צילום מקצועי-מאקרוסקופי של צמחי בר כאמצעי מחקר וזיהוי

עוז גולן, המרכז להנדסת חומרים ותהליכים, מכללת אפקה להנדסה בתל-אביב,
golanoz.me@gmail.com

———————————

תקציר: אפיון מאקרוסקופי של צמחים הינו כלי עזר בוטאני חשוב להכרת הביולוגיה של הצמח מצד אחד וכאמצעי לזיהוי והגדרה מהצד האחר. נחשף עולמם המופלא של הפרחים, על שלל מיקרו-המבנים, הגוונים והצורות, ומסייע לנו מבחינה מדעית להבין טוב יותר את מנגנוני הרבייה בפרח.

==========

אברי המין של הפרחים כמו צלקות ואבקנים, שהם לרוב אברים קטנים, מצריכים שיטות צילום מיוחדות בטכנולוגיית מקרו. בשנים האחרונים הנגישות לצילומי מאקרו נעשית פשוטה יותר בזכות כניסתן של טכנולוגיות צילום חדשות, וכן בזכות שדרוג והוזלה של הטכנולוגיות הוותיקות. המהפך הדיגיטלי בעולם הצילום אשר התחולל לפני כ-15 שנה, ובמקביל חשיפת מרבית הציבור לרשת האינטרנט, הופך את הצילום לכלי הכרחי בידי החובב והמדען כאחד. בעוד שצילומי המאקרו מפותחים למדי במדע האנטומולוגיה, הם נדירים בהקשר לצמחים, והסיבה לכך אינה ברורה. צילום מאקרו של פרח מאפשר לנו לדלות פרטים רבים לגבי דרכי הרבייה ומנגנוני האבקה. כמו גם לגבי הבחנת המיניות. אפשר לזהות באופן מוחלט את השלב הנקבי והשלב הזכרי בפרח. את שחרור גרגרי האבקה ואת הרצפטיביות של



הצלקות שלב אחרי שלב (תמונה 1).

תמונה 1. ***הרדופנין הציצית.*** **צלקת מגוללת האופיינית למספר רב של פרחים לשוניים במשפחת המורכבים צילם: עוז גולן ©**

בשנים אחרונות הוכנסו לשימוש טכנולוגיות צילום מתקדמות. בזכותן, הסתבר לנו שתפיסות מדעיות שנלמדו במשך שנים התבררו כשגויות, ורב הנסתר על הגלוי. דוגמה לכך הם זרעוני מורכבים אחדים המשמשים כאמצעי הגדרה למינים, זנים, טיפוסים ופנוטיפים. בסוג קחוון קיימים עשרה מינים אנדמיים שהוגדרו ע"י אייג לפני כ- 80 שנה. מינים אחדים לא אותרו בשדה מזה שנים, בגלל הצורך לבדוק בין-היתר סטרוקטורה מאקרוסקופית של זרעונים. למעשה, הבחנה בין מינים או זנים הופכת למורכבת יותר באמצעות הצילום, לעומת ההבחנה בעין בלתי מזוינת. בעולם המאקרוסקופי מתגלים סימני זיהוי נוספים גם בין אוכלוסיות שונות של אותו המין. וככל שנגדיל את הרזולוציה, כך נראה עוד ועוד מבנים סטרוקטוראליים. הצילום הבוטני של הפרחים נחלק לשני תחומים: צילום אומנותי וצילום מדעי. מההיבט האמנותי הוא מאפשר למצלם גישה לעולם נסתר של צורות וצבעים מדהימים מעשה ידי הטבע. מההיבט המדעי הוא מאפשר, כאמור, מידע מחקרי חשוב לגבי הביולוגיה ומנגנוני האבקה כמו גם לגבי ההתאמות המורפולוגיות של הפרח (תמונות 3,2).

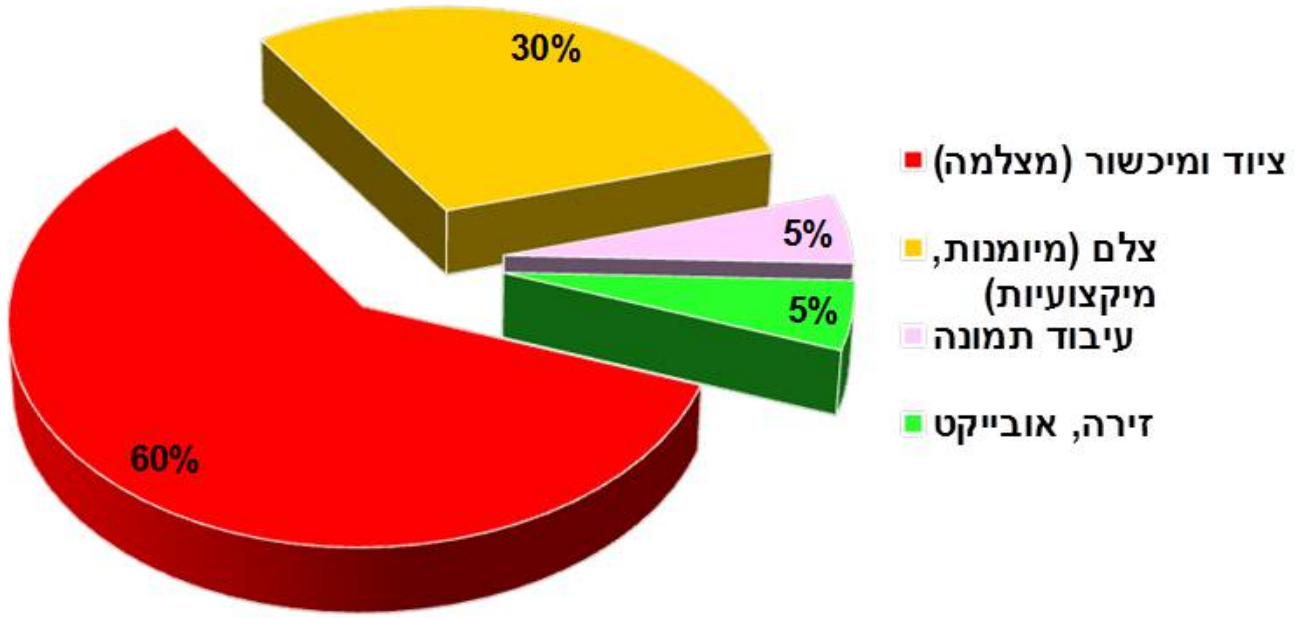


תמונה 2. ***מרווה מנוצה*** **- מנגנון האבקה דמוי-מנוף אופייני למיני המרווות כאשר שני האבקנים התחתונים משמשים כדוושות. צילם: עוז גולן©**



תמונה 3. מאבקים דמויי-מברשות שיער במשפחת הקוציציים – מאבק של *ריסן דק* בזמן פיזור אבקה צילם: עוז גולן ©

כיוון שגיליון דיגיטלי של צילומי מאקרו אינו מתבלה לעולם, ניתן לנצלו לתיעוד מדעי, בדומה לאוספים הקיימים בעשביות. הדבר חשוב בעיקר לשמירה וזיהוי של אותם מינים הנמצאים בסכנת הכחדה. מידע דיגיטלי נשמר, הוא נגיש לציבור ביתר קלות ואינו מתבלה. מההיבט ההנדסי-פיזיקלי, צילומים דיגיטליים של מבנים זעירים מספקים לא פעם השראה לחיקוי ביולוגי ומידול לצרכים הנדסיים (biomimetics, biomimicry , bio-inspiration). איכות התמונה שמתקבלת תלויה בטכנולוגיות הצילום. מכשור מקצועי יניב צילום מקצועי. להערכתנו, כ- 60 אחוזים מאיכות התמונה הסופית נקבע על-ידי הציוד והמכשור, היתר נקבעים ע"י מיומנות הצלם, האובייקט, הזירה ועיבוד התמונה (תמונה 4)



תמונה 4: מרכיבי איכות הצילום לפי השקפתו של צלם מקצועי.

צילומים מאקרוסקופיים ומיקרוסקופיים חייבים להיות מותאמי-טכנולוגיות. נדרש להבין מהן היכולות, החסרונות והיתרונות, של כל טכנולוגיה, ולהתאימה לצילום אליו נשאף. כיום, עומדות בפני המדען והחובב טכנולוגיות "מאקרו" ו"מיקרו" המאפשרות לחקור כמעט כל היבט מדעי. אם בעבר הגבול היה "מיקרו" (10^{-6} מטר) הרי כיום מדברים כבר על עידו ה"ננו" (10^{-9} מטר). חמישה פרמטרים פיזיקליים משחקים תפקיד בבחירת הטכנולוגיה: (א) הגדלה – בכמה ניתן להגדיל, או לקרב, את האובייקט, (ב) הרזולוציה – מבטאת את כושר ההפרדה של הפרטים המיקרו-מבניים או המיקרו-הרכבים באובייקט. מובן שהגדלה גבוהה אינה מבטיחה שנקבל תמונה בעלת רזולוציה גבוהה. אנלוגי הדבר לצפיפות הפיקסלים בתמונה. (ג) עומק השדה – הוא מדד המבטא את האפשרות לקבל צילום אובייקט תלת-ממדי עמוק שממוקד במלואו. עומק שדה הוא גורם קריטי מגביל מאוד בצילומי מאקרו ובקרתו אינה פשוטה. מצד אחד הצלם מעוניין להבליט את האובייקט על רקע מטושטש ומצד שני הוא מעוניין שכל עומק האובייקט יהיה ממוקד. (ד) פריטי ציוד לצילום בשטח מחייבים הכנה מוקדמת המסרבלת את פעולת הצילום. (ה) שאיפה לקבל צילום אמיתי בצבעים אמיתיים. צילום מאקרו מקצועי-מדעי אינו דבר פשוט. הוא דורש ניסיון רב והרבה סבלנות. תנאי הצילום צריכים להיות קפדניים במיוחד: (א) נדרש אוויר יציב שאינו בתנועה. גם רוח חלשה מפריעה לצילום, (ב) נדרשת בחירת אובייקט נקי מחלקיקים זרים לדוגמה:

אבק או פרוקי רגליים. בעולם המיקרוסקופי כל גוף זעיר נראה כמפלצת וכל תנועה משבשת את התמונה. (ג) מרבית הטכנולוגיות מחייבות ניקיון הציוד לעיתים קרובות. הקפדה על כללים אלה בעת השימוש בטכנולוגיות החדשות, מספקת לצלם תוצאות בלתי צפויות ומפתחת התמכרות לעולם חדש המאפשר מחקרים ותגליות אין-ספור (ראו דוגמה ב***איריס ארץ-ישראלי***, תמונה 5)



תמונה 5. ***איריס ארץ-ישראלי*****. ראש המאבק. גרגרי האבקה כדוריים הם חריגים ביותר במשפחת האיריסיים ומציאתם במין זה באמצעות טכנולוגיית המאקרו היא תגלית מדעית חשובה. צילם: עוז גולן ©**

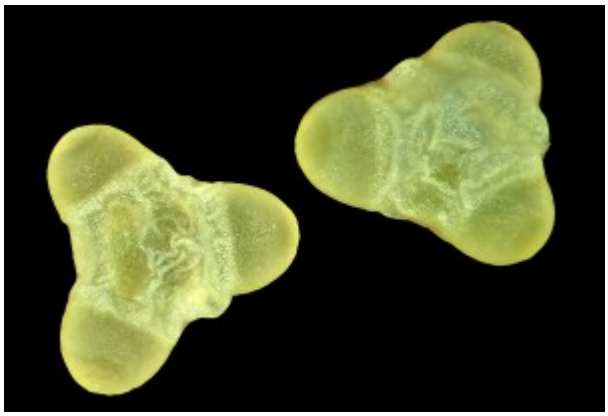
טכנולוגיות מאקרו ומיקרו אחדות, הנפוצות בשימושים מדעיים (פרטים נוספים על כל טכניקה ניתן למצוא בשפע ברשת האינטרנט):

א. **צילום ישיר באמצעות מצלמה מקצועית ועדשת מאקרו** – הוא הצילום הנפוץ ביותר בין חובבים. המגבלה של הציוד טמונה בהגדלות הנמוכות ובעומק שדה ירוד בגלל חוקי האופטיקה. שדרוגים באמצעות טבעות הארכה, עדשות מקרבות ("קלוז-אפ"), והרכבת עדשה הפוכה, מאפשרים התקרבות לאובייקט שגודלו עד 2 מ"מ.

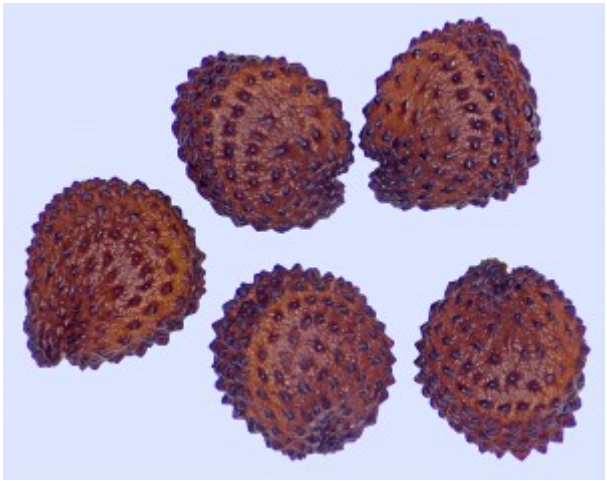
ב. שימוש בסורק דיגיטלי – היתרון של הסריקה מתבטא בעומק שדה מעולה, אך הרזולוציה תלויה בטיב הציוד. בעבר, בטרום עידן המצלמות הדיגיטליות, השתמשו בסורק דיגיטלי בכדי לקבל תמונות צמחים ללא מגבלת עומק השדה. בסורק, הגוף המצלם נע על פני האובייקט ובונה את התמונה שורה אחר שורה. בשנים האחרונות פותחו סורקים תלת-מימדיים מתקדמים (3D) המאפשרים למדל אובייקטים לתוכנות הנדסיות (קאד), כולל קבלת שרטוטים בשלושה מרחבים במידות מדויקות, והצגתם בתוכנות אלמנטים סופיים. ככל הנראה, צילום בטכנולוגיה זו ישלוט בעתיד בצילומי המאקרו, זה כאשר יוזלו המחירים

ותגדל הרזולוציה (אל נשכח שגם מצלמות דיגיטליות התחילו את דרכן באותו המצב). הסורקים התלת-מימדיים מהווים כיום כלי חשוב בתכן מכאני למהנדסי מכונות.

ג. טכנולוגיית מאקרו-גבוהות-רזולוציה – טכנולוגיה זו נמצאת כיום בשלבי פיתוח מתקדמים ומבוססת על סריקה שצוינה לעיל בשילוב סיבים אופטיים. הרעיון היה להשתמש בשבב החיישן של המצלמה כבסורק אופטי-מאקרוסקופי. כך שכל נקודה על-גבי החיישן תראה מקטע מיקרוסקופי אחר ובעומק שדה שונה. בפועל מדובר בצילום באמצעות מצלמה רגילה ללא-עדשה, כך שהטכנולוגיה לא רק שמסירה את המגבלות האופטיות של העדשה הממרכזת, אלא גם מוזילה את העלויות. טכנולוגיית המאקרו החדשה, מאפשרת לקבל צילומים בסופר-רזולוציה, ובהגדלות של עד X500, תוך שליטה מוחלטת בעומק השדה (עומק שדה בלתי מוגבל ובהתאם למיקום הסיבים האופטיים). לצורך יישום הטכנולוגיה נדרשת אפליקציה ייחודית השולטת בכל צומת בחיישן באופן אינדיבידואלי וכן ביצוע מספר שינויים במצלמה (תמונות 8,7,6).



תמונה 6: גרגרי אבקה של *נר-לילה חופי* הם בעלי צורה ייחודית (X400). טכנולוגיית הצילום המתקדמת מאפשרת לצלם גרגרי אבקה בתנאי שטח. צילם: עוז גולן ©



תמונה 7: *קרנונית מדוקרנת*, זרעים מהחרמון (X100). טכנולוגיית הצילום המתקדמת מאפשרת תיעוד תלת-מימדי של זרעי צמחים.

צילם: עוז גולן©



תמונה 8: תקריב לעבר אחת השערות הממוקמות בכניסה ללוע הפרח של *שפתן מצוי* (X500) צילם: עוז גולן©

ד. מיקרוסקופ אור סטריאוסקופי – מיקרוסקופ זול ופשוט המאפשר לראות אובייקטים תלת-מימדיים בעומק שדה גבוה. היתרון הגדול טמון בפשטות ובקבלת תמונות טובות יחסית (כמו זכוכית מגדלת איכותית). החיסרון נעוץ בהגדלה הנמוכה (בדרך כלל עד X50) ובעומק השדה אשר יורד מאוד עם העלייה בהגדלה.

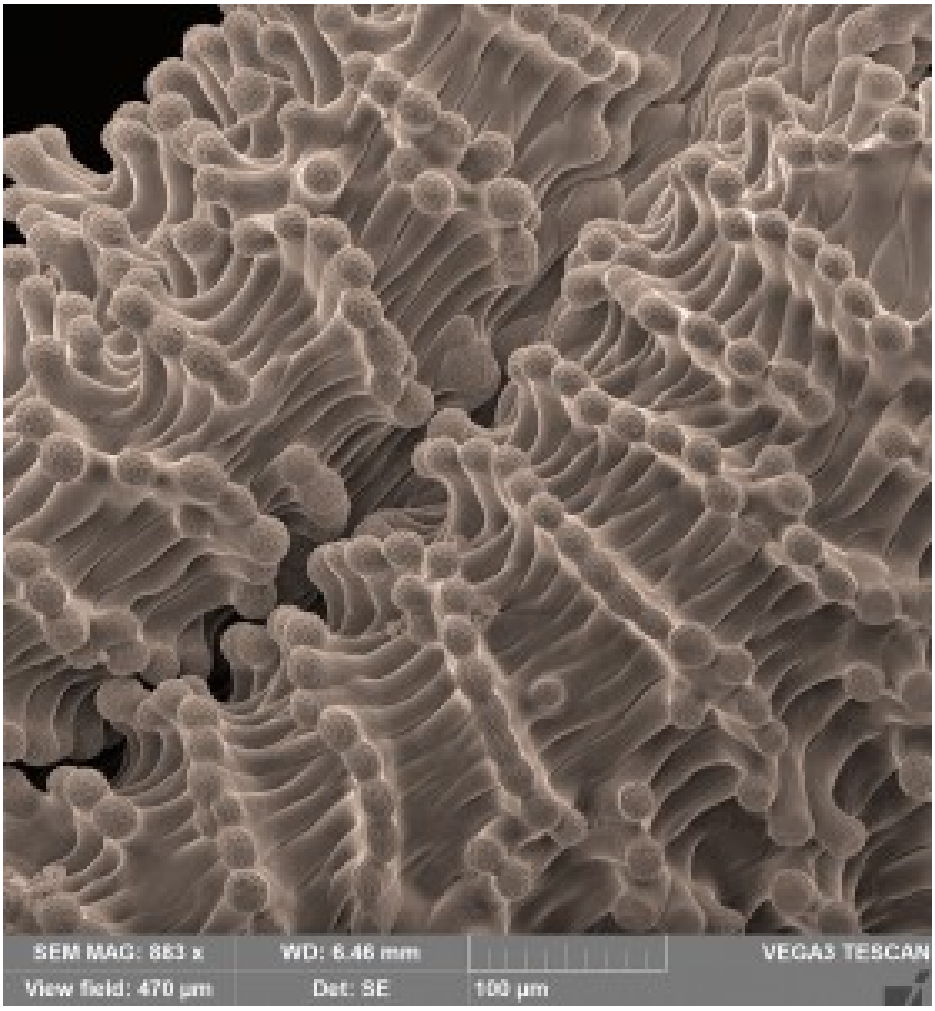
ה. מיקרוסקופים ביולוגיים למיניהם – קיימות כיום טכנולוגיות צילום בעזרת גרסאות שונות של מיקרוסקופ אור ביולוגי. היתרון של המיקרוסקופ הביולוגי הוא בהגדלה האופטית הגדולה יחסית (בדרך-כלל עד ל-X1,000), ובקבלת צבעים אמתיים. שלושת החסרונות הגדולים של המיקרוסקופים הללו הם (א) המיקרוסקופ נותן תמונה דו-ממדית עם עומק שדה אפסי. (ב) בגלל הצורך לקרב את העדשה לאובייקט- האור חייב לבוא מתחת לאובייקט ולחדור דרכו. לפיכך, על הדגם להיות שקוף דיו מבחינה אופטית. על כן אינו שימושי לצילומי מאקרו של פרחים למעט, אם רוצים לראות את הכותרת ואת אברי הרבייה. (ג) מחייב הכנה קפדנית של האובייקט על זכוכית נושאת, תנאי שאינו ישים בשטח.

ו. מיקרוסקופים מטלורגיים למניהם – המיקרוסקופ המטלורגי (או המטלורגפי) בגרסאותיו, מאפשר לבחון דגמים אטומים לאור בעזרת מקור אור חיצוני ופריזמה ו/או מראה חצי-חדירה. כך שניתן לקבל הגדלות של עד X1,000 באור אמיתי. החסרון של מיקרוסקופ זה, בדומה למיקרוסקופ הביולוגי הוא, בקבלת תמונה דו-ממדית בלבד עם עומק שדה אפסי. גם כאן נדרשת הכנה קפדנית של דגמים. מיקרוסקופ זה הוא יקר ומגושם לתנאי שטח, אך מתאים לתנאי מעבדה שם הוא מפיק צילומים איכותיים דו-ממדיים.

ז. מיקרוסקופ אלקטרונים סורק (SEM) – אחד המיקרוסקופים הנפוצים כיום בתחומים המדעיים ובמדע הביולוגיה בפרט (תמונה 9)

דמסון

תמונה 9: צילום פני שטח של זרעי



כוכבני במקרוסקופ אלקטרוני סורק. הפטמות ההידרופוביות יוצרות קשרים דיפוליים עם מולקולת המים ומאפשרות לזרע "לשחות" במים
למרחק ניכר. צילם: עוז גולן ©
ב- SEM של המרכז להנדסת חומרים ותהליכים במכללת אפקה.

יתרונו הגדול מתבטא בשילוב המצוין שבין הגדלה, רזולוציה, ועומק שדה. הרעיון מבוסס על שימוש בקרן אלקטרונים במקום האור הנראה, ותרגום האלקטרונים הנפלטים בעת סריקת הדגם לתמונה תלת-מימדית. המקרוסקופ מאפשר הגדלות של עד כמה מאות-אלפים, ברזולוציות-סופר ובעומק שדה מצוין. כמו כן, דטקטור מיוחד הממוקם במיקרוסקופ, מאפשר אנליזות כימיות של מקטעים נבחרים בתמונה, במפות שטח של יסודות, באנליזות פאזות, ובאנליזות נקודתיות. בעבר נדרשה הכנה קפדנית של דגמים ביולוגיים, כמו ציפויים בשכבה ננומטרית מוליכת חשמל (זהב או פחמן), וביצירת ריק גבוה (ואקום) ששינה את האובייקט הביולוגי. כיום חלק נכבד מהמיקרוסקופיים מצוידים בטכניקות המאפשרות צפייה בדגמים בלתי-מוליכים, בוואקום נמוך, וללא צורך בציפוי מוליך. במעבדות המרכז להנדסת חומרים ותהליכים במכללת אפקה, משתמשים במיקרוסקופ חדיש ומשוכלל, של חברת TESCAN, הכולל ארבעה גלאים ובהם גלאי של ואקום נמוך. למרות יתרונותיו העצומים לטכנולוגיה זו כמה חסרונות: (א) המיקרוסקופ יקר מאוד ומגושם, קיים רק במעבדות מחקר מתקדמות, ומחויב להימצא בחדרים נקיים. (ב) התמונה שמתקבלת הינה בגווני

אפור בלבד, דהיינו כיוון שמשתמשים באורכי גל מחוץ לספקטרום הנראה, לא ניתן לראות צבעים. ניתן אח"כ להוסיף צבעים מדומים בתוכנות עיבוד תמונה. (ג) עדיין נדרש ואקום בסיסי אשר שואב את החלקיקים החופשיים. (ד) נדרשת מיומנות וניסיון רב בהכנת דגמים לבדיקה, וכן בקביעת פרמטרים לעבודה במכשיר. לצורך מחקרים ביולוגיים-הנדסיים (כדוגמת ביומימיקרי), אנחנו משתמשים במרבית הטכנולוגיות האלה. הציוד, המיומנות והמומחיות, מצויים ברשותנו, כך שמתאפשר לנו להתאים כל מכשור ליעד אותו אנו רוצים להשיג. בעולם המדעי קיים ציוד מחקרי נוסף המאפשר קבלת צילומי מאקרו ומיקרו (ואפילו ננו), כדוגמת מיקרוסקופ מינהור (STM), מיקרוסקופ כוח-אטומי (AFM), מיקרוסקופ פלואורסנטי, אך הם מתאימים לתחומים אחרים בביולוגיה. בשנתיים האחרונות צילמנו רבבות צילומי מאקרו של צמחי ארץ-ישראל, בעיקר באמצעות "טכנולוגיית מאקרו-גבוהת-רזולוציה". הצילומים הללו חשפו אותנו לעולם חדש ואפשרו לנו לחקור וללמוד רבות על הביולוגיה, ועל המיניות ועל דרכי הרבייה של הפרחים. דוגמאות אחדות מוצגות בתמונות 10-14.



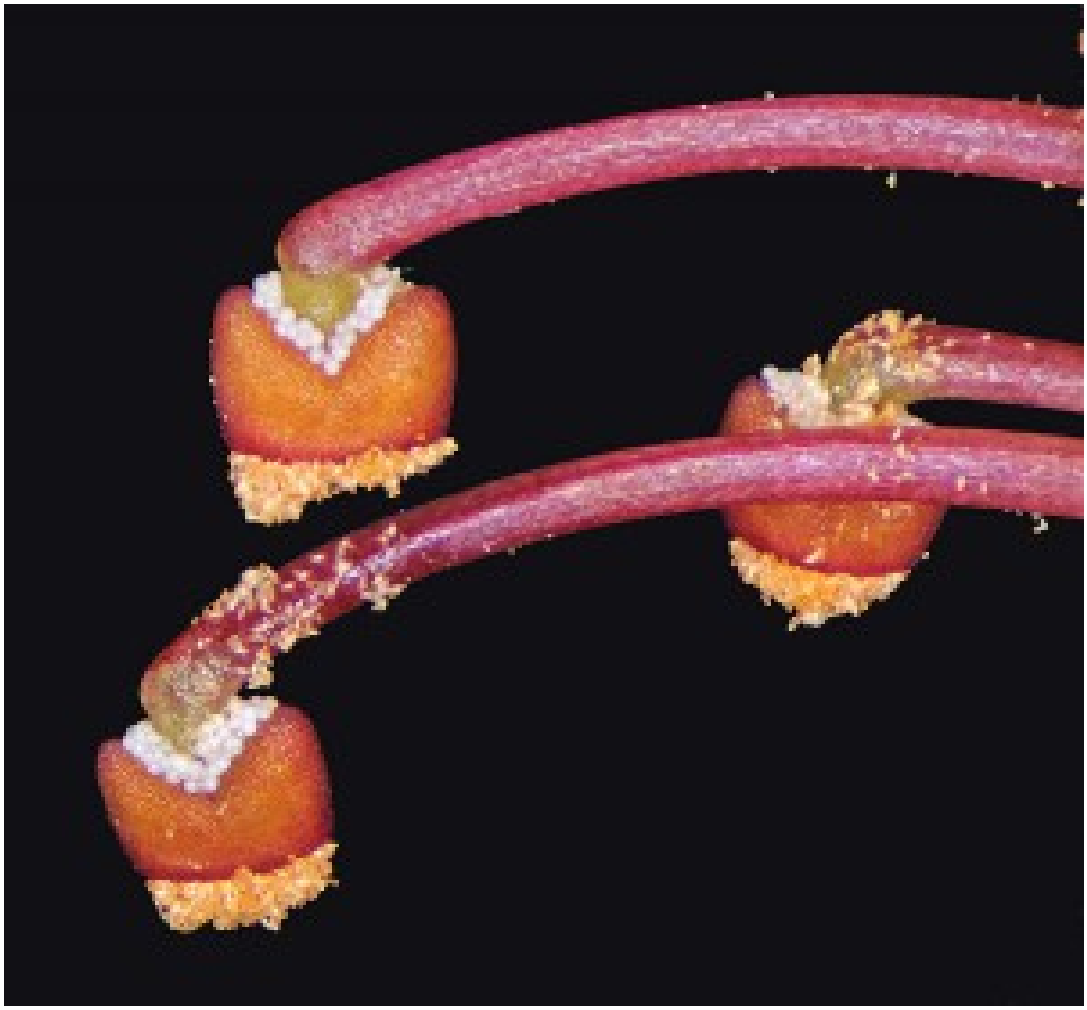
תמונה 10: *היביסקוס סיני*, תקריב לעבר ראשי האבקנים וגרגרי האבקה. צילם: עוז גולן©



תמונה 11: פתח המנהרה של *איריס הארגמן*. ניתן להבחין בפטמות על מפרש הצלקת ובשערות הזקן. צילם: עוז גולן©



תמונה 12: פרי של *אשחר ארץ-ישראלי*. צילום ממרחק של 2 מ"מ כאשר הפרי נמצא בעומק שדה מלא. צילם: עוז גולן©



תמונה 13: אבקנים של *נעדה מפושקת*. המאבקים של חלק מהשפתניים מכילים שלפוחיות הידרופוביות בחלקם העליון וגרגרי אבקה בחלקם התחתון. צילם: עוז גולן©



תמונה 14: ***עכנאי יהודה*****, אבקנים וצלקת. בצילום מתגלה עמוד העלי הזיפני. צילם: עוז גולן©**

==========

כל הזכויות שמורות ל"כלנית" ©

ציטוט: גולן, ע. 2014. צילום מקצועי-מאקרוסקופי של צמחי בר כאמצעי מחקר וזיהוי, כתב-עת "כלנית" מספר 1.
https://www.kalanit.org.il/?p=504

==========