

דו"ח סופי לתכנית מספר 17-0932-301

תקופת המחקר: 2018-2020

קביעת מדדי קרקע לזמינות מגנזיום והמלצות דישון עבורו

Determination of soil indices for Mg availability and for recommendations of Mg fertilization

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ע"י

המכון למדעי הקרקע, מים וסביבה, מינהל המחקר החקלאי	אשר בר-טל
מרכז מחקר גילת לחקלאות על סף המדבר, מינהל המחקר החקלאי	אורי ירמיהו
המכון למדעי הקרקע, מים וסביבה, מינהל המחקר החקלאי	גיא לוי
שרות שדה, שה"מ, משרד החקלאות	יורם אייזנשטדט
המכון למדעי הקרקע, מים וסביבה, מינהל המחקר החקלאי	רנין שוואהנה

Asher Bar-Tal, Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, POB 6, Bet Dagan, 50250. E-mail: abartal@volcani.agri.gov.il

Guy Levy, Raneen Shawahna, Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, ARO, POB 6, Bet Dagan, 50250.

Yoram Izenstadt, Shaham, Ministry of Agriculture.

Uri Yermiyahu, Gilat Research Station, Gilat.

תקציר

1. הצגת הבעיה - חסר מידע על מדדי קרקע לזמינות מגנזיום בקרקעות ישראל.
2. מטרת העבודה - מטרת מחקר זה להרחיב ולהעמיק את הידע הבסיסי ולגבש פרוטוקול לשיטת מיצוי של מגנזיום זמין המתאימה לקרקעות בישראל, לספק ערכי סף למגנזיום שימשו את המעבדות, המדריכים המקצועיים והחקלאים לקבלת החלטות על דישון ושיטת הערכה להמלצות דישון מבוססות על תוצאות המעבדה ועל הקשר הכמותי שנקבע בין כמות המגנזיום המוסף לקרקע לכמות המגנזיום הזמין לצמח בקרקע.
3. שיטות העבודה - התוכנית מבוססת על ניסויי מעבדה לבחינת כמות המגנזיום המתמצה בקרקעות שונות על ידי ממצים שונים, לימוד החילוף של מגנזיום עם קטיונים שונים בטלול בתרחיפי קרקע בתמיסות ומניסויי עציצים בבית צמיחה לבחינת קליטת מגנזיום מהקרקע כתלות במדדי הזמינות של המגנזיום שנבחנו בניסוי המעבדה.
4. תוצאות – בשנת המחקר הראשונה דגמנו קרקעות שמייצגות טווח רחב של תכונות קרקע ואיזורים גיאוגרפים שונים בארץ, ואפיינו את תכונות הקרקעות. התקבל טווח רחב מאוד של תכולת חרסית מ-7.5% עד 62.5% ובהתאמה תכולת החול בין 90% ל-18.7%. קבול הקטיונים החליפים היה בתחום רחב של 3.5 עד 63.8 מ"אק/100 ג ונמצא יחס ישר בין תכולת החרסית לקק"ח ולתכולת מים היגרסקופים, בהתאמה לספרות. צפיפות הקרקע נמצאה ביחס ישר הפוך לתכולת מים היגרסקופים, בהתאמה לספרות. בקרקעות שנדגמו הייתה שונות גדולה בתכולת הגיר שלא הייתה תלויה במרקם. לעומת זאת הייתה קורלציה בין תכולת הפחמן

האורגני לתכולת החרסית, כאשר הערכים הנמוכים ביותר היו בקרקעות החוליות והגבוהים ביותר בקרקעות חרסיות, אך המתאם לא היה גבוה כמו זה שבין הקק"ח לחרסית. בוצעו ניסויי המעבדה במיצוי מגנזיום מהקרקעות ומצאנו שסדר ריכוזי המגנזיום שהתקבלו במיצויים מהגבוה לנמוך היה:

מיצוי מליך < 1M KCl < NaHCO₃ (אולסן) < CaCl₂ = מיצוי מימי

התקבלו מתאמים גבוהים בין המיצויים בשלושת השיטות שבהן התקבלו הריכוזים הגבוהים ביותר של מגנזיום (מיצוי מליך, מיצוי ב- 1M KC ומיצוי אולסן) לבין המגנזיום הספוח. לא היה מתאם בין שיטות אלו לבין שתי השיטות הנוספות שבהן ריכוזי המגנזיום שהתקבלו היו הנמוכים ביותר, מיצוי מימי ומיצוי ב-CaCl₂, שביניהן התקבל מתאם טוב. בשנה השנייה בוצעו עקומי חילוף של סידן ומגנזיום בשמונה קרקעות מאלו שאופיינו בשנת המחקר הראשונה. כצפוי במרבית הקרקעות האיזוטרמות מצביעות על אי העדפה של אחד מבין שני זוגות הקטיונים הללו, חוץ משתי קרקעות שבהן נמצאה העדפה לסידן. מצאנו קשר בין האנרגיה החופשית של החילוף ליחס בין ריכוז חומר אורגני מומס לחומר האורגני המוצק וכמות הגיר בקרקע. בשנה השלישית נבדקה השפעה של נתון ברמות שונות (ערכי SAR 0, 2 ו-5) על עקומי החילוף של מגנזיום עם סידן בשלוש קרקעות. בשתי קרקעות לא הייתה השפעה מובהקת לערך ה-SAR על חילוף המגנזיום עם סידן ואילו בקרקע השלישית מצאנו שעם העליה בערך ה-SAR מ-0 ל-2 ועד 5, חלה עליה בהעדפה היחסית בקומפלקס הסופח למגנזיום.

בניסוי גידול הצמחים בעציצים בוצעו בשנה השנייה שני מחזורי גידול, חיטה ואחריה תירס. בהתאם לתכנון המקורי העציצים עם הקרקעות שעברו שני מחזורי גידול הועברו לגילת והוצבו להמשך הניסויים ביחד עם עציצים עם אותן קרקעות שלא עברו את שני מחזורי הגידול הראשונים. בשנה השלישית גודלה שוב חיטה ואחריה שני מחזורי גידול של תירס. תוצאות ייצור הביומסה נותחו והתקבלו הבדלים בין הקרקעות שנובעים כנראה מהבדלים בתכונות הפיזיקליות שלהם. ריכוזי המגנזיום בצמחים לא הושפעו מסוג הקרקע. נמצא מתאם בין קליטת המגנזיום המצטברת בשלושת המחזורים האחרונים לבין כמות המגנזיום הזמין בקרקע במיצוי מליך³. מבחינה כמותית ההתאמה נעשתה למודל מיטשרליך. כמות המגנזיום שנקלטה על ידי שני מיני הצמחים בחמישה מחזורי גידול הייתה משמעותית לדלדול הקרקע רק בשלוש קרקעות, הקרקע ממלכיה ושתי הקרקעות הקלות ביותר, רחובות ובית דגן. לבחינת הקשר בין קליטת מגנזיום לכמות המגנזיום הזמינה בקרקע רצינו ליצור רמות זמינות שונות של מגנזיום בכל קרקע, אולם עד מחזור הגידול האחרון לא הצלחנו לקבל הבדלים משמעותיים בכמות המגנזיום הזמינה בקרקעות בין קרקע שלא גידלנו בה צמחים לקרקע שגודלו בה מספר מחזורים. כדי להשיג את מטרות המחקר יש להאריך את המחקר ואנו מציעים דרך נוספת לקבלת רמות זמינות מגנזיום בקרקע.

רשימת פרסומים שנבעו מהמחקר

עדיין אין פרסומים. ניתנה הרצאה בכנס האגודה הישראלית למדעי הקרקע בשנת 2020 ופורסם תקציר ההרצאה. עבודת מסטר של מוני שטרית שנעשתה במסגרת המחקר הוגשה לפקולטה לחקלאות של האוניברסיטה העברית ואושרה בינואר 2021.

מעריכים מומלצים לבדיקת הדו"ח המדעי

1. אשר אייזנקוט – שרות שדה, שה"מ.

1. פנחס פיין – גמלאי המכון למדעי הקרקע, מים וסביבה, מרכז וולקני, מנהל המחקר החקלאי.

~~2. משה שנקר – המחלקה למדעי הקרקע והמים, הפקולטה לחקלאות ומדעי המזון, האוניברסיטה
העברית.~~

-הצהרת החוקר הראשי :

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות ניסויים.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים : לא

חתימת החוקר  תאריך: 5.05.2021

תוכן עניינים

נושא	עמוד
תקציר	1
1. מבוא	4
2. מטרות המחקר	5
3. פירוט עיקרי הניסויים ותוצאות המחקר	6
3.1 ניסוי מעבדה – חילוף סידן עם מגנזיום	6
3.2 ניסוי עציצים	9
4. סיכום ומסקנות	13
ביבליוגרפיה	14

1. מבוא

מגנזיום הוא אחד מיסודות ההזנה הראשיים (מאקרו נוטריינט) של צמחים. הכמות הנצרכת והריכוזים ברקמת הצמח במצב תקין דומים לאלה של סידן. התפקידים העיקריים בצמח הם פוטוסינטיזה והובלה של אניונים אורגניים (Cakmak and Yazici, 2010). בדומה לסידן ולאשלגן, המגנזיום נקלט כקטיון ובדומה לסידן כקטיון דו ערכי. המגנזיום הינו יסוד שכיח במינרלים רבים, הוא מהווה כ-2% מקרום כדור הארץ ו-0.05-0.5% מהקרקע, אך רוב המגנזיום בקרקע (95-98%) נמצא בסריג של המינרלים בקרקע בעיקר בחרסית ואינו זמין לצמח באופן מיידי (Gransee and Fur, 2013; Senbayram et al., 2015).

המודעות לחשיבותו להשאת יבולים ולאיכות היבול גברה בשנים האחרונות (Cakmak and Yazici, 2010; Gerendas and Furs, 2013; Senbayram et al., 2015) וחוקרים התריעו על כך שבמשך שנים המגנזיום היה יסוד ההזנה שנשכח (Cakmak and Yazici, 2010) ושתופעת מחסור מגנזיום בצמחים היא בעיה דחופה (Guo et al., 2016). השינוי הדרמטי באיכות המים בחקלאות ישראל בעקבות הכניסה המסיבית של מים מותפלים לישראל מחייב בחינה של הצורך בדישון ביסודות הזנה, וביניהם המגנזיום, שנמצאים בריכוזים גבוהים במקורות המים הטבעיים ואילו ריכוזיהם במים המותפלים נמוכים מאוד (Yermiyahu et al., 2007). במחקר שעשינו בעגבניות חממה בהשקיה במים מותפלים מצאנו השפעת גומלין חזקה בין סידן ומגנזיום מבחינת איכות הפרי (שכיחות שחור פיטם) והמצב ההזנתי של עגבניה בשני יסודות הזנה אילו (Bar-Tal et al., 2017). אייזנשטדט וחבריו (2012) דווחו על עוותים בנוריות שהושקו במים מותפלים ועל תגובה חיובית לדשנים המספקים סידן ומגנזיום. על פי נתוני שרות ההדרכה והמקצוע מחסור מגנזיום שכיחים בענבים (מאכל), כלניות, נוריות, אדמונית, רימון, הדסים, עגבניות, פלפל (אשר אייזנקוט, קשר אישי). במעבדות שרות שדה ישנם נתונים רבים על ריכוז המגנזיום בעלים שנדגמו במיני עצי פרי שונים במטעים מסחריים ונעשה ניתוח של הקשר בין ריכוז המגנזיום ליבול (מוטי פרס, שה"מ). לפי ניתוח זה מצבי מחסור במגנזיום במינים שונים שכיחים, אך לא נבדק הקשר בין מצב המגנזיום בקרקע לריכוז המגנזיום בעלים.

מצב של דיכוי אינטנסיבי ביסודות ההזנה העיקריים תוך התעלמות מהמגנזיום עלול לגרום לדלדול המגנזיום בקרקע ולהפוך אותו לגורם ההזנה המגביל. לדוגמה, בקרקעות המרעה בניו זילנד במשך עשרות שנים הדיכוי לא כלל מגנזיום עד שבשנות השמונים והתשעים של המאה הקודמת התרבו הדיווחים על מחסורי מגנזיום בקרקעות גסות המרקם (Edmeades, 2004). בהערכה שעשינו לפי הנתונים על צריכת מגנזיום על ידי מספר גידולים חשובים וקיבול המגנזיום החליף בקרקעות שונות מצאנו שבקרקע קלה כמו קרקע חמרה וקרקע לס חול-סייני מאגר המגנזיום הזמין בשכבה של 0-60 ס"מ הוא 47-55 ו-29-36 ק"ג/דונם, בהתאמה, ואילו הצריכה של גידול אינטנסיבי, פלפל חממה היא 6.5 ק"ג/דונם, כך שללא דיכוי המאגר בקרקע עלול לאזול תוך 4.5 עד 8.5 שנים.

למרות שמגנזיום הוא אחד מיסודות ההזנה העיקריים בניגוד ליסודות ההזנה האחרים לא פותחו שיטות מעבדתיות סטנדרטיות לקביעת זמינותו בקרקע ולהמלצות דיכוי על בסיס זה ובהתאם לתכונות הקרקע ודרישות הגידול. המדד היחיד הקיים היום למצב ההזנה במגנזיום ולהמלצות דיכוי הוא המדד הצמחי, כלומר ריכוז המגנזיום בעלה דיאגנוסטי. השינוי הגדול באיכות המים ומקור אספקת המים עם הכנסת מתקני ההתפלה לשימוש גרם למצב שבו מצד אחד מסופקים מים מאיכות גבוהה מבחינת ריכוז המלחים הנמוך בהם, ומצד שני גם ריכוז המגנזיום בהם נמוך מאוד. האספקה של מים מותפלים להשקיה בחקלאות כבר גרמה לתופעה של מחסורים בגידול אינטנסיבי של פרחים וירקות בקרקעות חוליות ואו מצעים מנותקים. בנוסף, צפוי שריכוז המגנזיום במי קולחים שמקורם במים מותפלים גם כן יהיה נמוך מאוד, כיון שכמעט ואין תרומה של מגנזיום למים במהלך השימוש העירוני בהם. להערכתנו, השקיה במים שריכוז המגנזיום בהם נמוך מאוד למשך תקופה ארוכה וללא דיכוי במגנזיום עלולה לגרום לדלדול מגנזיום ולמחסורי מגנזיום בעיקר בקרקעות קלות ושאינן מכילות דלומיט ובגידולים אינטנסיביים. המעבר לשימוש במים מותפלים בשילוב עם העיבוד האינטנסיבי והיישום של יסודות הזנה אחרים בקרקע גורמים להתפשטות של מצבי מחסור במגנזיום, חלקם מתגלים על ידי סימפטומים של מחסורים בצמח וחלקם מחסורים חבויים שבהם המגנזיום הוא הגורם המגביל שאינו מאובחן. אין כיום שיטה מקובלת ומדדים לקביעת זמינות המגנזיום בקרקע בשרות ההדרכה ובמעבדות שירות שדה בישראל כפי שיש לזמינות חנקן (מיצוי חנקה ואמון ב-1.0 N KCl), זרחן (מיצוי אולסן) ואשלגן (ערך ΔF במיצוי ב-0.01 N $CaCl_2$ או במיצוי עיסה רוויה).

השערות המחקר: (א) זמינות המגנזיום בקרקע והשינוי בזמינות בתגובה לדיכוי במגנזיום תלויים בקיבול הקטיונים החליפים בקרקע, הרכב הקטיונים החליפים, תכולת הגיר והרכבו ובהיסטוריה של הממשק החקלאי בקרקע. (ב) קיים קשר בין כמות המגנזיום הזמין בקרקע לריכוזו בתמיסה והיחס בין ריכוזו לבין ריכוז הסיידן ואו סך כל הקטיונים בקרקע. (ג) קיים מתאם בין כמות המגנזיום הזמין לצמחים לבין הריכוז בתמיסות מיצוי שונות אך רמת המתאם תלויה בתכונות הקרקע.

2. מטרת המחקר:

מטרת מחקר זה להרחיב ולהעמיק את הידע הבסיסי ולגבש פרוטוקול לשיטת מיצוי של מגנזיום זמין המתאימה לקרקעות בישראל, לספק ערכי סף למגנזיום שישמשו את המעבדות, המדריכים המקצועיים והחקלאים לקבלת החלטות על דיכוי ושיטת הערכה להמלצות דיכוי מבוססות על תוצאות המעבדה ועל הקשר הכמותי שנקבע בין כמות המגנזיום המוסף לקרקע לכמות המגנזיום הזמין לצמח בקרקע. המטרות הייחודיות הן:

1. בחינת כמות המגנזיום המתמצה מקרקעות שונות מייצגות מישראל בשיטות מיצוי שונות.

2. קביעה כמותית של השינוי בכמות המגנזיום הזמינה בשיטות מיצוי שונות בקרקעות בתגובה לגריעה או תוספת של מגנזיום בקרקעות מייצגות מישראל.
3. בחינת תגובת צמח בוחן לדישון במגנזיום בקרקעות מייצגות מישראל.
4. גיבוש פרוטוקול מיצוי ומדד ערך סף לדישון והמלצה לכמות הדישון הדרושה בקרקעות ישראל.

3. פירוט עיקרי הניסויים ותוצאות המחקר

3.1. ניסוי מעבדה – דיגום ואפיון הקרקעות

בשנת הניסוי הראשונה בחרנו ודגמנו קרקעות מייצגות מאזורים שונים בארץ (12 קרקעות), מצפון רמת הגולן ועד הנגב (פרוט אתרי הדיגום באיור 1). כאשר הדגש בבחירת הקרקעות היה על קרקעות גסות מרקם, קרקעות בעלות הרכב גיר שונה, וקרקעות שבהן התגלו מחסורי מגנזיום בגידולים חקלאיים. הקרקעות נדגמו מעומק של 0-30 ס"מ לאחר שהוסרה השכבה העליונה בעובי של כ- 2-3 ס"מ של שאריות חומר אורגני לא מפורק. הדיגום נלקח מ- 2-3 נקודות באותו אתר דגימה, בעזרת את חפירה ומעדר נאספה הקרקע לתוך 3 אשפתונים, כ- 60 ליטר קרקע בכל אחד. הקרקעות נאספו בשלושה מועדים בחודשים נובמבר-דצמבר. הקרקעות עברו ייבוש אוויר, כל קרקע נופתה בנפה של 8 מ"מ להרחקת אבנים ועצמים שונים שאינם קרקע. מכל קרקע נלקח מדגם בנפח של כ- 3 ליטר להמשך טיפול ושימוש בניסויי המעבדה והיתר הועבר לאחסון באשפתונים. מדגמי הקרקעות יובשו מספר ימים בתנור עם אוורור מאולץ בטמפרטורה של 60°C . דוגמאות הקרקע היבשות עברו טחינה במכונת טחינה וניפוי נוסף בנפה של 2 מ"מ. הדוגמאות הללו אוחסנו במכלי פלסטיק אטומים.

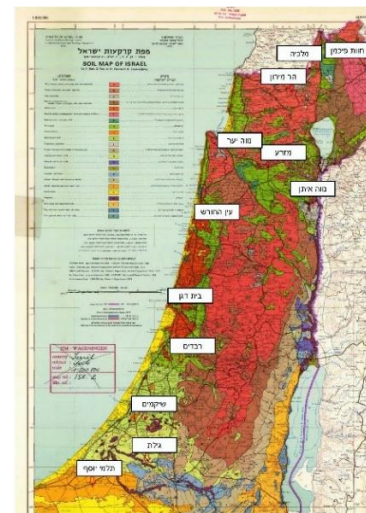
אפיון תכונות הקרקעות: הרכב מכני בשיטת ההידרומטר, תכולת גיר כללי בקלצימטר דיגטלי, צפיפות בשיטת המשורה, תכולת חומר אורגני במוצק בשיטת השריפה היבשה במכשיר אלמנט אנלייזר (CE Instruments flash EA 1112), קיבול קטיונים חליפיים והרכב הקטיונים החליפיים בשיטות סטנדרטיות והרכב תמיסת הקרקע במיצוי (מיס\קרקע) ביחס משקלי של 1:2. המדדים שנקבעו במיצוי הם: pH, EC וריכוזי הקטיונים (סידן, מגנזיום, נתרן, אשלגן). רוב בדיקות האפיון בוצעו בשלוש חזרות, מלבד הרכב מכני שנעשה בשתי חזרות.

אפיון הקרקעות מוצג בטבלה 1. בקרקעות שנדגמו התקבל אכן טווח רחב של ערכי מרקם, תכולת החרסית נעה בין 7.5% ל- 62.5% ובהתאם לכך תכולת החול נעה בין 18.7% ל- 90.0%. השונות הזו נמצאת בהתאמה לתכונות פיזיקליות של הקרקע, כפי שמתבטאת בתכולת המים ההיגרוסקופים מ- 0.60% עד 8.70%. כצפוי התקבל קשר לינארי עם מקדם קורלציה גבוה בין אחוז החרסית לתכולת מים ההיגרוסקופים (איור 2). שתי קרקעות היו יוצאות דופן, הקרקע מהגולן (חוות פייכמן) והקרקע ממלכיה וכאשר הוצאו אותן מהאוויר מקדם המתאם (r^2) עלה מ- 0.78 ל- 0.95. הקרקע מהגולן יוצאת דופן כי היא מכילה טוף שבו ידוע ששטח הפנים ותאחיזת המים אינם תלויים במרקם, החלקיקים הגסים של הטוף מכילים נקבובים עם שטחי פנים גדולים. בקרקע מלכיה תכולת המים ההיגרוסקופים נמוכה מהצפוי לפי אחוז החרסית כנראה בגלל שחלק גדול מהמקטע החרסיתי הוא קאוליניטי, בעוד שברוב קרקעות ישראל החרסית הדומיננטית היא מונטמורילוניט. גם המתאם בין אחוז החרסית לקק"ח גבוה, עם ערך r^2 0.906 שעולה ל- 0.986 כאשר גורעים את הקרקע מחוות פייכמן. צפיפות הקרקע יורדת עם העליה בכמות המים ההיגרוסקופיים, וקיים מתאם

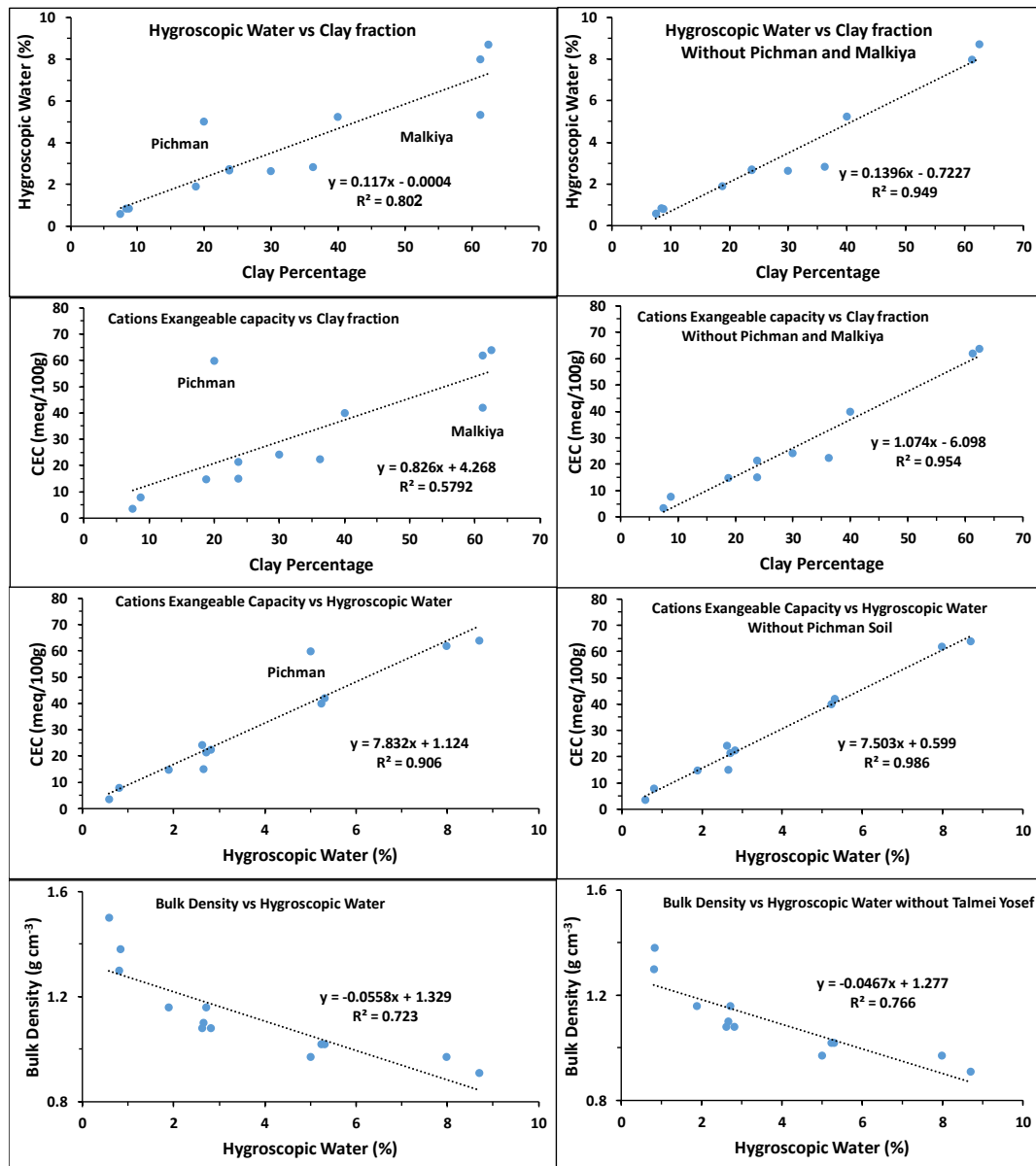
עם ערך $r^2 = 0.723$. בקרקעות החוליות השיפוע גדול מאוד וכאשר גורעים את הקרקע מתלמי יוסף ערך r^2 עולה ל-0.766.

טבלה 1. תכונות עיקריות של הקרקעות שנדגמו עבור הניסוי.

אתר הקרקע	תיאור הקרקע	חרסית	סילט	חול	צפיפות	רטיבות היגרסקופית	גיר כללי	פחמן אורגני	קק"ח	מגנזיום ספוח
		%			ג'סמ"ק	%		מ"ג ג	מא"ק 100	
בית דגן	חול חום אדום	23.8	3.7	72.5	1.10	2.66	2.3	6.3	14.9	4.51
גילת	לס איאולית	18.8	8.7	72.5	1.16	1.89	9.4	22.8	14.8	4.73
חוות פיכמן	חומה בזלתית	20.0	22.5	57.5	0.97	5.01	0.4	32.5	59.7	8.41
מזרע	גרמוסול של העמקים	61.2	17.5	21.2	0.97	7.98	5.3	29.5	61.8	18.01
מלכיה	טרה רוסה אדומה	61.2	16.2	22.5	1.02	5.30	1.4	21.1	42.0	4.68
נווה יער	חומה לוביאלית (ורטיסול)	62.5	18.7	18.7	0.91	8.70	10.9	39.3	63.8	14.47
רבדים	אלוביאלית	40.0	18.7	41.2	1.02	5.24	9.1	22.6	40.0	11.57
רחובות	חול חום אדום	8.4	1.6	90.0	1.38	0.83	0.01	3.4	6.4	1.14
עין החורש	חול חום אדום	8.7	2.5	88.7	1.30	0.81	0.2	14.6	7.8	1.79
שקמים	חומה ערבית	23.8	12.5	63.7	1.16	2.71	8.9	29.2	21.3	4.42
תלמי יוסף	חול לסית	7.5	2.5	90.0	1.50	0.58	2.0	7.8	3.5	1.63
נווה איתן	רנדזינה עמקים ממוצא משקעי גיר וגרף גירי	36.2	27.5	36.2	1.08	2.82	54.5	91.9	22.3	8.20
הר מירון	רנדזינה חומה קירטונית-חוורית חרסיתית	30.0	38.7	31.2	1.08	2.62	56.5	103.8	24.3	5.02



איור 1. מיקום אתרי הדיגום על מפת קרקעות ישראל (י. דן, צ. זיו, ד. יעלון, ח. קווימדז'יסקי).



איור 2. הקשר בין תכולת מים היגרוסקופים ל-% החרסית (שני האיורים העליונים), קבול קטיונים חליפים ל-% החרסית (שני האיורים בשורה השניה), קבול קטיונים חליפים לתכולת מים היגרוסקופים (שני האיורים בשורה השלישית) וצפיפות נדמית לתכולת מים היגרוסקופים (שני האיורים התחתונים) בקרקעות שנדגמו. באיורים מצד שמאל מוצגות כל הקרקעות ובאיורים מצד ימין כל הקרקעות ללא אלו שמצויינות בכותרת של כל תת-איור.

3.2. ניסוי מעבדה – מיצוי מגנזיום בממצים שונים

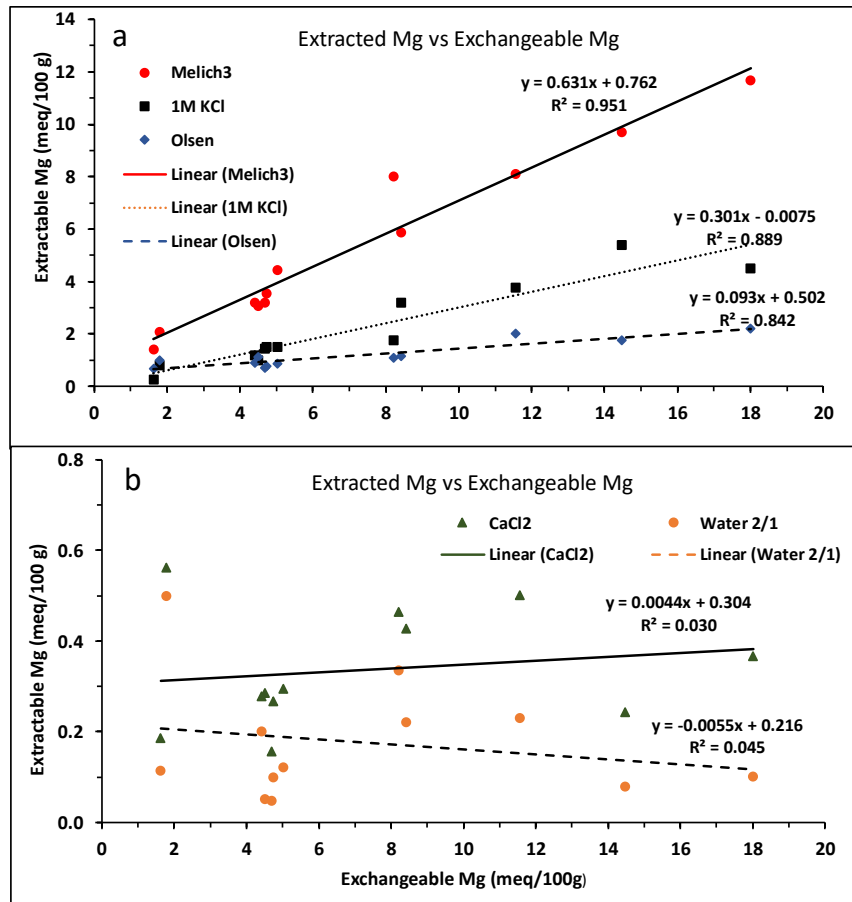
כמות המגנזיום המתמצה מהקרקעות נבדקה בשיטות המיצוי הבאות:

מיצוי במים חסרי יונים ביחס משקלי מיסוקרקע של 1/2 – זו שיטה מקובלת בעולם ודומה לשיטת העיסה הרוויה המקובלת בארץ לקביעת המוליכות החשמלית, החומציות (pH), ריכוזי מלחים מסיסים, ריכוזי הנתרן, סידן ומגנזיום ויחס ספיחת הנתרן (SAR). היתרונות של מיצוי זה שמצד אחד יחס התמיסה לקרקע

קרוב יחסית לזה שבתנאי שדה כך שהפרת המצב הטבעי קטנה יחסית ומצד שני הוא מאפשר מיצוי נפח תמיסה מספיק לאנליזות ובצורה קלה יותר מאשר מעיסה רוויה.

מיצוי בתמיסת $0.01N \text{ CaCl}_2$ – זו אחת מהשיטות המקובלות למיצוי אשלגן כאשר היתרון לעומת מיצוי במים מזוקקים הוא קביעת עצמה יונית קבועה על ידי קטיון אחיד לכל הקרקעות שנמצה מהן את המגנזיום. היחס המשקלי במיצוי הוא של 2 ממצה \ 1 קרקע, כך שנוח יותר לבצוע מאשר הפרדת התמיסה מהקרקע במיצוי עיסה רוויה.

מיצוי בשיטת אולסן – המיצוי ב- 0.5 M NaHCO_3 ($\text{pH}=8.5$) ביחס גבוה של תמיסה למוצק הוא המקובל ביותר בארץ וגם מקובל בעולם לקביעת זמינות זרחן. גרסה של שיטה זו הוצעה על ידי Bar-Yosef and Akiri (1977) להערכה בו זמנית של זמינות חנקן, זרחן ואשלגן. יש להניח שגם המגנזיום הספוח בדומה לאשלגן ימוצה על ידי כמות הנתרן הגבוהה במיצוי (שילוב של ריכוז 0.5 M ביחד עם יחס גבוה של תמיסה למוצק (1\10)).

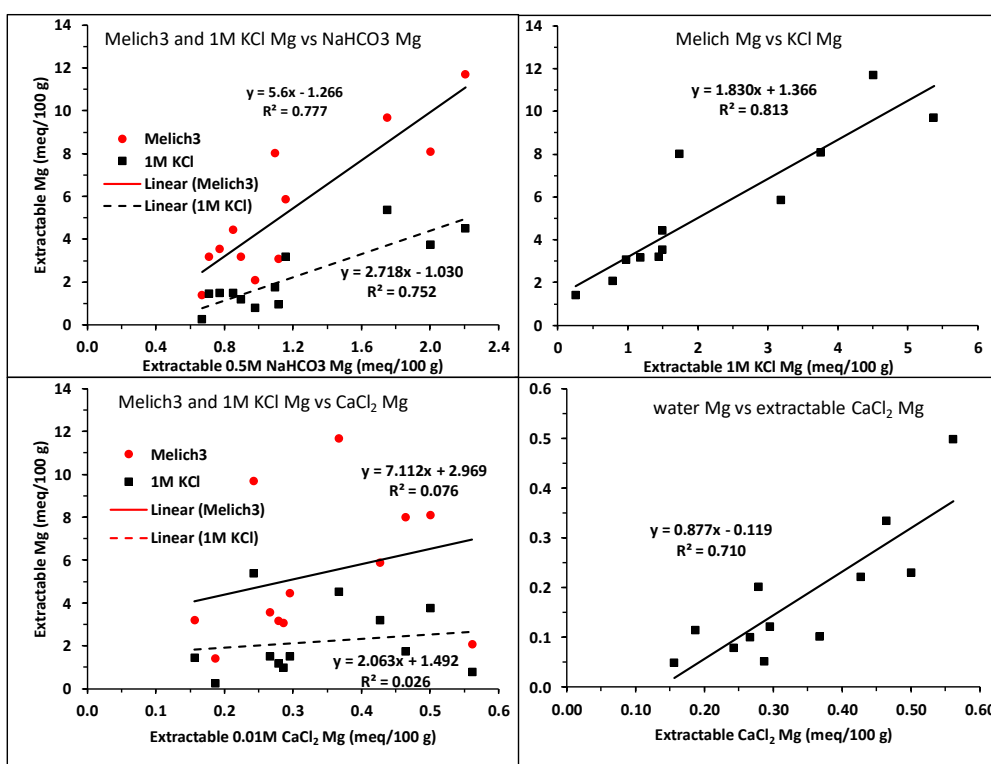


איור 3. כמות המגנזיום שמוצתה מהקרקעות שנבחנו במיצויים ב- 0.5 M NaHCO_3 , Melich3, 1 M KCl (איור a) וב- 0.01 M CaCl_2 , water (איור b), כתלות בכמות המגנזיום הספוח בקרקעות הניסוי.

במיצוי Melich 3 – זהו מיצוי מקובל במקומות שונים בעולם שהשימוש בו מתרחב בגלל שהוא מאפשר קביעה של הזמינות של מספר יסודות הזנה ומלחים (זרחן, אשלגן, סידן, מגנזיום, נתרן וגופרית) במיצוי אחד. זהו מיצוי חומצי והשילוב של חומצות להמסת מרכיבים קשי תמס עם אמון לדחיקת יונים ספוחים עם והכילט EDTA

להגדלת מסיסות הסידן והמגנזיום על ידי כילציה מאפשרים קביעת זמינות של היסודות שנמנו למעלה. הרכב הממצה: 0.2 N acetic acid-0.25 N NH_4NO_3 -0.015 N NH_4F -0.013 N HNO_3 -0.001 M EDTA. היחס המשקלי במיצוי הוא של 10 ממצה \ 1 קרקע.

כצפוי התגלו הבדלים גדולים בכמות המגנזיום הניתן למיצוי בין השיטות השונות כאשר סדר הערכים מהגדול לקטן הוא: מיצוי מליך $< 1\text{M KCl} < 0.5\text{M NaHCO}_3 < 0.01\text{M CaCl}_2$ (איור 3). טווח הכמות התמצה בקרקעות שנבדקו במיצוי מליך 3 הוא 1.4 עד 1.7 מ"אק/100 ג קרקע ואילו במיצוי במים הוא 0.05 עד 0.50 מ"אק/100 ג קרקע. נמצאו מתאמים גבוהים בין המגנזיום הספוח למגנזיום המתמצה במיצוי מליך 3 ($r^2 = 0.951$), באשלגן כלורי ($r^2 = 0.889$) ומיצוי בשיטת אולסן ($r^2 = 0.942$), בהתאמה, עם ערכי שיפועים הבאים: 0.631, 0.301 ו-0.093. המצביעים על יעילות מיצוי גבוהה של מגנזיום ספוח במיצוי מליך 3 (איור 3a). לא היו מתאמים בין המגנזיום הספוח למגנזיום המתמצה בסידן כלורי בריכוז 0.01M ובמיצוי במים ביחס 1/2.



איור 4. הקשר בין כמות המגנזיום במיצוי בשיטות מיצוי שונות: 1. הקשר בין ריכוז מגנזיום במיצוי מליך 3 ובמיצוי אשלגן כלורי לבין מיצוי אולסן, 2. הקשר בין ריכוז מגנזיום במיצוי מליך 3 לבין מיצוי אשלגן כלורי, 3. הקשר בין ריכוז מגנזיום במיצוי מליך 3 ובמיצוי אשלגן כלורי לבין מיצוי בסידן כלורי 0.01M, 4. הקשר בין ריכוז מגנזיום במיצוי מימי לבין מיצוי בסידן כלורי 0.01M.

מקדם המתאם בין המיצויים במליך 3 למיצוי באשלגן כלורי גבוהה עם ערך $r^2 = 0.813$ וגם מקדם המתאם בין שתי שיטות אלו למיצוי בביקרבונט טוב עם ערכי $r^2 = 0.777$ ו-0.752, בהתאמה (איור 4). המתאמים הגבוהים האלה מצביעים על כך שהמיצויים במליך 3 ובאשלגן כלורי מקור המגנזיום דומה, כנראה בעיקר מגנזיום ספוח וגם במיצוי בבי-קרבונט המגנזיום כנראה מאותו מקור אבל מתמצה חלק קטן בהרבה (0.6 עד 2.4 מ"אק/100 ג קרקע בביקרבונט בהשוואה ל- 1.4 עד 1.7 מ"אק/100 ג קרקע במליך 3). לעומת זאת אין קשר בין המיצויים במליך 3

ואשלגן כלורי למיצוי בסידן כלורי ויש מתאם טוב בין המיצוי במים למיצוי בסידן כלורי. גם טווח הכמות המתמצה בשני המיצויים הנמוכים דומה והכמות קטנה בסדר גודל מאשר במיצוי באשלגן כלורי. כנראה בשני המיצויים הללו מתקבל המגנזיום המסיס בתמיסת הקרקע בלבד.

בבחינת הממצים השונים במיצוי הקרקעות השונות לבדיקת כמות המגנזיום המתמצה לתמיסה, נבחנו חמישה ממצים שונים - 3, mehlich, KCl 1M, NaHCO_3 0.5M, CaCl_2 0.01M ומיצוי Water 2:1 שהושוו למיצוי בו משתמשים לקביעת המגנזיום החליף ($\text{NH}_4\text{-act } 1\text{N}$). כל אחד מהממצים האלו שונה מהממצים האחרים בעיקר בסוג הקטיון המחליף ובריכוז התמיסה. יעילות מיצוי המגנזיום הנמוכה ביותר נצפתה, כצפוי, במיצוי מימי בו ריכוז המלחים נמוך, ולכן כמות הקטיונים בתמיסה שאינם מגנזיום ויכולים לדחוק את המגנזיום הספוח היא קטנה מאוד. לכן בהמשך הדיון יתמקד בארבעת הממצים האחרים. ההעדפה בחילוף נובעת ממספר גורמים אשר כולם קשורים לפיצוי המטען השלילי שקיים על מינרלי הקרקע בעלי קיבול קטיונים, אותם גורמים מביאים לידי ביטוי את הזיקה שיש בין הקטיון לבין הסופת. רדיוס היום הממום והערכיות של הקטיונים החליפיים הם שתי התכונות שקובעות את יעילותם בניטרול מטען השטח. מאחר והאינטראקציה הקיימת בין המטען השלילי בשריג לבין המטען הנגדי של הקטיון החליף היא ברובה אלקטרוסטטית אזי קטיונים בעלי ערכיות גבוה יותר יועדפו במשיכה אל פני השטח על פני קטיונים בעלי ערכיות נמוכה יותר, לדוגמא, סידן, קטיון דו-ערכי יועדף על פני נתרן שהוא קטיון חד-ערכי וזאת מפני שכושר הסתירה שלו של המטען השלילי טוב יותר. הגורם הנוסף, רדיוס היום הממום לפיו קטיונים בעלי רדיוס יוני גדול יותר יהיו בעלי רדיוס ממום קטן יותר כך חזקה יותר הפולריזציה שלהם יוכלו להתקרב יותר לפני השטח ולהחליף את היום הספוח. האלקטרוסטטיות הספציפית נקבעת לפי היחס הערכיות של היום לשטח הפנים של רדיוס היום הממום שלו. מבלי להתייחס לשאר השוני בין הממצים במערכות שלנו, הזיקה שלהם אל שריג המינרל בהקשר של גודל היום הממום והערכיות שלו ניתן לומר ש- $\text{Na}^+ > \text{K}^+ \approx \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+}$. מכאן שלכאורה למיצוי בסידן כלורי היה הפוטנציאל להיות הממצה היעיל ביותר.

גורם נוסף שעשוי להשפיע על המיצוי בנוסף לקטיון הדוחק שמחליף את המגנזיום בקומפלקס הסופת הוא האניון הקשור אליו. Shuman and Duncan (1990) מצאו שלא היה הבדל בכמות המגנזיום המתמצה בשימוש אמון כלוריד לבין אמון אצטט. אולם בנוסף להבדלים בהרכב הקטיונים בתמיסות המיצוי, קיימים הבדלים בריכוז הכולל של היונים בתמיסה. להלן ריכוזי היונים בתמיסות המיצוי שנבחנו: תמיסת הסידן כלוריד - 0.01 מול/ליטר; תמיסת האשלגן כלורי - 1 מול/ליטר; תמיסת הנתרן מימן פחמתי - 0.5 מול/ליטר; תמיסת מליך 3 - 0.25 מול/ליטר של אמון חנקתי שהוא המרכיב העיקרי שגורם לשחרור המגנזיום. ניתן להניח שככל שעולה ריכוזו של הקטיון המחליף בתמיסה, כך עולה יעילותו במיצוי המגנזיום הספוח. מכאן שצפוי שמיצוי באשלגן כלורי בריכוז 1M יהיה הממצה היעיל ביותר של מגנזיום.

גורם נוסף שצריך להלקח בחשבון הוא השפעת הממצה על ערך ההגבה של תמיסת המיצוי. בניגוד לשאר הממצים שנבחנו, תמיסות מליך 3 ואמון-אצטט הינן חומציות ויכולות לכן גם לעודד המסה של דלומיט (MgCaCO_3) במידה וקיים בקרקע וכך להגדיל את מאגר המגנזיום הזמין בקרקע. בנוסף ערך ה-pH של תמיסת הקרקע קובע את החלוקה בין קטיון הסידן הדו ערכי החופשי לבין הסידן ההידרוקסילי ובכך משפיע גם על ספיחת הסידן.

בנוסף להבדלים בסוג ובריכוז המלחים בתמיסות המיצוי ישנם הבדלים בהליך המיצוי שמבוצע על דוגמת הקרקע. ההבדלים העיקריים הם ביחס בין משקל דוגמת הקרקע לנפח תמיסת המיצוי וזמן הטלטול בו תמיסת המיצוי באה במגע עם הקרקע. ככל שהיחס בין תמיסת המיצוי לדוגמת הקרקע יהיה גדול יותר לטובת התמיסה ככה ישנם יותר קטיונים בתמיסה הזמינים לתהליך החילוף. במקרים שלנו היחסים היו שונים בין תמיסות המיצוי השונות, בהתאם לפרוטוקולים הקבועים בהם משתמשים בדרך כלל במיצויים אלו, בתמיסת $N 0.01$ $CaCl_2$ היחס בין דוגמת הקרקע לתמיסה היה 7 ל-1 (ממצה ל-קרקע), במיצוי המימי היחס היה 2 ל-1 לטובת המיצוי, במיצוי ב- $NaHCO_3 0.5M$ היחס ביניהם היה 10 ל-1 לטובת המיצוי, במיצוי $KCl 1N$ – היחס ביניהם היה 5 ל-1 לטובת תמיסת המיצוי ומיצוי מליך 3 היחס בין תמיסת המיצוי לדוגמת הקרקע היה 10 ל-1 לטובת התמיסה. מכאן שלמיצוי בנתרן מימן פחמתי ובמליך 3 הייתה עדיפות באספקט זה על פני שאר הממצים.

בנוסף לשוני ביחס בין תמיסת הממצה לקרקע, היו גם הבדלים בזמני הטלטול. המיצוי המימי - שעה, מיצוי הסידן הכלורי - חצי שעה, מיצוי הנתרן מימן פחמתי - שעה, מיצוי האשלגן הכלורי - 40 דקות ובמיצוי מליך 3 - 5 דקות בלבד. למרות שתהליך חילוף יונים הוא מהיר מאוד, ישנה חשיבות לזמן הטלטול. ככל שארוך יותר, גדל הסיכוי הסטטיסטי שכל אתרי הספיחה בקרקע יחשפו לתמיסת הממצה וכך יתאפשר תהליך החילוף. על סמך קריטריון זה, למיצוי מימי ולנתרן מימן פחמתי עדיפות על שני הממצים האחרים במיצוי המגנזיום. מתוך תוצאות ניסוי המיצוי, ניתן לראות שבהשוואה למיצוי $NH_4\text{-act } 1N$, המשמש לקביעת מגנזיום ספוח, יעילות הממצים שנבחנו הייתה בסדר היורד הבא: מיצוי ב-3 mehllich, לאחריו מיצוי $KCl 1M$, $NaHCO_3 0.5M$, מיצוי $CaCl_2 0.01M$ ולבסוף מיצוי מימי 2 ל-1. תוצאות העבודה מצביעות על כך שסוג הקטיון המחליף וריכוזו בתמיסת המיצוי הם הגורמים העיקריים שמשפיעים על כמות המגנזיום המתמצה מדוגמת הקרקע.

בעבודה אחרת שנעשתה בנושא של מיצויי מגנזיום (Staugaitis and Rutkauskienė, 2010) נמצא שמיצוי 3 mehllich ממצה כמויות רבות יותר של מגנזיום מאשר מיצויים $NH_4\text{-Oac } 1N$, $KCl 1M$, $CaCl_2 0.01M$ וממיצוי מימי, כאשר פרוטוקול מיצוי ה-3 mehllich היה דומה למיצוי בו אנחנו השתמשתי, בעוד שהיו הבדלים בפרוטוקולים של המיצויים האחרים בין עבודה המצוטטת לעבודה הנוכחית בזמני הטלטול וביחסים בין הממצה לדוגמת הקרקע. מיצוי $CaCl_2 0.01M$ - יחס של 20 ל-1 ולמשך שעה לעומת יחס של 7 ל-1 וטלטול למשך 30 דקות; מיצוי $KCl 1M$ - יחס של 10 ל-1 למשך שעה, לעומת יחס של 5 ל-1 למשך זמן של 40 דקות; מיצוי המימי - יחס של 5 ל-1 בין הממצה לדוגמת הקרקע לעומת 2 ל-1. לדעתנו הסיבה העיקרית לכך שכמות המגנזיום במיצוי מליך 3 הייתה גדולה יותר ממיצוי אמון אצטט בעבודתם ואילו במחקר הנוכחי התוצאה הייתה הפוכה היא שבסדרת המיצויים שלנו, מיצוי אמון-אצטט נשטף 3 פעמים לפי הפרוטוקול התקני לעומת שטיפת מיצוי אחת בפרוטוקול מיצוי מליך 3. מבחינת המתאמים שנמצאו בין הממצים בעבודתם נמצא קשרים חזקים בין כלל הממצים מלבד מיצוי מימי. (Mamo et al., 1996) השוו מספר ממצים לקביעת זמינותם של מספר יסודות, ביניהם גם מגנזיום; בעבודתם נמצא שכמויות המגנזיום שמוצה בעזרת תמיסת מיצוי מליך 3 ובעזרת תמיסת מיצוי אמון-אצטט $1N$, היו זהות כאשר זמן הטלטול ויחס המיצוי בניסוי היו זהים לפרוטוקול בו השתמשנו במחקר הנוכחי, אך ההבדל הוא במיצוי אמון-אצטט שמוצה בשטיפת מיצוי אחת בעבודתם לעומת 3 שטיפות מיצוי במחקר הנוכחי, כמו כן זמן הטלטול עמד על 30 דקות בעבודתם לעומת 60 דקות טלטול במחקר הנוכחי. בנוסף הקשר בין הממצים היה חזק ביותר, ($R^2=0.99$). בקבוצת הקרקעות הגרמניות ו- ($R^2=0.98$) בקבוצת הקרקעות האתיופיות וכמו כן במובהקות של $P<0.001$. יכולת דומה וזהה של מיצוי מגנזיום בין

הממצים מליך 3 ל אמון-אצטט התקבלה גם בעבודתם של (Wang et al., 2004) שהשוו את יכולות המיצוי של ממצים שונים עבור מספר קטיונים על דוגמאות קרקעות מלואיזאנה. בסיכום ניתן לומר שמיצוי מליך 3 הוא ממצה טוב ומתאים למיצוי מגנזיום ספוח במגוון קרקעות ארצנו בזכות התכונות הבאות: יכולת מיצוי כמות רבה של מגנזיום, ניתן למצות בעזרתו מספר רב של יסודות הזנה במיצוי יחיד ובנוסף לכך עקב הפשטות היחסית של הליך המיצוי והזמן הקצר ביותר של הליך המיצוי הכולל בהשוואה לשאר המיצויים שבוצעו.

3.3. ניסוי מעבדה – חילוף סידן עם מגנזיום

הניסוי נועד לבדוק את יחסי ההעדפה בחילוף ובקשירה לקומפלקס הסופח בין שני קטיונים (סידן ומגנזיום). בניסוי השתתפו שמונה קרקעות (בית דגן, גילת, נווה יער, רבדים, מלכיה, תלמי יוסף, מזרע ורחובות). בניסוי בנינו עקומי ספיחה המורכבים מתמיסות חילוף בחמישה יחסים מולרים שונים בין הסידן למגנזיום (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0) בשלוש חזרות לכל יחס.

פרקצית המגנזיום החליף כתלות בפרקציה של מגנזיום בתמיסה במערכת דו-קטיונית של מגנזיום עם סידן בשמונה קרקעות מוצגות באיור 5. האיזוטטרמות מציגות מצב של העדפה ברורה לסידן בשלוש קרקעות (מלכיה, מזרע ורחובות) ומצב של העדפה לא ברורה התלויה בפרקציית המגנזיום בתמיסה בחמש קרקעות (גילת, נווה יער, רבדים, תלמי יוסף ובית דגן). על סמך אנרגיית ההידרטציה של סידן לעומת מגנזיום ובהתאם לדרוג לואיס של חומצות ובסיסים יש לצפות לעדיפות בספיחה לסידן על מגנזיום (Shainberg and Kemper, 1966; Sullivan, 1977; Visconti et al., 2012). אולם לסוג מינרל החרסית ולתכולת חומר אורגני בקרקע יש גם כן השפעה על ההעדפה של אחד משני הקטיונים ולכן בקרקעות שונות דווח על העדפה לסידן ואילו באחרות אין העדפה לסידן (Van Bladel and Gheyi, 1980; Robbins and Carter, 1983; Seyfried et al., 1989; Jalali et al., 2020).

הנתונים בטבלה 2, המציגים את האנרגיה החופשית של גיבס לחדירה לחילוף סידן במגנזיום ואת מקדמי החילוף של אותם הקרקעות מניסוי החילוף, תומכים בתוצאות שלעיל ומציגים העדפה של סידן על פני מגנזיום. נתוני האנרגיה החופשית של גיבס לחילוף, מציגים את האנרגיה החופשית הדרושה לחילוף יוני הסידן בקומפלקס הסופח ביוני מגנזיום. ערכים הקרובים ל-0 מציגים מצב שבו אין העדפה בחילוף בין היונים, ערכים שלילים מציגים מצב שבו מועדף יון המגנזיום על פני יון הסידן וערכים חיוביים מציגים מצב שבו מועדפים יוני הסידן על פני יוני המגנזיום.

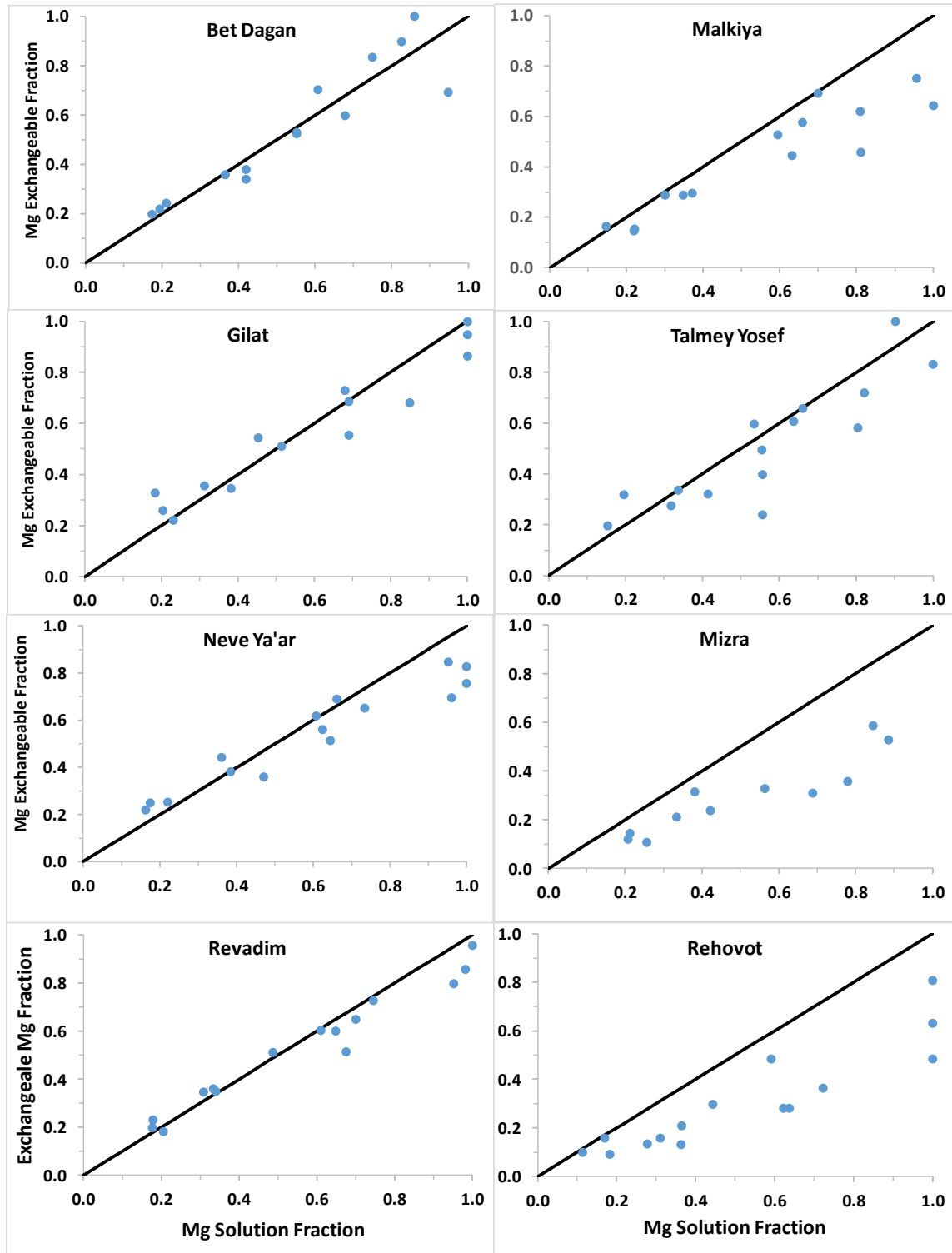
ניתן לראות מתוך תוצאות אלה שהערכים בכלל הקרקעות הינם חיוביים מצב המציג כאמור העדפה ליון הסידן, אם כי ערכים אלו יחסית נמוכים, מדובר על לא יותר מכמה מאות ג'ול/מול'. הערכים שהתקבלו בניסוי הנוכחי דומים לערכים הידועים בספרות עבור מערכות של חילוף בינארי שכזה כאשר מגנזיום מחליף סידן (Jensen and Babcock, 1973; Sparks, 2003).

בקרקעות נווה-יער, מלכיה, תלמי יוסף ורחובות האנרגיה החופשית של גיבס הדרושה לחילוף יוני הסידן במגנזיום הינה גבוהה יותר ועומדת על ערכים שבין 758 – 1600 ג'ול/מול'. התוצאות קרובות ודומות לתוצאות שנעשו בהליך חילוף בינארי דומה (מגנזיום מחליף סידן) (Jensen and Babcock, 1973). מקדם החילוף או מקדם הסלקטיביות (Kex), הינו ערך המתאר את העדיפות בחילוף בין היונים והוא מציג תמונה דומה, לפיה, הנתונים המחושבים קרובים לערך 1 ומתארים מצב שבו אין העדפה בחילוף בין שני היונים בעוד ערכים הקטנים מ-1 מציגים מצב שבו ישנה העדפה ליון המוחלף, במקרה הנוכחי יון הסידן. הקרקעות מלכיה ומזרע מציגות

את ערך המקדם הנמוך ביותר, 0.521 ו-0.525, בהתאמה. אלו ערכים מאוד נמוכים המציגים העדפה רבה יותר ליון הסידן על פני יון המגנזיום בהשוואה לקרקעות האחרות ששם הערך גבוה יותר. תוצאות דומות בחילוף בינארי בין מגנזיום לסידן (Udo, 1978) ששם השתמשו בקרקע חרסיתית (קאוליניט מינרל החרסית העיקרי) ומקדם החילוף שחושב באיזותרמת חילוף בטמפרטורה של 30° מעלות צלזיוס ערכו היה 0.653. בנוסף עבודה שנעשתה על ידי (Van Bladel and Gheyi, 1980) בחילוף בינארי דומה בקרקעות וורטיסול ואינספטיסול מציגה פרמטרים של חילוף $K_{ex} = 0.644$, $\Delta G \approx 270$ (j/mol) בערכים הקרובים לתוצאות שהתקבלו בניסוי החילוף. בעבודות רבות שנעשו בעבר על חילוף בינארי זהה אבל בחרסיות, נמצאה העדפה קלה בספיחה של סידן על פני מגנזיום כאשר האניון המשלים לקטיונים הוא כלוריד. (CLARK, 1966; Hunsaker and Pratt, 1971; Levy et al., 1972; Levy and Shainberg, 1972; Gheyi, HR, 1975; Van Bladel and Gheyi, 1980) לעבודות אלה, Sposito et al. (1983) טענו שההעדפה הקלה של יון הסידן על פני יון המגנזיום על חרסית מונטמורילוניט כאשר האניון המשלים הוא כלוריד שיוצר תצמידים של הכלוריד עם הקטיונים הדו-ערכיים $CaCl^+$ ו- $MgCl^+$ נובעת מהזיקה הגדולה יותר בין החרסית לבין $CaCl^+$ לעומת $MgCl^+$. כאשר הם (Sposito et al. 1983) ערכו חילופים דומים על חרסית מונטמורילוניט, אך בשונה מקודמיהם היון המשלים לקטיונים בניסוי היה פרכלורט ולא כלוריד, נמצא כי במערך שכזה אין העדפה ליוני הסידן על פני יוני המגנזיום. כלומר הדיווחים הקודמים על העדפה לסידן על מגנזיום בחרסית מונטמורילוניטית נובעים מארטיפקט של יצירת תצמידים יונים ולא מהעדפה אמיתית לקטיון הסידן הדו ערכי על פני המגנזיום הדו ערכי.

לעומתם, (Suarez and Zahow 1989) בדקו את מערך החילוף עם שלושה אניונים משלימים (כלוריד, פרכלורט וסולפט) כאשר כוון החילוף היה הפוך מאשר בעבודות הקודמות, כלומר חילוף של מגנזיום ספוח על פני החרסית על ידי סידן בתמיסה. מתוך עבודתם נמצא שאין הבדל מובהק במקדם הסלקטיביות של סידן לעומת מגנזיום לחרסית מונטמורילוניט בין Cl^- לבין SO_4^{2-} ול- ClO_4^- ובנוסף הם מצאו שבכל המקרים ישנה העדפה קלה לקשירה של סידן על פני קשירה של מגנזיום. בנוסף הם מייחסים את ההעדפה הקלה בספיחה של סידן על פני מגנזיום לגודלו המעט קטן יותר של רדיוס היון הממיום של הסידן בהתאמה למנגנון שהציע (Gheyi 1975). קונספט זה ישים עבור טווח רחב של תגובות חילוף הומו-וולנטיות בהם העדפה תתרחש בהתאמה לגודל רדיוס היון הממיום ועוצמת הפולריזציה שלו (Udo, 1978; Sparks, 2003; Evangelou, V. P., 2005).

השערה נוספת לגבי העדיפות של סידן לעומת מגנזיום בקרקעות היא שהחומר האורגני בקרקע הוא מקור ההעדפה (Fletcher et al., 1984). לכן הם ביצעו מערך חילוף בינארי של סידן ומגנזיום בקרקע סיין חרסית בעלת תכולת חומר אורגני של 4.1% ולא על חרסיות נקיות (האניון המשלים לקטיונים הוא פרכלורט בדומה ל-Sposito et al., 1983). תוצאותיהם הצביעו על העדפה קלה ליון הסידן על פני יון המגנזיום. תוצאות אלה נמצאות בהתאמה עם הדעה הרווחת שהאסוציאציה של חומר אורגני יחד עם חרסית מונטמורילוניט נוטה לשנות את ההעדפה בחילוף לכיוון הסידן לעומת המגנזיום (Schnitzer et al., 1970; Levy et al., 1972; Van Bladel and Gheyi, 1975; Curtin et al., 1994; Curtin et al., 1998). עם זאת, נראה שהשוני בסלקטיביות נוטה להיות קטן יותר לעומת זה שנובע מאניון הרקע שיכול ליצור תצמידים חד ערכיים עם קטיונים דו-ערכיים (לדוגמא אניון הכלוריד לעומת אניון הפרכלורט).

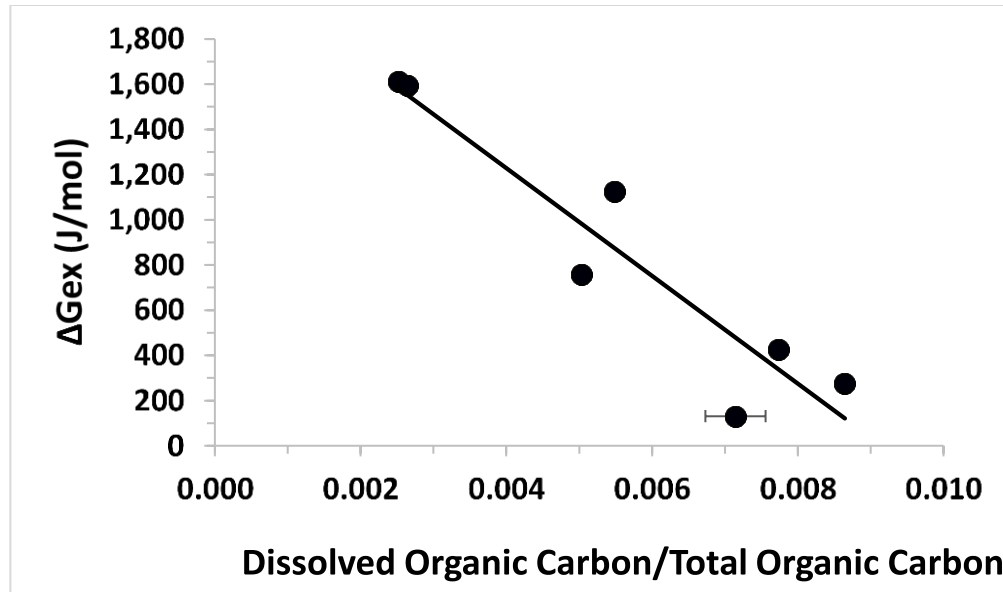


איור 5. פרקצית המגנזיום החליף כתלות בפרקציה של מגנזיום בתמיסה במערכת דו-קטיונית של מגנזיום עם סידן בשמונה קרקעות. הקו הרצף בכל האיורים הוא יחס של 1:1. הריכוז הכללי בתמיסה של מגנזיום וסידן היה 50 מ"אקליטר בכל הקרקעות.

טבלה 2. קבועי הקשר (K_{ex}) ואנרגיית גיבס החופשית לחילוף מגנזיום עם סידן בקרקעות הניסוי.

Soil	K_{ex}		Gibbs Free Energy	
	mean	S.E.	mean	S.E.
			Joule mol ⁻¹	
Talmey Yosef	0.82	0.016	483	48.1
Rehovot	0.95	0.001	759	3.7
Beit Dagan	0.95	0.001	131	3.7
Gilat	0.89	0.011	276	31.1
Revadim	0.84	0.005	427	15.0
Malkia	0.52	0	1614	0
Mizra	0.52	0	1595	0
Newe Ya'ar	0.63	0	1128	0

בבחינת מתאמים בין פרמטרים תרמודינמיים מתוך ניסוי החילוף לבין מאפייני קרקע שבחנו בקרקעות השונות נמצא קשר לינארי בין האנרגיה החופשית של Gibbs הדרושה לחילוף לבין היחס של חומר אורגני מסיס מתוך החומר האורגני הכללי DOC/TOC (היחס של הפחמן האורגני המסיס מתוך כלל הפחמן האורגני) (איור 6, משוואה 1). קשר זה מראה שככל שחלקו של הפחמן האורגני המסיס מתוך הפחמן האורגני הכללי עולה, כך יורדת האנרגיה החופשית של גיבס הדרושה לחילוף יוני הסידן ביוני מגנזיום ויורדת ההעדפה הקלה הקיימת בספיחת סידן על פני מגנזיום. בהמשך נבדקו האפשרויות שישנם גורמים נוספים שעשויים להשפיע על ההעדפה בספיחה של סידן על פני מגנזיום, והאם קיימת אינטראקציה בין אותן תכונות. נעשה לכן ניסיון להתאים מודל שיאפשר לחזות את האנרגיה החופשית מתכונות קרקע שונות וקלות למדידה. לצורך כך נעשה שימוש ברגרסיה בצעדים [stepwise regression analysis] בתוכנת JMP 15. כול מאפייני הקרקע שנמדדו הוכנסו למודל כמשתנים בלתי תלויים ובוצעה הרצה בשיטת BIC. לאחר הורדת משתנים אשר נבחרו על ידי המודל אך אינם מובהקים בעצמם ומשתנים בהשפעת מולטיקולינאריות, נבחרו המשתנים הבאים: היחס DOC/TOC ותכולת הקלציט בקרקע ($CaCO_3$). בהרצת הניתוח בשיטת backwards and forward התקבלו תוצאות דומות. מאחר וקרקע תלמי יוסף נמצאה כחורגת משמעותית מהמגמה של היחס שבין הפרקציה של DOC/TOC לבין האנרגיה הדרושה לחילוף, הוחלט לא לכלול קרקע זו בחישוב המודל.

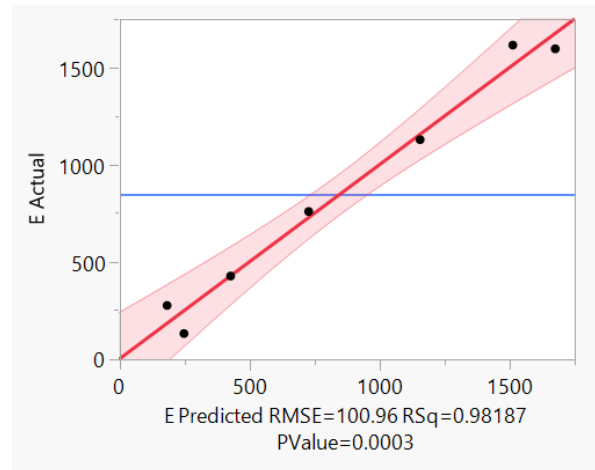


איור 6. הקשר בין ערך האנרגיה החופשית של גיבס לחילוף מגנזיום בסידן בקרקעות שנבחנו לבין הפרקציה של הפחמן האורגני המומס במים (DOC) מתוך כלל הפחמן האורגני המוצק בקרקע (TOC).

$$\Delta G_{ex}^0 = 2183.1 - \left(238599 * \frac{DOC}{TOC} \right) \quad r^2 = 0.88 \quad (1)$$

בהרצה בשיטת Akaike information criterion (AIC) מקבלים תוצאה מעט שונה. תוצאות המודל שנבחר כוללות מלבד היחס DOC/TOC שנבחר כגורם הראשי, גם את DOC+DIC שנבחר במקום אחוז הגיר במודל שנבחר לפי שיטת הרצה BIC. כאמור גם במקרה זה, קרקע תלמי יוסף לא נכללה כי היא נמצאה כחורגת משמעותית מהמגמה של היחס שבין הפרקציה של DOC/TOC לבין האנרגיה הדרושה לחילוף. תוצאות הרגרסיה בצעדים מוצגות בטבלה 3. המודל עצמו יצא מובהק $P\text{-Value} = 0.0003$ כמו גם שני המדדים שנבחרו (DOC/TOC, $CaCO_3$). היחס של DOC/TOC מסביר מעל 88% מתוך השונות שנמצאה בערכי האנרגיה החופשית של גיבס ואחוז הגיר ($CaCO_3$) מסביר עוד 10% מהשונות. ככל שה- DOC/TOC גבוה יותר, האנרגיה החופשית של גיבס נמוכה יותר בעוד שככל שאחוז הגיר גדול יותר האנרגיה החופשית של גיבס לחילוף יון הסידן ביון מגנזיום גבוהה יותר. על סמך תוצאות הרגרסיה בצעדים הביטוי לחיזוי האנרגיה החופשית של גיבס הדרושה לחילוף מתוך המשתנים, DOC/TOC ו- $CaCO_3$ הינו:

$$\Delta G_{ex}^0 = 2150.3 - \left(282872.4 * \frac{DOC}{TOC} \right) + (51.1 * CaCO_3) \quad (2)$$



איור 7. הקשר בין ערך האנרגיה החופשית של גיבס לחילוף מגנזיום עם סידן שחושבה מעקומי החילוף לבין הערכים שחושבו לפי משוואה (3) שהתקבלה בהתאמה סטטיסטית בשיטת הצעדים (stepwise) בתוכנת JMP.

טבלה 3 – אומדני המשתנים של המודל הנבחר

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	R ²
Intercept	2150.317	103.4272	20.79	<.0001*	.
DOC/TOC	-282872.4	19503.87	-14.50	0.0001*	0.8800
CaCO ₃	51.138019	10.78707	4.74	0.0090*	0.1019

על סמך תוצאות הרגרסיה בצעדים הביטוי לחיזוי האנרגיה החופשית של גיבס הדרושה לחילוף מתוך המשתנים, DOC/TOC ו-DIC+DOC הינו:

$$\Delta G_{ex}^0 = 1932.6 - \left(263254.9 * \frac{DOC}{TOC} \right) + (8.58 (DIC + DOC)) \quad (3)$$

בעבודה שנעשתה על אנליזת קטיונים חליפיים בקרקעות חומציות ובסיסיות (Bower, 1952) נמצא שתוספת של 5% קלציט לדוגמת הקרקע לא מביאה לשינוי בקיבול הקטיונים החליפיים שנמדד בשיטת נתרן-אצטט ומתוך כך תוספת הקלציט לא משפיעה בצורה ישירה על הקשירה בין היונים שנמדדים בשיטת הרכב קטיונים לבין הסידן הפחמתי. אך עם זאת לנוכחות של הסידן הפחמתי בדוגמה יש השפעה על חלק מהחומר האורגני המסיס שנמצא בקרקע. בעבודה שנעשתה על ספיחה של חומצות קרבוקסיליות לקלציט, (Geffroy et al., 1999) נמצא שישנן רמות קשירה שונות אל אותם חומצות קרבוקסיליות שנבדקו בהתאם לקבועי הדיסוציאציה שלהם. בעבודה מוקדמת יותר על קשר בין חומר אורגני לקרבונטים, (Suess, 1970) דווח שמינרל הקלציט יצר קשרים עם חומצה ציטרית ועם אלבומין בתמיסה ושהקשר של חומצה ציטרית עם סידן חזק מאשר עם מגנזיום. יתכן גם שהחומצה הציטרית יוצרת שכבה חד מולקולרית על הקלציט.

בהתבסס על סיכום של שתי עבודות אלה ובהתייחסות לתוצאות המחקר הנוכחי אנו מניחים שיתכן, שסידן מסיס נקשר לחומר האורגני המומס בצורה חזקה יותר מאשר המגנזיום המסיס ובכך קטנה התחרות של מגנזיום עם סידן על פני הקומפלקס הסופח המינרלי ובמצב שכזה הסלקטיביות בחילוף תהיה קרובה יותר

למצב של העדפה לטובת המגנזיום. לעומת זאת בנוכחות של גיר נוצרים קומפלקסים בין הגיר לבין החומר האורגני המומס ובכך קטנה יכולת הספיחה של הסיידן המסיס על ידי החומר האורגני המומס ובמצב שכזה הסלקטיביות בחילוף תהיה לטובת הסיידן.

בנוסף, נבחן גם הקשר בין האנרגיה החופשית של גיבס חילוף מגנזיום עם סידן כתלות בפרקציית המגנזיום הספוח. לא נמצא קשר בין ערכי האנרגיה הדרושים לחילוף סידן במגנזיום לבין המגנזיום המתמצה במיצויים השונים או ליחס של המגנזיום המתמצה מתוך כלל הקק"ח וכמו כן גם לא נמצא קשר בין היחס של מגנזיום וסידן במיצויים השונים לבין האנרגיה החופשית הדרושה לחילוף

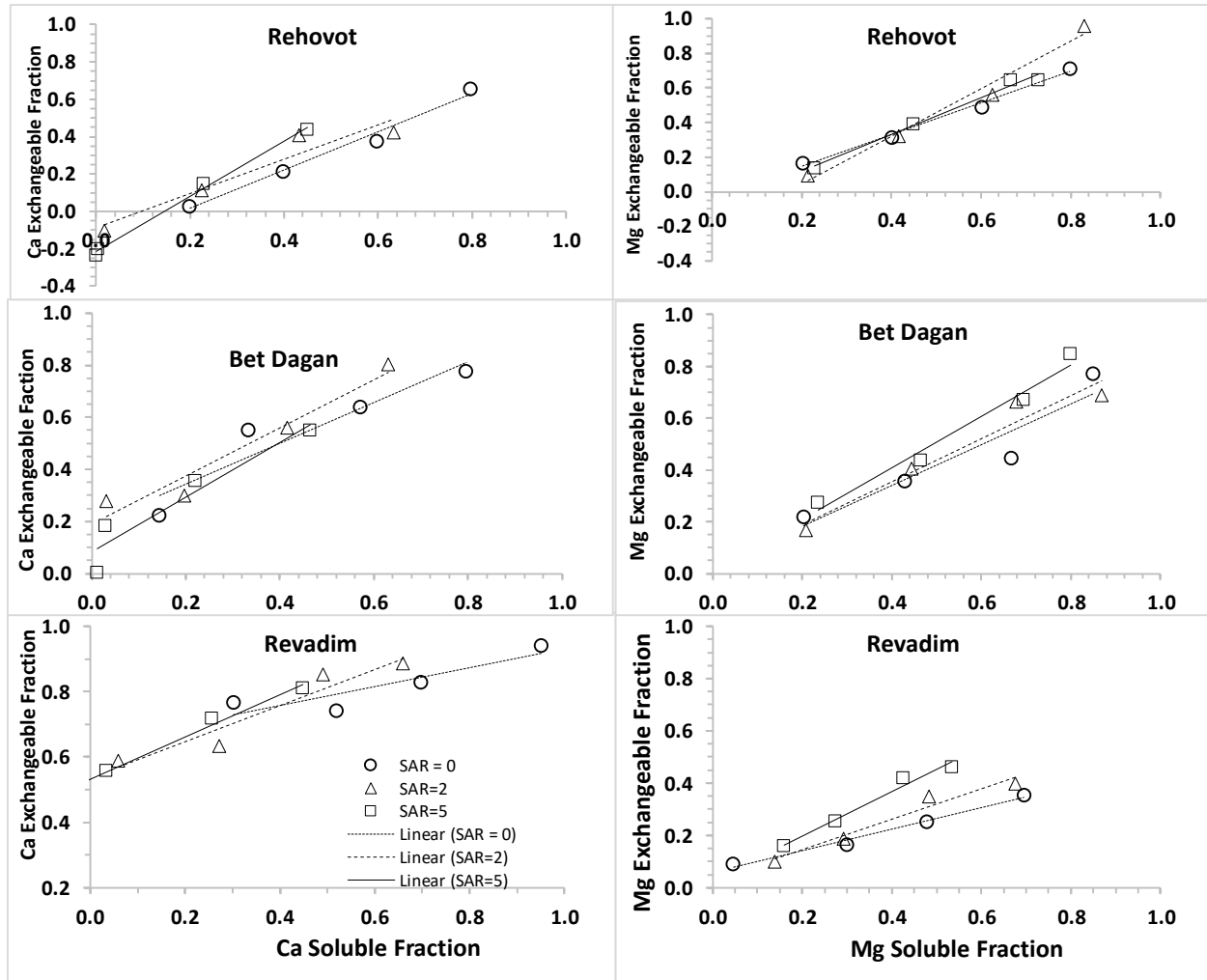
3.4. ניסוי מעבדה – השפעת קטיון חד ערכי על חילוף סידן עם מגנזיום

ההשפעה של ריכוז הנתרן על החלוקה בין המגנזיום המסיס לחליף במערכת שכוללת את המגנזיום והסיידן נבחנה בשלוש הקרקעות הבאות: בית דגן, רחובות ורבדים. הקשר בין הפרקציה הספוחה של המגנזיום לפרקציה המסיסה שלו בכל אחת מהקרקעות מוצג באיור 8. ההשפעה החזקה ביותר של ערך ה-SAR על הקשר בין המגנזיום החליף למסיס הייתה בקרקע רבדים שבה הגדלת ערך ה-SAR מ-0 עד 5 העלתה את השיפוע של הקו הליניארי מ-0.408 ל-0.850, והשפעה מתונה יותר התקבלה בקרקע בית דגן שבה השיפוע עלה מ-0.789 ל-0.997 (איור 8 וטבלה 4). לעומת זאת בקרקע רחובות לא הייתה השפעה ניכרת ובמגמה קבועה לערך ה-SAR על שיפוע הקו. יש לציין שנקודת החיתוך עם ציר ה-Y (הערך b) במשוואה הייתה במרחק קטן מהראשית בכל המשוואות ולא הושפעה במידה ניכרת מערך ה-SAR, כך שההבדל העיקרי בין המשוואות הוא בשיפוע, כאשר ככל שהוא קרוב יותר ל-1.0 הוא מציין אי העדפה בין המגנזיום לנתרן+סידן. הכיוון של השפעת ערך ה-SAR בקרקעות רבדים ובית דגן נמצא בהתאמה לציפיה שבמערכת שבה יש קטיון חד ערכי, נתרן, העדפה למגנזיום הדו-ערכי תגדל.

טבלה 4. המקדמים של המשוואות הליניאריות ($y=ax+b$) לקשר בין פרקציית המגנזיום או הסיידן הספוח לפרקציית המגנזיום או הסיידן בתמיסה בשלוש קרקעות (בית דגן, רחובות ורבדים) לשלושה ערכי SAR (0, 2, 5) בכל קרקע ומקדמי המתאם שלהם.

Soil	SAR	Mg			Ca		
		a	b	r ²	a	b	r ²
Bet Dagan	0	0.789	0.024	0.888	0.783	0.187	0.892
Bet Dagan	2	0.835	0.020	0.945	0.923	0.192	0.946
Bet Dagan	5	0.997	0.009	0.974	1.057	0.082	0.907
Rehovot	0	0.917	-0.036	0.991	1.025	-0.189	0.985
Rehovot	2	1.378	-0.234	0.980	0.918	-0.087	0.920
Rehovot	5	1.057	-0.093	0.983	1.474	-0.213	0.996
Revadim	0	0.408	0.060	0.986	0.289	0.643	0.800
Revadim	2	0.585	0.026	0.958	0.555	0.534	0.921
Revadim	5	0.850	0.027	0.978	0.647	0.533	0.988

כאשר מציגים את פרקציית הסידן החליף כתלות בסידן המסיס בקרקעות רחובות ובית דגן מתקבלת תמונה דומה לזו שבהצגת הקשר בין המגנזיום החליף למסיס (איור 8). יש לציין שבקרקע רבדים כמות הסידן הספוחה גם כאשר לא היה סידן בתמיסת הקרקע הייתה כמחצית מהקק"ח ולכן גם הפרקציה המירבית של מגנזיום ספוח הייתה כ-0.5 לעומת 0.8-1.0 בקרקעות בית דגן ורחובות.



איור 8. א. פרקצית המגנזיום החליף כתלות בפרקציה של מגנזיום בתמיסה במערכת תלת-קטיונית של מגנזיום עם סידן ונתרן בשלוש קרקעות: בית דגן, רחובות ורבדים (טור ימין). ב. פרקצית הסידן החליף כתלות בפרקציה של סידן בתמיסה במערכת תלת-קטיונית של סידן עם מגנזיום סידן ונתרן (טור שמאל). בכל קרקע נבחנו שלושה ערכי SAR בתמיסה. בכל הקרקעות הריכוז הכללי בתמיסה של מגנזיום, סידן ונתרן היה 50 מ"אקולטר. מקדמים של המשוואות הלינאריות של הקווים לכל ערך SAR ומקדמי המתאם שלהם מוצגים בטבלה 4.

אנחנו מתכננים להשלים את החלק הזה של הניסוי עם הוספת ערך נוסף גבוה יותר של SAR=10 ובחינה של שתי קרקעות נוספות, מלכיה ומזרע. לבסוף נגבש מודל כמותי להשפעת הקטיון השלישי על חילוף המגנזיום עם סידן בדומה למה שפותח על ידי Feigenbaum et al. (1991) לחילוף של אשלגן עם סידן במערכת תלת קטיונית של אשלגן, סידן ונתרן.

3.5. ניסוי עציצים – קליטת מגנזיום מקרקעות שונות

ניסוי עציצים הוקם בתחילת השנה השנייה של המחקר בפברואר 2019 בחממה במכון וולקני. בניסוי זה בחנו את קליטת המגנזיום על ידי צמחי בוחן, חיטה ותירס לסירוגין, תוך מעקב אחרי הדלדול בכמות המגנזיום בקרקעות והשינוי בכמות שתיקלט במחזורי הגדול הבאים כתוצאה מהירידה בזמינות המגנזיום בקרקעות. בניסוי זה נבחנו במחזור הגידול הראשון שמונה קרקעות: מלכיה, נווה יער, עין החורש, בית דגן, רבדים, תלמי יוסף, מזרע, רחובות. כל קרקע ב-6 חזרות, סה"כ 48 עציצים. בעציצים שהכילו את הקרקעות מתלמי יוסף ועין החורש כשבוע לאחר הנביטה נראו סימני צריבות בעלים ובשבועיים הבאים כל הצמחים בקרקעות אלו כמשו. לפי הסימפטומים הצמחים נפגעו משאריות חומרי הדברה (הערכה של חוקר מומחה ליישום חומרי הדברה ד"ר אברהם גמליאל). בבירור שעשינו עם מרכזי הפרדסים בתלמי יוסף ובעין החורש אכן היה יישום של קוטלי עשבים בעלי שאריות גבוהה מספר חודשים לפני דיגום הקרקע. לכן החל בגידול הבא של תירס הוחלפו הקרקעות מתלמי יוסף ובעין החורש בקרקעות מגילת ומחוות פיכמן. כל חמשת הניסויים נעשו זה אחר זה בעציצים באותה קרקע כדי ליצור עם הזמן דילדול של הקרקע ממגנזיום. בנוסף, לאחר סיום ניסוי הגידול השני עם תירס הוספנו טיפול של אותן קרקעות שלא גדלו בהן שני המחזורים הראשונים של חיטה ותירס, כך שהחל מניסוי הגידול השלישי כמות העציצים הוכפלה ונוסף משתנה של ההיסטוריה של הקרקע באופן פקטוריאלי עם סוג הקרקע. סדר הגידולים בניסוי, פירוט מועדי השתילה והקציר ודיגומי הקרקע מוצגים בטבלה 5.

טבלה 5. פירוט מועדי הזריעה או שתילה, קציר ודיגום קרקע בניסויי הצמחים בעציצים בבית דגן (ניסויים 1 ו-2) ובגילת (ניסויים 3, 4 ו-5).

ניסוי	1	2	3	4	5
מין צמח	חיטה	תירס	חיטה	תירס	תירס
זריעה	25.2.2019		24.1.2020		
שתילה		11.8.2019		8.6.2020	7.9.2020
קציר	29.5.2019	2.10.2019	11.3.2020	11.8.2020	11.11.2020
דיגום קרקע	30.5.2019	3.10.2019	12.3.2020	לא בוצע	12.11.2020

בכל הניסויים נפח כל עציץ היה 3 ליטר ונפח הקרקע בכל עציץ היה 2.35 ליטר. שטח פני העציץ הוא 0.0201 מ"ר. משקל הקרקע בכל עציץ השתנה בהתאם לצפיפות הנדמית של הקרקע (הערכים בטבלה 1). לפני תחילת הניסוי הראשון בחיטה נקבע קבול העציץ (כמות המים לאחר ניקוז חופשי משך 24 שעות) של כל קרקע. ההרטבה ההתחלתית של הקרקע נעשתה מלמטה, העציצים עם הקרקע הוכנסו למיכל המכיל מים מתחת לגובה העציץ שאפשר יניקת מים של הקרקעות היבשות מתחתית העציצים. ההשקיה הייתה על פי שקילה (עציץ לכל קרקע), ערך המקסימום היה לפי קבול עציץ וערך המינימום היה 35% מקבול עציץ ותכיפות ההשקיה הייתה על פי צריכת המים. השקיית העציצים במים מותפלים חסרי מלחים כולל מגנזיום. בכל הניסויים היה דישון של העציצים בדשנים המכילים חנקן, זרחן ואשלגן לפי הערכה של הצריכה על ידי הגידול. בגידול הראשון של חיטה לקחנו בחשבון גם בדיקות זמינות של היסודות חנקן (אמון וחנקן ב-1NKCl), זרחן (מיצוי אולסן) ואשלגן (Δf) בעיסה רוויה לפי ריכוזי האשלגן, סידן ומגנזיום במיצוי מימי (הערכים לא מוצגים כאן). מיקרואלמנטים הוספו

בכמות שווה בכל הקרקעות בדשן שחרור איטי מוצק למניעת מחסורים. ברוב הגידולים מחזור הייתה זריעה ישירה בכל עציץ, אך בגידול התירס השני בבית דגן הכנו שתילים במצע פרלייט בתוך גיגיות פלסטיק שמהם שתלנו שני שתילים אחידים ככל האפשר בכל עציץ. גדלנו את התירס באופן דומה לחיטה עם אותה שיטת השקיה.

כל גידול הסתיים בקציר של הנוף ובקביעת המסה הטרסה והיבשה וריכוז יסודות ההזנה ובמיוחד מגנזיום. לאחר הקציר של כל גידול חוץ מגידול התירס השני (הראשון בגילת) נלקחה דגימת קרקע מליבת העציץ בקוטר של כ 3-4 ס"מ והוכנסה לתוך שקית נייר ולתנור הקרקעות. לאחר יבוש נשקל מדגם הקרקע שנלקח מהעציץ בכדי לדעת את כמות הקרקע שנלקחה מהעציץ ואותה יש להחזיר לאחר מכן. מדגם הקרקע נכתש בעזרת מכתש ועלי וסונן לגודל של 1 מ"מ, לשם קביעת תכולת המגנזיום הזמין בעזרת מיצוי 3 Mehlich שנמצא כממצא היעיל ביותר במסגרת ניסוי בחינת יעילות ממצים שונים.

טבלה 6. הביומסה היבשה של נוף הצמחים וריכוז המגנזיום בנוף בכל אחד מניסויי הגידול שבוצעו במהלך המחקר בבית דגן וגילת, 2019-2020. המובהקות של השפעת סוג הקרקע וההיסטוריה שלה מוצגת כמובהקות F בניתוח שונות דו גורמי. הערכים מייצגים ממוצע של כל החזרות ואותיות שונות את ההבדל בין הטיפולים בכל טור ברמת מובהקות של 0.05 לפי מבחן Tukey's HSD (honestly significant difference).

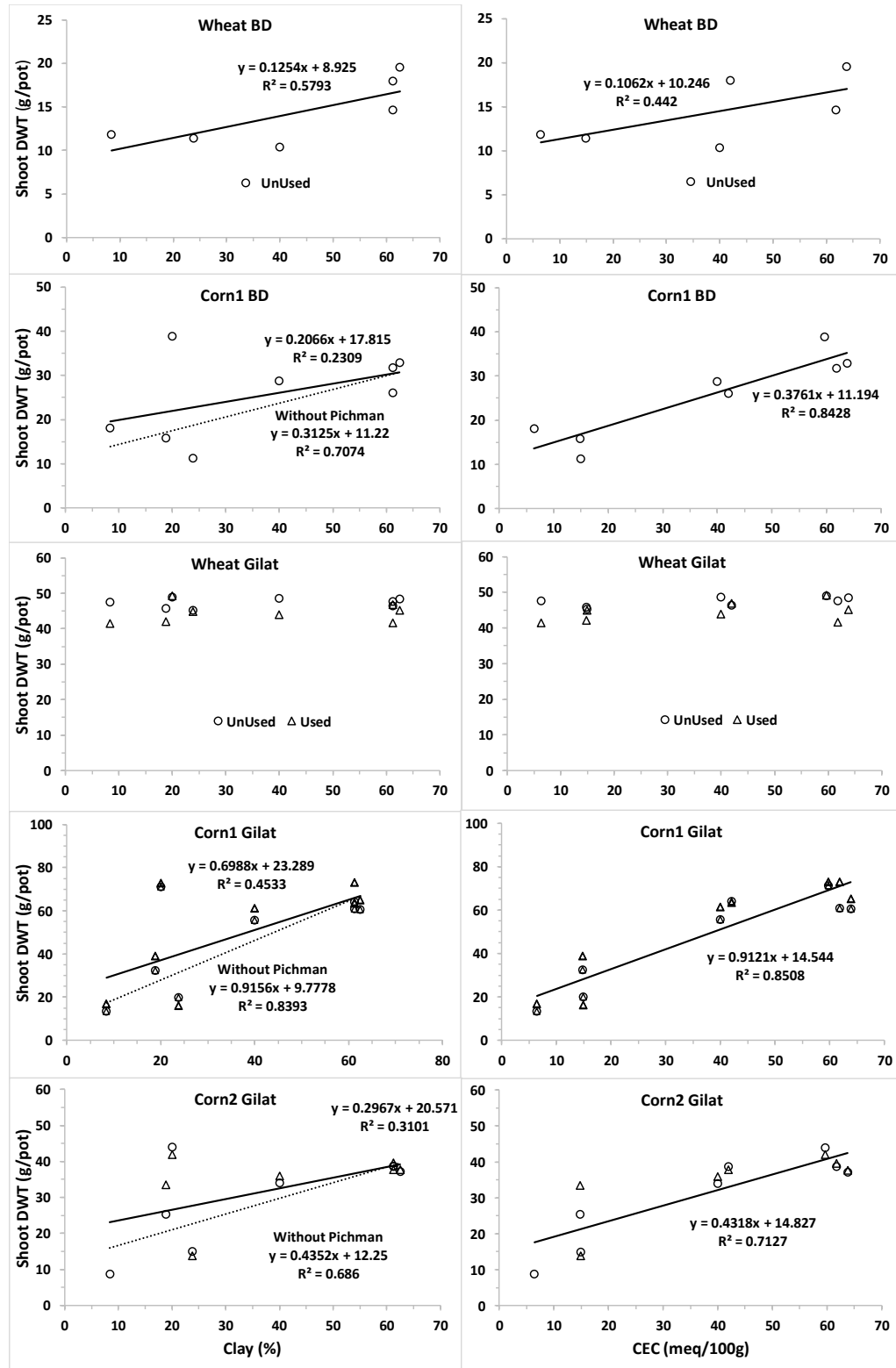
ריכוז מגנזיום בנוף					ביומסה יבשה					קרקע	
תירס3	תירס2	חיטה2	תירס1	חיטה1	תירס3	תירס2	חיטה2	תירס1	חיטה1		
מ"ג/גרם					ג/עציץ						
4.08 a	3.32	0.87 cde	2.04 ab	1.63 a	14.4 d	18.4 d	45.1 b	11.2 e	11.4 c		בית דגן
3.19 d	3.25	0.99abcd	2.32 a		29.4 c	37.5 c	43.9 b	15.9de			גילת
3.34 cd	2.79	1.11 a	1.77 bc		42.7 a	71.8 a	48.9 a	38.9 a			חוות פייכמן
3.92 abc	3.12	1.01 abc	1.74bcd	1.57 ab	39.1ab	67.0ab	44.6 b	31.7bc	14.7bc		מזרע
3.53 bcd	3.05	0.90 bcd	1.48 cd	1.27 bc	38.2ab	63.8ab	46.6ab	26.1 c	18.0ab		מלכיה
4.01 ab	2.97	0.83 de	1.43 d	1.29 bc	37.4 b	62.9ab	46.8ab	32.9ab	19.6 a		נווה יער
3.62abcd	3.06	1.06 ab	1.64 cd	1.56abc	35.0 b	58.5 b	46.3ab	28.8bc	19.4 a		רבדים
	3.08	0.73 e	1.77 bc	1.20 c		15.1 d	44.5 b	18.1 d	11.8 c		רחובות
											היסטוריה
3.58	3.09	1.05			34.3	51.1	47.3				חדש
3.66	3.07	0.82			33.2	47.2	44.3				ישן
F מובהקות לפי ערך F										ד"ח [±]	משתנה
<0.0001	0.498	<0.0001	<0.0001	0.001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	7	קרקע
0.575	0.805	<0.0001			0.212	0.053	<0.0001			1	היסטוריה

[±] ד"ח – דרגות חופש. בניסוי הראשון בחיטה הערך 5 ובאחרון בתירס 6

המשקל היבש של הנוף וריכוז המגנזיום בנוף שהתקבלו בכל אחד מניסויי העציצים מוצגים בטבלה 6. המשתנים שניתן לבחון את השפעתם על תוצאות אלו הם סוג הקרקע, ההיסטוריה של הקרקע (בניסויים חיטה 2 ותירס 2 ותירס 3 שבוצעו בגילת) והשונות בין הניסויים העוקבים באותו גידול (חיטה 1 לעומת חיטה 2 ותירס 1 לעומת תירס 2 ותירס 3). בכל מחזור גידול החל מהגידול הראשון של חיטה הייתה שונות גדולה ומובהקת בביומסה בין הקרקעות השונות, כאשר בניסוי החיטה הראשון (חיטה) ובשלושת הניסויים בתירס השונות הייתה גדולה בין הערכים הנמוכים ביותר שהתקבלו בקרקעות הקלות, בית דגן, רחובות וגילת לעומת ערכים הגבוהים ביותר בקרקע מחוות פייכמן ובקרקעות הכבדות, מזרע, מלכיה נווה יער וגם רבדים כאשר הסדר בין קרקעות אלו לא היה קבוע. יש לציין שבניסוי החיטה השני השונות בין הקרקעות הייתה קטנה יחסית, בין 41.5 עד 49.2 געציץ. בשלושת הניסויים האחרונים נבדקה השפעת ההיסטוריה של הקרקע, כלומר השפעת השימוש הקודם בקרקע בניסויים חיטה 1 ותירס 1. התקבלה השפעה מובהקת של ירידה קלה בביומסה בקרקע המשומשת לעומת החדשה בניסויים חיטה 2 ותירס 2, אך בניסוי התירס האחרון לא נמצאה השפעה של ההיסטוריה של הקרקע. נמצאה קורלציה גבוהה בין מרקם הקרקע לייצור הביומסה, ככל שתכולת החרסית הייתה גבוהה היבול היה גבוה יותר (איור 9). אנו מניחים שהגורם העיקרי לשונות זו היה התכונות הפיזיקליות של הקרקע ובעיקר קבול המים הזמינים, לפי מקדמי הקשר הגבוהים (r^2) שקבלנו בין אחוז החרסית בקרקע תכולת המים ההיגרוסקופים (איור 9).

הקרקע מחוות פייכמן היא קרקע יוצאת דופן בין הקרקעות שבחנו. זו קרקע וולקנית שמאופיינת בשטחי פנים גדולים הנמצאים בתוך חללי החלקיקים הגדולים ולכן החלוקה המקובלת למקטעי הגודל של חרסית, סילט וחול אינה מתאימה לה ולכן הקק"ח שלה גבוה מהצפוי לפי תכולת החרסית. זו קרקע שכנראה מתאימה מאוד לגדול בעציצים בזכות התכולה הגבוהה של אוויר גם ברטיבות גבוהה ולכן משקל הצמחים בה היה גבוה יחסית לקרקעות אחרות. ואכן כאשר בוחנים את הקשר בין המשקל היבש של הצמחים לקק"ח הקרקע מחוות פייכמן מתנהגת באופן דומה לשאר הקרקעות (איור 9).

ניתן גם לבחון את השפעתם של סוג הקרקע, ההיסטוריה של הקרקע (בניסויים שבוצעו בגילת) והשונות בין הניסויים העוקבים באותו גידול על ריכוז המגנזיום בנוף (טבלה 6). ברוב המועדים בשני מיני הצמחים חוץ מהניסוי השני בתירס השונות בריכוז המגנזיום בנוף הצמחים בהשפעת סוג הקרקע הייתה מובהקת, אך ההשפעה היחסית הייתה קטנה מאשר על ייצור הביומסה. תחום הריכוזים (%) היה 1.2-1.63, 1.43-2.32, 0.73-1.11, 2.79-3.32 ו-3.19-4.08 בחיטה 1, תירס 1, חיטה 2, תירס 2 ותירס 3. סדר הקרקעות מבחינת ריכוז המגנזיום בצמח לא היה קבוע בגידולים השונים ולא נמצא קשר ברור בין ריכוז המגנזיום בצמח למרקם הקרקע. למשל בשלושה ניסויים (חיטה 1, תירס 2 ותירס 3) הריכוז בצמח בקרקע הקלה מבית דגן היה הגבוה ביותר או השני אחרי גילת (תירס 1) ובשני ניסויים הערכים הנמוכים ביותר נמצאו בצמחים בקרקע רחובות בעלת מרקם קל דומה לבית דגן. הריכוזים בחיטה 2 נמוכים משמעותית מאשר בחיטה 1, תוצאה שהייתה יכולה להצביע על ירידה בזמינות המגנזיום אולם בתירס התקבלה עליה גדולה בריכוז מתירס 1 לתירס 2 ועליה נוספת מתירס 2 לתירס 3. גם בהשוואה בין קרקע שגודלו בה תירס וחיטה בבית דגן לקרקע בתולה נמצאה השפעה מובהקת רק בניסוי חיטה 2 ולא הייתה השפעה בשני הניסויים העוקבים בתירס 2 ותירס 3.



איור 9. הביומסה היבשה של נוף צמחי חיטה ותירס כתלות באחוז החרסית ובק"ח בקרקעות בניסויי העציצים בבית דגן ב-2019 ובגילת ב-2020.

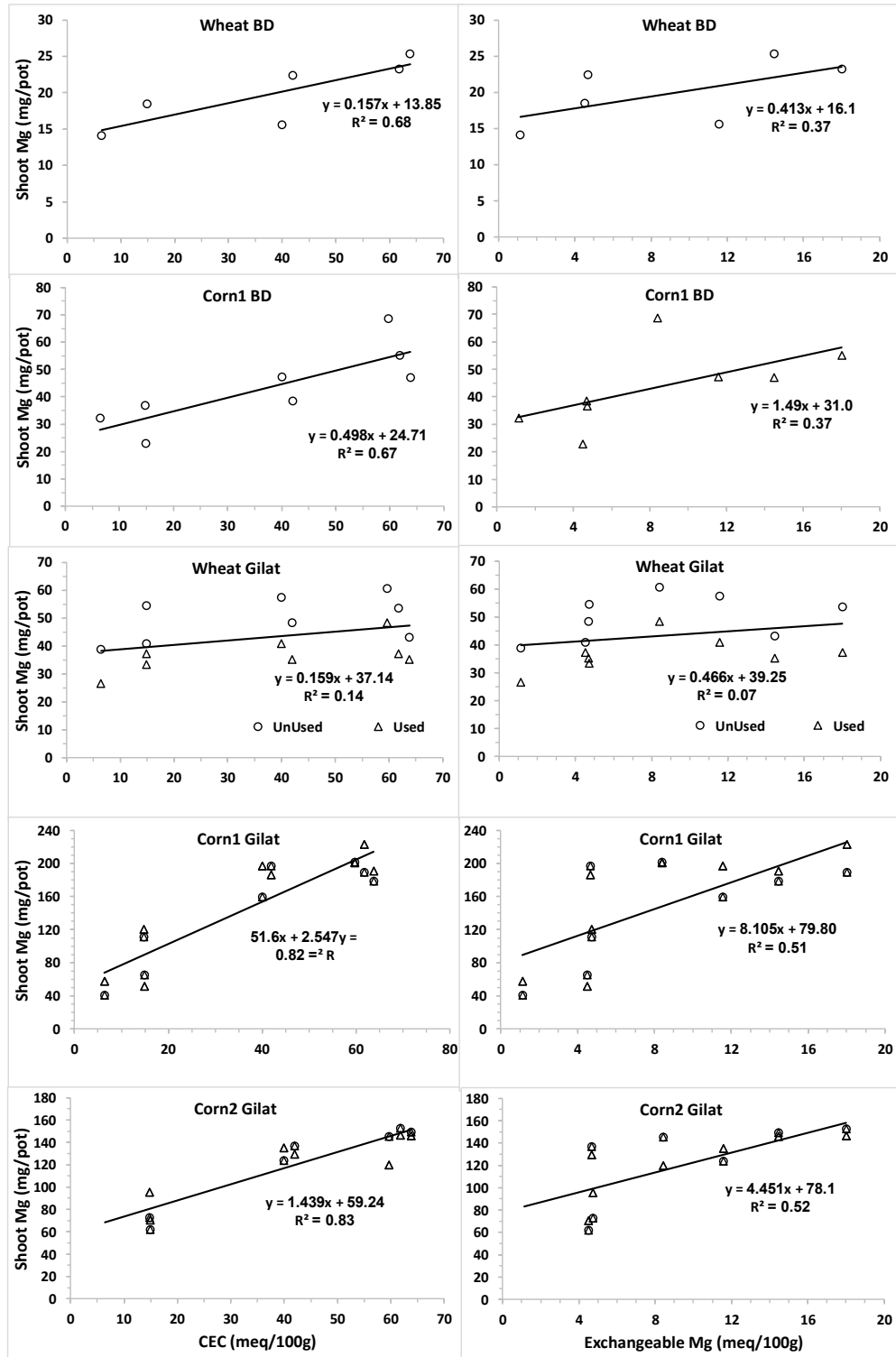
הנחת המחקר שלנו הייתה שעל ידי דישון ברמה גבוהה של כל יסודות ההזנה חוץ ממגנזיום נמזער את ההבדלים בפוריות בין הקרקעות והגורם ההזנתי העיקרי שייבחן הוא המגנזיום. בפועל התקבלו הבדלים גדולים ומובהקים בריכוזי היסודות בנוף הצמחים בין הקרקעות השונות ובחלקם הייתה השפעה גם להיסטוריה של הקרקע (טבלאות 1, 2 ו-3 בנספח). אולם לא נמצא קשר בין ריכוזי היסודות לייצור ביומסה ולפחות בחלק מהמקרים הריכוזים הגבוהים ביותר של יסודות הזנה נמצאו בקרקעות הקלות והנמוכים בקרקעות הכבדות שבהן יכול הביומסה גבוה יותר, לדוגמא אשלגן בניסויי חיטה², תירס² ותירס³.

כמות המגנזיום בנוף בכל הניסויים הושפעה באופן מובהק מסוג הקרקע ואילו ההיסטוריה השפיעה באופן מובהק רק על גידול החיטה השני כמו על ריכוז המגנזיום בנוף (טבלה 7). בדומה לביומסה של הצמחים כמות המגנזיום בנוף הצמחים בקרקעות הקלות בית דגן ורחובות הייתה קטנה באופן מובהק מאשר בקרקע פיכמן והקרקעות הכבדות ביותר מזרע, נווה יער ומלכיה וגם רבדים (טבלה 7).

טבלה 7. כמות המגנזיום בנוף הצמחים בכל אחד מניסויי הגידול שבוצעו במהלך המחקר, 2019-2020. המובהקות של השפעת סוג הקרקע וההיסטוריה שלה מוצגת כמובהקות F בניתוח שונות דו גורמי. הערכים מייצגים ממוצע של כל החזרות ואותיות שונות את ההבדל בין טיפולים בכל טור ברמת מובהקות של 0.05 לפי מבחן Tukey's HSD (honestly significant difference).

משתנה	חיטה 1	תירס 1	חיטה 2	תירס 2	תירס 3	
קרקע	מ"ג/עציץ					
בית דגן	18.5bc	22.9 e	39.0cd	59.4 c	65.9 b	
גילת		36.8cd	44.0bc	116.0 b	83.9 b	
מזרע	23.3ab	55.1 b	45.3bc	206.2 a	149.7 a	
מלכיה	22.4ab	38.6cd	41.8 c	191.6 a	133.1 a	
נווה יער	25.3 a	47.1bc	39.1cd	184.9a	147.5 a	
פיכמן		68.7 a	54.4 a	200.4 a	130.3 a	
רבדים	30.4 a	47.2bc	49.1ab	178.0 a	129.3 a	
רחובות	14.1 c	32.3de	32.7 d	49.5 c		
היסטוריה						
חדש			49.6	153.5		
ישן			36.7	143.0		
משתנה	F מובהקות לפי ערך					ד"ח [±]
קרקע	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	7
היסטוריה			<.0001	0.145	0.997	1

[±] ד"ח – דרגות חופש. בניסוי הראשון בחיטה הערך 5 ובאחרון בתירס 6



איור 10. הקשר בין כמות המגנזיום בנוף בכל אחד מניסויי הצמחים לבין הקק"ח של הקרקעות.

הקשר בין כמות המגנזיום בנוף בכל אחד מניסויי הצמחים לבין הקק"ח של הקרקעות מוצג באיור 10. בכל ניסויי הצמחים חוץ מאשר בניסוי החיטה השני (חיטה בגילת) התקבלו מתאמים גבוהים למדי עם ערכי r^2 בין 0.67 ל-0.83. בניגוד להשערת המחקר שלנו המתאם בין כמות המגנזיום בנוף לכמות המגנזיום הספוחה בקרקע בתחילת הניסויים היה קטן יותר מאשר עבור הקק"ח (איור 10).

אולם יש לציין שהנחת המחקר שלנו הייתה שהגורמים המשפיעים על זמינות מגנזיום מהקרקע לצמחים בנוסף לכמות הכללית של המגנזיום הספוח הם הפרקציה של המגנזיום הספוח מכלל הקק"ח ($\text{Frac}_{\text{MgEx}}$), הפחמן האורגני הקרקעי (SOC) וגיר הקרקע. במבחן רגרסיה בצעדים (Stepwise Regression) לסך כמות המגנזיום שנקלטה על ידי הצמחים בניסויים העוקבים כתלות במשתנים הללו התקבלה המשוואה הבאה:

$$Y = 9.39 \cdot \text{Mg}_{\text{Ex}} - 343.9 \cdot \text{Frac}_{\text{MgEx}} + 6.85 \cdot \text{SOC} - 4.926 \cdot \text{Calcite} + 216.9 \quad (4)$$

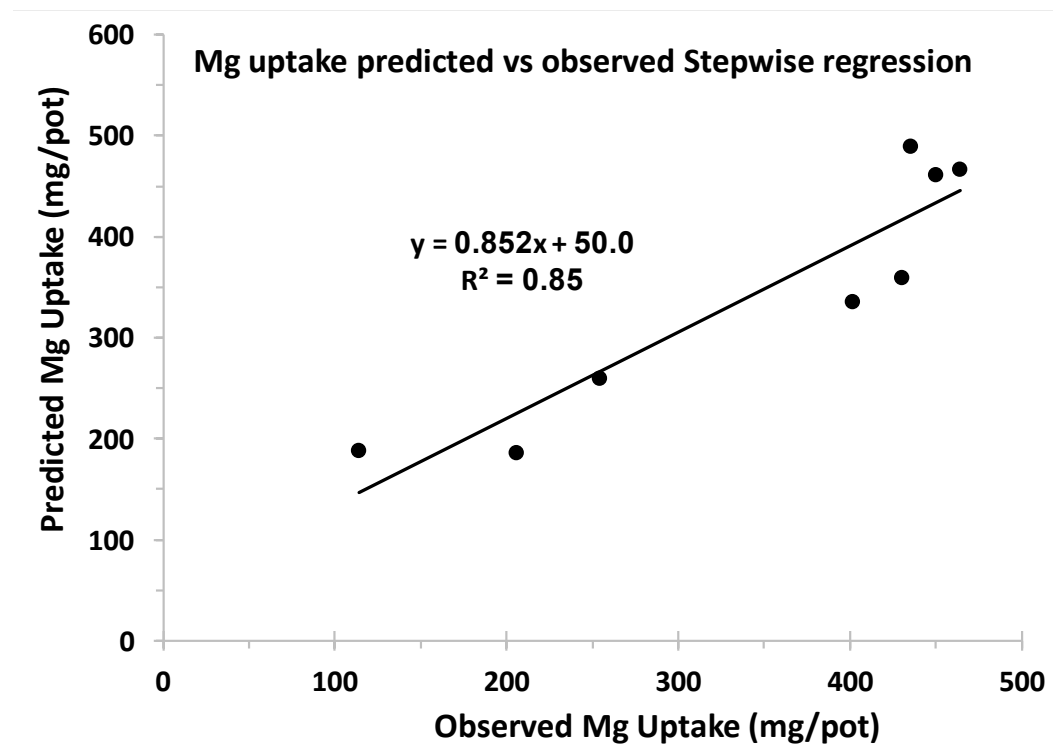
Mg_{Ex} - Exchangeable Mg, meq/100g

$\text{Frac}_{\text{MgEx}}$ - Fraction of exchangeable

Mg of CEC

SOC - Soil Organic Carbon mg/g

Calcite - total carbonates, %



איור 11. כמות המגנזיום המצטבר החזויה (מחושבת על ידי רגרסיה בצעדים לפי מדדים התחלתיים של הקרקע) שנקלטה על ידי הצמחים בגידולים העוקבים בשמונה הקרקעות שנבחנו בניסוי העציצים, לעומת הכמות המדודה.

המתאם בין כמות המגנזיום שנקלטה לבין הכמות החזויה לפי משוואה 4 גבוה ($r^2=0.85$, איור 11). בהשוואה בין שיטות המיצוי השונות בשנת המחקר הראשונה מצאנו שמיצוי מליך 3 הינו הממצה היעיל ביותר לקביעת כמות המגנזיום החליף בקרקע שהינה כנראה מדד טוב למגנזיום הזמין לצמח. בנוסף מכיוון שביצוע מיצוי מליך 3 מהיר וקל יותר מקביעת המגנזיום החליף ויכול לשמש גם לקביעת זמינות של יסודות הזנה נוספים (אשלגן, זרחן, מיקרואלמנטים), לכן החלטנו להשתמש במיצוי זה כמדד למגנזיום הזמין בניסוי העציצים. בחנו את המתאם בין סך כמות המגנזיום שנקלטה על ידי הצמחים בניסויים העוקבים לבין כמות המגנזיום הזמין בקרקע לפי מיצוי Melich3 שבוצע לפני תחילת ניסויי הגידול. בחנו את ההתאמה של התוצאות למודל מיטשרליך (משוואה 5) שהפרמטרים המתאימים ביותר שלו הותאמו על ידי הפרוצדורה Non linear בתוכנת JMP.

$$Y = A \cdot (1 - e^{-C \cdot Mg})$$

(5)

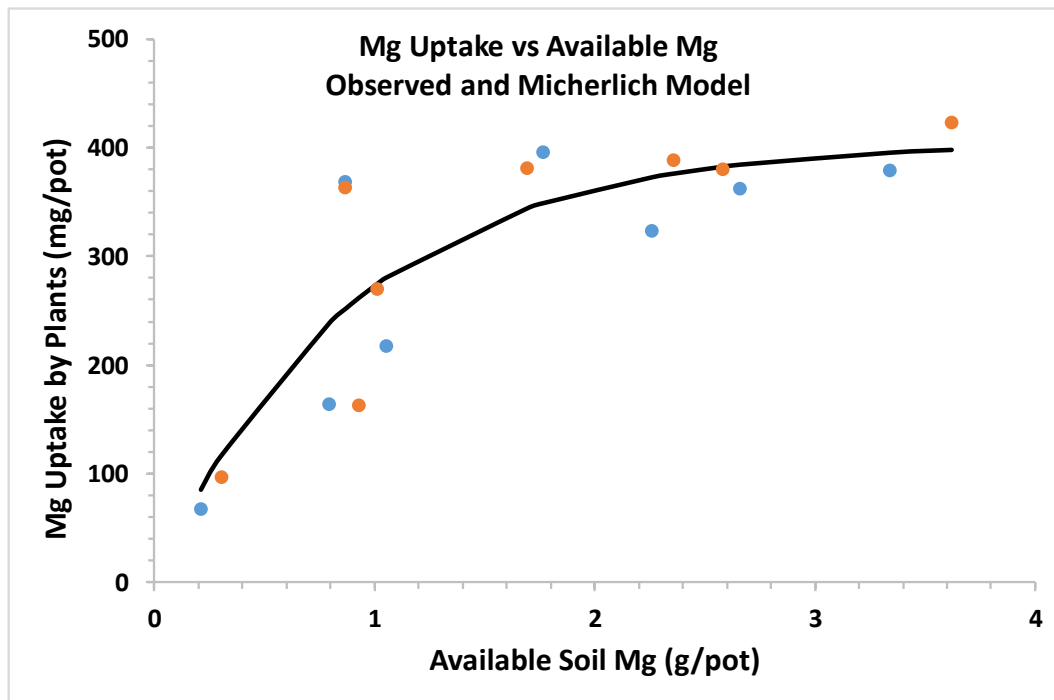
כאשר

A – כמות המגנזיום הפוטנציאלית שהצמחים קולטים בתנאים אופטימלים (מ"ג/עציץ)

C – מקדם

Mg – כמות מגנזיום זמינה בעציץ במיצוי מליך 3 (מ"ג/עציץ)

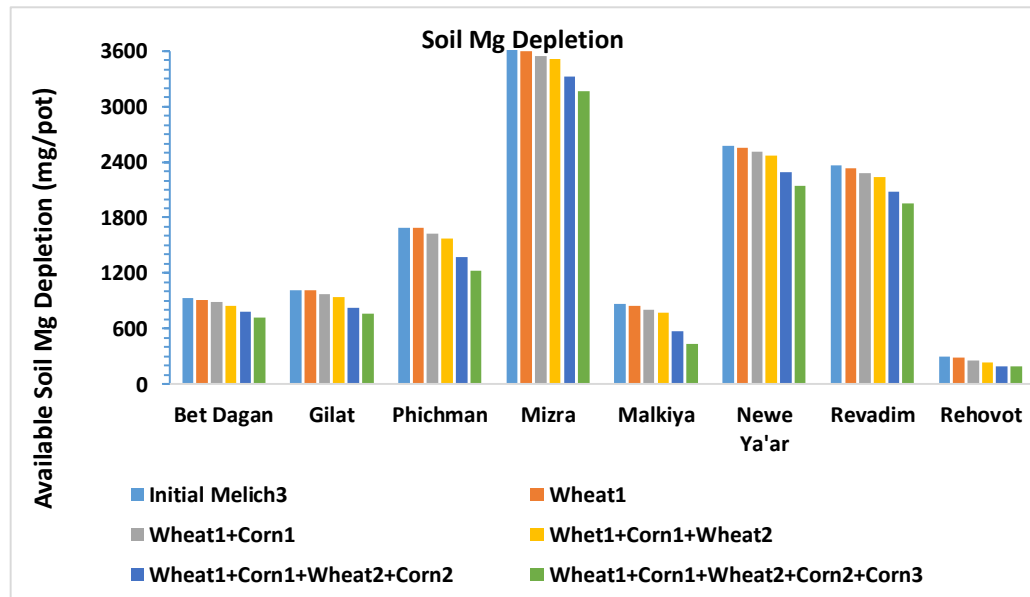
ההתאמה הגבוהה למודל וערך הפרמטרים שהתקבלו וסטיות התקן שלהם מוצגים באיור 12.



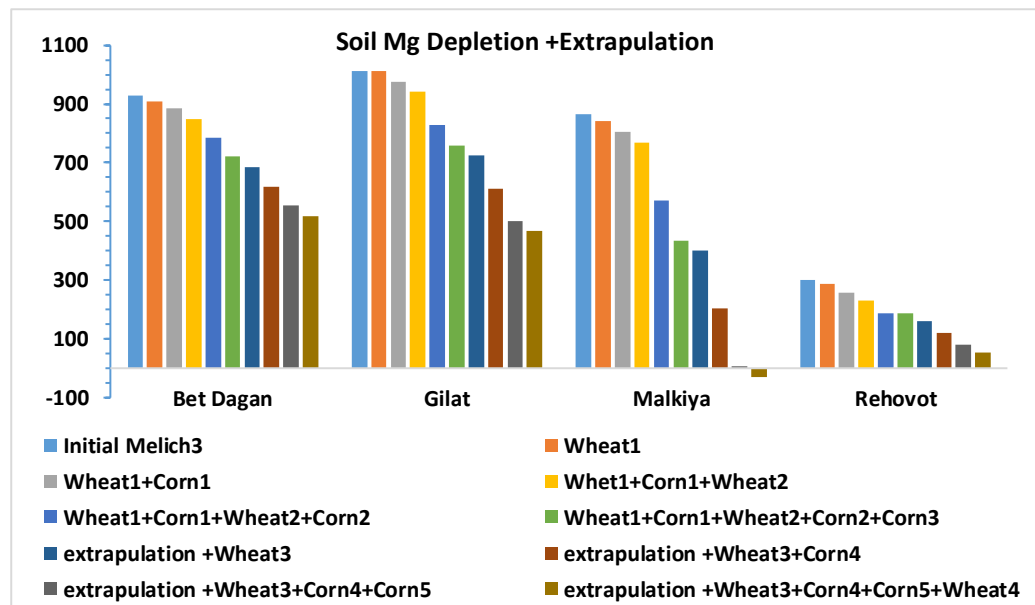
ApproxStdErr	Estimate	Parameter
36.6004124	405.42431487	A
0.2854248	1.119930289	c

איור 12. כמות המגנזיום שהורחקה מהקרקע על ידי מחזור גידולים של חיטה – תירס – תירס בניסוי העציצים בגילת כתלות בכמות המגנזיום ההתחלתית בעציץ. תוצאות מכל שמונת הקרקעות בקרקע עם היסטוריה של גדול חיטה ותירס בניסוי עציצים בבית דגן וקרקעות בתוליות.

א.



ב.



איור 13. הדלדול המחושב בכמות המגנזיום הזמין בקרקעות. א. הדלדול המחושב עבור כל הקרקעות על ידי חסרת הכמות שנקלטה על ידי החיטה בניסוי הראשון מכמות המגנזיום הזמין בקרקע שנמדדה בתחילת הניסוי ובניסויים העוקבים הפחתה של הכמות שנקלטה באותו גידול מהכמות הזמינה שחושבה לסוף הניסוי הקודם. ב. הערכה של המשך דלדול המגנזיום הזמין בניסויי המשך בקרקעות בית דגן, גילת, מלכיה ורחובות בהנחה שקליטת המגנזיום בניסויי המשך שווה לזו שבניסויים שבוצעו.

בניתוח התוצאות ובדיון שהוצג למעלה אומנם מצאנו קשרים בין קליטת מגנזיום על ידי הצמחים ותכונות קרקע כולל מדדים לזמינות, אך בניגוד להשערת המחקר, נראה שגם בניסויי האחרון בניסויים העוקבים לא הגענו למצב

של דלדול מגנזיום משמעותי בקרקעות המבחן, כולל הקרקעות הקלות. לכן גם לא בצענו ניסוי של תגובת צמחים לרמות שונות של מגנזיום שתכננו כדי לענות על מטרות 3 ו-4 של המחקר. ניתוח כמותי של השינוי בכמות המגנזיום הזמין לפי מיצוי מליך³ במהלך הניסויים העוקבים בכל אחת מהקרקעות נעשה על ידי החסרה של הכמות שנקלטה על ידי הצמחים בכל שלב מכמות המגנזיום הזמינה התחלתית בקרקע (איור 13).

בכל הקרקעות הייתה כמותן ירידה הדרגתית מגידול אחד לגידול שאחריו, אך בקרקעות מזרע, נווה יער ורבדים שבהן הכמות הזמינה ההתחלתית גבוהה מאוד הירידה לא הייתה משמעותית, והערך הסופי בשלושתן היה מעל 2000 מ"ג/עציץ, כמות גדולה מאוד ביחס לקליטה המצטברת על ידי הצמחים בכל חמשת הניסויים העוקבים שהייתה כ-420 מ"ג בקרקעות שבהן זמינות המגנזיום הייתה הגבוהה ביותר (איור 13א). הערכים הנמוכים ביותר של מגנזיום זמין היו בקרקעות הקלות בית דגן, גילת ורחובות ובקרקע הכבדה ממלכיה. בקרקעות הקלות הדלדול של המגנזיום במהלך הניסויים העוקבים היה מתון אך בקרקע ממלכיה הייתה פחיתה משמעותית מאוד בכמות המגנזיום הזמין. הערכה של דלדול מגנזיום זמין הצפוי בניסויים עוקבים נוספים בקרקעות העניות במגנזיום זמין בהנחה של קליטה דומה לניסויים הקודמים מוצגת באיור 13ב. בקרקעות ממלכיה ורחובות צפוייה הגעה לערכי מגנזיום זמין נמוכים מאוד מתחת ל-100 מ"ג לעציץ אחרי שני גדולים נוספים ובגידול נוסף הכמות הזמינה בקרקע תהיה דומה או פחותה מהצריכה הפוטנציאלית לפי הניסויים הקודמים.

4. סיכום ומסקנות

נאספו ואופיינו 12 קרקעות במגוון רחב של קרקעות ישראל. בדיקת מגנזיום בקרקעות בשיטות שונות מצביעה על ההבדל בין השיטות בכמות המגנזיום הניתן למיצוי כאשר סדר הערכים מהגדול לקטן הוא: מיצוי מליך³ < $0.5M NaHCO_3 < 0.01M CaCl_2 < 0.5M NaHCO_3 < 1M KCl$. טווח כמות המגנזיום הזמין במיצוי מליך³ בקרקעות שנבדקו הוא 1.4 עד 1.7 מ"ג/ק"ג ואילו במיצוי במים הוא 0.05 עד 0.50 מ"ג/ק"ג. יש בידינו כעת קרקעות עם ריכוזי מגנזיום שונים בטווח רחב כאשר תלמי יוסף הינה הקרקע עם פוטנציאל מגנזיום נמוך ביותר בהשוואה למזרע עם הערכים הגבוהים ביותר עד כדי פי 10 מתלמי יוסף כתלות בשיטת המיצוי.

בצענו עקומי חילוף של מגנזיום עם סידן בשמונה קרקעות. האיזוטומות מציגות מצב של העדפה קלה לסידן בשלוש קרקעות (מלכיה, מזרע ורחובות) ומצב של שוויון בעצמת הספיחה (אין העדפה) בחמש קרקעות (גילת, נווה יער, רבדים, תלמי יוסף ובית דגן). מצאנו קשר בין אנרגיית החילוף של מגנזיום עם סידן לפי גיבס לבין היחס חומר אורגני מסיס לחומר אורגני מומס. המתאם משתפר כאשר מוסיפים למשוואה גורם נוסף, כמות הגיר בקרקע.

במערכת של שלושה קטיונים שכוללת בנוסף למגנזיום וסידן גם נתרן מצאנו שבקרקעות רחובות ובית דגן לתוספת הנתרן לא הייתה השפעה על ההעדפה בחילוף סידן+נתרן עם מגנזיום ואילו בקרקע רבדים ההעדפה לסידן+נתרן על מגנזיום לעומת סידן למגנזיום מצטמצמת באופן משמעותי כאשר מעלים את ריכוז הנתרן בתמיסה לערך $SAR=5$. אנו משלימים חלק זה של המחקר בבחינה של ערך SAR נוסף גבוה יותר $SAR=10$. בנוסף אנו מבצעים ניסוי חילוף של מגנזיום עם סידן בנוכחות ריכוזים משתנים של נתרן בשתי קרקעות נוספות, ממלכיה ומזרע.

בניסוי העציצים אחרי גידולים עוקבים של חיטה, תירס, חיטה, תירס ותירס, מצאנו ששך קליטת המגנזיום על ידי הצמחים הייתה תלויה בכמות המגנזיום שניתן למיצוי במיצוי מליך³ ובכמות המגנזיום החליף בקרקע. ברוב

הקרקעות, חוץ משתי קרקעות קלות (רחובות ובית דגן) וקרקע כבדה אחת (מלכיה) כמות המגנזיום שנקלטה הייתה קטנה יחסית לכמות המגנזיום בקרקע שניתן למיצוי במליך³. לא הצלחנו לקבל קרקעות מדולדלות מגנזיום ברמה שתאפשר בחינה של תגובת הצמחים לדישון במגנזיום ברמות שונות. על סמך התוצאות אחרי גידול ברצף של חיטה, תירס, חיטה, תירס ותירס אנחנו שוקלים דרכים להגביר את דלדול המגנזיום מהקרקע. האפשרויות שנבחנות: 1. הארכת משך הזמן של ניסוי העציצים, כך שנוסיף עוד שני מחזורי גידול של צמחים, 2. גידול צמחים בתערובת של חול עם הקרקע שעברה גידול עם צמחים, כך שהכמות הכללית של מגנזיום זמין לצמחים בעציץ תהיה קטנה יותר וכמות המגנזיום הנקלט על ידי הצמחים תהווה חלק גדול ומשמעותי מהמאגר הזמין בקרקע.

5. ביבליוגרפיה

- Bar-Tal, A., Yermiyahu, U., Ben-Gal, A., Schwartz, A., Faingold, I. and Seligmann, R. (2017). Optimization of calcium and magnesium concentrations for fertigation of tomato with desalinated water. *Israel J Plant Sci.* 64:80-91.
- Bar-Yosef, B. and Akiri, B. 1977. Sodium bicarbonate extraction to estimate nitrogen, phosphorus, and potassium availability in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:319-323
- Cakmak, I. and Yazici, A.M. (2010) Magnesium: a forgotten element in crop production. *Better Crops* 94:23-25
- Edmeades, D.C. (2004). The Mg requirements of pastures in New Zeland: A review. *New Zeland J Exp Agri* 47:380
- Feigenbaum, S., Bar-Tal, A., Portnoy, R. and Sparks, D.L. (1991). Binary and ternary exchange of potassium on calcareous montmorillonitic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 49-56.
- Gerendas, J. and Fuhrs, H. 2013. The significance of magnesium for crop quality. *Plant & Soil* 368:101-128
- Gransee, A. and Fuhrs, H. 2013. Mg mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, Mg fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant & Soil* 368:5-21
- Guo, W., Nazinf, H., Liang, Z. and Yang, D. 2016. Magnesium deficiency in plants: an urgent problem. *The crop J.* 4:83-91
- Jalali, M., Arian, T.M. and Ranjbar, F. (2020). Selectivity coefficients of K, Na, Ca, and Mg in binary exchange systems in some calcareous soils. *Environ. Moni. Assess.* 192:80
- Robbins, C.W. and Carter, D.L. (1983). Selectivity coefficients for calcium-magnesium-sodium-potassium exchange in eight soils. *Irrig. Sci.* 4:95-102.

- Senbayram, M., Gransee, A., Wahle, V. and Thiel, H. (2015). Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant–soil continuum. *Crop Pasture Sci.* 66:1219-1229
- Seyfried, M.S., Sparks, D.L., Bar-Tal, A. and Feigenbaum, S. (1989). Kinetics of Ca-Mg exchange on soil using a stirred-flow reaction chamber. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 406-410.
- Sullivan, P.J. (1977). Principle of hard and soft acids and bases as applied to exchangeable cation selectivity in soils. *Soil Sci.* 124:117 – 121.
- Van Bladel, R. and Gheyi, H.R. (1980). Thermodynamic study of Calcium-Sodium and Calcium- Magnesium exchange in calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:938-942.
- Visconti, F., De Paz, J.M. and Rubio, J.L. (2012). Choice of selectivity coefficients for cation exchange using principal components analysis and bootstrap ANOVA of coefficients of variation. *Eur. J. of Soil Sci.* 63:501-513
- Yermiyahu, U., Tal, A. Ben-Gal, A., Bar-Tal, A., Tarchisky, J. and Lahav, O. (2007). Rethinking desalinated water quality and agriculture. *Science* 318:920-921

6. נספחים

בכל הניסויים בצמחים נבדקו ריכוזי יסודות ההזנה העיקריים חנקן, זרחן, אשלגן, סידן ומגנזיום וגם ריכוז הנתרן. בניסוי החיטה הראשון טווח ריכוזי החנקן הממוצעים בנוף בקרקעות השונות היה רחב מ- 9.0 מ"ג/ג ברבדים עד 22.8 מ"ג/ג במלכיה (טבלה נ1). לא נמצא קשר בין משקל הצמחים לבין ריכוז החנקן בצמח. גם טווח ריכוזי הזרחן הממוצעים לקרקע היה רחב למדי מ- 0.94 מ"ג/ג ברבדים עד 1.94 מ"ג/ג במלכיה ולא נמצא קשר בין משקל הצמחים לבין ריכוזי הזרחן בצמח, אך היה מתאם גבוה ($r^2=0.84$) בין ריכוזי החנקן והזרחן בחיטה. גם טווח ריכוזי האשלגן הממוצעים לקרקע היה רחב למדי מ- 6.5 מ"ג/ג בבית דגן עד 23.4 מ"ג/ג במלכיה ולא נמצא קשר בין משקל הצמחים לבין ריכוזי האשלגן בצמח, ולא היה מתאם בין ריכוזי האשלגן לריכוזי החנקן והזרחן בחיטה. טווח ריכוזי הסידן הממוצעים לקרקע היה רחב למדי מ- 4.5 מ"ג/ג ברחובות עד 9.6 מ"ג/ג בבית דגן ולא נמצא קשר בין משקל הצמחים לבין ריכוזי הסידן בצמח, ולא היה מתאם בין ריכוזי הסידן לריכוזי החנקן, זרחן ואשלגן בחיטה. טווח ריכוזי המגנזיום הממוצעים לקרקע היה צר יחסית מ- 1.20 מ"ג/ג ברחובות עד 1.63 מ"ג/ג בבית דגן ולא נמצא קשר ישיר בין משקל הצמחים לבין ריכוזי המגנזיום בצמח ובין ריכוזי המגנזיום לריכוזי היסודות האחרים בצמח החיטה.

טבלה נ1. ריכוזי יסודות הזנה בנוף צמחי החיטה במחזור הגדול הראשון בניסוי העציצים בבית דגן, 25 פברואר 2019 – 29 מאי 2019.

קרקע	חנקן	זרחן	נתרן	אשלגן	סידן	מגנזיום
מ"ג/ג						
בית דגן	13.5 ± 0.99	1.00 ± 0.08	0.99 ± 0.00	6.5 ± 0.54	9.6 ± 0.96	1.63 ± 0.12
נווה יער	14.8 ± 0.79	1.59 ± 0.10	0.99 ± 0.00	16.0 ± 1.00	6.5 ± 0.26	1.29 ± 0.04
רבדים	9.0 ± 0.55	0.94 ± 0.08	0.83 ± 0.15	10.9 ± 0.64	5.7 ± 0.41	1.51 ± 0.06
מלכיה	22.8 ± 1.05	1.94 ± 0.10	0.66 ± 0.19	23.4 ± 1.10	7.2 ± 0.45	1.28 ± 0.07
מזרע	19.4 ± 0.61	1.83 ± 0.03	0.99 ± 0.00	21.4 ± 0.38	6.1 ± 0.25	1.58 ± 0.05
רחובות	17.8 ± 0.43	1.43 ± 0.07	0.83 ± 0.15	14.1 ± 0.97	4.5 ± 0.24	1.20 ± 0.05

בניסוי התירס הראשון טווח ריכוזי האשלגן בנוף בקרקעות שנבחנו היה בין- 29.0 מ"ג/ג במלכיה עד 41.7 מ"ג/ג בפיכמן ולא נמצא קשר בין משקל הצמחים לבין ריכוזי האשלגן בצמח (טבלה נ2). טווח ריכוזי הסידן הממוצעים לקרקע היה רחב למדי מ- 4.3 מ"ג/ג ברבדים עד 9.0 מ"ג/ג בגילת ולא נמצא קשר בין משקל הצמחים לבין ריכוזי הסידן בצמח, ולא היה מתאם בין ריכוזי הסידן לריכוזי האשלגן בתירס. טווח ריכוזי המגנזיום הממוצעים לקרקע היה צר יחסית מ- 1.43 מ"ג/ג בנווה יער עד 2.33 מ"ג/ג בגילת ולא נמצא קשר ישיר בין משקל הצמחים לבין ריכוזי המגנזיום בצמח ובין ריכוזי המגנזיום לריכוזי היסודות האחרים בצמח התירס. בשני המינים התוצאות אינן מצביעות על אחד מיסודות ההזנה כגורם מגביל.

טבלה 2. ריכוזי יסודות הזנה בנוף צמחי התירס במחזור הגדול השני בניסוי העציצים בבית דגן, 2 אוקטובר 2019.

קרקע	אשלגן	סידן	מגנזיום
מ"ג/ג			
בית דגן	32.8±1.2	8.84±0.38	2.04±0.05
גילת	40.1±1.21	9.00±0.35	2.33±0.09
נווה יער	31.1±0.52	4.99±0.21	1.43±0.05
רבדים	31.4±1.3	4.26±0.38	1.65±0.07
מלכיה	29.0±0.24	6.86±0.40	1.48±0.07
מזרע	32.4±0.54	4.92±0.33	1.74±0.05
פיכמן	41.7±1.06	5.26±0.28	1.77±0.06
רחובות	31.5±1.3	6.99±0.48	1.77±0.05

טבלה 3. ריכוזי יסודות ההזנה בנוף צמחי חיטה ותירס במחזורי הגדול בניסוי העציצים בגילת.

קרקע	ריכוזי יסודות בנוף צמחי חיטה 2			ריכוזי יסודות בנוף צמחי תירס 2			ריכוזי יסודות בנוף צמחי תירס 3		
	חנקן	סידן	אשלגן	זרחן	סידן	אשלגן	ברזל	סידן	אשלגן
	%			מ"ג/ק"ג			מ"ג/ק"ג		
בית דגן	1.37bc	0.28	2.24b	0.11 d	0.85a	3.25 ab	74.2	0.790 a	3.82 a
גילת	1.23 c	0.30	2.23b	0.12 cd	0.69b	2.87abc	61.8	0.419 c	3.49 a
חוות פיכמן	1.48bc	0.28	2.73a	0.14abcd	0.61b	3.09 ab	56.0	0.338 d	3.33 a
מזרע	1.27bc	0.27	2.24b	0.15 abc	0.63b	2.60abc	44.0	0.384cd	2.58 b
מלכיה	1.73 a	0.30	2.91a	0.17 a	0.67b	1.92 c	50.2	0.500 b	1.88 c
נווה יער	1.33bc	0.25	2.32b	0.17 a	0.68b	2.34 bc	45.5	0.401 cd	2.20bc
רבדים	1.33bc	0.24	2.26b	0.17 ab	0.62b	2.41 bc	44.8	0.382 cd	2.32bc
רחובות	1.16 c	0.28	1.99b	0.13 bcd	0.96a	3.55 a	68.2		
היסטוריה									
חדש	1.40	0.27	2.49a	0.14	0.73	2.70	58.8	0.449	2.69b
ישן	1.33	0.27	2.24b	0.15	0.69	2.81	52.4	0.470	2.92a
משתנה	ד"ח [±]	מובהקות לפי ערך F							
קרקע	7	<0.0001	0.064	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0324	<0.0001	<0.0001
היסטוריה	1	0.052	0.781	0.0002	0.290	0.077	0.497	0.2215	0.141

[±] ד"ח – דרגות חופש. בניסוי הראשון בחיטה הערך 5 ובאחרון בתירס 6