



מכון הנרייטה סאלד
המכון הארצי למחקר במדעי ההתנהגות



מדינת ישראל
משרד החינוך, המינהל הפדגוגי
האגף לתלמידים מחוננים ומצטיינים

במעגל היצירה

המחזור השביעי של תוכנית מנחים-עמיתים
לטיפול מחוננים בישראל

סיכום הפעילות בשנים תש"פ-תשפ"א – 2019-2020

מר מנחם נדלר

ד"ר רחל זורמן

גב' פנינה זלצר

גב' ציפי בשן

יועצת חינוכית: גב' אפרת גולן

דצמבר 2020

תוכן העניינים

5.....	חלק א: תיאור התוכנית
13.....	חלק ב: הערכת התוכנית
23.....	חלק ג: תקצירי עבודות החניכים
25.....	מדעים מדויקים ומדעי החיים
27.....	1. תורה ספקטרלית של גרפים..... מנחה-עמית: פרופ' אבי ברמן, הפקולטה לחינוך למדע ולטכנולוגיה, הטכניון, חיפה חניך: יהב בונה, אורט רבין, קריית מוצקין
35.....	2. רובטיקה רפואית – פיתוח אמצעי שליטה אינטואיטיבי להפעלת הזרועות הרובוטיות הניתוחיות של מערכת HOMINIS..... מנחים-עמיתים: דביר כהן (מנכ"ל), שי כץ (מהנדס תוכנה), Memic Innovative Surgery Ltd חניכה: יובל ברנשטיין-מלמד, ראשון לציון, כפר הנוער החקלאי מקווה ישראל חולון
41.....	3. פלואורסצנציית רנטגן בגלקסיות פעילות..... מנחים-עמיתים: פרופ' אהוד בכר ורועי רחין, הפקולטה לפיזיקה, הטכניון, חיפה חניך: אחמד גנאים, תיכון אלחכמה, סכנין
51.....	4. כשירות של צמחים לאור היבטים סביבתיים וגנטיים..... מנחים-עמיתים: ד"ר אפרת שפר ואילן אלחנן, הפקולטה לחקלאות, האוניברסיטה העברית, רחובות חניך: ניתאי נחמיה, מקיף ג', אשדוד
63.....	5. שימוש בתאי CAR-T ספציפיים ל-MOG להפחתת אקטיבציה של תאי DR2 T ספציפיים ל-MBP..... מנחים-עמיתים: פרופ' יורם רייטר וענבר ערמן, הפקולטה לביולוגיה, הטכניון, חיפה חניכה: תמר נמיר, אורט כרמים, כרמיאל
71.....	6. פרדוקס היציבות: כיצד שומרות רשתות בטבע על יציבות דינמית..... מנחה-עמית: ד"ר ברוך ברזל, המחלקה למתמטיקה, אוניברסיטת בר אילן חניך: יותם קפלן, תיכון רמון, הוד השרון
77.....	7. האם ניתן להשפיע על קבלת החלטות בעלות וחסרות משמעות בעזרת גירוי לא מודע? ניסוי התנהגותי..... מנחות-עמיתות: פרופ' ליעד מודריק וענבל גור אריה, מדעי המוח, אוניברסיטת תל אביב חניכה: שחר שגיא, קריית חינוך עמק חפר, בית יצחק

מדעי החברה.....85

8. ניתוח סטטיסטי של קשרים בין ארבע תיאוריות אישיות
87 לבין עוצמות התמכרות לאינטרנט ולמסכים
מנחה-עמית: פרופ' יונתן מזרחי, החוג לסוציולוגיה ואנתרופולוגיה, האקדמית עמק יזרעאל
ומעבדת Lambda אוניברסיטת תל אביב
חניך: בן אליאב, תיכון אוסטרובסקי, רעננה
9. דרכים למיגור העוני ולשיפור המצב הכלכלי בישראל בעזרת מערכת החינוך.....97
מנחה-עמית: פרופ' דורון קליגר, מינהל עסקים, אוניברסיטת חיפה
חניך: אליחי ברזילי, אורט כרמים, כרמיאל

מדעי הרוח.....105

10. לא הולך ברגל – עיון סמנטי בפועל הלך בעברית המקראית בהשוואה לעברית בת ימינו.....107
מנחה-עמיתה: ד"ר פנינה טרומר, אוניברסיטת תל אביב
חניך: הדר איקוניקוב, מקיף מבואות עירון, כרכור
11. אאורקה: התגלית המדעית – תהליך או הארה פתאומית?.....119
מנחה-עמיתה: פרופ' ימימה בן מנחם, החוג לפילוסופיה, האוניברסיטה העברית, ירושלים
חניכה: אילה רוס, אולפנת חורב, ירושלים
- אומנות, מוזיקה וקולנוע.....127
12. דעיכת הפראיות של חיות בשבי – תערוכה, אומנות חזותית.....129
מנחה-עמיתה: גבי ניבי אלרואי, תל אביב
חניך: מאיה גונן, הרצליה, תיכון אלון, רמת השרון
13. קונטרפונקט, הרמוניה וניתוח.....139
מנחה-עמית: פרופ' מנחם ויזנברג, תל אביב
חניך: איתמר פיינברג, מרכז חינוך ליאו בק, חיפה
14. "על קצה המים" – סרט אנימציה קצר.....143
מנחה-עמית: פרופ' חנן קמינסקי, המכון הטכנולוגי, חולון
חניך: נדב רם, תיכון כצנלסון, כפר סבא

"הדרך הנכונה לחנוך
הנני אדעט היא להיות
למה לדואמה"
אלברט איינשטיין

חלק א: תיאור התוכנית

הרקע לתוכנית

תלמידים מחוננים¹ יכולים להפיק תועלת ייחודית מיצירת קשר עם מנחה-עמית מקצועי המאפשר להם להתנסות, במחיצתו ובהדרכתו, בשאלת מחקר מתחום הדעת והיצירה שבו הוא מומחה. התפקיד החשוב של מנחים-עמיתים בהצלחתם האקדמית של תלמידים מחוננים מתועד היטב בספרות המחקרית^{2,3}. תפקיד זה בא לידי ביטוי בעבודה אישית צמודה של אנשי מקצוע מן השורה הראשונה עם תלמידים בעלי פוטנציאל יוצא דופן אשר הופכים באופן הדרגתי להיות עמיתים לחקר וליצירה.

מחקרים שונים⁴ מצביעים על כך שמנחים-עמיתים יכולים להוות דמות משמעותית בהתפתחותם הרגשית והחברתית של מתבגרים מחוננים, וכן לסייע להם מבחינה מקצועית. בהתאם למודל ההתפתחות של כישרון⁵, המתייחס לתהליך של מספר שלבים – מיכולת לקומפוטנטיות, למומחיות ולבסוף להישגים יוצאי דופן. מחקרים מראים שבכל אחד מהשלבים, אך במיוחד בשלבים האחרונים, מנחים-עמיתים יכולים לשמש מודלים להזדהות למתבגרים מחוננים ולסייע להם ליישם ידע באופן מעשי, להתנסות בכיווני קריירה מקצועית ולמצוא את קולם הייחודי ואת המקום האישי שלהם.

הנחיה אישית של מנחה-עמית מתייחסת לסוגיות שונות המטרידות אנשי חינוך העובדים עם תלמידים מחוננים, כגון:

- כיצד להתייחס למגוון תחומי העניין והיכולות של התלמידים?

¹ הכתוב מנוסח בלשון זכר אך מיועד לשני המינים

² Bisland, A. (2001). Mentoring: An educational alternative for gifted students. *Gifted Child Today*, 24(4), 22-25.

³ Hamilton, S. F., & Darling, N. (1996). Mentors in adolescents' lives. In K. Hurrelmann & S. F. Hamilton (Eds.), *Social problems and social contexts in adolescence* (pp. 199-214). Hawthorne, NY: Aldine, De Gruyter.

⁴ Casey, K. M. A., & Shore, B. M. (2000). Mentors' contributions to gifted adolescents' affective, social and vocational development. *Roeper Review*, 22(4), 227-230.

⁵ Subotnik, R.F., Olszewski-Kubilius, P., & Worrell, F.C. (2011). Rethinking giftedness and gifted education: A proposed direction forward based on psychological science. *Psychological Science in the Public Interest*. 12(1), pp. 3-54.

- כיצד ליצור לתלמידים אלו הזדמנויות להגיע לידע, למיומנויות ולאמצעי החקר העדכניים והמתקדמים ביותר על מנת לאפשר להם לרכוש את הידע והמיומנויות העדכניות ביותר בתחומי העניין שלהם?
- כיצד לסייע לתלמידים לבחור באופן מושכל את כיוון הקריירה שלהם?
- כיצד לטפח תלמידות מחוננות, כשביבתן אינה מעודדת אותן תמיד לממש את הפוטנציאל שלהן?

תוכניות הנחיה אישית לתלמידים מחוננים בארצות הברית ובקנדה הצליחו להתמודד עם סוגיות אלו בקרב קבוצות אוכלוסייה⁶ שרמת המחוננות שלה גבוהה במיוחד^{7,8}, ובאופן ספציפי בקרב בנות מחוננות^{9,10}.

לאור המחקרים שצויינו לעיל, פועל האגף לתלמידים מחוננים ומצטיינים במשרד החינוך כדי שתלמידים מחוננים יפיקו תועלת ייחודית מיצירת קשר אישי הדוק עם מנחה-עמית מקצועי, מומחה מן המעלה הראשונה בתחומו, שיאפשר להם להתנסות במחקר בתחומי דעת ויצירה. במהלך התנסות ייחודית זו יוכלו התלמידים לפתח יכולות חקר ויצירה שקשה לפתחן בסביבת הכיתה, הן בזכות הליווי האישי של המנחה, הן כתוצאה מהחשיפה למבנה הדעת ולידע העדכני של התחום, והן בזכות ההתנסות המעשית עם אתגרים בתחום תוכן מסויים. כל זאת, תוך רכישת כלים להתמודדות עם מכשולים ותסכולים, בלויית הצלחות ונקודות אור שהתחום מזמן. התנסות זו תסייע לתלמידים מחוננים לממש את הפוטנציאל שלהם ולגבש את זהותם המקצועית לקראת בחירת קריירה עתידית.

מסיבה זו החליט האגף לתלמידים מחוננים ומצטיינים במשרד החינוך ליזום תוכנית ארצית ובמסגרתה לאתר ולטפח מתבגרים מחוננים מכל קצוות הארץ. למטרה זו הוקמה ועדת היגוי לתוכנית שבראשה עומד מנחם נדלר, מנהל האגף. ועדת ההיגוי מסייעת לעצב את מסגרת התוכנית ואת עקרונותיה ומלווה את פעילותה. צוות מומחים ממכון סאלד מפעיל את התוכנית בשותפות עם האגף, החל מינואר 2009, ומעריך אותה בהערכה מעצבת.

מטרת התוכנית

מטרת התוכנית היא לטפח מנהיגות עתידית ופורצת דרך בישראל בתחומי תוכן שונים.

⁶ Conley, J. (2003). Science education programs for middle school and high school students sponsored by the Howard Hughes Medical Institute. In P. Czermely & L. Lederman (Eds.), *Science education: Talent recruitment and public understanding* (pp. 129-137). Amsterdam: IOS Press.

⁷ Connolly, P., Szczesniak, E., & Nayak, L. (2003). Mentor, Merlin, muse: Inspiring poets and scientists. The Illinois Mathematics and Science Academy Program. In P. Czermely & L. Lederman (Eds.), *Science education: Talent recruitment and public understanding* (pp. 138-146). Amsterdam: IOS Press

⁸ Shmookler, S. R. (2003). Howard Hughes Medical Institute sponsored student and teacher internships at the National Institutes of Health in Bethesda, Maryland, USA. In P. Czermely & L. Lederman (Eds.). *Science education: Talent recruitment and public understanding* (pp. 169-177). Amsterdam: IOS Press

⁹ Armour, M. (1987). *Women into science, engineering and technology. Strategies for change at the University of Alberta*. Contributions to the Third Girls Science and Technology (GASAT) conference, Ann Arbor, Michigan.

¹⁰ Sloat, B. F., & Deloughry, C. M. (1985). *Summer internships in the science for high school women*. Ann Arbor, University of Michigan, Center for the Education of Women.

יעדי התוכנית

1. מתן הזדמנות לתלמידים מחוננים שיש להם תשוקה וסקרנות עזה להעמיק בתחום עניין ממוקד, מעל ומעבר למצופה, ולממש את הפוטנציאל הטמון בהם.
2. מתן אפשרות לתלמידים מחוננים לבחון לעומק כיוונים שונים לקראת בחירת קריירה עתידית.

מהלך התוכנית

שלב ראשון: יצירת הצמדים מנחה-עמית – תלמיד (ספטמבר-נובמבר 2019)

המטלה העיקרית בשלב זה הייתה לאתר תלמידים לתוכנית ולצוותם למנחים-עמיתים המתאימים ביותר, על בסיס תחומי עניין ונתוני התאמה אישיים.

הקריטריונים שהנחו את מכון סאלד באיתור המועמדים לתוכנית הותוו על ידי ועדת ההיגוי בשנת 2009, לקראת פתיחת המחזור הראשון של התוכנית. בראש הוועדה עומד מנהל האגף לתלמידים מחוננים ומצטיינים במשרד החינוך, מר מנחם נדלר. הוועדה כוללת נציגים ממוסדות להשכלה גבוהה כמו פרופסור דניאל זייפמן, הנשיא לשעבר של מכון וייצמן, פרופסור ורדה שושן-ברמץ, מנהלת המכון הלאומי לביו-טכנולוגיה באוניברסיטת בן גוריון, ומפקד תוכנית תלפיות בצה"ל. ועדת ההיגוי גיבשה את הקריטריונים לבחירת התלמידים המשתתפים בתוכנית ואישרה את התהליך שהוצע לאיתורם ולטיפוחם וכן את תהליך ההערכה המעצבת. תהליכים אלה יפורטו בהמשך.

הקריטריונים לבחירת התלמידים

- **תשוקה להעמיק בתחום עניין:** סקרנות, ייזום פעילויות והעמקה בתחום עניין בצורה יוצאת דופן.
- **יצירתיות:** גישה לסוגיות, לתופעות ולבעיות שונות מכיוונים בלתי צפויים ומזוויות הסתכלות רבות, חדשניות ומפתיעות, והצעת מספר דרכים לבחון תופעות ולפתור בעיות ולא היצמדות לדרך אחת; העלאת רעיונות מקוריים ובלתי שגורתיים, תוך קישורם למציאות; מציאת יחסים חדשים בין קטעי ידע וניסיון מוכרים; נכונות לנסות דברים לא בטוחים ולקחת סיכונים, לעמוד על דעות ולהגן עליהן, גם כאשר הן אינן מקובלות על דעת הרוב.
- **שאלת שאלות:** שאילת שאלות מסדר חשיבה גבוהה העוזרות להעמיק את ההבנה בנושאי התעניינות שונים. מיקוד השאלות בסוגיות ודילמות מורכבות הדורשות הבהרה, חשיבה והעמקה.
- **חשיבה ביקורתית:** הטלת ספק בפרדיגמות קיימות, בדיקת כל הנתונים טרם הסקת מסקנות, הבחנה בין עמדות סובייקטיביות לבין עובדות, זיהוי מידע רלוונטי, הבחנה בין עיקר לטפל, הבחנה בין תוצאות ומסקנות.
- **אינטגרציה של ידע חדש:** שימוש בידע בהקשרים שונים המביא ליצירת ידע חדש.
- **שאיפה לאתגרים:** התייחסות לקשיים ולתסכולים כאל אתגרים.
- **התמדה:** חתירה לקראת מטרות ויעדים בדבקות, והשלמת פעולות בנושאי עניין שונים.
- **רגישות להיבטים מוסריים וחברתיים:** הפגנת מעורבות חברתית בנושאים שונים, גילוי רגישות להשלכות של מעשים על הזולת, התייחסות להיבטים חברתיים ומוסריים כחלק מההתנהלות היומיומית ומהוויית החיים.

תהליך מיון המועמדים לתוכנית (ספטמבר-נובמבר 2019)

תהליך המיון של התלמידים לתוכנית מוצג ב**תרשים 11** – התהליך הוא מעין פירמידה הפוכה המתחילה מלמעלה בבסיס רחב, המתייחס **לכל** התלמידים המיועדים בשכבת היעד של התוכנית – כיתות י-יא – ומצטמצם באופן הדרגתי לקראת בחירת התלמידים שישתתפו בתוכנית.

תרשים 1: תהליך יצירת הצמדים של מנחים-עמיתים עם תלמידים המשתתפים בתוכנית (ספטמבר-נובמבר, 2019)



כפי ש**תרשים 1** מורה, קיימים מספר שלבים בתהליך המיון של המועמדים לתוכנית – המיון מתחיל בפנייה לכלל אוכלוסיית התלמידים המיועדים הלומדים בכיתות י ו-יא, ובמעבר משלב לשלב המיקוד הוא בקבוצת התלמידים המעוניינים להשתלב בתוכנית ומתאימים לה.

להלן פירוט השלבים:

שלב א: הפצת מידע על התוכנית – האגף לתלמידים מחוננים ומצטיינים במשרד החינוך מוציא מכתבים לכלל התוכניות למחוננים הלומדים בכיתות י ו-יא בארץ ומסביר את הייחוד שבתוכנית – התמקדות בעבודת חקר אישית של תלמידים מחוננים עם אנשי מקצוע מהשורה הראשונה באקדמיה ובמכוני מחקר, באומנויות, בתעשייה, ובכל תחום שהמשתתפות והמשתתפים בוחרים – בבחינת **“חנוך לנער על פי דרכו”** (משלי, מ"ג: כ"ב). התוכנית מוצגת בכנסים שמארגן האגף לתלמידים מחוננים ומצטיינים וגם באתר האגף ובאתר מכון סאלד, המפעיל את התוכנית. אנשי חינוך, העובדים עם תלמידים מחוננים, מתבקשים להמליץ על מועמדים לתוכנית בהתאם לקריטריונים שפורטו לעיל. מועמדים המעוניינים להשתתף בתוכנית מקבלים שאלון אישי שבו הם מפרטים את תחומי התעניינותם ופעילותם בתחומים אלו

¹¹ Zorman, R., Nadler, M., Zeltser, P. & Bashan, Z. (2018). The national mentoring program in Israel: model for developing leadership among highly gifted students. In B. Wallace, D.A. Sisk, J. Senior (Eds.) *The SAGE Handbook of Gifted and Talented Education*. (Pp. 343-356). Sage: London.

בתוך בית הספר ומחוצה לו, וכן את פעילותם החברתית ואת דרכי ההתמודדות שלהם עם אתגרים שונים בחיים. צוות מכון סאלד, הכולל את המנהלת, הרכזת והיועצת החינוכית של התוכנית, מסנן את המועמדים לאחר קריאת ההמלצות והשאלונים האישיים.

שלב ב: סינון מועמדים לתוכנית באמצעות ראיונות אישיים הנערכים על ידי צוות מכון סאלד, הכולל את המנהלת, הרכזת והיועצת החינוכית של התוכנית. מטרת הראיונות הינה להתחקות אחר היבטים אישיותיים, כגון התמדה ונחישות להתמודד עם אתגרים, שנמצאו כמשפיעים באופן מכריע על הישגיהם של תלמידים בלימודים אקדמיים גבוהים, בסקירת ספרות עכשווית¹² שנערכה על ידי קרן קרנגי בארה"ב – Carnegie Foundation for the Advancement of Teaching.

בזמן ההמתנה לריאיון, קיבלו המועמדים מאמר אקדמי לקריאה. הראיונות מתמקדים בתובנות ובשאלות שעלו מתוך המאמר, וכן במוטיבציה של המועמדים להצטרף לתוכנית, נכונותם לשנות סדרי עדיפויות במטרה להקדיש זמן ומאמץ ללמוד באופן עצמאי ולהתמיד בעבודת חקר, תוך התמודדות עם אתגרים ברמה אקדמית גבוהה מאוד. בהתאם לראיונות אלו, מחליט הצוות מי מהמועמדים ימשיך בתהליך האיתור.

במקביל, רכזת התוכנית בוחנת את מאגר המנחים-עמיתים שנבנה על ידי מכון סאלד על מנת לאתר מנחים ומנחות בעלי תחומי עניין הקרובים ביותר לתחומי הדעת של המועמדים לתוכנית, וכן לאתר מנחות ומנחים נוספים בהתאמה לתחומי עניין חדשים של המועמדות והמועמדים בכל מחזור ומחזור.

שלב ג: איתור מועמדים – בשלב זה מתראיינים המועמדים במקום עבודתו של מנחה-עמית מתחום התוכן יחד עם נציגי צוות התוכנית. לפני הריאיון מקבלים כל המועמדים מהמנחה-עמית המראיין אותם משימת ביצוע המתייחסת לתחומי התעניינותם. במהלך הריאיון מתנהל דיון על התובנות ועל השאלות שעלו מתוך המשימה, לצד שאלות על היבטים קוגניטיביים ואישיותיים אחרים.

שלב ד: התאמת הצמדים של מנחים-עמיתים ותלמידים – צוות התוכנית מחליט מי מבין המועמדים ישתתף בתוכנית ומי מבין המנחים-העמיתים ינחה אותו.

בתום התהליך שתואר לעיל, אותרו במחזור השביעי של התוכנית 15 צמדים של מנחים-עמיתים ותלמידים. 33% (5) מהתלמידים הגיעו מהפריפריה החברתית או הגיאוגרפית. בלוח הבא מוצגים אפיוני התלמידים מבחינת מגדר ותחומי החקר.

לוח 1: אפיוני תלמידי המחזור השביעי של תוכנית מנחים עמיתים מבחינת מגדר ותחומי חקר (n=15)

תחומי חקר מגדר	מדעים מדויקים ומדעי החיים	מדעי חברה והרוח	מוזיקה, אומנות וקולנוע
בנים	4	3	2
בנות	4	1	1
סה"כ	8	4	3

¹² Headen, S. & McKay, S. (2015). *Motivation matters. How new research can help teachers boost student engagement*. Stanford, CA.: Carnegie Foundation for the Advancement of Teaching.

מהלוח עולה ש-40% מהתלמידים (6 מתוך 15) במחזור השביעי הן בנות. יותר ממחצית מהמשתתפים בחרו בתחום חקר ממדעי החיים או מהמדעים המדויקים; ארבעה תלמידים בחרו בתחום חקר ממדעי החברה והרוח, ושלושה תלמידים – במוזיקה, באומנות ובקולנוע.

בנוסף, הורחב מאגר המנחים-עמיתים במכון סאלד, ששימש את התוכנית עד עתה, וימשיך לשמש את התוכנית בשנים הבאות. כעת כולל מאגר המנחים-עמיתים כ-130 מומחים בתחומי תוכן שונים.

הפעלת התוכנית – 12 חודשים (נובמבר 2019-נובמבר 2020)

המחזור השביעי של תוכנית מנחים עמיתים החל בחודש נובמבר 2019, ופעל בשני צירי פעילות:

א. טיפוח אישי ומעמיק של כישרון בתחומי ההתעניינות של התלמידים המשתתפים בתוכנית באמצעות מפגשים אישיים עם מנחים-עמיתים, לפחות פעמיים בחודש, למשך עשר שעות חודשיות. במפגשים אלו הם עבדו יחד על עבודת חקר בתחומי התעניינותם המשותפים, בהתאם לבחירתם. יש לציין ש-15 תלמידים התחילו את התוכנית ותלמידה אחת פרשה עקב נסיבות אישיות.

עקב מגפת הקורונה שפקדה את ישראל, החל מאמצע חודש מרץ 2020 ועד לתחילת יולי 2020, הוקפאו המפגשים האישיים פנים מול פנים בתוכנית, בהנחיית משרד החינוך, אולם הם לא פסקו. כביטוי למחויבות העמוקה של המנחים-עמיתים לתוכנית, הם ביקשו להמשיך ולהנחות את התלמידים **בהתנדבות** באופן וירטואלי ובתמיכה מרחוק. בקשה זו התקבלה בברכה, הן במכון סאלד והן באגף לתלמידים מחוננים ומצטיינים במשרד החינוך.

ב. פיתוח מיומנויות ומחויבות לעבודת החקר בקרב התלמידים המשתתפים בתוכנית באמצעות כנסים קבוצתיים עם צוות התוכנית. עד פרוץ מגפת הקורונה, התקיימו שני כנסים קבוצתיים של צוות התוכנית עם התלמידים – כנס הפתיחה וכנס מיומנויות רכישת מיומנויות למידה:

כנס הפתיחה נערך במכון סאלד בהשתתפות התלמידים, ההורים, המנחים וצוות האגף לתלמידים מחוננים ומצטיינים. בכנס הוצג הרקע לתוכנית ועקרונותיה, התקיימה סדנה לתלמידי התוכנית שבה נערך ה"חוויה" בינם לבין המנחים-העמיתים וכן תיאום ציפיות, ובנוסף התקיימה סדנה לתיאום ציפיות עם הורי התלמידים.

כנס רכישת מיומנויות ומפגש חברתי שבו התנסו התלמידים בסדנה שעסקה במיומנויות של איתור מידע ממאמרים ומספרים באנגלית, שהיא שפת המקורות של מרבית עבודות החקר, במהותה של כתיבה אקדמית, ובפיתוח מיומנויות חשיבה ביקורתית. בנוסף נערך דיון בדרכי התמודדות עם אתגרים בעבודות החקר שלהם, כגון קביעת סדרי עדיפויות וניהול יעיל של זמן.

שני מפגשי זום – לאחר פרוץ מגיפת הקורונה, התקיימו שני מפגשים עם התלמידים בזום כדי לשמוע כיצד הם מתמודדים עם המצב המורכב שנוצר עקב המגיפה, כיצד הם מתקדמים בעבודת החקר עם המנחים באופן וירטואלי, ובמפגשים פיזיים, כשמתאפשר, ולסייע להם לסיים את עבודתם לקראת סוף שנת הפעלת התוכנית.

✚ **כנס הסיום בזום** של המחזור יתקיים בדצמבר 2020, באופן מקוון, ומיועד לתלמידים שהשתתפו בתוכנית ולבני משפחותיהם, למנחים-העמיתים, לצוות האגף לתלמידים מחוננים ומצטיינים ולצוות התוכנית. בכנס זה תציג מנהלת התוכנית את ממצאי ההערכה של התוכנית ותוצאותיה, שיפורטו בהמשך. כל התלמידים יציגו את עבודותיהם בתערוכת פוסטרים, וחלקם יציגו את תוצרי עבודות החקר שביצעו בתחומי העניין שלהם ויספרו על התהליך ועל התרומה שהפיקו מהתנסויותיהם הייחודיות בתוכנית.

מאחר שמחזור זה התקיים במרבית השנה במהלך **מגפת הקורונה**, הרי שעבודת המנחים והתלמידים לוותה בהתמודדות עם אתגרים לא מעטים, שעליהם העידו הן התלמידים והן המנחים:

מדברי התלמידים

✚ ירידה במוטיבציה בהעדר מפגשים פנים אל פנים

הקורונה הייתה קושי יחיד ועצום בו נתקלתי במהלך השנה. עבודתנו התבססה בעיקרה על **ההפריה שלנו זה את זה במפגשינו, הפריה שהמרחק הפיזי גדע.** לא הצלחתי להניע עצמי לידי עבודה ברמה עמוקה בהיעדר מנחתי. בתחילת הקורונה עוד הצלחתי לעבוד ולחקור בעצמי אך איבדתי את שאיפותיי להניע עצמי. רק לאחר זמן ממושך התיישבתי והמשכתי במחקר בליט ברירה; תקופת הקורונה הרסה דברים... **הורידה לי מוטיבציה** בקשר לתוכנית בעיקר כי אין דרך להתמודד עם הקשיים האלה, כי אי אפשר לתקן אותם וחייבים להשלים עם המצב. **הרגשתי שהייתי יכול למצות הרבה יותר מהתוכנית אם הייתי יכול באמת להיפגש עם המנחה ולהתקדם ביחד במקום שאצטרך לעשות הכול מהמחשב בבית.**

✚ שילוב בין הלמידה מרחוק בבית הספר לבין הפעילות בתוכנית

עד תחילת משבר הקורונה לא הייתה לי שום בעיה לשלב בין הלימודים לתוכנית. **כאשר התחילו הלימודים המקוונים, בית הספר שלי לקח את זה קצת יותר מדי ברצינות, התחלנו את הלימודים בשמונה בבוקר וסיימנו בשש בערב,** ולאחר מכן היינו צריכים להגיש לפחות שלוש עבודות ליום... אז כן, לא ממש יכולתי לשלב את התוכנית עם הלימודים בתקופה הזאת. למרות זאת הצלחנו להיערך מחדש ולנצל את החופש להשלמת הפערים.

✚ בעיות שהתעוררו עקב הסגר, כמו למשל השגת רכיבים לתוצר

הקושי העיקרי בתוכנית הזאת היה בתקופת משבר הקורונה שרכיבים שהזמנו לא הגיעו בגלל הסגרים ולי לא הייתה אפשרות להגיע לשם, ולכן היינו צריכים להגדיר מחדש את הפרויקט. לאחר ניהול סיכונים החלטנו ללכת בדרך שלי ובסוף חודש יוני התחלנו לעבוד באינטנסיביות והצלחנו לעמוד ביעדים שלנו.

למרות כל האתגרים והקשיים, חלק מהתלמידים ציינו שהם **נתרמו** בתקופה זו בזכות התוכנית, ובעיקר במיומנויות הלמידה העצמית שאותן רכשו במסגרת התוכנית:

התוכנית לימדה אותי על **התמדה גם בתקופה קשה** כמו הקורונה, **דבקות במטרה ואת היכולת להרים את עצמי מתקופה לא פשוטה מבחינת השראה**... במיוחד בתקופת הקורונה היה קשה להיפגש ולעבוד, ונדרשתי לחקור **סגנונות שונים ולהוציא מתוך ליבי את האומנות שרציתי ליצור.** למדתי לחפש לעצמי **מקורות** שיתנו לי השראה, למשל לקרוא מאמרים, לשמוע הרצאות ולצפות בתוכניות; למדתי המון דרכים **להשלים חומר וללמוד באופן עצמי,** שהתבלטו במיוחד בתקופת הקורונה כשחבריי לכיתה התקשו ללמוד מרחוק ולהיות

בעלי משמעת עצמית ללמידה, אני הרגשתי שבזכות אסטרטגיות הלמידה שפיתחתי בתוכנית, אני צולחת את המשבר בקלות; בעקבות משבר הקורונה למדתי איך להתמודד עם משברים, לנהל סיכונים ולשנות תוכניות עבודה על פי האילוצים המתהווים.

מדברי המנחים

חלק מהמנחים ציינו אתגרים שנבעו ממשבר הקורונה וחוסר היכולת לניהול דיאלוג פנים אל פנים עם התלמידים. בחלק מהמחקרים חל עיכוב לאור הסגר וחוסר האפשרות לאינטראקציה עם אנשים, להפעלת מעבדות ולעומס של חלק מהמנחים בתקופה זו.

עיונים בביצוע עבודת החקר

הקורונה הציבה לנו קושי בדמות ניתוק ההמשכיות, אלמנט שהציב אתגר מיוחד שקשור בהתמדה והדיאלוג בינינו... אני מאמינה שבימים ללא קורונה היינו יכולות להעמיק יותר בעבודה בשטח... אני לא משוכנעת שהשנה הנוכחית, שעוברת על כולנו, יכולה להוות דוגמה לאור האתגרים בתקשורת בעת קורונה, הפסקת התוכנית וחזרתה; השנה התנאים היו מורכבים במיוחד והקשו על התקדמות הפרויקט. הקורונה מנעה מאיתנו מלהמשיך לשלב איסוף הדאטה [נתונים], שהוא השלב המהותי של הפרויקט... העיכוב שנכפה עלינו היה כמובן מתסכל, לא רק עבורה, עבור המעבדה כולה. התלמידה התמודדה עם המצב בצורה בוגרת ואחראית, וניצלה את הזמן על מנת להשלים את כתיבת העבודה ולהעמיק בעבודה התיאורטית; המגבלות היחידות שחשתי בהן היו בשל הקורונה, שמנעה מאיתנו מפגשים פיזיים למשך תקופה ארוכה ובכך עצרה את התקדמות המחקר; משבר הקורונה גרם לעיכוב, בעיקר בגלל שאני הייתי מאוד עמוס בתקופת השיא של המחלה, אך למרות זאת, הצלחנו להגיע לסיום הפרויקט.

למרות האתגרים ציינו המנחים יוזמות ודרכים שנקטו התלמידים כדי להתקדם בפרויקט ולעיתים אף לבצע שינויים בשלבי המחקר ובמאפייניהם:

פיתוח גמישות ואדפטציה לעמימות ולתנאים משתנים

ראוי לציין שעבודתנו המשותפת התבצעה בחלקה בצל הקורונה, וברגע שלא ניתן היה להיפגש, התלמיד הפגין יוזמה מבורכת לקדם את המחקר: הוא ביקש לקבל חומר מצולם שיוכל לחקור באופן עצמאי בביתו, וכך עשה; התלמידה התמודדה בצורה נפלאה עם הקשיים המובנים בעבודה בתקופת הקורונה, והצליחה לשלב בין הלימודים, הפרויקט ועבודה מהבית. הוחלט אף לנצל את המצב לביצוע סימולציה של ניתוח עסקי כחלק מתהליך ניהול הפרויקט להתמודדות מול חוסר זמינות חומרי הגלם אשר נתקעו במכס בתקופת הסגר; במחקר שלנו התקיים מצב של ריבוי אי ודאויות בשל אופי המחקר ובעיקר בשל סיטואציית הקורונה – הקושי להשיג נבדקים בשל הסגר ועוד. בהתאמה, התלמיד נדרש להרבה שינויים.

חלק ב: הערכת התוכנית

בהתאם להמלצתה של ועדת ההיגוי, לוותה התוכנית בהערכה מעצבת כדי לבחון את התקדמותה לקראת הגשמת מטרותיה ויעדיה. מכון סאלד ליווה ברציפות את תהליך העבודה של הצמידים על מנת להבטיח שהקשר פועל היטב, הן בהיבט המקצועי והן בהיבט האישי. הליווי נערך באמצעות שיחות טלפון אישיות שנערכו על ידי רכזת התוכנית עם התלמידים, וכן באמצעות שיחות אישיות עם המנחים-עמיתים, בהתאם לצורך. כמו כן, לרשות התלמידים, ההורים והמנחים-העמיתים עמדה יועצת חינוכית ותיקה המתמחה בעבודה עם תלמידים מחוננים ועם מוריהם, שעבדה אתם בדרך פרטנית, בהתאם לנסיבות. התלמידים והמנחים-העמיתים מילאו גם שאלוני משוב תקופתיים, ובעקבות המידע שעלה מהם נערכו שינויים בתהליך העבודה בתוכנית במהלך השנה.

השגת מטרת התוכנית ויעדיה

כאמור, מטרת התוכנית היא לטפח מנהיגות עתידית בישראל ופורצת דרך בתחומי תוכן שונים. אנו פרטנו את המטרה לשני יעדים מדידים לאחר שנת ההתנסות של התלמידים והמנחים-עמיתים בתוכנית. ברצוננו להתייחס עתה לעדויות שנאספו במהלך השנה באשר להשגת כל אחד מן היעדים.

באשר ליעד הראשון של התוכנית – מתן סיוע לתלמידים מחוננים בעלי תשוקה וסקרנות עזה להעמיק בתחום עניין ממוקד, מעל ומעבר למצופה, ולממש את הפוטנציאל הטמון בהם – התייחסנו לכמה היבטים: התמדת התלמידים, תוצרי עבודתם ותרומת התוכנית לטיפול הידע, הסקרנות ורכישת כלים ללימוד עצמי.

התמדת התלמידים

93% (14 מתוך 15) התלמידים שהתחילו במחזור זה בתוכנית אכן התמידו בה במהלך שנת הלימודים. כפי שצוין, תלמידה אחת פרשה מהתוכנית עקב בנסיבות אישיות.

תוצרים

כל 14 התלמידים שהתמידו בתוכנית הגיעו לתוצר, בתום שנת לימודים אחת, כמו עבודת חקר, יצירה בתחומי המוזיקה, האומנות והקולנוע וביצוע פרויקט בתעשייה. כל התוצרים היו באיכות גבוהה, לפי חוות דעתם של המנחים המומחים בתחום.

93% מבין התלמידים (13 מתוך 14 תלמידים) הגיעו להישגים יוצאי דופן לפי אמות מידה מקצועיות. בלוח הבא מוצגים נתונים לגבי אופני ההישגים יוצאי הדופן וכן דוגמאות להישגים אלו.

לוח 2: הישגים יוצאי דופן של התלמידים במחזור השביעי של התוכנית * (n=13)

דוגמאות להישג	מספר התלמידים	אופי ההישג
<ul style="list-style-type: none"> תלמידה אחת בצעה עבודת חקר בנוירוביוכימיה במעבדה באוניברסיטת תל אביב. תלמיד אחד השלים קורס לתואר שני בנושא מימון וכלכלה התנהגותיים, וכן קורס אתיקה בניסויים בבני אדם וקיבל תעודת הסמכה לערוך ניסויים. תלמידה אחת השלימה קורסים בטכניון בכימיה ובביולוגיה וצברה נקודות זכות לתואר. תלמיד אחד השלים קורסים במתמטיקה באוניברסיטה הפתוחה. תלמידה אחת למדה באוניברסיטה הפתוחה במסגרת תוכנית אקדמיה בתיכון. תלמיד אחד השלים קורס מבוא לסטטיסטיקה ולשיטות מחקר במדעי החברה. תלמיד אחד לומד תואר ראשון במדעי המחשב ומתמטיקה בטכניון. 	7	למידה מתקדמת למידה במוסדות אקדמיים
<ul style="list-style-type: none"> שבעה תלמידים ימשיכו לעבוד עם המנחה-עמית בתחום החקר שבו עסקו בתוכנית. תלמידה אחת תמשיך לעבוד בפיתוחי המשך לפרויקט שבו עסקה ובפרויקטים נוספים. החברה מעוניינת להמשיך ולחשוף אותה לניהול פרויקטים מורכבים בתחום הרובוטיקה הרפואית, כולל עיצוב מוצר, תכנון תלת ממד ויצירת ממשק משתמש הכולל אלמנטי רובוטיקה ואוטומציה. 	8	המשך עבודה של תלמיד עם מנחה-עמית
<ul style="list-style-type: none"> חמישה תלמידים מתכננים להציג את עבודתם בכנסים מקצועיים. תלמיד אחד יציג את הסרט שיצר בפסטיבל "אנימיקס" בסינמטק תל אביב – פסטיבל בינלאומי לאנימציה. תלמידה אחת תציג את הפרויקט שעליו עבדה ברובוטיקה רפואית לצוות הרפואי המקצועי של החברה (רופאים חוקרים, סמנכ"ל קליניקה ונשיאי איגוד הגניקולוגיה), ואף לרופא יועץ אמריקאי, מנכ"ל בית חולים בוורג'יניה לצורך "תיקוף השוק" ובחינת יכולות נוספות שניתן להטמיע כחלק מפרויקט ההמשך. 	7	הצגת העבודה בכנסים מקצועיים
<ul style="list-style-type: none"> שבעה תלמידים, יחד עם המנחים-העמיתים, מתכננים לפרסם את עבודתם בכתבי עת מקצועיים. 	7	פרסום בכתבי עת מקצועיים
<ul style="list-style-type: none"> תלמיד אחד השתתף בתחרות גרוסמן ב-2019 וב-2020 וזכה במקומות השלישי והשני בהתאמה. תלמידה אחת הגיעה לגמר של תחרות מדעני ומפתחי העתיד וקיבלה צל"ש באולימפיאדה ע"ש אילן רמון עם הצוות. סרטו של תלמיד אחד יוצג בתחרות השנתית "אסיף" של איגוד האנימציה הישראלית במסגרת הסרטים העצמאים. תלמיד אחד השתתף בתחרות הערים 2018-2019 וזכה בציון לשבח, וכן בתחרות גרוסמן 2018 וזכה במקום שלישי. תלמידה אחת השתתפה בתחרויות RoboCup – תחרות רובוטיקה בעלת שלושה מקצים. השתתפה במקצה של הופעות במה – מופע או הדגמת רובוטים. בשנים 2017-2019 זכתה הקבוצה באליפות ישראל ובתחרויות בינלאומיות: בשנת 2017 ביפן זכתה במקום ראשון במכניקה ותוכנה ומקום הרביעי בתחרות הכללית; ב-2018 זכתה במקום השלישי בתחרות הבינלאומית בקנדה; ב-2019 בתחרות הבינלאומית באוסטרליה, בקטגורית מתקדמים, זכתה במקום הראשון בביצוע ובמקום הרביעי בתחרות הכללית. 	5	השתתפות בתחרויות ובאולימפיאדות
<ul style="list-style-type: none"> תלמידה אחת פיתחה אבטיפוס לשלט אינטואיטיבי למערכת רובוטית לניתוחים המאפשר הפעלה של שתי זרועות רובוטיות באופן מלא ובמקביל על ידי שימוש בשתי ידיו של המפעיל. השלט מתפעל מפרקים דמויי כתף, מרפק וכף יד עבור כל זרוע, באמצעות סדרת ג'ויסטיקים אשר כל אחד מהם שולט על מפרק נפרד. השלט נבנה תוך שימוש ברכיבי מדף נגישים ופיתוח תוכנת embedded ייעודית, ופותח באופן גמיש המאפשר הוספת רכיבים לבדיקת יכולות נוספות. התוצר הסופי כולל סרטון הדגמה המציג את יכולות השלט. תלמיד אחד סייע בפיתור בעיה פתוחה אודות יציבות של רשתות. הוא הראה שיש תנאים – עד כה לא ידועים – שבהם הרשת יציבה לזמן מוגבל. האתגר כרוך בפיתוח אנאליטי ובתכנות מתקדם. תלמידה אחת פיתחה אתר במסגרת בגרות במדעי המחשב. 	7	פיתוח היבטים יישומיים

דוגמאות להישג	מספר התלמידים	אופי הישג
<ul style="list-style-type: none"> • תלמיד אחד פיתוח פרויקט ב-PYTHON לביצוע חישובים מורכבים כמו חישוב סוגי אינטגרלים שונים שחלקם לא פתורים מתמטית, גם חישובי נגזרת, וכן תוכנה ששולחת התראות כאשר יש עדכון באתרים שנבחרו מראש. • התובנות שנרכשו במהלך המחקר של תלמיד אחד יוכלו להיות מיושמות בכל פדגוגיה שעושה שימוש בהוראה מרחוק במטרה לאפשר התאמה (Customization) ככול שאפשר על פי מימדי אישיות של התלמידים. • תלמיד אחד שילב יצירה בתחומים רבים כמו כתיבה יוצרת, עיצוב, הנפשה, הלחנה וביצוע של יצירת מוזיקה מקורית לסרט. התלמיד הוא גם ראש סקציית כלי ההקשה בתזמורת הייצוגית של עיר מגוריו. • תלמידה אחת יצרה גוף עבודות של יצירות אמנות בדיו. 		

*מספר תלמידים הגיעו להישגים יוצאי דופן בכמה אופנים ולכן מספרם גבוה יותר ממספר התלמידים הכולל.

תרומת התוכנית לתלמידים – על פי דיווחי התלמידים

בלוח הבא מוצגים דיווחי התלמידים (במספרים ובאחוזים מכלל התלמידים) לתרומת התוכנית עבורם בסוף שנת ההתנסות, בהתאם לרכיבים שונים המתייחסים ליעדי התוכנית שצוינו לעיל. רכיבים אלו כוללים: רכישת ידע, העלאת הסקרנות, הגברת המוטיבציה להמשיך ולהעמיק בתחומי החקר שבהם עסקו, רכישת כלים ללימוד עצמי, חשיפה לסגנון העבודה בתחום החקר, וחשיבה על כיוונים של קריירה עתידית.

לוח 3: דיווחי התלמידים בסוף שנת התוכנית על תרומתה (במידה רבה או רבה מאוד)

(במספרים ובאחוזים) ובממוצעים על סולם מ-1-5 (n=14)

תרומה / מספר, אחוז וממוצע תלמידים	רכישת ידע	העלאת סקרנות	הגברת מוטיבציה	רכישת כלים ללימוד עצמי	היכרות עם סגנון עבודה	חשיבה על כיווני קריירה עתידיים
מספר תלמידים	14	13	12	9	13	6
אחוז תלמידים	100%	93%	86%	64%	93%	43%
ממוצע תלמידים	4.7	4.7	4.5	3.9	4.5	3.4

אשר ליעד הראשון של התוכנית – מיצוי הפוטנציאל של תלמידים מחוננים בתחומי התעניינותם באמצעות עבודה אינדיבידואלית צמודה עם מודלים להשראה (מנחים-עמיתים) – הרי שכל התלמידים, ציינו כי התוכנית תרמה במידה רבה או רבה מאוד לרכישת ידע חדש בתחומי החקר שלהם ובתחומים משיקים – אם באמצעות קריאת חומר רב, אם באמצעות התנסות ואם בהנחיית המנחה (ממוצע של 4.7 בסולם מ-1 עד 5), ולדברי התלמידים:

הידע שלי קפץ בכמה רמות מקריאה של חומר בסיסי יחסית וקלסיקות מוקדמות יותר לחומרים מתקדמים יותר, מחשבתי וכוונולוגית, ולביקורת על הקלסיקות. הכרתי המון תחומים חדשים, נישתיים יותר; קראתי ודנתי רבות על מה שנעשה עד כה בתחום התודעה והרצון החופשי ולמדתי רבות על הדרך בה המחקרים בתחומים אלו נעשים; התחלתי ללמוד על נושאים שלעולם לא הייתי חושב ללמוד אותם קודם, כמו פסיכולוגיה וסטטיסטיקה; המנחה סיפק לי נקודת מבט איך נראה אנימטור מקצועי, מה המחשבה שהולכת מאחורי העשייה ואיך ומה עושים בשביל לקבל תוצר מוגמר ומקצועי בזמן מוגדר.

חלק מהתלמידים **השתתפו בקורסים** שאותם העבירו המנחים וציינו את תרומתם הרבה להעשרת הידע:

במסגרת התוכנית **השתתפתי בקורס שהמנחה מעבירה... למדתי רבות על ההיסטוריה, המחקר והידע הקיים בנושא לצד ההיבטים הפילוסופיים**; בזכות התוכנית **זכיתי להקשיב ולהשתתף בהרצאות שהמנחה העבירה**, לנסוע לגלריות ולחקור שפות אומנות שונות... כתוצאה מכך, **נוסף לי ידע רב על אומנות... מכל רחבי העולם. הידע משתקף ביצירותיי, וגם בשיעורים בבית ספרי**; במהלך התוכנית **הגעתי לקורס באוניברסיטה מידי שבוע וכתוצאה מכך הידע שלי התעצם רבות.**

מעבר לידע בתחומי הדעת שבהם התמקדו, הרי שהתלמידים למדו כיצד לבצע **מחקר אקדמי** ולכתוב עבודות אקדמיות:

התוכנית תרמה **להרחבת הידע בתחום החקר**, בדרכים **לחיפוש חומר איכותי, כתיבה מדעית, חשיפה למחקרים מדעיים**; צורת הלמידה שלי השתנתה – **מקריאה פסיבית של טקסטים דידקטיים עברתי לניתוח ולעיבוד**; תרומת התוכנית לידע מתבטאת ביכולת שלי **להבין חומרים אוניברסיטאיים בתחום המחקר הכללי וביצירת דו-שיח פורה ועמוק עם מרצים**; התוכנית חידדה את **הידע שלי בתחום הכתיבה המדעית הנכונה**; קיבלתי **ידע על שיטות עבודה במעבדה**, תכנון ניסויים ואיך לעשות אנליזה לתוצאות ניסוי.

רובם המכריע (13 תלמידים המהווים 93%) של התלמידים ציינו שהתוכנית תרמה במידה רבה או רבה מאוד לטיפול סקרנותם (ממוצע של 4.7 בסולם מ-1 עד 5). ההשתתפות בתוכנית תרמה **לסקרנות בתחומי עיסוקם**, וככל שנחשפו יותר לנושא, שאלו יותר שאלות בתחום החקר שלהם, וגבר הרצון להעמיק בתחום תוך כדי הפעלת חשיבה ביקורתית:

ההשתתפות בתוכנית פתחה בפני **תחום שלם שכמעט ולא הכרתי לפני כן**, תחום יחסית חדש שיש עוד המון מה לחקור וללמוד בו. **קיבלתי צוהר לעולם שלם של ידע שמאוד מסקרן אותי**; נפתח עבורי **עולם חדש שרציתי ל"טרוף" ולנסות כל מה שהוא מציע** – טכניקות חדשות, שפות אומנות, הרצאות וחקר. **הסתקרנתי והמשכתי לקרוא בבית... ה"תיאבון" שלי ליצור אומנות רק הולך וגדל**; אני תמיד אוהב ללמוד דברים חדשים והתוכנית, בעזרת המנחה, **סיפקה לי מספיק חומרים בשביל שלעולם לא אשתעמם מבחינת החומר**. לעולם לא חשבתי שתחום הפסיכולוגיה יסקרן אותי עד כדי כך; התוכנית **עודדה אותי להמשיך ולחקור בתחום שמעניין אותי גם מחוץ למסגרת התוכנית**; התוכנית הובילה להגברת **הסקרנות שלי בתחום ולפיכך בתקופת התיכון גברה לי המוטיבציה להמשך הנושא בתחום הבוטניקה**; כחלק מהתוכנית צפיתי בכמה סרטי אנימציה קלסיים... רציתי לדעת איך דברים נעשים, **והקרתי איך מתבצעת האנימציה, ומה הפך סרטים ספציפיים לעבודות המופת שהם. מאוד נהניתי ורציתי ללמוד עוד על הנושא.**

רובם המכריע (12 תלמידים המהווים 86%) של התלמידים ציינו שהתוכנית תרמה במידה רבה או רבה מאוד להגברת המוטיבציה שלהם (ממוצע של 4.5 בסולם מ-1 עד 5). התלמידים ציינו כי התוכנית הגבירה את המוטיבציה שלהם להמשיך ולעסוק בתחום, ובעיקר העבודה עם המנחה-עמית:

בעקבות הסקרנות וההתלהבות הרבה שפשו במפגשי עם מנחתי, **ההניעה שלי להשכלה גבוהה בתחום גברה**, כפועל יוצא, וחלק רב מהחומר שנוקקתי ללמוד לקראת המחקר היה חומר אוניברסיטאי שהניעני ללמוד אותו בבגרותי; **התוכנית עזרה לי להחזיר לעצמי את המוטיבציה לחקור דברים חדשים**; העבודה על המחקר עוררה בי **רצון להמשיך לחקור** וסביר שאמשיך לפתח רעיונות מתמטיים; התוכנית חיזקה את הרצון שלי להתקדם בתחומי האומנות ולהמשיך להתעמק בהם. **המוטיבציה שלי ליצור באה בגלים אבל התוכנית לחלוטין חיזקה את העובדה שאומנות זה העתיד שלי**, והסקרנות שלי בנושא לא תיפסק; מדעי המוח בכלל

ותחום הפסיכולוגיה הקוגניטיבית אליו נחשפתי בזכות התוכנית מאוד גירה מאד את סקרנותי ואת רצוני ללמוד ולהעמיק בתחום.

התלמידים ציינו כי לאינטראקציה עם המנחה-עמית הייתה השפעה רבה על הגברת המוטיבציה, הן בפן האישי והן בפן המקצועי:

לא סתם קוראים לתוכנית הזאת מנחה-עמית. ההזדמנות לעבוד עם מומחים ואנשי מקצוע נוספים בתחום שהתייחסו אליך כאל שווה היא נדירה מאוד לאנשים בגילי כיוון שלרוב מתייחסים אלינו כאל ילדים חסרי ניסיון שזה התחביב שלהם. בתוכנית הזאת הייתה לי הזדמנות לעבוד עם אנשים המתייחסים אלי כאל שווה ובעלת ניסיון וידע לא פחות מאחרים; הקשר הקרוב עם המנחה היה מתנה ענקית בשבילי לאורך כל התוכנית. היא סיפקה תמיכה... ודרבנה אותי להמשיך... היא נתנה לי המון חופש ליצור, וכיוונה אותי בעדינות מדויקת למטרה שחיפשתי. היא פתחה אופקים עבורי וזיהתה בקלות איזה אמן כדאי לי לראות כדי לחדד את הכיוון בו צעדתי. הרגשתי שיצאתי למסע חובק עולם סביב אומנות עכשווית, והליווי של המנחה היה המפתח להתקדמות שלי; המסירות הרבה של המנחה והנכונות שלו להקדיש עבורי זמן שבועי קבוע על אף לוח הזמנים הצפוף... היא דבר שאינו מובן מאליו ועל כך אני מעריך אותו רבות; לא הייתי מסוגלת לעשות שום דבר ממה שעשיתי השנה לולא המנחה. לא ידעתי מאיפה להתחיל, איך לבחור נושא, אילו חומרים לקרוא ובמה להתמקד; המנחה... נתן לי הכוונה גדולה לגבי מה אני אמור לעשות בכל שלב... ברגע שיצא לשבת עם המנחה, רק אני מולו, נכנסתי לעולם מקצועי, ולא רק קורס בבית ספר.

קרוב לשני שליש (9 תלמידים המהווים 64%) מהתלמידים דיווחו שהתוכנית אפשרה להם לרכוש כלים ללימוד עצמי במידה רבה או רבה מאוד (ממוצע של 3.9 בסולם מ-1 עד 5). התלמידים ציינו שרכשו כלים כמו: מיומנויות ללמידה עצמית, לחשיבה ביקורתית, לחיפוש חומר באינטרנט ולשימוש במקורות ידע שונים, לקריאה ולכתיבה אקדמית כולל בשפה האנגלית:

תוך כדי התהליך למדתי כיצד לקרוא מאמר, להבין מה הידע החסר לי ולהשלים אותו באופן עצמאי בעזרת האינטרנט וניסוח שאלות מתאימות למנחה שלי. לצד זאת גם למדתי כיצד לקרוא מאמרים באופן ביקורתי, וכיצד לכוון את הקריאה בדרך התואמת לידע הקודם שלי; למדתי הרבה יותר דרכים איך ללמוד מאשר רק לקרוא על משהו בוויקיפדיה. למדתי בתוכנית איך לכתוב ולקרוא מאמרים אקדמיים. איך להתמודד עם כמות אינסופית של חומרים ולדעת איך לסנן את העיקר מהטפל; נפתח בפני עולם שלם של טקסטים ברמה גבוהה ומעמיקה הרבה יותר ממה שהכרתי... החידוש המשמעותי ביותר היה היכולת לקרוא מאמרים פילוסופיים באנגלית; למדתי לחפש מקורות שיתנו לי השראה, למשל לקרוא מאמרים, לשמוע הרצאות ולצפות בתוכניות טבע על חיות כך שנושא התערוכה שלי יתחדד.

כלי נוסף שאותו רכשו התלמידות והתלמידים היה משמעת וניהול זמן, וכך ציינו התלמידים:

במהלך התוכנית למדתי לעמוד באופן תקיף בלוח זמני ההגשה; לא פעם הייתי צריך לבחור בין לעבוד לבין לעשות דברים אחרים כמו לבלות עם חברים או הלימודים בבית ספר. בסופו של דבר, למדתי איך לשלב את הכול ולכן התוכנית עזרה לי להתמודד עם דילמות באמצעות הכנת רשימת סדר עדיפויות, ולפעול רק על ידי הרשימה הזאת. ככה הספקתי לעשות את מה שחשוב ודחוף בלי שדעתי תהיה מוסחת; לנהל זמן טוב יותר.

התוכנית העניקה לתלמידים תחושה של העצמה והגברת הביטחון העצמי – בעיקר בעקבות התמיכה והגיבוי של המנחה האישי/ת.

אחת התלמידות ציינה את המעבר מלמידה פסיבית להובלת הפרויקט שבו עסקה בתמיכת המנחה ובהתייחסות אליה כשווה בין חברי הצוות. ההכרה בכישוריה וביטחונה העצמי הובילו אותה לעמידה בלוח הזמנים ובהשגת מטרותיה בתוכנית:

אני חושבת שהשפעה הגדולה ביותר של התוכנית הזאת היא על ההתפתחות האישית שלי. התחלתי את התוכנית בצורה פסיבית למחצה – אני מוכנה ללכת לאן שהמנחה שלי יכוון אותי. במהלך התוכנית הבנתי שבסופו של דבר זה הפרויקט שלי והחלטתי להוביל אותו בכיוון שבחירתי למרות שלדעתם של אחרים כיוון זה קשה יותר, כאשר בחירתי בכיוון הזה קיבלתי את התמיכה המלאה של המנחה שלי... העבודה על פרויקט ממשי עם אנשים מקצועיים והיחס כלפיי כשווה תרמו רבות להרגשה שלי ולביטחון העצמי שלי בנושא. בהתמודדות עם משבר הקורונה, כאשר היה נראה שצריך להגדיר את הפרויקט מחדש, המנחה שלי תמך בי ונתן גיבוי להחלטה שלי ללכת בדרך שיועצים אחרים בפרויקט חששו שהיא קשה מדי, אך אני העדפתי לבחור בה כיוון שהיא התאימה יותר למטרות שהגדרתי לעצמי בתוכנית. עמדתי ביעדים ובזמנים שהגדרתי בתמיכת המנחים שלי בצורה שהפתיעה את המנחים שלי וגם את שאר אנשי ההייטק שאיתם עבדתי... התהליך שעברתי במסגרת הפרויקט תרם מאוד ליכולת שלי להתמודד עם פרויקטים גדולים ולנהל סיכונים.

תלמידה נוספת הצביעה על הצלחתה בהתמודדות עם דילמות שחוותה במהלך התוכנית, בתמיכתה של המנחה אך גם באפשרות לחופש יצירתי:

במהלך השנה האחרונה היו לי הרבה דילמות בתוכנית, למשל מציאת נושא שמעניין אותי, בחירה בטכניקות וקשת צבעונית לתערוכה. כמו כל אמן, היו תקופות שהיה יותר קשה ליצור ותקופות שפחות. התוכנית לימדה אותי על התמדה גם בתקופה קשה כמו הקורונה, דבקות במטרה ויכולת להרים את עצמי מתקופה לא פשוטה מבחינת השראה. המנחה מאוד עזרה לי בכל דילמה, אך גם השאירה אותן לשיקולי ונתנה לי את החופש היצירתי שהייתי זקוקה לו. בזכותה ובזכות המסגרת המדהימה של "מנחים עמיתים", אני מרגישה שגדלתי כאדם וכאמנית.

תלמידים אחרים ציינו את תרומת האינטראקציה עם המנחים לביטחונם העצמי:

זו פעם ראשונה שיש לי "מנטור"... והיה לי מאוד מביך וקשה לדעת איך לגשת אליו. לא ידעתי באיזו מידה צריך להיות רציניים ובאיזו מידה אפשר להיות חברותיים. אני בדרך כלל מאוד מובך להיכנס לסיטואציות כאלה עם אנשים אחרים והאינטראקציה עם המנחה, אפילו אם רק קצת, עזרה לי יותר להיפתח לאנשים חדשים; קודם כל זה תרם לביטחון העצמי שלי. זו פעם ראשונה שאני עושה את זה ולא תמיד היה ברור לי מה השלב הבא ומה אני צריך לעשות עכשיו, והמנחה כיוון אותי לכיוון הנכון.

תרומת התוכנית לתלמידים – על פי דיווחי המנחים-העמיתים

בלוח הבא מוצג משוב המנחים-העמיתים לקראת סיום העבודה עם התלמידים בתוכנית, לגבי פרמטרים שונים של התנהגות התלמידים.

לוח 4: דיווחי המנחים-עמיתים בסוף שנת התוכנית על רכיבים שונים של התנהגות התלמידים

בממוצעים על סולם מ-1-5 (n=14)

תשוקה	יצירתיות	שאלות שאלות	חשיבה ביקורתית	אינטגרציה של חומר	שאיפה לאתגרים	התמדה בשלות	התמודדות עם לחץ	למידה עצמית	ניהול זמן
4.9	4.6	4.7	4.6	4.6	4.5	4.6	4.6	4.5	4.4

מלוח 4 עולה שהמנחים מדרגים גבוה מאוד את התנהגות התלמידים בכל ההיבטים. בולט במיוחד הוא הדירוג הגבוה (4.9) לתשוקה שהתלמידים גילו בחקר תחום העניין שלהם. הדירוג הנמוך ביותר הוא על ניהול זמן (4.4). לאור דיווחיהם של התלמידים על האתגרים שעמם התמודדו במהלך השנה, ייתכן ששירת מסגרות הפעילויות השגרתיות במהלך מגיפת הקורונה והמעבר ללמידה מרחוק, הצריכו ניהול זמן באופן שונה ממה שהורגלו אליו ולכן לחלק מהם היה קשה לנהל את זמנם באופן יעיל.

בבחינת הדיווחים המילוליים של המנחים, ניתן לומר שממשובי המנחים מתקבל חיזוק לדברי התלמידים לגבי תרומת התוכנית ברכיבים שונים.

אחד המנחים הרחיב ותיאר את **התשוקה והיצירתיות** של תלמידה, את האתגרים שהציבה לעצמה ואף עמדה בהם, ובנוסף **רכשה כלים ומיומנויות להובלת דיון** ולהצגת הפרויקט בפני הצוות:

בתחילת הדרך הגיעה אלי תלמידה בעלת פוטנציאל מדהים, רצון אינסופי ללמידה וחשיפה לתחומים חדשים. הפרויקט החל בתהליך לימוד הדדי, בו אני מציב יעדים שונים לשם בחינת יכולת הלמידה של התלמידה להיחשף לתחומים חדשים ולעבודת צוות מול מהנדסים וטכנאים. התלמידה הפתיעה אותי ברמת העניין ויכולת הלמידה, הן פנים אל פנים והן מרחוק. לאחר השלמת יעדי הפרויקט, ישבנו כל הצוות ההנדסי והתלמידה הובילה את הדיון ואת אופן קביעת היעדים של המשך הפרויקט. התהליך היה תהליך מאיר עיניים, נדהמתי להיווכח בכל פעם מחדש ביכולותיה הייחודיות של התלמידה, ואני סמוך ובטוח שהיא תצליח בהמשך דרכה בכל מסלול שתבחר.

מנחה נוסף הצביע על הצלחתו של תלמיד באינטגרציה של חומר מדעי על אף שהגיע ללא רקע, וזאת באמצעות **מיומנויות שרכש – חיפוש חומר ושאלת שאלות** – ברמה אקדמית. המנחה אף ציין את העובדה שאף הוא נתרם מההנחיה בתוכנית:

עיקר הקושי איתו התמודד במהלך המחקר היה הרמה המדעית הגבוהה הנדרשת במשימה וחוסר הידע איתו הגיע. לשמחתי, התלמיד התמודד עם המשימה בהצלחה בעיקר באמצעות שאלת מגוון שאלות אך גם באמצעות חיפוש מידע באופן עצמאי. על אף החוסר בהשכלה מדעית פורמלית, הוא עדיין התמודד עם האתגר טוב לא פחות ממה שהייתי מצפה מסטודנט מן המניין בפקולטה... נהניתי להדריך את התלמיד ואני חושב שאפילו הרווחתי מהעניין. חיפוש מקורות יחד איתו עזר לי למצוא כמה מקורות נוספים לעבוד עליהם במחקר שלי. בהתאם, הוא מופיע בסעיף ה"תודות" במאמר האחרון שפרסמתי.

מנחים נוספים ציינו את **התשוקה, העניין והסקרנות** של התלמידים ואת היחשפותם לחומרים מגוונים:

יש לתלמיד להט, עניין וסקרנות, וגם יכולת למידה ואינטגרציה מרשימות... גילה אחריות, עמד בזמנים והשיג תוצאות. נהניתי מאוד מהאינטראקציה איתו; התלמיד התגלה כבחור חכם, מהיר תפיסה, סקרן, קולט במהירות וביעילות עקרונות של דיסציפלינה חדשה שלא הכיר כלל קודם לכן... הפגין רצון להעמיק בתחום העניין, חשיבה ביקורתית תוך שאלת שאלות טובות וכישר אינטגרציה של ידע חדש... העלה רעיונות טובים לשיפור אופן החשיפה של הנתונים הרלוונטיים למחקר;

מנחים אחרים ציינו את **התמודדות התלמידים בתקופת הקורונה**, הכנסת שינויים במחקר וההתמדה על אף הקשיים:

השנה התנאים היו מורכבים במיוחד והקשו על התקדמות הפרויקט. הקורונה מנעה מאיתנו מלהמשיך לשלב איסוף הדטה, שהוא השלב המהותי של הפרויקט... העיכוב שנכפה עלינו היה כמובן מתסכל... התלמידה התמודדה עם המצב בצורה בוגרת ואחראית, וניצלה את הזמן על מנת להשלים את כתיבת העבודה ולהעמיק בעבודה התיאורטית. התרשמתי מהמחויבות שלה למעבדה בנוכחות קבועה בישיבות המעבדה

ובהצטרפות לשלל הרצאות אונליין שאליהן עודדתי את הסטודנטים שלי להצטרף. ככלל, ההתרשמות שלי ממנה חיובית מאד; במחקר שלנו התקיים מצב של ריבוי אי ודאויות בשל אופי המחקר ובעיקר בשל סיטואציית הקורונה... בהתאמה, התלמיד נדרש להרבה שינויים, ללמידה מקדימה גם בטרם שהיפוטוזות המחקר נוסחו באופן סופי, ולחשיפה ללימודי יסוד... מרמת אפס לרמה אקדמית... נחשף לנושאי מקרו... ולנושאי מיקרו... בכל אלו עמד בהצלחה מרובה.

מכאן, שהרכיבים החיוניים למיצוי הפוטנציאל של תלמידים מחוננים בתחומי התעניינותם באמצעות עבודה אינדיבידואלית צמודה עם מנחים-עמיתים – אכן קיימים בתוכנית.

אשר ליעד השני של התוכנית – מתן אפשרות לתלמידים מחוננים לבחון לעומק כיוונים שונים לקראת בחירה של קריירה עתידית – כל התלמידים נחשפו לסגנון עבודתו של המנחה וחלקם אף שוקלים קריירה עתידית בתחום.

רובם המכריע (12% מההווים 86%) של התלמידים דיווחו שהתוכנית סייעה להם להכיר במידה רבה או רבה מאוד את סגנון העבודה הנדרש בתחום התוכן שבו עסקו (ממוצע של 4.5 בסולם מ-1 עד 5), ולדבריהם:

זה אולי אחד הדברים הכי משמעותיים שקיבלתי מהתוכנית. הגעתי עם ידע אקדמי מסויים... אבל בלי שום מושג איך נראית עבודה של חוקר בתחום. לא ידעתי איך בנויים מאמרים מודרניים שנכתבו בעשור האחרון... ולא איך מגיעים לכתיבה של מאמרים כאלו. העבודה עם המנחה הייתה קפיצה למים במובן הזה – קראתי מאמרים שבנויים בצורה שלא הכרתי, וכתבתי עבודה בעצמי – בזמן שכל הלמידה שלי עד אז הייתה פסיבית לחלוטין ולרוב גם בתיווך של ספרי לימוד.

ההשתתפות בתוכנית תרמה לתובנות משמעותיות לגבי סגנון העבודה הנדרש בתחומי הדעת השונים – החל מעבודה במעבדה וניתוח נתונים, דרך השתתפות בכנסים ובקורסים, ועד להתנהלות בתקופת משבר:

התוכנית חשפה אותי למחקרים נוספים ולפעילות המעבדה השוטפת, ואף יצא לי להשתתף בכנסים בינלאומיים בהם שמעתי הרצאות ודיונים על המחקרים החדשים ביותר, וחוויתי את הדרך בה החוקרים משתפים ידע ויוצרים קשרי עבודה; בתחום הבלשנות העבודה היא עבודת חשיבה בעיקרה, וטוב אם החשיבה תיעשה בקבוצה כדי להציג נקודות מבט שונות בכל עניין. סגנון העבודה הנדרש במישורים עמוקים אלה של התחום אינו דומה לעבודה רדודה ברמה תיכונית, והבדל זה הוא שהאחיב עליי את הבלשנות בפרט ובכלל תחומים רבים במישורים אקדמיים; סגנון העבודה הנדרש בתחום הוא עבודת צוות ושיתופי פעולה ובמהלך התוכנית למדתי רבות כיצד לעבוד בסגנון עבודה זה; ההשתתפות בתוכנית תרמה לי להתמודד עם ביצוע של עבודות מדידה שונות אשר דורשות זמן רב וחזרתיות. למדתי כי מדובר בפעילות חיונית כחלק מהחקר וכי בלעדיה לא ניתן לקבל את התוצאות שאנו מעוניינים להפיק מהניסוי; למדתי הרבה על סגנון עבודה במעבדה, על תכנון ניסויים ועל שימוש בכלי עזר מתאימים במהלכם; למדתי כיצד חברת פיתוח בתחום ההייטק מתנהלת. למדתי כיצד להגדיר תכולת פרויקט ולנהל תוכנית עבודה. בעקבות משבר הקורונה למדתי איך להתמודד עם משברים, לנהל סיכונים ולשנות תוכניות עבודה על פי האילוצים המתהווים; זכיתי לראות מקרוב את תהליכי העבודה של אמן, את סגנון עבודתו וההתמדה שנדרשת לכך.

קרוב למחצית (6 תלמידים מההווים 43%) מהתלמידים דיווחו שהתוכנית תרמה להם, במידה רבה או רבה מאוד, לשקול קריירה עתידית בתחום התוכן שבו עסקו (ממוצע של 3.4 בסולם מ-1 עד 5), ולדברי חלקם:

התוכנית פתחה בפני את השער לעולם המחקר הקוגניטיבי, לצד עבודה מרתקת המשלבת פילוסופים ומדענים דגולים בעבודה משותפת לצורך הבנה טובה יותר של העולם בו אנו חיים והדרך בה אנו חווים אותו. התוכנית

עוררה בי סקרנות רבה כך שאני שוקלת אולי ללמוד ולפתח בו קריירה עתידית; השתתפותי בתוכנית גרמה לחשוב כיצד אני יכול להמשיך בתחום בעתיד ולהתפתח בהמשך; חידדה את הרצון שלי ללמוד ולהתפתח בתחום המדעים/טכנולוגיה; ההשתתפות בתוכנית תרמה לי הרבה בנוגע לקריירה עתידית, אני חושבת שאני אעסוק בעתיד בתחום שבו חקרתי בתוכנית או תחום מאוד דומה לו.

היו שציינו כי בזכות הכלים שרכשו בתוכנית וליווי המנחה הם ימשיכו ויפתחו קריירה עתידית בתחומים קרובים:

מתחילת הפרויקט המטרה העיקרית של המנחה שלי הייתה שארכוש כלים, יכולות ודרך מחשבה לעיסוק בתחום הזה בעתיד כך שכאשר אצטרך להתמודד עם פרויקטים מורכבים בעתיד יהיו לי את הכישורים המתאימים ואת הכלים לפתח כישורים חדשים שאזדקק להם; בעקבות השתתפותי בתוכנית, התגברו מחשבותיי שאעסוק בבלשנות שמית בעתיד... לפיכך אני מקווה שאעסוק בשפות שמיות בעתיד.

אחרים ציינו כי הועצמו בעקבות ההיחשפות לסגנון העבודה של המנחה, והדבר נותן להם מוטיבציה להגשמת חלומותיהם:

אומנות זה תחום שתמיד מצאתי את עצמי בו, אבל היו לי חששות מובנים מלהפוך אותו לקריירה. הסביבה טענה שזאת "לא עבודה אמיתית", ושעלי לשמור את האומנות כתחביב. לאחר שזכיתי לראות מקרוב את חייו של אמן, העבודה הקשה שלו וההנאה שביצירה, הרגשתי שהכול אפשרי והשמיים הם הגבול. התוכנית העניקה לי אומץ לרדוף אחרי החלומות הכי גדולים שלי, להתנסות, לחקור ולהשתפר.

תלמידים אחרים טענו כי התוכנית דווקא תרמה להם לחשוב ולהתלבט האם התחום שבו עסקו הוא זה המתאים להם לקריירה העתידית:

ההתנסות בתוכנית דווקא הביאה אותי למסקנה כי אני לא רואה בתחום... כקריירה עתידית ודווקא לכן שמחתי אף יותר על ההזדמנות להיחשף לעבודה בתחום זה; במסגרת התוכנית יצא לי לפגוש הרבה אנשים שעוסקים במחקר וזה גורם לי לחשוב – האם זה מה שאני רוצה לעסוק בו, ולהבין את היתרונות והחסרונות; לא הייתה לי כוונה להיות אנימטור וכנראה גם לא תהיה. סביר להניח שזה יישאר להיות תחביב, אבל קיבלתי כבר כמה הזמנות ממוסדות כאלה או אחרים, ואנשים שמעוניינים בכישורים שלי – אז אני לא שולל.

**עם סיום שנת הלימודים של המחזור השביעי, ניתן איפה לסכם
שהיעד השני של התוכנית אכן הושג.**

סיכום – השגת מטרת התוכנית ויעדיה

בהתאם לעדויות שהוצגו לעיל, הרי ששני יעדי התוכנית – מיצוי הפוטנציאל של תלמידים מחוננים בתחומי התעניינותם באמצעות עבודה אינדיבידואלית צמודה עם מודלים להשראה (מנחים-עמיתים), ומתן אפשרות לתלמידים מחוננים לבחון לעומק כיוונים שונים לקראת בחירת קריירה עתידית – הושגו במחזור השביעי של התוכנית.

לפיכך, ניתן לסכם ולומר כי התוכנית תורמת באופן משמעותי ליצירת הקרקע והתנאים בקרב תלמידים מחוננים לטיפול מנהיגות עתידית ופורצת דרך בישראל בתחומי תוכן שונים.



חלק ג: תקצירי עבודות התלמידים

בחלק זה נציג את פירות עבודתם המאומצת של התלמידים במהלך השתתפותם בתוכנית. בכל תקציר יוצגו נושא העבודה, שאלת החקר בה עסקו, שיטת החקר, ממצאי החקר וכן רעיונות לעתיד. חלק מהתקצירים נכתבו באנגלית לצורך פרסום בכתבי עת מקצועיים.

התקצירים מויינו על פי תחומי הדעת הבאים:

- מדעים מדויקים ומדעי החיים
- מדעי החברה
- מדעי הרוח
- אומנות, מוזיקה וקולנוע

סדר התקצירים של החניכים בכל תחומי הדעת (לפי סדר א-ב של שמות המשפחה):

מדעים מדויקים ומדעי החיים

יהב בונה
יובל ברנשטיין-מלמד
אחמד גנאים
ניתאי נחמיה
תמר נמיר
יותם קפלן
שחר שגיא

מדעי החברה

בן אליאב
אליחי ברזילי

מדעי הרוח

הדר איקוניקוב
אילה רוס

אומנות, מוזיקה וקולנוע

מאיה גונן
איתמר פיינברג
נדב רם

מדעים מדויקים ומדעי החיים

תורה ספקטרלית של גרפים

Linear Algebra Applications in Graph Theory

חניך: יהב בונה, אורט רבין, קריית מוצקין

מנחה-עמית: פרופ' אבי ברמן, הפקולטה למתמטיקה, הטכניון, חיפה



1. Introduction

Graph theory is a field in mathematics commonly used for computer science, physics, chemistry, biology, and even sociology and linguistics. Over the years many mathematicians have tried to study graphs in different ways. In this paper we will focus on using linear algebra as a way to get a new lower bound for minimal vertex covering and a classical result for vertex covering on regular graphs, a bound for vertex coloring and decomposition of graphs.

2. Background

A graph G is a set of points V (i.e. the vertices) and a set of pairs E (i.e. the edges) which may or may not be ordered - depends on whether or not the graph is directed. In this paper we will discuss only undirected graphs, as the ones shown in Figure 1 - the graph to the left is the Petersen graph, and K_n is the complete graph on n vertices, i.e. the graph on n vertices with an edge between every two vertices.

There are few commonly used matrices associated with graphs, [Brouwer & Haemers (2011)]. We will present only the ones we have used here:

1. The adjacency matrix, usually notated by A , is a $0 - 1$ matrix with rows and columns indexed by the vertex set V of the graph, with $A_{i,j} = 1$ if there is an edge between i and j , and $A_{i,j} = 0$ otherwise.

2. The Laplace matrix, or Laplacian, usually notated by L , is a matrix with zero row sums defined as $L_{i,j} = -A_{i,j}$ for $i \neq j$ and $L_{i,i}$ is the valency (i.e. the numbers of edges connected to the vertex x) of the vertex associated with i . If D is the diagonal matrix, indexed by the vertex set of the graph, such that $D_{x,x}$ is the valency of x , then $L = D - A$.

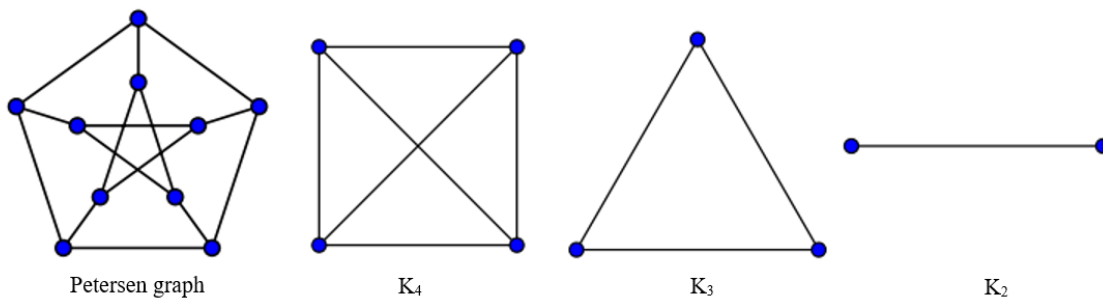


Figure 1: Four undirected graphs

The spectrum of a graph is by definition the spectrum of its adjacency matrix (i.e. its eigenvalues together with their multiplicities). The Laplace spectrum is the spectrum of the graph's Laplacian.

For example, the adjacency matrix of K_4 is

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

and the Laplacian is

$$L = \begin{pmatrix} 3 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 \end{pmatrix}$$

A direct computation gives $-1, -1, -1, 3$ as the spectrum of K_4 and $0, 4, 4, 4$ as the Laplacian spectrum. More generally, one can show the eigenvalues of K_n are $\underbrace{-1, -1, \dots, -1}_{n-1}, n - 1$ and

the Laplacian eigenvalues are $0, \underbrace{n, n, \dots, n}_{n-1}$.

3. Minimal Vertex Covering

A vertex cover of a graph is a subset of the graph's vertices such that every edge in the graph is connected to at least one vertex in the cover. The size of the minimum vertex cover in a graph G is denoted by $\tau(G)$. In this section we will suggest a new lower bound for $\tau(G)$ and compare it with a known bound for regular graphs.

3.1 The New Bound

Definition 3.1.1 Let G be a simple connected graph on n vertices with at least one edge. Let λ_1, λ_n be the largest and smallest eigenvalues of G , respectively, and θ_{n-1} be the algebraic connectivity of G (the second smallest Laplace eigenvalue), then we define $\xi(G) = \frac{n\theta_{n-1}^2}{\theta_{n-1}^2 - 4\lambda_1\lambda_n}$.

Theorem 3.1.1 Let G be a simple connected graph on n vertices with at least one edge, And $\tau(G)$ be the size of G 's minimal vertex cover size. Then

$$\tau(G) \geq \xi(G) \quad (1)$$

Proof. Let S be a minimal vertex cover of G of size r , λ_1, λ_n be the largest and smallest eigenvalues of G , respectively, and θ_{n-1} be the algebraic connectivity of G (the second smallest Laplace eigenvalue). The vertices of A can be partitioned into $V = S \sqcup (V \setminus S)$. If m denotes the number of edges in G and α denotes the average degree in the induced graph on S , then the quotient matrix corresponding to this partition is

$$B = \begin{pmatrix} \alpha & \frac{m-\alpha r}{r} \\ \frac{m-\alpha r}{n-r} & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

If $\mu_1 \geq \mu_2$ are the eigenvalues of B , then by interlacing

$$\begin{aligned} -\lambda_1\lambda_n &\geq -\mu_1\mu_2 = -\det B = \frac{(m-\alpha r)^2}{r(n-r)} = \frac{\left(\frac{1}{2}\sum_{i=1}^n \theta_i - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^r \sigma_i\right)^2}{r(n-r)} \\ &\geq \frac{((n-r)\theta_{n-1})^2}{4r(n-r)} = \frac{(n-r)\theta_{n-1}^2}{4r} \end{aligned} \quad (3)$$

Where $0 = \theta_n < \theta_{n-1} \leq \theta_{n-2} \dots \leq \theta_1$ are the Laplace eigenvalues of G and $\sigma_r \leq \sigma_{r-1} \leq \dots \leq \sigma_1$ are the Laplace eigenvalues of the induced sub-graph on S . Thus

$$\tau(G) \geq \frac{n\theta_{n-1}^2}{\theta_{n-1}^2 - 4\lambda_1\lambda_n} = \xi(G) \quad (4)$$

Thus we proved that for every graph G at least $\xi(G)$ vertices are required to create a cover of G . ■

Theorem 3.1.2 Let $\{G_n\}_{n=1}^{\infty}$ be a sequence of regular graphs each upholds all the assumptions from theorem 3.1.1 such that G_i is an induced sub-graph of G_{i+1} and is not equal to G_{i+1} . Suppose $\tau(G_i) = O(\xi(G_i))$, then $\tau(L(G_i)) = O(\xi(L(G_i)))$.

For the proof we'll need the following lemmas:

Lemma 3.1.1 Let G be a k -regular graph. Then $\tau(L(G)) \leq k\tau(G)$.

proof. The following statements are true for all regular graphs:

1. $\tau(G) = |V(G)| - \alpha(G)$
2. $\alpha(L(G)) = v(G)$
3. $v(G) \leq \tau(G) \leq 2v(G) \Rightarrow -\tau(G) \leq -v(G) \leq -\frac{1}{2}\tau(G)$
4. $k\tau(G) \geq |E(G)|$

Thus:

$$\begin{aligned} \tau(L(G)) &\stackrel{1}{=} |E(G)| - \alpha(L(G)) \stackrel{2}{=} |E(G)| - v(G) \leq |E(G)| - \frac{\tau(G)}{2} \\ &\stackrel{4}{\leq} k\tau(G) - \frac{\tau(G)}{2} \leq k\tau(G) \end{aligned}$$

Lemma 3.1.2 Let G be a k -regular graph. Then $k\xi(G) \leq 8\xi(L(G))$.

Proof. Let λ_2 be the second largest eigenvalue of G and λ_n be the smallest eigenvalue of G .

Then

$$\xi(G) = \frac{n(k-\lambda_2)^2}{(k-\lambda_2)^2 - 4k\lambda_n}$$

and

$$\begin{aligned} \xi(L(G)) &= \frac{\frac{nk}{2}(2k-2-(\lambda_2+k-2))^2}{(2k-2-(\lambda_2+k-2))^2 + 8(2k-2)} = \frac{\frac{nk}{2}(k-\lambda_2)^2}{(k-\lambda_2)^2 + 16k - 16} \\ &\geq \frac{k}{2} \cdot \frac{n(k-\lambda_2)^2}{(k-\lambda_2)^2 + 16k} = \frac{k}{8} \cdot \frac{n(k-\lambda_2)^2}{\frac{1}{4}(k-\lambda_2)^2 + 4k} \geq \frac{k}{8} \cdot \frac{n(k-\lambda_2)^2}{(k-\lambda_2)^2 + 4k} \\ &\stackrel{*}{\geq} \frac{k}{8} \cdot \frac{n(k-\lambda_2)^2}{(k-\lambda_2)^2 - 4k\lambda_n} = \frac{1}{8} \cdot k\xi(G) \end{aligned}$$

* The largest smallest eigenvalue possible for simple graph with at least one edge is -1. ■

Thus $k\xi(G) \leq 8\xi(L(G))$, as required. ■

Using these lemmas, the proof of Theorem 3.1.2 is almost immediate:

Proof of Theorem 3.1.2. By the assumption, for some constant $\alpha > 0$ and for large enough i we have $\tau(G_i) \leq \alpha\xi(G_i)$. By Lemma 3.1.1 we have $\tau(L(G_i)) \leq k_i\tau(G_i)$ where k_i is the valency of the vertices in G_i . By Lemma 3.1.2 we have $k_i\xi(G_i) \leq 8\xi(L(G_i))$ for all i . Thus $\tau(L(G_i)) \leq k_i\tau(G_i) \leq \alpha k_i\xi(G_i) \leq 8\alpha\xi(L(G_i))$. Since $\alpha > 0$, we have $8\alpha > 0$, so by definition $\tau(L(G_i)) = O(\xi(L(G_i)))$. ■

3.2 A Known Bound For Regular Graphs

In 1969, Alan J. Hoffman found the following result, that was reproduced in *a collection of his work*.

Theorem 3.2.1 [Hoffman (2003)] *Let G be a d -regular graph on n vertices with minimal eigenvalue λ_{min} . Then*

$$\alpha(G) \leq \frac{-n\lambda_{min}}{d-\lambda_{min}} \quad (5)$$

Proof. Let V be the set of vertices and I a maximal independent set of G . Suppose $V = \{1, 2, \dots, n\}$. Let $\langle \cdot, \cdot \rangle$ be the inner product on \mathbb{R}^n defined by $\langle x, y \rangle = \frac{x \cdot y}{n}$ where \cdot denotes the usual dot product. Let $\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle}$ be the corresponding norm on \mathbb{R}^n .

The adjacency matrix A is a real symmetric matrix, so we may suppose that the eigenvectors v_1, v_2, \dots, v_n (corresponding to the eigenvalues $d = \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n = \lambda_{min}$) form an orthonormal basis of \mathbb{R}^n with respect to the inner product $\langle \cdot, \cdot \rangle$. Note that since G is d -regular, v_1 is a vector with all entries equal to 1. Let u be the characteristic vector of the independent set I and define $\beta = \frac{|I|}{|V|}$.

Observe that $u^T A u$ counts the number of edges among the vertices of I . Since I is an independent set, we have $u^T A u = 0$. We write u as a linear combination of the eigenvectors, i.e. $u = \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 + \dots + \alpha_n v_n$. Since the v_i -s form an orthonormal set and v_1 is a vector with all entries equal to 1 we have $\beta = \langle u, v_1 \rangle = \alpha_1$. By the Parseval's Identity we also have

$\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2 = \|u\|^2 = \langle u, u \rangle = \beta$. We therefore have

$$0 = u^T A u = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \lambda_i \geq \alpha_1^2 \lambda_1 + \sum_{i=2}^n \alpha_i^2 \lambda_{\min} = \beta^2 d + (\beta - \beta^2) \lambda_{\min}$$

Thus $\beta d + (1 - \beta) \lambda_{\min} \leq 0 \Rightarrow \frac{\alpha(G)d}{n} + \left(1 - \frac{\alpha(G)}{n}\right) \lambda_{\min} \geq 0$, from which we obtain

$$\alpha(G) \leq \frac{-n\lambda_{\min}}{d - \lambda_{\min}} \quad \blacksquare$$

Corollary 3.2.1.1 *It is known that for a graph G on n vertices $\alpha(G) + \tau(G) = n$. Thus*

$$\tau(G) \geq \frac{nd}{d - \lambda_{\min}} \quad (6)$$

Note 3.2.1 "Unfortunately" Hoffman's bound is better for regular graphs. Suppose there is a graph G with all valencies k and n vertices for which our bound is tighter. Denote its smallest eigenvalue by λ_n and second largest eigenvalue by λ_2 , then

$$\begin{aligned} \frac{nk}{k - \lambda_n} &\leq \frac{n(k - \lambda_2)^2}{(k - \lambda_2)^2 - 4k\lambda_n} \Rightarrow nk(k - \lambda_2)^2 - 4nk^2\lambda_n \leq nk(k - \lambda_2)^2 - n\lambda_n(k - \lambda_2)^2 \\ &\Rightarrow 4k^2 \leq (k - \lambda_2)^2 \Rightarrow (\lambda_2)^2 - 2k\lambda_2 - 3k^2 \geq 0 \end{aligned}$$

which means λ_2 is outside of the interval $(-k, 3k)$, as opposed to fact all the eigenvalues of G are in $[-k, k]$ (note that only the greatest eigenvalue can be equal to k). Thus the Hoffman's bound is always tighter.

4. Vertex Coloring

A coloring of graph's vertices is a mapping of every vertex to a color. Our discussion will be only about "legal" colorings, which means no two adjacent vertices of the graph are colored with the same color. The minimum number of colors required to color all the vertices of a graph G is notated by $\chi(G)$. In this section we will present a well known upper bound for $\chi(G)$.

Proposition 4.0.1 *Let G be a graph. For $k \in \mathbb{N}$ if every induced sub-graph of G has a vertex whose valency is at most $k-1$ then G is k -colorable.*

Theorem 4.0.1 *Let G be a connected graph with an adjacency matrix A and largest eigenvalue λ . Then $\chi(G) \leq \lambda + 1$.*

Proof. By the Perron-Frobenius Theorem we know that every principle minor of A has spectral radius at most λ , and because the spectral radius of a matrix is bounded between the minimal

and maximal row sum, there has to be a row with sum smaller or equal to λ , which means the corresponding induced sub-graph has a vertex with valency at most λ . This is true for all the induced sub-graphs of G . By proposition 4.0.1 we get that G is $\lambda + 1 = \lambda + 1$ -colorable, so $\chi(G) \leq \lambda + 1$. ■

5. Decompositions

Proposition 5.0.1 [Schwenk & Lossers (1987)] *The complete graph K_{10} can not be decomposed into 3 Petersen graphs.*

Proof. Assume such a partition does exist. Let P_1, P_2, P_3 be the 3 adjacency matrices of the parts of the partition, so $P_1 + P_2 + P_3 = J_{10 \times 10} - I_{10}$. If P_1 and P_2 are Petersen graphs, a direct computation shows they both have a 5-dimensional eigenspace for eigenvalue 1, which is a sub-space of the 9-dimensional $\mathbf{1}^\perp$ space, and so both graphs has a common 1-eigenvector v , which means $P_3v = (J - I)v - P_1v - P_2v = -3v$. But -3 is not a Petersen eigenvalue, so P_3 is not a Petersen graph. ■

Theorem 5.0.1 [Graham & Pollak (1971)] *Suppose a graph G with an adjacency matrix A has a partition to r complete bipartite graphs. Then $r \geq \max\{n_+(A), n_-(A)\}$, where $n_+(A)$ and $n_-(A)$ are the number of positive and negative eigenvalues, respectively.*

Proof. For every part i in the partition of G into complete bipartite graphs we'll match 2 characteristic vectors v_i, u_i of both sides of the bipartition. Because the matrix $D_i = u_i v_i^T + v_i u_i^T$ has 1 in the j, k entry if and only if there is an edge between j and k , by definition it is the adjacency matrix of the i -th part, so $A = \sum_{i=1}^r D_i$. Let $W = \text{span}\{w \in \mathbb{R}^n \mid \langle w, u_i \rangle = 0, 1 \leq i \leq r\}$ and let P be the eigenspace of the eigenvectors corresponding to the positive eigenvalues. W contains vectors which are orthogonal to r vectors, so $\dim(W) \geq n - r$. For every $0 \neq p \in P$ we get $\lambda p^T p > 0 \Rightarrow p^T \lambda p = p^T A p > 0$ (where λ is a positive eigenvalue of A), and for every $w \in W$ we get $w^T A w = \sum_{i=1}^r (w^T u_i v_i^T w + w^T v_i u_i^T w) = 0$, so $W \cap P = \{0\}$. We get $\dim W \leq n - \dim P = n - n_+(A)$, which implies $n - r \leq n - n_+(A) \Rightarrow r \geq n_+(A)$. The same proof works for $n_-(A)$, so we get $r \geq \max\{n_+(A), n_-(A)\}$. ■

Bibliography

1. A. E. Brouwer & W. H. Haemers (2011). *Spectra of graphs*, Springer.
2. A. J. Hoffman (2003). On eigenvalues and colorings of graphs (p. 407-419), *Selected Papers of Alan J. Hoffman* (Charles A. Micchelli).
3. A. J. Schwenk & O. P. Lossers (1987), Solution to advanced problem #6434, *Amer. Math. Monthly* 94 885–886. (p. 12).
4. R. L. Graham & H. O. Pollak (1971), On the addressing problem for loop switching, *Bell System Tech. J.* 50 2495–2519. (p. 12).



רובוטיקה רפואית – פיתוח אמצעי שליטה אינטואיטיבי

להפעלת הזרועות הרובוטיות הניתוחיות של מערכת HOMINIS

חניכה: יובל ברנשטיין, ראשון לציון, כפר הנוער החקלאי מקווה ישראל, חולון

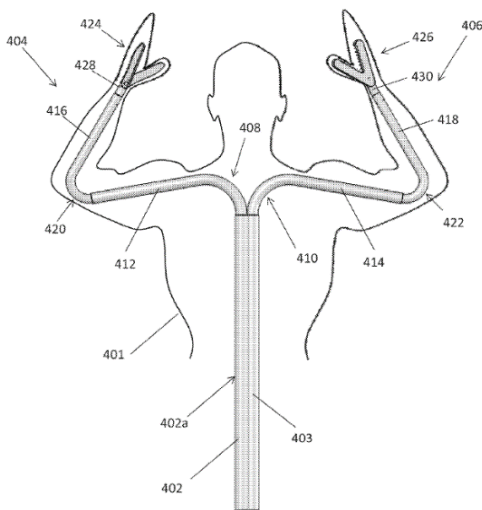
מנחים-עמיתים: דביר כהן (מנכ"ל), שי כץ (מהנדס תוכנה)

Memic Innovative Surgery Ltd, אור יהודה



רקע

רובוטיקה רפואית, ורובוטיקה בכלל, הוא ענף רב תחומי המשלב מכניקה, אלקטרוניקה, הדמיה, פיתוח תוכנה והנדסת אנוש ליצירת מכשירים היכולים להגיב על פי מידע מחיישנים ולבצע פעולות עם או בלי מעורבות אנושית. רובוטיקה רפואית רותמת את יכולת הדיוק של מערכות רובוטיות לפרוצדורות רפואיות כמו ניתוחים זעיר-פולשניים.



בעבר בוצעו ניתוחים בחלל הבטן בעזרת פתיחה מלאה של דופן הבטן ורקמת השריר. פיתוחים טכנולוגיים שונים אפשרו למנתחים לבצע את הניתוח בצורה זעיר-פולשנית דרך שלושה-ארבעה חתכים קטנים (8 מ"מ), אך עקומת הלימוד לשליטה בטכניקה מורכבת זו היוותה אתגר באימוץ הטכנולוגיה. הרובוטיקה הרפואית כיום מאפשרת לשלוט על הכלים בגישה זעיר-פולשנית בצורה פשוטה ואינטואיטיבית יותר.

חברת MEMIC מתמקדת בפיתוח אמצעי ניתוח רובוטיים המספקים גישה ויכולת תמרון ייחודית, ובכך מאפשרת לבצע את הניתוח דרך נקבים טבעיים, ללא צורך בחתכים גלויים בדופן הבטן.

איור 1: הקבלת מפרקים רובוט-אדם

מערכת HOMINIS של החברה היא פלטפורמה כירורגית חדשנית ורב תכליתית הכוללת זרועות רובוטיות מיניאטוריות בעלות מבנה ייחודי של כתף-מרפק-כף יד, ובכך מתאפשרת יכולת גישה ותמרון של 360° .

המערכת הרב תכליתית קטנה בצורה משמעותית ביחס למערכות הקיימות היום, ופותחת פתח לניתוחים זעיר-פולשניים שהיו בלתי אפשריים עד היום.



איור 2: תמונות של מערכת HOMINIS

מטרת הפרויקט

פיתוח אמצעי שליטה אינטואיטיבי להפעלת הזרועות הרובוטיות של מערכת HOMINIS.

המערכת הרובוטית מיישמת יכולת מבנה ייחודי של כתף-מרפק-כף יד ומאפשרת שליטה סימולטנית על כל דרגות החופש כדי להכווין את כלי הקצה לביצוע הניתוח. על מנת לאפשר למשתמש להבין את מנגנון השליטה על הזרוע, נדרש לפתח אמצעי שליטה המאפשר לשלוט על כל דרגת חופש בנפרד.

דרישות

שליטה בשתי זרועות רובוטיות הכוללות מפרקים המאפשרים תנועה בכל הכיוונים וצבתות המאפשרות פתיחה וסגירה הדרגתיים.

התממשקות עם המערכת בתקשורת טורית (Serial).

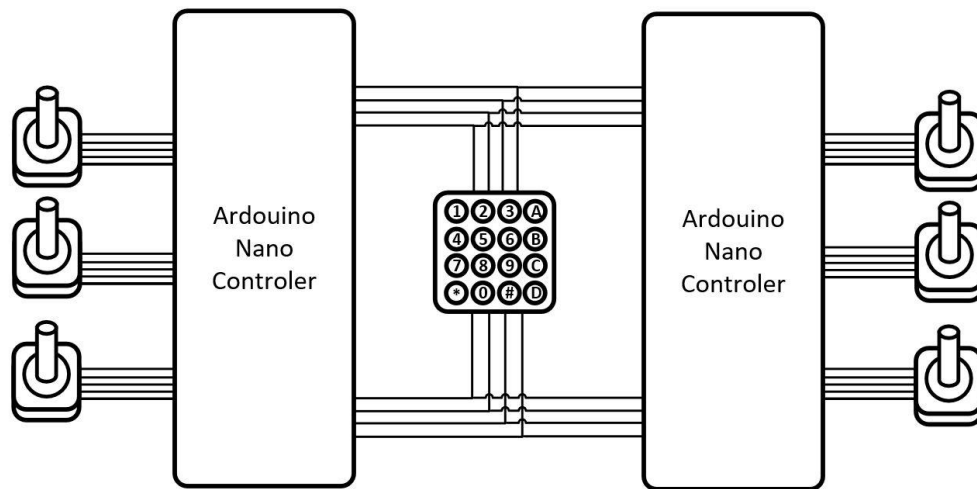
תהליך העבודה

חומרה

לאחר הגדרת הדרישות, הגדרנו את דרישות החומרה לשלט קטן, נוח ואינטואיטיבי. כדי ששתי הזרועות יפעלו בצורה עצמאית הפרדנו את התפעול שלהן לשני מעגלים שונים.

המעבד שישלוט על החומרה צריך להיות קטן ואמין מספיק לצרכים שלנו, בחרנו בשני מעבדי Arduino Nano.

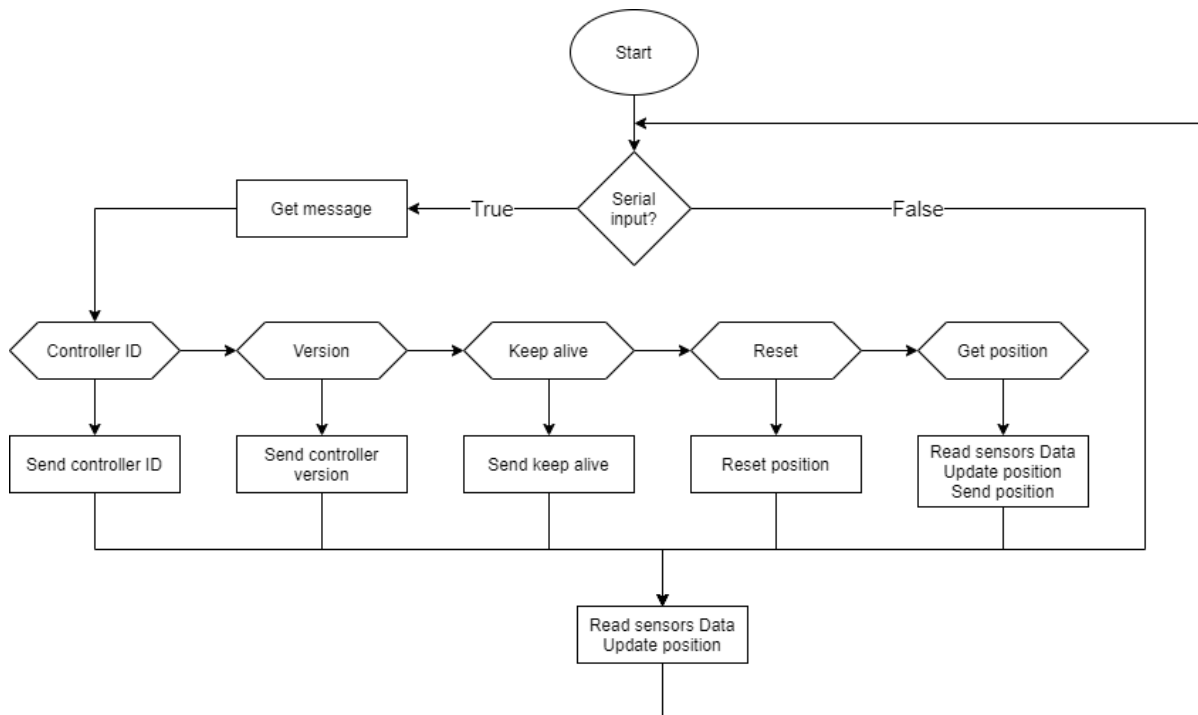
רכיבי joystick יתנו מענה אינטואיטיבי גם להפעלת המפרקים בסיבוב ובקיפול וגם לפתיחה וסגירה הדרגתיים של הצבת.



תרשים 1: תכנון החומרה

תוכנה

את התוכנה למעבד כתבתי בשפת C++ בסביבת העבודה של Arduino. בכדי לממש את פרוטוקול התקשורת של המערכת, בניתי תשתית גנרית לשליחת הודעות ולקבלתן, תכנתי מבני נתונים והשתמשתי בספריות קיימות על מנת לגשת בצורה נוחה יותר למידע שנמצא בערוץ התקשורת הטורית (Serial), בנוסף יצרתי ספריות חדשות בכדי להקל את השימוש במטריצת הכפתורים.



תרשים 2: תכנון התוכנה

אינטגרציה

את האינטגרציה ביצענו במעבדות החברה בכמה שלבים :

- בדיקת תקשורת טורית של השלט מול מחשב
- חיבור השלט למערכת ובדיקת תקינות הממשק
- בדיקת שליטה בכל המפרקים של הזרוע
- בדיקת עבודה של שתי הזרועות במקביל
- בדיקת פונקציונליות מלאה של השלט

בדיקות התקשורת בוצעו בעזרת תוכנת טרמינל תקשורת טורית (Serial) וכלי לניתוח תעבורת רשת (Sniffer).

במהלך העבודה התגלו כמה בעיות, וביניהן כאלה שנבעו מחוסר תאימות של החומרה. פתרנו אותן באמצעות מעקפי תוכנה ושינויי הגדרות של הרכיבים.

לאחר פתירת הבעיות שהתגלו במהלך תהליך האינטגרציה, הגענו לשלט שממלא את כל הדרישות, תוך הקדמת לוח הזמנים, והתחלנו לעבוד על כיווני המשך.

תוצאות



איור 3: התוצר הסופי

השלט מאפשר שליטה קלה ואינטואיטיבית במערכת, קרי – הפעלה של שתי זרועות רובוטיות באופן מלא ובמקביל, כאשר כל יד של המפעיל שולטת באופן טבעי על הזרוע הרובוטית המקבילה.

השלט מאפשר שליטה חופשית וסימולטנית של מפרקי הזרוע הרובוטית – כתף, מרפק וכף יד – בדומה ליכולות התנועה של יד אנושית.

השלט בנוי מחומרה פשוטה יחסית המבוססת על רכיבי מדף אלקטרוניים ותוכנה יעילה וייעודית, ולכן ניתן לבדוק בקלות את המערכת, תוך כדי שלילת האפשרות שאם מתעוררות בעיות הן אינן נובעות מהשלט עצמו.

השלט נבנה מרכיבים פשוטים, זולים ואמינים יחסית, ונותן פתרון פשוט וקל לייצור, לשליטה ולתפעול המערכת במהלך הפיתוח.

ניהול סיכונים – התמודדות בתקופת מגפת הקורונה

מגפת הקורונה גרמה לעיכוב של כשלושה חודשים בלוח הזמנים של הפרויקט. בעקבות הסגר הכלל עולמי, הרכיבים שנדרשו הגיעו באיחור של שלושה חודשים. כמו כן נמנעה היכולת להגיע פיזית לאתר הפיתוח והאינטגרציה. כתוצאה מעיכובים אלו נשקלו אלטרנטיבות לקיצור זמני ההתכנסות של הפרויקט, ונאלצנו להגדיר מחדש את תכולת הפרויקט, ובפרט נשקלה אפשרות המעבר לשימוש בחומרת מדף.

בחרתי להמשיך עם הפיתוח הקיים – כולל פיתוח החומרה – למרות הסיכון שבדבר. כדי להקטין את חוסר הוודאות, תעדפנו מחדש את השלבים בפרויקט והתמקדנו בפיתוח התכולות הפונקציונליות המלאות, תוך כדי דחיית עיצוב המעטפת לסופו.

אספקט זה של תכולת הפרויקט נוסף במטרה להתנסות בתהליכי ניהול סיכונים וקביעת שרשרת קריטית להתכנסות הפרויקט. היתרונות והחסרונות של כל גישה נותחו והובאו לדיון של צוות הפרויקט המלא, וצעדים למזעור הסיכונים ננקטו כדי להבטיח את התכנסות הפרויקט.

כיווני המשך

כיוון שהקדמנו את לוח הזמנים שנקבע, התחלנו לעבוד על כיווני המשך של הפרויקט הכוללים אוטומציה ושיפור הפונקציונליות של השלט. אנו עובדים כעת על הוספת פונקציונליות להקלטת סדרת תנועות והרצתן באופן רציף וחלק, כך שניתן יהיה לחזור על אותה סדרת תנועות מספר רב של פעמים בצורה מדויקת. שלב זה כולל התנסות באוטומציה של תהליך רובוטי ניתוחי – מבין האתגרים הגדולים ביותר כיום בעולם הרפואה.

סיכום

מטרת הפרויקט הושגה במלואה. השלט שפותח במסגרת הפרויקט מאפשר שליטה סימולטנית ואינטואיטיבית על כל אחת מדרגות החופש של המערכת. התכנון הגמיש של השלט מאפשר הוספת רכיבי חומרה והגדלת הפונקציונליות של התוכנה כעזר לפיתוח יכולות נוספות של המערכת, אפשרות זו הובילה לחשיבה יצירתית בכיוון של אוטומטיזציה של תהליכים רובוטיים ניתוחיים.

ההתמודדות במהלך הפרויקט, עם אתגרים צפויים ובלתי צפויים, חשפה בפניי תחומים שלא התנסיתי בהם בעבר. הצורך בטיפול יעיל במגוון הודעות תקשורת הביא אותי לפיתוח תשתית תקשורת גנרית. התהליך כלל חיפוש מקורות מידע ופנייה למומחים בתחום תוכנה ותקשורת בתוך החברה, וכן למומחים נוספים בהתבסס על היכרות אישית. בנוסף, משבר הקורונה הביא אותי להתנסות בהליכי ניהול סיכונים בפיתוח פרויקטים.

למדתי לתכנן תכולת עבודה ולוח זמנים של פרויקט; להגדיר דרישות מערכת ודרישות תוכנה וחומרה; לפתח ממשקים בין תוכנה וחומרה ובין מערכות. למדתי לנהל סיכונים ולהשתמש בידע ובניסיון של אנשים אחרים.

העבודה ב-MEMIC חשפה אותי לתהליך פיתוח של מוצר מסחרי מולטי-דיסציפלינרי, לחלוקת הפיתוח של תחומים שונים למספר קבוצות מקצועיות, ולאינטגרציה בין קבוצות וחלקים שונים של המערכת.

ביבליוגרפיה

Arduino Nano user manuel: <https://robotics.ee.uwa.edu.au/nano/doc/nano-user-manual.pdf>

Arduino Language Reference: <https://www.arduino.cc/reference/en/>

C++ Reference: <https://en.cppreference.com/w/>



פלאורסצנציית רנטגן בגלקסיות פעילות

X-ray fluorescence in active galactic nuclei

חניך: אחמד גנאים, תיכון אלחכמה, סכנין
מנחים-עמיתים: פרופ' אהוד בכר ורועי רחין
הפקולטה לפיזיקה, הטכניון, חיפה



Introduction

Fluorescence is the emission of X-ray photons by neutral atoms that have absorbed higher energy X-ray photons. Upon interaction between a photon and an atom, the atom absorbs the photon; this excites the atom to a higher energy state. The energy of the photon gets transferred as kinetic energy to one of the atom's inner shell electrons, causing the electron's ejection, leaving a gap in the inner shell (fig. 1). After excitation, one of the higher shell electrons decays to the inner shell and fills that gap. This process either emits an X-ray photon [1] or one or more electrons (emitting an electron is also called the Auger process) [2]. This occurs because natural systems tend to decay to a lower energy state over time.

The process of a neutral material absorbing a photon then emitting another is called fluorescence.



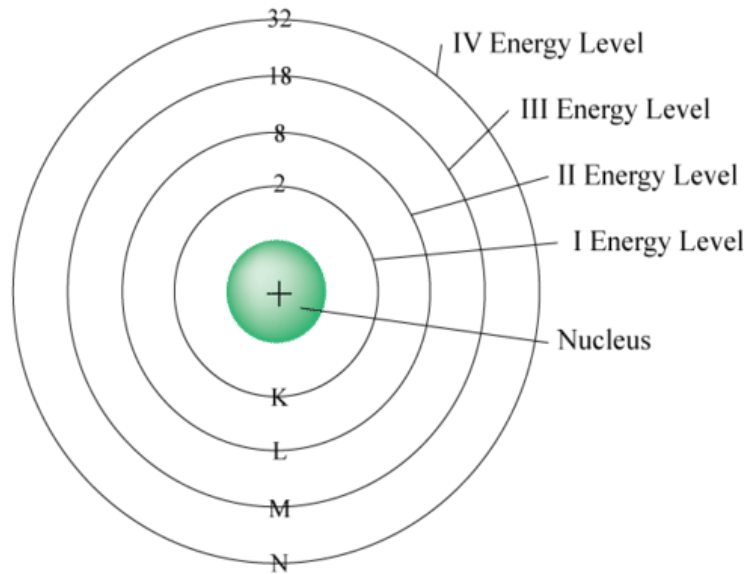


Figure 1. Different shells correspond to different energy levels – the higher the shell, the higher the energy level.

In space, we can expect fluorescence to happen in places where there is a strong X-ray source and neutral matter surrounding it.

One place which satisfies this is an active galactic nucleus (AGN). An AGN is a highly luminous center of a galaxy with a supermassive black hole in its center that forms an accretion disk around it. [3]

An accretion disk is a cloud of matter orbiting a black hole [4]; An AGN emits massive amounts of X-Ray radiation because of the high-speed collisions in the accretion disk, which makes this an excellent candidate to look for fluorescence.

We looked at 3 AGNs: Circinus, Markarian 3, NGC 1068, and we can clearly see fluorescence lines emerging there (fig. 2).

We want to study the fluorescence lines in these galaxies to see if they can teach us anything and we measure these fluorescence lines using flux. [5]

Flux is the number of photons that reach the detector per cm^2 per s .

We can calculate flux by fitting a gaussian curve under these fluorescence lines and computing its area. We do this with xspec, which is a tool to analyse X-Ray spectrums like the one shown in fig. 2. [6]

Since different AGNs have different luminosities, their lines have different luminosities. Comparing the same fluorescence line between two sources requires eliminating the difference caused by the source's luminosity.

To do that, we look at the relative flux between elements, specifically relative to iron. We chose iron because iron lines are the brightest (fig. 2), thus the most accurate (smallest uncertainty). A comparison of relative fluxes in each galaxy is shown in fig. 3.

Our hypothesis: "All AGNs have more or less the same relative flux between elements."

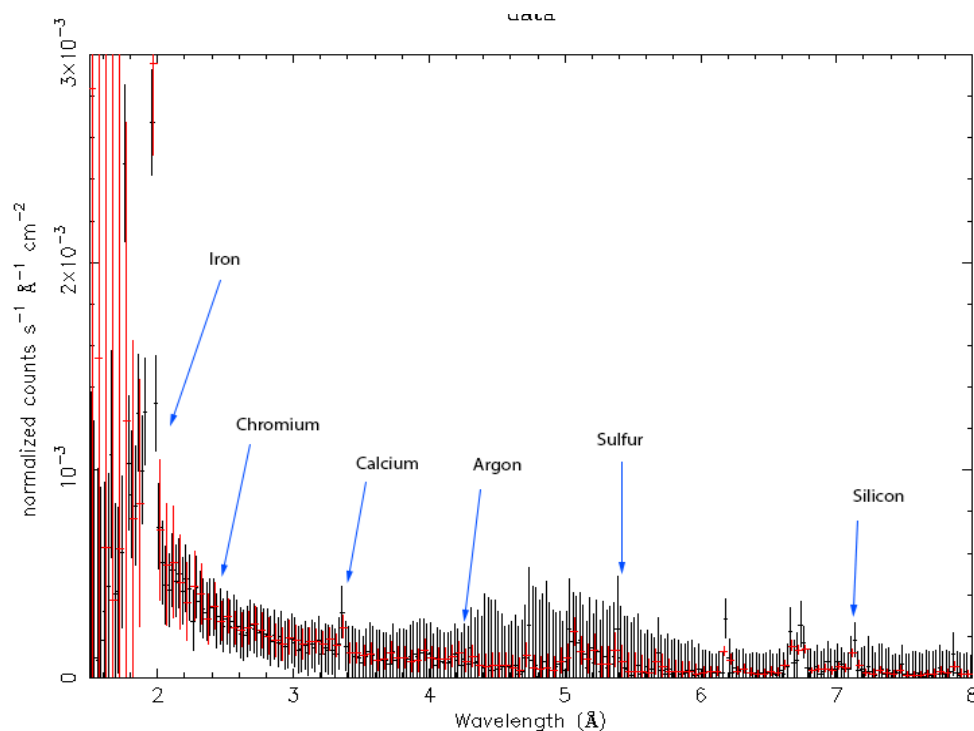
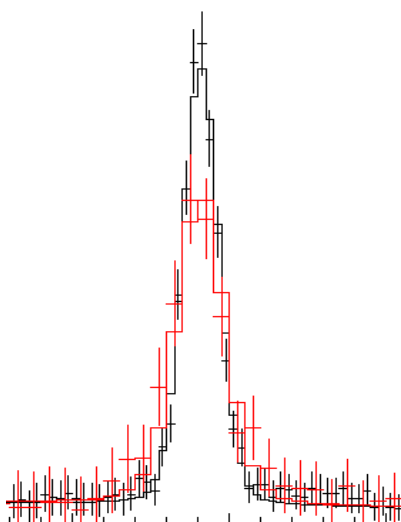


Figure 2. Fluorescence lines of different elements from galaxy NGC 1068



Example fitted gaussian curve under iron fluorescence line in Circinus.

By looking at the comparison (fig. 3), it is clear that Markarian 3 and NGC 1068 behave in a very similar way, while Circinus is different. The relative intensity of elements is lower in Circinus than the other two galaxies.

Because of these results, it is tempting to assume that Circinus contains significantly more iron (relatively) than other elements in other galaxies.

Based on other observations, we expect approximately the same distribution of elements in all AGNs (which these are) and that constitutes a discrepancy.

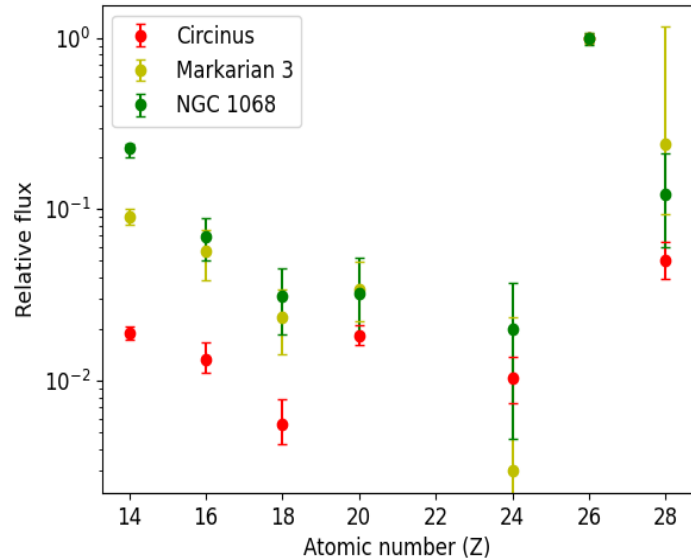


Figure 3. Fluxes relative to iron in galaxies Circinus, Markarian 3, NGC 1068. in log scale.

To try to explain this discrepancy, we need a better, more rigorous understanding of fluorescence. Therefore, we present a simplified explanation of the math behind X-Ray fluorescence. [7]

Consider the following geometry (fig. 4):

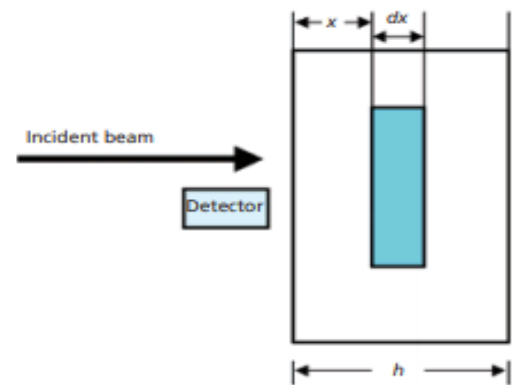


Figure 4. An incident beam enters a medium of material of length h .

Here a beam of light with energy E and intensity (power per unit area) I is incident on a sample of thickness h (fig. 3).

We will focus on the $k\alpha$ (where an electron jumps down from the second shell to a vacancy in the innermost shell of an atom) X-ray emission of element i with abundance A_i .

The intensity of the light beam gets attenuated and is described by:

$I = I(0, E) \cdot \exp(-\tau)$ where τ is called the total optical depth a distance x into the medium and is given by:

$$\tau = \int_0^x \sigma(E) n_H dx = \sigma(E) N_H \quad \text{eq. 1}$$

where $\sigma(E)$ is the total absorption cross-section at energy E , n_H is the hydrogen number density, and N_H is the hydrogen column density.

Optical depth is the natural logarithm of the ratio of incident to transmitted flux into a medium.

Not every interaction will cause fluorescence. Rather, A fraction of them do, the probability that $k\alpha$ radiation will be emitted instead of that of another K-line and the probability that radiation will be emitted instead of an Auger electron. We denote this probability by $(\omega_{K\alpha})$, these factors are constant for each element and can be measured in a lab.

The expected fluorescence intensity is:

$$I_f = \omega_{K\alpha} \int_{E_{K,Z}}^{\infty} \frac{A_i I(0, E) \sigma_{Z,K}(E)}{\sigma(E) + \sigma(E_{K\alpha,Z})} \cdot \left(1 - \exp(-\tau(E) - \tau(E_{K\alpha,i}))\right) dE$$

We can see that the intensity of fluorescence emitted by an element Z depends on: $\omega_{K\alpha}$, the total optical depth and $\sigma_{Z,K}(E)$

To simplify this, we can assume an optically thick source i.e. $\tau(E) \rightarrow \infty$ and $\tau(E_{K\alpha,i}) \rightarrow \infty$, we can make this assumption because the accretion discs surrounding these sources are very large:

$$I_f = A_i \omega_{K\alpha} \int_{E_{K,Z}}^{\infty} \frac{I_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\Gamma} \sigma_{Z,K}(E)}{\sigma(E) + \sigma(E_{K\alpha,Z})} dE$$

We assumed $I(E)$ to be a powerlaw, as in $I = I_0(E/E_0)^{-\Gamma}$, it is a common assumption to take $\Gamma = 2$.

This integral cannot be solved analytically, and so we solved it numerically. We also took relative calculations because there were several unknowns, specifically the source luminosity and making relative calculations allowed us to ignore them.

RESULTS

The model is plotted against the measurements in fig. 3. We can see that the measurements (mainly in Circinus) do not match within the margin of error of the theoretical line that we calculated.

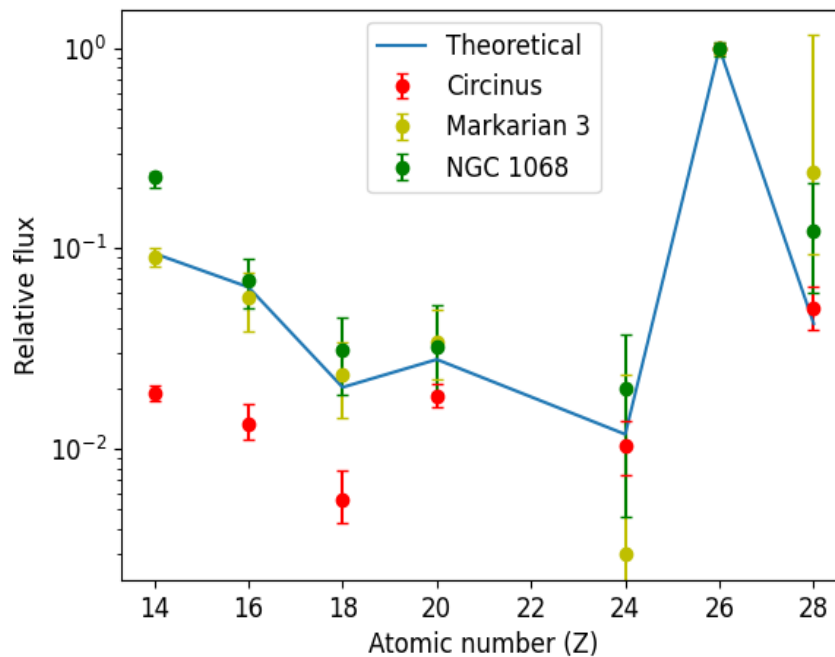


Figure 5

We expect, based on our hypothesis, measurements to match (within the margin of error) the theoretical calculations.

In NGC 1068 we can see that only Silicon flux is higher than expected. Other elements are as expected. In MRK 3, measurements are as expected (within the margin of error), and in Circinus, the relative flux of the lower Z elements (Silicon, Sulfur, and Argon) are significantly lower than expected according to our simplistic model for fluorescence. We tested 3 possible explanations for this discrepancy.

FIRST – Resonant Auger destruction (RAD):

RAD [8] is the process by which a fluorescence photon is absorbed by an atom, exciting it. This atom can decay using the Auger process mentioned above instead of re-emitting the photon. This effectively destroys the photon, hence, resonant Auger destruction (RAD).

It is basically stopping the fluorescence photon from being detected, causing the measurements to represent only a part of the initial fluorescence photons emitted.

The results are shown in fig. 6

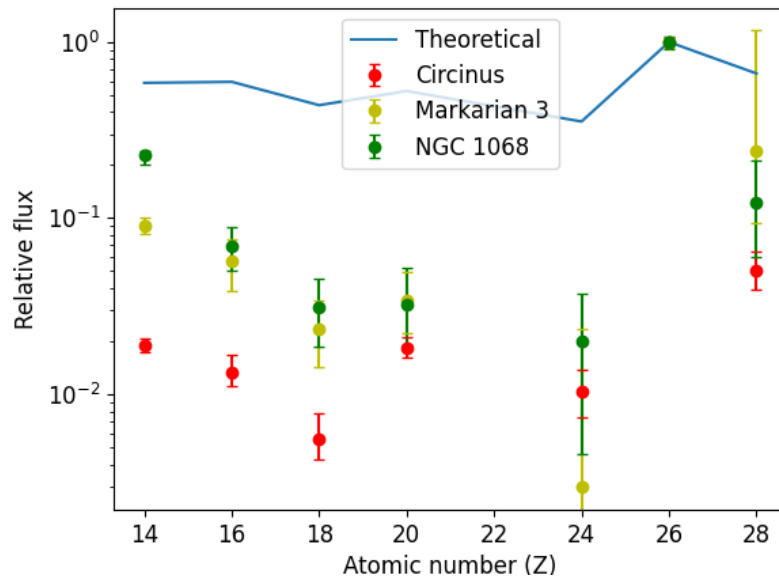


Figure 6

These results are in a significantly worse state than without accounting for RAD. Thus, we can reasonably conclude that RAD is not a significant factor in fluorescence

SECOND – The power law of the photon index Γ .

A power law [9] is a function of the form:

$$f(x) = kx^{-\Gamma}$$

if plotted in log-log scale it would be linear.

This is flux as a function of energy in log scale which means that the fitted line in the graph is a power law the slope of the line is Γ the steeper the slope is - the bigger the ratio of other elements to iron should be.

We assumed Γ to be 2, and it can be measured via other observations where its value would vary between (1.5-2.5).

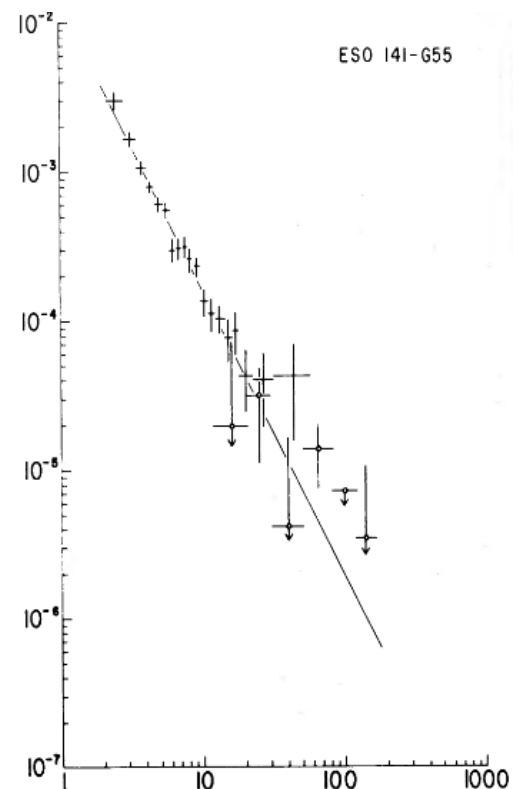


Figure 7

We implemented a gradient descent algorithm to minimize the error produced for every (possible) Γ which is between 1.5-2.5. We found that for Circinus a lower Γ produces less error, we took 1.6 [10]. In NGC 1068 it was the opposite: A higher Γ produces less error. We took $\Gamma = 2.2$.

MRK 3 was a good fit already.

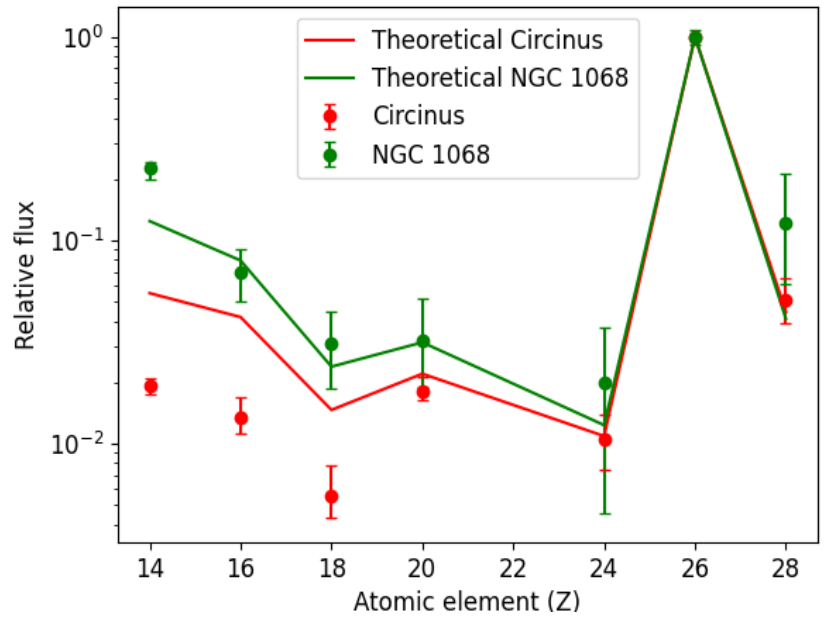


Figure 8

THIRD

We went over and checked our assumptions. One of them was Column density [11]: A measure of the amount of intervening matter between an observer and the object being observed. It is typically measured as the number of hydrogen atoms (HI) per square cm (cm^2) projected along a particular line of sight.

Normally, one would assume the Galactic column density to be the total column density between us and the source. The Galactic column density represents the matter in our galaxy in the line of sight towards the observed galaxy.

This assumption could be wrong if there is an intervening cloud of matter in the way which would increase the column density, rendering our measurements inaccurate.

So we estimated the optimal column density for Silicon to iron line ratio because it is the one with the smallest uncertainty. This estimation is made with:

$$N_H = \frac{1}{\sigma_{Fe}(E) - \sigma_{Si}(E)} \ln \left(\frac{I_{Fe}}{I_{Si}} \right) \text{ which follows from eq. 1}$$

Where I_{Fe} is Iron line intensity, I_{Si} is Silicon line intensity.

When we assume a different column density, the measurements are not as expected because this assumption, essentially, makes xspec think that fluorescence is not affected by any extra material in the way, deeming measurements inconsistent with theoretical calculations.

Results are shown in fig. 9. We can see that this makes a better fit for Circinus, which is exactly what we were looking for.

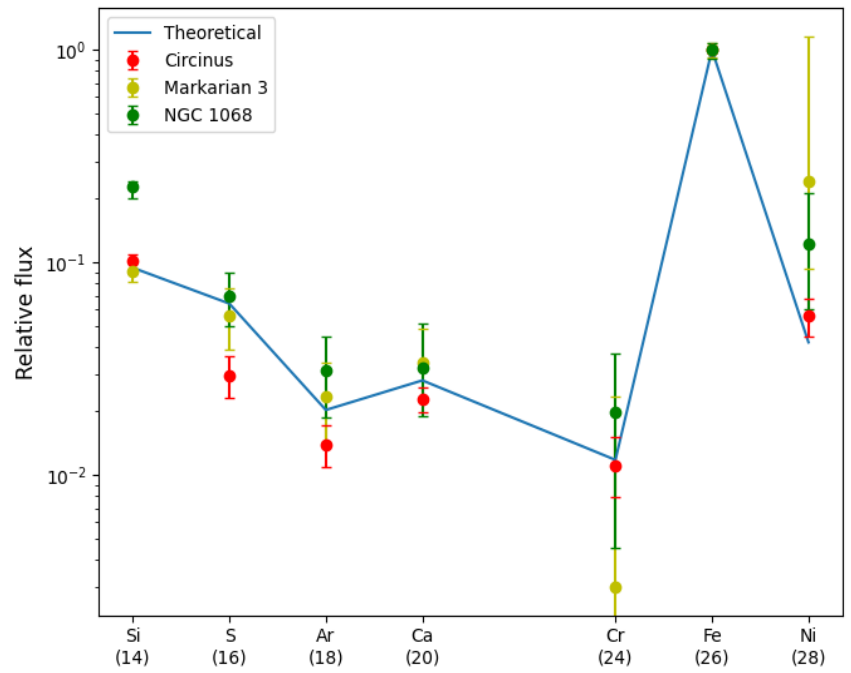


Figure 9

CONCLUSION

A simplistic model is good to explain fluorescence in AGNs. The only deviation was Circinus, in which the model predicted inconsistent results. The best way we found to explain this is the presence of extra matter in the Circinus galaxy. This obscures the line of sight and changes our measurements.

This finding has great implications that affect our understanding of the structure of Seyfert 2 galaxies and AGNs. We think the current perception of these astrophysical objects is lacking and extra matter is probably present there.

This also raises further questions such as:

- Markarian 3, NGC 1068 and Circinus are all very similar astronomical objects, why is Circinus different?
- What makes an accurate representation of such objects?

We still see a small unexplained difference in our model, but this is probably explained with minor abundance deviation, maybe a little more Iron, or less Silicon, or slight RAD occurrence.

Bibliography

- [1] Fluorescence: <https://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescence>
- [2] Auger effect: https://en.wikipedia.org/wiki/Auger_effect
- [3] Active galactic nuclei: https://en.wikipedia.org/wiki/Active_galactic_nucleus
- [4] Accretion disk: https://en.wikipedia.org/wiki/Accretion_disk
- [5] Flux: <https://en.wikipedia.org/wiki/Flux>
- [6] xspec: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/>
- [7] Fluorescence math: <https://www.tau.ac.il/~lab3/XRF/XRF5.pdf>
- [8] RAD: <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0502002>
- [9] Power law: https://en.wikipedia.org/wiki/Power_law
- [10] <https://arxiv.org/abs/0809.4656>
- [11] Column density: https://en.wikipedia.org/wiki/Area_density#Column_density



כשירות של צמחים לאור היבטים סביבתיים וגנטיים

חניך: ניתאי נחמיה, מקיף ג', אשדוד

מנחים-עמיתים: ד"ר אפרת שפר ואילן אלחנן

הפקולטה לחקלאות, האוניברסיטה העברית, רחובות



מבוא

העולם הסובב אותנו אוצר בחובו מגוון רחב של צמחים ממינים רבים ובעלי תכונות שונות. לכל צמח יש סביבות גידול אופייניות, אותן ניתן למקם על ציר בהתאמה לכמות משאבי הקרקע שבהם. בקצה אחד של הציר יהיו **סביבות עשירות**, משמע סביבות העשירות במיוחד במשאבי קרקע שונים כדוגמת מים, חנקן, זרחן, ומינרלים נוספים. בקצה השני של הציר יהיו **סביבות עניות**, משמע קיים חוסר באחד או יותר ממשאבי הקרקע השונים. בעבודה זו כאשר נדבר על סביבה עשירה אין אנו מתכוונים למצב הקיצון שהוגדר, אלא לכך שהיא עשירה ביחס לסביבה השנייה הנבדקת, ולהפך.

בטבע קיימות דוגמאות רבות לניגוד שבין סביבות עניות לבין סביבות עשירות. דוגמה אחת היא **עומק הקרקע** – זמינות משאבי הקרקע גבוהה יותר ככל שהקרקע עמוקה יותר, מאחר שלשורשי הצמח יש אפשרות לנצל יותר נפח של קרקע[1]; דוגמה נוספת היא **מפל המשקעים** – באזורים צחיחים כמות המשקעים היא נמוכה משמעותית, בניגוד לאזורים ברוכי משקעים. לכן, באזורים בעלי כמות נמוכה של גשם זמינות מי הקרקע עבור הצמחים תהיה נמוכה יותר לעומת אזורים בעלי כמות משקעים גבוהה[2]. גם **לגיל הקרקע** יש השפעה על עושר המשאבים הסביבתיים – ככל שגיל הקרקע עולה, כך יורדת כמות הזרחן באדמה[3].

כחלק מהתאמת הצמחים לסביבתם, קיימים הבדלים משמעותיים בין תכונותיהם של צמחים מסביבות עניות ועשירות. אחת התכונות, בחלק מהמקרים, היא **היחס בין המסה של העלה לשטחו** (dry leaf mass per area). ניתוח נתונים סטטיסטיים אודות LMA של צמחים מכלל העולם מצא כי לצמחים הגדלים בסביבות עניות במינרלים חיוניים (נוטריינטים) יש LMA גבוה יותר לעומת צמחים בסביבות עשירות. בנוסף, למינים של הצמחים הגדלים במדבריות יש LMA גבוה יותר לעומת מינים מסביבות בעלות זמינות מים גבוהה יותר[5]. תכונה נוספת המבטאת את השוני בין הצמחים בסביבות השונות היא **מסת הזרעים** – מאמר אשר כלל תצפיות וניסויים מבוקרים הציג כי באופן כללי צמחים מקרקע עמוקה יותר הם בעלי מסת זרעים גבוהה יותר[1].

לתכונות השונות של הצמחים יש משמעות בהתאמתם לסביבה – ככל שהפרט מותאם יותר לסביבתו, כך סיכויו להעמיד צאצאים פוריים הוא גבוה יותר, כלומר הכשירות שלו גבוהה יותר. ניתן להעריך את הכשירות על ידי מדידת הביומסה שלהם ומספר הזרעים שיוצרו באותה עונה.

קיימות תיאוריות שונות המסבירות מדוע תכונה המאפיינת צמחים מסביבה ענייה מגבירה את כשירותם בסביבה זו, אך תהווה חיסרון בעבור צמחים מסביבה עשירה ולהפך. אחת מהן היא "השערת שימור המשאבים" הגורסת שמיני צמחים מסביבות עניות, יהיו טובים יותר בשימור נוטריינטים מאשר מינים מסביבות עשירות. על פי השערה זו, למינים מסביבות עניות יהיו איברים עבים וצפופים, למשל עלים בעלי LMA גבוה או שורשים עם יחס אורך למסה נמוך. איברים אלו יהיו ארוכי חיים, אך הם יקרים לבנייה. בזכות תוחלת החיים הארוכה של האיברים הללו, המשאבים ששמשו לבנייתם נשמרים לאורך זמן בצמח, דבר המהווה יתרון בסביבה ענייה במשאבים. בסביבות עשירות, האנרגיה הגבוהה הדרושה לשם בניית איברי צמח מארכי חיים היא חסרון – LMA גבוה מפחית מיעילות קליטת האור ביחס ליחידת המסה, כלומר העלה פחות יעיל בקליטת אור ביחס לכמות המשאבים שהושקעו בבנייתו[6].

השערה נוספת היא "השערת ההשקעה בגובה" הגורסת שמינים מסביבות עשירות, משקיעים יותר משאבים בצמיחה לגובה, ביחס למינים מסביבות עניות, וזאת על מנת להתחרות על האור. על פי השערה זו התחרות בסביבות העניות היא בעיקר על משאבי הקרקע, ואילו בסביבות העשירות, התחרות תהיה בעיקר על קליטת האור. השקעה בגבעול נחוצה כדי להתחרות על האור. את מידת ההשקעה ניתן למדוד על ידי חישוב יחס הביומסה של הגבעול לביומסה של כלל הצמח. טילמן מציג בספרו "אסטרטגיות צמחים והדינמיקה והמבנה של קהילות צמחים" כי חלק מצמחים הגדלים בסביבות עשירות, נוטים להשקיע יותר משאבים בגבעול, לעומת צמחים מסביבות עניות[7].

הן השערת שימור המשאבים והן השערת ההשקעה בגובה עוסקות, בין היתר, גם במערכות הכוללות תחרות בין צמחים – צמחים הגדלים בצפיפות מתחרים על משאבים מוגבלים בסביבתם, כדוגמת אור או משאבי קרקע. התחרות מובילה להקטנת זמינות המשאבים בעבור כל פרט. דבר אשר בא לידי ביטוי בירידה בביומסה של הצמח ובמספר הזרעים שהוא ייצר במהלך העונה.

נדגיש את הדמיון ואת השוני בין הניבויים הנובעים מהשערת שימור המשאבים ומהשערת ההשקעה בגובה. על פי שתי ההשערות, בתנאים טבעיים שבהם יש תחרות בין צמחים, כולל בין צמחים ממינים שונים – מינים מסביבה ענייה יפגינו כשירות גבוהה יותר ממינים מסביבה עשירה כאשר שניהם גדלים בבית גידול עני במשאבים, ולהפך, מינים מסביבה עשירה יפגינו כשירות גבוהה יותר ממינים מסביבה ענייה, כאשר שניהם גדלים בבית גידול עשיר במשאבים.

כלומר, על פי שתי ההשערות נבא במצב של תחרות בין מינית דבר דומה, אך לכל השערה מנגנון שונה. השערת ההשקעה בגובה גורסת שמינים מסביבה ענייה יפגינו כשירות נמוכה יותר ממינים מסביבה עשירה, כאשר הם גדלים יחד בבית גידול עשיר במשאבים, מכיוון שהמינים מהסביבה העשירה יצלו עליהם וימנעו מהמינים מהסביבה הענייה גישה לאור. לפיכך, כאשר המינים גדלים בנפרד ואין תחרות בין מינית, מינים מסביבות עניות הגדלים בנפרד בבית גידול עשיר, יהיו בעלי כשירות גבוהה יותר ממינים מסביבות עשירות הגדלים בנפרד בבית גידול עשיר, מאחר וההשקעה בגובה ברמת המין מיותרת, שכן אין תחרות בין מינית על האור. בניגוד לכך השערת שימור המשאבים שמה את הדגש על ניצול המשאבים ברמת המין ולא על האינטראקציות הבין מיניות. לפיכך, גם אם המינים יגדלו בנפרד בסביבה העשירה, הכשירות של המינים מהסביבה הענייה תהיה קטנה יותר מהכשירות של המינים מהסביבה העשירה.

על מנת לבחון את תוקף ההשערות השונות, יצאנו לבדוק אם אכן בפועל מתקיימים הניבויים השונים הנובעים מהן.

שאלות המחקר

כיצד ריכוז משאבי הקרקע ותחרות בין-מינית משפיעים על כשירות מינים שונים של צמחים שמוצאם מסביבות עניות או שמוצאם מסביבות עשירות?

שיטות המחקר ומערכיו

כדי לענות על שאלות המחקר תכננו ניסוי עציצים בבית רשת. במהלך הניסוי עשינו שימוש בארבעה זוגות של מיני צמחים חד שנתיים נפוצים. כל זוג הורכב ממין מסביבה ענייה ומין מסביבה עשירה. על מנת לבודד את ההבדל הגנטי הנובע מההתאמה לסביבות השונות, כל זוג צמחים כלל מינים מאותו הסוג, וכאשר הדבר לא התאפשר נבחרו מינים מאותה המשפחה.

הזוג הראשון כלל צמחים ממשפחת הגרניים :

מקור חסידה חלמית המייצג מין מסביבה ענייה

ומקור חסידה תל אביבי המייצג מין מסביבה עשירה.



מקור חסידה חלמית
צילום : אבינעם דנין



מקור חסידה תל אביבי
צילום : שיר ורד



אספסת הכתרים
צילום : אבינעם דנין



אספסת מצויה
צילום : אבינעם דנין

הזוג השני כלל צמחים ממשפחת הקטניות :

אספסת הכתרים מייצגת מין מסביבה ענייה

ואספסת מצויה מייצגת מין מסביבה עשירה.

הזוג השלישי כלל צמחים ממשפחת הדגניים :

מלעניאל מצוי מייצג מין מסביבה ענייה, ושיבולת שועל

מייצגת מין מסביבה עשירה. במשפחת הדגניים לא נמצאו

שני מינים מאותו הסוג העונים לדרישה שאחד מהמינים

יהיה מסביבה ענייה והמין השני מסביבה עשירה, ולכן בחרנו

צמחים מסוגים שונים אך מאותה המשפחה.



שיבולת שועל
צילום : אבינעם דנין



מלעניאל מצוי
צילום : אבינעם דנין

הזוג הרביעי נבדק בניסוי פיילוט שבוצע אשתקד.

גם זוג זה ממשפחת הדגניים :

עוקצר מצוי מייצג מין מסביבה ענייה

ושעורת התבור מייצגת מין מסביבה עשירה.



עוקצר מצוי
צילום : אבינעם דנין



שעורת התבור
צילום : אילן זהרוני

על מנת לחשוף חלק מהעציצים לסביבה ענייה במשאבי קרקע וחלק אחר לסביבה עשירה, עשינו שימוש בריכוזים שונים של חנקן המהווה משאב קרקע חיוני לצמחים, חיוני לסינתזה של כלל החלבונים בצמח ועלייה בריכוז החנקן הזמין לצמח מקושרת עם עלייה בביומסה הצמחית[9]. מחצית מהעציצים בניסוי הושקו במים בעלי ריכוז 15 PPM חנקן, והמחצית השנייה ב-50 PPM חנקן.

בעבור כל זוג מינים מסויים וריכוז חנקן מסויים, היו עציצים שכללו צמח בודד ממין שמוצאו מסביבה ענייה, עציצים שכללו צמח בודד ממין שמוצאו מסביבה עשירה ועציצים מעורבים שכללו את שני המינים. ניסוי הפיילוט כלל גם עציצים שכללו מספר פרטים מאותו המין. להלן החלוקה:

לוח 1: חלוקת העציצים בטיפולים השונים בניסוי הראשי

השקיה בריכוז קרקע גבוה (50 PPM)	השקיה בריכוז חנקן נמוך (15 PPM)
10 עציצים מעורבים בכל עציץ היו 4 צמחים מכל מין	10 עציצים מעורבים בכל עציץ היו 4 צמחים מכל מין
5 עציצים שכללו צמח בודד מסביבה ענייה	5 עציצים שכללו צמח בודד מסביבה ענייה
5 עציצים שכללו צמח בודד מסביבה עשירה	5 עציצים שכללו צמח בודד מסביבה עשירה

הניסוי הראשי כלל בסך הכול 120 עציצים – 40 עציצים לכל זוג מינים כפול 3 זוגות של מינים.

מערכת הניסוי בפיילוט הייתה דומה, אך כללה בנוסף גם עציצים של תחרות תוך-מינית, כלומר בכל טיפול היו עציצים שכללו 10 פרטים מאותו המין. זאת בעבור שעורת התבור ועוקצר מצוי.

על מנת לבדוק את המובהקות הסטטיסטית של התוצאות אשר התקבלו מהניסויים, נעשה לרוב שימוש בשיטה הסטטיסטית מבחן t המאפשרת להשוות בין שתי קבוצות נתונים בלתי תלויות, תוך חישוב התפלגות הנתונים וערכי הממוצע בכל קבוצה. המבחן מציג האם השונות בין הקבוצות הנבדקות אכן מובהקת. בנוסף, בחלק מהמקרים נעשה שימוש גם בניתוח שונות (ANOVA), אשר בשונה ממבחן t, הוא כולל השוואה בין יותר משתי קבוצות.

מהלך הניסוי

הניסוי החל בהנבטת הזרעים, שנשטפו באקונומיקה ולאחריה במים מזוקקים, והונחו בצלחות אגר עד לנביטה. לאחר מכן נשתלו הנבטים בעציצים אשר מולאו במצע פרלייט (מצע גידול אינרטי). העציצים חוברו לטפטפות, והושקו במים שכללו אשלגן (60 ppm), זרחן (20 ppm), מיקרונוטריינטים וריכוזים שונים של חנקן כמפורט בלוח 1. ההשקיה בוצעה פעמיים בשבוע עד לרוויית מצע הפרלייט.

הניסוי החל בחורף 2019-2020 והסתיים בסוף אביב 2020. ניסוי הפיילוט החל בחורף 2018-2019 והסתיים באביב 2019. בסוף הניסוי כוסו הצמחים בשקיות נייר למשך שלושה שבועות וההשקיה הופסקה, על מנת לאפשר התייבשות הדרגתית של הצמחים ולמנוע את התפזרות הזרעים אל מחוץ לעציץ. לאחר מכן הופרדו הצמחים מכל עציץ לפי מין, הושמו בשקיות נייר ועברו ייבוש בתנור למשך שלושה ימים ב-60 מעלות צלזיוס. לאחר הייבוש, מדדנו את הביומסה העל קרקעית של כל מין מכל עציץ בעזרת מאזניים אלקטרוניות. הביומסה העל קרקעית הופרדה בחלק מהמקרים לביומסה ריפרודקטיבית (זרעים ויחידות ההפצה) וביומסה וגטטיבית (גבעולים ועלים). בעת ניתוח התוצאות נבחן את הביומסה הווגטטיבית.

תוצאות הניסוי

פרט בודד

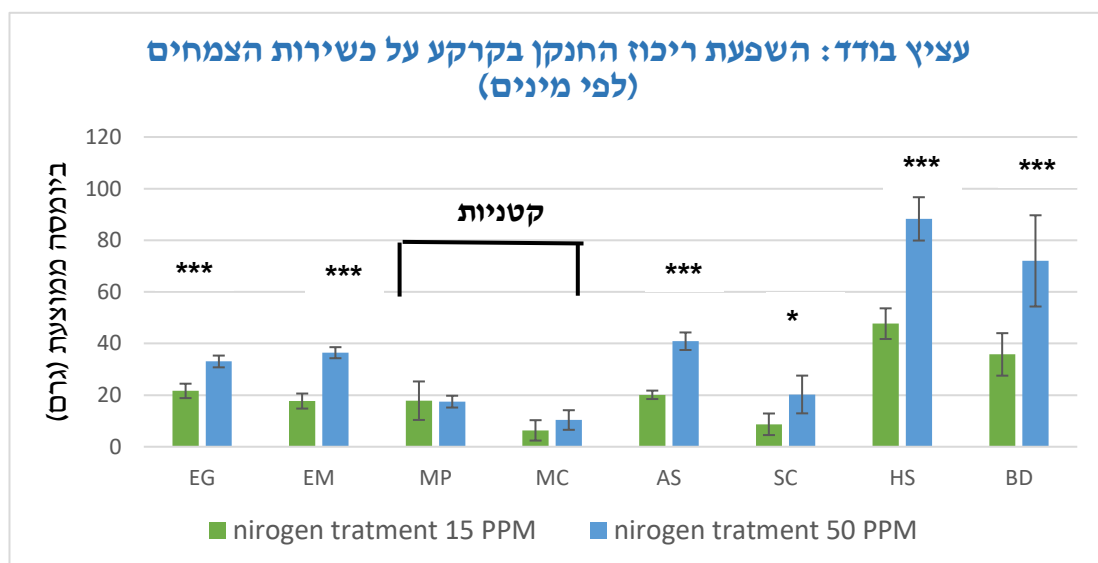
מתוצאות הניסויים יצרנו את **גרף 1** המתאר את כשירותם של הצמחים מהמינים השונים, בריכוז חנקן נמוך (15 PPM) ובריכוז חנקן גבוה (50 PPM). שקלנו את חלקו העל קרקעי של כל פרט אשר גדל לבד בעציץ ומיינו את התוצאות לפי מין וריכוז החנקן במצע הגידול. חשבנו ממוצע, סטיית התקן, ונבדקה מובהקות סטטיסטית (ראו **לוח 2**).

בשישה מינים – מקור חסידה תל אביבי, מקור חסידה חלמית, שיבולת שועל נפוצה, מלעניאל מצוי, שעורת התבור, ועוקצר מצוי – הביומסה הממוצעת של הפרטים שגדלו בריכוז חנקן גבוה, הייתה גבוהה באופן מובהק מהביומסה הממוצעת של הפרטים שגדלו בריכוז חנקן נמוך. העלייה היחסית בביומסה בריכוז החנקן הגבוה לעומת הביומסה בריכוז החנקן הנמוך היא פי-1.5 עד פי-2.5. יש להדגיש כי במינים ממשפחת הקטניות – באספסת הכתרים העלייה אינה מובהקת, ובאספסת מצויה לא הייתה עלייה.

התוצאות ממחישות את חיוניות החנקן בגדילת הצמח ובהתפתחותו, כי במינים שאינם קטניות, העלייה בריכוז החנקן הזמין לצמח הובילה לעלייה בביומסה הצמחית. בקטניות, בשונה ממינים אחרים בניסוי, מקור נוסף לאספקת חנקן הוא קיבוע חנקן אטמוספרי המבוצע על ידי חיידקים סימביוטיים בשורשי הצמח.

לוח 2: מקרא מובהקות סטטיסטית

תוצאות מבחן T (X מייצג את הערך המתקבל)	סימון המובהקות לפי כוכביות
$0.05 < X$	אינו מובהק
$0.005 < X < 0.05$	*
$0.0005 < X < 0.005$	**
$X < 0.0005$	***



גרף 1: השפעת ריכוז החנקן בקרקע על כשירות הפרטים המבוטאת כערך ביומסה ממוצע. נמדדו ערכי הביומסה בטיפולים של 15 ו-50 PPM חנקן. את שמות המינים לפי ראשי התיבות ניתן לראות בלוח 3.

לוח 3: סיכום ממצאי בדיקת פרט בודד

שם המין	ראשי תיבות	משפחה	סביבת המוצא (ענייה / עשירה)	יחס ביומסה בחנקן גבוה לביומסה בחנקן נמוך	מובהקות
מקור חסידה תל אביבי	EG	גרניים	עשירה	1.53	***
מקור חסידה חלמיתי	EM	גרניים	ענייה	2.06	***
אספסת מצויה	MP	קטניות	עשירה	0.98	אינו מובהק
אספסת הכתרים	MC	קטניות	ענייה	1.63	אינו מובהק
שיבולת שועל נפוצה	AS	דגניים	עשירה	2.03	***
מלעניאל מצוי	SC	דגניים	ענייה	2.33	*
שעורת התבור	HS	דגניים	עשירה	1.85	***
עוקצר מצוי	BD	דגניים	ענייה	2.01	***



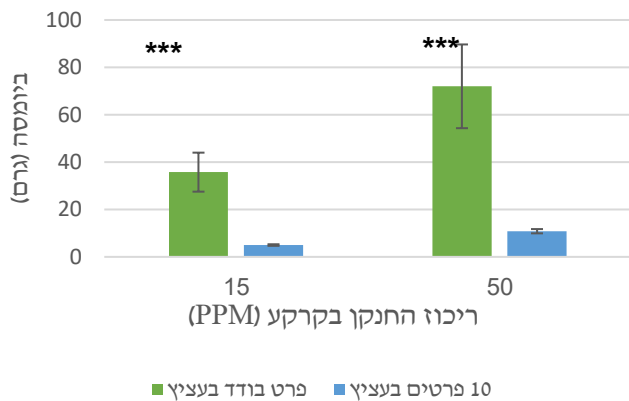
גרף 2: תגובה של מינים מסביבת מוצא שונה לעלייה בריכוז החנקן. כל זוג מינים מאותה המשפחה כולל מין מסביבה ענייה ומין מסביבה עשירה, בהתאם ללוח 3. הגרף מציג את יחס ביומסה בחנקן גבוה לביומסה בחנקן נמוך. ניתן לראות כי אין מגמה ברורה שבה המוצא הגנטי משפיע על עליית הביומסה כתוצאה מהעלייה בריכוז החנקן.

גרף 2 מציג את יחס הביומסה בחנקן גבוה לביומסה בחנקן נמוך, בעבור כל מין. כל זוג מינים מאותה המשפחה קובצו לשם השוואה. ביצענו בדיקת "ANOVA" עם המין, ריכוז חנקן והאינטראקציה ביניהם בתור המשתנים המסבירים את לוגריתם הביומסה, על מנת למצוא מודל שמתאר כיצד מינים שונים מגיבים לתוספת החנקן. תוצאות הבדיקה מראות השפעה מובהקת של ריכוז החנקן והמין על ערכי הלוגריתם של הביומסה. אולם, לא מצאנו הבדלים בתגובה של מינים מסביבות עניות ומינים מסביבות עשירות לריכוז החנקן. ניתוח המובהקות של גורמי האינטראקציה בין מין הצמח וריכוז החנקן מצא שרק מין אחד של הצמחים – אספסת מצויה – הגיב לריכוז החנקן בצורה שונה באופן מובהק מהמינים האחרים. הביומסה של שאר המינים עלתה עם העלייה בריכוז החנקן פי 1.5 עד פי 2.5, ואילו הביומסה של אספסת מצויה כלל לא השתנתה (יחס של 0.98 בין הביומסה בחנקן גבוה לביומסה בחנקן נמוך). לא נמצאו הבדלים מובהקים נוספים בין המינים. העדר מגמה ברורה לכך שהעלייה היחסית בביומסה של הצמחים מושפעת מסביבת מוצאם מהווה ניגוד לעולה מהשערת שימור המשאבים, אשר לפיה היינו מצפים כי העלייה בריכוז החנקן במצע הגידול תשפיע במידה ניכרת יותר על צמחים מסביבות עשירות.

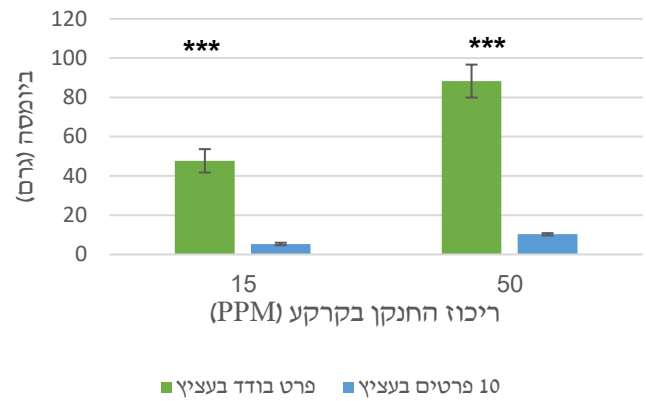
תחרות תוך מיניית

בניסוי הפיילוט, בנוסף על טיפול של תחרות בין מיניית ושל פרט בודד בעציץ, הועמד טיפול של תחרות תוך מיניית, כלומר חלק מהעציצים כללו 10 פרטים מאותו המין בעציץ בודד, בריכוזי החנקן השונים. לאחר תקופת הניסוי נשקלה הביומסה העל הקרקעית, חושב ערך הממוצע וסטיית התקן.

השפעת תחרות תוך מיניית על הביומסה של עוקצר



השפעת תחרות תוך מיניית על הביומסה של שעורה



גרף 4: השפעת תחרות תוך מיניית על הביומסה של עוקצר מצוי. ניתן לראות כי טיפול של 10 פרטים בעציץ מוביל לירידה משמעותית בביומסה הממוצעת של כל פרט, בשני ריכוזי החנקן שנבדקו.

גרף 3: השפעת תחרות תוך מיניית על הביומסה של שעורת התבור. ניתן לראות כי טיפול של 10 פרטים בעציץ מוביל לירידה משמעותית בביומסה הממוצעת של כל פרט, בשני ריכוזי החנקן שנבדקו.

לוח 4: סיכום ממצאי בדיקת תחרות תוך מיניית

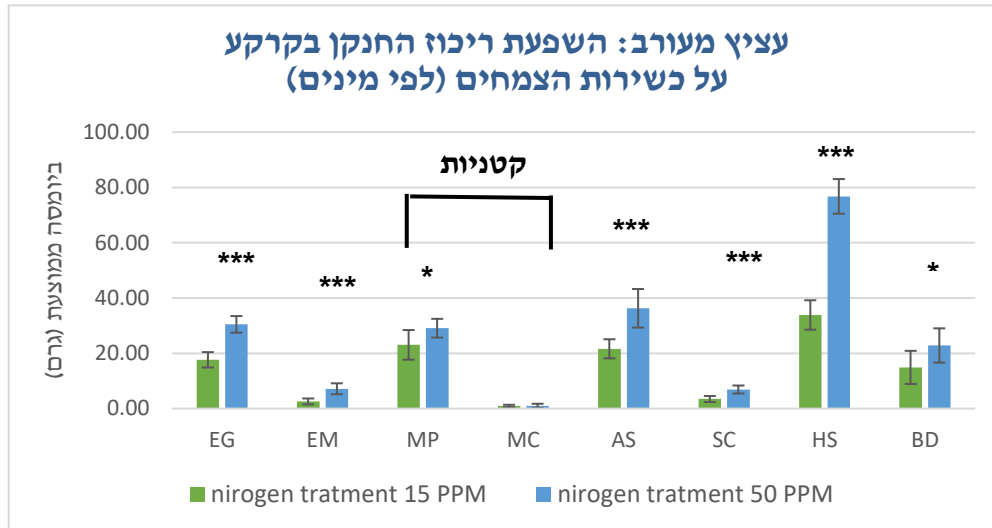
שם המין	סביבת המוצא (ענייה / עשירה)	יחס ביומסה ממוצע של פרט בודד בעציץ ל-10 פרטים בעציץ	מובהקות
שעורת התבור	עשירה	8.76	***
עוקצר מצוי	ענייה	6.90	***

לפי תוצאות הניסוי, הביומסה הממוצעת של כל פרט קטנה משמעותית בטיפול התחרות – זו של שעורת התבור קטנה באופן ממוצע פי 8.76 ושל עוקצר מצוי פי 6.9. תוצאה זו תואמת למצופה, שכן התחרות מובילה להקטנת זמינות המשאבים עבור כל פרט. כלומר, כל פרט קיבל פחות חנקן, מים, שטח קרקע ואור. תוצאת הירידה בזמינות המשאבים הייתה ירידה בביומסה הממוצעת. התוצאות מראות כי אכן הייתה תחרות בין הפרטים בעציצים שכללו יותר מפרט בודד.

תחרות בין מיניית

הניסוי כלל גם עציצים מעורבים בעבור כל אחד מזוגות המינים בניסוי, מלבד העציצים שכללו פרט בודד או מספר פרטים מאותו המין בעציץ. אלו הם עציצים שבהם גודלו ארבעה פרטים מכל אחד מהמינים בזוג, כלומר, שמונה פרטים בעציץ בסך הכול. מתוך מדידות הביומסה העל קרקעית בעציצים אלו יצרנו את גרף 5 המתאר את הביומסה של הצמחים מהמינים השונים, בריכוזי חנקן נמוך (15 PPM) ובריכוזי חנקן גבוה (50 PPM). מיינו את הביומסה שנמדדה לפי מין וריכוזי החנקן במצע הגידול, חשבנו את ממוצע הביומסה של פרט, סטיית התקן, ונבדקה מובהקות סטטיסטית.

בשבעה מינים – מקור חסידה תל אביבי, מקור חסידה חלמית, אספסת מצויה, שיבולת שועל נפוצה, מלעניאל מצוי, שעורת התבור, ועוקצר מצוי – הביומסה הממוצעת של הפרטים שגדלו בריכוז חנקן גבוה, הייתה גבוהה באופן מובהק מזו של הפרטים שגדלו בריכוז חנקן נמוך, העלייה היחסית בביומסה בריכוז החנקן הגבוה לעומת הביומסה בריכוז החנקן הנמוך (במינים שבהם נמצאה עלייה מובהקת) היא בין פי 1.26 עד פי 2.8. בהתייחס למשפחת הקטניות, העלייה באספסת הכתרים אינה מובהקת, והעלייה היחסית בביומסה באספסת מצויה הייתה 1.26, עלייה קטנה יותר מזו שנמדדה במינים שאינם קטניות (ראו לוח 4).

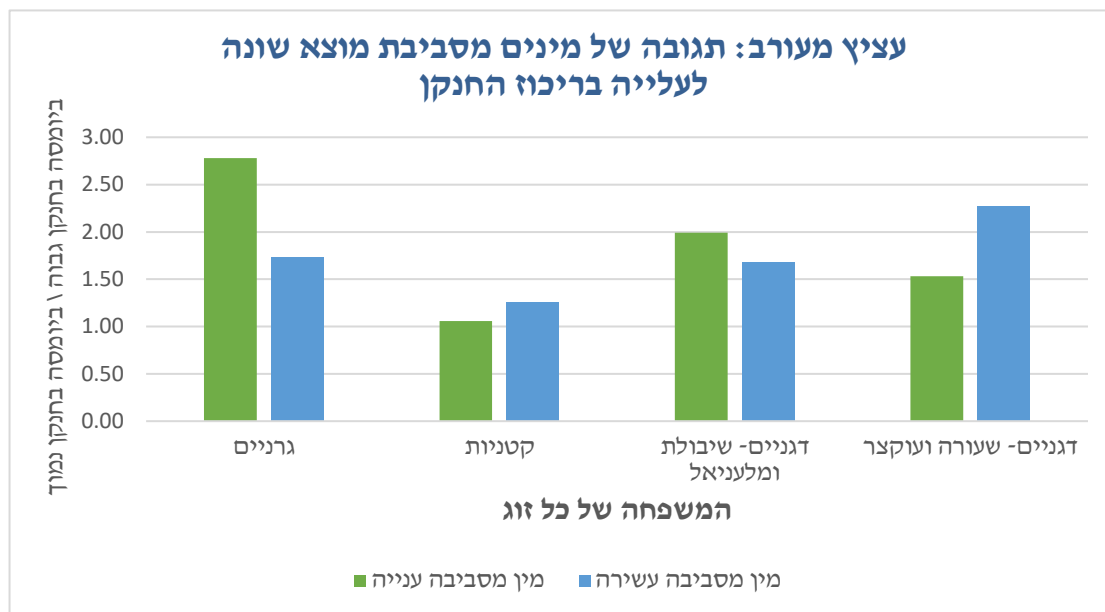


גרף 5: השפעת ריכוז החנקן בקרקע על כשירות הפרטים העציצים מעורבים. הכשירות מבוטאת כערך ביומסה ממוצע. נמדדו ערכי הביומסה בטיפולים של 15 ו-50 PPM חנקן. את שמות המינים לפי ראשי התיבות ניתן לראות בלוח 4.

העלייה המובהקת בביומסת שבעת המינים מחזקת את העולה מהתוצאות שהתקבלו בפרטים הבודדים – חנקן נחוץ לגדילת הצמח באופן ישיר. הניסוי מציג כי עלייה בריכוז החנקן הזמין לצמח מקושרת עם עלייה בביומסה הצמחית.

לוח 4: סיכום ממצאי בדיקת תחרות בין מינית

שם המין	ראשי תיבות	משפחה	סביבת המוצא (ענייה / עשירה)	יחס ביומסה בחנקן גבוה לביומסה בחנקן נמוך	מובהקות
מקור חסידה תל אביבי	EG	גרניים	עשירה	1.73	***
מקור חסידה חלמית	EM	גרניים	ענייה	2.78	***
אספסת מצויה	MP	קטניות	עשירה	1.26	*
אספסת הכתרים	MC	קטניות	ענייה	1.06	אינו מובהק
שיבולת שועל נפוצה	AS	דגניים	עשירה	1.68	***
מלעניאל מצוי	SC	דגניים	ענייה	1.99	***
שעורת התבור	HS	דגניים	עשירה	2.27	***
עוקצר מצוי	BD	דגניים	ענייה	1.53	*



גרף 6: תגובה של מינים מסביבת מוצא שונה לעלייה בריכוז החנקן בעציץ מעורב. כל זוג מינים מאותה המשפחה כולל מין מסביבה ענייה ומין מסביבה עשירה. הזוגות של כל מין גדלו באותו העציץ. הגרף מציג את יחס הביומסה בחנקן גבוה לביומסה בחנקן נמוך. ניתן לראות כי אין מגמה ברורה שבה המוצא הגנטי משפיע על עליית הביומסה כתוצאה מהעלייה בריכוז החנקן במצב של תחרות בין מינים.

גרף 6 מציג את יחס הביומסה בחנקן גבוה לביומסה בחנקן נמוך, בעבור כל מין. כל זוג מינים מאותה המשפחה קובצו לשם השוואה. כלומר מהגרף ניתן ללמוד על השפעת סביבת המוצא של מין מסויים (ענייה או עשירה) על היחס של הביומסה בחנקן גבוה לביומסה בחנקן נמוך, במצב של תחרות בין מינים. מתוך כך רצינו ללמוד איזה מין יגיב בצורה משמעותית יותר לעלייה בחנקן, כאשר מדובר בגידול של מספר פרטים של מין מסביבה ענייה ומספר פרטים של מין מסביבה עשירה באותו העציץ.

ביצענו בדיקת "ANOVA" עם המין, ריכוז חנקן והאינטראקציה ביניהם בתור המשתנים המסבירים את לוגריתם הביומסה, כדי למצוא מודל המתאר כיצד מינים שונים מגיבים לתוספת החנקן. תוצאות הבדיקה מראות השפעה מובהקת של ריכוז החנקן והמין על ערכי הלוגריתם של הביומסה. אולם, לא מצאנו הבדלים בתגובה של מינים מסביבות עניות ומינים מסביבות עשירות לריכוז החנקן. בניתוח המובהקות של גורמי האינטראקציה בין מין הצמח וריכוז החנקן מצאנו שני מינים – אספסת הכתרים ומקור חסידה חלמית – הגיבו לריכוז החנקן בצורה שונה באופן מובהק מהמינים האחרים. הביומסה של שאר המינים עלתה עם העלייה בריכוז החנקן פי 1.26 עד פי 2.27, ואילו הביומסה של אספסת הכתרים כלל לא השתנתה (יחס של 1.06 בין הביומסה בחנקן גבוה לביומסה בחנקן נמוך), והביומסה של מקור חסידה חלמית (מסביבה ענייה) עלתה באופן מובהק יותר מאשר במינים האחרים (עלייה של פי 2.78). לא נמצאו הבדלים מובהקים נוספים בין המינים. העלייה המובהקת הגדולה יותר בביומסה של מין זה, לעומת העלייה בביומסה של מינים מסביבות עשירות, באה בניגוד לעולה מהשערת ההשקעה בגובה ומהשערת שימור המשאבים, שלפיה העלייה היחסית בביומסה של מינים מסביבות עשירות כתוצאה מהעלייה בריכוז החנקן, אמורה להיות גבוהה יותר לעומת העלייה היחסית בביומסה של אלה מסביבות עניות.

סיכום והמשך המחקר

במחקר זה נבדקה כשירותם של צמחים שונים, לאור היבטים סביבתיים וגנטיים, באמצעות ניסוי בבית רשת בפקולטה לחקלאות ברחובות. הניסוי תוכנן כדי לבחון את השערת שימור המשאבים ואת השערת ההשקעה בגובה. השאלה שהנחתה אותנו הייתה – כיצד ריכוז משאבי הקרקע ותחרות בין-מינית משפיעים על הכשירות של מיני צמחים שמוצאם מסביבות עניות או מסביבות עשירות?

תוצאות הניסוי שלהלן לא תומכות בהשערת שימור המשאבים וגם לא בהשערת ההשקעה בגובה. בהתאם להשערת שימור המשאבים, היינו מצפים לראות שבטיפול של פרט בודד בעציץ ובעציצים מעורבים, העלייה היחסית בביומסה של מינים מסביבות עשירות, כתוצאה מעלייה בריכוז החנקן במצע הגידול, היא גבוהה יותר מהעלייה היחסית של מינים מסביבות עניות. זאת מכיוון שבהתאם להשערה, למינים מסביבות עניות יש איברים בעלי אורך חיים רב המובילים לשימור משאבים בצמח לטווח הארוך. אולם, בסביבות פרודוקטיביות, האנרגיה הגבוהה הדרושה לשם בניית איברי הצמח מאריכי החיים היא חסרון, מאחר ויעילותם ביחס ליחידת מסה היא נמוכה יותר. לכן, נצפה שמינים מסביבות עניות יושפעו במידה פחותה יותר מהעלייה בריכוז החנקן מאשר צמחים מסביבות עשירות, אשר בעלי התאמות לסביבה עשירה בחנקן. לפי הניסוי לא גילינו קשר בין סביבת המוצא והתגובה של המין לעלייה בריכוז החנקן גם בפרט בודד בעציץ וגם בעציצים מעורבים.

השערת ההשקעה בגובה גורסת שמינים מסביבות עשירות, ביחס למינים מסביבות עניות, משקיעים יותר משאבים בצמיחה לגובה, על מנת להתחרות על האור. על פי השערה זו התחרות בסביבות העניות היא בעיקר על משאבי הקרקע, ואילו בסביבות העשירות – בעיקר על קליטת האור. לכן, היינו מצפים לראות שבעציצים המעורבים, בשונה לפרט בודד בעציץ, העלייה היחסית בביומסה בצמחים מסביבות עשירות, כתוצאה מעלייה בריכוז החנקן במצע הגידול, תהיה גבוהה משמעותית בהשוואה לעלייה היחסית בצמחים מסביבות עניות. זאת מכיוון שבריכוז החנקן הנמוך, כאשר התחרות היא על משאבי הקרקע, צמחים מסביבות עשירות יזבזבו משאבים על צמיחה לגובה, יאבדו משאבים רבים והכשירות שלהם תהיה נמוכה. במצב של ריכוז חנקן גבוה, ההשקעה בצמיחה לגובה תהיה בעלת חשיבות רבה, מאחר שהצמיחה צפופה ויש תחרות על האור. המינים מהסביבות העשירות, המשקיעים בצמיחה לגובה, יצלו על המינים מהסביבות העניות וימנעו מהם גישה לאור. כך הביומסה של מינים מסביבות עשירות תגדל באופן משמעותי, בניגוד למינים מסביבות עניות, שלא יהיו מותאמים לתחרות מסוג זה. אולם, לפי הניסוי לא התגלה קשר בין המוצא הגנטי והתגובה של המין לעלייה בריכוז החנקן בעציצים מעורבים.

הסבר אפשרי לממצאים הללו הוא ששתי ההשערות אינן נכונות. לכאורה, ניתן לטעון כי לא הייתה תחרות על האור בעציצים המעורבים שגדלו בריכוז חנקן גבוה, תנאי הכרחי להשערת ההשקעה בגובה. אולם, יש לציין כי נצפתה תחרות על האור באופן ברור. מממצאי בדיקת אור עולה כי בריכוז החנקן הנמוך היחס בין עוצמת האור בתחתית העציץ לעוצמת האור המגיעה מהשמש היה בממוצע 0.55. לעומת זאת, בריכוז החנקן הגבוה היחס היה 0.19 – הבדל מובהק. ניתן לשער כי העלייה הרבה בביומסה הכללית כתוצאה מעלייה בריכוז החנקן, מעידה אף היא על תחרות על האור.

הסבר נוסף לתוצאות הוא שההשערות אכן מתקיימות, אך רק בחלק ממיני הצמחים. למשל, העלייה היחסית בביומסה של שעורת התבור מהסביבה העשירה, הייתה גבוהה יותר מזו של עוקצר מצוי מהסביבה

הענייה. בטיפול של העציצים המעורבים, ובטיפול של פרט בודד בעציץ, העלייה של שני המינים הייתה דומה. תוצאות אלו תומכות בהשערת ההשקעה בגובה עבור זוג המינים שעורת התבור ועוקצר מצוי (ולא בהשערת שימור המשאבים מכיוון שלא נצפה הבדל בין העלייה בביומסה בחנקן גבוה לעומת חנקן נמוך בשני המינים בטיפול של פרט בודד). לפיכך, ייתכן ובטבע קיימים זוגות של מינים נוספים שבהם מתקיימת השערת ההשקעה בגובה, וייתכן גם שישנם זוגות מינים שבהם מתקיימת השערת שימור המשאבים, אף על פי שלא מצאנו כאלו בניסוי הנוכחי.

אם אמנם השערת ההשקעה בגובה או השערת שימור המשאבים נכונה, רק בעבור חלק מהמינים שגדלים בטבע, אך לא בעבור רובם או כולם – מה המיוחד במינים שבעבורם היא אכן מתקיימת, ומדוע היא לא מתקיימת באחרים? הסבר אפשרי שיש להגדיר את הסביבות כעשירות או כעניות במשאב מסויים, ולא להגדירן באופן כללי. כאשר נגדיר את הסביבות באופן זה, ייתכן ונמצא תבניות עבור חלק מסוגי המשאבים. לדוגמה, ניתן להגדיר את סוג הסביבה לפי ציר של עומק הקרקע – ככל שהקרקע עמוקה יותר, זמינות משאבי הקרקע היא גבוהה יותר והסביבה עשירה יותר. בנוסף, ניתן להגדיר את סוג הסביבה לפי מפל המשקעים – כמות משקעים גבוהה מובילה לזמינות מים גבוהה ומכאן שהסביבה עשירה יותר. באופן דומה אפשר לבחון ציר של זמינות חנקן וזרחן כגורם הקובע את סוג הסביבה.

בהנחה ונמצא כי אחת ההשערות או שתיהן נכונות בעבור ציר מסויים, ניתן לפתח השערות חדשות ומדויקות יותר, המתייחסות בנפרד לכל אחד מהצירים. לדוגמה, מדבר מהווה סביבה ענייה במים, אך לא בהכרח דל גם בחנקן. ייתכן ומין המותאם לסביבה ענייה במים לא יהיה מותאם לסביבה ענייה בחנקן, מאחר ואפשרי שמינים מסביבות יבשות חסכוניים יותר בשימוש במים אך לא בהכרח יעילים בניצול החנקן.

בעבור שני מיני האספסת, לא מצאנו עלייה מובהקת בביומסה כתוצאה מעלייה בריכוז החנקן בפרט בודד. בעציץ מעורב מצאנו עלייה בביומסה באספסת מצויה אך לא באספסת הכתרים. יש לציין שהעלייה באספסת מצויה – סוג ממשפחת הקטניות שבה ההתאמה של נוכחות חיידקי ריזוביום בשורשי הצמח קטנה יחסית למינים אחרים. מדובר בחיידקים סימביוטיים המקבעים חנקן אטמוספרי ויוצרים חנקן זמין לקליטת הצמחים. אנחנו משערים שקיבוע החנקן התרחש בשני מיני האספסת בניסוי, ואפשר לאותם מינים להגיע לערכי ביומסה גבוהים גם בריכוז חנקן נמוך, מאחר והם קיבלו אספקה של חנקן זמין מחיידקי הריזוביום. בדומה למה שמצאנו, במחקר קודם נמצא כי הביומסה של צמחים ממשפחת הקטניות נשמרת לאורך טווח רציף של ריכוזי חנקן [10].

להעמקת הידע בנושא נציע **מספר כיוונים עתידיים להמשך המחקר**: ראשית, הקמת מערכת שתכלול טווח גבוה יותר של ריכוזי חנקן, ורצף של נקודות (5 PPM, 10 PPM, 50 PPM), לבדיקת מגמתיות, וכך לבחון האם ברמות נמוכות של חנקן מתקבלים ערכי ביומסה שונים. שנית, לבדוק זוגות של מינים נוספים, הן ממשפחות שנבדקו והן ממשפחות אחרות, במטרה לבדוק האם השערת שימור המשאבים וההשקעה בגובה מתקיימות בחלק מהמינים. נמליץ לבחון הרכב רחב יותר של טיפולי תחרות, כלומר ליצור רצף של צפיפויות, כדי לבדוק מגמתיות. לסיום, נמליץ על קיום ניסוי דומה, שבו כמות מים תחליף את המשתנה של ריכוז החנקן במצע הגידול, ומתוך כך לבחון את הרעיון שיש צורך להגדיר סביבה כעשירה או כענייה לפי נוכחות של משאב מסויים ולא באופן כללי.

1. Aschehoug, E. T., Brooker, R., Atwater, D. Z., Maron, J. L., & Callaway, R. M. (2016). The mechanisms and consequences of interspecific competition among plants. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 47, 263-281.
2. Burkle, L. A., & Irwin, R. E. (2010). Beyond biomass: measuring the effects of community-level nitrogen enrichment on floral traits, pollinator visitation and plant reproduction. *Journal of Ecology*, 98(3), 705-717.
3. Cornwell, W. K., & Ackerly, D. D. (2009). Community assembly and shifts in plant trait distributions across an environmental gradient in coastal California. *Ecological Monographs*, 79(1), 109-126.
4. DeMalach, N., Ron, R., & Kadmon, R. (2019). Mechanisms of seed mass variation along resource gradients. *Ecology letters*, 22(1), 181-189.
5. Grime, J. P. (1977). Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *The American Naturalist*, 111(982), 1169-1194.
6. Lajtha, K., & Schlesinger, W. H. (1988). The biogeochemistry of phosphorus cycling and phosphorus availability along a desert soil chronosequence. *Ecology*, 69(1), 24-39.
7. Meron, E., Gilad, E., von Hardenberg, J., Shachak, M., & Zarmi, Y. (2004). Vegetation patterns along a rainfall gradient. *Chaos, Solitons & Fractals*, 19(2), 367-376.
8. Poorter, H., Niinemets, Ü., Poorter, L., Wright, I. J., & Villar, R. (2009). Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. *New phytologist*, 182(3), 565-588.
9. Tilman, D. (1988). *Plant strategies and the dynamics and structure of plant communities*. Princeton University Press.
10. Yang, Z., Shen, Y., Xie, T., & Tan, G. (2009). Biological nitrogen fixation efficiency in soybean under different levels of nitrogen supply. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 29(3), 574-579.



שימוש בתאי CAR-T ספציפיים ל-MOG להפחתת אקטיבציה של

תאי T DR2 ספציפיים ל-MBP

Use of MOG Specific CAR-T Cells to Reduce MBP/DR2 T Cells Activation

חניכה: תמר נמיר, אורט ברמים, כרמיאל

מנחם-עמיתים: פרופ' יורם רייטר וענבר ערמן

הפקולטה לביולוגיה, הטכניון, חיפה



Introduction

Multiple sclerosis (MS) is a chronic, inflammatory-demyelinating disease of the central nervous system (CNS). MS is generated by myelin-specific auto-reactive T-cells that infiltrate the CNS and mediate an inflammatory response against the myelin sheath. That results in demyelination and axon degradation. Myelin is an extension of oligodendrocytes, which wrap tightly around the axon of a neuron, and provide insulation for fast electrical conduction. Neurons with impaired myelin, signal slowly or erroneously, resulting in a wide range of disabilities. There are four defined clinical courses of MS, the most common is relapsing–remitting, which is characterized by relapses at irregular intervals with complete or incomplete neurological recovery.

Upon encountering myelin antigen, antigen presenting cells (APCs) mature and travel to lymph nodes where they present antigen to naïve T cells in a pro-inflammatory context. During activation, T cell differentiation into mature effector CD4⁺ T cell subsets depends on the cytokines and co-stimulatory/inhibitory signals produced by APCs. Once activated, autoreactive CD4⁺ T cells traffic to the brain and cross the blood brain barrier (BBB), where they are re-stimulated by APCs. This leads to disease induction and progression. As disease progresses, new myelin antigens are presented by APCs (a well characterized phenomena, known as epitope spreading), leading to subsequent activation of newly infiltrated T cells, targeting different myelin peptides in the context of MHC class II molecules, such as, myelin oligodendrocyte glycoprotein (MOG) and Myelin basic protein (MBP). Autoreactive CD4⁺ T cells activation is characterized by upregulation of cell-surface activation markers, such as CD69 and secretion of pro-inflammatory cytokines, such as IL-2.

There are two well characterized MS mouse models: Theiler's Murine Encephalomyelitis Virus-Induced Demyelinating Disease (TMEV-IDD) and Experimental Autoimmune Encephalomyelitis (EAE). EAE is an inducible CD4⁺ T-cell mediated murine MS model. It exhibits relapsing-remitting phases in SJL/J mice and chronic progression in C57Bl/6 mice. The disease is induced by immunization with myelin peptide and an adjuvant or by adoptive transfer of CD4⁺ T cells derived from immunized mice into naïve recipient animals. In our experiments, the mice were transgenic with T cell receptors against MBP/DR2 and only DR2 major histocompatibility complex (MHC) class II.

MS susceptibility is genetically associated with human leucocyte antigen (HLA) class II alleles, specifically DRB1*1501 (DR2) allele. It is possible that this allele contributes to MS through an enhanced ability to present myelin associated peptides to pathogenic T cells. MBP (89-99) peptide was found to bind with high affinity to DRB1*1501 molecules. It has been found that Transgenic DRB1*1502 mice had moderate to strong T-cell response notably to (MOG)-35-55 peptide with favorable DRB1*1501 binding motifs. This suggests that the complex of MBP (89-99), MOG (35-55) and DRB1 molecules is more immunogenic for MBP reactive T cells.

Chimeric antigen receptor T cells (CAR-T) are T cells that were genetically engineered to produce an artificial ScFv chain, connected to the intracellular signaling domains of a T-cell receptor and the CD28 co-stimulatory activation domain. CARs are receptor proteins that were engineered to give T cells the ability to target a specific protein, which is targeted by the extracellular ScFV arm. CARs combine antigen-binding and T-cell activating functions.

The following study aims is to demonstrate that autoreactive T cells activation in MS can be reduced using MOG specific CAR T cells. As stated, in MS, APCs present different myelin peptides such as MOG and MBP in the context of DR2 MHC class II. Using MOG-specific CAR T cells, which specifically target MOG presenting APCs, we can eliminate APCs that co-express several myelin related peptides. Accordingly, we believe that MOG directed CAR-T cells would inhibit the activation of myelin-specific autoreactive CD4+ T. We will show that MBP/DR2 T cells activation by MOG and MBP presenting APCs can be reduced using MOG specific CAR T cells. This will show there is a possibility of treating MS by peptide specific CAR T cell.

Experiments

Measuring immune response of autoreactive T cells to MBP and MOG peptides by measuring IL-2 concentrations

Aim: to measure the minimal MBP peptide concentration, required for MBP\DR2 autoreactive T cell activation.

The experiment: Harvesting a mouse's MBP/DR2 spleen and obtaining APCs and autoreactive T cells from it. After obtaining the desired cell concentration by dilution, 200,000 cells were added to each well. After a series of dilutions, the desired concentration of MOG (0-100 ug/ml) and MBP (1-10 ug/ml) were obtained. The MOG and MBP were added to the wells. Anti-CD3\28 abs were used as a positive control. The cells were incubated for 48 hours, followed by supernatant ELISA assay.

The ELISA

Aim: to measure IL2 levels, secreted by activated autoreactive T cells.

The experiment: An Antibody against IL-2 was obtained. The antibody was fixated to the bottom of the well. Following a night incubation to allow IL-2 to bind to the antibody. We then washed away the wells from unwanted material and blocked each well using PBS- 2% milk. T cell supernatant was added to each well and incubated for 2 hours, allowing IL-2 to anti-IL2 binding. A second antibody was obtained. A second layer of the second antibody was bound. We then washed away the wells and blocked unwanted attachments. The second antibody connects to another part of the IL-2. The second antibody has biotin in the constant part. The

biotin allows to connect to strep-HRP. Strep-HRP was obtained and bound. We then washed away the wells and blocked unwanted attachments. Strep-HRP can react with TMB and cause blue color to appear. TMB was obtained and added to the wells. The blue color from the reaction can be ‘measured’ by measuring the absorption values in each well. In the ELISA there are three Columns with known IL-2 concentration (were obtained from a stock of IL-2). These columns can be analyzed and used to match concentration values to absorption values.

Results and explanation

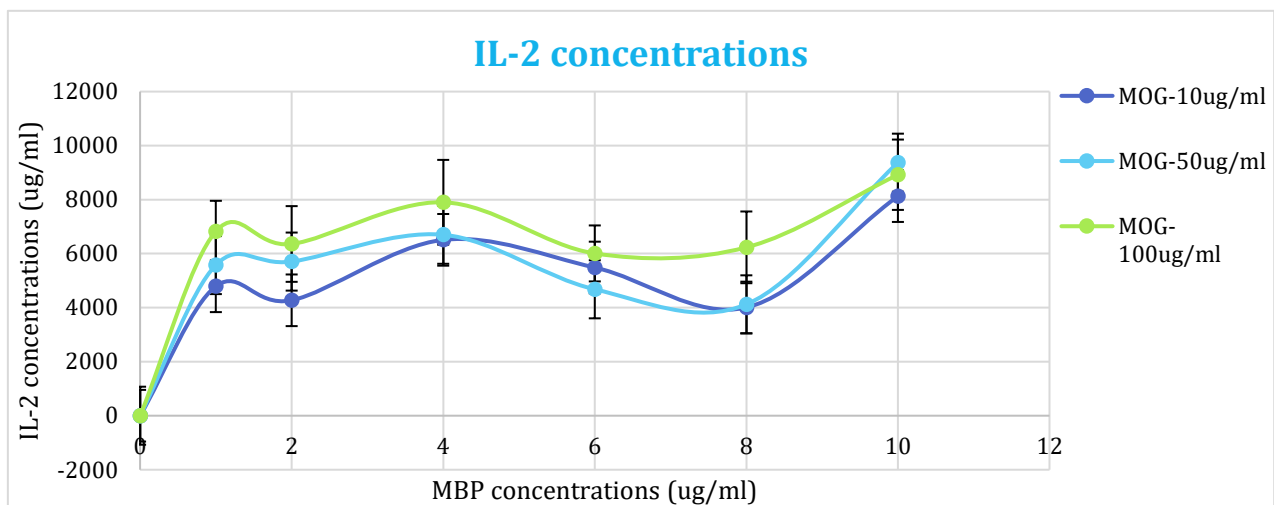


Figure 1: MBP/DR2 autoreactive T cells secrete IL-2 in response to MBP peptide stimulation

Absorption values were measured in each well. From the predetermined IL-2 concentrations in the ELISA, we inferred the IL-2 concentrations in each well. Each point represents three wells in the plate (which have the same concentrations). The purpose was to find specific and minimal concentrations of MOG and MBP which will activate the T cells. The black lines are the standard deviation. Though there was an activation (IL-2 was released) all the concentrations were overlapping. They were overlapping because the T cells reached their maximum of reactivity. The cells could not release more IL-2, they reached a plateau. We can understand that in order to create a concentration specific reaction, lower concentrations are needed.

Because of the deadline we did not have time to repeat this experiment with smaller concentrations. This is why in the next experiment we used 0, 0.1, 10 ug/ml of MBP.

Confirming the I4Z ability to reduce activation of autoreactive T cells

Aim: to test and measure I4Z CAR's ability to inhibit the activation of autoreactive T (MBP/DR2), via specific lysis of MBP and MOG co-expressing APCs, examining IL-2

concentration, released by activated MBP specific autoreactive T cells. MUC1 was used as a control CAR. MUC1 is a CAR unrelated to Multiple Sclerosis.

The experiment: Harvesting a mouse's MBP/DR2 spleen and obtaining APCs and autoreactive T cells from it. After obtaining the desired cell concentration by dilution, the cells were added to the wells of a plate. After a series of dilutions, desired concentrations of MOG and MBP were obtained. I4Z and MUC1 were obtained from the stock. The MOG, MBP and the CARs were added to the wells. After an incubation of the cells and peptides, we did the ELISA.

The ELISA was repeated as described in the previous experiment.

Results and explanation

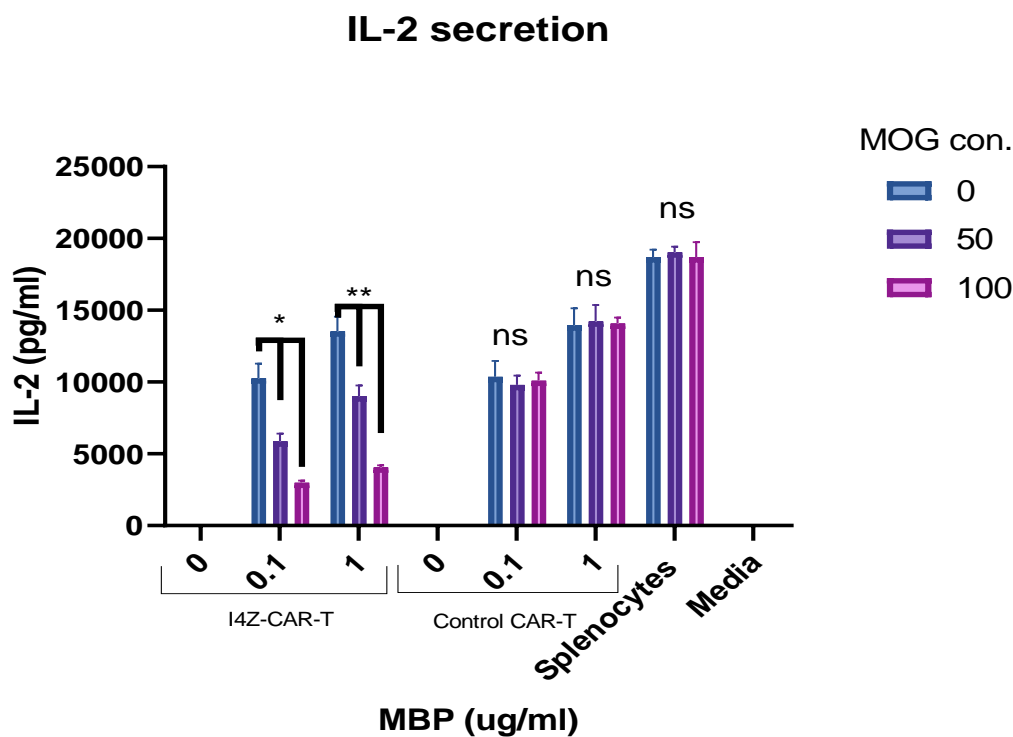


Figure 2: MOG/DR2 directed CAR-T cells inhibit MBP/DT2 T cell activation

Absorption values were measured in each well. From the predetermined IL-2 concentrations in the ELISA, we inferred the IL-2 concentrations in each well. We can see a difference between the I4Z and the MUC1. The I4Z CAR-T cells reduced autoreactive T cells activation. There is a significant difference between each column with the I4Z. There is a negative correlation between MOG concentration and activation of T cells. The more I4Z is activated, there is less

MBP presentation to the autoreactive T cells. Increased MBP concentration induces activation of autoreactive T cells. In the no CAR and MUC1 there isn't a difference in the variations of MOG concentrations. There is a difference between the activation in the MUC1 wells and the no CAR wells. This means even if the CAR is not specific or related to the peptides it reduces activation. The presence of a CAR may reduce activation because the autoreactive T cell has less interaction with the APCs.

Discussion

Currently, Most MS treatments generally suppress the immunity system, exposing patients to variety of risks. Although there are several medications for specific MS symptoms, these treatments only address MS symptoms and do not prevent disease progression, as they help with the results of the damage caused to the nervous system. For example, because of the demyelination in the nervous system, some patients experience pain. They are treated with pain medications. This kind of treatment does not stop the progression of MS but only treats a specific symptom. Steroids can reduce the duration and severity of individual demyelination episodes in relapsing–remitting MS. There are also treatments that reduce the activity of the immune system. For example, immunomodulatory drugs can be administered to reduce the incidence of relapses. Interferon- β can be administered as a treatment. It reduces T cell activations and inhibits their migration to the CNS. This suppresses the entire immune system, lowering inflammation and reducing demyelination. These kind of treatments can only delay progression of the disability and limit damage to brain tissue, as the disease keeps progressing at a slower pace. There is another specific treatment like Natalizumab. In this treatment, an engineered antibody connects to cells from the immune system. This prevents the cells' entry to the CNS through the BBB and prevents damage to the CNS. The disadvantage of this treatment is it prevents the low yet essential entry of T cells to the CNS. This exposes the patient to other diseases like JC virus.

In our study, we suggest to specifically inhibit the activation of myelin targeted autoreactive T cells, by reducing the presentation of myelin peptides on APCs. By using CAR T cells we can target specific myelin peptides shown by APCs. As showed in results of our experiment, the MOG specific CARs were able to reduce the activation of DR2/MBP T cells. Although the CAR T cells were MOG specific, it reduced activation by MBP peptide. Instead of reducing or preventing activity of already activated immune cells, the treatment we suggest could prevent

the cells from being activated. As shown in our study, the I4Z (anti-MOG/DR2) CAR T cells significantly reduced MBP/DR2 autoreactive T cells activation. The aim is to continue experimenting with the I4Z CAR T cell, hoping to move eventually to clinical testing. Future treatments for MS may be more efficient if they are peptide specific. Future medication that prevents activation of cells should be studied. Additionally, the usage of CARs to target specific myelin peptides should be further explored. Treatment of other autoimmune diseases which are caused or affected by the spreading of self-antigens with peptide-specific CAR T cells should be further explored and studied.

References

1. Massimo Filippi¹, Amit Bar- Or, Fredrik Piehl, Paolo Preziosa, Alessandra Solar, Sandra Vukusic and Maria A. Rocca *Multiple sclerosis* Nature Reviews | Disease Primers (2018)
2. Emily M. L. Chastain, D'Anne S. Duncan, Jane M. Rodgers, and Stephen D. Miller *The Role of Antigen Presenting Cells in Multiple Sclerosis* Biochim Biophys Acta (2011)
3. Paul M. Matthews *Chronic inflammation in multiple sclerosis — seeing what was always there* (2019)
4. Kai W. Wucherpfennig, Alessandro Sette, S Scott Southwood, S Carla Oseroff, Makoto Matsui, Jack L. Strominger, and David A. Hafler *Structural Requirements for Binding of an Immunodominant Myelin Basic Protein Peptide to DR2 Isotypes and for Its Recognition by Human T Cell Clones* J Exp Med (1994).
5. Thomas P Finn, Richard E Jones, Cathleen Rich, Rony Dahan, Jason Link, Chella S David, Yuan K Chou, Halina Offner, Arthur A Vandembark *HLA-DRB1*1501 risk association in multiple sclerosis may not be related to presentation of myelin epitopes* Neuroimmunology Research (2004)



פרדוקס היציבות:

כיצד שומרות רשתות בטבע על יציבות דינמית

חניך: יותם קפלן, תיכון רמון, הוד השרון

מנחה-עמית: ד"ר ברוך ברזל, המחלקה למתמטיקה, אוניברסיטת בר אילן



תורת הרשתות

תורת הרשתות היא תחום במתמטיקה שמטרתו להבין כיצד פועלים חלקיקים בטבע, כקבוצה ולא כיחידים. הרעיון הוא לפשט קבוצות של חלקיקים ולתארם כצמתים ברשת, את הקשרים ביניהם לסמן כקשתות, ולחקור את הגרף שנוצר. בבסיס התאוריה נמצאת ההנחה שלרוב התנהגות המערכת אינה מוכתבת על ידי התכונות הספציפיות של העצמים עצמם, אלא על ידי דפוסי האינטראקציה שביניהם – דהיינו מבנה הגרף. לדוגמה, כאשר חוקרים את הרשת החברתית ניתן, בהקשרים מסוימים, להתעלם מעומק המורכבות

האנושית של כל אינדיבידואל, ובמקום זאת להתרכז במבנה הרשת עצמה – שבה כל אדם הוא צומת המקושר לחבריו על ידי קשתות. מנקודת מבט אבסטרקטית זו ניתן לחקור את ההתפשטות של רעיונות או של וירוסים לאורך מסלולי הרשת בקנה מידה של החברה כולה מבלי להתעכב על ההתנהגות הפרטנית של כל אינדיבידואל.

בתורת הרשתות נהוג לייצג את הרשת על ידי מטריצה ריבועית, כך שכל שורה וכל טור מייצגים צומת, ולפיכך האיבר $A_{ij} = 1$ היכן שישנה קשת ואפס אחרת.



תמונה 1: הרשת החברתית

מודל ארדש-רניי (Erdős–Rényi model)

פול ארדש ואלפרד רניי, זוג מתמטיקאים הונגריים, פרסמו ב-1959 את **מודל ארדש-רניי [1]**, המודל הבסיסי ביותר למבנה של רשת, שבו כל זוג צמתים מקושר בהסתברות אחידה p . למרות פשטותו, המודל מצליח לתפוס לא מעט תופעות המתקיימות גם ברשתות אמיתיות. לדוגמה, תופעת העולם הקטן שלפיה אף ברשת גדולה מאוד עם קשרים יחסית דלילים, דהיינו p קטן מאוד, נמצא שיש מסלולים קצרים המאפשרים לנווט בין הצמתים בעזרת מספר נמוך מאוד של קשתות.

התפשטות בתוך רשת

נניח שמחלה חדשה מתפרצת ברשת החברתית, ורוצים לחקור את התנהלותה. בעזרת ניתוח הרשת ניתן ללמוד מי יכול להדביק את מי, שכן כל אדם מדביק רק את אנשי הקשר שלו ברשת, ובעזרת ניתוח מתמטי אפשר להעריך את הסיכוי של אדם מסוים להידבק. במחקר הנוכחי נתמקד במצב הכללי של הרשת, לדוגמה, כמה אנשים ככלל יחלו במחלה, באיזה מהירות היא תתפשט, ובעיקר – באיזה מצב הרשת תתייצב.

נקודת שבת

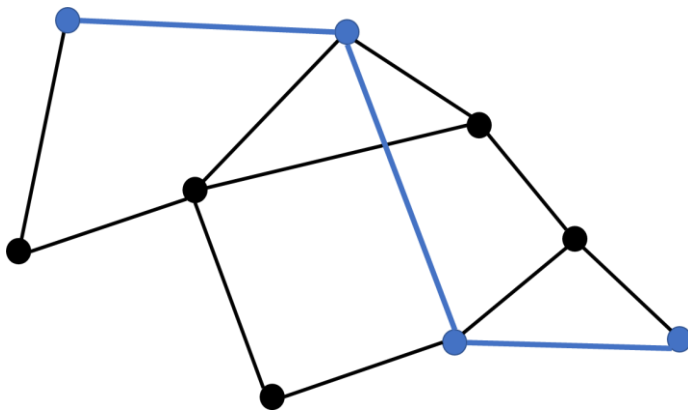
נקודת שבת מייצגת מצב שיווי משקל, שבו הרשת מתאזנת. למשל, רשת אקולוגית מגיעה לנקודת שבת שבה האוכלוסיות של בעלי החיים – טורפים או נטרפים – שומרים על איזון. התפשטות וירוסים במערכת חברתית נעצרת בנקודת חסינות העדר, שאינה אלא שיווי משקל בין קצב ההדבקה לקצב ההחלמה. כך גם רשת החשמל, הרשתות הגנטיות בתא ורשת הנוירונים במוח – כולן פועלות בסביבת נקודת השבת שלהן, שבה יש איזון בין הספק לצריכה, בין קצבים ביוכימיים או בין הפעילויות הנוירוניות השונות.

תפקוד הרשת תלוי במידת היציבות של נקודת השבת.

כאנלוגיה פשוטה לנקודת השבת, נתאר מצב שבו יש גבעות ואנחנו מציבים עליהן כדור ובודקים לאן הוא יתגלגל. אם נציב אותו במדרון שבין הגבעות הוא יתגלגל משם. לעומת זאת, אם נציב אותו בתחתית העמק, בין גבעות או בראש גבעה, הכדור יישאר במקום. נקודות אלה הן בדיוק **נקודות שבת** של המערכת.

יציבות

נשאלת השאלה, ביחס לכל נקודת שבת – מה ייקרה אם תתרחש הפרעה קטנה ברשת? זהו מדד ליציבות המערכת – אם נקודת השבת יציבה, ההפרעה תדעך, אך אם אינה יציבה, כל הפרעה קטנה עלולה להסיט את הרשת משיווי המשקל שלה.



תרשים 1: מסלול בתוך רשת

נסתכל שוב על הכדור בגבעות – אם הכדור נמצא בתחתית העמק שבין שתי גבעות, וניתן לו דחיפה קטנה, דהיינו הפרעה, הוא יצא מנקודת השבת, אבל מיד יתגלגל אליה חזרה. זוהי **נקודת שבת יציבה** שבה הפרעות דועכות. לעומת זאת, אם ניתן את אותה דחיפה לכדור שנמצא על ראש הגבעה, במקום לחזור לנקודת השבת הוא יתגלגל למטה, ולכן **נקודת השבת הזו אינה יציבה** – כל הפרעה קטנה תביא להפרת שיווי המשקל. בדרך מתמטית נגדיר נקודת שבת כיציבה אם כאשר גורמים להפרעה קטנה למערכת, המערכת תחזור לנקודת השבת. בנקודה לא יציבה המערכת תברח מאזור שיווי המשקל וההפרעה תלך ותגדל.

לשם הדגמה נשתמש ביציבות על נקודות שבת של מחלה ברשת החברתית. המצב שבו אף אחד לא חולה במחלה, דהיינו $x = 0$, מהווה נקודת שבת של הרשת. ניתן גם לדמיין מצב שבו יש חולים, אבל כל חולה מדביק בממוצע בן אדם אחד לפני שהוא מבריא. כמות האנשים החולים נשארת קבועה ולכן גם מצב זה מייצג נקודת שבת של המערכת. כעת נבדוק אם הנקודות האלה יציבות – אם אף אחד לא חולה, אך קבוצה קטנה של אנשים נדבקת במחלה (ההפרעה), כאשר המחלה מדבקת הקבוצה הזו תדביק עוד ועוד אנשים, וההפרעה תגדל. לעומת זאת, כאשר כבר יש הרבה חולים במחלה, דהיינו חסינות עדר, אם מישהו נוסף נדבק, כיוון שיש פחות אנשים הפנויים להידבק, כל אחד מדביק בממוצע פחות מאשר קודם. לכן כמות החולים תקטן, והמערכת תחזור לנקודת השבת שלה. לפיכך המצב הבריא $x = 0$ אינו יציב ואילו מצב חסינות העדר יציב.

כדי לענות על השאלה – האם נקודת שבת היא יציבה ברשת כלשהי בנקודת שבת כללית? – צריך לפתח מערכת משוואות דיפרנציאליות חדשות המתארת כיצד צמתים משפיעים אחד על השני בסביבה של נקודת השבת, כלומר כאשר ההפרעה הראשונית היא קטנה. מכיוון שההפרעה היא קטנה, נוכל להזניח את כל הגורמים שאינם ליניאריים כי הם יהיו מאוד קטנים עד שההפרעה גדלה משמעותית. התוצאה היא מערכת משוואות ליניאריות הבוחנת אם הרשת חוזרת למצב ההתחלתי – יציבה – או שההפרעה גדלה והמערכת משנה את מצבה לחלוטין – לא יציבה.

פרדוקס היציבות

רוברט מיי פרסם ב-1972 מאמר ובו הוא מוכיח שלרשת גדולה בעלת צמתים וקשתות רבים לא תהינה נקודות שבת יציבות [2]. תוצאה תיאורטית זו נמצאת בסתירה לתצפיות היום-יומיות שלנו. אכן, אנחנו רואים בכל עת מערכות יציבות, החל ממערכות אקולוגיות שונות ועד לרשת החשמל. כיצד, אם כן, מתיישבים התאוריה והמעשה האחד עם השני, כאשר כל הזמן קיימות הפרעות אקראיות, אך הרשתות שומרות על תפקוד יציב ואמין? תשובה אפשרית אחת היא שהמערכות האלה הן לא בנקודת שבת יציבה, הן משתנות כל הזמן ולכן זזות לכיוון אחר, וכך, למרות שהן לא בנקודת שבת יציבה, הן נשארות בערך באותו מצב. אפשרות שנייה היא שהמערכת כל הזמן זזה בין נקודות שבת לא יציבות. אפשרות נוספת היא שהמודלים שמשמשים בהם לא מספקים, וקיים דבר נוסף שאינו ידוע לנו המייצב רשתות אמיתיות. ב-50 השנים האחרונות נחקר הנושא, אולם עדיין לא נמצאה תשובה מספקת לשאלה, עד שרוברט מיי עצמו שאל – "מהן האסטרטגיות הזדוניות של הטבע להשיג יציבות?".

אנו מציעים ליישב את הפרדוקס על ידי מושג של יציבות זמנית: אנו מראים שרשתות, אף שאינן יציבות באופן כללי, עדיין מאפשרות נקודות שבת שהן יציבות לזמן מוגבל. לפיכך, רשת גדולה יכולה לשמר את נקודות השבת שלה לזמן מסוים עד שהיא מאבדת את יציבותה.

תהליך המחקר



תמונה 2: הכדור הוזה מנקודת שבת לא יציבה, אבל מכיוון שההבדל רק בציר יציב הוא יחזור אליה

בטרם ניגש ליציבות של רשת מורכבת, נחזור אל אנלוגיית הכדור בגבעה. אנחנו יודעים שכאשר הכדור נמצא על פסגה גבוהה או בתחתית עמק הוא בנקודת שבת, ובדקנו מי מהן יציבה. אך, יש אפשרות נוספת לנקודת שבת, והיא כאשר הכדור נמצא באוכף בין שתי גבעות. עקרונית, נקודת שבת כזו אינה יציבה שכן כל הפרעה, קטנה ככל שתהיה, תוציא אותו מאיזון. בכל זאת לנקודת שבת כזו יש ציר אחד שלאורכו היא כן יציבה – כאשר ההפרעה נעשית בדיוק לאורך האוכף.

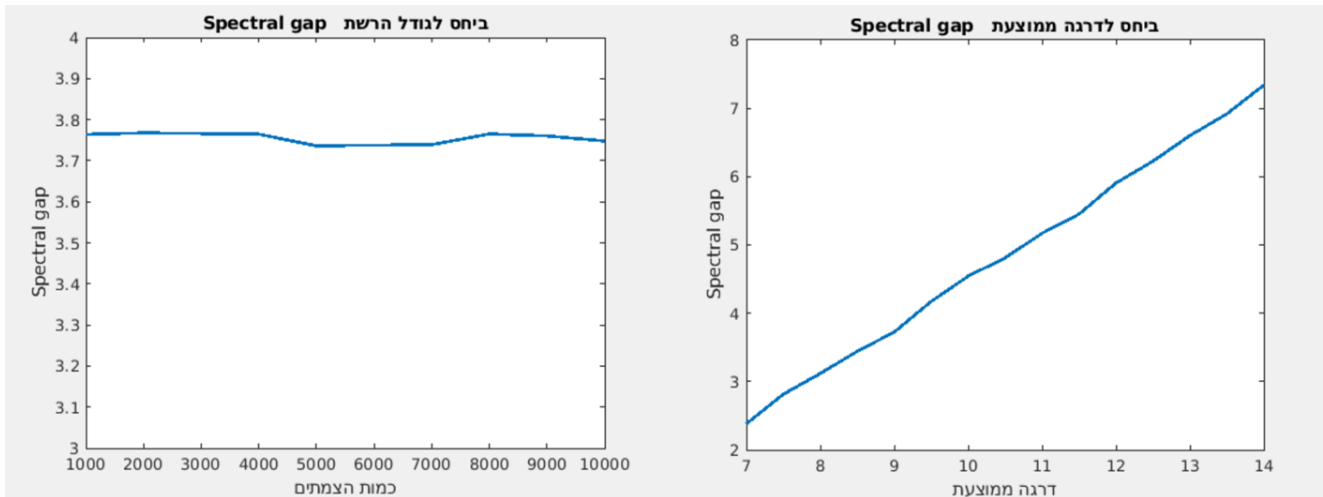
מצב דומה מתקיים גם ברשתות. סביב נקודת השבת קיימים צירים רב ממדיים המאונכים זה לזה. לכל ציר יש

אקספוננט אופייני המתאר את קצב הגידול של הפרעה בכיוון הציר. הצירים נקראים וקטורים עצמיים והאקספוננטים המתאימים להם נקראים ערכים עצמיים. לכל וקטור עצמי מותאם ערך עצמי יחיד, ולהיפך. נקודת השבת יציבה כאשר לכל הצירים יש ערכים עצמיים שלילים. זה מצב שבו בכל כיוון ההפרעה חווה גידול שלילי – דהיינו דעיכה. כשתנאי זה מופר, הרשת אינה יציבה, אך גם בתנאים אלו, אם יש צירים שמותאמים להם ערכים עצמיים הקטנים מ-0, אף שהרשת אינה יציבה, היא תהיה יציבה ביחס לצירים אלו. כלומר, אם ההפרעה היא רק על הצירים היציבים הרשת תחזור לנקודת השבת, בדומה לכדור שחווה הפרעה רק לאורך ציר האוכף.

וקטורים עצמיים

נסתכל על צירי ההפרעה, כלומר על הווקטורים העצמיים. כל ציר כזה הוא בעצם הפרעה על הרשת המשפיעה על כל הצמתים. ההבדל בין הצירים מייצג כיוונים שונים של הפרעות שפועלות על כל צומת. לדוגמה, ציר מסוים יכול לייצג הפרעה שמפעילה כוח זהה על כל הצמתים, ציר אחר יכול לייצג הפרעה סלקטיבית על חלק מהצמתים בלבד.

במהלך הראשון בדקתי האם נקודות שבת כאלה יכולות להתקיים, או שהפרדוקס שמונע מנקודות שבת להיות יציבות מונע גם מנקודות שבת להיות יציבות בחלק מהצירים. תחילה, בניתי נקודת שבת לרשת שריג, והסתכלתי על הערכים העצמיים של הצירים שלה. קיבלתי שההפרש בין הערך העצמי הגדול ביותר לזה שבא אחריו הוא קטן מאוד, ולכן הסיכוי שהערך העצמי הגדול ביותר יהיה גדול מ-0 ואילו השני הכי גדול קטן מ-0 – זניח. לעומת זאת, אותה הפעולה שעשיתי לרשת ממודל ארדש-רניי, קיבלתי שיש פער בין שני הערכים העצמיים הגדולים ביותר. תופעה זו ידועה בשם **הפעור הספקטרולי** (Spectral Gap). בדקתי את גודל הפער ברשתות שונות ומצאתי שהוא גדל ליניארית עם הערך העצמי הגדול ביותר. לפיכך ייתכן מצב שבו הציר הראשי אינו יציב, כי הוא מקושר לערך עצמי חיובי, אך יתר הצירים יציבים, שכן הערכים העצמיים שלהם קטנים משמעותית, ולכן שליליים.

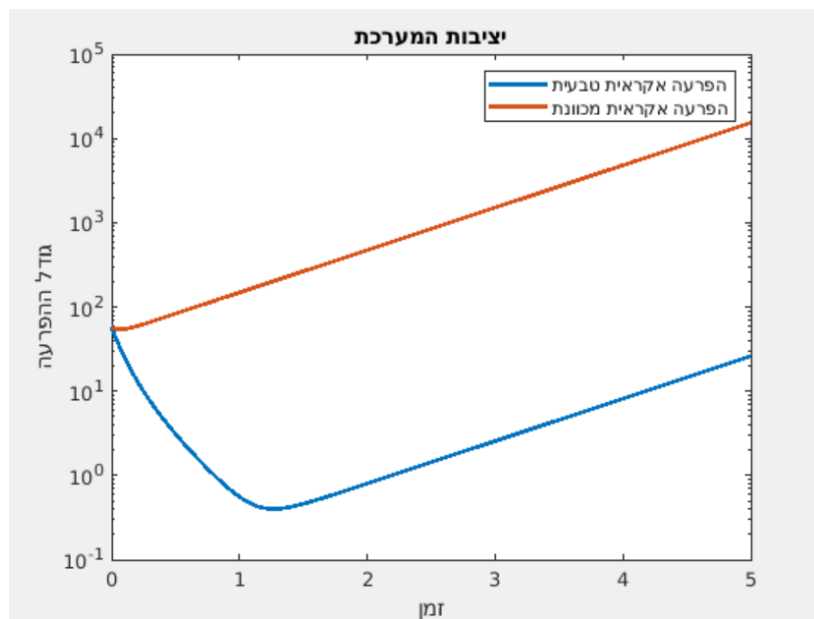


תרשים 2: כאשר הרשת גדלה, גודל הפער הספקטרי נשאר דומה, וכאשר כמות הקשתות הממוצעת לצומת גדלה, הפער גדל בשיפוע של בערך שני שלישי

בתנאים אלו, הפרעה שכיוונה לאורך הציר הראשי תוביל לאי יציבות, אך יתר ההפרעות, המאונכות לציר זה ידעכו, ויאפשרו לרשת לשמור על נקודת השבת שלה. אם כך, נבדוק אילו הפרעות מאונכות יש לציר הראשי, שבעקבותיהן הרשת תחזור לנקודת השבת. על מנת לעשות זאת, חקרתי את הווקטור העצמי הראשי, המקושר לערך העצמי הגדול ביותר. מצאתי (בקירוב) שהווקטור מייצג הפרעה אחידה על כל הצמתים. מכאן הוכחתי שכל הפרעה שסכום האיברים שלה אפס תהיה מאונכת לווקטור הזה. למעשה הפרעות אקראיות, בלא שום יד מכוונת, מקיימות את התנאי – סכום האיברים שלהן הוא בקירוב אפס. לפיכך הפרעה טבעית, אקראית, תהיה בקירוב מאונכת לווקטור הראשי, היא תבטא כמעט רק את הערכים העצמיים השליליים, ובעקבותיה הרשת תישאר יציבה.

כמובן, כאשר ההפרעה גדלה אקספוננציאלית, אפילו קירוב מאוד טוב לא מספיק. לאחר זמן מסוים ההפרעה בכל זאת תגדל והרשת תתרחק מנקודת השבת, ולכן היציבות המדוברת היא זמנית. לכן הייתי צריך להבין לכמה זמן הרשת תישאר יציבה, והאם זה באמת נותן הבדל משמעותי מנקודות שבת רגילות, כפי ששיערת. כדי לבדוק זאת, יצרתי במחשב רשתות ממודל ארדש-רניי בעלות 1,000 עד 10,000 צמתים, דרגה ממוצעת (כלומר כמות הקשתות הממוצעת שתהיה לכל צומת) של 5-9, והורדתי את הערכים העצמיים למצב שבו הערך העצמי הגדול ביותר חיובי אבל הבא אחריו שלילי. לאחר מכן, בעזרת הווקטורים העצמיים והערכים העצמיים יצרתי מערכת משוואות דיפרנציאליות שיידמו את התפשטות ההפרעה ברשת, ובחנתי איך ההפרעות מתפשטות. לכל רשת, בדקתי שתי הפרעות – אחת שתדמה הפרעה בטבע, דהיינו הפרעה אקראית, שסכומה בקירוב אפס, והשנייה הפרעה עם יד מכוונת, שבנוסף למבנה האקראי הוספתי קבוע לכל איבר, דהיינו יש כיוון מועדף להפרעה.

תוצאות



כצפוי, קיבלנו שתחת הפרעה אקראית (כחול) הרשת מראה יציבות זמנית. אכן, למרות שהרשת לא יציבה, לזמן מוגבל ההפרעה קטנה, הרשת חוזרת לנקודת השבת ורק לאחר פרק זמן היא מאבדת את יציבותה. יתרה מכך, ניתן לראות שאפילו בשלב שבו ההפרעה גדלה ומתרחקת מנקודת השבת, ההפרעה האקראית, המדמה הפרעות בטבע, קטנה בסדרי גודל ביחס להפרעה המכוונת (אדום), ולוקח לה פרק זמן לחזור לגודל המקורי שלה.

תרשים 3: ביחידת הזמן הראשונה ההפרעה האקראית כמעט חוזרת לנקודת השבת, ואפילו לאחר 5 יחידות זמן היא לא חוזרת לגודל המקורי שלה.

סיכום ומסקנות

במחקר מצאנו גישה חדשה לפתרון פרדוקס היציבות – רשת יכולה להישאר יציבה, גם אם לפרק זמן קצר, אפילו באזור נקודת שבת לא יציבה.

בהמשך, רצוי לבדוק מה קורה כאשר יש יותר מהפרעה אחת, והאם רצף של הפרעות יגדיל את היציבות של הרשת. בנוסף, אפשר לנסות למצוא דרכים להקטין את הערך העצמי הגדול ביותר, ובכך להגדיל את הסיכוי לנקודה בעלת ציר אחד לא יציב, או לנסות לקרב את הווקטור העצמי שקשור אליו לווקטור $(1, 1, \dots, 1)$ ובכך להגדיל את היציבות של הנקודה.

ביבליוגרפיה

Erdős, P.; Rényi, A. (1959). "On Random Graphs. I". *Publicationes Mathematicae* : 290–297.

May, R.M. (1972). "Will a large complex system be stable?". *Nature* : 238: 413–414.



האם ניתן להשפיע על קבלת החלטות בעלות וחסרות משמעות בעזרת גירוי לא מודע? – ניסוי התנהגותי

חניכה: שחר שגיא, קריית הינוך עמק חפר, בית יצחק
מנחות-עמיתות: פרופ' ליעד מודריק וענבל גור אריה
מודעי המוח, אוניברסיטת תל אביב



Introduction

The debate around the question of free will started centuries ago, resulting in many definitions and approaches to this term (for review, see Mele, forthcoming; Question 3). One important definition rests on the involvement of consciousness in the process. According to Baumeister (2018), an action is free if our conscious will initiates it. As Baumeister (2018) states, not all human actions are free, but what makes an action free is the involvement of conscious will in the flow of actions.

In neuroscience, this question was famously studied by Benjamin Libet, who defined free will as the conscious intention to act (Libet, Wright, & Gleason, 1983). Libet's experiment was the start of the empirical study of free will (Brass, Furstenberg & Mele, 2019). In his classical experiment, the participants were connected to an EEG (electroencephalogram) device and were asked to look at an analog clock and move their finger whenever they decide to, and report the time of the conscious decision to act (W time). In the EEG recordings, negative activity over central electrodes (Readiness Potential, or RP) was found to precede W time. Libet argued that RP represents an unconscious decision to act that preceded the conscious decision (Libet et al., 1983). Libet suggested that we have the ability to veto the decision in the 200ms time

gap between *W* and the action. Based on all of these findings, Libet argued that we only have the free will to veto an action that was unconsciously initiated (Filevich, Kühn, & Haggard, 2012; Marcel Brass, Ariel Furstenberg & Alfred R. Mele, 2019).

Since its publication, Libet's experiment and conclusions have faced criticism, both on philosophical grounds and on empirical ones. For example, in a follow-up study (Banks & Isham, 2011), the analog clock had been replaced with a digital one, and this led to a change in the reported *W* time, which means that the method of measuring *W* time affects the results. Moreover, Libet's opponents argue that the awareness of *W* is unnatural and might affect the RP itself (Brass et al., 2019; Rigoni, Brass, & Sartori, 2010; Banks & Isham, 2011). Besides the criticism on the *W* measuring method, there is also criticism about the meaning of the RP, and the validity of the experiment itself and the conclusions which Libet published (Brass et al., 2019).

One of these criticisms focused on the validity of Libet-like experiments with respect to real-life choices (Brass et al., 2019): Typically, in these experiments, subjects make completely arbitrary decisions, which have no consequences and are not based on reasons. Such decisions are termed 'Picking' (Ullman-Margalit & Morgenbesser, 1977), and are categorically different from 'Choosing' decisions, that are reasoned, between unequal alternatives, and assumed to be more realistic, and important. Thus, some have argued that choosing - rather than picking decisions - is more relevant and important to the free-will debate (Mudrik, Levy, Gavenas, & Maoz, 2019).

There are only a few experiments at this point that examined choosing decisions from the free will perspective, and their results are somewhat conflicting. In Maoz et al. (2019) EEG experiment, prior to the main procedure, the participants in this experiment were asked to rate a list of Non-Profit Organizations (NPOs) on the basis of how much they would like to donate to each of them. Based on these ratings, pairs of NPOs were created, to be used in the main experiment. Then, participants were asked to choose between two NPOs in each trial. Each choice was made under one of two conditions: an arbitrary choice or a deliberate one. Under the arbitrary condition, both NPOs have the same chance of receiving money, regardless of participant choice, while under the deliberate condition, the participant's decision affects that chance. The authors discovered that the RP was found only for the arbitrary condition but not for the deliberate one. This challenges previous interpretations of the RP as evidence against free will, by showing that the RP does not generalize to more meaningful decisions (Maoz et

al., 2019). In another EEG experiment (Khalighinejad, Schurger, Desantis, Zmigrod, & Haggard, 2018), choosing decisions were operationalized by allowing participants to either skip a task and get a smaller reward or choose to remain on task and potentially get a bigger one. In the non-choice condition, the participants were instructed when to skip the task. The results of this study focused on the variability of the EEG signal and showed that it is reduced before the ‘skip’ action in the choosing condition in comparison with the non-choice condition. Thus, while the former study suggests that the RP simply does not occur in meaningful decisions, the latter still found some neural markers that precede a choosing decision. Notably however, in that study, the decisions were still bereft of strong consequences, as opposed to the first one. And so, it might be that consciousness plays a different role in choosing vs. picking decisions.

If this is indeed the case, a possible prediction is that consciously-processed and unconsciously-processed stimuli have different effects on choosing vs. picking decisions. Based on previous studies (Furstenberg, Breska, Sompolinsky & Deouell, 2015; Schlaghecken & Eimer, 2004), we predict that unconscious priming will affect picking decisions. If consciousness does play an important role in choosing decisions (Maoz et al., 2019[RZ1]; Khalighinejad et al., 2018), we predict no effect of the unconscious priming on those decisions. This prediction will be tested in this experiment. To do so, we will present subjects with voluntary picking/choosing decisions that will be preceded by related and unrelated unconscious stimuli. We will test if subjects’ decisions are affected by the primes, despite being unconsciously processed.

To date, there are only a handful of experiments that have focused on unconscious priming in choosing decisions, yet they suffer from several methodological limitations. For example, (Andersson & Miettinen, 2017) found a 10-17% increase in donations after unconscious pro-social priming, only among people with a high agreeableness personality score. However, subjects’ awareness of the primes was not properly measured, making it harder to claim that this indeed constitutes a case of unconscious priming on choosing decisions. In another experiment (Pichon, Boccato, & Saroglou, 2007), positive religious unconscious priming was reported to increase pro-social behaviors. Yet here too, no proper assessment of awareness was done. Moreover, no study – to our knowledge – has directly examined the role of conscious perception in biasing picking vs. choosing decisions under the same conditions.

Accordingly, in the current study, we used the masked priming procedure to examine this question. In masked priming, the prime is visually masked (Forster & Davis, 1984) and its

effect on the processing of a second stimulus - the target - is measured. The experimental procedure will follow that of Maoz et al. (2019), yet here, the masked prime will be unconsciously presented prior to the decision in each trial. We will use two types of masked primes: An arrow directed up/down (non-semantic prime) or one/two words that semantically match the cause of one of the two NPOs (semantic prime). We will test whether picking and choosing decisions can be unconsciously biased, and if so, will the effect differ between semantic and non-semantic primes. We hypothesize that both types of primes will affect picking decisions, while only semantic primes – if it all – will affect choosing decisions.

Methods

Procedure

Rating session. In the first part of the experiment, subjects will be presented with 50 NPOs. They will be instructed to rate how much they would like to support each NPO with a \approx 1000 donation on a scale of 1 ("I would not like to support this NPO at all") to 7 ("I would very much like to support this NPO"). No time pressure will be put on the subjects, and they will be given access to the website of each NPO to give them the opportunity to learn more about the NPO and the cause it supports.

Calibration session. Prior to the experimental session, a near-threshold contrast level (determined as transparency on a scale of 0 (completely transparent) to 1 (not transparent at all)) will be determined using a double staircase calibration procedure. It will begin with a binary search in order to find an approximate threshold (12 trials)- starting with a large step size of 0.3, then cutting it in half on each iteration until reaching a minimum step size, and then, in order to determine the exact near-threshold level (>90% unaware), it will continue with a standard staircase algorithm (reducing the contrast upon stimulus detection and increasing it upon missing the stimulus) with a small step size (88 trials). The aim is to get to approximately 10 reversals on each staircase.

The first stage will determine the approximate threshold in a relatively few trials while the second stage will determine the exact threshold using the minimum step size needed.

Experimental session. The experiment block will be composed of twenty blocks of nine trials each, so that half the blocks will be deliberate and half arbitrary. Two succinct cause

descriptions, representing two actual NPOs that differ in ratings by one point only, will be presented in each trial. In deliberate blocks, subjects will be instructed to choose the NPO to which they would like to donate ₪1000 by pressing the up or down arrow key on the keyboard, using their right hand, for the NPO on the up or down, respectively, as soon as they decided. Subjects will be informed that at the end of each block, one of the NPOs they chose would be randomly selected to advance to a lottery. Then, at the end of the experiment, the lottery will take place and the winning NPO will receive a ₪20 donation. In addition, that NPO will advance to the final, inter-subject lottery, where one subject's NPO will be picked randomly for a ₪1000 donation. It will be stressed that the donations are real and that no deception is used in the experiment. Thus, subjects will know that in deliberate trials, every choice they make is not hypothetical, and could potentially lead to an actual ₪1020 donation to their chosen NPO.

Arbitrary trials will be identical to deliberate trials except for the following crucial differences. Subjects will be told that, at the end of each block, the pair of NPOs in one randomly selected trial would advance to the lottery together. And, if that pair wins the lottery, both NPOs would receive ₪10 (each). Further, the NPO pair that would win the inter-subject lottery would receive a ₪500 donation each. It will be stressed to the subjects that there is no reason for them to prefer one NPO over the other in arbitrary blocks, as both NPOs would receive the same donation regardless of their button press. Subjects will be told to therefore simply press either up or down as soon as they decide to do so.

Each block will start with an instruction written either in dark orange (Deliberate: "In this block choose the cause to which you want to donate ₪1000") or in blue (Arbitrary: "In this block both causes may each get a ₪500 donation regardless of the choice") on a gray background. Color assignment will be counterbalanced between subjects. Short-hand instructions will appear at the top of the screen throughout the block in the same colors as that block's initial instructions; Deliberate: "Choose for ₪1000" or Arbitrary: "Press for ₪500 each".

Each trial will start with a 1s gray screen that will be blank except for a centered, black fixation cross. Then, a 50 ms mask will appear, followed by a 30 ms prime and another 50ms mask. In Experiment 1, the prime will be the name of one of the two to-be-presented causes, and the mask will be a string of Xs. In Experiment 2, the prime will be an arrow pointing either up or down, and the mask will be a meta-contrast mask (e.g., Furstenberg et al., 2015). Then, the two cause-descriptions will appear on the up and down side of the fixation cross (up /down assignments were randomly counterbalanced) and remain on the screen until the subjects report

their decisions with a key press up or down arrows on the keyboard for the cause on the up or down, respectively. If subjects will not respond within 20 s, they will receive an error message and will be informed that, if this trial would be selected for the lottery, no NPO would receive a donation.

To make sure subjects are carefully reading and remembering the causes also during the arbitrary trials, 18 randomly interspersed memory catch-trials will be presented throughout the experiment (thus more than one catch trial could occur per block). On such trials, four succinct descriptions of causes will be presented, and subjects will be asked to select the one that appeared in the previous trial. A correct or incorrect response will add or subtract 50 cents from subjects' total, respectively.

After each trial, a question ('how well did you see the word\arrow) will appear. The subjects will rate the visibility of the prime using the Perceptual Awareness Scale (Ramsøy & Overgaard, 2004), where 1 is "I didn't see anything," 2 signifies "I had a vague perception of something," 3 represents "I saw a clear part of the image," and 4 stands for "I saw the entire image clearly."

Objective session. To make sure subjects did not see the primes as they reported, a post-test objective session will be given at the end of the experiment (N=100), in which subjects will be presented with the same sequence of stimuli, but at the end of each trial, instead of making a choice, they will be presented with two causes, and will be asked to determine which of the two was presented during the trial. Then, they will be asked to rate the visibility of the prime using the same PAS.

Measures

1. Tendency to choose the primed NPO – calculated as number of chosen Primed NPOs, divided by the total number of trials. This will be done separately for arbitrary and deliberate trials.
2. Difference in Reaction Times (RTs) – calculated as mean RT in trials in which subjects chose the primed NPO vs. mean RT in trials in which subjects did not choose the primed NPO.

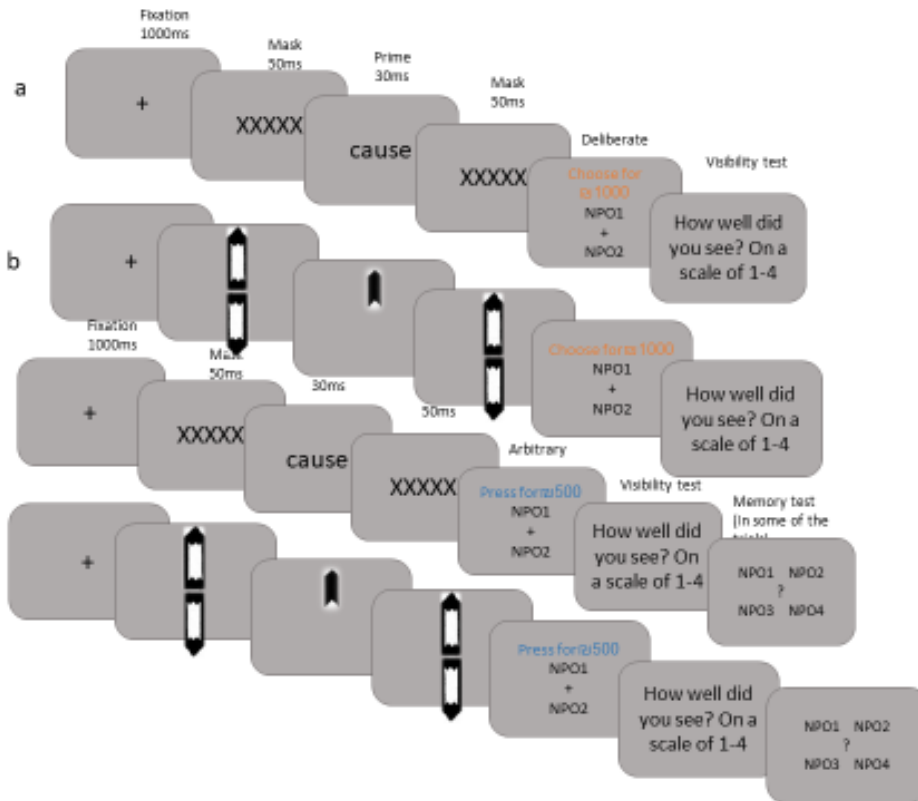


Figure 1: Experimental paradigm. The experiment includes deliberate (orange) and arbitrary (blue) blocks, and meaningful primes (cause) and meaningless primes (arrows). Therefore, four conditions are present: deliberate-meaningful (a), deliberate-meaningless (b), arbitrary-meaningful (c) and arbitrary-meaningless (d)

Personal note

Due to the unexpected COVID-19 pandemic, we did not have the opportunity to run the experiment. As I will continue to be part of the project beyond the one-year timeframe of the National Mentoring Program, we hope to be able to run the experiment in the coming months.

References

- Andersson, O., & Miettinen, T. (2017). *Subliminal influence on generosity*. 531–555. <https://doi.org/10.1007/s10683-016-9498-8>
- Banks, W.P., Isham, E.A., 2011. Do we really know what we are doing? Implications of reported time of decision for theories of volition, in: Sinnott-Amstrong, W.S., Nadel, L. (Eds.). *Conscious will and responsibility*. Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 47-60.
- Baumeister, R. F. (2008). Free will, consciousness, and cultural animals. *Are we free*, 65-85.
- Filevich, E., Kühn, S., & Haggard, P. (2012). Intentional inhibition in human action: The power of "no." *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 36(4), 1107–1118. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.01.006>

Khalighinejad, N., Schurger, A., Desantis, A., Zmigrod, L., & Haggard, P. (2018). NeuroImage Precursor processes of human self-initiated action. *NeuroImage*, 165(September 2017), 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.09.057>

Libet, B., Wright Jr, E. W., & Gleason, C. A. (1983). Preparation-or intention-to-act, in relation to pre-event potentials recorded at the vertex. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 56(4), 367-372.

Maoz, U., Yaffe, G., Koch, C., & Mudrik, L. (2019). Neural precursors of decisions that matter—an ERP study of deliberate and arbitrary choice. *ELife*, 8, e39787.

Brass, M., Furstenberg, A., & Mele, A. R. (2019). Why neuroscience does not disprove free will. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 102, 251-263.

Ullmann-Margalit, E., & Morgenbesser, S. (1977). Picking and choosing. *Social research*, 757-785.

Mudrik, L., Levy, D. J., Gavenas, J., & Maoz, U. (2019). Studying Volition With Actions That Matter: Combining the Fields of Neuroeconomics and the Neuroscience of Volition. *Psychology of Consciousness: Theory Research, and Practice*. <https://doi.org/10.1037/cns0000200>

Pichon, I., Boccato, G., & Saroglou, V. (2007). *Nonconscious influences of religion on prosociality : A priming study*. 1045(April 2006), 1032–1045. <https://doi.org/10.1002/ejsp>

Ramsøy, T. Z., & Overgaard, M. (2004). Introspection and subliminal perception. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 3(1), 1–23. <https://doi.org/10.1023/b:phen.0000041900.30172.e8>

Rigoni, D., Brass, M., & Sartori, G. (2010). Post-action determinants of the reported time of conscious intentions. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4(May), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00038>



מדעי החברה

ניתוח סטטיסטי של קשרים בין ארבע תיאוריות אישיות

לבין עוצמות התמכרות לאינטרנט ולמסכים

חניך: בן אליאב, תיכון אוסטרובסקי, רעננה
מנחה-עמית: פרופ' יונתן מזרחי, החוג לסוציולוגיה ואנתרופולוגיה,
האקדמית עמק יזרעאל ומעבדת Lambda אוניברסיטת תל אביב



הקדמה

כמות המשתמשים באינטרנט כיום עומדת על 4.57 מיליארד (Internet World Stats, 2020). עם כל הטוב שהביא האינטרנט לעולם, בתקופה האחרונה התגלתה סוגיה חדשה – שימוש בעייתי באינטרנט והתמכרות אליו. במחקר שלנו נעשה שימוש מחקרי נרחב בתיאוריות אישיות שונות כדי לבדוק את הקשר שבין תופעת השימוש הבעייתי באינטרנט, המוגדר כהתמכרות למסכים ולשימוש ברשת האינטרנט באופן כללי, לתכונות אישיות מגוונות. התיאוריות שנבדקו הן **תיאוריית חמש התכונות** (Big Five/Five Factor Model), **תיאוריית האישיות של פישר** (Fisher Temperament Inventory), **תיאוריית ההתקשרות למבוגרים** (Adult Attachment Theory) ו**תיאוריית השילוש האפל** (Dark Triad). באמצעות המחקר נוכל לדעת בעתיד, על פי האישיות של הנבדקים, מי נמצא אולי בקבוצת סיכון להתמכרות למסכים ולשימוש בעייתי באינטרנט, ולנקוט באמצעי מנע או סיוע רלוונטיים.

רקע וסקירת ספרות

שימוש בעייתי באינטרנט

בעשרות השנים האחרונות ניכר כי יותר ויותר בני אדם ברחבי העולם משתמשים באינטרנט. ככל שהולך וגובר השימוש, כך מתעוררים חששות לגבי שימוש בעייתי, המכונה במחקרים השונים גם **התמכרות לאינטרנט** (Young, 1998). מידע רב ממקורות ברחבי העולם מדגיש באופן חד משמעי את הפוטנציאל הקיים בשימוש באינטרנט להביא לפגיעה פסיכולוגית ניכרת. שימוש בעייתי באינטרנט מאופיין פעמים רבות בתחלואה נלווית, ושורת מחקרים קשרה, במידה שונה, בין השימוש הבעייתי באינטרנט לשתייה מופרזת

בגיל הנעורים, להתמכרות להימורים, להפרעת קשב, להפרעה זו קוטבית, לדיכאון ולחרדה חברתית (Spada, 2013).

מבחינת הגורמים להתפתחות התופעה, יש יותר ויותר עדויות המצביעות על גורמים גנטיים כמשפיעים על התפתחות השימוש הבעייתי באינטרנט (Lee et al., 2008). אולם, רבים גם המחקרים אשר מצאו קשר חיובי בין התמכרות לאינטרנט לבין גורמים אישיותיים כגון נטייה להימנע מפגיעה וכיוון עצמי נמוך (Ha et al., 2007). נעשה שימוש מחקרי נרחב בתיאוריות אישיות שונות כדי לבדוק את הקשר שבין תופעת השימוש הבעייתי באינטרנט לאישיות.

תאוריות האישיות

תיאוריית חמש התכונות הגדולות (Five Factor Model FFM)

"חמש הגדולות" צמחו מתוך חקר השפות – המחקר הלינגוויסטי. לפי תיאוריה זו, ההבדלים בין אנשים ניכרים בדרך שבה הם מתקשרים אחד עם השני מבחינה שפתית. מודל זה מורכב מחמש תכונות אישיות הנמצאות בקרב כלל בני האדם כאוניברסליים:

❖ **מוחצנות (Extraversion)** – אדם בעל מוחצנות גבוהה יהיה בעל אנרגיה, רגשות חיוביים, אסרטיביות וחברתיות (Barger, Campbell & Simmons, 2016).

❖ **ניירוטיות (Neuroticism)** – אדם בעל ניירוטיות גבוהה יהיה בעל נטייה לחוש רגשות שליליים (Barger et al., 2016) כמו דאגה, עצבנות, דיכאון וחוסר ביטחון. ניירוטיות מתייחסת גם לרמת היציבות הרגשית וליכולת לפקח על דחפים.

❖ **מצפוניות (Conscientiousness)** – לאדם בעל מצפוניות גבוהה תהיה נטייה להיות ממושמע ואף צייתן, דייקן, שאפתן, בעל משמעת עצמית ויכולת ריסון דחפים (Barger et al., 2016).

❖ **נעימות (Agreeableness)** – אדם בעל נעימות גבוהה ייטה להיות רחום ושיתופי, חמים ופתוח. אדם זה יעדיף יחסים חברתיים ויתפוס אחרים כאמינים (Barger et al., 2016).

❖ **פתיחות (Openness)** – אדם בעל פתיחות גבוהה יוקיר הרפתקאות, רעיונות יוצאי דופן, רגש ואומנות, ובעל עניין ומעורבות במאמצים אינטלקטואליים ותרבותיים (Barger et al., 2016).

הקשר בין תכונות אלו לבין שימוש בעייתי באינטרנט נבחן במחקרים רבים בעבר. אחד מהם (Zhou et al., 2017) הראה קשר שלילי בין מצפוניות ונעימות לשימוש בעייתי באינטרנט, אבל קשר חיובי עבור שאר התכונות. יש לציין כי תוצאות המחקרים בנוגע למוחצנות אינן עקביות ולעיתים יוצאות שליליות (Kayış et al., 2016).

תאוריית האישיות של פישר (Fisher Temperament Inventory)

הלן פישר (2010) – אנתרופולוגית וחוקרת אישיות – מחלקת את האישיות לאופי ולטמפרמנט, ומגדירה את הטמפרמנט כנטיות הביולוגיות הקבועות שהועברו לאדם בתורשה. בעבודתה היא ניגשת לאישיות דרך הביולוגיה, ועוסקת בסיווג אישיותי לפי ארבעה סוגי מערכות נוירולוגיות – דופמין, סרוטונין, טסטוסטרון ואסטרוגן. כל אחד מציע טמפרמנט שונה לאישיות:

❖ **סקרן/אנרגטי (Explorer)** – לסקרן/אנרגטי תהיה פעילות גבוהה של הורמון הדופמין. אנשים אלו הם בעלי תכונות כמו ספונטניות, אנרגטיות, הרפתקנות, אימפולסיביות ועצמאות.

❖ **זהיר/פועל על פי נורמות חברתיות (Builder)** – לאדם זהיר/פועל על פי נורמות חברתיות תהיה פעילות גבוהה של הורמון הסרוטונין. אנשים אלו הינם בעלי תכונות כמו ידידותיות, רוגע, נאמנות, מחויבות ושיתוף פעולה.

❖ **אנליטי/חד מחשבה (Director)** – לאדם אנליטי/חד מחשבה תהיה פעילות גבוהה של הורמון הטסטוסטרון, והם אנשים אנליטיים, תחרותיים, מבדילים בין עיקר וטפל, רציונליים וממוקדים.

❖ **אמפתי/חברתי (Negotiator)** – לאדם אמפתי/חברתי תהיה פעילות גבוהה של הורמון האסטרוגן. אלו הם אנשים אמפתיים, רגישים וטובים בניתוח רגשות, יודעים להסתכל על סוגיות מכל הזוויות, סבלניים וסובלניים.

ככול הידוע, טרם נערכו מחקרים העוסקים בקשר בין טמפרמנט הלן פישר לבין ההתמכרות לאינטרנט.

תאוריית סוגי התקשרות למבוגרים (Adult Attachment Styles)

התקשרות היא צורך מולד להיקשר לדמות אנושית, לרוב הדמות המטפלת. מערכת ההתקשרות אינה קיימת בינקות בלבד, אלא מלווה את האדם במהלך חייו, והסגנון שהוא חווה מהווה חלק אינטגרלי מאופיו (Bowlby, 1977). סוג ההתקשרות של האדם, בעודו תינוק, עם הדמות המטפלת יהווה גורם משמעותי לסוג ההתקשרות שלו במערכות יחסים רומנטיות בעתיד. הוגדרו ארבעה סגנונות התקשרות:

❖ **בטוח (Secure)** – אדם בעל סגנון התקשרות זה ירגיש תחושת ערך משמעותית בסביבתו. תפיסתו לגבי עצמו היא עקבית, יציבה, חיובית ומאופיינת בביטחון עצמי גבוה.

❖ **חרד-טרוד (Anxious-Preoccupied)** – אדם בעל סגנון התקשרות זה ירגיש תחושת חוסר ערך עצמית בשילוב עם צורך בהערכה חיובית של סביבתו. אדם זה זקוק לתשומת לב ולשמיעת חוות הדעת של הסובבים אותו על מנת להרגיש בטוח יותר.

❖ **נמנע-משחרר (Dismissive-Avoidant)** – אדם בעל סגנון התקשרות זה יגן על עצמו מפני אכזבה על ידי הימנעות מקשרים חברתיים, והוא בעל חשיבה רציונלית שלא מכילה רגש רב.

❖ **נמנע-חרד (Fearful-Avoidant)** – אדם בעל סגנון התקשרות זה ירגיש תחושת חוסר ערך בקרב אנשים ויצפה כי אחרים יפגעו בו. על מנת להגן על עצמו מפני דחייה צפויה, הוא יימנע מהתקשרות עם אחרים ויסמוך רק על עצמו.

הקשר בין סגנונות ההתקשרות השונים לבין ההתמכרות לאינטרנט ולמסכים נבחן במחקרים קודמים. נמצא קשר חיובי בין סוג התקשרות חרד-מוטרד וסוגי ההתקשרות הנמנעים לבין התמכרות לסמארטפון (Blackwell, Leaman, Tramposch, Osborne & Liss, 2017).

תיאוריית השילוש האפל (The Dark Triad Personality Theory)

מחקר **תכונות השילוש האפל** צמח מתוך מחקר השפות, בדומה לתכונות חמש הגדולות, והוא אנטי-תזה לתכונות נעימות ומצפוניות של חמש הגדולות (Furnham, Richard & Paulus, 2013). שלוש התכונות הן תכונות נפרדות אך לרוב ניתן לראות חפיפה ביניהן:

❖ **נרקסיזם (Narcissism)** – אדם בעל נרקסיזם גבוה יהיה בעל נטייה לגאוותנות יתר. נרקסיסט מאופיין בהערכה עצמית יתרה, אגואיזם, רוממות וחוסר אמפתיה כלפי אחרים. הוא לא יצליח להפריד בין רגשותיו הסובייקטיביים לבין האמת האובייקטיבית.

❖ **מקיאווליזם (Machiavellianism)** – אדם בעל מקיאווליזם גבוה יהיה זה המרוכז בעצמו ברמה שבה ינהג באופן מניפולטיבי וינצל את סביבתו על מנת להשיג את האינטרסים האישיים שלו, יתנהג בחוסר מוסריות וחוסר מצפון כלפי אחרים ויהיה בעל תחושת עליונות.

❖ **פסיכופתיה (Psychopathy)** – אדם בעל פסיכופתיה גבוהה יתאפיין בהתנהגות אנטי חברתית, באימפולסיביות, באנוכיות, בחוסר רגישות ובחוסר חרטה על מעשיו.

הקשר בין תכונות השילוש האפל להתמכרות לאינטרנט נבחנו בעבר. במחקר שנערך (עם מדגם $N=940$) נמצא קשר חיובי בין התכונות מקיאווליזם ופסיכופתיה לבין התמכרות לאינטרנט (Sindermann, Sariyska,) (Lachmann, Brand & Montag, 2018).

השערות המחקר ומטרות

מטרת המחקר

מטרת המחקר הייתה לבדוק את הקשרים שבין מאפייני האישיות של המשתתפים לבין מידת ההתמכרות שלהם לאינטרנט או למסכים. רצינו לראות אם ניתן יהיה לנבא את מידת ההתמכרות של משתתף ספציפי על פי תכונות האישיות שלו.

השערות

1. קיים **קשר חיובי** בין תכונת ה**נוירוטיזם (Neuroticism)** לבין שימוש בעייתי באינטרנט. אנו משערים כי הסיבה לכך היא שאנשים בעלי נוירוטיזם גבוהה פחות יציבים נפשית, ולכן הגיוני שיהיו בעלי הפרעות נפשיות רבות יותר, וביניהן התמכרות. בנוסף, נמצא במחקרים קודמים קשר בין מידת הנוירוטיזם לבין שימוש בעייתי באינטרנט (Kayış et al., 2016).

2. קיים **קשר שלילי** בין תכונת ה**מוחצנות (Extraversion)** לבין שימוש בעייתי באינטרנט. ההשערה נובעת מכך שהקשר נמצא כבר במחקרים קודמים (Kayış et al., 2016).

3. קיים קשר שלילי בין טמפרמנט אנליטי/חד-מחשבה (Analytical/Tough Minded) לבין שימוש בעייתי באינטרנט. בשל העדרם של מאמרים בנושא הטמפרמנטים של הלך פישר, העלנו השערות על פי ההיגיון והכרת המושגים. אנליטי-חד מחשבה, הפועל על פי הטסטוסטרון, מתנהג בצורה אנליטית וחושב ברציונליות. לכן, השערה הגיונית תהיה שאדם כזה לא יפעל מתוך היכנעות לדחפים שלו ויהיה נתון פחות להתמכרות לאינטרנט ולמסכים.

4. קיים קשר שלילי בין טמפרמנט הזהיר-הפועל על פי נורמות חברתיות (Cautious/Social Norm Compliant) לבין שימוש בעייתי באינטרנט. מפאת העדרם של מאמרים אקדמיים העוסקים בתכונת הלך פישר, עלינו להסתמך על הכרת המושגים ולהעלות השערות הגיוניות. לכן, הסיבה להשערה זו היא הגדרתם כאנשים רגועים ויציבים, דבר המקטין את הסיכוי שיתמכרו למסכים ולאינטרנט בקלות.

5. קיים קשר חיובי בין סוגי ההתקשרות נמנע-חרד (Fearful-Avoidant) וחרד-מוטרד (Anxious-Preoccupied) לבין שימוש בעייתי באינטרנט. הסיבה להשערה זו נובעת ממחקר שנערך לגבי הקשר בין סגנוני התקשרות אלה לבין התמכרות לאינטרנט, והראה קשר חיובי בשני המקרים (Blackwell et al., 2017).

6. קיים קשר חיובי בין תכונת הפסיכופתיה (Psychopathy) לבין שימוש בעייתי באינטרנט. ההשערה נובעת ממחקרים דומים בעבר שבהם נמצאו קשרים חזקים בין מידת הפסיכופתיה לבין שימוש בעייתי באינטרנט (Sindermann et al., 2018).

תהליך המחקר ותוצאותיו

המחקר נערך בקרב 112 משתתפים אשר נדגמו בשיטת דגימה לא הסתברותית (מתנדבים), והם ענו על סדרת שאלונים מקוונים (ר' להלן). המשיבים חולקו לשתי קבוצות על פי ניקוד ה-Internet Addiction Score [IAS] שלהם – קבוצת המכורים (בעלי IAS גבוה מ-29) וקבוצת הלא מכורים (Young, 1998). השתמשנו בקורלציות של פירסון וספירמן כדי למצוא קשרים בין האישיות לבין ה-IAS.

כלי מחקר – שאלונים

- ❖ **שאלון פרטים אישיים** – כולל שתי שאלות על אודות גיל הנחקרים ומינם.
- ❖ **שאלון התמכרות לאינטרנט (Internet Addiction Test [IAT])** – פותח על ידי יאנג (1998) על מנת למדוד את רמת ההתמכרות לאינטרנט. הציון נע בין 0 ל-80 כאשר 0-29 מציינים שאין התמכרות, 30-49 – התמכרות קלה ו-50-80 מציינים התמכרות קשה.
- ❖ **שאלון חמש התכונות הגדולות (Big5-10)** – נכתב על ידי Rammstedt & John (2007) ובוחר את חמש התכונות. על הנבדק לסמן כל היגד בשאלון במספר בין 1 ל-5, כאשר כל פריט מתייחס לתכונה אחת, ולבסוף, עושים ממוצע של הניקוד בעבור כל ההיגדים של כל תכונה.

❖ **שאלון תיאוריית הלן פיישר** – פותח על ידי הלן פיישר ועמיתיה הפסיכולוגים (Fisher, Rich, Island & Marchalik, 2006). השאלון כולל הצהרות, ומהנתונים ניתן ליצור פרופילים ביולוגיים ובכך לבחון את סוג האישיות של האדם.

❖ **שאלון התקשרות** – כולל שני חלקים (Relationship Questionnaire; Bartholomew & Horowitz, 1991): בחלק הראשון, הנבדק מסמן את הסגנון המתאים לו ביותר, ובחלק השני, הנבדק מדרג מ-1 עד 7 את מידת הסכמתו עם כל אחד מהסגנונות.

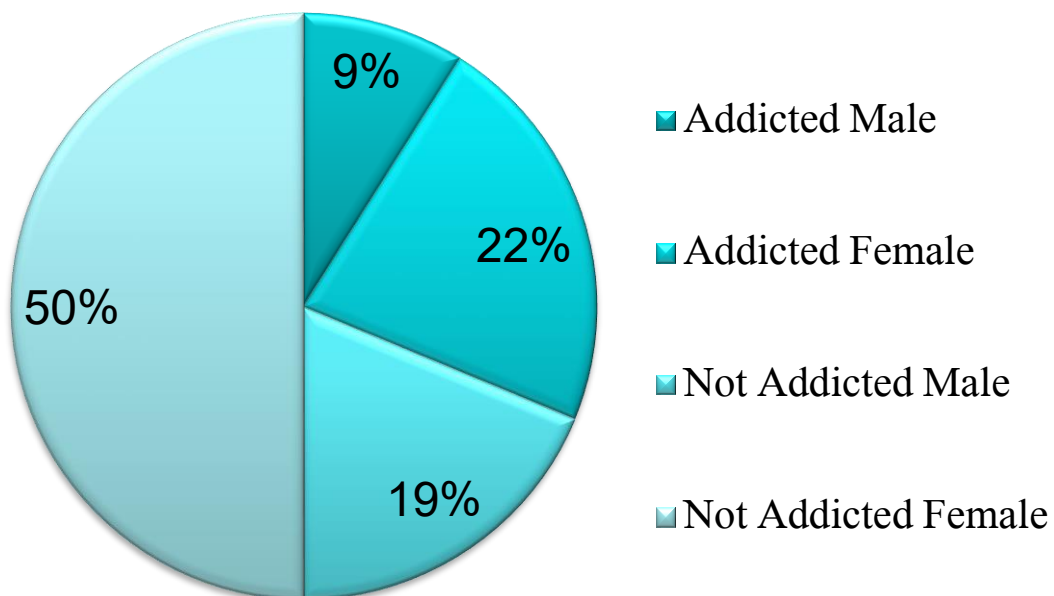
❖ **שאלון השילוש האפל** – פותח על ידי ג'ונסון וובסטר (Jonason & Webster, 2010), ודומה מאוד לשאלון חמש התכונות הגדולות – הנבדק מסמן את מידת הסכמתו עם כל היגד בסולם מ-1-5 ולבסוף מחשבים את ממוצע תשובותיו.

מתודולוגיה

אוכלוסיית המחקר מנתה 112 משתתפים שהתנדבו להשתתף במחקר, מתוכם 35 מכורים (31.25%) ו-77 שאינם מכורים (68.75%). מתוך אוכלוסיית המחקר הכללית 81 נשים (72.3%) ו-31 גברים (27.7%). גילם של כלל המשתתפים נע בין 19 ל-72 עם ממוצע שנים 30.9 וסטיית תקן 12.6.

מתוך אוכלוסיית המכורים – 25 נשים (71.4%) ו-10 גברים (28.6%). גילם של המכורים נע בין 19 ל-60 עם ממוצע שנים 26.5 וסטיית תקן 7.7. מתוך אוכלוסיית הלא מכורים, 56 נשים (72.7%) ו-21 גברים (27.2%). גילם של הלא מכורים נע בין 19 ל-72 עם ממוצע שנים 32.8 וסטיית תקן 13.9.

איור 1: התמכרות ומגדר



איור 2: מטריצת קורלציות (ספירמן)

Variables	Mean	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Gender	1.72	—								
2. Age	30.86	—	—							
3. Neuroticism	2.66	0.28**	-0.12	—						
4. Extraversion	3.75	0.29**	-0.16	-0.11	—					
5. Director Rank	11.78	-0.16	-0.13	-0.20*	0.02	—				
6. Builder Rank	12.27	0.23*	-0.17	-0.14	0.04	0.09	—			
7. Preoccupied	3.53	0.02	-0.28**	0.24*	-0.36***	0.04	-0.03	—		
8. Fearful	2.71	-0.04	-0.13	0.31**	-0.35***	0.04	-0.08	0.5***	—	
9. Psychopathy	2.18	-0.06	-0.04	0.04	-0.08	0.13	-0.02	0.2*	0.12	—
10. IAS	26.78	0.11	-0.34***	0.16	-0.13	0.19	-0.09	0.26**	0.25**	0.39***

מגדר: זכר=1, נקבה=2. * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

איור 2 הוא מטריצת קורלציה שנערכה באמצעות מתאם ספירמן. חשוב לציין שבבדיקת ההשערות, השתמשנו לרוב בקורלציית ספירמן בשל התפלגות לא נורמלית של הנתונים. בבדיקת הנוירוטיות, מכיוון שהתפלגות הנתונים הייתה נורמלית, השתמשנו במתאם פירסון הנחשב מדויק יותר בנתונים בעלי התפלגות נורמלית. בבדיקת הקשר בין הנוירוטיות לבין שימוש בעייתי באינטרנט שנערכה באמצעות מתאם פירסון נמצא קשר חלש וחיובי [$r_p = 0.2, p < 0.05$]. כך ככל שעולה הנוירוטיות, השימוש הבעייתי באינטרנט גם עולה.

ניתן לראות שהשערות 1, 5 (בשני חלקיו) ו-6 אוששו ומתאימות לסקירת הספרות. השערה 2 אינה מתאימה לסקירת הספרות אשר הראתה לעיתים קשורים חיוביים ולפעמים קשורים שליליים בין המוחצנות לבין האישיות, אך אף פעם לא הראתה שלא קיים שום קשר. 3 ו-4 נדחו אולם גם לא היו מחקרים קודמים להסתמך עליהם.

מסקנות ומחשבות לעתיד

מסקנות והשלכות

למחקר יש השלכות ומסקנות תיאורטיות והשלכות מעשיות – אחת מהן היא אישוש המידע שתאם את ההשערות וגם את סקירת הספרות. הממצאים מהווים בסיס נוסף לתאוריה שקיים מתאם בין האישיות לבין התמכרות לאינטרנט. השלכתם המעשית של ממצאי המחקר היא שכעת אפשר לדעת אם האדם חשוף יותר להתמכרות למסכים לפי אישיותו – אנשים בעלי ציון גבוה בנוירוטיות (Neuroticism), נמנע-חרד (Fearful-Avoidant), חרד-טרוד (Anxious-Preoccupied) ופסיכופתיה (Psychopathy) נמצאים בסכנה גבוהה יותר להתמכרות לאינטרנט, ולכן חשוב למנוע זאת מגיל צעיר. זיהוי מוקדם על ידי מבחן אישיות יוכל אולי למנוע את ההתמכרות מלכתחילה. יתכן ובעתיד פסיכולוגים יוכלו לתת לאדם טיפול מיוחד על מנת למנוע מצב של שימוש בעייתי באינטרנט בעזרת תכונותיו האישיות.

מגבלות המחקר

למחקר היו מספר מגבלות שחשוב להתייחס אליהן – הראשונה היא מגבלת גודל המדגם העומד על 112 משתתפים, מספר שהוא זניח כמובן לכמות המשתמשים באינטרנט כיום העומד על 4.57 מיליארד משתמשים (IWS, 2020). בהתאמה, לא ניתן לבצע הכללה מקיפה לכלל אוכלוסיית כדור הארץ באמצעות תוצאות מחקר זה. בעתיד נצטרך לבצע מחקר נרחב יותר על מנת להגיע למסקנות מקיפות יותר לכלל האוכלוסייה. השנייה היא זו הגורמת להטיה הנובעת מתהליך הדגימה – המדגם נבחר מטעמי נוחות, והשאלון הופץ למאות אנשים הקרובים אלינו וכל אחד בחר מרצונו אם לענות לשאלון ואם לאו. חשוב לדון בהטיה זו המשקפת מהי המוטיבציה הגורמת לאנשים מסוימים למלא את השאלון ולאחרים לא. מגבלה נוספת היא הטיית ההכחשה – יתכן שהעונים על השאלון אינם משיבים בכנות מוחלטת וגורמים להטיה בתוצאות המחקר. דבר זה אינו סביר כי נשמרה אנונימיות המשיבים. בנוסף, ניתן לראות שלהרבה משתתפים יצא ציון התמכרות לאינטרנט גבוה.

הצעות למחקרי המשך

למרות המגבלות הללו עדיין ניתן, לדעתנו, להסיק מסקנות רבות מתוך המחקר וגם להשתמש במסקנות המחקר כתבנית למחקרי המשך בנוגע לקשר שבין האישיות לבין ההתמכרות לאינטרנט.

יש מספר רב של מחקרי המשך שניתן יהיה לערוך במטרה לקבל תמונה רחבה וברורה יותר על הקשר שבין תכונות האישיות השונות לבין שימוש בעייתי באינטרנט. במחקרי המשך כאלה ניתן יהיה להתמקד למשל בתכונות אשר בחרנו שלא לעסוק בהן; חשוב לערוך מחקר המשך במדגם רחב הרבה יותר במטרה לצמצם במעט את גורם האקראיות וצירופי מקרים. מחקר המשך נוסף יכול להיות על הקשר שבין גילי המשתתפים לבין השימוש בעייתי באינטרנט כי ראינו בעמודה 5 שנמצא קשר חזק בין השניים. כמובן, חשוב גם לבצע מחקרים על ההשפעות הפסיכולוגיות לטווח הארוך של שימוש בעייתי באינטרנט והאם ניתן לטפל בסוגיה חשובה זו.

- Barger, B., Campbell, J., & Simmons, C. (2016). The Five Factor Personality Model in Children With ASD During Middle Childhood. *Focus on Autism and Other Developmental Disabilities*, 31(3), 174-183.
- Bartholomew, K., & Horowitz, L. M. (1991). Attachment styles among young adults: a test of a four-category model. *Journal of Personality and Social Psychology*, 61(2), 226.
- Blackwell, D., Leaman, C., Tramposch, R., Osborne, C., & Liss, M. (2017). Extraversion, neuroticism, attachment style and fear of missing out as predictors of social media use and addiction. *Personality and Individual Differences*, 116, 69-72.
- Bowlby, J. (1977). The Making and Breaking of Affectional Bonds. *British Journal of Psychiatry*, 130(5), 421-431.
- Digman, J. M. (1990). Personality Structure: Emergence of the Five-Factor Model. *Annual Review of Psychology*, 41(1), 417-440.
- Fisher, H. E., Rich, J., Island, H. D., & Marchalik, D. (2010). The second to fourth digit ratio: A measure of two hormonally-based temperament dimensions. *Personality and Individual Differences*, 49(7), 773-777.
- Furnham, A., Richards, S. C., & Paulhus, D. L. (2013). The Dark Triad of Personality: A 10 Year Review. *Social and Personality Psychology Compass*, 7(3), 199-216.
- Ha, J. H., Kim, S. Y., Bae, S. C., Bae, S., Kim, H., Sim, M., . . . Cho, S. C. (2007). Depression and Internet Addiction in Adolescents. *Psychopathology*, 40(6), 424-430.
- Internet World Stats. (2020). Retrieved from <https://www.internetworldstats.com/>
- Jonason, P. K., & Webster, G. D. (2010). The dirty dozen: A concise measure of the dark triad. *Psychological Assessment*, 22(2), 420-432.
- Kayış, A. R., Satıcı, S. A., Yılmaz, M. F., Şimşek, D., Ceyhan, E., & Bakioğlu, F. (2016). Big five-personality trait and internet addiction: A meta-analytic review. *Computers in Human Behavior*, 63, 35-40.
- Lee, Y. S., Han, D. H., Yang, K. C., Daniels, M. A., Na, C., Kee, B. S., & Renshaw, P. F. (2008). Depression like characteristics of 5HTTLPR polymorphism and temperament in excessive internet users. *Journal of Affective Disorders*, 109(1-2), 165-169.

Rammstedt, B., & John, O. P. (2007). Measuring personality in one minute or less: A 10-item short version of the Big Five Inventory in English and German. *Journal of Research in Personality, 41*(1), 203-212.

Sindermann, C., Sariyska, R., Lachmann, B., Brand, M., & Montag, C. (2018). Associations between the dark triad of personality and unspecified/specific forms of Internet-use disorder. *Journal of Behavioral Addictions, 7*(4), 985-992.

Spada, M. M. (2014). An overview of problematic Internet use. *Addictive Behaviors, 39*(1), 3-6.

Young, K. S. (1998). Internet Addiction: The Emergence of a New Clinical Disorder. *CyberPsychology & Behavior, 1*(3), 237-244.

Zhou, Y., Li, D., Li, X., Wang, Y., & Zhao, L. (2017). Big five personality and adolescent Internet addiction: The mediating role of coping style. *Addictive Behaviors, 64*, 42-48.



דרכים למיגור העוני ולשיפור המצב הכלכלי בישראל

בעזרת מערכת החינוך

חניך: אליחי ברזילי, אורט כרמים, כרמיאל

מנחה-עמית: פרופ' דורון קליגר, מינהל עסקים, אוניברסיטת חיפה



הקדמה

שנת 2020 – מצב העוני בארץ ובעולם הולך ומחריף. במהלך השנים ניתן לראות שאנשים הנמצאים במעגל העוני מתקשים לצאת ממנו, ומצבם הכלכלי הולך ומחמיר. רוב האנשים שנולדו למשפחות מוחלשות כלכלית לא הצליחו להגיע לעצמאות כלכלית, והדבר חוצה דורות. לעומת זאת, אלה הנמצאים בעשירונים הגבוהים – מתעשרים יותר ויותר. לפי נתוני הלמ"ס בשנת 2017 אחוז הילדים בני 0-17 בסיכון לעוני בישראל היה 34.5% לעומת 20.4% במדינות האיחוד האירופי.

השכבות החלשות בישראל מנצלות פחות הטבות פיננסיות המגיעות להן, וזאת כתוצאה מחוסר ידע פיננסי בנושא. הדבר גורם לכך שאנשים מפסידים כסף רב במהלך השנים (הרן רוזן ושדה, 2017).

מחקר אמריקאי מצא כי יש קשר מובהק בין רמת האוריינות הפיננסית של התושבים לבין רמת העוני במדינות השונות בארצות הברית – ככל שרמת האוריינות הפיננסית גבוהה יותר בכל מדינה בארה"ב, כך שיעורי העוני נמוכים יותר (Bumcrot, Lin and Lusardi, 2011).

במחקר שנערך באוניברסיטת פנסילבניה בארה"ב נמצא כי אנשים, חברות, או ממשלות יכולים לשפר את מצבם הכלכלי באמצעות השקעה באוריינות פיננסית (Behrman, Mitchell, Soo, and Bravo 2010).

ממצאי מחקר שנערך באוניברסיטת קיימברידג' בארה"ב הראו כי חשיפה לאורך זמן לחינוך פיננסי בבתי ספר תיכוניים שנבדקו, שיפרה לטובה את המצב הכלכלי בקרב אותם בוגרים (Bernheim, D., D. Garrett, and D. Maki. 2001).

בעקבות ממצאים אלו אנו סבורים כי ניתן לשפר את המצב הכלכלי בישראל בעזרת הקניית כלים ומיומנויות להתנהלות פיננסית נכונה מגיל צעיר.

מטרות המחקר

מטרות המחקר הן בחינת הצורך בשילוב חינוך פיננסי במסגרת תוכנית הלימודים בישראל ובחינת הצורך להגברת האוריינות הפיננסית בקרב החברה, במטרה לשפר את המצב הכלכלי של השכבות המוחלשות בחברה הישראלית.

שיטת המחקר ותוצאותיו

איסוף המידע נעשה באמצעות שאלון מחקרי שחובר על ידינו והופץ בקרב בוגרי בתי ספר תיכוניים וסטודנטים לתואר ראשון באמצעות הווטסאפ. מספר המשיבים על השאלון הוא 38 והמדגם לא מייצג את כלל האוכלוסייה, אך למרות זאת הוא שופך אור על תפיסת הבוגרים והסטודנטים בנוגע לסוגיות שהוצגו.

השאלון מורכב מ-18 שאלות, שמתוכן 11 אמריקאיות במטרה לקבל תמונה על הרקע הכלכלי של המשתתפים, ולבדוק האם וכיצד הם רכשו מיומנויות להתנהלות כלכלית בבית הספר ולאחר סיום לימודיהם בית הספר. מטרת 7 השאלות הנוספות – אמריקאיות או פתוחות – היא לבחון את הצורך בשילוב חינוך פיננסי במערכת החינוך ובהגברת האוריינות הפיננסית בקרב האוכלוסייה על מנת להפחית את העוני בארץ.

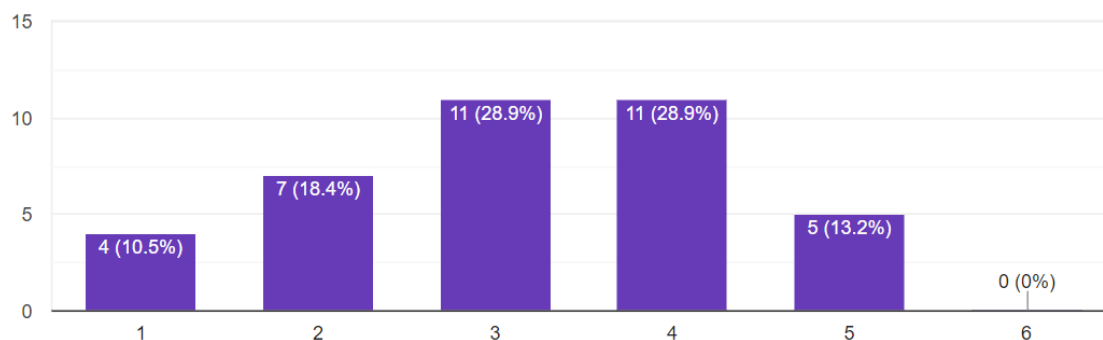
א. רקע כלכלי ורכישת מיומנויות להתנהלות כלכלית

להלן מובאות דוגמאות לכמה שאלות ולנתונים שהתקבלו מהשאלונים (דירוג מ-1-6. 1 = רמת השכלה נמוכה מאוד ו-6 = רמת השכלה גבוהה מאוד).

1. רמת ההשכלה הפיננסית

מהי רמת השכלתך הפיננסית?

38 תגובות

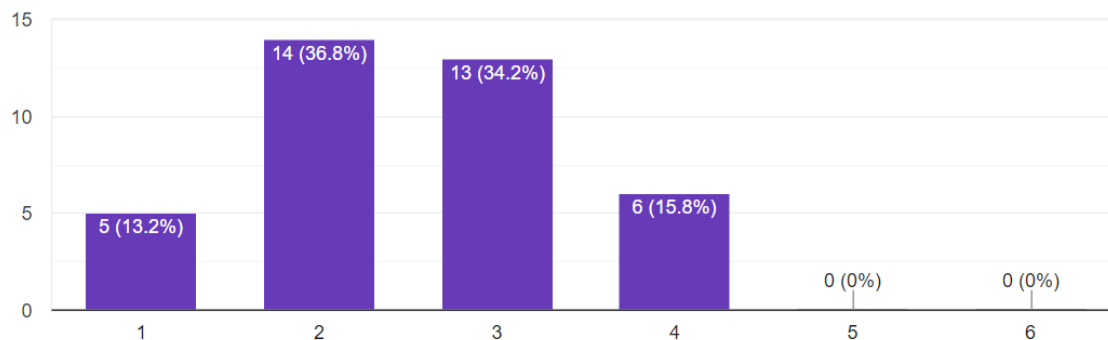


אף אחד (0%) מהנשאלים לא ציין שרמת השכלתו הפיננסית היא גבוהה מאוד. כ-13% מהמשתתפים דירגו את רמת השכלתם הפיננסית כגבוהה (5), כ-29% - 4, כ-29% דירגו 3, כ-18.4% - 2 וכ-11% דירגו אחד – רמת השכלה פיננסית נמוכה מאוד.

2. רמת ההשכלה הפיננסית של החברים

מהי רמת ההשכלה הפיננסית הממוצעת של חברים שלך?

38 תגובות

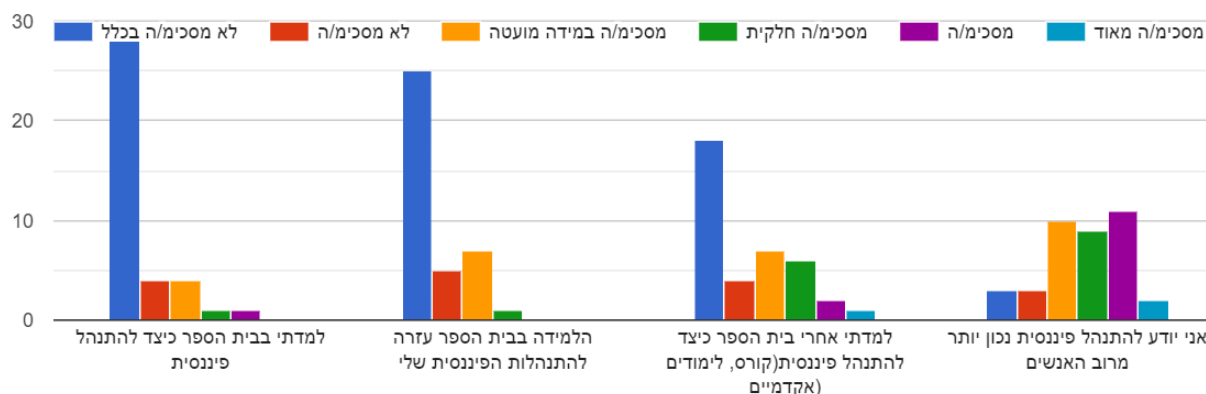


מהנתונים עולה כי המשיבים דירגו נמוך יותר את חבריהם מאשר את עצמם. אף אחד (0%) מהנשאלים לא ציין שרמת השכלתם הפיננסית של חבריו היא גבוהה מאוד (6) או גבוהה (5); כ-34% דרגו בדירוג 3, כ-37% בדירוג 2 וכ-13% דירגו 1 – רמת השכלה פיננסית גרועה.

3. לימודי התנהלות פיננסית

המשתתפים נשאלו האם הם למדו בבית הספר כיצד להתנהל פיננסית במסגרת בית הספר או לאחר סיום הלימודים.

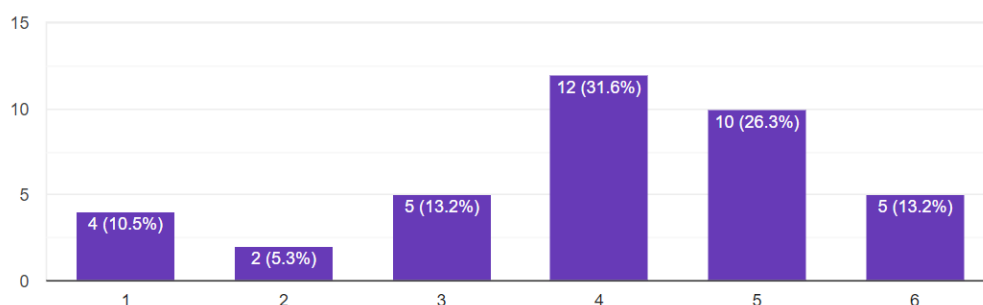
דרג/י בבקשה את ההגדים הבאים לפי מידת הסכמתך



נמצא כי הרוב המוחלט של המשיבים לא למדו נושא זה בבית הספר, וכתוצאה מכך לרובם הלמידה בבית הספר לא עזרה להתנהלותם הפיננסית בעתיד, וכך גם לאחר סיום לימודיהם במסגרת קורסים או לימודים אקדמיים. עם זאת, כאשר הם נשאלו האם הם חושבים שהם יודעים להתנהל פיננסית נכון יותר מרוב האנשים, כ-34% ענו כי הם מסכימים או מסכימים מאוד, 50% מסכימים חלקית או מסכימים במידה מועטה וכ-16% לא מסכימים או לא מסכימים בכלל.

4. השפעת החינוך הפיננסי על המצב הכלכלי

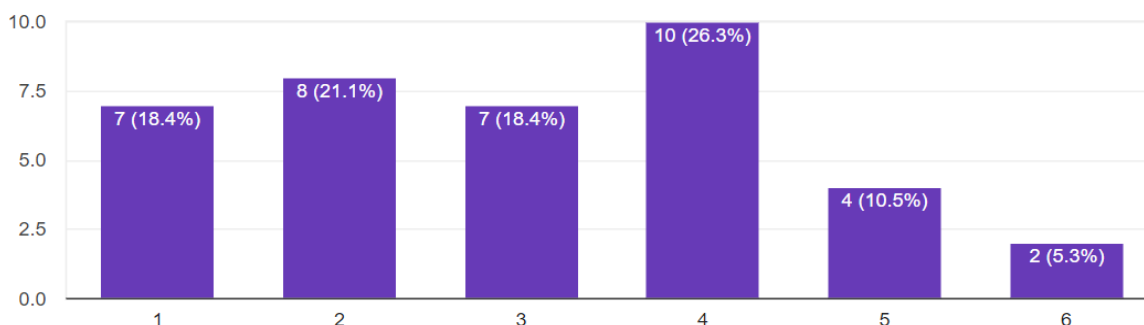
המצב הכלכלי שלי היה יכול להיות יותר טוב אם הייתי מקבל חינוך פיננסי ראוי
38 תגובות



מעל מחצית המשיבים (כ-71%) ציינו כי מצבם הכלכלי היה יכול להיות טוב יותר אם הם היו מקבלים חינוך פיננסי ראוי. כלומר, איכות חייהם יכולה הייתה להשתפר.

5. השפעת החינוך להתנהלות כלכלית על חיים מאושרים

אם הייתי לומד כיצד להתנהל כלכלית הייתי יכול להיות יותר מאושר היום
38 תגובות



נמצא כי הרוב (כ-45%) דירגו בצורה בינונית (3-4) שהם היו יכולים להיות מאושרים יותר, כ-40% ציינו שלא או לא ממש (1-2) וכ-16% דירגו בצורה גבוהה או גבוהה מאוד (5-6) שהם היו יכולים להיות מאושרים יותר היום.

לסיכום, מהנתונים שהובאו לעיל ניתן ללמוד כי לדעת חלק ניכר מהמשיבים במידה והם היו לומדים להתנהל כלכלית בדרך הנכונה, הייתה להם האפשרות לנהל את כספם בצורה טובה יותר, וכתוצאה מכך אף יכולה הייתה להשתפר איכות חייהם.

ב. דרכים לשיפור מצב העוני בארץ

החלק השני של השאלון עסק בשאלות שמטרתן לשפוך אור על דרכים שבהן יכולה המדינה לשפר את המצב הכלכלי של שכבת העוני בארץ:

1. כיצד המדינה הייתה יכולה לפעול כנגד מצב העוני בארץ?

2. כיצד המדינה יכולה לעזור לקשיי יכולת?

3. מה המדינה יכולה לעשות על מנת שהציבור ילמד להתנהל פיננסית בצורה יותר מושכלת?

מדברי המשיבים:

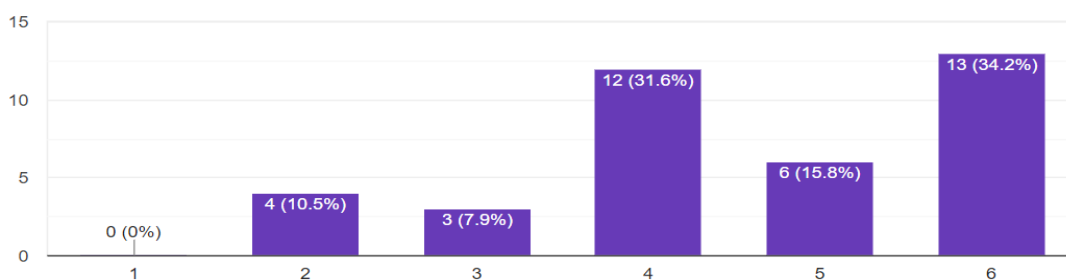
לשלב לימוד פיננסי בבתי הספר; הכנסת הנושא למערכת החינוך כך שיהיה מקצוע חובה; לתת לתלמידים יותר כלים וידע לגבי התנהלות כלכלית נכונה; קורס התנהלות פיננסית חובה בסוף הצבא; ללמד את האזרחים איך להתנהל עם הכסף שלהם במקום לזרוק קצבאות; חינוך כלכלי עוד במסגרת התיכון, ליווי לחשבון צעיר במסגרת הבנק; לתת השכלה פיננסית לכלל האוכלוסייה.

מהתשובות עולה כי רוב בוגרי בתי הספר חושבים שעל המדינה להנחיל השכלה פיננסית לכלל האוכלוסייה, חינוך כלכלי במסגרת לימודי התיכון וליווי מצד המדינה.

בהמשך התבקשו המשתתפים לדרג מ-1-6 את יעילות הדרכים לשיפור מצב העוני בארץ, כאשר 1 זאת הדרגה הנמוכה ביותר, כלומר דרך גרועה לשיפור מצב העוני, ודרגה 6 היא הגבוהה ביותר ומצביעה על דרך מצוינת לשיפור מצב העוני.

1. הוספת קורסים של לימוד התנהלות כלכלית בבתי ספר תיכוניים

הוספת קורסים של לימוד התנהלות כלכלית בבתי ספר תיכוניים
38 תגובות



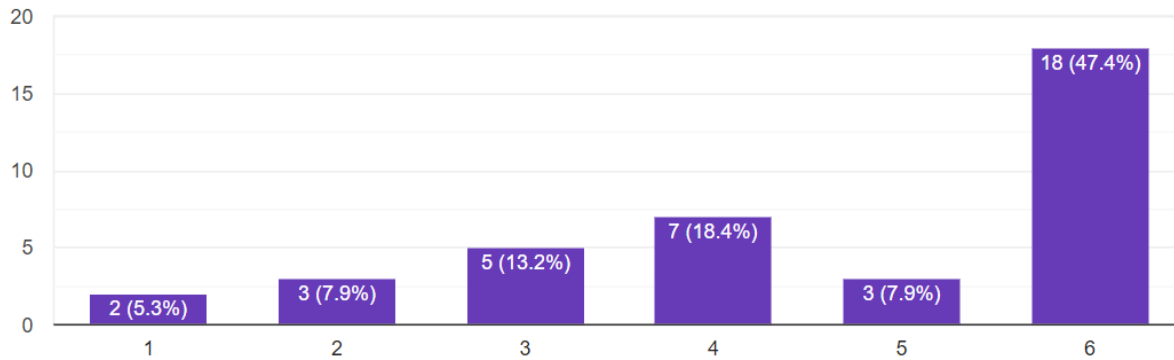
כשליש (כ-34%) מהמשיבים דירגו דרך זו כמצוינת (=6); כ-16% כדרך טובה מאוד (=5), כ-32% דירגו את הדרך כטובה (=4) ורק כ-8% וכ-10% דירגו 3 ו-2, כלומר דרך לא כל כך טובה או דרך לא טובה בהתאמה. חשוב לציין כי אפס משתתפים דירגו את הדרך כגרועה מאוד (=1).

כלומר, רוב המשתתפים (כ-81%) דירגו את הדרך של הוספת קורסים ללימוד התנהלות כלכלית בבתי ספר תיכוניים כדרך טובה, טובה מאוד או מצוינת לשיפור מצב העוני בארץ.

2. הוספת קורסים בנושאי התנהלות כלכלית נכונה לכלל גילי 18 ומעלה

הוספת קורסים חינוכיים בנושא התנהלות כלכלית נכונה לכלל גילי שמונה עשרה ומעלה

38 תגובות

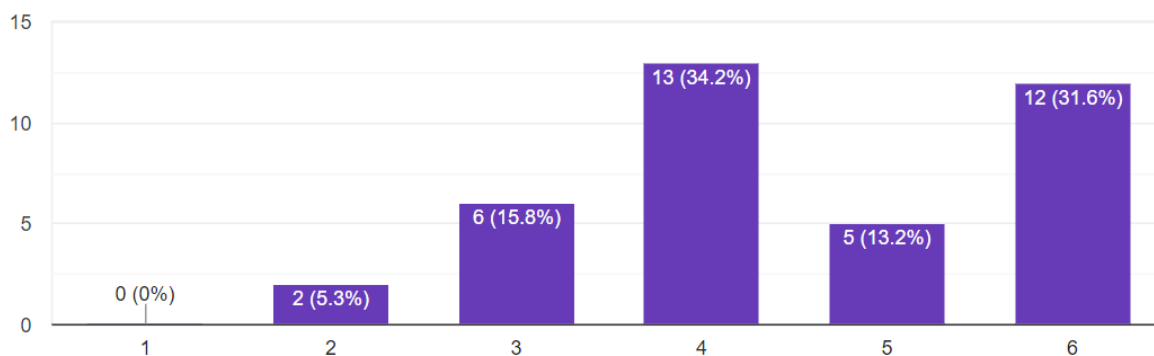


נמצא כי כמעט מחצית (כ-47%) ציינו אפשרות זו כמצוינת, כ-8% ציינו אפשרות זו כטובה מאוד וכ-18% ציינו את הדרך כדרך טובה. כלומר, רוב הנשאלים (כ-74%) חושבים שדרך זו לשיפור מצב העוני בארץ היא טובה, טובה מאד או מצוינת.

3. הוספת שיעורים לתוכנית הלימודים של משרד החינוך בנושא התנהלות כלכלית וחסכון

הוספת שיעורים בנושא התנהלות כלכלית וחסכון לתוכנית הלימודים של משרד החינוך

38 תגובות



רוב המשתתפים (כ-79%) דירגו את הדרך הזאת כדרך טובה עד מצוינת, כאשר כשליש (כ-34%) דירגו שזוהי דרך טובה, כ-13% דירגו את הדרך כדרך טובה מאוד, וכ-32% ציינו את הדרך כדרך מצוינת, בעוד שרק כ-5% דירגו 2 וכ-16% דירגו 3. אף אחד מהמשתתפים דירגו את הדרך הזאת כדרך גרועה.

מסקנות וסיכום

ממצאי המחקר מראים כי הרוב המוחלט של בוגרי בתי הספר והסטודנטים לתואר ראשון שהשתתפו במחקר, לא למדו כיצד להתנהל פיננסית במהלך הלימודים או לאחר סיומם. סיכויי ההצלחה הכלכלית של אנשים תלויה בהשכלה הפיננסית שלהם, ולכן אנו סבורים שניתן לשפר את המצב הכלכלי בעזרת הקניית כלים ומיומנויות להתנהלות פיננסית נכונה מגיל צעיר. חשוב לציין שנכון יהיה לבצע מחקר בצורה מעמיקה יותר כדי לייצג את כל הקבוצות באוכלוסייה.

מה מוטל על מוסדות המדינה לעשות על מנת לשפר את מצבה הכלכלי של האוכלוסייה המוחלשת?

לפי ממצאי מחקר זה מסתמן שרצוי שהמדינה תשקיע בחינוך כלכלי מגיל ילדות, וזאת על מנת להצמיח דורות משכילים יותר, בעלי מיומנויות, כלים וידע בהתנהלות כספית נבונה. ההצלחה הכלכלית תלויה רבות בחינוך ראוי, ולכן ככל שהמדינה תשקיע יותר בחינוך פיננסי, כך יצמח מספר האנשים שיצליחו כלכלית.

על מנת לשפר את המצב הכלכלי של כלל האוכלוסייה, ובפרט של האוכלוסיות המוחלשות, אנו מציעים להוסיף כמה אפשרויות במסגרות החינוך במדינה:

✚ מקצוע של חינוך פיננסי כמקצוע ליבה, כחלק ממקצועות הברות, או לחילופין, שיעורים בנושא התנהלות פיננסית וחסכון שיתווספו לתוכנית הלימודים של משרד החינוך לכלל בתי הספר.

✚ קורסים חינוכיים בנושא התנהלות כלכלית נכונה לכלל גילי 18 ומעלה.

✚ הכשרות אוריינות פיננסיות חינוכיות או מוזלות מטעם המדינה למסיימי בתי הספר התיכוניים.

ביבליוגרפיה

הרן רוזן מאיה, שדה אורלי, (2017) "האם הרגולציה הפיננסית מתעלמת בלא כוונה מאוכלוסיות מוחלשות?", חטיבת המחקר של בנק ישראל.

הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, פני החברה בישראל – פערם בין מרכז לפריפריה, דו"ח מס' 11 עמ' 156, (2019).

Behrman, J., O. S. Mitchell, C. Soo, and D. Bravo. 2010. Financial literacy, schooling, and wealth accumulation. NBER WP 16452, 25.

Bernheim, D., D. Garrett, and D. Maki, (2001) Education and saving: The long-term effects of high school financial curriculum mandates, Journal of Public Economics.

Christopher B. Bumcrot, Judy Lin and Annamaria Lusardi, (2011) The Geography of Financial Literacy, Financial Literacy Center.



מדעי הרוח

לא הולך ברגל

עיון סמנטי בפועל הלך בעברית המקראית בהשוואה לעברית בת ימינו

חניך: הדר איקוניקוב, מקיף מבואות עירון, כרכור

מנחה-עמיתה: ד"ר פנינה טרומר, תל אביב



הקדמה

השתתפתי בעבודת המחקר של ד"ר פנינה טרומר עם עמיתיה על מערך המשמעויות של פועל התנועה הלך בעברית בת ימינו, במחקר שבו נבדקו תזוזות המשמעות של הפעלים יצא, בא והלך. במסגרת זו חקרתי את מערך המשמעויות של הפועל הלך בלשון המקרא.

מטרת המחקר

חשיפת תמונת השימוש של הפועל הלך במקרא ובכתובות העבריות בנות זמנו של המקרא [מצבת מישע (מאה 9 לפנה"ס); כתובת ספר בלעם בר בעור (מאה 8 לפנה"ס); כתובת נקבת השילוח (מאה 7 לפנה"ס)] והשוואה לתמונת השימוש של פועל זה בעברית המדוברת בת ימינו.

תהליך המחקר ושיטת הביצוע

בדקנו 1346 היקרויות של הפועל הלך (בבניין קל בלבד) בהקשרן המלא במקרא על פי מראי המקומות שניתנו בקונקורדנציה לתנ"ך של מאנדלקרן (תשל"ב). הוספנו גם בדיקה של הפועל בכתובות העבריות בנות זמנו של המקרא, בספרו של שמואל אחיטוב אסופת כתובות עבריות (תשנ"ג). במקרים שנדרשנו לפרשנות של הפסוק המסוים, פנינו לתנ"ך מקראות גדולות שם מופיעות הפרשנויות של רד"ק, רש"י, מצודת דוד ומצודת ציון, וכן לתנ"ך עם פירוש "דעת מקרא".

גם המילונים הלועזיים ללשון המקרא היו לנו לעזר: מילונם של בראון, דרייבר בריגס (1907); מילון גזניוס (1910), מילונם של קהר-באומרגרטר (1958); ספרו של גזניוס (1910) על דקדוק. נעזרנו כמובן גם במילונים העבריים המצטטים מלשון המקרא: מילונו של אבן שושן (1972), מילון אריאל (1995) וקונקורדנציות חדשות למקרא אבן שושן (2000), קדרי (2007).

תוצאות המחקר

הפועל הלך שייך לקבוצת פועלי התנועה.

הגדרת תנועה בספרות המקצועית (טרומר, 1983: 18; Fillmore, 1985; גיונסון ואחרים 2001: 76) כוללת ישות Theme הנעה מנקודה אחת – מקום המוצא (Source) לנקודה אחרת – מקום היעד (Goal) לאורך הדרך בין שתייהן (Path).

הפעלים המציינים תנועה מתמיינים (שם) לקבוצות הבאות:

✚ פעלים המתמקדים במקום המוצא, מייצגם הוא הפועל יצא.

✚ פעלים המתמקדים במקום היעד, מייצגם הוא הפועל בא.

✚ פעלים המתמקדים בדרך שבין המוצא ליעד, מייצגם הוא הפועל הלך.

הפועל הלך משתייך אפוא לקבוצת פועלי התנועה המתמקדים בדרך שבין המוצא ליעד.

לקמן טבלאות המציגות חלק מן ההיקריות שנבדקו על ידינו:

הלך + מ + שם מקום	הלך + אל/ל + שם מקום //הלך + שם מקום בסיומת ה"א המגמה	הלך + מ + שם מקום + אל/ל + שם מקום	הלך + ל + דרך (בנטיית גופים)	הלך + ב + שם מקום	הלך + על + ש"ש
"ומלאך יי הלך מעיניו" (שופטים ו, כא) "...וראו מי הלך מעמנו..." (שמואל א יד, יז) "וילך ה' כאשר כילה לדבר..." (בראשית יח, לג) "ולקחנו את ביתנו והלכנו" (בראשית לד, יז)	"ולא הלך כפעם בפעם לקראת נחשים..." (במדבר כד, א) "וילכו בני מכיר בן מנשה גלעדה..." (במדבר לב, לט) "גם שאול הלך לביתו גבעתה" (שמואל א י, כו) "איה מעון אריות [...] אשר הלך אריה לביא שם" (נחום ב, יב)	"ואבימלך הלך אליו מגרר..." (בראשית כו, כו) "כי הלך שמעי מירושלים גת" (מלכים א ב, מא) "לא הלך עבדך אנה ואנה" (מלכים ב ה, כה)	"ויראו בניו את הדרך אשר הלך איש האלוהים אשר בא מיהודה" (מלכים א יג, יב)	"...הלך ישראל במדבר..." (יהושע יד, י)	"ועלה (הנהר) על אפיקו והלך על כל גדותיו" (ישעיהו ח, ז)

הלך ללא משלימי מקום

הלך שמשלימי המקום שלו ניתנים לשחזור				הלך שמשלימי המקום שלו ניתנים לשחזור	הלך במשמעות / אי הימצאות, הוויה / אי הימצאות	הלך במשמעות עשה
הלך במשמעות מטפורית						
הלך כפותח תבנית פריפרסטית		הלך במשמעות מטפורית	הלך במשמעות מטפורית של דרך התנהלות בחיים			
כאשר מבצע הפעולה אינו בעל חיים בעל גפיים	כאשר מבצע הפעולה הוא בעל חיים בעל גפיים					
"גם היא לגולה הלכה בשבי" (נחום ג, י)	"והלך מלכם בגולה" (עמוס א, טו) "ויהוצדק הלך בהגלות ה'" (דברי הימים א ה, מא)	"הלך הצל עשר מעלות (מלכים ב כ, ט) "ואחר עיני הלך לבי" (איוב לא, ז) "...והלך הגבול אל הימין אל יושבי עין תפוח" (יהושע יז, ז)	"הלך לפניך באמת ובצדקה ובישרת לבב" (מלכים א ג, ו) "אשר הלך חשכים ואין נגה לו" (ישעיהו נ, י)	"...והעם לא ידע כי הלך יונתן" (שמואל א יד, ג) "ולקחתם את ארון ה' [...] ושלחתם אותו והלך" (שמואל א ו, ח)	"כאשר הלך עבדי ישעיהו ערום ויחף שלוש שנים" (ישעיהו כ, ג) "הסתיו עבר הגשם חלף הלך לו" (שיר השירים ב, יא)	"וישע יי את דוד בכל אשר הלך" (שמואל ב ז, ו)

הלך = פועל תנועה שלא באמצעות הרגליים	הלך + אחרי + ישות / הלך + בעצת + ישות	הולך + ש"ת / בינוני	הלך + ויקטול / וקטל	הלך + שם פועל
"וירכב יהוא וילך יזרעאלה" (מלכים ב ט, טז) ... "וילך רוכב הסוס..." (שם, יח)	"...כל האיש אשר הלך אחרי בעל פעור..." (דברים ד, ג) "אשרי האיש אשר לא הלך בעצת רשעים ובדרך חטאים לא עמד ובמושב לצים לא ישב" (תהילים א, א)	"ויהי קול השופר הולך וחזק מאוד..." (שמות יט, יט) "והנער שמואל הולך וגדל וטוב גם עם ה'..." (שמואל א ב, כו) "וישתוק הים מעלינו כי הים הולך וסוער" (יונה א, יא)	"...הלך וילכוד את חותיהם..." (במדבר לב, מא) "ונבח הלך וילכוד את קנת..." (במדבר לב, מב) "והלך מדי שנה בשנה וסבב בית אל והגלגל והמצפה" (שמואל א ז, טז)	"ולבן הלך לגזוז את צאנו..." (בראשית לא, יט) וכן במראי המקומות הבאים: מלכים א כב, יג דברי הימים א יז, כא

מעריך המשמעויות של הלך במקרא בהשוואה לעברית בת ימינו

1. הלך = עבר ממקום מוצא למקום יעד

במקרא

הלך = התקדם, נע, (בני אדם) (מילון B.D.B.); צעוד ועבור ממקום למקום (שטרנברג 1961).
התבניות התחביריות: הלך משם מקום אל שם מקום.

- וַיֵּאמֶר יְהוָה אֶל אַבְרָם לֵךְ לְךָ מֵאַרְצְךָ [...] אֶל הָאָרֶץ אֲשֶׁר אֲרָאָךְ (בראשית יב, א).
- וַאֲבִימֶלֶךְ, הֵלֵךְ אֵלָיו מִגֶּר (בראשית כו, כו).

יש אשר משלים היעד מופיע ללא מילת היחס האופיינית אל.

- כִּי-הֵלֵךְ שְׂמָעִי מִירוּשָׁלַם גַּת וַיֵּשֶׁב (מלכים א ב, מא).

מקום המוצא ומקום היעד אינם אלא בבחינת המקום הראשון שהמהות הנעה נעה ממנו, והמקום האחרון שהיא נעה אליו, במסגרת הדרך (Path) כולה שהיא עוברת בתהליך תנועתה¹³.

- בְּשִׁבְתְּךָ בְּבֵיתְךָ וּבְלִכְתְּךָ בְּדַרְךָ, וּבְשִׁכְבְּךָ וּבְקוּמְךָ (דברים ו, ז).
- כִּי יְהוָה אֱלֹהֵינוּ, הוּא [...] וַיִּשְׁמְרֵנוּ בְּכָל-הַדָּרֶךְ אֲשֶׁר הֵלַכְנוּ בָּהּ (יהושע כד כז).

בעברית בת ימינו

בהגדרה הראשונה של הפועל הלך, במילונים לעברית החדשה, מוזכרות הרגליים האחראיות לתנועת ההליכה: הלך = עבר מרחק ברגל, עבר ברגל ממקום למקום (שויקה, 1997); הלך = צעד, עבר ברגליו ממקום למקום (אבן שושן, 2010); הלך = צעד ממקום למקום, התקדם ברגל (סיון-אגמון פרוכטמן, 2007).
דוגמאות:

- המכונית שלנו התקלקלה, ואימא הלכה לעבודה ברגל (שויקה, 1997, משמעות 1).
- מתחנת האוטובוס הלכנו ברגל רבע שעה עד שהגענו לתיאטרון (שויקה, 1997, משמעות 1).

2. הלך = יצא = עזב את מקום המוצא

במקרא

הלך מן: וּבְלִכְתֶּם מִמָּוֶן, כִּי-עֲזַבוּ אֹתוֹ בְּמַחְלָיִים רַבִּים (דברי הימים ב כד, כה).

נשים לב כי התקבולת לצירוף וּבְלִכְתֶּם מִמָּוֶן היא עֲזַבוּ אֹתוֹ. במילים אחרות, הלך = עזב.

הלך מאת / הלך מאצל: וַיֵּאמֶר לוֹ [...] הִנֵּה הוֹלֵךְ מֵאַתִּי [...] וַיֵּלֶךְ, מֵאַצְלוֹ (מלכים א כ, לו).

הלך מעל: וַיֵּאמֶר-לוֹ פְּרָעָה, לֵךְ מֵעָלַי; הֲשִׁמְרֵ לָךְ, אֶל-תִּסְּף רְאוֹת פָּנַי (שמות י, כח).

הלך מעם: פְּקֹדוּ-נָא וַיֵּאמֶר, מִי הֵלֵךְ מֵעַמָּנוּ (שמואל א יד, יז).

ההקשר מלמדנו שמדובר על עזיבת יונתן ונושא כליו את מחנה שאול כדי ללכת להרוג בפלשתים.

¹³ רעיון זה מעלים גם מילר-לירד (Miller & Laird, 1976: 405).

בעברית בת ימינו

הלך מ במשמעות יצא, עזב בנסיבות של דו שיח שבו אחד הדוברים מסלק את זולתו מעל פניו בכעס.

- לך מכאן! (= צא מפה!)

הפועל הלך במשמעות עזב את המקום עשוי להופיע גם ללא משלים המוצא, כפי שמדגים שטרן (1994) במשפט מלשון הדיבור: לפתע הוא קם והלך.

3. הלך = בא

במקרא

הלך אל: פה אמר בלק בן-צפור, אל-נא תמנע, מהלך אלי (במדבר כח, טז).

הלך לקראת: וילך עבדך והו לקראת אחאב (מלכים א יח, טז).

בעברית בת ימינו

בנסיבות של שאלה ותשובה עשוי הפועל הלך להיות מושלם במשלים היעד בלבד:

- איפה היית אתמול?

- הלכתי לרינה.

4. הפועל הלך בשימוש מטפורי

במקרא ובכתובות

הלך לסימון תנועה של בעלי חיים זוחלים:

- וכל הולך על-כפיו, בכל-החיה ההלכת על-ארבע טמאים הם (ויקרא יא, כז).

הלך לסימון תנועה של נוזלים:

- וילכו המים מן המוצא אל הברכה (כתובת נקבת השילוח שורות 4-5).

- וילכו המים, סביב למזבח (מלכים א יח, לה).

- כל-הנחלים הלכים אל-הים (קהלת א, ז).

הלך לסימון תנועה של כלי רכב:

- והושפט עשה אגיות תרשיש ללכת אפירה, לזהב ולא הלך (מלכים א כב, מט).

הלך לסימון תנועה של דוממים¹⁴:

- ותלך התבה, על-פני המים (בראשית ז, יח).

- בלכת, החיות, ילכו האופנים, אצלם (יחזקאל א, יט).

- אש לפניו תלך ותלהט סביב צריו (תהילים צט, ג).

- אחריו תלך הרב (ירמיהו מח, ב).

¹⁴ שטרנברג (1961 בציון משמעות א) צעוד ועבור ממקום למקום בהשאלה על תנועת הדוממים

בעברית בת ימינו

- במשחק השחמט **הרץ הולך** באלכסון (שויקה, 1977).
- משקף את הדרך החדשה **שאליה הולכת אור יהודה** (אתר עיריית אור יהודה, 2020).
- ישראל **הולכת לקראת** טרגדיה (חדשות 12, 26.9.2020).

הלך לסימון **תנועה בתחום הכלכלה** :

- לאחרונה **הלכו עסקיו מדחי אל דחי**, והוא עומד על סף פשיטת רגל (שויקה, 1977).
- **הכלכלה הולכת** למקומות לא טובים (עיתון גלובס, 25.11.2019).

5. הלך כמסמן תנועה בחשיבה

במקרא

- הלך אחרי: **פי כל האיש אשר הלך אחרי בעל פעור השמידו יתנה אלהיך מקרבך** (דברים ד, ג).
- הלך אחרי **צו**: **פי הואיל, הלך אחרי-צו** (מלכיו ושריו, דעת מקרא) (הושע ה, יא).

בעברית בת ימינו

- חברי הכת הזאת **הולכים אחרי הגורו** שלהם בעיניים עצומות (שויקה, 1997).

6. הלך כמסמן תנועה בהתנהלות של החיים

במקרא

הלך בצירופי יחס **בדרך, באורחות, בחוקות חיים** לסימון דרך מטפורית, התנהלות של אורח חיים, לדוגמה:

- ויָרְאוּ בְנֵי, אֶת-הַדֶּרֶךְ אֲשֶׁר הָלַךְ אִישׁ הָאֱלֹהִים, אֲשֶׁר-בָּא, מִיהוּדָה (מלכים א יג, יב).
- הלך **באורחות**: וְהָלְכוּ עִמָּיִם רַבִּים, וְאָמְרוּ לְכוּ וְנַעֲלֶה אֶל-הַר-יְהוָה [...] וְנִלְכֶה בְּאַרְחֹתָיו (ישעיהו ב, ג).
- הלך **בחוקות חיים**: **בְּחֻקֵי אֲבוֹתֵיכֶם אֶל-תֵּלְכוּ**, וְאֶת-מִשְׁפָּטֵיהֶם אֶל-תִּשְׁמְרוּ (יחזקאל כ, יח).
- הלך **בעצת**: אֲשֶׁרִי הָאִישׁ אֲשֶׁר **לא הלך בעצת רְשָׁעִים** (תהילים א, א).

בעברית בת ימינו

בדומה להשלמה של **הלך** בצירוף היחס **בדרך**, בעברית בת ימינו מושלם הפועל **הלך** בצירוף היחס **בתלם, בעקבות** המסמן דרך מטפורית, התנהלות מקצועית על פי המקובל ועל פי המוסכס.

- בניגוד לאחיו [...], **לא הלך בתלם** ובחר להיות שחקן (שויקה, 1997).
- מורנו הדגול החל במחקר זה, ואנחנו **הולכים בעקבותיו** (שויקה, 1977).

הלך (כינוי גוף) / הלך (כינוי גוף) + קלף במשמעות של הצלחה :

- לא הלך לה בבית הספר (שטרן, 1994).
- הולך לה קלף משוגע והיא מנצחת בכל משחק (שויקה, 1997).

הלך בין:

- לפיד ניסה ללכת [...] בין הטיפות למרות תמיכתו הבולטת יותר במזוז (רוזנטל, 2006).
 - הלך על¹⁵ + ביצים, קצות אצבעות – ההליכה הדורשת תנועה בזהירות רבה להביע התנהלות חברתית שקולה :
 - גם כאן בארץ עלינו ללכת על ביצים ולא לפגוע באותם השומרים מצוות (רוזנטל, 2006).
 - אני צריכה ללכת לידה על קצות האצבעות כדי לא להרגיז אותה (רוזנטל, 2006).
- הלך על + חבל דק – ההליכה עלולה לגרום להסתבכות :

- הוא הלך זמן רב על חבל דק, ולבסוף אכן הסתבך בפלילים (שויקה, 1997).

7. הלך כמסמן קיום

משמעות זו מנוסחת במילונים לעברית בת ימינו כ'קרה', 'התרחש', 'התחולל'.

- אל תשאל איזה צעקות הלכו שם (שויקה, 1997, משמעות 7) = היו צעקות.
- מה הולך פה? אתם השתגעתם להפוך ככה את כל החדר (שויקה, 1997, משמעות 7) = מה קורה פה.

במקרא נפוץ יותר השימוש של הלך במשמעות אי קיום.

- דֹר הַלֵךְ וְדֹר בָּא, וְהָאֶרֶץ לְעוֹלָם עֲמֻדָת (קהלת א, ד).
- כִּי-הַלֵךְ הָאָדָם אֶל-בֵּית עוֹלָמוֹ, וְסָבְבוּ בְשׁוּק הַסּוּפְדִים (קהלת יב, ה).

משמעות של אי קיום מובעת גם בעברית בת ימינו לא על בני אדם בלבד.

- שנה לאחר שנפטר אחיו, הלך גם הוא לעולמו¹⁶ (שויקה, 1997).
- הלכו איזה חמישים עד מאה מיליון דולר (רוזנטל, 2006) = התבזבז.
- הלכה היוקרה, הלך השם הטוב (רוזנטל, 2006) = נעלם.

¹⁵ במקרא אותה תבנית תחבירית משמשת להבעת תנועה פיזית בזכות האופי הסמנטי של השחקן הסמנטי - גדות של נהר. מעלה עליהם את מי הנהר... וְעָלָה, עַל-כָּל-אֶפְרַיִם, וְהָלַךְ, עַל-כָּל-גְּדוֹתָיו (ישעיהו ח, ז).

¹⁶ קרוב לוודאי שמבוסס על המקור המקראי בקהלת יב, ה

8. הלך כמסמן מודליות

כמונח בלשני, מקובל להגדיר את הרכיבים המודליים כרכיבים הקשורים **בהבעת דעתו או עמדתו של הדובר ביחס לתוכן** שהמשפט מביע או לסיטואציה שהתוכן מתאר (לבנת, תשע"א: 161).

בעברית בת ימינו המשמעות המודלית של **הלך** באה לידי ביטוי במסגרת תחבירית שבה הוא מושלם במילת היחס **על** + שם פעולה או שם עצם:

- "אנחנו **הולכים רק על ניצחון**", אמר המאמן לחברי הקבוצה (שויקה, 1997).
- **הלכתי על העסקה** המפוקפקת הזו רק בגללך (שויקה, 1997).
- אחרי הרבה התלבטויות **החלטנו ללכת על הבית** הזה בכל מחיר שהוא (שויקה, 1997).
- אורנה ואלה משינקין **החליטו ללכת על אוכל רחוב** (רוזנטל, 2006).

בשלוש הדוגמות מפרש שויקה (שם) את הצירוף **הלך על** – **התכוון לעשות (משהו מסוים)**.

9. הלך כמסמן אספקט

המושג "אספקט" מתייחס מבחינת תוכנו למהלך הזמן של ההתרחשות עצמה בלא תלות בזמן היקרותה. האספקט מתייחס לתחילתה של ההתרחשות, להימשכותה, להיפסקותה, לחזרתה וכיוצא בזה (טרומר, תשנ"ט).

במקרא נפוץ השימוש של הפועל **הלך** בצורת מקור מוחלט **הלוך** לשם הבעת משך¹⁷. אספקט **משך של פעולה** באה לידי ביטוי בתבנית התחבירית **מקור מוחלט (הלוך) ופועל מפורש/מקור**. מתוסף לתבנית הזו פועל תנועה לפנייה.

- וְשָׁבַע הַכֹּהֲנִים [...] **הִלְכִים הֶלְוֹךְ וְתָקְעוּ בַשּׁוֹפָרוֹת** (יהושע ו, ג).
- וַיִּשַׁע אַבְרָם, **הֶלְוֹךְ וְנִסְוַע הִנְגְּבָה** (בראשית יב, ט).

אספקט של **הימשכות מצב** באה לידי ביטוי בתבנית של **צורת בינוני (הולך) ושם תואר או צורת בינוני**.

- וַיְהִי קוֹל הַשֹּׁפָר **הוֹלֵךְ וְחֹזֵק מְאֹד** (שמות יט, יט).

בעברית בת ימינו

אספקט של הימשכות מצב – מצב בריאותו **הולך ומשתפר** מדי יום (שויקה, 1997).

אספקט של מצב הרגלי – גם בחורף דוד הולך בחולצה קצרה.

אספקט של התחלת פעולה – כל פעם שיש לו נזלת, ההיפוכונדר הזה בטוח שהוא **הולך למות** (שויקה, 1997).

¹⁷ במילון B.D.B יש הדגמה רחבה מאוד של השימוש הזה של המקור המוחלט **הלוך** לציון פעולה או תהליך סימולטניים, ובכך הוא מדגיש את המשך.

10. לך כמילת קריאה

בכתובות המוקדמות ובמקרא משמש הפועל **הלך** בצורת ציווי מוארך **לכה** או **לכו** כמילת קריאה לזירוז ביצוע פעולה כלשהי שהמזרז משתף עצמו בביצועה. הפעולה שיש לזרז מסומנת בפועל בעתיד בצורת גוף ראשון רבים.

- לְכֵה נִשְׁקֶה אֶת אֲבִינוּ יְיָ וְנִשְׁכָּבָה עִמּוֹ (בראשית יט, לב).
- לְכוּ נִרְנְנָה לִיהוָה נְרִיעָה לְצוֹר יִשְׁעֵנוּ (תהילים צה, א).

במקרא משמש הפועל **הלך** בצורת הציווי **לך (נא) + פועל בציווי**.

- לֵךְ אַחֲזֵה אֶת נְבִיָּה עַל יִשְׂרָאֵל (מצבת מישע, שורה 14).
- לֵךְ נָא רְאֵה אֶת שְׁלוֹם אַחֲיָד וְאֶת שְׁלוֹם הַצֶּאֱנָן (בראשית לו, יד).
- לֵךְ הַפְּרָה אֶת בְּרִיתְךָ (מלכים א טו, יט).
- לֵךְ אָמַר לָהֶם שׁוּבוּ לָכֶם לְאַהֲלֵיכֶם (דברים ה, כו).

לך ו+פועל בעבר

- לֵךְ וְאַסַּפְתָּ אֶת זִקְנֵי יִשְׂרָאֵל וְאַמְרַתְּ אֲלֵהֶם... (שמות ג, טז).
- לֵךְ וּמְשַׁכֶּת בְּהַר תְּבוֹר וְלִקְחֶתָּ עִמָּךְ עֲשָׂרַת אֲלָפִים (שופטים ד, ו).

בעברית בת ימינו

מילת קריאה לזירוז לפעולה – לך תקרא לאבא לבוא לעזור לי להוציא את הסלים מהמכוננית.
לך כמילת קריאה להבעת ריגושיות.

לך + פועל בגוף שני ציווי/עתידי

- יאללה אתה והצדקנות הפוריטנית שלך. לך חפש את החברים שלך (רוזנטל, 2006).
- מה רציתי מה? רק כסף לאיזה לאפה מדי פעם. לך תבנה מדינה (רוזנטל, 2006).

לך + שם פועל

- אין מקום לשאלות ואין לי גם תשובות. לך לטפס על עץ אחר (רוזנטל, 2006).
- בעברית בת ימינו, שימושים אלה משרתים כמילת קריאה להבעת זלזול, אכזבה ואי-ודאות.

מסקנות העולות מן השוואה

הפועל **הלך במקרא**, וגם בכתובות, כללי הרבה יותר מאשר "הלך" בעברית בת ימינו. במקרא הלך מסמן כל תנועה ממקום למקום לאו דווקא ברגליים, בעוד **שבעברית בת ימינו** – הרגליים אחראיות לתנועת ההליכה. שימוש כללי זה של **הלך** מקביל לשימוש הכללי של הפועל האנגלי GO לסימון כל סוג של תנועה, כשלצדו קיים באנגלית פועל מיוחד לסימון תנועה ברגליים – WALK.

במקרא – שימוש נרחב של **הלך** במשמעות עזיבת מקום המוצא במגוון השלמות תחביריות.

שימוש נרחב במספר תבניות תחביריות להבעת משך פעולה או מצב באמצעות המקור המוחלט **הלך**. מעניין לציין שמה שנשאר בעברית בת ימינו הוא הצירוף הכבול **הלך ושוב**.

בעברית בת ימינו – **הלך** כמביע קיום משמש רק בעברית בת ימינו. משמעות זו מנוסחת במילונים לעברית בת ימינו כ'קרה', 'התרחש', 'התחולל', ובנוסף משמש הפועל כמביע אי קיום, לא רק של בני אדם.

בעברית בת ימינו המשמעות המודלית של **הלך** באה לידי ביטוי במסגרת תחבירית שבה הוא מושלם במילת היחס על + שם פעולה או שם עצם.

בעברית המדוברת בת ימינו קיימת תוספת משמעות ריגושית בשימוש בפועל **הלך**.

ההבעה הסובייקטיבית-ריגושית היא מסימני ההיכר הבולטים של שפה חיה מדוברת. בנסיבות הקשר של שיח ספונטני, בדיבור פנים אל פנים, הדובר נוטה לבחור במילים טעונות רגשית יותר ממקבילותיהן הנייטרליות (טרומר 2016: 126).

הן במקרא והן בעברית בת ימינו שימוש מטפורי נרחב של **הלך** להבעת התנהלות חברתית.

סיכום המחקר

עבודת מחקר זו בחנה את מערך המשמעויות של הפועל **הלך** במקרא, בכתובות עבריות בנות זמנו ובעברית בת זמנו. לצד בדיקת היקרויות הפועל בכתובות העבריות המוקדמות, עיקר העבודה היה סיווג ההיקרויות המקראיות של הפועל בתנ"ך לתוך טבלה, אשר מבדילה בין שימושים תחביריים שונים של הפועל, וכיוצא מכך שימושים סמנטיים שונים. לאחר מכן נעשתה השוואה בין המשמעויות הסמנטיות המובנות מתוך הטבלה לבין המשמעויות הנחקרות על ידי ד"ר טרומר ועמיתיה למחקר קודם.

בכוונתנו להמשיך בתהליך המחקר ובכך למפות את כלל המשמעויות של פועל זה המופיעות בתנ"ך. כהמשך לכך, ברצוננו לחקור את הפועל בשפות שונות ולבדוק האם תזויות סמנטיות התרחשו גם בלעז.

ביבליוגרפיה

- א' אבן שושן, (1972). **המילון החדש**, ירושלים: הוצאת קרית ספר בע"מ.
- א' אבן שושן, (2000). **קונקורדנציה חדשה לתורה, נביאים וכתובים**, ירושלים: הוצאת המילון החדש בע"מ.
- א' בן-יהודה, (1980). **מלון הלשון העברית הישנה והחדשה**, ירושלים: הוצאת מקור בע"מ.

ד' סיון ומ' פרוכטמן, (1995). **מילון אריאל המקיף מילון עברי-עברי חדש מכל תקופות הלשון**, קריית גת: קוראים הוצאת ספרים בע"מ.

ז' לבנת, (תשע"א). **הרטוריקה של המאמר המדעי**, רמת גן: אוניברסיטת בר אילן.

י' שויקה, (1997). **רב מילים המילון השלם לעברית החדשה**, ישראל: סטימצקי, המרכז לטכנולוגיה חינוכית, ידיעות אחרונות וספרי חמד.

י' שטיינברג, (1961). **מלון התנ"ך**, תל אביב: הוצאת יזרעאל.

י' קיל, (תשנ"ט). **תנ"ך עם פירוש "דעת מקרא"**, ירושלים: מוסד הרב קוק.

מ"צ קדרי, (2007). **מילון העברית המקראית אוצר לשון המקרא מאל"ף עד תי"ו**, רמת גן: הוצאת אוניברסיטת בר-אילן.

פ' טרומר, (1983). **פועלי התנועה בעברית בת-ימינו – עיון סמנטי ותחבירי**, חיבור לשם קבלת התואר "דוקטור לפילוסופיה", תל אביב: אוניברסיטת תל-אביב.

פ' טרומר, (תשנ"ט). הפועל האוגדי במשפטים שמניים: ייחודו הסמנטי והפרגמטי על רקע מעמדו התחבירי. **בלשנות עברית**, 44: 33-47. רמת גן: אוניברסיטת בר אילן.

ר' רוזנטל, (2005). **מילון הסלנג המקיף**, ירושלים: כתר הוצאה לאור.

ש' מאנדלקרן, (תשל"ב). **קונקורדנצייה לתנ"ך**, ירושלים ותל אביב: הוצאת שוקן.

ש' אחיטוב, (1992). **אסופת כתובות עבריות**, ירושלים: מוסד ביאליק.

(תשל"ו). **מקראות גדולות**, ירושלים: הוצאת ספרים אשכול.

C.J. Fillmore, (1985). Frames and the Semantics of Understanding. **Quaderni di Semantica**, 6: 222-254.

G.A. Miller Jonson & P.N. Laird, (1976). **Language and Perception**, Cambridge: Cambridge University Press.

Johnson, C., Fillmore. C.J., Esther J. W., Ruppenhofer, J., Urban, M., Miriam R., Pertryck, I. & Collin F.B, (2001). **The Frame Net Project: Tools for lexicon building** (Mr.). International Computer Science Institute.

I. Koehler W. Boumgartner, (1958). **Lexicon in Veteris Testament Libros**, Leiden E.J.Brill.

S.R. Brown, C.A. Driver, F.B. Briggs, (1907). **Hebrew and English Lexicon of the Old Testament**, Oxford Clarendon Press.

W. Gesenius, (1910). **Hebrew Grammar**, Oxford at the Clarendon Press.

W. Gesenius, (1910). **Hebraisches und Aramaisches Handwörterbuch über das Alte Testament**, Leipzig Verlag Von F.C.W.Voge.



אאורקה: התגלית המדעית – תהליך או הארה פתאומית?

חניכה: אילה רוס, אולפנת חורב, ירושלים

מנחה-עמיתה: פרופ' ימימה בן מנחם, פילוסופיה, האוניברסיטה העברית, ירושלים



רקע

תגליות בכלל, ותגליות מדעיות בפרט, הן פלא. לא פעם פלא זה מתגלם בהרף עין של התגלות, הארה פתאומית – אאורקה¹⁸! מצאתי! – כמה טוב היה אילו הייתה בידינו נוסחה המסבירה את התרחשות הפלא הזה, ואולם נוסחה כזו המסבירה את תהליך הגילוי עדיין לא נמצאה וייתכן מאוד שכלל איננה נמצא. רגעי האאורקה אינם רק שלב אחרון בנתיב סלול, הם מהווים קפיצה מחשבתית בלתי צפויה, המפתיעה לעיתים גם את המגלים עצמם.

בעבודה זו אני מתחקה אחרי פלא הגילוי המדעי באמצעות שילוב דיון תאורטי המסביר מדוע נחוצה בכלל קפיצה, ודיון אמפירי-היסטורי, הבוחן מספר סיפורי תגלית ומצביע על ההבדלים שביניהם ואגב כך, על הייחוד שבכל אחד מהם. בחקירת מקרי הבוחן הללו ארצה להאיר את יחסי הגומלין המורכבים בין התהליך המתמשך של החיפוש אחר פתרון, תהליך שעשוי להיות מתסכל בחוסר הצלחתו, לבין רגע הגילוי, המאופיין על ידי בהירות וחווית סיפוק עילאית. נראה שבחלק מן המקרים אפשר לאתר זרז חיצוני שאפשר את המעבר מן החיפוש לגילוי, בעוד שבאחרים המעבר נשאר עלום. עם זאת, גם במקרים מן הסוג השני אציע מאפיינים מסוימים של דרך המחשבה הייחודית של כל אחד/ת מן המדענים הנדונים, מאפיינים שלטענתי היו חיוניים לגילוי שבו מדובר.

מטרת המחקר

הבנת תהליך הגילוי המדעי, ובפרט – הבנת המאפיינים המאפשרים את רגעי האאורקה.

¹⁸ אאורקה, ביוונית = מצאתי. אמרתו של ארכימדס המיוחסת לו לאחר גילוי חוק הציפה שעל שמו. הביטוי משמש בהשאלה לציון גילוי חשוב או תובנה חשובה ומפתיעה.

תהליך המחקר

העבודה כללה שני סוגי עיון. בחלק התאורטי חילצתי מתוך הספרות העוסקת בפילוסופיה של המדע תשובה לשאלה מדוע הגילוי המדעי אינו הכללה פשוטה מן הנתונים אלא דורש **קפיצה מחשבתית**. בחלק האמפירי-היסטורי חקרתי את תהליכי הגילוי של מדענים אחדים על פי עדויותיהם, ולאור הספרות ההיסטורית על אודותיהם, והסקתי מחקירה זו מסקנות אחדות לגבי השאלה המרכזית בדבר היחסים בין תהליך החיפוש הממושך ורגעי הגילוי.

מדוע נחוצה קפיצה מחשבתית?

לא פעם אנחנו מדמים לעצמנו את ההליך המדעי כהליך של הכללה – התצפיות והנתונים האמפיריים מוכללים על ידי המדענים ומוליכים אותם אל התאוריה. ואולם, דימוי זה שגוי ולוקה בכשל לוגי – ברוב המקרים של המקרים התאוריה חורגת מן הנתונים ואינה נובעת מהם. זו בעיה פילוסופית הידועה **כבעיית האינדוקציה**, שעליה עמדו פילוסופים רבים, והבולט ביניהם הוא דייוויד הום (David Hume 1776-1711). היסקים אינדוקטיביים, שבהם ההנחות הן מקרים פרטיים והמסקנה היא טענה כללית, אינם תקפים. בהיסק לוגי תיקוף המסקנה כלול בהנחות, כלומר, ההנחות כוללות יותר מאשר מסקנות. לעומת זאת, בטיעון האינדוקטיבי המסקנה שרוצים להגיע אליה כללית יותר מן ההנחות ולכן איננה נובעת מהן. אם מדובר במדע, ההנחות הם נתונים אמפיריים שמספרם סופי והמסקנה היא חוק כללי או תאוריה החלים על אין ספור מקרים. הם אינם נובעים מן ההנחות אלא לכל היותר מתיישבים אתן ונתמכים על ידן. יתר על כן, אותו מאגר נתונים מתיישב תמיד עם תאוריות שונות. זהו מצב שנקרא תת-היקבעות והוא דומה לתת-היקבעות במתמטיקה – מצב שבו יש לנו פחות מדי משוואות כדי לפתור אותן עבור כל הנעלמים. בשל בעיית האינדוקציה ובעיית תת-ההיקבעות של התאוריה, גילוי התאוריה כרוך בקפיצה מחשבתית.

מקרי בוחן

לאור התובנות שהגעתי אליהן בחלק התאורטי, בחנתי את תהליכי הגילוי של מדענים אחדים המוצגים בפרקים שלהלן:

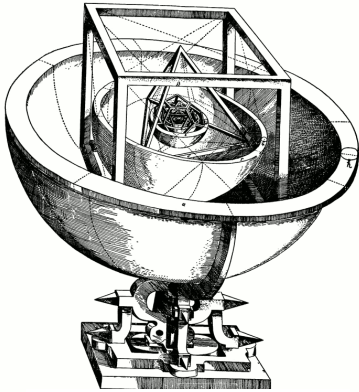
פרק 1 – יוהנס קפלר (Johannes Kepler, 1630-1571), ניסח את שלושת חוקי קפלר, המתארים את תנועת כוכבי הלכת במערכת השמש. קפלר תמך בתאוריה ההליוצנטרית של קופרניקוס (Copernicus), שהתפרסמה כ-30 שנה לפני הולדתו, ולפיה השמש היא מרכז מערכת השמש, וכדור הארץ מסתובב סביבה, כמו כל שאר כוכבי הלכת, במסלולים מעגליים. באסטרונומיה הקלסית היה לתנועה המעגלית במהירות קבועה מעמד בלתי מעורער ומעמד זה לא נפגע בתורתו של קופרניקוס. חוקי קפלר אתגרו לראשונה את התמונה הקלסית ובסופו של דבר מוטטו אותה. מאחר שתמונה זו הייתה כה מושרשת, קפלר נזקק לשנים ארוכות של עבודה סיוזיפית עד שהגיע ברגע אחד מופלא להכרה שהיא מוטעית.



יוהנס קפלר (1630-1571)

בשלב מסויים בחייו הגיע קפלר לפראג לעבוד על ניתוח מתמטי של תצפיות של אסטרונום מהמובילים בתקופתו – טיכו ברהה (Brahe Tycho), שנפטר כמה שנים לאחר מכן. קפלר המשיך להתבסס על המדידות

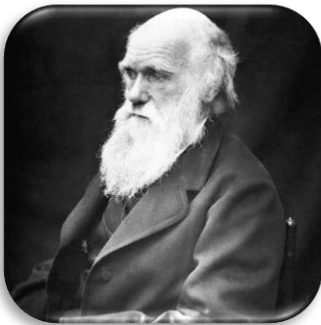
שהותיר אחריו, והתמקד באלו שעסקו במסלול של מאדים. אחרי שש שנים של ניסיונות לחשב את המסלול המדויק, הגיע קפלר למסקנה שמאדים נע במסלול אליפטי ולא מעגלי כמו שטען קופרניקוס.



יוהנס קפלר: שרטוט מודל מערכת השמש הראשוני

ההארה באה לאחר סדרה של כישלונות וטעויות שתעד קפלר ביושר רב. בהמשך הוא הצליח להוכיח שגם שאר מסלולי כוכבי הלכת במערכת השמש הם אליפטיים – זהו **החוק הראשון** מתוך שלושת החוקים שניסח. **החוק השני**, הסתמך על כך שכוכבי הלכת נעים במהירות שונה בקטעי התנועה השונים שלהם סביב השמש, ונגע ליחס שבין מרחק כוכב לכת מהשמש בנקודה כלשהי במסלולו סביב השמש, לבין מהירות התנועה של הכוכב. שני החוקים התפרסמו בספר שכתב כמה שנים לאחר התגלית. את **החוק השלישי** ניסח קפלר כעשר שנים מאוחר יותר והוא עסק בקשר שבין המרחק של מסלול של כוכב לכת מהשמש לבין המהירות שלו והזמן שלוקח לו להקיף את השמש. שלושת חוקי קפלר היו את התשתית למכניקה הניוטונית ונחשבים לפסגת יצירתו ולאחת הפסגות המדעיות בכלל. באופן מפתיע, לקפלר הייתה הערכה שונה.

הפרק עוקב אחרי דרכו הפתלתלה של קפלר אל גילוייו, על רגעי הנפילה ורגעי ההתעלות שבהם, ואגב כך, חותר להבין את הקושי שניצב בפניו בן התקופה, גם אם הוא מתמטיקאי גאוני כקפלר, כשהוא מנסה לקעקע את יסודות תפישת העולם המושרשת.



צ'ארלס דרווין (1809-1882)

פרק 2 – צ'ארלס דרווין (Charles Darwin, 1809-1882), ניסח את תורת האבולוציה בדרך ה**בריירה הטבעית**. בשנת 1831 יצא דרווין למסע סביב העולם על אניית החקר "ביגל", ובמהלך המסע גילה ממצאים מסוימים שגרמו לו לחשוב שהמינים הביולוגיים משתנים בהדרגתיות, ושמינים שונים הם בעלי אבות קדומים משותפים שמהם התפצלו.

דרווין, כמו רבים מחוקרי הטבע בני דורו, הבין שהמינים הביולוגיים משתנים עם הזמן בניגוד למה שחשבו בעבר. האתגר שעמד בפניו היה להבין כיצד זה קורה

– מה המנגנון שגורם למין מסויים להשתנות, ובאיזה אופן הוא משתנה. גם לו נדרשו כמה שנים של מחשבה מאומצת כדי להגיע אל הרעיון המרכזי של תורתו – ה**בריירה הטבעית**. ואולם, על סמך עדויות שהשאיר, ובניגוד לקפלר, ניתן לאתר גם גורמים חיצוניים שקידמו אותו אל שלב ניסוח התאוריה. כשחזר מהמסע,

קרא ולמד תאוריות רבות ומגוונות – תיאולוגיות, מדעיות, פילוסופיות וכלכליות – שבחלקן היו טמונים רעיונות פורצי דרך. אחת מהן פורסמה על ידי צ'רלס לייל (Charles Lyell) בספרו "עקרונות הגאולוגיה" וממנה השתמע שכדור הארץ קיים תקופה ארוכה בהרבה ממה שנטען במדע במאה ה-19 – תקופה שבה שינויים איטיים והדרגתיים במינים ביולוגיים הם אפשריים. ואולם, כפי שמראה הפרק המוקדש לדרווין, הקפיצה המכרעת במחשבתו חלה לאחר קריאה בספרו של תומס מלתוס (Malthus Thomas) "המסה על עקרון האוכלוסייה", שעל פיו גידול יתר של המין האנושי גורם למחסור במשאבי טבע ולתחרות עליהם, שבסופה הקבוצות החזקות מנצחות ושורדות. דרווין שאב השראה מהדפוס שתיאר מלתוס על



דוגמה לאבולוציה: עשים מסוג מודד מפולפל בצבעים שונים, כתוצאה מהשינוי הסביבתי שגרמה המהפכה התעשייתית באנגליה

מאבק הישרדותי, והגיע למסקנה שהוא מתקיים בכל עולם הטבע – ייצורים המתאימים לסביבה המשתנה ומצליחים להתרבות הם אלו ששורדים, וכך תכונות מסוימות מועברות הלאה לדור הבא ואחרות נכחדות. מנגנון זה הוא כינה **ברירה טבעית** – בהשראת הברירה המלאכותית שבני אדם עושים בבעלי חיים או בצמחים כדי שיתאימו לצרכיהם.

הפרק דן גם בתפקידה של אנלוגיה בתהליך הגילוי, נושא החוזר בהמשך בפרק על בוהר. בניגוד לתפישה המקובלת המדגישה את תפקידה של האנלוגיה ביצירת קשר של דמיון בין תחומים, התפישה העולה מן העבודה היא שהדמיון הוא אמנם נקודת מוצא, אך עיקר תרומתה של האנלוגיה בהמשך היא חשיפת **ההבדל** בין התחום הישן לחדש. הבדל זה הוא שמבטא את המהפכה המחשבתית שביסוד הגילוי הנדון.



גיימס ווטסון (1928)

פרק 3 – גיימס ווטסון (1928), פרנסיס קריק ורוזלינד פרנקלין,

(Rosalind Franklin 1958-1920, James Watson, Francis Crick 2004-1916)

גילו את מבנה ה-DNA. ווטסון וקריק עבדו יחד באוניברסיטת קיימברידג', ופרנקלין עבדה בקינגס קולג' שבלונדון. שלושתם פעלו באמצע המאה ה-20, וניסו לפצח את אותה הבעיה – לגלות את המבנה הכימי של מולקולת ה-DNA על סמך ההשערה שבה נמצא החומר התורשתי שקובע את תכונותיהם של ייצורים חיים (טרם היה קונצנזוס לגבי ההשערה, שכן היו כאלה שסברו שהמולקולות החשובות

בתהליך התורשה הן חלבונים). פרנקלין התבססה על עבודתו של מוריס וילקינס

(Maurice Wilkins), עמית המחקר שלה, שבין השאר העלה את הרעיון

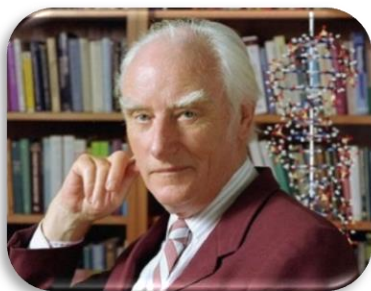
שהמולקולה היא בצורת סליל. המחקר של פרנקלין התקדם, והיא גילתה

שלמולקולת ה-DNA יש שני מצבים – 'יבש' ו'רטוב', ובאמצעות שימוש

בטכנולוגיית קרני רנטגן היא הצליחה להפיק תמונות באיכות גבוהה של שני

המצבים. ווטסון וקריק ניסו לבנות מודל פיזי של ה-DNA על סמך הנתונים

המעטים שהיו בידם, אך נכשלו בכך.



פרנסיס קריק (1916-2004)

בשנת 1951 התקיים בקינגס קולג' סמינר שעסק בחומצות הגרעין, ופרנקלין הציגה

את ממצאיה לגבי שני מצבי ה-DNA ונתונים נוספים שגילתה. ווטסון השתתף

בהרצאה, אך ככל הנראה לא הבין את הנאמר. הוא חזר לקיימברידג' במחשבה שיש

לו מספיק ידע כדי לבנות את המודל הנכון יחד עם קריק, אך כשהציגו בפני פרנקלין

את הדגם השגוי שיצרו בעקבות ההרצאה, היא אמרה להם שהוא בלתי אפשרי כיוון

שסתר חלק מממצאיה. העבודה של ווטסון וקריק נתקעה, ואילו פרנקלין המשיכה,

וב-1952 הצליחה להפיק תמונה ברורה באופן מיוחד של אחד משני המופעים של

מולקולת ה-DNA. בדיעבד התברר שהוא היה משמעותי מאוד – הוא הכיל נתונים

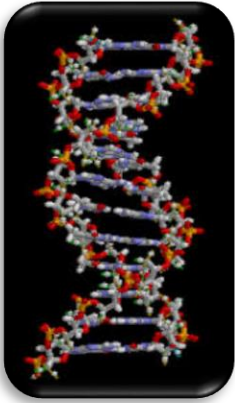
קריטיים להבנת מבנה המולקולה, אבל היא לא התעמקה בו והתמקדה בניסיון

להבין את הצורה השנייה של ה-DNA.



רוזלינד פרנקלין (1920-1958)

כאן אנו מגיעים לרגע **האאורקה** שהפעם מעורבת בו שאלה אתית יסודית שמשכה תשומת לב רבה בעשורים האחרונים. מוריס וילקינס, עמית המחקר שפרנקלין עבדה איתו, העביר את צילום הרנטגן הגורלי לווטסון ללא ידיעתה של פרנקלין. הפעם, בניגוד לפעם הקודמת, ווטסון הבין מיד את חשיבות המידע החדש שעלה



מודל ה-DNA הסופי

מהתמונה, ובהתבסס עליו בנה יחד עם קריק דגם חדש של DNA שהיווה את המודל הנכון ועליו זכו בפרס נובל. פרנקלין לא זכתה לכך, היא נפטרה קודם לכן, אך גם אילו הייתה בחיים, ספק אם היו מצרפים אותה לזוכים, שכן תרומתה המכרעת לא זכתה להכרה מספקת במאמרם של ווטסון וקריק. המחקר ההיסטורי והתודעה הפמיניסטית הביאו לשינוי, וכיום המגמה היא לעשות צדק לזכרה ולתרומתה של פרנקלין.

במקרה זה רגע ה**אאורקה** חד מאוד ומתועד בבירור. הוא מבוסס על אינפורמציה חיצונית שהגיעה בדרך שאפשר לפקפק בכשרותה, וסיפקה ללא כל ספק את המפתח לפתרון הבעיה. הפרק דן בשלבים השונים של הגילוי ובחשיבות ה**עיתוי** של רגע המפגש עם האינפורמציה החיצונית.



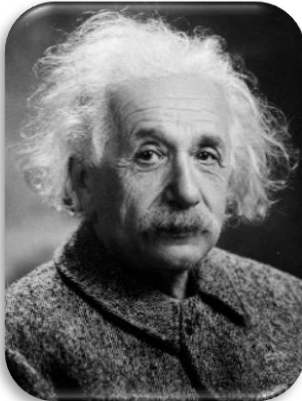
נילס בוהר (1885-1962)

פרק 4 – נילס בוהר (Niels Bohr 1962-1885) פיתח את מודל האטום. הרעיון שלפיו החומר בנוי מיחידות בסיסיות שאינן ניתנות לחלוקה – אטומים – נולד עוד ביוון העתיקה, אך התקבל על ידי המדע רק בתחילת המאה ה-19 בעקבות תגליות חדשות בכימיה. מאז הוצעו מודלים נוספים שנועדו להסביר כיצד נראים ומתנהגים חלקיקים בסיסיים אלו. במאה ה-20, בתקופת עבודתו של בוהר כמדען, התקבל המודל של ארנסט רתרפורד (Ernest Rutherford), שכונה "**המודל הפלנטרי**", ולפיו האלקטרונים מסתובבים סביב גרעין האטום כמו כוכבי הלכת סביב השמש, ומוחזקים במסלוליהם על ידי הכוח החשמלי (כיוון שהמטען שלהם שלילי ושל גרעין האטום חיובי) כמו שכוכבי הלכת נעים בהשפעת כוח הכבידה. בוהר שעבד באוניברסיטת מנצ'סטר, ניסה לפתח את המודל של רתרפורד וזיהה בו שתי בעיות:

הראשונה הייתה שגוף טעון חשמלית, כמו האלקטרונים שמטענם שלילי, שנע בתנועה מואצת, כמו תנועה המעגלית סביב גרעין האטום, אמור לאבד אנרגיה. האלקטרונים היו אמורים לנוע קרוב יותר לגרעין האטום, עד שיתנגשו בו – וזה לא מה שקורה בפועל. הבעיה השנייה הייתה שהמודל של רתרפורד לא הסביר את ספקטרום הפליטה של אטומים מסוגים שונים ולכן לא היה מסוגל לחזות מה יהיה ספקטרום הפליטה של כל חומר. הפתרון שהציע בוהר לשתי הבעיות הללו היה מודל מהפכני, שהושפע ממכניקת הקוונטים (שפיתחו פלאנק (Planck) ואינשטיין (Einstein) שנים ספורות קודם לכן), אך גם השפיע עליה השפעה מכרעת. לפי בוהר, האלקטרונים אינם יכולים לנוע בכל מקום סביב גרעין האטום אלא רק במסלולים מסוימים ומוגדרים. לטענתו, מסלולים מיוחדים אלה הם יציבים והאלקטרונים הנעים בהם אינם מאבדים אנרגיה ואינם מתנגשים בגרעין. השערה זו סותרת לחלוטין את התורה האלקטרומגנטית הקלאסית, אך היא מסבירה את יציבות האטומים. בנוסף, המודל של בוהר מסביר את ספקטרום הפליטה שמתקבל מאטומים שונים – לאלקטרונים במסלולים שונים יש אנרגיה שונה, וכמות הקרינה שנפלטת מהאטום בזמן שהוא מעורר אנרגטית היא תוצאת המעברים המוגדרים של אלקטרונים בין המסלולים היציבים. מכיוון שלכל יסוד יש מבנה אופייני של מסלולי האלקטרונים, ספקטרום הפליטה מאפיין את היסוד באופן ייחודי.

תהליך העבודה של בוהר על המודל שלו היה מהיר יחסית ולא איתרנו בו את רגע הגילוי. ואולם **הקפיצה המחשבתית** הנועזת ביסוד מודל האטום שלו גלויה לעין. ראשית, אנו רואים איך האנלוגיה שבבסיס המודל – האנלוגיה למערכת השמש – עוברת תפנית מהדגשת הדמיון להדגשת ההבדל היסודי בין התורה הקלאסית לתורה קוונטית. שנית, שמתני לב לתכונה שמאפיינת את חשיבתו של בוהר בגילוי זה וגם בגילויים עתידיים – נכונותו להכיל נקודות מבט שונות ואף סותרות. רק מי שמוכן לחשוב בצורה נועזת, על סף סתירה, יכול

להגות את מושג המסלול היציב שבו האלקטרון מציית לחוקים קלאסיים ובו בזמן מפר אותם הפרה יסודית. בהמשך, ניסח בוהר את עקרון הקומפלמנטריות שמרחיב את אפשרות המחשבה הדואלית לתורת הקוונטים בכלל. הפרק מתאר את המודל של בוהר והשלכותיו ומנסה לעמוד על מקורות אפשריים לצורת המחשבה הפרדוקסלית שלו.



אלברט איינשטיין (1879-1955)

פרק 5 – אלברט איינשטיין (Albert Einstein 1879-1955) פיתח את תורת היחסות הפרטית והכללית. פריצות הדרך שלו הותנעו לפחות בשני מקרים חשובים על ידי דימוי או תמונה, והן מהוות דוגמאות מובהקות לרגעי אאורקה. התמונה של אדם רוכב על קרן אור הופיעה לנגד עיניו של איינשטיין בצעירותו ועוררה בו את השאלה מה היא מהירות האור הנמדדת על ידי הרוכב הצמוד לקרן האור. התשובה לשאלה זו נתנה על ידיו בתורת היחסות הפרטית.

בעבודה זו התרכזתי דווקא בגילוי תורת היחסות הכללית. גם כאן הופיעה לנגד עיניו תמונה של אדם נופל בנפילה חופשית. לימים, הוא תאר תמונה זו והמחשבה שבאה בעקבותיה כמחשבה המאושרת של חייו! התמונה העלתה שאלה – מה מרגיש האדם הנופל? האם הוא חש בכוח הכבידה שכביכול פועל עליו? איינשטיין השיב בשלילה – האדם אינו חש בכוח הכבידה! והמשיך לטוות את חוט המחשבה המאושרת – הכבידה אנלוגית להתמדה, ויותר מכך, הכבידה בעצם איננה כוח!



אדם בנפילה חופשית בהשפעת כוח הגרביטציה.

דימוי האדם הנופל הופיע בשנת 1907. מה הייתה הבעיה שהעסיקה את איינשטיין בתקופה שקדמה להופעת הדימוי, ומדוע היוותה התמונה צעד כה חשוב בפתרון הבעיה? איינשטיין פרסם את תורת היחסות הפרטית בשנת 1905 והיא שינתה את תפישתנו את החלל והזמן אך לא עסקה בכוח הכבידה. הצעד הבא מבחינתו היה הרחבת התורה הפרטית כך שתחול גם על כוח הכבידה. היה ברור לו שללא הרחבה כזאת, תורתו אינה יכולה להשלים את המהפכה היחסותית ולהחליף את הפיסיקה הניוטונית. ברור, אם כן, שהמחשבה על הכבידה הייתה בתודעתו ללא הרף לפחות בשנתיים שקדמו להופעת הדימוי.

היה גם רקע עמוק יותר לעיסוק בבעיה זו. בתורתו של ניוטון היו למעשה שני מושגים של מסה – **מסת ההתמדה ומסת הכבידה**. ניוטון הבחין בהבדל המושגי ביניהן אך טען, בצדק, שמבחינה מתמטית שני סוגי המסה הם בעלי אותו גודל. לניוטון לא היה הסבר לשוויון זה והוא ראה בו עובדה מקרית, או אפילו נתון שמשקף את רצון האל וחסדו ונמצא לפיכך מחוץ לתחום המדע. איינשטיין לא יכול היה לקבל את רעיון העובדה המקרית. לדעתו, אם שני סוגי המסה מתלכדים מבחינת גודלם המתמטי, חייב להיות ביניהם קשר **מהותי**. ואכן הצעד הבא שלו היה ביסוס הקשר הזה באמצעות הטענה שהתמדה וכבידה הן פנים שונות של אותו מטבע. ועוד, הקשר בין התמדה וכבידה מכתוב גאומטריה החדשה למרחב זמן.

הפרק מראה כיצד השתלשלו רעיונותיו מרחיקי הלכת של איינשטיין מן התמונה שראה בעיני רוחו, אך גם שהדימוי הופיע בעקבות תהליך מחשבה מאומץ שהחיה חידה עמוקה ובלתי פתורה במכניקה של ניוטון.

כל אחד מן המדענים שעבודתם תוארה בפרקים הללו עבר תהליך מאומץ של חיפוש, אך כל אחד מהם גם חווה את חווית הגילוי כשהפתרון הופיע בבהירות וחלקי הפזל הסתדרו. בכל אחד מן המקרים ניסיתי לעמוד על המעבר בין שני המרכיבים של תהליך הגילוי. התברר לי שמצד אחד הקפיצה אל התגלית לא הייתה

מתרחשת ללא התהליך המתמשך של חיפוש, ומצד שני, רגעי הארה פתאומית – **רגעי אאורקה** – מהווים סיום טיפוסי לתהליך הממושך של החיפוש. הראיתי שתהליכי הגילוי שונים זה מזה ומשקפים את הייחודיות של האישיות החוקרת. עמדתי על תפקידם של זרזים שונים לגילוי – אנלוגיות, דימויים ויזואליים, פריט אינפורמציה חיצוני שהתגלה ברגע מסויים, היכולת להכיל עמדות סותרות ולשלב אותן לתמונה אחת. לבסוף, הראיתי שלעיתוי של הופעת הזרז יש חשיבות מכרעת.

מסקנות ומחשבות לעתיד

לעבודה כמה מסקנות מעניינות:

✚ המסקנה המובהקת הראשונה היא שתהליכי הגילוי ורגעי **האאורקה** נבדלים מאוד זה מזה. המדענים השונים מביאים אל הבעיה הרבה יותר מאשר את הנתונים – הם מביאים את אישיותם הייחודית, את אמונות הרקע שלהם, ואת הדמיון היצירתי ששונה מאדם לאדם. מסקנה זו מתיישבת יפה עם התובנות של החלק התאורטי המסביר מדוע אין נוסחה אחידה לגילוי מדעי.

✚ המסקנה השנייה היא שרגעי **האאורקה** אינם מופיעים יש מאין כפי שנוטים לפעמים לחשוב, אלא מייצגים הבשלה של תהליך ארוך ומאומץ שבחלקו התרחש באופן לא מודע. לעתים אף קורה שהמדען או המדענית נוטשים את העבודה על הבעיה מתוך תסכול וייאוש, ואז לאחר זמן, ברגע שלכאורה לא נתנו דעתם על הבעיה, הפתרון מופיע.

✚ העיתוי של הגילוי אינו מקרי. מאחר שלפי המסקנה הקודמת לא מדובר ברגע אחד של גילוי אלא ברגע שהוא אינטגרציה של תהליך שלם, ברור מדוע יש חשיבות לעיתוי. העבודה מראה שאינפורמציה חיצונית (שמתבררת לבסוף כרלוונטית) יכולה להיות חסרת ערך לחלוטין ברגע מסויים, וברגע אחר – לספק את המפתח שמחפשים אחריו. הסיבה לכך היא שכל עוד תהליך החיפוש לא הבשיל, האינפורמציה החיצונית, רלוונטית ככל שתהיה, אינה מתפענחת על ידי החוקרים ככזו ואינה זוכה לתשומת לבם גם אם הייתה בשדה הראיה שלהם זה מכבר.

אשמח להרחיב את מאגר מקרי הבוחן ולאתר מאפיינים נוספים של דרכי הגילוי היצירתיות של מדענים. משימה מאתגרת יותר תהיה לחקור את שלב המחשבה הלא-מודעת (בשינה, תוך עבודה על בעייה אחרת, וכדו'). לזה ידרשו כמובן כלים מתחום חקר המוח שאין בידי כרגע אך אני תקווה לרכוש אותם בעתיד.

סיכום

בחרתי לעסוק בחידה קשה ובלתי פתורה – טיבה של **ההארה הרגעית** – אאורקה – שמדענים חווים לפעמים. מלבד דיווחים אנקדוטליים של מי שחוו הארה כזו, אין אודותיה כמעט מידע בספרות.

לא יצאתי לדרך מתוך אשליה שביכולתי לפתור את החידה, אך קיוויתי להבין טוב יותר כיצד אירועי אאורקה מתרחשים, האם יש להם מאפיינים משותפים, ומה מקומם בתוך תהליכים ממושכים יותר של עבודה מדעית. המסקנות שהגעתי אליהן, ושאותן פרטתי לעיל, מעידות שתקוותי לא הייתה תקוות שווא.

ביבליוגרפיה – פריטים נבחרים

אוורס, כ', טגארט, ר', סטאר, ל', סטאר, ס'. (2015) [2013] *ביולוגיה – האחידות והמגוון של החיים*, תרגום מיכל גולן, רות לומניצר, עדי מרקוזה-הס, סוזן שפירא, רעננה: הוצאת האוניברסיטה הפתוחה.

איינשטיין, א'. (2015) [1916] *על תורת היחסות הפרטית והכללית*, תרגום יכין אונא, ירושלים: הוצאת מאגנס.

בראון, ג'. (2009) [2006] *מוצא המינים של דרווין*, תרגום ברוריה בן-ברוך, תל אביב: הוצאת משכל.

ברלואו, נ'. (2008) [1958] *אוטוביוגרפיה – צ'רלס דרווין*, תרגום יקי מנשנפרוינד, (תל אביב: הוצאת רסלינג).

גולד, ס'. (1990) [1980] *בוהן הפנדה*, תרגום עמוס כרמל, תל אביב: הוצאת דביר, פרק שני.

ווטסון, ג'. (2005) [2001] *הסליל הכפול*, תרגום איתי בן פורת, הוצאת ידיעות ספרי).

מדוקס, ב'. (2009) [2002] *רוזלינד פרנקלין: הגברת האפלה של הדנ"א*, תרגום עדי מרקוזה-הס, תל אביב: ספרי עליית הגג.

קסטלר, א'. (1970) [1959] *יוהאנס קפלר: האיש ופעלו*, תרגום חיים בן עמרם, תל אביב: דביר ועם עובד.

Duhem, P. (1954) [1906] *The Aim and Structure of Physical Theory* (Princeton, NJ: Princeton University Press) part I chapter 6.

Einstein, A. (1997) [1916] "The Foundations of the General Theory of Relativity" in: *The Collected Papers of Albert Einstein* vol. 7, doc. 30, edited by D. Kormos Buchwald et al., 147-200. (Princeton, NJ: Princeton University Press).

Einstein, A. (1922) *The Meaning of Relativity* (Princeton, NJ: Princeton University Press) in: *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol. 7, doc. 71, edited by D. Kormos Buchwald et al., 496-577. (Princeton, NJ: Princeton University Press).

Heilbron, J. (2015) "My courage is ablaze so wildly' Niels Bohr en route to his quantum atom" in: *one hundred years of the Bohr atom: proceedings from a conference the royal Danish academy of science and letters*.

Koestler, A. (1969) [1964] *the Act of Creation* (London: Pan Books press).

Quine, W.V. (1953) [1951] "Two Dogmas of Empiricism" in: *From a Logical Point of View* (Cambridge MA: Harvard University Press) pp. 20-46

Johannes Kepler in: *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (2015) [2011].

Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics in: *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (2002).



אומנות מוזיקה קולנוע

דעיכת הפראיות של חיות בשבי – תערוכה אומנות חזותית

חניכה: מאיה גונן, הרצליה, תיכון אלון, רמת השרון

מנחה-עמיתה: גב' ניבי אלרואי, תל אביב



הקדמה – סיפור האהבה שלי עם אומנות חזותית



קרנף בנוף עירוני, דיו, מאיה גונן

התאהבתי באומנות בגיל צעיר מאוד, והיא היוותה חלק משמעותי מחיי מאז שאני זוכרת את עצמי. תנועת העיפרון על הדף שחררה את המחשבות שלי והיוותה את הבריחה האולטימטיבית מהמציאות. השקיעה העמוקה בתוך מבע הדמות וחיבור הצבעים יחדיו העניקו לי שקט נפשי שאין כמותו.

בעיניי, האומנות החזותית מצליחה לדבר אל הנפש האנושית באופן שונה מכל תחום אחר. לא פעם אנשים נתקלים ביצירה ומרגישים שהיא מניעה בליבם משהו שאינם מסוגלים להביע במילים. האומנות החזותית מדברת אל חלק עמוק בלב, שלא ניתן להסביר או למדוד, ומסוגלת לשנות תפיסות עולם.

הצגת התזה

השנה, בזכות תוכנית מנחים-עמיתים, יצא לי להתנסות בצד אחר של האומנות – במקום להסתכל עליה כבריחה מהמציאות, יכולתי להשתמש בה כדי לדבר על המציאות. בחרתי לדבר על נושא שמאוד קרוב אל ליבי – דעיכת הפראיות של חיות הבר בגני חיות.

הטכניקה שבה בחרתי לעבוד היא **דיו על נייר בטכניקה רטובה בהשראת ציור מזרח אסייתי** – סיני, יפני וקוריאני.

רקע על השפה האומנותית

המשמעות התרבותית ומקורם של ציורי דיו

לציורי הדיו חלק משמעותי ומכובד באומנות המזרחית, ובעיקר באומנות הסינית. סגנון ציור זה הגיע ליפן דרך קוריאה וקיבל מקום של כבוד גם באומנות היפנית. הוא מחולק לסגנונות שונים אשר התפתחו עם הזמן, אך היכולת המוערכת ביותר היא להעביר בפשטות את תמצית החיים הפנימיים של מושא הציור.

טכניקת הציור הרטובה בדיו ובמים, שנקראת בסינית **suibok**, פותחה בסין בתקופת טאנג (618-907) ומשם

הגיעה ליפן. הציורים, שתאמו את המסורת הקלסית, היו בתחילה בעיקר ציורי נוף, וכללו הרים מתנשאים, צוקים ומפלי מים. רק מעט ציירים יפניים ביקרו בסין באותה תקופה, אך הנופים המדויקים והעדינים משכו אותם עמוק אל תוך הציורים העדינים הללו. לציורי הנופים נוספו גם ציורים המתארים בעלי חיים, ציפורים, פרחים ועוד.



דוב קוטב, דיו, מאיה גון

בתקופת סונג (960-1279) ובתחילת תקופת מינג (1368-1644) התפתחו בסין סגנונות ציור **במונוכרום** – ציור המורכב מצבע אחד, על גווני השונים. במאה ה-15 החלו הציירים היפניים לצייר גם נופים יפניים, אך המשיכו לעשות זאת בטכניקה ובסגנון של הציור הסיני. הדבר ניכר בציורי דיו של אומנים רבים מאסכולת קאנו (Kano).

בשנים 1603-1868 זכה זרם ה-Tokugawa להיות אסכולת הציור ה"רשמית". מלבד מגילות מצוירות, הם עסקו גם בקישוטי פרגודים ודלתות הזזה בארמונות ובמבצרים מפוארים. מטבע הדברים, ציוריהם דקורטיביים יותר ומסודרים בקומפוזיציות ברורות ומאוזנות. מאחר שהם נועדו לקישוט, הדבר חייב בהירות רבה יותר בביטוי הנושא המתואר מאשר עיסוק בדקויות רגשיות, ולכן הציורים מרומזים יותר מציורי הנופים של תקופת סונג הסינית.

משמעות הנייר בציורי דיו

החללים הריקים בציורים הסיניים ממלאים תפקיד חשוב לא פחות מן השטחים המצוירים, משום שהמתבונן נדרש להשלים בדמיונו את מה שהחסירו הקווים. הם מאפשרים לציור "לנשום", ומאתגרים את חשיבת המתבונן על ידי אילוץ העין למלא את החלל הריק.

הנייר, שהומצא בסין ונדד למערב, נושא בחובו, מזה אלפיים שנה, את התרבות האנושית כולה. לאחר מכן נדד הנייר לאסיה – לקוריאה הגיע במאה ה-6 לספירה, משם במאה ה-7 ליפן ולפרס, ובמאה ה-10 נדד ברחבי



המזרח התיכון. באיטליה נוסד מפעל הנייר הראשון בעיר פבריאנו ב-1276, אך אופיו של נייר זה היה שונה מאוד מן הנייר הסיני שיוצר מסיבי צמחים והיה רך ושקוף קמעא, ולעומתו הנייר האירופאי, שנוצר מסיבי כותנה וגילטין, הניב נייר בעל מרקם חלק ואטום. עם המצאת הדפוס במאה ה-15 גדל הביקוש לנייר, ובשנת 1800 החלו לייצר נייר מסיבי עץ. בה בעת החלו אומנים לייצר נייר איכותי להדפסים ולתחריטי אומנות. חלק מהאומנים הסיניים בחרו ליצור את הנייר בעצמם ולשלב בו חומרים נוספים, וחלקם בחרו בנייר מוכן, מודפס, ועיבדו אותו באמצעות קיפול, חיתוך, קריעה, הדבקה או עבודה בשכבות.

החיבור שלי לטכניקה שבחרתי

ציורי דיו מושכים אותי משום שהם גדושים ברוח ובאנרגיה אשר נוגעת במתבונן וחדורת לליבו. היופי בציור הסיני הוא הקו המלא רוח חיים,

קוף יד, צבעי מים, מאיה גונן

הקווים והכתמים נעשים באחת, בחד פעמיות ובמידיות. הסינים והיפנים התבוננו היטב בטבע ולמדו אותו לפרטי פרטיו, וכתוצאה מכך הקווים של הציור הסיני והיפני הינם המראה של הטבע.

צמצום האמצעים, הקווים והתנועות הם האתגר הקשה בציורים אלו. הקווים מעטים ונראים חסרי זהירות, אך למעשה הם תוצאה של אימון והתעמקות ממושכת. קווי דיו מעטים על רקע לבן רומזים על עולם ומלואו.

רקע – מצבם הבלתי אפשרי של בעלי החיים בשבי

אחד הרגשות שהתקשיתי להכיל הוא חוסר הצדק כלפי חיות הבר הכלואות בשבי הנובעים מבעיית ההכחדה הקשה שאנו עומדים מולה כיום.

הכחדה של מינים פירושה השמדת בעלי חיים או צמחים מפני כדור הארץ או היעלמותם. למרות שזהו תהליך טבעי בהתפתחותם של זנים שונים, הדבר מהווה סכנה ממשית על מגוון המינים והאיזון השברירי של שרשרת המזון. כיום, מינים הןדכים ונעלמים בקצב הגבוה מהקצב של יצירת מינים חדשים והוא מהיר עד פי 1,000 מהקצב בעבר. מצב זה מסוכן מאוד ומהווה פגיעה קריטית ביציבות מערכות אקולוגיות. ההידרדרות במגוון הביולוגי בעולם מאיימת באופן משמעותי על בריאות האדם ועל ביטחונו, ומעמידה בסימן שאלה את עתיד החברה המודרנית, וזאת מהעובדה שקיימים יחסי גומלין בין בעלי החיים, הצומח, ובני האדם, וכל התשתית האנושית תלויה בהם.

יחסי גומלין והכחדה

יחסי גומלין הם השפעות הדדיות בין יצורים חיים המתקיימים יחדיו, ויכולים להתקיים יחסי טריפה, הדדיות, טפילות או תחרותיות. קשרים אלו יוצרים מערכת יחסים מורכבת. ערעור מערכת זו, על כל חלקיה, עלול להוביל להתמוטטות המערכת כולה, וההשלכות על האדם יכולות להיות בלתי הפיכות. למשל, חרקים מאביקים כגון דבורים, פרפרים וצרעות חיוניים בתהליך הגידול של תוצרת חקלאית. בעלי חיים אלו נמצאים בסכנת הכחדה ובעקבותיה בני האדם עלולים לעמוד מול מחסור חמור במזון.

שינויי האקלים והשפעה סביבתית על בעלי חיים

קיימות סיבות רבות להאצה הקיצונית בהיכחדות בעלי החיים הפראיים, כשכולן הן תוצאה ממעשי ידי האדם – התחממות כדור הארץ, זיהום האוויר והמים, הרס שטחי מחייה, כריתת יערות וצייד.

אקולוגים טוענים כי שינויי האקלים נובע מפליטה מוגברת של גזים כתוצאה משריפת דלק. תהליך זה נקרא "אפקט החממה", והתוצאה היא עלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני, עליית בטמפרטורה, שינויים בלחות הקרקע והבדלים קיצוניים בטמפרטורה. שינויים אקלימיים אלה מתרחשים לאחרונה בקצב מהיר, ומסיבה



זו מיני בעלי חיים וצמחים אינם מספיקים להתאים את עצמם לתנאים המשתנים. תעשיית הבשר, המגדלת מיליוני פרות, תרנגולות, חזירים ודגים, גוזלת משאבים רבים כגון מים, שטחי מחייה ומזון. גז המתאן שמשתחרר מגופן של הפרות מעצים את ההתחממות הגלובלית, והופך לאחד הגורמים המשמעותיים ביותר המשפיעים על טמפרטורת כדור הארץ.

התחממות זו אינה משפיעה רק על חיות יבשתיות, שסביבתם הופכת לצחיחה, אלא גם על בעלי החיים באוקיינוסים. העלייה הקיצונית בטמפרטורת

זאבים ברצועה, דיו, מאיה גונן

המים של האוקיינוס השקט – המכונות תופעת "הילד"-ELNINO) –

נעשו נפוצות מאוד, ומסכנות את הדגים ועופות המים. כתוצאה מכך, פחתה בכ-80% אוכלוסיית הזואופלנקטון, המהווה מזון לדגים ולעופות הים, והתמעטה אוכלוסייתם באוקיינוס. אך לא רק תופעות אקלימיות פוגעות בעופות המים, ירידה חדה במספרם של האלברוסים ב-30 השנים האחרונות נובעת בעיקר מיתר דיג, ותופעה דומה של דלדול אוכלוסיית הדגים פוגעת גם בעופות ים צפוניים.

בנוסף, עקב הצטברויות עצומות של זבל אנושי שנזרק לים, יחד עם רעלים ופסולת ממפעלים, זיהום המים עולה, אלמוגים מתים ושוניות מושמדות, כך שכל סביבת החיים הזו נעלמת.

צייד לא חוקי בים, ביערות ובסוואנה הפך לנפוץ מאוד, וגם הוא מדלל באופן משמעותי את אוכלוסיית בעלי החיים באזור. צייד זה נעשה למטרות מזון, קישוטים, ביגוד וסמל סטטוס ועושר, אך פוגע במאזן האקולוגי בצורה קריטית.

כריתת יערות גשם וגידול האוכלוסייה האנושית גורמים לצמצום שטחי המחייה של מינים רבים ולירידה בכמות החמצן באטמוספירה שנוצר בתהליך הפוטוסינתזה. שטחים פתוחים רבים, כגון שדות בר ויערות, נחרשו והפכו לשדות חקלאיים כדי לספק מזון לאוכלוסיית בני האדם הגדלה. שטחים פתוחים רבים כוסו במלט ובאספלט והפכו לערים גדולות, כדי לספק דיור וצרכים אחרים לתושבים.

ביות של חיות

הביות הוא תהליך של שינויים שעושה האדם בבעלי חיים ובצמחים במטרה להתאימם לצרכיו. במהלך היווצרות הכלכלה האנושית והמעבר להתיישבות, בויתו חיות פרא לחיות משק כמו סוסים, חמורים

וגמלים, שנשאו משאות ובני אדם, סיפקו חלב ובשר או סייעו בכוחם הרב במלאכות שונות. צמחים רבים בויתו והפכו לגידולים חקלאיים שהניבו מזון רב. עופות בויתו לצורך הפקת ביצים ובשר וציידים בייתו עופות דורסים לעזרה בציד וכך הלאה.

בזכות הביות ומקורות המזון שהוא סיפק להם, יכלו בני האדם לעבור להתיישבות קבע ולעסוק בחקלאות. היכולת שלנו כבני אדם לבית ולתמרן את הצמחים ובעלי החיים בעולם, היוו את הבסיס שהוביל להתקדמות האנושות ב-15 אלף השנים האחרונות. אך זו לא הייתה הסיבה היחידה לביות – הפופולריות של חיות מחמד ושל חיות בקולנוע, בטלוויזיה ובספרים, מעידה על כך שהאינטראקציה עם בעלי חיים נובעת גם מצורך אנושי הנטוע עמוק בתוכנו. בעלי חיים בויתו בדרכים שונות – יש כאלה שהאדם סיגל אותם לצרכיו לגמרי, כמו כלבים, פרות, סוסים וחיות משק נוספות. באחרים לא שינה האדם את ההתנהגות הטבעית, כמו הדבורים למשל, ויש ששינה חלקית, כמו במקרה של החתולים.

בתהליך ארוך של ברירה מלאכותית הפכו בעלי החיים המבויתים לנוחים לצרכי האדם, וזה התממש כשהאדם עודד את פריון המניבים שבהם ודאג לעצור את התרבותם של אלה שלא הסתגלו מספיק לצרכיו, היו אלימים מדי, מניבים פחות וכדומה.

התנהגות חיות הבר כאשר מתייחסים אליהן כחיה מבויתת

כיום, לצערי, יש אנשים הנוטים להחזיק בחיית פרא כ"חיית מחמד" – גורי טורפים גדולים, קופים וחיות בר אחרות נמכרים כשהם עדיין גורים. אולם היותם קטנים ולא מסוכנים בשלב זה אינו אומר שיגדלו להיות מבויתים כמו כלבים או חיות מחמד אחרות. עד מהרה גדלות החיות ומתחזקות, המטפלים מתרחקים מהן בפחד, והן עלולות לחיות בכלובים זעירים או קשורות בשרשרת קצרה עד ליום מותן.

קרקסים הם מקום נוסף שלעיתים מחזיק חיות בר ומתייחס אליהן כאילו היו מבויתות. מצב זה מתאפשר על ידי אילוף אלים שנועד לגרום להם לבצע להטוטים מפחידים או מסוכנים. בקרקסים אין תנאי מחיה הולמים לחיות, אפילו למראית עין, אלא רק תנאים מינימליים להחזקת החיה בחיים ולהובלתה.

כאשר בעלי חיים פראיים מוחזקים בשבי, הם מפתחים מגוון התנהגויות שאינן קיימות בטבע. הבולטות ביותר הן "התנהגויות סטריאוטיפיות", ומדובר בפעולות בעלות שלושה מאפיינים:

✚ הן מתנהלות בתבנית קבועה.

✚ החיה חוזרת עליהן באופן סדיר.

✚ אין להן פונקציה ברורה.

התנהגויות סטריאוטיפיות כוללות צעידה, התהפכות, טלטולי ראש, לעיסה ומציצת עצמים שאינם מזון, גלגול לשון, אכילת צואה, ליקוק עצמי עד פציעה, מריטת נוצות, הטחת ראש בקיר ועוד. התנהגויות הללו מבטאות בדרך כלל מצוקה, בעיקר במצבים שבהם תנאי השבי אינם מאפשרים לממש דחף מסויים. הפעולה החזרתית עשויה לבטא משהו שהחיה משתוקקת אליו אך לא יכולה להשיגו, כגון: חוויה של חיפוש מזון בדרכים המאתגרות המותאמות לה, מסתור או שמירת מרחק מפני החיות שבמכלאה או מפני אנשים, או עניין שחסר במכלאה. כך למשל, במינים המבלים בטבע חלק ניכר מזמנם בחיפוש מזון ובאכילה, בגן החיות מופיעות תנועות חוזרות במשך שעות לקראת מועד האכלה קבוע. ההתנהגויות הסטריאוטיפיות נוטות להחמיר עם הגיל ולהתמשכות תקופת הכליאה.



ברבורים, טושים, מאיה גון

התנהגות סטריאוטיפית עלולה לשרוד כעדות להגבלות התנהגותיות שכבר אינן קיימות. למשל, טיפול לקוי בגור, המטופל על ידי אדם ולא על ידי אמו, עלול להשפיע על החיה גם בבגרותה, כשאינה נזקקת עוד לטיפול אימהי. בחיות בוגרות שעברו טיפול לקוי בינקותן מופיעה התנהגות סטריאוטיפית מוגברת, אם כי הפעולות החוזרות עשויות להיות שונות מאלה שאפיינו את החיה הצעירה.

הדואליות שבגני חיות

האנושות מעסיקה את עצמה בדימויים מעולם החי מראשית קיומה, בין שמדובר בחיות מבויתות או בטבע. המשיכה לחיות קדומה ונפוצה כל כך עד שנדמה כי מדובר בעיקרון אוניברסלי אנושי חוצה תרבויות. ההתבוננות בחיות בשבי מספקת את רצוננו לפרוץ את המחסום הקיומי שמפריד בינינו לבין יצורים אחרים, ולהתענג מההתבוננות ביצורים החיים בחופשיות בסביבתם הטבעית. אך האמת העצובה היא שרוב בעלי החיים בגני החיות אינם אלא "אנדרטה חיה להיעלמותם שלהם", כפי שאמר מבקר האומנות ג'ון ברגר ב-1977.



געגוע של ג'ירפה, טושים, עיפרון וצבעי מים. מאיה גונו

גני החיות של ימינו משתדלים להימנע מכלובים של בטון וסורגי מתכת, ולהחזיק את בעלי החיים במכלאות מוקפות בתעלה או בתאים שדפנותיהם שקופות. במקום המילה "כלוב" או "מכלאה" משתמשים במונח המכובס "תצוגה". למרות שמהנה להתבונן בבעלי החיים בגני החיות, הם מתמודדים עם סבל עצום – נאלצים לחיות בבדידות, בשעמום ובמצוקה כרוניים. מרביתם זקוקים לשטחים גדולים לאין שיעור מאלו שניתן לספק להם גם במכלאות המרווחות ביותר.

לא פעם בעלי חיים מופרדים זה מזה או מוכנסים לכלוב עם בעלי חיים בלתי מוכרים להם בשל אילוצים או אינטרסים של צוות גן החיות. גם המאמצים הכנים ביותר לעצב את המכלאה באופן שידמה את בית הגידול של בעל החיים ויספק גירויים, אינם מביאים אלא לתוצאות פתטיות ביחס לדבר האמיתי. החשיפה המתמדת לבני אדם, ולגירויים המאפיינים את הסביבה האנושית, כמו רעש ותאורה בלילה, אף היא מגורמי המצוקה המשמעותיים, מהם סובלים בעלי החיים בגני החיות.

שמירת רווחתם של בעלי החיים שבגן החיות מנוגדת לאינטרסים אחרים של הגן, המתמרן בתוך מרחב גדול של אילוצים: אל מול הדרישות של המבקרים במקום, אל מול הציפיות של גופים תורמים ומממנים ואל מול רשויות המדינה והרשויות המקומיות. לדוגמה, לגן החיות יש אינטרס להקטין את שטח המחיה של בעל חיים לא אטרקטיבי בעיני קהל המבקרים על מנת לפנות מקום לתצוגה של זן המושך קהל גדול יותר.

המבקרים מעוניינים מאוד במגע קרוב ככל הניתן עם בעלי החיים שעלול להיות כרוך בחרדה ואף בפגיעה עצמית. בעלי החיים ממשיכים לשרת את הפונקציה שלהם כמוצגים גם כשהם סובלים.

קיימת גם הטענה שגני חיות תורמים לשימור בעלי חיים שהינם בסכנת הכחדה. מצד אחד, עקב הפעילות האנושית שצינתי קודם, יש בעלי חיים שהסביבה הטבעית שלהם הושמדה באכזריות. לכן, הגיוני לנסות לשמור אותם במקום שיגונן עליהם ויתרום להרבעת המין. מצד שני, לגני החיות אין עניין להחזיק בעלי חיים שהציבור אינו מתעניין בהם, ורבים מהמינים המצויים בסכנת הכחדה אינם מרהיבים ביופיים.

בנוסף לכך, הרביית בעלי חיים בשבי והחזרתם לטבע הן משימות קשות מאוד ומספר ההצלחות זעום. הדרך האמתית והמוצלחת ביותר למנוע הכחדת מינים היא שימור מקומות המחיה הטבעיים שלהם, שם הם מתרבים טוב יותר מאשר בגני חיות.

קיימת סיבה נוספת, פחות תמימה, להרבעת בעלי חיים על ידי גני חיות, והיא "ייצור" גורים המהווים מוקד משיכה לקהל יותר מחיות בוגרות. דוב הקוטב קנוט, למשל, שנולד בגן החיות הוותיק של ברלין, הכניס לגן כחמישה מיליון אירו והפך את 2007 לשנה הרווחית ביותר בתולדות גן החיות. כשהגורים גדלים, הם מושכים פחות קהל, תופסים יותר מקום ויש אינטרס להיפטר מהם, וכך נוצרים "עודפים חברתיים".

עודפים חברתיים



הבעיה הבולטת ביותר היא עודף זכרים שאינם משתלבים במבנה החברתי הטבעי של המין. להקות טיפוסיות בטבע כוללות זכר דומיננטי המוקף במספר נקבות ובגורים, בעוד ששאר הזכרים הבוגרים חיים כבודדים או בלהקות קטנות. בגני החיות מעוניינים להחזיק רק בלהקה המרכזית, ורוב הזכרים הופכים ל"עודפים".

גני החיות הגדולים משתדלים להעביר חיות עודפות לגני חיות אחרים. להעדפה זו יש בסיס בתקנות של האיחוד האירופי ובתקנונים וולונטריים. למרות זאת, גני חיות רבים סוחרים בחיות או מוסרים אותן לגורמים מפקפקים. מכיוון שהדברים נעשים בהסתר, המידע על כך מועט מאוד. הארגון האמריקני PETA מזכיר שלושה גני חיות שנחשפו בשנים האחרונות בהעברת חיות לסוחרים, ובכלל זה ג'ירפות, זברות, קנגורים, וולבים ואנטילופות. העיתון הבריטי The Observer חשף ב-2004 שלושה

שחף ללא דג, דיו, מאיה גונן

גני חיות בריטיים שנפטרו מחיות עודפות דרך סוחר מפקפק שמכר אותן לכל המרבה במחיר.

אחד מהיעדים הבולטים של החיות העודפות מגני החיות בארצות הברית הוא חוות הרג שהתפתחו במהירות בעקבות חוק המינים בסכנת הכחדה, שנחקק ב-1973 והגביל ציד חיות בטבע אך לא בשבי. יזמים מיהרו לנצל את ההזדמנות, והקימו חוות שבהן מרביעים חיות בר במטרה לאפשר לצרכנים להרוג אותן ברובה, ואף בחץ וקשת. להערכת הארגון האמריקני HSUS, למעלה מאלף חוות כאלה פועלות בארצות הברית, מרביעים בהן חיות ומרגילים אותן לנוכחות קרובה של אנשים כדי שיהיה קל לירות בהן ממרחק קרוב. אספקה של חיות מגיעה גם מבחוץ, וחיות עודפות רבות מגני חיות מסיימות את חייהן במכלאות אלה, דרך תיווכם של סוחרים חיות.

שאלת המחקר

עלה בי רצון לבדוק כיצד אוכל לבטא את קונפליקט הערכים שלי כלפי גני החיות, כאשר הכלי הוא האומנות החזותית – וזוהי למעשה שאלת המחקר שלי.

תהליך העבודה

✚ **מציאת נושא לתערוכה** – מציאת הנושא הוא חלק ארוך והכרחי בעבודתו של אמן. שלב זה דורש התבוננות עמוקה פנימה, חשיבה על נושאים שנוגעים בליבו ודורשים התייחסות אומנותית. באופן אישי, הדרך למציאת הנושא לתערוכה שלי עברה דרך עולמות תוכן שונים – מגבולות גוף, דרך פמיניזם, ועד שהגענו יחד לנושא שמעסיק אותי ומציאת השפה האומנותית המתאימה להביעו.

✚ **ביקור בתערוכות שונות וצפייה בהרצאות** – במהלך התהליך השתתפתי בהרצאות של המנחה ניבי אלרואי על אומנים, למשל הרצאה על האמן הקוריאני דו הו סה והרצאות רבות נוספות דרך זום עקב תקופת הקורונה. סיירנו יחד במוזיאונים והתבוננו בתערוכות, לדוגמה תערוכת דיוקן במוזיאון הרצליה. ביקרנו גם בגלריות רבות, למשל גלריית שלוש וגלריית נגא. כאשר יוסרו הגבלות הקורונה נפגש בסטודיו של אומנים נוספים ואזכה לראות את עבודתם מקרוב.

✚ **פירוק שפות אומנות שונות והרכבתן מחדש** – בזכות ניבי המנחה, נחשפתי לאומנים שונים, למשל אומנים מאסיה כמו פן ודו הו סה, דרך אומנים מערביים כמו מרלן דומא ואגון שילה ועד אומנים ישראליים עכשוויים שפועלים בינינו כמו מורן קליגר ומאיה בלוך. יחד פירקנו את השפה האומנותית שלהם – כיצד הם משתמשים בצבע, בדיו, או בעפרון? מהו מקצב תנועת המכחול שלהם? איך הם מתייחסים לנייר? האם לכסות את כל הדף, או להשאיר אזורים לבנים כדי "לנשום"? שלב זה תרם רבות להתפתחותי האומנותית והעניק לי עולם דימויים חדש לגמרי.

✚ **ביקור בגני חיות** – הנושא שבחרתי דורש התבוננות אמיתית בחיות שבשבי. נסענו כמה פעמים לגני חיות, צילמנו וציירנו אותן פנים אל פנים. השלב הזה היה מאתגר ומרתק, משום שמעולם לא ציירתי חיות בתנועה אלא רק מתוך דימויים. לניבי ולי הייתה פנטזיה לשתף פעולה עם רשויות הספארי, ומכון סאלד אף יצר איתם קשר, אך לצערנו, בגלל התנאים המיוחדים בימי הקורונה, הספארי נסגר למבקרים והתוכנית לא יצאה לפועל. כולי תקווה שבעתיד עוד אוכל להגשים אותה.

✚ **עבודה בסטודיו** – נפגשנו בסטודיו של ניבי, ועבדנו יחד מתוך הדימויים שצילמתי בגן החיות. ניבי כיוונה אותי, תמכה בי ויחד חשבנו על רעיונות שונים להתקדם. בנוסף, ציירתי בסטודיו ונחשפתי לתהליכי עבודת האמן. ניבי ואני יצאנו לטבע עירוני, ציירנו שם, והגענו להבנה שגוף העבודות שלי ישלב ציור בשטח ורישום מתוך תמונות שאצלם. מכאן הגענו לרעיון של ציור בגן חיות, ונסענו לחקור את הספארי.

✚ **עבודה מהבית תוך ליווי צמוד** – עקב הסגר בתקופת הקורונה, עבדנו מרחוק במשך תקופה ארוכה. ניבי ליוותה אותי בכל שלב בדרך, שלחתי לה ציורים והשתתפתי בהרצאות שהעבירה דרך הזום.

✚ **מחקר של שחור לבן מול צבע** – אני רגילה לעבוד בצבעים מאוד חזקים וחיים, במהלך תקופת המחקר הציורי התנסיתי בצמצום הפלטה הצבעונית ומציאת הצבעונית שבתוך השחור והלבן. באופן הדרגתי התחלתי להוסיף צבע אחד אל השחור והלבן, ולמדתי להבין את מערכת היחסים ביניהם.

✚ **בחירת עבודות ורפלקציה על התהליך** – לקראת סוף השנה המשותפת, שהייתה לא צפויה ומאתגרת, ניבי ואני מנסות להפיק סרט קצר שבו נשוחח על התהליך בימים שבהם אין אפשרות מעבר בין ערים. אנחנו מנסות לערוך יחד מחשבות בחללים שונים על תהליך מחשבה משותף – יצירה שהיא בפני עצמה אתגר יצירתי. מעניין במיוחד להבין כיצד החיות בשבי מרגישות בימים אלו, ללא מבקרים בספארי ובלי הנראות שהן רגילות אליה.

✚ **בתום התהליך** – לאחר שגוף עבודתיי היה מוכן, התבוננו על כל היצירות ובחרנו ביחד את ההצבה וההצגה שלהן זו ליד זו. אני שמה לי למטרה להציג את העבודות מול קהל בחלל פתוח לציבור. מאחר ועולם האומנות – הגלריות, המוזיאונים וכל מקום שבו מוצגות יצירות אומנות – סגור בימים אלה לקהל על פי צו ממשלה, ועל פי המתווה החדש יפתח רק בעוד כמה חודשים, האתגר שלי הוא להבין כיצד אני יכולה לחשוף את העבודות בתנאים הלא פשוטים האלו.

העברת מסר

התערוכה למעשה מעמתת את הצופה עם דעיכת בעלי החיים. המסר הזה מתבטא דרך איבוד הגבולות שבין גן החיות ובעל החיים בתוך הציור, בשאלה מי הוא בעצם מושא היצירה ומי הרקע. המבטים בעיניהם והחור שהם משאירים בהיעלמותם. הפראיות דועכת מציור לציור, והמתבונן נאלץ להסתכל עליהם בעוד קיומם דוחה.

אני מקווה שאנשים שיתבוננו ביצירותיי יגבשו דעה בנושא קונפליקט הערכים של גני חיות, וינסו לשפר את טביעת הרגל האקולוגית שישאירו אחריהם. אני מקווה שהם ירגישו את כאב החיות הדועכות, ויזדהו עם הצורך שלי לגונן על בעלי החיים הנכחדים.

מחשבות לעתיד

תוכנית מנחים-עמיתים, בליווי הצמוד של המנחה, ניבי אלרואי, לימדה אותי הרבה מאוד על האומנות החזותית, ונתנה לי את הכלים ליצור ולעשות. אומנות היא פלטפורמה נהדרת למחאות, לספר סיפור ולגעת באנשים. האהבה והתשוקה שלי לתחום גדלה בזכות התוכנית. הרצון שלי ליצור שיח על נושאים חשובים דרך האומנות שלי בוער בי, ואני מתכוונת להמשיך ולעסוק ביצירה שלי ככל האפשר. הזכות להתבונן בסטודיו של אומנית, לראות מקרוב את שגרת היום-יום בחייה, נתנו לי אמונה עצמית ברדיפה אחרי החלום שלי מבלי לוותר, גם כשמדובר בתחום תובעני כמו אומנות. החלומות שלי בתחום זה גדולים, ואני מקווה שאוכל להגשים אותם. שנת העבודה בתוכנית עם ניבי פתחה לי אופקים חדשים, ואני מתכוונת להמשיך ולחקור לאן אוכל להגיע.

ביבליוגרפיה

1. אאוריקה, מהו ביות <https://eureka.org.il/item/53929/>
2. אלכסון, משיכה חייתית – מאת דויד ברש <http://earthweb.tau.ac.il/content/species-extinction>
3. אנימלס, הצד האפל של גני חיות – מאת אריאל צבל. <https://anonymous.org.il/art171.html>
4. אנימלס, דו"ח: תעשיות המזון מן החי אחראיות למחצית מפליטות גזי החממה – מאת אריאל צבל. <https://anonymous.org.il/art670.html>
5. וויקיפדיה – מינים בסכנת הכחדה <https://he.wikipedia.org/wiki/>
6. זווית (סוכנות ידיעות לטבע ולסביבה) – מאת יעל מור 2019 <https://www.zavit.org.il>
7. זרימת המכחול – בית ספר לקליגרפיה סינית <https://www.brushflow.co.il/chinese-japanese-painting>
8. מוזיאון ווילפריד ישראל, בין לבין - מאת האוצרת, שיר מלר-ימגוצי 2011 <http://www.wilfrid.org.il/?p=308>
9. מוזיאוני חיפה – גוונים של דיו מאת ד"ר אילנה זינגר בליין <https://www.tmja.org.il/>
10. מסע אחר, חיים על הסף – מאת נדב לוי <https://www.masa.co.il/article>
11. קמפוס טבע – אוניברסיטת תל אביב <http://earthweb.tau.ac.il/content/species-extinction>
12. שפת האומנות <https://sites.google.com/site/artforschool/home/color/monochrom>
13. תנו לחיות לחיות, גן חיות או בית כל לחיות? 2014 <https://www.letlive.org.il/?article>



פילים מאחור, דיו, מאיה גונן

קונטרפונקט, הרמוניה וניתוח

חניך: איתמר פיינברג, מרכז חינוך ליאו בק, חיפה

מנחה-עמית: פרופ' מנחם ויזנברג, תל אביב



רקע

פוליפוניה (Polyphony) היא מרקם מוזיקלי, המכיל כמה קולות הנעים באופן עצמאי, כך שלא ניתן לזהות היררכיה פורמלית בין הקולות, וזאת בהבדל מקטע מוזיקלי, למשל שיר, המכיל מנגינה ברורה וליווי. למען אינטואיציות הקורא, מומלץ לחשוב על קול כעל זמר. מכאן, כאשר חושבים על "פוגה בארבעה קולות", רצוי לדמיין ארבעה זמרים, כשכל אחד מהם שר את התפקיד שהוא ממלא. עם אנלוגיה זאת, ניתן לחשוב על מרקם פוליפוני כעל צורת מוזיקה שבה כל אחד מהקולות יוכל להיחשב "המנגינה הראשית", והיצירה עדיין תישמע הגיונית במידת מה.

הפוליפוניה במוזיקה האירופאית התפתחה מהאורגנוס החופשי ומהמליסמטי, שהופיעו בשירה הגרגוריאנית במאה ה-11 וה-12 בהתאמה ועד הרנסנס, והיא הפכה לאחד המאפיינים העיקריים של המוזיקה המערבית. ניתן להבחין בקיומה כמעט בכל יצירה מהתקופה, וכן מתקופות מאוחרות, כגון הבארוק.

בתקופות המאוחרות יותר, כגון התקופה הקלאסית או הרומנטית, ניתן לחזות בירידה במורכבות המרקם הפוליפוני ברוב היצירות, אך הפוליפוניה מעולם לא "נעלמה" – היא המשיכה להוות מאפיין מובהק המצוי במוזיקה, גם אם לא ניתן לחזות בה "על פני השטח" של היצירה.

מהפוליפוניה צמח מושג חדש – **קונטרפונקט (Counterpoint)** – קבוצת חוקים הנדרשת מקבוצה של קולות, על מנת שתהיה אפשרות לארגן אותם לכדי פוליפוניה. במהלך השנים, מהרנסנס דרך התקופה



היינריך שנקר (1868-1935)

הרומנטית (בערך המאה ה-19) ועד ימינו, חוקי הקונטרפונקט השתנו והתעדכנו בהתאמה לרוחה האומנותית של התקופה.

עם זאת, חוקים מסוימים נותרו כמעט ללא שינוי, וניתן לראות בהם מעין אינווריאנטים במוזיקה של העולם המערבי (למעט דוגמאות מסוימות, בעיקר מוזיקה שלא עונה לשום הגדרה טונלית). חוקים אלו משמשים כיום תיאורטיקנים לאנליזה של יצירות מוזיקליות שונות, מכל התקופות. אחת מצורות האנליזה המקובלות כיום פותחה על ידי **היינריך שנקר (Heinrich Schenker)**, שהיה מבין הראשונים אשר זיהו את העקרונות הקונטרפונקטיים החבויים כמעט בכל יצירה טונלית. התורה שפיתח – **אנליזה שנקריאנית (Schenkerian analysis)** – מהווה אזור מחקר והתמחות של תיאורטיקנים רבים, ומתפתחת עד ימינו.

The image shows a musical score for 'O Lamm Gottes' in G major. Above the staff are Roman numerals indicating chord functions: I, II, III, IV, V, I, II, III, IV, V, I. Below the staff is figured bass notation: G dur: I (VII) II#3 V I IV V I I V II V I-VI II V I. The score includes a treble clef, a key signature of one sharp (F#), and a common time signature (C).

גרף הולכת קולות של הרמוניזציית הכוראל "O Lamm Gottes", מאת י.ס. באך

גרפים, מעין זה שלעיל, הם אמצעי אילוסטרטיבי נפוץ מאוד באנליזה שנקריאנית, ומשמשים להמחזות המגמות הכלליות בהולכת הקולות ביצירה. בגרף שבדוגמה, ניתן להבין כי המלודיה של הכוראל – שיר תפילה של הכנסייה הלותרנית המושר על ידי כלל הקהל בכנסייה – מורכבת בעיקרה מתנועה מהדרגה הסולמית החמישית אל הדרגה הסולמית הראשונה.

נושא המחקר ותהליך העבודה

במהלך השנה עסקנו במגוון נושאים – קונטרפונקט, הרמוניה, הלחנה וניתוח – כאשר כל אחד מהם נלמד בדרך אחרת.

נושא הקונטרפונקט נלמד על ידי כתיבת תרגילים – בהינתן קו מלודי (הנקרא Cantus Firmus), מטרת התרגיל היא לכתוב "קו נגדי", הקרוי "קונטרפונקט", שמקיים שתי דרישות עיקריות – עליו להיות לא תלוי בקנטוס פירמוס מבחינה מלודית מפורשת, ובמקביל, לציית לחוקים נוקשים בנוגע לאינטראקציה שלו עם קו הקנטוס פירמוס, למשל, תנאים מוגדרים היטב ליצירת מרווחים דיסוננטיים בין הקולות. יכולים להתקיים כמה קונטרפונקטים לאותו הקנטוס פירמוס במקביל, בתנאי שגם הם מקיימים את הדרישות הנחוצות ביניהם. בדרך כלל מספר הקולות הנוספים לקנטוס פירמוס לא יעלה על שניים, במקרה של תרגיל (כמות האינטראקציות עולה בצורה דרסטית עם כל קול שנוסף לו).

מתודה זו, של הוראת קונטרפונקט בתרגילים מסוג זה, מובאת בחמישה סוגים, כאשר הראשון הוא הסוג הפשוט ביותר, אך גם הנוקשה ביותר מבחינת ההגבלות על הקונטרפונקט, ובעל המספר הנמוך ביותר של הפתרונות לכל קנטוס פירמוס, והסוג החמישי הוא המורכב ביותר, אך המתירני ביותר מבין חמשת הסוגים.



דוגמה לתרגיל פתור בקונטרפונקט מסוג חמישי, בשני קולות.

הקו התחתון הוא הקנטוס פירמוס (מסומן ב-cf).

ניתן לשים לב למאפיין חסר קצבי של הקנטוס פירמוס.

הרמוניה (Harmony) היא האינטראקציה ה"רגעית" בין כמה קולות. בעוד שקונטרפונקט מתעסק בעיקר בכיוון המאוזן – עצמאות הקולות היא עיקר העניין, הרמוניה דנה בממד המאונך – בהינתן רגע מסויים בזמן, ההרמוניה היא בחינת השילוב של כל הקולות הנוכחים באותו רגע. באותו אופן שיש כללים לכתיבת פוליפוניה, המכתיבים כללים לשילוב כל הקולות יחד תוך שמירה על עצמאותם, כך יש חוקים גם להרמוניה המתעסקים ביחסים השונים שבין **אקורדים (Chord)** – שילוב של כמה צלילים ביחד (חלק מהחוקים ההרמוניים נובעים מחוקים שמקורם בקונטרפונקט). מאחר והרמוניה בוחנת מצב רגעי, הקולות מאבדים את עצמאותם, וזאת, מאחר ועצמאות הקולות היא תכונה הנצפית אך ורק במשך זמן מסויים – אחרת אי אפשר להשוות ולעמוד על ההבדלים בין כל קול. רק כאשר אנו בוחנים **מהלכים הרמוניים (Harmonic Progression)** – רצף של כמה אקורדים בזה אחר זה – ניתן להבחין בשובה של עצמאות הקולות.

הרמוניה נלמדה על ידי שילוב של תרגילי **הרמון (Harmonization)** – בהינתן מלודיה, יש לכתוב לה הרמוניה אפשרית, תוך שמירה על החוקים המוגדרים, ונגינת כוראלים מאת י.ס. באך. **כוראל (Chorale)** הוא שיר הכתוב לכמה קולות, בדרך כלל – ארבעה. באופן טבעי, במקרים רבים ניתן לצפות בתהליכים קונטרפונקטיים בכוראל, למרות שהאלמנט הבולט בו הוא ההרמוניה שכל הקולות יוצרים ביחד. הכוראל, אם כך, הוא דוגמה טובה לקשר העמוק שקיים בין קונטרפונקט להרמוניה. חלק מהכוראלים היו בעלי בס ממוספר – שיטה קצרנית לרישום מידע הרמוני, ללא כתיבתו כמפורש. במקום רישום כל הקולות בצורה מפורשת, רק הבס נתון, ומעליו מספרים המרמזים על האופן שבו הקולות האחרים אמורים להישמע.

לצד העבודה על הכוראלים, חלקם נותחו הן בגישה הרמונית והן בגישה קונטרפונקטית.

160. Herzlich thut mich verlangen

(Cant. 153. Schau, lieber Gott, wie meine Feind' B. A. 32, 46)

H. L. Hassler 1601

דוגמה לכוראל: "Herzlich thut mich verlangen"

על היצירה

בנוסף לתהליך העבודה, הלחנתי יצירה לטריו כלי קשת – כינור, ויולה וצ'לו. העבודה על הטריו נעשתה במקביל לעבודה על כל הנושאים המוזכרים לעיל. הנושא המאגד את היצירה הוא מרווחים – היצירה מחולקת לכמה חלקים, המנוגנים *attacca* – ללא הפסקה ביניהם – כאשר התשתית המוטיבית מורכבת ממנעד מרווחי מלודי אשר הולך וקטן. ה"אנרגיה" ההולכת לאיבוד מדעיכת גודל מנעד זה (ככל שמרווח מלודי גדול יותר, המתח שהוא יוצר גדל גם כן) "מומרת" במהירות הנגינה, שכן לקראת סוף היצירה כל חלק נהיה מהיר מקודמו. בחירת ההרכב נובעת מאחידות הצלילם של כלי הקשת. אמנם דבר זה מונע את ה"ייחודיות" של כל כלי (למרות שגם כלי קשת שונים נשמעים אחרת, וייחודיות זו נשמרת במידת מה), אך באותו מטבע הוא מאפשר את אחידות ההרכב. שלושת הכלים משתלבים ברגעים הרצויים למרבד הרמוני אחיד.

לאחר כתיבת היצירה כולה נעשתה רביזיה אשר במהלכה שוכתבו חלקים מסוימים, נמחקו כליל מהיצירה, או נוספו חלקים חדשים במקומות ספציפיים ביצירה.

סיכום

באופן אישי, תהליך היצירה היה לי ייחודי, מאחר ובעבר כמעט ולא עסקתי בהלחנה, ועיקר מאמצי היצירתיים הושקעו באלתור. ההבדל העקרוני בין הלחנה לאלתור הוא המהירות בהן מתקבלות החלטות, וניתן לומר, באופן כזה או אחר, כי אלתור הוא מעין הלחנה במהירות קיצונית. החסרונות של האלתור ביחס להלחנה נובעות באופן ישיר מהעובדה שבמהלך האלתור אין זמן לשקול פתרונות "חדשים", במובן מסויים, ורוב הבסיס להחלטה הוא אינסטינקטיבי ומסתמך על ניסיון וזיכרון, בעוד במהלך ההלחנה רוב ההחלטות היצירתיים מתבצעות כחלק מתהליך יותר אנליטי, אך איטי.

ביבליוגרפיה

Edward Aldwell & Carl Schachter (2003), **Harmony & Voice Leading** (3rd edition)

Felix Salzer & Carl Schachter (1989), **Counterpoint in Composition**

R.O. Morris & Howard Ferguson (1931), **Preparatory Exercises in Score Reading**

Samuel Adler (1989), **The Study of Orchestration**



”על קצה המים” – סרט אנימציה קצר

חניך: נדב רם, תיכון ע”ש ברל כענלסון, כפר סבא
מנחה-עמית: פרופ’ חנן קמינסקי, ראש התכנית לעיצוב משולב
המכון הטכנולוגי, חולון



הקדמה

מקור המילה אנימציה הוא בשורש המילה הלטינית ”אנימטיו” (animātiō) אשר משמעותה היא ”מתן חיים”. כיאה לשורשים האטימולוגיים, מטרתי כאנימטור היא להפיח חיים בסיפור באופן ויזואלי. במהלך הפרויקט כתבתי, ביימתי, הפקתי והלחנתי סרט קצר.

רקע

התחלתי את הפרויקט עם ניסיון קודם בכמה סוגי אנימציה, והחלטתי להשתמש בסגנון אנימציה דו ממדי בשם Frame by Frame, המאופיין ברצף תמונות, המופיעות מהר אחת אחר השנייה, כאשר כל תמונה היא ציור חדש. זאת, בניגוד ל-Tweening, אשר שם הטכניקה כוללת הזזה של עצם קיים בתוך תמונה, או Stop motion, שבו מצלמים עצם פיזי כמה פעמים, כאשר כל פעם מזיזים אותו מעט.

תהליך העבודה

תהליך העבודה החל ביצירת הסיפור שאותו תתאר האנימציה.

בחירת הסיפור

אנימטורים רבים אינם כותבים את התסריטים של עצמם, וחלקם אף לא מעצבים את הדמויות, אך אני הייתי נחוש בדעתי לעשות את הכול מ”אפס”.

דרכי החלה בהעלאת רעיונות לסיפורים שאפשר לספר באמצעות מדיום ויזואלי זה. חשבתי על מכשפים עוצמתיים, סוגי טירות גבוהות ואולי גם כמה דרקונים, אך בחיי היום-היום אני מוזיקאי – מנגן על תופים בתזמורת, גיטרה בס אחר הצהריים ונבל "בין נשימות" – ולכן הגעתי למסקנה שראוי שגם הסרט יהיה קשור למוזיקה. לבסוף, לאחר שיקולים בין כליזמר ג'אז למטאל פרוגרסיבי, בין מוזיקה ארמנית מסורתית ליצירות מתקופת הבארוק, מצאתי "במגירה" (לכל יוצר יש אחת כזאת) סיפור שהתחלתי בכתיבתו עם חבר – "ים כסערה" – המבוסס על פרשנות לספר בראשית שזכרתי מתקופת לימודי בבית הספר היסודי.

מדוע ספר בראשית מתחיל דווקא באות ב'?! – על פי פרשנות מסוימת, שאיני זוכר מדוע ומתי שמעתי אותה, הסיבה לכך היא שהעולם שבו אנו חיים לא היה ניסיונו הראשון של אלוהים. אני לא אדם מאמין, אך כמו ניצוץ הרעיון הדליק בי אש, ולבסוף החלטתי לבסס על כך את הסיפור – דייג הנמצא בקץ ימי עולמו וחווה את תחילת הבריאה של העולם הבא.

כתיבת סיפור – Treatment, Synopsis

קונספט אינו סיפור מלא אלא רק רעיון כללי, כי הרי בסיפור יש דמויות, יש משמעות וכמובן שיש תהליך – אז מה עכשיו? עד כה, הייתי לוקח את הרעיון הכללי ומוסיף לו קצת פה וקצת שם, "לש" אותו היטב, במשך כמה חודשים, מעכל את הכול, ולבסוף מקווה שזה לא היה לשווא. אך הפעם אני תחת מגבלת זמן ובהנחיית חנן לא הייתי צריך "לירות בחשיכה".

תחילה, כתבתי את הסיפור עם כל הפרטים השוליים שהציפו את ראשי. שום דבר לא היה קטן מדי – זה נקרא **Treatment** – שלב שבו אני שם למולי כל חומר גלם שאיתו אעבוד. כמובן, מצאתי שיש דמויות שחסר להן תפקיד ממשי, ותפקידים ממשיים שחסרים להם דמויות, אז כתבתי מחדש את ה-Treatment, ובכל פעם תיקנתי פרט קטן. במהלך העבודה קראתי גם קצת Ernest Hemingway, וראיתי לא מעט סרטי אנימציה קלסיים מרחבי העולם.

והרי לכם סוד תעשייה קטן – באנימציה Frame by Frame בדרך כלל כל שנייה מורכבת מ-24 תמונות (Frames), וכאשר כל שנייה היא אינטנסיבית לעשייה (ובהכרח גם יקרה) צריך לחשוב מה משלבים בסרט.

כאן מגיע שלב ה-Synopsis הדורש לעבד את העופרת ששלפתי מעמקי דמיוני, ולהכין מתכת טהורה. קצת קשה, לוותר על חלקים מהסיפור שעליו עבדתי קשה בכתיבה לפרטי פרטים, אבל לאחר כמה שבועות הגעתי לגרסה סופית.

מורבלי לויזואלי (From Verbal to Visual)

יפה מאוד – יש סיפור. אך האם זה לא צריך להיות סרט אנימציה?

התרגום ממילים לתמונות קשה מאוד. נכון שכל תמונה שווה אלף מילים, אבל יש לך 24 תמונות בשנייה בסרט של שעתיים ועדיין הספר היה טוב יותר.

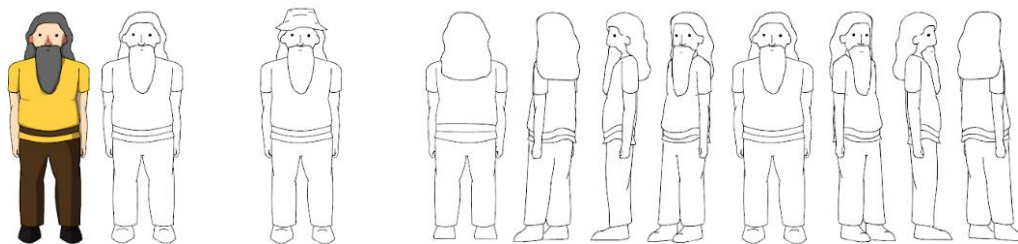
אני לא מתיימר להיות רב אומן, אבל כאן נכנס אחד מתחומי הידע שלי – העיצוב – והיה עליי לשבת ולעצב כל אחת מן הדמויות המופיעות בסרט.



בזכות שעות רבות שבהן מצאתי את עצמי בוחה בקיר של הכיתה, אלה הן הדמויות שאותן הכנתי :

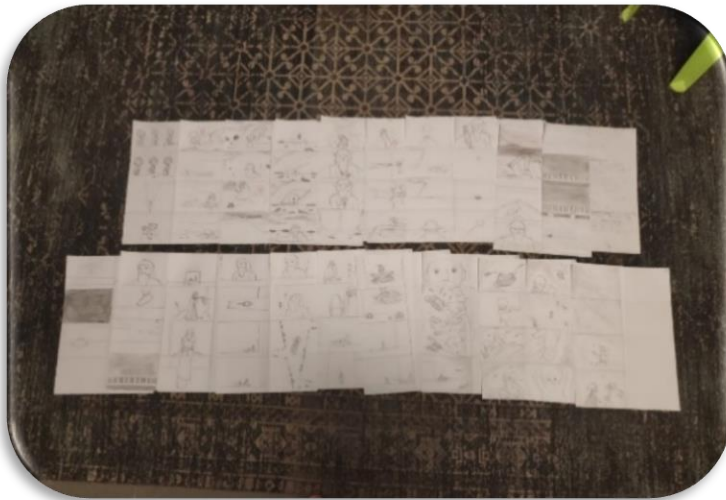


לדמות המרכזית – **הדייג** – הכנתי גם **Turnaround** – מודל של הדמות מכל זווית בסיבוב. עשיתי זאת על מנת לוודא שהדייג נמצא בפרופורציות נכונות ולא משנה מאיפה מסתכלים עליו.



הפקת הסרט

בימוי – Storyboard



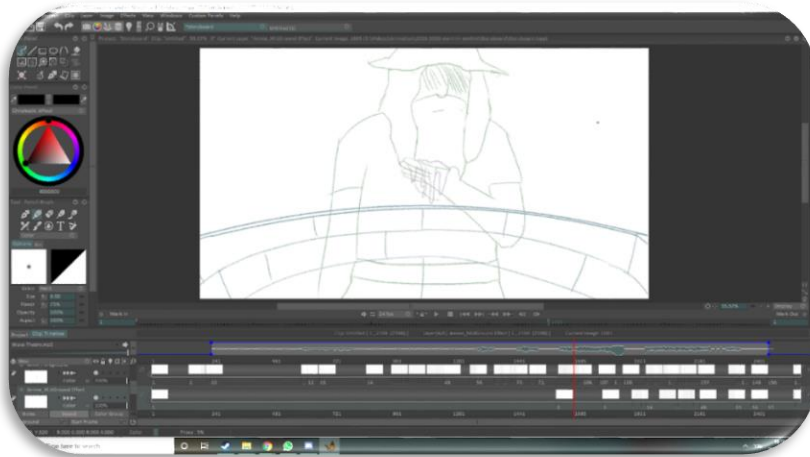
הסטוריבורד

עד כה עסקתי בקדם הפקה – החלטתי מה, מי, מתי, איפה, למה ואיך יקרה מה שיקרה – ועתה הגיע הזמן להפקת הסרט. השלב הראשון בהפקת סרט, ולא רק סרט אנימציה, הינו ה-Storyboard, שבו מציירים כל שוט – פרק זמן שבו ה"מצלמה" נשארת במקום אחד – על כמה דפים ומחברים אותם ברצף על מנת ליצור מעין קומיקס גדול המכיל את כל הסרט. ה-Storyboard מאפשר לתכנן ולביים כל שוט, סצנה וסיקוונס (רצף אירועים במקום אחד).

הפקת הסרט - Animatic

ה-Animatic מהווה את תחילתה של האנימציה בסרט, בתור שלב ביניים, בין הדומם לנע. Animatic הוא למעשה גרסה מופשטת של הסרט הסופי, כאשר המיקוד הוא על צורה ותנועה, ולא על הפרטים הקטנים.

בשלב זה לא נותר לי אלא לנטוש את מחברתי הקטנה והשחורה, את העיפרון שאינו מחודד כמו שצריך, ואת המחק שמשאיר קצת מהעופרת על הדף. מכיוון שהאנימציה הסופית עומדת להיות דיגיטלית, כך גם הסטוריבורד צריך להיות.



עבדתי עם תוכנת Animate (לשעבר Flash) של חברת Adobe. אישית, לא אהבתי את החברה, אך לא הכרתי דבר אחר. למזלי לחנן היו תוכנות אחרות – תוכנה צרפתית בשם TVPaint, המהווה סטנדרט מקצועי לחברות כמו דיסני, ובהחלט הוכיחה את עצמה כאן בתור תוכנה אינטואיטיבית, נוחה ויעילה מאוד.

ציירתי את כל התמונות, ומיקמתי אותן על ציר הזמן כך שתנועתן תיראה (ותורגש) הגיונית וטבעית. התברר שעשיתי עבודה בפרופורציות קצת שגויות, וכמובן שהסרט שתכננתי היה ארוך מדי לכמות הזמן שנתרה לסיום האנימציה המלאה ולהפקתה.

הלחנת הסרט

מגיע שלב ההלחנה – את רוב הסרטים מסיימים להכין ואז מתאימים להם מוזיקה, אך רוב מפיקי הסרטים אינם גם מוזיקאים. מוזיקה לסרטים היא סוגה שמתפתחת ללא הרף, ופיתוחים שונים בתחום הקולנוע ובתחום המוזיקה מייצרים כל פעם משהו חדש. אפשר היה לעשות עבודת מחקר שלמה רק על נושא זה, ולכן החלטתי להכין מוזיקה שאני אוהב ולתת לה להשפיע על הסרט הסופי.

אני אוהב ג'אז, פיוז'ן, מטאל פרוגרסיבי ואפילו רוק ומטאל כבדים. אומנים כמו אבישי כהן (הבסיסט), ורון מיניס, חברה כמו Tool ו-Tigran Hamasyan ועד לקלסיקות כמו Miles Davis ו-Chick Corea – לכולם הייתה השפעה עליי ועל היצירה הסופית. לאור תקופת הקורונה החלטתי לתכנת את הסאונד של כל הכלים, ולהוסיף את התופים באופן חי. הכנתי כבר כמה שירים בדרך זו, וזה הקל עליי שכן לא הייתי צריך להיאבק בסגר על מנת לקיים חזרות עם מוזיקאים אחרים.

לאחר שכתבתי את היצירה במלואה, התאמתי אליה את ה-Animatic – חתכתי פה והוספתי שם עד שהגעתי ל-Animatic שאני מרוצה ממנו עם מוזיקה.

הכנת התוצר המוגמר

בניגוד למה שודאי חושבים, מדובר בחלק ה"משעמם" ביותר ביצירת סרט – כתבתי סיפור, ביימתי אותו, עיצבתי כמה דמויות שונות ומשונות, הכנתי סקיצה של האנימציה המלאה, כתבתי מוזיקה – ולמעשה עכשיו אני "רק" צריך לעבור על הדברים ולגרום להם להיות יפים. את התופים הקלטתי בסטודיו של המורה שלי.

סיכום



"מחלה" שמדביקה כל יוצר צעיר – השאיפות הגבוהות והאכזבה כאשר מתברר שלא ניתן יהיה לבצען. אך, מעולם לא נתתי לזה לעצור אותי, והכנתי תכנית שלפיה חציו הראשון של הסרט יכול לעמוד בפני עצמו. לכן, חילקתי את הסרט לשני מקטעים – את הראשון אסיים בפרויקט זה – "על קצה המים", ואת חציו השני – "בין מים לתהום" – אסיים במועד מאוחר יותר, ולא אצטרך לוותר על העבודה היצירתית שעשיתי (הסרטונים שלי מופיעים ב-Youtube תחת השם The Zaper).

Alive, Written and preformed by Hiromi Uehara

Avatar Studios, 2013. Music Album

EMI / Blue Note, 2011. Music Album

Heart, Directed by Erick Oh

Nausicaa of the Valley of the Wind, Directed by Hayao Miyazaki

No studio, 1999. Film

No studio, 2010. Film

Plus Loin Music, 2009. Music Album

Princess Mononoke, Directed by Hayao Miyazaki

Red Hail, Written and preformed by Tigran Hamasyan

Seven Seas, Written and preformed by Avishai Cohen

Spirited Away, Directed by Hayao Miyazaki

Studio Ghibli, 2001. Film

Studio Ghibli, 1984. Film

Studio Ghibli, 1997. Film

The Old Man and the Sea, Directed by Aleksandr Petrov

