

הערכה כמותית של השפעת השינוי הצפוי באקלים האזורי על אבדן מים מהתאדות מפני קרקע

Estimating the effect of global climate change on evaporation from soils

מוגש ללשכת המדען הראשי ע"י

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, בית דגן	שמואל אסולין
המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי, בית דגן	יוסי טנאי
מכון צוקרברג לחקר המים, המכונים לחקר המדבר, אוני-בן-גוריון	נעם וייסברוד
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית, הטכניון	אורי שביט

Shmuel Assouline Soil, Water and Environmental Sciences, A.R.O., P.O.B. 6, Bet Dagan 50250,

E-mail: ywshmuel@agri.gov.il

Josef Tanny Soil, Water and Environmental Sciences, A.R.O., P.O.B. 6, Bet Dagan 50250,

E-mail: tanai@agri.gov.il

Noam Weisbrod BGU, Sde Boqer.

E-mail: weisbrod@bgu.ac.il

Uri Shavit Technion, Haifa.

E-mail: aguri@technion.ac.il

מהנדס מחקר
כפיר נרקיס

30 אפריל 2013

ח' אייר תשע"ב

**הממצאים בדו"ח הנם תוצאות ניסויים ואינם מהווים המלצות לחקלאים
חתימת החוקר:**

תקציר:

ההערכה הרווחת הינה כי העולם עומד בפני תהליך של התחממות. תהליך כזה ישפיע בהכרח על מגוון רחב של נושאים, ביניהם הנושאים הקשורים למשאבי המים, ומן הראוי להיערך לקראת שינוי זה. הערכות כזו דורשת יכולת לאמוד מה מידת ההשפעה של השינוי הצפוי או החזוי על המשתנים השונים. תהליך ההתאדות מפני קרקע גורם לאבדן מים משמעותי לאטמוספירה. מצד שני, הוא גם משפיע מאוד על התהליכים הקובעים את האקלים המקומי והאזורי. ההתאדות תושפע בצורה משמעותית מכל שינוי אקלימי. ביטוי כמותי מתאים של הקשר בין משתני אקלים להתאדות מפני קרקע יאפשר קודם כל להעריך מה תהיה מידת ההשפעה של השינוי הצפוי באקלים האזורי על מערכות חקלאיות וטבעיות, ועל משאבי המים, ויאפשר למקבלי החלטות לבנות תכנית הערכות מציאותית לקראת השינוי הצפוי. הוא יהווה נדבך משמעותי בהערכת השינויים הצפויים בדרישות המים של גידולים שונים ואזורים חקלאיים שונים. הוא גם ישפר את יכולת החיזוי של מודלים אקלימיים בהם מרכיב הקשר בין פני הקרקע לאטמוספירה הינו חלק מכריע הקובע את ביצועי המודל. המטרה הכללית של המחקר הינה לבחון את השפעת הגומלין בין טמפרטורת הסביבה לתהליך ההתאדות מפני קרקע. באופן פרטני יותר, הכוונה הינה לבחון את: (א) השפעת שינויים בטמפרטורה על שיעורי ההתאדות מקרקעות חול וחמרה; (ב) השפעת המשרעת בשינוי היומי בטמפרטורת האוויר על עצמת תהליך ההתאדות. בחינה זו תאפשר לפתח קשרים כמותיים בין משתנים אלו ושיעור ההתאדות. הבחינה תתבצע במעבדה בעמודות ובמיכלים, תוך ניצול מעבדה מבוקרת טמפרטורה באוני-בן-גוריון; ובשדה תוך ניצול שיטת קורלצית הערבליים וסינטילומטר לאמדן שטפי החום הכמוס והמוחשי.

במהלך השנה השלישית, העבודה במעבדה התמקדה בבחינת השפעת המשרעת בשינוי הטמפרטורה על ההתאדות מעמודות בתנאי רטיבות התחלתית שונים. השפעת המשרעת נבחנה גם באופן תיאורטי בעזרת מודל התאדות אשר נבחן מול מדידות שדה בשיטת קורלצית הערבליים אשר נערכו בשדה כותנה בעמק החולה. כמו כן הוערך הקשר בין טמפרטורת אוויר לשטפי החום הכמוס והמוחשי על בסיס מדידות שנערכו במהלך כל השנה בשדה שהיה בור בחלק מהזמן, וזרוע בשיבולת שועל בחלק האחר. מדידות אלו נערכו בעזרת סינטילומטר המאפשר מדידה ישירה של שטף החום המוחשי לאורך חתך הנע בין 50 ל-250 מ'.

בגלל ריבוי התוצאות, דו"ח זה מתמקד בתוצאות השנה השלישית.

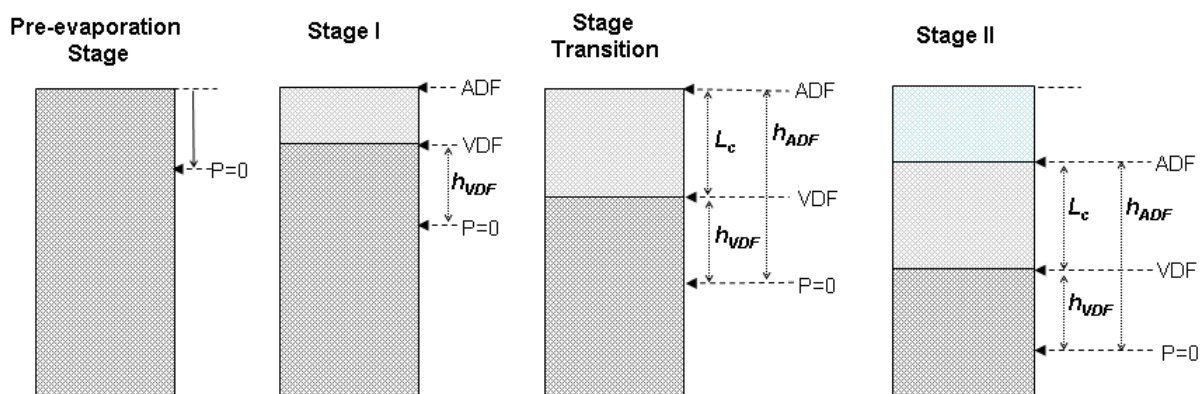
ב. מבוא.

ההערכה הרווחת הינה כי העולם עומד בפני תהליך של התחממות. תהליך כזה ישפיע בהכרח על מגוון רחב של נושאים, ביניהם הנושאים הקשורים למשאבי המים, ומן הראוי להיערך לקראת שינוי זה. הערכות כזו דורשת יכולת לאמוד מה מידת ההשפעה של השינוי הצפוי או החזוי על המשתנים השונים. תהליך ההתאדות מפני קרקע גורם לאבדן מים משמעותי לאטמוספירה. מצד שני, הוא גם משפיע מאוד על התהליכים הקובעים את האקלים המקומי והאזורי. ההתאדות תושפע בצורה משמעותית מכל שינוי אקלימי. ביטוי כמותי מתאים של הקשר בין משתני אקלים להתאדות מפני קרקע יאפשר קודם כל להעריך מה תהיה מידת ההשפעה של השינוי הצפוי באקלים האזורי על מערכות חקלאיות וטבעיות, ועל משאבי המים, ויאפשר למקבלי החלטות לבנות תכנית הערכות מציאותית לקראת השינוי הצפוי. הוא יהווה נדבך משמעותי בהערכת השינויים הצפויים בדרישות המים של גידולים שונים ואזורים חקלאיים שונים. הוא גם ישפר את יכולת החיזוי של מודלים אקלימיים בהם מרכיב הקשר בין פני הקרקע לאטמוספירה הינו חלק מכריע הקובע את ביצועי המודל.

קצב האידוי תלוי בהרכב המכני ובהתפלגות גודל החללים של הקרקע החקלאית (מעובדת ולא מעובדת), בתהליכי שקיעת המלחים ובמידת הכיסוי הצמחי. כחלק מההערכות לקראת השינוי הצפוי באקלים האזורי והשפעתו על המערכות החקלאיות השונות, מחקר זה בוחן את תהליך ההתאדות מפני קרקע ומעריך באופן

כמותי את ההשפעה של מאפייני האקלים השונים על עצמתו. הבחינה התבצעה ב: (א) במעבדה בעמודות ובמיכלים, תוך ניצול מעבדה מבוקרת טמפרטורה שנבנתה במיוחד לבחינת הקשר בין תנאים אקלימיים לתהליכי אידוי וחילוף גזים במכון המים של אבי"ג; ו - (ב) בשדה תוך ניצול שיטת קורלציית הערבליים וסינטילוטר לאמדן שטפי החום הכמוס והמוחשי. הרעיון הכללי הוא לספק את הבסיס למודל כמותי אשר יבטא את השפעת הפרמטרים האקלימיים העיקריים על שיעור ההתאדות על סמך מערך המדידות המבוקרות והמדויקות ברמת המעבדה, ולנצל את המדידות בשדה, בו לא ניתן לשלוט על מאפייני האקלים, בכדי לבדוק את המודל הכמותי ואת יישומו לתנאי שדה ולסביבה טבעית.

תהליך ההתאדות מקרקעות הוא תהליך מורכב ולא פתור שכן הוא תלוי במספר רב של גורמים והעיסוק בו מחייב מעקב אחר משתנים ותהליכים מגוונים. מודל אטרקטיבי לתיאור מנגנון ההתאדות מקרקעות הוא "מודל שני השלבים" (שלב ההתאדות הראשון - Stage I - ושלב ההתאדות השני - Stage II). על פי המודל (ראה תיאור סכמתי בתרשים 1), נוצרת תחילה חזית המכונה VDF (Visible Drying Front) ומוגדרת על ידי מים הנמצאים בנקבובים הגדולים ואשר ניתן לעקוב אחריה ויזואלית. מים זורמים במהלך השלב הראשון (Stage I) כלפי מעלה מחזית ה-VDF אל פני הקרקע, שם מתרחשת ההתאדות המתבטאת במעבר פאזה ממצב נוזלי לפאזה האדים. ההתאדות בשלב הראשון נשלטת על ידי התנאים האטמוספריים שמעל פני הקרקע, ולכן בהינתן שהתנאים האטמוספריים לא משתנים בזמן, קצב ההתאדות קבוע. כאשר המרחק האנכי בין פני הקרקע וחזית ה-VDF גדול מדי וכוחות התאחיזה של הקרקע אינם מספיקים כדי לאחוז במים שבפני השטח נוצרת חזית שנייה. חזית זו מכונה כאן ADF (Actual Drying Front) וזאת במטרה לציין את ההנחה שמעבר הפאזה (מנוזל לאדים) מתרחש בחזית זו. תהליך ההתאדות במהלך השלב השני נשלט על ידי שטף הדיפוזיה של אדים מחזית ה-ADF אל פני השטח ולכן המיקום של חזית ה-ADF וההתאדות המצטברת בשלב השני מתנהגים לפי שורש הזמן. רגע המעבר בין שני השלבים מוגדר כזמן בו מתרחש השינוי בקצב ההתאדות. העומק של חזית ה-VDF ברגע המעבר מוגדר כאורך האופייני של תהליך ההתאדות. אורך זה, המתאר גם את המרחק בין שתי החזיתות במהלך שלב 2, תלוי, על פי המודל, בתכונות ההידראוליות של הקרקע, ולכן מושפע במידה מסוימת מטמפרטורת הקרקע. נושא זה נדון בהרחבה בדו"חות הקודמים.



תרשים 1: תיאור סכמתי של מודל שני השלבים

בדו"ח זה נתמקד בגורם חשוב נוסף הקשור לשינויים הדינמיים המתרחשים בטמפרטורת הסביבה במהלך היממה. ממצאים שונים מצביעים על כך שיחד עם העלייה בטמפרטורה נצפתה ירידה בקצב ההתאדות (Cong, et al. 2009). ממצא מפתיע ולא מוסבר זה כונה בספרות "פרדוקס ההתאדות מגיגית" (PEP - Pan Evaporation Paradox) (McVicar, et al. 2012) סקרו למעלה מ-50 אזורים

ברחבי העולם ומצאו שב- 82% מהמקרים קצב ההתאדות מגיגית (E_{pan}) ירד במהלך ה- 50 שנה האחרונות. במחקרים שדווחו על ידי Peterson et al. (1995) ועל ידי Ohmura and Wild (2002) נמצא שקיימת קורלציה בין הירידה המדווחת ב- E_{pan} (Easterling et al., 1997; Shen et al., 2010) ובין ירידה במשרעת הטמפרטורה היומית (DTR - diurnal temperature range). משרעת זו (DTR) מוגדרת כהפרש בין טמפרטורת המקסימום היומית (T_{max}) וטמפרטורת המינימום היומית (T_{min}). מסתבר, שתופעת ההתחממות הגלובלית והעליה של הטמפרטורה הממוצעת במקומות רבים בעולם נובעת בעיקר מעלייה של טמפרטורת המינימום היומית (T_{min}) ולא מעלייה של טמפרטורת המקסימום (T_{max}). אסימטריה זו היא הסיבה לירידה ב- DTR (Vose et al., 2005; Easterling et al., 1997; Zhou et al., 2008; Travis et al., 2002; Zhou et al., 2009; Dai et al., 1999). תהליך ההתאדות מקרקעות מושפע מטמפרטורות הקיצון T_{min} ו- T_{max} ומהדינמיקה של הטמפרטורה והלחות במהלך היממה (Assouline et al., 2010). מסיבה זו ניתן לצפות של- DTR תהיה השפעה משמעותית על קצב ההתאדות. טמפרטורות גבוהות המתפתחות באמצע היום גורמות לעליה בהתאדות הפוטנציאלית (E_p), לירישה' אטמוספירית גבוהה ולירידה בתכולת הרטיבות של שכבות הקרקע העליונות (סנטימטרים ספורים). בתנאים אלו שטף המים שעולה אל פני הקרקע קטן משטף ההתאדות לאטמוספירה. התנאים ששוררים בלילה הם על פי רוב הפוכים כאשר שטף המים שנעים אל פני השטח שווה או גדול משטף ההתאדות (Agam and Berliner, 2004). כתוצאה מהשינויים היומיים הללו יש לצפות שמקדם ההתאדות ($K_E = E/E_p$) יהיה מקסימלי בשעות הבוקר ומינימלי בשעות אחה"צ המאוחרות. מטרת השלב הנוכחי של מחקר הייתה לבחון את ההתנהגות של K_E בתלות במשרעת הטמפרטורה היומית (DTR - diurnal temperature range).

המחזור היומי והשפעתו על תהליכי ההתאדות מורכב שכן העלייה והירידה של תכולת הרטיבות גורמים לשינויים בעומד המטריצי ובמקדם המוליכות. תהליכי ההתאדות וההסעה גורמים תרמודינמית למחזורי התקררות וחימום של הקרקע. מעברים בין מנגנונים המתוארים כ- stage I וב- stage II מעורבים בתהליך וכל אלה מצומדים להשפעה של שכבת הגבול המתפתחת מעל פני הקרקע. נראה אם כך שיש למחקר שעוסק בהשפעת משרעת הטמפרטורה היומית על קצב ההתאדות מקרקעות חשיבות רבה.

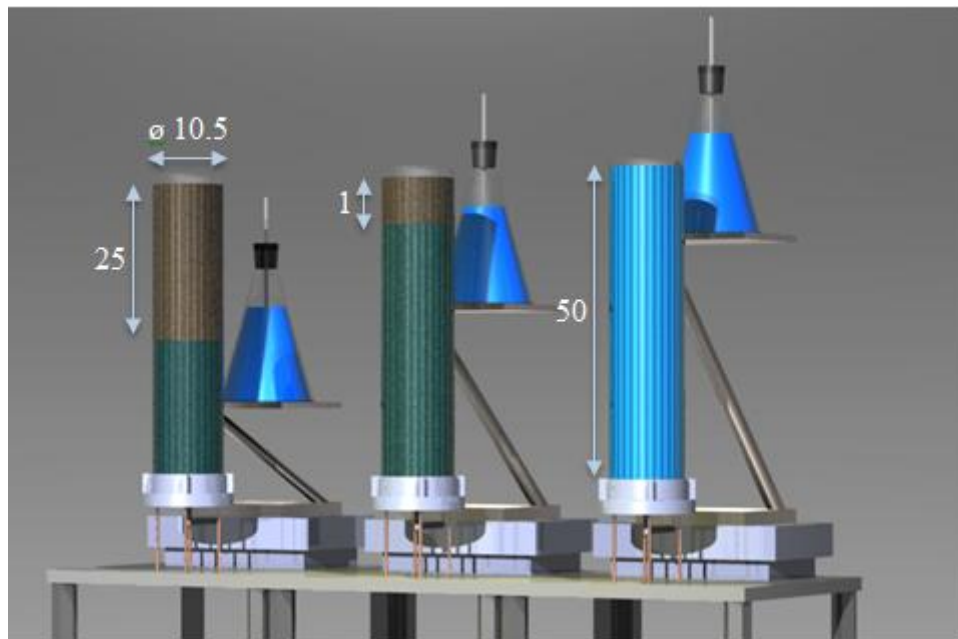
ג. תוצאות.

1. ניתוח תוצאות

1.1 השפעת משרעת הטמפרטורה היומית על קצב ההתאדות מקרקעות

הניסוי בוצע בעמודות פרספקס (50 סמ' אורך ו- 10 סמ' קוטר) שמוקמו בחדר מבוקר טמפרטורה (תיאור מפורט של החדר מופיע ב- Kamai et al., 2009; Nachshon Shakraeni, et al., 2011). עבור כל טמפרטורת-חדר שנבחנה, הועמדו שש עמודות מלאות בחול עדין ועמודה שביעית שמולאה במים לשם מדידה של ההתאדות הפוטנציאלית. החול עבר ניפוי לתחום גודל החלקיקים של בין 150 ו- 300 מיקרון. הנקבוביות של הקרקע היא 0.33 ± 0.02 ומניתוח של עקום התאחיזה המבוסס על המודל הקפילרי התקבל שגודל הנקבובים הממוצע הוא 78 מיקרון. ערך כניסת אוויר הוא 24 סמ' (Weisbrod et al., 2009). במטרה להאיץ ולבקר את תהליך ההתאדות, מוקמו מאווררים (GlacialTech, Silent Blade 120 mm, Taiwan) מעל ובסמוך לכל אחת מהעמודות. משתנה הניסוי העיקרי היה משרעת הטמפרטורה היומית (DTR) אשר שונתה על ידי שינויי של טמפרטורת המינימום (T_{min}) בלבד. שלושת

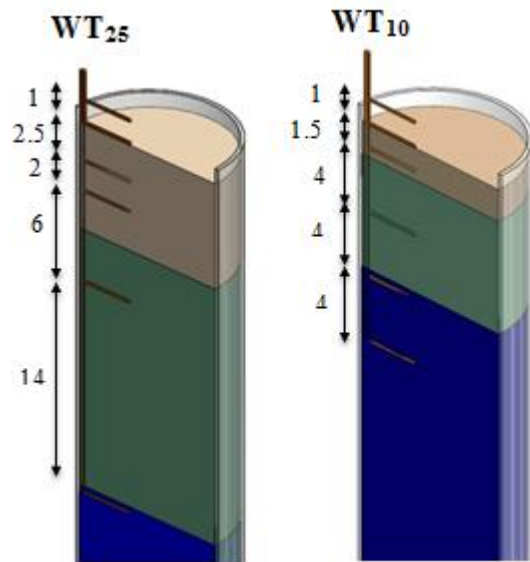
המצבים שנבדקו היו כדלקמן: 28 – 35, 25.5 – 35 ו- 23.5 – 35 מעלות צלזיוס או ערך DTR ששווה ל- 7, 9.5 ו- 11.5 מעלות. כל אחד מהניסויים נמשך 6 ימים כאשר הטמפרטורה (בעקבות זאת גם הלחות היחסית) שונתה בין הערך הגבוה והערך הנמוך לסירוגין כל 12 שעות. משך זמן המעבר בין שני ערכי הטמפרטורה היה בין שעה לשעתיים. ששת העמודות חולקו לשתי קבוצות, שלוש עמודות בכל קבוצה לשם חזרות. בקבוצה הראשונה מפלס המים היה קבוע בעומק של 25 סמ' (WT25) מתחת לפני הקרקע, ובקבוצה השנייה, מפלס המים היה בעומק 10 סמ' (WT10) במהלך כל הניסוי (איור 1). שמירת המפלס התקבלה על ידי בקבוקי מריוט (איור 1) אשר בודדו תרמית מסביבתם כדי למנוע התפשטות והתכווצות של חלל האוויר הנמצא בתת-לחץ בבקבוק תוך כדי שינויי הטמפרטורה. מבדיקה נמצא ששינוי בנפח חלל האוויר היה מספיק איטי כדי לצמצם את ההשפעה שלו למינימום.



איור 1: מערך הניסוי. העמודה הימנית מכילה מים ללא קרקע ונועדה למדידה של ההתאדות הפוטנציאלית. שתי העמודות האחרות מולאו בקרקע כאשר מפלס המים בעמודה השמאלית היה קבוע בעומק של 25 סמ' (WT₂₅) ואילו בעמודה האמצעית המפלס היה בעומק 10 סמ' (WT₁₀) במהלך כל הניסוי. ניסויי הקרקע בוצעו ב-3 חזרות כך שהועמדו 7 עמודות עבור כל טמפרטורה שנבחנה.

קצב ההתאדות התקבל על ידי מדידת השינוי במשקל של העמודות ובקבוקי המריוט על ידי מאזניים (Merav 2000, SHEKEL, Beit-Keshet, Israel) שחוברו לקריאה מקוונת. כדי להימנע משגיאות כתוצאה מרגישות המאזניים לשינויים בטמפרטורה ולתלות של קצב ההתייבבות שלהם הוחלט לערוך את המדידה רק פעם ביממה, כאשר הטמפרטורה הייתה 35 מעלות וזוהה בכל הניסויים.

בנוסף למעקב רציף אחר טמפרטורת החדר והלחות היחסית הוחלט למדוד את פרופיל הטמפרטורה בתוך העמודה. איור 2 מצביע על המיקום של מדי הטמפרטורה לאורך העמודה. המדיד העליון נמצא מעל פני הקרקע בגובה של 1 סמ' והיתר פוזרו בעומק בהתאם לשני המיקומים של מפלס המים. תדר המדידה והמיצוע בזמן נקבעו כך שמכל אחד ממדי הטמפרטורה נלקחה נמדדה אחת ל 2 דק'. ערך ממוצע חושב ונשמר אחת לכל 10 דקות.



איור 2 : תיאור סכמתי של מדי הטמפרטורה ומיקומם לאורך שתי העמודות. (המידות בסמ').

חישוב ההתאדות הפוטנציאלית, E_p , מבוסס על משוואת פנמן-מונטית' בגרסה המוצגת כדלקמן,

$$E_p = \frac{1}{\gamma_{av}} \frac{\rho_a C_p (e_s - e_a)}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad (1)$$

כאשר γ_{av} הוא ההתנגדות האווירודינמית, ρ_a הוא צפיפות האוויר, C_p מקדם קיבול חום, e_s לחץ אדים חלקי ברוויה, e_a לחץ אדים חלקי באוויר שמעל הקרקע, λ הוא החום הכמוס, Δ גרדיינט עקום הרוויה בתלות בטמפרטורה ו- γ הוא המקדם הפסיכרומטרי (Psychrometric constant). הפרמטרים ρ_a , γ_{av} , e_s ו- e_a תלויים בטמפרטורה ומשתנים במהלך היממה. מדידות שנעשו בתנאים של טמפרטורה ומהירות רוח קבועים ונמצא שניתן לחשב את ההתנגדות על ידי המשוואה האמפירית הבאה (ראה דו"ח קודם),

$$\gamma_{av} = 1.9 + 538 T^{-1} - 1515 T^{-2} \quad (2)$$

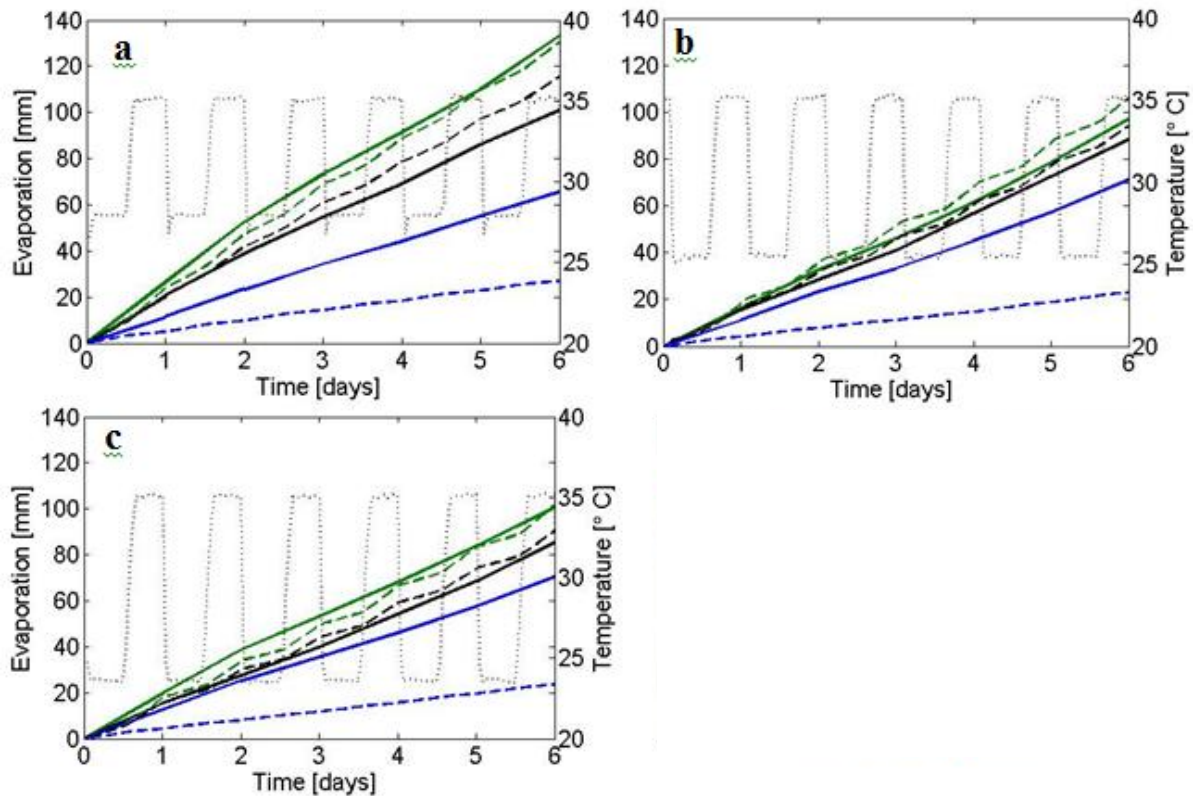
הערך של צפיפות האוויר עבור טמפרטורה, T , נתונה חושב על סמך משוואת המצב של הגזים. הערך של לחץ האדים החלקי באוויר מעל העמודה חושב על סמך מדידה של הלחות היחסית, $e_a = RH/100 \cdot e_s$. ההתאדות מעמודות הקרקע חושבה על סמך ההתאדות הפוטנציאלית ומקדם ההתאדות (טבלה 1),

$$E = K_E E_p \quad (3)$$

Temperature (T)	r_{av} [mm/day] ⁻¹	$K_E(WT_{10})$	$K_E(WT_{25})$
35°C	15.79	0.8596	0.1136
25°C	21.39	0.942	0.411
15°C	30.89	0.9116	0.6591
5°C	51.00	1.24	0.2875

הממצאים בטבלה 1 ממחישים את ההשפעה הייחודית של טמפרטורת אוויר של 5°C על תהליך ההתאדות. תופעה זו ראוי שהיא תיחקר לעומק בהמשך.

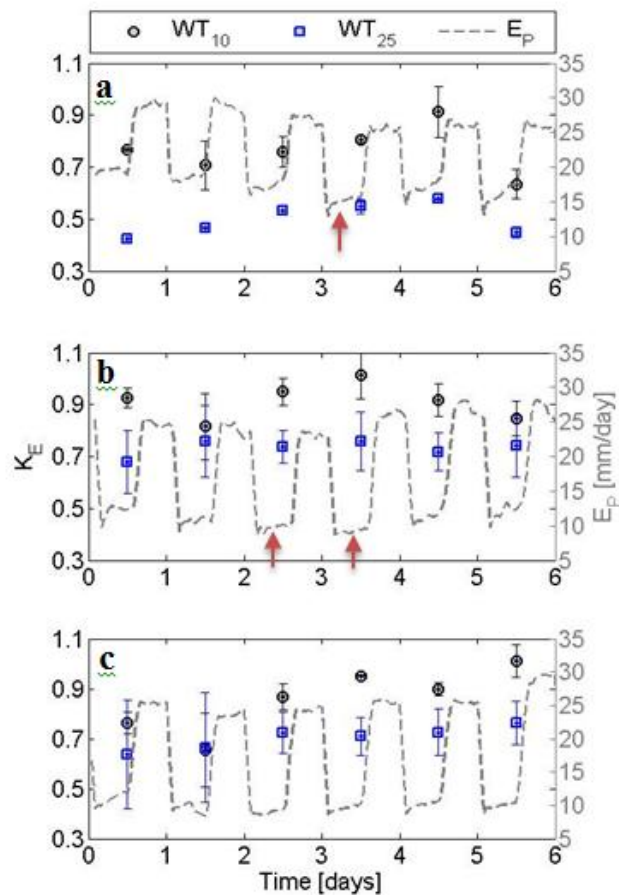
תרשים 2 מסכם סדרת ניסויים בהם שונתה משרעת הטמפרטורה היומית (DTR) עבור שני מפלסי המים, WT_{10} ו- WT_{25} . ברקע נראה גרף טמפרטורת החדר בתלות בזמן. גידול ב- DTR מלווה גם בירידה של הטמפרטורה הממוצעת ולכן קצב האיידוי יורד ככל שה- DTR עולה. השוואה בין תרשים a2 (DTR = 7 °C) לאיור b2 (DTR = 9.5) מצביע על הבדל משמעותי בקצבי ההתאדות המצטברת, אבל למרות הירידה הנוספת בטמפרטורה ועליה ב- DTR התוצאה המוצגת בתרשים c2 (DTR = 11.5°C) דומה לזו שבתרשים b2. תרשים 3 כולל גם חישוב של קצבי ההתאדות שבוצעו בעזרת משוואות 1-3. התוצאות עבור שלשת ערכי ה- DTR מצביעים על התאמה טובה בחישוב ההתאדות הפוטנציאלית ובחישוב ההתאדות מעמודות בהם מפלס המים היה בעומק 10 סמ' אך חיזוי חסר בעמודה בה מפלס המים היה בעומק 25 סמ'.



תרשים 2 התאדות מצטברת מדודה (קווים רציפים) ומחושבת לפי משוואות 1-3 (קווים מקווקוים). משרעת הטמפרטורה הייתה 7 מעלות (a), 9.5 מעלות (b) ו- 11 מעלות צלזיוס (c). הקווים הירוקים מייצגים את ההתאדות הפוטנציאלית, השחורים את WT_{10} והכחולים מייצגים את WT_{25} .

ההתאמה הטובה בין ההתאדות המדודה לזו המחושבת במפלס של 10 ס"מ מתחת לפני השטח מראה כי תחת תנאים הידראוליים כאלו למחזורי הטמפרטורה אין השפעה משמעותית על הדינמיקה של תהליך האידי. כלומר, אין הבדל משמעותי בין קצבי האידי הפועל לאלו שחשבו על סמך קצבי האידי בטמפרטורות הקבועות המתאימות. כלומר, ניתן לחזות את קצבי האידי לאורך היממה על סמך קצבי האידי בטמפרטורות המקסימום והמינימום בקרוב טוב.

לעומת זאת, כאשר המפלס נשמר בגובה של 25 ס"מ מתחת לפני השטח, ההתאדות המצטברת המחושבת הייתה קטנה באופן משמעותי מזו שנמדדה בפועל. כלומר, לא ניתן לחזות את סך האידי (יום ולילה) על סמך קצבי האידי בטמפרטורות המקסימום והמינימום אם מפלס המים רחוק מחזית האידי. הסיבה לכך היא ככל הנראה תוצאה של הרטבה מחדש וחלוקה מחדש של המים בתת הקרקע בתוך העמודה בשעות הלילה. כמות גדולה יחסית של רטיבות הצטברה בקרב פני השטח בשעות הלילה ולכן האידי בשעות היום החמות היה גדול יותר מהחזוי. מחקר נוסף דרוש לכמת את השפעת שינויי הטמפרטורה בין היום והלילה על השתנות תכולת הרטיבות בעמודת הקרקע.

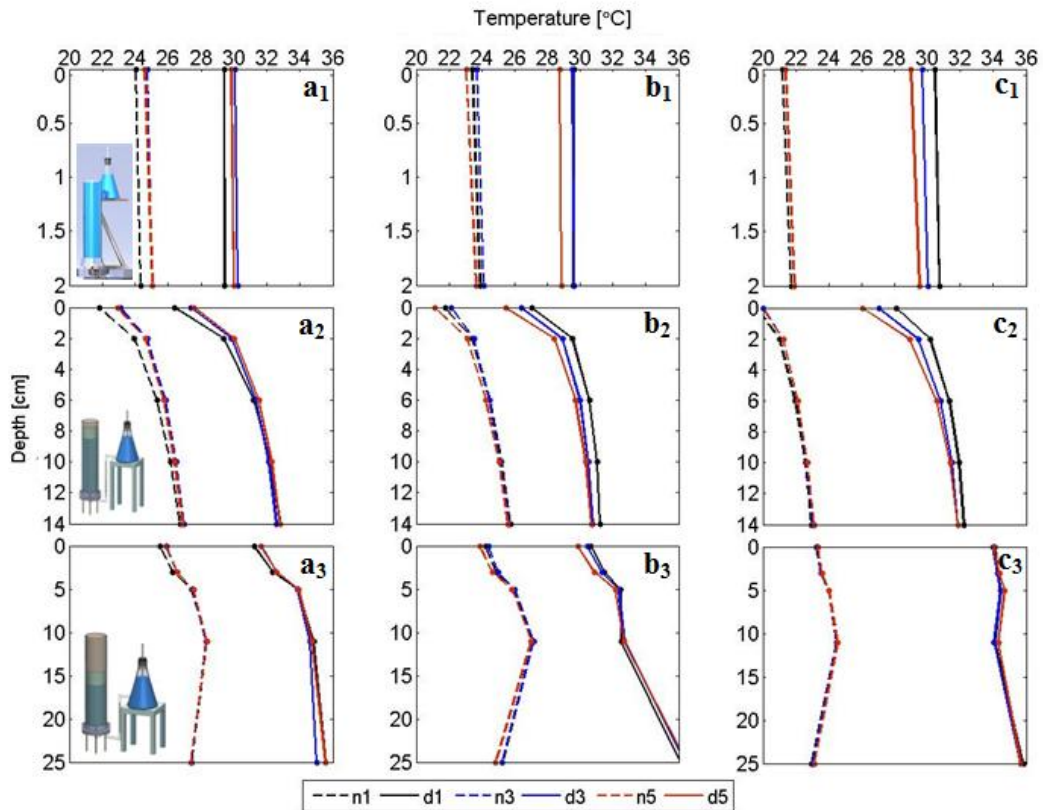


תרשים 3 ערכים יומיים של מקדם ההתאדות K_E והתאדות פוטנציאלית E_P בתלות בזמן עבור שלשת הערכים של DTR מעלות 7, (a), 9.5 מעלות (b) ו-11 מעלות צלזיוס (c). הסימנים הם עבור ההתאדות מעמודות הקרקע והקו המקווקו עבור ההתאדות הפוטנציאלית.

מתרשים 3 ניתן לראות כי ההשתנות שנצפתה בניסויים שבוצעו בטמפרטורות קבועות לא נראתה בניסויים של הטמפרטורה המשתנה. בתרשים 3 אנו רואים כי ערכי מקדם ההתאדות נעו בשינויים קטנים סביב ערך קבוע והיו תמיד גבוהים מ-0.5. תצפית מעניינת היא העובדה שלאחר תקופות של אידי מינימאלי (חיצים אדומים) ערכי מקדם ההתאדות עלו לערכים מקסימאליים. תופעה זו עשויה

להיות תוצאה של האצה בקצב ההרטבה של האזור הלא רווי העליון בעמודה בשעות הלילה כאשר ערכי ההתאדות הפוטנציאלית היו מינימאליים. כתוצאה מכך ביום שאחרי קצבי האידוי הגיעו לערכים מקסימאליים (בעקבות תכולות הרטיבות הגבוהות בקרבת פני השטח שנקבעו בלילה). המנגנון בו תכולת הרטיבות בקרבת פני השטח עולה בשעות הלילה קשורה לעיבוי באזור זה מייד לאחר הזריחה (Yamanaka et al., 1998, 1999).

תהליך ההתאדות יכול להיות מוצג כתהליך אנרגטי הקובע את משטר החום בקרקע. פרופילי הטמפרטורה נמדדו בצהריים ובחצות במקרים השונים בשלושה ימים (1, 3, ו-5) והם מוצגים בתרשים 4. גודל המשרעת משפיע על גודל השינוי בזמן במהלך תקופת הייבוש (המרחק בין הפרופילים גדל עם המשרעת). ככל שתכולת הרטיבות גבוהה, כך גדל ההפרש בין הפרופילים. כאשר מפלס המים בעומק שהוא קטן מהאורך האופייני של התווך המתייבש, טמפרטורת המינימום נמצאת תמיד בפני הקרקע. כאשר עומק זה גדול מהאורך האופייני, אין השפעה משמעותית של המשרעת וניתן לזהות את מישור האידוי בו מתקיימת הטמפרטורה המינימאלית. פרופילים אלה שימשו לפיתוח מודל המתאר את ההתאדות במצב של טמפרטורה אחידה. מודל זה הוצג בדו"חות הקודמים.



תרשים 4 פרופילים של טמפרטורה בחתך עמודות הקרקע בימים 1, 3, ו-5. הערכים נמדדו בצהריים (d) ו-11.5 (n) ובחצות (n) (קו מקוקו). עמודות a-c מציינות את שלושת המשרעות שנבחנו (7, 9.5 ו-11.5 מעלות בהתאמה). השורות 1-3 מציינים שלושת משטרי ההרטבה שנבחנו (רווי, מפלס מים בעומק 10 ס"מ, ומפלס מים בעומק 25 ס"מ, בהתאמה).

1.2 השפעת משרעת הטמפרטורה היומית על קצב ההתאדות הפוטנציאלית

לצורך בחינת השפעת שינויי טמפרטורה על ההתאדות, נערכו חישובים על נתוני אמת של 90 יום לא רצופים, החל מיום 159 ועד יום 255 (יולי עד ספטמבר), שנמדדו בשדה כותנה בעמק החולה בקיץ 2012. נמדדו טמפרטורת אוויר יבש ולח, קרינה נטו, שטף חום לקרקע ומהירות וכוון רוח.

נתונים אלה שימשו לחישוב התאדות הייחוס, ET_0 , לפי נוסחת פנמן-מונטית' עבור פני שטח היפותטיים המייצגים כיסוי דשא ללא מגבלת מים לפי FAO56. המודל ששימש לחישובים הוא מודל Penman-Monteith (PM):

$$(4) \quad PM [W m^{-2}] = \frac{\Delta(R_N - G) + \rho_a C_p (e_s - e) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)}$$

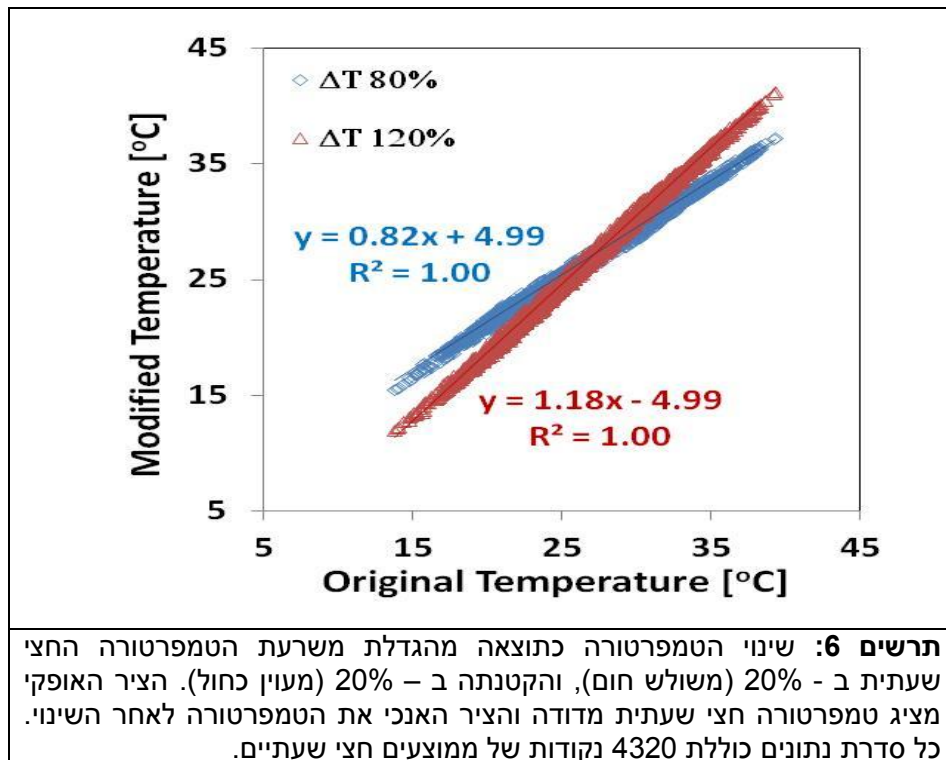
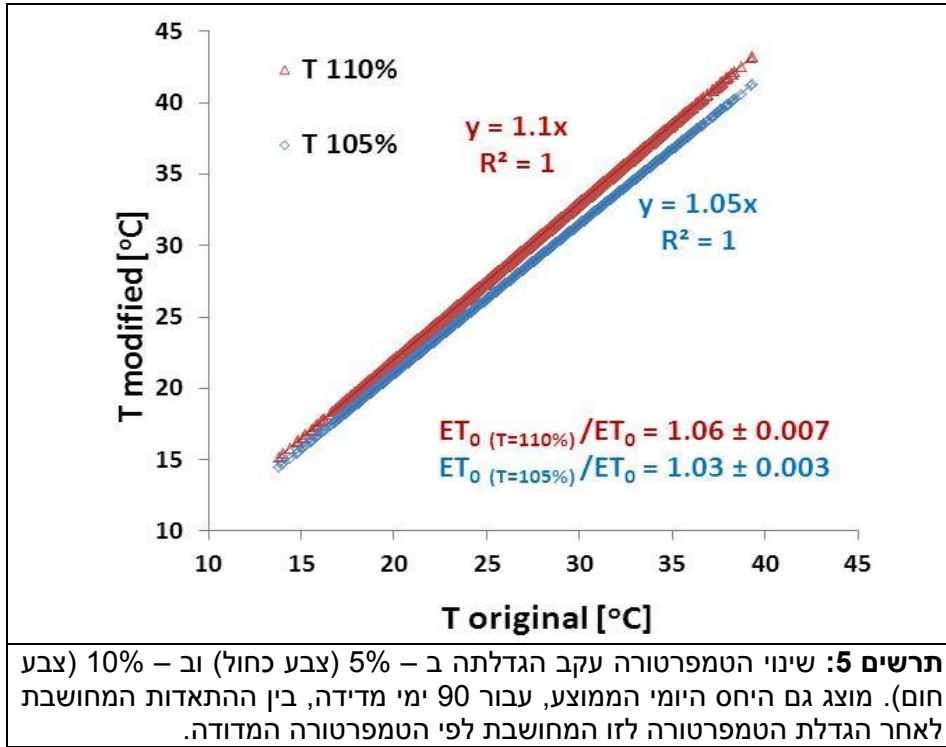
בנוסחה זו: Δ – שיפוע עקומת לחץ האדים $[kPa \text{ } ^\circ C^{-1}]$ – R_N קרינה נטו $[J s^{-1} m^{-2}]$, G – שטף חום לקרקע $[J s^{-1} m^{-2}]$, ρ_a – צפיפות האוויר $[Kg m^{-3}]$, C_p – חום סגולי של האוויר בלחץ קבוע $[J Kg^{-1} K^{-1}]$, e_s – לחץ אדים ברוויה $[kPa]$, e_a – לחץ אדים $[kPa]$, γ – קבוע פסיכרומטרי $[kPa \text{ } ^\circ K^{-1}]$ ו- r_a – התנגדות אווירודינאמית $[s m^{-1}]$. את התנגדות הצמחייה, r_c , ניתן לבטא כ:

$$(5) \quad r_c = r_l / LAI_{active}$$

כאשר $LAI_{active} = 0.5LAI$ (Allen et al., 1998) ו- r_l היא התנגדות הפיוניות. מודל הייחוס, ET_0 , אשר חושב בניתוח הנוכחי מחושב ממשוואת PM הנייל (משוואה 4), עבור גידול דשא היפותטי בגובה 0.12 מ'. גידול הדשא על שטח אופקי גדול, אחיד במרחב ומושקה היטב. עבור גידול כזה התנגדות הצמחייה, r_c , עומדת על ערך קבוע של $70 s m^{-1}$ וההתנגדות האווירודינאמית, r_a , מחושבת כ- $208/u_{2m}$ כאשר, u_{2m} היא מהירות הרוח בגובה 2 מ'.

ההשפעה של שינויי האקלים נבחנה בשתי דרכים. בדרך הראשונה, הוגדלה הטמפרטורה החצי שעתית באופן אחיד ב- 5% וב- 10%. תרשים 5 מראה את הקווים של הטמפרטורה המוגדלת ב- 5% וב- 10%. כן מוצג על הגרף היחס היומי הממוצע (על 90 ימים), עם סטיית תקן, בין ההתאדות המחושבת לאחר עליית הטמפרטורה לזו המחושבת לפי הטמפרטורה המדודה. עבור עליית טמפרטורה של 5%, ההתאדות גדלה ב- 3%, ואילו עליית הטמפרטורה ב- 10% הגדילה את ההתאדות ב- 6%.

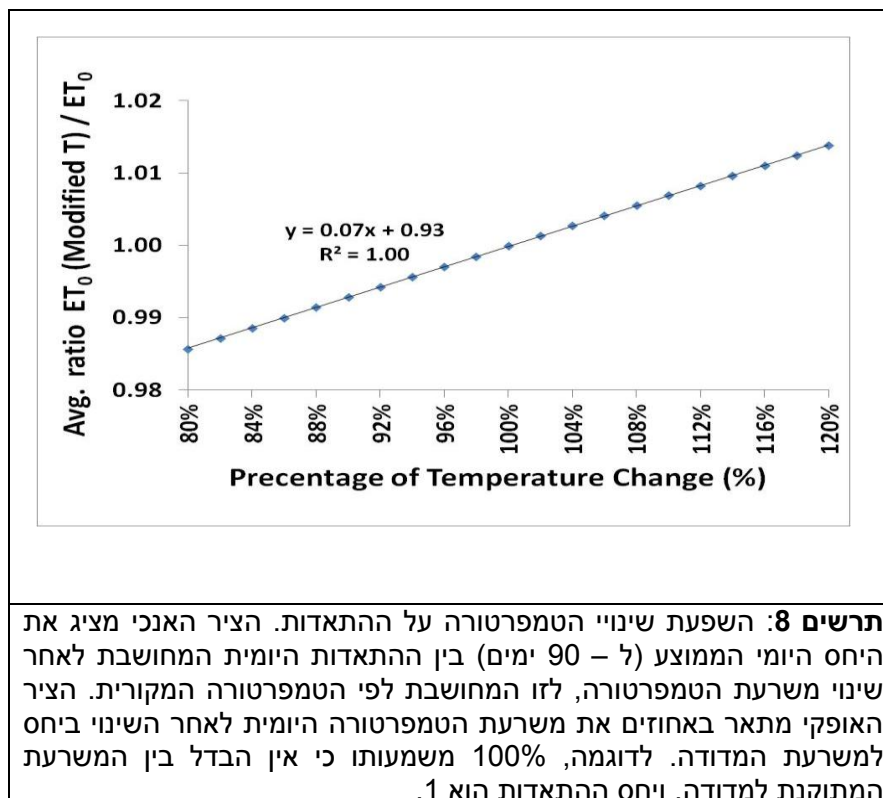
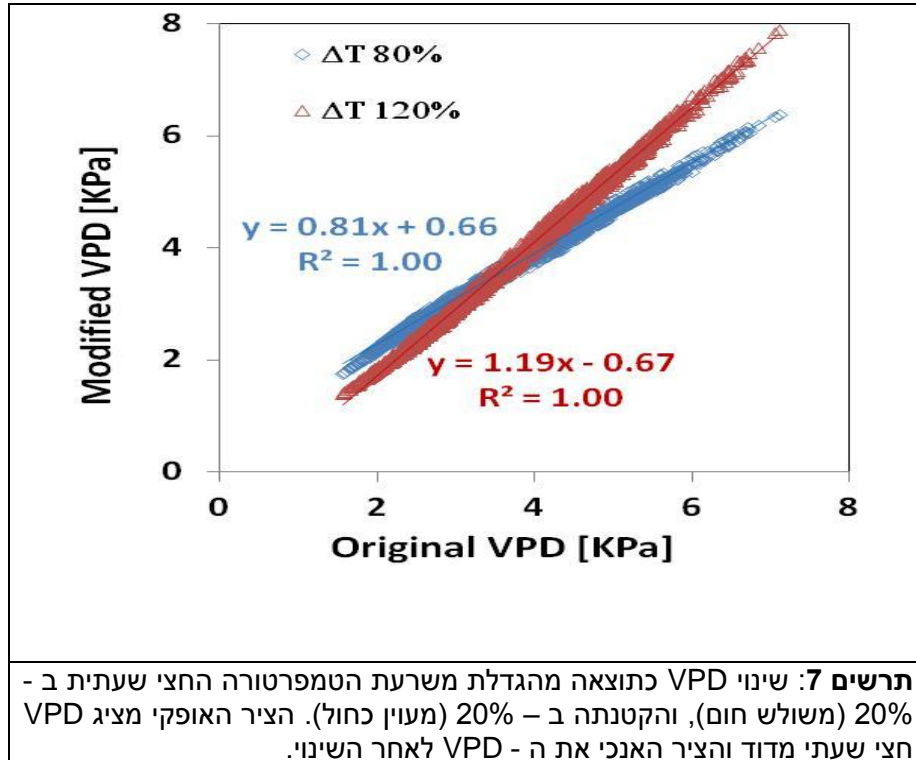
הדרך השנייה לבחינת השפעת שינויי טמפרטורה על ההתאדות הייתה ע"י הקטנת או הגדלת ההבדל בין טמפרטורה חצי שעתית לטמפרטורה יומית ממוצעת, כלומר, הקטנת או הגדלת משרעת הטמפרטורה היומית, תוך שמירה על טמפרטורה ממוצעת קבועה. לדוגמה, אם הוגדלה המשרעת, הטמפרטורה היומית המרבית עלתה והמזערית ירדה. לעומת זאת, אם הופחתה המשרעת, ירדה הטמפרטורה היומית המרבית, ועלתה הטמפרטורה המזערית. בחישובים להלן, נבחן טווח של שינויים, החל מהקטנת המשרעת ב- 20% ועד הגדלתה ב- 20%. תרשים 6 מראה את הטמפרטורה החצי שעתית לאחר השינוי, כתלות בטמפרטורה החצי שעתית שנמדדה בפועל בשדה. מוצגים נתונים עבור הקטנת/הגדלת משרעת הטמפרטורה ב- 20%.

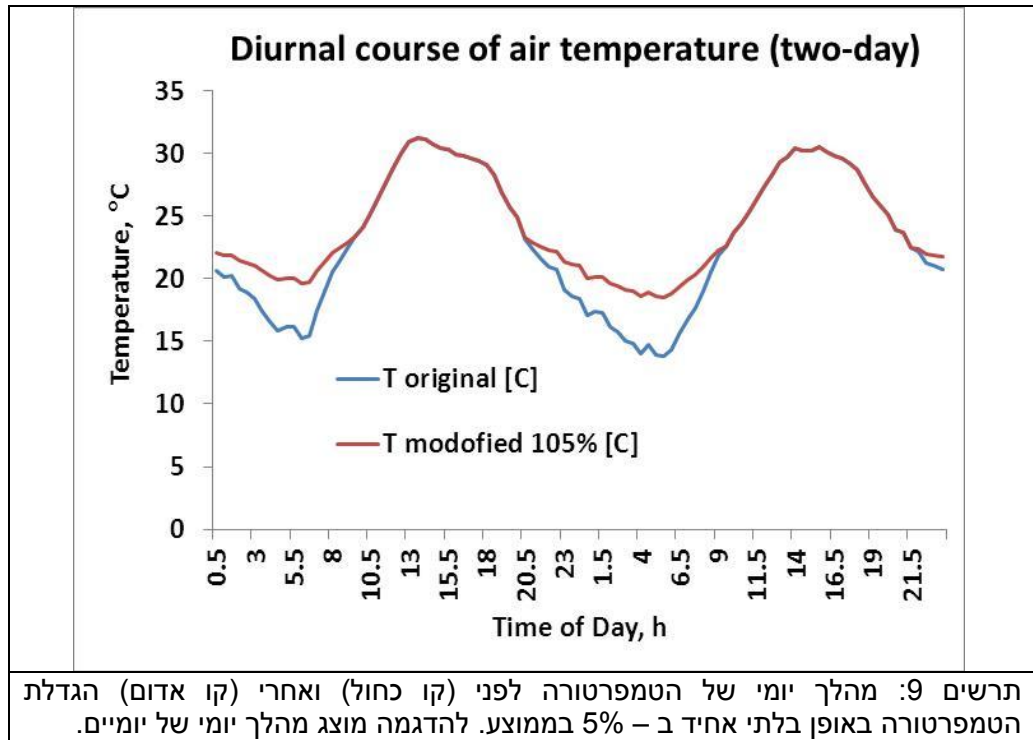


במודל התאדות הייחוס טמפרטורת האוויר משפיעה על גרעון לחץ האדים (VPD), וכן על מספר קבועים פיסיקליים. תרשים 7 מראה את VPD החצי שעתי לאחר השינוי, כתלות ב - VPD חצי שעתי לפני השינוי, שהתקבל מתוך הטמפרטורה שנמדדה בפועל בשדה.

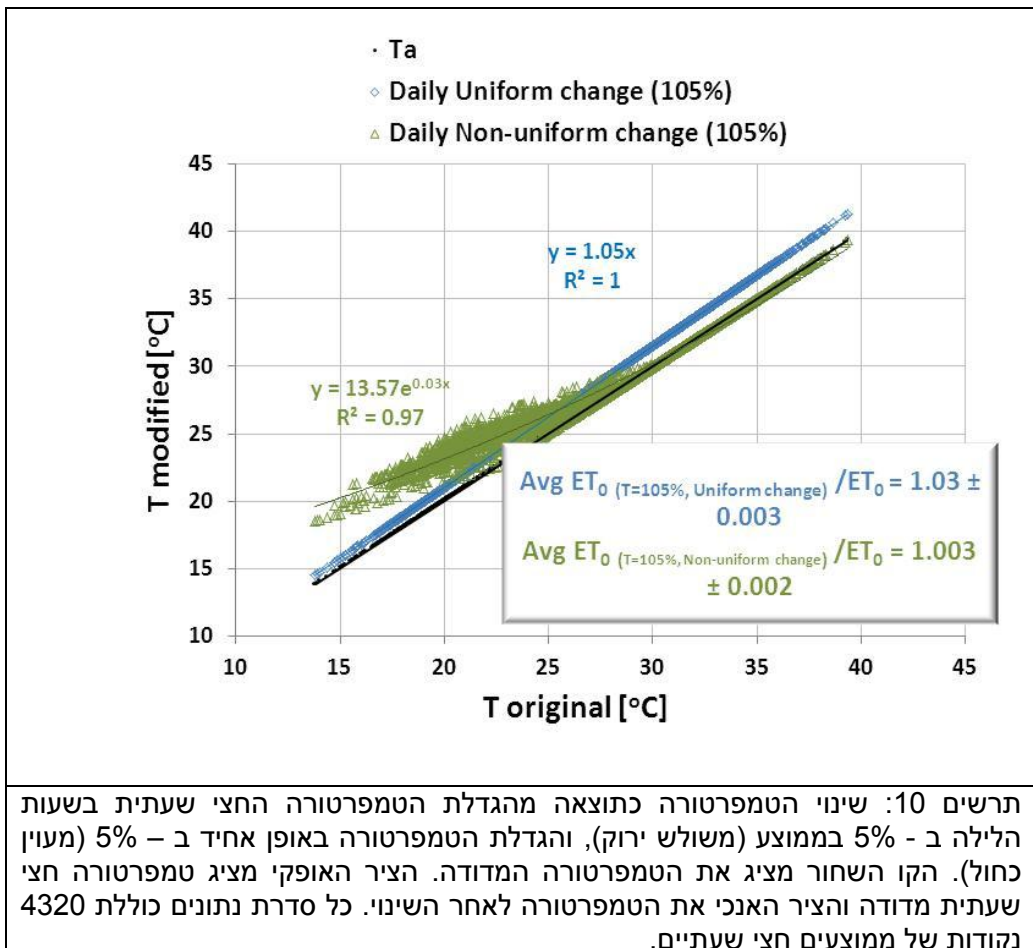
תרשים 8 מציג את השינוי בהתאדות יומית ממוצעת על תקופת המדידה (90 יום), כתלות באחוז השינוי של משרעת הטמפרטורה. הגרף מראה כי השינויים בהתאדות כתוצאה משינויי משרעת הטמפרטורה, תוך שמירת טמפרטורה ממוצעת קבועה, קטנים יחסית, עד כדי 2% לכל כוון.

כאמור אחד התרחישים מצביע על כך שההתחממות הגלובאלית נובעת בעיקר מהקטנת המשרעת של טמפי האוויר במהלך היממה ע"י עליה בטמפרטורות המינימום בלילה. לכן בחנו את השפעת הגדלת הטמפרטורה החצי שעתית באופן בלתי אחיד (העלאת טמפי מינימום) כך שהממוצע היומי יעלה ב- 5%. הגדלה זו נעשתה ע"י הגדלת הטמפרטורות הנמוכות (בעיקר בשעות הלילה) בלבד ללא שינוי בטמפרטורות המקסימום. תרשים 9 מראה מהלך של יומיים להמחשת השינוי שנבחן.



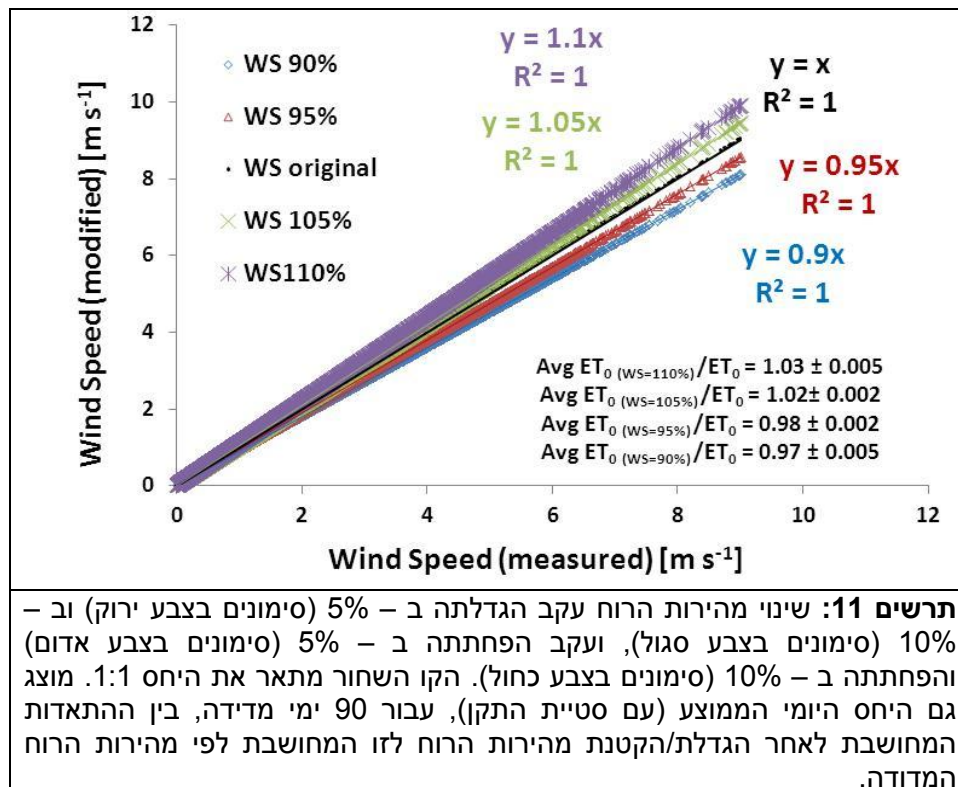


תרשים 10 מראה את הטמפרטורה החצי שעתית לאחר השינוי, כתלות בטמפרטורה החצי שעתית שנמדדה בפועל בשדה. לשם השוואה מוצגת גם הטמפרטורה לאחר שינוי אחיד ב - 5% (כמו בתרשים 5). בתרשים 10 מוצגת גם השפעת שינוי הטמפרטורה על התאדות הייחוס. ניתן לראות כי הגדלה אחידה של הטמפרטורה ב - 5% העלתה את ההתאדות בכ - 3%, ואילו הגדלה בלתי אחידה של הטמפרטורה ב - 5% (בעיקר ע"י התחממות שעות הלילה), העלתה את ההתאדות ב - 0.3% בלבד.



1.4 השפעת מהירות הרוח על קצב ההתאדות הפוטנציאלית

לאחרונה, מתרבים הדיווחים על ירידה במהירות הרוח הממוצעת כמרכיב נוסף בתהליך ההתחממות הגלובאלית. מצב זה, המכונה "stilling" אף הוצע כהסבר לפרדוקס הגיגית. ההשפעה של מרכיב זה בשינוי האקלים על ההתאדות נבחנה ע"י הגדלה או הקטנה של מהירות הרוח החצי שעתית (בגובה 2 מ') באופן אחיד ב- 5% וב- 10%. תרשים 11 מראה את הקווים של המהירות המוגדלת והמוקטנת ב- 5% וב- 10%. כן מוצגים על הגרף היחסים היומיים הממוצעים (על 90 ימים), עם סטיית תקן, בין ההתאדות המחושבת לאחר עליית (או ירידת) מהירות הרוח לזו המחושבת לפי מהירות הרוח המדודה. עבור עליית (ירידת) מהירות הרוח ב- 5%, ההתאדות עלתה (ירדה) ב- 2%, ואילו עליית (ירידת) מהירות הרוח ב- 10% הגדילה (הפחיתה) את ההתאדות ב- 3%.



1.5 הקשר בין שטפי החום המוחשי והכמוס לטמפרטורה על בסיס מהלך שנתי

בחנינת המהלך השנתי של רכיב שטף החום המוחשי, H , בוצע בעזרת מדידות מסינטילומטר. זוהי מערכת הכוללת משדר ומקלט המפיקה קרן לייזר הדוגמת את האוויר בחתך בין שני המכשירים ומאפיינת את שדה הטורבולנציה באוויר (אורך 3). המאפיינים של שדה הטורבולנציה נמצאים בקורלציה עם שטפי החום והתנע הטורבולנטיים. כתוצאה מכך, ניתן לאמוד את H . מדידה של קרינה נטו R_n מאפשרת להסיק לגבי שטף החום הכמוס (התאדות) LE על בסיס משוואת מאזן האנרגיה תוך הזנחת שטף החום לתוך הקרקע.

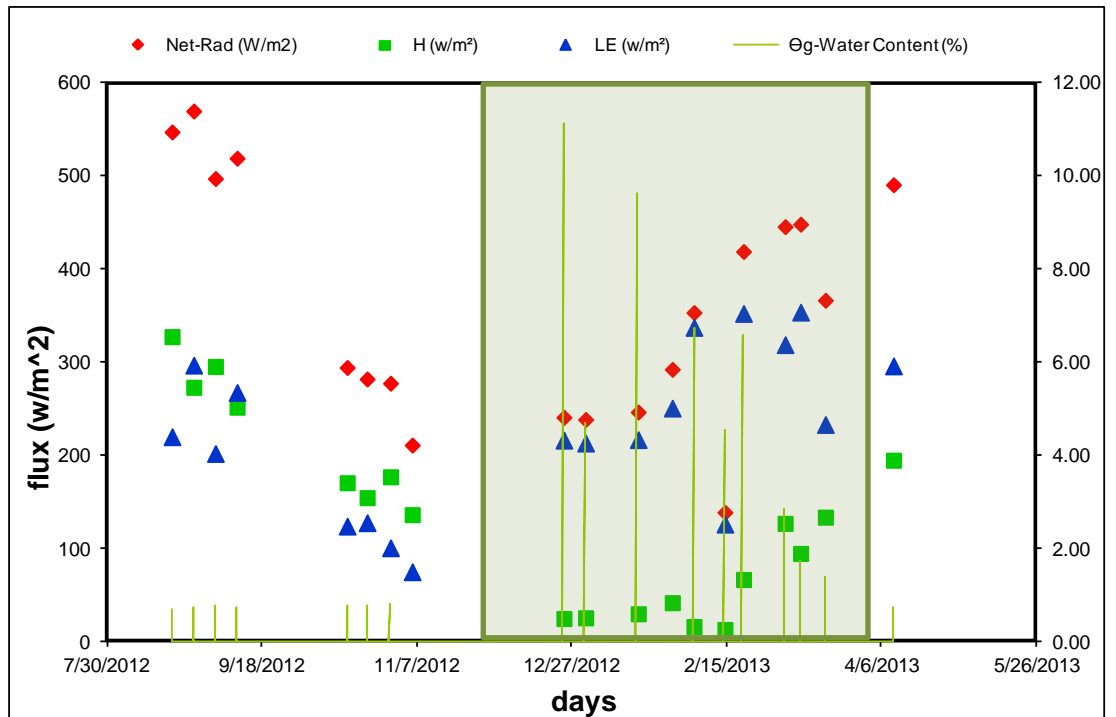
המערכת הוצבה באוגוסט 2012 על בסיס שבועי בין השעות 10:00 ל-14:00 בשדה בור (קרקע חמרה) שנחרש ונזרע לשיבולת שועל בתחילת דצמבר. הקציר נערך בתחילת אפריל 2013. המערכת הוצבה

בגובה 1.5 מ' מפני הקרקע. המרחק בין המקלט למשדר היה 80 מ'. במהלך השנה נמדדה תכולת הרטיבות של פני הקרקע ביום המדידה ובוצע מעקב אחר גובה הצמחייה.



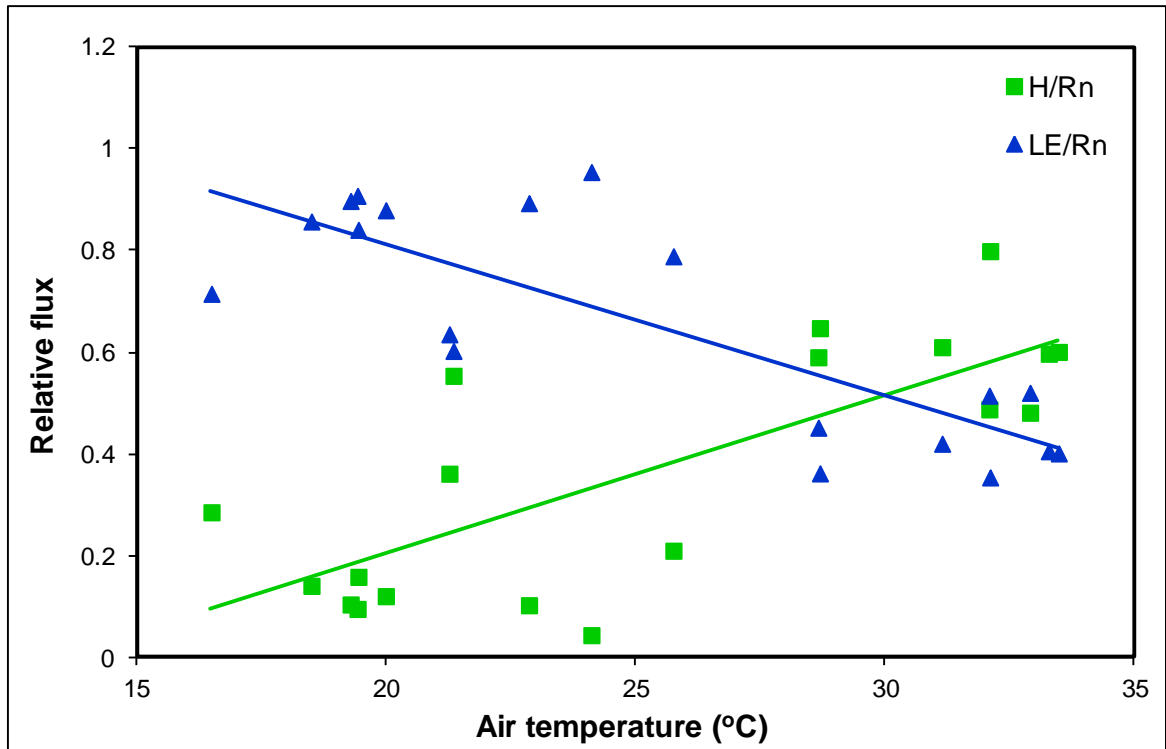
איור 3: מערכת הסינטיילומר אשר הוצבה בשדה שיבולת השועל.

תוצאות המדידות של H ו- R_n ואמון LE מוצגים בתרשים 12 יחד עם ערכי תכולת הרטיבות של פני הקרקע (עמודות). האזור האפור מציין את תקופת המצאות הגידול בשדה.



תרשים 12: ערכים מדודים של H ו- R_n במהלך השנה יחד עם אמדני LE המקבילים.

התוצאות מצביעות על מהלך שנתי בו השטפים יורדים לקראת החורף ועולים בחזרה לקראת האביב. בשיא החורף, ערכי H נמוכים מאוד וכמעט כל הקרינה מתורגמת להתאדות כי הקרקע נמצאת במצב הרטוב ביותר. ניתן לנרמל את השטף המדוד H ואת השטף המוערך LE ע"י חלוקה ב- R_n על מנת לבטל את המגמה המובנת של השתנות הקרינה במהלך השנה. הצגת הערכים המנורמלים כנגד טמפרטורת האוויר מובאת בתרשים 13. התוצאה המתקבלת הינה שבתנאים של שדה בור (ללא השקיה) עולה עם הטמפרטורה בעוד LE יורד עם העלייה בטמפרטורה בגלל הקורלציה הגבוהה בין רטיבות פני קרקע לטמפרטורה נמוכה (גשמי החורף). מכאן שבתנאי מחסור במים (אזורים צחיחים), עליה בטמפרטורה תלויה בעליה ב-H על חשבון ירידה ב-LE.



תרשים 13: הערכים המנורמלים H/R_n ו- LE/R_n כנגד טמפרטורת האוויר.

2. סיכום

השפעת הטמפרטורה על ההתאדות נבדקה בסדרה של ארבעה ניסויים איזותרמליים (בטמפרטורות: 5, 15, 25 ו 35 מעלות) עם תצורות הנבדלות אחת מהשנייה בתנאי ההתחלה ובתנאי השפה. השפעת הטמפרטורה על ההתאדות מפני קרקע חשופה תלויה דרגת הרוויה של הקרקע. תופעה ייחודית נמדדה כאשר הטמפרטורה ירדה ל- 5°C . תהליך ההתאדות בכלל והמעבר משלב אי לשלב בי קשור לאורך האופייני של הקרקע. אורך זה קטן עם העלייה בטמפרטורה כך שתיתכן השפעה ישירה של העלייה בטמפרטורה על משך שלב אי (משך שלב אי יתקצר) בו רוב אובדני המים מתרחשים. סוג הקרקע (התפלגות גודל החלקיקים) משפיע בצורה משמעותית על עצמת ההתאדות. ככל שהקרקע דקת מרקם, כמות המים המתאדים גדולה יותר. במערכות קרקע טבעיות, במרבית המקרים, מי הנקבובים הינם תמיסה מלוחה ולא מים מזוקקים. תנועת התמיסה עד סמוך לפני השטח ואידוי התמיסה משם גורם לירידה מובהקת בקצה האידוי בזמן. ניתן לומר בברור כי נוכחות מלחים, והשקעתם בנקבובים ומעליהם כשכבת מלח בעלת מקדם דיפוזיה נמוך לאדי מים, צפויה להוות גורם חשוב בתהליך האידוי מקרקעות.

חישובים מראים תלול ברורה ומשמעותית של ערך ההתנגדות האווירודינמית עם הטמפרטורה, כאשר הערך קטן עם ירידה בטמפרטורה.

ניתוח רגישות של משוואת פנמן-מונטיט להשפעת שינויים בטמפרטורה ומהירות רוח על שיעור ההתאדות במהלך היממה על בסיס נתוני שדה מראה שההשפעה של הטמפרטורה גבוהה יותר מזו של מהירות הרוח.

השפעת השינוי הצפוי באקלים הגלובאלי על תהליך ההתאדות מורכבת מאוד. הטמפרטורה משפיעה על ההתאדות. משטר המים בעת תהליך ההתאדות משפיע מאוד על התהליך ומשנה את ההשפעה היחסית של הטמפרטורה. אם בניסוי מבוקר בו שומרים על מפלס קבוע של מי תהום, ההתאדות עולה עם העלייה בטמפרטורה, נתוני שדה מאים שההתאדות יורדת עם העלייה בטמפרטורה בגלל הירידה במים הזמינים להתאדות.

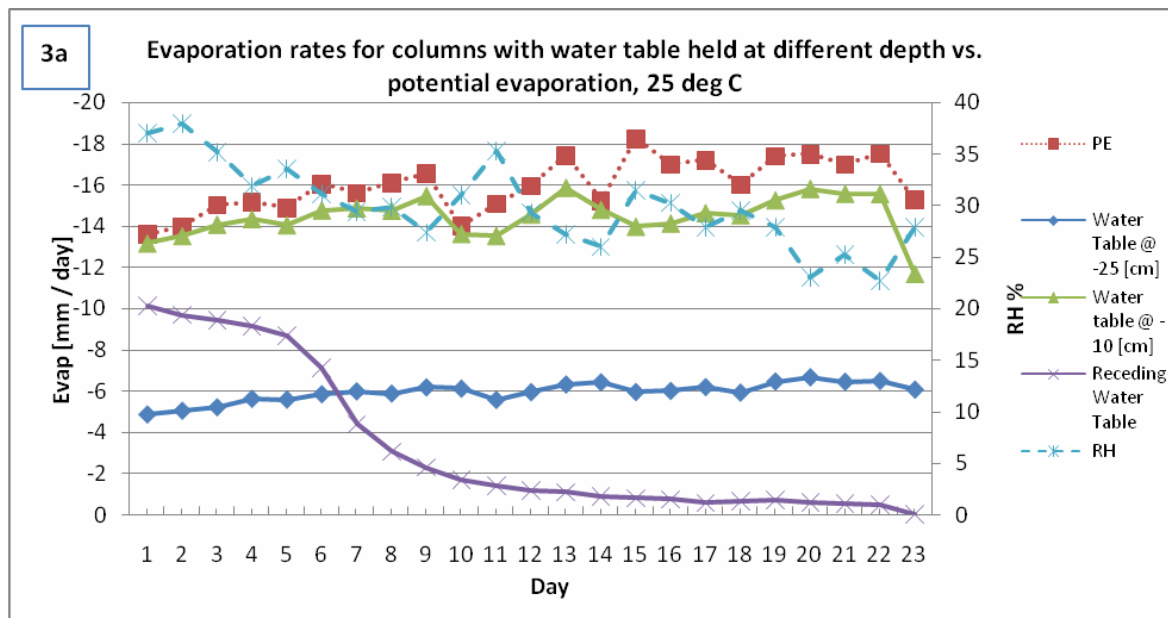
כאשר הטמפרטורה משתנה, יש חשיבות מכרעת על משרעת השינוי. במידה ומשרעת השינוי לא תושפע מהשינוי באקלים, אזי עליה של 10% בטמפרטורה הממוצעת תתבטא בעלי של כ- 6% בשיעור ההתאדות. במידה והעלייה בטמפרטורה הממוצעת תגרם ע"י צמצום המשרעת דרך עלייה בטמפרטורת המינימום בלילה, אזי שיעור ההתאדות כמעט ולא יושפע.

שינוי האקלים ילווה ככל הנראה גם בשינוי משטר הרוח, לו יש גם השפעה מכרעת על תהליך ההתאדות. עלייה של 10% במהירות הרוח הממוצעת תתבטא בעלייה של כ- 3% בשיעור ההתאדות. עצמת תהליך ההתאדות הינה תוצאה של מאזן האנרגיה הגלובאלי. עבור רמות קרינה סולרית ללא שינוי, ייתכן וחלק גדול יותר מהעלייה הצפויה בטמפרטורה ילך לשטף החום המוחשי מאשר לשטף החום הכמוס המבטא את שיעור ההתאדות.

נספח: ריכוז תוצאות משמעותיות מהדוחות הקודמים.

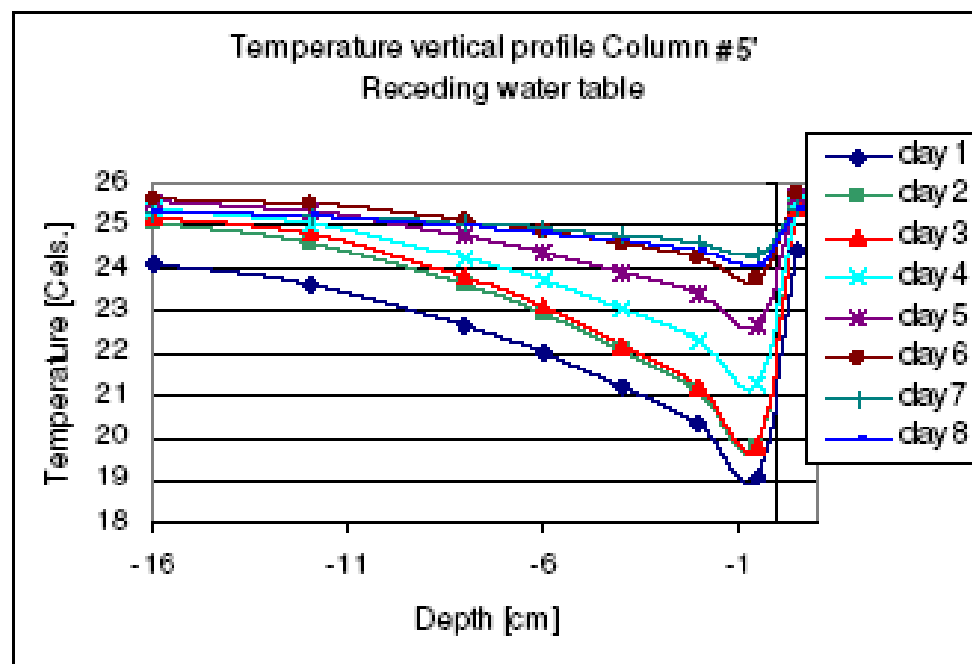
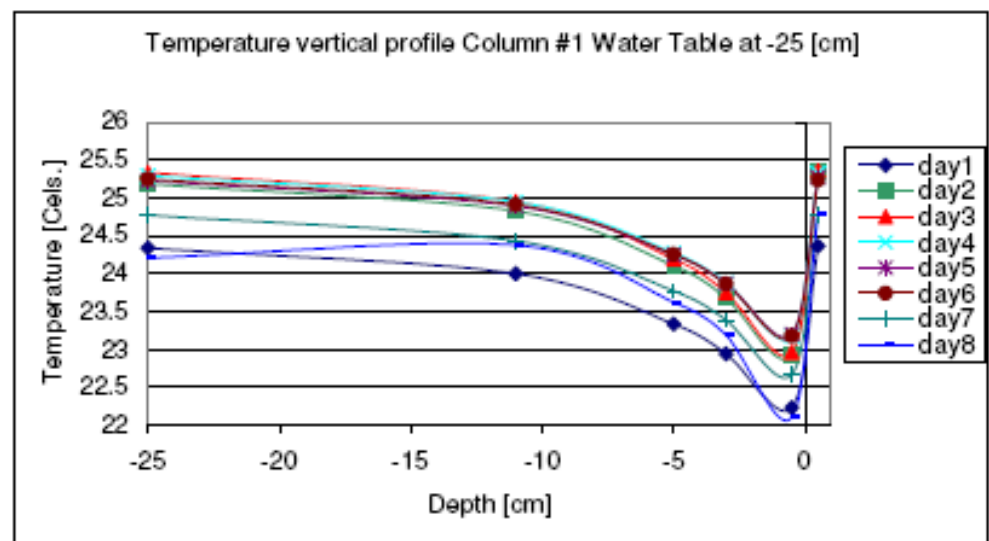
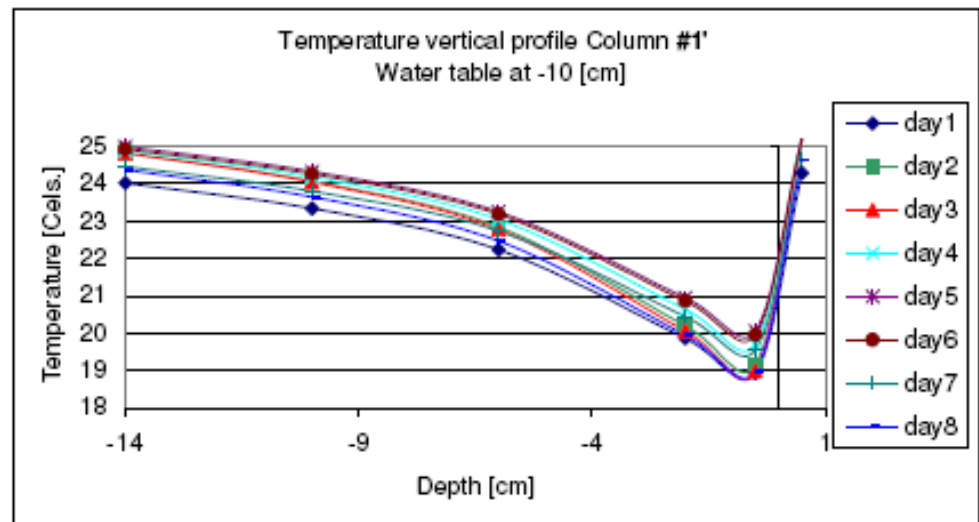
1. השפעת תנאי ההתחלה בפירוס תכולת הרטיבות בקרקע

סדרת הניסויים הראשונה בוצעה בטמפרטורה קבועה של 25°C . תוצאות הניסוי מובאות בתרשים נ-1. רמת הלחות היחסית נשמרת קבועה פחות או יותר לאורך הניסוי, עם מגמה קלה של ירידה ככל שהניסוי נמשך. בהתאם, רמת ההתאדות הפוטנציאלית המדודה בחדר הניסוי גם היא פחות או יותר קבועה, עם מגמה קלה הפוכה לזו של הלחות היחסית. כאשר פני המים החופשיים היו 10 ס"מ מתחת לפני הקרקע, שיעור ההתאדות עקב אחר ההתאדות הפוטנציאלית עם ערך קצת יותר נמוך. כאשר פני המים נקבעו בעומק 25 ס"מ, שיעור ההתאדות היה כמחצית השיעור הפוטנציאלי, ונותר קבוע במהלך הניסוי. העקום המתקבל במקרה בו העמודה הרוויה התייבשה ללא אספקת מים חיצונית הינו אופייני לתהליך ומתאר את שלביו השונים. ניתן להיווכח שעבור תכונות החול המסוים בניסוי, מפלס מים חופשיים בעומק 10 ס"מ מקיים עדיין את התנאים של שלב א', בו קיימת רציפות הידרואולית עד לפני הקרקע המהווה במקרה זה את מישור האידי. לעומת זאת, בעומק 25 ס"מ, המצב הינו ביניים, בקרבת נקודת הפיתול של העקום הייבוש האופייני (מקרה 3) ומצביע על מצב ביניים בו נותקה הרציפות ההידרואולית אל פני הקרקע, מישור האידי נע אל תוך עמודת הקרקע ותהליך דיפוזיבי מעורב כבר בתהליך ההסעה של אדי המים אל פני הקרקע.



תרשים נ-1: תוצאות הניסוי בטמפרטורה קבועה של 25°C עבור 3 תנאי ההתחלה.

פרופילי הטמפרטורה המתאימים למצבים השונים מובאים בתרשים נ-2. הקשר בין פרופיל הטמפרטורה לאופי תהליך ההתאדות בולט לעין. במקרה בו שיעור ההתאדות היה הגבוה ביותר (עומק מפלס המים החופשיים 10 ס"מ מתחת לפני הקרקע), התקררות שכבת פני הקרקע הינה המשמעותית ביותר, כ- 6°C , וטווח השינוי של הטמפרטורה בשכבה הקרובה לפני הקרקע הינו הקטן ביותר, כ- 1°C בשבוע. כאשר פני המים החופשיים נקבעו כ-25 ס"מ מתחת לפני המים ושיעור ההתאדות ירד לכדי מחצית, השכבה בפני הקרקע התקררה פחות (כ- 3°C). במקרה של עמודה רוויה, הקירור בשכבת פני הקרקע זהה לזה המאפיין את שיעור ההתאדות הגבוה וטווח ההשתנות במהלך השבוע הוא הגדול ביותר (כ- 5°C).

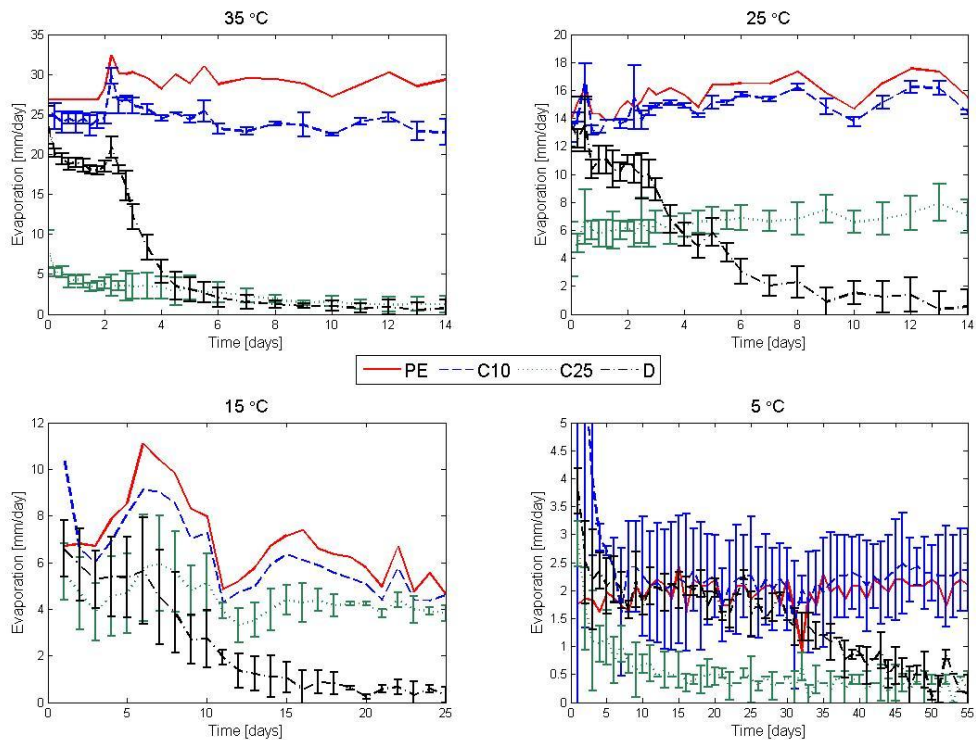


תרשים נ-2: פרופילי הטמפרטורה במהלך הניסוי בטמפרטורה קבועה של 25°C עבור 3 תנאי ההתחלה.

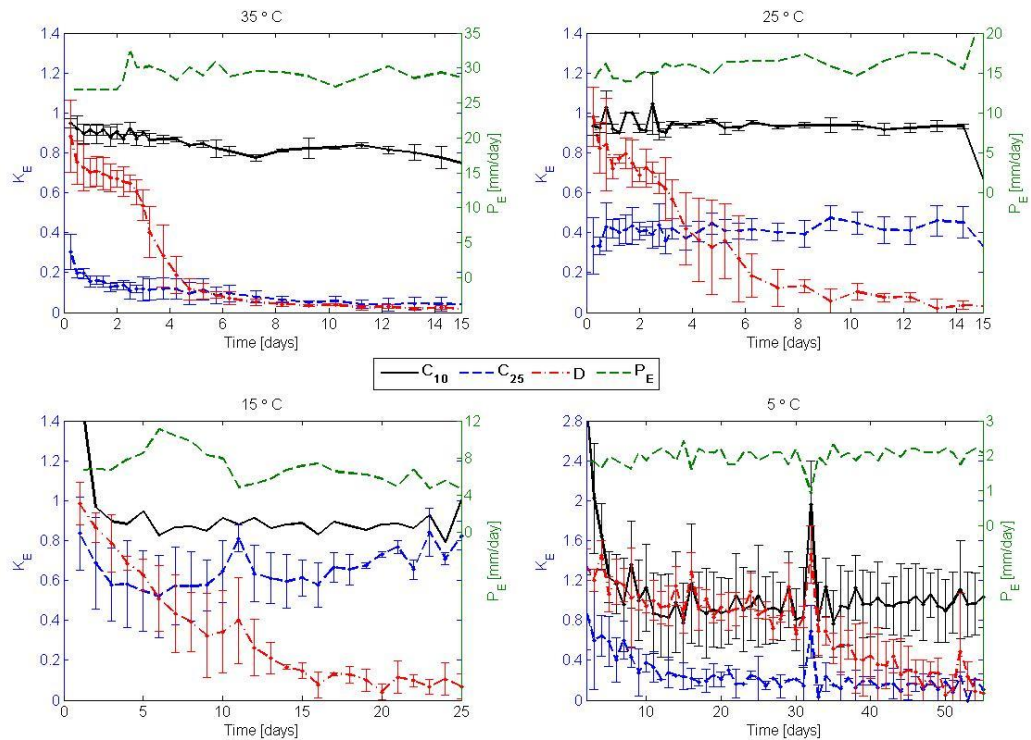
2. השפעת הטמפרטורה

סדרה של ארבעה ניסויים איזותרמיים (בטמפרטורות: 5, 15, 25 ו 35 מעלות) שמטרתם להשוות את קצבי האידוי ואובדן המים המצטבר מתצורות הנבדלות אחת מהשנייה בתנאי ההתחלה ובתנאי השפה נערכה בחדר מבוקר אקלים במהלך השנה הראשונה והשנייה. בכל ניסוי נמדדו קצבי האידוי מ: (1) משטח מים פריאטי בתחתית העמודה; (2) עמודות חול עם מפלס מים רדוד שנשמר באופן קבוע בעומק של 10 ס"מ מפני הקרקע; (3) עמודות חול עם מפלס מים קבוע בעומק 25 ס"מ מפני הקרקע; ו (4) עמודות חול רוויות ויבוש חופשי.

התוצאות מובאות בתרשים נ'3. בארבעת הניסויים, הנבדלים בטמפרטורת הסביבה ודרישת אידוי, נראה כי בעמודות הקרקע בהן נשמר מפלס מים רדוד בעומק של 10 ס"מ מתחת לפני הקרקע האידוי בפועל עוקב אחרי האידוי הפוטנציאלי הנמדד תחת אותם תנאים. אולם בטמפרטורה הגבוהה, ההפרש בין השניים גדל והאידוי מהקרקע לא מצליח להדביק את דרישת האידוי. כאשר טמפרטורת הסביבה נשמרה על 5 מעלות ודרישת האידוי סביב 2 מ"מ ליום האידוי בפועל לעתים מעפיל על האידוי הפוטנציאלי. כאשר המפלס נשמר 25 ס"מ מתחת לפני הקרקע, רמת האידוי יורדת בצורה משמעותית עם העליה בטמפרטורה. מקדם האידוי, המוגדר כיחס שבין האידוי בפועל לפוטנציאל האידוי תחת אותם תנאי סביבה, מאפשר השוואה של דינאמיקת תהליך האידוי בסביבות שונות. התוצאות מוצגות בתרשים נ'4. בתצורה בה נשמר מפלס קבוע בעומק 10 ס"מ מפני הקרקע מקדם האידוי נשמר סביב ערך קבוע הקרוב לאחד. בסביבה של 35 מעלות חום ודרישת אידוי מדודה של 30 מ"מ ליום מקדם האידוי נע סביב ערך ממוצע של 0.86 לעומת 1.04 בסביבה של 5 מעלות. כאשר מפלס המים נשמר בעומק של 25 ס"מ מתחת לפני הקרקע, מקדם האידוי מושפע רבות מתנאי הסביבה. בטמפרטורות מתונות של 15 ו 25 מעלות מקדם האידוי עולה עם הירידה בטמפרטורה. באותם תנאי סף, נצפתה ירידה במקדם האידוי עם הזמן בניסויים שנערכו בתנאי סביבה קיצוניים בהם הוחלה טמפרטורה של 5 ו 35 מעלות צלסיוס. בתנאים אלו נצפתה ירידה של כמעט סדר גודל במקדם האידוי.



תרשים נ'3: אידוי בפועל כפי שנמדד ממשטח מים פריאטי (PE), עמודות חול עם מפלס מים קבוע בעומק 10 ס"מ (C10), עמודות חול עם מפלס מים קבוע בעומק 25 ס"מ (C25), ועמודות חול מתייבשת (D).



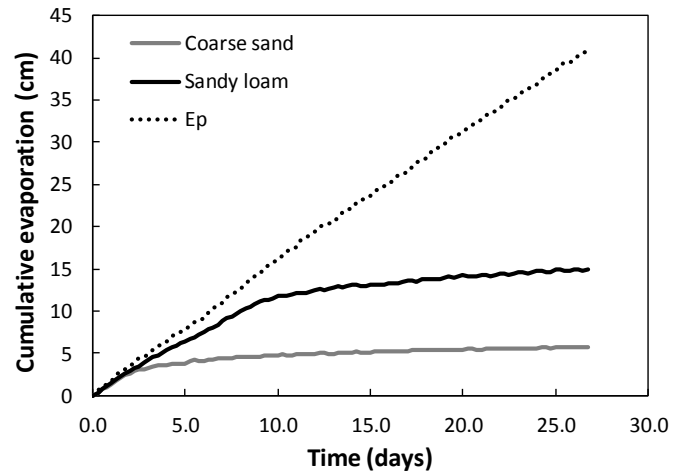
תרשים נ'4: מקדם האידיוי כפי שנמדד ממשטח מים פריאטי (PE), עמודת חול עם מפלס מים קבוע בעומק 10 ס"מ (C10), עמודת חול עם מפלס מים קבוע בעומק 25 ס"מ (C25), ועמודת חול מתייבשת. דרישת האידיוי משורטטת בציר המשני כקו ירוק מקווקו לשם בקרה.

3. השפעת סוג הקרקע ושיעור ההמלחה על תהליך ההתאדות

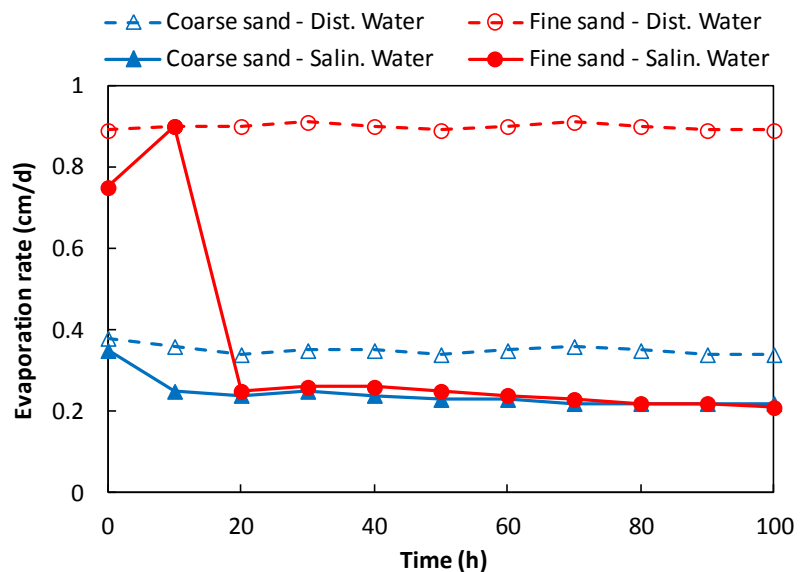
תכונות הקרקע, דרך האורך האופייני, משפיעות אם כך בצורה משמעותית על תהליך ההתאדות. לא ניתן היה לבצע בצורה מטריצית את כל הניסויים שהוצגו עד כה גם עבור החמרה. אולם, על מנת להמחיש את השפעת סוג הקרקע על התוצאות, נערך ניסוי התאדות בעמודות קרקע רוויות הארוזות בחול גס ובקרקע חמרה. הניסויים בוצעו בטמפרטורה ממוצעת של 25 מעלות. התוצאות של ערכי ההתאדות המצטברת עבור שני סוגי הקרקע יחד עם ההתאדות המצטברת בעמודה מלאה במי ברז המייצגת התאדות פוטנציאלית, מוצגות בתרשים נ'5. קרקע החמרה מכילה מקטע חרסיתי דק הגורם לגידול משמעותי באורך האופייני בהשוואה לחול הגס. כתוצאה מכך, ההתאדות המצטברת עד למעבר משלב 1 לשלב 2 (סוף הקטע הלינארי) הרבה יותר גבוהה מזו המאפיינת את החול הגס.

במערכות קרקע טבעיות, במרבית המקרים, מי הנקבובים הינם תמיסה מלוחה ולא מים מזוקקים. אחת המטרות של המחקר הייתה הבנה ראשונית, בסיסית, של השפעת עובדה זו על תהליך האידיוי מקרקעות. יש לציין כי נוכחות מלחים במי הנקבוב בחלקו העליון של התווך הלא רווי גדולה במיוחד באזורים מדבריים ומדבריים למחצה. מלחים אלו, בשילוב תנאים המתאימים לקצבי אידיוי גבוהים, עשויים לגרום לכך שתהליך האידיוי מקרקעות באזורים אלו יהיה שונה לחלוטין מהתהליך בו נמדוד אידיוי של מים מזוקקים. העמודות בגובה של 25 ס"מ וקוטר של 10 ס"מ נארוזו בחול נקי (99.9% סיליקה) בשני גדלים: חול גס בקוטר גרגר של 1 – 1.3 מ"מ (ערך פריצת אוויר של 1.5- ס"מ) וחול דק בקוטר גרגר של 0.1 – 0.3 מ"מ (ערך פריצת אוויר של 6.0- ס"מ). על ידי בקבוק מריוט נקבע המפלס בעומק של כ- 6 ס"מ מתחת לפני החול, בתחום ערך פריצת האוויר של החול הדק אבל גבוה מזה של החול הגס. התנאים בחדר הניסוי היו קבועים (שינויים קלים של עד אחוזים בודדים בלחות יחסית ו- 22 מעלות סלציוס ± מעלה). רמת האידיוי הפוטנציאלי בתנאים אלו היה 0.9 ס"מ/יום. כדי לבדוק את השפעת המלח ביחס למי נקבובים ללא מלח, בוצע ניסוי דומה

בעמודת ביקורת עם מים מזוקקים, עבור שני סוגי החול באותם תנאים. הניסויים בוצעו בשתי חזרות עם חזרתיות טובה מאוד ולכן יוצגו תוצאות רק של ניסוי אחד לדוגמא. התוצאות מובאות בתרשים נ-6.



תרשים נ-5: ההתאדות המצטברת עבור שני סוגי הקרקע יחד עם ההתאדות המצטברת בעמודה מלאה במי ברז המייצגת התאדות פוטנציאלית, E_p .



תרשים נ-6: שיעור ההתאדות עבור שני סוגי החול ושתי איכויות המים (מים מזוקקים ומים מליחים) בתנאים של פני מי תהום בעומק 6 ס"מ מתחת לפני הקרקע והתאדות פוטנציאלית, E_p , 0.9 ס"מ/יום.

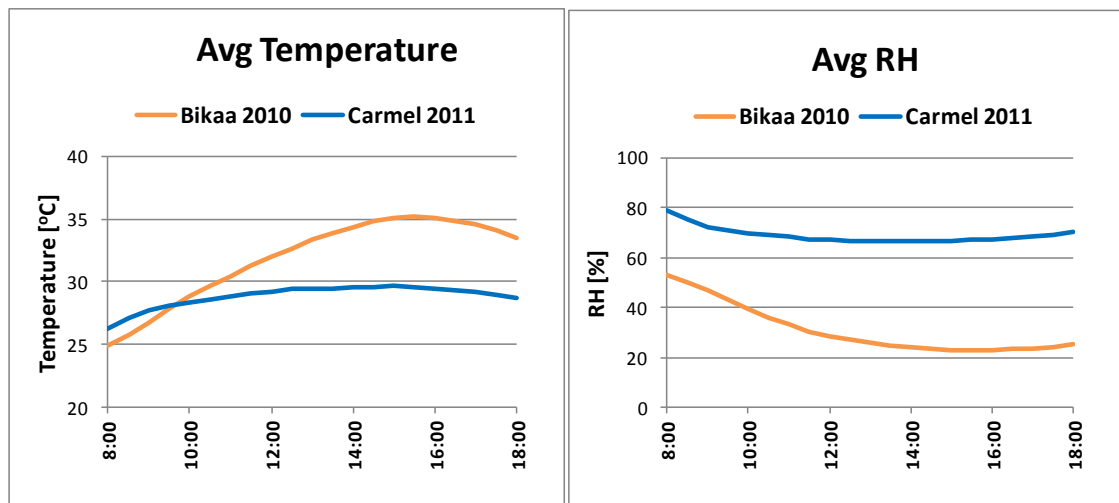
כצפוי, בעמודות בהן בוצע שימוש במים מזוקקים קצב האיידוי היה בקירוב טוב קבוע. הוא היה זהה לאידוי הפוטנציאלי בחול הדק כי האורך האופייני שלו גדול מ-6 ס"מ (עומק פני המים החופשיים) בעוד שהוא היה יותר קטן (פחות מחצי) מהאיידוי הפוטנציאלי בחול הגס כי האורך האופייני שלו יותר קטן מ-6 ס"מ ולכן החול הזה כבר במצב לא רווי בתחילת התהליך. לעומת זאת, תוצאות הניסוי עם תמיסות מלוחות היו מפתיעות. עבור החול הגס, בו העלייה הקפילרית היא של כ-1.5 ס"מ וקצבי האיידוי נמוך מהאיידוי הפוטנציאלי, קצבי האיידוי נשארו פחות או יותר קבועים לאורך הניסוי, אם כי נמוכים יותר מקצב האיידוי המקביל בעמודה עם המים המזוקקים. לעומת זאת, בחול הדק, בו העלייה הקפילרית הגבוהה יותר אפשרה את תנועת התמיסה עד סמוך לפני השטח ואידוי התמיסה משם, ניתן לראות ירידה מובהקת בקצה

האידיוי בזמן. ניתן לומר בברור כי נוכחות מלחים, והשקעתם בנקבובים ומעליהם כשכבת מלח בעלת מקדם דיפוזיה נמוך לאדי מים, צפויה להוות גורם חשוב בתהליך האידיוי מקרקעות.

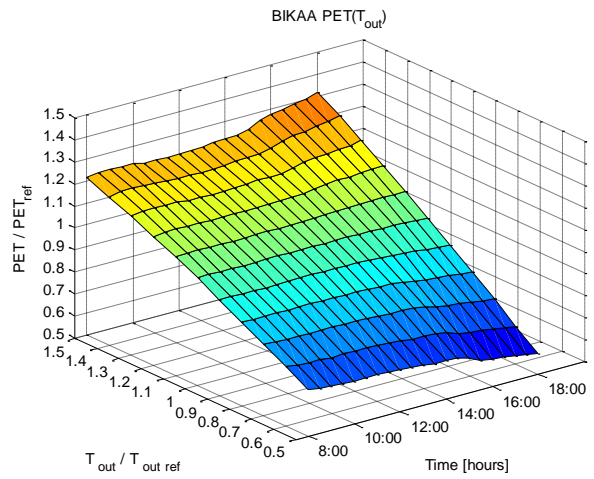
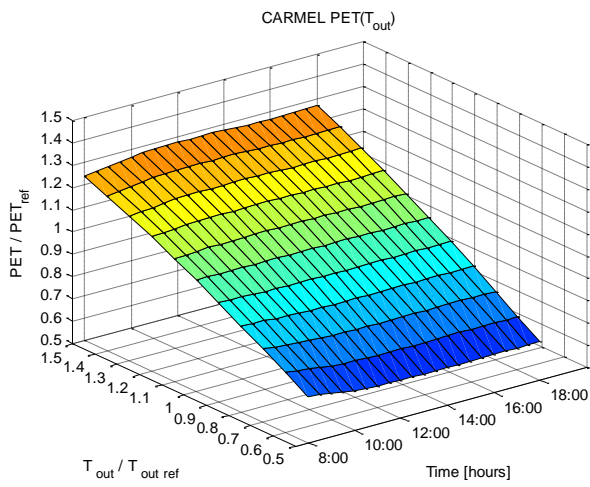
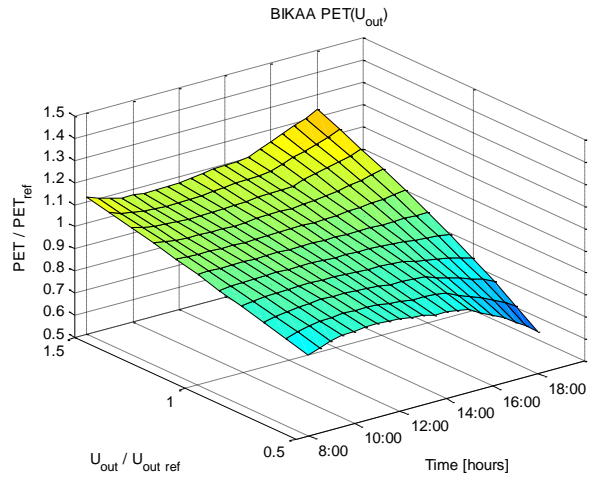
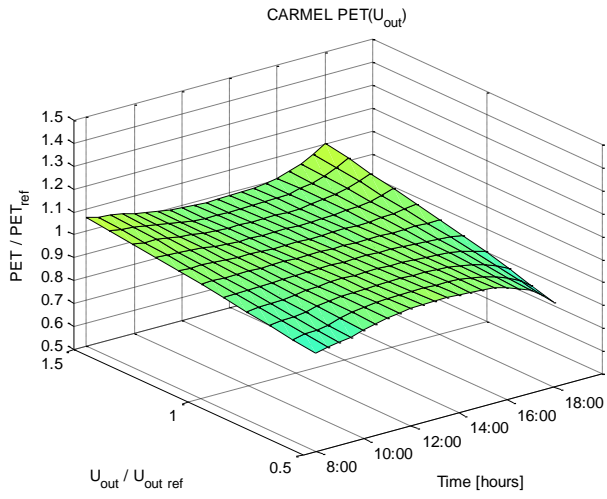
4. ניתוח רגישות של משוואת פנמן-מונטיט להשפעת שינויים בטמפרטורה ומהירות רוח על שיעור

ההתאדות במהלך היממה על בסיס נתוני שדה

השינוי הנפוץ ביותר הצפוי בשינוי האקלים הגלובאלי הינו עליה בטמפרטורה. אולם ניתן גם להעריך ששינויים בטמפרטורת אוויר יגרמו לשינויים בלחצים הברומטרים אשר ישפיעו על כיוון ומהירות הרוח. גם לטמפרטורה וגם למהירות הרוח השפעה על שיעור ההתאדות. נעשה שימוש במשוואת פנמן-מונטית' בכדי להעריך את מידת ההשפעה של שינויי באחד משני הגומים האלה על שיעור ההתאדות. נמדדו שיעורי ההתאדות בשדה ברמה השעתית ע"י שיטת קורלצית ההערבלים השני אתרים הנבדלים בסוג האקלים שלהם בכרמל (ים תיכוני ממוזג) ובבקעה (ים תיכוני יבש). במשוואת פנמן-מונטית' הותאמה לנתונים המדודים. נבחרה יממה מסוימת ונתוני האקלים האופייניים לשני האתרים מוצגים בתרשים נ-7. ערכים אלה המתאימים לכל שעה במהלך היממה נוידו מ-50% ל-150% מהערך המדוד. הערכים השונים הוצבו במשוואה והשינוי היחסי בשיעור ההתאדות (יחסית לערך המתאים לערכים המדודים) חושבו. ההשפעה היחסית על שיעור ההתאדות כתלות בשינוי בטמפרטורה או במהירות הרוח עבור כל שעה ביממה מוצגת בתרשים נ-8. ההשפעה של הטמפרטורה גבוהה יותר מזו של מהירות הרוח. הרגישות לשינוי בשני גורמים אלה עולה אחר הצהריים באקלים היבש של הבקעה, והיא מודגשת יותר עבור מהירות הרוח. ההשפעה של מהירות הרוח באזור הבקעה חזקה יותר מאשר בכרמל לאורך כל שעות היום אך מתגברת לקראת ערב.



תרשים נ-7: מהלך יומי של הטמפרטורה והלחות היחסית באייר בכרמל ובבקעה



תרשים נ-8: ניתוח רגישות של אמדן שיעור ההתאדות לשינויים בטמפרטורה ומהירות רוח במהלך היממה בכרמל ובבקעה

- Agam, N., and Berliner, P.R., 2004, Diurnal water content changes in the bare soil of a coastal desert: *Journal of Hydrometeorology*, v. 5, p. 922–933.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage*. Paper 56, FAO, Rome, Italy.
- Assouline, S., K. Narkis, S.W. Tyler, I. Lunati, M.B. Parlange, and J.S. Selker. 2010. On the diurnal soil water content dynamics during evaporation using dielectric methods. *Vadose Zone J.*, 9: 709-718, doi:10.2136/vzj2009.0109.
- Cong, Z.T., Yang, D.W., and Ni, G.H., 2009, Does evaporation paradox exist in China?: *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 13, no. 3, p. 357–366, doi: 10.5194/hess-13-357-2009.
- Dai, A., Trenberth, K.E., and Karl, T.R., 1999, Effects of Clouds, Soil Moisture, Precipitation, and Water Vapor on Diurnal Temperature Range: *Journal of Climate*, v. 12, no. 8, p. 2451–2473, doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<2451:EOCSMP>2.0.CO;2.
- Easterling, D.R., Horton, B., Jones, P.D., Peterson, T.C., Karl, T.R., Parker, D.E., Salinger, M.J., Razuvayev, V., Plummer, N., Jamason, P., and Folland, C.K., 1997, Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe: *Science*, v. 277, no. 5324, p. 364–367, doi: 10.1126/science.277.5324.364.
- Kamai, T., Weisbrod, N., and Dragila, M.I., 2009, Impact of ambient temperature on evaporation from surface-exposed fractures: *Water Resources Research*, v. 45, no. 2, p. 1–11, doi: 10.1029/2008WR007354.
- McVicar, T.R., Roderick, M.L., Donohue, R.J., Li, L.T., Van Niel, T.G., Thomas, A., Grieser, J., Jhajharia, D., Himri, Y., Mahowald, N.M., Mescherskaya, A. V., Kruger, A.C., Rehman, S., and Dinpashoh, Y., 2012, Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation: *Journal of Hydrology*, v. 416-417, p. 182–205, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.10.024.
- Nachshon, U., Shahraeeni, E., Or, D., Dragila, M., and Weisbrod, N., 2011a, Infrared thermography of evaporative fluxes and dynamics of salt deposition on heterogeneous porous surfaces: *Water Resources Research*, v. 47, no. 12, p. 1–16, doi: 10.1029/2011WR010776.
- Ohmura, A., and Wild, M., 2002, Is the hydrological cycle accelerating?: *Science (New York, N.Y.)*, v. 298, no. 5597, p. 1345–1346, doi: 10.1126/science.1078972.
- Peterson, T.C., Golubev, V.S., and Groisman, P.Y., 1995, Evaporation losing its strength: *Nature*, v. 377, no. 6551, p. 687–688.
- Shen, Y., Liu, C., Liu, M., Zeng, Y., and Tian, C., 2010, Change in pan evaporation over the past 50 years in the arid region of China: *Hydrological Processes*, v. 231, p. 225–231, doi: 10.1002/hyp.
- Travis, D.J., Carleton, A.M., and Lauritsen, R.G., 2002, Contrails reduce daily temperature range.: *Nature*, v. 418, no. 6898, p. 601, doi: 10.1038/418601a.
- Vose, R.S., Easterling, D.R., and Gleason, B.B., 2005, Max and MinTemperature Trends for the globe: An update through 2004: *Geophysical Research Letters*, v. 32, no. 23, p. 1–5, doi: 10.1029/2005GL024379.
- Yamanaka, T., Takeda, A., and Shimada, J., 1998, Evaporation beneath the soil surface: some observational evidence and numerical experiments: *Hydrological Processes*, v. 12, no. 13-14, p. 2193–2203, doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19981030)12:13/14<2193::AID-HYP729>3.0.CO;2-P.
- Yamanaka, T., and Yonetani, T., 1999, Dynamics of the evaporation zone in dry sandy soils: *Journal of Hydrology*, v. 217, no. 1-2, p. 135–148, doi: 10.1016/S0022-1694(99)00021-9.
- Zhou, L., Dai, A., Dai, Y., Vose, R.S., Zou, C.-Z., Tian, Y., and Chen, H., 2008, Spatial dependence of diurnal temperature range trends on precipitation from 1950 to 2004: *Climate Dynamics*, v. 32, no. 2-3, p. 429–440, doi: 10.1007/s00382-008-0387-5.
- Zhou, L., Dickinson, R.E., Dai, A., and Dirmeyer, P., 2009, Detection and attribution of anthropogenic forcing to diurnal temperature range changes from 1950 to 1999: comparing multi-model simulations with observations: *Climate Dynamics*, v. 35, no. 7-8, p. 1289–1307, doi: 10.1007/s00382-009-0644-2.

סיכום עם שאלות מנחות

נא לענות על כל השאלות, בקצרה ולעניין, ב 3 עד 4 שורות מכסימום לכל שאלה (לא תובא בחשבון חריגה מגבולות המסגרת המודפסת).

שיתוף הפעולה שלך יסייע לתהליך ההערכה של תוצאות המחקר.

הערה: נא לציין הפנייה לדו"ח אם נכללו בו נקודות נוספות לאלה שבסיכום.

1. מטרת המחקר לתקופת הדו"ח תוך התייחסות לתוכנית העבודה.
- השפעת משרעת השינוי בטמפרטורה על שיעורי ההתאדות מקרקעות; - מהלך שנתי של התאדות מהשדה והקשר עם טמפרטורת הסביבה;
- ניתוח רגישות השפעת מהירות הרוח, הטמפרטורה ומשרעת השינוי בטמפרטורה על ההתאדות; 2. עיקרי הניסויים והתוצאות שהושגו בתקופה אליה מתייחס הדו"ח.
- ניסויי התאדות בקרון מבוקר טמפרטורה ובמעבדה; מדידה בשדה בעזרת קורלצית הערבליים וסינטילומטר - עיבוד נתונים - בחינת מהלך שנתי וקשר עם טמפרטורת אוויר - ניתוח רגישות המסקנות המדעיות וההשלכות לגבי יישום המחקר והמשכו. האם הושגו מטרת המחקר בתקופת הדו"ח.
- המחקר התקדם בעיקרו לפי התכנית.
3. הבעיות שנתרו לפתרון ו/או השינויים שחלו במהלך העבודה (טכנולוגיים, שיווקיים ואחרים); התייחסות המשך המחקר לגביהן, האם יושגו מטרת המחקר בתקופה שנתורה לביצוע תוכנית המחקר.
- בחינת השפעת הטמפרטורה במעבדה הושלמה אולם מודל כללי המתאר את תהליך ההתאדות בתנאי שדה על כל המרכיבים המשפיעים עדיין לא הושלם.
5. האם הוחל כבר בהפצת הידע שנוצר בתקופת הדו"ח - יש לפרט: פרסומים – כמקובל בביבליוגרפיה, פטנטים - יש לציין מס' פטנט, הרצאות וימי עיון - יש לפרט מקום ותאריך.
- מאמר ראשון נמצא בהכנה מתקדמת פרסום הדו"ח: אני ממליץ לפרסם את הדו"ח: (סמן אחת מהאופציות)
ממליץ לא לפרסם עד לפרסום המאמרים.