

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

ניסויים באוויר טבעי בהשפעת כוחות ציפה ורוח

חיבור זה הוגש כפרויקט לקראת התואר "מוסמך אוניברסיטה" בהנדסה מכנית

על – ידי

אילונה שטיין

העבודה נעשתה בבית הספר להנדסה מכנית, המחלקה להנדסת סביבה

בהנחיית: פרופ' אלכסנדר גלפגט
דר' יוסף טנאי

תמוז תשס"ח

תוכן עניינים

<u>מס' פרק</u>	<u>שם הפרק</u>	<u>מס' עמוד</u>
	I תוכן עניינים	
	III רשימת האיורים	
	V רשימת הסימנים	
1	..... מבוא	1
2	..... אוורור טבעי מושרה ציפה	1.1
4	..... אוורור טבעי מונע רוח	1.2
6	..... סקר ספרות	2
6	..... ניסויים בסקלה בינונית וגדולה	2.1
10	..... ניסויי מעבדה בסקלה קטנה	2.2
12	..... אוורור דחיקה	2.2.1
13	..... אוורור ערבוב	2.2.2
14	..... אוורור בחדר עם מספר פתחים בגבהים שונים	2.3
17	..... תנועת אוויר כתוצאה מהרוח	2.4
17	..... אוורור משולב-אוורור מושרה ציפה ורוח	2.5
18	..... ניסויי מעבדה בסקלה קטנה	2.5.1
20	..... רוח המתנגדת לאוורור דחיקה	2.5.1.1
24	..... רוח המסייעת לאוורור מושרה ציפה	2.5.1.2
27	..... אוורור טבעי במבנים חקלאיים	2.6
28	..... מודלים תיאורטיים	2.7
29	..... פתח עליון ותחתון בלבד	2.7.1
30	..... השפעת הפתח האמצעי	2.7.2
30	..... רוח המתנגד לאוורור מושרה ציפה	2.7.3
33	..... רוח המסייעת לאוורור מושרה ציפה	2.7.4
36	..... מטרת הפרויקט	3
37	..... תיאור הניסוי	4
37	..... תאור מערכת הניסוי והמדידים	4.1
39	..... מהלך הניסוי	4.1.1

42	.....הפחתת השפעת הקרינה הישירה	4.1.2
44	.....תוצאות	5
44	.....הפרשי טמפרטורה בתהליך המעבר	5.1
46	.....הפרשי טמפרטורה ממוצעים במצב מתמיד	5.2
51	.....סיכום ומסקנות	6
52	.....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 הדחיקה.....	3
3	תיאור סכימאתי של אוורור הערבוב.....	3
4	השפעתו של המכשול לתנועת הרוח הנושבת והיווצרות מפל לחץ בין פני שטח חזיתי הניצב לזרימה לבין פני שטח אחורי של המבנה.....	4
5	מערכת הניסוי במחקר של Howell & Potts.....	6
6	פרופילי טמפרטורה אנכיים בתוך תא ניסוי בפתחי אוורור שונים.....	7
7	טמפרטורה בפתח בזמנים שונים מתחילת הניסוי.....	9
8	הפרשי טמפרטורה בין תאי הניסויים כתלות בזמן.....	9
9	פרופילי מהירות האוויר בפתח מנורמלים במהירות האופיינית.....	10
10	אוורור דחיקה בנקודות זמן שונות מתחילת הניסוי.....	11
11	אוורור ערבוב במצב מתמיד.....	11
12	פרופיל הצפיפות בתוך תיבת הניסויים.....	12
13	(a) - h/H כתלות בשטח האפקטיבי של הפתחים,	
13	(b) - g'/G'_h כתלות בשטח האפקטיבי של הפתחים.....	13
14	אוורור ערבוב. צפיפות היחסית כפונקציה של שטח של הפתח התחתון.....	14
15	איור סכימתי של החדר מחומם ע"י מקור חום נקודתי.....	15
16	כיווני זרימה דרך פתח אמצעי בהשוואה למודל התיאורטי.....	15
17	גובה פאן הביניים כתלות בגובה הפתח האמצעי. (a) שלושת הפתחים בגודל שווה,	
16	(b) פתח עליון קטן יותר מפתח תחתון.....	16
18	תיור סכימאתי של אוורור משולב-רוח ואוורור דחיקה : (a) רוח מגבירה את תופעת האוורור; (b) רוח מחלישה את תופעת האוורור.....	18
19	דיאגרמה סכימאתית של מערכת הניסוי.....	19
20	רוח המתנגדת לאוורור הדחיקה בנקודות זמן שונות מתחילת הניסוי.....	21

21	אווור דחיקה – אפקט של מהירות הרוח על ξ (a), ו- G' (b) עבור שטחים
22	אפקטיביים שונים.....
22	תופעת מעבר מאווור דחיקה לאווור ערבוב בנקודות זמן שונות מתחילת
23	הניסוי.....
23	אווור הערבוב ב.....
24	אווור דחיקה בנקודות זמן שונות מתחילת הניסוי.....
25	פרופיל הצפיפות בתוך תיבת הניסויים.....
26	אפקט של מהירות הרוח על אוור דחיקה.....
27	תיאור סכמאטי של אופני אוור שונים. a - אוור דחיקה של החדר מחומם ע"י
31	מקור חום נקודתי, b - מקרה בו רוח מתנגדת לאווור מושרה ציפה.....
32	בגרף מתואר שטף נפחי חסר ממד Q/Q_w כפונקציה של פרמטר F.....
29	אווור דחיקה בתוך המבנה; פתחים עליונים ותחתונים מוצבים כך שרוח וכוחות
34	ציפה מחזקים אחד את שני.....
30	תיאור סכמאטי של אופני אוור שונים. a - אוור דחיקה, b - אוור ערבוב, c -
37	אופן משולב של אוור מושרה ציפה.....
31	חדר הניסויים – מידות כלליות.....
32	פריסת חיישני טמפרטורה לגובה בתוך החדר.....
33	צילום כללי של מערכת הניסוי.....
34	תצלום פנים החדר - כל הקירות וכבלים חשמליים צופו ברדיד אלומיניום. בעיגול
43	אדום מסומן אחד מחיישני טמפרטורה, במלבן אדום מסומן גוף חימום.....
36	שינוי בהפרשי טמפרטורה בזמן בין פנים לחוץ המבנה (אווור דחיקה).....
37	שינוי הפרשי טמפרטורה בזמן בין פנים לחוץ המבנה (אווור ערבוב).....
38	פרופיל אנכי של הפרשי טמפרטורה בין פנים לחוץ למבנה עבור אוור דחיקה, לפני
47	(diamonds) ו- 60 min אחרי (asterisk) הפעלת מאוררים.....
39	פרופיל אנכי של הפרשי טמפרטורה בין פנים לחוץ למבנה עבור אוור ערבוב, לפני
48	(diamonds) ו- 60 min אחרי (asterisk) הפעלת מאוררים.....
40	פרופיל אנכי של שינוי בהפרשי טמפרטורה בין פנים לחוץ החדר כתוצאה מהפעלת
50	הרוח.....

רשימת סימנים

A	– שטח הפתיחה (cm^2)
C	– מקדם שחרור (discharge coefficient)
B	– שטף הציפה (m^4/s^3)
H	– 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 הניטרלי 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)
- τ_m – סקלת הזמן האופיינית של אורור הערבוב (s)
- ξ – עומק פאן הביניים חסר ממד

1 מבוא

מושג אוורור בכלל ואוורור טבעי בפרט ניתן להגדיר כהכנסת אוויר צח מחוץ לחלל מסוים והחלפתו בין פנים של המבנה לבין סביבתו החיצונית. האוויר הנכנס מקרר את חללי המבנה בעונת הקיץ באופן טבעי כדי לחסוך בחשמל, מכניס לבית אוויר צח לטובת איכות החיים והבריאות ומוריד את רמת הלחות וכך מונע הופעת עובש. יתרה מכך, תפקידו של אוורור גם בפינוי מזהמים, מזיקים ופחמן דו-חמצני; הורדת הטמפרטורה ורמת הלחות בתוך מבנים, חממות 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: מאווררים, 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 פסולי ומזהמים את הסביבה.

אוורור טבעי הוא אחד מהעקרונות של בנייה ירוקה, המכונה גם בנייה אקולוגית. בשיטה זו נעשה שימוש בעקרונות תכנון חשובים המשולבים בכל סגנון אדריכלי. תכנון נכון של המבנה משפר את איכות החיים בו, חוסך אנרגיה ומים, ובמישור העולמי – מקטין את הנזק שמסב האדם לאיזון האקולוגי של כדור הארץ. יישומם של חלק גדול מעקרונות התכנון האקולוגי כלל אינו מייקר את הבנייה. העמדה נכונה על המגרש, תכנון הפתחים לקליטת אנרגיית השמש, אוורור טבעי ועוד – אלה מביאים לחיסכון רב של חשמל ומשפרים במידה ניכרת את איכות החיים במבנה.

כאשר אנו מעוניינים לאוורר מבנים ללא התערבות מכאנית וללא עלויות משמעותיות, נצטרך לחפש פתרונות העושים שימוש בתופעות 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 טבעי ניתן להגדיר כאוורור המונע ע"י כוחות טבעיים של הרוח הנושבת על המבנה הגורם להפרש לחצים ממוצע בין פנים לחוץ המבנה וכך נוצר תנועת אוויר פנימה והחוצה מהמבנה. גורם אחר, שתורם לאוורור הטבעי הוא כוח מושרה ציפה (Buoyancy force) הנוצרת עקב הפרשי טמפרטורה, במילים אחרות, הפרשי צפיפויות. אוורור ע"י כוחות הציפה ידוע גם בשם "אפקט הארובה" (Stack effect) – תוצאה של הפרש טמפרטורה בין פנים המבנה לבין הסביבה החיצונית. האוויר החם, בצפיפות נמוכה יותר, עולה וזורם החוצה דרך פתחים באזור העליון של הבניין ומושך את האוויר החיצוני הקר יותר פנימה דרך פתחים הנמצאים באזור התחתון. במציאות, ברב המקרים, נוצרת אינטראקציה בין שתי התופעות המתוארות לעיל, שמסבכות את חקירת האופנים של אוורור טבעי. 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.

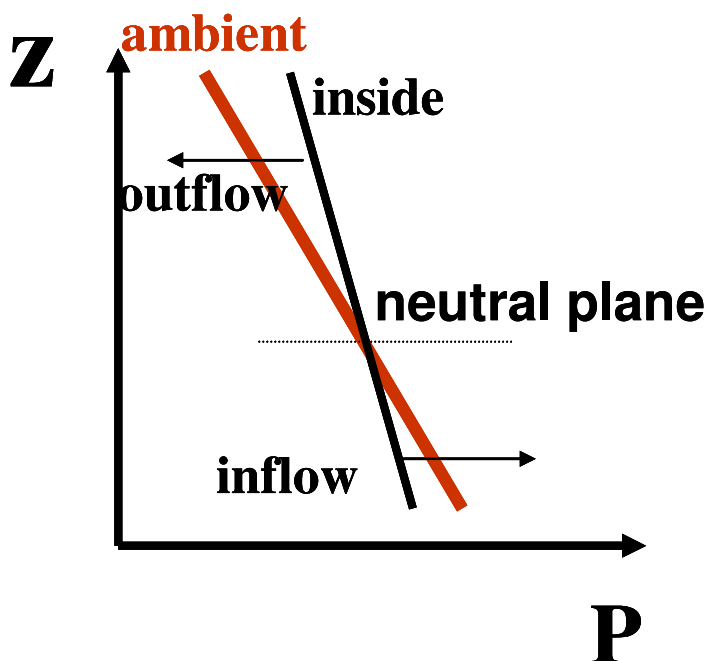
אומנם, אוורור טבעי הוא זול, אך דורש תכנון יעיל של מבנה מבחינת הגודל, מספר פתחי האוורור ומיקום פתחי האוורור. כמו כן יש לקחת בחשבון שהאוורור על ידי משבי רוח תלוי לא רק בהפרש לחץ ממוצע בין פנים המבנה והסביבה, אלא גם בתנודות לחץ רגעיות, האחראיות לזרימה משתנה דרך פתחי האוורור. החלק המשתנה בזרימה נגרם ממערבולות אוויר טורבולנטיות, שנעות פנימה והחוצה דרך פתחי האוורור,

כתוצאה משינויים רגעים בלחצי האוויר בפתחים. בעוד שאת החלק הממוצע בזרימה קל למדוד, הרי שאת החלק המשתנה קשה יותר למדוד.

בעבודה זו נחקרה בצורה ניסיונית השפעתה של הרוח החיצונית על אוורור מושרה ציפה בתוך המבנה בסקלה גדולה עם פתח עליון ותחתון על אותו קיר צדדי. כדי לחקור את אפקט הרוח החיצונית על אוורור, נבנה מערך של ארבעה מאווררים גדולים אשר מספקים רוח יציבה ואחידה בכיוון קבוע. ברור ששינוי בכיוון הרוח יחסית למבנה ישפיע על תהליך האוורור, אך, יחד עם זאת, בעבודה זו נחקר רק כיוון הרוח המקביל לפתחים של המבנה בגלל חוסר זמן ואילוצי התקציב. מהירות הרוח תהיה בערכים נמוכים על מנת לאפשר אינטראקציה בין אוורור מושרה ציפה ורוח. הניסויים כללו מדידות הפרשי טמפרטורה בין פנים המבנה ובגבהים שונים לסביבה החיצונית ומדידות רכיב מהירות רוח בכיוון הזרימה.

1.1 אוורור טבעי מושרה ציפה

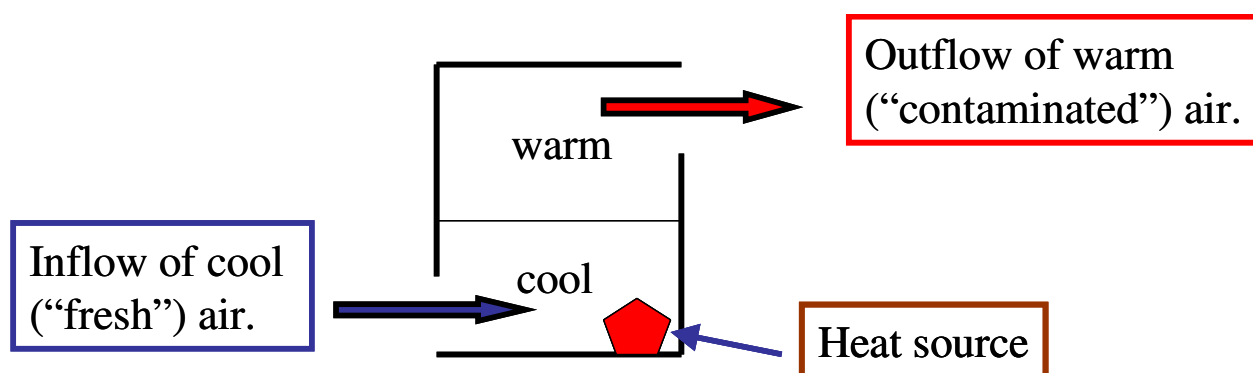
המנגנון הבסיסי של אוורור מסוג זה מומחש באיור מס' 1. נניח כי נתון חדר בו האוויר חם יותר מהסביבה החיצונית ולכן צפיפותו קטנה יותר מהצפיפות של האוויר החיצוני. כפי שנראה באיור, צפיפות קטנה יותר גורמת למפל לחץ הידרוסטאטי קטן יותר בהשוואה למפל הלחץ החיצוני. ההפרש בין הלחצים באזור העליון והתחתון יגרום לתנועת 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.



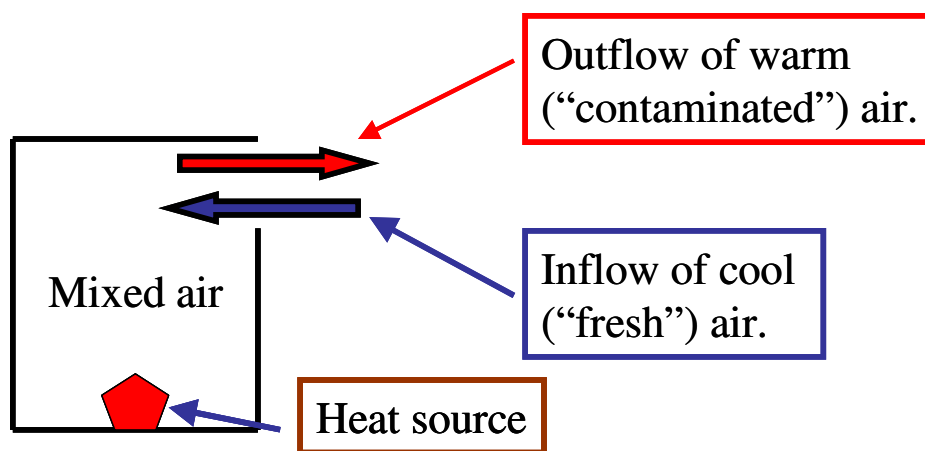
איור 1. מנגנון בסיסי של אוורור טבעי מושרה ציפה - אפקט הארובה (Stack effect). P - לחץ, Z - גובה החדר.

באופן עקרוני קיימים שני אופנים שונים ביסודם של אוורור טבעי מושרה ציפה – אוורור דחיקה (displacement ventilation) – איור מס' 2 ואוורור ערבוב (mixing 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' 3). במקרה זה, פלומת האוויר החיצוני הקר נכנסת דרך האזור התחתון של הפתח העליון, מתערבבת עם האוויר בתוך חלל המבנה והאוויר החם יוצא מן המבנה דרך האזור העליון של אותו פתח. באוורור ערבוב המישור הניטרלי, המפריד בין זרימה פנימה והחוצה, נמצא בערך באמצע גובה הפתח העליון.



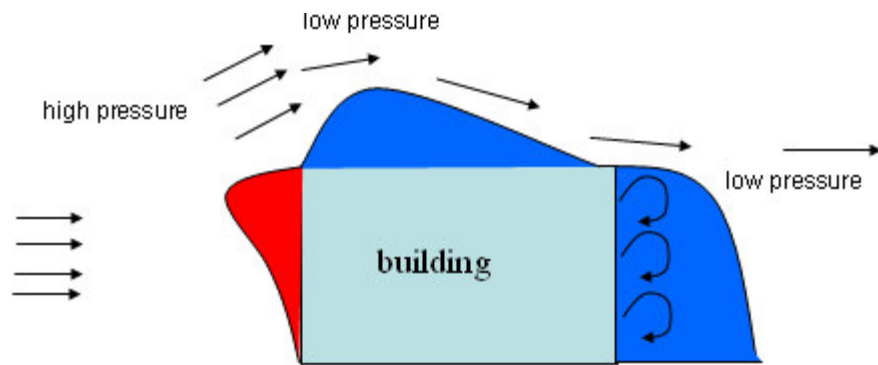
איור 2. תיאור סכימאטי של אוורור הדחיקה.



איור 3. תיאור סכימאטי של אוורור הערבוב.

1.2 אוורור טבעי מונע רוח

הגורם המרכזי ליצירת רוחות הוא הפרשי לחצים באטמוספירה המתורגמים לאנרגיה קינטית שהיא רוח. הפרשי הלחצים נוצרים בעיקר מהפרשי טמפרטורה באטמוספירה. סיבות נוספות ליצירת רוח הן הפרשים במשקל הסגולי של גושי אוויר והגיאוטרפיה של פני כדור הארץ. תופעה זו מושפעת על ידי תופעות אחרות על פני הקרקע למשל יערות, מדבריות, גושי מים גדולים, וגם בניינים – איור מס' 4. ההסעה הבסיסית נוצרת כתוצאה מהעובדה שאנרגיית השמש מחממת הכי הרבה את האזור של קו המשווה, ואז נוצר הבדל גדול של טמפרטורות בין הקטבים לקו המשווה. כתוצאה מכך אוויר חם באזור קו המשווה מתרומם מעל פני הקרקע, ואוויר קר יותר הבא מהקטבים תופס את מקומו. כך נוצרת התופעה של תזוזת האוויר. בקנה מידה מקומי ולא גלובלי, נוצרת הרוח מהפרשים לוקליים בלחצים או בטמפרטורות, הגורמים לזרימת האוויר. רוחות כאלה, לרוב, אינן חזקות במיוחד.



איור 4. השפעתו של המכשול לתנועת הרוח הנושבת והיווצרות מפל לחץ בין פני שטח חזיתי הניצב לזרימה (במעלה הזרם לחץ הוא חיובי) לבין פני שטח אחורי של המבנה (במורד הזרם לחץ הינו שלילי עקב הפרדת הזרם בקצוות של המבנה ואפקט הטורבולנציה).

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 בניהם. תנועות האוויר במבנים כאלו, 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.

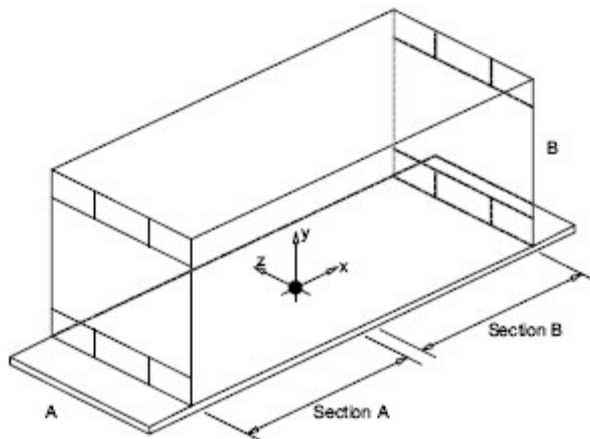
פרויקט זה מאפשר גם אנליזה פשוטה של סקאלות הזמן עבור תופעות אינטראקציה בין אוורור מונע רוח בעוצמות שונות לבין אוורור טבעי מושרה ציפה ושינוי בזמן של אופן האוורור. אחד האתגרים העיקריים בשלב התכנון הוא להחליט על מיקומם, מידותיהם ובקרתם של הפתחים אשר יאפשרו אוורור יעיל ומבוקר היטב בתוך בניינים. הדמיות נומריות וניסויים מעבדתיים בסקאלות בינוניות, כמו הניסוי שבוצע בפרויקט 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. התוצאות של פרויקט זה הוצגו בכנס : ROOMVENT 2007 (פינלנד), ראה (Tanny et al. (2007.

2 סקר ספרות

מחקרים בנושא של אוורור טבעי לצורך חקירת זרימה תלת-ממדית במשרדים ובבנייני מגורים החלה בשנות השמונים ובחממות החלו עוד בשנות ה-50. במהלך השנים עד ימינו נעשו עבודות במגוון רחב של נושאים, אולם, הסקר הנוכחי מוגבל לעבודות רלוונטיות לפרויקט המוצג.

2.1 ניסויים בסקלה בינונית וגדולה

הניסויים באוורור דחיקה במבנים בסקלה ממשית דווחו, למשל, ע"י (2002) Howell & Potts ו-Xing (2002) & Awbi. מדידות פרופילי צפיפות פנמיים 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. (2002) Howell & Potts, בעבודתם, הציגו נתונים ניסיוניים על ריבוד טמפרטורה הנבנה במבנה בסקלה ממשית כתוצאה מאוורור דחיקה, עם מקור חום נקודתי. מערכת הניסוי שלהם מתוארת באיור מס' 5. 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.

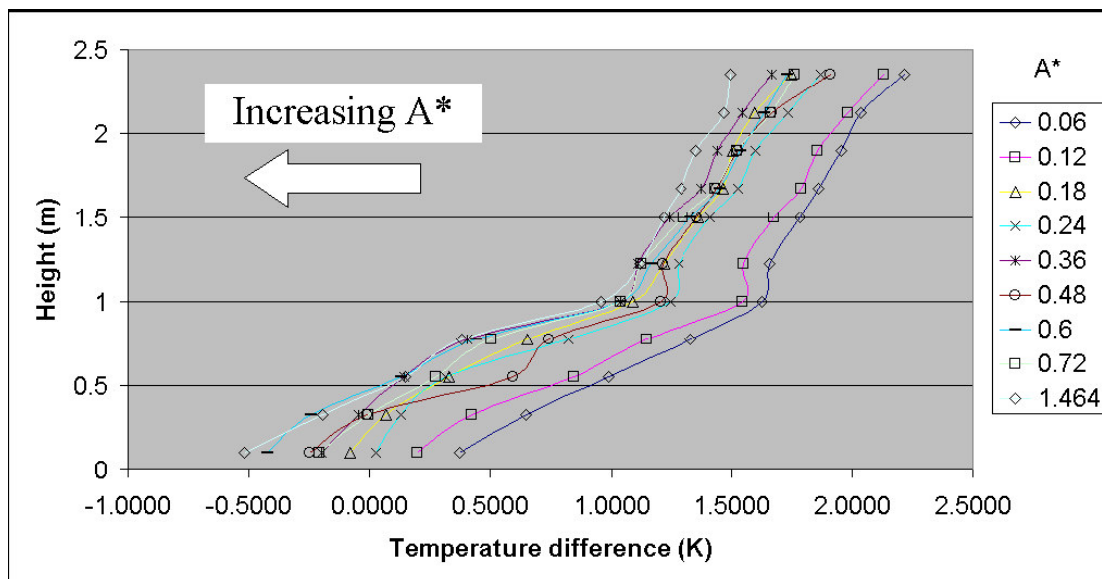


איור 5. מערכת הניסוי במחקר של (2002) Howell & Potts.

תוצאות הניסויים (איור מס' 6) 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 לעבודתם 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 i מציינ פתח כניסת אוויר (פתח תחתון באוורור דחיקה) ו- T_i מציינ פתח יציאה (פתח עליון באוורור דחיקה). תוצאה נוספת שניתן ללמוד מהמחקר (איור מס' 6) היא שגרדיאנט הטמפרטורה יורד עם העלייה בגובה, כלומר הגרדיאנט עד כחצי הגובה גדול ויורד במעבר חד בדומה לתוצאות ממחקרים אחרים.



איור 6. פרופילי טמפרטורה אנכיים בתוך תא ניסוי בפתחי אוורור שונים, Howell & Potts (2002).

תוצאות נוספות בסקלה גדולה הרלוונטיות לפרויקט 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-

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

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:

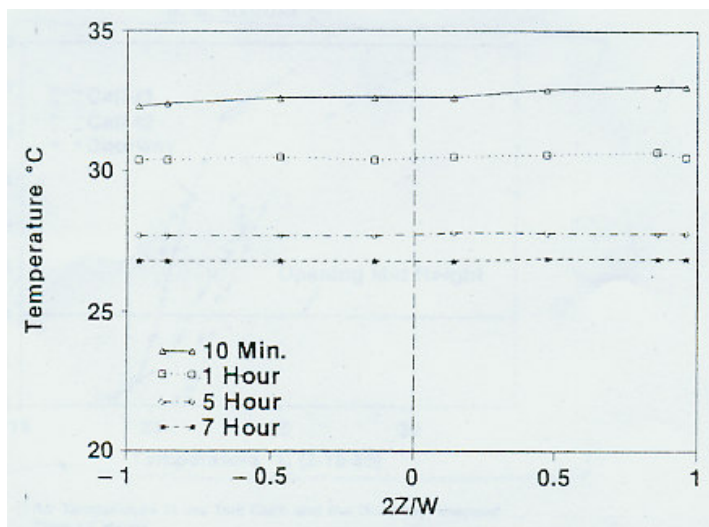
$$(3) \quad \frac{u}{U_m} = C \cdot [\frac{2Y}{H}]^{0.5}$$

כאשר H הוא גובה הפתח ו-

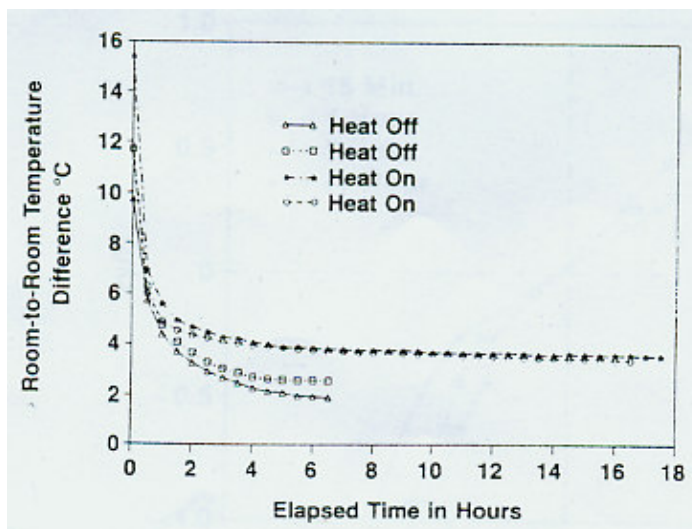
$$(4) \quad U_m = [\frac{g \cdot H \cdot \Delta T}{\bar{T}}]^{0.5}$$

כאשר U_m מהירות מכסימלית אפשרית בזרימה אידיאלית עבור ערכים נתונים של $\bar{T}, \Delta T, H$.

תוצאות הניסויים הראו כי הטמפרטורה בפתח כמעט אחידה לרוחבו (איור מס' 7) 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' 8).

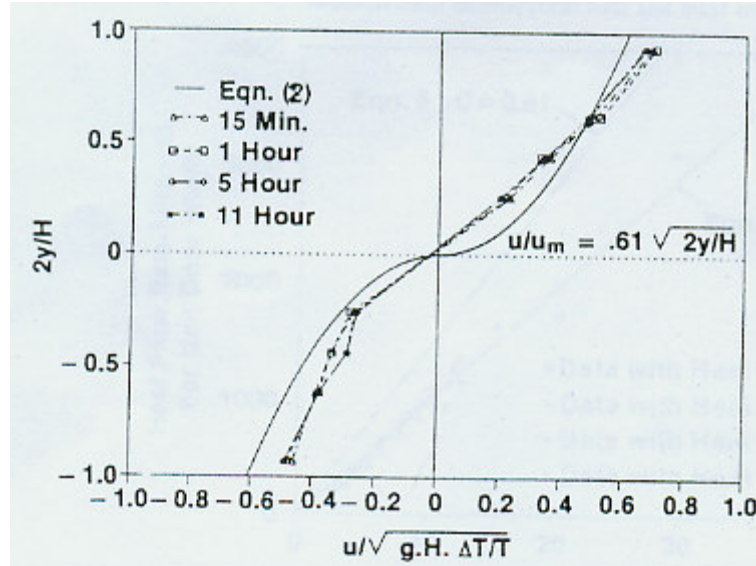


איור 7. טמפרטורה בפתח בזמנים שונים מתחילת הניסוי, Mahajan (1987).



איור 8. 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' 9.

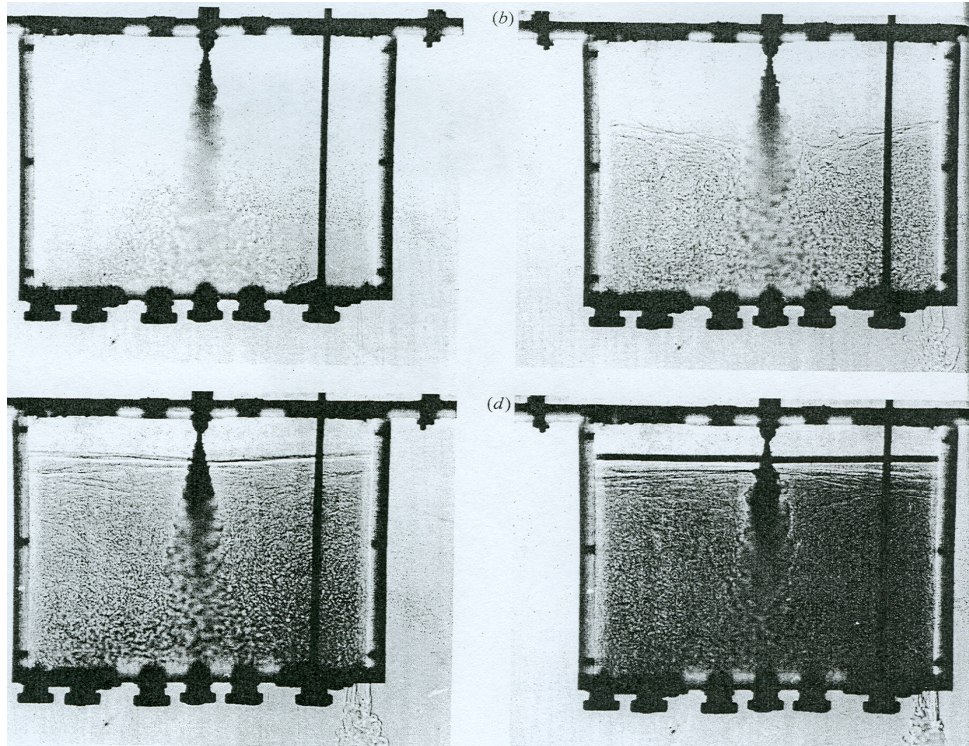


איור 9. פרופילי מהירות האוויר בפתח מנורמלים במהירות האופיינית, Mahajan (1987)

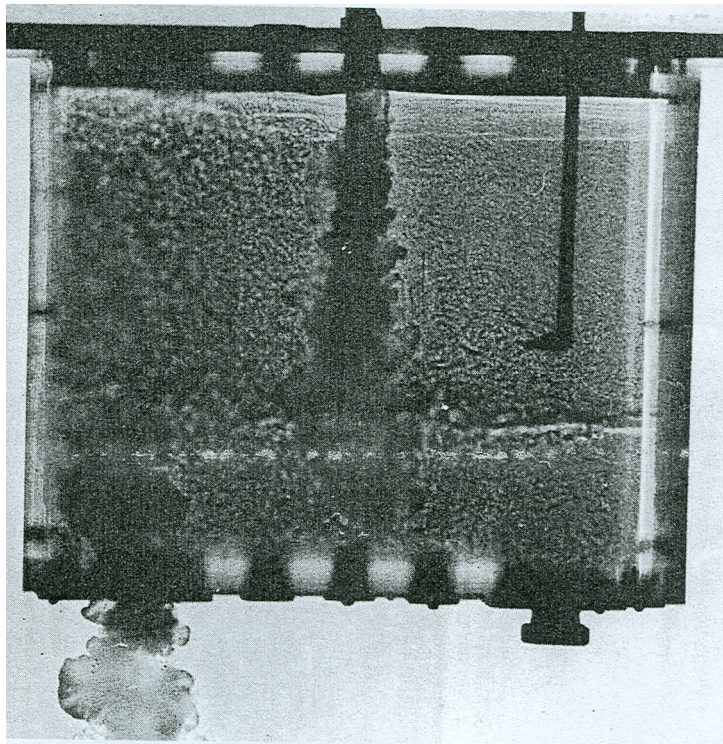
2.2 ניסויי מעבדה בסקלה קטנה

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 ע"י 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 (0.13x0.6x0.6 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' 10 ובאיור מס' 11.



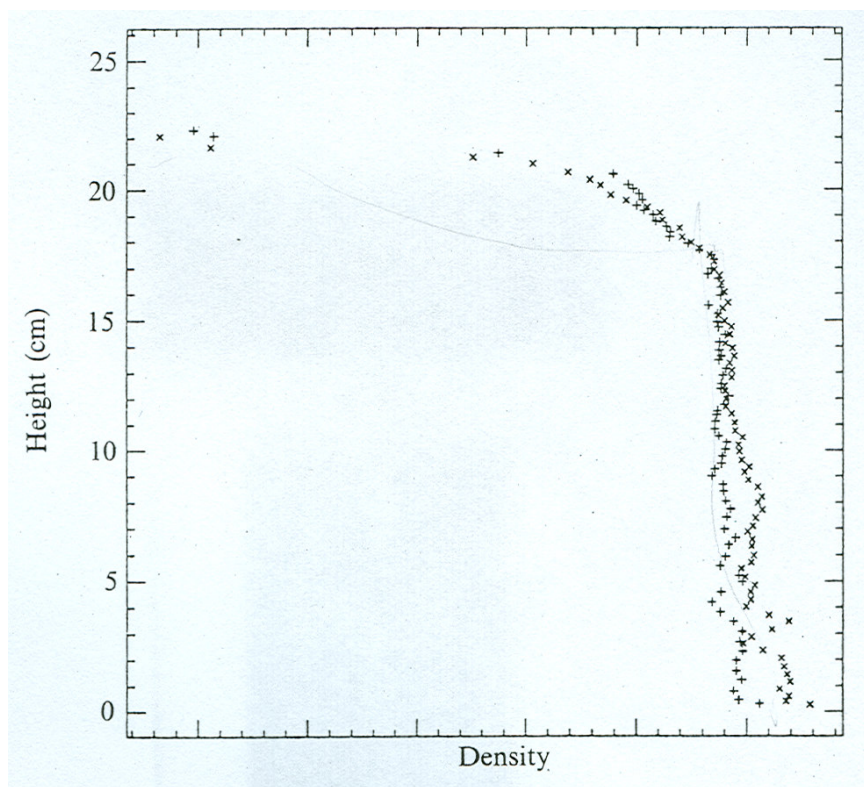
איור 10. אוורור דחיקה בנקודות זמן שונות מתחילת הניסוי, Linden *et al.* (1990).



איור 11. אוורור ערבוב במצב מתמיד, Linden *et al.* (1990).

2.2.1 אוויר דחיקה

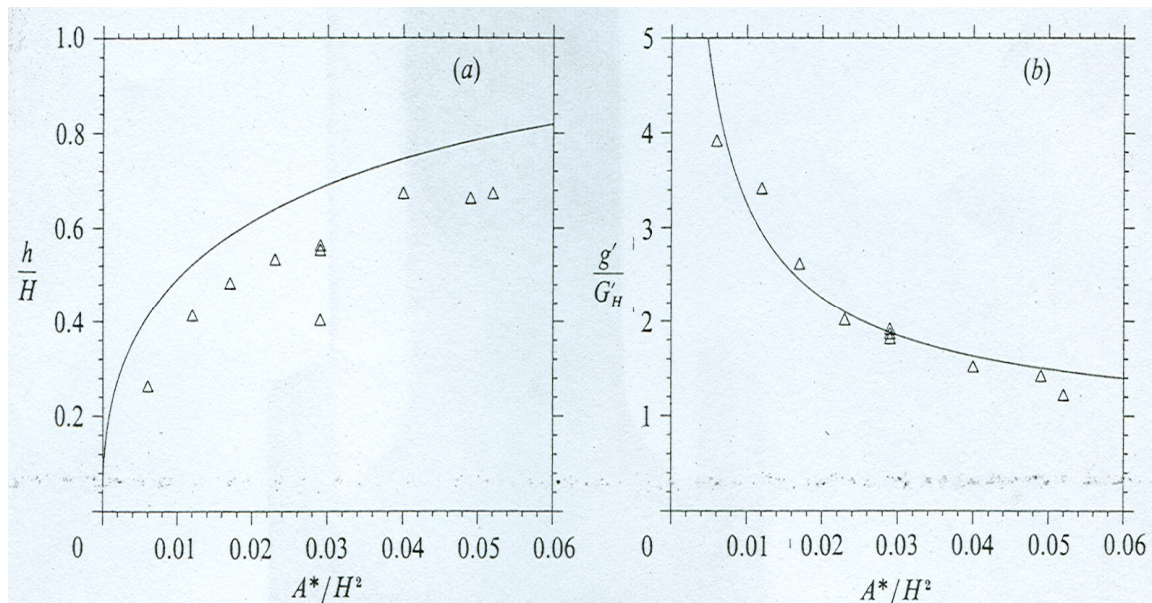
בניסויים באוויר דחיקה גם פתחים עליונים וגם פתחים תחתונים היו פתוחים. כמקור "חום" שימש נוזל בצפיפות גבוהה (תמיסת מי מלח) שהוזרק בחלק העליון של תיבת הניסויים. כאשר הניסוי החל, פלומה טורבולנטית ירדה מהמקור. פלומה זאת משכה איתה את הנוזל החיצוני אשר ירד גם הוא למטה עד אשר היגיע עד לתחתית התיבה, שם הוא התפשט 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' 10) עד אשר המערכת היגיעה למצב מתמיד. באיור מס' 12 ניתן לראות את פרופילי הצפיפות בתוך תיבת הניסויים באוויר דחיקה עם מקור ציפה במצב מתמיד.



איור 12 . 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' 13) 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 13. (a) - h/H כתלות בשטח האפקטיבי של הפתחים, (b) - g'/G'_H כתלות בשטח האפקטיבי של הפתחים, Linden *et al.* (1990).

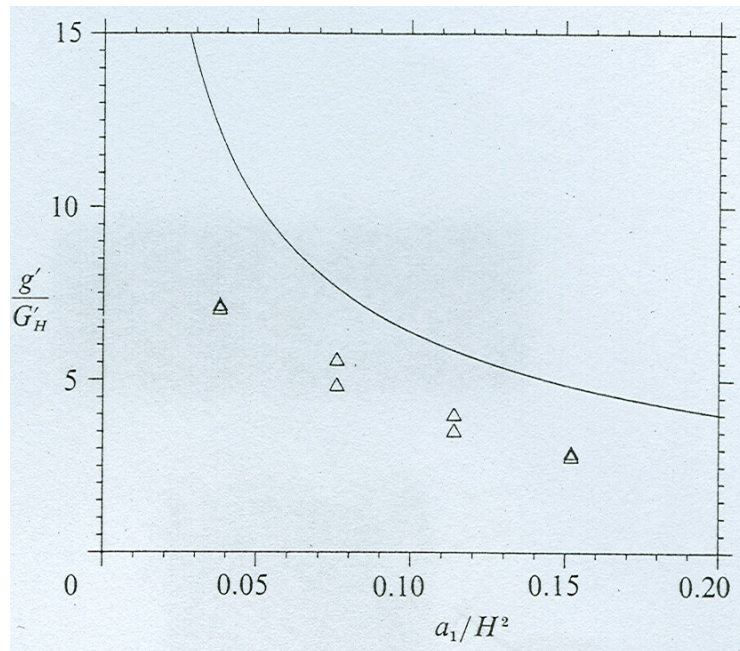
ניתן לראות מן הגרפים כי עליה ב- A^* גורמת לעליית פאן הביניים, וערכי g' יורדים עם עליה ב- A^* . שיעור השינוי בערכים הנ"ל קטן בערכים גדולים של A^* ולהיפך.

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

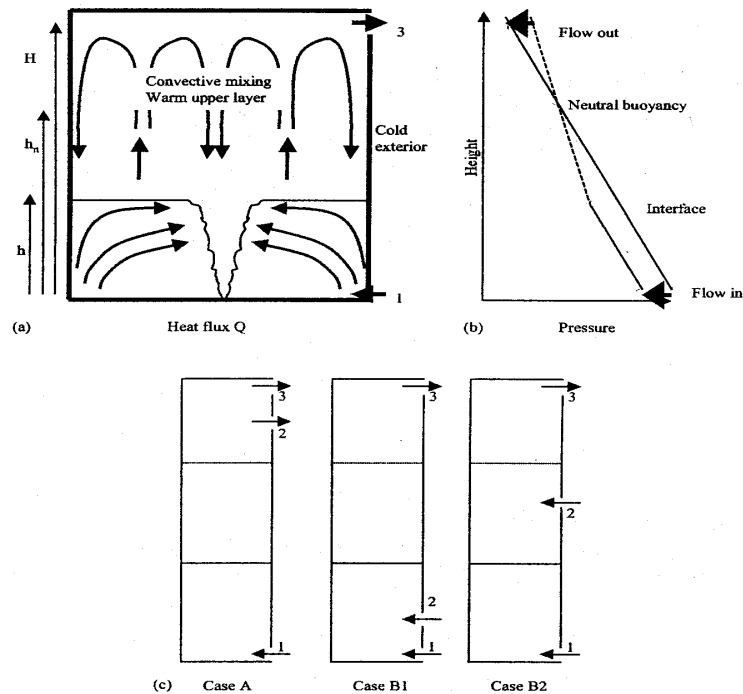
שיטת הניסוי של הזרקת תמיסת מי מלח לתיבה שימשה גם למחקרים בהם נלמד אוורור טבעי עם שניים או יותר מקורות ציפה. (Cooper & Linden, 1996a, Linden & Cooper, 1996b). מאחר והפרויקט הנוכחי עוסק במקור ציפה יחיד לא נסקור עבודות אלו כאן.



איור 14 . אוורור ערבוב. צפיפות היחסית כפונקציה של שטח של הפתח התחתון, Linden *et al.* (1990).

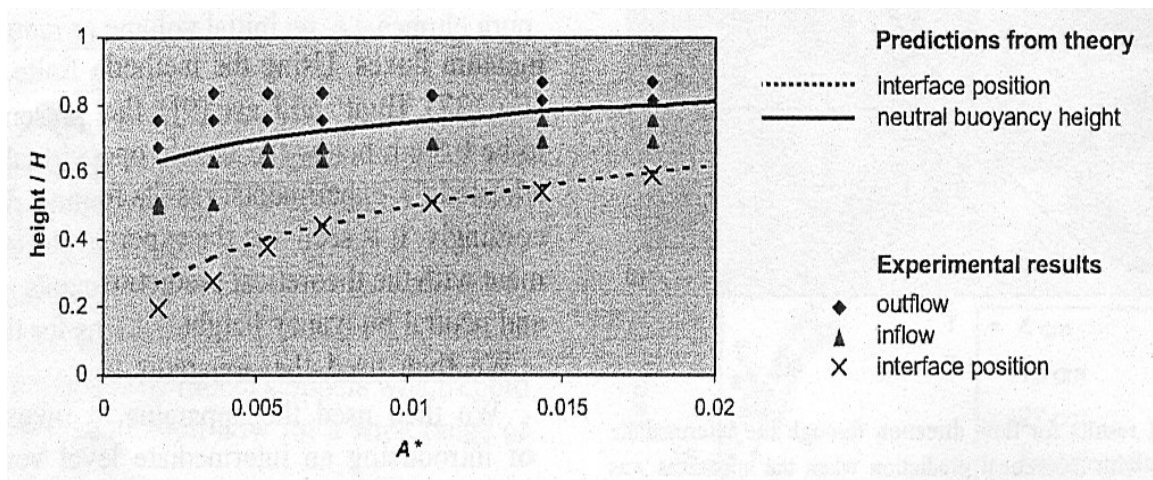
2.3 אוורור בחדר עם מספר פתחים בגבהים שונים

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' 15. 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 לניסוייו 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 צמדים תרמיים ואופי הזרימה נצפה ע"י צילום שדוגרף (shadowgraph).



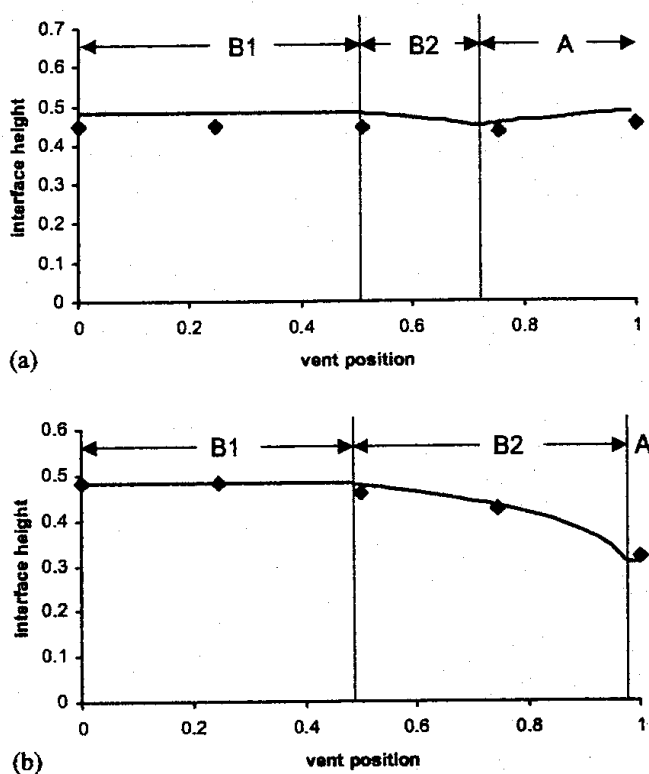
איור 15. איור סכימתי של החדר מחומם ע"י מקור חום נקודתי. פילוג הלחצים בתוך החדר ומחוצה לו והתנהגות הזרימה בנוכחות פתח שלישי הנמצא בין הפתח העליון לתחתון, (Fitzgerald & Woods 2004).

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' 16 ניתן לראות כי מיקומם של פאן הביניים ומישור הניטרלי נמצאים בהתאמה טובה מאוד עם החיזוי התיאורטי (ראה פרק 2.7).



איור 16. 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' 17 אנו רואים את תוצאות הניסויים בשתי תצורות של הפתחים - העליון והתחתון. באיור מס' a17 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' b17 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.



איור 17. גובה פאן הביניים כתלות בגובה הפתח האמצעי. (a) שלושת הפתחים בגודל שווה. (b) פתח עליון קטן יותר מפתח תחתון, Fitzgerald & Woods (2004).

2.4 תנועת אוויר כתוצאה מהרוח

הרוח יוצרת פילוג של הלחץ מעל המבנה – איור מס' 4, אשר מושפע גם על ידי מהירות הרוח הממוצעת וגם על ידי טורבולנציה. רב מחקרים שניתחו התנהגות של זרימת אוויר סביב המבנה בוצעו בעזרת מנהרות רוח. המטרה העיקרית של הניסויים במנהרת רוח הינה מציאת מקדמי לחץ. את פילוג הלחץ הממוצע ניתן לאפיין בעזרת מקדם לחץ בלתי ממדי (Bailey 1999):

$$P = C_p 2\rho u^2 \quad (5)$$

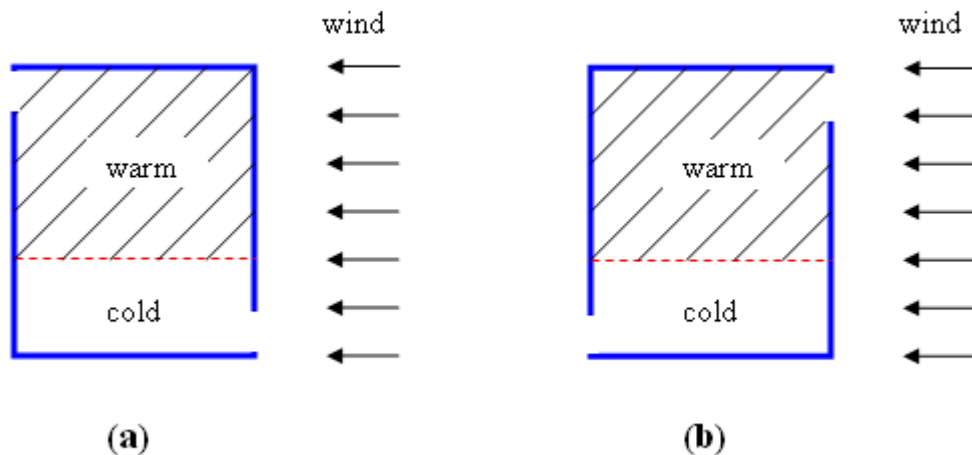
C_p מקדם הלחץ, u מהירות הרוח. באופן דומה ניתן להגדיר מקדם לחץ טורבולנטי אשר לוקח בחשבון את התנודות בלחץ. מקדמי לחץ אבסולוטי נלמדו בצורה נרחבת על פתחים סגורים (Wells & Hoxey, 1991), מדידות אשר נעשו במנהרת רוח על מודל חממה בעלת גמלון בודד ופתחי אוורור (Sase et al., 1984) מראות שמקדם זה מושפע מזווית פתח האוורור ומכיוון הרוח ביחס לפתח. מקדם הלחץ הטורבולנטי לא נלמד באופן נרחב כל כך כמו זה הממוצע, אם כי ישנן עבודות בתחום (Gandemer & Bietry, 1989; Miguel, 1998). על מנת לפשט את ההגדרה של מקדם הלחץ, הציעו Papadakis et al. (1996) ו-Boulard et al. (1995) מקדם לחץ כללי של הרוח C_w (מקדם השפעת הרוח) אשר מהווה שילוב של מקדם הלחץ הממוצע וטורבולנטי. עבור מבנה בעל פתחי אוורור, אם כן, ניתן לרשום את שטף האוורור באופן הבא:

$$\frac{Q_v}{A_o} = C_d u C_w^{0.5} \quad (6)$$

A_o שטח פתח האוורור האפקטיבי.

2.5 אוורור משולב – אוורור מושרה ציפה ורוח

בנושאים של אוורור טבעי מושרה ציפה ורוח לחוד נעשו ניסויים רבים ופותחו מודלים תיאורטיים. מכיוון שזרימת אוויר דרך פתחים היא פונקציה לא ליניארית של מפל הלחץ כך האפקט המשולב של הרוח והפרשי טמפרטורה מורכב יותר וכתוצאה מזה אין אפשרות לצירוף שתי תופעות הפועלות באופן נפרד על מנת לחזות את התוצאות של אוורור משולב. שיעור השפעת הרוח על אוורור מושרה ציפה בעיקר תלוי בעוצמתה וכיוונה של הרוח, בממדים ומיקום הפתחים ובהפרשי הטמפרטורה בין פנים לחוץ המבנה. באיור מס' 18 ניתן לראות דוגמאות המייצגות שני מקרים של השפעת רוח על האוורור הדחיקה: (a) – רוח המגבירה את תופעת האוורור; (b) – רוח המחלישה את האוורור.



איור מס' 18. תיאור סכמתי של אוורור משולב – רוח ואוורור דחיקה, (a) רוח מגבירה את תופעת האוורור, (b) רוח מחלישה את תופעת האוורור, (Hunt & Linden 1999).

(Wilson & Walker 1993) סקרו שיטות להערכה של ספיקת האוויר שבהן ישנו שילוב של אוורור כתוצאה מרוח עם אוורור המונע מהפרש טמפרטורות. אוורור אשר מונע כתוצאה מהפרש של טמפרטורות, נהייה חשוב רק עבור מהירויות רוח נמוכות. עבור חממות, Bot (1983) הראה שאפקט האוורור כתוצאה מהרוח הינו השולט כאשר $3u > (T)^2$, בעוד ש-Papadakis et al (1996) שהאפקט התרמי נהייה חשוב במהירויות הנמוכות מ- 2 m/s .

2.5.1 ניסויי מעבדה בסקלה קטנה

על מנת לחקור את השפעת הרוח על אוורור (Hunt & Linden 2001) ביצעו ניסויים בסקלה קטנה בעזרת המערכת בדומה לשיטה המתוארת בסעיף 2.2. (Hunt & Linden 2001) השתמשו בקופסת פרספקס במידות של חתך רוחב $0.15\text{m} \times 0.295\text{m}$ ובגובה 0.25m . חמישה חורים בקוטר 20mm נקדחו בדפנות של הקופסה במעלה הזרם (דופן תחתונה) ובמורד הזרם (דופן עליונה), הבטיחו קשר בין פנים הקופסה והסביבה החיצונית; החורים נסגרו ונפתחו, במידת הצורך, עם פקקי פלסטיק. את הקופסה הציבו במיכל גדול ($2.65\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.57\text{m}$) מלא במים מתוקים.

את מהירות הרוח הממוצעת ניתן היה לשנות ולכל מהירות רוח נמדדו מפל לחץ בין פתח תחתון ועליון ע"י מנומטר שמן-מים (Hunt & Linden 1997), אף הוקלטו תנודות של הלחץ בין 5%-10% ממפל לחץ ממוצע, וכצפוי, נתקבלה תוצאה פרופורציונאלית למהירות הרוח בריבוע – נוסחה מס' 9.

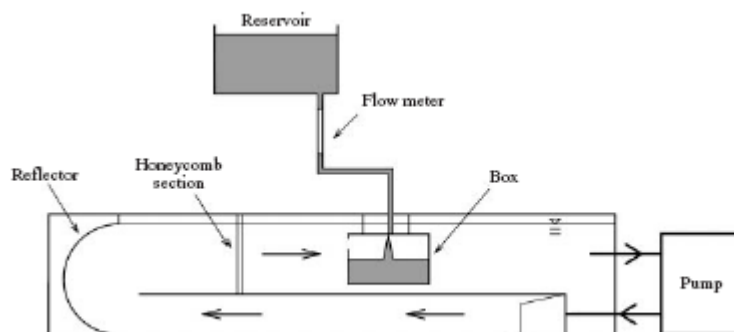
$$(7) \quad P_i = C_{pi} \frac{1}{2} \rho U_{wind}^2 : \text{לחץ בפתח כניסת אוויר}$$

$$(8) \quad P_o = C_{po} \frac{1}{2} \rho U_{wind}^2 : \text{לחץ בפתח יציאת אוויר}$$

מקדמי הלחץ: C_{pi} ו- C_{po}

$$(9) \quad \Delta = P_i - P_o = \frac{1}{2} \rho U_{wind}^2 (C_{pi} - C_{po}) : \text{מפל הלחץ}$$

כמקור "רוח" שימש נוזל בצפיפות גבוהה (תמיסת מי מלח) שהוזרק בחלק העליון של תיבת הניסויים דרך זרבובית בקוטר 5mm. באזור סביב הקופסה התרחשה זרימה אופקית של מים מתוקים המייצגת את הרוח. שליטה על הגברה של עוצמת "הרוח" נעשתה באמצעות הגדלת הצפיפות של מים מלוחים. כל הניסויים צולמו ע"י שימוש ב-shadowgraph, כפי שמופיע באיור מס' 20 ובאיור מס' 22. דיאגרמה סכמאטית של מערכת הניסוי מוצגת באיור מס' 19. על מנת להבטיח זרימה מושרה ציפה השתמשו במים מתוקים ומים מליחים. בניגוד לתיאוריה, בניסויים כוחות ציפה פעלו כלפי מטה, אולם, כיוון הפוך של כוחות ציפה לא מתנגד לקרוב Boussinesq, מלבד התחושה של זרימה הפוכה. כתוצאה ממפל לחץ בין פתחים במעלה "הרוח" לבין פתחים במורד "הרוח" באזור סביב הקופסה התרחשה זרימה אופקית של "הרוח". המפל הלחץ נמדד בעזרת מנומטר (manometer tube).



איור מס' 19. דיאגרמה סכמאטית של מערכת הניסוי. בעזרת הפעלת המשאבה נוצרה תנועה סיבובית של מים מתוקים. על מנת לספק פרופיל מהירות אחיד, השתמשו ברשת נקבובית (Honeycomb gauze). Linden & Hunt (2001).

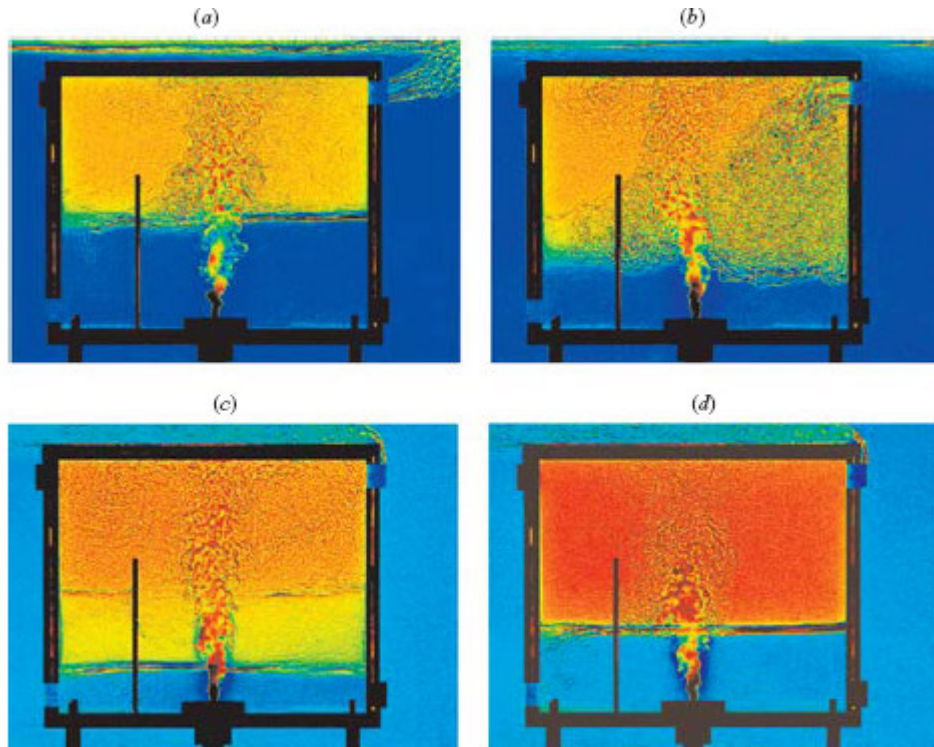
2.5.1.1 רוח המתנגדת לאורור מושרה ציפה

בעבודה ניסיונית (Linden & Hunt (2004 חקרו השפעתו של הרוח הנושב בכיוון הפוך לאורור דחיקה וראו, שכתלות במהירות הרוח נוצרים שני מנגנונים שונים של האורור טבעי. תוצאות הניסויים הראו כי עבור מהירות הרוח מאפס ועד לערך מסוים של מהירות הרוח נשמר אורור דחיקה עם ריבוד דו – שכבתי ואילו במהירות הרוח גדולה יותר נוצר אורור ערבוב.

במקרה של שינויים משמעותיים בעוצמת הרוח, פאן ביניים, המפריד בין השכבות, התרומם מעל רמת הפתחים במורד הרוח ואפשר לזורם ציפה לצאת "לסביבה החיצונית". כאשר שטף של הזורם היוצא דרך הפתחים לסביבה החיצונית יותר קטן משטף של הפלומה ממקור הציפה, אז כושר ציפה נטו גדל, ולאחר זמן, יציאת הזורם הופסקה ומערכת חזרה לאורור דחיקה במצב עמיד. מאידך גיסא, כאשר שטף של הזורם דרך הפתחים יותר גדול משטף של הפלומה ממקור הציפה, כושר ציפה נטו קטן עם הזמן, המישור הניטרלי התרומם עד לקצה העליון של הקופסה ונוצר, כצפוי, ערבוב שכבות בתוך קופסת הניסוי.

רוח + אורור דחיקה

בניסויים של (Linden & Hunt (2004 באורור דחיקה גם פתחים עליונים וגם פתחים תחתונים היו פתוחים. כאשר הניסוי החל, כתוצאה מהזרימה נבנה ריבוד דו-שכבתי – איור 20a. לאחר שהגדילו את עוצמת "הרוח" בצורה דיסקרטית ובכיוון המתנגד לאורור דחיקה, נוצרה תופעת המעבר – איור מס' 20b. מעקב לאחר המשך הניסוי מראה שעבור שינויים יחסית גדולים במהירות "הרוח" נוזל סביבתי נכנס דרך פתחים במעלה "הרוח", יציאת הנוזל בצפיפות גדולה דרך פתחים האלה הפסיקה ונוצרה פלומה שפרצה את המישור האופקי המפריד בין השכבות. יחד עם זאת נוצרה שכבה נוספת עם צפיפות מעורבת של שני סוגי המים; עובי של שכבה אמצעית גדל בו-זמנית עם הכנסת מים מתוקים דרך פתחים במעלה "הרוח" – ראו איור מס' 20c.



איור מס' 20. רוח המתנגדת לאווירור הדחיקה בנקודות זמן שונות מתחילת הניסוי, Linden & Hunt (2004).

בגרפים הבאים (איור מס' 21) ניתן לראות את עומק פאן הביניים חסר ממד $\xi = \frac{h}{H}$ ואת הערך של

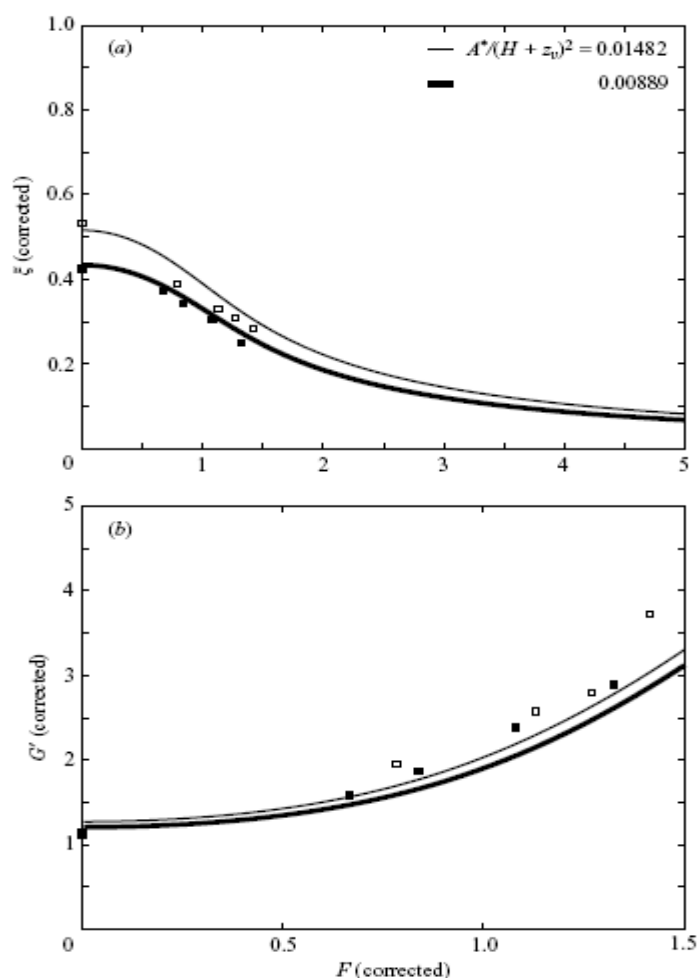
$\frac{g'}{G'}$ חסר ממד כאשר $G' = \frac{g \Delta \rho}{\rho}$ כפונקציות של F , המייצגת את היחס בין מהירות מושרה רוח לבין מהירות מושרה ציפה (נוסחה מס' 10).

$$F = Fr \left(\frac{A^*}{H^2} \right)^{1/3} \quad (10)$$

כאשר Fr מייצג מספר פרוד, שווה ל- $Fr = \sqrt{\frac{\Delta/\rho}{(B/H)^{2/3}}}$.

מכאן אפשר להגיע למסקנה: ככל ש F ו- U_{wind} גדלים, כך ξ קטן, שמרמז על הפחתה של עוצמת האווירור.

Ventilation driven by opposing wind and buoyancy

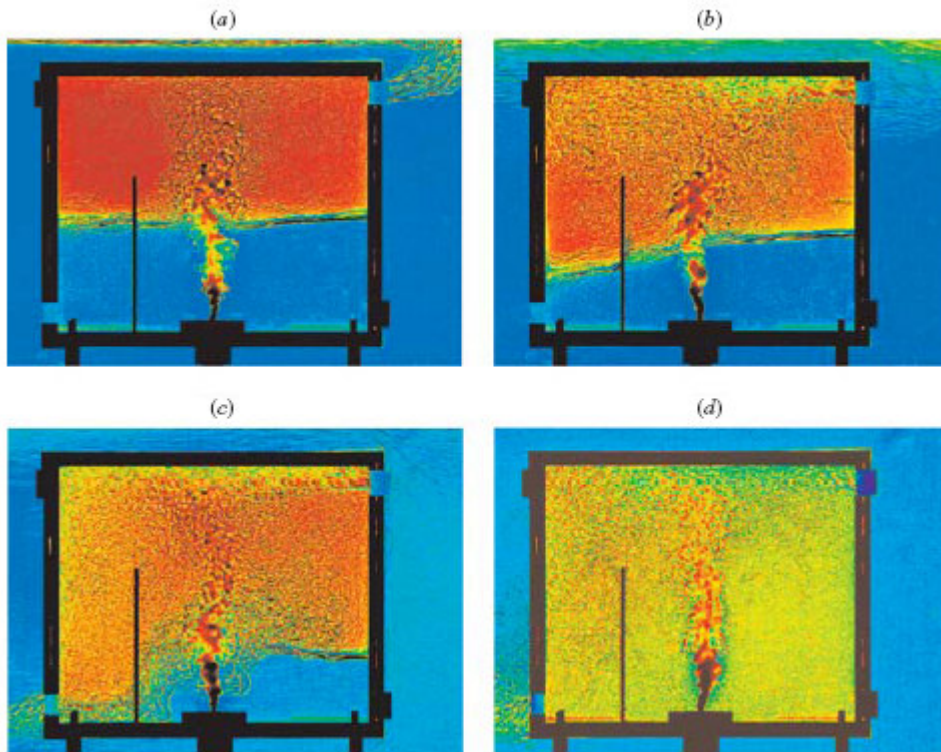


איור מס' 21. אוורור דחיקה – אפקט של מהירות הרוח על ξ (a) ו- G' (b) עבור שטחים אפקטיביים שונים
Linden & Hunt (2004).

רוח + אוורור ערבוב

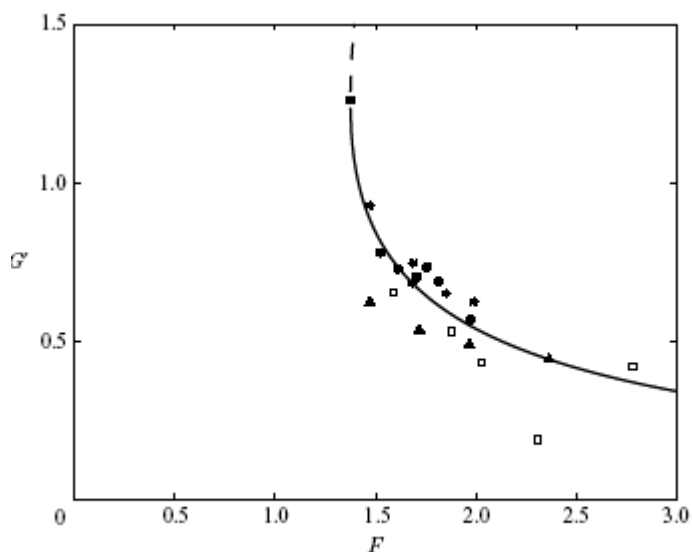
איור מס' 22 מתאר את תופעת המעבר מאוורור דחיקה (22a) למצב עמיד חדש - אוורור הערבוב (22d) כאשר על מערכת פועלים כוחות ציפה וכוחות "רוח" בכיוונים מנוגדים זה לזה. ברגע שהגדילו את מהירות "הרוח" U_{wind} , זורם סביבתי התחיל להיכנס דרך פתחים במעלה "הרוח". בתחילה, זורם סביבתי (22b), ולאחר מכן זורם ציפה (22c) יצאו דרך פתחים במורד הרוח. עבור טווח מסוים של מהירות "הרוח" הזורם הנכנס התרומם בצורת פלומה, התנגש והתערבב עם הפלומה ממקור ציפה. על-ידי זה, עובי של שכבה התחתונה גדל וגם מישור הניטרלי התרומם עד לקצה עליון של הקופסה. לאחר מכן, זורם ציפה נוקז דרך פתחים במורד "הרוח", צפיפות הממוצעת בקופסת הניסוי הלכה וקטנה ונוצרה זרימת ערבוב יציבה. עבור מהירות "רוח"

גדולה, זרימה הפוכה שנוצרה, שברה את הריבוד לפני שמישור הניטרלי מגיע לקצה העליון של קופסת הניסויים. למרות השוני בפרטים, אשר תלויים בגיאומטריה המבנה וגם בשנויים במהירות "הרוח", תופעת המעבר מאוורור הדחיקה לאוורור הערבוב נגרמה אך ורק בגלל ששטף הזרימה דרך פתחים גדול משמעותי משטף של הפלומה ממקור הציפה.



איור מס' 22. תופעת מעבר מאוורור דחיקה לאוורור ערבוב בנקודות זמן שונות מתחילת הניסוי, Linden & Hunt (2004).

באיור מס' 23 ניתן לראות את תוצאות שנתקבלו עבור אוורור הערבוב במצב עמיד. בגרף מוצג G' כפונקציה של F עבור ערכים שונים של שטח הפתחים A^*/H^2 (מסומנים בצורת ריבוע, משולש וכוכבית) ועבור כוח ציפה שונה (מסומנים בעיגול). ניתן לראות מן הגרף שככל ש- F גדל, כך G' קטן, ואז Q גדל.

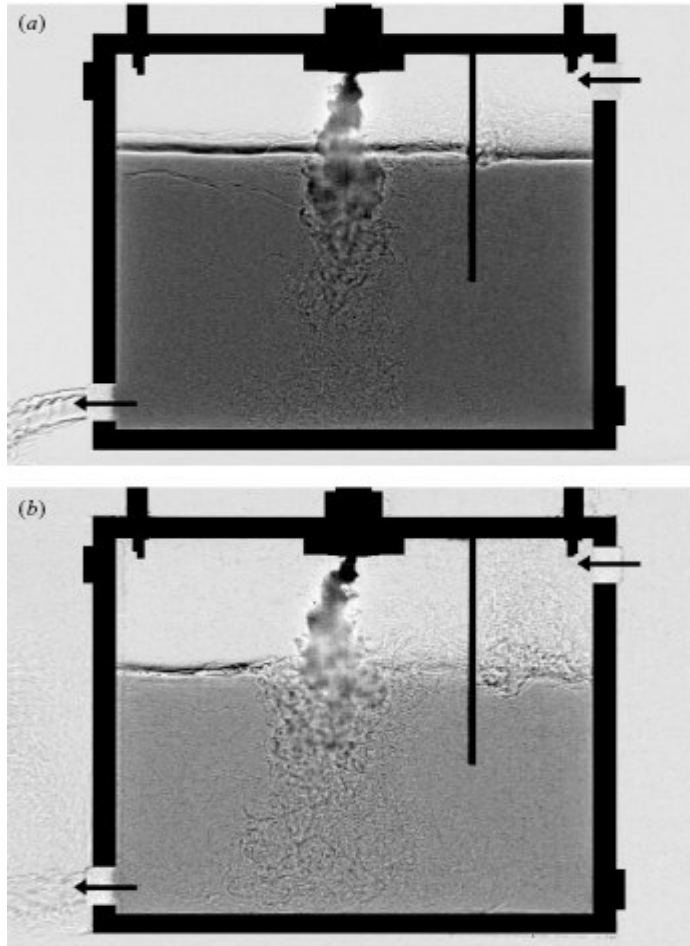


איור מס' 23. אוורור ערבוב בהשפעת רוח (Linden & Hunt (2004).

2.5.1.2 רוח המסייעת לאוורור מושרה ציפה

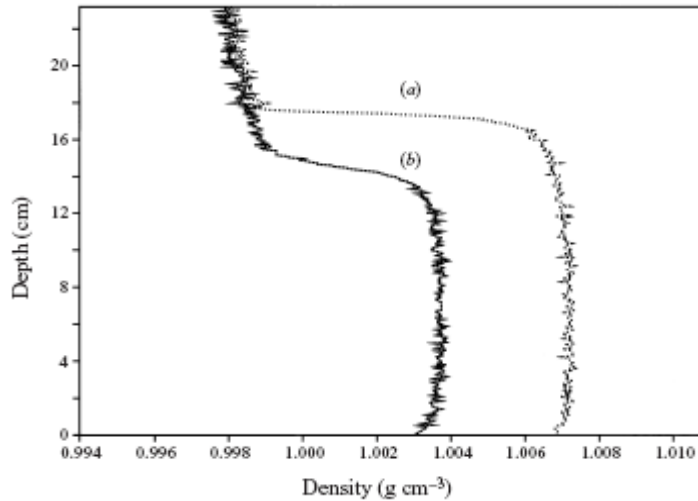
ניסויים נערכו בקופסה עשויה פרספקס (אורך 29.5cm x רוחב 15cm x גובה 25cm) שהוצבה בתוך המיכל בצורת התעלה במידות גובה, רוחב ועומק: 2.65m, 0.30m ו- 0.57m בהתאמה (איור מס' 19) המלא במים מתוקים. מספר חורים בקוטר 2 ס"מ נקדחו בדופן עליונה ותחתונה של הקופסה במעלה "הרוח" ובמורד "הרוח" בהתאם. החורים נסגרו ונפתחו במידת הצורך.

לאחר שמערכת היגיעה למצב מתמיד, כאשר זורם סביבתי נכנס דרך פתחים עליונים במעלה "הרוח" וזורם עם צפיפות גבוהה יותר יצא דרך פתחים תחתונים במורד "הרוח", בעזרת המשאבה הפעילו את "רוח". בתופעת המעבר המישור הניטרלי התקדם כלפי מטה, יחד עם זה, עומק וצפיפות של שכבה תחתונה הלכה וקטנה. ברגע ששטף נפחי דרך מישור ניטרלי השתווה לשטף נפחי דרך פתחים, המערכת התייצבה ועומק של שכבת מים מלוחים נעשתה יותר קטנה מעומק של אותה שכבה ללא "רוח". באיור מס' 24 ניתן לראות את תמונות שצולמו ע"י שימוש ב- shadowgraph: (a) – אוורור מושרה ציפה, (b) – אוורור מושרה ציפה ורוח.



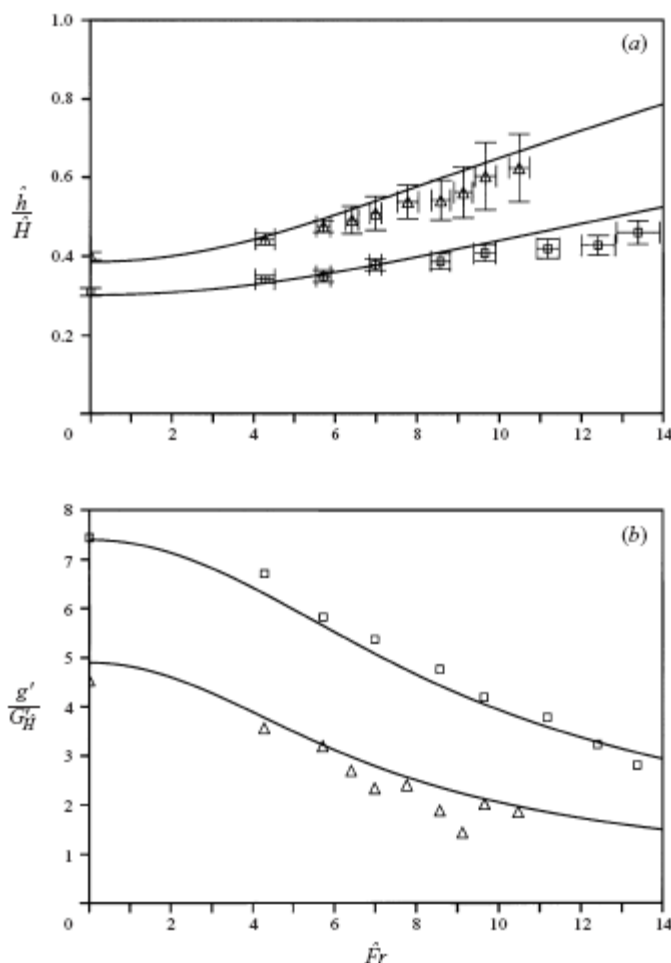
איור מס' 24. אוורור דחיקה בנקודות זמן שונות מתחילת הניסוי. (a) – אוורור מושרה ציפה, (b) – אוורור מושרה ציפה ורוח (Linden & Hunt (2001).

את אוורור הדחיקה מאפיין תחום רחב של מספרי פרוד (Froude number). באיור מס' 25 ניתן לראות את פרופילי הצפיפות בתוך תיבת הניסויים באוורור דחיקה עם מקור ציפה במצב מתמיד: (a) – אוורור מושרה ציפה, כאשר העומק של המישור הניטרלי 17cm, (b) – אוורור מושרה ציפה ורוח, כאשר העומק של המישור הניטרלי 15cm. הפרשי צפיפות בין שכבה עליונה ותחתונה יותר משמעותיים עבור מקרה (b). מגרף ניתן ללמוד: ככל ש- Δ או Fr גדלים, כך צפיפות בתוך תיבת הניסויים קטנה יותר וגם עובי של שכבה תחתונה קטן יותר.



איור מס' 25. פרופיל הצפיפות בתוך תיבת הניסויים, Linden & Hunt (2001).

מעקב על גובה של מישור ניטרלי \hat{h}/\hat{H} ו- $\hat{g}/G'_{\hat{H}}$ כפונקציות של מספר פרוד Fr מוצגים באיור מס' 26. מכאן רואים שהגדלת ה- Δ , ו- Fr נובעים מגידול העומק של השכבה עם מים סביבתיים (מים מתוקים) והקטנה של שכבה עם מים מלוחים. לאחר מכן הגדילו את שטח של הפתחים פי שתיים וחזרו על הניסוי פעם נוספת. התוצאות שהתקבלו מסומנים בצורת משולשים באיור מס' 26. מהגרף ניתן לראות שהגדלת השטח של הפתחים מ- $A^*/\hat{H}^2 = 3.4 * 10^{-3}$ ל- $A^*/\hat{H}^2 = 6.8 * 10^{-3}$ הגביר את ההתרוממות של מישור ניטרלי והקטין את הפרשי צפיפות בין השכבות עבור כל מספר פרוד.



איור מס' 2.6. אפקט של מהירות הרוח על אוורור דחיקה (Linden & Hunt (2001).

2.6 אוורור טבעי במבנים חקלאיים

לאוורור 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 האוורור בוצעו בדרך כלל באמצעות גז נותב (Tracer gas), מספר דוגמאות הן : Bot (1983), de Jong (1990), Fernandez and Bailey (1992), Boulard (1996), Papadakis *et al.* (1996), Kittas *et al.* (1995), Draoui (1995) and. מאמרים אלה התרכזו, בעיקר, בהשפעתם של פרמטרים משתנים, כמו זווית פתיחת החלון, הפרשים בין טמפרטורה פנימית וחיצונית ומהירות הרוח, על מאפייני החלפת האוויר. במאמרם Teitel and Tanny (1999) חקרו את תגובתם בזמן של טמפרטורת האוויר ולחות בתוך החממה בעקבות פתיחתם הפתאומית של פתחי הגג. בעבודתם הם פיתחו מודל תיאורטי עבור תהליכי מעבר באוורור טבעי ואימתו אותו באמצעות ניסויים בחממה בסקאלה ממשית. במחקר שנערך

לאחרונה ע"י Teitel & Tanny (2005) נחקרה השפעת מהירות וכוון הרוח על אוורור טבעי של חממה המאווררת ע"י פתחי גג בלבד. הניסויים נערכו בחוות הבשור בחממה בעלת ארבעה גמלוניס, עם שטח רצפה של כ 960 מ^2 ומרזבים בגובה של 3.9 מ', בה גדלו צמחי פלפל. 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 החיצונית. 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 בקצה האחר. נמצאו פרקי זמן קצרים בהם מתחלפים כווני הזרימה ואז מהירות זרימת האוויר דרך שני קצות הפתח נמוכה מאוד. השינויים בכיווני הזרימה נגרמים בעיקר עקב שינויים בכוון הרוח החיצונית ביחס למבנה.

2.7 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).

נתבונן בחדר עם גובה H אשר מחומם בבסיסו ע"י מקור נקודתי עם שטף חום Q , כפי שמתואר באיור מס' 15. 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)).

2.7.1 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

$h_n - h$ 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 $C = (6\pi\epsilon/5)(9\epsilon/10\pi)^{1/3}$, B היא עוצמת מקור ציפה נקודתי, כפי שהוגדרה במשוואה 20, בעמוד 28, $\epsilon - \epsilon$ 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} :

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

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

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.

2.7.2 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.

(Fitzgerald and Woods (2004) פיתחו משוואה מפורשת עבור מיקום של פאן הביניים הנמצא בין שכבות עליונה ותחתונה. לאחר שמצאו את מיקומו של הפאן הביניים, ניתן מיד לדעת את שטפי הזרימה הנפחיים ואת הטמפרטורה בשכבה העליונה.

2.7.3 רוח המתנגדת לאוורור מושרה ציפה

על מנת לנתח מודל מתמטי עבור השפעת "הרוח", כאשר כיוונה מתנגד לאוורור דחיקה (Linden & Hunt (2004) השתמשו במודל המשורטט באיור מס' 27. נתבונן בשטח סגור בגובה H המאוורר ע"י שני פתחים – עליון, בעל שטח A_w במעלה "הרוח" (לחץ של "הרוח" הוא חיובי), ותחתון ששיטחו A_L , הממוקם במורד "הרוח" (לחץ של "הרוח" הוא שלילי). ההנחות ששמשו בפיתוח מודל תיאורטי הם: מהירות "הרוח" U_{wind} אחידה; מספר ריינולדס של זרימת אוויר סביב המבנה גבוה, כאשר מייצר מפל לחץ בין פתחים במעלה "הרוח" לבין פתחים הנמצאים במורד "הרוח"; החדר מחומם ע"י מקור נקודתי עם מקור ציפה B , הממוקם על הרצפה; זרימת אוויר חם מעל מקור חום מתפתחת כפלומה טורבולנטית, כאשר הפחתת כוח כבידה G'_p וגם שטף נפחי Q_p נתונים ע"י (Morton, Taylor & Turner (1956):

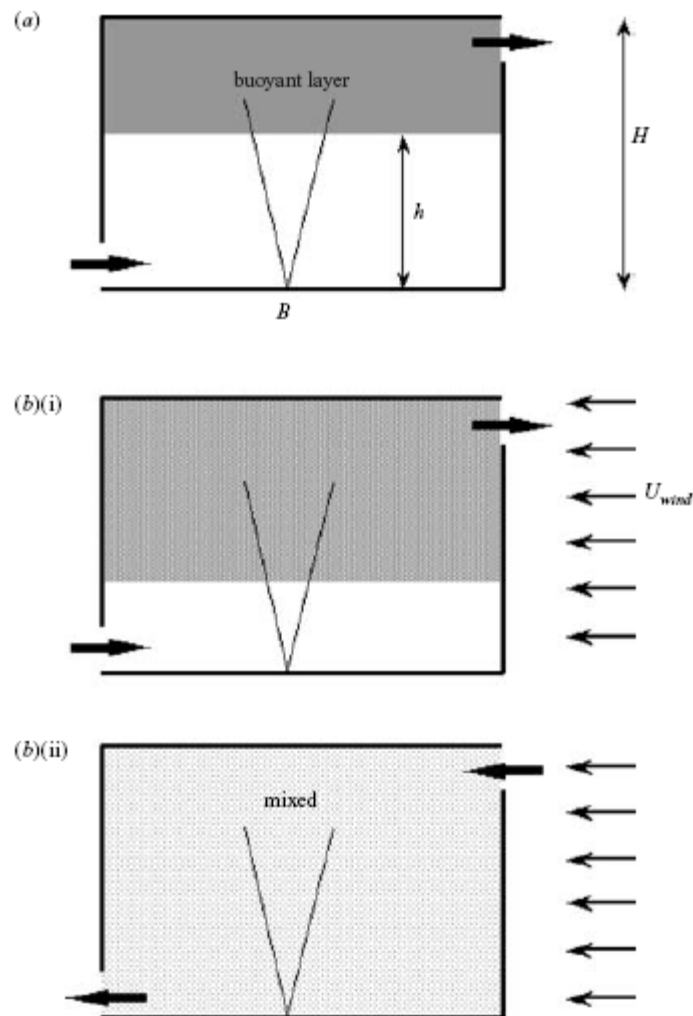
$$(13) \quad G_p'(z, B) = \frac{B^{2/3}}{Cz^{5/3}}$$

$$(14) \quad Q_p(z, B) = CB^{1/3}z^{5/3}$$

כאשר:

C – קבוע הקשור ל- α “top hat” התרוממות של הפלומה, α – מקדם אמפירי של התרוממות הפלומה, נבחר:

$$\alpha = \sqrt{2} \times 0.083 = 0.117, C = \frac{6}{5} \alpha (9\alpha/10)^{1/3} \pi^{2/3}$$



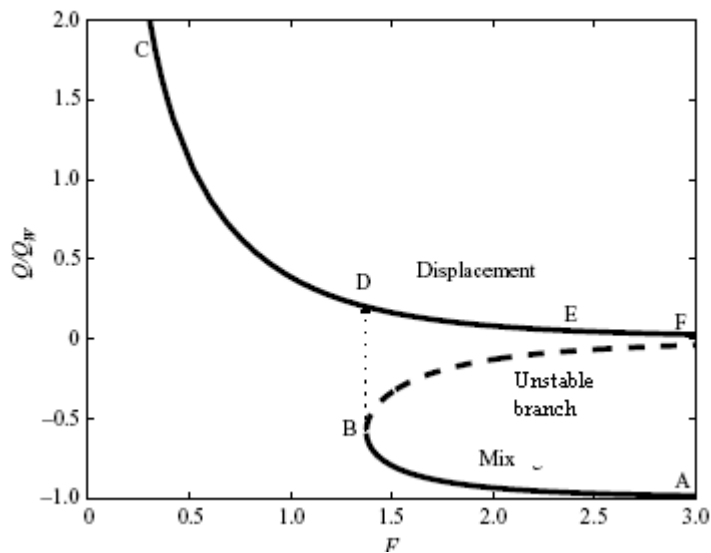
איור סכימתי מס' 27. (a) – אוורור דחיקה של החדר מחומם ע"י מקור חום נקודתי. (b) – מקרה בו רוח מתנגדת לאוורור מושרה ציפה, (i) אוורור דחיקה (עוצמת הרוח נמוכה) ו- (ii) אוורור ערבוב (עוצמת הרוח גבוהה). חשוב לציין שכיווני הזרימה במקרים (i) ו- (ii) הפוכים (Linden & Hunt (2000).

במקרה בו מהירות "הרוח" חלשה, כאשר ריבוד דו-שכבתי נשמר, שטף נפחי Q הוא קבוע ותלוי במפל לחץ Δ של "הרוח" המתנגד לזרימה מושרה ציפה עם שכבה עליונה בעומק $(H - h)$ והפרשי צפיפות ביו השכבות $\Delta\rho$. ניתן להניח שהפרשי צפיפות בין הזורם בתוך שכבה עליונה וזורם סביבתי קטן ביחס לצפיפות של זורם סביבתי ρ , ואז אפשר להשתמש בקרוב Boussinesq.

Linden & Hunt (2004) הגדירו פרמטר F שמתאר את הזרימה, ומייצג את היחס בין מהירות מושרה רוח לבין מהירות מושרה ציפה ושווה:

$$(20) \quad F = \left(\frac{\Delta}{\rho} \right)^{1/2} \left(\frac{A^*}{BH} \right)^{1/3} = Fr \left(\frac{A^*}{H^2} \right)^{1/3}$$

בגרף מס' 28 הוצגו ע"י Linden & Hunt (2004) השטף הנפחי חסר ממד כפונקציה של F עבור אוורור ערבוב ואוורור דחיקה מתמיד. העקומה המתארת את המצב הלא יציב, מתרחשת כאשר שטף זרימה Q קטן וציפה פנימית g' גדולה. הגדלה נוספת של Q מובילה להפסדי החום וכתוצאה מכך g' קטן. במצב בו Q ממשיך לגדול המערכת עוברת לאוורור ערבוב יציב. הקטנה של g' , מקטינה את שטף הציפה ומגדילה את Q וכך g' עוד יותר קטן. בדומה לזה הקטנה של Q מובילה את המערכת לאוורור דחיקה יציב.



איור מס' 28. בגרף מתואר שטף נפחי חסר ממד Q/Q_w כפונקציה של פרמטר F . Linden & Hunt (2004).

במטרה להבין את תופעת מעבר מאוורור ערבוב לאוורור דחיקה נבחר מהירות רוח קבועה בהיעדרות מקור חום ($B=0$). מקרה זה מייצג אוורור ערבוב יציב (ראה איור 27 (ii) (b)), כאשר $Q/Q_w = -1$ (נקודה A באיור מס' 28). ברגע ש-B מתחיל לגדול, F קטן ובשלב מסוים מצב יציב נשבר (עקומה בין נקודות A ו-B).

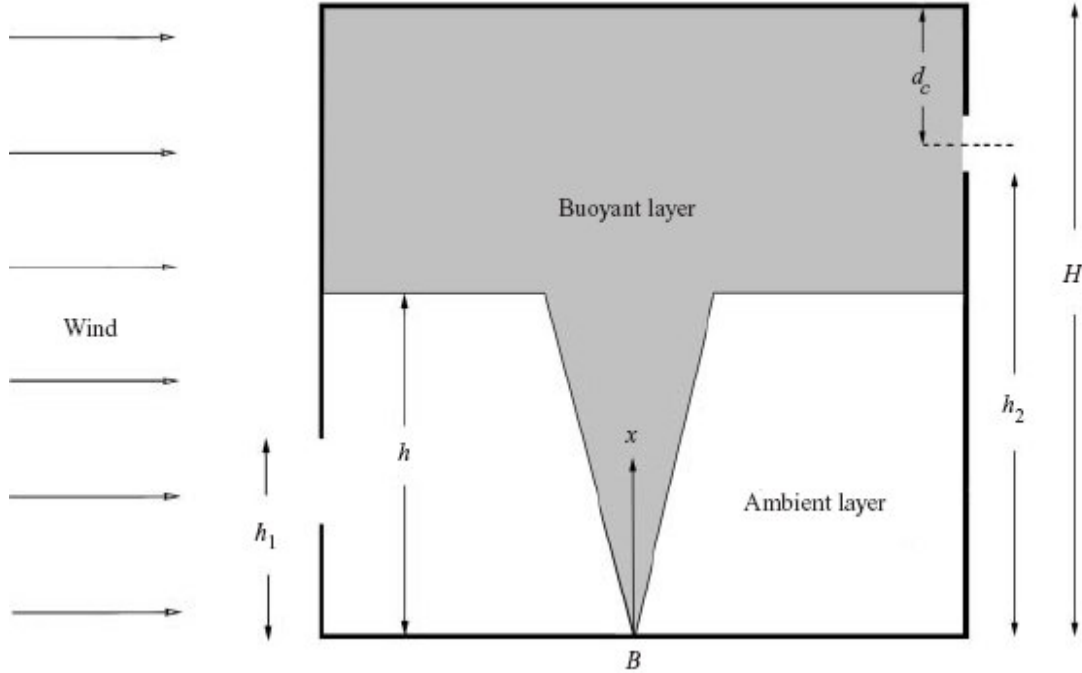
שטף נפחי של ציפה, המתנגד לתנועת הרוח גדל, מכאן נובע ש- $|Q/Q_w|$ קטן. עבור ערך קריטי של B, כאשר $F = F_C$ (נקודה B) הרוח לא מסוגלת לשמור על אוורור ערבוב והמשך הגידול של B מוביל למעבר מאוורור ערבוב לאוורור דחיקה (עקומה בין נקודות B ו-D). כתוצאה מכך כיוון הזרימה בתוך המבנה הופך וגם היחס $|Q/Q_w|$ גדל משמעותית. אם שטף ציפה B עוד יותר גדל, נוצר אוורור דחיקה יציב (ראה איור 27 (i) (b)). (עקומה בין נקודות D ו-C). נקודה C מייצגת מקרה בו $F = 0$.

מאידך גיסא, כאשר שטף ציפה קבוע $B > 0$ ומהירות הרוח שווה לאפס $Q_w = 0$ וגם $F = 0$ (נקודה C באיור מס' 28) מתרחש אוורור דחיקה. נניח שמתחילים להגדיל את מהירות הרוח, כך F גדל, שטף נפחי של הרוח גדל, Q/Q_w קטן ואז אוויר צף מצטבר בתוך המבנה. תופעה זאת מתרחשת כאשר $F > F_C$. עבור ערכים מסוימים של F (נקודה E), התלויים בגיאומטריה של המבנה ושל הפתחים, קורים הפסדי ציפה דרך פתחים תחתונים ומערכת יכולה לעבור לאוורור ערבוב לא יציב. מכיוון שהמצב אינו יציב, המערכת עוברת לאוורור ערבוב יציב (עקומה AB).

2.7.4 רוח המסייעת לאוורור מושרה ציפה

על מנת לחקור מקרה בו רוח מסייעת לאוורור טבעי (Linden & Hunt (2001) בנו מודל, כאשר פתחים תחתונים מוקמו במעלה הרוח (לחץ של הרוח הוא חיובי), ופתחים עליונים הוצבו במורד הרוח (לחץ של הרוח הוא שלילי). שטח של פתחים תחתונים (windward openings) מסומנים כ- a_w , ושטח של פתחים עליונים (leeward openings) - a_L (ראה איור מס' 29). בתוך המבנה על הרצפה מוצב מקור חום נקודתי עם שטף ציפה B, ומרחק אנכי בין מקור חום ותקרה מסומן כ- H. ההנחה העיקרית היא ששטח החתך של המבנה מספיק גדול כך שקירות צדדיים לא מפריעים לעליה חופשית של הפלומה המתפתחת. רוח הנושבת מעבירה לזרם כוח מניע נוסף המגדיל את מפל לחצים Δ בין הפתחים במעלה הרוח לבין הפתחים במורד הרוח. במקרה המתואר לעיל, כאשר פתחים תחתונים הוצבו במעלה הרוח ופתחים עליונים - במורד הרוח, הרוח מסייעת לאוורור דחיקה.

למטרת האנליזה הניחו הנחה נוספת שבתוך המבנה נבנה ריבוד דו-שכבתי, מכיוון שריבוד הזה קיים עבור טווח רחב של מהירויות הרוח ושטפי ציפה. הגדלת הזרימה דרך הפתחים תחת השפעתה של הרוח, גורמת לעליה של פאן הביניים המפריד בין שכבה תחתונה לעליונה, היכן ששטף נפחי של הפלומה שווה לשטף נפחי הנוצר ע"י כוחות ציפה ורוח, והמערכת מגיעה למצב מתמיד חדש. (Linden et al (1990) הציעו שיטה למציאת גובה h של מישור ניטרלי במצב עמיד. הם הניחו שגם פרופיל המהירות וגם פרופיל הצפיפויות בתוך הפלומה בצורת "top-hat"; גובה h – גובה בו שטף נפחי וכוח כבידה מופחתת בתוך הפלומה המתרוממת משתווים עם שטף נפחי דרך פתחים, מונע ע"י שכבה עם זרם ציפה, בעלת הפרש צפיפות $\rho - \Delta\rho$, כפוף למפל לחץ Δ של הרוח.



איור מס' 29. אוורור דחיקה בתוך המבנה; פתחים עליונים ותחתונים מוצבים כך שרוח וכוחות ציפה מחזקים אחד את שני (Linden & Hunt (2001).

הפרש בצפיפות $\Delta\rho$ בין זורם בתוך שכבת ציפה הומוגנית, כאשר צפיפותה ρ , לבין זורם סביבתי הוגדר כקטן ואז ניתן להשתמש בקרוב Boussinesq ונוסחה - $g' = g\Delta\rho / \rho$ מאפיינת כוח כבידה מופחת. עבור מקרה המתוארת באיור מס' 29 שטח האפקטיבי חסר ממד שווה ל-

$$(21) \quad \frac{A^*}{H_2} = \frac{C^{3/2} \xi^{5/3}}{((1 - \xi - d_c / H) / \xi^{5/3} + C Fr^2)^{1/2}}$$

כאשר $\xi = h / H$ - גובה של מישור ניטרלי חסרת ממד.

מספר פרוד שווה ל- $Fr = \sqrt{\frac{\Delta/\rho}{(B/H)^{2/3}}}$ מספר חסר ממד המייצג יחס בין מהירויות רוח ומהירות אוור

מושרה ציפה. כאשר $Fr \ll 1$ כוחות ציפה שולטים באוורור טבעי, ואם $Fr \gg 1$ השפעתה של רוח היא דומיננטית באוורור טבעי. ממשוואה (38) ניתן ללמוד שעבור אוורור טבעי מושרה ציפה ורוח המסייעת לאוורור טבעי, מיקום של מישור ניטרלי תלוי גם בעליית של הפלומה, גם בשטף ציפה B, גם במפל לחץ של רוח Δ וגם בשטח של הפתחים חסר ממד A^* / H^2 . בניגוד לזה, במקרה של אוורור טבעי מושרה ציפה ללא רוח מיקום של מישור ניטרלי תלוי אך ורק בעליית של הפלומה ו- A^* / H^2 . עבור מבנה בגובה H, מנוסחה (38)

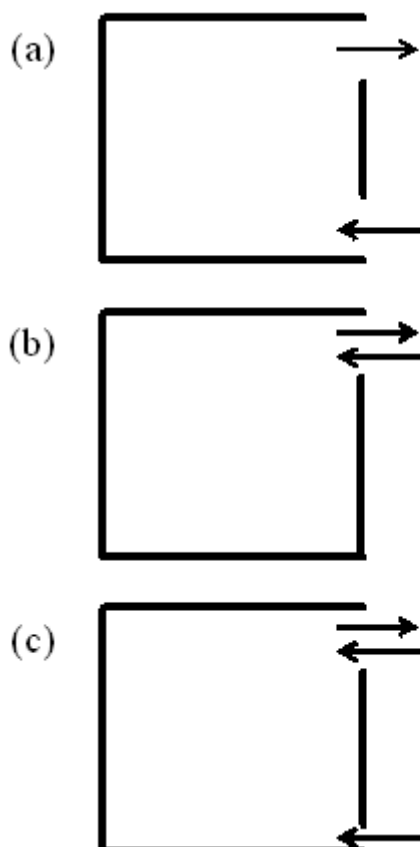
אפשר לסכם שהגדלת מספר פרוד Fr שקול להגדלת מפל לחץ דינאמי בין הפתחים, במילים אחרות, הגדלת מהירות הרוח או הקטנת עוצמת החימום.

3 מטרת הפרויקט

בנושא של חקירת אפקט המשולב של רוח חיצוני והפרשי טמפרטורה נעשו עבודות ע"י Ohba, Irie Kurabuchi & (2001); (2004); Linden & Hunt (2001); Lishman & Woods (2006). רובן התרכזו על מודלים בסקאלות קטנות ועל ניתוחים תיאורטיים, שמאפשרות הבנת המכניזם הפיזיקאלי של התהליך האוורור. לעומת זאת, חקירת האוורור הטבעי בסקאלות גדולות הרבה פחות שכיחה בעיקר עקב קשיים בשמירה על התנאים הרצויים (Xing & Awbi (2002), Howell & Pots (2002)). לאחרונה, Haslavsky (2006) חקר את האינטראקציה בין אוורור ערבוב לבין אוורור דחיקה וגם את התהליך המעבר בין שני אופני אוורור בסקאלות גדולות עם מקור חום נקודתי. בעבודה זו לראשונה הוצג 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. המחקר הזה הראה כי פתיחת הפתח התחתון לגבהים קטנים יחסית מובילה לאינטראקציה בין שני סוגי האוורור הבסיסיים ולהופעתו של אופן אוורור משולב (איור מסי' 30) Haslavsky et.al. (2006).

סקר ספרות מראה שאין מידע על אפקט הרוח על אוורור טבעי מושרה ציפה בסקאלות גדולות, כנראה, עקב קשיים בביצוע של מערכת הניסוי הגדולה, שמירה על תנאים הרצויים, וגם בגלל הקשיים בביצוע סימולציה של הרוח. המטרה העיקרית של הפרויקט הזה למלא את חוסר ידע זה ע"י ביצוע ניסויים על מנת לחקור השפעתה של הרוח על אוורור טבעי מושרה ציפה בסקאלות גדולות. הלימוד מתרכז על אפקט של מהירות הרוח ואופני אוורור מושרה ציפה (גם אוורור דחיקה וגם אוורור הערבוב) על פרופיל אנכי של הפרשי טמפרטורה בין פנים לחוץ המבנה.

בפרויקט הנוכחי נחקרו השפעה של הפעלת מאווררים במהירויות שונות על פילוג טמפרטורה בתוך המבנה בתהליך המעבר וגם במצב עמיד, לאחר 60min, כאשר המערכת התייצבה, עבור אוורור ערבוב ואוורור דחיקה.



איור 30. תיאור סכמאטי של אופני אוורור שונים. a - אוורור דחיקה, b - אוורור ערבוב, c - אופן משולב של אוורור מושרה ציפה (Haslavsky et.al. (2006).

4 תיאור הניסוי

4.1 תיאור מערכת הניסוי והמדידים

הניסויים נערכו במבנה (תא אוורור) עם אורך, רוחב וגובה של 242, 243 ו- 235 ס"מ בהתאמה (איור מס' 31), העשוי ממסגרת של פרופילי ברזל. הקירות בנויים מלוחות עץ בעובי 1 ס"מ המבודדות תרמית בעזרת לוחות קלקר (Styrofoam plates) בעובי 5 ס"מ. הבידוד התרמי נועד למנוע איבודי חום דרך הקירות ולקרב 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 15 ס"מ מעל הרצפה בעזרת רגליות על מנת לבדוד 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 חיצונית וקרינת שמש (איור מס' 33).

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' 31). 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-

$$B = \frac{g\alpha W}{\rho c_p}$$

(34)

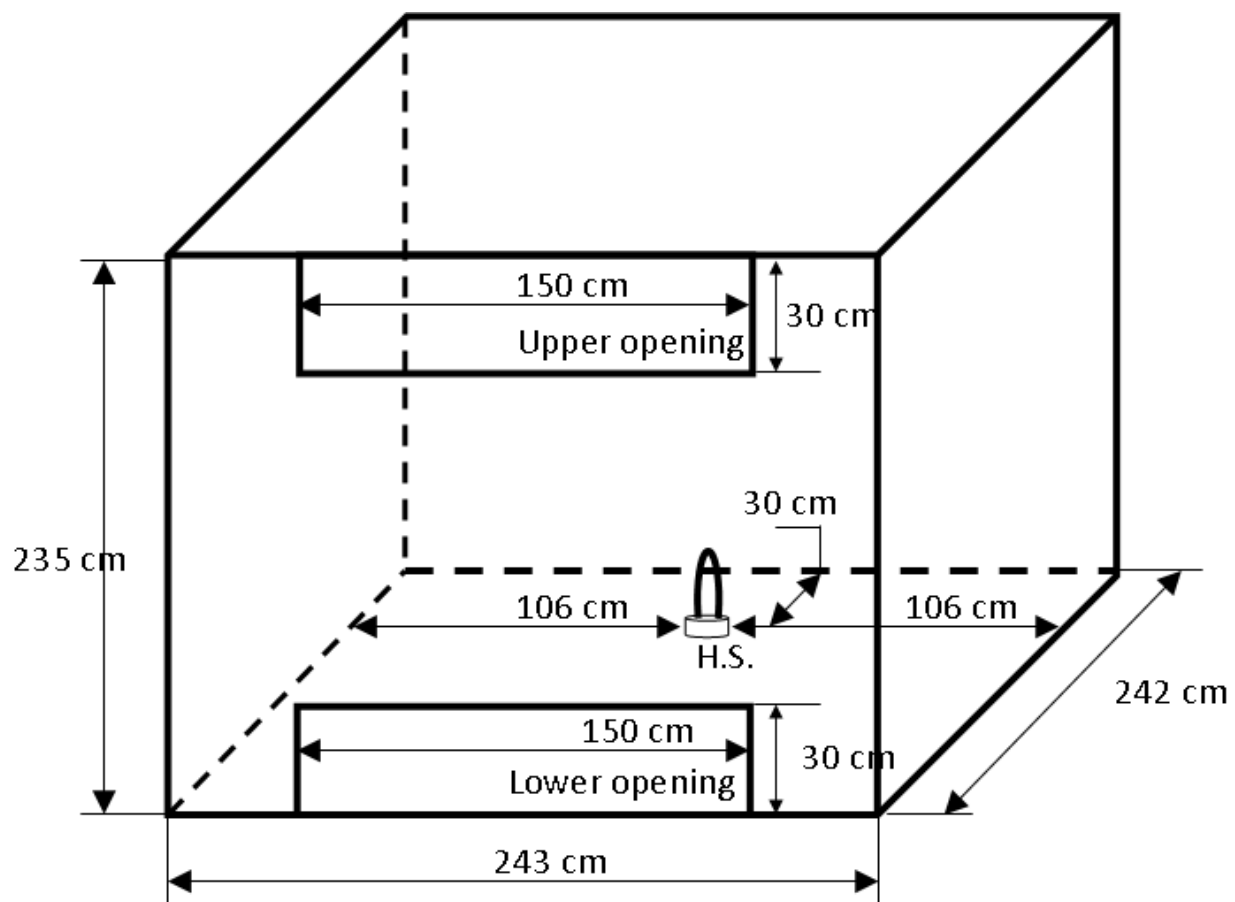
כאשר W הוא ההספק החשמלי של מקור החום.

11 חיישנים מסוג צמד תרמי (thermocouples), העשויים מנחושת-קונסטנטן (סוג T, דיוק של $\pm 0.75^\circ\text{C}$, קוטר הצומת בערך 0.25 מ"מ, קבוע הזמן 1.5 שניות), מדדו את פילוג הטמפרטורה האנכי במרכז החדר (איור מס' 32). 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 וחיסורם של הטמפרטורה הממוצעת הזו מקריאתם של כל אחד ואחד מצמדים התרמיים הפנימיים. בדרך זו, הוצג בפרויקט פרופיל אנכי של הפרשי טמפרטורה בין פנים לחוץ למבנה. מכיוון שקיים ריבוד תרמי יציב של הסביבה מחוץ למבנה, כתוצאה מטמפרטורת סביבה גבוהה, בתוצאות נתקבלו, לפעמים, ערכים שליליים של הפרשי טמפרטורה. כל חיישני הטמפרטורה היו מצופים זהב למניעת השפעות קרינה ישירה על המדידות (ראה פרק מס' 4.1.2).

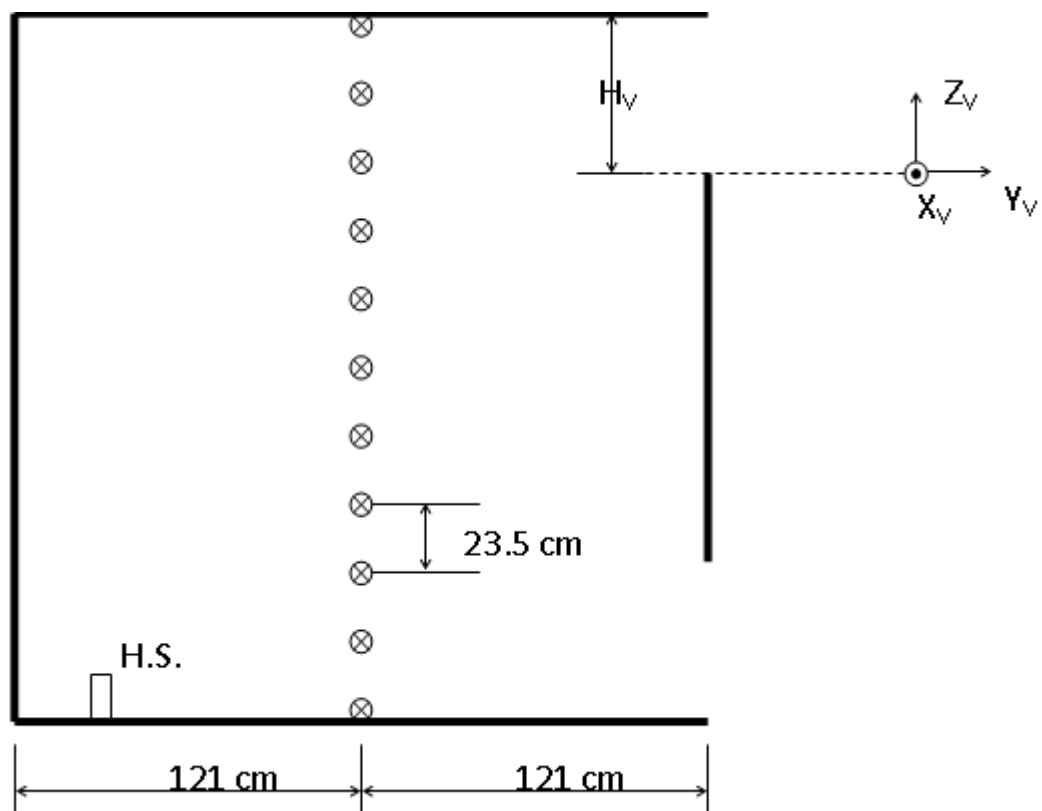
על מנת לחקור את אוורור טבעי מושרה רוח, הניסויים כללו רוח נושבת, שמופעלת בעזרת מפוחים, והפעלת גוף חימום (מקור ציפה) בו-זמנית. גנראטור היה מורכב מארבעה מפוחים (1.37m) המסודרים בתוך תבנית 2x2, כפי שמראה באיור מס' 33 שהוצבו לצד החדר. מהירות הסיבוב של המאווררים ניתנת הייתה לשליטה ע"י שינוי תדירות. כדי להשיג זרימת "רוח" הומוגנית, לפני המאווררים הוצבה רשת העשויה מצינורות PVC (קוטר של הצינורות 5cm). מחולל הרוח הוצב במרחק 4m מהמבנה, כך שהרוח נשבה בכיוון המקביל לקיר המבנה עם הפתחים. מדידות פרופיל האנכי של מהירות הרוח מראה שהוא לא אחיד. לכן, כדי לבדוק את מהירות "הרוח" המגיע לגובה של פתח העליון הוצב מד מהירות (hot wire anemometer-Model 8745, TSI) רב כיווני במרחק 1m לפני המבנה ובגובה של פתח העליון. על מנת ללמוד את אפקט הרוח על האוורור הטבעי מושרה ציפה נקלטו נתונים בתהליך המעבר ובמצב מתמיד גם עבור אוורור דחיקה וגם עבור אוורור ערבוב. מקור החום סיפק עוצמה קבועה – W 500.

4.1.1 מהלך הניסוי

תחילה נבחר אופן האוורור – ערבוב או דחיקה. באוורור ערבוב נשאר פתוח רק הפתח העליון והפתח התחתון נסגר. באוורור דחיקה שני הפתחים היו פתוחים. גוף החימום הופעל בהספק של 500W והטמפרטורה בחדר ומחוצה לו החלו להימדד. החימום (ללא רוח) נמשך כ – 5 שעות עד שנראה שאין שינויים משמעותיים בטמפרטורות בחדר, כלומר האוורור בחדר הגיע למצב מתמיד. אז הופעל מחולל הרוח במהירות של 1 m/s או 2 m/s. המעקב אחרי הטמפרטורות בחדר נמשך גם בשלב המעבר וגם במצב המתמיד החדש שנוצר עם הרוח.

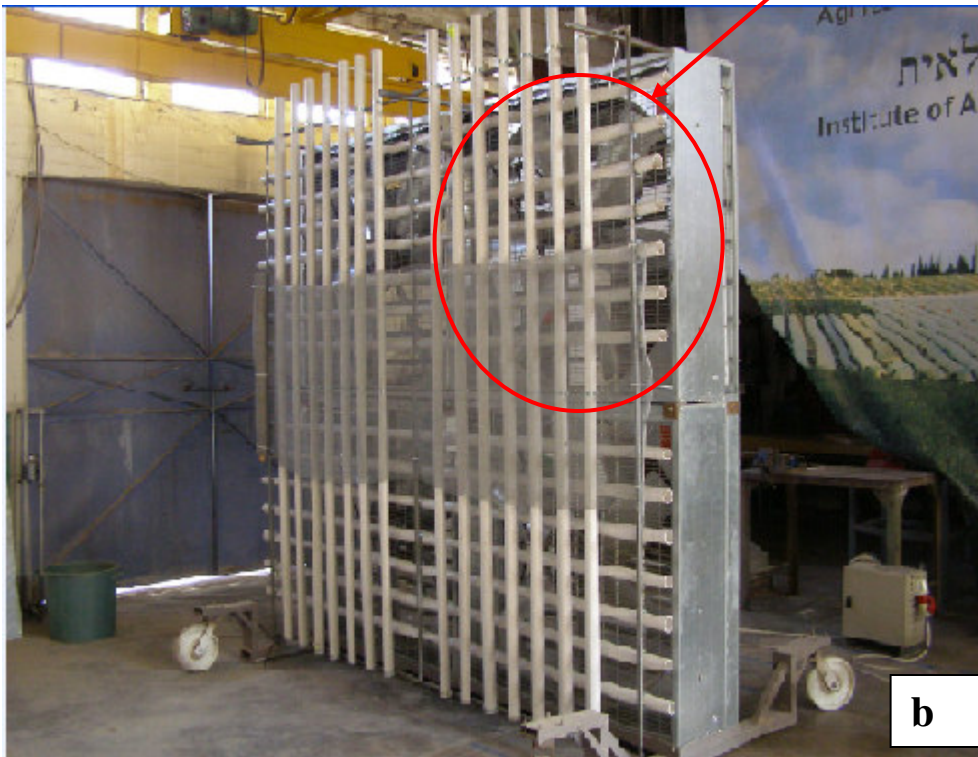
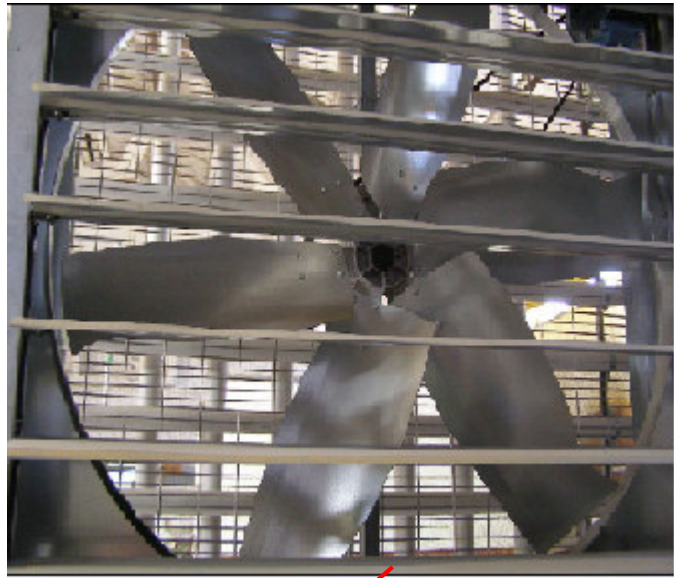


איור 31. חדר הניסויים - מידות כלליות.



איור 32. פריסת חיישני טמפרטורה (⊗) לגובה בתוך החדר.





איור מס' 33. (a) - צילום כללי של מערכת הניסוי. הצגתו של מחולל, הכולל את 4 מאווררים (צד ימין) ומבנה הניסוי (צד שמאל). מערכת הניסוי ממוקמת באולם גדול של מכון למחקר החקלאי, ARO. אוויר נושב מימין לשמאל. (b) - צילום של מחולל.

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 חיישני טמפרטורה או חוטי תרמוקפלים, נוצרת בחדר זרימת הסעה טבעית משנית מפריטים אלו ולא ניתן לומר כי החדר מאופיין ע"י מקור חום נקודתי יחיד. לפיכך הייתה חשיבות רבה למזעור חימום הקירות והפריטים הנוספים ע"י קרינה ישירה 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 צמדים תרמיים וגוף החימום צופו ברדיד אלומיניום (איור מס' 33). 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. בחלק מהניסויים הוכנסו שלושה צמדים 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.

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:

$$e_{non-black} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (35)$$

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

כמו כן, בכל גוף תמיד מתקיים המאזן הבא:

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (36)$$

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:

$$\epsilon(T) = \alpha(T) \quad (37)$$

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



איור 34. תצלום פנים החדר - כל הקירות וכבלים חשמליים צופו ברדיד אלומיניום. בעיגול אדום מסומן אחד מחיישני טמפרטורה, במלבן אדום מסומן גוף חימום.

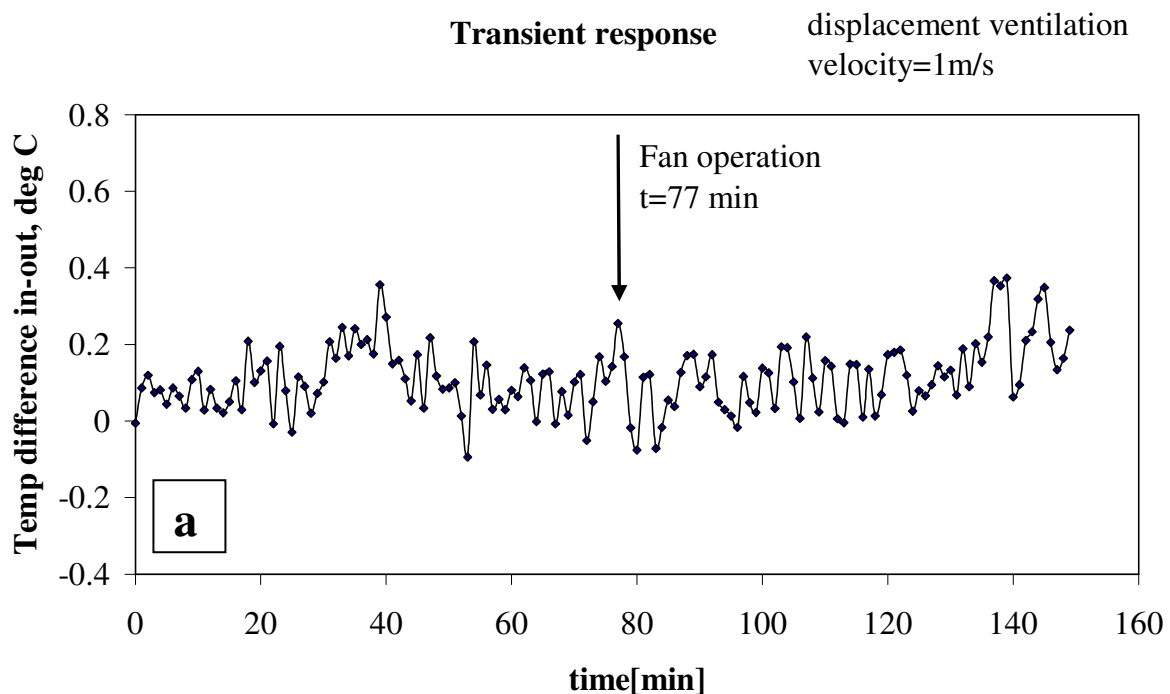
קרינה ישירה עלולה גם להשפיע על חיישני הטמפרטורה ולכן, כפי שהוראה בעבודה של Haslavsky et.al. (2006), צופו החיישנים בזהב (אמיסיביות של 0.03 -) אשר מונע חימום החיישן עקב קרינה מגוף החימום. מדידות שנערכו ע"י Haslavsky et.al. (2006) הראו שאכן ציפוי הקירות ברדיד אלומיניום וציפוי חיישני הטמפרטורה בזהב הפחיתו באופן משמעותי את השפעת הקרינה.

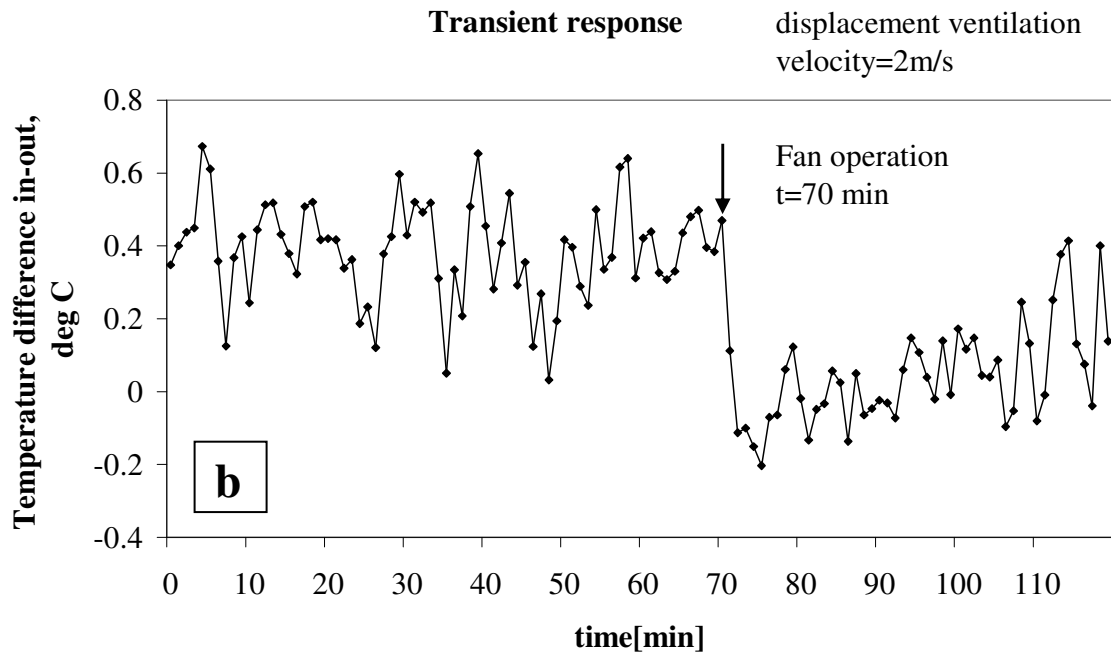
5. תוצאות

תוצאות חולקו לשני חלקים: בחלק ראשון מתוארים הפרשי טמפרטורה בין פנים לחוץ המבנה בתהליך המעבר, בעוד שחלק השני מתרכז במצב המתמיד סופי. בניסויים נחקרו שני אפקטים: 1 – אפקט של מהירות הרוח, 2 – אפקט של אופני האוורור (אוורור דחיקה, אוורור ערבוב). בגרפים מוצגים גם הפרשי טמפרטורות ממוצעים וגם פילוגים אנכיים של הפרשי הטמפרטורות.

5.1 הפרשי טמפרטורה בתהליך המעבר

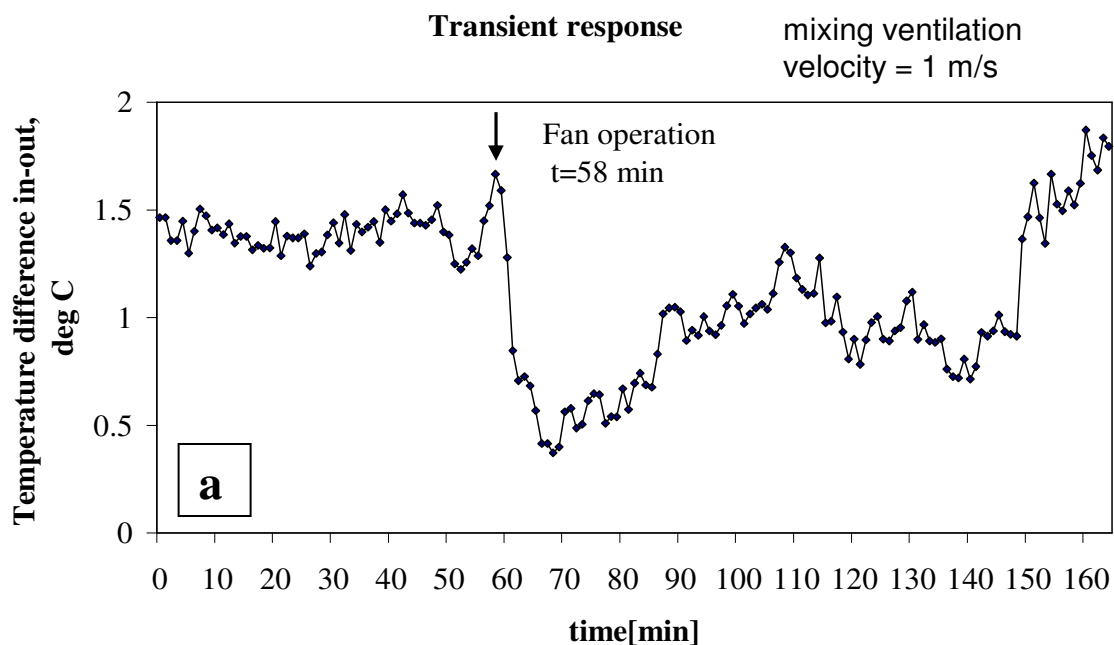
הפרשי טמפרטורה בין פנים החדר לסביבה חושבו ע"י מיצוע הקריאות של 6 צמדים תרמיים חיצוניים וחיסורה של הטמפרטורה הממוצעת הזו מקריאתם של כל אחד ואחד מצמדים התרמיים הפנימיים. איור מס' 36 (a) מראה את תגובת הפרשי טמפרטורה בזמן בין פנים החדר לסביבה בתוך החדר והשפעתו הפעלת "רוח" במהירות 1m/s עבור אוורור דחיקה. מכאן ניתן לראות שאין השפעת "הרוח" על הפרשי טמפרטורה בתוך החדר. למרות זאת, בוצעו אותם ניסויים עבור מהירות "הרוח" 2m/s ובאיור מס' 36 (b) ניתן לראות נפילה משמעותית בהפרשי טמפרטורה מיד לאחר הפעלת הרוח, שמציינת על הגברת האוורור. בפירוט, עבור אוורור הדחיקה נפילה מיידיית של הפרשי טמפרטורה, כאשר מהירות הרוח 1m/s , הייתה כמעט אפס, וכאשר מהירות הרוח 2m/s , נפילה בטמפרטורה הייתה 0.569°C .

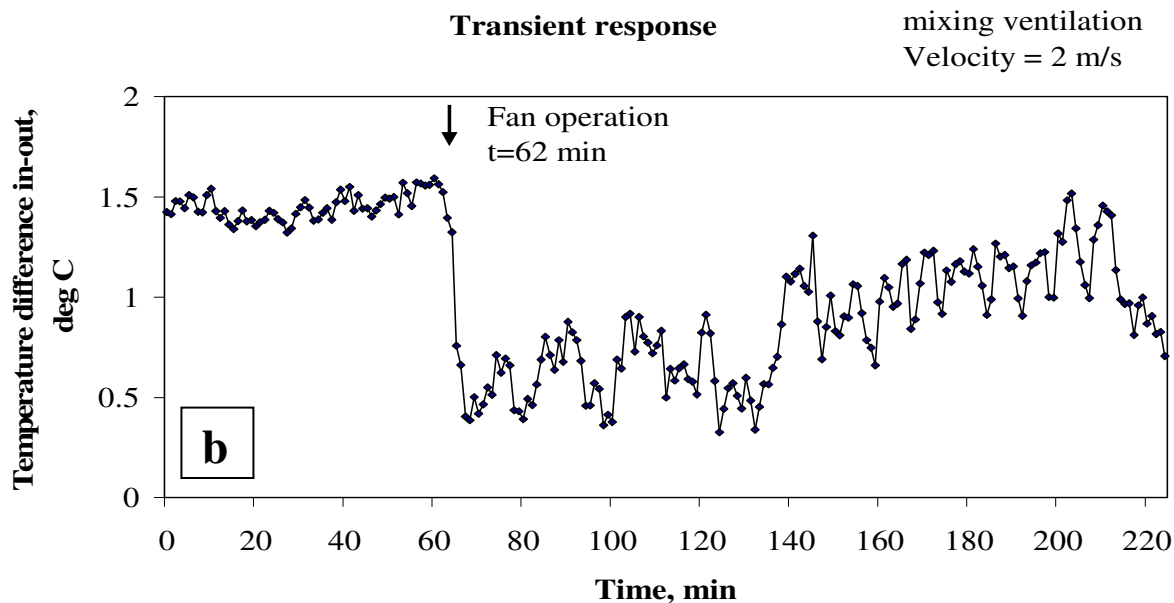




איור מס' 36. שינוי הפרשי טמפרטורה בזמן בין פנים לחוץ המבנה (אוורור דחיקה). (a) – מהירות הרוח 1m/s, זמן הפעלת מחולל הרוח t = 77min, (b) – מהירות הרוח 2 m/s, זמן הפעלת המחולל t = 70min.

בדומה לניסויים המתוארים לעיל בוצעו בדיקות עבור אוורור ערבוב. איור מס' 37 מראה את תוצאות שנתקבלו כאשר מהירות הרוח שווה 1m/s ו- 2m/s בהתאמה. מהתוצאות המתקבלות רואים השפעה ניכרת של הרוח על הפרשי טמפרטורה בין פנים לחוץ למבנה בשתי מהירויות הרוח. נפילה בטמפרטורה הייתה $0.96^{\circ}C$ (במהירות הרוח 1m/s), ו- $1.14^{\circ}C$ (כאשר מהירות הרוח 2m/s). מכאן ניתן להגיע למסקנה שהשפעת הרוח על אוורור טבעי מושרה ציפה יותר משמעותית עבור אוורור הערבוב מאשר לערבוב דחיקה.

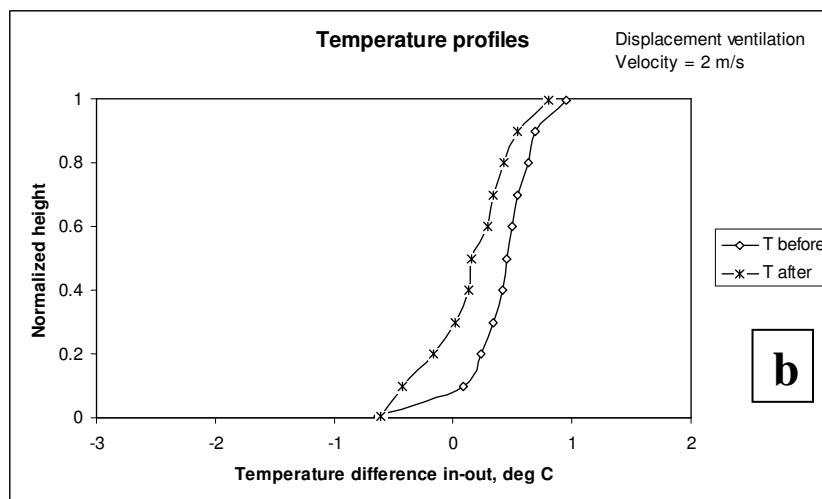
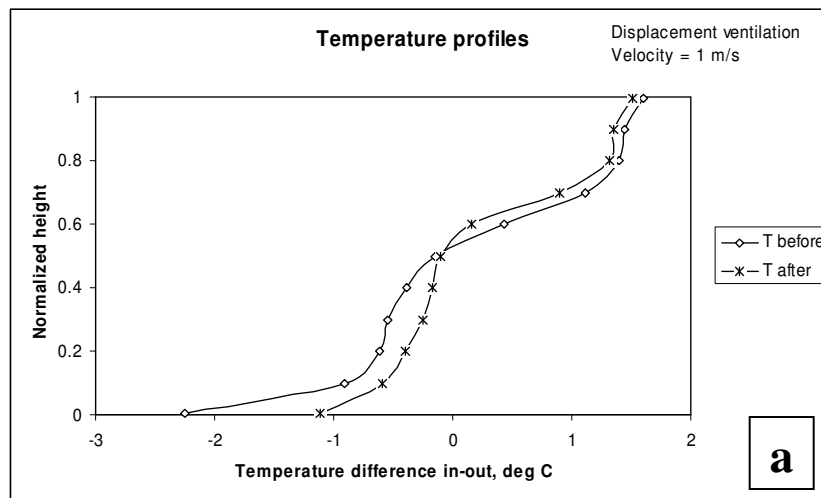




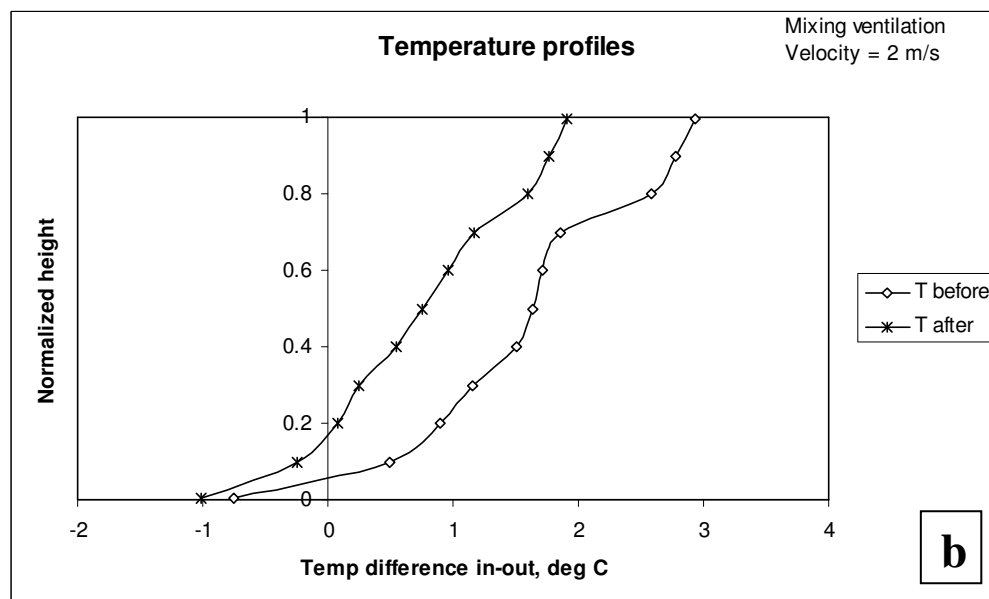
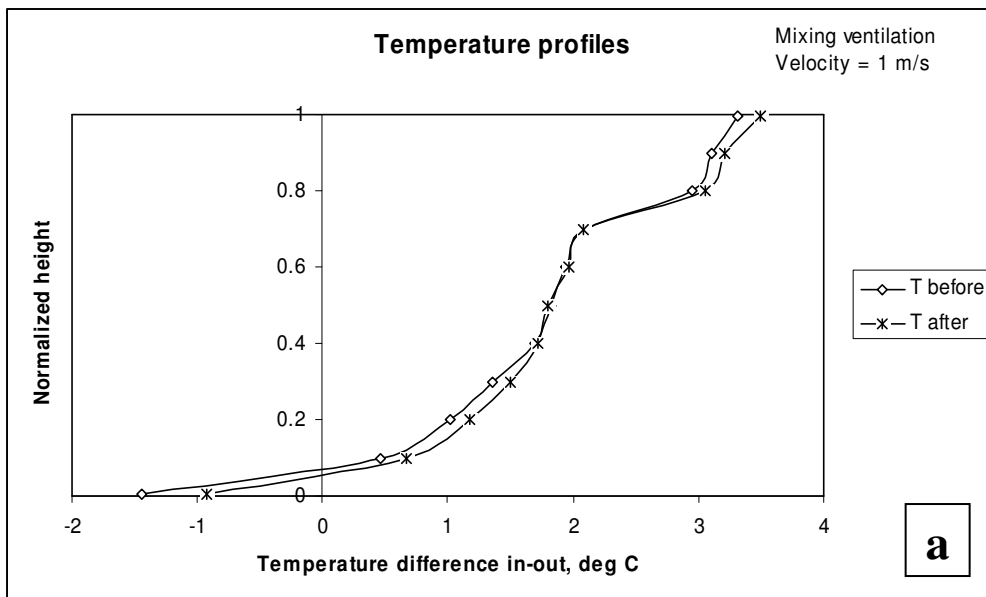
איור מס' 37. שינוי הפרשי טמפרטורה בזמן בין פנים לחוץ המבנה (אוורור ערבוב). (a) – מהירות הרוח 1m/s, זמן הפעלת מחולל הרוח $t = 58$ min, (b) – מהירות הרוח 2 m/s, זמן הפעלת מחולל הרוח $t = 62$ min.

5.2 הפרשי טמפרטורה ממוצעים במצב מתמיד

פרק זה דן בפרופיל האנכי של הפרשי טמפרטורה בין פנים לחוץ המבנה במצב מתמיד. נמדד פרופיל טמפרטורה לפני הפעלת מאווררים, המסומן באיורים מס' 38 ו- 39 כ- "before" (ללא רוח), עבור שני אופני זרימה (אוורור ערבוב, אוורור דחיקה) לאחר 5 שעות פעולה ללא רוח, כאשר מערכת התייצבה. פרופיל, המסומן באיורים מס' 36 ו- 37 כ- "after", מציין פרופיל טמפרטורה לאחר 60 min של הפעלת מאווררים וכשהמערכת הגיעה למצב מתמיד חדש. ה גרפים באיור מס' 38 (a) ו- 38 (b) מייצגים פרופיל טמפרטורה עבור אוורור דחיקה, כאשר מהירות הרוח שווה 1m/s (a), ו- 2m/s (b). בגרפים באיור 39 (a) ו- 39 (b) ניתן לראות את התוצאות המתקבלות עבור אוורור ערבוב, כאשר מהירות הרוח שווה 1m/s (a), ו- 2m/s (b) בהתאמה.



איור מס' 3.8. פרופיל אנכי של הפרשי טמפרטורה בין פנים לחוץ למבנה עבור אוורור דחיקה, לפני (diamonds) ו-60min אחרי (asterisk) הפעלת מאווררים. (a) – מהירות הרוח 0.1m/s. (b) – מהירות הרוח 0.2m/s.

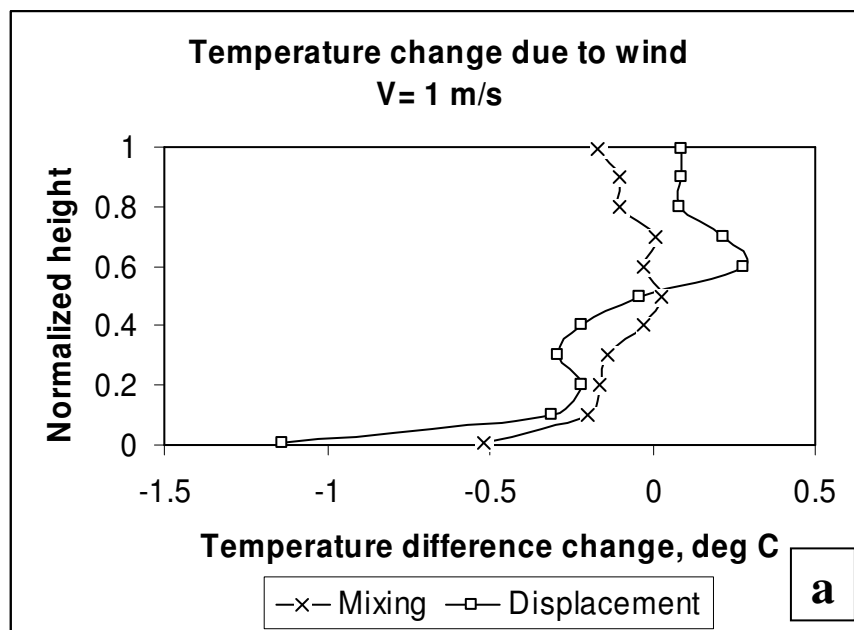


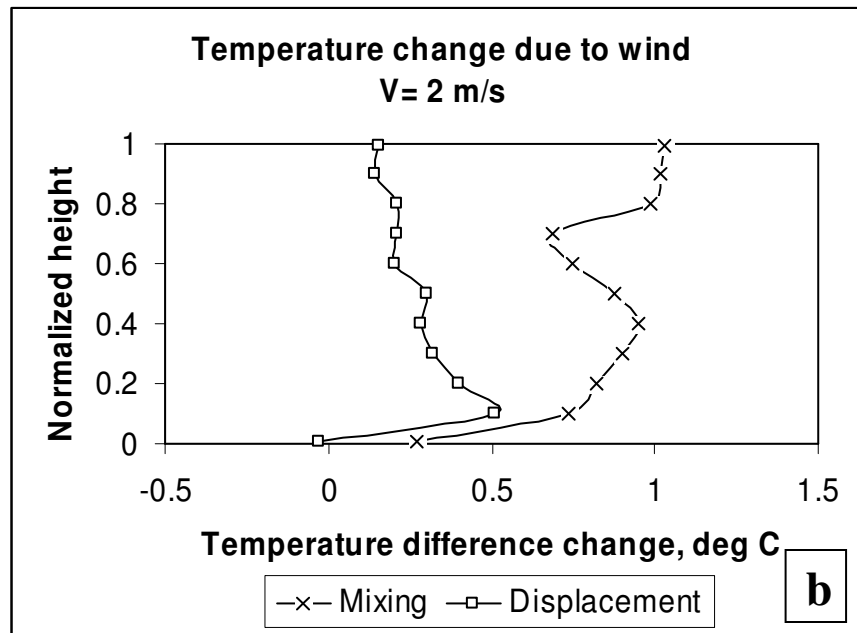
איור מס' 39. פרופיל אנכי של הפרשי טמפרטורה בין פנים לחוץ למבנה עבור אוורור ערבוב, לפני (diamonds) ו- 60min אחרי (asterisk) הפעלת מאווררים. (a) – מהירות הרוח 1m/s. (b) – מהירות הרוח 2m/s.

מהגרפים (38 ו - 39) ניתן לסכם שעבור שני אופני האוורור (אוורור ערבוב, אוורור דחיקה) אפקט הרוח הנעה במהירות 1m/s על פרופיל טמפרטורה מאוד חלש, מכיוון שפרופיל הטמפרטורה כמעט לא השתנה ודומה לפרופיל ללא רוח. בניגוד לכך, במקרה בו המהירות הרוח שווה - 2m/s, השפעתה על אוורור מושרה ציפה

משמעותי, במיוחד, עבור אוורור הערבוב. רואים באיור b39 כי הפרש טמפרטורה בין פנים לחוץ המבנה הרבה יותר קטן מאשר ללא רוח וזה נצפה בכל הגבהים שנמדדו בחדר. התוצאות האלו מרמזות על העובדה הידועה שעבור מהירויות רוח קטנות מנגנון הציפה הוא דומיננטי בתופעות אוורור טבעי, ואילו עבור מהירויות גדולות יותר – מנגנון הרוח הוא השולט.

דרך אחרת לבחון את אפקט הרוח על שני אופני אוורור היא לבדוק את שינוי פרופיל טמפרטורה עקב רוח. איורים מס' 40 (a) ו- 40 (b) מראים פרופילי טמפרטורה כאשר מהירות הרוח 1m/s ו- 2m/s. כל עקומה מייצגת הבדל בין 2 עקומות מאיורים 38 (a) ו- 38 (b), 39 (a) ו- 39 (b). מהגרפים ניתן ללמוד שעבור מהירות הרוח 1m/s (איור מס' 39 (a)) אין שינויים גדולים בין שני אופני אוורור (ערבוב ודחיקה) והפרשי טמפרטורה ממוצעים (ממוצע לגובה של המבנה) היו שווים ל- $0.13^{\circ}C$ בשני מקרים. במילים אחרות, השפעתה של הרוח על הפרשי טמפרטורה מאוד חלשה. אולם, במהירות 2m/s, עבור אוורור הערבוב (איור מס' 39 (b)) הפרש טמפרטורה ממוצע היה $-0.82^{\circ}C$ – שמשמעותי יותר בהשוואה לאוורור הדחיקה, שם הפרש טמפרטורה ממוצע היה $-0.24^{\circ}C$.





איור מס' 40. פרופיל אנכי של שינוי בהפרשי טמפרטורה בין פנים לחוץ החדר כתוצאה מהפעלת הרוח. אוורור ערבוב מסומן כ- x, אוורור דחיקה מסומן כ- ריבוע. (a) – מהירות הרוח 1m/s. (b) – מהירות הרוח 2m/s.

6 סיכום ומסקנות

בעבודה זו לראשונה נבדקה השפעת הרוח על אוורור טבעי מושרה ציפה בחדר בסקלה גדולה עם שני פתחי אוורור אנכיים. בשלב ראשון נלמדו הפרשי טמפרטורה בין פנים לחוץ המבנה בתהליך המעבר, בעוד שהחלק השני מתרכז על מצב מתמיד סופי. תוצאות הניסויים מראות, כצפוי, שככל שמהירות הרוח גדולה יותר, כך השפעתה על פרופיל טמפרטורה יותר משמעותית, אולם, האפקט של הרוח תלוי גם באופני אוורור מושרה ציפה: עבור אוורור דחיקה שינוי בהפרשי טמפרטורה היה קטן לעומת אוורור ערבוב. תוצאה זו משקפת את העובדה הידועה (Haslavsky et al. 2006) שאוורור דחיקה יותר אפקטיבי לסילוק חום או פינוי מזהמים, מזיקים ומרכיבים אחרים מהמבנה ואז תוספת רוח כמעט לא משפיעה על תופעת האוורור. לכן, עבור המקרה בו כיוון הרוח הוא במקביל לקיר עם הפתחים, תרומת הרוח באוורור דחיקה פחות משמעותית מאשר עבור אוורור ערבוב. מכאן ניתן לסכם, שעבור אוורור ערבוב, אדריכלים מתכננים צריכים לשים לב כדי לבחור מיקום הפתחים כך שתהיה אפשרות של תרומת אפקט הרוח.

התוצאות מדגימות כי תרומת הרוח ביחס לתרומת ציפה, חשובה יותר באוורור ערבוב. Linden & Hunt (2001) הגיעו למסקנה שחשיבות יחסית של כוחות ציפה וכוחות רוח באוורור טבעי ניתן לאפיין ע"י

$$\text{פרמטר חסר ממד} - \text{מספר פרוד} : Fr = \sqrt{\frac{\Delta/\rho}{(B/H)^{2/3}}} \quad \text{כאשר:}$$

Δ - מפל הלחץ

ρ - צפיפות אוויר

g - תאוצת כוח כבידה

α - מקדם התפשטות התרמית

ΔT - הפרש טמפרטורה בין פנים לחוץ המבנה

H - מרחק אנכי בין אמצע גובה של פתח עליון לבין פתח תחתון

את מקדמי הלחץ של הרוח בחרנו מ – ASHRAE ובעזרתם חישבנו ערכים של מפלי הלחץ בין אזורי כניסת ויציאת האוויר עבור שני אופני אוורור ומהירויות 1 m/s – 2 m/s. התוצאות המתקבלות של מס' פרוד עבור אוורור ערבוב הן 4.8 (מהירות הרוח 1 m/s) ו- 15.2 (מהירות הרוח 2 m/s) ועבור אוורור דחיקה הן 3.6 (מהירות הרוח 1 m/s) ו- 9.3 (מהירות הרוח 2 m/s). מכאן רואים, שערכי מס' פרוד יותר גדולים עבור אוורור ערבוב, שמצביעים על השפעה ניכרת של הרוח במקרה זה.

הניסויים הנוכחים לוקחים בחשבון רוח מלאכותית שנוצרה ע"י מאווררים. בניגוד לרוח טבעית, זרימת אוויר בעזרת מאווררים היא חד כיוונית, עם מהירות זרימה קבועה ועם פרופיל מהירות מסוים, לאו דווקא דומה לפרופיל הלוגריתמי עבור רוח טבעית. לכן, לא ניתן ליחס באופן כמותי את התוצאות הכמותיות שהתקבלו בניסויים לבעיות אמיתיות של אוורור טבעי עם רוח. תוצאות הניסויים האיכותיות, אנו מאמינים, נכונות גם תחת תנאים אמיתיים של רוח.

ASHRAE, 1997. Handbook, Fundamentals.

B.J. Bailey, Constraints, limitations and achievements in greenhouse natural ventilation, *Presented at Int. ISHS Symp. Greenhouse Techniques towards the 3rd Millenium, Haifa, Israel*, 5-8 Sept, 1999.

Batchelor, G. K. 1967 An Introduction to Fluid Dynamics. *Cambridge University Press, Cambridge*.

Bot, G.P.A., 1983. Greenhouse climate from physical processes to a dynamic model. *Ph.D. Thesis, University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands*.

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.

De Jong, T., 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouses. *Ph.D. Thesis, Agricultural University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands*.

Fernandez, J.E. and Bailey, B.J., 1992. Measurements and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 229-245.

Fitzgerald SD, Woods AW. Natural ventilation of a room with vents at multiple levels. *Building and Environment* 2004; 39: 505-521.

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.

Holman, J. P. 1989. *Heat Transfer*, McGraw-Hill.

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.

R.P. Hoxey, P. Moran, Full scale wind pressure and load experiments-Multispan 167x111 m glasshouse (Venlo), *Divisional note 1594, AFRC Institute of Engineering Research, Wrest Park, Silsoe*, Bedford, January, 1991.

Hunt G. R. and Linden, P. F. Laboratory modeling of natural ventilation flows driven by the combined forces of buoyancy and wind. In *Proc. CIBSE National Conference*, October 1997, vol. 1, pp. 101-107.

- Hunt, G. R. and Linden, P. F.** 2001 Steady-state flows in an enclosure ventilated by buoyancy forces assisted by wind. *Journal of Fluid Mechanics*, 426, pp. 355-386.
- Hunt, G. R. and Linden, P. F.** 2004. Displacement and mixing ventilation driven by opposing wind and buoyancy. *Journal of Fluid Mechanics*, 527, pp. 27-55.
- 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.
- Kozai, T., Sase, S. and Nara, M.,** 1980. A modeling approach to greenhouse ventilation control. *Acta Horticulturae*, 106, 125-136.
- 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.
- Linden, P. F.** 1999. The fluid mechanics of natural ventilation. *Annual Rev. Fluid Mech.*, 31, pp. 201-238.
- Lishman, B. and Woods, A. W.** 2006. The control of naturally ventilated buildings subject to wind and buoyancy. *Journal of Fluid Mechanics*, 557, 451-471.
- Mahajan, Bal M.,** 1987. Measurement of interzonal heat and mass transfer by natural convection. *Solar Energy*, Vol. 38, No 6, pp.437-446.
- 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.
- Ohba, M., Irie, K., Kurabuchi, T.** (2001), Study on airflow characteristics inside and outside a cross-ventilation model, and ventilation flow rates using wind tunnel experiments, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, pp 1513–1524
- 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.
- 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.
- Shang X-D, Xia K-Q.** Scaling of the velocity power spectra in turbulent thermal convection. *Physical Review E*, 2001; 64(6): 065301(4). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, pp 1513-1524.
- Tanny J., Shtein I., Nedelko M., Regev R., Teitel M.** (2007). The effect of external wind on buoyancy – induced natural ventilation of a full – scale enclosure. *Roomvent, Helsinki, Finland*.

Teitel, M. and Tanny, J. (1999). Natural Ventilation of Greenhouses: Experiments and Model, *Agricultural and Forest Meteorology*, 96, pp.59-70.

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.

Ward-Smith, A. J. 1980 Internal Fluid Flow - the Fluid Dynamics of Flow in Pipes and Ducts. Clarendon.

Xing H, Awbi HB. Measurement and calculation of the neutral height in a room with displacement ventilation. *Building and Environment* 2002; 37: 961-967.

Experiments on the effect of external wind on buoyancy-induced natural ventilation of a full-scale enclosure

Ilona Shtein

Experiments have been carried out to study the effect of external air flow on the temperature difference between inside and outside of a naturally ventilated full scale. The enclosure was located inside a large hall to minimize undesired effects of external wind and solar radiation. The enclosure was made of wooden plates with two vertical openings cut at high and low levels on one of the sidewalls. Buoyancy was generated by a localized electrical heater installed on the floor of the enclosure. Vertical temperature profiles were measured inside and outside of the enclosure using gold-plated fine-wire thermocouples. Wind was generated by a 4-fan facility which delivered air flow at a constant speed in a direction parallel to the openings plane. Results show that increasing the wind speed caused an increased reduction in the temperature difference, i.e., improved the ventilation, as expected. It was also shown that the effect of wind was more pronounced in mixing rather than in displacement ventilation. In particular, air speed of 2 m/s caused an average temperature change due to wind of 0.82°C in mixing ventilation and only 0.24°C in displacement ventilation. Thus the assistance of the wind in ventilating the enclosure is more pronounced in mixing than in displacement ventilation.