

## אנה זורבל

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני; המחלקה לקרקע ומים, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים

## משה שנקר

המחלקה לקרקע ומים, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים

## חיים טנאו

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי – מרכז וולקני

## מני בן-חור

המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, המנהל החקלאי – מרכז וולקני

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

## ציטוט מומלץ

זורבל א, שנקר מ, טנאו ח ובן-חור מ. 2017. השפעה של תוספת בוצות שפכים מטופלות לקרקעות לס וחמרה על המבנה והמוליכות ההידראולית שלהן. *אקולוגיה וסביבה* 8(2): 41-49.



פיזור בוצת שפכים בשדה פלחה על-ידי מפזרת זבל | צילום: אלי ארגמן

## השפעה של תוספת בוצות שפכים מטופלות לקרקעות לס וחמרה על המבנה והמוליכות ההידראולית שלהן

1 ביוני, 2017

גיליון קיץ 2017 / כרך 8(2)

[חזית המחקר](#)

### על קצה המזלג

- בוצות הן פסולת הנוצרת בתהליך טיהור שפכים, והשימוש בהן כתחליף למשאב המתכלה של דשנים לחקלאות נעשה נפוץ בהתאם לעיקרון הסביבתי 'מפסולת למשאב'. עם זאת, יש לוודא שהשימוש אינו פוגע בבריאות האדם או בסביבה.
- המחקר בנושא שימוש בבוצות מטופלות בשטחים חקלאיים התמקד בעיקר בהשפעתן על זמינות המזינים לצמח, אך הבנת השפעתן על מבנה הקרקע ועל התכונות ההידראוליות שלה, בייחוד בתנאי הארץ, לוקה בחסר.
- השפעת הבוצות המטופלות על התכונות ההידראוליות של הקרקע יכולה להשליך על התנועה המרחבית של מזהמים בקרקע שמקורם בבוצה, ויש להביא מידע זה בחשבון בקביעת מדיניות לשימוש בבוצות

בקרקות חקלאיות.

- להוספת בוצות מטופלות לקרקע השלכות רבות אחרות, נוסף על ההשפעה על התכונות הפיזיקליות של הקרקע המתוארות במאמר זה. האתגר בפני קובעי המדיניות הוא לתכלל את ההשפעות השונות כדי לקבוע מדיניות מיטבית.

המערכת

## תקציר

סילוק בוצות שפכים לים גורם לזיהום מי החופים בארץ עקב הימצאות ריכוזים גבוהים של חומר אורגני מומס ומזהמים אורגניים ואי-אורגניים בבוצות. הפיכת הבוצות ממטרד למשאב על-ידי שימוש בהן בקרקעות חקלאיות היא פתרון מועדף מבחינה סביבתית וחקלאית. מטרת המחקר הייתה ללמוד את ההשפעה שיש לתוספת בוצות מטופלות על מבנה הקרקע ועל המוליכות ההידראולית שלה ברוויה ( $K_s$ ). לתכונות אלה השפעה ניכרת על תנועת מים, מזינים ומזהמים בקרקע. מבנה קרקע יציב וערכי  $K_s$  גבוהים מורים על כושר הולכה גבוה של הקרקע למים ולמומסים. במחקר הנוכחי נבחנו השפעות של שתי בוצות, בוצה שטופלה בקומפוסטציה (קומפוסט בוצה) ובוצת שפד"ן שיוצבה על-ידי תוספת סיד ואפר פחם (במס"א), לאחר הוספתן לקרקע לס וחמרה, בכמות של 1.25% מהמשקל היבש של הקרקע, בהשוואה לקרקעות ללא תוספת בוצה (טיפול ביקורת). ערכי ה- $K_s$  של הקרקעות נמדדו בעומד הידראולי קבוע בעמודות שנארו בהן קרקעות מופרות. תוספת קומפוסט בוצה ובמס"א ללס וקומפוסט בוצה לחמרה העלתה את ערכי ה- $K_s$  באופן מובהק לעומת הביקורת. העלייה בערכי ה- $K_s$  נבעה בעיקר מייצוב מבנה הקרקע שהקטין את מיגוג התלכידים (הרס תלכידים על-ידי כוחות פנימיים) עם הרטבת הקרקעות המטופלות בבוצה. אף על פי שהמחקר נעשה בקרקעות מופרות ובקנה מידה קטן, לממצאים שהתקבלו חשיבות בהערכת הפוטנציאל הטמון בבוצות שפכים לשמש חומר מטייב בשיפור המבנה והתכונות ההידראוליות של קרקעות חקלאיות.

## מבוא

בעשורים האחרונים חלה בארץ עלייה ניכרת בכמות השפכים שעוברים טיפול, והבוצה היא תוצר לוואי עיקרי מטיפול זה. המקטע המוצק של הבוצה מורכב בעיקר ממסה מיקרוביאלית ומשאיות אורגניות ואי-אורגניות שהורחקו מהשפכים במהלך הטיפול. הכמות השנתית של בוצת שפכים המסולקת לים התיכון בארץ, בעיקר על-ידי מפעל השפד"ן, מוערכת בכ-47,330 טונות חומר יבש, שהיא כ-42% מכלל הבוצה המיוצרת בארץ [5]. סילוק זה של הבוצה לים הוא גורם עיקרי בזיהום מי החופים כתוצאה מהימצאות ריכוזים גבוהים של חומר אורגני מומס, מזהמים אורגניים ומתכות כבדות בבוצה [4]. כתוצאה מכך, נגרמים שינויים באוכלוסיית החי בקרקעית הים, עלייה בפעילות המיקרוביאלית המלווה בהקטנת ריכוז החמצן במים, ועלייה בקליטת מתכות כבדות ומזהמים אורגניים על-ידי הדגה, וממנה כניסה לשרשרת המזון [4]. רשויות איכות הסביבה והחקלאות בארץ ובעולם מעודדות שימוש בבוצות מטופלות בקרקעות חקלאיות כמקור למזינים (nutrients) מתוך הכרה, ששימוש זה בבוצות הופך אותן ממטרד למשאב המועיל לצמח, ומקטין את הצורך בייצור ובכרייה של מזינים מינרליים. בדו"ח שהוגש למשרד להגנת הסביבה בשנת 2011 צוין, שכ-55% (63,000 טונות חומר יבש) מכלל הבוצות המיוצרות בארץ מפוזרות בשטחים חקלאיים [5]. עם זאת, לאחר שיופסק סילוק הבוצה לים על-ידי השפד"ן בעתיד הקרוב, כ-97% מכלל כמות הבוצה המיוצרת בארץ תהיה זמינה פוטנציאלית לשימוש בשדות.

בוצות יכולות לשפר גם את התכונות הפיזיקליות של הקרקע [9, 10, 11, 18, 21], וכך להגדיל את היתרון בשימוש בהן בשטחים חקלאיים. לדוגמה, תוספת בוצה יכולה להגדיל את נקבוביות הקרקע ואת תאחיזת המים בה על-ידי יצירת תלכידים [13, 17]. במתחי מים נמוכים ( $>5.0 \text{ kPa}$ ) נמצא שתוספת של 112 טונות להקטר לשנה של בוצה בעלת 35% מוצקים לקרקע חרסיתית סילטית, העלתה באופן מובהק את תאחיזת המים בקרקע. כאשר הוספו 44.8 טונות להקטר לשנה העלייה בתאחיזה הייתה נמוכה יותר מאשר כשהוספו 112.0 טונות להקטר לשנה [24]. השפעת הבוצה על תאחיזת המים יכולה לנבוע משני מנגנונים עיקריים: (א) ספיחה ואצירה של מים על-ידי הבוצה עצמה; (ב) שינוי בתכונות הפיזיקליות של הקרקע, כגון צפיפות גושית ונקבוביות [22]. Gupta ואחרים [11] מצאו, שבוצה במינון של 450 ו-900 טונות להקטר, שעברה עיכול אל-אווירני (anaerobic) ומכילה 24% חומר אורגני, שהוספה לחול גס העלתה את המוליכות ההידראולית ברוויה ( $K_s$ ) ב-7%, 13% ו-18% לעומת החול ללא בוצה, בהתאמה.

בן-חור ואחרים<sup>[2]</sup> מצאו שבהצנעת בוצת שפכים שפוסטרה בסיד, או קומפוסט בוצה או בוצה מעוכלת אווירנית (aerobic) ללא פסטור, במינון של 1.5 טונות יבש לדונם בחלקות שדה בגודל 5 מ"ר, התקבלו אחוזי נגר של 9%, 12%, 5% מכלל הגשם השנתי, בהתאמה, לעומת 13.3% בקרקע ללא בוצה (טיפול ביקורת). נוסף על כך, כמויות הקרקע שנסחפו עם מי הנגר במהלך כל החורף בטיפולי הבוצה השונים היו נמוכות מאשר בטיפול הביקורת. הכמות הגדולה ביותר של קרקע שנסחפה (320.6 גרם למ"ר) התקבלה בטיפול הביקורת, והקטנה ביותר (71.3 גרם למ"ר) בקרקע שטופלה בבוצה לא מפוסטרת.

המחקרים שבחנו שימוש בבוצות בשטחים חקלאיים בדקו בעיקר את השפעתן על זמינות מזינים לצמח, ורק חלק קטן מהם בחנו את השפעת הבוצות על המבנה והתכונות ההידראוליות של הקרקע, בייחוד בתנאי הארץ. מכיוון שלהשפעת הבוצות על התכונות ההידראוליות של הקרקע יכולה להיות השלכה על תנועה מרחבית של מזהמים שמקורם בבוצה, חשובה בחינת הנושא בקרקעות הארץ. בוצות שפכים המותרות לשימוש בשדות חקלאיים ללא הגבלת סוג הגידול בארץ הן בוצות לאחר ייצוב ופסטור להפחתת תכולת הפתוגנים בהן (בוצה סוג א'). הבוצות המקובלות להוספה בשדות חקלאיים הן: בוצה שעברה קומפוסטציה ובוצה שעברה פסטור על-ידי הוספת חומרים אלקליניים. מטרת המחקר הנוכחי הייתה ללמוד את השפעת תוספת של שני סוגי בוצה סוג א' על המבנה ועל המוליכות ההידראולית ברוויה של שתי קרקעות חקלאיות אופייניות בארץ. המחקר הנוכחי אינו מתיימר להציג המלצות למדיניות השימוש בבוצות שפכים בשדות חקלאיים בארץ. עם זאת, להשפעת תוספת הבוצות על תכונות ההידראוליות של הקרקע יש חשיבות בהערכת הפוטנציאל הטמון בשימוש בבוצות כחומר מטייב לשיפור המבנה של קרקעות חקלאיות.

## חומרים ושיטות

קרקע לס מבקעת ערד (אזור מדברי) וחמרה מאזור בית דגן (אזור ים תיכוני) נלמדו במחקר הנוכחי. הקרקעות הללו נבחרו בעקבות ההבדל בתכונותיהן, והיותן קרקעות שכיחות בשדות חקלאיים בארץ. החרסית הדומיננטית בשתי הקרקעות היא מונטמורילוניט (<44%), והן מכילות גם כמויות קטנות יותר של קאוליניט (>27%) ואלטי (>13%)<sup>[6]</sup>. הקרקעות נדגמו משכבת הקרקע העליונה (0-20 ס"מ) משדה בור עבור הלס ומשדה פלחה בממשק בעל ללא תוספת פסולת אורגנית עבור החמרה. דגימות הקרקע יובשו למצב של שיווי משקל עם לחות האוויר (=יובש אוויר), נכתשו ונופו לגודל תלכידים >2 מ"מ ונשמרו בחדר יבש ומאוורר להמשך מחקר. הבוצות שנבחנו היו: (א) קומפוסט בוצת שפכים שיוצר באתר טובולן בבקעת הירדן על-ידי קומפוסטציה של בוצת שפכים לאחר עיכול אל-אווירי עם שבבי עץ ביחס נפחי של 1:1. בוצה זו תיקרא להלן קומפוסט בוצה. (ב) בוצת שפד"ן שיוצבה על-ידי תוספת סיד ואפר פחם ביחס 5:35:60 בוצה:אפר פחם:סיד, בהתאמה (N-viro). בוצה זו תיקרא להלן במס"א (בוצה מטופלת בסיד ובאפר פחם). שתי הבוצות מוגדרות כבוצות סוג א', והן מותרות לשימוש בשדות חקלאיים ללא הגבלה בסוג הגידול. הבוצות יובשו ליובש אוויר, נכתשו לגודל חלקיקים >2 מ"מ ונשמרו בקירור בטמפרטורה של 4 מעלות צלזיוס להמשך מחקר. התכונות הפיזיקליות והכימיות הכלליות של הקרקעות והבוצות נקבעו בשיטות סטנדרטיות, ומובאות בטבלה 1.

טבלה 1. אפיון פיזיקלי וכימי של הקרקעות (א) והבוצות (ב) שנלמדו. המספרים בסוגריים מציינים אח ערך שגיאת החקן

| סוג הקרקע | אנליזה מכנית |            |            | קטיונים חליפיים | חומר אורגני כללי | גיר      | אחוז נחרן ספוח | מיצוי עיסה רוויה |                |                 |                               |                 |
|-----------|--------------|------------|------------|-----------------|------------------|----------|----------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|
|           | חרסית        | סילט       | חול        |                 |                  |          |                | pH               | מוליכות חשמלית | Cl <sup>-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | מנת ספיחת הנתרן |
| לט        | 27.7 (0.7)   | 17.3 (0.7) | 55 (0.7)   | 18.6 (0.5)      | 0.9 (0.1)        | 18.7 (0) | 2.1 (0)        | 7.2 (0.25)       | 1.0 (0)        | 9.2 (0)         | 7.7 (0.6)                     | 2.4 (0)         |
| חמרה      | 18.9 (0.7)   | 2.6 (0)    | 78.5 (0.7) | 20.7 (0.2)      | 1.6 (0)          | 1.7 (0)  | 0.9 (0)        | 7.3 (0.2)        | 0.7 (0)        | 8.8 (0.3)       | 2.9 (0.1)                     | 1.5 (0.1)       |

| סוג הבוצה    | * תכולה כללית |      | C/N | pH        | EC      | Cl <sup>-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | מנת ספיחת הנתרן | פחמן אורגני מסיס |
|--------------|---------------|------|-----|-----------|---------|-----------------|-------------------------------|-----------------|------------------|
|              | פחמן אורגני   | חנקן |     |           |         |                 |                               |                 |                  |
| קומפוסט בוצה | 19.0          | 2.0  | 9.7 | 7.0 (0.1) | 0.6 (0) | 0.9 (0.1)       | 3.27 (0.46)                   | 1.6 (0.6)       | 10.5 (0.3)       |
| במס"א        | 9.9           | 1.3  | 7.5 | 9.7 (0.3) | 1.2 (0) | 2.6 (0.3)       | 4.51 (0.51)                   | 0.1 (0)         | 21.3 (0.4)       |

\* הנתונים נלקחו מהכט"גן<sup>[3]</sup>.

## אפיון פיזיקלי וכימי של הקרקעות (א) והבוצות (ב) שנלמדו. המספרים בסוגריים מציינים את ערך שגיאת התקן

הטיפולים שנבחנו היו: טיפול ביקורת (קרקעות ללא תוספת בוצה), טיפול קומפוסט בוצה וטיפול במס"א. בשני טיפולי ההוספה עורבבה כל קרקע עם קומפוסט בוצה או עם מס"א, בכמות של 1.25% מהמשקל היבש של הקרקע. כמויות אלה תואמות למינון המקובל בשימוש בבוצות בשדות חקלאיים בארץ. כמות של כ-600 גרם מכל קרקע ללא בוצות ומהתערובות שלהן עם הבוצות הורטבה באופן אחיד לתכולת רטיבות של קיבול שדה, והונחה בצנצנות זכוכית להדגרה באינקובטור בטמפרטורה של 30 מעלות למשך 25 יום. בניסוי מקדים נמצא, שזמן הדגרה זה מספיק ליצירת אינטראקציה בין הבוצה וחלקיקי הקרקע. בגמר ההדגרה יובשו הקרקעות ליובש אוויר ושימשו למדידות, כפי שמתואר בהמשך.

לאחר ההדגרה נמדדו ערכי  $K_s$  של דגימות הקרקע בטיפולים ביקורת, קומפוסט בוצה ובמס"א באופן הבא: 120 גרם קרקע מכל טיפול, עם תכולת רטיבות השווה לרטיבות קרקע לאחר ייבוש בטמפרטורה של 105 מעלות בתנור, נארוזו באופן המתואר בעבודתם של Lado and Ben-Hur<sup>[16]</sup> בעמודת פרספקס בקוטר 5 ס"מ על גבי שכבה בעובי 2 ס"מ של חול גס חסר מלחים; עובי שכבת הקרקע בעמודה היה 5 ס"מ, וצפיפותה הגושית הייתה  $\sim 1.22$  גרם לסמ"ק. כל עמודת קרקע הורטבה מלמטה בשיעור של 68 מ"מ לשעה בתמיסה כלורידית (להלן תמיסת מלח) עם ריכוז מלחים כללי של 50 מיליאקוויוולנט (מא"ק) לליטר וערך מנת ספיחת הנתרן (SAR) התואם לערכו במיצוי עיסה רוויה של הקרקע (טבלה 1א). הרטבת הקרקע בתמיסת המלח מאפשרת להרוות את הקרקע ללא פיזור כימי של החרסית ועם מינימום תפיחה<sup>[15,12]</sup>. לאחר ההרוויה הוחלף כיוון הזרימה של תמיסת המלח מלמעלה למטה, והקרקע נשטפה בעומד הידראולי קבוע בתמיסת מלח בנפח של כ-3 נפחי נקבובים (נפחם של כלל הנקבובים בקרקע), ומיד לאחר מכן בכ-6 נפחי נקבובים של מים מזוקקים, כדימוי למי גשם. במהלך השטיפה עם שני סוגי המים נאסף התשטיף (הנקז) מתחתית העמודה במקטעים, נפח המקטעים נמדד, וערכי  $K_s$  חושבו בעזרת נוסחת דארסי. ערכי המוליכות החשמלית (EC), ה-SAR וריכוז החרסית נמדדו במקטעים השונים של התשטיף, כאשר ריכוז החרסית בתשטיף נקבע במדידת בליעת אור באורך גל 420 ננומטר בספקטרוטומטר<sup>[16]</sup>. ניסויים אלה בעמודות עם דוגמאות של קרקעות מופרות בתנאי רוויה אינם מחקים את התנאים בשדה, אולם הם כן מאפשרים ללמוד ולאפיין תהליכים ומנגנונים המשפיעים על התכונות ההידראוליות של הקרקע כתוצאה מתוספת הבוצה.

יציבות תלכידים של הקרקעות בטיפולי הבוצה השונים ולאחר ההדגרה נקבעה על-ידי מדידת ערכי המיגוג (slaking values, SLV) (מיגוג – תהליך שבו כוחות פנימיים בתלכיד מחלישים את יציבותו עם הרטבתו וגורמים להתפוררות) של הקרקע על פי השיטה של Ben-Hur ואחרים<sup>[8]</sup> תוך הרטבה מהירה או אטית של תלכידים יבשים בגודל 2–4 ס"מ. קוטר ממוצע משוקלל (MWD) של התלכידים לאחר הרטבה מהירה או אטית וניפוי של התלכידים לאחר ייבוש בתנור חושב לכל דגימת קרקע על פי נוסחה [1]:

כאשר  $W_i$  = פרקציה משקלית של התלכידים בקבוצת גודל  $i$  עם ממוצע קוטר. לצורך הבדיקה הוגדרו שבעה מקטעי גודל בעלי קוטר של: >50, 50–100, 100–250, 250–500, 500–1,000, 1,000–2,000, ו- >2,000 מיקרומטר.

ערך המיגוג (SLV) של כל קרקע בטיפול בוצה נתון חושב על פי נוסחה [2]:

כאשר  $MWD_s$  ו- $MWD_f$  הם קוטר ממוצע משוקלל של התלכידים לאחר הרטבה אטית או מהירה, בהתאמה. ערך מיגוג מזערי של 1 מצביע על מצב יציב של תלכיד הקרקע במהלך הרטבתם. ככל שערך המיגוג גדול יותר, הוא מצביע על פעולה חזקה יותר של כוחות המיגוג שגורמת להתפוררות רבה יותר של תלכיד הקרקע, ולכן מצביע על מבנה קרקע פחות יציב.

כל הבדיקות נעשו בשלוש חזרות לטיפול. בחינת מובהקות ההבדלים בין ממוצעי המדדים השונים נקבעה על-ידי תוכנת JMP pro10 באמצעות מבחן (Honestly Significant Difference) (LSMeans Tukey HSD) ברמת מובהקות של  $\alpha=0.05$ .



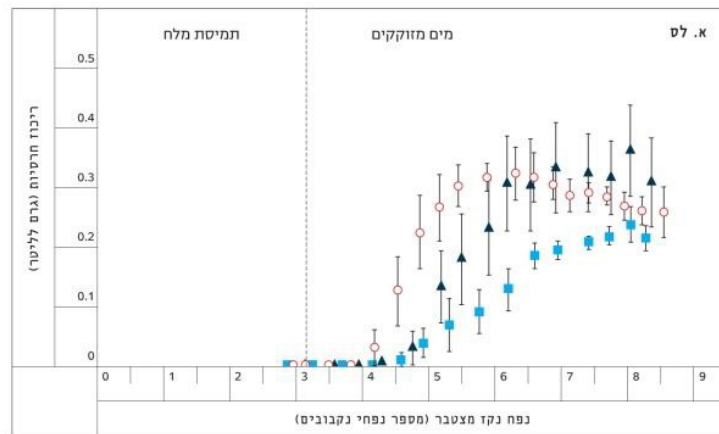
צננת בוצת שפכים בקרקע על-ידי דיסק | צילום: אלי ארגמן

## תוצאות ודיון

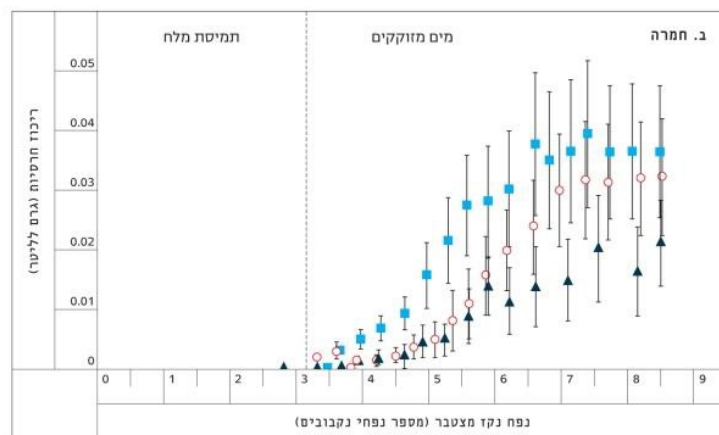
הרכב היונים וריכוזם בתמיסת הקרקע עם שטיפתה יכולים להשפיע על ערכי ה- $K_s$  של הקרקעות בטיפולים השונים [12]. כדי לבחון את ההשפעות בדקנו את ערכי ה-EC וה-SAR במי הנקז כתלות בנפחו המצטבר בטיפול הבוצה השונים במהלך שטיפת הלס והחמרה בתמיסת מלח ומים מזוקקים (נספח 1). ערכי ה-EC וה-SAR במי הנקז מייצגים בקירוב טוב את ערכיהם בתמיסת הקרקע במהלך השטיפה. בשתי הקרקעות לא נמצאו הבדלים מובהקים בערכי ה-EC בתשטיף בין טיפולי הבוצה השונים במהלך השטיפה. ערכי ה-EC בתשטיף בשטיפה בתמיסת המלח נעו בין 4.1 ל-4.5 דציסימנס למטר בשתי הקרקעות – ערכים הקרובים לערך ה-EC של תמיסת המלח ששימשה לשטיפה. המעבר לשטיפה במים מזוקקים הפחית באופן חד את ערכי ה-EC בתשטיף בשתי הקרקעות עד להתייצבותם לערכים של כ-0.1 ו-0.2 דציסימנס למטר בלס ובחמרה, בהתאמה, לאחר שטיפה בכ-3 נפחי נקבובים של מים מזוקקים.

ערכי ה-SAR במי הנקז בשטיפה בתמיסת מלח היו גבוהים יותר בלס (2.4 בממוצע), מאשר בחמרה (1.1 בממוצע) (נספח 1). הבדלים אלה תואמים לאחוז הנתרן הספוח (ESP) שגבוה יותר בלס מאשר בחמרה (טבלה 1א) ולערכי ה-SAR של תמיסת המלח ששימשו לשטיפה. שטיפת הקרקעות במים מזוקקים הקטינה את ערכי ה-SAR במי הנקז, והערכים במהלך השטיפה היו גבוהים יותר בלס מאשר בחמרה. למרות השינויים בערכי ה-SAR בשטיפות השונות, ערכים אלה בנקז בכל קרקע היו דומים בטיפולי הבוצה השונים.

ערכי ה- $K_s$  של שתי הקרקעות עם טיפולי הבוצה השונים במהלך שטיפתן בתמיסת מלח ומים מזוקקים כתלות בנפח הנקז המצטבר מובאים באיור 1. ערכי ה- $K_s$  בטיפולי הבוצה השונים במהלך השטיפה בתמיסת מלח נעו בין 21.5 ל-56.2 מ"מ לשעה בלס לעומת 263.5 ל-442.9 מ"מ לשעה בחמרה, הבדלים של סדר גודל בין הקרקעות (איור 1). הבדלים אלה ב- $K_s$  התקבלו אף על פי שהתפלגות גודל התלכידים והצפיפות הגושית בשתי הקרקעות בטיפולי הבוצה השונים בזמן אריזתן בעמודות היו דומות. ערכי ה- $K_s$  הגבוהים בחמרה בהשוואה ללס בטיפולי הבוצה השונים נבעו בחלקם מהמרקם הגס (סיין חולי) של החמרה לעומת המרקם הדק יותר של הלס ומערך ה-ESP הגבוה יותר בלס מאשר בחמרה (טבלה 1), שהשפיעו באופן שונה על הרס מבנה הקרקעות עם הרטבתן.



**איור 3. ריכוז החרסית במי הנקז במהלך שטיפה הקרקעות לס (א) וחמרה (ב) עם טיפולי הבוצה השונים בתמיסת מלח ובמים מזוקקים, כמלות בנפח נקז מצטבר מבוטא במספר נפחי נקבובים**  
 הקו האנכי המקווקו החוצה את האיוורים מסמן את המעבר משטיפה בתמיסת מלח לשטיפה במים מזוקקים. המספרים ליד הסימונים במקרא מציינים את כמות החרסית המצטברת במיליגרם, שנשטפה מעמודת הקרקע בכל טיפול. הקווים האנכיים ליד הערכים מציינים שגיאת חקן.



**א. כמות חרסיות (מיליגרם)**  
 64 ○  
 31 ■  
 54 ▲  
**ב. כמות חרסיות (מיליגרם)**  
 5 ○  
 7 ■  
 3 ▲  
 ○ ביקורת  
 ■ במס"א  
 ▲ קומפוסט

## איור 1

### ערכי מוליכות הידראולית ברוויה של הקרקעות לס (א) וחמרה (ב) עם טיפולי הבוצה השונים במהלך שטיפת בתמיסת מלח ומים מזוקקים כתלות בנפח נקז מצטבר מבוטא במספר נפחי נקבובים

הקו האנכי המקווקו החוצה את האיוורים מסמן את המעבר משטיפה בתמיסת מלח לשטיפה במים מזוקקים. קווים אנכיים ליד הערכים מציינים שגיאת חקן. אותיות שונות בתחילת הגרפים ובסופם מציינות הבדלים מובהקים בין טיפולי הבוצה השונים של ערכי המוליכות ההידראולית הממוצעים במהלך השטיפה בתמיסת מלח או בסוף השטיפה במים מזוקקים, בהתאמה.

ערך ה- $K_s$  הממוצע בקרקע לס בשטיפה בתמיסת מלח בטיפול הביקורת היה נמוך באופן מובהק מאשר בטיפולים קומפוסט בוצה ובמס"א, וההבדל בין שני הטיפולים האחרונים היה לא מובהק; ערכי ה- $K_s$  הממוצעים בטיפולים השונים – ביקורת, במס"א וקומפוסט בוצה, היו: 21.6, 45.6 ו-56.2 מ"מ לשעה, בהתאמה (איור 1א). לעומת זאת, בשטיפת החמרה בתמיסת מלח התקבל ערך ה- $K_s$  הממוצע הגבוה ביותר, 442.9 מ"מ לשעה, בקומפוסט בוצה, בעוד שבביקורת ובמס"א התקבלו ערכים ממוצעים נמוכים באופן מובהק של 308.8 ו-263.5 מ"מ לשעה, בהתאמה (איור 1ב). בשטיפה בתמיסת מלח היה ריכוז האלקטרוליטים בתמיסת הקרקע בלס ובחמרה (נספח 1) מעל ערכי ההִפְּתָה (flocculation) של חרסית הקרקע [23]. מכאן, שהשינויים ב- $K_s$  בין טיפולי הבוצה השונים בשטיפה בתמיסת מלח לא נבעו מהשפעה על תהליכי הפיזור של החרסית, אלא בעיקר מהשפעת הבוצות על יציבות התלכידים כנגד כוחות המיגוג והתפיחה. ערכי ה-MWD של תלכיד הקרקע בלס ובחמרה לאחר הרטבת האטית או המחירה וערכי המיגוג שחושבו מנוסחאות [1] ו-[2], בהתאמה, מובאים באיור 2. בשתי הקרקעות ובכל הטיפולים, ערכי ה-MWD בהרטבה אטית היו גבוהים יותר מאשר בהרטבה מהירה באופן מובהק. מכאן, ששתי הקרקעות, עם או בלי תוספת בוצה, היו רגישות לכוחות המיגוג עם הרטבתן. עם זאת, ערכי המיגוג בלס היו גבוהים מאלה של החמרה, והשפעת טיפולי הבוצה בהקטנת ערכי המיגוג בלס הייתה בולטת יותר (איור 2). הדבר נבע כנראה מתכולת חרסית וסילט גבוהה יותר בלס (44.6%) מאשר בחמרה (21.5%) (טבלה 1א). תוצאות דומות נמצאו במחקרים אחרים [8, 14, 15], שנמצא בהם שכוחות המיגוג גדלים ככל שמרקם הקרקע דק יותר. ערכי המיגוג הגבוהים יותר בלס מאשר בחמרה היו כנראה גורם נוסף לערכי ה- $K_s$

הנמוכים יותר בלס מאשר בחמרה עם שטיפתן בתמיסת מלח (איור 1).

## איור 2. ערכי קוטר ממוצע משוקלל (MWD) של תלכידי הקרקע בלס

(א) ובחמרה (ב) לאחר הרטבתם האטית או המהירה עבור טיפולי

הבוצה השונים

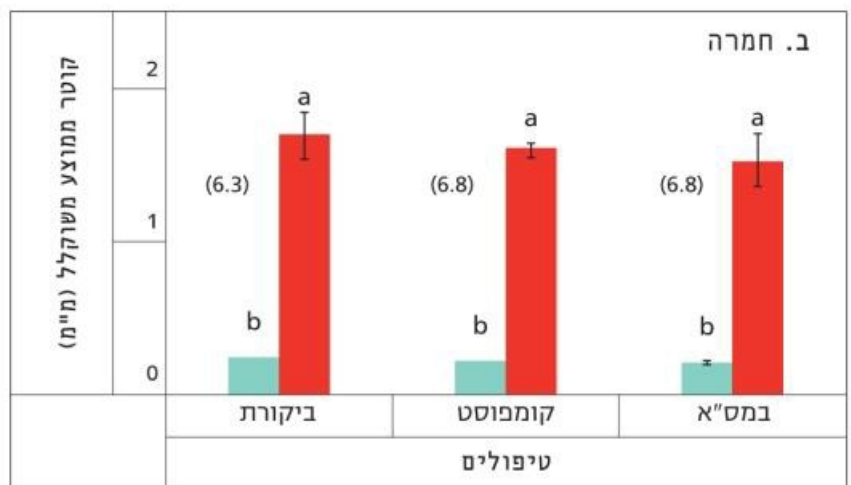
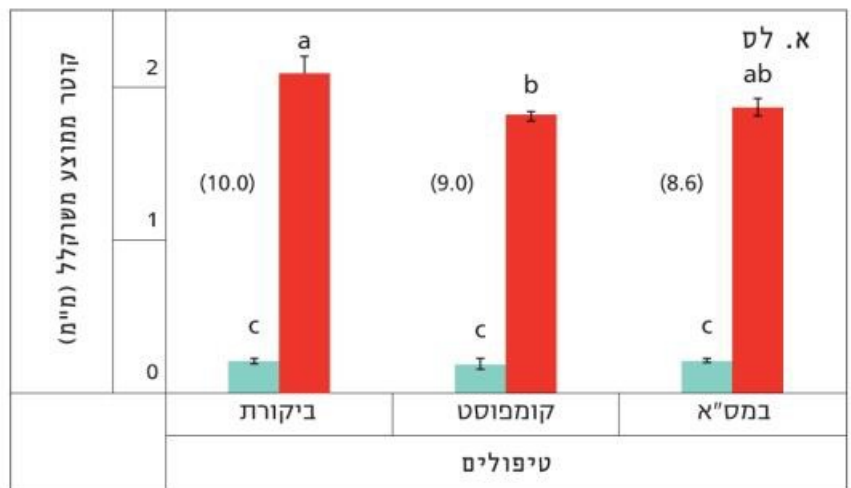
מספרים בסוגריים ליד ראש העמודות מציינים את ערך המיגוג

(SLV) של התלכידים בכל טיפול. קווים אנכיים בראש העמודות

מציינים שגיאת תקן. אותיות שונות בראש העמודות מציינות

הבדלים מובהקים של ערכי ה-MWD בהרטה מהירה או אטית בין

טיפולי הבוצה בכל טיפוס קרקע.



## איור 2

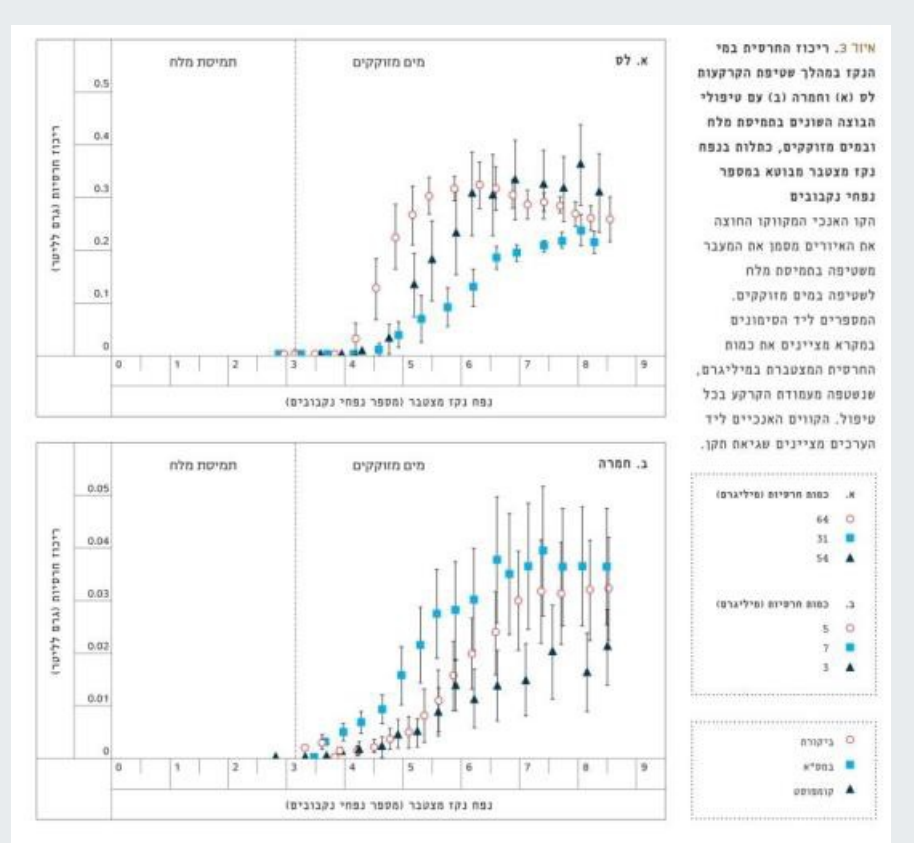
ערכי קוטר ממוצע משוקלל (MWD) של תלכידי הקרקע בלס (א) ובחמרה (ב) לאחר הרטבתם האטית או המהירה עבור טיפולי הבוצה השונים

מספרים בסוגריים ליד ראש העמודות מציינים את ערך המיגוג (SLV) של התלכידים בכל טיפול. קווים אנכיים בראש העמודות מציינים שגיאת תקן. אותיות שונות בראש העמודות מציינות הבדלים מובהקים של ערכי ה-MWD בהרטה בהירה או אטית בין טיפולי הבוצה בכל טיפוס קרקע.

בקרע לס גרם, ככל הנראה, ערך המיגוג הגבוה יותר בטיפול הביקורת (10.0) בהשוואה לקרקע המטופלת בקומפוסט בוצה (9.0) או בבמס"א (8.6) (איור 2א) להתפוררות רבה יותר של התלכידים ולירידה מובהקת בערכי ה- $K_s$  בטיפול הביקורת בהשוואה לשני טיפולי הבוצה במהלך שטיפת הקרקע בתמיסת מלח (איור 1א). השפעה מטייבת זו של קומפוסט בוצה ובמס"א בהגדלת יציבות התלכידים כנגד כוחות המיגוג נבעה כנראה משלושה גורמים עיקריים: (א) התלכדות על-ידי החומר האורגני המוסף לקרקע; (ב) הגברת הפעילות של המיקרואורגניזמים בקרקע, הגורמת לשחרור מוגבר של פוליסכרידים, שנספחים לחלקיקי הקרקע ומייצבים את התלכידים [7, 2]; (ג) עלייה באוכלוסיית הפטריות בקרקע, שבעקבותיה התפטרים שלהן קושרים ואוחזים את חלקיקי הקרקע בתלכיד ומייצבים אותו [19]. בחמרה, כמו בלס, ערך ה- $K_s$  הממוצע במהלך השטיפה בתמיסת מלח היה גבוה באופן מובהק בקומפוסט בוצה בהשוואה לטיפול הביקורת. עם זאת, בטיפול הבמס"א בחמרה, ערך זה של ה- $K_s$  היה נמוך ודומה לביקורת (איור 1ב). ערך ה- $K_s$  הנמוך בחמרה המטופלת בבמס"א נבע כנראה מהתכולה הגבוהה של אפר פחם בבוצה זו (35% מהמשקל היבש). אפר פחם מורכב מחלקיקים קטנים בגודל של 1–20 מיקרומטר [1], המוגדרים כמקטע גודל של חרסית ואבק. ניתן להניח, שתוספת חלקיקים קטנים אלה של אפר פחם לחמרה בטיפול הבמס"א הגדילה את שכיחות הנקבובים הקטנים בקרקע על חשבון הנקבובים הגדולים, וזו גרמה כנראה לירידה בערכי ה- $K_s$  (איור 1ב). לעומת זאת, בקרקע לס, המאופיינת במרקם דק יותר (טבלה 1א), יש פחות נקבובים גדולים, ולכן השפעת המקטע הדק, שמקורו באפר פחם, הייתה מועטה, ואילו השפעת ההתלכדות כתוצאה מתוספת הבמס"א, הייתה דומיננטית בעליית ערכי ה- $K_s$  (איור 1א).

שטיפה במים מזוקקים הקטינה את ערכי ה- $K_s$  בכלל הקרקעות והטיפולים, למעט טיפול קומפוסט בוצה בחמרה (איור 1ב). ירידה זו ב- $K_s$  במהלך שטיפת הקרקעות במים מזוקקים נבעה מירידה בריכוז האלקטרוליטים בתמיסת הקרקע (נספח 1), שגרמה תחילה לתפיחת החרסית ולהקטנת נפח הנקבובים המוליכים בקרקע [20], ובהמשך לפיזור של החרסית עם ירידת ריכוז האלקטרוליטים מתחת לערך ההפְּתָה [23]. הפיזור של החרסית בלס ובחמרה בא לידי ביטוי בהימצאות חלקיקי חרסית במי הנקז עם שטיפת הקרקעות במים מזוקקים (איור 3). חלקיקי החרסית המפוזרים נעו בקרקע עם המים. חלק מהם נלכד בנקבובים ואטם אותם, וחלק אחר העלה את צמיגות התשטוף. כתוצאה מכך, חלה ירידה ב- $K_s$  של הקרקע [12]. ריכוזי החרסית בתשטוף בטיפולי הבוצה השונים היו גבוהים בסדר גודל בלס בהשוואה לחמרה (איור 3). סביר להניח, שתכולת החרסית וערך ה-ESP הגבוהים יותר בלס מאשר בחמרה (טבלה 1א) גרמו לפיזור מוגבר של החרסית ולשטיפתה הרבה במי הנקז בלס. כמויות החרסית הגבוהות, 64 ו-54 מיליגרם, שנשטפו במהלך כל השטיפה מהלס בטיפולים ביקורת וקומפוסט בוצה, בהתאמה, לעומת 31 מיליגרם בבמס"א (איור 3א) יכלו לנבוע משני מנגנונים עיקריים: (א) תהליכי פיזור מוגברים של החרסית בשני הטיפולים הראשונים לעומת הטיפול השלישי; (ב) אפקט סינון מוגבר בטיפול הבמס"א עקב תוספת חומר דק שמקורו באפר הפחם המוסף לבוצה, שהקטין את יכולת שטיפת החרסית שעברה פיזור מהקרקע. בלס, האחוז הגדול ביותר של הירידה בערכי ה- $K_s$  בסוף השטיפה במים מזוקקים, ביחס לערכם הממוצע בשטיפה בתמיסת מלח בטיפולים ביקורת וקומפוסט בוצה (45.4% ו-41.4% לעומת הטיפול הבמס"א (33.9%) (איור 1א), תומך במנגנון הראשון כמנגנון הדומיננטי בקרקע זו. בחמרה, לעומת זאת, אולי עקב תכולת החרסית הנמוכה יותר, כמות החרסית שנשטפה עם הנקז הייתה נמוכה מאוד, וההבדלים בין טיפולי הבוצה היו קטנים, 3, 5 ו-7 מיליגרם בטיפולים קומפוסט בוצה, ביקורת ובמס"א, בהתאמה (איור 3ב). בהתאם לכך, הירידה בערכי ה- $K_s$  בסוף השטיפה במים מזוקקים, ביחס לערכם בשטיפה בתמיסת מלח, הייתה קטנה בטיפולי הבוצה השונים בקרקע זו (איור 1ב).





**איור 3**

## ריכוז החרסית במי הנקז במהלך שטיפת הקרקעות לס (א) וחמרה (ב) עם טיפולי הבוצה השונים בתמיסת מלח ובמים מזוקקים, כתלות בנפח נקז מצטבר מבוטא במספר נפחי נקבובים

הקו האנכי המקווקו החוצה את האיורים מסמן את המעבר משטיפה בתמיסת מלח לשטיפה במים מזוקקים. המספרים ליד הסימונים במקרא מציינים את כמות החרסית המצטברת במיליגרם, שנשטפה מעמודת הקרקע בכל טיפול. הקווים האנכיים ליד הערכים מציינים שגיאת תקן.

## מסקנות

- ערכי  $K_s$  בקרקע לס, המאופיינת במרקם דק, בעלת ESP גבוה ויציבות תלכידים נמוכה, היו נמוכים בסדר גודל לעומת ערכי  $K_s$  גבוהים בחמרה, המאופיינת במרקם גס, ESP נמוך ויציבות תלכידים גבוהה יותר.
- תוספת קומפוסט בוצה ובמס"א ללס וקומפוסט בוצה לחמרה העלתה באופן מובהק את ערכי ה- $K_s$  של הקרקעות. העלייה נבעה בעיקר מהגדלה ביציבות התלכידים כנגד כוחות המיגוג עם הרטבתם.
- חוסר ההשפעה של תוספת הבמס"א בהגדלת ערכי ה- $K_s$  בחמרה נבעה, כנראה, מתכולת אפר פחם גבוהה בבוצה זו, המורכבת מחלקיקים קטנים בגודל מיקרון, שהגדילו את שכיחות הנקבובים הקטנים בקרקע זו על חשבון הנקבובים הגדולים שתורמים למוליכות הידראולית גבוהה ברוויה.
- תוספת בוצות לקרקעות לא נתרנית ובעלות מרקם גס, כגון חמרה, במטרה לשפר את המוליכות הידראולית שלהן, אינה אפקטיבית, עקב ערכי ה- $K_s$  הגבוהים של קרקעות אלה גם ללא תוספת בוצות.
- במכלול השיקולים בקביעת המדיניות בשימוש בבוצות שפכים מטופלות בשדות חקלאיים, יש לכלול את הפוטנציאל הטמון בבוצות לשמש חומר מטייב שמשפר את המבנה והתכונות ההידראוליות של קרקעות חקלאיות, כפי שנמצא במחקר הנוכחי.

## מקורות

1. בן-חור מ, קרן ר ורשף ג. 1998. השפעת אפר פחם מרחף על זיהום קרקע ומקורות מים ביסודות קורט. דו"ח שהוגש למשרד להגנת הסביבה ולמנהלת אפר פחם, אשכול מדעי טבע.
2. בן-חור מ, פיין פ, לייב ל ואחרים. 2012. השפעת תוספת בוצת שפכים בשטחים חקלאיים על מבנה קרקע, נגר עילי וסחף. *אפיקים בגאוגרפיה* **78**: 152-141.
3. הכט-גנן ה. 2014. פליטת גזי חממה מקרקע לאחר יישום בוצת שפכים אשר עברו תהליכי ייצוב שונים (עבודת גמר לתואר מוסמך). רחובות: האוניברסיטה העברית בירושלים.
4. טל-ספירו א. 2010. היבטים סביבתיים ובין-לאומיים של הזרמת בוצה מהשפד"ן לים התיכון. מסמך לקראת דיון בוועדה המשותפת לסביבה ובריאות בכנסת, מרכז המידע והמחקר.
5. רובין ד וצדיקוב א. 2011. סילוק בוצות מט"שים עירוניים 2010. דו"ח שהוגש למשרד להגנת הסביבה, אשכול מדעי טבע.
6. רביקוביץ ש. 1992. קרקעות ישראל, התהוותן, טבען ותכונותיהן. הקיבוץ המאוחד.
7. Ben-Hur M. 2006. Using synthetic polymers as soil conditioners to control runoff and soil loss in arid and semiarid regions – a review. *Australian Journal of Soil Research* **44**: 191-204.
8. Ben-Hur M, Yolcu G, Uysal H, et al. 2009. Soil structure changes: Aggregate size and soil texture effects on hydraulic conductivity under different saline and sodic conditions. *Australian Journal of Soil Research* **47**: 688-696.
9. Epstein E, Taylor JM, and Chaney RL. 1976. Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties. *Journal of Environmental Quality* **5**: 422-426.
10. Epstein E. 1975. Effect of sewage sludge on some soil physical-properties. *Journal of Environmental Quality* **4**: 139-142.
11. Gupta SC, Dowdy RH, and Larson WE. 1977. Hydraulic and thermal-properties of a sandy soil as influenced by incorporation of sewage sludge. *Soil Science Society of America Journal* **41**: 601-605.
12. Keren R and Ben-Hur M. 2003. Interaction effects of clay swelling and dispersion and CaCO<sub>3</sub> content on saturated hydraulic conductivity. *Australian Journal of Soil Research* **41**: 979-989.
13. Khaleel R, Reddy KR, and Overcash MR. 1981. Changes in soil physical-properties due to organic waste applications – a review. *Journal of Environmental Quality* **10**: 133-141.
14. Lado M, Ben-Hur M, and Shainberg I. 2004. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation and erosion. *Soil Science Society of America Journal* **68**: 1992-1999.
15. Lado M, Paz A, and Ben-Hur M. 2004. Organic matter and aggregate size interactions in saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal* **68**: 234-242.

16. Lado M and Ben-Hur M. 2010. Effects of irrigation with different effluents on saturated hydraulic conductivity of arid and semiarid soils. *Soil Science Society of America Journal* **74**: 23-32.
17. Lindsay BJ and Logan TJ. 1998. Field response of soil physical properties to sewage sludge. *Journal of Environmental Quality* **27**: 534-542.
18. Logan TJ and Harrison BJ. 1995. Physical characteristics of alkaline stabilized sewage-sludge (n-viro soil) and their effects on soil physical-properties. *Journal of Environmental Quality* **24**: 153-164.
19. Metzger L, Levanon D, and Mingelgrin U. 1987. The Effect of sewage sludge on soil structural stability: Microbiological aspects. *Soil Science Society of America Journal* **51**: 346-351.
20. Shainberg I and Letey J. 1984. Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia* **52**: 1-57.
21. Tiarks AE, Mazurak AP, and Chesnin L. 1974. Physical and chemical properties of soil associated with heavy applications of manure from cattle feedlots. *Soil Science Society of America Journal* **38**: 826-830.
22. Tsadilas CD, Mitsios IK, and Golia E. 2005. Influence of biosolids application on some soil physical properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **36**: 709-716.
23. van Olphen H. 1977. An introduction to clay colloid chemistry, 2nd ed. NY: John Wiley & Sons.
24. Wei QF, Lowery B, and Peterson AE. 1985. Effect of sludge application on physical-properties of a silty clay loam soil. *Journal of Environmental Quality* **14**: 178-180.

## נספחים (זמינים באתר)

נספח 1. ערכי מוליכות חשמלית (א), (ב), ומנת ספיחת הנתרן (ג, ד) במי הנקז במהלך שטיפת הקרקעות לס וחמרה עם טיפולי הבוצה השונים בתמיסת מלח, ולאחריה במים מזוקקים, כתלות בנקז הנקז המצטבר המבוטא במספר נפחי נקבובים

[להורדה](#)

