

דו"ח מדעי מסכם: 459-4298-10

חקירת מיקרו אקלים בחממה מצוננת – מודל סימולציה ומדידות

Investigation of climatic conditions in cooled greenhouses - simulation model and measurement

מוגש לקרן מדען ראשי משרד החקלאות

ע"י

| | |
|----------------|--|
| אלכסנדר שקליאר | המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן |
| אברהם ארבל | המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן |
| יוסי טנאי | המכון לקרקע ומים, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן |
| שבתאי כהן | המכון לקרקע ומים, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן |
| מרדכי ברק | המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן |
| גיא לידור | המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן |
| אשר לוי | המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן |
| רומן בריקמן | המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן |
| אברהם גרווה | המכון לקרקע ומים, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן |

A. Shklyar, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: shklyar@agri.gov.il

A. Arbel, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: arbel@agri.gov.il

J. Tanny, Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: tanai@agri.gov.il

S. Cohen, Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: vwshep@agri.gov.il

M. Barak, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan.

G. Lidor, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan.

A. Levi, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan.

R. Brikman, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan.

A. Grava, Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan.

אוגוסט 2010

אלול תש"ע

הממצאים בדו"ח זה הנם תוצאות ניסויים ואינם מהווים המלצות לחקלאים

חתימת החוקר

תקציר

הצגת הבעיה – תכנון מערכות בקרת אקלים בחממות (ומערכות הבקרה הנלוות) בפרט ומבנים חקלאיים בכלל, מבוסס כיום על יישום עקרונות שימור אנרגיה ומסה לגבי חלל המבנה כולו, המשמש כ"נפח בקרה". נהוג להשתמש במשוואות אמפיריות לחישוב שטפי חום ומסה כוללים. כדוגמה לכך, קיימות מספר משוואות אמפיריות לחישוב הפסדי החום כתלות בהפרש טמפרטורות בין חלל המבנה (או הכיסוי) לסביבה החיצונית ובמהירות הרוח. מיפוי התנאים האקלימיים, המתקבלים הלכה למעשה, כרוך בהשקעה רבה מאוד. אי לכך, כיום אין למתכננים כלי לחזות מראש את התנאים האקלימיים המתקבלים.

מטרת העבודה – מטרת העבודה העיקרית הינה פיתוח מודל סימולציה לחיזוי המיקרו-אקלים בחממה מצוננת ואימותו ע"י מדידות. המודל מיועד לשמש ככלי עזר לתכנון החממה.

מהלך ושיטות עבודה – לאחר שבשנה שעברה הוכנס לשימוש מחשב בעל ביצועים גבוהים (HPC – High Performance Computer) אשר נרכש במיוחד לטובת המחקר ונערך סקר ספרות מקיף. סקירת ספרות המקפת שנערכה מעמידה מפנינו מגוון רחב של אפשרויות לאפיון שדות הזרימה. מהלך העבודה כלל שני שלבים שבוצעו במקביל עבור אספקטים שונים של הזרימה במטרה לבחון את הסקאלות השונות שבה. בשלב הראשון אופיין שדה הזרימה במזרן הלח במימדים האמיתיים כתלות במהירות האוויר וכיוונו. אפיון זה מחייב חלוקה לנפחים סופיים עדינה מאוד של מרחב הזרימה. בשלב השני שבוצע במקביל נערך אפיון שדה של הזרימה במרחב החממה באמצעות המודל ($SST\ k-\omega$) המהווה פשרה הטובה ביותר הידועה כיום, בין משאבי החישוב הנחוצים ובין רמת הדיוק המתקבלת. בשלב זה החישוב על גבי המזרון הלח התבצע לפי מודל קיים בתוכנה המסחרית (Ansys-Fluent)

תוצאות עיקריות והמלצות – לצורך אפיון שדות הזרימה בחממה המצוידת במזרון לח ומאוורר ננקטו שתי גישות, מיקרו ומאקרו, אשר כל אחת מהן פותרת סקאלה שונה בבעיה המוצגת. השלב הבא יהיה אפיון שדה הזרימה במזרן הלח תוך התייחסות אליו כתווך נקבובי על כל מאפייניו אשר אופיינו בשלב הראשון (מיקרו) ואפיון שדה של הזרימה במרחב החממה באמצעות המודל ($SST\ k-\omega$).

פרסומים מדעיים שנבעו מביצוע המחקר: אין, בשלב המוקדם בו אנו מצויים

מבוא ותאור הבעיה

ענפי החקלאות המבוקרת כגון חממות, לולים וכדומה התפתחו מאוד במהלך שלושת העשורים האחרונים. במשך תקופה זו אנו עדים להגברת ההשקעות והתחכום במגמה לשפר ולייעל את תנאי הגידול. מגמה זו נובעת משיקולים כלכליים ומהדרישה למוצרי איכות במהלך כל השנה. דבר זה מתאפשר לאור ההתפתחות הטכנולוגית של השנים האחרונות. הספקה סדירה של תוצרת חקלאית איכותית ובכל ימות השנה מבטיחה יתרון שיווקי ניכר למגדלים. הספקה סדירה של תוצרת חקלאית מחייבת גידול ואו שתילה במהלך חודשי הקיץ, תקופה שבה עומס החום גדול בעקבות שילוב של שטף הקרינה וטמפרטורות הסביבה הגבוהים. בעונה זו חיוני לצנן את החממה. צינון החממות נעשה על ידי שתי שיטות עיקריות הנהוגות כיום – מזרן לח וערפול, והמבוססות על המרת חום מוחש לחום כמוס באמצעות אידוי מים. עבודה זו מתמקדת באפיון שדה הזרימה המתקבל באמצעות מזרן לח. שיטה זו מבוססת על החדרת אוויר לחממה מבעד למזרן רטוב הממוקם בצד האחז של החממה (רצוי צפוני למניעת הצללה) באמצעות מאווררים המותקנים בצד הנגדי. תכנון אקלים חממות (ומערכות הבקרה הנלוות) בפרט ומבנים חקלאיים בכלל, מבוסס כיום על יישום עקרונות שימור אנרגיה ומסה לגבי חלל המבנה כולו, המשמש כ"נפח בקרה". נהוג להשתמש במשוואות אמפיריות לחישוב שטפי חום ומסה כוללים. כדוגמה לכך, קיימות מספר משוואות אמפיריות לחישוב מעבר החום כתלות בהפרש טמפרטורות בין חלל המבנה (או הכיסוי) לסביבה החיצונית ובמהירות הרוח. בדיקות של תנאי אקלים ממוצעים בנקודות שונות בחלל מאפשרות תיקון והתאמה לתנאים מקומיים. מיפוי התנאים האקלימיים, המתקבלים הלכה למעשה, כרוך בהשקעה רבה מאוד. אי לכך, כיום אין למתכננים כלי לחזות מראש ובאופן מדויק את התנאים האקלימיים שיתקבלו. מיפוי שדה הזרימה ותנאי האקלים הן בחלל המבנה והן בסביבה, השלובים זה בזה, באמצעות מודלים שהוכנו מראש, עשוי לתרום להבנת התהליכים המתחוללים הן בחלל הגידול והן בסביבה ומכאן לשמש ככלי עזר לתכנון משופר של המבנה, במגמה להקנות תנאי גידול מיטביים. כמו כן, באמצעות מיפוי זה ניתן יהיה להעריך את התרומה השולית של שינויים בסוג המבנה או שיפורים שיוצעו. בעשור האחרון מתרחב השימוש בהדמיה ממוחשבת למיפוי המיקרו אקלים במבנים חקלאיים. המשותף למרבית העבודות האלה, הוא הקושי באימות תוצאות ההדמיה. זאת בשל העובדה שבמרבית המקרים נדרשת לצורך זה, מערכת מדידות מורכבת ויקרה מאוד. חסרונה העיקרי של שיטה זו בא לידי ביטוי בחוסר האחידות בתנאי האקלים המתקבלים בחממה.

רקע תיאורטי

הישגים מדעיים רבים מתחום זרימה ומעבר חום, אשר התקבלו במהלך חמישים השנים האחרונות, משמשים כיום להבנת שדות זרימה במבנים חקלאיים. לדוגמה, נערך אפיון ספיקת האוויר במבנים חקלאיים באמצעות מדידת ריכוז גזים [3-1] ונעשה שימוש במדי לחץ לחישוב ספיקת האוויר מבעד לפתחי האוויר [4-6]. כמו כן, נערכו מיפוי תלת ממדי של טמפרטורה ומהירות האוויר בשדה הזרימה באמצעות מערכת אולטרא-סונית רבת ערוצים [9-7], מדידת מהירות אוויר באמצעות מד מהירות אולטרא-סוני תלת כיווני [10], עריכת ניסיונות במנהרת רוח [13-11] ושימוש במערכות לייזר להמחשת תנועת האוויר [14]. על אף ההשקעה הגדולה במערכות המדידה, אף לא אחת משיטות הנ"ל מקנה תוצאות מפורטות למיפוי שדה הזרימה בתוך המבנה ומחוץ לו כפי שמקבלים מהדמיה ממוחשבת.

הדמיה ממוחשבת במבנים חקלאיים עשויה לשמש למטרות שונות כגון אפיון פיזור מזהמים (אמוניה ואבק) [15], [16] או מידת השונות של מהירות האוויר ורמת הטורבולנציה בדיר חזירים [17] אשר נבחנו ניסיונית [18]. הדמיה ממוחשבת הותאמה לזרימה דו ממדית [19-24] ולגבי מקרים מורכבים - זרימה תלת ממדית ברפתות [25-27] ובחממות [28-31]. מיפוי שדה זרימה במבנים חקלאיים ככלל ובתי רשת בפרט, באמצעות הדמיה ממוחשבת מציב קשיים שמקורם בעיקר בממדים הגדולים של המבנה ומשמעותם המעשית היא לדוגמה, מספרי ריינולדס גבוהים המחייבים שימוש במודלים טורבולנטיים. בנוסף, השימוש באלגוריתמים אלה מחייב מיומנות רבה בתפעולם, עריכת ההנחות והקרובים המתאימים לכל מקרה. לשם הדגמה, Hoxey וחבריו [32] חקרו את פילוג הלחצים הנגרם על ידי רוח על מבנים חקלאיים בעלי קומה נמוכה באמצעות עריכת ניסיונות בממדים אמיתיים ואפיונם במקביל באמצעות הדמיה ממוחשבת. בעוד שההדמיה הממוחשבת נערכה בהנחה שהזרימה הנה דו ממדית, מתוך התוצאות הניסיוניות עלתה המסקנה ששדה הזרימה רגיש מאוד לתופעות תלת ממדיות. בעקבות השימוש ברשתות נגד מזיקים בחממות המותקנות בפתחי האוויר, נבחנה השפעתן על ספיקת האוויר של המבנה [34-42]. מהתוצאות נראה שמקדם מעבר האוויר של פתחי האוויר עם רשת קטן וכתוצאה מכך ספיקת האוויר קטנה עד כדי מחצית [38]. כמו כן מבנים מסוג זה נבחנו במנהרת רוח במגמה לאפיין את עומסי הרוח [41]. לאחרונה נעשה שימוש [43] במחולל יישומים מסחרי (CFD2000[®]) לאפיון שדה הזרימה במנהרה עבירה בעלת פתחי אוורור בצדדים המותקנים בהם רשתות. התוצאות מלמדות שספיקת האוויר קטנה באופן משמעותי בנוכחות הרשתות וכתוצאה מכך גדלה רמת השונות בתנאי האקלים בתוך המבנה.

צינון חממות באמצעות מזרן לח הוצע על ידי DeWerth כבר בשנת 1954 [44] ומאז נעשו עבודות רבות בנושא. חסרונה העיקרי של שיטה זו בא לידי ביטוי בחוסר האחידות בתנאי האקלים המתקבלים בחממה [45, 46].

הדמיה באמצעות מחוללי יישומים מסחריים - כיום קיימים מספר מחוללי יישומים מסחריים המשמשים לאפיון ומיפוי מרחבי של זרימות המתקבלות במצבים שונים. Reichrath ו-Davies [47] סקרו את מחוללי היישומים המסחריים להדמיית שדות זרימה והתאמתם למבנים חקלאיים (חממות). מחולל היישומים FLUENT מהווה פלטפורמה טובה לשלבים "קדם חישוב - אופן הצגת הבעיה" ול- "אחר חישוב - אופן הצגת התוצאות". מחולל יישומים זה מאפשר חישובים באמצעות מספר מודלים (אלגוריתמים) אפשריים. Haxaire et al. [48] ו-Mistriotis et al. [23] ערכו הדמיה של חממה מסוג הנהוג באזור הים התיכון, בעלת שני מפתחים, באמצעות מחוללי היישומים Phoenics v.2.1 ו-FLUENT v.4. עבודה זו ממחישה את ההשפעות שמקורן בזרימה תלת ממדית וכיוון הרוח. לדוגמה, פילוג ספיקת האוויר בפתחי האוויר מושפע מאורך החממה. Lee et al. [13] ערכו ניסיונות במנהרת רוח והדמיה ממוחשבת (באמצעות FLUENT v.5.4) של שתי חממות בעלות מספר מפתחים ובקנה מידה של 1/16. התאמה טובה התקבלה מתוך השוואת התוצאות הניסיוניות לתוצאות ההדמיה. לאור זאת, נראה שמחוללי היישומים FLUENT ו- PHOENICS עשויים להתאים לאפיון שדות הזרימה עבור מבנים חקלאיים.

בחירת אלגוריתם - אלגוריתמים של זרימה טורבולנטית [49] מתבססים על משוואות ריינולדס (תנע) ומשוואות מעבר סקלריות כגון: אנרגיית חום, אנרגיית קינטית, ריכוזים וכו'. Launder ו-Spalding [50] פיתחו מודל לזרימה טורבולנטית ($k-\varepsilon$) המהווה את הפשרה הטובה ביותר הידועה כיום בין משאבי החישוב הנחוצים ובין רמת הדיוק המתקבלת. מודל זה כולל שתי משוואות דיפרנציאליות נוספות: משוואת האנרגיה הקינטית הטורבולנטית (k) ומשוואת שטף הכחדת האנרגיה הקינטית הטורבולנטית (ε), תוך התייחסות לצמיגות הטורבולנטית (חסרת כיוון) כשוות ערך לצמיגות למינרית. מודל זה ישים לגבי זרימה טורבולנטית מפותחת, וכדי לטפל בשכבות הגבול

בקרב הקרקע והדפנות פותחו משוואות קיר בדומה לאלה שפותחו ע"י Launder ו- Spalding [50]. נעשה שימוש במודל זה לגבי מספר יישומים בעלי ממדים גדולים (כגון: מבנים [51], מבני משק החי [52] וחממות [21], [28, 53-57]) אשר תוצאותיו היו בהתאמה טובה לתוצאות הניסיוניות.

שימוש במודל זה ($k-\varepsilon$) מחייב שמרחק הנקודה הראשונה הנמצאת בתחום הטורבולנטי יהיה בהתאם למרחק חסר הממד המוגדר כ- y^+ (ולעיתים כ- y^*) בתחום הגדול מ- 11 והקטן מ- 500. אי לכך, הקושי העיקרי בשימוש במודל זה הנו חלוקה לאלמנטים סופיים שתענה על דרישה זו. מתוך סקירה זו ניתן להצביע על כך שרק Hoff וחבריו [25] הציגו את y^+ בנייתו דו ממדי של מבנה משק החי. מחוללי היישומים המסחריים (המצוינים למעלה) כוללים מודלים מורכבים יותר כגון: $k-\varepsilon$ דו שכבתי ו- RNG. Mistrioties וחבריו [55] ערכו הדמיה של חממה דו ממדית באמצעות המודלים: $k-\varepsilon$ הסטנדרטי, $k-\varepsilon$ דו שכבתי ו- RNG. מתוך השוואה איכותית נראה שבעוד שתוצאות המודלים $k-\varepsilon$ דו שכבתי ו- RNG הן בהתאמה טובה לתוצאות הניסיוניות, תוצאות המודל $k-\varepsilon$ הסטנדרטי אינם מצביעים באופן ברור על זרימה חוזרת בקרבת דופן הגג הנגדית לרוח. לעומת זאת, Shklyar וחבריו [56, 57] עשו שימוש במודל $k-\varepsilon$ הסטנדרטי עבור חממה תלת ממדית והתקבלו תוצאות בהתאמה טובה לתוצאות הניסיוניות. מודל הטורבולנציה $k-\omega$ פותח על ידי Menter [78] על מנת לשלב את האמינות והדיוק של מודל $k-\omega$ בסביבת קירות ושכבת הגבול, עם מודל $k-\varepsilon$ שמתפקד טוב יותר בזרימה חופשית עם מספרי ריינולדס גבוהים. בכדי לאפשר את השילוב בין המודלים, מודל $k-\varepsilon$ עבר המרה לצורה של $k-\omega$, ושני המודלים פועלים במקביל כאשר פונקצית ערבוב מגדירה איזה מהמודלים יפעל בהתאם לאופי הזרימה.

קביעת מרחב הזרימה החיצוני ותנאי גבול - תנאי הגבול מוגדרים באמצעות קביעת הפרמטרים הבאים: מהירות זרימה על שלושת רכיביה (u, v ו- w בכיוונים x, y ו- z בהתאמה), k ו- ε . כמובן, תנאים של זרימה ללא החלקה נקבעו על פני הקרקע והדפנות האטומות למעבר אויר. מעבר לכך, תנאים של זרימה חופשית נקבעו לכל דפנות מרחב הזרימה פרט לדופן הכניסה. זרימה חופשית משמעותה שאין גראדיאנטים של הפרמטרים הנ"ל בניצב לדופן. כאשר לדופן הכניסה, בנוסף להתפלגות מהירות הזרימה ניתן לקבוע פילוג של k ו- ε המתקבל מתוצאות ניסיוניות או משוואות מתאימות [55].

מטרות העבודה

- מטרת העבודה העיקרית הינה פיתוח מודל סימולציה לחיזוי המיקרו-אקלים בחממה מצוננת ואימותו ע"י מדידות. המודל מיועד לשמש ככלי עזר לתכנון חממות. להשגת מטרה זו, הוצבו שלושת היעדים הבאים:
1. פיתוח מודל סימולציה באמצעות מחולל יישומים FLUENT לחיזוי שדה הזרימה ותנאי האקלים בחממה המצוננת באמצעות מזרן לח.
 2. אימות ניסויי וכיול של מודל הסימולציה ע"י מדידות בחממה מסחרית.
 3. הפעלת הסימולציה לצורך בחינת השפעת מידות המבנה ותנאי ההפעלה של המזרן והאוורור על המיקרו-אקלים של הגידולים, כולל תנאי הסביבה.

תיאור מהלך העבודה

לאחר שבשנה שעברה הוכנס לשימוש מחשב בעל ביצועים גבוהים (HPC – High Performance Computer) אשר נרכש במיוחד לטובת המחקר ונערך סקר ספרות מקיף. סקירת ספרות המקפת שנערכה מעמידה מפנינו מגוון

רחב של אפשרויות לאפיון שדות הזרימה. מהלך העבודה כלל שני שלבים שבוצעו במקביל עבור אספקטים שונים של הזרימה במטרה לבחון את הסקאלות השונות שבה. בשלב הראשון אופיין שדה הזרימה במזרן הלח במימדים האמיתיים כתלות במהירות האוויר וכיוונו. אפיון זה מחייב חלוקה לנפחים סופיים עדינה מאוד של מרחב הזרימה. בשלב השני שבוצע במקביל נערך אפיון שדה של הזרימה במרחב החממה באמצעות המודל ($SST k-\omega$) המהווה פשרה הטובה ביותר הידועה כיום, בין משאבי החישוב הנחוצים ובין רמת הדיוק המתקבלת. בשלב זה החישוב על גבי המזרון הלח מתבצע לפי מודל קיים בתוכנה המסחרית (Ansys-Fluent)

שלב א - אפיון שדה הזרימה במזרן הלח במימדים האמיתיים כתלות במשתני הזרימה לשלב זה של העבודה ישנן שלוש מטרות עיקריות: לבחון באמצעות ניסויים את ההשפעה של משטרי זרימת המים דרך המזרון-לח על הנקבוביות וירידת הלחץ כאשר אוויר עובר דרך המזרון, לכייל את הקבועים במשוואה המתארת את מפל הלחץ כתלות במהירות זרימת האוויר ולבנות מודל נומרי באמצעות תוכנת CFD.

אימות

לצורך אימות המודל נבחר מקרה של תעלה אנכית המורכבת משתי פלטות שמחוממות א-סימטרית [79]. הקיר השמאלי היה רטוב ומחומם לטמפרטורת דופן קבועה, ואילו הקיר הימני הוגדר כאדיאבטי. תערובת האוויר-מים נכנסת לתעלה בטמפרטורה T_0 , ואנו מניחים כי מהירות האוויר הלח הנכנס לתעלה קטנה יחסית לכוחות הציפה שיתווספו למשוואת המומנטום בכיוון y , התהליך יציב והזרימה היא בלתי דחיסה. בנוסף נעשו ההנחות הבאות:

1. כל התכונות התרמודינמיות והתרמופיסיקליות של האוויר, המים והתערובת הן פונקציה של הטמפרטורה וההרכב המקומיים.
2. אפקטים של דיפוזיה זניחים ביחס להסעה.
3. אפקטים של קרינה תרמית ודיסיפציה חום כתוצאה מצמיגות זניחים ביחס להסעה.
4. הקיר השמאלי מכוסה כולה בשכבה דקה של מים, שלא מושפעת מזרם האוויר.
5. בחישוב הריכוז המסי של אדי המים באוויר מניחים כי קיים שיווי משקל תרמודינמי.

הדמיה נומרית של זרימה מולטי-פאזית

בדומה לכל שדה זרימה, ניתוח ואפיון שדות זרימה מולטי-פאזית מתבסס על העקרונות והחוקים הכלליים ביותר. הווה אומר, שימור מסה, תנע ואנרגיה. עקרונות וחוקים אלה, עשויים לבוא ידי ביטוי באופן מתמטי עבור כל נקודה במרחב ובזמן, על ידי משוואות שדה זרימה מקומיים ורגעיים. בכל אופן, פתרון מדויק של משוואות אלה הוא כמעט בלתי אפשרי ויקר מאוד (מבחינת יכולות וזמן חישוב), מצריך מעקב מורכב ומפותל אחר ריבוי טווחי-ביניים (Interface) נוזל-גז אשר משתנים באופן רציף בזמן ובמקום. כתחליף לכך, השיטה המקובלת מבוססת על מיצוע מקומי של המשוואות כתלות במרחב או בזמן או בשניהם. על אף העובדה שאנו מאבדים מידע בתהליך זה, המשוואות המתקבלות מניבות פתרונות מדויקים למגוון רחב של בעיות. זאת, כל עוד שמיצוע המשתנים מוביל לתוצאות הדומות למצב המעשי. הווה אומר, כל עוד ששדה הזרימה אינו קאוטי מדי.

בתהליך המיצוע, ניתן להתייחס לפאזות השונות במשותף על מנת למצע את המשתנים השונים של הזרימה המולטי-פאזית. דבר, המחייב שימוש בהדמיה של זרימת תערובת. לחילופין, ניתן להתייחס לכל פאזה בנפרד ולקבל

משתנים ממוצעים עבור כל פאזה. אפשרות זו מובילה לשימוש בהדמיה של מספר זורמים. הדמיה זו ככלל הינה יותר מקובלת ושימושית. כמובן, הדמית זרימת תערובת עשויה להיגזר משימוש בהדמיה של מספר זורמים, אך לא ההיפך.

הדמית שדה זרימה עם שני זורמים, הנהוגה כוללת שש משוואות שדה: שימור מסה, תנע ואנרגיה עבור הפאזה הנוזלית ועבור הפאזה הגזית (אדים). בנוסף לכך, מוצגים משנים במשוואות השימור כגון נפחים (או שטחים) חלקיים של הפאזה הגזית a_p , והפאזה הנוזלית a_w , בכל מיקום וזמן נתון. מאחר והזרימה מורכבת משתי הפאזות מתקיים:

$$a_p + a_w = 1 \quad (1)$$

על אף העובדה ששיטה זו הינה השלטת, קיימות מספר שיטות נוספות (כגון שיטת בולטצמן המבוססת על מיצוע סטטיסטי) המשמשות לקבלת משוואות שדה הזרימה. למזלנו, כל השיטות מניבות סדרת משוואות זהה ובאופן יעיל, לפחות עבור זרימה חד ממדית.

משוואות שדה הזרימה בדרך כלל נגזרות מתוך הנחה שטווח הביניים (המפריד בין הפאזות) בעל עובי ומסה אפסיים ולכן אינו יכול להכיל תנע או אנרגיה קינטית וחומנית. לצורך השלמת משוואות שדה הזרימה, שטפי מסה, תנע ואנרגיה של אחת הפאזות חייבים להיות קשורים בחתך טווח הביניים בהתאם לשטפי הפאזות האחרות. לאחר הפשטה מתאימה, תנאים אלה בדרך כלל מושפעים ומוגדרים באמצעות "קפיצת תנאים".

הדמית זרימה של התערובת היא למעשה הפשטה של הדמיה של זרימה מולטי-פאזית הניתנת לשימוש בדרכים שונות [70, 71]. לשם הדגמה, כאשר הפאזות השונות נעות במהירויות שונות, בהנחה של שיווי משקל מקומי, מעבר למרחק-מרחבי-אופייני קצר. כמו כן, בהנחה של זרימה הומוגנית עם קשר חזק בין הפאזות הנעות במהירות משותפת. הדמיה המשמשת לצורכי חישוב צמיגות (Non-Newtonian) של התערובת. הדמיה זו עשויה לדמות מספר פאזות באמצעות פתרון משוואות תנע, רציפות, ואנרגיה של התערובת, נפח חלקי של הפאזות המשניות וביטויים אלגבריים של המהירויות היחסיות. הדמיה זו הינה תחליף הולם להדמיית אוילר המלאה של זרימה מולטי-פאזית ובמספר מקרים. ההדמיה המלאה עלולה להיות בלתי אפשרית כאשר קיים פיזור רחב של אחת הפאזות או במקרים בהם חוקי טווחי-הביניים אינם ידועים או בלתי אמינים. הדמיה פשוטה יותר כגון הדמית זרימה של התערובת עשויים להציג תוצאות טובות בדומה להדמיה המלאה של זרימה מולטי-פאזית, תוך כדי אפיון מספר קטן יותר של משתנים.

השימוש בהדמיה של זרימת תערובת המוצגת במחולל היישומים ANSYS-FLUENT, מציב מספר מגבלות:

1. הפתרון מבוסס על לחצים חלקיים ולא על בסיס משקל סגולי (נפח חלקי).
2. ההדמיה מבוססת על הגישה של זרימת זורם יחיד. עם זאת, שונה בשני היבטים:
 - ההדמיה מאפשרת מעבר פאזי הדדי. הנפחים חלקיים של הפאזה השונות a_p ו- a_w עבור נפח בקרה עשוי להיות בתחום שבין 0 ל-1, בהתאם לנפח התפוס על ידי הפאזות p ו-w, בהתאמה.
 - ההדמיה מאפשרת, מהירויות שונות של הפאזות השונות, תוך כדי שימוש בעיקרון של מהירות החלקה. חשוב לציין, ניתן להניח מהירות זהה ובכך ההדמיה מצטמצמת להדמיית זרימה מולטי-פאזית הומוגנית. ההדמיה פותרת את משוואות התנע, הרציפות והאנרגיה עבור התערובת, משוואת הנפחים החלקיים של הפאזות המשניות וביטויים אלגבריים של המהירויות היחסיות. (כאשר הפאזות השונות נעות במהירויות שונות).

רציפות – משוואת הרציפות של התערובת היא:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (2)$$

כאשר: \vec{v}_m – מהירות ממוצעת של המסה הכוללת:

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (3)$$

ו- ρ_m – משקל סגולי של התערובת:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (4)$$

α_k – נפח חלקי של פאזה k .

תנע – משוואת התנע של התערובת מתוך סכום של הפאזות השונות ומתקבל מתוך:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = & -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \\ & + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

כאשר: n – מספר הפאזות, \vec{F} – כוחות גוף ו- μ_m – צמיגות של התערובת:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (6)$$

כאשר: $\vec{v}_{dr,k}$ – מהירות הפאזה של פאזה k :

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (7)$$

אנרגיה – משוואת האנרגיה של התערובת:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (8)$$

כאשר k_{eff} – מקדם המוליכות האפקטיבי $(\sum_{i=1}^n \alpha_k (k_k + k_t))$, כאשר k_t – מקדם המוליכות הטורבולנטי המוגדר בהתאם למודל הטורבולנטי שבשימוש. הביטוי הראשון בצד הימני של המשוואה מייצג מעבר חום בהולכה. S_E – מייצג מקורות חום נפחיים אחרים. הביטוי E_k – מתקבל מתוך:

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (9)$$

מהירויות החלקה וסחיפה – מהירות היחסית (הנקראת גם כמהירות החלקה) מוגדרת כמהירות הפאזה המשנית של הפאזה (p) ביחס למהירות הפאזה הראשית (q):

$$\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \quad (10)$$

המסה חלקית של כל פאזה (k) מוגדרת:

$$c_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \quad (11)$$

מהירות הסחיפה (drift) ומהירות החלקה (\vec{v}_{pq}) קשורות:

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{i=1}^n c_k \vec{v}_{qk} \quad (12)$$

על פי מאינן וחבריו [72], מהירות החלקה מתקבלת מתוך:

$$\vec{v}_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} \vec{a} \quad (13)$$

כאשר τ_p – זמן רגיעה (relaxation) של החלקיק:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (14)$$

d – קוטר החלקיק (או טיפה או בועה) של הזורם המשני p , \vec{a} – תאוצת החלקיק. קיימות מספר שיטות לחישוב כוחות הגרר כאשר ברירת המחדל לקוחה משילר וניומן [73]:

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15Re^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183 Re & Re > 1000 \end{cases} \quad (15)$$

והתאוצה \vec{a} מחושבת מתוך:

$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{v}_m \cdot \nabla)\vec{v}_m - \frac{\partial \vec{v}_m}{\partial t} \quad (16)$$

הביטוי האלגברי הפשוט ביותר של החלקה והנקרא drift flux model, בו התאוצה של החלקיקים נתונים על ידי כוחות בגרוויטציה או צנטריפוגליים וזמן הרגיעה מותאם בהתאם לנוכחות חלקיקים אחרים. בזרימה טורבולנטית מהירות היחסית אמורה לכלול את החלק הנובע מדיפוזיה הכפוף לרמת הפיזור:

$$\vec{v}_{pq} = \frac{(\rho_p - \rho_m) a_p^2}{18\mu_q f_{drag}} \vec{a} - \frac{\eta_t}{\sigma_t} \left(\frac{\nabla \alpha_p}{\alpha_p} - \frac{\nabla \alpha_q}{\alpha_q} \right) \quad (17)$$

כאשר σ_t – מספר פרנטל/שמידט השווה בערכו ל-0.75 ו- η_t – דיפוזיה טורבולנטית המחושבת מתוך הקרולציה continuous-dispersed fluctuating velocity:

$$\eta_t = C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \left(\frac{\gamma_\gamma}{1 + \gamma_\gamma} \right) (1 + C_\beta \zeta_\gamma^2)^{-1/2} \quad (18)$$

כאשר ζ_γ – יחס זמנים שבין סקלת הזמן של אנרגיית הערבול הטורבולנטית המושפעת מאפקט מסלולי-החצייה (crossing-trajectories) וזמן הרגיעה של החלקיק:

$$\zeta_\gamma = \frac{|\vec{v}_{pq}|}{\sqrt{2/3}\kappa} \quad (19)$$

כאשר

$$C_\beta = 1.8 - 1.35 \cos^2 \theta \quad (20)$$

$$\cos^2 \theta = \frac{\vec{v}_{pq} \cdot \vec{v}_p}{|\vec{v}_{pq}| |\vec{v}_p|} \quad (21)$$

חשוב להזכיר, ללא חישוב מהירות ההחלקה הזרימה הופכת להיות אחידה.

נפח חלקי – נפח חלקי של הפאזה המשנית (p) מתקבל מתוך משוואת הרציפות:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (22)$$

מודל אידי-עיבוי – ניתן לשלב בזרימה מולטי פאזית את המודל האידי-עיבוי אשר הינו מודל מכאני עם בסיס פיזיקאלי [74]. משטר שטף המסה מתקבל תחת האילוצים:

כאשר $T > T_{sat}$

$$\dot{m}_{e \rightarrow v} = coeff * \alpha_l \rho_l \frac{(T - T_{sat})}{T_{sat}} \quad (23)$$

וכאשר $T < T_{sat}$

$$\dot{m}_{e \rightarrow v} = coeff * \alpha_v \rho_v \frac{(T - T_{sat})}{T_{sat}} \quad (24)$$

כאשר: $\dot{m}_{e \rightarrow v}$ – שטף מסה העובר מהפאזה הנוזלית לפאזה הגזית, $coeff$, (kg/s/m³) – מקדם מעבר המסה שיש להתאימו. הביטוי של מקור שטף החום מתקבל ממכפלת שטף המסה בחום הכמוס. בנוסף לכך ובהתבסס על התיאוריה הקינטית עבור משטח שטוח, שטף האידי-עיבוי עשוי להתקבל משוואת הרץ קונדנסן:

$$F = \beta \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_{sat}}} (P^* - P_{sat}) \quad (25)$$

כאשר: P – לחץ, T – טמפרטורה ו- R – קבוע הגז האוניברסאלי. P^* – מייצג את לחץ החלקי של האדים בטווח הביניים בצד של הגז. משוואת קליפירון-קלאזיוס המיוחסת לתנאי רוויה:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T(v_g - v_l)} \quad (26)$$

כאשר v_g ו- v_l – נפח סגולי של הגז והנוזל, בהתאמה, L – חום כמוס. עבור התנאים הקרובים לתנאי הרוויה מתקבל:

$$P^* - P_{sat} = -\frac{L}{T(v_g - v_l)} (T^* - T_{sat}) \quad (27)$$

מתוך הצבת משוואה זו במשוואה (24) עבור התנאים הקרובים לתנאי הרוויה מתקבל [75]:

$$F = \beta \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_{sat}}} L \left(\frac{\rho_g \rho_l}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{(T^* - T_{sat})}{T_{sat}} \quad (28)$$

כאשר β – מקדם מוגדר באמצעות מקדם ההכלה ותכונות פיזיקאליות של הגז, ושווה בקירוב ל-1 בתנאי שיווי משקל.

מודל טורבולנטי – בהשוואה לזרימת זורם יחיד, מספר הביטויים שיש לחשב במשוואת המומנטום הינו גדול בחישוב זרימה מולטי-פאזית. ברירת המחדל הינה מודל טורבולנטי של זרימת תערובת. המודל הטורבולנטי שנבחר הינו $(Low-Reynolds k-\epsilon)$ שמהווה פשרה טובה בין משאבי החישוב הנחוצים ובין רמת הדיוק המתקבלת. המודל אינו מופיע בממשק הגרפי של התוכנה (GUI), וניתן לבחור אותו דרך ממשק הטקסט (TUI). המודל מייצג זרימה אחידה וישים כאשר קיימת הפרדה וריבוד של הפאזות השונות וכאשר יחס המשקלים הסגוליים קרוב ל-1. בתנאים אלה, שימוש בתכונות ומהירויות התערובת עשוי לספק לקבלת מאפיינים חשובים של הזרימה הטורבולנטית.

משוואת האנרגיה הקינטית הטורבולנטית:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{g}{\rho} \left(\frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) - \rho \epsilon + G_k \quad (29)$$

כאשר G_k מייצג את ייצור האנרגיה הטורבולנטית כתוצאה מגרדיאנט מהירות

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} \kappa \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (30)$$

משוואת הדיסיפציה של האנרגיה הקינטית הטורבולנטית (ε):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_3 \frac{g}{\rho} \left(\frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\varepsilon}{k} \right) \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (31)$$

כאשר

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (30)$$

הערכים עבור הקבועים ופונקציות הערבוב של הקיר שנלקחו בעבודה זו:

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.8, C_3 = 1.5, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, Pr_t = 0.9, Sc_t = 0.9$$

$$f_1 = 1.0, f_2 = 1.0 - 0.3 \exp(-Re_t^2), f_\mu = \exp\left[-3.4 / (1 + Re_t / 50)^2\right]$$

תנאי שפה – תנאי אי החלקה מיושם על רכיבי המהירות על הקיר, עבור זרימה של תערובת אוויר-מים המהירות בכניסה מוגדרת, וגרדיאנט המהירות ביציאה שווה לאפס. המהירות הרוחבית של רכיב המהירות u על הקיר הרטוב ($x=0$) מונמכת בכך שמניחים שהמשטח הצי-חדיר, שהמסילות של האוויר באדי מים נמוכה ושמהיאות האוויר במגע עם המים היא 0.

$$u_i = m_i / \rho = -\frac{D}{(1 - \omega_i)} \frac{\partial \omega}{\partial x}, x = 0 \quad (31)$$

כאשר ω_i הוא השבר המסי של אדי המים במפגש בין האוויר והמים ($x=0$). בהנחה של שיווי משקל תרמודינמי ושהתערובת מתנהגת כגז אידיאלי השבר המסי של האדים יחושב כך:

$$\omega_i = \frac{M_v p_{v,i}}{M_a (p - p_{v,i}) + M_v p_{v,i}} \quad (32)$$

כאשר $p_{v,i}$ הוא הלחץ החלקי של אדי המים ומחושב בטמפרטורת המפגש. תנאי הגבול על הקיר עבור k ו ε נקבעו

בהתאמה למודל [83] Low-Reynolds number $k-\varepsilon$

$$k = 0 @ walls$$

$$\varepsilon = 2 \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial x} \right)^2 @ walls \quad (33)$$

האנרגיה הקינטית הטורבולנטית נתונה בכניסה:

$$k = k_0 = \frac{3}{2} Tu_0 v_0^2 \quad (34)$$

כאשר Tu_0 היא עוצמת הטורבולנציה בכניסה. קצב הדיסיפציה של האנרגיה הקינטית הטורבולנטית בכניסה:

$$\varepsilon_0 = \frac{\mu}{\rho} \frac{C_\mu}{k} \left(\frac{\rho k^{3/2}}{\mu x_w} \right) \quad (35)$$

כאשר x_w הוא המרחק מהקיר. הטמפרטורה והלחות נקבעו כתנאי הסביבה אטמוספריים.

פרמטרים עבור מעבר חום ומסה

מעבר החום המקומי בין זרם האוויר ושכבת המים תלוי בשני גורמים הקשורים זה לזה: גרדיאנט הטמפרטורה באזור החפיפה בצד של האוויר כתוצאה ממעבר חום מוחשי, וקצב מעבר החומר באידוי בצד של המים כתוצאה ממעבר של חום כמוס. הקצב של סך כל החום העובר מהמים לאוויר מבוטא באופן הבא:

$$q(y) = q_s(y) + q_l(y) = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} - \left[\frac{\rho D}{(1-\omega_i) \frac{\partial \omega}{\partial x}} \right] h_{fg} \quad (36)$$

במונחים של חום h_y ומסה g_y מקומיים, שטף החום המקומי הכולל על הקיר החם והרטוב יהיה:

$$q(y) = h_y [T_i(y) - T_b(y)] + \frac{g_y \rho}{(1-\omega_i)} [\omega_i(y) - \omega_b(y)] h_{fg} \quad (37)$$

כאשר האינדקס i מבוטא את האינטרפייס בין האוויר למים. T_b ו ω_b מחושבים באופן הבא:

$$T_b(y) = \int_0^W \rho C_p v T dx / \int_0^W \rho C_p v dx \quad (38)$$

$$\omega_b(y) = \int_0^W \rho v \omega dx / \int_0^W \rho v dx$$

מספר נוסלט המקומי על הקיר הרטוב:

$$Nu_y = \frac{h_y D_h}{k} = - \frac{2Wq_s}{k [T_w(y) - T_b(y)]} \quad (39)$$

אם נציג את מקדם מעבר המסה במקומי בהתבסס על שטף מסה דיפוזיבי, מספר שרווד המקומי מבוטא באופן הבא:

$$Sh_y = \frac{g_y D_h}{D} = - \frac{2W}{[\omega_w(y) - \omega_b(y)]} \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{2Wm_\omega (1-\omega_w)}{D\rho [\omega_w(y) - \omega_b(y)]} \quad (40)$$

תוצאות האימות

את התוצאות שהתקבלו מהמודל משווים לתוצאות סמי-אמפיריות [80] שנתנו ביטוי עבור מספרי נוסלט ושרווד הממוצעים (ראה איור 1)

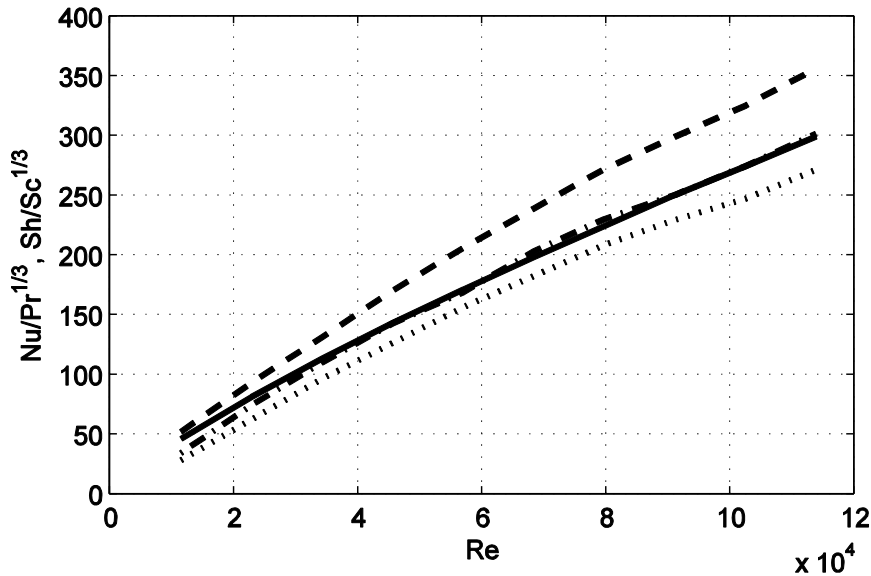
$$Nu/Pr^{1/3} = 0.023 [1 + (D_h/H)^{0.7}] Re^{0.8} \quad (41)$$

באנלוגיה של מעבר חום וחומר

$$Sh/Sc^{1/3} = 0.023 [1 + (D_h/H)^{0.7}] Re^{0.8} \quad (42)$$

במשוואות אלה האורך האופייני מבוסס על הקוטר ההידראולי D_h .

תנאי הכניסה כמו עוצמת הטורבולנציה נבחנו ומוצגת השפעת עוצמת הטורבולנציה בכניסה על מספר נוסלט ושרווד הממוצעים :



איור 1 - מספר נוסלט הממוצע כתלות בטורבולנציה

(— ניסוי [80], ··· $Tu_0 = 5\%$, --- $Tu_0 = 10\%$, -·- $Tu_0 = 20\%$)

בהתאם למודל הנומרי התקבלו תוצאות טובות במיוחד עבור עוצמת טורבולנציה $Tu_0 = 10\%$.

השפעה של הרשת הנומרית

לצפיפות של הרשת הנומרית, בעיקר ליד הקיר, יש השפעה רבה על טיב הפתרון וקצב ההתכנסות. נמצא שהתוצאות הטובות ביותר התקבלו כאשר $y^* < 0.6$ על יד הקיר המחומם. אבחנה זו נתמכת גם על ידי בחינה של Re_y על הקיר המחומם:

$$Re_y = \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} \quad (43)$$

נמצא שכאשר יחס גידול התאים ברשת הוא 1.2 אז מתקבל $Re_y < 200$ עבור 15 התאים הראשונים. מספר זה של תאים באזור הקרוב לקיר משפר את טיב הפתרון וההתכנסות.

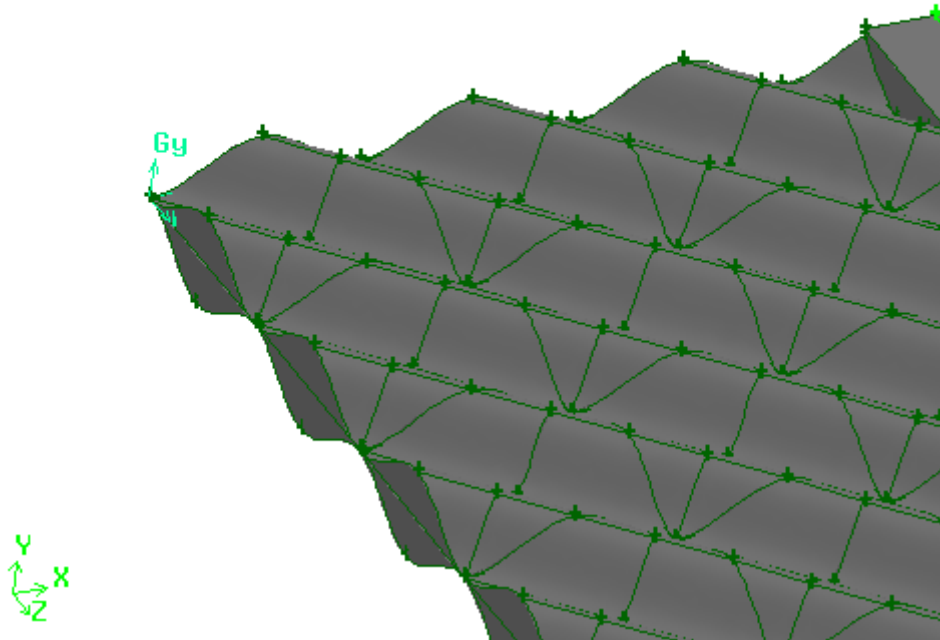
מזרון לח - מאפיינים גיאומטריים

המזרון מורכב ממספר יריעות גליות של צלולוזה המחוברים זה לזה באופן שהזוויות בין כל יריעה ישרות. על ידי כך ניתן להשיג שטח פנים גדול יותר ($[m^2 / m^3]$) והתנגדות נמוכה יותר למעבר אוויר ומים. אורך ורוחב הגליות של היריעות, זווית החיבור בין היריעות ועובי המזרון הם הפרמטרים הגיאומטריים המגדירים את המזרון. ישנם ארבעה דגמים של מזרון-לח שמיוצרים על ידי שתי חברות ונבדלים זה מזה בעובי המזרון וזווית החיבור בין היריעות. בעבודה זו נבחנו שני סוגי יריעות בזווית $(45-45^0)$ ובעובי של 100 ו 200 מ"מ.

סימולצית CFD.

בחלק זה של העבודה נעשה שימוש בתוכנת Fluent 12.0. בתוכנה זו משתמשים בדיסקרטיזציה של נפחים סופיים בכדי לחשב את משוואות השימור. שיטת העבודה לביצוע מחקר זה באמצעות קוד מסחרי הינה יצירת הגיאומטריה של מרחב הזורם, רישות, הגדרת תנאי השפה והתכונות הפיסיקליות (pre-processing), פתרון וניתוח התוצאות (post-processing).

הגיאומטריה של מרחב הזורם והמזרון-לח נבנתה באמצעות תוכנת GAMBIT. הסימולציה בוצעה במצב מתמיד תחת לחץ קבוע של 1 אטמ'. המודל שנבחר עבור הטורבולנציה הינו (RNG k-ε). באיור 2 ניתן לראות את צורת רישות המזרון.

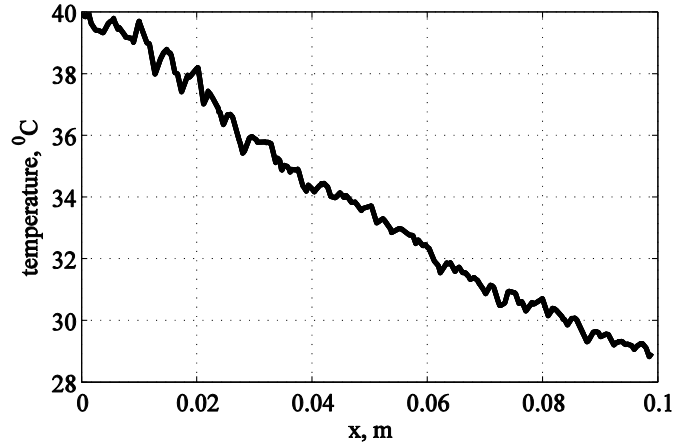


איור 2 - רישות המזרון

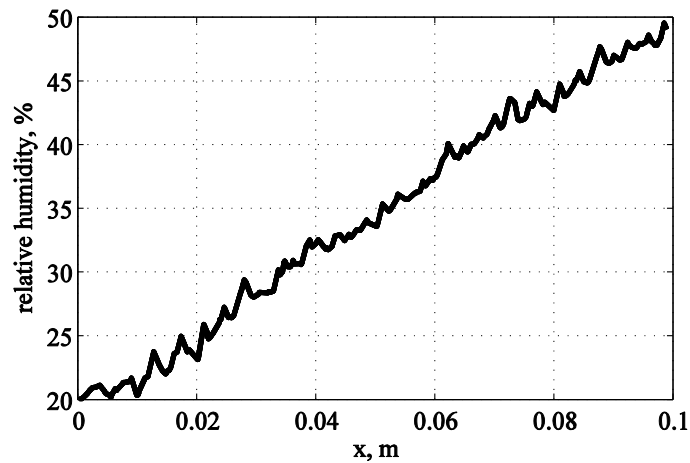
תנאי השפה שנבחרו:

- כניסה: חושבו מהירויות שונות בכיוון ניצב לכניסה (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 [m/s]).
- קירות: הוגדרו בצידי המודל קירות חלקים המקיימים תנאי אי החלקה.
- מחזוריות: צד ימין ושמאל של המודל הוגדרו כאינטרפייס בכדי לקיים את תנאי השימור של הזורם.

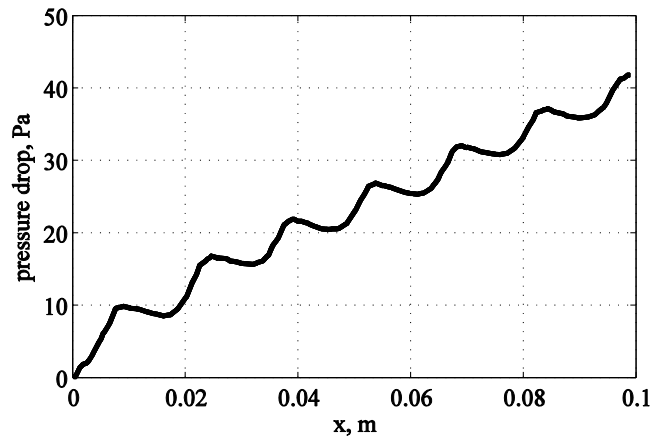
איורים 3-5 מציגים את הלחות היחסית, הטמפרטורה ומפל הלחץ בתוך תאי המזרון. מפל הלחץ (איור 5) משתנה בהתאם לתוואי המזרון, אולם הלחות והטמפרטורה לא מתנהגים בחוקיות כזו.



איור 3 - טמפרטורה כתלות במיקום

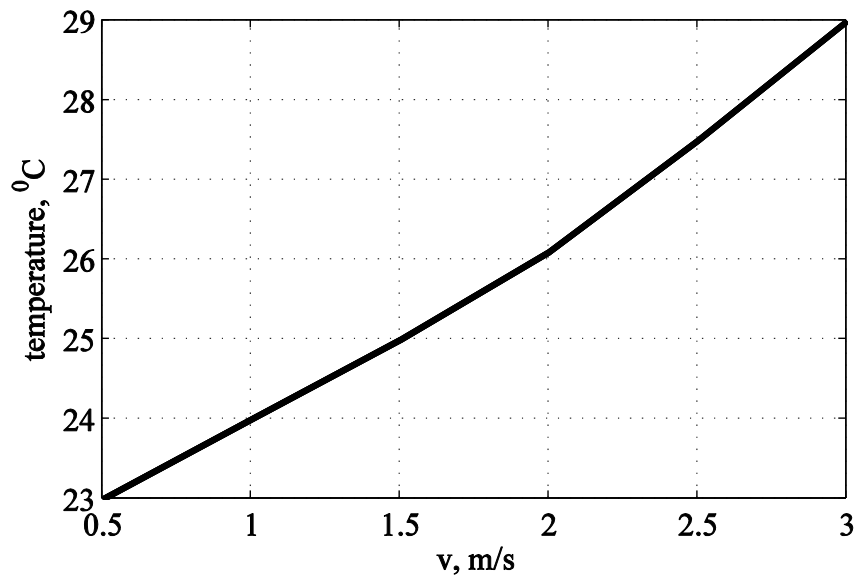


איור 4 - לחות יחסית כתלות במיקום

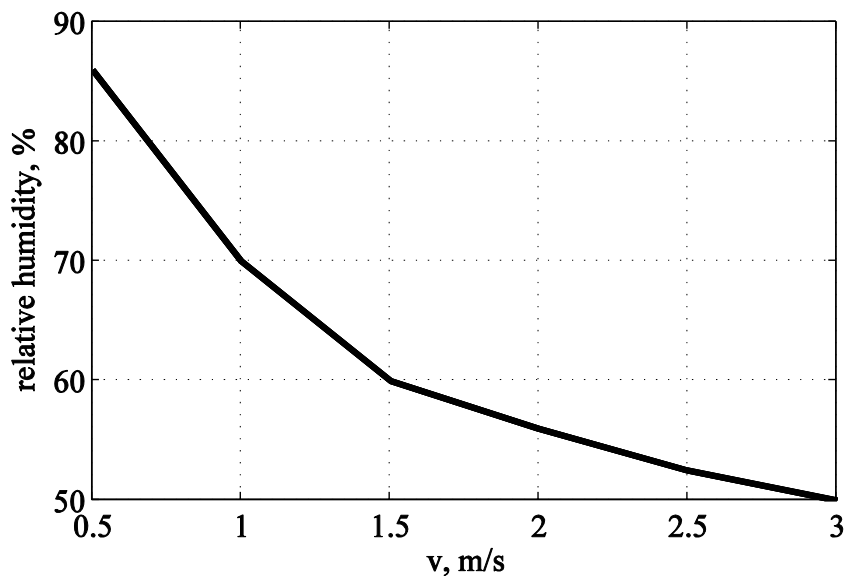


איור 5 - מפל לחץ כתלות במיקום

איור 6 מראה את ההשפעה של מהירות האוויר על היעילות של המזרון. היעילות עולה והטמפרטורה יורדת ככל שמהירות האוויר יורדת. באיור 7 ניתן לראות כי ככל שמהירות האוויר עולה הלחות היחסית יורדת.



איור 6- טמפרטורה כתלות במהירות



איור 7- לחות יחסית כתלות במהירות

מודל של מזרון לח באמצעות CFD נמצא ככלי טוב לביצוע אופטימיזציה של עיצוב המזרון, מכיוון שנמצאה התאמה טובה בין תוצאות הסימולציה לניסויים שנערכו בתעלת רוח. באמצעות שיטה זו אנו יכולים לחשב כיצד ינהג המזרון עבור מהירויות אוויר שונות ולחזות את כל הפרמטרים הרלוונטים לביצועי המזרון. המודל הנומרי שפותח בעבודה זו יכול לשמש ככלי רב עוצמה עבור יצרנים של מזרון לח ליצור גיאומטריות שונות בכדי לשפר את ביצועי המזרון.

שלב ב - אפיון שדה הזרימה בחממה המצוידת במזרון לח ומאוורר במקביל למחקר שנועד לאפיין את הזרימה דרך המזרון לח יש צורך לאפיין את שדה הזרימה הכולל בתוך החממה אשר מצוידת במזרון לח ומאוורר. לצורך כך נבנה מודל נומרי באמצעות תוכנת CFD שבהינתן התכונות של המזרון לח יאפשר לבחון את שדה הזרימה כתלות בתנאי הסביבה.

סביבת החממה - מאפיינים גיאומטריים

החממה שנבדקת היא בעלת צורה ומידות שנפוצים בארץ, באורך 32 מ' רוחב 8 מ' וגובה 4 מ', עם גג משולש בגובה מקסימלי של 6 מ'. בצד אחד של החממה ממוקם מזרון לח בגובה 1.2 מ' מעל הקרקע ולכל רוחב הקיר, ובצד השני מוקם מאוורר בקוטר 1.5 מ'. סביבת החממה נבחנת עד גובה של 30 מ'.

סימולצית CFD

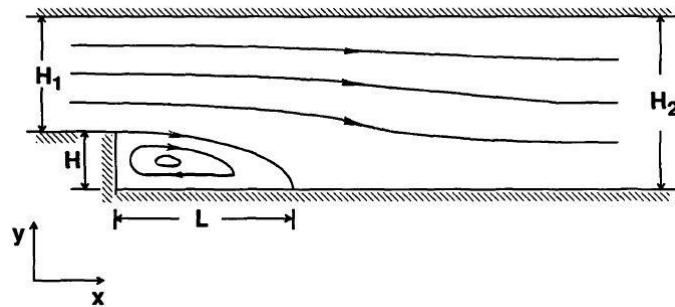
בחלק זה של העבודה נעשה שימוש בתוכנת Fluent 14.0, והגיאומטריה נבנתה באמצעות תוכנת GAMBIT. הסימולציה בוצעה במצב מתמיד תחת לחץ קבוע של 1 אטמ'. המודל שנבחר עבור הטורבולנציה הינו (SST $k-\omega$). מודל הטורבולנציה SST $k-\omega$ פותח על ידי Menter [78] על מנת לשלב את האמינות והדיוק של מודל $k-\omega$ בסביבת קירות ושכבת הגבול, עם מודל $k-\varepsilon$ שמתפקד טוב יותר בזרימה חופשית עם מספרי ריינולדס גבוהים. בכדי לאפשר את השילוב בין המודלים, מודל $k-\varepsilon$ עבר המרה לצורה של $k-\omega$, ושני המודלים פועלים במקביל כאשר פונקציית ערבוב מגדירה איזה מהמודלים יפעל בהתאם לאופי הזרימה. תנאי השפה שנבחרו:

- כניסה: פרופיל מהירות וטורבולנציה לוגריתמי המתאים לזרימה אטמוספירית בכיוון ניצב לכניסה.
- חלק עליון וצידי המרחב: תנאי סימטריה הוגדרו בכדי לדמות זרימה בשטח פתוח.
- מזרון לח: הוגדר כ-Porous Jump, ומדמה את מפל הלחץ כתלות במהירות האוויר דרך המזרון.
- מאוורר: הוגדר כ-Fan, ומדמה את מפל הלחץ כתלות במהירות האוויר דרך המאוורר.

אימות

זרימה טורבולנטית מעבר למדרגה (הרחבה) בתעלה

שלב ראשוני לבחירת המודל הטורבולנטי המתאים לבעיה הוא בחינה של זרימה טורבולנטית מעבר למדרגה, המהווה תפקיד מרכזי במידול זרימה מופרדת (seperated flow). במקרה זה נבחנת זרימה דו-מימדית, בלתי דחיסה, טורבולנטית במצב מתמיד בתעלה מעבר למדרגה הפונה אחורה (backward-facing step), כאשר הפרמטר הנבדק הוא מרחק נקודת ההתפצלות (Reattachment Point) מהמדרגה. ניסויים שנערכו מצביעים על כך שמרחק נקודת ההתפצלות הינו (7.0 ± 0.5) פעמים גובה המדרגה kim [81]. בניסויים קודמים נמצא כי מודל הטורבולנציה (standart wall function) $k-\varepsilon$ נותן תוצאות נמוכות ב 25% מאלו שהתקבלו בניסוי. Thangam & Speziale [82] מראים כי באמצעות שינויים בפונקציית הקיר ניתן לקבל תוצאות קרובות יותר לניסוי (הם מציינים כי תוצאת הניסוי המדוייקת היא 7.1m). לאחר בחינת מספר מודלים של טורבולנציה נמצא כי המודל SST $k-\omega$ נותן את התוצאות הקרובות ביותר לניסוי (למעט מודל Transition SST שדורש משאבי חישוב רבים במיוחד).



איור 8 - Backward facing step

המידות באיור :

$$H_1 = 2[m]$$

$$H_2 = 3[m]$$

$$H = 1[m]$$

 $L = \text{Reattachment point}$

תוצאות :

| Reattachment Point [m] | תא ראשון כניסה | תא ראשון על הקיר | תא ראשון על הקרקע | פונקציית קיר | מודל טורבולנציה | |
|------------------------|----------------|------------------|-------------------|--------------|-----------------|---|
| 6.1 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | Standart | k-ε | 1 |
| 6.7 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | Enhanced | k-ε | 2 |
| 6.82 | 0.003 | 0.007 | 0.005 | Standard | RNG | 3 |
| 7.38 | 0.003 | 0.007 | 0.005 | Enhanced | RNG | 4 |
| 7.25 | 0.003 | 0.007 | 0.004 | SST | k-ω | 5 |
| 7.06 | 0.003 | 0.010 | 0.005 | | TRANSITION SST | 6 |

זרימה מסביב לקובייה

הניסוי לאימות בוצע על מבנה בצורת קובייה ללא פתחי אוורור (אורך צלע 6 מ'), והפרמטר שנבדק היה מקדם

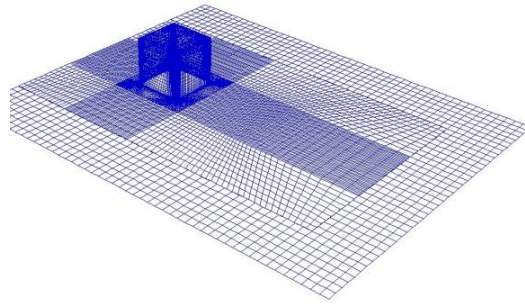
הלחץ $\left(C_p = \frac{1}{2} \cdot \frac{P - P_\infty}{\rho_\infty V_\infty^2} \right)$ על גבי ציר הסימטריה על קירות ועל גג. מכיוון שאין פתחי אוורור ניתן להתייחס

למבנה כאל מכשול, ולכן בשלב זה אין צורך לבצע חישובים בפנים המבנה.

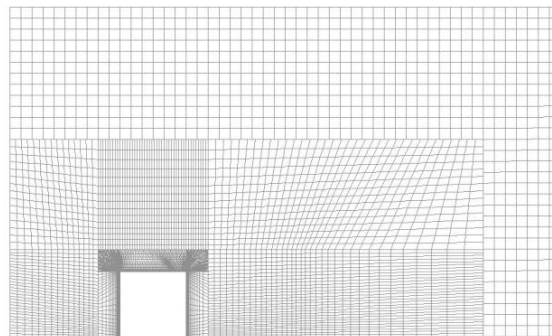
סימולציה CFD.

הקוביה שעליה בוצעה הסימולציה הינה בעלת אורך צלע של 6 מ' והמרחק לפני הקוביה הוא 10 מ', והרשת הנומרית כללה 1.14×10^6 תאים. בכדי לשמור על מספר תאים קטן בסימולציות הגיאומטריה נבנתה ממספר גיאומטריות שונות שמחוברות ביניהן בתנאי גבול של אינטרפייס (interface). על ידי פעולה זו ניתן ליצור רשת צפופה מאוד ליד הקירות ורשת מרווחת יותר רחוק מהקירות.

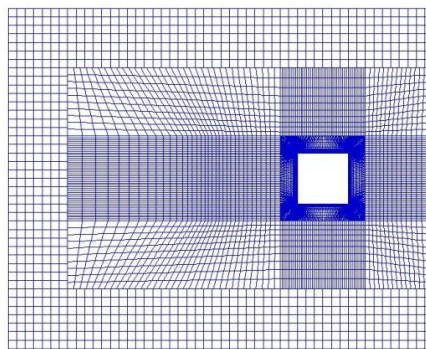
איורים 9-11 מראים את רישות הקוביה



איור 9 - רשת הקוביה - איזומטריה

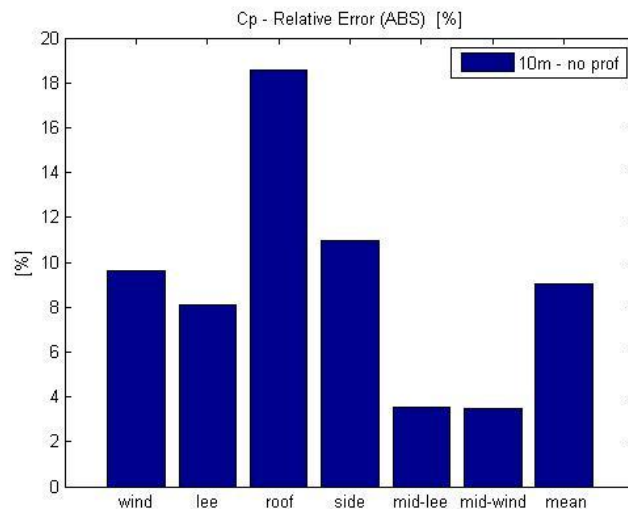


איור 10 - רשת הקוביה - XY



איור 11 - רשת הקוביה - XZ

בגלל שהניסוי בוצע בשטח פתוח, קיים קושי בבחירת תנאי הכניסה של פרופילי הזרימה באטמוספירה. אמנם קיימים מודלים המתארים את פרופילי הזרימה, אולם הזרימה אינה יציבה בעוצמתה ובכיוונה, ולכן יש אי וודאות בהגדרת תנאי הכניסה. בעבודתי בחרתי להשתמש בפרופיל מהירות לוגריתמי המתאים למהירויות שנמדדו בניסוי, ולבדוק כיצד המרחק לפני החממה משפיע על התוצאות. השגיאה היחסית הממוצעת שהתקבלה הייתה קטנה מ-10%, והשגיאה המקסימאלית הייתה 31.6% (בנקודה על גג המבנה). תוצאות אלה מתקבלות על הדעת, שכן בניסוי (משנת 1991) לא מצוינת שגיאת המדידה של המכשור, ואי הוודאות בתנאי הכניסה, שלהם השפעה ניכרת על מקדם הלחץ.



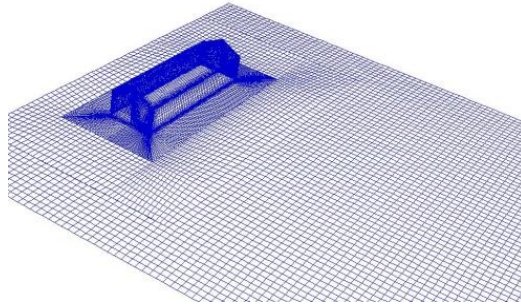
איור 12 - השגיאה היחסית הממוצעת בכל אחת מפאות הקוביה

זרימה מסביב לחממה

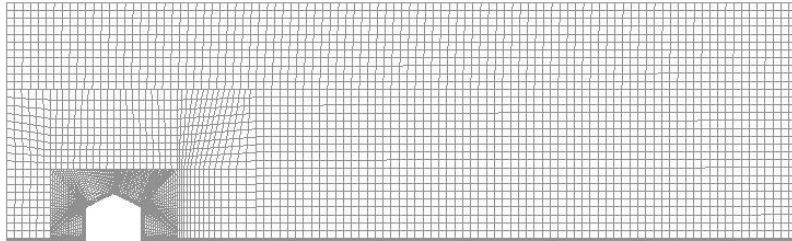
אימות נוסף למודל התבצע בהשוואה לניסוי משנת 1991 (Hoxey & Moran) שגם בו נמדד מקדם הלחץ על גבי ציר הסימטריה על קירות ועל גג.

סימולצית CFD.

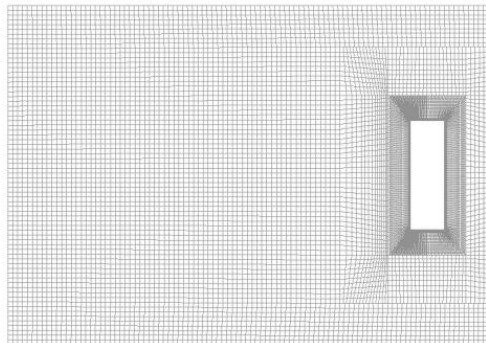
הסימולציה בוצעה על חממה באורך של 22.6 מ' ורוחב של 7 מ' בעלת גג עם פרופיל משולש. גובה הקירות 4.15 מ' והגובה המקסימלי הוא 5.86 מ'. המרחק לפני הקוביה הוא 10 מ', והרשת הנומריית כללה 7.86×10^5 תאים. גם במקרה זה הגיאומטריה נבנתה ממספר גיאומטריות שונות שמחוברות ביניהן בתנאי גבול של אינטרפייס (interface). על ידי פעולה זו ניתן ליצור רשת צפופה מאוד ליד הקירות ורשת מרווחת יותר רחוק מהקירות.



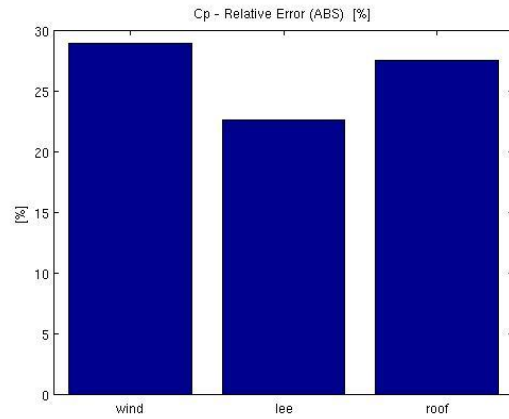
איור 13 - רשת החממה - איזומטריה



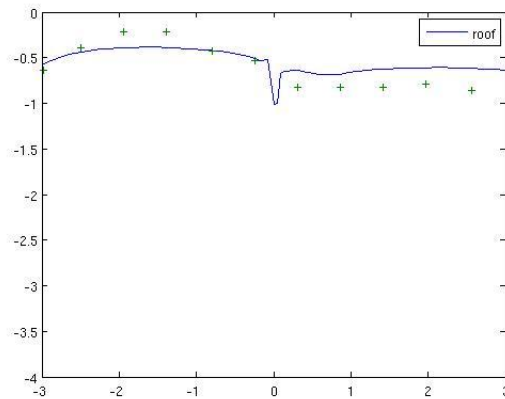
איור 14 - רשת החממה - XY



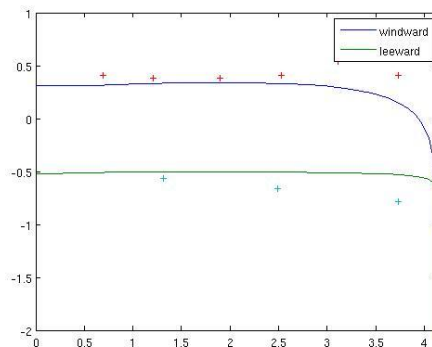
איור 15 - רשת החממה - XZ



איור 16 - השגיאה היחסית הממוצעת



איור 17 - מקדם הלחץ על הגג בהשוואה לניסוי



איור 18 - מקדם הלחץ על הקירות בהשוואה לניסוי

התוצאות עבור הסימולציה של החממה היו פחות קרובות לתוצאות הניסוי, וניתן להסביר זאת מכמה סיבות. ראשית, בניסוי זה כמו הניסוי הקודם (משנת 1991) לא מצוינת שגיאת המדידה של המכשור, ואי הוודאות בתנאי הכניסה, שלהם השפעה ניכרת על מקדם הלחץ. בנוסף ערכו של מקדם הלחץ הוא נמוך מאוד (± 0.5 על הקירות), דבר המוביל לשגיאה יחסית גבוהה גם אם אבסולוטית ההפרש מתוצאות הניסוי קטן. למרות זאת השגיאה הממוצעת בכל אחת מהפאות שנבדקו היתה קטנה מ-30%.

חממה המצוידת במזרון לח ומאוורר

בשלב זה של העבודה זרימת האוויר בתוך חממה המקוררת באמצעות מזרון לח נחקרת. לצורך כך נבנתה גיאומטריה של חממה הכוללת את פנים החממה ואת הסביבה, כאשר בצד אחד של החממה מוקם מזרון לח (porous-jump), ובצדה השני מוקם מאוורר. לאחר ביצוע הולידציה הוחלט להשתמש במודל טורבולנציה $SST k - \omega$.

תנאי גבול

פרופילי המהירות והטורבולנציה בכניסה (לפי Richards & Norris 2011)

$$U(y) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(1 + \frac{y}{y_0} \right) \quad (44)$$

$$u_* = \kappa \frac{U_{ref}}{\ln \left(\frac{y_{ref} + y_0}{y_0} \right)} \quad (45)$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (46)$$

$$\left(C_\mu = \beta' ; \varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa y} \right) \quad (47)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k \beta'} = \frac{u_*}{\sqrt{\beta' \kappa y}}$$

כאשר מהירות הייחוס בגובה 10 מ' היא 3 מ'/שנייה

מזרון לח

בשלב זה של העבודה המזרון לח הוגדר כ-porous jump, כלומר מפל לחץ דרך משטח חסר עובי. בגלל שמזניחים מעבר חום וחומר במזרון אין צורך להגדיר את המזרון כ-porous media, והמידול שמתבצע פשוט יותר. הפרמטרים בנוסחה נקבעו כך שעבור מזרון לח בעובי $\Delta m = 20[cm]$ ומהירות כניסת אוויר של

$$v = 1[m/s] \text{ מפל הלחץ שיתקבל יהיה } \Delta p = -10[Pa].$$

המודל עבור porous jump מפורט במדריך של Fluent.

מאוורר

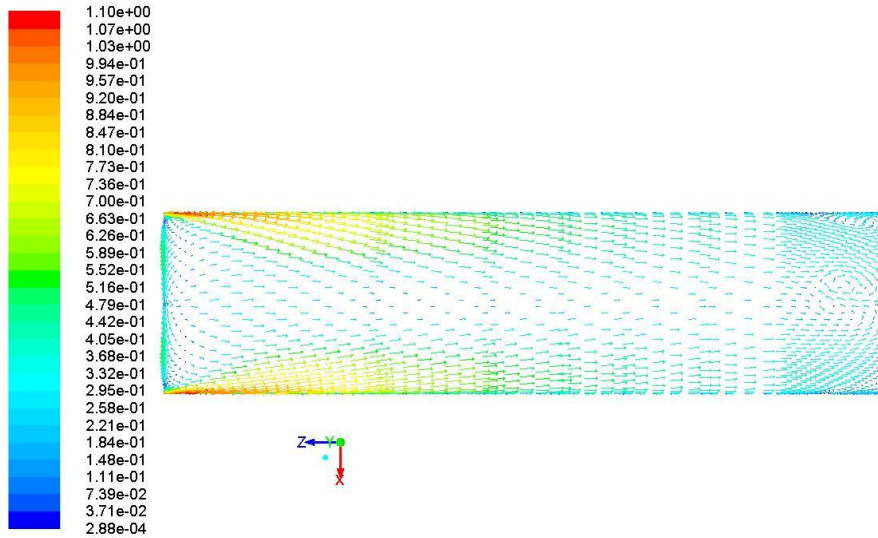
תנאי הגבול עבור המאוורר הוגדר כ-fan, ומפל הלחץ הוגדר ע"י פולינום כך שתתקבל ספיקה נפחית של

$$Q = 10000 \left[\frac{m^3}{h} \right] \text{ עבור חממה בשטח של } 1 \text{ דונם. קוטר המאוורר הוא } 1.5 \text{ מ'}. \text{ } \cdot$$

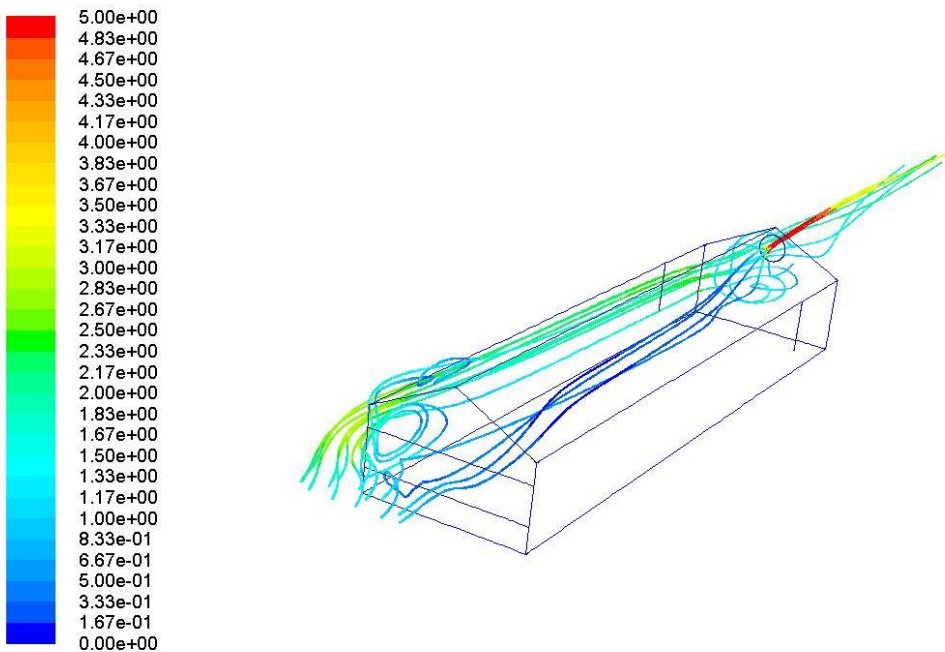
תוצאות

מתוצאות הסימולציה (איורים 19-20) עולות הנקודות הבאות:

- המהירות בתוך החממה בגובה $0.5[m]$ נמוכה מאוד
- יש השפעה רבה על כיוון הזרימה - הצדקה לחישוב משולב של פנים וחוץ החממה



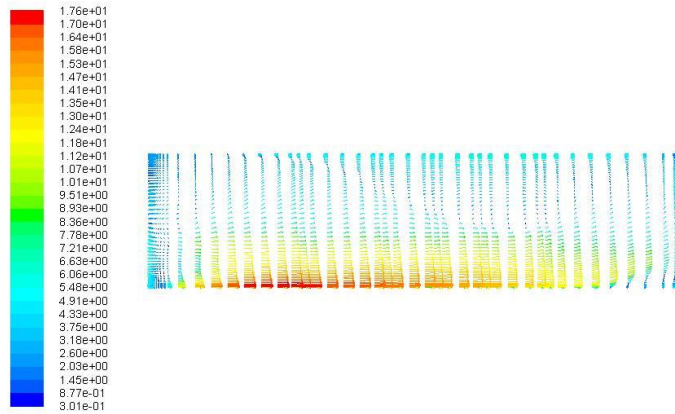
איור 19 - מהירות בחתך בגובה $0.5m$ בתוך החממה



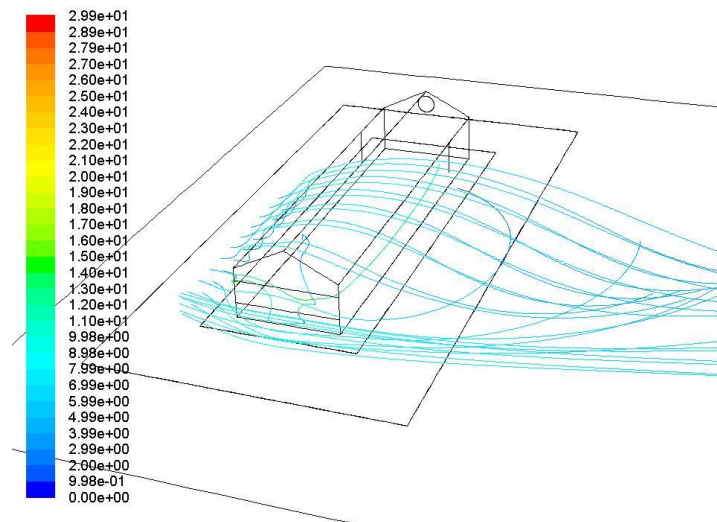
איור 20 - מסלול ומהירות החלקיקים

רוח בכיוון 90° :

מאיורים 21-22 ניתן לראות כי כאשר כיוון זרימת הרוח היה בניצב לחממה יש השפעה רבה על הזרימה בתוך החממה. המקרה המוצג כאן הינו עבור מהירות ייחוס בגובה $10[m]$ היא $3[m/s]$, שבו יש חשיבות רבה לכיוון זרימת הרוח.



איור 21 - מהירות בחתך בגובה $0.5m$ בתוך החממה



איור 22 - מסלול ומהירות החלקיקים

סיכום ומסקנות

גובשה הגישה הכוללת לאפיון שדה הזרימה בחממה המצוננת באמצעות מזרן לח. שדה זרימה המאופיין בזרימה מורכבת ומולטי-פאזית. מתוך סקירת הספרות המקפת עולה שאפיון שדה הזרימה הכולל מחייב:

- אפיון שדה הזרימה במזרן הלח במימדים האמיתיים כתלות במשתני הזרימה
- אפיון שדה הזרימה במזרן הלח תוך התייחסות אליו כתווך נקבובי על כל מאפייניו אשר אופיינו בשלב הראשון

• אפיון שדה של הזרימה במרחב החממה באמצעות המודל $(SST\ k-\omega)$. בעבודה זו פותחו מודלים נומרים המאפשרים לאפיין את הזרימה במזרן הלח במימדים האמיתיים כתלות במשתני הזרימה, ואת שדה הזרימה במרחב החממה באמצעות המודל $(SST\ k-\omega)$. שני המודלים אומתו באמצעות ניסויים ונמצאו מתאימים. המשך העבודה יכול שילוב של שני המודלים למודל אחד הכולל אפיון מדויק של הזרימה דרך המזרון הלח תוך התייחסות לזרימה בתוך ומחוץ לחממה.

רשימת ספרות מצוטטת

1. Papadakis, G. Mermier, M. Meneses, J. F. Boulard, T. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings, Journal of Agricultural Engineering Research 63 (1996) 219-228.
2. Kittas, C. Boulard, T. Mermier, M. Papadakis, C. Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings, Journal of Agricultural Engineering Research 65 (1996) 37-49.
3. Demmers T. G. M., Burgess L. R., Phillips V. R., Clark J. A. and Wathes C. M., Assessment of Techniques for Measuring the Ventilation Rate, using an Experimental Building Section. Journal of Agricultural Engineering Research, 76, 1, (2000), 71-81.
4. Boulard, T. Kittas, C. Papadakis, G. Mermier, M. Pressure field and airflow at the opening of a naturally ventilated greenhouse, Journal of Agricultural Engineering Research 71 (1998) 93-102.
5. Boulard, T. Meneses, J. F. Mermier, M. Papadakis, G. The mechanism involved in the natural ventilation of greenhouses, Agricultural and Forest Meteorology 79 (1997) 61-77.
6. Demmers T. G. M., Phillips V. R., Short L. S., Burgess L. R., Hoxey R.P. and Wathes C. M. Validation of Ventilation Rate Measurement Methods and the Ammonia Emission from Naturally Ventilated Dairy and Beef Buildings in the United Kingdom. Journal of Agricultural Engineering Research, 79, 1, (2001), 107-116.
7. Fernandez, J. E. Bailey, B. J. The influence of fans on environmental conditions in greenhouses, Journal of Agricultural Engineering Research 58 (1994) 201-210.

8. Harral B. B., Boon C. R. Comparison of Predicted and Measured Air Flow Patterns in a Mechanically Ventilated Livestock Building without Animals. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66, 3, (1996), 221-228.
9. Heber A. J., Boon C. R., Peugh M. W. Air Patterns in an experimental livestock building. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 64, (1996), 209-226.
10. S. Wang, J. Deltour, Lee-side ventilation-induced air movement in a large-scale multi-span greenhouse, *Journal of Agricultural Engineering Research* 74 (1999) 103-110.
11. Sase, S. Takakura, T. Nara, M. Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse, *Acta Horticulturae* 148 (1984) 329-336.
12. Okushima, L. Sase, S. Maekawa, T. Ikeguchi, A. Airflow patterns forced by wind effect in a Venlo type greenhouse, *The Journal of the Society of Agricultural Structures, Japan* 29 (1998) 159-167.
13. Lee, I. B. Okushima, L. Ikeguchi, A. Sase, S. Short, T. H. A prediction of natural ventilation of multi-span greenhouse using CFD techniques and its verification with wind tunnel test, *ASAE Paper No. 005003* (2000).
14. Boulard, T. Haxaire, R. Lamrani, M. A. Ruy, J. C. Jaffrin, A. Characterization and modeling of the air fluxes induced by natural ventilation in a greenhouse, *Journal of Agricultural Engineering Research* 74 (1999) 135-144.
15. Reynolds A. M., A Model for Predicting Airborne Dust Concentrations within a Ventilated Airspace. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66, 2, (1996), 103-109.
16. Quinn A. D., Wilson M., Reynolds A.M., Couling S.B., Hoxey R.P. Modeling the dispersion of aerial pollutants from agricultural buildings - an evaluation of computational fluid dynamics (CFD). *Computers and Electronics in Agriculture*, 30 (2001) 219-235.
17. Hoff S. J. Isothermal Airflow Characteristics in the Animal-occupied Zone of a Slot-ventilated Swine Facility. *Transactions of the ASAE* 38(6), (1995), 1853-1862.
18. Smith J. H., Boon C. R., Webster A. J. F. and Wathes. Measurements of the Effect of Animals on Airflow in an Experimental Piggery. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72, 2, (1999), 105-112.
19. Lee, I. B. Short, T. H. Predicted effects of internal horizontal screens on natural ventilation of a multi-span greenhouse, *ASAE Paper No. 987014* (1998).
20. Lee, I. B. Short, T. H. Sase, S. Okushima, L. Qio, G. Y. Evaluation of spectral characteristics of naturally ventilated multi-span greenhouses using computer simulation, *Japan Agricultural Research Quarterly* 34 (2000) 247-256.
21. Reichrath, S. Davies, T. W. CFD modelling of the internal environment of commercial multi-span Venlo-type glasshouses, *ASAE Paper No. 01-4054* (2001).

22. Reichrath, S. Davies, T. W. Computational fluid dynamics simulations and validation of the pressure distribution on the roof of the commercial multi-span Venlo-type glasshouse, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90 (2002) 139-149.
23. Mistriotis, A. Arcidiaconom C. Bot, G. P. A. Picuno, P. Scarascia-Mugnozza, G. Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero- and low-wind-speeds, *Agricultural and Forest Meteorology* 79 (1996) 61-77.
24. Mistriotis, A. Briassoulis, D. Numerical estimation of the internal and external aerodynamic coefficients of a tunnel greenhouse structure with openings, *Computers and Electronics in Agriculture* 34 (2002) 191-205.
25. Hoff S. J., Janni K. A., Jacobson L. D. Three-dimensional buoyant turbulent flows in a scaled model, slot-ventilated, livestock confinement facility. *Transactions of the ASAE* 35(2), (1992), 671-686.
26. Hoff S. J., Janni K. A., Jacobson L. D. Evaluating the Performance of a Low Reynold's Number Turbulence Model for Describing Mixed-Flow Airspeed and Temperature Distributions. *Transactions of the ASAE* 35(2), (1995), 1533-1541.
27. Hoff S. J. A Simplified Turbulence Model for Describing Airflow in Ceiling Slot-ventilated Enclosures. *Transactions of the ASAE* 38(6), (1995), 1853-1862.
28. Mistriotis, A. Bot, P. G. P. A. Picuno, G. Scarascia-Mugnozza, Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics, *Agricultural and Forest Meteorology* 85 (1997) 217-228.
29. Al-Arifi, A. Short, T. Ling, P. Validating the CFD model for air movements and heat transfer in ventilated greenhouses, *ASAE Paper No. 01-4056* (2001).
30. Boulard, T. Wang, S. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel, *Computers and Electronics in Agriculture* 34 (2002) 173-190.
31. Bartzanas, T. Boulard, T. Kittas, C. 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 (2002) 207-221.
32. Hoxey, R. P. Robertson, A. P. Basara, B. Younis, B. A. Geometric parameters that affect wind loads on low-rise buildings: full-scale and CFD experiments, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 50 (1993) 243-252.
33. Taylor R. A. J., Shalhevet S., Spharim I., Berlinger M. J., Lebiush-Mordechi S. Economic evaluation of insect-proof screens for preventing tomato yellow leaf curl virus of tomatoes in Israel. *Crop Protection* 20 (2001) 561-569.

34. Miguel A. F. Airflow through porous screens: from theory to practical considerations
Energy and Buildings 28 (1998) 63-69.
35. Miguel A. F. Airflow through porous screens: from theory to practical considerations
Energy and Buildings 28 (1998) 63-69.
36. Teitel M., Shklyar A., Pressure drop across insect-proof screens. *Trans. ASAE* 41, (1996)
1829-1834.
37. Teitel M. The effect of insect-proof screens in roof openings on greenhouse microclimate.
Agricultural and Forest Meteorology 110 (2001) 13-25.
38. Montero J. I., Munoz P., Anton A. Discharge coefficients of greenhouse windows with
insect-proof screens. *Axta Hort.* 443, ISHS (1997) 71-77.
39. Munoz P., Montero J. I., Anton A. and Giuffrida F. Effect of Insect-proof Screens and
Roof Openings on Greenhouse Ventilation 73 (1999) 171-178.
40. Demrati H., Boulard T., Bekkaoui A. and Bourden L. Natural Ventilation and
Microclimatic Performance of a Large-scale Banana Greenhouse. *Journal of Agricultural
Engineering Research* 80 (2001) 261-271.
41. Robertson A. P., Roux Ph., Gratraud J., Scarascia G., Castellano S., Dufresne de Virel M.,
Palier P. Wind pressures on permeably and impermeably-clad structures. *Journal of Wind
Engineering and Industrial Aerodynamics* 90 (2002) 461-474.
42. Fatnassi H., Boulard T., Demrati H., Bourden L. and Sappe G. Ventilation Performance of
a Large Canarian-Type Greenhouse equipped with Insect-proof Nets. *Biosystems
Engineering* 82 (2002) 97-105.
43. Bartzanas T., Boulard T., Kittas C. 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 (2002) 207-221
44. A.F. DeWerth. 1954. A practical method of cooling greenhouses. *Texas Agric. Expt. Sta.
Prog. Rpt.* 1729.
45. A. Arbel, O. Yekutieli and M. Barak. 1999. Performance of a fog system for cooling
greenhouses, *Journal of Agricultural Engineering Research* 72:129-136.
46. C. Kittas, T. Bartzanas and A. Jaffrin. 2003. Temperature gradient in a partially shaded
large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. *Biosystems Engineering* 85: 87-
94.
47. Reichrath, S. Davies, T. W. Using CFD to model the internal climate of greenhouses: past,
present and future, *Agronomie* 22 (2002) 3-19.

48. Haxaire, R. Boulard, T. Mermier, M. Greenhouse natural ventilation by wind forces, Proceedings of the International Conference and British-Israeli Workshop on Greenhouse Techniques towards the 3rd Millenium, *Acta Horticulturae* 534 (2000) 31-40.
49. Fletcher, C. A. J. Computational techniques for fluid dynamics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988.
50. Launder, B. E. Spalding, D. B. The numerical computation of turbulent flows, *Computational Methods in Applied Mechanical Engineering* 3 (1972) 269-289.
51. Jones, P. J. Whittle, G. E. Computational fluid dynamics for building air flow prediction - current status and capabilities, *Building and Environment* 27 (1992) 321-338.
52. Shklyar, A. Arbel, A. The function of the viscous sublayer in numerical simulation of turbulence recirculating flow with heat transfer, "Advances in Computational Heat Transfer" G. de Vahal Davis (Ed.), Begell House Inc.; New York (1998) 665-672.
53. Shklyar, A. Arbel, A. Greenhouse turbulence flow numerical simulation. Proceeding of the International Conference and British-Israeli Workshop on Greenhouse Techniques towards the 3rd Millennium, Haifa, Israel (1999) *Acta Horticulturae* 534:49-55..
54. Kozai, T. Sase, S. A simulation of natural ventilation for a multi-span greenhouse, *Acta Horticulturae* 87 (1978) 39-49.
55. Mistriotis, A. De Jong, T. Wagemans, M. J. M. Bot, G. P. A. Computational fluid dynamics (CFD) as a tool for the analysis of ventilation and indoor microclimate in agriculture, *Netherlands Journal of Agricultural Science* 45 (1997) 81-96.
56. Arbel A., Shklyar A. and Barak M. 2002. Application of CFD to agriculture – greenhouse airflow as an example. *Mikun Vehandasa Bachaclaut, in press (in Hebrew)*.
57. Shklyar A and Arbel A. 2004. Numerical model of the three-dimensional isothermal flow patterns and mass fluxes in a pitched-roof greenhouse. *Journal Of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 92:1039-1059.
58. E.J. Baeza., J. Perez-Parra., J.I Montero., 2004. Effect of Ventilator Size on Natural Ventilation in Parral Greenhouse by Means of CFD Simulations. Greensys 2004, Sept. 12-16, Leuven, Belgium.
59. J.C.Roy., T. Boulard., 2004. CFD Prediction of the Natural Ventilation in a Tunnel-Type Greenhouse: Influence of Wind Direction and Sensibility to Turbulence Models. Greensys 2004, Sept. 12-16, Leuven, Belgium.
60. Shklyar A. and Arbel A. 1998. Greenhouse wind ventilation: numerical simulations of the interaction between internal and external turbulence flow. *ASAE Annual International Meeting, Orlando, Florida, ASAE Paper No. 987010*.

61. Short, T.H. and Lee, I.B. 2002. Temperature and Airflow Predictions for Multi-Span Naturally Ventilated Greenhouse. *Acta Horticulturae* 578, 141-152.
62. M. Brugger., J.Montero., E.Baezz., J. Perez-Parra. 2004. Computational Fluid Dynamic Modeling to Improve the Design of the Spanish Parral Style Greenhouse. *Greensys 2004*, Sept. 12-16, Leuven, Belgium.
63. J.B. Campen , 2004. Greenhouse design applying CFD for Indonesian conditions. *Greensys 2004*, Sept. 12-16, Leuven, Belgium.
64. J.B. Campen and G.P.A. Bot. 2003. Determination of Greenhouse-specific Aspects of Ventilation using Three-dimensional Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering*, 84(1), 69-77.
65. H. Fatnassi., T.Boulard., C.Poncet., M. Chave., 2004. Greenhouse insect screening optimization based on CFD studies. *Greensys 2004*, Sept. 12-16, Leuven, Belgium.
66. M. Kacira., S. Sase., L. Okushima., 2004 Effects of Side Vents and Span Numbers on Wind-Induced Natural Ventilation of a Gothic Multi-Span Greenhouse. *Greensys 2004*, Sept. 12-16, Leuven, Belgium.
67. M. Kacira., S. Sase., L. Okushima., 2004 Optimization of Vent Configuration by Evaluating Greenhouse and Plant Canopy Ventilation Rates Under Wind-Induced Ventilation. *Transactions of the ASAE*, 47(6), 2059-2067.
68. I. Lee., T.H. Short., S. Sase., L. Okushima., 2000 Evaluation of Structural Characteristics of Naturally Ventilated Multi-Span Greenhouses Using Computer Simulation. *Transactions of the ASAE*, 44(1), 119-127.
69. J.I Montero., P. Munoz., A. Anton, N. Iglesias. 2004. Computational Fluid Dynamic modeling of night-time energy fluxes in unheated greenhouses. *Greensys 2004*, Sept. 12-16, Leuven, Belgium.
70. *Multiphase Flow Handbook* by Clayton T. Crowe (Editor), CRC Press, 2005.
71. Brennen, Christopher *Fundamentals of Multiphase Flow*. Cambridge University Press, 2005.
72. M. Manninen, V. Taivassalo, and S. Kallio. *On the mixture model for multiphase flow*. VTT Publications 288, Technical Research Centre of Finland, 1996.
73. L. Schiller and Z. Naumann. *Z. Ver. Deutsch. Ing.*, 77:318, 1935.
74. W.H. Lee. *A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Modeling*. Technical Report LA-UR 79-975, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 1979.
75. I. Tanasawa. *Advances in Condensation Heat Transfer*. *Advances in Heat Transfer*, 21:55-139, 1991

76. Shklyar A., **Arbel, A.** 2008. Numerical Simulations of Turbulent Flow through Screen Mesh by transient SST and k- ϵ turbulent models. *Acta Horticulturae* 802:61-66.
77. Shklyar A and Arbel A. 2009. Numerical simulations of turbulent flow through screen. *The 6th International Symposium on "Turbulence, Heat and Mass Transfer", Rome, Italy, p. 1103-1106.*
78. Menter FR. 1994 Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal* 32(8):269-89.
79. W.Ambrosini, A.Manfredini, F.Mariotti, F.Oriolo, 1995 Heat transfer from a plate cooled by a water film with countercurrent air flow, *Nuclear Technol.* 112 227-237.
80. F. Kreith, M. Bohn, 1986 *Principles of heat transfer, Int. J. Numer. Meth. Fluids* 321-354.
81. Kim, J. J. 1978 Investigation of separation and reattachment of a turbulent shear layer: Flow over a backward-facing step *Ph.D. Thesis Stanford Univ., CA.*
82. S. Thangam, C. G. SPEZIALE 1991 Turbulent separated flow past a backward-facing step: A critical evaluation of two-equation turbulence models *AIAA journal* 30 (5) p. 1314-1320
83. W.M.To, J.A.C.Humphrey 1986 , Numerical simulation of buoyant, turbulent flow -i.free convection along a heated vertical plate, *Int. J. Heat Mass Transfer* 29 573-592.

סיכום עם שאלות מנחות

1. מטרת המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
מטרת העבודה העיקרית הינה פיתוח מודל סימולציה לחיזוי המיקרו-אקלים בחממה מצוננת ואימותו ע"י מדידות.
2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח.
גובשה הגישה הכוללת לאפיון שדה הזרימה בחממה המצוננת באמצעות מזרן לח. שדה זרימה המאופיין בזרימה מורכבת ומולטי-פאזית. העבודה כללה שני משימות שונות שנערכו במקביל – אפיון שדה הזרימה במזרן הלח במימדים האמיתיים כתלות במשתני הזרימה, ואפיון שדה של הזרימה במרחב החממה באמצעות המודל ($SST k-\omega$) בעבודה זו פותחו מודלים נומרים המאפשרים לאפיין את הזרימה במזרן הלח במימדים האמיתיים כתלות במשתני הזרימה, ואת שדה הזרימה במרחב החממה באמצעות המודל ($SST k-\omega$). שני המודלים אומתו באמצעות ניסויים ונמצאו מתאימים. המשך העבודה יכלול שילוב של שני המודלים למודל אחד הכולל אפיון מדוייק של הזרימה דרך המזרון הלח תוך התייחסות לזרימה בתוך ומחוץ לחממה.
3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו.
מודל של מזרון לח באמצעות CFD נמצא ככלי טוב לביצוע אופטימיזציה של עיצוב המזרון, מכיוון שנמצאה התאמה טובה בין תוצאות הסימולציה לניסויים שנערכו בתעלת רוח. באמצעות שיטה זו אנו יכולים לחשב כיצד ינהג המזרון עבור מהירויות אוויר שונות ולחזות את כל הפרמטרים הרלוונטים לביצועי המזרון. המודל הנומרי שפותח בעבודה זו יכול לשמש ככלי רב עוצמה עבור יצרנים של מזרון לח ליצור גיאומטריות שונות בכדי לשפר את ביצועי המזרון.
- החלק השני של המחקר שכלל את זרימת האוויר בסביבת החממה ובתוכה הוכיח שלא ניתן להזניח את המתרחש מחוץ לחממה, וכי כיוון זרימת האוויר משפיע מאוד על פנים החממה למרות המאוורר והמזרון-לח. בנוסף נמצא כי מהירות הזרימה בגובה חצי מטר מפני הקרקע הייתה נמוכה מאוד גם כאשר רוח חזקה נשבה מחוץ לחממה, ויש צורך לבחון את חשיבות הזרימה בגובה הצמחייה.
4. הבעיות שנתרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה.
לצורך אפיון שדות הזרימה בחממה המצוידת במזרון לח ומאוורר ננקטו שתי גישות, מיקרו ומאקרו, אשר כל אחת מהן פותרת סקאלה שונה בבעיה המוצגת. השלב הבא יהיה אפיון שדה הזרימה במזרן הלח תוך התייחסות אליו כתווך נקבובי על כל מאפייניו אשר אופיינו בשלב הראשון (מיקרו) ואפיון שדה של הזרימה במרחב החממה באמצעות המודל ($SST k-\omega$). לא נעשו מדידות בחממה משתי סיבות עיקריות: האחת שההצעה אושרה באיחור ובמקביל החממה שהתבססנו עליה לצרכי מדידה המערכות יצאו מכלל פעולה.
5. האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח?
עדיין לא בשל השלב המוקדם שאנו מצויים בו.
6. פרסום הדוח:
ללא הגבלה
7. האם בכוונתך להגיש תוכנית המשך בתום תקופת המחקר הנוכחית?
כן.