

השפעת ממשקי חקלאות שונים במרחב שקמה על מאזן גזי החממה

שירות המערכת האקולוגית - ויסות הרכב אטמוספרי

יוני וייץ¹ וז'זה גרינצוויג²

¹ מכון דש"א - לשמירת השטחים הפתוחים, תל אביב; ² פקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים, רחובות

השירות: ויסות הרכב אטמוספרי (כולל ע"י לכידת פחמן). התועלת: מיתון התחממות גלובלית

1. מבוא

הפחתת פליטות גזי החממה ולכידת פחמן במאגרים קרקעיים עשויים לתרום דרך ויסות מאזן ההרכב האטמוספרי למיתון תהליכי שינויי האקלים העולמיים ולהפחית את קצב ההתחממות גלובלית (IPCC 2007). שירות המערכת ויסות ההרכב האטמוספרי ותועלתו באים לידי ביטוי ברמה העולמית ולא בהכרח באזור המחקר הספציפי. בחינת השפעתו של ממשק חקלאי על השירות של ויסות הרכב אטמוספרי דורשת התייחסות למאזן גזי החממה בחקלאות על כל היבטיו, כולל גידול הצמח וקציר היבול, תהליכים מיקרוביאליים בקרקע הקשורים ביצור גזי חממה, שריפת דלקים בעת הפעילות בשדה ויצור והובלת התשומות החקלאיות (חומרי הדברה, דשנים ועוד). לכל התהליכים הנ"ל תפקיד חשוב במאזן גזי החממה בחקלאות (טבלה 1 בנספח). הפעילות החקלאית העולמית מוערכת כמקור ל-14% מהפליטות העולמיות של גזי החממה, לא כולל השפעת השינוי ביעודי הקרקע משטח טבעי לשטח חקלאי (איור 2 בנספח). נושא זה תופס כיום מקום מרכזי במחקר העולמי והוא בעל השלכות קריטיות על הקיימות הסביבתית ועל ביטחון המזון לטווח הארוך (Foley et al. 2011).

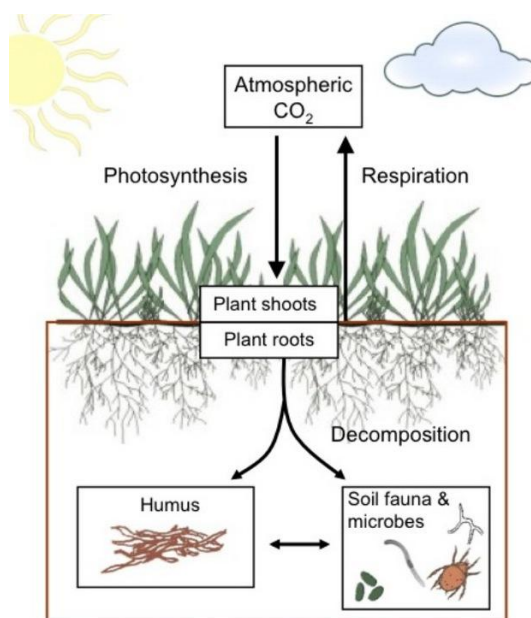
גזי החממה מוכרים כמשפיעים על תהליכי שינוי האקלים העולמיים, אשר בין השפעותיה המקיפות עשויות להימצא התחממות כדור הארץ, פגיעה על ידי נזקי הצפות, בצורת באזורים צחיחים וצחיחים למחצה, פגיעה ביצור מזון, פגיעה במגוון הביולוגי והשלכות גיאופוליטיות (Root et al. 2003). גזי החממה המשמעותיים ביותר הגורמים להתחממות העולמית הם פחמן דו-חמצני (CO₂), חמצן דו-חנקני (N₂O) ומתאן (CH₄). השפעת שני הגזים האחרונים הנה גדולה בסדרי גודל מזו של פחמן דו-חמצני, אולם כמות הפליטות שלהם קטנה יותר (איור 1 בנספח). עלייה בריכוז גזי החממה באטמוספירה היא בעיקר תוצאה של שריפת דלקים פוסיליים (נפט, פחם ועוד) ושינוי ייעודי קרקע במהלכו נפלטו גזי חממה על ידי שריפת ביומסה (עצים ועוד) ופירוק חומר אורגני בקרקע (Vitousek 1994). בין המדענים בעולם ישנה הסכמה לכך שישנו הכרח במיתון פליטות גזי החממה ובהיערכות לשינויים הצפויים מכך (Foley et al. 2011).

אחת ההשפעות המשמעותיות של שינוי שימוש הקרקע היא הירידה במאגרי הפחמן בצומח ובקרקע. שינוי זה הוא תוצאה של הפיכת שטח טבעי או טבעי למחצה, כגון יער או חורש לשטח בשימוש האדם, כגון שדה חקלאי. המעבר משטחים פתוחים לשטחי חקלאות מפחית מכמות

הפחמן בקרקע ב-50%-30% תוך 50-100 שנים באזורים ממוזגים (כדוגמת ישראל) ועד 75% מכמות הפחמן תוך 20-50 שנה באזורים טרופיים (Lal 2008). התהליך הינו משמעותי במיוחד במדינות מתפתחות (Confalonieri et al. 2007).

בקנה המידה העולמי, כמות הפחמן האורגני בקרקע גדולה משמעותית מכמות הפחמן בביומסה הצמחית ובאטמוספירה, ועיקרה ביערות טרופיים וצפוניים (Eswaran et al. 1993, Janzen 2004). שינויים בריכוזי הפחמן ניתנים למדידה על ידי בחינה של מחזור הפחמן בטבע, אשר התהליכים העיקריים המעורבים בו הם קיבוע פחמן אטמוספרי לתרכובות אורגניות ופירוקן בתהליכי נשימה של הצומח וצריכתם על ידי הצרכנים בקרקע (איור 1).

שאריות הצומח אשר נשארות בשדה בתום מחזור גידולים עוברות תהליכים שונים של פירוק בקרקע ליצירת חומר אורגני או Humus (איור 1). בתהליכי הפירוק של שאריות הצמחים ובהמשך גם של החומר האורגני בקרקע משתחרר פחמן דו-חמצני לאטמוספירה על ידי הנשימה של אורגניזמים רבים (בע"ח, פטריות וחיידקים). בסופם של תהליכים אלו נשאר אחוז מסוים מהחומר האורגני בפרופיל הקרקע והוא המאגר העיקרי של פחמן אורגני בקרקע (SOC). כמות הפחמן האורגני אשר תימצא במאגר הקרקעי לטווח ארוך הנה התוצאה של המאזן בין כמות החומר העוברת משכבת הצומח לקרקע לבין קצב הפירוק של החומר הצמחי המחזיר את הפחמן לאטמוספירה בתור פחמן דו-חמצני (Alvaro-Fuentes and Paustian 2010, Palm et al. 2013).



איור 1. מאזן הפחמן בין הקרקע לאטמוספירה, תהליכי קיבוע פחמן ונשימה. (Onlt&Schulte 2012).

הפחמן האורגני אשר נשאר בקרקע (Soil Organic Carbon - SOC), אחרי תהליכי הפירוק והנשימה הרבים הנו מאגר המשמש כ"מבלע" (Sink) עבור הפחמן הדו-חמצני מהאטמוספירה (Janzen 2004). הגדלתו של מאגר זה עשויה להפחית במידה את עומס הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה ולהפחית מהשפעתו כגז חממה (Power 2010).

באזורים יובשניים או יובשניים למחצה, בהם זמינות המים הינה הגורם המגביל העיקרי על הגידול (כדוגמת ישראל), נמצא כי אי-פליחה משפר את תנאי הלחות בקרקע ובעקבות זאת עשוי לתרום לגידול הצמח ולבניית מאגר הפחמן, זאת מבלי להאיץ את קצב הפירוק של החומר האורגני (Blanco-Canqui and Lal 2008, Ogle et al. 2011). בבתי גידול יובשניים, פוטנציאל אגירת הפחמן בקרקע (כלומר, הכמות המקסימאלית של הפחמן שעשויה להישאר בתוך המאגר לטווח ארוך) תלויה בגורמים רבים, כגון סוג הקרקע והרכבה המינרלי והמכאני, כך שאופי תהליך הצטברות הפחמן תלוי בריכוז ההתחלתי עד להגעה לרוויה (Six et al. 2002). גורם נוסף שנמצא כמשמעותי במיוחד בהגברת הצטברות הפחמן בקרקע באזורים בהם היצרנות הראשונית הנה נמוכה עקב מגבלת מים, הנו כמות הקש הנשארת בשדה לאחר הקציר (Pawlsen et al. 2011).

פליטת חמצן דו-חנקני הינה תהליך טבעי במחזור החנקן בקרקע, אולם הוספה של חנקן כדשן לגידולים מגביר באופן משמעותי את הפליטות לאטמוספירה. זאת במיוחד כאשר תוספת החנקן, כתוצאה משימוש בדשנים סינתטיים, זבל בע"ח או שימוש רב בגידולים המסוגלים להעשיר את הקרקע בחנקן כגון קטניות, נעשה בעודף וחלק מהחנקן לא מנוצל על ידי הצמח (Robertson and Vitousek 2009, Kessel et al. 2013). הגורם המשמעותי ביותר בקביעת כמות פליטות חמצן דו-חנקני תהיה כמות החנקן המשמש לדישון וזיבול, וההבדלים בכמות החנקן המדושנת מושפעים מהממשקים חקלאיים שונים (Davidson 2009).

מטרת העבודה הנוכחית הייתה להעריך את ההשפעות של ממשק חקלאי על פוטנציאל ההתחממות הגלובלית של ייצור חיטה בתנאי האקלים צחיח למחצה. השערתנו הייתה כי פוטנציאל ההתחממות תרד עם המעבר עיבוד קרקע קונבנציונלי לעיבוד משמר.

2. שיטות העבודה

מאזן גזי החממה של שדה חקלאי חושב למסגרת זמן של שנה אחת לדונם והוא מורכב משטפים בקרקע (שינויים בפחמן האורגני בקרקע, שטפי N_2O) ומשטפים הנובעים מהתשומות החקלאיות (פליטת גזי חממה משריפת דלקים בעת עיבוד, ייצור והשמת דשנים וחומרי הדברה ועוד). השימוש בדלקים בפעילות החקלאית והשימוש בחומרים שונים הוערכו על בסיס מידע שהתקבל מרכזי פלחה בשני קיבוצים - דורות ורוחמה, אשר מייצגים שתי חלופות של שיטות עיבוד באזור הפרויקט. הערכת הפליטות מהשימוש בדלק והשימוש בחומרים שונים התבססה על מחקרים מהעולם (Gelfand et al. 2013).

מרכיבי המאזן של גזי חממה GHG_{bal} ביחידות אקויוולנטיות ל- CO_2 ($gCO_2e\ m^{-2}\ yr^{-1}$) או $(tCO_2e\ ha^{-1}\ yr^{-1})$, כאשר פליטה נטו של גזי חממה מסומנת כאן בסימן שלילי:

$$GHG_{bal} = F_{SOC} + F_{ag_in} + F_{N_2O} + F_{CH_4}$$

משוואה 1

כאשר F_{SOC} הוא שינוי במאגר הפחמן האורגני בקרקע (סימן חיובי או שלילי), F_{ag_in} הם כל השטפים בסימן שלילי הקשורים בתשומות החקלאיות, F_{N_2O} הוא פליטת החמצן דו-חנקני מהקרקע כתוצאה משימוש בחומרי דישון שונים (סימן שלילי). F_{CH_4} הוא מאזן המתאן, שהוערך כשטף קטן וזניח בשדות מהסוג הזה (Palm et al. 2013). בסקר זה התבצעה הערכה כמותית של פליטת הפחמן מהתשומות החקלאיות (F_{ag_in}) ופליטת החמצן דו-חנקני מהקרקע (F_{N_2O}) יחד עם הערכה כמותית חלקית של השינוי במאגר הפחמן הקרקעי (F_{SOC}), בהשוואה בין שדות הקיבוצים דורות, שבו שיטות עיבוד קונבנציונליות, ורוחמה המאמץ מאפיינים של עיבוד משמר. מאגר הפחמן בתוך הביומסה הצמחית של הגידול אינו מחושב במשוואה שכן רובו ככולו נצרך וחוזר לאטמוספירה תוך תקופה קצרה.

2.1. מאגר הפחמן האורגני בקרקע

טרם נערכו מחקרים בארץ המעריכים באופן כמותי את מאזן גזי החממה בשטחי חקלאות. פוטנציאל השינוי במאגר הפחמן הקרקעי כתוצאה ממעבר לאי-פליחה והשארית הקש הוערך על בסיס מחקרים מאתרים שונים בעולם בעלי מאפיינים סביבתיים דומים לאזור הפרויקט. על בסיס סקרי קרקע שונים באזור שקמה ובאתרים נוספים בעלי אופי סביבתי דומה הוערך כי הפוטנציאל לאגירת פחמן אורגני בקרקע באזור הנו נמוך למדי ואינו עובר את 1-2% פחמן אורגני בשכבת הקרקע העליונה (ג.אשל, מידע בע"פ, 2014). ריכוזים של 1-2% פחמן אורגני נמצאו ב-20 ס"מ העליונים של הקרקע ביער יתיר שבצפון הנגב (Grünzweig et al. 2007).

שיטות העיבוד באזור הפרויקט אינן מייצגות את שיטות הקצה המתוארות במחקרים אלא מהוות רמות שונות של עיבוד מופחת (דורות - קילטור כל שנה וחריש אחת למספר שנים, רוחמה - שיטת אי הפליחה בשילוב עם עיבוד אחת למספר שנים). דבר זה מהווה גורם מגביל נוסף בהשוואה למחקרים קיימים. השארית הקש בשדה, שנמצאה משמעותית כמו אי-פליחה במחקרים שונים, עשויה לתרום באופן ניכר לכמות החומר האורגני בקרקע באזור הפרויקט שהנו עני למדי בפחמן קרקעי.

התמונה המתקבלת מהשוואה בין מחקרים שונים אשר בחנו את ההשפעה ארוכת הטווח על מאגר הפחמן האורגני בקרקע הנה של שונות גדולה בתוצאות בין אתרים שונים. ההערכה היא כי הבדלים בגורמים סביבתיים, מחזור הגידולים והיסטוריה של בתי הגידול מהווים גורמים היוצרים את השונות הרבה המקשה על הערכה כמותית של השינוי במאגר הפחמן בקרקע. במחקרים שביצעו ניסוי שדה ושנבחרו כ"מייצגים" אתרי מחקר דומים בארץ, נמצא כי טווח השינוי בין שיטות עיבוד קונבנציונאליות (CT) לממשק אי-פליחה מלא (NT) או פליחה מצומצמת (RT) הנו 5-25% מכמות הפחמן האורגני בקרקע לאחר 10-20 שנה (טבלה 1). שני המחקרים אשר

הציגו תוצאות של מודלים מצאו שונות גדולה יותר מאשר ניסויי השדה. ישנם מחקרים בהם נמצא בהם נמצא שנשארת בשדה והשפעת מחזור הגידולים (Luo et al. 2011, Palm et al.) (2013).

טבלה 1. תוצאות ניסויים ממחקרים נבחרים בעולם (CT-conventional tillage, RT-reduced tillage, NT-no tillage).

ספרות	משך המחקר (בשנים)	שינוי בין RT או NT ל-CT בתום המחקר (%)	שיטות העיבוד במחקר	מרקם וסוג הקרקע (במידה וישנו מידע)	משקעים (מ"מ/שנה)	ארץ מקור
ניסוי						
Sombrero & de-Benito 2010	10	15,25	NT, RT/CT	loamy-clay	448	ספרד
Mrabet et al. 2001	11	10-15	NT/CT	clayey Vertic Calcixeroll	358	מרקו
Chan et al. 1992	10	10	RT/CT	sandy-loam	550	אוסטרליה
Dalal et al. 1991	20	5	NT/CT	clay	685	אוסטרליה
Saffigna et al. 1989	20	7	NT/CT	Vertisol (Entic Pellustert)	698	אוסטרליה
מודל						
Alvaro-Fuentes & Paustian 2010	90	30	NT/CT	fine-loamy, mixed, thermic Xerollic Calciorthid	350	ספרד
Luo et al. 2011	120	non-significant	NT/CT	clay	467	אוסטרליה

במחקר ארוך טווח שנערך בארץ בתחנת משרד החקלאות בגילת, נמצא כי שילוב של אי-פליחה רצוף בשילוב עם השארת קש מלאה למשך 18 שנה הובילה לעלייה בריכוז הפחמן האורגני בקרקע מ-0.6-0.7% עד ל-1.1% ב-5 ס"מ העליונים של הקרקע השוות ערך לעלייה של 320 ק"ג פחמן אורגני לדונם (Eshelet al. 2014). עלייה משמעותית זו נכונה רק לשכבה דקה יחסית של הקרקע (5 ס"מ) ובמשק "אידיאלי" של אי-פליחה רצוף המשלב השארת קש מלאה. מחקר על השפעת ייעור בצפון הנגב על אגירת פחמן מצא כי 35 שנים לאחר הנטיעות עלה מאגר הפחמן האורגני בקרקע ב-375 ק"ג לדונם ב-5 ס"מ העליונים של הקרקע ב-1,750 ק"ג לדונם עד לעומק של 50 ס"מ (Grünzweig et al. 2007).

שילוב של אי-פליחה רצוף בשילוב עם השארת קש מלאה למשך 18 שנה הובילה לאגירה של כ-19 ק"ג פחמן אורגני או 71 ק"ג CO₂e לדונם לשנה ב-5 ס"מ העליונים של הקרקע (Eshel et al.) (2014). המחקר ביער יתיר מצביע על פוטנציאל אגירה באזורים צחיחים למחצה של 11 ק"ג פחמן לדונם לשנה לעומק קרקע עד 5 ס"מ ושל 50 ק"ג פחמן לדונם לשנה לעומק עד 50 ס"מ במשך

לפחות 35 שנה (Grünzweig et al. 2007). עליה במאגרים אלה שוות ערך ל- 39 ו- 183 ק"ג CO₂e לדונם לשנה, בהתאמה. המחקרים הנבחרים מהספרות (טבלה 1) מצביעים על 0.3-2.5% שינוי לשנה בפחמן אורגני בין עיבוד משמר לעיבוד קונבנציונלי. על פי נתונים אלה ובמאגר מוערך של 2,300 ק"ג פחמן אורגני לדונם עד העומק של 50 ס"מ (על פי המחקר בבתה של סירה קוצנית ליד יער יתיר), ניתן להעריך שינוי של 25-210 ק"ג CO₂e לדונם לשנה. אמנם, גם עלייה משמעותית בכמות הפחמן האורגני בקרקע איננה עשויה להימשך לטווח ארוך והיא עשויה לפחות עם השנים עד להגעה לרמת "רוויה" (Six et al. 2002).

בשדות רוחמה נשאר שלף בגובה של כ-10 ס"מ ללא פעילות רעייה. בשדות דורות, קציר הקש הינו עד לגובה של 5 ס"מ מהקרקע, ויש בשדות מרעה עונתי בדרך כלל. ניתן להעריך כי גורם זה ישפיע גם כן על הצטברות החומר האורגני בקרקע לטווח הארוך.

2.2. חישוב התשומות החקלאיות

דלק – נתונים לגבי צריכת הדלק בשימוש בכלים ייעודיים בשדה חושבה ליחידת שטח של דונם ועל בסיס הערכה כללית של צריכת דלק מהחקלאים. נתונים מפורטים לגבי שימוש בכלים וצריכת הדלק מצויים בטבלאות 2 ו- 3.

טבלה 2. צריכת דלק שנתית בפעילות חקלאית בשדות רוחמה (ר. פולקו, מידע בע"פ, 2014).

רוחמה			
פעילות חקלאית	תדירות (שנתית)	צריכת דלק (L/dunam)	צריכה שנתית (L)
זריעה+דישון	0.75	0.75	0.56
זריעה+גימום	0.25	0.75	0.19
דישון	0.25	0.75	0.19
פיזור קומפוסט	0.1	0.75	0.08
ריסוס קיץ	0.2	0.5	0.1
ריסוס	1	1	1
משתת	0.19	1.5	0.29
מעגלה	0.19	1.5	0.29
מעגלה שנייה + דיסוק	0.06	1.5	0.09
קציר+מכבש	0.5	2.5	1.25
קומביין	0.5	1	0.5
מכבש	0.5	1	0.5
גיבוב	0.5	0.5	0.25
סה"כ			5.29

טבלה 3. צריכת דלק שנתית בפעילות חקלאית בשדות דורות (ע. יעקובי, מידע בע"פ, 2014).

דורות			
צריכה שנתית (L)	צריכת דלק (L/dunam)	תדירות (שנתית)	
1.5	1.5	1	קלטור לפני זריעה
0.50	1.5	0.33	קלטור נוסף לעשבים
1	1	1	זריעה
1	1	1	דישון
0.33	1	0.33	זיבול
1	1	1	ריסוס
0.26	1.5	0.17	חריש
0.19	1.5	0.125	משתת
0.19	1.5	0.125	ארגז
1	1	1	קציר
1	1	1	מכבש
7.97			סה"כ

חומרי דישון והדברה – הדישון ברוחמה גבוה במקצת מזה שבדורות (8-6 ק"ג מול 5 ק"ג חנקן צרוף לדונם, בהתאמה). משמעות הייצור של חומרי דישון והדברה המשוקללת לפליטת גזי חממה נמצאה בדורות כ- 25-30 ק"ג CO₂ לדונם וברוחמה כ- 30-40 ק"ג CO₂ לדונם. החישוב נעשה ע"פ Gelfand et al. (2013). הגורם העיקרי להבדל בין המשקים הנו שימוש רב יותר ב- N בדישון ברוחמה. עלות ייצור הדשן החנקני, מבחינת פליטת גזי חממה הנה גבוהה באופן משמעותי (כ- 4.5 ק"ג CO₂ עבור ייצור 1 ק"ג N צרוף) מעלות ייצור חומרי ההדברה (Gelfand et al. 2013).

2.3. פליטות חמצן דו-חנקני (N₂O)

כמות הפליטות חושבה על בסיס כמות החנקן המגיעה לשדה במשך שנה בצורת דשן, זבל או קומפוסט. ההערכה הקיימת הינה שכ- 1% מכמות החנקן הנכנסת לשדה (אורגני ומינרלי), משתחררת בצורת חמצן דו-חנקני אשר השפעתו כגז חממה הנה גבוהה פי 298 מזו של פחמן דו-חמצני (De-Klein et al. 2006). בדומה לפליטות הנובעות מתהליכי הייצור, גם כאן – עיקר הפליטה נובע משימוש בדשן רב.

דורות – כמות החנקן הנפלט כחמצן דו-חנקני, מדישון ושימוש בזבל עופות הינה כ- 0.046 ק"ג לדונם, השווה ערך ל- 13.7 ק"ג פחמן דו-חמצני.

רוחמה – כמות החנקן הנפלט כחמצן דו-חנקני הינה כ- 0.072-0.092 ק"ג לדונם, השווה ערך ל- 21.6-27.6 ק"ג פחמן דו-חמצני.

3. סיכום

מהשוואת פליטות גזי החממה אשר מקורן בייצור חומרי דישון והדברה ושריפת דלקים בפעילות בתוך השדה - על בסיס נתוני החקלאים עולה סך הפליטות הבא:

דורות (ק"ג CO₂e לדונם לשנה):

$$21.1 \text{ מצריכת דלק} + 25-30 \text{ מייצור חומרי דשן והדברה} + 13.7 \text{ מפליטת } N_2O = 60-65$$

רוחמה (ק"ג CO₂e לדונם לשנה):

$$14.0 \text{ מצריכת דלק} + 30-40 \text{ מיצור חומרי דשן והדברה} + 21.6-27.6 \text{ מפליטת } N_2O = 66-82$$

בשדות רוחמה, שם ממשק העיבוד הינו של הפחתה משמעותית יותר מהעיבוד הינו כ-82-66 ק"ג פחמן דו-חמצני לדונם לשנה, בעוד שבשדות דורות, בהם ישנו עיבוד קרקע אינטנסיבי יותר סך הפליטות עומד על 60-65 ק"ג לדונם לשנה. נמצא כי ישנה תרומה באותו סדר גודל לכל אחד משלשת הגורמים – שימוש בחומרי דישון וחומרי הדברה (למעשה, עיקר התרומה הנה עקיפה - בייצור דשן חנקני), שימוש בדלקים בשדה ופליטות חנקן בצורת חמצן דו-חנקני. נראה כי על אף הפחתת עיבוד הקרקע, בהשוואה בין דורות לרוחמה מאזן פליטת גזי החממה ברוחמה גבוה יותר, דבר שנובע מדישון החנקן ובעקבות כך פליטת חמצן הדו-חנקני הגבוהים יותר. אולם, הפחתה בעיבוד הקרקע עשוי להביא לאגירה גבוהה יותר של פחמן אורגני בקרקע. יש לציין, שרמת הדישון תלויה בגורמים רבים, ביניהם ההרגלים של החקלאי, ולאזן דווקא קשורה בשיטת העיבוד או ברמת פוריות הקרקע (תקשורת אישית עם חקלאי במרחב שקמה).

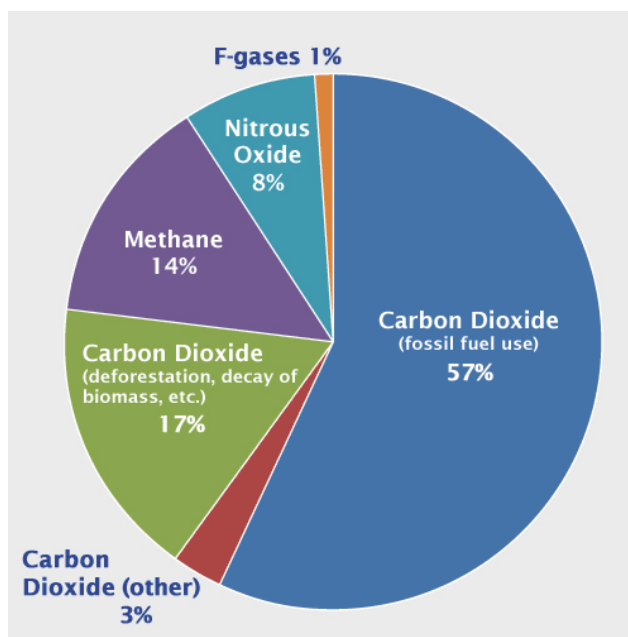
התרומה של הצטברות הפחמן בקרקע עשויה להיות משמעותית למאזן הכולל של גזי החממה בתוך המערכת החקלאית. ההערכה היא שקצב הצטברות הפחמן בקרקע לטווח הארוך בשדות רוחמה למשל יהיה איטי מזה שתועד במחקרם של Eshel et al. (2014). זאת בגלל שממשק אי-הפליחה אינו רצוף ובגלל שכמות הקש הנשארת בשדה נמוכה יחסית. השארת כמות גדולה יותר של קש בשדה (המומלץ במחקרים הוא כ-300 ק"ג לדונם) והימנעות מעיבוד ופליחת הקרקע, יוכלו להעלות את ריכוז הפחמן הקרקעי לאורך שנים ובכך לתרום לירידה בריכוז פחמן דו-חמצני באטמוספירה. עם זאת, היות ומחזור גידולים ובעיות חקלאיות אחרות מקשות על מעבר לממשק אי-פליחה רציף, והיות ומחירי הקש גבוהים בישראל – ישנה סבירות נמוכה ליישום מלא של המלצות אלה. אולם, כאשר מדובר בסדרי גודל כאלה של הבדלים בין שיטות עיבוד (25-210 ק"ג CO₂e לדונם לשנה), ברור שלאגירת פחמן בקרקע עשויה להיות משמעות רבה במאזן גזי חממה בעיבוד משמר, גם אם הממשק החקלאי אינו אופטימלי. בהתחשב באגירת פחמן בקרקע, מאזן גזי החממה במשקים שנחקרו עשוי לנטות לטובת רוחמה, על אף השימוש הרב בדשן חנקני. אין צורך לומר שללא בדיקות נוספות בשטח לא ניתן לדעת את ההבדלים האמיתיים באגירת פחמן בין ממשק עיבוד משמר כמו ברוחמה לממשק העיבוד הנהוג בדורות.

על בסיס השוואת פליטות גזי החממה בין הגורמים המשפיעים ביותר על מאזן גזי החממה בשדות בעל נוכל להעריך כי הפחתה בפעילות החקלאית – שימוש בכלים כבדים והימנעות מדישון עודף, יובילו להפחתה בפליטות.

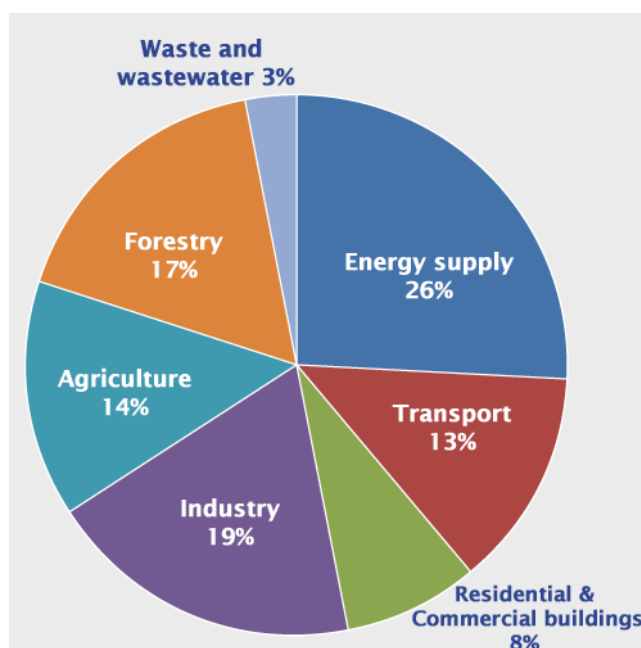
המלצות להמשך – טרם נאספו נתונים לגבי הרכב הקרקע והחומר האורגני בפרופיל הקרקע. למטרת מחקר המשך ממשי של התופעה ישנה חשיבות לאיסוף נתונים ארוך טווח של כל פרופיל הקרקע בשדות ובשטחים פתוחים באזור אשר יאפשר בחינה ברורה של חלופות הממשק השונות על מאגר הפחמן הקרקעי. כמו כן, על מנת לאפשר כימות מדויק יותר של התשומות החקלאיות והשפעתן – יש להיערך בשיתוף עם החקלאים לאיסוף נתונים מדויק לאורך השנה ומעבר לה.

תודות: תודתנו נתונה לגיל אשל, איליה גלפנד, פנחס פיין, אלון מאור, דוד בונפיל, רמי פולקו ועמוס יעקובי על העזרה בעיבוד ואיסוף הנתונים.

נספחים



איור 1. חלוקה בין גזי החממה השונים הנפלטים ברמה העולמית (IPCC 2007)



איור 2. מקורות פליטות גזי חממה ברמה העולמית (IPCC 2007)

Table 1. Annual (2010) agricultural emissions by source categories for the globe and for the US

Source	Worldwide		US	
	Tg C	%	Tg C	%
N ₂ O soil	770	26%	56	42%
CH ₄ enteric fermentation	489	17%	38	29%
CO ₂ biomass burning	183	6%	0.1	0%
CH ₄ rice	168	6%	2	1%
CH ₄ and N ₂ O manure management	113	4%	18	14%
CO ₂ inputs and operations	321	11%	19	14%
CO ₂ land conversion and soil C change	900	31%	-277	
Total without land conversion	2044		133	
Total with land conversion	2944		-144	

Notes: Global estimates for emissions related to land-use change are from Friedlingstein *et al.* (2010); all other sources are from Smith *et al.* (2007) and Flynn and Smith (2010). US estimates are from US EPA (2011) and USDA (2011).

מקורות

Alvaro-Fuentes, J. and Paustian, K. 2010. Potential soil carbon sequestration in a semi arid Mediterranean agroecosystem under climate change: quantifying management and climate effects. *Plant Soil*, 338:261–272.

Blanco-Canqui, H. and Lal, R. 2008. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. *Soil Science Society of America Journal*, 72: 693–701.

Chan, K.Y., Roberts, W.P. and Heenan, D.P. 1992. Organic carbon and associated soil properties of a red Earth after 10 years of rotation under different stubble and tillage practices. *Australian Journal of Soil Research*, 30: 71–83.

Confalonieri, U., Menne, B. and Akhtar, R. 2007. Human Health. In M.L. Parry, O.F. Canziani, J. P. Palutikof *et al.* (Eds.), *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK. Cambridge University Press. pp. 391–431.

Dalal, R.C., Henderson, P.A. and Glasby, J.M. 1991. Organic matter and microbial biomass in a Vertisol after 20 yr of zero tillage. *Soil Biology and Biochemistry*, 23: 435–441.

Davidson, E.A. 2009. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860. *National Geoscience*, 2: 659–662.

De Klein, C., Nova, R.S.A., Ogle S., Smith, K.A., Rochette P., Wirth, T.C., McConkey, B.G., Mosier, A. and Rypdal, K. 2006. N₂O emissions from managed

- soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. and Tanabe, K. (eds). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and other Land Use. Institute for Global Environmental Strategies, Hanagawa, Japan. pp 11.1–11.54.
- Eshel, G., Lifschitz, D., Bonfil, D.J. and Sternberg, M. 2014. Carbon exchange in rainfed wheat fields: Effects of long-term tillage and fertilization under arid conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 195: 112–119.
- Eswaran, H., Van den Berg, E. and Reich, P. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 192–194.
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O'Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockstrom, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D. and Zaks, D.P. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478: 337–342.
- Gelfand, I., Sahajpal, S., Zhangm X., Izaurralde, R.C., Gross, K.L. and Robertson, G.P. 2013. Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest. *Nature*, 493: 514–517.
- Grünzweig, J.M., Gelfand, I., Fried, Y. and Yakir, D. 2007. Biogeochemical factors contributing to enhanced carbon storage following afforestation of a semi-arid shrubland. *Biogeosciences*, 4: 891–904.
- IPCC. 2007. In: R.K. Pachauri and A. Reisinger (ed.) *Climate change 2007 :Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Janzen, H.H. 2004. Carbon cycling in earth systems - a soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104:399–417.
- Kessel, C., Venterea, R., Six, J., Adviento-Borbe, M.A., Linnquist, B. and Groenigen, K.J. 2013. Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 19: 33–44.
- Lal, R. 2008. Sequestration of atmospheric CO₂ in global carbon pools. *Energy and Environmental Science*, 1:86–100.
- Luo, Z., Wang, E., Sun, O.J., Smith, C.J. and Probert, M.E. 2011. Modeling long-term soil carbon dynamics and sequestration potential in semi-arid agro-ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151: 1529–1544.
- Mrabet, R., Saber, N., El-Brahli, A., Lahlou, S. and Bessam, F. 2001. Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. *Soil and Tillage Research*, 57: 225–235
- Ogle, S.M., Swan, A. and Paustian, K. 2012. No-till management impacts on crop productivity, carbon input and soil carbon sequestration. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 149: 37–49.
- Ontl, T.A. and Schulte, L.A. 2012. Soil Carbon Storage. *Nature Education Knowledge* 3(10):35.

- Palm, C., Blanco-Canqui, H., De Clerck, F., Gatere, L. and Grace, P. 2013. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 187: 87-105.
- Powlson, D.S., Whitmore, A.P. and Goulding, K.W.T. 2011. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*, 62:42-55.
- Power, A.G. 2010. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. . *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B* 365: 2959–2971.
- Ryan, M.G., Harmon, M.E., Birdsey, R.A., Giardina, C.P., Heath, L.S., Houghton, R.A., Jackson, R.B., McKinley, D.C., Morrison, J.F., Murray, B.C., Pataki, D.E. and Skog, K.E. 2010. A synthesis of the science on forests and carbon for US forests. *Issues in Ecology*, 13: 1–16.
- Robertson, G.P. and Vitousek, P.M. 2009. Nitrogen in agriculture: balancing then cost of an essential resource. *Annual Review of Environment and Resources*, 34: 97–125.
- Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider, S.H., Rosenzweig, C. and Pounds, J.A. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421:57–60.
- Saffigna, P.G., Powlson, D.S., Brookes, P.C. and Thomas, G.A. 1989. Influence of sorghum residues and tillage on soil organic matter and soil microbial biomass in an Australian vertisol. *Soil Biology and Biochemistry*, 21: 759–765.
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A. and Paustian, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241: 155-176.
- Sombrero, A. and de Benito, A. 2010. Carbon accumulation in soil. Ten-year study of conservation tillage and crop rotation in a semi-arid area of Castile-Leon, Spain. *Soil and Tillage Research*, 107: 64-70.
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J. and Melillo, J.M. 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*, 277: 494-499.