



*תוצאות המחקר מצביעות על נוכחות משאב טבעי בעל ערך בשפכי בתי בד. ולכן, מוצע כאן טיפול קדם המפריד בצורה ראשונית בין המרכיבים השונים שבשפכים, אוסף את המולקולה הפעילה הידרוקסיטירוזול, ומרכז אותה בתוך תמיסת ההשקיה הניתנת לצמחים ולמטעים בקרקעות מלוחות" | צילום: Flavio, Flickr, CC BY 2.0

תרכובות פנוליות שמקורן בשפכי בתי בד מגבירות את קצב הגדילה וההתפתחות של צמחייה הסובלת מעקת מלח

חזית המחקר

גיליון חורף 2023 / כרך 14(4)

4 בפברואר, 2024

עולא דיב

בית ספר מקיף אום אלפחם

נאיל אבו רעד

בית ספר מקיף אום אלפחם

אלאא מחאג'נה

בית ספר מקיף אום אלפחם

ציטוט מומלץ

עאסלה ס, שחאדה-נאסר ע, חליפה נ ואחרים. 2023. תרכובות פנוליות שמקורן בשפכי בתי בד מגבירות את קצב הגדילה וההתפתחות של צמחייה הסובלת מעקת מלח. אקולוגיה וסביבה 14(4).

על קצה המזלג

- המלחת קרקעות חקלאיות היא בעיה משמעותית ברחבי העולם, וסיבה לדאגה מיוחדת בישראל בשל היותנו מובילים עולמיים בהשקיית שטחים חקלאיים בקולחים.
- הזרמת שפכי בתי בד, המאופיינים בעומס גבוה מאוד של חומר אורגני, למכוני טיהור שפכים עלולה לגרום לקריסתם ולזרימה של שפכים לא מטופלים לנחלים.
- תרומה לפתרון שתי הבעיות הסביבתיות האלה יכולה לבוא מפיתוח טכנולוגיות חדישות, שיאפשרו הוצאת רכיבים מסוימים מתוך שפכי בתי בד, ושימוש בהם לגידול צומח בקרקעות מלוחות.
- במאמר מודגם כיצד הוספת נגזרת של תרכובות פנוליות, הנמצאת בשפכי בתי בד, לקרקע מלוחה, מעודדת צמיחה של בזיליקום.
- מחקר זה מוסיף נדבך נוסף למדיניות פיזור עקר בשטחים חקלאיים, כפתרון ההופך מטרד למשאב.

מערכת אקולוגיה וסביבה

תקציר

שפכי בתי הבד בצורתם הגולמית מאופיינים בתכולה רעילה שעלולה לגרום לזיהום קרקע ומי תהום, לעיכוב גדילת צמחים ולפגיעה במאזן האקולוגי ובמגוון הביולוגי. למרות זאת, טכנולוגיות טיפול חדישות יכולות להפוך שפכים אלה לידידותיים לסביבה, היות שהם מכילים תרכובות פנוליות, שנגזרותיהן, כדוגמת הידרוקסיתירוזול, הן בעלות ערך.

במחקר הנוכחי נבחנו פעילות הידרוקסיתירוזול ממקור מסחרי בהגברת סבילות צמחי ריחן (בזיליקום) לריכוז מלח גבוה. במהלך ניסוי קרקע הושקו צמחי הביקורת בתמיסה רגילה למשך שבעה שבועות. לעומתם, קבוצות הטיפול הושקו בתמיסת מלח למשך שישה שבועות בלבד, ובשבוע השביעי הושקו בתמיסה רגילה או בתמיסה רגילה בתוספת ריכוזים שונים של הידרוקסיתירוזול.

עקת המלח גרמה לירידה בקצב הגדילה עד 34% בהשוואה לקבוצת הביקורת. חשיפת צמחי הטיפול, החל מהשבוע השביעי לניסוי, לתוספת הידרוקסיתירוזול בריכוז 3 חלקיקים למיליון (חל"מ) גרמה לשיפור המשמעותי ביותר: קצב הצמיחה הגיע ל-93% מקצב הצמיחה בקבוצת הביקורת, ומספר העלים עלה ל-73% בהשוואה לקבוצת הביקורת.

התוצאות מצביעות על נוכחות משאב טבעי בעל ערך בשפכי בתי בד. ולכן, מוצע כאן טיפול קדם המפריד בצורה ראשונית בין המרכיבים השונים שבשפכים, אוסף את המולקולה הפעילה הידרוקסיתירוזול, ומרכז אותה בתוך תמיסת ההשקיה הניתנת לצמחים ולמטעים בקרקעות מלוחות, כדוגמת אלה שבעמק יזרעאל. התוצאות מראות את חשיבות שיתוף הפעולה בין משרדי הממשלה לשם פתרון בעיות סביבה וחקלאות. מצד אחד ניתן להיפטר מהזיהום, ומצד שני ניתן להרוויח בחקלאות, ולכן שיתוף הפעולה מביא לרווח כפול לסביבה, ותורם לחקלאות בת-קיימא.

מבוא

אחת התוצאות החמורות של תופעת שינוי האקלים היא הפגיעה בחקלאות בעקבות העלייה בריכוז המלח בקרקעות. קצב ההתאיידות הגבוה הנגרם מהעלייה בטמפרטורה מגדיל את ריכוז המלח בקרקע. ההתמודדות עם האיום הזה מחייבת פתרונות מתקדמים לשמירה על יציבות המערכת האקולוגית והביטחון התזונתי העולמי.



מסיק זיתים נערך בישראל בסביבות אוקטובר. הדרך המסורתית למסיק זיתים היא בשיטה הידנית, הדורשת כוח אדם רב / צילום: עוזי פז, פיקיוויקי, CC BY 2.5

קרקע חקלאית נחשבת מלוחה כאשר ריכוזי המלחים בה הוא מעל ל-3,000 חל"מ (חלקיקים למיליון, ppm) או כשהמוליכות החשמלית שלה היא מעל 500 מיליסימנס, ונחשבת בעלת מליחות בינונית בטווח ריכוזי מלחים של 1,000–3,000 חל"מ או כשהמוליכות החשמלית שלה היא 167–500 מיליסימנס. בריכוז מלחים נמוך יותר הקרקע הנחשבת רגילה ובלתי מלוחה [13].

המלחת קרקעות חקלאיות היא בעיה עולמית המשפיעה על כ-20% מהקרקעות המושקות, מה שעלול לגרום להפחתה מהותית בכמות היבולים המופקים בשטחים אלה ולהעמיד בסכנה את הביטחון התזונתי עבור אוכלוסיית העולם הגדלה [2, 10]. את רוב מיני הגידולים החקלאיים לא ניתן לגדל בקרקע מלוחה. צמחים מתמודדים עם עקת מלח, בין השאר, בשינויים ברמת ביטוי הגנים, שבסופו של דבר יכולים להביא לשחרור רעלים, כגון מי חמצן, הנוצרים בשל חשיפת התאים למלחים. כאשר מי החמצן נוצרים, הם יכולים להפעיל תגובות הגנה נוספות כדי להביא לשיקום המאזן בתוך התאים ולהתאוששות הצמיחה [16]. כמו כן, עקת מלח פורט, מפעילות לעיתים קרובות מסלולי איתות דומים, המתבטאים גם הם ברמת ביטוי הגנים. מסלולי האיתות גורמים להפרשת חומרים, כגון חלבוני עקה, ולהעלאת רמת נוגדי חמצן שמנטרלים את ההשפעה השלילית של פעולת החמצון שנגרמת ממלח וממי חמצן שנוצרים כתגובה לו. בעקבות ביטוי מוגבר של הגנים המשופעלים בשל החשיפה לריכוזי המלח מצטברים מומסים ספציפיים, כגון כליומין (chelomin), פפטידים נוגדי חמצן ותרכובות פנוליות ונגזרותיהן, שמטרתם הגנה על התאים מפני נזקי החמצון. חומצה אצטילסליצית (acetylsalicylic acid) היא דוגמה לתרכובת פנולית, וחומצה אסקורבית (המוכרת כוויטמין C) וחומצה ג'סמונית (jasmonic acid) הן דוגמאות לנגזרות של תרכובות פנוליות. כל המומסים האלה מפחיתים את הנזק שנגרם מעקת המלח. בהקשר זה, דווח כי חשיפת צמחים שסובלים מעקת מלח לתרכובות הפנוליות ולנגזרותיהן יכולה לנטרל את ההשפעה השלילית של עקת מלח על צמחים. התרכובות האלה פועלות כמצע ראשוני במסלול אנזימטי ביוכימי בתוך התאים, שיכול להביא לנטרול רעילותם של מי חמצן המצטברים בתאים בעקבות חשיפת הצמח לעקת מלח. נוסף על כך, החומצות הללו מתפקדות כנוגדי חמצון וממלאות תפקיד מפתח בוויסות ובצמיחה של צמחים הסובלים מעקה [3].



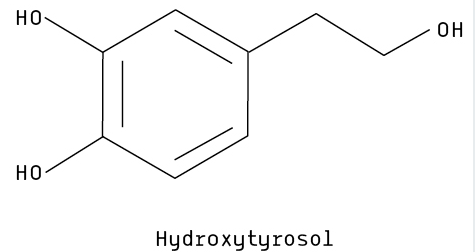
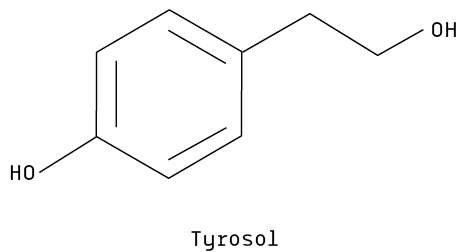
'חשיפת צמחים שסובלים מעקת מלח לתרכובות הפנוליות ולנגזרותיהן יכולה לנטרל את ההשפעה השלילית של עקת מלח על צמחים' | צילום: Flavio, Flickr, CC BY 2.0

שפכי בתי הבד נוצרים בתהליך ייצור שמן הזית בעיקר במערכת התלת-פאזית המאופיינת בניצול כמויות גדולות של מים בעת הסחיטה, ולבסוף במיצוי השמן בשיטת הצנטריפוגה. בזמן הסחיטה נוצרות שלוש פאזות: שמן, שפכים ופסולת מוצקה. בתהליך זה מוסיפים מים כדי לשפר את ההפרדה בין שני התוצרים: שמן וחומר מוצק. המערכת התלת-פאזית מאופיינת בכך שמכל טונה של זיתים מתקבלים כ-0.2 טונה של שמן זית (המקבילים ל-0.217 מ"ק) ועד 1.6 מ"ק של שפכי בתי בד [6, 17]. כלומר, נפח השפכים הוא בערך פי 7-8 מנפח השמן שמופק. מדי שנה, במהלך התקופה הקצרה של מסיק עצי הזית והפקת שמן הזית, משתמשים ברחבי העולם בכ-12 מיליון טונות של זיתים לייצור כ-2.4 מיליון טונות שמן זית (המקבילים ל-2.6 מיליון מ"ק), ובתהליך נוצרים כ-19 מיליון מ"ק של שפכי בתי בד שהם 7-8 פעמים יותר מנפח השמן הנוצר [8, 14].

טירוזול (tyrosol) והידרוקסיטירוזול (hydroxytyrosol) (איור 1) הם תרכובות של פנולים פלבנואידים הנמצאות בשמן זית, ותורמות לטעמו המר ולעפוצות. נוסף על כך, הן נחשבות למרכיב בריאותי רצוי בשמן הזית [15], בשל היותן נוגדי חמצון טבעיים בו, והן ניחנות בשורה של השפעות מועילות, החל מריפוי כוויות שמש ועד הורדת כולסטרול, לחץ דם וסיכון למחלות באופן כללי [11]. שפכי בתי הבד עשירים בפנולים (תרכובות אורגניות המבוססות על פנול) שניתנים להפקה ולניצול כנוגדי חמצון טבעיים לתעשיות המזון והתרופות [7, 18]. בדרך כלל, 2% מסך הפנולים נמצאים בשמן זית, ו-98% עוברים לשפכים [11].

איור 1. המבנה הכימי של טירוזול והידרוקסיטירוזול

התרכובות האלה מתאפיינות בטבעות פנוליות, ושכיחות בשמן זית ובקליפת פרי הזית. חומרים פנוליים נוספים יכולים לחקות את הפעילות של טירוזול והידרוקסיטירוזול הודות למבנה הכימי הדומה שלהם.



איור 1

המבנה הכימי של טירוזול והידרוקסיטירוזול

התרכובות האלה מתאפיינות בטבעות פנוליות, ושכיחות בשמן זית ובקליפת פרי הזית. חומרים פנוליים נוספים יכולים לחקות את הפעילות של טירוזול והידרוקסיטירוזול הודות למבנה הכימי הדומה שלהם.



ניקוי זיתים בבית בד לפני ריסוקם | צילום: Flavio, Flickr, CC BY 2.0

במשך תקופה ארוכה נחשבו שפכי בתי בד כפסולת מסוכנת ובעלת השפעה שלילית על הסביבה, ויצרו עומס כלכלי על תעשיית שמן הזית. עם זאת, בעשור האחרון השתנתה ההשקפה הזו, והשפכים זכו להכרה כחומר מוצא פוטנציאלי המאופיין בעלותו הנמוכה ובעושר תרכובות אורגניות המאופיינות בפעילות ביולוגית וכימית, בייחוד פנולים, כפי שצוין לעיל. שפכי בתי בד הם מקור עשיר של חומרים נגד פטריות, ויש להם ערך כחלופה לקוטלי פטריות כימיים בלתי פריקים ביולוגית. פעילותן החזקה של תמציות עשירות בהידרוקסיטירוזול כקוטלות פטריות נבחנה בהצלחה נגד *Botrytis cinerea* בעגבניות [9, 21].

צמח הריחן (בזיליקום, *Ocimum basilicum*) הוא צמח עשבוני ממשפחת הקנבונים. הריחן נמצא בשימוש נרחב במטבחים וברפואה העממית, והוא ידוע בריחו ובטעמו הייחודיים [19]. לשימוש בריחן כצמח מודל במחקר יש יתרונות רבים, היות שקל לגדל אותו ולעקוב אחרי התארכות הנוף (החלק הירוק בצמח) והשתנות מספר העלים, ומפני שהוא מכיל תרכובות אורגניות (כמו פנולים ונגזרותיהם, פלבנואידים, פלבנוולים ואלכוהולים) שעשויות להיות מעורבות במנגנון ההתמודדות עם עקת מלח [4]. כמו כן, הריחן מכיל תרכובות נוגדות חמצון, שיכולות לסייע בהגנה על תאים, ולכן סביר להניח כי שהן יכולות לנטרל את השפעת החמצון שנגרם בגלל חשיפת השורשים לעקת מלח [12]. במחקר שנערך לאחרונה הראו החוקרים כי פנולים ותמציות טבעיות בודדות שמקורם בשפכי בתי הבד, הם מרכיבים פעילים התורמים להגברת הסבילות (tolerance) של צמחים לעקת מלח [12]. במחקר הנוכחי בוצע מעקב אחרי השפעתו של ההידרוקסיטירוזול על קצב התארכות צמחי ריחן ועל מספר העלים על

הצמח. שאלת המחקר היא מהי השפעת ריכוזים שונים של הידרוקסירזול על התאוששות צמחים הנתונים בעקת מלח?



תלמידי בית ספר במהלך ניסוי גידול בזיליקום / באדיבות: צוות המחקר באקדמיית אלקאסימי ובית הספר "מקיף אום אלפחם"

שיטות וחומרים

המחקר בוצע במכון לחינוך מדעי-טכנולוגי, אקדמיית אלקאסימי, על-ידי צוות תלמידים מכיתה י"ב מהמגמה המדעית בבית הספר מקיף אום אלפחם. התלמידים ביצעו את המחקר במעבדה ובהנחייה של צוות המכון. התלמידים עם צוות המדעים בבית הספר יזמו את המחקר לאחר ביקורים במכון לחינוך המדעי באקדמיית אלקאסימי, ולאחר שהתרשמו מהנעשה במכון, החליטו להצטרף לצוות המחקר במעבדות המכון.

גידול הצמחים

שתילי ריחן נרכשו ממשלתה בגליל וגודלו בעציצים בנפח של 500 מ"ל בתוך קרקע מסוג טרה רוסה במשקל 0.5 ק"ג, בהתאם לתיאור השיטה ^[1]. השתילים היו אחידים מבחינת הגיל (כ-20 ימים), הגובה (15–18 ס"מ) והמצב הפנולוגי (עלוה, כ-15 עלים בממוצע). הצמחים הועברו לחדר נביטה עם תנאים מבוקרים: טמפרטורה של 27 ± 2 מעלות צלזיוס, תאורה של 35 ואט למ"ר במנורות לד לפרק זמן של 12 שעות ביממה, ולחות של 35% ביום ו-60% בלילה. מערכת הניסוי הורכבה משלוש קבוצות עיקריות: (1) **צמחי הביקורת** גודלו שבעה שבועות (49 ימים) עם השקיה בתמיסה רגילה ללא מלח וללא הידרוקסירזול; (2) **צמחי הטיפול א'** גודלו שישה שבועות (42 ימים) עם השקיה יומית ב-35 מ"ל תמיסת מלח (NaCl בריכוז של 80 מילימולר), שיוצרת עקת מלח בינונית והשפעה שלילית ברורה. בשבוע השביעי הושקו בתמיסה רגילה, וכך התאפשרה בדיקת התאוששות הצמחים מהעקה ^[4]; (3) **צמחי הטיפול ב'** גודלו שישה שבועות (42 ימים) עם השקיה בתמיסת מלח, אך מתחילת השבוע השביעי הושקו בתמיסה רגילה בתוספת ריכוזים שונים של הידרוקסירזול (1, 2, 3, 4 חל"מ). תמיסת ההידרוקסירזול נרכשה מחברת Sigma Aldrich.

קצב גדילת הנופים

כדי למדוד את התארכות הנופים עקבנו אחר ההתארכות היומית (ביחידות ס"מ) של אחד הענפים בצמרת הצמח. כל ענף כזה

סומן בתחילת הניסוי בסרט אדום בכל מערכת ניסוי. קצב ההתארכות היומי (ביחידות ס"מ ליום) חושב על פי ההבדל באורך המצטבר בסוף הניסוי והאורך ההתחלתי, והתוצאה חולקה ב-49 ימים.

התארכות הנופים של קבוצת הטיפול ב' נמדדה בנוכחות הידרוקסיטירוזול בריכוזים שונים בהשוואה לקבוצת הטיפול א' שלא קיבלה הידרוקסיטירוזול, וגם בהשוואה לקבוצת הביקורת שלא סבלה מעקת מלח [4,5]. התארכות הענפים המסומנים נקבעה ביחס לנקודת הקביעה הראשונית שהיא תחילת הענף [5].

שיעור העלים

בסוף הניסוי נספרו העלים בכל צמח בקבוצות הטיפול ובקבוצת הביקורת ומספרם הושווה למספר העלים המצטבר בצמחי הביקורת. שיעור העלים בכל טיפול חושב בהתאם למספר העלים המצטבר בסוף השבוע השביעי בהשוואה למספרם על צמח הביקורת (40 עלים). שיעור העלים על צמחי הביקורת הוגדר כ-100%.

עיבוד סטטיסטי

ההבדלים בין שש קבוצות הניסוי (ביקורת, תוספת מלח בלבד, תוספת מלח והידרוקסיטירוזול 1 חל"מ, 2 חל"מ, 3 חל"מ ו-4 חל"מ) נבדקו במבחן ANOVA חד-כיווני. הגרפים והמבחנים הוכנו באמצעות תוכנת המחשב GraphPad Prism 8. בכל טיפול נעשה שימוש בחמישה שתילים (ריבוי פריטים), והבדיקות בוצעו בשלוש חזרות.



ריסוק זיתים באבן ריחיים בתהליך ייצור שמן זית בבית הבד של 'סבא חביב', קיבוץ פרוד | צילום: David Shankbone, Wikimedia, CC BY 3.0

תוצאות

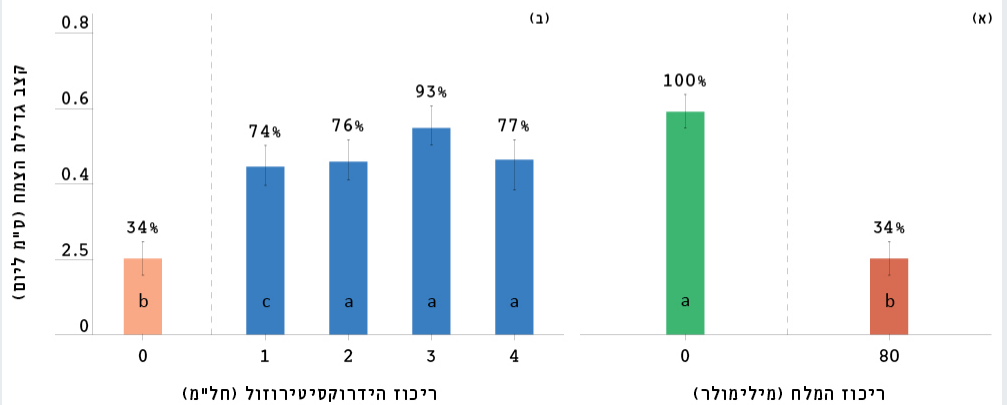
זשפעת עקת מלח על גדילת הצמחים

קצב הגדילה היומי של צמחי הביקורת הוגדר כ-100% ונקבע כ-0.59 ס"מ ליום. נמצא שקצב הגדילה של צמחי ריחן שהושקו

בתמיסת המלח ירד לשליש מערכו (34%) בהשוואה לקבוצת הביקורת (איור 2). כשצמח סובל מעקת מלח, נפגע כושר קליטת המים שלו. בעקבות זאת פוחתים קצב התארכות הצמח ומספר העלים הצומחים בו, ובתנאי עקה חריפים הצמח יגיע לכמישה ולמוות. קצב התארכות הצמחים הלך וירד בשל ההשקיה המתמשכת בתמיסת המלח.

איור 2. השפעת עקת מלח על גדילת הצמחים

באיור מוצגים ממוצעי הקצב היומי לגדילת צמחי ריחן בעקת מלח ובריכוזים שונים של הידרוקסטיירוזול. (א) השפעת עקת המלח (80 מילימולר NaCl) על קצב ההתארכות היומי של צמחי ריחן במשך שבועה שבועות בהשוואה לקבוצת הביקורת; (ב) קצב ההתארכות היומי של הצמחים שגודלו במשך שישה שבועות בעקת מלח (80 מילימולר NaCl), ורק בשבוע השביעי הושקו בתמיסה רגילה ונחשפו לריכוזים שונים (0-4 חל"מ) של הידרוקסטיירוזול. מוצגים ממוצעים ושגיאת תקן עבור 3 חזרות שונות (ממוצע $\pm$ טעות תקן, $n=3$). האחוזים על העמודות מייצגים את קצב ההתארכות של הצמחים ביחס לקבוצת הביקורת שהוגדרה כ-100%. בוצעה השוואה בין הממוצעים על פי Tukey's multiple comparisons test בשני הגרפים. אותיות שונות פירושן הבדל סטטיסטי ברמת מובהקות 95%.



איור 2

השפעת עקת מלח על גדילת הצמחים

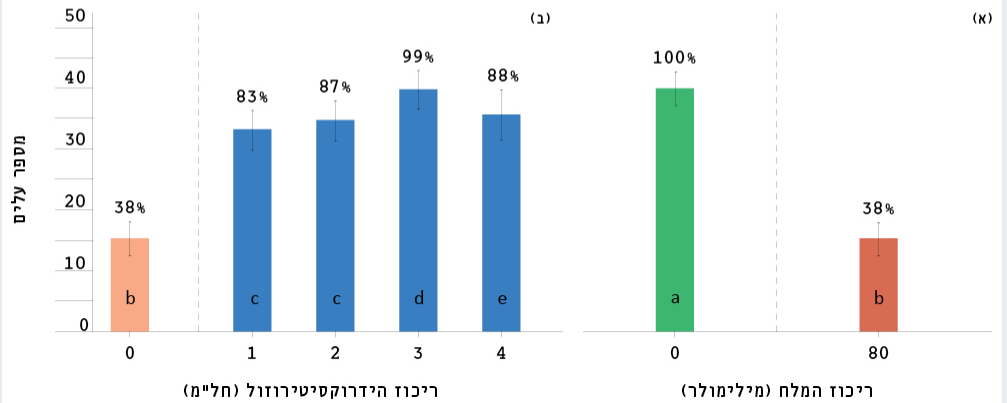
באיור מוצגים ממוצעי הקצב היומי לגדילת צמחי ריחן בעקת מלח ובריכוזים שונים של הידרוקסטיירוזול. (א) השפעת עקת המלח (80 מילימולר NaCl) על קצב ההתארכות היומי של צמחי ריחן במשך שבועה שבועות בהשוואה לקבוצת הביקורת; (ב) קצב ההתארכות היומי של הצמחים שגודלו במשך שבועות בעקת מלח (80 מילימולר NaCl), ורק בשבוע השביעי נחשפו לריכוזים שונים (0-4 חל"מ) של הידרוקסטיירוזול. מוצגים ממוצעים ושגיאת תקן עבור 3 חזרות שונות (ממוצע $\pm$ טעות תקן, $n=3$). האחוזים על העמודות מייצגים את קצב ההתארכות של הצמחים ביחס לקבוצת הביקורת שהוגדרה כ-100%. בוצעה השוואה בין הממוצעים על פי Tukey's multiple comparisons test בשני הגרפים. אותיות שונות פירושן הבדל סטטיסטי ברמת מובהקות 95%.

זשפעת עקת מלח על מספר העלים

בצמחי הביקורת שהושקו בתמיסה נטולת מלח מספר העלים עלה עם הזמן. צמחים המציגים מחזוריות בהתחדשות העלים נותנים אינדיקציה חשובה לגידול תקין ונכון שלהם. כאשר מספר העלים עולה בצורה עקבית, הדבר מעיד על תהליך צמיחה סדיר ובריא. בניגוד לכך, כאשר מספר העלים בצמחים אינו גדל בצורה כזו, הדבר יכול להעיד על תנאי עקה. ההבנה המדויקת של מחזוריות התחדשות העלים כאינדיקטור לגידול בריא ותקין יכולה לשמש כלי בעל ערך להבנת השפעת תנאי הסביבה על גידול הצמחים. צמחי הביקורת, שלא נחשפו לתמיסת מלח לכל אורך הניסוי, ייצגו את מספר העלים המיטבי (100%). בהשוואה אליהם, מספר העלים בצמחי הטיפול שהושקו בתמיסת מלח ירד ל-38% ביחס לצמחי הביקורת, ונראה שתהליך הייצור של עלים חדשים נפסק בשל הטיפול במלח (איור 3).

איור 3. שיעור העלים בצמחי ריחן בעקת מלח ובריכוזים שונים של הידרוקסיטירוזול

(א) ממוצעי מספר העלים של צמח ריחן הגדל בעקת מלח (80 מילימולר NaCl) לאחר גידול של שבעה שבועות בהשוואה לצמחי הביקורת שלא הושקו במלח; (ב) ממוצעי מספר העלים של צמחי ריחן שגודלו במשך שבעה שבועות בעקת מלח (80 מילימולר NaCl), ורק בשבוע השביעי הושקו בתמיסה רגילה ונחשפו לריכוזים שונים של הידרוקסיטירוזול. מוצגים ממוצעים ושגיאת תקן עבור שלוש חזרות שונות (ממוצע $\pm$ טעות תקן, $n=3$). האחוזים על העמודות מייצגים את שיעור העלים בתום שבעה שבועות ביחס לקבוצת הביקורת שגודלה ללא עקת מלח. בוצע מבחן השוואה מסוג Holm-Sidak's multiple comparisons test בין הממוצעים בשני הגרפים. אותיות שונות מעידות על הבדל סטטיסטי מובהק ברמת מובהקות של 95%.



איור 3

שיעור העלים בצמחי ריחן בעקת מלח ובריכוזים שונים של הידרוקסיטירוזול

(א) ממוצעי מספר העלים של צמח ריחן הגדל בעקת מלח (80 מילימולר NaCl) לאחר גידול של שבעה שבועות בהשוואה לצמחי הביקורת שלא הושקו במלח; (ב) ממוצעי מספר העלים של צמחי ריחן שגודלו במשך שבעה שבועות בעקת מלח (80 מילימולר NaCl), ורק בשבוע השביעי נחשפו לריכוזים שונים של הידרוקסיטירוזול. מוצגים ממוצעים ושגיאת תקן עבור שלוש חזרות שונות (ממוצע $\pm$ טעות תקן, $n=3$). האחוזים על העמודות מייצגים את שיעור העלים בתום שבעה שבועות ביחס לקבוצת הביקורת שגודלה ללא עקת מלח. בוצע מבחן השוואה מסוג Holm-Sidak's multiple comparisons test בין הממוצעים בשני הגרפים. אותיות שונות מעידות על הבדל סטטיסטי מובהק ברמת מובהקות של 95%.

השפעת תוספת הידרוקסיטירוזול על התאוששות צמחים שסבלו מעקת מלח

תוספת הידרוקסיטירוזול בריכוזים שונים לתמיסת המלח השפיעה בצורה מתמשכת על קצב התארכות צמחי הריחן ועל מספר העלים הכולל שלהם. ריכוז של 3 חל"מ נמצא כריכוז המיטבי שיכול לגרום להתאוששות מרבית של הצמחים מעקת מלח מבחינת קצב התארכות הנופים וכן מבחינת מספר העלים המצטבר על כל צמח, עד להגעה ל-93% ביחס לקצב הגדילה של הביקורת (איור 2), ועד כ-73% מבחינת מספר העלים הכולל על כל צמח (איור 3). בריכוזים גבוהים יותר של הידרוקסיטירוזול התקבלה דעיכה בקצב הגידול היומי, באורך הנופים המצטבר ובמספר העלים המצטבר.



פסולת נוזלית שמנונית מבית הבד (מוחל, בערבית עקר) וביוב זורמים לנחל אלכסנדר | צילום: איתי אורן, אגף סביבה חקלאית, המשרד להגנת הסביבה

דיון

במחקר זה נבחנה השפעתה של עקת מלח על צמחי ריחן בהשוואה לצמחי ביקורת שהושקו בתמיסת השקיה רגילה ללא מלח. נמצא כי תפקודם של הצמחים שסבלו מעקת מלח לא היה תקין מבחינת התארכות נוף הצמחים ומבחינת מספר העלים. כדי לבדוק את סיכויי ההתאוששות של הצמחים נבדקה השפעת תוספת הידרוקסיטירוזול לתמיסת ההשקיה מבחינת יכולת ההתארכות מחדש ויכולת העלאת מספר העלים. מסתבר כי תוספת של הידרוקסיטירוזול בריכוז 3 חל"מ לצמחים בעקת מלח גרמה להעלאת קצב ההתארכות היומי והגדילה את מספר העלים.

תוצאות המחקר הביאו מידע מועיל על השפעת הידרוקסיטירוזול על התאוששות הצמחים בעקת מלח. שפכי בתי בד עשירים בתרכובות פנויות מגוונות בכלל^[7], ובהידרוקסיטירוזול בפרט. מכאן, שהשקיית צמחים הסובלים מעקת מלח בחלקים מסוימים משפכי בתי בד, ובייחוד בחלקים שמכילים תרכובות פנויות ונגזרותיהן, שעשירות בהידרוקסיטירוזול, יכולה לגרום להתאוששות צמחים הסובלים מעקת מלח. דווח כי הידרוקסיטירוזול יכול לגרום להרחבת נקבוביות בדפנות התאים בשורשים, ובכך הוא מעלה את זמינות המים לצמח^[4]. בעקבות החשיפה למלח הצטמק קוטר הנקבוביות בדפנות תאי השורשים בצורה ברורה, אך החשיפה להידרוקסיטירוזול גרמה להרחבתן מחדש, וכך כושר קליטת המים דרך השורשים עלה בצורה מובהקת^[4]. הידרוקסיטירוזול יכול לפעול כחומר נוגד חמצון וכך להשפיע על תהליכים ביוכימיים בתאים^[11]. כדוגמה נוספת לתרכובות פנויות שעשויות להימצא בשפכי בתי בד^[11], נחקרה השפעת תוספת של חומצה אסקורבית לתמיסת ההשקיה של צמחים הסובלים מעקת מלח. חומצה אסקורבית יכולה להראות תוצאות דומות ולשפר את קצב ההתארכות היומי של צמחים בעקת מלח. החוקרים קישרו בין יכולתה של חומצה אסקורבית להעלות את כושר ההגנה בפני חומרים מחמצנים לבין פעילותה בהגברת יכולת ההתאוששות של צמחים השוריים בעקת מלח^[2].

התועלת היישומית מתוצאות המחקר יכולה לתרום למציאת פתרון לשפכי בתי הבד העשירים בהידרוקסיטירוזול. בעונת המסיק שפכי בתי הבד מסולקים בקצב גבוה אל בריכות השיקו, שבדרך כלל גודלן קטן. לכן, לעיתים העומס האורגני בבריכות עולה לרמות גבוהות, דבר שגורם לגלישת השפכים לנחלים סמוכים^[17]. כיום אין מתקנים ייחודיים המתאימים לטיפול בשפכי בתי הבד, מכיוון שכמותם השנתית קטנה ביחס לשפכים ביתיים. הזרמה בלתי מבוקרת של שפכי בתי בד אל הקרקע גורמת לירידה בכושר החזקת המים של הקרקע (קיבול השדה) ובכושר החדירה של מים בקרקע (הולכת המים בקרקע)^[20]. לכן, סילוק בלתי מבוקר של שפכי בתי בד לא מטופלים אל הקרקע עלול לגרום לזיהומה. נוסף על כך, שפכים לא מטופלים אלה עלולים

לגרום לזיהום מי תהום, דבר המאיים על איכות משאבי המים במדינות הים התיכון הצחיחות, ומהווה מקור לדאגה.



פיזור מוחל (עקר) בשולי חלקת חיטה ליד צומת גלני | צילום: איתי אורן, אגף סביבה חקלאית, המשרד להגנת הסביבה

מסקנות

פיזור שפכי בתי בד בצורה מבוקרת בשדות המאופיינים בקרקעות מלוחות עשוי לנטרל את ההשפעה השלילית של המלח המצטבר בקרקע. התאמה מרבית של תוכניות איסוף שפכי בתי בד למקומות היווצרותם ופיזורם בשדות עשויה לצמצם את בעיית השפכים מצד אחד, וגם לסייע בפתרון בעיית המלחת הקרקע. אימוץ פתרון שכזה ויישומו נתון בידי מקבלי ההחלטות במשרדי הממשלה האחראיים, כגון המשרד להגנת הסביבה ומשרד החקלאות ופיתוח הכפר.

מבחינה ביצועית יש לדאוג להפרדת החלק העשיר בפנולים ובנגזרותיהם מהשפכים ולפזר אותו בלבד בקרקעות מלוחות במטרה לטייב אותן (כפי שנדרש בחלק מקרקעות עמק יזרעאל) או להכשיר אותן לחקלאות (כפי שנדרש בחלק מקרקעות הנגב ומישור החוף). פעולה שכזו תרחיב את תחום הסבילות למליחות קרקע של מגוון רב של גידולים חקלאיים (כגון חיטה, סלק, גזר, תרד ותפוח אדמה), וגידולם יעשה אפשרי גם בקרקעות שלא ניתן לגדל אותם בהן כיום. על מהנדסי מים וביוב המכונים תוכנית סילוק לסביבה של שפכי בתי בד לדאוג, בין השאר, למערך איסוף של שאריות השפכים, לאחר שהוצא מהם החלק העשיר בפנול ובנגזרותיו, ולדאוג למיהולו ולהעברתו למכוני הטיפול בשפכים.

הלכה למעשה

ד"ר תומא עבוד, מרכז בכיר באגף סביבה חקלאית, המשרד להגנת הסביבה:

הפתרון הסביבתי, הכלכלי והזמין ביותר לסילוק עקר במדינת ישראל הוא פיזור מבוקר בשטחים חקלאיים מעובדים. המשרד להגנת הסביבה ביחד עם משרד החקלאות ופיתוח הכפר מנסים להעלות את מודעות החקלאים לכך שפיזור עקר באופן מבוקר בשטח חקלאי אינו מזיק לקרקע ולגידול, ואף יכול להועיל להם ולחסוך בדישון. כל מחקר שמקדם את השימוש בעקר ובודק את ההשפעות החקלאיות או הסביבתיות שלו מבורך. עם זאת, יש לשים לב שבמחקר זה לא השתמשו בעקר עצמו, אלא ברכיבים מסוימים שהופקו ממנו. מאחר שהעקר מכיל מגוון רחב של חומרים, כולל מלחים וחומרים אחרים שיכולים להשפיע לרעה או לטובה על הקרקע והסביבה, חשוב להמשיך ולחקור את הנושא תוך שימוש בעקר עצמו ולא ברכיבים מבודדים, בעיקר כאשר המטרה היא לעודד את השימוש בו על-ידי חקלאים.

מקורות

1. עאסלה ס. 2014. שיטות חקר חדשות לגיוון נושאי חקר בבית הספר. *שמורת טבע, עלון מורי הביולוגיה ומורי מדעי הסביבה* **188**: 45–41.
2. Alves RDC, Rossatto DR, da Silva JDS, et al. 2021. Seed priming with ascorbic acid enhances salt tolerance in micro-tom tomato plants by modifying the antioxidant defense system components. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* **31**: 101927.
3. Asli S, Diab M, and Haj-Zaroubi M. 2023. Valuable materials from olive mill wastewater. In: Souabi S and Abdelkader A (Eds). *Wastewater from olive oil production: Environmental Impacts, treatment and valorization*. Cham: Springer International Publishing.
4. Asli S, Diab M, Hugerat M, and Haj-Zaroubi M. 2023. [Hydroxytyrosol increases salt tolerance of maize and wheat by expanding the pore diameter on root cell wall](#). *Theoretical and Experimental Plant Physiology* **35**: 287–298.
5. Asli S, Massalha N, Diab M, and Hugerat M. 2022. Phytotoxic effects of treated wastewater used for irrigation on root hydraulic conductivity and plant growth of maize seedlings (*Zea mays* L. PR 32w86). *Irrigation Science* **40**(6): 817–828.
6. Azaizeh H, Abu Tayeh H, and Gerchman Y. 2020. Valorization of olive oil industry solid waste and production of ethanol and high value-added biomolecules. Chapter 2 In: Rathinam NK and Sani RJ (Eds). *Bipolarization of wastes to renewable chemicals and biofuels*. Elsevier Press.
7. Azaizeh H, Halahleh F, Najami N, et al. 2012 Antioxidant activity of phenolic fractions in olive mill wastewater. *Food Chemistry* **134**: 2226–2234.
8. Cabrera F, Lopez R, Martinez Bordiu A, et al. 1996. Land treatment of olive oil mill wastewater. *International Biodeterioration and Biodegradation* **38**: 215–225.
9. Chaves-Lopez C, Serio A, Mazzarrino G, et al. 2015. Control of household mycoflora in fermented sausages using phenolic fractions from olive mill wastewaters. *International Journal of Food Microbiology* **207**: 49–56.
10. Corwin DL and Scudiero E. 2019. Review of soil salinity assessment for agriculture across multiple scales using proximal and/or remote sensors. *Advances in Agronomy* **158**: 1–130.
11. D'Angelo S, Ingrosso D, Migliardi V, et al. 2005. Hydroxytyrosol, a natural antioxidant from olive oil, prevents protein damage induced by long-wave ultraviolet radiation in melanoma cell. *Free Radic Biology and Medicine* **38**: 908–919.
12. Dhama K, Sharun K, Gugjoo MB, et al. 2023. A comprehensive review on chemical

- profile and pharmacological activities of *Ocimum basilicum*. *Food Reviews International* **39**(1): 119–147.
13. DPRID. 2022. [Agriculture and food – Soil salinity](#). Department of Primary Industries and Regional Development (DPIRD), Government of Western Australia.
 14. El-Mekawy A, Diels L, Bertin L, et al. 2014. Potential biovalorization techniques for olive mill biorefinery wastewater. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* **8**: 283–293.
 15. Granados-Principal S, Quiles J, Ramirez-Tortosa C, et al. 2010. Hydroxytyrosol: From laboratory investigations to future clinical trials. *Nutrition Reviews* **68**(4): 191–206.
 16. Hashem A, Alqarawi AA, Radhakrishnan R, et al. 2018. Arbuscular mycorrhizal fungi regulate the oxidative system, hormones, and ionic equilibrium to trigger salt stress tolerance in *Cucumis sativus* L. *Saudi Journal of Biological Sciences* **25**: 1102–1114.
 17. Khdair A and Abu-Rumman G. 2020. Sustainable environmental management and valorization options for olive mill byproducts in the Middle East and North Africa (MENA). *Region Processes* **8**: 671.
 18. Obied HK, Allen MS, Bedgood DR, et al. 2005. Bioactivity and analysis of bio-phenols recovered from olive mill waste. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **53**: 823–837.
 19. Shahrajabian MH, Sun W, and Cheng Q. 2020. Chemical components and pharmacological benefits of Basil (*Ocimum basilicum*): A review. *International Journal of Food Properties* **23**(1): 1961–1970.
 20. Sierra J, Marti E, Garau AM, and Cruanas R. 2007. Effects of the agronomic use of olive oil mill wastewater: Field experiment. *Science of The Total Environment* **378**: 90–94.
 21. Yangui T, Sayadi S, Rhouma A, and Dhouib A. 2010. Potential use of hydroxy-rosol-rich extract from olive mill wastewater as a biological fungicide against *Botrytis cinerea* in tomato. *Journal of Pest Science* **83**: 437–445.

קריאה נוספת

מאמר המתאר הגברה של הסבילות למלח בצמחי תירס וחיטה לאחר חשיפה להידרוקסיטירוזול ואת המנגנון הקשור להרחבת קוטר הנקבוביות בדפנות תאי השורשים. מאמר זה מסייע להבנת מנגנון הפעולה של הידרוקסיטירוזול בהפחתת ההשפעה השלילית של המלח ובהעלאת הסבילות למלח.

Asli S, Diab M, Hugerat M, and Haj-Zaroubi M. 2023. [Hydroxytyrosol increases the salt tolerance of maize and wheat by expanding the pore diameter on the root cell wall](#). *Theoretical and Experimental Plant Physiology* **35**(3): 287–298.

מאמר המתאר את ההשפעה של תוספת חומצה אסקורבית (ויטמין C) לצמחים בעקת מלח. יכולתה של החומצה לפעול כחומר נוגד חמצון מסייעת לנטרול ההשפעה השלילית של עקת מלח על צמחים.

Athar H, Khan A, and Ashraf M. 2008. [Exogenously applied ascorbic acid alleviates salt-induced oxidative stress in wheat](#). *Environmental and experimental Botany* **63**(1–3): 224–231.

המאמר מתאר את ההשפעה של פיזור קולחים בקרקע על התכונות הפיזיקליות של הקרקע ועל המרקם הביולוגי שלה. במאמר נסקרות הבעיות הסביבתיות והחקלאיות הנובעות מפיזור קולחים בקרקע חקלאית.

קרן י, בוריסובר מ, דג א ואחרים. 2015. [השפעת פסולת נוזלית של בתי בד על אינטראקציות ספיחה של תרכובות אורגניות בקרקע](#). *אקולוגיה וסביבה* **6**(4): 302–308.