

אוניברסיטת תל - אביב
הפקולטה להנדסה ע"ש איבי ואלדר פליישמן
בית הספר לתארים מתקדמים ע"ש זנדמן-סליינר

תופעות מעבר באורור טבעי מושרה ציפה

חיבור זה הוגש כעבודת גמר לקראת התואר "מוסמך אוניברסיטה" בהנדסה מכנית

על - ידי

ויטלי חסלבסקי

העבודה נעשתה בבית הספר להנדסה מכנית, המחלקה למכניקת זרימה ומעבר חום

בהנחית: פרופ' אליעזר קיט

דר' יוסף טנאי

דר' מאיר טייטל

תקציר

אוורור טבעי מוגדר כאוורור המונע ע"י כוחות טבעיים של רוח והפרשי טמפרטורה. האוורור הטבעי הוא שיטה אמינה ויעילה, שאינה דורשת תחזוקה רבה וחסכונית באנרגיה לשמירת איכות האוויר ואקלים נוח בתוך הבניינים. הרעיון המרכזי באוורור טבעי הוא שזרימת האוויר בתוך המבנה מונעת ע"י שני כוחות טבעיים זמינים: כוח מושרה ציפה וכוחות הרוח, ובשימוש נכון בהם הניצול שלהם כרוך בעלות מינימאלית.

עד היום נחקרו שני אופנים של אוורור טבעי: אוורור ערבוב (mixing ventilation) ואוורור דחיקה (displacement ventilation) כאשר כל אופן נלמד בנפרד. במצבים מסוימים יכול להתרחש מעבר מאופן אחד לשני וכן תיתכן אינטראקציה בין שני האופנים. בעבודה זו נחקרו לראשונה בצורה ניסיונית תופעות מעבר באוורור טבעי מושרה ציפה במבנה בסקלה גדולה עם פתח עליון ותחתון על אותו קיר צדדי. האינטראקציה בין אוורור ערבוב לבין אוורור דחיקה נלמדה באמצעות פתיחת הפתח התחתון לגבהים שונים, כאשר הפתח העליון נשמר במצב קבוע של פתיחה מלאה. תהליך המעבר בין שני אופני אוורור וגם המצב המתמיד נלמדו ביסודיות במחקר זה. הניסויים כללו מדידות הפרשי טמפרטורה בין פנים המבנה, בגבהים שונים, לסביבה החיצונית ומדידות שלושת רכיבי מהירות זרימת האוויר דרך הפתח העליון.

נמצא כי מקומו של המישור הניטרלי בפתח העליון, המוגדר כאן כמישור המפריד בין זרימת אוויר פנימה אל תוך המבנה לבין זרימת אוויר החוצה, יורד עם R , שהוא היחס בין גובה (שטח) הפתיחה של הפתח התחתון לגובה (שטח) הפתיחה של הפתח העליון. הניסויים הראו כי כאשר $0 < R < 0.27$ שני אופני האוורור מתרחשים בו זמנית תוך יצירת אופן אוורור חדש – אוורור משולב. באופן זה מתקיימת זרימת אוויר החוצה דרך הפתח העליון בלבד בעוד שזרימת האוויר פנימה מתקיימת בו-זמנית דרך הפתח העליון והתחתון. עבור $0.53 < R < 1$ אוורור הדחיקה הוא הדומיננטי, בעוד שבתחום הביניים, $0.27 < R < 0.53$, שתי צורות האוורור עשויות להתרחש (בנפרד) – או אוורור משולב או אוורור דחיקה. הניסויים נמצאו בהתאמה איכותית טובה עם מודלים תיאורטיים קודמים. מדידות הראו כי ההפרש בין הטמפרטורה הממוצעת בתוך המבנה לסביבה החיצונית יורד עם עליית R . נמצאה התאמה טובה בין המיקום של עוצמת טורבולנציה מכסימלית לאורך הפתח לבין המיקום של המישור הניטרלי. נמצא כי וקטור מהירות האוויר היוצא מהמבנה נוטה כלפי מעלה ואילו וקטור המהירות של האוויר הנכנס נוטה כלפי מטה. ממצאים אלו אומתו באופן איכותי ע"י ראיית הזרימה באמצעות עשן.

תוכן עניינים

<u>מס' עמוד</u>	<u>שם הפרק</u>	<u>מס' פרק</u>
I	.....תקציר	
II	.....תוכן עניינים	
IV	.....רשימת האיורים	
VI	.....רשימת הסימנים	
1	.....מבוא	1
4	.....אורור מונע רוח	1.1
5	.....סקר ספרות	2
5	.....ניסויים בסקלה בינונית וגדולה	2.1
9	.....ניסויי מעבדה בסקלה קטנה	2.2
11	.....אורור דחיקה	2.2.1
12	.....אורור ערבוב	2.2.2
13	.....אורור בחדר עם מספר פתחים בגבהים שונים	2.3
16	.....סימולציות נומריות	2.4
20	.....מודלים תיאורטיים	2.5
21	.....פתח עליון ותחתון בלבד	2.5.1
22	.....השפעת הפתח האמצעי	2.5.2
23	.....אורור טבעי במבנים חקלאים	2.6
25	.....מטרת המחקר וחשיבותו	3
25	.....מטרת המחקר	3.1
25	.....חקירת תהליך המעבר מאופן אורור אחד לשני	3.1.1
26	.....חקירת מצב מתמיד באופני אורור שונים	3.1.2
27	.....השוואה עם סימולציה נומרית	3.1.3
27	.....חשיבות המחקר	3.2
28	.....תיאור הניסוי	4
28	.....מערכת הניסוי והמדידות	4.1
28	.....תאור מערכת הניסוי והמדידים	4.1.1
32	.....הפחתת השפעת הקרינה הישירה	4.1.2
33	.....מהלך הניסוי	4.2
34	.....הערכת שגיאת המדידות	4.3

36	.....תוצאות	5
36	..... השפעת מעבר חום בקרינה על המדידות	5.1
40	..... תהליך המעבר	5.2
40	..... מהירות האוויר דרך פתח העליון	5.2.1
41	..... הפרשי הטמפרטורה בתהליך המעבר	5.2.2
43	..... מצב מתמיד	5.3
43	..... הפרשי טמפרטורה ממוצעים	5.3.1
44	..... מהירות הזרימה דרך פתח העליון	5.3.2
47	..... וקטורי מהירות ממוצעת	5.3.3
49	..... עוצמת הטורבולנציה	5.3.4
51	..... ספקטרום המהירות	5.3.5
53	..... פילוג הטמפרטורה בפתח העליון	5.3.6
54	..... השוואה עם סימולציה נומרית	5.3.7
57	..... סיקום ומסקנות	6
59	..... רשימת מקורות	7

רשימת איורים

<u>מס' איור</u>	<u>תיאור האיור</u>	<u>מס' עמוד</u>
1	מנגנון בסיסי של אוורור טבעי מושרה ציפה - אפקט הארובה (Stack effect).....	2
2	תיאור סכימאתי של אוורור הערבוב.....	3
3	תיאור סכימאתי של אוורור הדחיקה.....	3
4	מערכת הניסוי במחקר של Howell & Potts [10].....	6
5	פרופילי טמפרטורה אנכיים בתוך תא ניסוי בפתחי אוורור שונים [10].....	7
6	טמפרטורה בפתח בזמנים שונים מתחילת הניסוי [19].....	8
7	הפרשי טמפרטורה בין תאי הניסויים כתלות בזמן [19].....	8
8	פרופילי מהירות האוויר בפתח מנורמלים במהירות האופיינית [19].....	9
9	אוורור דחיקה בנקודות זמן שונים מתחילת הניסוי [18].....	10
10	אוורור ערבוב במצב מתמיד [18].....	10
11	פרופיל הצפיפות בתוך תיבת הניסויים [18].....	11
12	(a) - h/H כתלות בשטח האפקטיבי של הפתחים,	12
12	(b) - g'/G'_h כתלות בשטח האפקטיבי של הפתחים [18].....	12
13	אוורור ערבוב. צפיפות היחסית כפונקציה של שטח של הפתח התחתון [18].....	13
14	איור סכימתי של החדר מחומם ע"י מקור חום נקודתי [7].....	14
15	כיווני זרימה דרך פתח אמצעי בהשוואה למודל התיאורטי [7].....	14
16	גובה פאן הביניים כתלות בגובה הפתח האמצעי. (a) שלושת הפתחים בגודל שווה,	16
15	(b) פתח עליון קטן יותר מפתח תחתון [7].....	15
17	רשת נומרית בסימולציה [10].....	16
18	פרופילי טמפרטורה שהתקבלו מסימולציה נומרית, עבור מודלים	18
17	טורבולנטיים שונים [10]. (a) - $A^* = 0.18$, (b) - $A^* = 0.48$	17
19	תיאור סכימתי של תא ניסויים [24].....	18
20	פילוג טמפרטורה בתוך החדר - סימולציה נומרית [24].....	19
21	מהירות האוויר הממוצעת במישור y-z בתוך התא ובפתח האוורור [24].....	19
22	מהירות הזרימה דרך הפתח - השוואה בין שיטות חישוב שונות וניסויים [24].....	20
23	תיאור סכמתי של אופני אוורור שונים. a - אוורור דחיקה, b - אוורור ערבוב,	23
26	c - אופן משולב של אוורור מושרה ציפה.....	26
29	חדר הניסויים - מידות כלליות.....	29
25	תצלום חדר הניסויים.....	30

31	.....פריסת חיישני טמפרטורה.....	26
31	.....מד-רוח סוני תלת מימדי.....	27
32	.....תצלום מד מהירות סוני תלת מימדי המוצב בפתח.....	28
33	.....תצלום פנים החדר.....	29
37	.....השפעת ציפוי קירות – 200 וואט (ללא ציפוי).....	30
37	.....השפעת ציפוי קירות – 200 וואט (עם ציפוי).....	31
38	.....השפעת ציפוי קירות – 400 וואט (ללא ציפוי).....	32
38	.....השפעת ציפוי קירות – 400 וואט (עם ציפוי).....	33
39	.....השפעת קרינה תרמית על מדידות טמפרטורה. חיישני טמפרטורה ללא ציפוי זהב....	34
39	.....השפעת קרינה תרמית על מדידות טמפרטורה. חיישני טמפרטורה עם ציפוי זהב.....	35
40	.....רכיב מאונך לפתח של מהירות האוויר - 3 ס"מ מקצה תחתון של החלון.....	36
	.....הפרשי טמפרטורה בין פנים החדר לסביבתו תוך כדי תהליך המעבר מאוורור	37
41	.....הערבוב לאוורור הדחיקה.....	
42	.....תגובת מעבר של פרופיל הפרשי טמפרטורה אנכיים כתוצאה מפתיחת חלון התחתון	38
	.....הפרשי טמפרטורה ממוצעים במצב מתמיד בשלושה הספקים שונים	39
44	.....של גוף חימום כתלות בגובה פתח החלון המנורמל.....	
45	.....פרופילי מהירות האוויר מנורמלים דרך פתח העליון במצב מתמיד	40
	.....מיקומו של מישור הנייטרלי בפתח העליון כתלות בערכי R שונים, בהספקים של	41
47	.....גוף חימום שונים.....	
48	.....ווקטורי המהירות עבור ערכי R שונים, במישור מאונך לפתח.....	42
	.....פרופילי מהירות הממוצעת (רכיב מאונך למישור הפתח) - ריבועים ריקים	43
50	.....ועוצמת הטורבולנציה תואמת את מהירות הממוצעת – ריבועים מלאים.....	43
	.....צפיפות האנרגיה הספקטרלי של זרימת האוויר במאונך למישור הפתח	44
51	.....בשני נקודות בגבהים שונים באמצע החלון, באוורור ערבוב.....	
	.....קצב הדיעכה של ספקטרום האנרגיה כפונקציה של הגובה של הפתח בארבעה	45
52	.....ערכים שונים של R.....	
54	.....פרופילי הפרשי טמפרטורה בפתח העליון.....	46
55	.....השוואה עם סימולציה נומרית – אוורור דחיקה.....	47
56	.....השוואה עם סימולציה נומרית – אוורור ערבוב.....	48

רשימת סימנים

- A – שטח הפתיחה (cm^2)
- B – שטף הציפה (m^4/s^3)
- H_E – גובה כללי של המבנה (cm)
- H_V – גובה פתח העליון (cm)
- I_i – עוצמת הטורבולנציה
- N – מספר הניסויים
- P – לחץ (Pa)
- $R = h_L/h_U$ – היחס בין גובה הפתיחה של הפתח התחתון לגובה הפתיחה של הפתח העליון
- ΔT – הפרש בין טמפרטורה פנימית וחיצונית ממוצעת (K)
- $U_c = (g\alpha\Delta TH_E)^{0.5}$ – מהירות אופיינית (cm/s)
- U_i – מהירות הזרימה המקומית הממוצעת בכל גובה לאורך הפתח (cm/s)
- u'_i – רכיב טורבולנטי של מהירות הזרימה המקומית הממוצעת בכל גובה לאורך הפתח (cm/s)
- V – נפח המבנה (m^3)
- W – הספק חשמלי של מקור החום (W)
- Z_{np} – מקומו של מישור הניטרלי הנמדד מהקצה התחתון של הפתח העליון (cm)
- Z_V – קואורדינאטה הצמודה לחלון העליון (cm)
- c_p – חום סגולי בלחץ קבוע ($\text{kJ kg}^{-1}\text{C}$)
- $e_{\text{non-black}}$ – שטף חום קרינתי עבור גופים אפורים (W/cm^2)
- f – תדירות (Hz)
- g – תאוצת כוח הכובד (cm/s^2)
- h_L – גובה הפתיחה של הפתח התחתון (cm)
- h_U – גובה הפתיחה של הפתח העליון (cm)
- \hat{h} – גובה פאן הביניים המנורמל
- \hat{h}_n – גובה מישור הנייטרלי המנורמל במודל התיאורטי
- k – מקדם, עבור פתח אנכי $k = 0.25$
- t – זמן (min)
- t_s – זמן פתיחה של הפתח התחתון (min)
- u – מהירות הזרימה דרך הפתח (cm/s)
- v_i – מהירות הזרימה דרך הפתחים במודל התיאורטי (cm/s)
- z – גובה מדידת טמפרטורה (cm)

סימנים באותיות יווניות

- Δ_m – דיוק מכשירי המדידה
- α – מקדם התפשטות תרמי (1/K)
- ε – מקדם הסחיפה, כושר הפליטה (emissivity)
- ρ - צפיפות האוויר (g/cm^3)
- σ – קבוע סטפאן-בולצמן ($\text{W/m}^2\text{K}^4$), סטיית תקן
- τ_m – סקלת הזמן האופיינית של אורור הערבוב (s)

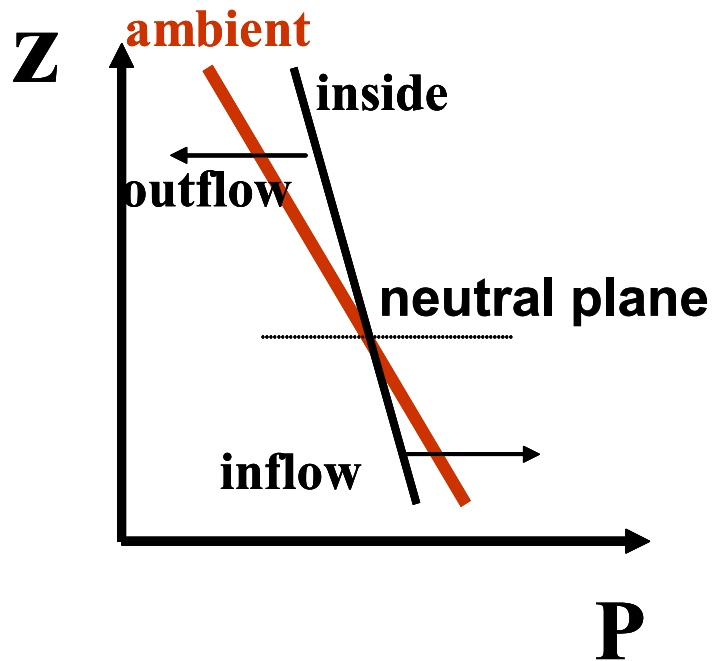
אוורור בכלל ואוורור טבעי בפרט מוגדר, באופן עקרוני, כהחלפת אוויר בין פנים של חלל מסוים לבין סביבתו החיצונית. חשיבתו של אוורור היא רבה מאוד בעיקר בשמירת אקלים נוח לבני האדם בתוך מבני מגורים, משרדים וכו'. יחד עם זאת לאוורור תפקיד מרכזי גם בפינוי מזהמים, מזיקים, פחמן דו חמצני; הורדת הטמפרטורה ורמת הלחות בתוך מבנים וחממות חקלאיות ועוד דוגמאות רבות. קיימים שני סוגי אוורור עיקריים: אוורור מאולץ, המופעל ע"י אמצעים מכאניים ואוורור טבעי הנגרם ע"י משאבים טבעיים זמינים.

כיום קיים מגוון רחב של שיטות אוורור מאולץ. מאוררים, מזגנים, מפוחים, ויונקי אוויר למיניהם הם בשימוש רחב מאוד בחיי היום-יום שלנו. יתרונותיהם של עזרים מכאניים באוורור מאולץ הם, כמובן, רבים, אך לצד היתרונות בולט חיסרון אחד משמעותי מאוד והוא – בזבוז אנרגיה וכתוצאה מכך עלויות גבוהות מאוד בשימוש בהם. חיסרון נוסף לא פחות חשוב – זהו אוויר אשר נגרם עקב הפעלות הולכות וגדלות, בשל ביקוש מתעצם לאנרגיה, של תחנות הכוח אשר שורפות דלק פוסילי ומזהמות את הסביבה.

כאשר אנו מעוניינים לאוורר מבנים ללא התערבות מכאנית וללא עלויות משמעותיות נרצה לחפש פתרונות העושים שימוש בתופעות טבע ובמשאבי טבע זמינים ולחקור אותם על מנת ליעל את השימוש במשאבים אלה. שני המשאבים הזמינים לאוורור טבעי הם כוחות טבעיים של רוח והפרשי טמפרטורה.

אוורור הנגרם עקב הפרשי טמפרטורה או, במילים אחרות, הפרשי צפיפויות נקרא אוורור מושרה ציפה. אוורור ע"י כוחות הציפה גם ידוע בשם "אפקט הארובה" (Stack effect) – תוצאה של הפרש טמפרטורה בין פנים המבנה לסביבה החיצונית. האוויר החם, בצפיפות נמוכה יותר, עולה וזורם החוצה דרך פתחים באזור העליון של הבניין ומושך את האוויר החיצוני הקר פנימה דרך פתחים הנמצאים באזור התחתון. זרימה המונעת ע"י הרוח תלויה במיקומם וגודלם של הפתחים ויכולה לתרום לשיפור של אפקט הארובה או, להיפך, להפרעה בזרימה – הכול תלוי במהירות הרוח וכיוונה.

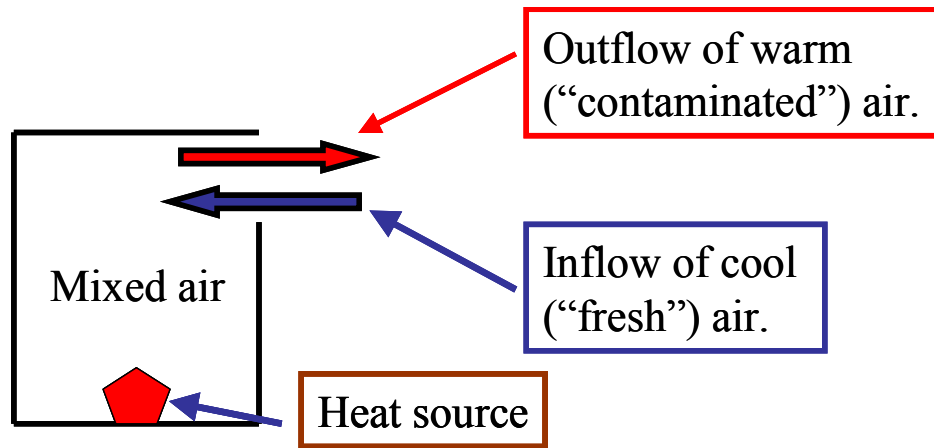
עבודת מחקר זו מתמקדת באוורור מושרה ציפה בלבד. המנגנון הבסיסי של אוורור מסוג זה מומחש באיור מס' 1. נניח כי נתון חדר בו האוויר חם יותר מהסביבה החיצונית ולכן צפיפותו קטנה יותר מהצפיפות של האוויר החיצוני. כפי שנראה באיור, צפיפות קטנה יותר גורמת למפל לחץ הידרוסטאטי קטן יותר בהשוואה למפל הלחץ החיצוני. ההפרש בין הלחצים באזור העליון והתחתון יגרום לתנועת אוויר החוצה ופנימה, בהתאמה. המישור הניטרלי מוגדר כמישור אופקי בו הלחץ הפנימי שווה ללחץ החיצוני. מעל המישור הניטרלי האוויר יזרום מן החדר החוצה ומתחתיו יזרום אוויר חיצוני פנימה אל תוך החדר.



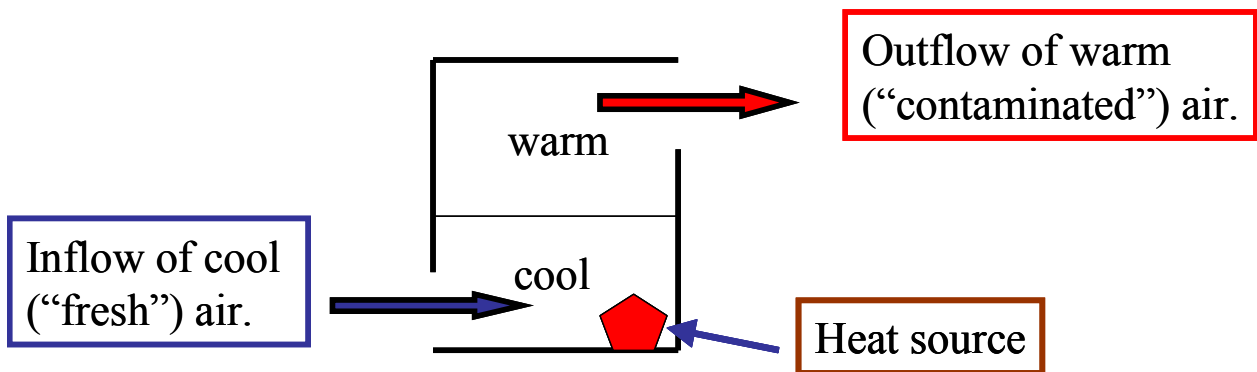
איור 1. מנגנון בסיסי של אוורור טבעי מושרה ציפה - אפקט הארובה (Stack effect). P – לחץ, Z – גובה החדר.

באופן עקרוני קיימים שני אופנים שונים ביסודם של אוורור טבעי מושרה ציפה – אוורור ערבוב (mixing ventilation) – איור מס' 2 ואוורור דחיקה (displacement ventilation) – איור מס' 3. אוורור הדחיקה מתרחש כאשר אוויר החיצוני נכנס דרך פתח תחתון, ודוחק החוצה אוויר חם מתוך החלל הפנימי דרך פתח עליון. במצב של אוורור דחיקה, נמצא המישור הניטרלי בין הפתח העליון לתחתון. במקרה כזה קיים ערבוב מינימאלי בין האוויר הנכנס (מהפתח התחתון) לבין האוויר החם בפנים הנדחק כלפי מעלה, ולכן מתפתח בתוך חלל החדר ריבוד יציב (האזור התחתון של החדר קריר יותר מהאזור העליון). אם בתוך המבנה קיים מקור חום מקומי ורציף, במצב המתמיד יתפתח ריבוד דו-שכבתי עם פאן ביניים המפריד בין השכבה התחתונה לעליונה. הימצאות מקורות חום מרובים גורמת לריבוד יותר מורכב עם שינויים רציפים נוספים בטמפרטורה עם הגובה.

מצד שני, אוורור ערבוב 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 מס' 2). 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. אחד הממצאים החשובים של מחקר זה הוא כי קיים גם אופן אוורור שלישי המשלב את שני האופנים הנ"ל. אוורור זה מתקבל כאשר קיימים בחדר שני פתחים, עליון ותחתון; שניהם פתוחים אבל הפתח העליון בעל גובה פתיחה גדול יותר מן הפתח התחתון. תוצאות המחקר יראו באילו תנאים מתקבל אוורור משולב ומה המאפיינים שלו.



איור 2. תיאור סכימאתי של אוורור הערבוב.



איור 3. תיאור סכימאתי של אוורור הדחיקה.

למרות שהזרימות הנ"ל מתפתחות, כידוע, אפילו בחללים פתוחים יחסית, כמו חממות או פרוזדורים גדולים, תנועת אוויר הקשורה לאוורור טבעי יכולה להיות מאוד מסובכת, במיוחד במבנים מורכבים הכוללים מספר חללי אוויר המחוברים ביניהם. תנועת האוויר במבנים כאלה, מורכבות מאוד בגלל צורתה המיוחדת של הגיאומטריה הפנימית. יכולים להתקיים ערבוב ותנועה טורבולנטית לא סדירה בתחום רחב של סקאלות והמאפיינים העיקריים של תנועת האוויר יכולים להיות נשלטים ע"י פתחים קטנים יחסית המקשרים אזורים שונים של המבנה.

למרות שהזרימה בתוך בניינים אמיתיים מאוד מורכבת, ולא רק בגלל גיאומטריה פנימית מסובכת האופיינית לבניינים עם ריבוי חדרים ופתחים (דלתות וחלונות), עדיין יש מספר תופעות זרימה בסיסיות המונעות ע"י כוחות ציפה ו/או פילוג לחצים עקב רוח אשר שולטות על תנועת האוויר. הבנת התהליכים הבסיסיים האלה בתצורות גיאומטריות פשוטות מספקת בסיס ללימוד הזרימה במצבים מורכבים יותר. מחקר בסיסי כזה מאפשר גם אנליזה פשוטה של סקאלות הזמן עבור תופעות המעבר שונות המתרחשות כתוצאה מפתחה או סגירה של פתחי האוורור ושינוי בזמן של אופן האוורור.

הניסויים המעבדתיים מתבססים על לימודים פסיקאליים של תופעת המעבר באוורור טבעי. השפעות בזמן, התלויות בגודלם של פתחי אוורור, על אוורור טבעי יחקרו באמצעות בקרה

חשמלית של גודל החלונות. הניסויים יכללו מדידות מתקדמות וטכניקות לויזואליזציית זרימה, כמו עשן, מד-רוח סוני התלת-מימדי וצמדים תרמיים. אחד האתגרים העיקריים בשלב התכנון הוא להחליט על מיקומם, מידותיהם ובקרתם של הפתחים אשר יאפשרו אוורור יעיל ומבוקר היטב בתוך בניינים. הדמיות נומריות וניסויים מעבדתיים בסקאלות בינוניות, כמו הניסוי שבוצע במחקר זה, יכולים לשמש אותנו למטרת לימוד זרימה ואוורור תחת תנאים שונים ולאחר מכן לספק רעיונות לתכנון וכלים מעשיים עבור ניצול יעיל של מערכות אוורור טבעי בבניינים.

1.1 אוורור מונע רוח

כל הניסויים המעבדתיים שתוארו קודם לכן יכולים לשמש לחקירת אפקט הרוח החיצונית על אוורור המבנה ועל תהליך המעבר באוורור זה. בעבודה זו לא תחקר השפעתו של הרוח על האוורור הטבעי, אך למטרת המשך המחקר נבנה מערך של ארבעה מאווררים גדולים אשר מספקים רוח יציבה בכיוון קבוע. ברור ששינוי בכיוון הרוח יחסית למבנה ישפיע על תהליך האוורור, אך, יחד עם זאת, רק כמה כיוונים מסוימים של הרוח יחקרו בעתיד בגלל חוסר זמן ואילוצי התקציב. מהירות הרוח תהיה בערכים נמוכים על מנת לאפשר אינטראקציה בין אוורור מושרה ציפה ורוח.

חלק מהתוצאות של מחקר זה הוצגו בכנסים הבאים: ROOMVENT 2004 (פורטוגל) ובכנס הישראלי ה-30 להנדסת מכונות (תל אביב, מאי 2005). כמו כן פורסמו חלק מהתוצאות במאמר (2006) *Haslavsky et al.*, וחלק מהתוצאות נכללות במאמר נוסף הנמצא בהכנה.

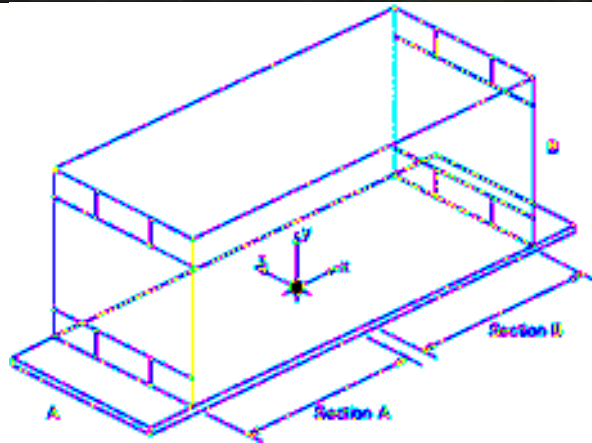
2.1 ניסויים בסקלה בינונית וגדולה

חקירה אינטנסיבית של זרימה תלת-ממדית במשרדים ובבנייני מגורים החלה בשנות השמונים. הכנס הראשון, ROOMVENT, בנושא התפלגות אוויר בתוך החדרים נערך ב-1987. שנה אחת לאחר מכן הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה התחילה את פרויקט "זרימת אוויר בתוך הבניינים" (Annex 20) ("Air flow patterns within buildings").

הניסויים באוורור דחיקה במבנים בסקלה ממשית דווחו, למשל, ע"י Howell & Potts (2002) ו-Xing & Awbi (2002). מדידות פרופילי צפיפות פנימיים הראו כי באוורור דחיקה עם מקור חום נקודתי נבנה ריבוד יציב דו-שכבתי עם פאן ביניים. מצד שני באוורור ערבוב גרדיאנט הצפיפות, בדרך כלל, היה חלש יותר עקב הערבוב של הפלומה היורדת של האוויר הנכנס עם פלומת האוויר העולה ממקור החום בתוך המבנה.

Howell & Potts (2002), בעבודתם, הציגו נתונים ניסיוניים על ריבוד טמפרטורה הנבנה במבנה בסקלה ממשית כתוצאה מאוורור דחיקה, עם מקור חום נקודתי. מערכת הניסוי שלהם מתוארת באיור מס' 4.

חדר הניסוי היה מחולק לשני תאים (תא A ותא B), כאשר כל המבנה היה ממוקם באולם גדול מאוד ואטום על מנת למנוע השפעות הלא רצויות של רוחות חיצוניות. בנוסף, השפעת חימום הקירות החיצוניים של האולם על זרימת האוויר בתוך תאי הניסויים צומצמה למינימום בגלל מימדים הפיסיים הגדולים של האולם החיצוני יחסית לחדר הניסויים. מקור החום בניסויים היה פלטת חימום בגודל 0.4 על 0.2 מ', הספקה החשמלי היה 225 W והיא מוקמה על הרצפה במרכז התא. נערכו מדידות טמפרטורה בתוך התאים ע"י 12 מדידים, כמו כן הטמפרטורה נמדדה בכל פתח על מנת ללמוד את אופיו של האוויר הנכנס או היוצא.

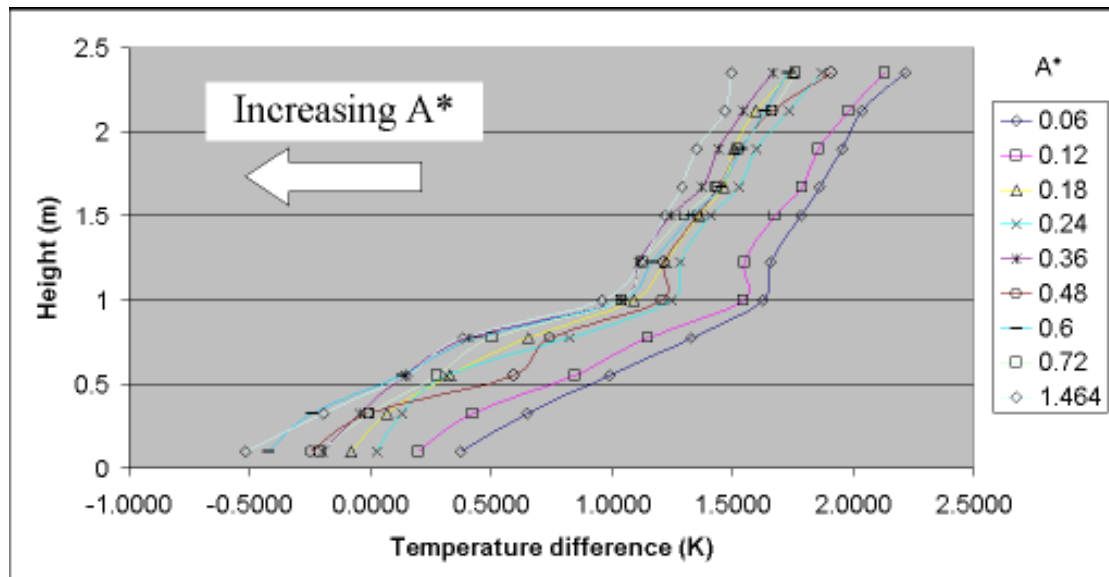


איור 4. מערכת הניסוי במחקר של Howell & Potts (2002).

תוצאות הניסויים (איור מס' 5) מראות, כצפוי, את עליית הפרש הטמפרטורה פנים חוץ עם הגובה. התוצאה החשובה היא שיש השפעה ברורה של שטח פתיחת חלונות האפקטיבי (A^* המוגדר עבור אוורור דחיקה בלבד) על הפרש טמפרטורה: ככל שהפתחים גדולים יותר כך ישנה ירידה בהפרש הטמפרטורה במצב מתמיד. השטח האפקטיבי של הפתחים מוגדר בדומה לעבודתו של Linden *et al.* (1990) כ-

$$(1) \quad A^* = \left(\frac{A_i \cdot A_o}{\sqrt{A_i^2 + A_o^2}} \right) \cdot \sqrt{2}$$

כאשר T_o תחת T_i מצוין פתח כניסת אוויר (פתח תחתון באוורור דחיקה) ו- A_o מצוין פתח יציאה (פתח עליון באוורור דחיקה). תוצאה נוספת שניתן ללמוד מהמחקר (איור מס' 5) היא שגרדיאנט הטמפרטורה יורד עם העלייה בגובה, כלומר הגרדיאנט עד כחצי הגובה גדול ויורד במעבר חד בדומה לתוצאות ממחקרים אחרים.



איור 5. פרופילי טמפרטורה אנכיים בתוך תא ניסוי בפתחי אוורור שונים, Howell & Potts (2002).

תוצאות נוספות בסקלה גדולה הרלוונטיות למחקר זה ניתן למצוא בעבודתו של Mahajan (1987). ניסויים אלו נערכו במטרה ללמוד את מעבר חום והמסה בין שני חדרים סמוכים עם דלת בניהם, תחת שני תנאים שונים. בניסוי ראשון אחד החדרים חומם לטמפרטורה ממוצעת של 32°C והשני קורר לטמפרטורה ממוצעת של 19°C . בתחילת הניסוי החימום והקירור הופסקו בשני החדרים ופתח המפריד בין החדרים נפתח. בתחילת הניסוי השני רק הקירור נפסק עם פתיחת הפתח בין החדרים והחימום המשיך לפעול.

בניסויים אלה נמדדו פרופילי טמפרטורות בתוך החדרים וגם פרופילי טמפרטורה ומהירות הזורם בפתח עצמו. כמו כן נערכה הדמיית זרימה בעשן דרך הפתחים. לשם השוואת הניסויים עם תיאוריה נעשה שימוש בפיתוח של משוואת ברנולי. כאשר המערכת נמצאת במצב מתמיד, ניתן להניח כי הפרש הטמפרטורה בין החדרים לא תלוי בגובה מעל הרצפה, וניתן להגדיר את ערך המהירות המקומית דרך הפתח כ-

$$(2) \quad u = C \cdot \left[2g \cdot \left(\frac{\Delta T}{T} \right) \cdot Y \right]^{0.5}$$

כאשר C מציין מקדם שחרור (discharge coefficient) עבור זרימה דרך הפתח, ΔT הוא הפרש הטמפרטורה בין שני החדרים, \bar{T} היא טמפרטורה ממוצעת של שני החדרים ו- Y היא קואורדינטה שראשיתה מרכז גובה הפתח. משוואה (2) בצורה חסרת מימד נראית כך:

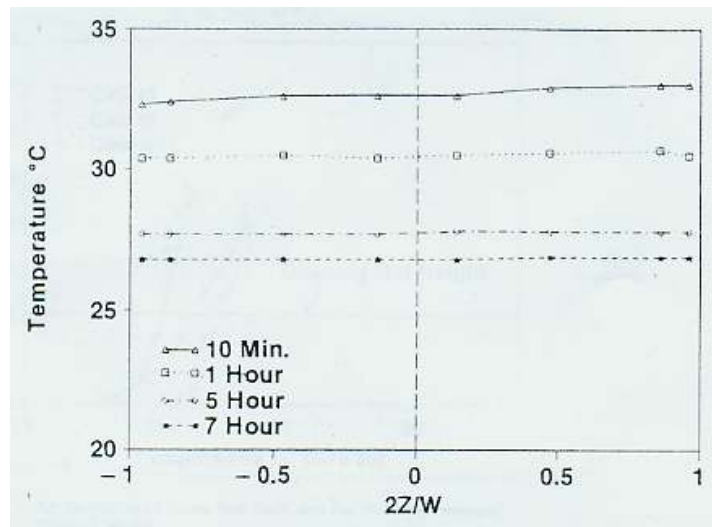
$$(3) \quad \frac{u}{U_m} = C \cdot \left[\frac{2Y}{H} \right]^{0.5}$$

כאשר H הוא גובה הפתח ו-

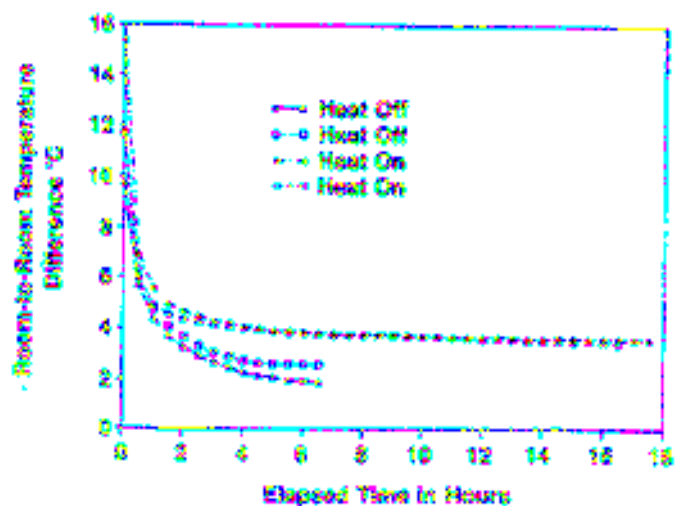
(4)

$$U_m = \left[\frac{g \cdot H \cdot \Delta T}{\bar{T}} \right]^{0.5}$$

כאשר U_m מהירות מכסימלית אפשרית בזרימה אידיאלית עבור ערכים נתונים של \bar{T} , ΔT , H . תוצאות הניסויים הראו כי הטמפרטורה בפתח כמעט אחידה לרוחבו (איור מס' 6) והטמפרטורה הזאת קטנה עם הזמן כתוצאה מירידת הטמפרטורה בתא החם. הפרשי טמפרטורה בין שני תאי הניסוי קטנו עם הזמן כצפוי והם היו תלויים בצורה ברורה בגובה מעל הרצפה (בניגוד להנחה המתאימה למצב מתמיד). כמו כן ΔT בין התאים קטן בצורה חדה בשעתיים הראשונות מתחילת הניסוי ולאחר מכן השיפוע של ירידת הפרש הטמפרטורה קטן בצורה משמעותית ומתייצב על ערך קרוב לקבוע אחרי כ-8 שעות (איור מס' 7).

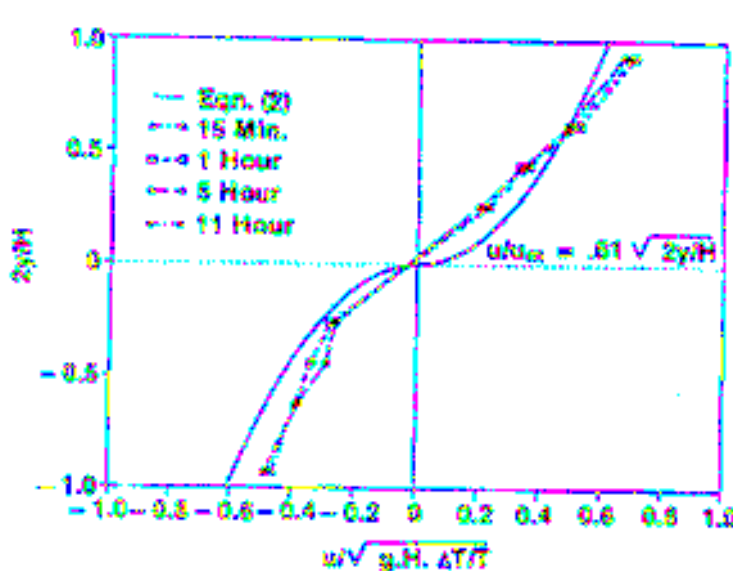


איור 6. טמפרטורה בפתח בזמנים שונים מתחילת הניסוי, (Mahajan (1987).



איור 7. הפרשי טמפרטורה בין תאי הניסויים כתלות בזמן, (Mahajan (1987).

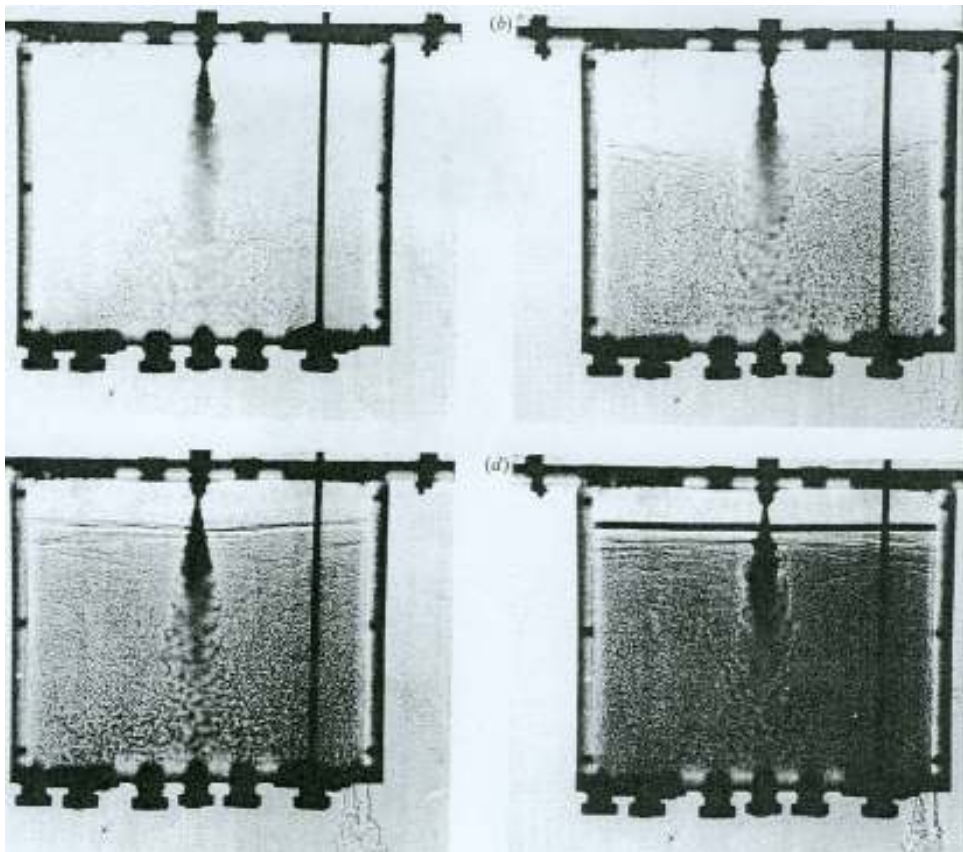
מדידות מהירות הזרימה שנעשו ע"י חוט להט הראו כי פרופיל המהירות בפתח אינו סימטרי יחסית לאמצע גובה הפתח וערכי המהירות גדולים יותר בזרימת אוויר החוצה מאשר בזרימה פנימה. הבדלים אלה מוסברים בשוני בתנאי הגבול בחלק עליון והתחתון של הפתח. תוצאה מעניינת נוספת היא שגובה המישור הניטרלי בפתח (בו המהירות משתווה לאפס) לא נמצא באמצע גובה הפתח אלא מעט מעליו. את התוצאות ניתן לראות באיור מס' 8.



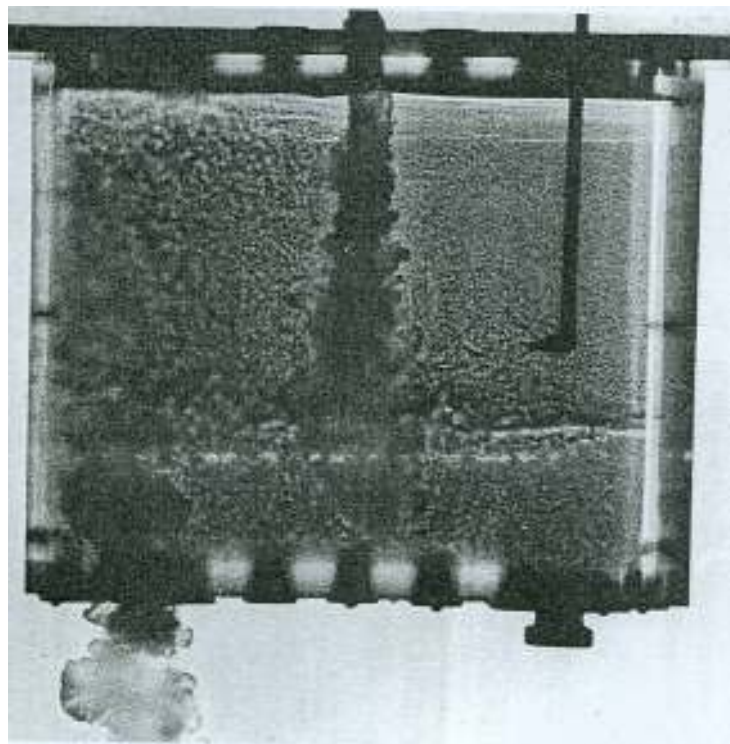
איור 8. פרופילי מהירות האוויר בפתח מנורמלים במהירות האופיינית, (Mahajan (1987).

2.2 ניסויי מעבדה בסקלה קטנה

שתי הצורות של אוורור טבעי (אוורור דחיקה ואוורור ערבוב) מושרה ציפה נלמדו היטב ותועדו בניתוחים תיאורטיים ובניסויים במודלים מעבדתיים בסקלה קטנה ע"י Linden *et al.* (1990). בניסויים אלו, זרימה מושרת ציפה נוצרה בשל שימוש במי מלח, אשר צפיפותם גדולה יותר ממים מתוקים, וכתוצאה מכך כוחות הציפה פעלו כלפי מטה בניגוד לניתוחים תיאורטיים ומצבים מעשיים בהם בדרך כלל כוחות הציפה נגרמים עקב חימום ולכן פועלים כלפי מעלה. ניסויים נערכו במיכל גדול (0.6x0.6x0.13 מ') מלא במים מתוקים. במיכל הגדול הוצבו תיבות קטנות בגדלים שונים. ברוב הניסויים השתמשו בקופסה עשויה פרספקס במידות גובה, אורך ורוחב: 25 ס"מ, 30 ס"מ ו- 20 ס"מ בהתאמה. מספר חורים בקוטר 1.8 ס"מ ו- 5.5 ס"מ נקדחו בדופן עליונה ותחתונה של הקופסה. החורים נסגרו ונפתחו במידת הצורך. מימדיו הגדולים של המיכל החיצוני הבטיחו כי הזרם החיצוני סביב תיבת הניסויים יישאר בצפיפות קבועה במשך כל הניסוי. ניסויים נערכו גם במצב של אוורור דחיקה וגם במצב של אוורור ערבוב. כל הניסויים צולמו ע"י שימוש ב-shadowgraph, כפי שמופיע באיור מס' 9 ובאיור מס' 10.



איור 9. אורור דחיקה בנקודות זמן שונים מתחילת הניסוי, Linden *et al.* (1990).

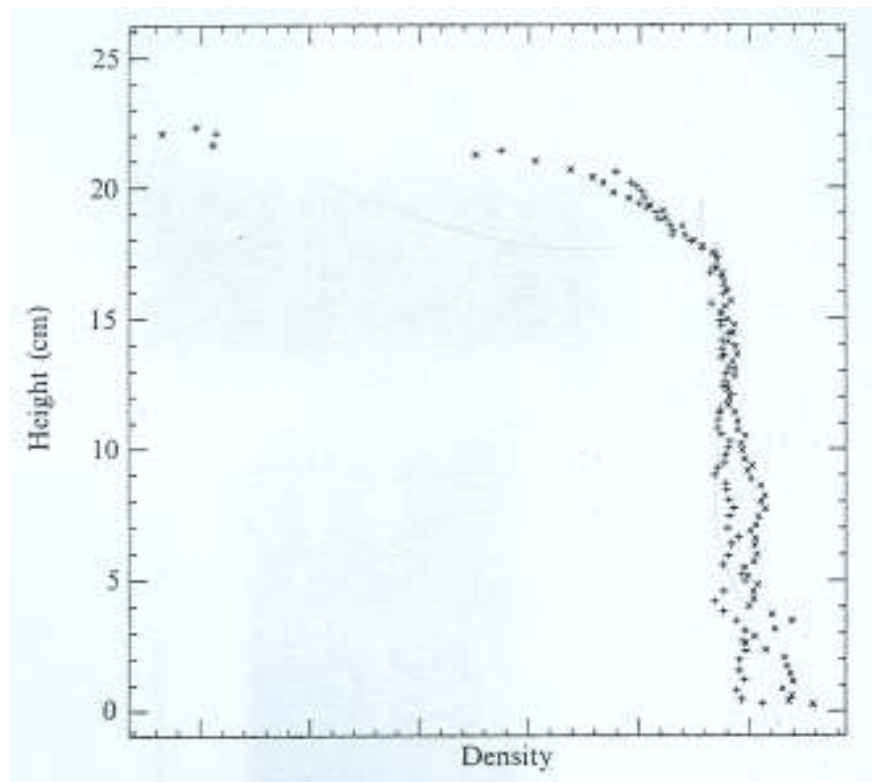


איור 10. אורור ערבוב במצב מתמיד, Linden *et al.* (1990).

2.2.1 אורור דחיקה

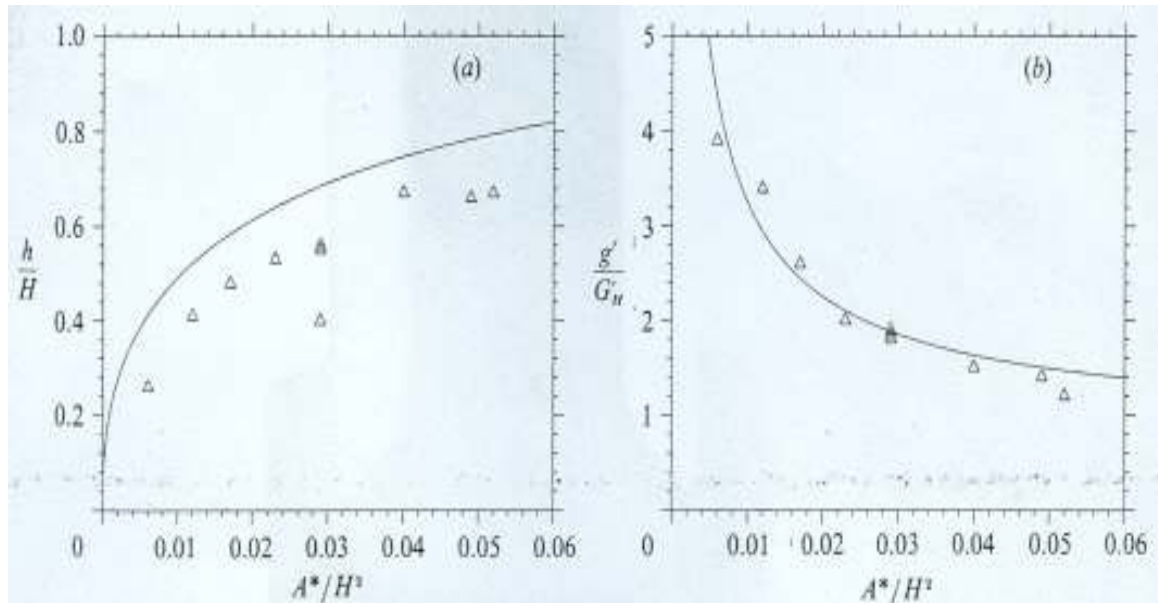
בניסויים באורור דחיקה גם פתחים עליונים וגם פתחים תחתונים היו פתוחים. כמקור "חום" שימש נוזל בצפיפות גבוהה (תמיסת מי מלח) שהוזרק בחלק העליון של תיבת הניסויים. כאשר הניסוי החל, פלומה טורבולנטית ירדה מהמקור. פלומה זאת משכה איתה את הנוזל החיצוני אשר ירד גם הוא למטה עד אשר היגיע עד לתחתית התיבה, שם הוא התפשט בצורה אופקית. בהמשך, הנוזל בצפיפות גדולה שהצטבר בתחתית התיבה החל לעלות כלפי מעלה באזור מחוץ לתנועת הפלומה, וכך נוצרה זרימה בתוך התיבה, כאשר קיימת זרימה החוצה מן התיבה דרך פתח תחתון בלבד ואילו זרימה פנימה אל תוך התיבה דרך פתח עליון בלבד. כתוצאה מהזרימה נבנה ריבוד דו-שכבתי וצפיפותה של השכבה התחתונה עלתה (כפי שניתן לראות באיור מס' 9) עד אשר המערכת היגיעה למצב מתמיד.

באיור מס' 11 ניתן לראות את פרופילי הצפיפות בתוך תיבת הניסויים באורור דחיקה עם מקור ציפה במצב מתמיד.



איור 11. פרופיל הצפיפות בתוך תיבת הניסויים, Linden *et al.* (1990).

ניתן לראות מן הגרף כי הצפיפות כמעט אחידה בחלק התחתון (עד 17 ס"מ גובה) וקטנה בצורה חדה מאוד בחלק עליון. מכאן ניתן ללמוד כי הזורם מעורבב היטב למטה ואינו אחיד למעלה. בגרפים הבאים (איור מס' 12) ניתן לראות את עומק פאן הביניים h ואת הערך של $g' = g\Delta\rho/\rho$ כפונקציה של שטח הפתחים מנורמל בגובה התיבה, כאשר ρ – צפיפות חיצונית.



איור 12. (a) - h/H כתלות בשטח האפקטיבי של הפתחים, (b) - g'/G'' כתלות בשטח האפקטיבי של הפתחים, Linden *et al.* (1990).

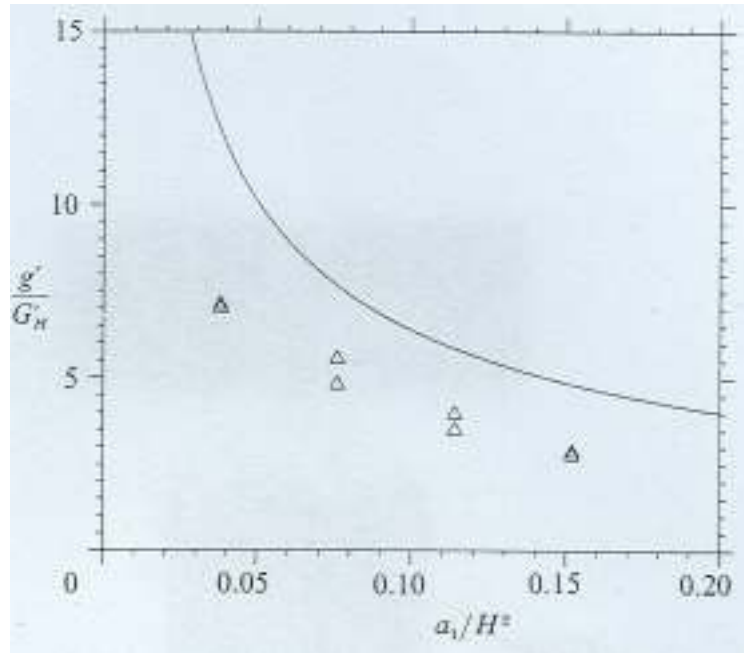
ניתן לראות מן הגרפים כי עליה ב- A^* גורמת לעליית פאן הביניים, וערכי g' יורדים עם עליה ב- A^* . שיעור השינוי בערכים הנ"ל קטן בערכים גדולים של A^* ולהיפך.

2.2.2 אורור ערבוב

ניסויים באורור ערבוב נערכו כאשר רק פתחים תחתונים היו פתוחים בתיבת הניסויים. בניסויים האלה צפיפותו של הזורם בתוך הקופסה הייתה זהה לזה של הזורם החיצוני, והזורם בצפיפות גדולה יותר (תמיסת מי מלח) הוכנס מלמעלה באמצעות מקור נקודתי. הפלומה היורדת מהמקור יצרה שכבה עם זורם בצפיפות גדולה יותר בתחתית התיבה, בדומה לאורור הדחיקה, אך אופי הזרימה היה שונה לגמרי. כאשר פתח יחיד היה פתוח בתחתית התיבה והמערכת היגיעה למצב מתמיד – גובה פאן הביניים נצפה כ- $h/H \sim 0.3$, כאשר H הוא הגובה הכללי של תיבת הניסוי. ככל שנפתחו יותר ויותר פתחים בתחתית, פאן הביניים התקרב יותר לתחתית. לאחר זמן מסוים המערכת היגיעה למצב מתמיד, בו מקור הציפה התאזן ע"י זרימה החוצה של זורם בצפיפות גדולה.

באיור מס' 13 ניתן לראות את ההשתנות של הצפיפות היחסית כפונקציה של שטח הפתח התחתון במצב של אורור ערבוב עם מקור ציפה.

שיטת הניסוי של הזרקת תמיסת מי מלח לתיבה שימשה גם למחקרים בהם נלמד אורור טבעי עם שניים או יותר מקורות ציפה. (Cooper & Linden, 1996a, Linden & Cooper, 1996b). מאחר והמחקר הנוכחי עוסק במקור ציפה יחיד לא נסקור עבודות אלו כאן.

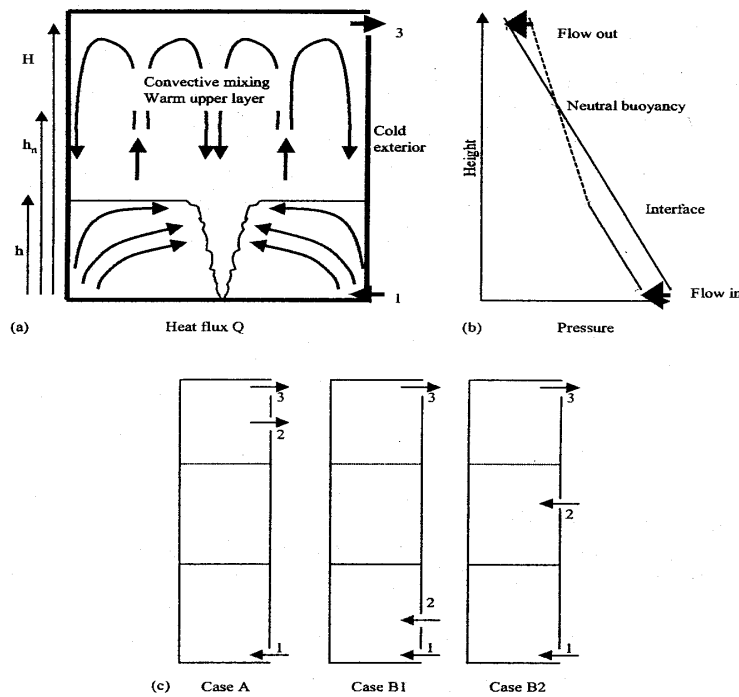


איור 13. אורור ערבוב. צפיפות היחסית כפונקציה של שטח של הפתח התחתון, Linden *et al.* (1990).

2.3 אורור בחדר עם מספר פתחים בגבהים שונים

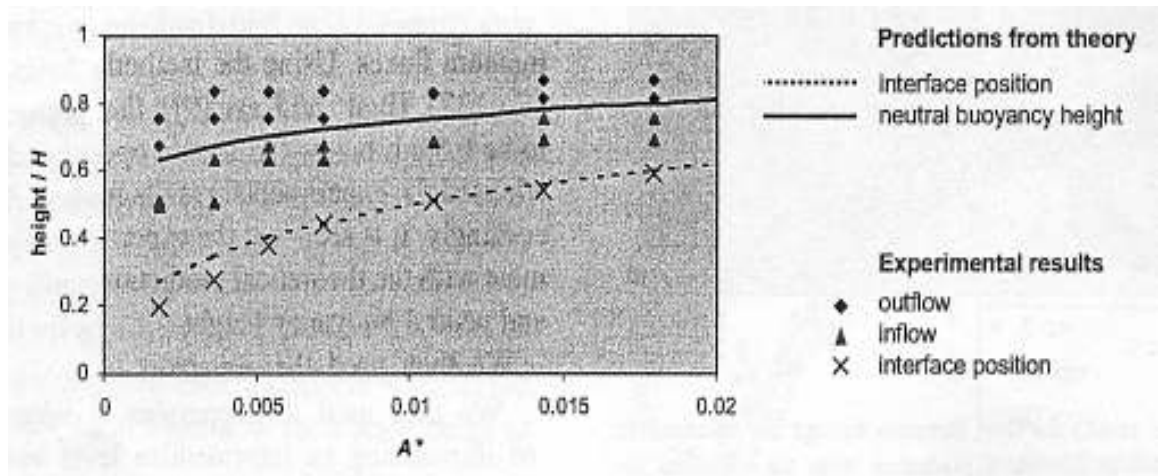
לאחרונה התפרסמה עבודתם של Fitzgerald & Woods (2004), בה הם הציגו מודלים תיאורטיים וניסויים בסקלה קטנה עם מספר פתחים בשלושה גבהים שונים על קיר צדדי. שני סוגי ניסויים נערכו: האחד עם מקור חום מפולג בצורה אחידה על פני השטח של הרצפה, והשני עם מקור חום נקודתי בתחתית החדר. בעבודתם נחקר אופי הזרימה כאשר בנוסף לזרימה דרך הפתח העליון והתחתון, קיימת זרימה פנימה או החוצה דרך פתח שלישי נוסף הנמצא בגובה ביניים. הצגה סכמאטית של מערך הניסויים ניתן לראות באיור מס' 14.

כל הניסויים נערכו בתא קטן העשוי מפרספקס בגודל 17.8 ס"מ x 17.6 ס"מ x 28.6 ס"מ עם מספר פתחים עגולים על אחד הקירות. התא היה מוצב במיכל גדול יחסית על מנת ליצור תנאי סביבה אחידים. גם כאן, בדומה לניסוי של Linden *et al.* (1990), נעשה שימוש בתמיסת מלח ובמים מתוקים על מנת ליצור הפרש צפיפויות וע"י כך את כוח הציפה. הטמפרטורה בתוך התא ובמיכל החיצוני נמדדה כל 5 שניות באמצעות צמידים תרמיים ואופי הזרימה נצפה ע"י צילום שדוגרף (shadowgraph).



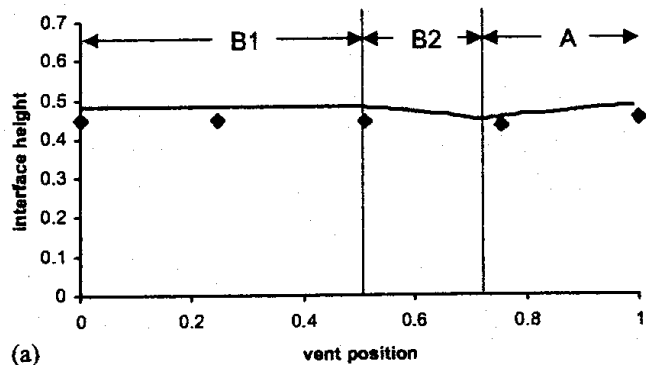
איור 14. איור סכימתי של החדר מחומם ע"י מקור חום נקודתי. פילוג הלחצים בתוך החדר ומחוצה לו והתנהגות הזרימה בנוכחות פתח שלישי הנמצא בין הפתח העליון לתחתון, Fitzgerald & Woods (2004).

בתחילת הניסוי שני הפתחים, העליון והתחתון היו פתוחים (אוורור דחיקה) וזהים בגודלם. תמיסת מלח צבועה באדום בריכוז של 4% הוזרמה לתוך התא כמקור ציפה. כאשר פאן ביניים ברור נבנה בתא, נפתח פתח קטן נוסף בקוטר 5 מ"מ במטרה ללמוד האם פתח זה הוא מעל או מתחת למישור הניטרלי. באיור מס' 15 ניתן לראות כי מיקומם של פאן הביניים ומישור הניטרלי נמצאים בהתאמה טובה מאוד עם החיזוי התיאורטי (ראה פרק 2.5).

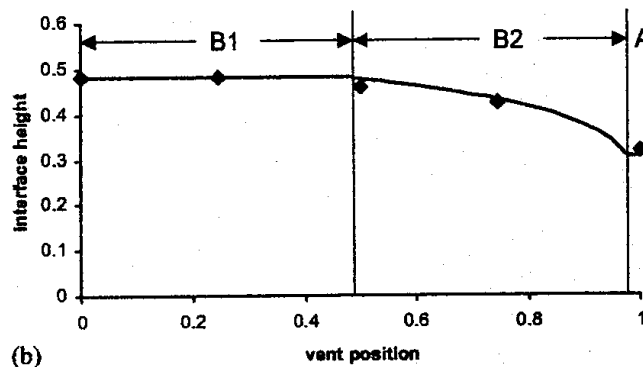


איור 15. כיווני זרימה דרך פתח אמצעי בהשוואה למודל התיאורטי, Fitzgerald & Woods (2004).

בנוסף, בניסויים הם בדקו את המודל התיאורטי של משטר הזרימה וגובה פאן הביניים. באיור מס' 16 אנו רואים את תוצאות הניסויים בשתי תצורות של הפתחים - העליון והתחתון. באיור מס' a16 לשני הפתחים אותו שטח פתיחה והמרחק ביניהם 24.5 ס"מ. פתח אמצעי היה זהה לפתחים העליון והתחתון. כאשר פתחים אמצעיים נפתחו בזה אחר זה, מיקומו של פאן הביניים ירד מעט מאוד ככל שהפתח האמצעי התקרב למישור הניטרלי, בהתאמה למודל התיאורטי (ראה פרק 2.5). באיור מס' b16 הפתח העליון היה קטן מהפתח התחתון. במקרה כזה ניתן למקם את הפתח האמצעי בטווח גבהים הרבה יותר רחב כאשר עדיין תתקיים דרכו זרימה פנימה, כלומר גובה המישור הניטרלי גדול יותר.



(a)



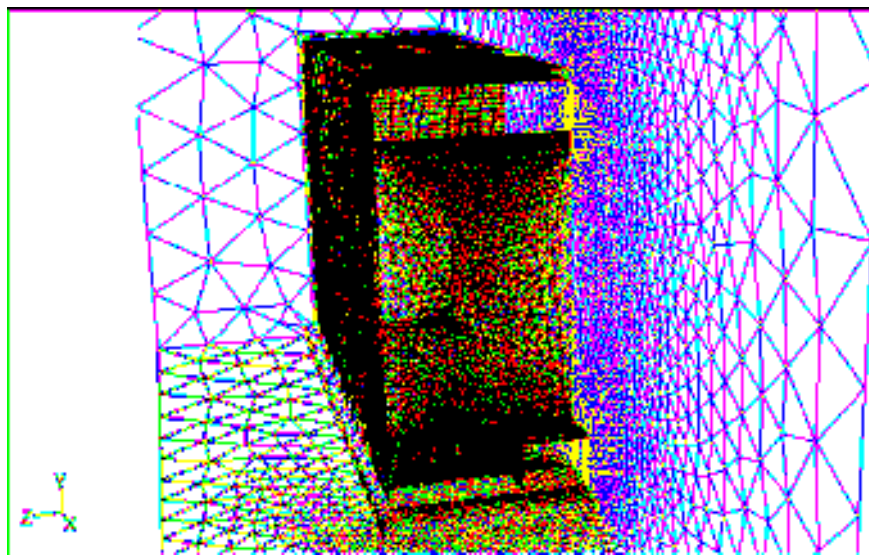
(b)

איור 16. גובה פאן הביניים כתלות בגובה הפתח האמצעי. (a) שלושת הפתחים בגודל שווה. (b) פתח עליון קטן יותר מפתח תחתון, Fitzgerald & Woods (2004).

2.4 סימולציות נומריות

מחקרים בנושא אוורור בדרך כלל כללו יישומים של CFD (computational fluid dynamics) על מנת לחזות את זרימת האוויר בתוך החדרים (Lemaire *et al.*, 1993). אבל רוב המחקרים הנ"ל דנו בזרימה יציבה כתוצאה מאוורור מכאני. הקשיים העיקריים בחישובים האלה היו מיודול הטורבולנציה, תיאור מתמטי של תנאי הגבול ויכולת חישובית של המחשבים. למרות שכל הקשיים הנ"ל קיימים עדיין, כמה וכמה שיפורים הושגו בבניית המודלים, כמו כן ביצועי המחשב הולכים ומשתפרים באופן קבוע.

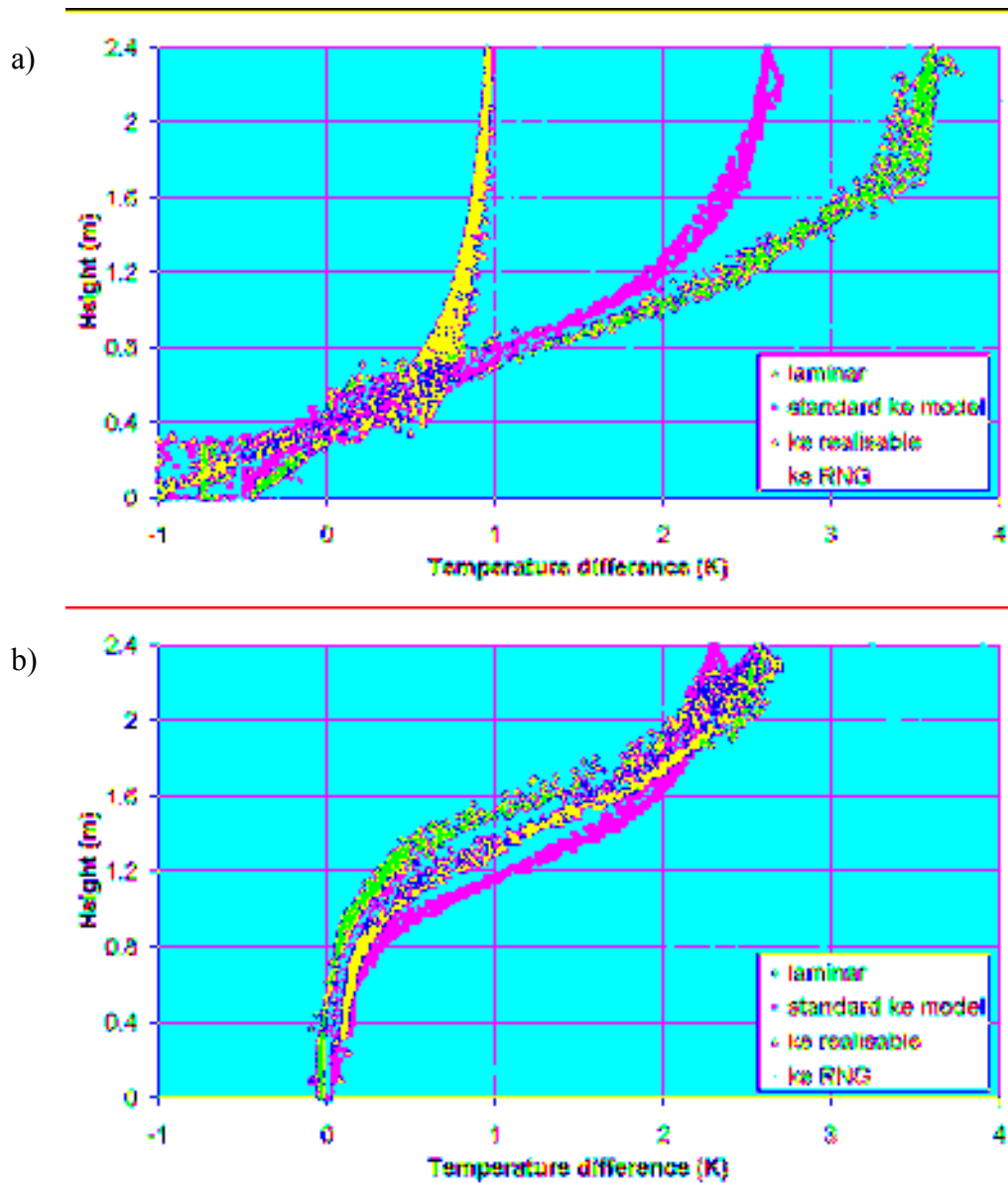
דוגמא אחת לשימוש ב-CFD היא עבודתם של Howell & Potts (2002) (תיאור מערכת הניסוי ורקע תיאורטי מופיעים בפרק 2.1). הרשת הנומרית בסימולציה הכילה 150,000 תאים חישוביים, כפי שניתן לראות באיור מס' 17. כמודל בסימולציה נומרית נבחר חדר ניסויים בתוך אולם גדול אשר מאפשר להזניח צורך בהתייחסות מיוחדת אל תנאי הגבול 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-ε שימשו כבסיס בחישובים נומריים בעבודה זו.



איור 17. רשת נומרית בסימולציה, Howell & Potts (2002).

תוצאות הסימולציה באוורור דחיקה עבור שני שטחים אפקטיביים של פתחי אוורור שונים ניתן לראות באיור מס' 18. 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 (ראה

פרק 2.1). 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.



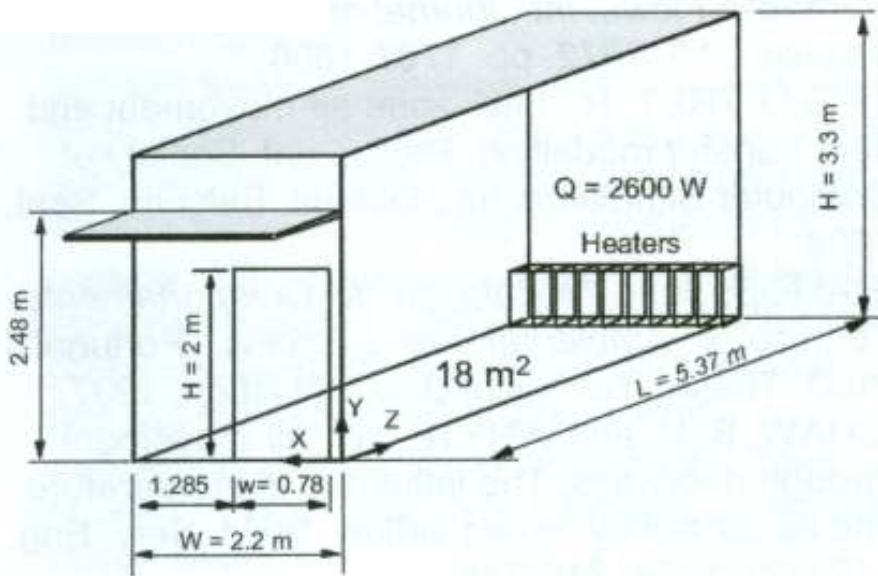
איור 18. פרופילי טמפרטורה שהתקבלו מסימולציה נומרית בחתך Y-Z, עבור מודלים טורבולנטיים שונים, (Howell & Potts (2002). (a) - $A^*=0.18$, (b) - $A^*=0.48$.

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 נוויה-סטוקס הלא דחיסות, משוואת שימור האנרגיה, משוואת שימור האנרגיה הטורבולנטית וקצב דיסיפציה של אנרגיה הטורבולנטית.

הבעיה בתנאיי גבול בחישובים נומריים הייתה שכאן מעבר חום בקירות משולב – בשונה מבעיית הסעה-הולכה, כאן הבעיה מוגדרת כשילוב של הסעה, הולכה וקרינה, 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 לתנאיי 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' 19) 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 19. תיאור סכימתי של תא ניסויים, Ramos *et al.*, (2002).

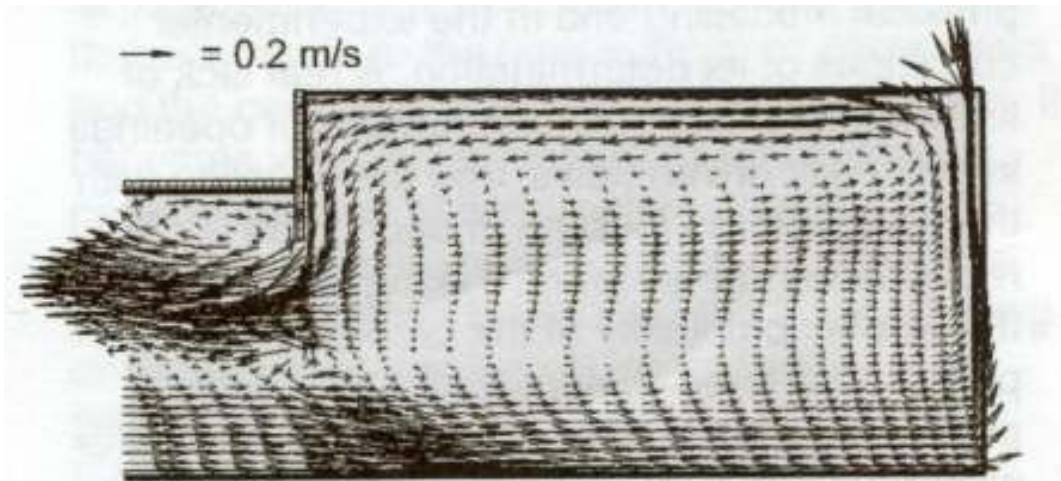
באיור מס' 20 רואים את פילוג הטמפרטורה בתוך החדר אשר התקבל בסימולציה נומרית. ניתן לראות בבירור את הריבוד הנבנה בתוך החדר כתוצאה מהפעלת מקורות חום פנימיים הצמודים לקיר.



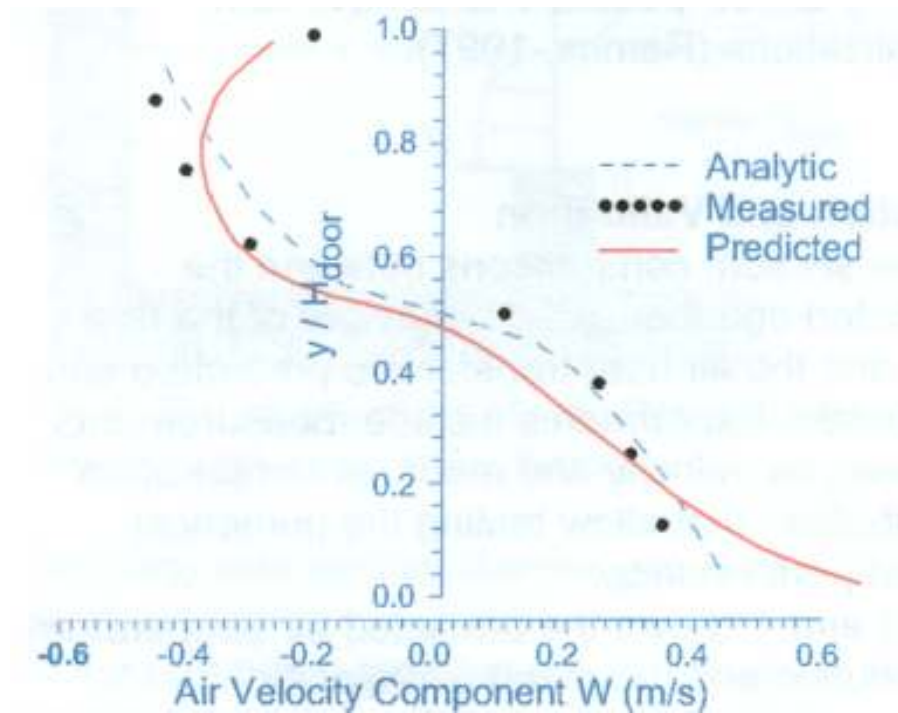
איור 20. פילוג טמפרטורה בתוך החדר לאורכו בחתך אמצעי Y-Z - סימולציה נומרית, Ramos *et al.*, (2002).

באיור מס' 21 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 מס' 22 מראה את רכיב מהירות הזרימה הניצב לפתח האוורור כהשוואה בין מודל אנליטי תוך שימוש במשוואת ברנולי, חיזוי הזרימה ע"י סימולציה נומרית ונתונים מניסויים. ניתן להבחין כי שלושת התוצאות דומות מאוד. הערכים החיוביים בגרף מציינים את כניסת האוויר פנימה, ואילו השליליים יציאת האוויר החוצה מן התא. ניתן לראות את האסימטריות של הזרימה יחסית למישור הניטרלי וגם אסימטריות בערכי מהירות הזרימה פנימה והחוצה.



איור 21. מהירות האוויר הממוצעת במישור אמצעי Y-Z בתוך התא ובפתח האוורור, Ramos *et al.*, (2002).



איור 22. מהירות הזרימה דרך הפתח - השוואה בין שיטות חישוב שונות וניסויים, Ramos *et al.* (2002).

לצד מחקרים המתייחסים לבנייני מגורים, עניין רב התגלה לאחרונה בדינאמיקת זורמים ממוחשבת (CFD) על מנת לעשות אנליזות להתנהגות זרימת האוויר וגם איכות האוויר ותנאים תרמיים במתקנים חקלאים מאווררים. עבודות התמקדו באוורור של חממות ומבנים לגידול בעלי חיים. המאמרים הבאים (שלא נסקור בפירוט בפרק זה) מתארים עבודות אלו: (Lee *et al.*, 2000; Kacira *et al.*, 1998; Lee and Short, 1998; Mistriotis *et al.*, 1997a, 1997b, Bartzanas *et al.*, 2002).

2.5 מודלים תיאורטיים

עבודתם של Fitzgerald and Woods (2004) דנה בשני מקרים שונים של חדר המאוורר ע"י כוחות ציפה: חימום החדר ע"י מקור חום אחיד מפולג על פני רצפת החדר וחימום החדר ע"י מקור חום נקודתי (ניסויים מובאים בפרק 2.3). כאן אתייחס רק למודל מתמטי תיאורטי במקרה של אוורור החדר המחומם ע"י מקור חום נקודתי ויחיד, הרלוונטי למחקר זה. נתבונן בחדר עם גובה H אשר מחומם בבסיסו ע"י מקור נקודתי עם שטף חום Q , כפי שמתואר באיור מס' 14. החדר מאוורר ע"י שני פתחים – העליון בעל שטח a_3 והתחתון ששיטחו a_1 . השכבה התחתונה מכילה אוויר בטמפרטורת הסביבה, פרט לאזור מצומצם מעל מקור הציפה,

והשכבה העליונה מעל פאן הביניים מכילה אוויר חם יחסית. מפל הלחצים בין פנים החדר לסביבה בפתח התחתון מאפשר לאוויר הקר להיכנס אל תוך החדר. מעל הפאן הביניים, הממוקם בגובה h , גרדיאנט הלחצים נחלש עקב צפיפותו הנמוכה יותר של האוויר החם. בגובה h_n הלחץ בתוך החדר זהה לזה שבחוץ (המישור הניטרלי). מפל הלחצים בין פנים החדר לסביבה בפתח העליון מאפשר לאוויר החם לזרום החוצה מן החדר. על מנת ללמוד את השפעתו של פתח אמצעי נוסף על זרימה טבעית בחדר נעשה תחילה שימוש בעבודתו של Linden *et al.* (1990) בכדי להגדיר את גובה המישור הניטרלי עבור חדר עם שני פתחים בלבד. פותח מודל מתמטי עבור הזרימה הנוצרת עקב הוספת פתח אמצעי (Fitzgerald and Woods (2004)).

2.5.1 פתח עליון ותחתון בלבד

ההנחות הבסיסיות ששמשו לפיתוח מודל המתמטי עבור חדר מאוורר עם שני פתחים (העליון והתחתון) הם: ערבוב טוב וצפיפות אחידה מעל ומתחת פאן הביניים ומחוץ למבנה. מפל לחצים על פני פתח תחתון קשור להקטנת כוח הכבידה של השכבה העליונה הפועל

על פני מרחק $h-h_n$ וגם

$$(5) \quad v_3 = \sqrt{2g'(H-h_n)} = \sqrt{2g'H(1-\hat{h}_n)}$$

$$(6) \quad v_1 = \sqrt{2g'H(\hat{h}_n-\hat{h})}$$

$$\text{כאשר } \hat{h} = \frac{h}{H}, \hat{h}_n = \frac{h_n}{H}, g' = \Delta\rho g / \rho_0$$

בהצבת משוואות (5) ו-(6) במשוואת שימור מסה ובהנחה כי הצפיפויות בכניסה וביציאה שוות:

$$(7) \quad v_1 = \gamma v_3$$

כאשר $\gamma = a_3 c_3 / a_1 c_1$ – היחס בין שטחים אפקטיביים של פתחי אוורור, נקבל

$$(8) \quad \gamma \sqrt{1-\hat{h}_n} = \sqrt{\hat{h}_n-\hat{h}}$$

שטף נפחי V חושב לפי תיאורית הפלומה של Morton *et al.* (1956):

$$(9) \quad v_1 a_1 c_1 = C \cdot B^{1/3} h^{5/3}$$

כאשר $C = (6\pi\varepsilon/5)(9\varepsilon/10\pi)^{1/3}$, B היא עוצמת מקור ציפה נקודתי, כפי שהוגדרה במשוואה 20, בעמוד 28, ε – מקדם הסחיפה.

את שימור שטף הציפה הכללי ניתן לרשום כ-

$$(10) \quad B = v_1 a_1 c_1 g'$$

שילוב של משוואות (6), (9) ו-(10) נותן ביטוי המקשר בין h ו- h_n :

$$(11) \quad C^3 \hat{h}^5 = 2 \left(\frac{a_1 c_1}{H^2} \right)^2 (\hat{h}_n - \hat{h})$$

ומכאן שילוב של (11) עם (8) נותן ביטוי עבור גובה הפאן הביניים \hat{h} :

$$(12) \quad , C^{3/2} \left(\frac{\hat{h}^5}{1-\hat{h}} \right)^{1/2} = \frac{A^*}{H^2}$$

$$A^* = \frac{a_3 a_1}{\left(\frac{1}{2} \left((a_1/c_3)^2 + (a_3/c_1)^2 \right) \right)^{1/2}} \quad \text{כאשר}$$

מכאן רואים כי הגובה המנורמל של פאן הביניים \hat{h} ושל המישור הניטרלי \hat{h}_n נשלטים ע"י שטח הפתחים האפקטיבי המנורמל A^*/H^2 וע"י מקדם הסחיפה ε ; מעניין להדגיש כי גבהים אלה אינם תלויים בעוצמת מקור הציפה.

2.5.2 השפעת הפתח האמצעי

בהמשך, דנו (Fitzgerald and Woods (2004) בהשפעתו של פתח שלישי – אמצעי בעל שטח a_2 הנמצא בגובה h_2 מעל הפתח התחתון. הם ציינו כי הפתח האמצעי עשוי להימצא בכל גובה – מעל מישור הניטרלי ומתחתיו, וגם בכל גובה יחסית לפאן הביניים. לכל מיקום תהיה השפעה שונה על גובה הפאן הביניים ועל המישור הניטרלי ולכן גם על אופי הזרימה בכלל. כאן אסקור רק את המקרה הרלוונטי למחקר שלי, בו הפתח האמצעי ממוקם מעל פאן הביניים, אך מתחת למישור הניטרלי, המפריד בין השכבה העליונה לתחתונה. במקרה כזה אנו צופים כי הזרימה דרכו תהיה פנימה אל תוך החדר. האוויר הקר בצפיפות גדולה הנכנס דרך הפתח האמצעי, יהיה בצפיפות גדולה יותר מהאוויר בשכבה העליונה והוא יזרום למטה דרך שכבה זו, יתערבב איתה וצפיפותו תקטן. כאשר הפלומה היורדת תגיע לפאן הביניים בין השכבה העליונה לתחתונה היא תהיה כבר בצפיפות הקטנה מזו של השכבה התחתונה ולכן תיעצר בגובה פאן הביניים. כתוצאה מכך הפלומה תזרום בצורה רוחבית (אופקית) בין שתי השכבות.

על מנת לפשט את המודל של זרימה יורדת הציעו (Fitzgerald and Woods (2004) להזניח את אפקט הסחיפה. מהירות האוויר דרך הפתח האמצעי היא :

$$(13) \quad v_2 = \sqrt{2g'(h_n - h_2)}$$

משוואת שימור המסה תראה בצורה כזאת :

$$(14) \quad \lambda = a_2 c_2 / a_1 c_1 \quad \text{כאשר} \quad , v_1 + \lambda v_2 = v_3$$

הצבת משוואות (5), (6) ו-(13) אל תוך משוואת שימור המסה (14) נתנה :

$$(15) \quad \sqrt{\hat{h}_n - \hat{h}} + \lambda \sqrt{\hat{h}_n - \hat{h}_2} = \gamma \sqrt{1 - \hat{h}_n}$$

השטף הנפחי של הזרם בפלומה היורדת הוא :

$$(16) \quad V_3 = v_3 a_3 c_3 = C \cdot B^{1/3} h^{5/3}$$

שטף הציפה הכללי נירשם כ-

$$(17) \quad .B = v_3 a_3 c_3 g'$$

תוך שילוב של משוואות (7), (16) ו-(17), נמצא כי

$$(18) \quad \hat{h}_n = 1 - \frac{C^3 \hat{h}^5}{2(a_3 c_3 / H^2)^2}$$

Fitzgerald and Woods (2004) איחדו את המשוואות (15) ו-(18) על מנת לקבל משוואה מפורשת עבור מיקום של פאן הביניים הנמצא בין שכבות עליונה ותחתונה, \hat{h} :

$$(19) \quad \sqrt{1 - \hat{h} - \frac{C^3 \hat{h}^5}{2(a_3 c_3 / H^2)^2}} + \lambda \sqrt{1 - \hat{h}_2 - \frac{C^3 \hat{h}^5}{2(a_3 c_3 / H^2)^2}} = \gamma \sqrt{\frac{C^3 \hat{h}^5}{2(a_3 c_3 / H^2)^2}}$$

כאשר מצאנו את מיקומו של הפאן הביניים, ניתן מיד לדעת את שטפי הזרימה הנפחיים ואת הטמפרטורה בשכבה העליונה.

2.6 אורור טבעי במבנים חקלאיים

לאורור טבעי שימוש נרחב גם בבקרת האקלים בתוך מבנים חקלאיים. השפעת מהירות הרוח וכוחות הציפה על קצב החלפת אוויר בין חממות לבין הסביבה החיצונית נלמדה בחממות עם פתחי גג ופתחי צד בסקאלות קטנות ע"י Kozai *et al.* (1980). תוך שימוש בשיטת מאזן האנרגיה וע"י Sase *et al.* (1984) תוך שימוש בניסויים במנהרת הרוח. בחממות בסקאלות גדולות המדידות של קצב האורור בוצעו בדרך כלל באמצעות גז נותב (Tracer gas), מספר דוגמאות הן: Bot (1983), de Jong (1990), Fernandez and Bailey (1992), Boulard and Papadakis *et al.* (1996) and Kittas *et al.* (1995), Draoui (1995). 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 פתיחת הפתאומית של פתחי הגג. בעבודתם הם פיתחו מודל תיאורטי עבור תהליכי מעבר באורור טבעי ואימתו אותו באמצעות ניסויים בחממה בסקאלה ממשית. במחקר שנערך לאחרונה Teitel & Tanny (2005) נחקרה השפעת מהירות וכוון הרוח על אורור טבעי של חממה המאווררת ע"י פתחי גג בלבד. הניסויים נערכו בחוות הבשור בחממה בעלת ארבעה גמלוניים, עם שטח רצפה של כ- 960 מ² ומרזבים בגובה של 3.9 מ', בה גדלו צמחי לפל. המרזבים היו מוצבים בכוון צפון-דרום. החממה אווררה ע"י 3 פתחי גג אנכיים שהיו פתוחים לגובה של 0.8 מ' מעל המרזב. שלושה

מדי רוח מסוג sonic anemometer הוצבו לאורך כל פתח ומדדו את זרימת האוויר בשני קצותיו ובמרכזו בו זמנית. שלשת המדידים הועברו לסירוגין בין פתחי הגג השונים. תורן חיצוני מדד את מהירות וכוון הרוח. התוצאות מראות כי ברוב שעות היום, בדרך כלל כיווני זרימת האוויר בשני קצות הפתח הפוכים זה לזה. כאשר יש זרימה מהחממה החוצה בקצה אחד של הפתח, תהיה זרימה פנימה בקצהו האחר. נמצאו פרקי זמן קצרים בהם מתחלפים כיווני הזרימה ואז מהירות זרימת האוויר דרך שני קצות הפתח נמוכה מאד. השינויים בכיווני הזרימה נגרמים בעיקר עקב שינויים בכוון הרוח החיצונית ביחס למבנה.

3.1 מטרות המחקר

בהרבה מצבים השטחים של הפתח התחתון והעליון יכולים להיות לא שווים, ורק במספר מועט של עבודות קודמות (Fitzgerald & Woods (2004), Linden et al. (1990)) נלמדה השפעת היחס בין שטחים של פתח עליון ותחתון על מיקום פאן הביניים. לאחרונה, Fitzgerald & Woods (2004) בעבודתם חקרו את השפעתו של יחס השטחים אלה על מיקומו של מישור הניטרלי. הקטנת שטחו של הפתח התחתון בהשוואה לשטח פתח העליון גרמה להורדת המישור הניטרלי. כמו כן הוצג (Fitzgerald & Woods (2004)) כיצד הכנסת פתח שלישי צר בין שני הפתחים (עליון ותחתון) משפיע על מיקום פאן הביניים ועל מיקומו של המישור הניטרלי. הפתחים הנ"ל היו מאוד צרים בכיוון האנכי ולכן אפשרו או כניסת זורם אל תוך המבנה או יציאתו מחוצה לו. לא נבדקה האפשרות של זרימה פנימה והחוצה דרך אותו פתח כאשר קיימים מספר פתחי אוורור.

רוב המחקרים הקודמים הציגו פתחים עליון ותחתון עם גובה פתח זהה לשניהם, כלומר היחס, $R = h_l/h_U = 1$, כאשר h הוא גובה פתיחת החלון ואותיות L ו- U מציינות פתח תחתון ועליון בהתאמה. בכל זאת, כאמור, בהרבה מקרים הגבהים של שני החלונות אינם זהים, זאת אומרת $R \neq 1$. אם לשני הפתחים רוחב זהה (כמו בעבודה הנוכחית), הרי שערכו של R מייצג גם את היחס בין שטחי הפתחים. כמו כן עבודות קודמות חקרו את כל אחד משני אופני האוורור, ערבוב ודחיקה, בנפרד ולא נעשה ניסיון לבדוק האם קיימים מצבים בהם יש אינטראקציה בין שניהם. לכן, בעבודה זו נחקרו תופעות מעבר בין אופני אוורור שונים ואינטראקציות אפשריות ביניהם. לפיכך, המטרות העיקריות של המחקר הן:

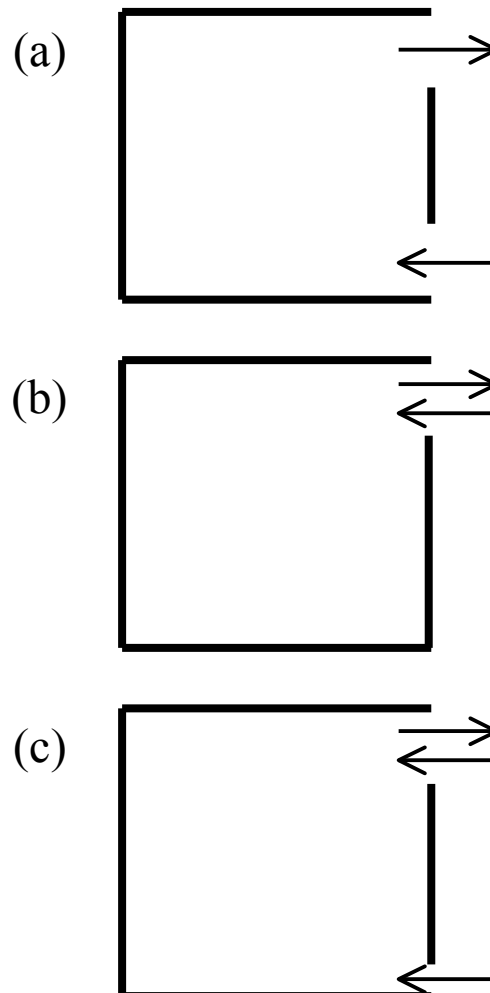
3.1.1 חקירת תהליך המעבר מאופן אוורור אחד לשני

למרות שקיים בספרות ידע רב על אוורור טבעי בכל אחד מהאופנים (ערבוב ודחיקה) בנפרד, לא נמצא מידע על תהליך המעבר מאופן אחד לשני. הבנת תהליך זה חשובה מאחר וייתכנו מצבים בהם יש צורך מהיר בשינוי אופן האוורור, למשל במצבי חירום בהם יש צורך לפנות במהירות עשן או גז אחר מחדר. לדוגמה נבחן מקרה בו הפתח העליון פתוח לגמרי ואילו הפתח התחתון סגור. במצב מתמיד, עם מקור חום תמידי (עוצמה קבועה בזמן), המבנה מאוורר באוורור ערבוב. אם, לעומת זאת, באופן פתאומי פותחים את הפתח התחתון, לדוגמה, עד לאמצע הגובה, אז פרופילי הצפיפות בתוך החדר והזרימה דרך הפתחים מגיעים למצב מתמיד חדש תוך כדי תהליך מעבר.

3.1.2 חקירת מצב מתמיד באופני אוורור שונים

לאחר תהליך המעבר, מגיעה המערכת למצב שווי משקל חדש. בעבודה זו נחקרה ההשפעה של יחס גבהי (ושטחי) הפתחים על מאפייני הזרימה והטמפרטורה במצב המתמיד. בעבודה זו לראשונה יוצג במפורט אוורור טבעי המאופיין ע"י אופן אוורור משולב (combined mode) של אוורור ערבוב ואוורור דחיקה. הפתח העליון היה תמיד פתוח לגובה מכסימלי, כאשר הפתח התחתון נפתח ונסגר לגבהים שונים בטווח $0 \leq R \leq 1$. הגבולות $R = 0$ ו- $R = 1$ מתייחסים לאוורור ערבוב ואוורור דחיקה בהתאמה.

לדוגמא, אם גובה הפתח התחתון קטן יחסית אז זרימה פנימה מתרחשת בו זמנית דרך שני הפתחים – תחתון ועליון (Fitzgerald & Woods (2004), Linden et al. (1990)), כמתואר באופן סכמתי באיור מס' c23. המחקר הזה מראה כי פתיחת הפתח התחתון לגבהים קטנים יחסית מובילה לאינטראקציה בין שני סוגי האוורור הבסיסיים ולהופעתו של אופן אוורור משולב.



איור 23. תיאור סכמתי של אופני אוורור שונים. a - אוורור דחיקה, b - אוורור ערבוב, c - אופן משולב של אוורור מושרה ציפה

3.1.3 השוואה עם סימולציה נומרית (שנערכה בגרמניה)

המטרה השלישית הייתה השוואה בין הניסויים בסקלה גדולה שנערכו בעבודה זו לבין סימולציה נומרית בתנאים זהים לניסוי. מחקר זה נערך במסגרת שיתוף פעולה עם קבוצת מחקר גרמנית מאוניברסיטת דרזדן (בראשות פרופ' ריכטר ובמימון משרד המדע) אשר ביצעה סימולציות נומריות לחלק מהמצבים שנחקרו בניסוי. (השוואת הניסוי לסימולציה בשני אופני האורור). פיתוח של סימולציה אמינה הוא בעל חשיבות כדי לאפשר חיזוי של תהליכי אורור במצבים שונים.

3.2 חשיבות המחקר

עבודת מחקר זו תקדם ידע באורור טבעי למצב העדכני ביותר בתחומים הבאים: המחקר יספק רעיונות לתכנון וכלים לאופטימיזציה של פתחי אורור במטרה להבטיח תנאים נוחים בתוך המבנים עם השקעה מינימאלית של אנרגיה; המחקר יספק אמצעים להערכת התאמה של סימולציות אשר פותחו לאחרונה לתנאי זרימה מציאותיים; המחקר ישפר את הבנתנו בזרימה במבנים בסקאלה ממשית תחת תנאים אמיתיים, וישמש כבסיס לפיתוחים הבאים של סימולציות של תהליכי אורור מורכבים. ניתן לצפות שהבנה עמוקה של תהליכי אורור טבעי ורעיונות מעשיים הנובעים מעבודת המחקר הזו יעודד שימוש נרחב ויעיל יותר בשיטה הזאת מאשר באורור מכאני. בעתיד זה עשוי להוביל להפחתה בצריכת האנרגיה הדרושה כיום לאורור בניינים.

4.1 מערכת הניסוי והמדידות

4.1.1 תיאור מערכת הניסוי והמדידים

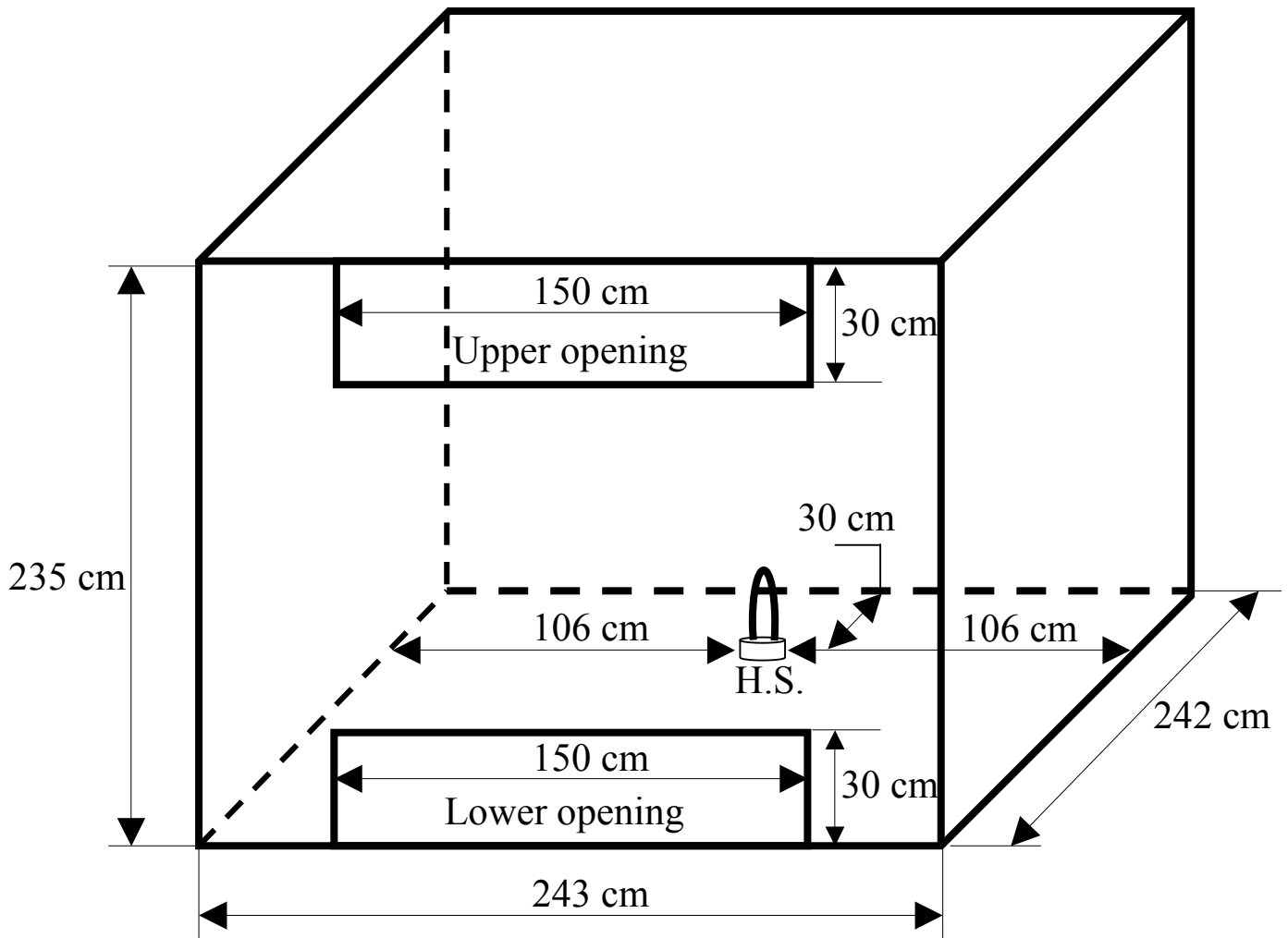
הניסויים נערכו במבנה (תא אוורור) עם אורך, רוחב וגובה של 243, 242 ו- 235 ס"מ בהתאמה (איור מס' 24), העשוי ממסגרת של פרופילי ברזל. הקירות בנויים מלוחות עץ בעובי 1 ס"מ המבודדות תרמית בעזרת לוחות קלקר בעובי 5 ס"מ. הבידוד התרמי נועד למנוע איבודי חום דרך הקירות ולקרר את המבנה לתנאים אדיאבטיים. הקיר הקדמי כלל 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. המבנה היה מוגבה 20 ס"מ מעל הרצפה בעזרת רגליות על מנת לבודד אותו מהשפעת הקרקע ולאפשר זרימת אוויר ללא הפרעות דרך הפתח התחתון. 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 חיכונית וקרינת שמש (איור מס' 25).

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). את ההספק של גוף החימום ניתן היה לשנות באמצעות ווסת זרם מ- 0 וואט עד 600 וואט, שווה ערך לשטף ציפה של $0.0167 \text{ m}^4 \text{ s}^{-3}$ (עבור אוויר ב- 20°C) כאשר שטף הציפה מוגדר כ -

$$(20) \quad B = \frac{g\alpha W}{\rho c_p}$$

כאשר W הוא ההספק החשמלי של מקור החום.

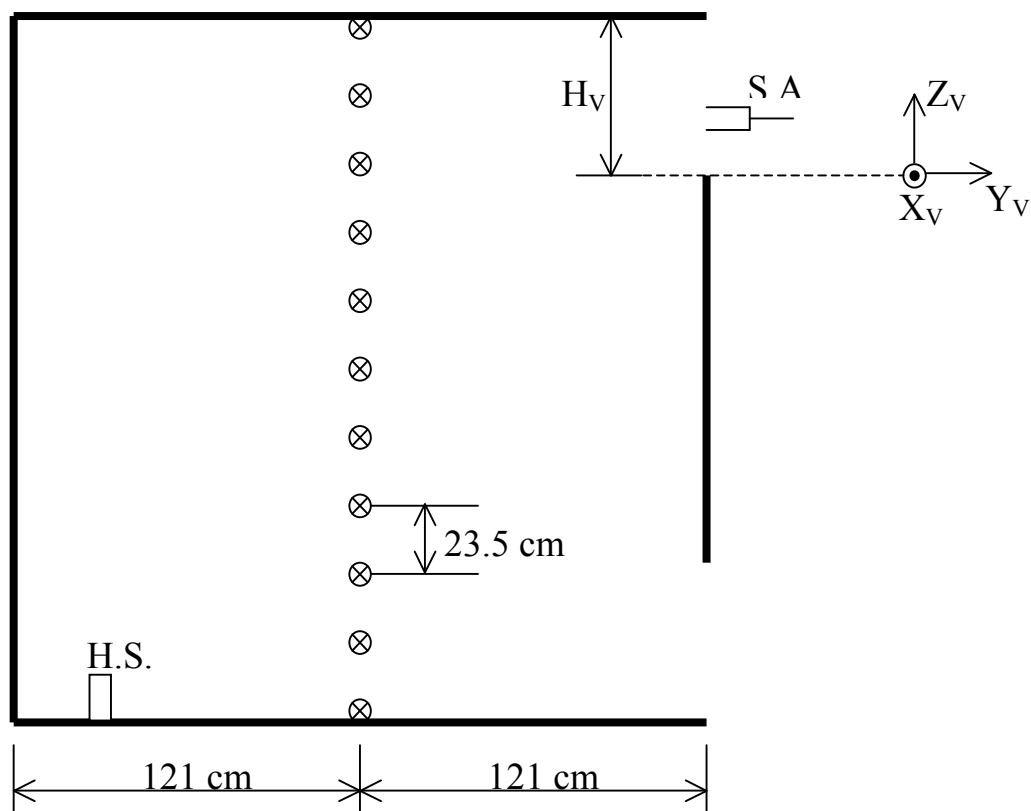
11 חיישני מסוג צמד תרמי (thermocouples), העשויים מנחושת-קונסטנטן (סוג T, דיוק של $\pm 0.75^\circ\text{C}$, קוטר הצומת בערך 0.25 מ"מ, קבוע הזמן 1.5 שניות), מדדו את פילוג הטמפרטורה האנכי במרכז החדר (איור מס' 26). הטמפרטורה מחוץ לחדר, באולם הניסויים הגדול (סביבה) נמדדה ע"י 6 צמדים תרמיים נוספים מאותו סוג 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 (ראה פרק מס' 4.1.2).



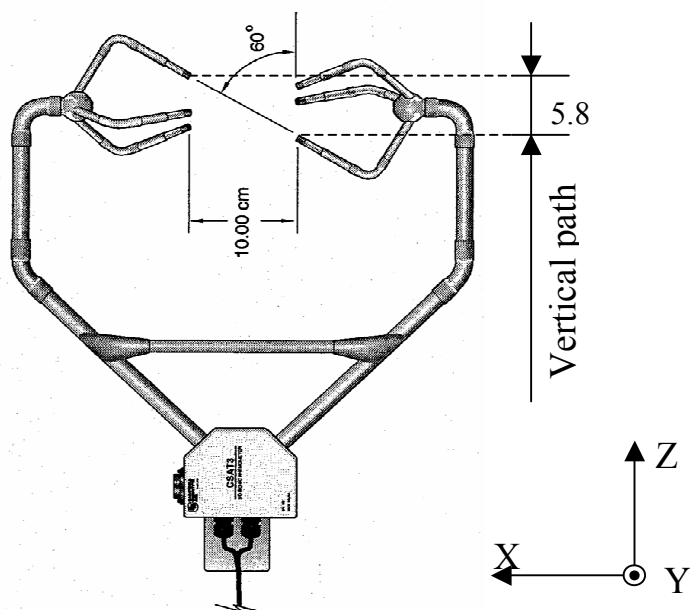
איור 24. חדר הניסויים - מידות כלליות.



איור 25. תצלום חדר הניסויים המוצב באולם גדול. קירות חיצוניים מצופים לוחות קלקר. מדידות מהירות האוויר דרך הפתח העליון בוצעו ע"י מד-רוח סוני תלת מימדי (3-dimensional sonic anemometer) – ראה איורים מס' 27, 28 (דגם CSAT3, מתוצרת Campbell Sci., USA, רזולוציה 1 mm/s, דיוק פחות מ- ± 4 cm/s, אורך מסלול בכיוון האנכי 5.8 ס"מ, קצב דגימה עד 60 הרץ). מד הרוח מדד את הפרופיל האנכי של שלושת רכיבי מהירות האוויר דרך הפתח העליון במרכז הפתח. כל פרופיל מהירות כלל 11 נקודות מדידה, 3 ס"מ בין נקודת מדידה אחת לשנייה. בכל נקודת מדידה מד הרוח מדד בקצב של 10 הרץ במשך 2 דקות. על מנת ללמוד את תגובת המערכת למעבר בין שני אופני האוורור, ובמיוחד את תגובת הזרימה דרך הפתח למעבר זה, בחלק מן הניסויים מד הרוח הוצב בנקודה קבועה באזור התחתון של הפתח העליון ומהירות האוויר נמדדה באופן רציף לפני ואחרי פתיחתו של הפתח התחתון.



איור 26. פריסת חיישני טמפרטורה (\otimes) לגובה בתוך החדר ומיקומו של מד מהירות סוני בחלון העליון (S.A.).
H.S. – מקור חום.



איור 27. מד רוח סוני תלת-ממדי.



איור 28. תצלום מד מהירות תלת-מימדי המוצב בפתח העליון.

4.1.2 הפחתת השפעת הקרינה הישירה

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 חישני 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 מגוף החימום.

על מנת למנוע את האפקט של קרינה תרמית הנפלטת מגוף החימום, כל הקירות הפנימיים (כולל ריצפה ותקרה), הכבלים החשמליים בתוך המבנה, חוטים של צמידים תרמיים וגוף החימום צופו ברדיד אלומיניום (איור מס' 29). מכיוון שכושר הפליטה (emissivity) של רדיד אלומיניום נמוך מאוד ($\epsilon \approx 0.09$), הרי שאפקט הקרינה הנפלטת מגוף החימום יופחת אם נצפה אותו ברדיד אלומיניום (ראה פרק 5.1). בחלק מהניסויים הוכנסו שלושה צמידים תרמיים אל תוך אחד הקירות הצדדיים בגבהים שונים, וטמפרטורת הקיר נמדדה עם ובלי ציפוי האלומיניום. שלושה מדידים אשר מדדו את טמפרטורת הקיר הוכנסו לתוך הקיר בגבהים 12, 50 ו-80 ס"מ מהריצפה.

מאותם סיבות בדיוק, קרינה ישירה עלולה גם להשפיע על חיישני הטמפרטורה ולכן צופו החיישנים בזהב (אמיסיביות של 0.03 -) אשר מונע חימום החיישן עקב קרינה ישירה מגוף החימום (ראה פרק 5.1).



איור 29. תצלום פנים החדר - כל הקירות וכבלים חשמליים צופו ברדיד אלומיניום. בעיגול אדום מסומן אחד מחיישני טמפרטורה, במלבן אדום מסומן גוף חימום.

4.2 מהלך הניסויים

ניסויים נערכו בהספקים שונים של גוף החימום : 100, 300 ו- 500 וואט. שימוש בעשן להדמיית זרימה מעל מקור החום הראה כי עבור שלושת ההספקים הזרימה מושרתה הציפה מעל גוף חימום היא טורבולנטית. יצוין כי עוצמת הריבוד ומהירויות הזרימה תלויים בעוצמת המקור (Linden et al.(1990)). בשטפי חום של 100, 300 ו- 500 וואט, נלמדו 18, 18 ו- 17 ערכים שונים של R בהתאמה. מספר חזרות נערכו בכל R , ומספרם הכללי של כל הניסויים (בכל שטפי חום ובכל R) הגיע ל- 121 ניסויים.

כל סדרה של ניסויים התחילה בהפעלתו של גוף החימום למשך 5 שעות לפחות, כאשר רק הפתח העליון פתוח לגובהו המכסימלי והפתח התחתון סגור (אוורור ערבוב). זה מאפשר למערכת להגיע למצב של מעין שיווי משקל (quasi-equilibrium). ואז, בכל ניסוי, הפתח התחתון נפתח לגובה מסוים (R).

מדידות נערכו ברציפות הן תוך כדי תהליך המעבר מאופן אוורור אחד לשני וכן במצב המתמיד אליו הגיעה המערכת לאחר פרק זמן. בפועל המערכת והמדידות המשיכו לפעול לפחות 30 דקות אחרי השינוי בגובה הפתח התחתון. התוצאות הראו כי, למעשה, המערכת מגיעה למצב מתמיד אפילו בזמן קצר יותר מ- 30 דקות. פרק זמן של 30 דקות גם גדול יותר מסקלת הזמן האופיינית של אוורור הערבוב (Linden et al. (1990)) המוערך בין 12 ל- 21 דקות עבור שטפי חום המסופקים בעבודה זו. סקלת הזמן של אוורור הערבוב, τ_m , מחושבת בעזרת הביטוי הבא (Linden et al. (1990)):

$$(21) \quad \tau_m = \frac{2V}{B^{1/3} (kA\sqrt{H_V})^{2/3}}$$

כאשר V מציין נפח חלל החדר, B – שטף ציפה, k – קבוע (עבור פתחים אנכיים $k=0.25$), A ו- H_V – שטח וגובה הפתח בהתאמה. פרק זמן של 30 דקות בוודאי גדול יותר מאשר סקלת הזמן באוורור דחיקה, כיוון שבאוורור דחיקה סקלת הזמן תמיד קטנה יותר מסקלת הזמן האופיינית באוורור הערבוב.

4.3 הערכת שגיאת המדידות

ניתן להבחין בין שני סוגי שגיאות מדידה: שגיאה שיטתית ושגיאה אקראית. שגיאה שיטתית היא שגיאה קבועה במהלך הניסוי, כלומר שגיאה המסיטה את כל התוצאות בניסוי באותה מידה ובאותו כוון. אחד הגורמים האפשריים לשגיאה שיטתית בעבודה הנוכחית הוא אי דיוק במכשירי המדידה - Δ_m . השגיאה במד-הרוח הסוני היא 0.04m/s ובמדידי הטמפרטורה היא 0.75°C , לפי הוראות היצרן, כפי שמופיע בפרק 4.1.1.

שגיאה אקראית (שגיאה סטטיסטית – תנודות סטטיסטיות בתהליך המדידה של הגודל הנמדד) היא שגיאה שאינה קבועה לא בגודלה ולא בכוונה, כלומר תוצאת המדידה יכולה להיות גדולה או קטנה מהערך האמיתי. יתירה מזאת, אם נחזור על מדידת אותו גודל מספר פעמים, תתקבל בכל פעם תוצאה שונה במקצת.

על מנת להקטין את השגיאה הסטטיסטית במדידות השתמשתי בחזרות רבות של אותו ניסוי (אותו הספק של גוף החימום, אותו אופן האוורור, אותו גובה מדיד בתוך החדר – במקרה של מדידת טמפרטורה, אותה נקודת מדידה בפתח העליון – במקרה של מדידת מהירות האוויר דרך הפתח).

ניתן להראות שהערכת השגיאה הסטטיסטית אינה עולה על $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$, כאשר σ - סטיית התקן, N - מספר המדידות. את סטיית התקן של ההתפלגות נעריך ע"י סטיית התקן של המדידות שביצענו:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (22)$$

כאשר \bar{x} - התוחלת של המדידות ו x_i הוא ערך של כל מדידה. עבור מדידות מהירות זרימת האוויר דרך הפתח העליון באוורור הערבוב עם 10 מדידות חוזרות, כלומר 10 ניסויים שחזרו על עצמם, השגיאה המתקבלת היא:

$$\Delta u = 0.01 \text{ m/s}$$

עבור מדידות טמפרטורה בתוך החדר ב- $R=0.1$, עם 23 מדידות חוזרות, כלומר 23 ניסויים שחזרו על עצמם, השגיאה המתקבלת היא:

$$\Delta T = 0.1^\circ \text{C}$$

ניתן לראות כי השגיאות הסטטיסטיות קטנות יחסית לשגיאת המכשירים. הערכת השגיאה הכוללת - כדי להעריך את גודל השגיאה האקראית הכוללת, עלינו לדעת להעריך את שני סוגי השגיאות. להערכת השגיאה האקראית הכוללת נבחר את השורש של סכום הריבועים של שגיאת המכשיר והשגיאה הסטטיסטית.

$$\Delta x = \sqrt{\Delta_m^2 + \frac{\sigma^2}{N}} \quad (23)$$

במקרה שלנו, כיוון שהשגיאות הסטטיסטיות זניחות ביחס לשגיאה השיטתית, השגיאה הכוללת המתקבלת היא כמו שגיאת המכשירים.

5.1 השפעת מעבר חום בקרינה על המדידות

כפי שצוין קודם, 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. מכיוון שכושר הפליטה (emissivity) של רדיד אלומיניום נמוך מאוד ($\epsilon \approx 0.09$), הרי שאפקט הקרינה הנפלטת מגוף החימום יופחת אם נצפה אותו ברדיד אלומיניום. ניתן להסביר את התופעה הזאת ע"י משוואת שטף חום של סטפאן-בולצמן (Stefan-Boltzmann) (Holman, 1989) עבור גופים אפורים:

$$(24) \quad e_{non-black} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

כאשר σ – קבוע סטפאן-בולצמן. ניתן לראות מהמשוואה כי הקטנת האמיסיביות מקטינה את הקרינה הנפלטת מגוף חימום.

כמו כן, בכל גוף תמיד מתקיים המאזן הבא:

$$(25) \quad 1 = \alpha + \rho + \tau$$

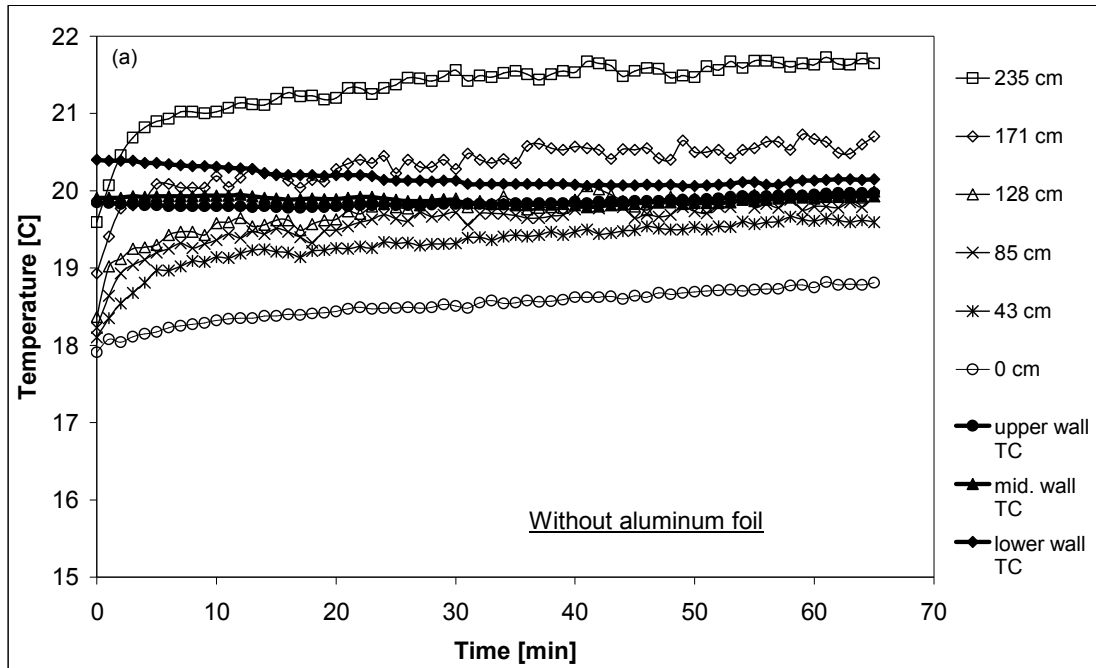
כאשר τ – העברת קרינה דרך החומר, ρ – החזרת קרינה מהחומר ו- α – קליטת קרינה ע"י חומר. אם נניח כי τ בגופים אטומים (עץ, מתכת וכו') שווה לאפס, אזי ככל שהחזרת קרינה (reflection) מהחומר תהיה גדולה יותר הוא יקלוט פחות קרינה ולא יתחמם. מצד שני, ניתן לומר כי לפי חוק קירכהוף (Kirchhoff's law) בשיווי משקל מתקיים:

$$(26) \quad \epsilon(T) = \alpha(T)$$

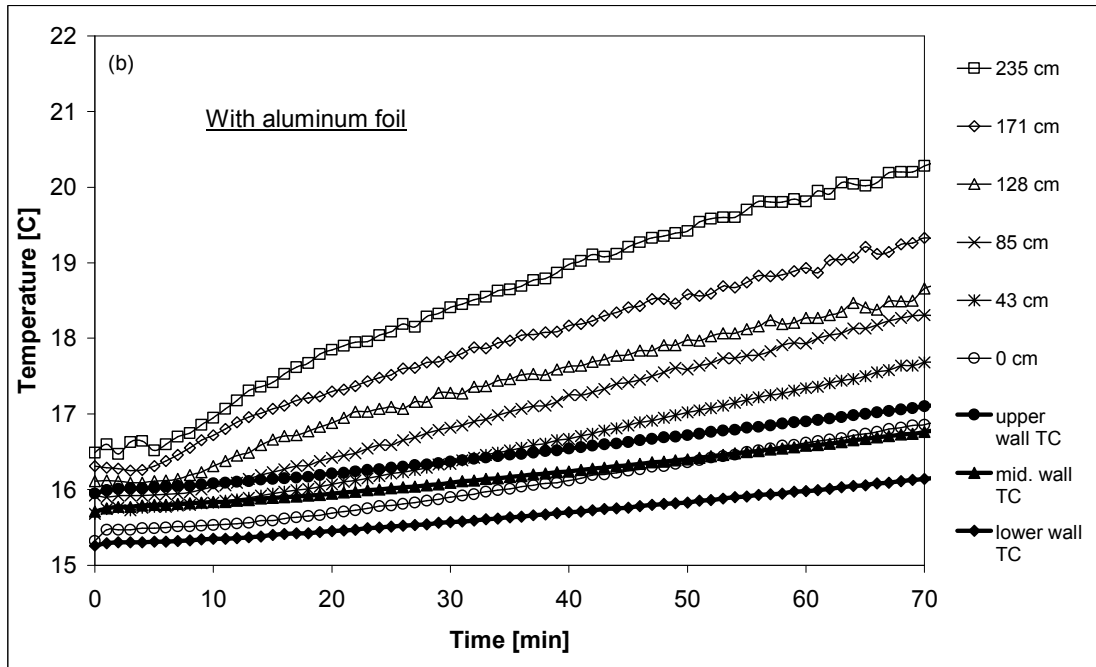
כלומר ככל שכושר הפליטה של החומר יהיה קטן יותר כך גם כושר הקליטה.

בהתבסס על המשוואות (25), (26) הצמתים (junctions) של הצמדים התרמיים צופו בשכבת זהב ($\epsilon = 0.03$) על מנת למזער השפעת קרינה תרמית על מדידות הטמפרטורה. על מנת ללמוד בצורה מעשית על השפעתה של הקרינה התרמית הנפלטת מגוף החימום ועל תרומתו של רדיד האלומיניום במניעתה, בחלק מהניסויים הוכנסו שלושה צמדים תרמיים אל תוך אחד הקירות הצדדיים בגבהים שונים, וטמפרטורת הקיר נמדדה עם ובלי ציפוי האלומיניום. באיורים מס' 30 - 33 מומחשת בצורה גראפית השפעתה של הקרינה על חימום הקירות. בגרפים הנ"ל רואים את הטמפרטורה בתוך החדר ובאחד הקירות הצדדיים עם ובלי ציפוי אלומיניום מתחילת הניסוי, כאשר גוף החימום פועל בהספק של 200 וואט (איורים מס' 30, 31) ובהספק של 400 וואט (איורים מס' 32, 33). שלושה מדידים אשר מדדו את טמפרטורת הקיר הוכנסו לתוך הקיר בגבהים 12, 50 ו- 80 ס"מ מהרצפה. בשני ההספקים ניתן לראות בבירור כי ללא ציפוי אלומיניום (איורים מס' 30, 32) הקיר היה הרבה יותר חם מהאוויר באותו גובה וגם המדיד התחתון מראה טמפרטורה יותר גבוהה מהמדיד העליון – תוצאה ישירה של הקרינה התרמית (המדיד התחתון נמצא יותר קרוב לגוף החימום). לעומת זאת, כאשר מצפים את הקיר ברדיד אלומיניום (איורים מס' 31, 33) רואים כי הקיר לא מתחמם אלא כתוצאה מהסעה טבעית והטמפרטורה שלו אף נמוכה יותר מטמפרטורת האוויר באותו גובה. כמו כן ציפוי הקירות תרם להגעה של מערכת

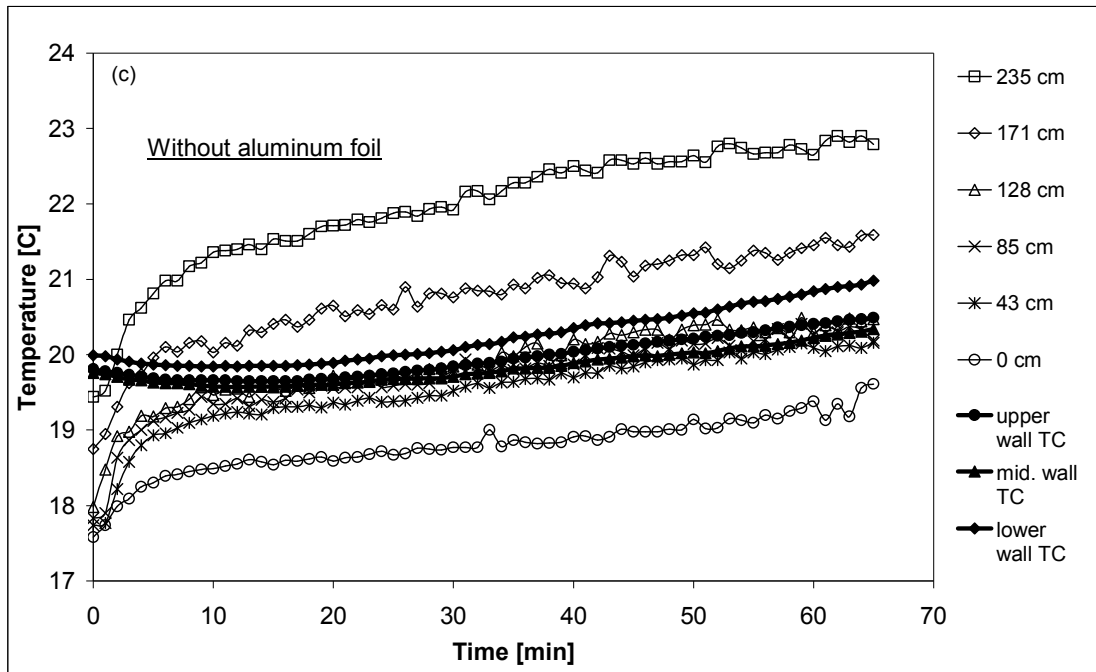
הניסוי למצב של שיווי משקל בזמנים הרבה יותר קצרים, מפני שהמסה התרמית הגדולה של הקירות לא השתתפה כמעט בתהליך.



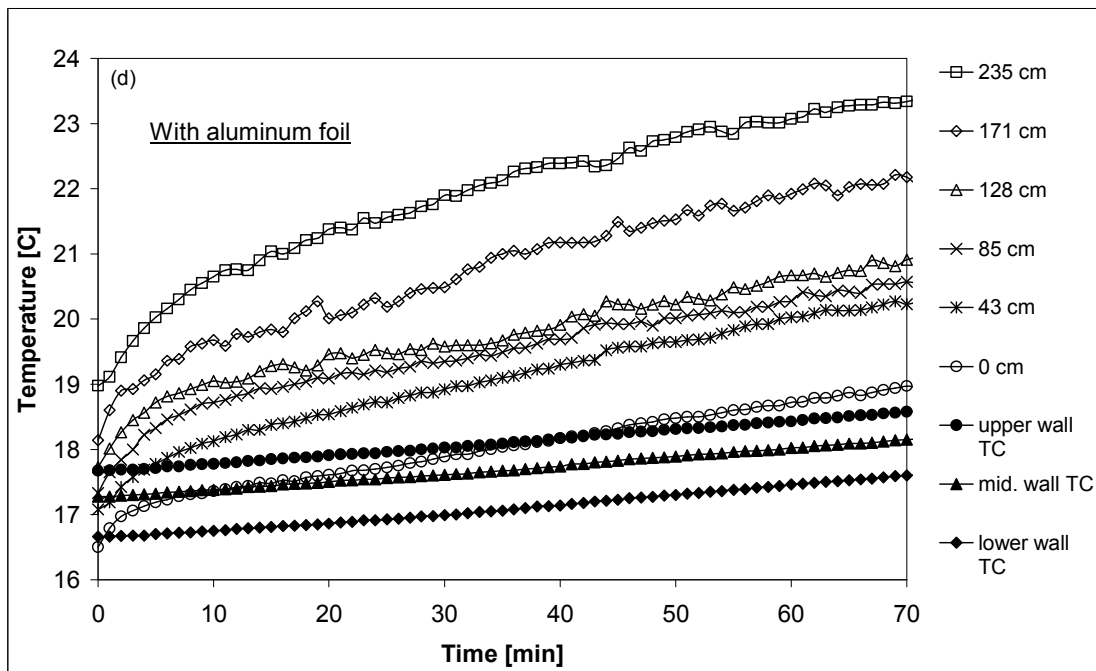
איור 30. השפעת ציפוי קירות ברדיד אלומיניום על מדידות טמפרטורה בתוך חדר הניסויים. הספק גוף חימום – 200 וואט, ללא ציפוי.



איור 31. השפעת ציפוי קירות ברדיד אלומיניום על מדידות טמפרטורה בתוך חדר הניסויים. הספק גוף חימום – 200 וואט, עם ציפוי.



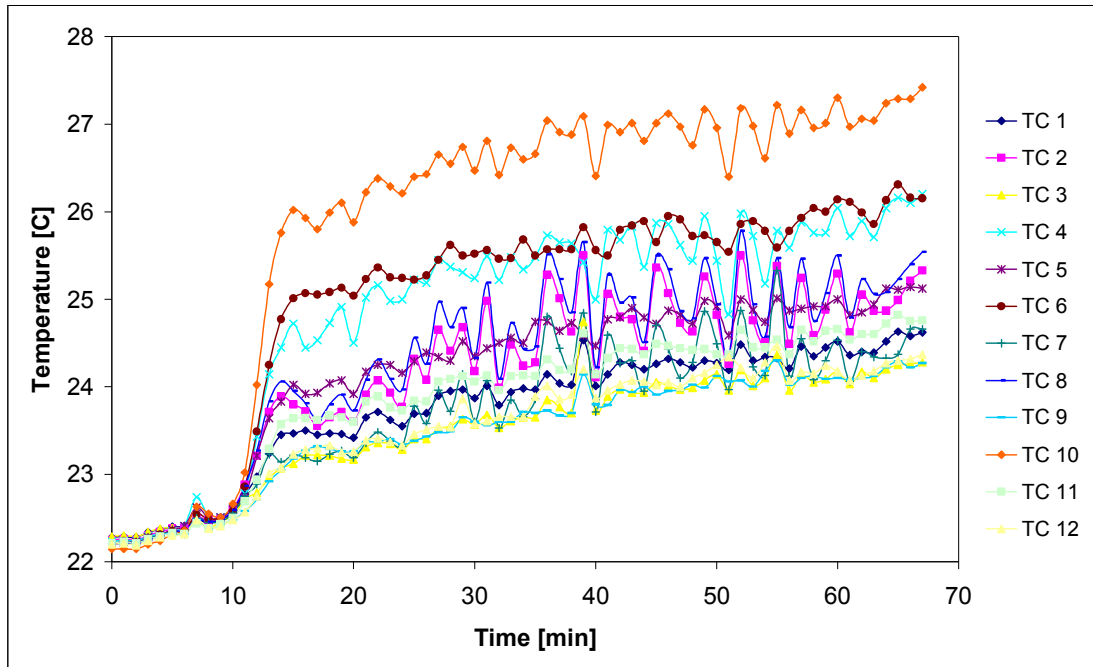
איור 32. השפעת ציפוי קירות ברדיד אלומיניום על מדידות טמפרטורה בתוך חדר הניסויים. הספק גוף חימום – 400 וואט, ללא ציפוי.



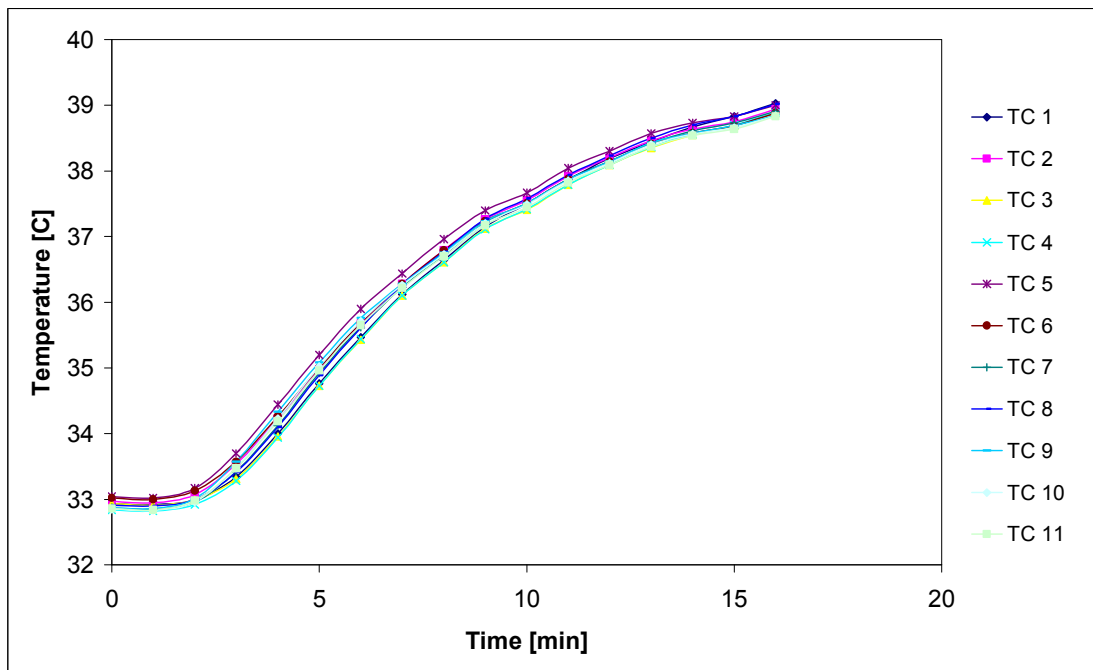
איור 33. השפעת ציפוי קירות ברדיד אלומיניום על מדידות טמפרטורה בתוך חדר הניסויים. הספק גוף חימום – 400 וואט, עם ציפוי.

קרינה ישירה עלולה גם להשפיע על חיישני הטמפרטורה ולכן צופו החיישנים בזהב (אמיסיביות של 0.03) אשר מונע חימום החיישן עקב קרינה מגוף החימום. כדי לבחון את יעילות הציפוי, הוצבו כל החיישנים החשופים במקום אחד, במרחק של לא יותר מ 5 ס"מ זה מזה וחימום החדר הופעל ברציפות בהספק של 400 וואט. באיור מס' 34 ניתן לראות כי למרות שכל החיישנים מוקמו באותה נקודה, נמצא בניהם הפרש טמפרטורות גדול (עד 3°C) וזאת כתוצאה

מקרינה ישירה שהשפיעה באופן שונה על כל אחד מהחיישנים (עקב זווית ראייה שונה מעט בין גוף החימום לכל חיישן). הניסוי נעשה גם עם חיישנים מצופים זהב ובאיור מס' 35 נראה כי הפרש הטמפרטורות בניהם ירד באופן משמעותי והיה לא גדול מ- 0.5°C . במקרה זה לא היה חימום עקב קרינה ישירה על החיישנים והם מדדו את טמפרטורת האוויר שבסביבתם בלבד. לכן לא היו הבדלים גדולים בטמפרטורות של החיישנים השונים.



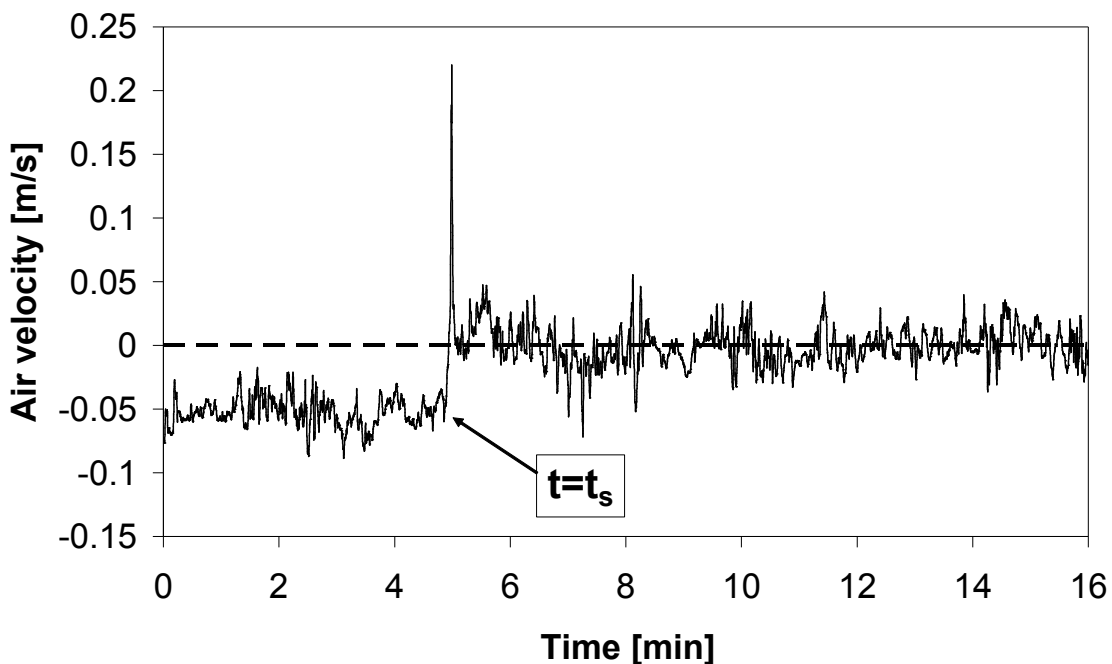
איור 34. השפעת קרינה תרמית על מדידות טמפרטורה. חיישני טמפרטורה ללא ציפוי זהב. TC - תרמוקפלים (צמדים תרמיים).



איור 35. השפעת קרינה תרמית על מדידות טמפרטורה. חיישני טמפרטורה עם ציפוי זהב. TC - תרמוקפלים (צמדים תרמיים).

5.2.1 מהירות האוויר דרך הפתח העליון

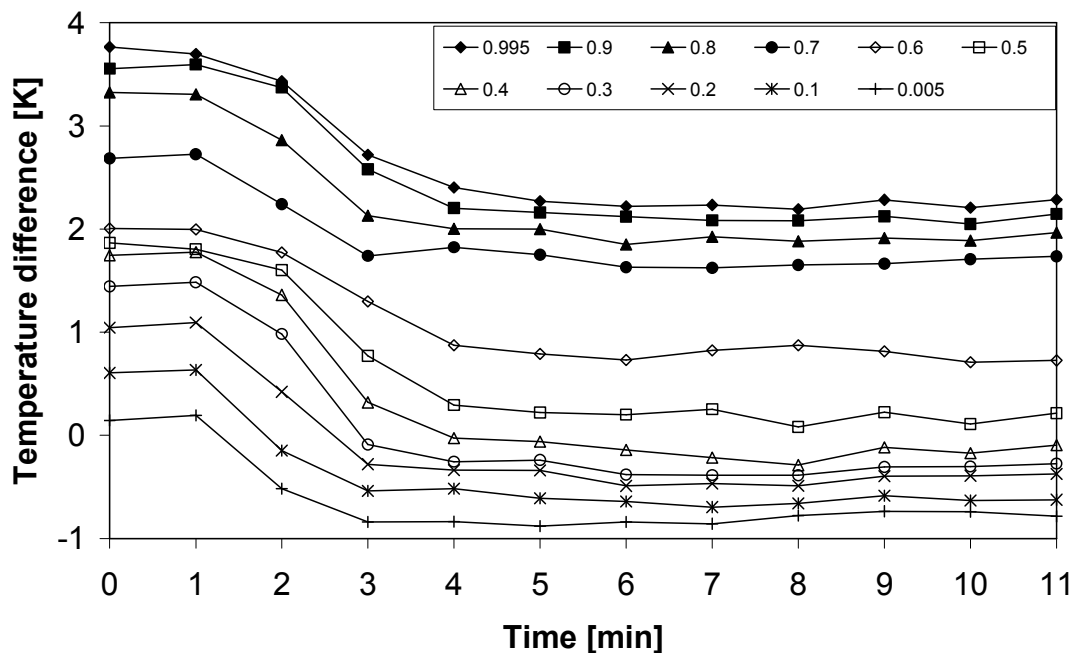
איור מס' 36 מראה את הרכיב הניצב למישור הפתח של מהירות האוויר כפי שהוא נמדד ע"י מד הרוח, 3 ס"מ מעל הקצה התחתון של הפתח העליון. תחילה חדר הניסוי היה מאוורר באוורור ערבוב עם שטף חום רציף של 100 וואט. באופן זה של אוורור קיימת זרימה דו-כיוונית פנימה והחוצה דרך אזור התחתון ועליון של הפתח העליון, בהתאמה. מצב זה מומחש באיור מס' 36 ע"י מהירות שלילית (כלומר אל תוך החדר) באזור התחתון של הפתח העליון, עבור $t < t_s$. בזמן $t = t_s$ החלון התחתון נפתח באופן פתאומי לגובה המכסימלי (אוורור דחיקה, $R=1$) ותהליך המעבר מתחיל. ניתן להבחין בקפיצה במהירות בזמן $t = t_s$ ולאחריה התייצבות די מהירה של המהירות על ערכים חדשים, אשר מיצוע שלהם נותן ערך קבוע בזמן וקרוב לאפס. מהירות כזו מאוד אופיינית לאוורור הדחיקה באזור התחתון של הפתח העליון, כאשר אין זרימה פנימה דרך פתח זה. איור מס' 36 מראה כי משך זמן הנדרש למהירות האוויר דרך הפתח לעבור ממצב מתמיד אחד (אוורור ערבוב) לשני (אוורור דחיקה) ארך כ- 30 שניות.



איור 36. רכיב מאונך לפתח של מהירות האוויר בפתח העליון - 3 ס"מ מקצה תחתון של החלון. t_s - רגע פתיחת החלון. ערכים שליליים של המהירות מציינים כניסת אוויר.

5.2.2 הפרשי טמפרטורה בתהליך המעבר

איור מס' 37 מראה את תגובת הפרשי טמפרטורה בזמן בין פנים החדר לסביבה בגבהים שונים בתוך החדר. כל סימון מייצג גבה שונה של המדידים (צמדדים תרמיים) המנומל בגובה הכללי של חדר הניסוי (235 ס"מ). יצוין גם כי הפרשי טמפרטורה גדלים עם עליה בגובה, כצפוי. באיור זה, בזמן $t = 0$, החלון התחתון נפתח בצורה פתאומית לגובה המרבי ($R = 1$) ותגובת המערכת של המערכת מוצגת במשך 11 דקות. התוצאות מראות כי כמעט בכל הגבהים עד לזמן $t = 5 \text{ min}$ הפרשי טמפרטורה יורדים תוך כדי הגברת האוורור, וזהו בערך משך הזמן הנדרש לפרופילי הטמפרטורה לסיים את תהליך המעבר. כלומר, עבור $t \geq 6 \text{ min}$ המערכת התייצבה למצב מתמיד חדש בו הפרשי טמפרטורה קבועים בזמן. תוצאות דומות באופן איכותי הושגו גם בתהליכי המעבר בערכים אחרים של R (זאת אומרת, בגבהים שונים של הפתח התחתון). יש לציין כי קרוב לתחתית המבנה התקבלו הפרשי טמפרטורה שליליים וזה נובע מהנחת הטמפרטורה החיצונית אחידה, כאשר למעשה זאת הטמפרטורה הממוצעת מחוץ למבנה, ללא התחשבות בריבוד הטמפרטורה החיצונית. אי לכך, הטמפרטורה החיצונית הממוצעת עשויה להיות גבוהה מטמפרטורה בתוך החדר בחלקו התחתון.

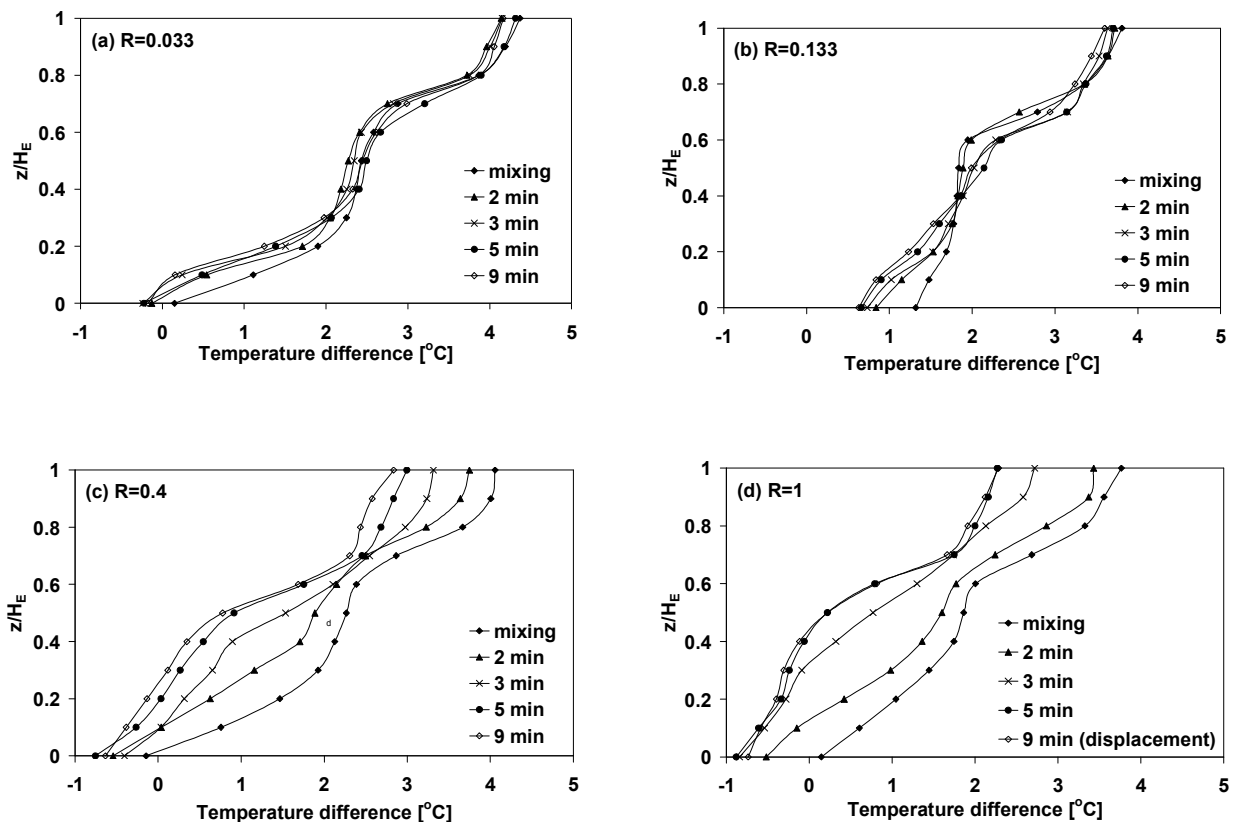


איור 37. הפרשי טמפרטורה בין פנים החדר לסביבתו תוך כדי תהליך המעבר מאוורור הערבוב לאוורור הדחיקה.

מהתוצאות המוצגות בגרפים 36 ו-37 ניתן להגיע למסקנה כי התגובה בזמן של מהירות האוויר דרך הפתח העליון לשינוי פתאומי של גובה הפתח התחתון מהירה בהרבה מתגובתם של הפרשי טמפרטורה פנים-חוץ לשינויים אלה. יצוין גם כי פתיחת החלון התחתון משנה כמעט מיידית את פילוג הלחצים המקומי בפתח העליון וזה גורם לשינוי מהיר מאוד של אופי הזרימה

בפתח זה. ואז הזרימה הנ"ל מייצבת הדרגתית את שדה הטמפרטורות למצב מתמיד חדש בתוך המבנה. תהליך זה (התייצבות טמפרטורה) תלוי במלוא הנפח של חדר הניסוי וכתוצאה מכך איטי יותר בצורה ניכרת מאשר התהליך הקודם (התייצבות המהירות) אשר מתרחש מקומית בפתח העליון.

איור מס' 38 מכיל סדרת גרפים, כאשר כל גרף מראה את הפרש הטמפרטורה בין פנים החדר לסביבתו החיצונית כפונקציה של הגובה המנורמל של החדר עבור שטף חום של 100 וואט. כל הנקודות על הגרפים מייצגים הפרשי הטמפרטורה הממוצעים של דקת מדידה אחת. בכל הניסויים תחילה החדר היה מאוורר באוורור ערבוב במצב מתמיד, כאשר רק החלון העליון היה פתוח והתחתון סגור. בזמן $t=0$ החלון התחתון נפתח בצורה פתאומית לגובה מסוים. איורים מס' a38 עד d38 מדגימים את התגובה בזמן של הפרשי טמפרטורה כתוצאה מפתחתו של החלון התחתון לגבהים: 1 ס"מ, 4 ס"מ, 12 ס"מ ו- 30 ס"מ, ערכים מתאימים ל- $R=0.033, 0.133, 0.4, 1$ בהתאמה. ערכים שליליים של הפרשי טמפרטורה נובעים מאותן הסיבות המוזכרות קודם.



איור 38. תגובת מעבר של פרופיל הפרשי טמפרטורה אנכיים כתוצאה מפתחת חלון התחתון.

איור מס' a38 מראה כי פתיחתו של החלון התחתון לגובה קטן ($R=0.033$) כמעט לא משפיעה על פרופילי טמפרטורה תוך כדי תהליך המעבר. הפרש הטמפרטורה בין פנים לחוץ קטן בכל גובה בשיעור של פחות מ- 1°C עקב תוספת האוורור הקטנה דרך הפתח התחתון, אך צורתם של הפרופיל לפני ואחרי הפתיחה כמעט זהים. ב- $R=0.033$ הפרש הטמפרטורה היה קרוב לאחיד

בטווח של $0.3 \leq z/H_E \leq 0.6$ ו- $0.8 \leq z/H_E \leq 1$, בעוד שגרדיאנט יותר חזק נצפה בגבהים אחרים. אף על פי שישנה כניסת אוויר דרך הפתח התחתון, פרופילי טמפרטורה נראים עדיין כמו באוורור הערבוב. זה אומר שבמקרה כזה החדר מאוורר באופן המשולב של האוורור כלומר שילוב של אוורור ערבוב ואוורור דחיקה.

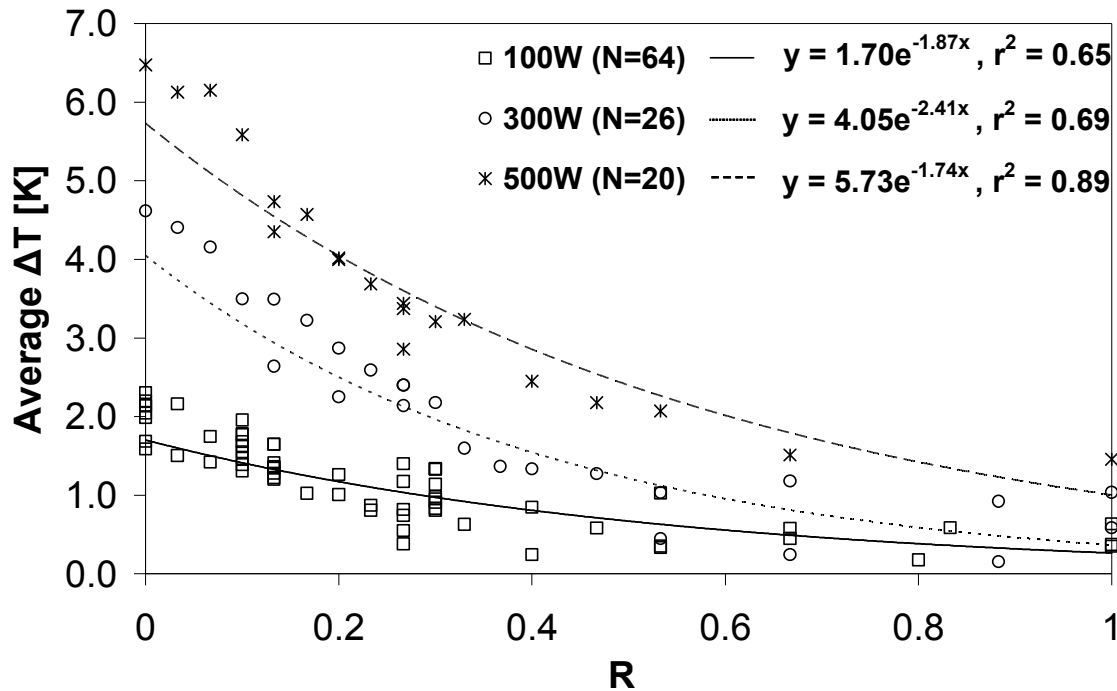
איור מס' b38 מראה כי לפתיחה גדולה יותר של החלון התחתון ($R=0.133$) ישנה השפעה רבה יותר על פרופיל הפרשי טמפרטורה. האפקט הזה מורגש יותר מהרצפה עד הגובה של $z/H_E \approx 0.6$, במקום בו גרדיאנט אחיד בקרוב מוחלף בגרדיאנט תלול יותר. איור מס' c38 מראה את תהליך המעבר אחרי שחלון התחתון נפתח לגובה של 12 ס"מ ($R=0.4$) וכתוצאה מכך ישנו שינוי משמעותי יותר בפרופילי טמפרטורה תוך כדי המעבר מאוורור ערבוב לאוורור משולב. השפעה רבה על פרופילי טמפרטורה נראית ב- $z/H_E \approx 0.35$ ו- $z/H_E \approx 0.9$, כאשר ב- $z/H_E \approx 0.65$ נצפה שינוי קטן מאוד יחסית כפונקציה של הזמן.

איור מס' d38 מראה תהליך דומה מאוד מהותית לזה שנראה באיור מס' c38, מה שמרמז על כך שפתיחת הפתח התחתון ל- $R \geq 0.4$ משפיעה בצורה מעטה על דינמיקת תהליך המעבר. מכל הגרפים באיור מס' 38 ניתן ללמוד כי פרופילי הפרשי טמפרטורה מגיעים לשיווי משקל כבר בערך אחרי 5 דקות מרגע הפתיחה של החלון התחתון.

5.3 מצב מתמיד

5.3.1 הפרשי טמפרטורה ממוצעים

בכל R נמדדו הפרשי טמפרטורה בין מדידים פנימיים וחיצוניים כאשר המערכת הגיעה למצב מתמיד. ואז חושב ממוצע לגובה החדר של הפרשים אלה ותוצאות מוצגות באיור מס' 39. במטרה להמחיש יותר טוב את התנהגות הפרשי טמפרטורה ממוצעים כתלות ב- R , לנקודות מדודות על הגרף הותאמו עקומות מעריכיות בשיטת הריבועים הפחותים. הגרף מראה כי ככל שה- R עולה, ע"י הגדלת גובה הפתח התחתון (וגם שטחו), הפרש הטמפרטורה הממוצע בין פנים החדר לסביבה יורד בהתאם לשיפור האוורור, כצפוי. הפרש טמפרטורה ממוצע בשיווי משקל עבור 500 וואט גדול יותר מאשר עבור 300 ו- 100 וואט, שוב כצפוי.



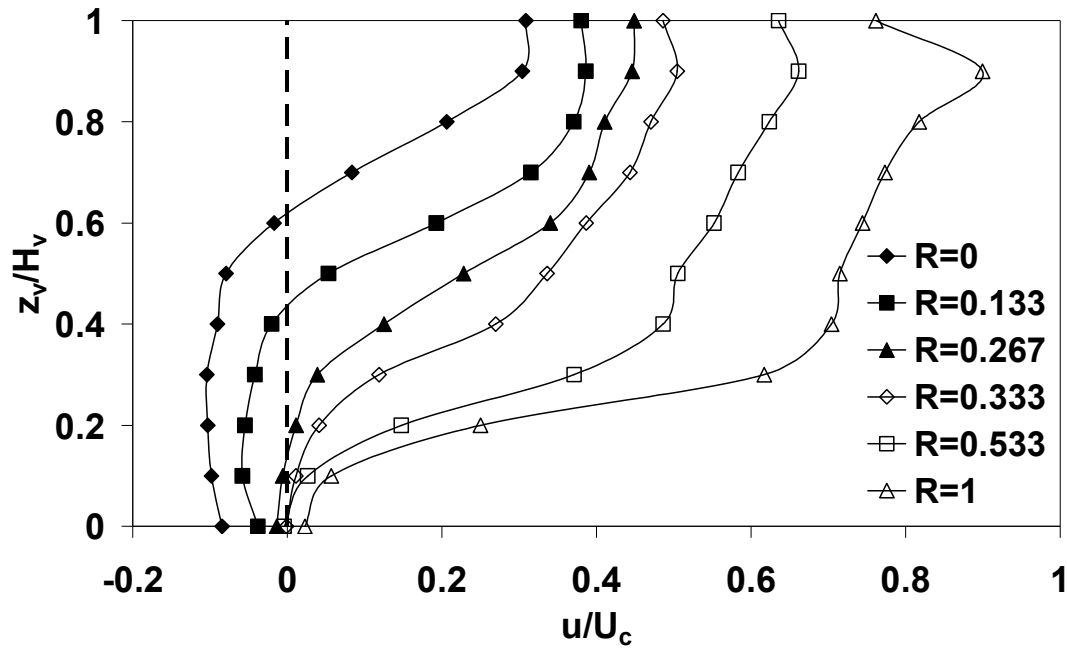
איור 39. הפרשי טמפרטורה ממוצעים במצב מתמיד בשלושה הספקים שונים של גוף החימום כתלות בגובה פתח החלון המנורמל. N - מספר ניסויים שנערכו באותו הספק.

5.3.2 מהירות הזרימה דרך פתח עליון

החלפת אוויר בין אוויר חיצוני לפנימי מוצגת ע"י מהירות בכיוון הניצב למישור הפתח. הפרופיל האנכי של רכיב הנורמאלי של מהירות האוויר דרך פתח העליון במרכזו מוצג באיור מס' 40, עבור הספק של 500 וואט. מדידות בכל נקודה המוצגת על הגרף בוצעו לאחר שהמערכת היגיעה לשיווי משקל בערכים שונים של R. מהירות האוויר מנורמלת במהירות אופיינית להסעה חופשית, המוגדרת כ-:

$$(27) \quad U_C = \sqrt{g\alpha\Delta TH_E}$$

כאשר g מציין תאוצת כוח הכובד, α - מקדם ההתפשטות התרמי ו- ΔT - הפרש טמפרטורה פנים-חוץ ממוצעת לכל הגובה של החדר, H_E . תוצאות זהות באופן איכותי התקבלו גם עבור שטפי חום של 100 ו- 300 וואט. בהתחשב באורך המסלול האנכי של המכשיר (vertical path length) - 5.8 ס"מ, כל נקודת מדידה בגרף מייצגת מהירות ממוצעת על מרחק אנכי של ± 2.9 ס"מ.



איור 40. פרופילי מהירות האוויר מנורמלים דרך פתח העליון במצב מתמיד, בערכי R שונים. הספק גוף החימום – 500 וואט.

איור מס' 40 מראה כי באוויר הערבוב ($R = 0$, מעוין מלא) זרימה החוצה מתרחשת דרך חלקו העליון של הפתח העליון, ואילו זרימה פנימה (מהירות שלילית) – דרך אזור התחתון של אותו פתח. האזור בו המהירות מחליפה סימן הוגדר כמישור הניטרלי ועבור $R = 0$ הוא ממוקם ב- $Z_v/H_v \approx 0.62$, כאשר Z_v היא קואורדינטה אנכית לאורך הפתח ו- H_v – גובה הפתח (30 ס"מ). יודגש כי פרופיל המהירות לא סימטרי יחסית למישור הניטרלי. כאשר החלון התחתון פתוח חלקית, לגובה של 4 ס"מ ($R = 0.133$, ריבועים מלאים), פרופיל המהירות דומה מאוד איכותית לזה של $R = 0$ רק עם מישור ניטרלי נמוך יותר, $Z_v/H_v \approx 0.43$. במצב זה גם החלון התחתון פתוח ומצב כזה אמור להוביל לאוויר הדחיקה, אך בכל זאת ישנה עדיין כניסת אוויר דרך הפתח העליון. בערך כזה של R האוויר מתבצע באופן משולב של אוויר ערבוב ואוויר דחיקה (combined mode ventilation).

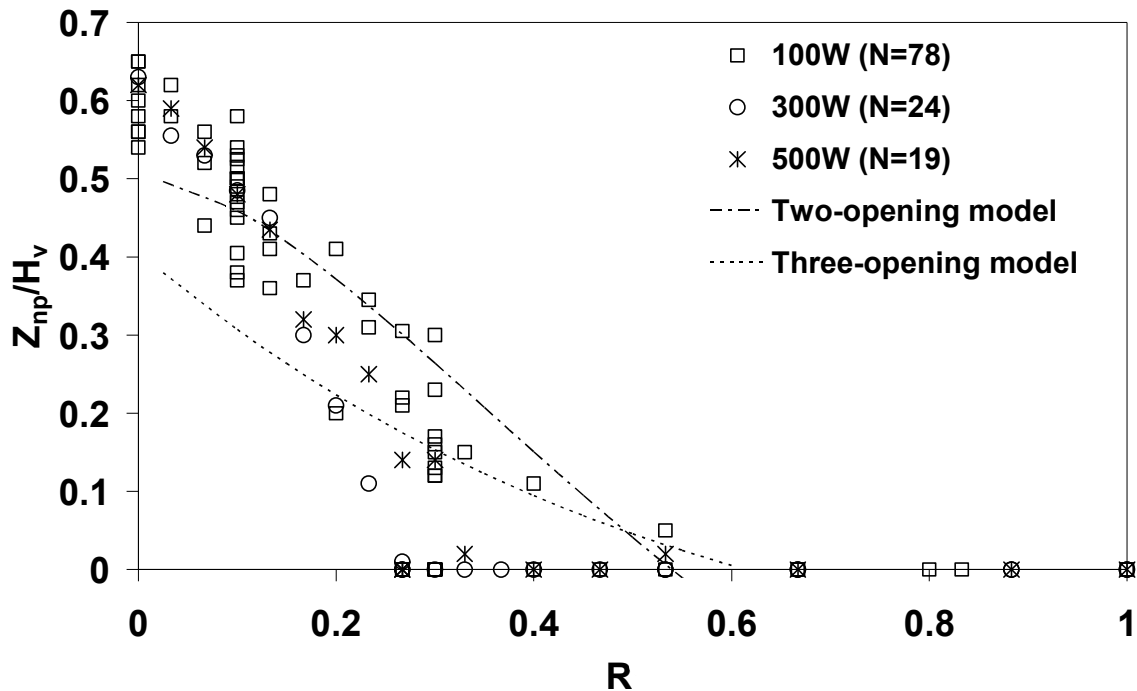
ככל שהחלון התחתון נפתח עוד ועוד לגובה רב יותר, מיקומו של המישור הניטרלי ממשיך לרדת. במצב של פתיחת החלון התחתון לגובה של 8 ס"מ ($R = 0.267$, משולשים מלאים) זרימה החוצה תופסת את רוב הפתח העליון ורק באזור קטן מאוד בתחתית הפתח העליון ($Z_v/H_v < 0.15$) מתקיימת זרימת אוויר פנימה אל תוך המבנה. כלומר עדיין אנו נמצאים באופן של אוויר משולב. עבור $R \geq 0.333$ עובר רק זרימה החוצה מתרחשת בפתח העליון, מה שמוביל למסקנה כי אוויר הדחיקה דומיננטי בתהליך. זרימת אוויר פנימה מתרחשת דרך הפתח התחתון בלבד.

מיקומו של המישור הניטרלי בערכים שונים של R חושב מתוך פרופילי המהירות האנכיים, כמו אלה המוצגים באיור מס' 40. איור מס' 41 מראה את מיקומו המנורמל של המישור

הניטרלי בפתח העליון, Z_{np}/H_V כפונקציה של R שחושב מ-121 פרופילי המהירות עבור שטפי חום של 100, 300 ו-500 וואט. כמה נקודות מדידה יוצאות דופן הוצאו מן הגרף כיוון שהן הושגו בניסויים בהם טמפרטורת הסביבה הייתה גדולה משמעותית מטמפרטורת הסביבה הממוצעת בשאר הניסויים הנידונים כאן. כאשר $R = 0$ המבנה מתאוויר באוויר הערבוב ו- $Z_{np}/H_V \approx 0.6$ עבור כל שטפי החום. אבל כאשר החלון התחתון נפתח והערך של R עולה, מיקומו של המישור הניטרלי יורד בצורה ליניארית עם R , בקירוב. בתחום זה של ערכי הביניים של R קיימת גם כניסת אוויר דרך פתח התחתון (הדבר נלמד בעזרת הדמיה בעשן), אך גם, באותה שעה, ישנה זרימה פנימה דרך האזור התחתון של הפתח העליון. לפיכך, קיימת אינטראקציה בין אוויר ערבוב לאוויר דחיקה וכתוצאה מכך המבנה מאוויר באופן אוויר משולב.

איור מס' 41 ממחיש כי קיים תחום קריטי של R שמעליו אין כבר זרימת אוויר פנימה דרך הפתח העליון, כלומר הגובה של מישור הניטרלי הוא: $Z_{np}/H_V = 0$. בהתאם לאיור מס' 41, הגבול העליון של אותו תחום נמצא ב- $R \approx 0.53$. הגבול התחתון הנמצא ב- $R \approx 0.27$, מציין ערך שמתחתיו שני אופני האוויר יכלים להתקיים – אוויר הערבוב הטהור ($R = 0$) או אופן חדש של אוויר – אוויר משולב. מכאן ניתן לראות כי עבור $0 < R < 0.27$ אוויר הערבוב ואוויר הדחיקה נכנסים לאינטראקציה ביניהם וע"י כך יוצרים אופן חדש של אוויר – אוויר משולב (new combined ventilation mode). עבור $0.53 < R \leq 1$ אוויר הדחיקה הוא הדומיננטי, בעוד שבתחום הביניים, $0.27 \leq R \leq 0.53$, אחד משני הסוגים – או אוויר המשולב או אוויר הדחיקה עשויים להתקיים. בתחום הזה הופעתו של אופן אוויר מסויים (או אוויר המשולב או אוויר הדחיקה) מושפע, ככל הנראה, מתופעת ביפורקציה, כלומר כל הפרעה קטנה או שינוי קטן בתנאי הניסוי עלולים להשפיע על אופן אוויר בתחום הביניים, $0.27 \leq R \leq 0.53$, כפי שנראה באיור מס' 41. תלות חלשה מאוד של גובה המישור הניטרלי בשטף הציפה, בתחום הביניים, נצפתה בניסויים.

שני הקווים המקווקווים באיור מס' 41 מסמנים את הערך התיאורטי של גובהו של המישור הניטרלי, המבוסס על שני מודלים תיאורטיים של Fitzgerald and Woods (2004) עבור שניים ושלושה פתחים. מקדם פריקה (discharge coefficient) הנבחר לצורך חישוב במודל הוא 0.5, טיפוס לפתח עם מסגרת דקה (Linden et al., 1990), ומקדם הסחיפה (entrainment coefficient) הוא 0.102, כפי שמופיע במאמר. מודל עם שני פתחי אוויר מציג זרימה פנימה דרך הפתח התחתון וזרימה החוצה דרך הפתח העליון. במודל עם שלושה פתחים, לעומת זאת, ישנו פתח שלישי נוסף באזור האמצעי של החדר (בין שני החלונות) המאפשר גם הוא כניסת אוויר אל תוך המבנה מכיוון שמיקומו מתחת למישור הניטרלי. בעבודה הנוכחית פתח שלישי זה מיוצג ע"י האזור התחתון של הפתח העליון, דרכו מתבצעת זרימת אוויר פנימה כאשר החדר מאוויר באופן המשולב. מאחר ושטחים של אזור התחתון ואזור העליון בפתח העליון משתנים עם שינוי בגובה מישור הניטרלי, החישוב נעשה באמצעות איטרציות.

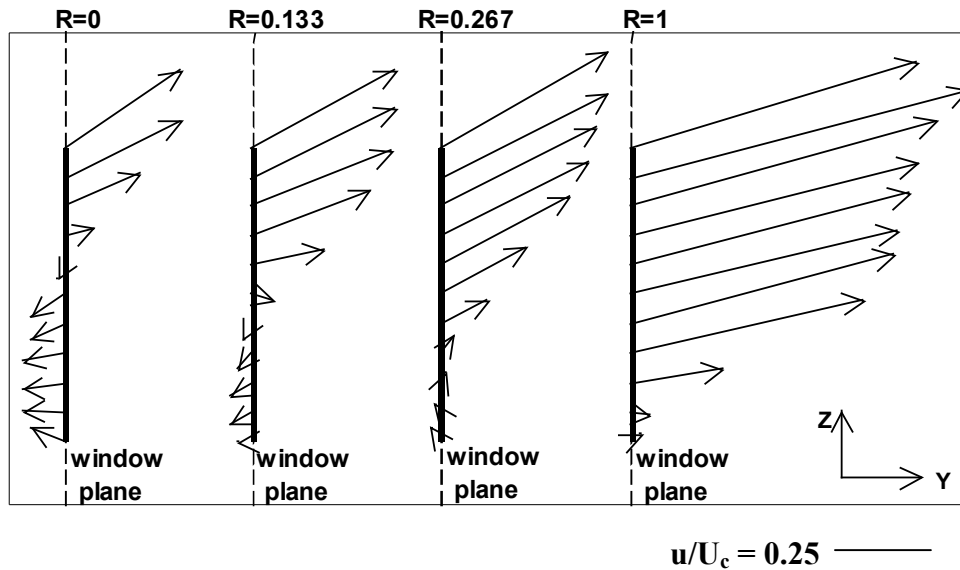


איור 41. מיקומו של מישור הנייטרלי בפתח העליון כתלות בערכי R שונים, בהספקים של גוף חימום שונים. קווים מקווקים מציינים את חיזוי התיאורטי – משוואות (5) – (19).

התאמה טובה באופן איכותי נצפתה בין שני המודלים התיאורטיים הנ"ל לבין הניסויים המוצגים כאן, מה שתומך בקיום אופן האורור המשולב. יתרה מזאת, שתי העקומות חותכות את הציר האופקי באיור מס' 41 בערך ב- $R \cong 0.57$, מה שמתאים לגבול העליון של התחום הקריטי של R ($\cong 0.53$), המוזכר קודם. ההבדל הכמותי בין הניסויים למודלים ניתן ליחס לעובדה כי המודלים מתארים פתחים קטנים וצרים המאפשרים זרימה חד-כיוונית בלבד, בניגוד לניסויים, בהם בפתח העליון קיימת זרימה דו-כיוונית עם גזירה בין שני זרמים מנוגדים.

5.3.3 וקטורי מהירות ממוצעת

אחת התוצאות המעניינות, המתייחסת לזרימה דרך הפתח היא מציאת כיווני הזרימה דרכו, או במילים אחרות זוויות כניסת האוויר פנימה אל תוך החדר וזוויות היציאה ממנו לאורך גובה הפתח, יחסית למישור החלון. באיור מס' 42 ניתן לראות את וקטורי המהירות באמצע רוחב הפתח לאורך גובהו במישור הניצב למישור הפתח. כל הניסויים כאן בוצעו כאשר הספק מקור החום היה 500 וואט.



איור 42. ווקטורי המהירות עבור ערכי R שונים, במישור מאונך לפתח. פתח מיוצג ע"י קו אנכי עבה.

בגרף מוצגים תוצאות עבור 4 ערכים של R (יחס הגבהים של הפתחים) – $R=0$, $R=0.133$, $R=0.267$, $R=1$. איור מס' 42 מציג את הווקטורים במישור Y-Z המאונך למישור הפתח. מערכת הקואורדינטות באיור הנ"ל בהתאם למתואר באיורים מס' 26, 27. כל סט של ווקטורים נמדד לאחר שכל המערכת היגיעה למצב של שיווי משקל בערכים שונים של R. כל המהירויות מוצגות בצורה מנורמלת ע"י מהירות האופיינית עבור הסעה טבעית U_c , כמוגדר במשוואה (27). יציין גם כי תוצאות זהות איכותית התקבלו עבור הספקים 300 וואט ו-100 וואט של מקור החום. איור מס' 42 א' ($R=0$) מראה שזרימה החוצה (ווקטורים מופנים ימינה) מתרחשת דרך חלקו העליון של הפתח, כאשר זרימה פנימה (ווקטורים מופנים שמאלה) דרך חלקו התחתון של הפתח, כפי שכבר תואר בפרק 5.3.2. יחד עם זאת, החידוש המוצג לראשונה במחקר זה מתבטא בזה שווקטורי הזרימה פנימה והחוצה נטויים יחסית למישור האופקי. הטיה זאת של הזרימה ניתנת להסבר ע"י אפקטים של כוחות הציפה על הזרימה, כלומר האוויר החם אשר זורם החוצה אל האוויר החיצוני הקר, עולה כלפי מעלה ואילו האוויר הקר החיצוני אשר זורם פנימה אל תוך החדר, יורד לכיוון האוויר החם הנמצא בתוך המבנה.

כאשר הפתח התחתון פתוח מעט - איור מס' 42 ב' ($R=0.133$), מקבלים תוצאה דומה לזו שב- $R=0$ עם נטייה דומה של ווקטורי המהירות. בערך כזה של R קיים כבר אופן משולב של הזרימה (אוורור ערבוב ואוורור דחיקה גם יחד), כפי שמופיע בפרק 5.3.2. גם כאן רואים בבירור כי האזור העליון של יציאת האוויר גדל על חשבון האזור התחתון של זרימה פנימה וזאת עקב ירידה קטנה של המישור הניטרלי.

ככל שהפתח התחתון נפתח יותר ויותר ($R=0.267$, $R=1$), הזרימה החוצה תופסת יותר מקום בפתח העליון כיוון שהמישור הניטרלי ממשיך לרדת. ניתן לראות זאת באיורים 41 ג' ו- ד'. תוך כדי התהליך הזה המהירות החוצה גדולה בערכה המוחלט ואילו הזרימה פנימה קטנה ומשתווה כמעט לאפס. גידול במהירות הזרימה החוצה מבטא שיפור בקצב האוורור כאשר

מתרחש תהליך המעבר מאוורור ערבוב לאוורור הדחיקה דרך האופן של אוורור משולב בו כניסת האוויר מתרחשת גם דרך הפתח תחתון.

ניתן להבחין כי בערכים גדולים של R זווית הנטייה כלפי מישור האופקי של ווקטורי המהירות קטנה. מכאן ניתן להסיק כי בערכי R גדולים האוויר אשר יוצא מן החדר יחסית קר. המסקנה הזאת תואמת לחלוטין את תוצאות ממדידת הפרשי טמפרטורה בין פנים החדר לסביבתו – הפרש טמפרטורה ממוצע יורד עם עליה ב- R (ראה איור מס' 39).
על מנת לאמת את התוצאות האלה בוצעו הדמיות עם עשן אשר הראו בצורה ברורה את קיום הנטייה של ווקטורי המהירות יחסית למישור האופקי בזרימה דרך הפתח.

5.3.4 עוצמת הטורבולנציה

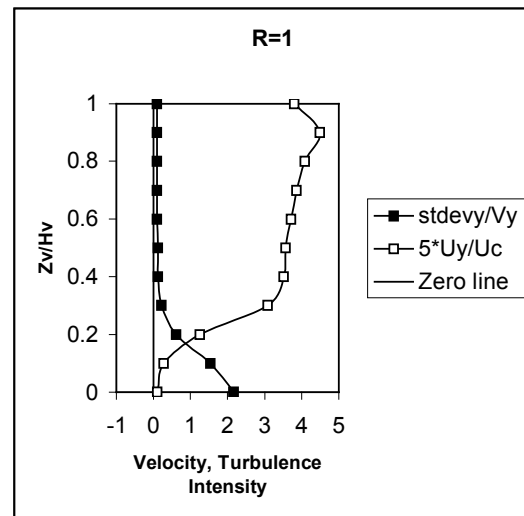
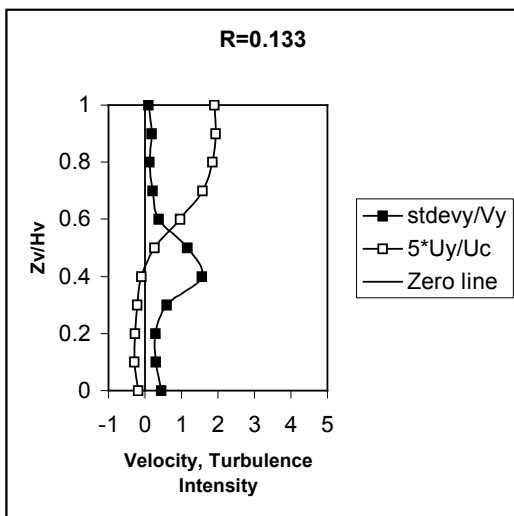
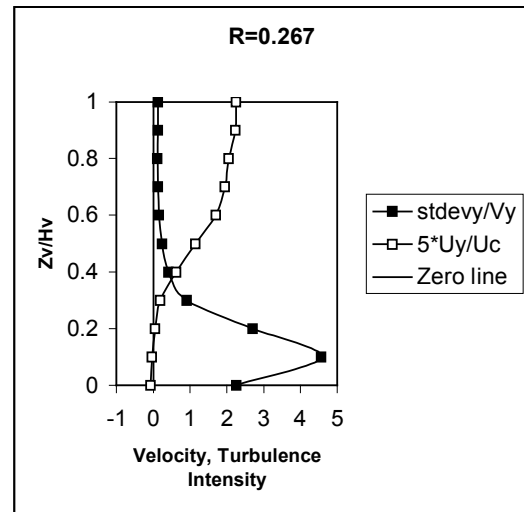
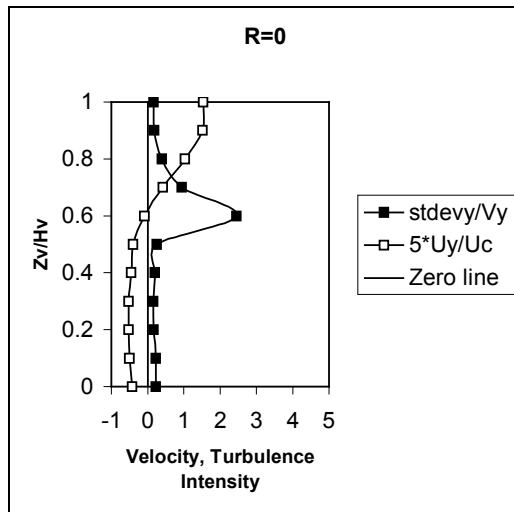
עוצמת הטורבולנציה מוגדרת כשורש ממוצע הריבועים (R.M.S. – root-mean-square) של מהירות בפרק זמן נתון מחולקת במהירות ממוצעת באותו פרק זמן. וקטור המהירות הרגעי יכול להיות מפורק למרכיבים של ממוצע והטורבולנציה בכיוונים X, Y, Z (כאשר X ו- Y קואורדינטות אופקיות ואילו Z – קואורדינטה אנכית, ראה איור מס' 26):

$$(28) \quad u_i = U_i + u'_i$$

כאשר U_i – מהירות המקומית הממוצעת בכל גובה לאורך הפתח, u'_i – רכיב טורבולנטי שלה ואינדקס i מייצג X, Y ו- Z . שורש ממוצע הריבועים (R.M.S) של כל רכיב המהירות, u_i^{rms} , מוגדר כסטיית התקן של u_i . R.M.S. של המהירות מנורמלת או, במילים אחרות, עוצמת הטורבולנציה מוגדרת כ-:

$$(29) \quad I_i = u_i^{rms} / U_i$$

איורים 43a-43d מציגים פרופילים אנכיים של מהירות הממוצעת ועוצמת הטורבולנציה של רכיב המהירות מאונך למישור הפתח ב- 4 ערכים שונים של R (יחס גובה פתיחת החלון התחתון לגובה פתיחת החלון העליון). הגרפים מראים בצורה ברורה ביותר כי לעוצמת הטורבולנציה ערכים מכסימאליים בגובה הפתח בו ישנה אינטראקציה בין האוויר הנכנס לאוויר היוצא דרך החלון, כלומר בגובה המישור הניטרלי. יש לציין שערכים המוחלטים של RMS היו כמעט אחידים לאורך הפתח, אבל חלוקה שלהם במהירות שקרובה לאפס, באזור המישור הניטרלי, נתנה נקודת מכסימום בפרופילי עוצמת הטורבולנציה, כפי שנראה באיור מס' 43. ממצא זה מראה כי גם באזור שבו מהירות הממוצעת קרובה לאפס היה ייצור גובה יחסית של טורבולנציה וזאת, ככל הנראה, עקב גזירה קיימת באזור זה, כפי שיוסבר בהמשך. תוצאה בערכים של R הקטנים מאחד ($R=0, R=0.133, R=0.267$) עוצמת הטורבולנציה המכסימאלית מופיעה בגובה מנורמל של פתח העליון של 0.6 ($R=0$), 0.4 ($R=0.133$) ו- 0.1 ($R=0.267$). כאשר $R=1$ (אוורור הדחיקה) זרימת האוויר החוצה מן החדר מתרחשת דרך פתח העליון כולו וכתוצאה מכך מישור הניטרלי נמצא מתחת לפתח זה, ואז לא נצפה מקסימום מקומי של עוצמת הטורבולנציה בפתח. עוצמת הטורבולנציה, לפיכך, יכולה לשמש אותנו כלי שימושי ומעשי לזיהוי מקומו (גובהו) של המישור הניטרלי.



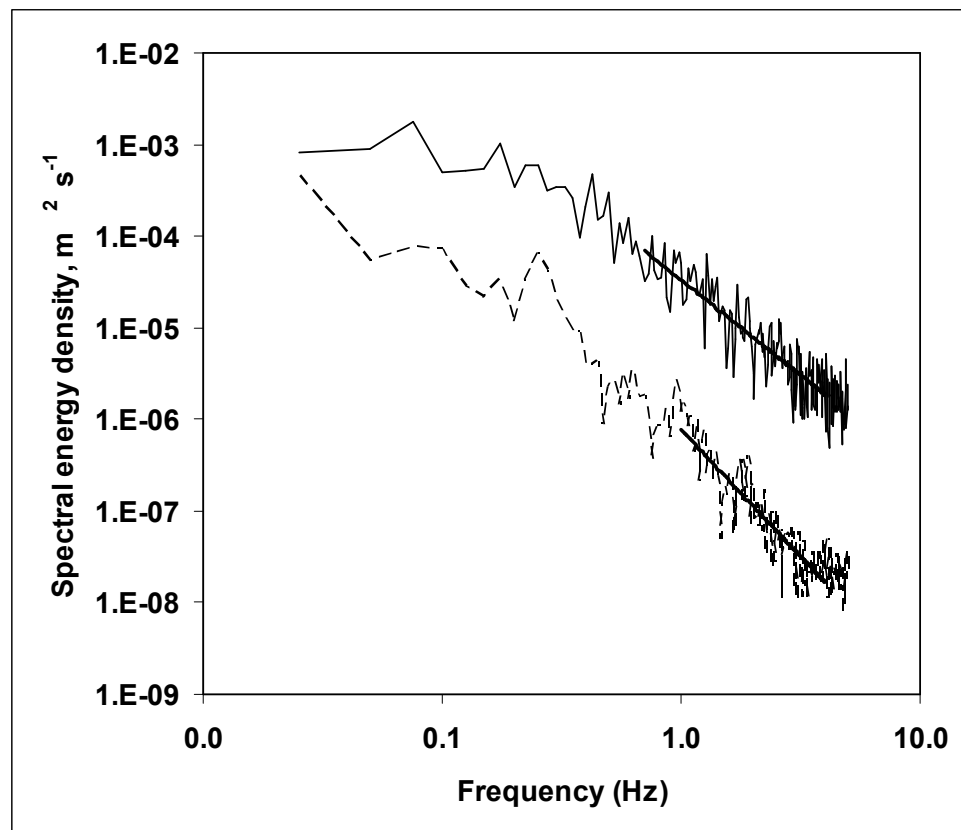
איור 43. פרופילי מהירות הממוצעת (רכיב מאונך למישור הפתח) - ריבועים ריקים ועוצמת הטורבולנציה תואמת את מהירות הממוצעת - ריבועים מלאים. ערכים של מהירות מוכפלים בפקטור 5. ערכים חיוביים (שליליים) מייצגים זרימה החוצה (פנימה). קו אנכי מראה את מישור הפתח.

פרופילי מהירות הממוצעת באיורים 43a-43d מרמזים כי המישור הניטרלי קשור לנקודת הפיתול אשר מובילה לאי יציבות של Kelvin-Helmholtz, בצורה דומה כמו בשכבת הערבוב (Brown et al., 1974). בשכבת הערבוב אי יציבות זו מובילה ליצור של מערבולות גדולות אשר שולטות במעבר אנכי של מומנטום וסקלרים (לדוגמה, טמפרטורה) דרך שכבה זו. מערבולות אלה הם ככל הנראה הסיבה לעוצמה הטורבולנטית הגבוהה שנמצאה באזור הזה של הפתח.

5.3.5 ספקטרום המהירות

הספקטרום של רכיב המהירות המאונך למישור הפתח חושב בעזרת נתונים של 2 דקות מדידה רצופות. הנתונים נדגמו ונרשמו ע"י מד-רוח סוני (Sonic anemometer) בקצב של 10 הרץ – 1200 דגימות במשך שתי דקות. כל קבוצת הנתונים של 2 דקות חולקה לשלוש תת קבוצות עוקבות, כל אחת בעלת 400 דגימות. הספקטרום חושב עבור כל תת קבוצה כזאת ונלקח ממוצע של שלושת התוצאות האלה. בחלק ממישור של הפתח נצפו ערכים גבוהים יחסית (>0.5) של עוצמת הטורבולנציה (איור מס' 43) מה שמלמד על אי תקפות של הנחת טיילור על "frozen turbulence". לכן ההצגה של ספקטרום כפונקציה של תדירות עדיפה על פני ההצגה כפונקציה של מספר גל.

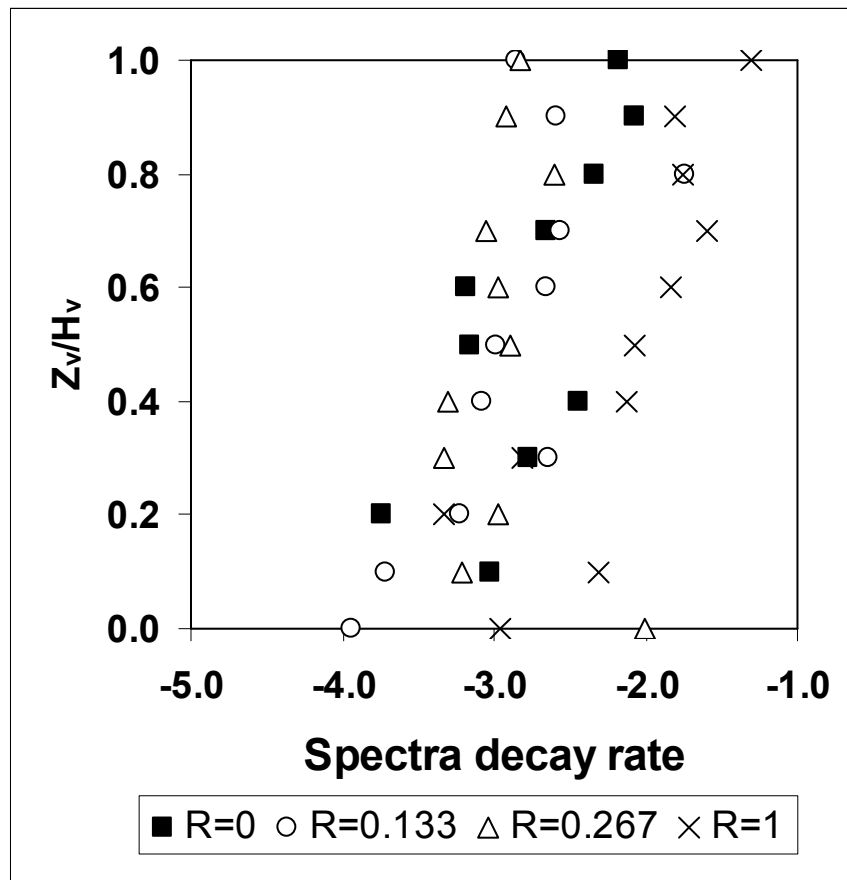
דוגמת הספקטרום בשני גבהים שונים בפתח העליון (גובה מנורמל של 0.3 ו-0.9) מוצגת באיור מס' 44 עבור $R=0$. יצוין כי עבור $R=0$ (אוורור הערבוב) בגובה של $Z_v/H_v = 0.3$ ישנה כניסת אוויר דרך הפתח העליון ואילו עבור $Z_v/H_v = 0.9$ – זרימה החוצה מן החדר.



איור 44. צפיפות האנרגיה הספקטרלי של זרימת האוויר במאונך למישור הפתח בשני נקודות בגבהים שונים באמצע החלון, באורור ערבוב. קו מקווקו - $Z_v/H_v = 0.3$, קו מלא - $Z_v/H_v = 0.9$. קווי מגמה ישרים עם שיפועים של -2.77 ו- -2.17.

תדירויות נמוכות היו הכי אנרגטיות ועוצמת האנרגיה גדלה עם עלייה במהירות האוויר הממוצעת, כצפוי. הספקטרום דועך עם התדירות בהתאם ל- $E(f) \propto (f)^{-n}$, כאשר f היא תדירות

(בהרץ) ו- ו- מציינ קצב דעיכה. קצב הדעיכה נקבע בעזרת קו מגמה מעריכי על נתונים של ספקטרום באזור בו הדעיכה קבועה ואחידה (במערכת קואורדינטות לוגריתמיות של איור מס' 44). קצבי הדעיכה ב- $Z_V/H_V = 0.3$ ו- $Z_V/H_V = 0.9$ היו -2.77 ו- -2.17 בהתאמה. ולכן נראה כי קצב הדעיכה קטן יותר (בערכו המוחלט) בגובה פתח גדול יותר. ניתן לראות זאת גם באיור מס' 45 אשר מראה את קצב הדעיכה של הספקטרום כפונקציה של המיקום בפתח עבור ארבעה ערכים של R. קצב הדעיכה משתנה בין -1.3 ל- -3.94, כאשר הממוצע הוא -2.69. אף על פי שהתוצאות די מפורזות, מגמה כללית של הקטנת קצב הדעיכה עם עליה בגובה החלון נצפתה בברור. המגמה הזאת בעיקר ניכרת בתוצאות עבור R=1 (אוורור הדחיקה), כאשר דרך כל החלון העליון מתרחשת זרימה החוצה.



איור 45. קצב הדעיכה של ספקטרום האנרגיה כפונקציה של הגובה של הפתח בארבעה ערכים שונים של R.

הערכים הקטנים של קצב הדעיכה בחלקו העליון של הפתח יכולים לנבוע מצורתו של קצה הפתח. (כזכור (איור מס' 24), הקצה העליון של הפתח העליון הוא, בעצם, קצה התקרה האופקית השטוחה, בעוד שהקצה התחתון של אותו פתח הוא חלק מקיר קדמי אנכי. הקצה התחתון מתפקד כמדרגה חדה (חלק מפתח חד) אשר יוצר הפרעה בזרימה ומייצר מערבולות קטנות בזרימת אוויר העוברת דרכו. בחלקו העליון של החלון ההפרעה לזרימה קטנה בהרבה בגלל הזרימה החלקה לאורך התקרה האופקית. (Chen ו- Jiang (2003) הראו תוצאות דומות של

התנהגות הספקטרום. הם הציגו ספקטרום של זרימה טורבולנטית בפתח במבנה המאוורר ע"י אוורור מושרה ציפה עבור שני סוגי הפתחים: דלת וחלון. לדלת היה קצה חד בחלק העליון אשר יצר הפרעה לזרימה והזיז את שיא הספקטרום לתדירויות גבוהות וגם יצר קצב דעיכה גבוה. בניגוד לזה בתחתית הדלת לא הייתה שום הפרעה לזרימה ואז האוויר נכנס אל תוך החדר בצורה חלקה וכתוצאה מכך לא היה שינוי בשיא הספקטרום ולא נראה שום שינוי בקצב הדעיכה. מצד שני, לחלון היו קצוות חדים גם בחלקו התחתון וגם בחלקו העליון אשר גרמו להזזת השיא לתדירויות גבוהות ולקצבי הדעיכה גדולים בשני הקצוות – העליון והתחתון.

בערכים גדולים של מספר ריינולדס (Reynolds number) בתנאי שהמערבולות קטנות בהשוואה לכל אי-הומוגניות מרחבית בזרימה, ניתן להניח "איזוטרופיה מקומית". בתנאים אלו ניתן לצפות כי הספקטרום של קולמוגורוב יתקיים אפילו בזרימות גזירה. בניסויים המוצגים כאן מספר ריינולדס, מבוסס על סקלת מערבולות הגדולות, היה בסדר גודל של אלפים שנחשב לקטן יחסית. ולכן קצב הדעיכה המופיע באיור מס' 45 באופן כללי גדול יותר מאשר הערך קלאסי של קולמוגורוב-אובוכוב (Kolmogorov-Obukhov) $-5/3 - (-1.67)$ עבור Inertial subrange. ניתן להסביר זאת ע"י מספר ריינולדס נמוך בזרימה מושרת ציפה טיפוסית. לדוגמא, Xia and Shang (2001), אשר חקרו הסעה טבעית טורבולנטית בתוך חלל הפנימי, הראו כי המעבר מסקלה אינרטיית לסקאלת ציפה מגדיל את קצב הדעיכה של ספקטרום הטורבולנציה מ-1.35 ל-11/5 (-2.2). קצב הדעיכה אשר התקבל במחקר זה (ממוצע של -2.69) קרוב יותר לערך השני מאשר לראשון, וזה מדגיש את תפקידה המשמעותי של הציפה.

5.3.6 פילוג הטמפרטורה בפתח העליון

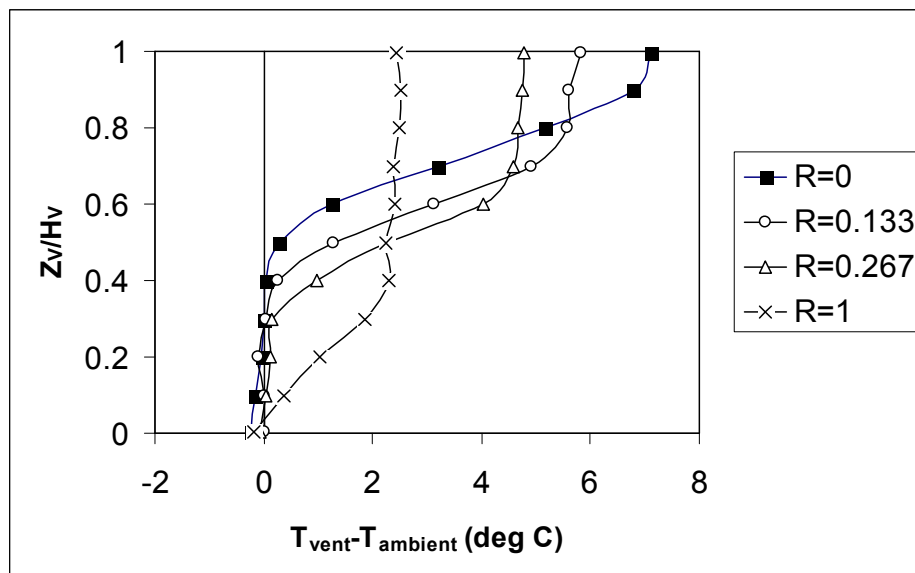
בנוסף לרכיבי המהירות, מודד מד הרוח בכל נקודה את הטמפרטורה הקולית (Sonic temperature). הקשר בין טמפרטורה זו (T_s) לטמפרטורת האוויר (T) נתון לפי:

$$T = T_s / (1 + 0.51\omega) \quad (30)$$

כאשר ω הוא יחס הלחות המבוטא ביחידות של גרי' אדי מים לגרי' אוויר. מדידות אלו נערכו בחודש ינואר בתנאי טמפרטורה ולחות אוויר של כ-16°C ו-60% לחות יחסית. במצב זה ניתן לבחור ערך מייצג של יחס הלחות של 0.007 וע"י שימוש בנוסחה (28) ניתן להמיר את הטמפרטורה הקולית לטמפרטורת אוויר.

פילוג אנכי של ההפרש בין טמפרטורת האוויר לאורך הפתח העליון לבין הטמפרטורה מחוץ לחדר נראה באיור מס' 46 עבור ארבעה ערכים שונים של R. שלושה פרופילים עבור $R < 1$ אפשר לחלק לשלושה קטעים: קטעים עליון ותחתון בהם הפרש טמפרטורה כמעט אחיד לגובה וקטע אמצעי בו ישנו גרדיאנט טמפרטורה משמעותי. קטע תחתון בגרף מייצג זרימת האוויר פנימה אל תוך החדר ולכן טמפרטורת האוויר הנכנס זהה לטמפרטורת הסביבה. הקטע העליון מייצג את אוויר הזורם החוצה מן החדר, כאשר הוא חם משמעותית מאוויר החיצוני. האזור עם גרדיאנט טמפרטורה גדול מייצג את שכבת הערבוב בין שני זורמים מנוגדים בכיוונים – הנכנס הקר והיוצא

החם, תוך כדי שינוי הדרגתי בטמפרטורה לגובה הפתח. נין לראות גם כי שכבת הגרדיאנט יורדת עם עלייה ב- R , בהתאמה מלאה עם ירידת מישור הנייטרלי אשר נראה באיור מס' 40. עבור $R=1$ (אוורור דחיקה) רק זרימה החוצה מתקיימת דרך פתח העליון ואז כל הפרופיל מייצג אוויר עם טמפרטורה גבוהה יותר מן הסביבה החיצונית. במצב הזה רק שני אזורים נראים בגרף: האזור העליון עם פרופיל הפרש טמפרטורה אחיד בקירוב, ואזור עם גרדיאנט טמפרטורה אשר מגיע עד לתחתית של פתח העליון.



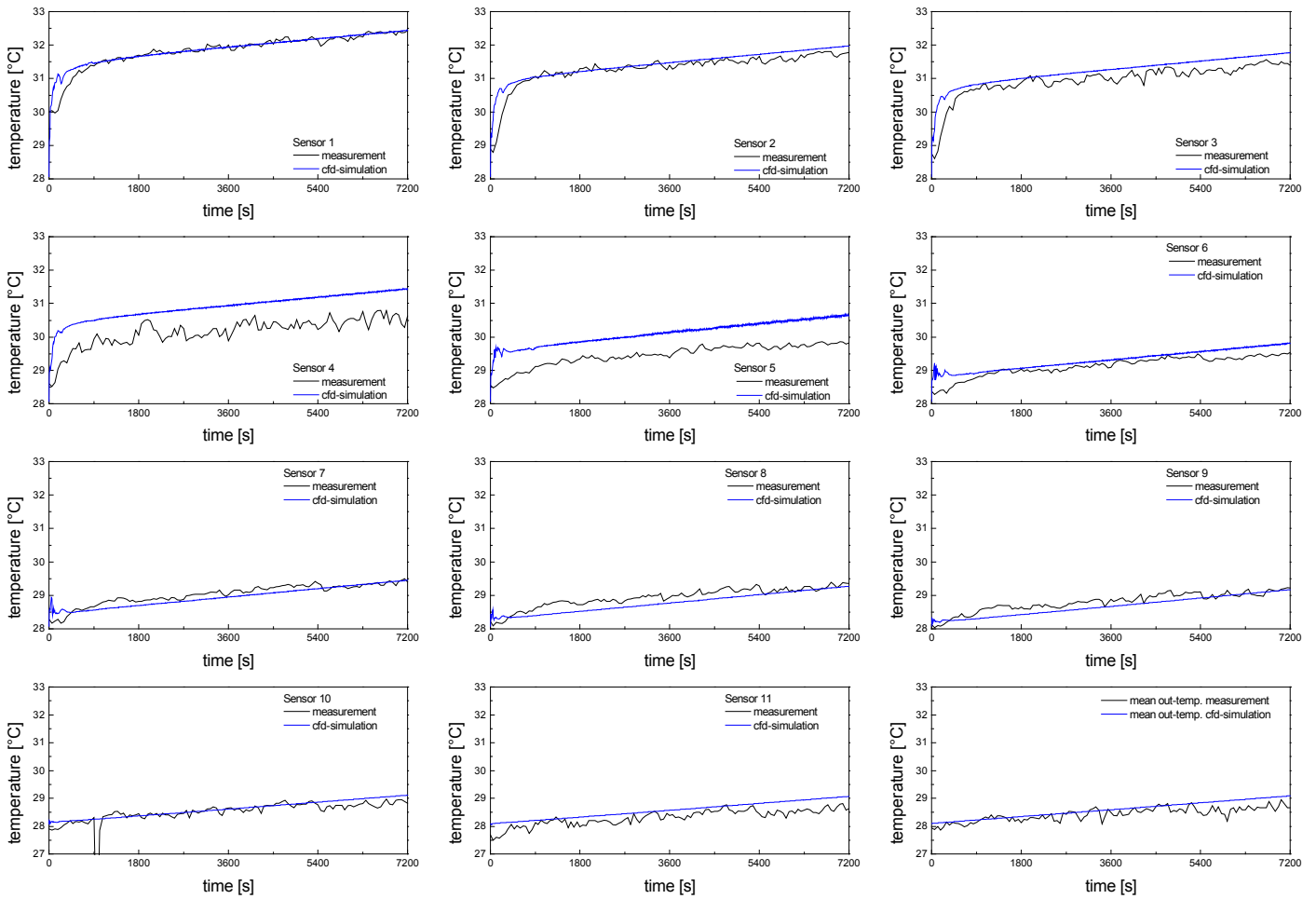
איור 46. פרופילי הפרש הטמפרטורה בפתח עליון עבור ערכי R שונים.

5.3.7 השוואה עם סימולציות נומריות

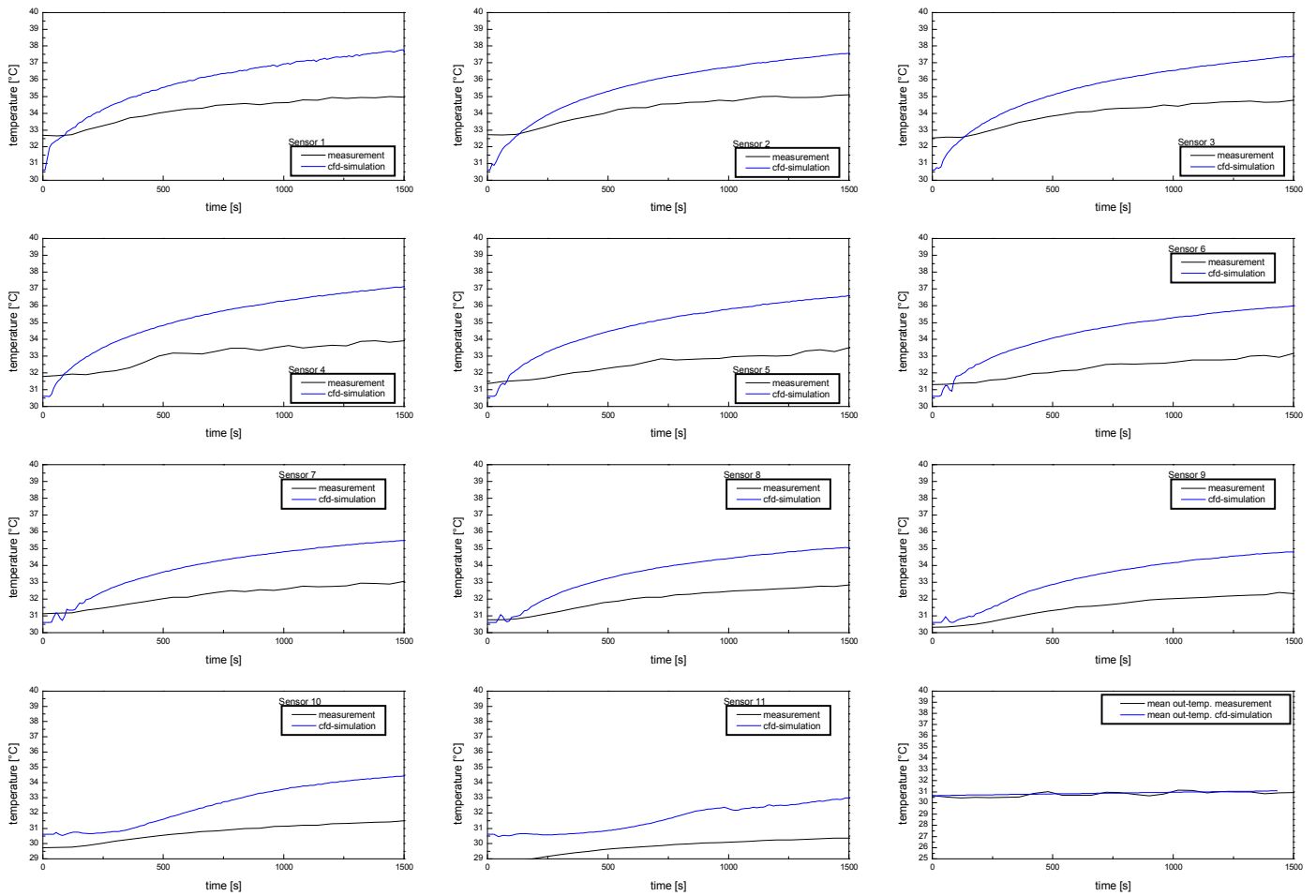
סימולציות נומריות נערכו ע"י חוקרים מאוניברסיטת דרזדן, גרמניה, במסגרת שיתוף פעולה מדעי. משוואות Reynolds-Averaged Navier-Stokes עבור זרימה לא דחיסה משמשות כמשוואות בסיסיות בחישובים של שדה זרימה. על מנת לתאר את שדה טמפרטורה נעשה שימוש במשוואת אנרגיה עבור בעיות הלא-אוזוטרמיות. אפקט הציפה נלקח בחשבון באמצעות קירוב Boussinesq.

התוצאות שהתקבלו עד עכשיו הם שנוי טמפרטורה בזמן מרגע הפעלת חימום בחדר, בהספק של 300 וואט עבור שני אופני האוורור – אוורור דחיקה ואוורור הערבוב. באיור מס' 47 ניתן לראות את ההשוואה בין הסימולציה הנומרית לתוצאות הניסיוניות של אוורור הדחיקה. כל גרף באיור מייצג טמפרטורה בגובה שונה מהרצפה (קו כחול – סימולציה, קו שחור – ניסויים). מהאיור נראה כי ישנה התאמה טובה מאוד בין הסימולציה לניסויים מעשיים. באיור מס' 48 רואים את הסימולציה באוורור ערבוב בהשוואה לניסויים. כאן ההתאמה בין הניסויים לסימולציה הנומרית לא כל כך טובה. ניתן להסביר זאת ע"י בחירה לא מתאימה של תנאי גבול עבור סימולציה הנומרית. בכל אופן התוצאות מסימולציה הם עדיין ראשוניות וניתן לשפרם

בעתיד. יחד עם זאת, גם סימולציה באווורור דחיקה וגם באווורור ערבוב מתאימה באופן איכותי (צורות הפרופילים) לניסויים.



איור 47. השוואת סימולציה נומרית עם תוצאות מניסויים עבור פרופילי טמפרטורה בתוך החדר באופן אוורור דחיקה, הספק גוף החימום – 300 וואט.



איור 48. השוואת סימולציה נומרית עם תוצאות מניסויים עבור פרופילי טמפרטורה בתוך החדר באופן אוורור ערבוב, הספק גוף החימום – 300 וואט.

6 סיכום ומסקנות

מעבודה ניסיונית זו ניתן להסיק את המסקנות הבאות :

- כאשר $0 < R < 0.27$ שתי צורות האוורור – הערבוב והדחיקה נכנסים לאינטראקציה ביניהם ויוצרים אופן אוורור חדש – אוורור משולב. עבור $0.53 < R \leq 1$ אוורור הדחיקה הוא הדומיננטי, ואילו בתחום הביניים, $0.27 \leq R \leq 0.53$, עשוי להתקיים או האוורור המשולב או אוורור הדחיקה.
- אוורור הערבוב מלווה בהפרשי טמפרטורה גדולים יותר בין פנים החדר לסביבה, מאשר אוורור הדחיקה.
- הפרשי הטמפרטורה הממוצעים בין פנים לחוץ יורדים בצורה מונוטונית עם עליה בערכי ה- R . הפרשי טמפרטורה הכי גדולים נגרמים כתוצאה משטף חום גבוה יותר של גוף החימום, כצפוי.
- תגובת המעבר של מהירות האוויר דרך פתח העליון מהירה יותר מאשר תגובתם של הפרשי הטמפרטורה לאותו המעבר.
- זרימת אוויר במבנה המאוורר ע"י זרימה מושרת ציפה תלויה באופן האוורור.
- וקטורי המהירות הממוצעת של כניסת האוויר ויציאתו דרך הפתח העליון נמצאים בנטייה יחסית למישור האופקי וזאת עקב האפקט של הציפה. באוורור הדחיקה, כאשר הפרשי הטמפרטורה בין פנים החדר לסביבתו יחסית קטנים, הווקטורים הופכים ליותר מקבילים למישור האופקי.
- לעוצמת הטורבולנציה המנורמלת לפי מהירות ממוצעת מקומית יש מכסימום מקומי בגובה בו האוויר הזורם החוצה נמצא באינטראקציה עם אוויר הנכנס ונוצרת שכבת גזירה.
- מיקומה של עוצמת הטורבולנציה המכסימלית נמצא בהתאמה טובה עם מיקומו של המישור הניטרלי בפתח העליון.
- קצב הדעיכה של ספקטרום הטורבולנציה בזרימה דרך הפתח באופן כללי גדול יותר מקצב הדעיכה של קולמוגורוב ($-5/3$) עבור זרימה איזוטרופית. קצבי הדעיכה האלה הם אופייניים לזרימה מושרת ציפה, מה שאומר שציפה משפיעה לא רק על הנטייה של ווקטורי מהירות הממוצעת אלא גם על מאפיינים טורבולנטיים של הזרימה.
- פילוגים אנכיים של הטמפרטורה לאורך הפתח העליון מראים כי האוויר היוצא באזור העליון של הפתח העליון חם יותר מאוויר הסביבה ואילו האוויר הנכנס באזור התחתון של הפתח העליון הוא קרוב לטמפרטורת הסביבה, כצפוי.

בעבודה זו נחקר בצורה יסודית אוורור טבעי מושרה ציפה בחדר בסקלה גדולה עם שני פתחי אוורור אנכיים. בשלב ראשון נלמדה התנהגות המערכת במצב מתמיד בשני אופני האוורור הידועים והבסיסיים – אוורור דחיקה ואוורור ערבוב. בהמשך, נחקרו תהליכי המעבר מאופן אוורור אחד לשני. תוך כדי לימוד האופנים הבסיסיים ותהליך המעבר התגלה כי במצבים מסוימים יכול להתרחש אופן אוורור חדש – אוורור משולב, בו תיתכן אינטראקציה בין שני האופנים. האינטראקציה בין אוורור ערבוב לבין אוורור דחיקה נלמדה באמצעות פתיחת הפתח התחתון לגבהים שונים, כאשר הפתח העליון נשמר במצב קבוע של פתיחה מלאה. תהליך המעבר בין שני אופני אוורור וגם המצב המתמיד נלמדו ביסודיות ע"י ביצוע ניסויים בחדר בסקלה גדולה במחקר זה. הניסויים כללו מדידות הפרשי טמפרטורה בין פנים המבנה, בגבהים שונים, לסביבה החיצונית ומדידות שלושת רכיבי מהירות זרימת האוויר דרך הפתח העליון. בעבודה הנוכחית נחקרו ואופיינו רוב הגדלים הפיסיקליים המאפיינים אוורור טבעי כמו: פילוגי טמפרטורה בתוך החדר ובפתח העליון, שדה הזרימה התלת מימדי בפתח העליון, עוצמת הטורבולנציה וספקטרום המהירות. כל הממצאים אומתו באופן איכותי ע"י ראיית הזרימה באמצעות עשן ובאמצעות תוצאות ראשוניות מסימולציות נומריות. תוצאות המחקר הוצגו בשני כנסים ובמאמר בכתב עת מדעי בינלאומי.

למרות שכל המטרות שהצבנו לפנינו במחקר הנוכחי הוסגו, ניתן ורצוי להרחיב את המחקר ולהעמיק את הידע באוורור טבעי במחקרים עתידיים. אחת האפשרויות להמשך המחקר היא אפיון שדה הזרימה בתוך המבנה המאוורר הן בצורה ניסיונית והן ע"י סימולציות נומריות. מידע זה חיוני להבנה יסודית של תהליך האוורור והתפלגות החום בתוך החדר. כוון מחקר חשוב נוסף הוא לאפיין אוורור מושרה ציפה המושפע גם עקב רוח חיצונית (מתקן בנוי ממאווררים גדולים נבנה לצורך מטרה זו כבר תוך כדי המחקר הנוכחי). כמו כן חשוב מאוד להמשיך ולהתקדם בנושא של סימולציות נומריות אשר תאמתנה את התוצאות הניסיוניות של המחקר הנוכחי.

1. Bartzanas, T., T. Boulard, C. Kittas. 2002. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the openings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, 207-221.
2. Bot, G.P.A., 1983. Greenhouse climate from physical processes to a dynamic model. *Ph.D. Thesis, University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands*.
3. Boulard, T. and Draoui, B., 1995. Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis. *J. agric. Eng. Res.*, 61, 27-36.
4. Brown GL, Roshko A. On density effects and large structure in turbulent mixing layers. *J. Fluid Mech.* 1974; 64:775 – 816.
5. De Jong, T., 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. *Ph.D. Thesis, Agricultural University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands*.
6. Fernandez, J.E. and Bailey, B.J., 1992. Measurements and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 229-245.
7. Fitzgerald SD, Woods AW. Natural ventilation of a room with vents at multiple levels. *Building and Environment* 2004; 39: 505-521.
8. Haslavsky V, Tanny J, Teitel M. Interaction between the mixing and displacement modes in a naturally ventilated enclosure. *Building and Environment* 2006, 41, pp. 1755-1761.
9. Holman, J. P. 1989. *Heat Transfer*, McGraw-Hill.
10. 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.
11. Jiang, Y, Chen, Q. Buoyancy-driven single-sided natural ventilation in buildings with large openings. *Int. J. of Heat and Mass Transfer.* 2003; 46:973-988.
12. Kacira M. Short, T.H. and Stowell R.R. 1998. A CFD evaluation of naturally ventilated multi-span sawtooth greenhouses. *Transaction of the ASAE*, 41(3):833-836.
13. Kittas, C., Draoui, B. and Boulard, T., 1995. Quantification of the ventilation of a greenhouse with roof opening. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77, 95-111.
14. Kozai, T., Sase, S. and Nara, M., 1980. A modeling approach to greenhouse ventilation control. *Acta Horticulturae*, 106, 125-136.

15. Lee In-Bok, Okushima L., Ikeguchi A., Sase S., Short, T. H. 2000. Prediction of natural ventilation of multi-span greenhouses using CFD techniques and its verification with wind tunnel test. *ASAE Annual International Meeting, July 9-12, Milwaukee Wisconsin, USA.*
16. Lee In-Bok, Short T. 1998. A CFD model of volumetric flow rates for a naturally ventilated multi-span greenhouse. Paper 987011, ASAE Annual International Meeting, July 12-16, Orlando Florida, USA.
17. Lemaire, A. D. (Ed.) 1993. Room Air and Contaminant Flow, Evaluation of Computational Methods. *Subtask 1 Summary Report. IEA-ECBCS-Annex 20. TNO Building and Construction Research, The Netherlands*
18. Linden, P. F., Lane-Serff, G. F. and Smeed, D. A., 1990. Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation. *J. Fluid Mech.*, 212, pp. 309-335.
19. Mahajan, Bal M., 1987. Measurement of interzonal heat and mass transfer by natural convection. *Solar Energy*, Vol. 38, No 6, pp.437-446.
20. Mistriotis A., G.P.A. Bot, P. Picuno, G. Scarascia- Mugnozza. 1997a. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85, 217-228.
21. Mistriotis A., Arcidiacono C., Picuno P., Bot G.P.A, Scarascia- Mugnozza G. 1997b. Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero-and low-wind-speeds. *Agricultural and Forest Meteorology*, 88, 121-135.
22. Morton, B.R., Taylor, G.I. & Turner, J.S. (1956), Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc. R. Soc. Lond. A* 234, 1-23.
23. Papadakis, G., Mermier, M., Meneses, F. and Boulard T., 1996. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *J. agric. Eng. Res.*, 63, 219-228.
24. 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.
25. Reichel, D. 2000. Zur Zuluftsicherung von nahezu fugendichten Gebaeden mittels dezentraler Lueftungseinrichtungen. *PhD Thesis, Dresden University of Technology, Dresden, Germany.*
26. Riffat S. B. & Kohal J. S. 1994, Experimental study of interzonal natural convection through an aperture, *Appl. Energy* 48, 305-313.

27. Rutman, E., Inard, C., Bailly, A., Allard, F. 2000. Horizontal cold air jets induced by a fan coil HVAC System and Indoor Comfort. *Proceedings of the 7th International Conference on Air Distribution in Rooms, Reading, UK*, vol. 1, pp. 125-130, ELSEVIER, Oxford.
28. Sase, S., Takakura, T. and Nara, M., 1984. Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse. *Acta Horticulturae*, 148, 329-337.
29. Shang X-D, Xia K-Q. Scaling of the velocity power spectra in turbulent thermal convection. *Physical Review E*, 2001; 64(6): 065301(4).
30. Sherman, M.H., 1990. Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. *Building and Environment*, 25, 365-374.
31. Teitel, M. and Tanny, J. (1999). Natural Ventilation of Greenhouses: Experiments and Model, *Agricultural and Forest Meteorology*, 96, pp.59-70.
32. 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.
33. Xing H, Awbi HB. Measurement and calculation of the neutral height in a room with displacement ventilation. *Building and Environment* 2002; 37: 961-967.

Abstract

Experiments were carried out to study transition phenomena in buoyancy-induced natural ventilation in a 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 process studied is transition from the mixing to the displacement ventilation mode realized by opening the lower vent to different heights while keeping the upper vent fully open. Measurements included inside vertical temperature profiles and outside temperature using thermocouples and mean and vertical profiles of turbulent air velocity through the upper vent using a three dimensional sonic anemometer. Both the time dependent transition process and the final steady state were investigated. Results show that if the height of the lower vent is small in comparison to that of the upper vent, ventilation takes place by a new combined ventilation mode of mixing and displacement. The location of the neutral level at the upper vent, defined here as the level separating between inflow and outflow, depends on the ratio between the opening heights of the lower and upper vents, R . Results show that when $0 < R < 0.27$ the mixing and displacement modes interact through the new combined ventilation mode. For $0.53 < R \leq 1$, the displacement mode prevailed whereas in the intermediate range, $0.27 \leq R \leq 0.53$, either the combined or the pure displacement mode took place. The airflow through the upper vent appeared to be inclined to the horizontal plane due to the effect of buoyancy. The level of the neutral plane at the upper vent, defined here as the plane separating between inflow and outflow, was identified by the vertical profiles of both mean flow and turbulence intensity, with good agreement between the two approaches. The decay rate of the energy spectrum of the flow through the upper vent was larger than the common value for isotropic turbulence in the inertial sub-range. Vertical temperature profiles along the upper vent showed that outflow is warmer than inflow, as expected.

TEL AVIV UNIVERSITY
The Iby and Aladar Fleischman Faculty of Engineering
The Zandman-Slaner School of Graduate Studies

TRANSITION PHENOMENA IN BUOYANCY-INDUCED NATURAL VENTILATION

A thesis submitted toward the degree of
Master of Science in Mechanical Engineering

by

Vitaly Haslavsky

This research was carried out in the School of Mechanical Engineering, Department
of Fluid Mechanics and Heat Transfer

Under the supervision of Prof. Eliezer Kit

Dr. Josef Tanny

Dr. Meir Teitel

August 2006