

פיתוח ריכוזי מטרה לעלה דיאגנוסטי לגידול קנאביס רפואי

2024

במימון קרן שה"מ

שאדי סרחאן - תחום קרקע, מים והזנת הצמח, אגף משאבי סביבה, שה"מ
נרית ברנשטיין, סיוון שיפוני - המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מכון וולקני
מולי זקס - תחום קרקע, מים והזנת הצמח, אגף משאבי סביבה, שה"מ

דו"ח מסכם לתכנית מספר 870-2025-21

תקציר

על פי מידע חדש מהשנים האחרונות, ייצור החומרים הרפואיים מצמח הקנאביס הרפואי מושפע מאוד ממשטר הדישון, ולכן יש צורך לייצב את מצב ההזנה בצמח בחלקות המסחריות, כדי לספק לתעשיית הפארמה מוצר רפואי בעל איכות כימית אחידה. דרך מעקב מקובלת לבקרת מצב ההזנה בצמחים בחקלאות היא אנליזת ריכוז יסודות הזנה ברקמה הצמחית, המבוצעת בעלים דיאגנוסטיים (עלים מייצגים).

שיטה זו היא בעלת יתרון ניכר בשל היותה שיטה כמותית המאפשרת לכוון את מצב ההזנה של הצמח לטווח ריכוזי מטרה אופטימליים ידועים. עם זאת, שיטה זו אינה מיושמת עדיין בתעשיית הקנאביס, משום שטרם הוגדרו, ולא ידועים ריכוזי מטרה מומלצים ליסודות ההזנה השונים בעלים הדיאגנוסטיים. במגוון ניסויים שנערכו בשבע השנים האחרונות בקבוצת המחקר של פרופ' נרית ברנשטיין ממכון וולקני, נקבעו ריכוזים אופטימליים ליסודות הזנה בתמיסת דישון בגידול במצע מנותק. בפרויקט הנוכחי נבחן הקשר בין תפקוד מיטבי של הצמח בניסויים אלו, לבין ריכוז יסודות הזנה בעלים הדיאגנוסטיים (אשר נשמרו לשם כך מניסויים אלו), לצורך פיתוח מדדים הנחוצים להכוונת אגרוטכניקת הגידול בשדות המסחריים. במהלך המחקר נבחנו דגימות של עלים דיאגנוסטיים שנדגמו בניסויי הזנה האלו לאורך השנים בשלב הווגטטיבי ובשלב ההפרחה.

אנליזות ריכוזי יסודות ההזנה בעלה המיצג מצמחים שגודלו בתנאי ההזנה המגוונים בניסויים השונים אשר עבורם גם אופיין התפקוד הפיסיולוגי וההנבה של הצמחים, אפשרו להגדיר סטנדרט לטווחי ריכוזים מיטביים ליסודות ההזנה Fe, Mn, Cu, N, P, K בשלב הגידול הווגטטיבי ובשלב ההפרחה. טווחי הריכוזים המיטביים שזוהו הם: 3.75-6.25 % ו- 1.64-4.11% עבור חנקן בשלב הגידול הווגטטיבי והרפרודוקטיבי בהתאמה; 0.31-0.55% ו- 0.598-0.186% עבור זרחן בשלב הגידול הווגטטיבי והרפרודוקטיבי בהתאמה; 2.34-3.89%, ו- 0.91-3.74% עבור אשלגן בשלב הגידול הווגטטיבי והרפרודוקטיבי בהתאמה; 71.7-160.6 ח"מ ו- 80.8-186.9 ח"מ עבור ברזל בשלב הגידול הווגטטיבי והרפרודוקטיבי, בהתאמה; 43.3-106.6 ח"מ ו- 17.6-228 ח"מ עבור מנגן בשלב הגידול הווגטטיבי והרפרודוקטיבי בהתאמה; ו- 3.7-6.2 ח"מ ו- 1.7-4.82 ח"מ עבור נחושת בשלב הגידול הווגטטיבי והרפרודוקטיבי בהתאמה. בינת קורלציות בין ריכוז יסודות הזנה בעלה המיצג בהשוואה לכלל ביומסת העלים על הצמח גלתה מתאם חלקי עם שונות בן יסודות הזנה ובין תנאי גידול, תוצאה המדגישה את חשיבות השימוש בעלה מיצג בהשוואה לאנליזת מינרלים לעמדתן מצב ההזנה בצמח הקנאביס.

מבוא

קנאביס (*Cannabis Sativa* L.) הוא צמח מרפא המוכר לאנושות ומתועד מזה כ- 6000 שנה. הצמח מכיל מגוון רחב של כ-1000 מטבוליטים שניוניים אשר המוכרים ביניהם הם קנבינואידים, טרפנים ופלבנואידים אשר הם הבסיס לפעילותו הרפואית.

לגבי צמחים רבים ידוע כי פרופיל המטבוליטים השניוניים (סוג המטבוליטים הקיימים בצמח וריכוזם) מושפע מאוד מתנאי הגידול, ביניהם דישון. מכיוון שמתן החומרים הפעילים בצורה בדידה אינו משיג את האפקט הרפואי המתקבל מתרופה שמוצתה מהחומר הצמחי, הטיפול הרפואי מבוסס על החומר הצמחי הנצרך בעישון, באידוי או במיצויים. לפיכך, חשוב מאוד לפתח תנאי גידול אופטימליים לצמח הקנאביס למיטוב וייצוב פרופיל המטבוליטים השניוניים בצמח, זאת בנוסף להשגת כמות יבול מיטבית.

בגלל מצבו החוקי של צמח הקנאביס, הוא לא נחקר מאז שנות החמישים ועד לשנים האחרונות, ולכן כמעט שלא קיים מידע אגרוטכני לגביו. מחקרים מהשנים האחרונות חשפו כי למשטר הדישון הניתן לצמח יש השפעה רבה על הרכב החומרים הרפואיים בצמח הקנאביס, לצד השפעה על התפתחות הצמח, תפקודו וכמות היבול שלו. אספקת החנקן (Saloner and Bernstein, 2021), הזרחן (Shiponi and Bernstein, 2021a), האשלגן, המנגן, האבץ והמגנזיום בשלב הפריחה (לא פורסם עדיין) משפיעה על ריכוז החומרים הרפואיים. כמו כן, אספקת החנקן (Saloner and Bernstein, 2020), הזרחן (Shiponi and Bernstein, 2021b), האשלגן (Saloner et al., 2019) והמגנזיום (Morad and Bernstein, 2023) בשלב הצימוח הווגטטיבי משפיעה על מורפולוגיית הצמח ועל תפקודו. מכאן עולה כי יש חשיבות רבה לבקרת מצב ההזנה בצמח הקנאביס כדי להשיג איכות רפואית מיטבית וכמות יבול מירבית.

בצמחי חקלאות מקובל להעריך את מצב ההזנה של הצמח באמצעות בדיקות עלים. ריכוז יסודות ההזנה משקף את מצב ההזנה של הצמח ומאפשר להתאים את תכנית הדישון לצורכי הגידול. ריכוז יסודות ההזנה בעלים משתנה בשלבים שונים של התפתחות הצמח וביחס לגיל העלה. לפיכך, השימוש באנליזת עלים ככלי דיאגנוסטי לבקרת מצב ההזנה מחייב הגדרה של עלה דיאגנוסטי, כלומר יש לדייק בבחירת העלה ולהגדיר מאיזה שלב גידול של הצמח יידגם, באיזה שלב של התפתחותו ומהו המיקום המדויק שממנו יילקח. לגבי מרבית הצמחים, העלה הדיאגנוסטי מוגדר כעלה הבוגר הצעיר ביותר, הנמצא על ענף מוגדר על הצמח, בשלב התפתחותו פנולוגית מוגדרת של הצמח.

מכיוון שהמחקר בקנאביס רפואי נמצא עתה בראשיתו, יש צורך להגדיר עלה דיאגנוסטי לגידול חדש זה. עלה דיאגנוסטי לקנאביס הוגדר כנהוג לצמחים אחרים, **כעלה הבוגר הצעיר ביותר על הגבעול המרכזי של הצמח** (Bernstein et al., 2019a). עד כה לא ידועים ריכוזי המטרה של מינרלים בעלה זה בהקשר לאיכות מיטבית של קנבינואידים ויבול, בשני שלבי הגידול של הצמח: שלב הצימוח (המתרחש בתנאי חשיפה ליום ארוך) ושלב הפריחה (המתרחש בתנאי חשיפה ליום קצר). מעבודות קודמות (Bernstein et al., 2019 a,b) וממאמרים המצוטטים בפיסקאות קודמות, ידועים ריכוזי יסודות הזנה באברי הצמח השונים (שורשים, פרחים, גבעולים וסך כל העלים בצמח, אך טרם נבחנו ריכוזים בעלה דיאגנוסטי, ולכן חסר בידינו כלי לאומדן מצב ההזנה בצמח. העובדה כי לא הוגדרו בעולם, ובכלל זה בישראל, ריכוזי מטרה בעלה הדיאגנוסטי, מקשה מאוד על הכוונת משטר הדישון בשטחי הגידול המסחריים. לכן, פרויקט זה מתמקד בהגדרת ריכוזי מטרה של מינרלים בעלה הדיאגנוסטי, להכוונת הדישון לשם קבלת איכות וכמות יבול מיטביים.

מטרת המחקר

מטרת מחקר הייתה לזהות טווח ריכוזי מטרה מומלצים ליסודות הזנה בעלה דיאגנוסטי בקנאביס רפואי בשלב הגידול הווגטטיבי ובשלב הגידול הרפרודוקטיבי (שלב הפריחה). זאת, בהקשר להתפתחות והנבה מיטבית של הצמח בצמחים שגדלו בממשקי הזנה שונים, באמצעות אנליזות עלים דיאגנוסטיים שנדגמו בניסויי הזנה קודמים.

חומרים ושיטות

כדי להעריך את טווח האופטימום עבור ריכוזי מינרלים בעלה מייצג של צמחי קנאביס רפואי, נערכו אנליזות של יסודות הזנה בעלים דיאגנוסטיים, שנשמרו מניסויי דישון קודמים. החומר השמור מניסויים אלו נאסף לצורך פיתוח ריכוזי מטרה מיטביים, בהתאם לתוצאות תפקוד הצמחים, כפי שהתקבלו בשלל הניסויים הללו. בניסויי ההזנה נבחן מספר פרמטרים רב מאוד, ביניהם: התפתחות מורפולוגית של הצמח, תפקודו הפיזיולוגי והכמות והאיכות הכימית של היבול, אשר אפשרו לקבוע את טיפולי האופטימום בכל ניסוי. בנוסף, נבחן גם ריכוז המינרלים בפרחים, בגבעולים, בתפרחות ובעלים (בכל העלים יחד על הצמח) בדיגומים הרסניים בסיום הניסוי. לצורך הפרויקט הנוכחי, דגימות העלה הדיאגנוסטי (אשר הוגדר כעלה הבוגר הצעיר ביותר) אשר נדגם בכל הטיפולים בניסויי דישון קודמים שימשו בפרויקט הנוכחי לקביעת ריכוזי מטרה.



איור 1: עלה מייצג בצמח קנאביס כפי שנדגם בניסויי הדישון. העלה הבוגר הצעיר ביותר, הוא עלה המניפה הבוגר שהגיע לגודל מלא בחלק העליון של הענף הראשי כפי שמסומן בחץ

בתום הדיגום העלים יובשו ב- 64°C למשך שלושה ימים ונשמרו עד לאנליזה. החומר השמור נטחן, ונשקל 0.1 גרם לעיכול החומר הצמחי בחומצה זרחתית ולעיכול נוסף בחומצה חנקתית (Bernstein et al., 2019). אנליזות יסודות ההזנה השונים בתמיסות העיכול בוצעה כמתואר ב- (Bernstein et al., 2019; Shiponi and Bernstein, 2021a,b; Saloner and Bernstein 2020, 2021). דוגמאות העלה המייצג נדגמו משלושה זנים של קנאביס רפואי (אנאפורנה של חברת קנדוק, ורויאל מדיק (RM), ודזרט קווין (DQ) של חברת טבע אדיר), מעשרה ניסויי הזנה בשלב הווגטטיבי (חנקן, סידן ומגנזיום) ובשלב הרפרודוקטיבי (חנקן, זרחן, מגנזיום, סידן, מנגן ואבץ). בכל הניסויים הצמחים הושרשו מייחורים ונשתלו במצע פרלייט בעציצים בנפח של 5 ליטר. פרלייט נבחר כמצע הגידול בשל התכונות האינרטיות שלו. הצמחים גודלו בחדרי גידול מבוקרים בטמפרטורה של $24-26^{\circ}\text{C}$ ולחות יחסית 45-60%. השקיה סופקה מטפטפות של 1 ליטר/שעה מתמיסת הזנה סופית. שלב הצימוח הווגטטיבי התבצע בתנאי יום ארוך (18:6 שעות לילה:יום), ותאורה סופקה על ידי נורות Metal halide בעוצמה של $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ במשך חודש. השריית פריחה בוצעה באמצעות יום קצר (12:12 שעות לילה:יום) על ידי הארה עם נורות HPS בעוצמה של $980 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ במשך חודשיים. במהלך הניסויים בוצעו בדיקות שגרתיות של מי ההשקיה והנקז. הטיפולים בניסויי הדישון מהם נדגמו העלים המייצגים, מפורטים בטבלה מס' 1.

ריכוזי יסודות ההזנה בתמיסת ההשקיה, מלבד היסוד הנבדק, היו (ח"מ):
 146 N-NO_3^- , 30 P-PO_4^{3-} , 14 N-NH_4^+ , 175 K^+ , $45\text{-}120 \text{ Ca}^{+2}$, 35 Mg^{+2} , $47\text{-}85 \text{ S-SO}_4^{2-}$,
 $2\text{-}57 \text{ Cl}^-$, 1.7 Fe^{+2} , 0.8 Mn^{+2} , 0.1 B^{+3} , 0.4 Zn^{+2} , 0.04 Cu^{+2} , and 0.03 Mo^{+2}

לקביעת טווח ריכוזי מטרה לתפקוד אופטימלי נבחרו מכל ניסוי הטיפולים בעלי הביצועים הגבוהים ביותר, שהוגדרו כטיפולים בהם יכול התפרחות שנמדד היה לפחות 85% מהיבול המקסימלי בטיפול המיטבי בכל ניסוי.

טבלה 1: ריכוזי הטיפולים בניסויי הדישון. כל יסוד נבדק בניסוי נפרד בחמישה ריכוזים.

טיפולים (מ"ג/ליטר)					היסוד הנבדק
30	80	160	240	320	N
5	15	30	60	90	P
10	50	100	150	200	Ca
2	20	35	70	140	Mg
0.05	0.2	0.85	1.6	8	Mn
0.05	0.1	0.3	1	4	Zn

תוצאות

תוצאות טווחי הריכוזים האופטימליים שזוהו בעלה המייצג של צמחי קנאביס בשני שלבי הגידול של הצימח הווגטטיבי ובהפרחה, מוצגות בטבלה 2. כאמור, הטווחים מייצגים את הריכוזים שנמצאו בעלה הדיאגנוסטי בצמחים בהם נמצא היבול המירבי (הם אינם מייצגים סף מינימום וסף מקסימום אופטימלי). בכל המקרים נמצא טווח ריכוזים דיי רחב כמאפיין ריכוז אופטימלי.

עבור חנקן: טווח ריכוזי האופטימום שזוהה הוא 3.75-6.25 % בשלב הגידול הווגטטיבי, 1.64-4.11% בשלב הגידול הרפרודוקטיבי.

עבור זרחן: טווח ריכוזי האופטימום שזוהה הוא 0.31-0.55% בשלב הגידול הווגטטיבי, ו-0.186-0.598% בשלב הגידול הרפרודוקטיבי.

עבור אשלגן: טווח ריכוזי האופטימום שזוהה הוא 2.34-3.89% בשלב הגידול הווגטטיבי, ו-0.91-3.74% בשלב הגידול הרפרודוקטיבי.

עבור ברזל: טווח ריכוזי האופטימום שזוהה הוא 71.7-160.6 ח"מ בשלב הגידול הווגטטיבי, ו-80.8-186.9 ח"מ בשלב הגידול הרפרודוקטיבי.

עבור מנגן: טווח ריכוזי האופטימום שזוהה הוא 43.3-106.6 ח"מ בשלב הגידול הווגטטיבי, ו-17.6-228 ח"מ בשלב הגידול הרפרודוקטיבי.

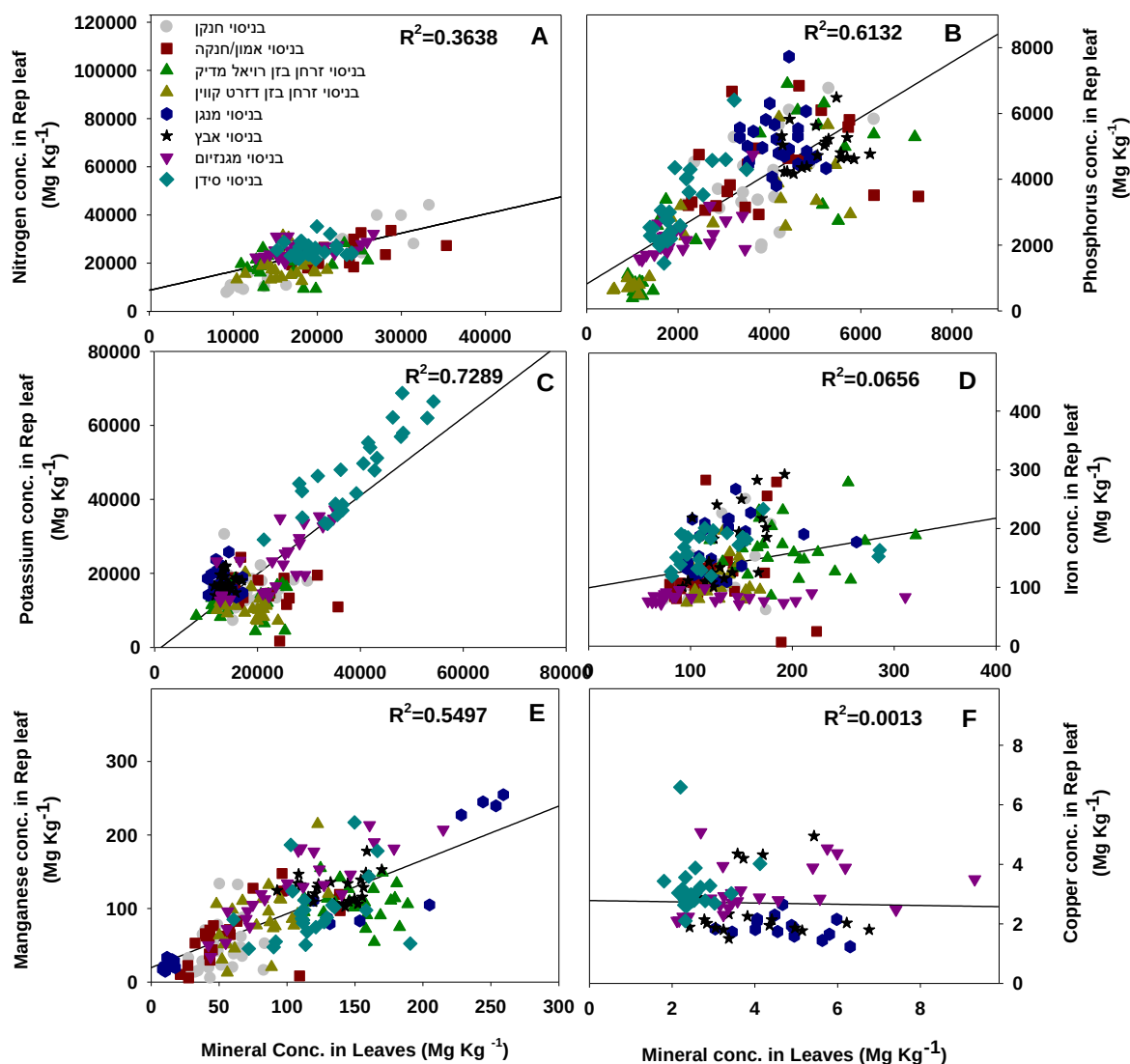
עבור נחושת: טווח ריכוזי האופטימום שזוהה הוא 3.7-6.2 ח"מ בשלב הגידול הווגטטיבי, ו-1.7-4.82 ח"מ בשלב הגידול הרפרודוקטיבי.

טבלה 2: ריכוזי האופטימום של המינרלים N, P, K בעלה מייצג בשני שלבי הגידול, הווגטיבי והפרודוקטיבי. התוצאות הן טווח שהתקבל מדוגמאות עלה מייצג שנאספו בניסויי הדישון.

ריכוז בעלה מייצג (%)		יסוד הזנה
שלב הגידול הפרודוקטיבי	שלב הגידול הווגטיבי	
4.11 - 1.64	6.25 - 3.75	N
0.598 - 0.186	0.55 - 0.31	P
3.74 - 0.91	3.89 - 2.34	K
ריכוז בעלה מייצג (ppm)		
186.9 – 80.8	160.6 – 71.7	Fe
228.0 – 17.6	106.6 – 43.3	Mn
4.82 – 1.7	6.2 – 3.7	Cu

תנאי סביבה וגנטיקה יכולים להשפיע מאוד על התגובה של הצמח לתנאי ההזנה, ולכן אין להסתכל על טווח הריכוזים כקשיח אלא גמיש. ייתכן כי זנים מסוימים יימצאו רגישים לטווח הנמוך או לטווח הגבוה שזוהו, ובשלב זה לא ניתן לשלול את האפשרות כי בזנים אחרים יתקבלו ביצועים אופטימליים גם בטווחים מעט גבוהים או נמוכים יותר.

על מנת לבחון באם הריכוז בעלה המייצג דומה לריכוז בכלל העלווה של הצמח, זאת בכדי לעזור בהכוונת העלווה שיש לדגום לאבחון מצב ההזנה, ביצענו השוואה וחישבנו קורלציה בין ריכוז המינרלים בעלווה כולה לריכוזם בעלה המייצג (איור 2). ההשוואה חשפה כי הקורלציה בין ריכוז המינרלים בעלה המייצג לריכוזם בסה"כ ביומסת העלווה על הצמח שונה בין המינרלים השונים (איור 2). עבור זרחן, אשלגן, ומנגן נמצאה קורלציה גבוהה יותר מאשר עבור חנקן, ברזל, אבץ, ונחושת עבורם נמצאה קורלציה חלשה. במרבית הניסויים ריכוז החנקן והזרחן נמצאו גבוהים יותר בעלה המייצג, וריכוז יתר המינרלים נמצאו דומים\גבוהים\ נמוכים בעלווה כולה בהשוואה לעלה מייצג כתלות בניסוי.



איור 2: גרסיה לינארית לריכוזי המינרלים חנקן (A), זרחן (B), אשלגן (C), ברזל (D), מנגן (E), ונחושת (F) בעלה המייצג (ציר Y) כתלות בריכוזם בכלל העלווה על הצמח (ציר X). תוצאות אנליזה של דגימות עלה מייצג מ-6 ניסויי הזנה קודמים בהם נבדקה השפעת דישון בחנקן (Saloner and Bernstein 2020,2021), יחס אמון/חנקן (Saloner and Bernstein 2022b), זרחן (Shiponi and Bernstein 2021a,b), ומגנזיום (Morad and Bernstein, 2023), ואבץ ומנגן (לא פורסם).

דיון

תפקוד אופטימלי ויצרנות גבוהה תלויים רבות במצב ההזנתי של הגידול. דרישות ההזנה של הצמח שונות בין גידולים שונים ותלויות הן בגנטיקה והן בתנאי הסביבה (Harris, 1992; Chapin, 2013; Wilkinson and Mays, 2015). המחקר הנוכחי בחן 350 דגימות עלה מייצג משלושה זנים של צמחי קנאביס רפואי שגודלו בתנאי סביבה דומים, וכתגובה לשינוי יישום ריכוזי מינרלים יחידניים בניסויים בהם נבדקה השפעת ריכוזים עולים של מינרלים. האחידות בתנאי הגידול והשימוש בגנטיקות מכמוטיפים שונים מאפשרים להגדיר טווח ריכוזים אופטימלי לייצור יכול גבוה.

בטבלה 2 מוצגים טווחי הריכוזים האופטימליים שזיהינו בעלה מייצג של צמחי קנאביס רפואי, עבור המינרלים Cu, Mn, Fe, N, P, K. הריכוזים שנמצאו במחקר זה עבור קנאביס רפואי דומים לריכוזים שנמצאו אופטימליים עבור המפ, שהוא טיפוס קנאביס שתורבת במקור לייצור סיבים וזרעים. זאת, מלבד חנקן בשלב הרפרודוקטיבי שנמצא מעט נמוך יותר בקנאביס רפואי (1.6%-4.1%), בהשוואה להמפ (4.28%-5-6% אצל Cockson et al., 2019 ו- Iványi and Izsáki, 2009). הדמיון בריכוזים בין השלב הווגטיבי בקנאביס רפואי להמפ נעוץ, ככל הנראה, בשלב הפיזיולוגי שבו הם נבחנו. מאחר שקנאביס מטיפוס המפ מיועד בעיקר לייצור סיבים, הדיגום בוצע כאשר הצמחים גודלו בתנאי יום ארוך, המשרה צימוח וגטטיבי, בדומה לדיגום שבוצע בשלב הצימוח הראשון (השלב הווגטיבי) במחקר הנוכחי. הירידה בריכוז החנקן בשלב הרפרודוקטיבי לעומת הווגטיבי נמצאה בעבר בקנאביס רפואי בסך כל העלים של הצמח בניסויי החנקן (Saloner and Bernstein, 2020, 2021), זרחן (Shiponi and Bernstein, 2021a, 2021b), והאשלגן (Saloner et al., 2019; Saloner and Bernstein, 2022), שבוצעו במעבדתנו. רימוביליזציה לאיברים הרפרודוקטיביים בשלב הפריחה גורמת לריכוזים נמוכים יותר בעלים (Schrader, 1984; Ciampitti and Vyn, 2011). בנוסף, חנקן ידוע כמעודד גידול וגטטיבי, וריכוזי חנקן גבוהים יכולים להשרות צימוח עלוותי על חשבון רפרודוקטיבי.

הטווח הרחב של הריכוזים האופטימליים שמצאנו עבור ייצור יבול מקסימלי בקנאביס רפואי, מעיד על דרישות הזנה גמישות של הצמח. בבחירת ריכוז המטרה יש לקחת בחשבון גם את השפעת ההזנה על ריכוזי קנבנואידים וטרפנים. נמצא כי ריכוזי מחסור של N, P, K מעלים את ריכוזי המטבוליטים המשניים בתפרחות בצמחי קנאביס רפואי (Caplan et al., 2017; Saloner and Bernstein, 2021, 2022; Shiponi and Bernstein, 2021b) וחסר בינתיים מידע על השפעת שאר יסודות ההזנה.

הריכוז הגבוה יותר של חנקן בעלה המייצג בהשוואה לעלווה כולה (איור 2) אינו מפתיע שכן בשל המוביליות הגבוהה שלו בצמח הרבה מהחנקן עובר ריטרנסלוקציה מעלים מבוגרים (Maynard, 1979; Pilbeam, 2015). ריכוז זרחן בעלים ירד עם גיל העלה ולכן ריכוז זרחן היה בד"כ גבוה בעלה מייצג בהשוואה לעלווה כולה (Hopkins, 2015). תוצאות ההשוואה בין ריכוז יסודות ההזנה בעלה המייצג ובעלווה כולה חושפות כי בדומה לידוע לצמחים אחרים, גם בקנאביס יש חשיבות רבה להגדרת מצב ההזנה בעלה ייחוס (עלה מייצג) ולעמוד את מצב ההזנה על פי הריכוזים בעלה זה בהשוואה לטווח האופטימום המוגדר עבור היסודות השונים (איור 2).

יש להביא בחשבון שהאבחון המדויק ביותר של מחסורים ורעילויות בצמחים נעשה אמנם באמצעות אנליזת עלים, אולם זהו תהליך הדורש מיומנות מסוימת. העלים הנדגמים צריכים להיות באותו גיל פיזיולוגי, מאותו מיקום בצמח ובתנאי סביבה דומים (טמפרטורה, לחות, תאורה וכו'). לכן, על מנת להעריך את מצב ההזנה של הצמח ולהשוות לריכוזים הניתנים במחקר זה, יש להקפיד על דיוק הרקמה הנדגמת.

תודות

ניסויי ההזנה השונים והאנליזות הכימיות התבצעו על ידי הסטודנטים סיון שיפוני, דלית מורד, ואביה סלונר, כחלק מעבודות הגמר בהדרכת פרופ' נירית ברנשטיין. הפרויקט מומן על ידי קרן שה"מ.

- Bernstein, N., Gorelick, J., Zerahia, R., and Koch, S. (2019a). Impact of N, P, K, and humic acid supplementation on the chemical profile of medical cannabis (*Cannabis sativa* L). *Front. Plant Sci.* 10, 736. doi:10.3389/fpls.2019.00736.
- Bernstein, N., Gorelick, J., Koch, S. (2019b). Interplay between chemistry and morphology in medical cannabis. *Indust. Crop Prod.* 129:185-194.
- Caplan, D., Dixon, M., and Zheng, Y. (2017). Optimal rate of organic fertilizer during the flowering stage for cannabis grown in two coir-based substrates. *HortScience* 52, 1796–1803. doi:10.21273/HORTSCI12401-17.
- Chapin, F. S. (2013). The mineral nutrition of wild plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 11, 233–260.
- Ciampitti, I. A., and Vyn, T. J. (2011). A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *F. Crop. Res.* 121, 2–18. doi:10.1016/j.fcr.2010.10.009.
- Cockson, P., Landis, H., Smith, T., Hicks, K., and Whipker, B. E. (2019). Characterization of nutrient disorders of Cannabis sativa. *Appl. Sci.* 9, 4432. doi:10.3390/app9204432.
- Harris, P. M. (1992). Mineral nutrition. In: P.M. Harris (Ed.), *The Potato Crop: The Scientific Basis for Improvement*. 2nd Edition. Chapman & Hall, London, pp. 162–213.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager, I., et al. (2012). “Functions of Macronutrients,” in *Marschner’s Mineral Nutrition of Higher Plants*, ed. Marschner P (London: Academic Press), 135–190. doi:10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6.
- Iványi, I., and Izsáki, Z. (2009). Effect of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization on nutritional status of fiber hemp. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 40, 974–986. doi:10.1080/00103620802693466.
- Morad, D., Bernstein, N. (2023). Response of drug-type medical cannabis to magnesium (Mg) supply at the vegetative growth phase. *Plants.* 12(14), 2676; <https://doi.org/10.3390/plants12142676>
- Saloner, A., Bernstein, N. (2020). Response of medical cannabis (*Cannabis sativa* L.) to nitrogen supply under long photoperiod. *Front. Plant Sci.* 11, 1517. doi:10.3389/fpls.2020.572293.
- Saloner, A., Bernstein, N. (2021). Nitrogen supply affects cannabinoid and terpenoid profile in medical cannabis (*Cannabis sativa* L.). *Ind. Crops Prod.* 167, 113516. doi:10.1016/j.indcrop.2021.113516.
- Saloner, A., Bernstein, N. (2022a). Effect of potassium (K) supply on cannabinoids , terpenoids and plant function in medical cannabis. *Agronomy* 12, 1242.
- Saloner, A., and Bernstein, N. (2022b). Nitrogen source matters: High NH₄/NO₃ ratio reduces cannabinoids, terpenoids, and yield in medical cannabis. *Front. Plant Sci.* 13, 1–17. doi:10.3389/fpls.2022.830224.

- Saloner, A., Sacks, M. M., and Bernstein, N. (2019). Response of medical cannabis (*Cannabis sativa* L.) genotypes to K supply under long photoperiod. *Front. Plant Sci.* 10, 1–16. doi:10.3389/fpls.2019.01369.
- Schrader, L. E. (1984). Functions and transformation of nitrogen in higher plants. In: Hauck RD (Ed.) Nitrogen in Crop Production. pp. 55-60.
- Shiponi, S., and Bernstein, N. (2021a). Response of medical cannabis (*Cannabis sativa* L.) genotypes to P supply under long photoperiod: Functional phenotyping and the ionome. *Ind. Crops Prod.* 161, 113154. doi:10.1016/j.indcrop.2020.113154.
- Shiponi, S., and Bernstein, N. (2021b). The highs and lows of P supply in medical cannabis: Effects on cannabinoids, the ionome, and morpho-physiology. *Front. Plant Sci.* 910. doi:10.3389/fpls.2021.657323.
- Wilkinson, S. R., and Mays, D. A. (2015). Mineral nutrition. *Tall Fescue*, 41–73. doi:10.2134/agronmonogr20.c4.
- Wong, M. (2005). Visual symptoms of plant nutrient deficiencies in nursery and landscape plants. *Soil Crop Manag.* 10, 1–4.