



ביטויים פיזיולוגיים שונים במשק המים של אורן ירושלים במצב של עקת מים כתוצאה משנות בצורת

עבודת גמר – מדעי הסביבה

נענע טראוב (ת.ז. 207025362)

בית הספר: עירוני א תל אביב

שם המנחה: יקיר פרייזלר

מוסד אקדמי: מכון ויצמן

31.12.13

הסיבות שהובילו לבחירת הנושא

בחרתי לעסוק בנושא של מדעי הסביבה בהקשר של עצים ויערות ממספר סיבות. ראשית, נושא זה הוא בעל חשיבות גדולה לעתידו המידי ורחוק הטווח של כדור הארץ ויושביו. במאה האחרונה האנושות עברה שינויים רבים שהשפיעו וממשיכים להשפיע רבות גם על כדור הארץ, דוגמאות לכך ניתן לייחס לכך שבחמישים השנים האחרונות נכרתו יותר ממחצית יערות העולם (Dudley, 1995), המדבור משפיע באופן ישיר על 250 מיליון אנשים ברחבי העולם וצופים שעד שנת 2020, 135 מיליון אנשים יצטרכו לעזוב את מקום מחייתם בעקבות נזקי המדבור (Malagnoux, 2007).

מלבד האקטואליות של נושא זה שסיקרן אותי, מצא חן בעיני שניתן לגשת לנושא זה ממגוון רחב של היבטים, כגון היבט גאולוגי, היבט זואולוגי, היבט חברתי-כלכלי ועוד רבים. כאמור מבחינה תאורטית נושא זה הוא בעל עניין רב אך גם הצד המעשי, ניסויי, של מחקר זה עורר בי עניין רב, שכן המחקר נעשה ע"י לקיחת דגימות מעצים בשטח, דבר שאפשר לי לראות ולחוות את העצים מנקודת מבט רחבה ואותנטית.

תוכן עניינים

הסיבות לבחירת הנושא – עמוד 2

1. מבוא – עמודים 5-14

1.1. שינויי אקלים בעשרות השנים האחרונות – עמודים 5-6

1.1.2. השפעת שינויי אקלים על מערכות אקולוגיות בעולם ובאזורים צחיחים למחצה –

עמוד 6

1.1.3. חשיבות חברתית של צמחיה ויערות באזורים חצי יבשים – עמוד 6

1.1.4. השפעת יערות על תהליך המדבור – עמודים 6-7

1.1.5. יער יתיר – עמוד 7

1.1.6. אורן ירושלים – עמודים 7-8

1.1.7. המחסור במים והבצורות ביער יתיר והשפעותיהם על עצי אורן ירושלים – עמודים 8-

10

1.1.8. רקע תאורטי בנושא הפיזיולוגיה והדינמיקה של תנועת המים במערך העץ – עמוד 10

1.8.1. הגעת מי משקעים לבית השורשים – עמוד 11

1.8.2. מעבר מים מבית השורשים לעלים - עמודים 12-13

1.8.3. מעבר מים מהעלווה לאטמוספירה – עמוד 13

2. סקירת ספרות – עמודים 14-16

3. מטרת שאלות והשערות המחקר – עמוד 16

3.1. מטרת המחקר - עמוד 16

3.2. שאלות המחקר - עמוד 16

3.3. השערות המחקר - עמוד 16

4. גוף העבודה – עמודים 17-32

4.1. פרק 1-ניסוי 1 – עמודים 17-25

4.1.1. שיטות המחקר - עמוד 17

4.1.2. מערך הניסוי – עמוד 17

4.1.3. חומרים – עמודים 18-19

4.1.4. כלים – עמודים 19-20

4.1.5. גודל מדגם וחזרות – עמוד 20

4.1.6. מהלך הניסוי – עמודים 21-22

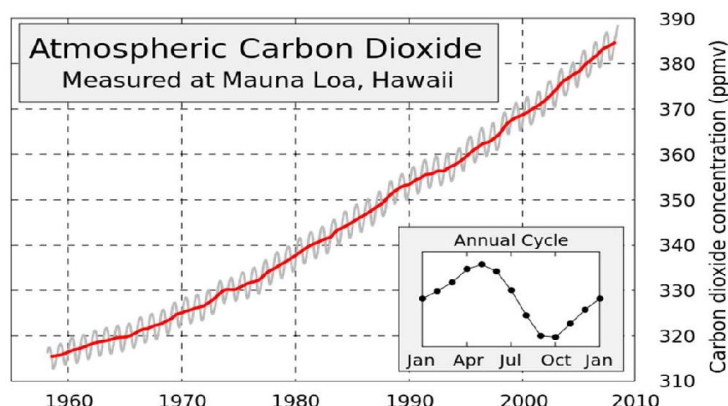
4.1.7. ניתוחים סטטיסטיים – עמוד 23

- 4.1.8. תוצאות ביניים-ניסוי 1 – עמודים 24-25
- 4.1.9. סיכום מסקנות ביניים-ניסוי 1 – עמוד 25
- 4.2. פרק 2-ניסוי 2 – עמודים 26-31
 - 4.2.1. מערך ניסוי 2 – 26-27
 - 4.2.2. חומרים – עמוד 27
 - 4.2.3. כלים – עמודים 27-28
 - 4.2.4. גודל מדגם וחזרות – עמוד 29
 - 4.2.5. מהלך ניסוי 2 – עמודים 29-30
 - 4.2.6. ניתוחים סטטיסטיים – עמוד 30
 - 4.2.7. תוצאות ניסוי 2-גרפים- עמודים 31-32
 - 4.2.8. סיכום תוצאות ניסוי 2 – עמודים 32-33
- 5. דיון ומסקנות – עמודים 34-39
 - 5.1. סיכום המחקר ותוצאותיו המידיות – עמודים 34-35
 - 5.2. הסבר התוצאות ביחס להשערת המחקר – עמוד 35
 - 5.3. יתרונות וחסרונות של מדידת תכולת מים יחסית במחטים – עמודים 35-36
 - 5.4. דיון הסברים ומסקנות – עמודים 36-38
 - 5.5. הצעות לשימור קיומו של יער באזור שעובר תהליך מדבור – 38-39
 - 6. סיכום – עמוד 40
 - 7. תודות – עמוד 41
 - 8. רשימת מקורות – עמודים 42-43
 - 9. נספחים – עמודים 44-45
 - 9.1. תוצאות גולמיות של הניסויים
 - 9.1.1. ניסוי 1 – עמוד 44
 - 9.1.2. ניסוי 2 – עמודים 44-45

1.1 שינויי אקלים בעשרות השנים האחרונות

בעשרות השנים האחרונות נצפו שינויים אקלימיים עולמיים, הבאים לידי ביטוי בעליית טמפרטורה ושינוי בכמויות המשקעים. באזורים צחיחים למחצה (Semi-arid)¹, שחלקה הדרומי של ארץ ישראל נמנית עליהם, שינויים אלה באים לידי ביטוי בעיקר בירידה בכמות המשקעים הממוצעת לשנה ועלייה בתכיפות שנות בצורת.

שינויי אקלים עולמיים, מיוחסים בין היתר לעלייה ברמת גז פחמן דו חמצני אטמוספרי, שהתגברה מאז המהפכה התעשייתית (Taylor et al, 1994) ובחלוף השנים (איור 1). עלייה זאת נגרמת כתוצאה משרפה מוגברת של דלקים פוסילים (Fossil fuel) לצורך הנעת כלי תחבורה, יצור חשמל, גידול בהיקף חוות צאן וכן בירוא יערות.



איור 1 –גרף גדול- העלייה בריכוז הפחמן הדו חמצני באטמוספירה בין השנים 1960-2010. גרף קטן- רמת ריכוז הפחמן דו חמצני באטמוספירה ביחס לחודשי השנה.

גז פחמן דו חמצני שקוף לקרינה מהשמש, בתחום הנראה. קרינה זאת נבלעת בכדור הארץ, גורמת להתחממותו ולקרינה חזרה של אנרגיה באורך גל אחר, אינפרא אדום טרמלי (שלא נמצא בתחום הנראה). פחמן דו חמצני בולע את הקרינה החוזרת בתחום אינפרא אדום טרמלי וגורם להתחממות האטמוספירה לטמפרטורה אופיינית של כדור הארץ (אפקט החממה). אי לכך, כל עלייה נוספת בריכוז פחמן דו חמצני מביאה לעלייה בטמפרטורת כדור הארץ כחלק מאפקט החממה. השפעת

¹ . אקלים צחיח מתאפיין בטמפרטורה של מעל 18° מעלות צלזיוס בשנה וממוצע משקעים שאינו גבוה מ-200 מ"מ לשנה. אקלים צחיח למחצה הוא כזה שכמות המשקעים בו היא בין 200-400 מ"מ לשנה.

העלייה בטמפרטורת כדור הארץ מתבטאת בין היתר בשינוי בכמות ומשטר המשקעים (סערות, בצורות) בקנה מידה עולמי.

1.2 השפעת שינויי אקלים על מערכות אקולוגיות בעולם ובאזורים צחיחים למחצה

באופן כללי, ירידה בכמות המשקעים משבשת את האיזון האקולוגי במערכות טבעיות מאחר ושרשרת המזון ופעילות המערכת מבוססת על הצמחייה (יצרנים ראשוניים) וזאת מצידה היא תלויה מים. כאשר מדובר באקולוגיה של אזורים צחיחים למחצה שבהם כמות המשקעים הינה מועטה וגבולית (רז-יסיף, 2008), כל ירידה בכמות המשקעים תקטין בצורה משמעותית את כמות הצמחייה של האזור (Malagnoux et al, 2007).

בקרנע שבה הצמחייה מועטה יש מחסור בחומרים אורגנים החשובים לחיוניות הקרקע וכך המשך התחדשות הצמחייה נמנעת. כמו כן, הצמחייה באזורים אלה מחזיקה באופן מכני את הקרקע במקום וכתוצאה מכך מונעת את היסחפות ואיבוד הקרקע (בורות). תהליך זה שבו אזור צחיח למחצה שנמצא בספר המדבר (קו הצחיחות) הופך לצחיח (מדברי), נקרא תהליך המדבור.

1.3 חשיבות חברתית של צמחיה ויערות באזורים חצי יבשים

אזורים צחיחים מכסים כ-13% משטח פני כדור הארץ. באזורים אלה חיים כמיליארד בני אדם, שמרביתם מבין העניים בעולם. מרעה וחקלאות הינם מקורות הפרנסה העיקריים של יושבי אזורים אלה ולכן הישרדותם תלויה בהם. אולם התופעה של רעיית יתר ועיבוד לא נכון של הקרקע לחקלאות (דוגמא לפעולות המובילות לשמירה על קרקע חקלאית הן לדוגמא: קיום שנות שמיטה, עיבוד מופחת, שתילת עצים בצד החלקות ועוד) הינו נפוץ באזורים אלה ומביא לדלדול בערכה של הקרקע וכך מסכן את מקור מחייתם של יושבי אזורים אלה. מתוך כך, מלבד שינויים אקולוגיים כתוצאה מירידה בכמות המשקעים כגורם לתהליך המדבור, גם פעולות ישירות של בני האדם באזורים אלה מעודדים את תהליך המדבור.

1.4 השפעת יערות על תהליך המדבור

אחת הדרכים להתמודדות עם התגברות תהליך המדבור היא שתילת מלאכותית של יערות, עצים וצמחיה עשבונית. אולם, סוג הצמחים שנשתלים, צפיפותם, מיקומם ועוד פרמטרים אחרים הם בעלי חשיבות גדולה בעת תכנון השתילה. שכן, אי התאמת פרמטרים אלה לסביבה עלולה להכשיל את התהליך ויתרה מזאת, להזיק. במקרה כזה, הצמחים שנשתלו יביאו לחיסול הביוספרה המקומית,

הטבעית, ובמקרה של אי קליטת הנשתלים, לגרום לצחיחות מלאה וכך להגביר את תהליך המדבור (Malagnoux et al, 2007).

1.5 יער יתיר

יער יתיר שאותו אנו חוקרים (איור 2), הוא יער נטוע המוגדר כשוכן באקלים צחיח למחצה. היער ממוקם בנקודת הגבול שבין אקלים מדברי, שכן הוא שוכן מצפון לנגב, ואקלים ים-תיכוני, שכן הוא שוכן מדרום לאזור מישור החוף (Schiller, 2011). הימצאותו של היער, בנקודת התפר בין שני אזורים אקלימיים שונים אלה כמו גם נתוני המשקעים (276 מ"מ בממוצע) והטמפרטורה השנתית (18.2 מעלות צלזיוס בממוצע לשנה) מגדירים את אזור היער כצחיח למחצה (האתר של קבוצת המחקר של מכון ויצמן).

עצי היער הראשונים ניטעו על ידי קק"ל (קרן קיימת לישראל) בשנת 1964. היער המשתרע על כ-30,000 דונמים. רוב העצים ביער הם מסוג אורן ירושלים (Schiller, 2011).



איור 2 תמונת-על של חלק מיער יתיר וברקע מדבר

1.6 אורן ירושלים

אורן ירושלים או בשמו המדעי *Pinus Halepensis Mill* הינו עץ מחטני ממשפחת *Pinaceae*. עץ זה נפוץ, באופן טבעי (איור 2) באגן הים התיכון (Critchfield and Little, 1966). העץ שכיח בגבהים הקרובים לגובה פני הים אך יכול להימצא עד 1700 מטר (לדוגמא בשרשרת הרי האטלס שבצפון אפריקה). תפוצתו הטבעית הרחבה (איור 3) מעידה על היותו עמיד לתנאי יובש ולכן נמצא שכיח ביערות נטועים (כדוגמאת יער יתיר).

גודלו של עץ זה נחשב כקטן עד בינוני כשגובהו בדרך כלל לא עובר 25 מטר וקוטר גזע עד כ 60 ס"מ. גזע העץ בצבע חום – אדמדם ומאופיין בחריצים לכל אורכן ההולכים ומתעבים בחלקו התחתון של הגזע. עלי האורן מחטניים באורך של 6 – 12 ס"מ ובקוטר של כ 1 – 3 מילימטר ומופיעים בדרך כלל בזוגות. איברי הרבייה באורן הם מסוג אצטרובל (Cone) שצורתם דמוית חרוט ומורכבים מעלים קשקשניים המסודרים בצורה לוליינית לאורך ציר האצטרובל.

כל עץ מגדל אצטרובלים זכריים ונקביים גם יחד.

האצטרובל הזכרי, המכיל את גרגרי האבקה, אינו נראה באופן בולט על פני העץ, בעל מבנה רך יחסית ומת בסיום עונת הרבייה.

האצטרובל הנקבי, שקשקשיו עבים וקשיחים יותר, מכיל את ביציות האורן שלאחר הפרייתן על ידי האבקה יהפכו לזרעים. בסוף חייו של האצטרובל הנקבי הוא פותח את קשקשיו וכך נושרים הזרעים המפותחים לכיוון הקרקע בא יוכלו לנבט.



איור 3 מפת תפוצת אורן ירושלים באגן הים התיכון

1.7 המחסור במים והבצורות ביער יתיר והשפעותיהם על עצי אורן ירושלים

על אף עמידותו והתאמתו של אורן ירושלים לתנאי יובש ובצורת, בשנת 2010 נרשמה תמותה של כ- 50,000 (5% מכלל עצי היער) עצים כתוצאה מירידה בכמות המשקעים (דורמן, 2012) השנתית וממספר מוגבר של שנות בצורת. בעקבות מצב זה, בשנת 2011 קק"ל ביקשו ממכון ויצמן לערוך מחקר שיבחן לעומק את סיבות תמותת העצים ביער וכן חיפוש אפשרויות לדרכי טיפול חדשות ביער. קבוצת המחקר של מכון ויצמן התחילה עם מיפוי מצב העצים ביער ע"י צילומי אוויר בשילוב עם תוכנת מערכות מידע גאוגרפיות (GIS). בעזרת כלים אלה, הקבוצה הצליחה להבדיל ע"י צבעים, בעזרת מודל ממוחשב, בין עצים חיים ומתים.

מתוך התבוננות בתצלומי האוויר נמצא שישנם חלקים שבהם ניכר שרוב העצים חיים וחלקים שבהם רוב העצים מתים (איור 4). לפי החלקים המתים והחיים של היער הוא חולק לחלקות (דוח פרויקט הבצורת של המחלקה למדעי הסביבה, מכון ויצמן לקק"ל, 2012).



איור 4 האזור הנמצא בתוך המלבן האדום מרובה עצים מתים. בסמוך לו, בתוך המלבן הירוק, נמצא אזור ללא עצים מתים כלל.

כדי להבין את סיבת ההבדל נעשו בדיקות סביבתיות שונות (קרקע, מסלע שיפועים וכדומה), שכן שוער כי הפרמטרים כגון: סוג העצים, גיל העצים, האקלים וכמות המשקעים, זהים. מבדיקות אלה נמצא שמקור ההבדל נעוץ במיקרו סביבה של העץ. כדוגמה לכך נמצא כי הקרקע באזורים מסוימים בחלקה עשירים בסלע קירטון. אשר ביכולתו של סלע זה לספוח מים ובכך למנוע מן המים לחדור במהירות את שכבות הקרקע הראשונות ולברוח למי התהום (רבינוביץ, 1985), מים אלו מהווים מקור מים זמינים לעצים אלו במהלך חודשי הקיץ (בחודשי הקיץ החמים העץ סובל מעקת המים החמורה ביותר) מאחר והעומק הממוצע של עיקר מערכת השורשים הוא בין 20-60 ס"מ, לכן נראה, כי סלע זה מקיים מאגר מים בעומק נגיש לשורשי העץ.

לאחר מיפוי היער, והבנת חלק מהגורמים המשפיעים על מצבם של העצים ברמת החלקות (הימצאותו של סלע קירטון לדוגמה), הוחלט להתמקד בחלקות החיות. גם בחלקות החיות נמצאו הבדלים משמעותיים בין מצב חיוניות העצים (איור 5). הבדלים אלה באים לידי ביטוי, בגובה העצים, קוטרם, כמות העלווה, עובי הטבעות השנתיות, אורך המחטים, פוטנציאל מים ועוד. הסיבה לשוני זה בין העצים (בחלקות החיות) עדין אינה ידועה במלואה והבנתה מהווה את מטרת העל של מחקר רחב היקף. מחקר זה, שלי, הינו למעשה שלוחה קטנה של המחקר הגדול שזאת מטרתו.



איור 5 עצי אורן ירושלים מתים לצד חיים ביער יתיר

מתוך הנחה שהשונות הגנטית בין העצים אינה משמעותית וכן העובדה שהעצים מקבלים את אותם תנאי בסיס (גיל וסוג העצים, אקלים, כמות משקעים וכדומה), יש לשער שההבדלים המתקבלים נובעים מהמיקרו סביבה של העצים הבודדים (דוח פרויקט הבצורת של המחלקה למדעי הסביבה, מכון ויצמן לקק"ל, 2012).

מאחר והמחקר ביער יתיר, הינו מחקר מבוסס תצפיות, לא ניתן לשנות את המיקרו סביבה כדי להבין את הקשר בין מצב העץ למיקרו סביבה בה הוא נמצא. מתוך כך החלטתי לבחון מספר פרמטרים במשק המים של עצים השרויים ברמות עקה שונות כדי שבעזרת ההשוואה ביניהם אוכל להבין יותר על קשר זה.

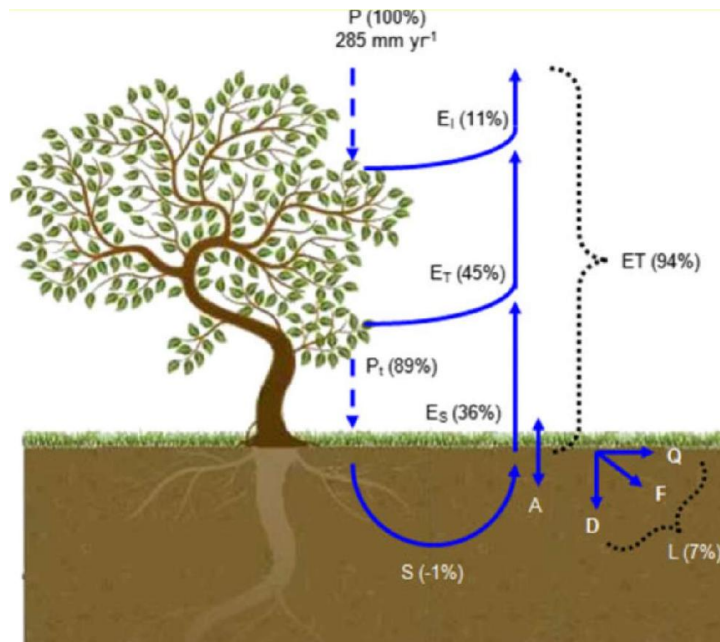
1.8 רקע תאורטי בנושא הפיזיולוגיה והדינמיקה של תנועת המים במערך העץ

על מנת להבין וללמוד על תלות העצים במשטר המים של סביבתו, אציג את הפיזיולוגיה והדינמיקה של תנועת המים במערך העץ משורשיו ומגעם עם הקרקע לצורך קליטת מים ועד לעליו המאדים מים חזרה לאטמוספירה.

1.8.1 הגעת מי משקעים לבית השורשים

כמות המשקעים המקומית מתפלגת לחמישה מרכיבים עיקרים כאשר רק אחד מהם תורם למשטר המים הספציפי של העץ:

המרכיב הראשון הוא המים הנתפסים על פני העלים ומתאיידים ללא הגעה לקרקע (איור E1-6). שאר מי המשקעים מגיעים לפני הקרקע ומתחלקים לארבעה מרכיבים נוספים: מרכיב שלאחר הגעתו לקרקע מתאדה ישירות חזרה לאטמוספירה (איור ES-6). מרכיב שניגר על פני הקרקע ומסולק מהאזור בהתאם לשיפוע המקומי (נגר עילי) (איור Q-6). מרכיב שמחלחל את שכבות הקרקע עד הגעה למפלס מי התהום (איור D-6) ונאגר בו והמרכיב האחרון המחלחל עד לבית השורשים של העץ ונקלט בו (איור Pt-6) (רז-יסיף, 2009).



איור 6 הצגת אופן התפלגות מי המשקעים וההתאיידות החלקית חזרה לאטמוספירה ביער יתיר (רז-יסיף, 2009).

מידת חלחול המים בקרקע, הן לבית השורשים והן למפלס מי התהום, מושפעת מסוג הקרקע, המסלע ומידת הנקבוביות בהם. מהירות חלחול המים יכולה לנוע בין מספר דצימטרים עד מספר מטרים לשנה (Walter Larcher 2003-physiological plant ecology-chapter 4).

1.8.2 מעבר מים מבית השורשים לעלים

החיים נוצרים במים והם כלי חשוב לתהליכים ביוכימיים, לכן מים הם מרכיב הכרחי לקיומם של צמחים. בקרב עצים, המקור העיקרי למים הוא באדמה. הקליטה הראשונית של המים מתבצעת בעזרת שורשי העץ. המשמעות של עובדה זאת היא שעל העץ להעביר מים מהמקום הנמוך ביותר שלו – בית השורשים עד למקום הגבוה ביותר שלו – צמרות העצים. פעולה זו אינה פשוטה שכן היא מנוגדת לכוח המשיכה של כדור הארץ לכן, עם התקדמות האבולוציה העץ פיתח מנגנונים שיאפשרו לו להתנגד לכוח המשיכה כדי לספק מים לכל אבריו.

המנגנון שבעזרתו צמחים יבשתיים מעלים מים מהקרקע לכל אברי הצמח מתבסס על העובדה שקיים איבוד קבוע (למעט שעות הלילה) של מים לאטמוספירה כתוצאה מהפרשים בין הלחות היחסית באטמוספירה ובפני העלה (דרישה אטמוספירית למים). לכן, על מנת להחזיר את המים שנאבדו, הצמח מבצע קליטה של מים מהקרקע. תהליך זה של מעבר המים מהקרקע לאטמוספירה דרך הצמח נקרא "דיות" (*Transpiration*). תהליך מעבר המים (*Sap-flow*) מתבצע באופן ספונטני במורד פוטנציאלי המים השונים המתקיימים במערכת: פוטנציאל המים (ψ) הגבוה ביותר נמצא בקרקע ובבית השורשים והפוטנציאל הנמוך, באזור המגע בין פני העלים ובאטמוספירה. הדיות שומרת למעשה על עמודת מים רציפה ודינמית לאורך הצמח (Larcher, 2003). באופן כללי פוטנציאל מים, הוא כמות האנרגיה הנדרשת להעביר יחידת מסת מים ממצב מקושר כלשהו למצב של מים מזוקקים וחופשיים. מים ינועו מאזור בעל פוטנציאל מים גבוה לאזור בו פוטנציאל המים (ψ) נמוך (ידיעת ההפרש בין שני מדיומים בעלי פוטנציאל שונה תאפשר לדעת את כיוון זרימת הנחלים ביניהם).

פוטנציאל מים (ψ) בכל נקודה בצמח הוא סכום של פוטנציאלים ספציפיים (משוואה 1) הנובעים מגורמים פיזיקאליים שונים המתקיימים באזור האמור כגון:

- פוטנציאל אוסמוטי (ψ_s) - האנרגיה הגורמת לתנועה של מים ממקום בו ריכוז המומסים נמוך למקום בו ריכוז המומסים גבוה. במערך הצמחי אזור המגע בין הקרקע ובית השורשים הינו בעל הלחץ האוסמוטי הגבוה, עקב כמות מומסים נמוכה.

- פוטנציאל טורגור (ψ_p) - אנרגיה הנוצרת כתוצאה מלחץ ממברנות הפלזמה כנגד דפנות התא הצמחי (Turgor) עקב חדירת נוזל לתוך חלל הממברנה.

- פוטנציאל גריבטציה (ψ_g) - האנרגיה הדרושה להעלאת מסת נוזל בצמח לגובה כנגד כוח משיכת כדור הארץ.

- פוטנציאל לחות (Ψ_v) - האנרגיה הדרושה לשחרר מולקולות מים ממדיום נחלי לסביבה גזית (האטמוספירה) בעלת אחוז לחות מסוים.

משוואה 1:

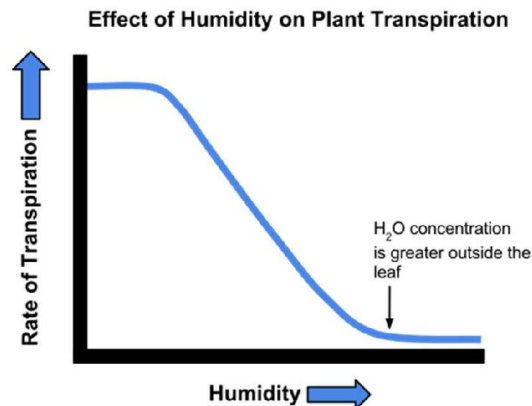
$$\Psi = \Psi_{\pi} + \Psi_p + \Psi_s + \Psi_v$$

1.8.3 מעבר מים מהעלווה לאטמוספירה

מים מהווים את אחד משני המרכיבים הבסיסיים (בצירוף עם פחמן דו חמצני) בתהליך הפוטוסינתזה שמתרחש בעלווה של הצמחים.

הפוטוסינתזה הוא תהליך המתרחש בצמח שבמהלכו מופקות מולקולות סוכר עתירות אנרגיה (גלוקוז) ממולקולות מים ופחמן דו חמצני אטמוספרי תוך ניצול אנרגיית אור.

האיבר שבעזרתו מתאפשרת כניסת פחמן דו חמצני אטמוספרי לצמח נקרא פיוניות. הפיוניות, הן מעין פתחים קטנים שבנויים משני "תאי שמירה" - (*guard cells*) שקובעים את גודל הפתיחה של הפיוניות. אומנם הפיוניות מאפשרות כניסת פחמן דו חמצני לצמח אך בו בעת משתחררים מפתחים אלו, מים מהצמח לאטמוספירה. המים מהעלה משתחררים כאדים ואת בעקבות הפרשי הלחצים, בין רמת הלחות הגבוהה בתוך העלה לעומת רמת הלחות הנמוכה (יחסית) באוויר. כך, שעל מנת לקלוט פחמן דו חמצני, הדרוש לייצור אנרגיה, הצמח מאבד כמות גדולה של מים, בעל כרחו. אחוז הלחות באוויר כמו גם טמפרטורת האוויר, גודל העלה ומהירות הרוח משפיעים על איבוד המים מהעלה לאטמוספירה (איור 7).



איור 7 השפעת הלחות על קצב הדיות בצמח.

2. סקירת ספרות

עוד בתחילת המאה ה-20 נראה שהנושא של משק המים של צמחים ואופן הבקרה על זרימת המים בהם נחקר. דוגמא לכך ניתן לראות במחקרו של נייט שנערך ב-1917 ובו נבדק הקשר בין פתיחת פיוניות לתכולת מים בעלים וקצב הטרנספירציה (דיות). תוצאותיו הראו שיש קורלציה הפוכה בין הדיות ופתיחת הפיוניות, שכן ירידה בדיות בדרך כלל מלווה בפתיחה הפיוניות. כמו כן הוא גילה שתכולת המים בעלים משפיעה על הדיות, תכולה גבוהה של מים בעלים מביאה לקצב מוגבר של דיות ואילו דיות בקצב נמוך מתקבלת בעקבות תכולה נמוכה של מים בעלים. מלבד זאת נייט הראה שמחסור קל במים לא יביא להקטנה בגודל פתיחת הפיוניות ומכאן שהדעה הרווחת דאז שאמרה כי הפיוניות הן הפרמטר העיקרי והחשוב ביותר לשמירה על תכולת המים בעלים אינה נכונה. אולם מצד שני הפיוניות רגישות לשינויי אור לכן עליה בעוצמת האור יכולה להביא למצב שבו הפיונות שומרות על פתיחתן גם כאשר ישנו איבוד מים בעלים, כתלות במצב המים בקרקע.

הרלוונטיות של הבנת משק המים של הצמח, קיבלה ממד נוסף מאז המחצית השנייה של המאה ה-20 כאשר נצפו שינויים באקלים העולמי. שנויים אלה משפיעים עד היום על משק המים של צמחים עצים ויערות, ולכן הבנת המנגנונים ההידרולוגיים שלהם חשובה למניעת שינויים אקולוגיים מרחקי לכת.

גישה זאת מובאת במחקרם של אלן מקדוול ואחרים (2010). לפי מחקרם, פליטת גזי חממה שינתה בצורה משמעותית את האקלים העולמי ותמשיך לשנות גם בעתיד. גדילה בתדירות, משך זמן ו/או חומרת הבצורות ועקת חום המקושרים לשינוי אקלים יכולים לשנות, באופן משמעותי, את הקומפוזיציה, המבנה והביו-גאוגרפיה של יערות באזורים שונים בעולם. קבוצת הסיכון הגבוהה ביותר הם אזורים שסובלים מבעיות סביבתיות נוספות כגון התפשטות רחבה של חרקים מזיקים או שרפות. לפי מחקר זה, קיימות תחזיות למוות של עצים אך אלה מבוססים על מודלים שחסרים בהם הפונקציונאליות והראליסטיות של מנגנוני המוות של עצים, מאחר ולא נמצאה, עדיין, עדות לניסיון אשר בא אבחן מוות של עצים כתוצאה משינויי אקלים במבט גלובלי. מחקר מביאה סקירה של החסרים במידע וחוסר הוודאיות המדעיות שמעקבות את היכולת לחזות מוות של עצים כתוצאה משינוי אקלים.

במחקר מוצגת הערכה חלוצית לגבי מוות של עצים כתוצאה מעקת מים ובצורות במבט גלובלי. אך חשוב מכך כותבי המחקר קבעו כי ישנה חשיבותה גבוהה לקיום מערכת תצפיות ומחקר המתואמת בצורה עולמית בנושא זה.

בהמשך לגישה זאת מספר מחקרים מהשנים האחרונות בדקו את הקשר בין פרמטרים שונים במשק המים של העץ לבין מצב של חוסר במים, עקת מים (העלייה בשכיחות עקת במים בקרב עצים שונים מושפעת פעמים רבות משינוי האקלים העולמיים).

כדוגמא לכך ניתן לציין את מחקרם של אלקרון דומינגו ואחרים (2000) אשר בדקו את הקשר בין איבוד המים, באמצעות דיות, למוהל העצה של עצי מישמש צעירים. במחקרם הם הראו קשר זה במצבים סביבתיים שונים ותחת רמות שונות של מחסור מים בקרקע (עקת מים). הניסוי התקיים בחממה למשך זמן של שבועיים והשתמש בעצי מישמש בני 3 שנים שגודלו בעציצים. בניסוי נעשו מדידות יומיות של פוטנציאל מים בעלים, פתיחת פיוניות בעלים, פוטנציאל טורגור חמינות מים בקרקע. נתונים מארבעה ימים שבהם התקיימו מצבים סביבתיים שונים נבחרו לביצוע אנליזה. בכל אחד מהימים שנבחרו פוטנציאל המים בעלים והקצב הממוצע של הדיות נמצאו בקורלציה. השיפוע שהתקבל בקורלציה זאת בא להראות שקיימת התנגדות תמידית לזרימת מים בעץ במצב רגיל וגדילה בהתנגדות זאת כאשר העץ נמצא במצב של עקת מים. כאשר העצים לא סבלו מעקת מים מחזור מוהל העצה-דיות היה דומה. אך כאשר העצים חוו עקת מים נתוני מוהל העצה היו נמוכים מעט מהדיות. מנתוני בדיקות המים בעצה נמצא שכמות המים הקיימת בגזע וברקמות העלים הינה כזאת היכולה להספיק לקצב שיא של הדיות לשעה אחת בלבד.

דוגמא נוספת למחקר אשר חקר את הקשר בין פרמטרים שונים במשק המים של העץ למצב עקת המים בו הוא שרויי הוא מחקרם של אירוין פרקס ואחרים (1997) אשר בדקו את ההשפעה של בצורת על הפיזיולוגיה של אורן סקוטי (scot pine) בוגר במרכז סקוטלנד. במחקר זה נבדק המחזור העונתי של הדיות, פתיחת פיוניות בכתרי העצים, פוטנציאל מים במחטים, תכולת מים בעצה, התנגדות הידראולית בין הקרקע למחטים וכן קצב גדילה. במחקר נעשתה השוואה בין עצים שקיבלו טיפול של בצורת לבין עצים שקיבלו כמות מים הזזה לממוצע הגשם באזור.

מתוצאות המחקר נמצא שסגירת פיוניות מתרחשת כאשר הקרקע מסביב לבית השורשים נמצאת על סף יובש, גם על אף שרוב המים נשאבים מעומק גדול יותר. בצורה זאת סגירת הפיוניות מנעה מפוטנציאל המים בעלים לרדת מתחת ל: -1.5 MPa , דבר שמנע יצירת תסחיף ברקמת העצה שבגזע העץ המוביל לקריסה כתוצאה מאמבולזים. מכך הוסק שהגדילה בהתנגדות ההידראולית בין הקרקע לבין המחטים הינה תוצאה של יובש בקרקע.

בעונה הגדילה שלאחר תקופת הבצורת התנגדות במערכת ההידראולית של העץ לא גדלה ומקרה של האטה בגדילה לא סביר שיהיה משויך לתסחיף בעץ.

מסקירת הספרות לא נמצא מחקר שבחן את הקשר בין תכולת המים היחסית במחטי אורן ירושלים לבין רמת החיוניות של העץ וקצב זרימת העצה שלו לאורך היום על ידי תצפיות באזור צחיח למחצה.

3.1 מטרת המחקר

מציאת מאפייני הקשר בין תכולת מים יחסית במחטים ובין מצב עקה בעצים. ידיעת קשר זה תוכל לשפוך אור על הבנת המנגנונים במערכת ההידראולית של עץ וכיצד היא מגיבה למחסור במים.

3.2 שאלות המחקר

- א. הבנת הקשר בין תכולת מים יחסית במחטי עצי אורן ירושלים (*Pinus Halepensis*) לבין עצים במצבי עקה שונים.
- ב. אפיון התנודתיות היומית של תכולת המים היחסית במחטים של עצים ברמות עקה שונות.
- ג. אפיון התנודתיות היומית של קצב זרימת המים בעצה.
- ד. מה הקשר בין קצב זרימת המים בעצה לתכולת המים היחסית במחטים.

3.3 השערת המחקר

- א. קיים קשר ישיר בין תכולת מים יחסית במחטי עצי אורן ביער יתיר ובין מצב העקה של העץ, קשר זה ניתן לאפיון בעזרת מדידות ישירות ופשוטות.
- ב. תכולת המים היחסית במחטים תלויה בקצב זרימת המים בעצה.

4. גוף העבודה

4.1 פרק 1

כפי שהראיתי במהלך המבוא, מים הם מקור החיוניות והצמיחה העיקרי של העץ ולכן נעשתה החלטה, במסגרת קבוצת המחקר (על ידי המנחה שלי, יקיר פרייזלר) לבדוק את תכולת המים בעלוה כתלות במצב החיוניות של העצים (רמת העקה של העצים).

4.1.1 שיטות המחקר

רוב המחקרים שנעשים ביער יתיר משלבים שתי שיטות מחקר שונות: תצפיות וטיפולים. בתצפית, נאספים נתונים מתוך המצב הקיים בשטח הטבעי ללא יצירת הפרעה מצד החוקר. בטיפולים, החוקר מבצע תהליכים שונים (מניפולציות) על האובייקט הנחקר ובודק את השפעתם. מחקר זה, משלב שתי שיטות אלה לקבלת הנתונים הרצויים.

4.1.2 מערך ניסוי 1

ניסוי זה מיועד לבדוק תכולת מים במחטים טריות ביחס לתכולת מים של מחטים במצב של רווית מים (תכולת מים יחסית), תוך השוואה בין 4 סוגי עצים כשכל קבוצה מייצגת רמת עקה שונה. סיווג העצים ל-4 רמות עקה התבסס על נתונים איכותניים (אורך המחטים, איכות צבע המחטים, כמות המחטים, עובי הגזע ועוד) כחלק ממחקרו של המנחה שלי. העצים סווגו במספרים מ-1-4 כאשר 1 הוא עץ השרוי ברמת העקה הקשה ביותר ואילו עץ מספר 4 אינו שרוי בעקה ולכן נחשב חיוני.

מציאת תכולת מים יחסית (RLWC-Relative Leaf Water Content) של קבוצת מחטים נעשית על ידי הצבת פרמטרי משקל שונים, כפי שיפורטו בהמשך, בתוך המשוואה הבאה:

משוואה 2:

$$RLWC = \left(\frac{w - dw}{tw - dw} \right) \cdot 100$$

w - משקל מחטים טרי:

שקילה זאת מתבצעת בסמוך לזמן קטיפת המחטים מהעץ תוך נקיטת אמצעים למניעת שינויים בתכולת המים המקורית.

tw - משקל מחטים בטורגור מלא:

שקילה זאת מתבצעת לאחר הרווית המחטים במים. הרוויה זאת תעשה במים מזוקקים שלהם פוטנציאל מים הגבוה ביותר ולכן קליטתם במחטים יעילה ביותר.

dw -משקל מחטים יבש:

שקילה זאת מתבצעת לאחר ייבוש מלא של המחטים בטמפרטורה (80 מעלות צלזיוס ל-24 שעות) שאינה פוגעת בתכולת החומר היבש של המחטים.

הסבר משוואה 2:

המונה מתאר את כמות המים המקורית במחט.
המכנה מתאר את כמות המים המרבית האפשרית המחט.
תכולת המים היחסית מוצגת באחוזים.

4.1.3 חומרים

א. מחטי אורן ירושלים - עלי עץ אורן ירושלים הם מסוג מחטים (ראה איור 8). מחטים אלה צומחים בזוגות, אחת לשנה, במקבצים הכוללים עשרות זוגות. צמיחת המחטים מתרחשת בתקופת האביב והקיץ (מרץ-אוקטובר). המקבצים ממוקמים על גבי הענף על פי שנת צמיחתם. המקבץ המבוגר ביותר הוא הקרוב ביותר לבסיס הענף, הצעיר בשנה מקודמו, ממוקם בהמשכו של המקבץ המבוגר ואילו המקבץ האחרון והצעיר ביותר נמצא במקום המרוחק מבסיס הענף. מקבצי מחטים בני יותר משלוש שנים נעלמים מהענף עקב נשירה. לניסוי זה נלקחו מחטים משנות הצימוח 2011 ו-2012.



איור 8 א' (האיור הימני) מקבץ של זוגות מחטי עץ אורן. בסוף הענף ניתן לראות אצטרובל זכרי ומתחתיו שני גלי צימוח של מחטים (THE ART OF INSTRUCTION-KATRIEN VAN DER SCHUEREN-PLAT 70).
איור 8 ב' (האיור השמאלי) מספר ענפי עץ אורן בהם ניתן להבחין במספר גלי צימוח. הרווח שבין שני מקבצי מחטים, גלי צימוח, הוא המקום שבו גדל האצטרובל הזכרי.

4.1.4 כלים

- א. מבחנות זכוכית.
- ב. מים מזוקקים.
- ב. שקיות פלסטיק קטנות המאפשרות סגירה הרמטית (ZipLock).
- ג. משקל מעבדתי רגיש למסות קטנות (± 0.0001 גרם) מסוג Precisa 62A.
- ד. תנור חימום מסוג: Gallenkamp.
- ה. צידנית קירור.
- ו. מזמרה עם מוט מאריך.
- ז. מקרר בטמפרטורה של 5 מעלות צלזיוס.

4.1.5 גודל מדגם וחזרות

המחטים נאספו מ-20 עצי אורן ירושלים שונים הנמצאים ב-5 חלקות שונות של היער (טבלה 1). ההחלטה לבחור בחלקות אלה הייתה כדי לאפשר גודל מדגם מקיף שייצג את היער כולו ולא רק חלק ממנו. על כן, מתוך חמשת החלקות ישנן שתיים מערביות, שתיים מזרחיות ואחת שממוקמת באזור המרכזי של היער. בכל חלקה נבחרו 4 עצים ב-4 רמות עקה שונות כפי שמתואר לעיל.

מכל עץ נחתכו שלושה ענפים. כל אחד משלושת הענפים מחזיק עשרות מחטים, מחטים אלה נלקחו לביצוע הבדיקות. מכל עץ נלקחו שתי קבוצות של מחטים על פי שנות הצימוח שלהן (2011, 2012). המחטים הוכנסו לשקיות נפרדות שממוינות לפי מספר חלקה, רמת העקה של העץ ושנת צימוח המחטים.

רמות העקה השונות של העצים כמו גם שנות הצימוח השונות של המחטים לא נעשו במכוון לצורך המחקר מאחר ומחקר זה מבוסס תצפיות אך למרות זאת השונות ביניהם, ברמת העקה, מיוחסת מבחינת המונח כסוג טיפול.

טבלה 1 מערך הניסוי בכל חלקה מתחלק ל-4 טיפולים של 4 רמות עקה שונות. בכל אחד מהטיפולים ישנן שתי קבוצות מחטים המייצגות שנות צימוח שונות כל אחת, שגם הן נחשבות טיפולים. כאשר מכל עץ יילקחו שלושה ענפים שונים לצורך ריבוי פריטים. מערך זה יתקיים בחמש חלקות שונות ברחבי היער.

ריבוי פריטים - מספר ענפים	מספר שנות צימוח של המחטים - מספר טיפולים	רמות עקה שונות - מספר טיפולים	שם חלקה - כל חלקה מייצגת חזרה
3	2	4	3
3	2	4	5
3	2	4	12
3	2	4	15
3	2	4	18

4.1.6 מהלך ניסוי 1- מדידת תכולת המים היחסית במחטים-RLWC לעצים ב-4 רמות עקה שונות

המדדות נעשו בתאריך 3.6.13 בין השעות- 12:00-18:30

א. המחטים נקטפו בעזרת מזמרה עם מוט מאריך מגובה של 4-6 מטרים.



איור 9 קטיפת מחטים מגובה של 4-6 מטרים על ידי מזמרה עם מוט מעריך

- ב. המחטים הוכנסו למבחנות זכוכית ונשמרו בצידנית עם קרח על מנת לשמר את תכולת המים שהייתה בעת הגיזום עד לשקילה.
- ג. המבחנות נשקלו בתחנה של מכון ויצמן ביער ולאחר מכן מולאו במים מזוקקים בטמפרטורת החדר למשך מספר שעות (מינימום שעתיים).



איור 10 שקילת מחטים בעזרת משקל מדויק למסות קטנות.



איור 11 מבחנות המכילות מחטים ומים מזוקקים.

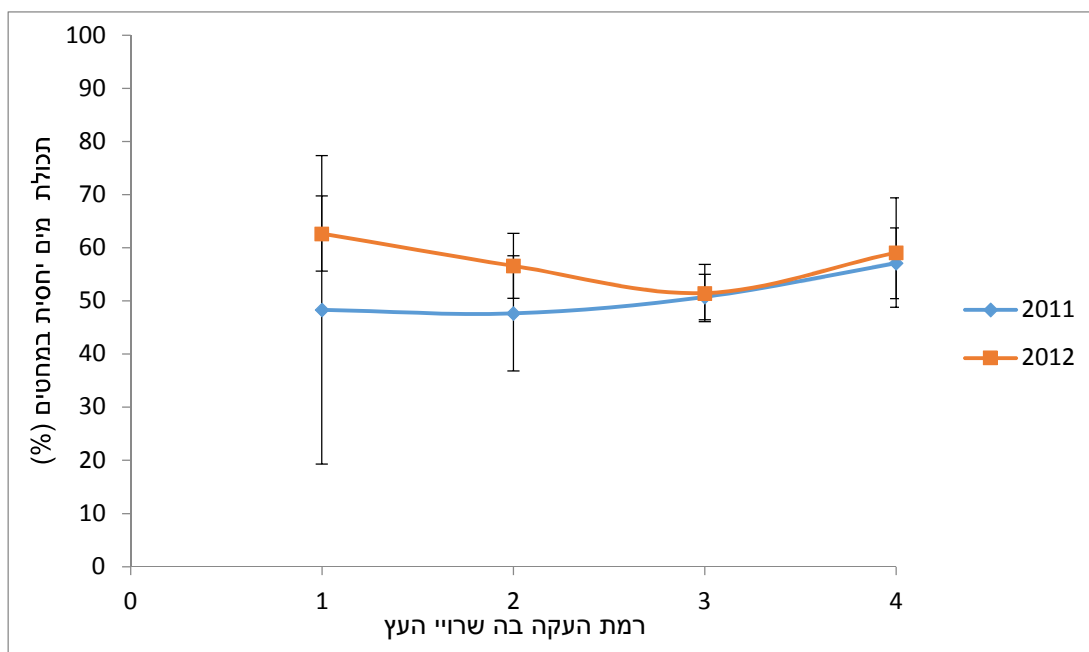
- ד. ביום שלאחר קטיפת המחטים, המחטים הוצאו מן המים, שטח פניהם יובש בעזרת מטלית יבשה והם נשקלו שנית.
- ה. לאחר השקילה המחטים הוחזרו לשקיות נייר.
- ו. המחטים הוכנסו לתנור חימום בטמפרטורה של 80 מעלות צלזיוס למשך 24 שעות.
- ז. הנתונים מהשקילות הוכנסו למשוואה המוצאת את תכולת המים היחסית במחטים (משוואה 2)

4.1.7 ניתוחים סטטיסטיים

כל הנתונים הסטטיסטיים נערכו בעזרת תוכנת EXCEL, לצורך בדיקת שונות בין טיפולים נערך Ttest, לבדיקת שונות מובהקת. כמו כן, שגיאות התקן מהממוצע חושבו ומוצגות כמקובל בכל הגרפים (נספחים-איור 22).

4.1.8 תוצאות ומסקנות ביניים-ניסוי 1

כאשר בחנתי את תוצאות ניסוי 1 נוכחתי לדעת שהן שונות משציפיתי, על כן אציג את בקצרה את תוצאות המחקר ומסקנותיי ממנו אשר הביאו אותי להמשך המחקר בכיוון שונה מזה שחשבתי תחילה.

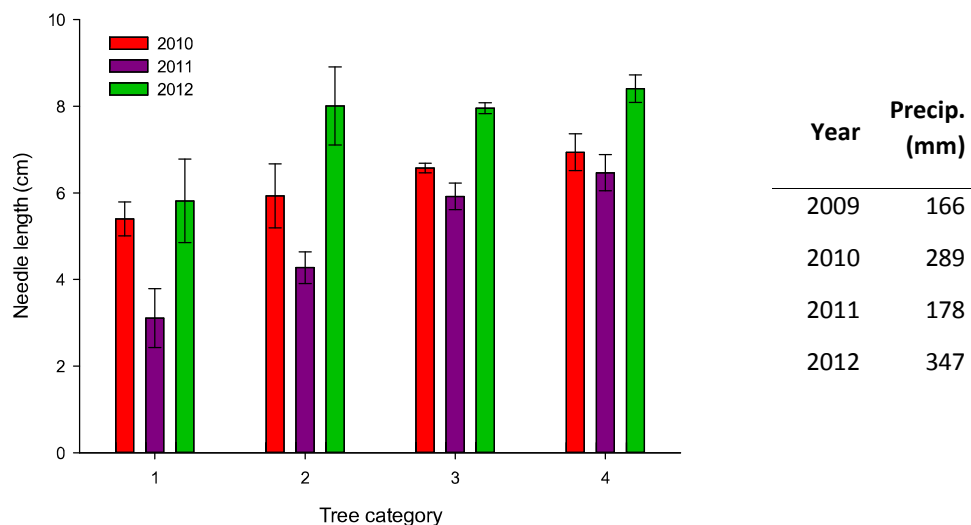


איור 12 הגרף מתאר את אחוז המים היחסי במחטי 2011 ו-2012, מעצים בארבע רמות עקה שונות \pm שגיאת תקן.

מתוך התבוננות באיור 12 לא ניתן להצביע על קשר כלשהו בין תכולת מים יחסית במחטים לבין רמת עקה של עץ. עובדה זאת נובעת מרמת השונות הגבוהה בין נתוני תכולת מים יחסית במחטים מהעצים ברמות העקה השונות.

במחקרים קודמים שנעשו על אותם עצים ובחנו את הקשר בין מאפיינים מורפולוגיים ופיזיולוגיים אחרים בעצים כתלות במצב העקה, נראתה עלייה בחיוניות האובייקט הנבדק (לדוג' אורך מחטי העצים – איור 13) עם השיפור במצבו של העץ (ירידה ברמת עקה). באיור 13, שנלקח כדוגמא מאחד ממחקרים אלו (ממחקרו של יקיר פרייזלר, מנחה שלי) ניתן לראות כי אורך המחטים הממוצע של עצי

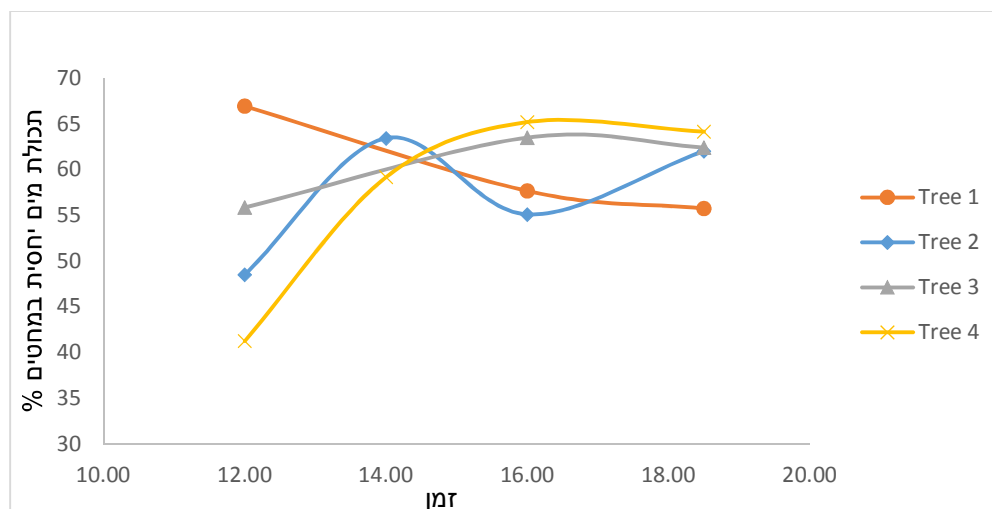
עקה 1 (השרוי בעקה) בשלושת שנות הניסוי הוא כ- 5 ס"מ, לעומת אורך מחטים ממוצע של כ- 8 ס"מ בעצי עקה 4 (ללא עקה).



איור 13 בגרף זה מוצגת השוואה בין אורך המחטים לרמת העקה של העצים ביחס לשלוש שנות צימוח שונות. מצד ימין מוצגת טבלה המראה את כמות הגשם במ"מ של שלושת שנות הצימוח של המחטים.

כדי לבחון את סיבת ההבדל בין השערת הבסיס של המחקר לבין התוצאה שהתקבלה באיור 12 החלטתי להציג את הנתונים בצורה שונה. כזכור, אספתי את המחטים מחמש חלקות יער שונות לצורך חזרתיות וייצוג של היער כולו, אולם המרחק בין החלקות לבין תחנת שקילת המחטים גרם להפרשי זמנים נכרים של כ- 2-3 שעות בין שעת הקטיפה של חלקה אחת לאחרת. מצב זה הביא להשפעה לא רצויה מבחינה מחקרית על תכולת המים הנבדקת.

מאחר ושעת קטיפת המחטים בכל עץ נרשמה, הרי ניתן לערוך השוואה בין שעת קטיפת המחטים בכל חלקה לבין תכולת המים היחסית במחטים של העצים בארבעת רמות העקה השונות (ראה איור 14), וכך לערוך מעין עקום יומי המתאר את השינוי בתכולת המים היחסית במחטים בכל סוג עץ.



איור 14 בגרף זה מוצגת השוואה בין 4 עצים ברמות עקה של 1-4 בהתייחס לתכולת המים היחסית כתלות בארבע שעות לאורך היום.

עץ מספר 1 בשעה 12 עם כ- 70% מים ולאורך היום יורד בצורה הדרגתית עד 55% מים בשעה 18:30. עץ מספר 2 בין השעות 12-14 ישנה עלייה מ47% עד 65%, בין ישנה ירידה מ65% עד 55% ואז עלייה שוב עד השעה 18:30 עד 63%.

עץ מספר 3 בין השעות 12-16 עולה מ55% מים ל65% מים ובין 16-18:30 יורד בכ-2% עד ל53%. עץ מספר 4 בין השעות 12-16 ישנה עלייה מ40% עד 65% ובין השעות 16-18:30 ישנה ירידה בכ-2% עד 63%.

מתוך התבוננות באיור 14, ניתן להבחין בשתי התנהגויות:

א. דפוס ההתנהגות היומי של עצים 1 ו-4 שונה ואף הפוכה באופן ברור אחד מהשני

ב. ההתנהגות של עצים 2 ו-3 דומה אחד לשני ושונה מ-1 ו-4.

אולם, לא ניתן להסיק דבר קונקרטי על הקשר בין תכולת המים למצב העקה של העץ והשעה ביום. הסיבה לכך נובעת, כנראה, מכך שמספר השעות שנבדקו היה קטן מידי (4 שעות שונות במהלך היום), וכן האופן שבו ייחסתי ארבעה עצים שונים, שאומנם הוגדרו כאותו עץ מבחינת רמת עקה, כעץ אחד דורשת בדיקה מעמיקה יותר בהיבט של תכולת המים במחטים.

4.1.9 סיכום מסקנות ביניים-ניסוי 1

חוסר העקביות בהתנהגות תכולת המים היחסית במחטי 2011 ו-2012 עבור עצי רמות עקה שונות, כפי שבאה לידי ביטוי בניסוי 1, הביאה אותי (אותנו) למסקנה כי בניגוד להשערת המחקר הראשונית, נמצא שאין קשר ישיר בין מצב העץ לתכולת המים היחסית במחטים.

הסיבה לכך היא כנראה בעקבות השונות הרבה בין עצי היער (מיקרו סביבה), רגישות תכולת המים לשעת איסוף המחטים, הבעיות הלוגיסטיות בהעברת המחטים לנקודת השקילה וכדומה. כל אלה מקשים על הסקת מסקנות ולכן יש לבצע ניסוי נוסף אשר יערך בצורה פרטנית יותר ועל קבוצה ממוקדת של עצים.

4.2 פרק 2-ניסוי 2

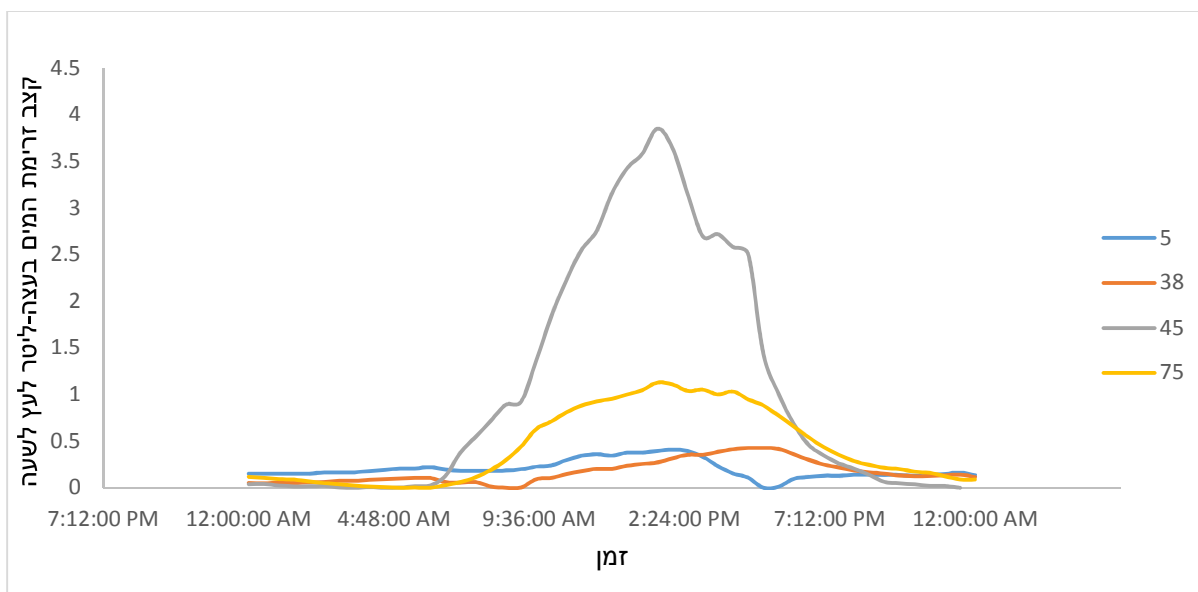
4.2.1 מערך הניסוי

ניסוי זה יכלול מספר רב של מדידות (תכולת מים יחסית) במהלך היום, מדידה אחת לשעה מן השעה 7 בבוקר עד השעה 7 בערב לצורך יצירת עקום יומי מסודר. בנוסף אשלב בניסוי פרמטר נוסף, קצב זרימת המים בעצה (*Sap-flow*). פרמטר זה יהיה בעל שני תפקידים בניסוי:

א. כמדד למצב העקה בעץ - העצים בניסוי זה לא סווגו לפני תחילת הניסוי למספר רמות עקה שונות כמו בניסוי 1, לכן, כדי ליצור הקבלה בין שני הניסויים אשתמש בקצב זרימת המים בעצה כמסווג לרמת העקה של העץ. כאשר עץ שקצב זרימת המים בעצה שלו גבוה יותר נחשב עץ חיוני יותר ולהפך.

ב. כמדד הקשור במשק המים של עץ - קצב זרימת המים בעצה הוא חלק ממנגנון העברת מים בעץ ולכן הבנת הקשר בין שני פרמטרים אלה (תכולת מים יחסית במחטים וקצב זרימת מים בעצה) יכולה לשפוך אור מכיוון חדש על הנושא הנחקר.

לניסוי זה נבחרו 4 עצים שנמצאים בחלקת המחקר של מכון ויצמן ביער יתיר. בחלקה (10 דונם, צפיפות ממוצעת של 40 עצים לדונם) ישנם כ-30 עצים העוברים בדיקות קצב זרימת מים בעצה בתדירות שוטפת (אחת לחצי שעה). העצים לניסוי זה נבחרו על פי נתוני קצב זרימת המים בעצה שלהם מהחודשים מאי, יוני ויולי 2013, כך ששניים מהם הינם בעלי קצב זרימת מוהל (מים) עצה נמוך (עצים מספר: 5, 38). אחד בעל זרימות בקצב בינוני (עץ מספר: 75) ואחד בעל נתונים טובים במיוחד, עץ מצטיין (עץ מספר: 45), כפי שניתן לראות באיור 15.



איור 15 קצב זרימת המים בעצה לפי שעות היממה בקרב 4 עצים שונים (5,38,45,75)

העצים שנתוני מוהל העצה שלהם נמוכים (עצים מספר: 5,38) יחשבו כעץ מסוג 1, השרוי בעקה הגבוהה ביותר, העץ בעל הנתונים הבינוניים (עץ מספר 75), השרוי ברמת עקה בינונית, יחשב כעץ מסוג 2 והעץ בעל נתוני מוהל העצה הטובים במיוחד (עץ מספר 45) יחשב כעץ מסוג 3.

על ידי יצירת עקום יומי המורכב מנתוני תכולת המים היחסית של המחטים ונתוני קצב זרימת המים בעצה אוכל ללמוד אודות הקשר הפיזיולוגי בין שני פרמטרים אלה וכן אוכל להשוות קשר זה בין מספר עצים ברמות שונות של חיוניות (עקה).

4.2.2 חומרים

א. מחטי אורן ירושלים משנת הצימוח 2012.

4.2.3 כלים

- א. מבחנות זכוכית.
- ב. מים מזוקקים.
- ג. שקיות פלסטיק קטנות המאפשרות סגירה הרמטית (ZipLock).
- ד. משקל מעבדתי רגיש למסות קטנות (+0.0001 גרם) מסוג Precisa 62A.
- ה. תנור חימום מסוג: Gallenkamp.
- ו. צידנית קירור.

ז. מכשיר למדידת Granier- Sap-flow:

שיטת גרנייר למדידת קצב זרימת המים בעצה מבוססת על עקרון סילוק חום בעזרת תנועת נחלים.

מערכת מדידה המבוססת על שיטה זאת, מכילה 2 מחטים המוחדרות באופן רדיאלי לתוך גזע העץ, אחת מעל השנייה ובמרחק אנכי של כ 15 ס"מ (ראה איור 16).

המחט העליונה מכילה גוף חימום חשמלי וחייושן טמפרטורה ואילו המחט התחתונה מכילה חייושן טמפרטורה בלבד.

בזמן המדידה, מחום זרם חשמלי בעוצמה קבועה דרך גוף החימום (מחט עליונה) וגורם לעליית טמפרטורה מקומית הנמדדת על ידי חייושן הטמפרטורה העליון. חום זה מוסע גם לכיוון החייושן התחתון וגורם אף בו לעליית טמפרטורה.

הפרש הטמפרטורות בין שני חייושני המחטים תלוי במהירות זרימת המים בעצה בעץ: כאשר אין זרימה, חום מצליח להגיע בקלות יחסית מגוף חימום עליון לחייושן טמפרטורה תחתון. במצב שיש זרימת נחלים מכיוון החייושן התחתון לכיוון גוף החימום החום מסולק לכיוון מעלה העץ (או מורד זרימת מוהל העצה) ומתקשה להגיע לחייושן טמפרטורה תחתון.

ככל שמהירות זרימת המים בעצה גבוהה יותר, כך יגדל הפרש הטמפרטורות הנמדדות בין חייושן גוף החימום (החייושן העליון) לבין החייושן התחתון.

נתוני כמות החום הנכנסת למערכת דרך מחט החימום מועברת למכשיר אוגר נתונים (*data logger*) (איור 17) ונאספת אחת לזמן מסוים. נתונים אלה מחושבים ביחד עם הנתונים הגאומטריים של האזור הנבדק (קוטר העץ, מרחק בין חייושנים, עומק החדרת המחטים), קבועי טמפרטורה של החומר הצמחי באזור הנבדק וכמו כן הפרשי הטמפרטורה בין החייושנים וביחד מאפשרים לחשב את קצב זרימת מוהל העצה ביחידות מידה של ליטר לעץ לשעה.



איור 16 שתי מחטי המכשיר למדידת קצב זרימת מים בעצה.



איור 17 אוגר נתונים (DATA LOGGER) של קצב זרימת המים בעצה בעצים המחוברים למכשיר. יער יתיר אוגוסט 2013.

4.2.4 גודל מדגם וחזרות

המחטים לניסוי זה נלקחו מ-4 עצים, עצים אלה מהווים את גודל המדגם של הניסוי. העצים סווגו לשלוש קבוצות שכל אחת הוגדרה כטיפול (קצב זרימת המים בעצה כמסווג לרמת העקה שבו שרוי העץ). בכל שעת דגימה, מכל אחד מהעצים נלקחו 3 ענפים והם מהוויים את החזרות.

4.2.5 מהלך הניסוי 2- מדידת תכולת מים במחטים וקצב זרימת מים בעצה של 4 עצים

המדידות נעשו בתאריך 26.8.13 בין השעות 07:00-19:00.

1. דגימות המחטים נלקחו אחת לשעה מגובה של 2-2.5 מטרים מצדו הדרום-מזרחי של כל אחד מארבעת העצים.
2. מיד עם קטיפת המחטים הם הוכנסו למבחנות זכוכית ונשקלו.

3. לאחר שקילת המבחנות נמזג לכל אחת מהן כמות מים מזוקקים עד לכיסוי מלא של המחטים.
4. ביום שלאחר מכן הוצאו המחטים מהמים, פני שטחם יובש, כמו גם המבחנות, ולאחר מכן המחטים הוכנסו בחזרה למבחנות (המייובשות) ונשקלו בשנית.
5. לאחר השקילה נכתבו פרטי המחטים של כל מבחנה על גבי הפקקים.
6. המבחנות הוכנסו לתנור למשך 2 ימים בחום של 60 מעלות צלזיוס (איור 17).



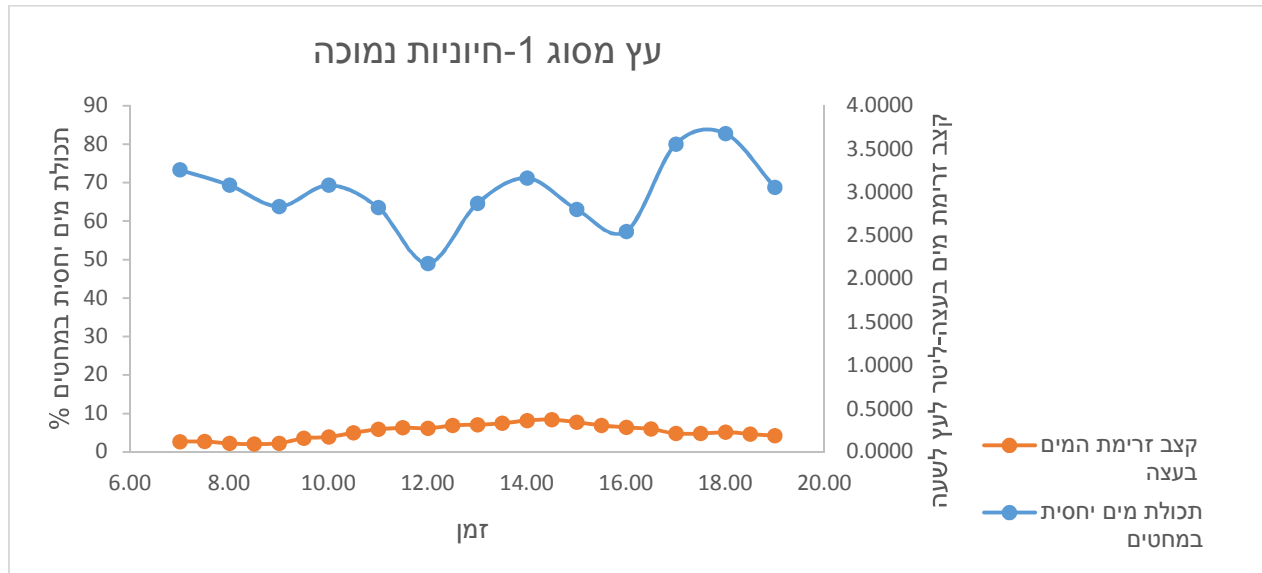
איור 17 ייבוש המחטים בתנור.

7. לאחר הוצאת המבחנות מהתנור הפקקים הורכבו על גבי המבחנות המתאימות ונשקלו.
8. הנתונים מהשקילות הוכנסו למשוואה המוצאת את תכולת המים היחסית במחטים (משוואה 2).

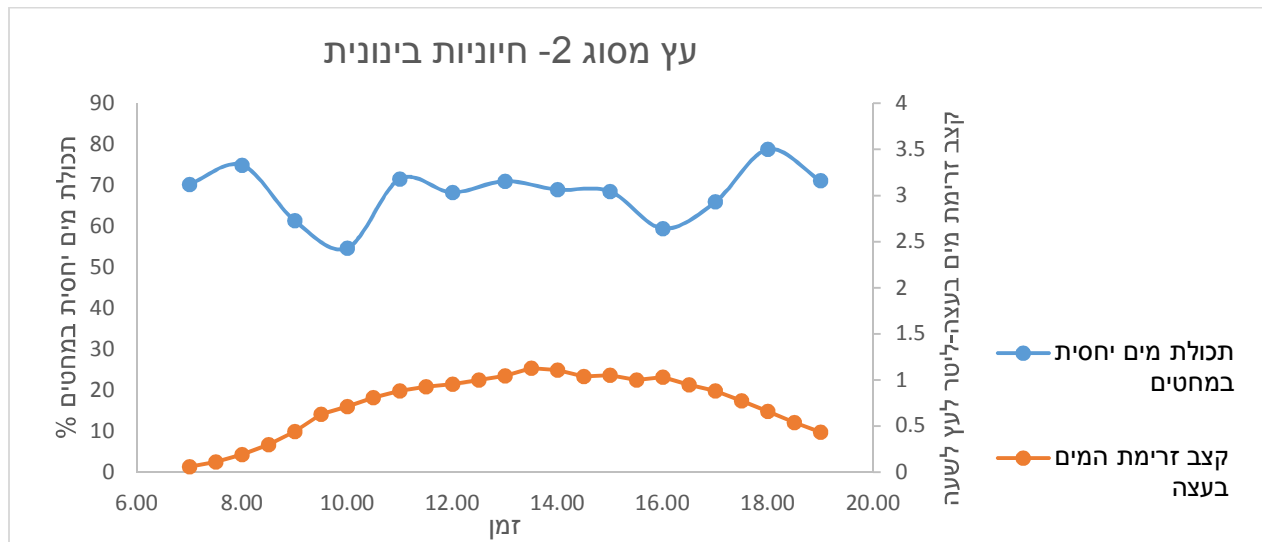
4.2.6 ניתוחים סטטיסטיים

כל הנתונים הסטטיסטיים נערכו בעזרת תוכנת EXCEL (נספחים-איורים 23-24) לצורך בדיקת שונות בין הטיפולים נערך Ttest, לבדיקת שונות מובהקת. כמו כן, שגיאות התקן מהממוצע חושבו ומוצגות כמקובל בכל הגרפים.

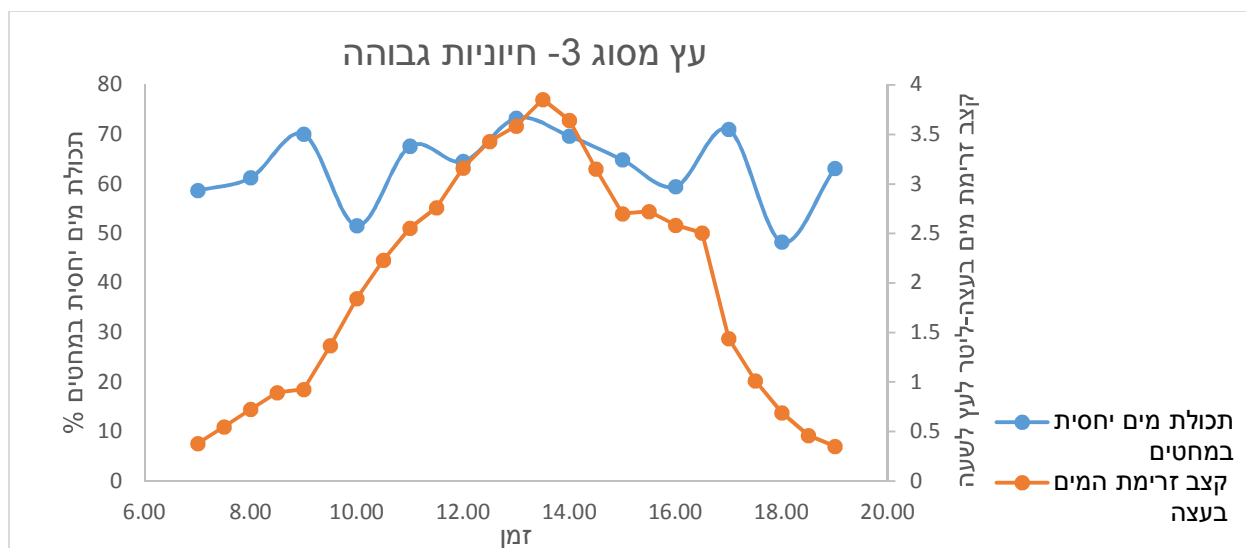
4.2.7 תוצאות ניסוי 2



איור 18 עץ מסוג 1 תכולת מים יחסית במחטים וקצב זרימת מוהל העצה לאורך שעות היום. הגרף של קצב זרימת המים בעצה (כתום) מראה על ערך מקסימלי בסביבות השעה 14. הגרף של תכולת המים היחסית (כחול) מראה על מספר עליות וירידות, אך במבט יומי כולל נראה שכמות המים היחסית במחטים נותרה כמעט זהה.



איור 19 עץ מסוג 2, תכולת מים יחסית במחטים וקצב זרימת מוהל העצה לאורך שעות היום. הגרף של קצב זרימת המים בעצה מראה על ערכים גבוהים יחסית בין השעות 10 עד 16 כאשר הערך המקסימלי הוא בסביבות השעה 14. הגרף של תכולת המים היחסית מראה על עליה ולאחר מכן ירידה בין השעות 7-10 וכן 16-19 וביניהם יציבות בין השעות 11-15 לערך. במבט יומי כולל נראה שכמות המים היחסית במחטים נותרה כמעט זהה.



איור 20 עץ רמת עקה 3 תכולת מים יחסית במחטים וקצב זרימת מוהל העצה לאורך שעות היום. הגרף של קצב זרימת מוהל העצה מראה ערך מקסימלי בסביבות השעה 14, כאשר עד השעה 14 ישנה עליה רציפה ולאחריה ישנה ירידה כמעט רציפה. הגרף של תכולת המים היחסית מראה על עלייה וירידה בין השעות 7-10 וכן 16-18 וביניהם יציבות יחסית בין השעות 11-16 לערך. במבט יומי כולל נראה שכמות המים היחסית במחטים נותרה כמעט זהה.

4.2.8 סיכום תוצאות ניסוי 2

מדידת תכולת מים יחסית במחטים וקצב זרימת המים בעצה של עצי עקה 1-3 (איורים 18 - 20)

מתוך התבוננות בעקומת קצב זרימת המים בעצה של שלושת סוגי העצים (1-3) ניתן לראות מספר מאפיינים משותפים:

א. בין השעות 7-14 ישנה עלייה בקצב זרימת המים בעצה, ובין השעות 14-19 ישנה ירידה בקצב זרימת המים בעצה.

ב. 14 היא שעה שבה קצב זרימת המים בעצה הוא המהיר ביותר.

ג. בין השעות 10-16 השינוי בקצב זרימת העקה מהיר יותר מאשר בשאר שעות היום.

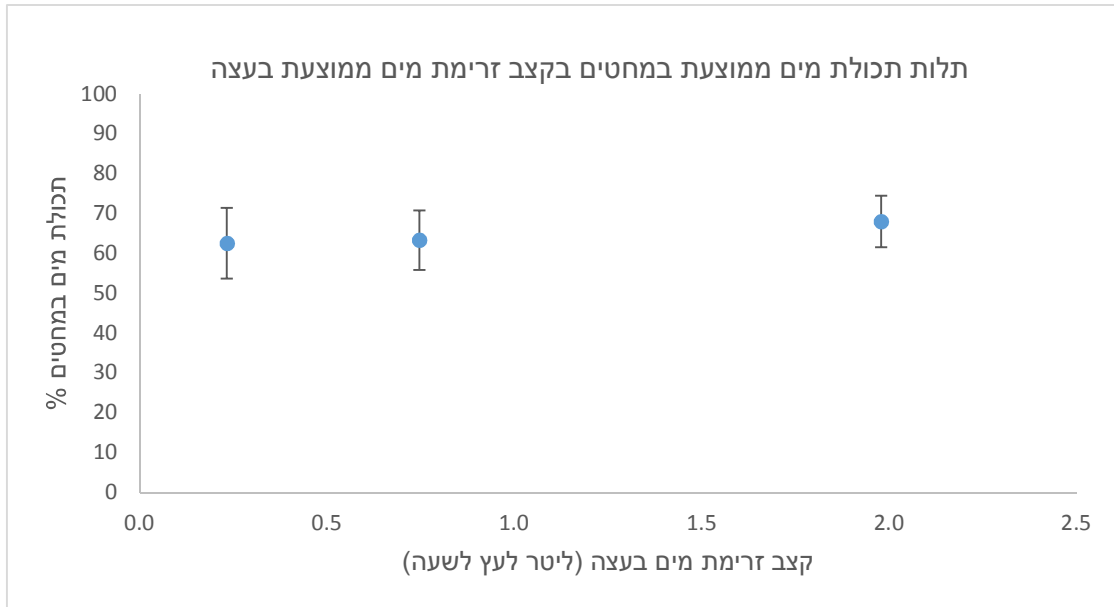
ד. ערכי קצב זרימת המים בעצה נעים בין 0.3852 – 0 ליטר לעץ לשעה.

מתוך התבוננות בעקומת תכולת המים היחסית במחטים של עצים מסוג 1-3 ניתן לראות מספר התנהגויות:

א. במבט יומי כולל, השינוי בתכולת המים במחטים של עצי סוג 1-3, אינו גדול מ- +5%.

ב. ערכי תכולת המים היחסית במחטים נעים בין 48.286% - 82.755%.

ג. בין העצים מסוג 2 ו-3 ישנה יציבות יחסית משותפת בין השעות 10-15.



איור 21 תכולת מים יומית ממוצעת (\pm סטיית תקן) במחטים ביחס לקצב ממוצע של זרימת המים בעצה הנקודה הימנית מייצגת את עץ מסוג 3, הנקודה האמצעית מייצגת את מסוג 2 והנקודה השמאלית מייצגת את עץ מסוג 1. ערך ה-Y (תכולת מים יחסית במחטים) של שלושת סוגי העצים כמעט זהה לעומת ערך ה-X (קצב זרימת המים בעצה) של שלושת סוגי העצים ששונה בצורה ניכרת ביניהם.

5. דיון ומסקנות

5.1 סיכום המחקר ותוצאותיו המידיות

בניסוי 1 בחנתי את תכולת המים היחסית של מחטים, משנות הצימוח 2011 ו-2012, בעצים מארבע רמות עקה שונות.

תוצאות המדידה הראו כי רמת השונות הגבוהה בין החזרות- אינה מאפשרת להבין את הקשר בין רמת העקה שבה שרוי העץ לבין תכולת המים היחסית של המחטים. איסוף המחטים בניסוי זה התבצע בשעות שונות של היום. הסיבה לכך הייתה טכנית מאחר והחלקות מהן נלקחו המחטים היו רחוקות אחת מהשנייה והצריכו שימוש במכונת, מעבר לכך זמן איסוף המחטים אך כחצי שעה לכל הפחות. עובדה זאת, מצד אחד, פגמה בדיוק של המדידה מאחר וכל חלקה הייתה אמורה להוות כחזרה ולכן על התנאים היה להיות זהים בכל החזרות. אך מצד שני, עובדה זאת אפשרה לבחון את הנתונים הקיימים בצורה אחרת. עקב כך, הוחלט לבחון את הקשר בין השעה ביום לבין תכולת המים היחסית במחטים של העצים בארבעת רמות העקה השונות. בדיקה זאת הניבה תוצאות שהראו התנהגויות שונות בין העצים בארבעת רמות העקה השונות. לא נמצא קשר שטתי בין תכולת המים היחסית במחטים ובין שעת האיסוף.

בעקבות כך הוחלט לערוך ניסוי חדש שבו תהיה התמקדות בקשר בין תכולת המים היחסית לשעת היום וכן יוסף פרמטר חדש הקשור במשק המים של העץ והוא קצב זרימת המים בעצה (*Sap Flow*). פרמטר זה סווג את העצים בניסוי לשלוש רמות עקה שונות. עץ בעל קצב זרימת מים גבוה, סווג כעץ מצטיין/ חיוני (עץ מספר 3), עץ בעל קצב זרימת מים בינוני יסווג כעץ ברמת עקה בינונית (עץ מספר 2) ועץ בעל זרימת מים נמוכה נחשב כעץ ברמת העקה הקשה ביותר (עץ מספר 1).

בניסוי 2 נבדקה תכולת המים היחסית במחטים של עצים בהם קצב זרימת מים בעצה מנוטר באופן עצמאי ואוטומטי לאורך כל שעות היום. מתוצאות הניסוי נמצא כי:

- א. קצב זרימת המים בעצים בכל רמות העקה משתנה לאורך היום. מן השעה 07-14 ישנה עלייה ומן השעה 14-19 ישנה ירידה, כך שניתן לתאר עקום יומי אופייני לזרימת המים בעצה (איור 15).
- ב. תכולת מים יחסית במחטים, בכל שעה ביום, נשארת קבועה יחסית ואינה עוקבת אחרי שינויי קצב זרימת המים בעצה לאורך היום, בעצים ברמות העקה השונות.

ג. תכולת המים היחסית במחטים היא קבועה ואינה תלויה בממוצע היומי של קצב זרימת המים בעצים ברמות העקה השונות. בדיקת t-test תמכה בממצאים אלה והראתה כי השונות בין תכולת המים היחסית של העצים בכל רמות העקה אינה גדולה מספיק כדי ליחס אותן לקבוצות שונות של עקה.

4.2 הסבר תוצאות ביחס להשערת המחקר

בניסוי 1 ו-2 נראה שתכולת מים יחסית במחטים (RLWC) הינה תכונה טבועה פנימית של העץ (אינהרנטית) שאינה תלויה במשטר המים הכולל שלו (חומרת העקה שבה שרוי העץ בשנים האחרונות) ו/או במשטר המים הרגעי (זמני) של העץ - זרימת המים הרגעית בעצה (*Sap-flow*).

במילים אחרות נראה כי עצים הנמצאים ברמת עקה גבוהה לא מכילים כמות קטנה יותר של מים באופן יחסי במחטים מאשר עצים הנמצאים ברמת עקה נמוכה יותר (Edwards and Dixon, 1995) ממצא זה עומד בניגוד להשערת המחקר (השערה 1) שהעריכה כי קיים קשר ישיר בין תכולת מים יחסית במחטי עצי אורן ובין מצב העקה של העץ. בנוסף נראה כי תכולת המים היחסית במחטי העץ נשמרת זהה באופן יחסי לאורך כל שעות היום. לעומת זאת זרימת המים בעצה משתנה לאורך שעות היום ומכאן שאין תכולת המים היחסית במחטים אינה תלויה בקצב זרימת המים בעצה חזת בניגוד להשערת המחקר (השערה 2).

4.3 יתרונות וחסרונות של מדידת תכולת מים יחסית במחטים

יתרונות מדידת תכולת מים יחסית במחטים:

- א. מדידה בעלות נמוכה – מדידה זאת אינה מצריכה ציוד יקר ומיוחד ולכן ניתנת לביצוע במסגרות שונות.
- ב. מדידה מהירה – מדידה זאת לא אורכת זמן רב, כ 2.5 – 3 ימים מזמן איסוף המחטים עד לקבלת התוצאות הסופיות.
- ג. מדידה שאינה מצריכה התמחות מעמיקה – המדידה מורכבת ממספר צעדים פשוטים ולא מצריכה ידע רב כדי להבין את אופן התבצעותה.

חסרונות מדידת תכולת מים יחסית במחטים:

- א. מדידה המצריכה מדגם גדול של פרטים – כתוצאה משונות גדולה בערכי תכולת מים יחסית בכל אחד מהפרטים הנמדדים (המחטים) יש לבצע את המדידה על קבוצה גדולה של פריטים על מנת לחזק את אמינות התוצאה הממוצעת (הקטנת ערך שגיאת תקן).
- ב. מדידה שתקפותה לגבי עקה בעצים לא הוכחה עדיין במלואה – נעשו מעט ניסויים המשלבים מדידת תכולת מים במחטים לעומת פרמטרים פיזיולוגיים אחרים בעץ ולכן לא קיים עדיין מודל ברור המתאר את ההקשרים ביניהם.

4.4 דיון הסברים ומסקנות

- א. בניגוד להשערת המחקר הראשונית נמצא כי, בתנאי ובשיטות המחקר הנוכחי, אין קשר ישיר בין תכולת מים יחסית במחטים ובין מצב עקת העץ.
קשר זה לא נמצא בניסוי 1 עבור עצים שמצב העקה שלהם היה ידוע מראש (על סמך מדדים איכותיים) קשר זה גם לא נמצא בניסוי 2 שבו מצב העקה נמצא באופן כמותי על ידי מדידת קצב זרימת מים בעצה.
מאחר וכידוע עצים שונים נמצאים ברמות עקה שונות, נשאלת השאלה כיצד באה לידי ביטוי רמת העקה בכמות המים שבעץ. התשובה כנראה אינה נמצאת בתכולת המים היחסית במחטים, אלא בתכולת המים הכוללת של העץ.
עצים הגדלים בסביבה דלה במים (שמובילה לעקה) יקטינו את תכולת המים הכוללת שלהם על ידי צמצום נפח העלווה, הן במספרה הכמותי והן על ידי הקטנת גודל העלים (אורך המחטים – ראה איור 13) וכל זה על מנת לשמור על תכולת מים יחסית קבועה בעלים (מחטים).
או במילים אחרות, מצב העקה בעצים משפיע כנראה על כמות המים הכוללת בעלים אך לא על כמות המים היחסית בהם.
שמירת תכולת מים יחסית קבועה בעלים חשובה והכרחית לשם שמירת לחץ טורגור קבוע לקבלת חזק מבני-מכני של העלה החשוב לתפקודו הפיזיולוגי.
- ב. בעקבות העובדה שתכולת המים במחטים היא קבועה, ניתן להסיק שסך הטרנספירציה (דיות) בעץ שווה לסך זרימת המים בעצה.

הפיוניות על גבי העלים נפתחות כדי לקלוט CO₂ החיוני לעץ. פתיחת הפיוניות יוצרת קשר ישיר בין תאי הצמח לאטמוספירה. תאי הצמח מכילים מאגרי מים בעלי אחוז לחות גבוה (99% לחות לערך), האטמוספירה מכילה בדרך כלל אחוז לחות נמוך מזה שבתא הצמחי ולכן נוצר מפל ריכוזים שבו מים מהצמח מתאדים לאטמוספירה. שינוי זה בתכולת המים של התאים (כתוצאה מפתיחת פיוניות) גורם בצורה ישירה להעלאת מים מבית השורשים (דרך העצה) לעלים כתוצאה משינוי בפוטנציאל המים בעלים.

תכולת המים בעלים נשארת תמיד זהה זה נעשה על ידי החזרה מחדש של מים שהתאדו לאטמוספירה על ידי הולכת מים בעצה. מכך ניתן להסיק כי סך הטרנספירציה בעץ שווה לסך זרימת המים בעצה, ומכאן גם שאין קשר בין הטרנספירציה לתכולת המים היחסית במחטים.

מסקנה זאת מאפשרת הבנה מעמיקה יותר במשק המים של העץ ובמקומה של תכולת המים היחסית בה. בעקבות מסקנה זאת נראה כי ניתן לדעת את הטרנספירציה שעושה עץ בפרק זמן מסוים על ידי חיבור נתוני קצב זרימת המים בעצה באותו פרק זמן ולהפך.

ג. מדידת קצב זרימת המים בעצה היא מדידה אמינה ומדויקת לשיקוף מצב העץ מבחינת משטר המים. מתוך התבוננות איור 15 ניתן לראות את האופן הרציף שבו משתנה קצב זרימת המים בעצה במהלך היום. רציפות זאת חוזרת על עצמה בעצים שונים ולכן מעידה על אמינות. אמינות מדידה זאת מאפשרת להשתמש בה כבסיס ומדד יחוס לפיתוח שיטות מדידה אחרות ופשוטות יותר לביצוע, כגון מדידת תכולת מים ומדידות פיזיולוגיות שונות.

ד. מהתבוננות באיור 13 המתאר את אורך המחטים כתלות ברמת משקעים שנתית עבור רמות עקה שונות, ניתן לראות שתגובת העץ לעלייה שנתית במשקעים (2012) מתרחשת בעזרת גידול מחטים ארוכות יותר יחסית לאורכן בשנים שחונות (2011). לעומת זאת, כפי שנראה איור 12 לא הצלחנו זהות שינויים משמעותיים בתכולת המים היחסית בשנים אלו.

ה. כפי שנראה במחקר זה תכולת מים יחסית במחטים אינו משתנה משמעותית בין עצים ברמות עקה שונות ובשעות שונות של היום.

מתוך כך נראה כי מדד זה גבוה במעלה החשיבויות של העץ ולכן העץ יעבוד קשה כדי לשמור עליו יציב. במקרים של עקת מים קשה, כדי לשמור על יציבות בכמות המים של

העץ עליו לסגור פיוניות, כדי למנוע איבוד של מים (ההשפעה של התנהגות זאת מוצגת באיור 15). סגירת פיוניות מונעת קיבוע פחמן דו חמצני אשר הכרחי לקיום תהליך הפוטוסינתזה, כך שתהליך הפוטוסינתזה מעוכב ובהמשך באים לידי ביטוי גם שינויים מבניים כגון: ירידה בתכולת המים והכלורופיל בעלים וכן השרת עלים (דורמן, 2012) מכאן, שבטווח הקרוב, העץ ישמור על הישרדותו אך בד בבד תהיה ירידה בפרודוקטיביות שתוביל בסופו של דבר אפילו לתמותת העץ.

לעובדה זאת משמעות סביבתית חשובה. מאחר ולמרות שלעצים שנבחרו במחקר יש מנגנוני הסתגלות טובים למצבי יובש אולם זאת לעיתים על חשבון ירידה בפרודוקטיביות וכך ירידה או הפסקת ההתחדשות. כך ניתן לחזות כי ביערות באזורים שעוברים תהליך מדבור (כתוצאה משינויי אקלים ועוד) השינוי במצב העצים בטווח הקרוב לא יהיה משמעותי מידי, אך לאורך זמן, אם המצב ימשך, תורגש ירידה בפרודוקטיביות של העצים וכתוצאה מכך התפשטות התמותה. ירידה בהתחדשות ותמותת עצים, תוביל לאחר זמן לצמצום שטח היער ואף לחיסולו המלא (דורמן, 2012).

דוגמא למצב זה ניתן לראות ביער יתיר. יער יתיר הוא יער שנמצא באזור צחיח למחצה. רוב עצי היער, האורנים, נשתלו בשנות ה-50 של המאה ה-20 על ידי קק"ל. לאורך השנים עברו על היער מספר שנות בצורת אך בשנים האחרונות שכיחותן עלתה (5 מתוך 10 השנים האחרונות היו שונות בצורת). אומנם בשנת 2010 5% מעצי היער מתו אך למרות זאת, במבט כולל עצי היער מצליחים לשרוד מעבר למצופה, בעקבות התאמת הטובה יחסית של העץ אורן ירושלים לתנאי בצורת (ראה מבוא-1.6). אולם כאשר נבחנת ההתחדשות נמצא כי היא שואפת ל-0. אלא אם כן תהיה שתילה מלאכותית חדשה נראה שהיער עתיד להיכחד כאשר העצים שנשתלו בצורה מלאכותית ימותו. נושא זה, בהיבטיו השונים, נמצא במחקר מעמיק ומקיף בימים אלו.

4.5 הצעות לשימור קיומו של יער באזור שעובר תהליך מדבור (כדוגמת יער יתיר)

א. דילול כמות עצים ביער על ידי כריתה מבוקרת- מאחר וכל יחידת שטח ביער מקבלת כמות מסוימת של משקעים, ככל שמספר העצים בשטח קטן יותר כך לכל עץ כמות משקעים גדולה יותר. לכן, כריתת עצים מבוקרת ומתואמת למבנה ומצב החלקה, לשם

הקטנת הצפיפות תטיב עם העצים (דוח פרויקט הבצורת של המחלקה למדעי הסביבה לקק"ל, 2012).

ב. שתילה מלאכותית מושכלת- שתילת עצים בצורה המתאימה לתנאי יובש:

- I. שתילה לאחר סקר קרקע ובחינה מקיפה של בית הגידול המיועד- שתילת עצים תעשה רק לאחר בחינה מקיפה של מצב השטח כגון: סוג המסלע, כמות המשקעים, הצמחייה המקומית, שיפוע וכדומה. בחינת השטח והבנתו תאפשר לבחור את מין העץ המתאים ביותר למקום הגידול הספציפי.
 - II. שתילת עצים קטנים- עצים קטנים צורכים פחות מים מעצים גדולים, בעלי נפח גדול.
 - III. שתילת עצים שכתריהם רחבים המצלים על שאר העלווה- עצים אשר כתריהם רחבים מצלים על שאר עלוות העץ וכך מקטינים את חשיפת עלי העץ האחרים לשמש. החשיפה לשמש מגבירה את האידוי ולכן ככל שעלים רבים יותר מוצלים כך תהיה פחות התאדות.
- דוגמא לעץ כזה הוא עץ השיטה. עץ זה בעל מבנה הדומה למשולש הפוך כך שהחלק העליון הרחב מצל על שאר העץ (איור 21).



איור 21 עץ שיטה. כתרו הרחב מצל על שאר העץ.

- IV. שתילת מרווחת- שתילה מרווחת על מנת שלרשותו של כל עץ יעמוד מאגר מים קרקעי גדול יותר (בדומה לסעיף 1).

6. סיכום

בעבודת מחקר זאת בחנתי את מקומו של הפרמטר תכולת מים יחסית במחטים בהקשר של מצב העקה של העץ ביחס לשעת היום ולקצב זרימת מים בעצה. בעקבות ניתוח התוצאות הסקתי שתכולת מים יחסית במחטים הוא פרמטר אינהרנטי במערכת משק המים של העץ ומכאן שהוא אינו תלוי במצב העקה של העץ או השעה ביום, מסקנה זאת נמצא בניגוד להשערת המחקר הראשונית. לעומת זאת המדידה של זרימת קצב מוהל העצה הביאה לתוצאות שהראו שונות ניכרת בין עץ לעץ ולכן נמצאה כמתאימה יותר לסיווג רמות עקה שונות בקרב קבוצת עצים. כמו כן ההנחה שהסקנו כי תכולת מים יחסית במחטים היא קבועה מסבירה את האופן שבו כמות המים הנאבדת בעקבות הטרנספירציה שווה לכמות המים המוחזרת, על ידי העצה, מבית השורשים.

מעניין לערוך מחקרים עתידיים בנושאים הבאים:

1. הקשר בין רמת העקה בו שרוי עץ לתכולת המים הכוללת שלו.
2. הקשר בין זרימת המים בעצה לבין הטרנספירציה בעצים ברמות עקה שונות.
3. הקשר בין כמות המשקעים יומית/עונתית לבין קצב זרימת מים יומית/עונתית.

7. תודות

ראשית תודה גדולה למנחה שלי, יקיר פרייזלר, שעזר לי לאורך כל העבודה מהכרת המושגים והנושא דרך ביצוע הניסויים ועד כתיבת העבודה. הנחייתו הייתה סבלנית ומבינה, דבר שהקל והנעים את עשיית העבודה.

תודה רבה לפליקס לאוב שהאמין ביכולותיי והודות לו ניתנה לי ההזדמנות לעשות את העבודה וכך להיחשף לעולם המדע על כל יופיו ועומקו.

תודה לקבוצת המחקר של דר' דן יקיר וכן לדר' אייל רוטנברג מהמחלקה למדעי הסביבה במכון ויצמן.

תודה לאורני מרבאום סלנט, רכזת עבודות גמר של תוכנית חוקרים צעירים במכון ויצמן, וכן תודה ליהודית שטריף וגבריאלה אהרון-אחראיות עבודות גמר בבית הספר בו אני לומדת- עירוני א' תל אביב.

תודה להורי היקרים שעודדו אותי ותמכו בי לאורך כל עשיית העבודה.

8. רשימת מקורות

- א. דורמן, מ., סבוראי, ט., ופרבולוצקי, א., 2012, "התייבשות ביערות אורן ירושלים בישראל- מבט מגובה רב", אוקולוגיה וסביבה 3(3), עמודים 230-237.
- ב. רבינוביץ א. (1985). יחידות צומח העץ בחבל הים תיכוני של הארץ. רתם. 5-13: 18.
- ג. חז-יסיף, נ., 2008, " הפרדת שטף האוופוטורנסיפציה למרכיביו ביער צחיח למחצה". עבודת דוקטורט.
- ד. יער יתיר, האתר של קק"ל. http://www.kkl.org.il/forestsearch/yatir_forest.aspx.
תאריך כניסה לאתר: 7.7.13
- ה. J. J. Alarcon, R. Domingo, S. R. Green, M.J. Sanchez-Blanco, P. Rodriguez and A. Torrecillas (2000). Sap flow as an indicator of transpiration and water status of young apricot trees. *Plant and Soil* 227: 77-85.
- ו. C. D. Allen, A. K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, T. Kitzberger, A. Rigling, D. D. Breshears, E.H. Hogg, P. Gonzalez, R. Fensham, Z. Zhang, J. Castro, N. Demidova, J. H. Lim, G. Allard, S. W. Running, A. Semerci, N. Cobb (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. 259 (4), 660-684.
- ז. W. B. Critchfield, E. L. Little (1966). *Geographic Distribution of the Pines of the World*. Miscellaneous Publication 991. Berkeley University, California. Page 12.
- ח. N. Dudley, J. P. Jeanrenaud and F. Sullivan (1995). *Bad harvest? The timber trade and the degradation of the world's forests*. Earthscan Publishers in association with WWF, London.
- ט. D. R. Edwards and M. A. Dixon (1995). Mechanisms of drought in Thunja Occidentalis L. II. Post-conditioning water stress and stress relief. *Tree Physiology* 15, 129-133.
- י. M. Malagnoux, E. H. Sene and N. Atzmon (2007). *Forests, trees and water in arid lands: a delicate balance*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
<http://www.fao.org/docrep/010/a1598e/a1598e06.htm>. 7.9.13 כניסה לאתר:

- יא. Y. Preisler, E. Rotenberg, L. Korol, N. Herr and D. Yakir (2012). Survey of tree mortality In Yatir forest. דוח פרויקט הבצורת של מכון ויצמן ל"לקק" ל
- יב. R. C. knight (1917). The Interrelations of Stomatal Aperture, Leaf Water-content and Transpiration Rate. *Annals of Botany* 10-31(2): 221-240.
- יג. W. Larcher (2003). *Physiological plant ecology-fourth edition-chapter 4*. Published by Springer. Germany.
- יד. G. schiller (2011). *Forest Management and Water Cycle - The Case of Yatir Forest*. Springer Netherlands, 163-186.
- טו. K. V. D. Schueren (2011). *The Art of Instruction -Plat 70*. Chronicle Books, San Francisco.
- טז. G. E. Taylor JR, D. Johnson and C. P. Andersen- AIR POLLUTION AND FOREST ECOSYSTEMS: A REGIONAL TO GLOBAL PERSPECTIVE. *ECOLOGICAL APPLICATIONS* 4(4), 1994, p.p 662-689.
- יז. Weizmann Reseach site of the Yatir forest research group-
http://www.weizmann.ac.il/ESER/People/Yakir/YATIR/pages/research_site_location.htm

9. נספחים

9.1 תוצאות גולמיות

9.1.1 ניסוי 1

איור 22 תכולת מים יחסית במחטים (באחוזים) של ארבעת קבוצות העצים (לפי רמות עקה), לפי שנות צימוח 2011 ו-2012 וכולל שגיאת תקן וסטטיית תקן.

total average

tree number	year	RWC (%)	SE	stdev
1	2011	48.31886	14.52083	29.04167
2	2011	47.66893	5.416493	10.83299
3	2011	50.76215	2.137077	4.274154
4	2011	57.10206	3.329966	6.659932
1	2012	62.68345	3.537389	7.074778
2	2012	56.6122	3.069028	6.138057
3	2012	51.47959	2.702714	5.405428
4	2012	59.10848	5.153185	10.30637

9.1.2 ניסוי 2

איור 23 תכולת מים יחסית במחטי שלושת קבוצות העצים (לפי רמות עקה) לאורך שעות היום

RWC	1		2		3	
time	5	38	mean 5 38	75	45	mean 5, 38,45,75
7.00	71.47498	75.14155	73.308268	70.23207	58.65735115	68.87648873
8.00	78.59136	60.07332	69.332344	74.86792	61.27124908	68.70096548
9.00	51.18243	76.42767	63.805053	61.37141	70.00835422	64.74746716
10.00	74.24063	64.39765	69.31914	54.6635	51.57019704	61.21799357
11.00	48.1537	78.85542	63.504562	71.49685	67.61141152	66.52934626
12.00	48.22232	49.73714	48.979733	68.23391	64.54821308	57.68539612
13.00	74.55064	54.59448	64.57256	70.97518	73.28818661	68.35212156
14.00	70.09422	72.2276	71.160913	68.92496	69.68286296	70.23241307
15.00	73.98742	52.11921	63.053311	68.49564	64.88178025	64.87101156
16.00	51.67955	62.92268	57.301115	59.45622	59.47965679	58.38452794
17.00	85.3914	74.60162	79.996509	65.89199	71.01449275	74.22487466
18.00	88.06486	77.44511	82.754984	78.76035	48.28592268	73.13906106
19.00	78.41031	59.17313	68.791719	71.1317	63.1468897	67.96550634

איור 24 קצב זרימת המים בעצה (בליטר לשעה לעץ) של שלושת קבוצות העצים (לפי רמות עקה) לאורך שעות היום

S-f	1	2	3
time	mean 5,38	75	45
7.00	0.1186	0.06051	0.378419
7.50	0.1216	0.112996	0.546556
8.00	0.0986	0.190573	0.718961
8.50	0.0919	0.298401	0.890593
9.00	0.1001	0.442577	0.924198
9.50	0.1583	0.630583	1.364919
10.00	0.1724	0.710768	1.842007
10.50	0.2225	0.809314	2.230994
11.00	0.2606	0.882075	2.553484
11.50	0.2806	0.925944	2.759595
12.00	0.2736	0.95483	3.159841
12.50	0.3060	1.000213	3.427579
13.00	0.3151	1.046528	3.582791
13.50	0.3323	1.127648	3.852221
14.00	0.3629	1.107937	3.641362
14.50	0.3738	1.038517	3.152129
15.00	0.3433	1.052339	2.696953
15.50	0.3074	1.00057	2.720412
16.00	0.2834	1.030518	2.581574
16.50	0.2654	0.947297	2.50588
17.00	0.2127	0.882312	1.437383
17.50	0.2139	0.774892	1.010952
18.00	0.2278	0.659126	0.687533
18.50	0.2078	0.537486	0.458063
19.00	0.1883	0.436439	0.347049
ממוצע	0.2336	0.746416	1.978858