

# מחקר אסטרונומי מרחוק של תלמידי תיכון באמצעות טלסקופים רבוטיים גדולים

בועז רון-זוהר<sup>1</sup>, מאיר מידב<sup>2</sup>, נח ברוש<sup>3</sup>

לצאת  
מהשיגרה



## מבוא

לדעת רבים מדע האסטרונומיה מעניין מאוד תלמידים רבים בכל הגילאים, מהווה בסיס לידע מדעי ולהבנתו של היקום שבו אנו חיים ומהווה נכס צאן ברזל במאגר הידע האנושי. האסטרונומיה מאפשרת לנו ללמוד היבטים רבים של מדעי הטבע ולהתוודע להתפתחותם של היבטים אלה. על כן נושא זה צריך להיות חלק מההשכלה הכללית הבסיסית של כל אדם בעידן המודרני, ונעשים מאמצים להנחילו לאוכלוסיית העולם כולו.

בתכנית לימודי הפיזיקה הקיימת כיום בארץ (ת"ל, 2008) התלמידים לומדים שלושה נושאי חובה מרכזיים: מכניקה ניוטונית, חשמל ומגנטיות וקרינה וחומר. רק חלק מזערי מנושא האסטרונומיה נלמד במסגרת לימודים זו. פרק לימודי האסטרונומיה (או בשם אחר "אסטרופיזיקה"), שהיה בעבר אחד משני פרקי בחירה, הושמט עד הודעה חדשה מתכנית הלימודים. כיום הדרך היחידה בארץ להוראת אסטרונומיה באופן מסודר במסגרת תכנית הלימודים הקיימת, היא להנחות תלמידים המגישים עבודת חקר במקום בחינת בגרות (חוזר מפמ"ר פיזיקה, 2008).

חלק ניכר מהמחקר האסטרונומי בימינו מתבצע מרחוק בעזרת טלסקופים רבוטיים מסוגים שונים הממוקמים ברחבי העולם ובחלל. המחשבה שתלמידי תיכון יבצעו חקר מרחוק באמצעות טלסקופים רבוטיים וילמדו אסטרונומיה בדרך זו מלהיבה ומרגשת. דוגמה מרכזית לטלסקופים רבוטיים אשר בעזרתם תלמידים יכולים לתכנן ולבצע תצפיות, היא פרויקט הטלסקופים פולקס: The Faulkes Telescope Project (<http://faulkes-telescope.com>). במסגרת פרויקט זה הוקמו שני טלסקופים אופטיים רבוטיים גדולים בעלי מראה ראשית בקוטר שני מטר; גובהם שמונה וחצי מטר, האחד ממוקם בהוואי והאחר ממוקם באוסטרליה. בשנת 2005 נטל לידינו מצפה לאס קמברס (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network) את האחריות לניהול הפרויקט (<http://lcogt.net/en/network>). מטרת הארגון לאפשר לכל בית ספר בעולם לערוך תצפיות בחינם בעזרת רשת הטלסקופים שתוקם.

במאמר זה מוצג מחקר שבדק אם יצליחו תלמידי י"ב בישראל הלומדים פיזיקה בהיקף של חמש יחידות לימוד, לבצע חקר מרחוק בנושא אסטרונומיה באמצעות הטלסקופים הרבוטיים של פרויקט פולקס. במסגרת החקר יידרשו לתכנן את שלבי המחקר, להחליט על התצפיות הנדרשות למחקר ולבצע אותן, לעבד את התמונות שיתקבלו; לאסוף, לעבד ולנתח את הנתונים שיתקבלו ולבסוף - להגיש לפיקוח על הוראת הפיזיקה עבודה כתובה על מחקרם על פי קריטריונים מדעיים מקובלים.

1 מורה לפיזיקה באולפנת צביה מעלות ומרכז קבוצת האסטרונומיה במרכז פרויקטים אחר"ת.

2 פרופ' להוראת פיזיקה ומדעים בחוג לחינוך מתמטי, מדעי וטכנולוגי, אוניברסיטת תל אביב.

3 אסטרונום וחבר בסגל הבכיר בביה"ס לפיזיקה ואסטרונומיה, אוניברסיטת תל אביב, מנהלו המדעי של מצפה הכוכבים ע"ש וייז ומנהל המחקר של TAUVEEX.

במחקר המוצג השתתפו שבעה תלמידים מארבעה בתי ספר: "אולפנת צביה מעלות", "בי"ס מקיף השלום דגון", "תיכון מנור-כברי" ו"מקיף גליל מערבי" הלומדים פיזיקה בהיקף של חמש יחידות לימוד. שלוש תלמידות י"ב הצליחו להשלים את המחקר במלואו בשנת המחקר. ארבעת התלמידים האחרים היו כולם תלמידי כיתות י"א, אשר הצליחו לבצע את רוב התהליכים האלה, אך דחו את סיום העבודות והגשתן לשנת הלימודים שבה יהיו בכיתה י"ב היות שהיו עסוקים בבחינות הבגרות. שלוש תלמידות י"ב הגישו עבודה בהיקף של שתי יחידות לימוד, נבחנו עליה והוכיחו בפני בוחנת חיצונית אובייקטיבית, מטעם משרד החינוך, שליטה בנושאי העבודה ובנושאים באסטרונומיה. הן עשו כל זאת למרות שכלל לא (!) ראו טלסקופ כלשהו לפני המחקר או במהלכו. ממצאים אלו דומים לממצאים ממחקר קודם שלפיהם לא היה יתרון לסטודנטים שהיו פיזית במצפה וראו טלסקופ-רדיו ואת המכשור הדרוש לתפעולו (Pratap&Salah, 2004).

נושא המחקר שהוצע לתלמידים היה על סוגי התפלגות צבירים כחולים בגלקסיות ספירליות. במחקרים קודמים (Brosch, 1992) שהתבססו על מראה עיניים בלבד, נמצא כי צבירים כחולים יכולים לשמש כסמנים לאזורי היווצרות כוכבים בדומה לאזורי HII (מידב, ברוש ונצה, 2000)<sup>4</sup>. במחקר הנוכחי, לעומת זאת, צולמו חמש גלקסיות ספירליות דרך מסנני אור שונים, ולאחר חישוב אינדקס צבע של צבירי כוכבים נמצא סוג ההתפלגות המרחבית של צבירים כחולים בגלקסיות.

## רקע תאורטי

### למידה דרך חקר

ניתן לערוך מחקר במסגרת בית הספר על ידי עריכת פרויקט או עבודת גמר בפיזיקה (חוזר מפמ"ר פיזיקה, 2008). במקרים אלו התלמידים חוקרים תחום לא מוכר להם, מתכננים ועורכים ניסויים, מעבדים את התוצאות, מארגנים ועורכים אותן בטבלה ובגרף, מנתחים אותן, מסיקים מסקנות ומגישים למשרד החינוך עבודה כתובה על פי קריטריונים מדעיים. על העבודה הם נבחנים בעל פה בפני בוחן חיצוני. הפרויקט יכול להיות בהיקף של יחידת לימוד אחת או שתיים. עבודת הגמר היא בהיקף של חמש יחידות לימוד.

חקר יכול להתבצע בעזרת מערכת ניסוי הנמצאת בכיתה עצמה או על ידי חקר מרחוק. בשנים האחרונות עם התפתחות רשת האינטרנט והמחשוב נפתחו אפשרויות רבות לחקר מרחוק. על רקע דיון ער בשאלה אם סימולציות ממוחשבות מספקות דרך למידה אפקטיבית לעומת ניסויים, נמצא כי הדרך השלישית - החקר מרחוק - אפקטיבית מאוד.

חקר מרחוק בתחומים שונים כגון אסטרונומיה, כימיה, ביולוגיה, אלקטרוניקה, רובוטיקה יכול להתבצע בעזרת מערכת רובוטיות הנשלטות מרחוק באמצעות רשת האינטרנט (Kubaskoa, 2008). הפעלה מרחוק של מערכות ניסוי ומחקר משפרת את עבודת הצוות ויכולה להכין הן תלמידי בית ספר, והן סטודנטים במוסדות להשכלה גבוהה, ללמידה ועבודה בסביבה עתירת ידע הקיימת והמתפתחת כיום בעולם המחקר והתעשייה.

חקר מרחוק מספק דרך למידה שהיא אפקטיבית לפחות כמו חקירה בעזרת מערכות ניסוי הנמצאות בכיתה. ניתן גם לשלב סימולציות ושליטה מרחוק במערכות הניסוי ליצירת סביבת לימוד אפקטיבית. יתרון ברור לדרך זו קיים כאשר מבחינה כלכלית או מעשית לא ניתן לרכוש ולתחזק מערכת ניסוי מסוימת. זה בדיוק המקרה כשמדובר בטלסקופים רובוטיים גדולים. החקירה המדעית יכולה להתבצע מרחוק בעודה נעזרת ברשת האינטרנט.

מכשור הנשלט מרחוק הוא משאב חיוני וכלי הוראה חשוב לסטודנטים בפריפריה או במוסדות לימוד בעלי משאבי לימוד מוגבלים. נמצא שאין הבדל משמעותי בין תלמידים ששהו פיזית במקום הניסוי לתלמידים שצפו בניסוי מרחוק או

4 מימן, כידוע, הוא החומר הנפוץ ביותר ביקום, וניתן למצאו כמעט בכל הסביבה הנחקרת על ידי אסטרונומים. האסטרונומים מתייחסים לעתים קרובות לשלושה מצבים של מימן: HI (מימן לא מיונן), HII (מימן מיונן) ו-H2 (מולקולות מימן).

שהפעילו את המערכת מרחוק וקיבלו את התוצאות ברשת (Pratap&Salah, 2004). הפעלה מרחוק של מערכות ניסוי מתקדמות מעלה את המוטיבציה ללימודי מדעים ואת ההתלהבות מהם ומשפרת את ההבנה ואת הישגים של התלמידים (Beare, 2007).

### חקר מרחוק באמצעות טלסקופים רובטיים

השימוש בטלסקופים רובטיים הלך וגבר בשנות התשעים של המאה העשרים. בתחילה לא שלטו המשתמשים בטלסקופ ישירות כי אם מסרו תכנית תצפית למפעיל במקום או במרכז הבקרה. בהמשך התאפשרה שליטה ישירה מרחוק בטלסקופ באמצעות תקשורת מחשבים בין המשתמשים למערכת רובוטית השולטת בטלסקופ. מחקרים אסטרונומיים רבים כיום מתבצעים באמצעות טלסקופ רובוטי כלשהו. תקצר היריעה מלתאר את כל סוגי הטלסקופים הרובטיים על פני כדור הארץ ובחלל הנשלטים כיום מרחוק.

טלסקופים רובטיים חשובים לצפייה בכוכבים גם על רקע זיהום אוויר וזיהום אור בסביבת המגורים האורבאנית של האדם המודרני. תלמידים ובני האדם בכלל במדינות המתועשות רואים פחות ופחות כוכבים בלילות. טלסקופים רובטיים נגישים העומדים לרשות הציבור מחזירים את היכולת לצפות ביותר כוכבים ולראות טוב יותר על מסכי המחשב, גם אם לא ישירות.

ברוב המקרים כאשר מתאפשרת לציבור הרחב או למערכת חינוך כלשהי גישה לטלסקופ, הגישה היא רק לנתוני תצפיות שאחרים ערכו. דוגמה מפורסמת לכך היא טלסקופ החלל האבל (Hubble). עם זאת קיימים זה זמן טלסקופים רובטיים שחלק מזמן התצפית בהם מוקדש גם לסטודנטים, מורים, תלמידים בכל הגילאים ואף לציבור הרחב. דוגמה בולטת לטלסקופים שאליהם יש למורים ולתלמידים גישה מלאה היא הטלסקופים של פולקס (Beare, 2007; Camacho et. al.) (2009).

פרויקט הטלסקופים של פולקס שהושק במרץ 2004, שם לו למטרה להקים רשת עולמית של טלסקופים שיועמדו לרשותם של אנשי חינוך ותלמידים. כחלק מהפרויקט הוקמו שני טלסקופים אופטיים רובטיים גדולים בעלי מראה ראשית בקוטר שני מטר, הממוקמים באתרי תצפית מהמדרגה הראשונה. האחד מוקם בהוואי על פסגת הר בגובה 3055 מטר מעל פני הים והשני מוקם באוסטרליה בגובה 1149 מטר מעל פני הים. מיקומי הטלסקופים נבחרו במיוחד על מנת לאפשר לתלמידים באנגליה לצפות בזמן אמת - זמן הלימודים - משני חצאי כדור הארץ: הצפוני והדרומי. במסגרת פרויקט פולקס הוקם אתר אינטרנט עשיר בתכנים (<http://faulkes-telescope.com>) בנושא אסטרונומיה תאורטית ומעשית. בשנת 2005 קיבל על עצמו מצפה לאס קמברס (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network) אחריות על פרויקט פולקס וקנה את שני הטלסקופים של פולקס במטרה להקים רשת טלסקופים עולמית משלו (<http://lcogt.net/en/network>).

### השפעת חקר בעזרת טלסקופים רובטיים על ההבנה וההתעניינות במדע

על רקע ירידה בינלאומית במספר התלמידים הבוחרים בפיזיקה, במתמטיקה ובמקצועות טכנולוגיים ברמה מוגברת, נערך מחקר מקדים שבמסגרתו ערכו סטודנטים להוראה בחינוך היסודי תצפיות אסטרונומיות מרחוק באמצעות הטלסקופים של פרויקט פולקס. לאחר שקיבלו הדרכה בסיסית, הצליחו רוב הסטודנטים בקלות יחסית לצלם גלקסיות שנבחרו בעבורם ולבצע מדידות פשוטות של תצורות שונות ושל עצמת האור בגלקסיות שצולמו בכלים ממוחשבים. מסקנה עיקרית של מחקר מקדים זה היא שלמחקרים דומים בעזרת טלסקופים רובטיים יש פוטנציאל רב לעורר אצל תלמידים בכל הגילים עניין באסטרונומיה ובחקר חלל, ואולי בעקבות זאת - גם במדע בכלל. תוכנה הרחבה של המחקר לבתי ספר תיכוניים לאחר שהטלסקופים כבר עברו את שלב ההרצה שלהם, אך מחקר זה לא בוצע עד כה (Beare, 2007).

דוגמה נוספת לחקר בעזרת טלסקופים רובוטיים ולהשפעתו על תלמידים היא התכנית להבאת רדיו-אסטרונומיה לכיתות של תואר ראשון במכללות ובאוניברסיטאות ברחבי ארה"ב. התכנית עשתה שימוש מרחוק בטלסקופ-רדיו קטן (SRT) ובטלסקופ-רדיו גדול, שקוטר הצלחת שלו 37 מטר, במצפה הייסטק של MIT בארה"ב (MIT Haystack Observatory) (Pratap&Salah, 2004). נמצא שהסטודנטים הבינו טוב יותר את נושא הרדיו-אסטרונומיה ואת הכישורים הדרושים לביצוע מחקר. כמו כן נמצא שלא היה יתרון לסטודנטים שהיו פיזית במצפה לעומת אלה שערכו את המחקר מרחוק. מלבד ההתפעלות ממדי הצלחת, הסטודנטים רוכשים אותו ניסיון מחקרי ומקבלים אותה החשיפה, בין שהיו פיזית במצפה ובין שלא.

## מחקר התלמידים

המטרה העיקרית במחקר התלמידים המתואר במאמר זה, הייתה למצוא את צורת ההתפלגות של צבירים כחולים (Blue Knots), שהם צבירי כוכבים צעירים, בגלקסיות הספירליות שאותן צילמו. התלמידים צילמו את הגלקסיות דרך מסננים רחבי פס בתחומי אורך גל שונים ואפיינו את הצבירים הכחולים על ידי חישוב אינדקס הצבע שלהם. לאחר מכן השוו התלמידים את התפלגות הצבירים הכחולים שנמצאה בשיטה זו, להתפלגות צבירים כחולים שנמצאה על פי מראה עיניים של גלקסיות באטלס גלקסיות (Brosch, 1992) ולהתפלגות אזורי היווצרות כוכבים מסוג HII באותן גלקסיות לפי הספרות. התפלגות אזורי HII נמצאה במחקרים אחרים באמצעות צילומים דרך מסננים צרי פס בתחום  $H_{\alpha}$ . מהשוואת ההתפלגויות בדקו התלמידים אם שיטת צילום של צבירים כחולים דרך מסנני צבע רחבי פס, יכולה לשמש כשיטה למציאת אזורי היווצרות של כוכבים בגלקסיות ספירליות. שיטה כזו תהיה יעילה יותר משיטת הצילום דרך מסננים צרי פס במונחים של כמות פוטונים הנאספת ביחידת זמן טלסקופ.

### מבנה ההוראה ונושאי הלימוד

השיעורים התחילו מיד לאחר חנוכה תשס"ט, בתחילת ינואר 2009, במרכז פיס בתחומי בי"ס מקיף גליל מערבי המחובר לרשת האינטרנט והמצויד ברשת מחשבים ובאמצעי הקרנה על מסך גדול. לפי התכנון המקורי הייתה אמורה להתבצע הוראת מבוא לאסטרונומיה ואסטרופיזיקה במשך כשבועים וחמש שעות הוראה לפני תכנון התצפיות ועריכתן. בפועל, בשל אילוצים, קוצרה הוראת נושא זה לעשרים וארבע שעות הוראה. ההוראה התבצעה במשך שנים עשר מפגשים, וכל מפגש ארך כשעתיים (120 דקות), כלומר, עשרים וארבע שעות שעון בסך הכול. ההוראה התבצעה בעזרת מצגות, תמונות, סרטונים, אתרי אינטרנט, תוכנות אינטראקטיביות של מפות כוכבים והדמיות השמיים וספרים. חלק מכל שיעור היה פרונטלי וחלק ממנו כלל עבודה יחידנית מול מחשב.

לאחר הוראת המבוא הועברה הדרכה מעשית בנושאים של תכנון תצפית, עריכת תצפית, קבלת נתונים, עיבודם וניתוחם. במהלך 14 מפגשים תכננו התלמידים תצפיות, ערכו אותן, קיבלו את הנתונים, עיבדו וניתחו אותם. רוב המפגשים ארכו כשעתיים (120 דקות), אך היו גם כמה מפגשים של 4 שעות ויותר, ובסך הכול - כ-36 שעות שעון. עריכת התצפיות וקבלת הנתונים נעשו בכיתה במהלך השיעורים. לאחר שקיבלו הסבר כיצד לעבד ולנתח את הנתונים שעלו, הם התחילו לעבוד באופן עצמאי, בכיתה ובבית, ונעזרו בי במידת הצורך.

במהלך כתיבת העבודה נתקלו התלמידים בנושאים שלא הספיקו ללמוד בכיתה. הם למדו וכתבו על נושאים אלו בעזרת קריאה מודרכת. בנוסף הם נעזרו במנועי חיפוש אינטרנטיים ובאתרי אינטרנט שונים כגון אסטרופדיה, ויקיפדיה, האתר של פולקס ועוד.

הנחיית התלמידים בעבודתם חייבה התייעצות שוטפת עם אסטרונומים מנוסים: ד"ר נח ברוש, מנהל מצפה וייז, ופרייזר לואיס (Fraser Lewis), אסטרונום מצוות התמיכה של פרויקט פולקס; הם התייעצו גם עם מנהל הפרויקט של פולקס,

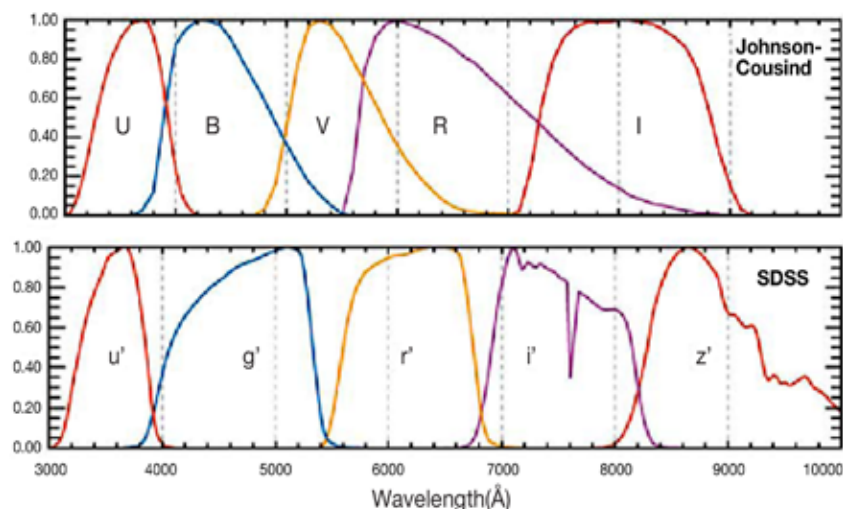
ד"ר פול רושה (Paul Roche), בנושאים כלליים הנוגעים לעבודה עם הטלסקופים. ללא כל התמיכה הזו הנחיית התלמידים לא הייתה אפשרית.

### תהליך תכנון התצפיות, עריכתן וניקוי התמונות על ידי התלמידים

התלמידים בחרו גלקסיות מתאימות למחקר ולתצפית בעזרת התוכנה סטריום ומאגרי המידע NED ו-Simbad (<http://nedwww.ipac.caltech.edu/>, <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>).

עדיפות בבחירה ניתנה לגלקסיות שהופיעו במאמרים של ברוש (Brosch, 1992) ושל הודג' וקניקוט, (Hodge&Kennicutt, 1983) מכיוון שיש בהם נתונים זמינים על התפלגות הצבירים הכחולים או נתונים על התפלגות אזורי HII, שניתן יהיה להשוות אליהם את תוצאות התלמידים. לאחר הבחירה הצליחו כל אחת מארבע התלמידות - שלוש מי"ב ואחת מי"א - לצלם גלקסיה. שתי תלמידות מי"א בחרו אותה גלקסיה וצילמו אותה יחד. תלמיד מי"א לא הצליח לבחור ולצלם גלקסיה בשנת המחקר (אך הצליח בכך בשנה שלאחר מכן). במקרים מסוימים ערכו התלמידות בדיקה נוספת של הקואורדינטות בעזרת התוכנה Aladin (<http://aladin.u-strasbg.fr/>). בזמן התצפית הקלידה כל תלמידה את הקואורדינטות שמצאה, בחרה מסננים ואת זמן החשיפה וביצעה את התצפית באופן עצמאי לחלוטין ללא שום התערבות.

התלמידות צילמו את הגלקסיה שבחרו דרך שלושה מסננים: B, V, R - במשך 120 שניות דרך כל מסנן. מסננים אלו הם מסננים רחבי פס המעבירים אור בתחומי אורכי גל שונים, המהווים חלק ממערכת מסננים, כמתואר באיור 1. כמו כן התלמידות צילמו שלוש תמונות דרך כל מסנן, כשהן מזיזות מעט את הטלסקופ בין צילום לצילום על מנת לנקות את התמונה מפגמים רגעיים צפויים כמו: הפרעות אקראיות, פגמים אקראיים ב-CCD, רוויה (סטורציה) של התאים הרגישים לאור (תופעה ידועה הגורמת להופעת "הילת רפאים" סביב חלק מהעצמים המצולמים). ההנחה היא שפגמים אלה יופיעו בצילום אחד, אך לא בשני או בשלישי. שיעור הזזת הטלסקופ בין צילום לצילום היה חמש שניות קשת, ימינה או שמאלה, למעלה או למטה, על מנת שהתמונות לא יחפפו בדיוק. על מנת לבצע פעולה זאת נדרשו התלמידות להקליד קואורדינטות שמימיות מדויקות עד כדי שניית קשת של הגלקסיה שבחרו. הן היו צריכות להבין את מערכת הקואורדינטות השמימיות וכיצד השינוי של כמה שניות קשת בעלייה הישרה או בנטייה ישפיע על כיוון הטלסקופ ועל התמונה שיקבלו.



איור 1: ספקטרום העברת אור של שתי מערכות מסננים שונות

חמש הגלקסיות שצילמו התלמידות היו: NGC 3631, NGC 5371, NGC 5921, NGC 3810, NGC 3596. מעניין לציין שהתלמידות הופתעו לגלות שלטלסקופ לוקח זמן להתכוון לקואורדינטות שהוזנו ושאינן התמונה מתקבלת תוך כדי התצפית, אלא רק בסופה. לאחר שהושלם תהליך הצילום ועיבוד התמונות (הרחבה בנושא זה ניתן למצוא בעבודת

הגמר שאותה ניתן לקבל במייל מבעז רון-זוהר), היו בידיהן של כל אחת משלוש תלמידות י"ב ומשלוש תלמידות י"א שלוש תמונות נקיות של הגלקסיה שצילמו דרך שלושת המסננים. על תמונות אלו התבצע עיבוד וניתוח הנתונים. תצלומים 3-1 הובאו כאן כדוגמאות לתמונות שהתקבלו. בנוסף הכינו תלמידות י"ב גם תמונות צבעוניות של הגלקסיות שצילמו, על מנת להציג אותן בשער העבודות שכתבו (תצלומים 4-6).

NGC 5371 - color



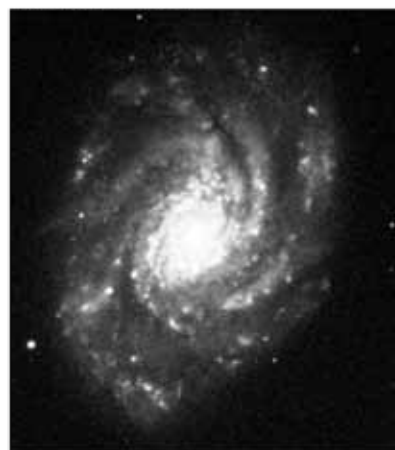
NGC 5371 - B Filter



NGC 3810 - color



NGC 3810 - B Filter



NGC 5921 - color



NGC 5921 - B Filter



## עיבוד וניתוח הנתונים על ידי התלמידות, דיון ומסקנות בממצאים האסטרונומיים

תחילה מדדו התלמידות בשיטת החריר ובעזרת התוכנה Aip4Win 2.0 את שטף האור המגיע מכל אזור שחשוד כצביר כחול בגלקסיה. לאחר מכן הן חישובו את אינדקס הצבע של כל אזור כזה. בתצלום אזורים אלו נראים ככתמים בהירים. על מנת להבחין ביתר קלות בתצורות השונות בגלקסיה, שינו התלמידות את ניגודיות התמונה בתצוגה והחליפו בין תצוגה רגילה לתצוגת תשליל. לאחר שזיהו את הצבירים הכחולים על פי אינדקס הצבע שחישובו, שרטטו התלמידות גרף של צפיפות התפלגות של הצבירים בגלקסיה כפונקציה של מרחקם הרדיאלי ממרכז הגלקסיה. לבסוף הן מצאו את סוג ההתפלגות של הצבירים הכחולים בגלקסיה שצילמו, והשוו אותו לסוג ההתפלגות של אזורי HII בגלקסיה לפי הספרות. התלמידות פיתחו שיטות עבודה מסודרות ויעילות והיו עצמאיות לחלוטין במהלך עבודתן. שלב זה הצריך שעות עבודה מרובות וריכוז רב והתבצע על ידי התלמידות באופן עצמאי בבית ולא בכיתה. לא כאן המקום לעמוד על הפרטים המקצועיים הרבים הקשורים בכיול התוצאות, בחישוב אינדקס הצבע ועוד; נסתפק באזכור חלק מהממצאים האסטרונומיים (למעוניינים, פירוט רחב ניתן למצוא בעבודת הגמר שכאמור, ניתן לקבלה במייל מבוטא רון-זוהר). מיד בהמשך נרחיב את הדיון במטרות הדידקטיות של העבודה, שהן המטרות העיקריות של עבודת הגמר ובמסקנות.

## דיון ומסקנות בממצאי התלמידות

ממצאי התלמידות אישרו ממצאים קיימים על סמך מראה עיניים של תמונות מכילות מאטלס גלקסיות. התלמידות חיזקו גם את הממצאים שלפיהם צבירים כחולים יכולים לשמש כסמנים לאזורי היווצרות של כוכבים בגלקסיות, בדומה לשימוש באזורי HII כסמנים לאזורי היווצרות של כוכבים (Brosch, 1992). בעוד שהממצאים הקודמים מבוססים על מראה עיניים של צילומים קיימים באטלס גלקסיות, הגיעו התלמידות במחקר זה לממצאים על סמך מדידות פוטומטריות וחישוב אינדקס הצבע של הצבירים על בסיס נתוני צילומים במצלמת CCD שאותם תכננו וערכו בעצמן. תלמידות י"ב השלימו את כתיבת העבודות בתנאים של עומס גדול ולחץ רב ובמקביל להגשת מבחני מתכונת ובגרות בכל המקצועות. בשל קוצר הזמן לא הספיקו תלמידות י"ב לערוך הערכת שגיאה מלאה, במיוחד הערכת שגיאה בחישוב אינדקס הצבע, ולכן לתוצאות שלהן אין תקפות מדעית מלאה (בשנה שלאחר מכן הספיקו תלמידי י"א לערוך את הערכות השגיאה האלו בעבודות שהגישו).

## דיון ומסקנות מהמחקר

לאחר השלמת העבודות, תלמידות י"ב הגישו אותן לבוחנת חיצונית, מורה לפיזיקה ואסטרונומית תצפיתנית. מספר ימים לאחר שקראה הבוחנת את העבודות ולאחר ששאלה אותי מספר שאלות הבהרה עליהן, היא ערכה לתלמידות מבחן בעל פה על העבודות שהגישו. כל תלמידה נבחנה במשך שעה שלמה (60 דקות) והגנה על התוצאות שקיבלה. הבוחנת שאלה אותן גם שאלות תאורטיות כלליות בנושאי פיזיקה, אסטרופיזיקה ואסטרונומיה וגם שאלות על הצדדים המעשיים של העבודה שלהן. בין השאר היא שאלה אותן על אופן עריכת התצפיות, על הטלסקופים, על שיטת ניקוי והרכבת התמונות, על העבודה עם התוכנות השונות ועל עיבוד וניתוח התוצאות שקיבלו. גם הישיגהן של תלמידות י"ב וגם הישיגיהם של תלמידי י"א שהגישו את עבודותיהם בשנה שלאחר מכן, היו גבוהים מאוד.

כל התלמידים השקיעו עבודה רבה מאוד ולמדו הרבה מעבר לתלמידי פיזיקה בכיתותיהם שניגשו למבחני הבגרות הרגילים. בנוסף לכל נושאי החובה של מכניקה, אלקטרומגנטיות וקרינה וחומר, שכל תלמידי חמש יחידות בפיזיקה לומדים, למדו התלמידים שני נושאים נוספים: אסטרופיזיקה ועריכת תצפיות אסטרונומיות מעשיות. שתיים מתוך שלוש תלמידות י"ב, הצליחו מאוד וקיבלו ציונים גבוהים מאוד גם במבחני הבגרות שערכו בכתב בנושאי מכניקה ואלקטרומגנטיות. תלמידת י"ב שלישיית קיבלה ציונים בינוניים במבחנים אלו.

כל התלמידים הוכיחו יכולת לתכנן מחקר אסטרונומי, לבצע תצפיות, לעבד את התמונות ולנתח את התוצאות ולכתוב עבודה מסכמת על פי עקרונות מדעיים מקובלים. הם הצליחו לתכנן ולערוך תצפית המבוססת על תפעול מרחוק של טלסקופ רובוטי גדול, לקבל תמונות באיכות טובה ומספקת על מנת לערוך על פיהן מחקר וללמוד להשתמש בתוכנה מתאימה לעיבוד וניתוח תוצאות תצפית. הם למדו והפנימו את הנושאים שלמדו והוכיחו שליטה בהם ובנושאי העבודה שכתבו בפני בוחנים חיצוניים אובייקטיביים. הם עשו כל זאת למרות שכלל לא ראו טלסקופ כלשהו לפני המחקר או במהלכו. ממצאים אלו דומים לממצאים ממחקרם של פרטפ וסאלה (Pratap & Salah, 2004). לפי הממצאים של פרטפ וסאלה לא היה יתרון לסטודנטים שהיו פיזית במצפה וראו את הטלסקופ-רדיו ואת המכשור הדרוש לתפעולו. עם זאת לא תמיד היה התפעול מרחוק מוחשי בעבורם בשלבים השונים של העבודה. כך למשל, באחת התצפיות הראשונות שכבר הזמנו, התרעמה אחת מהתלמידות ואמרה: "אני לא חוזרת במיוחד מירושלים ומפסידה חצי יום של סמינר, רק כדי ללחוץ על כפתור. תלחצו אתם בשבילי על הכפתור". אמירה זו ממחישה מאוד את העובדה שהתלמידים מתקשים להפנים שהם מפעילים מכשור יקר ומתוחכם להפליא ממרחק עצום של כמחצית הגלובוס. בדומה לממצאים של פרטפ וסאלה (Pratap & Salah, 2004), כשלים בביצוע התצפית בשל תנאי מזג אוויר או תקלות בתחזוקת הטלסקופ ובתפעולו לא הזיקו להבנתם או למחקרם, נהפוך הוא: כשלים אלו תרמו להבנתם. הם הבינו טוב יותר כיצד מתקבלת תמונה חדה וברורה, כיצד פועל הטלסקופ וכיצד מתבצע מחקר אסטרונומי. זהו כלי חשוב בחינוך תלמידים לחשיבה ולביצוע מחקר מדעי על כל מכשולותיו וקשייו.

למרות שהמורה שהנחה את התלמידות למד קורסי מבוא באסטרופיזיקה וכמה קורסים מתקדמים באסטרונומיה במסגרת הלימודים האקדמיים שלו, לא היה לו שום ניסיון קודם בעריכת תצפיות אסטרונומיות, לא מרחוק ולא בכלל. הוא צפה מספר פעמים בכוכבי לכת ובירח דרך טלסקופ חובבים, אך לא ראה כלל כיצד מתכננים או עורכים תצפית מסודרת. ללא תמיכה ותקשורת ישירה ועקיפה עם אסטרונומים מומחים ומנוסים - לא היה מצליח להנחות את התלמידות בעבודתן. עם זאת ניתן לשער שככל שיתמחה ויצבור ניסיון - יזדקק פחות ופחות לתמיכה חיצונית.

המסקנה העיקרית העולה מכל זאת היא שתלמידי תיכון בארץ יכולים לתכנן ולערוך הן תצפיות מרחוק בעזרת טלסקופים רובוטיים גדולים והן מחקר אסטרונומי על בסיס תצפיות אלו, בתנאי שיקבלו הנחיה וליווי של מנחה מנוסה בעל ידע תאורטי ומעשי באסטרונומיה. אפשרות זו מלהיבה ומאפשרת הוראת אסטרונומיה ואסטרופיזיקה בתיכון ברמה גבוהה גם במסגרת תכנית הלימודים הקיימת. מעניין יהיה לבדוק אם תלמידים שנחשפו ללימוד מעמיק יותר, יוכלו גם להגדיר בעצמם נושא למחקר. מעניין יהיה לבדוק אם תלמידי תיכון יכולים לנהל מחקר משותף עם סטודנטים לתארים מתקדמים בפיזיקה הלומדים אסטרופיזיקה במוסדות להשכלה גבוהה ולהשתמש בטלסקופים רובוטיים גדולים הנשלטים מרחוק. ברור שהידע והכלים של הסטודנטים יהיו רחבים יותר, אך ההשערה שלנו היא שכשם שסטודנטים עובדים במשותף עם חוקרים בעלי ידע וניסיון רחבים הרבה יותר משלו, כך תלמידי תיכון יוכלו ללמוד ולהפיק הרבה מאוד ממחקר משותף עם סטודנטים לתארים מתקדמים בפיזיקה.

**תודות למנהלי בתי הספר:** "אולפנת צביה מעלות", "בי"ס מקיף השלום דנון", "תיכון מנור-כברי" ו"מקיף גליל מערבי",  
**למנהלת מרכז הפיס** במקיף גליל מערבי **ולמנהל מרכז פרויקטים אחר"ת בגליל המערבי, על כל העזרה, התמיכה ושיתוף הפעולה בעריכת מחקר זה.**



1. חוזר מפמ"ר פיזיקה התשס"ט/1 (2008). משרד החינוך, המזכירות הפדגוגית, אגף המפמ"רים, הפיקוח על הוראת הפיזיקה. אוחר בתאריך 05/10/2009: [http://62.90.118.237/Uploads/16411\\_08-09.doc](http://62.90.118.237/Uploads/16411_08-09.doc)
2. מידב, מ., ברוש, ג., נצר, ח. (2000). היקום יסודות האסטרופיזיקה. האוניברסיטה הפתוחה, תל אביב.
3. תוכנית הלימודים בפיזיקה לחטיבה העליונה (2008). משרד החינוך ירושלים. אוחר בתאריך 05/10/2009: <http://62.90.118.237/Uploads/15265U.doc>
4. Beare, R. (2007). Investigation into the Potential of Investigative Projects Involving Powerful Robotic Telescopes to Inspire Interest in Science. *International Journal of Science Education*, 29 (3), 279-306.
5. Brosch, N. (1992). Star formation systematic from color images. *Astrophysics and space science*, 188, 289-298.
6. Camacho, A., Holt, R., Marley, S., Roberts, S. (2009). Robotic telescopes classroom activities at the cutting edge of science. *School Science Review*, 90 (333), 73-82.
7. Hodge, P. W., Kennicutt, R. C. (1983). The radial distribution of H II regions in spiral galaxies. *Astrophysical Journal*, 267 (1), 563-570.
8. Kubaskoa, D., Jones, M.G., Tretter, T., Andre, T. (2008). Is it Live or is it Memorex? Students' Synchronous and Asynchronous Communication with Scientists. *International Journal of Science Education*, 30 (4), 495 – 514.
9. Pratap, P., Salah, J. (2004). The Effectiveness of Internet Controlled Astronomical Research Instrumentation for Education. *Journal of Science Education and Technology*, 13 (4), 473-484.



**צד הכוכב,**

**לאיליה מזין**  
לקבלת פרס רקאנטי-צ'ייס-רש"י למורה היזם, תש"ע

**לאייל סיני ולמשה פרידמן**  
לקבלת פרס המורה המצטיין על-שם עמוס דה שליט תשע"א

**לחזי יצחק**  
לקבלת פרס למורה מצטיין תשע"א - מימון השתתפות ב-CERN