

כתב העת של רשת אסכולה | ספטמבר 2025

12 עיין ערך:



אסכולה
רשת הבוגרים



מרכז מדעני העתיד
MAIMONIDES FUND

12	עיון ערד:
----	-----------

03 דבר המערכת

05 עכשיו טורי
שלו וקסמן

07 מדור כנסים
רינה סבוסטיאנוב

08 בינה מלאכותית
רז קליינרמן

12 הרעיון של וויטן
לילי ריש קוריציקי

17 שני חזונות אוטופיים בספרות המערבית
איתמר חנוני

21 מדור כנסים
שרון מלטר

27 מדור האומנות

דבר המערכת

ראש השנה ויום הכיפורים מזמינים אותנו להתבוננות פנימית ולתקווה מחודשת. ראש השנה מסמל התחלה חדשה והזדמנויות חדשות לשנה הקרובה, ויום הכיפורים מעניק לנו את האפשרות לעצור, לסלוח, ולבקש מחילה. שני החגים יחדיו מזכירים לנו את היכולת לפתוח דף חדש, לשתף, לתמוך אחד בשני ולגדול ביחד.

בחודשים האחרונים קהילת אסכולה התרחבה והצטרפו לרשת 540 בוגרות ובוגרי תוכניות מרכז מדעי העתיד ונבחרות ישראל במדעים - שכבה 9 ברוכות וברוכים הבאים! מצפים לראותכם ולראותכן בפעילויות ברשת ומחכים לרעיונות חדשים שירתמו לקהילה.

הגיליון הנוכחי מביא עמו מגוון מאמרים, הגיגים ומחשבות בנושאים מגוונים: השימושים פורצי דרך של הבינה המלאכותית ברפואה, דרך העיסוק בשאלות העמוקות של תורת הקשרים, שערים לוגיים ומחשוב קוונטי ועד החזונות האוטופיים בכתיבה המערבית. השילוב בין מדע מדויק, טכנולוגיה מתקדמת ומחשבה הומניסטית מזכיר לנו את חוזקתה של הרשת - מפגש בין דיסציפלינות המתעצם בזכות שיח קהילתי פתוח ומכרה.

תודה לכל מי שלקחו חלק במלאכת כתיבת גיליון זה - כותבות, כותבים, עורכות ועורכים. בזכותכם אנו יכולים לפתוח שנה חדשה עם תזכורת לכוחו של הידע לחבר בין אנשים, לחוסנה של הקהילה ולתקוותנו המשותפת.

אנו תפילה לשנה טובה יותר,
בתקווה להחזרת החטופים כולם,
לבריאות הפצועים ושלמות הגוף והנפש של חיילינו.
צוות המערכת.

מעוניינים.ות לכתוב לגיליון
הבא של עיין ערך?

יש לכם.ן יצירה שתמצו לחשוף
(שיר, תמונה, ציור, סיפור קצר)?

לחצו פה ושתפו אותנו

שלושה הַמה נפלאו ממני

כותב: שלו וקסמן

השינוי בתפיסתי, שאולי נחשתם שהגיע בעקבות השבעה באוקטובר, חל דווקא במהלך הקיץ שלפניו. מעלליי בקיץ הזה כללו השתתפות באולימפיאדה הבינלאומית בבילוגיה (שם מוצאי ההודי עזר לי להתחבר עם המארגנים, וגם ליצור חבורת מתחרים דוברי הודית ממדינות שונות בעולם); במחנה של תוכנית הדו-קיום meet (שבו, בין ספרינטים של עבודה על סטארט-אפ, התעמתי עם חבריי למחזור כשידי תמונה של החאג' אמן אל-חוסייני משוחח עם אדולף היטלר); ובמחנה קיץ טראומטי אך זכור לטובה בנבחרת הפיזיקה.

בין כל אלה מצאתי גם זמן לחכך בדעתי על חוק השבות וזכות השיבה, על כדים, גנים וגנין, על תורה ועבודה, על נביאי ישראל שחזו מה שחזו, ועל היום בו החרב תפסיק לאכול ותתחיל להתכת. לא אפרט כאן את מחשבותי בנושאים אלו – מה שחשוב הוא שניצתה אצלי תקווה. עיקרון שאימצתי בקיץ ההוא, הוא שאם אין לי פתרון לבעיה, סימן שאני לא מבין את הבעיה. כך גם בנוגע לחיים בארץ – הסירוב שלי להשלים עם מסקנת הפלונטר הלא פתיר הכריח אותי לחקור עוד, עד שהרגשתי שאני מבין מספיק כדי לצייר קווי מתאר לעתיד טוב יותר.

חמוש ברשפי תקווה עזה, פניתי לנושא ששיסע אז את המדינה – הרפורמה המשפטית. את מה שבעיניי היינו זקוקים לו יותר מכל – דיון אמיתי, אמפתי ובו זמנית מעוגן בעובדות – לא מצאתי בשום מקום. לאחר שיחה מרתקת עם עו"ד אילן בומבך שנקטעה באיבה, יזמתי פיילוט בבית הספר שלי, בתקווה להתחיל תהליך שיתרחב בקרב הנוער. רתמתי את חבריי לשכבה בעלי העמדות הניציות ביותר, והשגתי את תמיכת בית הספר לתוכנית שהייתה אמורה להתחיל אחרי החגים – אותם חגים שקפאו בשמחת תורה.

יחסי לשירות שלי בצה"ל לא השתנה בעקבות מאורעות אוקטובר – שלאחר שעיקלתי את זוועותיהם הבנתי, לצערי, שהם כלל לא מפתיעים אותי. התהליך שעברתי בקיץ שלפניהם, הוא שהבהיר לי שאני מחויב לתרומה במלוא יכולתי, בפרט בתחום הביטחון. ההתלבטות אם לרדת מהארץ הוחלפה בהתלבטות בין מסלולים צבאיים בני תשע שנים. ולבסוף, החלום לעבור לצרפת הומר ברגע גורלי באולם בית צרפת.

90 נערים, לבושים בחולצה עם הדפס של כרה, אוחזים תיקייה כחולה.

ההחלטה הכי קשה שקיבלתי עד כה. הפעם הראשונה שבה פעולה

ניווט הוא אתגר שלא מפסיק להפתיע אותי. כשברצוני להגיע ליעד מסוים, אני בוחר את דרכי מבין שלל הדרכים שמובילות לעברו. לעיתים אני מתכנן את הדרך מראש, ולעיתים אני מסתפק בכיוון כללי ובמצפן הפנימי שלי. הגישה השנייה היא האהובה עליי, למרות שהיא הובילה אותי לא פעם למצבים כמו עמידה במבוכה במבוי סתום בסמטה ירושלמית, קרוב מאוד ליעדי, אך על שפת חומה שנמצאת כמה מטרים מעליי; או יציאה מסבך קוצי ברקן, שרוט וחבול אך מסופק מכך שמצאתי קיצור דרך חדש. לפעמים, אני עולה על שבילים שנראים מעניינים ללא מחשבה על כיוון ויעד. דוגמה לכך היא הטור שאתם קוראים עכשיו – לא החלטתי לאן הוא מתכנס, ובכל זאת, הנה הוא לפניכם. כשסלעית הציעה לי לכתוב טור על "כל מה שאתה עושה", קיבלתי הזדמנות לשאול את עצמי – מה אני עושה? וחשוב מכך, למה? אני מודה לסלעית על הזדמנות זו ועל התמיכה לאורך השנים, ולכל צוות מרכז מדעני העתיד שהיה חלק בלתי נפרד מהמסע שעברתי.

כשבוע לפני הצו הראשון שלי, ישבתי באודיטוריום בבניין המכינה בטכניון, ובמקום להקשיב להרצאה, חרשתי את אתר מיטב. לאחר שמצאתי Easter Egg בלומדת ההכנה לדפ"ר, פניתי להשוות מסלולים שנראו רלוונטיים עבורי בצבא – שחקים, גאמ"א, עתודה – ולמורת רוחי, גיליתי שכולם דורשים התחייבות לשלוש שנות קבע. לא בשבילי. באותה העת, דעתי על החיים בארץ הייתה כזו: הזדהיתי מאוד עם הרעיון הציוני, אך חשבתי שהוא חומר טוב לספר יותר מאשר לתנועה מדינית. אחרי המשבר הפוליטי, גלי פיגועים וההכרזה על רפורמה משפטית ואיתה המחאה, הבנתי שאל לי לצפות לחיים יציבים ובטוחים בארץ. לנצח תאכל חרב, ולנצח נריב מהו "חזונם של נביאי ישראל". קראתי על הגשת מועמדות ל-MIT ועל פטור מגיוס מטעמי מצפון (אפשרות שזנחתי לאחר בחינה לאור העיקרון "היה השינוי שאתה רוצה לראות בעולם"), ופנטזתי על חיים כ"צרפתי בן דת משה". למרות החיבור האישי שלי לארץ, והמורשת המשפחתית של שרידת השואה מצד אחד ועלייה מטעמי ציונות גרידא מהצד השני, פשוט לא ראיתי כאן עתיד.

זו לא הייתה פסימיות של ייאוש רגעי. בתור אדם שאוהב ללמוד על פוליטיקה והיסטוריה, חילוני עם חיבור עמוק ליהדות שכל משפחתו מגיעה מהציונות הדתית, וציוני שחותר לדו-קיום ומשתתף בתוכניות חינוכיות לנוער יהודי וערבי – כבר בכיתה י"א הייתה לי הבנה לא רעה של המצב במדינה, שהובילה למסקנה שנראתה לי בלתי נמנעת – הפלונטר אינו פתיר.

צבאיים בני תשע שנים. ולבסוף, החלום לעבור לצרפת הומר ברגע גורלי באולם בית צרפת.

90 נערים, לבושים בחולצה עם הדפס של פרה, אוחזים תיקייה כחולה.

ההחלטה הכי קשה שקיבלתי עד כה. הפעם הראשונה שבה פעולה שלי קובעת באופן בלתי הפיך את עשר השנים הבאות בחיי.

גם אני, כיאה למתקבל טרי למחזור מ"ו של תלפיות, לבשתי חולצה עם הדפס של פרה, וגם אני החזקתי חוזה. אך לדאבונו של חברי היקר שישב לשמאלי – חבר שהכרתי באותו מחנה פיזיקה טראומטי, הזכור לטובה בעיקר בזכותו – הפצרותיו לא עזרו: אני לא חתמתי.

יומיים לפני כן, לאחר שיחות עם מפקד תלפיות ועם רמ"ח ביוטכנולוגיה במפא"ת, החלטתי, לאחר התלבטות קשה, להצטרף למסלול BIO החדש של מפא"ת. את הבחירה המפוקפקת הסברתי כך: בהנחה שהתוכנית החדשה הוקמה מתוך ראיית הנולד וציפית צורך בטחוני אמיתי, יש לאייש אותה בחלוצים בעלי יוזמה, יצירתיות ותשוקה לביוולוגיה ולשילוב רב תחומי. חשתי כי אין ספק שבתלפיות התרומה שלי תהיה משמעותית, אבל ב-BIO, התרומה שלי כמוביל בתחום חדש במערכת, עשויה להיות חסרת תחליף.

שנה לאחר מכן, מוקדם לומר אם זו הייתה הבחירה הנכונה. ספק אם ישנה בחירה "נכונה". אני מוקיר את ההזדמנויות שבחירה זו פתחה בפניי השנה, ביניהן עיצוב דרך אקדמית לא שגרתית – תואר במדעי המחשב וביוולוגיה חישובית, בשילוב חטיבה במדעי המוח, קורסים בפיזיקה ועבודה במעבדת מיקרו-תעופה; פעילות חינוכית – התנדבות בבית הספר הדו-לשוני בירושלים, עבודה כמורה למדמ"ח ב-meet, והדרכה בנבחרת הביוולוגיה; והרחבת אופקים מעבר לכך, למשל בהשתתפות בחבורת גמרא לצד פרוץ' ישראל אומן. נוסף על כך, לי ולחבריי הנהדרים לתוכנית (ביניהם אסכולאים רבים, למשל, אופיר מילר שהרצה ב-Meet and Mind), ניתנה הזכות לעצב אותה מתחילתה, ואנו פועלים לשיפור וביסוסה למען המחזורים הבאים.

אותו רגע גורלי בבית צרפת חתם עבורי תקופה אינטנסיבית שהחלה בשבעה באוקטובר – תקופה שבה חרשתי את הארץ, אם לטובת מיונים לצה"ל ואם עבור משימות התנדבות שונות. התקופה שנותרה עד הצטרפותי ל-BIO הייתה מרעישה הרבה פחות, ובסוף הקיץ כבר נכנסתי לשגרה כאשר עבדתי במעבדת הניורואקולוגיה באוניברסיטת תל אביב.

אולי שגרה זה לא בשבילי. יום אחד, בעודי מעורר חיפושיות במעבדה, קיבלתי את אחת ההודעות הראשונות מרשת אסכולה – הזמנה להתנדב בשיקום קיבוצי העוטף. לא חשבתי פעמיים לפני שנרשמתי, אבל כן חשבתי פעמיים – ואולי יותר – לפני שאיישתי את משבצת "איש הקשר עם המארגן בשטח" בקובץ האקסל. רציתי לרדת ליום התנדבות ולחזור, ולא לקבל על עצמי אחריות של תיאום וארגון. אבל אז, עצרתי לרגע והרהרתי; היה השינוי שאתה רוצה לראות בעולם.

לא תיארתי לעצמי עד כמה ההחלטה הקטנה הזו תשפיע עליי. משיחת הטלפון עם אייל בן דוד, איש שהקדיש עצמו לשיקום קהילות העוטף, הבנתי שקיים צורך במתנדבים נוספים מעבר לאלו שנרשמו. אספתי עוד כמה אנשים, וארגנתי מקום לינה עבור אלו שרצו להתנדב יום נוסף. איני יודע מדוע למחרת אייל בחר להתקשר דווקא אליי כדי שאמצא מתנדבים למשימה נוספת. מפה לשם, חבר הביא חבר, ו-11 איש הפכו לקבוצה של מעל מאה בני נוער, שבשיתוף עם קבוצות נוער נוספות הוציאה בקיץ עשרות מתנדבים מדי שבוע למשימות

שיקום קהילות העוטף. אני שמח שזכינו לסייע להשבת תחושת הבית לקהילות שאיבדו את ביתן, ובכל פעם מחדש, אני נפעם מהמחשבה על אותה בחירה, קטנה אך גדולה, מול משבצת תמימה בקובץ אקסל.

שלוש התחנות שתיארתי – ההסתעפות של שאלת חיי בארץ, הצומת המרכזי של בחירת מסלולי הצבאי, והפנייה החמקמקה של ההרשמה להתנדבות – עיצבו את הדרך בה למדתי לנווט בחיי: לשאוף להבין בעיות לעומק, לא לפחד לצעוד בדרך לא זרועה, לא לשקוע בחרטות, ולאמץ הזדמנויות ליזום ולהוביל.

ובאשר לעתיד – הדרך עודנה נפקחת לאורך. דרך שתכלול מקטעים מתוכננים בקפידה, ומקטעים ברוח הכיוון הכללי. דרך שתוביל לעבר מטרות מוגדרות, וגם לעבר בירור שאיפות ערטילאיות שלי (שהגדולה שבהן עוסקת בתחום החינוך). תהא הדרך אשר תהא, אני שמח שבחרתי ללכת בשבילי ארץ ישראל. אני שמח שזכיתי לצעוד לצד אנשים מוכשרים ממגוון תחומים ורקעים. ואני שמח על ההזדמנות להעמיק את הקשר עם קהילת אסכולה ולנווט יחד, בטיולים ובחיים.

וכאן אסיים. אולי כמוני, גם אתם לא בטוחים לאן הטור הזה מתכנס, אבל אני מקווה שלפחות נהניתם מהדרך... תודה על שקראתם!



שלו וקסמן, בוגר תוכנית אודיסיאה בטכניון, נבחרת ישראל בפיזיקה ונבחרת ישראל בביוולוגיה. סטודנט שנה א' בתוכנית BIO של מפא"ת. אוהב ללמוד וללמד, ורוצה לדעת הכול מהכול. מייל shalev.wachsmann@mail.huji.ac.il

Schrodinger European group user

כותבת: רינה סבוסטיאנוב

חברת שרדינגר פיתחה פלטפורמה רחבה מאוד עם שיטות חישוביות מגוונות שכל אחת מהן הייתה בפיתוח במשך עשורים בכלי אחד שכל אחד יכול להשתמש בו ברמות משתנות של חיבור לכתיבת קוד. זה נשמע מדהים, איפה הקאץ? הקושי הגדול ביותר הוא לבנות מודל שייתן חיזוי מדויק לתוצאות ניסיוניות. בניית מודל כזה לוקחת זמן וכמה מחזורים של מעבר בין החישובי לנסייני עד למציאת מודל אמין. את השיטה הזו ייסדנו במעבדה רק לפני שנה, וכדי ללמוד מאנשים שכבר עשו את המעבר הזה מהחישובי לנסייני כמה פעמים נסעתי לכנס האירופאי למשתמשי התוכנה שהתקיים השנה בבודפשט בחודש יוני.

מעבר להרצאות המדהימות שחשפו אותי לפיתוחים שתעשיית התרופות מובילה באמצעות הכלי הזה, הייתה לי הזדמנות לדבר אחד על אחד עם רבים מאותם אנשים. את העצות שקיבלתי מהם על המעבר הראשון מהחישובי לנסייני אוכל לממש כבר בחודשים הקרובים! מרגש לראות מה עוד צופן העתיד לתחום הזה שמתפתח בקצב אדיר. אם אתם מתעניינים בתחום או שכבר עושים שימוש בתוכנה הזו, בואו נהיה בקשר!

<https://www.youtube.com/watch?v=DWbOsE7tq70>



רינה סבוסטיאנוב, בוגרת תוכנית אלפא באוניברסיטת תל אביב ונבחרת ישראל בכימיה. סטודנטית לדוקטורט במעבדה של פרופ' רונית סצ'י-פאינרו. מפתחת מעכבים מולקולריים למחלת הסרטן, תוך שימוש בתוכנות מחשב לתיכנון. אוהבת טיולים בטבע, ללמוד שפות ולאחרונה טיפוס. מייל: sevastianov@tauex.tau.ac.il

במאמר זה אשתף בחוויותיי מכנס שהתקיים בבודפשט, אך לפני שאיכנס לפרטיו, אני רוצה לתת הקדמה קטנה למחקר שלי ולספר מה הוא תחום פיתוח תרופות באמצעות מחשב ולמה הוא תופס תעוצה בשנים האחרונות.

בתחילת שנות ה-2000, חוקרים מאוניברסיטת סטנפורד פרסמו את הניסוח שלהם ל"חוק Eroom" -היפוך אותיות של "חוק Moore" המוכר. חוק אירוס מציינ כי העלות של מו"פ הנדרש לאישור תרופה חדשה עלתה באופן מעריכי במהלך 60 השנים האחרונות. כיום, פיתוח תרופה חדשה בודדת עולה בין שניים לשלושה מיליארד דולר ונמשך מעל עשר שנים. עם זאת, הודות לפריצות דרך מהשנים האחרונות, אנו מתחילים לראות סטייה מחוק אירוס, דבר שמעורר תקווה להיפוך המגמה.

עיצוב תרופות בסיוע מחשב (Computer-aided drug design) הוא תחום שקיים כבר כמה עשורים. למרות זאת, רק בשנים האחרונות הוא נעשה לכלי נפוץ בתהליך גילוי תרופות, הן בתעשיית התרופות והן באקדמיה. זה קורה בגלל עלייה משמעותית בכוח החישובי, זמינות של ספריות נרחבות של תרכובות כימיות לסריקות ראשוניות ומתקדמות, הבנה טובה יותר של תהליכים ביולוגיים המובילים למחלות ברמת החלבון, ושפע מבנים קריסטלוגרפיים של חלבונים מטר.

יש בידנו נוגדנים כנגד רבים מהחלבונים הללו ולהם יתרונות רבים כמו קישור חזק, ספציפיות גבוהה ויציבות במחזור הדם. מולקולות קטנות הן מה שאנחנו מדמיים כשאנחנו חושבים על תרופות, ובניגוד לנוגדנים, הן יכולות להינתן בכדורים שאותם המטופל יכול לקחת בנוחות של ביתו מבלי להגיע לאשפוז פעם בשלושה שבועות לשם מתן מנת נוגדן. כמו כן, עלות הייצור של כדורים אלה נמוכה יותר, מה שמנגיש את התרופה לציבור רחב יותר של חולים. יתרה מכך, בסרטן הבלבל שאותו אני חוקרת נוצרת רקמת חיבור קשיחה שלא מאפשרת חדירה של נוגדנים. מולקולות קטנות, לעומת זאת, יכולות לעבור דיפוזיה לרקמה כזו בקלות רבה יותר, ולפיכך לפעול ביעילות רבה יותר.

אז בגדול המטרה שלי היא למצוא מולקולה קטנה שתעכב אינטראקציה בין שני חלבונים לטיפול בסרטן הבלבל.

מכון ון ליר בירושלים – מהפכת הבינה מלאכותית ברפואה; יעילות, דיוק ורפואה הוגנת

כותב: רז קליינרמן
עורכים: אלון אלכסנדר, אחינעם בלאו ושירה ששון

מצבים כגון דיכאון, חרדה או סכיזופרניה. גישה זו מספקת מענה אבחוני חדשני ומסייעת בהתאמת טיפול מדויק יותר למטופל.

על אף ההתקדמות בתחומים אלו, בסקירה זו ארצה להתעמק בצדדים ובשימושים הפחות מוכרים של בי"מ.

הקלת הנטל על המערכת הרפואית

אחד ההיבטים הפחות מוכרים של בינה מלאכותית הוא היכולת להפחית את העומס האדמיניסטרטיבי והקוגניטיבי המוטל על רופאים. עומס זה הוא גורם מרכזי לשחיקה, לירידה באיכות הקשר עם מטופלים ואף לשגיאות רפואיות. בעשור האחרון, יישומי בי"מ ובעיקר טכנולוגיות תיעוד אמביינטי (ambient documentation) מתפקדים כמתעדים וככלי עזר לשפה. הללו מציגים פוטנציאל מוכח להקלת הנטל [1], ומראים ירידה מובהקת בשיעורי שחיקה תוך שבועות, קיצור ניכר של זמן תיעוד, ושיפור במדדי רווחה מקצועית. עם זאת, ההשפעה תלויה ביישום תקין, באבטחת מידע ובהטמעה קלינית אחראית. חלק זה של המאמר יציג את הראיות הבולטות ואת הטיעונים המרכזיים לכך שבי"מ מפחיתה את הלחץ על הרופא, לצד מגבלות ואתגרים.

מערכות בי"מ מסוגלות לשלוף מידע רלוונטי, להציע אבחנות מבוססות נתונים ולהתריע על חריגות. בכך הן מפחיתות את העומס המנטלי ומאפשרות ריכוז במטופל. אף ששימוש בהן לשם אבחנה ללא פיקוח אנושי עדיין אינו בנמצא, שימוש לשם הקטנת העומס האדמיניסטרטיבי בהחלט קיים. אחד מהקשיים המרכזיים במערכת הבריאות המודרנית אינו נובע מהצד הקליני של הרפואה, אלא מהצד הבירוקרטי: הצורך במילוי טפסים, עדכון רשומות, קידוד חיובים, תיעוד פגישות וניהול תקשורת. לפי נתוני ה-AMA (American Medical Association), רופאים ואחיות מקדישים עד חצי מזמן עבודתם למטלות אדמיניסטרטיביות שאינן כוללות טיפול ישיר במטופל [2] עד כדי כך שיש המתלוצצים והמזהים את תואר ה-MD גם כ-Master of Documentation.

אדמיניסטרציה רפואית היא בעלת סטנדרטים קבועים, ולכן ניתנת לאוטומציה. מתחילת הרפואה המודרנית רופאים תיעדו את המצב

במסגרת תוכנית ההעמקה של אסכולה "אוטונומיה בעולם של טכנולוגיה" התכנסו חברי הרשת ללמוד ולדון בשימושים של בינה מלאכותית בשדה הקרב וברפואה בסמינר שנערך במכון ון ליר בירושלים. המשתתפים נחלקו לקבוצות ודנו במסגרת שני דיבייטים במתחים, בקשיים, ביתרונות ובאתיקה הכרוכים בשימוש בבינה מלאכותית בכל אחד מהתחומים.

במאמר זה אסקור ואציג חלק מהיתרונות שעלו בדיון מכון ון ליר בירושלים בנוגע לשימוש בבינה מלאכותית (להלן: בי"מ) ברפואה.

מהפכת הבינה המלאכותית ברפואה

בינה מלאכותית שיכולה לשפר את הרפואה המודרנית ולהגיע לביצועים טובים יותר מהרופאים המוצלחים בעולם נראתה לנו מדע בדיוני עד לפני כמה שנים, אך כיום יותר ויותר בכירים במערכות בריאות רואים את הבינה מלאכותית כאמצעי הנותן "מרחב נשימה" לרופא ומספק ראיות אמפיריות למחלות, מנגנוני השפעה ואף השלכות מערכתיות.

ככלל, הציפיות שלנו מבי"מ גבוהות במיוחד, ושמענו רבות על שימושיה – החל בניתוח צילומי רנטגן, CT, MRI וממוגרפיה, עבור בבריאות דיגיטלית ורפואת קהילה (בין היתר: שימוש באפליקציות שמנטרות לחץ דם וחמצן בדם ומזהות חריגות ואנמליות) וכלה בסייענים דיגיטליים בדמות הצ'טבוטים הרפואיים.

בי"מ תופסת מקום מרכזי בתחומי הרפואה השונים, ובפרט בגנטיקה, בפתולוגיה ובפסיכיאטריה. בתחום הגנטיקה, נעשה בה שימוש לניתוח רצפי דנ"א ולזיהוי דפוסים המאפשרים הערכה מוקדמת של סיכון למחלות נפוצות, ובהן מחלות לב וכלי דם או סוכרת. יכולת זו מאפשרת התערבות מונעת ותכנון טיפולי מותאם אישית, עוד בטרם הופעת התסמינים. בתחום הפתולוגיה, מערכות למידה עמוקה מסוגלות לנתח באופן אוטומטי דימות היסטולוגי של רקמות ולזהות מאפיינים מיקרוסקופיים שלא ניתן לאתר בעין אנושית. כך ניתן לנבא חוסר יציבות בדנ"א ולזהות מצבים שבהם קטעי דנ"א חוזרים על עצמם ונוצרים שיבושים או מוטציות (לרוב בגלל פגמים במערכת ניהול הדנ"א) בתחום הפסיכיאטריה, פותחו כלים המנתחים דפוסי שפה, קול ותנועה, לצורך זיהוי מוקדם של

מעט מחקרים המצביעים על השפעה יתרה שלהן על מחלקות שונות באופן ספציפי (השלכות על כל מחלקה בנפרד). לפני זמן לא רב היה חשש שהטמעה של מערכות שכאלו תהיה חלק מ"אפקט החדשנות" (Novelty effect), שמשמעו ששיפור בביצועים או בתחושת המשתמשים נובע מהתלהבות ראשונית מטכנולוגיה חדשה ולא בהכרח מיתרון אמיתי (ניתן לראות זאת הרבה פעמים בהטמעה של אמצעי למידה בבתי ספר). כיום נראה שגם אם שביעות הרצון של המשתמשים תשתנה לאורך זמן ואף תפחת (מה שכרגע לא נראה באופן), היתרון התועלת הבא לידי ביטוי בחיסכון של זמן שריר וקיים.

האצת החדשנות במחקר פיתוח תרופות

זוג יישומים מרכזיים נוספים שיש לבינ"מ ברפואה הוא רפואה מותאמת אישית ומחקר רפואי ופיתוח תרופות.

כבר עשרות שנים שהיעילות של פיתוח תרופות נשחקת. מאז שנות ה-50, מספר התרופות החדשות המאושרות לכל מיליארד דולר שמושקע במחקר ופיתוח ירד פי 80 לערך (תופעה המוכרת כ-"Eroom's law", ההפך מחוק מור הנוגע לשבבים). במילים פשוטות: המחקר יקר יותר, איטי יותר, ומסובך יותר, וכתוצאה מכך עלות מחקר ופיתוח התרופות עולה מעריכית. מחקר ופיתוח תרופות נחשב כיום לאחד התחומים המורכבים והיקרים ביותר ברפואה המודרנית. תהליך ממוצע של גילוי, בדיקה ואישור תרופה חדשה עשוי להימשך מעל עשור ולעלות מיליארדי דולרים, ובדרך כלל יותר מ-90% מהמולקולות שנבדקות נכשלות עוד לפני הכניסה לשלב הניסויים הקליניים. [5] במטרה להתגבר על כך, מדענים מחפשים מנועי יעילות. בינ"מ מציעה קיצור מחזורי בנקודות הכואבות של הגילוי (זהו מטרות, עיצוב מולקולות, סינון וירטואלי, חיזוי רעילות) ובנקודות הכואבות של הקליניקה (התאמה אישית, חיזוי תגובה לטיפול), אך חשוב לזכור שהראיות מלמדות גם על מגבלות ועל הצורך בבקרה קפדנית לאורך זמן.

בגזרת מחקר ופיתוח תרופות, אפשר לראות את תרומתה של בינ"מ בכמה דרכים עיקריות, וביניהן מיפוי תלת-ממדי של מטרות ביולוגיות, שכן הבסיס של כל תרופה הוא ההבנה אילו חלבונים או קולטנים בגוף מהווים מטרה מתאימה להתערבות האדם. המבנה התלת-ממדי של חלבון קובע את תפקודו. חיזוי של מבנה זה על סמך רצף הדנ"א בלבד נחשב לאחד האתגרים הגדולים בתחום, במיוחד בשנים האחרונות, והוא חיוני כדי לדעת היכן מולקולה חדשה יכולה להיקשר ולהשפיע. כאן בינ"מ משחקת תפקיד מפתח: בעזרת אלגוריתמים מתקדמים כמו AlphaFold של Deepmind ניתן כיום לחזות מבנים תלת-ממדיים בדיוק שלא היה אפשרי בעבר [6] ובמשאבים נמוכים משמעותית. המשמעות היא שבעתיד הלא רחוק ייתכן קיצור דרמטי של הזמן הדרוש להבנה ראשונית של מטרות תרופתיות חדשות. למעשה, ההתפתחות הזו משמעותית כל כך, שהיא נחשבת לאחת הקפיצות המדעיות הגדולות בעשורים האחרונים. כיום מקווים שה-AlphaFold יצמצם משמעותית את הכלים האחרים המשמשים את הקהילה המדעית כדוגמת קריסטלוגרפיה או מיקרוסקופ אלקטרוני, ובשנת 2020 Deepmind הראתה לראשונה שאלגוריתם בינ"מ יכול להגיע לרמת דיוק כמעט זהה לזו של ניסויים פיזיים. [7] עוד נדבך חשוב הוא העובדה שה-AlphaFold נגיש גם למעבדות ומכוני מחקר קטנים

לעקוב בזמן אמת אחר השינויים. כיום התיעוד נעשה בעיקר דרך תבניות, שבתוכן שדות נתונים מוגדרים (אלרגיות, תרופות, בעיות פעילות וכדומה). מאחר שהתוצרים הסופיים ממילא נדרשים לעמוד בכללי צורה ותוכן, הדבר מאפשר לאלגוריתמים למפות את השיחה של הרופא עם המטופל ולעבד אותה לתקציר, ולאחר מכן לרשומה מובנית. נכון להיום יש כבר כלים טכנולוגיים שמשמשים לכך. כלים אלו מגדירים אובייקטים, יחסים וסכמות לייצוג אחיד של המידע, מה שמקטין עמימות והופך הפקת אוטומטית של מסמכים ליעד הנדסי סביר. אחד מהכלים המוצלחים ביותר כיום הוא Nuance Dragon Ambient eXperience בבעלות מיקרוסופט: הבינ"מ מאזינה לשיחה בין הרופא למטופל בזמן אמת, מנתחת אותה, ומייצרת באופן אוטומטי סיכום רפואי מובנה בפורמט SOAP (Subjective, Objective, Assessment, Plan):

- החלק הסובייקטיבי (S) מתעד את תלונות המטופל כפי שתוארו.
- החלק האובייקטיבי (O) כולל נתונים קליניים, בדיקות פיזיות או תוצאות מעבדה.
- החלק של ההערכה (A) מתאר את אבחנת הרופא.
- החלק של התוכנית (P) כולל את תוכנית הטיפול וההמלצות.

בסיום, הרופא רק עובר על הטקסט, מאשר או מתקן במידת הצורך, והרשומה נשמרת. מחקרים שבוצעו על הכלי מצביעים על פחות שעות תיעוד ויותר זמן עם המטופל. [3]

באפשרותן של התייעלויות דומות שלהמערכת הרפואית להנגיש את הטיפול ליותר אנשים, שכן הוזלה של הטיפול הרפואי מאפשרת ליותר אנשים להרשות לעצמם טיפול רפואי. הדבר נכון במיוחד נוכח העובדה שלרוב האנושות אין גישה לשירותי רפואה מתקדמים, והדבר נכון גם לאוכלוסיות שונות במדינות מפותחות דוגמת ארה"ב.

העומס האדמיניסטרטיבי הפך נפוץ כל כך, עד שבז'רגון הרפואי נפוץ המונח pajama charting שיכול להישמע כאילו לקוח ממסיבת פינ'מות, אך למעשה מתייחס לתיעוד רפואי שרופאים מבצעים לאחר שעות העבודה. בשנים האחרונות נערכו מחקרים רבים בניסיון ליעל את הפעולה באמצעות בינ"מ, בין היתר על ידי תאגידי בריאות וביטוח בארה"ב. במרכז אחד מניסיונות אלו הייתה הטמעת מערכות מתעדי בינ"מ אשר מאזינות למפגש עם המטופל ומזינות את הפרטים לתוך הרשומה האלקטרונית. במהלך שנה אחת הוטמע השימוש ביותר מ-2.5 מיליון פגישות קליניות, ונחסכו לרופאים 15,791 שעות תיעוד נטו. מדובר בזמן שווה ערך לכ-1,794 ימי עבודה. [4]

חיסכון של אלפי ימי עבודה שקול לגיוס עשרות רופאים חדשים למערכת. הדבר יהיה משמעותי במיוחד אם פתרונות שכאלו יאומצו על ידי מערכות בריאות במדינות בעלות הכנסות נמוכות/בינוניות שבהן מחסור בכוח אדם רפואי מורגש במיוחד, מה גם ששימוש בבינ"מ מהסוג הזה יגרום לניצול טוב יותר של כוח אדם רפואי בעל ניסיון – הגורם המבוקש והיקר ביותר בכל מערכת בריאות בעולם.

יש לציין שמאחר שהתחום חדש וההטמעה נעשתה רק במעט קליניקות ומוסדות רפואיים, לא קיימים עדיין מחקרים הנוגעים להשלכות ארוכות הטווח של שימוש במערכות כאלה, וישנם רק

חיצוניות" (external control arms) בניסויים קליניים, וכן בחברות פרמה, כדי לצמצם את מספר המשתתפים הדרוש לניסוי, ליעל את תהליך הפיתוח הקליני ולתת תמונה סטטיסטית טובה יותר [8].

לקראת רפואה הוגנת ומותאמת אישית

שימוש מרכזי נוסף בבינ"מ יהיה ברפואה מותאמת אישית, ששאפתה לתת לכל מטופל טיפול מדויק המתאים לפרופיל האישי שלו – גנטיקה, נתונים קליניים, אורח חיים והיסטוריה רפואית. בינה מלאכותית מסייעת בכך באמצעות ניתוח כמויות עצומות של נתונים מורכבים, אך כאן טמון גם אתגר גדול: רוב המודלים מאומנים על מאגרי נתונים מקומיים או מוגבלים, שמייצגים אוכלוסיות מסוימות בלבד למשל חולים בארצות הברית או באירופה. התוצאה היא שהמערכת עלולה ללמוד דפוסים שאינם מתאימים לחולים מאזורים אחרים, מרקע אתני שונה או מתנאים חברתיים-כלכליים שונים. מצב כזה עלול ליצור הטיות מובנות ולגרור לכך שחלק מהמטופלים יקבלו טיפול פחות מדויק או אפילו שגוי – פגיעה ישירה בצדק החברתי ובשוויון בבריאות.

ככל שהמודל עובר על פחות נתונים של קבוצות מטופלים מסוימות כדוגמת מיעוטים, אוכלוסיות מאזורים גיאוגרפיים מסוימים וכדומה, כך גדל הסיכוי שיווצרו הטיות במודל.

הטיות אלו יכולות להיגרם בין היתר כתוצאה מכך שקיימות אוכלוסיות שהמודל לא התנסה עליהם מספיק והשפעת אותן אוכלוסיות על המודל מעטה/זניחה, במשך שנים, ספרי לימוד רפואיים ומאגרי תמונות דיגיטליים כללו ייצוג לא מספק ואף חסר של מגוון מחלות עור בגווי עור כהים. כתוצאה מכך, כאשר אותם אלגוריתמי בינ"מ אומנו על אותם מאגרים, הם למדו לזהות מאפיינים שמופיעים בעיקר על עור בהיר, ופיתחו יכולת זיהוי נמוכה יותר עבור עור כהה. סיבות נוספות להטיות הללו הם הטיות שנגרמו כתוצאה מיעדים שגויים שמשפיעים על אותם אוכלוסיות (יחס עלות תועלת בטיפולים רפואי), קיצורי דרך (Shortcut Learning) ושימוש באמצעי למידה לא נכונים במקום מציאת הסיבה הקלינית האמיתית וכד'.

כדי להתמודד עם בעיה זו התפתחה בשנים האחרונות גישה חדשה בשם "למידה פדרטיבית". במקום לרכז את כל הנתונים הרפואיים במאגר אחד גדול – מה שגם היה עלול להפר פרטיות וליצור סיכונים אבטחה שלהשלכות מרחיקות הלכת שיכולות להיות להם אנו מודעים. למידה פדרטיבית מאפשרת לאמן מודל משותף מבלי שהנתונים יעזבו את בתי החולים או את המדינות שבהם הם נשמרים. כל מוסד רפואי מאמן את המודל על הנתונים המקומיים שלו, ורק התובנות (המשקלים הסטטיסטיים של המודל) נשלחות חזרה למרכז. המרכז מאחד את התובנות מכל האתרים, וכך נבנה מודל חזק ועשיר יותר – מבלי לחשוף נתוני חולים רגישים.

היתרון של שיטה זו הוא כפול: גם שמירה על פרטיות וביטחון מידע – הנתונים הרפואיים הרגישים נשארים במקום שבו נאספו ולעולם לא מועברים לצד שלישי וגם צמצום ההטיות ושיפור הייצוג, מכיוון שהמודל לומד במקביל על נתונים שמגיעים ממוסדות רפואיים שונים ברחבי העולם. הוא "רואה" מגוון רחב של מטופלים: נשים וגברים, צעירים ומבוגרים, אוכלוסיות ממוצא אתני שונה ורמות שונות של נגישות לשירותי בריאות. כך הופך המודל ליותר אוניברסלי ומסוגל לתת מענה מדויק גם למטופלים שלא

וחסרי תקציבי עתק, בניגוד לניסויים המסורתיים ששימשו עד כה לחיזוי. מכון שאכן משמש לחיזוי מבני חלבונים שכאלו הוא המכון לקריסטלוגרפיה שבהמבורג (משוייך ל-EMBL), שבו נוהגים לבקר תלמידי אודיסאה במסלול כימיה לקראת סוף התכנית.

המיפוי שה-AlphaFold עשה למולקולות נשמר במאגר שזמין לציבור ללא תשלום, ובו למעלה מ-200 מיליון מבנים שחזה הכלי נכון לעת כתיבת שורות אלו. אתם כמובן מוזמנים להתנסות בו. יש לציין כי עדיין אין בו שימוש קליני מאחר שהוא לא מודד את המציאות בפועל, וברפואה קלינית נדרשת ודאות ניסויית (כמו זו שמספקת הקריסטלוגרפיה), מה גם שהרגולציה לא הצליחה להדביק את הקצב של ההתפתחות והתפוצה של הטכנולוגיה הזאת. כמו כן, בדומה לטכנולוגיות חדשות אחרות ברפואה, גם כאן פרשנות קלינית היא מורכבת, ולכן עיקר השימוש בכלי כיום הוא ככלי מסייע נוסף פיתוח ומחקר תרופות חדשות.

דרך נוספת היא עיצוב וסינון של מולקולות חדשות. המרחב הכימי האפשרי – כלומר, מספר המולקולות שניתן לייצר תיאורטית הוא עצום. בעבר, חוקרים נאלצו לסנן ידנית אלפי מועמדים, אך כיום בינ"מ מתפקדת כמו מנוע חיפוש חכם שמסוגל לשוטט במרחב הזה ולהציע מועמדים מבטיחים יותר. האלגוריתמים בוחנים מראש אילו מבנים מולקולריים צפויים להיות פעילים, יציבים ולא רעילים. כבר היום קיימת דוגמה ממשיה של תרופה נגד מחלת ריאות נדירה שפותחה באמצעות בינה מלאכותית והגיעה לניסוי קליני בבני אדם בתוך פחות משנה תהליך שבעבר היה נמשך זמן ארוך יותר משמעותית (כי כמה וכמה שנים). הדבר מוכיח שהגישה אינה רק רעיון תיאורטי אלא כלי יישומי.

תרומה משמעותית נוספת תהיה בחיזוי ADMET (ספיגה, פיזור, מטבוליזם, הפרשה ורעילות).

אחד השלבים שבהם חלק ניכר המועמדים לתרופות נכשלים הוא שלב ה-ADMET. גם אם מולקולה "נראית טובה על הנייר", ייתכן שהיא לא תיספג כראוי בגוף, תתפרק מהר מדי, תצטבר באיברים לא רצויים או תגרור לרעילות. כאן בינ"מ נותנת יתרון עצום אלגוריתמים מתקדמים מסוגלים לחזות מראש את התכונות הללו על סמך מבנים כימיים, גרפים מולקולריים ונתונים מניסויים קודמים). המשמעות היא שחוקרים יכולים לוותר כבר בתחילת הדרך על חומרים שלא צפויים לעבוד ולחסוך חודשים של עבודה מיותרת. סקירות שיטתיות מצביעות על כך שהחיזוי משתפר בהתמדה, אך נדרשים עדיין מחקרים רחבי היקף כדי לוודא שהמודלים מתאימים למציאות המורכבת של גוף האדם.

נוסף על כך, תכנון ניסויים וניהול קליני נכון באמצעות כלים שכאלו יוכל להשפיע ביותר דווקא מאחר שהשלב האחרון והיקר ביותר הוא הניסוי הקליני – בדיקה של התרופה בבני אדם. התקווה היא שבינ"מ תאפשר בתקווה לייצר ניסוי "חכם" יותר. אלגוריתמים בעתיד הרחוק יוכלו לדמות אוכלוסיות שונות של חולים, להתאים לכל ניסוי את המטופלים המתאימים ביותר, ולבנות קבוצות טיפול לפי מאפיינים אישיים. באותו עתיד רחוק נוכל לייצר "תאומים דיגיטליים" מודלים ממוחשבים שמדמים את הגוף או איבר מסוים של המטופל לצורך בדיקה. למרות שחשוב לציין שיישום רעיון ה-"תאומים הדיגיטליים" נמצא בחיתוליו כיום נעשה שימוש ראשוני בתאומים דיגיטליים, בעיקר כחלק ממה שמכונה "קבוצות ביקורת

J. G. You, "MD," Ambient Documentation Technology in Clinician Experience of Documentation Burden and Burnout, 2025

T. A. H. N. University, "Physicians' greatest use for AI? Cutting administrative burdens," American Medical Association-assn, no. <https://www.ama-assn.org/practice-management/digital-health/physicians-greatest-use-ai-cutting-administrative-burdens>, 2025

M. C. C. M. G. L. S. P. C. B. M. N. S. M. C. T. M. L. Y. M. B. M. M. D. I.-L. M. Tyler Haberle, "The impact of nuance DAX ambient listening AI documentation: a cohort study," JAMIA, vol. 31, no. 4, 2024

B. Feldheim, "AI scribes save 15,000 hours—and restore the human side of medicine," American Medical Association, no. <https://www.ama-assn.org/about/authors-news-leadership-viewpoints/benji-feldheim>, 2025

W. G. a. H. H. a. S. Z. b. Duxin Sun a, Why 90% of .* clinical drug development fails and how to improve it?, pmc, 2022

R. E. A. P. T. G. M. F. O. R. K. T. R. B. A. Ž. A. P. A. B. C. M. S. A. A. K. A. J. B. A. C. B. John Jumper, "Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold," 2021

R. E. A. P. T. G. M. F. O. R. K. T. R. B. A. Ž. A. P. A. B. C. M. S. A. A. K. A. J. B. A. C. B. John Jumper, Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold, nature, 2021

L. Z. Q. C. Z. J. S. L. & S. Z. Bin Zhang, Harnessing artificial intelligence to improve clinical trial design, nature, 2023

B. E. G. A. R. J. M. S. P. A. K. M. M. W. X. D. M. R. R. C. & S. B. Micah J. Sheller, "Federated learning in medicine: facilitating multi-institutional collaborations without sharing patient data," nature, 2020

1. Microsatellite Instability – MSI a condition of genetic hypermutability resulting from impaired DNA mismatch repair (MMR), leading to length variations in short, repetitive DNA sequences known as microsatellites. MSI is commonly used as a biomarker in certain cancers, particularly colorectal and endometrial cancer. מקור: National Cancer Institute (NCI) Dictionary of Cancer Terms

2. ambient AI scribes.

3. SOAP.

4. European Molecular Biology Laboratory.

https://alphafold.ebi.ac.uk/?utm_source=deepmindgoogle&utm_medium=referral&utm_campaign=qd-m&utm_content=

1181-DSP-תחזית למחלת ריאות, פותחה בסיוע בינ"מ

היו מיוצגים מספיק במאגרי הנתונים המסורתיים למודל הזה יש אפשרות להיות מותאם במעט לשימור דיוק לקבוצות ייחודיות מקומיות(למעשה לבצע פרסנליזציה), לשמור על נרמול מתאים ולהתאים טיפול לאוכלוסיות שנמצאות במיעוט במקומות מסוימים על ידי מידע שעובד על אותם קבוצות ממקומות אחרים בהם האוכלוסייה גדולה יותר. למעשה, כך כל אתר שתרם למודל יכול לכוון את המודל עבור המטופלים והאוכלוסייה שלו ולאפשר ייצוג רחב, התאמה מקומית ומגוון הוגנות.

מחקרים עדכניים שפורסמו הראו כי מודלים שנבנו בגישה פדרטיבית נבנים על בסיס נתונים המגיעים ממגוון רחב של בתי חולים המשרתים אוכלוסיות מגוונות מצליחים לזהות מחלות ולהעריך סיכונים בדיוק גבוה יותר עבוראותם אוכלוסיות ייחודיות, בהשוואה למודלים שפותחו על בסיס נתונים מבתי חולים מסוימים בלבד [9] במילים אחרות, למידה פדרטיבית לא רק מגינה על הפרטיות, אלא גם מחזקת את הצדק החברתי במערכת הבריאות, משום שהיא מונעת מצב שבו "החזקים", כלומר אוכלוסיות עם ייצוג עודף בנתונים, מקבלים טיפול מדויק יותר לעומת "החלשים" שמודרים ממנו.

כך הופכת למידה פדרטיבית לכלי מרכזי במימוש החזון של רפואה מותאמת אישית. היא מאפשרת לפתח אלגוריתמים חכמים ומדויקים, הנשענים על ידע גלובלי ורב-תרבותי, תוך שמירה על זכויות המטופלים ופרטיותם. השילוב בין הגנה על המידע לבין צמצום פערים בין אוכלוסיות הופך את השיטה ללא רק לפתרון טכנולוגי, אלא גם לצעד חשוב בדרך לרפואה הוגנת ושוויונית יותר.

בסופו של דבר, הבינה המלאכותית לא מחליפה את הרופאים אלא מחזקת אותם היא עוזרת לגלות תרופות חדשות, למצוא סימנים נסתרים, ולהתאים טיפולים מדויקים יותר. עם זאת, ישנה חובה להוכיח שהכלים הללו באמת משפרים באופן עקבי את מצב המטופלים ולא רק את המדדים בתוכנה שכן רק שיפור קליני משמעותי יגרום לרגולטורים להטמיע ולקדם טכנולוגיות שכאלו. לכן, מדובר בדרך ארוכה והדרגתית, אבל כבר עכשיו יש תוצאות שמראות שבינ"מ יכולה להפוך את הרפואה ליעילה ומדויקת הרבה יותר.

הקבוצות לוו על ידי סא"ל (במיל") רמי שקד, מומחה לחדשנות וטכנולוגיות בינ"מ, פרופ' שי לביא, ראש מכון ון ליר בירושלים, ד"ר חן שגיב, מומחית בפיתוח אלגוריתמים ותוכנה, ופרופ' חגי בועז, ראש תחום מדע, טכנולוגיה וחברה במכון ון ליר. הדיון נוהל על ידי ד"ר יובל דרור, חוקר, סופר וסוציולוג של טכנולוגיה.

ברצוני להודות לחברי הרשת אלון אלכסנדר, אחינעם בלאו ושיירה ששון על ביקורת עמיתים מעמיקה וכן לחברי הרשת שהשתתפו בדיבייט על התרומה המחשבתית, השאלות החריפות והדיון הפורה. תודתי נתונה גם למכון ון ליר בירושלים, לפרופ' שי לביא ראש המכון ולפרופ' חגי בועז ראש תחום מדע, טכנולוגיה וחברה על התמיכה, השיח הפורה וההכוונה.

רז קליינרמן, בוגר אוניברסיטה באוניברסיטת תל אביב ונבחרת ישראל בכימיה, משרת בצוות ERP rzui.1b@gmail.com אשמח לענות על כל שאלה



הרעיון של ויטן על כבידה קוונטית ותורת הקשרים

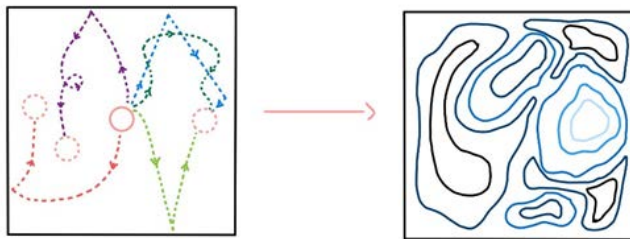
כותבת: לילי ריש קוריצקי
עורך: נצר עברי

פתיחה

בחוקים ובמשוואות של התורה כדי למצוא ערכים אלו בזמן מאוחר יותר במדויק.

- עוברים לגרסה הסתברותית של התורה, כלומר בכל רגע נתון יש בידינו רק התפלגות הסתברות של כל המידע הפיזיקלי. במקרה של הכדור למשל, התפלגות על כל המיקומים/מהירויות האפשריים. ההתפלגות הזו אינה תוצאה של חוסר ידע, אלא מצב ממשי של חוסר ודאות עבור הטבע עצמו – מיקומו של הכדור באמת יהיה מרוח על פני איזורים רבים בגרסה הזו של התורה עד אשר תבצע מדידה שתכריח את ההתפלגות לקטון.

- מחליפים את חוקי ההתקדמות בזמן בגרסה הסתברותית שלהם: אם ההתפלגות ההתחלתית מרוכזת סביב מצב ספציפי (נניח, הכדור נמצא בכיור במנוחה), אז ההסתברות להגיע למיקום/מהירות אחרים כלשהם תחושב לפי הכלל הבא: סופרים כמה מסלולים יש בין המצב ההתחלתי למצב הסופי שבחרנו כאשר כל מסלול נספר עם משקל שמודד כמה הוא "רחוק מהמסלול בתורה הקלאסית" (כלומר מסלולים מזרים/לא פיזיקליים יספרו עם משקל קטן מאוד) ותוצאת הספירה תיתן את ההסתברות של הימצאות במיקום שבחרנו. אם ההתפלגות ההתחלתית מסובכת יותר, מחשבים עבור כל נקודה בה בנפרד וסוכמים את ההתפלגויות הסופיות.

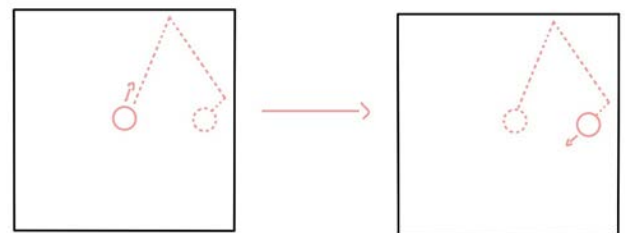


איור 2: בתורה הקוונטית, גם בהינתן מצב התחלתי ידוע (משמאל) תתקבל בסוף התפלגות הסתברות (מימין), ההסתברות גבוהה ככל שהצבע בהיר יותר. כדי לקבל את ערך ההתפלגות בנקודה כלשהי "סופרים מסלולים" מהמצב ההתחלתי לנקודה זו, כאשר המסלול הקלאסי (בכחול) תורם את המשקל הכי גדול, מסלולים קרובים (ירוק יער) מקבלים משקל דומה, ומסלולים רחוקים (ירוק ליים, סגול, כתום) תורמים מעט.

במאמר זה אנסה לספר לכם את אחד הסיפורים היפים במתמטיקה ובפיזיקה אשר התחיל מתהייה לגבי פולינום מסתורי והסתיים בהולדתו של תחום אינטרדיסציפלינרי רחב בשם "טופולוגיה קוונטית" ובזכייה של 4 מדליות פילדס ("הנובל של המתמטיקאים"). זהו אחד הסיפורים האהובים עליי, בין השאר כי ההתעניינות שלי בפיזיקה החלה והתמקדה סביב תורת השדות הקוונטית בעוד ההתעניינות שלי במתמטיקה החלה והתקמדה סביב טופולוגיה (וספציפית תורת הקשרים), לכן הייתי מאושרת לגלות מאוחר יותר ששני התחומים הכביכול רחוקים הללו קשורים בצורה כל כך עמוקה ומרחיקת לכת.

תורת השדות הקוונטית

סיפורינו מתחיל בתורת השדות הקוונטית, המסגרת שבה רוב הפיזיקה המודרנית מנוסחת ושבלביה מצוי רעיון ה"קוונטיזציה". תהליך הקוונטיזציה של תורה (כלומר סט גדלים מדידים וחוקים שהם מקיימים) הולך כך:

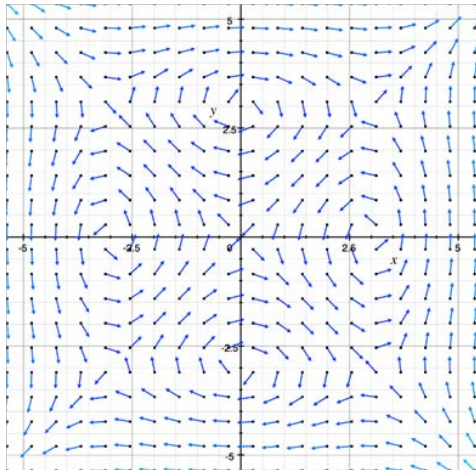


איור 1: בתורה הקלאסית של פיזיקת הכדור, ניתן להסיק מהמיקום והמהירות ההתחלתיים את מסלול הכדור ובכך את המיקום והמהירות שלו בזמן מאוחר יותר.

- בוחרים תורה פיזיקלית דטרמיניסטית (לה נקרא לעיתים "התורה הקלאסית"), למשל סט החוקים והמשוואות שמכתיבים את התנועה של כדור המקפץ בחדריו של בניין. הכוונה בתורה קלאסית/דטרמיניסטית היא שבהינתן כל המידע הפיזיקלי ברגע מסוים (למשל המיקום והמהירות של הכדור) ניתן להשתמש

בשדה החשמלי, כך שנוצרת אינטראקציה אפקטיבית בין חלקיקים על פני מרחק גדול. למעשה, החלקיקים עצמם הם חלק משדה אחר – ניתן להראות שבתורת שדות קוונטית, תנודות קטנות בשדה (למשל גלים חלשים במים) מתנהגות קצת כמו חלקיקים (הן נטות לנוע כגוש מרוכז), ואנו יודעים היום שכל החלקיקים שמצאנו בטבע הם באמת תנודות בשדות מתאימים (למשל האלקטרונים הם תנודות חלשות ב"שדה האלקטרונים").

המרכיב החסר האחרון ל"תורה של הכול" הוא שילוב הכבידה כשדה נוסף. לשם כך נצטרך להתייחס לתורה המודרנית של כבידה, הידועה כתורת היחסות הכללית של איינשטיין.



איור 3: מהירות הרוח היא שדה, כלומר מורכבת ממידע פיזיקלי נפרד בכל נקודה במרחב (במקרה הזה הגודל והכיוון של מהירות הרוח)

תורת היחסות הכללית והגביע הקדוש של הפיזיקה התיאורטית

בפיזיקה המודרנית נהוג להתייחס למרחב ולזמן כגוף אחד (הידוע כ"המרחב-זמן") אליו אנו מתייחסים כמרחב 4-ממדי מופשט. הנקודות במרחב-זמן נקראות "אירועים" מאחר שיש להן זמן מסוים (הקואורדינטה הראשונה במרחב ה-4 ממדי) וגם מיקום מסוים (שלוש הקואורדינטות האחרות). למען הפשטות, נצייר כרגע את הכול בדיאגרמות דו-ממדיות (כלומר נתייחס בציורים רק לקואורדינטה מרחבית אחת). לרוב אנו רגילים לחשוב על פיזיקה במרחב "שטוח", כלומר אנו מציירים את המרחב-זמן על מישור עם גריד ריבועי שמכתיב לנו מהם הקווים הישרים, מה המרחק בין נקודות ומה הזווית בין קווים נחתכים. לגדלים גיאומטריים במרחב-זמן יש משמעות פיזיקלית ישירה – למשל חלקיק הזז במהירות קבועה ינוע במרחב-זמן לאורך ישר ששיפועו הוא בדיוק מהירות החלקיק.

תורת היחסות הכללית לימדה אותנו כי הגיאומטריה של המרחב-זמן עצמו יכולה להשתנות – למשל במקום דף שטוח יהיה מדובר בכיפה עקומה כמו באיור. גדלים גיאומטריים שנמדדו במרחב-זמן יושפעו מהעיקום, כמו שאורכים שאנו מודדים על כדור הארץ מושפעים מצורתו הכדורית. ניתן להציג את המידע על הגיאומטריה העקומה בצורה נגישה יותר ע"י הצגת המרחב-זמן במפה שטוחה (כמו המפות שאנחנו משתמשים בהן עבור כדור הארץ), כאשר

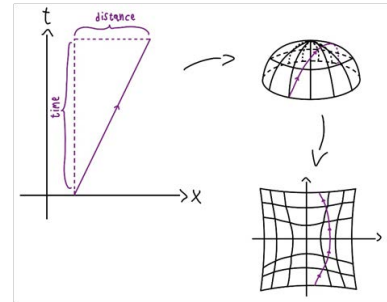
המדד של "כמה המסלול רחוק ממסלול קלאסי" נקרא גם ה"פעולה" והוא מעניש אותנו על מסלולים קיצוניים או רחוקים ממה שהיינו מצפים באופן נאיבי. כך למשל, בתורה הקלאסית של כדור המקפץ בחדרי בניין, גם מסלולים מוזרים מאוד יתאפשרו כגון תהליכים בהם הכדור עובר דרך קיר לצידו השני, אך בגלל שהם כל כך "משונים" (כלומר בעלי פעולה גדולה) מבחינים בהם רק בהסתברות קטנה. בממוצע, אנו רואים בעיקר תהליכים הדומים מאוד לתהליך בתורה הדטרמיניסטית המקורית (שהוא התהליך עם הפעולה המינימלית).

כך בעצם, לכל תורה פיזיקלית דטרמיניסטית יש גרסה הסתברותית שנקראת "תורה הקוונטית" ומתקבלת ממתכון הקוונטיזציה. מתברר שכל המציאות שלנו מתנהגת בעצם לפי החוקים הקוונטיים האלה, אך בסדרי הגודל והאנרגיה שלנו יוצא שהפעולה גדולה מאוד עבור סטיות קטנות מהמסלולים שאנחנו רגילים אליהם. כאשר יורדים לסדרי גודל קטנים יותר (למשל ברמת מולקולות, גרעין האטום או אפילו מתחת) או לחלופין כאשר מגיעים לאנרגיות גדולות מאוד ההבדלים בפעולה נהיים קטנים והסיפור הקוונטי נהיה דומיננטי, כלומר תהליכים קורים בצורה מאוד לא דטרמיניסטית.

התורה הקלאסית שהשתמשנו בה כדוגמה לקווינטוט (תורה של כדור מקפץ) מגיעה מהעולם של "מכניקה קלאסית" – חפצים עפים במרחב, מסתובבים, מתנגשים וכן הלאה. התורות הקלאסיות שבליבה של הפיזיקה היסודית הן מסוג קצת אחר ונקראות לרוב "תורות שדות". בתורת שדות קלאסית, האובייקט הפיזיקלי שמתפתח בזמן נקרא "שדה" ובניגוד למשל לאובייקטים של המכניקה המרוכזים במקום מסוים (כגון הכדור מקודם), שדה הוא אובייקט המרוח על כל המרחב בעל השפעה על כל נקודה אפשרית. דוגמה למשל היא שדה הטמפרטורה אשר משייך מספר לכל נקודה במרחב ולמספר זה חשיבות והשפעה פיזיקלית על כל מה שנוגע באותה נקודה. דוגמה נוספת היא שדה המהירות של אוויר, אשר משייך לכל נקודה מידע מורכב יותר – מהירות הרוח וכיוונה (איור 3). באופן כללי, שדה משייך אובייקט פיזיקלי/מתמטי. כלשהו לכל נקודה, והערך בכל נקודה משתנה עם הזמן, כך שרק ערכים קרובים משפיעים זה על זה. למשל, אם ערך הטמפרטורה שונה בין זוג נקודות קרובות אז בחלוף הזמן הטמפרטורה בנקודה החמה יותר תרד, ובנקודה הקרה יותר תעלה. תורת שדות קלאסית אם כך היא אוסף של שדות (למשל שדה הטמפרטורה של נוזל, שדה הצפיפות שלו ושדה המהירות שלו) יחד עם סט של חוקים המכתיבים כיצד הערכים בכל נקודה מתפתחים עם הזמן.

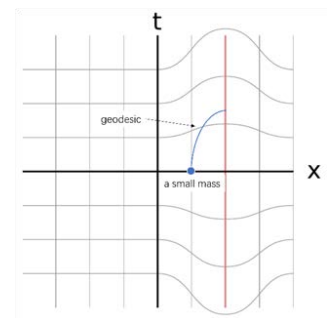
כיום פיזיקאים יודעים שלמעשה ניתן לתאר את כל התופעות הפיזיקליות (מלבד הכבידה, שאליה נתייחס מאוחר יותר) בעזרת תורות שדות קוונטיות, כלומר אנו מפעילים את תהליך הקוונטיזציה על תורת שדות קלאסית כלשהי. במקום שדה חד משמעי (ערך ספציפי בכל נקודה), בכל רגע בזמן תהיה לנו התפלגות על כל השדות האפשריים, ובמקום התפתחות בזמן לפי חוקי הטבע הדטרמיניסטיים נצטרך לסכום על פני כל התהליכים האפשריים של השדה תחת משקל הפעולה. בימינו אנו אכן יודעים שאת כל הכוחות של הטבע ניתן לתאר בעזרת שדות, למשל הכוח החשמלי בין חלקיקים רחוקים: ישנם חלקיקים מיוחדים ("חלקיקים טעונים חשמלית") בעלי אינטראקציה עם השדה החשמלי, כלומר הם יוצרים תנודות (או "הפרעות") בשדה החשמלי שסביבם, ואותן תנודות עוברות לאחר זמן מה לנקודות רחוקות תחת התפתחות השדה, ובסוף מגיעות לחלקיקים טעונים אחרים שמגיבים לשינוי

הגריד על המפה עקום כדי לפצות על ההשטחה. כך למשל, מוצאים את המסלול הקצר ביותר עבור מטוס הטס בין זוג נקודות על כדור הארץ ע"י ציור של "קו ישר" לאורך הגריד (שכמובן לא יהיה ישר לפי גריד הריבועים הרגיל של דף שטוח) ובכך ההצגה שלנו תופסת את השפעת העקמומיות. כך גם מסלולם של חלקיקים במרחב זמן יושפע מהעקמומיות שלו – אם תנועה במהירות קבועה משמעה לנוע בקו ישר בעל שיפוע מסויים במרחב זמן (כמו בפסקה הקודמת) וההגדרות של "קו ישר" ו"שיפוע" מושפעות מצורת הגריד, אז גם הדינמיקה של חלקיק הממשיך לנוע בחלל ללא השפעה חיצונית תשתנה בהתאם.



איור 4: חלקיק חופשי (נע ללא השפעת כוחות חיצוניים) ינוע במהירות קבועה, כלומר במרחב-זמן הוא יזוז בקו ישר (משמאל) ושיפוע הישר יהיה בדיוק המהירות שלו. אם המרחב-זמן הוא יריעה עקומה במקום דף שטוח (ימין למעלה) ההגדרה של "קו ישר" תשתנה בהתאם, ומהירותו של החלקיק תשתנה בגודלה ובכיוונה בהתאם. ניתן להציג את העקמומיות בצורה נוחה באמצעות הטלה חזרה למישור (ימין למטה) עם גריד עקום שמגדיר מהם קווים ישרים ומה המרחק בין נקודות.

הרעיון המבריק של איינשטיין היה לקודד את כוח המשיכה דרך העקמומיות הזו. האקסיומה הבסיסית של היחסות הכללית היא שללא השפעת כוחות חיצוניים חלקיק ימשיך לנוע בקו ישר בעל שיפוע קבוע על הגריד העקום, וחלקיקים בעלי מסה מעקמים את הגריד לכיוונם (ראו לדוגמה באיור 5). כך למשל, אם ניקח גוף מסיבי מאוד כגון כדור הארץ, הוא יעקם את הגריד לכיוונו, וחלקיקים שיישארו "במנוחה" במובן של הגריד העקום (כלומר המסלול שלהם במרחב-זמן יהיה מאונך לקווים ה"מרחביים", מה שבמרחב שטוח מייצג מהירות 0) בעצם יתקרבו לכדור הארץ לאורך זמן. בפרט מיקומם של גופים בעלי מסה משפיע על הגיאומטריה של המרחב-זמן כלומר הגיאומטריה עצמה משתנה בזמן!



איור 5: גוף מסיבי במנוחה (הקו הכתום) מעקם את המרחב סביבו ולכן גוף אחר (קו כחול) במנוחה ביחס למרחב העקום יתקרב אליו לאורך זמן.

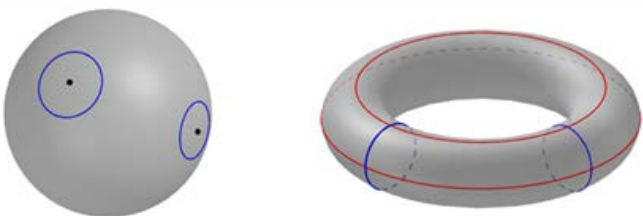
למעשה, תורת היחסות הכללית היא דוגמה לתורת שדות קלאסית – צורת הגריד המקומית ניתנת לקידוד כאוסף של ערכים המוגדרים בכל נקודה (ואומרים לנו בעצם מה המרחק בין קווי הגריד בכל כיוון ומה הזווית ביניהם) ולכן ניתן להתייחס לגיאומטריה עצמה כשדה (רעיון הידוע בתור הגישה הרימנית לגיאומטריה). חוקי ההתפתחות בזמן נקבעים לפי תורת היחסות הכללית (גופים מסיביים מעקמים

את הגריד אליהם), והשדה משפיע על חלקיקים במרחב-זמן לפי התיאור שניתן קודם, בדומה לאופן שבו שדה חשמלי משפיע על חלקיקים טעונים. מפתה אם כך לנסות להפעיל את תהליך הקוונטיזציה על תורת היחסות הכללית כדי לקבל תורת שדות קוונטית שתכיל בתוכה את שאר התופעות הפיזיקליות שמצאנו בטבע. כאשר מנסים לבצע את תהליך הקוונטיזציה בצורה נאיבית על היחסות הכללית, מגלים שהרבה מהחישובים "מתבדרים" (כלומר גדלים פיזיקליים שאנו מחשבים בתורה הקוונטית יוצאים אינסופיים אף על פי שהם אמורים להיות מדידים במעבדה) לכן אנו יודעים כי זוהי לא הדרך לגשר בין תורת היחסות הכללית ושאר הפיזיקה שאנחנו מכירים – עלינו לנסות דברים חדשים. כתוצאה מכך, נפוץ בקרב חוקרים לשחק עם גרסאות פשוטות יותר של יחסות כללית (למשל במידת מרחבי אחד פחות או שימוש בסוגים שונים של גיאומטריות שלא מוכתבות ע"י בחירה של גריד עקום אלא ע"י מידע פשוט יותר) ולנסות להבין איך לבצע את הקוונטיזציה בצורה הגיונית על היחסות הכללית, או איך לשנות את תורת היחסות הכללית כך שתעבוד עם מתכון הקוונטיזציה הרגיל. ההבנה של כבידה קוונטית תאפשר לנו לאחד את כל הפיזיקה שאנו מכירים לתורה אחת עקבית ולכן היא בעלת חשיבות עליונה בפיזיקה המודרנית.

תורת הקשרים ופולינום ג'ונס

הרכיב האחרון בסיפור שלנו מגיע בכלל מהעולם המתמטי – טופולוגיה ותורת הקשרים. טופולוגיה היא תחום העוסק בצורות גמישות וניתן להסתכל על הקשר שלה לגיאומטריה בשתי דרכים:

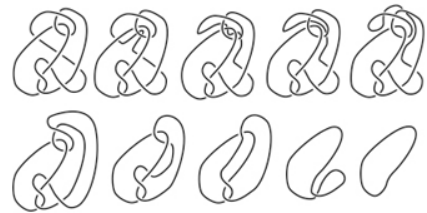
● דרך אחת היא להסתכל על טופולוגיה בתור "רקע לגיאומטריה". בהסתכלות של החלק הקודם, כדי לשים גריד על המרחב שלנו צריך לומר משהו על הצורה שעליה אנחנו שמים את הגריד – כל גריד שנשים על מעטפת של כדור למשל יכתיב צורה גיאומטרית קצת שונה (אליפסה, צורה של ביצה וכו'), אך אף בחירה של גריד לא תיתן לנו צורה של דונאט. כדי להביא את מעטפת הכדור לצורה של דונאט צריך למשל לחורר את הקטבים ולהדביק מחדש אחרת, מה שלא ניתן לעשות על ידי בחירה חכמה של גריד. מה שנשאר כאשר זורקים את הגריד הוא מה שנקרא "הטופולוגיה של המרחב". אי אפשר למדוד מרחקים, זוויות, נפחים וכדומה ללא הגריד, אך עדיין אפשר לומר דברים מסוימים – למשל ניתן לשאול: אם נצייר עקומה סגורה בתוך המרחב שלנו, האם ניתן לצייר אחת שלא יהיה ניתן לכווץ לנקודה מבלי שהעקומה תצא מהמרחב? על השפה של כדור הדבר אפשרי תמיד, אך על השפה של הדונאט ניתן לצייר עקומות רבות שעבורן הדבר לא אפשרי, והתשובה לשאלה לא תלויה בבחירה של גריד לכן היא נקראת "תכונה/שמורה טופולוגית".



איור 6: כל עקומה שנצייר על מעטפת של כדור ניתן לכווץ לנקודה (למשל את המעגלים הכחולים באיור ניתן לכווץ לנקודה השחורה), בעוד על מעטפת של דונאט יש עקומות רבות שעבורן אי אפשר לעשות זאת (לדוגמה כל המעגלים בציר)

דרך אחרת להסתכל על טופולוגיה היא בתור "גיאומטריה של צורות גמישות". עבור טופולוג, כל עיוות או עיקום של צורה נותן צורה "שקולה טופולוגית", אך פעולות אלימות ולא רציפות כגון חירור או הדבקה יתנו צורות "שונות טופולוגית". במילים אחרות, טופולוגיה היא "גיאומטריה איכותנית". למעשה, כל שינוי של גריד על צורה/ מרחב טופולוגיים כלשהם ניתן לבצע על ידי קיבוע הגריד ועיוות הצורה (במקום הפעולה ההפוכה), ולכן שתי ההגדרות שתיארת מתלכדות.

תחום פעיל בטופולוגיה למשל שואל את השאלה הבאה: בהינתן שתי עקומות סגורות בתוך מרחב תלת-ממדי סטנדרטי, האם ניתן לעוות אחת לכדי השנייה באופן רציף בלי שתעבור דרך עצמה? בניגוד לשאלה על טופולוגיה של צורה "מופשטת" אשר קיימת בפני עצמה, כגון הצורה של היקום, כאן אנו מסתכלים על צורות שזזות בתוך מרחב אחר בלי לצאת ממנו. אם ניקח למשל גומיית שיער, אז כל צורה מוזרה שנוכל לעקם אותה אליה תהיה שקולה טופולוגית,



איור 7: עקומות מסובכות השקולות למעגל הפרום.

כמו (ראו לדוגמה את העקומות באיור 7). הדבר מעלה את השאלה: האם יש בכלל עקומות סגורות כך שלא ניתן לעוות אחת לצורה של השנייה? התשובה היא שכן, וזה קורה בדיוק כאשר יש קשרים שונים בכל אחת מהן. הדוגמה הכי פשוטה היא למשל מעגל פשוט ("פרום") לעומת חבל שנעשה בו קשר סטנדרטי ונסגור את קצותיו כמופיע באיור 8 – לא משנה כמה ננסה לשחק עם החבל הקשור,



איור 8: קשר לא טריבואלי.

לא ניתן יהיה להגיע ממנו למעגל הפרום בלי לחתוך את החבל, כי פרימה של קשר דורשת מאיתנו להעביר קצה אחד של החבל חזרה דרך הלולאה. לתחום שחוקר שקילויות כאלה של עקומות קוראים "תורת הקשרים", ויש בו הרבה שאלות דומות בהשראת שאלה זו. רוב הקשרים שאנחנו נתקלים בהם ביומיום נוטים להיות בחבלים פתוחים, אך הסגירה של החבל בסך הכול מאפשרת לנו לנסח "שקילות בין קשרים" בעזרת עקרונות טופולוגיים (בניגוד לקשר פתוח, שאותו ניתן תמיד לפרום באופן רציף).

איך ניגשים בכלל ללחוכיח שלא ניתן לעוות עקומה מסוימת לכדי אחת אחרת? ישנם אינסוף עיוותים שונים מאוד של כל עקומה, ולכן אין גישה אחידה/פשוטה שתעבוד בכל המקרים. הטקטיקה של אנשי תורת הקשרים (שאינה אוהבת לכנות "קשרולוגים") היא למצוא שמורות טופולוגיות, כלומר גדלים שניתן לחשב בקלות מתוך צורה כלשהי של הקשר, ושנשמרים תחת עיוותים רציפים שכאלה. ברגע

שיש לנו שמורה כזו (למשל מספר שאפשר לחשב), ניתן לקחת זוג קשרים, לחשב את השמורה ולהשוות. אם התוצאות שונות, אז בהכרח אי אפשר לעוות אחד לכדי השני, כי זה אומר שהשמורה תשתנה ולכן היא אינה באמת שמורה טופולוגית. אם התוצאות זהות, עלינו לחפש שמורה אחרת שתבדיל ביניהם. השמורות הטופולוגיות אומנם לא מחזיקות את כל המידע על הקשר, אך נותנות לנו מידע חלקי שאפשר להשוות. מציאת שמורות טופולוגיות דורשת יצירתיות רבה – כמעט כל גודל שניתן לחשוב עליו הוא בעצם גודל גיאומטרי, כלומר תלוי בצורה המדויקת ולא נשמר תחת עיוותים (למשל אורך של עקומה, עקמומיות ממוצעת או דברים מתוחכמים יותר).

בכל זאת מצאו אנשי הקשרים שמורות לאורך השנים. אני ממליצה להיכנס לדף הוויקיפדיה ולקרוא קצת על התחום מאחר שכל שמורה מגיעה מאיזשהו רעיון יצירתי או קישור לתחום אחר – היצירתיות הדרושה כדי למצוא גדלים כאלה הביאה לכך שהתחום מקושר לכמעט כל תחום אחר במתמטיקה (כגון אלגברה, קומבינטוריקה, גיאומטריה, תורת הקטגוריות, אנליזה ועוד) וגם לתחומים רבים אחרים. אחת השמורות העוצמתיות שהתגלו ידועה כ"פוליון ג'ונס" והוגדרה במקור בצורה די מופשטת:

מטילים את הקשר על דף דו-ממדי ומסמנים בכל נקודת חיתוך איזו מחתיכות החבל הייתה מעל האחת ע"י "שבירת" הקו התחתון כבאיורים 8 ו 9. אנו רוצים לחשב ביטוי אלגברי מתוך הטלה זו. כעת ניעזר בחוק המופיע באיור 9 כדי לפשט את הביטוי לסכום פולינומים של קשרים דומים, ונשחק איתו בצורה חכמה עד שנגיע לפולינום כלשהו כפול הפולינום של המעגל הפרום. נגדיר את הפולינום המשויך למעגל הפרום להיות 1 וכך נקבל את פולינום ג'ונס.

על פניו אין סיבה שהביטוי האלגברי שקיבלנו יישמר תחת עיוותים של הקשר או שדרכים שונות של הפעלת האקסיומה הזו יתנו את אותה התוצאה (ואכן ג'ונס גילה אותו חלקית בטעות), אך על ידי מעקב זהיר אחר השינויים הקומבינטוריים שיכולים לקרות להטלה הדו-ממדית כאשר מבצעים עיוות של הקשר ניתן להראות שאכן הביטוי הזה נשמר. מסתבר שהוא גם שמורה חזקה במיוחד, כלומר ניתן להבדיל בעזרתו בין רוב הקשרים ולזהות תכונות עדינות שלהם אשר קשה לבדוק ולאתר באמצעים אחרים. שמורה זו הייתה משמעותית במיוחד להתפתחות של תורת הקשרים, אך המסתורין לגבי פולינום ג'ונס נשאר – למה הוא קיים בכלל ומאיפה הוא מגיע?

$$\begin{aligned}
 x \cdot P(\text{X}) + \frac{1}{x} \cdot P(\text{X}) &= \left(\frac{1}{\sqrt{x}} + \sqrt{x}\right) \cdot P(\text{X}) \\
 P(\text{Q}) &= -x^2 P(\text{Q}) + (\sqrt{x} + x\sqrt{x}) P(\text{Q}) \\
 \text{Q} &= \text{Q} = \text{Q} \quad \text{Q} = \text{Q} = \text{Q} \\
 \Rightarrow P(\text{Q}) &= (-x^2 + \sqrt{x} + x\sqrt{x}) P(\text{Q})
 \end{aligned}$$

איור 9: מקבל דיאגרמה דו מימדית של קשר ובעזרת האקסיומה בשורה הראשונה יחד עם הבחירה ש של המעגל הפרום ייתן 1 אפשר לשייך פולינום (לור) $x\sqrt{x}$ לכל דיאגרמה כזו. מתחת לאקסיומה מצויר חישוב עבור הקשר הפשוט ביותר (מאיור 8) שמדגים איך אפשר להשתמש בה כדי להגדיר את פולינום ג'ונס של הקשר.

פולינום ג'ונס מוגדר בצורה אלגברית, קומבינטורית ודו-ממדית – על פניו אין זכר לטופולוגיה התלת-ממדית של קשרים, והמשמעות שלו לא ברורה בכלל. וויטן פירש אותו מחדש במאמר נקי ומהמם שפתר את התעלומה: פולינום ג'ונס מגיע מכבידה קוונטית!

על פי עקרונות הקוונטיזציה, בתורת שדות קוונטית עלינו לסכום על כל התהליכים האפשריים של השדה הפרוס על כל המרחב כדי לקבל את ההתפלגות הסופית של השדות האפשריים על המרחב שלנו – באופן שקול, עלינו לספור את כל השדות המוגדרים על המרחב-זמן (שהרי שדה על המרחב-זמן הוא בדיוק תהליך של שדה לאורך הזמן), ולמשקל את הסכום לפי הפעולה. אם ננסה לקוונטט תורה שמזכירה את היחסות הכללית, נרצה בעצם לסכום על כל הגיאומטריות האפשריות על המרחב-זמן, כי הרי השדה הקלאסי שלנו הוא הגיאומטריה עצמה. כל גודל פיזיקלי בתורה של כבידה קוונטית גם הוא יהיה הסתברותי – למשל ניתן לשאול בתורה הקלאסית שאלה כזן: נניח ששני חלקיקים נוצרים ברגע כלשהו בנקודה מסוימת, עושים מסלול מסובך כלשהו ואז נפגשים ומשמידים זה את זה. מה הנפח הממוצע שירד מהמרחב במהלך הריקוד שלהם כתוצאה מההשפעה שלהם על הגיאומטריה? בתורה קלאסית התשובה תהיה נפח מסוים, ואילו בתורה הקוונטית נקבל התפלגות על נפחים שאותה נחשב באמצעות סכימה על כל הגיאומטריות האפשריות ומשקול לפי הפעולה (שתעדף גיאומטריות הדומות לגיאומטריה הקלאסית). כך ניתן לשאול שאלה שתלויה בבחירה של הגריד (למשל כמה נפח ירד ממצב ללא החלקיקים), ומתוך המיצוע שכבידה קוונטית דורשת מאיתנו נקבל תשובה שמושפעת מכל הגיאומטריות האפשריות. התשובה, אם כך, חייבת להיות שמורה טופולוגית כי היא לא תלויה בבחירה של גיאומטריה ספציפית! זהו בדיוק הרעיון של וויטן: אם נעבוד במרחב-זמן עם 2 ממדים מרחביים 11 זמני, נוכל לחלץ שמורה של קשרים על ידי שאילת שאלה גיאומטרית על מסלול של חלקיקים (כמו זו ששאלנו מקודם), להתייחס למסלול כקשר החי בתוך המרחב-זמן, ונקבלת שמורה טופולוגית מהקוונטיזציה. במילים אחרות, אפשר לסכם את הרעיון במשפט הבא:

כדי למצוא גודל שלא תלוי בגיאומטריה (כלומר שמורה טופולוגית), נחשב גודל התלוי בגיאומטריה (של המרחב-זמן) ואז נמצע על פני כל הגיאומטריות של המרחב-זמן!

למעשה וויטן הראה שאם ניקח את אחת הואריאציות הפשוטות והחשובות של כבידה קוונטית ב-2 ממדים מרחביים ("תורת צ'רן-סימונס"), כל הגדלים הפיזיקליים שנחשב עבור מסלול סגור מסוים של חלקיקים יהיו בדיוק ערכים של פולינום הג'ונס של המסלול עבור בחירות שונות של המשתנה בפולינום (כאשר בחירת המשתנה נקבעת על פי פרמטרי התורה) ומתוך ערכים אלה ניתן לשחזר את הפולינום בשלמותו, כלומר מצאנו פרשנות תלת-ממדית וגיאומטרית לפולינום המסתורי הזה! אם נסתכל על תורות היפותטיות אחרות של כבידה קוונטית, נקבל שמורה חזקה וכללית שהתגלתה מאוחר יותר ("פולינום HOMFLYPT"), וכך בעצם חישובים של כבידה קוונטית שקולים לחישובים בתורת הקשרים.

כך נולד תחום רחב בשם "טופולוגיה קוונטית" שסוחט מהפיזיקה הקוונטית תובנות עמוקות על טופולוגיה ב-3,4 ממדים. בעיה טיפוסית בטופולוגיה קוונטית לרוב תערב חלקים קומבינטוריים (כמו הגרפים שהוצגו באיור 9) ומהלכים קומבינטוריים עליהם, חלקים אלגבריים (הגילוי של פולינום ג'ונס למשל התבסס על הצגות של חברות ואלגבראות מיוחדות), חלקים מתורת הקטגוריות (למעשה שימוש "פרקטי" ייחודי במבנה של קטגוריה גבוהה בניגוד לשימוש ה"פילוסופי" הרגיל שלהן ככלי ארגוני), חלקים טופולוגיים טהורים וחלקים גיאומטריים (שעליהם בסוף נמצע על פני כל הגיאומטריות). אלו רק האספקטים המתמטיים כמובן – בפועל הרבה מהרעיונות בתחום משמשים ומגיעים מתחומים פיזיקליים כגון תורת שדות קוונטית, תורת היחסות הכללית או גם תחומים רחוקים יותר כגון מכניקה סטטיסטית, חומרים אלסטיים או מחשוב קוונטי.

הרעיונות היפים האלה הובילו אותי להתקמד בטופולוגיה קוונטית כתחום המחקר העיקרי שלי, בין השאר כי הוא מאפשר לי לעסוק בכל דבר פיזיקלי/מתמטי שמתחשק לי וליישם אותו לבעיות עם אווירה קלילה וכמעט משחקית (הבעיות של תורת הקשרים) אך גם לבעיות המרכזיות שמעסיקות את הפיזיקה התיאורטית היסודית ושתמיד ריתקו אותי עוד כילדה קטנה.



לילי ריש קוריצקי, בוגרת תכנית אודיסיאה תל אביב (מחזור יב), השתתפה באולימפיאדות הפיזיקה (ב-2023, ב-2024), כיום דוקטורנטית. חוקרת בעיקר תורת שדות קוונטית, תורות מיתרים וטופולוגיה. אוהבת מאוד כתיבת פנטזיה. מאוהבת בעולם הזה וכל היופי שלו.
lilyrsch@gmail.com מייל:

מבט על השלמות: הצצה אל שני חזונות אוטופיים בספרות המערבית

כותב: איתמר חנוני

תקציר

וכותבים בפילוסופיה הפוליטית, והוא משמש כיום כמילה יומיומית המקושרת עם מחשבה אופטימית ושאילה לשלמות.

האוטופיות למעשה מספקות לקורא הצצה לחזון חברתי מסוים של המחבר, הזוכה להציג מציאות טובה יותר מהנוכחית ללא הצורך לפרוס תיאוריה אמפירית מוכחת או דרך פעולה מעשית להגשמתו. העובדה שהספרות האוטופית מציגה עולם מתוקן, אך גם כזה שבהגדרתו רחוק מהמציאות הקיימת, מעלה סוגיה שבה עסקו הוגים רבים לאורך ההיסטוריה המודרנית: מדוע בוחר הכותב בעל החזון לתאר עולם אידיאלי דמיוני ורחוק מהמציאות, וכיצד בחירה זו משרתת את חזונו לשיפור החברה?

מאמר זה מציע כלי אנליטי שדרכו ניתן לסווג את הדרכים המרכזיות שבהן עונים הסופרים האוטופיים לסוגיות הקשורות ליחס בין החזון האוטופי למציאות הקיימת: הבחנה בין חזון אוטופי סגור, חזון שבו מוצגת תבנית של חברה מושלמת שאליה צריך לשאוף להגיע; לבין חזון אוטופי פתוח (או דינמי), המציע לבחון בצורה ביקורתית ומורכבת יותר את החברה המושלמת ואת האידיאליים הקיימים בה ובכך להוביל להתפתחות חיובית הדרגתית. המאמר ישתמש בדוגמאות מתוך ספרים אוטופיים מתקופות שונות כדי לעסוק בחזונות אלו ובמטרתם, ויציע קשר בין הלך הרוח ההיסטורי שנכח בתקופה שבה נכתבו לבין בחירתו של הכותב בסוג חזון מסוים.

המונח "אוטופיה" עצמו, כפי אל התודעה המערבית בתקופת הרנסנס, והוצג לראשונה בספרו משנת 1516 של ההומניסט והפוליטיקאי האנגלי תומס מור, שנשא את אותו השם. מקורה של המילה בשפה היוונית העתיקה, שסקרנה כל כך את ההומניסטים, שהחיו את הטקסטים היווניים והלטיניים והחלו להחזיר אותם ללב התרבות המערבית לאחר תקופת ימי הביניים הארוכה, החל מהמאה ה-15. **האוטופיה** של מור, שבה מתוארים בפירוט רב חוקיה ומנהגיה של מדינת אי בדיונית וכביכול אידיאלית, שואבת השראה ברורה משתי מסורות בולטות מהעת העתיקה: ממסות פילוסופיות-פוליטיות כמו אלו של אפלטון ושל הפילוסוף הנוצרי אוגוסטינוס, ומכתבים סאטיריים והיתוליים כמו אלו של הרטוריקן היווני לוקיאנוס והמחזאי היווני אריסטופנס.² המשמעות הכפולה של המילה "אוטופיה" (Utopia), העשויה להתפרש כ"המקום הטוב" (Eu-topia) או כ"לא מקום" (Ou-topia) מתכתבת עם שילוב שתי המסורות העתיקות הללו. שם זה נבחר בידי מור כדי לרמוז כי למרות התיאורים המפורטים של החברה המושלמת המוצגת

מאמר זה עוסק במסורת הספרות האוטופית המערבית, המבקשת לתאר בכתב חברה בדיונית טובה יותר מזו המוכרת לקורא. מסורת זו החלה את דרכה בתקופת הרנסנס, אך שורשיה נעוצים בכתבים פילוסופיים ופוליטיים מהעת העתיקה ובמיתוסים דתיים רבים העוסקים בעולמות אידיאליים. הסופרים האוטופיים הם אלו המציגים בספריהם חזון מסוים לחברה חדשה המתוארת כאידיאלית. המאמר מציג הבחנה בין שני סוגים של חזונות אוטופיים: חזון סגור וחזון פתוח, ומציע קשר בין הלך הרוח החברתי בזמן שבו נכתב הספר האוטופי לבין סוג החזון שאותו הוא מציג. ספרים בעלי חזון אוטופי סגור הם ספרים שנועדו להוביל שינויים חברתיים פוליטיים מידיים שבהם מאמינים הכותבים, והם נכתבו בתקופות שלוו בהלכי רוח מהפכניים, כמו אלה שנפוצו בקרב החוגים הקומוניסטיים של המאה ה-19. ספרים אלו מציגים לקורא עולם מושלם במטרה למשוך אותו אל חזון "סגור" מסוים, תבנית ברורה שתשמש השראה לשינויים חברתיים. ספרים בעלי חזון פתוח לעומת זאת, משתמשים בעולם המושלם כמראה אשר דרכה יש לבחון את האידיאליים הקיימים בחברה. ספרים אלו נכתבים כתגובה להלכי רוח אוטופיים מסוימים ושינויים חברתיים, ומטרתם להביע ביקורת על המצב הקיים וגם על רעיון השלמות האוטופית. הסופר אינו מנסה להציג לקורא חזון שיש להגשים, אלא מציע חזון "פתוח" של התקדמות והתפתחות חברתית דרך למידה וחקר של תרבויות שונות.

אם נביט לאחור אל עבר ההיסטוריה האנושית, נגלה כי היא רצופה בניסיונות לתאר עולמות, אשר בתקופה המודרנית יוגדרו כ"עולמות אוטופיים", שבהם בני האדם חיים בשלווה, בשפע, ובסיפוק. נראה כי השאיפה לחיות חיים טובים יותר מאלו הקיימים במציאות, טבועה עמוק במין האנושי. עולמות אוטופיים נכחו במיתוסים דתיים בכל רחבי הגלובוס, החל בסיפורים מקראיים המוכרים לקורא המערבי כמו סיפורי גן עדן וימות המשיח, דרך מיתוס תור הזהב מהמיתולוגיה היוונית ועד האגדה הסינית על הר פנגלאי השמימי, שבו אין מחסור או מכאובים. אך העיסוק בתיאור החברה האידיאלית לא נותר רק בידי אנשי הדת, אלא העסיק הוגים רבים לאורך ההיסטוריה, שבחנו את מאפייניה של חברה זו. הידוע והעתיק ביותר בתרבות המערבית הוא הפילוסוף היווני אפלטון שבספרו **הפוליטיאה** מהמאה הרביעית לפנה"ס, הציג תוכנית ליצירת חברה הרמונית וצודקת. במרוצת השנים, הפך המונח "אוטופיה" למושג מרכזי בקרב הוגים

בספרו, שבה חיים כולם באחוזה, שוויון מוחלט ורוחניות, היא אינה אלא ניסיון פוליטי דמיוני ועל כן יש לקחת את הרעיונות הפוליטיים שהיא מציעה בעירבון מוגבל, במיוחד את אלו הכוללים את ביטול הרכוש והתחום הפרטי.³

ספרו של מור החל "מסורת אוטופית" שצמחה והתפתחה מהמאה ה-16 ועד לימינו, וכללה ספרים רבים המתארים עולמות סוציו-פוליטיים שונים וטובים יותר מהנוכחיים, המופיעים כעיר, אי או מדינה בדיונית. הספרים האוטופיים, אשר לרוב נכתבו כספרי מסעות גדושים בתיאורים, מציעים לקורא מעין סיור מודרך בעולם המדומיין, משלטונו ותרבותו ועד לחיי המשפחה והפרט.⁴ אחד מהמוטיבים המרכזיים במסורת האוטופית, המלווה אותה עוד מספרו של מור (ושאוב גם הוא מהמסורת העתיקה), הוא העיסוק בדילמה שבין חיי העיון האידיאליים לבין חיי המעשה הפרקטיים (בלטינית: Vita Contemplativa אל מול Vita Activa). הסופרים המציגים תמונה של חברה אוטופית צריכים גם להסדיר אל מול הקורא את תפקידה של אותה חברה אידיאלית במציאות הפגומה הנוכחית; האם תפקידה לספק הצעה מוחשית לשינויים חברתיים (חזון סגור) או שעליה להישאר בגדר ניסוי חברתי בדיוני שנועד לבחון את המציאות אך לא מעבר לכך (חזון פתוח)?

ההבחנה שמבצע מאמר זה בין החזונות, מתיישבת במובן מסוים עם שתי הגישות שמציג הפילוסוף הפוליטי וההיסטוריון הבריטי ישעיה ברלין כלפי המחשבה האוטופית, שאותן הוא מציג במאמרו "החתייה אחר האידיאל" שפורסם לראשונה בשנת 1990 בספרו **האנושות – בול עץ עיקש: פרקים בהיסטוריה של הרעיונות**, ובו הוא בוחן את ההיסטוריה של הרעיונות הפילוסופיים והפוליטיים המובילים במערב מהעת העתיקה ועד המאה ה-20 רצופת המלחמות. הגישה הראשונה שמתאר ברלין נכחה בזרם הפילוסופי המרכזי במהלך רוב ההיסטוריה המודרנית, והיא מתבססת על רעיון האידיאל האפלטוני, המאמין כי לכל סוגיה תשובה רציונלית אחת, המיוצגת בדמות האידיאה. לכן, גם לשאלת החברה האידיאלית קיימת תשובה שכזו. בהתבסס על גישה זו, נוצרו אוטופיות המתחקות אחר מאמציו של אפלטון לתאר חברה הרמונית דרך ניסיונות פוליטיים שונים.⁵ אוטופיות אלו מציגות "חזון סגור" וסטטי של עולם טוב, בעל מסגרת וקווי מתאר ברורים, שניתן לקחת ממנו השראה, להסתכל עליו בהערצה ולשאוף להביאו אל עולמנו.

במאה ה-19, אוטופיות אלו נתפסו בידי הוגים רבים כבעלות תפקיד חשוב בקידום שינויים חברתיים מהפכניים. הפילוסוף המרקסיסטי בן המאה ה-19 ארנסט בלוך טען כי כדי להוביל שינוי משמעותי, נגד עיניו של המהפכן צריכה להיות מטרה אוטופית שהוא יכול לראות ולחוש את הכמיהה אליה. ספרים אוטופיים אלו, המנסים ליזום מהפכה, שואפים להציג עולם אנושי אידיאלי שהקורא יוכל לראות בדמיונו.⁶

במאה ה-19, שנחשבה בעיני רבים לתור הזהב של הספרות האוטופית, כותבים סוציאליסטים רבים האמינו ביכולות של רעיונותיהם החברתיים לשמש קו מנחה אוניברסלי לחברה חדשה וטובה יותר. אמונה זו התחזקה בעקבות כמה אירועים שהתרחשו בסופה של המאה ה-18, כמו המהפכה האמריקאית והמהפכה הצרפתית אשר העמיקו את התפיסה שבה החזיקו הוגי הנאורות בנוגע לכוחם של המדע והרציונליות לקדם את העולם אל עבר הטוב. לקראת סוף המאה, סופרים ופעילים סוציאליסטים, שבין הבולטים בהם ניתן למנות את המעצב הבריטי ויליאם מוריס והעיתונאי

האמריקאי אדוארד בלאמי, השתמשו בספרות האוטופית כדי לתאר את העולם הטוב שיווצר לאחר נפילת ההיררכיה המעמדית הקיימת, במטרה להשפיע על דעת הקהל. כך אומר ויליאם גסט, גיבור הספר האוטופי **חדשות משום מקום או עידן של מנוחה** (News from Nowhere or An Epoch of Rest) של מוריס משנת 1891:

"ואם אחרים יוכלו לראות זאת כפי שאני ראיית זאת [את האוטופיה], אזי הדבר ייקרא חזון ולא חלום".⁸

ההבדל שמשרטט מוריס בין החלום (Dream) לחזון (Vision), נועד להציג לקורא בן המאה ה-19 את ההבדל בין עולם החלומות הקסום והאידיאלי שהוא מכיר מהספרות הפופולארית של זמנו (כמו למשל בחלומה של אליס **באליס בארץ הפלאות** של לואיס קרול הלא הוא צ'ארלס דודג'סון) לבין דבר מה המוצג לנגד עיניו, מוחשי. נקודה זו ממחישה את מטרתו של הספר האוטופי בעל החזון הסגור, להפוך את החלום הטוב לכזה שהקורא מסוגל לדמיין בעולמו האמיתי. ההבנה שלרגשות תפקיד משמעותי בביסוס כוחו של החזון האוטופי בולטת במיוחד בספרים בעלי חזון אוטופי סגור. ואכן, במהלך הספר שם מוריס דגש מרכזי על הרגש ככוח המניע את המהפכה; הוא ראה את העולם האוטופי הבדיוני ככזה שנועד להדליק את התשוקה בקרב הציבור ולגרום לו לפעול אקטיבית למען השינוי. כך מסבירה זאת דמות מספרו:

אנו יכולים עכשיו לראות שהכוח המניע העיקרי לשינוי היה הגעגע לחופש ולשוויון, רגש שהוא די דומה, אם תרצה, לתשוקתו הבלתי הגיונית של האוהב.⁹

הגישה השנייה שמתאר ברלין, שהחלה להתפתח בתקופה המודרנית וברנסנס, גורסת כי אין פתרון לשאלת החברה המושלמת, לא מבחינה מעשית, וחשוב מכך: לא מבחינה רעיונית. גישה זו נשענת על התובנה שבני אדם שונים מחזיקים בערכים וברצונות שונים, אשר אינם תמיד נמצאים בהלימה, ולכן אף חברה לא תוכל להביא להרמוניה מוחלטת בין כל יושביה.¹⁰ הבנה זו, הקשורה לתהליכים היסטוריים ומגמות חברתיות, היא היוצרת ספרים אוטופיים בעלי "חזון פתוח", חזון הדוגל בהתקדמות והתפתחות במקום שלמות. הם מציגים חברה המתיימרת להיות אידיאלית, ואף עשויה להיתפס ככזו במהלך הספר, אך יש בה בעיות מהותיות הנובעות מאותה אי הלימה.¹¹ סופרים אלו משתמשים באוטופיה כדי לאתגר את המציאות הקיימת, אך גם כדי להעביר את המסר כי לא ניתן, ולא צריך, לנסות להגיע לשלמות חברתית. במקום זאת, ניתן ללמוד ולהתפתח מהמפגש עם חברות שונות. סופרים אלו נוטים להשתמש באמצעים בדיוניים וסאטיריים כדי להרחיק את החברה החדשה מזו המוכרת לקורא, ובכך להגביר את תחושת החקר של התרבות הזרה.

דוגמה בולטת ומוכרת לכך ניתן למצוא בספר המסעות הסאטירי **מסעות גוליבר** (בשם המקור: Travels into the Remote Nations of the World, in Four Part, by Lemuel Gulliver) שכתב ג'ונתן סוויפט ופורסם בשנת 1726. בהתחזותה ליומן מסע אמיתי (כפי שניתן להבין משמו של הספר), נבנית הסאטירה של סוויפט, שמצליחה לגעת במגוון רחב של דמויות ורעיונות בתרבות ובפוליטיקה האנגלית של זמנה, על גבו של ז'אנר סיפורי המסעות שהיה נפוץ במאה ה-18 אשר אפיין גם את המסורת האוטופית. סיפורי המסעות נתנו ביטוי לשאיפה האירופאית של התקופה לפגוש ולחקור את דמותו של הזר, הקשורה להתפתחות

הקולוניאליזם ולמפגש עם העולם הלא מערבי באמריקה, אפריקה ואסיה. סוויפט משתמש בשאיפה זו ובציפייה של הקורא האנגלי המצוי לפגוש עולמות מרוחקים ואקזוטיים, כדי להציב בפניו מראה החושפת את פגמיה של החברה והתרבות האירופאית המוכרת לו. הדבר נעשה דרך מפגשיו של גוליבר עם אנשים ויצורים מקהילות נידחות ברחבי הגלובוס, שהשונות שלהם מובלטת ומוקצנת בזכות השימוש של סוויפט בפרודיה ובבדין.¹²

בחלקו הרביעי של הספר, "ארץ ההוינהנמים", מוצגת ביקורת נוקבת כלפי הלך הרוח האוטופי של הנאורות, על פיה יש להאמין כי בכוחם של המדע וההיגיון להביא את החברה לכדי שלמות, דרך עולמם המושלם והמבודד של הסוסים הרציונליים. בחלק זה לועג סוויפט לחזון הנאורות ומסביר כי החיים על פי האידיאלים הנאורים מובילים לחברה חסרת רגש, חילוקי דעות או רחמים. בסיומו של הספר, ולאחר הביקורת הקשה שמטיח סוויפט כלפי המין האנושי (לא סתם הוא כונה מיזנתרופ בידי מבקריו),¹³ מציג גוליבר את מטרתו בצורה הממחישה את מטרתו של החזון האוטופי הפתוח, לא להציג אוטופיה אשר אחריה יש להתחקות בקנאות, אלא כזו שתשפר את בני האדם:

לנו, הנוסעים לארצות רחוקות [...], קל לבדות מן הלב תיאורים של חיות מופלאות בים וביבשה. אך המטרה שצריכה לעמוד לנגד הנוסע היא לשפר את בני האדם, להוסיף להם דעת ולחדד את שכלם באמצעות דוגמאות מארצות נכר, לטוב ולרע.¹⁴

אם כך, החזון האוטופי הפתוח, כמו זה המוצע **במסעות גוליבר**, מהווה תגובה להלכי רוח אוטופיים "סגורים", ומציע גישה המכירה במורכבות האנושית המונעת הגעה לשלמות, אבל לא מונעת תהליך של למידה והתפתחות דרך הסתכלות בעולמות שונים ומופלאים.

יותר ממאתיים שנים לאחר פרסום ספרו של סוויפט, לאחר דעיכתו של האוטופיות הסוציאליסטיות של המאה ה-19 ותחילת המאה ה-20 לטובת כתיבה דיסטופית פסימית יותר, הציעה הסופרת האמריקאית זוכת הפרסים אורסולה לה גוין, בספרה האוטופי **בידיים ריקות** (The Dispossessed) משנת 1974, חזון אוטופי דינמי פתוח המאמין בכוחה של האוטופיה לעורר תקווה לשינוי חיובי. במאה ה-20, לאחר שתי מלחמות העולם שהובילו להרס חסר תקדים ברחבי הגלובוס, ולאחר המהפכה הקומוניסטית של 1917 אשר הייתה אמורה לתת אלטרנטיבה ממשית לקפיטליזם אך במקום זאת הובילה לדיכוי, אלימות רבה ולמלחמה הקרה, איבד העולם המערבי מן התקווה שתלו הוגי הנאורות והסוציאליסטים המהפכניים במחשבה האנושית ובטכנולוגיה שיביאו אותנו אל עולם טוב יותר. העלייה בכתיבה הדיסטופית בתקופה זו, שהזירה מפני המהירות שבה חזון אוטופי מושך לעין עשוי להוביל לדיכוי ולטוטליטריזם, קשורה קשר הדוק להתרחקות מהרעיונות האוטופיים ומהעיסוק בשלמות. כמו כותבים רבים באותה תקופה, גם לה גוין אימצה גישה זו והביעה בספרה ביקורת חריפה על רעיונות טוטליטריים ועל הניסיון להביא לשלמות סטטית אך גם חרגה ממנה בכך שלא התעלמה מהכוח שיש לרעיונות האוטופיים לעורר רגשות תקווה ויוזמה ולהוביל לשינוי חברתי חיובי.

בידיים ריקות, המתואר בכותרת המשנה כ"אוטופיה עמומה", משתמשת לה גוין בז'אנר המדע הבדיוני, שהפך כלי פופולארי במאה ה-20 לביטוי ספקולציות חברתיות ופוליטיות, כדי להציע כי עלינו לחיות בתהליך של התפתחות דיאלקטית דרך למידה

מהאחר, מהזר (ובמקרה של ספר זה, מכוכב אחר לחלוטין). לה גוין דוחקת בנו לשבור את הנורמות הקיימות בחברה ולא לחשוש לקדם רעיונות שעשויים להיראות אוטופיים, כל עוד אנו מודעים לכך שהם אינם מוחלטים וממשיכים לחשוב בביקורתיות. כך אומרת הדמות הראשית בסוף הספר:

זאת היית מטרתנו מלכתחילה [...] לטלטל את הדברים, לבחוש בקלחת, לשבור כמה הרגלים, להניע את הבריות לשאול שאלות.¹⁵

למרות ההבדל בסגנון הכתיבה שלהם (ספר מסעות סאטירי מול ספר מדע בדיוני עלילתי), המסר של סוויפט ושל לה גוין דומה: באמצעות העולם האוטופי הם מציעים "חזון פתוח" של התפתחות אישית ושיפור בני האדם דרך הבחינה של החברה הקיימת ושל זו הבדיונית, האוטופית, מזוויות שונות. גישה זו הפכה בולטת בקרב הוגים שונים, במיוחד לאחר מלחמת העולם השנייה, שאיתם עשויים להזדהות אותם כותבים בעלי חזון פתוח. אחד מהבולטים שבהם, הוא הפילוסוף האוסטרי קרל פופר, אשר הביע התנגדות עזה למהפכות רדיקליות בעלות מאפיינים אוטופיים והציע לקיים במקומן תהליך אינסופי של ניסוי ולמידה, כזה שישפר את החברה בהדרגה במקום להגיע למצב סטטי.¹⁶ ואכן, נראה כי הכותב בעל החזון הפתוח אינו מנסה להטיף לקורא לאמץ את חוקיה של החברה האוטופית, אלא שם דגש על תהליך הבחינה הביקורתית של החברה הקיימת ושל התפיסה האוטופית שלה.

שני החזונות שהוצגו במאמר זה מבטאים גישות שונות שדרך ניתן לבחון את המסורת האוטופית ומטרותיה: דרך החזון הסגור, שאפיין סופרים שהושפעו מהלכי רוח מהפכניים, למשל בתקופת המהפכה התעשייתית שבה השינוי נראה קרב ובא, והשתמשו ברעיונות האוטופיים וברגשות שהם מעוררים בשביל להניע שינוי חברתי עמוק ולקדם ערכים בהם האמינו; ודרך החזון הפתוח, שאפיין סופרים שפעלו בתגובה למהפכה מסוימת ולתפיסה האוטופית בת זמנם, למשל כמו במאה ה-20 בה נחשבה המסורת האוטופית למסוכנת ומאיימת, והשתמשו ברעיונות האוטופיים כדי לעודד חקר תרבותי אשר יוביל לשיפור החברה ולהתפתחות הדרגתית.

הסקירה של החזונות האוטופיים השונים מאפשרת להבין בצורה טובה יותר את המטרות והרעיונות החברתיים שעמדו לנגד עיניהם של הסופרים האוטופיים לאורך ההיסטוריה, ואת הדרכים השונות שבהן ניתן להתייחס לעולמות המושלם שתיארו. סוגי החזונות האוטופיים השונים מביאים לידי ביטוי מאבקים של רדיקליות מול הדרגתיות, אופטימיות מול פסימיות ועוד, הממשיכים להעסיק את המין האנושי עד היום.

1 James Hankins, "Humanism, Scholasticism, and Renaissance Philosophy," In The Cambridge Companion to Renaissance Philosophy, Ed. James Hankins (Cambridge: Cambridge University Press, 2007), 31–32.

2 Frank E. Manuel & Fritzie P. Manuel, "The Golden Age of Kronos," In Utopian Thought in the Western World, (Cambridge, MA and London, England: Harvard University Press, 1979), 66.

3 James C. Davis "Thomas More's Utopia: Sources, legacy, and interpretation," In The Cambridge Companion to Utopian Literature, Ed. G. Claeys (Cambridge: Cambridge University Press, 2010), 29.

פישלוב, דוד. "מסע קריאה משעשע ומטלטל במסעות גוליבר." בתוך **מסעות גוליבר**, מאת ג'ונתן סוויפט, תרגום יותם בנשלום. ירושלים: כרמל, 2022.

Berlin, Isaiah. "The Decline of Utopian Ideas in the West." In *The Crooked Timber of Humanity: Chapters in the History of Ideas*. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press, 2013, 21–50.

Berlin, Isaiah. "The Pursuit of the Ideal." In *The Crooked Timber of Humanity: Chapters in the History of Ideas*. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press, 2013, 1–20.

Davidson, Joe P. L. "Looking laterally: The literary utopia and the task of critical social theory." *Current Sociology* 69, no. 7 (2021): 1069–1084.

Davis, James C. "Thomas More's Utopia: Sources, legacy, and interpretation." In *The Cambridge Companion to Utopian Literature*, edited by Gregory Claeys. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, 28–50.

Hankins, James. "Humanism, Scholasticism, and Renaissance Philosophy." In *The Cambridge Companion to Renaissance Philosophy*, edited by James Hankins. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 30–48.

Manuel, Frank E. & Manuel, Frizie P. "The Golden Age of Kronos." In *Utopian Thought in the Western World*. Cambridge, MA and London, England: Harvard University Press, 1979, 64–92.

<https://doi.org/10.4159/9780674040564-004>

Roemer, Kenneth M. "Paradise Transformed: Varieties of Nineteenth-Century Utopias." In *The Cambridge Companion to Utopian Literature*, edited by Gregory Claeys. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, 79–106.

Williams, Kathleen. "Introduction." In Jonathan Swift *The Critical Heritage*, edited by Williams Kathleen. London and New York: Routledge, 1995, 11–40.



איתמר חנוני, בוגר תוכנית אידיאה תל אביב, זוכה פרס שושני לעבודת מחקר מצטיינת במדעי הרוח לשנת 2024 ובפרס ון ליר לשנת 2025. עתודאי בתוכנית עילית בטכניון. אוהב לקרוא, לכתוב, לגנון בגיטרה ובכינור ולשחות. מייל itamarhanooni@gmail.com

4 Joe P. L. Davidson, "Looking laterally: The literary utopia and the task of critical social theory," *Current Sociology* 69, no. 7 (2021): 1072, <https://doi.org/10.1177/0011392120969758>.

5 Isaiah Berlin, "The Pursuit of the Ideal," In *The Crooked Timber of Humanity: Chapters in the History of Ideas*. 2nd ed. (Princeton: Princeton University Press, 2013), 6.

6 ארנסט בלוך, "חשיבותה של האוטופיה," תרגום דוד ארן, בתוך **אוטופיות: אנתולוגיה**, בעריכת אברהם יסעור ונגה וולף (תל אביב: רסלינג, 2011), 230.

7 Kenneth M. Roemer, "Paradise Transformed: Varieties of Nineteenth-Century Utopias," In *The Cambridge Companion to Utopian Literature*, ed. Gregory Claeys (Cambridge: Cambridge University Press, 2010), 79.

8 ויליאם מוריס, **חדשות משום מקום או עידן של מנוחה**, תרגום משה אלחנתי (תל אביב: רסלינג, 2015), 297.

9 שם, 170–171.

10 Isaiah Berlin, "The Decline of Utopian Ideas in the West," In *The Crooked Timber of Humanity: Chapters in the History of Ideas* (Second Edition) (Princeton: Princeton University Press, 2013), 17–20.

11 מיכאיל בכטין, **צורות הזמן והכרונוטופ ברומן: מסה על פואטיקה היסטורית**, תרגום דינה מרקון (שוהם: דביר, 2007), 7.

12 דוד פישלוב, "מסע קריאה משעשע ומטלטל במסעות גוליבר," בתוך **מסעות גוליבר**, מאת ג'ונתן סוויפט, תרגום, יותם בנשלום (ירושלים: כרמל, 2022), 399.

13 Kathleen Williams, "Introduction," In Jonathan Swift *The Critical Heritage*, ed. Williams Kathleen (London and New York: Routledge, 1995), 2–3.

14 ג'ונתן סוויפט, **מסעות גוליבר**, תרגום יותם בנשלום (ירושלים: כרמל, 2022), 282–277.

15 אורסולה ק' לה גווין, **בידיים ריקות**, תרגום עמנואל לוטם (חיפה: מובי דיק, 2015), 407.

16 יחיאל גלבע, **קרל פופר והפילוסופיה של האמצע** (תל אביב: רסלינג, 2022), 59.

ביבליוגרפיה

בכטין, מיכאיל. **צורות הזמן והכרונוטופ ברומן: מסה על פואטיקה היסטורית**. תרגום דינה מרקון. שוהם: דביר, 2007.

בלוך, ארנסט. "חשיבותה של האוטופיה." תרגום דוד ארן. בתוך **אוטופיות: אנתולוגיה**, בעריכת אברהם יסעור ונגה וולף. תל אביב: רסלינג, 2011.

גלבע, יחיאל. **קרל פופר והפילוסופיה של האמצע**. תל אביב: רסלינג, 2022.

לה גווין, אורסולה ק'. **בידיים ריקות**. תרגום עמנואל לוטם. חיפה: מובי דיק, 2015.

מוריס, ויליאם. **חדשות משום מקום או עידן של מנוחה**. תרגום משה אלחנתי. תל אביב: רסלינג, 2015.

סוויפט, ג'ונתן. **מסעות גוליבר**, תרגום יותם בנשלום. ירושלים: כרמל, 2022.

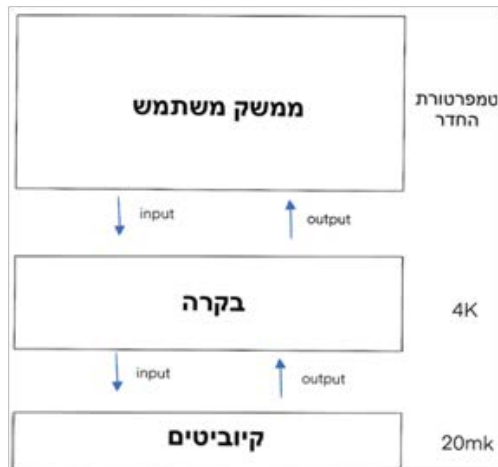
ייעול שערים לוגיים לקראת עידן המחשוב הקוואנטי

כותבת: שרון מלטר

עורך: תמיר שפירא

ממנו פלט, יש למצוא דרך לתקשר עימו ממרחק. מאחר שתחום המחשוב הקוונטי עודנו חדש, עוד לא קיים המחשב הקוונטי שמסוגל לבצע את פעולות החישוב הבסיסיות ביותר. לכן, לא ניתן להשתמש ברשת תקשורת אלחוטית כדי לתקשר עם המחשב הקוונטי – תקשורת שנדרשת בייחוד בשלבי הפיתוח. אך במחלקת ההנדסה באוניברסיטת בר-אילן הועלה הפתרון הבא; המפתחים נקטו גישה של "סוכן אמצעי" – מחשב בקרה אשר מתקשר עם המחשב הקוונטי במקום אדם. הוא איננו חייב טמפרטורה קריוגנית, וכך אפשר לתקשר עם הממשק שלו באופן ישיר.

להלן שרטוט אשר מדגים את אופן התקשורת עם המחשב:



איור 1: שרטוט אסטרטגיית התקשורת עם מחשב קוונטי, על פי מעבדת Enics באוניברסיטת בר-אילן

עם זאת, כפי שניתן לראות בשרטוט, נוצרת בעיה חדשה; אותו מחשב בקרה, אשר מתקשר ישירות עם המחשב הקוונטי, עדיין יצטרך להימצא בסביבת טמפרטורה קריוגנית (4 K). כלומר, נצטרך לוודא כי הוא מתפקד בסביבת טמפרטורה קיצונית זו. לא מדובר בוודא טריוויאלי, מכיוון שמרבית המחשבים בניינים כך שיוכלו להפיק ביצועים מיטביים בטמפרטורת החדר, שהיא לרוב 300 K.

תפקוד מיטבי של מחשב הבקרה משפיע על יכולת ביצוע ניסויים, על משך הפיתוח ועל התקציב הנדרש לשם כך. אם בסביבה הקריוגנית מחשב הבקרה יבצע את פקודותיו באופן איטי מדי, או

אחד הרעיונות התיאורטיים המסעירים ביותר בעולם המתמטיקה והמחשוב היום הוא המחשב הקוונטי. גופים רבים, מחברות פרטיות ועד ממשלות, משקיעים מיליארדי דולרים בניסיון להפוך את המודל התיאורטי למחשב אמיתי ופרקטי.

לפי מומחים משדה המתמטיקה והאלגוריתמיקה, מחשב קוונטי, או מחשב אשר מבוסס על קיוביטים במקום טרנזיסטורים (על שניהם נרחיב בהמשך) מסוגל לפתור בעיות מסוימות באופן מהיר משמעותית ממחשבים רגילים. כך, בעוד אלגוריתמים מסוימים לפענוח צופן עלולים לצרוך עשרות שנות חישוב לפני שיגיעו לפתרון כאשר הם מורצים במחשב רגיל, מחשב קוונטי יוכל לפתור את אותן בעיות בזמן חישוב של כמה ימים או אף כמה שניות. כלומר, ייתכן שהראשונים שיצליחו לפתח מחשב קוונטי פועל יהיו בעלי יכולת לפענח הודעות מוצפנות אשר עד היום נחשבו מאובטחות. לכן, גם בישראל ישנן מעבדות בשוק הפרטי והציבורי אשר מנסות להביא את המחשב הקוונטי מהעולם התיאורטי לפרקטי.

מבוא

לפני הפיתוח של מחשב קוונטי, יש לוודא כי ניתן לייצר את הרכיבים הבסיסיים שלו. כמו כן, יש להבטיח כי ניתן יהיה להכניס אליו קלט ולקבל ממנו פלט. לא מדובר בעניין טריוויאלי, בייחוד עקב אחת התכונות המרכזיות של קיוביטים: סופרפוזיציה.

יכולת החישוב המיוחדת של מחשבים קוונטיים מתאפשרת בעזרת תכונת הסופרפוזיציה של הקיוביטים. לא ניכנס למורכבות התופעה, אך על רגל אחת ניתן לתאר רכיב שנמצא בסופרפוזיציה כך: מצבו הנוכחי אינו ידוע עד שנבדוק אותו. כפי שהחתול של שרדינגר אינו מת ואינו חי עד אשר אנו בודקים את מצבו, כך גם כל קיוביט איננו 0 ואיננו 1 עד אשר עד בודקים אותו. כדי לקיים סופרפוזיציה, כל קיוביט צריך להיות מבודד לחלוטין מסביבתו, כך שאפילו אטומים אשר נמצאים לידו לא יוכלו להשפיע עליו. לשם כך, מעבדות רבות שמנסות לפתח מחשב מבוסס קיוביטים, עושות זאת בתנאי טמפרטורות קריוגניות. טמפרטורה קריוגנית היא כל טמפרטורה שאיננה גדולה מ-80 מעלות צלזיוס או 193.15 K. בטמפרטורות אלה, ניתן להקפיא את תזוזת האטומים הנעים מסביב לקיוביטים ובכך לנסות לקיים את תכונת הסופרפוזיציה שלהם.

מחשב אשר נדרש להימצא בטמפרטורה קריוגנית איננו מתאים לתקשורת ישירה מול אדם. לכן, כדי להעניק קלט למחשב ולקבל

שתירש הרבה יותר אנרגיה מהמצופה, ניסויים עלולים להיכשל. לפיכך, יש לוודא כי זמן ההשהיה (דיליי) של המחשב, שהוא הזמן העובר בין העברת קלט לקבלת פלט – מינימלי. אחד הגורמים המשפיעים ביותר על זמן ההשהיה של מחשב, הוא זמן ההשהיה של השערים הלוגיים המרכיבים אותו. כמו כן, מידת בזבז האנרגיה של השערים היא הגורם העיקרי לבזבז אנרגיית המחשב. לכן, הוחלט כי יש להתמקד במהירות ובחיסכון אנרגיה אופטימלי של השערים הלוגיים השונים אשר ישמשו את מחשב הבקרה. בכך התמקד המחקר שלי; איך ניתן להביא שערים לוגיים שונים לביצועים אופטימליים בטמפרטורות קריוגניות?

רקע תיאורטי

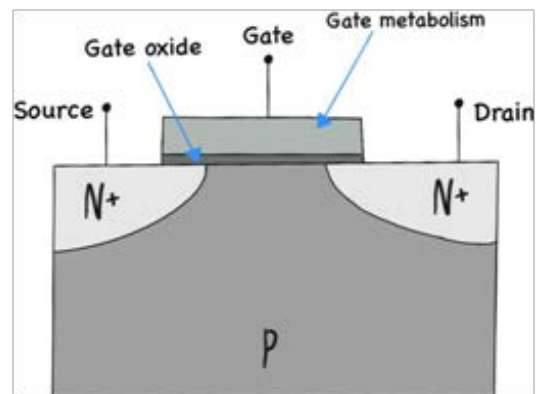
טרנזיסטורים

כל מידע שנשמר במחשב, בין שמדובר בצבע של פיקסל במסך, מילה בטקסט או כתובות של קבצים בזיכרון, נשמר כמספר. כל מספר נשמר על ידי הייצוג הבינארי שלו. כלומר, על ידי רצף של אפסיים ואחדות; רצף של ביטים. כל ביט נשמר על ידי טרנזיסטור. טרנזיסטור הוא רכיב מזערי שבבבים שמטרתו לייצג אחד מהערכים 0 או 1. נהוג כי הערך 0 מסמל עצירה של זרם חשמלי באותו טרנזיסטור, ו-1 מסמן מצב שבו הטרנזיסטור מאפשר מעבר זרם חשמלי דרכו. הערך שמויוצג תלוי בעוצמת הזרם המגיעה ל-Source, דיינו למקור הזרם שמגיע לטרנזיסטור. האזור שאליו הוא יוצא, אם זרימה אכן מתאפשרת, מכונה Drain.

מצב הטרנזיסטור, כלומר הערך שהוא מייצג, תלוי במתח הסף שלו (Threshold Voltage, שסוגיו יוסברו בהמשך) ובעוצמת הזרם המגיעה אליו. אם עוצמת הזרם מגיעה למתח הסף, תתאפשר זרימת החשמל ל-Drain, והערך שאותו טרנזיסטור ייצג יהיה 1. אחרת, זרימה לא מתאפשרת, והערך שמויוצג הוא 0.

הערה: ישנם דגמים של טרנזיסטורים שבהם קיים קשר הפוך בין הביט שהטרנזיסטור מייצג לבין זרימת זרם חשמלי דרכו. כלומר, כאשר מגיעה עוצמת זרם אשר עולה על סף המתח, הביט שמויוצג הוא דווקא 0. דגמים אלה נפוצים פחות.

להלן שרטוט המתאר מבנה של טרנזיסטור מדגם NMOS:



איור 2: שרטוט של דגם טרנזיסטור ממבנה NMOS

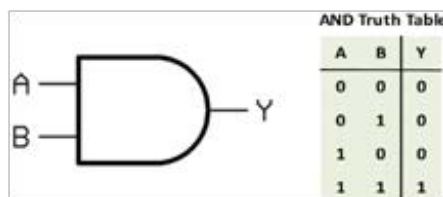
בדגמי NMOS, אזורי ה-Source וה-Drain מופרדים על ידי P-Type, סיליקון טהור ש"זוהם" במעט יסוד אחר שקולט אלקטרונים (למשל אינדיום) מאחר שכל אטום שואף תמיד למלא ולרוקן את רמת האנרגיה שלו, ולשם כך הוא יוצר קשרים קוולנטיים עם אטומים אחרים.

לאטומי הסיליקון שבאזור P ישנם ארבעה אלקטרונים, אך הם שואפים להחזיק בשמונה אלקטרונים. לכן, האטומים באזור יוצרים קשרים קוולנטיים זה עם זה. קשרים אלה יוצרים "חורים", כלומר אטומים חסרי אלקטרונים. כאשר זרם חשמלי נכנס מה-Source, אלקטרונים עוברים בין אותם חורים וכך חלה תנועת אלקטרונים וחורים באזור P. הזרם החשמלי מצליח לעבור מה-Source ל-Drain רק אם ישנם מספיק אלקטרונים כדי למלא את החורים ובכך לנוע לעבר ה-Drain. לכן, מתח הסף נקבע על פי רמת הזיהום של הסיליקון – ככל שהוא מזוהם יותר ביסוד קולט-אלקטרונים, כך יש בו יותר אטומים חסרי-אלקטרונים, כלומר יותר חורים.

נשים לב כי כאשר עוצמת הזרם חזקה יותר, החורים שבאזור P מתמלאים מהר יותר, כך שמעבר הזרם מתבצע מהר יותר. מכאן נקבל כי הענקת עוצמת זרם חזקה יותר, כל עוד היא גדולה ממתח הסף, יכולה להקטין את זמן ההשהיה של הטרנזיסטורים.

שערים לוגיים

שערים לוגיים הם הרכיבים המבניים את המערכת, לאחר טרנזיסטורים. אלו הם פונקציות פשוטות אשר מקבלות ביטים כקלט ומוציאות ביט יחיד כפלט. למשל, השער הלוגי AND, מוציא 0 כפלט כל עוד לפחות אחד מהקלטים שלו הוא 0. אחרת, הוא מוציא את הפלט 1. לכל שער לוגי ישנה "טבלת אמת", אשר מציגה את הפלט הנכון עבור כל קלט אפשרי. להלן סמל השער הלוגי AND, וטבלת האמת שלו:



איור 3: מימין, טבלת האמת של השער הלוגי AND. משמאל, סמל השער הלוגי AND.

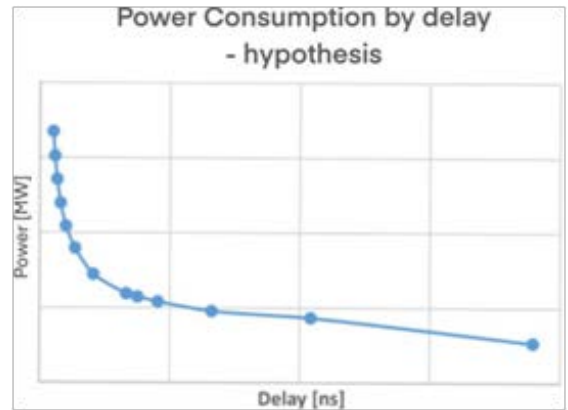
זמן ההשהיה של שער לוגי מוגדר כזמן שעובר בין הרגע שבו קיבל את הקלטים שלו, עד הרגע שבו הוא הוציא את הפלט המתאים. בעזרת שערים לוגיים, ניתן לבצע פעולות חשבון בינאריות, כלומר פעולות אריתמטיות על הייצוג הבינארי של מספרים. באמצעות פעולות אלה ניתן לבצע כל חישוב אריתמטי. כל שבב מורכב מכמה שערים לוגיים. לכן, שבבים מכונים גם "מעגלים משולבים". במחשבים אלקטרוניים מודרניים יש מספר רב של שערים לוגיים. למשל, בכל טלפון חכם מודרני ישנם כמה ביליונים של שערים לוגיים. על כן, טיב תפקודם הוא גורם מרכזי בתפקוד המכשיר הכולל.

ישנם כמה סוגי שערים לוגיים אשר יש להשתמש בהם כדי לממש פונקציות מורכבות: NOT, NAND, NOR ועוד. בין אותם שערים יש הבדלי מבנה, ולכן יש להתייחס לזמני ההשהיה וחיסכון האנרגיה שלהם בנפרד. ייתכן כי תנאים אשר יגררו תפקוד אופטימלי של שער מסוג אחד לא יתאימו לשער מסוג אחר. כמו כן, ניתן להבדיל בין שערים לוגיים לפי סף המתח שלהם, המכונה Threshold Voltage. סף המתח של שער מציין את עוצמת המתח המינימלית עבור אותו השער על מנת שיקלוט קלט. ניתן לסווג את מתחי הסף ל-HVT, LVT ו-Ultra Low Threshold Voltage. High, Low, כלומר, מאחר שבטמפרטורה נמוכה לא מתקבלת אנרגיה תרמית, עוצמת המתח קטנה, כך שנתמקד בשערי LVT ו-Ultra Low Threshold Voltage. אחרת, עוצמת המתח שתגיע לשערים לא תספיק כדי לקבל מהם קלט.

קשר בין זמן ההשהיה לחיסכון אנרגיה

לצערנו, עבור כלל סוגי השערים הלוגיים, ככל שזמן ההשהיה קטן, בזבוז האנרגיה גדל. יחס זה מתקיים עקב הקשר בין עוצמת זרם המגיע לטרנזיסטור לזמן ההשהיה שלו, שצוין קודם. בזבוז זה נוטה לגדול תחילה בקצב לינארי ולאחר מכן בקצב אקספוננציאלי.

להלן דוגמה לצורת גרף המייצג תלות של כמות בזבוז אנרגיה בזמן ההשהיה של שער:

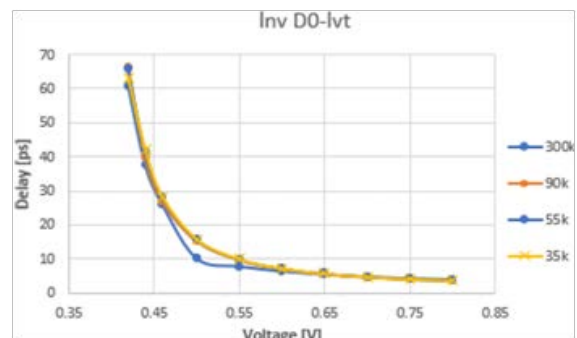


איור 4: ייצוג של מבנה גרף המתאר תלות בין כמות בזבוז אנרגיה בזמן ההשהיה של שער לוגי

ניתן לראות כי בכל ניסוי אשר נעשה בטמפרטורת החדר, כאשר בוחנים את תלות כמות בזבוז האנרגיה בזמן ההשהיה, מתקבל גרף בעל מבנה זה. עקב אופי יחס זה, לא ניתן לקבל גם זמן ההשהיה וגם בזבוז אנרגיה מינימליים. עם זאת, בהנחה שנקבל תלות זהה גם בטמפרטורות קריוגניות, ניתן יהיה לזהות את זמני ההשהיה המינימליים אשר עבורם עדיין לא מתרחשת הגדילה האקספוננציאלית באנרגיה שבה משתמש השער. כלומר, ניתן יהיה למצוא את זמן ההשהיה המינימלי אשר בו חיסכון השער אינו נפגע יתר על המידה.

שרשרת שערים לוגיים

כפי שצוין, בטלפונים חכמים ישנם ביליוני שערים לוגיים, כך שניתן להסיק אינטואיטיבית כי זמן ההשהיה שלהם כמעט לא מורגש בקרב בני אדם. ואכן, יש להשתמש ביחידות מידה קטנות מאוד כדי לראות באופן ברור הבדלים בזמני ההשהיה. לדוגמה, להלן תוצאת מדידות זמן ההשהיה של השער הלוגי Inverter DO-LVT בטמפרטורות שונות:



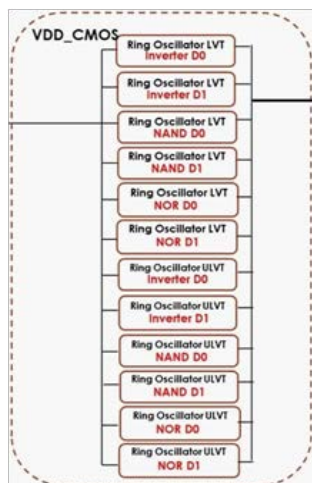
איור 5: דוגמה לזמני ההשהיה של השער הלוגי Inverter DO-LVT, לפי תלות בטמפרטורת הסביבה ועוצמת הזרם הניתן לו

הסימון DO מייצג את גודל השער הלוגי. במהלך הניסויים השתמשנו רק בגדלים Do ו- D1 עבור השערים הלוגיים. גדלים אלה נבחרו על פי דרישות מהנדסי מחשב הבקרה, אשר פסקו כי רק הם רלוונטיים עבור הפיתוח.

ניתן לראות כי גם בתנאים הגרועים ביותר, זמן ההשהיה של השער הלוגי הוא עד 70 ps. כלומר, 70 פיקו-שניות (פיקו-שנייה הוא טריליונית השנייה). בעקבות יחידות המידה הקטנות, יש למדוד את זמני ההשהיה באופן מדויק ככל שניתן. לפיכך, במקום לנסות למדוד את זמן ההשהיה של שער לוגי יחיד, ניתן להשתמש ב"שרשראות שערים" – Ring Oscillators. כמו כן, בסופו של כל אחד מהשערים מוצב ממיר (Inverter)

שרשרת שערים לוגיים היא שבב שמורכב מרצף באורך אי-זוגי של שערים לוגיים מאותו הסוג. הפלט של כל אחד מהשערים מועבר כקלט לשער הלוגי הבא. בזכות מבנה זה – המספר האי-זוגי של השערים והממירים שבסוף כל אחד מהם – נקבל כי הפלט הסופי הנכון זהה לקלט שנכנס לראשונה. כך ניתן לשלוט על הפלט שאמור לצאת ולזהות אותו. כמו כן, מאחר שניתן להרכיב שבב מכמה תתי-שבבים (כמה מעגלים משולבים אחרים), ניתן לתכנן שבב שבו שרשראות שערים לוגיים מכמה סוגים. כך, ניתן לבחור את סוגי השערים שאנו רוצים לבנות עבורם שרשרת, ולהציב את כלל השרשראות בשבב אחד.

להלן דוגמה לשרטוט שבב Ring Oscillators, שבו כמה שרשראות שערים לוגיים בגדלים ו-Threshold Voltages שונים:



איור 6: שרטוט של תכנון שבב בעל כמה שרשראות שערים לוגיים. לפי תכנון זה השרשראות מכילות שערים לוגיים בעלי מבנה CMOS.

מאחר שניתן לבחור את מספר השערים הלוגיים שבשרשרת באופן חופשי תחת אי-זוגיות, ניתן לבחור מספר גדול של שערים ולמדוד את הזמן שעבר מהכנסת הפלט לשרשרת עד לקבלת הקלט. לאחר מכן, ניתן לקחת זמן זה, לחלק אותו במספר השערים שבשרשרת, ולקבל שיערוך לזמן ההשהיה של הסוג של אותו השער לוגי.

מדובר בשערוך מדויק יותר ממדידת זמן ההשהיה של שער לוגי יחיד, מכיוון שהזמנים שנמדדים גדולים יותר ולכן מושפעים פחות משגיאת מדידה.

מערך המחקר

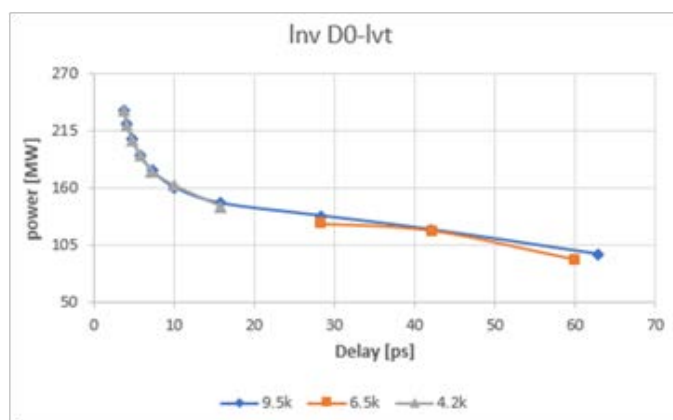
כפי שצוין, מטרת המחקר היא לזהות תנאים אופטימליים עבור שערים לוגיים שונים בטמפרטורות קריוגניות שונות. בפרט, ביצענו ניסויים על השערים Nor-i Inverter, Nand ו-ULVT, מכיוון שניתן להריץ שרשראות שערים רק על שערים בעלי ממיר. כמו כן, השתמשנו בגדלים D0 ו-D1 ובמתח סף LVT ו-ULVT לכל אחד מהשערים. עבור כל אחד מהם, יש לבחור עוצמת מתח אשר מובילה לזמן השהיה וחיסכון אנרגיה אופטימליים. התמקדנו בטווח עוצמות המתח 0.8V–0.36V ובטווח הטמפרטורות 4.2K–90K.

הערה: לא ביצענו ניתוח לגבי תנאים אופטימליים בטמפרטורת החדר, 300 K, מכיוון שדרכי אופטימיזציית שערים לוגיים בטמפרטורה זו כבר נחקרו.

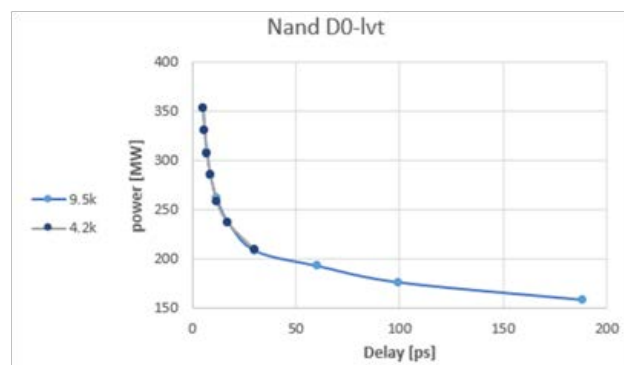
תחילה, רצינו לבדוק אם גם בטמפרטורות קריוגניות היחס בין בזבז אנרגיה לזמן השהיה דומה ליחס שניתן לראות בטמפרטורת החדר. לכן, ביצענו כמה מדידות.

הצבנו שבב שבו שרשראות שערים עם כלל סוגי השערים שפירטנו עליהם, וכל שער לוגי קיבל שרשרת עבור כל צירוף של גודל ומתח סף מבין אלה שבחרנו להתמקד בהם. את השבב הצבנו על מוט וטבלנו בחנקן נוזלי כדי להציב את השערים בסביבת הקפאה קריוגנית. לאחר הרצת כל סוג שער לוגי בטמפרטורות קריוגניות שונות ואיסוף מדידות זמני ההשהיה ובזבז האנרגיה, גלינו כי אכן התלות בין בזבז אנרגיה להשהיה נשארת תמיד כפי שהיא בטמפרטורת החדר.

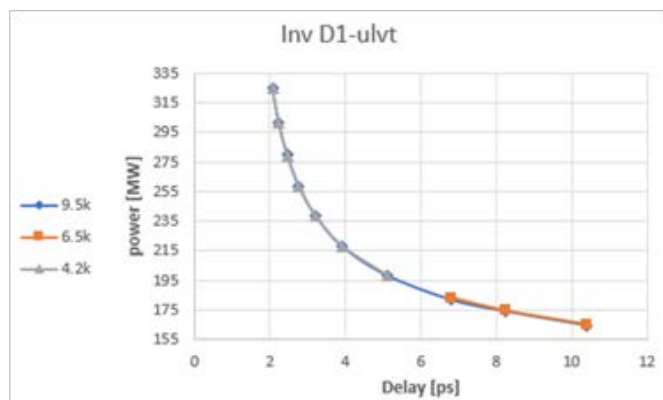
להלן דוגמאות ליחסים בין מידת בזבז האנרגיה לזמן ההשהיה של שערים שונים בטמפרטורות קריוגניות:



איור 7: גרפים המייצגים את תלות האנרגיה שבזבז על ידי השער הלוגי Inverter D0-LVT בזמן ההשהיה שלו, בטמפרטורות K4.2, K6.5, K9.5



איור 8: גרפים המייצגים את תלות האנרגיה שבזבז על ידי השער הלוגי Nand D0-LVT בזמן ההשהיה שלו, בטמפרטורות K4.2, K9.5



איור 9: גרפים המייצגים את תלות האנרגיה שבזבז על ידי השער הלוגי Inverter D1-ULVT בזמן ההשהיה שלו, בטמפרטורות K4.2, K6.5, K9.5

אף שצורת הגרפים שונה מעט בכל שער לוגי והטמפרטורות שבהן הוא מוצג, עדיין ניתן לראות כי מדובר בגרף שבו ישנה עלייה לינארית בבזבז האנרגיה ככל שמקטינים את זמן ההשהיה, שעוברת לעלייה אקספוננציאלית.

לאחר שיחה עם מנהל המעבדה, פרופ' אלכסנדר פיש, הובהר כי זמן ההשהיה נחשב כפרמטר קריטי יותר מחיסכון עבור המפתחים. לכן, הצענו לבחור את התנאים שבהם זמן ההשהיה הוא באורך המינימלי שבו אין קפיצה אקספוננציאלית בבזבז אנרגיה. לפיכך, בחרנו את עוצמות המתחים אשר יינתנו לשערים השונים לפי טמפרטורת המעבדה.

תוצאות המחקר

כעת נציג את עוצמות המתחים האופטימליות שנבחרו. אלה עוצמות מתחים שעבורן התקבלו זמני ההשהיה מינימליים וגדילה לינארית בלבד בכמות האנרגיה שהשערים מבזבזים. לנוחותם של המפתחים, נבחרו מתחים אופטימליים לכל סוג שער לוגי בכל טמפרטורה, וגם מאוחר יותר טווחי עוצמות מתחים אופטימליות לפי טמפרטורה בלבד.

להלן עוצמות המתחים האופטימליות לכל סוג שער לוגי בכל טמפרטורה:

Optimal Voltage Operation Range [V]					
Temperature [K]	Inv D0-lvt	Inv D1-lvt	Nand D0-lvt	Nand D1-lvt	Nor D1-lvt
300	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
90	0.6	0.55	0.5	0.5	0.5
55	0.6	0.55	0.5	0.5	0.5
35	0.6	0.55	0.5	0.5	0.5
9.5	0.6	0.55	0.55	0.5	0.5
6.5	0.6	0.55	0.55	0.5	0.5
4.2	0.6	0.55	0.55	0.5	0.5

טבלה 1

עוצמות המתחים האופטימליים שנמצאו לשערים עם מתחי סף LVT

Optimal Voltage Operation Range [V]-2						
Temperature [K]	Inv D0-ulvt	Inv D1-ulvt	Nand D0-ulvt	Nand D1-ulvt	Nor D0-ulvt	Nor D1-ulvt
300	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
90	0.55	0.6	0.6	0.55	0.55	0.6
55	0.55	0.6	0.6	0.55	0.55	0.6
35	0.55	0.6	0.6	0.55	0.55	0.6
9.5	0.5	0.65	0.6	0.55	0.5	0.6
6.5	0.5	0.65	0.6	0.55	0.5	0.6
4.2	0.5	0.65	0.6	0.55	0.5	0.6

טבלה 2

עוצמות המתחים האופטימליים שנמצאו לשערים עם מתחי סף ULVT

ולחלן טווחי עוצמות המתחים האופטימליות לפי טמפרטורה בלבד:

Optimal Voltage Operation Range - By Temperature	
Temperature [K]	Optimal Voltage [V]
300	0.8
90	0.55-0.6
55	0.55-0.6
35	0.55-0.6
9.5	0.5
6.5	0.5
4.2	0.5

טבלה 3

טווחי מתחים אופטימליים לשערים שונים לפי טמפרטורות בלבד

טווחים אלה נבחרו לפי כמות הפעמים שהמתחים נמצאו אופטימליים באותה טמפרטורה, עבור סוגי שערים מסוימים. בטבלה זו ניתן גם לראות כי ישנה ירידה בעוצמות המתח שנמצאו כאופטימליות ככל שהטמפרטורה יורדת.

דיון ומסקנות

מן הנתונים שהתקבלו מהמדידות, ניתן לראות כי לא קיימים הבדלים משמעותיים בין ההשהיה ומידת בזבז האנרגיה של שערי מסוים בטמפרטורה אחת לבין ההשהיה ומידת בזבז האנרגיה של אותו השער בטמפרטורה אחרת. הגורם העיקרי שהשפיע על ערכים אלה היה המתח שקיבל השער. מסיבה זו, כמעט לכל שער במתח מסוים ניתן מתח אופטימלי שאינו תלוי בטמפרטורה שבה הוא נמצא. מכאן נסיק כי לטמפרטורה השפעה קטנה מן המצופה על עבודת השערים הלוגיים. מסקנה זו חיונית כדי להמשיך ולאפיין רכיבים בטמפרטורות קיצוניות בתנאים שונים. אך בכל זאת ניתן לראות שינוי קטן: כאשר השערים הלוגיים שרויים בטמפרטורות נמוכות יותר, המתח האופטימלי שנקבע להם קטן גם הוא. זוהי מגמה הפוכה לשינוי בגודל במתח הסף של השער, שגדל ככל שהשער נמצא בטמפרטורה נמוכה יותר, ולכן זוהי תוצאה קצת מפתיעה.

עם זאת, ידוע שרעש תרמי קטן ככל שטמפרטורה שבה מצוי השער הלוגי קטנה. ניתן להניח שזאת הסיבה למקור של גודל המתחים בטמפרטורות הנמוכות.

כפי שהוסבר במבוא, ניתן להשתמש בקירור קריוגני כדי למנוע תזוזת אטומים בסביבות קיוביטים, שהם רכיבים מרכזיים בהגדרת מחשב קוונטי. לכן, ישנם פיתוחים בתחום המחשוב הקוונטי אשר משתמשים בטמפרטורות אלו. כדי לוודא יעול של השערים הלוגיים שישמשו בפיתוחים אלה, יש להמשיך ולבדוק את השפעות הטמפרטורות הקריוגניות על תכונות נוספות של שערים ושל רכיבים אחרים. מעבר לכך, יש להמשיך ולבדוק את השפעת הטמפרטורות הקריוגניות בהצלבה עם השפעות ניתנות לשליטה כגון מתח, מבנה השערים הלוגיים וסוגי שערים שונים. המשיך מחקר בתחום זה יוודא אופטימיזציה של רכיבים. אופטימיזציה זו היא קריטית, מאחר שנושא המחשוב הקוונטי צובר תאוצה בקרב מעבדות, חברות ואף גורמים ממשלתיים. אם סוג מחשוב זה אכן היה סימן לעידן המחשבים הבא, יש לוודא כי בידינו מידע אשר מאפשר עבודה אופטימלית עימו. כמצוין במבוא, למבנה המחשב הקוונטי אשר רלוונטי למחקר זה ישנם שלושה חלקים עיקריים: ממשק משתמש, בקרה והקיוביטים אשר מבצעים את חישובי המחשב, אך כל חלק מוחזק בטמפרטורה שונה. מחקר זה נועד למצוא את המתחים האופטימליים עבור חלק הבקרה. לכן, הטמפרטורה הנמוכה ביותר שבה נוסו שרשראות השערים הלוגיים היא 4.2 K לפיכך, מבחירת

המתחים האופטימליים שנעשתה במחקר זה עבור תכונות מהירות וחיסכון אנרגיה לא ניתן לגזור המלצות לאופטימיזציה לכלל המחשב. בייחוד חשובה מציאת תנאים הגורמים ליעול רכיבים הנמצאים לצד קיוביטים, שכן רכיבים אלה מוחזקים בטמפרטורה 20 K. טמפרטורה זו קיצונית אף יותר מן הטמפרטורה שבחלק הבקרה, ונדרשת חקירה מעמיקה של השפעתה על תכונות רכיבי המחשב (לפירוט ניתן לראות את אזור 1)

יש לציין, כי קיימים כיוונים שונים לפיתוח מחשב קוונטי, אשר אינם כוללים טמפרטורות קריוגניות. עם זאת, אין לבטל את חשיבות המחקר על השפעות טמפרטורות קיצוניות על רכיבי מחשב, מכיוון שהשפעות אלה מכתובות את עלותם ויעילותם של מחשבים במעבדות רבות. טמפרטורות קריוגניות חיוניות לביצוע פעולות ומחקרים שונים, כגון שימור עצמים ביולוגיים, ולכן נרצה להמשיך ולוודא אופטימיזציה של רכיבי מחשב בטמפרטורות אלה, גם עבור תכונות ופרמטרים שלא התמקדנו בהם במחקר זה.

ביבליוגרפיה

- Aharonov, D. (1999). Quantum computation. Annual Reviews of Computational Physics, VI, 259–346.
- Allen, P. E., & Holberg D. R. (2011). CMOS analog circuit design. Elsevier.
- Brown, A. R., Pomp, A., Hart, C. M., & de Leeuw, D. M. (1995). Logic gates made from polymer transistors and their use in ring oscillators. Science , 270(5238), 972–974.
- Devoret, Michel H., Andreas Wallraff, and John M. Martinis. "Superconducting qubits: A short review." arXiv preprint cond-mat/0411174 (2004).
- Duvall, S. G. (2000). Statistical circuit modeling and optimization. In Proceedings of the 5th International Workshop on Statistical Metrology (Cat. No. 00TH8489, pp. 16–22). IEEE. <https://doi.org/10.1109/STATMET.2000.123456>
- Edwards, C. (2021). Moore's law: What comes next? Communications of the ACM, 64(2), 12–14. <https://doi.org/10.1145/3440992>
- Fair, R. B. (1998). History of some early developments in ion-implantation technology leading to silicon transistor manufacturing. Proceedings of the IEEE, 86(1), 111–137. <https://doi.org/10.1109/5.658764>
- Gag, M., Wegner, T., Waschki, A., & Timmermann, D. (2012). Temperature and on-chip crosstalk measurement using ring oscillators in FPGA. In Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS) (pp. 201–204). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DDECS.2012.6219057>.
- Heinkel, U., Mayer, C., Webb, C., Sahm, H., Haas, W., & Gossens, S. (2004). An optimized flow for designing high-speed, large-scale CMOS ASIC SoCs. In A. D. Pimentel & S. Vassiliadis (Eds.), Computer systems: Architectures,

Moore's Law. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.05956>

Waldrop, M. M. (2016). The chips are down for Moore's law. *Nature*, 530(7589), 144–147. <https://doi.org/10.1038/530144a>

Williams, C. P., & Clearwater, S. H. (1998). Explorations in quantum computing. *Telos*.

modeling, and simulation (SAMOS 2004) (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3133, pp. 98–107). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-27776-7_11

Hey, T. (1999). Quantum computing: An introduction. *Computing & Control Engineering Journal*, 10(3), 105–112.

Kaplan, D. A. (2012). Gordon Moore's journey. *Fortune*, 166(6), 156–162.

Kjaergaard, Morten, et al. "Superconducting qubits: Current state of play." *Annual Review of Condensed Matter Physics* 11 (2020): 369–395.

Kroemer H. (1982). Heterostructure bipolar transistors and integrated circuits. *Proceedings of the IEEE*, 70(1), 13–25. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12226>

MacQuarrie, E. R., Simon, C., Simmons, S., & Maine, E. (2020). The emerging commercial landscape of quantum computing. *Nature Reviews Physics*, 2(11), 596–598. <https://doi.org/10.1038/s42254-020-00247-5>

Nishizawa, J., Terasaki, T., & Shibata, J. (1975). Field-effect transistor versus analog transistor (static induction transistor). *IEEE Transactions on Electron Devices*, 22(4), 185–197. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1975.18103>

Pérez-Delgado, C. A., & Kok, P. (2011). Quantum computers: Definition and implementations. *Physical Review A*, 83(1), 012303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.83.012303>

PhysRevA.83.012303

Preskill, J. (1998). Quantum computing: Pro and con. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1969), 469–486. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0171>

Rajendran, J., Jyothi, V., Sinanoglu, O., & Karri, R. (2011). Design and analysis of ring oscillator based design-for-trust technique. In *Proceedings of the 29th VLSI Test Symposium (VTS)* (pp. 105–110). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VTS.2011.5783766>

Ramazani, A., Biabani, S., & Hadidi, G. (2014). CMOS ring oscillator with combined delay stages. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 68(6), 515–519.

Sah, C. T. (1964). Characteristics of the metal-Oxide-semiconductor transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 11(7), 324–345. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1964.15336>

Strubell, Emma. "An introduction to quantum algorithms." *COS498 Chawathe Spring 13* (2011): 19.

Suhas, K. (2015, November 18). Fundamental limits to



שרון מלצר, בוגרת תוכנית אלפא באוניברסיטת בר אילן ונבחרת ישראל במדעי המחשב. בוגרת תכנית "אתגר" ללימודי תואר ראשון במדעי המחשב בזמן התיכון, וכיום סטודנטית לתואר שני. אחראית לוגיסטית ב"השומר החדש" אזור חוף הכרמל וצפויה להתגייס כקצינה אקדמית. המחקר המוצג כאן בוצע במסגרת תוכנית "אלפא", והגיע לגמר הארצי של התחרות למדענים ומפתחים צעירים. מייל: sharon.shor06@gmail.com

מדור האומנות

עורכת: תמר מרקוביץ'

שלו אלי

נימיו נפתוליו / שלו אלי

האיר היום כאן
שכלוא בזה דבר מה
המבקש אנחה ורק
שותק שקיעת עולמים כבדה
עלינו

ואני לא אדעהו
רק אשמע
לבב סלע מגיד עוצם עינים
נוטר נימיו נפתוליו
שורים עלי

אין אוכל לחצב בו פנימה
אין אוכל לו ואצבעותי חורקות בו עד זוב דם
אין תדברנה ידי באבן
והן כחול המתפורר

גלידה / שלו אלי

שנה טובה ומתוקה
כתוב על תמונתם שעל המקור
עם סמל המרכז הרפואי בצד

אני אוציא לך מכאן גלידה
היא אומרת
גלידה
זה הכי טוב

אין לי יותר מה לתת אני
מצטערת אני
כבר לא יכולה לעשות

וקלסתר פניו החור קפוא ליד פניה
ועיניו מביטות החוצה מן התמונה
למקום אחר

והיא שבוייה בחלום חיוכה אל המצלמה
כמו תשאיר שם לעד

שנה טובה ומתוקה
ובצד השני התאריך
שנה לכני מותו



שלו אלי, בוגר אודיסיאה תל אביב ובעל תואר ראשון בפיזיקה
ובמדעי המחשב. בימים אלה לומד לתואר שני בהנדסת חשמל
וצובר קורסים בלימודי תרבות. כותב שירה ופרוזה, מדי פעם מצייר
ובאופן כללי חובב אמנות מושבע. אוהב מאוד לטייל ולדבר על תרבות
ופילוסופיה. אשמח שתכנו אליי! מייל: shaleveli11@gmail.com

תמונות נוף // אטל גראואר



קצה עיירה למרגלות רכס בוצ'ג' ברומניה



דרום אדום ביער שוקדה כשנה וחודשיים
מתחילת המלחמה



תצפית מהר הארבל המשקיף על הכנרת



אטל גראואר, בוגרת תוכנית אלפא במכון ויצמן מחזור ה',
אוהבת לטייל ולצלם. מייל: Ethel.grauer.travel@gmail.com

פרחים בקנה // פלג קונפורטי

משאבת דם מתאמצת דוהרת כקטר המחליק על הפסים, משתנק וחורק בין דיונות חול ואבק.
הכרטיסן שורק במשורקית והמנוע דומם, נוסעים מבולבלים עולים ויורדים כנהר גועש, נתקעים בגדרות ומחליקים בשיחים.
שריקה מפלחת את הכאוס והמכונה נעה בשנית, ארגז כחם נדחק אל פיר בערה קטנטן, שולח נתזי צללים ומכתים קירות תכולים.
גלגלים וקפיצים נמתחים ונקרעים כשרירי טיטאן האוחז בספירה, פרקי אצבעותיו מתחפרות נואשות בעפר ההווה, מקפיאות את העתיד ומוחקות את העבר.
רק שלא יגמר, רק שישאר, רק ש...
פתחו שעון.

טורקיז // פלג קונפורטי

אוקיינוס אדיר מימדים. רקיע אצילי הנמתח אל האינסוף.
נחלים מפותלים המלטפים את אדמת הארץ.
סוד החיים הניתן לזיקוק ושמור בבקבוק.
אז מדוע מתעוררת בי חלחלה כשהוא יושב לי על הכתף?



פלג קונפורטי, בוגר תוכנית אלפא במכון וייצמן. מתגורר ברחובות, בן 19. נכנס לעולם הכתיבה בתיכון, בזכות מורה משמעותית לספרות. שחיין מזה אחת-עשרה שנים, אמן לחימה מזה תשע שנים. לפניות: Peleg.conforti@gmail.com

תמונות // יובל שניידמן



מבט מכדור פורח:

התמונה צולמה מכדור פורח מעל עמק יזרעאל.

קצת על כדורים פורחים:

כדורים פורחים מורכבים ממעטפת גמישה גדולה, המלאה באוויר חם, וסל תלוי מתחתיה.

המעוף של הכדור מתאפשר על בסיס עיקרון הציפה.

המבער המותקן בסמוך למעטפת, מחמם את האוויר בתוך הכדור, כך שברגע שהטמפרטורה של האוויר בתוך הכדור עולה, הוא מתרחב וצפיפותו יורדת (האוויר החם בפנים קל יותר מהאוויר הקר בחוץ). כוח הציפה שנוצר דוחף את הכדור כלפי מעלה.

הניווט של הכדור הפורח נעשה באמצעות מעברים לזרמי אוויר שונים זמן הטיסה, כך שכיוון תנועתו נשלט באופן בלעדי על ידי הרוח.

הרוח נושבת במהירויות וכיוונים שונים בגבהים שונים, והטייס משתמש בשליטה על גובה הכדור (על ידי חימום הקירור שלו) כדי למצוא את שכבת הרוח המתאימה שתיקח אותו לכיוון הרצוי.

הבלון הפורח הראשון הומצא על ידי האחים ז'וזף-מישל וז'אק-אטיין מונגולפייה בצרפת.

מכיוון שעד אותו זמן בני אדם מעולם לא עלו לשמיים, האחים לא ידעו האם דבר זה הוא בטוח לביצוע ולכן בחרו שהנסעים הראשונים שיעלו השמימה בכדור הפורח יהיו לא אחרים מאשר: כבשה, תרנגול וברווז!

לאחר הצלחתה, בוצעה הטיסה המאוישת הראשונה ב-21 בנובמבר 1783, כשנסועיה היו ז'אן-פרנסואה פילאטר דה רוזייה ופרנסואה לורן המרקז.

בעבר שימשו בלונים פורחים גם למטרות צבאיות, אך כיום השימוש בהם הוא בעיקר למטרות פנאי ותיירות, ואפילו מתקיימים בארץ מדי שנה פסטיבלים של כדורים פורחים.

בתמונה נמצאת ככל הנראה נקבת שפירית אדומה (דלגנית אדומה), וצולמה בפארק המעיינות.

קצת על שפירית אדומה:

השפירית האדומה היא חרק טורף. אורכה 3.5 עד 4.5 ס"מ, והיא נפוצה מאוד בקרבת מקווי מים מתוקים בכל הארץ. עיניה גדולות וכושר ראייתה מעולה.

הבוגרים עסוקים שעות רבות בצייד. הם עומדים בעמדות תצפית, צופים על הסביבה, וכשהם מבחינים בחרקים קטנים, הם לוכדים אותם תוך כדי תעופה.

הנקבות לאחר ההפריה עפות מעל המים, טובלות בהם את קצה בטן ומטילות במים את הביצים.

הזחל הבוקע מן הביצה חי במים. בטנו קצרה ומעוגלת, ואורך גופו יכול להגיע עד 2 ס"מ. הוא נושם בעזרת זימי-טרכיאות (תוספתנים שבקצה בטנו, שקולטים את החמצן המומס במים).

במהלך הגידול הזחל מתנשל פעמים אחדות. כשהוא מגיע לשיא גודלו, הוא מטפס ונאחז בענף צמח שמתבלט מחוץ למים ולאחר ימים אחדים הוא מתנשל שוב, והבוגר שמגיע מתעופף אל חייו העצמאיים.



יובל שניידמן, בוגר אלפא ויצמן ובשכבה 6 באסכולה. כיום מפקד בבה"ד 7 וסטודנט לביוטכנולוגיה. אוהב מאוד לטפס, לנגן, לטייל ולצלם. עמוד צילום: [beyond_uvs_lens](https://www.beyond_uvs_lens.com)

כתב העת של רשת אסכולה | ספטמבר 2025

עין ערוך:

12



אסכולה
רשת הבוגרים



מרכז מדעני העתיד
MAIMONIDES FUND