

# זיהוי המינרלים השולטים על מסיסות הזרחן בקרקות צפון רמת הגולן (שנת ביצוע 2020)

**שאדי סרחאן - שה"מ**  
**ליאור אבישי - צמח נסיונות**  
**פרופ' משה שנקר - הפקולטה לחקלאות מזון וסביבה - רחובות - האוניברסיטה  
העברית בירושלים**

## רקע

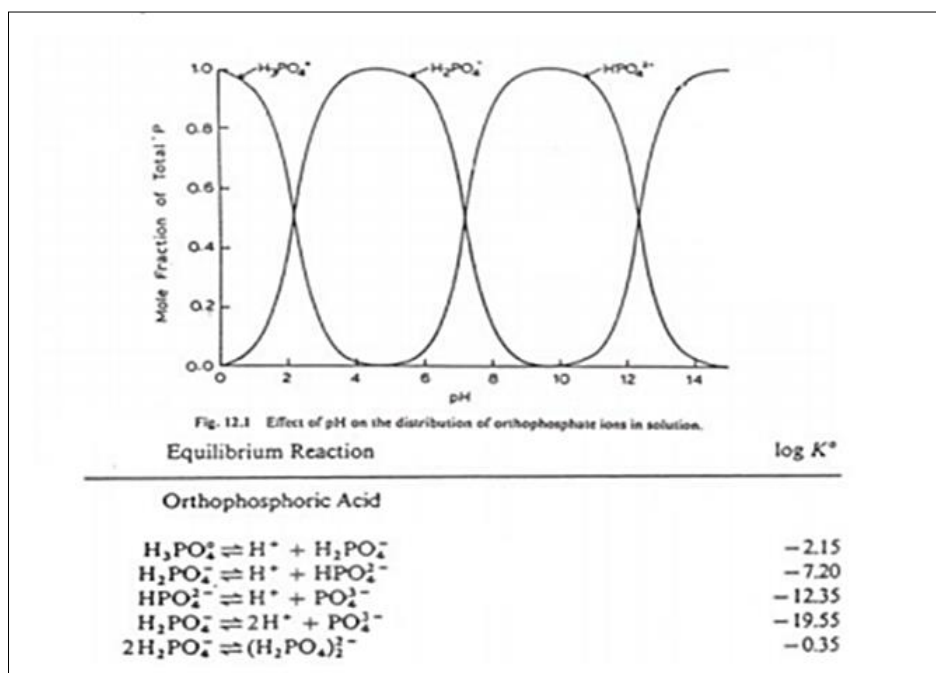
קרקעות צפון רמת הגולן, המוגדרות כקרקעות חומות, ים-תיכוניות, בזלתיות - ידועות כעשירות בזרחן, ולכן לרוב אין מדשנים אותן בזרחן. קרקעות אזור זה נחשבות קרקעות צעירות, בעלות ערך הגבה חומצי במקצת - בטווח של 6-6.5 (טווח שבו הזרחן זמין לצמח).

## זרחן (P)

הזרחן הוא יסוד חיוני להזנת הצמח, הנמנה על קבוצת המאקרו בהיותו נצרך בכמויות גדולות יחסית (קילוגרמים לדונם בכל הגידולים החקלאיים המסחריים). הדעה הרווחת (היסטורית) היא כי יישום זרחן בכמות הנדרשת מביאה להמרצת גדילת מערכת השורשים. ניסויים רבים בוצעו ביסוד הזנה זה במטרה לבחון את מידת השפעתו על גדילת השורשים, ונמצא כי שילובו בחנקן בצורת אמון הביא להתפתחות משמעותית במערכת השורשים של שעורה (Tisdale, 1985). תכולת הזרחן הממוצעת בבדיקות עלים נמצאת בטווח של 0.1%-0.3%, והיא מהווה כ-10% עד 20% מכמות החנקן וגם מכמות האשלגן הנצרכות בגידול מסחרי. לזרחן ניידות גבוהה בצמח, ולכן מחסור בו יתבטא קודם כל בעלים הבוגרים. הזרחן נמצא בכל תא בכל רקמות הצמח, והוא מרוכז בחומצות הגרעין, בפוספולפידים, וכן במולקולות ה-ATP-ADP השותפות בתהליכי העברת אנרגיה בצמח, וככזה יש לו תפקיד חשוב בהרבה מהפעילות המטבולית ומהבקרה האנזימטית בתא הצמחי (Theodorou, 1993). הזרחן מזרז את תהליך התבגרות הצמח ומהווה מרכיב חשוב בזרעים המשלימים את מחזור החיים של הצמח (Tisdale, 1985). הזרחן נקלט אל תוך הצמח בדיפוזיה דרך הממברנה ופחות במעבר מסה. לפיכך, סביבה לחה ומתחי מים רפים בסביבת השורש מהווים תנאים המקלים על פעילות הקליטה של יסוד זה (Schachtman, 1998).

ממשק הדישון הזרחני נקבע לפי רמת זמינות הזרחן בשיטת אולסן (Olsen, 1982), המתאימה לקרקעות ניטרליות ואף בסיסיות מתונות. דיוק בכמות הזרחן שיש ליישם בגידול חקלאי בקרקע מצריך מיומנות רבה, כיוון שקשה להעריך את כמותו הזמינה לאחר היישום. הזרחן המיושם דרך הקרקע נספח ברובו במהירות לשטחי פנים של הידרוקסידים בברזל, באלומיניום, בחרסיות ובחומר אורגני. בתהליך איטי יותר הוא עובר קיבוע בתרכובות קשות תמס עם סידן, ברזל, אלומיניום ומתכות נוספות. לזמן החולף ממועד היישום יש חשיבות רבה בעניין זמינות הזרחן, כיוון שככל שחולף הזמן מתרחשת טרנספורמציה לתרכובות יותר יציבות,

פחות מסיסות ופחות זמינות לצמח. בקרקעות בסיסיות העשירות בגיר, ולכן גם בסידן, המינרלים היציבים הם בעיקר של תרכובות עם סידן בדרגת מסיסות שונה בהתאם ל-pH של הקרקע. לפרמטר זה וכן למצב הרטיבות בקרקע יש חשיבות מכרעת לעניין זמינות יסוד זה לצמח. עם החדרת חומצה זרחתית לקרקע המכילה סידן (המקור העיקרי לסידן הוא גיר הקרקע) נוצרים כמה מינרלים אורטופוספטיים בעלי מסיסות שונה, בהתאם לסוג המינרל המצוי בקרקע ובהתאם לזמן שחלף ממועד היישום. הצורונים שנקלטים לצמח הם  $H_2PO_4^-$  ו- $HPO_4^{2-}$  בהתאם לערך ה-pH כמתואר באיור 1.



**איור 1:** התפלגות צורני החומצה הזרחתית בהתאם ל-pH (Lindsay, 1979)

לא מעט מחקרים עוסקים עדיין בהבנת התהליכים ובניסיון להעריך כמותית את מידת זמינות הזרחן. מכפלת המסיסות מהווה כלי לזיהוי המרכיבים שקובעים את דרגת המסיסות של הזרחן בקרקע ואת הצורה הזמינה לצמח (Lindsay, 1979). עם זאת, השימוש באיזותרמות של מכפלת המסיסות - עדיין אין בהן כדי לכמת את המרכיבים ולקבוע את כמות הזרחן הזמינה לצמח (Olsen, 1980), כך שהפרקטיקה היום ביישום דשן זרחני היא על בסיס ניסוי וטעיה ובהסתמך על הידע החקלאי שהצטבר בתחום, בהתאם לתוצאות בדיקות המעבדה המתייחסות למידת זמינות הזרחן לפי השיטת אולסן.

### שאלת המחקר

מהו המינרל השולט על זמינות הזרחן בקרקעות חומות, ים-תיכוניות, בזלתיות, המצויות מצפון לרמת הגולן?

### מטרת המחקר

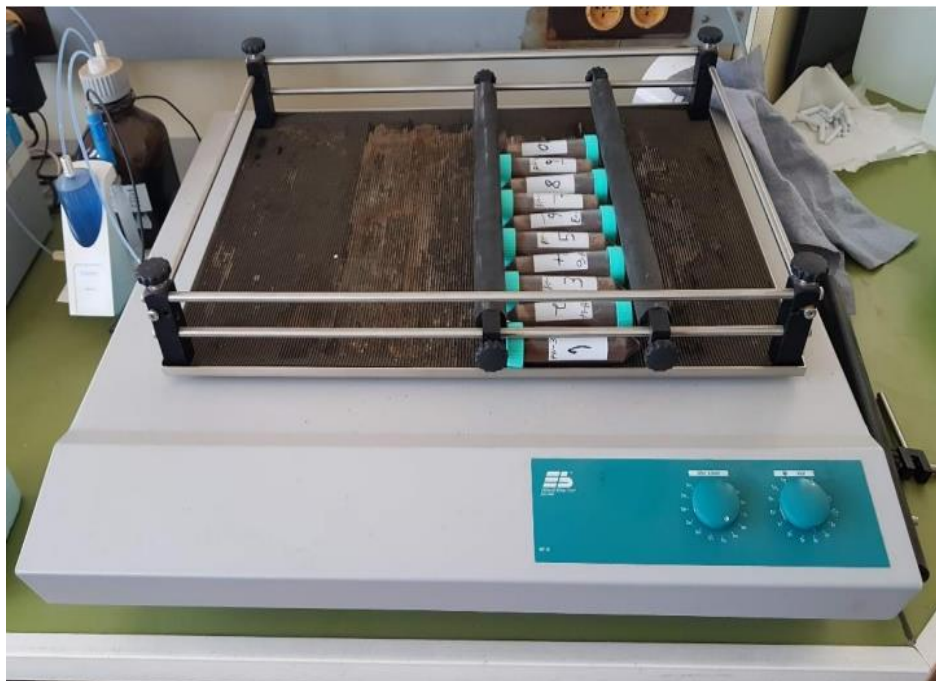
בניית דיאגרמת יציבות של מינרל הזרחן השולט על תמיסת הקרקע בקרקעות חומות, ים-תיכוניות, בזלתיות, המצויות צפונית לרמת הגולן.

## מהלך הניסוי

דגימת קרקע מייצגת נלקחה מהשכבה העליונה (0-30) של קרקע בעמק קוניטרה, שעליה נטוע כרם יין, השייך לקיבוץ מרום גולן. דוגמה זו עברה סדרת טיפולים במעבדה שכללו: ייבוש ב- 65 מעלות צלזיוס, טחינת הקרקע ומעבר בנפה של 2 מ"מ. לאחר הניפוי עברו הדגימות אינקובציה בערכי הגבה שונים (pH=3-7) במשך 48 ו- 96 שעות (סה"כ 10 דגימות).

מיצוי הקרקע בוצע ביחס 4:1, 10 גרם קרקע ל-40 מ"ל מים, בחוזק יוני של 1.0 מולר (תמיסה המכילה NaCl ומים מזוקקים), במבחנות פלסטיק 50 מ"ל. התמיסות עברו תיקון pH בעזרת חומצה הידרוכלורית (HCl) או בעזרת אשלגן הידרוקסיד (KOH) לערכי pH 3, 4, 5, 6, 7. התיקון התבצע לאחר הוספת 30 מ"ל והשלמה ל-40 מ"ל. התמיסה הוכנה ראשונה, ולאחר מכן הוספה לה דגימת הקרקע השקולה. כאמור, סט אחד היה באינקובציה בטלטול למשך 48 שעות, וסט שני - למשך 96 שעות. לאחר זמן האינקובציה הוצאו המבחנות מהמטלטלת והונחו על השולחן לכ-5 שעות, כדי לאפשר שקיעה של הקרקע.

בדיקת pH בוצעה בעזרת אלקטרודה שנטבלה במבחנת האינקובציה וכך גם בדיקת המליחות. הדגימות עברו סינון עם נייר סינון, ובוצע מיהול לתסנין פי 10. לאחר מכן אוחסנו הדגימות במקרר במבחנה סגורה עד לאנליזה במכשיר ICP. התוצאות שנתקבלו עברו עיבוד גיאוכימי בתוכנת "Visual Minteq" (2014) (Gustafsson,

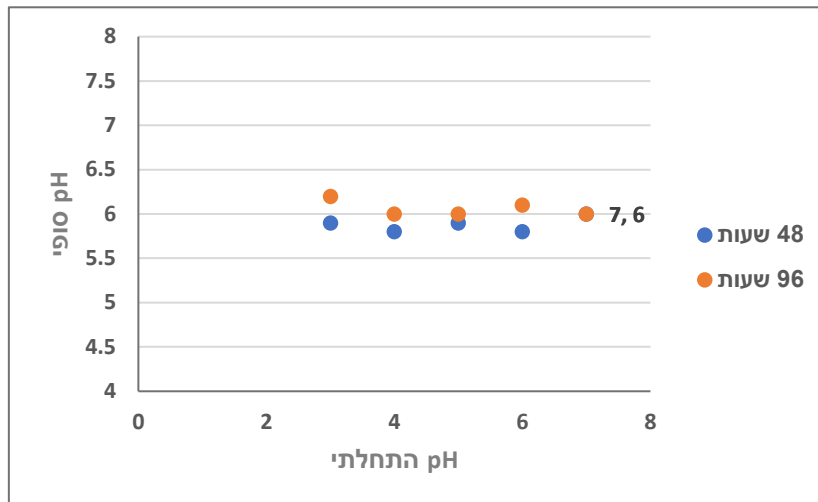


**איור 2:** דגימות הקרקע בשלב הטלטול והאינקובציה בתמיסות ה- pH השונות

## ערך ההגבה וזיהוי המינרל השולט על זמינות הזרחן

למציאת מינרל הזרחן השולט על תמיסת הקרקע, היה צורך במדידות בתנאי pH שונים, בכדי לוודא שתוצאות הבדיקה לא ייטו בעקבות גורמים חד-פעמיים, כמו מיהול הבדיקה, זמן הבדיקה או מדגם לא מייצג. ערך ההגבה הממוצע שנתקבל בבדיקה זו עמד על 5.9 ו-6.1 עבור האינקובציה ב- 48 ו-96 שעות, בהתאמה.

ערך ה- pH שנתקבל בבדיקות המעבדה עבור אותה שכבה עמד על 6.25, הנמצא גם בטווח ה-pH של קרקעות חומות, בזלתיות, ים-תיכוניות. הקרקע שנבדקה שייכת לקרקעות צעירות (Singer, 2007) וטווח ה-pH שנתקבל בה הוא האופטימלי לזמינות הזרחן.



**איור 3:** שינוי ה- pH של מיצוי הקרקע לאחר האינקובציה בשני מרווחי זמן (לנקודות 6 ו-7 ערך pH זהה)

### תוצאות עיבוד גיאוכימי של התוצאות (בתוכנת "Visual Minteq"):

כל הנתונים שנתקבלו מבדיקת מכשיר ה-ICP עבור דגימות המיצוי, הוכנסו לתוכנה ביחידות mg/l. ההרצה התבצעה לכל טיפול, בהתבסס על ההנחה שהמוצקים אינם שוקעים, ו- pH התמיסה נקבע לפי הערך הנמדד בכל טיפול. בכל ההרצות של התוכנה ההבדל בין הסא"מ (סך אניונים מסיסים) לסק"מ (סך קטיונים מסיסים) לא עלה על 5%.

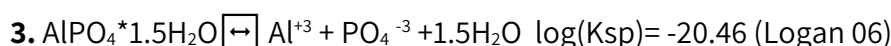
לאחר בחינת תוצאות ההרצה של כל טיפול בפלט ה- saturation index של התוכנה, נראה כי המערכת שואפת לשיווי משקל עם המינרלים  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{amorphous})$  ו-  $\text{AlPO}_4 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$  (sat. index שואף לאפס). בהתאם לכך, יצרנו דיאגרמת יציבות למינרלים, לפי המשוואות שלהלן, כאשר קבועי המסיסות, המצוינים בצידי המשוואות, לקוחים מתוכנת עיבוד הנתונים (Gustafsson, 2014). המשוואות ששימשו ליצירת הדיאגרמות:



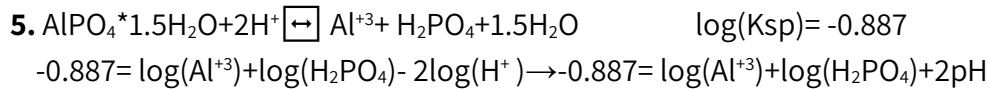
$$10.8 = \log(\text{Al}^{+3}) - 3\log(\text{H}^+) \rightarrow \log(\text{Al}^{+3}) + 3\text{pH} = 10.8$$



$$8.29 = \log(\text{Al}^{+3}) - 3\log(\text{H}^+) \rightarrow \log(\text{Al}^{+3}) + 3\text{pH} = 8.29$$

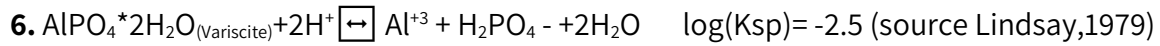


חיבור המשוואות 3 ו- 4:



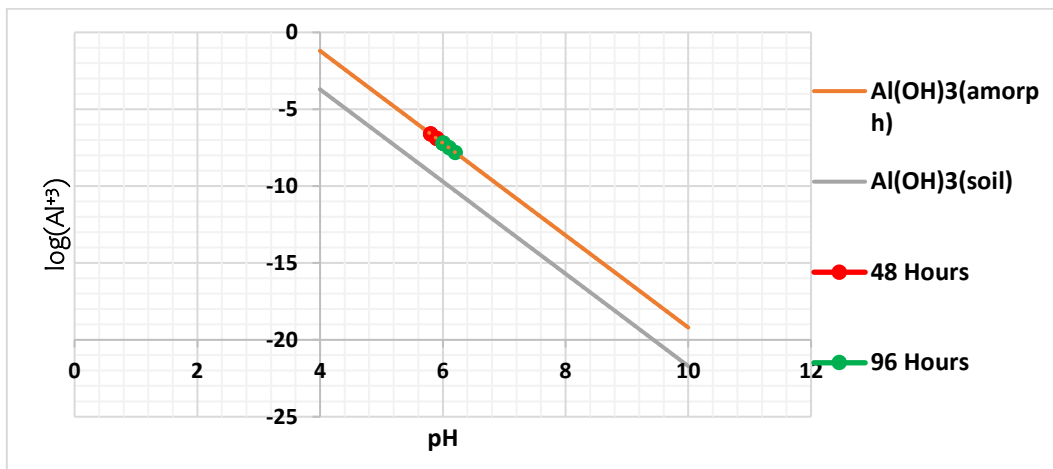
הוספת pH לכל צד של המשוואה

$-0.887 + \text{pH} = \log(\text{Al}^{3+}) + \log(\text{H}_2\text{PO}_4) + 3\text{pH} \rightarrow \log(\text{H}_2\text{PO}_4) - \text{pH} = -(\log(\text{Al}^{3+}) + 3\text{pH}) - 0.877$



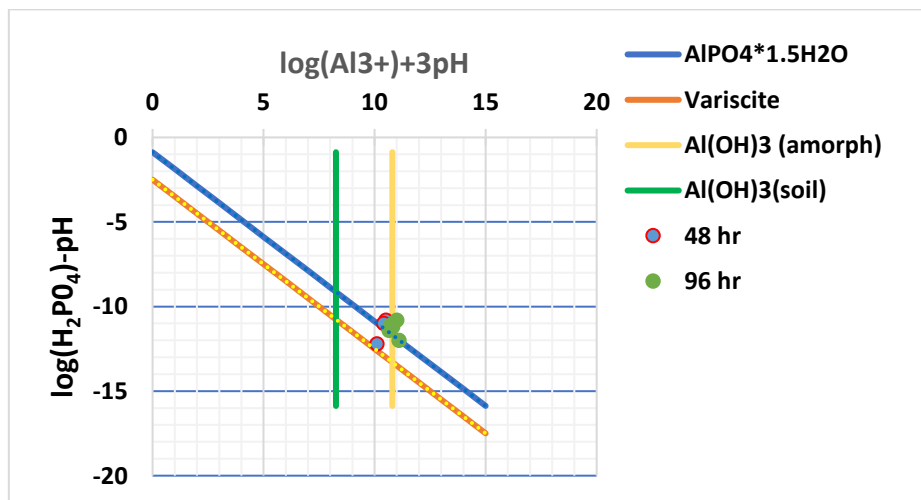
הוספת pH לכל צד של המשוואה

$-2.5 + \text{pH} = \log(\text{Al}^{3+}) + \log(\text{H}_2\text{PO}_4) + 3\text{pH} \rightarrow \log(\text{H}_2\text{PO}_4) - \text{pH} = -(\log(\text{Al}^{3+}) + 3\text{pH}) - 2.5$



**איור 4:** דיאגרמת יציבות של Al(OH)<sub>3</sub>(amorphous) ושל Al(OH)<sub>3</sub>(soil) ותוצאות הבדיקה

הנקודות שעל התרשים מייצגות את ערכי ה-pH שנתקבלו לאחר האינקובציות, וציר ה-y מייצג את הביטוי הלוגריתמי (log(Al<sup>3+</sup>)) שחושב לפי עיבוד הנתונים בתוכנת **Visual Minteq**.



**איור 5:** דיאגרמת יציבות של AlPO<sub>4</sub>·1.5H<sub>2</sub>O, Al(OH)<sub>3</sub>(soil), Al(OH)<sub>3</sub>(amorphous) ושל Variscite

גם באיור 5 הנקודות שעל התרשים מייצגות את ערכי ה-pH, שנתקבלו לאחר האינקובציות ואת הערך הלוגריתמי של אקטיביות היונים  $Al^{3+}$  ו-  $H_2PO_4^-$ , כפי שחושבו לאחר עיבוד הנתונים בתוכנת Visual Minteq. השערת הבדיקה הייתה כי ישנם מינרלים היוצרים כושר בופר pH לקרקע ממשפחת ה-  $Al(OH)_3$  (Bloom, 2005). בהתאם, המינרל שישלוט על ריכוז הזרחן יהיה ממשפחת אלומו-פוספטים. מכאן עולה כי בקרקעות מסוג זה זמינות הזרחן גבוהה מזו שבקרקעות גירניות בעלות כושר בופר בסיסי.

בשתי האינקובציות נראה כי אקטיביות האלומיניום וה-pH שהתקבלו בניסוי תואמים לכך ש-  $Al(OH)_3$  amorphous שולט על המסיסות. בנוסף, ניתן לראות שהמערכת מגיעה לרוויה לגבי המינרל  $Al(OH)_3$  soil. זמינות הזרחן בקרקע: לאחר העיבוד בתוכנה הגיאוכימית ניתן לראות כי המערכת נמצאת בשיווי משקל עם המינרל  $AlPO_4 \cdot 1.5H_2O$ , השולט למעשה על ריכוזי הזרחן בתמיסת הקרקע. באיור 5 רואים את דיאגרמת היציבות של המינרלים  $AlPO_4 \cdot 1.5H_2O$  ו- Variscite כפונקציה של אקטיביות הזרחן, האלומיניום וה-pH, לצד דיאגרמת היציבות של  $Al(OH)_3$  amorphous ו-  $Al(OH)_3$  soil. מינרלים אלו אינם תלויים בריכוז הזרחן, והמערכת יכולה להתקיים בנקודת החיתוך בין דיאגרמת היציבות של המינרלים השונים. כאשר מציבים את הערכים שהתקבלו בניסוי, אכן רואים כי כל הנקודות נמצאות באזור החיתוך של  $Al(OH)_3$  amorphous ו-  $AlPO_4 \cdot 1.5H_2O$ . כלומר, המערכת בשיווי משקל עם מינרלים אלו. כאמור, קרקעות צפון רמת הגולן מאופיינות בבופר pH 6.5-6 ובזמינות טובה של זרחן בקרקע (ברמה הפרקטית, חקלאי האזור אינם מדשנים בזרחן כבר שנים רבות).

## סיכום ומסקנות

קרקעות צפון רמת הגולן מאופיינות בבופר pH של 6.5-6 ובזמינות טובה של זרחן בקרקע. בניסוי זה ניסינו ללמוד מהם המינרלים השולטים בקרקע על כושר הבופר ועל זמינות הזרחן. כדי לאפיין את המינרלים השונים, בוצע ניסוי אינקובציה של קרקע עם תמיסה בעלת חוזק יוני ידוע ב-pH שונים ובזמני אינקובציה שונים. המטרה בטיפולים השונים הייתה לוודא שמערכת שיווי המשקל "אמיתית" ולא נבעה מטיפול אחד מסוים שהשפיע על התוצאות.

## pH הקרקע

לאחר זמן אינקובציה בכל טיפול נע ערך ההגבה של הקרקע סביב 6 (איור 3). כפי שמצוין בספרות ולפי כמה בדיקות שביצע שירות השדה באזור זה, יש לקרקע יכולת בופר ל-pH עם ערך דומה. כל הטיפולים שהתחילו ב-pH שונה (מלבד הטיפול ב-pH 6) הגיעו בסוף הניסוי ל-pH 6. תופעה זו התרחשה הן באינקובציה הקצרה של 48 שעות והן בזמן הארוך יותר של 96 שעות, כלומר בופר ה-pH הוא תהליך קצר יחסית עד ההגעה לשיווי המשקל. לאחר עיבוד הנתונים של התוכנה הגיאוכימית ובניית דיאגרמת יציבות עם המינרל  $Al(OH)_3$  amorphous (גרף 2), האחראי למעשה על כושר בופר ה-pH של המערכת. בנוסף, ניתן לראות שכל הנקודות תואמות והמערכת בשיווי משקל עם מינרל זה שאופת לשיווי משקל עם המינרל מכיוון שהנקודות סמוכות לקו אך לא ממוקמות עליו במדויק. כעבור 96 שעות נראה כי המערכת קרובה יותר לשיווי משקל, מכיוון שהנקודות מסתדרות סמוך יותר לקו. בשני המקרים אקטיביות האלומיניום וה-pH שהתקבלו בניסוי תואמים לכך כי  $Al(OH)_3$  amorphous שולט על המסיסות. בנוסף, ניתן לראות שהמערכת מגיעה לרוויה לגבי שיווי משקל עם  $Al(OH)_3$  soil.

## זמינות הזרחן בקרקע

לאחר העיבוד בתוכנה הגיאוכימית ניתן לראות כי המערכת בשיווי משקל עם המינרל  $\text{AlPO}_4 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ , השולט למעשה על ריכוזי הזרחן בתמיסת הקרקע. בגרף 3 רואים את דיאגרמת היציבות של המינרל  $\text{AlPO}_4 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$  ו- Vaiscite כפונקציה של אקטיביות הזרחן, האלומיניום וה- pH, לצד דיאגרמת היציבות של amorphous  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ו- soil  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . מינרלים אלו אינם תלויים בריכוז הזרחן, והמערכת יכולה להתקיים בנקודת החיתוך בין דיאגרמת היציבות של המינרלים השונים. כאשר מציבים את הנקודות שהתקבלו בניסוי, רואים כי כל הנקודות נמצאות באזור החיתוך של  $\text{AlPO}_4 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$  ו- amorphous  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , כלומר נמצאת המערכת בשיווי משקל עם מינרלים אלו.

איור 5 מציג תקריב של אזור החיתוך ושל ערך ההגבה הראשוני בכל טיפול. מגרף זה ניתן ללמוד שהקרקעות שהיו באינקובציה ל- 96 שעות, קרובות יותר לנקודת החיתוך, כלומר לשיווי משקל, לעומת הקרקעות שהיו באינקובציה רק 48 שעות. אין מגמה ברורה לגבי ההשפעה של ערך ה- pH הראשוני באינקובציה.

## סיכום

מטרת ניסוי זה הייתה לאפיין את המינרלים השולטים על זמינות הזרחן וערך ההגבה בקרקעות חומות, ים-תיכוניות ובזלתיות מצפון רמת הגולן. תוצאות ניסוי זה מצביעות על כך שהמינרל amorphous  $\text{Al}(\text{OH})_3$  הוא המינרל השולט על כושר בופר pH הקרקע, והמינרל  $\text{AlPO}_4 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$  שולט על מסיסות הזרחן בתמיסת הקרקע.

## רשימת ספרות

- Bloom R., et al (2005). "Soil acidity" in Chemical processes in Tabataba D et al (Editors), chemical processes in soils: 411-459. The Soil Science Society of America.
- Gustafsson J., (2014). Visual Minteq, 3.1. Stockholm: KTH, Department of Land and Water Resources Engineering.
- Lindsay W., (1979). Chemical Equilibria in Soils. Wiley-Interscience, New York.
- [Olsen](#) S.R. and [Khasawneh](#) F. E. (1980). Use and Limitations of Physical-Chemical Criteria for Assessing the Status of Phosphorus in Soils. In [Khasawneh](#) F.E., et al., Book Editors. [The Role of Phosphorus in Agriculture](#). the American Society of Agronomy. USA.
- Olsen, S. R. and Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. pp. 403-430. In: A. L. Page, et al. (eds.) Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties. Agron. Mongr. 9. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Schachtman D., et al., (1998). Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiology*, Volume 116. Issue 2. 447-453.
- Singer A., (2007). The soils of Israel. Springer Science & Business Media, pp. 186.
- Theodorou M. and Plaxton W., (1993). Metabolic Adaptations of Plant Respiration to Nutritional Phosphate Deprivation. *Plant Physiology*, [Vol. 101, No. 2](#). pp. 339-344.



## נספח 1: צבע קרקעות הניסוי



צבע הקרקעות של הניסוי במצב רטוב וגם יבש

## נספח 2: התוצאות שנתקבלו ממכשיר ה- ICP אשר הוזנו לתוכנת Visual Minteq בבדיקת המינרל השולט על זמינות הזרחן

טבלה 2- ריכוזי היסודות השונים במיצוי הקרקע

מספר מדגם	Al (mg/l)	Ca (mg/l)	Fe (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	P (mg/l)	PO4 (mg/l)	S (mg/l)	SO4 (mg/l)	Cl (mg/l)
1	0.252	216.370	0.321	21.093	62.920	1565.250	0.237	0.727	6.359	19.050	3098.186
2	0.228	215.350	0.339	19.236	61.870	1598.040	0.462	1.418	6.472	19.391	3292.412
3	0.123	217.370	0.192	21.655	61.770	1560.240	0.282	0.864	7.556	22.635	3201.798
4	0.038	239.370	0.111	21.316	67.540	2009.850	0.024	0.073	6.325	18.948	3807.815
5	0.142	242.960	0.257	34.589	66.780	1932.800	0.030	0.092	5.394	16.160	3834.675
6	0.323	209.720	0.358	19.830	59.390	1437.410	1.270	3.893	5.443	16.305	2913.493
7	0.214	216.130	0.316	19.544	61.520	1645.370	0.141	0.433	6.318	18.927	3275.763
8	0.405	223.530	0.442	22.218	62.300	1567.990	0.083	0.253	6.422	19.238	3190.580
9	0.229	252.490	0.306	21.538	67.610	1974.450	0.376	1.153	7.622	22.834	3821.866
10	0.377	203.210	0.379	26.706	58.950	1300.380	0.149	0.458	10.590	31.726	2816.042