

הצעת מחקר - עבודת גמר עבודה לא-צמודה במדעי המחשב מעגלים אופטימליים לעבודה עם מחשוב קוונטי

במסגרת תוכנית אלפא

אוניברסיטת בר-אילן

פרטי התלמידה

שם התלמיד/ה: שרון מלטר מס' תעודת הזהות: 327872347 כתובת מגורים כולל ישוב ומיקוד: בנימינה

רחוב הפיק"א 13 מס' טלפון: 0526311806 כתובת דוא"ל: Sharon.shor06@gmail.com

פרטי בית הספר

שם בית הספר: מאיר שפיה סמל מוסד: 380028 טלפון מזכירות: 528351551

פרטי מנחים

שם מנחה: נועם רוקניאן נייד: 054-453-8153 כתובת אימייל: noam.roknian@biu.ac.il

שנת לידה: 2000 ארץ לידה: ישראל

שם מנחה: ענבל סטנגר נייד: 526919936 כתובת אימייל: inbal.stanger@biu.ac.il שנת לידה: 1993

ארץ לידה: ישראל

פרטי ראש מעבדה שם ראש המעבדה: פרופסור אלכס פיש תעודת זהות: 305869562 תואר אקדמי: פרופסור עיסוק: חוקר שם מוסד המחקר המלווה: אוניברסיטת בר-אילן התמחות ראש המעבדה: מעגלים ומערכות משולבים, ננואלקטרוניקה כתובת ראש המעבדה: פקולטה להנדסה, אוניברסיטת בר אילן נייד: 0548044144 כתובת מייל: alexander.fish@biu.ac.il

2. נושא העבודה

מעגלים אופטימליים לעבודה עם מחשוב קוונטי.

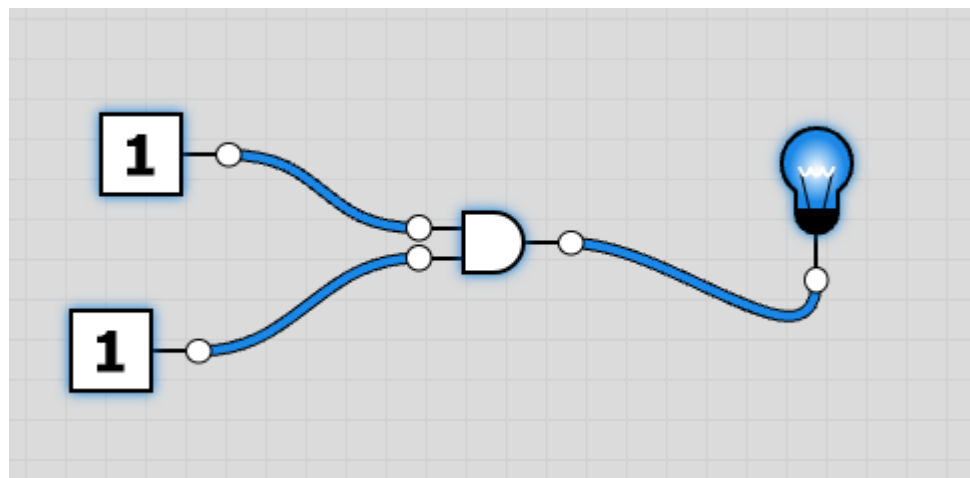
3. מטרת העבודה

מטרת העבודה היא למצוא מבנה מעגל חשמלי המתאים לעבודה משותפת עם מחשוב קוונטי יותר ממעגלים קיימים.^[8]

4. רקע עיוני

מעגל חשמלי הוא רכיב בסיסי של כל מחשב מודרני^[5]. המעגל החשמלי עצמו מורכב ממספר רכיבים אשר נקראים "שערים לוגיים". כל שער לוגי עובד כך שהוא מבצע פעולה (למשל: להעביר חשמל למנורה) אם מתקיים תנאי מסוים (למשל: המתג לחוץ). אופן הפעולה של שערים לוגיים נקרא "הגיון בוליאני", שמבוסס על *אם ו- *אז*. למשל: אם המתג נלחץ, תעביר זרם חשמלי למנורה.

לשערים לוגיים יש מבנים ואופני פעולה שונים, כגון שערי AND, OR ו- NO. לכל אחד ביטוי בוליאני שונה.



כך נראה שער לוגי פשוט מסוג AND

"1" מסמל שעובר זרם דרך המוליך (להלן החוט כחול), ו-"0" מסמל חוסר זרם בזרם חשמלי.

בתרשים המוצג מעלה מתואר מצב של "זרם", כלומר ערך "1" בשני המוליכים ולכן הנורה דולקת.

שער לוגי מסוג 'AND' עובד כך שאם הערכים של שני ה'קלטים' שלו (הזרמים שמתחברים אליו מצד שמאל בשרטוט) הינם

"1", אז הפלט שלו (הזרם שהמעגל ישחרר לצד ימין) גם יהיה "1".

בראייה בוליאנית, אפשר להגיד שהתנאי הוא ששני קלטים יהיו מסוג "1" והפעולה היא יצירת פלט של "1".^[5]

(פלט: Output קלט: Input)

[2]

מעגלים חשמליים בנויים מכמה שערים לוגיים, כך שהם מבצעים פעולות מסובכות ומסוימות יותר.

לכל מעגל חשמלי ישנה רמת איכותו כמכשיר. רמות האיכות נקבעות על פי טיב התכונות הבאות, שהינן קריטריון לתפקוד המכשיר; [9]

- עמידות לרעש (בהקשר של להפרעות אלקטרוניות)
- מחיר ייצור
- צריכת אנרגיה מעטה (אנרגיה = וולט)
- תפקוד בקבלות מתח לא אידיאליות
- דיוק (למשל: דיוק של פתרון בעיה מתמטית)
- אמינות
- דרישת שטח מינימלית
- מהירות ביצוע
- ערך Fan-In גבוה (ערך זה הוא כמות הקלטים שיכולים להתחבר לשער לוגי)
- ערך Fan-Out גבוה (ערך זה הוא כמות השערים שיכולים לקבל כקלט את הפלט האחד של שער לוגי)
- יכולת תפקוד בטמפרטורות לא-אידיאליות ומצבי קיצון

המעגל האידיאלי הוא כינוי למעגל חשמלי דיגיטלי היפותטי, אשר כל תכונותיו הן אופטימליות. עמידותו לרעש ומהירותו מקסימלית, אמינותו לא מתערערת ודרישת האנרגיה שלו מינימלית. גם ערכי Fan-In, Fan-Out מקסימליים למבנה המעגל. מעגל זה הינו רק מודל מתמטי, מעגלים חשמליים מציאותיים מסוגלים רק לשאוף אליו או לחלוק איתו אלמנטים יחידים. אין מעגל שחולק עם המעגל האידיאלי את כל תכונותיו, מכיוון ששלמות של תכונה מסוימת במבנה תמיד תבוא על חשבון תכונה אחרת.

למרות חוסר הריאליות של המעגל החשמלי, הוא מרכיב חשוב במדידת יעילות של מעגלים חשמליים. כל עיצוב חדש של מעגל חשמלי דיגיטלי מושווה למעגל האידיאלי, וערכו נקבע בקרבתו לאידיאל.

לרוב שיפור של אחת מהתכונות המצוינות כאן באה על חשבון השנייה. למשל, כאשר מייצרים מחשב זול יותר, לרוב הוא יהיה פחות מהיר. לכן כאשר נמצאת דרך לשדרג את אחת או יותר מן התכונות בלי לפגוע (או לא לפגוע משמעותית) באחרות, זוהי פריצת דרך שמשפיעה על עולם הטכנולוגיה. למשל, כאשר המדענים ויליאם שוקלי, ג'ון ברדין ו-וולטר ה. ברטיין בנו את הטרנזיסטור, טכנולוגיית הטרנזיסטור החליפה את צינורות הוואקום שהיו נפוצים עד אז. זאת אף על פי שהמחשבים המפותחים של התקופה (תחילת המאה ה-20) כגון ה-ENIAC היו מבוססים על טכנולוגיית צינורות וואקום.^[1]

התיאוריה של מכונות הפועלות בעזרת מעגלים חשמליים הייתה קיימת עוד בשנת 1886, כאשר צ'רלס סנדרס פירס תיאר במכתב איך מכונות יכולות לפעול בעצמן עם שימוש בהגיון בוליאני.^[10]



אלפא
תכנית למחקר בתחומים מדעיים

**המרכז
האוניברסיטאי
לנוער**
אוניברסיטת בר-אילן



מדעני העתיד
המרכז לקידום מחוננים ומצטיינים



משרד החינוך

השימוש במעגלים חשמליים ובשערים לוגיים התפתח מאוד בחלוף השנים, עד ליצירת מונופול שלהם על מכשירים אלקטרוניים.

השינוי, השיפוץ והשיפור של מעגלים חשמליים קורה באופן מהיר ביותר ביחס לתעשיות פיתוח אחרות. מי ששם לב לתופעה ואף נתן לה את שמה הוא גורדון מור, אחד ממייסדי חברת Intel. מור הסתכל במבט מקיף על התפתחות המחשב לאורך השנים (זאת הוא עשה בשנת 1965, עשרות שנים לפני המצאת הטלפונים החכמים), והחל לטעון שבכל (בערך) שנתיים המהירות של המחשב תגדל בעוד מחירו וגודלו יירדו. מור בנה נוסחה המתארת את כמות הטרנזיסטורים שמצויים במעגל חשמלי משולב כמספר שמכפיל את עצמו כל שנתיים עד שנתיים וחצי, בזמן שמחיר וגודל המכשיר השלם קטנים. כאשר אמר זאת מור, רבים סברו שהוא טועה ובעוד שנה או שניים מחשבים לא יוכלו להיות מתוחכמים יותר. פיזיקאים סברו כי פיתוח טכנולוגיים יגיעו לגודל המינימלי האפשרי פיזיקלית. כיום נראה שחוק מור מתעכב, לכן דרושה פריצת דרך חדשה בהקטנת טרנזיסטורים כדי להמשיך את התפתחות המחשוב.^[4]

המודל הפופולרי ביותר כיום בתחום מעגלים חשמליים דיגיטליים הוא מודל CMOS, אשר היו קיימים כבר בשנת 1975, אך לקחו להם מספר שנים להיות בשימוש הנרחב של היום. מודל זה הפך למיוצר ביותר במידה מסחרית עקב איכות ניצול האנרגיה שלו, אשר עלתה על איכות המודל הקודם במדד זה. המודל הקודם, אשר היה פופולרי משנות 1970 עד 1980, נקרא dynamic או pseudo NMOS וכיום הוא לרוב לא משמש כמבנה מעגל חשמלי דיגיטלי.^[7] אך היום גם טכנולוגיית CMOS נחשבת לפחות יעילה בניצול אנרגיה, ככל שהדרישות למדדי איכות המעגל החשמלי גדלות.^[6]

למרות העלייה החדה באיכות המכשירים האלקטרוניים, עדיין קיימים אינטרסים לשכלל אף יותר את המעגלים החשמליים המשולבים. שימושים רבים וחיוניים למחשב כגון אפליקציות ביו, מחשוב קוונטום וחשובי קצה (אלו חישובים וסימולציות מסובכות אשר לא ניתנות לחישוב על ידי אדם) לא מנוצלים מכיוון שגם המחשבים החכמים ביותר עוד אינם מספיקים מבחינת מדדי איכותם.

למשל: מחשבים קוונטיים, אשר מחשבים במהירות גבוהה בהרבה ממחשבים קיימים, פועלים בטמפרטורות קריוגניות. לא כל רכיב אלקטרוני מסוגל לבצע את עבודתו בטמפרטורות כאלו. על מנת להיות להתאים למחשוב משוכלל יותר, שבבים צריכים להיות קטנים יותר, לפעול על פחות אנרגיה ולעבוד כדרוש גם בטמפרטורות נמוכות קיצוניות (טמפרטורות קריוגניות). על מנת להגיע לשבבים העונים על צרכים אלה נדרש המשך פיתוח ארוך במעבדות ובנייה ובדיקה של מודלים חדשניים.^[13]

המודל הפופולרי ביותר כיום בתחום מעגלים חשמליים דיגיטליים הוא מודל CMOS, אשר היו קיימים כבר בשנת 1975, אך לקחו להם מספר שנים להיות בשימוש הנרחב של היום. מודל זה הפך למיוצר ביותר במידה מסחרית עקב איכות ניצול האנרגיה שלו, אשר עלתה על איכות המודל הקודם במדד זה. המודל הקודם, אשר היה פופולרי משנות 1970 עד 1980, נקרא dynamic או pseudo NMOS וכיום הוא לרוב לא משמש כמבנה מעגל חשמלי דיגיטלי.^[7] אך היום גם טכנולוגיית CMOS נחשבת לפחות יעילה בניצול אנרגיה, ככל שהדרישות למדדי איכות המעגל החשמלי גדלות.^[6]

עקב חוסר הסיפוק מטכנולוגיות CMOS והמסקנה שהן לא יניבו עוד שיפור, נוצר הרעיון למעגלים החשמליים שנבנו בשביל מחקר זה. רעיון זה מהווה בסיס למטרת המעבדה של פרופסור פיש (המעבדה בה מתקיים מחקר זה). כל המעגלים שעוצבו על ידי המומחים אופיינו במבנים שמשלבים בין טכנולוגיות CMOS ו-dynamic, כך שהמעגל הינו לא-סטנדרטי. לעומת מעגלים חשמליים סטנדרטיים, למבנה חדש זה יש את הפוטנציאל לנחול הצלחה כחלק אופטימלי ממחשבי-על.

תכונות האיכות העיקריות במחקר זה הינן סיבולת לטמפרטורות קיצוניות (קריוגניות במקרה זה)^[4] ויכולת עבודה בטווח רחב של רמות הספק בזמן קירור קריוגני. אלו תכונות קריטיות עבור מכשירים שיפעלו בסביבת מחשבי קוונטום ואפליקציות ביו וחשובי קצה. לכן הכרחי שבמחקרי יוודאו אופי תכונות אלה של המכשירים.

5. שאלת המחקר

שאלה ראשונה; כיצד מתח ההספק משפיע על המעגל החשמלי בטמפרטורות קריוגניות?

משתנה תלוי

תפקוד המעגל החשמלי

משתנה בלתי תלוי

מתח הספק

שאלה שנייה; כיצד משפיעות טמפרטורות קריוגניות שונות על התפקוד של המעגל החשמלי במתחים שונים?

משתנה תלוי

תפקוד המעגל החשמלי

משתנה בלתי תלוי

טמפרטורה

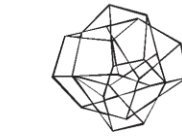
6. מערך המחקר

1. מבני המעגלים החשמליים הדיגיטליים עליהם עובדים



אלפא
תכנית למחקר בתחומים מדעיים

**המרכז
האוניברסיטאי
לנוער**
אוניברסיטת בר-אילן



מדעני העתיד
המרכז לקידום מחוננים ומצטיינים



משרד החינוך

ענבל סטנדר ונועם רוקניאן, מומחי עיצוב שבבים, בנו מעגלים חשמלים לא סטנדרטיים. מעגלים לא סטנדרטיים הינם מעגלים בעלי תכונות עיצוב שונות מאלו הנפוצות כיום.^[12] כל מעגל לא סטנדרטי נשמר בקירור ועובר בדיקות אמינות וביצוע, כך שתקבע איכותו. בדיקות האיכות יעשו כדי למצוא את תכונות המעגל בכל אחד ממדדי טיבו של שבב (אשר מפורטים ברקע העיוני), אך יתמקדו במאפייני המעגל הקריטיים לעבודה עם מחשבים קוונטיים; עמידה בטמפרטורות קריוגניות וניצול אנרגיה.

2. בדיקות תפקוד בסיסיות - עמידה בטמפרטורות

בדיקות אמינות בטמפרטורות קיצוניות יבוצעו בעזרת קירור מהליום נוזלי. טווח הקירור הינו בין טמפרטורות של כ- 80- מעלות צלזיוס לטמפרטורות קריוגניות (טמפרטורות הנמוכות מ-120 מעלות קלווין).^[3] מעבר לקירור, המעגלים גם יחקרו בטמפרטורות קיצוניות גבוהות של 90 מעלות צלזיוס ומעלה, על מנת לראות את עמידתם בטווח רחב של תנאים.^[11]

3. בדיקות תפקוד בסיסיות - עבודה ברמות הספק לא אידיאליות

סיקור איכות המעגלים ברמות מתח שונות יבוצע למטרות קביעת ניצול האנרגיה של המעגל וקביעת סיבולת המעגל למתחים קיצוניים. טיב ניצול האנרגיה של המעגל מסמל עד כמה הוא חסכוני ותפקודו בגדלי מתח שונים מראה את אמינותו בסביבות עבודה לא אידיאליות.

4. מציאת מתח אופטימלי ומתח מינימלי אפשרי לפעילות במעגל

אצליב את מדידות תנאי הטמפרטורות ורמות המתח השונות, כך שניתן יהיה להסיק כיצד המעגל מתפקד בכל קיבולות המתח בשילוב עם טווח הטמפרטורות. בעזרת ההצטלבויות יוסק טווח המתח האופטימלי עבור כל מעגל בכל טמפרטורה ומהו המתח המינימלי המאפשר את תפקודו בטווח זה. כך ניתן יהיה לראות מהו טווח התנאים אשר המכשיר מסוגל לפעול בהם. שיפור של כ-15% במאפייני אמינות וניצול האנרגיה של המעגל החשמלי בזמן מצבי קיצון, לעומת מעגלים סטנדרטיים, ייחשב להצלחה במחקר.

7. רשימת פרקי העבודה:

1. הקדמה אישית
2. מבוא וסקר ספרות מורחב
3. כלים, שיטות וחומרים
4. תיאור הניסויים המעבדתיים והתיאורטיים



5. ממצאים ותוצאות

6. מסקנות ודיון

7. רשימה ביבליוגרפית

ח. רשימת מקורות ראשונית עליה תתבסס העבודה (ביבליוגרפיה):

[1] Rabaey, Jan. **Digital Integrated Circuits : a Design Perspective**. Englewood Cliffs, N.J. :Prentice Hall, 1996

[2] **Digital Circuits for Mobile Computing: Optimizing Power Performance and Innovation Opportunities**

[3] **Cryopreservation: Technologies, Applications, and Risks-outcomes**

[4] **Moore's Law: What Comes Next?** by Chris Edwards

[5] **Evaluation and Comparison of Threshold Logic Gates**

[6] **CMOS Technology** - by Kwon, Min-jun

[7] **Introduction to Nmos and Cmos Vlsi Systems Design**

[8] **A NASA perspective on quantum computing: Opportunities and challenges**

[9] **Understanding inherent qualities of evolved circuits: Evolutionary history as a predictor of fault tolerance**

[10] **From Boolean Logic to Switching Circuits and Automata: Towards Modern Information Technology** by Radomir S Stankovic, Jaakko Astola

[11] **Impact of negative bias temperature instability on digital circuit reliability** by Vijay Reddy, Anand T Krishnan, Andrew Marshall,

[12] **The Logic of Digital Circuits** - by Glebov, Alexei L



אלפא
תכנית למחקר בתחומים מדעיים

**המרכז
האוניברסיטאי
לנוער**
אוניברסיטת בר-אילן



מדעני העתיד
המרכז לקידום מחוננים ומצטיינים



משרד החינוך

[13] Symbolic model checking for sequential circuit verification - by Burch J.R, Clarke E.M, Long D.

ט. לוח זמנים להכנת העבודה:

מרץ 2022: הגשת הצעת מחקר

מרץ-יוני 2022: כתיבת המבוא, סקירה ספרותית, תכנון ניסוי ותוצאות ראשוניות

יולי 2022: ביצוע ניסויים

אוגוסט-ספטמבר 2022: ניתוח תוצאות הניסוי

אוקטובר 2022 – ינואר 2023: כתיבת תוצאות הניסויים שבוצעו, הדיון ומסקנות עבודת המחקר.

מרץ 2023: הגשת העבודה