

## אופטימיזציה של מיקרו-אקלים בבתי רשת: מודל סימולציה ומדידות

### Screen-house microclimate optimization: Simulation model and measurements

מוגש לקרן מדען ראשי משרד החקלאות

מאת:

|                                                  |                |
|--------------------------------------------------|----------------|
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | אלכסנדר שקליאר |
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | אברהם ארבל     |
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | מאיר טייטל     |
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | מרדכי ברק      |
| המכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן | אשר לוי        |
| המכון לקרקע ומים, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן    | יוסף טנאי      |
| המכון לקרקע ומים, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן    | שבתאי כהן      |
| המכון לקרקע ומים, מינהל המחקר החקלאי, בית דגן    | אברהם גרווה    |
| שה"מ                                             | יצחק אסקירה    |

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

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

M. Teitel, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: [qrteitel@agri.gov.il](mailto:qrteitel@agri.gov.il)

M. Barak, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: [barak@agri.gov.il](mailto:barak@agri.gov.il)

A. Levi, Institute of Agricultural Engineering, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: [asherl@volcani.agri.gov.il](mailto:asherl@volcani.agri.gov.il)

J. Tanai, Institute of Soil, water and Environmental sciences, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: [tanai@volcani.agri.gov.il](mailto:tanai@volcani.agri.gov.il)

A. Cohen, Institute of Soil, water and Environmental sciences, ARO, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: [vwshep@volcani.agri.gov.il](mailto:vwshep@volcani.agri.gov.il)

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

I. Askira, Extension service, P.O.B. 6 Bet Dagan. E-mail: [iseker@shaham.mpoag.gov.il](mailto:iseker@shaham.mpoag.gov.il)

יוני 2009

תמוז תשס"ט

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

חתימת החוקר

\*

## תקציר

הצגת הבעיה - החקלאות בישראל עוברת בשנים האחרונות מהפכה בתחום השימוש ברשתות והשטח הכולל של גידולים תחת רשתות עולה בהתמדה ועומד כיום על כ- 15,000 דונם. אין ספק כי לתצורת בית הרשת השפעה ניכרת על המיקרו-אקלים שבתוכו ועל הגידולים, אך למיטב ידיעתנו היום קיים מידע מועט בספרות בתחום זה. כתוצאה מכך התכנון ההנדסי של בתי רשת אינו אופטימאלי. מידת השפעת הרוח החיצונית והקרנה על המיקרו-אקלים תלויה באופן ניכר בסוג הרשת ובתצורת בית הרשת. בשיחות שערכנו עם חקלאים בערבה, שם מתרחב מאוד גידול פלפל בבתי רשת, התברר כי למרות שלנושא יש חשיבות כלכלית רבה, אין להם כיום תשובות ברורות לגבי תצורת מבנה המשרה מיקרו-אקלים ואורור מיטביים.

מהלך ושיטות עבודה - העבודה התמקדה בעיקר בהתאם לפירוט הבא: פותחה הדמיה המבוססת על המודל (Transient SST) לאפיון הזרימה מבעד לרשת במימדים הפיזיקאליים שלה. תוצאות ההדמיה אומתו בהשוואה לתוצאות ניסיוניות והתקבלה התאמה מלאה על כל משתני הזרימה. פותחה גישה כוללת להכלת תוצאות המודל (Transient SST) במודל (Standard  $k-\epsilon$ ) באמצעות הגדרת משתני הזרימה הניתנים להצבה ישירות במשוואות התנע והאנרגיה. פותחה הדמיה המבוססת על המודל (Standard  $k-\epsilon$ ) לאפיון הזרימה מבעד לרשת תוך התייחסות לרשת כתווך נקבובי ובהתבסס על תוצאות המודל (Transient SST). תוצאות ההדמיה אומתו בהשוואה לתוצאות המודל (Transient SST) והתקבלה התאמה מלאה על כל משתני הזרימה. לאחר שתוצאות המודל (Transient SST) אומתו, נעשה מיפוי מפורט של משתני הזרימה של רשת 50 מ"ש (המקובלת) בתחום רחב וכתלות במהירות האוויר וכיוונה היחסי לרשת ובשני הכיוונים - שתי וערב. על בסיס זה, פותחה הדמיה המבוססת על המודל (Standard  $k-\epsilon$ ) לאפיון שדה הזרימה בבית הרשת ובסביבתו.

תוצאות עיקריות - פותחה ואומתה הגישה הכוללת לאפיון הזרימה מבעד לרשת תוך התייחסות לרשת כתווך נקבובי ומבוססת על המודל (Standard  $k-\epsilon$ ). פותחה ואומתה הדמיה לאפיון הזרימה מבעד לרשתות המבוססת על המודל (Transient SST) ובמימדים הפיזיקאליים של הרשת. באמצעות מודל זה נעשה מיפוי מפורט של משתני הזרימה של רשת 50 מ"ש (המקובלת) בתחום רחב וכתלות במהירות האוויר וכיוונה היחסי לרשת ובשני הכיוונים - שתי וערב. על בסיס זה, פותחה הדמיה המבוססת על המודל (Standard  $k-\epsilon$ ) לאפיון שדה הזרימה בבית הרשת ובסביבתו.

מסקנות והמלצות - על בסיס התוצאות המעודדות שהתקבלו, מומלץ להמשיך בעבודה בהתאם לפרוט הבא: המשך פיתוח מודל הסימולציה במימדי בית הרשת ובחינתו בבית רשת ללא צמחיה, פיתוח מודל סימולציה במימדי הצמח תוך התייחסות לצמחייה לתווך נקבובי, והמשך פיתוח מודל הסימולציה (במימדי בית הרשת) תוך כדי שילוב הצמחייה ובחינתו בתנאים מעשיים.

**פרסומים מדעיים שנבעו מביצוע המחקר:** בהתאם להתקדמות העבודה, תוצאות העבודה הוצגו בשלושה כנסים בינלאומיים וכמאמרים מבוקרים הנלווים לכך.

## מבוא ותאור הבעיה

החקלאות בישראל עוברת בשנים האחרונות מהפכה בתחום השימוש ברשתות והשטח הכולל של גידולים תחת רשתות עולה בהתמדה ועומד כיום על כ- 15,000 דונם. הסיבות העיקריות לגידול בבית רשת הן הגנת הצמח

מפני מזיקים, הגנה נגד קרה וברד בגידולי חורף (בעיקר שסק ומטעים נשירים), הגנה מעודפי קרינה הגורמת לצריבות שמש ותופעות פיסולוגיות שליליות אחרות בקיץ והצללה והפחתת רוח להגדלת החיסכון במים.

בתי הרשת הראשונים הוקמו בעיקר לצורך הצללה והרשתות היו דלילות יחסית. עם המעבר לבתי רשת נגד מזיקים, התרחב השימוש ברשתות צפופות יותר, אשר יצרות התנגדות רבה יותר לזרימת הרוח דרכן ומעבירות פחות קרינה לנוף. תופעה זו משפיעה על בית הרשת בשתי דרכים: (1) הגדלת ההתנגדות לזרימת הרוח מגדילה את כוח הרוח הפועל על הרשת הצפופה, דבר שמחייב עגינה טובה יותר של הרשת לשלד המבנה. לפיכך, בשנים האחרונות, חקלאים עוברים לשימוש בבתי רשת בעלי גג דו-שיפועי או קשתי המאפשר אחיזה משופרת של הרשת ומפחית את נזקי הרוח לבית הרשת, (2) הרשת הצפופה מקטינה את עוצמת האוורור בתוך בית הרשת. מסיבה זו בתי רשת מודרניים הם גבוהים יותר, וזאת לצורך שיפור האוורור על ידי יצירת חלל אוויר גדול יותר מעל הגידולים ומניעת הצטברות אוויר חם ולח באזור הצמחייה.

אין ספק כי לתצורת בית הרשת השפעה ניכרת על המיקרו-אקלים שבתוכו ועל הגידולים, אך למיטב ידיעתנו היום קיים מידע מועט בספרות בתחום זה. כתוצאה מכך התכנון ההנדסי של בתי רשת אינו אופטימאלי. מידת השפעת הרוח החיצונית והקרינה על המיקרו-אקלים תלויה באופן ניכר בסוג הרשת ובתצורת בית הרשת. בשיחות שערכנו עם חקלאים בערבה, שם מתרחב מאד גידול פלפל בבתי רשת, התברר כי למרות שלנושא יש חשיבות כלכלית רבה, אין להם כיום תשובות ברורות לגבי תצורת מבנה המשרה מיקרו-אקלים ואוורור מיטביים.

במחקר זה מוצע לשלב שיטות תיאורטיות וניסיוניות מתקדמות על מנת ללמוד את ההשפעה של תצורת בית הרשת על המיקרו-אקלים של הגידולים. מיפוי ניסויי מלא של התנאים האקלימיים בבית רשת כרוך בהשקעת משאבים גדולים מאד בציוד מדידה ובכוח אדם. לעומת זאת, מיפוי תנאי האקלים בתוך ומחוץ למבנה באמצעות מודלים תיאורטיים (הדמיה ממוחשבת), לאחר שעברו אימות וכיול, עשויים לשמש ככלי עזר לתכנון משופר של המבנה במגמה להקנות תנאי גידול מיטביים. במחקר זה, ישולבו מדידות ומודל הדמיה תיאורטי. לאחר כיול ואימות תוצאות ההדמיה הממוחשבת כנגד ניסויים, ניתן יהיה, בקלות יחסית, להעריך את ההשפעה של שינויים בסוג הרשת או בתצורת המבנה על המיקרו-אקלים. לפיכך, המחקר יכול ביצוע הדמיה ממוחשבת, וניסויי שדה בבתי רשת בעלי גובה שונה ובעלי מבנה שונה של גג (אופקי לעומת דו שיפועי). התועלת הצפויה מן המחקר תהיה אפשרות לשפר את המיקרו-אקלים בבית הרשת באופן פסיבי, כלומר ע"י שינוי התצורה שלו, גובהו, או שינוי כוון המבנה ביחס לרוח השלטת באזור. שיפור פסיבי לא יגדיל את מחיר בית הרשת והוא יישאר זול יותר מחממה, גם לאחר יישום השיפור.

**מטרות העבודה** – המטרה העיקרית של המחקר היא להגיע להמלצות על מאפייני בית רשת שישרה מיקרו-אקלים מיטבי בתנאי אקלים חיצוני נתונים. להשגת מטרה זו יתמקד המחקר בשלושת הנושאים הבאים:

1. פיתוח מודל סימולציה באמצעות מחולל יישומים FLUENT לחיזוי שדה הזרימה ותנאי האקלים בבתי רשת.
2. אימות ניסויי וכיול של מודל הסימולציה ע"י מדידות בבית רשת מסחרי.
3. בחינת השפעת ממדי המבנה (גובה, רוחב ואורך), צורת המבנה (שיפוע הגג והקירות) וסוג הרשת על המיקרו-אקלים של הגידולים.

## תאור מהלך העבודה

ממדי מרחב הזרימה מחוץ לבית הרשת יוגדלו באופן הדרגתי עד למצב בו לא יגרמו שינויים משמעותיים בשדה הזרימה שבבית הרשת ובקרבתו. בהתאם לכך ולאחר ניסוי וטעייה, יקבע מרחב הזרימה החיצוני המתאים. מניסיון שהצטבר נראה שממדי מרחב הזרימה גדולים בהשוואה למימדי המבנה הנדון. כמתואר באיור 1 ועל פי ניסיון המצטבר, ממדי מרחב הזרימה – גובה, רוחב ואורך גדולים כדי פי 5, 10 ו- 20 ממימדי המבנה, בהתאמה. בנוסף לכך, לצורך אפיון שדה זרימה זה יש להתייחס לבית הרשת ומרכיביו בשלוש רמות של סקלה: (1) רשת – המורכבת מחוטים דקים (בקוטר של עשיריות המ"מ) ובצפיפות שונה. (2) צמחייה – סקלה העשויה להשתנות החל ממספר סנטימטרים (בזמן שתילה – או גידולים שרועים) וכלה במספר מטרים (גידולים מודלים, שיחים וכו'). (3) בית הרשת – בממדים של עשרות עד מאות מטרים. כמצוין למעלה, לצורך אפיון שדה הזרימה במבנה, מרחב הזרימה המתחייב גדול מאוד בהשוואה לבית הרשת הנדון. כמובן, לא ניתן לערוך חלוקה לנפחים סופיים בהתאם לשלושת הסקאלות בעת ובעונה אחת. במגמה לגשר על כך, מחולל היישומים FLUENT מאפשר להתייחס הן לרשת והן לצמחייה כתווך נקבובי. הרשת והצמחייה עשויים להוות בור לקרינת השמש, מקור לאנרגיה חום (קרינתי והסעתי – חום מוחש וכמוס) וכהתנגדות לזרימת האוויר דרכם. מאפיינים אלה ניתנים לכימות באופן ניסיוני או באמצעות מודל סימולציה מתאים תוך התייחסות לבעיה ולמימדים האמיתיים.

תחילה, העבודה התמקדה בפיתוח מודלים של סימולציה לאפיון משתני הזרימה בהשפעת הרשת שהם: הפרש לחצים, שינוי כיוון זרימה, האנרגיה הקינטית הטורבולנטית ושטף הכחדת האנרגיה הקינטית הטורבולנטית, כתלות במהירות וכיוון של הזרימה המציפה. במסגרת זו פותחו שני מודלים:

1. מודל רשת פיזיקאלי – תוך התייחסות לתצורה ולממדים האמיתיים של הרשת

2. מודל רשת ייצוגי – תוך התייחסות לרשת כתווך נקבובי ובהתבסס על תוצאות המודל הפיזיקאלי

**מודל רשת פיזיקאלי** – כמצוין, לצורך אפיון משתנים אלה יש צורך להתייחס לצורה ולמימדים האמיתיים של הרשת (כמתואר באיור 2). לצורך זה, ניתן להסתפק באפיון זרימה של יחידה מודולארית של הרשת ובהנחה שהזרימה הינה דומה עבור היחידות המודולאריות השכנות (תנאי גבול זהים). עבור רשת ארוגה הנהוגה כיום, היחידה המודולארית (במימדים של כחצי מ"מ לכל צד), כמתואר באיור 3, כוללת שני חוטים במרכז וארבעה חצאי חוטים בהיקף היוצרים ארבעה פתחים שהאוויר עובר דרכם. בתנאים אלה, מרחב הזרימה המתבקש הינו תעלה מלבנית ארוכה (כדי מטר ויותר לקבלת זרימה מפותחת), כמתואר באיור 4. בתנאים אלה תנאי הגבול הינם על פי הפירוט הבא: דופן כניסה – אוויר במהירות מציפה בעלת שלושה רכיבים בניצב (בכיוון  $x$ ), בכיוון  $y$  ובכיוון  $z$  (ובהתאם לכך מוגדרות הזוויות  $\alpha$  ו- $\beta$ ). דפנות צד – תנאי הגבול מוגדרים כתנאים מחזוריים שמשמעותם תנאי כניסה בדופן האחת זהים לתנאי היציאה בדופן הנגדית, דופן יציאה – תנאים חופשיים אשר מיקומה נקבע בניסוי ותהיה כך שהיא מורחקת עד לקבלת שינויים זניחים בשדה הזרימה.

כמתואר באיור 5, חלוקת מרחב זרימה זה לאלמנטים סופיים נעשתה בהתאם לדרישות הבאות: חלוקה עדינה ביותר בקרבת החוטים ודילול מספר האלמנטים על ידי הגדלת האלמנטים באופן הדרגתי ככול שהמרחק מהרשת גדל. בהתאם לכך, נבחנו מספר מודלים לאפיון הזרימה מבעד לרשת והם:

1. Standard RNG  $k-\epsilon$

Realizable  $k-\varepsilon$  .2Standard SST  $k-\omega$  .3

Reynolds stress (RSM) .4

Transient SST  $k-\omega$  .5

מתוך בחינת תוצאות המודלים האלה עולה שרק המודל Transient SST  $k-\omega$  מניב תוצאות בהתאמה מלאה לתוצאות הניסיוניות על כל משתני הזרימה (כמפורט בהמשך). מודל זה מאפשר לאפיין זרימה לאמינארית, טורבולנטית והמעבר ביניהם בקירוב טוב תוך שימוש במשוואות קיר משופרות. הזרימה בקרבת החוטים מתאפיינת בשכבת גבול המשתנה באופן ניכר במרחב. שימוש במודל זה מחייב שמרחק הנקודה הראשונה (מרכז האלמנט הסופי הראשון שבקרבת החוט) יהיה בהתאם למרחק חסר הממד המוגדר כ-  $y^+$  בקרבת 1. אי לכך, הקושי העיקרי בשימוש במודל זה הינו חלוקה שתענה על דרישה זו (המתקבלת רק לאחר ניסוי וטעייה). מספר האלמנטים הסופיים הנדרש בעקבות זאת נאמד ב- 1000000.

במקביל לכך, נערך סקר ספרות מקיף באשר לתוצאות תיאורטיות וניסיוניות בנושא. מתוך סקירה זו עולה שעבודה רבה נעשתה בנושא [1 – 3] בעיקר לצורכי תעלות רוח המתאפיינות באנרגיה קינטית טורבולנטית נמוכה (עד 2%) בהשוואה לתנאים חיצוניים (עד 20%) של בית רשת (המצויה בשכבת גבול של האטמוספירה – שהיא למעשה סקאלה נוספת על הסקאלות המתוארות למעלה). לצורך בחינת תוצאות המודל אותרו תוצאות ניסיוניות של רשתות מאותו סוג ואופיינו באמצעות המודלים הנ"ל. תוצאות המודלים השונים נבחנו בהשוואה לתוצאות הניסיוניות, כמפורט בהמשך.

**מודל רשת ייצוגי** – כמצוין, FLUENT מאפשר לייצג את הרשת כתווך נקבובי. הווה אומר, הרשת מיוצגת על ידי מספר שכבות של אלמנטים סופיים שבהם מתחוללים השינויים המשקפים את הרשת, על פי תוצאות המודל של הרשת הפיזיקאלי. כמתואר באיור 6, רוחב כולל של ה- "התווך הנקבובי" נקבע בהתאם למודל הפיזיקאלי ומתאפיין בכך שהזרימה בכניסה אליו וממנו הינה אחידה, כמתואר בהמשך. תוצאות ה"מודל רשת פיזיקאלי" מיוצגות כמקורות או בורות במודל רשת ייצוגי המתבסס על המודל (Standard  $k-\varepsilon$ ) ועל פי הפרוט הבא:

- הפרש לחצים – מקדם הגרר
- שינוי כיוון זרימה – כוחות גרר המוספים למשוואות המומנטים (בשני הכיוונים)
- אנרגיה קינטית טורבולנטית – שינוי בהתאם
- שטף הכחדת האנרגיה הקינטית הטורבולנטית – שינוי בהתאם

**מיפוי הזרימה מבעד לרשת 50 מש מקובלת** – העבודה התמקדה באפיון הזרימה מבעד לרשת 50 מש (המקובלת) במימדים הפיזיקאליים שלה. אפיון זה נעשה באמצעות המודל (Transient SST) שנמצא מתאים לצורך זה ולאחר שתוצאותיו אומתו בהשוואה לתוצאות ניסיוניות. אפיון זה נועד לצורך מיפוי מקדמי ומשתני הזרימה השונים תוך התייחסות לרשת כתווך נקבובי ושימוש במודל (Standard  $k-\varepsilon$ ) המתאים יותר לאפיון הזרימה של בית הרשת ומרחב הזרימה הכולל. מקדמים ומשתנים אלה משקפים את השפעת הרשת כמקורות ובורות למשתני הזרימה השונים תוך כדי שילובם במשוואות האנרגיה והתנע. מיפוי זה נעשה כתלות במהירות האוויר וכיוונה היחסי לרשת ובשני הכיוונים – שתי וערב. בהתאם לתוצאות שהתקבלו, נבחנו והותאמו מקדמי ומשתני הזרימה השונים שיהיו ניתנים להכלה במודל Standard  $k-\varepsilon$  ולשימוש ידידותי.

**הדמיה של בית רשת וסביבתו** – פותחה הדמיה תלת ממדית של בית הרשת וסביבתו. הדמיה זו מבוססת על המודל (Standard  $k-\varepsilon$ ), תוך התייחסות לרשת כתווך נקבובי ובהתבסס על תוצאות המודל (Transient SST). פרט לכך, ההתייחסות לבית הרשת דומה במהותה למבנים אחרים כמפורט בהצעת העבודה, כגון חממות [4] בכל הקשור למרחב הזרימה ותנאי גבול.

### תוצאות ודיון

**מודל רשת פיזיקאלי** – באמצעות הדמיה זו ניתן לקבל ולאפיין את הזרימה על כל משתניה הרבים (מהירות, לחץ וכדומה). לשם הדגמה, באיור 7 מוצגת השתנות מהירות האוויר בחתך אנכי של מרחב הזרימה ובמרכזו. כמו כן, ניתן לתאר משתנים נוספים כגון לחץ, מהירות אוויר בכיוון  $x$  (בניצב לרשת), מהירות אוויר בכיוון  $y$ , מהירות אוויר בכיוון  $z$ , בהתאמה כמתואר בחמש נקודות שונות שבחתך הזרימה באיורים 8a, 8b, 8c, 8d. כצפוי, בקרבת הרשת (ראה איור 8a) קיימת שונות בלחץ הסטטי בין הנקודות השונות וניתן להבחין בכך שהזרימה אחידה הן לפני הרשת והן לאחריה רחוק מספיק מהרשת. כמו כן, ניתן להצביע על כך שלחץ של הזרימה שלאחר הרשת נמוך בהשוואה לזה שלפני הרשת. ירידת לחץ זו משקפת את התנגדות הרשת לזרימה. בדומה לכך, מהירות האוויר שבכיוון  $x$  (ראה איור 8b) אלא שמהירות האוויר שלפני ואחרי זהות, כצפוי. הדבר שונה באשר למהירויות האוויר (ראה איורים 8c ו-8d) בכיוון  $y$  ובכיוון  $z$ , כך המהירויות שאחרי הרשת קטנה בהשוואה לזו שלפני הרשת. שינוי זה מצביע על שינוי כיוון זרימה במעבר דרך הרשת שיש להתחשב בו. המשותף לכל המשתנים האלה שהזרימה אחידה ובלתי משתנה במרחק שמעל לכ-  $10d$  לפני הרשת ובמרחק שמעל לכ-  $20d$  אחרי הרשת. באשר לאנרגיה טורבולנטית (ראה איור 9) אומנם הינה אחידה אלא שהיא משתנה גם לפני הכניסה לתחום זה וגם אחרי היציאה מתחום זה. משמעות הדברים, שתוצאות שני המודלים (הפיזיקאלי והייצוגי) אמורים להיות דומים באשר לאנרגיה טורבולנטית לפני הכניסה לתחום הערבוב ואחריה. כמתואר בהמשך, השינויים באנרגיה טורבולנטית מתחוללים לאורך של עד כ- מטר מעבר לרשת. מכל מקום ובהתאם לכך, כמתואר באיורים 8d ו-9, תחום זה מוגדר כתחום הערבוב בחישובים על פי המודל הפיזיקאלי Transient SST ומיוצג כתווך נקבובי בחישובים על פי המודל הייצוגי Standard  $k-\varepsilon$  (ראה איור 6).

**אימות תוצאות המודל הפיזיקאלי** – לצורך בחינת תוצאות המודל אותרו תוצאות ניסיוניות של רשתות מאותו סוג ואופיינו באמצעות המודלים הנ"ל. תוצאות המודלים השונים נבחנו בהשוואה לתוצאות הניסיוניות. מתוך בחינה זו עולה שכל המודלים הנ"ל משקפים נאמנה את הפרש לחצים ושינוי כיון זרימה. לעומת זאת, רק המודל Transient SST  $k-\omega$  משקף נאמנה גם את האנרגיה הקינטית הטורבולנטית ושטף הכחדת האנרגיה הקינטית הטורבולנטית. תחילה נבחן באופן פרטני המקרה בו: רשת 54 מש (בשני הכיוונים), עובי חוט 0.14 מ"מ, זרימה מציפה אנכית לרשת, מהירות של 3 מ' לשנייה והאינטנסיביות של הזרימה בכניסה 0.6%. תוצאות אלה נבחנו בהשוואה לתוצאות ניסיוניות [3] והתקבלה התאמה מלאה. בדומה לכך, חושבו מספר רב של מקרים נוספים של רשת זו. לצורך ההשוואה חושבו המשתנים השונים כתלות במספר ריינולדס המחושב לפי הרכיב הניצב של המהירות המציפה ועובי החוט. באיור 10 מוצג מקדם מפל הלחץ של הרשת (המוגדר כיחס בין מפל הלחץ ואנרגיה הקינטית של הזרימה המציפה) על פי תוצאות ניסיוניות מדגמיות, משוואת Brundrett [2] המשקפת סקירה מקיפה של עבודות רבות, בהתאם לסטיות של 10% ממשוואת Brundrett המשקפים את תחום שגיאת המדידות באמצעות גבול עליון

וגבול תחתון, ותוצאות המודלים שפותחו לצורך זה. על פי התוצאות נראה שקיימת התאמה מלאה לתוצאות משוואת Brundrett. לצורך אימות פילוג האנרגיה הטורבולנטית, נבחנו המקרים בהן: רשת 24 מש (בשני הכיוונים), עובי חוט 0.19 מ"מ, זרימה מציפה אנכית לרשת, בשלושה מהירויות של 10, 20 ו-30 רגל לדקה והאינטנסיביות של הזרימה בכניסה 0.6%. כמתואר באיור 11, קיימת התאמה טובה בין התוצאות של ההדמיה לתוצאות הניסיוניות [3]. חשוב להדגיש, בתנאי הסביבה האינטנסיביות בכניסה גדולה בהשוואה לזו הנהוגה במנהרות רוח. תוצאות ניסיוניות דומות לערכי אינטנסיביות גבוהות אינן בנמצא. אי לכך, ניאליץ להסתמך על תוצאות מודל הסימולציה שפותח לצורך זה.

**מודל רשת ייצוגי** – נבחנו מספר מקרים כאשר מרחב הזרימה בדומה לזה שנעשה ב"מודל רשת פיזיקאלי", אלא שהרשת יוצגה כתווך נקבובי והחלוקה לאלמנטים סופיים נעשה בהתאם לכך ולשימוש במודל  $k-\varepsilon$ . Standard תחילה, נבחן פילוג הלחץ באמצעות שני המודלים פיזיקאלי וייצוגי, כמתואר באיור 12. כצפוי, תוצאות המודל הייצוגי בתחום התווך הנקבובי או תחום הערבוב שונות מתוצאות המודל הפיזיקאלי. עם זאת והחשוב מכול, התוצאה המתקבלת שתנאי הכניסה והיציאה מתחום זה הינן זהות בשני המודלים. בדומה לכך, ניתן להראות שקיימת התאמה מלאה בשינוי כיוון הזרימה בשני הכיוונים  $y$  ו- $z$ . לעומת זאת, כאשר לאנרגיה קינטית טורבולנטית לא ניתן להסתפק בבחינה סביב תחום הערבוב אלא הרבה מעבר לכך. כמתואר באיור 13, תוצאות שני המודלים הייצוגי והפיזיקאלי בהתאמה מלאה.

**מיפוי רשת 50 מש** – לאחר שתוצאות מודל הסימולציה אומתו, העבודה התמקדה באפיון הזרימה מבעד לרשת 50 מש (המקובלת – חוטים 'לאינצ' בכיוון  $y$  ו-25 בכיוון  $z$ ) במימדים הפיזיקאליים שלה באמצעות המודל (Transient SST). אפיון זה נועד לצורך מיפוי מקדמי ומשני הזרימה השונים תוך התייחסות לרשת כתווך נקבובי ושימוש במודל ( $k-\varepsilon$ ) המתאים יותר לאפיון הזרימה של בית הרשת ומרחב הזרימה הכולל. כמצוין למעלה אפיון זה כולל את: מפל לחץ, שינוי כיוון זרימה בכיוון  $y$  ובכיוון  $z$ , מקור אנרגיה קינטית טורבולנטית ( $k$ ) ובור לשטף אנרגיה קינטית טורבולנטית ( $\varepsilon$ ). משתנים אלה אופיינו כתלות במספר ריינולדס ובזווית הזרימה (בכיוון  $y$  -  $\alpha$  ובכיוון  $z$  -  $\beta$  כמתואר באיור 4). תוצאות אלה מוצגות באיורים 14 ו-15. באיור 14 מתואר מקדם מפל הלחץ ונראה שעד לזוויות של כ- $60^\circ$  (לשני הכיוונים) ההבדלים בין התוצאות יחסית קטנים ולעומת זאת במצבים בהן הזוויות גדולות יותר ההבדלים הולכים וגוברים. כמו כן, באיורים 15a ו-15b מוצגים מקדמי שינוי זווית הזרימה בכיוון  $y$  ובכיוון  $z$ , בהתאמה. על פי התוצאות נראה שעד לזוויות של כ- $45^\circ$  (לשני הכיוונים) ההבדלים בין התוצאות יחסית קטנים ולעומת זאת במצבים בהן הזוויות גדולות יותר ההבדלים הולכים וגוברים. בנוסף לכך, באיורים 15c ו-15d מוצגים בורות ומקורות של אנרגיה קינטית טורבולנטית ( $k$ ) ושטף הכחדה של אנרגיה קינטית טורבולנטית ( $\varepsilon$ ), בהתאמה. בהתאם לתוצאות שהתקבלו נראה שניתן לתאר את המשתנים הנ"ל באמצעות משוואות מקורבות (כתלות ב- $Re_x$ ,  $\alpha$  ו- $\beta$ ), פרט לשני המשתנים האחרונים (בורות ומקורות של אנרגיה קינטית טורבולנטית -  $k$  ושטף הכחדה של אנרגיה קינטית טורבולנטית -  $\varepsilon$ ). בעקבות זאת, בחנו גישות נוספות עקיפות יותר ומשתנים אחרים שיענו על הצורך הזה. הגישה שנבחרה מבוססת על הניתוח הבא: משוואות אנרגיה קינטית טורבולנטית ושטף ההכחדה של המודל  $k-\varepsilon$  הינם:

$$(1) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_{sk} - \rho \varepsilon + S_k$$

$$(2) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_{sk} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

כאשר  $G_{sk}$  מייצג את מקורות האנרגיה הקינטית הטורבולנטית בהתאם לגרדינטים של מהירות הזרימה הממוצעת ומתקבל מתוך:

$$(3) \quad G_k = \mu_t S^2$$

כאשר:  $\mu$  צמיגות מולקולארית,  $\mu_t$  צמיגות טורבולנטית ו- $S$  ערך ממוצע של טנזור המאמצים ומחושב מתוך:

$$(4) \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

בדומה לכך, משוואות אנרגיה קינטית טורבולנטית ושטף ההכחדה של המודל Transient SST  $k-\omega$  הינם:

$$(5) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k$$

$$(6) \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega$$

כאשר  $G_k$  מייצג את מקורות האנרגיה הקינטית טורבולנטית בהתאם לגרדינטים של מהירות הזרימה הממוצעת ומחושב בהתאם למשוואה (3), אלא שצמיגות טורבולנטית -  $\mu_t$  מחושבת בהתאם למודל Transient SST  $k-\omega$ . המשותף לשני המודלים הנ"ל בצמיגות המולקולארית וטנזור המאמצים  $S$ . אי לכך, ניתן לחשב את טנזור המאמצים מתוך:

$$(7) \quad S^2 = \frac{G_k}{\mu_t}$$

ואת האיבר -  $G_{sk}$  המופיע בשתי המשוואות של המודל Standard  $k-\varepsilon$  ומחושב מתוך:

$$(8) \quad G_{sk} = \mu_t S^2$$

בהתאם לכך, כתחליף לבורות ומקורות של אנרגיה קינטית טורבולנטית -  $k$  ושטף הכחדה של אנרגיה קינטית טורבולנטית -  $\varepsilon$ , אופיינו משתנים  $C_\mu$  ו- $G_k$  כמתואר באיורים 16 ו-17, בהתאמה.

נציין, לצורך מיפוי זה חושבו מעל ל-100 מצבים כאשר כול מצב חייב התאמה לחלוקה לאלמנטים סופיים ולאחר שזה נקבע, חישוב שדה הזרימה באמצעים שבידינו כיום, ארך מעל ליממה.

**הדמיה של בית רשת** – כמתואר למעלה, פותחה הדמיה תלת ממדית של בית הרשת וסביבתו. הדמיה זו מבוססת על המודל (Standard  $k-\varepsilon$ ), תוך התייחסות לרשת כתווך נקבובי ובהתבסס על תוצאות המודל (Transient SST).

כשלב התחלתי, בשל מגבלות אמצעי החישוב שבידינו כיום, מודל זה נבחן עבור בית רשת קטן מימדים יחסית (אורך 20 מ', רוחב 20 מ' וגובה 4 מ'), מצב איזותרמי ובאופן עקרוני בלבד. אי לכך מוקדם מידי להציג תוצאות מקיפות. עם זאת ולצורך הדגמה בלבד, באיור 18 מוצגים מספר קווי זרימה בחתך מרכזי ולאורכו. בנוסף לכך, באיור 19 מוצגת התפלגות האינטנסיביות של האנרגיה הטורבולנטית לאורך מרכז המבנה ובגובה 2 מ'. בהתאם לכך וכצפוי, ניתן להצביע על כך שהאינטנסיביות של האנרגיה הטורבולנטית הממוצעת שבתוך המבנה נמוכה מאוד בהשוואה לזו של הסביבה. נתון זה חשוב בעיקר לאפיון מעבר חום ומסה.



לאחרונה הצלחנו לשכנע את הנהלת מינהל המחקר החקלאי והנהלת המכון להנדסה חקלאית לסייע לנו ברכישת אמצעי חישוב מתקדמים והן בהרחבת הרישיונות של השימוש ב-Fluent, המותאמים לצרכים המשתקפים מעבודה זו. במהלך השנה האחרונה עסקנו רבות בהתקנתה של מערכת זו ולאחרונה הצלחנו להפעיל את המערכת הזו אך באופן חלקי בלבד. בהתאם לכך ובדומה למתואר למעלה, אופיין שדה הזרימה של בית רשת גדול יותר (במימדים של: אורך 50 מ', רוחב 50 מ' וגובה 4 מ'), כאשר הרוח ניצבת לדופן ומהירות הרוח הינה 5 מ' לשנייה בגובה של 10 מ'. לצורך הדגמה, באיור 20 מוצגים מספר קווי זרימה בחתך מרכזי ולאורכו. באיור 21 מוצגים מהירות האוויר ומספר קווי זרימה בחתך אנכי שבמרכז בית הרשת. בנוסף לכך, באיור 22 מוצג תקריב של פילוג מהירות בחתך אנכי במרכז בית הרשת וקווי זרימה. תוצאות אלה מעידות על רמת המורכבות של הזרימה בבית הרשת ובסביבתו. על פי תוצאות אלה ניתן להבחין בכניסת האוויר דרך הדופן החשופה לרוח ויציאה מבעד לכל שאר הדפנות. כמו כן, ניתן להצביע על מספר ערבולים הקיימים מאחורי הדופן החסויה לרוח. בדומה לכך, ניתן להציג התפלגויות של משתני הזרימה כגון מהירות אוויר על רכיביה, לחצים, אנרגי טורבולנטית, ובחתכים שונים. לצורך אפיון כמותי, בחרנו להציג מספר משתנים על פי הפירוט הבא:

**מהירות אוויר** – באיור 23 מתואר פילוג מהירות האוויר בתוך בית הרשת כתלות במיקום לאורך המבנה (ציר x) ובמיקום לרוחב המבנה (ציר z) ממרכז המבנה ( $z=0$  – קו הסימטריה) עד חצי מ' מהדופן הצד ( $z=24.5$ ) ובגובה (ציר y) של 1 מ' מפני הקרקע. על פי התוצאות ניתן להצביע על כניסת אוויר במהירות אחידה ומהירות אחידה לרוחב המבנה, פרט לאזור שבקרבת דפנות הצד.

**לחץ סטטי** – בדומה לסעיף הקודם, באיור 24 מובאים תוצאות של לחץ סטטי.

**אינטנסיביות** – בדומה לסעיפים הקודמים, באיור 25 מובאים תוצאות של לחץ האינטנסיביות הטורבולנטית. תוצאות דומות התקבלו עבור גבהים נוספים של 0.5, 1.5, ו-2 מ'. תוצאות אלה עשויות להצביע על רמת האחידות של התנאים השוררים בבית הרשת.

בנוסף לכך, באיורים 26 – 29 מוצגים פילוג רכיב המהירות הניצבת על דפנות בית הרשת: דופן החשופה לרוח, דופן החסויה לרוח, דופן צד (האחת מטעמי סימטריה) ודופן עליונה, בהתאמה. תוצאות אלה מלמדות על שטף האוויר של בית הרשת כמכלול.

## סיכום ומסקנות

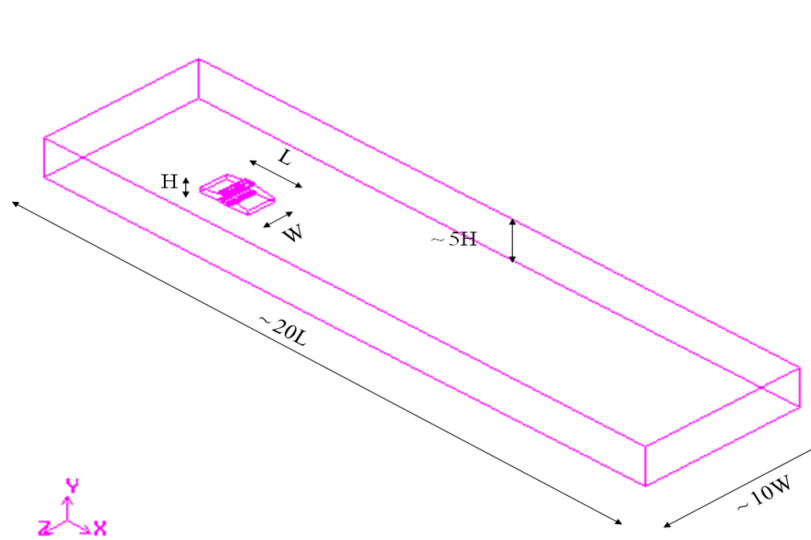
העבודה התמקדה בעיקר בהתאם לפירוט הבא: פותחה הדמיה המבוססת על המודל (Transient SST) לאפיון הזרימה מבעד לרשת במימדים הפיזיקאליים שלה. תוצאות ההדמיה אומתו בהשוואה לתוצאות ניסיוניות והתקבלה התאמה מלאה על כל משתני הזרימה. פותחה גישה כוללת להכלת תוצאות המודל (Transient SST) במודל (Standard k-ε) באמצעות הגדרת משתני הזרימה הניתנים להצבה ישירות במשוואות התנע והאנרגיה. פותחה הדמיה המבוססת על המודל (Standard k-ε) לאפיון הזרימה מבעד לרשת תוך התייחסות לרשת כתווך נקבובי ובהתבסס על תוצאות המודל (Transient SST). תוצאות ההדמיה אומתו בהשוואה לתוצאות המודל (Transient SST) והתקבלה התאמה מלאה על כל משתני הזרימה. לאחר שתוצאות המודל (Transient SST) אומתו, נעשה מיפוי מפורט של משתני הזרימה של רשת 50 מש (המקובלת) בתחום רחב וכתלות במהירות האוויר וכיוונה היחסי לרשת ובשני הכיוונים – שתי וערב. על בסיס זה, פותחה הדמיה המבוססת על המודל (Standard k-ε) לאפיון

שדה הזרימה בבית הרשת ובסביבתו. על פי התוצאות המעודדות שהתקבלו ניתן להצביע על המסקנות העיקריות הבאות:

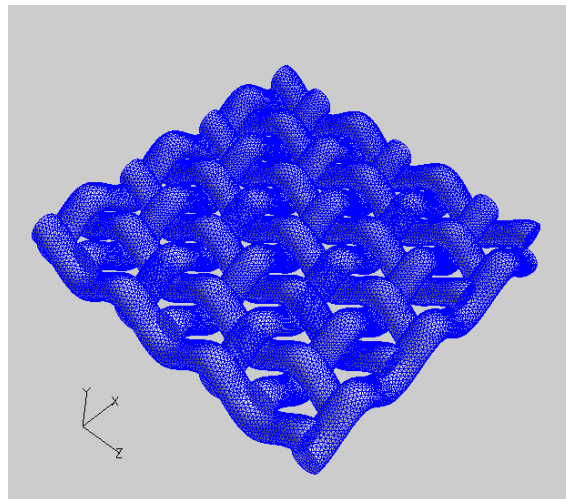
1. אותרו המודלים המתאימים לאפיון הזרימה מבעד לרשת כאשר האחד מותאם למימדי הרשת והשני מותאם למימדי בית הרשת והסביבה.
2. תוצאות המודל הפיזיקאלי נבחנו בהשוואה לתוצאות ניסיוניות והתקבלה התאמה מלאה.
3. אותרו המשתנים העשויים לשמש במודל הייצוגי (תוך התייחסות לרשת כתווך נקבובי) המחושבים באמצעות המודל הפיזיקאלי של הרשת.
4. יש בידינו מיפוי מקיף של רשת 50 מש מקובלת המאפשר לבחון את שדה הזרימה בבית רשת וסביבתה.
5. פותחה הדמיה המבוססת על המודל ( $k-\epsilon$  Standard) לאפיון שדה הזרימה בבית הרשת ובסביבתו אך לא אומתו תוצאותיה.
6. על בסיס התוצאות המעודדות אלה, המשך העבודה בטווח הקצר יתמקד בהתאם לפרוט הבא:
  1. מיפוי רשתות מקובלות נוספות
  2. המשך פיתוח מודל הסימולציה במימדי בית הרשת ובחינתו תחילה בבית רשת ללא צמחיה
  3. פיתוח מודל סימולציה במימדי הצמח תוך התייחסות לצמחייה לתווך נקבובי
  4. המשך פיתוח מודל הסימולציה (במימדי בית הרשת) תוך כדי שילוב הצמחייה ובחינתו בתנאים מעשיים

#### רשימת ספרות מצוטטת

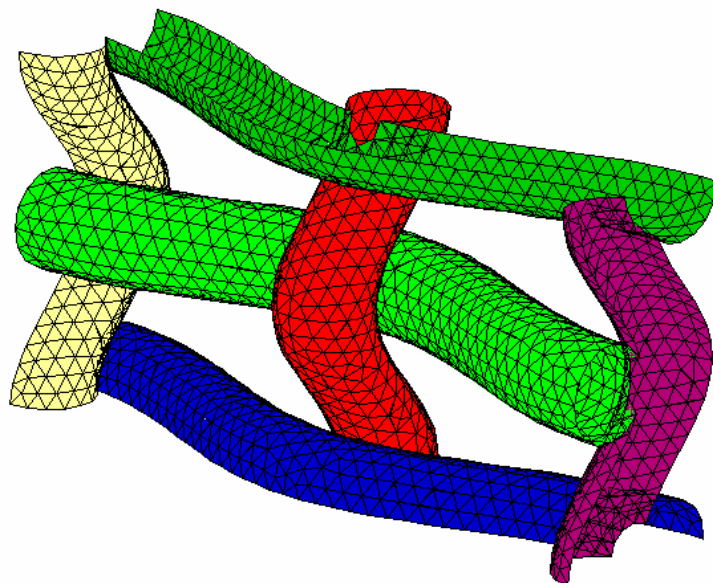
1. Schubauer, G.B., Spangenberg, W.G. and Klebanoff, P.S., 1948, Aerodynamic Characteristics of Damping Screens, NACA TN 2001.
2. Brundrett, E. 1992, Prediction of Pressure Drop for Incompressible Flow Through Screens, Journal of Fluids Engineering, Vol. 115, pp. 239-242.
3. Tan-achitat, J., Nagio, H.M., and Loehrke, R.I., 1982, Interaction of Free-Stream Turbulence with Screens and Grids: A Balance Between Turbulence Scales, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 114, pp. 501-528.
4. 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.



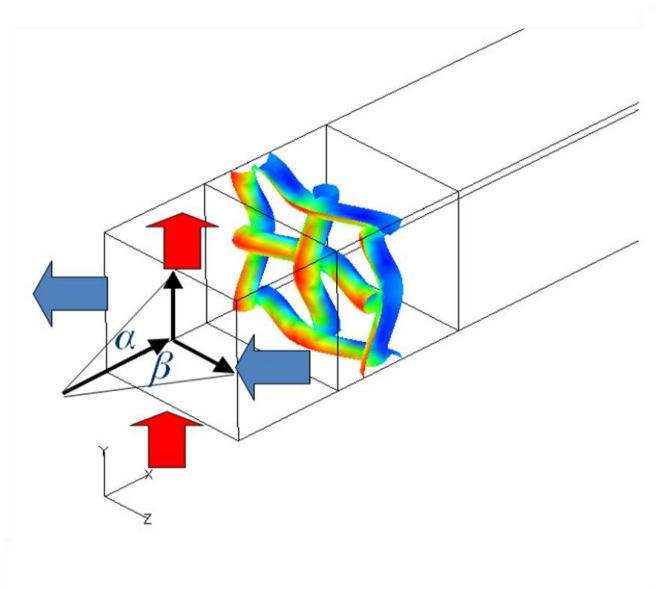
איור 1: ממדי מרחב הזרימה



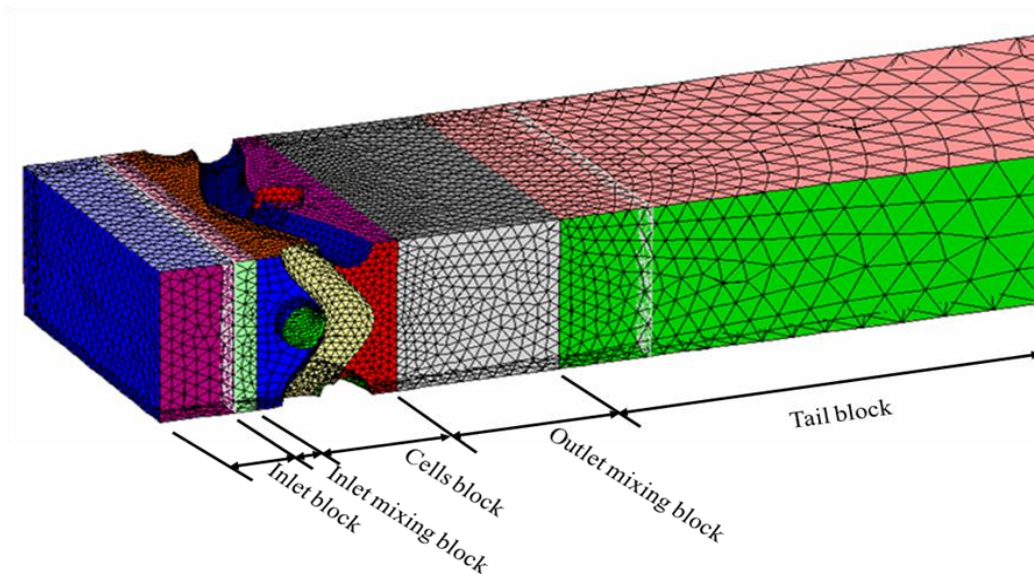
איור 2: מבנה של הרשת הארוגה



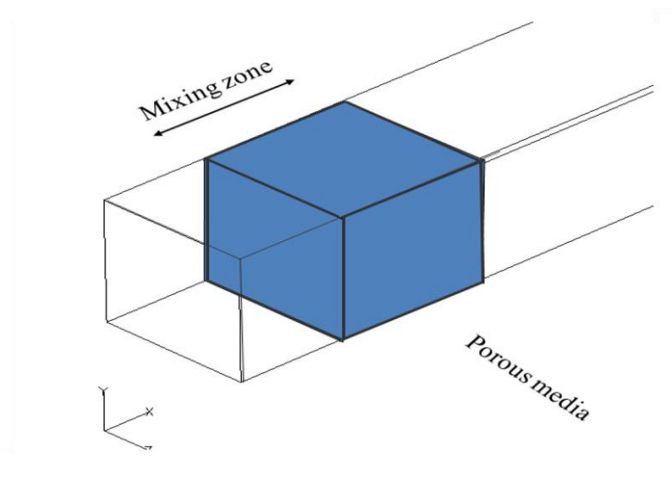
איור 3: חלק מודולארי של הרשת לצורכי אפיון זרימה



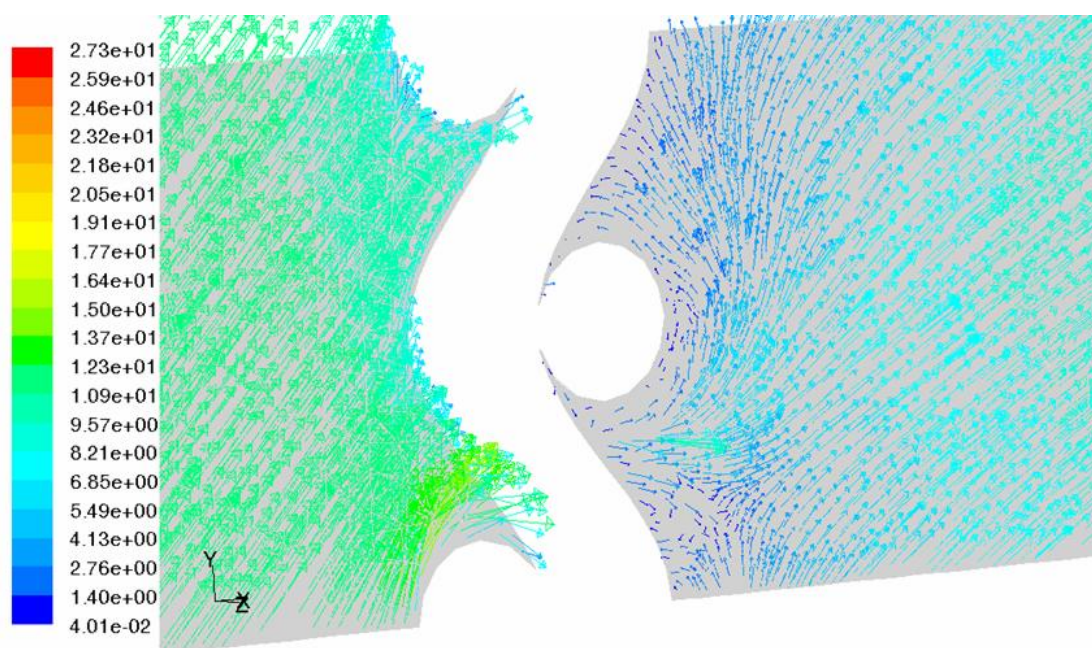
איור 4: מרחב הזרימה ותנאי גבול



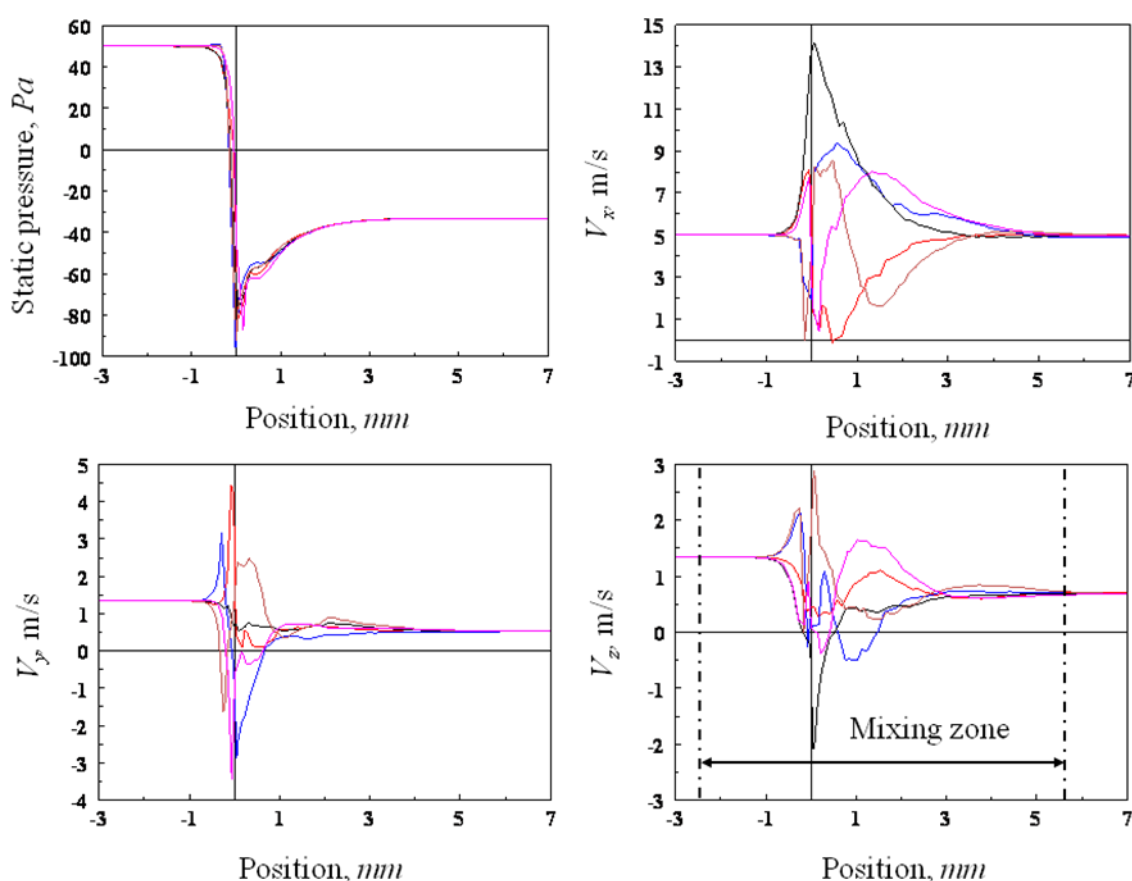
איור 5: חלוקת מרחב הזרימה לחלוקה משנית ולאמנטים סופיים



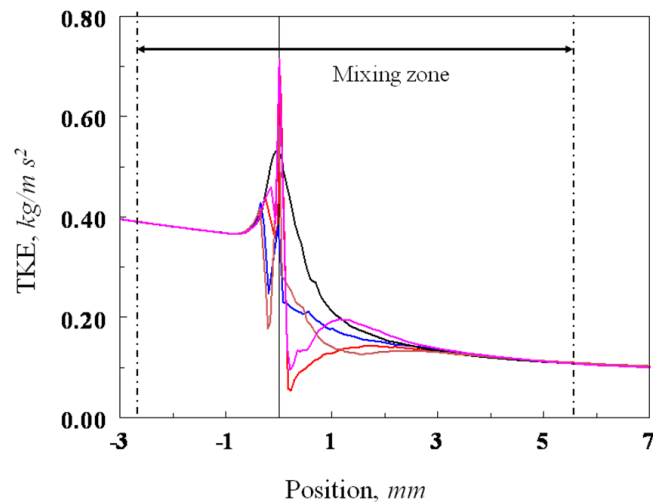
איור 6: מרחב הזרימה תוך התייחסות לרשת וסביבתה כתווח נקבובי



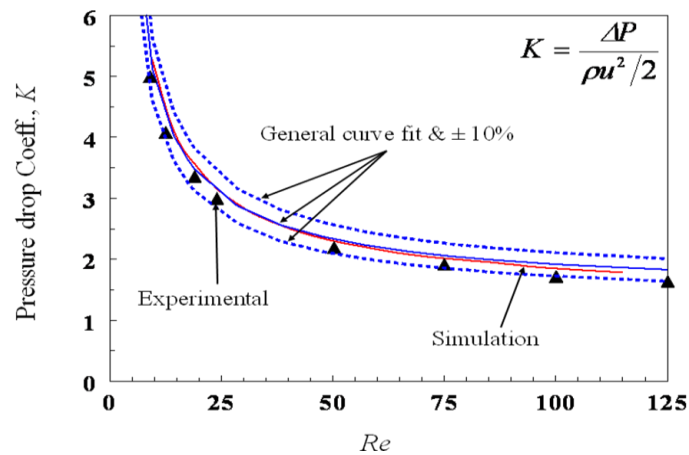
איור 7: פילוג מהירות האוויר בחתך אנכי במרכזו של מרחב הזרימה



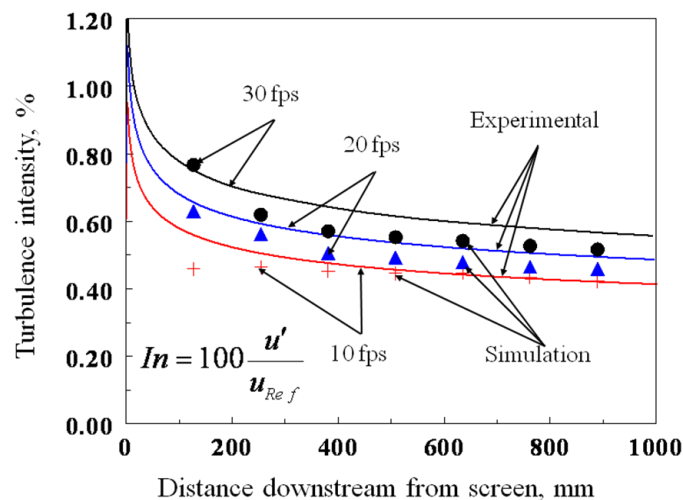
איור 8: התפלגות משתני הזרימה מבעד לרשת ובסביבתה הקרובה, בחמש נקודות שונות של חתך הזרימה כאשר מהמהירות בכניסה 5, 1.3 ו-1.3 מ' לשנייה בכיוונים  $x$ ,  $y$  ו- $z$ , בהתאמה: (a) – לחץ סטטי, (b) – רכיב המהירות בניצב לרשת (בכיוון  $x$ ), (c) – רכיב המהירות בכיוון  $y$ , (d) – רכיב המהירות בכיוון  $z$ .



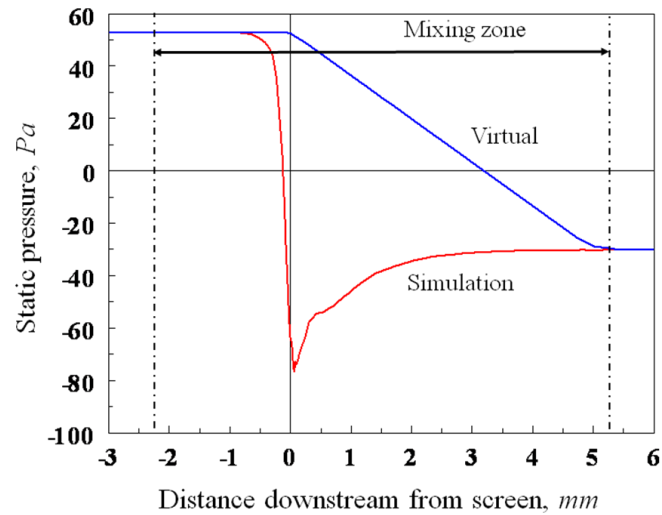
איור 9: התפלגות האנרגיה הקינטית הטורבולנטית מבעד לרשת ובסביבתה הקרובה, בחמש נקודות שונות של חתך הזרימה כאשר מהמחירות בכניסה 5, 1.3 ו-1.3 מ' לשנייה בכיוונים  $x$ ,  $y$  ו- $z$ , בהתאמה.



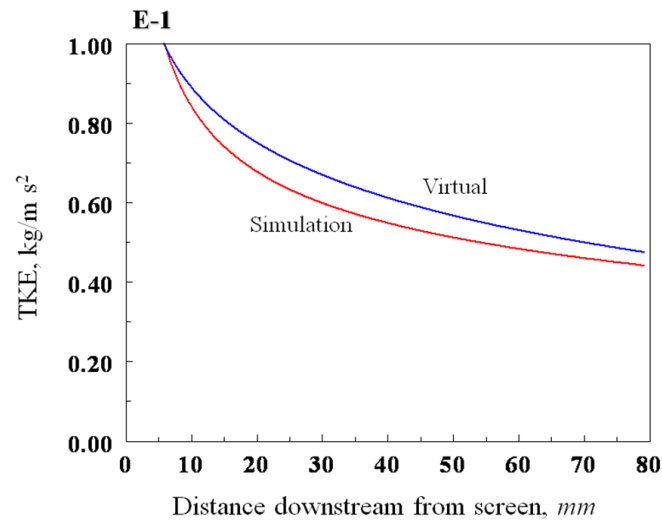
איור 10: השוואת מקדם מפל הלחץ בין תוצאות ההדמיה לבין תוצאות ניסיוניות כאשר: רשת 54 מש, עובי חוט 0.14 מ"מ, זרימה מציפה אנכית לרשת, מהירות של 3 מ' לשנייה והאינטנסיביות של הזרימה בכניסה 0.6%



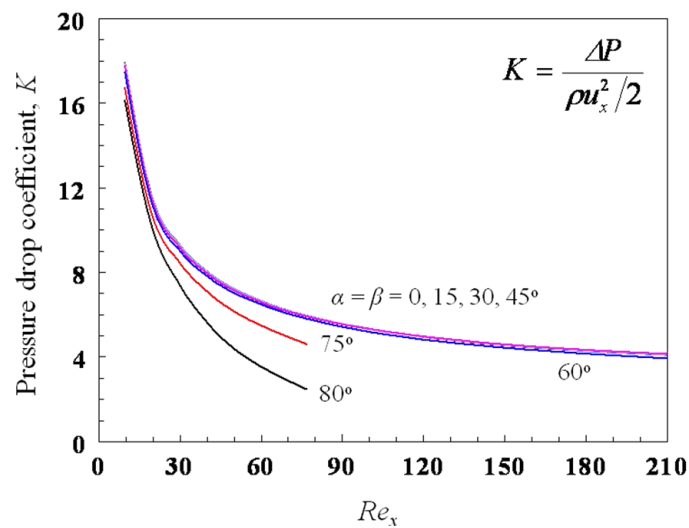
איור 11: השוואת האינטנסיביות של הטורבולנציה בין תוצאות ההדמיה לבין תוצאות ניסיוניות כאשר: רשת 24 מש, עובי חוט 0.19 מ"מ, זרימה מציפה אנכית לרשת והאינטנסיביות של הזרימה בכניסה 0.6%



איור 12: השוואת מקדם מפל הלחץ מבעד לרשת בין תוצאות המודל הפיזיקאלי לבין המודל הייצוגי

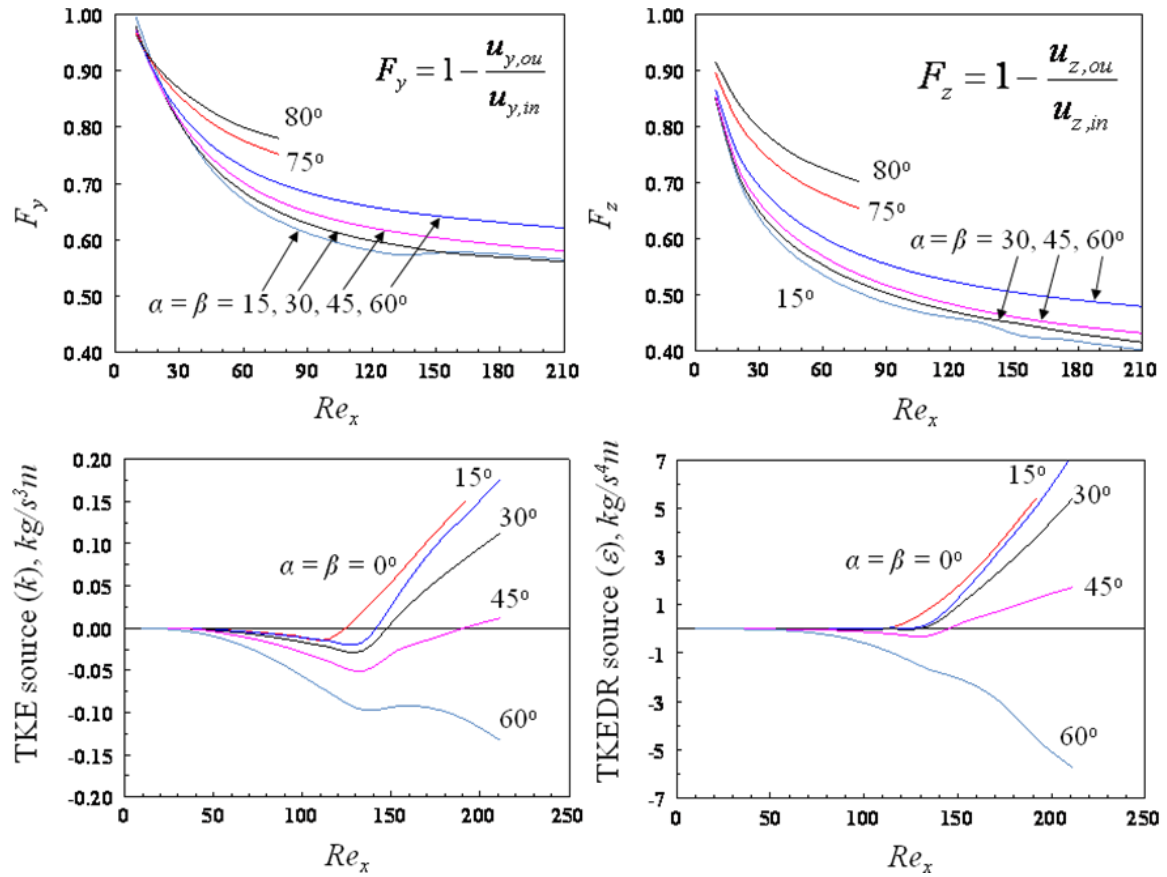


איור 13: השוואת האינטנסיביות של הטורבו לנציה במורד הזרימה ומעבר לרשת בין תוצאות המודל הפיזיקאלי לבין המודל הייצוגי

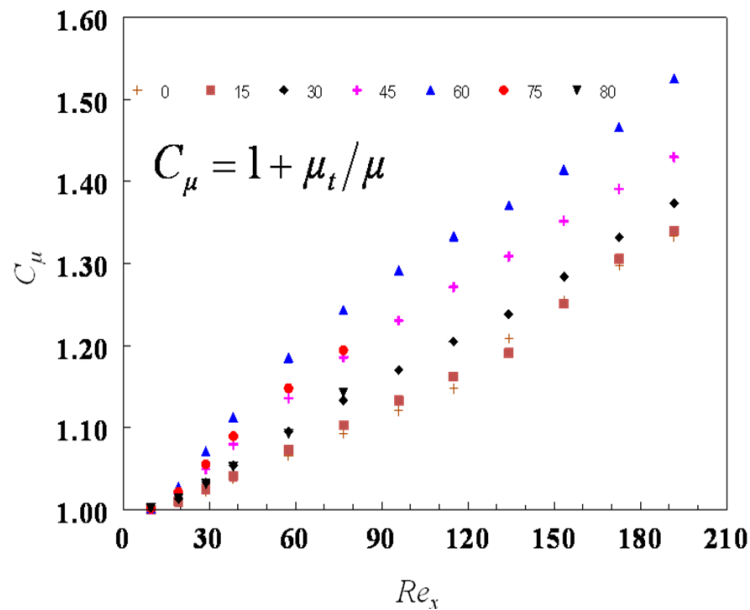


איור 14: מקדם מפל הלחץ של רשת 50 מש מקובלת (חוט בעובי 0.28 מ"מ, 50 חוטים בכיוון האחד ו- 25 בכיוון השני), כתלות במספר ריינולדס (המחושב ע"פ רכיב המהירות הניצבת לרשת) ושתי זוויות  $\alpha - \beta$



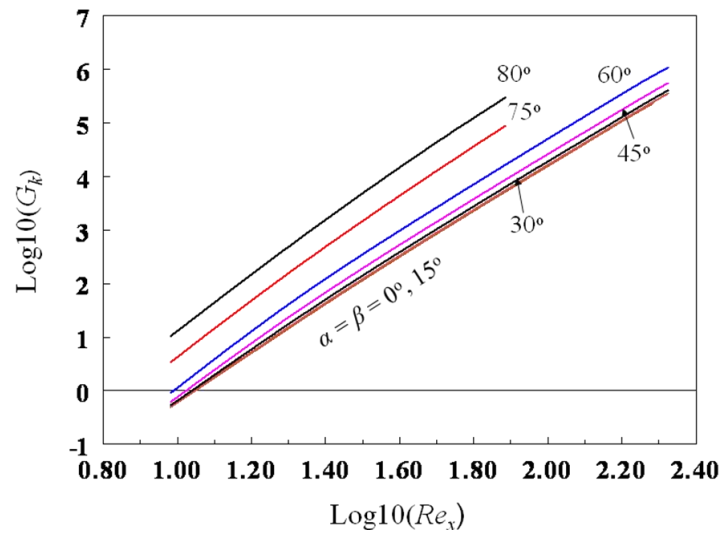


איור 15: התפלגות משתני הזרימה מבעד לרשת 50 מ"מ מקובלת (חוט בעובי 0.28 מ"מ, 50 חוטים בכיוון האחד ו-25 בכיוון השני) ובסביבתה הקרובה, כתלות במספר ריינולדס (המחושב ע"פ רכיב המהירות הניצבת לרשת) ושתי זוויות  $\alpha - \beta$ : (a) – מקדם שינוי כיוון מהירות בכיוון y, (b) – מקדם שינוי כיוון מהירות בכיוון y, (c) – מקור לאנרגיה קינטית טורבולנטית, (d) – בור לשטף הכחדת אנרגיה קינטית טורבולנטית

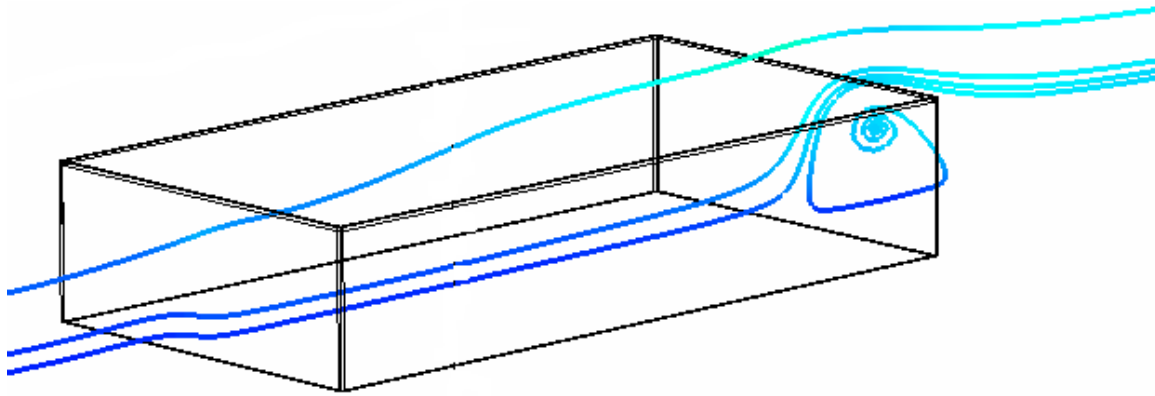


איור 16: מקדם  $C_\mu$  של רשת 50 מ"מ מקובלת (חוט בעובי 0.28 מ"מ, 50 חוטים בכיוון האחד ו-25 בכיוון השני), כתלות במספר ריינולדס (המחושב ע"פ רכיב המהירות הניצבת לרשת) ושתי זוויות  $\alpha - \beta$

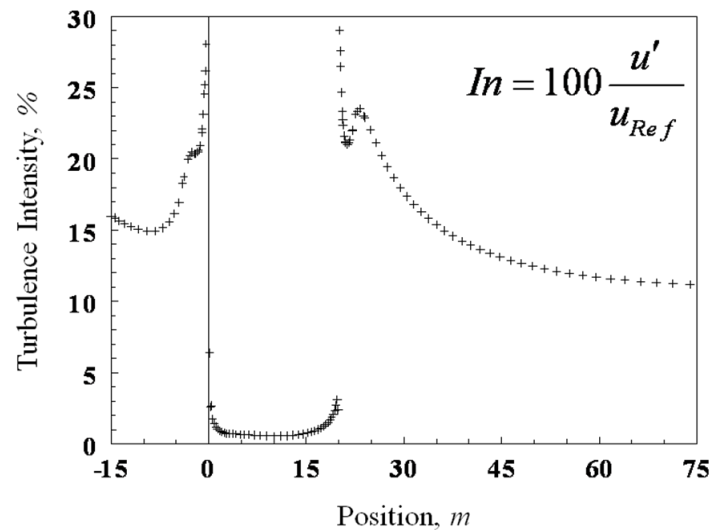




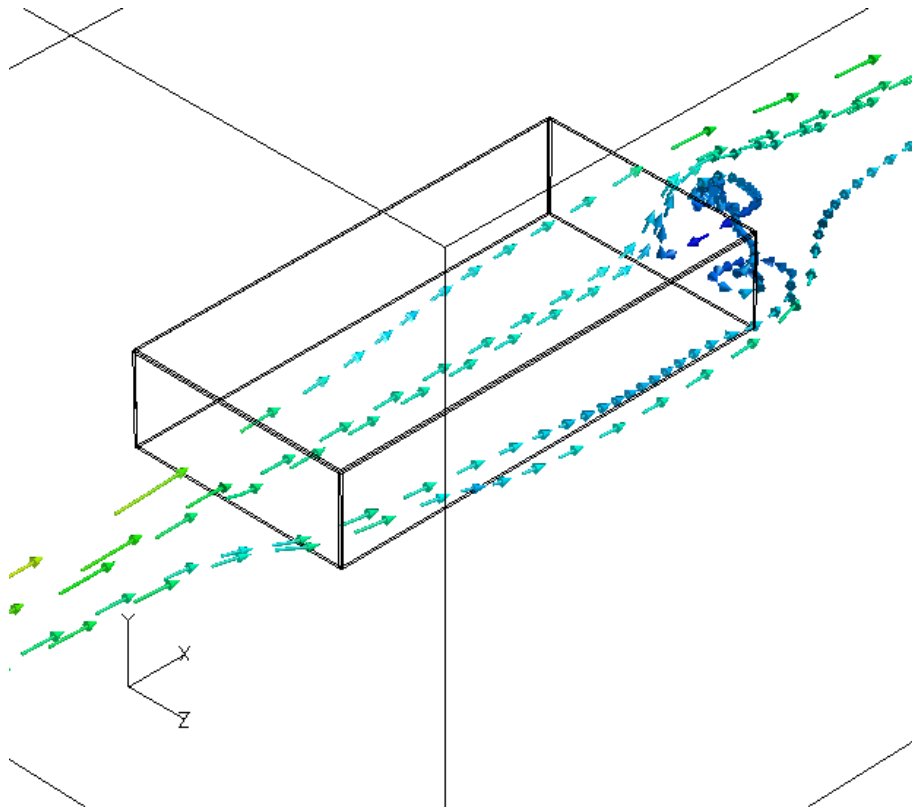
איור 17: פילוג של המקדם  $G_k$  של רשת 50 מש מקובלת (חוט בעובי 0.28 מ"מ, 50 חוטים בכיוון האחד ו- 25 בכיוון השני), כתלות במספר ריינולדס (המחושב ע"פ רכיב המהירות הניצבת לרשת) ושתי זוויות  $\alpha - \beta$



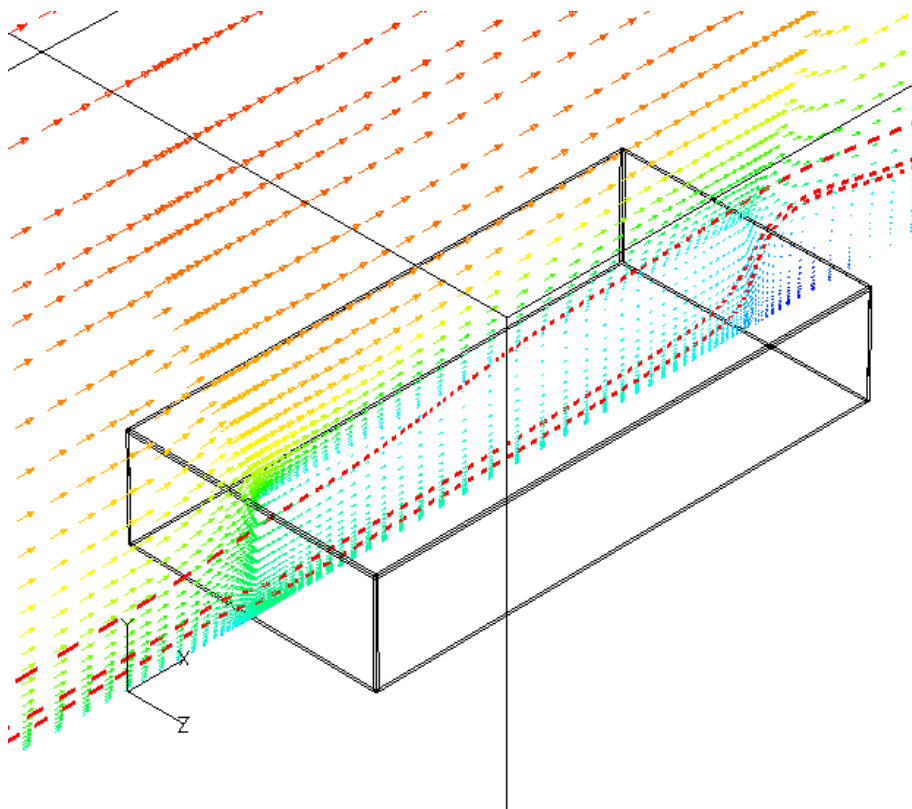
איור 18: קווי זרימה בבית רשת ובסביבתה כאשר בית הרשת במימדים: אורך 20 מ', רוחב 20 מ' וגובה 4 מ'



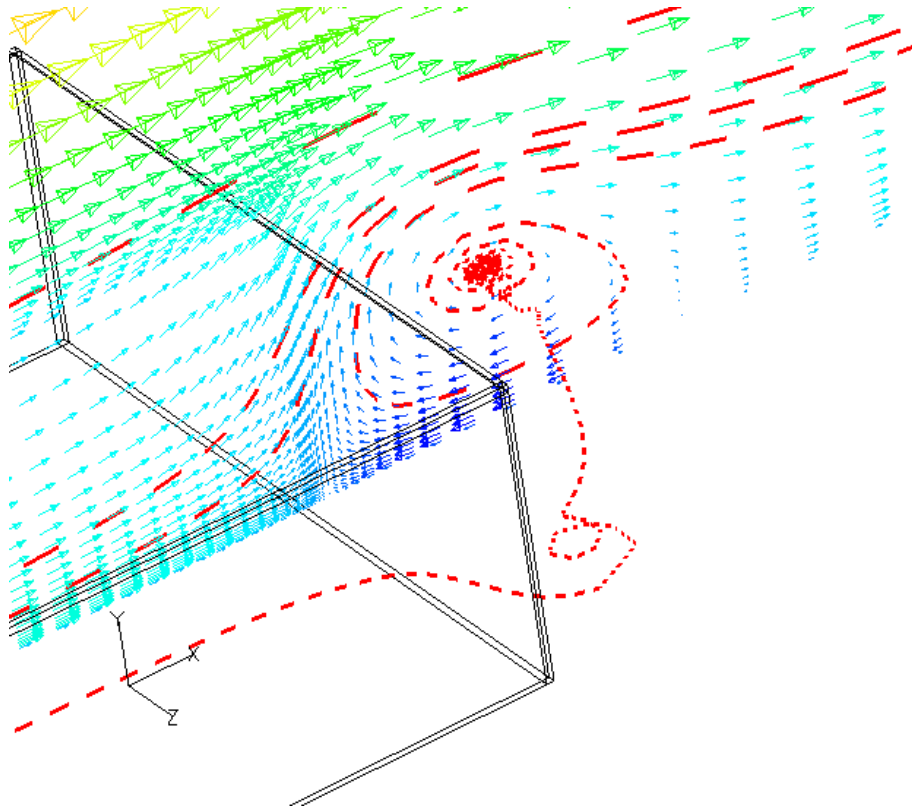
איור 19: האינטנסיביות של הטורבולנציה בגובה 2 מ' בבית רשת ובסביבתה כאשר בית הרשת במימדים: אורך 20 מ', רוחב 20 מ' וגובה 4 מ'



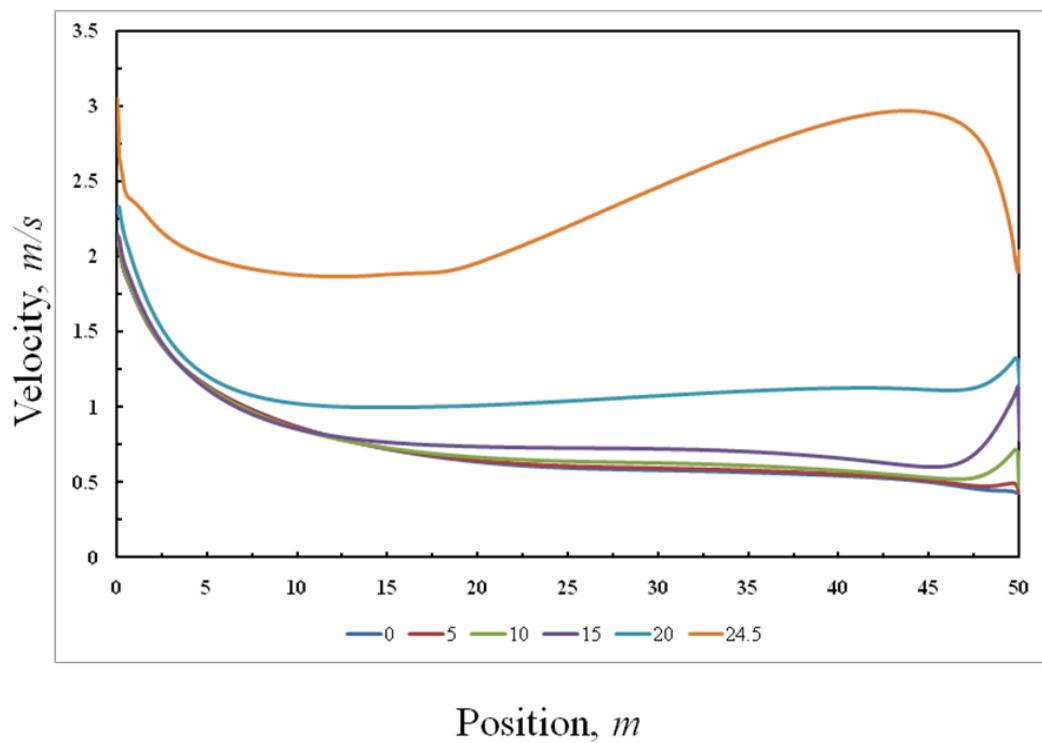
איור 20: קווי זרימה בבית רשת ובסביבתה כאשר בית הרשת במימדים: אורך 50 מ', רוחב 50 מ' וגובה 4 מ'



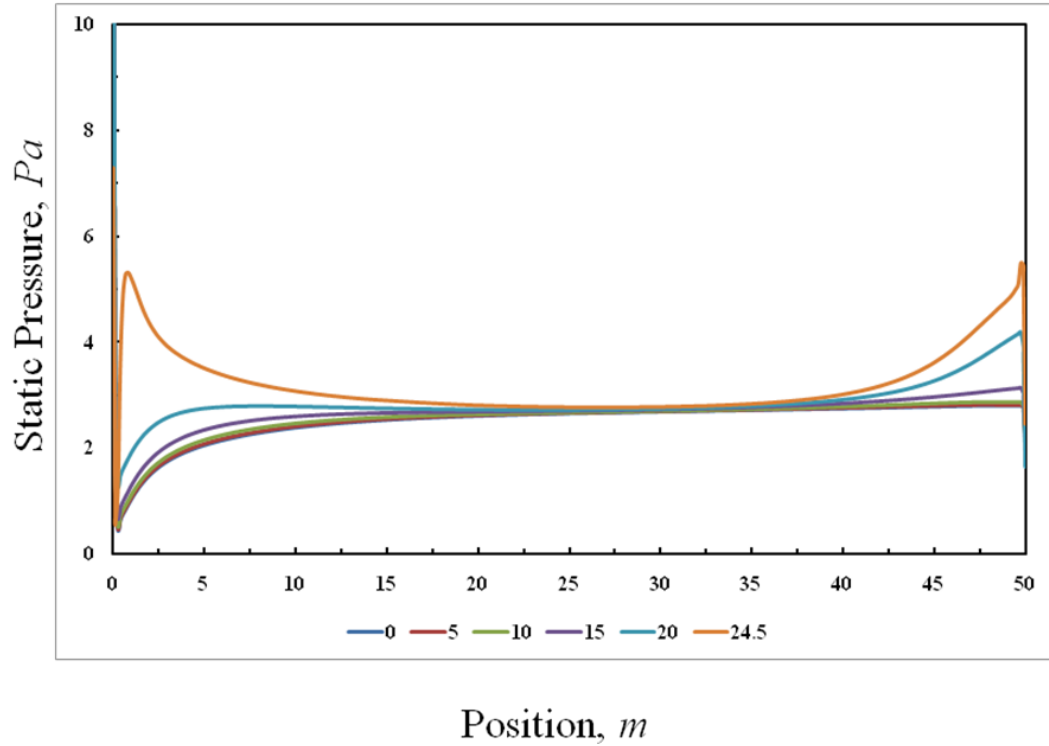
איור 21: פילוג מהירות וקווי זרימה בחתך אנכי במרכז בית הרשת, בבית רשת ובסביבתה כאשר בית הרשת במימדים: אורך 50 מ', רוחב 50 מ' וגובה 4 מ'



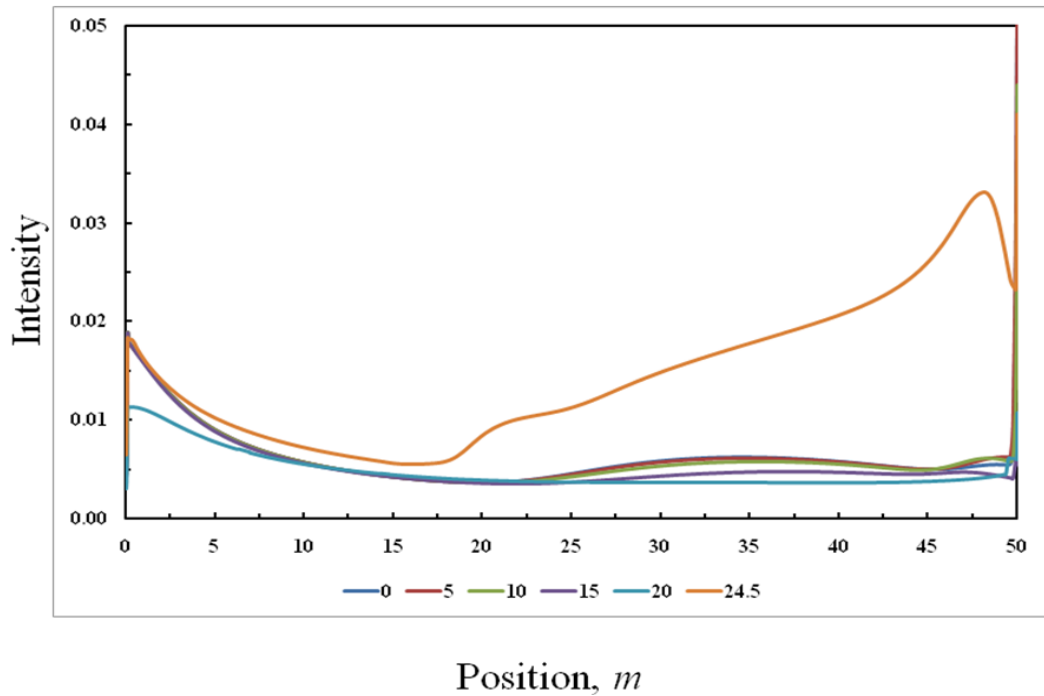
איור 22: תקריב של פילוג מהירות בחתך אנכי במרכז בית הרשת וקווי זרימה, בבית רשת ובסביבתה כאשר בית הרשת במימדים: אורך 50 מ', רוחב 50 מ' וגובה 4 מ'



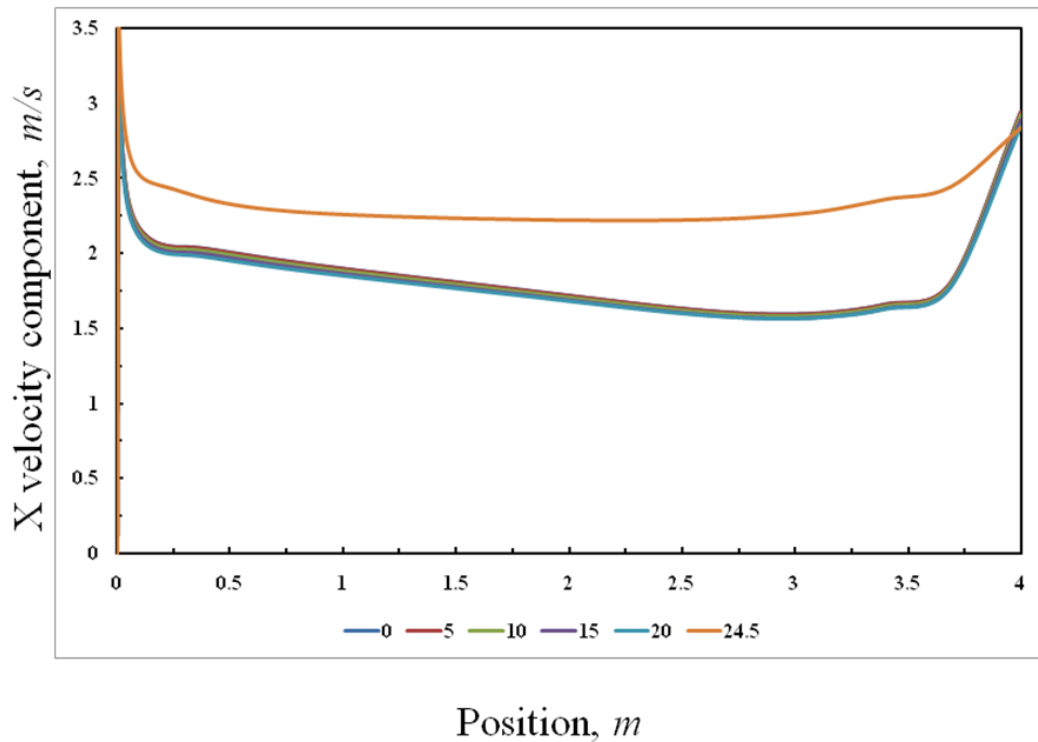
איור 23: פילוג מהירות האוויר בבית הרשת כתלות במיקום לאורך המבנה (ציר X) ובמיקום לרוחב המבנה (ציר Z) ממרכז המבנה (Z=0) עד חצי מ' מהדופן הצד (Z=24.5) ובגובה (ציר Y) של 1 מ' מפני הקרקע



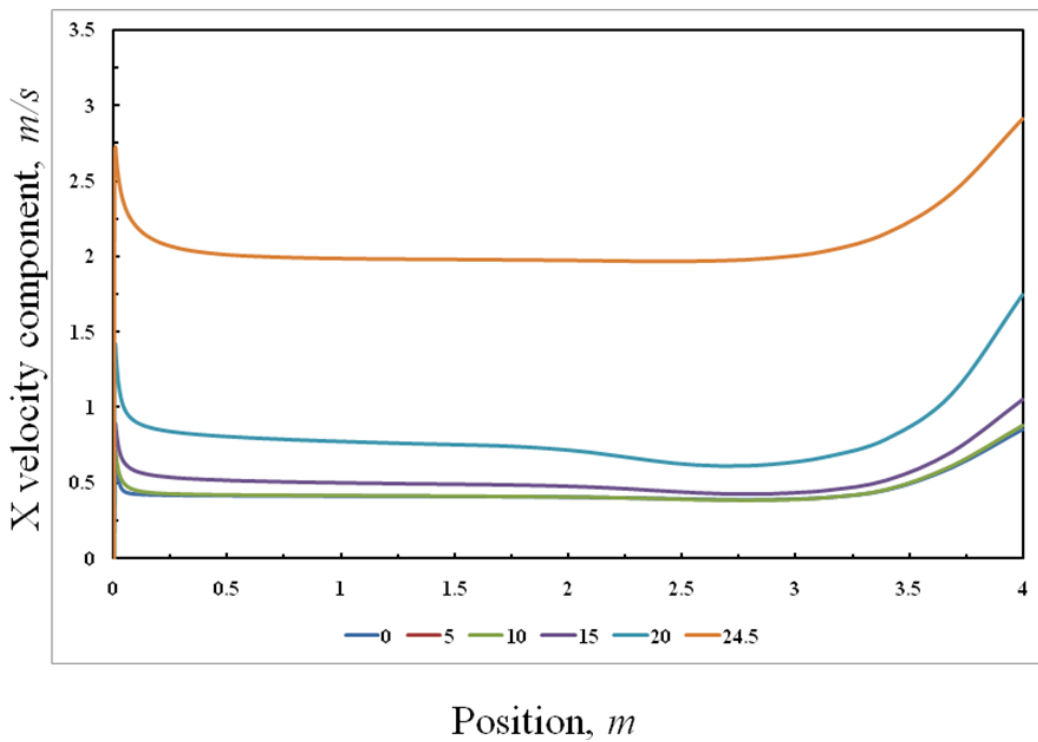
איור 24: פילוג לחץ סטטי של האוויר בבית הרשת כתלות במיקום לאורך המבנה (ציר X) ובמיקום לרוחב המבנה (ציר Z) ממרכז המבנה ( $Z=0$ ) עד חצי מ' מהדופן הצד ( $Z=24.5$ ) ובגובה (ציר Y) של 1 מ' מפני הקרקע



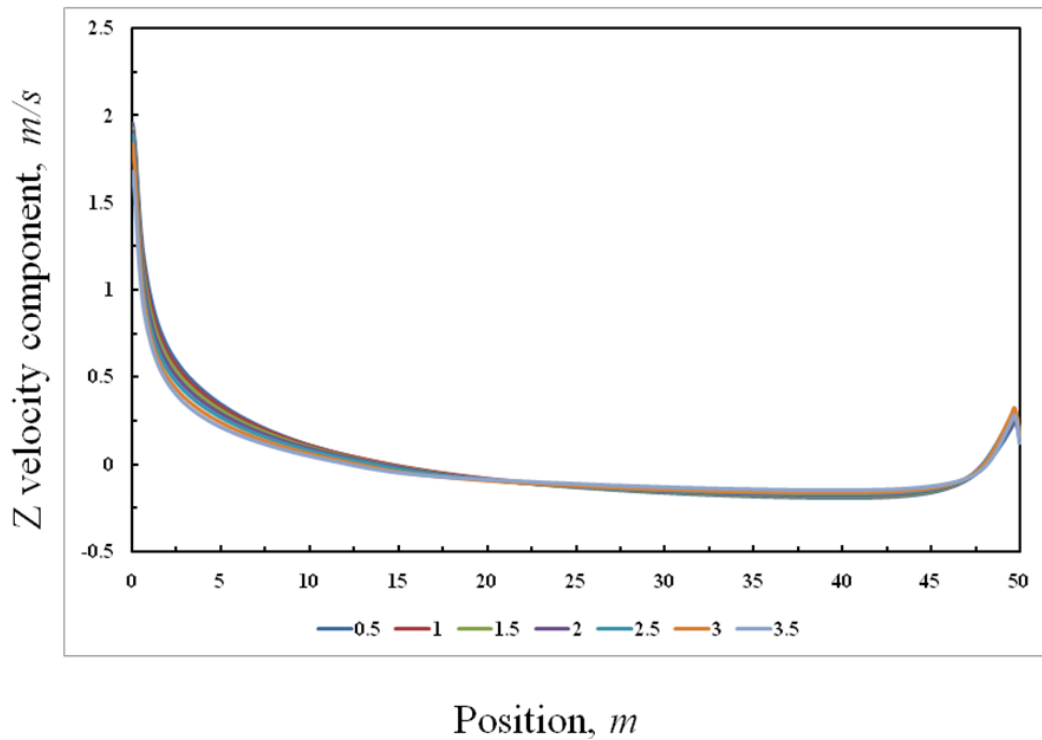
איור 25: פילוג האינטנסיביות של האוויר בבית הרשת כתלות במיקום לאורך המבנה (ציר x) ובמיקום לרוחב המבנה (ציר Z) ממרכז המבנה ( $Z=0$ ) עד חצי מ' מהדופן הצד ( $Z=24.5$ ) ובגובה (ציר Y) של 1 מ' מפני הקרקע



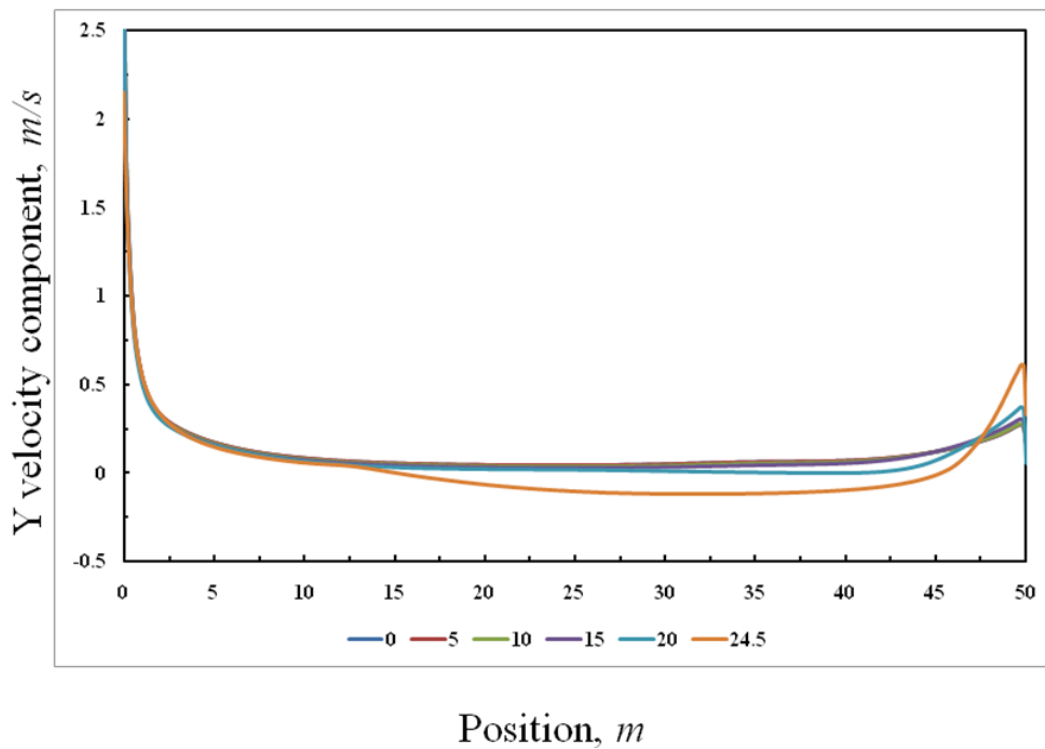
איור 26: פילוג מהירות ניצבת של האוויר על הדופן החשופה לרוח כתלות במיקום לגובה המבנה (ציר Y) ובמיקום לרוחב המבנה (ציר Z) ממרכז המבנה ( $Z=0$ ) עד חצי מ' מהדופן הצד ( $Z=24.5$ )



איור 27: פילוג מהירות ניצבת של האוויר על הדופן החסויה לרוח כתלות במיקום לגובה המבנה (ציר Y) ובמיקום לרוחב המבנה (ציר Z) ממרכז המבנה ( $Z=0$ ) עד חצי מ' מהדופן הצד ( $Z=24.5$ )



איור 28: פילוג מהירות ניצבת של האוויר על דופן הצד כתלות במיקום לאורך המבנה (ציר X) ובמיקום לגובה המבנה (ציר Y)



איור 29: פילוג מהירות ניצבת של האוויר על הדופן העליונה כתלות במיקום לאורך המבנה (ציר X) ובמיקום לרוחב המבנה (ציר Z) ממרכז המבנה ( $Z=0$ ) עד חצי מ' מהדופן הצד ( $Z=24.5$ )

## סיכום עם שאלות מנחות

1. מטרת המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.  
המטרה העיקרית של המחקר היא להגיע להמלצות על מאפייני בית רשת שישרה מיקרו-אקלים מיטבי בתנאי אקלים חיצוני נתונים.
2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח.  
העבודה התמקדה בעיקר בהתאם לפירוט הבא:
  - פותחה הדמיה המבוססת על המודל (Transient SST) לאפיון הזרימה מבעד לרשת במימדים הפיזיקאליים שלה. תוצאות ההדמיה אומתו בהשוואה לתוצאות ניסיוניות והתקבלה התאמה מלאה על כל משתני הזרימה.
  - פותחה גישה כוללת להכלת תוצאות המודל (Transient SST) במודל (Standard  $k-\epsilon$ ) באמצעות הגדרת משתני הזרימה הניתנים להצבה ישירות במשוואות התנע והאנרגיה.
  - פותחה הדמיה המבוססת על המודל (Standard  $k-\epsilon$ ) לאפיון הזרימה מבעד לרשת תוך התייחסות לרשת כתווך נקבובי ובהתבסס על תוצאות המודל (Transient SST). תוצאות ההדמיה אומתו בהשוואה לתוצאות המודל (Transient SST) והתקבלה התאמה מלאה על כל משתני הזרימה.
  - לאחר שתוצאות המודל (Transient SST) אומתו, נעשה מיפוי מפורט של משתני הזרימה של רשת 50 מש (המקובלת) בתחום רחב וכתלות במהירות האוויר וכיוונה היחסי לרשת ובשני הכיוונים – שתי וערב.
  - על בסיס זה, פותחה הדמיה המבוססת על המודל (Standard  $k-\epsilon$ ) לאפיון שדה הזרימה בבית הרשת ובסביבתו.
3. המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו.  
פותחה ואומתה הגישה הכוללת לאפיון הזרימה מבעד לרשת תוך התייחסות לרשת כתווך נקבובי ומבוססת על המודל (Standard  $k-\epsilon$ ). פותחה ואומתה הדמיה לאפיון הזרימה מבעד לרשתות המבוססת על המודל (Transient SST) ובמימדים הפיזיקאליים של הרשת. באמצעות מודל זה נעשה מיפוי מפורט של משתני הזרימה של רשת 50 מש (המקובלת) בתחום רחב וכתלות במהירות האוויר וכיוונה היחסי לרשת ובשני הכיוונים – שתי וערב. על בסיס זה, פותחה הדמיה המבוססת על המודל (Standard  $k-\epsilon$ ) לאפיון שדה הזרימה בבית הרשת ובסביבתו.
4. הבעיות שנותרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה.  
על בסיס התוצאות המעודדות שהתקבלו, מומלץ להמשיך בעבודה בהתאם לפרוט הבא: המשך פיתוח מודל הסימולציה במימדי בית הרשת ובחינתו בבית רשת ללא צמחיה, פיתוח מודל סימולציה במימדי הצמח תוך התייחסות לצמחייה לתווך נקבובי, והמשך פיתוח מודל הסימולציה (במימדי בית הרשת) תוך כדי שילוב הצמחייה ובחינתו בתנאים מעשיים.
5. האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח?  
בהתאם להתקדמות העבודה, תוצאות העבודה הוצגו בשלושה כנסים בינלאומיים וכמאמרים מבוקרים הנלווים לכך.