

# אוורור טבעי

כותב: ניר טל

## תוכן עניינים

1.....	רקע מדעי והבעיה ההנדסית:
1.1 .....	הקדמה:
1.2 .....	החלפות אוויר.....
1.3 .....	עליית טמפרטורה במבנה סגור.....
1.4 .....	טבלה פסיכומטרית.....
1.5 .....	<i>Qin</i> פליטת חום בתוך מבנה.....
1.6 .....	<i>Qout</i> החום השורר בסביבה.....
1.7 .....	בחירת סוג החלון לאוורור טבעי.....
1.8 .....	מטרה:
1.9 .....	שאלות הנדסיות:
2.....	המודל לפתרון הבעיה:
2.1 .....	הנחות והזנחות לפתרון אנליטי.....
2.2 .....	מודלים לפתרון.....
2.3 .....	נתונים פיסיקלים.....
2.4 .....	עומס חום הנדרש לפנות.....
2.5 .....	כמות אוויר (ספיקה) הדרושה להחלפות.....
2.5.1 .....	מהירות הציפה התרמית של האוויר.....
2.6 .....	שטח הפתחים האפקטיבי של הוצאת האוויר החם.....
2.7 .....	השפעת מהירות כניסת האוויר על האדם.....
3.....	פתרון אנליטי:
3.1 .....	מודל מבנה תעשייתי לאוורור טבעי.....
3.2 .....	חישוב עומס החום הכללי.....
3.3 .....	חישוב כמות אוויר (ספיקה נפחית).....
3.4 .....	חישוב מהירות הציפה התרמית.....
3.5 .....	חישוב שטח חלון בגג:.....
3.6 .....	חישוב מספר החלפות אוויר בשעה:.....
4.....	CFD-פתרון נומרי.....
4.1 .....	הדמית טמפרטורה במבנה דו ממדי.....
5.....	סיכום.....
6.....	מסקנות.....
7.....	מקורות.....

## 1 רקע מדעי והבעיה ההנדסית:

### 1.1 הקדמה:

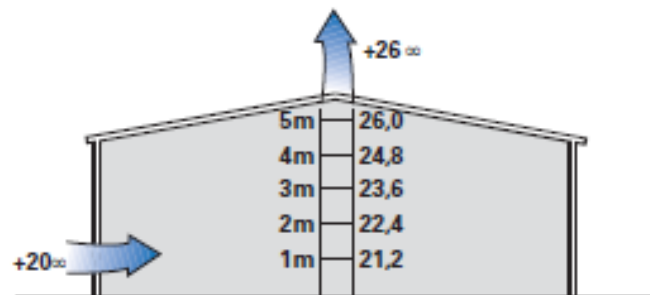
האטמוספירה הנכונה במבנה היא לא רק המרכיב החיוני של האדם במקום עבודתו אלא גם פקטור פרודוקטיבי חשוב מאוד. אף אדם לא יכול לעבוד בצורה אופטימלית כאשר האטמוספירה במקום העבודה לא מתאימה. יתרה מכך, במדינות שונות בעולם קיים חוק לביצוע אוורור בין אם מאולץ או טבעי.

### 1.2 החלפות אוויר

ישנן המלצות לביצוע כמות החלפות האוויר בתוך המבנה בשעה אחת, לדוגמה: במחסן המלצה היא בין 1-2 החלפות אוויר בשעה, בהשוואה למצבעה ההמלצה היא בין 10-30 החלפות לשעה.

### 1.3 עליית טמפרטורה במבנה סגור

במבנים סגורים כאשר ישנם מכונות שמייצרות חום, האוויר החם עולה למעלה ונשאר כלוא בגג המבנה, בנוסף לכך קיימת השפעת עומס חום של קרני השמש על גג המבנה וקירותיו ובכך אנו מקבלים עליית טמפרטורה ככל שעולים לגובה. ניתן לחלק את עליית הטמפרטורה בגובה ל 3 קטגוריות, אזור מפעל קר, אזור מפעל בינוני ואזור מפעל חם. ניתן לראות באיור 1 את עליית הטמפרטורה עם העלייה בגובה.



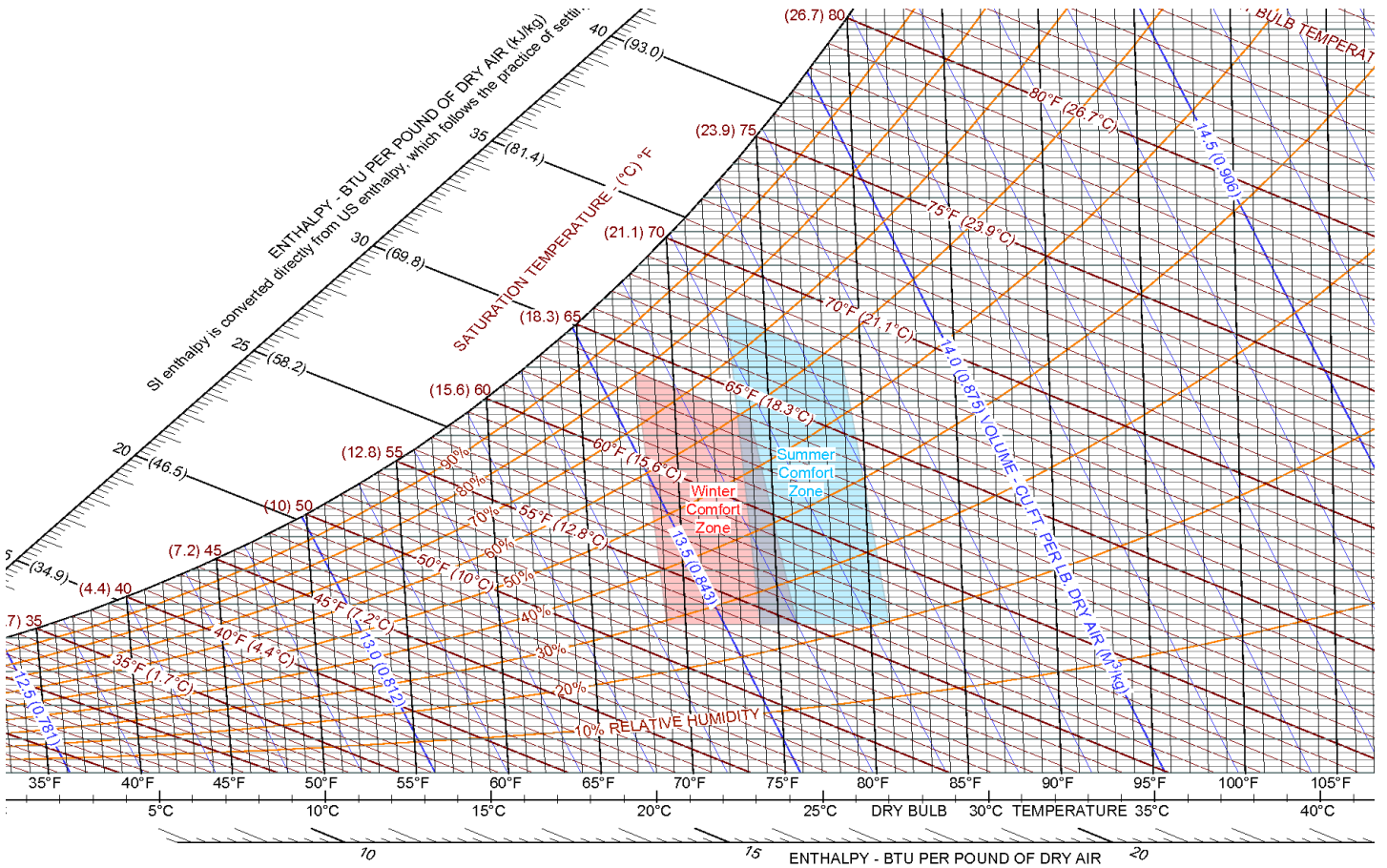
איור 1- תיאור עליית הטמפרטורה עם עליית הגובה בתוך מבנה

### 1.4 טבלה פסיכומטרית

סעיף זה חשוב מאוד למרות שאינו דן בזרימת האוויר, ישנה טבלה הנקראת טבלה הפסיכומטרית של האוויר.

טבלה זו היא טבלה המראה לנו את נתוני האוויר בגובה מסוים מעל הקרקע ואת תנאי האוויר השוררים בגובה זה על-ידי מדידה פשוטה של הלחות היחסית RH והטמפרטורה היבשה DB.

לאחר מדידות אילו אנו יכולים למקם את הנקודות האלו בטבלה ולקבל את כל הנדרש. לדוגמה: לחות מוחלטת, טמפרטורה רטובה וכמה אנרגיה או זקוקים בכדי להגיע ל- Comfortable Zone. ניתן לראות באיור 1.1, בצבעים ורוד-עבור החורף וכחול בקיץ.



איור 1.1 - טבלה פסיכומטרית של אזורי נוחות.

### 1.5 פליטת חום בתוך מבנה $Q_{in}$

השפעת פליטת החום ממכונות או מכל דבר אחר שמוקן במבנה היא קריטית מאד להסעת (הובלת) האוויר לכיוון גג המבנה. לדוגמה:  
 בנאדם במצב מנוחה יכול לשחרר כמות חום של כ- 100 W, בנוסף ניתן לראות בטבלה 1 את כמות עומס החום למ"ר של מכונות הנדסה שונות כקנה מידה.

סוג מכונה	פליטת חום $q_i$ [ W/m <sup>2</sup> ]
עיבוד שבבי	120
טיפול טרמי	110
חישול	400
יציקות פלסטיק	350

טבלה 1

$$Q_{in} = q_i \times A_m \times 10^{-3}$$

$A_m$  - שטח מכונות במבנה

$q_i$  - פליטת חום מכונות

## 1.6 החום השורר בסביבה $Q_{out}$

במקרה שלנו מאנרגית השמש.

$$Q_{out} = Q_{DL} + Q_{FD}$$

$$Q_{DL} = A_{DL} \times I \times g_e \times k_1 \times k_2$$

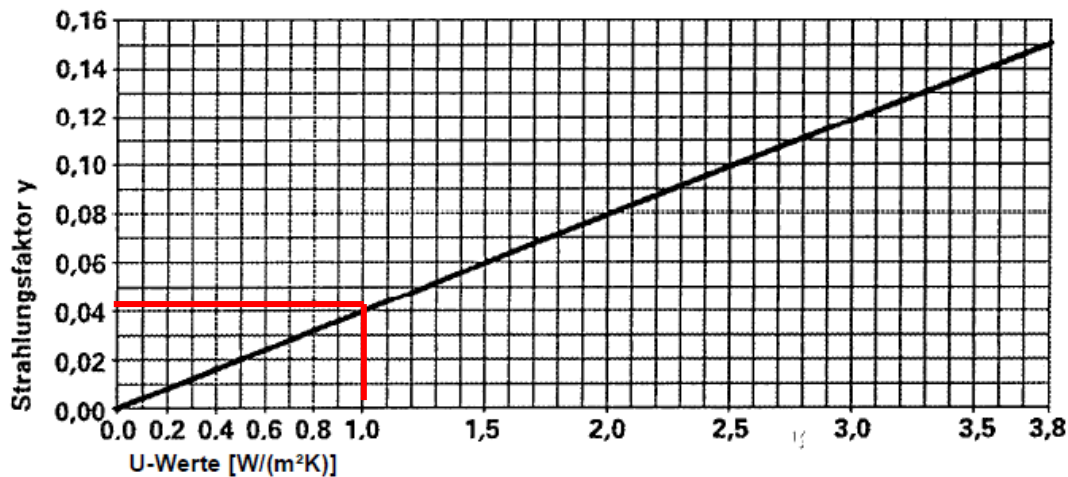
$$Q_{FD} = A_{FD} \times I \times y \times \alpha$$

$I$  - עוצמת שמש  $\left[ \frac{KW}{m^2} \right]$

$k_1$  - פקטור הקטנת עוצמת האור הנכנס מהגג מגודל הפתח

$k_2$  - פקטור הקטנת עוצמת האור הנכנס מהגג כתוצאה מלכלוך על החלון

$y$  - פקטור קרינת השמש, U value, איור 1.2



איור 1.2 - ערך  $y$  לעומת ערכי  $U$

$\alpha$  - מקדם יכולת הספיגת האנרגיה של החומר (תלוי בחומר הגג)

$g_e$  - מקדם העברת האנרגיה הכוללת של חומר זיגוג שקוף של פתחים

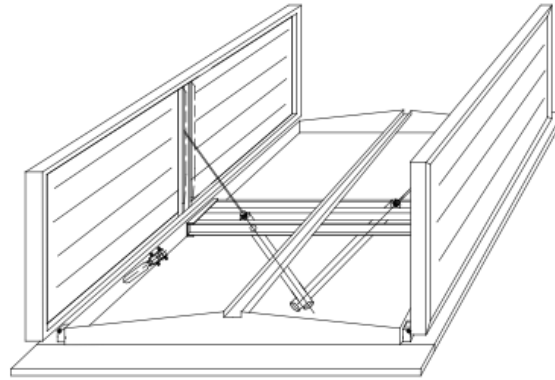
$A_{DL}$  - שטח פתחי האור הכלליים שבגג

$A_{FD}$  - שטח הגג ללא הפתחים

## 1.7 בחירת סוג החלון לאורור טבעי

לכל מבנה יש את הצורך בחלון מסוג אחר, לדוגמה אם מדובר במבנה תעשייה ניתן יהיה להתקין חלון בגג המבנה לשחרור החום ויחידות המותקנות בקירות המבנה להכנסת אויר צח, אילו יהיו יחידות יותר מתועשות כאשר יופיין הוויזואלי לא יהיה משמעותי במיוחד. לעומת זאת במבנה משרדים יותקנו חלונות לרוב בקירות המבנה שיופיין הוויזואלי מאוד משמעותי. לכל חלון יש את הנתונים טכניים שלו, הדבר החשוב ביותר הוא השטח האווירודינמי של החלון המתקבל עלידי השטח הגאומטרי עם מכפלת מקדם ה-  $C_v$ .

חברות המייצרות חלונות מסוג זה חלה עליהם החובה להוכיח את ערך זה בבדיקת מנהרת רוח. אנו ניקח לדוגמה חלון מין הסוג Phoenix שערך  $C_v = 0.65$  כמתואר באיור 2 ונחשב את השטח האווירודינמי שלו.



PHÖNIX PX2

איור 2- חלון Phoenix של חברת Roda

### 1.8 מטרה:

- המטרה היא לבצע הכנסת אוויר צח בחלקו התחתון של המבנה אל אזור בו העובדים שוהים ובכך לאפשר להם סביבת עבודה אופטימאלית באוויר ובטמפרטורה נוחה הכוללת אוויר ולחות מתאימים.
- עם סילוק אוויר חם דרך פתחים בגג המבנה המיועדים לכך, אנו מסלקים גם את השאריות וריחות היצור הנפלטות לאוויר ע"י מכונות היצור.

### 1.9 שאלות הנדסיות:

- מה היא ספיקת האוויר המתקבלת עבור מבנה בעל ממדים של 60 על 30, גובה 8 מטר?
- מה היא מהירות האוויר המתקבלת במבנה?
- מספר החלפות אוויר בשעה המתקבלות?
- מהו שינוי הטמפרטורה עם עליה בגובה בתוך המבנה הנ"ל?
- מהו גודלם וכמות הפתחים בגג הנדרשים עבור אוורור טבעי?

## 2 המודל לפתרון הבעיה:

### 2.1 הנחות והזנחות לפתרון אנליטי.

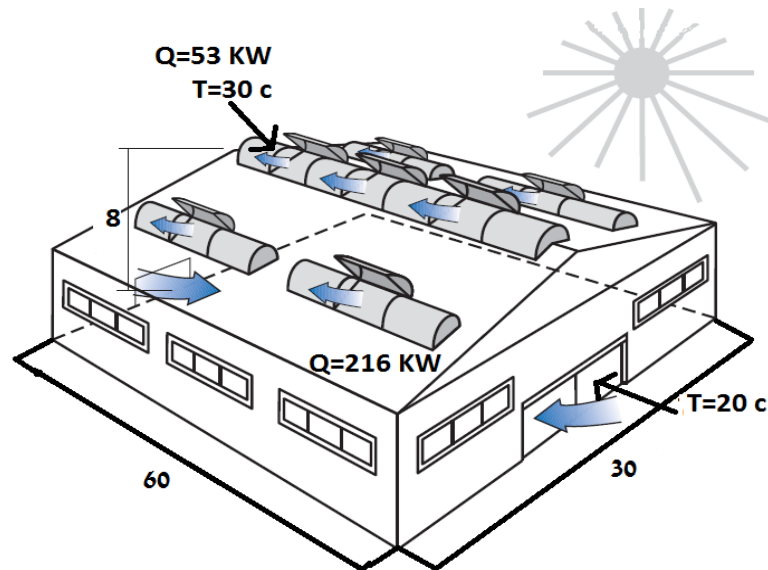
- אנו נניח שעומס החום באטמוספירה יהיה  $Q_{out} = 63 \text{ KW}$ . נתון נלקח
- אנו נניח שעומס החום בתוך המבנה הנוצר על-ידי מכונות הוא  $Q_{in} = 200 \text{ KW}$ .
- אנו נניח את הנתונים האטמוספריים לפי אטמוספירה נוחה ליום אביבי ארץ ישראל להגעה לאזור ה - Comfortable Zone ללא השקעת אנרגיה נוספת.
- אנו נחשב את כמות האוויר ומהירות האוויר הנדרשת עלפי הנתונים דלעיל.
- נזניח את הרוחות הסובבות את המבנה והלחצים הנגרמים מכך.
- אנו נזניח את הלחות היחסית ואת הלחות המוחלטת של אותם תנאים אטמוספריים שנבחר ונתייחס כאילו אנו בטווח הלחות המוחלטת המתאימה לאזור ה Comfortable Zone.
- הערה- לרוב, בתקופת האביב מבלי להתייחס לאטמוספירה קיצונית התנאים הם מתאימים לאוורור ואין צורך ביבוש/ הרטבה של האוויר.
- אנו נניח את גודל הפתח להכנסת אוויר: במבנה קיים פתח כניסת אוויר מסוג שער גלילה, בעל ממדים של 3.5 ו3 מטר, גובה ורוחב בהתאמה.

## 2.2 מודלים לפתרון

- לצורך פתרון האנליטי נקרב את הבעיה הנדסית למודל גיאומטרי: המודל שעליו נחשב את הפתרון האנליטי היה מודל מישורי דו מימדי.
- מודל קבוע בעומס החום הפנימי והחיצוני – בהנחה שחום הסביבה והחום השורר בתוך המבנה קבוע.

גאומטריה - המודל לפיתרון מתואר באופן סכמתי באיור 3.

המבנה המתואר גודלו 60X30 מטר וגובהו 8 מטרים, בגג המבנה מותקנים פנסי תאורה אשר מכניסים אור וחום בתוך המבנה, בתוך המבנה ישנם מכונות חישול המפיקות חום לפי טבלה 1



איור 3- גיאומטריית מבנה נתון לפתרון באנליטי

## 2.3 נתונים פיסיקליים

במסגרת החישובים נלקחו נתונים אמתיים של אלמנטי בניה, נתוני מזג אויר והנחות יסוד של המבנה. גיאומטריה ונתונים פיסיקליים.

- טמפרטורה חיצונית  $T_{out} = 20^{\circ}\text{C}$
- טמפרטורת אויר בשכבה הקרובה לגג  $T_{Ab} = 30^{\circ}\text{C}$
- גובה מבנה אפקטיבי (ממרכז שטח הפתח של כניסת האוויר עד לפתח יציאת האוויר החם)  $H=8\text{ m}$
- רוחב המבנה 30 מטר
- אורך המבנה 60 מטר.
- שטח פתחי האור הכוללים בגג  $A_{DL} = 20\text{ m}^2$
- עוצמת שמש לפי מרכז מטאורולוגי  $I = 4 \left[ \frac{\text{KW}}{\text{m}^2} \right]$
- מקדם העברת האנרגיה הכוללת של חומר זיגוג שקוף של פתחים  $g_e = 0.5$  לפי נתוני יצרן פוליקרבונט.
- פקטור הקטנת עוצמת האור הנכנס מהגג מגודל הפתח  $K_1 = 0.3$  הנחה יסוד.
- פקטור הקטנת עוצמת האור הנכנס מהגג כתוצאה מלכלוך על החלון  $K_2 = 0.5$  הנחת יסוד.
- שטח הגג ללא הפתחים  $A_{FD} = 1780\text{ M}^2$
- פקטור קרינת השמש  $y = 0.04$ , [נלקח מאיור 1.2](#)
- מקדם יכולת ספיגת האנרגיה של החומר  $\alpha = 0.02$
- עומס החום החיצוני  $Q_{out} = 63\text{ KW}$  על פי חישוב בפתרון האנליטי.
- עומס החום הפנימי  $Q_{in} = 200\text{ KW}$  על פי חישוב בפתרון האנליטי.

## 2.4 עומס חום הנדרש לפנות

אנו נתחשב בעומס החום החיצוני והפנימי

$$Q_{tot} = Q_{in} + Q_{out}$$

$-Q_{tot}$  - עומס חום כללי

$$Q_{in} = q_i \times A_m \times 10^{-3}$$

$$Q_{in} = 400 \times 500 \times 10^{-3} = 200 [KW]$$

נחשב עומס חום חיצוני עבור מבנה שגגו אלומיניום עם פתחי פוליקרבונט בגג

$$Q_{out} = A_{DL} \times I \times g_e \times k_1 \times k_2 + A_{FD} \times I \times y \times \alpha$$

$$Q_{out} = 20 \times 4 \times 0.5 \times 0.3 \times 0.5 + 1780 \times 4 \times 0.04 \times 0.2$$

$$Q_{out} = 63 [KW]$$

## 2.5 כמות אוויר (ספיקה) הדרושה להחלפות

אנו נדרשים לבצע כמות מסוימת של החלפות אוויר בתוך המבנה כדי להעניק לעובדים שנמצאים בו את התנאים האופטימליים הנדרשים לביצוע עבודה אפקטיבי. אנו נחשב את כמות האוויר על ידי עומס החום הכללי, צפיפות האוויר, קיבול חום סגולי והפרשי טמפרטורה.

$$V_{req} = \frac{Q_{tot}}{\rho_L C_{PL} \Delta T}$$

$V_{req}$  - ספיקת אוויר נדרשת

$C_{PL}$  - קיבול עומס חום סגולי

$\Delta T$  - הפרש טמפרטורות

$\rho_L$  - צפיפות אוויר

$-Q_{tot}$  - עומס חום כללי

### 2.5.1 מהירות הציפה התרמית של האוויר

אנו מחשבים את מהירות הציפה התרמית של האוויר כדי לחשב את כמות השטח האפקטיבי של החלונות בביצוע אוורור טבעי ואפקטיבי.

$$W_{TH} = \sqrt{0.5gH\Delta T/T_a} *$$

\* מקור הנוסחא ממסמך של Fach Verband Tageslicht Rauchschtz Richtlinie August 2014

$-W_{TH}$  - מהירות הציפה התרמית של האוויר

$-T_a$  - טמפרטורה חיצונית

$-\Delta T$  - הפרש טמפרטורות

H - גובה אפקטיבי

g - תאוצת הכובד

$A_a$  - שטח פתח יעיל אווירודינמי

$C_v$  - מקדם יעילות אווירודינמי

$$A_v = L \times B$$

$$A_a = C_v \times A_v = 0.65 \times A_v$$

לדוגמה: חלון L=275 ו B=170

$$A_v = 2.75 \times 1.7 = 4.675 \text{ m}^2$$

$$A_a = 0.65 \times 4.675 = 3.03 \text{ m}^2$$

אנו נשתמש רק בשטח האווירודינמי.

B - רוחב החלון

L - אורך החלון

$A_v$  - שטח גאומטרי של החלון

$A_a$  - שטח אווירודינמי של החלון

## 2.6 שטח הפתחים האפקטיבי של הוצאת האוויר החם

את שטח הפתחים הכולל הנדרש עבור אזור טבעי אנו נקבל מהנוסחה הבאה:

$$A_{eff} = V_{req} / W_{TH} [m^2]$$

את כמות החלונות אנו נבחר לפי השטח הכללי האפקטיבי שמתקבל ולפי השטח האווירודינמי שמתקבל.

## 2.7 השפעת מהירות כניסת האוויר על האדם

כמו בתנאי מזג האוויר יש גם מהירות זרימת אויר נוחה לאדם. טבלה 2

מהירות האוויר $\left[\frac{m}{s}\right]$	השפעה (בקרוב)
>0.25	לא מורגש
0.25-0.5	נעים
0.5-1	באופן כללי נעים כאשר המהירות אינה משתנה
1-1.5	רוח פרצים (במשך זמן לא נעים)



<1.5	רוח חזקה מידי
------	---------------

טבלה 2

### 3 פתרון אנליטי:

#### 3.1 מודל מבנה תעשייתי לאוורור טבעי

אנו נדמה מבנה בגודל של 60 מטר על 30 מטר עם גובה מקסימלי כולל שיפוע גג 10 מטר וגובה אפקטיבי 8 מטר לחישוב אנליטי לאוורור טבעי.

#### 3.2 חישוב עומס החום הכללי

$$Q_{tot} = Q_{in} + Q_{out}$$

$$Q_{tot} = 200 + 63 = 263 \text{ KW}$$

#### 3.3 חישוב כמות אויר (ספיקה נפחית)

$$V_{req} = \frac{Q_{tot}}{\rho_L C_{PL} \Delta T}$$

$$V_{req} = \frac{263}{1.204 * 1.004 * (30 - 20)} = 22 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$V_{req} = 22 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 3600 = 79,200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

#### 3.4 חישוב מהירות הציפה התרמית

$$W_{TH} = \sqrt{0.5gH\Delta T/T_a}$$

$$W_{TH} = \sqrt{0.5 * 9.81 * 8 * 10 / (20 + 273)} = 1.15 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

#### 3.5 חישוב שטח חלון בגג:

$$A_{eff} = \frac{V_{req}}{W_{TH}}$$

$$A_{eff} = \frac{22}{1.15} = 19 \text{ m}^2$$

אנו נחשב את השטח (פתח האור) האמתי של החלון לפי בחירתנו (חלון תוצרת חברת RODA) תוספת של 35% לשטח החלון בגלל פקטור ה  $C_V = 0.65$  של החלון.

$$A_V = 19 \text{ m}^2 * 1.35 = 26 \text{ m}^2$$

לכן אם נשתמש בחלון שמידותיו  $L=2.75$  ו  $B=1.70$

$$A_V = 2.75 * 1.7 \approx 4.7 \text{ m}^2$$

מספר החלונות שידרשו להוצאת האוויר החם ממבנה מסוג זה יהיה 6 חלונות ששטחם הכולל יהיה:

$$A_{Vtot} = 4.7 * 6 \approx 28 \text{ m}^2$$

### 3.6 חישוב מספר החלפות אויר בשעה:

- נחשב את נפח המבנה

$$V = 30 * 60 * 8 = 14.400 \text{ m}^3$$

- נחשב את מספר ההחלפות

$$Air_{AC} = \frac{79,200}{14,400} = 5.5 \approx 6 \frac{Air_{AC}}{H}$$

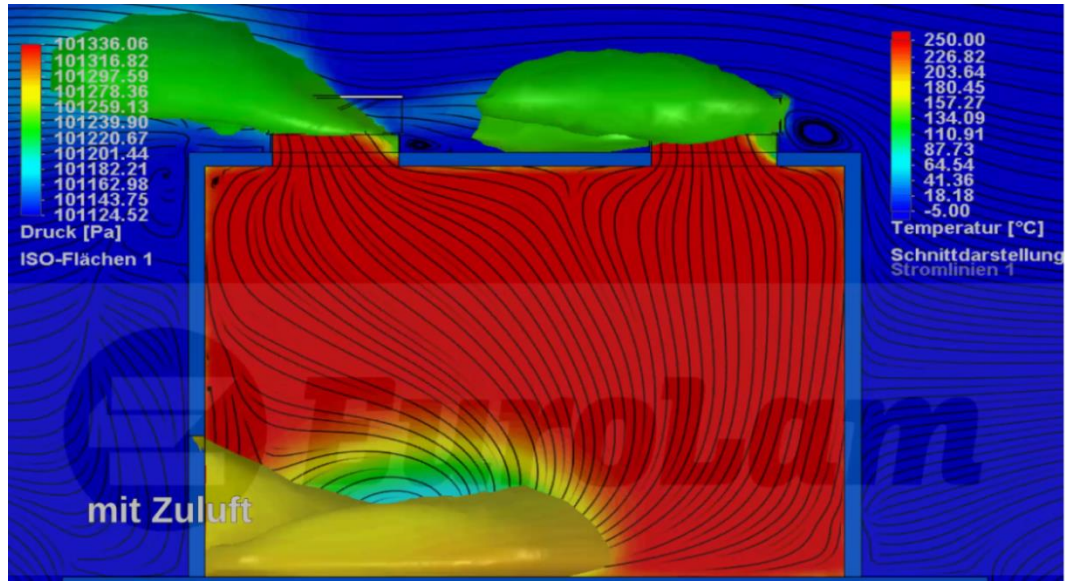
### 4 פתרון נומרי -CFD:

#### 4.1 הדמיית טמפרטורה במבנה דו ממדי

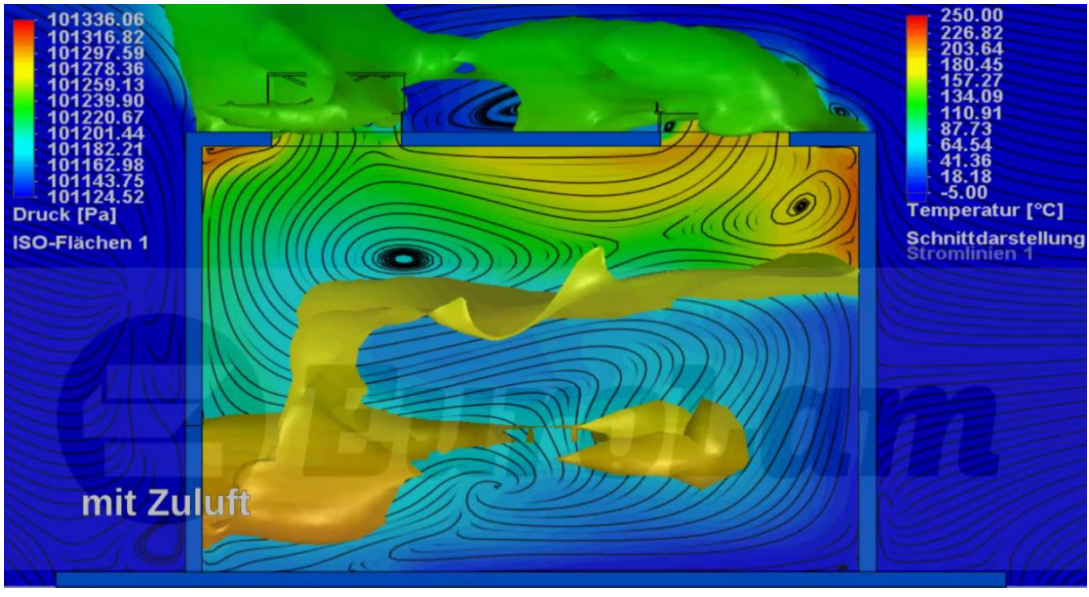
אנו נבחן את הפתרון הנומרי למשך זמן לתנועת אויר והכנסת אויר קר לתוך המבנה באמצעות פתח הכנסת אויר והוצאת האוויר המשולב (חם והקר) לסביבה על-ידי חלונות בגג המבנה. באיור 4 ניתן לראות מבנה דו ממדי עם פתחים סגורים וטמפרטורת מבנה גבוהה בצבע אדום, באיור 4.1 ניתן לראות שהפתחים בגג ובדופן נפתחו ולאחר 2 שניות כמות גדולה של אויר נכנסת למבנה בטמפרטורת הסביבה, מצוין בצורה משטחי בצבע צהוב. בפתחים שמותקנים בגג ניתן לראות משטחים בצבע ירוק ולבסוף באיור 4.2 ניתן לראות את התוצאה לאחר 10 שניות כאשר הרקע בתוך המבנה צבוע בכחול, טמפרטורה של כ-18 מעלות צלסיוס.



איור 4 - הדמיית טמפרטורה השוררת במבנה סגור, אדום מצוין טמפרטורה גבוהה



איור 4.1 - טמפרטורה במבנה המאוורר לאחר 2 שניות



איור 4.2 - טמפרטורה במבנה לאחר 20 שניות מתחילת האוורר

5 סיכום

במודל שבחרנו יש מספר הערכות שיכולות לגרום לשגיאות בפתרון האנליטי:

- במסמך זה דנו בצורך של אוורור טבעי במבנים ובדרישות התחלופה של אוויר במבנים בהם יש מכונות הפולטות חום, מספר רב של אנשים וחומרים מסוכנים אשר ריכוזם עלול לגרום לסכנה בריאותית וסכנת התלקחות.
- אנו בחרנו עומס חום ממוצע לפי נתונים של השירות המטאורולוגי בישראל, עומס החום יכול להשתנות בהתאם לתנאי מזג האוויר. לכן ספיקת האוויר יכולה להשתנות במקביל לתנאי מזג האוויר השוררים בסביבת המבנה.
- עומס החום בתוך המבנה תלוי בפליטת בחום על ידי המכונות לפי החישוב האנליטי שלנו, אנו הזנחנו כל אמצעי פליטת חום אחר כגון: בני אדם, מסכי מחשב, מנורות, מחשבים וכו'.
- השוואה בין הפתרון האנליטי לבין הנומרי מאשרים זה את זה.

- ניתן לראות בפתרון הנומרי שהאוויר החם עולה כלפי מעלה וכאשר פתחי האוויר בגג נפתחים, האוויר החם ששורר בתוך המבנה עולה כלפי מעלה ויוצא דרך הפתחים. דבר זה מאשר את הפתרון האנליטי שלנו. לפיכך ניתן לראות שהאוויר בטמפרטורת הסביבה הנכנס בחלקו התחתון של המבנה ובמקביל האוויר החם יוצא מהפתחים בגג.
- תהליך האוורור הוא קבוע והחלפת האוויר החם במבנה משתנה תמיד ומאפשרת תנאי סביבת עבודה טובים בהתאם לתנאי מזג האוויר בסביבת המבנה.
- צמצום התחלואה במבנה על-ידי הכנסת אויר צח.
- על ידי אוורור טבעי ניתן לצמצם את כמות גזי החממה הנפלטים לאטמוספירה על ידי צמצום את צריכת האנרגיה ובמקביל לחסוך בהוצאות כספיות.

## 6 מסקנות

- בתקופות מזג אוויר נוח, ניתן להשתמש במערכות אוורור טבעי ובכך לחסוך בהוצאות מיזוג אוויר.
- אוורור טבעי אינו יכול להחליף יחידות מיזוג אוויר ויבוש.

## 7 מקורות

- [.Fach Verband Tageslicht Rauchschutz](http://www.fachverband-tageslicht-rauchschutz.de)
- Ashrae standard
- חברת RODA הגרמנית.
- חברת EUROLAM הגרמנית.
- IDES-EDU INTELLIGENT ENERGY EUROPE
- <http://www.engineeringtoolbox.com>
- אוניברסיטת תל אביב- הפקולטה להנדסה, סימולציות נומריות של אוורור טבעי בהשפעת כוח ציפה ורוח.