

אבחון מחלת בית גרעין בפירות באמצעות

ספקטרוסקופיה בתחום NIR

חיבור על מחקר

לשם מילוי חלקי של הדרישות לקבלת תואר

מגיסטר למדעים

בהנדסה חקלאית

מאת

קלרה שנדריי

הוגש לסנט הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

ינואר 2008

חיפה

שבט תשס"ח

המחקר נעשה בפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית במסלול להנדסה חקלאית בהנחייתם

פרופ"ח יצחק שמולביץ וד"ר זאב שמילוביץ

אני מודה לטכניון-מכון טכנולוגי לישראל על התמיכה הכספית הנדיבה בהשתלמותי.

אני שמחה להביע את תודתי העמוקה ל פרופ"ח י. שמולביץ ולד"ר ז. שמילוביץ על הנחייתם המסורה, על העידוד ועל התמיכה בכל שלבי המחקר.

ברצוני להודות לד"ר ו. אלחנתי, לד"ר ס. לוריה ולד"ר ר. בן-אריה על עזרתם ותמיכתם המקצועית במהלך עבודתי.

ברצוני גם להודות לצוות של מכון להנדסה החקלאית, מרכז וולקני ולצוות של המעבדה למחקר ולאחסון פירות בקריית שמונה על הסיוע הטכני ועזרתם הנדיבה.

כמו כן אני רוצה להודות מעומק לבי למשפחתי היקרה: הורי אליעזר ונטליה, בעלי לאוניד, אחי איליה וילדי האהובים יוסף, דבורה ודויד על סבלנותם האינסופית, עידוד ותמיכה נפשית לכל אורך הדרך.

תוכן עניינים

עמוד

1	תקציר
3	רשימת סימנים
6	1. מבוא
8	2. רקע תיאורטית וסקר ספרות
8	2.1 מחלת בית גרעין
11	2.2 שיטות הערכה לא הרסניות
15	2.3 ספקטרוסקופיה בתחום NIR
15	2.3.1 רקע
25	2.3.2 שיטות עיבוד נתוני ספקטרוסקופיה NIR
25	2.3.2.1 סקירה כללית של שיטות כימוטריות
27	2.3.2.2 הכנת הנתונים ועיבודם בשיטות כימוטריות
28	2.3.2.3 שיטה כימוטרית PLS
31	2.3.2.4 שיטת מיון Cluster analysis
32	2.3.2.5 שיטת ניתוח שונות Two Way ANOVA
38	2.3.3 תוצאות מקדמיות למחקר הנוכחי
40	3. מטרת העבודה
40	4. שיטות ואמצעים
40	4.1 מערכת מעבדתית נייחת
44	4.2 מערכת בתנועה
46	4.3 השיטה ההרסנית לבחינת נוקי בית גרעין
49	4.4 אמצעים ומהלך הניסויים
49	4.5 תהליך עיבוד נתוני הניסויים
51	5. תוצאות
51	5.1 תוצאות הניסויים במערכת מעבדתית נייחת
51	5.1.1 תוצאות PLS
53	5.1.2 תוצאות Cluster Analysis

תוכן עניינים (המשך)

עמוד

54.....	Two Way ANOVA תוצאות	5.1.3
61.....	תוצאות הניסויים במערכת בתנועה	5.2
61.....	PLS תוצאות	5.2.1
64.....	Cluster Analysis תוצאות	5.2.2
66.....	Two Way ANOVA תוצאות	5.2.3
75.....	דין	6
75.....	PLS שיטת	6.1
76.....	Cluster Analysis שיטת	6.2
79.....	Two Way ANOVA שיטת	6.3
81.....	מסקנות, סיכום והמלצות להמשך	7
81.....	PLS משיתת	7.1
82.....	Cluster Analysis משיתת	7.2
82.....	מסקנות מהמכשיר הנייח	7.2.1
82.....	מסקנות מהמכשיר בתנועה	7.2.2
83.....	מסקנות מ 2 המכשירים	7.2.3
83.....	Two Way ANOVA משיתת	7.3
83.....	סיכום	7.4
85.....	המלצות להמשך	7.5
86.....	נספחים	8
86.....	תוצאות השייכות לניסויים מקדמיים	8.1
88.....	תוצאות השייכות לניסויים במערכת ניחת	8.2
88.....	PLS שיטת	8.2.1
89.....	Two Way ANOVA שיטת	8.2.2
93.....	תוצאות השייכות לניסויים במערכת בתנועה	8.3
93.....	PLS שיטת	8.3.1

תוכן עניינים (המשך)

עמוד

98.....	Two Way ANOVA שיטת	8.3.2
101.....	שיטות סטטיסטיות בהם השתמש המחקר הנוכחי	8.4
101.....	אלגוריתם PLS בתוכנת Matlab	8.4.1
106.....	אלגוריתם Cluster Analysis בתוכנת Matlab	8.4.2
108.....	אלגוריתם Two Way Anova בתוכנת JMP	8.4.3
109.....	רשימת הספרות	
I.....	תקציר באנגלית	

רשימת טבלאות

עמוד

- טבלה 1. תחומי קרינה אלקטרומגנטית.....17
- טבלה 2. עוצמות יחסיות של פסי C-H לתחום אינפרא-אדום ולהרמוניות ה- NIR השונות...20
- טבלה 3. מבנה כללי של טבלאות פלט Cluster analysis.....32
- טבלה 4. מבנה כללי של טבלאות פלט JMP לניתוח שונות דו-כיווני.....35
- טבלה 5. דוגמת פלט תוכנת JMP לניתוח שונות דו-כיווני.....36
- טבלה 6. תוצאות עיבוד נתוני הניסוי המקדים שהתקבלו באמצעות שיטת ה-PLS.....39
- טבלה 7. תוצאות עיבוד נתוני הניסוי שהתקבלו באמצעות שיטת ה-PLS במחקר נוכחי במערכת ניידת.....52
- טבלה 8. דיוק המיון הכללית ולפי 2 הקבוצות המדגם הנבדק במערכת ניידת.....53
- טבלה 9. דיוק המיון הכללית ולפי 4 הקבוצות המדגם הנבדק במערכת ניידת.....53
- טבלה 10. תוצאות בדיקת השפעת גורמי מיקום התפוח ושיעור ריקבון ה- *Alternaria* על שיאים של 3 תצוגות ספקטרום מתמטיות התקבלות במערכת ניידת.....54
- טבלה 11. תוצאות בדיקת השפעת גורמי מיקום התפוח ושיעור ריקבון ה- *Alternaria* על קואורדינאטות מרכז-הכובד של ספקטרום $\log(1/T)$ וספקטרום קרינת העברה T התקבלות במערכת ניידת.....55
- טבלה 12. תוצאות עיבוד נתוני הניסוי שהתקבלו באמצעות שיטת ה-PLS למדגם עם כלל קבוצות מיון של התפוחים במערכת בתנועה.....61
- טבלה 13. תוצאות עיבוד נתוני הניסוי שהתקבלו באמצעות שיטת ה-PLS למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון - *Alternaria* עד 4% במערכת בתנועה.....62
- טבלה 14. תוצאות עיבוד נתוני הניסוי שהתקבלו באמצעות שיטת ה-PLS למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון אלטרנריה עד 10% במערכת בתנועה.....62

רשימת טבלאות (המשך)

עמוד

- טבלה 15. דיוק המיון הכללית ולפי 4 הקבוצות למדגם עם כלל התפוחים הנבדק במכשיר בתנועה.....65
- טבלה 16. דיוק המיון הכללית ולפי 4 הקבוצות למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4% הנבדק במכשיר בתנועה.....65
- טבלה 17. דיוק המיון הכללי לפי 4 הקבוצות למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10% הנבדק במכשיר בתנועה.....66
- טבלה 18. תוצאות בדיקת השפעת גורמי מיקום התפוח ושיעור ריקבון ה- *Alternaria* על קואורדינאטות מרכז-הכובד של ספקטרום $\log(1/T)$ וספקטרום קרינת העברה T התקבלות במערכת ניידת.....67
- טבלה 19. תוצאות בדיקת השפעת גורמי מיקום התפוח ושיעור ריקבון ה- *Alternaria* על שיאים של 3 תצוגות ספקטרום מתמטיות התקבלות במערכת בתנועה.....68
- טבלה 20. פקודות לעיבוד מתמטי של נתוני הספקטרום באמצעות PLS.....102
- טבלה 21. פקודות לעיבוד מתמטי של נתוני הספקטרום באמצעות Cluster Analysis.....107
- טבלה 22. דוגמת פלט תוצאות ניתוח דו-כיווני באורך הגל המוגדר לבחינת השפעה של 2 הגורמים ולאינטראקציה ביניהם.....108
- טבלה 23. דוגמת פלט תוצאות ניתוח דו-כיווני באורך המוגדר לבחינת השפעה של 2 הגורמים ללא אינטראקציה ביניהם.....108
- טבלה 24. פלט תוצאות ניתוח דו-כיווני באורך הגל המוגדר לבחינת השפעת גורם אחד של שוער השטח הנגוע ב-*Alternaria*.....108

רשימת ציורים

עמוד

- ציור 1. נבגי הפטריות *Alternaria-alternata* 9
- ציור 2. התפתחות *Alternaria-alternata* בצורה סימטרית..... 10
- ציור 3. התפתחות *Alternaria-alternata* בצורה אי – סימטרית..... 10
- ציור 4. תמונות X-rays של חתכי התפוחים מזן Red Delicious בעלי שיעורים שונים של watercore..... 14
- ציור 5. דוגמאות של תמונות חתכי תפוחים בעלי פגמים..... 14
- ציור 6. תמונות NMR לתפוחים מזן Fuji הפגועים ב watercore 15
- ציור 7. תחומי קרינה אלקטרומגנטית ושימושיה..... 16
- ציור 8. תחומי ספקטרום אינפרא אדום, NIR ואור הנראה..... 20
- ציור 9. תיאור סכמאתי של אינטראקצית אור עם חומר..... 23
- ציור 10. דוגמאת פלט תוכנת JMP לניתוח שונות חד-כיווני המייצג הבדל מובהק בין תחומי סיווג של משתנה תגובה..... 37
- ציור 11. דוגמת פלט תוכנת JMP לניתוח שונות חד-כיווני המייצג חוסר הבדל מובהק בין תחומי סיווג של משתנה תגובה..... 38
- ציור 12. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת ראשונה של קרינת העברה $d(T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית בניסוי המקדים..... 39
- ציור 13. סכמת מערכת NIR הנייחת לקרינת מעבר..... 41
- ציור 14. מקורות האור, מיקום הפרי וסיב אופטי חד-כיווני במכשיר NIR הנייח..... 42
- ציור 15. מצב התפוח בזמן הבדיקה, מבט צד..... 42
- ציור 16. מערכת ניסוי NIR בתנועה (קרוסלה), המתבססת על קרינת מעבר..... 44
- ציור 17. סכמת מערכת NIR בתנועה (קרוסלה), המתבססת על קרינת העברה..... 45
- ציור 18a. דוגמת תמונת חתך התפוח בתוכנת AutoCAD..... 47

רשימת ציורים (המשך)

עמוד

- ציור 18b. דוגמאות תפוח עם שיעור ריקבון 10% (מימין) ו 20% (משמול).....47
- ציור 19. השוואה בין מדידת שיעור הריקבון באחוזים מחושב באמצעות תוכנת AutoCAD לחישוב באמצעות מכשיר לעיבוד תמונות.....48
- ציור 20. השוואה בין מדידת יחס צורות מחושב באמצעות נוסחאות לחישוב באמצעות תוכנת AutoCAD.....48
- ציור 21. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת ראשונה של קרינת העברה $dT/d\lambda$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית במחקר נוכחי למערכת ניחת.....52
- ציור 22. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני באורך הגל 677 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $\log(1/T)$ למכשיר הניח.....56
- ציור 23. דוגמאות ספקטרום $\log(1/T)$ המתקבלות במכשיר ניח.....56
- ציור 24. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 717 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך T למכשיר הניח.....57
- ציור 25. דוגמאות ספקטרום T המתקבלות במכשיר ניח.....57
- ציור 26. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 695 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $dT/d\lambda$ למכשיר הניח.....58
- ציור 27. דוגמאות ספקטרום $dT/d\lambda$ המתקבלות במכשיר ניח.....58
- ציור 28. תוצאות חישוב מרכזי כובד ספקטרום $\log(1/T)$ של התפוחים הבריאים והנגועים ב *Alternaria* שהתקבלו במערכת ניחת.....59
- ציור 29. תוצאות ניתוח חד-כיווני לקואורדינאטת ה - Y_c של מרכז כובד ספקטרום $\log(1/T)$ למכשיר הניח לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria*.....59
- ציור 30. תוצאות חישוב מרכזי כובד ספקטרום T של התפוחים הבריאים והנגועים ב *Alternaria* שהתקבלו במערכת ניחת.....60

רשימת ציורים (המשך)

עמוד

- ציור 31. תוצאות ניתוח חד-כיווני לקואורדינאטת ה- Y_c של מרכז כובד ספקטרום T למכשיר הנייה לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב*Alternaria*.....60
- ציור 32. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על קרינת העברה T שהתקבלו במערכת בתנועה לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם עם כלל קבוצות מיון של התפוחים.....63
- ציור 33. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על קרינת העברה T שהתקבלו במערכת בתנועה לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4%...63
- ציור 34. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על קרינת העברה T שהתקבלו במערכת בתנועה לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10%.....64
- ציור 35. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני באורך הגל 674 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $\log(1/T)$ למכשיר בתנועה.....69
- ציור 36. דוגמאות ספקטרום $\log(1/T)$ המתקבלות במכשיר בתנועה.....69
- ציור 37. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 719 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך T למכשיר בתנועה.....70
- ציור 38. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 732 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $dT/d\lambda$ למכשיר בתנועה.....70
- ציור 39. דוגמאות ספקטרום T המתקבלות במכשיר בתנועה.....71
- ציור 40. דוגמאות ספקטרום $dT/d\lambda$ המתקבלות במכשיר בתנועה.....71
- ציור 41. תוצאות חישוב מרכזי כובד ספקטרום $\log(1/T)$ של התפוחים הבריאים והנגועים ב *Alternaria* במכשיר בתנועה.....72
- ציור 42. תוצאות חישוב מרכזי כובד ספקטרום T של התפוחים הבריאים והנגועים ב *Alternaria* במכשיר בתנועה.....73

רשימת ציורים (המשך)

עמוד

- ציור 43. תוצאות ניתוח חד-כיווני לקואורדינאטת ה- Y_c של מרכז כובד ספקטרום $\log(1/T)$ לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב- *Alternaria* במכשיר בתנועה. 74.....
- ציור 44. תוצאות ניתוח חד-כיווני לקואורדינאטת ה- Y_c של מרכז כובד ספקטרום T לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב- *Alternaria* במכשיר בתנועה. 74.....
- ציור 45. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על קרינת העברה T לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית בניסוי המקדים. 86.....
- ציור 46. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על $\log(1/T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית בניסוי המקדים. 87.....
- ציור 47. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של $\log(1/T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית בניסוי הקדים. 87.....
- ציור 48. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על קרינת העברה T שהתקבלו במערכת הנייחת לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית במחקר נוכחי. 88.....
- ציור 49. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על $\log(1/T)$ שהתקבלו במערכת הנייחת לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית במחקר נוכחי. 88.....
- ציור 50. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של $\log(1/T)$ שהתקבלו במערכת הנייחת לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית במחקר הנוכחי. 89.....
- ציור 51. דוגמת ספקטרום $\log(1/T)$ עם שיא אופייני שלו שנתקבל במכשיר נייח. 89.....
- ציור 52. דוגמת ספקטרום קרינה מועברת T עם שיאים אופייניים שלו שנתקבל במכשיר נייח. 90.....
- ציור 53. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 809 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב- *Alternaria* על ערך T למכשיר הנייח. 90.....
- ציור 54. דוגמת ספקטרום $dT/d\lambda$ עם שיאים אופייניים שלו שנתקבל במכשיר. 91.....

רשימת ציורים (המשך)

עמוד

- ציור 55. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 732 nm לבחינת השפעת גורם שיעור
השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $dT/d\lambda$ למכשיר הנייח.....91
- ציור 56. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 829 nm לבחינת השפעת גורם שיעור
השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $dT/d\lambda$ למכשיר נייח.....92
- ציור 57. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של קרינת העברה $dT/d\lambda$
שנתקבלו במכשיר בתנועה לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם עם כלל
קבוצות מיון של התפוחים.....93
- ציור 58. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של קרינת העברה $dT/d\lambda$
שנתקבלו במכשיר בתנועה לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים
בעלי שיעור ריקבון עד 4%.....94
- ציור 59. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של קרינת העברה $dT/d\lambda$
שנתקבלו במכשיר בתנועה לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים
בעלי שיעור ריקבון עד 10%.....94
- ציור 60. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על $\log(1/T)$ שנתקבלו במכשיר בתנועה
לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם עם כלל קבוצות מיון של התפוחים.....95
- ציור 61. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על $\log(1/T)$ שנתקבלו במכשיר בתנועה לבין
תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4%.....95
- ציור 62. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על $\log(1/T)$ שנתקבלו במכשיר בתנועה לבין
תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10%.....96
- ציור 63. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של $\log(1/T)$ שנתקבלו במכשיר
בתנועה לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם עם כלל קבוצות מיון של
התפוחים.....96
- ציור 64. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של $\log(1/T)$ שנתקבלו במכשיר
בתנועה לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון
עד 4%.....97
- ציור 65. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של $\log(1/T)$ שנתקבלו במכשיר
בתנועה לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון
עד 10%.....97
- ציור 66. דוגמת ספקטרום $\log(1/T)$ עם שיא אופייני שלו המתקבל במכשיר בתנועה.....98

רשימת ציורים (המשך)

עמוד

- ציור 67. דוגמת ספקטרום קרינה מועברת T עם שיאים אופייני שלו המתקבל במכשיר בתנועה.....99
- ציור 68. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 809 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך T למכשיר בתנועה.....99
- ציור 69. דוגמת ספקטרום נגזרת ראשונה של קרינה מועברת d(T) עם שיאים אופייניים שלו המתקבל במכשיר בתנועה 100
- ציור 70. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 701 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך d(T) למכשיר בתנועה.....100
- ציור 71. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 829 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך d(T) למכשיר בתנועה.....101
- ציור 72. חלון לבחירת אפשרות חלוקת המדגם לתת-מדגם לכיול ולתת-מדגם לאימות.....103
- ציור 73. חלון לטעינת והרצת נתונים.....103
- ציור 74. חלון לבחירת מספר הפקטורים האופטימאלי.....104
- ציור 75. חלון של פיזור הנקודות השייכות לדגימות המסוימות.....105
- ציור 76. חלון של מתאם בין התוצאות החזויות לתוצאות הנמדדות.....105

תקציר

קיום תעבורה רבה של תוצרת חקלאית בין מדינות דורשת הערכת איכות של התוצרת בכל שלביה החל בקטיף ועד לשיווק מכאן שהנושא מוביל לצורך במיון קפדני של פירות וירקות. האתגר הינו בהערכת איכות פנימית ובמיוחד במחלות בית גרעין ופגמים פנימיים אחרים. לכן יש צורך בפיתוח שיטות לא הרסניות המתבססות על פס ספקטרום רחב להגדרת הפגמים הפנימיים. אחת ממחלות בית הגרעין נגרמת על-ידי הפטרייה *Alternaria-alternata* שהיא פתוגן תוקפני נפוץ במיוחד בתפוחים מזן Red Delicious. קיים לכן צורך בפיתוח שיטה לא הרסנית המסוגלת לזהות פירות הנגועים ב- *Alternaria* בצורה מהירה ומדויקת ובמחיר זול.

הטכנולוגיה המוצגת בעבודה הנוכחית מתבססת על קרינה NIR שהינה השיטה שימושית ביותר בהערכת איכות של תוצרת חקלאית. שיטה זו לא הרסנית, מהירה, זולה יחסית, מדויקת ופשוטה לשימוש. מכון שפטריית ה-*Alternaria* ברוב המקרים מתחילה להתפתח מבית הגרעין, במחקר הנוכחי יושמה שיטת המתבססת על קרינה מועברת בתחום NIR.

השערת המחקר הכללית הינה כי ניתן למיין פירות נגועים ב-*Alternaria* באופן פרטני בקן המיון באמצעות בדיקות NIR בשיטת מעבר. המטרה הכללית של המחקר הינה לפתח שיטה לא הרסנית המתבססת על ספקטרוסקופיה בתחום NIR לבחינת איכות פנימית של תפוחים לנגיעות במחלת בית-גרעין כתוצאה מ-*Alternaria*.

הניסויים בוצעו ב 2 מכשירים המתבססים על קרינה במעבר NIR: מכשיר ניח ומכשיר בתנועה. לניסוי ב מכשיר הניח נלקחו 207 התפוחים מזן Red Delicious ו-873 התפוחים מזן זה לניסוי נלקחו במכשיר בתנועה. אחרי סריקת התפוחים ב NIR בוצעה בדיקה הרסנית של שיעור הריקבון באמצעות חיתוך התפוח ל 2 חצאים ומדידת השטח הנגוע לצורך השוואה.

לקבלת תוצאות ערכי שיעור הריקבון החזוי, נעשה שימוש בספקטרום הקרינה המועברת המקורית ותצוגות מתמטיות של הספקטרום כגון: נגזרת ראשונה של ספקטרום הקרינה המועברת, לוגריתם ערך הפוך של הקרינה המועברת ונגזרת שנייה שלו. תוצאות הניסויים עובדו באמצעות שיטות סטטיסטיות: (PLS) Partial Least Square, Cluster Analysis ו- Two

Way Anova.

בניסויים שבוצעו במכשיר בתנועה במדגם התפוחים היה לפחות 30% תפוחים נגועים ב-*Alternaria* בשיעור ריקבון של יותר מ 10%. תוצאות PLS מעידות על קורלציה גבוהה בין שיעור הריקבון הנמדד לשיעור החזוי עם מקדם המתאם בתחום 80% - 84% לספקטרום ותצוגות מתמטיות של הספקטרום (להוציא ספקטרום הנגזרת השנייה של לוגריתם שבו נמצא מתאם נמוך 66%). כאשר הוסרו כל התפוחים הנגועים בפחות מ 10% (תפוחים לא נגועים נשארו במדגם) ניכר שיפור והתקבלו מתאמים גבוהים יותר (80%-90%) ודיוק המיון שנותח באמצעות Cluster Analysis עולה מ 58%-77% עד 75%-94% כלומר באופן משמעותי.

בניסויים מקדמים שבוצעו במכשיר הנייח היה במדגם יותר מ 30% תפוחים בשיעור ריקבון של יותר מ 10%. תוצאות PLS מעידות על קורלציה גבוהה בין שיעור הריקבון הנמדד לשיעור החזוי עם מקדם המתאם בתחום 87% - 92%. אולם בניסויים שבוצעו במכשיר במחקר הנוכחי כמות תפוחים במדגם בנגיעות יותר מ 10% הייתה קטנה מ 30% מהמדגם. תוצאות PLS הדגימו את הקורלציה נמוכה יותר (55%-67%). בניתוח באמצעות Cluster Analysis התקבל דיוק המיון גבוה ביותר לקבוצת תפוחים בעלי בשיעור ריקבון יותר מ 10% וערכו נמצא בתחום 81% - 88% לספקטרום המקורי ולטיפולים מתמטיים של הספקטרום (להוציא ספקטרום הנגזרת השנייה שבו נמצא דיוק המיון נמוך 56%).

תוצאות Two Way ANOVA מעידות על אפשרות זיהוי תפוחים בעלי שיעור ריקבון גדול מ 10% לפי אמדים שונים של ספקטרום ונגזרת הספקטרום ברמת ביטחון של 95%. עם זאת, נמצאו קשיים בזיהוי תפוחים נגועים לפי עוצמה באורך גל ספציפי ומרכז כובד של לוגריתם הערך ההפוך של הקרינה המועברת.

הממצא העיקרי של המחקר הנוכחי הראה כי ניתן להבחין בנזק פנימי כתוצאה מ-*Alternaria* בנגיעות מעל 10%. מומלץ להמשיך ולשפר במחקר את השיטה להגדרת דיוק הזיהוי מתחת ל 10% נגיעות באמצעות חומרה וחקירת אפיונים נוספים של ספקטרום המושפעים משיעור הנגיעות בתחום האמור.

רשימת סימנים

A - יכולת בליעה

c - מהירות אור

$dT/d\lambda$ – נגזרת ראשונה של קרינה מועברת יחסית ביחס לאורך גל

$d^2(\log(1/T))$ - נגזרת שנייה של לוגריתם הערך ההפוך של קרינה מועברת יחסית

e – רעש (שגיאה)

\bar{e} - ווקטור יחידה

E - אנרגיה של פוטון

f - ווקטור שגיאות (רעש)

F - מטריצת שגיאות (רעש)

h - קבוע פלאנק

H_0 - השערת אפס

H_1 - השערה אלטרנטיבית

I_0 - עוצמת קרן פוגעת

I_R - אנרגיה של קרינה מוחזרת

I_T - אנרגיה של קרינה מועברת

I_{WHITE} - עוצמת הקרן הפוגעת המתקבלת כתוצאת ממעבר דרך הגוף ייחוס או N.D.F

(Neutral Density Filter)

I_{BLACK} - עוצמת הקרן העוברת בתנאי החשיכה

k - מספר חזרות לכל המיקום ולכל קבוצת שיעור ריקבון

l - מרחק אופייני של מעבר קרן

$\log(1/T)$ – לוגריתם הערך ההפוך של קרינה מועברת יחסית

m – מספר תחומי סיווג של גורם τ

n - מספר דגימות
 N - התפלגות נורמאלית
 p - מספר תחומי סיווג של גורם β
 p_value - הסתברות שמהו יהיה לא נכון
 P - מטריצת מקדמי מודל סטטיסטי של PLS
 R - קרינה מוחזרת יחסית
 r - מקדם המתאם
 r_c^2 - מקדם דטרמינציה לכיול
 r_p^2 - מקדם דטרמינציה לחיזוי
 q - ווקטור מקדמי מודל סטטיסטי של PLS
 SEC - שגיאת הכיול הסטנדרטית הממוצעת
 SEP - שגיאת האימות הסטנדרטית הממוצעת
 t - ווקטור מספר משתנים סמויים (מספר פקטורים) של PLS
 T - קרינה מועברת יחסית
 \bar{x} - ממוצע של מטריצת ערכים של ספקטרום לכל הדגמים ולכל אורכי הגל
 X - מטריצת ערכים של ספקטרום לכל הדגמים ולכל אורכי הגל
 X_c - קואורדינאטה X של מרכז כובד ספקטרום
 \bar{y} - ממוצע של ווקטור ערכי שטח נגוע בחתכי התפוחים
 Y - ווקטור תוצאות בדיקה הרסנית
 Y_{pred} - ווקטור תוצאות חזויות
 Y_c - קואורדינאטה Y של מרכז כובד ספקטרום
 \hat{Y} - ערכים חזויים של NIR למדגם נלקח לכיול
 Y_{ijk} - משתנה תגובה בניתוח שונות דו-כיווני;
 $\bar{y}_{i..}$ - ממוצע לכל תחום סיווג של גורם ראשון;

$\overline{y_{.j}}$ - ממוצע לכל תחום סיווג של גורם שני ;

$\overline{y_{ij}}$ - ממוצע חזרות לכל דגימה בניסוי.

y_{ij} - משתנה תגובה בניתוח שונות חד-כיווני ;

α_i - הגורם שני בניתוח שונות חד-כיווני

β - גורם שני בניתוח שונות דו-כיווני

β_j - אפקט תחום סיווג j של גורם β בניתוח שונות דו-כיווני

ε - בליעה מולרית

λ - אורך גל

λ_i - אורך הגל בכל נקודת ספקטרום

ρ - ריכוז מולרי

σ^2 - שונות

τ - גורם ראשון בניתוח שונות דו-כיווני

τ_i - אפקט תחום סיווג i של גורם τ בניתוח שונות דו-כיווני

$(\tau\beta)_{ij}$ - אפקט אינטראקציה בין τ_i ל β_j בניתוח שונות דו-כיווני

1. מבוא

העולם המודרני מאופיין כיום על-ידי קשרי סחר בין לאומיים מפותחים וכתוצאה מכך קיימת תעבורה רבה של תוצרת חקלאית בין מדינות. תוצרת חקלאית בדרכה לצרכן עוברת מספר שלבים החל בקטיף, שינוע, אחסון, טיפול ואריזה ועד לשיווק. בנקודות שונות לאורך הדרך מוערכת איכות התוצרת. איכות התוצרת מוערכת בשלבי המיון, האריזה והמשלוח על-ידי אנשי מקצוע מיומנים. לעומת זאת הצרכן הסופי מתייחס לתכונות מסוימות העונות על צרכיו וציפיותיו. לפיכך יתכן פער בתפיסת האיכות ובהגדרתה בין מגדל התוצרת, המשווק והצרכן. דרישת הצרכן לאיכות הולכת וגוברת והתמורה לתוצרת באיכות גבוהה גדולה בהרבה מהתמורה הממוצעת. דרישות השוק לתוצרת חקלאית באיכות גבוהה מובילה לצורך במיון קפדני של פירות וירקות. כיום עדין מרבית מיון התוצרת מבוצע בבית האריזה והוא נעשה באופן ידני כשהערכת מצב ואיכות הפרי מתבצעת בראיה בלבד. לעיתים קרובות לא ניתן לבצע מיון מסוג זה בצורה ידנית וכמובן העין האנושית אינה מסוגלת להבחין בכל הפגמים מכיוון שיכולת הראיה מוגבלת לפס צר של הספקטרום האלקטרומגנטי. חלק מהפגמים ובמיוחד פגמים פנימיים, כך למשל פגיעת מחלת בית גרעין – אלטרנריה, הפוגעת בגידולי תפוחים, אגסים ורימונים, ניתן לגלות רק בחלק הלא נראה של ספקטרום אלקטרומגנטי. כדי לזהות פגמים אלו יש צורך בפיתוח כלים ושיטות לא הרסניות, מהירות, הפועלות בספקטרום אלקטרומגנטי בפס רחב יותר מאשר התחום הנראה. קיימת כמה שיטות לא הרסניות המשמשות באבחון פגמים פנימיים בפירות וירקות והן יכולות לשמש לאבחון מחלת בית גרעין :

1. X-Ray Imaging (רנטגן) ;

2. Nuclear magnetic resonance(NMR) ;

3. Near-Infrared Spectroscopy(NIR).

לפי המחקר של Clark and Bielecki (1997), Schatzki et. al(1997) שיטות X-Ray Imaging ו- NMR הן יחסית מדויקות ומיושמות בהערכת איכות של תוצרת חקלאית אבל יקרות, לא מהירות ולא מתאימות לשימוש בבדיקת בקו המיון. כמו כן, הלקוחות לא תמיד רוצים לקנות מוצרי מזון המוקרנים ב X-rays.

הטכנולוגיה המתבססת על החזר והעברת קרינת NIR הינה אחת השיטות השימושיות ביותר בהערכת איכות של תוצרת חקלאית. שיטה זו היא לא הרסנית, מהירה, זולה יחסית, מדויקת

ופשוטה לשימוש. שיטת NIR היא שיטה ספקטרוסקופית המשמשת לתחום של ספקטרום אלקטרומגנטי מ 800 nm עד 2500 nm (Burns and Ciurczak, 1992). תגלית אנרגית NIR מיוחסת ל William Herschel בתחילת מאה 19. בכל זאת מחקר בספקטרוסקופית NIR באופן שיטתי התחיל אחרי שנת 1950. בהתחלה, ספקטרוסקופית NIR נחשבה כיישום מורחב של שיטות ואמצעים המתבססים על אורכי גל אחרים, למשל קרינת אולטרא סגול, קרינת אור הנראה וקרינת mid-IR. מערכת NIR הראשונה פותחה בשנת 1980. עניין אקדמי ותעשייתי וגם ישום מסחרי עלה בהבלטה משנת 1990 הודות לפיתוח מערכות המתבססות על סיבים אופטיים וגלאים רגישים יותר המתבססים על מוליכים למחצה כמו *InGaAs*. ספקטרוסקופית NIR מיושמת למדידת חומרים אורגאניים ומשמשת בהצלחה בחקלאות ובתעשיית מזון להערכת איכות התוצרת.

אחד מאפיוני איכות פירות וירקות הוא חוסר או הימצאות פגמים פנימיים הנגרמים במחלת בית גרעין *Alternaria*. על תופעות ריקבון בית גרעין דיווחו בעבר בארה"ב במדינת ניו-יורק

(Ellis and Barrat, 1983), בדרום אפריקה (La Grande and Aveling, 1998),

(Kang et al., 2002), וגם בספרד (Teixido et al., 1998).

מוטיבציית המחקר הנוכחי לפתח לבחון שיטות ואמצעים לאבחון תפוחים הנגועים ב *Alternaria* באמצעות קרינת NIR. מחלת בית הגרעין נגרמת מסיבות שונות. פיטרית ה- *Alternaria* הינה מהגורמים העיקריים למחלת בית גרעין בפירות וירקות. הנזק המוערך בזנים מסוימים כגון תפוח סטרקינג יכול להגיע עד 40% מכל הפירות בשנים מסוימות. הפגיעה הפנימית אינה מורגשת בפני הפרי החיצוניים ולכן מהווה קושי בתהליך המיון וההפרדה. הפגיעה הפנימית מתפתחת מהר ועלולה לגרום לירידת איכות דרסטית של כל המישלוח. הנחת המחקר הנוכחי כי באמצעות טכנולוגית NIR על יתרונותיה נוכל לבסס מערכת לבחינת נפגיעות פנימית של *Alternaria* בפירות ללא הרס ולקבל באמצעותה אפשרות מיון פירות לאיכות גבוהה.

2. רקע תיאורטית וסקר ספרות

2.1. מחלת בית גרעין

מחלות בית גרעין משפיעות בצורה שלילית על גידול ושיווק פירות. המחלות נגרמות על-ידי פיטריות כמו למשל *Cladosporium*, *Fusarium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Penicilium* ואחרים (Amusa et. al., 2003, Teixido et. al., 1998, Pierson et. al., 1971).

פיטריות הן סוג של מיקרואורגניזמים השייכים לצמחים אשר לא מסוגלים להפיק מזון לעצמם ממים, מפחמן דו-חמצני ומאנרגיה השמש. הם ניזונים מחומרים אורגאניים של צמחים מתים או חיים. פיטריות ניזונות מחומרים חיים נקראים פרוזיטים, אולם פיטריות ניזונות מחומרים מתים נקראים ספרופיטים. לרוב הפטריות יש צורת חוטים מיקרוסקופיים. מרביתם מועברים מצמח לצמח באמצעות גופיפים זעירים הנקראים נבגים המטולטלים בזרמי אוויר או בנתזי מים. הפטריות יכולות לחדור לציפת הפרי או לבית הגרעין שלו דרך פצעים וסדקים או דרך הפיטם הפתוח בזמן פריחה ובשלבי התפתחות פרי מוקדמים. הפעילות בתוך הפרי גורמת לשינויים בצבע בבית הגרעין ולריקבון בציפה אבל לא ניתן לראות את התופעה בהתחלה, תפוח רקוב בפנים נראה יפה, בריא ושלם מחוץ. הפטרייה *Alternaria-alternata* היא אחת מהפטריות הנפוצות והתוקפניות. על אבחון מחלת בית הגרעין הנגרמת בפטרייה זאת כתוב בעבודה הנוכחית.

הפטרייה *Alternaria-alternata* התגלתה בשנים אחרונות כפתוגן תוקפני וכאחד מהגורמים העיקריים לריקבון בבית הגרעין בפרי התפוח בזנים המשתייכים לזן Red Delicious המאופיינים בפיטם פתוח במיוחד בזמן פריחה ובשלבים מוקדמים הבשלת הפרי

(Ellis and Barrat, 1983, Brown and Hendrix, 1978). זנים אלו מהווים כשליש מכל זני התפוח הגדלים באזור הגליל והגולן. המחלה גורמת לפסילת הפרי ולנזק של מיליוני שקלים ובנוסף לירידה באמינות טיב התפוח הישראלי. הדבר יכול לאפשר בעתיד יבוא מוגבר של תפוחים מחו"ל כתחליף ליצור מקומי. הגורם המרכזי לנזק בפרי הינו פטרייה מסוג *Alternaria-*

alternata (Reuveni et. al., 2002).



ציור 1. נבגי הפטריות *Alternaria-alternata*.

Figure 1. *Alternaria-alternata* fungus spore.

(Source: Doctor Fungus Corporation, Medical Mycology Research Center, 2007).

נבגי הפטריות *Alternaria* רב-תאיים ומסודרים בשרשרות ובענפים (ציור 1) ומתחלקים לאורך ולרוחב (Laemmlen, 2001). אורך נבג הפטרייה הוא $20 - 60 \mu\text{m}$ ורוחב שלו $9 - 18 \mu\text{m}$ (Fallah, 2004, Lillard, 2004). הנבגים מדביקים פירות צעירים דרך הפיטם הפתוח שלהם וללא חדירה לציפת הפרי. הפטרייה יכולה להתפתח לתוך הציפה מסביב לבית הגלעין (Spotts, 1990). צבע הריקבון הוא חום כהה. בציור 2 הודגמה התפתחות של *Alternaria* באופן סמטרי ובציור 3 הודגמה התפתחות הנזק לא סמטרית. תנאים של לחות גבוהה, טמפרטורות נוחות ונוכחות של זנים רגישים הם הגורמים החשובים שתורמים הדבקה במטע (Reuveni et. al., 2002), (Perez et. al., 1995). אחרי חדירה לפרי הפטרייה מוגנת מפני ריסוסי הדברה (Spotts, 1990).

בתנאי הארץ, הדברת המחלה הנגרמת ע"י *Alternaria-alternata* נבחנה בעבר באמצעות ריסוסים בזמן הפריחה. הריסוסים גרמו להפחתה מובהקת של המחלה בשיעור של 40%, ועד 70% (Reuveni et. al., 2002). התוצאות אינן מספקות את התעשייה כיוון ששיווק מסודר של

תפוח איכותי מחייב רמת נגיעות אפסית. חוסר הדברה מושלמת בניסויים השונים הוא כנראה תוצאה של חוסר התכשירים המתאימים למניעת הדבקה במחלה.



ציור 2. התפתחות *Alternaria-alternata* בצורה סימטרית.

Figure 2. *Alternaria-alternata* development symmetrically.

תוצאות בנושא מעידות שיש צורך בפיתוח שיטות לא הרסניות המסוגלות להבחין תפוחים נגועים ב *Alternaria* בשלבים שונים של התפתחות המחלה בתוך הפרי בצורה מהירה, מדויקת ובעלות נמוכה.



ציור 3. התפתחות *Alternaria-alternata* בצורה אי – סימטרית.

Figure 3. *Alternaria-alternata* development not symmetrically.

2.2. שיטות הערכה לא הרסניות

תוצרת חקלאית בעלת איכות גבוהה ובמיוחד תוצרת המיועדת לייצוא צריכה להיות מבוררת וממוינת בצורה קפדנית בכדי להתאימה לסטנדרטים של איכות גבוהה מבחינת השוק המודרני. לעיתים מתגלה שאיכות התוצרת החקלאית ובפרט ירקות ופירות, המגיעה לשוק היעד, אינה נאותה וזאת עקב חוסר בקרת איכות וטיפול נאות בזמן הובלה. יש שיטות רבות להערכת איכות ולמיון פירות לפי תכונות חיצוניות כגון מידות, צורה, צבע ופגמים חיצוניים ולפי תכונות פנימיות כגון מירקם, רמת בשלות, טעם, ריח ופגמים פנימיים הקשורים לתכונות חיצוניות באופן עקיף. שיטות קלאסיות להגדרת תכונות פנימיות כמו למשל תכולת רטיבות, תכולת סוכר, מוצקות, הימצאות פגמים חיצוניים וכו' הן אמינות, אולם השיטות הללו הן הרסניות

(Giangiaco et. al., 1981) ולכן מתאימות למדגמים בלבד. יש צורך בשיטות לא הרסניות של הערכת איכות פירות וירקות מהירות, פשוטות בשימוש. שיטות הבדיקה עשויות להחליף באופן הדרגתי את הבדיקות השגורות שמבוצעות על-ידי בן-אדם. במילים אחרות, שיטות מדויקות עשויות להפחית שגיאות הנובעות מהסובייקטיביות של בני-האדם בתהליך הבדיקה (Valero and Ruiz-Altisent, 2000). שיטות לא הרסניות המיושמות להערכת תכונות פנימיות ופגמים פנימיים הינם: בדיקה אקוסטית, בדיקת X-ray, בדיקת NMR, בדיקת ספקטרוסקופיה המתבססת על מדידת אור מוחזר או מעבר, פלואורסנטיות וכו'. שיטה אקוסטית למשל, פותחה להגדרת מוצקות פירות (Shmulevich et. al., 1996 ; Rosenfeld et. al., 1993). לאחרונה דווח על יישום פלואורסנטיות לקבלת מידע על כמות מולקולות פיגמנטיות ועל שיעור כלורופיל בפירות (Schmitt et. al., 2005).

נוכחות פגמים בפירות מורידה את איכותם למכירה. פגמים חיצוניים, כגון איבוד צבע, עיוות צורה, מכות, נראים מחוץ. פגמים פנימיים בדרך כלל לא נראים והם מתגלים רק אחרי קניית הפירות על-ידי הצרכן. הפגמים הפנימיים הם חללים בציפת הפרי, נוכחות מים בחללים נגרמות ממחלות על-ידי פיטריות שונות ובפרט *Alternaria*.

להגדרת תכונות פנימיות מסוימות מיושמת שיטה אקוסטית. גלים אקוסטיים הינם עיוותים המתפשטים בתווך אלסטי. גל אלסטי מעביר אנרגיה מצד אחד בצורת עיוות אלסטי ומצד שני בצורת אנרגיה קינטית. במילים אחרות טבעם של גלים אקוסטיים הוא מכני ולכן הם תלויים בתכונות המכניות של החומר. שיטה אקוסטית פותחה להערכת מספר פרמטרי העברה אשר יכולים להתייחס באופן כמוטי לבשלות, למוצקות ולתכונות אחרות של פירות אבוקדו ומנגו.

ירידת בעוצמת הגלים העוברים דרך קליפת הפרי ומגיעים עד רקמתיו משתנה עם הבשלת וריכוך הפרי במשך העונה ובזמן איחסון (Mizrach, 2000). הניסויים הדגימו שקיימת מתאם בין ירידות נמדדות בעוצמת הגלים האקוסטיים לתכולת שמן, משקל יבש ומוצקות של אבוקדו (Mizrach, 2000). שיטה אקוסטית מאפשרת להעריך גם בשלות מנגו (Mizrach, 2000), מוצקות שזיפים (Mizrach, 2004) ו 3 רמות קמחיות בתפוחים (Mizrach et. al., 2003). השיטה האקוסטית בטווח תדרים 1300-300 Hz כלומר בתחום אורכי גל 44 - 26 cm עשויה למיין אגסים בעלי וחסרי חללי אוויר (Schrevens et. al., 1998). השיטה יכולה גם להבחין באבטיחים חסרי גלעינים עם יעילות מיון של 80% וקורלציה בין התוצאות הנמדדות לתוצאות חזויות של 62% - 67% (Diezema et. al., 2003). אך לא תמיד התכונות הפנימיות והפגמים הפנימיים של הפירות קשורים אך ורק בתכונות מכניות של החומר ממנו מורכב הפרי.

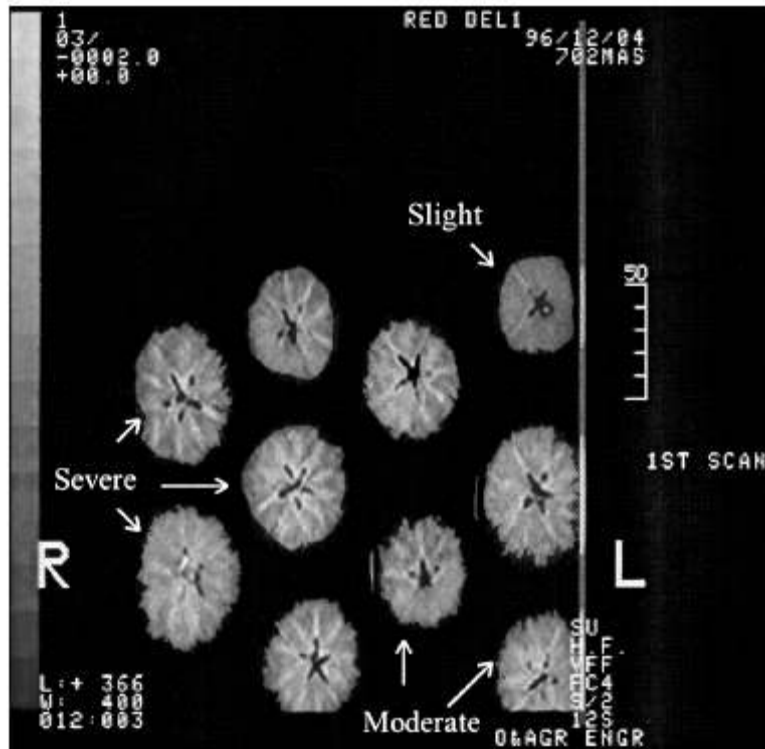
ספקטרוסקופיה מולקולרית הינה שיטה המתבססת על בליעת ופליטת קרינה אלקטרומגנטית על-ידי מולקולות. המחקר של Schatzki et. al. (1997) הראה שבאמצעות X-rays radiographic imaging, שהינה אחת מסוגי ספקטרוסקופיה, אפשר למיין תפוחים בריאים ותפוחים בעלי איבוד צבע, השחמה, הזדקנות, ריקבון פנימי, פגמים מחרקים ו- watercore מזנים Red Delicious, Golden Delicious, Fuji, Granny Smith ו Braeburn. יעילות המיון במצב הנייח הייתה מעל מ 50%, אמנם היא פחתה כאשר התבוננו בהדמיית תנועת התפוחים בצג המחשב. במחקר של Shahin and Tollner (1997) נבדקה אפשרות למיין תפוחים בעלי וחסרי פגיעת watercore באמצעות תמונות X-rays דיגיטאליות ויעילות המיון התקבלה 65% בממוצע.

שיטת X-rays computer tomography (CT) – נוצרת תמונה תלת-ממדית של חלקים דקים פנימיים בגוף או בעצם מסדרת תמונות דו- ממדיות הנעשות באמצעות סיבוב של קרן דק X-rays מסביב ציר הגוף הנבדק (Gunasekaran, 2001). יישום בשיטת CT הראתה אפשרות לזהות אגסים בעלי וחסרי בית גלעין רקבובי, איבוד צבע ברקמות וסדקים פנימיים עם שגיאת זיהוי פחות מ 12% (Lammertyn et. al., 2001). מחקר חדש של Haff et. al. (2006) הראה קורלציה של 96% לזיהוי חללים אוויריים באגסים. היישום בשיטות X-rays למערכות On-line אפשרי בעתיד, אבל נדרשת עבודה רבה לשיפור ניתוח תמונות ולהגדלת דיוק ההבחנה לפי Cavalieri, (1997); Schatzki et. al., (1997).

התופעה פיזיקאלית של שיטת Nuclear magnetic resonance (NMR) מתרחשת כאשר גרעיני אטומים מסוימים נמצאים בשדה מגנטי סטטי ונחשפים להשפעת שדה מגנטי שני המתנוודד. תגובת גרעין האטום להשפעת השדה המגנטי תלויה בתכונה הנקראת ספין, כלומר, מומנט זוויתי פנימי של גרעין האטום (Hornak, 1999; Chang, pp 52-53, 1971). התגובה מיושמת בספקטרוסקופיה של NMR וביצור תמונות NMR. שיטת NMR יושמה בהצלחה לזיהוי ומיון תפוחים מזן Fuji בעלי רמת watercore יותר מ 2% וחסרי ה-watercore כאשר הקורלציה בין התוצאות הנמדדות לתוצאות החזויות הייתה כמעט 100% (Clark and Bielecki, 1997).

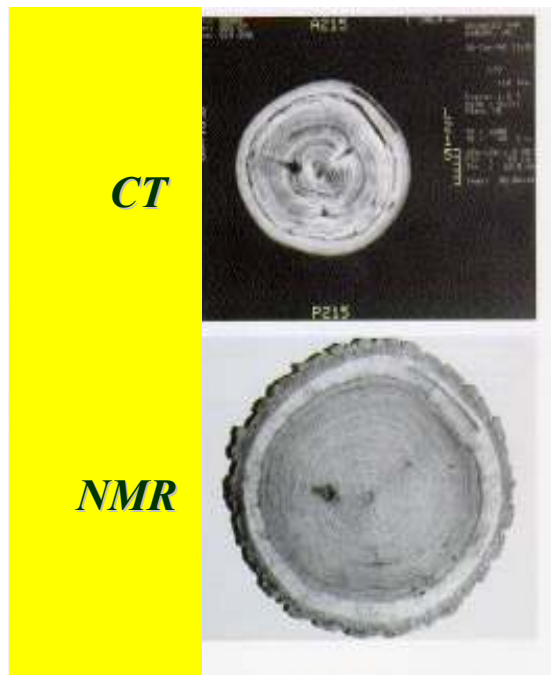
החוקרים Zion et. al. (1997) יישמו בהצלחה מדידה בשיטת NMR לאבחון זיתים בעלי וחסרי גלעין עם שגיאת 0% - 7% במערכת ניחת ובמסוע. מהירות המסוע הגיעה עד 250 מ"מ/שנייה. ניסיון ליישום NMR במערכת מסוע למיון דובדבנים בעלי וחסרי גלעין נערך על-ידי Kim et. al. (1999). החישן שפותח על-ידם היה מחובר למערכת מסוע ומהירות המערכת הגיעה עד 250 מ"מ/שנייה. המערכת הבחינה בדובדבנים בעלי וחסרי גלעין עם שגיאת 0% - 2% כאשר כיוון החור מגלעין הפרי היה ניצב לתנועת מסוע. באמצעות המערכת (Kim et. al., 1999) התקבל מתאם 89% - 97% בין שיא התהודה המגנטי של יחס שומן ומים באבוקדו למשקל יבש של הפרי.

הדגמת תוצאות מדידה השיטות של X-rays images מובאת בציר 4, שיטות CT ו NMR מובאות בצירים 5 ו 6. השיטות מאפשרות אבחון ומיון פירות בעלי פגמים פנימיים ובפרט לאבחון מחלות בית גרעין. יישום השיטות ב On-line עשוי להיות אפשרי בעתיד, אך כיום יש צורך עדיין בשיפורים ובהשקעות כדי למיין פירות בצורה נכונה ומהירה (Cavalieri,1997). בנוסף, השיטות הן יחסית יקרות ולא כל צרכן מוכן לקנות פירות מוקרנים.



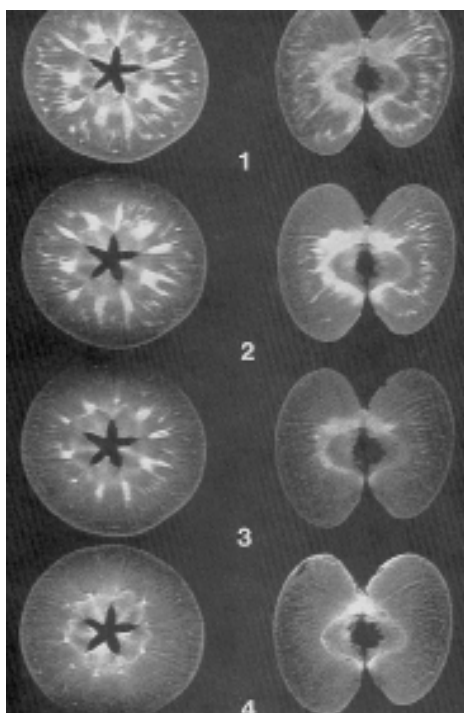
ציור 4. תמונות X-rays של חתכי התפוחים מזן Red Delicious בעלי שיעורים שונים של watercore.

Figure 4. X-rays image of Red Delicious cultivar apples section with different watercore ratio (source: Shahin et. al., 1999).



ציור 5. דוגמאות של תמונות חתכי תפוחים בעלי פגמים.

Figure 5. Apples section image example with internal defects and operation. (Source: Shmulevich Presentation, 2000)



ציור 6. תמונות NMR לתפוחים מזן Fuji הפגועים ב watercore .

Figure 6. NMR images of Fuji cultivar apples infected with watercore.

.(Source: Clark and Bielecki, 1997).

2.3. ספקטרוסקופיה בתחום NIR

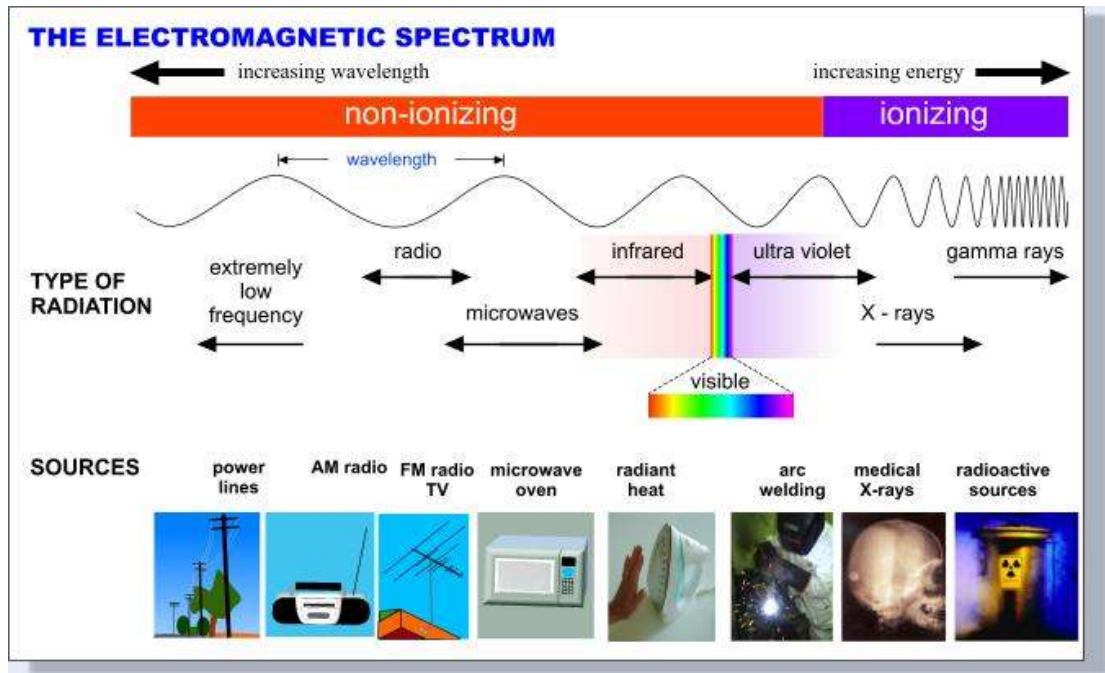
2.3.1. רקע

שיטות ספקטרוסקופיה אופטיות מבוססות על יכולת חומרים לבלוע קרינה אלקטרומגנטית. את הקרינה האלקטרומגנטית נהוג לחלק לתחומים כמפורטים בטבלה 1 ובציור 7. כידוע מתורת הקוונטים, רמות האנרגיה בחומר הן דיסקרטיות. יתרה מזאת, גם הקרינה האלקטרומגנטית עצמה מועברת במנות אנרגיה קצובות שנקראות פוטונים. האנרגיה של כל פוטון נתונה ע"י הנוסחה הבאה :

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

כאשר h [J*sec] הוא קבוע פלאנק, c [m/sec] - מהירות האור ו λ [m] - אורך הגל לפי

.White pp 577 ,(1962) ;Williams and Norris pp 17, (1987)



ציור 7. תחומי קרינה אלקטרומגנטית ושימושיה.

Figure 7. Electromagnetic radiation ranges and its use.

(Source: Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, 2007).

במעבר דרך החומר נבלעים רק אותם פוטונים שהאנרגיה שלהם שווה להפרשים האפשריים בין רמות האנרגיה השונות לפי Williams and Norris pp 17-18, (1987); במילים אחרות, בליעת האור הנראה גורמת העברת אלקטרונים לרמות יותר גבוהות, בעוד שהתנודות המכאניות של המולקולות בולעות קרינה באזור IR. זאת הסיבה שקרינת IR יכולה "לחמם" חומר. רמות האנרגיה הפנימית שונות בין חומר לחומר והדבר זה נובע מההרכב השונה של האטומים המרכיבים את החומר, הרכב זה המשפיע על רמות האלקטרונים, ומהצורות השונות של המולקולות, שמשפיעות על התנודות המכאניות האפשריות. לכן, כל חומר בולע הרכב שונה של אורכי גל. עובדה זאת מאפשרת לזהות את ההרכב הכימי של חומרים מבלי לבצע אנליזות כימיות, שהן בדרך כלל הרסניות. לשם כך יש להעביר דרך החומר הנבדק קרינה ולבחון את הספקטרום של האור העובר. על הרכב החומר ניתן יהיה להסיק לפי אורכי גלי הקרינה שלא נבלעת כלומר הקרינה המוחזרת או המעוברת. נשאלת השאלה באיזה תחום של הספקטרום האלקטרומגנטי כדאי להשתמש לזיהוי ההרכב בחומרי מזון? כידוע חומרי מזון הם חומרים אורגניים. התכונה העיקרית של החומרים האורגניים היא שהם מורכבים בעיקר מפחמן ומימן. כמעט לא ניתן להבדיל בינם ע"י השימוש בחלק הנראה של הספקטרום, אשר כאמור גורם

טבלה 1. תחומי קרינה אלקטרומגנטית

Table1. Electromagnetic radiation ranges
(Source: Chang pp 28, 1971; Sandwell, 2007)

Type of Radiation	Frequency Range (Hz)	Wavelength Range	Type of Transition
gamma-rays	10^{20} - 10^{24}	$<10^{-11}$ m	nuclear
x-rays	10^{17} - 10^{20}	10 nm-0.01 nm	inner electron
ultraviolet	10^{15} - 10^{17}	400 nm-10 nm	outer electron
visible	$4\text{-}7.5 \times 10^{14}$	750 nm-400 nm	outer electron
near-infrared	10^{12} - 4×10^{14}	2.5 μm -750 nm	outer electron molecular vibrations
infrared	10^{11} - 10^{12}	0.1mm-2.5 μm	molecular vibrations
microwaves	10^8 - 10^{12}	1 m-0.1mm	molecular rotations, electron spin resonance
radio waves	10^6 - 10^8	1000 m-1 m	nuclear spin resonance

למעברים של אלקטרונים. עיקר ההבדל בין חומרים האורגניים נובע ממבנה המולקולות והצירופים שלהם. לכן, רוב ההבדלים ניתן יהיה לזהות בחלק ה-IR של הספקטרום.

בתחילת המאה העשרים המדען Coblenz מדד ספקטרה של מאות חומרים אורגניים בתחום אינפרא אדום IR בין 1000 nm ל 15000 nm לפי (Burns and Ciurezak pp 1-2, (1992).

בהתאם לממצאיו נמצא שאין 2 חומרים שיש להם ספקטרום זהה. ספקטרום של אתנול, למשל, שונה מספקטרום של מתיל אף על פי שהם כוללים אותם אטומים: פחמן, מימן וחמצן. במילים אחרות ספקטרום IR בתחום 15000 – 2000 מייצר "טביעת אצבעות" המאפשרות לזהות חומרים אורגניים לפי (Burns and Ciurezak pp 2,(1992). החוקר Coblenz המצוטט ע"י Burns and Ciurezak pp 2,(1992) שם לב שלחומרים אורגניים בעלי קבוצות כימיות דומות

יש פס בליעה דומים. למשל, לאלכוהולים, לפנולים, לחומצות קרבוקסיליות ולחומרים אורגניים אחרים. לחומרים בעלי קבוצה הדרוקסילית OH יש פס בליעה בסביבת אורך הגל 2700 nm לפי

.Burns and Ciurczak pp 2,(1992)

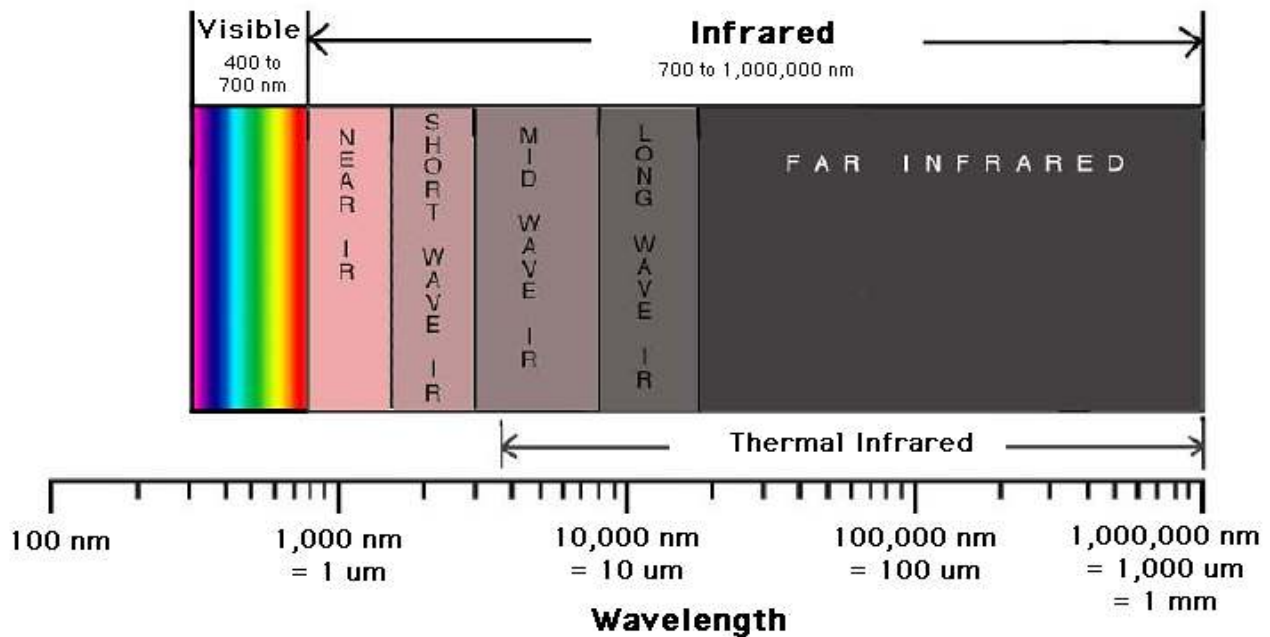
ספקטרוסקופיה בתחום אינפרא-אדום שימושית מאוד באופן נרחב בתעשייה, בקרימינולוגיה, בתעשיית מזון ובחקלאות(Lai et. al., 1994) ולשיטות המתבססות עליה יש פוטנציאל לגילוי מהיר ורגיש של מיקרואורגניזמים (Schmilovich et. al., 2005). המחקרים הדגימו שבאמצעות ספקטרוסקופיה של mid-IR לפי פסי בליעה המתאימים לחומרים כימיים מסוימים אפשר להבחין למשל שמנים צמחיים (Lai et. al., 1994), עם דיוק המיון מ 93% עד 100%, ריכוז חלבון בחלב טרי עם שגיאה עד 10% באינטראקציה עם שומן ולקטוזה (Etzion et. al., 2004), ריכוז ניטרטים בקרקע במיתאם 98% - 99% עם תוצאות אנליזה כימית (Jahn et. al., 2006). בניסויים אלה יושמו מערכות המבוססות על קרינה מוחזרת. חוץ מזה, מכיוון שקרינת mid-IR נבלעת מים באופן חזק ופסי בליעת המים חופפים את פסי בליעת החומרים הנחקרים, היה צורך בהחסרת מים (Etzion et. al., 2004 ; Linker et. al., 2005) או בהפחתת אותם עד שיעור מסוים מינימאלי כגון בניסוי עם מישחות הנעשות מקרקע כאשר תכולת מים בהן היתה 20% (Jahn et. al., 2006). רוב פירות בשלים שלמים כוללים מים בכמות גדולה. החסרת או הפחתת מים מהפירות לפני ניסוי הינה הרס הפרי. במילים אחרות בבדיקה לא הרסנית באמצעות ספקטרוסקופית mid-IR פסי בליעת מים חופפים את פסי בליעת כמה חומרים אחרים הנמצאים בפרי. בנוסף לזה פיטריית *Alternaria* מתחילה להתפתח בבית גרעין (Spotts, 1990). לכן יש צורך בחקירת ספקטרום קרינה מועברת להבחנת הפרי הנגוע. לקבלת ספקטרום קרינה מועברת של mid-IR יש צורך בעוצמת הארה חזקה. מכיוון שהקרן עובר דרך יותר ארוכה בתוך הפרי מאשר בשיטת קרינה מוחזרת וגם מכיוון שהקרינת mid-IR נבלעת במים בצורה חזקה, יש קושי בישום ספקטרוסקופית mid-IR לבדיקת תכונות פנימיות ופגמים פנימיים של פירות שלמים ללא הרס. הציוד לספקטרוסקופיה של mid-IR הוא יקר ולא את כל הפרמטרים ניתנים לחזות בספקטרוסקופית mid-IR (Kempen and Qiao, 2002).

קיים תיעוד נרחב לשימוש ספקטרוסקופית Near Infrared לאנליזות כמותיות מהירות במזון ובתוצרת חקלאית לאבחון של תכולת כגון מים, שומן, חלבון וסיבים. ספקטרום Near Infrared (NIR) נמצא בתחום 750 – 2500 nm (ציור 8) והוא, בדומה לספקטרום mid-IR מאופיין בבליעות מולקולות אורגניות.

בד"כ פסי בליעת קרינת ה-NIR הם תנודות משנה, או הרמוניות משנה של תדירויות ראשוניות הנמצאות בפסי בליעת קרינת ה-IR. לפי התצפיות פסי בליעת קרינת ה-NIR חופפים חלקית אחד לשני בניגוד לספקטרום mid-IR. לפי ספקטרום NIR קשה להבהיר איזה אורך גל מתאים לאיזה חומר. שינויי בליעה בתחום NIR מושפעים פחות משינוי בריכוז החומר הבולע לפי Burns and Ciurczak pp 37,(1992). בכל זאת לספקטרוסקופיה של NIR יש יתרונות בהשוואה לספקטרוסקופיה של mid-IR (Workman, 2000):

1. ציוד המבוסס על קרינת NIR זול יחסית;
2. צורך בעוצמת אור קטנה יותר בהשוואה למערכת mid-IR;
3. תפוקה גבוהה של מערכת NIR אפשרית אפילו בשימוש מערכת סיבים אופטיים זולה יחסית;
4. כושר חדירת קרינת NIR גבוה יותר מכושר חדירת קרינת mid-IR והמרחק האופייני של מעבר הקרן יכול להשתנות מ 1mm עד 10 mm ויותר נתוצא משימוש תחומי ספקטרום NIR שונים;
5. קרינת NIR לא מחממת חומר בניגוד לקרינת mid-IR.

בטבלה 2 מובאות עוצמות יחסיות לקשרי פחמן – מימן CH, כושר חדירה וצפיפויות אופטיות לאורכי גל שונים בתחום mid-IR ולהרמוניות או לתנודות משנה שלהם בתחום NIR. בנוסף לבדיקה האיכותית, אשר מגלה אילו רכיבים נמצאים בתוך החומר הנבדק, מסוגלת הספקטרוסקופיה לבצע גם בדיקה כמותית, שמפרטת באופן כמותי את ריכוז של כל רכיב ורכיב, יכולת הניתוח הכמותית קשורה לעובדה שרכיבי החומר אינם מסוגלים לבלוע את כל הקרינה באורכי הגל המתאימים. יכולת הבליעה תלויה בריכוז של הרכיב הבולע בתוך החומר. רכיב



ציור 8. תחומי ספקטרום אינפרא אדום, NIR ואור הנראה.

Figure 8. Infrared, NIR and Visible light spectrum ranges

(Source: Boston Museum of Science, project "Measuring Vegetation Health", USA, 2006).

טבלה 2. עוצמות יחסיות של פסי C-H לתחום אינפרא-אדום ולהרמוניות ה-NIR השונות

Table 2. Relative intensities of C-H bands for infrared and the various NIR overtone regions (Source: Workman, 2000)

Band C-H	Wavelength region	Relative Intensity	Pathlength	Optical Density
Fund. (n)	3380 - 3510 nm	100	0.01 mm	2
1st over. (2n)	1690 - 1755 nm	1	1.0 mm	2
2nd over.(3n)	1127 - 1170 nm	0.1	1.0 cm	2
3rd over. (4n)	845 - 878 nm	0.01	10.0 cm	2
4th over. (5n)	690 - 780 nm	0.005	10.0 cm	1

שריכוזו גבוה יבלע יותר קרינה מרכיב שריכוזו נמוך. לפי Williams and Norris, (pp 21, 1987) מתקבלת האנרגיה של הקרינה הנבלעת באופן ישיר, אם מודדים את הקרינה העוברת מכוון שבדרך כלל לא ניתן למדוד את האנרגיה של הקרינה הנבלעת באופן ישיר, מודדים את הקרינה העוברת. עבור I_0 - עוצמת הקרן הפוגעת ו I_T - האנרגיה של הקרינה העוברת.

ניתן להגדיר את יכולת הבליעה של הדגם באופן הבא :

$$A = \log \frac{I_0}{I_T} \quad (2)$$

לפי חוק ביר-למברט (Beer-Lambert)

$$A = \varepsilon \cdot \rho \cdot l \quad (3)$$

כאשר :

ε - הבליעה המולרית ;

ρ - הריכוז המולרי ;

l - המרחק האופייני של מעבר הקרן.

כלומר, יכולת הבליעה הינה יחסית לריכוז הרכיב הנבחן. ניתן להציג את הקשרים הנ"ל גם בצורה אחרת. נגדיר את יחס ההעברה :

$$T = \frac{I_T}{I_0} \quad (4)$$

לפי המשוואות (2) ו-(3) הריכוז המולרי יחושב :

$$\rho = \frac{1}{\varepsilon \cdot l} \log \frac{1}{T} \quad (5)$$

ממשוואה (5) רואים כי הריכוז הינו פרופורציונאלי לערך $\log 1/T$. למרות שקרינת העברה משקפת יכולת הבליעה, בשיטה יש חיסרון ; כדי שיהיה ביציאה $I_T \neq 0$ יש צורך בעוצמת קרינה גבוהה. בשימוש במכשיר NIR המתבסס על קרינת העברה יש צורך לכן בעוצמת קרינת פוגעת גבוהה יותר מאשר בשימוש במכשיר NIR המתבסס על קרינת החזרה. קיימים שני סוגים של

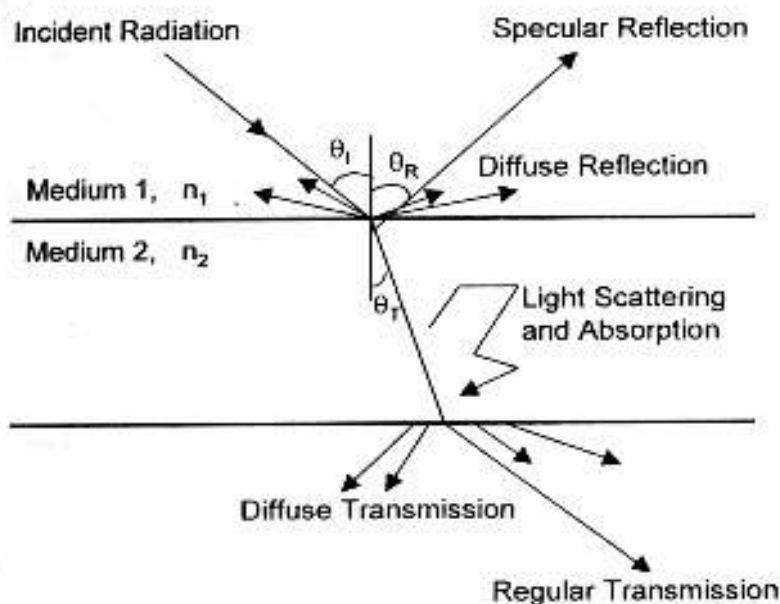
החזרה: החזרה ספקולרית (Specular reflection) והחזרה דיפוזית (Diffuse reflection). החזרה ספקולרית היא תופעת פני שטח ובטבע דומה להשתקפות מפני שטח חלקים. החזרה הדיפוזית מהווה את החלק העיקרי של הקרינה החוזרת בחומרי מזון ולכן שכיחה בבדיקות איכות של מוצרי טבעיים. החוקרים Williams and Norris (pp 2, 1987) טענו כי ההחזרה הדיפוזית נגרמת לא רק על-ידי פני השטח אלא גם על-ידי האזורים הפנימיים של הגוף הנבדק. בהתאם למתואר בציור 9, כאשר הקרינה חודרת לתוך הגוף היא בחלקה נבלעת ובחלקה חוזרת תוך שבירה ועקיפת פגמים פנימיים. לכן, מדידות ההחזרה הדיפוזית יכולות לשמש לבחינת ההרכב הפנימי של הדגמים והפגמים, באופן דומה למדידות ההעברה. שיטת החזרה יכולה גם לשקף את יכולת הבליעה בדומה לשיטת ההעברה. שיטת ההחזרה פשוטה יותר ליישום מאשר שיטת ההעברה. מכוון שההחזרה בדומה להעברה משקפת את יכולת הבליעה, מקובל להניח לפי Williams and Norris, (pp 21,1987) כי הריכוז המולרי פרופורציונאלי באופן הבא:

$$\rho \propto \log \frac{1}{R} \quad (6)$$

כאשר יחס ההחזרה R נתון על-ידי

$$R = \frac{I_R}{I_0} \quad (7)$$

ו- I_R היא האנרגיית הקרינה המוחזרת.



Schematic representation of interaction of light with matter. θ_i = angle of incidence, θ_R = angle of reflectance, θ_T = angle of transmittance, n_1, n_2 = refractive index of medium 1 and 2, respectively.

ציור 9. תיאור סכמתי של אינטראקציה אור עם חומר.

Figure 9. Schematic representation of light interaction with matter

(Source: Gunasekaran, 2001).

בליעת קרינת NIR בתדירות מסוימות מתרחשת כאשר תדירות זו מתלכדת עם תדירות התנודות במבנה המולקולארי של הדגם הנבדק. במילים אחרות, ספקטרום הבליעה מאפיין את החומרים שמהם הדגם מורכב (Burns and Ciurczak, pp 386, 1992). אולם מאחר ואפשר למדוד רק את עוצמת קרינת החזרה או עוצמת קרינת העברה יש למצוא קשר בין ערכי המדידה לבליעה. לפי הנוסחאות (3) ו (5) הבליעה שווה ל- $\log(1/T)$ במדידת קרינת העברה או ל $\log(1/R)$ במדידת קרינת החזרה. לכן להערכת מוצר חקלאי נתוני NIR מועברים ללוגריתם של הערכים הופכים שלהם (Lu,2001), (Giagiacomio et.al., 1981).

פסי הבליעה מוגדרים על – ידי 3 פרמטרים: המיקום, הגובה, והרוחב. אולם קשה להעריך את הפרמטרים בצורת לוגריתם של הערכים הופכים של עוצמת קרינת ה- NIR בגלל השפעת חפיפה חלקית של פסי הבליעה השכנים (Burns and Ciurczak, pp 387, 1992). לכן, לעיתים קרובות

משתמשים בספקטרום – נגזרות של עוצמת קרינת או בליעת NIR . הנגזרת הראשונה הנה עקום הכולל שיאים ושקעים המתאימים לנקודות הפיתול של קו- הספקטרום המקורי. שיאים של הספקטרום הנגזרת השנייה של $\log(1/T)$ או $\log(1/R)$ הינם יותר גבוהים וחדים מאשר הפיקים של הספקטרום עצמו. מספר השיאים בספקטרום נגזרת שנייה שלא מתאימים לריכוז החומר המסוים הינו קטן מאוד והספקטרום מאפיין את הדגם בצורה יותר נכונה מאשר ספקטרום עוצמת הקרינה, לוגריתם של הערך ההפוך שלו הנגזרת הראשונה שלו (Lu, et. al, 2006), (Finney and Norris, 1978). בניסוי להגדרת מדדים פיזיולוגיים של מנגו כגון תכולת סוכר, חומציות, מוצקות ותקופת איחסון המתאם עם תוצאות בדיקה הרסנית הגבוה ביותר התקבל עבור תוצאות נגזרת שנייה של לוגריתם הערך ההפוך של ספקטרום קרינה מוחזרת. המתאם נמצא בין 61% ל 94% (Schmilovich et. al., 2006).

מכשיר למדידת קרינת NIR כולל בד"כ מקור אור, סיב אופטי חד-כיווני, ספקטרומטר, וחישן המחובר למחשב. האור נופל על הדגם, באמצעות הסיב האופטי מועבר לספקטרומטר. הספקטרומטר מחלק את הקרינה לפי אורכי הגל ומעביר את התחום המסוים כלומר תחום NIR לחישן. החישן קולט את קרינת אורכי הגל השונים והופך אותם לאותות חשמלאיים. המחשב מקבל את האותות והופך אותם לצורה נומרית, באמצעות Fast Fourier Transform (Guanasecaran, 2001), (Liu and Ying, 2004; Liu et. al., 2005) או תוכנת OOID המפותחת על-ידי חברת Ocean Optic. מקור האור הנפוץ ביותר הינו מנורת וולפרם – הלוגן בעלת עצמות שונות. מקור כזה בעוצמה של 250 W יושם על-ידי Lu and Ariana (2002) לבדיקת אפשרות חיזוי תכולת סוכר ומוצקות לתפוחים במערכת מבוססת על קרינת מוחזרת. מקור בעל עצמה של 450 W יושם על-ידי במכון הנדסה חקלאית. המערכת מבוססת על קרינת מועברת עבור ניסוי ראשוני לבדיקת אפשרות אבחון תפוחים נגועים במחלת בית גלעין

Alternaria

החישן *InGaAs* הינו נפוץ ויושם בניסויים המוזכרים לעיל ובדיווח של החוקר Lu (2001) לבדיקת אפשרות חיזוי תכולת סוכר ומוצקות לדובדבנים. חישן Si נפוץ יותר ומשמש בספקטרומטר S2000 ובספקטרומטר USB2000 המיושמים במחקר הנוכחי.

באמצעות ספקטרוסקופיית NIR אובחנו רכיבים פנימיים ותכונות פנימיות כמו תכולת סוכר, מוצקות, (Lu and Ariana, 2002), (Lu, 2001), (Slaughter et. al., 1996), כמות חומר יבש (Kang et. al., 2003) וחומציות (Valero and Ruits_Altisent., 2000) עם מקדם התאמה מתקבל בין 72% ל-94%. החוקרים Schmilovich et. al. (2000) הדגימו יישום שיטה המתבססת על קרינה מועברת של NIR למדידת פיזור ריכוז של שומן בחלב ולא היה צורך בהסרת או הפחתת מים בניגוד לניסוי בדיקת תכולת רכיבים בחלב באמצעות ספקטרוסקופיית mid-IR (Etzion et. al., 2000). ספקטרוסקופיית NIR המבוססת על קרינה מועברת יושמה גם לזיהוי תפוחים בריאים ותפוחים בעלי השחמה -browning מזן Braeburn באמצעות מערכת ניחת עם מקדם קורלציה 0.69 – 0.91 (Clark et. al., 2003) ובאמצעות מערכת בתנועה עם מקדם קורלציה 0.7 – 0.9 (McGlone et. al, 2005).

2.3.2. שיטות עיבוד נתוני ספקטרוסקופיית NIR

2.3.2.1. סקירה כללית של שיטות כימומטריות

מערכות המבוססות על NIR, הקיימות כיום, מסוגלות למדוד ספקטרום במספר אורכי גל הנע בין יחידות בודדות לבין כמה אלפים. הבעיה היא איך לבחור צירוף אורכי הגל המתאים עבור אנליזה ספקטרוסקופית מסוימת מהשפע של אורכי הגל הנמדדים.

לפי Roberts et. al pp 158 (2004) את הקריטריונים לבחירה המתאימה של אורכי הגל אפשר לסכם באופן הבא:

1. מודל הכיול אמור להיות מדויק; באופן אידיאלי, אורכי הגל הנבחרים צריכים להביא לתוצאות המדויקות ביותר אשר אפשר לקבל מנתוני הספקטרום.
2. המודל אמור להיות רובוסטי כלומר הוא צריך להישאר מדויק עם הזמן ובתנאים של שינויים קטנים במערכת עצמה, בדגימות, בשיטת ההכנה של הדגימות ובסביבה.
3. המודל אמור להיות רפיטבילי (repeatable), במובן שאם נאספו שני מדגמים ונמדדו הספקטרום שלהם, שיטת הכיול אמורה לבחור אותם אורכי הגל עבור שניהם.

קשר אמפירי בין הערך החזוי לנתונים הספקטראליים עצמם מתקבל באמצעות שיטות כימוטריות כמו:

-- Multilinear regression (MLR);

-- Ridge Regression;

-- Principal Component Analysis (PCA);

-- Partial Least Square (PLS);

-- Neural Networks.

המופיעים בספרהם של: (Burns and Ciurczak, pp 162-169, 1992),

(Roberts et. al. pp158-167, 2004), (Williams and Norris pp 36-40, 1987).

בעיבוד נתונים ספקטראליים באמצעות MLR כאשר מספר אורכי גל הינו גדול שיטות בחירת הצירופים המתאימים של אורכי הגל כגון "כל הצירופים האפשריים" או "רגרסיה בצעדים" לוקחות זמן רב ויכולות להביא לתופעת Multicolleniarity (Roberts et. al. pp160-162, 2004). התופעה זו באה לידי ביטוי כאשר במודל הרגרסיה קיימת קורלציה גבוהה מאוד בין המשתנים התלויים לבין המשתנים הבלתי תלויים. הדבר מוביל להיווצרות מטריצות סינגולריות וכתוצאה למודל לא נכון ולא אמין (Pasternak et. al., 2001). מחברי העבודה הנ"ל הציעו להתגבר על תופעת ה-Multicolleniarity באמצעות Ridge regression. לפי דיווח שלהם התקבלו מטריצות יציבות עם מודלים אמינים, אך המתאם בין האמידים לבין הערכים האמיתיים הינו נמוך. לעומת זאת יכולת חיזוי של המשוואה שהתקבלה הינה טובה ואפשר ליישם אותה להגדרת תכולת פיגמנט אדום lycopene בעגבניות כי העדכון שלה יחסית קל.

שיטות PSA ו PLS מתבססות על התמרה מתמטית של ספקטרום וקבלת מספר קטן של משתני משוואת החיזוי הנקראים מספר פקטורים ממספר גדול של הנתונים הספקטראליים. הבדל ביניהם נמצא בשיטת ההתמרה ובקבלת מספר הפקטורים (Roberts et. al. pp165, 2004). הפקטורים שהתקבלו באמצעות PCA הינם תכונות עצמאיות המשפיעות על ספקטרום של דגימות הנמצאות במדגם, בעלות יכולת להשתנות באופן מובהק ואי-תלות בתכונות אחרות.

הפקטורים האלה נקראים רכיבים עיקריים (principal components). אחד מחסרונות של שיטת PCA הינו שרכיב אחד לעיתים רחוקות משתנה ללא תלות ברכיבים אחרים (Burns and Ciurczak, pp 144,1992). הפקטורים התקבלו באמצעות PLS מתבססים על שונות משותפת (covariance) בין ספקטרום לבין תוצאות מדידה מעבדתית. מכיון שפקטורים של PLS מציגים תרומת הרכיב המעניין לספקטרום התוצאות המעבדתיות נותנות מתאם גבוה יותר עם התוצאות החזויות של PLS מאשר התוצאות PCA (Roberts et. al. pp165, 2004).

רשתות עצביות מלאכותיות ANN הינן אוסף של אלגוריתמים לא ליניאריים המתבססים על עיקרונות עבודה של מוח בן-אדם. הן מיושמות כאשר תלות מתמטית בין התוצאות הנמדדות במעבדה לבין התוצאות החזויות הינה לא ליניארית (Roberts et. al. pp165, 2004).

השיטות הכימוטריות יושמו למשל להערכת תכולת רטיבות, חלבון ושומן באמצעות Multileniar regression (Adamopoulos and Goula, 1999), להערכת מוצקות תפוחים באמצעות PCA ו Neural Networks (Abbott et. al., 2002), (Lu,2003), להערכת תכולת סוכר בתפוחים ובפרי הדר באמצעות PCA ו PLS (Miller and Zude-Sasse, 2004), (Abbott et. al., 2002), להערכת ריכוז חלבון בחלב טרי באמצעות PLS, PCA ו Neural Networks (Etzion et. al., 2004).

2.3.2.2. הכנת הנתונים ועיבודם בשיטות כימוטריות

תוצאות הניסויים המבוצעים במכשירי NIR מתקבלות בצורת מטריצה. כל עמודה של מטריצת הספקטרום מתאימה לאורך הגל המוגדר (Burns and Ciurczak, pp 117,1992). כמו שמתואר בתת-סעיף "רקע" לטובת עיבוד הנתונים משתמשים לא רק בספקטרום קרינה מועברת או מוחזרת עצמו, אלא תצוגות מתמטיות שלו כגון: לוגריתם של הערך הופכי שלו או הנגזרת הראשונה והשנייה שלהם. מטריצת הספקטרום ומערך תוצאות הנמדדות במעבדה הינם קלט תהליך עיבוד הנתונים באמצעות השיטות הכימוטריות המתוארות לעיל.

התהליך כולל שני שלבים: כיול ואימות. לכן תוצאות הניסויים מחולקות לשתי קבוצות. בשלב **הכיול** מטריצת הספקטרום ומערך תוצאות המעבדה של הקבוצה הראשונה מוצבים למערכת המשוואות הכימומטריות, כך שאיברי המטריצה משמשים כמקדמים לפני נעלמים ומערך התוצאות המעבדתיות – כווקטור האיברים החופשיים. תוצאות הפיתרון של מערכת המשוואות הינם מקדמי המודל, כאשר כל מקדם מתאים לאורך גל. בשלב **האימות** מוצבים למערכת המשוואות מקדמי המודל שחושבו בשלב הכיול ומטריצת הספקטרום לקבוצה שנייה של תוצאות הניסויים. ממערכת המשוואות מחושב מערך התוצאות החזויות, משווים אותו למערך תוצאות המעבדה של הקבוצה השנייה ומחשבים מקדם דטרמינציה r^2 בנייהם. הערך r^2 מראה את השונות המוסברת. מקדם המתאם r מראה לכמה אחוזים התוצאות המדודות מתאימות לתוצאות החזויות בהתפלגות נורמאלית וברגרסיה ליניארית (Montgomery, 1997) ומתחשב לפי נוסחה הבאה:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{pred(i)} (Y_i - \bar{Y})}{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \sum_{i=1}^n (Y_{pred(i)} - \bar{Y}_{pred})^2 \right]^{0.5}} \quad (8)$$

כאשר Y - ווקטור תוצאות בדיקה הרסנית;

Y_{pred} - ווקטור תוצאות חזויות

2.3.2.3 שיטה כימומטרית PLS

השיטה הכימומטרית הסטטיסטית Partial Least Square (PLS) מתבססת על מערכת המשוואות הבאות (Williams and Norris, pp 61-65, 1987):

$$\begin{aligned} X - \bar{e} * \bar{x} &= t * P + F \\ Y - \bar{e} * \bar{y} &= t * q + f \end{aligned} \quad (9)$$

כאשר

Y - ווקטור גודל פיסיקאלי שמעוניינים לקבל מתוך ספקטרום.

\bar{y} - ממוצע של Y ;

X - מטריצת ערכים של ספקטרום לכל הדגמים ולכל אורכי הגל ;

\bar{x} - ממוצע של X ;

t - מספר משתנים סמויים (מספר פקטורים) ;

P ו q - ווקטור ומטריצה מקדמי המודל ;

F ו f - שגיאות (רעש) ;

\bar{e} - ווקטור-עמודה של יחידות.

Y היא פונקציה של X ובמשוואות (8) היא נתונה בצורה פרמטרית : Y תלוי ב t ו X תלוי

ב t . את מערכת במשוואות (8) פותרים באמצעות שיטת הריבועים הפחותים.

בתהליך הכיול :

■ מדידת דגימת הפירות באמצעות NIR ;

■ מדידת אותה הדגימה בשיטה הרסנית ;

■ חישוב מקדמי המודל P ו q ממשוואות השיטה הכימומטרית ;

■ חישוב מקדם הקורלציה לכיול r_c^2 בין הערך Y המחושב לערך Y הנמדד בשיטה

הרסנית ושגיאת הכיול הסטנדרטית הממוצעת SEC (Standard Error Calibration) .

שגיאת הכיול הסטנדרטית הממוצעת מחושבת לפי הנוסחה (Burns and Ciurczak, 1992) ,

(Mika et. al., 2003) :

$$SEC = \frac{\sum (Y - \hat{Y}_c)^2}{n - 1 - t} \quad (10)$$

כאשר Y - תוצאות בדיקה מעבדתית הרסנית ;

\hat{Y}_c - ערכים חזויים של NIR למדגם נלקח לכיול;

n - מספר דגימות;

t - מספר משתנים סמויים (מספר פקטורים).

בתהליך האימות:

- מדידת דגימת הפירות באמצעות NIR;
- מדידת אותה הדגימה בשיטה הרסנית;
- ממשואות השיטה הכימוטרית מחושבים התוצאות החזויות \hat{Y} ;
- חישוב מקדם הקורלציה לחיזוי r_p^2 בין הערך \hat{Y} המחושב לערך Y הנמדד בשיטה הרסנית ושגיאת האימות הסטנדרטית הממוצעת (Standard Error Prediction) SEP.

שגיאת האימות הסטנדרטית הממוצעת מחושבת לפי הנוסחה הבאה:

(Burns and Ciurczak, 1992), (Mika et al., 2003):

$$SEP = \frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{n} \quad (11)$$

כאשר Y - תוצאות בדיקה מעבדתית הרסנית;

\hat{Y} - ערכי NIR למדגם נלקח לאימות;

n - מספר דגימות.

תוכנת PLS של חברת Eigenvectors המיושמת ב Matlab מבצעת את חילוק המדגם וחשוב באופן אוטומטי ובמספר אופנים אפשריים. קלט התוכנה כולל את מטריצת תוצאות NIR ואת מערך תוצאות בדיקה הרסנית. הפלט הינו הערכים החזויים של תוצאות הבדיקה ההרסנית המתאימות לערכים נמדדים שלהם, שגיאות הכיול והאימות הסטנדרטיות SEC ו SEP ומספר הפקטורים שהם תוצאות פונקציה של מטריצות ספקטרום לכל אורך גל. מספר הפקטורים המשפיע על יציבות המודל הסטטיסטי ומשתנה מ 2 עד 10 אך מספר אופטימאלי נבחר כאשר

הפרש בין SEC ו SEP הינו קטן יותר. ככל שמספר הפקטורים קטן יותר כך המודל הסטטיסטי יציב יותר.

שיטת PLS מבטיחה שערכי המשתנים ומספרם, המייצרים את המודל הספקטראלי, משקפים את השונות של תכולת המרכיבים הנמדדים והשונות של הספקטרא על-ידי דחיסת נתונים משולבת באופטימיזציה ביחס לתוצאות הכיול והחיזוי (Schmilovich et. al., 2006).

2.3.2.4 שיטת מיון Cluster analysis

השיטה זו מיועדת לחזות שייכות לקבוצה. מיון המדגם לפי הקבוצות מבוצע באמצעות Canonical Discriminant Analysis (CDA). למדגם הכולל n - דגימות או תצפיות כאשר כל הדגימה או התצפיה כוללת m - משתנים CDA לוקח את המשתנים המקוריים ויוצר כמות חדשה t של משתנים הנקראים משתנים קנוניים (Matthew et. al., 1994). הפקטורים שמתקבלים בתהליך PLS או PCA הינם משתנים קנוניים. מספר המשתנים הקנוניים משמש ל Discriminant Analysis למיון המדגם לפי הקבוצות (Matthew et. al., 1994) כאשר כל קבוצה מתאימה מבחינה כמותית לתכולת המרכיבים הנמדדים או לגודל פיזיקאלי כלשהו. לעיבוד נתוני הניסויים באמצעות Cluster Analysis המדגם מחולק לקבוצות לפי גודל הערך על-ידי בדיקה הרסנית. כתוצאת העיבוד מתקבלת המדגם לאותו הקבוצות לפי גודל הערך החזוי ודיוק המיון המחושב. דיוק המיון משקף עד כמה חלוקה לקבוצות לפי תוצאות בדיקה הרסנית מתאימה לחלוקה לקבוצות לפי התוצאות החזויות. בשיטה זו כל החישובים בוצעו באמצעות תוכנית שנכתבה בתוכנת Matlab ושימושית לצורכי מחקר במכון להנדסה חקלאית. קלט התוכנית כולל את מטריצות הספקטרום או תצוגות מתמטיות שלו שתוארו לעל שהתקבלו כתוצאות הניסויים ומערך תוצאות הנמדדות במעבדה. פלט התוכנית הינו סידרת טבלאות מתאימות לכל תצוגה מתמטית ולכל מספר המשתנים הקנוניים כלומר מספר הפקטורים. הטבלאות המתאימות ביותר נבחרים לפי מספר אופטימאלי של משתנים קנוניים לכל תצוגה מתמטית. טבלה 3 משקפת באופן כללי את תוצאות הפלט. האותיות במשבצות מסמנות כמויות דגימות השייכות לקבוצת מיון כלשהי. דיוק המיון לכל הקבוצה הינו יחס בין כמות דגימות

השייכות לאותו קבוצה לפי תוצאות מעבדתיות וחזויות בו-זמנית לבין כמות כללית של דגימות השייכות לאותו קבוצה לפי תוצאות מעבדה (טבלה 3).

Cluster analysis טבלה 3. מבנה כללי של טבלאות פלט

Table 3. General structure of Cluster analysis output tables

קבוצות המדגם לפי תכולת מרכיב או גודל פיזיקאלי כלשהו נמדד במעבדה			קבוצות המדגם לפי תכולת מרכיב או גודל פיזיקאלי כלשהו חזוי
קבוצה ראשונה	קבוצה שנייה	קבוצה שלישית	
B	C	G	קבוצה ראשונה
J	K	L	קבוצה שנייה
M	O	Q	קבוצה שלישית
$B/(B+J+M)$	$K/(C+K+O)$	$Q/(G+L+Q)$	דיוק המיון

2.3.2.5. שיטת ניתוח שונות Two Way ANOVA

שיטות ניתוח שונות (ANOVA or Analysis of Variance) מיושמות לבדיקת השפעת כל מיני גורמים על הערך המוגדר. הגורמים הינם משתני קלט בלתי-תלויים השייכים למשתנים קטגוריים. סוגים של המשתנים הקטגוריים נקראים אפקטים או תחומי הסיווג. הערך המוגדר הינו משתנה מוסבר או משתנה תגובה. המשתנה הוא תלוי בגורמים ושייך למשתנה רציף. לפי

Montgomery (1997) ניתוח שונות מבצע מבחן F ומתבסס על 3 הנחות:

1. אי-תלות של תצפיות;

2. $e \sim N(0, \sigma^2)$, כאשר e - רעש;

3. σ שווה בכל תצפיות.

כאשר יש צורך בבדיקת השפעת שני גורמים על משתנה תגובה, מיושמת שיטת ניתוח שונות דו-כיווני (Two Way ANOVA). בשיטה יש לבחון כיצד שני גורמים בנפרד ובאינטראקציה ביניהם משפיעים על משתנה תגובה. כדי להסביר משמעות ניתוח סטטיסטי דו-כיווני הוכנס סימון הבא:

y_{ijk} - משתנה תגובה;

τ - גורם ראשון;

β - גורם שני;

i - אינדקס תחומי סיווג של גורם τ , משתנה מ 1 עד m ;

j - אינדקס תחומי סיווג של גורם β , משתנה מ 1 עד p ;

k - מספר חזרות לכל תחומי סיווג של הגורמים;

μ - ממוצע ממוצעים (אמד) של משתנה תגובה לכל תחומי סיווג של הגורמים.

לפי Montgomery (1997, pp.236). תוצאות המדידה יכולות להיות מתוארות באמצעות

מודל סטטיסטי ליניארי:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + e_{ijk} \quad (12)$$

כאשר $\tau_i \rightarrow$ אפקט תחום סיווג i של גורם τ ;

$\beta_j \rightarrow$ אפקט תחום סיווג j של גורם β ;

$(\tau\beta)_{ij} \rightarrow$ אפקט אינטראקציה בין τ_i ל β_j .

כדי לנתח ביחס לכל גורם נבדקות השערות הבאות (Montgomery pp.236-237, 1997),

(Asscher pp.15, 2003):

לגורם A:

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_m = 0$$

$$H_1 : \text{לפחות אחד } \tau_i \neq 0$$

ולגורם B:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_p = 0$$

$$H_1 : \text{לפחות אחד } \beta_i \neq 0 .$$

בנוסף נבדק האם מתקיימת האינטראקציה בין שני הגורמים ונבדקות השערות הבאות:

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 ;$$

$$H_1 : \text{לפחות אחד } (\tau\beta)_{ij} \neq 0 .$$

תוכנת JMP הינה אחת מתוכנות מחשב המיושמת לניתוח שונות. פלט התוכנה הינה טבלת ניתוח שונות ANOVA שבודקת השפעת הגורמים (Draper et. al, pp 493, 1998). טבלה 4 משקפת באופן כללי את טבלת הפלט של ניתוח שונות דו-כיווני.

דוגמת פלט JMP לניתוח שונות דו-כיווני הודגמה בטבלה 5. בעמודה ימנית של טבלת פלט נמצאים ערכי הסתברות, שתוצאה סטטיסטית כלשהיא תקבל ערכים לא קטנים מהערך הנמדד שלה בניסוי בהינתן שהיפותזת אפס H_0 תקפה והערכים מתאים לערך F סטטיסטי מחושב. הערכים מסומנים נקראים p-value (D.C.Montgomery pp.32,37, 1997). ערך ה-p-value מושווה ברמת מובהקות. לפי ברירת מחדל רמת מובהקות הינו 0.05 אולם היא יכולה להיות שונה מזה.

בהתחלה נבדקת השפעת אינטראקציה בין שני הגורמים (טבלה 5). אם ערך ה-p-value של האינטראקציה יותר קטן מרמת המובהקות המקובל, האינטראקציה בין שני הגורמים משפיעה על משתנה התגובה באופן מובהק. אם ערך ה-p-value של האינטראקציה יותר גדול מרמת המובהקות המקובל, האינטראקציה בין שני הגורמים לא משפיעה על משתנה התגובה באופן מובהק וכדאי להוציא אותה מהמודל הסטטיסטי. אחר כך נבדקת השפעת שני הגורמים על משתנה התגובה ללא אינטראקציה ביניהם. אם ערך ה-p-value של כל הגורם יותר קטן מרמת המובהקות המקובל שני הגורמים משפיעים על משתנה התגובה באופן מובהק. אם ערך ה-p-value של אחד מהגורמים יותר גדול מרמת המובהקות, הגורם לא משפיעה על משתנה התגובה באופן מובהק וכדאי להוציא אותו מהמודל הסטטיסטי. כאשר נשאר גורם אחד במודל נבדקת השפעה שלו על משתנה התגובה.

טבלה 4. מבנה כללי של טבלאות פלט JMP לניתוח שונות דו-כיווני

Table 4. General structure of JMP output tables for Two Way ANOVA

מקור	דרגות חופש df	סכום ריבועים SS	ערך מבחן F
גורם ראשון	$df_1 = m - 1$	$SS_1 = k * p * \sum_{i=1}^m (\bar{y}_{i..} - \mu)^2$	$(\frac{SS_1}{df_1}) / (\frac{SS_{error}}{df_{error}})$
גורם שני	$df_2 = p - 1$	$SS_2 = k * m * \sum_{j=1}^p (\bar{y}_{.j.} - \mu)^2$	$(\frac{SS_2}{df_2}) / (\frac{SS_{error}}{df_{error}})$
אינטראקציה בין הגורמים	$df_{12} = (m-1)*(p-1)$	$SS_{12} = k * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \mu)^2$	$(\frac{SS_{12}}{df_{12}}) / (\frac{SS_{error}}{df_{error}})$
שגיאה	$df_{error} = m * p * (k-1)$	$SS_{error} = \sum S_{ij}^2 (k-1)$	

לפי סימון הטבלה :

$\bar{y}_{i..}$ - ממוצע לכל תחום סיווג של גורם ראשון ;

$\bar{y}_{.j.}$ - ממוצע לכל תחום סיווג של גורם שני ;

$\bar{y}_{ij.}$ - ממוצע חזרות לכל דגימה בניסוי ;

S_{ij} - סטיית תקן לכל דגימה בניסוי.

טבלה 5. דוגמאת פלט תוכנת JMP לניתוח שונות דו-כיווני

Table 5. Example of program JMP output for Two Way ANOVA

(Source: Asscher pp.20, 2003).

Effect Tests					
Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
machine	1	1	148.22500	32.5769	<.0001*
method	3	3	9.87500	0.7234	0.5454
machine*method	3	3	29.27500	2.1447	0.1140

p value

בנוסף, כדי לאשר את התוצאה ניתן לבצע את הקירוב הבא: במקום הניתוח דו-כיווני Two way ANOVA לבצע ניתוח חד-כיווני One Way ANOVA גם באמצעות תוכנת JMP. לפי Montgomery (1997) הניתוח One Way ANOVA בדומה לניתוח Two way ANOVA מבצע

מבחן F ומתבסס על 3 הנחות:

1. אי-תלות של תצפיות;

2. $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$, כאשר ε - רעש;

3. σ שווה בכל תצפיות (Asscher, pp.13-14, 2003).

לפי Draper et. al (1998, pp 475) תוצאות המדידה בניתוח שונות דו-כיווני יכולות להיות

מתוארות באמצעות מודל סטטיסטי ליניארי:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + e_{ij} \quad (13)$$

כאשר α_i - הגורם;

μ - ממוצע;

y_{ij} - משתנה תגובה;

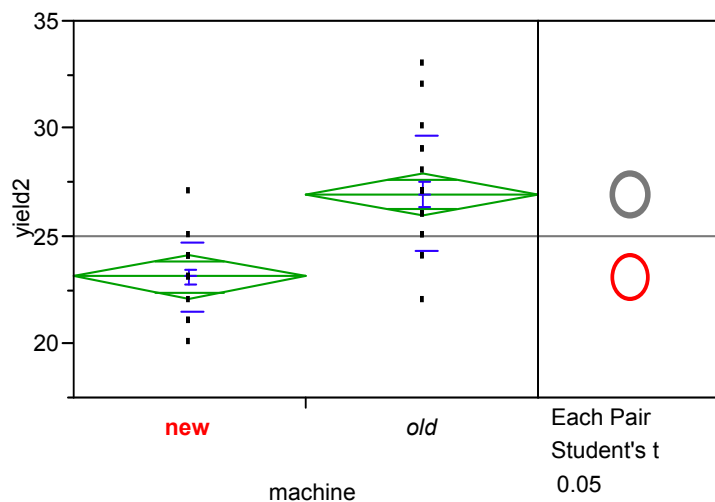
i - אינדקס תחומי סיווג של גורם α , משתנה מ 1 עד m .

כדי לנתח את הגורם נבדקות השערות הבאות (Draper et. al, pp 475, 1998):

$$; \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_m = 0 : H_0$$

$$. \alpha_i \neq 0 : H_1$$

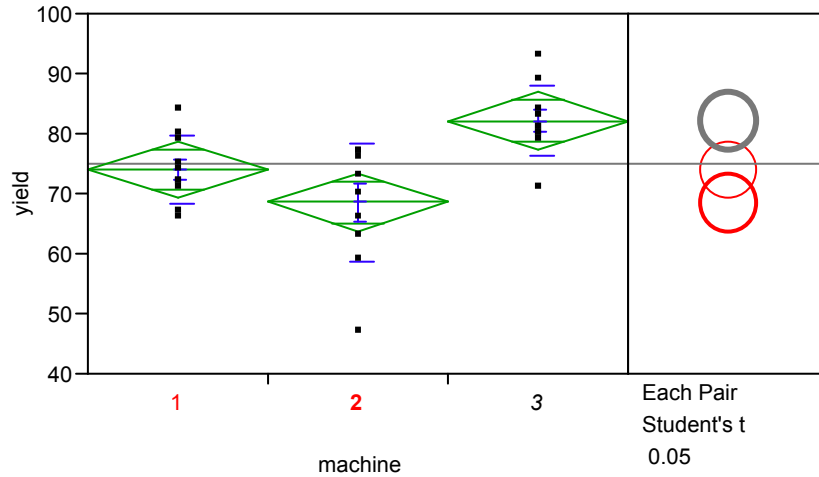
דוגמאות פלט ה-JMP לניתוח חד-כיווני נמצאות בציורים 10 ו 11. בציור x נמצאים תחומי סיווג של הגורם הנבדק ובציור y נמצא משתנה התגובה. לפי חיתוכים בין מעגלים המתאימים לקבוצות סיווג אפשר להסיק האם יש הבדל מובהק בין קבוצות הסיווג. אם כל המעגלים חותכים אחד את השני אין הבדל מובהק בין הקבוצות של הערך הנמדד ובמצב זה השערת H_0 האומרת שכל הממוצעים שווים הינה לא נידחת ברמת מובהקות המקובלת(ציור 11). אם המעגלים לא חותכים אחד את השני יש הבדל מובהק בין הקבוצות של הערך הנמדד ובמצב זה השערת H_0 נידחת (ציור 10).



ציור 10. דוגמאות פלט תוכנת JMP לניתוח שונות חד-כיווני המייצג הבדל מובהק בין תחומי סיווג של משתנה תגובה .

Figure 10. Example of JMP program output for One Way Anova expressing significant difference between categories of response variable.

(Source: Asscher pp.12, 2003).



ציור 11. דוגמת פלט תוכנת JMP לניתוח שונות חד-כיווני המייצג חוסר הבדל מובהק בין תחומי סיווג של משתנה תגובה.

Figure 11. Example of JMP program output for One Way Anova expressing lack of significant difference between categories of response variable.

(Source: Asscher pp.12, 2003)

2.3.3. תוצאות מקדמיות למחקר הנוכחי

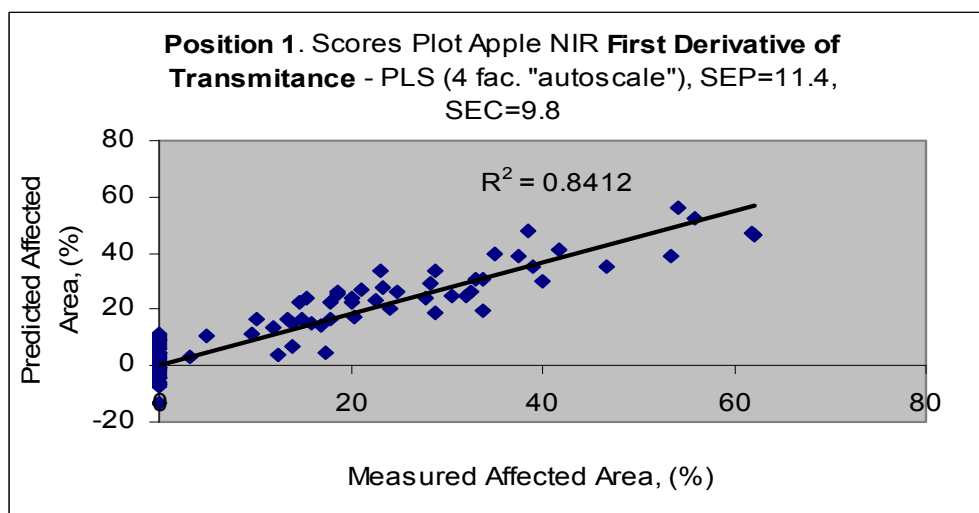
המחקר הנוכחי מתבסס על מחקר מקדים שבוצע במכשיר ניח במכון להנדסה חקלאית, מרכז וולקני, משרד החקלאות. הניסוי בוצע על ידי Erkinbaev et. al (2004). לניסוי נלקחו 300 תפוחים מין Red Delicious. התוצאות הינן תוצאות קורלציה בין ערכי שיעור ריקבון ה *Alternaria* הנמדדים בבדיקה הרסנית לערכים חזויים שהתקבלו באמצעות PLS ל-4 התצוגות המתמטיות המתוארות בטבלה 6. התוצאות מוצגות גם בטבלה 6. דוגמת תוצאה לנגזרת ראשונה בצורת גרף נתנה בציר 12. תוצאות בצורת גרף של התצוגות המתמטיות אחרות נמצאות בנספח

8.1

טבלה 6. תוצאות עיבוד נתוני הניסוי המקדים שהתקבלו באמצעות שיטת ה PLS

Table.6. Processing of the preliminary experiment data results carried out by PLS
(Source: Erkinbaev et. al. ,2004)

	<i>SEP, % affected area</i>	<i>SEC, % affected area</i>	<i>Optimal latent factors number</i>	<i>r, %</i>
T	11	9	8	87
$\frac{dT}{d\lambda}$	11	10	4	92
$\log\left(\frac{1}{T}\right)$	12	9	5	90
$\frac{d^2(\log(1/T))}{d\lambda^2}$	11	10	5	92



ציור 12. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת ראשונה של קרינת העברה $d(T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית בניסוי המקדים.

Figure 12. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance radiation derivative $d(T)$ in the preliminary experiment (Source: Erkinbaev et. al, 2004) .

3. מטרת העבודה

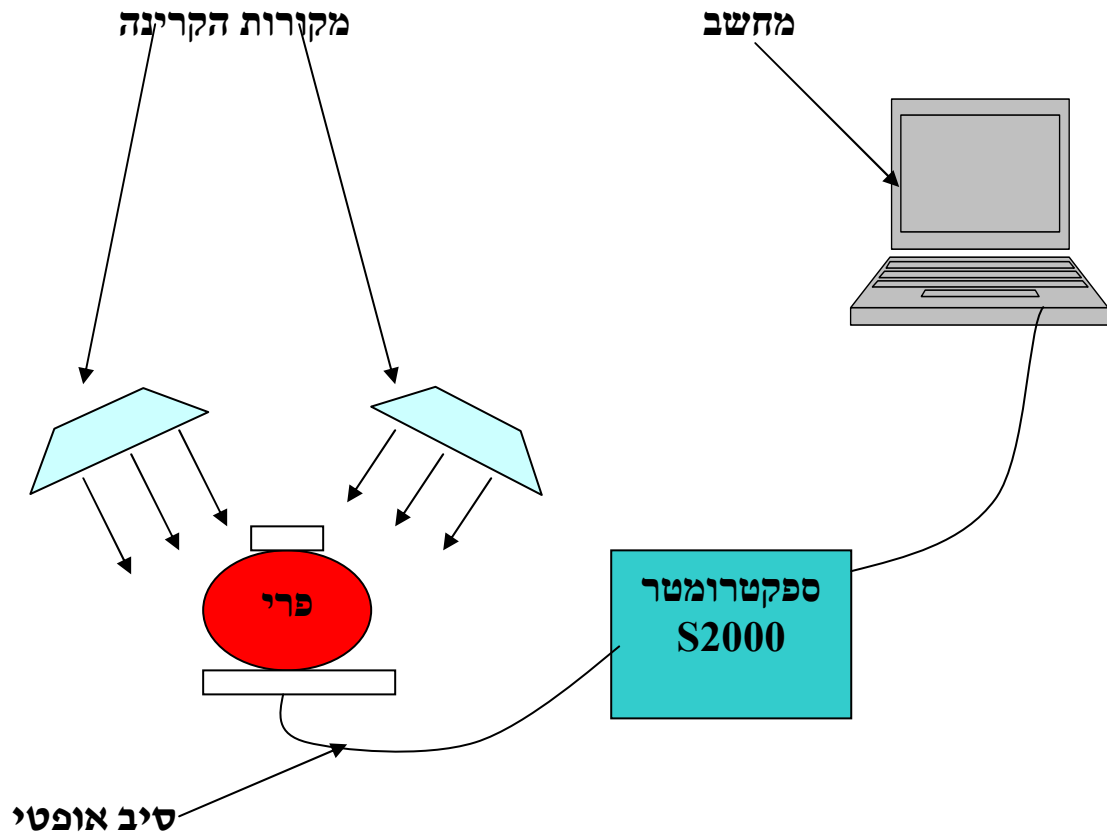
המטרה הכללית של המחקר הנוכחי הינה לפתח שיטה לבחינת איכות פנימית של תפוחים לאיבחון נגיעות במחלת בית-גרעין כתוצאה מ-*Alternaria*, בשיטת בדיקה לא הרסנית המתבססת על ספקטרוסקופיה בתחום NIR. המטרות הספציפיות של המחקר הינן:

1. פיתוח טכנולוגיית NIR בשיטת מעבר (Transmittance) למערכת ניידת;
2. פיתוח טכנולוגיית NIR בשיטת מעבר למערכת On-line;
3. בחינת פרמטרים נחוצים לקבלת ספקטרום נאות: עוצמת אור, מערכת ניידת או On-line;
4. אבחון השפעת שיעור ריקבון ותנחתת הפרי בעת המדידה על תוצאות הזיהוי ביחס לשיטת המדידת מעבר, סוג הספקטרומטר, מדידה ניידת ומדידה בתנועה או בקן מיון.

4. שיטות ואמצעים

4.1 מערכת מעבדתית ניידת

המערכת הניידת מבוססת על קרינת מעבר בתחום NIR. סכמת המערכת מוצגת בציור 13 ותמונת המכשיר מוצגת בציור 14. המכשיר כולל 2 מקורות קרינת אור של נורות מסוג וולפרם הלוגן בעוצמת 250W כל אחד (1) ו (2) הנמצאים משני הצדדים של הפרי הנבדק (3), סיב אופטי חד כיווני (4), ספקטרומטר NIR S2000 תוצרת חברת Ocean Optic הכולל חיבור לסיב אופטי, שריג מפצל ברוחב $50 \mu\text{m}$, חיישן CCD ליניארי סילקוני (Charge Couple Devices) ומערכת מחשב. המרחק שהאור עובר מהנורות לנקודה תחתונה של תפוח הינו 28 cm הקרן פוגעת בזווית 65° . זמן חשיפה בניסוינו הינו 80 msec. במשך זמן החשיפה החיישן אוסף את האור והופך אותו לאותות חשמליות.



ציור 13 . סכמת מערכת NIR הנייחת לקרינת מעבר.

Figure 13. The scheme of stationary NIR transmittance system.

תחום אורכי הגל הנמדד של הספקטרומטר הינו מ 520 nm עד 1180 nm, סה"כ נבדקות 2048 נקודות סריקה. אורכי הגל בתחום הספקטרום הנמדד נתונים לחישוב באמצעות הקשר הבא:

$$\lambda_i = -2.27655 * 10^{-5} * i^2 + 0.370566 * i + 520 \quad (14)$$

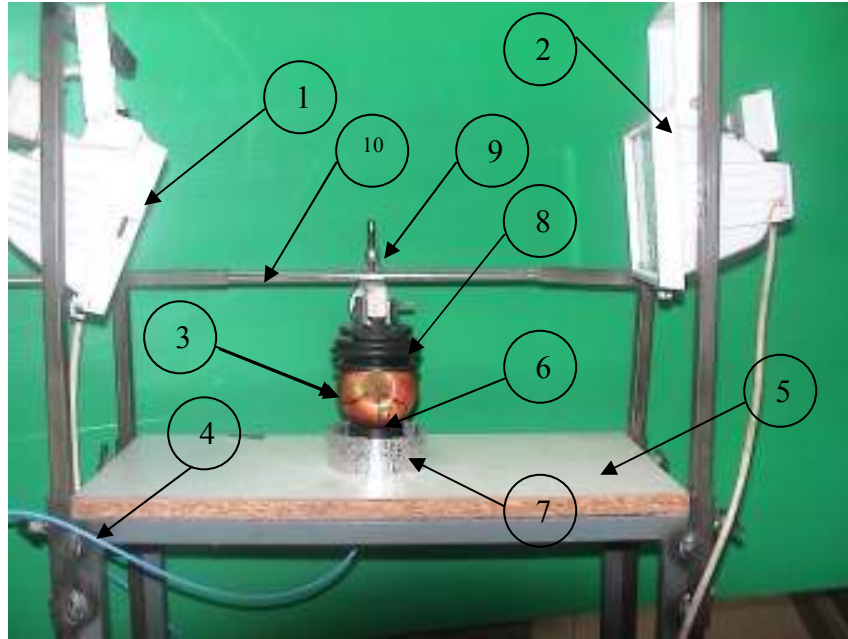
כאשר i – אינדקס אורך הגל מ – 0 עד 2049. המרחק בין הנקודות הינו בערך 0.3 nm.

מהירות העברת המידע ממערכת הספקטרומטר-החישן הינה 56400 bit/second. המתקן להנחת

הפרי (ציור 14) מותקן על שולחן (5) בעל מידות 23x50 cm. המתקן כולל בסיס ספוגי להנחת

הפרי (6) ומגן (7) מאלומיניום למטרת איטום. תפקיד הבסיס הספוגי והתומך להבטיח שהסיב

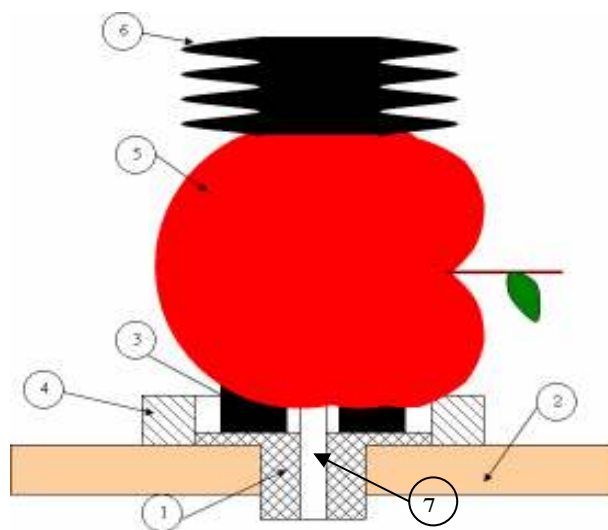
האופטי יקלוט רק את הקרינה העוברת דרך התפוח. תומך עליון מתותב הגומי (מתכנן) (8)



ציור 14 . מקורות האור, מיקום הפרי וסיב אופטי חד-כיווני במכשיר NIR הנייח.

Figure 14. Light sources, fruit location, one-way optical fiber in stationary NIR transmittance system.

מחובר לזרוע (9) המותקנת על ציר (10). בצורה זו מהודק הפרי למתקן ומקבל קרינה שבמקורה מתקבלת מ שני מקורות אור לבן. ציור 15 מראה שבחלק המתקן שעל השולחן הנקרא מחזיק סיב אופטי (1) נקדח חור מפולש בעל קוטר 3 mm. מחזיק הסיב האופטי הוכנס לקדח בשולחן (2). בציור 15 גם נראים הבסיס ספוגי להנחת הפרי (3), המגן (4)



ציור 15. מצב התפוח בזמן הבדיקה, מבט צד.

Figure 15. Apple position during the test, side view.

ומתקן הגומי - מתכונן (6) המוזכר לעיל. הפרי הנבדק מוצב על הקדח. מתחת לשולחן באזור הקדח מוצב סיב אופטי חד-כיווני. הסיב האופטי אינו נוגע בפרי: ביניהם יש רווח אוויר (7) באורך 13 mm. כאשר האור ממקור הקרינה פוגע בפרי הנבדק, הסיב האופטי מקבל את האור המועבר ומעביר אותו לספקטרומטר. הספקטרומטר מפלג את הקרינה לפי אורכי הגל ובאמצעות החישן קולט את תחום אורכי הגל המסוים (תחום NIR-VIS) והופך את הקרינה לאותות חשמליים. המחשב מקבל את האותות והופך אותם לצורה נומרית באמצעות תוכנת OOID שפותחה על-ידי חברת Ocean Optic. בזמן המדידה הפרי נמצא במצב אופקי ונבדק בהיקפו, כמתואר בצור 14, ובוצעו עליו 3 בדיקות: לאחר המדידה הראשונה הפרי מסובב ב - 120° ומבוצעת המדידה השנייה. מדידה שלישית מתקבלת לאחר סיבוב נוסף מעמדה שנייה ב - 120° . הניסוי מבוצע ללא תאורה נוספת בחדר. לפני תחילת הניסוי מבוצע תהליך כיול של המערכת ביחס לגוף לבן ותנאי חשיכה, כדי לבטל את השפעת מקור האור והשפעת התכונות הספקטראליות של המכשיר עצמו. לכיול באמצעות גוף לבן מוצב במקום הפרי הנבדק הגוף שהינו גליל לבן מטפלון בעל קוטר ואורך של 20 mm שהוצמד לבסיס. כיול תנאי חשיכה בוצע על ידי סגירת מקורות האור. אחרי הכיול עוצמת קרינה מעבר יחסית חושבה לפי :

$$T = \frac{I_T - I_{BLACK}}{I_{WHITE} - I_{BLACK}} \quad (15)$$

כאשר I_T - עוצמת הקרן העוברת;

I_{WHITE} - עוצמת הקרן הפוגעת המתקבלת כתוצאה ממעבר דרך הגוף הלבן;

I_{BLACK} - עוצמת הקרן העוברת של תנאי החשיכה;

T - עוצמת מעבר (Transmittance).

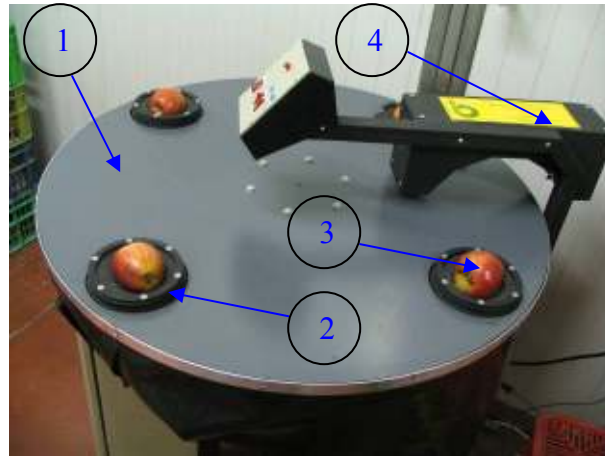
בזמן ניסוי סריקת הפירות המחשב שמר בזיכרון 2 סוגי ספקטרום:

א. עוצמת העברה;

ב. עוצמת הנגזרת הראשונה של הספקטרום כתלות באורך הגל.

4.2. מערכת בתנועה

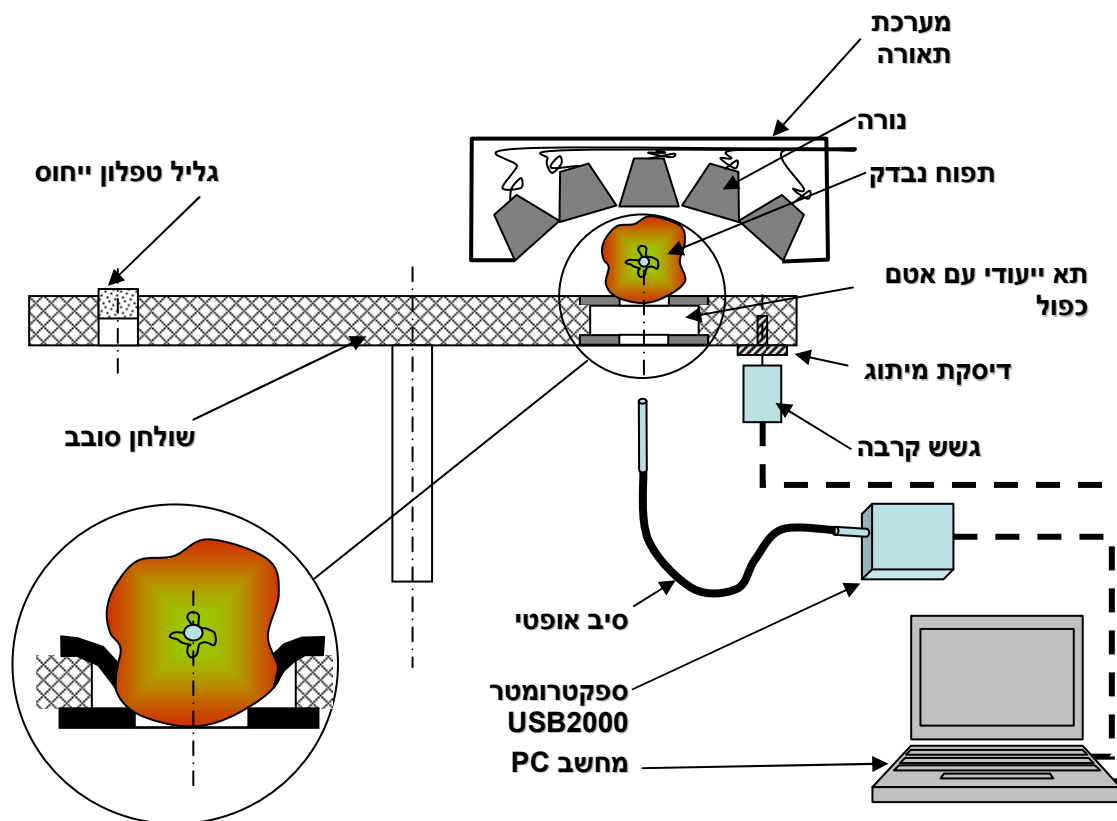
במסגרת המחקר נערך שימוש במערכת שנבנתה במכון להנדסה חקלאית, מרכז וולקני. המערכת המתוארת לעיל הינה אב-טיפוס של מערכת בתנועה. המכשיר המעבדתי בודק את הפרי בתנועה ומבוסס על קרינת העברה, המוצג בציור 16, תהליך הפיכת הקרינה לאותות חשמליות ותהליך הפיכת האותות לצורה נומרית מבוצעים באמצעות אותה שיטה שתוארה נעל במכשיר הנייח.



ציור 16 . מערכת ניסוי NIR בתנועה (קרוסלה), המתבססת על קרינת מעבר.

Figure 16. The rotating NIR transmittance system (carousel).

המכשיר הבדיקה בתנועה המתואר בציור 16 כולל שולחן סובב עגול (1) בעל 4 תאים (2) המשמשים כעריסות לפירות הנבדקים (3). קוטר שולחן הבדיקה 860 mm וקוטר תא הבדיקה 130 mm. התפוח מונח במצב אופקי, בדומה למכשיר הנייח (ציור 15), ממוקם על 2 דיסקיות גומיות המותקנות בתא ונמצאות אחת מתחת השנייה (ציור 17) למניעת בריחת קרינה מועברת. קוטר חור הדיסקית העליונה הינו 60 mm וקוטר חור הדיסקית התחתונה הינו 40 mm. השיטה של 2 דיסקיות הגומי משמשת לאיטום כלומר מאפשרת קליטת אור שעבר רק דרך התפוח הנבדק על-ידי סיב אופטי. גישה זו נמצאה כיעילה משורת אמצעים שונים שנוסו במסגרת מחקר במכון להנדסה חקלאית – מרכז וולקני. דיסקת מיתוג מתכת המורכבת ליד כל התא התפוח מפעילה גשש קירבה הנותן פקודה למחשב לדגום ספקטרום בזמן שהתפוח נמצא מתחת מערכת התאורה ומעל סיב אופטי המותקן בתותב כיוון הסיב (ציור 17). גובת השולחן הינה 800 mm. מנוע חשמלי



ציור 17 . סכמת מערכת NIR בתנועה (קרוסלה), המתבססת על קרינת העברה.

Figure 17. The scheme of rotating NIR transmittance system (carousel).

מסובב באמצעות ממסרת רצועה וממסרת חלזונית גל שעליו מותקן השולחן העגול. יש בשולחן הסובב תא לגליל הייחוס הלבן (ציור 17). תהליך הכיול ביחס לגוף לבן וביחס לתנאי חשיכה דומה לתהליך במכשיר הנייח.

במערכת 5 נורות וולפרם – הלוגן הנמצאות במרחק שווה (120 mm) מהפרי ומשמשות כמקור אור. כל נורה הינה בעלת עוצמת 50 W. המרחק מקצה הסיב האופטי עד נקודת התפוח התחתונה הינו 20 mm. הסיב האופטי נמצא בצינור קשיח המחובר לקופסה הכוללת ספקטרומטר דגם USB2000 מחברת Ocean Optic עם חישן CCD ליניארי סילקוני (ציור 17). זמן חשיפת הספקטרומטר הינה 80 msec ותחום הספקטרומטר מ 400 nm עד 1000 nm, שה"כ מבוצעות 2048 נקודות סריקה. אורכי הגל בתחום הספקטרום הנמדד נתונים לחישוב באמצעות הקשר הבא:

$$\lambda_i = -1.47094 * 10^{-9} * i^3 - 1.70073 * 10^{-5} * i^2 + 0.3705789 * i + 340 \quad (16)$$

כאשר i – אינדקס אורך הגל מ – 0 עד 2048. המרחק בין הנקודות הינו בערך 0.3 nm .
מהירות העברת המידע ממערכת הספקטרומטר-החישן הינה בערך 1000 kbit/second וערך
הזה יותר גדול כמעט פי 2 מאשר ערך מהירות העברת המידע להספקטרומטר S2000 .
ספיקת המתקן בתנועה הינה 11 תפוחים בדקה. בזמן המדידה הפרי נמצא במצב אופקי, כמתואר
בציורים 16 ו 17 ומבוצעות עליו 3 בדיקות בדומה לניסוי במכשיר הנייח, ובכל מצב הנחת הפרי
בוצעו 3 חזרות.

4.3 השיטה ההרסנית לבחינת נזקי בית גרעין

לאחר ביצוע המדידות בגישת NIR המתוארות לעיל בוצעו בדיקות הרסניות לבחינת המצאות,
טיב וגודל הריקבון בפירות הניסוי. הבדיקה ההרסנית מבוצעת באופן הבא: הפרי נחתך ל-2
חצאים. השטח הכללי של החתך והשטח הנגוע נמדדו. אם לא נמצא ריקבון בציפה אך דפנות בית
גרעין בצבע חום כהה, נמדד השטח באזור בית הגרעין ושטח זה נחשב כנגוע. אם נמצא ריקבון
בציפה, נמדד השטח שלו ביחד עם שטח בית הגרעין. היחס בין השטח הנגוע לשטח חתך התפוח
הכללי נקבע "יחס הנגיעות", ושמש כמדד של איכות הפגיעות הפנימיות בפרי. אם התפוח הנבדק
לא נגוע, ניתן ערך אפס ל"יחס הנגיעות". מדידת השטח של חתך התפוח והשטח הנגוע נעשתה
באמצעות תוכנת AutoCAD, גרסה 14, מצילום דיגיטאלי של תמונת חתך הפרי.

תהליך העבודה אחרי חיתוך הפרי כולל שלבים הבאים:

1. חתכי התפוחים מצולמים במצלמה דיגיטאלית;
 2. תמונת חתך התפוח מועברת לתוכנת שרטוט AutoCAD;
 3. בתוכנת AutoCAD תוחמים את גבולות השטחים;
 4. מחשבים את השטחים באמצעות הפקודה AREA.
- הדגמת שיטת חישוב השטח הנגוע באמצעות AutoCAD מובאת בציור 18a. בנוסף, ל 2 מדגמים
בוצעו חישובי השטחים באמצעות מכשיר לעיבוד תמונות הנמצא בבית-אריזה "פירות גולן"
ובציור 19 מובאת השוואה בין 2 שיטות המדידה ומצאה קורלציה גבוהה בין השיטות השונות

לבחינת השוואה של השיטות צולמו משולש, ריבוע ומעגל. שטחי הצורות חושבו והשוו למדידה באמצעות בתוכנת AutoCAD. השוואה מובאת בציור 20. מהשוואה ניתן להסיק כי שיטת המדידה באמצעות בתוכנת AutoCAD מדויקת ומספיקה לצורכי המחקר הנוכחי.



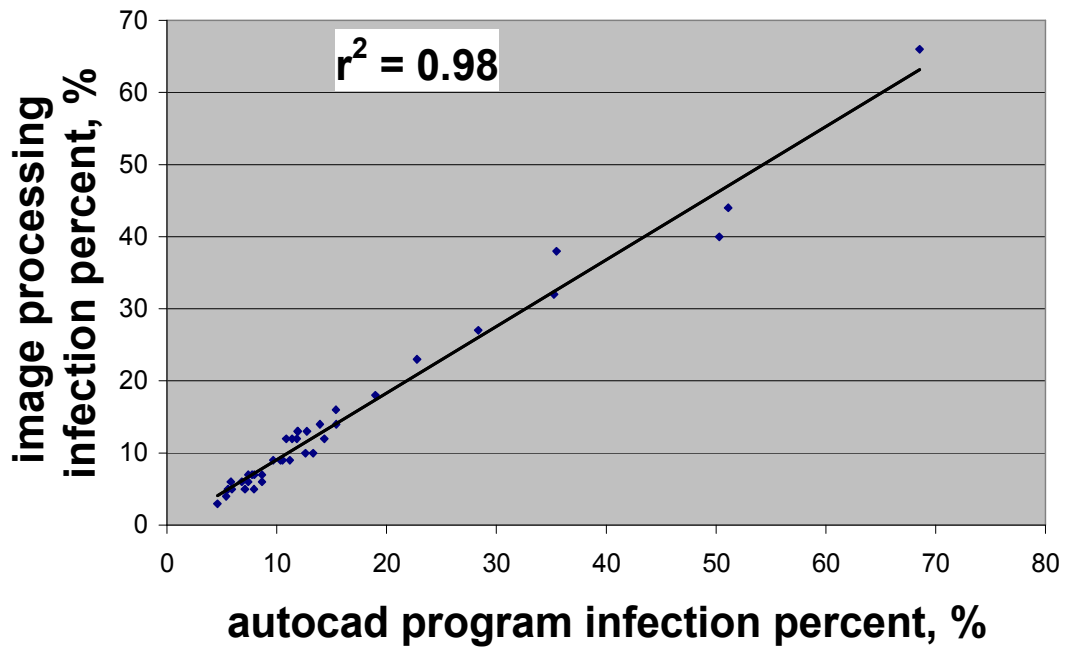
ציור 18a. דוגמת תמונת חתך התפוח בתוכנת AutoCAD.

Figure 18a. Example of apple section image in AutoCAD software.



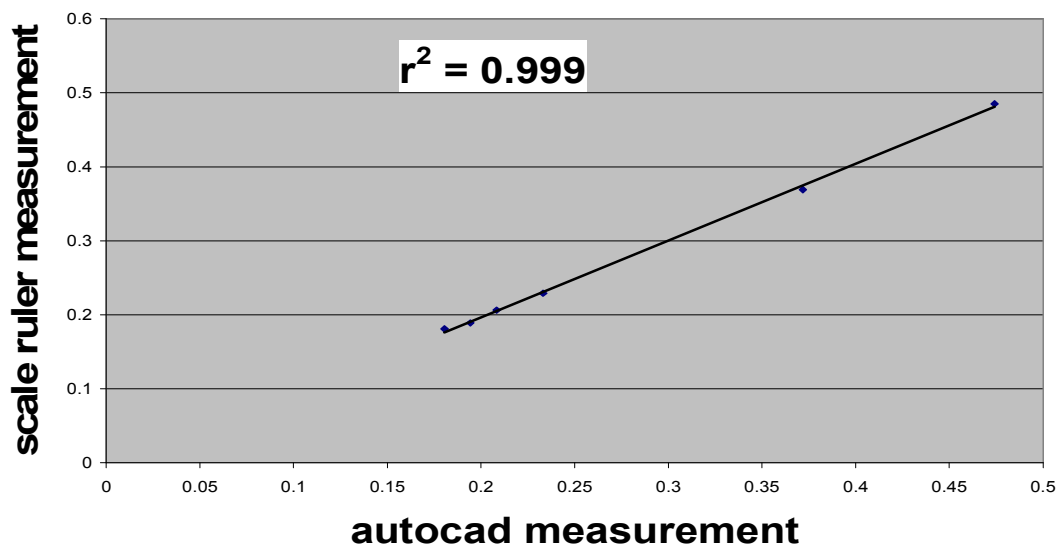
ציור 18b. דוגמאות תפוח עם שיעור ריקבון 10% (מימין) ו 20% (משמול).

Figure 18b. Example of apple with infection ratio 10%(on the right side) and 20%(on the left side).



ציור 19. השוואה בין מדידת שיעור הריקבון באחוזים מחושב באמצעות תוכנת AutoCAD לחישוב באמצעות מכשיר לעיבוד תמונות.

Figure 19. Comparison between rotting percent measurement results made by AutoCAD software and by image processing apparatus.



ציור 20. השוואה בין מדידת יחס צורות מחושב באמצעות נוסחאות לחישוב באמצעות תוכנת AutoCAD.

Figure 20. Comparison between rotting ratio measurement results made by formula and by AutoCAD software.

4.4. אמצעים ומהלך הניסויים

התפוחים ששמשו לניסויים הינם מזן "Red Delicious" נלקחו ממשקים שונים בגליל העליון. חלק נלקח לניסויים ישר אחרי קטיף וחלק אחר שנשמר בקירור ב 0°C במעבדת קריית-שמונה ובמכון לטכנולוגיה ואחסון של תוצרת חקלאית בוולקני עד למועד ביצוע הניסויים. התפוחים נלקחו לניסויים בכמויות הבאות:

■ 207 תפוחים למכשיר NIR הנייח ;

■ 873 תפוחים למכשיר NIR בתנועה.

מידת התפוחים בקוטר השתנתה מ 60 עד 70 מ"מ.

בזמן הניסויים התפוחים נמצאו במצב אופקי (ציורים 14, 15, 16 ו-17) ובוצעה סריקה ב 3 מצבי הנחת התפוח כמו שמתואר לעל בסעיפים 4.1 ו 4.2. בניסוי במכשיר הנייח בכל מצב הנחת התפוח בוצעה סריקה אחת – בסה"כ 3 הרצות לתפוח אחד. בניסוי במכשיר בתנועה בכל מצב הנחת התפוח בוצעו 3 סריקות - בסה"כ 9 הרצות לתפוח אחד. נבדקו מספר מדגמים השייכים למשקים שונים.

4.5. תהליך עיבוד נתוני הניסויים

תוצאות הניסויים נתקבלו לכל הרצת המדגם (כלומר לכל מצב הנחת התפוח ולכל חזרה) בצורת מטריצה של ספקטרום קרינה מועברת ונגזרת ראשונה שלה. באמצעות תוכנת Matlab נתקבלו עוד 2 תצוגות מתמטיות של ספקטרום קרינה מועברת: לוגריתם הערך ההפוך של הספקטרום ($\log(1/T)$) ונגזרת שנייה שלו. לכל מדגם, אוחדו מטריצות התוצאות של כל ההרצות. המטריצות המאוחדות עובדו באמצעות שיטת PLS המתוארת לעל בסעיף 2.3.2.3. כתוצאת העיבוד נתקבלה התאמה בין ערכי שיעור הריקבון החזוי לבין ערכי השיעור הנמדד. לא היה צורך לחלק את המדגם לקבוצת כיוול ולקבוצת אימות באופן ידני כי תוכנת PLS ב Matlab מבצעת את החלוקה באופן אוטומטי כך שלא יודעים מראש האם התפוח הנבדק הוא נגוע או לא נגוע. בניית המדגם חולק באופן הבא: תפוח אחד היה בקבוצת אימות ואחרים בקבוצת כיוול והמודל סטטיסטי נתקבל. אחר כך תפוח שני היה בקבוצת אימות ואחרים בקבוצת כיוול והמודל סטטיסטי נתקבל

וכדומה. החלוקה הזו נקראת leave one out. באמצעות אופטימיזציה נבחר מודל אופטימאלי. אחר כך המטריצות המאוחדות עובדו באמצעות שיטת Cluster Analysis המתוארת לעל בסעיף 2.3.2.4. במשך עיבוד מטריצת הספקטרום שנתקבלה במכשיר הנייח, המדגם בהתחלה חולק תחילה ל 2 קבוצות התפוחים: נגועים ולא נגועים ואחר כך המדגם חולק ל 4 קבוצות הבאות:

1. תפוחים לא נגועים;

2. תפוחים בעלי שיעור ריקבון ה-*Alternaria* פחות מ 5%;

3. תפוחים בעלי שיעור ריקבון ה-*Alternaria* גדול או שווה ל 5% ופחות מ 10%;

4. תפוחים בעלי שיעור ריקבון ה-*Alternaria* גדול או שווה ל 10%.

למטריצות הספקטרום שנתקבלו במכשיר בתנועה באמצעות השיטה המדגמים חולקו ל 4 קבוצות הבאות:

1. תפוחים לא נגועים;

2. תפוחים בעלי שיעור ריקבון ה-*Alternaria* פחות מ 10%;

3. תפוחים בעלי שיעור ריקבון ה-*Alternaria* גדול או שווה ל 10% ופחות מ 20%;

4. תפוחים בעלי שיעור ריקבון ה-*Alternaria* גדול או שווה ל 20%.

כתוצאה העיבוד נתקבל דיוק המיון לפי הקבוצות של שיעור ריקבון ה-*Alternaria*.

המטריצות המאוחדות של המדגם השייכות למכשיר בתנועה אוחדו למטריצה גדולה אחת. צומצמה המטריצה הגדולה כך שבכל רמת נגיעות יהיה מספר דומה של תפוחים. המטריצה גדולה

החדשה עובדה באמצעות שיטות ה-PLS

וה - Cluster Analysis.

בנוסף לזה נבדקה השפעה של 2 גורמים: מצב הנחת הפרי בזמן הניסוי ושיעור ריקבון ה-*Alternaria* על שיאים של ספקטרום לוגריתם הערך ההפוך של קרינה מועברת $\log(1/T)$, נגזרת ראשונה של ספקטרום קרינה מועברת T ו T עצמו. הניתוח בוצע באמצעות שיטת Two Way

ANOVA המתוארת לעל בסעיף 2.3.4.5. בתוכנת JMP.

תוצאות הניתוח הדגימו האם יש השפעת הגורמים ביניהם בצורה מובהקת על עוצמת בספקטרום קרינה מועברת ובתצוגות מתמטיות שלו באורכי הגל המודגרים כלומר בשיאים. באמצעות השיטה נבדקה גם השפעת הגורמים על מרכזי הכובד של ספקטרום קרינה מועברת לוגריתם הערך ההפוך שלו $\log(1/T)$. לבדיקה נלקחו ספקטרים של תפוחים השייכים לקבוצות המיון לפי ערכי שיעור הריקבון הנמדדות. בהתחלה נותחו הספקטרים שנתקבלו במכשיר הנייח ואחר כך נותחו הספקטרים שנתקבלו במכשיר בתנועה.

לניתוח ספקטרום שנתקבלו במכשיר הנייח המדגם חולק ל 3 קבוצות הבאות על פי שיעור הריקבון שנקבע באמצעות השיטה ההרסנית שתוארה בסעיף 4.3 :

1. תפוחים לא נגועים ;

2. תפוחים בעלי שיעור ריקבון ה-*Alternaria* פחות מ 10% ;

3. תפוחים בעלי שיעור ריקבון ה-*Alternaria* גדול או שווה ל 10%.

לניתוח ספקטרים שנתקבלו במכשיר בתנועה המדגם חולק ל 4 קבוצות הבאות :

1. תפוחים לא נגועים ;

2. תפוחים בעלי שיעור ריקבון ה-*Alternaria* פחות מ 10% ;

3. תפוחים בעלי שיעור ריקבון ה-*Alternaria* גדול או שווה ל 10% ופחות מ 20% ;

4. תפוחים בעלי שיעור ריקבון ה-*Alternaria* גדול או שווה ל 20%.

5. תוצאות

5.1. תוצאות הניסויים במערכת נייחת

5.1.1. תוצאות PLS

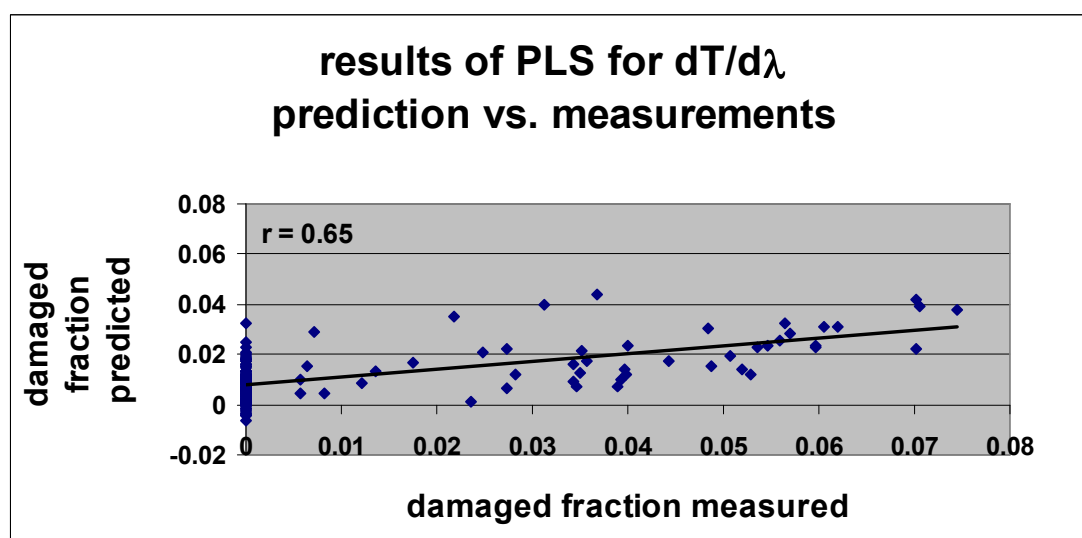
בטבלה 7 מוצגות תוצאות קורלציה בין ערכי שיעור ריקבון ה- *Alternaria* הנמדדים בבדיקה הרסנית לערכים חזויים שהתקבלו באמצעות PLS ל 4 המודלים עבור מדגם 207 תפוחים. בציור

21 נמצאות תוצאות נגזרת ראשונה של קרינה מועברת מקורית בצורת גרף. תוצאות בצורה גראפית של התצוגות המתמטיות אחרות נמצאות בנספח 8.2.1.

טבלה 7. תוצאות עיבוד נתוני הניסוי שהתקבלו באמצעות שיטת ה PLS במחקר נוכחי במערכת ניידת

Table 7. Results of experiment data results processing carried out by PLS in the current research in stationary system

	<i>SEP, % affected area</i>	<i>SEC, % affected area</i>	<i>Optimal latent factors number</i>	<i>r, %</i>
T	1.9	1.8	8	67
$\frac{dT}{d\lambda}$	1.9	1.8	5	65
$\log\left(\frac{1}{T}\right)$	2.0	1.8	8	66
$\frac{d^2(\log(1/T))}{d\lambda^2}$	2.0	1.9	2	55



ציור 21. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת ראשונה של קרינת העברה $dT/d\lambda$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית במחקר נוכחי.

Figure 21. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance radiation derivative $dT/d\lambda$ in current experiment.

5.1.2 . תוצאות Cluster Analysis

בטבלאות 8 ו 9 מוצגת דיוק המיון לתפוחים של המערכת הנייחת ששמשה בניסוי .

טבלה 8. דיוק המיון הכללי ולפי 2 הקבוצות המדגם

Table 8. Total and 2 sample groups based classification accuracy

	<i>Optimal latent factor</i>	<i>accuracy according to infection ratio, %</i>		<i>Total accuracy, %</i>
		Non-infected apples	Infected apples	
T	8	50	85	62
$\frac{dT}{d\lambda}$	5	67	89	75
$\log(\frac{1}{T})$	8	62	87	71
$\frac{d^2(\log(1/T))}{d\lambda^2}$	2	75	73	74

טבלה 9. דיוק המיון הכללי ולפי 4 הקבוצות המדגם

Table 9. Total and 4 sample groups based classification accuracy

	<i>Latent factor</i>	<i>accuracy according to infection ratio, %</i>				<i>Total accuracy, %</i>
		0	From 0% to 5%	From 5% to 10%	From 10% to 100%	
T	8	58	50	33	81	56
$\frac{dT}{d\lambda}$	5	53	58	39	88	55
$\log(\frac{1}{T})$	8	55	50	36	85	54
$\frac{d^2(\log(1/T))}{d\lambda^2}$	2	65	12	58	56	55

5.1.3. תוצאות Two Way Anova

בטבלה 10 ובציורים 22, 23, 24, 25, 26 ו 27 מוצגות תוצאות השפעת גורמי מיקום התפוח ושיעור ריקבון ה *Alternaria* על שיא אחד של ספקטרום $\log(1/T)$ ועל שיא אחד של נגזרת ראשונה של T ו T עצמה. אורך הגל המתאים לשיא נקבע באופן ידני תוך הסתכלות על גרף הספקטרום. תוצאות טבלה 10 מראות אורך הגל הממוצע של כל התפוחים. התוצאות לשיאים אחרים נמצאים בנספח 8.2.2. בטבלה 11 ובציורים 28, 29, 30 ו 31 נמצאות תוצאות השפעת הגורמים על קואורדינטות מרכז-הכובד של ספקטרום $\log(1/T)$ וספקטרום קרינת העברה T .

טבלה 10. תוצאות בדיקת השפעת גורמי מיקום התפוח ושיעור ריקבון ה - *Alternaria* על

שיאים של 3 תצוגות ספקטרום מתמטיות

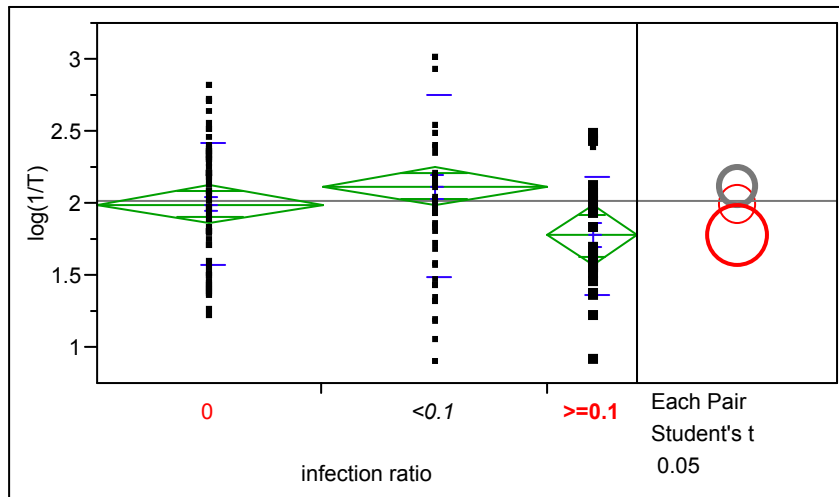
Table 10. Influence test results of fruit position and *Alternaria* infection degree factors on peaks for 3 mathematical treatments of spectrum

אינטראקציה בין הגורמים		גורם שיעור הריקבון התפוח		גורם מיקום התפוח		אורך גל המתאים לשיא, מתאים לנקודת max	טיפול מתמטי
השפעה	P_{value}	השפעה	P_{value}	השפעה	P_{value}		
לא מובהקת	0.71	מובהקת	0.0242	לא מובהקת	0.25	677 nm	$\log(\frac{1}{T})$
לא מובהקת	0.68	מובהקת	<0.0001	לא מובהקת	0.13	732 nm	$\frac{dT}{d\lambda}$
לא מובהקת	0.23	מובהקת	<0.0001	לא מובהקת	0.34	829 nm	
לא מובהקת	0.48	מובהקת	<0.0001	לא מובהקת	0.13	695 nm	
לא מובהקת	0.34	מובהקת	<0.0001	לא מובהקת	0.21	717 nm	T
לא מובהקת	0.4	מובהקת	<0.0001	לא מובהקת	0.44	809 nm	

טבלה 11 . תוצאות בדיקת השפעת גורמי מיקום התפוח ושיעור ריקבון ה- *Alternaria*
 על קואורדינאטות מרכז-הכובד של ספקטרום $\log(1/T)$ וספקטרום קרינת העברה T

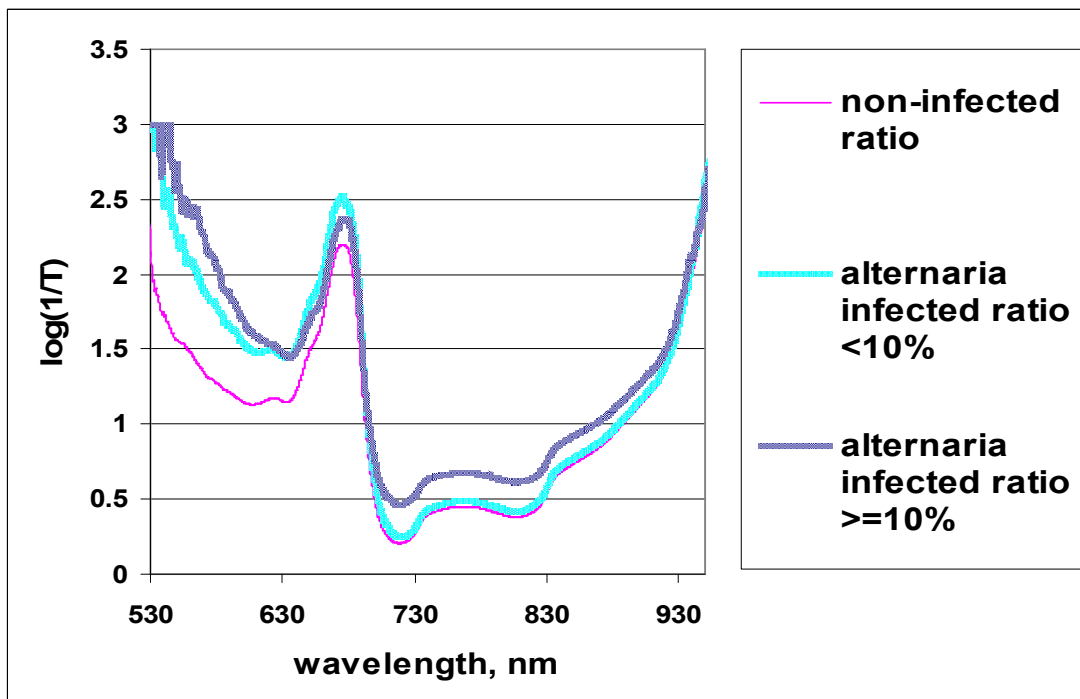
Table 11. Test results of fruit position and infection degree factors influence on
 gravity center of $\log(1/T)$ spectrum and of T transmittance spectrum

אינטראקציה בין הגורמים		גורם שיעור הריקבון התפוח		גורם מיקום התפוח		קואורדינאטות מרכז-הכובד	טיפולי מתמטי
השפעה	P_{value}	השפעה	P_{value}	השפעה	P_{value}		
לא מובהקת	0.89	לא מובהקת	0.12	לא מובהקת	0.26	Xc	$\log\left(\frac{1}{T}\right)$
לא מובהקת	0.95	מובהקת	0.0008	לא מובהקת	0.15	Yc	
לא מובהקת	0.72	לא מובהקת	0.72	לא מובהקת	0.07	Xc	T
לא מובהקת	0.15	מובהקת	<0.0001	לא מובהקת	0.45	Yc	



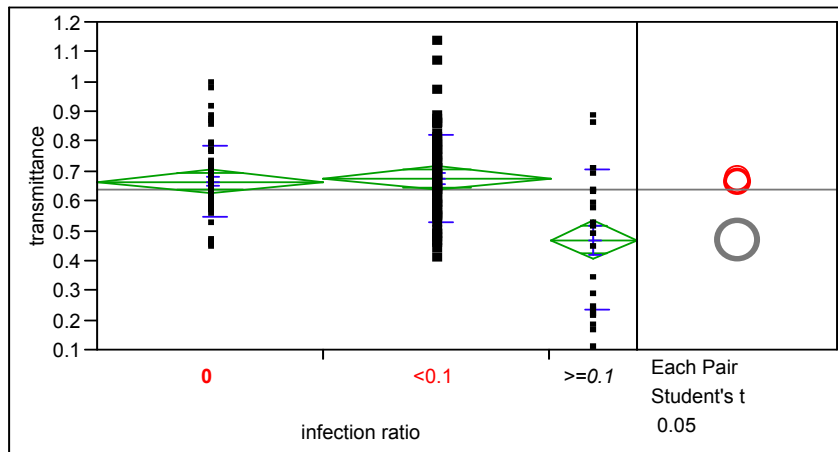
ציור 22. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני באורך הגל 677 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $\log(1/T)$ למכשיר הנייח .

Figure 22. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 677 nm for influence *Alternaria* infecting ratio factor test on $\log(1/T)$ value for the stationary system.



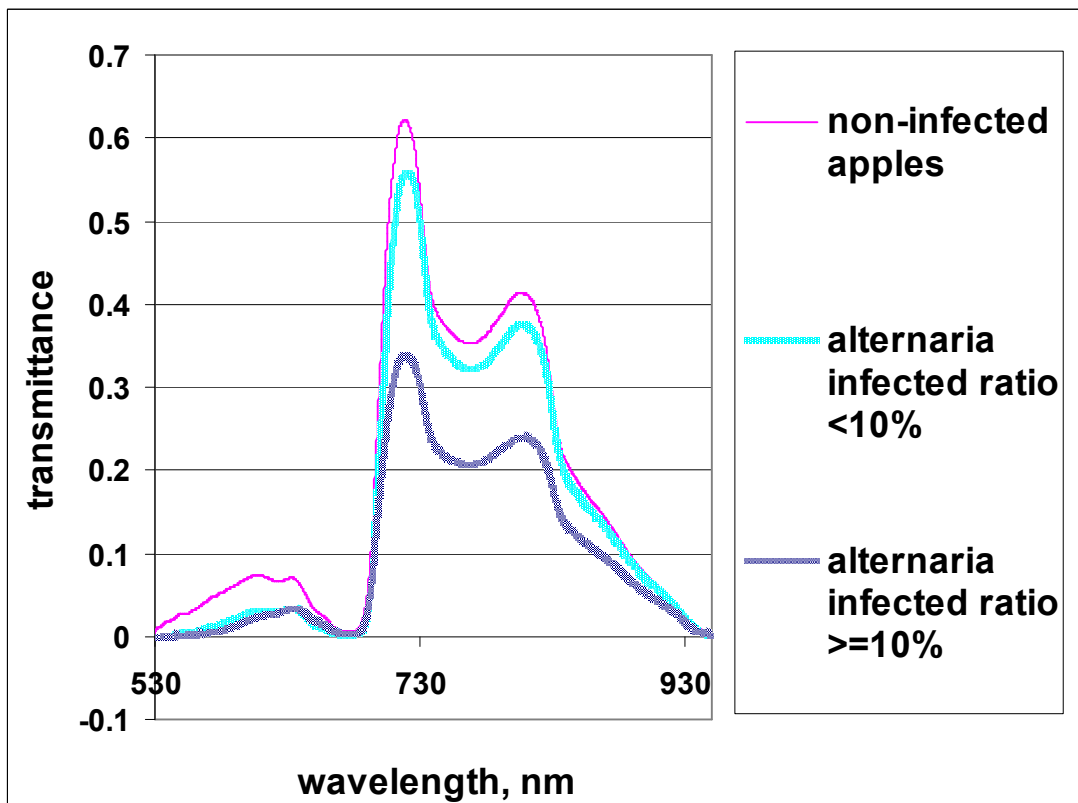
ציור 23. דוגמאות ספקטרום $\log(1/T)$ המתקבלות במכשיר נייח.

Figure 23. Typical examples of spectrum $\log(1/T)$ obtained by stationary system.



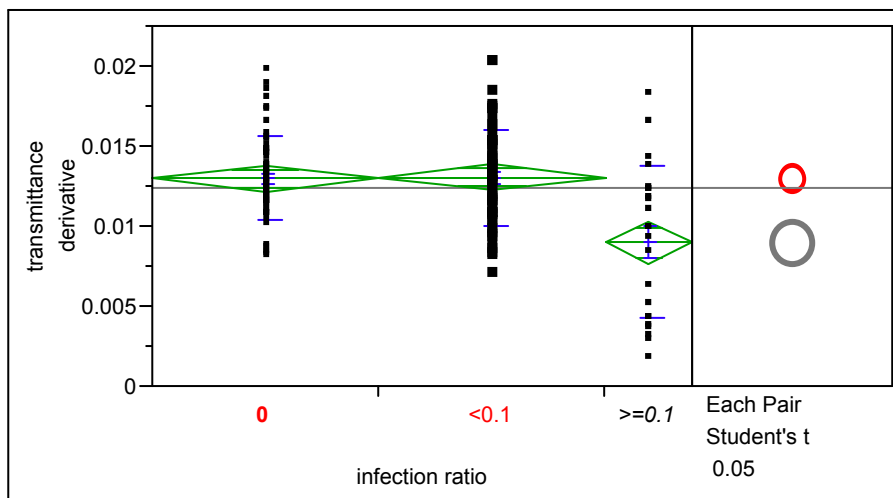
ציור 24. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 717 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך T למכשיר הנייח.

Figure 24. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 717 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on T value for the stationary system.



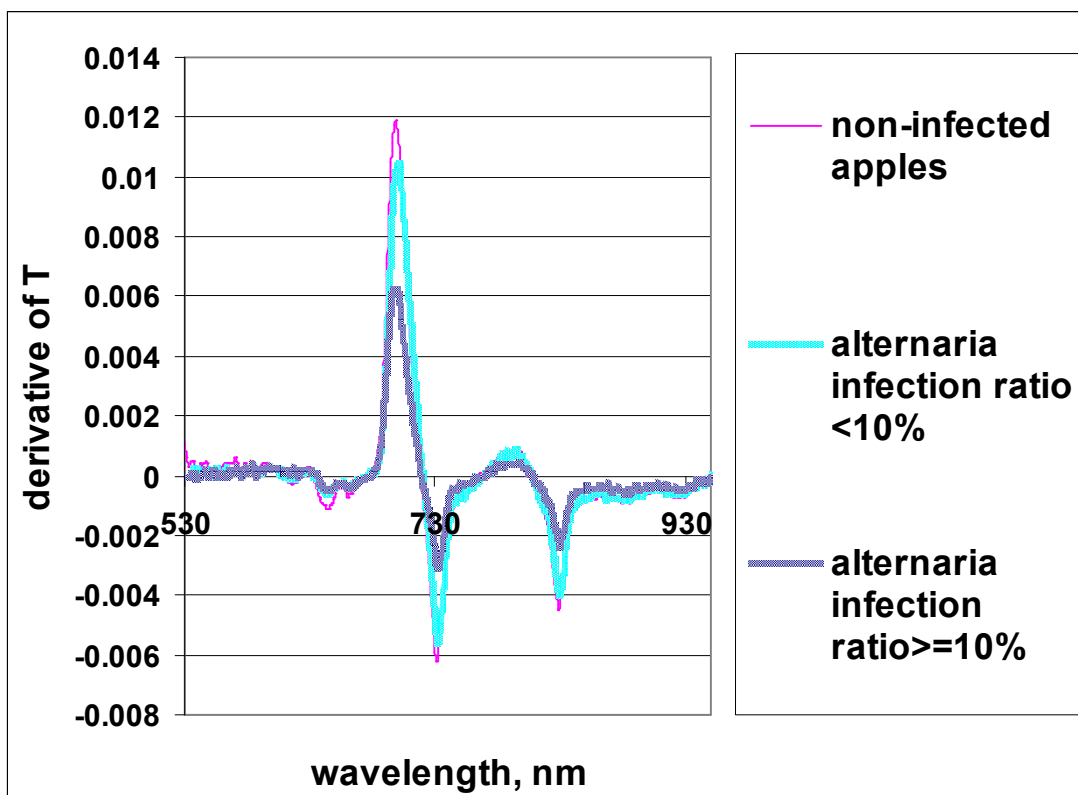
ציור 25. דוגמאות ספקטרום T המתקבלות במכשיר נייח.

Figure 25. Typical examples of spectrum T obtained by the stationary system.



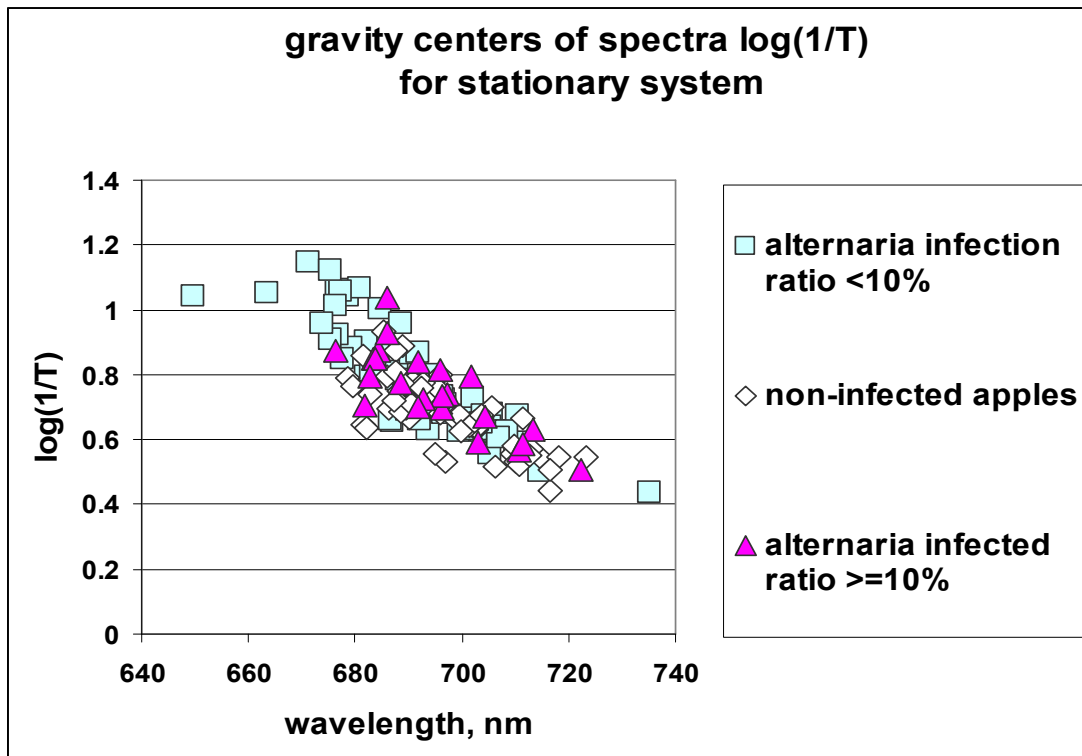
ציור 26. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 695 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $dT/d\lambda$ למכשיר הנייח.

Figure 26. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 695 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on $dT/d\lambda$ value for the stationary system.



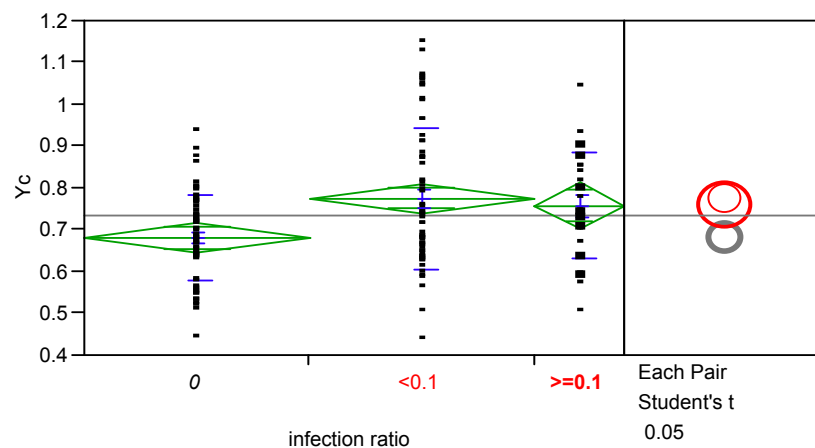
ציור 27. דוגמאות ספקטרום $dT/d\lambda$ המתקבלות במכשיר נייח.

Figure 27. Typical examples of spectrum $dT/d\lambda$ obtained by stationary system.



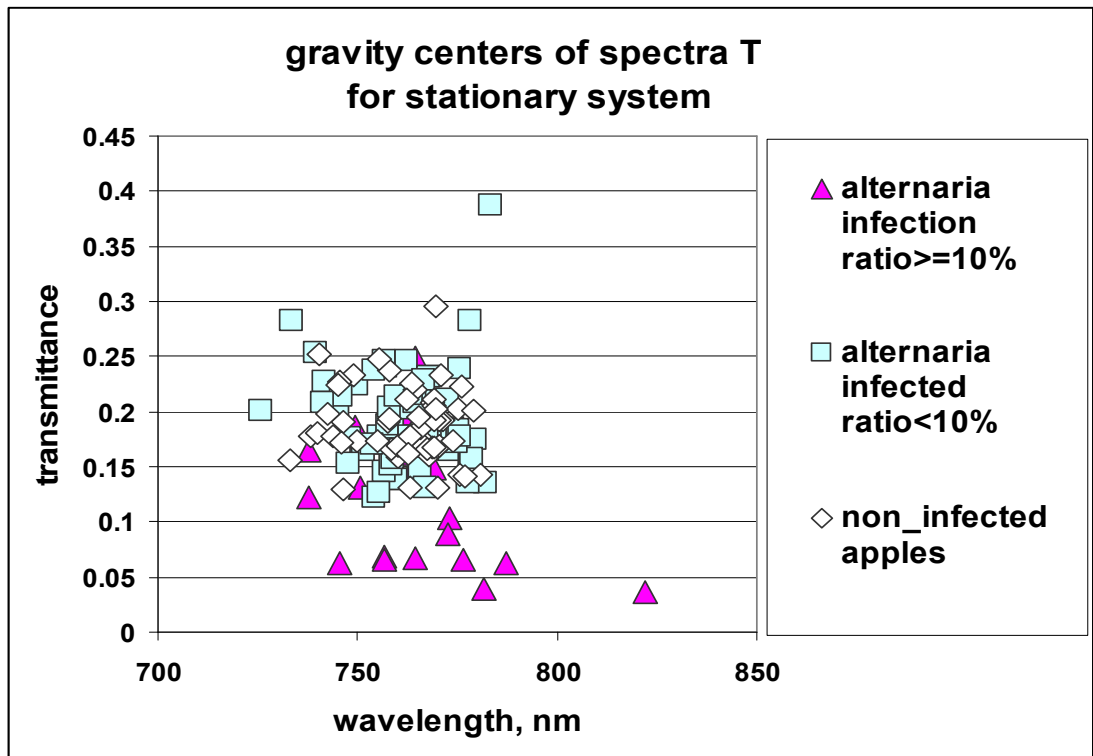
ציור 28 . תוצאות חישוב מרכזי כובד ספקטרום $\log(1/T)$ של התפוחים הבריאים והנגועים ב *Alternaria* .

Figure 28. Calculation results of $\log(1/T)$ spectra gravity centers for healthy apples and apples infected by *Alternaria*.



ציור 29. תוצאות ניתוח חד-כיווני לקואורדינאטת ה Y_c של מרכז כובד ספקטרום $\log(1/T)$ למכשיר הנייח לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע באלטרנריה במכשיר הנייח.

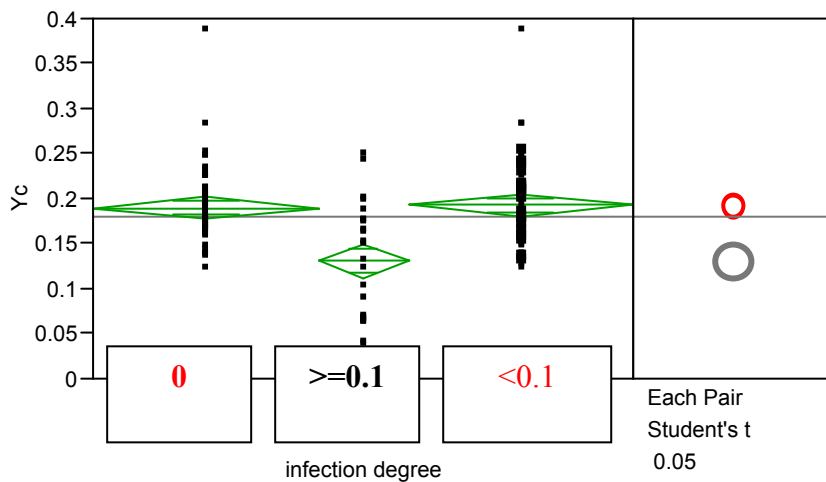
Figure 29. One - Way Anova analysis results output for stationary system corresponding to to gravity center coordinate Y_c of spectrum $\log(1/T)$ for *Alternaria* infecting ratio factor.



ציור

ציור 30 . תוצאות חישוב מרכזי כובד ספקטרום T של התפוחים הבריאים והנגועים ב *Alternaria*.

Figure 30. Calculation results of T spectra gravity centers for healthy apples and apples infected by *Alternaria*.



ציור 31. תוצאות ניתוח חד-כיווני לקואורדינאטת ה- Y_c של מרכז כובד ספקטרום T למכשיר הנייח לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע באלטרנריה במכשיר הנייח .

Figure 31. One - Way Anova analysis results output for stationary system corresponding to to gravity center coordinate Y_c of spectrum T for *Alternaria* infecting ratio factor.

5.2. תוצאות הניסויים במערכת בתנועה

5.2.1. תוצאות PLS

בטבלה 12, 13 ו-14 מוצגות תוצאות קורלציה בין ערכי שיעור ריקבון ה- *Alternaria* הנמדדים בבדיקה הרסנית לערכים חזויים שהתקבלו באמצעות PLS ל 4 המודלים עבור מדגם 873 תפוחים. בציורים 32, 33 ו-34 נמצאות תוצאות של קרינה מועברת מקורית בצורה גראפית. תוצאות בצורה גראפית של הטיפולים מתמטיים אחרים נמצאות בנספח 8.3.1.

טבלה 12. תוצאות עיבוד נתוני הניסוי שהתקבלו באמצעות שיטת ה PLS למכשור בתנועה למדגם עם כלל קבוצות מיון של התפוחים

Table 12. Processing data results from rotating system carried out by PLS for sample with all classification groups of apples

	<i>SEP, % affected area</i>	<i>SEC, % affected area</i>	<i>Optimal latent factors number</i>	<i>r, %</i>
<i>T</i>	3.5	3.4	10	80
$\frac{dT}{d\lambda}$	4.3	3.5	10	82
$\log\left(\frac{1}{T}\right)$	3.6	3.3	10	84
$\frac{d^2(\log(1/T))}{d\lambda^2}$	4.4	4.0	4	66

טבלה 13. תוצאות עיבוד נתוני הניסוי שהתקבלו באמצעות שיטת ה PLS למכשור בתנועה למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון אלטרנריה עד 4%

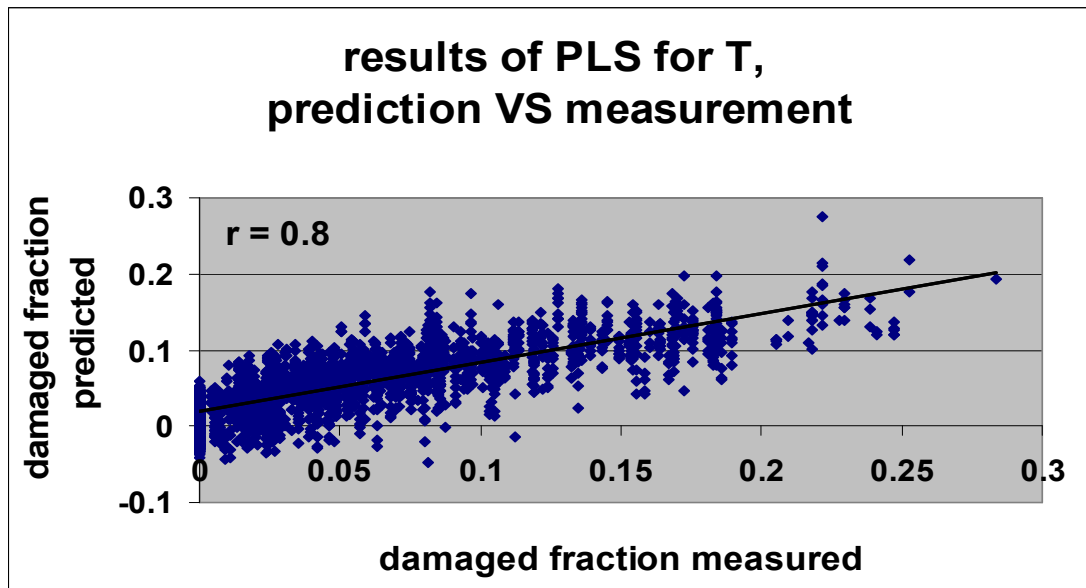
Table. 13. Processing data results from rotating system carried out by PLS for sample without apples that have *Alternaria* infection ratio less 4%

	<i>SEP, % affected area</i>	<i>SEC, % affected area</i>	<i>Optimal latent factors number</i>	<i>r, %</i>
<i>T</i>	3.5	3.4	10	83
$\frac{dT}{d\lambda}$	4.3	3.9	5	82
$\log(\frac{1}{T})$	3.6	3.3	10	86
$\frac{d^2(\log(1/T))}{d\lambda^2}$	4.4	4.1	3	71

טבלה 14. תוצאות עיבוד נתוני הניסוי שהתקבלו באמצעות שיטת ה PLS למכשור בתנועה למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון אלטרנריה עד 10%

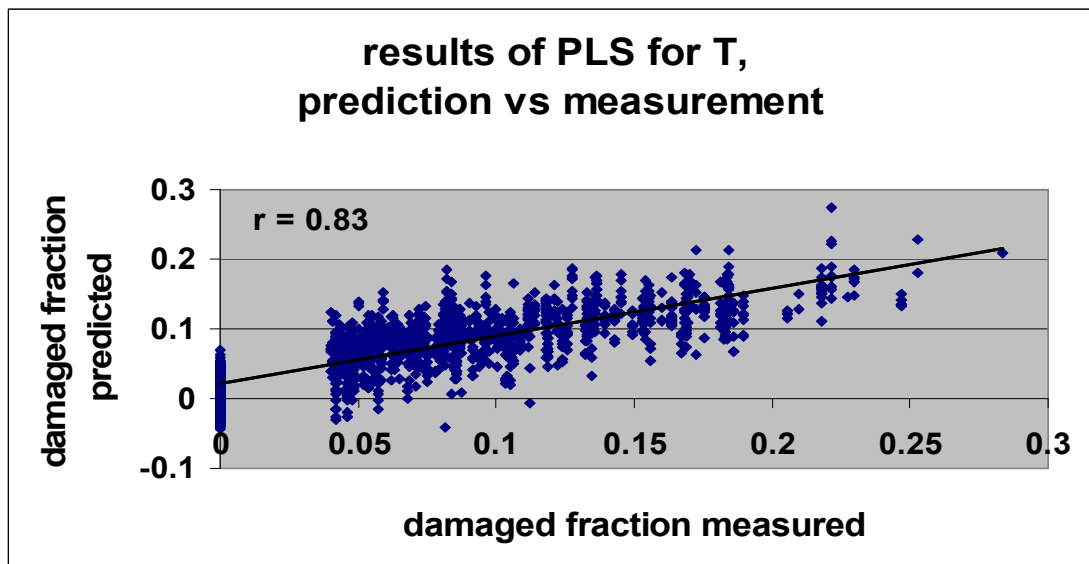
Table 14. Processing data results from rotating system carried out by PLS for sample without apples that have *Alternaria* infection ratio less 10%

	<i>SEP, % affected area</i>	<i>SEC, % affected area</i>	<i>Optimal latent factors number</i>	<i>r, %</i>
<i>T</i>	3.6	3.3	10	0.90
$\frac{dT}{d\lambda}$	3.9	3.7	5	0.90
$\log(\frac{1}{T})$	5.0	4.7	6	83
$\frac{d^2(\log(1/T))}{d\lambda^2}$	5.2	4.3	3	80



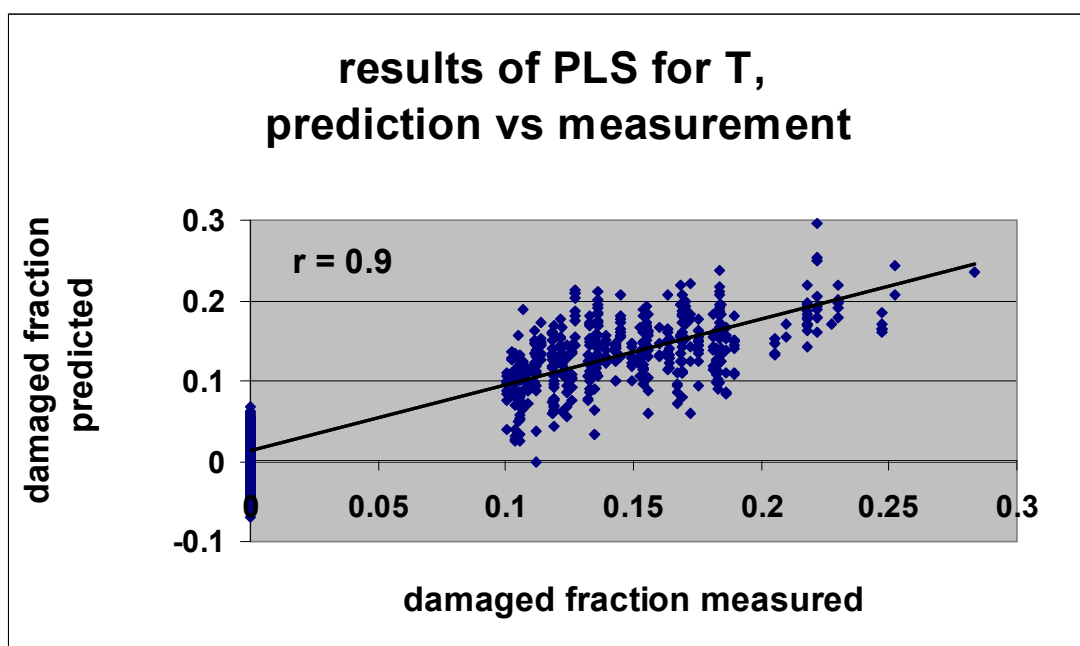
ציור 32. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על קרינת העברה T שהתקבלו במערכת בתנועה לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם עם כלל קבוצות מיון של התפוחים .

Figure 32. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance radiation T for sample with all classification groups of apples, obtained by rotating system .



ציור 33. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על קרינת העברה T שהתקבלו במערכת בתנועה לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ויקבון עד 4% וכולל תפוחים לא נגועים.

Figure 33. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance radiation T without apples that have infection ratio less 4% and include non-infected apples, obtained by rotating system .



ציור 34. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על קרינת העברה T שהתקבלו במערכת בתנועה לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10% וכולל תפוחים לא נגועים.

Figure 34. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance radiation T without apples that have infection ratio less 10% and include non-infected apples, obtained by rotating system.

5.2.2 תוצאות Cluster Analysis

בטבלאות 15, 16 ו-17 ניתן לראות באיזה דיוק מיונו התפוחים במערכת בתנועה.

טבלה 15. דיוק המיון הכללית ולפי 4 הקבוצות למדגם עם כלל התפוחים

Table 15. Total accuracy and accuracy based on 4 mathematical treatments with all classification groups

	<i>Optimal latent factor</i>	<i>accuracy according to infection ratio, %</i>				<i>Total accuracy %</i>
		0	<i>From 0% to 10%</i>	<i>From 10% to 20%</i>	<i>From 20% to 100%</i>	
T	10	76	75	56	57	71
$\frac{dT}{d\lambda}$	10	86	80	60	55	77
$\log(\frac{1}{T})$	10	57	74	70	90	70
$\frac{d^2(\log(1/T))}{d\lambda^2}$	4	71	53	62	77	58

טבלה 16. דיוק המיון הכללית ולפי 4 הקבוצות למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4%

Table 16. Total accuracy and accuracy based on 4 mathematical treatments without apples infection ratio less 4%

	<i>Optimal latent factor</i>	<i>accuracy according to infection ratio, %</i>				<i>Total accuracy %</i>
		0	<i>From 0% to 10%</i>	<i>From 10% to 20%</i>	<i>From 20% to 100%</i>	
T	10	90	74	56	50	74
$\frac{dT}{d\lambda}$	5	90	68	57	67	72
$\log(\frac{1}{T})$	10	68	73	71	93	71
$\frac{d^2(\log(1/T))}{d\lambda^2}$	3	62	49	44	86	51

טבלה 17. דיוק המיון הכללי לפי 4 הקבוצות למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10%

Table 17. Total accuracy and accuracy based on 4 mathematical treatments without apples infection ratio less 10%

	<i>Optimal latent factor</i>	<i>accuracy according to infection ratio, %</i>			<i>Total accuracy %</i>
		0	<i>From 10% to 20%</i>	<i>From 20% to 100%</i>	
T	10	100	89	69	94
$\frac{dT}{d\lambda}$	5	99	87	69	93
$\log\left(\frac{1}{T}\right)$	6	92	82	95	88
$\frac{d^2(\log(1/T))}{d\lambda^2}$	3	85	64	91	75

5.2.3 תוצאות Two Way ANOVA

בטבלה 19 ובציורים 35, 36, 37, 38, 39 ו-40 מוצגות תוצאות השפעת גורמי מיקום התפוח, ושיעור ריקבון ה *Alternaria* על השיא של ספקטרום $\log(1/T)$ ועל שיא אחד של נגזרת ראשונה של T ועצמה של T . אורך הגל המתאים לשיא נקבע באופן ידני תוך הסתכלות על גרף הספקטרום. תוצאות טבלה 10 מראות אורך הגל הממוצע של כל התפוחים. התוצאות לשיאים אחרים נמצאים בנספח 8.3.2. התוצאות לשיאים אחרים נמצאים בנספח 8.3.2. בטבלה 18 ובציורים 41, 42, 43 ו-44 נמצאות תוצאות השפעת הגורמים על קואורדינאטות מרכז-הכובד של ספקטרום $\log(1/T)$ וספקטרום קרינת העברה T .

טבלה 18 . תוצאות בדיקת השפעת גורמי מיקום התפוח ושיעור ריקבון ה- *Alternaria*

על קואורדינאטות מרכז-הכובד של ספקטרום $\log(1/T)$ וספקטרום קרינת העברה T

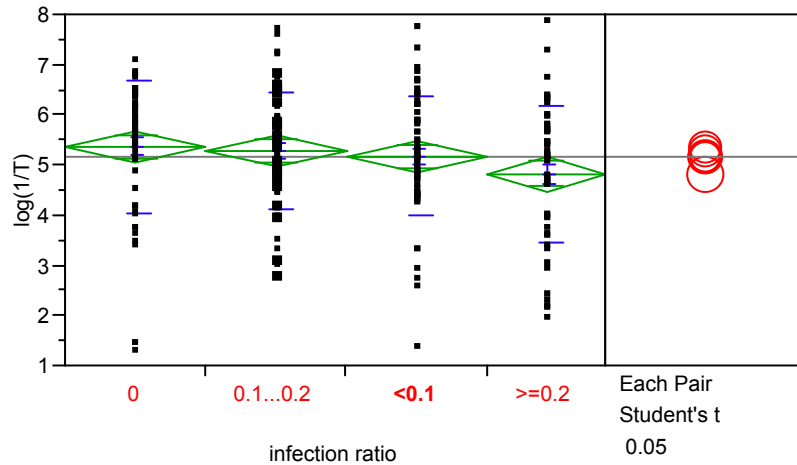
Table 18. Test results of fruit position and infection degree factors influence on gravity center of $\log(1/T)$ spectrum and of T transmittance spectrum.

אינטראקציה בין הגורמים		גורם שיעור הריקבון התפוח		גורם מיקום התפוח		קואורדינאטות מרכז-הכובד	טיפול מתמטי
השפעה	P_{value}	השפעה	P_{value}	השפעה	P_{value}		
לא מובהקת	0.87	מובהקת	0.043	לא מובהקת	0.54	Xc	$\log(\frac{1}{T})$
לא מובהקת	0.95	לא מובהקת	0.778	לא מובהקת	0.94	Yc	
לא מובהקת	0.95	מובהקת	0.047	לא מובהקת	0.66	Xc	T
לא מובהקת	0.65	מובהקת	<0.0001	לא מובהקת	0.53	Yc	

טבלה 19. תוצאות בדיקת השפעת גורמי מיקום התפוח ושיעור ריקבון ה- *Alternaria* על שיאים של 3 תצוגות ספקטרום מתמטיות

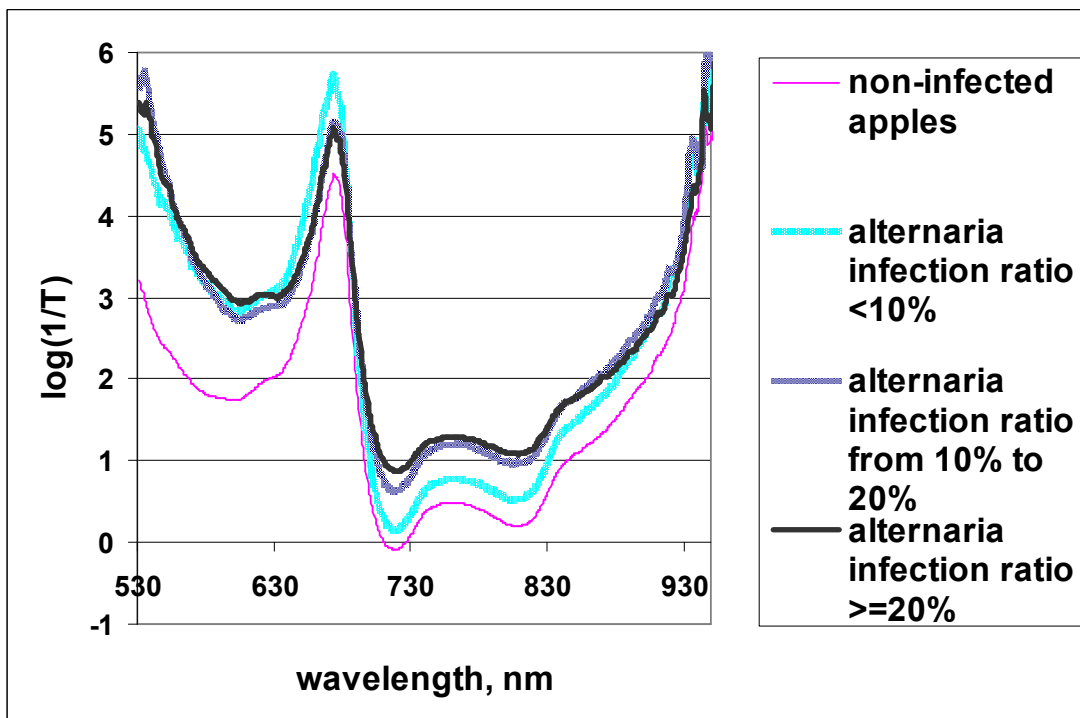
Table 19. Influence test results of fruit position and *Alternaria* infection degree factors on peaks for 3 mathematical treatments of spectrum

אינטראקציה בין הגורמים		גורם שיעור הריקבון התפוח		גורם מיקום התפוח		אורך גל המתאים לשיא, מתאים לנקודת max	טיפולי מתמטי
השפעה	P_{value}	השפעה	P_{value}	השפעה	P_{value}		
לא מובהקת	0.95	לא מובהקת	0.131	לא מובהקת	0.94	674 nm	$\log(\frac{1}{T})$
לא מובהקת	0.62	מובהקת	<0.0001	לא מובהקת	0.47	732 nm	$\frac{dT}{d\lambda}$
לא מובהקת	0.58	מובהקת	<0.0001	לא מובהקת	0.2	829 nm	
לא מובהקת	0.78	מובהקת	<0.0001	לא מובהקת	0.61	701 nm	
לא מובהקת	0.79	מובהקת	<0.0001	לא מובהקת	0.45	719 nm	T
לא מובהקת	0.7	מובהקת	<0.0001	לא מובהקת	0.51	809 nm	



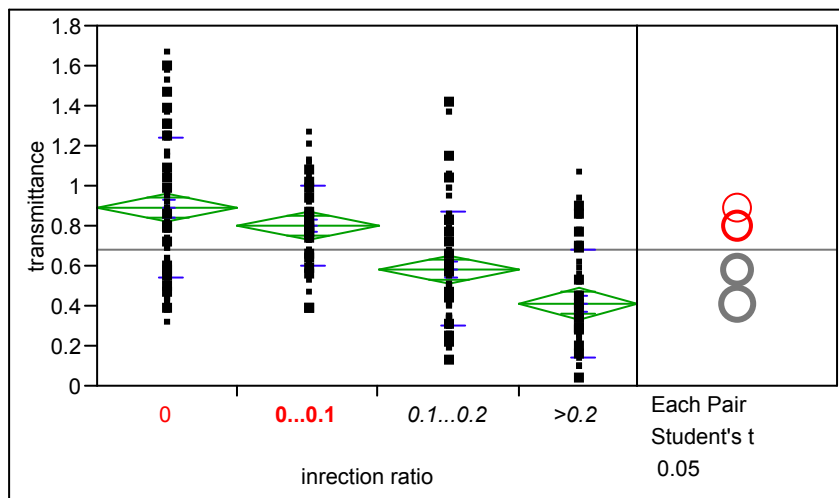
ציור 35. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני באורך הגל 674 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $\log(1/T)$ למכשיר בתנועה .

Figure 35. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 674 nm for influence *Alternaria* infecting ratio factor test on $\log(1/T)$ value for the rotating system.



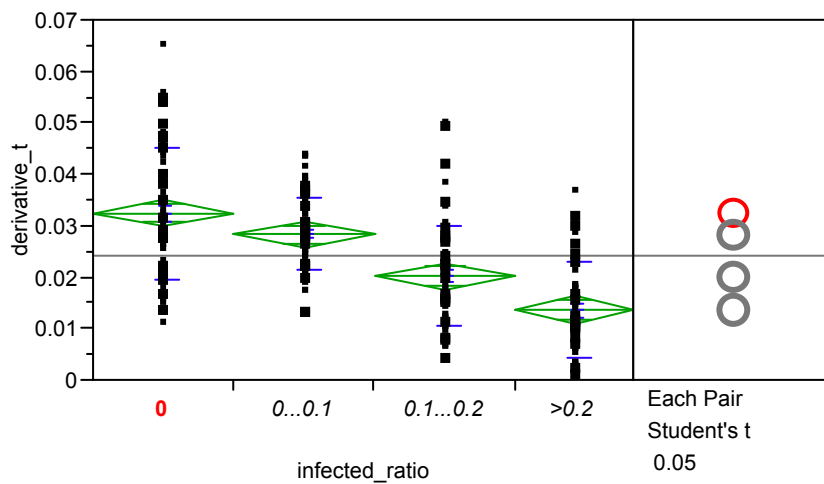
ציור 36. דוגמאות ספקטרום $\log(1/T)$ המתקבלות במכשיר בתנועה.

Figure 36. Typical examples of spectrum $\log(1/T)$ obtained by rotating system.



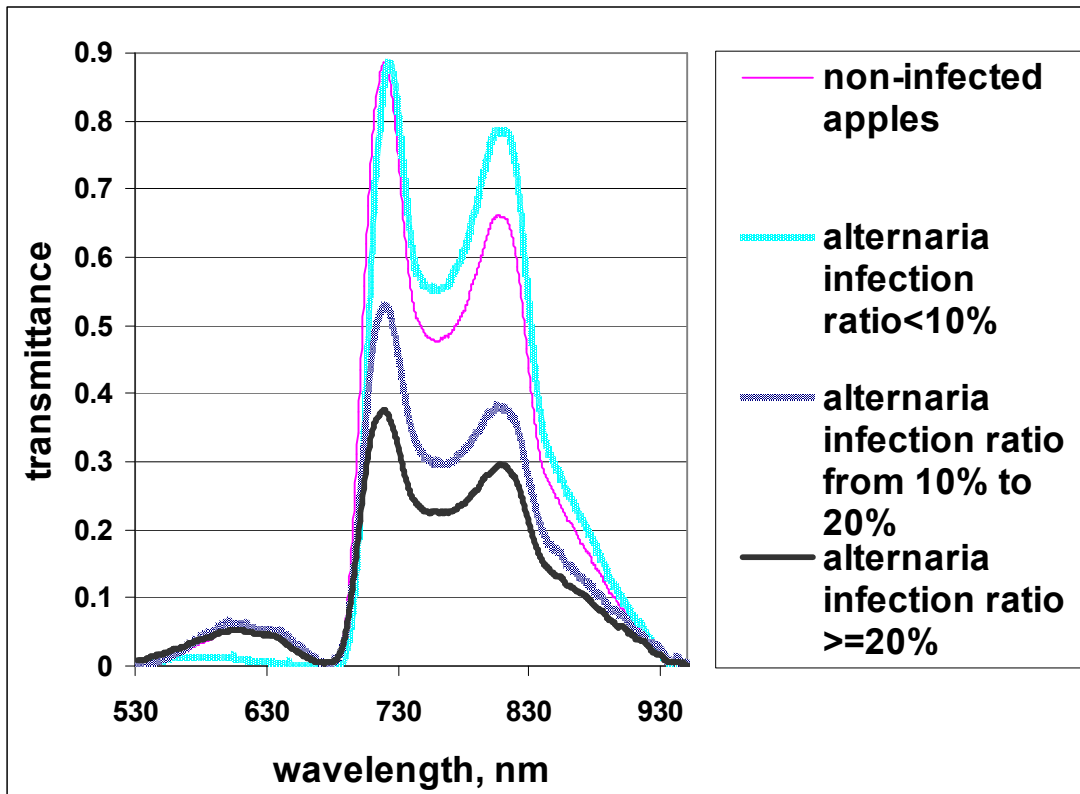
ציור 37. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 719 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך T למכשיר בתנועה .

Figure 37. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 719 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on T value for the rotating system.



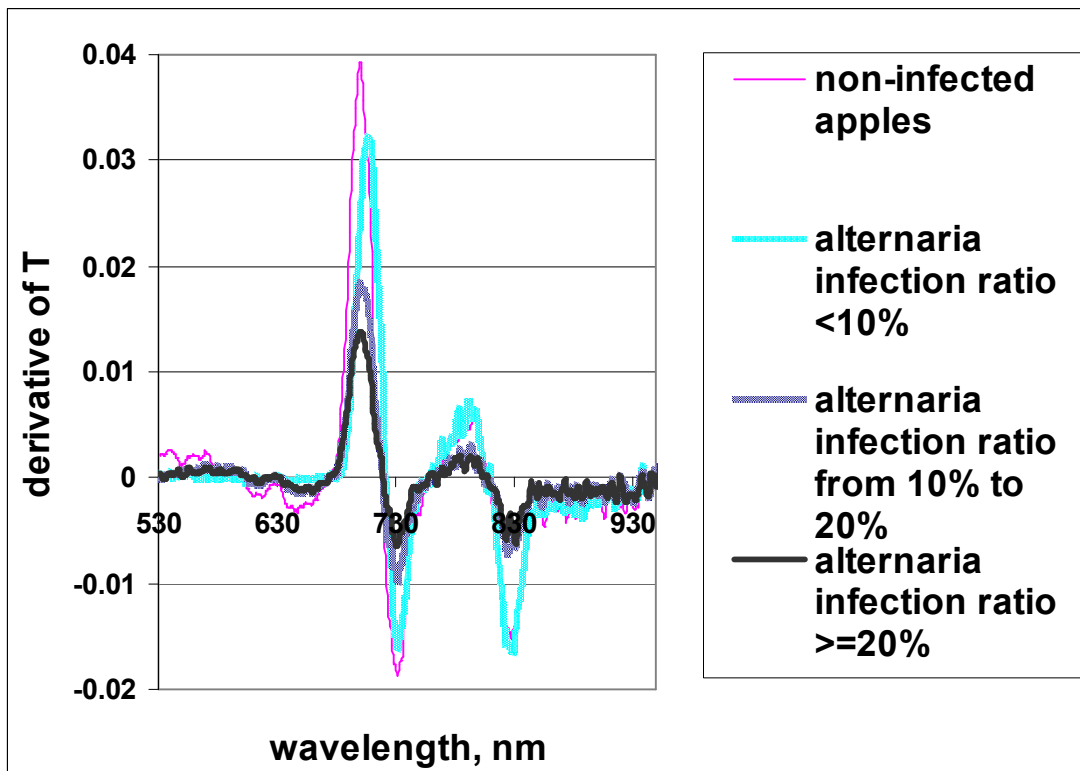
ציור 38. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 732 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $dT/d\lambda$ למכשיר בתנועה .

Figure 38. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 732 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on $dT/d\lambda$ value for the rotating system.



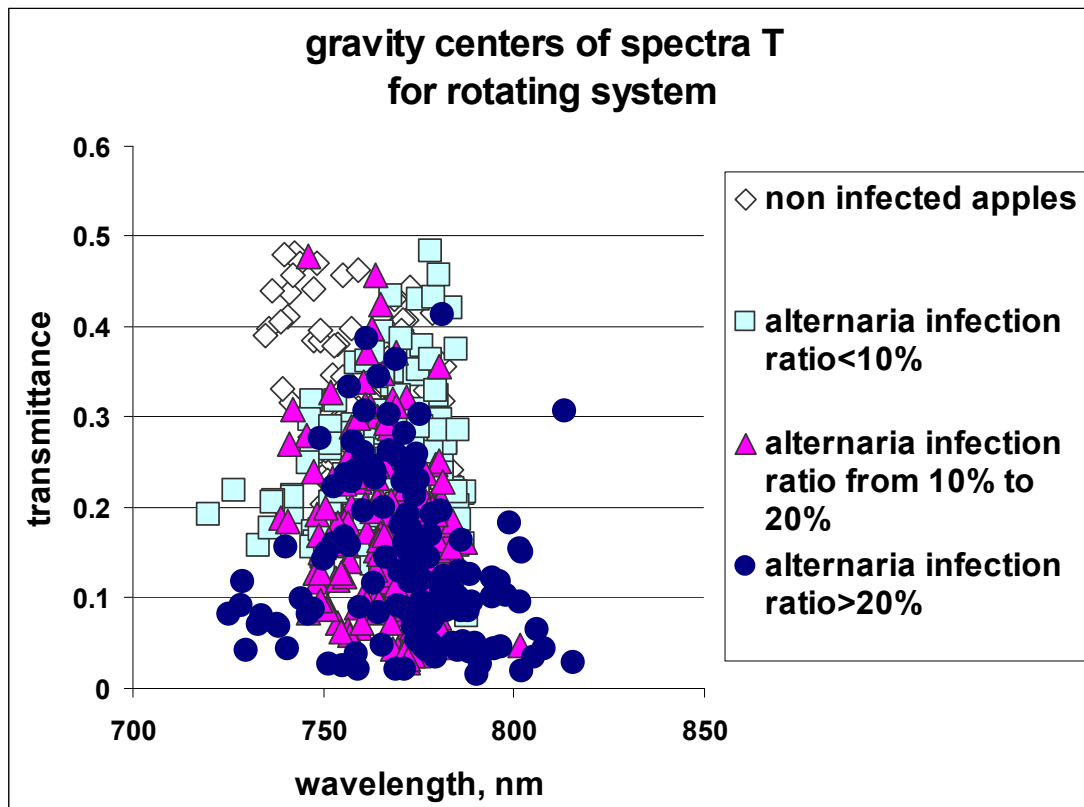
ציור 39. דוגמאות ספקטרום T המתקבלות במכשיר בתנועה.

Figure 39. Typical examples of spectrum T obtained by rotating system.



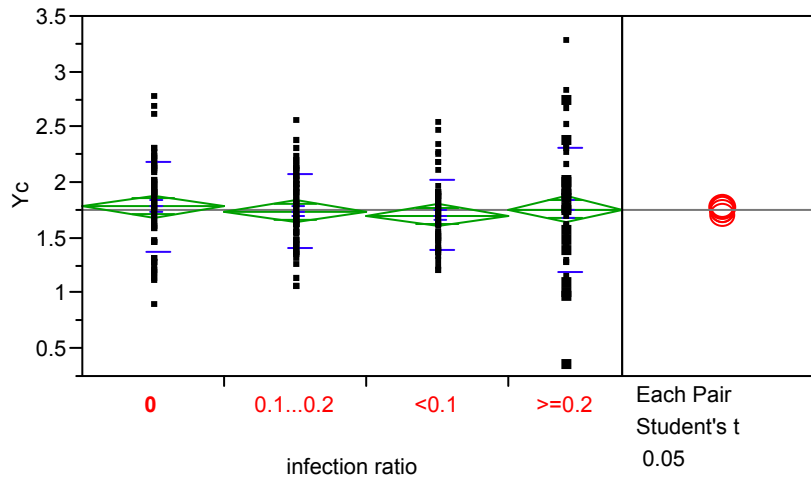
ציור 40. דוגמאות ספקטרום $dT/d\lambda$ המתקבלות במכשיר בתנועה.

Figure 40. Typical examples of spectrum $dT/d\lambda$ obtained by rotating system.



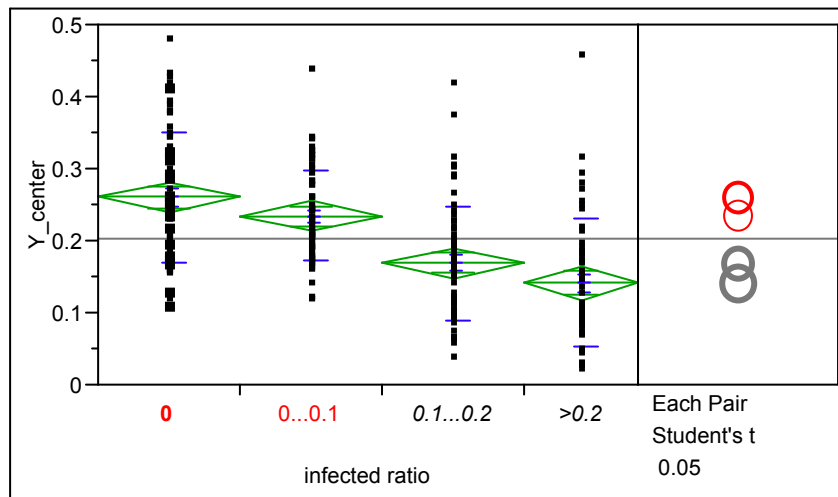
ציור 42 . תוצאות חישוב מרכזי כובד ספקטרום T של התפוחים הבריאים והנגועים ב *Alternaria* במכשיר בתנועה.

Figure 42. Calculation results of T spectra gravity centers for healthy apples and apples infected by *Alternaria* for rotation system.



ציור 43. תוצאות ניתוח חד-כיווני לקואורדינאטת ה- Y_c של מרכז כובד ספקטרום $\log(1/T)$ לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע באלטרנריה במכשיר בתנועה.

Figure 43. One - Way Anova analysis results output for rotating system corresponding to to gravity center coordinate Y_c of spectrum $\log(1/T)$ for *Alternaria* infecting ratio factor.



ציור 44. תוצאות ניתוח חד-כיווני לקואורדינאטת ה- Y_c של מרכז כובד ספקטרום T לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע באלטרנריה במכשיר בתנועה.

Figure 44. One - Way Anova analysis results output for rotating system corresponding to to gravity center coordinate Y_c of spectrum T for *Alternaria* infecting ratio factor.

התוצאות לעיל מבוססות על פלטי תוכנת ה JMP ודוגמא של אחד מפלטים נמצאת בנספח 8.4.3.

6. דיון

בניגוד לספקטרום MIR בעל שיאים המאפיינים את ההרכב הכימי של חומרים אורגאניים עקב תנודות ראשיות, ספקטרום NIR כולל תנודות משנה או הרמוניות משניות שלו וחפיפות אופיינית לספקטרום NIR. לכן, לפי שיאים של ספקטרום ה-NIR קשה להגדיר הרכב כימי של חומרים אורגאניים וריכוז של מרכיבים אופניים. בנוסף לכך למרות שתפוח הנגוע ב *Alternaria* שונה בהרכב הכימי מתפוח לא נגוע, ההבדל הינו מורכב יותר מנוכחות או היעדרות של חומר אורגאני מסוים. נובע מכך, כי קיים קושי להבדיל בין ספקטרום של תפוחים לא נגועים לספקטרום של תפוחים הנגועים ב *Alternaria*. הדבר הינו מורכב יותר בהשוואה להבדל בין השיאים השונים. במחקר הנוכחי נבדק אם קיימת תלות ליניארית בין שיעור ריקבון ה- *Alternaria* הנמדד באופן הרסני לבין שיעור הריקבון החזוי באמצעות ספקטרוסקופית NIR.

6.1 שיטת PLS

תוצאות PLS **למכשיר בתנועה** ותוצאות PLS מדיווח של Erkinbaev, et.al.(2004) **למכשיר נייח** מאשרות שקיימת קורלציה ליניארית גבוהה בין שיעור ריקבון חזוי לשיעור הנמדד. מקדם המתאם שנמצא הינו בין 87% ל 92% **למכשיר נייח** (טבלה 6, ציור 12 וציורים בנספח 8.1). לתפוחים שנסקרו **במכשיר בתנועה** למדגם עם כלל התפוחים מקדם המתאם הינו בין 66% ל 84% (טבלה 12, ציור 32 וציורים בנספח 8.3.1) כלומר יותר נמוך מאשר מקדם המתאם שהתקבל **במכשיר הנייח**. אחת הסיבות לירידת מקדם המתאם הינה שלתפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4% - 10% לא תמיד ברור האם הם נגועים ב- *Alternaria* או במשהו אחר, למשל בהשחמה. אם נסיר מן המדגם את התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4% מקדם המתאם שהתקבל בין 71% ל 86% (טבלה 13, ציור 33 וציורים בנספח 8.3.1) המתאם גדל אך לא באופן מובהק. אם נסיר מן המדגם את התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10% (ציור 18b), מקדם המתאם עלה והינו בין 80% ל 90% (טבלה 14, ציור 34 וציורים בנספח 8.3.1). כאשר במדגם קיים פחות מ 30% תפוחים בעלי

שיעור ריקבון יותר מ 10% (ציור 18b), מקדם המתאם התקבל בין 55% ל 67%. כלומר התקבלה תוצאה נמוכה יותר מהמצבים שתוארו קודם (טבלה 7, ציור 21 וציורים בנספח 8.2.1). התצוגה המתמטית הטובה ביותר נבחרת לפי שילוב מספר הפקטורים הקטן ביותר, כאשר השגיאה הריבועית הממוצעת קטנה יותר ומקדם המתאם גדול יותר. נתקבל כי עבור **מכשיר נייח** התצוגה המתמטית האופטימאלית הינה נגזרת ראשונה של קרינה מועברת המקורית (טבלאות 6 ו-7). עבור **המכשיר בתנועה** התצוגה המתמטית האופטימאלית שנתקבלה הינה $\log(1/T)$ עבור מדגם שכלל את כל התפוחים (טבלה 12). כמו כן נתקבלה תוצאה של מתאם טוב (82%) עבור תוצאת עיבוד הנגזרת הראשונה של הקרינה המועברת המקורית עבור מדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4%. עבור מדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10% (ציור 18b) נתקבל מתאם של 90% (טבלאות 13 ו-14).

6.2 שיטת Cluster Analysis

מתוצאות עיבוד הנתונים שהתקבלו **במכשיר הנייח** באמצעות שיטת Cluster Analysis בחלוקה של המדגם ל 2 קבוצות: תפוחים נגועים ותפוחים לא נגועים *Alternaria*, נראה שדיוק המיון לקבוצת התפוחים הנגועים גבוה ומשתנה בין 73% ל 87% בניגוד לקבוצת התפוחים הלא נגועים (טבלה 8) כאשר שדיוק המיון משתנה רק בין 50% ל 75%.

בחלוקת המדגם ל 4 קבוצות (טבלה 9) נמצא שדיוק המיון הגבוה ביותר אופייני לקבוצת תפוחים שבה שיעור הריקבון יותר מ 10% (ציור 18b) במדגם נתקבל דיוק מיון של 81% לספקטרום קרינת מעבר T , 88% לנגזרת ראשונה של $dT/d\lambda$ ו 85% לספקטרום הערך $\log(1/T)$. עבור תפוחים בעלי שיעור ריקבון פחות מ 10% (ציור 18b), ולתפוחים לא נגועים, דיוק המיון נמצא יחסית נמוך ומשתנה מ 33% עד 58% עבור ספקטרום קרינת מעבר T , ודיוק מיון בתחום 39% עד 58% לנגזרת ראשונה של הספקטרום $dT/d\lambda$, ודיוק מיון בתחום 36% עד 55% לספקטרום $\log(1/T)$. דיוק מיון לנגזרת שנייה של $\log(1/T)$ נמצאה בדיוק מיון פחות מ 65% לכל קבוצות המיון (ראה טבלה 9). יש לציין כי כל תוצאות שדיוחו ערכי דיוק מיון, חושבו עבור מספר פקטורים אופטימאלי שחושבו קודם התהליך באמצעות PLS. ככל שמספר הפקטורים יותר נמוך כך נחשב המודל הסטטיסטי יציב יותר. לנגזרת שנייה של $\log(1/T)$ מספר הפקטורים הינו נמוך

ביותר ושווה 2 (ראה טבלאות 8 ו 9). לתצוגות מתמטיות אחרות כלומר לסוגי ספקטרום T , $dT/d\lambda$, $\log(1/T)$, מספר המשתנים הסמויים (מספר הפקטורים) במודל הינו 8, 5 ו 8 בהתאמה (טבלאות 8 ו 9). אומנם ל - $d^2(\log(1/T))$ דיוק המיון נמוך יחסית בהשוואה לדיוק המיון ל T , $dT/d\lambda$, $\log(1/T)$. הסיבה המשוערת לכך היא שספקטרום $d^2(\log(1/T))$ המתקבל כולל הרבה רעשים.

תוצאות Cluster Analysis שהתקבלו ממדידות **עבור מכשיר בתנועה**, מראות שדיוק המיון הכולל למדגם עבור כל התפוחים (טבלה 15) הינו בין 58% ל 71%. אם נסיר מן המדגם את התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4%, דיוק המיון הכולל שהתקבל הינו בין 51% ל 74% (טבלה 16) כלומר לא חל שיפור משמעותי בדיוק המיון. לנגזרת ראשונה של קרינה מועברת $dT/d\lambda$ ולנגזרת שנייה $d^2(\log(1/T))$ דיוק המיון הכולל נתקבל מעט נמוך יותר מתוצאות שתקבלו לכלל התפוחים (טבלה 15). אולם, יש לקחת בחשבון שמספרי הפקטורים בתצוגות מתמטיות עבור המדגם של התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4%, קטנים יותר מאשר שמספרי הפקטורים באותן תצוגות מתמטיות למדגם עם כל התפוחים. אם נסיר מן המדגם את התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10% (ציור 18b), דיוק המיון הכולל עולה בצורה מובהקת וערכו נע בין 75% ל 94% (טבלה 17). דיוק המיון הכולל לתוצאות **המכשיר הנייח** משתנה בין 62% ל 74% בחלוקה ל 2 קבוצות לפי שיעור הריקבון (טבלה 8). התוצאה שנתקבלה בחלוקה ל 4 קבוצות לפי שיעור הריקבון מראה דיוק מיון בתחום 54% ל 56% (טבלה 9). התוצאות מאשרות שככל שכמות תפוחים בעלי שיעור הריקבון הינם פחות מ 10% נגיעות (ציור 18b) גדול מקטין את דיוק המיון.

דיוק המיון **לתפוחים לא נגועים** במכשיר **התנועה בחלוקה** ל-4 קבוצות מיון, עבור המדגם שכלל את כל התפוחים נמצא בין 57% ל 86% (טבלה 15). כלומר לא נמצא דיוק מיון גבוה לכל התצוגות המתמטיות חוץ מנגזרת ראשונה של קרינה מועברת $dT/d\lambda$. עם נסיר, מן המדגם את התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4%, דיוק המיון עולה באופן מובהק עבור קרינה מועברת T ולנגזרת ראשונה שלה $dT/d\lambda$ וערכו התקבל 90% לשני תצוגות הספקטרום (טבלה 16). עבור תצוגת הספקטרום - $\log(1/T)$ דיוק המיון גדל והגיע ל 68% דיוק מיון (טבלה 16) אך פחות מגידול בדיוק המיון של T ו $dT/d\lambda$. לנגזרת שנייה $d^2(\log(1/T))$ דיוק המיון נמצא קטן יותר ביחס למדגם כלל התפוחים והינו בתחום מ 71% לעד 62%. מספר פקטורים עבור המודל הסטטיסטי קטן יותר עבור הנגזרת השנייה $d^2(\log(1/T))$ ומשתנה מ 4 עד 3 עבור כלל התפוחים

בהשוואה למדגם המוקטן. לכן ניתן להסיק שדיוק המיון עבור ניתח הספקטרום באמצעות $d^2(\log(1/T))$ כמעט לא הושפע מהקטנת המדגם. עבור הסרת התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10% מן המדגם, דיוק המיון עולה לכל התצוגות המתמטיות של ספקטרום ונתקבל בין 85% ל 100% (טבלה 17).

דיוק המיון לתפוחים בעלי שיעור ריקבון יותר מ 0% ועד 10% עבור ניתוח מדגם שכלל את כל התפוחים נמצא בין 53% ל 80% דיוק מיון (טבלה 15). התקבל כי כמעט לא השתנתה התוצאה כאשר הוסרו מן המדגם התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4% ראה הבדל בין טבלה 15 ל- 16 במיוחד עבור הנגזרת ראשונה של קרינה מועברת $dT/d\lambda$ ונגזרת שנייה $d(\log(1/T))$.

דיוק המיון לתפוחים בעלי שיעור ריקבון יותר מ 10% ועד 20% (ציור 18b) עבור המדגם עם כלל התפוחים נמצא בין 56% ל 70% (טבלה 15) כלומר דיוק המיון אינו גבוה. עם נסיר מן המדגם את התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4%, דיוק המיון נמצא בין 44% ל 71% כלומר הוא כמעט לא משתנה עבור T , $dT/d\lambda$ ו $\log(1/T)$. כמו כן לנגזרת שנייה $d^2(\log(1/T))$ דיוק המיון יורד (טבלה 16). עם נסיר מן המדגם את התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10% (ציור 18b), כפי שראינו בתוצאות הקודמות וכצפוי, דיוק המיון עולה באופן מובהק ונמצא בין 64% ל 89% (טבלה 17).

דיוק המיון לתפוחים בעלי שיעור ריקבון יותר מ 20% (ציור 18b) נתקבל דיוק מיון עבור מדגם עם כלה תפוחים בשיעור 57% עבור T ; דיוק מיון של 55% עבור $dT/d\lambda$ אך דיוק מיון גבוה ל $\log(1/T)$ בשיעור 90% ו - 77% עבור $d^2(\log(1/T))$ (כאשר מספר הפקטורים הינו 4) (טבלה 15). עם הסרת חלק מהמדגם של התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4%, עולה כצפוי דיוק המיון מ 55% עד 67% ל $d(T)$ כאשר מספר הפקטורים יורד מ 10 עד 5 ודיוק המיון עולה מ 77% עד 86% עבור $d^2(\log(1/T))$ כאשר מספר הפקטורים יורד מ 4 עד 3. דיוק המיון יורד מעט מ 57% ל 50% עבור ניתוח בספקטרום T ועולה מעט מ 90% ל- 93% עבור $\log(1/T)$ (טבלאות 15 ו 16). עם נסיר חלק מהמדגם של התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10%, דיוק המיון עולה כצפוי בצורה מובהקת לכל התצוגות המתמטיות של ספקטרום (טבלה 17). לנגזרת ראשונה $dT/d\lambda$ נמצא כי ערך דיוק המיון אינו יותר גדול בהרבה מאשר למדגם ללא התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4% (טבלאות 16 ו 17). דיוק המיון הינו גבוה- 95% עבור $\log(1/T)$ ו- 91% עבור $d^2(\log(1/T))$ (טבלה 17).

מכל שאמור לעיל, אפשר להסיק שעם נסיר חלק מן מדגם התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10%, דיוק המיון יעלה בצורה מובהקת.

מצד שני דיוק המיון הכולל של תפוחים הנמדדים **במכשיר בתנועה** נמצא יותר גבוה מאשר דיוק המיון של תפוחים הנמדדים **במכשיר הנייח** תוצאה זו נובעת כנראה מהבדלי החומרה של הספקטרומטרים. הספקטרומטר USB2000 שמשמש **למכונה בתנועה** רגיש יותר ומפיק אות חזק יותר מאשר הספקטרומטר S2000 שמשמש **למכונה נייחת** באותו עצמת אור.

6.3. שיטת Two Way ANOVA

השיא האופייני של ספקטרום $\log(1/T)$ נתקבל באורך גל של 677 nm לפי מדידות **במכשיר הנייח** (טבלה 10 ונספח 8.2.2). לפי מדידות **המכשיר בתנועה** נתקבל אורך גל של 674 nm (טבלה 19 ונספח 8.3.2). לפי ניתוח סטטיסטי דו – כיווני הכולל את תוצאות **המכשיר הנייח** נמצא הבדל מובהק ברמת מובהקות של 0.05 בעוצמת ערך $\log(1/T)$ בשיא הספקטרום באורך גל של 677 nm בין קבוצות תפוחים בעלי שיעור ריקבון ב- *Alternaria* גדול או שווה ל 10% לקבוצות תפוחים בעלי שיעור הריקבון פחות מ 10%. אולם לא נמצא הבדל מובהק בין קבוצות תפוחים לא נגועים לקבוצות המתוארות לעיל. הדבר נראה בפלט תוכנת JMP (ציור 22) שבו המעגל המסמן את קבוצת תפוחים הלא נגועים חותך את המעגלים המסמנים את קבוצות בעלות שיעור ריקבון גדול או שווה ל 10% ופחות מ 10%. חיתוך המעגלים בציור 22 מצביע על חוסר הבדל מובהק ביניהם לקבוצת התפוחים הלא נגועים. אמנם, המעגלים המסמנים את קבוצות שיעור הריקבון גדול או שווה ל 10% ופחות מ 10% לא חותכים אלא משיקים אחד לשני. מצב זה מצביע על כך שיש הבדל מובהק בין הקבוצות בערכי שיא הספקטרום. הערך הסטטיסטי (ראה סעיף 2.3.2.5) $p_value=0.0242<0.05$ מאשר עובדה זו (טבלה 10) אולם ההבדל זה הינו גבולי.

לפי פלט תוכנת JMP הכולל את תוצאות **המכונה בתנועה** כל המעגלים הינם חותכים זה את זה עובדה המסבירה שאין הבדל מובהק בין קבוצות התפוחים בערך $\log(1/T)$ עבור שיא הספקטרום ברמת מובהקות של 0.05 וערך $p_value=0.13>0.05$ (ראה ציורים 35, 36 וטבלה 19).

בנוסף לניתוח ספקטרום $\log(1/T)$ **במכשיר הנייח** הוערך כצורה גיאומטרית הספקטרום כולו ונבחנה ההשערה האם אפשר לזהות את התפוחים הנגועים ב- *Alternaria* לפי קואורדינאטות מרכז הכובד של הספקטרום. ההשערה נבדקה באמצעות תוכנת JMP. לאחר ניתוח פלטי התוכנה נמצא כי אין הבדל מובהק בערך קואורדינאטה X_c (מרכז כובד הספקטרום) לתוצאות

שהתקבלו ובאפשרות למצוא הבדל בין הקבוצות בעלות שיעור ריקבון שונה (ציור 28 וטבלה 11) ברמת מובהקות 0.05. עבור תוצאות שנתקבלו **במכשיר בתנועה** המובאות בטבלה 18, נראה כי יש הבדל מובהק בין הקבוצות בעלי שיעור ריקבון פחות מ 10% לקבוצות בעלי השיעור גדול או שווה ל 10% ברמת מובהקות 0.05. אף הערך $p_value=0.043<0.05$ (טבלה 18) הינו קרוב מאוד לערך גבולי כמובא בציור 41.

מפלט הכולל תוצאות ניסוי **במכשיר הנייח** לגבי קואורדינאטה Y_c של מרכז כובד הספקטרום שהתקבלו בחילוק המדגם ל 3 הקבוצות בעלות שיעור ריקבון (מתואר לעיל בציור 29) נראה שהמעגל האפור המסמן את תפוחים הלא נגועים מעט חותך את המעגל האדום המודגש המסמן את תפוחים בעלי שיעור ריקבון גדול או שווה ל 10%. מעגל זה לא חותך את המעגל אדום המסמן את תפוחים בעלי שיעור הריקבון פחות מ 10%. אם זאת המעגל משיק מבפנים את המעגל האדום המודגש. זאת אומרת, שיש הבדל מובהק בקואורדינאטה Y_c של המרכז הכובד בין קבוצות תפוחים הלא נגועים לקבוצות תפוחים בעלי שיעור הריקבון פחות מ 10% וכמעט אין ההבדל בין קבוצות התפוחים הלא נגועים לקבוצות תפוחים בעלי שיעור הריקבון גדול או שווה ל 10%. כמו כן אין ההבדל, בין קבוצות התפוחים הנגועים בשיעור פחות מ 10%, לקבוצות התפוחים הנגועים בשיעור גדול או שווה ל 10%.

לגבי תוצאות **המכשיר בתנועה** כאשר המדגם חולק ל 4 הקבוצות האמורות לעיל אין הבדל מובהק בין ערכי קואורדינאטות Y_c של המרכז כובד ספקטרום ה- $\log(1/T)$ ברמת מובהקות 0.05 והערך $p_value=0.7776>0.05$ מאשר את זה (טבלה 18).

ממה שאמור לעיל נובע שיש הבדל בערך $\log(1/T)$ בשיא הספקטרום האופייני (ציור 22) בין הקבוצות שנבחנו כלומר תפוחים בעלי שיעור של פחות מ-10% לתפוחים לא נגועים. אולם ניתוח מרכזי הכובד של הספקטרום $\log(1/T)$ לא הראה תופעה זו. נושא זה לא מוצע דיו ויש להמשיך ולחפש אמדים נוספים בספקטרום שישפכו אור על ההבדלים, נושא זה יכול להוות אתגר להמשך המחקר.

בנוסף לכך נבחנה ההשערה האם שיאי ספקטרום של- T וספקטרום של נגזרת ראשונה $dT/d\lambda$ ומרכז כובד ספקטרום T מושפעים על-ידי שיעור ריקבון ה- *Alternaria*.

מתוצאות שנתקבלו **במכשיר הנייח** לתפוחים בעלי שיעור הריקבון גדול או שווה ל 10%, שיאים של ספקטרום ה-T ושל נגזרת ראשונה שלו $dT/d\lambda$ נמוכים יותר באופן מובהק ברמת מובהקות 0.05 מאשר שיאים של תפוחים בעלי שיעור הריקבון פחות מ 10% ושל התפוחים לא נגועים (טבלה 10 ציורים 24, 25, 26, 27 וציורים בנספח 8.2.2).

ניתוחי התוצאות הראו גם שקואורדינאטת מרכז הכובד Y_c של ספקטרום T לתפוחים בעלי שיעור ריקבון ה-*Alternaria* גבוהה מ- 10% נמוכה יותר באופן מובהק מאשר הקואורדינאטה לתפוחים בעלי שיעור הריקבון הנמוך מ- 10%. תוצאה דומה נתקבלה עבור לתפוחים לא נגועים (טבלאות 11, ציור 30 וציורים בנספח 8.2.2). בניגוד לקואורדינאטות ה- Y_c לא נמצא הבדל מובהק בין קואורדינאטות ה- X של מרכז כובד וספקטרום בכל הקבוצות עבור תחום הספקטרום מ 720 nm עד 820 nm (ציור 30 וציורים בנספח 8.3.2). הדברים אמורים לעיל מתאמים גם להשפעת שיעור ריקבון ה-*Alternaria* לגבי טיפולים מתמטיים של ספקטרום T ו $d(T)$ השייכים לא רק **למערכת הנייחת** אך גם **למערכת בתנועה** שנבחנה במחקר הנוכחי (ציורים 37, 38, 39, 40, 41 ו 42 וטבלאות 18 ו 19).

7. מסקנות, סיכום והמלצות להמשך

7.1. מסקנות משיטת PLS

א. מודל אופטימאלי התקבל עבור ספקטרום נגזרת ראשונה של קרינה מועברת $dT/d\lambda$ בניסוי הקדמי **במכשיר נייח**. תוצאה זו פחותה מזו שנתקבלה בעבודה הנוכחית. ניתן להסביר ההבדל בכך שבעבודה הנוכחית במדגם הנבחן באופן מובהק נמצאו אחוז נמוך יותר של תפוחים בשיעור נגיעות יותר מ-10% ;

ב. קיימת קורלציה ליניארית גבוהה בין שיעור ריקבון חזוי לשיעור הנמדד והיא גודלת עם הפחתת כמות **תפוחים בעלי שיעור ריקבון פחות מ 10%**. תוצאה זו נתקבלה בשני מכשירי המחקר הנייח **ובתנועה** ;

ג. מודל אופטימאלי של: מקדם מתאם גבוה, מספר פקטורים (משתנים נסתרים ב (PLS) נמוך ושגיאה ריבועית ממוצעת נמוכה התקבל עבור ספקטרום $\log(1/T)$ למדגם עם כלל תפוחים

במכשיר בתנועה ;

ד. מודל אופטימאלי התקבל עבור ספקטרום נגזרת ראשונה של קרינה מועברת $dT/d\lambda$ למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4% ועד 10% במכשיר בתנועה ;

7.2. מסקנות משיטת Cluster Analysis

7.2.1. מסקנות מהמכשיר הנייח

א. דיוק המיון הגבוה ביותר נתקבל עבור התפוחים בעלי שיעור ריקבון יותר מ 10% ;
ב. המיון המדויק ביותר נתקבל עבור ספקטרום נגזרת ראשונה של קרינה מועברת $dT/d\lambda$.

7.2.2. מסקנות מהמכשיר בתנועה

א. למדגם עם כלל התפוחים, דיוק המיון התקבל גבוה ביותר לתפוחים לא נגועים עבור ספקטרום נגזרת ראשונה של קרינה מועברת $dT/d\lambda$ ולתפוחים בעלי שיעור ריקבון יותר מ 20% עבור ספקטרום $\log(1/T)$;
ב. דיוק המיון התקבל גבוה ביותר עבור קבוצת התפוחים לא נגועים לספקטרום קרינה מועברת נגזרת ראשונה שלו $dT/d\lambda$ ועבור קבוצת התפוחים בעלי שיעור ריקבון יותר מ 20% לספקטרום $\log(1/T)$ ולנגזרת שנייה שלו $d^2(\log(1/T))$ (קבוצת התפוחים בניתוח זה לא כללה את התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4%) ;
ג. דיוק המיון התקבל גבוה ביותר לתפוחים לא נגועים עבור כל סוגי ספקטרום, ולתפוחים בעלי שיעור ריקבון מ 10% עד 20% דיוק המיון גבוה ביותר כל סוגי ספקטרום חוץ מספקטרום $d^2(\log(1/T))$, ולתפוחים בעלי שיעור ריקבון יותר מ 20% עבור ספקטרום $\log(1/T)$ ולנגזרת שנייה שלו $d^2(\log(1/T))$ (קבוצת התפוחים בניתוח זה לא כללה את התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10%) ;
ד. דיוק המיון הכולל לא גודל בהרבה עם נסיר מן המדגם את התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4% ועולה בצורה מובהקת עם נסיר מן המדגם את התפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10% ;

7.2.3. מסקנות מ 2 המכשירים שנבחנו במחקר

תוצאות המכשיר בתנועה טובות יותר מאלו של המכשיר הנייח עקב שיפורים טכניים כגון :
ספקטרומטר מותאם יותר, תאורה ואיטום תא מדידה שפותחו במהלך המחקר.

7.3. מסקנות משיטת Two Way ANOVA

- א. זיהוי תפוחים הנגועים ב- *Alternaria* בשיעור ריקבון נמוך מ 10% על פי מרכז הכובד
ספקטרום T- או לפי אורכי גל מוגדרים של ספקטרום T- וספקטרום d(T)- אינו מובהק ;
- ב. נמצא זיהוי מובהק (רמת מובהקות 95%) בחיזוי תפוחים הנגועים ב- *Alternaria* בשיעור
ריקבון גבוה מ 10% על פי מרכז הכובד ספקטרום T- או לפי אורכי גל מוגדרים של ספקטרום T
וספקטרום - dT/dλ ;
- ג. זיהוי תפוחים הנגועים לפי אורכי גל מוגדרים או על פי מרכז הכובד ספקטרום - log(1/T) לא
נמצא מובהק (רמת מובהקות 95%).

7.4. סיכום

מהמחקר הנוכחי ניתן להסיק שקיימת קורלציה ליניארית בין תוצאות שיעור הריקבון הנמדד בצורה הרסנית לתוצאות שיעור הריקבון החזויות לספקטרום קרינה מועברת מקורית T. עבור נגזרת ראשונה של הספקטרום dT/dλ ולוגריתם הערך ההופכי שלה log(1/T) נתקבלו תוצאות עבור מכשיר בתנועה עם מקדם מתאם בתחום 80% ל-83%, כאשר כמות תפוחים בעלי שיעור הריקבון יותר מ 10% הינה לפחות 30% מכל המדגם. לספקטרום d²(log(1/T)), נמצאה קורלציה ליניארית יותר נמוכה ומקדם המתאם התקבל 66% עבור אותו מדגם. ערך מקדם המתאם נמוך לספקטרום d²(log(1/T)) קשור במספר הפקטורים במודל סטטיסטי. מקדם המתאם עולה בצורה מובהקת עם הסרת תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10% מהמדגם. לספקטרום T, d(T)- ו log(1/T) נתקבל, אחרי הסרת התפוחים, מקדם מתאם בתחום בין 83% ל 90% ולספקטרום d²(log(1/T)) מתקבל מתאם של 80%. לספקטרום log(1/T) מקדם המתאם

כמעט לא משתנה אך מספר הפקטורים במודל הסטטיסטי הופחת מ 10 ל- 6, כלומר באופן מובהק ניכר שיפור בתוצאות מודל החיזוי.

מתוצאות ניסוי המקדים שהווה מוטיבציה למחקר הנוכחי ומהמחקר עצמו, הוסק שככל שמספר התפוחים בעלי שיעור הריקבון יותר מ 10% גדול יותר, כך מתקבלת קורלציה גבוהה יותר לספקטרום שהתקבל **במכשיר הנייח**. עם הסרת תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10% מן המדגם, מקדם המתאם מגיע ל- 87% עבור ספקטרום T. עבור תצוגות מתמטיות אחרות מתקבל מתאם בתחום גבוה של 90% ל-92%.

תוצאות ניתוח בכלי Cluster Analysis שהתקבלו **למכשיר בתנועה** הדגימו שדיוק המיון הכולל נמצא בין 70% ל 77% לספקטרום T, $dT/d\lambda$ ו- $\log(1/T)$. דיוק המיון גודל עם הסרת תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10% מן המדגם ומגיע לערכים בין 88% ל-94%. דיוק המיון לספקטרום $d^2(\log(1/T))$ נתקבל 58%, כלומר, נמוך יותר מהקודמים. ניתן להסביר התוצאה זו בקשר של מספר הפקטורים במודל הסטטיסטי PLS. עם הסרת תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10% מן המדגם, דיוק המיון לספקטרום $d^2(\log(1/T))$ עולה עד 75% בצורה מובהקת. תוצאות Cluster Analysis שהתקבלו **למכשיר נייח** הדגימו שדיוק המיון הכולל נמצא בין 54% ל 56% לספקטרום T ול-3 התצוגות המתמטיות שלו עבור מדגם שבו יחס תפוחים הינו בעלי שיעור ריקבון **יותר מ 10%** במדגם שבו יש פחות מ 30% תפוחים נגועים. דיוק המיון הגבוה ביותר באופן מובהק הינו לקבוצת תפוחים בעלי שיעור ריקבון **יותר מ 10%** לספקטרום T, $dT/d\lambda$ ו- $\log(1/T)$. ערכי דיוק המיון במקרה הינם בתחום 81% ל-88%.

יש אפשרות לזהות את תפוחים בעלי שיעור הריקבון **יותר מ 10%** לפי שיאי ספקטרום קרינה מועברת T- ונגזרת ראשונה שלה $dT/d\lambda$ וכן לפי מרכז כובד ספקטרום T למכשיר הנייח ולמכשיר בתנועה במהירות 11 של תפוחים/דקה (במחקר זה בוצעה הבדיקה במהירות אחת) עם רמת ביטחון 95%. אולם נמצא כי אין אפשרות לזהות את התפוחים לפי שיאי הספקטרום ומרכז כובד של ספקטרום $\log(1/T)$ למרות לפי תיאורית ספקטרוסקופיה תצורה זו מאפיינת את הרכב הכימי של החומרים האורגניים.

ספקטרומטר USB2000 ששמש **בניסוי בתנועה** נמצא רגיש יותר מאשר ספקטרומטר S2000 שהווה את בסיס המיכשור **בניסוי הנייח**. כך ניתן להסביר את הסיבות שהקורלציה ודיוק המיון של התפוחים נמצאו גבוהים יותר עבור **המכשיר בתנועה**. שיכלול רגישות, הגברת עצמת האותות

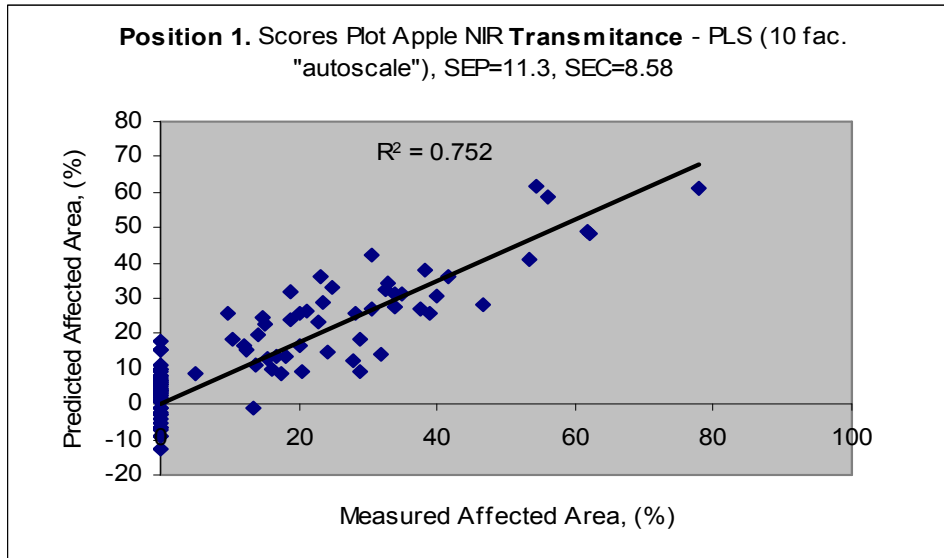
ופרמטרים אחרים של איכות הספקטרומטר וחקירת אמדים נוספים של הספקטרום המושפעים משיעור ריקבון הנגרם מ-*Alternaria* יכולים להוות נושאים למחקרי המשך במטרה להגדלת מקדם המתאם ודיוק המיון, במיוחד כאשר שיעור הריקבון הינו פחות מ 10%.

7.5. המלצות להמשך

1. להמשיך לחקור אמדים נוספים של הספקטרום המושפעים משיעור הריקבון הנגרם מ-*Alternaria* כאשר שיעור הנגיעות הינו פחות מ 10% ;
2. להמשיך לשכלל רגישות, עצמת אותות ופרמטרים אחרים של איכות ספקטרומטר בכדי להגדיל את דיוק המיון ואת מקדם המתאם ;
3. להמשיך לחקור אפשרות זיהוי תפוחים כאשר שיעור הנגיעות הינו פחות מ 10% ;
4. לשפר פרמטרים של מכשיר בתנועה כדי למיין במהירות גבוהה יותר ;
5. לחקור פירות אחרים הנגועים ב-*Alternaria* בטכניקות דומות.

8. נספחים

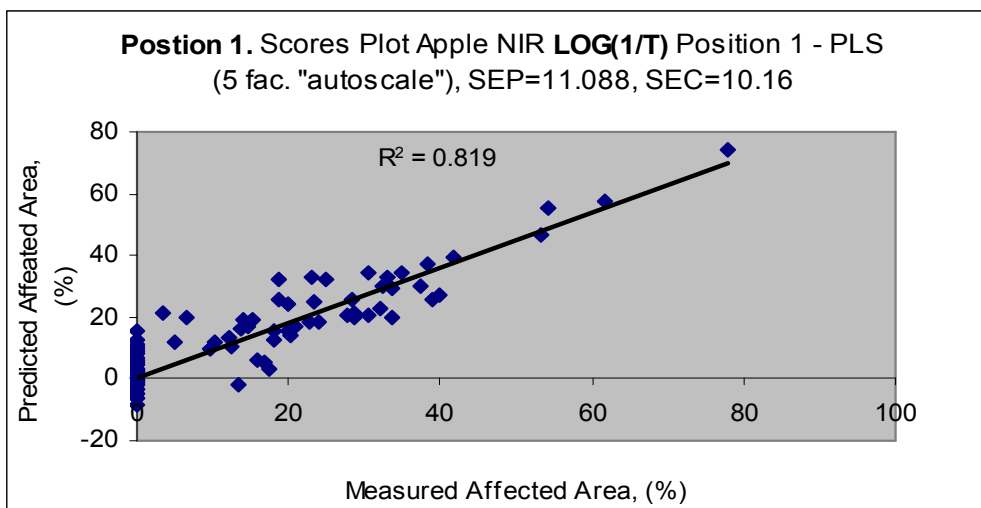
8.1. תוצאות השייכות לניסויים מקדמיים



ציור 45. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על קרינת העברה T לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית בניסוי המקדים.

Figure 45. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance radiation T in preliminary experiment

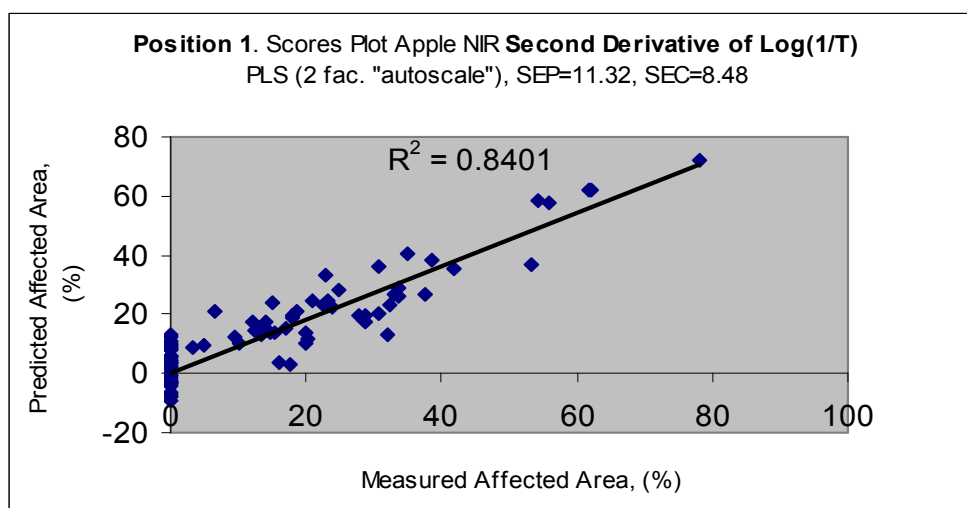
(Source: Erkinbaev et. al, 2004) .



ציור 46. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על $\log(1/T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית בניסוי המקדים.

Figure 46. Correlation between measured and predicted results that are based $\log(1/T)$ in preliminary experiment

(Source: Erkinbaev et. al, 2004) .



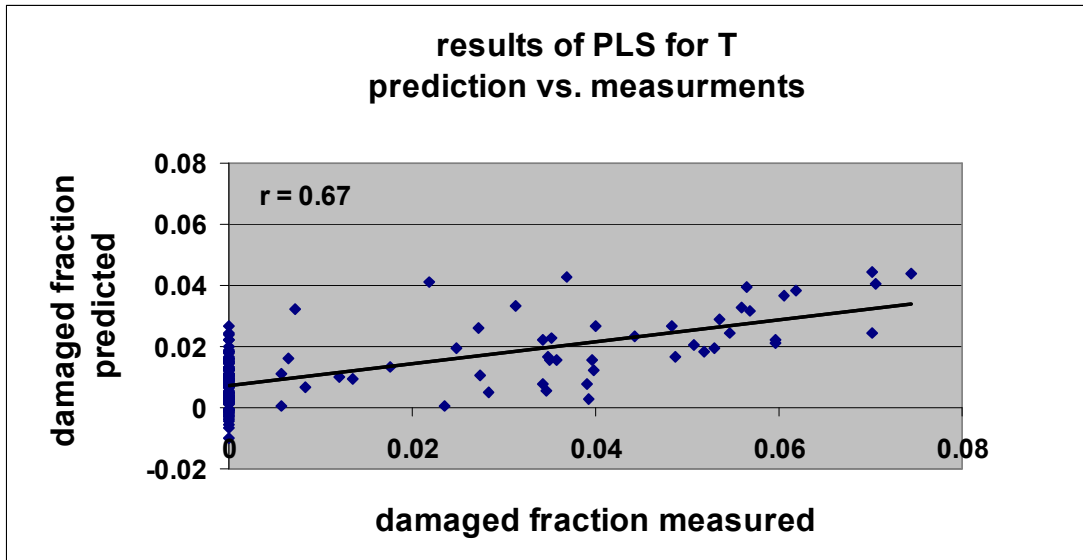
ציור 47. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של $\log(1/T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית בניסוי המקדים.

Figure 47. Correlation between measured and predicted results that are based on second derivative of $\log(1/T)$ in preliminary experiment

(Source: Erkinbaev et. al, 2004) .

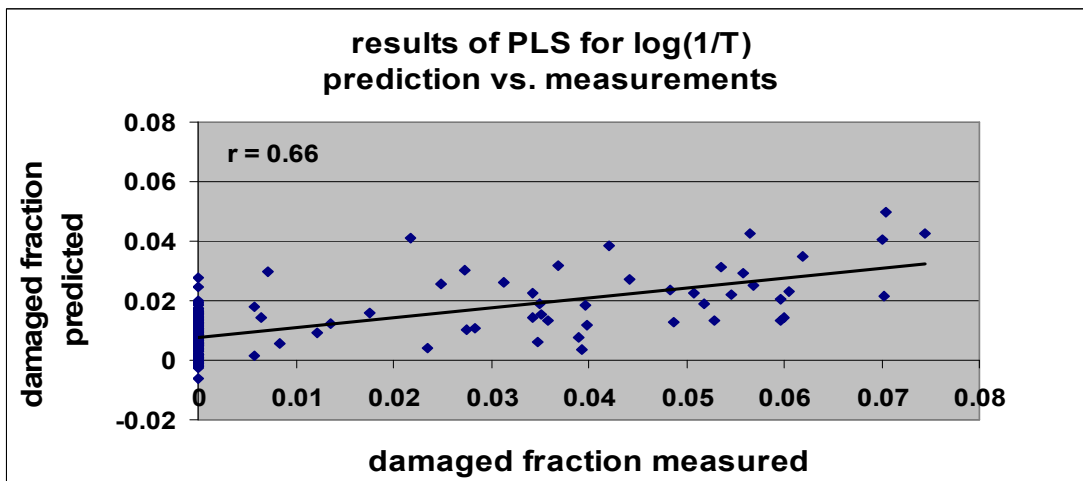
8.2. תוצאות השייכות לניסויים במערכת ניחת

8.2.1. שיטת PLS



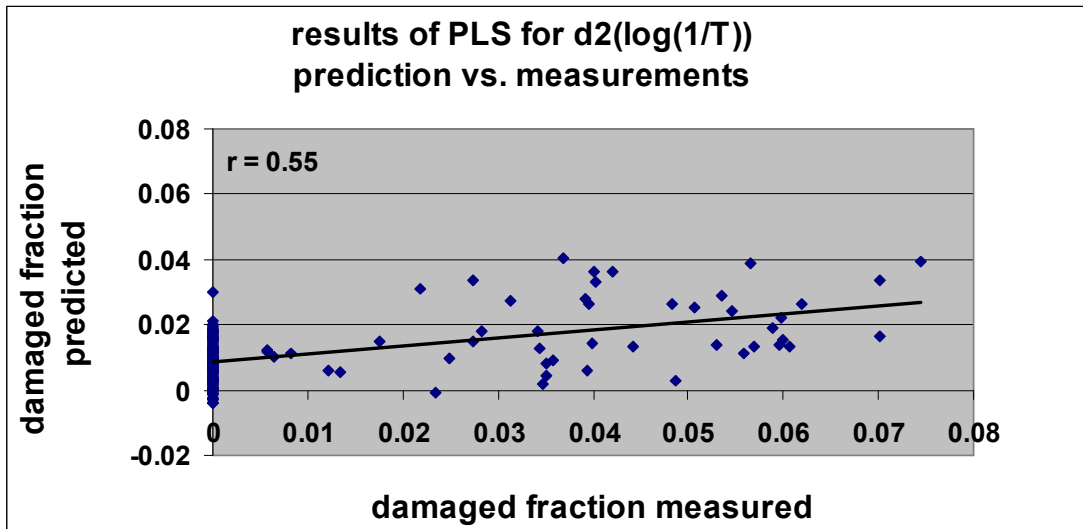
ציור 48. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על קרינת העברה T לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית במחקר נוכחי.

Figure 48. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance radiation T in current experiment.



ציור 49. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על $\log(1/T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית במחקר נוכחי.

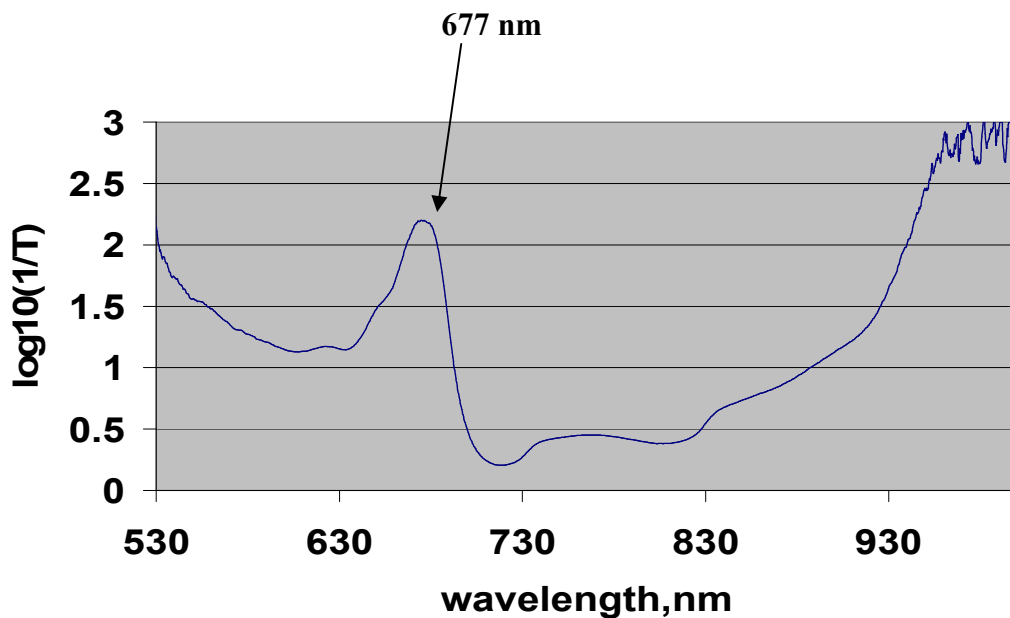
Figure 49. Correlation between measured and predicted results that are based on $\log(1/T)$ in current experiment.



ציור 50. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של $\log(1/T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית במחקר נוכחי.

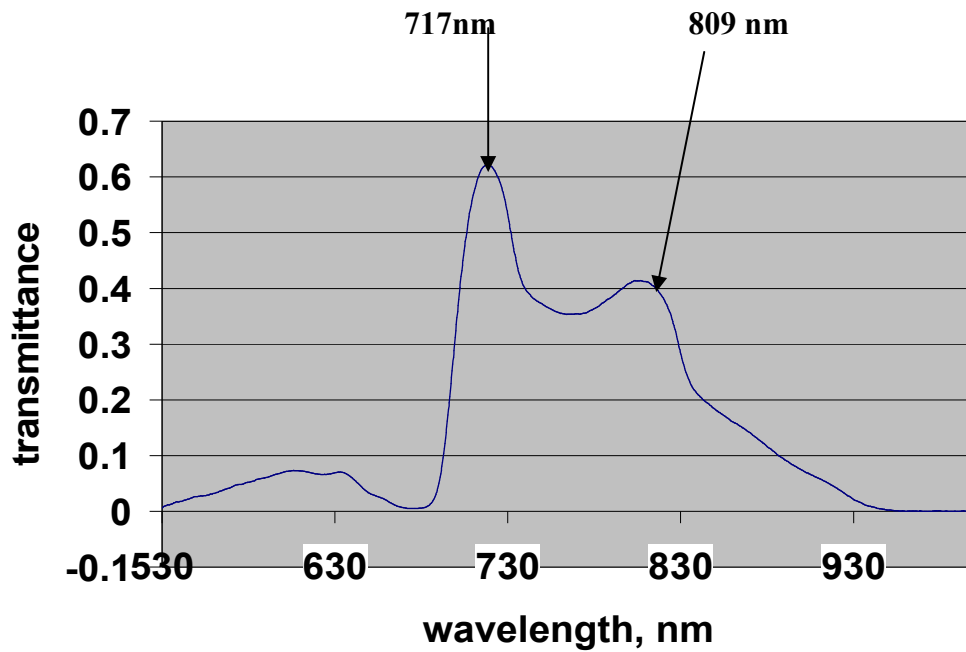
Figure 50. Correlation between measured and predicted results that are based on second derivative of $\log(1/T)$ in current experiment.

8.2.2 שיטת Two Way ANOVA



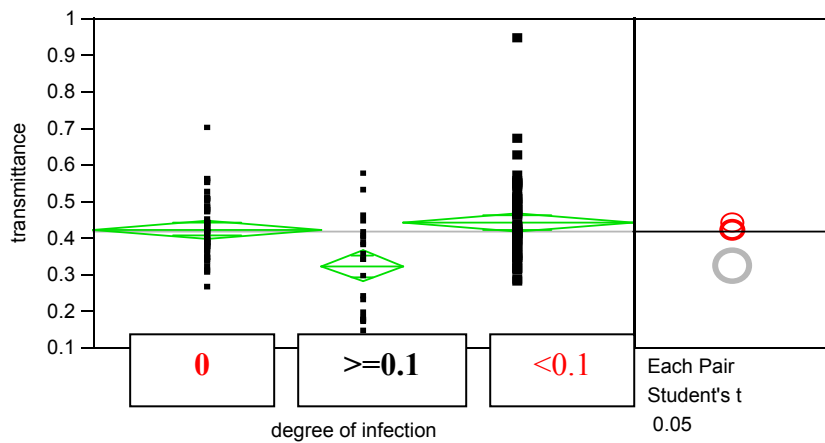
ציור 51. דוגמת ספקטרום $\log(1/T)$ עם שיא אופייני שלו שנתקבל במכשיר ניח.

Figure 51. Typical example of spectrum $\log(1/T)$ obtained by stationary system with its characteristic peaks .



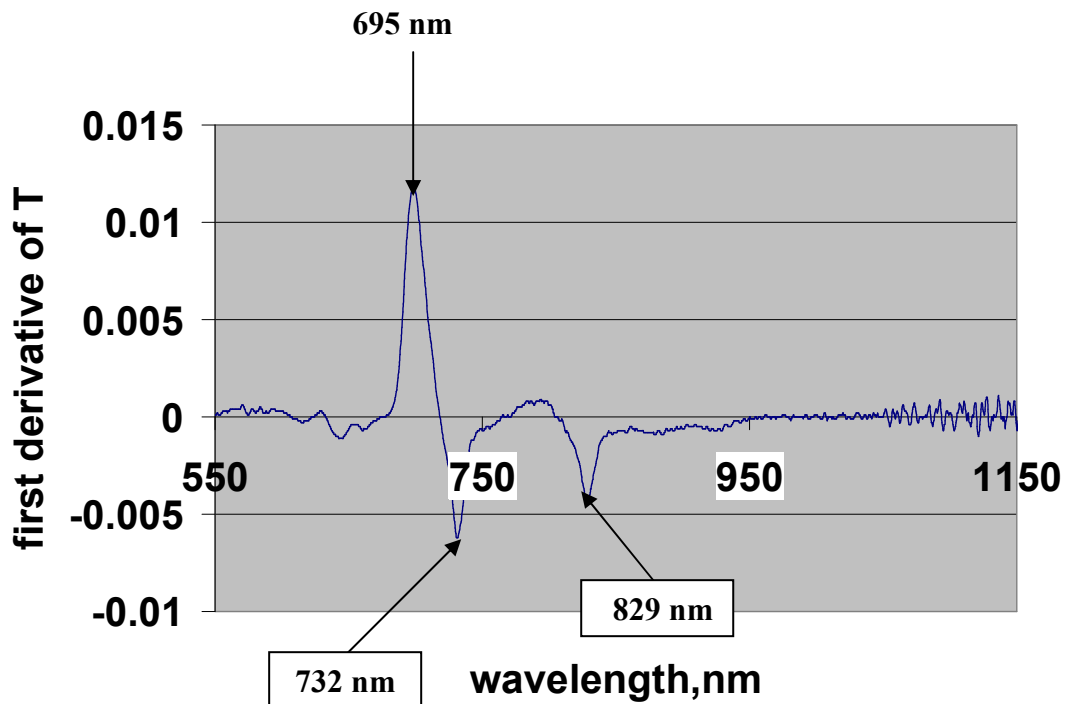
ציור 52. דוגמת ספקטרום קרינה מועברת T עם שיאים אופייניים שלו שנתקבל במכשיר ניח.

Figure 52. Typical example of transmittance radiation T spectrum obtained by stationary system with its characteristic peaks .

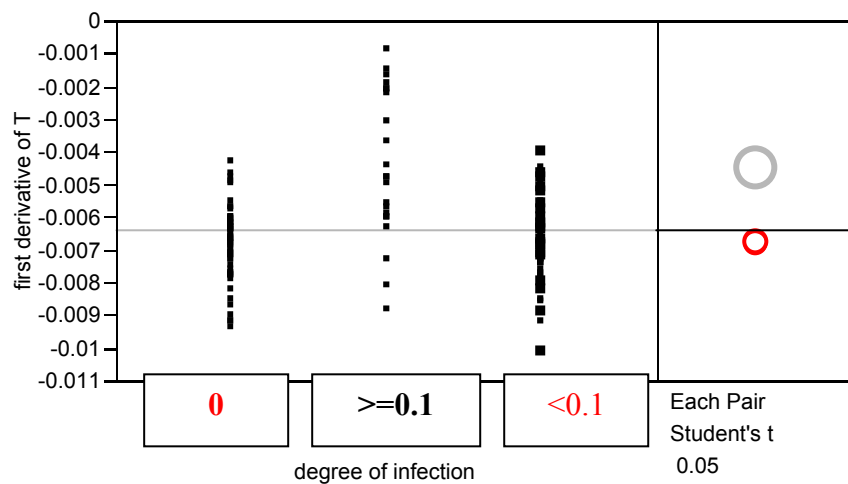


ציור 53. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 809 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך T למכשיר הניח .

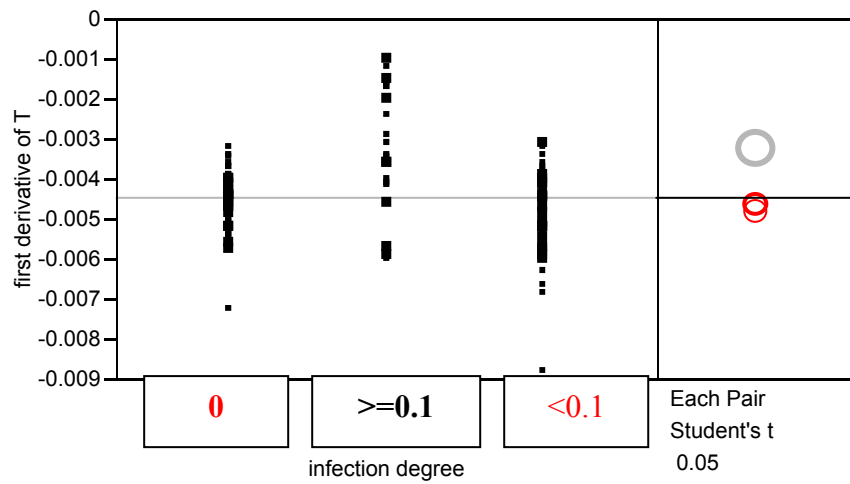
Figure 53. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 809 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on T value for the stationary system.



ציור 54. דוגמת ספקטרום $dT/d\lambda$ עם שיאים אופייניים שלו שנתקבל במכשיר ניח.
 Figure 54. Typical example of $dT/d\lambda$ spectrum obtained by stationary system with its characteristic peaks .



ציור 55. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 732 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $dT/d\lambda$ למכשיר הניח .
 Figure 55. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 732 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on $dT/d\lambda$ value for the stationary system.

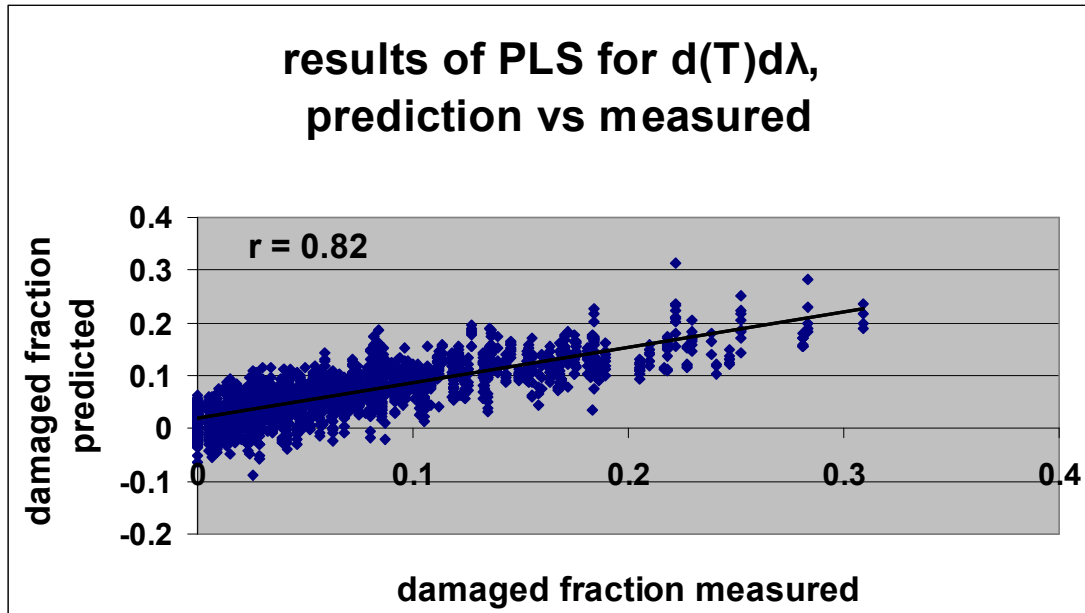


ציור 56. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 829 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $dT/d\lambda$ למכשיר הנייח.

Figure 56. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 829 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on $dT/d\lambda$ value for the stationary system.

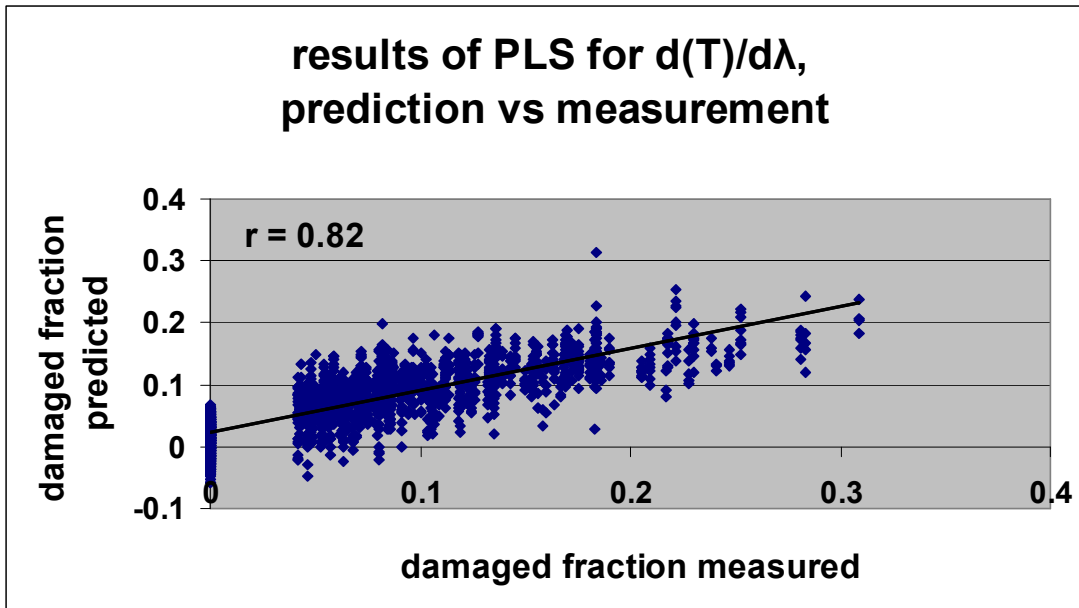
8.3. תוצאות השייכות לניסויים במערכת בתנועה

8.3.1. שיטת PLS



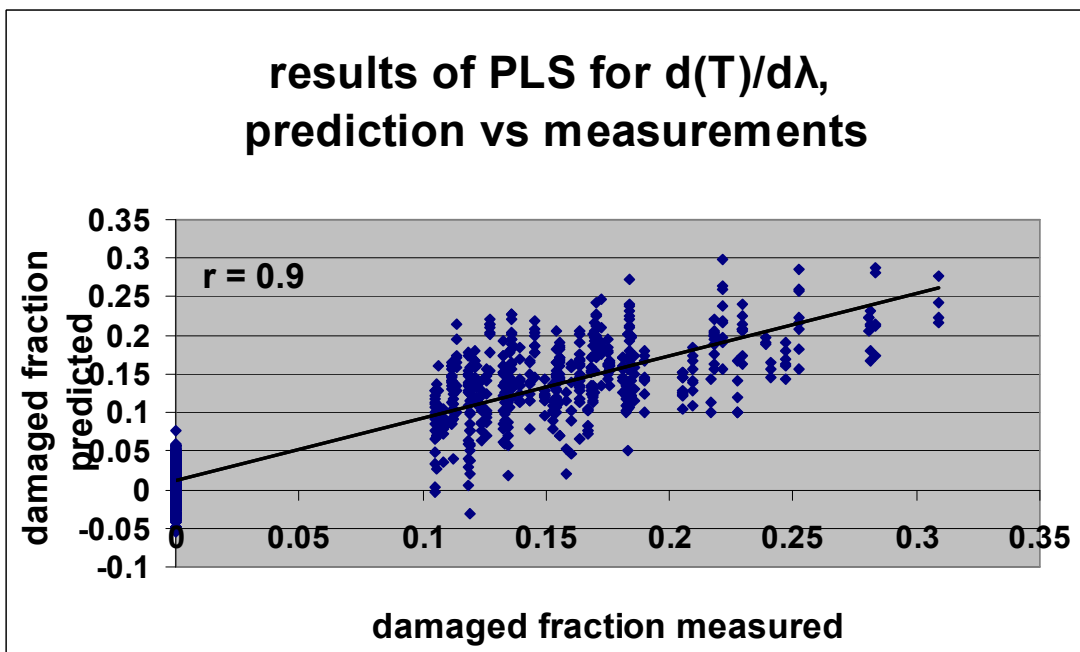
ציור 57. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של קרינת העברה $dT/d\lambda$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם עם כלל קבוצות מיון של התפוחים .

Figure 57. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance derivative radiation $dT/d\lambda$ for sample with all classification groups of apples .



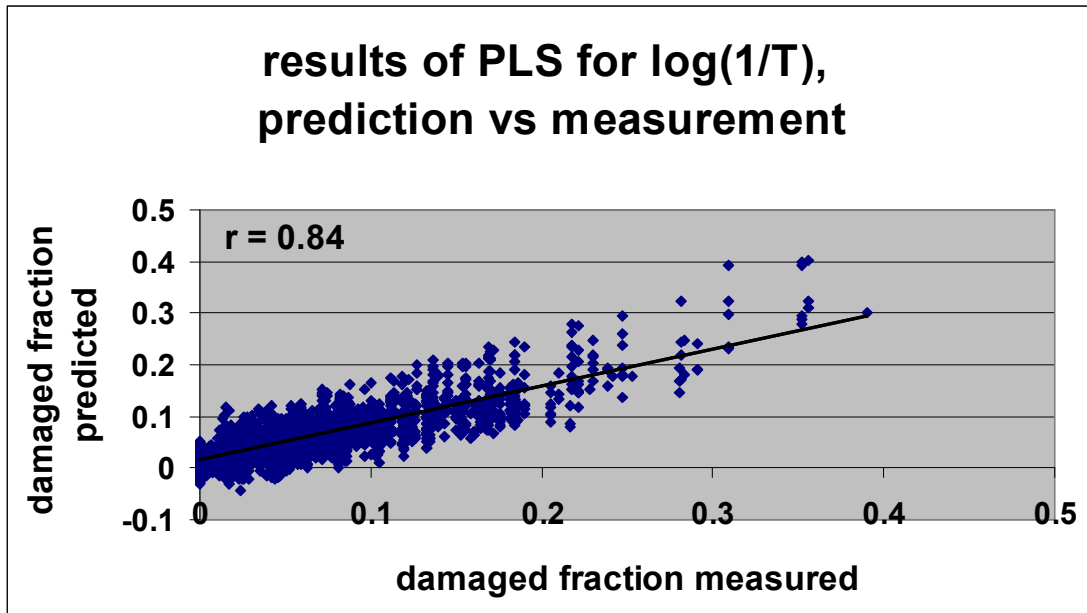
ציור 58. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של קרינת העברה $dT/d\lambda$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4% .

Figure 58. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance derivative radiation $dT/d\lambda$ for without apples that have infection ratio less 4% .



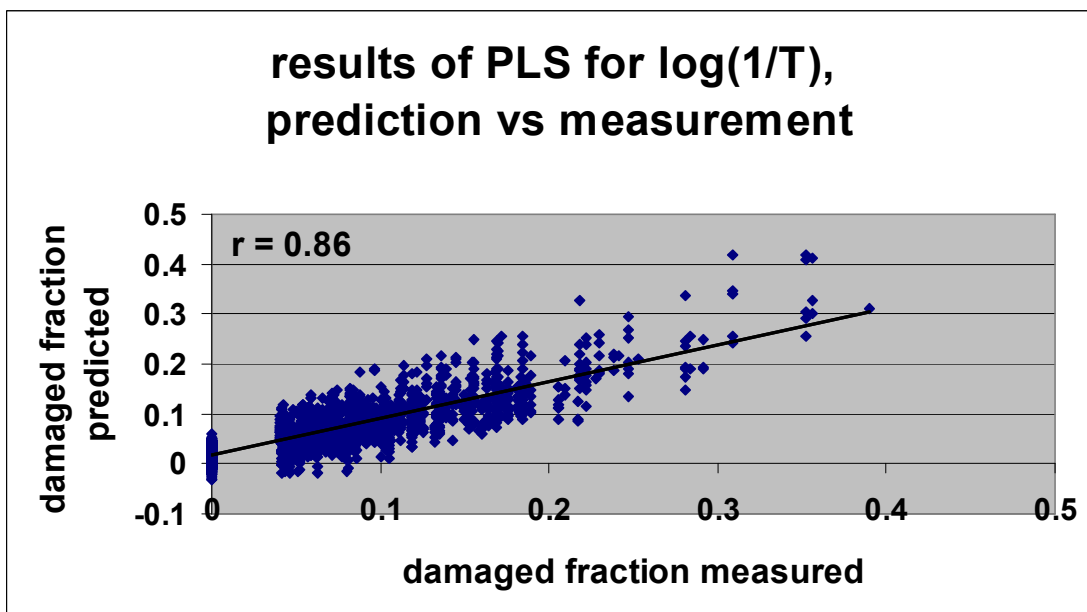
ציור 59. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של קרינת העברה $dT/d\lambda$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10% .

Figure 59. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance derivative radiation $dT/d\lambda$ for without apples that have infection ratio less 10% .



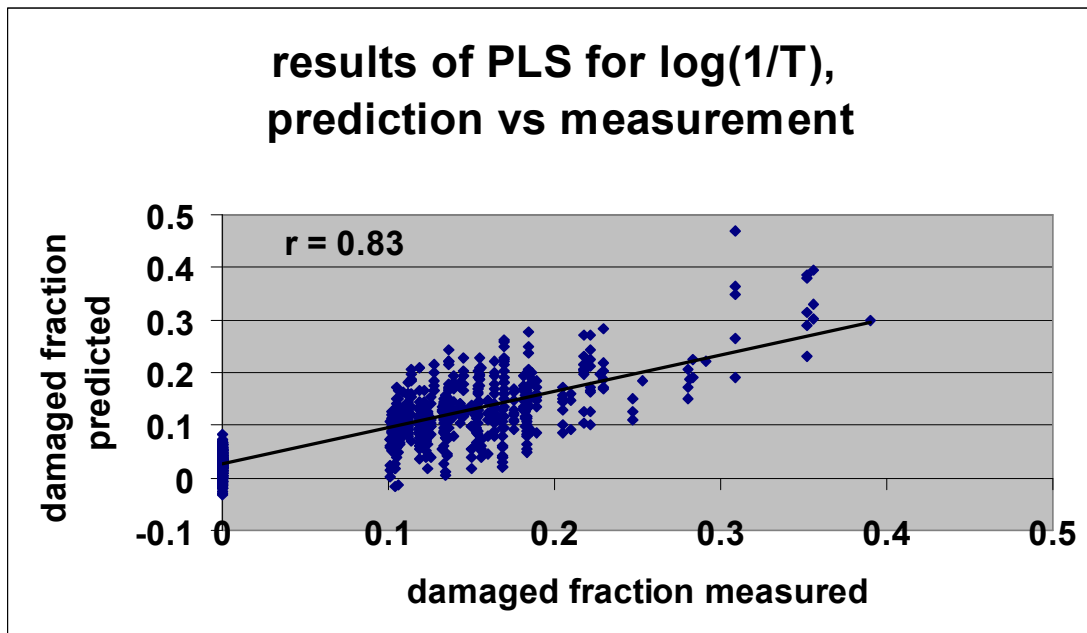
ציור 60. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על $\log(1/T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם עם כלל קבוצות מיון של התפוחים .

Figure 60. Correlation between measured and predicted results that are based on $\log(1/T)$ for sample with all classification groups of apples .



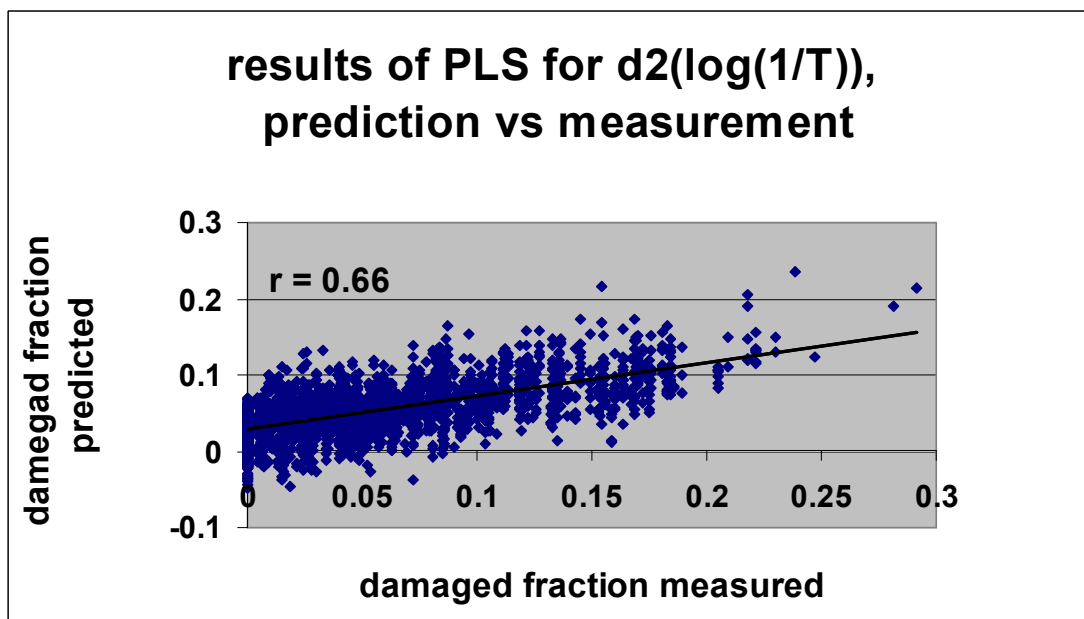
ציור 61. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על $\log(1/T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4% .

Figure 61. Correlation between measured and predicted results that are based on $\log(1/T)$ for without apples that have infection ratio less 4% .



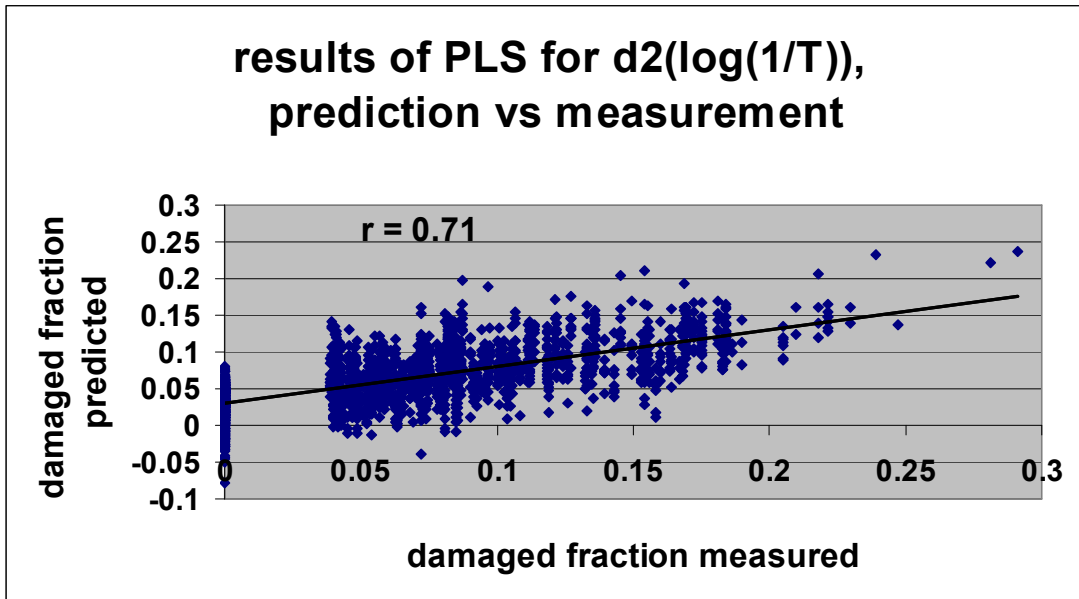
ציור 62. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על $\log(1/T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10%.

Figure 62. Correlation between measured and predicted results that are based on $\log(1/T)$ for without apples that have infection ratio less 10% .



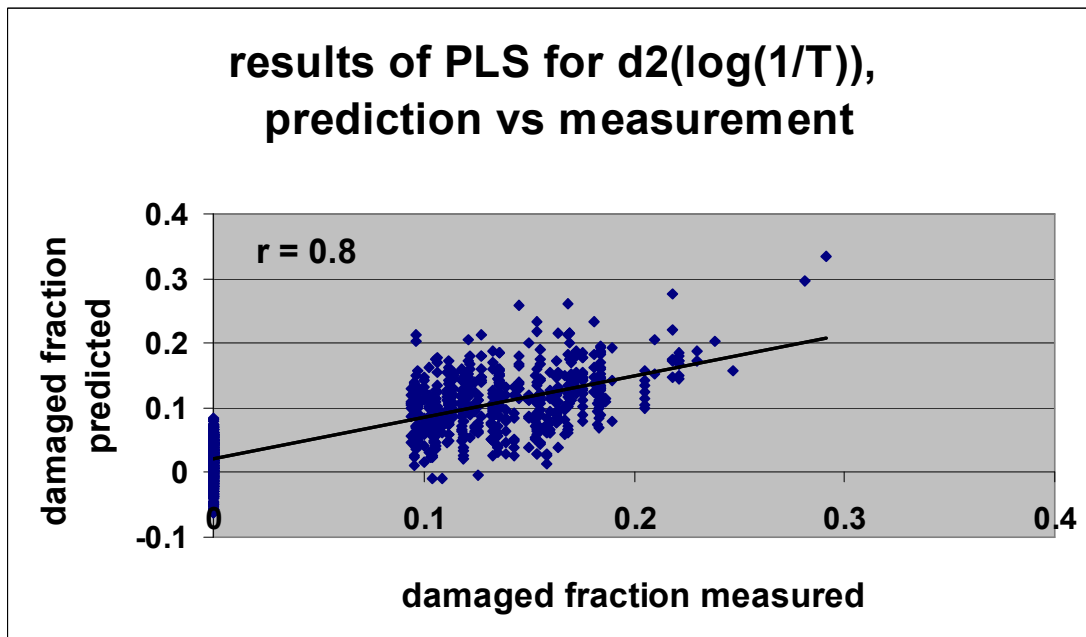
ציור 63. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של $\log(1/T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם עם כלל קבוצות מיון של התפוחים .

Figure 63. Correlation between measured and predicted results that are based on second derivative of $\log(1/T)$ for sample with all classification groups of apples .



ציור 64. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של $\log(1/T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 4%.

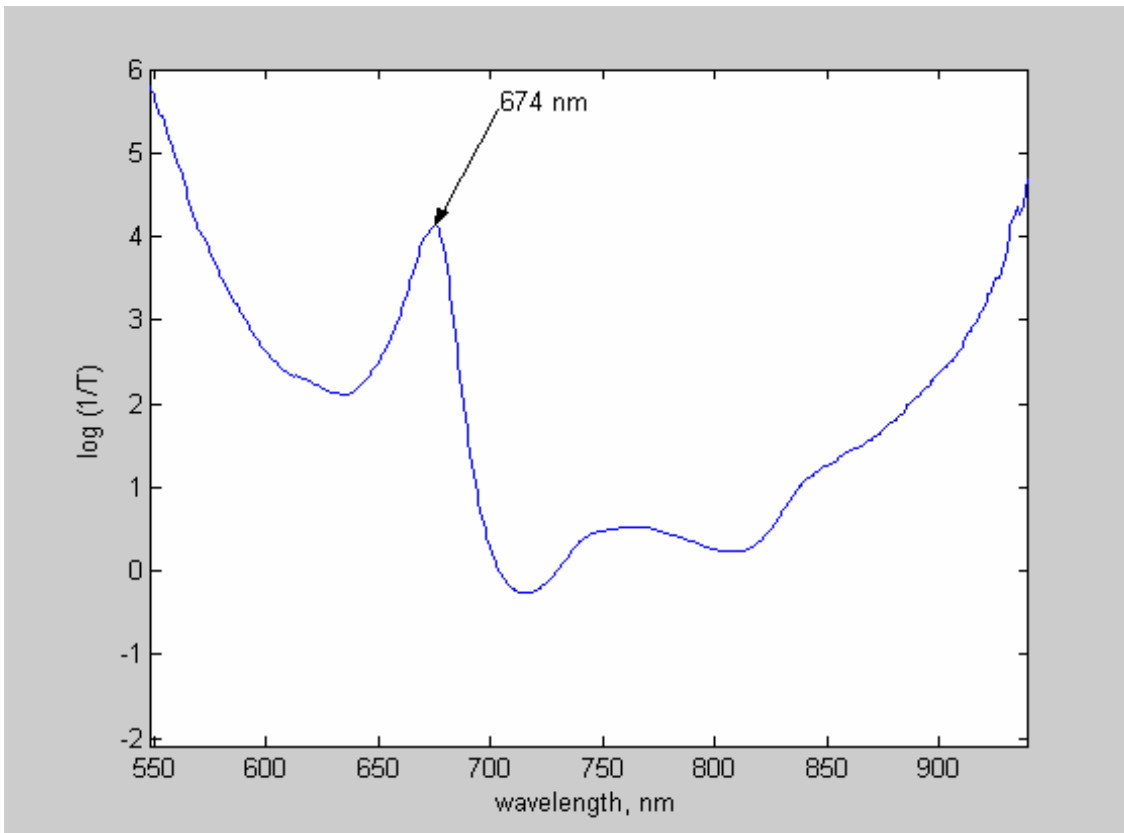
Figure 64. Correlation between measured and predicted results that are based on second derivative of $\log(1/T)$ for without apples that have infection ratio less 4%



ציור 65. מתאם בין תוצאות חיזוי המתבססות על נגזרת שנייה של $\log(1/T)$ לבין תוצאות מדודות בשיטה הרסנית למדגם ללא תפוחים בעלי שיעור ריקבון עד 10%.

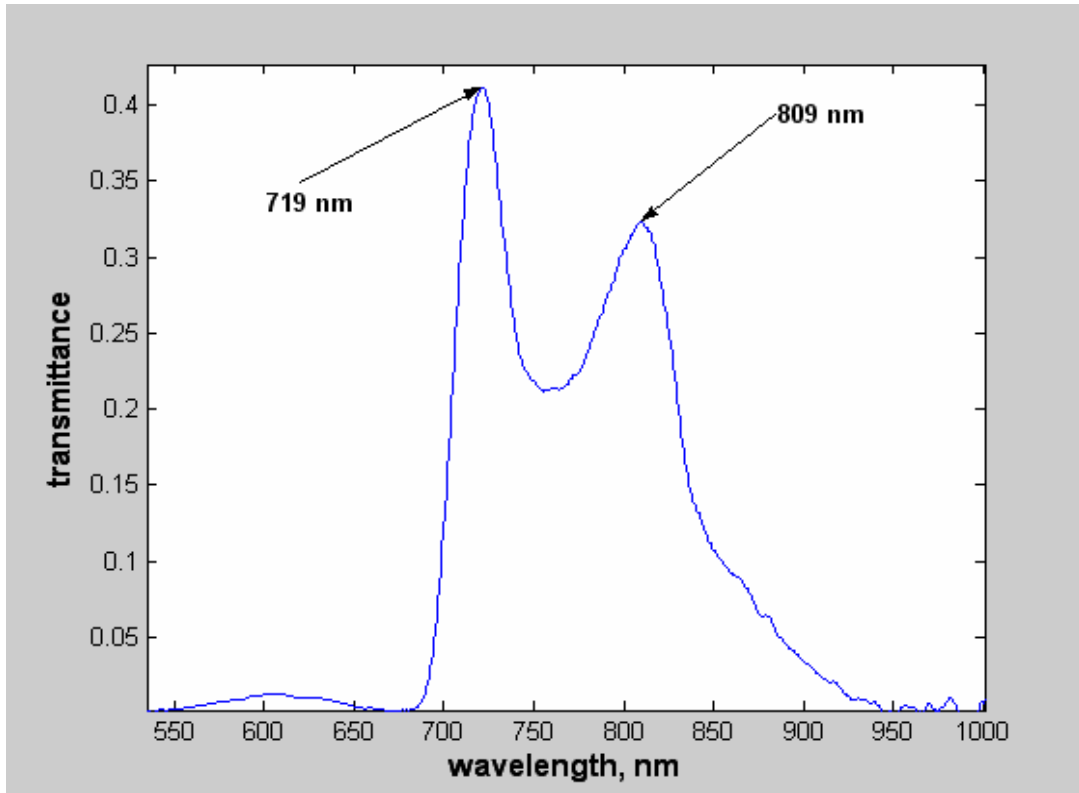
Figure 65. Correlation between measured and predicted results that are based on second derivative of $\log(1/T)$ for without apples that have infection ratio less 10% .

8.3.2. שיטת Two Way ANOVA



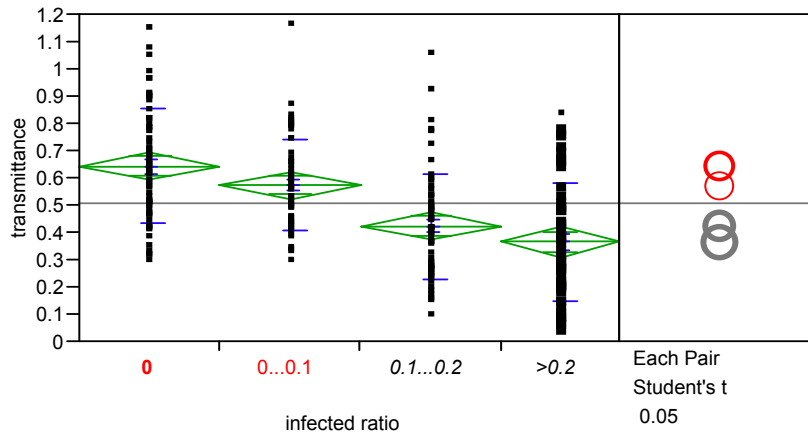
ציור 66. דוגמת ספקטרום $\log(1/T)$ עם שיא אופייני שלו המתקבל במכשיר בתנועה .

Figure 66. Typical example of spectrum $\log(1/T)$ obtained by rotating system with its characteristic peaks .



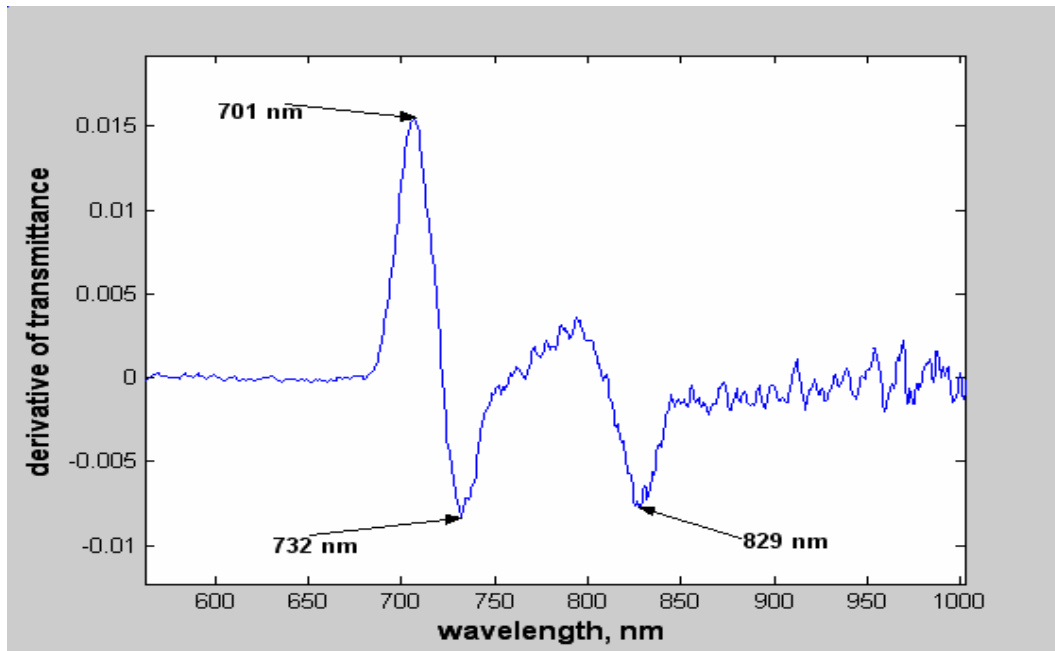
ציור 67. דוגמת ספקטרום קרינה מועברת T עם שיאים אופייני שלו המתקבל במכשיר בתנועה .

Figure 67. Typical example of spectrum transmittance radiation T obtained by rotating system with its characteristic peaks .



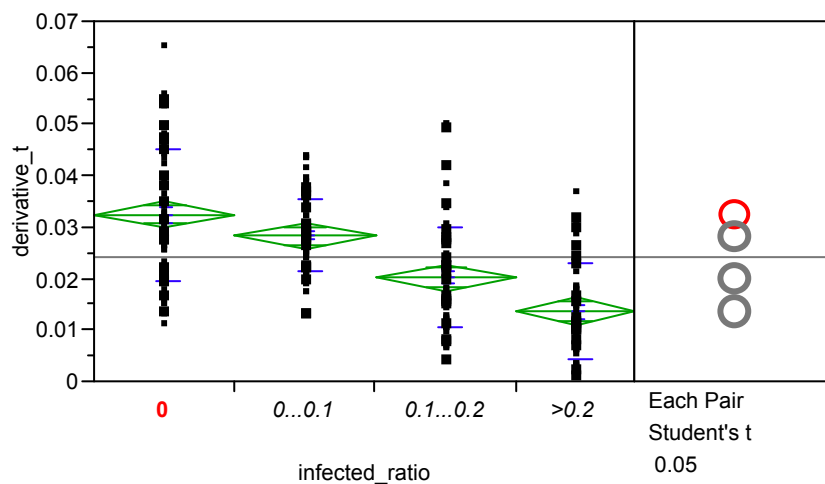
ציור 68. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 809 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך T למכשיר בתנועה .

Figure 68. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 809 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on T value for the rotating system.



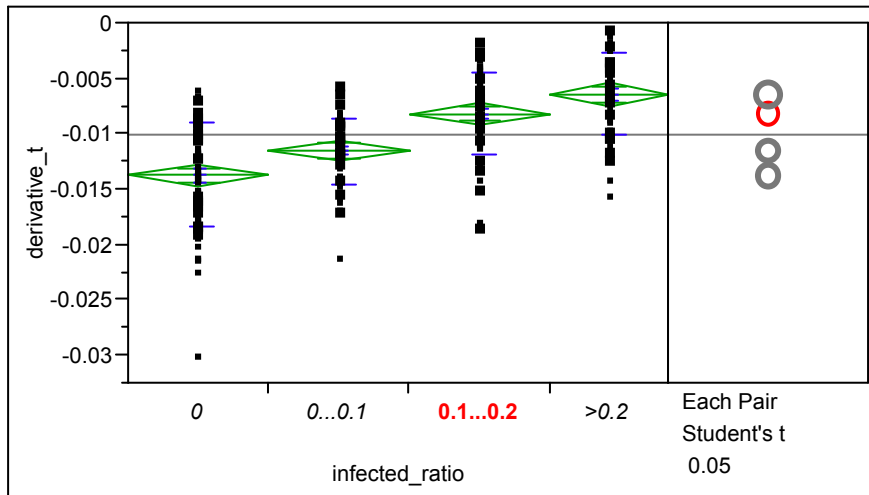
ציור 69. דוגמת ספקטרום נגזרת ראשונה של קרינה מועברת $dT/d\lambda$ עם שיאים אופייני שלו המתקבל במכשיר בתנועה .

Figure 69. Typical example of spectrum of first derivative of transmittance radiation $dT/d\lambda$ obtained by rotating system with his characteristic peaks .



ציור 70. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 701 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $dT/d\lambda$ למכשיר בתנועה .

Figure 70. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 701 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on $dT/d\lambda$ value for the rotating system.



ציור 71. פלט תוצאות ניתוח חד-כיווני בשיא של אורך הגל 829 nm לבחינת השפעת גורם שיעור השטח הנגוע ב *Alternaria* על ערך $dT/d\lambda$ למכשיר בתנועה .

Figure 71. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 829 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on $dT/d\lambda$ value for the rotating system.

8.4. שיטות סטטיסטיות בהם השתמש המחקר הנוכחי

8.4.1 אלגוריתם PLS בתוכנת Matlab

שלבי העבודה הם כדלקמן:

1. יש לשמור את הנתונים בתכנת Excel בתבנית (format) -Text (Tab delimited)

.filename.txt

הערה: ניתן לשמור בקובץ אחד- נתוני ספקטרום ותוצאות בדיקה הרסנית בקבצים

הנפרדים הבאים: filename1.txt filename2.txt .

2. פתח תכנת MATLAB (קליק כפול על האייקון)

3. יש להכניס את הנתונים ל-MATLAB ע"י פקודה Import Data. הפקודה תייצר מטריצות,

לכל מטריצה יש לתת שם נפרד. נסמן את מטריצת הספקטרומים T ומטריצת רכיבים ing

(כגון TA, TSS, firmness).

T=filename1;

ing=filename2;

הערה: כאשר יש בקובץ אחד- ספקטרה ורכיבים.

לדוגמא: שורה ראשונה אינדקס מספרים רץ, ושורה 2 רכיב ושורה שלישית עד שורה n

ספקטרום נרשום:

T=filename (3:n,:);

ing=filename (2,:);

4. פקודות לעיבוד מתמטי של נתוני הספקטרום נמצאות בטבלה 20.

טבלה 20. פקודות לעיבוד מתמטי של נתוני הספקטרום באמצעות PLS

Table 20. Commands for mathematical processing of spectral data by means of PLS

$Td1=savgol(T,5,1,1);$	נגזרת ראשונה - (חלון חישוב 5 נקודות, פולינום 1, נגזרת ראשונה)
$Tlog=log(1./T+(min(min(T))));$	לוגריתם – פונקציית min מבטלת מספרים שליליים (נובעים מרעש ותיקון יתר לחושך)
$Td2=savgol(Tlog,5,3,2);$	נגזרת שנייה של לוגריתם – (חלון חישוב 5 נקודות, פולינום 3, נגזרת שנייה)

5. להפעלת PLS כותבים את הפקודה: modlgui. בפקודה זו נפתחים שני חלונות:

Linear Regression ו- Regression Parameters (ציורים 72 ו 73).

6. בחלון Linear Regression בוחרים MOLD_File ואח"כ בחלון זה- Load Data.

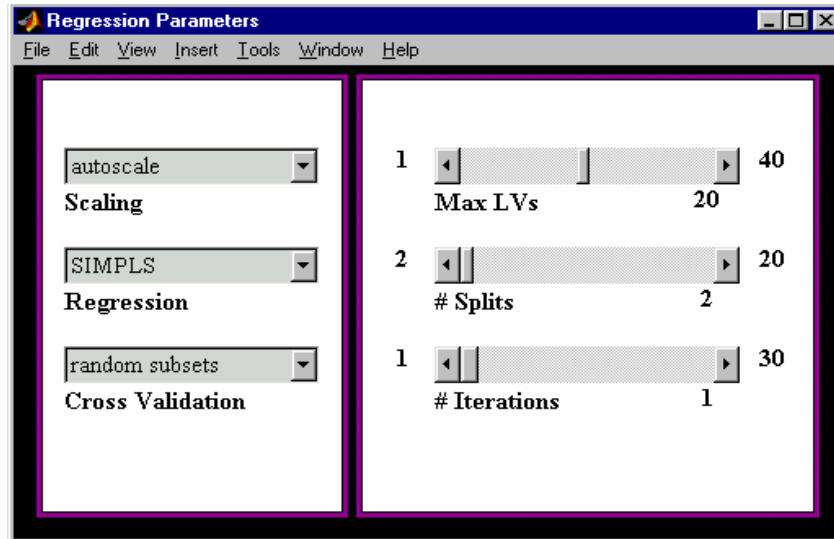
מעלים קודם את T אחר כך את ing.

7. בחלון Regression Parameters

7.1. ב- Cross Validation בוחרים אחת האפשרויות לדוגמא: leave one out. (אפשר גם

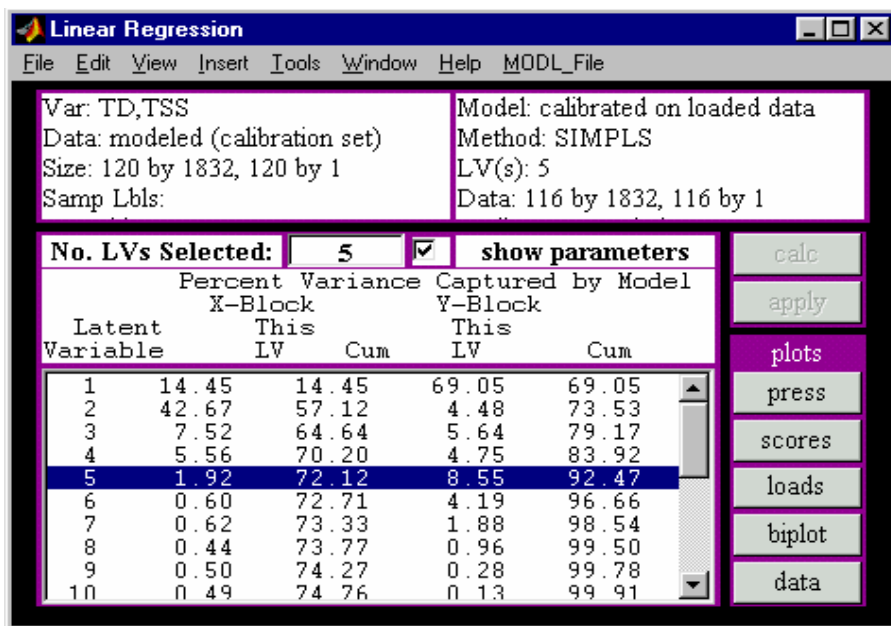
אחרות ראה ציור)

7.2. ב- Max LVs לוקחים 10% מגודל (מספר הדוגמאות)-T.



ציור 72. חלון לבחירת אפשרות חלוקת המדגם לתת-מדגם לכיול ולתת-מדגם לאימות.

Figure 72. Window for possibility selection of sample division into calibration and validation subsets.



ציור 73. חלון לטעינת והרצת נתונים.

Figure 73. Window for loading and running of data.

8. לוחצים calc, זו פקודת חישוב מודל. המחשב מוצא נקודה מספר פקטורים במודל סטטיסטי

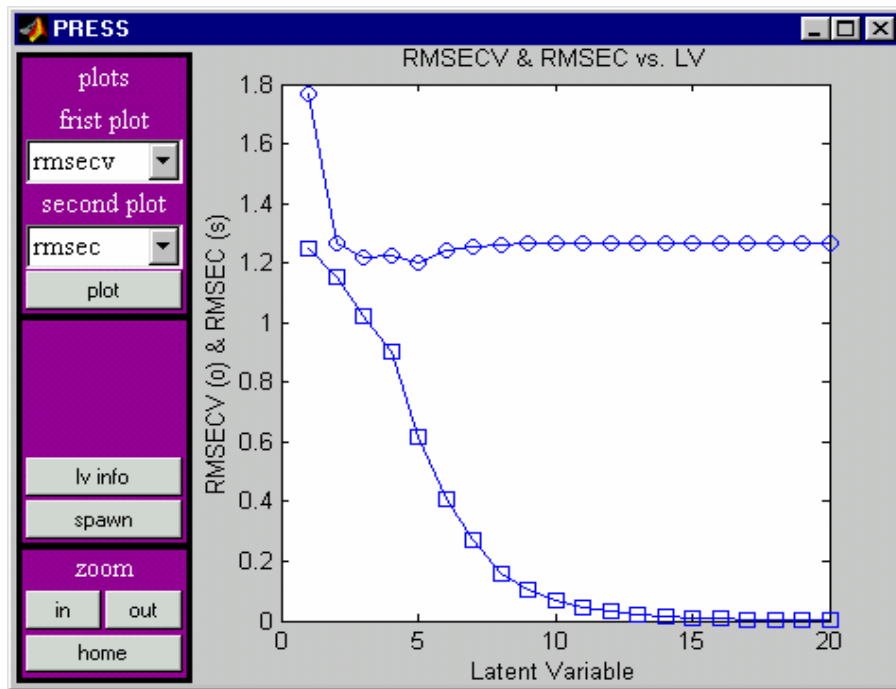
ומסמן אותו בטבלה בכחול (ציור 73).

כדי לבדוק האם מתאים לקחת את נקודה המומלצת קודם מסתכלים על העמודה האחרונה,

אשר מראה אחוזים של אוכלוסיית המדגם המתוארת על ידי המודל, במקרה אידיאלי

מקבלים בין 85% ל-95% (ציור 73).

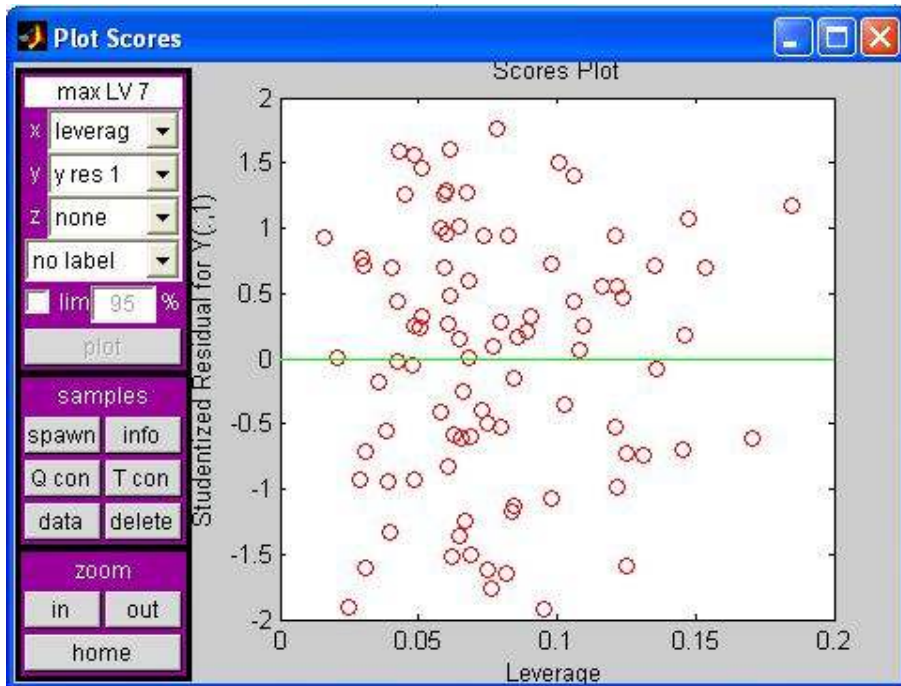
המדד השני הוא גרפי. לקבלתו לוחצים press (ציור 73). לפי הגרף (ציור 74) המתקבל אפשר לבחור את מספר הפקטורים יותר מתאים. הקו העליון עם הנקודות מראה שגיאת SEP המתאימה למספר הפקטורים המסוים. הקו התחתון עם הנקודות מראה שגיאת SEC המתאימה למספר הפקטורים המסוים.



ציור 74. חלון לבחירת מספר הפקטורים האופטימאלי.

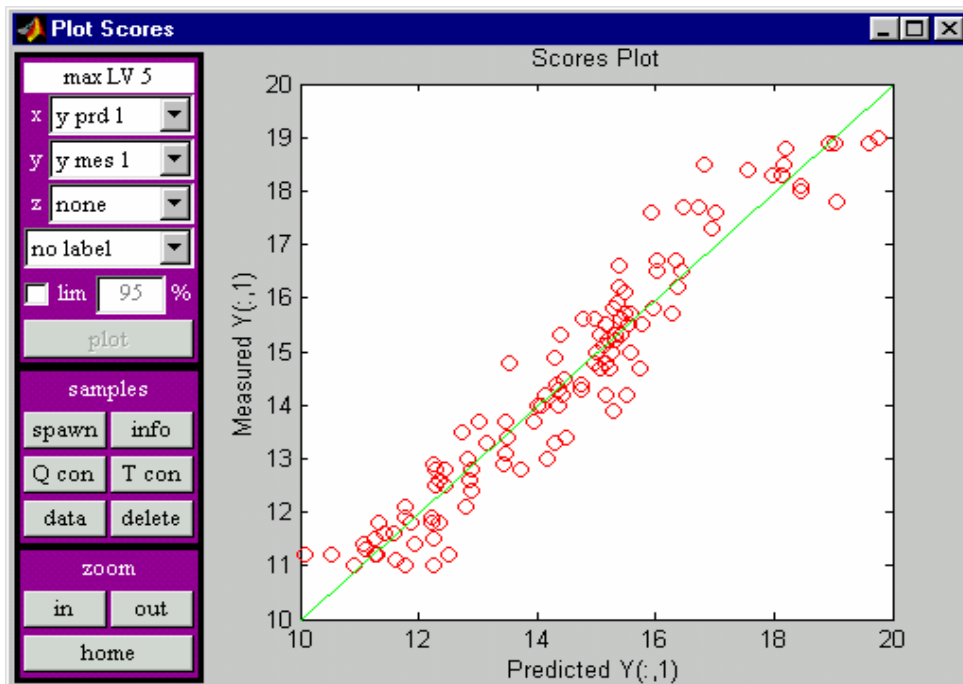
Figure 74. Window for selection of factors number.

9. לוחצים scores (ציור 73), בחלון הנפתח (Plot Scores) בוחרים עבור X במקום LV1 את leverage ועבור Y במקום LV2 בוחרים y res 1 ולוחצים plot מקבלים פיזור, אשר אמור להיות בגבולות מ-2 עד 2- ומאפס עד 0.2.
10. כאשר ישנן נקודות אשר חורגות מן הגבולות, מגדירים אותם כיוצאים מן הכלל ומוחקים. **הערה:** לא למחוק יותר מ-1% מה-T!
8. על הפעולה חוזרים עד לקבלה גבולות הנדרשות או עד שמוחקים 1% מה-T.
11. לוחצים scores, בחלון הנפתח (Plot Scores) בוחרים במקום LV 1 y mes 1 ובמקום LV 2 בוחרים y prd 1 ולוחצים plot מקבלים גרף התאמה בין בדיקה ספקטראלית והרסנית (ציור 76).



ציור 75. חלון של פיזור הנקודות השייכות לדגימות המסוימות.

Figure 75. Window of points distribution related to certain samples.



ציור 76. חלון של מתאם בין התוצאות החזויות לתוצאות הנמדדות.

Figure 76. Window of correlation between prediction and measured results.

12. לוחצים spawn ומקלים גרף שאפשר להכניס בו כותרות, לשמור כגרף ב-MATLAB או ע"י

בחירת Export בתפריט File לשמור כתמונה.

13. חוזרים לחלון Linear Regression וב-MOLD_File בוחרים Save Model (ציור 73).

14. יוצרים קובץ Excel בתבנית Text מ-MATLAB
בכדי לראות את רשימת הרכיבים שלו באמצעות הפקודות:

```
Y= modelname.ypred  
X=delsamps(ing, modelname.drow)  
p=[X Y];  
wkl write ('filename',p)  
: כדי לקבל את מקדמי הרגרסיה:  
Y= modelname.reg  
wkl write ('filename.wk1',Y)
```

8.4.2 אלגוריתם Cluster Analysis ב-Matlab

שלבי העבודה הם כדלקמן:

- יש לשמור את הנתונים בתכנת Excel בתבנית (format) -Text (Tab delimited) - filename.txt. הערה: ניתן לשמור בקובץ אחד- נתוני ספקטרום ותוצאות בדיקה הרסנית בקבצים הנפרדים הבאים: filename1.txt filename2.txt.
- פתח תכנת MATLAB
- יש להכניס את הנתונים ל-MATLAB ע"י פקודה Import Data. בקובץ אחד מוכנסים נתוני הספקטרום ותוצאות בדיקה הרסנית.
לדוגמא: שורה ראשונה אינדקס מספרים רץ, ושורה 2 רכיב ושורה שלישית עד שורה n ספקטרום נרשום:
$$SpT = filename(3:n,:);$$
$$ing = filename(2,:);$$
- תוכנות אשר חייבות להיות בתיקה על מנת לבצע מיון הינן:

Prepare_data, erro_matr, Run_models

- פקודות לעיבוד מתמטי של נתונים הנמצאים בטבלה 21.

טבלה 21. פקודות לעיבוד מתמטי של נתוני הספקטרום באמצעות Cluster Analysis

Table 21. Commands for mathematical processing of spectral data by means of Cluster Analysis

$SpT\ d1=savgol(SpT,5,1,1);$	נגזרת ראשונה - (חלון חישוב 5 נקודות, פולינום 1, נגזרת ראשונה)
$SpT\ l=log(1./ SpT +(min(min(SpT))));$	לוגריתם – פונקציית min מבטלת מספרים שליליים (נובעים מרעש ותיקון יתר לחושך)
$SpT\ d2=savgol(SpT\ l,5,3,2);$	נגזרת שנייה של לוגריתם – (חלון חישוב 5 נקודות, פולינום 3, נגזרת שנייה)

6. התאמת קוד לקבוצות מיון :

לדוגמא מוצג קוד ל- 4 קבוצות המיון :

$$CodeT=(ing==0)*1+(ing>0\&ing\leq 0.1)*2+(ing>0.1\&ing\leq 0.2)*3+(ing>0.2\&ing\leq 0.3)*4;$$

7. לשמור קובץ בשני צורות :

עם שם → save filename

בלי שם → save

שמירה בלי שם נותנת matlab.mat שהוא הכרחי להרצת תוכנה.

8. פקודה לשמירת תוצאות :

לאחר מכן מריצים תוכנת Prepare_data

פקודת סוף שמירה

diary('filename.txt')

diary off

8.4.3 אלגוריתם Two Way ANOVA בתוכנת JMP

טבלה 22. דוגמת פלט תוצאות ניתוח דו-כיווני באורך הגל המוגדר לבחינת השפעה של 2 הגורמים ולאינטראקציה ביניהם

Table 22. Example of Two Way Anova analysis results output corresponding to defined wavelength for 2 factors and interaction between them

Effect Tests					
Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
position	1	1	0.5187367	1.9300	0.1670
infection ratio	2	2	2.0391823	3.7936	0.0249*
position*infection ratio	2	2	0.1820032	0.3386	0.7134

p_value

טבלה 23. דוגמת פלט תוצאות ניתוח דו-כיווני באורך המוגדר לבחינת השפעה של 2 הגורמים ללא אינטראקציה ביניהם

Table 23. Example of Two Way Anova analysis results output corresponding to defined wavelength for 2 factors without interaction between them

Effect Tests					
Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
position	1	1	0.3578507	1.3441	0.2483
infection ratio	2	2	2.0391823	3.8297	0.0240*

p_value

טבלה 24. פלט תוצאות ניתוח דו-כיווני באורך הגל המוגדר לבחינת השפעת גורם אחד של שוער השטח הנגוע באלטרנריה

Table 24. Two Way Anova analysis results output corresponding to defined wavelength for 1 Alternaria infecting ratio factor

Effect Tests					
Source	Nparm	DF	Sum of Squares	F Ratio	Prob > F
infection ratio	2	2	2.0391823	3.8204	0.0242*

p value

רשימת הספרות

Abbott, J. A., Lee, K.-J., Choi, C.-H. and Choi, K.-H. 2002. Near-Infrared Spectroscopy to Predict Soluble Solids and Firmness in Apples. ASAE/CIGR Annual International Meeting. Chicago, USA. Paper No:023066.

Adamopoulos, K.J. and Goula, A.M. 2003. Application of near-infrared reflectance spectroscopy in the determination of major components in taramosalata. Journal of Food Engineering, Volume 63:199-207.

Amusa, N.A., Ashaye, O.A. and Oladapo, M.O. 2003. Biodeterioration of the African star apple (*Chrysophyllum aalbum*) in storage and the effect on its food value. African Journal of Biotechnology, Volume 2:56-59.

Asimopoylos, G., Savvidis, S. and Asimopoylos, N. 2004. On-line monitoring of dairy products with use of NIR technology, Volume 9:36-40.

Asscher, J. 2003. Design and Analysis of Experiments. Technion. Israel.

Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. 2007.
<http://www.arpsa.gov.au/basics/ion-nonion.htm>.

Boston Museum of Science, project "Measuring Vegetation Health", USA. 2007. <http://mvh.sr.unh.edu/mvhinvestigations/investigations.htm>.

Brown, E.A. and Hendrix, F. F. 1978. Effect of certain fungicides sprayed during apple bloom on fruit set and fruit rot. Plant Disease Reporter, Volume 62: 739-741.

Burns, D. A. and Ciurczak, E.W. 1992. Handbook of Near-Infrared Analysis. Marcel Dekker.Inc. New York. USA.

Cavalueri, R. 1997. Detection of Watercore in Apples. Tree Fruit Postharvest Journal, Volume 8(4): 3-8.

Chang, R. 1971. Basic Principles of Spectroscopy. McGraw-Hill Book Company

Clark, C. J. and Bielecki, R. L. 1997. Application of NMR imaging to detection of watercore in Fuji apple post-harvest. In: Proceedings from the Sensors for Nondestructive Testing International Conference and Tour. Orlando, 18-21 February. pp. 211-220.

Clark, C. J., McGlone, V.A. and Jordan,R.B. 2003. Detection of detection of Brownheart in Braeburn apples by transmission NIR spectroscopy. Postharvest Biology and Technology, Volume28(1):87-96.

Diezema, I.B., Ruiz-Altisent, M. and Orihuel, B. 2003. Acoustic Impulse Response for Detecting Hollow Heart in Seedless Watermelon. Acta Horticulturae ,(ISHS) 599: 249-256.

Doctor Fungus Corporation, Medical Mycology Research Center. 2007. http://www.doctorfungus.org/Thefungi/img/ale2_1.jpg.

Draper, N.R. and Smith, H. 1998. Applied Regression Analysis – 3th edition. John Wiley & Sons, Inc. USA.

Ellis, M.A. and Barrat, J.G. 1983. Colonization of Delicious apple fruits by *Alternaria* spp. and effect of fungicide sprays on moldy-core. Plant Disease, Volume 67: 150-152.

Erkinbaev, Ch., Schmilovitch, Z. and Alchanatis, V. 2004. Non-destructive Evaluation of Internal Quality of Apple Fruits by Near Infrared Spectroscopy. Volcany Institute Internal Report.

Etzion, Y., Linker, R., Cogan, U. and Shmulevich, I. 2004. Determination of Protein Concentration in Raw Milk by Mid-Infrared Fourier Transform and Infrared/Attenuated Total Reflectance Spectroscopy. Journal of Dairy Science, Volume 87(9):2779-2788.

Fallah, P. 2004. Fungi of the month VII: *Alternaria* species. Environmental Reporter. Volume 2, Issue 12. Environmental Microbiology Laboratory EMLab P&K, USA. <http://www.emlab.com/s/samling/env-report-12-2004.html>, last access in 16/07/2007.

Finney, E. E., and Norris, Jr. K. H. 1978. Determination of Moisture in Corn Kernels by Near-Infrared Transmittance Measurements. Transactions of the ASAE:581-584.

Giangiaco, R., Magee, J.B., Birth, G.S. and Dull, G.G. 1981. Predicting concentrations of individual sugars in dry mixtures by near infrared reflectance spectroscopy. J. Food science, Volume 46:531-534

Gunasekaran, S. Nondestructive Food Evaluation. 2001. University of Wisconsin-Madison.

Haff, R.P., Slaughter, D.C., Sarig, Y. and Kader, A. 2006. X-ray Assessment of Translucency in pineapple. *Journal of Food Processing and Preservation*, Volume 30:527-533.

Hornak, J.P. 1999. *The Basics of NMR*. Rochester Institute of Technology, Center of Imaging Science. <http://www.cis.rit.edu/htbooks/nmr/inside.htm>, last access in 11/06/2007.

Jahn, B.R., Linker, R., Upadhyaya, S.K., Shaviv, A., Slaughter, D.C. and Shmulevich, I. 2006. Mid-Infrared Spectroscopic Determination of Soil Nitrate Content. *Biosystems Engineering*, Volume 94(4):505-515.

Kang, J. C., Crous, P.W., Mchau, G.R.A., Serdany, M. and Song, S.M. 2002. Phylogenetic analysis of *Alternaria* spp. associated with apple core rot and citrus black rot in South Africa. *Mycological Research*, Volume 106:1151-1162.

Kang, S., Lee, K., Choi, W., Son, J., Choi, D. and Kim, G. 2003. A near Infrared Sensing Technique for Measuring the Quality of Potatoes. ASAE Annual Meeting. Nevada, USA. Paper No:033137

Kempen, T. van and Qiao, N. 2002. Near and Mid Infrared Reflectance as Tools for Ingredient Real Time Analysis: Implications for Precision Formulation. Maryland Nutrition Conference, pp.80-87.

Kim, S.M., Chen, P, McCarthy, M.J., Zion B. 1999. Fruit Internal Quality Evaluation Using On-Line Nuclear Magnetic Resonance Sensors. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Volume 74(3):293-301.

La Grande, N. and Aveling, T. A. S. 1998. First Report of *Alternaria cassiae* on Cowpea. Plant Disease, Volume 82:1171.

Laemmlen, F. 2001. Alternaria Diseases. University of California. Division of Agriculture and Natural Resources. <http://anrcatalog.ucdavis.edu>, last access in 16/07/2007.

Lai, Y.W., Kemsley, E.K. and Wilson R.H. 1994. Potential of Fourier Transform Infrared Spectroscopy for the Authentication of Vegetable Oils. Journal of Agricultural and Food Chemistry, Volume 42: 1154-1159.

Lammertyn, J., Jancsok, P., Dresselaers, T., Van Hecke, P., Wevers, M., De Baerdemaeker, J., Nicolai, B. 2001. X-ray CT and Magnetic Resonance Imaging to Study the Development of Core Breakdown in 'Conference' Pears. ASAE Annual International Meeting, Sacramento Convention Center. Paper No:016037.

Lillard, S. 2004. Alternaria. Mold Help Organization. <http://www.mold-help.org/content/view/405/>, last access in 16/07/2007.

Linker, R., Shmulevich, I., Kenny, A. and Shaviv, A. 2005. Soil identification and chemometrics for direct determination of nitrate in soils using FTIR-ATR mid-infrared spectroscopy. Chemosphere, Volume 61:652-658.

Liu, Y. and Ying, Y. 2004. Prediction of Maturity for Pears using Fourier Transform Near Infrared Spectroscopic Technology. ASAE/CSAE Annual International Meeting. Ottawa. Canada. Paper No: 046187.

Liu, Y., Ying, Y. and Fu, X. 2005. Prediction of valid acidity in intact apples with Fourier Transform Near Infrared spectroscopy. Journal of Zhejiang University Science. Volume 6B:158-164.

Lu, R. 2001. Predicting Firmness and Sugar Content of Sweet Cherries Using Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy. Transaction of the ASAE, Volume 44(5): 1265-1271.

Lu, R. 2003. Predicting Apple Fruit Firmness and Sugar Content Using Near-Infrared Scattering Properties. ASAE Annual International Meeting. Nevada. USA. Paper No: 036212.

Lu, R. and Ariana, D. 2002. Near-Infrared Sensing Technique for Measuring Internal Quality of Apple Fruit. Applied Engineering in Agriculture, Volume 18(5): 585-590.

Lu, X., Xu, H., Ying, Y., Fu, X., Yu, H. and Tian, H. 2006. Application Fourier Transform Near Infrared Spectrometer in rapid estimation of Soluble Solids content of intact citrus fruits. Journal of Zhejiang University Science B, Volume 7(10):794-799.

Matthew, C., Lawoko, C.R.O., Korte, C.J. and Smith, D. Application of canonical discriminant analysis, principal component analysis and canonical correlation analysis as tools for evaluating differences in pasture botanical composition, Volume 37:509-520.

- McGlone, V.A., Martinsen, P.J., Clark, C.J. and Jordan, R.B. 2005. On-line detection of Brownheart in Braeburn apples using near infrared transmission measurements. *Postharvest Biology and Technology*, Volume 37:142-151.
- Mika, V., Pozdisek, J., Tillman, P., Nerusil, P., Buchgraber, K. and Gruber, L. Development of NIR calibration valid for two different grass sample collections. 2003. *Czech Journal Anim. Science*, Volume 48(10):419-424.
- Miller, W.M. and Zude_Sasse, M. 2004. NIR-Based Sensing to Measure Soluble Solids Content of Florida Citrus. *Applied Engineering in Agriculture*, Volume 20(3):321-327.
- Mizrach, A. 2000. Determination of avocado and mango fruits properties by ultrasonic technique. *Ultrasonics*, Volume 38:717-722.
- Mizrach, A., Bechar, A., Grinshpon, Y., Hofman, A., Egozi, H. and Rosenfeld, L. 2003. Ultrasonic Classification of Mealiness in Apples. *Transactions of the ASAE*, Volume 46(2): 397-400.
- Mizrach, A. 2004. Assessing plum fruits quality attributes with an ultrasonic method. *Food Research International*, Volume 37:627-631.
- Montgomery, D. C. 1997. *Design and Analysis of Experiments – 4th edition*. John & Sons Inc. USA.
- Pasternak, H., Schmilovitch, Z., Fallic, E. and Edan, Y. 2001. Overcoming Multicollinearity in Near Infrared Analysis for Lycopene Content Estimation in Tomatoes by Using Ridge Regression. *Journal of Testing and Evaluation*, Volume 29:60-66.

Perez, A., Ben-Arie, R., Dinoor, A., Genizi, A. and Prusky, D. 1995.

Prevention of Black Spot Disease in Persimon Fruits by Gibberellic Acid and Iprodione Treatments. *Phytopathology*, Volume 85(2):221-225.

Pierson, C. F., Ceponis, M.J. and McColloch, L.P. 1971. Market Diseases of Apples, Pears and Quinces. United States Department of Agriculture.

Agriculture Handbook No.376, pp. 3-4.

Reuveni, M., Sheglov, D., Sheglov, N., Ben-Arie, R. and Prusky, D. 2002.

Sensitivity of Red Delicious Apple Fruits at Various Phenologic Stages to Infection by *Alternaria-alternata* and Moldy-core Control. *European Journal of Plant Pathology*, Volume 108: 421-427.

Roberts, C.A., Workman, Jr.J. and Reeves, J.B. 2004. Near-Infrared

Spectroscopy in Agriculture. American Society of Agronomy, Inc.

Rosenfeld, D., I. Shmulevich and G. Rosenhouse. 1993. "Three-dimensional simulation of acoustic response of fruits for firmness sorting". *Transactions of the ASAE*, Volume 35(4):1267-1274.

Sandwell, D. 2007. Overview of remote sensing.

<http://topex.uscd.edu/rs/overview.pdf>.

Schatzki, T.F., Haff, R. P., Young, R., Can, I., Le, L.C., Toyofuku, N. 1997.

Defect Detection in Apples by Means of X-Ray Imaging. *Transactions of ASAE*, Volume 40(5):1407-1415.

Schatzki, T. F., Haff, R. P., R. Young, R., Can, I., Le, L. C and Toyofuku, N. 1997. Defect detection in apples by means of X-ray imaging. Transactions of the ASAE, Volume 40(5):1407-1415.

Schmilovich, Z., Shmulevich, I., Notea, A. and Maltz, E. 2000. Near Infrared Spectrometry of milk in its heterogeneous state. Computers and Electronics in Agriculture, Volume 29:195-207.

Schmilovich, Z., Mizrach, A., Hoffman, A., Egozi, H. and Fuchs, Y. 2000. Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry. Postharvest Biology and Technology, Volume 19:245-252.

Schmilovich, Z., Mizrach, A., Alchanatis, V., Kritzman, G., Korotic, R., Irudayraj, J. and Dedroy, C. 2005. Detection of Bacteria with Low-Resolution Raman Spectroscopy. Transactions of the ASAE, Volume 48(5): 1843-1850.

Schmilovich, Z., Shenderoy, C., Shmulevich, I., Alchanatis, V., Egozi, H., Hoffman, A., Ostrovsky, V., Lurie, S. and Ben-Arie, R. 2006. NIRS Detection of Internal Decay Caused by *Alternaria* in Apples. CIGR Agricultural Engineering World Congress, Bonn, Germany.

Schmitt, F.J., Eckert, H. J. and Eichler, H. J. 2005. Analytical Methods Based on Fluorescence Spectrometry. In COST Action 924 Working Group Meeting, Pub. ATB, Potsdam-Borning, Germany, pp.17-25.

Schrevens, E., De Busscher, R., Verstreken, E. and De Baerdemaeker, J. 1998. Detection of Hollow Pears by Tree Based Modelling on Non-Destructive Acoustic Response Spectra. Acta Horticulturae. (ISHS) 464:441-446.

Schmitt, F.J., Eckert, H. J. and Eichler, H. J. 2005. Analytical Methods Based on Fluorescence Spectrometry. Cost Action 924. Working Group Meeting.

Bornimer Agrartechnische Berichte. Potsdam-Bornim, pp 17–25.

Schrevens, E., De Busscher, R. Verstreken, L. and De Baerdemaeker, J. 1998.

Detection of Hollow Pears by Tree Based Modelling on Non-Destructive

Acoustic Response Spectra. ISHS Acta Horticulturae 464: International

Postharvest Science Conference Postharvest 96, Volume 1.

Shahin, M.A. and Tollner, E.W., 1997. Detection of Watercore in Apples

using X-rays linescans feature extraction and classification. In: Proceedings

from the Sensors for Nondestructive testing International Conference and

Tour. Orlando, 18-21 February, pp. 389- 400.

Shahin, M.A., Tollner, E.W., Evans M.D., Arabnia, H.R. 1999. Watercore

features for sorting Red Delicious apples: a statistical approach. Transactions

of the ASAE, Volume 42(6):1889-1896.

Shmulevich, I., N. Galili and D. Rosenfeld. 1996. Detection of fruit firmness

by frequency analysis. Transactions of the ASAE., 39(3): 1047-1055.

Shmulevich, I. 2000. Nondestructive Quality Assessment by Sensor

Technology. Postharvest. Jerusalem. Israel.

Slaughter, D. C., Barrett, D. C. and Boersig, M. 1996. Nondestructive

Determination of Soluble Solids in Tomatoes using . Near-Infrared

Spectroscopy. Journal of Food Science, Volume 61(4): 695-697.

Spotts, R.A. 1990. Moldy Core and Core Rot. In: Jones A.L. and Aldwinckle H.S.(eds). Compedium of Apple and Pear Diseases (pp 29-30) APS Press.ST. Paul, USA.

Teixido, N., Usall, J., Gutierrez, O., Vinas, I. 1998. Effect of the antagonist *Candida sake* on apple surface microflora during cold and ambient (shelf life) storage. *European Journal of Plant Pathology*, Volume 104:387-398.

Valero, C. and Ruiz-Altisent, M. 2000. Design Guidelines for a Quality Assessment System of Fresh Fruits in Fruit Centers and Hypermarkets. *Agricultural Engineering International:the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Electronic journal, www.agen.tamu.edu./cigr/. Volume 2. August.

Van Kempen, T. and Qiao, N. 2002. Near and MID Infrared Reflectance as Tools for Ingredient Real Time Analysis: Implication for Precision Formulation. *Maryland Nutrion Conference*, pp:80-87.

White, H.E. 1962. *Modern College Physics*. D.Van Nostrand Company, inc. Princeton, New Jersey.

Williams, P. and Norris, K. 1987. *Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. American Association of Cereal Chemists, Inc. St.Paul, Minnesota, USA.

Workman, J.J. 2000. *Introduction to Near Infrared Spectroscopy*. Jonn Wiley & Sons. <http://www.amason.ca/Introduction-Infrared-Jerry-dp/04715>, last access in 19/3/2007.

Zion, B. Kim, S. M., McCarthy M. J., and Chen, P. 1997. Detection of Pits in Olives under Motion by Nuclear Magnetic Resonance. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Volume 75(4):496-502

**Diagnosis of fruit-core-seed disease
using NIR spectroscopy**

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of **Master of Science**
in Agricultural Engineering

by

Shenderey Clara

Submitted to Senate of the Technion – Israel Institute of Technology

Shvat 5768

Haifa

January 2008

The study was carried out in the faculty of Civil and Environmental Engineering,
in Agriculture department , under the supervision of
Assoc. Prof. **Itzhak Shmulevich** and Dr. **Zeev Schmilovich**

The generous financial help of the Technion-Israel Institute of Technology is gratefully acknowledged.

I have a great pleasure to express my deep gratitude to Assoc. Prof. I. Shmulevich and Dr. Z. Schmilovich for their devoted guidance, continuous encouragement, support and patience throughout all research stages of the work.

I am also grateful to Dr. V. Alchanatis, Dr. S. Lurie and Dr. R. Ben Arie for their help and professional support of my research.

I would like to express my gratitude to the staff of Agriculture Engineering Institute and to Fruit Storage Research Laboratory in Kiriati Shmona for their technical assistance and generous help.

Last but not the least I thank from the bottom of my heart my dear family: my parents Eliezer and Natalia, my husband Leonid, my brother Ilia and my lovely kids: Joseph, Deborah and David for their unlimited support, patience, continuous encouragement and mental support throughout all stages of my studies.

Table of contents

page

Abstract	1
List of symbols	3
1. Introduction	6
2. Theoretical background and literature survey	8
2.1. Seed core disease.....	8
2.2. Non-destructive estimation methods.....	11
2.3. Spectroscopy in NIR range.....	15
2.3.1. Background.....	15
2.3.2. Data processing methods of NIR spectroscopy.....	25
2.3.2.1. General survey of chemometrical methods.....	25
2.3.2.2. Data preparing and its processing using chemometrical methods.....	27
2.3.2.3. PLS chemometrical method.....	28
2.3.2.4. Cluster analysis classification method.....	31
2.3.2.5. Two Way Analysis of Variance (ANOVA) method.....	32
2.3.3. Preliminary results of present research.....	38
3. Research goal	40
4. Materials and methods	40
4.1. Stationary laboratory system.....	40
4.2. Rotating system.....	44
4.3. Destructive method for seed core damage testing.....	46
4.4. Materials and experiments process.....	49
4.5. Experiment data processing route.....	49
5. Results	51
5.1. Stationary laboratory system results.....	51

Table of contents (continue)

page

5.1.1. PLS results.....	51
5.1.2. Cluster analysis results.....	53
5.1.3. Two Way ANOVA results.....	54
5.2. Rotating system results.....	61
5.2.1. PLS results.....	61
5.2.2. Cluster analysis results.....	64
5.2.3. Two Way ANOVA results.....	66
6. Discussion.....	75
6.1. PLS method.....	75
6.2. Cluster analysis method.....	76
6.3. Two Way ANOVA method.....	79
7. Conclusions, summary and recommendations for future research.....	81
7.1. Conclusions from PLS method	81
7.2. Conclusions from Cluster analysis method	82
7.2.1. Conclusions from stationary system conclusions.....	82
7.2.2. Conclusions from rotating system	82
7.2.3. Conclusions from the 2 systems.....	83
7.3. Conclusions from Two Way ANOVA method	83
7.4. Summary.....	83
7.5. Recommendations for future research.....	85
8. Appendices.....	86
8.1. Results belonged to preliminary experiments.....	86
8.2. Results belonged to stationary system experiments.....	88
8.2.1. PLS method.....	88

Table of contents (continue)

page

8.2.2. Two Way ANOVA method.....	89
8.3. Results belonged to rotating system experiments.....	93
8.3.1. PLS method.....	93
8.3.2. Two Way ANOVA method.....	98
8.4. Statistical methods used in present research.....	101
8.4.1. PLS algorithm in Matlab software.....	101
8.4.2. Cluster analysis algorithm in Matlab software.....	106
8.4.3. Two Way Anova algorithm in JMP software.....	108
References.....	109
Abstract (English)	I.

List of tables

page

Table1. Electromagnetic radiation ranges.....	17
Table 2. Relative intensities of C-H bands for infrared and the various NIR.....	20
Table 3. General structure of Cluster analysis output tables.....	32
Table 4. General structure of JMP output tables for Two Way Anova.....	35
Table 5. Example of program JMP output for Two Way Anova.....	36
Table.6. Processing of the preliminary experiment data results carried out by PLS..	39
Table 7. Results of experiment data results processing carried out by PLS in the current research in stationary system.....	52
Table 8. Total and 2 groups based classification accuracy for sample examined on the stationary system.....	53
Table 9. Total and 4 groups based classification accuracy for sample examined on the stationary system.....	53
Table 10. Influence test results of fruit position and <i>Alternaria</i> infection degree factors on peaks for 3 mathematical treatments of spectrum obtained from the stationary system.....	54
Table 11. Test results of fruit position and infection degree factors influence on gravity center of $\log(1/T)$ spectrum and of T transmittance spectrum obtained from the stationary system	55
Table 12. Processing data results from rotating system, carried out by PLS for sample with all classification groups of apples.....	61
Table.13. Processing data results from rotating system, carried out by PLS for sample without apples that have <i>Alternaria</i> infection ratio less 4%.....	62

List of tables (continue)

page

Table 14. Processing data results from rotating system, carried out by PLS for sample without apples that have <i>Alternaria</i> infection ratio less 10%.....	62
Table 15. Total accuracy and accuracy based on 4 mathematical treatments with all classification groups, obtained from rotating system.....	65
Table 16. Total accuracy and accuracy based on 4 mathematical treatments without apples infection ratio less 4%, obtained from rotating system.....	65
Table 17. Total accuracy and accuracy based on 4 mathematical treatments without apples infection ratio less 10%, obtained from rotating system....	66
Table 18. Test results of fruit position and infection degree factors influence on gravity center of $\log(1/T)$ spectrum and of T transmittance spectrum, obtained from rotating system.....	67
Table 19. Influence test results of fruit position and <i>Alternaria</i> infection degree factors on peaks for 3 mathematical treatments of spectrum obtained from rotating system.....	68
Table 20. Commands for mathematical processing of spectral data by means of PLS.....	102
Table 21. Commands for mathematical processing of spectral data by means of Cluster Analysis.....	107
Table 22. Example of Two Way Anova analysis results output corresponding to defined wavelength for 2 factors and interaction between them.....	108
Table 23. Example of Two Way Anova analysis results output corresponding to defined wavelength for 2 factors without interaction between them.....	108
Table 24. Two Way Anova analysis results output corresponding to defined wavelength for one <i>Alternaria</i> infecting ratio factor.....	108

List of figures

page

Figure 1. <i>Alternaria-alternata</i> fungus spore.....	9
Figure 2. <i>Alternaria-alternata</i> development symmetrically.....	10
Figure 3. <i>Alternaria-alternata</i> development not symmetrically.....	10
Figure 4. X-rays image of Red Delicious cultivar apples section with.....	14
Figure 5. Apples section image example with internal defects and operation.....	14
Figure 6. NMR images of Fuji cultivar apples infected with watercore.....	15
Figure 7. Electromagnetic radiation ranges and its use.....	16
Figure 8. Infrared, NIR and Visible light spectrum ranges.....	20
Figure 9. Schematic representation of light interaction with matter.....	23
Figure 10. Example of program JMP output for One Way Anova expessing significant difference between categories of response variable.....	37
Figure 11. Example of JMP program output for One Way Anova expessing lack of significant difference between categories of response variable.....	38
Figure 12. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance radiation derivative $d(T)$ in the preliminary experiment...39	39
Figure 13. The scheme of stationary NIR transmittance system.....	41
Figure 14. Light sources, fruit location, one-way optical fiber in stationary NIR transmittance system.....	42
Figure 15. Apple position during the test, side view.....	42
Figure 16. The rotating NIR transmittance system (carousel).....	44
Figure 17. The scheme of rotating NIR transmittance system (carousel).....	45
Figure 18a. Example of apple section image in AutoCAD software.....	47

List of figures (continue)	<u>page</u>
Figure 18b. Example of apple with infection ratio 10%(on the right side) and 20% (on the left side).....	47
Figure 19. Comparison between rotting percent measurement results made by AutoCAD software and by image processing apparatus.....	48
Figure 20. Comparison between rotting ratio measurement results made by formula and by AutoCAD software.....	48
Figure 21. Correlation between measured and predicted results, based on transmittance radiation derivative $dT/d\lambda$ in current experiment, obtained using stationary system.....	52
Figure 22. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 677 nm for influence <i>Alternaria</i> infecting ratio factor test on $\log(1/T)$ value for the stationary system.....	56
Figure 23. Typical examples of spectrum $\log(1/T)$ obtained by stationary system.....	56
Figure 24. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 717 nm peak for test of <i>Alternaria</i> infecting ratio factor influence on T value for the stationary system.....	57
Figure 25. Typical examples of spectrum T obtained by the stationary system.....	57
Figure 26. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 695 nm peak for test of <i>Alternaria</i> infecting ratio factor influence on $dT/d\lambda$ value for the stationary system.....	58
Figure 27. Typical examples of spectrum $dT/d\lambda$ obtained by stationary system.....	58
Figure 28. Calculation results of $\log(1/T)$ spectra gravity centers for healthy apples and apples infected by <i>Alternaria</i>	59
Figure 29. One - Way Anova analysis results output for stationary system corresponding to to gravity center coordinate Y_c of spectrum $\log(1/T)$ for <i>Alternaria</i> infecting ratio factor.....	59
Figure 30. Calculation results of T spectra gravity centers for healthy apples and apples infected by <i>Alternaria</i> , obtained by stationary system.....	60

List of figures (continue)	<u>page</u>
Figure 31. One - Way Anova analysis results output for stationary system corresponding to to gravity center coordinate Y_c of spectrum T for <i>Alternaria</i> infecting ratio factor.....	60
Figure 32. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance radiation T for sample with all classification groups of apples, obtained by rotating system.....	63
Figure 33. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance radiation T without apples that have infection ratio less 4% and include non-infected apples, obtained by rotating system...	63
Figure 34. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance radiation T without apples that have infection ratio less 10% and include non-infected apples, obtained by rotating system.....	64
Figure 35. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 674 nm for influence <i>Alternaria</i> infecting ratio factor test on $\log(1/T)$ value for the rotating system.....	69
Figure 36. Typical examples of spectrum $\log(T)$ obtained by rotating system.....	69
Figure 37. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 719 nm peak for test of <i>Alternaria</i> infecting ratio factor influence on T value for the rotating system.....	70
Figure 38. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 732 nm peak for test of <i>Alternaria</i> infecting ratio factor influence on $dT/d\lambda$ value for the rotating system.....	70
Figure 39. Typical examples of spectrum T obtained by rotating system.....	71
Figure 40. Typical examples of spectrum $dT/d\lambda$ obtained by rotating system.....	71
Figure 41. Calculation results of $\log(1/T)$ spectra gravity centers for healthy apples and apples infected by <i>Alternaria</i> for rotation system.....	72

List of figures (continue)

page

- Figure 42. Calculation results of T spectra gravity centers for healthy apples and apples infected by *Alternaria* for rotation system.....73
- Figure 43. One - Way Anova analysis results output for rotating system corresponding to to gravity center coordinate Y_c of spectrum $\log(1/T)$ for *Alternaria* infecting ratio factor.....74
- Figure 44. One - Way Anova analysis results output for rotating system corresponding to to gravity center coordinate Y_c of spectrum T for *Alternaria* infecting ratio factor.....74
- Figure 45. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance radiation T in preliminary experiment.....86
- Figure 46. Correlation between measured and predicted results that are based on $\log(1/T)$ in preliminary experiment.....87
- Figure 47. Correlation between measured and predicted results that are based on second derivative of $\log(1/T)$ in preliminary experiment.....87
- Figure 48. Correlation between measured and predicted results that are based on transmittance radiation T in current experiment, obtained from the stationary system.....88
- Figure 49. Correlation between measured and predicted results that are based on $\log(1/T)$ in current experiment, obtained from the stationary system.....88
- Figure 50. Correlation between measured and predicted results that are based on second derivative of $\log(1/T)$ in current experiment, obtained from the stationary system.....89

List of figures (continue) page

Figure 51. Typical example of spectrum $\log(1/T)$ obtained by stationary system with its characteristic peaks.....89

Figure 52. Typical example of transmittance radiation T spectrum obtained by stationary system with its characteristic peaks.....90

Figure 53. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 809 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on T value for the stationary system.....90

Figure 54. Typical example of $dT/d\lambda$ spectrum obtained by stationary system with its characteristic peaks.....91

Figure 55. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 732 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on $dT/d\lambda$ value for the stationary system.....91

Figure 56. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 829 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on $dT/d\lambda$ value for the stationary system.....92

Figure 57. Correlation, obtained by rotating system, between measured and predicted results that are based on transmittance derivative radiation $dT/d\lambda$ for sample with all classification groups of apples.....93

Figure 58. Correlation, obtained by rotating system, between measured and predicted results that are based on transmittance derivative radiation $dT/d\lambda$ for without apples that have infection ratio less 4%.....94

Figure 59. Correlation, obtained by rotating system, between measured and predicted results that are based on transmittance derivative radiation $dT/d\lambda$ for without apples that have infection ratio less 10%.....94

Figure 60. Correlation, obtained by rotating system, between measured and predicted results that are based on $\log(1/T)$ for sample with all classification groups of apple.....95

List of figures (continue)

page

- Figure 61. Correlation, obtained by rotating system, between measured and predicted results that are based on $\log(1/T)$ for without apples that have infection ratio less 4%.....95
- Figure 62. Correlation, obtained by rotating system, between measured and predicted results that are based on $\log(1/T)$ for without apples that have infection ratio less 10%.....96
- Figure 63. Correlation, obtained by rotating system, between measured and predicted results that are based on second derivative of $\log(1/T)$ for sample with all classification groups of apples.....96
- Figure 64. Correlation, obtained by rotating system, between measured and predicted results that are based on second derivative of $\log(1/T)$ without apples that have infection ratio less 4%.....97
- Figure 65. Correlation, between measured and predicted results that are based on second derivative of $\log(1/T)$ for without apples that have infection ratio less 10%.....97
- Figure 66. Typical example of spectrum $\log(1/T)$ obtained by rotating system with its characteristic peaks.....98
- Figure 67. Typical example of spectrum transmittance radiation T obtained by rotating system with its characteristic peaks.....99
- Figure 68. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 809 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on T value for the rotating system.....99
- Figure 69. Typical example of spectrum of first derivative of transmittance radiation $dT/d\lambda$ obtained by rotating system with his characteristic peaks.....100

List of figures (continue)

page

- Figure 70. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 701 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on $dT/d\lambda$ value for the rotating system.....100
- Figure 71. One - Way Anova analysis results output corresponding to wavelength 829 nm peak for test of *Alternaria* infecting ratio factor influence on $dT/d\lambda$ value for the rotating system.....101
- Figure 72. Window for possibility selection of sample division into calibration and validation subsets.....103
- Figure 73. Window for loading and running of data.....103
- Figure 74. Window for selection of factors number.....104
- Figure 75. Window of points distribution related to certain samples.....105
- Figure 76. Window of correlation between prediction and measured results.....105

Abstract

The transportation of agricultural produce between countries requires quality estimation of the production at all stages, from harvest to marketing. The subject concerns the necessity of the careful sorting of fruits and vegetables. It is often impossible to manually carry out this sorting. The human eye is not capable of distinguishing all product damage because human vision is limited by the narrow band of the electromagnetic spectrum. Some damage, especially internal, can only be detected using the invisible part of the electromagnetic spectrum. To distinguish this damage, it is necessary to develop non-destructive and fast-working tools and methods that operate in a band broader than the visible light range. Seed core diseases are common causes for the fruits internal damage to fruit.

One of the seed core diseases is caused by the *Alternaria-alternata* fungus. This fungus is an aggressive pathogen and is especially common in Red Delicious apples which constitute one-third of the apples grown in the Galil and Golan regions. The disease has caused rejection of the fruit at a cost of millions of shekels damage. Conditions of high relative humidity, mild temperatures and tissue susceptibility are important factors that affect natural infection in orchards. Once inside the fruit, the fungus is protected against contact fungicides, and conditions for continued growth of the pathogen are excellent. Attempts to control *Alternaria* by using foliar sprays of several fungicides reduced disease level at a rate from 40% to 70%. These results are not satisfactory because the modern market of high quality apples requires an almost zero % damage level. Therefore, it is necessary to develop fast and cheap non-destructive methods, capable of precisely identifying *Alternaria*-infected fruits.

There are several non-destructive methods that are used to detect internal defects in fruit, and they include: X-ray imaging, including computer tomography (CT) and Nuclear Magnetic Resonance (NMR). According to reports the methods are precise, but they are expensive, not fast and not suitable for on-line quality control.

The technology suggested in the present work is based on Near Infrared Radiation (NIR), which is commonly used in the quality estimation of agriculture produce. The method is non-destructive, fast, relatively cheap, precise and simple to use. Since the *Alternaria* fungus starts developing from the seed core in the majority of cases, the method based on NIR transmittance radiation is used in the present research.

The general research assumption is that it is possible to sort out *Alternaria*-infected apples individually on the sorting line by means of NIR transmittance tests. The goal of the present research is to develop a non-destructive NIR spectroscopy based method to examine for *Alternaria* infection in the apple seed core.

The experiments were carried out using two devices based on NIR transmittance radiation: a stationary system and a rotating system. The operating speed of the rotating system is 11 apples per minute. During measuring the fruit was laid down horizontally, and measurements were carried out at three points along the cross-section perimeter. 207 Red Delicious apples were taken for the stationary system experiment and 873 apples of the same species for the rotating system experiment. Results obtained from the non-destructive test were compared to the results of a destructive test that involved cutting each apple into two equal parts and measuring the infection ratio. For this measurement, measure both parts of each apple were photographed. Using Autocad software, the resulting images were then processed by measuring the total and infected area of each apple, and computing the ratio between them.

The predicted values of infection ratio were obtained from transmittance of the raw spectra and their mathematical transforms: first derivative of transmittance spectra, logarithm of transmittance spectra inversed value and its second derivative. The experiment results were processed using the following statistical methods: Partial Least Square (PLS), Cluster Analysis and Two-Way Anova. The PLS technique was used to obtain the correlation coefficient between the predicted and the measured infection ratio values. The Cluster Analysis method was implemented to estimate sample classification accuracy into groups. To apply this method the sample was sorted into groups according to the infection ratio values obtained using the destructive testing method mentioned above. The Two-Way Anova method was applied to test effect of both measurement location on the fruits perimeter and infection ratio of the fruit on the peak intensity and gravity center of the raw spectrum and its mathematical transforms.

The sample examined using the rotating system included at least 30% of *Alternaria* infected apples with the infection ratio more than 10%. PLS results indicate a high correlation between measured and predicted infection ratio. The correlation coefficients are in the 80% - 84% range. This coefficient range is related to raw spectra and all their mathematical transforms with the exception of a second

derivative of the logarithm spectra in which the coefficient is low (66%). When all the apples that had an infection ratio less than 10% were removed (non-infected apples remained in the sample), improvement was observed: higher correlations were obtained (80% - 90%), and classification accuracy analyzed by means of the Cluster Analysis significantly increased (from 58%-77% to 75%-94%). In both cases the maximum of the total classification accuracy was achieved when the raw spectrum first derivative was used. Minimum accuracy was obtained with the second derivative of the transmitted radiation inverse logarithm.

A sample examined in preliminary experiments using the stationary system included more than 30% of *Alternaria* infected apples with the infection ratio more than 10%. PLS results indicate a high correlation between measured and predicted infection ratio, when the correlation coefficients are in the range of 87% - 92%. Nevertheless, in the present research the sample examined using the stationary system included less than 30% of *Alternaria* infected apples with the infection ratio more than 10%. PLS results indicate that there is a lower correlation between measured and predicted infection ratio (55% -67%). The highest classification accuracy analyzed by means of Cluster Analysis is obtained for groups of *Alternaria*-infected apples with the infection ratio being more than 10%. The classification accuracy values are in the range of 81% -88%, and they relate to raw spectra and all their mathematical transforms with the exception of the second derivative of logarithm spectra in which the coefficient is low (56%).

Two-Way Anova results indicate that it is possible to identify *Alternaria*-infected apples with the infection ratio more than 10% according to the intensity at a particular wavelength of raw spectra and their first derivative and according to the gravity center of raw spectra at confidence level 95%. However, problems have been detected that are associated with the identification of infected apples using the magnitude of the transmitted radiation inverse logarithm at a particular wavelength as well as at its gravity center. These conclusions apply for both stationary and rotating systems.

The main result of the present research is that it is possible to detect internal damage caused by *Alternaria* if it constitutes more than 10%. Further research should be concentrated on extending the present method to the damage percentages of less than 10% using more sophisticated hardware and examining additional spectrum characteristics.