

שימוש בשיטות עבודה של חישה מרחוק לאיתור שטחי מרעית לפי שימושי הקרקע באגן ניקוז

נחל פטיש

Using remote sensing techniques to locate grazing areas by land uses in Patish river basin

מוגש לקרן המדען הראשי במשרד החקלאות ולהנהלת ענף מרעה

ע"י

נפתלי גולדשלגר, אוניברסיטת אריאל, הנדסה אזרחית, התחנה לחקר הסחף, משרד החקלאות.

אלי צעדי, המחלקה משאבי טבע, מינהל המחקר החקלאי, מרכז מחקר גילת.

רחל לוגסי, אוניברסיטת אריאל, הנדסה אזרחית.

Naftali Goldshlager, Soil Erosion Research Station, Rupin, Israel, E-mail: goldshleger@gmail.com

Eli Zaady, Natural Resource and Agronomy, Gilat Research Center, E-mail: zaadye@volcani.agri.gov.il

Rachel Luggasi, Civil Engineering Faculty, Ariel University, Israel, E-mail: rachellugassi1@gmail.com

תקציר

הצגת הבעיה: איכות המנה הנאכלת על ידי בעלי החיים במרעה, היא אחד הגורמים החשובים ביותר המשפיע על יצרנותם. לפיכך, מידע אודות איכות המרעית חשוב להקצאה מושכלת של שטחי המרעה. בשיטה המקובלת כיום של איסוף דוגמאות לאנאליזה כימית, התוצאות מתקבלות לאחר יציאת העדרים למרעה.

מטרות המחקר: (1) נתינת כלים לניהול בזמן אמיתי של מאפייני המרעית באגן הפטיש בצפון הנגב. (2) יצירת בסיס לניהול המרעה באגנים נוספים ובחינת השפעתם של שימושי הקרקע; חקלאות שלחין ובעל, שטחים פתוחים ופעילות קק"ל ביערות נטועים על מאפייני המרעית העשבונית הפוטנציאלית המשמשת למזון לבעלי החיים באגן נחל פטיש.

שיטות: במחקר זה פיתחנו מתודולוגיה מבוססת ספקטרוסקופיה ל-1. קביעה איכותית של ריכוז חלבון, NDF ו- MEC בצמחייה לאחר יבוש מאזורי מרעה והוגדרו שלושה קטגוריות (נמוך, בנוני וגבוה) לכל מדד. 2. הערכה כמותית של ריכוז חלבון ו- NDF של צמחייה טרייה.

תוצאות: אחוזי הצלחה גבוהים התקבלו הן בחיזוי הקטגורי והן בהערכה הכמותית.

מסקנות: השיטה תאפשר הערכה כמותית לאיכות מרעה בהתבסס על מדידות ספקטראליות (ספקטרומטר נייד ASD), תוך חסכון בעלויות של האנליזות הכימיות המעבדתיות. השימוש בשיטה יאפשר לקבל בזמן קצר ובעלות נמוכה, הערכה של איכות המרעה.

.....
הצהרת החוקר הראשי:

הממצאים בדו"ח זה הינם תוצאות הניסויים עד כה של המחקר.

הניסויים מהווים המלצות לחקלאים: לא (מחק את המיותר)

חתימת החוקר _____ תאריך: 10.5.2015

עמוד	<u>תוכן עניינים:</u>
3	1. מבוא
3	1.1 רקע מדעי
4	1.2 מטרות המחקר
4	2. חומרים ושיטות
4	2.1 אזור המחקר
4	2.2 איסוף נתונים
5	2.3 שיטות ניתוח ועיבוד נתונים
6	2.4 מדדים להערכת איכות המרעה
6	2.5 פירוט שלבי המחקר
7	3. תוצאות
7	3.1 הערכת איכות מרעית של נתוני ארכיון
7	3.1.1 הערכת איכות המרעית בהתבסס על שיפוע הספקטרום
12	3.1.2 הערכת איכות מרעית מבוססת SAM (Spectral Angel Mapper)
	3.2 הערכת איכות המרעית בהתבסס על שיפוע הספקטרום, לאחר דיגום נתונים
14	לערוצי חיישן AISA.
16	3.3 הערכת איכות מרעית של צמחיה טרייה בהתבסס על שיפוע הספקטרום
23	3.4 מיפוי צמחיה באגן נחל פטיש מתוך נתוני חיישן WorldView
29	4. סיכום ומסקנות
30	5. רשימת ספרות
32	6. נספחים

1.1 רקע מדעי

איכות המנה הנאכלת על ידי בעלי החיים במרעה, היא גורם חשוב ביותר המשפיע על יצרנותם. עם זאת, זהו הגורם הפחות ידוע במרעה טבעי. איכות המנה נגזרת ממכלול גורמים: 1. איכות המזון הפוטנציאלית הגלומה בצומח. 2. צריכת המזון. 3. גורמים המשפיעים על התנהגות הרעייה ושיחור המזון, כמו סוג המרעה (עשבוני/חורש) (גלסר, תשס"ד, 2004). שיטה מקובלת להערכת איכות המזון הפוטנציאלית הגלומה בצומח הינה אנאליזה כימית של הצמחייה, בה נבדקים ריכוז החלבון, מרכיבי דופן התא (ADF - acid detergent fiber, NDF - neutral detergent fiber), ליגנין (acid detergent lignin ADL - acid), צלולוז, המיצולוז, נעכלות (digestible) וריכוז אנרגיה מטבולי (MEC - metabolizable energy concentration). בשיטה זו, נאספות דוגמאות אקראיות מאזורי המרעה הפוטנציאליים ונשלחות לבדיקה כימית במעבדה. הזמן הנדרש עד לקבלת תוצאות המעבדה ארוך והן מתקבלות זמן רב לאחר יציאת העדרים למרעה.

באגן נחל פטיש בצפון הנגב, לפני הוצאת העדרים לרעה נעשית הערכה של כמות הביומסה בשטחי המרעה המשמשת כבסיס להקצאת שטחים לרועים בהתאם לגודל העדרים. מידע אודות איכות המרעה, יכול לשמש כמדד להקצאה מושכלת של שטחי המרעה ולפיכך נדרשת טכניקה מהירה להערכת איכות המרעה.

שיטת ה-NIRS (Near Infrared Reflectance Spectroscopy), הנה שיטה ספקטרוטרית בעזרתה ניתן לאתר קשרים כימיים בחומר אורגני באמצעות בליעות בתחום ה-NIR-SWIR (1000-2500 nm). השיטה מבוססת על האינטראקציה בין קרינה אלקטרומגנטית ובין החומר הנבדק וכמות האנרגיה הנבלעת/מוחזרת מהאובייקט כפונקציה של אורך גל מושפעת ישירות משני מגוונים בליעה הקרויים כרומופורים כימיים וכרומופורים פיזיקליים. כרומופור כימי הנו מרכיב או קבוצה כימית בחומר שבולע קרינה בשני מנגנונים תנודתיים ומנגנון אלקטרוני: (1) מכפלה (overtone) של התנודה הבסיסית הנמצאת בתחום 2500-10000 nm. (2) קומבינציות של התנודה הבסיסית ו/או של ה-overtone (3) בליעה הנובעת ממעברים אנרגטיים ומופיעה בדרך כלל בתחום הקרינה האולטרא סגול, אך לעיתים גם בתחום ה-NIR (780-1100 nm) (Ben-Dor et al., 1997; Clark, 1999; Hunt & Salisbury, 1970). כרומופור פיזיקלי משפיע על עוצמת הקרינה המוחזרת התלויה במבנה העלה, זווית הפגיעה של הקרינה באובייקט, עוצמת הקרינה, צבע ולחות (Baumgradner et al., 1985; Dalal & Henry, 1986).

לצמחייה פעילות ספקטראלית בכל תחום ה-VIS-NIR-SWIR (400-2500nm). אזורי בליעה בולטים בתחום ה-NIR-SWIR כוללים בליעות של קשרי פחמן-מימן (910, 1120, 1200, 1400, 1730, 2200, 2300 nm); קשרי חמצן-מימן של פחמימות (1500, 1600, 2000, 2100 nm) וקשרי חנקן-מימן (1020, 1500, 2060, 2180, 2300 nm) (Curran, 1989; Murray et al., 1987; Schwanninger et al., 2011; Workman et al., 2008). בשל מורכבות העצומה של חומרים אורגניים, ספקטרום של צמחייה בתחום ה-NIR-SWIR מכיל ערוצי מידע רבים בשל הכרומופורים הרבים. לפיכך, השפעת הרכב הצמחייה על ספקטרום ההחזרה שלה מקשה על זיהוי תרומת כל מרכיב בה. דהיינו, לא ניתן לקשור באופן ישיר בין בליעות ספקטראליות ספציפיות ובין מרכיבים ספציפיים בצמחייה (חלבון, צלולוז וכו'). השילוב של בליעה במספר אורכי גל והיחס ביניהם הוא זה המאפשר בסופו של דבר את החיזוי דרך התנהגות הספקטרום בתחום ספקטראלי ספציפי ובין המרכיב הנבדק (גלסר, 2004).

למעשה, זיהוי המרכיבים הכימיים והפיזיקליים של הצומח באמצעות ה-NIRS נקבע כיום על ידי יישום שיטות סטטיסטיות רבות משתנים (Schwanninger et al., 2011). השיטה מצריכה כיום מדויק המתבסס על מספר רב של

דוגמאות. הצורך בביצוע אנאליזות כימיות ועלותן הגבוהה הינו גורם מגביל ומשמעותי בחיזוי נכון (גלסר, 2004; פרידמן, 2002). השיטה הנהוגה כיום באזורי המרעה שבאגן נחל פטיש היא דגימת אזורי צומח במרעה והערכת הביומסה המבוססת על שקילת ביומסה יבשה של דוגמאות אלה ועל הערכת החוקרים והסוקרים בשטח. הדוגמאות נשלחות למעבדה והמידע הכימי מוערך בשיטת ה-NIRS. זאת, פרט לשיטת הערכת ביומסת המרעית הקיימת ביערות קק"ל המבוצעת על ידי סוקרים בשטח ושאיינה יורדת לרמת איכות המרעית, אלא רק לכמות הביומסה הצמחית.

באגן הניקוז נחל פטיש, אזור מדברי למחצה, הצמחייה מגיעה למקסימום גודלה תוך פרק זמן קצר והגידול המרבי מתרחש בסוף פברואר תחילת מרס. הזמן החולף בין מקסימום הצימוח ובין יציאת העדרים לאזורי המרעה (סוף פברואר - תחילת מרס) קצר מכדי שניתן יהיה להשתמש בתוצאות בדיקות המעבדה ולשלב את המידע בתהליך קבלת החלטות הנוגע להקצאת אזורי המרעה לעדרים. לפיכך, נדרשת שיטה בה זמן הפקת המידע הנחוץ יהיה קצר דיו כך שיעמוד לרשות מקבלי ההחלטות. למיטב ידיעתנו, לא ניתן מענה להערכה איכותית וכמותית של איכות המרעית בשטחי מרעה פתוחים מתוך המידע הספקטראלי בלבד ומחקר זה בא לפתח שיטה ספקטראלית לביצוע הערכה זו בזמן אמת.

1.2 מטרת המחקר

נתינת כלים לניהול בזמן אמיתי של מאפייני המרעית באגן הפטיש ויצירת בסיס לניהול המרעה באגנים נוספים. דהיינו, בניית מתודולוגיה מבוססת ספקטרוסקופיה, לקביעה איכותית וכמותית של המרעית הכוללת את תכולת החלבון, NDF (neutral detergent fiber) ו-MEC (metabolizable energy concentration) בשטחי המרעה. המטרה לפתח שיטה המספקת תשובה תוך פרק זמן קצר לאיכות המרעה ואף ניתנת ליישום באתר של שטחי המרעה בנחל פטיש.

2. חומרים ושיטות.

2.1 אזור המחקר

אזור המחקר אגן נחל פטיש (נספח 1) נבחר היות ובנוסף לפעילות ייעור של קק"ל ולחקלאות שלחין ובעל, שימוש הקרקע הדומיננטי בו הוא מרעה. אגן הנחל מנקז שטח של כ-230 קמ"ר וגבולותיו מצפון גבעות גורל, נחל שומריה ונחל הגדי ומדרום נחל אופקים ולון. בשטח האגן, נכללים פארק סיירת שקד, פארק באר שבע, דודאים, יער גילת, שומריה ויער שגרירים המשמשים למרעה. שתי חלקות נבחרו לביצוע המחקר בסיירת שקד ובגילת. האקלים האופייני לאזור המחקר הינו חצי-צחיח כאשר עונת הגשמים נמשכת מנובמבר ועד אפריל וממוצע הגשמים השנתי הוא 200-300 מ"מ. הצומח האופייני בתקופת המרעה (מרס-מאי) כולל עשבוניים כבן-שלח, שיבולת שועל, מלעניאל מצוי, שעורת העכבר, קדד, ניסנית, חוח וברומית.

2.2 איסוף נתונים

1) נתוני ארכיון של מכון וולקני של כ-300 דוגמאות צומח שונות (מרעית קש מחוות מיגדה וצומח מאזורי מרעה), שנאספו בין השנים 2002 - 2011, כללו מידע כימי (ריכוז חלבון, NDF, ADF, ליגנין, צלולוז, המיצלולוז ונעכלות) ומדידות ספקטראליות. האנליזה הכימית והמדידות הספקטראליות נעשו לאחר ייבוש הדוגמאות ב-60°C במשך 48 שעות וטחינתם. מדידות ספקטראליות לדוגמאות צומח אלו, נעשו על ידי ספקטרומטר מעבדה Foss NIRS system

5000, בתחום 1100-2498 nm וברזולוציה של 2 ננומטר (700 ערוצים) (Landau et al., 2008). נתונים אלה, שימשו לאיתור מנגנונים ספקטראליים להערכת איכות המרעה.

(2) דוגמאות צומח מאזור המחקר נאספו בשני מועדים: ב- 5.11.2012 16 דוגמאות של עשבוניים רב-וחד-שנתיים מאגן נחל פטיש וב- 12.3.2013, 36 דוגמאות של בן-שלח, שיבולת שועל, מלעניאל מצוי, שעורת העכבר, קדד, ניסנית, חוח וברומית נאספו מחלקות המרעה בסיירת שקד וגילת. דוגמאות הצמחייה מנחל פטיש שנאספו לפני עונת הגשמים האופיינית לאזור, חלקן היו טריות (כגון מיתנן) וחלקן בשלבי יובש שונים (כגון סטיפה). הדוגמאות שנאספו מסיירת שקד וגילת היו טריות. ספקטרום החזרה של כל דוגמאות הצמחייה, נמדד בו ביום, ולאחר מכן הדוגמאות יובשו ב-60°C במשך 48 שעות, נטחנו וספקטרום החזרה נמדד בשנית. החזרת הקרינה של הצמחייה נמדדה באמצעות ספקטרומטר שדהומעבדתי ASD (Analytical Spectral Device) (ASD, Inc. Boulder, CO, USA) בתחום 350-2500nm ברזולוציה ספקטראלית של 1 ננומטר (2151 ערוצים).

אנליזה כימית להערכת שיעור הפרוטאין וה NDF, נעשתה במעבדת נווה יער.

(3) נתוני לוויין WorldView-2 עם 8 ערוצים בתחום ה VIS-NIR (400-950 nm) ורזולוציה מרחבית של 2X2 מ'. ההדמאה נאספה בתאריך 28.2.2010 מעל אזור נחל פטיש. נתוני הלוויין שימשו למיפוי הצמחייה באזור נחל פטיש לפי שלושה קטגוריות: צמחיה עשבונית, שיחים ועצים

2.3 שיטות ניתוח ועיבוד נתונים

1. מניפולציות מתמטיות הופעלו על נתוני ההחזרה 1. נרמול לקו הבסיס (Continuum Removal) להדגשת בליעות (Clark, 1999). 2. נגזרת ראשונה, נגזרת שנייה ו-Kubelka-Munk המדגישות את הכרומופור הכימי ומבטלות את השפעת הכרומופור הפיזיקלי (Esbenden 2002).
חושב שיפוע הספקטרום בתחומים ספקטראליים שונים על פי הנוסחה:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

כאשר x, מייצג את אורך הגל, ו y מייצג ערך החזרה לאחר נרמול לקו הבסיס.

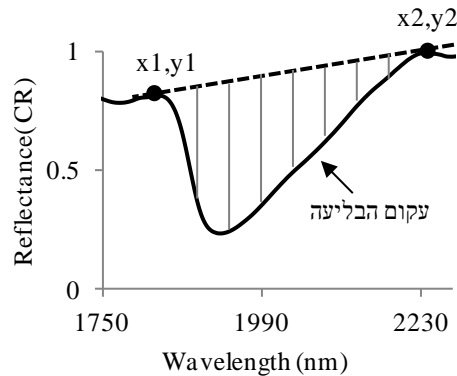
2. בניית מודל לחיזוי כמותי של חלבון ו NDF נעשתה באמצעות מודל סטטיסטי PLS (Esbenden 2002).
3. שיעור האנרגיה הסולרית הנבלעת על ידי הצמחייה בתחום ה NIR-SWIR הוא פונקציה של כמות המים שבה (Jensen, J.R., 2007). לפיכך, ניתן להעריך את כמות המים בצמחייה על ידי חישוב סך שטח הבליעה סביב בליעת המים ב 1940 nm (כדלקמן: 1) איתור שתי נקודות מקסימום של כתפי הבליעה (x1,y1 ו x2,y2 באיור 1).
(2) חישוב מקדמי משוואת הקו הישר העובר בין שתי נקודות אלה ע"י:

$$a = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1), \quad b = y_1 - ax$$

(3) חישוב השטח בין משוואת הקו הישר ובין עקום הבליעה על ידי:

$$\text{Total area} = \sum_{i=x_1}^{x_2} (y_L^{(i)} - y_C^{(i)})$$

כאשר x_1-x_2 , הטווח הספקטראלי של שטח הבליעה, $y_L(i)$ - ערך ה CR על משוואת הקו הישר וה $y_C(i)$ - ערך ה CR על עקום הבליעה



איור 1: הדגמת חישוב שטח בליעת המים ב 1940 nm

עיבוד, ניתוח המידע הספקטראלי ופיתוח אלגוריתמים להערכת חלבון, NDF ו- MEC, נעשו באמצעות תוכנת ENVI (ITT Visual Information Solutions) (<http://www.ittvis.com/>), תוכנת Excel (Microsoft) ותוכנת סטטיסטית Unscrambler (Esbenden 2002).

2.4 מדדים להערכת איכות המרעה

המדדים שישמשו להערכת איכות המרעה הם: אחוז חלבון, NDF ו- MEC. ערכו של המזון לבעלי-חיים תלוי בשיעור הנעכלות, החלק מהמזון שיכול להיספג דרך מערכת העיכול. לחלבון, שיעור נעכלות גבוה ול- NDF (סיבים בלתי נעכלים) נמוך. מדדים אלה נבחרו בשל היותם מדדים ידועים לאיכות המנה הנאכלת על ידי בעל-חיים המשפיעה על יצרנותם. כמו כן, נמצא מתאם גבוה בין מדדים אלה ובין המידע הספקטראלי (טבלה 1).

האנאליזות הכימיות להערכת חלבון, NDF ונעכלות שנעשו לנתוני הארכיון של מכון וולקני, מופיעים ב- Henkin וחובריו (2011), וב- Landau וחובריו (2004; 2008). ה- MEC חושב מתוך אחוז הנעכלות (Dig.) על פי הנוסחה: $(4.4 * Dig * 0.82) / 100$

האנליזה הכימית להערכת חלבון, עבור דוגמאות הצמחייה שנאספו מנחל פטיש, סיירת שקד וגילת מופיעים ב- Tilley וחובריו (1963) (עבור פרוטאין) וב- Van Soest וחובריו (1991) (עבור NDF). טווח ערכי החלבון, NDF ו- MEC של נתוני הארכיון היה רחב ונע בין: 32% - 2.5 (225 דוגמאות עם ממוצע 9.46% וסטיית תקן 6.9%) עבור חלבון, 76% - 28 (235 דוגמאות, עם ממוצע 59.24% וסטיית תקן 10.95%), עבור NDF ו- 3.12 - 1.06 (166 דוגמאות, ממוצע 2.04 וסטיית תקן 0.55) עבור MEC.

טווח ערכי החלבון ו NDF של הדוגמאות מנחל פטיש, סיירת שקד וגילת נעו בין: 17.2%-3.4 (48 דוגמאות עם ממוצע 9.5% וסטיית תקן 3.9%) עבור חלבון, 71%-27 (43 דוגמאות עם ממוצע 51.5% וסטיית תקן 11.8%).

2.5 פירוט שלבי המחקר

1. בשלב ראשון, בסיס הנתונים שהתקבל מארכיון מכון וולקני, שימש לפיתוח מנגנונים ספקטראליים להערכת מדדי איכות המרעה (פרוטאין, NDF ו MEC). שלב זה מתואר בסעיף 3.1.

2. בשלב שני, הנתונים הספקטראליים מתוך בסיס נתוני הארכיון, שנמדדו על ידי ספקטרומטר מעבדתי (Foss NIRS system 5000 בתחום 1100-2498 nm (700 ערוצים), נדגמו בהתאם לערוצי ה-AISA, חישן היפר ספקטראלי מוטס, ונבדקה יכולת המנגנונים הספקטראליים שפותחו להעריך את איכות המרעית בהתאם לערוצי AISA. שלב זה מתואר בסעיף 3.2

3. שלב שלישי, בסיס נתונים ספקטראלי משולב המורכב מנתוני הארכיון (ספקטרה של הצמחייה נמדדה לאחר יבוש) ומנתוני הצמחייה הטרייה שנאספו באזור המחקר, שימשו לבחינת יכולת המנגנונים הספקטראליים (שזוהו בשלב הראשון) להעריך את שיעור הפרוטאין וה-NDF של הצמחייה הטרייה. כמו כן, בדקנו מהו היחס בין מספר דוגמאות של צמחייה יבשה ובין מספר דוגמאות של טרייה הנדרש לקבלת מודל חיזוי מספק. שלב זה מתואר בסעיף 3.3. ישימות השיטה במקרה של צמחיה טרייה, תאפשר בעתיד בחינת הפעלת השיטה באמצעות חישן מוטס, דוגמת ASIA, לקבלת הערכת איכות המרעית על פני שטח נרחבים ובזמן אמת.

4. סיווג ומיפוי צמחייה לפי שלושה קטגוריות: עשבוני, שחים ועצים. שלב זה מתואר בסעיף 3.4.

3. תוצאות

שני אינדקסים ספקטראליים אותרו כבעלי יכולת להעריך את איכות המרעה. האחד מבוסס על שיפוע הספקטרום והשני מבוסס על SAM (Spectral Angel Mapper).

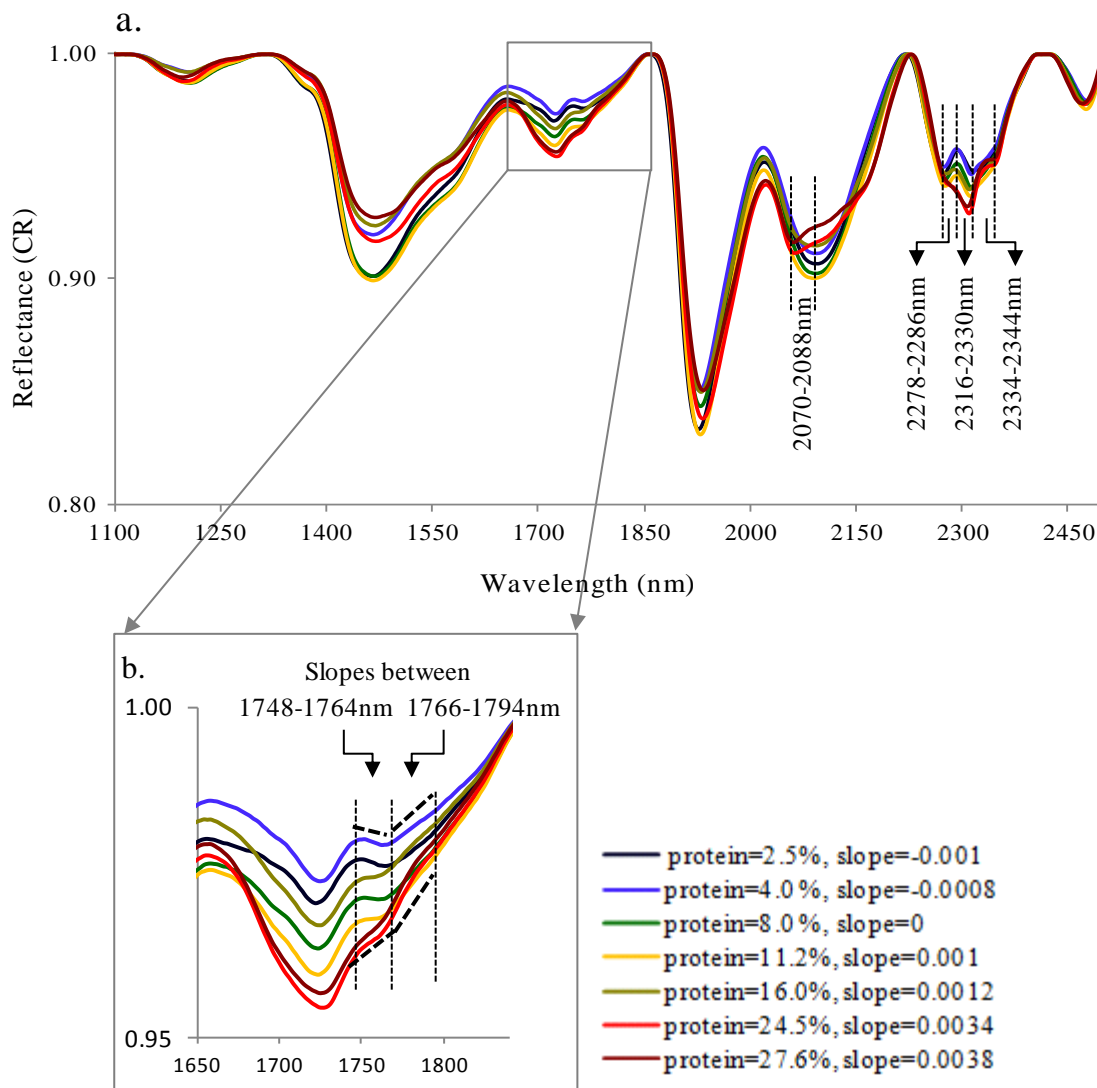
3.1 הערכת איכות מרעית של נתוני ארכיון

3.1.1 הערכת איכות המרעית בהתבסס על שיפוע הספקטרום

מניתוח נתוני ארכיון נמצאו שישה אזורים ספקטראליים שבהם מגמת השינויים בשיפוע תאמה את מגמת השינויים של המדדים הנבדקים והתוצאות מסוכמות בטבלה 1. מגמה זו מודגמת באיור 2 על ידי החלבון. נראה כי בתחומים הספקטראליים המסומנים באיור 2, ישנם שינויים במבנה הספקטרום התואמים לשינויים בערכי החלבון. להדגמת התאמה זו נעשתה הגדלה של התחום הספקטראלי הכולל שניים מתוך ששת האזורים. ניתן לראות שעם העלייה בשיפוע שבין 1748-1764 nm ובין 1766-1794 nm, חלה עלייה באחוז החלבון.

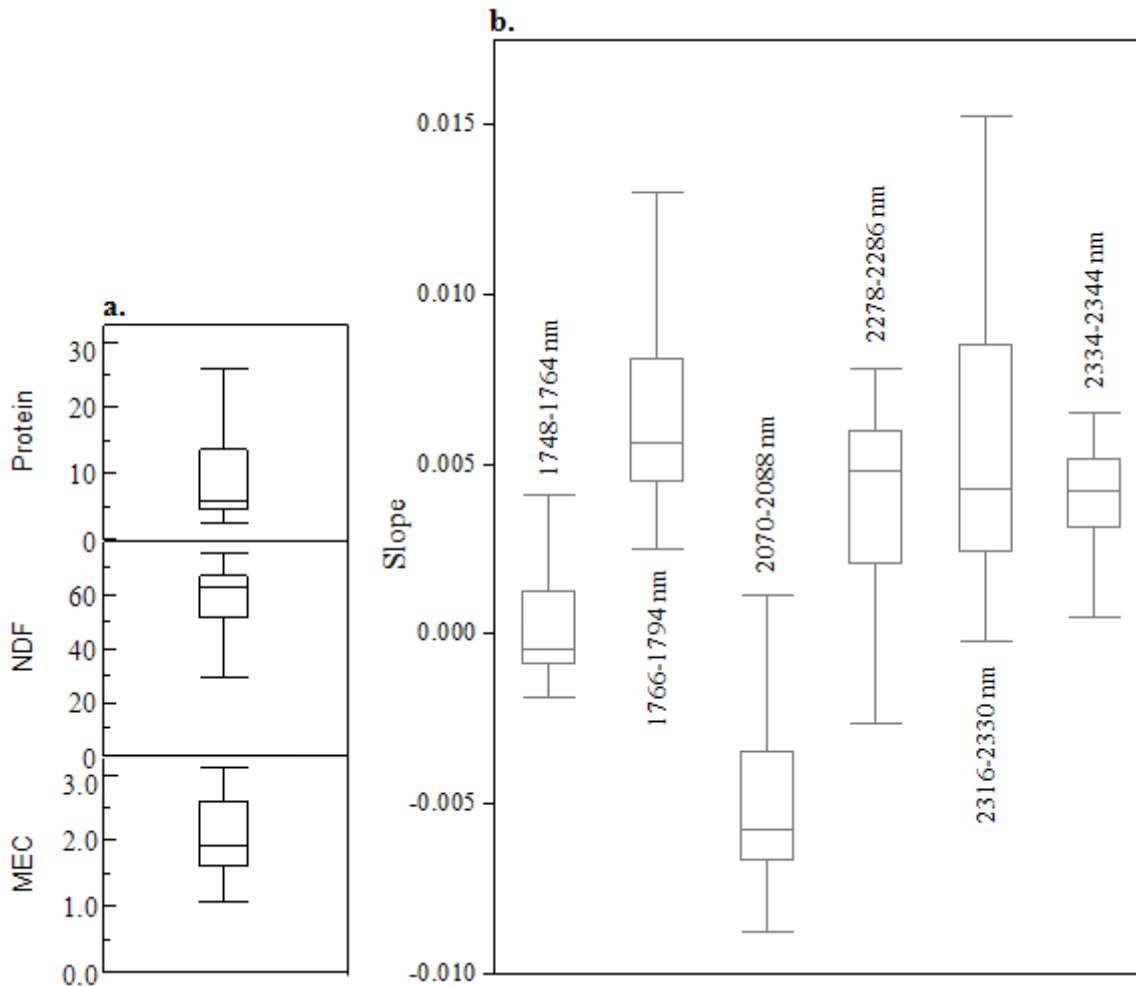
טבלה 1 : מקדמי מתאם בין שיפוע הספקטרום ובין מדדים לאיכות מרעה.

מדדים לאיכות מרעה	Slope(1748-1764nm)	Slope(1766-1794nm)	Slope(2070-2088nm)	Slope(2278-2286nm)	Slope(2316-2330nm)	Slope(2334-2344nm)
% Protein	slope: ↑ % Protein: ↑	slope: ↑ % Protein: ↑	slope: ↑ % Protein: ↑	slope: ↓ % Protein: ↑	slope: ↑ % Protein: ↑	slope: ↓ % Protein: ↑
R ²	0.914	0.6951	0.8582	0.8809	0.8536	0.6781
% NDF	slope: ↓ % NDF: ↑	slope: ↓ % NDF: ↑	slope: ↓ % NDF: ↑	slope: ↑ % NDF: ↑	slope: ↓ % NDF: ↑	slope: ↑ % NDF: ↑
R ²	0.7939	0.5066	0.7405	0.8581	0.6686	0.7478
% MEC	slope: ↑ % MEC: ↑	slope: ↑ % MEC: ↑	slope: ↑ % MEC: ↑	slope: ↓ % MEC: ↑	slope: ↑ % MEC: ↑	slope: ↓ % MEC: ↑
R ²	0.8013	0.7125	0.5947	0.7512	0.8023	0.4593



איור 2 : הדגמת השינויים בשיפוע הספקטרום כנגד השינויים בריכוז החלבון בצמחיה.

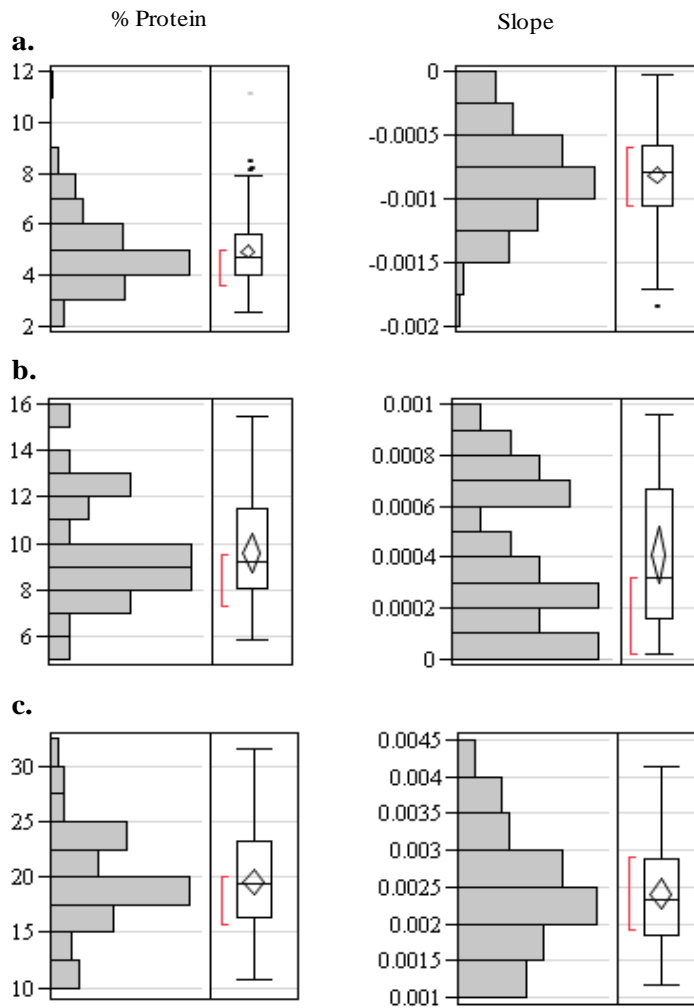
פיזור ערכי החלבון, ו- MEC מוצגים באיור 3a ופיזור ערכי השיפועים בששת האזורים הספקטראליים מוצגים באיור 3b. אנו רואים השתנות משמעותית בערכי השיפועים, ככל הנראה בשל ההבדלים בהרכב הכימי והכרומופורים השונים לכל טווח ספקטראלי.



איור 3: פיזור ערכי החלבון, NDF, MEC וערכי השיפועים.

כדי לקבל תובנה נוספת על הקשר שבין השיפועים הספקטראליים ובין ההרכב הכימי של צומח, טווחים שונים של ערכי חלבון המותנים בטווחים של ערכי שיפוע, חולקו לשלוש קבוצות: שיפוע קטן מאפס, בין 0-0.001 ומעל 0.001 (איור 4). נמצא כי שיפוע שלילי תואם לערכי חלבון נמוכים ושיפוע בין 0-0.001 לערכי חלבון בנוניים (6-15%) ושיפוע מעל 0.001 תואם לערכי חלבון גבוהים מ-15%.

לאור תוצאות אלה נעשתה אנאליזה של פיזור ערכי החלבון, ו- MEC כנגד ערכי השיפוע בששת האזורים הספקטראליים וזוהו שלושה קטגוריות עיקריות: (1) נמוך - המייצגת כ-25% מהנתונים, כאשר $4.5\% \leq \text{חלבון}$, $67\% \leq \text{NDF}$ ו- $1.6 \leq \text{MEC}$. (2) בנוני - המייצגת כ-50% מהנתונים כאשר $13\% < \text{חלבון} < 4.5\%$, $53\% < \text{NDF}$ ו- $1.6 < \text{MEC} < 2.5$. (3) גבוה - המייצגת כ-25% מהנתונים, כאשר $13\% \geq \text{חלבון}$, $53\% \leq \text{NDF}$ ו- $2.5 \leq \text{MEC}$.



איור 4 : פיזור ערכי החלבון לשיפוע (בין 1748-1766nm) נמוך מאפס (a), בין 0-0.001 (b) וגבוה מ-0.001 (c).

לכל קטגוריה ולכל שיפוע בטווח ספציפי זוהו טווח ערכי שיפוע מתאימים. לדוגמה, אם השיפוע בין 1748-1767n גדול מ-0.001, או בין 0.001-0.0008 או קטן מ-0.0008, אזי ריכוז החלבון הוגדר כגבוה, בנוני או נמוך (בהתאמה). סיכום תנאי החלוקה לקטגוריות בטבלה 2.

טבלה 2: תנאי חלוקה לקטגוריות על פי ערך השיפוע בתחומים ספציפיים.

Spectral range	Protein		
	Low ($\leq 4.5\%$)	Meduim (4.5-13%)	High ($\geq 13\%$)
1748-1764 nm	Slope ≤ -0.0008	$-0.0008 < \text{Slope} < 0.001$	Slope ≥ 0.001
1766-1794 nm	Slope ≤ 0.005	$0.005 < \text{Slope} < 0.008$	Slope ≥ 0.008
2070-2088 nm	Slope ≤ -0.0065	$-0.0065 < \text{Slope} < -0.003$	Slope ≥ -0.003
2278-2286 nm	Slope ≥ 0.0058	$0.0025 < \text{Slope} < 0.0058$	Slope ≤ 0.0025
2316-2330 nm	Slope ≤ 0.003	$0.003 < \text{Slope} < 0.008$	Slope ≥ 0.008
2334-2344 nm	Slope ≥ 0.0048	$0.0034 < \text{Slope} < 0.0048$	Slope ≤ 0.0034
NDF			
	Low ($\geq 67\%$)	Meduim (53-67%)	High ($\leq 53\%$)
1748-1764 nm	Slope ≤ -0.0008	$-0.0008 < \text{Slope} < 0.001$	Slope ≥ 0.001
1766-1794 nm	Slope ≤ 0.0052	$0.0052 < \text{Slope} < 0.0076$	Slope ≥ 0.0076
2070-2088 nm	Slope ≤ -0.0065	$-0.0065 < \text{Slope} < -0.0032$	Slope ≥ -0.0032
2278-2286 nm	Slope ≥ 0.0058	$0.0026 < \text{Slope} < 0.0058$	Slope ≤ 0.0026
2316-2330 nm	Slope ≤ 0.0032	$0.0076 > \text{Slope} > 0.0032$	Slope ≥ 0.0076
2334-2344 nm	Slope ≥ 0.005	$0.005 > \text{Slope} > 0.0033$	Slope ≤ 0.0033
MEC			
	Low ($\leq 1.6\%$)	Meduim (1.6-2.5%)	High ($\geq 2.5\%$)
1748-1764 nm	Slope ≤ -0.0005	$-0.0005 < \text{Slope} < 0.0016$	Slope ≥ 0.0016
1766-1794 nm	Slope ≤ 0.0053	$0.0053 < \text{Slope} < 0.0091$	Slope ≥ 0.0091
2070-2088 nm	Slope ≤ -0.0062	$-0.0062 < \text{Slope} < -0.0022$	Slope ≥ -0.0022
2278-2286 nm	Slope ≥ 0.0057	$0.0018 < \text{Slope} < 0.0057$	Slope ≤ 0.0018
2316-2330 nm	Slope ≤ 0.003	$0.003 < \text{Slope} < 0.0093$	Slope ≥ 0.0093
2334-2344 nm	Slope ≥ 0.0048	$0.0031 < \text{Slope} < 0.0048$	Slope ≤ 0.0031

הקריטריונים שבטבלה 2, הופעלו על נתוני השיפועים שחושבו עבור כל תחום ספקטראלי וסיכום אחוזי הצלחה של הערכת איכות מרעית לפי חלוקה לשלושה קטגוריות (נמוכה, בנונית וגבוהה), (טבלה 3). כללית, ניתן לראות כי אחוזי ההצלחה בהערכת הקטגוריות היו טובים, כאשר שיעורי ההצלחה היו: 1) עבור חלבון, 72-80% (נמוך), 50-74% (בנוני) ו- 84-98% (גבוה). 2) עבור NDF, 69-77% (נמוך), 37-72% (בנוני) ו- 79-94% (גבוה). 3) עבור MEC, 56-87% (נמוך), 46-60% (בנוני) ו- 79-89% (גבוה). סיכום סך אחוז הצלחה של שלושת הקטגוריות (טבלה 3), מראה כי השיפועים הטובים ביותר להערכת חלבון ו-NDF היו בתחום 1748-1764 nm ו- 2278-2286 nm, ולהערכת MEC היו בתחום 1748-1764 nm ו- 2316-2330 nm.

טבלה 3 : סיכום חיזוי הצלחה לפי חלוקה לשלושה קטגוריות של נתוני ארכיון בהתבסס על שיפועים.

Protein	סה"כ בכל קטגוריה בהתבסס על בדיקות כימיות	סה"כ בכל קטגוריה בהתבסס על שיפוע הספקטרום					
		1748-1764 nm	1766-1794 nm	2070-2088 nm	1748-1764 nm	1766-1794 nm	2070-2088 nm
Low ($\leq 4.5\%$)	54	41	76%	39	72%	41	76%
Medium (4.5-13%)	114	83	73%	57	50%	84	74%
High ($\geq 13\%$)	57	55	96%	48	84%	49	86%
Total	225	179	80%	144	64%	174	77%
NDF							
Low ($\geq 67\%$)	64	49	77%	49	77%	44	69%
Medium (53-67%)	109	79	72%	40	37%	72	66%
High ($\leq 53\%$)	62	54	87%	51	82%	49	79%
Total	235	182	77%	140	60%	165	70%
MEC							
Low (≤ 1.6)	39	30	77%	26	67%	25	64%
Medium (1.6-2.5)	80	44	55%	41	51%	42	53%
High (≥ 2.5)	47	42	89%	41	87%	41	87%
Total	166	116	70%	108	65%	108	65%
Protein							
Low ($\leq 4.5\%$)	54	41		43	80%	43	80%
Medium (4.5-13%)	114	79	69%	72	63%	68	60%
High ($\geq 13\%$)	57	56	98%	55	96%	49	86%
Total	225	176	78%	170	76%	160	71%
NDF							
Low ($\geq 67\%$)	64	48	75%	46	72%	45	70%
Medium (53-67%)	109	71	65%	57	52%	64	59%
High ($\leq 53\%$)	62	56	90%	58	94%	50	81%
Total	235	175	74%	161	69%	159	68%
MEC							
Low (≤ 1.6)	39	30	77%	34	87%	22	56%
Medium (1.6-2.5)	80	48	60%	47	59%	37	46%
High (≥ 2.5)	47	40	85%	41	87%	37	79%
Total	166	118	71%	122	73%	96	58%

3.1.2 הערכת איכות מרעית מבוססת SAM (Spectral Angel Mapper).

SAM (Spectral Angel Mapper), מיון מונחה (בתוכנת ENVI), המחשב את מידת ההתאמה שבין ספקטרום נתון ובין ספקטרום הייחוס. כל ספקטרום מיוצג כווקטור במרחב n מימדי (גודל n כמספר הערוצים) וההתאמה נקבעת לפי גודל הזווית בין הווקטור של ספקטרום הנבדק ובין ווקטור הייחוס. ככל שהזווית (θ) בין הווקטורים גדולה יותר, ההתאמה הספקטראלית ביניהם קטנה יותר (Boardman et al., 1996). נמצא שספקטרום של צמחייה אשר לה שיעור חלבון נמוך מאוד (2-3%), הניב תוצאות טובות ולכן הוגדר ספקטרום יחוס כספקטרום ממוצע של 4 ספקטרה שערכי החלבון היו בין 2-3%.

מיון SAM הופעל על הספקטרה לאחר הפעלת מניפולציות מתמטיות (CR, First derivative, Second derivative) ו Kubelka Munk). לכל קטגוריה ולכל טווח ספקטראלי ספציפי זהו טווח ערכי הזווית (θ) מתאימים. לדוגמה, אם הזווית בין 2020-2410 nm : קטנה מ- 0.085, או בין 0.085-0.3 או גדולה מ- 0.3 אזי ריכוז החלבון הוגדר כנמוך, בנוני או גבוה (בהתאמה). סיכום תנאי החלוקה לקטגוריות בטבלה 4.

טבלה 4: תנאי חלוקה לקטגוריות על פי זווית θ בתחומים ספציפיים של נגזרת ראשונה ושנייה.

פרוטאין				
	ערך הזווית (θ) בתחום	Low	Medium	High
		(< 4.5%)	(4.5-13%)	(> 13%)
נגזרת ראשונה	2020-2410 nm	$\theta \leq 0.085$	$0.085 < \theta < 0.3$	$\theta \geq 0.3$
	2020-2220 nm	$\theta \leq 0.07$	$0.07 < \theta < 0.28$	$\theta \geq 0.28$
	2220-2410 nm	$\theta \leq 0.09$	$0.09 < \theta < 0.28$	$\theta \geq 0.28$
נגזרת שנייה	2020-2410 nm	$\theta \leq 0.25$	$0.35 < \theta < 0.5$	$\theta \geq 0.56$
	2020-2220 nm	$\theta \leq 0.27$	$0.27 < \theta < 0.56$	$\theta \geq 0.56$
	2220-2410 nm	$\theta \leq 0.22$	$0.22 < \theta < 0.48$	$\theta \geq 0.48$
NDF				
	ערך הזווית (θ) בתחום	Low	Medium	High
		(> 67%)	(53-67%)	(< 53%)
נגזרת ראשונה	2020-2410 nm	$\theta < 0.1$	$0.1 \leq \theta \leq 0.28$	$\theta > 0.28$
	2020-2220 nm	$\theta < 0.08$	$0.08 \leq \theta \leq 0.28$	$\theta > 0.28$
	2220-2410 nm	$\theta < 0.1$	$0.1 \leq \theta \leq 0.28$	$\theta > 0.28$
נגזרת שנייה	2020-2410 nm	$\theta < 0.25$	$0.25 \leq \theta \leq 0.5$	$\theta > 0.5$
	2020-2220 nm	$\theta < 0.27$	$0.27 \leq \theta \leq 0.5$	$\theta > 0.5$
	2220-2410 nm	$\theta < 0.23$	$0.23 \leq \theta \leq 0.47$	$\theta > 0.47$
MEC				
	ערך הזווית (θ) בתחום	Low	Medium	High
		(< 1.6%)	(1.6-2.5%)	(> 2.5%)
נגזרת ראשונה	2020-2410 nm	$\theta \leq 0.12$	$0.12 < \theta < 0.35$	$\theta \geq 0.35$
	2020-2220 nm	$\theta \leq 0.12$	$0.12 < \theta < 0.34$	$\theta \geq 0.34$
	2220-2410 nm	$\theta \leq 0.12$	$0.12 < \theta < 0.34$	$\theta \geq 0.34$
נגזרת שנייה	2020-2410 nm	$\theta \leq 0.27$	$0.27 < \theta < 0.56$	$\theta \geq 0.56$
	2020-2220 nm	$\theta \leq 0.34$	$0.34 < \theta < 0.56$	$\theta \geq 0.56$
	2220-2410 nm	$\theta \leq 0.25$	$0.25 < \theta < 0.56$	$\theta \geq 0.56$

הקריטריונים שבטבלה 4, הופעלו על נתוני SAM לכל תחום ספקטראלי וסיכום אחוזי הצלחה לפי חלוקה לשלושה קטגוריות (נמוכה, בנונית וגבוהה) (טבלה 5). כללית, ניתן לראות כי אחוזי ההצלחה הטובים יותר התקבלו מהפעלת נגזרת ראשונה ושנייה כאשר תוצאות הנגזרת הראשונה גבוהים משל השנייה. שיעורי ההצלחה של נגזרת ראשונה היו: (1) עבור חלבון, 83-98% (נמוך), 68-74% (בנוני) ו 81-96% (גבוה). (2) עבור NDF, 72-90% (נמוך), 55-61% (בנוני) ו 82-91% (גבוה). (3) עבור MEC, 77-87% (נמוך), 43-51% (בנוני) ו- 83-96% (גבוה). אחוזי הצלחה הטובים ביותר התקבלו מהפעלת SAM בין 2020-2410 nm.

בטבלה 5: סיכום חיזוי הצלחה לפי חלוקה לשלושה קטגוריות של נתוני ארכיון, בהתבסס על SAM.

Protein	סה"כ בכל קטגוריה בהתבסס על בדיקות כימיות	סה"כ בכל קטגוריה בהתבסס על SAM של נגזרת ראשונה					
		2020-2410nm		2020-2220nm		2220-2410nm	
		מספר	אחוז	מספר	אחוז	מספר	אחוז
Low ($\leq 4.5\%$)	54	46	85%	53	98%	45	83%
Medium (4.5-13%)	114	84	74%	81	71%	77	68%
High ($\geq 13\%$)	57	55	96%	46	81%	55	96%
Toatal	225	185	82%	180	80%	177	79%
NDF							
Low ($>67\%$)	58	44	76%	52	90%	42	72%
Medium (53-67%)	110	67	61%	65	59%	60	55%
High ($<53\%$)	57	52	91%	47	82%	52	91%
Toatal	167	119	71%	112	67%	112	67%
MEC							
Low (<1.6)	39	30	77%	30	77%	34	87%
Medium (1.6-2.5)	80	41	51%	34	43%	37	46%
High (>2.5)	47	43	91%	39	83%	45	96%
Toatal	166	114	69%	103	62%	116	70%
סה"כ בכל קטגוריה בהתבסס על SAM של נגזרת שנייה							
Protein		2020-2410nm					
		2020-2410nm		2020-2220nm		2220-2410nm	
		מספר	אחוז	מספר	אחוז	מספר	אחוז
Low ($\leq 4.5\%$)	54	45	83%	47	87%	44	81%
Medium (4.5-13%)	114	75	66%	66	58%	72	63%
High ($\geq 13\%$)	57	55	96%	52	91%	55	96%
Toatal	225	175	78%	165	73%	171	76%
NDF							
Low ($>67\%$)	58	42	72%	52	90%	40	69%
Medium (53-67%)	110	60	55%	59	54%	57	52%
High ($<53\%$)	57	52	91%	46	81%	53	93%
Toatal	167	112	67%	105	63%	110	66%
MEC							
Low (<1.6)	39	30	77%	27	69%	33	85%
Medium (1.6-2.5)	80	39	49%	26	33%	40	50%
High (>2.5)	47	44	94%	43	91%	42	89%
Toatal	166	113	68%	96	58%	115	69%

3.2 הערכת איכות המרעית בהתבסס על שיפוע הספקטרום, לאחר דיגום נתונים לערוצי חיישן AISA.

חיישן AISA הינו חיישן היפר-ספקטראלי מוטס מתוצרת חברת SPECIM הפינית. החיישן מורכב משני ספקטרומטרים בעלי אופטיקה עצמאית המכוונים לאותו מוקד ובעל מערכת איסוף נתונים בשיטת PUSH BROOM. שני הגלאים (AISA Hawk ו ASIA Eagle) מכסים את הטווח הספקטראלי 400-2500 nm, כאשר הגלאי Eagle מכסה את התחום ה VNIR (400-970 nm) ורזולוציה ספקטראלי של 3.3 nm) וגלאי Hawk את התחום ה SWIR (970-2500 nm) ורזולוציה ספקטראלי של 12 nm). הרזולוציה במרחבית של חיישן זה גבוהה. לדוגמה מטיסה בגובה 1000 מ' מתקבלת רזולוציה של 0.52 מ' בתחום ה- VNIR) ועד ל- 1 מ' בתחום ה SWIR. (<http://www.specim.fi>)

חיישן זה זמין לשימוש בארץ ולפיכך בחנו את היכולת של מנגנון השיפועים המתואר לעיל (סעיף 3.1.1) להעריך, קטגורית, את איכות המרעית באמצעות חלבון, NDF ו- MEC. לשם כך, הנתונים הספקטראליים של ספקטרומטר

המעבדה Foss NIRS system 5000 בתחום 1100-2498 nm (ערוצים 700), נדגמו בהתאם לערוצי ה-AISA בתחום 970-2500 nm והתקבל סט נתונים חדש עם 109 ערוצים בין 1110-2363 nm. בתחום זה, נמצאו חמישה אזורים ספקטראליים שבהם מגמת השינויים בשיפוע תאמה את מגמת השינויים של המדדים הנבדקים והוגדרו קריטריונים לחלוקה (טבלה 6).

הקריטריונים שבטבלה 6, הופעלו על נתוני השיפועים שחושבו, לאחר הדיגום, עבור כל תחום ספקטראלי וסיכום אחוזי הצלחה של הערכת איכות מרעית לפי חלוקה לשלושה קטגוריות (נמוך, בנוני וגבוה), בטבלה 7. כללית, ניתן לראות כי ההפחתה במספר הערוצים מ-700 ל-109, לא השפיעה על הצלחת החיזוי ואחוזי ההצלחה בהערכת הקטגוריות נותרו טובים כפי שהיו ולעיתים אף השתפרו: 1) עבור חלבון, 83-91% (נמוך), 70-58% (בנוני) ו-86-100% (גבוה). 2) עבור NDF, 64-95% (נמוך), 33-67% (בנוני) ו-79-92% (גבוה). 3) עבור MEC, 67-85% (נמוך), 46-63% (בנוני) ו-83-94% (גבוה).

טבלה 6: תנאי חלוקה לקטגוריות על פי ערך השיפוע בתחומים ספציפיים, לאחר דיגום הנתונים לערוצי חיישן AISA

בתחום ה-SWIR

Spectral range	Protein		
	Low ($\leq 4.5\%$)	Medium (4.5-13%)	High ($\geq 13\%$)
1747-1770nm	Slope ≤ 0.00025	$0.00025 < \text{Slope} < 0.003$	Slope ≥ 0.003
2061-2096 nm	Slope ≤ -0.014	$-0.014 < \text{Slope} < -0.008$	Slope ≥ -0.008
2270-2293 nm	Slope ≥ 0.01	$0.01 > \text{Slope} > 0.0045$	Slope ≤ 0.0045
2306-2317 nm	Slope ≤ -0.001	$-0.001 < \text{Slope} < 0.0025$	Slope ≥ 0.0025
2317-2328 nm	Slope ≤ 0.0045	$0.0045 < \text{Slope} < 0.008$	Slope ≥ 0.008
Spectral range	NDF		
	Low ($\geq 67\%$)	Medium (53-67%)	High ($\leq 53\%$)
1747-1770nm	Slope ≤ 0.0005	$0.0005 < \text{Slope} < 0.003$	Slope ≥ 0.003
2061-2096 nm	Slope ≤ -0.014	$-0.014 < \text{Slope} < -0.008$	Slope ≥ -0.008
2270-2293 nm	Slope ≥ 0.01	$0.01 > \text{Slope} > 0.0035$	Slope ≤ 0.0035
2306-2317 nm	Slope ≤ 0.0004	$0.0004 < \text{Slope} < 0.003$	Slope ≥ 0.003
2317-2328 nm	Slope ≤ 0.0045	$0.0045 < \text{Slope} < 0.008$	Slope ≥ 0.008
Spectral range	MEC		
	Low ($\leq 1.6\%$)	Medium (1.6-2.5%)	High ($\geq 2.5\%$)
1747-1770nm	Slope ≤ 0.001	$0.001 < \text{Slope} < 0.004$	Slope ≥ 0.004
2061-2096 nm	Slope ≤ -0.013	$-0.013 < \text{Slope} < -0.006$	Slope ≥ -0.006
2270-2293 nm	Slope ≥ 0.01	$0.01 > \text{Slope} > 0.001$	Slope ≤ 0.001
2306-2317 nm	Slope ≤ -0.0005	$-0.0005 < \text{Slope} < 0.0035$	Slope ≥ 0.0035
2317-2328 nm	Slope ≤ 0.0045	$0.0045 < \text{Slope} < 0.009$	Slope ≥ 0.009

טבלה 7: סיכום חיזוי הצלחה לפי חלוקה לשלושה קטגוריות של נתוני ארכיון בהתבסס על שיפועים, לאחר דיגום לערוצי חיפוש AISA.

Protein	סה"כ בכל קטגוריה בהתבסס על בדיקות כימיות	סה"כ בכל קטגוריה בהתבסס על שיפוע הספקטרום									
		1747-1770nm	2061-2096nm	2270-2293nm	2306-2317nm	2317-2328nm	2317-2328nm	2317-2328nm	2317-2328nm	2317-2328nm	2317-2328nm
Protein											
Low ($\leq 4.5\%$)	54	48	89%	38	70%	45	83%	49	91%	46	85%
Medium (4.5-13%)	114	72	63%	80	70%	66	58%	77	68%	66	58%
High ($\geq 13\%$)	57	55	96%	49	86%	57	100%	55	96%	55	96%
Total	225	175	78%	167	74%	168	75%	181	80%	167	74%
NDF											
Low ($\geq 67\%$)	64	42	66%	41	64%	51	80%	61	95%	46	72%
Medium (53-67%)	109	73	67%	63	58%	63	58%	36	33%	57	52%
High ($\leq 53\%$)	62	49	79%	49	79%	56	90%	53	85%	57	92%
Total	235	164	70%	153	65%	170	72%	150	64%	160	68%
MEC											
Low (≤ 1.6)	39	33	85%	26	67%	28	72%	29	74%	33	85%
Medium (1.6-2.5)	80	39	49%	37	46%	50	63%	40	50%	45	56%
High (≥ 2.5)	47	44	94%	39	83%	44	94%	42	89%	42	89%
Total	166	116	70%	102	61%	122	73%	111	67%	120	72%

3.3 הערכת איכות מרעית של צמחייה טרייה בהתבסס על שיפוע הספקטרום.

עד כה נמצאו תחומים ספקטראליים (טבלה 3) המאפשרים הערכת איכות מרעית בהתבסס על מידע ספקטראלי שנמדד לאחר שהצמחייה עברה הליך של יבוש וטחינה. בצמחייה טרייה, בשונה מצמחייה לאחר יבוש, בליעות המים סביב 1400nm וסביב 1940nm הן בליעות עמוקות ורחבות (איור 11.a,b) ולהן השפעת ניכרת על המידע הספקטראלי המתבטאת במיסוך חלק מהמידע הספקטראלי הקשור במרכיבי הצמחייה האחרים כמו חלבון ו NDF. הפתרון המוצע הוא לבנות מודל ספקטראלי מבוסס שיפוע הספקטרום, לחיזוי ערכי חלבון ו NDF של צמחייה טרייה, מתוך בסיס הנתונים משולב של נתוני הארכיון (להלן צמחייה יבשה) ושל הדוגמאות שנאספו מאזורי המחקר סיירת שקד, גילת ונחל פטיש (להלן צמחייה טרייה). לפיתוח המודל ולאישוש הממצאים, נעשו בדיקות כימיות של חלבון ו NDF עבור 51 דוגמאות הצומח הטריות במעבדת נווה יער. לפני פיתוח המודל נעשו הפעולות הבאות:

1. דיגום ערוצי ASD (1501 ערוצים בתחום 1000-2500 nm) של נתוני הצמחייה הטרייה לערוצי ה Foss NIRS system 5000 (700 ערוצים בתחום 1100-2498 nm) של הצמחייה היבשה, לקבלת מספר ערוצים זהה בתחום 1000-2500 nm. לאחר מכן, חושבו שיפועים בשמונה תחומים ספקטראליים שנמצאו מתאימים.
2. בדקנו מהו היחס המינימאלי בין מספר הדוגמאות היבשות והטריות הנדרש לחיזוי מספק של חלבון ו NDF של הצמחייה הטרייה ולשם כך נעשתה החלוקה כדלקמן: 15%-85%, 25%-75%, 50%-50%, ו 35%-65% (טבלה 8). הנתונים חולקו לשלושה קבוצות, כיול (calibration), אימות (validation) וקבוצת מבחן (prediction) (טבלה 8) ואנאליזת PLS (partial least square) שימשה לבניית מודל לחיזוי כמותי של הפרוטאין וה NDF המבוסס על הקורלציה בין השיפועים ובין המידע הכימי.

נמצאו שמונה אזורים ספקטראליים המתאימים להערכת החלבון, וכוללים חמישה מתוך ששת האזורים שזוהו כבעלי יכולת חיזוי בבסיס הנתונים של הצמחייה יבשה (סעיף 3.1) (1748–1764 nm, 1766–1794 nm, 2070–2088 nm, 2088 nm, 2278–2286 nm, 2334–2344 nm), ושלושה אזורים נוספים: 1940–2226 nm, 2024–2090 nm ו-2090–2160 nm (איור 5.b,c). שבעה מתוך השמונה (לא כולל 1940–2226 nm) נמצאו מתאימים להערכת ה-NDF. להדגמת התאמה זו נעשתה הגדלה של התחום הספקטראלי שבין 2334–2344 nm (איור 5.c). ניתן לראות שעם העלייה בשיפוע חלה ירידה באחוז החלבון הן בצמחייה הטרייה והן בצמחייה היבשה.

כאשר המודל נבנה עבור נתוני הצמחייה היבשה בלבד, התקבל מתאם גבוה עבור החלבון ($r^2=0.97$) ועבור ה-NDF ($r^2=0.85$). לעומת זאת כאשר המודל נבנה על בסיס נתוני הצמחייה הטרייה בלבד, התקבל מתאם נמוך עבור ה-NDF ($r^2=0.56$) ועבור החלבון לא ניתן לבנות מודל (not applicable-NA) (טבלה 8).

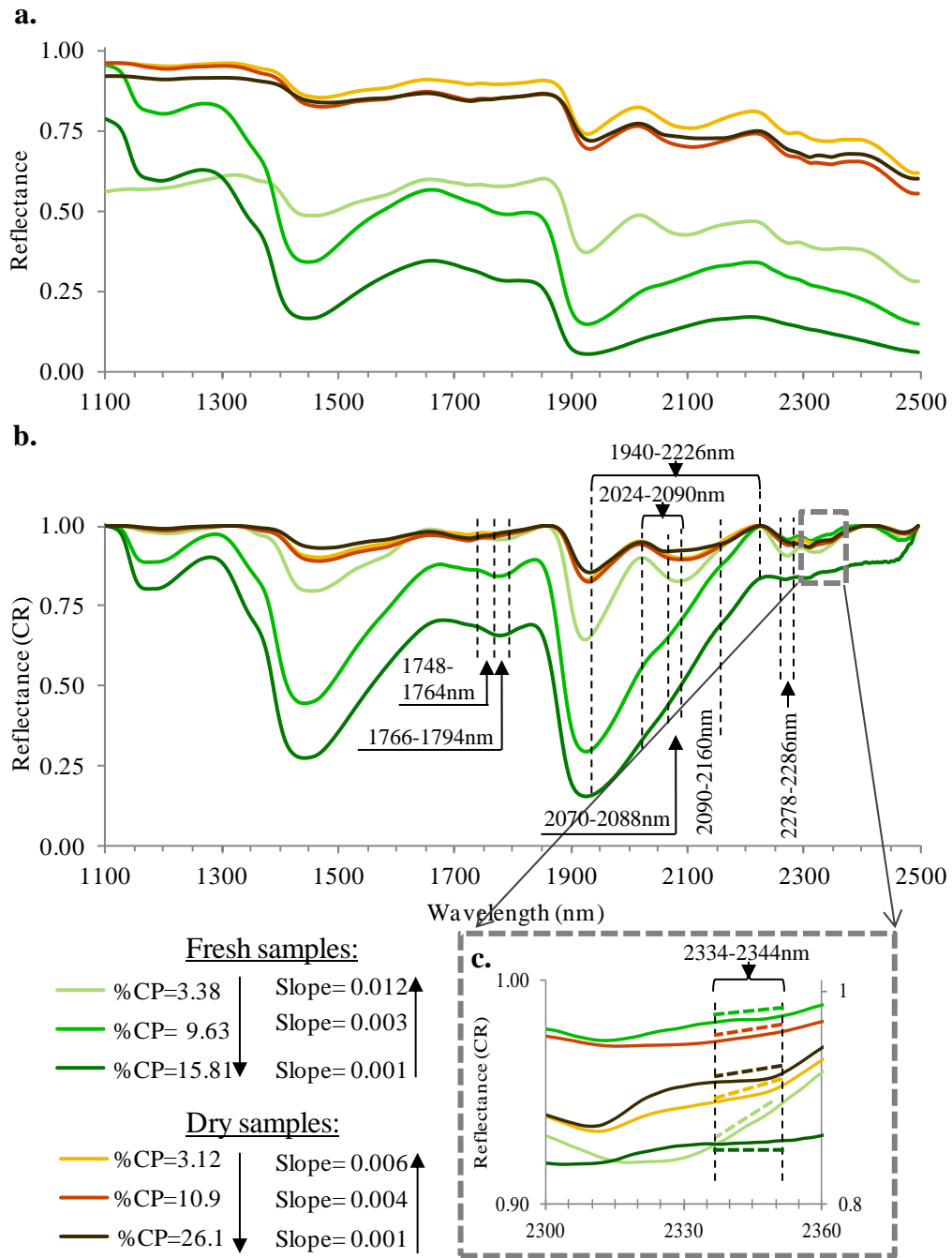
שילוב בין הצמחייה היבשה לטרייה שיפר משמעותית את יכולת החיזוי של הצמחייה הטרייה. כאשר היחס בין מספר דוגמאות עמד על 85% דוגמאות יבשות ו-15% טריות, התקבל מתאם גבוה והקרוב לזה המבוסס על צמחייה יבשה, עבור החלבון ($r^2=0.95$) ועבור ה-NDF ($r^2=0.84$). נמצא כי כאשר היחס היה 50% דוגמאות טריות לעומת 50% יבשות, עדיין התקבל מתאם גבוה לחיזוי חלבון ($r^2=0.92$) וכשהיחס היה 75% יבשות לעומת 25% טריות התקבל מתאם טוב לחיזוי NDF ($r^2=0.82$) (טבלה 8).

מניתוח הגורמים נמצא כי במודל לחיזוי פרוטאין, שלושה משתנים במודל ה-PLS מסבירים 100% מהשונות של X (שיפוע הספקטרה) ו-83% של Y (אחוז החלבון) ובחיזוי ה-NDF שני משתנים מסבירים 98% של X ושל Y. איור 6 מציג את ציוני התקן (Score plot) של חיזוי פרוטאין על ידי שיפוע, ורואים כי הן בצמחייה הטרייה והן בצמחייה היבשה, ישנה עלייה בשיעור החלבון עם התזוזה מלמעלה למטה.

בליעת המים הרחבה סביב 1940 nm ממסכת חלק מהמידע הספקטראלי הקשור במרכיבי צמחייה האחרים, למרות זאת ניתן באמצעות שילוב הנתונים להתגבר על מגבלה זו. ואכן, כאשר הלבשנו על גרף ציוני התקן שבאיור 6 את סך שטח אזור הבליעה המשמש כמדד לכמות המים בצמחייה (איור 7) רואים כי הן בצמחייה הטרייה והן בצמחייה היבשה ישנה עלייה בכמות המים מימין לשמאל. כלומר, השילוב בין מידע ספקטראלי של צמחייה יבשה ובין זה של טרייה מאפשר להעריך את החלבון וה-NDF של הצמחייה הטרייה.

הופעה רגרסיה לינארית בין הערכים החזויים ובין המדודים רק עבור קבוצות המבחן של הצמחייה הטרייה והתוצאות מסוכמות באיור 8 ומחזקות את המסקנות לעיל.

לסיכום, ניתן להעריך את שיעור החלבון וה-NDF מתוך מסד נתונים המשלב מידע ספקטראלי של צמחייה יבשה לשל צמחייה טרייה, כמו גם לשלב בנתוח מידע ספקטראלי שנמדד על ידי ספקטרומטרים שונים.



איור 5 : הדגמת השינויים בשיפוע הספקטרום כנגד השינויים בריכוז החלבון עבור שלוש דוגמאות טריות ושלוש דוגמאות יבשות.

טבלה 8 : תוצאות רגרסית PLS (partial least squares) לחיזוי אחוז פרוטאין ו NDF ביחסים משתנים של צמחייה יבשה וטרייה

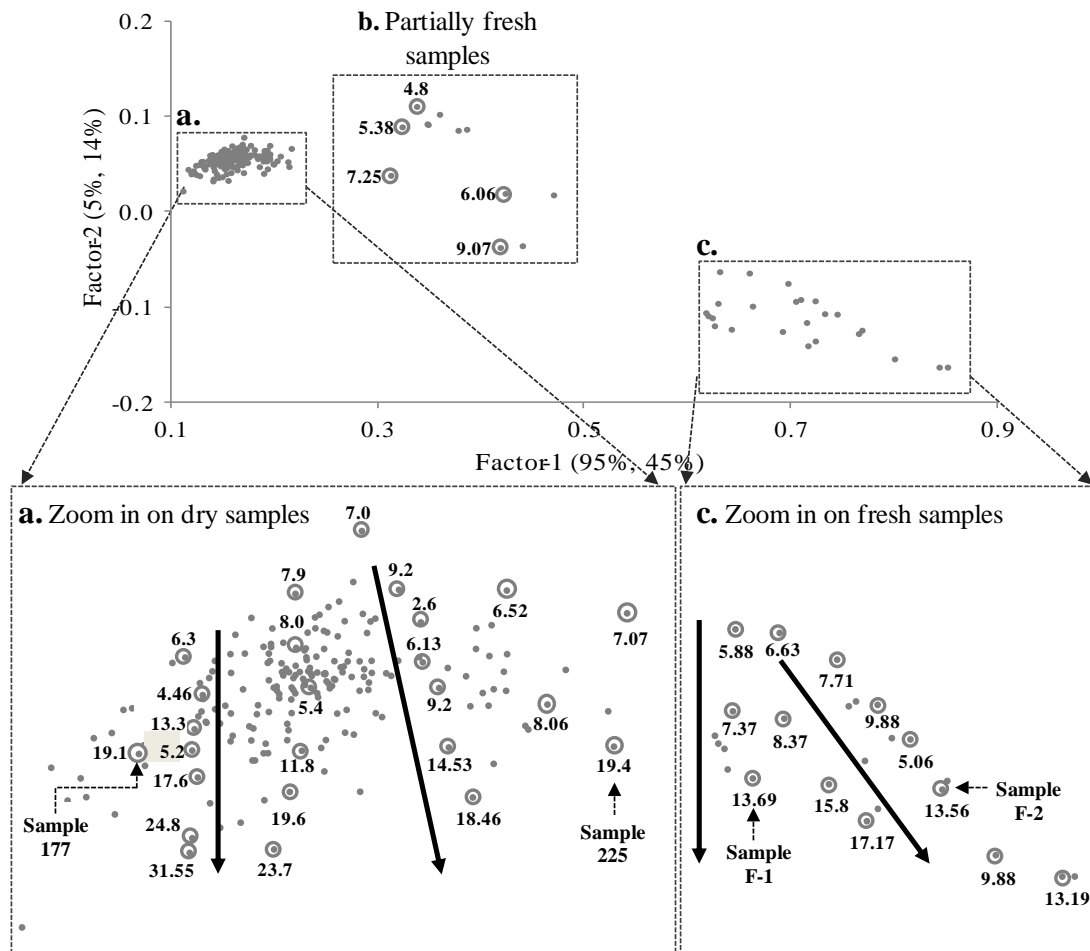
	CP model statistical characteristics			NDF model statistical characteristics		
	Calibration	Validation	Prediction	Calibration	Validation	Prediction
100% dry samples						
Total dry samples	198	198	26	197	197	35
Slope	0.95	0.94	0.99	0.96	0.96	0.98
Offset	0.34	0.36	-0.15	1.56	1.60	0.32
RMSE	1.76	1.82	1.33	6.12	6.17	4.69
RPD	3.74	3.62	5.92	1.96	1.94	2.72
R ²	0.98	0.97	0.97	0.99	0.99	0.85
85%:15% (dry/fresh samples)						
Total dry samples	198	198	26	197	197	35
Total fresh samples	36	36	12	32	32	11
Slope	0.91	0.90	1.01	0.90	0.90	0.95
Offset	0.55	0.64	-0.55	4.98	5.10	2.63
RMSE	2.34	2.52	1.45	7.49	7.57	4.75
RPD	2.50	2.70	4.80	1.68	1.67	2.59
R ²	0.96	0.95	0.95	0.98	0.98	0.84
75%:25% (dry/fresh samples)						
Total dry samples	122	122	23	113	113	32
Total fresh samples	38	38	10	31	31	11
Slope	0.90	0.89	1.01	0.88	0.87	0.95
Offset	0.62	0.75	-0.78	5.78	6.01	2.60
RMSE	2.63	2.82	1.26	8.18	8.32	4.63
RPD	2.43	2.27	5.15	1.59	1.57	2.49
R ²	0.95	0.94	0.95	0.98	0.97	0.82
50%:50% (dry/fresh samples)						
Total dry samples	42	42	10	43	43	10
Total fresh samples	38	38	10	32	32	10
Slope	0.89	0.86	0.92	0.78	0.77	0.97
Offset	0.64	0.99	0.43	11.2	11.7	3.01
RMSE	2.74	3.19	1.75	8.9	9.2	8.3
RPD	2.18	1.89	3.74	1.42	1.39	1.63
R ²	0.94	0.92	0.92	0.97	0.97	0.51

35%:65% (dry/fresh samples)

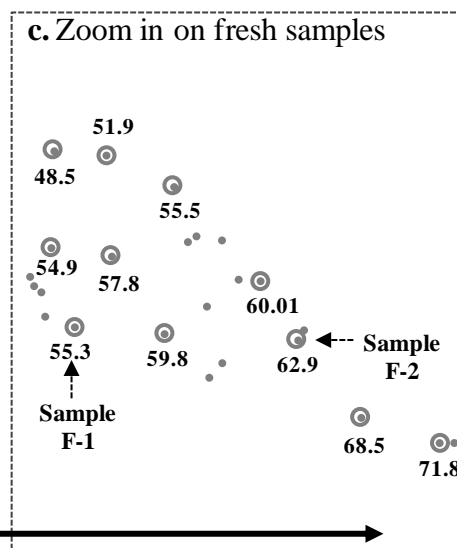
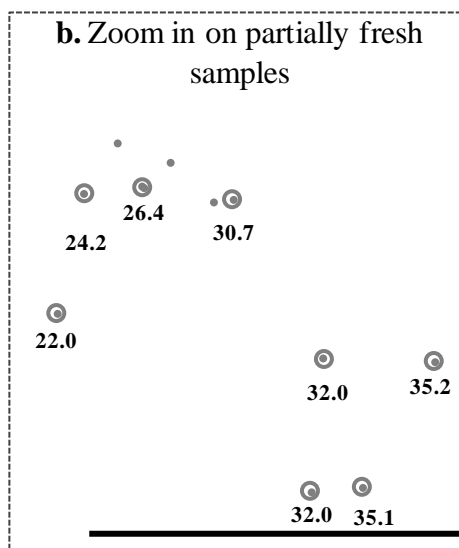
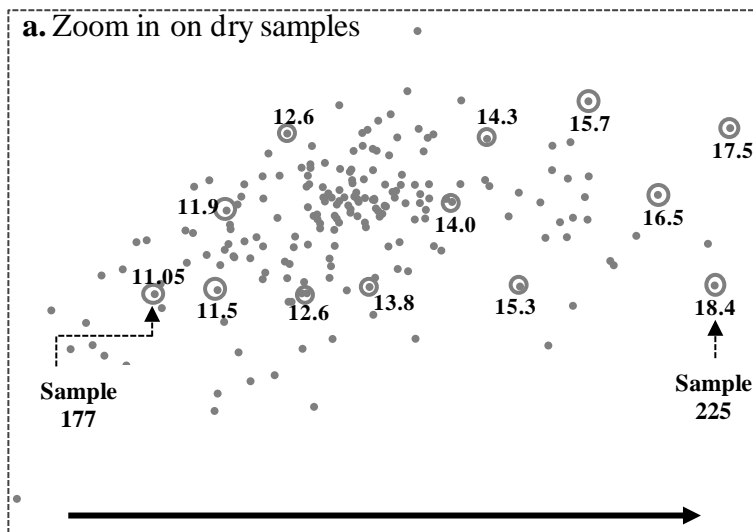
Total dry samples	20	20	5	22	22	5
Total fresh samples	38	38	10	31	31	10
Slope	0.89	0.86	0.73	0.69	0.67	0.81
Offset	0.67	1.05	1.73	15.7	16.6	11.1
RMSE	2.88	3.36	2.14	9.69	9.99	8.43
RPD	2.15	1.87	1.97	1.27	1.23	1.55
R ²	0.94	0.91	0.72	0.96	0.96	0.50

100% fresh samples

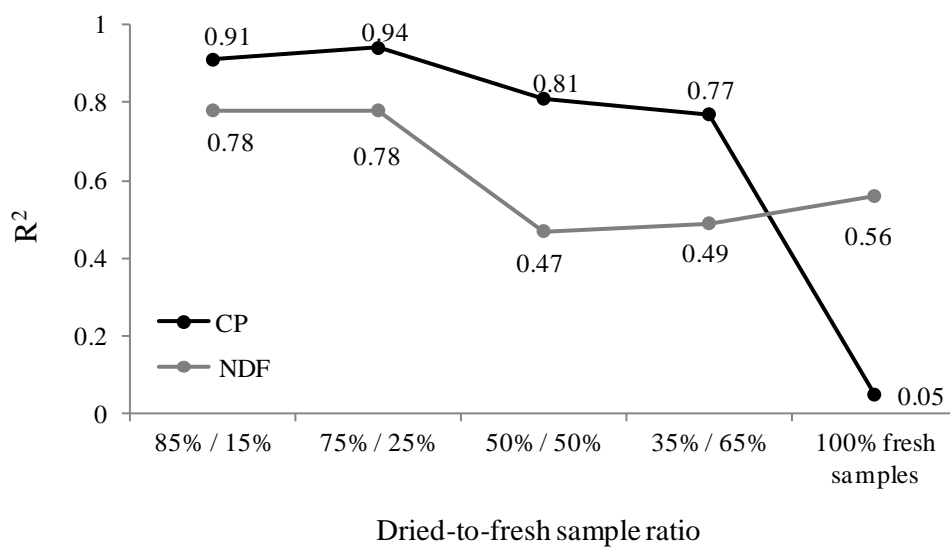
Total fresh samples	38	38	10	33	33	10
Slope	0.4	0.38	-0.08	0.47	0.48	0.58
Offset	5.32	5.54	11.7	25.47	25.6	23.9
RMSE	3.18	3.3	4.2	11.5	12.2	8.04
RPD	0.87	0.84	0.35	0.99	1.00	1.20
R ²	0.89	0.88	NA	0.95	0.94	0.56



איור 6: ציוני התקן (score plot) של מודל PLS לחיזוי פרוטאין באמצעות שיפועים בשמונה תחומים ספקטרלים.



איור 7: הלבשת שטח בליעת המים סביב 1940 nm על גרף ציוני התקן מאיור 12



איור 8: רגרסיה לינארית בין הערכים החזויים ובין המדודים רק עבור קבוצות המבחן של הצ הטרייה

3.4 מיפוי צמחייה באגן נחל פטיש מתוך נתוני חיישן WorldView

הצמחייה באזור נחל פטיש יכולה להיות אחת משלושת הקטגוריות: עשבונית, שיחים ועצים. עיקר הצמחייה הנאכלת על ידי העדרים היא הצמחייה העשבונית והשיחים. לכן, נחוץ מיפוי המבדיל בין שלושת סוגי צמחייה אלה.

נתונים:

למיפוי הצמחייה באזור אגן נחל פטיש, נבחרה הדמאת לוויין WorldView אשר לו 8 ערוצים בתחום ה-VIS-NIR (400-950 nm), ורזולוציה מרחבית גבוהה של 2X2 מ', מתאריך 28.2.2010. תאריך זה נבחר משום שזמן יציאת העדרים למרעה באזור נחל פטיש תחילת מרס עד סוף מאי. תדירות המעבר של הלוויין מעל אזור היא כל 1.1 ימים (<http://www.digitalglobe.com/>). הרזולוציה המרחבית הגבוהה ותדירות המעבר יאפשרו מיפוי מרחבי ברמת פרוט מרחבית ועיתית גבוהה וניתן יהיה לעקוב אחר איכות צמחיית המרעה לאורך כל עונת הרעייה.

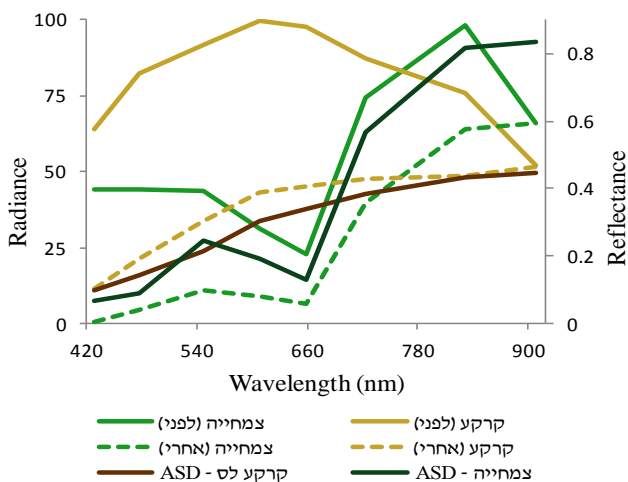
תיקון אטמוספרי:

קרינת השמש בדרכה לאטמוספירה עוברת מספר שינויים. מעל האטמוספירה הקרינה עוברת בריק ולכן ההפרעות הן מינימליות. עם מעבר קרינת השמש בתוך האטמוספירה, שטף הקרינה פוחת בשל תגובת הקרינה עם גזים ואירוסולים באוויר ודועך בשנית לאחר הפגיעה בפני השטח בחזרה לחיישן. שלב מקדים לתיקון אטמוספרי הוא תיקון רדיומטרי בו מותמרים ערכי DN (Digital Number) לערכי קרינה (Radiance) כפי שמתקבלים בחיישן. מקדמי הכיול לביצוע תיקון רדיומטרי מסופקים באתר של DigitalGlobe.

http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/Radiometric_Use_of_WorldView-

[\(2_Imagery%20%281%29.pdf](#)

לתיקון השפעת האטמוספירה על הקרינה השתמשנו במודל EL (Empirical Line), לתיקון אטמוספרי. EL, הינה טכניקה נפוצה הנעזרת במדידות ספקטראליות, שנערכו בשטח או מדידות שנעשו בתנאי מעבדה. לשם כך, נבחרו שתי מטרות בהדמאה, מטרה בהירה (קרקע לס) ומטרה כהה (כביש אספלט) והותאמו להן מדידות קרקע לס ואספלט שנעשו על ידי ספקטרומטר נייד (ASD). תוצאות התיקון מודגמות באיור 9. ספקטרה הצמחייה בצבע ירוק כהה וקרקע לס (צהוב), היא ספקטרה כפי שנמדדה על ספקטרומטר ASD ולאחר הפחתת מספר ערוצים מ-2251 ל-8 כמספר ערוצי ה-WorldView-2. ניתן לראות כי בין ספקטרה צמחייה וקרקע מתוך ההדמאה לאחר ביצוע תיקון אטמוספרי איכות התיקון האטמוספרי טובה, ובין ספקטרה של צמחייה וקרקע לס שנמדדו על ידי ספקטרומטר מעבדתי קיים דמיון רב.



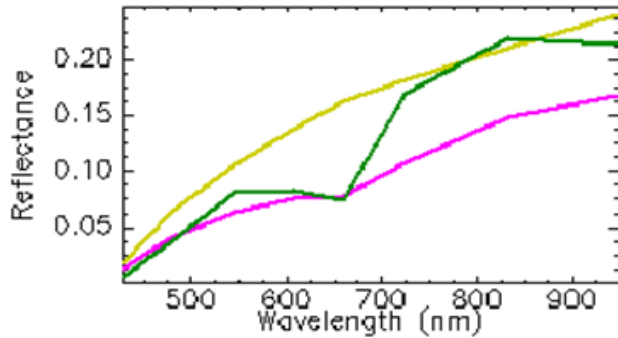
איור 9: הדגמת ספקטרום צמחייה וקרקע לפני ולאחר תיקון אטמוספרי.

סיווג ומיפוי צמחייה

שיטת המיון שנקטה מכונה פרוצדורת SAM (Spectral Angle Mapper) אשר נמצאת בשימוש נרחב בניתוח של נתונים היפר-ספקטראליים. כאמור, SAM, היא טכניקה של מיון מונחה, הבודקת את מידת הדמיון של פיקסל נתון למטרות הנבחרות, זאת באמצעות הזווית שנוצרת בין ספקטרום המטרה לספקטרום הפיקסל הנבדק. לצורך מיון סוגי הצמחייה, הוגדרו מספר מטרות לכל סוג צמחיה מבוקש (דוגמאות באיור 10) ופרוצדורת המיון הופעלה. התקבלה הדמאה שכל פיקסל מכיל ערך הזווית (θ) המבטא את מידת הקירוב לספקטרום המטרות. לבסוף הוגדרו ערכי סף לכל סוג צמחייה כאשר עבור עצים ערכי הסף היו בין 0.06- 0.12 רדיאן, עבור שיחים 0.05 רדיאן ועבור עשבוני בין 0.02- 0.04 רדיאן.



איור 9: הדגמת ספקטרום צמחייה וקרקע לפני ולאחר תיקון אטמוספרי.



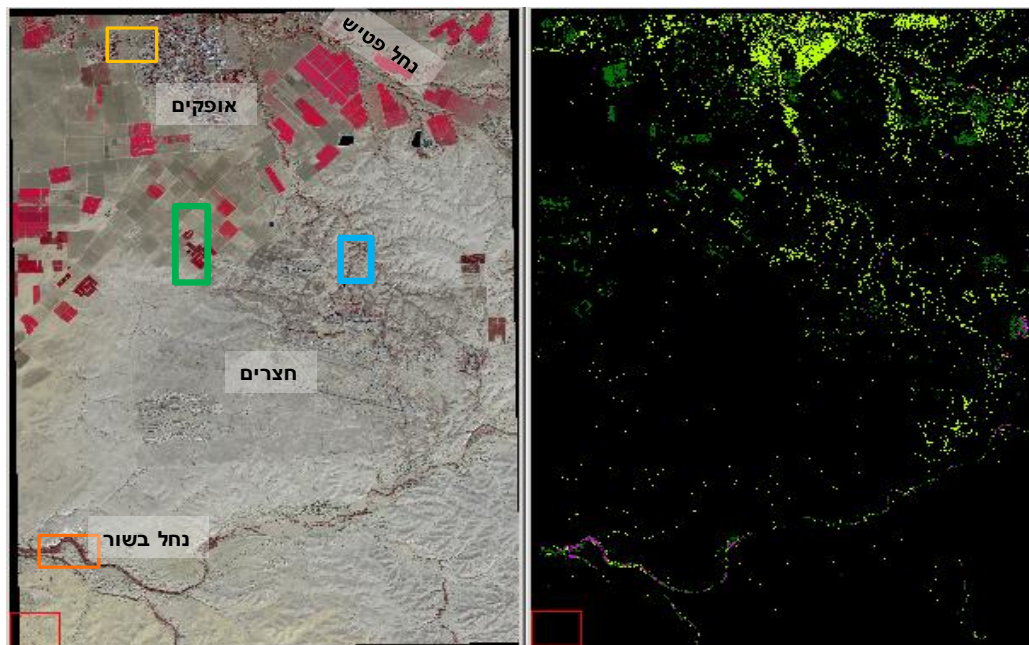
עצים שיחים עשבוני

איור 10 : מטרות לסיווג צמחיה באיור עליון (צמחיה מודגשת באדום) וספקטרום החזרה של כל מטרה (איור תחתון).

תוצאות המיון

תוצאות הסיווג מוצגות באיור 11 והגדלה של מספר אזורים באיורים 11.1 - 11.4.

בדיון להלן נפרט מספר אזורים על ידי הגדלת האזור ונדון ברמת הסיווג וב"מיוני שווא" עם הדגמה של היכולת הספקטראלית למפות מטרות שונות ומגוונות.



עצים שיחים עשבוני

איור 11 : תוצאות מיון מכוון מטרות. הגדלה של האזורים המתוחמים במלבנים באיורים 7.1-7.4.

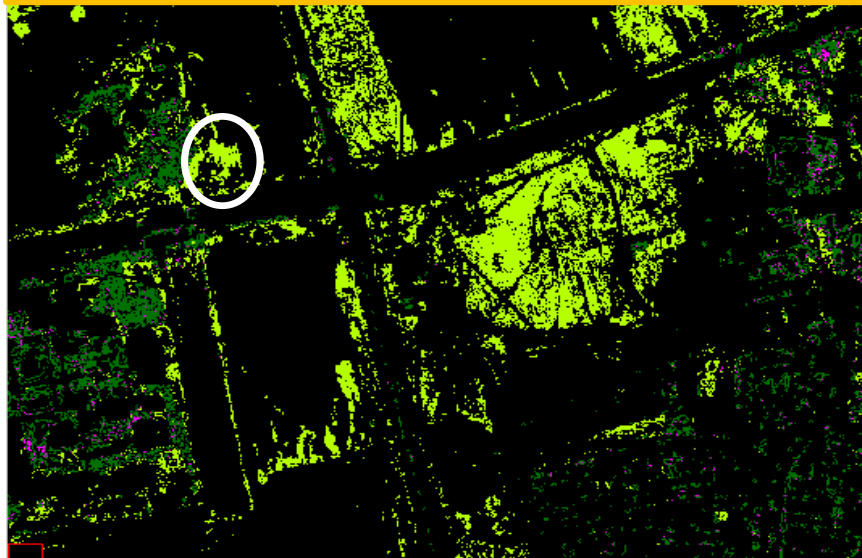
באיור 11.1, הוגדל אזור המאופיין בעיקר בצמחייה עשבונית ובעצים. ניתן לראות כי סיווג הצמחייה העשבונית וצמחיית העצים על פי רוב מופתה בהצלחה. עם זאת היה מיעוט של מיוני שווא ובעיקר של צמחייה עשבונית (מודגם בעיגול הלבן).

באיור 11.2, הוגדל אזור נחלים, המאופיין בעיקר בעצים וצמחייה עשבונית. נראה שחלק מהפיקסלים שסווגו כשיחים, הינם מיון שווא והם למעשה צל עצים.

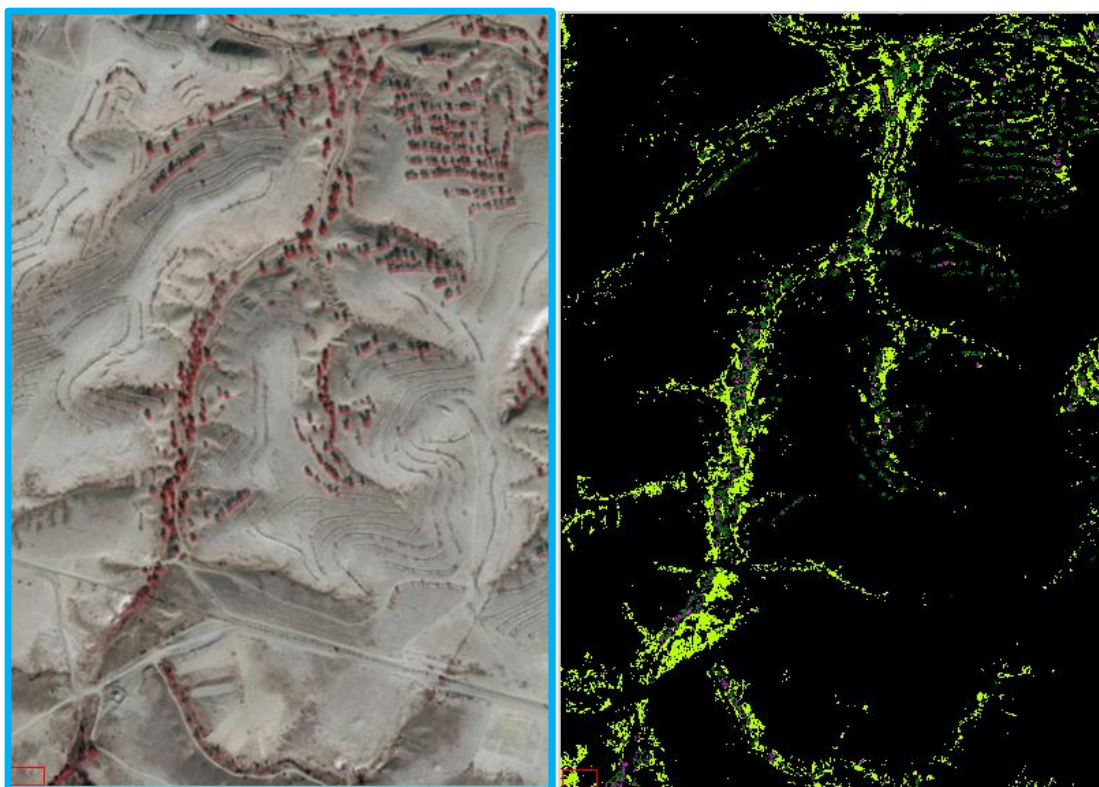
באיור 11.3, הוגדל אזור המאופיין בעיקר בשדות חקלאיים. ניתן לראות כי מרבית השדות לא נכללו בסיווג. ממצא זה חשוב, משום שחשוב להוציא את השדות חקלאיים מתוך מפות שטחי המרעה הטבעי.

באיור 11.4, הוגדל אזור נחל בשור. האזור מאופיין בערוב של עצים, שיחים וצמחייה עשבונית וניתן לראות כי רמת הסיווג טובה.

לסיכום, נראה שבאמצעות טכניקת SAM ניתן למפות את סוגי הצמחייה באגן נחל פטיש באיכות טובה. מיפוי כזה יהווה בסיס להערכת הביומסה בהתאם סוג הצמחייה המשמשת למרעה ולא של כלל הצמחייה המצויה באזור.



איור 11.1: הגדלה של אזור המאופיין בצמחייה עשבונית ובעצים.
עצים שיחים עשבוני



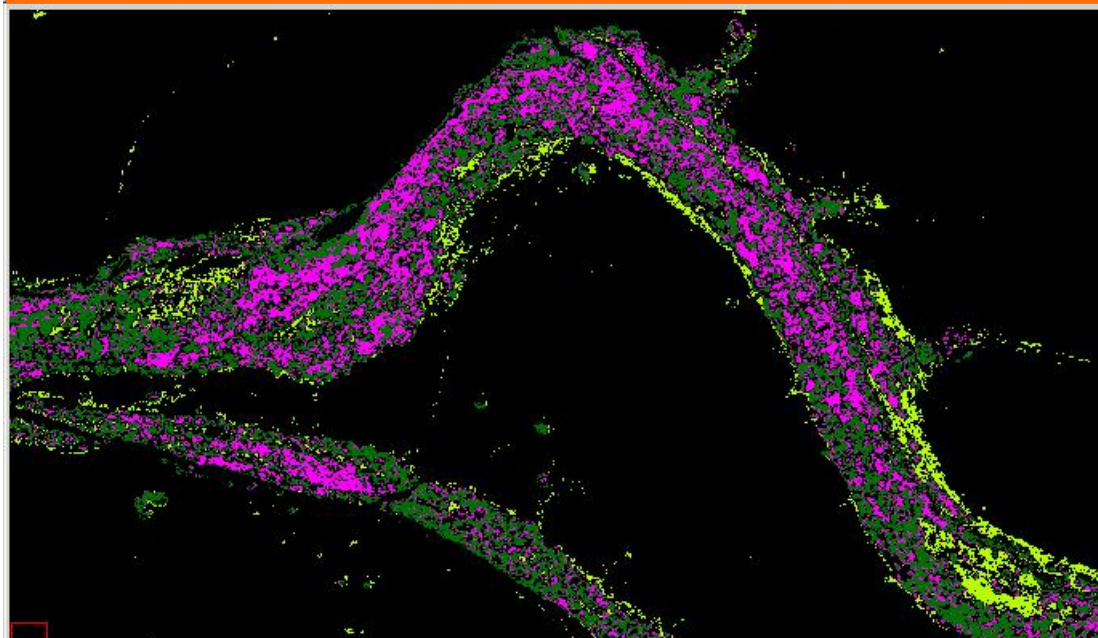
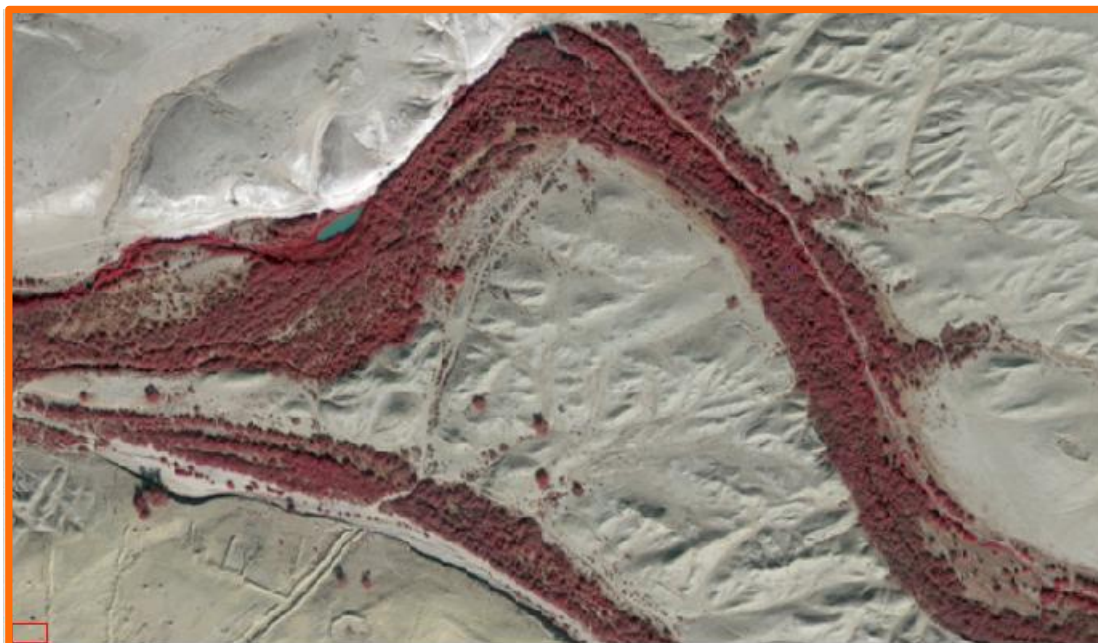
עצים שיחים עשבוני

איור 11.2 :: הגדלה של אזור נחלים.



עצים שיחים עשבוני

איור 11.3 :: הגדלה של אזור המאופיין בשדות חקלאיים.



עצים שיחים עשבוני

איור 11.4 : הגדלה של אזור נחל המאופיין בעצים, שיחים וצמחייה צמחייה עשבונית.

4. סיכום ומסקנות:

בהתבסס על מדידות ספקטראליות של ספקטרומטר מעבדה NIRSystems 5000, אחוזי הצלחה שהתקבלו הן מתוך שיפוע הספקטרום והן באמצעות ה-SAM היו גבוהים. היתרון של השיפועים הוא בכך שהחיזוי מבוסס על המידע הספקטראלי בלבד, לעומת ה-SAM שבו אנו נדרשים לספק יחוס של ספקטרה של צמחייה אשר לה שיעור חלבון נמוך מאוד.

להערכתנו, בשיטות שתוארו לעיל, ניתן לקבל הערכה קטגורית טובה בהתבסס על מדידות ספקטראליות שיבוצעו על ידי ה-NIRSystems 5000 לדוגמאות צמחייה מאזורי מרעה (לאחר ייבוש וטחינה), ללא צורך באנליזות כימיות. השימוש בשיטה זו יאפשר לקבל בזמן קצר ובעלות נמוכה, הערכה ראשונית של איכות המרעה וניתן להשתמש בשיטה כחלופה לבדיקות כימיות.

זאת ועוד, ההצלחה בהערכת המדדים למרות ההפחתה במספר הערוצים (מ-700 של ספקטרומטר מעבדה ל-109 של חיישן מוטס), מראה שהשינויים במבנה הספקטרום, הינם תלויי שינויים בהרכב החלבון, ה-NDF וה-MEC של צמחייה. בנוסף, לספקטרום של צמחייה יש שני תחומים ב-SWIR ובהן בליעות רחבות בשל המים שבצמח, בין 1280-1650 nm ובין 1850-2210 nm. ארבע מתוך חמשת האזורים הספקטראליים שאותרו בחיישן AISA הינם לחלוטין מחוץ לתחום בליעות המים. לפיכך, יש סבירות טובה למימוש המנגנון הספקטראלי המבוסס על שיפועים בתנאי שדה, באמצעות הדמאות הנרכשות על ידי חיישן היפר ספקטראלי דוגמת AISA.

בעבודה זו, הראנו כי ניתן להשתמש במסד נתונים משולב הכולל מידע ספקטראלי של צמחייה יבשה ושל צמחייה טרייה ושנרכש באמצעות ספקטרומטרים שונים לחיזוי שיעור הפרוטאין וה-NDF בצמחיה טרייה. מידע ספקטראלי והרכב כימי (חלבון וכו') של דוגמאות צמחייה לאחר יבוש מצוי במעבדות רבות וחשיבות השיטה היא ביכולת הפעלתה המיידית, כאשר נדרש איסוף מספר דוגמאות קטן של צמחייה טרייה. זאת ועוד, המתודולוגיה המבוססת על שיפוע, מאפשרת שימוש בספקטרומטר עם מספר ערוצים קטן (16) בהשוואה לספקטרומטרים איתם השתמשנו (בין 1500-700). לכך יש השלכה יישומית חשובה בפיתוח ספקטרומטר קטן, נוח לתפעול וזול לרכישה.

לבסוף, ראינו כי ניתן למפות באיכות את סוגי צמחייה (עצים, שיחים ועשבונית) באזור אגן נחל פטיש, באמצעות טכניקת SAM ובפרט הצמחייה העשבונית והשיחים, שהם המשמשים למרעה. מיפוי כזה יהווה בסיס להערכת הביומסה בהתאם סוג הצמחייה המשמשת למרעה ולא של כלל הצמחייה המצויה באזור.

- גלסר צח אהרון, 2004, קביעה כמותית ואיכותית של מנת עיזים במרעה בעזרת ספקטרוסקופית NIR, עבודת תיזה, הפקולטה לחקלאות, רחובות.
- פרידמן שמואל, 2002, קביעת ערך מרעה זרוע בנגב הצפוני עבור מעלי גירה בעזרת ספקטרוסקופית NIR, עבודת תיזה, הפקולטה לחקלאות, רחובות.
- Ben-Dor, E., Inbar, Y., and Chen, Y., 1997, The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400–2500 nm) during a controlled decomposition process. *Remote Sensing of Environment*, 61: 1–15.
- Baumgardner M.F., Silva L.F., Biehl L.L and E.R., Stoner, 1985, Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*. 38: 1-44.
- Boardman, J.W., and Huntington, J.F., 1996. Mineral mapping with 1995 AVIRIS data. *Sixth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*, JPL Publication, Pasadena, California, USA, 96-4(1), 9-12.
- Clark R.N., 1999, Spectroscopy of rock and minerals and principles of spectroscopy In: *Remote Sensing of the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*, Rencz A.N. (Ed.), Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 3-57.
- Curran P.J., 1989, Remote sensing of foliar chemistry, *Remote Sensing of Environment*, 30: 271-278.
- Dalal R.C., and Henry R.J., 1986, Simultaneous determination of moisture, organic carbon and total nitrogen by near infrared reflectance spectroscopy, *Soil Science Society of America Journal*, 50: 120-123.
- Esbensen, K. (2002). *Multivariate Data Analyses – In Practice, an Introduction to Multivariate Data Analyses and Experimental Design*, Aalborg University, CAMO, Esbjerg, Denmark.
- Henkin Z., Ungar E.D., Dvash L., Perevolotsky A., Yehuda Y., Sternberg H., Voet H. and Landau S.Y., 2011, Effects of cattle grazing on herbage quality in a herbaceous Mediterranean rangeland, *Grass and Forage Science*, 55: 516-525.
- Hunt, G.R., and J.W., Salisbury, 1970, Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicate minerals. *Modern Geology*, Vol. 1, pp. 283-300.
- Jensen, J.R. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2007; pp. 355–408.
- Landau, S., Friedman, S., Brenner, S., Bruckental, I., Weinberg, Z.G., Ashbell, G., Hen, Y., Dvash, L., Leshem, Y., 2004. The value of safflower (*Carthamus tinctorius*) hay and silage grown under Mediterranean conditions as forage for dairy cattle. *Livestock Prod. Sci.* 88, 263–271.

- Landau, S., Giger-Reverdin, S., Rapetti, L., Dvash, L., Dorleans, M., Ungar, E.D., 2008. Data mining old digestibility trials for nutritional monitoring in confined goats with aids of fecal near infra-red spectrometry. *Small Ruminant Res.* 77, 146–158.
- Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L. & Randall, R.J. (1951). Protein measurement with the folin-phenol reagent. *Journal of Biology and Chemistry*, 193: 265–275.
- Murray I., and Williams P.C., 1987, Chemical principles of near infrared technology. In: Near infrared technology in agriculture and food industries, Eds: Williams, P.C. and Norris, K.H., pp. 17-34, Americ. Assoc. cereal chem. Inc. St. Paul. MN.
- Schwanninger M., Rodrigues J.C., and Fackler K., 2011, A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components, *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 19: 287-308.
- Tilley, J.M.A.; Terry, R.A. A two-stage technique for the *in vitro* digestion of forage crops. *J. Br. Grassl. Soc.* **1963**, 18, 104–111.
- Van Soest, P.J.; Robertson, J.B.; Lewis, B.A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* **1991**, 74, 3583–3597.
- Workman J, Jr., and Weyer L., 2008, Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy, CRC pressTaylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA.

