

**אוניברסיטת תל-אביב**

**הפקולטה להנדסה ע"ש איבי ואלדר פליישמן**

**בית הספר לתארים מתקדמים ע"ש זנדמן – סליינר**

## **סימוולציות נומריות של אורור טבעי בהשפעת כוחות ציפה ורוח**

פרוייקט גמר לתואר שני

2007

מגישה : נדלקו מרינה

ת.ז. : 322188335

מנחים : ד"ר יוסי טנאי – מנהל המחקר החקלאי

פרופ' אלקסנדר גלפגט - אוניברסיטת ת"א

## תוכן

3.....	<b>1. מבוא</b>	<b>1</b>
5.....	<b>סקר ספרות</b>	<b>2</b>
5.....	סוגים של אוורור טבעי חד-צדדי (single-sided ventilation)	2.1
8.....	מידול האוורור	2.2
8.....	משוואות הזרימה ומעבר חום, מודל טורבולנטי	2.2.1
9.....	משוואת הרציפות (שימור מסה)	2.2.1.1
11.....	משוואת התנע	2.2.1.2
14.....	משוואת האנרגיה	2.2.1.3
16.....	מידול של זרימה טורבולנטית	2.2.1.4
20.....	דוגמאות לשימוש ב- CFD בספרות	2.3
26.....	<b>3. תיאור המבנה</b>	<b>3</b>
30.....	<b>4. חקירה נומרית</b>	<b>4</b>
30.....	משוואות הזרימה	4.1
30.....	משוואות הזרימה עבור זורם ניוטוני	4.1.1
31.....	סקימה נומרית של נפחים סופיים	4.1.2
35.....	מודל נומרי	4.2
36.....	רישות תלת ממדי	4.2.1
38.....	<b>5. תוצאות ודיון</b>	<b>5</b>
82.....	<b>6. סיכום</b>	<b>6</b>
83.....	<b>7. ביבליוגרפיה</b>	<b>7</b>

## מבוא

אוורור טבעי הוא אמצעי יעיל לחסוך אנרגיה נצרכת בבניינים ולשפר את תכונות האוויר שבתוך הבית. הפרויקט הזה עוסק באוורור טבעי חד-צדדי (single-sided ventilation) על ידי שימוש בסימולציות נומריות (computational fluid dynamics (CFD)), יחד עם המודלים הניסויים. המודל של CFD יושם לקבוע את ההשפעות של כוח ציפה, רוח, או השילוב שלהם בשיעור האוורור ותנאים שבתוך המבנה. כלי זה של סימולציות נומריות משמש לשם חקירה של כל תהליכי ההסעה אשר קשורים בזרימה ובמעבר חום ומסה. יתרונות הסימולציה הנומרית הן רבות והעיקריות שבהן הינן: יכולת להעריך תנאים ומודלים רבים במהירות, עלות נמוכה, בסיס נתונים רחב על שדה הזרימה, סימולציה של משטרי זרימה עבור גיאומטריה בסקאלות גדולות וקטנות.

Sinha et al.2002 ניתח בסימולציות נומריות את ההתפלגות של אוויר בחדר עם ובלי כוח ציפה, בשביל קונפיגורציות יציאה וכניסה שונות. Telbany et al.,1985, Dascalaki et al.1996 חקרו בסימולציות נומריות ובאופן ניסיוני את האוורור טבעי החד-צדדי (single-sided ventilation).

Dehghan et al.,1990, Papakonstantinou et al.,2000 התמקדו על הניתוח של האוורור טבעי החד-צדדי (single-sided ventilation) בחדרים על ידי שימוש ב-CFD.

Eftekhari et al.,2003 ביצעו ניסוי וסימולציה של CFD של התפלגות זרימת האוויר בתוך החדר ומסביבו. ההתפתחות בתעשיית הבנייה דורשת ממעצבים לספק את הצרכים של משתמשים בלי להתפשר על היכולת של דורות העתיד לקדם את הצרכים שלהם. אוורור מכני ומיזוג אוויר של בניינים צורכים כמויות גדולות של אנרגיה בעולם, במיוחד בארצות המפותחות, בניינים משתמשים בשליש מכל צריכת האנרגיה (Energy Information Administration). השימוש המוגדל הזה של אנרגיה גורם לזיהום אטמוספרי וחימום גלובלי. האוורור הטבעי הוא שיטה אלטרנטיבית יעילה בשביל להקטין את שימוש האנרגיה בבניינים, משיג נוחות תרמית, ושומר סביבה בריאה שבתוך הבית (J.J. Finnegan et al.1994, 1998, J.F. Busch 1992, R. Zhao). בדרך כלל, מחיר האנרגיה של הבניין שמאוורר באופן טבעי תהיה כ-40% פחות מזה של בניין ממוזג (Energy Consumption Guide). האוורור הטבעי, לכן, תורם לסביבה על ידי הקטנת שימוש האנרגיה בבניינים. האוורור הטבעי משפיע על עיצוב בניינים ע"י אדריכלים (T. Willmert 2001, A. Krishan 2001) ומשמש בהרבה סוגים של בניינים, אפילו בבתי חולים (D. Clarke 2001). אף על פי כן, יש לציין כי האוורור הטבעי יכול להתייחס רק לאקלימים מסוימים ויש בו הרבה מגבלות (G.J. Levermore 2002). רעש מקומי ורמות הזיהום מגבילים את השימוש של האוורור הטבעי. הרבה מחקרים מהעבר באוורור הטבעי הוגבלו למאפיינים מסוימים, כמו הכוח המניע שלו (2000). (J. Hirunlabh et al 2001, A.M. Rodrigues et al), מאפייני זרימה (D.W. Etheridge 2000), או יישום לבנין רגיל (G. Ziskind 2002).

לאוורור טבעי שימוש נרחב גם בבקרת האקלים בתוך מבנים חקלאיים. מאמרים אלה התרכזו, בעיקר, בהשפעתם של פרמטרים משתנים, כמו זווית פתיחת החלון, הפרשים בין טמפרטורה פנימית וחיצונית ומהירות הרוח, על מאפייני החלפת האוויר. במאמרם (Teitel and Tanny (1999) חקרו את תגובתם בזמן של טמפרטורת האוויר ולחות בתוך החממה בעקבות פתיחתם

הפתאומית של פתחי הגג. בעבודתם הם פיתחו מודל תיאורטי עבור תהליכי מעבר באוורור טבעי ואימתו אותו באמצעות ניסויים בחממה בסקאלה ממשית. במחקר שנערך לאחרונה (Teitel & Tanny (2005) נחקרה השפעת מהירות וכוון הרוח על אוורור טבעי של חממה המאווררת ע"י פתחי גג.

יש שני סוגים עיקריים של אוורור טבעי: cross ventilation ו- single-sided ventilation. יותר מקובל מ- cross ventilation, למרות שיעילותו שלו יותר נמוכה. הפרויקט הזה מתמקד על - single-sided ventilation.

הכוחות המניעים באוורור הטבעי הם רוח וכוח ציפה. ההבדלים בלחץ של הרוח דרך החזית וההבדלים בין הטמפרטורות של הכניסה והיציאה יוצרים החלפת אוויר טבעית בין זרם האוויר בכניסה וביציאה. שיעור האוורור תלוי בחוזק וכיוון של הכוחות האלה וההתנגדות של מסלול הזרם. התהליכים הפיסיים האלה הם מסובכים, וקשה לחזות את קצב האוורור. האתגר הוא לשלוט באוורור הטבעי כדי להשיג את התנאים הדרושים של הסביבה בתוך הבניין. רוב העיצובים ל- single-sided ventilation מתמקדים על ההשפעות של כוח ציפה. יש חוסר מידע על ההשפעות המשולבות של רוח וכוח ציפה על single-sided ventilation. זה חשוב להבנה מלאה וניתוח של single-sided ventilation עקב שילוב של רוח וכוח ציפה כדי לעשות את העיצוב שלו יותר יעיל.

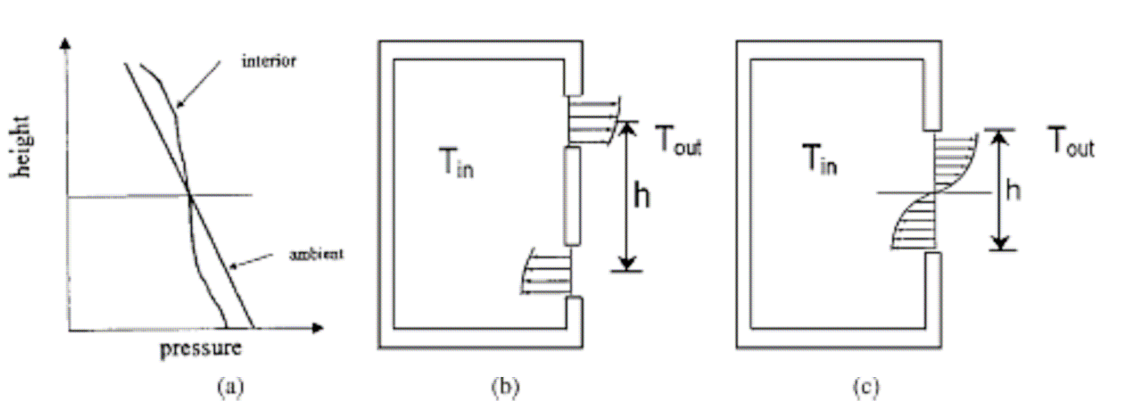
## 2. סקר ספרות

### 2.1 סוגים של אוורור טבעי חד-צדדי (single-sided ventilation)

הבדל הטמפרטורה דרך הפתחים בין מקום כניסה ויציאה וכוחות הרוח הם שני הפרמטרים העיקריים המשפיעים על זרימת אוויר באוורור טבעי חד-צדדי (single-sided ventilation) (C. Alloca, Q. Chen & L.R. Glicksman 2003). פרק זה מראה איך שני הפרמטרים יוצרים סוגים שונים של single-sided ventilation.

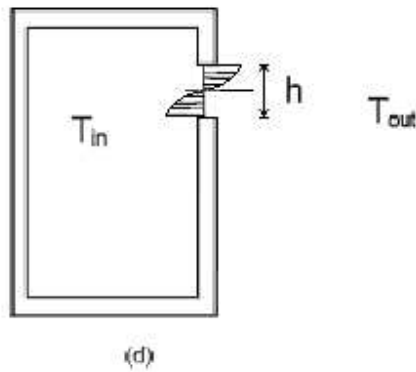
אוורור מושרה כוח ציפה:

למרווח עם פתחים עליון ותחתון, הבדל הטמפרטורה בין פנים החדר והסביבה בחוץ גורם להבדל הצפיפות, האוויר החם פחות צפוף מהאוויר הקר יותר. כתוצאה, קיים הבדל לחץ בין האוויר בתוך ומחוץ למבנה (איור 2.1a). הלחץ הפנימי הגבוה יותר בפתח העליון גורם לזרימה כלפי-חוץ. הזרם מושרה כוח הציפה הזה גם ידוע כ"אפקט הארובה" (stack effect). כאשר טמפרטורות בתוך ובחוץ המבנה שוות, הפרש הלחץ (stack pressure) מתקרב לאפס ואין כוח מניע לאוורור. המיקום של פתחי האוורור קובע את התפלגות הטמפרטורה בתוך החדר. אם שני פתחים הם פתוחים, בחלק העליון של החדר ובחלק התחתון, האוויר הקריר יזרום לתוך הפתח התחתון, ואוויר חם יזרום מהפתח העליון (איור 2.1b). הסוג הזה של אוורור, שיוצר ריבוד טמפרטורה בתוך החדר, נקרא אוורור דחיקה (displacement ventilation). אף על פי שיש השפעה חזקה של מקום הפתח העליון והתחתון, אוורור דחיקה יכול גם לקרות במקומות עם פתח גדול יחיד, (איור 2.1c). במקרה הזה, הפתח משמש גם לכניסת וגם ליציאת אוויר. לעומת הפתחים העליון והתחתון, פתח יחיד יוצר קצב האוורור נמוך יותר והאוויר המאוורר לא חודר רחוק לתוך החדר. זרימת אוויר יותר חזקה תיגרם כאשר יש הפרדה אנכית גדולה בין כניסה ויציאה, וכאשר יש הבדל גדול בין טמפרטורות של כניסה ויציאה.



איור 2.1- התפלגות הלחץ של האוויר בתוך ובחוץ המבנה עבור הזרם המונע על ידי כוח ציפה (a) במקרה עם פתח עליון ופתח תחתון (b) או במקרה עם פתח יחיד (c).

אוורור ערבוב (mixing ventilation) מתרחש כאשר קיים רק פתח אחד באזור העליון של החדר, כך שזרימת האוויר פנימה והחוצה מתבצעת דרך שני אזורים שונים של אותו פתח עליון (איור 2.1d). במקרה זה, פלומת האוויר החיצוני הקר נכנסת דרך האזור התחתון של הפתח העליון, מתערבבת עם האוויר בתוך חלל המבנה והאוויר החם יוצא מן המבנה דרך האזור העליון של אותו פתח. באוורור ערבוב המישור הניטרלי, המפריד בין זרימה פנימה והחוצה, נמצא בערך באמצע גובה הפתח העליון.



איור 2.1- מקרה עם פתח עליון יחיד, אוורור ערבוב (d)

#### אוורור מושרה רווח:

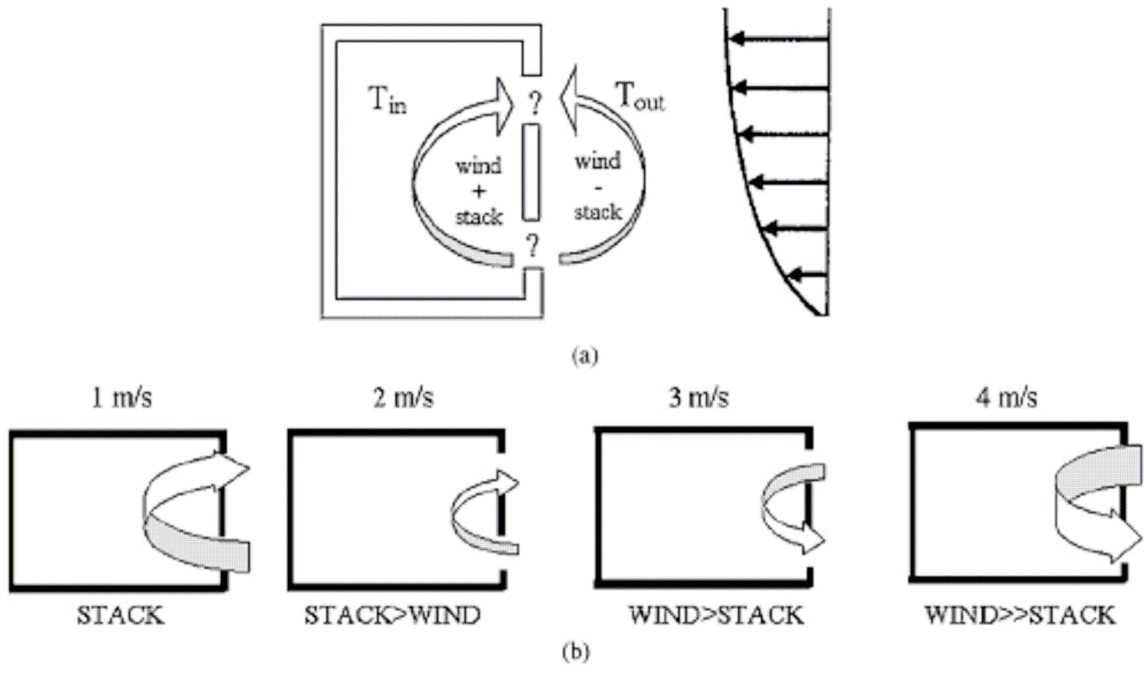
האוורור הטבעי החד-צדדי יכול גם להיות נוצר על ידי הבדלי הלחץ על הפתחים בגלל הרווח. התהליכים הפיזיים הם מסובכים, בגלל ההשתנות בתנאים של הרווח. תוצאות ניסיוניות הראו שהשפעות המשתנות של הרווח ו\ או טורבולנציה שנגרמה על ידי הבניין עצמו (F. Allard, 1998), גם אחראית לאוורור חד-צדדי (single-sided ventilation). טורבולנציה בזרימת האוויר דרך פתח גורמת לעליות וירידות לחץ חיוביות ושליליות בו זמניות בתוך המבנה.

#### אוורור משולב מושרה כוח ציפה ורווח:

ברוב המקרים, האוורור מונע על ידי כוח ציפה ורווח סימולטנית. השפעת הטמפרטורה והרווח בו זמנית על תהליכי האוורור בחלון פתוח מאוד מסובכת מפני שהרווח ו"אפקט הארובה" (stack forces) מחזקים או מתנגדים זה לזה. אפקט הטמפרטורה אשר נקרא גם אפקט הציפה (buoyancy), תורם באופן משמעותי לתהליך האוורור רק כאשר מהירות הרווח בחוץ נמוכה מ-  $2 \text{ m/s}$ , בעוד שבמהירויות גבוהות יותר אפקט הרווח הוא השולט (Bot, 1983).

באיור 2.2 רואים השפעה (F. Allard, 1998) של כוחות ציפה ורווח:

מהירות פחות מ-  $2 \text{ m/s}$  - השפעה של כוח ציפה דומיננטית וגורמת לכניסת האוויר דרך הפתח התחתון ויציאת האוויר דרך הפתח העליון. אם מהירות הרווח יותר מ-  $3 \text{ m/s}$  - השפעה של הרווח היא דומיננטית וגורמת לכניסת האוויר דרך הפתח העליון ויציאת האוויר דרך הפתח התחתון. מהירות הרווח בין  $2 \text{ m/s}$  ל-  $3 \text{ m/s}$  - כוחות של ציפה ורווח כמעט שווים, כתוצאה מזה קיים אוורור מינימלי.



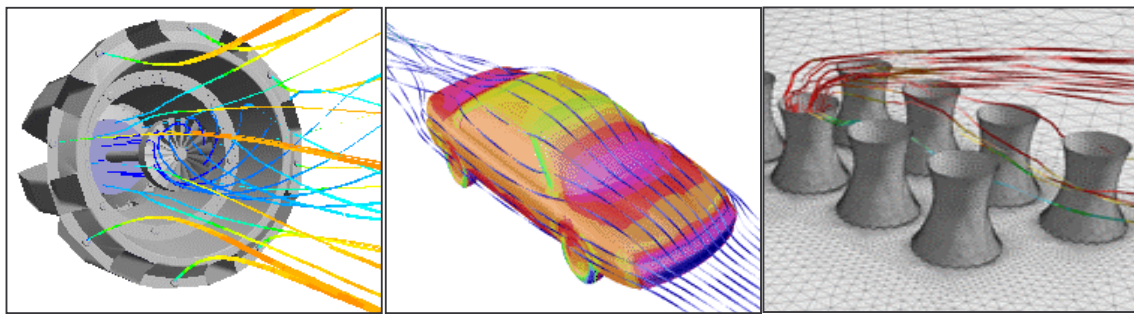
איור 2.2- השפעה של כוחות ציפה ורוח

מכיוון שהזרם מושרה רוח נלמד באופן מקיף, הפרויקט הזה מתמקד על האוורור טבעי חד-צדדי (single-sided ventilation) כתוצאה מהזרם מושרה כוח ציפה והזרם המשולב מושרה כוח ציפה ורוח.

## 2.2 מידול האוויר

CFD זה כלי שמשמשים בו בחקירה של כל התהליכים אשר קשורים בזרימה ובמעבר חום ומסה. הסיבות העיקריות לשימוש בסימולציות נומריות הינם: יכולת להעריך תנאים ומודלים רבים במהירות, עלות נמוכה, סיפוק בסיס נתונים רחב לשם חקירה של שדה הזרימה.

CFD נמצא בשימוש בתעשיות רבות, כפי שניתן לראות בציור 2.9, כגון: אווירונאוטיקה, כלי רכב, ייצור חשמל ובשנים האחרונות גם הולך ומתפתח השימוש בו בחקלאות. בעזרת כלי זה ניתן למדל את האקלים הפנימי בתוך חממה ולאחר מכן יכולים מודלים אלו לשמש לשם לימוד התלות של האקלים הפנימי בתנאי מזג האוויר החיצוניים וכיצד לשלוט בכך.



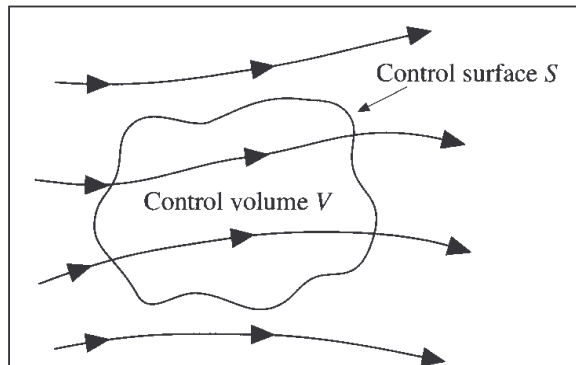
ציור 2.9. דוגמאות לשימושים של CFD בתעשיות השונות.

### 2.2.1 משוואות הזרימה ומעבר חום, מודל טורבולנטי

בסעיף זה יוצג הבסיס המתמטי אשר נותן הבנה כללית עבור מודלים אשר כוללים זרימה של נוזל או גז ומעבר חום מתוך העקרונות היסודיים של שימור מסה, תנע ואנרגיה. דבר זה יוביל אותנו למשוואות השולטות בזרימה של זורם. בנוסף יוצגו המשוואות השולטות עבור המודל הטורבולנטי  $k-\epsilon$ .

נתבונן בשדה הזרימה הכללי אשר מיוצג על ידי קווי הזרם בציור 2.10 ונדמיין נפח סגור אשר נמצא בתחום סופי של הזרימה. נפח זה מגדיר 'נפח בקרה'  $V$ , כאשר המעטפת הסגורה אשר תוחמת את הנפח הזו נקראת 'מעטפת בקרה'. במקרה הנוכחי נפח הבקרה קבוע במרחב בעוד שהזורם עובר דרכו. אם כן במקום להסתכל בכל שדה הזרימה בבת אחת, במודל של נפח בקרה אנו מגבילים את תשומת הלב שלנו רק לזורם בתחום הסופי של הנפח עצמו. משוואות הזרימה אשר נקבל באופן ישיר על ידי יישום של עקרונות פיסיקאליים בסיסיים על נפח בקרה הסופי, יהיו בצורה אינטגרלית וניתן על ידי מניפולציה לכתוב אותן גם בצורה של משוואה דיפרנציאלית חלקית.

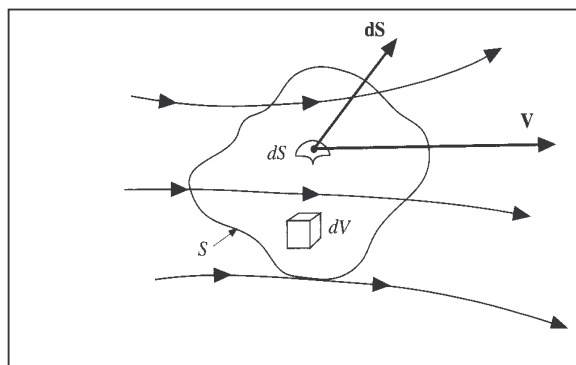




ציור a.2.10 נפח בקרה סופי קבוע במרחב, כאשר הזורם עובר דרכו. (Anderson, 1995).

### 2.2.1.1 משוואת הרציפות (שימור מסה)

העיקרון הפיסיקאלי המנחה אותנו בסעיף זה הינו חוק שימור המסה, אשר כתוצאה ממנו נקבל את משוואת הרציפות. נתבונן בציור b.2.10 אשר מראה באופן יותר מפורט את מה שראינו בציור a.2.10:



ציור b.2.10. נפח בקרה סופי קבוע במרחב (Anderson, 1995).

$\mathbf{V}$  הינה המהירות של נקודה כלשהי על מעטפת הבקרה  $\mathbf{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$ , ווקטור הניצב לאלמנט מעטפת  $dS$ ,  $dV$  הינו אלמנט נפחי בתוך נפח הבקרה הסופי. עיקרון שימור המסה אומר:

Net mass flow out of control volume through surface S	=	Time rate of decrease of mass inside control volume	
			(2.11)

האיבר השמאלי של משוואה 2.11 הופך להיות אינטגרל משטחי בגבול של מעטפת הבקרה:

$$\iint_S \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.12)$$

קצב השינוי (עלייה) בזמן של המסה בתוך  $V$  (איבר ימני):

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV \quad (2.13)$$

מכאן:

$$\iint_S \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{S} + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV = 0 \quad (2.14)$$

מאחר ונפח הבקרה שממנו נגזרה משוואה 2.14 קבוע בזמן אזי גבולות האינטגרציה הינם קבועים ולכן נגזרת הזמן  $\frac{\partial}{\partial t}$  יכולה

להיכנס לתוך האינטגרל:

$$\iint_S \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{S} + \iiint_V \frac{\partial}{\partial t} \rho dV = 0 \quad (2.15)$$

יישום של תיאוריית הדיברגנץ נותן אפשרות לבטא את האינטגרל המשטחי כאינטגרל נפחי:

$$\iint_S (\rho \mathbf{V}) \cdot d\mathbf{S} = \iiint_V \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) dV = 0 \quad (2.16)$$

מכאן:

$$\iiint_V \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) \right] dV = 0 \quad (2.17)$$

האפשרות היחידה שבה האינטגרל במשוואה 2.17 יהיה אפס, הינה שהאינטגרנד יהיה אפס בכל נקודה בתוך נפח הבקרה ולכן נקבל:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

(2.18)

אם כן משוואה 2.18 הינה משוואת הרציפות בצורה דיפרנציאלית חלקית. במהלך ההצגה של משוואת הרציפות ראינו שתי צורות של המשוואה: צורה אינטגרלית וצורה של משוואה דיפרנציאלית חלקית. הצורה האינטגרלית מאפשרת לנו נוכחות של אי רציפיות בתוך נפח הבקרה הקבוע (אין סיבה להניח אחרת), בעוד שהצורה הדיפרנציאלית מעצם הגדרתה אינה מאפשרת אי רציפיות. מסקנה זו מתחזקת כאשר ביצענו את המעבר בין שתי הצורות (מאינטגרלית לדיפרנציאלית) בעזרת תאוריית הדיברגנץ, אשר מניחה רציפות מתמטית. הטיעון מדוע להשתמש אם כן בצורה האינטגרלית מתבסס על היותה נשענת על יסודות חזקים יותר מאשר הצורה הדיפרנציאלית. הטיעון נהייה חזק אף יותר כאשר באים לחשב זרימה המכילה אי רציפות כמו גלי הלם למשל.

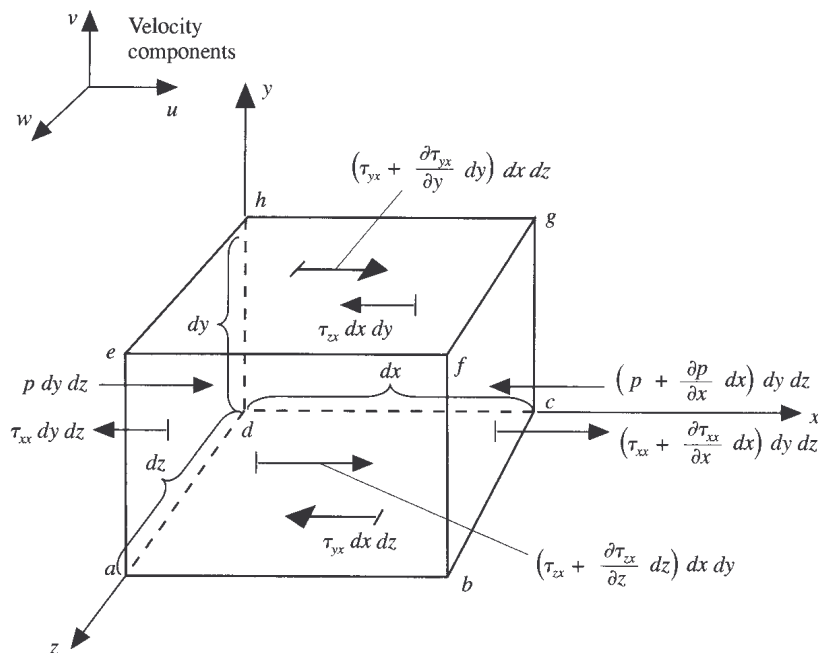
### 2.2.1.2 משוואת התנע

על מנת לפתח את משוואת התנע אנו צריכים ליישם חוק פסיקאלי יסודי שהוא:

$$F = ma \quad (2.19)$$

נתבונן באלמנט של הזורם הנע במרחב (ציור 2.11), כאשר רק הכוחות הפועלים עליו בכיוון  $x$  מוראים. בתחילה נסתכל על האגף השמאלי של משוואה 2.19, מקור הכוחות אשר פועלים על האלמנט (בכיוון  $x$ ):

- כוחות גוף, הפועלים באופן ישיר על המסה הנפחית של אלמנט הזורם. לדוגמה, גרביטציה וכוח חשמלי ומגנטי.
- כוחות פנים, הפועלים באופן ישיר על פני האלמנט. כוחות אלו נובעים מהלחץ שמפעילה הסביבה החיצונית של אלמנט הזורם על פניו ומפילוג המאמצים הנורמאליים ומאמצי הגזירה על פני האלמנט.



ציור 2.11. אלמנט זורם אינטיפיסימלי הנע במרחב. רק הכוחות המופעלים בכיוון  $x$  מוראים

(Anderson, 1995).

$\tau_{ij}$  מסמל את המאמץ בכיוון  $j$  המופעל על מישור הניצב לציר  $i$ .  $u, v, w$  הם רכיבי המהירות.

אם כן כוחות הגוף הפועלים על האלמנט בכיוון  $x$ :

$$\rho f_x (dx dy dz) \quad (2.20)$$

סך כל כוחות הפנים הפועלים על הגוף בכיוון  $x$ :

$$\begin{aligned} & \left[ P - \left( P + \frac{\partial P}{\partial x} dx \right) \right] dy dz \\ & + \left[ \left( \tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) - \tau_{xx} \right] dy dz + \left[ \left( \tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) - \tau_{yx} \right] dx dz \\ & + \left[ \left( \tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dx dy \end{aligned} \quad (2.21)$$

הכוח הכללי שפועל על האלמנט בכיוון  $x$ :

$$F_x = \left[ -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] dx dy dz + \rho f_x dx dy dz \quad (2.22)$$

כעת נתבונן באגף ימין של משוואה 2.19, המסה של אלמנט הזורם קבועה ושווה ל:

$$m = \rho dx dy dz \quad (2.23)$$

התאוצה הינה קצב השינוי בזמן של המהירות ולכן:

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (2.24)$$

כאשר  $\frac{D}{Dt}$  הינה הנגזרת החומרית ומשמעותה:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \quad (2.25)$$

לבסוף נקבל בכיוון  $x$ :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2.26)$$

בכיוון  $y$ :

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (2.27)$$

בכיוון  $z$ :

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2.28)$$

משוואות 2.26-2.28 הינן רכיבי משוואת התנע בצורה לא משמרת שכן הן ניגזרו מתוך אלמנט זורם אשר נע עם הזורם. את האיבר  $\rho f_i$  במשוואת התנע אשר מביא לידי ביטוי את כוחות הגוף ניתן גם לרשום בתור איבר מקור  $S_{mi}$  (source term). במקרים בהם יש תוספת של מקור מומנטום כמו במקרה של תווך נקבובי, יכלול האיבר  $S_{mi}$  גם את הביטוי עבור התרומה של התווך למומנטום כתוספת למשוואת הזרימה הסטנדרטיות. את הביטוי לכך נראה בפרק 4 של החקירה הנומריית.

### 2.2.1.3 משוואת האנרגיה

העיקרון הפועל הוא שימור של אנרגיה, אם ניישם את החוק הראשון של התרמודינאמיקה על אלמנט זורם אשר נע במרחב נקבל:

$$\begin{array}{l} \text{Rate of change} \\ \text{of energy inside} \\ \text{fluid element} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Net flux of} \\ \text{heat into} \\ \text{element} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Rate of work done on} \\ \text{element due to} \\ \text{body and surface forces} \end{array} \quad (2.29)$$

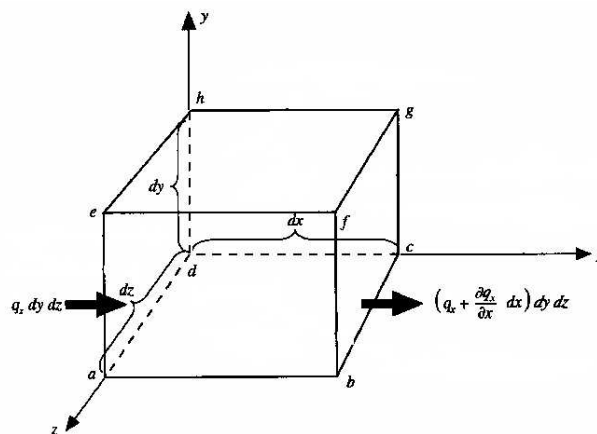
קצב העבודה אשר נעשית על אלמנט הזורם כתוצאה מכוחות שטח שווה למכפלה של הכוח ורכיב המהירות בכיוון הכוח. אם כן הכפלה של משוואה 2.21 ברכיב המהירות בכיוון  $x$  תיתן:

$$\left[ -\frac{\partial uP}{\partial x} + \frac{\partial u\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial u\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial u\tau_{zx}}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (2.30)$$

מכאן שסך כל העבודה אשר נעשית מכוחות פנים (שטח) על האלמנט בכיוון  $(x, y, z)$ :

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot (PV) + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.31)$$

בציור 2.12 ניתן לראות את הרכיבים של וקטור שטף החום בכיוון  $x$ :



ציור 2.12. רכיבי וקטור שטף החום (Anderson, 1995).

סך כל שטף החום אשר נכנס אל תוך האלמנט בכיוון  $x$  :

$$\left[ q_x - \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) \right] dydz \quad (2.32)$$

בכיוון  $y, z$  באופן דומה ומכאן שסך שטף החום אשר נכנס אל תוך האלמנט ליחידת נפח  $(dx dy dz)$  :

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} = -\nabla \cdot q \quad (2.33)$$

בעזרת חוק פורייה למעבר חום בהולכה נקשור את שטף החום לגרדיאנט הטמפרטורה:

$$q = -k \nabla T \quad (2.34)$$

כעת נעבור לאגף שמאל במשוואה 2.29, קצב שינוי האנרגיה בתוך האלמנט ליחידת נפח:

$$\rho \frac{DE}{Dt} \quad (2.35)$$

ומכאן משוואת האנרגיה הינה:

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (P\mathbf{V}) + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \nabla \cdot (\mathbf{k}\nabla T) + S_E \quad (2.36)$$

כאשר  $S_E$  הינו איבר מקור אנרגיה ליחידת נפח וליחידת זמן.

#### 2.2.1.4 מידול של זרימה טורבולנטית

מרבית בעיות הזרימה שנתקלים בהם מהנדסים בזמן עבודתם הינן בעלות אופי טורבולנטי. לפי

(Tennekes and Lumley, 1972) ניתן לאפיין זרימה טורבולנטית בתכונות הבאות:

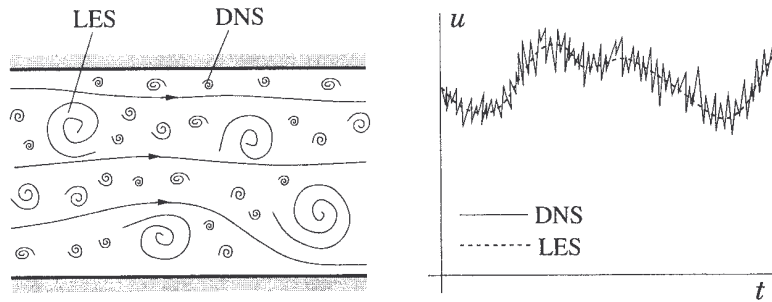
- **אי-רגולריות.** זרימה טורבולנטית הינה לא סדירה, רנדומאלית וכאוטית. הזרימה הינה בעלת סקאלות שונות (גודל ערבול) כאשר הערבולים הגדולים הינם מאותו סדר של גאומטריית הזרימה (למשל עובי שכבת הגבול). בצד השני של הספקטרום ישנם הערבולים הקטנים ביותר.
  - **דיפוזיביות.** בזרימה טורבולנטית הדיפוזיביות עולה. משמעות הדבר שקצב ההתפשטות של שכבות הגבול למשל, עולה ככל שהזרימה נהיית יותר טורבולנטית.
  - **מספרי ריינולדס גבוהים.** זרימה טורבולנטית מתרחשת במספרי ריינולדס גבוהים. לדוגמה, המעבר לזרימה טורבולנטית בצינורות מתרחש כאשר  $Re_D = 2300$ .
  - **תלת ממדיות.** זרימה טורבולנטית הינה תמיד תלת ממדית. אולם כאשר המשוואות ממוצעות על פי הזמן ניתן להתייחס לזרימה כדו-ממדית.
  - **דיסיפציה.** זרימה טורבולנטית הינה דיסיפטיבית כלאמר, אנרגיה קינטית הנמצאת בערבולים הקטנים הופכת לאנרגיה פנימית. הערבולים הקטנים מקבלים את האנרגיה הקינטית מערבולים מעט גדולים יותר אשר מקבלים את האנרגיה הקינטית מערבולים גדולים עוד יותר וכך הלאה. תהליך זה של העברת אנרגיה מהערבולים הגדולים ביותר לקטנים ביותר נקרא "cascade process".
  - **תווך רציף.** למרות שיש סקאלות קטנות בזרימה, הן הרבה יותר גדולות מהסקאלה המולקולרית ולכן ניתן להתייחס לזרימה כרציפה.
- כדי למדל זרימה טורבולנטית בעזרת מחשב ישנן מספר דרכים וגישות כיצד לבצע זאת. השיטות הנומריות וגישות שונות בפתרון של זרימה טורבולנטית הנפוצות לפי (Ferziger, 2002; Shaw, 1992) הן:
- **Direct Numerical Simulation (DNS),** השיטה המדויקת ביותר לסימולציה של זרימה טורבולנטית הינה לפתור את משוואות הזרימה מבלי למצע או לעשות הערכה כלשהיא מלבד דיסקריטיזציה נומרית אשר את שגיאותיה ניתן להעריך ולפקח. בסימולציות מהסוג הזה, כל התזוזות בזרימה נכללות ונפתרות. בסימולציה נומרית ישירה, על מנת להבטיח שכל המבנה הטורבולנטי נכלל, התחום שעליו מבוצע החישוב חייב להיות גדול לפחות כמו המודל הפיסיקאלי או כמו הערבול הגדול ביותר. סימולציה מלאה צריכה גם לכלול את כל אנרגיית הדיסיפציה הקינטית. דבר זה קורה בסקאלות הקטנות ביותר, אלו אשר בהן הצמיגות היא הדומיננטית, לכן גודל הרשת חייב להיות קטן מאותה סקאלה (הנקבעת מתוך הצמיגות) ונקראת סקאלת קולמוגורוב. מאחר ומספר נקודות הרשת אשר משמשות לחישוב הינו מוגבל, לפי מהירות המעבד וכמות הזיכרון במחשב נתון, DNS הינו אפשרי רק במספרי ריינולדס נמוכים ובתחום גיאומטרי פשוט. לדוגמה עבור טורבולנציה איזוטרופית אחידה שהינה הפשוטה ביותר, מספר נקודות הרשת בכל כיוון חייב להיות לפחות  $L/\eta$ , ניתן להראות (Tennekes and Lumley, 1976) שהיחס הזה הינו פרופורציונאלי ל:



$$L/\eta \propto \text{Re}_L^{3/4} \quad (2.37)$$

L - הינו גודל הסקאלה האינטגרלית אשר מאפיין את הערבולים הגדולים ביותר.

- **Large Eddy Simulation (LES)**, זרימה טורבולנטית מכילה בתוכה טווח נרחב של סקאלות אורך וזמן. סקאלות התנועה הגדולות הינן הרבה יותר אנרגטיות מאלו הקטנות, גודלן וכוחן הופך אותן ליותר אפקטיביות בהעברה של התכונות המשמרות. הסקאלות הקטנות בדרך כלל יותר חלשות ומעבירות בצורה מועטה את התכונות הללו. סימולציה אשר מתייחסת לערבולים הגדולים בצורה יותר מדוייקת מאשר לקטנים הינה אם כן בעלת הגיון וקוראים לה LES. מבחינת משאבי מחשב שיטה זו הינה פחות יקרה מ-DNS ועדיפה לשימוש כאשר מספר ריינולדס הינו גבוה והגאומטרייה של הבעיה הפיזית מורכבת מדי.



ציור 2.13. הצגה סכמטית של תנועה טורבולנטית (משמאל) ותלות של רכיב מהירות בזמן בנקודה (ימין)

(Ferziger, 2002).

בציור 2.13 ניתן לראות באופן סכמטי את טווח גודל הערבולים שניתן למצוא בזרימה (צד שמאל), בצד ימין של הציור רואים את היסטוריית הזמן של רכיב מהירות טיפוסי בנקודה מסוימת בזרימה.

- **RANS Models**, בדרך כלל כאשר אנו רוצים לנתח בעייה המערבת זרימה טורבולנטית אנו מעוניינים לדעת אך ורק מספר מוגבל של ערכים כמותיים, כמו למשל את הכוחות הממוצעים או את פילוג הכוחות אשר פועלים על גוף. אחת השיטות לפתרון הנדסי של בעייה הינה Reynolds-Averaged Navier-Stokes אשר קרויה ומתבססת על רעיונותיו של Osborne Reynolds. בגישה זו לטורבולנציה, כל אי יציבות עוברת תהליך של מיצוע, כלומר ההתייחסות לאי היציבות הינה כחלק בלתי נפרד מתוך הטורבולנציה. בזמן תהליך המיצוע נוצרים ביטויים מתוך משוואות Navier-Stokes אשר חייבים לעבור מידול מכיוון שאינם ניתנים לפתרון אנליטי. באופן מתמטי ניתן לתאר את רכיב המהירות  $u$  כ:

$$u = \bar{U} + u' \quad (2.38)$$

כאשר  $\bar{U}$  הינה המהירות הממוצעת ו  $u'$  הינו הרכיב הרנדומלי התונד. נתבונן במשוואת התנע עבור אלמנט דו ממדי מלבני של הזורם, כאשר ההנחה היא שהזרימה הינה בלתי דחיסה ואין כוחות גוף (בכיוון  $x$ ):

$$\rho \frac{\partial(u)}{\partial t} + \rho u \frac{\partial(u)}{\partial x} + \rho v \frac{\partial(u)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.39)$$

כעת נציב את משוואה 2.38 בתוך משוואה 2.39 ונקבל:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial(\bar{U})}{\partial t} + \rho \bar{U} \frac{\partial(\bar{U})}{\partial x} + \rho \bar{V} \frac{\partial(\bar{U})}{\partial y} \\ = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right) - \overline{\rho \frac{\partial u'^2}{\partial x}} - \overline{\rho \frac{\partial u'v'}{\partial y}} \end{aligned} \quad (2.40)$$

שני האברים האחרונים במשוואה 2.40 (אגף ימין) ידועים בתור מאמצי ריינולדס. אברים נוספים אלו אינם ניתנים לפיתרון אנליטי ולכן עוברים מידול על מנת לקחת בחשבון את הטורבולנציה. אחת הדרכים על מנת לפשט את מאמצי ריינולדס הינה להתייחס אליהם כמאמצי צמיגות אשר נוצרים כתוצאה מהטורבולנציה שבזרימה. לצורך כך מבטאים את המאמצים בצורה דומה למאמצי הצמיגות ממשוואת התנע (ביטוי 2.41):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_T \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_T \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right) \quad (2.41)$$

$\mu_T$  צמיגות נוספת כתוצאה מטורבולנציה (צמיגות הערבול). הצבה של ביטוי 2.41 בתוך משוואה 2.40 תיתן:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial(\bar{U})}{\partial t} + \rho \bar{U} \frac{\partial(\bar{U})}{\partial x} + \rho \bar{V} \frac{\partial(\bar{U})}{\partial y} \\ = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( (\mu + \mu_T) \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\mu + \mu_T) \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2.42)$$

משוואה 2.42 זהה למשוואת התנע 2.39 בתוספת צמיגות טורבולנטית, מציאה של הצמיגות הטורבולנטית מתוך שאר המשתנים של הזרימה תיתן את האפשרות להשלים את תהליך המידול של הטורבולנציה.

אחד המודלים הנפוצים ביותר ואשר נעשה בו שימוש רב בספרות ובסימולציות של CFD הינו מודל  $k - \varepsilon$  הידוע אשר בעזרתו ניתן למצוא את צמיגות הערבול. צמיגות הערבול במודל זה נתונה באופן אמפירי על ידי התלות באנרגיה הקינטית הטורבולנטית וקצב הדיסיפציה:

$$\mu_T = \rho C_\mu \sqrt{k} L = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.43)$$

$C_\mu$  קבוע של המודל.

משוואות ההסעה עבור  $k$  ו  $\varepsilon$  ניתן להציג כך (Fluent User's guide):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k \bar{U}) = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \varepsilon \bar{U}) = & \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2.45)$$

$G_k$  מייצג את הייצור של אנרגיה קינטית טורבולנטית כתוצאה מגרידאנטים של מהירות,  $G_b$  מייצג את הייצור של אנרגיה קינטית טורבולנטית כתוצאה מכוחות ציפה,  $Y_M$  מייצג את השפעת הדחיסות על הטורבולנציה (זניח כאשר הזרימה איננה דחיסה).  $C_{3\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{1\varepsilon}$  הינם קבועים.  $\sigma_k$  ו  $\sigma_\varepsilon$  הינם מספרי פרנדטל הטורבולנטיים עבור  $k$  ו  $\varepsilon$  בהתאמה.  $S_k$   $S_\varepsilon$  הינם אברי מקור המוגדרים בידי המשתמש.

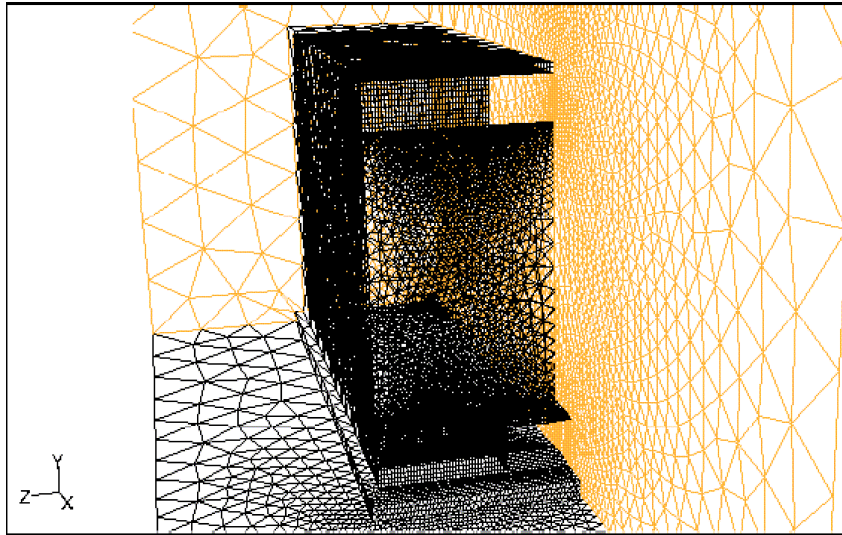
קבועי המודל  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  הינם בעלי הערכים:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (2.46)$$

ערכי ברירת המחדל הללו נקבעו מניסויים עם אוויר ומים ונמצא שהם עובדים בצורה די טובה עבור קשת רחבה של בעיות אשר תחומות בידי קירות או זרימות גזירות חופשיות.

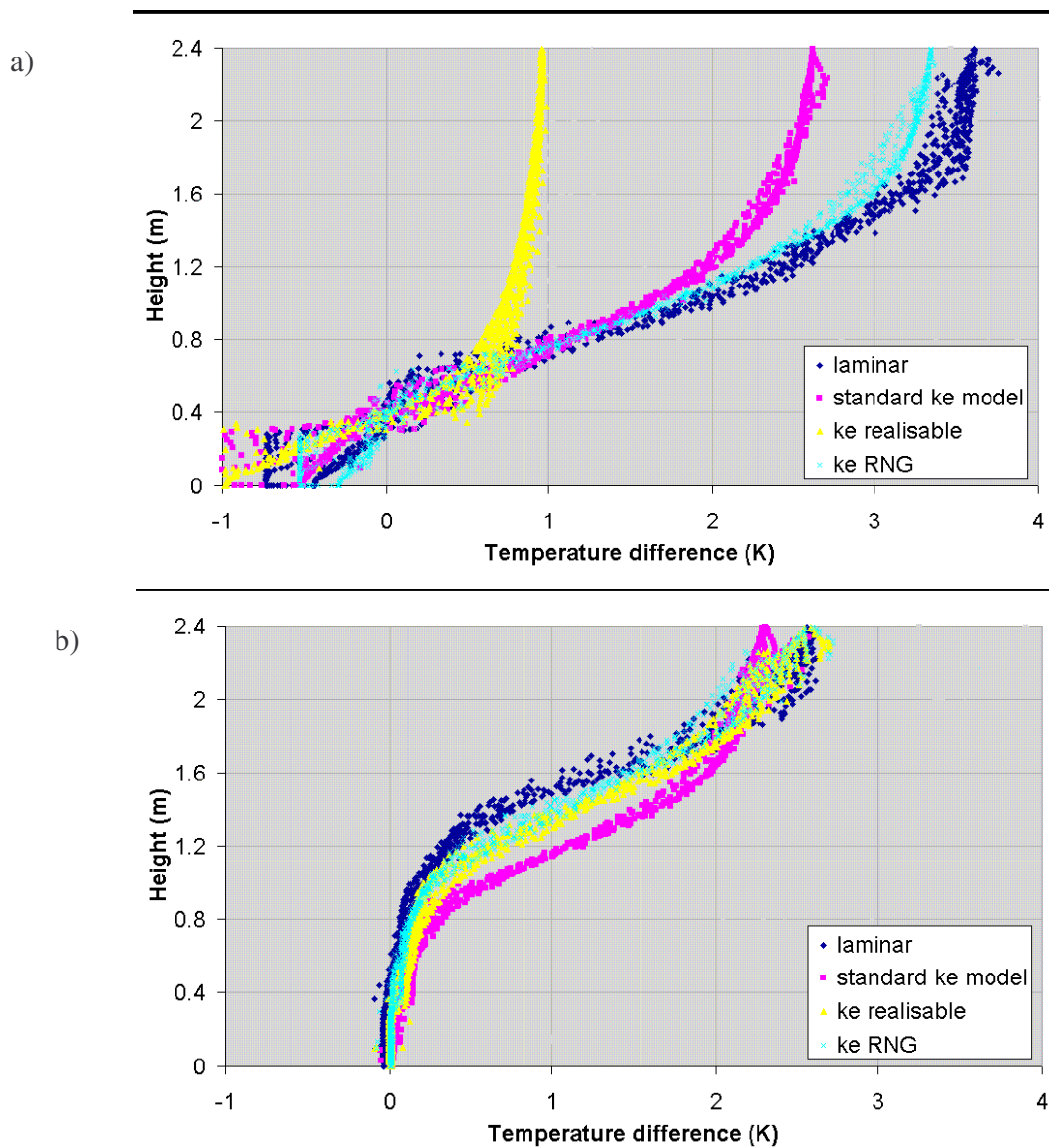
### 2.3 דוגמאות לשימוש ב-CFD בספרות

דוגמא אחת לשימוש ב-CFD היא עבודתם של Howell & Potts (2002). הרשת הנומרית בסימולציה הכילה 150,000 תאים חישוביים, כפי שניתן לראות באיור מס' 2.14. כמודל בסימולציה נומרית נבחר חדר ניסויים בתוך אולם גדול אשר מאפשר להזניח צורך בהתייחסות מיוחדת אל תנאי הגבול באזור הפתחים של חדר הניסויים. עקב סימטריה מישורית לאורך צירים  $x$  ו- $z$  רק רבע מהחדר נלקח בחשבון במודל הנומרי. חישובים נומריים בסימולציה כללו גם האפקט הקרינתי על קירות החדר – פני השטח של הקירות היו בעלי כושר קליטה של 0.85. מספר מודלים טורבולנטיים מסוג  $k-\epsilon$  שימשו כבסיס בחישובים נומריים בעבודה זו.



איור 2.14. רשת נומרית בסימולציה, Howell & Potts (2002).

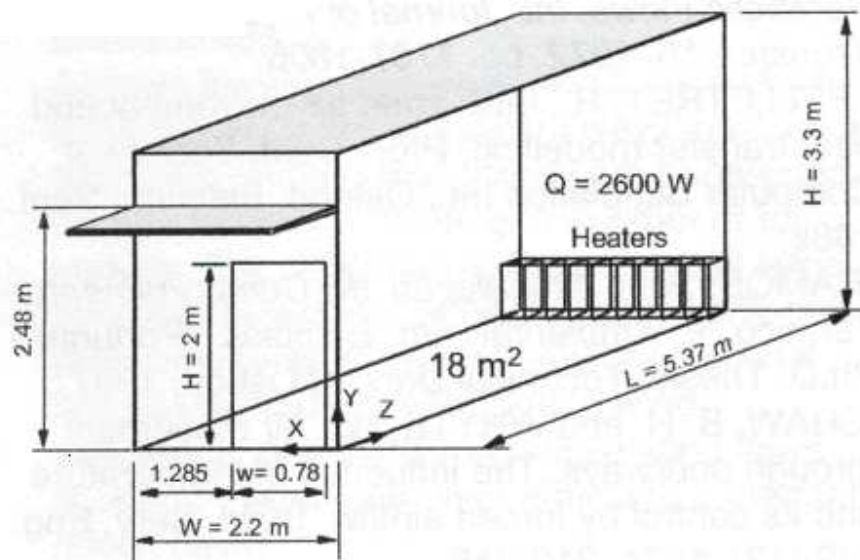
תוצאות הסימולציה באווור דחיקה עבור שני שטחים אפקטיביים של פתחי אוורור שונים ניתן לראות באיור מס' 2.15. כל קו בגרפים הנ"ל מייצג מודל טורבולנטי אחר עבור ריבוד הטמפרטורה הנבנה בתוך חדר הניסויים. תוצאות הסימולציה עבור פתח קטן ( $A^*=0.18$ ) מראות גרדיאנט טמפרטורה חזק וקבוע באזור התחתון של החדר, כאשר באזור העליון הוא משתנה וקטן בהדרגה. הגובה בו הגרדיאנט מתחיל להשתנות תואם את הניסויים באותה עבודת מחקר. לעומת זאת, עבור פתח גדול ( $A^*=0.48$ ) התוצאות מראות כי באזור התחתון הפרש הטמפרטורה כמעט קבוע עם הגובה, באזור האמצעי הגרדיאנט גדל בצורה הדרגתית ובאזור עליון שוב מתמתן.



איור 2.15. פרופילי טמפרטורה שהתקבלו מסימולציה נומרית בחתך Y-Z, עבור מודלים טורבולנטיים שונים, Potts (2002) & (a) -  $A^*=0.18$  - (b) -  $A^*=0.48$ .

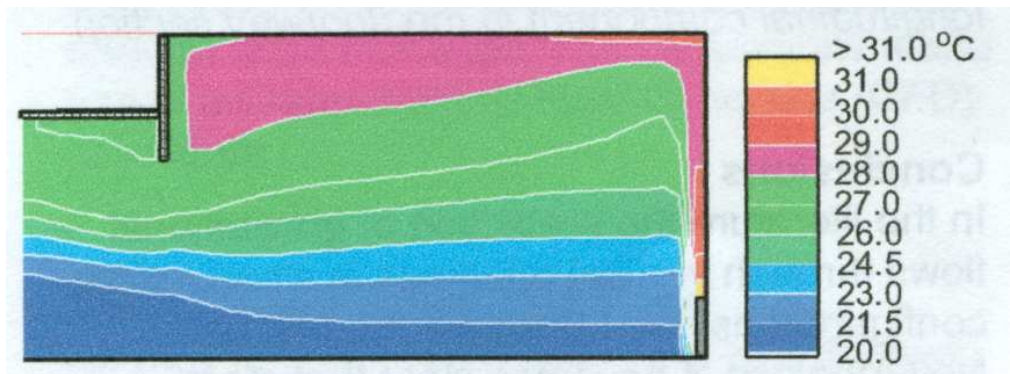
דוגמה נוספת היא עבודתו של Ramos *et al.*, (2002). המשוואות המתארות את תנועת הזרם ומעבר החום בתוך החלל הפנימי היו מבוססות על שימור מסה, מומנטום ואנרגיה תרמית בתוך החלל הפנימי של המודל. כיוון שברוב המקרים הזרימה דרך הפתחים טורבולנטית, מודל k-ε נראה הכי מתאים וגם הכי שימושי בסוג כזה של סימולציה נומרית. מאחר והבדלי הטמפרטורה בתוך החדרים קטנים יחסית לטמפרטורה מוחלטת (סקאלת Kelvin) ניתן להשתמש בקירוב Boussinesq. הצפיפות מיוצגת ע"י משוואת המצב ומשוואות ראשיות מיוצגות ע"י משוואת הרציפות, משוואות נוייה-סטוקס הלא דחיסות, משוואת שימור האנרגיה, משוואת שימור האנרגיה הטרובולנטית וקצב דיסיפציה של אנרגיה הטרובולנטית.

הבעיה בתנאי גבול בחישובים נומרניים הייתה שכאן מעבר חום בקירות משולב – בשונה מבעיית הסעה-הולכה, כאן הבעיה מוגדרת כשילוב של הסעה, הולכה וקרנה, מה שהפך את החישובים הנומריים להרבה יותר מסובכים ומורכבים. מטעמי חיסכון במשאבים תחום החישובים לא כלל את כל הסביבה החיצונית של החדר. הזרימה הייתה מקושרת לתנאי הסביבה ע"י שימוש בגבולות חופשיים – גבולות לא פיסיקליים, אך תוחמים את החישובים בגבולות בהם הלחצים ידועים. כמו כן נערכו ניסויים בתא בודד (איור מס' 2.16) על מנת להשוותם עם סימולציה נומרית. בתוך התא, ליד אחד הקירות הוצבו 4 מחממים, אשר שימשו כמקור חום, בהספקים שונים – 2600 וואט סך הכול. בניסויים נערכו מדידות טמפרטורה ומהירות זרימת האוויר.



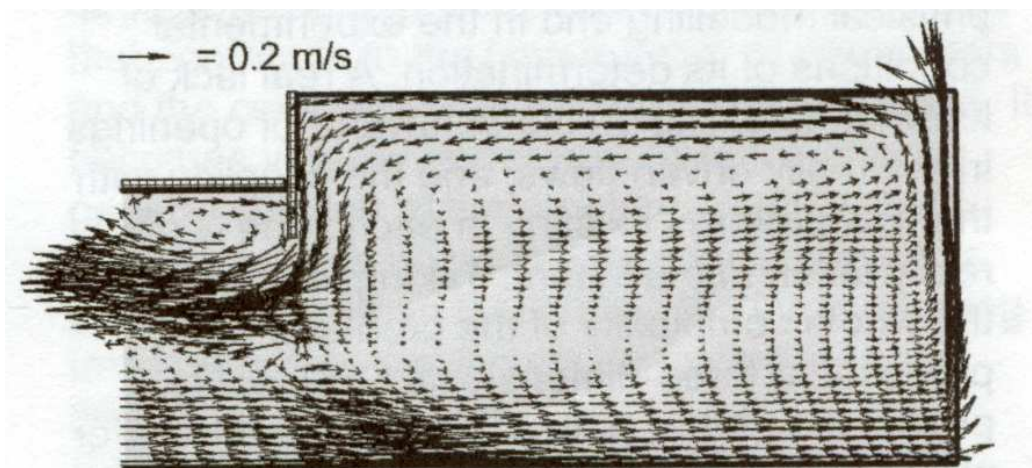
איור 2.16. תיאור סכימתי של תא ניסויים, (Ramos *et al.*, (2002).

באיור מס' 2.17 רואים את פילוג הטמפרטורה בתוך החדר אשר התקבל בסימולציה נומרית. ניתן לראות בבירור את הריבוד הנבנה בתוך החדר כתוצאה מהפעלת מקורות חום פנימיים הצמודים לקיר.



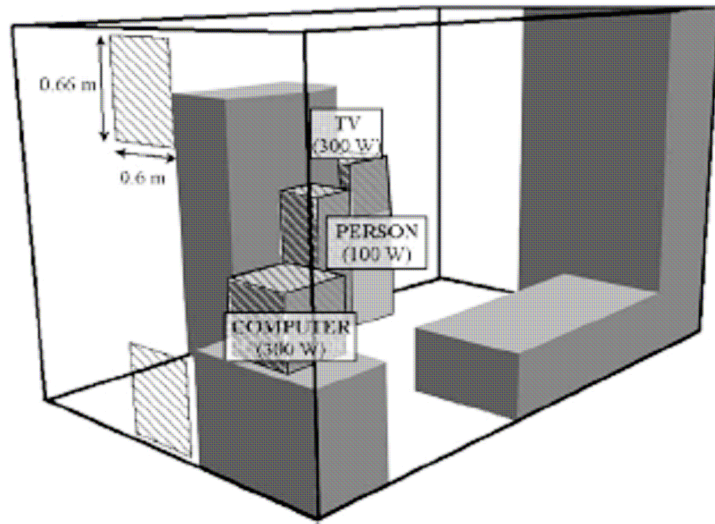
איור 2.17 . פילוג טמפרטורה בתוך החדר לאורכו בחתך אמצעי Y-Z - סימולציה נומרית, Ramos *et al.*, (2002).

באיור מס' 2.18 מופיעה תוצאת הסימולציה הנומרית עבור שדה הזרימה בתוך החדר ודרך הפתח. ניתן לראות שכניסת אוויר מתרחשת דרך האזור התחתון של הפתח, ויציאתו דרך האזור העליון.



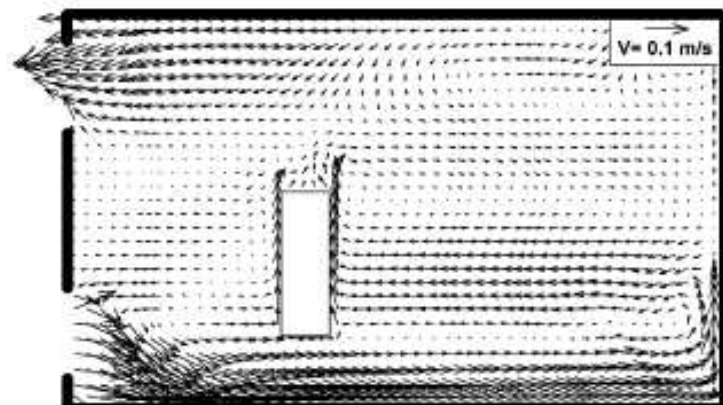
איור 2.18. מהירות האוויר הממוצעת במישור אמצעי Y-Z בתוך התא ובפתח האוויר, Ramos *et al.*, (2002).

בעבודה של Alloca *et al.*, (2002) כמודל בסימולציה נומרית נבחר חדר ניסויים באיור 2.19 בגודל  $2.9\text{m} \times 2.8\text{m} \times 4.7\text{m}$ , עם מקור חום: מחשב –  $W 300$ , טלוויזיה –  $W 300$ , ובן אדם –  $W 100$ . חישובים נומריים בסימולציה כללו גם האפקט הקרינתי על קירות החדר. כיוון שברוב המקרים הזרימה דרך הפתחים טורבולנטית, השתמשו במודל  $k-\epsilon$ .



איור 2.19- חדר ניסויים לאוורור חד צדדי.

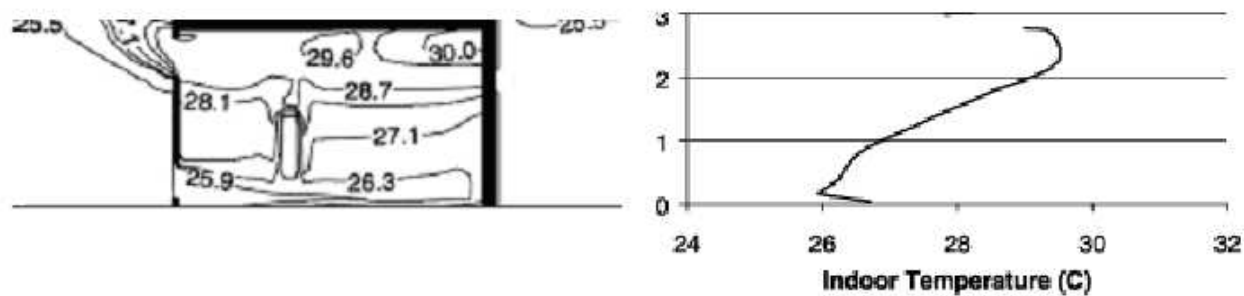
באיור מס' 2.20 מופיעה תוצאת הסימולציה הנומרית עבור שדה ווקטורי של המהירות בתוך החדר ודרך הפתחים. ניתן לראות שכניסת אוויר מתרחשת דרך הפתח התחתון, ויציאתו דרך הפתח העליון.



איור 2.20- שדה ווקטורי של המהירות בתוך החדר במישור המרכזי.



באיור 2.21 ניתן לראות תוצאת הסימולציה הנומרית עבור התפלגות הטמפרטורה בחדר במישור המרכזי.



(א)

(ב)

איור 2.21- א) - התפלגות הטמפרטורה בחדר במישור המרכזי, (ב) - הפרופיל האנכי של הטמפרטורה בחדר.

### 3. תיאור המבנה

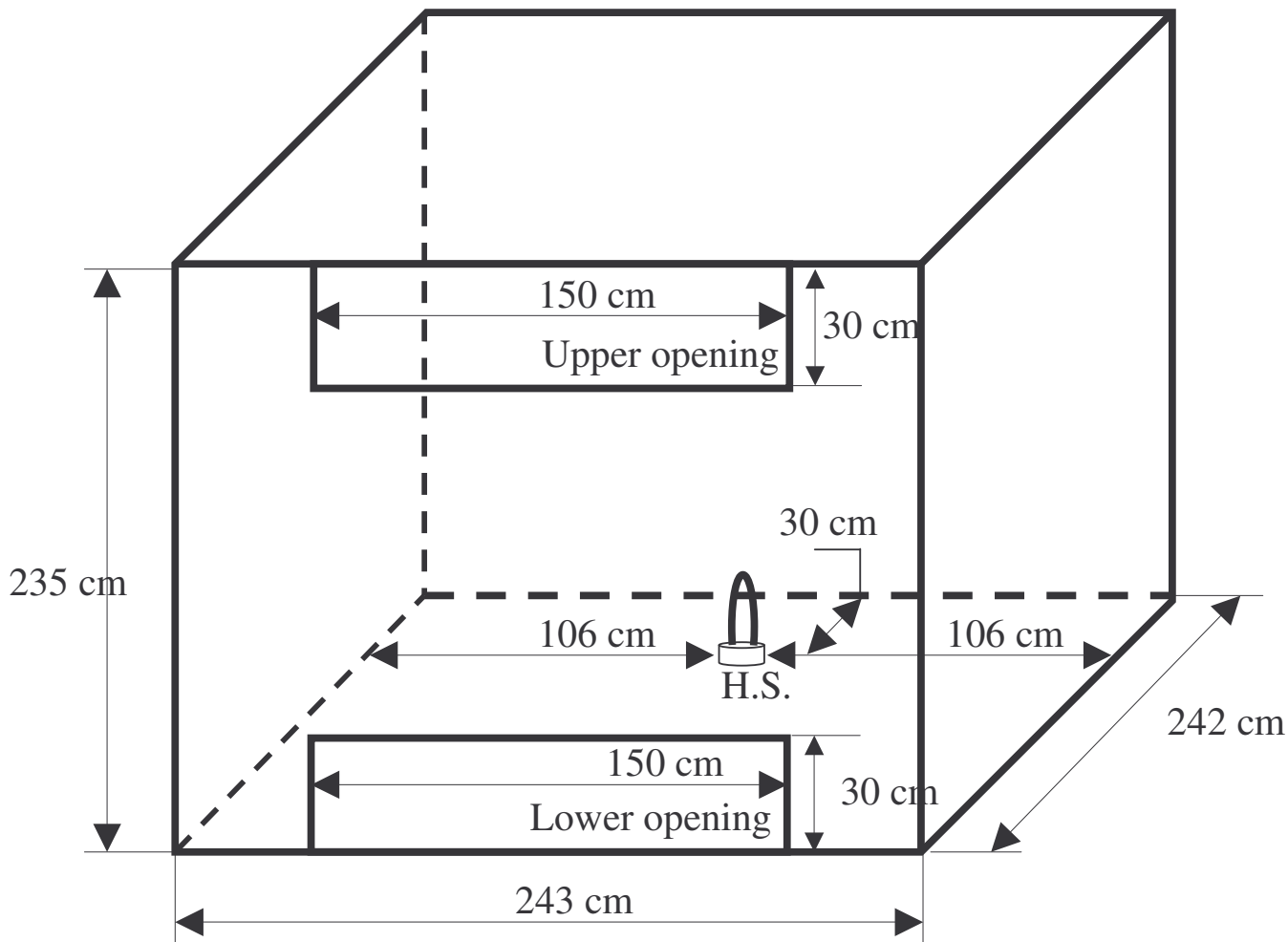
בפרק זה של העבודה יובא תיאור מלא של המבנה אשר בהן התבצעו ניסויים. כמו כן יתווסף תיאור סכמתי של המבנה. בהמשך יוצג החישוב הנומרי שנעשה בהתאמה מלאה למערכת הניסוי.

הניסויים נערכו במבנה (תא אוורור) עם אורך, רוחב וגובה של 243, 242 ו- 235 ס"מ בהתאמה (איור מס' 3.1), העשוי ממסגרת של פרופילי ברזל. הקירות בנויים מלוחות עץ בעובי 1 ס"מ המבודדות תרמית בעזרת לוחות קלקר בעובי 5 ס"מ. הבידוד התרמי נועד למנוע איבודי חום דרך הקירות ולקרר את המבנה לתנאים אדיאבטיים. הקיר הקדמי כלל שני חלונות אנכיים (עליון ותחתון). הפתחים הם ברוחב 150 ס"מ וגובהם נע בין 0 ס"מ (מצב סגור) לבין 30 ס"מ (פתיחה מכסימלית). החלון התחתון היה מצויד במנגנון חשמלי על מנת לאפשר הרמה או הורדה מבוקרת של החלון וע"י כך הקטנת/הגדלת השטח של הפתח. החדר הוצב באולם גדול (15 מ' אורך, 13 מ' רוחב ו- 5 מ' גובה) וזאת בכדי לאפשר החלפת אוויר ללא הפרעות בין המבנה והסביבה, וכדי למזער השפעות לא מבוקרות של רוח חיצונית וקרינת שמש.

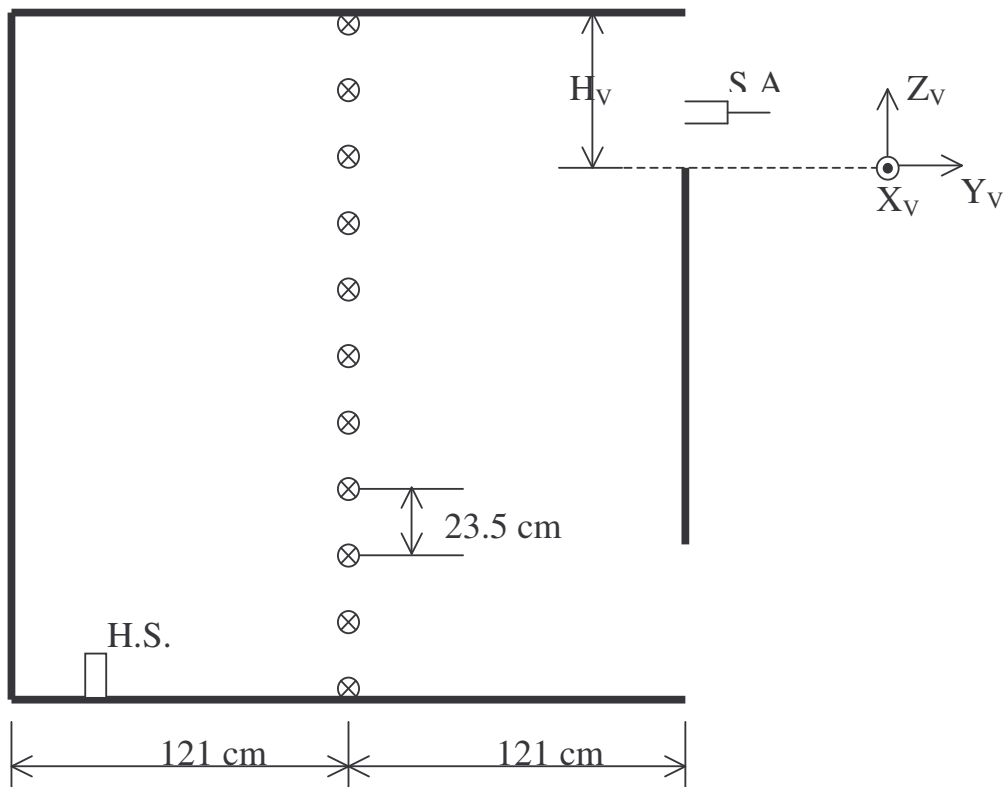
בתוך החדר הותקן גוף חימום חשמלי בצורת צינור U, ומידותיו: 33 ס"מ גובה ו- 0.8 ס"מ קוטר. הוא הוצב בצורה אנכית על רצפת החדר, בערך 210 ס"מ מהקיר הקדמי עם הפתחים במרחק שווה מהקירות הצדדיים (איור מס' 24). ההספק של גוף החימום היה 500 וואט.

11 חיישנים מסוג צמד תרמי (thermocouples), העשויים מנחושת-קונסטנטן (סוג T, דיוק של  $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$ , קוטר הצומת בערך 0.25 מ"מ, קבוע הזמן 1.5 שניות), מדדו את פילוג הטמפרטורה האנכי במרכז החדר (איור מס' 3.2). הטמפרטורה מחוץ לחדר, באולם הניסויים הגדול (סביבה) נמדדה ע"י 6 צמדים תרמיים נוספים מאותו סוג המותקנים בשני צידי הקיר הקדמי בחלקו החיצוני. בכל פינה היו פרוסים לגובה 3 צמדים תרמיים. אוגר נתונים (דגם CR21X, מתוצרת Campbell Sci. USA) דגם קריאות של צמדים תרמיים כל שתי שניות. הפרשי טמפרטורה בין פנים החדר לסביבה חושבו ע"י מיצוע הקריאות של 6 צמדים תרמיים חיצוניים וחיסורה של הטמפרטורה הממוצעת הזו מקריאתם של כל אחד ואחד מצמדים התרמיים הפנימיים. כל חיישני הטמפרטורה היו מצופים זהב למניעת השפעות קרינה ישירה על המדידות.

מכיוון שגוף החימום הנ"ל פולט קרינה תרמית בעוצמה גבוהה (במיוחד בהספקים גבוהים), השפעתו על התהליך ניכרת במידה רבה במספר היבטים עיקריים: חלק מן האנרגיה של מקור חום זה "מתבזבזת" על חימום לא רצוי של הקירות ע"י קרינה תרמית וכתוצאה מכך כל מערכת הניסוי מגיעה למצב המתמיד אחרי זמן רב מרגע הפעלת החימום עקב מסה תרמית גבוהה של הקירות. בנוסף, כתוצאה מחימום הקירות ופריטים נוספים הנמצאים בתוך החדר כמו חיישני טמפרטורה או חוטי תרמוקפלים, נוצרת בחדר זרימת הסעה טבעית משנית מפריטים אלו ולא ניתן לומר כי החדר מאופיין ע"י מקור חום נקודתי יחיד. לפיכך הייתה חשיבות רבה למזעור חימום הקירות והפריטים הנוספים ע"י קרינה ישירה מגף החימום. על מנת למנוע את האפקט של קרינה תרמית הנפלטת מגוף החימום, כל הקירות הפנימיים (כולל ריצפה ותקרה), הכבלים החשמליים בתוך המבנה, חוטים של צמדים תרמיים וגוף החימום צופו ברדיד אלומיניום.

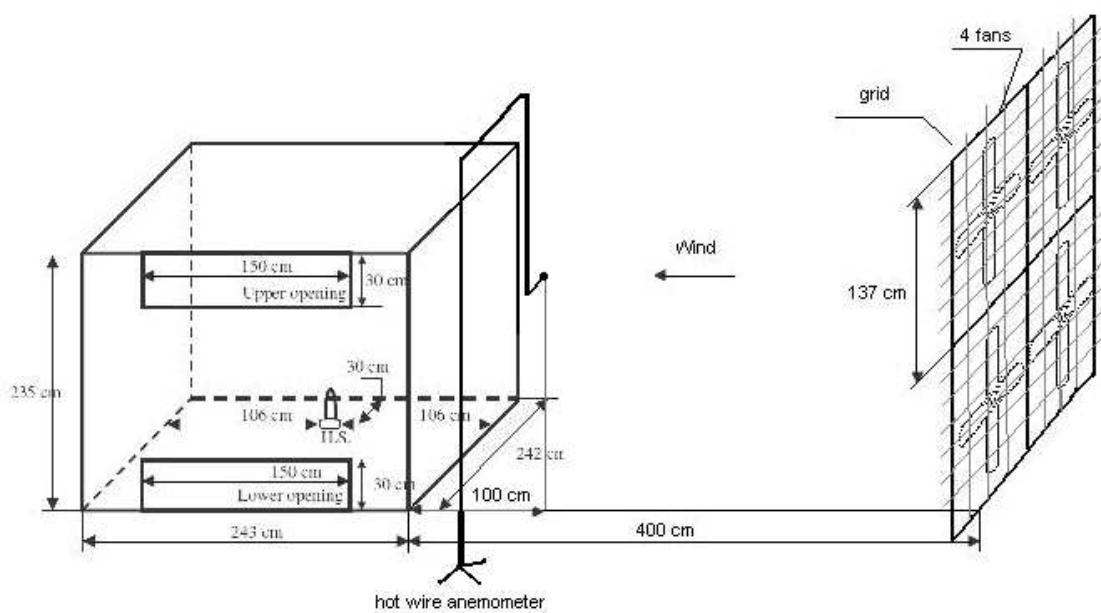


איור 3.1. חדר הניסויים - מידות כלליות.



איור 3.2. פריסת חיישני טמפרטורה ( $\otimes$ ) לגובה בתוך החדר ו.H.S. – מקור חום.

סימולציה של רוח בוצעה באמצעות הפעלת מאווררים ומקור חום (מקור כוח ציפה) בו זמנית. האוויר יוצר על ידי גנרטור של רוח שמורכב מ- 4 מאווררים בגודל 1.37 m מסודרים במטריצה 2x2 (איור - 3.3). המהירות הסיבובית של המאוורר מבוקרת על ידי בקר משתנה תדר. כדי ליצור זרימת אוויר הומוגנית הייתה ממוקמת רשת עשויה מצינורות פוליווינילכלוריד (PVC) בקוטר 5 סמ'. גנרטור של רוח הוצב כ- 4 מ' מהחדר עם כיוון של זרימת אוויר במקביל למישור הפתחים. בזמן מדידת מהירות הרוח שנוצרה על ידי מאווררים, נתברר שהמהירות לא הייתה אחידה. לכן בכל הניסויים מד רוח ( Model 8745, TSI hot wire anemometer ) היה ממוקם במרחק 1 מ' מהחדר במעלה הזרימה, בגובה של החלון העליון (איור - 3.3).



איור 3.3- גנרטור של רוח מ- 4 מאווררים (צד ימין), מד מהירות הרוח (אמצע) וחדר ניסויים (צד שמאל). כיוון הרוח מימין לשמאל.

## 4. הקירה נומרית

בפרק 2 הוצגו משוואות הזרימה בצורתן הכללית, מהן ניתן לפתח את המודלים הרלוונטיים. בפרק הנוכחי תובא הצגה פרטנית עבור סכימה נומרית של נפחים סופיים אשר משמשת את תוכנת Fluent לצורך דיסקריטיזציה של משוואות הזרימה, כפי שמוצג בספרות: Patankar (1981) ו-Versteeg and Malalaskera (1995). כמו כן בחלקו השני של הפרק יוצגו המודלים הנומריים אשר שימשו לצורך החישובים.

### 4.1. משוואות הזרימה

במהלך החלק הראשון של פרק החקירה הנומרית יוצגו משוואות הזרימה (מסה, מומנטום, אנרגיה) בצורתן המשמרת עבור מודל של זורם ניוטוני, בצורה כזאת שיהיה נוח לפתח ממנה את הסכימה של נפחים סופיים.

#### 4.1.1 משוואות הזרימה עבור זורם ניוטוני

לצורך הנוחות אציג פעם נוספת את משוואות הרציפות מפרק 2:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (2.18)$$

את משוואות נבייה סטוקס בכיוון  $x, y, z$  עבור זורם ניוטוני ניתן להציג באופן הבא:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{V}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) \quad (4.3)$$

ניתן להציג את משוואות האנרגיה הפנימית (אנרגיה תרמית) באופן הבא:

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho i \mathbf{V}) = -P \nabla \cdot \mathbf{V} + \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) + \Phi + S_i \quad (4.4)$$

$\Phi$  הינה פונקציית הדיסיפציה אשר כוללת בתוכה את האפקט של מאמצי הצמיגות,  $S_i$  הינו איבר מקור האנרגיה,  $i$  אנרגיה פנימית.

משוואת האנרגיה בצורתה הכללית ביותר נתונה בפרק 2 (משוואה 2.36). האנרגיה הסגולית  $E$  של זורם מוגדרת כסכום של האנרגיה הפנימית (אנרגיה תרמית), אנרגיה קינטית ואנרגיה פוטנציאלית. מטרת ההצגה הנוכחית של משוואת האנרגיה הינה למצוא ביטוי לאנרגיה התרמית תוך כדי כך שהתרומה של החלק הפוטנציאלי תילקח בחשבון בתור איבר מקור. את התרומה של האנרגיה הקינטית למשוואת האנרגיה ניתן למצוא על ידי הכפלה של משוואות המומנטום (משוואות 2.26-2.28) ברכיבי ווקטור המהירות  $u, v, w$  בהתאמה. לאחר ביצוע ההכפלה מתקבלת משוואה חדשה אשר אותה מחסרים ממשוואת האנרגיה הכללית (2.36) ולבסוף מתקבלת משוואה 4.4 עבור האנרגיה התרמית כאשר איבר המקור  $S_i$  החדש בעצם מתקבל מהחסרת איבר המקור של משוואת האנרגיה הקינטית מאיבר המקור במשוואת האנרגיה הכללית.

#### 4.1.2 סכימה נומרית של נפחים סופיים

אם ניזכר בהצגה של משוואות 2.18 ו- 4.4-4.1 אזי ניתן לכתוב אותן עבור משתנה  $\phi$  כלשהו:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\mathbf{V}) = \nabla \cdot (I\nabla\phi) + S_\phi \quad (4.10)$$

משוואה 4.10 נקראת משוואת ההסעה עבור משתנה  $\phi$ ,  $I$  הינו מקדם הדיפוזיה. במילים ניתן לכתוב:

- האיבר הראשון באגף שמאל, קצב השינוי של  $\phi$ .
- האיבר השני באגף שמאל, איבר ההסעה.
- האיבר הראשון באגף ימין, איבר הדיפוזיביות.
- האיבר השני באגף ימין, איבר המקור.

איבר המקור מכיל בתוכו את כל אותם האברים אשר אינם משותפים לכל המשוואות (מסה, מומנטום, תנע).

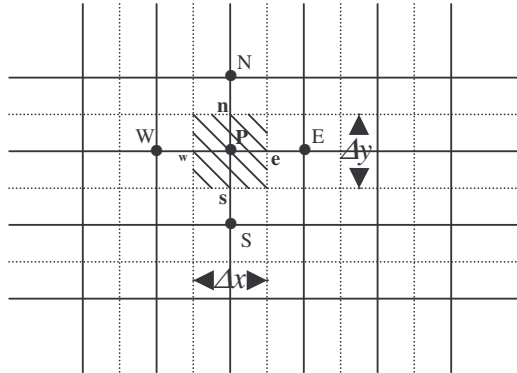
משוואת ההסעה 4.10 משמשת אותנו בתור נקודת התחלה לשם תהליכי חישוב בשיטת הנפחים הסופיים בה משתמשת תוכנת Fluent. במקרה הכללי ביותר (מודל תלת ממדי) עבור מצב מתמיד בזמן פותרת התוכנה את משוואת ההסעה 4.10 בצורתה האינטגרלית עבור נפח בקרה  $V$  באופן הבא:

$$\int_{CV} \nabla \cdot (\rho\phi\mathbf{V}) dV = \int_{CV} \nabla \cdot (I\nabla\phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (4.11)$$

משוואה 4.11 מיושמת עבור כל נפח בקרה בתחום החישובי.

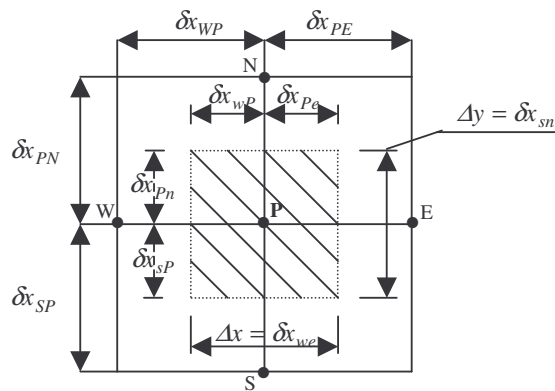
על מנת להציג את השיטה בצורה מפורטת יותר ניישם את סכימת הנפחים הסופיים (נפח בקרה) על ידי אינטגרציה של המשוואות על תחום דו ממדי ובמצב המתמיד.

נתבונן בציור הבא שבו רואים חלק מרשת נומרית דו ממדית אשר משמשת עבור הדיסקריטיזציה:



ציור 4.1. חלק מרשת הנומרית הדו ממדית (Versteeg and Malalasekera, 1995).

נקודה P הינה נקודה כללית, נקודות N, E, S, W הינן צמתים שכנות לנקודה P. n, e, s, w הינן הפאות של נפח הבקרה אשר מקווקו.



ציור 4.2. מבט מקרוב על נפח הבקרה (Versteeg and malalasekera, 1995).

עבור בעיה דו ממדית (בהתאם לנפח הבקרה מציור 4.2) ממשוואה 4.11:

$$\int_{\Delta V} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\rho \phi u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \phi v) \right] dx dy = \left[ \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dx dy + \int_{\Delta V} S_\phi dV \quad (4.12)$$



$$\begin{aligned}
& [(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w] + [(\rho v A \phi)_n + (\rho v A \phi)_s] \\
& = \left[ \left( \Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left( \Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] + \left[ \left( \Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \left( \Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] + \bar{S} \Delta V
\end{aligned} \tag{4.13}$$

משוואה 4.13 מייצגת את השטפים דרך פאות נפח הבקרה.  $\Delta V$  הינו הנפח (בקרה) בעוד ש- $\bar{S}$  הינו הערך הממוצע של המקור  $S$  על נפח הבקרה.

ההערכה של ביטויי השטף הדיפוזיבי דרך פאות נפח הבקרה הינם:

$$\Gamma_w A_w \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_w = \Gamma_w A_w \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}} \tag{4.14}$$

$$\Gamma_e A_e \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_e = \Gamma_e A_e \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} \tag{4.15}$$

$$\Gamma_s A_s \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_s = \Gamma_s A_s \frac{\phi_P - \phi_S}{\delta y_{SP}} \tag{4.16}$$

$$\Gamma_n A_n \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_n = \Gamma_n A_n \frac{\phi_N - \phi_P}{\delta y_{PN}} \tag{4.17}$$

$A_w, A_e, A_s, A_n$  - הינם שטחי החתך של פאות נפח הבקרה.

על מנת שנוכל לקבל משוואות דיסקרטיות לבעיית דיפוזיה-הסעה הדו ממדית, יש צורך לבצע ההערכה של הביטויים

במשוואה 4.13. לצורך הנוחות נגדיר משתנה  $F$  אשר ייצג את השטף המסי ליחידת שטח ו- $D$  אשר ייצג את הדיפוזיה:

$$\begin{aligned}
(\rho u)_w = F_w; \quad (\rho u)_e = F_e; \quad (\rho v)_n = F_n; \quad (\rho v)_s = F_s \\
\frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} = D_w; \quad \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} = D_e; \quad \frac{\Gamma_n}{\delta y_{PN}} = D_n; \quad \frac{\Gamma_s}{\delta x_{SP}} = D_s
\end{aligned} \tag{4.18}$$

המשך תהליך הדיסקרטיזציה מתבסס על העובדה ש:  $A_w = A_e = A_n = A_s = A$ .

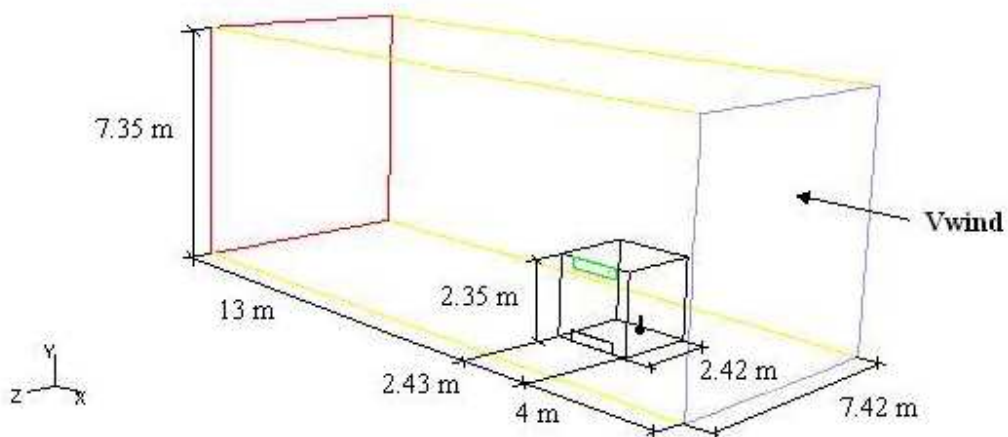
לאחר יישום של משוואות 4.14-4.18 לתוך משוואה 4.13 ניתן לכתוב:

$$\begin{aligned}
 & F_e \phi_e - F_w \phi_w + F_n \phi_n + F_s \phi_s \\
 & = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) + D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S) + \frac{\bar{S} \Delta V}{A}
 \end{aligned}
 \tag{4.19}$$

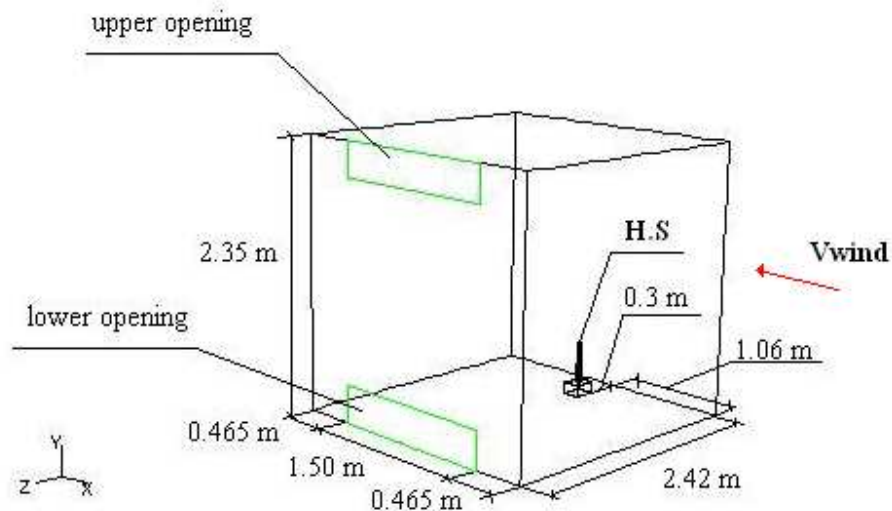
משוואה 4.19 הינה משוואת הסעה דיפוזיה דיסקרטית. בהנחה ושדה המהירויות ידוע לנו (מתוך תנאי גבול למשל) בכל אחת מהפאות, ניתן לחשב בקלות את הערכים עבור  $F$ . על מנת לפתור את המשוואה עבור  $\phi$  בכל אחת מארבעת הפאות, ישנו צורך ביישום של סכימה של הפרשים סופיים.

### 4.3 מודל נומרית.

במהלך החלק של החקירה הנומרית מוצג המודל עבור המבנה כפי שנבנה בתוכנת Gambit, כמו גם הרשת הנומרית. בניית המודל הנומרי עבור החדר בתלת מימד. על מנת לבצע את הסימולציה הנומרית היה צורך טרם ביצוע החישובים לבנות את המודל הגאומטרי כך שיהיה העתק מדויק של המבנה. בתחילה נבנתה הסביבה החיצונית ולאחר מכן המבנה עצמו (ציור 4.1.1).



ציור 4.1.1. אוריינטציה של המבנה. הווקטור אשר מייצג את כיוון הרוח החיצונית הינו מקביל לציר X (Gambit).  
 בציור 4.1.2 אנו רואים את המודל הגיאומטרי התלת ממדי שנבנה בתוכנת Gambit והוא מהווה העתק מדויק של המבנה האמיתי.



ציור 4.1.2. העתק מדויק של המבנה ומיקום החלונות (Gambit).

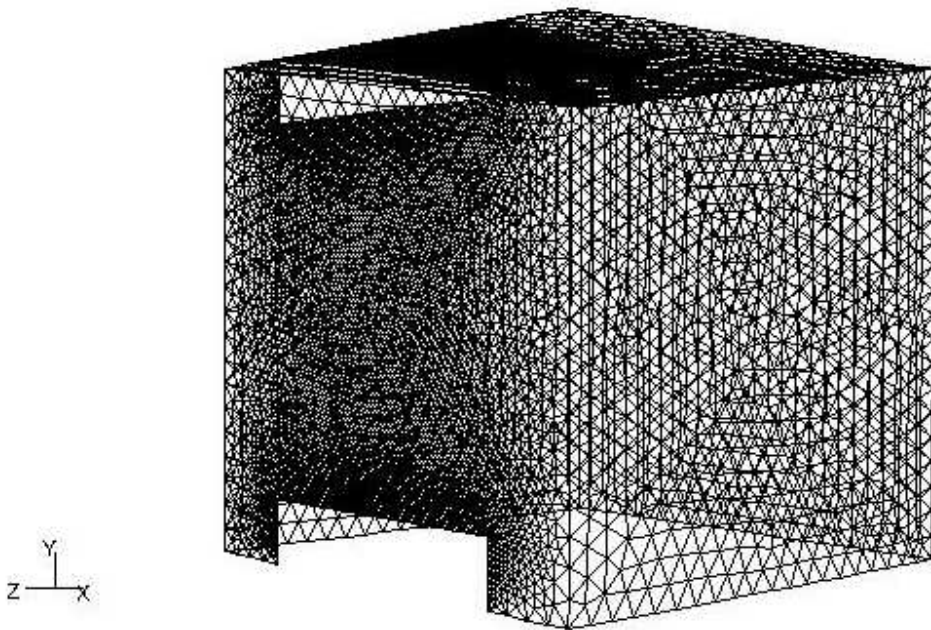
במהלך הסימולציות נבדקו 3 מקרים שונים שבהם מהירות הרוח הייתה שונה:

$$V3 = 2\text{m/s}, V2 = 1\text{m/s}, V1 = 0\text{m/s}$$

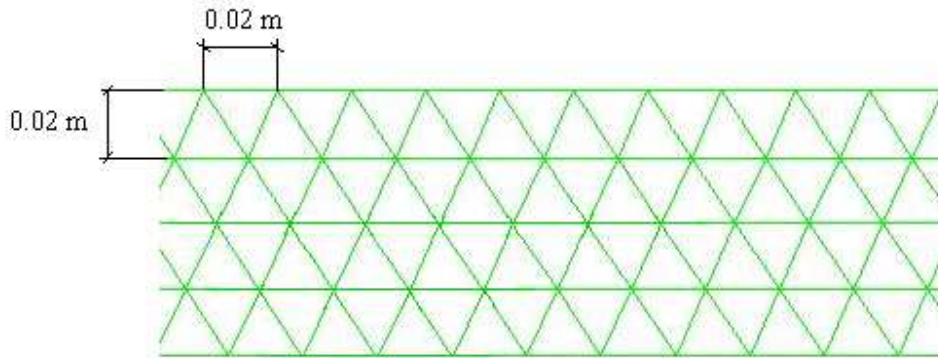
ובכל מקרה נעשו סימולציות עם החלון העליון פתוח בלבד ועם שני חלונות פתוחים. וזאת על מנת שנוכל לבדוק את השפעת הרוח על המהירויות וטמפרטורות בחלונות המבנה.

#### 4.1.2 רישות תלת מימד

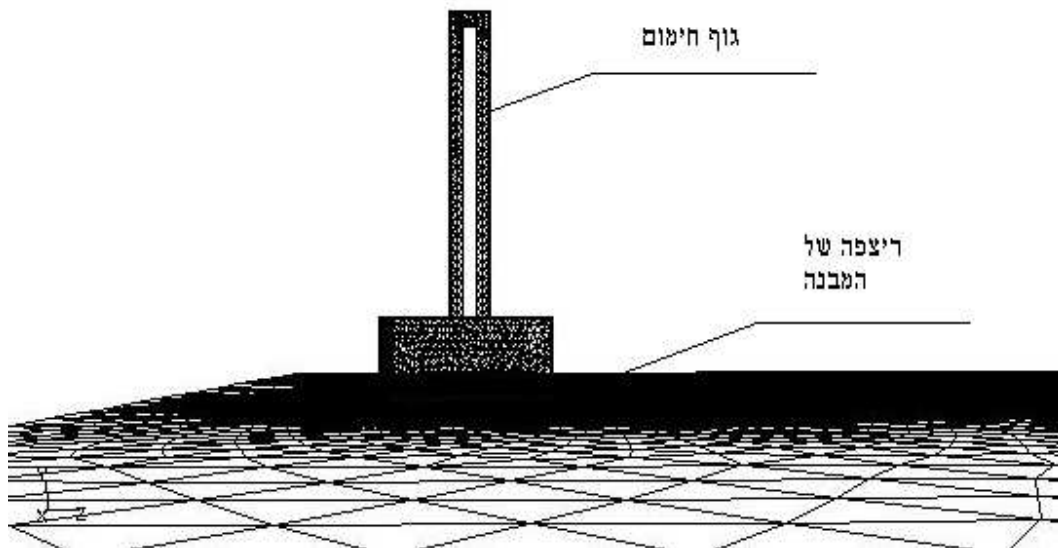
קירות המבנה רושתו באלמנטים משולשים (ציור 4.1.3) בעלי גודל של  $0.12\text{ m}$ . במקומות החשובים, כלומר בחלונות (ציור 4.1.4) ה'מש' היה חייב להיות עדין יותר, לצורך כך הרישות היה מובנה באלמנטים בעלי גודל של  $0.02\text{ m}$ . הרישות על קירות התחום החיצוני היה מובנה באלמנטים בעלי גודל של  $0.5\text{ m}$  (ציור 4.1.5).



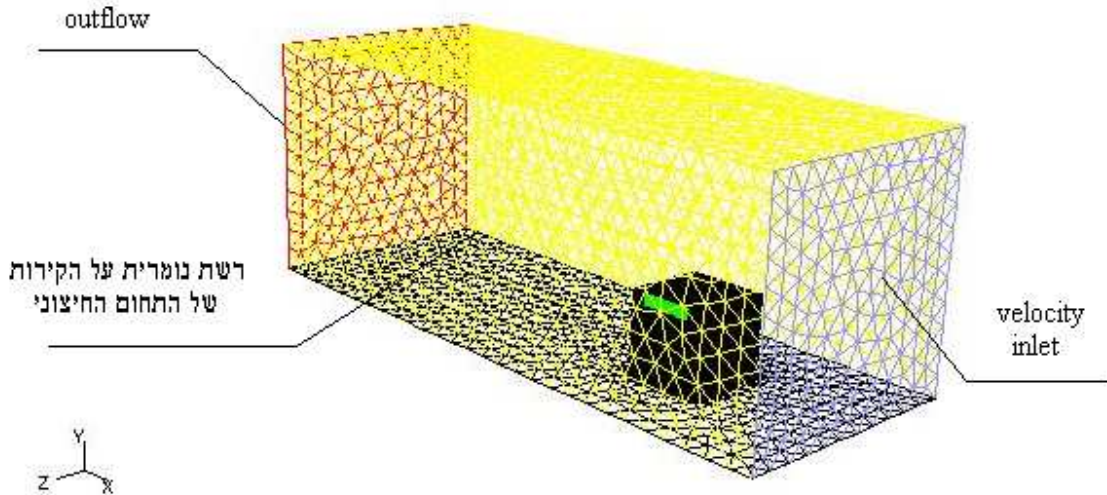
ציור 4.1.3. רישות נומרי על קירות המבנה.



ציור א 4.1.4. רישות נומרי בחלונות המבנה.



ציור ב 4.1.4. רישות נומרי של גוף חימום (האלמנטים בעלי גודל של  $0.01\text{ m}$ ).



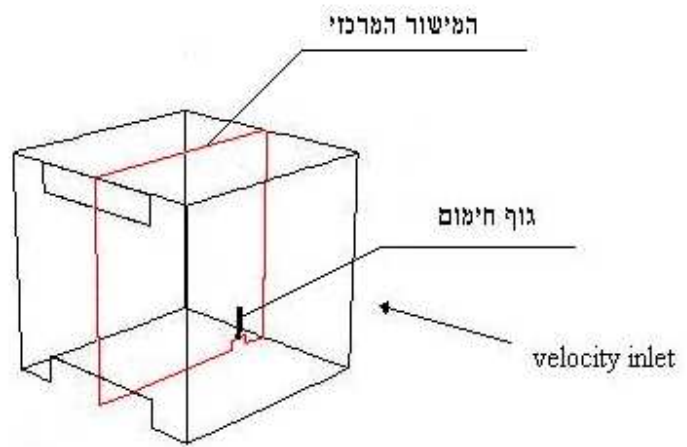
ציור 4.1.5. רישות נומרית של התחום החיצוני.  
 הרישות כולל 392929 אלמנטים.

## 5. תוצאות ודיון

המשוואות המתארות את תנועת הזורם ומעבר החום בתוך החדר היו מבוססות על שימור מסה, מומנטום ואנרגיה תרמית. כיוון שברוב המקרים הזרימה דרך הפתחים טורבולנטית, מודל  $k-\epsilon$  נראה הכי מתאים וגם הכי שימושי בסוג כזה של סימולציה נומרית, Ramos *et al.*, (2002), Howell & Potts (2002), Alloca *et al.*, (2002). כלל התוצאות הנומריות אשר מובאות בפרק זה מוצגות עבור סימולציות אשר נעשו במצב מתמיד.

בציורים הבאים מוצגים תוצאות שדה המהירויות וטמפרטורות במבנה במישור מרכזי (ציור 5.1 מישור yz) עבור שלושה מקרים:

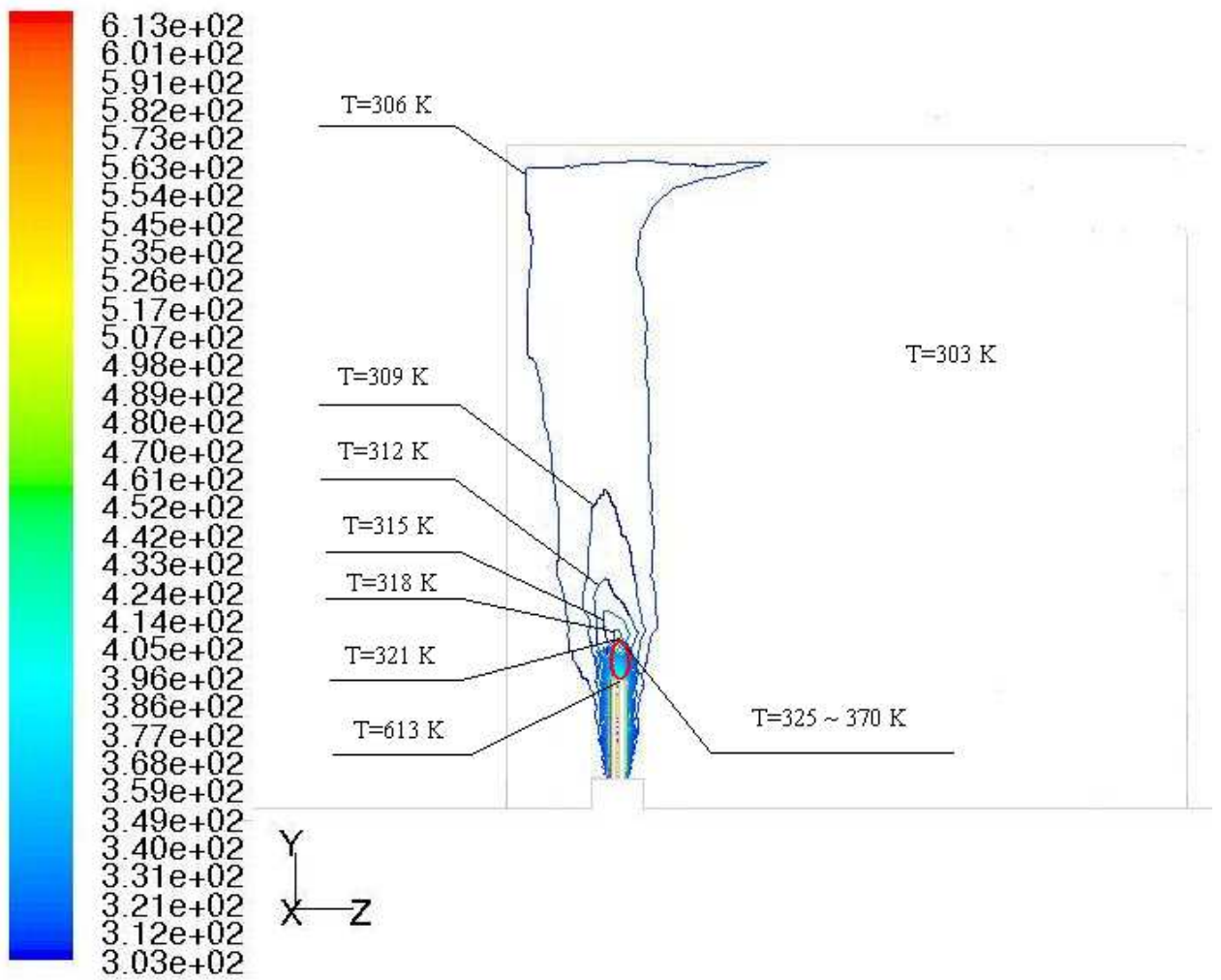
1. מהירות הרוח (בכיוון ציר x)  $V=0$  m/s – אוורור מושרה כוחות ציפה בלבד ללא רוח.
  2. מהירות הרוח (בכיוון ציר x)  $V=1$  m/s – אוורור משולב מושרה כוחות ציפה ורוח.
  3. מהירות הרוח (בכיוון ציר x)  $V=2$  m/s – אוורור משולב מושרה כוחות ציפה ורוח.
- ובכל מקרה נעשו סימולציות עם החלון העליון פתוח בלבד ועם שני חלונות פתוחים.  
 כמו כן מוצגים המהירויות והטמפרטורות בפתחים.



ציור 5.1 המישור המרכזי, מישור yz.

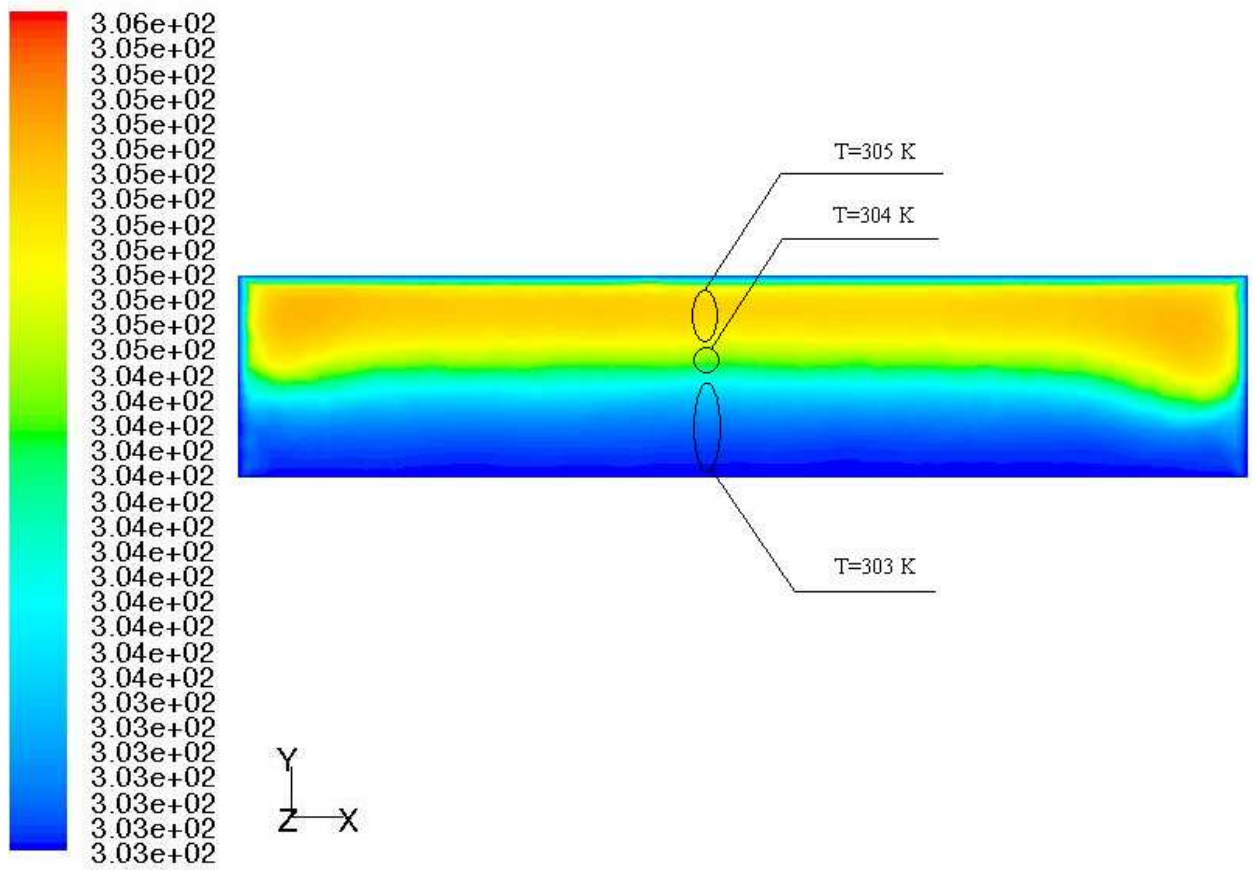
מקרה 1:  $V=0\text{m/s}$

(\*) סימולציות עם החלון העליון פתוח (mixing ventilation).

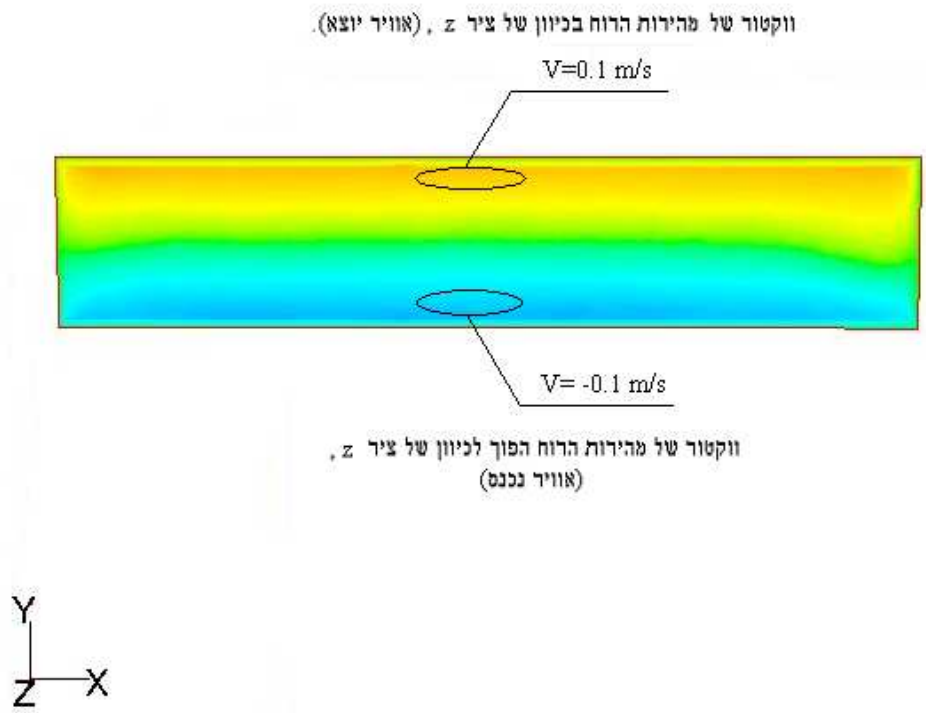
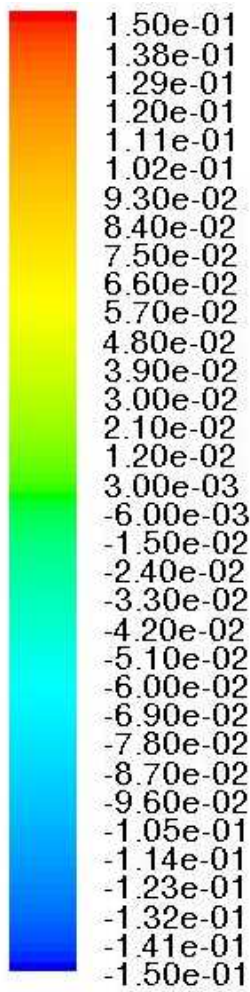


צור 5.2 שדה הטמפרטורות בחדר במישור המרכזי.

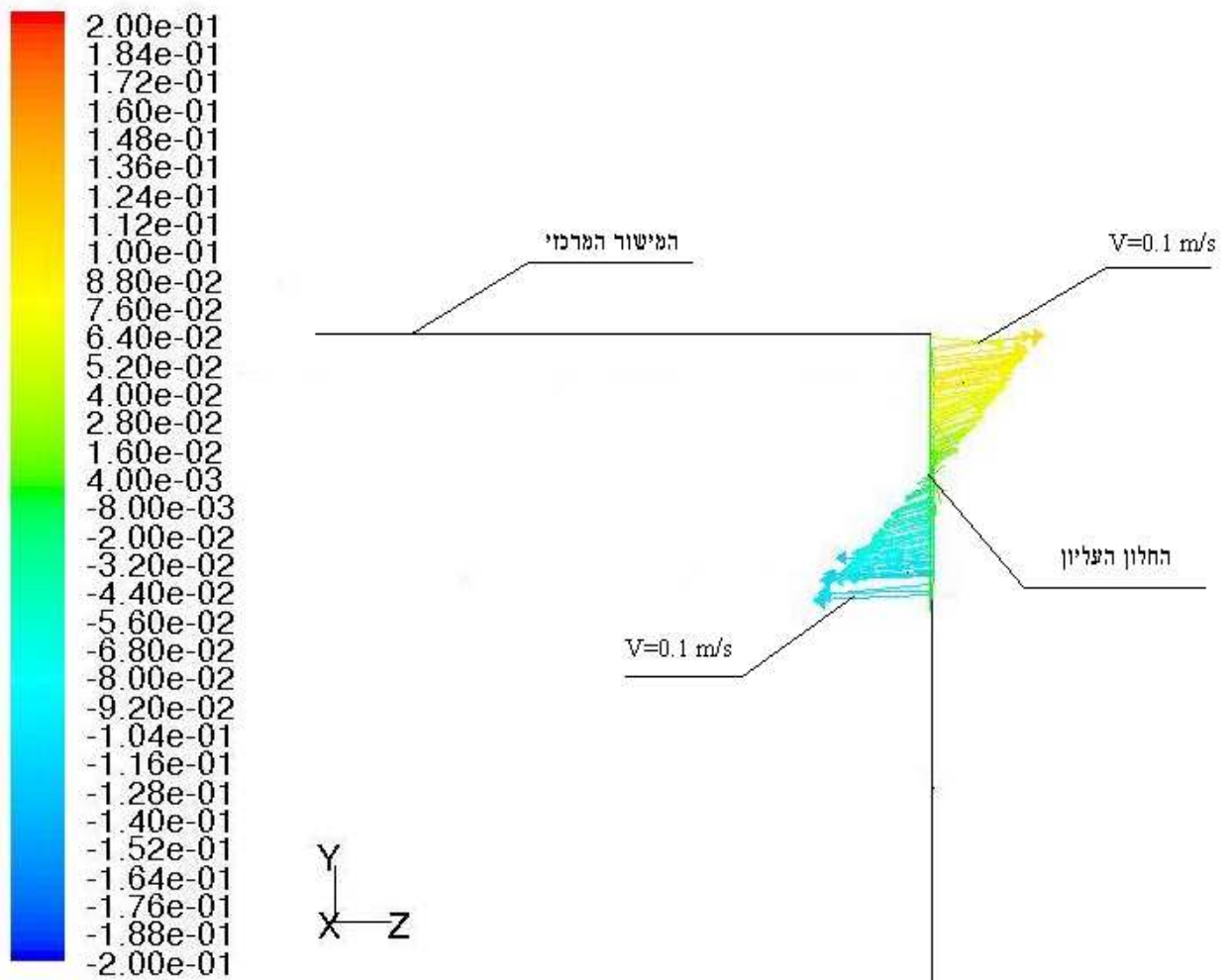




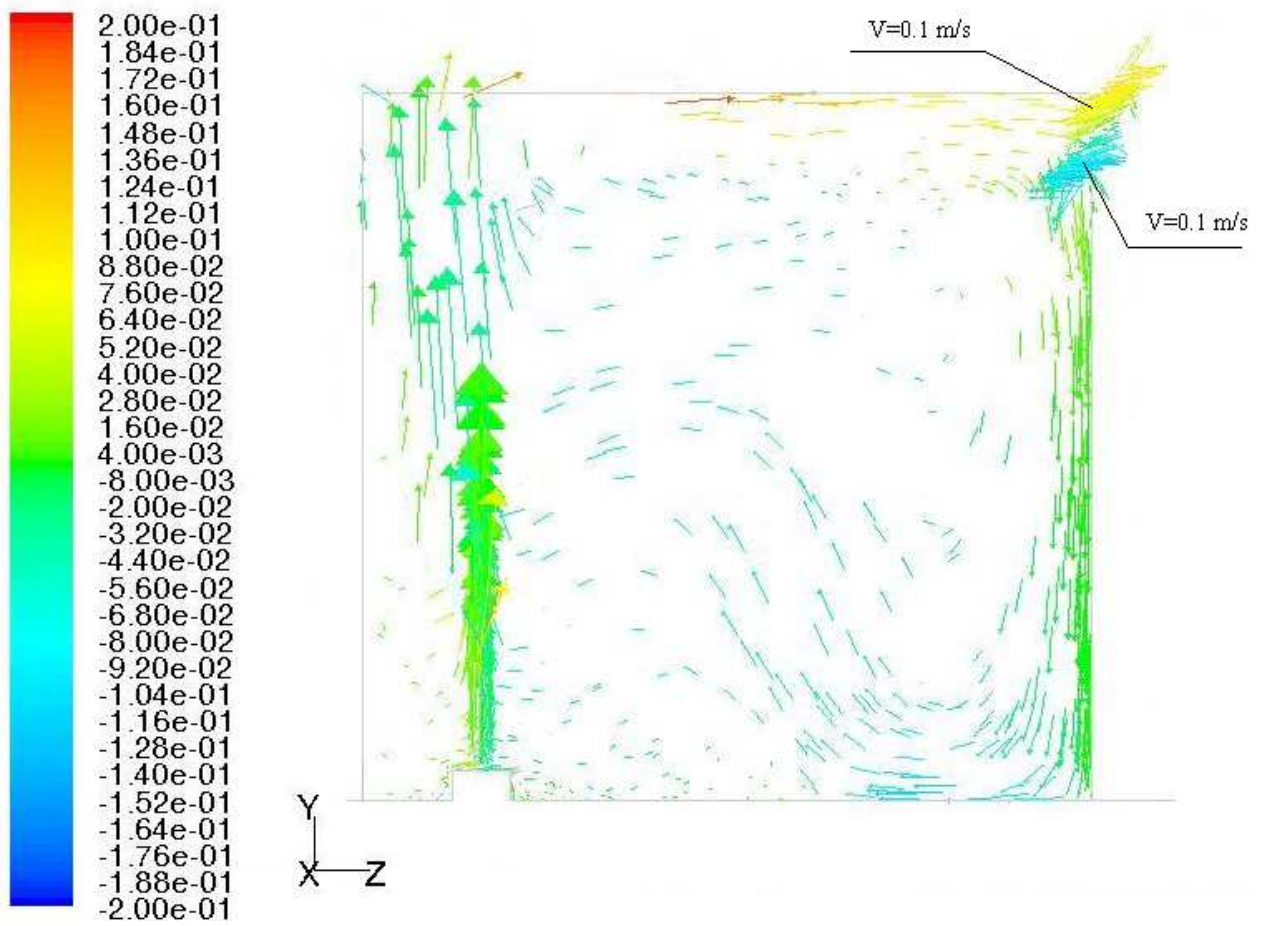
ציור 5.3 שדה הטמפרטורות בחלון העליון של החדר (מבט מקדימה, מישור  $yx$ ).



ציור 5.4 שדה המהירויות בחלון העליון של החדר (מבט מקדימה, מישור  $xy$ ).

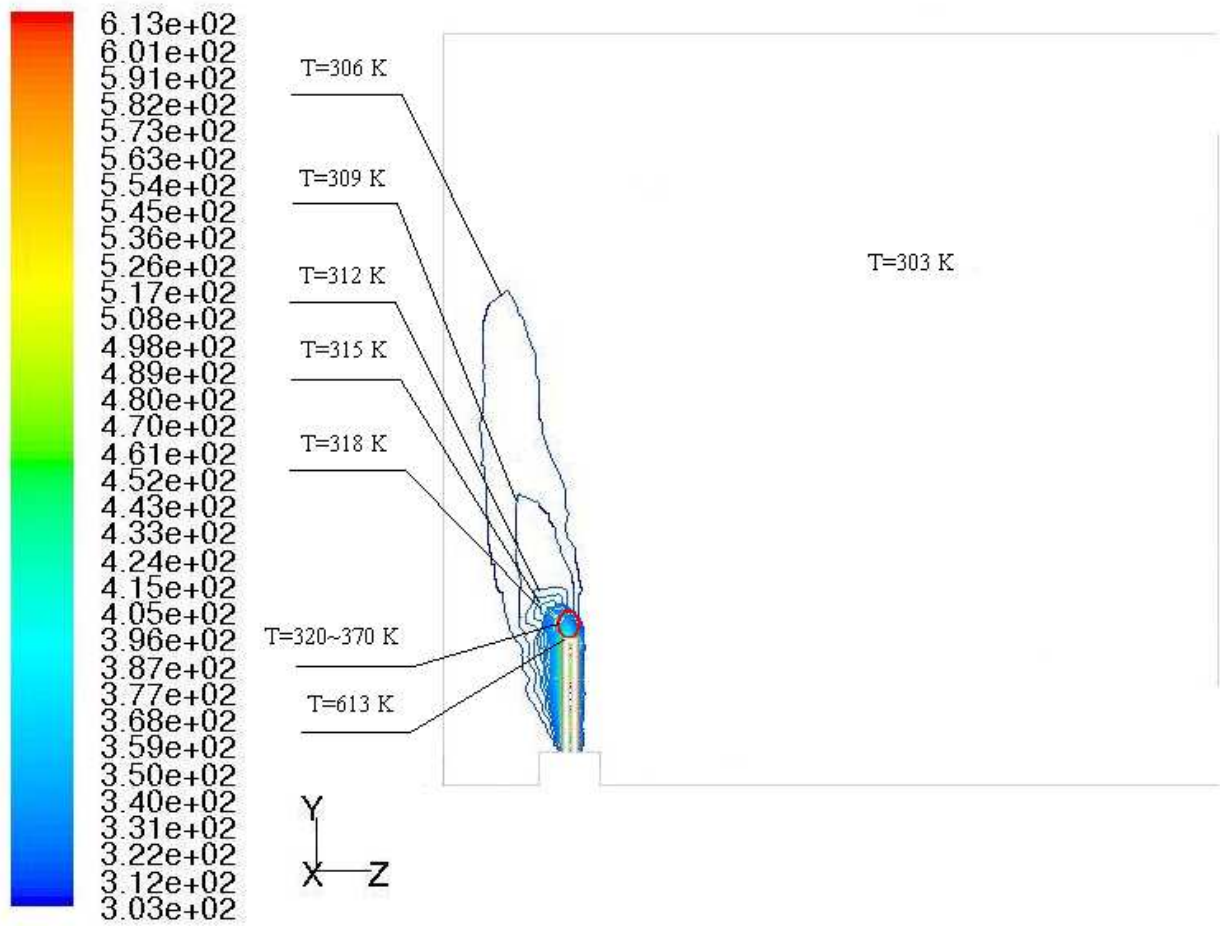


ציור 5.5 שדה ווקטורי של המהירויות בחלון העליון של החדר (מבט על המישור המרכזי yz).

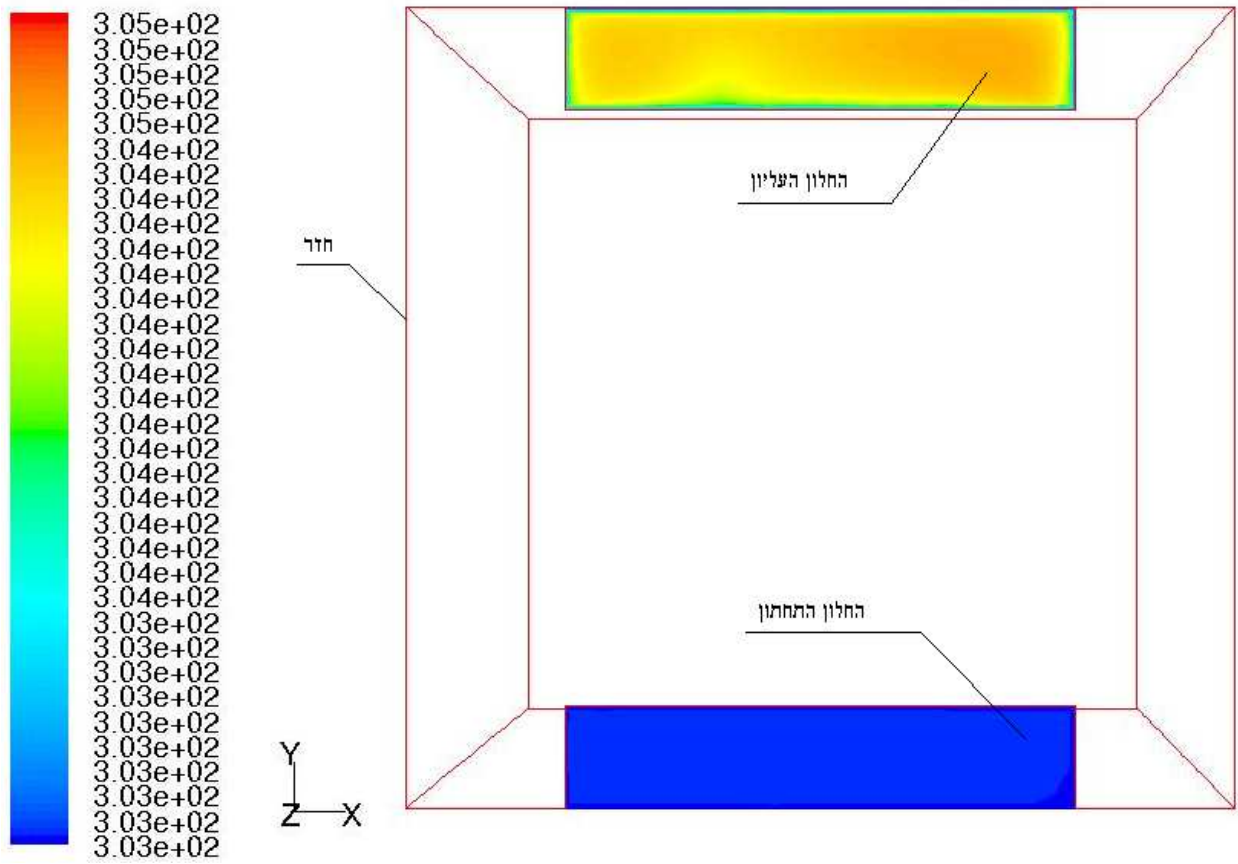


ציור 5.6 שדה ווקטורי של המהירויות בחדר (מבט על המישור המרכזי yz).

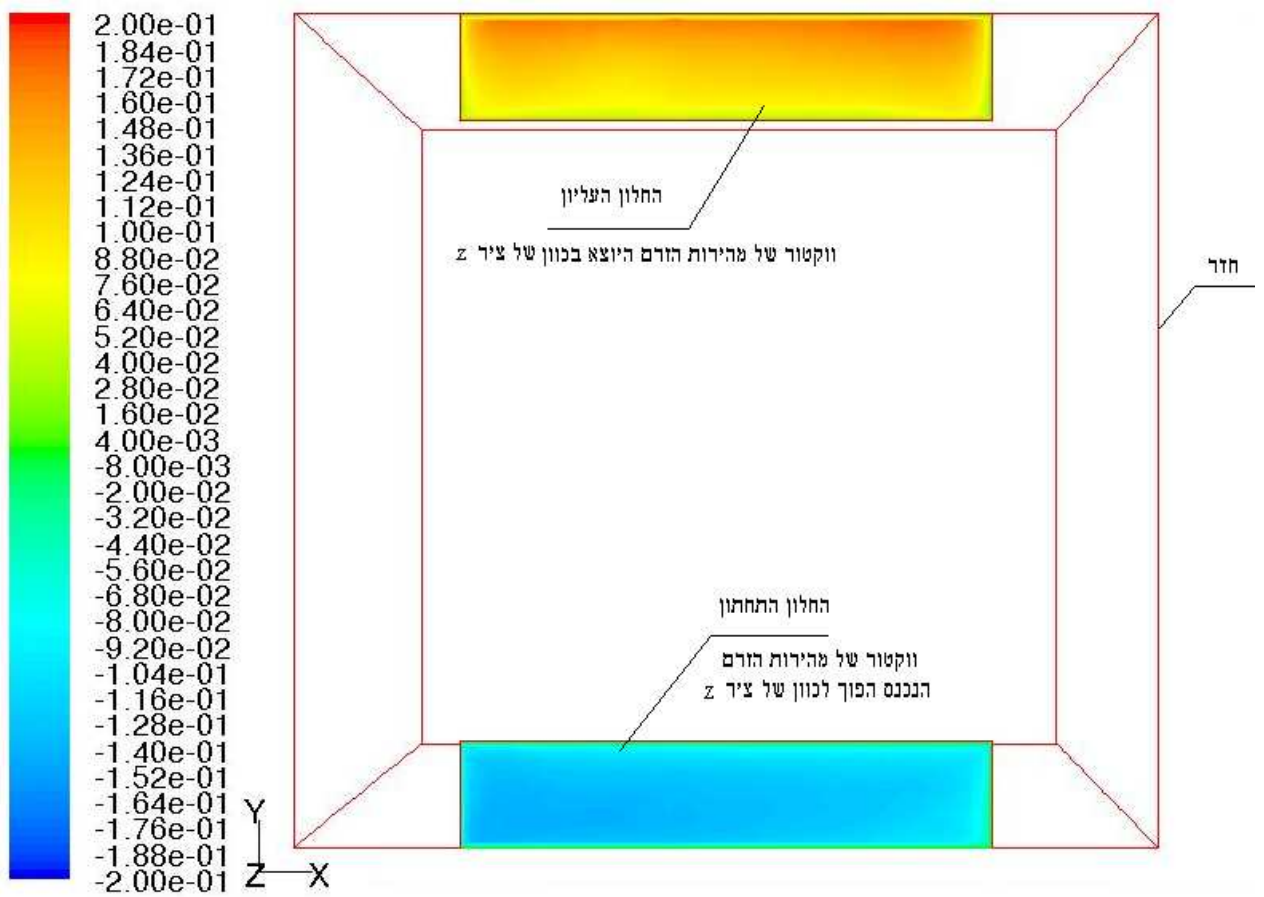
(ב) סימולציות עם שני חלונות פתוחים (displacement ventilation).



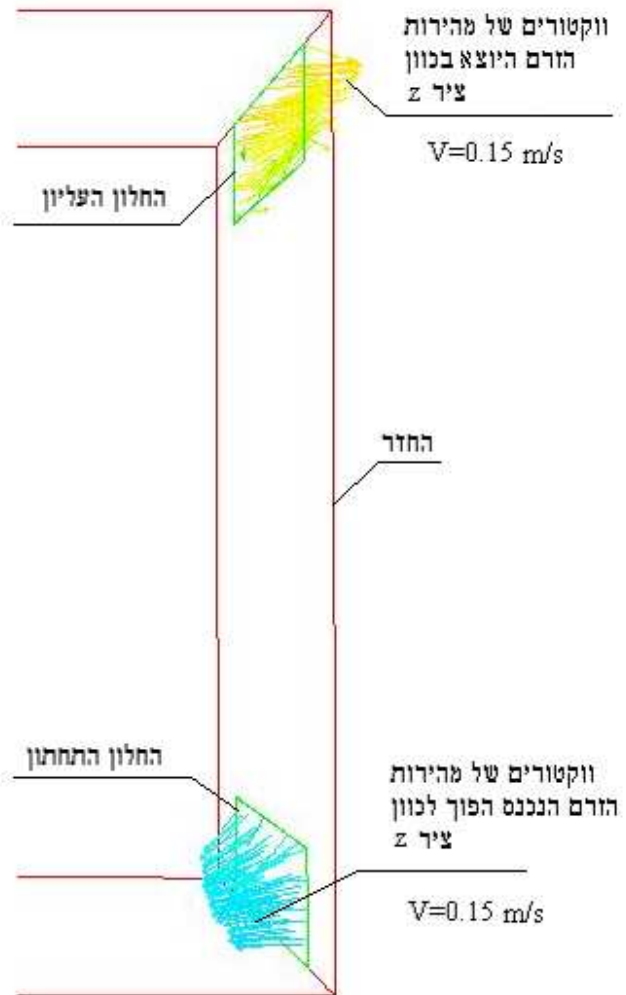
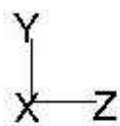
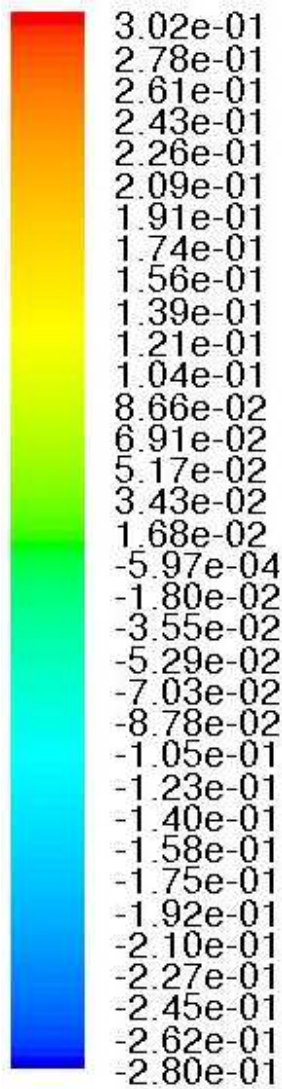
ציור 5.7 שדה הטמפרטורות בחדר במישור המרכזי.



ציור 5.8 שדה הטמפרטורות בשני חלונות של החדר (מבט מקדימה, מישור yx).

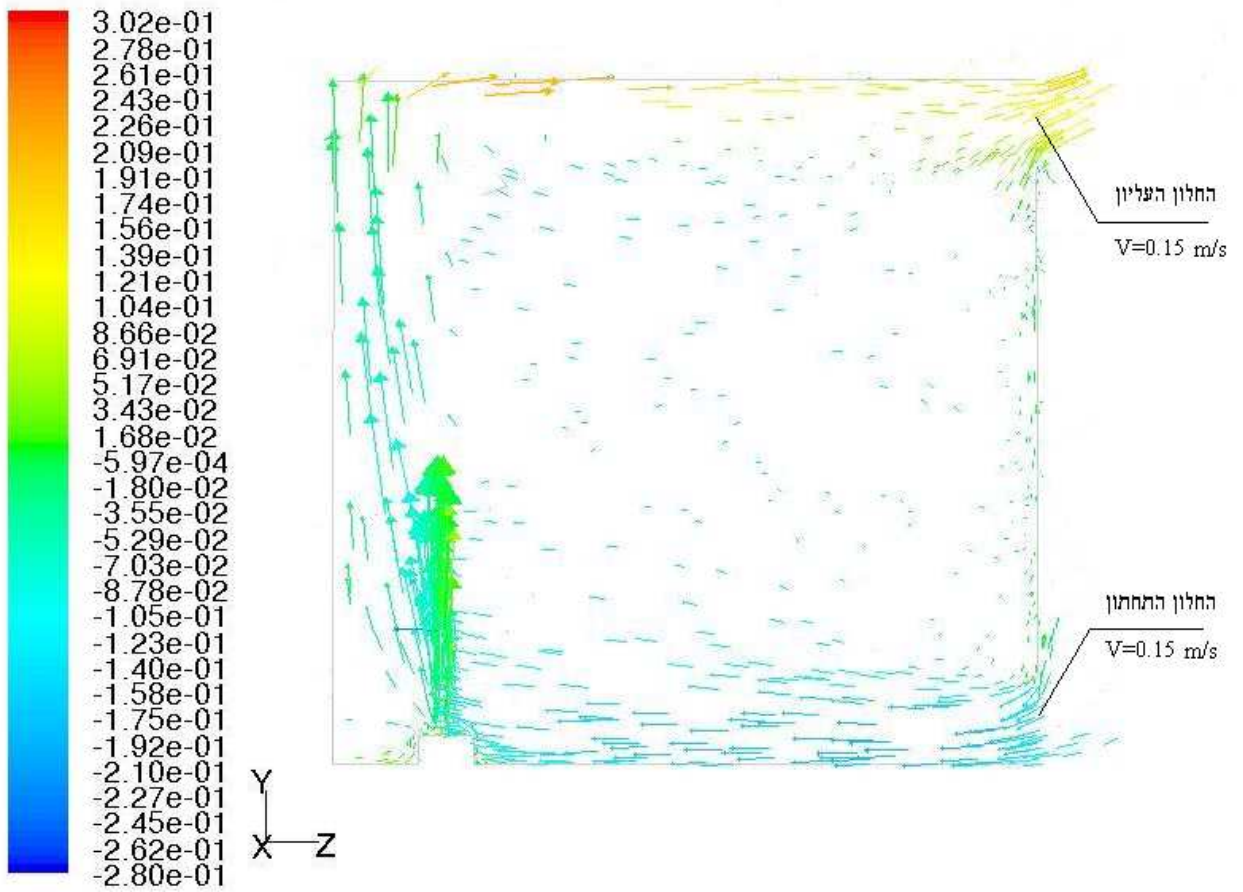


ציור 5.9 שדה המהירויות בשני חלונות (מבט מקדימה, מישור yx).



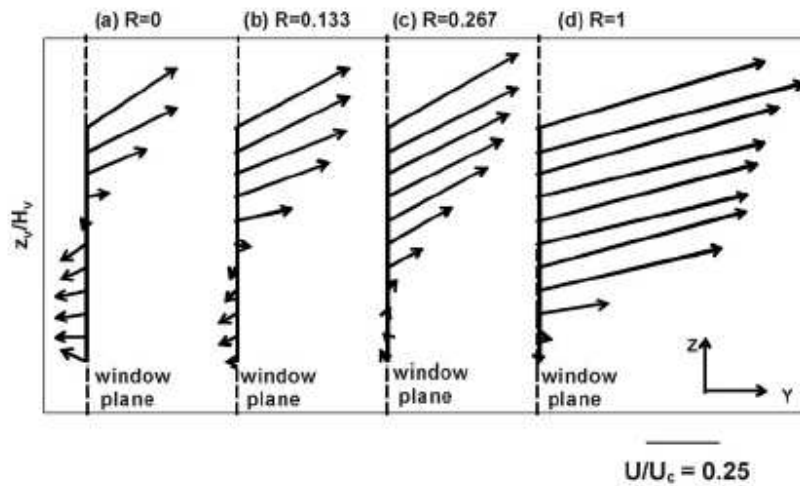
ציור 5.10 ווקטורים של המהירויות בשני חלונות.





ציור 5.11 שדה ווקטורי של המהירויות בחדר (מבט על המישור המרכזי yz).

התוצאות שהתקבלו במהלך מקרה 1 - מהירות הרוח  $V=0$  m/s - אוורור מושרה כוחות ציפה בלבד ללא רוח, (ציור 5.5 - שדה ווקטורי של המהירויות בחלון העליון של החדר, ציור 5.11 שדה ווקטורי של המהירויות בחדר - מבט על החלון העליון) מתאימות לתוצאות הניסויים ללא רוח שבוצעו באותו חדר ופורסמו במאמר Tanny, J. , Haslavsky, V. and Teitel, M. (2007) (איור 5.5):



איור 5.5 - שדה ווקטורי של מהירות האוויר בפתח העליון לערכים שונים של  $R^*$ . מבט על המישור מאונך לחלון העליון. הפתיחה של חלון מתוארת על ידי קו אחיד אנכי. הווקטורים מכוונים ימינה מציינים זרימה החוצה, שמאלה - זרימה פנימה.

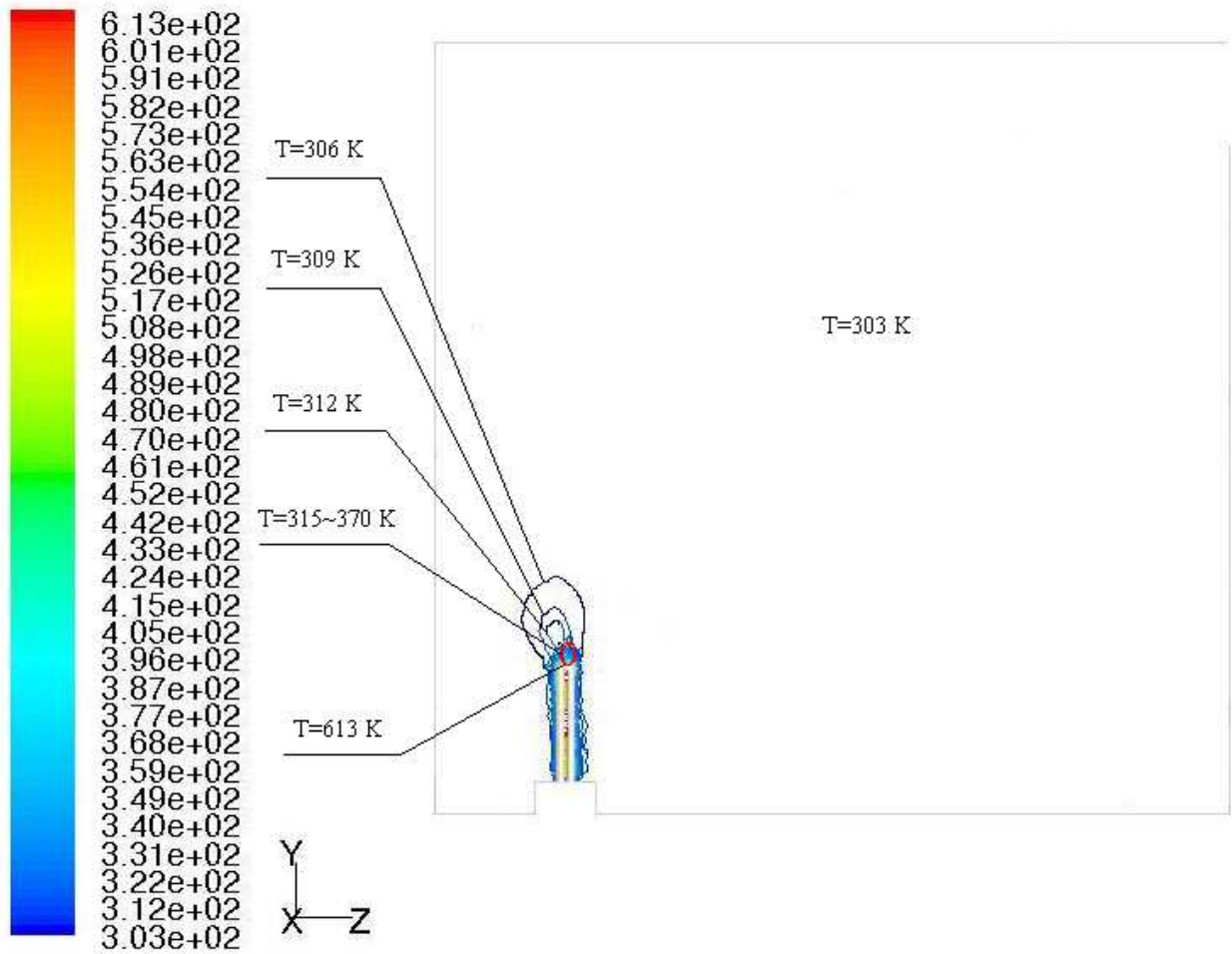
$R^* = h_U / h_L$  - יחס בין גובה של פתיחה של פתחים תחתון ועליון.

אוורור ערבוב: (Mixing ventilation)  $R^* = 0$  - פתח תחתון סגור, פתח עליון פתוח.

אוורור דחיקה (Displacement ventilation)  $R^* = 1$  - פתח עליון ותחתון פתוחים.

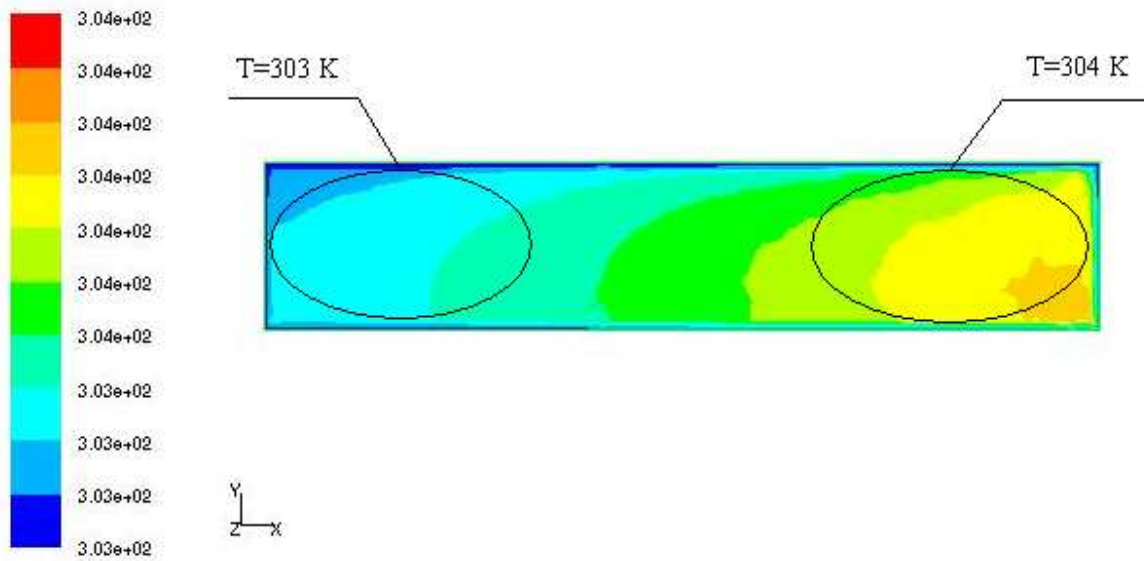
מקרה 2:  $V=1\text{m/s}$

(\*) סימולציות עם החלון העליון פתוח (mixing ventilation).



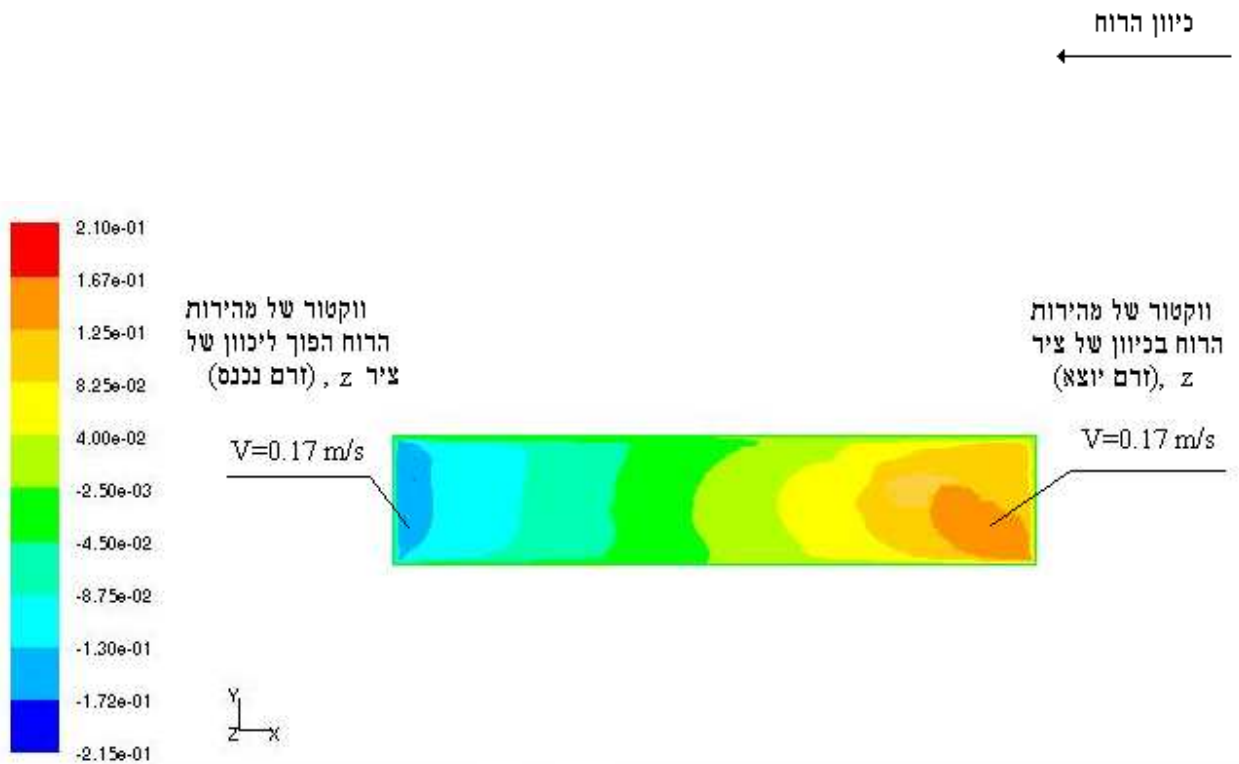
ציור 5.12 שדה הטמפרטורות בחדר במישור המרכזי.

כיוון הרוח ←



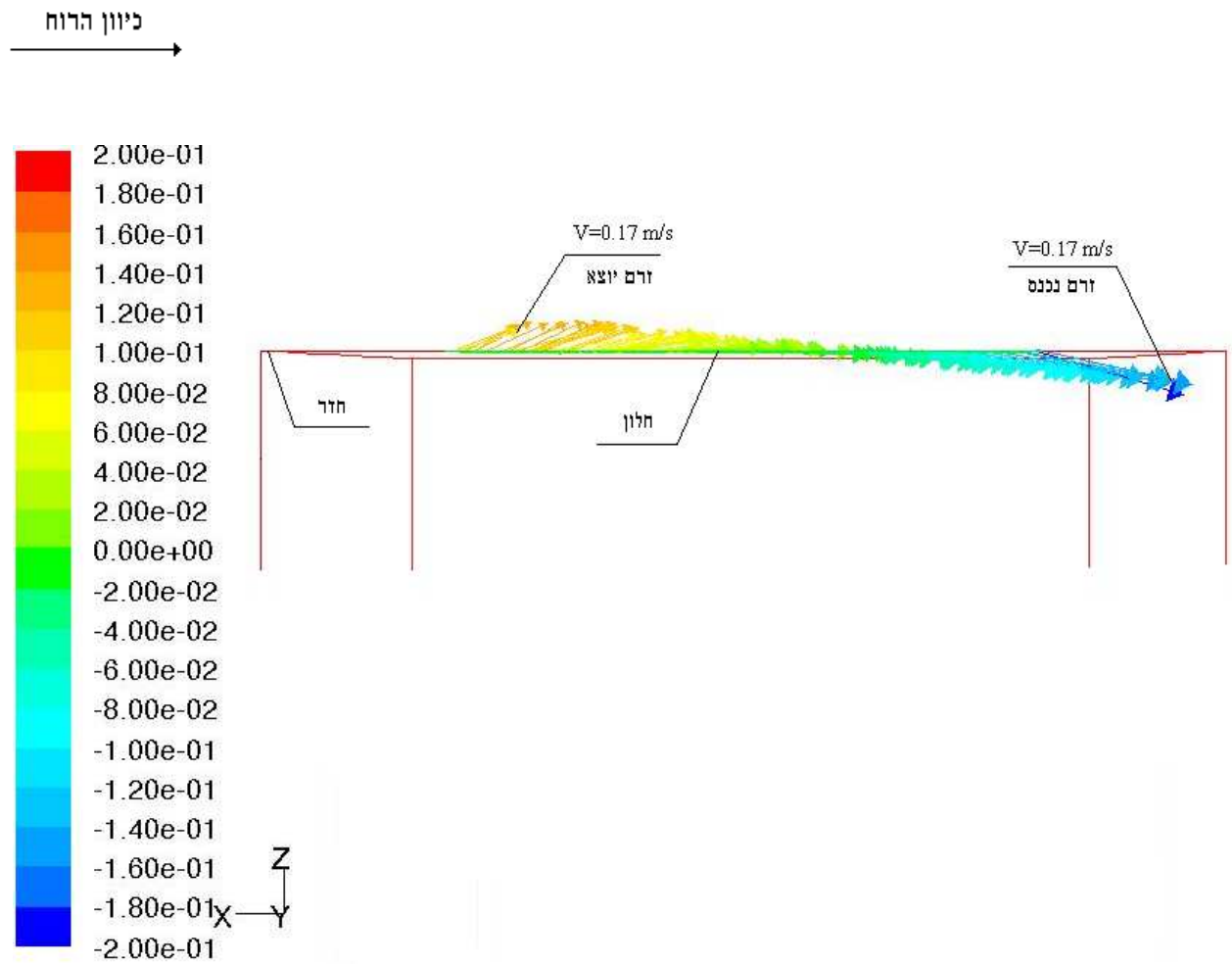
ציור 5.13 שדה הטמפרטורות בחלון העליון של החדר (מבט מקדימה, מישור yx).

ניתן לראות שכאשר מופעלת רוח במקביל למישור הפתח משתנה פילוג הטמפרטורה בהשוואה למקרה ללא רוח, בציור 5.4.

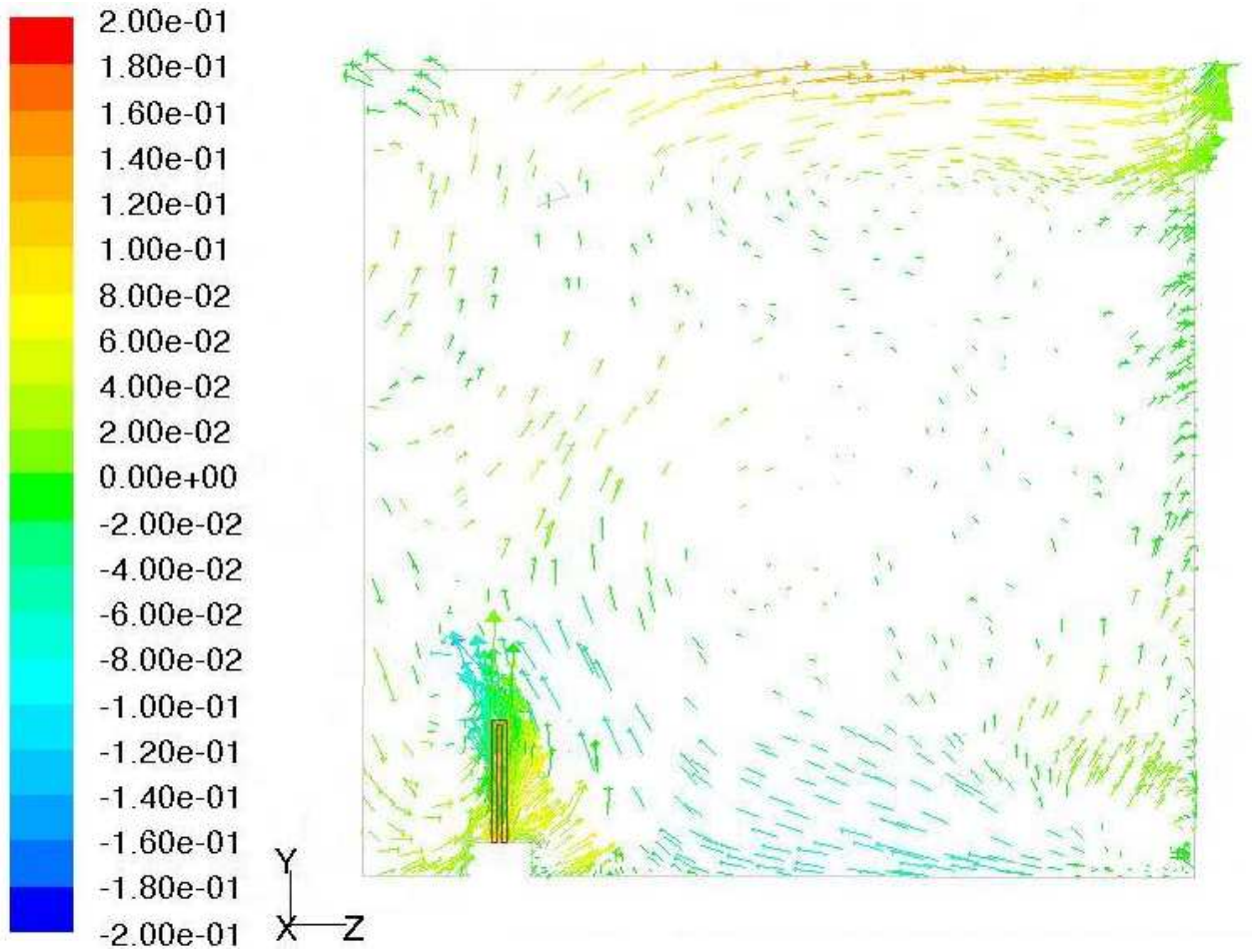


ציור 5.14 שדה המהירויות בחלון העליון של החדר (מבט מקדימה, מישור  $yx$ ).

בתוצאה מהפעלת הרוח אנו רואים יציאת אוויר בצד הפתח הנמצא במעלה הרוח וכניסת אוויר בצד הפתח הנמצא במורד הרוח. זה נובע כתוצאה משדה הלחצים שמשרה הרוח על מישור הפתח.

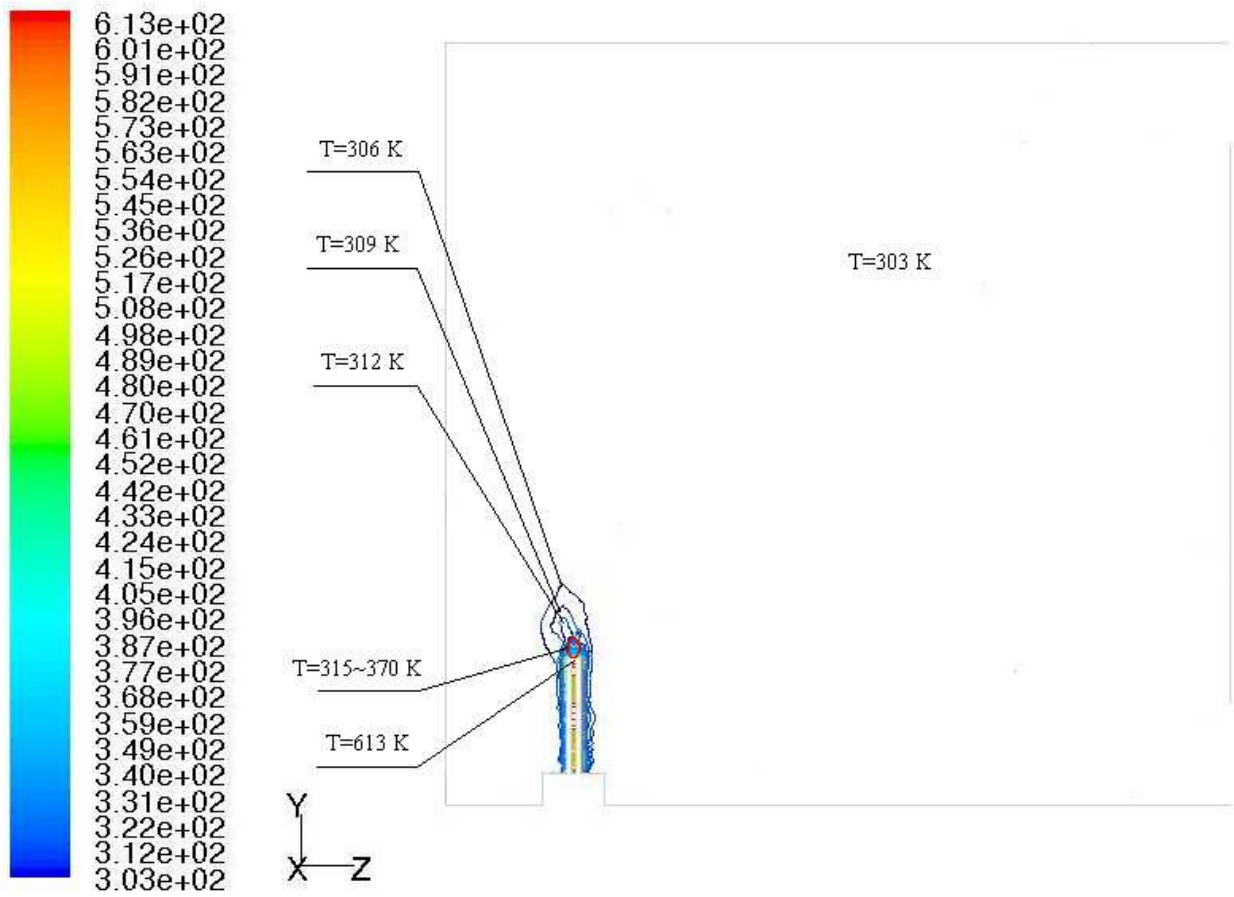


ציור 5.15 שדה ווקטורי של המהירויות בחלון העליון של החדר (מבט מעל המישור xz).



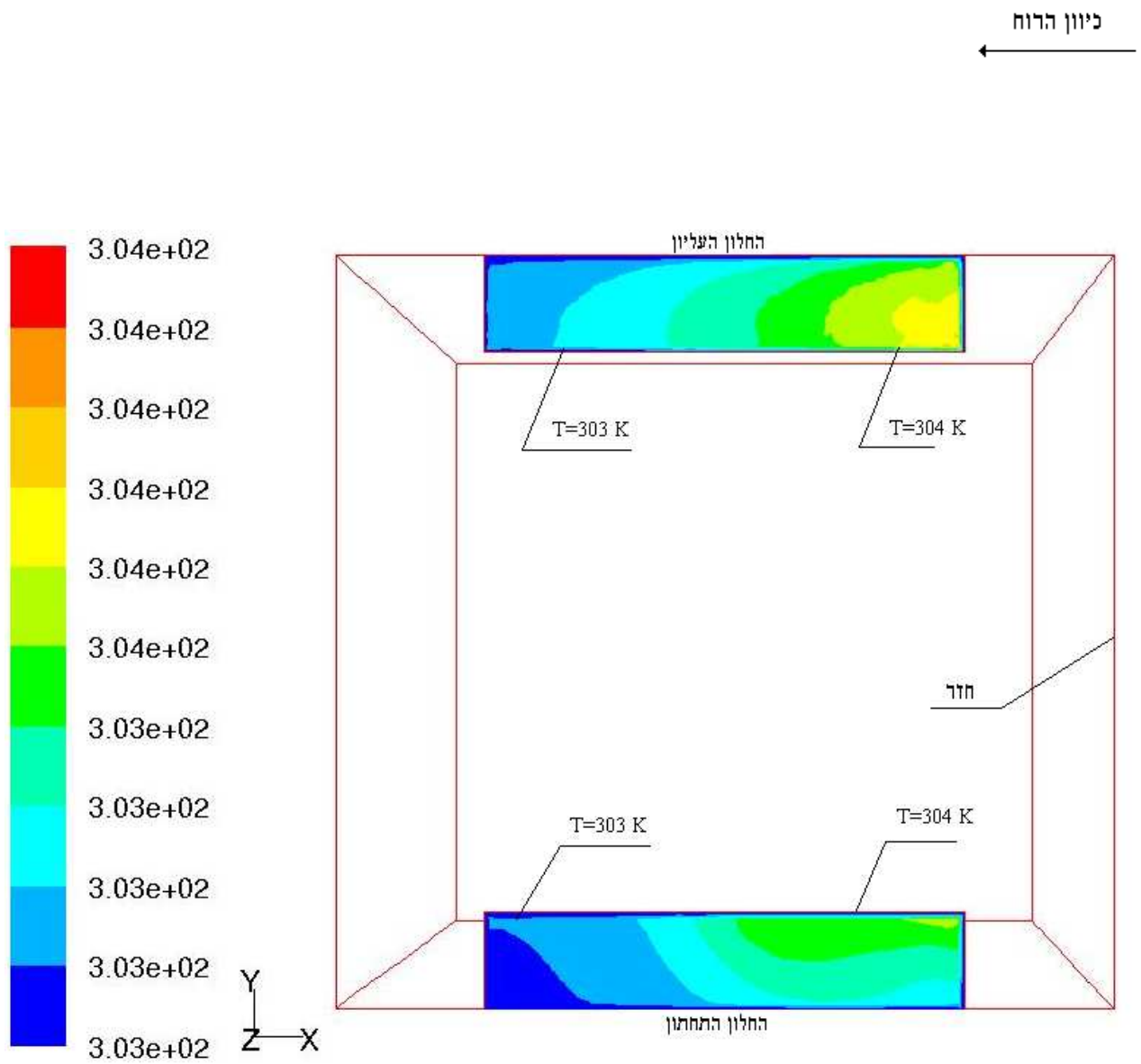
ציור 5.16 שדה ווקטורי של המהירויות בחדר (מבט על המישור המרכזי yz).

(ב) סימולציות עם שני חלונות פתוחים (displacement ventilation).

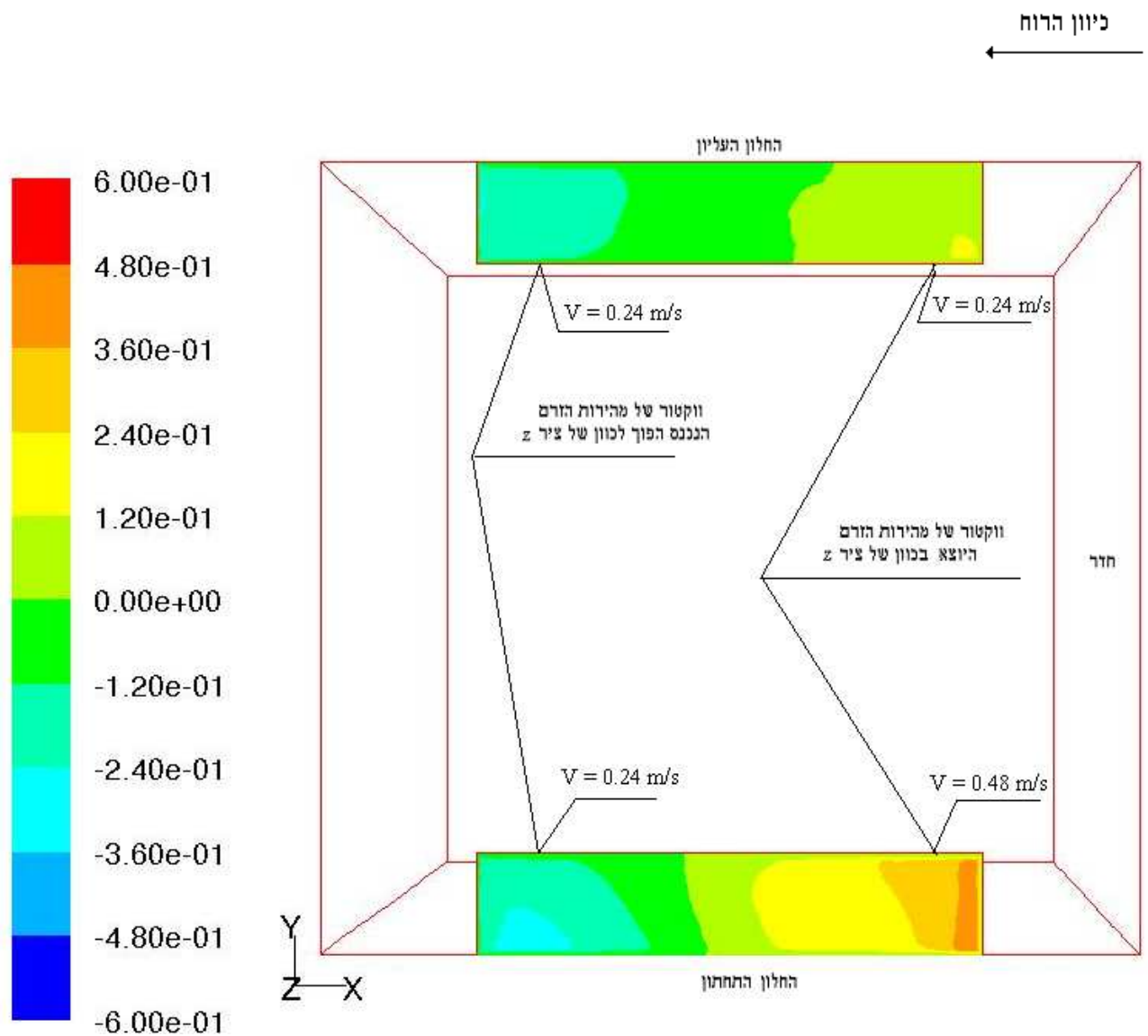


ציור 5.17 שדה הטמפרטורות בחדר במישור המרכזי.



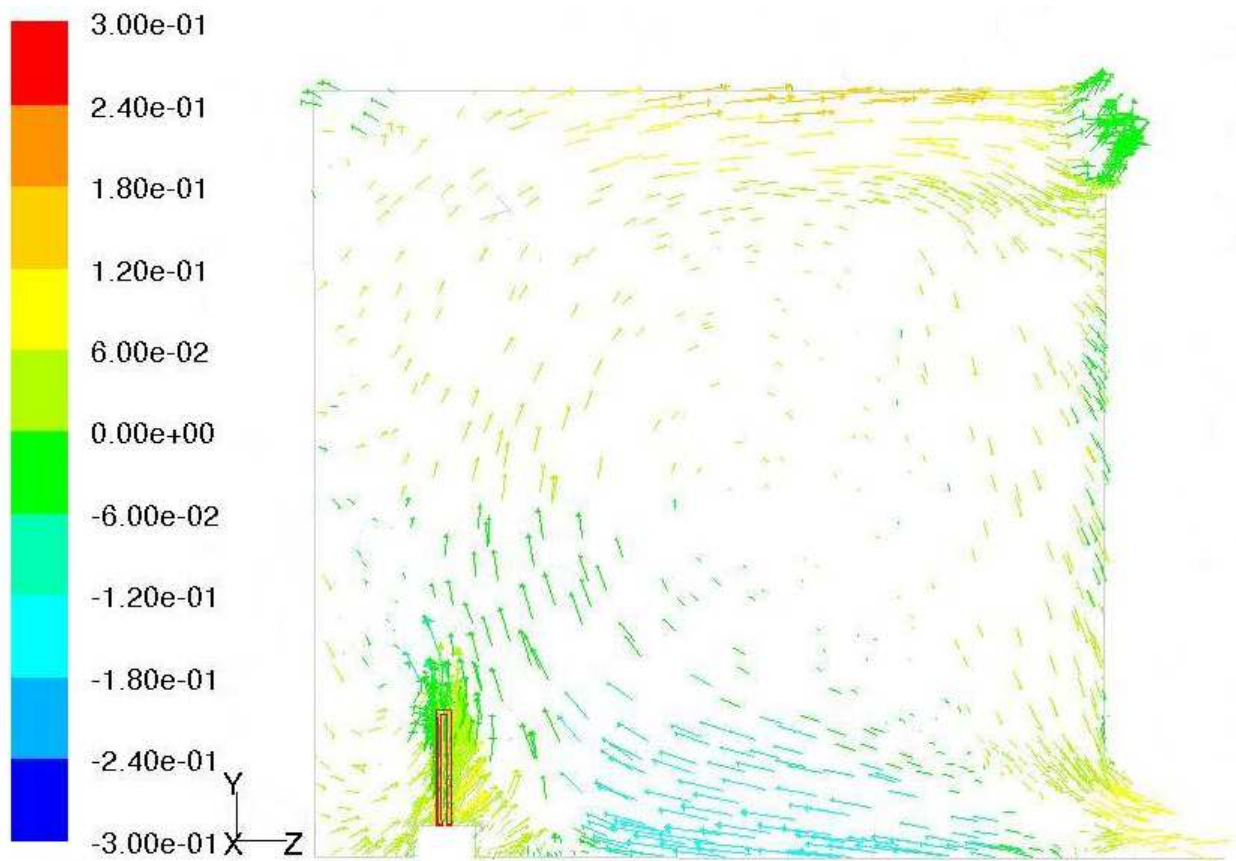


ציור 5.18 שדה הטמפרטורות בשני חלונות של החדר (מבט מקדימה, מישור yx).



ציור 5.19 שדה המהירויות בשני חלונות (מבט מקדימה, מישור yx).

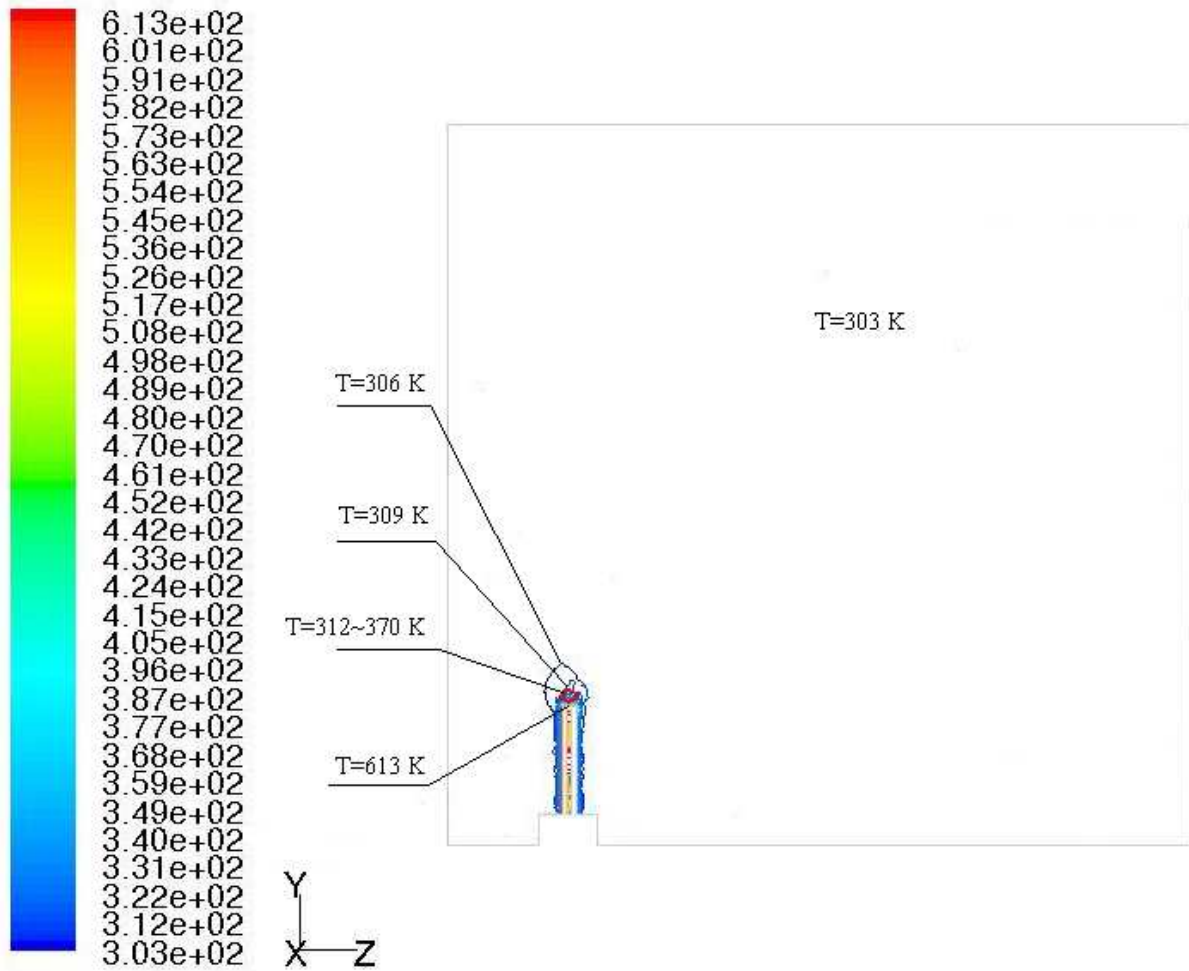
גם במקרה של שני חלונות פתוחים ניתן לראות יציאת אוויר בצד הפתח הקרוב למעלה הרוח וכניסת אוויר בצד של מורד הרוח.



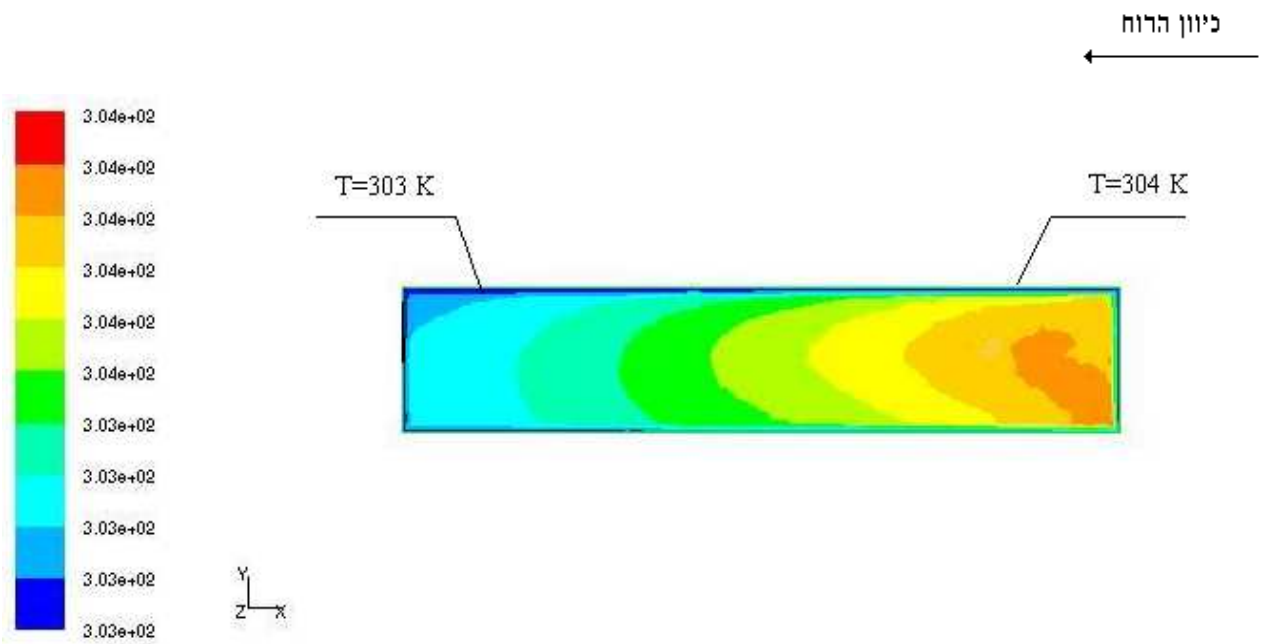
ציור 5.20 שדה ווקטורי של המהירויות בחדר (מבט על המישור המרכזי yz).

מקרה 3:  $V=2\text{m/s}$

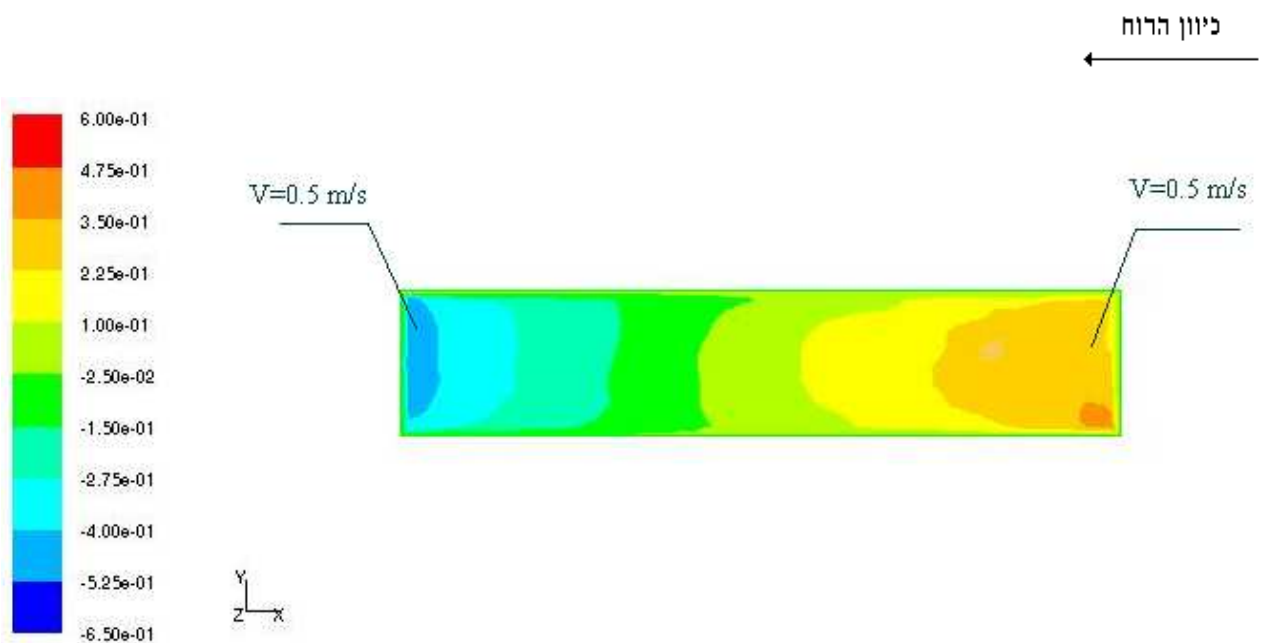
(א) סימולציות עם החלון העליון פתוח (mixing ventilation).



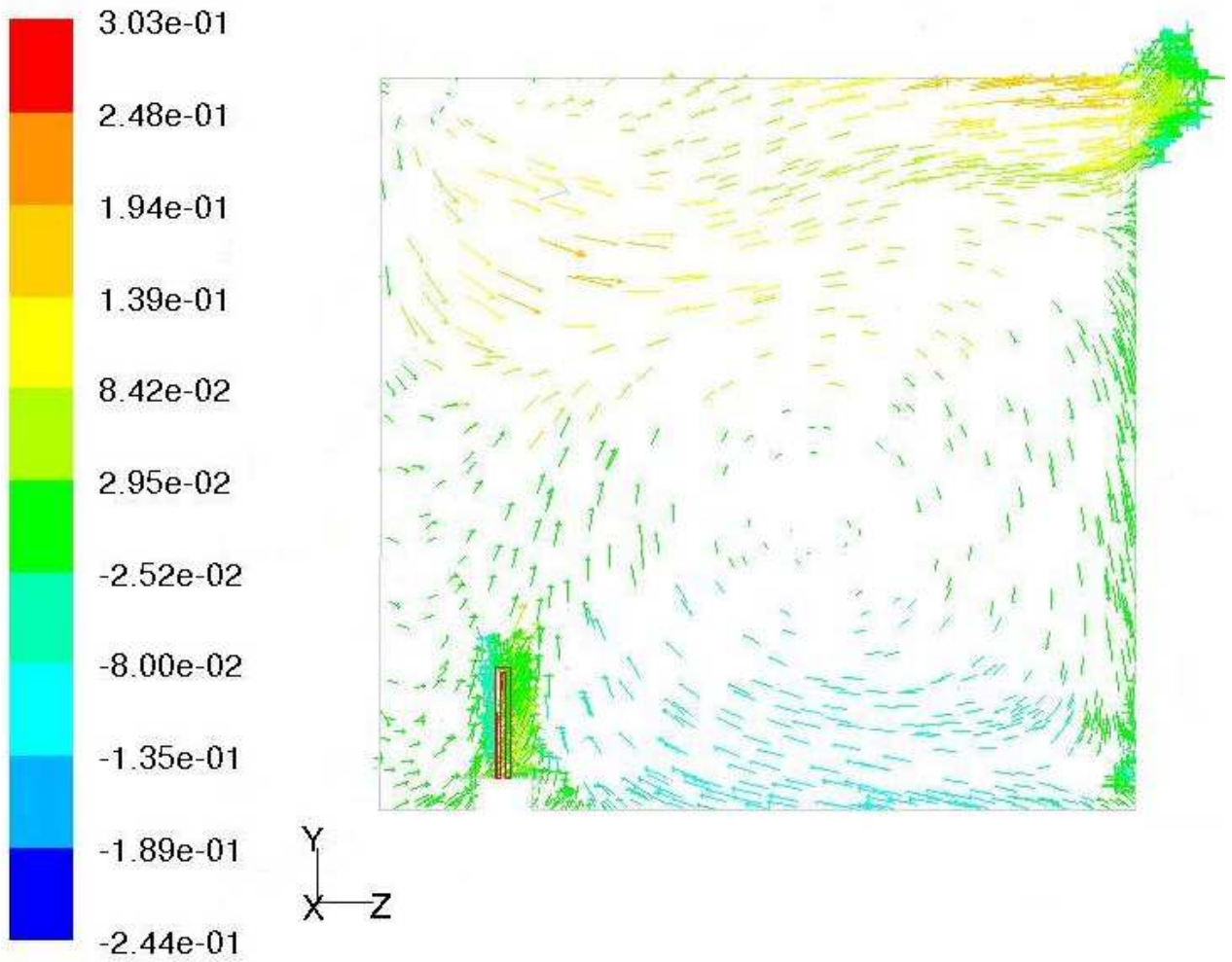
ציור 5.21 שדה הטמפרטורות בחדר במישור המרכזי.



ציור 5.22 שדה הטמפרטורות בחלון העליון של החדר (מבט מקדימה, מישור yx).

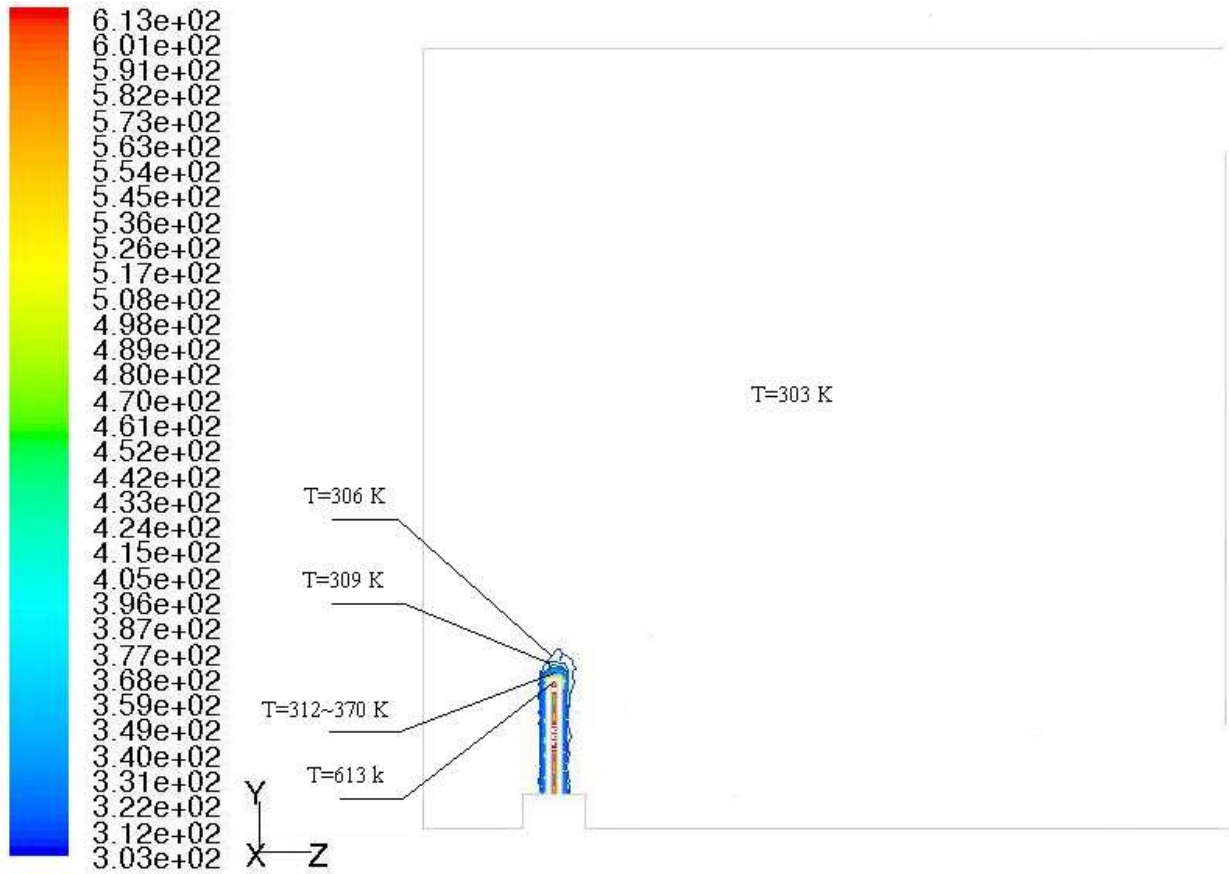


ציור 5.23 שדה המהירויות בחלון העליון של החדר (מבט מקדימה, מישור yx).



ציור 5.24 שדה ווקטורי של המהירויות בחדר (מבט על המישור המרכזי yz).

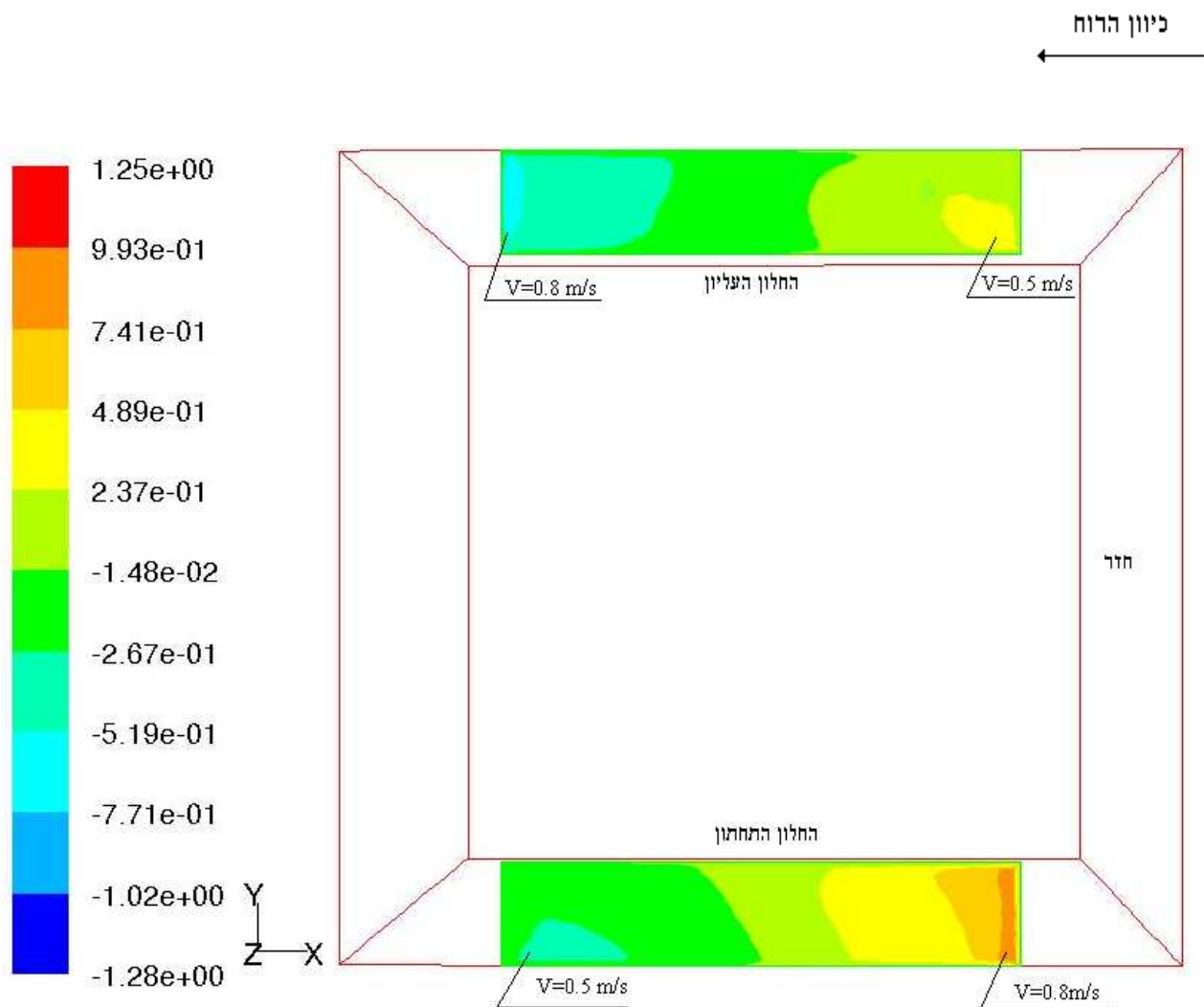
(ב) סימולציות עם שני חלונות פתוחים (displacement ventilation).



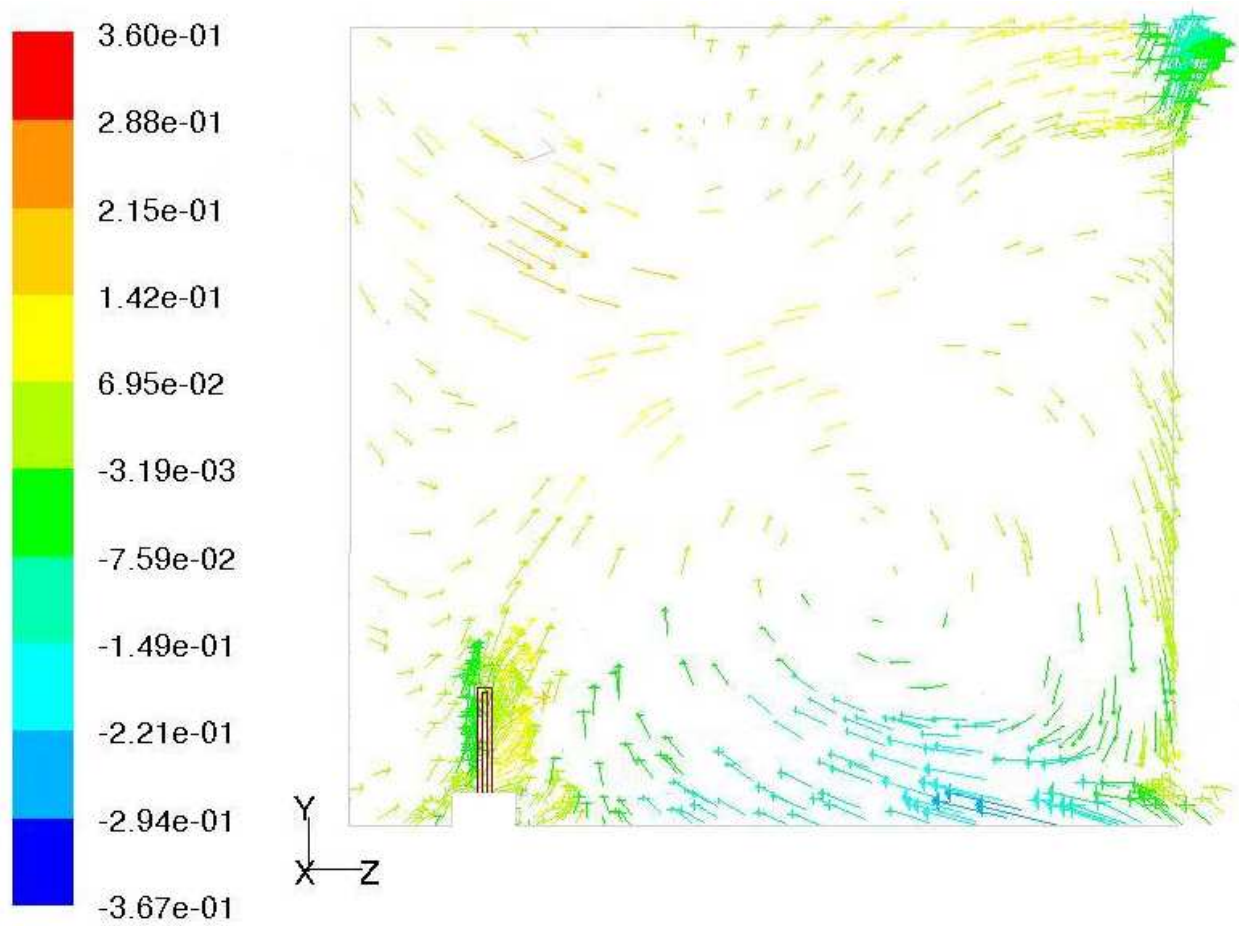
ציור 5.25 שדה הטמפרטורות בחדר במישור המרכזי.







ציור 5.27 שדה המהירויות בשני חלונות (מבט מקדימה, מישור xy).

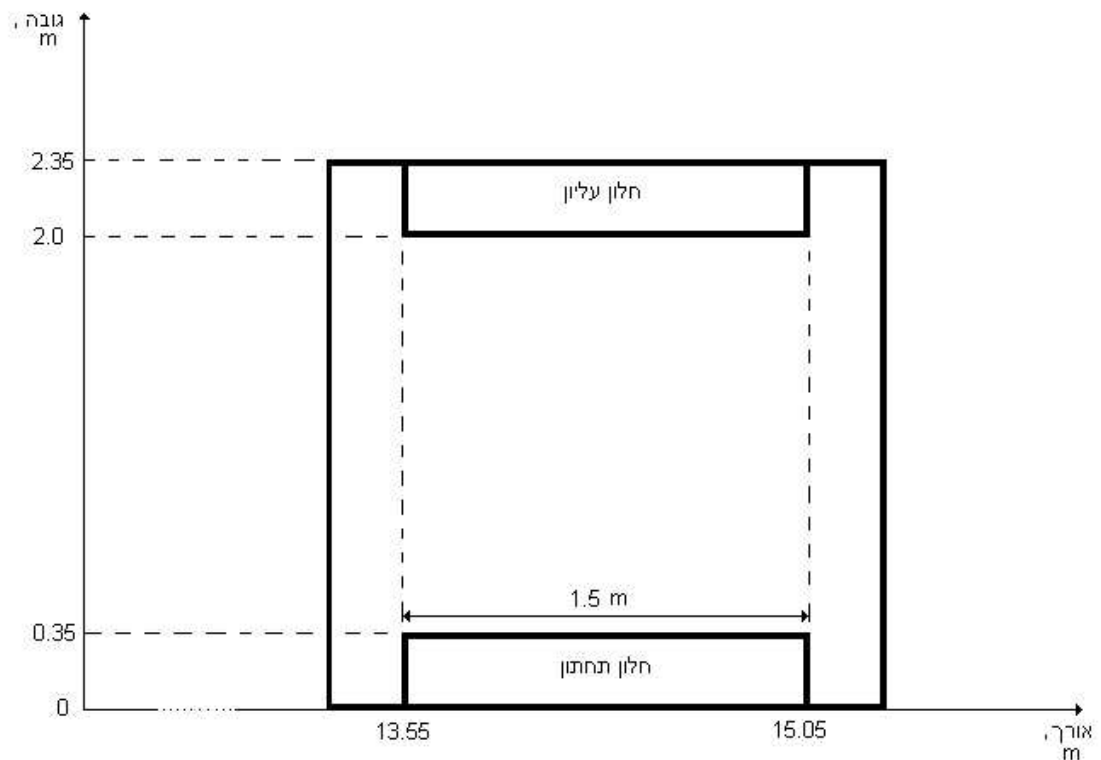


ציור 5.28 שדה ווקטורי של המהירויות בחדר (מבט על המישור המרכזי yz).

בסימולציות שנעשו על מודל בעזרת תוכנת Fluent נבחנו שני פרמטרים עיקריים: השפעת עוצמת הרוח החיצונית על פילוג המהירות ופילוג הטמפרטורה בחלונות.

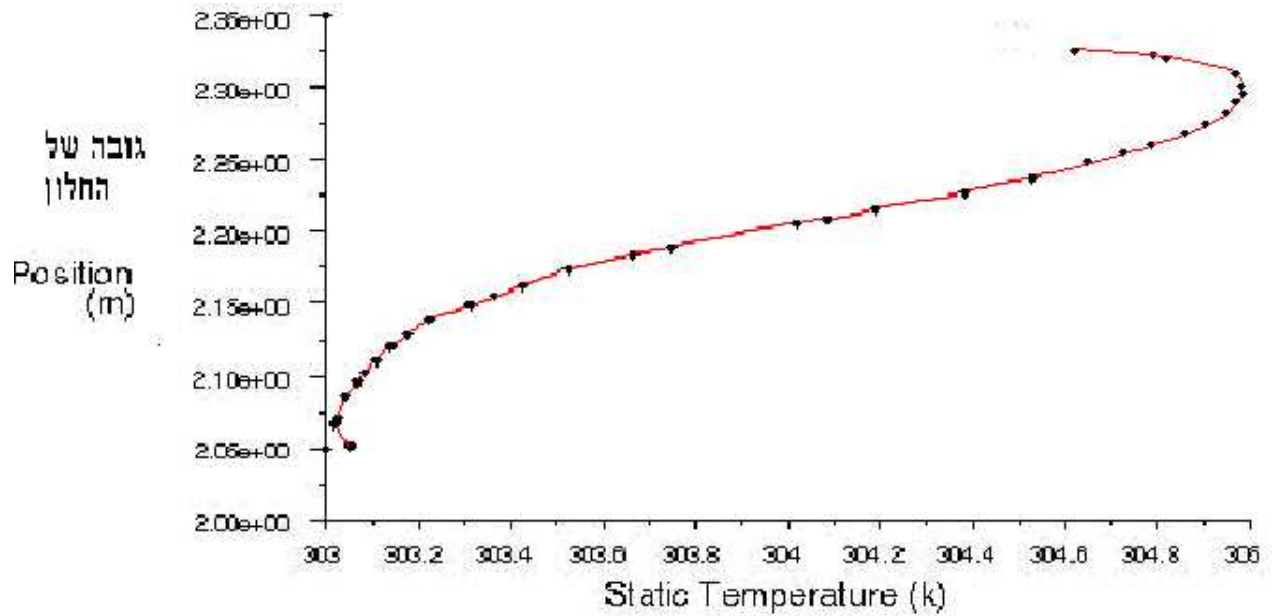
בציורים 5.2, 5.12, 5.21 (mixing ventilation) וציורים 5.7, 5.17, 5.25 (displacement ventilation) ניתן לראות התפשטות הפלומה בחדר במישור מרכזי והקטנתה אם עוצמת הרוח גדלה.

בציורים של שדה הטמפרטורות בחלונות, (מקרה  $V=0$  m/s: ציור 5.3 - mixing ventilation, וציור 5.8 - displacement ventilation) רואים שהתפלגות של הטמפרטורה  $\Delta T \cong 2^\circ\text{C}$  קטנה אם עוצמת הרוח גדלה ל  $\Delta T \cong 1^\circ\text{C}$  (מקרים  $V=1$  m/s: ציור 5.13 - mixing ventilation, וציור 5.18 - displacement ventilation, ו  $V=2$  m/s: ציור 5.22 - mixing ventilation, וציור 5.26 - displacement ventilation).

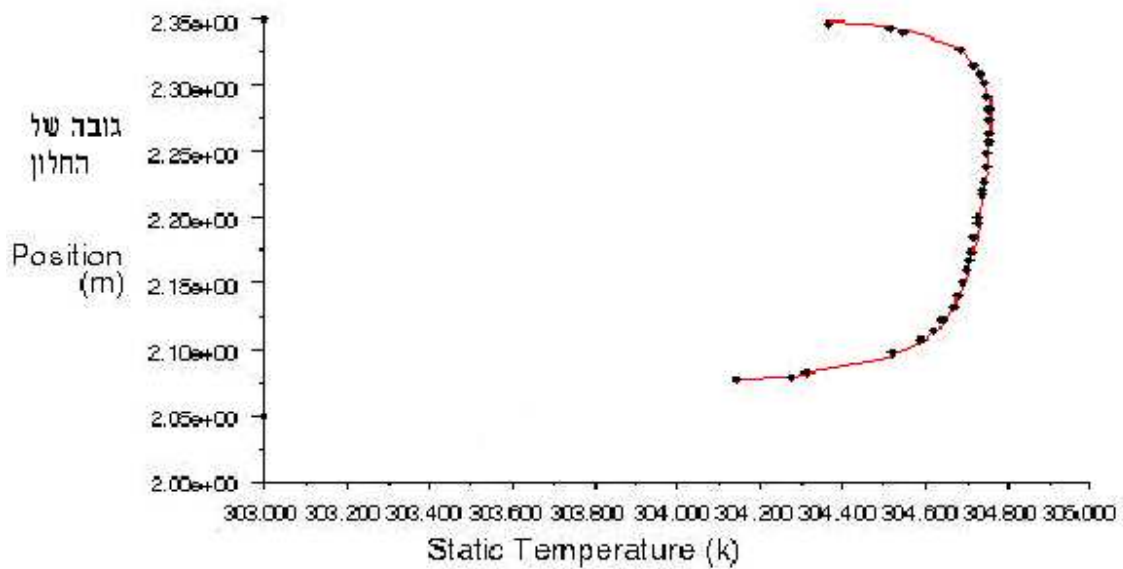


איור 5.5 – איור גובה ואורך של החלונות בחדר ( מבט על המישור xy).

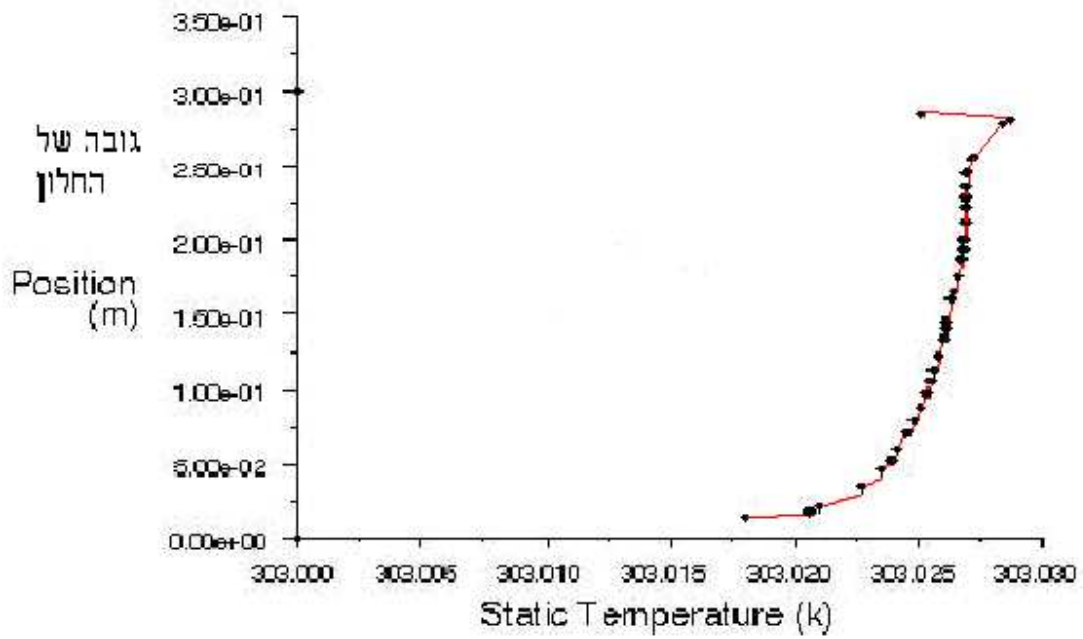
התפלגויות של הטמפרטורה בחלונות (בציר Y – גובה של החלון) במקרה  $V=0$  m/s:



$\Delta T=2^{\circ}\text{C}$ , mixing ventilation – איור 5.1



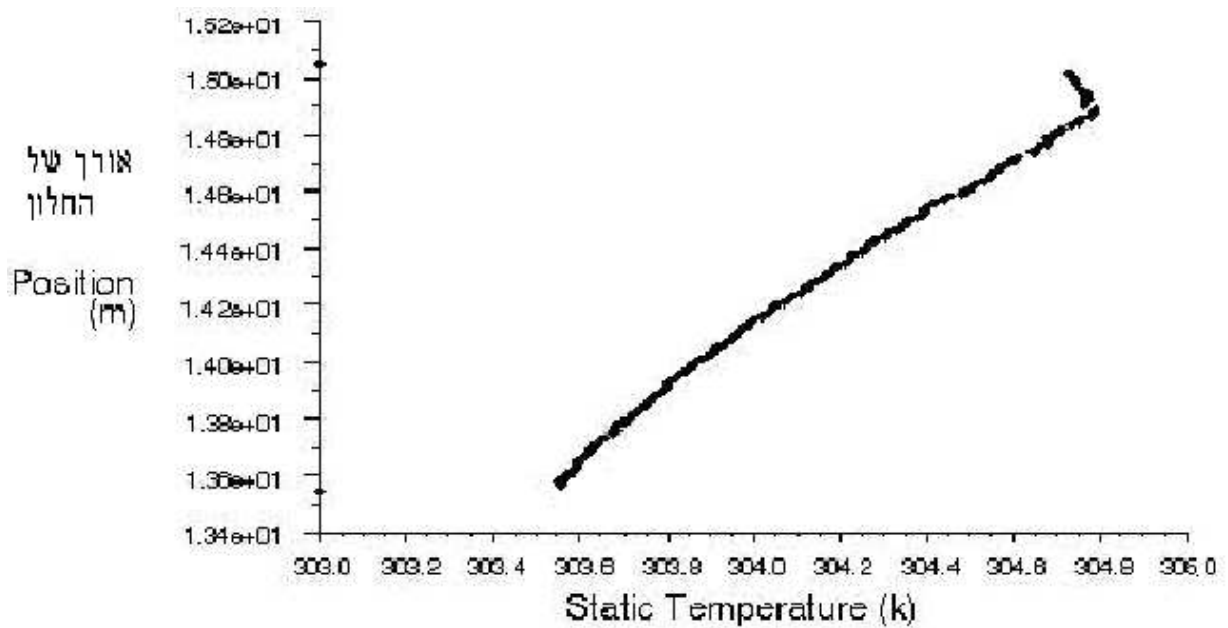
איור 5.2 - displacement ventilation, החלון העליון - אזור יציאת האוויר



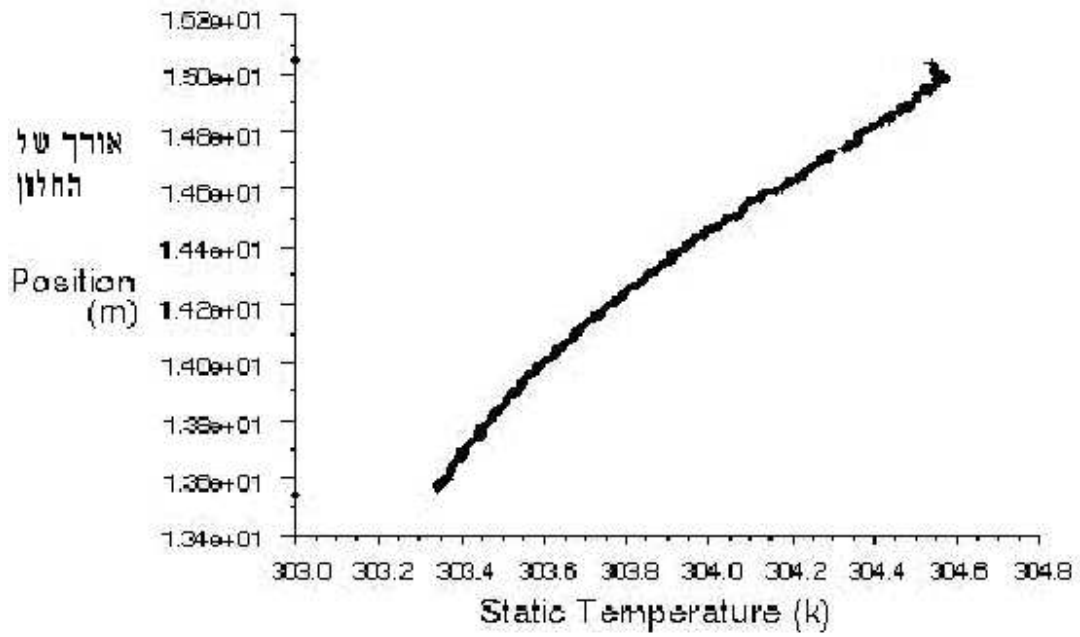
איור 5.3 - displacement ventilation, החלון התחתון - אזור כניסת האוויר

ב-  $\Delta T=1.8^{\circ}\text{C}$  displacement ventilation

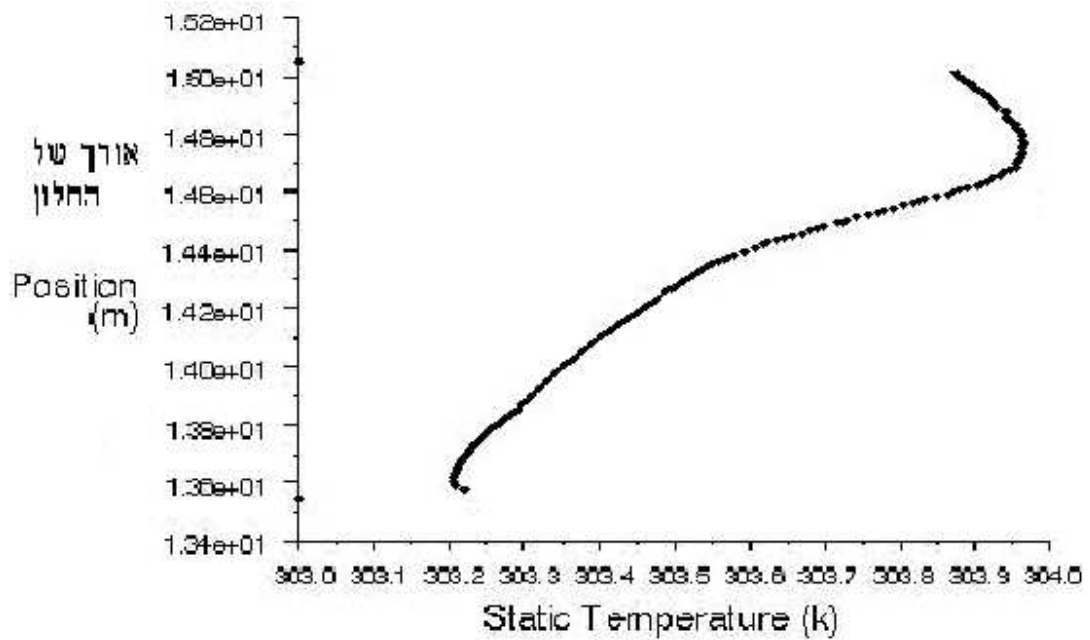
התפלגויות של הטמפרטורה בחלונות (בציר X - אורך של החלון) במקרה  $V=1\text{ m/s}$ , רוח נושבת במקביל לאורך החלון, כיוון הרוח - הפוך לציר X :



איור 5.4 - mixing ventilation,  $\Delta T=1.8^{\circ}\text{C}$



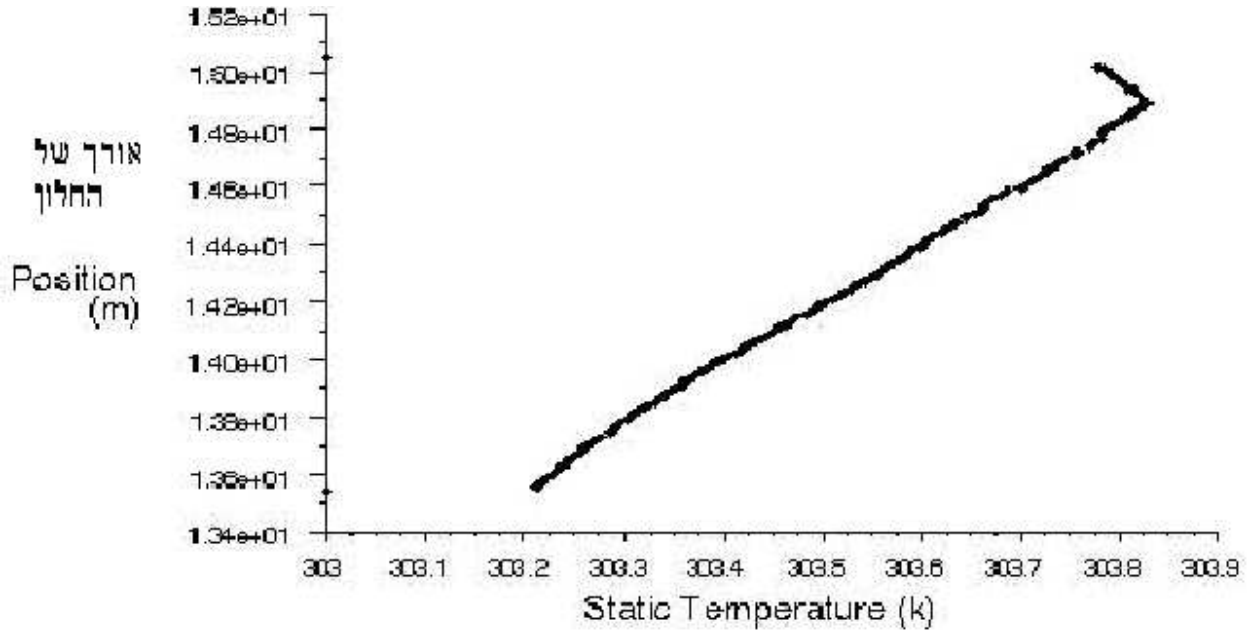
איור 5.5 - displacement ventilation, החלון העליון



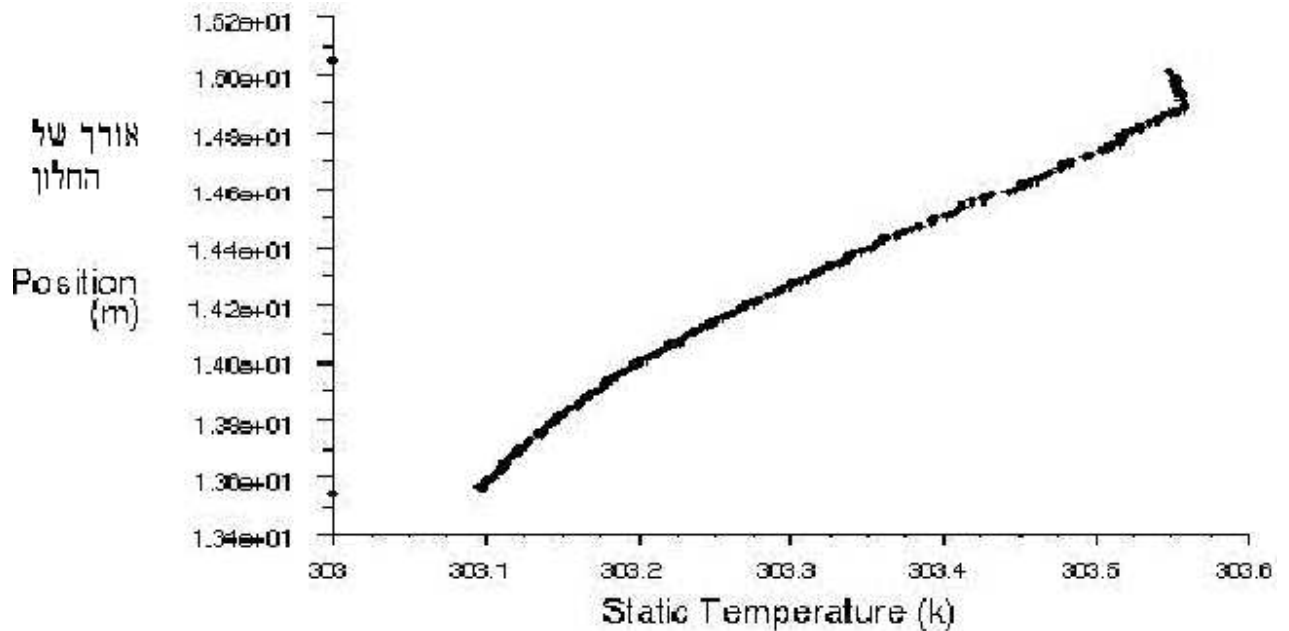
איור 5.6 - displacement ventilation, החלון התחתון

ב-  $\Delta T=1.6^{\circ}\text{C}$  displacement ventilation

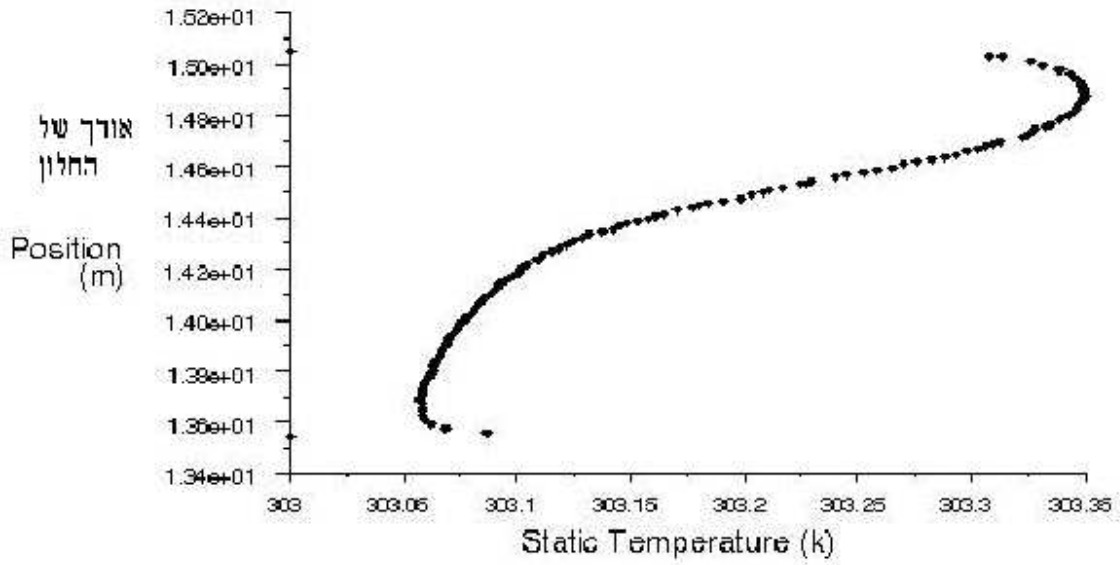
התפלגויות של הטמפרטורה בחלונות (בציר X – אורך של החלון) במקרה  $V=2\text{ m/s}$ , רוח נושבת במקביל לאורך החלון, כיוון הרוח – הפוך לציר X :



איור 5.7 - mixing ventilation,  $\Delta T=0.8^{\circ}\text{C}$



איור 5.8 - displacement ventilation, החלון העליון



איור 5.9 - displacement ventilation, החלון התחתון

ב- displacement ventilation  $\Delta T=0.5^{\circ}\text{C}$

בציורים של שדה המהירויות שדה ווקטורי (5.4, 5.5, 5.9, 5.10, 5.14, 5.15, 5.19, 5.23, 5.27) בחלונות ניתן לראות תלות בין הרוח ואזורי כניסה ויציאה של האוויר. במקרה  $V=0\text{ m/s}$ :



- displacement ventilation



- mixing ventilation

במקרים  $V=2\text{ m/s}$ ,  $V=1\text{ m/s}$ :



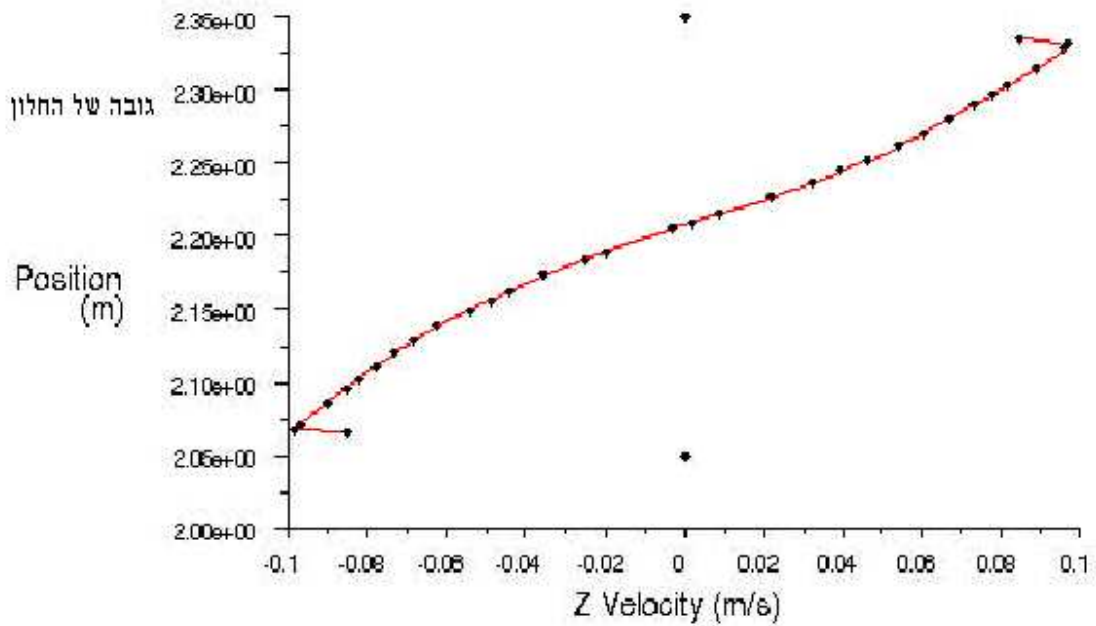
- displacement ventilation



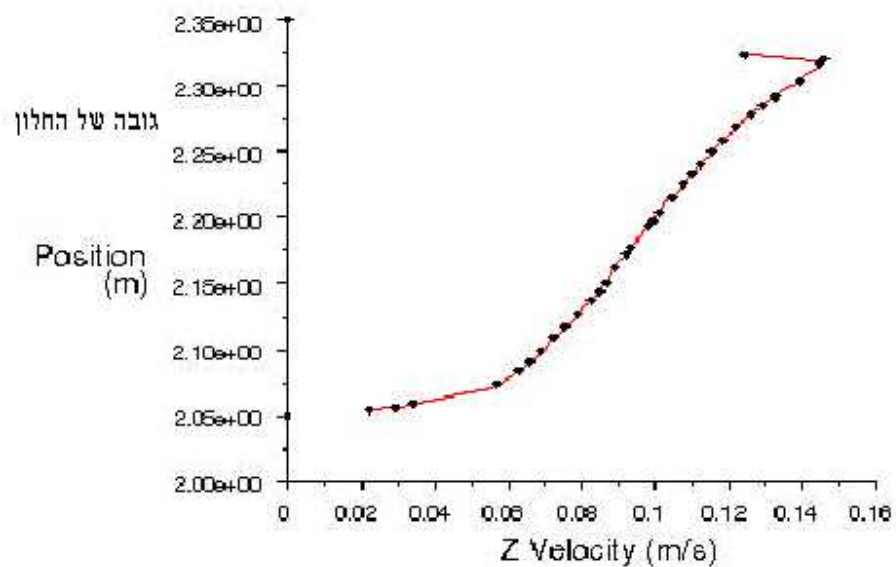
- mixing ventilation



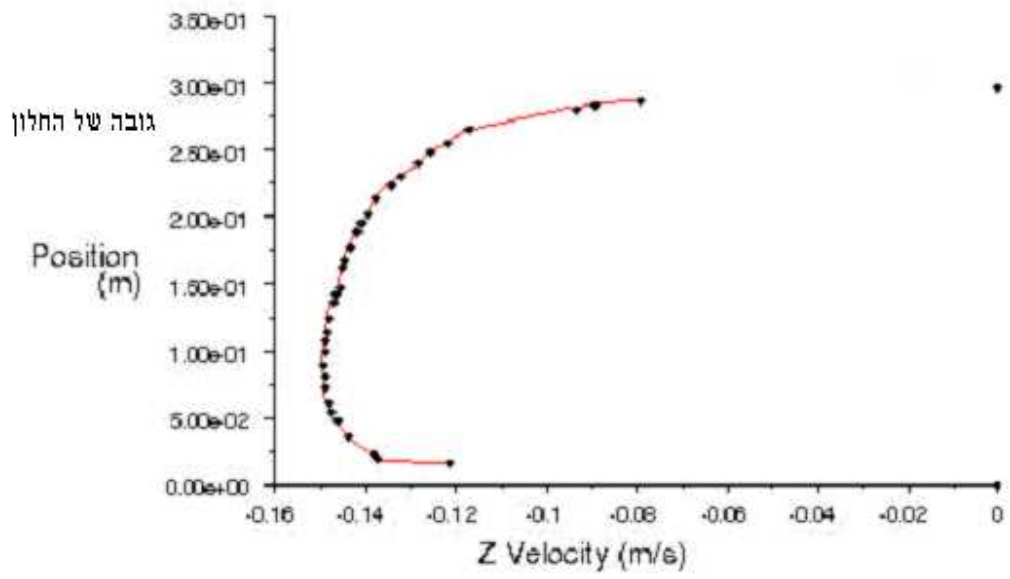
התפלגויות של המהירות האוויר בחלונות (בציר Y – גובה של החלון) במקרה  $V=0$  m/s:



איור 5.10 – mixing ventilation, מהירות האוויר בחלון  $V_{max}=0.1$  m/s



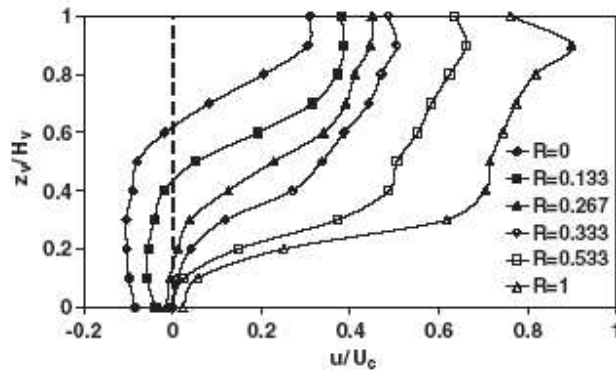
איור 5.11 – displacement ventilation, החלון העליון



איור 5.12 - displacement ventilation, החלון התחתון, גובה של החלון

מהירות האוויר בחלונות ב displacement ventilation  $V_{max}=0.15$  m/s

התוצאות שהתקבלו במהלך מקרה 1 - מהירות הרוח  $V=0$  m/s - אוורור מושרה כוחות ציפה בלבד ללא רוח, (איור 5.10 - mixing ventilation, מהירות האוויר בחלון, איור 5.11 - displacement ventilation, החלון העליון) מתאימות לתוצאות הניסויים ללא רוח שבוצעו באותו חדר ופורסמו במאמר (Haslavsky, V., Tanny, J. and Teitel, M. (2005) (איור 5.5):



איור 5.5 - הפרופיל אנכי של רכיב מנורמל של מהירות הרוח דרך פתח עליון לערכים שונים של  $R^*$  בהספק מקור חום 500 W. הערכים השלילים מראים כניסת אוויר.

$$R^* = \frac{h_U}{h_L} - \text{יחס בין גובה של פתיחה של פתחים תחתון ועליון.}$$

אוורור ערבוב: (Mixing ventilation)  $R^* = 0$  - פתח תחתון סגור, פתח עליון פתוח.

אוורור דחיקה (Displacement ventilation)  $R^* = 1$  - פתח עליון ותחתון פתוחים.

$H_v$  - גובה של פתח עליון, (30 סמ').

$Z_v$  - קואורדינטה אנכי לכיוון גובה של פתח עליון.

מהירות האוויר הייתה מנורמלת על ידי מהירות קונבקטיבית אופיינית -  $U_c$ .

$$U_c = \sqrt{g \alpha \Delta T H_E}$$

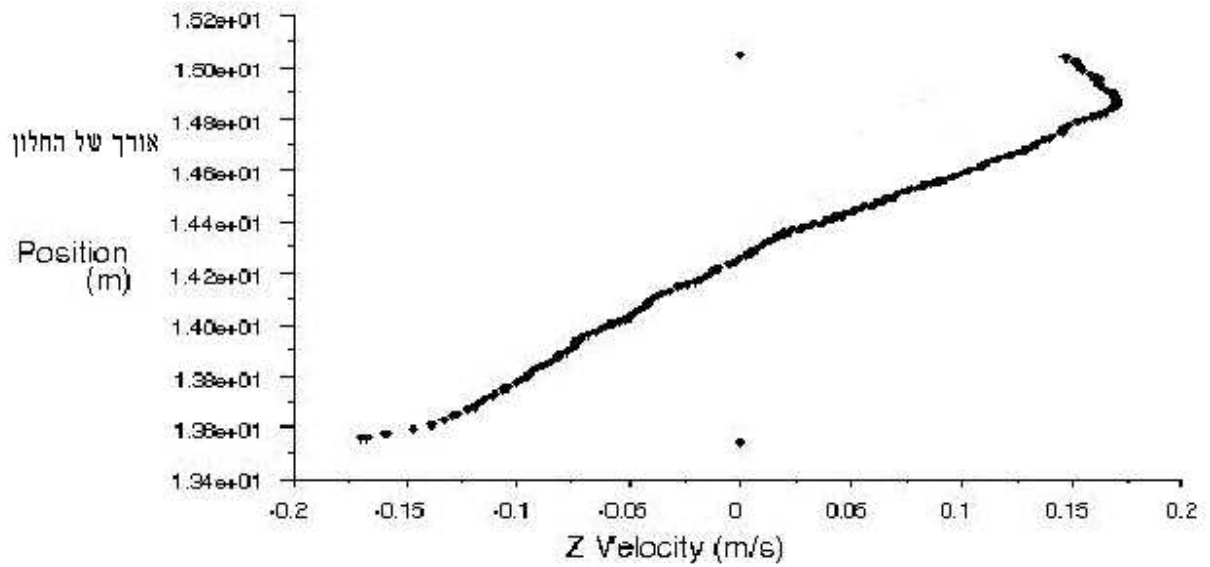
$g$  - תאוצה עקב כוח המשיכה.

$\alpha$  - מקדם התפשטות תרמית.

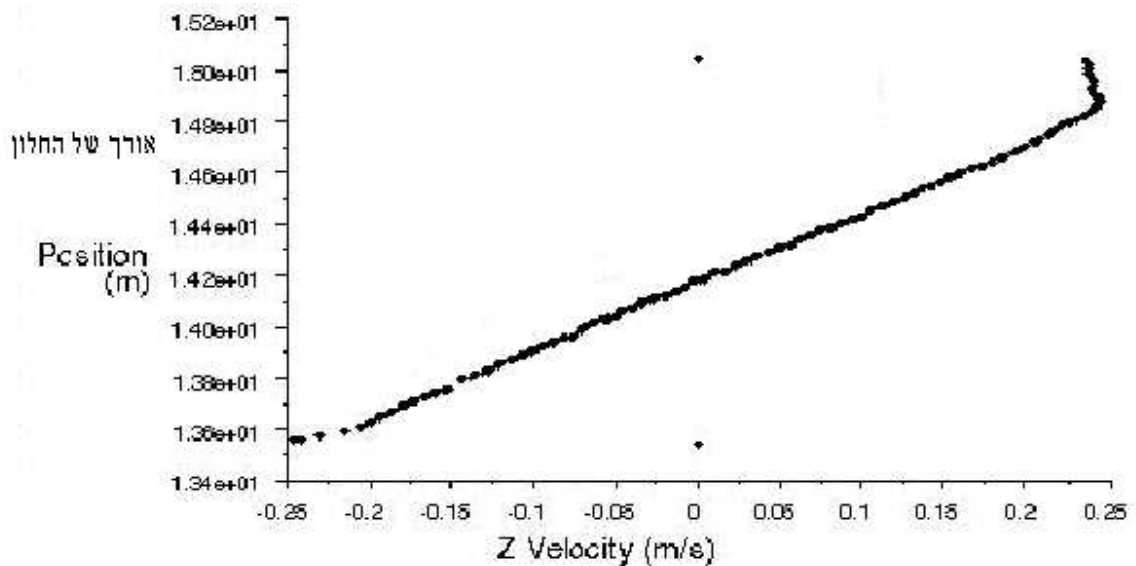
$\Delta T$  - הבדל בין טמפרטורות בתוך ובחוץ החדר.

$H_E$  - גובה מוחלט של החדר.

התפלגויות של המהירות האוויר בחלונות (בציר X – אורך של החלון) במקרה  $V=1$  m/s, רוח נושבת במקביל לאורך החלון, כיוון הרוח – הפוך לציר X:

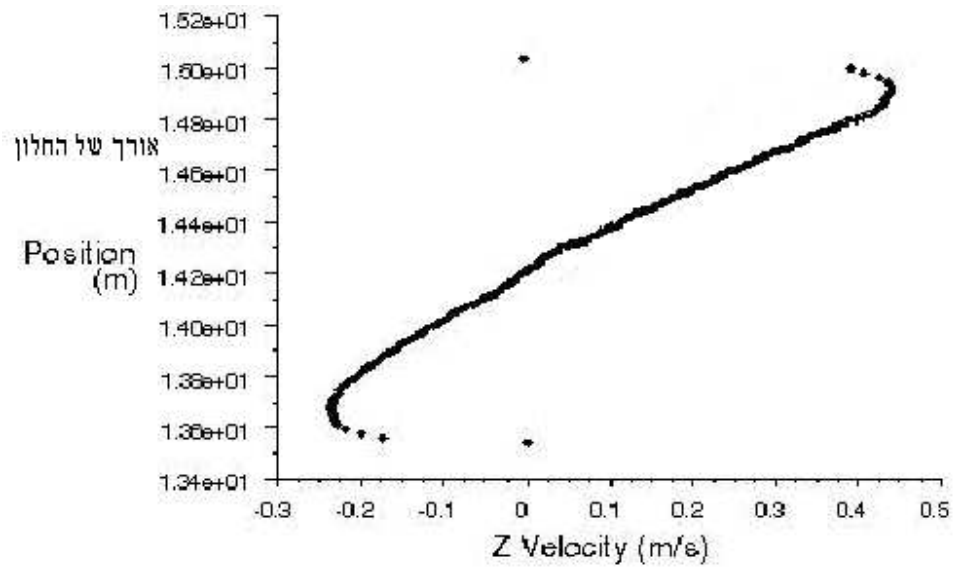


איור 5.13 – mixing ventilation, מהירות האוויר בחלון  $V_{max}=0.17$  m/s



איור 5.14 - displacement ventilation, החלון העליון

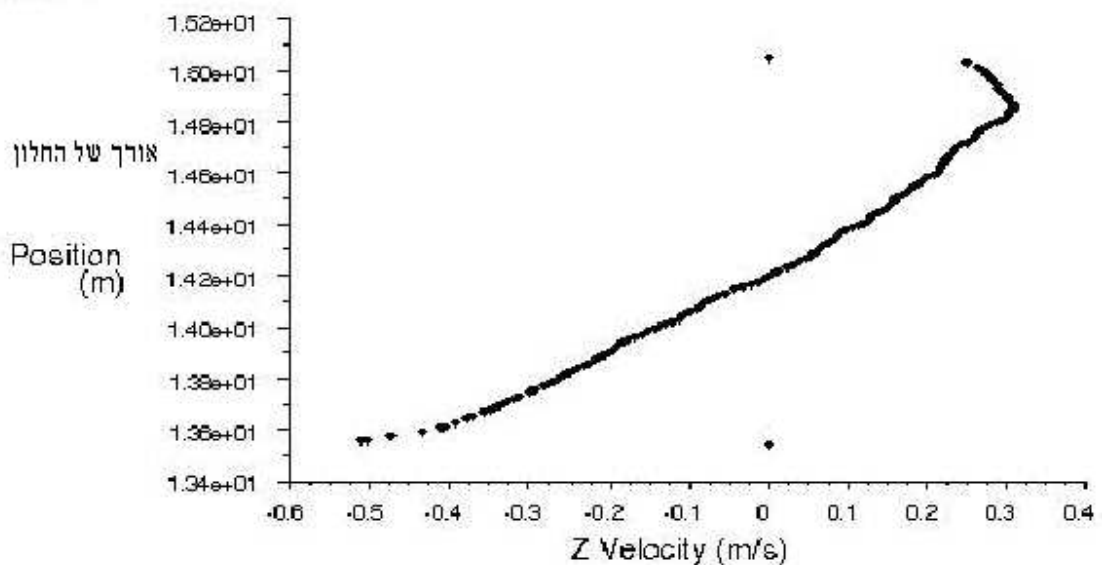
מהירות האוויר בחלון ב displacement ventilation  $V_{max}=0.25$  m/s



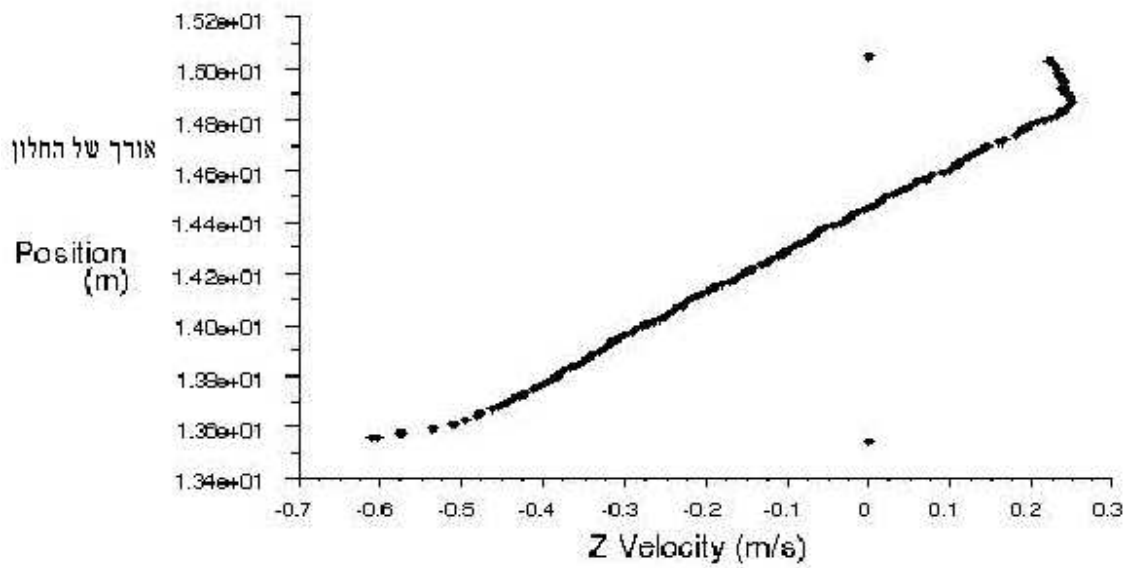
איור 5.15 - displacement ventilation, החלון התחתון

$V_{max}=0.45$  m/s displacement ventilation במהירות האוויר בחלון ב

התפלגויות של המהירות האוויר בחלונות (בציר X – אורך של החלון) במקרה  $V=2$  m/s, רוח נושבת במקביל לאורך החלון, כיוון הרוח – הפוך לציר X:

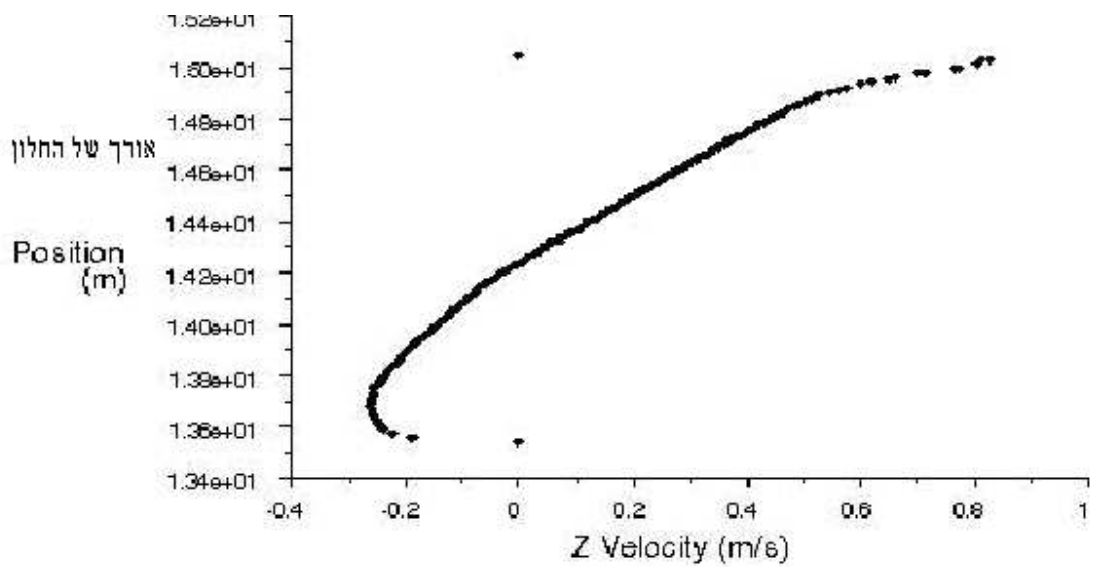


איור 5.16 – mixing ventilation, מהירות האוויר בחלון העליון  $V_{max}=0.5$  m/s



איור 5.14 - displacement ventilation, החלון העליון

$V_{max}=0.25$  m/s displacement ventilation ב מהירות האוויר בחלון ב



איור 5.15 - displacement ventilation, החלון התחתון

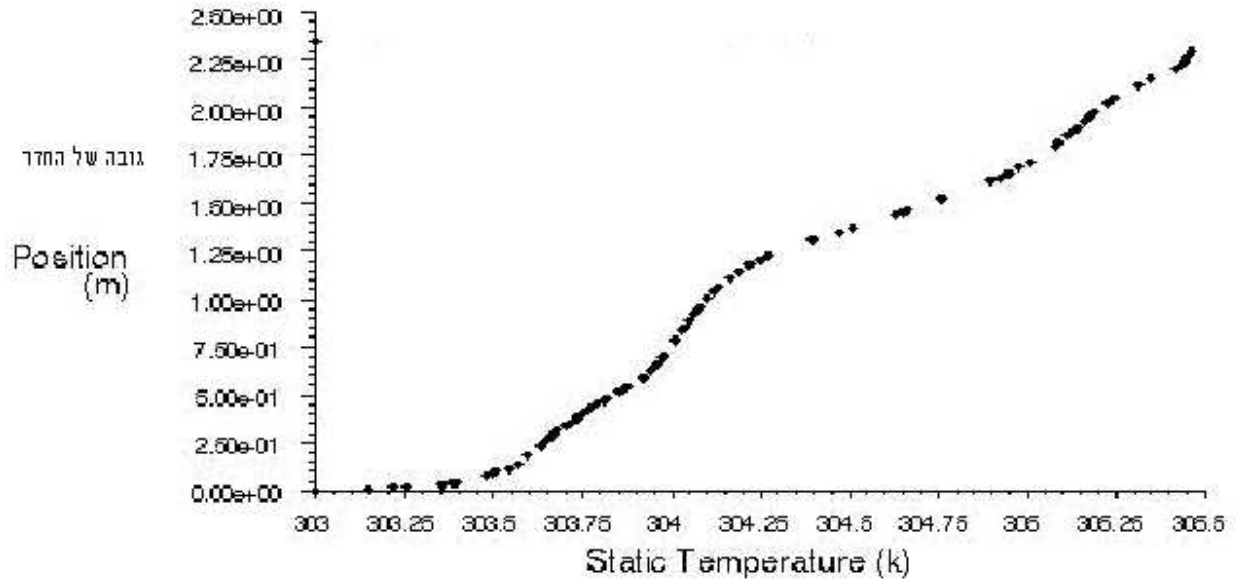
$V_{max}=0.45$  m/s displacement ventilation ב מהירות האוויר בחלון ב

באיורים 5.16 – 5.21 ניתן לראות התפלגות של טמפרטורה באמצע החדר תלויה בגובה של החדר באווורור ערבוב ובאווורור דחיקה.

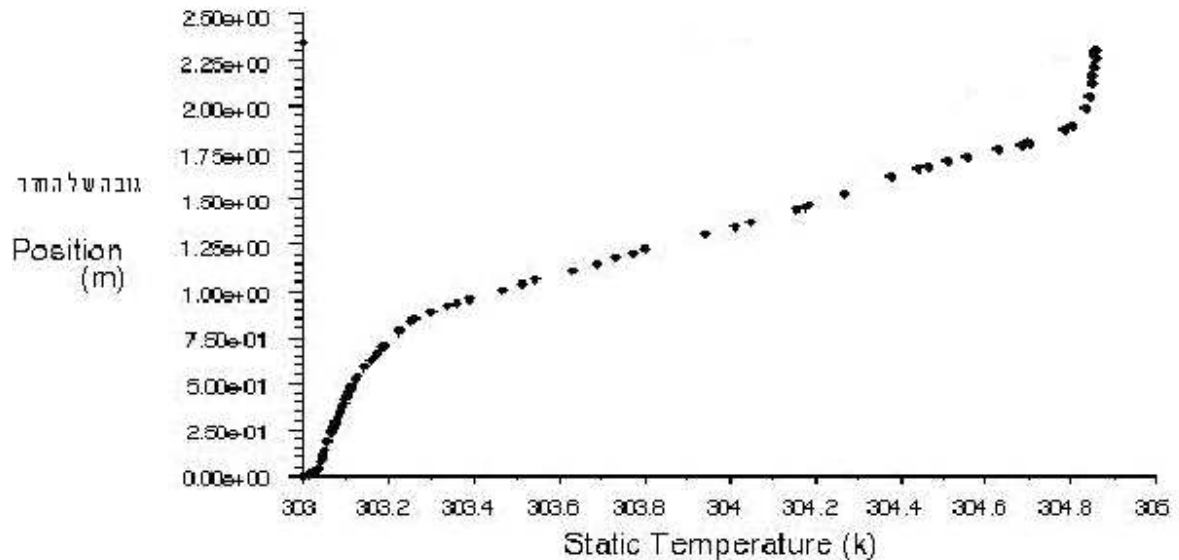
תוצאות הסימולציה עבור אוורור ערבוב מראות גרדיאנט טמפרטורה בחדר הוא חזק.

תוצאות הסימולציה עבור אוורור דחיקה מראות באזור התחתון הפרש הטמפרטורה כמעט קבוע עם הגובה, באזור האמצעי הגרדיאנט גדל בצורה הדרגתית ובאזור עליון שוב מתמתן.

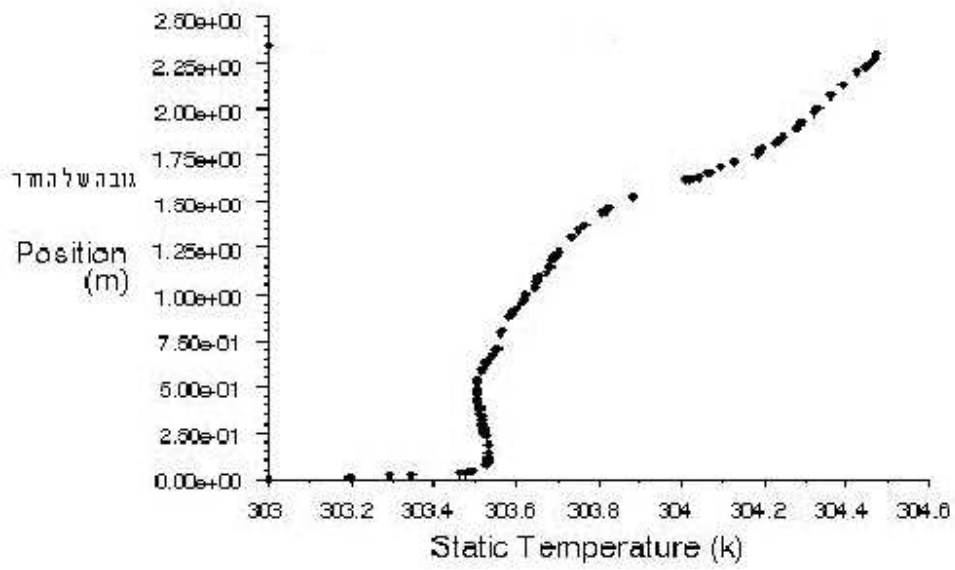
עם הגדלת עוצמת הרוח גרדיאנט טמפרטורה בחדר קטן ומתיישר.



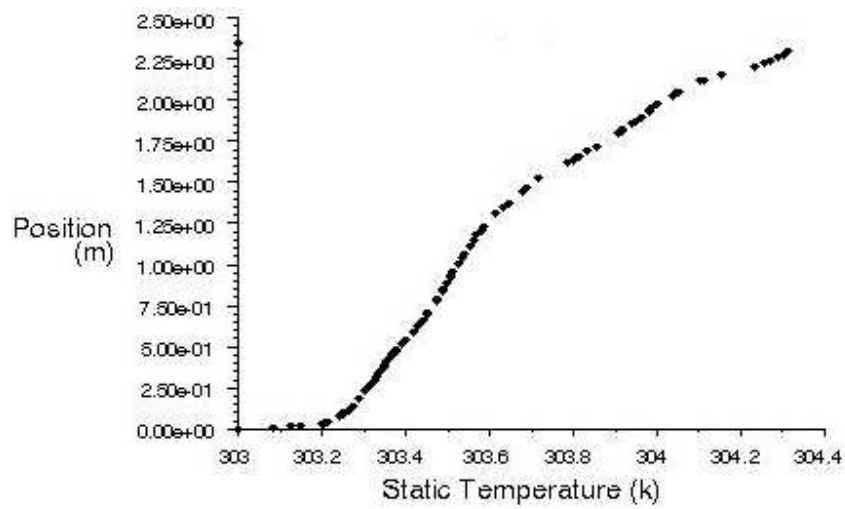
איור 5.16 - התפלגות של הטמפרטורה באמצע החדר באווורור הערבוב ( $V=0$  m/s)



איור 5.17 - התפלגות של הטמפרטורה באמצע החדר באווורור דחיקה ( $V=0$  m/s)

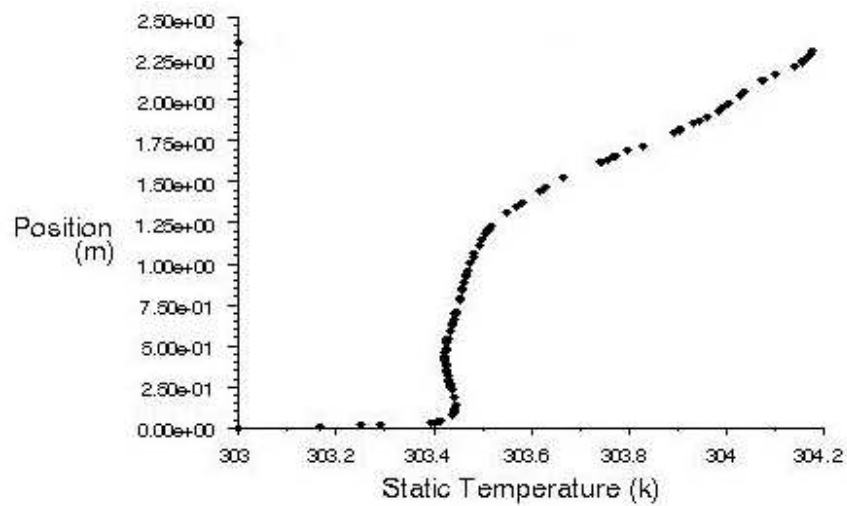


איור 5.18 - התפלגות של הטמפרטורה באמצע החדר באוויר ערבוב ( $V=1$  m/s)

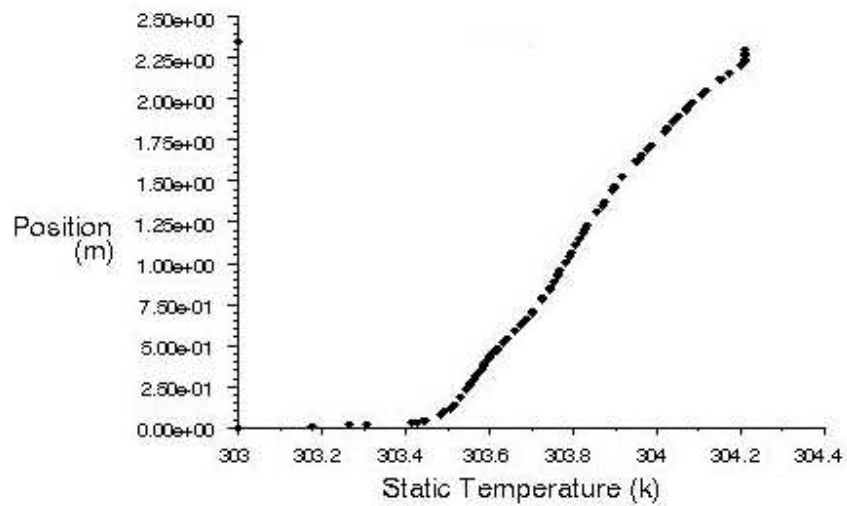


איור 5.19 - התפלגות של הטמפרטורה באמצע החדר באוויר דחיקה ( $V=1$  m/s)





איור 5.20 - התפלגות של הטמפרטורה באמצע החדר באוויר הערוב ( $V=2$  m/s)



איור 5.21 - התפלגות של הטמפרטורה באמצע החדר באוויר דחיקה ( $V=2$  m/s)

## 6. סיכום

בעבודה זו בוצעה אנליזת סימולציות נומריות של אוורור טבעי בהשפעת כוחות ציפה ורוח בחדר מרובע בגודל  $m2.42 \times m2.35 \times m2.43$  עם שני פתחי אוורור אנכיים ועם מקור חום בהספק  $500W$ , בעזרת תוכנת Fluent על העתק מדויק ולאחר מכן הושו תוצאות למקרים הדומים אשר מופיעים בספרות.

תהליך החקירה הנומרית עבור החדר כלל בחינה של השפעת הרוח על שדה הזרימה בחדר עבור שתי תצורות אוורור שונות. התצורה הראשונה שנבדקה הייתה פתיחת החלון העליון בלבד, לאחר מכן פתיחת שני חלונות (כיוון הרוח היה מקביל לחלונות של החדר). הצגת התוצאות הנומריות עבור החדר כללה תהליך מסודר שבו הוצגו שדה המהירויות ושדה הטמפרטורות המתקבלות בחדר ובחלונות של החדר.

מתוך התוצאות הנומריות עולה המסקנה החשובה שכיוון הרוח משפיע על כיוון זרימת האוויר בחלונות החדר (כניסה או יציאה) ועוצמת הרוח משפיע על גרדיאנט הטמפרטורה בחדר. בנוסף ניתן לראות כי המגמה של אוויר הנכנס דרך החלון (מהירות שלילית) או של אוויר היוצא דרך החלון (מהירות חיובית) הינה דומה עבור הסימולציה וסימולציות מסקר ספרות: התוצאות שהתקבלו במהלך שיאף 5 מקרה 1 - מהירות הרוח  $V=0$  m/s - אוורור מושרה כוחות ציפה בלבד ללא רוח, (ציור 5.5 - שדה ווקטורי של המהירויות בחלון העליון של החדר ( אוורור ערבוב ), ציור 5.11 - שדה ווקטורי של המהירויות בחדר ( אוורור דחיקה ) - מבט על החלון העליון ) מתאימות לתוצאות הניסויים ללא רוח שבוצעו באותו חדר ופורסמו במאמר Tanny, J. , Haslavsky, V. and Teitel, M. (2007) : איור 5.5 - שדה ווקטורי של מהירות האוויר בפתח העליון.

התוצאות שהתקבלו במהלך שיאף 5 מקרה 1 - מהירות הרוח  $V=0$  m/s - אוורור מושרה כוחות ציפה בלבד ללא רוח, (איור 5.10 - אוורור ערבוב, התפלגות מהירות האוויר בחלון , איור 5.11 - אוורור דחיקה, התפלגות מהירות האוויר בחלון העליון) מתאימות לתוצאות הניסויים ללא רוח שבוצעו באותו חדר ופורסמו במאמר Tanny, J. , Haslavsky, V. and Teitel, M. (2005) : איור 5.5 - הפרופיל אנכי של רכיב מנורמל של מהירות הרוח דרך פתח עליון.

תוצאות נוספות שהוצגו (הגרפים שחושבו מתוך תוכנת Fluent) הראו את התפלגויות של מהירות וטמפרטורות בכל אחד מחלונות החדר וגם התפלגויות של הטמפרטורה בתוך החדר (איורים 5.16 - 5.21). באיורים אלה ניתן לראות שעם הגדלת עוצמת הרוח גרדיאנט טמפרטורה בחדר קטן ומתיישר - כצפוי.

אם כן, שימוש בתוכנת CFD כמו Fluent הוכיח את עצמו ככלי יעיל מאוד בחיזוי של שדה הזרימה בתוך החדר. הסימולציה הנומרית הנוכחית כללה מידול של טמפרטורה ומידול של מהירות.

ניתן ורצוי להרחיב את העבודה ולהעמיק את הידע באוורור טבעי במחקרים עתידיים בשימוש תוכנות CFD.

- [1] F. Allard, *Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook*, James & James Ltd., London, 1998.
- [2] C. Alloca, Q. Chen, L. R. Glicksman, Design analysis of single-sided natural ventilation, *Energy and Building* 35 (2003) 785-795.
- [3] J.D. Anderson, *Computational Fluid dynamics: the basics with applications*, McGraw-Hill Book Company, 1995.
- [4] G.P.A. Bot, *Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model*, Agricultural University, Wageningen, Ph.D. Dissertation, 1983
- [5] J.F. Busch, A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand, *Energy and Buildings* 18 (3/4) (1992) 235-249.
- [6] D. Clarke, Abreath of fresh air, *Hospital Development* 32 (11) (2001) 13-17.
- [7]. Dascalaki *et al.*, 1996. On the combination of air velocity and flow measurements in single sided natural ventilation configurations. *Energy and Buildings*, 24: 155-165.
- [8]. Eftekhari *et al.*, 2003. Air flow distribution in and around a single sided naturally ventilation room. *Building and Environments*, 38: 389-397.
- [9] *Energy Consumption Guide 19, Energy Efficiency in Offices*, Energy Efficiency Office/HMSO, London, 1993.
- [10] *Energy Information Administration, State Energy Data Report 1995*, 3-7 Tables, 1995
- [11] D.W. Etheridge, Unsteady flow effects due to fluctuating wind pressures in natural ventilation design-instantaneous flow rates, *Building and Environment* 35 (4) (2000) 321-337.
- [12] J.H. Ferziger, M. Peric, *Computational methods for fluid dynamics*, third edition, Springer Book Company, 2002.
- [13] J.J. Finnegan, C.A.C. Pickering, P.S. Burge, The sick building syndrome: prevalence studies, *British Medical Journal* 289 (1994) 1573-1575.
- [14]. Haslavsky, V. , Tanny, J. and Teitel, M. (2005). Interaction between the mixing and displacement modes in a naturally ventilated enclosure. *Building and Environment*, 41, 1755-1761.
- [15] J. Hirunlabh, S. Wachirapuwadon, N. Pratinthong, J. Khedari, New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation, *Building and Environment* 36(3) (2001) 383-391.

- [16] Howell SA, Potts I. On the natural displacement flow through a full-scale enclosure, and the importance of the radiative participation of the water vapor content of the ambient air. *Building and Environment* 2002; 37: 817-823
- [17] A. Krishan, *Climate Responsive Architecture: A Design Handbook for Energy Efficient Buildings*, McGraw-hill, New York, 2001.
- [18] G.J. Levermore, The exponential limit to the cooling of buildings by natural ventilation, *Building Services Engineering Research and Technology* 23 (2) (2002) 119-125.
- [19]. Mokhtarzadeh-Dehghan *et al.*, 1990. Transfer rates in single-sided Ventilation', *Building and Environments*, 25: 155-161.
- [20]. Papakonstantinou *et al.*, 2000. Numerically simulation of air flow field in single sided ventilated buildings. *Energy and Buildings*, 33: 41- 48.
- [21] Ramos, J.A.E., Martinho, N.A.G, Pitarma, Rui A., Carvalho,M.G., 2002. *Tree dimensional natural convection in rooms connected to the outside through large openings*, Roomvent 2002, Copenhagen, Denmark.
- [22] A.M. Rodrigues, A. Canha da Piedade, A. Lahellec, J.Y. Grandpeix, Modelling natural convection in a heated vertical channel for room ventilation, *Building and Environment* 35(5) (2000) 455-469.
- [23] C.T. Shaw, *Using computational fluid dynamics*, Prentice Hall, 1992.
- [24]. Sinha, S.L., R.C. Arora and Subhransu Roy, 2002. Numerical prediction of the laminar two dimensional room air flows with and without buoyancy. *Fluid Mechanics and Fluid Power*, pp: 563-568.
- [25]. Sinha, S.L., R.C. Arora and Subhransu Roy, 2002. Numerical simulation of room air distribution with Buoyancy at different outlet locations. *Fluid Mechanics and Fluid Power*, pp: 181-190.
- [26]. Sinha, S.L., R.C. Arora and Subhransu Roy, 2002. Numerical simulation of buoyant and non-buoyant flows in a room using a low-Reynolds number turbulence model. *Fluid Mechanics and Fluid Power*, pp: 569-575.
- [27]. Tanny, J. , Haslavsky, V. and Teitel, M. (2007). Airflow and heat flux through the vertical opening of buoyancy-induced naturally ventilated enclosures. . *Energy and Buildings*, 40,637-646.
- [28]. Teitel, M. and Tanny, J. (1999). *Natural Ventilation of Greenhouses: Experiments and Model*, *Agricultural and Forest Meteorology*, 96, pp.59-70.
- [29]. Teitel, M. and Tanny, J. (2005). Turbulent transport of scalars through roof window in a naturally ventilated enclosure, *Flow, Turbulence and Combustion*, 74, pp.21-24.

- [30]. Telebany *et al.*, 1985. Single sided ventilation Part- I – The flow between a cavity and external air stream. *Energy and Buildings*, 20: 15-24.
- [31] H. Tennekes, J.L. Lumley, *A first course in turbulence*, Fifth Edition, MIT Press, 1972.
- [32] T. Willmert , The return of natural ventilation, *Architectural Record* 189 (7) (2001) 137-148.
- [33] R. Zhao, Y. Xia, Effective non-isothermal and intermittent air movement on human thermal responses, *Roomvent* 2 (1998) 351-357.
- [34] G. Ziskind , V. Dubovsky, R. Letan, Ventilation by natural convection of a one-story building *Energy and Buildings* 34 (2002) 91.

## Numerical simulations on the effects of buoyancy and wind forces on natural ventilation of enclosures

Marina Nedelko

### Abstract

Numerical simulations analysis was carried out to study influence of natural ventilation and wind forces in the large-scale enclosure equipped with a localized heat source and two vertical openings (upper and lower) on one of the sidewalls. The enclosure was located inside a large hall to minimize undesired effects of external wind and solar radiation. The Numerical simulations analysis was carried out with software CFD FLUENT. Numerical investigation process for the enclosure included assessing the effect of wind on flow in the room for two different ventilation configurations. The first configuration tested was the only top window opening, then open two windows (wind direction was parallel to the windows of the room). Numerical results are presented for room orderly process, which included a velocity fields and temperature fields in the room and in the windows of the room. From the numerical results indicate the important conclusion that wind direction affects on the airflow direction in the room windows (entry or exit) and wind power affects on the temperature gradient in the room. Can be seen that the trend of air enters through the window (negative velocity) or outgoing air through the window (positive velocity) and with increasing wind power temperature gradient in the room small and flattens.