

**אפיון כימי ופיזיקלי של סוגי אפר פחם תחתי מנופה
ופיתוח השימוש בו כמצע לגידול צמחים**

דו"ח מסכם

מוגש

לחברת "מצעים חקלאיים בע"מ"

ע"י

פרופ' יונה חן

צלה אביעד

אורי מגדל

תוכן עניינים

עמוד

3	א. מבוא ורקע מדעי
5	ב. מטרות המחקר
5	ג. חומרים
6	ד. שיטות הבדיקה
9	ה. תוצאות
9	אנליזה כימית של תמיסת המיצוי המיימי
16	שטיפה בעמודות עם תמיסת דשן
21	צפיפות חלקיקים, צפיפות גושית, נקבוביות
22	עקומי תאחיזה במתחים נמוכים
27	מוליכות הידראולית ברוויה
28	גידול בזיל וכרוב סיני
38	ו. סיכום
39	ז. רשימת ספרות

א. מבוא ורקע מדעי

הפחם הולך ומהווה מרכיב מרכזי כמקור אנרגיה זול יחסית במדינות מערביות רבות. בישראל, פועלות שתי תחנות גדולות לייצור חשמל המשתמשות בפחם כמקור אנרגיה בלעדי. השימוש בפחם לייצור אנרגיה כרוך בהתהוות בעיה חמורה בתחום סילוק הפסולת. כ- 80% מהאפר המתהווה נקרא "אפר מרחף" (Fly ash) ואילו יתרת החומר היא "אפר תחתי" (לעיתים מכונה "אפר תחתית") (Bottom ash).

במקומות שונים בעולם ובמיוחד בארה"ב משמש אפר הפחם המרחף כחומר למילוי מכרות פחם עיליים (Strip mines), אשר בסופו של תהליך עוברים השבחה מתוך שאיפה להחזרתם למצב של שטחים חקלאיים רגילים. תהליך זה כרוך בבעיות רבות בתחומי הפיזיקה והכימיה של הקרקע שלא כאן המקום לדון בהם. בישראל, בהעדרם של מכרות פתוחים על פני השטח, משתמשים באפר המרחף בעיקר בתעשיות המלט, ותשתית כבישים. חומר עודף גורם לבעיות חמורות של סילוק לאתרים ספציפיים, שהשגת הרישוי עבורם הוא תהליך בעייתי ביותר.

אפיק מבטיח למיחזור אפר פחם תחתי הוא השימוש בו כמצע גידול לצמחים בחממות. השימוש בחומר למטרה זו מחייב הבנה יסודית של התכונות הפיזיקליות והכימיות של האפר. גודל החלקיקים חייב להיות בתחום אופטימלי, כאשר ריכוז גבוה של חלקיקים דקים (קטנים מ-0.1 או 0.2 מ"מ) איננו רצוי. התפלגות גודל החלקיקים תקבע את יחסי האויר והמים שיווצרו במצע בתנאי החממה.

לאפר הפחם תכונות כימיות שלעיתים אינן רצויות לצמחים ואשר עלולות לגרום לרעילות. בין היסודות הרעילים לצמחים בולטים במיוחד אלומיניום, ניקל, קדמיום ובורון, אך תתכן נוכחות של יסודות נוספים, ובמיוחד מתכות השייכות לקבוצת האוקסי-אניונים (As, Cr). מסיסותם של אלה באפר התחתי (אשר את התאמתו לשמש מצע גידול צמחים ברצוננו לבחון, היא נמוכה בסוגי אפר אותם בחנו עד כה, אולם נדרשת בדיקה תקופתית של הערכים המתקבלים בשל השינויים התקופתיים במקור חומר הגלם.

אפר הפחם נוסה במדינות שונות במספר קטן של ניסויים כמצע גידול לצמחים בתנאי שדה (3, 4, 5, 6), או כמצע לגידול צמחים בחממות (7, 10, 11). במרבית הניסויים דווח על קשיים, אם כי מסתמנות גם הצלחות בודדות (9). במחקרים שערכה קבוצת המחקר שלנו בפקולטה לחקלאות באפר פחם תחתי ממקורות תעשייתיים (1, 11, 13, 14, 15, 16, 17) ובאפר מתחנות הכוח של חברת החשמל (17, 18, 19, 20), נמצא שניתן להשתמש באפר לאחר ערבובו בקומפוסט של פסולת חקלאיות מסוימות כמצע לגידול ירקות וצמחי בית. התוצאות שהתקבלו בכל הניסויים אינן נופלות מאלו שהתקבלו בתערובות דומות של טוף, ולעיתים אף נמצאו טובות יותר.

במחקר זה נבחן אפר תחתי מנופה או גרוס - על פי המפרט של חברת "יעקב לוינ' ובניו בע"מ", בתוספת של קומפוסטים אורגניים - כמצע לגידול צמחים. קומפוסטים כאלה הוכנסו לשימוש בישראל ע"י צוות מחקר בראשות פרופ' י. חן. איכותם גבוהה במיוחד, לאור תכונותיהם הכימיות והפיזיקליות המאפשרות תנאים מיטביים במצע, וכן עקב פעילותם בדיכוי מחלות קרקע, ומחירים הסביר. הערך המוסף המתקבל מערבוב אפר פחם עם קומפוסט אורגני, נובע בין השאר מיכולתו של החומר האורגני לספוח ולקשור בורון (12) ויסודות רעילים אחרים ובכך למנוע את נזקייהם. בנוסף לכך, הקומפוסט עשוי לעודד התפתחות צמחים בשל מכלול תכונות הנקראות "עידוד גידול" (IGR), וכן לסייע כאמור, בדיכוי המחלות.

בנוסף לגידול צמחי בית וירקות ניתן יהיה להציע חומר זה לגידול צמחים שונים בתעלות, כגון ורדים וציפורן בחממות, או לגידול בתעלות או ערוגות מוגבהות, בשטחים פתוחים (למשל – בנקציה). בגידולים הללו מקובלת טכניקה של יצירת תעלות בקרקע, ציפוי ביריעת פלסטית ומילוי התעלה (או הערוגה) בטוף כמצע גידול. מוצע להשתמש באפר הפחם כאלטרנטיבה לחומר זה, אם יוכח שהוא באיכות דומה. שימוש אפשרי חשוב במצע אפר הפחם הוא לגידולים חסויים של ירקות שונים, ענף הנמצא בהתפתחות מהירה בישראל. אינפורמציה נוספת הראויה לבחינה, היא הנחתו של האפר בתעלות הזנה או בשרוולי הזנה, לצדה של שורת עצי מטע, לצורך הספקת המים, חומרי הדשן והחמצן.

יצוין שיכול להיווצר בשוק יתרון יחסי לאפר הפחם בהשוואה לטוף בשל מיקומו של מפעל ההכנה וההפרדה בהשוואה למקום מקור הטוף (רמת הגולן). יתרון נוסף נובע כמובן מן העובדה שאפר פחם הינו מטרד סביבתי הדורש השקעת כספים לשם סילוקו.

מצע מנותק לגידול צמחים בשדה או בחממה צריך להיות בעל תכונות פיזיקליות, כימיות, וביולוגיות

מיטביות. העיקריות שבהן:

א. התכונות הפיזיקליות:

1. תאחיזה גבוהה של מים זמינים לצמח.
2. תכולת אויר גבוהה כבר במתחי מים נמוכים.
3. התפלגות גודל חלקיקים שתאפשר קיומן במקביל של התכונות 1+2.
4. צפיפות גושית שתספק מצע קל משקל מחד, ויכולת עיגון יציב לצמח מאידך.
5. נקבוביות כללית גבוהה.
6. מוליכות הידראולית גבוהה לצורך ניקוז יעיל.

ב. תכונות כימיות:

1. קיבול קטיונים חליפים גבוה.
2. רמת יסודות הזנה סבירה ויכולת הספקתם לצמח.
3. כושר בופר ויכולת שמירה אחידה של pH.
4. רמת מלחים נמוכה.

ג. תכונות ביולוגיות ואחרות:

1. נקיון מעשבים ומחלות.
2. היכולת להכין מצע אחיד לאורך זמן.
3. מחיר זול.
4. נוהות בערבוב.

קשה ביותר למצוא מרכיב מצע בודד אשר יענה על כלל הדרישות האלו ולכן יש להתאים תערובות שונות למגוון צמחים נרחב, בהתאם לדרישות הצמח ותכונות המצע. לצורך התאמתו של חומר כלשהו לשמש כמרכיב במצע מנותק יש להכיר היטב את תכונותיו הפיזיקליות והכימיות.

ב. מטרות המחקר

1. איפיון כימי ופיזיקלי של אפר תחתי שמקורו במפעל הניפוי של "יעקב לוינ ובניו בע"מ".
2. בחינת התאמתן של התכונות הכימיות והפיזיקליות של אפר הפחם התחתי למצע לגידול צמחים.
3. בחינת התאמתן של התכונות הכימיות והפיזיקליות של אפר פחם תחתי בתערובת עם קומפוסט של פסולות אורגניות ממקור חקלאי, למצע לגידול צמחים.
4. בחינת התאמת אפר הפחם כמרכיב בודד או בתערובת עם קומפוסט, כמצע לגידול צמחי-בית וירקות במערכות של גידולים חסויים.

ג. חומרים

רשימת החומרים שנמסרו לבדיקה

1. אפר תחתי דק (להלן "רפודית"; 2 מ"מ <).
2. אפר תחתי מנופה עדין (להלן "מצעית" 2-9 מ"מ).
3. אפר תחתי מנופה גס (8-25 מ"מ).
4. ריפודית עם קומפוסט קדרון.
5. מצעית עם קומפוסט קדרון.
6. טוף דק (בגודל חלקיקים דומה ל"מצעית").
7. טוף בינוני (2-8 מ"מ)(בגודל חלקיקים דומה ל"מצעית").
8. טוף דק בתערובת עם קומפוסט (כמו בסעיף 4).
9. טוף בינוני בתערובת עם קומפוסט (כמו בסעיף 5).
10. טוף M (טוף מסחרי המשמש כמצע לגידול).

התערובות הן ביחס של: 70% מהנפח חומר אנאורגני (אפר או טוף), ו- 30% קומפוסט.

ז. שיטות הבדיקה

א. אנליזה כימית של תמיסת מיצוי המימי (יסודות מקרו, יסודות מיקרו, ויסודות נדירים)

בוצעה אנליזה כימית של תמיסת מיצוי מימי הכוללת בדיקת pH, מוליכות חשמלית, בדיקת יסודות ההזנה (מאקרו ומיקרו) ובדיקת ריכוזיהם של יסודות נדירים כולל מתכות כבדות הידועות כרעילות לצמח ולאדם. מכל חומר נלקחו שתי דוגמאות אשר טולטלו ביחס משקלי מוצק:תמיסה של 5:1 למשך שעתיים. בתום הטלטול סורכזו הדוגמאות וסוננו בפילטר מסוג Whatman מס. 42. בתמיסת המיצוי נבדקו ה- pH, והמוליכות החשמלית (מד pH תוצרת חברת Metrohm ומד-מוליכות מתוצרת Radiometer), ריכוז החנקן וריכוז היסודות בתמיסה. ריכוזי היסודות נבדקו במכשיר ICP-AES מתוצרת חברת Spectro, למעט חנקן (NO_3) שנבדקה באלקטרודה ספציפית לחנקן מתוצרת Radiometer.

ב. שטיפה בעמודות ומעקב אחר רמת החנקן, האשלגן, הזרחן, הבורון, ה- pH והמוליכות החשמלית, בתלות בנפחי השטיפה

חומר הושם בעמודה דרכה הוזרמה תמיסה שהכילה דשן ("שפר 538") בריכוז של 1.5 סמ"ק לכל ליטר מים (כמות המקובלת בגידול ירקות במצעים מנותקים), בקצב קבוע של כ- 60 סמ"ק לשעה. התשטיפ נאסף במבחנות, ונבדקו בו המוליכות החשמלית ה- pH, וכן ריכוזי החנקן, האשלגן, הזרחן והבורון, בשיטות הבדיקה המתוארות בסעיף א'.

ג. צפיפות חלקיקים

צפיפות החלקיקים הינה מסת חומר יבש ליחידת נפח חומר (ללא הנקבובים), מבוטאת ב- ג'ס"מ³. נפח החלקיקים מחושב מתוך מדידת נפח המים הנדחק על-ידי הדוגמה.

ד. צפיפות גושית

הצפיפות הגושית, הינה צפיפות החומר כולל הנקבובים מבוטאת ב- ג'ס"מ³, ערך זה נקבע על-ידי מדידת מסה של דוגמה הנתונה בנפח ידוע. המסה נקבעת על-ידי שקילת הדוגמה ונפחה מחושב לפי נתוני כלי המדידה.

ה. נקבוביות כללית.

הנקבוביות הכללית היא הנפח שאינו תפוס על-ידי מוצק, כלומר תפוס על-ידי מים או אוויר- "הזורמים" במצע. הנקבוביות הכללית מחושבת מנתוני הצפיפות הגושית, וצפיפות החלקיקים של החומרים השונים, על-פי הנוסחה:

$$N = \left(1 - \frac{d_b}{d_s}\right) * 100$$

כאשר d_b = הצפיפות הגושית ו- d_s = צפיפות חלקיקים, ו- N = נקבוביות.

ו. עקומי תאחיזה במתחים נמוכים (0-100 מיליבר)

עקום התאחיזה נמדד על גבי ארגו חול במערכת של Sand Box Apparatus מדגם 08.03 מתוצרת Eijkelkamp. בשיטה זו שמים את הדוגמאות בתוך גלילים בגודל אחיד על גבי משטח חול המכוסה במים, כך שהמצב התחילי של הדוגמאות הוא רוויה. בהדרגה מפעילים מתח על הדוגמאות על-ידי הורדת עמוד המים כלפי מטה. בכל נקודת גובה של עמוד המים, נשקלו הדוגמאות מדי יום, עד לקבלת מצב שווי-משקל. בתום התהליך (לאחר יצירת מתח של 100 סנטיבר) הדוגמאות יובשו, ונקבע המשקל היבש של החומר בכל גליל. מתוך הנתונים שנמדדו מחושבת תכולת הרטיבות בכל נקודת מתח, ומשורטט עקום המתאר את תלות אחוז הרטיבות הנפחי במתח המים המופעל - קרי, עקום התאחיזה. נבדק עקום התאחיזה של חומרי המצע והתערובות כמפורט ברשימת החומרים.

ז. מוליכות הידראולית ברוויה

המוליכות ההידראולית (K) מתארת את יכולת זרימת המים בקרקע או במצע הגידול, והיא משתנה בהתאם לסוג הקרקע/מצע ולאחוז הרטיבות הקיים במצע נתון. זהו ערך המבטא את מקדם הפרופורציה בין השטף (ספיקה/שטח הזרימה) ובין הגרדיאנט ההידראולי ומבוטא ביחידות של אורך/זמן.

המוליכות ההידראולית ברוויה, מצביעה על יכולת ניקוז המים במשך ההשקיה, והינה ערך המסייע בקביעת הספיקה הרצויה, תדירות ההשקיה, ומנת ההשקיה המתאימה.

$$q = \frac{Q}{A} = K \frac{\Delta H}{L}$$

כאשר q = שטף המים (ס"מ/שניה), Q = ספיקת המים (ס"מ³/שניה), A = שטח החתך של הקרקע בניצב לכיוון הזרימה (ס"מ²), ΔH = הפרש העומד בין שתי הנקודות (ס"מ), L = המרחק בין שתי הנקודות (ס"מ) ו- K = מקדם הפרופורציה, הערך המכונה מוליכות הידראולית (להב וחובריו, 1999).

מהלך הבדיקה: חומר המצע נארז בעמודה דרכה הוזרמו מים. המים נאספו במבחנות בפרק זמן מדוד. חישוב הספיקה נעשה על-ידי חלוקת נפח המים במשך זמן הזרימה. נמדד גובה המצע בעמודה, ונשמר עומד קבוע של מים מעליה. חישוב ערך המוליכות ההידראולית ברוויה נעשה על סמך חוק דרסי שהוצג לעיל.

ח. גידול בזיל וכרוב סיני

שתילים של בזיל (*Ocimum basilicum*) וכרוב סיני (*Brassica rapa var. pekinensis*), נשתלו בעציצים בנפח 0.6 ליטר.

בכל ניסוי נכללו 5 טיפולים:

1. "מצעית" - אפר תחתי מנופה עדין (2-9 מ"מ)

2. תערובת של מצעית עם קומפוסט קדרון.

3. תערובת של אפר תחתי דק ("ריפודית") עם קומפוסט קדרון.

4. טוף M (0-8 מ"מ).

5. תערובת של טוף M עם קומפוסט קדרון.

התערובות הוכנו ביחס נפחי של 70% חומר אנאורגני ו-30% קומפוסט.
בכל טיפול נכללו 10 חזרות אשר הוצבו על פני שולחנות בחממת הגידול בפיזור אקראי, כדי להמנע ככל שניתן מהטייה בתוצאות בשל חוסר אחידות בתנאי הסביבה בחממה.
משטר השקייה בחממה היה אחיד: חמש השקיות ביום.
5 ימים ממועד שתילת הבזיל ו-12 ימים משתילת הכרוב הוסף דשן ("שפר 538") בריכוז 1.5 ליטר למ³ מי ההשקייה. הדשן ניתן באופן שוטף בכל השקייה.
אחת למספר ימים נאסף נקז מדוגמאות הטיפולים השונים, ובאלו בוצעה אנליזה כימית לבדיקת המוליכות החשמלית, ה-pH, וכן ריכוזי הנקה, זרחן, אשלגן ובורון בשיטות המתוארות בבדיקה בסעיף א'.
בסיום הניסוי, (בזיל - 23 יום משתילה וכרוב 30 יום ממועד השתילה), נקצרו הצמחים ונמדד המשקל היבש שלהם. בוצע מבחן סטטיסטי - "Tukey-Kremer", ברמת מובהקות של 5% ($\alpha=0.05$). לקביעת השונות בין הטיפולים.

ה. תוצאות

אנליזה כימית של תמיסת מיצוי המימי

נתוני המוליכות החשמלית וה-pH של המיצוי המימי מוצגים בטבלה 1.

(המיצוי נעשה ביחס משקלי של 1:5 מים מזוקקים: מוצק)

טבלה 1 – ה-pH, והמוליכות החשמלית בתמיסת המיצוי המימי.

מצע הגידול	pH	EC
		dsim/m
"ריפודית" (אפר דק)	6.7	0.66
"מצעית" (אפר בינוני)	7.0	0.42
אפר חיפוי	7.4	0.34
"ריפודית" + קומפוסט	7.0	4.57
"מצעית" + קומפוסט	7.3	6.33
טוף דק (> 2 מ"מ)	6.7	0.06
טוף בינוני (< 2 מ"מ)	6.8	0.04
טוף דק + קומפוסט	7.2	3.22
טוף בינוני + קומפוסט	7.4	5.69
קומפוסט קדרון	7.2	14.30
קומפוסט חצרים	6.9	9.43

רמת ה-pH בכל המצעים הינה בתחום נוח ביותר לגידול של מרבית הצמחים. המוליכות החשמלית מצויה במתאם טוב עם ריכוז היונים המצויים בתמיסה (כפי שמוצגים בהמשך בטבלה 2). המוליכות החשמלית של הקומפוסט היא גבוהה במיוחד, ותרומתה באה לידי ביטוי בתערובות המכילות קומפוסט. מוליכות חשמלית גבוהה, המעידה כאמור על ריכוז גבוה של היונים השונים – דהיינו "המליחות של המצע", אינה מיטיבה עם צמחים הגדלים במצע, במיוחד בשלבי הגידול הראשונים. שטיפה במים, מספיקה בד"כ להרחיק את עודפי המלח, בחומר שעבר תהליך קומפוסטציה מלא ואינו עובר תהליכי התפרקות נוספים. לאחר השטיפה מתאפשר גידול תקין של צמחים במצע. נפח השטיפה הדרוש הוא בד"כ בין נפח נקבובים אחד לשניים, בהתאם לרמת המליחות התחילית, וזו משתנה בין סוגי הקומפוסט. הכמות המספקת נקבעת על-ידי מדידת המוליכות החשמלית של מי התשטוף. התייצבות על ערך נמוך וקבוע מצביעה על מצב מצע המתאים לתחילת גידול (זריעה או שתילה). במידה והמוליכות החשמלית אינה מתייצבת על ערך נמוך וקבוע, יש חשש כי החומר אינו מפורק דיו, ובשל המשך תהליך הפירוק, מתקיים שחרור

מתמיד של מלחים. כהמלצה לחברה – ראוי לציין כי יש להשתדל לרכוש קומפוסט דל יחסית במלחים לצרכי עירבוב עם האפר. רמה גבוהה כל-כך של מלחים, כפי שנמצאה בקומפוסט קדרון, וגם בקומפוסט מחצרים, מעידה על רמת פירוק גבוהה מן הדרוש של החומר האורגני בקומפוסט.

ריכוז יסודות המקרו בתמיסת המיצוי מוצג בטבלאות 2 ו-3 (מ"ג/ל' ו- מא"ק/ל', בהתאמה).

טבלה 2 – ריכוזי יסודות המקרו בתמיסת המיצוי (יחס מיצוי משקלי של 1:5 מים:מוצק) - מבוטאים בח"מ.

SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	PO ₄ ²⁻	K ⁺	N-NO ₃ ⁻	מצע הגידול
מ"ג/ל'							
232	27	9	83	0.8	6	9	ריפודית (אפר דק)
144	12	8	54	1	2	6	מצעית
124	8	6	46	1	4	3	אפר חיפוי
605	266	44	64	8	735	977	ריפודית+ קומפוסט קדרון
961	538	100	85	19	1162	1813	מצעית+קומפוסט קדרון
7	6	1	3	2	6	11	טוף דק (> 2 מ"מ)
5	3	1	1	2	4	6	טוף בינוני (< 2 מ"מ)
318	218	32	41	15	504	960	טוף דק+קומפוסט קדרון
729	494	68	72	23	1027	1770	טוף בינוני +קומפ קדרון
1743	937	179	175	15	2377	4404	קומפוסט קדרון
1282	645	129	261	30	1276	4249	קומפוסט חצרים

טבלה 3 – ריכוזי יסודות המקרו בתמיסת המיצוי (יחס מיצוי משקלי של 1:5 מים:מוצק) – מבוטאים במא"ק/ל'.

SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	PO ₄ ²⁻	K ⁺	N-NO ₃ ⁻	מצע הגידול
מא"ק/ל'							
4.8	1.2	0.7	4.1	0.02	6	0.6	ריפודית (אפר דק)
3.0	0.5	0.6	2.7	0.02	2	0.4	מצעית
2.6	0.3	0.5	2.3	0.02	4	0.2	אפר חיפוי
12.6	11.6	3.6	3.2	0.16	735	69.8	ריפודית+קומפוסט קדרון
20.0	23.4	8.2	4.2	0.41	1162	129.5	מצעית+קומפוסט קדרון
0.1	0.3	0.1	0.1	0.05	6	0.8	טוף דק (> 2 מ"מ)
0.1	0.2	0.1	0.1	0.04	4	0.4	טוף בינוני (< 2 מ"מ)
6.6	9.5	2.6	2.1	0.32	504	68.6	טוף דק+קומפוסט קדרון
15.2	21.5	5.6	3.6	0.48	1027	126.5	טוף בינוני+קומפ קדרון
36.3	40.8	14.7	8.7	0.32	2377	314.6	קומפוסט קדרון
26.7	28.1	10.6	13.1	0.63	1276	303.5	קומפוסט חצרים

ריכוזי החנקת, האשלגן, והזרחן בתמיסות המיצוי של החומרים האנאורגנים הם נמוכים ביותר. הריכוזים הגבוהים של החנקן החנקתי בשני סוגי הקומפוסט מעידים על כך שהם עברו קומפוסטציה מלאה, קרוב לוודאי בתהליך ממושך יתר על המידה. ריכוזי האשלגן במיצוי המימי הם גבוהים במיוחד בחומרים האורגניים, ומקורם ככל הנראה, בחומרי המוצא שלהם. ריכוזי היונים הללו בתערובות מושפעים במיוחד מתרומת הקומפוסטים. גם המקור העיקרי לנתרן, סידן, מגניזיום, וגפרית הוא הקומפוסט, עם זאת חשוב לציין כי תהליך השטיפה שלפני השתילה הנחוץ על מנת למנוע נזקי המלחה, יגרום גם לשטיפה של חלק ניכר מיסודות אלו, ובהמשך הגידול יידרש תגבור ביסודות הזנה על-ידי דישון. בדיקת קצב הדחיקה של עודפי המלחים ניתנת בהמשך, בפרק העוסק בשטיפת החומרים השונים בתמיסה המכילה דשן תוך מעקב אחר המוליכות החשמלית, ה-pH, וריכוזי החנקת, האשלגן, הזרחן והבורון.

ריכוזי יסודות המיקרו הדרושים לגידול תקין של צמחים, בתמיסת המיצוי המימי, מוצגים בטבלה 4.

טבלה 4 – ריכוזי יסודות המיקרו בתמיסת המיצוי המימי (יחס מיצוי משקלי של 1:5 מים:מוצק).

Cu^{2+}	Mn^{2+}	Zn^{2+}	Fe^{2+}	
מ"ג/ל'				
0.00	0.09	0.00	0.00	ריפודית
0.00	0.06	0.00	0.00	מצעית
0.00	0.13	0.00	0.00	אפר חיפוי
0.00	0.01	0.01	0.13	דק+ קומפוסט קדרון
0.09	0.00	0.06	2.13	מצעית+קומפוסט קדרון
0.00	0.00	0.02	2.74	טוף דק (> 2 מ"מ)
0.00	0.00	0.00	1.20	טוף בינוני (< 2 מ"מ)
0.05	0.01	0.04	0.58	טוף דק+קומפוסט קדרון
0.06	0.00	0.04	0.64	טוף בינוני +קומפ קדרון
0.05	0.00	0.05	0.50	קומפוסט קדרון
0.10	0.00	0.10	1.02	קומפוסט חצרים

ריכוזי הברזל, האבץ והנחושת במיצוי המימי של אפר הפחם לסוגיו, נמוכים ביותר. ריכוזיהם במיצוי של הקומפוסט גבוהים במעט, אולם יתכן כי שטיפה ראשונית של החומר לדחיקת עודפי המלחים, תביא גם לדחיקת יסודות אלה. משום כך, להבטחת הזנה מספקת ביסודות המיקרו בתערובות המכילות רכיבים אלו, תידרש אספקה שלהם עם מי ההשקייה.

בנוסף לריכוזי יסודות ההזנה, נבדקו גם ריכוזיהם של יסודות נדירים, שבחלקם ידועים כיסודות רעילים לצמחים, לבע"ח, ולבני אדם. הצורך לבדוק את ריכוזיהם במיצוי המימי מקורו בעובדה שאפר פחם (בייחוד האפר המרחף) מכיל ריכוזים גבוהים של יסודות רעילים.

בטבלה 5 מוצגים ריכוזי היסודות הנדירים שריכוזיהם בתמיסת המיצוי עולים על הריכוזים הניתנים לבדיקה במכשיר ה-ICP (שצוין בפרק החומרים והשיטות). יסודות נדירים אחרים ריכוזיהם היו נמוכים מסף הרגישות (ה-LOD) Limit Of Detection.

טבלה 5 - ריכוזי היסודות הנדירים בתמיסת המיצוי המימי (יחס מיצוי משקלי 1:5 מים:מצע).

Sr²⁺	Li⁺	Ba²⁺	B	Al³⁺	מצע הגידול
מ"ג/ל'	מ"ג/ל'	מ"ג/ל'	מ"ג/ל'	מ"ג/ל'	
1.67	0.38	0.10	0.64	0.10	ריפודית
1.07	0.10	0.08	0.17	0.09	מצעית
1.27	0.07	0.12	0.61	0.14	אפר חיפוי
0.50	0.22	0.03	0.67	0.12	ריפודית+קומפוסט קדרון
0.14	0.04	0.00	0.57	0.39	מצעית+קומפוסט קדרון
0.04	0.00	0.01	0.02	5.63	טוף דק (> 2 מ"מ)
0.00	0.00	0.00	0.02	2.47	טוף בינוני (< 2 מ"מ)
0.38	0.00	0.01	0.27	0.54	טוף דק+קומפוסט קדרון
0.21	0.00	0.00	0.51	0.31	טוף בינוני+קומפ קדרון
0.71	0.00	0.00	0.89	0.31	קומפוסט חצרים
0.24	0.00	0.00	0.80	0.26	קומפוסט קדרון

ריכוזי היסודות : Ag, As, Cd, Co, Cr, Hg, Ni, Pb, Se הם נמוכים ביותר (מתחת ליכולת המדידה של המכשיר).

הריכוזים המקסימליים המותרים (במבוטאים בח"מ) במי שתיה ובמי השקייה לפי תקנים שונים, מוצגים בטבלה 6.

טבלה 6 – ריכוזי סף מותרים של יסודות שונים במי שתייה ובמי השקייה.

(5)	(4)	(3)	(2)	(1)	יסוד	
מי השקייה (מ"ג/ליטר)	מי שתייה (מ"ג/ליטר)	מי שתייה (מ"ג/ליטר)	מי שתייה (מ"ג/ליטר)	מי שתייה (מ"ג/ליטר)	כסף	Ag
	0.01		0.1	0.01	ארסן	As
	0.05	0.01	0.05	0.05	בורון	B
0.75					בריום	Ba
	0.1	2.0	2.0	1.0	בריליום	Be
0.1		0.004	0.004		קדמיום	Cd
0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	כרום	Cr
0.1	0.05	0.1	0.1	0.05	כספית	Hg
	0.001	0.002		0.001	מוליבדן	Mo
0.01					ניקל	Ni
0.2				0.05	עופרת	Pb
5.0	0.05	0.015	0.015	0.01	סלניום	Se
	0.01	0.05	0.05	0.01	אנטימוני	Sb
		0.006	0.05		תליום	Tl
		0.002	0.002			

(1) לפי תקן ישראלי לאיכות מי שתייה (1994)

(2) לפי EPA 1992 מתוך "Water Quality"

(3) לפי USEPA מתוך (Pontius E.W, 2003) Drinking Water Regulation and Health

(4) לפי תקן השוק האירופי (EEC)

(5) לפי תקן EPA (1973)

ריכוזי מרבית היסודות הנדירים, וביחוד אלו המוגדרים כרעילים (טבלה מס. 6) הם נמוכים ביותר (מתחת לסף הרגישות של המכשיר) – בכל המצעים והתערובות.

ריכוז האלומיניום (Al) במיצוי המימי של אפר פחם ותערובותיו נמוך ביותר. הריכוז המצוי בתמיסת המצוי של הטוף גבוה יותר, אולם יסוד זה אינו נחשב רעיל ברמות אלו. ריכוז הבריום (Ba) נמוך במיוחד במיצוי של הטוף, וגבוה יותר בשאר החומרים, אולם ערכיו מצויים עדיין בתחום המותר במי שתייה, לפי התקנים השונים. יש לציין כי הרעילות של הבריום לבע"ח היא נמוכה, ומומלץ בארה"ב לכלול רמה של 0.75 מ"ג ביום של יסוד זה במזונות היומיים. ריכוז הליתיום (Li) גבוה יותר בתמיסות המיצוי שמקורן בדוגמה שהכילה אפר פחם, לעומת מיצויים שמקורם בטוף, בהם הרמה נמוכה ביותר. הליתיום אינו נחשב יסוד רעיל לבני אדם, וכאשר נצרך בכמות גדולה, הוא מופרש בשתן. יתרה מכך, הליתיום משמש כמרכיב בתרופות המסדירות מחלות נפשיות ובעיות בפעולה של בלוטת התירוואיד. ריכוז הסטרונציום (Sr) גבוה יחסית באפר ביחס לשאר החומרים, אולם בתערובות הטוף והאפר עם הקומפוסט, הריכוז דומה מאוד. יסוד זה אינו נחשב רעיל לבע"ח ואין תקן לרמה מכסימלית מותרת. דרוש ריכוז גדול ביותר של יסוד זה על מנת לגרום להרעלה.

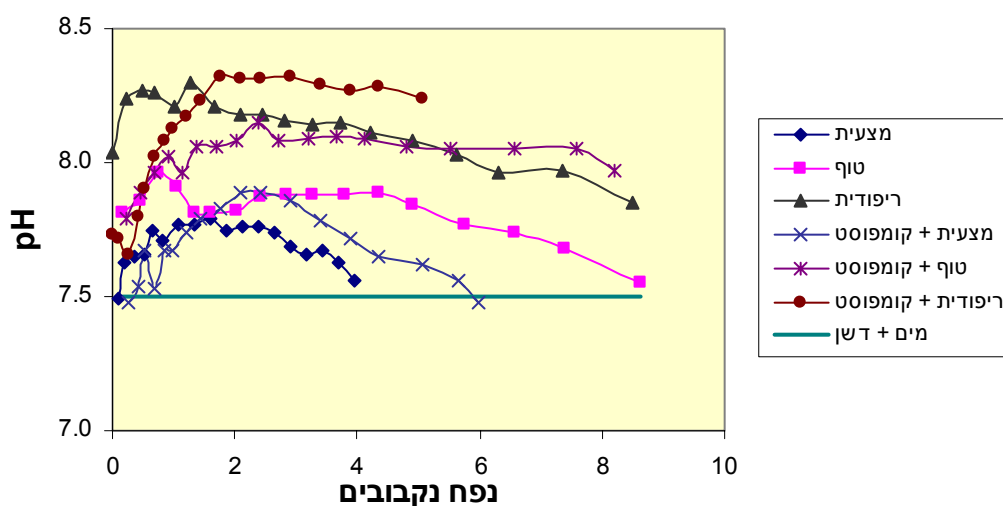
התוצאות מצביעות על כך שניתן להשתמש באפר פחם מתחנות הכוח, ללא חשש לרעילות לצמחים הגדלים בהם, וככל הנראה גם לבע"ח או בני-אדם הניזונים מתוצרת שגודלה במצעים הללו. מסקנה זו נובעת מן העובדה שריכוזי המתכות בתמיסת המיצוי נמוכים מן התקן למי שתייה. עם זאת, על מנת להסיר כל חשש, גודלו ירקות למאכל במצעים המכילים אפר פחם, ונבדקה רמת היסודות הנדירים בחלקים המשמשים למאכל (פירות, עלים, שורש). תוצאות הבדיקות מפורטות בדו"ח נפרד.

בנפחי השטיפה

על-מנת להבטיח הזנה נאותה לצמח הגדל במצע המנותק, יש לבחון האם יש אינטראקציה בין יסודות ההזנה המוספים בדשן, לבין חומר המצע. יתכן שקיימים תהליכי ספיחה או שקיעה שיחייבו תגבור של מנת הדשן, או לחילופין תהליכי שחרור שיגרמו להפחתה במנת הדשן.

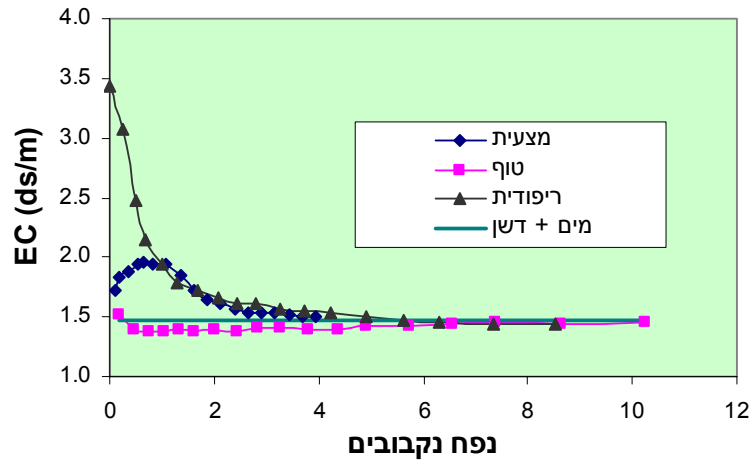
לברור סוגיה זו הוכנסו החומרים לעמודה, דרכה הוזרמה תמיסה שהכילה דשן מורכב מסוג "שפר 538" בריכוז של 1.5 ל"מ³. התשטיפ נאסף ונבדקו בו : pH, מוליכות חשמלית וריכוזי חנקן, אשלגן, זרחן ובורון.

בציורים 1-9 מוצגים תוצאות הבדיקות של תמיסת השטיפה והתשטיפ של החומרים והתערובות.

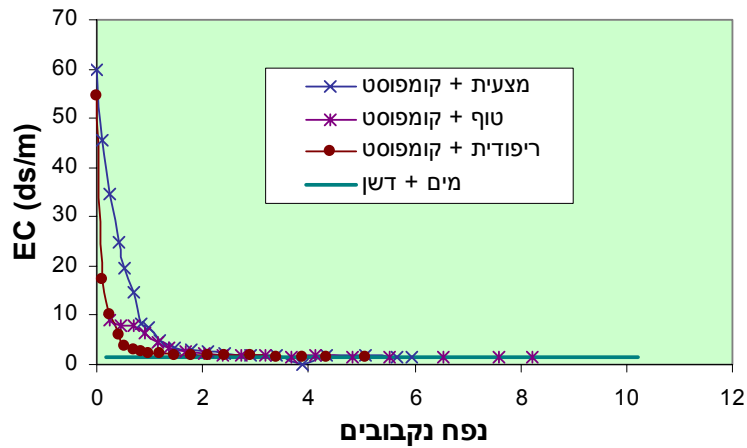


ציור 1 - ה- pH בתשטיפי המצעים השונים בהשוואה לתמיסת השטיפה.

ה- pH של התשטיפים במרבית המצעים גבוהה במקצת מה- pH של תמיסת הדשן השוטפת. לאפר הפחם ולטוף יש נטייה לשחרור ההידרוקסיד ולגרור להשראת pH בסיסי במידה מועטה בתמיסת התשטיפ. בגידולים הניזוקים מרמות pH העולות על 8, ניתן להוריד את ה- pH בעזרת הוספת חומצה (חנקתית/זרחתית) למי ההשקיה, טכניקה המקובלת בגידול צמחים במצע מנותק.



ציור 2 - המוליכות החשמלית בתשטיפים של המצעים השונים בהשוואה לתמיסת השטיפה

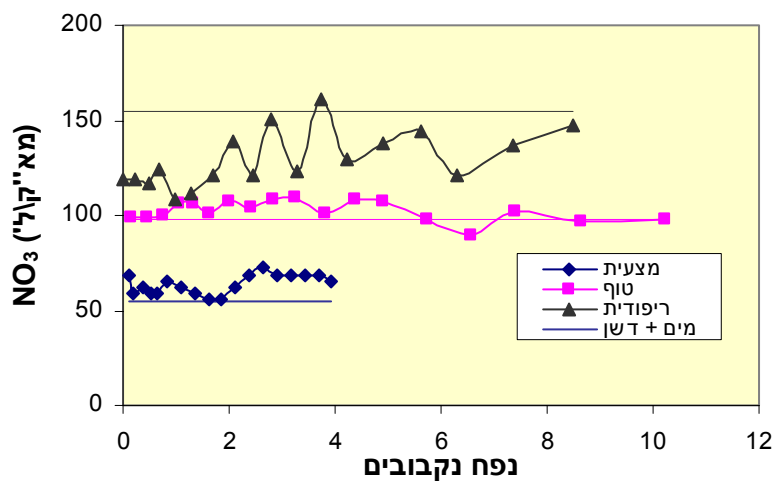


ציור 3 - המוליכות החשמלית בתשטיפים של תערובות המצעים השונים עם קומפוסט בהשוואה לתמיסת השטיפה.

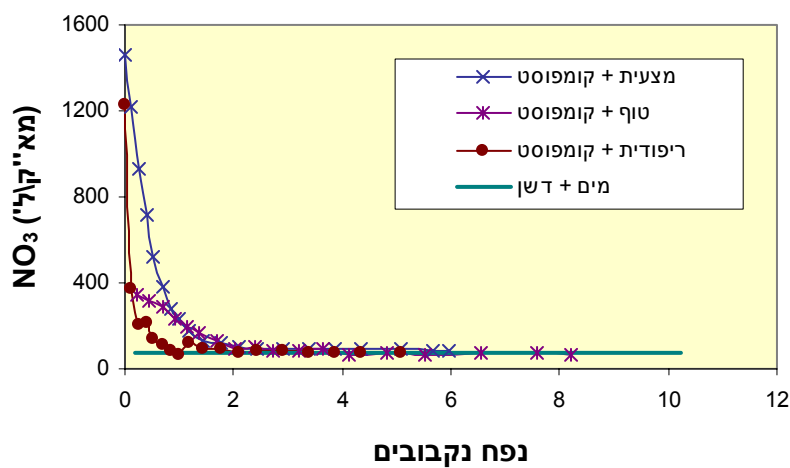
המוליכות החשמלית של מי התשטיפ של הריפודית והמצעית היא גבוהה במעט מהמוליכות החשמלית של תמיסת הדשן, כנראה בשל קירור האפר בתחתית כבשן השריפה (בתחנת הכח) במים מליחים במקצת. שטיפת האפר במים או בתמיסת דשן בכמות השווה לשני נפחי נקבובים - דוחקת את עודפי המלחים, ומאפשרת גידול תקין לצמחים. מבחינה חקלאית עדיפה החלופה של קבלת חומר המוכן לשימוש מייד, על פני קבלת חומר המצריך טיפול מקדים לשתילה או זריעה. מומלץ לבחון את האפשרות לקרר את האפר במים פחות מליחים, ולא - יש ליידע את המשתמשים בדבר הצורך להדיח מלחים לפני השימוש. חשוב לציין כי הצורך בשטיפה אינו פוסל את החומר מלשמש כמרכיב במצע מנותק, לראיה, גם במקרה של שימוש בקומפוסט חקלאי יש לבצע שטיפה כטיפול מקדים לשימוש.

המוליכות החשמלית של תשטיפי התערובות עם אפר הפחם גבוהה במיוחד, ויש סכנה ממשית בשתילה או זריעה במצע המכיל קומפוסט שלא עבר תהליך של שטיפה מוקדמת. יחד עם זאת, גם כאן די בשטיפה בכמות של כשני

נפחי נקבובים על מנת לקבל מצע מתאים, שכן המלחים הינם קלי תמס, שמקורם בחומר המוצא (זבל בקר) ובמלחים הנוצרים במהלך הקומפוסטציה. במידה ותהליך הקומפוסטציה הושלם - אין אספקה של מלחים נוספים, מעבר למלחים המוספים באמצעות תמיסת הדשן.

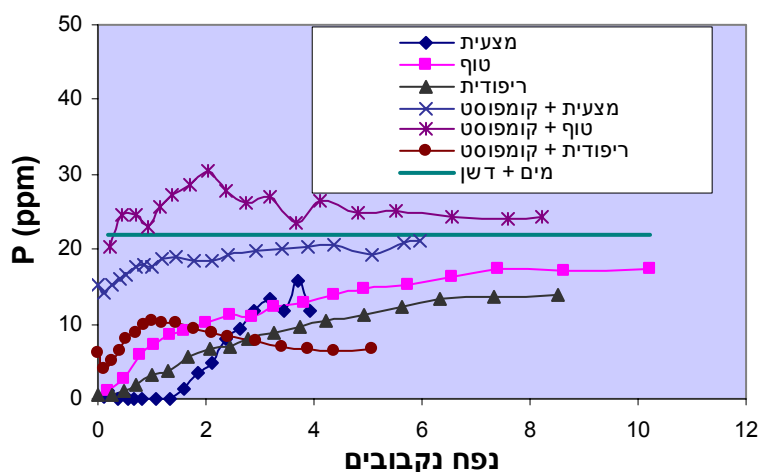


ציור 4 - ריכוז החנקת בתשטיפים של המרכיבים האנאורגניים השונים בהשוואה לתמיסת השטיפה.



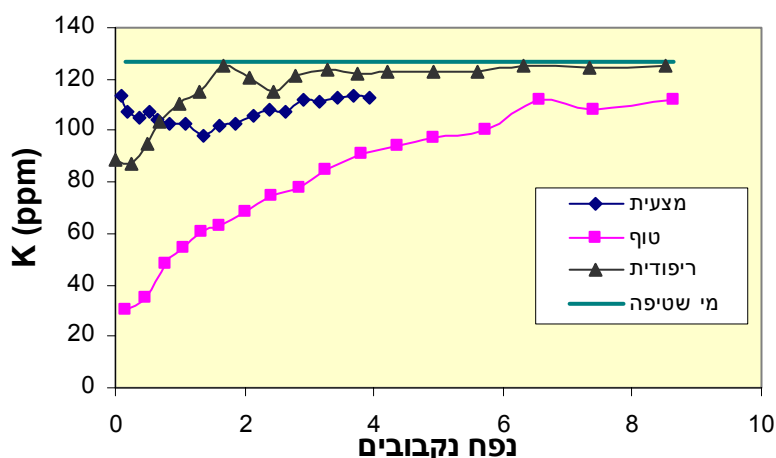
ציור 5 - ריכוז החנקת בתשטיפים של תערובות השונות עם קומפוסט בהשוואה לתמיסת השטיפה.

ריכוז החנקן בתמיסה השוטפת היה שונה במצעים האנאורגניים השונים, והוא מצויין בציור כקו רציף אופקי בצבע זהה לריכוז של היום הנשטף, במצע המסויים. בכל החומרים האנאורגניים, ריכוז החנקן בתשטיפים דומה לריכוזו בתמיסת השטיפה. ריכוזי החנקן בתשטיפי התערובות המכילים קומפוסט - גבוהים יותר, בהתאמה למוליכות החשמלית הגבוהה (ציור 3). ריכוזי חנקן ברמות כה גבוהות מעידים על "בשלות" יתר של הקומפוסט. יחד עם זאת במהלך השטיפה הראשונית, הדרושה לשם הורדת ריכוז המלחים הכללי, נדחקים גם עודפי החנקן, ורמתה נותרת דומה לרמתה במי התמיסה הדוחקת.

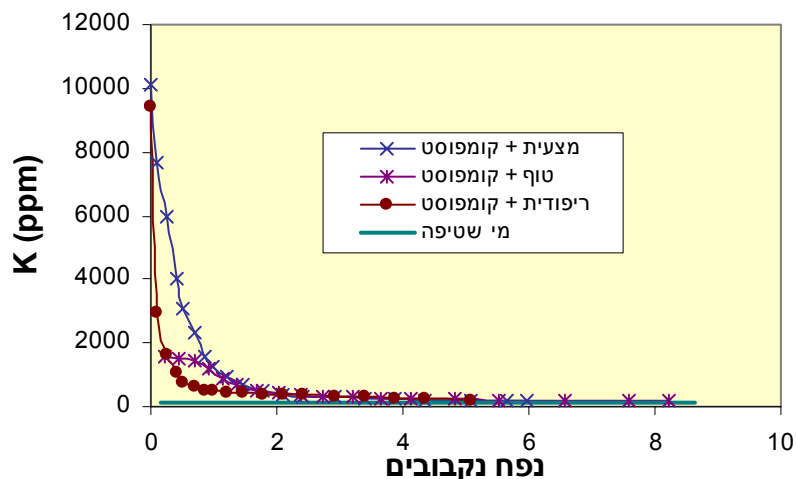


ציור 6 - ריכוז הזרחן בתשטיפים של המצעים השונים בהשוואה לתמיסת השטיפה.

זרחן המוסף במי ההשקיה לטוף ואפר פחם, שוקע או מתקבע, ומשום כך רמתו בתשטיפ נמוכה מרמתו בתמיסה השוטפת. בריפודית העלמות הזרחן רבה יותר, בשל שטח הפנים הגדול יותר. התוצאות מצביעות על כך שישנו צורך בהגברת הדישון הזרחני על מנת להבטיח רמה מספקת של זרחן זמין לצמח. תוספת קומפוסט משפרת את זמינות הזרחן לצמח, למעט ערבובו עם הריפודית.

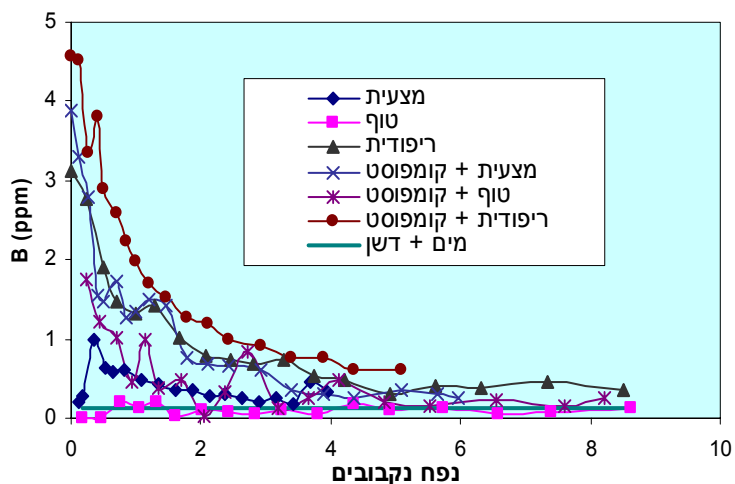


ציור 7 - ריכוז האשלגן בתשטיפים של המרכיבים האנאורגניים בהשוואה לתמיסת השטיפה.



ציור 8 - ריכוז האשלגן בתשטיפים של התערובות עם קומפוסט בהשוואה לתמיסת השטיפה.

הטוף ואפר הפחם מקבעים אשלגן מתמיסת הדשן. תהליך "העלמות" האשלגן אינו פוסק גם לאחר שטיפה בכמות מרובה של תמיסה, והרמה נותרת נמוכה מהכמות הנדרשת בתמיסת ההזנה. עובדה זו מחייבת תגבור רמות האשלגן המוסף בדשן, על מנת שתובטח אספקה נאותה של אשלגן לצמח. תוספת קומפוסט למצעים משפרת את זמינות האשלגן לצמח



ציור 9 - ריכוז הבורון בתשטיפים של המצעים השונים בהשוואה לתמיסת השטיפה.

ריכוז הסף של בורון במי ההשקיה הינו 0.75 ח"מ. ריכוזי הבורון בתשטיפי הטוף ואפר הפחם (מצעית) מצויים מתחת לסף זה. תוספת קומפוסט מעלה את ריכוז הבורון ומצריכה שטיפה של כ-שני נפחי נקבובים על מנת להוריד את ריכוזו אל מתחת לסף המותר למי ההשקיה.

צפיפות חלקיקים, צפיפות גושית, ונקבוביות

צפיפות החלקיקים היא מסת החומר היבש ליחידת נפח של המוצקים בחומר. צפיפות החלקיקים הוא תכונה של החומר, כאשר בחומרים מינרליים צפיפות החלקיקים גבוהה מזו של חומרים אורגניים (בד"כ 2.5-2.8 ג'ס"מ³ בחומר מינרלי לעומת כ-1.3 עד 1.5 ג'ס"מ³ בחומר אורגני).

הצפיפות הגושית, הינה מסת חומר יבש ליחידת נפח - כולל הנקבובים שבין החלקיקים. הצפיפות הגושית מושפעת מצפיפות החלקיקים של החומר, ומגודל החלקיקים. הצפיפות הגושית קובעת את משקל העציץ, ואת יכולתו לשמש כחומר עיגון לצמח. כאשר המצע מיועד ליצוא, יש צורך להפחית ככל האפשר את משקל מצע הגידול.

בטבלה 7 מוצגים: צפיפות החלקיקים, הצפיפות הגושית, והנקבוביות של החומרים ותערובותיהם. מכירת חומרים למצעי גידול נעשית לעיתים לפי משקלם, ואילו הכמות הנדרשת הינה נפחית. כלומר, במצעים עם צפיפות גושית גבוהה, נדרשת כמות (משקלית) גדולה יותר של מצע על מנת למלא את נפח כלי הגידול. לאפר הפחם ולקומפוסט יתרון בשל הצפיפות הגושית הנמוכה שלהם.

הנקבוביות משפיעה על יחסי מים\אוויר במצע, זאת בנוסף לנתוני תאחיזת המים של החומר (כפי שיפורט בהמשך). ככל שהחלקיקים קטנים יותר הנקבוביות קטנה. נקבוביות נמוכה יכולה להביא לבעיות של אוורור במצע, ולנזק לגידול צמחים.

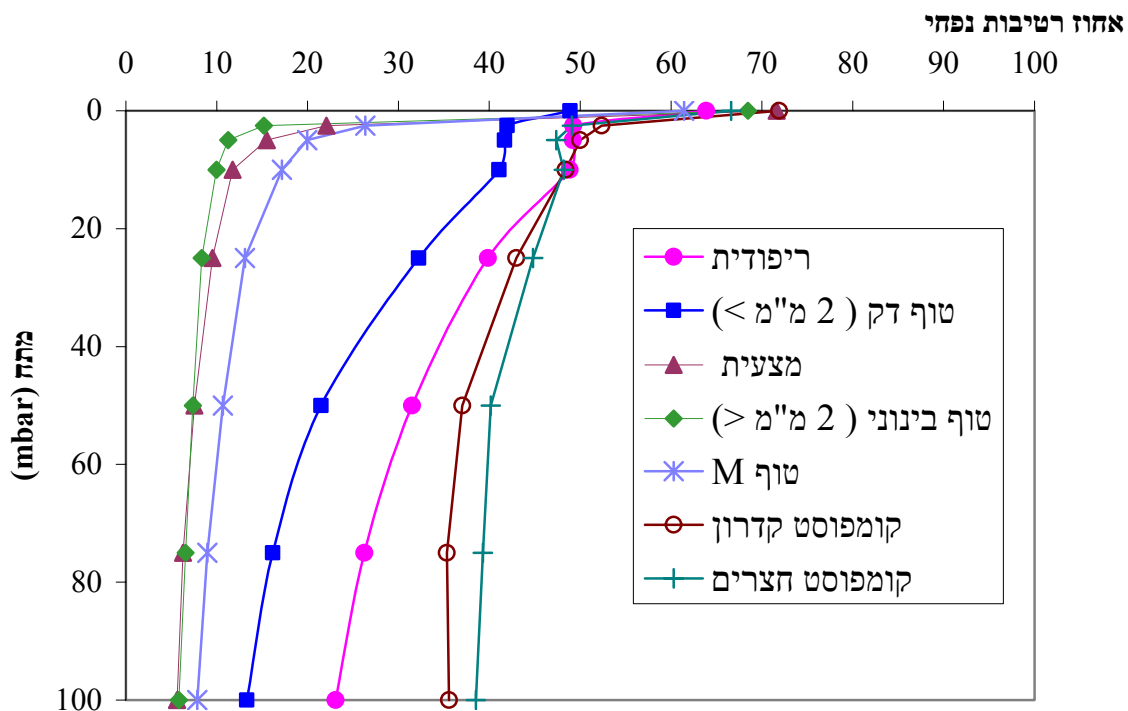
טבלה 7 צפיפות החלקיקים, הצפיפות הגושית, והנקבוביות של החומרים ותערובותיהם.

נקבוביות	צפיפות גושית	צפיפות חלקיקים	
%	ג'ס"מ ³	ג'ס"מ ³	
64	0.77	2.12	ריפודית
71	0.59	2.02	מצעית
78	0.45	2.02	אפר חיפוי
64	0.74	2.17	ריפודית + קומפוסט קדרון
64	0.63	2.10	מצעית + קומפוסט קדרון
49	1.33	2.60	טוף דק ($2 < \text{מ"מ}$)
68	0.82	2.60	טוף בינוני ($2 > \text{מ"מ}$)
78	1.12	2.50	טוף דק + קומפוסט קדרון
64	0.79	2.50	טוף בינוני + קומפוסט קדרון
67	0.74	2.21	קומפוסט חצרים
72	0.61	2.19	קומפוסט קדרון
61	1.00	2.60	טוף M

עקומי תאחיזה במתחים נמוכים (0-100 מיליבר)

אחד הגורמים החשובים בבחינת התאמתו של חומר או תערובת חומרים לשמש כמצע מנותק לגידול צמחים, הוא כושר תאחיזה המים שלו, המשפיע על יחסי אויר/מים במצע, במתחי מים שונים. על מנת שהצמח יתפתח באופן אופטימלי במצע הגידול, יש להבטיח לו אספקה של מים זמינים מחד, ורמת אויר שתאפשר פעילות תקינה של המערכות בשורשים.

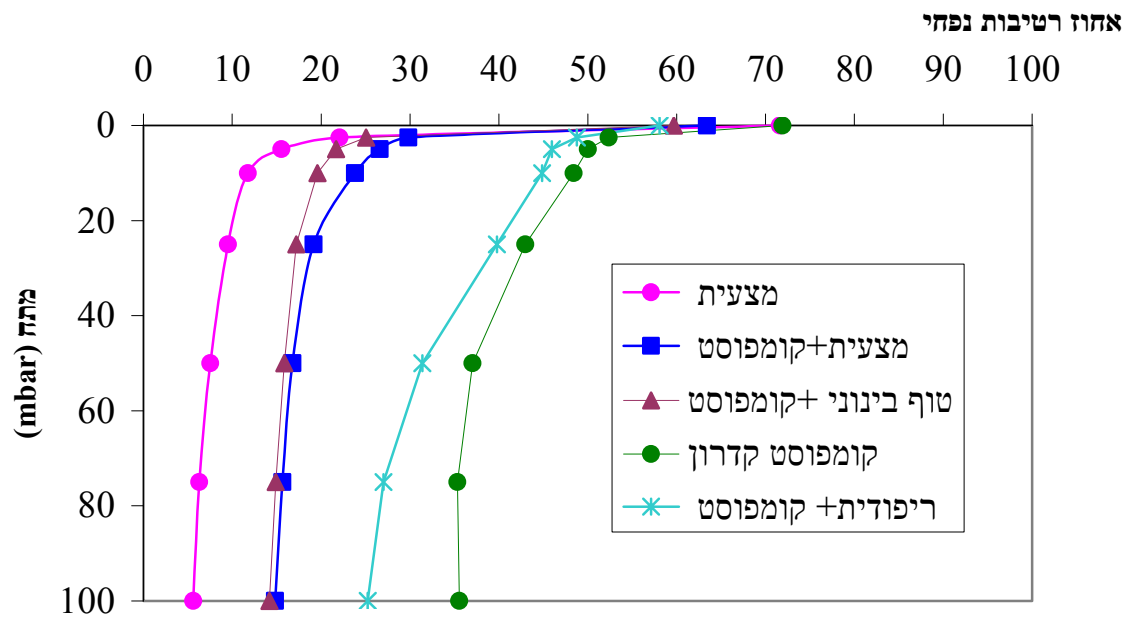
עקום התאחיזה מייצג את כושר נשיאת המים של מצע במתחי מים שונים. המתחים הרלוונטים במצעים מנותקים הם בתחום שבין 0 (רוויה) ל- 100 מיליבר. מתחים גבוהים יותר אינם רצויים בשל השריית עקה לצמח. ציור 10 – מציג את עקומי התאחיזה של החומרים השונים.



ציור 10 – עקום התאחיזה של סוגי החומרים

למצעית ולטוף הבינוני כושר תאחיזה נמוך של מים, אבל רמה מיטבית של אוורור. לעומתם לקומפוסט שנבדק ולמקטעים הדקים של האפר (ריפודית) והטוף כושר תאחיזה מים גבוה, אבל רמה לקויה של אוורור – נתונים אלו מצביעים על כך ששילובם בתערובת – ישפר את יחסי המים/אוויר במצע.

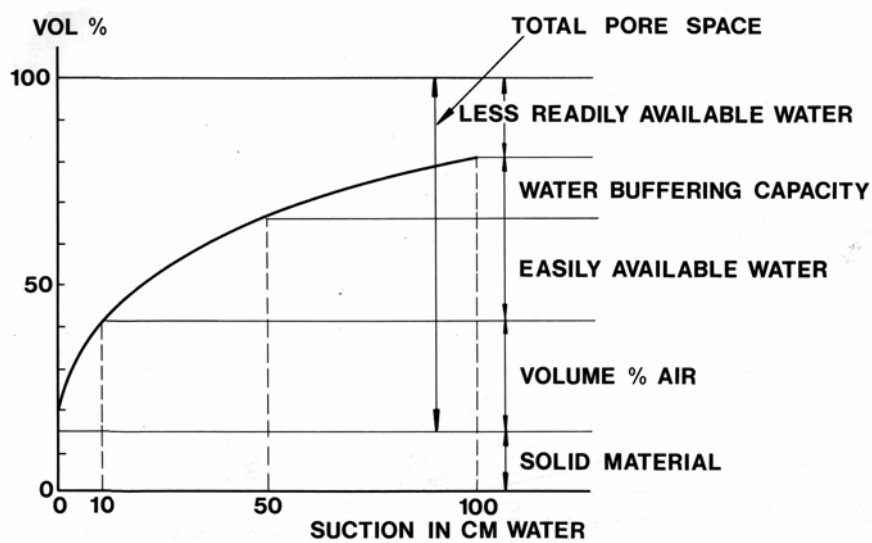
עקומי התאחיזה של התערובות השונות (טוף או אפר פחם עם קומפוסט), מוצגים בציור 11.



ציור 11 – עקומי התאחיזה של התערובות השונות.

תוספת קומפוסט בשיעור של 30% למצעית ולטוף הבינוני (שדומה בגודל חלקיקיו למצעית) מביא לעליה בכושר תאחיזת המים של המצע.

ישנם מספר מדדים המצביעים על תכונות תאחיזת המים של המצע (לפי De-Boodt & Verdonck, 1971). המדדים השונים שהוצעו על-ידי חוקרים אלו מודגמים סכמטית בציור 12. (יש לשים לב להיפוך הצירים וכיוונם בהשוואה לציורים 10 ו-11).



ציור 12 - מדדי זמינות מים במצעים מנותקים (לפי De Boodt & Verdonck, 1971)

"תכולת המים ברוויה" (Total Pore Space) הינה כמות המים המצויה במצע כאשר אין מפעילים עליו כל מתח (או יניקה), והיא זהה לנפח הנקבובים במצע. במצב זה דרגת הרוויה (נפח המים מחולק בנפח הנקבובים – מבוטא באחוזים) – היא 100%.

"נפח האויר לאחר ההשקיה" (Air Space) מוגדר כהבדל (באחוזים מהנפח) בין הנקבוביות הכללית (קרי, תכולת הרטיבות ברוויה) לבין תכולת הרטיבות במתח של 10 ס"מ. למעשה זהו נפח האויר של המצע לאחר שזה התנקז בתום ההשקיה.

"המים הזמינים בקלות" (Easily Available Water) הינם המים המשתחררים מהמצע כאשר המתח עולה מ-10 ל-50 מיליבר. זהו התחום בו הצמח יכול לקלוט מים בקלות מהמצע.

"רזרבת המים" (Water Buffering Capacity) הינה כמות המים המשתחררת מהמצע כאשר המתח עולה מ-50 מיליבר ל-100 מיליבר. זוהי כמות מים אותה יכול לקלוט הצמח, אם כי תוך השקעת אנרגיה גבוהה יותר.

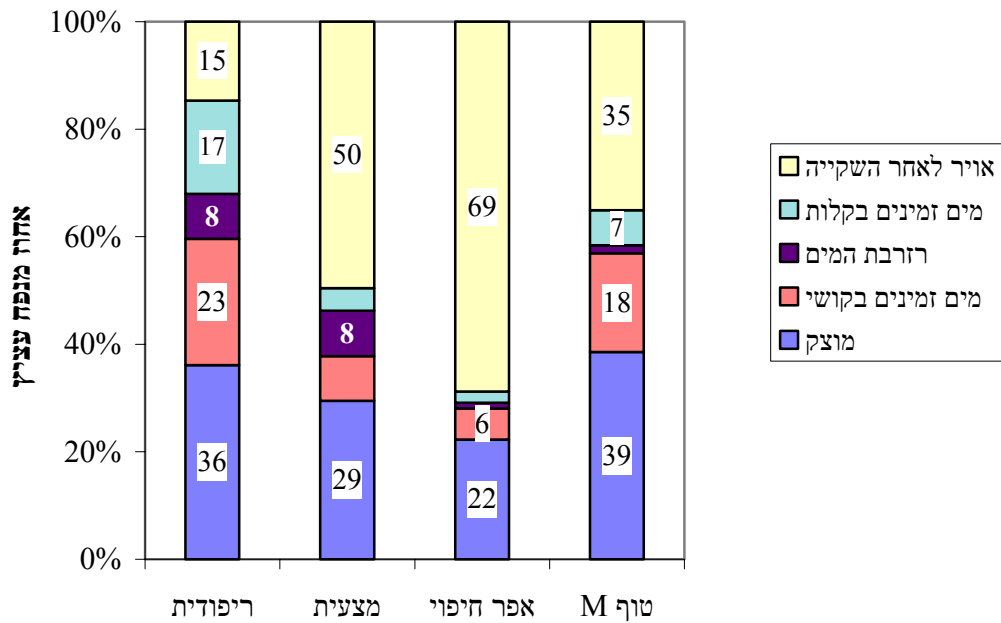
"שארית המים" (Less Readily Available Water) הם המים המצויים במצע במתח תאחיזה הגדול מ-100 מיליבר ועד יובש מוחלט. מבחינת גידול צמחים למים אלו משמעות שולית, אם בכלל.

מתוך נתוני עקומי התאחיזה מחושבים המדדים המצביעים על זמינות המים לצמח ומידת האווורור (לפי: De Boodt & Verdonck, 1971), לפיהם ניתן לאמוד את מידת התאמתו של החומר לשמש כמצע מנותק.

טבלה 8 – מדדי זמינות המים במצעים המינרלים השונים ובתערובותיהם עם קומפוסט.

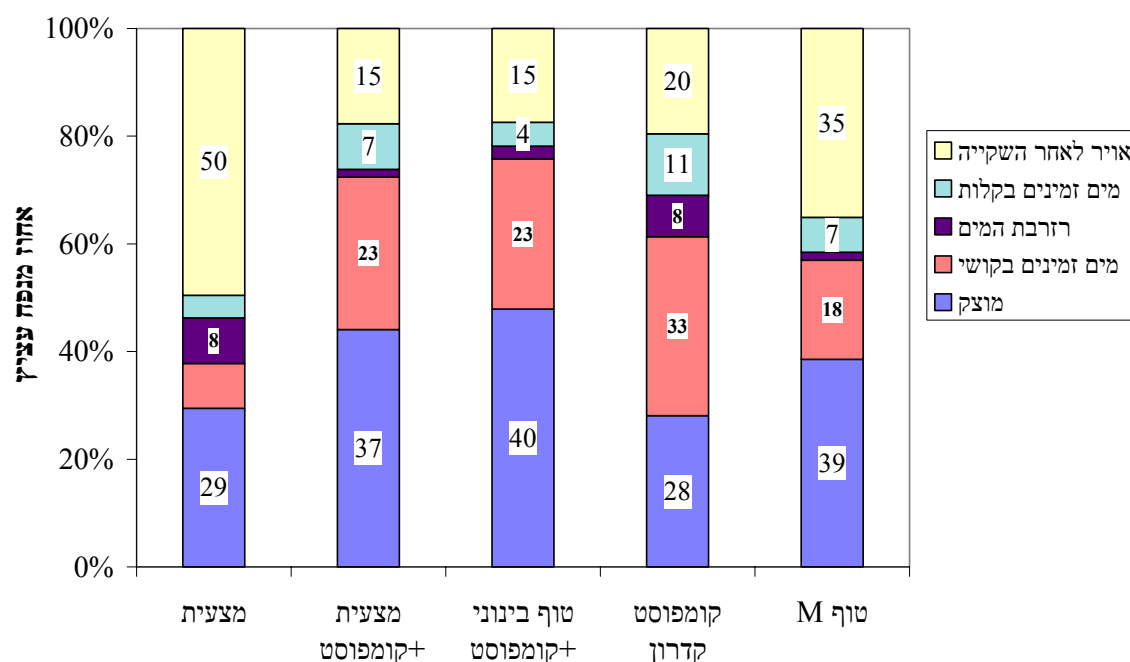
מתח (מיליבר)				מצעי הגידול
50-100	10-50	0-10	נקבוביות	
Water Buffering Capacity	Easily Available Water	Air Space	Total Pore Space	
רזרבת המים	הזמינים המים בקלות	נפח האויר לאחר ההשקיה	תכולת המים ברוויה	
8	17	15	64	ריפודית
8	4	50	72	מצעית
1	2	69	78	אפר חיפוי
1	13	15	58	ריפודית + קומפוסט קדרון
1	7	15	63	מצעית + קומפוסט קדרון
1	20	7	49	טוף דק (> 2 מ"מ)
6	3	53	68	טוף בינוני (< 2 מ"מ)
6	14	15	43	טוף דק + קומפוסט קדרון
2	4	15	60	טוף בינוני + קומפוסט קדרון
2	8	18	67	קומפוסט חצרים
8	11	20	72	קומפוסט קדרון
1	7	35	61	טוף M
4-10	20-30	20-30	85	"מצע אידאלי"

ציורים 13 ו-14 ממחישים את ההתפלגות היחסית של נפחי מוצק-מים-אוויר בכלי הגידול.



ציור 13 - יחסים נפחיים של מוצק-אוויר-מים בעציץ – מצעים אנאורגניים.

בריפודית (שגודל החלקיקים שלה קטן מ-2 מ"מ) הנקבוביות קטנה ביחס לשאר סוגי האפר, ודומה לזו של טוף M. נפח האוויר לאחר ההשקייה מועט, כלומר לאחר הניקוז יש מעט אוויר במצע, ומשום כך הוא אינו מתאים לשמש כמרכיב יחיד במצע לגידול צמחים. המצעית לעומת זאת מתנקזת היטב, אולם כמות המים הזמינים בקלות ורזרבת המים, הנובעת מהתפלגות גודל החלקיקים שלה, היא נמוכה. מצב זה יחייב השקייה תדירה, או לחילופין, עירבוב עם מרכיב אחר בעל כושר תאחיזת מים גבוהה יותר, כגון קומפוסט (ראה ציור 14). צורך זה הוא בהתאמה לתכונות הכימיות של אפר הפחם, שמצביעות אף הן על יתרון לשילובו עם קומפוסט. חשוב לציין כי גם כמות המים הזמינים בקלות ורזרבת המים של טוף M, המקובל כמצע גידול בפרחים ירקות, אינה מיטבית. אפר החיפוי מיועד רק לפיזור על גבי שכבת מצע כלשהי, ומשום כך אין חשיבות לכושר תאחיזת המים שלו, אלא לרמת האיוורור שהיא רבה ביותר.



צירור 14 יחסים נפחיים של מוצק-אזיר-מים בעציץ – חומרים נקיים ותערובות.

תוספת של 30% קומפוסט למצעית, אכן מביאה לפחיתה משמעותית בנפח האזיר לאחר ההשקיה, הכמות הנותרת (15%) היא נמוכה במעט מן הרצוי לפי המוגדר לגבי מצע אידאלי (טבלה 7) – אולם עדין בתחום המאפשר תנאי אוורור תקינים לצמח, אבל מחייב המנעות מהשקיה תכופה מדי. על מנת להגדיל את נפח האזיר לאחר השקיה, ניתן לשקול הכנת תערובת עם כמות קטנה יותר של קומפוסט. בהשוואה בין תערובת של מצעית עם קומפוסט לתערובת טוף M עם קומפוסט (תערובת מקובלת לגידולים שונים) – לא ניתן לראות הבדל משמעותי בתכונות תאחיזת המים.

מוליכות הידראולית ברוויה

קצב תנועת המים במצע גידול הינו גורם חשוב בקביעת התאמתו לשמש מצע מנותק לגידול צמחים, ובהתאמת משטר ההשקייה. מבחינים בדרך כלל, בשני מצבי זרימה: זרימה בתנאי רוויה וזרימה בחומר בלתי רווי. בשני המקרים הזרימה מתוארת על ידי חוק דרסי (Darcy) הקובע כי מהירות הזרימה הממוצעת בחתך הזרימה, פרופורציונלית למפל הפוטנציאל (פירוט בפרק שיטות וחומרים). שיפוע הקו מוגדר כ- K_{θ} שהוא המוליכות ההידראולית. בתנאי רוויה מציינים את K_{θ} כ- K_s (S=saturation), ובתנאי אי-רוויה, מציינים את תכולת הרטיבות הנפחית θ , ליד ה-K.

בגידול במצעים מנותקים מקובל להשקות בתדירות גבוהה יחסית, ולכן חשובה גם המוליכות ההידראולית ברוויה. יחד עם זאת, חשוב לציין כי עיקר תנועת המים במצע הגידול נעשית בתנאים של אי רוויה – שבה המוליכות ההידראולית קשה למדידה.

המוליכות ההידראולית ברוויה של סוגי חומרי המצע ותערובותיהם מוצגת בטבלה 9.

מוליכות הידראולית ברוויה			מצע הגידול
(cm/sec)	(cm/min)	(cm/hr)	
0.39	23.1	1387	מצעית
0.29	17.2	1031	טוף M
0.10	6.0	360	מצעית + קומפוסט
0.09	5.5	327	טוף + קומפוסט
0.08	4.6	277	ריפודית
0.02	1.0	58	ריפודית + קומפוסט

טבלה 9 - מוליכות הידראולית ברוויה של החומרים השונים.

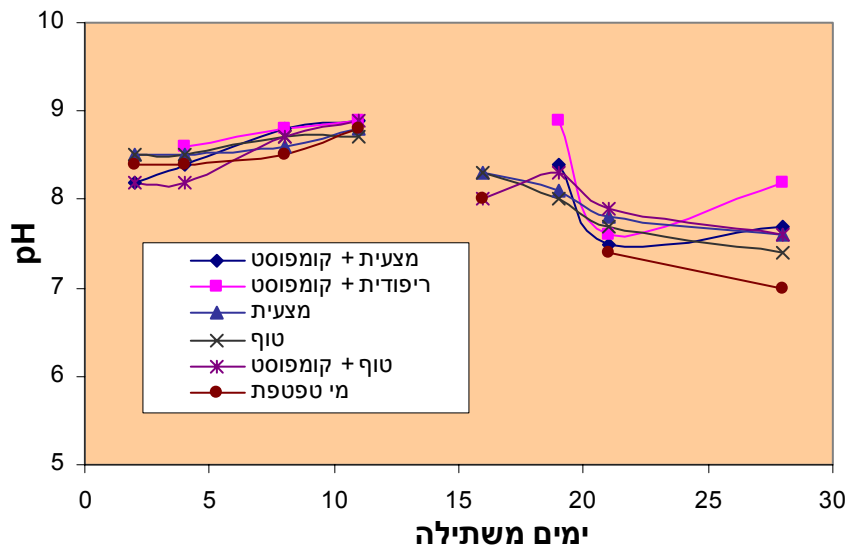
המוליכות ההידראולית ברוויה של מצעית וטוף M דומה, ומאפשרת ניקוז מהיר של מי ההשקייה. עובדה זו לצד נתוני אחוז המים הזמינים בקלות, מצביעה כי משטר ההשקייה האפקטיבי לצורך גידול בשני המצעים הללו, יהיה של השקיות תכופות. תוספת קומפוסט מקטינה את המוליכות ההידראולית ברוויה, כך שמהירות הניקוז של עודפי מי ההשקייה נמוכה יותר, ולכן במקרה של התערובות עם הקומפוסט, יש לרווח את תדירות ההשקיות, על מנת לאפשר ניקוז ואיוורור תקין לשורשים.

גידול בזיל וכרוב סיני

שתילים של בזיל, (*Ocimum basilicum*) וכרוב סיני, (*Brassica rapa var. pekinensis*), נשתלו במצעים שונים (פירוט בפרק שיטות וחומרים). כל טיפול כלל עשר חזרות. העציצים פוזרו באקראיות גמורה, על גבי שולחנות בחממת הגידול. במהלך הניסוי נדגמו מי נקז ומי הטפטפת, ובוצעה בהם אנליזה כימית.

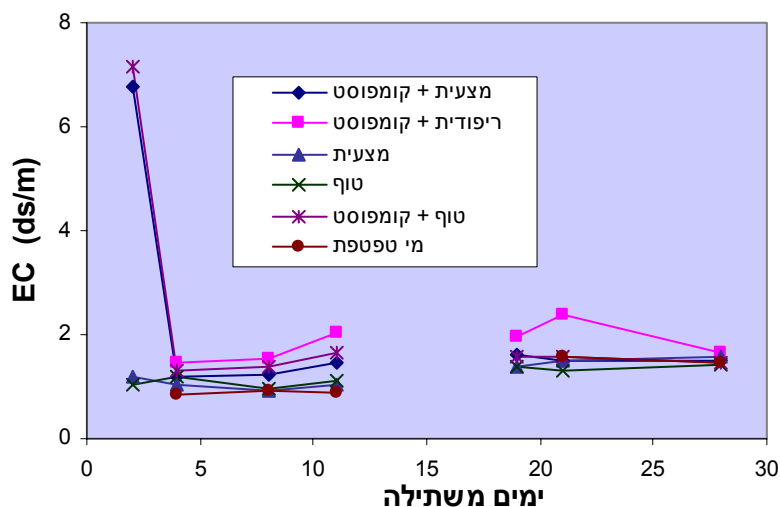
בצירורים 15 עד 20 ו-22 עד 27 מוצגים נתוני האנליזה של מי הטפטפת ומי הנקז. בכל הצירורים מחולקים הנתונים הקשורים למהלך ההשקייה והדישון: בשלב הראשון, מיד אחר השתילה, לא ניתן דשן לצמחים, ואילו בשלב השני (5 ימים לאחר השתילה של הבזיל, ו-12 יום במקרה של הכרוב) הוסף דשן למי ההשקייה. תוספת הדשן למי ההשקייה הביאה לשינויים בהרכב הכימי של מי הנקז. אי לכך מוצגות מדידות הדיגום בגרפים כשתי תקופות נפרדות. המדידות בצידו השמאלי של הצירור מייצגות את הדיגום לפני תוספת הדשן, ובצידו הימני - הנתונים לאחר תוספת הדשן.

א. גידול כרוב סיני (*Brassica rapa var. pekinensis*)



צירור 15 - ה-pH במי הטפטפת ובמי הנקז בטיפולים השונים לאורך תקופת גידול הכרוב הסיני.

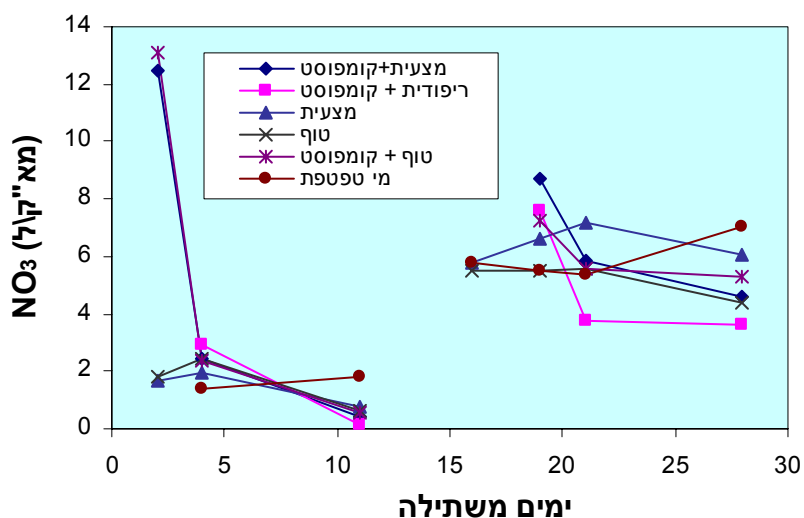
ה-pH של מי הנקז ומי ההשקייה, הוא גבוה. תוספת הדשן מביאה לירידה ב-pH, אולם בתערובת המכילה ריפודית כושר הבופר גדול, וה-pH נותר גבוה.



ציור 16 - המוליכות החשמלית במי הטפטפת ובמי הנקז בטיפולים השונים לאורך תקופת גידול הכרוב הסיני.

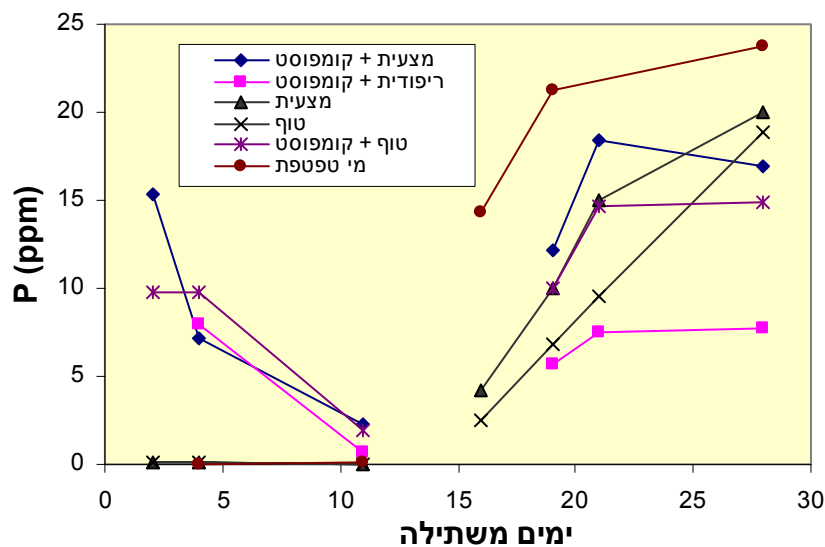
קומפוסט מזבל בקר מכיל רמה גבוהה של מלחים, כתוצאה מהפרשות הבקר. כתוצאה מכך, במצעים המכילים קומפוסט, במידה ולא נשטפו טרם השתילה המוליכות החשמלית של מי הנקז – גבוהה ביותר, ומהווה סכנה לשתילים. זו גם הסיבה העיקרית שמומלץ לפני השתילה לבצע הדחת מלחים, על-ידי שטיפת המצע ב-2-3 נפחים של מי ברז.

לאחר הדחת המלחים, מוליכות חשמלית העולה על זו של מי הברז, או מי ההדשייה (דשיון+השקייה), מקורה בעיקר בפירוק נוסף של הקומפוסט. תרומת המסת מלחים קשי תמס המצויים באפר הפחם נמוכה ביותר - על פי ממצאים קודמים. מכל מקום, תוספת זו היא שולית, ואין בה כדי לסכן את הגידול התקין של הצמחים.



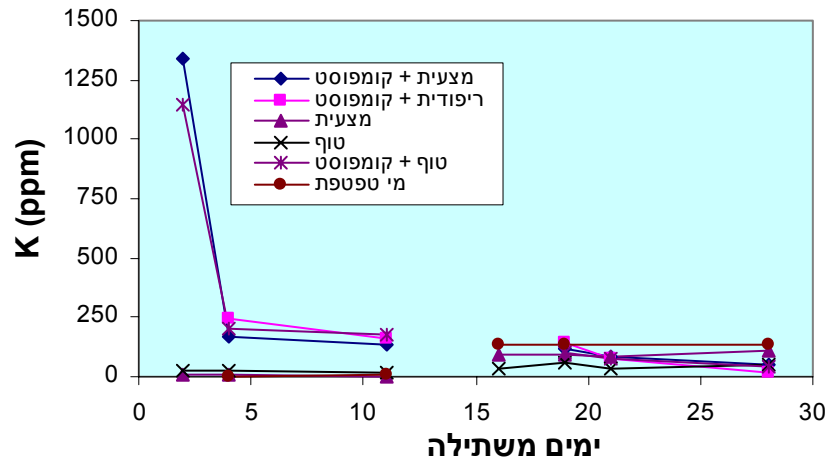
ציור 17 - ריכוז החנקן במי הטפטפת ובמי הנקז בטיפולים השונים לאורך תקופת גידול הכרוב הסיני.

ריכוזי החנקת במצעים האנאורגניים הם נמוכים. שילוב של קומפוסט ברמה של 30%, מביא לעליה ניכרת בריכוז החנקת הנשטפת מהעציץ, כפי שהדבר מתבטא במועד הדיגום הראשון. במועד זה מתקבלים ערכים של כ- 12 מא"קל' במצעים עם קומפוסט, לעומת כ- 2 מא"קל' במצעים האנאורגניים. הריכוז הגבוה של חנקת מעיד כי הקומפוסט בשל, ולא צפויים שינויים משמעותיים בתכונותיו במהלך תקופת הגידול. החנקת מסיסה היטב במים, ומשום כך כבר בדגימה שנלקחה יומיים לאחר מכן, הריכוז ירד לרמה נמוכה ביותר. לאחר תוספת הדשן, רמות החנקת בנקז של כל מצעי הגידול עלו, ובדגימה האחרונה שנלקחה, נראה בבירור כי ריכוזי החנקת בכלם, נמוכים מריכוזם במי הטפטפת, עדות לצריכה מוגברת על-ידי הצמחים.



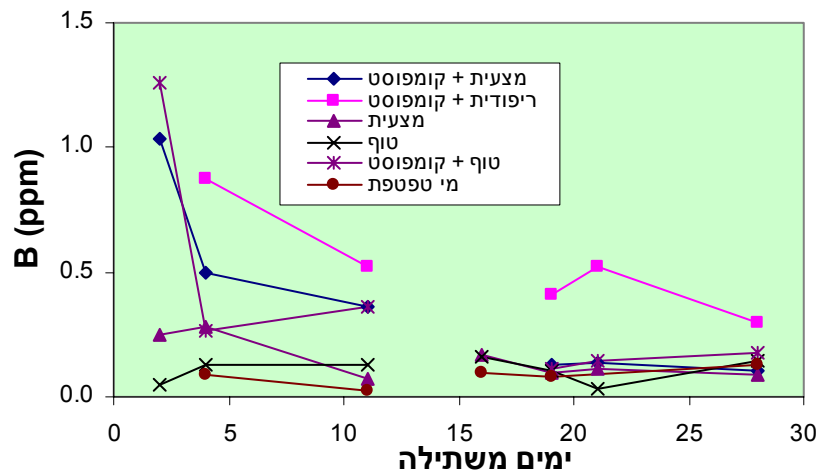
ציור 18 - ריכוז זרחן במי הטפטפת ובמי הנקז בטיפולים השונים לאורך תקופת גידול הכרוב הסיני.

ריכוזי הזרחן במי הטפטפת ובמי הנקז של החומרים האנאורגניים מיד לאחר השתילה – ללא תוספת דישון הם נמוכים ביותר. במצעים המכילים קומפוסט הרמה גבוהה יותר – תרומה ישירה של הקומפוסט. לאחר מספר ימים הזרחן המסיס של הקומפוסט נשטף, והריכוזי במי הנקז גם במצעים המכילים קומפוסט נמוך ביותר. כלומר, לא ניתן להתייחס אל הקומפוסט כספק זרחן לאורך זמן, ויש להוסיף זרחן בדישון. תוספת זרחן באמצעות דישון אכן מעלה את ריכוזו במי הנקז של המצעים השונים, אולם לא עד לרמה המצויה במי הטפטפת. הזרחן המוסף עובר תהליך של קיבוע או שקיעה במצע. הקיבוע חמור ביותר במצע המכיל ריפודית, כנראה בשל שטח הפנים הגבוה של האפר הדק, אולם גם בשאר המצעים הקיבוע אינו זניח. יש להתחשב בתהליך במהלך הגידול, ולתגבר את מנות הזרחן בדשן, על מנת שהזרחן הזמין יהיה מתאים לדרישות הצמח, בהתאם לשלב הגידול שלו.



ציור 19 - ריכוז אשלגן במי הטפטפת ובמי הנקז בטיפולים השונים לאורך תקופת גידול הכרוב הסיני.

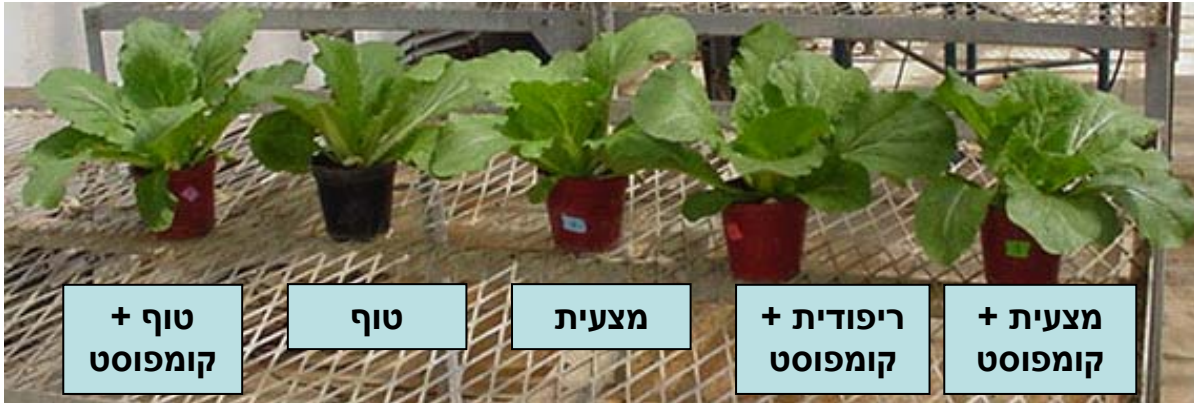
ריכוז האשלגן בתשטיפים של התערובות עם הקומפוסט גבוה ביותר בתחילת העונה, אך לאחר מספר ימי השקייה במים נטולי דשן, ריכוזי האשלגן פוחתים. ריכוז האשלגן בנקז של המצעים האנאורגניים הוא נמוך. הריכוז הגבוה של האשלגן מקורו בקומפוסט המכיל בתוכו שיירי הפרשות של פרות - העשירות באשלגן. לאחר כ-12 יום רמת האשלגן במי הנקז דומה לרמה הרצויה במי ההדשייה. לאחר תוספת הדשן ניכר דווקא קיבוע קל של אשלגן, בעיקר בנקז של הטוף, ולקראת סוף תקופת הגידול - הרחקה בולטת של אשלגן מן הנקז של הריפודית עם הקומפוסט.



ציור 20 - ריכוז הבורון במי הטפטפת ובמי הנקז בטיפולים השונים לאורך תקופת גידול הכרוב הסיני.

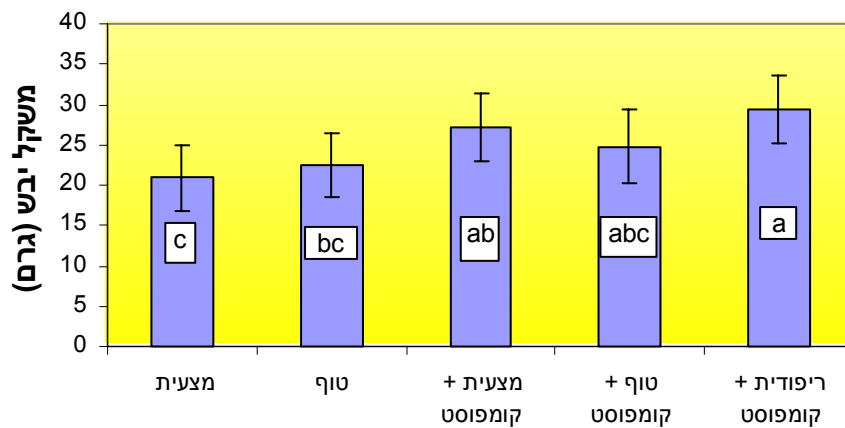
בתחילת תקופת הגידול ריכוז הבורון במי הנקז שהתקבלו מהמצעים מכילי הקומפוסט היה גבוה ביחס לשאר המצעים. מקור הבורון הוא בקומפוסט, כפי שנמצא במיצוי המיימי במעבדה. עם זאת חשוב לציין כי הריכוזים שנמצאו אינם מסכנים את הצמחים הגדלים במצעים אלו. הריכוז המותר במי השקייה הוא עד 0.75 ח"מ (כפי שמצויין בטבלה 6).

בתמונה 1 נראים צמחי כרוב הסיני מייצגים של הטיפולים השונים.



תמונה 1 - צמחי כרוב סיני במצעים השונים.

תוצאות היבול (משקל יבש) של צמחי הכרוב הסיני, מוצגות בצירור 21. המשקל היבש המוצג בעמודות, מייצג ממוצע של 10 חזרות. הקווים מציינים את סטיית התקן. האותיות הלטיניות מציינות את המובהקות שבין הטיפולים, ע"פ מבחן "Tukey-Kramer", ברמת מובהקות של 5% ($\alpha=0.05$).



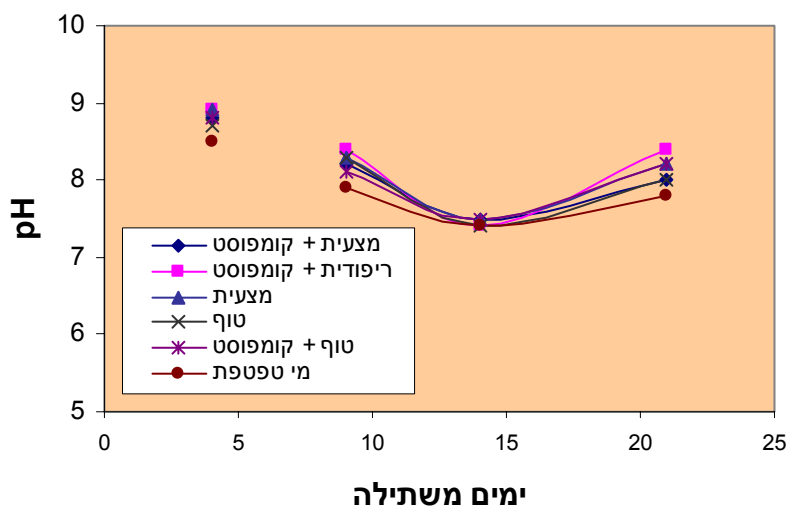
צירור 21 משקל יבש של כרוב סיני בטיפולים השונים.

היבול המירבי התקבל במצע שהכיל ריפודית עם קומפוסט, כנראה בשל משטר מים שהבטיח כמות רבה של מים זמינים בקלות, ולא מנע איורור תקין. בהשוואה בין מצעית עם קומפוסט וטוף עם קומפוסט - לא ניכר הבדל סטטיסטי. המצעים האנאורגניים הניבו יכול נמוך יותר (מובהק סטטיסטית) בהשוואה למצעים שהכילו קומפוסט.

ב. גידול בזיל (*Ocimum basilicum*)

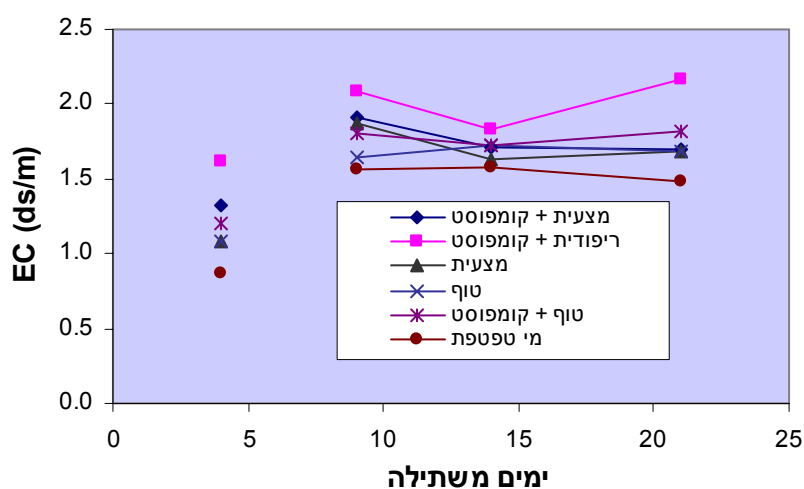
שתילי הבזיל, בניגוד לכרוב, נשתלו לאחר שהמצעים עברו שטיפה יסודית שדחקה את המלחים המסיסים המצויים בקומפוסט.

בעקבות השטיפה המקדימה ריכוזי המלחים כבר בדיגום הראשון דומים בכל המצעים. הדישון החל לאחר חמישה ימים ממועד השתילה. דגימה אחת בלבד נערכה לפני תחילת הדישון.



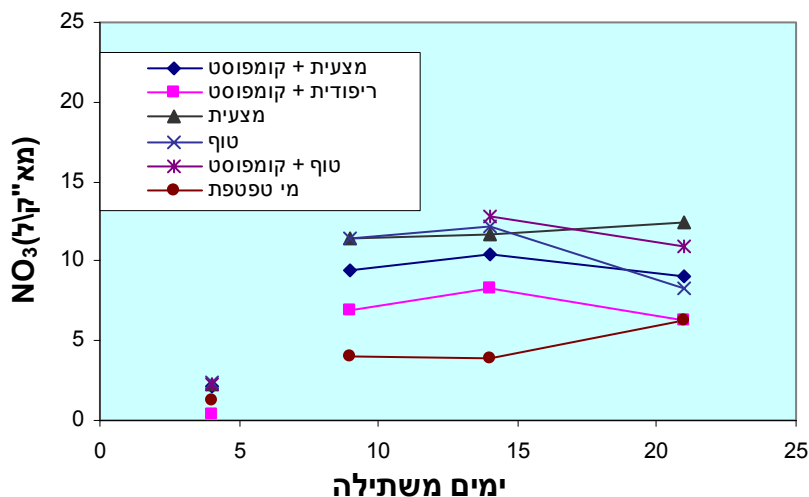
ציור 22 - ה-pH במי הטפטפת ובמי הנקז בטיפולים השונים לאורך תקופת גידול הבזיל.

בדומה לכרוב הסיני, גם בבזיל, ה-pH של מי הנקז ומי ההשקיה, הוא גבוה. תוספת הדשן מביאה לירידה ב-pH, אולם בתערובת המכילה ריפודית כושר הבופר גדול, וה-pH נותר גבוה. בכל מקרה, כאשר משמשים מצעים אלו לגידול גידולים הרגישים ל-pH גבוה - יש להוסיף למי ההשקיה חומצה.



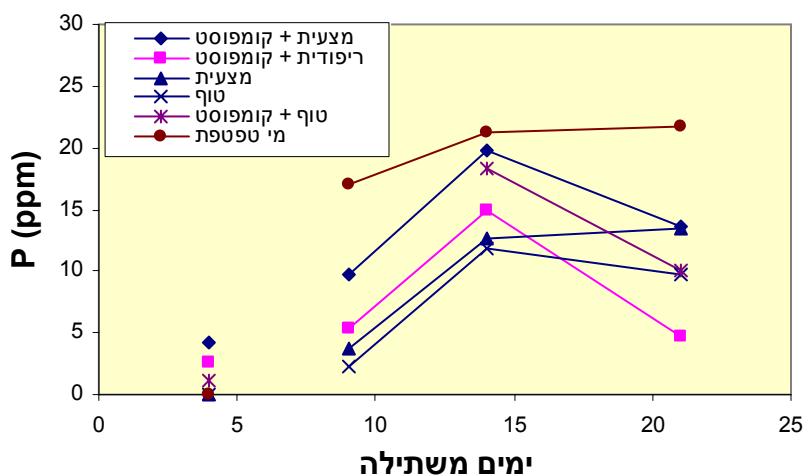
ציור 23 - המוליכות החשמלית במי הטפטפת ובמי הנקז בטיפולים השונים לאורך תקופת גידול הבזיל.

למרות דחיקת המלחים המקדימה ישנו עדיין שוני, אם כי קטן יחסית, במוליכות החשמלית בין המצעים השונים. התערובות המכילות קומפוסט מכילות מלחים בריכוז גבוה במקצת, ומגמה זאת נשארת עד סוף הגידול. ראוי לציין שלהפרש הנמדד אין משמעות של ממש מבחינת גידול הצמח, והערכים בכל הטיפולים מתאימים לגידול תקין של צמחים.



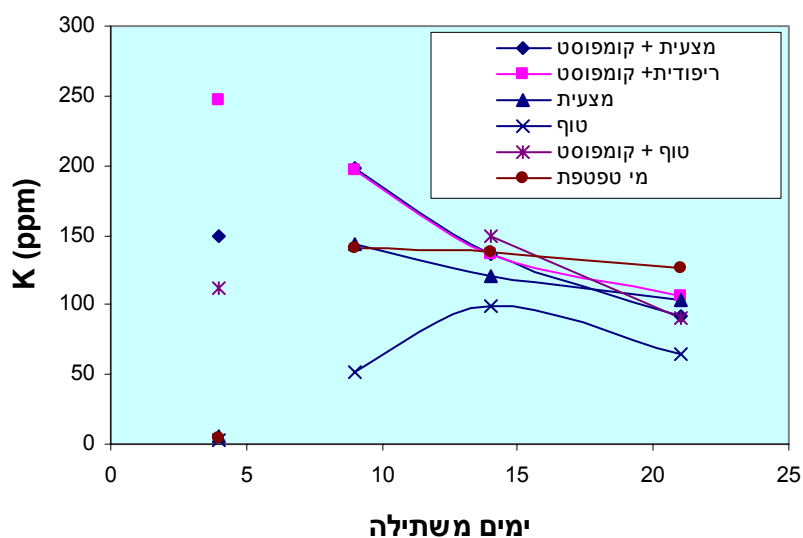
ציור 24 - ריכוז החנקה במי הטפטפת ובמי הנקז בטיפולים השונים לאורך תקופת גידול הבזיל.

ריכוז החנקה בכל המצעים נמוך במצעים השונים לפני תחילת הדישון בעקבות הדחיקה המקדימה של המלחים. ריכוז שאינו עולה על 2.5 מא"ק"ל (פחות מ-40 מ"ג"ל חנקן צרוף), הוא נמוך מהנדרש לגידול תקין של צמחים (כ-150 עד 300 מ"ג"ל חנקן צרוף), ודרושה תוספת חנקה כדשן.



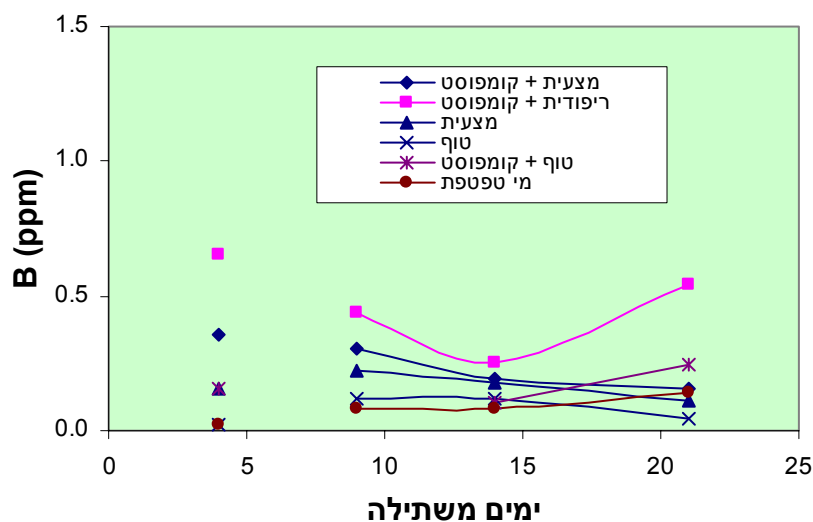
ציור 25 - ריכוז הזרחן במי הטפטפת ובמי הנקז בטיפולים השונים לאורך ימי גידול הבזיל.

בדומה למדידות הנקז בגידול הכרוב הסיני, גם כאן בא לידי ביטוי קיבוע הזרחן על ידי המצעים. בולט במיוחד קיבוע הזרחן לריפודית. קיבוע מוגבר זה מיוחס לשטח הפנים הסגולי הגדול של המקטע הדק. לפיכך, יש לתגבר דישון זרחני בהתאם לצרכי הצמח.



ציור 26 - ריכוז האשלגן במי הטפטפת ובמי הנקז בטיפולים השונים לאורך ימי גידול הבזיל.

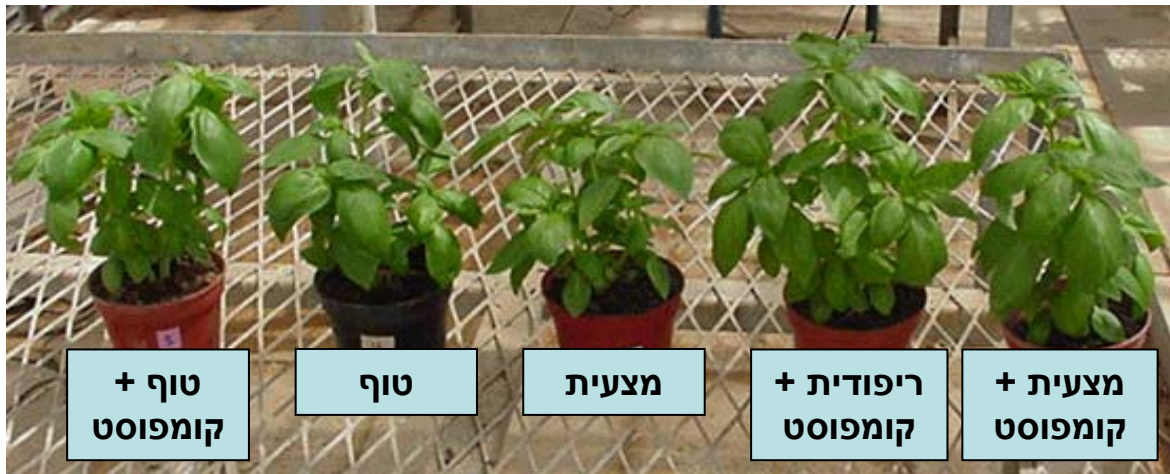
למרות דחיקת המלחים המקדימה ישנו עדיין שוני, אם כי קטן יחסית, בריכוז האשלגן בין המצעים השונים. גם כאן בא לידי ביטוי קיבוע קל של אשלגן במיוחד בטוף.



ציור 27 - ריכוז הבורון במי הטפטפת ובמי הנקז בטיפולים השונים לאורך תקופת גידול הבזיל.

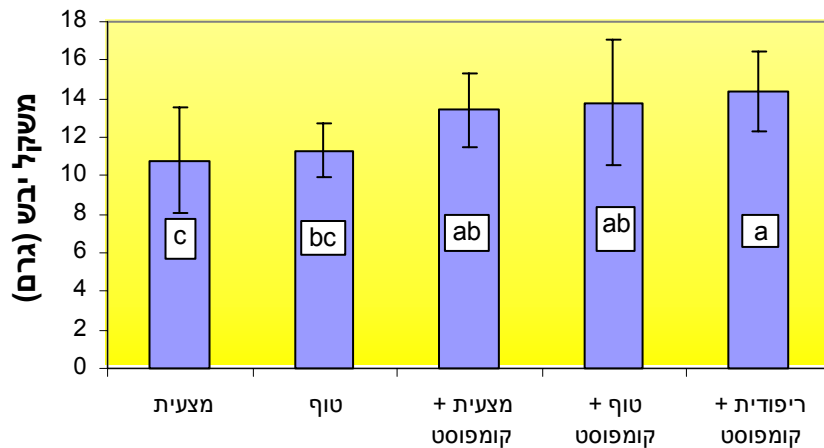
בתחילת תקופת הגידול ריכוז הבורון במי הנקז מהמצעים שהכילו קומפוסט, גבוה ביחס לשאר המצעים. מקור הבורון הוא בקומפוסט, כפי שנמצא במיצוי המיצוי המיימי במעבדה. עם זאת חשוב לציין כי הריכוזים שנמצאו אינם מסכנים את הצמחים הגדלים במצעים אלו. הריכוז המותר במי השקיה הוא עד 0.75 מ"מ (כפי שמצויין בטבלה 6).

בתמונה 2 נראה צמח בזיל מייצג מכל אחד מהטיפולים.



תמונה 2 - צמחי בזיל במצעי הגידול השונים.

תוצאות היבול (משקל יבש) של צמחי הבזיל, מוצגות בציור 28. המשקל היבש המוצג בעמודות, מייצג ממוצע של 10 חזרות. הקווים מציינים את סטיית התקן. האותיות הלטיניות מציינות את המובהקות שבין הטיפולים, ע"פ מבחן "Tukey-Kremer", ברמת מובהקות של 5% ($\alpha=0.05$).



ציור 28 משקל יבש של צמחי הבזיל בטיפולים השונים.

בשני הגידולים היבול המרבי הוא זה שגדל בתערובת ריפודית וקומפוסט, אם כי לא באופן מובהק מתערובות שהכילו מצעית או טוף עם קומפוסט. במצעים האנאורגניים היבול נמוך ביחס לתערובות עם הקומפוסט.

1. סיכום

מכלול הבדיקות והניסויים שבוצעו באפר פחם ממויין ("מצעית" ו"ריפודית") מתוצרת חברת "יעקב לויין ובניו", מצביעים כי מוצרים אלו יכולים להוות מרכיב אנאורגני מתאים במצעי גידול, בתערובת עם קומפוסט. נמצא כי ה-pH של המיצוי המיימי ותמיסות הנקז מעט גבוהים, אולם אינם שונים מהערכים של הטוף הנקי או תערובת של טוף עם קומפוסט. ערכי pH אלו אמנם אינם מיטביים לגידול צמחים, על-פי ההגדרה השכיחה לערך זה, אולם בעזרת החמצה קלה של מי הטפטפת - ניתן להוריד את רמתו לרמה תקינה להתפתחות צמחים. תוספת חומצה למי ההשקיה, מקובלת בשטחי חממות בישראל, בשל מי ההשקיה, או מצעים, או הקרקעות שהם בעלי pH נייטרלי או בסיסי קל. יחד עם זאת, בשל כושר בופר גדול של האפר, ביחוד למרכיב הדק של שלו - לא מומלץ להשתמש בו כמרכיב יחיד במצע גידול. שילוב של קומפוסט, ממתן במעט את עליית ה-pH, ותורם חומרים אורגניים מסיסים, המשפרים את הזנת הצמח.

רמת המלחים התחילית הינה גבוהה במקצת, אולם בשטיפה בכ-2 נפחי עציץ - מודחים המלחים המסיסים העודפים. העובדה כי ניתן בקלות להוריד את רמת המלחים המסיסים, ואין שחרור נוסף לאחר השטיפה הראשונית, מאפשרת שימוש באפר, במצעי גידול, אולם, אפר הפחם, אינו מהווה מקור לחומרי הזנה לצמח. נבדק, ולא נמצא שחרור של יסודות מזיקים לסביבה מהאפר לסוגיו.

מבחינת התכונות הפיזיקליות, למצעית כושר תאחיזת מים נמוכה, ומוליכות הידראולית גבוהה. שילוב של קומפוסט משפר את תכונות תאחיזת המים, ומקטין אך במעט את המוליכות ההידראולית ברוויה. תכונות אלו מאפשרות פתיחת מרווחי השקיה גדולים יותר, ומונע התמוטטות של הגידול במקרה של טמפרטורות גבוהות, או תקלה במערכת ההשקיה.

ניסויי הגידול הוכיחו כי גידול בתערובת של קומפוסט עם מצעית, מביא ליבולים שאינם שונים מגידול בטוף נקי או בתערובת של טוף עם קומפוסט. יתרה מזאת, הוכח כי במשטר השקיה מתאים, אפשר להשתמש גם במקטע הדק (ריפודית) בתערובת עם קומפוסט - כמצע לגידול. חשוב לסייג ולומר כי בניסוי המקדים שערכנו, משך הגידול היה קצר, ואפשר שתופעות הקשורות בבעיות ניקוז של מצע דק זה לא באו לידי ביטוי. לכן, יידרש ניסוי ארוך טווח על מנת לבחון אפשרות שימוש באפר דק כמרכיב במצע גידול.

ז. רשימת ספרות.

1. Chen, Y., A. Gottesman, T. Aviad, and Y. Inbar. 1991. The use of bottom-ash coal cinder as container medium in horticulture. *Acta Horticulturae* 294:173-181.
2. De Boodt, M., and Verdonck, O. 1971. The physical properties of the substrates, used in horticulture. *Acta Horticulture* 26:105-111.
3. Gillham, E.W.F., and W. Moreley-Davies. 1971. The behaviour of plants growing on pulverised fuel ash. Scientific Services Department C.E.G.B.
4. Hodgson, D.R., R. Holliday, and F. Cope. 1963. The reclamation of land covered with pulverised fuel ash. The influence of soil depth on crop performance. *J. Agric. Sci.* 61:299-308.
5. Kao Chun-Wai, et al. 1981. Application of coal fly ash to agricultural land. Dept. of Soil Sciences, Michigan State Univ., East Lansing, U.S.A.
6. Moreley-Davies, W., E.W.F. Gillham, and D.T. Simpson. 1971. An economic investigation into farming on land restored with pulverised fuel ash *J. Br. Grassland Soc.* 26:25-30.
7. Neal, J.C., and D.F. Wanger. 1983. Physical and chemical properties of coal cinders as container media component. *HortScience* 18(5):693-695.
8. Report on potential use of coal ash in Israel. 1982. Gama Engineering and Marketing, Ramat Hasharon, Israel.
9. Pontius E.W, 2003. Drinking water regulation and health. New York, NY : John Wiley & Sons.
10. Townsend, W.M., and E.W.F. Gillham. 1975. Pulverised fuel ash as a medium for plant growth. In: "The Ecology of Resource Degradation and Renewal: M.J. Chadwick and Goodman (eds.) Blackwell, Oxford.
11. Wagner, D.F., and J.C. Neal. 1984. Coal cinders with pine bark as growing media. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 109(6):822-826.
12. Yermiyahu U., R. Keren and Y. Chen. 1995. Boron sorption by soil in the presence of composted organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 405-409.
13. דיין ר., צביאלי י., מדואל ע., חן י., גוטסמן א., ענבר י., קרמר ש., אוקו א. 1990. גידול מילונים בחממה, בקרקע ובמצע מנותק - בתנאי כיכר סדום. השדה ע': 1072-1074.
14. דיין ר., אופנבך ר., צביאלי י., מדואל ע., חן י., גוטסמן א., ענבר י., קרמר ש. אוקו א. 1990. עגבניות חממה בכיכר סדום - בקרקע, במצע מנותק, בחממה, בבית רשת ובשטח גלוי. השדה ע': 1218-1222.
15. חן י., אביעד צ. 1988. אפיון כימי ופיזיקלי של אפר פחם תחתי ופיתוח השימוש בו כמצע לגידול צמחים. דו"ח מסכם לשנת המחקר הראשונה.

16. חן י., אביעד צ. 1989. אפיון כימי ופיזיקלי של אפר פחם תחתי ופיתוח השימוש בו כמצע לגידול צמחים. דו"ח מסכם לשנת המחקר השניה.
17. חן י., אביעד צ. 1991. אפיון כימי ופיזיקלי של אפר פחם תחתי ופיתוח השימוש בו כמצע לגידול צמחים. דו"ח מסכם לשנת המחקר השלישית.
18. חן י., אביעד צ. 1998. בחינת פוטנציאל השחרור של יסודות רעילים מאפר פחם תחתי שמקורו בתחנת הכוח החדשה בחדרה, וקליטתם על-ידי צמחים. דו"ח מסכם.
19. חן י., אביעד צ. 1998. אפיון כימי ופיזיקלי של אפר פחם תחתי תוצר תחנות הכוח "רוטנברג" ופיתוח השימוש בו כמצע לגידול צמחים. דו"ח מסכם.
20. חן י., אביעד צ. 1999. גידול עגבניות צ'רי במצע המכיל אפר פחם ממויין. דו"ח מסכם.
21. חן י., גוטסמן א., ענבר י., גרינברגר א., נויבאואר י., גלבוש ש., אדלר א. 1991. גידול מילון בהדלייה במצעים מנותקים בבקעת הירדן. השדה ע"א: 1176-1172.
22. להב נ., שנקר מ., חן י. 1999. יסודות מדע הקרקע. פקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה, רחובות.
23. צביאלי י., חן י., ענבר י., אביעד צ., דייו ר., מיכאלי ד., וקנין ב., אופנבך ר., קטן י., גמליאל א., הדר א. 1991. שימוש חוזר במצע מנותק בגידול מילון אביבי בחממה בערבה. השדה ע"א: 1501-1495.