



אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
הפקולטה למדעי ההנדסה
היחידה להנדסת אנרגיה



אופטימיזציה רבת פרמטרים לקירות מבודדים

מבוססי בטון

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות

לקבלת התואר "מגיסטר" בהנדסה (M. Sc.)

מאת: ניצן אויזרט

מנחים: ד"ר ארז גל

פרופ' דיוויד פרלמוטר



אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
הפקולטה למדעי ההנדסה
היחידה להנדסת אנרגיה



אופטימיזציה רבת פרמטרים לקירות מבודדים מבוססי בטון

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות

לקבלת התואר "מגיסטר" בהנדסה (M. Sc.)

מחברת: ניצן אויזרט  תאריך: 7.6.2016

מנחים: ד"ר ארז גל  תאריך: 9.6.2016

פרופ' דיוויד פרלמוטר  תאריך: 10.6.2016

יו"ר ועדת מוסמכים: _____ תאריך: _____

יוני 2016

אייר תשע"ו

I. תקציר

המושג בנייה ירוקה המיוחס לבנייה בת-קיימא חסכונית באנרגיה, נכנס לתודעה בארץ ואף נקבעה תקינה להשגתו ושמירתו. המושג מגדיר בנייה המשלבת הבנה של אילוצי הסביבה הטבעית והטמעתם בתכנון, תוך שילוב של חומרים ומערכות היוצרים סביבה נוחה וחיסכון בתשומות האנרגיה. השאיפה ליצור תנאים רצויים בסביבתנו מתבטאת בין היתר בשימוש באמצעים מלאכותיים לבקרת האוויר ומיזוגו ולמערכות נוספות. אמצעים אלה כוללים תנורי חימום למיניהם, מזגני אוויר, מאווררים ועוד. צריכת אנרגיה לתחזוקת בניינים, מסתכמת בכ-40% מסך כל האנרגיה הנצרכת כיום בארצות מתועשות ע"פ נתוני המח' לאנרגיה בארה"ב.

בנייה חוסכת אנרגיה עשויה להוות פתרון המספק נוחות תרמית למשתמש תוך חסכון במקורות אנרגיה מתכלים ושמירה על איכות הסביבה. במחקר זה בוצעה אופטימיזציה רבת-משתנים למעבר חום בחתך קיר בהתאם לדרישות בידוד ומסה נתונים. המחקר בוצע בנסיון לאתר קריטריון יחיד עבור חתך קיר אופטימלי מבחינה אנרגטית, מותאם לאיזורי האקלים השונים בארץ, תוך שימוש בחומרי הבנייה הקיימים.

במסגרת המחקר נערכו אופטימיזציות לקירות מעטפת הבניין באמצעות תכנת ABAQUS, נחקרה התקינה הנהוגה בארץ, נחקרה המשוואה המתמטית המתארת את הבעיה של הולכת החום בקירות המעטפת ופותח כלי לקבלת פתרון אופטימלי למשוואה, הנותן מענה להנדסת חומרי המבנה. באמצעות הכלי שפותח ניתן להגיע לפתרון אופטימלי עבור כמות האנרגיה הנדרשת לשמירת נוחות תרמית בדירה, באזורי האקלים השונים ועל פי הדרישות המשתנות לבידוד ולמסה התרמית.

II. מילות מפתח

בנייה ירוקה

חסכון אנרגטי

נוחות תרמית

מעבר חום בבניינים

מסה תרמית במעטפת בניה

תקן לבנייה ירוקה

.III תודות

תודתי נתונה למנחים, דיוויד וארז על הדרכתם במחקר זה.
על תרומתם, ייעוץ והנחייתם לכל אורך הדרך.
להוריי, שפתחו בפניי את האפשרויות האקדמיות.
וכמובן, לבעלי- שחף ולילדיי- עידו ודביר, שתמכו ועודדו במהלך כל העבודה.

תוכן עניינים

2	..... תקציר	I
3	..... מילות מפתח	II
4	..... תודות	III
6	..... רשימת הסימנים	IV
7	..... רשימת איורים	V
9	..... מטרת המחקר	1.
10	..... מבוא ורקע מדעי	2.
12	..... רקע תיאורטי	3.
12	..... בניה ירוקה	3.1.
14	..... עומסים תרמיים	3.2.
15	..... הדמיה תרמית של בניין	3.3.
21	..... מעבר חום	3.4.
25	..... אזורי אקלים	4.
25	..... חלוקה לאזורי אקלים על פי ת"י 1045	4.1.
25	..... מאפיינים אקלימיים של אזורי הארץ	4.2.
27	..... קיר רב-שכבתי	4.3.
29	..... שיטת המחקר	5.
29	..... אנליזת אלמנטים סופיים	5.1.
34	..... אנליזת אלמנטים סופיים- סיכום	5.2.
35	..... פיתוח כלי האופטימיזציה	6.
35	..... תיאור הבעיה המתמטית	6.1.
36	..... כלי האופטימיזציה BGU-TBOT	6.2.
51	..... סיכום מסקנות והמלצות	7.
54	..... נספחים	8.
54	..... מודל אלמנטים סופיים ב-ABAQUS	8.1.
52	..... ביבליוגרפיה	9.
75	..... Abstract	10.

IV. רשימת הסימנים

משמעות	סימן
מקדם מוליכות תרמית	K
מעבר חום	Q
מקדם מעבר חום בהסעה	h
עובי הקיר	$t, \Delta x$
טמפרטורה	T
שטף מעבר החום	Q
קיבול חום	c_p
מסה תרמית	M
משקל סגולי	ρ
זמן	t
קורדינטות	x,y,z
טמפרטורת הסביבה	T_∞

V. רשימת איורים

10	איור מס' 1- הקטנת משרעת הטמפרטורה
11	איור מס' 2- כלי האופטימיזציה BGU TBOT
16	איור מס' 3 א' – מאפייני תכנון של בניין בקיץ- דוגמא 1
17	איור מס' 4 א'- מאפייני תכנון של בניין בחורף- דוגמא 1
18	איור מס' 5 – הדמייה תרמית של בניין בקיץ- דוגמא 2
18	איור מס' 6 - הדמייה תרמית של בניין בחורף- דוגמא 2
19	איור מס' 7 – הדמייה תרמית של בניין בקיץ- דוגמא 3
19	איור מס' 8 - הדמייה תרמית של בניין בחורף- דוגמא 3
20	איור מס' 9 - הדמייה תרמית של בניין בקיץ- דוגמא 4
20	איור מס' 10 - הדמייה תרמית של בניין בחורף- דוגמא 4
21	איור מס' 11- חתך קיר בטון הנתון לעומס חום
22	איור מס' 12 - פתרון משוואת החום בשיטת האלמנטים הסופיים
23	איור מס' 13- שיטת הנגדים התרמיים
24	איור מס' 14- מ"ח בהולכה, שיטת הנגדים התרמיים
26	איור מס' 15 - חלוקה לאזורי אקלים על פי ת"י 1045
30	איור מס' 16- תלות המוליכות תרמית כפונקציה של הצפיפות
31	איור מס' 17 - אינטרפולציה עבור מוליכות תרמית כפונקציה של צפיפות החומר
31	איור מס' 18- מודל בן 8 שכבות
32	איור מס' 19- תיאור הקיר המועמס
33	איור מס' 20- שינויי הטמפרטורה במהלך הולכת החום בחורף
33	איור מס' 21- שטף החום כפונ' של הזמן
34	איור מס' 22- התפלגות שטף החום בדופן הפנימית בחורף
37	איור מס' 23- מסך פתיחה ותפריט ראשי בכלי
38	איור מס' 24- מסך "בחירת חומרים"
38	איור מס' 25- הודעת שגיאה
39	איור מס' 26- בחירת המשתמש, עובי בלוק 22 ס"מ
40	איור מס' 27- בחירת מידת הדיוק
40	איור מס' 28- תוצאות העובי מעוגל
41	איור מס' 29- פלט גרפי לבלוק המרוכב
41	איור מס' 30- בחירת המשתמש-דוגמא 2
42	איור מס' 31- הרכב הבלוק- דוגמא 2
42	איור מס' 32- תפריט אפשרויות גליון
43	איור מס' 33 - תפריט העתקת גליון
44	איור מס' 34- מנהל השמות
48	איור מס' 35- התראות
54	איור מס' 36- תפריט יצירת חלק
57	איור מס' 37- בחירת הריבוע החיצוני

- 58 איור מס' 38- בחירת הקווים המחברים
- 58 איור מס' 39- חלוקה לאלמנטים סופיים

רשימת טבלאות

- 14 טבלה מס' 1- קיבול החום של חומרים שונים
- 15 טבלה מס' 2- עומס שטף החום במשך יממה
- 30 טבלה מס' 3- תוצאות המדידות
- 37 טבלה מס' 4- ההתנגדות המומלצת ע"פ התקן
- 49 טבלה מס' 5- ההתנגדות המומלצת ע"פ התקנים השונים
- 54 טבלה מס' 6- הגדרת תכונות החומרים

1. מטרת המחקר

המחקר התרכז במציאת קריטריון אופטימלי יחיד עבור סידור שכבות קיר בעלות עובי משתנה, לעמידה בדרישות התקינה לבידוד ומסה תרמית רצויה.

לצורך כך הוגדרו מטרות המשנה הבאות:

- מציאת קריטריון לקביעת המסה התרמית
- פיתוח כלי אופטימיזציה
- יצירת ממשק נוח למשתמש

המחקר בוצע בנסיון לאתר חתך קיר אופטימלי מבחינה אנרגטית, מותאם לאיזורי האקלים השונים בארץ, תוך שימוש בחומרי הבנייה הקיימים, לעמידה בסטנדרטים של דרישות התקינה לבידוד ושמירה על מסה תרמית רצויה.

במהלך המחקר, נבחן הקריטריון למציאת המסה התרמית (מאחר שלבידוד כבר יש את הדרישות שנגזרות מתוך התקנים)

בהמשך נבחנה האפשרות לביצוע אופטימיזציה שכזו באמצעות כלי שימש את מתכנני המבנים.

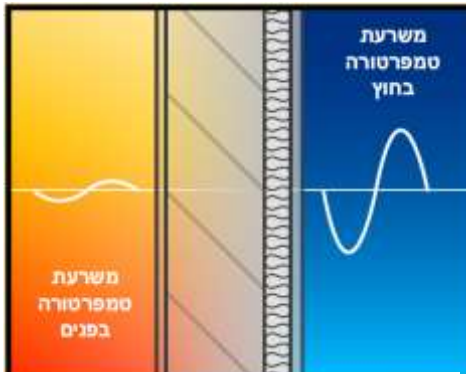
תוצר המחקר העיקרי- כלי טכנולוגי להעברת הידע שנרכש במחקר בצורה נוחה ופרקטית למשתמש.

2. מבוא ורקע מדעי

בתנאי האקלים האופייניים בישראל, קיימות תנודות טמפרטורה רחבות בין יום ולילה ובין עונה לעונה- לכן, לקיר המעטפת יש שתי תכונות מנוגדות: התנגדות תרמית גבוהה ויכולת אגירה תרמית גבוהה.

בכדי למתן את תנודות הטמפרטורה, נדרשת מהקיר "אינרציה תרמית" גבוהה, (יכולת אגירת חום לאורך זמן). סוג החומר, שמעניק לקיר את יכולת האגירה נקרא "מסה תרמית" – חומר בעל קיבול חום נפחי גבוה.

קיבול החום הנפחי קשור למשקל הסגולי של החומר, כך שלבטון יש קיבול חום גבוה יחסית, לחומרים "כבדים" יש מוליכות תרמית גבוהה.



איור מס' 1- הקטנת משרעת הטמפרטורה

מתוך [3]

על מנת להתגבר על התנודות בטמפרטורת הדירה הפנימית- על חומר הבידוד האופטימלי, להיות שילוב של שני חומרים שיענו על שתי הדרישות האנרגטיות: בידוד תרמי ומסה תרמית. השילוב, יצמצם את משרעת תנודות הטמפרטורה ויצור פער זמן בין שינוי הטמפרטורה מחוץ למבנה לבין השפעתו בתוך המבנה [10].

בנוסף, קיימת חשיבות עליונה למיקום היחסי של סוגי החומר בחתך הקיר כך שמסה בצדו הפנימי של הקיר מובילה ליציבות אקלימית כמתואר באיור 1.

ע"פ מחקרו של Balars [6], ניתן להסיק כי:

בתקופת החורף – בשעות היום, הבידוד מאפשר אגירת חום בתוך המסה ע"י קרינת שמש ובשעות הלילה, הבידוד מונע הפסדי חום כלפי חוץ.

בתקופת הקיץ - בשעות הלילה, מסלקים חום מהמסה. המסה הקרירה סופגת חום מהחלל הפנימי והבידוד מונע התחממות.

בדרך כלל, התכונות התרמית של הבטון (המוליכות התרמית וקיבול החום) ממודלות בצורה מאקרוסקופית על ידי שימוש בחוקים שונים מהספרות. אחת הבעיות במודלים המאקרוסקופיים השונים, היא העובדה שקיימים סוגים שונים של מבני בטון אשר מתאפיינים בהבדל המיקרוסקופי שלהם. שוני זה נובע בעיקר בגודל וצורה של האגרגטים, יחס מים וצמנט, סוג הצמנט ותוספים שונים (כגון: סיבים מחומרים שונים).

ממאמרה של בקר [13] ניתן להסיק כי יש צורך בהבנת מכלול המגבלות התכנוניות, תוך הערכת התרומה של כל אחד מן הפרמטרים לתכנון בניינים ברי קיימא. אופטימיזציה שכזו, יעילה, כלכלית, בעלת זיקה לשמירה על הסביבה ומאפשרת תכנון בניינים ירוקים בשיטת PBD (Performance Based Design).

שימוש באנליזות תרמיות מרובות סקאלות (Multi-scale Analysis) יאפשר פתרון המתייחס להרכב החומר לצורך הערכה נכונה של התכונות התרמיות (כגון: מקדם ההולכה), כך שבסופו של דבר, ניתן יהיה לתכנן באופן אופטימלי מבנים המאפשרים את צמצום הצריכה החשמלית במבנה.

לכן- במחקר זה תוצגנה שתי גישות של אנליזות מרובות שבוצעו ברמת חתך הקיר:

א. ביצוע אנליזות בתכנת האלמנטים הסופיים ABAQUS- ובאמצעותה ניתן היה להמחיש את מעבר החום דרך חתך קיר בעל תכונות משתנות.

מאנליזות אלו, ניסינו למצוא את היחס הנדרש בין המסה לערכי הבידוד, תוך שימוש בנתונים קיימים בספרות.

לא הצלחנו במהלך המחקר למצוא קריטריון בודד להמלצה על המסה התרמית הנדרשת ולכן פנינו לכלי המאפשר ביצוע אופטימיזציה רבת משתנים לשכבות חומרי המבנה.

ב. מציאת סידור השכבות האופטימלי עבור חומרי המבנה בקיר באמצעות בכלי האופטימיזציה שפותח במחקר: ה- Thermal Block Optimization Tool - BGU, בתכנת אקסל (איור 2).

לשם מציאת הפתרון, היה צורך בהכרת המשתנים שיש לקחת בחשבון:

לכל חומר יש את תכונות הצפיפות ρ_n וקיבול חום k_n המוכרות לנו מהספרות.



מהתקן הישראלי מוגדרת לנו ההתנגדות המומלצת לעמידה בתקן R_t , עבור כל אחד מאזורי האקלים בארץ.

המסה התרמית המומלצת לקיר כולו M_t , נבחרה בסביבות הערך של 240 $[kg/m^2]$, בחירה המבוססת על ההפרדה הקיימת בתקן בין בניה קלה וכבדה [1].

איור מס' 2- כלי האופטימיזציה BGU TBOT כעת, היה צורך במציאת עובי השכבות

הנדרש t_n להגעה לפתרון, כפי שנדרש מעלה ובמציאת הסידור של השכבות- חומרי המבנה הקלים יהיו בשכבה החיצונית ואילו הכבדים- בפנימית.

השימוש בכלי ה- BGU TBOT לסידור שכבות אופטימלי בבלוק בטון מרוכב, יאפשר לפתח בלוקים ייעודיים עבור כל אחד מאזורי האקלים בארץ, ע"פ המלצות התקינה. בעזרת הכלי, ניתן יהיה לתכנן קיר אופטימלי שידרוש פחות אנרגיה המשמשת לחימום או קירור הדירה, עד להגעה לטמפ' הנוחות.

3. רקע תיאורטי

3.1. בניה ירוקה

המושג בניה ירוקה במחקר זה מתייחס לבניה בה נדרשת אנרגיה מופחתת לצורך חימום וקירור הבית. האספקטים המשפיעים על תכנון תרמי נכון הינם מגוונים כגון: בידוד וקיבול החום של המעטפת, גג ורצפות המבנה, צבע הקירות החיצוניים, אוורור, הצללה, פתחים וחלונות. מחקר זה מתמקד בהשפעת המסה התרמית של המעטפת על משרעת הטמפרטורות בדירה.

3.1.1. מעטפת המבנה

בבניה ירוקה, קירות המעטפת של הבניינים חייבים להיות בעלי כושר בידוד מתאים לאזור הבניה ובעלי מסת אגירה תרמית שתאפשר ניצול אמצעים טבעיים, כגון שמש ואוורור, לשיפור התנאים התרמיים בבניין תוך השקעת כמויות קטנות ככל האפשר של אנרגיה. הבידוד והקיבול התרמי מאפשרים את הקטנת משרעת תנודות הטמפרטורה בתוך הבניין לעומת משרעת תנודות הטמפרטורה מחוצה לו וכן יצירת פיגור זמן בין שינוי טמפרטורה מחוץ למבנה לבין השפעתם בתוך המבנה [11]. באופן כללי על קירות הבניין לענות על שתי דרישות אנרגטיות עיקריות: בידוד וקיבול חום או כושר אגירה תרמי.

3.1.2. בידוד:

יעילות הבידוד נקבעת על פי כמות החומר המבודד ותכונותיו ועל פי מיקומו במעטפת הבניין.

א. כמות החומר המבודד הדרושה תלויה בהפרשי הטמפרטורה הנמדדים בתוך המבנה (כלומר תנאי הנוחות המבוקשים) ומחוץ לו, ובשיעורי האנרגיה שיש נכונות להשקיע בבניין על מנת לקיים בו תנאי נוחות כמבוקש. אפקט הבידוד אינו ליניארי: התועלת המושגת מהגדלה ברמת הבידוד הופכת לשולית יותר ויותר עם הגדלת עוביו [9].

בישראל קיימת תקינה הדורשת מידה מינימלית של בידוד מבנים- דרישות התקן מבוססות על אפיונים אקלימיים של ארבעה אזורים אקלים בשטח המדינה, והן מהוות מינימום חוקי נדרש [1].

ב. מיקום הבידוד: מיקומו של הבידוד בחתך הקיר משפיע על כושר התפקוד התרמי של הקיר. הוספת שכבת בידוד בצדו החיצוני של הקיר תבטיח יעילות תרמית גבוהה יותר. יעילות זו תתבטא בהקטנת האפקט של קרינת השמש הפוגעת בקיר ובצמצום הפער בין טמפרטורת האוויר החיצוני לבין הטמפרטורה בפנים המבנה. כשהבידוד בחוץ גם תושגנה בתוך המבנה טמפרטורות מקסימום נמוכות יותר וטמפרטורות מינימום גבוהות יותר. למיקום הבידוד בצד הפנימי ולא החיצוני של הקירות- אפקט שלילי בהורדת כושר ספיגת החום של הקירות.

ירידת כושר ספיגת החום תגרום לתנודות טמפרטורה גדולות בתוך הבניין: בשל חום שנוצר בתוך הבניין, או שמוכנס אליו על- ידי חדירת אוויר או קרינת שמש דרך החלונות, הטמפרטורה של הבניין עולה במהירות. עם חדירת מעט אוויר קר לבניין ואיבוד אנרגיה דרך המעטפת, יתקרב הבניין במהירות. בשל כך יגדל מאוד שיעור תנודת הטמפרטורה היומית (מקסימום-מינימום) גם בחורף וגם בקיץ. יש

מקרים מיוחדים מאוד שבהם רצוי בכל זאת לשים את הבידוד בצד הפנימי של קירות מעטפת הבניין: כך במקומות שבהם משתמשים בקירור או בחימום אקטיביים ממקורות חום חיצוניים ואשר בהם רוצים זמן תגובה קצר לפעולת החימום או הקירור, לדוגמה: אולמות ציבוריים ממוזגים שהשימוש בהם מזדמן יצרכו פעולת קירור ארוכה מאוד אם יהיה להם קיבול חום גדול מאוד ואנרגיה רבה תלך לאיבוד "הכנת" האולם לשימוש.

צבע המשטח החיצוני של הקיר הוא משתנה בעל השפעה רבה על מעבר החום דרך הקיר. ההתייחסות בספרות המקצועית, לפיה כמות החום העוברת דרך אלמנט מעטפת הבניין היא יחסית להפרש הטמפרטורה בין אוויר החוץ לבין אוויר הפנים, אינה מדויקת. הכוח המניע את מעבר החום דרך הקיר הוא הפרש הטמפרטורה שבין שני משטחי- הפנימי והחיצוני. בעוד שניתן להניח שטמפרטורת המשטח הפנימי של קיר המעטפת קרובה מאוד לטמפרטורת האוויר הפנימית, הרי שטמפרטורת המשטח החיצוני עלולה להיות גבוהה בהרבה מטמפרטורת האוויר החיצוני, וההפרש בין שני האחרונים תלוי בעיקר בצבע הקיר (כלומר במקדם הבליעה של המשטח החיצוני של הקיר). מבדיקה של אפקט הצבע על טמפרטורת המשטח החיצוני של הקיר אכן מתברר שצבעו של הקיר ישנה במידה רבה את שטף האנרגיה דרכו.

לסיכום: ברוב המקרים מומלץ למקם את הבידוד בצדו החיצוני של הקיר. במקרים מיוחדים, כגון אולמות ממוזגים, אשר מתפקדים בפרקי זמן קצרים יחסית תחת עומסים פנימיים גדולים (מספר רב של משתמשים) ואשר נעשה בהם שימוש באמצעים אקטיביים למיזוג אוויר, רצוי למקם את הבידוד בצד הפנימי של הקיר. בידוד פנימי מנטרל את מסת הבניין ומאפשר מיזוג מסת האוויר תוך זמן קצר [15].

3.1.3. קיבול החום:

כאשר התנאים אינם משתנים לאורך זמן, כלומר מתקיים "מצב יציב" (Steady-State), מעבר החום דרך גוף מוצק תלוי רק במוליכות התרמית הכוללת שלו. אולם כאשר התנאים משתנים לאורך זמן, מעבר האנרגיה דרך קיר תלוי גם בקיבול החום של החומר.

קיבול חום נפחי של חומר (Volumetric Heat Capacity) הוא כמות האנרגיה אשר תביא לעליית טמפרטורה של מעלה אחת ליחידת נפח. קיבול חום מכונה גם "מסה תרמית".

קיבול החום של מעטפת הבניין משפיע על:

- א. גודל המשרעת (התנודה בין המינימום למקסימום) של הטמפרטורה בתוך המבנה, בשל שינוי טמפרטורה וקרינה חיצוניים. עם עליית קיבול החום של המעטפת והקטנת המוליכות התרמית שלה, משרעת הטמפרטורה תקטן ופיגור הזמן בין שינוי טמפרטורת החוץ לבין שינוי טמפרטורת הפנים יגדל.
- ב. הקטנת ההשפעה של החום הנוצר בתוך הבניין (ממכשירים יוצרי חום, אנשים, קרינת שמש, חדירת אוויר חם וכו'). כאשר קיבול החום גבוה- למשל במקרה של מעטפת בטון, מעטפת הבניין יכולה לספוג חום מהאוויר במהירות, תוך הקטנת השינוי בטמפרטורת האוויר שבחדר. כאשר קיבול החום קטן- למשל

במקרה של הוספת חומר בידוד, כל יצירת חום פנימי בתוך המבנה תגרום לעלייה מהירה וגדולה של טמפרטורת האוויר שבו [14].

קיבול חום גבוה אופייני לחומרים מסיביים – כלומר, חומרים בעלי משקל גבוה ליחידת נפח, ושמישמים בנפחים גדולים בתוך הבניין. כמות החומר האוגר האנרגיה – אשר מכונה "מסה תרמית" – במעטפת הבניין ובמחיצותיו ומיקומו ביחס לבידוד משפיעים משמעותית על תנאי הנוחות במבנה.

חומר	צפיפות [kg/m ³]	חום סגולי [kJ/kg K]	קיבול חום נפחי [kJ/m ³ K]
בטון	2400	0.85	2040
בטון תאיל (כגון איטונג)	600	0.95	570
מים	1000	4.18	4180
אוויר	1.18	1.3	1.5

טבלה מס' 1- קיבול החום של חומרים שונים

בטון ומוצריו הם החומרים המקובלים ביותר לבנייה בישראל. בשל קיבול החום הגבוה יחסית של בטון (ראה טבלה 1), השפעתם של שינויי טמפרטורה מהירים מחוץ לבניין על הטמפרטורה בתוך בניין העשוי בטון, מוקטנת והם גם מתרחשים בתוך הבניין בפיגור בן מספר שעות. ניתן לנצל תופעה זו על מנת לחסוך באנרגיה [16], לדוגמה: אפשר לחמם או לקרר בית 'כבד', מבודד היטב במעטפתו החיצונית, בשעות שצריכת החשמל הארצית נמוכה. מסת הבניין תאצור בתוכה את החום או הקור, ותוכל להבטיח נוחות תרמית גם בשעות שיא של צריכת החשמל.

אפיון נוסף של אלמנט המעטפת (קירות, גגות) הנובע מתכונות הבידוד וקיבול החום הוא **קבוע הזמן התרמי**. קבוע זה הופיע בעבר בתקן 1045 [1] ובאמצעותו נעשו מאמצים לקביעת קריטריון אחיד למסה ולבידוד. תיאורטית, מאפיין זה מבטא את הזמן הדרוש לשינוי שנוצר בטמפרטורת המשטח החיצוני של הקיר כדי להגיע אל המשטח הפנימי. מעשית, מאפשר חישוב קבוע הזמן התרמי להשוות בין אלמנטים כדי לדעת איזה מהם יגיב במהירות לשינוי טמפרטורה ואיזה יהיה יותר איטי. מבדיקת הביטוי של קבוע הזמן התרמי מתברר שיש חשיבות רבה לסדר השכבות בתוך הקיר: שכבות זהות אך מסודרות בסדר שונה בתוך הקיר יתנו קבועי זמן שונים מאוד.

בתחילת מחקר זה, פעלנו למציאת קריטריון המשלב בין תכונות הבידוד והקיבול ע"י תכנת ABAQUS- אך בסופו של דבר, לא הצלחנו להגיע לקריטריון אחד המבטא בפשטות את השילוב בין התעונות השונות.

תכונות הבידוד וקיבול החום הן מנוגדות מטבען בכל חומר יחיד: חומר בעל בידוד טוב הוא בד"כ בעל קיבול חום נמוך עקב משקלו הנמוך ולהפך.

קבלת קיר בעל התכונות המומלצות אפשרית רק על ידי שילוב נכון של חומרים אשר כשלעצמם הם בעלי תכונות מנוגדות, אך יחדיו- נותנים את התוצאות הרצויות.

3.2. עומסים תרמיים

3.2.1. מקורות חום פנימיים:

בכל בניין הנמצא בשימוש, מצויים כמה מקורות חום פנימיים שיש לקחת בחשבון, כאשר מתכננים את מערכת החימום או הקירור. דוגמאות: החום הנובע ממכשירים חשמליים, החום הנובע מתאורה מלאכותית והחום הנובע מנוכחותם של אנשים בבניין. בחורף- אנרגיה זו עוזרת להקטנת הצורך בחימום הבניין, אולם בקיץ היא מהווה נטל בלתי רצוי של אנרגיה אשר יש לנטרלו בדרך כלשהי.

3.2.2. מקורות חום חיצוניים:

מקורות החום החיצוניים גורמים נובעים לעומס שטף חום הנגרם מטמפרטורת האוויר ומקרינת השמש כמתואר בטבלה 2.

שעה [h]	טמפרטורה- חודש אוגוסט [°C]	שטף חום עקב קרינת בשמש [Wh/m ²] - חודש אוגוסט	טמפרטורה- חודש ינואר [°C]	שטף חום עקב קרינת השמש [Wh/m ²] - חודש ינואר
00	21.4	0	8.9	0
01	21	0	8.7	0
02	20.5	0	8.4	0
03	20.3	0	8	0
04	20.1	0	7.9	0
05	20.7	18	7.7	0
06	23.5	212	7.8	0
07	26.6	385	9.1	75
08	28.2	457	12.1	289
09	29.5	585	14.9	425
10	30.3	679	16.4	496
11	30.5	736	17.3	516
12	30.4	749	17.8	503
13	30.3	722	17.8	493
14	30	694	17.2	429
15	29.4	614	16.5	341
16	28.7	490	15.7	156
17	27.7	306	13.4	0
18	26.5	29	12.3	0
19	25.2	0	11.6	0
20	24	0	10.9	0
21	23.3	0	10.4	0
22	22.5	0	9.9	0
23	21.8	0	9.2	0

טבלה מס' 2- עומס שטף החום במשך יממה

3.3. הדמיה תרמית של בניין

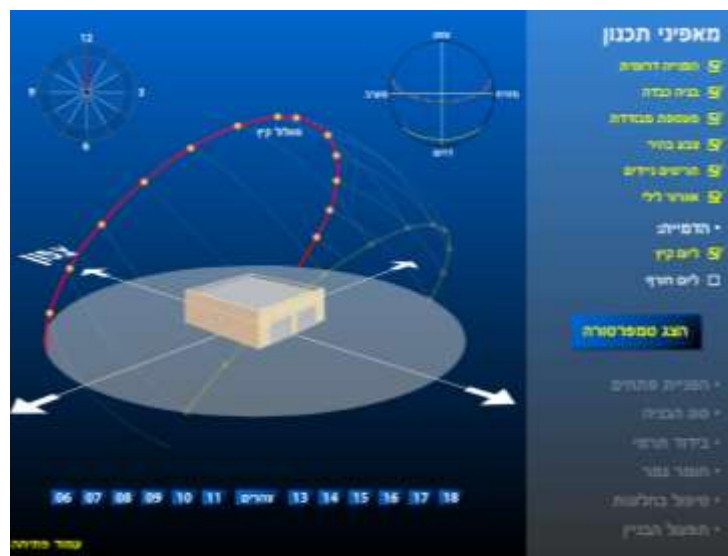
בחלק זה של המחקר, נעשה שימוש בסימולטור לצורך המחשת ההשפעה של מאפיינים תכנוניים על משרעות הטמפרטורה במבנה. באמצעות כלי הדמייה מתוך המדריך לבניה ביו- אקלימית בישראל [3], אשר נערך באמצעות תכנת QUICK, ניתן להתרשם מהשפעתם של מאפייני תכנון נבחרים על התפקוד התרמי של בניין נתון. הטמפי' שיוצגו עבור חודשי הקיץ, נדגמו בחודש יולי, ובחורף- בחודש ינואר. ההערכה הכמותית של תפקוד הבניין בכל עונה כוללת טמפי' מקסימום, מינימום וממוצע יומיות ומבטאות את הצורך בקירור בקיץ וחימום בחורף. להלן מס' דוגמאות להמחשה של תפקוד הבניין בתנאים משתנים.

3.3.1. דוגמא 1

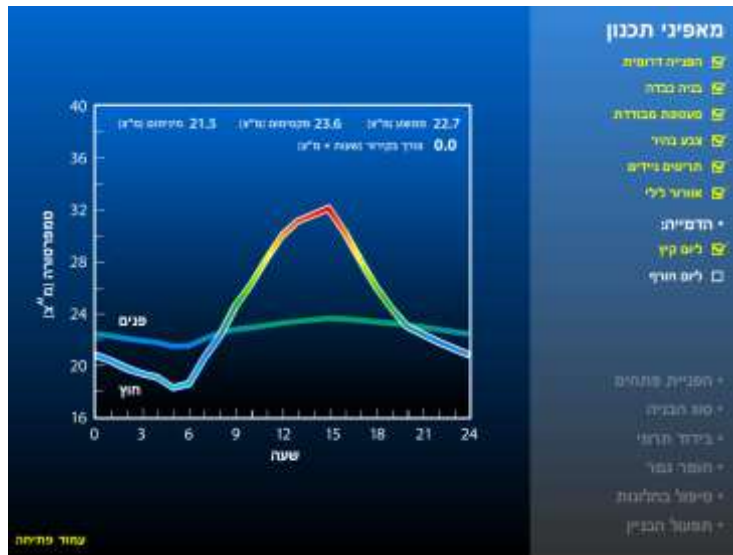
עבור מאפיינים דומים בהם-

- הפניית פתחים: דרומית- דלתות הזכוכית הגדולות ממוקמות בחזית המערבית
- סוג הבנייה: בניה כבדה- מעטפת הבניין בנויה מבטון יצוק בעובי 20 ס"מ
- בידוד תרמי: מעטפת מבודדת- קירות חוץ וגג מצופים בשכבת פוליסטירן מוקצף בעובי 5 ס"מ
- חומר גמר: צבע מעטפת הבניין- בהיר (קירות חוץ וגג מחזירים את רוב קרינת השמש
- טיפול בחלונות: תריסים בדירה ניידים (כל הפתחים המזוגגים מותקנים תריסים מבודדים)
- תפעול הבניין: אוורור ליילי- בקיץ כל החלונות והדלתות נפתחים מהערה עד הבוקר

ביום קיץ: (ראה איורים 3 א', 3 ב')

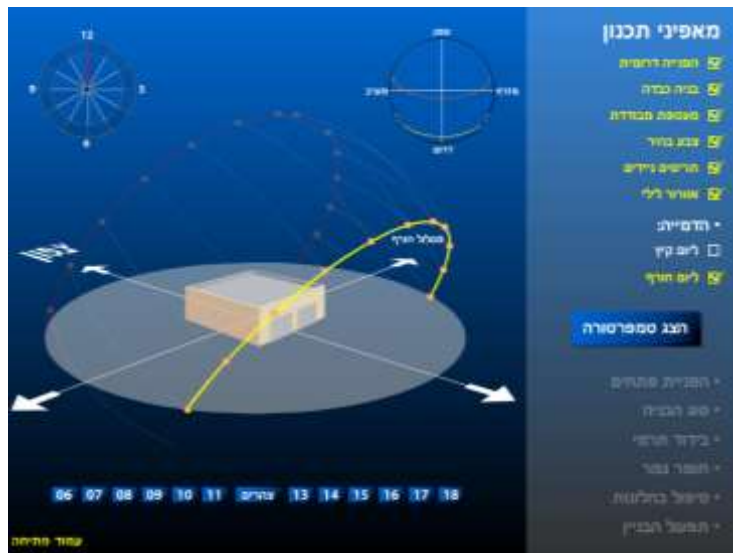


איור מס' 3 א' – מאפייני תכנון של בניין בקיץ- דוגמא 1

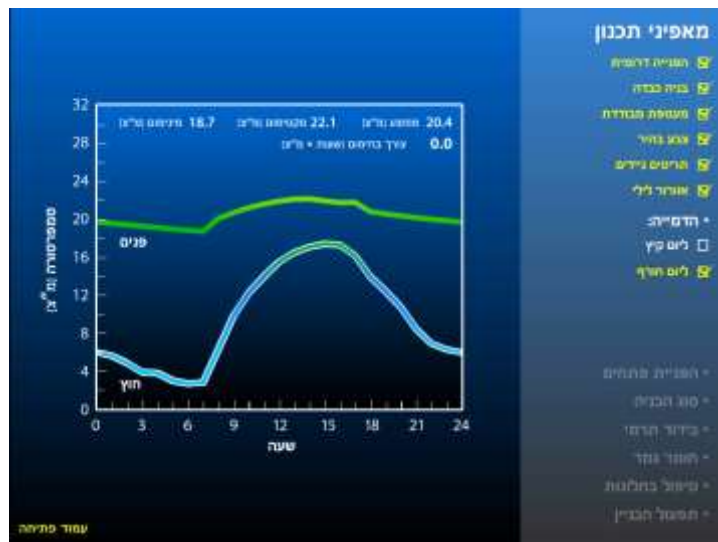


איור מס' 3 ב'- הדמייה תרמית של בניין בקיץ- דוגמא 1

ביום חורף: (ראה איורים 4 א', 4 ב')



איור מס' 4 א'- מאפייני תכנון של בניין בחורף- דוגמא 1

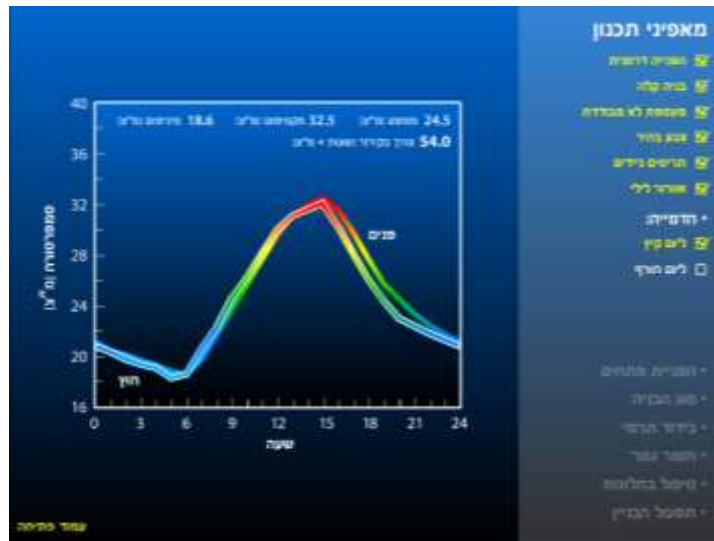


איור מס' 4 ב' – הדמייה תרמית של בניין בחורף- דוגמא 1

3.3.2. דוגמא 2

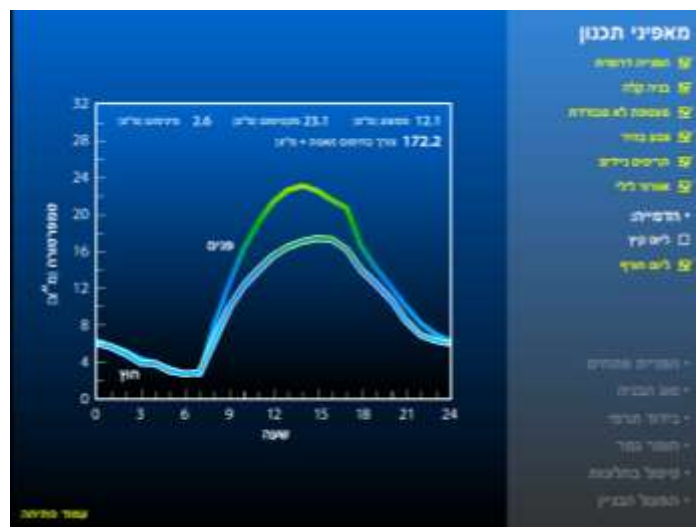
עבור בנייה קלה ומעטפת לא מבודדת:

ביום קיץ: (ראה איור 5)



איור מס' 5 – הדמייה תרמית של בניין בקיץ- דוגמא 2

ביום חורף: (ראה איור 6)



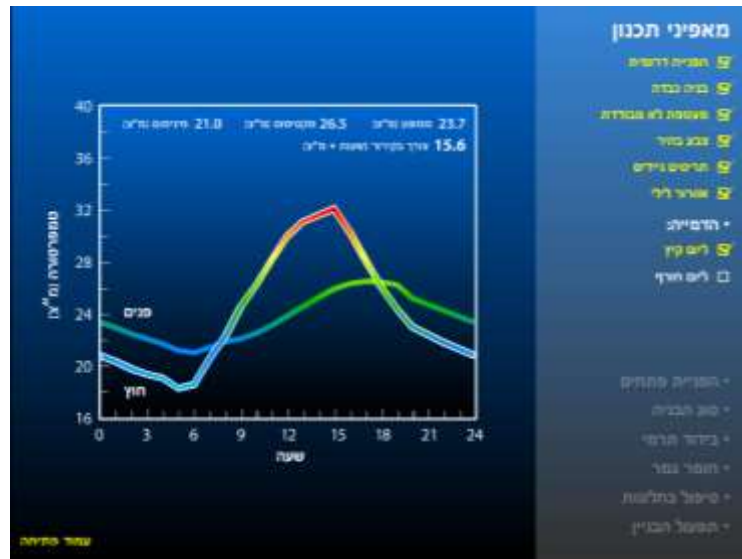
איור מס' 6 - הדמייה תרמית של בניין בחורף- דוגמא 2

הבחנו כי במעטפת בנייה קלה משרעת הטמפרטורה ועקבת הטמפרטורה אינם משתנים ולכן אין כל יתרון בבניה מסוג זה. לעומת זאת, בבניה כבדה- כאשר מוכנס אלמנט בעל מסה תרמית, נוכל להבחין בעקבה ובשינוי משרעת הטמפרטורה המורגש בפנים הדירה, ביחס לטמפי השוררת בחוץ- כמתואר בדוגמאות הבאות.

3.3.3. דוגמא 3

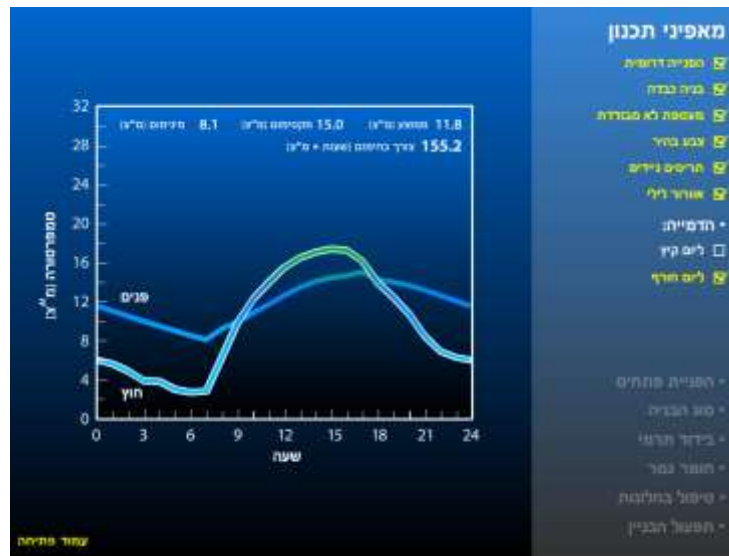
בבנייה כבדה אך מעטפת לא מבודדת:

ביום קיץ: (ראה איור 7)



איור מס' 7 – הדמייה תרמית של בניין בקיץ- דוגמא 3

ביום חורף: (ראה איור 8)

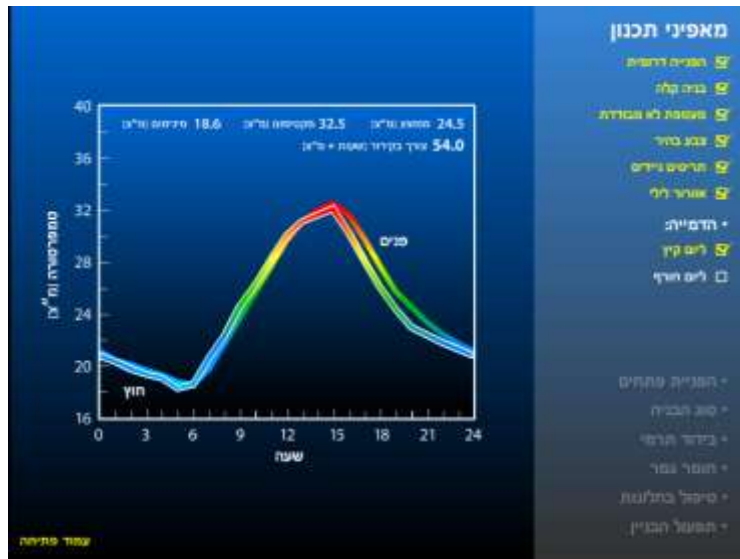


איור מס' 8 - הדמייה תרמית של בניין בחורף- דוגמא 3

3.3.4. דוגמא 4

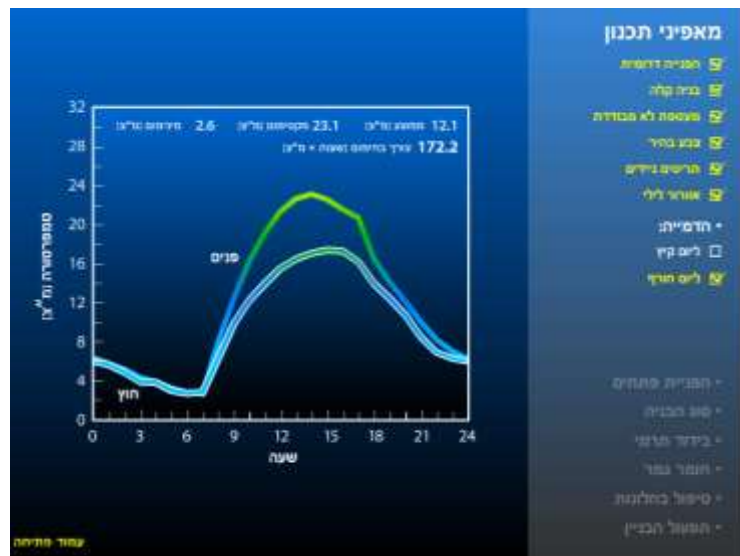
בבניה קלה ומעטפת לא מבודדת:

ביום קיץ: (ראה איור 9)



איור מס' 9 - הדמיייה תרמית של בניין בקיץ - דוגמא 4

ביום חורף: (ראה איור 10)



איור מס' 10 - הדמיייה תרמית של בניין בחורף - דוגמא 4

לסיכום- אין כל יתרון במעטפת בנייה קלה מכיוון שבמשרעת הטמפרטורה ובעכבה אין שינוי בין פנים וחוף המבנה. לעומת זאת, בבניה כבדה- בשימוש אלמנט בעל מסה תרמית, נוכל להבחין בעכבה ובשינוי משרעת הטמפרטורה.

3.4. מעבר חום

קיימים שלושה סוגי מעבר חום :

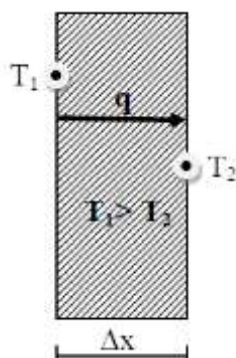
א. מעבר חום בקרינה (Radiation) - סוג זה של מעבר חום אינו זקוק לתווך וחום עובר בו גם בואקום.

דוגמא למעבר חום בקרינה הינה התחממות גוף עקב חשיפתו לקרינת השמש.
ב. מעבר חום בהסעה (Convection) - סוג זה של מעבר חום מתרחש בזורמים (נוזלים וגזים) ובאופן כללי החום מועבר ע"י התפתחות של זרימת הזורם מאיזורים חמים לקרים ולמעשה הזורם "נושא" עימו את החום מהאיזור החם לאיזור הקר. דוגמאות לזורמים המוליכים טוב בהסעה הינם גזים כגון אוויר ומבודדים הינם זורמים כגון מים.

ג. מעבר חום בהולכה (Conduction) - סוג זה של מעבר חום מתרחש במוצקים. כאשר בין שתי נקודות שונות בגוף מוצק קיים הבדל טמפרטורה, יתרחש מעבר האנרגיה ביניהן בתהליך הולכה. הולכת אנרגיה במוצק מתרחשת ברמה המולקולרית, ואינה כרוכה בתנועה של המסה המרכיבה את הגוף. (בניגוד להסעה) במסגרת מחקר זה בוצעו אנליזות מעבר חום בהולכה דרך קיר בטון, בהתייחס למקדם מעבר החום בהסעה המגדיר את מקדם ההולכה של המוצק (הקיר) עקב תנאי הסביבה (רוח, איוורור) בדירה ומחוצה לה ושטפי החום הנובעים מקרינת השמש על חלקו החיצוני של הקיר.

הרקע התיאורטי המפורט בהמשך מתייחס לתיאורית מעבר החום בהולכה בלבד.

3.4.1. מעבר חום בהולכה בקיר



איור מס' 11 - חתך קיר בטון הנתון לעומס חום

תופעת מעבר החום בהולכה דרך קיר כתוצאה מהפרשי טמפרטורה אשר קיימים בתווך ניח מתוארים להלן. נתאר קטע קיר הנתון להפרש טמפרטורות כמתואר באיור 11:

כאשר: T_1 היא הטמפרטורה החיצונית, T_2 היא הטמפרטורה הפנימית, Δx הוא עובי הקיר ו- q שטף מעבר החום (כמות האנרגיה העוברת ליחידת זמן ושטח).

הגורמים המשפיעים על קצב מעבר החום q הינם עובי הקיר Δx , המוליכות התרמית של החומר k המאפיינת את תכונות המשטח וההפרש בין

הטמפרטורה החיצונית לטמפרטורה הפנימית

$$(3.1)$$

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

קצב מעבר החום הוא גודל מפתח מכיוון שהוא למעשה כמות האנרגיה שנצטרך להשקיע על מנת לאזן את כמות החום הנכנסת לדירה בקיץ וכמות החום היוצאת מן הדירה בחורף, על מנת להגיע לטמפרטורת היעד בתוך הדירה. ככל שהמוליכות התרמית גבוהה יותר, קצב מעבר החום גבוה יותר ונזדקק למזגן חזק יותר. שימוש בחומר מבודד בעל מוליכות תרמית נמוכה, יגרום לקצב מעבר חום קטן יותר. בחורף- כאשר אנו מעוניינים שקצב מעבר החום יהיה קטן כך שלא "יברח" חום מתוך הבית,

נחפוץ בכך שהקירות יהיו מבודדים ככל הניתן, לעומת זאת- בשעות הלילה בקיץ בידוד הקירות לא מאפשר את יציאת החום מהבית. תכנון תרמי נכון לוקח בחשבון תופעות אלו.

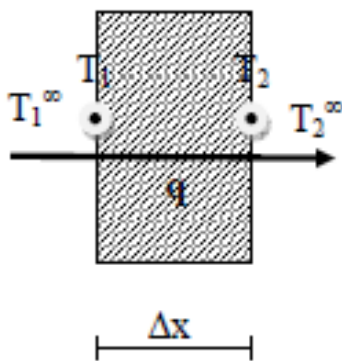
ככל שהפרש הטמפרטורות גדול יותר קצב מעבר החום גדל וככל שהקיר עבה יותר- קצב מעבר החום קטן.

ניתן אף לתאר את הקיר כ"נגד" אלקטרוני- המתנגד למעבר החום דרכו- ככל שההתנגדות התרמית של הקיר גדלה, קצב מעבר החום קטן.

ממאזן האנרגיה העוברת דרך הקיר, מתקבלת המשוואה הדיפרנציאלית הבאה המכונה משוואת החום (למקרה החד- ממדי ללא חום פנימי):

$$(3.2) \quad k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$$

כאשר: ρ הינה המשקל הסגולי של החומר, C הינו קבוע קיבול החום של החומר, T הינה פונקציית פילוג הטמפרטורה לאורך חתך הקיר, x הקואורדינטה המרחבית של הבעיה ו- t מתאר זמן. הצד הימני של המשוואה מייצג את השינוי באנרגיה הפנימית של הקיר עקב שינוי הטמפרטורה, בעוד הצד השמאלי של המשוואה את כמות החום הנכנסת לקיר. הגודל ρC מוגדר כמסה התרמית של הקיר. ממשוואה זו ניתן לראות כי הפרמטרים המשפיעים על מעבר החום בקיר הינם המסה התרמית והמוליכות של החומר k .



איור מס' 12 - פתרון משוואת החום
בשיטת האלמנטים הסופיים

הקטע הבא מוקדש לחישוב המוליכות המשוקללת הכוללת תנאי שפה של הסעה.

הסעה - מעבר חום המתרחש בין משטח וזורם כתוצאה מהפרשי טמפרטורה.

מוליכות הקיר תלויה גם בחומר ממנו הקיר מורכב (מעבר חום בהולכה) וגם מהסביבה (תנאי גבול בהסעה). במחקר שלנו- נתמקד בהסעה טיבעית אשר מתרחשת ע"י כוחות עילוי, שנגרמים מהפרשי צפיפויות. הפרשים אלו נובעים משינויי טמפרטורה בזורם.

מעיון באיור 12 ניתן לראות כי טמפרטורת הסביבה וטמפרטורת שפת הקיר שונות בפנים הבית ומחוצה

לו כאשר: T_1^∞ הינה טמפרטורת הסביבה (האוויר) החיצונית, T_1 הינה טמפרטורת הקיר החיצונית, T_2^∞ הינה טמפרטורת הסביבה (האוויר) הפנימית ו- T_2 טמפרטורת הקיר הפנימית.

ניתן להראות כי המוליכות המשוקללת של הקיר הינה :

$$(3.3) \quad k_{\text{קיר}} = \frac{h_1 h_2 k \Delta x}{h_1 h_2 \Delta x + h_1 k + h_2 \Delta x}$$

כאשר: h_1 ו- h_2 הינם מקדמי החום בהסעה מחוץ ובפנים המבנה בהתאמה ו- Δx הינו עובי הקיר.

חשוב לציין שמקדמי מעבר אלו אינם רק פונקציה של החומר ממנו עשוי הקיר, אלא גם של הסביבה (למשל מהירות זרימת האוויר בסביבת הקיר). למשל עבור אויר בפנים הדירה נהוג לקחת בחשבון ערך של 8 וואט למ' מעלה קלוין ובחוף - 25.

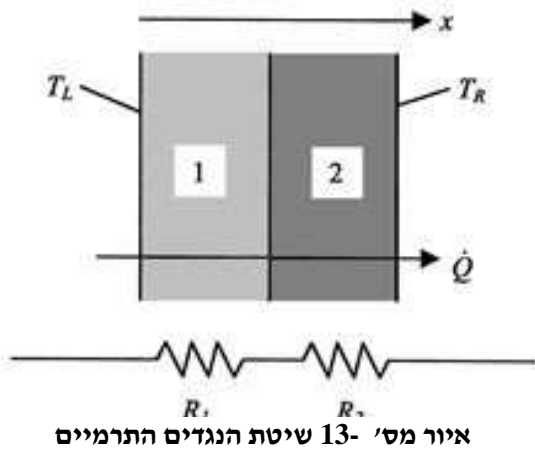
פתרון בשיטת האלמנטים הסופיים מכונה פתרון נומרי בו הפתרון מתקבל בנקודות בדידות ולא ע"י פתרון אנליטי שנותן פתרון רציף של הבעיה המתמטית והפתרון המוצע עבורה בתוכנת ABAQUS הוא בעזרת בידוד הבעיה בשיטת האלמנטים הסופיים עבור הקואורדינטות המרחביות (צירים x,y,z) ובידוד הבעיה בשיטת ההפרשים הסופיים עבור ציר הזמן.

בכדי לפתור את הבעיה הנ"ל יש לקבוע תנאי התחלה ותנאי גבול. אחד היתרונות של שיטת האלמנטים הסופיים לפתרון בעיות מהסוג הנ"ל נעוצה בעובדה שהיא מסוגלת להתמודד עם כל גיאומטריה של קיר ומבנה.

3.4.2 מעבר חום בהולכה - שיטת הנגדים התרמיים

שיטה מקובלת לחישוב ההתנהגות התרמית של חתך קיר מרוכב היא שיטת הנגדים התרמיים.

בשיטה זו- מבוצעת הקבלה של:

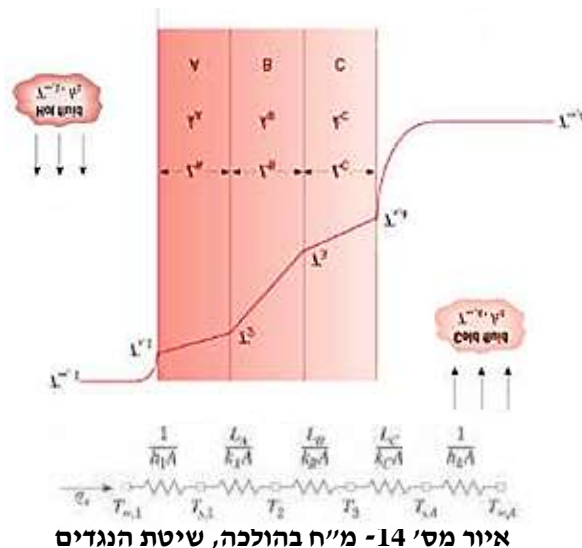


- הפרש טמפרטורות להפרש פוטנציאליים $\Delta T \leftrightarrow \Delta U$
 - התנגדות התרמית להתנגדות חשמלית $R_{th} \leftrightarrow R$
 - מעבר החום לזרם חשמלי $\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \leftrightarrow I = \frac{\Delta U}{R}$ (3.4)
- ההתנגדויות של שכבות הקיר למעבר חום, ניתנות לתיאור ע"י חיבור נגדים אלקטרוניים בטור. סכימת ההתנגדויות במקרה זה תתן לנו את סך התנגדות הקיר למעבר חום:

$$(3.5) \quad R_{tot} = R_{conv} + R_{cond} = R_L + R_R + R_1 + R_2$$

תנאים והנחות בשיטה:

1. הולכה חד- מימדית
2. מצב תמידי (כלומר- לא מתרחש ייצור אנרגיה פנימי)
3. קיר מישורי (מעבר החום תלוי בכיוון X בלבד)
4. התנגדות המגע זניחה



התרמיים

מקדם ההולכה של אלמנט במעטפת נמצא ביחס הפוך למקדם ההתנגדות התרמית הכוללת של כל שכבותיו – כלומר, ביחס הפוך לסכום ההתנגדויות (ערכי הבידוד) של כל החומרים שבחתך הקיר או התקרה, ללא תלות בסדר השכבות. עבור קיר מישורי בעל n שכבות בין 2 זורמים,

יתרחש מעבר חום בהולכה

$$(3.6) R_{t,cond} = \frac{\Delta x}{kA}$$

ותתרחש גם הסעה: $(3.7) R_{t,conv} = \frac{1}{hA}$

ההתנגדות הכוללת של הקיר למעבר חום במקרה זה (כמתואר באיור 14):

$$(3.8) R_n + R_{conv2} = R_{tot} = \sum R_t = R_{conv1} + R_1 + R_2 + \dots$$

$$= \frac{1}{A} \cdot \left[\frac{1}{h_1} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \dots + \frac{L_n}{k_n} + \frac{1}{h_2} \right]$$

מאחר וההתנגדות תלויה גם בתכונות החומר (כושר הבידוד) וגם בעובי שלו, ניתן באופן תיאורטי ליצור מעטפת מבודדת היטב באמצעות אלמנט עבה מאוד, שמורכב מחומר אחד או יותר, גם אם אין לאף אחד מהחומרים המרכיבים את האלמנט כושר בידוד גבוה.

אבל בפועל, יש מגבלות על עובי המעטפת ועל תרומתם הבידודית של חלק מהחומרים (כגון בטון קונסטרוקטיבי).

לכן, במקרים רבים נדרשים חומרי בידוד ייעודיים שמתאפיינים במשקל וחוזק נמוך וכושר בידוד גבוה ולהם תפקיד יחיד: לסכל מעבר חום דרך המעטפת.

4. אזורי אקלים

מדינת ישראל קטנה בשטחה. אף על פי כן, תנאי האקלים השוררים בחלקי הארץ השונים נבדלים במאפיינים חשובים. תכנון המתייחס בצורה נאותה לתנאי האקלים השונים עשוי להבטיח כי הסביבה הבנויה תהיה נוחה יותר, אגב חיסכון ניכר באנרגיה. על מנת לסייע לציבור המתכננים להתאים את התכנון לאתר מסוים, ניתן לסווג את כל הישובים בארץ למספר מצומצם יחסית של אזורים בתוכם שוררים תנאים דומים [3].

4.1. חלוקה לאזורי אקלים על פי ת"י 1045

בישראל נהוגה בתחום הבנייה חלוקה לאזורים אשר מתבססת על טמפרטורת האוויר בלבד. חלוקה זו נדרשה על מנת לאפשר תכנון מיטבי של כמות הבידוד התרמי הנדרשת בבניינים, בהתייחס להבדל בין הטמפרטורה הפנימית וטמפרטורת הסביבה. החלוקה לאזורי אקלים נעשתה לפי ניתוח נתונים אקלימיים רב-שנתיים של תחנות מטאורולוגיות [4]. סיווג היישובים נעשה לפי הטמפרטורה היומית הממוצעת בקיץ ובחורף.

במסגרת התקן, נקבעה חלוקה לארבעה אזורי אקלים. איור 15 מראה את החלוקה לאזורי אקלים על פי ת"י 1045 [1]. הבסיס לחלוקה זו הוא ניתוח השפעות הטמפרטורה של הסביבה על התנאים בתוך הבניין. החלוקה לאזורי אקלים לצורך קביעת בידוד תרמי נעשתה כאמור על סמך פרמטר אקלימי אחד, דהיינו טמפרטורת אוויר, ואיננה מביאה בחשבון גורמים אחרים כגון הלחות באוויר או קרינת שמש, העשויים להיות בעלי השפעה רבה על התכנון. אף על פי כן, גם סדרת התקנים ת"י 5282, "דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה" [2], המבוססים על מאפיינים נוספים של הבניין מלבד הבידוד התרמי, נשענת על החלוקה אשר נקבעה בתקן 1045 [5].

4.2. מאפיינים אקלימיים של אזורי הארץ

כמתואר באיור 15, החלוקה אשר התקבלה על ידי ניתוח הטמפרטורות יוצרת ארבע רצועות המקבילות בקירוב לחוף הים התיכון ולגב ההר, למעט באזורים אשר בהם האזור ההררי אינו רציף (כגון בגליל התחתון). חלוקה זו אינה מביאה בחשבון מאפיינים אקלימיים אחרים אשר להם עשויה להיות השפעה רבה על תהליך התכנון. חשיפה לקרינת השמש, ביחוד לקרינה ישירה, עלולה להוות מקור לרווח חום רב בבניין. מאחר וכל שטח המדינה מאופיין בשמיים בהירים במהלך כל הקיץ (למעט עננות בוקר בעיקר ברצועת החוף והשפלה), אין כמעט הבדל בין האזורים השונים במידת החשיפה לקרינת השמש בעונה זו. לא כך הדבר בחורף: כמות העננים פוחתת בהדרגה מצפון לדרום וממזרח לגב ההר, וכמות הקרינה אותה ניתן לנצל לחימום משתנה בהתאם.

להלן תיאור מקוצר של התנאים האופייניים לכל אחד מאזורי האקלים על פי תקן 1045.



איור מס' 15 - חלוקה לאזורי האקלים על פי ת"י 1045'

4.2.1. אזור א-אזור רצועת החוף

אזור זה כולל רצועה צרה ברוחב של כק"מ מן הים בלבד, המושפעת מן הקרבה הישירה לים.

הבדלי הטמפרטורה בין יום ללילה ובין קיץ לחורף מתונים באזור זה בשל ההשפעה של הים. הלחות בו גבוהה, כך שגם אם הטמפרטורות בקיץ אינן גבוהות, שורר בו עומס חום כמעט כל שעות היממה. בחורף הדרישה לחימום קטנה.

4.2.2. אזור ב- מישור החוף והשפלה;

למעט הנגב הר הנגב; העמקים הצפוניים ומקומות אחרים

אזור זה כולל את כל חלקי הארץ אשר גובהם מתחת כ-430 מטר מעל פני הים, למעט רצועת החוף הצרה ואזור הבקעה והערבה. לפיכך התנאים השוררים בו אינם אחידים, וההבדלים בין הגליל התחתון לבין באר שבע, למשל, הם ניכרים. הגבולות בין אזור זה לבין רצועת החוף מצד אחד ואזור ההר מאידך, אינם חדים.

הגורם העיקרי המעצב את תנאי האקלים באזור זה הוא המרחק מהים, הגורם לכך שהטמפרטורות ביום גבוהות מאלו שלאורך החוף ונמוכות יותר בלילה, בעוד שהלחות באוויר פחותה בהשוואה לאזורים הסמוכים לים.

4.2.3. אזור ג- אזור ההר

אזור זה מאופיין בתנאים נוחים בקיץ ובדרישה משמעותית להסקה בחורף. בשל הריחוק מהים והגובה הטופוגרפי, טמפרטורת האוויר לרוב נמוכה מזו שבשפלה, וכן גם הלחות באוויר, כך שאין כמעט עומס חום בקיץ.

4.2.4. אזור ד- בקעת הירדן והערבה

החלק הדרומי של אזור זה, בין ים המלח לים סוף, מאופיין באקלים מדברי חם ויבש, שמים בהירים כמעט כל השנה וכמות משקעים קטנה מאוד ולא סדירה. בקיץ שורר עומס חום כל שעות היממה, אף שהאוויר יבש מאוד. בחורף מזג האוויר נוח: הטמפרטורות ביום נעימות והדרישה להסקה מינימלית. הרוח באזור זה נושבת כמעט תמיד מצפון או מצפון מזרח.

בחלק הצפוני של האזור, כמות המשקעים עולה בהדרגה מים המלח ועד לכנרת. הטמפרטורות בקיץ גבוהות כמעט כמו בערבה, אך הלחות גבוהה מעט יותר. הטמפרטורות בחורף נמוכות באזור זה ביחס לערבה, אם כי הדרישה לחימום בכל זאת נמוכה.

4.3. קיר רב-שכבתי

בתנאי הארץ, הבניין נתון לעיתים קרובות לעומסים תרמיים משמעותיים אשר נובעים מתנאי חוץ לא נוחים – בעוד שקיימות תנודות טמפרטורה רחבות בין יום ולילה ובין עונה לעונה [7]. מצבים דינמיים אלה מחייבים קירות המעטפת בעלי שתי תכונות מנוגדות: מצד אחד- נדרש קיר בעל התנגדות תרמית גבוהה, כדי לסכל מעבר חום בלתי רצוי (שמוגדרת בתקינה), מצד שני- על הקיר להיות בעל יכולת אגירה תרמית גבוהה (שאינה מעוגנת בתקינה), שתאפשר מיתון של התנודות וניצול של "אנרגיה טבעית" לחימום וקירור.

ברוב אזורי האקלים של הארץ, שוררים תנאים לא נוחים בפרקי זמן ניכרים במשך המחזור השנתי האופייני: בשעות היום של ימי הקיץ יש תנאים חמים למדי (טמפרטורות גבוהות וקרינת שמש חזקה, ובמישור החוף גם לחות גבוהה), ובשעות הלילה של החורף הטמפרטורות נמוכות (במיוחד באזורי ההרים). כאשר הטמפרטורה החיצונית של קיר נתון שונה בהרבה מזו שרצויה, מטעמי נוחות תרמית, בתוך הבניין, מוגבר מעבר אנרגיה דרך הקיר – מבפנים החוצה בתנאים קרים, ובכיוון הפוך בתנאים חמים.

ברוב המקרים הקירות מהווים חלק גדול ממעטפת הבניין, ומעבר החום המוגבר דרכם עלול להוות גורם עיקרי להתחממות או התקררות החלל. לכן, חסכון באנרגיה הנדרשת כדי לשמור על תנאי נוחות קשורה ישירות ליכולת הקיר להתנגד למעבר חום. משום שמעבר החום דרך הקיר מתרחש בהולכה, התכונה שקובעת את קצב המעבר היא המוליכות התרמית של הקיר כולו, הנמצאת ביחס הפוך למקדם ההתנגדות התרמית הכוללת של כל שכבותיו.

חומרים נפוצים לבניית קירות בארץ, כגון בטון ומוצריו, מתאפיינים במוליכות תרמית גבוהה יחסית. מבלי לעבות את הקיר מעבר לטווח המקובל, ניתן להשיג שיפור משמעותי בהתנגדות שלו רק תוך שימוש בחומרי בידוד תרמי – דהיינו, חומרים בעלי מוליכות תרמית נמוכה, שמתאפיינים כחומרים "קלים" מבחינת המשקל הסגולי (הצפיפות) שלהם.

אולם בחלק גדול מאזורי הארץ, ובעיקר באלה שגבוהים וצחיחים יותר, האקלים מתאפיין במשרעת טמפרטורה גדולה במחזור היומי, ובמצב תרמי לא יציב. בחורף, למרות הטמפרטורות הנמוכות, ישנם ימים רבים בהירים וקרינת שמש בעוצמה גבוהה, ובקיץ הימים החמים מלווים בלילות קרירים ורוחות חזקות. כדי למתן את תנודות הטמפרטורה ולנצל בצורה מיטבית את מקורות האנרגיה הטמונים באקלים המקומי, נדרשת מהקיר "אינרציה תרמית" גבוהה, אשר תלויה באגירת חום לאורך זמן. סוג החומר שמעניק לקיר את יכולת האגירה נקרא "מסה תרמית" – דהיינו, חומר בעל קיבול חום גבוה, אשר מיושם בנפחים גדולים.

בתעשייה- מקובל להשתמש בחתכי קיר המורכבים משכבות שונות עשויות חומרים שונים- ומשתנות בכמות החומרים ואופיים. כמו כן, באמצעות המחקר- יתאפשר הינדוס של חתך קיר מרוכב, העונה על כל דרישות המסה התרמית והבידוד, כבר בתהליך היציקה, ע"י שימוש בטכנולוגיות ייצור שונות.

לכן, נדרש לבצע אופטימיזציה רבת-משתנים למציאת קיר מרוכב בעל שכבות שונות, בעלות תכונות משתנות.

באמצעות הכלי שפותח במחקר זה, ה-BGU TBOT, ניתן לפתח בלוקי בטון מרוכבים מרובי שכבות, ייעודיים עבור כל אחד מאיזורי האקלים בארץ, ע"פ המלצות התקינה, בעזרתו, ניתן יהיה לתכנן מבנים כך שתחסך אנרגיה המשמשת לחימום או קירור הדירה, עד להגעה לטמפ' הנוחות.

5. שיטת המחקר

בפרק זה יוצגו שיטות המחקר השונות ותוצאות האנליזות שבוצעו במהלך מחקר זה. האנליזות נועדו לצורך השוואת ההתנהגות התרמית וחיפוש אחר קריטריון אחיד המאפיין את ההתנהגות התרמית של קירות הבנויים מחומרי בנייה שונים לרבות בטון וחומרי בידוד לסוגיהם השונים בעונות השנה השונות.

5.1. אנליזת אלמנטים סופיים

על מנת למצוא חתך קיר אופטימלי ולהשיג פתרון אופטימלי לקביעת הקריטריון לקביעת היחס בין המסה לערכי הבידוד, החלטנו להשתמש באנליזת אלמנטים סופיים. אנליזות האלמנטים הסופיים פותרות את משוואת החום במצב מעבר, לצורך חיזוי פילוג הטמפרטורות הפנימיות מול החיצוניות, בקטע קיר בטון הנתון לעומסי חום בשעות היממה השונות. האנליזה דימתה את תהליך מעבר החום בקיר, הנמצא בצידו האחד חשוף לשמש וצידו האחר פונה לפנים הדירה. בעזרת אנליזות אלו, בדקנו את האפשרות לקבוע קריטריון אחיד לבידוד הנקבע מביצוע אינטגרל על שטפי החום, המבטא את האנרגיה שיש להשקיע בפנים המבנה, לשמירה על טמפרטורת הנוחות.

5.1.1. בניית המודל בתכנת ABAQUS (ראה נספח 8)

האנליזה בוצעה עבור קיר בטון בעובי 20 ס"מ. האנליזות בוצעו עבור עומסי חום בחודשי השנה השונים כפי שנמדדו בתחנה המטאורולוגית בבית דגן (ראה טבלה מס' 2) מצידו החיצוני של הקיר וטמפרטורה קבועה של 22°C מצידו הפנימי, כך שנקבעה טמפרטורת יעד פנים הדירה ונמדד שטף החום אותו יש לאזן ע"י מערכת האקלום ליחידת שטח. הרישות נעשה בעזרת אלמנטים מסדר שני בעלי פונקציות צורה פרבוליות. הקיר הועמס לעומס חום על פי מדידות דיסקרטיות של שטף חום וטמפרטורה חיצונית בהפרשים של שעה. משך פעולת העומס התרמי נבחר להיות 2 יממות (48 שעות).

5.1.2. אנליזה של קיר בטון ללא בידוד הנתון לעומס טמפרטורת נוחות פנימית

במחקר נבחנו 5 דוגמאות של חתכי קיר בעלי תכונות משתנות, כמתואר בטבלה מס' 3 ובאיור מס' 12. כל חתך קיר היה מורכב מ-8 שכבות בעלות תכונות שונות- צפיפות ρ ומקדם ההולכה k - אותו קבענו מאיור מס' 13.

sample 15

sample 22

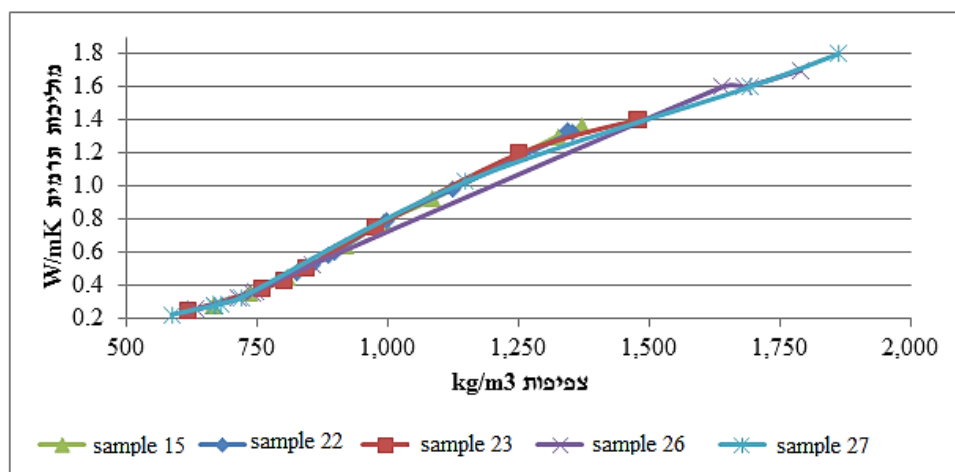
sample 23

	ρ (kg/m ³)	K		ρ (kg/m ³)	K		ρ (kg/m ³)	K
L-1	665.57	0.28	L-1	826.81	0.48	L-1	619.79	0.24
L-2	737.08	0.35	L-2	856.14	0.53	L-2	760.1	0.38
L-3	807.6	0.44	L-3	887.68	0.58	L-3	801.33	0.43
L-4	920.56	0.64	L-4	898.61	0.60	L-4	844.34	0.51
L-5	992.12	0.78	L-5	997.00	0.79	L-5	976.3	0.75
L-6	1086.04	0.92	L-6	1124.02	0.98	L-6	1251.59	1.2
L-7	1324.2	1.3	L-7	1353.07	1.33	L-7	1475.58	1.4
L-8	1370.64	1.36	L-8	1345.04	1.34	L-8	1479.59	1.4

sample 26		
	ρ (kg/m ³)	K
L-1	634.57	0.25
L-2	715.20	0.32
L-3	741.17	0.35
L-4	747.04	0.36
L-5	855.07	0.52
L-6	1639.18	1.60
L-7	1681.53	1.60
L-8	1789.20	1.70

sample 27		
	ρ (kg/m ³)	K
L-1	588.24	0.22
L-2	668.21	0.28
L-3	669.37	0.28
L-4	682.11	0.29
L-5	721.48	0.33
L-6	1148.24	1.03
L-7	1691.95	1.60
L-8	1861.03	1.80

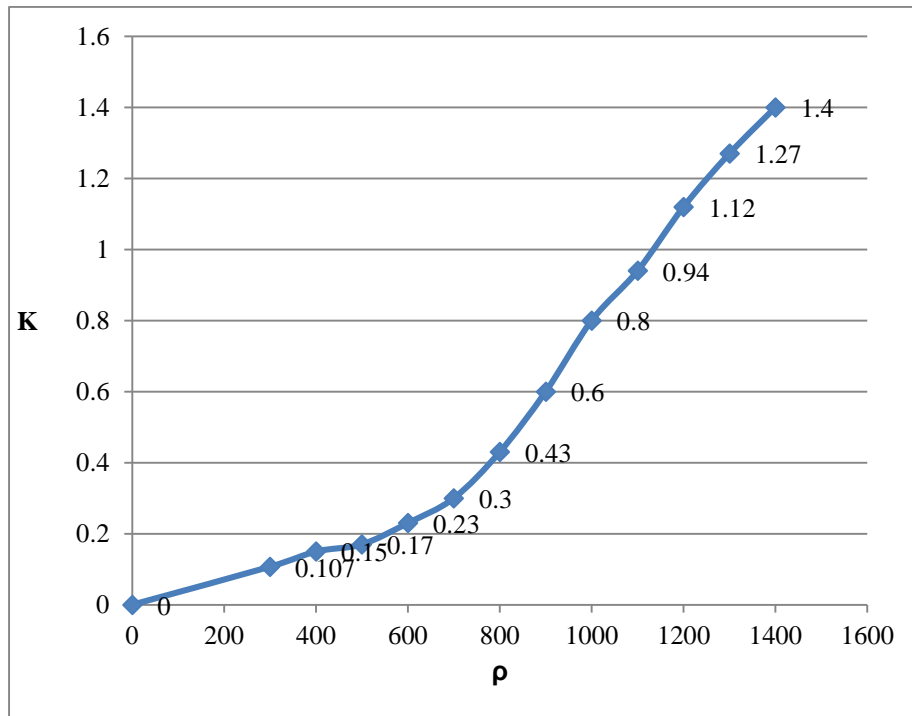
טבלה מס' 3- תוצאות המדידות



איור מס' 16- תלות המוליכות התרמית כפונקציה של הצפיפות

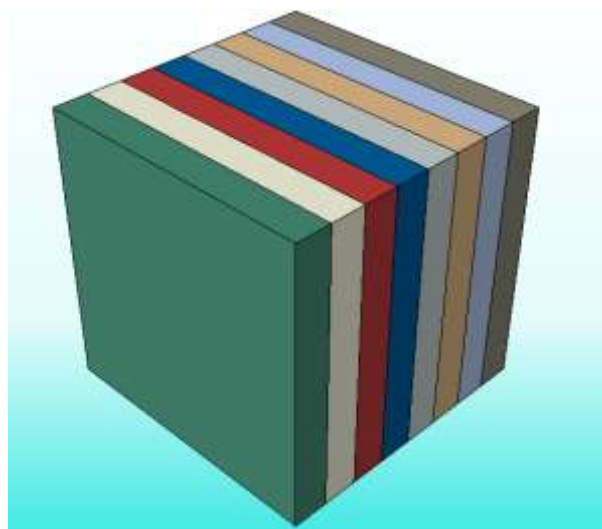
איור 16 מתאר את צפיפות השכבה כנגד מקדם המוליכות התרמית- כל קו מתאר פרופיל שינוי הצפיפות בעובי השכבה.

עבור חתכים אלו, בוצעה אינטרפולציה ליניארית לצורך חישוב K - מקדם המוליכות התרמית של השכבות השונות, תוך שימוש בערכים מוכרים בספרות ומהנחות בסיסיות לערכי K .



איור מס' 17 - אינטרפולציה עבור המוליכות התרמית כפונקציה של צפיפות החומר

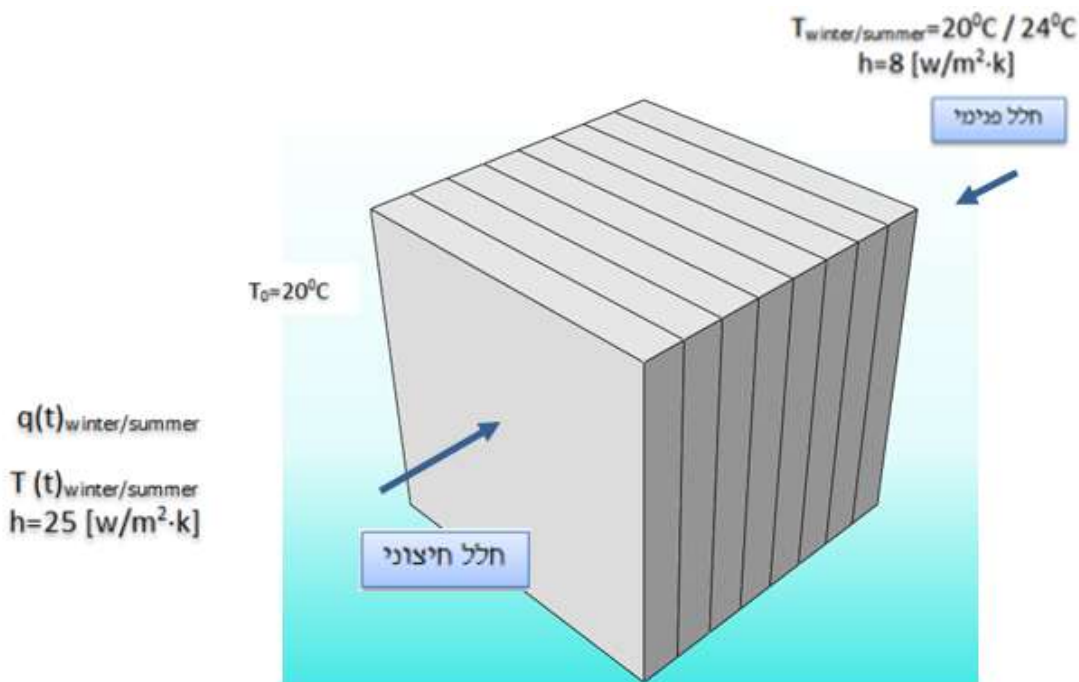
לצורך בניית המודל, כל חתך קיר בעובי 20 ס"מ, חולק בתכנת ABAQUS ל-8 שכבות, כמתואר באיור מס' 17. לצורך בניית מודל האלמנטים הסופיים, נדרש למדל כל שכבה לחוד, ולהניח כי לכל שכבה קיימות תכונות תרמיות ומכניות שונות, כלומר: צפיפות $\rho[kg/m^3]$, מקדם המוליכות התרמית $k[W/m \cdot ^\circ k]$, וקיבול החום $c_p[j/kg \cdot ^\circ k]$.



איור מס' 18 - מודל בן 8 שכבות

תנאי השפה המתוארים באיור מס' 18 הינם:

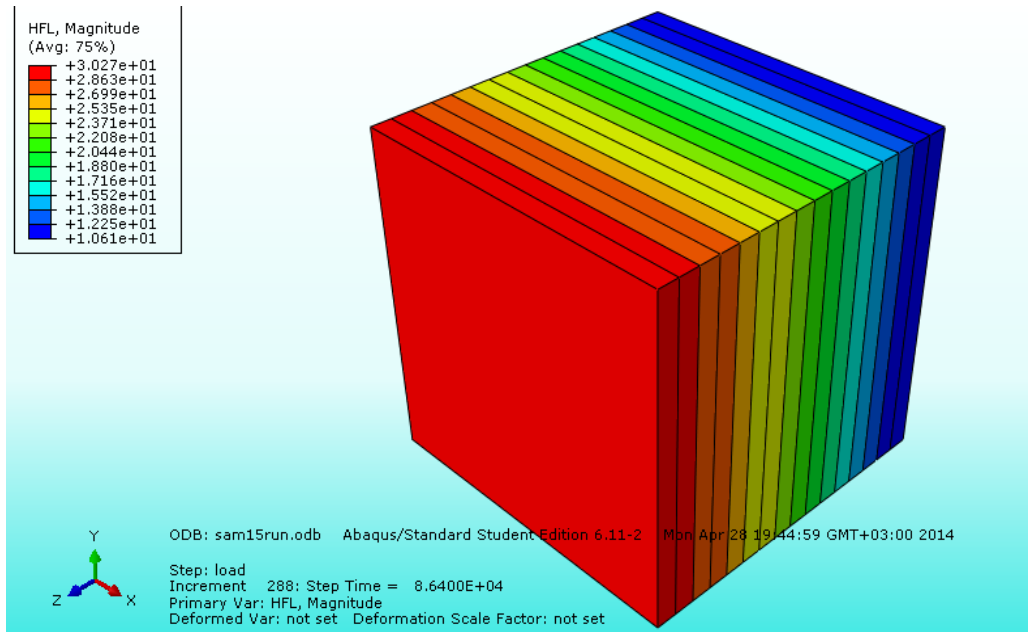
1. מקדם מעבר החום בהסעה h באוויר- בתוך המבנה $h = 8 [W / m^2 \cdot ^\circ k]$ ומחוצה לו $h = 25 [W / m^2 \cdot ^\circ k]$.
2. טמפרטורה רצויה בתוך המבנה, המוגדרת כטמפרטורת הנוחות בעונה- בקיץ 24 מ"צ ובחורף 20 מ"צ.
3. עומסי חום המבוטאים במשרעת שטף החום אופייני הנובע מקרינת השמש וטמפרטורת הסביבה בעונה ובחודשי השנה השונים, למשך 48 שעות, כפי שנמדדו בתחנה המטאורולוגית בבית דגן [4] מצידו החיצוני של הקיר.



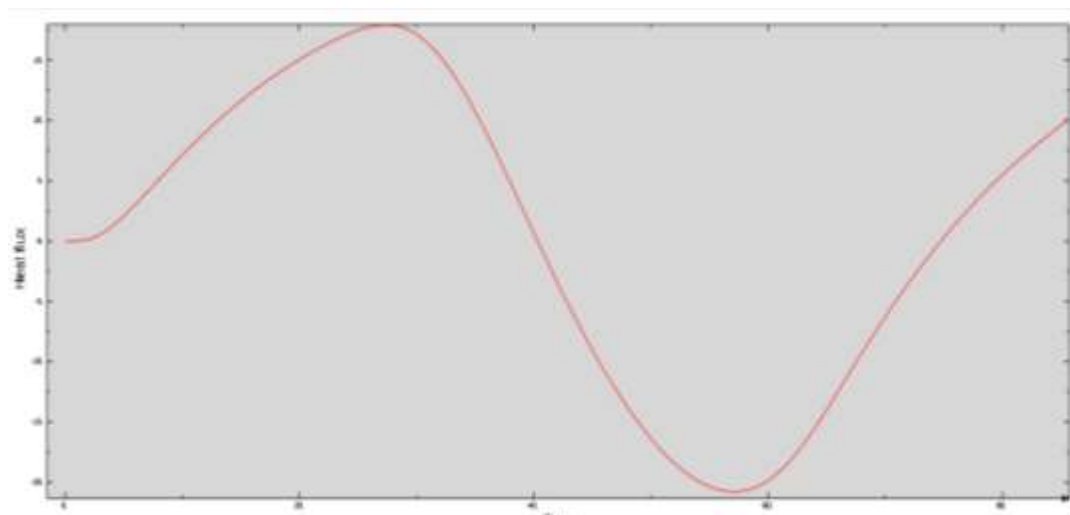
איור מס' 19- תיאור הקיר המועמס

5.1.3 תוצאות האנליזות

בדקנו את הגרדיאנט של שינוי מתון במשקלי השכבות או שינוי דרמטי, ובחנו איזה מן השינויים משרת אותנו בצורה טובה יותר מבחינה תרמית. באיור 20 ניתן לראות את שינויי הטמפרטורה ההדרגתיים המתרחשים לאורך קיר התואם לחתך 15 sample, במהלך הולכת חום דרכו בעונת החורף. ניתן להבחין כי טמפ' פנים הדירה המסומנת בצבע האדום- גבוהה מטמפ' החוץ, הצבועה בצבע הכחול, בתקופת החורף. באיור 21 ניתן לראות את שטפי החום הנדרשים לצורך שמירה על טמפרטורת הנוחות במבנה.



איור מס' 20 - שינויי הטמפרטורה במהלך הולכת החום בחורף

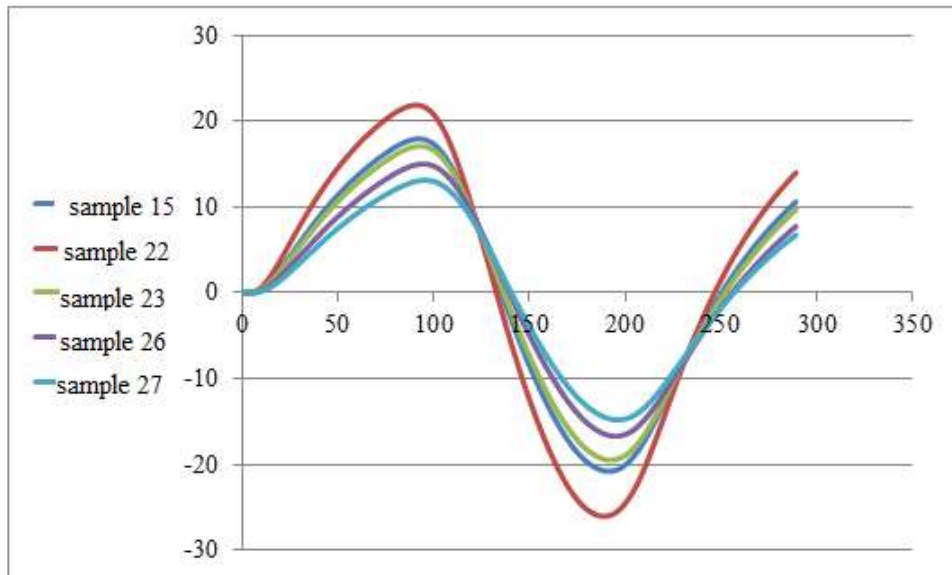


איור מס' 21 - שטף החום כפונ' של הזמן

גרפים אלו נעשו עבור כל חתך קיר נבחן בעונת החורף ובעונת הקיץ. עבור תוצאות אלו הנחנו כי השטח החיובי בין הפונקציה לציר, זוהי האנרגיה שנדרשת להשקיע ע"מ לקרר את המרחב הפנימי של הדירה בתקופת הקיץ, ולחילופין- השטח השלילי- כמות האנרגיה שיש להשקיע לחימום במהלך החורף.

5.1.3.1. השוואה בין הדגמים:

לאחר בניית 5 המודלים, ערכנו השוואה של שטף החום בדירה. הנחנו כי ביצוע אינטגרל על הפונקציה המתארת את הגרף, מבטא את כמות האנרגיה הנדרשת להשקעה בתוך הדירה, לטובת שמירה על טמפ' הנוחות. באיור 22 מתוארת התפלגות שטף החום לאורך הזמן בדופן הפנימית של הקיר בעונת החורף, עבור 5 חתכים שונים.



איור מס' 22- התפלגות שטף החום בדופן הפנימית בחורף

בבחינת הדגמים, הסקנו כי דווקא שינוי דרסטי במשקלי השכבות, נותן תפקוד תרמי טוב יותר. בדקנו איפה נדרשת יותר אנרגיה, כתלות במשקל השכבות. חשבנו שהשטח מתחת לגרף שיתקבל, משקף את צריכת האנרגיה לשמירה על טמפי נוחות וישמש אותנו להחלפת הקריטריון לקביעת המסה והבידוד- לנוכח היותו אנליזה דינמית-החלטנו שפתרון זה אינו ישים עבורנו. ע"י ה- ABAQUS, בחנו את השפעת הבידוד והבחנו כי לא ניתן לאפיין אופטימום מתמטי יישומי- מכיוון שתוספת בידוד ע"ג המסה אמנם שיפרה את התכונות התרמיות אבל השפעתה דעכה בצורה שהקשתה על קביעת הקריטריון.

5.2. אנליזת אלמנטים סופיים- סיכום

בסופו של תהליך האנליזות, השטח שחושב אכן מתאים כקריטריון בודד לקביעת התפקוד התרמי אך יחד עם זאת אינו לוקח בחשבון את ההשפעות המבניות, כגון: הפניות, גודל חלונות, צבע קיר וכו' ולכן לא מתאים לצרכים פרקטיים. מחקר המשך יכול להיות כזה המשליך את השפעות המבנה על מודל חתך הקיר ואנו מניחים כי התקדמות כזו תניח את הבסיס למציאת קריטריון בודד. לכן- עברנו לשיטת המחקר הבאה- פיתוח כלי לאופטימיזציה רבת משתנים של שכבות המבנה.

6. פיתוח כלי האופטימיזציה

מכיוון שלא מצאנו קריטריון בודד המתאר את ההתנהגות המבנית, החלטנו להמשיך בתהליך של מציאת פתרון אופטימלי של חתך קיר על סמך דרישות התקן לבידוד [1] והערכת המסה התרמית הרצויה.

על מנת למצוא את סידור השכבות האופטימלי עבור חומרי המבנה בקיר, היה צורך בהכרת המשתנים שיש לקחת בחשבון: לכל חומר יש את תכונות הצפיפות ρ_n וקיבול חום k_n המוכרות לנו מהספרות. מהתקן הישראלי מוגדרת לנו ההתנגדות המומלצת לעמידה בתקן R_t , עבור כל אחד מאזורי האקלים בארץ.

המסה התרמית המומלצת לקיר כולו M_t , נבחרה בסביבות הערך של $240 \text{ [kg/m}^2]$. כעת, היה צורך במציאת עובי השכבות הנדרש t_n של כל שכבה בחתך הקיר ובמציאת הסידור של השכבות - כפי שפורט ברקע התיאורטי (ההמלצה היא שחומרי המבנה הקלים יהיו בשכבה החיצונית ואילו הכבדים - בפנימית).

6.1. תיאור הבעיה המתמטית

עבור n חומרים, יש למצוא את הסידור האופטימלי לעמידה בעובי הקיר הנדרש t_T הנקבע ע"י המתכנן. ידוע לנו כי R_t , ההתנגדות הכוללת של הקיר, היא סכום

$$(6.1) \quad R_n = \frac{k_n}{t_n} \quad \text{: הקיר מבנה בקיר}$$

באופן דומה M_t , ניתנת לתיאור ע"י סכום כל המסות התרמיות של חלקי המבנה

$$(6.2) \quad M_n = \frac{\rho_n}{t_n}$$

נגדיר את האילוצים שלנו באמצעות המשוואות הבאות:

$$(6.3) \quad R_t = \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{k_1}{t_1} + \frac{k_2}{t_2} + \frac{k_3}{t_3} + \dots + \frac{k_n}{t_n} \right)$$

$$(6.4) \quad M_t = \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{\rho_1}{t_1} + \frac{\rho_2}{t_2} + \frac{\rho_3}{t_3} + \dots + \frac{\rho_n}{t_n} \right)$$

(המכפלה בגודל $\frac{1}{100}$ נובעת מהעברת יחידות). ניתן להבחין כבר בשלב זה כי אנו עומדים בפני פתרון של בעיה לא ליניארית, היות וגם ההתנגדות התרמית וגם המסה התרמית, תלויות בעובי השכבה t_n . עוביו הכולל של הקיר ניתן לתיאור כסכום כל עוביי השכבות של חומרי המבנה, באמצעות פונקציית המטרה הבאה:

$$(6.5) \quad t_T = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n$$

בעית אופטימיזציה לא ליניארית בעלת n משתנים ושלושה אילוצים אינה פשוטה לפתרון ולכן, נמצא פתרון אשר בא לידי ביטוי באמצעות תכנת אקסל בכלי האופטימיזציה שפותח במחקר: ה-BGU - Thermal Block Optimization Tool.

6.2. כלי האופטימיזציה BGU-TBOT

בכלי האופטימיזציה באים לידי שימוש תוספים של תוכנת האקסל המאפשרים פתרון לבעיה הלא ליניארית שתוארה לעיל. באמצעות תוסף ה-Solver ותכונות Macro נוספות, ניתן לפתור את הבעיה ולאפיין את העוביים הנדרשים לשם עמידה בדרישות המתכנן.

6.2.1 הפתרון באמצעות ה-Solver

בתכנת האקסל קיים תוסף שנקרא "פותר הבעיות" המהווה חלק ממערכת פקודות המכונה לעתים כלי ניתוח "מה-אם". פותר זה מאפשר פתרון של בעיות מתמטיות בעלות אילוצים וביצוע אופטימיזציה רבת משתנים (עד 200 משתנים). באמצעות ה-Solver ניתן למצוא ערך אופטימלי עבור תא הקרוי תא המטרה, הנתון לאילוצים או מגבלות, החלים על הערכים של תאי נוסחה אחרים בגליון עבודה. ה-Solver פועל עם קבוצת תאים, המכונים משתני החלטה (תאים ניתנים לשינוי), הלוקחים חלק בחישוב הנוסחאות בתאי המטרה ותאי האילוצים. ה-Solver מבצע התאמה של הערכים בתאי משתני החלטה, כך שיעמדו במגבלות החלות על תאי אילוצים ויתנו את התוצאה הרצויה עבור תא המטרה.

עבור בעיה מהסוג שלנו, פנינו לאלגוריתם (Generalized Reduced Gradient -GRG Nonlinear) המשמש לפתרון עבור בעיות חלקות לא ליניאריות.

כשהפותר מוצא פתרון בשיטה זו, הוא מוצא פתרון מקומי אופטימלי- כלומר, אין עוד קבוצת ערכים למשתני החלטה הקרובים לערכים הנוכחיים, שמניבה פתרון טוב יותר לפונקציית המטרה [12]. הפתרון נקרא פתרון מקומי מאחר והאלגוריתם אינו מבצע מציאה של ערכי מינימום או מקסימום מוחלטים, אלא מוצא פתרונות המאפשרים את קיומם של כל האילוצים. ייתכנו מס' קבוצות של ערכים העונים על האילוצים אך הכלי עוצר ברגע שמצא קבוצה העונה על כל האילוצים, ועברה את בדיקתו שלוש פעמים. בדרך הפתרון הנבחרת יש לוודא הגדרות מתאימות לבעיה:

- שונות: כמות השינויים בחמשת החזרות האחרונות לפני הפסקת פעולת הפותר. ככל שהערך קטן יותר, הבפתרון שיוצג יהיה קרוב יותר לפתרון האופטימלי הקיים.
 - נגזרות: גזירות קדימה אמנם יותר מדוייקות אף כמות החישובים הנדרשת תהיה כפולה ותארך זמן כפול.
- אם לאחר הגדרות אלו, הפותר אינו מוצא פתרון, ככל הנראה יש לשנות את קנה המידה שהוגדר לפתרונות.

6.2.2 תיאור הכלי

ה- BGU-TBOT, פותח באמצעות קובץ אקסל. הקובץ שמור בפורמט (xlsm.) מאחר והוא מכיל פקודות מאקרו.

בפתיחת הקובץ- יופיע מסך הפתיחה המתואר באיור 23. ניתן לראות כי ישנן מס' אפשרויות בחירה בידי המשתמש:



- האיזור האקלימי בו הוא מעוניין לבנות- א', ב', ג' או ד'.
- התקן לבניה בו הוא מעוניין לעמוד בדרישות- 1045 או 5282 משני טווחים אלו, תוגדר ההתנגדות המומלצת ע"פ הרשום בתקינה, עבור כל אחד מן האזורים האקלימיים, כמתואר בספרות ובטבלה 4.

איור מס' 23- מסך פתיחה ותפריט ראשי בכלי

ה-BGU-TBOT

התנגדות רצויה		
תקן / אזור אקלימי	1045	5282
	א	0.6	1
ב	0.7	1.2
ג	0.85	1.4
ד	1	1.6

טבלה מס' 4- ההתנגדות המומלצת ע"פ התקן

- אפשרות נוספת לבחירת המשתמש היא ההתנגדות הרצויה לחישוב- אין זה מן ההכרח כי ההתנגדות לחישוב תהיה ההתנגדות המומלצת ע"פ התקן, אך זוהי ברירת המחדל.
- מסה טרמית לחישוב- כפי שהוסבר בפרקים הקודמים, המסה הנבחרת ע"י המשתמש, צפויה להיות בסביבות הערך של 240 kg/m^3 .

כעת, על המשתמש לעבור לבחירת החומרים, מהם הוא מעוניין ליצור את הבלוק המרוכב.

לבחירה זו, יש ללחוץ על התיבה המתאימה.

ברגע לחיצה על התיבה, יפתח בפני המשתמש המסך המתואר באיור מס' 24.

Material	Density [kg/m ³]	Conductivity [W/mK]	X	Use Material 1 Or 0
בטון רגיל	2400	2.10	0	1
בטון קל בצפיפות 2000	2000	1.40	0	0
בטון קל בצפיפות 1800	1800	0.87	0	0
ניח תרמי 600	600	0.17	0	1
ניח תרמי 500	500	0.14	0	0
ניח תרמי 400	400	0.12	0	0
ניח תרמי 300	300	0.09	0	0
בלוק איזונג 025	261	0.08	0	0
בלוק איזונג 020	210	0.07	0	0
ניח פולי יאם	200	0.07	0	1
ניח תרמי 200	200	0.07	0	0
זכוכית חוקתית	122	0.05	0	0
ניח צמר סלעים	100	0.04	0	0
ניח פוליפרופילן חוקתני קטנת F30	30	0.04	0	1
ניח פוליפרופילן חוקתני קטנת פונד' בשיתוף	30	0.03	0	0
ניח פוליאורטן או פוליאורטן חוקתני	30	0.03	0	0
חומר צמר סלעים	24	0.04	0	0
חומר צמר זכוכית	24	0.04	0	0
ניח פוליפרופילן חוקתני קטנת F20	20	0.04	0	0

הוספת חומרים ידנית בעלי עובי משתנה		
Density	Conductivity	Use Material
550	0.16	0
0	0	0

הוספת חומרים בעלי עובי קבוע		
Density	Conductivity	Wanted t
200	0.07	2

נקה לוח

נבחרו חומרים

איור מס' 24 - מסך "בחירת חומרים"

במסך זה- ניתן לראות מס' אפשרויות לבחירה:

- בחירת חומרים מבנק החומרים המוזן בכלי- ע"י סימון 1 או 0 בעמודת הבחירה, כאשר 0 היא ברירת המחדל.
- הוספת חומרים בצורה ידנית, במידה וקיימים בידי המשתמש חומרים נוספים אשר אינם מופיעים בבנק החומרים המופיע.
- לשימוש בחומר. המשתמש ניתנת האפשרות להכניס את נתוני החומר בעמודות הצפיפות והמוליכות וכן גם כאן, על המשתמש להכניס בעמודה המתאימה את בחירתו- 1 לשימוש בחומר.
- טבלה נוספת להוספת חומרים בעלי עובי קבוע- בהנחה שיש חומר מסויים, דוגמת צמר סלעים, שהמשתמש מעוניין להגדיר מראש את העובי של חומר זה, אשר יבוא לידי שימוש בבלוק המרוכב, עליו להכניס את נתוני החומר המלאים ולנקוב בערך העובי הרצוי בס"מ, בעמודה t Wanted.

למשתמש ניתנת האפשרות לנקות את הלוח ע"י לחיצה בתיבה המתאימה. יצויין כי בכלי הוגבל השימוש ב-6 חומרים בעלי עובי משתנה, לכל היותר, מאחר והדעה הרווחת היא כי לא ניתן ליצור פיזית בלוק המורכב מיותר מידי חומרים. במידה והמשתמש ינסה להזין יותר מ-6 חומרים בעלי עובי משתנה, תופיע לו הודעת שגיאה במסך, כמתואר באיור מס' 25.

איור מס' 25 - הודעת שגיאה

בסיום בחירת החומרים הרלוונטיים, על המשתמש ללחוץ על התיבה "נבחרו חומרים".
בלחיצה על תיבה זו, יועבר המשתמש בחזרה לתפריט הראשי, כמתואר באיור מס' 19.

- כעת, על המשתמש לבחור את עובי הבלוק הרצוי- העוביים הניתנים לבחירה הינם 20-35 ס"מ.

בתום הבחירה, על המשתמש ללחוץ על התיבה "מעבר לגליון הרצוי".
גם כאן יצויין כי למשתמש ניתנת האפשרות לנקות את הלוח ע"י לחיצה בתיבה המתאימה.

בלחיצה על התיבה "מעבר לגליון הרצוי", הכלי מעביר את כל הנתונים, כפי שנבחרו ע"י המשתמש, באמצעות שרשרת של פקודות מאקרו.
באיור 26 מופיעה בחירת המשתמש לטווחים שתוארו מעלה :

- אזור אקלימי- ד'
- תקן- 5282
- התנגדות תרמית לחישוב- 1.5 [m²K/W]
- מסה תרמית- 250 [kg/m²]
- עובי בלוק נדרש : 22 ס"מ

The screenshot shows a software interface with the following components:

- BLOCK Table:**

Material	Density [kg/m ³]	Conductivity [W/mK]	Thickness [cm]	Resistance [m ² K/W]	Mass [kg/m ²]	
בטן רזל	2400	2.10	0.00 cm	1	0.00	0.00
בטן קל כבסיסות 1800	1800	0.87	0.00 cm	1	0.00	0.00
טון תרמי 600	600	0.17	0.00 cm	1	0.00	0.00
לוח סטי'אס	200	0.07	0.00 cm	1	0.00	0.00
רוח סוליסטרן חלקי F30 nrep	30	0.04	0.00 cm	1	0.00	0.00
	540	0.16	0.00 cm	1	0.00	0.00
	0	0.00	0.00 cm	0	0.00	0.00
					0.00	0.00
sub total 1 =			0.00 cm			
	250.00	0.07	2.00 cm		0.29	4.00
					0.00	0.00
					0.00	0.00
sub total 0 =			2.00 cm			
total >			2.00 cm		0.29	4.00
					-1.21	-216

- OVERALL WALL Table:**

Resistance [m ² K/W]	Mass [kg/m ²]	Thickness [cm]	Temp	
1.50	250	22	0.0 cm	
			0.0 cm	
			0.0 cm	
			0.0 cm	
			0.0 cm	
			0.0 cm	
			0.0 cm	
			0.0 cm	
			0.0 cm	
			0.0 cm	
			2.0 cm	
			0.0 cm	
			0.0 cm	
			0.0 cm	
			sum	2.0 cm

- Buttons:** "start solving", "Graphic View", "Main Menu".

איור מס' 26- בחירת המשתמש, עובי בלוק 22 ס"מ

ניתן להבחין כי הכלי העתיק את כל החומרים בעלי העובי המשתנה לצידה העליון של הטבלה- כך שאלה יוכנסו לאופטימיזציה שתבוצע באמצעות ה-Solver, ואת החומרים שהמשתמש הגדיר עבורם עובי קבוע- לתחתית הטבלה- עובי זה לא יוכנס למשוואה והוא מהווה עוגן. כמו כן, לנוחותו של המשתמש, מופיעים כל הפרמטרים הרלוונטיים כפי שבוחר בצורה נוחה וידידותית. כעת על המשתמש להפעיל את הכלי לחישוב ע"י לחיצה על התיבה Start Solving. בלחיצה זו, יתחיל הכלי לאתר את הבלוק האופטימלי ע"פ הנתונים שהזין המשתמש. הכלי, מעמיד בפני המשתמש אפשרות לבחירת הגמישות בה הוא מעוניין ביחס לתוצאה, ומידת הדיוק הנדרשת.

כפי שמתואר באיור 27, באמצעות לחיצה חוזרת על Continue בתיבה שנפתחת, הכלי יחזור על שרשרת החישובים, עד שיגיע לתוצאה המתאימה ביותר עבור המשתמש.

BLOCK					
Material	Density (kg/m ³)	Conductivity (W/mK)	Thickness (cm)	Resistance (m ² K/W)	Mass (kg/m ²)
בטון רגיל	2400	2.10	7.21 cm	1 0.03	173.01
בטון קל בפיציות 1800	1800	0.07	1.35 cm	1 0.02	24.24
טיח תרמי 600	600	0.17	3.60 cm	1 0.21	21.59
לוח פולי אטן	200	0.07	3.34 cm	1 0.51	6.68
לוח פוליסטירן מקבץ קשיח F30	30	0.04	0.83 cm	1 0.21	0.25
	550	0.16	3.68 cm	1 0.23	20.23
	0	0.00	0.00 cm	0 0.00	0.00
			0.00 cm		0.00
sub total 1 >			20.00 cm		
	200.00	0.07	2.00 cm	0.29	4.00
			0.00 cm	0.00	0.00
			0.00 cm	0.00	0.00
			0.00 cm	0.00	0.00
sub total 0 >			2.00 cm		
total >			22.00 cm	1.50	250.00
				0.00	0

OVERALL WALL		
Resistance (m ² K/W)	Mass (kg/m ²)	Thickness (cm)
1.50	250	22

t round
7.2 cm
1.3 cm
3.6 cm
3.3 cm
0.8 cm
3.7 cm
0.0 cm
0.0 cm
0.0 cm
2.0 cm
0.0 cm
0.0 cm
0.0 cm
sum 21.9 cm

Dialog box: Solver paused, current solution values displayed on worksheet. Buttons: Continue, Stop, Save Scenario...

Buttons: Graphic View, Main Menu

איור מס' 27 - בחירת מידת הדיוק

בתום לחיצה מס' פעמים על הלחצן Continue, ניתן לראות כי נמצאה התוצאה האופטימלית- ע"י בדיקה ויזואלית פשוטה בעמודות ההתנגדות, המסה והעובי, בתחתיתן ניתן לראות כי ההפרש בין המידות הרצויות, כפי שמופיעות בצבע הכהה במרכז המסך, לבין התוצאות שהתקבלו מכלי החישוב, שווה ל-0 וכן העובי זהה לעובי הנדרש.

ברגע זה, לחיצה על Stop או Escape, תציג בפנינו את התוצאות שהתקבלו לעוביים עבור כל אחד מן החומרים. לנוחות המשתמש מופיעים הערכים המעוגלים לרמת עשירית הס"מ, בעמודה הימנית במסך בשם t round, כפי שמופיע באיור מס' 28. (בדוגמא זו- ניתן להבחין כי קיימת סטייה מזערית בעובי הנדרש לעובי של 21.9 ס"מ).

BLOCK					
Material	Density (kg/m ³)	Conductivity (W/mK)	Thickness (cm)	Resistance (m ² K/W)	Mass (kg/m ²)
בטון רגיל	2400	2.10	7.21 cm	1 0.03	173.01
בטון קל בפיציות 1800	1800	0.07	1.35 cm	1 0.02	24.24
טיח תרמי 600	600	0.17	3.60 cm	1 0.21	21.59
לוח פולי אטן	200	0.07	3.34 cm	1 0.51	6.68
לוח פוליסטירן מקבץ קשיח F30	30	0.04	0.83 cm	1 0.21	0.25
	550	0.16	3.68 cm	1 0.23	20.23
	0	0.00	0.00 cm	0 0.00	0.00
			0.00 cm		0.00
sub total 1 >			20.00 cm		
	200.00	0.07	2.00 cm	0.29	4.00
			0.00 cm	0.00	0.00
			0.00 cm	0.00	0.00
			0.00 cm	0.00	0.00
sub total 0 >			2.00 cm		
total >			22.00 cm	1.50	250.00
				0.00	0

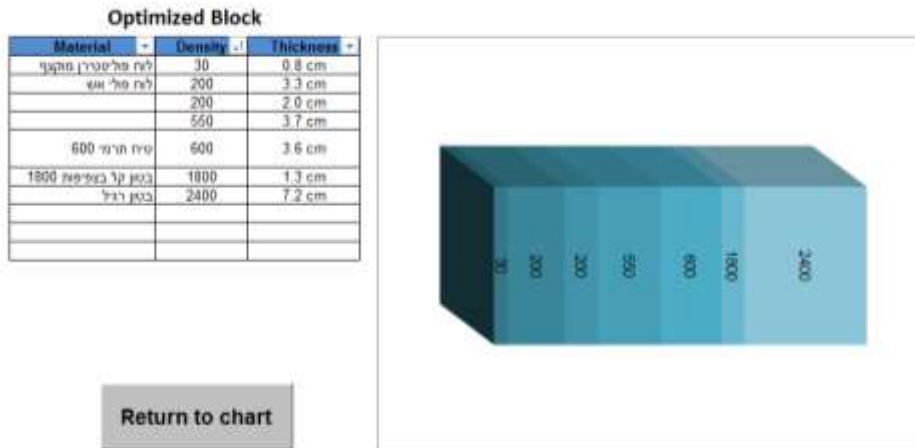
OVERALL WALL		
Resistance (m ² K/W)	Mass (kg/m ²)	Thickness (cm)
1.50	250	22

t round
7.2 cm
1.3 cm
3.6 cm
3.3 cm
0.8 cm
3.7 cm
0.0 cm
0.0 cm
0.0 cm
2.0 cm
0.0 cm
0.0 cm
0.0 cm
sum 21.9 cm

Buttons: start solving, Graphic View, Main Menu

איור מס' 28 - תוצאות העובי המעוגל

בנוסף לחישוב העוביים הנדרשים, המשתמש יוכל להפיק המחשה ויזואלית של הבלוק המרוכב לייצור באמצעות לחיצה על התיבה Graphic View. בלחיצה זו, ה- BGU- TBOT יפיק פלט גרפי לשכבות הנדרשות בבלוק, מהשכבה הקלה ביותר- החיצונית, לשכבה הכבדה ביותר- הפנימית, המשתמש יכול לחזור לטבלה, ע"י לחיצה על התיבה המתאימה, כמתואר באיור מס' 29.

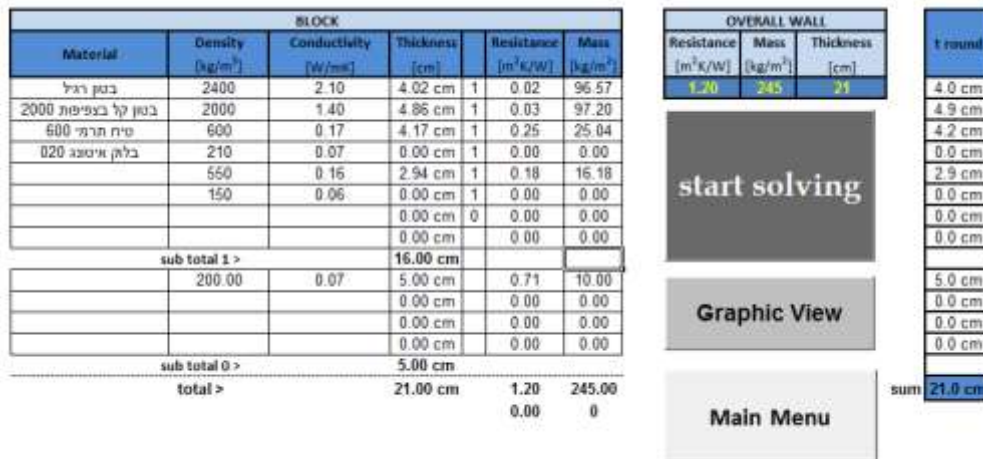


איור מס' 29- פלט גרפי לבלוק המרוכב

6.2.3. דוגמא נוספת לשימוש בכלי ה-BGU- TBOT

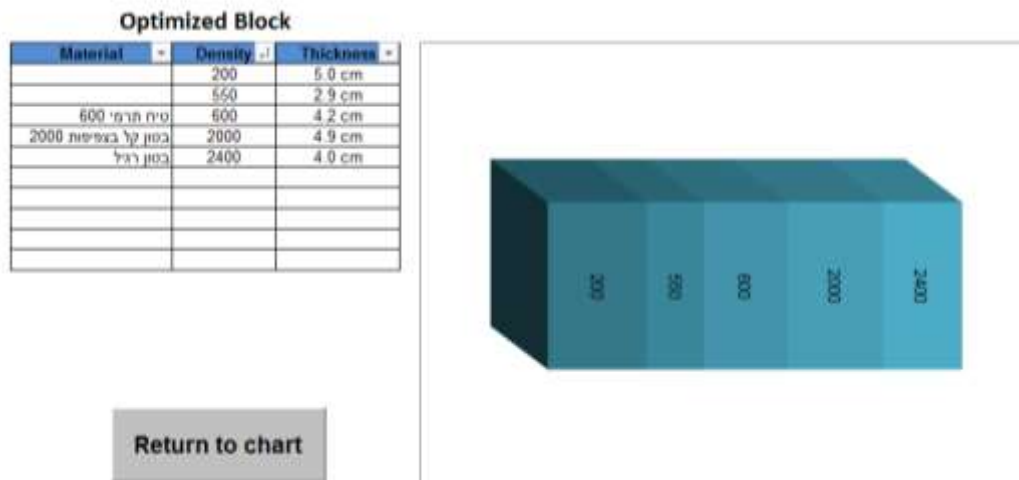
באיור 30 מופיעה בחירת המשתמש לטווחים הבאים:

- אזור אקלימי- א'
- תקן- 5282
- התנגדות תרמית לחישוב- $1.2 [m^2K/W]$
- מסה תרמית- $245 [kg/m^2]$
- עובי בלוק נדרש: 21 ס"מ



איור מס' 30- בחירת המשתמש- דוגמא 2

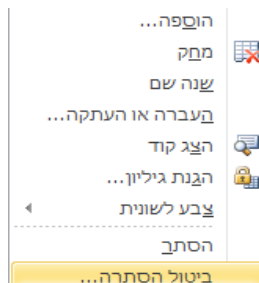
כפי שניתן לראות באיור 31, הרכב הבלוק יהיה מהחומרים הבאים :



איור מס' 31 - הרכב הבלוק - דוגמא 2

6.2.4. תפעול ועדכון הכלי

כעת נעסוק בצורה מעמיקה כיצד בנוי הקובץ, על מנת לאפשר למשתמש לעדכן. לפני שניגשים לבצע עדכון כל שהוא בקובץ יש לזכור שזהו קובץ הבנוי על פקודות מאקרו רבות שחלקן נבנו ברמת ה-VBA (Visual Basic for Applications) על כן חשוב לבצע כל שינוי על פי ההוראות!



שלב 1- לפני כל פעולה יש להסיר את ההסתרה מלשונית "פרמטרים" כפי שמתואר מטה- נעמוד עם העכבר על לשונית מסויימת, קליק ימני יפתח את התפריט המופיע באיור 32. נבחר מהרשימה הנפתחת את גליון "פרמטרים" ונלחץ אישור.

איור מס' 32 - תפריט אפשרויות הגליון

6.2.4.1. התקנת פותר הבעיות – Solver

ה-Solver הינו תוסף של תכנת ה-Excel. על מנת להתקינו יש להיכנס לתפריט "קובץ" ובתוך התפריט לבחור באופציה "אפשרויות" (Excel Options).

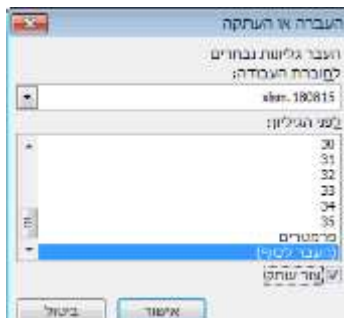
כעת יפתח חלון תפריטים חדש בו יש להכנס ללשונית "תוספות" (Excel Add-in) בתיבה נהל, לחץ על "תוספות של Excel" ולאחר מכן לחץ על ביצוע. תופיע תיבת דו- השיח "תוספות". בתיבה "תוספות זמינות", בחר בתיבת הסימון לצד התוספת שברצונך להפעיל – במקרה שלנו : Solver Add-in , Analysis ToolPak-VBA , ו- Analysis ToolPak. ולאחר מכן לחץ על אישור. לאחר ביצוע שלבים אלו, יתווסף ללשונית "נתונים" (Data) התוסף Solver ותתווסף הלשונית "מפתחים".

6.2.4.2. עדכון רשימות חומרים

על מנת לעדכן את רשימת החומרים הקבועה (המופיעה באיור מספר 24- טבלה שמאלית) על המשתמש לרשום את החומר הרצוי בנוסף לכל הנתונים הנדרשים Density ו-Conductivity, בעמודה X יש לרשום 0. לאחר מכן להעתיק את הקובייה האחרונה מעמודת Use Material, על מנת לאפשר תפריט בחירה נוסף גם לחומר החדש. הפקודה תדע לשלוף את החומר הנוסף כמובן במידה ואכן ייבחר. הסימון "1" בעמודת Use Material הוא אשר גורם למאקרו למשוך את נתוני החומר לגיליון הרצוי.

6.2.4.3. הוספת עובי בלוק רצוי

כפי שצוין במדריך למשתמש ניתן לבחור עובי בלוק בין 20-35 ס"מ. במידה ויש צורך להוסיף עובי יש לעבוד על פי השלבים הבאים-



איור מס' 33 - תפריט העתקת גליון

א- יש לבחור את אחד מגיליונות העובי, לחוץ קליק ימני לתפריט אפשרויות גיליון (איור 32) ולבחור באופציה "העברה או העתקה"

ב- יפתח תפריט העתקת גיליון כמתואר באיור 33.

ג- נסמן את האופציות (העבר לסוף) ו"צור עותק".

ד- יפתח גיליון חדש.

ה- לחיצה כפולה על הגיליון יאפשר לנו לשנות את שם הגיליון לעובי הרצוי.



ו- בלשונית "נתונים" יש להיכנס לתפריט ה-Solver

ז- בתפריט הפותר (איור 28) יש לשנות בתיבה השנייה את הערך למספר הרצוי.

ח- יש לעבור לגיליון פרמטרים ולהוסיף בעמודה A "עובי בלוק" את העובי הרצוי בסוף הרשימה.



ט- בלשונית "נוסחאות" יש להיכנס ל"מנהל השמות"

בתפריט זה מופיעות כל הרשימות המקובעות בקובץ, כפי שניתן לראות באיור 34, יש לסמן את הרשימה בשם "Ovi" ולעדכן בשורת נוסחאות בתחתית התפריט את טווח הרשימה כולל העובי שהוספנו ותא ריק נוסף.



איור מס' 34 - מנהל השמות

י- פעולה זו תעדכן את הרשימה הנשלפת בתפריט הראשי. פקודת המאקרו מתוכנתת כך שהעובי הנבחר בתפריט הראשי, לגיליון זה יועתקו כל החומרים הנבחרים, כך שאין צורך להיכנס לפקודה.

6.2.5 פקודות מאקרו ונוסחאות

הקובץ בנוי ממספר פקודות מאקרו אשר תוכנתו בשפת VBA יחד עם טפסי עבודה. כעת נסקור פקודות אלו.

א- פקודת דילוג בין תפריטים

התפריט הראשי, תפריט בחירת חומרים וכל מסכי העובי השונים ממוקמים כל אחד בגיליון נפרד באקסל, על כן- כל לחצן שמשמש דילוג בין תפריטים, מקושר למאקרו. למעבר לגיליון כדוגמא להלן- מעבר לתפריט "גיליון ראשי"

```

End Sub
Sub main_manu ()
'
' מאקרו main_manu
'
'
    Sheets("תפריט ראשי").Select
End Sub
Sub step3 ()

```

ב- פקודת העתקת חומרים לשימוש

אחת הפקודות העיקריות הינה הפקודה המעתיקה את החומרים מגיליון "בחירת חומרים" לגיליון הרצוי- הפקודה מחולקת ל-3 צעדים. כאשר לפני תחילת הצעדים הגדרנו את העובי הנבחר בתא F19 בתפריט הראשי כגיליון היעד אליו יועתקו כל הנתונים.

```

Sub main_work()
aaa = Range("F19").Text
Sheets(aaa).Select

clear

'spet1

Sheets("בוחרת חומרים").Select
ActiveSheet.Range("$A$1:$E$23").AutoFilter Field:=5, Criterial:="1"
Range("a1").Select
ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.Copy
Sheets(aaa).Select
Range("B6").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False

'step2

Sheets("בוחרת חומרים").Select
ActiveSheet.Range("$A$1:$E$23").AutoFilter Field:=5
Range("G4").Select
Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.Copy
Sheets(aaa).Select
Range("b14:d14").Select
Selection.End(xlUp).Select

ActiveCell.Offset(0, 1).Range("A1").Select

ActiveCell.Offset(1, 0).Range("A1").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False

'step3

Sheets("בוחרת חומרים").Select
Range("L4:N7").Select
Selection.Copy
Sheets(aaa).Select
Range("c15").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False

End Sub

```

הגדרת העובי הנבחר לגיליון יעד העתקה

מחיקת התאים בגיליון היעד (פקודה מפורטת מטה)

צעד 1-
מיון החומרים מהרשימה כך שיופיעו רק החומרים הנבחרים (מסומנים ב-1). סימון חומרים אלו בלבד, מעבר לגיליון הנבחר והדבקה כערכים במקום ספציפי.

צעד 2-
חוזר לתפריט בחירת חומרים, משחרר את המיון מצעד 1. בוחר רק את התאים המלאים בטבלת האמצעית. מעתיק ומדביק בגיליון היעד בדיוק מתחת להדבקה מצעד 1.

צעד 3-
חוזר לתפריט בחירת חומרים, סימון כל הטבלה הימנית. מעבר לגיליון הרצוי והדבקה במקום מדויק.

```

Sub clear()
'
' clear מאקרו
'
'
Range("B6:E13").Select
Selection.ClearContents
Range("B15:E18").Select
Selection.ClearContents
Range("A1").Select

End Sub

```

מחיקת התאים בגיליון היעד. סימון התאים עם הנתונים ופקודת Delete

```
Sub clear_mat ()  
'  
' מאקרו clear_mat  
'  
'  
Range ("E3").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E4").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E5").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E6").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E7").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E8").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E9").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E10").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E11").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E12").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E13").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E14").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E15").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E16").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E17").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E18").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E19").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("E20").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("G4").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("H4").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("I4").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("J4").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("G5").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("H5").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("I5").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("J5").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("G6:J14").Select  
Selection.ClearContents  
Selection.ClearContents  
Range ("L4").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("M4").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("N4").Select  
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
Range ("L5:N14").Select  
Selection.ClearContents  
Range ("A1").Select  
End Sub
```

שורות של פקודה אשר בוחרת כל
תא בעמודות Use material
בטבלאות השונות, ומציבה את
הערך "0".

ד- פקודת הפעלת המאקרו

פקודה זו משויכת לקבוצת פקודות אשר מובנות ב-VBA על כן כל מה שצריך זה לשייך ללחצן ולהפעיל על ידי פקודה True

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
SolverSolve UserFinish:=True  
End Sub
```

ה- פקודת הצגת פלט גרפי

לצורך הצגת פלט גרפי יש את הצורך להעתיק את הערכים המתקבלים כערכים, למיין אותם מהגדול לקטן וזאת להציג כגרף אותו עיצבנו מראש.

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
bbb = Range("M6").Text
```

```
Range("B42:D53").Select  
Range("D42").Activate  
Selection.ClearContents
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 34  
Range("B79:D90").Select  
Selection.Copy  
ActiveWindow.SmallScroll Down:=-33
```

```
Range("B42").Select  
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _  
:=False, Transpose:=False  
Application.CutCopyMode = False  
ActiveWorkbook.Worksheets(bbb).AutoFilter.Sort.SortFields.clear  
ActiveWorkbook.Worksheets(bbb).AutoFilter.Sort.SortFields.Add Key:=Range(_  
"C41"), SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:= _  
xlSortNormal
```

```
With ActiveWorkbook.Worksheets(bbb).AutoFilter.Sort  
.Header = xlYes  
.MatchCase = False  
.Orientation = xlTopToBottom  
.SortMethod = xlPinYin  
.Apply
```

```
End With  
ActiveWindow.SmallScroll Down:=6
```

```
Range("A54").Select  
Range("A53").Select
```

```
End Sub
```

הגדרת העובי הנבחר לגיליון יעד לפלט גרפי

בחירת הנתונים שצריך- החומר והעובי, העתקה למיקום הנדרש בתחתית הגיליון.

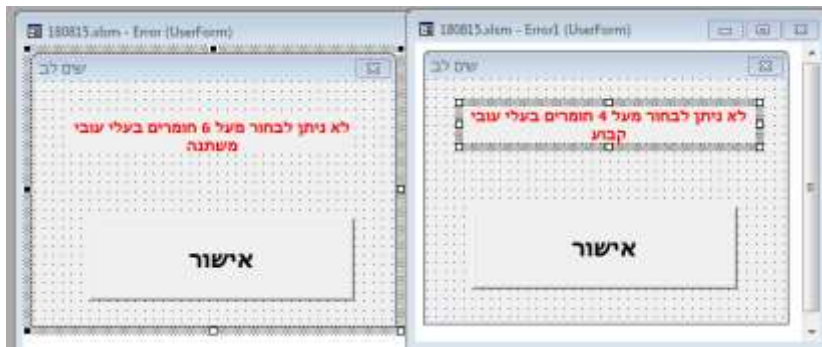
מיין ערך העובי מהגדול לקטן

מכיוון שגיליון היעד מוגדר אוטומטית יכלנו להשתמש בפקודה זו לכל הגליונות של העובי וכן, עדכון הנתונים עצמו מספיק ליצירת הפלט גרפי- מכיוון שהגרף מוגדר.

ו- טופס התראה על בחירת חומרים מעבר להגבלה

לצורך הודעת הגבלת בחירת החומרים הוחלט ליצור טופס הודעה ה"קופץ" במסך המשתמש, כאשר מספר החומרים הנבחר חורג ממה שנקבע (אצלנו בתוכנה- 6 חומרים בעלי עובי משתנה).

1. יצרנו במערכת Forms את ההודעות המתוארות באיור 25.



איור מס' 35- התראות

2. הגדרנו לטפסים שמות Error ו-Error1.
3. על מנת ליצור פקודה שתקפיץ את ההודעה בהתאם לערך בגיליון, יש להיכנס למערכת פקודות המשויכות לגיליון. זאת נעשה על ידי בחירת Worksheet בתפריט גלילה במודל-



4. הפקודה עצמה-

```

Sub טבל
Private Sub Worksheet_Change(ByVal Target As Range)

If Range("f1").Value >= 6 Then
Error.Show

Else

If Range("k1").Value >= 4 Then
Error1.Show

Else

End If
End If

End Sub

```

כמות החומרים הנבחרת מסוכמת בתא F1 לחומרים בעלי עובי משתנה ובתא K1 לחומרים בעלי עובי קבוע. הפקודה המפעילה היא Show, במידה והערכים עוברים את מה שקבענו. על מנת לסגור את הטופס נשתמש בפקודה Hide.

```

Private Sub err_btml_Click()

Error1.Hide

End Sub

```

ז- שליפת "המלצת תקן" על ידי נוסחת Vlookup
הנתון נשלף לפי חיתוך של 2 נתונים משתנים: אזור אקלימי ותקן. כשיש שילוב כזה עלינו לשלב בנוסחא שליפה על ידי Match.

```

fx =VLOOKUP(F14,DATA,MATCH(F15,Koteret),0)

```

1. VlookUp שולף את הערך של האזור אקלימי ומחפש אותו בתפריט
.DATA

תקן אזור אקלימי	1045	5281	5282
א	0.6	0.8	1
ב	0.7	1	1.2
ג	0.85	1.2	1.4
ד	1	1.4	1.6

טבלה מס' 5-ההתנגדות המומלצת ע"פ התקנים השונים

2. הנוסחא Match בוחרת את העמודה המתאימה לפי התקן שנבחר.
3. החיתוך בין שני הנתונים שולף את המלצת התקן הרצויה.

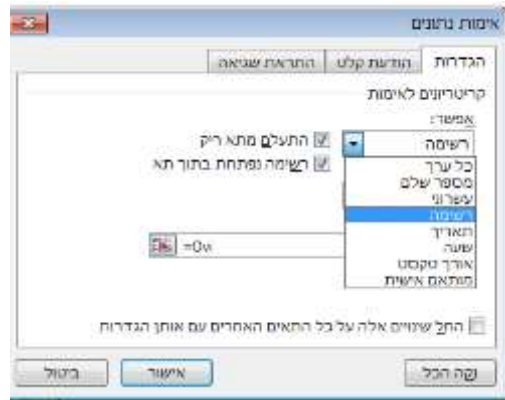
- ח- רשימה נשלפת לשדות "עובי בלוק", "אזור אקלימי" ו"תקן"
על מנת למנוע טעויות קיבענו שדות אלו לרשימה נשלפת אשר רק ממנה המשתמש יכול לבחור נתונים. זאת עושים לפי השלבים הבאים-
1. סימון הרשימה הנדרשת ולקבע אותה על ידי שם מתאים.

Ovi	
	A
1	עובי בלוק
2	20
3	21
4	22
5	23
6	24
7	25
8	26
9	27
10	28
11	29
12	30
13	31
14	32
15	33
16	34
17	35
18	

2. נעמוד על השדה (תא) אותו נרצה לקבע, ניגש לתפריט נתונים – אימות נתונים.



3. נבחר באופציה "רשימה" ונקליד את שם הרשימה בשורת טקסט.



7. סיכום מסקנות והמלצות

במחקר זה פותח כלי לביצוע אופטימיזציה רבת משתנים לקבלת חתך קיר אופטימלי, ע"פ דרישות התקן.

לצורך חיפוש אחר קריטריון בודד המתאר את התפקוד התרמי של מבנים עבור מוליכות תרמית ומסה תרמית רצויה, בוצעו אנליזות מעבר חום מרובות סקאלות לחתך הקיר באמצעות תכנת אלמנטים סופיים (ABAQUS). מהאנליזות שביצענו, ניתן להסיק כי הרכב החומר והשפעתו על התנהגותו התרמית של הקיר, תלויים לא רק בחומרים מהם הבלוק מורכב ובאופן הסידור בין השכבות, אלא גם במאפיינים השונים של המבנה כגון: הפניה, גודל חלונות, צבע קיר, אוורור וכד'.

לא נמצא קריטריון בודד ברמת נתוני החתך בלבד שיכל לכלול גם את תרומת המבנה ולכן במחקר זה אנו ממליצים להעריך את המסה התרמית המומלצת עבור הקיר, על סמך ההפרדה הקיימת בתקן 1045 [1] בין בנייה כבדה לקלה, בערכים של 240-250 $[kg/m^2]$ ולחשב את הרכב השכבות של הקיר על סמך ערך זה של מסה תרמית ודרישות התקן לבידוד בהתבסס על האזור האקלימי.

7.1. ממצאי המחקר:

תרומת המחקר הראשית בתחום הבנייה הירוקה- פיתוח כלי ה- BGU TBOT לקביעת סידור השכבות האופטימלי בבלוק בטון מרוכב. השימוש בכלי ה- BGU TBOT מאפשר פיתוח בלוקים ייעודיים עבור כל אחד מאיזורי האקלים בארץ, ע"פ המלצות התקינה.

שימוש בממצאי המחקר והכלי שפותח עשויים להוביל לתכנון טוב יותר ובכך לחסוך אנרגיה רבה שמשמשת להשגת נוחות תרמית.

7.2. המלצות להמשך המחקר:

מציאת קריטריון בודד שיבטא את המסה התרמית והבידוד על ידי העברת מידע מסקלת המבנה לסקלת החתך.

8. ביבליוגרפיה

- [1] תקן ישראלי 1045 : בידוד תרמי של בניינים: כללי, ישראל 2011.
- [2] תקן ישראלי 5282 :דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה, ישראל 2005.
- [3] א.פורשפן, ש. רובין, י. בנימיני, ר. בקר, המדריך לבניה ביו-אקלימית בישראל, יוני 2010.
- [4] אתר האינטרנט של השירות המטאורולוגי הישראלי- תחנת בית דגן
http://www.ims.gov.il/ims/all_tahazit/
- [5] המועצה הישראלית לבנייה ירוקה, מדריך טכני לת"י 5282 לבנייה בת קיימה (בנייה ירוקה), ינואר 2012.
- [6] C.A. Balaras, The role of thermal mass on the cooling load of buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 24, No. 1, pp. 1–10, 1996.
- [7] E. Shaviv, A. Yezioro, I. G. Capeluto, Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy, *Renewable Energy*, Vol. 24, No. 3–4, pp. 445–452, November 2001.
- [8] U.S Department Of Energy, Energy efficiency and renewable energy, October 2008
- [9] N. Huberman, D. Pearlmutter, E. Gal, I.A. Meir: Optimizing structural roof form for life-cycle energy efficiency, *Energy and Buildings*, Vol. 104, pp. 336–349, October 2015.
- [10] N.D. Lagaros, M. Fragiadakis, M. Papadrakakis, Y. Tsompanakis, Structural optimization: a tool for evaluating seismic design procedures, *Engineering Structures*, Vol. 28, No.12, pp.1623–1633, 2006.
- [11] Y. Etzion, D. Pearlmutter, E. Errel, I.A. Meir, Adaptive architecture: integrating low-energy technologies for climate control in the desert, *Automation in Construction*, Vol. 6, No. 5–6, pp. 417-425, September 1997.
- [12] M. Harmon, Step-By-Step Optimization With Excel Solver - the Excel Statistical Master, Kindle Edition, USA 2012.
- [13] R.Becker, A performance based approach to sustainability and sustainable building design, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Proceedings of the US-Israel Workshop on: Sustainable Buildings – Materials and Energy, Technion, Haifa, Israel, 12-13 July 2010.

- [14] R.A Taylor ,M. Miner, A metric for characterizing the effectiveness of thermal mass in building materials. *Applied energy*, Vol.128, pp.156-163, 2014.
- [15] S.A. Al-Sanea, M.F. Zedan, S.N. Al-Hussain, Effect of masonry material and surface absorptivity on critical thermal mass in insulated building walls, *Applied Energy*, Vol. 102, pp. 1063-1070, 2013.
- [16] L.S. Wang, P. Ma, E. Hu, D. Giza-Sisson, G. Mueller, N. Guo, A study of building envelope and thermal mass requirements for achieving thermal autonomy in an office building, *Energy and Buildings*, Vol. 78, pp. 79–88 ,August 2014.

9. נספחים

9.1. מודל אלמנטים סופיים ב- ABAQUS

9.1.1. סדר הפעולות בבניית מודל

פתח את התכנה ABAQUS

בחר Part: Module

לחיצה על Create Part תפתח את התפריט הבא:



איור מס' 36- תפריט יצירת חלק

מאחר ואנו עוסקים בבחינת שכבות החומר, בחלקו של בלוק מרוכב, נשנה את השדה
ב- Proximate Size לערך 0.5.

נבנה את החלקים, במודל שלנו השכבות, ע"י שרטוטם, בתכנה והגדרת ערכי הגדלים
הרצויים- אצלנו- בלוק במימדים של 0.2X 0.2 (במטרים).

הגדרת השכבות:

		K	ρ	C
In- STONED CONCRETE	L-8	2.1	2400	0.97
	L-7	1.4	2000	0.9
	L-6	0.87	1800	0.86
	L-5	0.81	1600	0.97
	L-4	0.26	700	0.97
	L-3	0.6	500	0.97
	L-2	0.15	350	0.97
Out- KALKAR	L-1	0.04	30	0

טבלה מס' 6- הגדרת תכונות החומרים

בתוך תפריט Part:

- בוחרים חומרים : נכנסים לתפריט Material ומכניסים את החומרים ואת התכונות שלהם ע"י הוספת הטווחים : Specific ,Density ,Conductivity ,Heat.

- עורכים חלוקה של החומרים בדגם ע"י תפריט Sections.

- בחירת החומרים בכל חלק מתבצעת ע"י הפקודה Section Assignment.

מחברים בין כל השכבות לחלק אחד ע"י תפריט Assembly :

- בוחרים את כל השכבות ע"י גרירת הסמן .

- מאשרים את ביצוע ההרכבה ונותנים שם לחלק שנוצר. חלק זה יהיה החלק עליו תבוצענה האנליזות.

בתפריט STEP מכניסים את נקודות הזמן שברצוננו לבצע בהן שינויים

- כברירת מחדל יופיע לנו שלב התחלתי בשם Initial.

- נרצה להוסיף שלב נוסף בו תתחיל העמסת החום ולכן ניצור שלב חדש בשם Load.

- סוג השלב - Heat Transfer.

- בלשונית Basic :

- נבחר ב Transient.

- נבחר את משך הזמן הרצוי לשלב - 86,400 במקרה שלנו (מס' השניות

- בלשונית Incrementation :

- סוג הגידול : Fixed.

- מס' מקסימלי : 10000.

- גודל : 300.

בתפריט מצד שמאל נחפש את Amplitudes :

- ע"י קליק ימני ניצור אמפליטודות חדשות - אחת לשטף החום ואחרת לשינויי הטמפרטורה.

- נכניס את שם האמפליטודה הרצוי.

- נבחר בסוג Tabular, מאחר ואנו מעוניינים להזין נתונים מטבלה - כפי שניתן לקבל מאתרי השירות המטאורולוגי.

- נכניס את גודל המדידות שקיבלנו.

נחזור על שלבים אלו עבור שני סוגי העומסים.

בתפריט load מכניסים את עומסי החום הידועים לנו :

- יוצרים הגדרה של תנאי קצה (טמפי הנוחות שלנו- 24 מ"צ בקיץ ו-20 מ"צ בחורף) ע"י Predefined Field:
- בשלב ההעמסה נבחר Initial.
- בקטגוריה נסמן Other, נלחץ פעמיים על Temperature.
- כעת יש לבחור את המשטח הפנימי בו תורגש הטמפי הרצויה ע"י סימונו.
- ונשנה את הגודל ל-24 או 20 בהתאמה לעונה הרצויה.

- יוצרים עומס חדש, למשל- שטף החום, לו נקרא Flux.
- שלב ההעמסה הנבחר- Load אותו יצרנו קודם.
- קטגוריה- thermal.
- סוג Surface Heat Flux.
- יש לבחור על איזה משטח יופעל השטף ולכן ע"י הסמן לוחצים על הפאה החיצונית של הבלוק.
- ב Distribution בוחרים Uniform.
- בגודל Magnitude מכניסים 1.
- באמפליטודה בוחרים את השטף שהכנסנו קודם.

ניצור כעת את סוגי האינטראקציות שיש לקיר עם הסביבה- כלומר- מעברי החום בהסעה מצידו הפנימי ומצידו החיצוני - בתפריט Interactions, נקליק על Interaction manager:

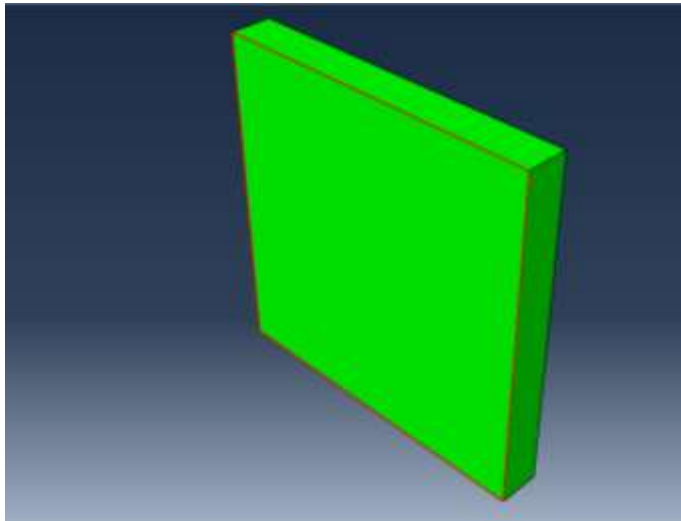
- ניצור מ"ח בהסעה מצד פנים ולכן נקרא לו Hin.
- בסוג נבחר Surface Film Condition.
- כעת יש לבחור את המשטח בו מתרחש מ"ח מסוג זה- במקרה זה, המשטח הפנימי.
- בשדה Film coefficient נבחר את הערך 8- מקדם מ"ח בהסעה הידוע לנו.
- בשדה Sink Temperature נבחר 20 בחורף.
- באופן דומה עבור המשטח החיצוני נבחר מקדם מ"ח בהסעה בגודל 25 אך בצד החיצוני יש להבחין כי קיים לנו שטף טמפרטורה-
 - בשדה Sink Temperature נבחר 1.
 - בשדה Sink Amplitude נבחר את אמפליטודת הטמפרטורות שיצרנו קודם.

כעת נרצה ליצור נקודות ייחוס בשני צידי הקיר- בלשונית- על Tools:

- תחת בחירה Set :
 - סוג- גיאומטרית
 - נבחר נקודה במשטח הפנימי ונקצה לה שם IN למשל
- כנ"ל עבור נק' על גבי המשטח החיצוני

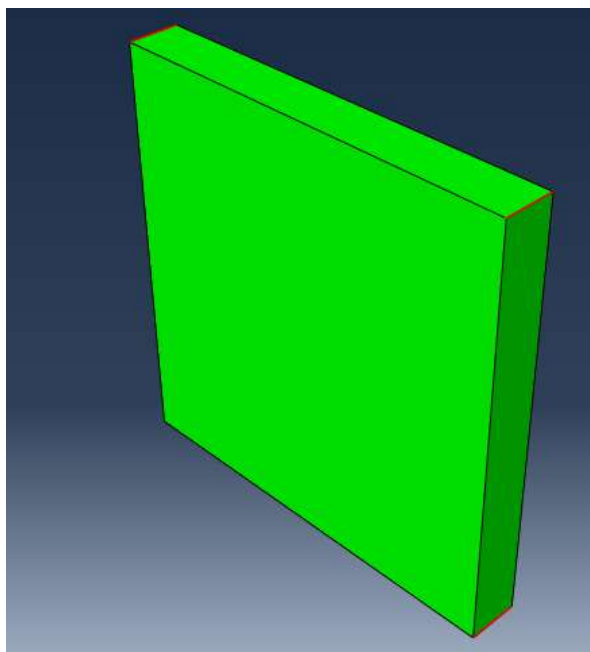
בתפריט Mesh :

- בתפריט ELEMENT TYPE :
 - במשפחה בוחרים - Heat Transfer.
- ע"י Seed Edges מאפיינים את האלמנטים הסופיים שלפיהם יערכו האנליזות- אצלנו אנו מעוניינים לראות את השינוי לאורך הקיר ולכן נרצה כי גודל היחידה יישאר קבוע אך חתך הקיר יחולק לשכבות :
 - נבחר את החלק אותו אנו רוצים לערוך- זהו החלק שנוצר כתוצאה מההרכבה שביצענו בשלבים הקודמים.
 - כעת יש לבחור את היקף המשטח- נלחץ על SHIFT ונשאיר אותו לחוץ כאשר אנו בוחרים את הריבוע החיצוני.



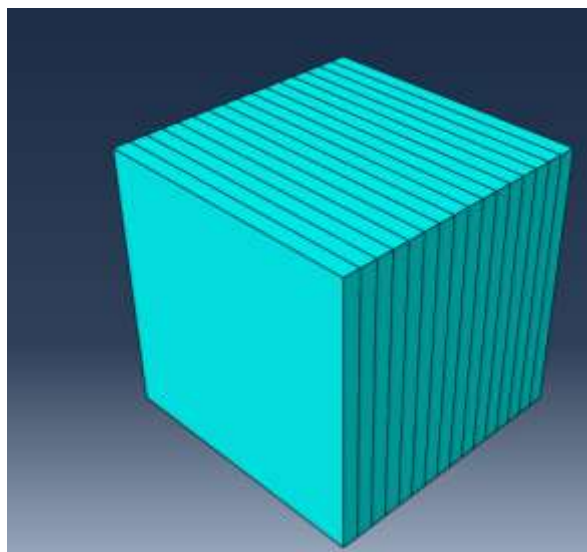
איור מס' 37- בחירת הריבוע החיצוני

- לחיצה על OK תפתח לנו תפריט בו נגדיר כי שיטת החלוקה תהיה ע"פ מספר- 1
- באופן דומה נבצע עבור הריבוע הפנימי.
- כעת יש לסמן את הקווים המתברים את השכבות, כמתואר באיור 38.
- לחיצה על OK תפתח לנו תפריט בו נגדיר כי שיטת החלוקה תהיה ע"פ מספר השכבות הרצוי- במקרה שלנו 2.



איור מס' 38 - בחירת הקווים המחברים

- כך נבצע עבור כל 8 השכבות.
- לחיצה על mesh part תדגים לנו את אופן החלוקה לפיה תבוצענה האנליזות, כמתואר באיור 39.



איור מס' 39 - חלוקה לאלמנטים סופיים

כעת יצרנו את החלק ונרצה להריץ עליו אנליזות שונות.

בחירת האנליזות מתבצעת באמצעות תפריט Step :

- History Output, -Set Domain: In, נסמן את סוג האנליזות אותן נהיה מעוניינים לבצע, למשל: אנליזות תרמיות במקרה שלנו מסוג Heat Flux Vector (HFL).
- לאחר מכן ניצור פלט נוסף באופן זהה עבור Out.

בתפריט Job :

- ניצור הרצה חדשה בשם שנבחר ונלחץ על Submit.

בתפריט Visualization :

- נפתח את קובץ ה- odb. שיצרנו בשלב הקודם.
- לחיצה על Create XY Data.
- סימון ODB field Output.
- בתפריט שנפתח בלשונית משתנים נבחר במיקום : Unique Nodal.
- נסמן את סוג השטף אותו נרצה לחקור- במקרה שלנו את HFL3.
- בלשונית Elements / Nodes, נבחר ב- Node Sets.
- במחקר זה אנו מעוניינים בשטף החום שנוצר בפנים הדירה, על מנת ללמוד על תנודתיות הטמפרטורות ולכן נבחר בנקי IN.
- לחיצה על Plot תציג לנו את הגרף.
- את נתוני הגרף נוכל להציג גם בצורת טבלה ע"י לחיצה על תפריט XY Data, קליק ימני על HFL, Edit.
- את הנתונים ניתן להעתיק לאקסל או כל לתכנת עיבוד נתונים שנחפוץ.

9.1.2 קובץ Input

בכל יצירה של קובץ בתכנת ABAQUS, נוצר קובץ מסוג (.inp). בקובץ זה נשמרים כל הפרטים והפקודות. להלן קובץ Input לדוגמא של מודל בעל 8 שכבות, מועמס בשטף חום למשך 2 יממות בתקופת החורף- ינואר :

```
*Heading
**Job name: concretetest2Jan Model name: Model-1
**Generated by: ABAQUS/CAE Student Edition 6.11-2
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
**PARTS
**
*Part, name=mixed_wall
*Node
0.25      ,0.512499988 ,0125000002.0- ,1
0.25      ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,2
.0        ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,3
.0        ,0.512499988 ,0125000002.0- ,4
0.25      ,0.0125000002 ,512499988.0- ,5
.0        ,0.0125000002 ,512499988.0- ,6
.0        ,0.512499988 ,512499988.0- ,7
0.25      ,0.512499988 ,512499988.0- ,8
```

0.25- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,9
 25.0- ,0.512499988 ,0.0125000002- ,10
 0.25- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,11
 0.25- ,0.512499988 ,512499988.0- ,12
 0.5- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,13
 0.5- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,14
 5.0- ,0.0125000002 ,0.512499988- ,15
 0.5- ,0.512499988 ,512499988.0- ,16
 0.75- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,17
 0.75- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,18
 0.75- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,19
 0.75- ,0.512499988 ,512499988.0- ,20
 .1- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,21
 .1- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,22
 .1- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,23
 .1- ,0.512499988 ,512499988.0- ,24
 1.25- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,25
 1.25- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,26
 1.25- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,27
 1.25- ,0.512499988 ,512499988.0- ,28
 1.5- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,29
 1.5- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,30
 1.5- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,31
 1.5- ,0.512499988 ,512499988.0- ,32
 1.75- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,33
 1.75- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,34
 1.75- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,35
 1.75- ,0.512499988 ,512499988.0- ,36
 0.25 ,0.262499988 ,0125000002.0- ,37
 0.125 ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,38
 .0 ,0.262499988 ,0125000002.0- ,39
 125.0 ,0.512499988 ,0.0125000002- ,40
 0.25 ,0.262499988 ,512499988.0- ,41
 0.125 ,0.0125000002 ,512499988.0- ,42
 .0 ,0.262499988 ,512499988.0- ,43
 0.125 ,0.512499988 ,512499988.0- ,44
 125.0- ,0.0125000002 ,0.0125000002- ,45
 0.25- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,46
 0.125- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,47
 0.125- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,48
 0.25- ,0.262499988 ,512499988.0- ,49
 0.125- ,0.512499988 ,512499988.0- ,50
 0.375- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,51
 0.5- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,52
 0.375- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,53
 0.375- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,54
 0.5- ,0.262499988 ,512499988.0- ,55
 0.375- ,0.512499988 ,512499988.0- ,56
 0.625- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,57
 0.75- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,58

0.625- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,59
 0.625- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,60
 0.75- ,0.262499988 ,512499988.0- ,61
 0.625- ,0.512499988 ,512499988.0- ,62
 0.875- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,63
 .1- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,64
 0.875- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,65
 0.875- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,66
 .1- ,0.262499988 ,512499988.0- ,67
 0.875- ,0.512499988 ,512499988.0- ,68
 1.125- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,69
 1.25- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,70
 1.125- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,71
 1.125- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,72
 1.25- ,0.262499988 ,512499988.0- ,73
 1.125- ,0.512499988 ,512499988.0- ,74
 1.375- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,75
 1.5- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,76
 1.375- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,77
 1.375- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,78
 1.5- ,0.262499988 ,512499988.0- ,79
 1.375- ,0.512499988 ,512499988.0- ,80
 1.625- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,81
 1.75- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,82
 1.625- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,83
 1.625- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,84
 1.75- ,0.262499988 ,512499988.0- ,85
 1.625- ,0.512499988 ,512499988.0- ,86
 0.125 ,0.262499988 ,0125000002.0- ,87
 0.125 ,0.262499988 ,512499988.0- ,88
 0.125- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,89
 0.125- ,0.262499988 ,512499988.0- ,90
 0.375- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,91
 0.375- ,0.262499988 ,512499988.0- ,92
 0.625- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,93
 0.625- ,0.262499988 ,512499988.0- ,94
 875.0- ,0.262499988 ,0.0125000002- ,95
 0.875- ,0.262499988 ,512499988.0- ,96
 1.125- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,97
 1.125- ,0.262499988 ,512499988.0- ,98
 1.375- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,99
 375.1- ,0.262499988 ,0.512499988- ,100
 1.625- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,101
 1.625- ,0.262499988 ,512499988.0- ,102
 0.1875 ,0.512499988 ,512499988.0- ,103
 0.125 ,0.387499988 ,512499988.0- ,104
 0.1875 ,0.262499988 ,0.512499988- ,105
 0.25 ,0.387499988 ,512499988.0- ,106
 0.25 ,0.387499988 ,0125000002.0- ,107
 0.1875 ,0.262499988 ,0125000002.0- ,108

0.125 ,0.387499988 ,0125000002.0- ,109
 0.1875 ,0.512499988 ,0125000002.0- ,110
 0.25 ,0.262499988 ,262499988.0- ,111
 0.25 ,0.512499988 ,262499988.0- ,112
 0.125 ,0.262499988 ,262499988.0- ,113
 0.125 ,0.512499988 ,262499988.0- ,114
 0.125 ,0.137499988 ,512499988.0- ,115
 0.1875 ,0.0125000002 ,512499988.0- ,116
 0.25 ,0.137499988 ,512499988.0- ,117
 0.25 ,0.137499988 ,0125000002.0- ,118
 0.1875 ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,119
 125.0 ,0.137499988 ,0.0125000002- ,120
 0.25 ,0.0125000002 ,262499988.0- ,121
 0.125 ,0.0125000002 ,262499988.0- ,122
 0.0625 ,0.512499988 ,512499988.0- ,123
 .0 ,0.387499988 ,512499988.0- ,124
 0.0625 ,0.262499988 ,0.512499988- ,125
 0.0625 ,0.262499988 ,0125000002.0- ,126
 .0 ,0.387499988 ,0125000002.0- ,127
 0.0625 ,0.512499988 ,0125000002.0- ,128
 .0 ,0.262499988 ,262499988.0- ,129
 .0 ,0.512499988 ,0.262499988- ,130
 .0 ,0.137499988 ,512499988.0- ,131
 0.0625 ,0.0125000002 ,512499988.0- ,132
 0.0625 ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,133
 .0 ,0.137499988 ,0125000002.0- ,134
 .0 ,0.0125000002 ,262499988.0- ,135
 0.0625- ,0.512499988 ,512499988.0- ,136
 0.125- ,0.387499988 ,512499988.0- ,137
 0.0625- ,0.262499988 ,512499988.0- ,138
 0.0625- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,139
 0.125- ,0.387499988 ,0125000002.0- ,140
 0.0625- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,141
 0.125- ,0.262499988 ,262499988.0- ,142
 0.125- ,0.512499988 ,262499988.0- ,143
 0.125- ,0.137499988 ,512499988.0- ,144
 0.0625- ,0.0125000002 ,0.512499988- ,145
 0.0625- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,146
 0.125- ,0.137499988 ,0125000002.0- ,147
 0.125- ,0.0125000002 ,262499988.0- ,148
 0.1875- ,0.512499988 ,512499988.0- ,149
 25.0- ,0.387499988 ,0.512499988- ,150
 0.1875- ,0.262499988 ,512499988.0- ,151
 0.1875- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,152
 0.25- ,0.387499988 ,0125000002.0- ,153
 0.1875- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,154
 0.25- ,0.262499988 ,262499988.0- ,155
 0.25- ,0.512499988 ,262499988.0- ,156
 0.25- ,0.137499988 ,512499988.0- ,157
 0.1875- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,158

0.1875- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,159
 0.25- ,0.137499988 ,0125000002.0- ,160
 0.25- ,0.0125000002 ,262499988.0- ,161
 0.3125- ,0.512499988 ,512499988.0- ,162
 0.375- ,0.387499988 ,512499988.0- ,163
 0.3125- ,0.262499988 ,512499988.0- ,164
 0.3125- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,165
 0.375- ,0.387499988 ,0125000002.0- ,166
 0.3125- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,167
 0.375- ,0.262499988 ,262499988.0- ,168
 0.375- ,0.512499988 ,262499988.0- ,169
 0.375- ,0.137499988 ,512499988.0- ,170
 0.3125- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,171
 0.3125- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,172
 0.375- ,0.137499988 ,0125000002.0- ,173
 0.375- ,0.0125000002 ,262499988.0- ,174
 0.4375- ,0.512499988 ,512499988.0- ,175
 0.5- ,0.387499988 ,512499988.0- ,176
 0.4375- ,0.262499988 ,512499988.0- ,177
 0.4375- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,178
 0.5- ,0.387499988 ,0125000002.0- ,179
 4375.0- ,0.512499988 ,0.0125000002- ,180
 0.5- ,0.262499988 ,262499988.0- ,181
 0.5- ,0.512499988 ,262499988.0- ,182
 0.5- ,0.137499988 ,512499988.0- ,183
 0.4375- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,184
 4375.0- ,0.0125000002 ,0.0125000002- ,185
 0.5- ,0.137499988 ,0125000002.0- ,186
 0.5- ,0.0125000002 ,262499988.0- ,187
 0.5625- ,0.512499988 ,512499988.0- ,188
 0.625- ,0.387499988 ,512499988.0- ,189
 0.5625- ,0.262499988 ,512499988.0- ,190
 0.5625- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,191
 0.625- ,0.387499988 ,0125000002.0- ,192
 0.5625- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,193
 0.625- ,0.262499988 ,262499988.0- ,194
 0.625- ,0.512499988 ,262499988.0- ,195
 0.625- ,0.137499988 ,512499988.0- ,196
 0.5625- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,197
 0.5625- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,198
 0.625- ,0.137499988 ,0125000002.0- ,199
 0.625- ,0.0125000002 ,262499988.0- ,200
 0.6875- ,0.512499988 ,512499988.0- ,201
 0.75- ,0.387499988 ,512499988.0- ,202
 0.6875- ,0.262499988 ,512499988.0- ,203
 0.6875- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,204
 0.75- ,0.387499988 ,0125000002.0- ,205
 0.6875- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,206
 0.75- ,0.262499988 ,262499988.0- ,207
 0.75- ,0.512499988 ,262499988.0- ,208

0.75- ,0.137499988 ,512499988.0- ,209
 0.6875- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,210
 0.6875- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,211
 0.75- ,0.137499988 ,0125000002.0- ,212
 0.75- ,0.0125000002 ,262499988.0- ,213
 0.8125- ,0.512499988 ,512499988.0- ,214
 0.875- ,0.387499988 ,512499988.0- ,215
 0.8125- ,0.262499988 ,512499988.0- ,216
 0.8125- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,217
 0.875- ,0.387499988 ,0125000002.0- ,218
 0.8125- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,219
 0.875- ,0.262499988 ,262499988.0- ,220
 0.875- ,0.512499988 ,262499988.0- ,221
 0.875- ,0.137499988 ,512499988.0- ,222
 0.8125- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,223
 0.8125- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,224
 0.875- ,0.137499988 ,0125000002.0- ,225
 0.875- ,0.0125000002 ,262499988.0- ,226
 0.9375- ,0.512499988 ,512499988.0- ,227
 .1- ,0.387499988 ,512499988.0- ,228
 0.9375- ,0.262499988 ,512499988.0- ,229
 9375.0- ,0.262499988 ,0.0125000002- ,230
 .1- ,0.387499988 ,0125000002.0- ,231
 0.9375- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,232
 .1- ,0.262499988 ,262499988.0- ,233
 .1- ,0.512499988 ,262499988.0- ,234
 .1- ,0.137499988 ,0.512499988- ,235
 0.9375- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,236
 0.9375- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,237
 .1- ,0.137499988 ,0125000002.0- ,238
 .1- ,0.0125000002 ,262499988.0- ,239
 1.0625- ,0.512499988 ,0.512499988- ,240
 1.125- ,0.387499988 ,512499988.0- ,241
 1.0625- ,0.262499988 ,512499988.0- ,242
 1.0625- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,243
 1.125- ,0.387499988 ,0125000002.0- ,244
 1.0625- ,0.512499988 ,0.0125000002- ,245
 1.125- ,0.262499988 ,262499988.0- ,246
 1.125- ,0.512499988 ,262499988.0- ,247
 1.125- ,0.137499988 ,512499988.0- ,248
 1.0625- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,249
 1.0625- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,250
 1.125- ,0.137499988 ,0125000002.0- ,251
 1.125- ,0.0125000002 ,262499988.0- ,252
 1.1875- ,0.512499988 ,512499988.0- ,253
 1.25- ,0.387499988 ,512499988.0- ,254
 1.1875- ,0.262499988 ,512499988.0- ,255
 1.1875- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,256
 1.25- ,0.387499988 ,0125000002.0- ,257
 1.1875- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,258

1.25- ,0.262499988 ,262499988.0- ,259
 1.25- ,0.512499988 ,262499988.0- ,260
 1.25- ,0.137499988 ,512499988.0- ,261
 1.1875- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,262
 1.1875- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,263
 1.25- ,0.137499988 ,0125000002.0- ,264
 25.1- ,0.0125000002 ,0.262499988- ,265
 1.3125- ,0.512499988 ,512499988.0- ,266
 1.375- ,0.387499988 ,512499988.0- ,267
 1.3125- ,0.262499988 ,512499988.0- ,268
 1.3125- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,269
 375.1- ,0.387499988 ,0.0125000002- ,270
 1.3125- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,271
 1.375- ,0.262499988 ,262499988.0- ,272
 1.375- ,0.512499988 ,262499988.0- ,273
 1.375- ,0.137499988 ,512499988.0- ,274
 1.3125- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,275
 1.3125- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,276
 1.375- ,0.137499988 ,0125000002.0- ,277
 1.375- ,0.0125000002 ,262499988.0- ,278
 1.4375- ,0.512499988 ,512499988.0- ,279
 1.5- ,0.387499988 ,512499988.0- ,280
 1.4375- ,0.262499988 ,512499988.0- ,281
 1.4375- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,282
 1.5- ,0.387499988 ,0125000002.0- ,283
 1.4375- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,284
 1.5- ,0.262499988 ,262499988.0- ,285
 1.5- ,0.512499988 ,262499988.0- ,286
 1.5- ,0.137499988 ,512499988.0- ,287
 1.4375- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,288
 1.4375- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,289
 5.1- ,0.137499988 ,0.0125000002- ,290
 1.5- ,0.0125000002 ,262499988.0- ,291
 1.5625- ,0.512499988 ,512499988.0- ,292
 1.625- ,0.387499988 ,512499988.0- ,293
 1.5625- ,0.262499988 ,512499988.0- ,294
 1.5625- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,295
 1.625- ,0.387499988 ,0125000002.0- ,296
 1.5625- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,297
 1.625- ,0.262499988 ,262499988.0- ,298
 1.625- ,0.512499988 ,262499988.0- ,299
 1.625- ,0.137499988 ,512499988.0- ,300
 1.5625- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,301
 1.5625- ,0.0125000002 ,0125000002.0- ,302
 1.625- ,0.137499988 ,0125000002.0- ,303
 1.625- ,0.0125000002 ,262499988.0- ,304
 1.6875- ,0.512499988 ,512499988.0- ,305
 1.75- ,0.387499988 ,512499988.0- ,306
 1.6875- ,0.262499988 ,512499988.0- ,307
 1.6875- ,0.262499988 ,0125000002.0- ,308

1.75- ,0.387499988 ,0125000002.0- ,309
 1.6875- ,0.512499988 ,0125000002.0- ,310
 1.75- ,0.262499988 ,262499988.0- ,311
 1.75- ,0.512499988 ,262499988.0- ,312
 1.75- ,0.137499988 ,512499988.0- ,313
 1.6875- ,0.0125000002 ,512499988.0- ,314
 1.6875- ,0.0125000002 ,0.0125000002- ,315
 1.75- ,0.137499988 ,0125000002.0- ,316
 1.75- ,0.0125000002 ,262499988.0- ,317
 *Element, type=DC3D20
 ,109 ,108 ,107 ,103 ,104 ,105 ,106 ,40 ,87 ,37 ,1 ,44 ,88 ,41 ,8 ,1
 114 ,113 ,111 ,112 ,110
 ,120 ,119 ,118 ,105 ,115 ,116 ,117 ,87 ,38 ,2 ,37 ,88 ,42 ,5 ,41 ,2
 113 ,122 ,121 ,111 ,108
 ,127 ,126 ,109 ,123 ,124 ,125 ,104 ,4 ,39 ,87 ,40 ,7 ,43 ,88 ,44 ,3
 130 ,129 ,113 ,114 ,128
 ,134 ,133 ,120 ,125 ,131 ,132 ,115 ,39 ,3 ,38 ,87 ,43 ,6 ,42 ,88 ,4
 129 ,135 ,122 ,113 ,126
 ,140 ,139 ,127 ,136 ,137 ,138 ,124 ,47 ,89 ,39 ,4 ,50 ,90 ,43 ,7 ,5
 143 ,142 ,129 ,130 ,141
 ,147 ,146 ,134 ,138 ,144 ,145 ,131 ,89 ,45 ,3 ,39 ,90 ,48 ,6 ,43 ,6
 142 ,148 ,135 ,129 ,139
 ,153 ,152 ,140 ,149 ,150 ,151 ,137 ,10 ,46 ,89 ,47 ,12 ,49 ,90 ,50 ,7
 156 ,155 ,142 ,143 ,154
 ,160 ,159 ,147 ,151 ,157 ,158 ,144 ,46 ,9 ,45 ,89 ,49 ,11 ,48 ,90 ,8
 155 ,161 ,148 ,142 ,152
 ,166 ,165 ,153 ,162 ,163 ,164 ,150 ,53 ,91 ,46 ,10 ,56 ,92 ,49 ,12 ,9
 169 ,168 ,155 ,156 ,167
 ,173 ,172 ,160 ,164 ,170 ,171 ,157 ,91 ,51 ,9 ,46 ,92 ,54 ,11 ,49 ,10
 168 ,174 ,161 ,155 ,165
 ,179 ,178 ,166 ,175 ,176 ,177 ,163 ,14 ,52 ,91 ,53 ,16 ,55 ,92 ,56 ,11
 182 ,181 ,168 ,169 ,180
 ,186 ,185 ,173 ,177 ,183 ,184 ,170 ,52 ,13 ,51 ,91 ,55 ,15 ,54 ,92 ,12
 181 ,187 ,174 ,168 ,178
 ,192 ,191 ,179 ,188 ,189 ,190 ,176 ,59 ,93 ,52 ,14 ,62 ,94 ,55 ,16 ,13
 195 ,194 ,181 ,182 ,193
 ,199 ,198 ,186 ,190 ,196 ,197 ,183 ,93 ,57 ,13 ,52 ,94 ,60 ,15 ,55 ,14
 194 ,200 ,187 ,181 ,191
 ,205 ,204 ,192 ,201 ,202 ,203 ,189 ,18 ,58 ,93 ,59 ,20 ,61 ,94 ,62 ,15
 208 ,207 ,194 ,195 ,206
 ,212 ,211 ,199 ,203 ,209 ,210 ,196 ,58 ,17 ,57 ,93 ,61 ,19 ,60 ,94 ,16
 207 ,213 ,200 ,194 ,204
 ,218 ,217 ,205 ,214 ,215 ,216 ,202 ,65 ,95 ,58 ,18 ,68 ,96 ,61 ,20 ,17
 221 ,220 ,207 ,208 ,219
 ,225 ,224 ,212 ,216 ,222 ,223 ,209 ,95 ,63 ,17 ,58 ,96 ,66 ,19 ,61 ,18
 220 ,226 ,213 ,207 ,217
 ,231 ,230 ,218 ,227 ,228 ,229 ,215 ,22 ,64 ,95 ,65 ,24 ,67 ,96 ,68 ,19
 234 ,233 ,220 ,221 ,232
 ,238 ,237 ,225 ,229 ,235 ,236 ,222 ,64 ,21 ,63 ,95 ,67 ,23 ,66 ,96 ,20
 233 ,239 ,226 ,220 ,230

,244 ,243 ,231 ,240 ,241 ,242 ,228 ,71 ,97 ,64 ,22 ,74 ,98 ,67 ,24 ,21
247 ,246 ,233 ,234 ,245
,251 ,250 ,238 ,242 ,248 ,249 ,235 ,97 ,69 ,21 ,64 ,98 ,72 ,23 ,67 ,22
246 ,252 ,239 ,233 ,243
,257 ,256 ,244 ,253 ,254 ,255 ,241 ,26 ,70 ,97 ,71 ,28 ,73 ,98 ,74 ,23
260 ,259 ,246 ,247 ,258
,264 ,263 ,251 ,255 ,261 ,262 ,248 ,70 ,25 ,69 ,97 ,73 ,27 ,72 ,98 ,24
259 ,265 ,252 ,246 ,256
,270 ,269 ,257 ,266 ,267 ,268 ,254 ,77 ,99 ,70 ,26 ,80 ,100 ,73 ,28 ,25
273 ,272 ,259 ,260 ,271
,277 ,276 ,264 ,268 ,274 ,275 ,261 ,99 ,75 ,25 ,70 ,100 ,78 ,27 ,73 ,26
272 ,278 ,265 ,259 ,269
,283 ,282 ,270 ,279 ,280 ,281 ,267 ,30 ,76 ,99 ,77 ,32 ,79 ,100 ,80 ,27
286 ,285 ,272 ,273 ,284
,290 ,289 ,277 ,281 ,287 ,288 ,274 ,76 ,29 ,75 ,99 ,79 ,31 ,78 ,100 ,28
285 ,291 ,278 ,272 ,282
,296 ,295 ,283 ,292 ,293 ,294 ,280 ,83 ,101 ,76 ,30 ,86 ,102 ,79 ,32 ,29
299 ,298 ,285 ,286 ,297
,303 ,302 ,290 ,294 ,300 ,301 ,287 ,101 ,81 ,29 ,76 ,102 ,84 ,31 ,79 ,30
298 ,304 ,291 ,285 ,295
,309 ,308 ,296 ,305 ,306 ,307 ,293 ,34 ,82 ,101 ,83 ,36 ,85 ,102 ,86 ,31
312 ,311 ,298 ,299 ,310
,316 ,315 ,303 ,307 ,313 ,314 ,300 ,82 ,33 ,81 ,101 ,85 ,35 ,84 ,102 ,32
311 ,317 ,304 ,298 ,308
*Nset, nset=_PickedSet2_#1, internal
44 ,43 ,42 ,41 ,40 ,39 ,38 ,37 ,8 ,7 ,6 ,5 ,4 ,3 ,2 ,1
116 ,115 ,114 ,113 ,112 ,111 ,110 ,109 ,108 ,107 ,106 ,105 ,104 ,103 ,88 ,87
132 ,131 ,130 ,129 ,128 ,127 ,126 ,125 ,124 ,123 ,122 ,121 ,120 ,119 ,118 ,117
135 ,134 ,133
*Elset, elset=_PickedSet2_#1, internal, generate
1 ,4 ,1
*Nset, nset=_PickedSet2_#2, internal
50 ,49 ,48 ,47 ,46 ,45 ,43 ,39 ,12 ,11 ,10 ,9 ,7 ,6 ,4 ,3
142 ,141 ,140 ,139 ,138 ,137 ,136 ,135 ,134 ,131 ,130 ,129 ,127 ,124 ,90 ,89
158 ,157 ,156 ,155 ,154 ,153 ,152 ,151 ,150 ,149 ,148 ,147 ,146 ,145 ,144 ,143
161 ,160 ,159
*Elset, elset=_PickedSet2_#2, internal, generate
1 ,8 ,5
*Nset, nset=_PickedSet2_#3, internal
56 ,55 ,54 ,53 ,52 ,51 ,49 ,46 ,16 ,15 ,14 ,13 ,12 ,11 ,10 ,9
168 ,167 ,166 ,165 ,164 ,163 ,162 ,161 ,160 ,157 ,156 ,155 ,153 ,150 ,92 ,91
184 ,183 ,182 ,181 ,180 ,179 ,178 ,177 ,176 ,175 ,174 ,173 ,172 ,171 ,170 ,169
187 ,186 ,185
*Elset, elset=_PickedSet2_#3, internal, generate
1 ,12 ,9
*Nset, nset=_PickedSet2_#4, internal
62 ,61 ,60 ,59 ,58 ,57 ,55 ,52 ,20 ,19 ,18 ,17 ,16 ,15 ,14 ,13
194 ,193 ,192 ,191 ,190 ,189 ,188 ,187 ,186 ,183 ,182 ,181 ,179 ,176 ,94 ,93
210 ,209 ,208 ,207 ,206 ,205 ,204 ,203 ,202 ,201 ,200 ,199 ,198 ,197 ,196 ,195
213 ,212 ,211

```

*Elset, elset=_PickedSet2_#4, internal, generate
1 ,16 ,13
*Nset, nset=_PickedSet2_#5, internal
68 ,67 ,66 ,65 ,64 ,63 ,61 ,58 ,24 ,23 ,22 ,21 ,20 ,19 ,18 ,17
220 ,219 ,218 ,217 ,216 ,215 ,214 ,213 ,212 ,209 ,208 ,207 ,205 ,202 ,96 ,95
236 ,235 ,234 ,233 ,232 ,231 ,230 ,229 ,228 ,227 ,226 ,225 ,224 ,223 ,222 ,221
239 ,238 ,237
*Elset, elset=_PickedSet2_#5, internal, generate
1 ,20 ,17
*Nset, nset=_PickedSet2_#6, internal
74 ,73 ,72 ,71 ,70 ,69 ,67 ,64 ,28 ,27 ,26 ,25 ,24 ,23 ,22 ,21
246 ,245 ,244 ,243 ,242 ,241 ,240 ,239 ,238 ,235 ,234 ,233 ,231 ,228 ,98 ,97
262 ,261 ,260 ,259 ,258 ,257 ,256 ,255 ,254 ,253 ,252 ,251 ,250 ,249 ,248 ,247
265 ,264 ,263
*Elset, elset=_PickedSet2_#6, internal, generate
1 ,24 ,21
*Nset, nset=_PickedSet2_#7, internal
80 ,79 ,78 ,77 ,76 ,75 ,73 ,70 ,32 ,31 ,30 ,29 ,28 ,27 ,26 ,25
272 ,271 ,270 ,269 ,268 ,267 ,266 ,265 ,264 ,261 ,260 ,259 ,257 ,254 ,100 ,99
288 ,287 ,286 ,285 ,284 ,283 ,282 ,281 ,280 ,279 ,278 ,277 ,276 ,275 ,274 ,273
291 ,290 ,289
*Elset, elset=_PickedSet2_#7, internal, generate
1 ,28 ,25
*Nset, nset=_PickedSet2_#8, internal
86 ,85 ,84 ,83 ,82 ,81 ,79 ,76 ,36 ,35 ,34 ,33 ,32 ,31 ,30 ,29
298 ,297 ,296 ,295 ,294 ,293 ,292 ,291 ,290 ,287 ,286 ,285 ,283 ,280 ,102 ,101
314 ,313 ,312 ,311 ,310 ,309 ,308 ,307 ,306 ,305 ,304 ,303 ,302 ,301 ,300 ,299
317 ,316 ,315
*Elset, elset=_PickedSet2_#8, internal, generate
1 ,32 ,29
**Section: Section-1
*Solid Section, elset=_PickedSet2_#1, material="L-1 POLY"
,
**Section: Section-2
*Solid Section, elset=_PickedSet2_#2, material=L-2
,
**Section: Section-3
*Solid Section, elset=_PickedSet2_#3, material=L-3
,
**Section: Section-4
*Solid Section, elset=_PickedSet2_#4, material=L-4
,
**Section: Section-5
*Solid Section, elset=_PickedSet2_#5, material=L-5
,
**Section: Section-6
*Solid Section, elset=_PickedSet2_#6, material=L-6
,
**Section: Section-7
*Solid Section, elset=_PickedSet2_#7, material=L-7

```

```

,
**Section: Section-8
*Solid Section, elset=_PickedSet2_#8, material="L-8 FULL STONES"
,
*End Part
**
**
**ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=mixed_wall-1, part=mixed_wall
*End Instance
**
*Nset, nset=out, instance=mixed_wall-1
,1
*Nset, nset=in, instance=mixed_wall-1
,34
*Nset, nset=_PickedSet40, internal, instance=mixed_wall-1
317 ,316 ,313 ,312 ,311 ,309 ,306 ,85 ,82 ,36 ,35 ,34 ,33
*Elset, elset=_PickedSet40, internal, instance=mixed_wall-1
32 ,31
*Nset, nset=_PickedSet41, internal, instance=mixed_wall-1
121 ,118 ,117 ,112 ,111 ,107 ,106 ,41 ,37 ,8 ,5 ,2 ,1
*Elset, elset=_PickedSet41, internal, instance=mixed_wall-1
2 ,1
*Nset, nset=_PickedSet42, internal, instance=mixed_wall-1, generate
1 ,317 ,1
*Elset, elset=_PickedSet42, internal, instance=mixed_wall-1, generate
1 ,32 ,1
*Elset, elset=__PickedSurf38_S3, internal, instance=mixed_wall-1
2 ,1
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf38, internal
__PickedSurf38_S3, S3
*Elset, elset=__PickedSurf43_S3, internal, instance=mixed_wall-1
2 ,1
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf43, internal
__PickedSurf43_S3, S3
*Elset, elset=__PickedSurf44_S5, internal, instance=mixed_wall-1
32 ,31
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf44, internal
__PickedSurf44_S5, S5
*End Assembly
*Amplitude, name=BDFluxAug
,3 ,0 ,2 ,0 ,1 ,0 ,0
.0
,7 ,212 ,6 ,18 ,5 ,0 ,4
.385
,11 ,679 ,10 ,585 ,9 ,457 ,8
.736

```

,694	,14	,722	,13	,749	,12	
.614	,15					
,19	,29	,18	,306	,17	,490	,16
.0						
,23	,0	,22	,0	,21	,0	,20
.0						
,27	,0	,26	,0	,25	,0	,24
.0						
,31	,212	,30	,18	,29	,0	,28
.385						
,679	,34	,585	,33	,457	,32	
.736	,35					
,694	,38	,722	,37	,749	,36	
.614	,39					
,43	,29	,42	,306	,41	,490	,40
.0						
,47	,0	,46	,0	,45	,0	,44
.0						
*Amplitude, name=BDTempAug						
,3	,20.5	,2	,21	,1	,21.4	,0
20.3						
,7	,23.5	,6	,20.7	,5	,20.1	,4
26.6						
,11	,30.3	,10	,29.5	,9	,28.2	,8
30.5						
,15	,30	,14	,30.3	,13	,30.4	,12
29.4						
,26.5	,18	,27.7	,17	,28.7	,16	
25.2	,19					
,23	,22.5	,22	,23.3	,21	,24	,20
21.8						
,27	,20.5	,26	,21	,25	,21.4	,24
20.3						
,23.5	,30	,20.7	,29	,20.1	,28	
26.6	,31					
,30.3	,34	,29.5	,33	,28.2	,32	
30.5	,35					
,39	,30	,38	,30.3	,37	,30.4	,36
29.4						
,26.5	,42	,27.7	,41	,28.7	,40	
25.2	,43					
,47	,22.5	,46	,23.3	,45	,24	,44
21.8						
*Amplitude, name=BDTempJan						
,3	,8.4	,2	,8.7	,1	,8.9	,0
.8						
,7	,7.8	,6	,7.7	,5	,7.9	,4
9.1						
,11	,16.4	,10	,14.9	,9	,12.1	,8
17.3						

,17.2	,,14	,17.8	,,13	,17.8	,,12	
16.5	,,15					
,12.3	,,18	,13.4	,,17	,15.7	,,16	
11.6	,,19					
,,23	,9.9	,,22	,10.4	,,21	,10.9	,,20
9.2						
,,27	,8.4	,,26	,8.7	,,25	,8.9	,,24
.8						
,,31	,7.8	,,30	,7.7	,,29	,7.9	,,28
9.1						
,16.4	,,34	,14.9	,,33	,12.1	,,32	
17.3	,,35					
,17.2	,,38	,17.8	,,37	,17.8	,,36	
16.5	,,39					
,12.3	,,42	,13.4	,,41	,15.7	,,40	
11.6	,,43					
,,47	,9.9	,,46	,10.4	,,45	,10.9	,,44
9.2						
*Amplitude, name=BDfluxJan						
,,3	,,0	,,2	,,0	,,1	,,0	,,0
.0						
,,7	,,0	,,6	,,0	,,5	,,0	,,4
.75						
,,11	,,496	,,10	,,425	,,9	,,289	,,8
.516						
,,429	,,14	,,493	,,13	,,503	,,12	
.341	,,15					
,,19	,,0	,,18	,,0	,,17	,,156	,,16
.0						
,,23	,,0	,,22	,,0	,,21	,,0	,,20
.0						
,,27	,,0	,,26	,,0	,,25	,,0	,,24
.0						
,,31	,,0	,,30	,,0	,,29	,,0	,,28
.75						
,,496	,,34	,,425	,,33	,,289	,,32	
.516	,,35					
,,429	,,38	,,493	,,37	,,503	,,36	
.341	,,39					
,,43	,,0	,,42	,,0	,,41	,,156	,,40
.0						
,,47	,,0	,,46	,,0	,,45	,,0	,,44
.0						
**						
**MATERIALS						
**						
*Material, name="L-1 POLY"						
*Conductivity						
,2.1						
*Density						

,.2400
*Specific Heat
,0.97
*Material, name=L-2
*Conductivity
,2.1
*Density
,.2400
*Specific Heat
,0.97
*Material, name=L-3
*Conductivity
,2.1
*Density
,.2400
*Specific Heat
,0.97
*Material, name=L-4
*Conductivity
,2.1
*Density
,.2400
*Specific Heat
,0.97
*Material, name=L-5
*Conductivity
,2.1
*Density
,.2400
*Specific Heat
,0.97
*Material, name=L-6
*Conductivity
,2.1
*Density
,.2400
*Specific Heat
,0.97
*Material, name=L-7
*Conductivity
,2.1
*Density
,.2400
*Specific Heat
,0.97
*Material, name="L-8 FULL STONES"
*Conductivity
,2.1
*Density
,.2400

```

*Specific Heat
,0.97
**
**PREDEFINED FIELDS
**
**Name: Predefined Field-1  Type: Temperature
*Initial Conditions, type=TEMPERATURE
_PickedSet42, 20.
----- **
**
**STEP: load
**
*Step, name=load, inc=10000
*Heat Transfer, end=PERIOD, mxdem=1.
, , ,.47 ,.1
**
**LOADS
**
**Name: flux  Type: Surface heat flux
*Dflux, amplitude=BDfluxJan
_PickedSurf38, S, 1.
**
**INTERACTIONS
**
**Interaction: Int-1
*Sfilm, amplitude=BDTempJan
_PickedSurf43, F, 1., 25.
**Interaction: Int-2
*Sfilm
_PickedSurf44, F, 20., 8.
**
**OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
**FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CFL, NT, RFL, RFLE
*Element Output, directions=YES
FLUXS, HBF, HFL, NFLUX, TEMP
*Contact Output
HFLA, HTL, HTLA, SJD, SJDA, SJDT, SJDTA, WEIGHT
*Radiation Output
FTEMP, RADFL, RADFLA, RADTL, RADTLA, VFTOT
**
**HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history

```

```
*Node Output, nset=in
CFL, NT, RFL, RFLE
**
**HISTORY OUTPUT: H-Output-2
**
*Node Output, nset=out
CFL, NT, RFL
*Contact Output, nset=out
HFLA ,
*End Step
```

Abstract

Recently, the concept of energy-efficient building design and construction, also known as "green" or sustainable building, has entered the mainstream consciousness and standards have been set for achieving and promoting it. The Green Building concept combines understanding of the natural environmental constraints, integrated planning, material compositing and combined systems that create a comfortable environment while saving energy costs.

The desire to create a comfortable indoor environment is expressed by the use of artificial means to control temperature, humidity, air flow, etc. Achieving the desired comfort is typically done by using various types of heaters, air conditioners, fans and more. Largely because of these systems, energy use in buildings amounts to approximately 40% of the total energy consumed in industrialized countries. Green Building may be a solution that provides the user thermal comfort, while reducing the use of non-renewable energy sources and minimizing the associated pollution.

One of the most important aspects of this approach is the material composition of the building envelope, particularly the use of thermal insulation and thermal mass in exterior walls. In this research, a multivariate optimization is performed on heat-transfer through a wall according to user defined insulation and mass. The research agenda was to find a reduced energy consuming composite building material, which is adaptable to different climate zones in Israel, using existing basic building materials.

The study included simulation of heat transfer through the walls of the building envelope by using the ABAQUS program, investigation of the existing Israeli standards, finding a formula to describe the problem and developing an optimization tool in order to achieve an optimal solution.

Using the developed optimization tool, it is possible to minimize the amount of energy required for maintaining indoor thermal comfort, in different climatic zones and according to different insulation and thermal mass requirements.



BEN- GURION UNIVERSITY OF THE NEGEV
FACULTY OF ENGINEERING SCIENCES
THE ENERGY ENGINEERING UNIT



MULTI-VARIANT OPTIMIZATION OF CONCRETE-BASED INSULATED WALLS

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the M.Sc. Degree

BY: Nizzan Avizrat

UNDER THE SUPERVISION OF: Prof. David Pearlmutter

Dr. Erez Gal

Signature of student:

Date: 7.6.2016

Signature of supervisor:

20166.9 Date:

Date: 10.6.2016

Signature of chairperson of the committee for graduate studies:

_____ Date: _____

JUNE 2016



BEN- GURION UNIVERSITY OF THE NEGEV
FACULTY OF ENGINEERING SCIENCES
THE ENERGY ENGINEERING UNIT



MULTI-VARIANT OPTIMIZATION OF CONCRETE-BASED INSULATED WALLS

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the M.Sc. Degree

BY: Nizzan Avizrat

UNDER THE SUPERVISION OF: Dr. Erez Gal

Prof. David Pearlmutter

JUNE 2016