

עבודת סמינריון

ביוצ'אר, טכנולוגיה חקלאית עתיקה: מהאמזונס לגן הבוטני באורנים

מרצה: ד"ר מוקי גרוס

קורס: חשיבה סביבתית

מכללת אורנים

2.11.2014

מגיש: אסף צ'רטקוף

ת.ז. 039075312

050-6558146

asaf.chertkoff@gmail.com

תודות

תודה לד"ר מוקי גרוס על האמון, ההנחיה וההתלהבות שליוותה אותי לאורך כל המחקר. תודה לאורן עזרי שאתגר אותי עם הרעיון, וליונתן גל על הטיפ המנצח. תודה לחאטם מבית מרגולין על העזרה עם המדידות והשקילות. תודה לאינדיאנים באמזונס על השיתוף הטכנולוגיה שלהם (חבל שרק לא השארתם את ספר ההוראות, זה היה עושה את זה הרבה יותר קל...). ולבסוף, תודה אדירה לעפרה ואילן על סבלנות אין קץ. לא הייתי יכול לעשות זאת בלעדיכם (מה לעשות, משפחה לא בוחרים...).

"שום טכנולוגיה לא נותנת מענה לתרבות שאינה יודעת שובע - תרבות המקדשת את

הצריכה והנהתנות" (אטינגר, ל. 2007)

סתיו 2014, א.צ.

תוכן עניינים

4 עמ'	רשימות איורים וקיצורים
5 עמ'	מבוא
7 עמ'	סקירת ספרות
7 עמ'	אדמה שחורה מהאמזונס
12 עמ'	טרה פרטה נובה – טכנולוגיה עתיקה בשימוש מודרני
12 עמ'	מטרה פרטה לביוצ'אר
13 עמ'	תהליך הפקת הביוצ'אר
14 עמ'	הביוצ'אר – מבנה ותפקוד
14 עמ'	ביוצ'אר כטכנולוגיה לקיבוע פחמן
16 עמ'	ביוצ'אר בחקלאות
17 עמ'	ביוצ'אר במצעים מנותקים
20 עמ'	מתודולוגיה ושיטות מחקר
21 עמ'	בחינת אחוזי נביטה ושרידות
22 עמ'	שקילת ביומאסה יבשה
23 עמ'	ניתוח נתונים
23 עמ'	נביטה ושרידות
24 עמ'	ביומאסה יבשה לגר'
25 עמ'	דיון
29 עמ'	סיכום
31 עמ'	נספחים
31 עמ'	נספח א' – ניסוי מקדים
34 עמ'	בבליוגרפיה

רשימות: איורים וקיצורים

רשימת האיורים

- איור 1: חפירות באתר טרה-פרטה, בו גיל הביוצ'אר מוערך בכ-800 שנים עמ' 9
- איור 2: תמונה מיקרוגרפית של חלקיק ביוצ'אר טיפוסי עמ' 13
- איור 3: מתקן להכנת ביוצ'אר, זהה לזה שבו השתמשנו עמ' 20
- איור 4: שניים ממיכלי השטיפה בהם הושרו התערובות עמ' 21
- איור 5: נביטה ושרידות לאורך זמן. באחוזים מצוין אחוז הביוצ'אר בכל טיפול עמ' 23
- איור 6: ממוצעים, שגיאת תקן ודמיון לפי קבוצות (מבחן טוקי), המסומנות ב a, b ו c עמ' 24
- איור 7: הבדלים בין הקבוצות בעין בלתי מזוינת במגש מס' 4 עמ' 31

רשימת קיצורים

ADE = Amazonian Dark Earth = טרה פרטה

SAB = Slash-and-Burn

SOM = Soil organic matter = החומר האורגני בקרקע

SOC = Soil Organic Carbon = הפחמן האורגני בקרקע

CEC = Cation Exchange Capacity = קיבול קטיונים חליפים (קק"ח)

העומס הגדל על שירותי המערכת האקולוגית מעמיד את האנושות כולה, לא פחות, בפני אתגרים רבים. כדרך של מערכות אקולוגיות, רבות מן הבעיות חוצות גבולות ובימים וקשורות זו לזו. העלייה בפחמן האטמוספרי עקב גורמים שונים, ביניהם העליה בפליטות הפחמן שמקורם בפעילות אנושית, קשורה בקשר הדוק בכמות הפחמן המקובע בקרקע (Soil Organic Carbon – SOC) (Lehmann, 2007). אחד הגורמים המשמעותיים ביותר לירידה ב-SOC העולמי הינו אופיה של החקלאות הקונבנציונאלית (Gurwick, Moore, Kelly, & Elias, 2013; Shackley & Sohi, n.d). מתוך כלל כמות הפחמן שהשתחררה לאטמוספירה בעקבות צריכת דלקים פוסיליים, כ-60% מיוחסים ל-SOC שנפלט לאטמוספירה כתוצאה מהתדלדלות קרקעות בלבד (Atkinson, Fitzgerald, & Hipps, 2010). כמות החומר האורגני בקרקע (Soil Organic Matter – SOM), ואיתו ה-SOC, אמנם משתנה משמעותית בין הרכבי קרקעות שונים אך בתמונה הגלובלית, ה-SOM מייצגת את מאגר הפחמן הגדול ביותר שנמצא בשיווי משקל בין הביוספירה לאטמוספירה. על כן, שינויים טבעיים או יזומים ב-SOM עשויים להשפיע בצורה משמעותית על מאזן הפחמן הגלובלי, בפרט הפחמן האטמוספרי. זאת ועוד, למרות הקצב האיטי בהיווצרות ה-SOM, בהשוואה לזרמים אחרים במעגל הפחמן, מרכיב זה יציב באופן יחסי לפירוק מיקרוביאלי, יציבות שמאפשרת הצטברות של SOC לאורך זמן (Atkinson et al., 2010).

חקלאות במצע מנותק, למרות מה שניתן לדמיין, אינה פרקטיקה צעירה והיא מתוארכת כבת ארבעת אלפי שנים לפי ציורי קיר מצריים. לאורך ההיסטוריה, חקלאות שכזו הייתה כרוכה במשאבים פיננסיים רבים מאחר שהובלת מצעי השתילה הייתה יקרה לאין שיעור, בהשוואה לימינו. ניתן לומר שרק במאתיים השנים האחרונות, בעקבות המהפכה המדעית, השימוש במשאבים פוסיליים לתחבורה והידע הבוטני והביולוגי המצטבר, הפכה החקלאות במצע מנותק לכדאית מן הבחינה הכלכלית, כשעלתה הדרישה להגדלת תנובה ולגידול מינים אקזוטיים באקלימים קשים (Raviv & Lieth, 2008). על אף מאתיים שנה של ניסיון ומחקר, ממש עד אמצע שנות ה-70 של המאה העשרים, החקלאות במצע מנותק הייתה עדיין מושתתת על מצע מבוסס קרקע - בדרך כלל שליש אדמה מקומית משדה סמוך, שליש כבול ושליש פרלייט. החיפוש אחר מצעי גידול אלטרנטיביים משנות ה-70 ואילך נבע בתחילה משיקולים כלכליים (שינוע מצעים כבדים) ואיכותיים (הקושי באספקת קרקע מקומית נקייה ואיכותית). חיפוש זה

הביא לשינוי הסטנדרט להרכב גנרי חדש שהכיל כשני שלישי כבול וכשליש פרלייט או ורמקוליט, כאשר שלושתם קלי משקל, סופחים מים רבים והכבול אף מכיל חומרי תזונה במידה מסויימת.. מכיוון שפרלייט, ורמקוליט ואפילו כבול הינם משאבים מחצביים, השימוש בהם איננו בר-קיימא לטווח הבינוני והרחוק. בשנים האחרונות ההתעניינות הגוברת סביב יצירת מוצרים ושיטות ייצור מקיימות יותר מביאה לחשיבה מחודשת בתחומי מחקר רבים, ביניהם החקלאות במצע מנותק. מספר אפיקי מחקר החלו בוחנים חומרים בני-קיימא כמו קומפוסט, ביוצ'אר ועוד, שיחליפו חלק, לכל הפחות, ממרכיבי המצעים הקונבנציונאליים (Northup, 2013; Ribeiro et al., 2007).

המושג ביוצ'אר (Biochar), הלחם של המילים Biological ו-Charcoal, אוזכר לראשונה בשנת 1998, ומתאר את התוצר של תהליך הפיחום (פירוליזה – pyrolysis) של ביומאסה (Spokas et al., 2012). בתחום הפקת האנרגיה מביומאסה (שם נקרא פחמן שחור), הביוצ'אר הינו תוצר לוואי של התהליך. ביוצ'אר הינו מרכיב חשוב ב"טרה-פרטה נובה" (Terra Preta Nova - TPN), ניסיון בין זממנו לחיקוי טכנולוגיה חקלאית עתיקה ששימשה שבטים אינדיאנים באמזונס ליצירת אדמה עשירה ופוריה לחקלאות מקרקעות הג'ונגל הדלות (Denevan & Woods, 2004). שיטה עתיקה זו, שתורגלה באמזונס במשך אלפי שנים, הפכה אדמה לעשירה ופוריה עד שגם מאות שנים אחרי שננטשו אותן אדמות על ידי המתיישבים המקוריים, ישנה עדות לפעילות חקלאית על אדמות טרה פרטה ללא צורך בדישון במשך עשורים.

ביוצ'אר ככלל, הינו קל משקל ונקבובי, ואלו הן לפחות חלק מן התכונות החשובות לחומרים המשמשים כמצעי שתילה. כך, ביוצ'אר עשוי להמצא כפתרון מערכתי לשתי בעיות בו זמנית - בעיית קיבוע הפחמן האורגני, ומענה לצורך ההולך וגדל בהרכבי מצעים מנותקים זולים וברי קיימא, כחלופה למצעים מחצביים (Northup, 2013; Solaiman, Murphy, & Abbott, 2012).

מחקר זה מהווה ניסיון צנוע לנסות ולענות על בעיה גלובאלית באמצעות פתרון מקומי וקטן היקף. כאן חוברים שינוי האקלים, שיא תפוקת המשאבים, והתרבות מבוססת הנפט שבה אנו חיים לבעיה רב-מימדית אחת, עליה ניתן אולי לענות באמצעים טכנולוגיים, אך אלו לבד לא יספיקו. טכנולוגיה היא ארגז כלים ותו לא. נדרש מאיתנו לבחור את הכלים המתאימים לכל משימה ומשימה. זו היא תרומה צנועה לחיפוש אחר הכלי המתאים למענה בעיתנו הרב-מימדית, כאן בגן הבוטני, בידיים מפוחמות.

סקירת ספרות

אדמה שחורה מהאמזונס

בשנת 1865, לאחר מלחמת האזרחים בארה"ב מספר קטן של משפחות מן הדרום המובס העדיפו להגר לברזיל מלהישאר בצד המפסיד. המהגרים התיישבו מדרום לעיר סנטרם שבמרכז אגן האמזוניה, ולפי עצת המקומיים שתלו את שדות הטבק וקני הסוכר בקרקעות השחורות, שנודעו כפוריות במיוחד. בתחילת שנת 1870, צ'ארלס פ. הארט, גיאולוג צעיר מאוניברסיטת קורנוול שערך מחקר באזור, התוודע על ידי אותם מהגרים אמריקאיים לעושר הארכיאולוגי המצוי באדמות השחורות. בעקבות מחקרים ראשוניים, בשנת 1874 פרסם הארט את התיאור הרשמי הראשון של ADE (אדמה שחורה מהאמזונס, Amazonian Dark Earth, או בשם הלטיני המקובל טרה-פרטה, Terra Preta de Indio - "האדמה השחורה של האינדיאנים", מקור: פורטוגזית), ארבע שנים לאחר האזכור המצומצם אך המפורסם הראשון, "שחורה ופורייה מאוד", של ג'יימס אורטון, גיאולוג אמריקאי אחר, ב-1870 (Denevan & Woods, 2004). מחקריו של הארט, יחד עם פריירה פניה, ארכיאולוג ברזילאי, היו הראשונים לחשוף את השכיחות, הפיזור הגיאוגרפי וההקשר האנתרופוגני של ה-ADE, אם כי בשלבים הראשונים של המחקר הקשר בין פוריות הקרקע וההתיישבות הילידית באמזונס כלל לא היה מובן (Kawa & Oyuela-Caycedo, 2008).

ככל שהאדמה השחורה צברה פופולאריות בקרב חוקרי קרקע וארכיאולוגים, התמונה הגדולה התבהרה. מרבצי האדמה השחורה שהתגלו היו אחידים בגודלם, בהרבה מן המקרים שטחם לא עלה על דונם אחד (80% מהמרבצים היו קטנים מ-20 דונם, וכמעט תמיד היו ממוקמים בקרבה לגדה הגבוהה של ערוץ מים כלשהו. קנה המידה הגיאוגרפי המדויק נשאר לא ידוע ומוערך בכ-0.1-0.3% (-6,000, 18,000 קמ"ר) מתוך כל אגן האמזוניה (3 מליון קמ"ר בסה"כ). האנומליה הגדולה מכולן, שהפתיעה את החוקרים הראשונים שהשוו ADE עם קרקעות יער טבעיות קרובות היא כמות הפחמן השחור: ב-ADE ניתן היה למצוא פי 64 ויותר פחמן שחור לפי נפח (Glaser, Haumaier, Guggenberger, & Zech, 2001; Lehmann, 2003). עומק הטרה פרטה הממוצע עומד על 0.73 מ' כשהעומק הגדול ביותר שנמדד היה 2 מטרים. עומקים אלו מעידים על תהליך היווצרות ארוך. לפי חישובים ותיארוך פחמן קצב יצירת הטרה פרטה הינו בין 0.002 סנט' בשנה לעד 0.1 סנט' בשנה. על אף שהפער בין ההערכה הנמוכה לגבוהה הוא גדול, ניתן לומר בוודאות כי קצב הייצור הוא איטי מאוד בקנה מידה אנושי (Lehmann, 2003).

כמעט מתחילת המחקר המתועד הייתה הסכמה רחבה בין החוקרים כי אדמות הטרסה פרטה היו מאוכלסות בעבר על ידי שבטים אינדיאנים מקומיים באמזוניה, שכן ברוב החלקות ניתן היה למצוא חרסים המתוארכים לתקופה הפרה-קולומביאנית, בתדירות משתנה בשכבה השחורה העליונה של הקרקע או ממש מתחתיה. בתקופה שלפני הגל האירופאי הראשון שבטים אלו שגשו וחיו בקהילות מפותחות בשטחים יבשים לאורך גדות הנהרות, בדיוק אותם אזורים בהם ניתן למצוא כיום את הטרסה פרטה (Sombroek, 1966). ישנה הסכמה רחבה כי גודל האתר ועומק האדמה השחורה קשורים בקשר ישר עם גודל האוכלוסייה והזמן שבו ישבה במקום. בהשוואה בין אתרי ההתיישבות בעלי ADE לאתרים דומים ללא ADE, אפשר היה להסיק כי ה-ADE בעצמה היא גורם חשוב להצלחת ההתיישבות הילידית באזור, ואף הוצע להשתמש בה כאינדיקטור להתיישבות שכזו (Lehmann, 2003). שאלה שנשארה ללא מענה במשך שנים ארוכות היא שאלת "הביצה והתרנגולת" - האם ההתיישבות האינדיאנית הייתה הגורם האחראי להיווצרות הטרסה פרטה (במכוון או שלא במכוון), או שמא האינדיאנים זיהו את מרבצי הקרקע השחורים כמועילים לחקלאות ולכן בחרו להתיישב בהם.

כבר מן השנים הראשונות של המחקר היו חוקרים שטענו כי הטרסה פרטה נוצרה מהטמנה שיטתית של פסולת מטבח (Denevan & Woods, 2004), וכנגדם קמו אחרים שהתנגדו לרעיון שקרקע זו נוצרה עקב התיישבות ילידית (Kawa & Oyuela-Caycedo, 2008). לבסוף, נצחה ההיפותזה אודות המקור האנתרופוגני של ה-ADE שהתבססה על מספר טיעונים שהוכחו עם השנים:

1. הטקסטורה של הטרסה פרטה משתנה בין אתר לאתר, אך תמיד מותאמת להרכב הקרקע שמסביבה. הרכב החרסית וגודל הגרגר באדמות הטרסה פרטה זהה להרכב שבאדמות השכנות, ושונה בין אתר לאתר. הווה אומר, הגיאולוגיה הלא אורגנית של ה-ADE דומה יותר לגיאולוגיה המקומית הספציפית מאשר להרכבם של מרבצי ADE אחרים.
2. אופק C של עמודת הקרקע בטרסה פרטה, קרי - האופק העמוק הלא ביוטי, שה-ADE אינה נוכחת בו, זהה לאופק C של עמודת הקרקע בקרקעות השכנות (Sombroek, 1966).
3. טרסה פרטה תמיד מכילה שברי חרסים, עצמות, קונכיות ועוד פסולת ביתית, מה שמעיד על כך שנוצרה על ידי בני אדם שישבו במקום לאורך זמן רב (Lehmann, 2003).

לא כל החוקרים הסכימו לקבל את המסקנות שעלו מן השטח. לפי התיאוריה המקובלת, בקרקעות הדלות של היערות הטרופיים הגדולים לא ניתן לפתח מערכת חקלאית אחרת מ"Slash and Burn" (S&B), בה מבארים חלקות יער, מעבדים אותן למספר שנים בודדות עד שהיא מאבדת מפוריותה, ועוברים הלאה. עם זאת, תיאוריה זו לא עמדה עם העובדות הארכיאולוגיות והאקולוגיות שנאספו ב-30 השנים האחרונות אודות הלידים באגן האמזוניה, המתארות, כאמור חברות צפופות, לא נוודיות ומורכבות מבחינה סוציו-פוליטית, שלא היו יכולות להתקיים אילולא התפתחה מערכת חקלאית מקיימת ואינטנסיבית יותר מה S&B. כיום, מעטים הם החוקרים שמחזיקים בתיאוריות אודות חברות פרימיטיביות-נוודיות באגן האמזוניה. בנוסף, הדומיננטיות של ה-S&B באמזונס היום אינה יכולה להעיד בהכרח על מרכזיותה בעבר. מחקרים אחרונים הוכיחו שה-S&B לא הייתה יכולה להתפתח לפני שזנים פרודוקטיביים יותר וברי אחסון של תירס היו בנמצא, ולא לפני שהתפתח גרזן המתכת שהיה נחוץ על מנת לבאר שטחי יער נרחבים כל-כך, באופן שיש ביכולתו להחזיר את ההשקעה בעבודה הקשה ובכוח האדם (Lehmann, 2003).



איור 1: חפירות באתר טרה-פרטה, בו גיל הביוצ'אר מוערך בכ-800 שנים. מתוך Lehmann, 2007.

לאורך השנים, המחקר הפדיוולוגי אודות הרכב הטרה פרטה חשף, פיסה אחר פיסה, את הדינמיקה המיוחדת שהביאה ליצירת הקרקע ולפוריותה. מחקרים שביצעו אנליזה כימית וביולוגית של הקרקע, הוכיחו כי נוצרה מריכוז של פסולת ביתית ופחם, ועושרה המיוחד, בעיקר בזרחן וסידן, הגיע מזבל בעלי חיים, זבל מטבח ועצמות שנותרו מציד ודיג (Sombroek, 1966). מחקרים שעסקו בניתוח הפרופיל הפחמני של הקרקע, הראו כי פחמן שחור (Black Carbon - BC) שנוצר מ"הפחמה" (Charring) של חומר צמחי, הוא מרכיב חשוב ב-ADE, הינו יציב כימית ומיקרוביולוגית ובעל יכולת להשאר בקרקע לאורך מאות ואולי אלפי שנים. הפחמן השחור היציב בקרקע אינו יכול להיווצר באופן ספונטני בתהליכים טבעיים של שריפות, ואף לא כתוצר לוואי של שריפה בחקלאות ה

S&B, שתוצרתה העיקרי היא ברובה המוחלט אפר, כך שבלתי אפשרי לזקוף לזכותה את לכידת הנוטריינטים בקרקע (Kawa & Oyuela-Caycedo, 2008).

מעניין לציין, שבעוד שיש הסכמה בקרב החוקרים אודות מספר מאפיינים בסיסיים של ADE כמו צבעה הכהה, עושר בפחמן שחור, פוריות גבוהה ואתרופוגניות – מעבר לזה, יש מחלוקת רבה, שבין השאר נובעת מן שונות הקרקע בתוך ובין כל אתר ואתר (Lehmann, 2003). כך, ישנה הסכמה פה אחד כי ADE הינה תוצר של התיישבות אינדיאנית, אם כי על התהליך הספציפי שיצר קרקעות אלו, קרי הסיבה התרבותית בגינה נאספו ערימות של שיירי מטבח עם פחם העץ במרבצים המסויימים ובקצב המסויים, ישנה עדיין מחלוקת (Kawa & Oyuela-Caycedo, 2008). כידוע, בקרב חוקרי הקרקע תמיד נחשבו קרקעות האמזונס לאדמות הומוגניות, דלות במשאבים, בעלות פוטנציאל חקלאי קטן מאוד, אם בכלל. מפתיע, אם כן, שדווקא באמזונס תועדה שיטה חקלאית עתיקה שפוריותה נשארה לאורך עשרות ומאות שנים ומעשירה יותר מאשר מדלדלת אותה, וזאת בניגוד מוחלט להשפעות החקלאות הקונבנציונאלית, על אף (ואולי לומר בגלל) הידע והמשאבים הרבים שבאמתחתה. לרוב, כאשר נושא הקרקע נחקר בהקשר של תרבות אנושית, המחקר כמעט תמיד יעסוק בגבולות הטבעיים הנפגעים ובהשפעה השלילית שיש לבני האדם על תא השטח בו הם חיים, כגון סחף קרקע ושימוש יתר. כאשר מנסים להבין מדוע חברות אנושיות קורסות באזורים של יערות גשם, קרקע דלה עולה כאחד הגורמים המשמעותיים לגבולות הסביבתיים של ההתפתחות התרבותית (Lehmann, 2003), ואף לקריסת התרבות כולה (Diamond, 2005).

אם כך, כיצד הצליחו הילידים באמזונס ליצור מערכת חקלאית מקיימת ופורייה ב"מדבר הרטוב" של הג'ונגל הטרופי (Mann, 2002), כזאת שעד לפני כמה עשרות שנים אפילו חוקרים מודרניים התקשו לדמיין? הראיות מעידות על האפשרות ש ADE היא תוצאה של העדפה תרבותית, יותר מאשר הזדמנויות וגבולות אקולוגיים. החלטות פשוטות אך מכריעות אודות ניהול הפסולת בכפר היו גורם מכריע לגבי היווצרות או אי היווצרות של ADE. חומר אורגני שהיה נזרק ישירות לשדה היה מתפרק מהר, לעומת חומר אורגני שהצטבר (יחד עם פחמן שחור) ליצירת ADE לשימוש מאוחר יותר בשדה עשוי להיות כל

ההבדל. בתרבות בה הפסולת הביתית הייתה נזרקה לנהרות או לאגמים לא הייתה יכולה להתפתח טרה-פרטה (Lehmann, 2003).

שאלה מתבקשת היא האם האינדיאנים באמת היו מדענים-חקלאים מחוננים, ויצרו את הטרטה פרטה בכוונה תחילה, או שמא הקרקע נוצרה כתוצר לוואי לסגנון חיים ותרבות מסויימת. כדיון בשאלה המעניינת, לכל הפחות, אפשר לטעון כי:

- לפחות בכל הנוגע לאגירת הפסולת, מכל הידוע לארכיאולוגים על האינדיאנים האמזוניים, סביבת המחיה הייתה נקייה ומסודרת. הם הזדקקו לסדר גם מן הבחינה הפסיכולוגית - כגבול בין האזור המבוית ליער הפראי, מן הבחינה התרבותית - כפר נקי היה גאווה לכפר והייתה לו גם חשיבות טקסית בהתארגנות לקראת חג כזה או אחר, וגם מן הבחינה הבריאותית - הרחקת חומר אורגני מהקרקע מנעה התכנות של זיהומים פתוגניים. לכן, אין שחר לרעיון כי יצירת ה-ADE היא כתוצאה של אורח חיים שאינו אחראי לסביבתו. ההיפך הוא הנכון.
- הכנה של פחמן שחור דורשת טכניקת שריפה מכוונת במצב של חוסר חמצן, שתשאיר הרבה חתיכות פחמן שלמות. במצב ספונטני, שריפה תייצר כמעט אך ורק אפר, מה שמעיד על כך שלכל הפחות השליטה בתהליך השריפה, והוספת הפחמן לקרקע הינה מכוונת.
- על מנת להכין נדרשות לכל הפחות כמה שנים (כולל הפירוק האורגני של העצמות, הקונכיות והקליפות), אם לא כמה עשרות. תהליך זה של איסוף הפסולת בערימות, בניגוד להטמעה של פסולת ישירות בשדה, עשוי לרמז על כך שיצירת ה-ADE היה תהליך מודע. מצד שני, הגיוני לשער שתהליך שנדרשות מאות שנים של התיישבות כדי להשלימו יהיה תוצר לוואי של תרבות, ולא בהכרח פעולה מכוונת (Lehmann, 2003).

האם יש לנו מה ללמוד מהמסורת החקלאית העתיקה של האינדיאנים באגן האמזוניה? האם ADE מתגלה כמערכת מקיימת לניהול משאבים? העובדה שטרטה פרטה שימשה לעיתים עשרות מאות של שנים ברציפות, ושהיא מצליחה להמשיך להחזיק במבנה ובפוריות שלה לאורך מאות שנים לאחר הנטישה, עד ימינו, מעיד על כך ש ADE היא בת-קיימא.

ולבסוף, ניתן לשאול - אם הטכנולוגיה שלהם כל-כך מוצלחת, כיצד היא נדחקה הצידה ונשכחה, בשעה שהצורך העולמי בחקלאות מקיימת יותר גואה ועולה? התשובה לשאלה זו נעוצה, לפחות באופן חלקי, ביחס של הקולוניאליזם האירופאי ליושבי העולם החדש. באותה תקופה קולוניאלית, אוכלוסיית האמזוניה התדלדלה בצורה מסיבית וחברות רבות ומורכבות מן האמזוניה נעלמו כמעט לגמרי (Kawa & Oyuela-Caycedo, 2008). אלו שלא נעלמו נדחקו עוד פנימה אל מעבה הג'ונגל, משאירים מאחוריהם ידע וטכנולוגיה חקלאית שהאירופאים לא השכילו ללמוד ממנו, וגם אם רצו, לא היה להם ממי ללמוד אותו. היחס הקולוניאליסטי המתנשא של האירופאים שראה באינדיאנים כולם כמקשה אחת - ברברים טיפשים - לא איפשר מעבר ידע בין התרבויות גם אם ההזדמנות הייתה קיימת (Lehmann, 2003).

טרה פרטה נובה - טכנולוגיה עתיקה בשימוש מודרני

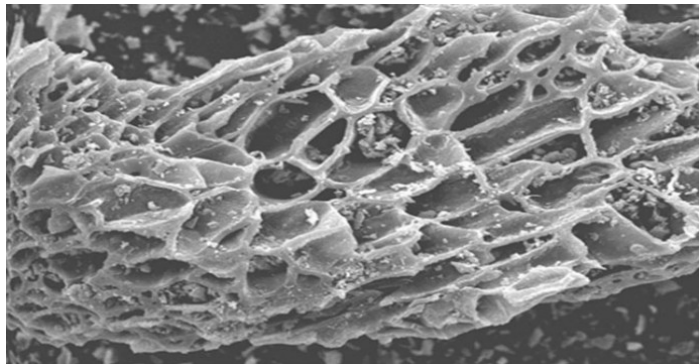
בשנת 2002, סומברוק, מחלוצי מחקר ה-ADE, העלה בקרב קהילת החוקרים רעיון מהפכני - Terra Preta Nova (אדמה שחורה חדשה, New Dark Earth). מתוך הכרות רבת שנים עם הטרה-פרטה ואמונה כי לחקלאות המודרנית יש מה ללמוד מהטכנולוגיה העתיקה מהאמזונס, הציע סומברוק לשכפל באופן יזום אדמות שחורות על מנת לשפר את התנובה והפוריות של משקים חקלאיים קטנים באמזונס (Denevan & Woods, 2004). הפרוייקט התקבל בחיוב בקרב החוקרים, בין היתר כיוון שהציע לקהילת הטרה פרטה יעד יישומי סביבו יכלו לשתף פעולה. כך ארגוני מחקר מברזיל, ארה"ב, גרמניה והולנד הוזמנו להשתתף - אוניברסיטאות, מכוני מחקר, תאגיד המחקר החקלאי הברזילאי (EMBRAPA) ואפילו מוזיאון אחד השתלבו בפרוייקט (Kawa & Oyuela-Caycedo, 2008).

מטרה פרטה לביוצ'אר

המונח ביוצ'אר אוזכר לראשונה בשנת 1998, כמשקע מוצק כתוצאה מפירוליה של ביומאסה (Spokas et al., 2012). באותם שנים, בעקבות הצורך ההולך וגובר למצוא טכניקות חדשות לקיבוע פחמן בקרקע, צמחה הפופולאריות העולמית של ה-ADE והשלכותיו אל מעבר לקהילה המדעית. העולם החל להתעניין בתחום המחקר הצעיר גם בקרב ארגונים לאומיים ורב-לאומיים שעוסקים באופן יזום במיתון פליטות

הפחמן (Carbon Emission Mitigation), אם כמשימה סביבתית גלובאלית ואם בעקבות זיהוי השוק הצעיר יחסית של מסחר בפליטות פחמן כפוטנציאל כלכלי (Denevan & Woods, 2004). חברות מסחריות ומכוני מחקר החלו לחקור וליישם הנדסה הפוכה ליצירת "טרה-פרטה נובה". באופן היסטורי, בתחום הפקת האנרגיה פחמן שחור הינו תוצר לוואי של התהליך הפירוליזה כשתשומת הלב התמקדה בנוזלים ובגזים כמקור לאנרגיה, ולא בביוצ'אר, בטח ובטח לא כטכניקה לקיבוע פחמן, זאת עד לשנות השמונים של המאה הקודמת (Spokas et al., 2012). כך, בשנים האחרונות, ביוצ'אר והטמעתו בקרקע הוצע כטכנולוגיה פשוטה לקיבוע פחמן בקרקע מחד, ולשיפור פוריות הקרקע מאידך (Graber et al., 2010; Gurwick et al., 2013; Kawa & Oyuela-Caycedo, 2008; Northup, 2013).

תהליך הפקת הביוצ'אר - הפירוליזה



איור 2: תמונה מיקרוגרפית של חלקיק ביוצ'אר טיפוס, מתוך Graber et al., 2010.

כאמור, ביוצ'אר הינו תוצר של תהליך פירוק תרמוכימי בטמפרטורה גבוהה (בעירה) של חומר אורגני במצב של חוסר חמצן, ובמילה אחת **פירוליזה**. פירוליזה הינו תהליך מוכר לאדם מזה אלפי שנים, כשהמצרים מתועדים בשימוש בתוצרי הפירוליזה בתהליך החניטה (Spokas et al., 2012).

הפירוליזה היא שם כללי לתהליך שעשוי להיעשות בטווח גדול של משתנים – טמפרטורות נמוכות (300°C) או גבוהות (800°C), זמנים קצרים (חצי שעה) או ארוכים (מספר שעות), ללא בקרה או בבקרה מלאה. בתהליך הפירוליזה כ-50% מהפחמן המקורי בביומאסה (בקירוב) נלכדים בביוצ'אר (Atkinson et al., 2010). ה-pH הסופי ואתו יכולת קיבול קטיונים החליפים (CEC, Cation Exchange Capacity) עולים ככל שטמפרטורת ההפקה גבוהה יותר, ביחס הפוך לתפוקת הביוצ'אר בסוף תהליך ההפקה. לפי נתונים אלו, ניתן לתחום את הטמפרטורה האופטימלית להפקה בין 450°C ל- 550°C . ככל הנראה, פירוליזה איטית מבוקרת הינה השיטה המוצלחת ביותר למיקסום הפקת ביוצ'אר. בתהליך הפירוליזה מתרחשים תהליכי פילמור שבסופם מתקבל מבנה פחמני ארומטי יציב טרמית. התהליך הינו

אנדותרמי בטמפרטורות גבוהות ואקסותרמי בטמפרטורות נמוכות, ועל כן בעת ייצור אנרגיה מביומאסה התהליך מתבצע בטמפרטורות נמוכות ($400^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$) (Lehmann, 2007). להרכב חומר הגלם יש גם חלק משמעותי בקביעת איכות הפירוליזה ותכונות שונות של הביוצ'אר כמו כמות האפר, צפיפות וקושי החומר. נראה כי ביוצ'אר שהופק מעשב וזבל בעלי חיים מכיל בתוכו כמות גבוהה יותר של נוטריינטים. בנוסף, נצפו תוצאות חיוביות על נביטה, נטרול אללופטיה, צימוח ראשוני וכמות היבול בביוצ'אר מעץ קשה שהופק בשיטה המסורתית ובטמפרטורות נמוכות (Rogovska, Laird, Cruse, Trabue, & Heaton, 2012; Spokas et al., 2012).

הביוצ'אר – מבנה ותפקוד

הביוצ'אר איננו הומוגני. טווח רחב של הרכבים כימיים ומבנים פיזיקלים מעיד על הקושי בליצר הגדרה אחידה וסטנדרטיזציה, גם במעבדה אך בעיקר בשדה (Gurwick et al., 2013; Spokas et al., 2012). מחקר שערך אנליזה במגוון דגימות ביוצ'אר הראה שונות גבוהה בהרכב. למשל, הרכב הפחמן המקובע נע בין 6 ל-60% (Rogovska et al., 2012). המבנה הארומטי של הביוצ'אר מקנה לו יציבות פיסיקלית ועמידות כימית וביולוגית פוטנציאלית למאות שנים (Atkinson et al., 2010; Glaser et al., 2001; Lehmann, 2007), מספק מקלט למיקרואורגניזמים שונים, כגון מיקוריזה, וקושר יונים חיוניים כנוטריינטים שונים (חנקן, זרחן, אשלגן). לביוצ'אר ישנן השפעות נוספות שמשפיעות על תכונות הקרקע כגון העלאת ה-pH, הגדלת המוליכות החשמלית, עלייה ביכולת קיבול קטיונים חליפים בקרקע ועוד הרבה יש לגלות ולחקור. ה-pH הגבוה בביוצ'אר אינו מפתיע בהתחשב בתיעוד הרב במחקר בשימוש באפר עץ לשינוי ה-pH, ולהעלאת זמינות נוטריינטים, בעיקר אשלגן וזרחן (Atkinson et al., 2010; Rhodes, 2012).

ביוצ'אר כטכנולוגיה לקיבוע פחמן

על ידי גידול עצים וצורות נוספות של ביומאסה, CO_2 נקלט על ידי פוטוסינתזה. אם הביומאסה הזו עוברת פירוליזה ומוטמעת בקרקע, אפשר לתאר את התהליך כיניקה איטית של פחמן מהאוויר והטמעתו בקרקע (Lehmann, 2007; Rhodes, 2012). חוקרים רבים דנים ביכולת של הביוצ'אר להשפיע על

מיתון פליטות הפחמן הגלובאליות על ידי קיבוע פחמן בקרקע. למשל, מטוביק חישוב כי פיחוס וקבירה של 10% מהצימוח החדש בביומאסה הגלובאלית כל שנה יאזן את העלייה השנתית בפד"ח האטמוספרי. בפוטנציאל הבר-קיימא המקסימלי, ביוצ'אר עשוי להפחית פליטות הפחמן השנתיות (נכון להיום) ב 12%, בהנחה שהפחמן נשאר יציב לאחר 100 שנים (Gurwick et al., 2013). חישוב אחר מציע כי ניתן לחסוך 40% מפליטות הפחמן (נכון להיום), אם הטכנולוגיה תיושם על פני כל השטח הזמין לעיבוד על פני כדור"א. חוקרים אחדים מרחיקים לכת, וטוענים כי ייצור מיליוני טונות בשנה של ביוצ'אר, בקנה מידה עולמי, עשוי להפוך את סך פליטת הפחמן האנתרופוגני, ואולי אף את ההתחממות הגלובאלית. בנוסף, קיימת השערה כי היווצרות תפטירים על גבי מבנה הביוצ'אר עשויה להיות אחראית לקיבוע סופי של פי חמישה יותר מהכמות שהתהליך הראשוני של ייצור הביוצ'אר מקבע בקרקע (Rhodes, 2012). מן הצד השני, חוקרים אחדים מזהירים מהערכה אופטימית מדי אודות יכולת קיבוע הפחמן של הביוצ'אר, מארבע סיבות עיקריות:

1. מחקרית, עוד לא פותחו הכלים להערכת אורך החיים של הביוצ'אר באדמה, בהתייחס כמובן בכך שההערכה הזהירה טוענת לכל הפחות למאה שנים. נכון להיום, באופן היפותטי המחקרים הותיקים ביותר אינם עדיין בני יותר מעשרים ושש שנים, כיוון שלפני 1998 המושגים ביוצ'אר או טרה נובה פרטה עוד לא הוגדרו, ולכן עוד לא היה מה לחקור (Shackley & Sohi, n.d.; Spokas et al., 2012).
2. הטענות אודות היציבות של הביוצ'אר בקרקע נשענות על המצאות פחם בקרקעות אנתרופוגניות עתיקות. עצם המצאותו של הפחם ואפילו גילו המוערך, אינו מעיד על כמות הפחם שהייתה בקרקע מלכתחילה, ואפשר שכמות הביוצ'אר שהתקבעה בקרקע תלויה בהקשר האקלימי והקרקעי הספציפי. ניתן להניח כי על מנת להפיק קרקע בעלת פרופיל קרקע של טרה פרטה יש צורך בתהליך ביולוגי שיארך שנים לכל הפחות. כך או כך, קשה להסיק על בסיס דגימות פחם מאתרי ADE עתיקים על התפקוד של הביוצ'אר באופן כללי (Gurwick et al., 2013; Rhodes, 2012).
3. מחקרים שנעשו עד היום שניסו לקבוע את גיל ההשארות של הפחמן השחור בקרקע מציגים נתונים בעלי שונות של שלושה סדרי גודל, בין שנים בודדות ועד אלפי שנים, מה שמעיד על רמה גבוהה של אי ודאות ושונות אפשרית בשדה (Graber et al., 2010; Lehmann, 2007).

4. השונות הגדולה בתהליכי ההכנה, המגוון בחומרי הגלם לביוצ'אר, וההבדלים בין האקלימים השונים על התהליכים האקולוגיים בהם ואופי מעגלי החומרים, מקשה מאוד על היכולת לכמת מראש את כושר קיבוע הפחמן של הביוצ'אר (Gurwick et al., 2013; Lehmann, 2007).

ביוצ'אר בחקלאות

המנגנון המדויק בו ביוצ'אר תורם לרבות מהתכונות החקלאיות החיוביות שמיוחסות לו, כמו הגדלת צימוח ויבול, הקטנת אבדן נוטריינטים ושיפור לכידות הקרקע, עדיין מובן לנו בצורה חלקית בלבד. ועם זאת מאות ניסויים במעבדה ובשדה הוכיחו כי יישום הביוצ'אר במערכת חקלאית עשוי לתרום במגוון דרכים.

ביוצ'אר עשוי לשפר את פוריות הצמח על ידי הגברת יכולת אחזקת ושחרור הנוטריינטים ושיפור באחזקת הנוטריינטים הכללית של הקרקע; הגדלת קיבול הקטיונים החיוביים; שיפור בחומציות הקרקע; שיפור בתכונות הפיזיקליות של הקרקע, כולל אחזקת מים ושיפור ניקוז; הקטנת דחיסות הקרקע והשפעה חיובית על גודל האוכלוסיות המיקרוביולוגיות של הקרקע והפעילות שלהן (Graber et al., 2010); יישום ביוצ'אר באדמות חומציות יכול להעלות את ה-pH של הקרקע לרמות בסיסיות, בעיקר אם יושמו כמויות גדולות של ביוצ'אר שבעקבותיהן התרחש שינוי משמעותי ביכולת קיבול קטיונים חליפים בקרקע (Solaiman et al., 2012).

מחקרים חדשים מציעים קשר בין ביוצ'אר ושגשוג מיקרוביאלי באדמות טרה פרטה, בהן מיקוריזה משגשגת ומייצרת גלומאלין, וישנן הוכחות מוצקות לכך שהגליקופרוטאין דמוי הדבק אחראי בצורה משמעותית לאחזקת חומר אורגני בקרקע ולבריאות האדמה. אף ישנן הערכות מרחיקות לכת כי הגלומאלין הינו ה"סוד" של אדמות הטרטה פרטה (Rhodes, 2012; Spokas et al., 2012). יחד עם זאת, כדאי לציין כי לרוב הביוצ'אר נחקר בסביבות בהן האדמה החקלאית התדלדלה או נפגעה, ובמערכות בעלות אדמה דלה מלכתחילה (Graber et al., 2010).

שימוש בביוצ'אר בחקלאות מציב מספר אתגרים טכניים משמעותיים כמו הובלה ויישום בשדה, ובמקביל גם אתגרים כלכליים כמו החזר השקעה ארוך-טווח. ככל הנראה, בתעשיית הגינון והמשתלות האתגרים הטכניים והחקלאיים יהיו זהים, אך אפשר לצפות שהחזר ההשקעה יהיה מהיר יותר, כך שהתמריץ הכלכלי ליישום ביוצ'אר בתעשייה זו גדול יותר, ויוצר יחד איתו אפשרות ערך משני של קיבוע פחמן.

ביוצ'אר במצעים מנותקים

על אף גילו הצעיר של התחום, ניתן למצוא מחקרים אודות ההשפעה של ביוצ'אר על מצעים מנותקים. בין ההשפעות החיוביות של הביוצ'אר ניתן לזהות השפעה על שיפור בצימות, הקטנת נפח המרכיבים המחצביים של מצע השתילה, שיפור עמידות למחלות, והקטנת אבדן נוטריינטים ומינרלים (Northup, 2013). השפעות אלו, יחד עם הערך המתווסף של קיבוע פחמן, עשויים להפוך את הביוצ'אר למצע שתילה מהפכני. במחקר מקיף שמטרתו הייתה לבדוק את השפעת הביוצ'אר על צימוח תוך כדי נטרול כל השפעה נוספת, הוכח כי הוספת כמויות קטנות של ביוצ'אר (1%-5% משקלית) למצע מנותק, בדישון והשקייה אופטימלית לצמחי עגבניה ופלפל, מניבה השפעה חיובית על צימוח ובריאות הצמח, יחד עם עמידות גבוהה יותר למחלות עלוותיות, וככל הנראה עמידות למחלות בכלל. את התוצאות החיוביות הללו מסבירים במחקר באמצעות שתי היפותזות – דחיקה תחרותית מיקרוביאלית ופטרייתית, או הורמזיס (תופעה בה לכמות קטנה מרעלן, במקרה זה עטרן מן הביוצ'אר, יש השפעה חיובית על תהליכים ביולוגיים) (Graber et al., 2010).

עם זאת, המחקר עוד רחוק מלמצות את הפוטנציאל היישומי של הביוצ'אר. מחקרים ניסיוניים חדשים, בעיקר בחקלאות, מתפרסמים חדשות לבקרים על ידי חוקרים ממכוני מחקר ואוניברסיטאות מסביב לעולם. למשל, לאחרונה נמצא כי הטמעת ביוצ'אר בקרקע מפחיתה בצורה משמעותית את פליטת האמוניה מקרקעות שטופלו בזבל בהמות וכי האמוניה שנספגת בביוצ'אר הינה זמינה ביולוגית (

שהביוצ'אר עשוי להציע. (Taghizadeh-Toosi, Clough, Sherlock, & Condrion, 2012a, 2012b), הדגמה מרתקת למגוון היישומי

חשוב לציין כי יש חוקרים המזהירים כי לביוצ'אר יכולה להיות השפעות שליליות על החקלאות, כמו שחרור איטי של מתכות כבדות שאחרת לא היו מוכרות לקרקע, הקטנת ההשפעה של קוטלי חרקים והשארות ארוכה של קוטלי חרקים ומזהמים אחרים בקרקע החקלאית תוך הקטנת החלחול למי התהום, כשפעולות אלו תלויות מאוד בתכונות הדגל של הביוצ'אר, ביניהן היכולת לקיבול קטיונים חליפים ולשחרור חומרים בשחרור איטי (Gurwick et al., 2013; Rogovska et al., 2012). במילים אחרות, פחמן שחור אינו בהכרח מועיל לפוריות הקרקע וישנן עדויות להאטת צמיחה ולמהפך בהרכב הקרקע עד לאיבוד פוריות, כמו למשל באתרים של ייצור פחם (Spokas et al., 2012). סקירה מחקרית צרה אודות ההשפעה של הביוצ'אר על היבול החקלאי, הראתה כי בעוד 50% מהמחקרים הציגו השפעות חיוביות על היבול או הצימות, 30% מהמחקרים לא הציגו הבדל משמעותי בתוצאות, ו 20% מהמחקרים הציגו השפעה שלילית על הצימוח או היבול. זאת ועוד, מורכבות שעולה בעת ניסיון להגדיר איכות של דגימות ביוצ'אר שונות קשורה בהבנה כי התכונות שעושות דגימה מסויימת מתאימה לקיבוע פחמן, כמו למשל קצב הפירוק, לא בהכרח עומדות בהתאמה עם התכונות שעושות את הביוצ'אר מתאים לשימוש כתוסף קרקע חקלאי, כמו למשל אחזקת מים, ושחרור איטי של נוטריינטים. מורכבות זו נתמכת חלקית על ידי (Lehmann 2007), שמסביר כי בפירוליזה בטמפרטורה נמוכה מאוד (מתחת 400°C), כמות הביוצ'אר בסוף התהליך אמנם גדולה יותר, אך ה Ph ויכולת קיבול קטיונים חליפים נמוכות, ערכים שמקטינים את היכולת של הביוצ'אר לשמש כתוסף קרקע משפר פוריות. עדיין נחוץ מחקר רב על מנת לקבוע את תהליך הפירוליזה האופטמלי לשימושים שונים ומשולבים.

הרוב המוחלט של המחקר היישומי בביוצ'אר עוסק בצימוח ויבול. מספר מועט של מחקרים עוסק בשלבים הראשונים של הצימוח כמו הנביטה והתפתחותו הראשונית של השתיל. ההשפעה של ביוצ'אר על נביטה נבדקה בעיקר בצמחי בר. מחקרים בצמחי תרבות חקלאיים הראו נביטה מוגברת בטיפול בביוצ'אר, אך גם תועדו מקרים בהם הנביטה והצימוח הראשוני לא הושפעו בהטמעת ביוצ'אר. ניתן לשער, עקב השונות הגבוהה בביוצ'אר בין יצרנים, חומרי גלם ואתרים שונים כי לא כל הרכב ביוצ'אר

יתאים כתוסף קרקע, ובעיקר בכל הנוגע לנביטה שהינה שלב עדין בהרבה משלבי הצימוח הבוגרים של הצמח. הורמזיס נצפתה ביישום ביוצ'אר על סוגים שונים של זרעים בנביטה ובימוח הראשוני, כאשר בריכוז של מעל 100 טון להקטר ($t/Ha < 100$) נצפה עיכוב בנביטה עבור סוגים שונים של ביוצ'אר (Solaiman et al., 2012).

שאלת המחקר בה בחרתי לעסוק הינה:

מה תהיה ההשפעה של מצע שתילה מבוסס ביוצ'אר על נביטה וצימוח?

ניתן להרחיב את השאלה ולשאול האם מצע שתילה מבוסס ביוצ'אר יתגלה כאפקטיבי יותר מאשר מצע השתילה הקלאסי במשתלות בכלל, ובפרט במשתלה של הגן הבוטני באורנים? האם באמצעות מצע שתילה מבוסס ביוצ'אר נוכל להזיל את עלויות המשתלה של הגן הבוטני, עקב ייצור עצמי של רוב נפח מצע השתילה והמנעות מרכישת מרכיבים יקרים ומחצביים? האם שימוש במצע שתילה מבוסס ביוצ'אר יוכל להקטין את טביעת הרגל הפחמנית של שתלנות בחממה? או אולי אפילו להפוך את השתלנות בחממה לפעולה בעלת פליטת פחמן שלילית, ובזה להפוך את השתלנות לפעולה רצויה גם כאשר אין השפעה חיובית משמעותית על הזריעה והשתילה, כמו נביטה וצימוח מוגבר.

בחרתי באופן מודע לעבוד עם חומרי הגלם והמשאבים הזמינים בגן הבוטני על מנת לבחון התכנות ממשית להכנת הביוצ'אר במקום, להשגת חומרי הגלם, ולהשפעה הישירה שיש לכל תהליך על שאר הפעולות שדורשת עבודת המשתלה.

מתודולוגיה ושיטות מחקר

לניסוי זה היה ניסוי מקדים. בחרתי לכלול את הניסוי כנספח מאחר ולניסוי המקדים הייתה השפעה גדולה על תכנון ניסוי זה (לקריאה נוספת, נספח א').



איור 3: מתקן להכנת ביוצ'אר, זהה לזה שבו השתמשנו

הנפח של כ-80 ליטר ביוצ'אר הוכן בשיטה מקובלת לקנה מידה קטן¹ לאורך שעה וחצי מתחילת הבעירה ועד סופה, בטמפרטורה של לא יותר מ-500 מעלות בשיא, כשרוב התהליך ככל הנראה נעשה בפחות מ-400 מעלות (לפי העין וידע כללי²). נבחר חומר גלם קיים שככל הנראה יהיה יותר זמין לגן הבוטני מאשר פסולת עץ נקייה - רסק גזם רשותי (מהמועצה המקומית קריית טבעון). רסק הגזם נוקה ידנית מחתיכות פלסטיק, אבנים ושאר פסולת לא מעוצה לפני ההכנה.

לאחר ההתקררות, הביוצ'אר חולק לחמישה מיכלים מנוקבים בתחתיתם. בכל מיכל הביוצ'אר עורבב עם קומפוסט קנוי של מרום-גולך³. הוכנו חמש תערובות מצע (יחסים בנפחים): 100% ביוצ'אר (0:4), 75% ביוצ'אר ל-25% קומפוסט (1:3), 2:2, 3:1, 4:0 (100% קומפוסט, ללא ביוצ'אר). המיכלים נשטפו בהשקייה ידנית לפחות פעם ביומיים במשך שבועיים (הרטבה בצינור עד שהמיכל מלא, כשהמים מתנקזים לבד בחופשיות), לפי נוהל מקובל והמלצות מעוגנות במחקר (Rogovska et al., 2012).

1 - חלק גדול מהמחקרים נעשה עם ביוצ'אר קנוי מחברות מסחריות שמספקות ביוצ'אר. חלק קטן מהמחקרים מציין כי אחד או יותר מהטיפולים הוכן במקום ע"י שיטות מסורתיות ו/או כבשן פח, כאשר האחרונה היא השיטה בה הביוצ'אר הוכן במחקר זה. לעיון נוסף -

<http://www.holon.se/folke/carbon/simplechar/simplechar.shtml>

2 - בעבודת הברזל ניתן לשער את הטמפרטורה על פי הגוון שאליו משתנה צבע הברזל החם.

http://sizes.com/materls/colors_of_heated_metals.htm

3 - שק בלה, 1 קו"ב, על מנת להשוות את חומרי הגלם לחומרים הנגישים לגננים בגן הבוטני. הקומפוסט הינו קומפוסט בוגר מזבל בקר.



איור 4: שניים ממיכלי השטיפה בהם הושרו התערובות

לניסוי נבחרו זרעי עגבניה (*Solanum lycopersicum*) מזן "מרמנד" ממשווק זרעים מוכר. לקראת הזריעה במגשים, הוכנה תערובת נוספת, כקבוצת ביקורת, על פי היחס המקובל בגן הבוטני לתערובת למצע זריעה (דיווח ע"י מר אורן עזרי) - 70% כבול, 20% פרלייט, ו-10% וורמיקוליט.

התערובות ייושמו בשישה טורים אקראיים של ארבע תאים לכל טיפול בשישה מגשים (שש חזרות, a-f). על מנת לצמצם את האפשרות של אחוזי נביטה נמוכים או תקלות בזריעה כמו זרע שנח על חתיכת פחם שמונעת את נביטתו באופן פיזיקלי, נזרעו בכל תא 3 זרעים בדיוק. כל התערובות כוסו בשכבת הומוס אחידה (2-3 מ"מ), לפי הוראותיו של מר אורן עזרי אודות תערובת השתילה של הגן (קבוצת הביקורת). הניסוי הונח בחממה ב 1.7.2014.

השערת המחקר הייתה שלביוצ'אר תהיה השפעה חיובית על השרידות והצימוח, שתעלה על ביצועי קבוצת הביקורת (טיפול מס' 6) ועל ביצועי הטיפול שהכיל 100% קומפוסט (טיפול מס' 5).

בחינת אחוזי נביטה ושרידות

שבוע לאחר תחילת הניסוי, נספרו נביטות בקבוצות (8.7). חמישה ימים מאוחר יותר, נעשתה תצפית וספירה נוספת על התקדמות הנביטה (13.7). בסוף הניסוי (10.8) סומנו שקיות הנייר בהם הנבט לא היה במצב בריאותי מתפקד (נבט קטן צהוב, פריד ויבש, ו/או ללא עלים צעירים או בוגרים, כלל). אף

שקילה לא עלתה מעל 0.05 ג' במצב ביומאסה יבש. הערך 0.05 ג' נקבע כרף השרידות של הפרט, אשר נבחן שוב אל מול טבלת הנביטה. נרשמו אחוזי השרידות של כל הטיפולים.

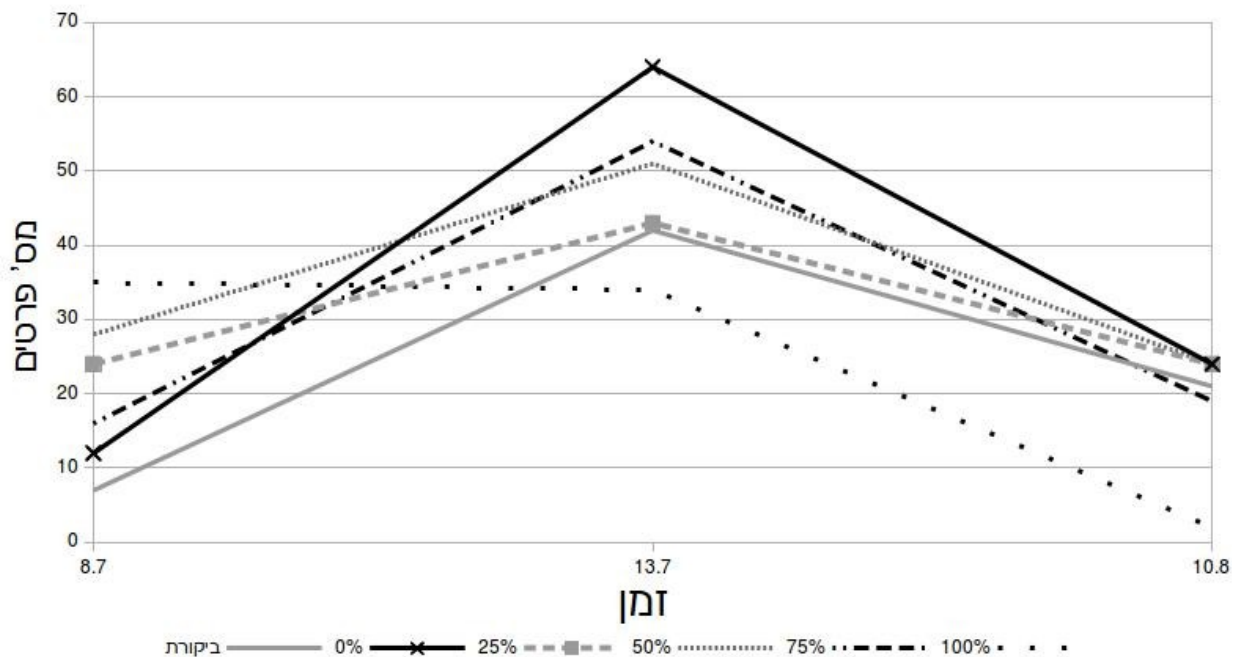
שקילת ביומאסה יבשה

כחודש לאחר תחילת הניסוי (10.8), התבצעה שקילת הביומאסה. בתחילה נעשה ניסיון למדוד את העלווה ובית השורשים בנפרד, אך הרעיון נזנח, כמו שצפינו, כיוון שלא הייתה אפשרות להפריד את מצעי השתילה מהשורשים ברמת דיוק מספקת. בעיה זו נצפתה אף במחקרים דומים אחרים (Northup, 2013). על כן, העלווה הופרדה בבסיס הגבעול, קרוב ככל הניתן למצע השתילה, בעזרת סכין מטבח. לאחר מכן, העלווה של כל צמח בנפרד קוצצה והוכנסה למעטפה עליה צויין הטיפול, החזרה והמגש. כל המעטפות הוכנסו לתנור מתאים, ויובשו 72 שעות בטמפרטורה של 60 מעלות. לאחר סיום הייבוש, נשקל תוכן כל מעטפה בנפרד, במשקל מעבדה מדויק, ונרשמו התוצאות.

ניתוח נתונים

נביטה ושרידות

איור 5 מציג את נביטת ושרידות הפרטים לפי ששת הטיפולים השונים, לאורך זמן של 41 יום ושלוש דגימות. מן האיור ניתן להבחין כי לביוצ'אר הייתה השפעה חיובית על מהירות הנביטה, אך השפעה שלילית על ההשרדות. היחס בין 100% ביוצ'אר (טיפול 1) לבין 0% ביוצ'אר (טיפול 5) הוא יחס הפוך: טיפול 1 נבט מהר, ולפי השוואת המדידות בין דגימה א' (ה-8.7) ובין דגימה ב' (ה-13.7) כלל הנראה שחלק מהצמחים שנבטו הספיקו באותם חמישה ימים לנבול עד שלא היה אפשר להבחין בהם בעין. זאת ועוד, אחוזי השרידות של טיפול 1 היו הנמוכים ביותר (N=2), בעוד שבטיפול 5 (0% ביוצ'אר, 100% קומפוסט) הנביטה התחילה לאט, אך הגיע לשיא באחוזי נביטה ושרידות אבסולוטים (88% נביטה בזמן דגימה ב'), ולמקסימום פרטים ששרדו את כל אורך תקופת הגידול (N=24). עוד ניתן להבחין כי בתערובת השתילה של הגן הבוטני (קבוצת הביקורת) הזרעים נבטו בקצב האיטי ביותר, ואחוז השרידות של השתילים היה בינוני, דבר שמעיד על נחיתות מצע גידול זה בשקלול של תכונות מהירות הנביטה ואחוז ההשרדות.



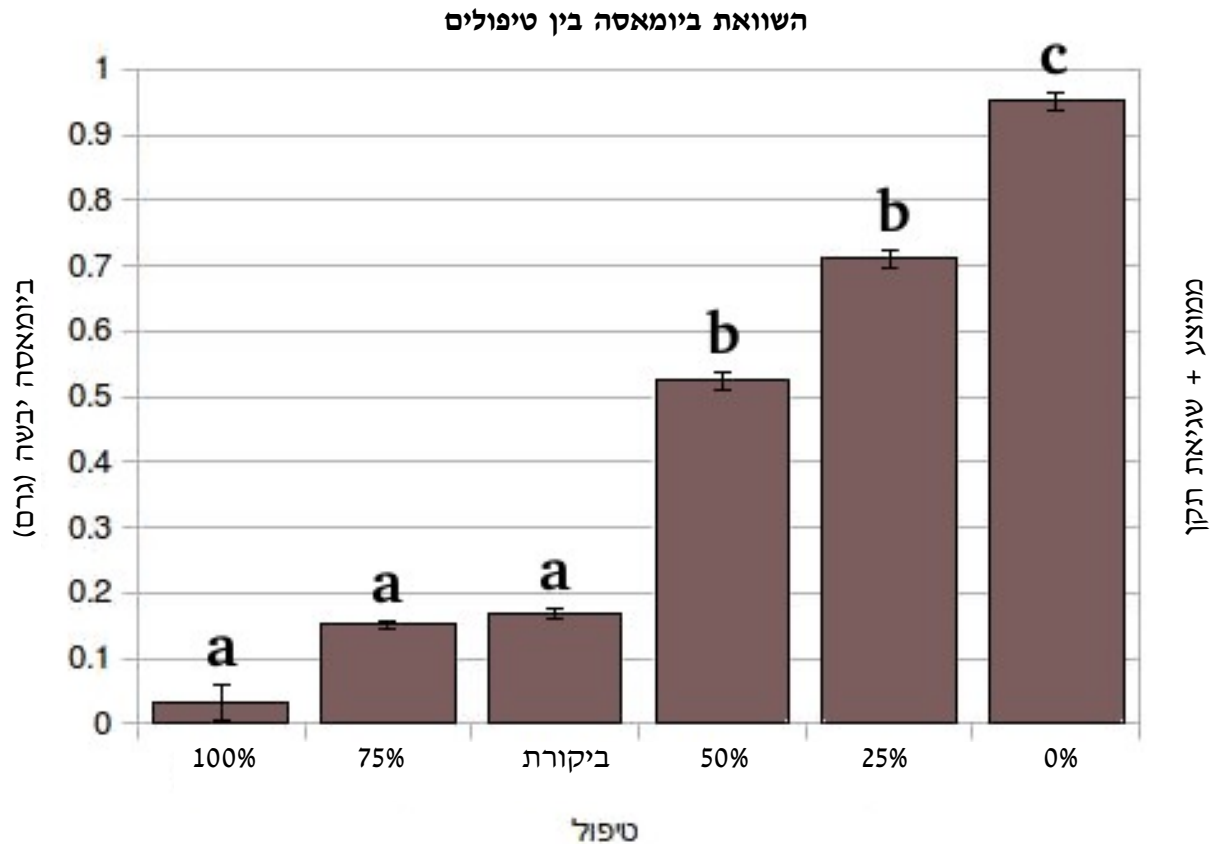
איור 5: נביטה ושרידות לאורך זמן. באחוזים מצוין אחוז הביוצ'אר בכל טיפול.

ביומאסה יבשה לגר'

לפי מבחן לווין, נמצא הבדל מובהק בין השונויות כש $F(5,138) = 11.68, P < 0.001$. במבחן Tukey HSD, כש $\alpha = 0.05$, נמצאה שונות מובהקת בין מקבצים, המסומנים כ-a, b ו-c (איור 6).

הפערים המובהקים בין הטיפולים מראים כי אכן הייתה השפעה לביוצ'אר על מצע השתילה. טיפול 2, המכיל 75% ביוצ'אר ו 25% קומפוסט, הראה ממוצע צימוח דומה לטיפול 6, מצע השתילה הקלאסי, קרי קבוצת הביקורת, שביצועיה היו רק במעט טובים יותר מטיפול 1 ו-2. מבחן Tukey HSD מצביע על כך שאין שונות מובהקת בין שלושת הטיפולים האחרונים.

טיפולים 3 ו-4 (50%-ו 25% ביוצ'אר, בהתאמה) הציגו ביומאסה יותר מכפולה מזו שנמדדה עבור קבוצת הביקורת, וטיפול 5 (ללא ביוצ'אר, 100% קומפוסט) הציג את הביומאסה הגדולה ביותר, כ-20% יותר ממקבץ b. מבחן Tukey HSD הראה שונות מובהקת בין המקבצים a (טיפולים 1, 2 ו-6), b (טיפולים 3 ו-4), ו-c (טיפול 5).



איור 6: ממוצעים, שגיאת תקן ודמיון לפי קבוצות (מבחן טוקי), המסומנות ב a, b, c

נתוני הנביטה (איור 5) מראים כי לביוצ'אר הייתה השפעה משמעותית על מהירות הנביטה, כאשר ככל שכמות הביוצ'אר גדולה יותר במצע השתילה כך הנביטה התרחשה מהר יותר. יחס ההשרדות התגלה כיחס הפוך – ככל שכמות הביוצ'אר גדולה יותר בטיפול פחות פרטים שרדו את מלוא תקופת הגידול. הלא יודע עולה בהרבה על הידוע בניסיון להסביר תופעה זו. אם ידוע שה pH האופטימלי לנביטה לעיתים גבוה מה pH האופטימלי להמשך הצימוח (Deska, Jankowski, Bombik, & Jankowska, 2011), ניתן לנסות ולהסביר את התופעה כך שככל שריכוז הביוצ'אר במצע הגידול עולה כך ה-pH במצע גדל, ומניע את הזרעים לנבוט מהר יותר, אך עוצר את התפתחות הצמחים לאחר הנביטה, אפקט שהניב אחוזי שרידות של פחות מ-3% בתום תקופת הגידול בטיפול 1, ונמצא תואם לספרות המעטה הקיימת (Northup, 2013; Solaiman et al., 2012). היפותזה אפשרית נוספת היא שאחוז החמצן גבוה בביוצ'אר הגביר את נביטת זרעי העגבניה (Liu, Porterfield, Li, & Waldemar, 2012), אך השפיע פחות מתכונות אחרות של תערובת השתילה על שלבי הצימוח. עם זאת, התהליכים הביוכימיים המתקיימים במערכת שכזו הם רבים ויש צורך במחקר רב לפני שניתן יהיה לקבוע את תהליך המפתח שבא לידי ביטוי בתופעה הנצפית. בנוסף, יש לקחת בחשבון את השונות הגדולה באיכות הביוצ'אר ביחס לתהליך ההפקה. מכיוון שבמחקר לא בוצעו מבחני Ph ותכונות קרקע נוספות, קשה לשער את ההשפעה המדויקת של הביוצ'אר על נביטת הזרעים בתנאים הנתונים, (קרי תהליך הפירוליזה על מרכיביו). מחקר נוסף נדרש לקביעת תכונות הביוצ'אר מחומר המוצא הנתון.

ניתוח נתוני מבחן הביומאסה היבשה מראה, בהתאמה לתוצאות מבחן הנביטה, כי ככל שריכוז הביוצ'אר במצע עולה כך ההשפעה על השיפור בצימוח יורדת, עד לכדי עיכוב קריטי בצימוח בריכוז של 100% ביוצ'אר (טיפול מס' 1). אלמלא מקבץ c (טיפול 5), השונות בין מקבץ b ל-a הייתה מוכיחה כי העלאת אחוז הביוצ'אר אכן משפרת את הצימוח, בהבדל משמעותי על פני תערובת השתילה הקלאסית (ביקורת, טיפול 6), טענה שאף מקבלת אישור ממחקר דומה נוסף שבחן שיפור בצימוח בתערובות שתילה בחממה (Northup, 2013), אך טיפול 5, מטיל אור חדש על הנחיצות של הביוצ'אר במצע השתילה, ומהווה אישור להשערה של יונתן גל (אוזכר לעיל) על אפשרות היות הקומפוסט הבשל

תערובת שתילה אופטימלית, או לפחות טובה מאוד, כמו שהיא, ללא תוספות. גם טענה זו בדבר האפשרות לשימוש בקומפוסט כמרכיב יחידי במצע שתילה, מקבלת אישור בספרות (Ribeiro et al., 2007).

מחקרים על מצעי שתילה מבוססי ביוצ'אר כמעט אינם בנמצא. מיעוט המחקרים מראים תוצאות סבירות עד טובות ביישום ביוצ'אר בגידול במיכלים (Northup, 2013). ניתן לשער מספר השערות לגבי ממצאי מחקר זה שלכל הפחות לא חופפים עם העדות הקיימות:

- הכנת הביוצ'אר, מתוך אילוץ אך במחשבה תחילה, התבצעה באמצעים פשוטים, חסרי בקרה, ומחומרי מוצא הנמצאים בהשיג יד עבור אנשי הצוות של הגן הבוטני באורניס. זאת בכדי לדמות את היעילות הממשית של מצעים מבוססי ביוצ'אר לעבודת המשתלה בגן. בעצם, מלבד העובדה שאנו יודעים שנוצר ביוצ'אר (כיוון שהוא ענה לכל ההגדרות הפיסיקליות) לא נבחן אף מדד נוסף מלבד המדדים שהצמחים עצמם הציגו באופן עקיף. עובדה שאין עליה עוררין היא שבטמפרטורה, חומר מוצא או משך שונה היינו מקבלים תוצר שונה, שהיה עשוי להשפיע שונה על הצמחים (Atkinson et al., 2010; Lehmann, 2007).
- אפשר שצמח שונה שאינו עגבניה, היה מראה תוצאות אחרות, טובות יותר או פחות, ביישומו במצעי השתילה מבוססי הביוצ'אר (Northup, 2013). צמחים שונים זקוקים לתנאים שונים, ואפשר שההצלחה בשרידות וצימוח בצמח מסויים תתבטא באופן שונה באותו המצע (Deska et al., 2011; Glaser, Lehmann, & Zech, 2002).
- על אף שהספרות מאשרת כי קומפוסט וביוצ'אר הינם תחליפים אפשריים למצעי שתילה קונבנציונאליים (Northup, 2013; Ribeiro et al., 2007), אפשר כי מעולם שני אלו לא נבדקו זה מול זה, ועל כן קשה היה לצפות את התוצאה הספציפית של מחקר זה. לכל הפחות, במחקרים שנסקרו לעיל, לא נמצא מחקר שהשווה נביטה וצימוח ראשוני בקומפוסט לבין ביוצ'אר, לא בשדה ולא במצע מנותק.

- לבסוף, יכולת קיבול קטיונים חליפים גבוהה המיוחסת לרוב לביוצ'אר זקוקה לזמן התיישנות ארוך. בטמפרטורות קרקע גבוהות (30° - 70°) התגברות יכולת קיבול זו עשויה לקחת כמה חודשים. בטמפרטורות נמוכות יותר, התהליך מתארך (Lehmann, 2003, 2007). אם זה נכון לגבי יכולת זו, אין מן הנמנע לחשוב שהביוצ'אר זקוק ל"התבשלות" ארוכה יחסית גם בעבור שיפור תכונות פיסיקליות אחרות.

יחד עם זאת, בוודאי שבמנעד רחב של תכונות פיסיקליות וכימיות של תרכובות ביוצ'אר שונות וללא סטנדרט מוסכם, לא כל ביוצ'אר עשוי להתאים לנביטה וצימוח ראשוני (Solaiman et al., 2012). אם נתעלם לרגע מהיתרון הברור שטיפול 5 (100% קומפוסט) הציג אל מול כל מצעי הביוצ'אר (טיפולים 1-4), בהנחה שבכל זאת רוצים להשתמש בביוצ'אר כמצע גידול, רצוי לבצע מבחן נביטה מקדים לפני יישום מלא. מטרת המבחן היא, כמובן, לא להעריך את טיב הזרעים, אלא את טיב הביוצ'אר (Solaiman et al., 2012). בדיקות נביטה בתמציות ביוצ'אר נתגלו כאפקטיביות לזיהוי הרכבים פיטוטוקסיים. היתרונות הגדולים במבחני נביטה לצורך זה הם שבעזרת מבחני נביטה ניתן לחסוך באנליזות כימיות יקרות, ניתן להבין בהשפעה הספציפית שיש לכל תרכובת על כל מין ומין ושארורך הנצרון בלבד הוא מדד מהימן, רגיש ומספק לזיהוי התרכובות המתאימות ביותר לנביטה וצימוח ראשוני (Rogovska et al., 2012). עובדה זו מעניקה יתרון מעשי שבלעדיו היה קשה לשקול לחיוב את השימוש בביוצ'אר בהכנה עצמית, ולכן היה מייקר את כל התהליך. ניתן לתהות, עם זאת, לגבי מבחני נביטה אלו האם אפשר שביוצ'אר ספציפי, בעל השפעה חיובית על בריאות הצמח בטווח הקצר (כמו בשלב הנביטה והצימוח הראשוני), יפגע בפוריות הקרקע בטווח הבינוני והארוך. שאלה זו נותרת פתוחה ונדרשת במחקר נוסף.

מומלץ לבצע, כמחקר המשך, אנליזה פיסיקלית וכימית של הקומפוסט הנ"ל (טיפול 5), בהשוואה לטיפול 4, על מנת להבין את מדדי התכונות שאיפשרו לצימוח מהיר יותר. במחקר לא נבדקו מדדים אחרים שעשויים לשפוך אור על ההבדלים הביוכימיים במצע המשפיעים על הנביטה והצימוח במצע שתילה מבוססי ביוצ'אר, תחום מחקר שעדיין נמצא בראשיתו. חשוב לציין שגם קומפוסט (Ribeiro et al., 2007) וגם ביוצ'אר (Gurwick et al., 2013; Spokas et al., 2012) הינם שמות כלליים לתהליכים, ולא לחומרים

הומוגניים כמו שניתן להתייחס למצעי שתילה קלאסיים, שלרוב הינם אינרטיים וסטרייליים יחסית. ככאלו, נדרשים פרוטוקולים מדויקים לייצור וניטור קומפוסט וביוצ'אר על מנת שיהיה אפשר ליישם בבטחה כמצע שתילה מהימן.

במחקר ביקשתי לבחון את האפשרות להחליף מצעי שתילה מחצביים ויקרים אנרגטית וכלכלית במצע שתילה מבוסס ביוצ'אר בייצור עצמי. מצע שתילה שכזה יקטין את ההוצאה הכלכלית, יקטין את המשמעויות הסביבתיות שיש בהובלת כבול, פרלייט וורמיקוליט אלפי קילומטרים, ישפר את תכונות המצע כך שייטיבו עם הזרעים והצמחים ויהווה פיסה בתמונה הגדולה של המאבק בשינוי האקלים בעזרת קיבוע פחמן אטמוספרי בקרקע. תוצאות המחקר פתחו יותר שאלות חדשות מאשר ענו על שאלות ישנות, אך המניע הראשוני של מחקר זה – לנסות ולהפחית את השימוש במרכיבים פוסיליים, יקרים ומיובאים במצע השתילה של הגן הבוטני – קיבל מענה בדרך עקיפה ומפתיעה. יישום ביוצ'אר כמרכיב במצע השתילה מצריך עוד מחקר רב, אך האישור החד משמעי לכך שקומפוסט בשל הינו מתאים ביותר להנבטה ולצימוח במשתלה, לכל הפחות בעגבניה, עשוי לחסוך כסף רב לגן הבוטני באורנים בפרט ולמשתלות בכלל, ולהקטין את טביעת הרגל הפחמנית של המצע בשיעור מוערך של סדרי גודל. מצעי השתילה הקלאסיים מורכבים ממחצבים שאינם מתחדשים ומובלים על פני הגלובוס כולו, בעוד שהקומפוסט הבשל המסחרי הינו משאב מתחדש, שבמצב אחרת הופך לזיהום מקומי חריף, ומובל כ-150 ק"מ בלבד. זאת ועוד, את הקומפוסט המסחרי ניתן להנדס לאחור ולהכין במקום, עם פסולת מקומית, עם עלות אנרגטית, פחמנית וכלכלית זניחה. עם זאת, נדרש מחקר נוסף על מנת להעריך את ההשפעה של קומפוסט ממקורות שונים כמצע נביטה ושתילה עבור זני צמחים נוספים. מחקר נוסף שעשוי להניב תוצאות מעניינות הוא לנסות לפחם (להעביר תהליך פיחום, פירוליזה) את הקומפוסט עצמו, ולבחון את איכותו של הביוצ'אר במשתלה בהשפעה על נביטה וצימוח ראשוני, כפי שנבחנו במחקר זה.

במבט מעט רחב יותר מגבולות הגן הבוטני, אם השימוש התעשייתי בביומאסה לייצור אנרגיה יגבר, אפשר שהזמינות של ביוצ'אר תגדל, עובדה שככל הנראה תוזיל את העלות היחסית של הביוצ'אר עבור שימושים כמו מצעי שתילה, עלות שכיום, ללא מפעל ביואנרגיה זמין במרחק נסיעה משתווה ואף עולה לעלות מצעי שתילה קונבנציונאליים (Northup, 2013).

בעולם המחקר הצעיר של הביוצ'אר, חוקרים רבים מעמיסים אחריות גדולה וציפיות רבות על הטכנולוגיה, כפתרון לקיבוע פחמן אטמוספרי וכתוסף קרקע בעל פוטנציאל להקטין או אפילו להפוך את נזקי החקלאות הקונבנציונאלית. ארגון הביוצ'אר הבינלאומי שואף להגיע ליעד של קיבוע מליון טונות ביוצ'ר בכל שנה עד שנת 2050. על מנת להגיע לכמות זו, ניתן לדמיין אוסף של מערכות הפקה קטנות בהן אדם מייצר 100 קילוגרם ביוצ'אר בשנה, או לוקח חלק בקהילה בה הביוצ'אר מיוצר באופן קולקטיבי עבורו. לפי חישוב גס, ניתן לומר שעל מנת להתמודד עם כל פליטת הפחמן האנתרופוגנית, מבלי לשנות את אורח חיינו, ולאפס אותה עד שנת 2050, נזדקק להגיע מאוד קרוב לשיא כושר הצימוח של כדור הארץ (היכולת לגדל צמחים), לבנות מערכים הנדסיים בקנה מידה גלובאלי, ולערב בתכנית מדינות, חברות, ואת הציבור הרחב בתיאום מעולה על מנת להצליח במשימה. במצב כזה, אפשר לומר שאולי גם הביוצ'אר, כמו טכנולוגיות בנות-קיימא פוטנציאליות אחרות, נוטה להכשל במבחן קנה המידה. (Rhodes, 2012). אם לסיים בנימה אופטימית - לדידי, יותר מהכל, היכולת של כל אדם, גנן, וחקלאי בכל קנה מידה לייצר באמצעים פשוטים, גם אם לא יעילים בצורה האופטימלית, ביוצ'אר ובטווח הארוך - טרה פרטה נובה, היא משמעותית ומהפכנית (Kawa & Oyuela-Caycedo, 2008).

שהמחקר הקיים עדיין איננו מסוגל להסביר את הטווח הגדול ביציבות הביוצ'אר בקרקע (בין שנים לאלפי שנים), כך שעל אף האופטימיות שעוטפת מספר ארגונים בינלאומיים וחוקרים, קשה להעמיד על כתפיו של הביוצ'אר את כל נושא קיבוע הפחמן האנושי (Gurwick et al., 2013). לאמיתו של דבר, נאלץ לתכנן מחדש את הצורה בה אנו חיים, לא רק על ידי הפחתת השימוש ברכב פרטי, אלא על ידי מחזור חנקן ואשלגן מזבל בעלי חיים, כולל בני אדם, על מנת לגדל מזון, וזאת בלי לציין גידולים לשימוש משני. באידיאל, אפשר לשלב בין קיבוע פחמן בקרקע (והקטנת הפחמן האטמוספרי במעשה זה) ושיפור הפוריות של האדמות החקלאיות (Rhodes, 2012). קיבוע פחמן באמצעות ביוצ'אר לא יכול להיות הפתרון היחיד לקיבוע פחמן, וקיבוע פחמן לא יכול להיות הפתרון היחיד לחיים ברי-קיימא לאורך זמן (Lehmann, 2007; Rhodes, 2012).

”שום טכנולוגיה לא נותנת מענה לתרבות שאינה יודעת שובע - תרבות המקדשת את

הצריכה והנהתנות” (אטינגר, ל. 2007)

נספחים

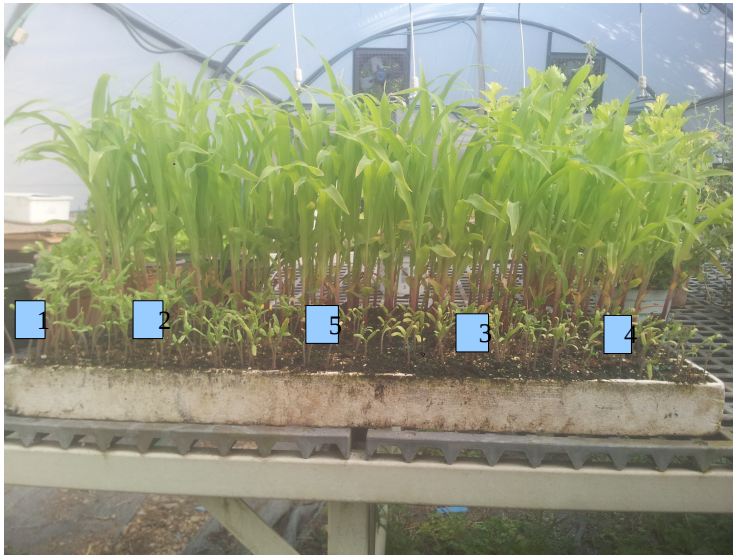
נספח א' – ניסוי מקדים

נפח של כ-80 ליטר ביוצ'אר הוכן בשיטה מקובלת לקנה מידה קטן לאורך שעה וחצי מתחילת הבעירה ועד סופה, בטמפרטורה של לא יותר מ-500 מעלות בשיא, כשרוב התהליך ככל הנראה נעשה בפחות מ-400 מעלות (לפי העין וידע כללי). חומר המוצא היה עץ קשה – שבבי אקפליטוס אדום, שנאספו מעבודות פיסול בעץ בבית הספר האנתרופוסופי.

לאחר ההתקררות, הביוצ'אר חולק לארבע מיכלים מנוקבים בתחתיתם. בכל מיכל הביוצ'אר עורבב עם קומפוסט קנוי של מרום-גולן. ביחסי נפח עולים של 1:3 (25% ביוצ'אר, 75% קומפוסט), 2:2, 3:1, ו-100% ביוצ'אר, תערובות מס' 1 עד 4 בהתאמה. המיכלים נשטפו בהשקייה ידנית לפחות פעם ביומיים במשך שבועיים (הרטבה בצינור עד שהמיכל מלא, כשהמים מתנקזים לבד בחופשיות), לפי נוהל מקובל והמלצות מעוגנות במחקר (Rogovska et al., 2012).

נקנו זרעי עגבניה (*Solanum lycopersicum*) מזן "מרמנד" ותירס (*Zea mays*) מזן "סופר מתוק צהוב" ממשווק זרעים מוכר. לקראת הזריעה במגשים, הוכנה תערובת נוספת, כקבוצת ביקורת, על פי היחס המקובל בגן הבוטני לתערובת למצע זריעה (דיווח ע"י מר אורן עזרי) - 70% כבול, 20% פרלייט, ו-10% וורמיקוליט. חמשת הטיפולים השונים (ארבעה טיפולי ביוצ'אר וקבוצת ביקורת אחת) ייושמו על שני סוגי הזרעים, ונעשה 4 חזרות לכל טיפול (זריעה ב-4 מגשי שתילה נפרדים). בכל חזרה, הקבוצות עורבבו בצורה רנדומלית, על מנת לנטרל השפעות אפשריות של מיקום הקבוצות בתוך מגש השתילה. מיקומי המגשים בתוך המשתלה. המגשים הונחו בחממה ב-20.5 לאורך אותו שולחן השתילה.

השערות הניסוי היו כי תערובת מס' 1 (25% ביוצ'אר, 75% קומפוסט) תהיה המוצלחת מכולן במדדי צימוח ובריאות הצמח; כי תערובת מס' 4 (100% ביוצ'אר) תהיה הכי פחות מוצלחת, וכי קבוצת הביקורת תתייצב היכן שהוא סביב הממוצע.



איור 7: הבדלים בין הקבוצות בעין בלתי מזוינת במגש מס' 4

בניסוי א' התרחשו שתי תקלות: כוסיות השתילה קטנות מדי לזרעי התירס והרבה מהם "דחפו" את עצמם החוצה בחלק מהמגשים, ובנוסף פיזור המים לשניים מהמגשים היה לקוי, וחלקים גדולים במגש לא הורטבו כלל מן ההתחלה. על אף התקלות ניתן היה להבחין בעין בלתי מזוינת בכמה מסקנות שעזרו לתכנן את ניסוי ב':

- בניסוי על התירס הביוצ'אר לא היה ניתן להבחין בהבדלים משמעותיים, אך אחוזי השרדות וקצב צימוח בעגבניות, אפשר היה להבחין בעין בהבדלים משמעותיים מאוד בין התערובות. תערובת מס' 1 מאוד מוצלחת (25% ביוצ'אר) ו 4 (100% ביוצ'אר) הכי פחות (כמצופה). על כן, מכיוון שהתירס לא הראה הבדלים ברורים מספיק בנביטה ובצימוח ומכיוון שבעגבניות כן ניתן היה לזהות הבדלים ואפילו הבדלים וויזואליים, החלטתי להתמקד בעגבניות בלבד בניסוי השני.
- על מנת לנטרל את הבעיה שהתפתחה עקב כוסיות שתילה קטנות מדי, החלטתי להקטין את מספר הפריטים ולהגדיל את כוסות השתילה לכוסות של חצי ליטר.
- הביוצ'אר בניסוי א' הוכן מעץ שמקורו אינו מובטח עבור הגן הבוטני. על מנת להציע אלטרנטיבה ואמיתית למצע זריעה חדש, יש להשתמש בחומר גלם שקיים בשפע ושהאפשרות להמשיך ולהשיג אותו אינה מוטלת בספק.

זאת ועוד, בזמן התייעצות, מר יונתן גל, שהינו אגרונום, גנן מנוסה ועובד בגן הבואני, הסב את תשומת ליבי לכך שאפשר שהקומפוסט הקנוי הינו תערובת זריעה מספיק טובה כבר כמו שהוא, מאחר והוא בשל ועשוי להיות תערובת שתילה אופטימלית בפני עצמו מבחינת פירוק החומר האורגני, קצב ואופי החלחול והמצאות הנטוריינטים במצע. השערה זו אוששה בספרות רק בשלב זה של המחקר מכיוון שלא

עלתה בעת תכנון המחקר הראשוני (Ribeiro et al., 2007). במבט על הנתונים מניסוי א' כאשר ברור שכושר ההשרדות, בריאות הצמח והצימוח גדלים ככל שריכוז הקומפוסט עולה, החלטתי להוסיף תערובת זריעה שישית שבה מצע הגידול יהיה 100% מקומפוסט, ללא ביוצ'אר כלל.

וכך, אם נבחין בניסוי ב' שאין הבדלים במדדים הנבחרים בין התערובת המוצלחת ביותר בניסוי א' (1 ביוצ'אר: 3 קומפוסט) לבין מצע זריעה בהרכב של 100% קומפוסט, או לחילופין, שהביצועים של האחרון טובים יותר מהראשון, נוכל להסיק מכך, ספציפית לניסוי זה, את מידת ההשפעה של הביוצ'אר על הנביטה והצימוח הראשוני ביחס למצע גידול המורכב מ-100% קומפוסט בשל ו 0% ביוצ'אר.

- Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D., & Hipps, N. A. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil*, 337(1-2), 1–18.
- Denevan, W. M., & Woods, W. I. (2004). Discovery and awareness of anthropogenic Amazonian Dark Earth (Terra Preta).
- Deska, J., Jankowski, K., Bombik, A., & Jankowska, J. (2011). Effect of growing medium pH on germination and initial development of some grassland plants. *University of Natural Sciences and Humanities*, 10, 45–56.
- Diamond, J. M. (2005). *Collapse: how societies choose to fail or succeed*. New York: Viking.
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., & Zech, W. (2001). The “Terra Preta” phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88(1), 37–41.
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219–230.
- Graber, E. R., Meller Harel, Y., Kolton, M., Cytryn, E., Silber, A., Rav David, D., ... Elad, Y. (2010). Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant and Soil*, 337(1-2), 481–496.
- Gurwick, N. P., Moore, L. A., Kelly, C., & Elias, P. (2013). A Systematic Review of Biochar Research, with a Focus on Its Stability in situ and Its Promise as a Climate Mitigation Strategy. *Plos One*, 8(9), 1–10.
- Kawa, N. C., & Oyuela-Caycedo, A. (2008). Amazonian Dark Earth: A Model of Sustainable Agriculture of the Past and Future? *The International Journal Of Environmental, Cultural, Economic And Soical Sustainability*, 4(3), 9–16.

- Lehmann, J. (Ed.). (2003). Amazonian dark earths: origin properties management. Dordrecht ; Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(7), 381–387.
- Liu, G., Porterfield, D. M., Li, Y., & Waldemar, K. (2012). Increased Oxygen Bioavailability Improved Vigor and Germination of Aged Vegetable Seeds. *Hortscience*, 47(12), 1714–1721.
- Mann, C. C. (2002). The Real Dirt on Rainforest Fertility. *Science*.
- Northup, J. (2013). Biochar as a replacement for perlite in greenhouse soilless substrates. Graduate Theses and Dissertations, Iowa State University.
- Raviv, M., & Lieth, J. H. (2008). Soilless culture theory and practice. Amsterdam; Boston: Elsevier Science. Retrieved from <http://site.ebrary.com/id/10204210>
- Rhodes, C. J. (2012). Biochar, and its potential contribution to improving soil quality and carbon capture. *Science Progress*, 95(3), 330–340.
- Ribeiro, H. M., Romero, A. M., Pereira, H., Borges, P., Cabral, F., & Vasconcelos, E. (2007). Evaluation of a compost obtained from forestry wastes and solid phase of pig slurry as a substrate for seedlings production. *Bioresource Technology*, 98(17), 3294–3297.
- Rogovska, N., Laird, D., Cruse, R. M., Trabue, S., & Heaton, E. (2012). Germination Tests for Assessing Biochar Quality. *Journal of Environment Quality*, 41(4), 1014.
- Shackley, S., & Sohi, S. (n.d.). An Assessment of the benefits and issues associated with the application of Biochar to Soil. A report commissioned by the United Kingdom Department for Environment, Food and Rural Affairs, and Department of Energy and Climate Change, UK Biochar Research Centre.
- Solaiman, Z. M., Murphy, D. V., & Abbott, L. K. (2012). Biochars influence seed germination and early growth of seedlings. *Plant and Soil*, 353(1-2), 273–287.

Sombroek, W. G. (1966). Amazon Soils. Wageningen, Netherlands: Centre For Agricultural Publications and Documentation.

Spokas, K. A., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Archer, D. W., Ippolito, J. A., Collins, H. P., ... Nichols, K. A. (2012). Biochar: A Synthesis of Its Agronomic Impact beyond Carbon Sequestration. *Journal of Environment Quality*, 41(4), 973.

Taghizadeh-Toosi, A., Clough, T. J., Sherlock, R. R., & Condon, L. M. (2012a). A wood based low-temperature biochar captures NH₃-N generated from ruminant urine-N, retaining its bioavailability. *Plant and Soil*, 353(1-2), 73–84.

Taghizadeh-Toosi, A., Clough, T. J., Sherlock, R. R., & Condon, L. M. (2012b). Biochar adsorbed ammonia is bioavailable. *Plant and Soil*, 350(1-2), 57–69.