

# עבודת גמר

העבודה בוצעה במסגרת תוכנית אלפא באוניברסיטת בר-אילן



המרכז  
האוניברסיטאי  
לנוער  
אוניברסיטת בר-אילן



משרד  
החינוך

מקצוע: מדעי המחשב

נושא העבודה: מציאת מתחים אופטימליים לייעול

שערים לוגיים בטמפרטורות קריוגניות

מוגש ע"י:

שרון מלטר, 327872347

כתובת: בנימינה, רחוב הפיק"א 13

דוא"ל: Sharon.shor06@gmail.com

טלפון: 0526311806

ביה"ס: מאיר שפיה

סמל ביה"ס: 380028

כיתה: י"א 4

העבודה בוצעה באוניברסיטת בר אילן בהנחיית:  
הדוקטורנטים ענבל סטנגר ונועם רוקניאן  
הפקולטה להנדסה המחלקה להנדסה

## **תודות**

קודם כל, אודה למנחים האישיים שלי, נועם רוקניאן וענבל סטנגר. לולא הסבלנות וההיענות של שניהם, אף פרק מעבודה זו לא היה נכתב. אני מודה על כל פגישת זום. אוסיף תודה למנחים הקבוצתיים שלא וויתרו לי והדריכו אותי כיצד לכתוב עבודה אקדמית.

אודה גם להורי, שעודדו אותי להתמיד בתוכנית אלפא גם כשחששתי שלא אוכל לצלוח אותה. תודה גם שהסעתם אותי למעבדה ולמיוני התוכנית למרות כל עומס בעבודה. אודה גם לסבי ולסבתי על העידוד והתמיכה.

תודה אחרונה ומיוחדת מיוחדת לחבריי לתוכנית אלפא, על כך שתמכנו זה בזה ושיתפנו בקשיים ובתלונות. למרות הכול, הצלחנו ביחד לעלות על הציפיות ולסיים את המחקרים.

## תוכן עניינים

1.	הקדמה אישית	5
2.	תקציר	6
3.	מבוא	
4.	שאלות המחקר	8
5.	השערות המחקר	9
6.	סקירת ספרות	10
6.1	הטרנזיסטור	10
6.1.1	היסטוריית הרכיב	10
6.1.2	מהו טרנזיסטור	10
6.1.3	תכונות הטרנזיסטור	10
6.1.4	טרנזיסטור ביפולרי	11
6.1.5	טרנזיסטור MOSFET	13
6.1.6	טרנזיסטור NMOS	14
6.1.7	טרנזיסטור PMOS	14
6.2	חוק מור	15
6.2.1	משמעות החוק	15
6.2.2	תחילת סופו של חוק מור	15
6.3	שערים לוגיים	16
6.3.1	הקדמה	16
6.3.2	היסטוריה	16
6.3.3	אופן פעולה	16
6.3.4	שער NOT	17
6.3.5	שער NAND	18
6.3.5	שער NOR	18
6.3.6	טכנולוגיית CMOS	19
6.4	מעגלים ומעגלים משולבים	20
6.4.1	הקדמה	20
6.4.2	שרשראות שערים לוגיים	20
6.4.3	תכונות המעגל	20

20	שיפור איכותו של מעגל	6.4.4
20	CMOS Library Farm	6.4.5
22	מחשוב קוונטי	6.5
22	הקדמה	6.5.1
22	הגדרה	6.5.2
22	הצורך במחשב קוונטי	6.5.3
22	תנאי העבודה של מחשוב קוונטי	6.5.4
24	שיטות וחומרים	7
24	כלים וכלי עבודה	7.1
24	מדידות השערים הלוגיים	7.2
25	ניתוח תוצאות המדידות	7.3
26	תוצאות	8
26	תוצאות המדידות עבור שרשראות Nand D0	8.1
29	המתחים האופטימליים לפי סוג שרשרת והטמפרטורה	8.2
30	המתחים האופטימליים לפי טמפרטורה	8.3
31	דיון ומסקנות	9
31	סקירת המתחים האופטימליים	9.1
31	השפעת טמפרטורה על המתח האופטימלי	9.2
31	שימושי תוצאות המחקר	9.3
32	מתחים נמוכים	9.4
32	מגבלות המחקר	9.5
32	המשך למחקר	9.6
34	ביבליוגרפיה	10
37	נספחים	11
55	הצעת המחקר	11.1

## 1. הקדמה אישית

עבודת הגמר המובאת בפניכם היא ההתנסות האישית הראשונה שלי, ובתקווה לא האחרונה, במחקר מדעי. במהלך המחקר התאפשר לי ללמוד על כתיבה אקדמית, ניסויים במעבדה יבשה, מבנה של מחקר מדעי וניתוח נתונים. העיסוק בנושאים אלה ליווה אותי במשך שנה שלמה, בה הייתי במעבדות, בהרצאות ובסדנאות כתיבה רבות. בזכות השנה הזו, נחשפתי לעולם המחקר במלואו, ואני יכולה להגיד בפה מלא, כי עולם זה מרתק אותי יותר מכפי שהוא ריתק אותי לפני שהיה לי כל ניסיון בו. כל מה שחשבתי על מעבדות ומחקרים השתנה מספר כביר של פעמים במהלך השנה האחרונה, וגיליתי כי מדע טהור הינו דבר מורכב ומרשים, אך בו בזמן הוא נושא מרתק ומזמין שכל אחד העוסק ומתעניין בו מוצא בו סוג יפה ושונה של אומנות. לכן, אני מודה מקרב לב על הטעימה ראשונה מחייה של מדענית, על השנה הארוכה והמלאה שהייתה לי ועל ההזדמנות שניתנה לי על ידי תוכנית אלפא.

במהלך המחקר זכיתי ללמוד על אלקטרוניקה, מחשבים ואף קצת מחשוב קוונטי- תחומים אשר לא הייתי יכולה לטעום מהם כמעט באף מקום אחר. אני מאושרת על כך שמחקרי עסק בנושאים אלה, מכיוון שכעת אני יודעת כי ארצה ללמוד אותם יותר ואף לעסוק בהם בעתיד. קל לי לדמיין את עצמי בעוד כמה שנים עושה בדיוק את מה שעשיתי עבור עבודת הגמר; מבצעת ניסויים ומנתחת את תוצאותיהם, פועלת לקדם את מצבור הידע האנושי ואף להוביל לפריצות דרך טכנולוגיות. בעבודת גמר זו, תראו את הצעד הראשון שלי לקראת עתיד זה. אני מקווה כי הקריאה תוסיף להשכלתכם ואף תעורר בכם סקרנות עזה כלפי נושאי העבודה, כפי שהתעוררה בי.

## 2. תקציר

מהירות חישוב וחיסכון באנרגיה של מחשב הינן תכונות בולטות בו שמשפיעות רבות על הגדרת איכותו. כמו תכונות נוספות במחשבים, לעיתים רמת האיכות של תכונה אחת באה על חשבון איכות התכונה השנייה. שערים לוגיים, רכיבי מחשב בסיסיים, נוטים להיות מהירים אך בזבזנים יותר ככל שהמתח הניתן להם גדל. לכן על מנת לוודא אופטימיזציה של תכונות אלו, יש לוודא שהיחס בין איכויותיהן הינו קטן ככל הניתן.

מטרת המחקר הינה לקבוע מתח אשר מובילות לאיכות אופטימליות של שערים לוגיים שונים בטמפרטורות שונות מטמפרטורת החדר ועד טמפרטורות קריוגניות. לכל סוג שער בכל טמפרטורה הותאם מתח (או טווח מתחים) אופטימלי וכך מתח אופטימלי לכלל השערים בטמפרטורה מסוימת. הגדרנו את המתח האופטימלי להיות המתח עבורו מקבלים איכות סבירה של חסכוניות ומהירות השערים הלוגיים.

במחקר זה הפעלנו שרשראות שערים לוגיים במתחים וטמפרטורות שונות, כך שבכל פעם נמדדו ערך הדיליי (שקובע את הזמן שלוקח לשער לוגי לבצע את פעולתו) ורמת בזבז האנרגיה שלהם. נתוני הדיליי ובזבז האנרגיה אפשרו לנתח את השפעות הטמפרטורות ומתח על תכונות השערים. טווח המתחים האופטימליים שנקבעו בעקבות הניסוי הינם  $0.5-0.8V$  אך מרביתם בתחום  $0.5-0.6V$ . בנוסף ראינו שהמתח האופטימלי של השערים הלוגיים קטן עם ירידת הטמפרטורה.

### 3. מבוא

מידת האיכות של מחשב נמדדת באמצעות מספר תכונות, כגון מהירות, דיוק, זיכרון, חיסכון אנרגיה ועוד. תכונות אלו נשלטות על ידי רכיבי המחשב, כך שהיעילות שלהן משפיע על כלל המכשיר. שערים לוגיים הינם רכיבי מחשב בסיסיים, אשר תפקידם "לקבוע" מתי יש להעביר זרמים חשמליים. שערים אלה נמצאים בכל מכשיר חשמלי ולכן אופי תכונותיהם משפיע רבות על תפקוד המכשירים.

מחשוב קוונטי פועל באמצעות קיוביטים- רכיבים המנצלים את חוקי עולם הקוונטים, לפיהם מצבו של עצם יכול להשתנות לאחר שהוא נבדק, כלומר מצבו לא ידוע עד לרגע הבדיקה. עצם שלא ניתן לדעת האם הוא בשני מצבים שונים או יותר, הינו עצם בסופרפוזיציה. כדי להגיע לסופרפוזיציה, יש צורך לנתק כל תקשורת בין הקיוביט לעולם שסביבו, עד שמצבו נבדק. כל השפעה חיצונית על הקיוביט יכולה לשנות את מצבו ובכך להוציאו ממצב סופרפוזיציה. ניתוק מהסביבה ברמה זו דורש שאף אטום שבסביבת הקיוביט לא ישפיע על הקיוביטים. לכן הקיוביטים נשמרים בטמפרטורות קריוגניות, אשר יורדות ל-4.2K. ביכולתן של טמפרטורות אלה לעצור תנועת אטומים, כך שהן מובילות לסביבת עבודה המתאימה לרכיבי קיוביטים.

על מנת לוודא את איכות רכיבי מחשב קוונטי, יש להבין את ההשפעות של טמפרטורות קריוגניות על תכונות שערים לוגיים שונים. הבנה של השפעות אלה תאפשר ניתוח של איכות השערים בטמפרטורות שונות, ובכך ניתן יהיה למצוא באילו מקרים איכות תכונות השערים אופטימלית.

חוסר אפיון של התנהגות השערים בטמפרטורות שונות ובתנאים שונים, לא יאפשר למצוא את התנאים אשר מובילים לתפקוד אופטימלי של השערים בכל טמפרטורה. למשל, המתח שניתן יכול להשפיע לטובה או לרעה על תכונות שונות של שערים ולהשפיע באופן שונה על סוגי שערים שונים.

ועל כן מטרת העבודה היא לבחון את השפעות הטמפרטורה ועוצמת המתח המובאת לשערים לוגיים על יעילותם. יש לאפיין את ביצועי השערים עבור כל זוג טמפרטורה וגודל מתח, ובכך למצוא עבור כל טמפרטורה עבור איזה מתח ערכי הדילי ובזבוז האנרגיה אופטימליים. המתחים שיימצאו יסומנו כמתחים האידיאליים עבור אותן טמפרטורות.

שימוש במתחים אלה יוודא איכות אופטימלית של השערים הלוגיים. במחקר זה אנו מתמקדים באיכות מהירות וחסכון אנרגיה של השערים, כך שהמתחים האופטימליים אמורים להבטיח את יעילות השערים בתחומים אלה.

באמצעות ווידוי האיכות של התכונות שצוינו, ניתן יהיה לפתח ולחקור מחשוב קוונטי באופן יעיל, ובכך לייעל את תהליך המחקר, הן בתחום מהירות הפיתוח והן בעלותו הכלכלית. מעבר לכך, טמפרטורות קריוגניות מנוצלות למשימות הקפאה ושימור שונות, כך שהיכולת לייעל שערים לוגיים בטמפרטורות קריוגניות היא בעלת פוטנציאל לתרום ליעילות מכשירים בתחומים רבים.

#### 4. שאלות המחקר

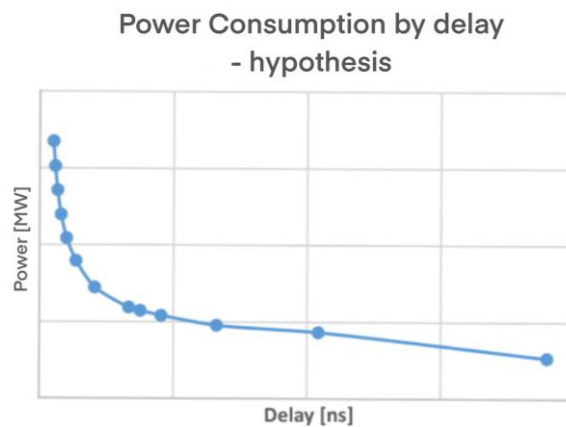
שאלה ראשונה ; כיצד מתח ההספק משפיע על המעגל החשמלי בטמפרטורות קריוגניות?  
משתנה תלוי : תפקוד המעגל החשמלי  
משתנה בלתי תלוי : מתח הספק

שאלה שנייה ; כיצד משפיעות טמפרטורות קריוגניות שונות על התפקוד של המעגל החשמלי במתחים שונים?  
משתנה תלוי : תפקוד המעגל החשמלי  
משתנה בלתי תלוי : טמפרטורה



## 5. השערות המחקר

ידוע כי היחס בין כמות בזבז האנרגיה גדל עם עליית המתח על השער, אך גודל הדיליי של שער לוגי מתנהג ביחס הפוך למתח השער, כלומר ככל שמתח השער גדל כך גודל הדיליי קטן ובזבז האנרגיה גדל. בשביל למצוא את המתח האופטימלי של שער לוגי נרצה למצוא ערך מתח שייתן יחס אופטימלי בין ערכי בזבז האנרגיה לגודל הדיליי, לכן ניסינו לשער איך יראה גרף התלות בין בזבז האנרגיה לגודל הדיליי. אנו משערים שגרף המתאר את תלות גודל בזבז האנרגיה בגודל הדיליי יתנהג כמו פונקציה מהצורה  $Y = \frac{a}{x}$  כאשר  $a$  קבוע חיובי, כפי שניתן לראות באיור 1. מבנה הגרף המשווער מאפשר להבחין ביעילות ולמצוא היכן קיימת נקודה בה היחס בין ערך הדיליי של כל שרשרת שערים לרמת בזבז האנרגיה שלהם מינימלית לטמפרטורה ספציפית. נקודה זו אמורה להימצא בנקודת המפנה של הפונקציה, כאשר היא משתנה מירידה חדה לירידה מתונה. בנקודה זו, איכות שתי תכונות השערים מאוזנת, כך שזוהי הנקודה בה ניתן להגדיר את פעילות השערים כאופטימלית.



איור 1 : השערה של גרף גודל בזבז האנרגיה (ציר Y) כתלות בגודל הדיליי (ציר X)

## 6. סקירת ספרות

### 6.1. הטרוניסטר

#### 6.1.1. היסטוריית הרכיב

הפטנט הראשון לרעיון של מכשיר הטרוניסטר נרשם בשנת 1925, על ידי הפיזיקאי יוליוס אדגר לילינפלד. אך היה מדובר רק בתיאוריה; לא ידוע על ניסויים לבניית המכשיר. אך ויליאם שוקלי, אחד ממפתחי הטרוניסטר הפרקטי הראשון, נעזר רבות בכתביו של אדגר בנושא.

הניסיונות הראשונים לבניית פרקטית של טרוניסטר נעשו במעבדות 'Bell Labs', על ידי המדענים ויליאם שוקלי, וולטר ברטיין וג'ון ברדין. הצוות עבד על דגמים שונים של רעיון המכשיר, שכוללים את הניסויים הראשונים בסיליקון כרכיב במכשיר אלקטרוני ומכשיר שעובד במים. החקר נמשך מ-1945 עד 1947, ובסופו נבנה הטרוניסטר הראשון שעבד. טרוניסטר מסוג זה נקרא 'טרניסטר ביפולרי', שאינו דומה לטרניסטר הנפוץ כיום; טרוניסטר MOSFET. זו הייתה המצאה כה מהפכנית ששלושת המדענים זכו בעקבותיה בפרס נובל.

כאשר ייצור הטרוניסטורים גדל, החלו להימצא בהם מספר תקלות פרקטיות; גרמניום הינו יסוד שקשה לטיהור, מה שמייקר את תהליך הייצור של המכשירים. ומעבר לכך, גרמניום הינו עמיד בטווח מוגבל של טמפרטורות- כך שהשימוש בו מסובך. היו קיימות מספר תאוריות על כך שהיסוד סיליקון יוכל להיבנות בקלות רבה יותר. מוריס טננבאום, ממעבדת 'Bell Labs', בנה את הטרוניסטר הראשון אשר מבוסס על סיליקון<sup>[1]</sup>.

#### 6.1.2. מהו טרוניסטר

הטרוניסטר הינו רכיב יסודי בשערים לוגיים ובמעגלים חשמליים. הוא האלמנט הבסיסי ביותר של מכשירים אלקטרוניים שנדבר עליו בסקירה זו.

תפקידו של הטרוניסטר הוא לשלוט בזרמים חשמליים; להגבירם או לעצור אותם. במילים אחרות, אפשר לתאר את הטרוניסטורים כשסתומים של הזרמים החשמליים. תפקיד זה הוא קריטי לעבודה נכונה של כל המכשירים החשמליים, הרי הזרמים החשמליים הם מקור האנרגיה שמפעילה אותם. ככל שהמכשיר מתוחכם ומסובך יותר, הוא דורש יותר טרוניסטורים, זאת מכיוון שהוא מבצע מספר מגוון יותר של פעולות שונות.

למשל; באיפון 12 ישנם 11.8 מיליארד טרוניסטורים, ובאיפון 13 יש כבר 15 מיליארד טרוניסטורים (עוד על עליית מספר הטרוניסטורים בכל מכשיר בפרק על חוק מור בהמשך)

#### 6.1.3. תכונות הטרוניסטר

טרוניסטורים הינם מכשירים נפוצים עקב תכונותיהם היעילות<sup>[2]</sup>. תכונות אלה הן:

- יכולת ביצוע פעולות מגוונות

חיזוק ומיתוג (הגברת או עצירת) זרמים חשמליים שעוברים דרכו. כך הטרוניסטר יכול לגרום לפעולות שמבצעים מכשירים או להגביר את עוצמת הפעולות, למשל כאשר רוצים להגביר את הווליום של רדיו. סוג נוסף של טרוניסטורים המבצעים פעולה אחרת הינו פוטו-טרוניסטורים אשר מסוגלים לזהות אור ולהפיק ממנו אנרגיה חשמל. בעזרתם ניתן להשתמש בטכנולוגיות לייזר בשביל תקשורת ממרחק. מכשירים

פולטי אור אורגניים (OLED) הינם גם טרנזיסטורים, אשר יכולים להפיץ אור ובכך ליצור את המסכים בהן אנו משתמשים כיום.

- ניצול מירבי של אנרגיה

טרנזיסטורים נחשבים לרכיבים דלים בהספקם, כך ששימושם זול. תכונה זו מאפשרת להם להיות משומשים באופן תעשייתי. אפשר לבנות טרנזיסטורים כך שמיליונים מהם יוכלו לפעול על בטרייה אחת, מה שהופך אותם לשמישים באופן ביתי ותעשייתי.

- מהירות

טרנזיסטורים מסוגלים להעביר או לעצור זרמים בליון פעמים בשנייה. תכונה זו הופכת מכשירים מבוססי-טרנזיסטורים ליעילים ונוחים לשימוש.

- מזעור

כמצוין מקודם, טרנזיסטורים כיום יכולים להימצא בכמות של ביליונים על מילימטרים מרובעים. היכולת למזער טרנזיסטורים מאפשרת להרכיב מכשירים מתוחכמים בגודל של כיס במקום בגודל של חדר. אחרת, הנחות היום יומית של טלפונים חכמים לא הייתה מתקיימת ומכשיר זה לא היה הופך לנחלת הכלל.

- עמידות

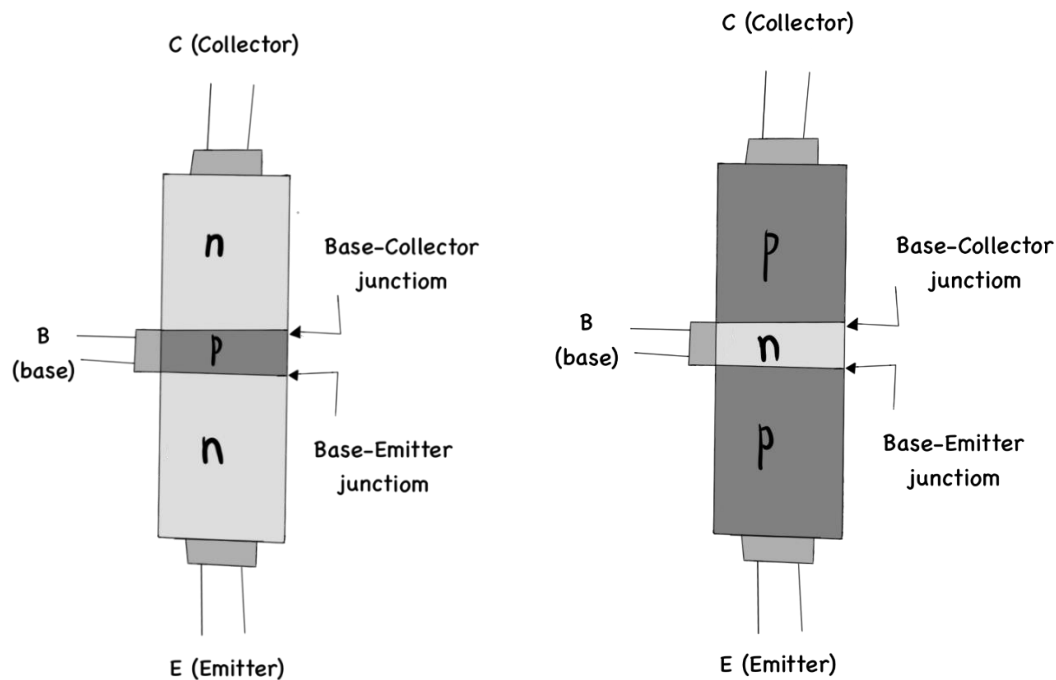
טרנזיסטורים מסוגלים לתפקד במגוון סיטואציות שאינן אידיאליות; קבלת הספק קטן או גדול מן ההספק האופטימלי, רעשים בזרמי החשמלי וטמפרטורה נמוכה או גבוהה מן האופטימלית עבור הרכיב.

#### 6.1.4. טרנזיסטור ביפולרי

הטרנזיסטור הביפולרי (Bipolar Junction Transistor / BJT) הינו הטרנזיסטור בסיסי, עליו מבוססים הרכיבים המורכבים יותר.

כמצוין, זהו הטרנזיסטור הראשון. הוא הומצא על ידי מדעני Bell Labs, והחליף את צינורות הוואקום כשולט בזרמים. דגם זה היה הרכיב הסטנדרטי של מעגלים חשמליים למשך שלושים שנה לאחר פרסומו, אך בסופם טרנזיסטור תוצא השדה מילא את מקומו.

לטרנזיסטור הביפולרי ישנם שני סוגים בסיסים - PNP ו-NPN. באיור 2 ניתן לראות תרשימים המתארים את שניהם.



איור 2: מימין טרנזיסטור מסוג PNP, משמאל טרנזיסטור מסוג NPN. תרשים זה הוכן על ידי.

B (בסיס) - אזור המורכב מחומר מסוג N עבור PNP ומחומר מסוג P עבור NPN. C (קולט) - אזור המורכב מחומר מסוג P עבור PNP ומחומר מסוג N עבור NPN. אזור זה קולט את הזרם ומעביר אותו אל גוף הטרנזיסטור.

E (פולט) - אזור המורכב מחומר מסוג P עבור PNP ומחומר מסוג N עבור NPN. דרך מוליך זה מועבר הזרם מחוץ הטרנזיסטור ולהמשך המעגל.

Base-Collector Junction - הצומת המעבירה זרם מאזור C לאזור B.

Base-Emitter Junction - הצומת המעבירה זרם מאזור B לאזור E.

\*N-Type - חומר זה הינו סיליקון טהור ש"זוהם" במעט מן יסוד טהור שתורם אלקטרונים (למשל זרחן או ארסן)

\*\*P-Type - חומר זה הינו היסוד סיליקון טהור ש"זוהם" במעט מן יסוד טהור שקולט אלקטרונים (למשל אינדיום)

מבנה זה של הטרנזיסטור מאפשר מעבר מהיר של הזרם החשמלי דרכו; אטומים שואפים למלא או לרוקן את רמת האנרגיה האחרונה שלהם ולשם כך הם מייצרים קשרים קוולנטיים עם אטומים אחרים. באמצעות אותם קשרים, האטומים תורמים או מקבלים אטומים. לאטומי סיליקון ישנם 4 אלקטרונים ברמה הגבוהה, אך הם שואפים להחזיק ב-8. לכן, כל אטומי הסיליקון מתחברים זה לזה בקשרים קוולנטיים. הקשרים ביניהם גוררים התנגדות גדולה ולכן סיליקון הינו מוליך-למחצה, כלומר חומר המעביר חשמל אך בהתנגדות גבוהה.

כדי לזרז את המעבר, אפשר לזהם את הסיליקון הטהור בחומר אחר, בעזרת תהליך הנקרא אילוח. עבור אילוח ל-N, כאשר מחדירים אטומי יסוד כגון זרחן לסיליקון, הם משנים את מאזן האלקטרונים בחומר. אטומי זרחן מחזיקים ב-5 אלקטרונים ברמה הגבוהה, אחד יותר מן אטומי הסיליקון. כך, כאשר

נוצרים קשרים קוולנטיים בין סוגי האטומים, נותרים אלקטרונים חופשיים שביכולתם לעבור ממקום למקום. כך נוצר מעבר חלק יותר של זרם בתוך החומר.

לעומת זאת היסוד שמוחדר לסיליקון כאשר P-Type הוא התוצאה הרצויה, הוא בעל 3 אלקטרונים ברמה הגבוהה. למשל, אינדיום. כך שהאטומים הזרים הינם בעלי אלקטרון אחד פחות מן אטומי הסיליקון. כאשר נוצרים הקשרים הקוולנטיים בין האטומים, נותרים מקומות חסרי אלקטרונים אצל האטומים. אטומים ריקים אלה מכונים 'חורים'. אלקטרונים הנלקחים מאטומים אחרים מחליפים מקום עם החורים, כך שנוצרת תנועת אלקטרונים וחורים. תנועה זו מאפשרת מעבר חלק יותר של זרם בתוך החומר. שיטת אפשרות התנועה בחומר P הפוכה משיטת חומר N, כך שכיוון התנועה הפוך מכיוון התנועה בחומר N.

תנועת הזרם שבתוך חומר אחד משפיעה על התנועה שתיווצר מחיבור החומרים. כאשר מחברים את החומרים N ו-P, כמו שקורה בין הבסיס לקולט, אלקטרונים עודפים מאזור P עוברים למלות את החורים של אזור N. תהליך זה גורם לכך שנוצר "גבול" בין החומרים שבה לכל אטום ישנם את כל האלקטרונים הדרושים לו. האטומים שבגבול זה לא לוקחים אלקטרונים ולא מניבים חורים, לכן כל אלקטרון שינסה לעבור את הגבול יידחף אחורה. אפשר לתאר את הגבול כמתג כיבוי שלא דורש מגע אדם<sup>[3]</sup>.

כאשר נרצה שתנועת האלקטרונים לא תיעצר בגבול, ניתן להזרים מעט חורים בעלי מטען חיובי (יחידות חשמל בעלי מטען חיובי) דרך הבסיס. החורים שבזרם החיובי מושכים את האלקטרונים שבגבול, לכן האטומים שבו חוזרים למצב חוסר שלמות והגבול קטן. כעת, אם הזרם הראשי חזק דיה, הוא חוצה את הגבול. עיקרון זה מאפשר לשלוט בזרמים הגדולים שנכנסים או יוצאים מן הטרנזיסטור בעזרת זרמים חלשים. עוצמת המתח המינימלית הדרושה למעבר הזרם הראשי דרך הטרנזיסטור נקראת (VT) Threshold Volt והיא נמדדת בוולטים.

טרנזיסטורים מסווגים לפי גודל ערך ה-VT שלהם, למשל:

HVT - סף מתח גבוה

LVT - סף מתח נמוך

ULVT - סף מתח מאוד נמוך

#### 6.1.5 טרנזיסטור MOSFET

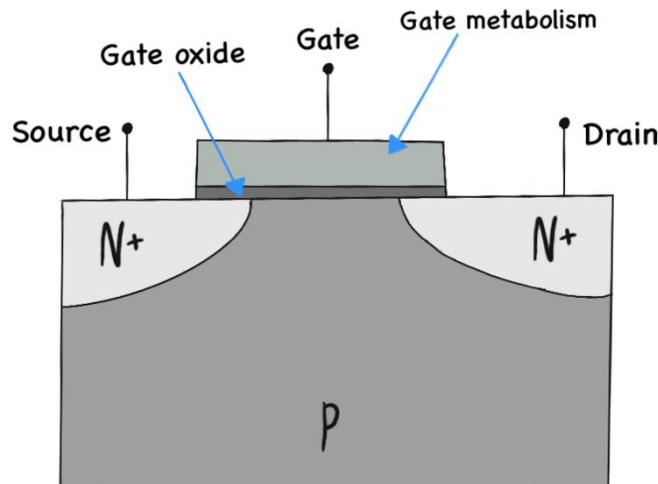
דגם MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) מבוסס על דגם הטרנזיסטור הביפולרי, אך מבנהו ואופן פעולתו שונים במקצת. גם לדגם זה ישנם שני סוגים עיקריים; P-Channel MOS ו-N-Channel MOS (MOS הינו קיצור ל-MOSFET)<sup>[4]</sup>.

הוא פותח בשנת 1959 על ידי המדענים מוחמד אטלה ודון קהאנג, גם הם ממעבדות Bell Labs. וגם כעת בשנת 2022, זהו הטרנזיסטור הנפוץ ביותר. מעבר לכך, טרנזיסטור זה הינו גם המכשיר שיוצר הכי הרבה פעמים בכל ההיסטוריה- עם הערכה שיוצרו 10<sup>21</sup> טרנזיסטורים תוצא שדה משנת 1960 עד 2018.

ישנן מספר סיבות אשר הובילו להעדפת טרנזיסטורי תוצא שדה על פני טרנזיסטורים ביפולרים:

- טרנזיסטור ביפולרי מאופיין בעמידות נמוכה לקרינה ולזרם חשמלי שאינו מינימלי.
- מהירות עבודת טרנזיסטורי תוצא שדה הוכחה כגבוהה משל הטרנזיסטורים הביפולרים.
- עיצוב טרנזיסטורי תוצא שדה פשוט מעיצוב הטרנזיסטורים הביפולרים.

להלן תרשים של טרנזיסטור מוצא שדה;



איור 3: תרשים של דגם NMOS. יש לשים לב כי עבור PMOS, אזור P מתחלף לאזור N ואזורי N מתחלפים לאזורי P. תרשים זה הוכן על ידי.

כמו בטרנזיסטור ביפולרי, הבדלי שיטת העברת הזרם בין הגרסאות תלויה במיקומי חומרי N וחומרי P.

#### 6.1.6 טרנזיסטור NMOS

ברכיב זה, זרם חשמלי נשלח דרך קשרי Source ו-Drain. כמצוין מקודם, כאשר ישנו חיבור בין חומרי N ו-P, נוצר גבול הדוחה ממנו אלקטרונים. במקרה של NMOS, נוצרים שני גבולות, בשני צידי הטרנזיסטור. בשלב זה מעבר זרם דרך הטרנזיסטור בלתי אפשרי. בנוסף לכך, על טרנזיסטורים מסוג MOS מחוברת שכבה של היסוד תחמוצת ומעליו שכבה של מתכת.

כאשר רצוי לאפשר זרימת זרם בין שני קצות הרכיב, טוענים את שכבת המתכת במטען חיובי. אותו מטען מושך אליו את האלקטרונים העודפים שבאזורי N, כך שהם נעים מעלה ומשאירים אחריהם חורים. שכאשר הם נעים במעלה אזור P, החורים שבאזור יורדים לתחתיתו ונוצרת תנועת אלקטרונים וחורים. האלקטרונים שעברו יוצרים ערוץ זרם חשמלי שמשלים את מעבר הזרם דרך הטרנזיסטור. גם כאן ישנו ערך VT הקובע כמה גבוה צריך להיות המתח ב-Gate על מנת לא לעצור את זרימת החשמל.

#### 6.1.7 טרנזיסטור PMOS

מאחר ומיקומי אזורי P ו-N אצל PMOS הופכיים למיקומם אצל NMOS, באזורי Source ו-Drain ישנו חומר P המלא בחורים חסרי אלקטרונים. כאשר מטעינים את שכבות הברזל והתחמוצת במטען חיובי, הוא מושך אליו את האלקטרונים שבאזור N, כך שנוצר ערוץ מעבר של חורים וזרימת חשמל מתאפשרת.

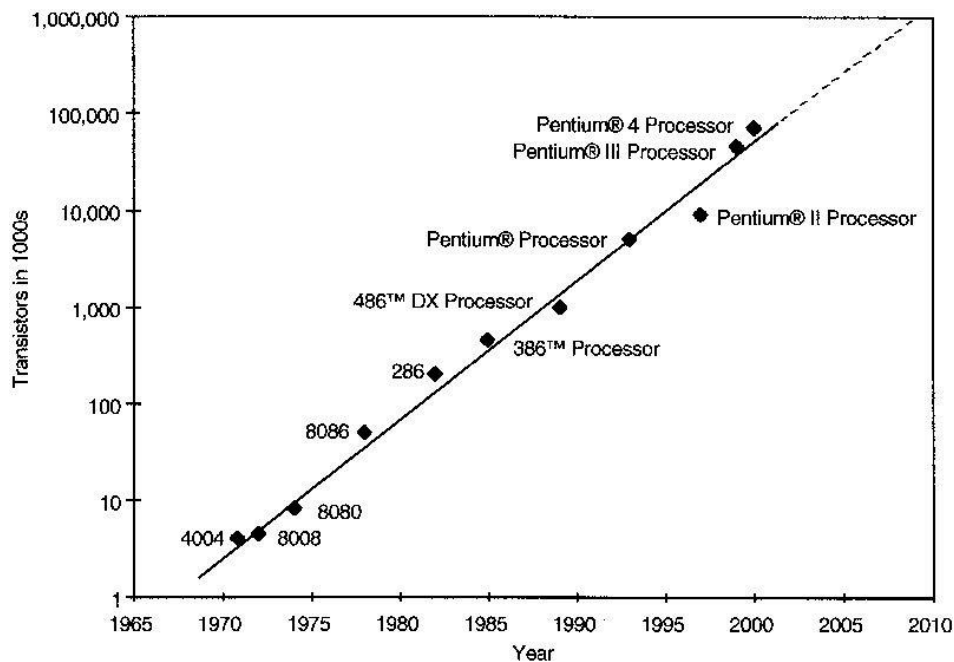
## 6.2 חוק מור

כאשר מתבוננים במהירות בה מחשבים משתכללים כיום, אפשר לחשוב שזוהי מגמה טבעית וצפויה הנובעת מהמשאבים הניתנים לחקר ופיתוח מכשירים אלקטרוניים. אמנם, קצב פיתוח זה איננו מובן מאליו ותלוי רבות בהמשך מחקר (גרף בהמשך) האדם אשר נחשב לחוזה תופעת עילוי המחשוב המתמשכת הינו גורדון מור, כותב התזה 'חוק מור'.

### 6.2.1 משמעות החוק

גורדון היה מהנדס מחשב אשר הקים ביחד עם רוברט נויס את חברת הנדסת השבבים Intel. בזמן עבודתו בפירצ'יילד, בשנת 1965, מגזין 'אלקטרוניקה' ביקש ממור להעלות הצעה בנוגע לעשר השנים הבאות של רכיבי המכשירים המוליכים למחצה. מור ניתח את קצב שינוי כמות הרכיבים הדרושים לשבבים, והבחין כי בכל שנה מספר הרכיבים גדל פי 2. בכתבה למגזין, הוא העריך כי תופעה זו תמשיך עוד 10 שנים. כך קצב שיכלול השבבים החל להיקרא 'חוק מור'<sup>[5][6]</sup>.

חוק מור בחלוף השנים:



איור 4: גרף של מספר הטרנזיסטורים במעבד (ציר Y) לפי שנה (ציר X). ניתן לראות בקלות את התקיימות חוק מור.

### 6.2.2 תחילת סופו של חוק מור

בשנים האחרונות נרשמה ירידה בקצב עליית מספר הטרנזיסטורים בכל שבב<sup>[7]</sup>, מספר הרכיבים בשבב כבר אינו מכפיל עצמו כל שנתיים, למרות המשך חיזוק המחשבים. גודל טרנזיסטור MOSFET הקטן ביותר כיום הינו בגודל של 3 nm - ערך השווה לגודל 10 אטומים גדולים. ייתכן כי מזעור הטרנזיסטורים אינו מסוגל להמשיך עקב מגבלות פיזיקליות; רכיבים בגדלי אטום מתנהגים שונה מרכיבים אחרים. סופו של חוק מור מסיבה זו שוער על ידי על פיזיקאים עוד בתחילתו<sup>[8]</sup>, אך ישנה זווית מחקר חדשה היכולה להחזיר

את החוק ואף לעקוף אותו. מחשוב קוונטי, אשר מבוסס על qubits במקום על טרנזיסטורים, מסוגל לבצע פעולות חישוב מסובכות ממחשבים מבוססי טרנזיסטורים עם שימוש בפחות שטח (עוד על מחשוב קוונטי בהמשך)

### 6.3 שערים לוגיים

#### 6.3.1 הקדמה

שערים לוגיים הם הרכיב השני הכי מורכב שיוסבר בסקירה זו. השערים מורכבים ממספר טרנזיסטורים (או, בעבר, מרכיב אחר אשר תפקידו היה כתפקיד הטרנזיסטור) - כל סוג שער מכיל סידור וכמות שונה של הטרנזיסטורים המרכיבים אותו. כך, שערים יכולים לבצע פעולות אשר מבוססות על יכולות הטרנזיסטור, אך הינן מגוונות ומשוכללות יותר. שערים ניצבים ביחד, כך שסידורם גורם למספר גדול אף יותר של אפשרויות פעולה. אופן הפעולות המתבצעות בפועל משתנה לפי גודל המתחים העוברים דרך השערים (מתח יכול להיחשב כ-0 או 1) ולפי מבנה השערים. הגיוון במספר התגובות האפשריות של מכשיר לסיטואציות שונות הכרחי למחשבים שמצופים לתת מגוון שירותים.

#### 6.3.2 היסטוריה

שערים לוגיים, כאמור, לא תמיד היו מבוססים על טרנזיסטורים. למעשה, השיטה הבינארית עליה מבוססת פונקציית השערים הלוגיים, נכתבה עוד בשנת 1705 על ידי גוטפריד וילהלם לייבניץ. יותר ממאה שנים אחר כך, ב-1886, הגה הלוגיקן צ'רלס פרס תיאוריה למניפולציה של זרמים חשמליים על ידי שימוש בבינאריות. בנייה פרקטית של מכשיר מסוג זה נעשתה רק ב-1924, על ידי המהנדס ולטר בותה, שגם קיבל פרס נובל בפיזיקה על המצאה זו. השער שבנה בותה נקרא שער AND, שכיום נחשב לרכיב בסיסי עבור שערים מורכבים יותר.

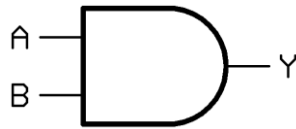
#### 6.3.3 אופן פעולה

כדי לפשט את אופן הפעולה של שער לוגי, מתארים אותו כפונקציה. המשתנה של הפונקציה הינו ה-input שנכנס לשער (ישנם שערים בעלי מספר משתנים) ותוצאת הפונקציה מכונה Output. כמו בכל פונקציה אחרת המבוססת על בינאריות, ערך המשתנים והפונקציה יכול להיות רק 0 או 1 (אפשר גם לקרוא לתוצאות אלה 'אמת' או 'שקר' בהתאמה). כאשר הפונקציה מקבלת ערך הגדול מ-1, גם ערך זה ייחשב כאמת. כמוסכמה 1 מייצג מתח החזק מ-0, אך יש לשים לב כי 0 לא בהכרח מייצג חוסר במתח חשמלי. "0" יכול גם להביע מתח החלש מן ערך ה-VT הדרוש למעבר חשמלי דרך הטרנזיסטורים שבשער הלוגי.

לכל שער לוגי ישנה פונקציה בוליאנית המתארת אותו, ומראה בפשטות מה יצא מין השער בסיטואציות שונות. לשערים בסיסיים ישנם סמלים המתארים רק אותם. כדי לראות באופן ישיר יותר את כל אפשרויות הפעולה, לכל שער ישנה גם 'טבלת אמת' (Truth Table) שמכילה את כל המשתנים האפשריים שאפשר להכניס אליו ואת הערך שהוא יחזיר. הערך המוכנס מכונה קלט, והמוחזר פלט. להלן דוגמא לפונקציה, סמל וטבלת אמת של השער AND, אשר מחזיר "אמת" רק כאשר שני המשתנים שלו הינם מערך "אמת";

$$Y = A * B$$





איור 5: סמל השער הלוגי *and*.

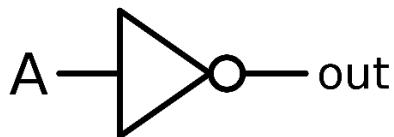
AND Truth Table

A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

טבלה 1: טבלת אמת של השער *and* כאשר  $B, A$  הם הקלטים, ו- $Y$  הוא ערך הפלט.

#### 6.3.4 שער *NOT*

לעתים נקרא גם Inverter או ממיר.  
סמל שער *NOT*;



איור 6: סמל השער *not*.

תיאור השער: הקלט שמחזיר השער הינו ההיפוך של מערך המשתנה המוכנס אליו.  
הפונקציה המתארת את השער (! מייצג פעולת היפוך):

$$Y = \neg A$$

טבלת האמת של השער:

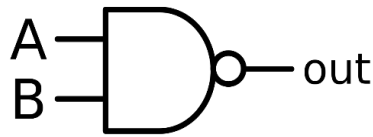
NOT Truth Table

A	Y
0	1
1	0

טבלה 2: טבלת האמת של שער *not*.

### 6.3.5 שער NAND

סמל שער NAND ;



איור 7 : סמל השער nand.

תיאור השער : הפלט שווה לערך ההופכי של מכפלת שני הקלטים.  
הפונקציה המתארת את השער :

$$Y = \neg (A * B)$$

טבלת האמת של השער :

A	B	Out
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

טבלה 3 : טבלת אמת של השער nand.

### 6.3.6 שער NOR

סמל שער NOR ;



איור 8 : סמל השער nor.

תיאור השער : השער מקבל שני קלטים, ומוציא את ההיפוך של סכומם (כאשר  $A = 1, B = 1$  מתקיים  $A + B = 1$ )

הפונקציה המתארת את השער :

$$Y = \neg (A + B)$$

טבלת האמת של השער :

A	B	Out
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

טבלה 4 : טבלת אמת של השער nand.

CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) הינו סוג של שער לוגי<sup>[9]</sup>, אך הוא מוגדר על ידי אופן בנייתו ולא על פי פונקציה בוליאנית; שער מסוג CMOS מסוגל ליצור כל פונקציה אפשרית של שער לוגי.

ההבדל בין שערים לוגיים של CMOS לבין שערים לוגיים אחרים מצוי בשיטת שימוש הטרנזיסטורים בשער; שערי CMOS הם שערים שבהם השער מורכב גם מטרנזיסטורי NMOS וגם מטרנזיסטורי PMOS. הרעיון התיאורטי לשער לוגי המבוסס על שני טיפוסים הטרנזיסטורים נרשם כפטנט על ידי המהנדס ג'ורג' קליפורד סיקלאי, בשנת 1958. הראשון ליישם את הרעיון היה פול ויימר, שהצליח להמציא שער לוגי המשלב בין שני סוגי הטרנזיסטורים. השער היה חדשני, אך בסופו של דבר פיתוחו נזנח על ידי ויימר. כאשר פותח MOSFET, הדגם עוד פותח כשני טיפוסים שונים, NMOS ו-PMOS. מכשיר CMOS הראשון שיצא לאור הומצא במעבדות פיירצ'יילד ויוצר תעשייתית בשנות 1960 המאוחרות. בזכות עלות ייצורו הנמוכה וניצול האנרגיה היעיל שלו, CMOS יושם במכשירים שונים.

## 6.4 מעגלים ומעגלים משולבים

### 6.4.1 הקדמה

בסקירה זו הוזכרו מספר פעמים המכשירים 'שבבים' ו'מעגלים משולבים' - שאלו שני שמות לאותו הרכיב. מעגלים מורכבים ממספר שערים לוגיים ואילו שבבים הינם סדרת מעגלים, ולכן נקראים גם מעגלים משולבים. שבבים נמצאים במחשבים, טלפונים, מכונות וקונסולות משחק. הם משמשים כמחסי זיכרון, כשסתומי זרמי חשמל ובזכותם אפשר להריץ תוכנות.

### 6.4.2 שרשראות שערים לוגיים

נקראות גם; Ring oscillators

שימוש נפוץ בשבבים הינו יצירת 'שרשרת' שערים לוגיים. כאשר במעגל חשמלי שער לוגי מסוים חוזר על עצמו מספר אי-זוגי של פעמים, מעגל זה נקרא 'שרשרת'. על השערים שבשרשרת להיות מאותו דגם. שרשראות אלו משמשות בעיקר בתחום המחקר, על מנת לבדוק את תפקוד המעגל המשולב (השבב) המורכב מהם<sup>[10]</sup>. כאשר המטרה היא לחקור השפעות של תנאים שונים (כגון הטמפרטורה והמתח שמקבל השבב) על תפקוד השבב, בדיקת שרשרת על השבב היא שיטה מקובלת לכך<sup>[11]</sup>. שרשרת מספקת גם מספר פקודות, כך שהשבב נדרש לפעול, וגם הערך בסופה הוא ערך ידוע כך שפשוט להבין אם השער פעל נכונה.

### 6.4.3 תכונות המעגל

מאחר והשבב קריטי לתפקוד המחשב, איכות אופן פעולתו משפיעה רבות על מדד האיכות שלו. תכונות שבב כגון מהירותו, עלות ייצור ויעילות ניצול האנרגיה שלו חשובות ליצרן או לצרכן המכשיר, אך לעיתים שיפור תכונה אחת בא בחשבון על האחרות - למשל הוזלת מחיר השבב בעזרת בנייה פשוטה יותר עלולה לפגוע במהירותו<sup>[12]</sup>. שבב שתכונותיו לא מתאימות לצרכן או שמבנהו אינו מתאים לייצור המוני, לא יישמש גם אם הוא מבצע את פעולותיו באמינות.

### 6.4.4 שיפור איכותו של מעגל

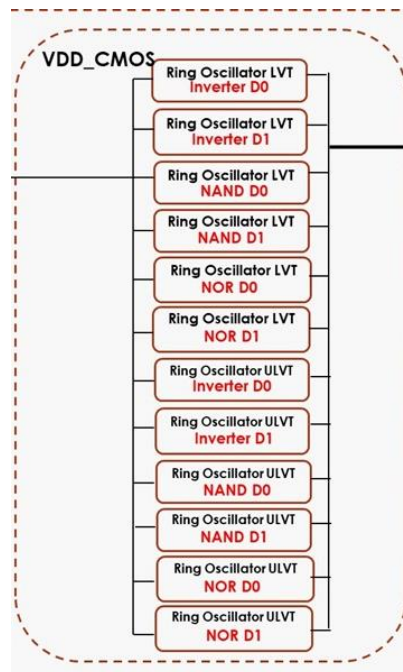
כאשר נעשה פיתוח של שבב חדש, על מעצביו להבטיח שיתאים לייצור ושימוש. לכן, נעשה גם מחקר על תכונותיו. לרוב, התכונות מוגדרות כפרמטרים לקביעת איכות השבב, כך שניתן לראות את אופיו גרפית<sup>[13]</sup>. כאשר מדובר בשבב שנבנה לפי כמה מודלים, ניתן להשוות ביניהם באמצעות אותם גרפים. למשל; ישנו שבב שנרצה למצוא את יעילות ניצול האנרגיה שלו. על מנת לנתח את יעילותו, נוכל לחשב את כמות האנרגיה שהשבב מבזבז במצבים שונים. השבב יקבל זרמים במתחים שונים, שיעברו דרך שרשראות השערים הלוגיים שבתוכו. ניתן לחשב את כמות האנרגיה שבזבזה באמצעות הכפלת גודל המתח שניתן ועוצמת הזרם שעברה בשרשרת<sup>[14]</sup> (הזמן למעגל להוציא פלט נכון לאחר שקיבל קלט) ניתן לראות את מהירות השבב לעומת דגמים אחרים באמצעות נתוני הזמן שלקח לשבבים להפעיל את שרשראותיהם. שיטה זו מובילה להבנה של מעצבי שבבים אילו מאפייני מבנה מייעלים את מהירות השבב - ואילו גורעים או לא משפיעים עליה.

### 6.4.5 CMOS Library Farm

על מנת למצוא את הפרמטרים הדרושים לקביעת איכות תכונות המהירות וחיסכון השבב (או להשוואת איכותן לעומת שבבים אחרים אותו השבב בתנאים שונים), יש למצוא ערכים שונים המייצגים את תכונות אלה. מציאת 'מהירות' השבב שוות ערך למציאת הזמן הנדרש לו לשנות את הפלט. זמן זה נקרא Delay. אורך זמן זה משפיע רבות על איכות השבב מכיוון שתפקיד השבב הוא לבצע חישובים רבים. אך על מנת לקבוע את זמן ה-Delay, יש למצוא את מספר הפעמים שהפלט התחלף ואת הזמן הכולל שלקח לשבב לעבור

על כל השרשראות (אורך זמן זה מכונה זמן המחזור) בשביל למצוא את היקף בזבוז האנרגיה של השבב לאחר עבודתו, יש למצוא את ההספק החשמלי של אותה עבודה (הספק חשמלי הינו כמות האנרגיה החשמלית אשר נוצלה עבור פעולות בפרק זמן מסוים)

CMOS library farm הינו מעגל אשר תפקידו לספק את ערכי הפרמטרים הצוינו לעיל<sup>[15]</sup>. המעגל מורכב על שני שיש לבחון את יעילותו, ומחזיר כפלט את פרמטרים הנדרשים לכך. הפרמטר Counter סופר את מספר העליות שהזרם ביצע במהלך מעברו בשרשראות (כלומר; את מספר הפעמים בהן שער קיבל 0 כקלט והוציא 1 כפלט) באמצעות פרמטר זה ובעזרת זמן המחזור, המערכת מחשבת את ערך ה-Delay של השבב. הספק חשמלי שווה לכפל הזרם והמתח. המתח אשר מוכנס לשבב ידוע, אך בשביל למצא זרם יש לחבר למערכת גם מכשיר DMM. עם האמפרמטר, ניתן לחשב את הספק השבב בקלות. כפי שצוין מקודם, את כמות האנרגיה שבזבוזה ניתן לחשב עם גודל המתח שניתן לשרשרת וזמן הדילי. להלן תרשים של המערכת;



איור 9: איור של המערכת CMOS library farm ורכיביה.

בתרשים זה ניתן לראות ששרשראות השערים הלוגיים אשר צוינו לפני כן. יש לשים לב כי השערים Inverter D0, Inverter D1 הינם שניהם שערי ממיר, אך D0 מסמל שמדובר בגודל המינימלי של אותו שער ו-D1 הינו פי 2 מגודל זה. שני גדלי השערים נבדקים על מנת לדייק באפיון כל מקרה.

## 6.5 מחשוב קוונטי

### 6.5.1 הקדמה

נכון לזמננו אנו, מחשבים קוונטיים לא נמצאים בהישג ידם של אנשים כמו מחשבים רגילים. מרבית הצרכנים אינם מכירים או דורשים סוג זה של מחשב. למרות המצב הנוכחי, תחזיות כגון הסקירה של ג'ון פרסקיל מהמכון למידע וחומר קוונטי, מתארות את טכנולוגיה זו כפריצה הבאה של ייעול המחשוב הכלל עולמי. חברות ענק כגון גוגל, מיקרוסופט ו-IBM משקיעות בפיתוחי מחשוב קוונטי, כמו גם גופים ממשלתיים<sup>[16]</sup> ואוניברסיטאות ממדינות שונות<sup>[17]</sup>. פיתוחים אלה נועדו להבטיח שהמשקיעים יישארו בראש תחרות פיתוח המחשב.

### 6.5.2 הגדרה

הגדרת המחשב הקוונטי היא מחשב שנעזר במכניקת הקוונטים על מנת לבצע את חישוביו. אין שיטת בנייה או הפעלה מסוימת שמגבילה את המושג. לכן ישנם כיווני פיתוח שונים, כמו; יישום באמצעות מוליכי על, פוטונים, אטומים לכודים ועוד<sup>[18]</sup>.

### 6.5.3 הצורך במחשב קוונטי

מחשבים מודרניים הינם מורכבים ומתוחכמים, ומסוגלים לבצע פעולות שונות שהיו נחשבות לבלתי אפשריות. המהירות והמזעור של המכשירים כיום טובים מאי פעם. עובדות אלה מעלות את השאלה מדוע גופים רבים משקיעים כוח אדם וכסף על מעבדות למחשוב קוונטי- שאין הבטחה שיצליחו לייצר רכיב או מכשיר תקין.

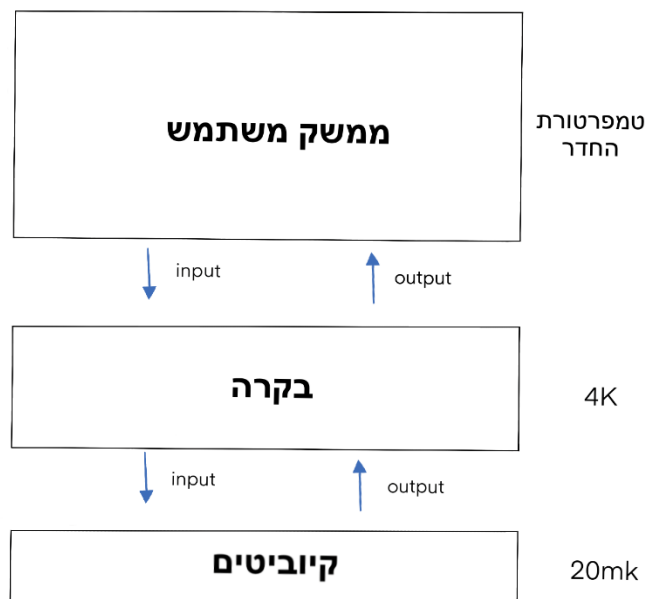
התשובה נובעת דווקא במהירות התיאורטית של מחשב קוונטי<sup>[19]</sup>. מחשבים שאינם קוונטיים מסוגלים לבצע פעולות חישוב רבות. אך ישנן פעולות אשר המחשב יוכל לבצע, אך הזמן שייקח לו לבצען ארוך מדי. למשל; ניתן לפרק מספר לגורמים- אך במקרים של מספרים גדולים מאוד, החישוב יכול להימשך שנים ואף עשרות אלפי שנים. זאת מכיוון שפעולת הפירוק לגורמים דורשת לחשב את הכפל של זוגות מספרים רבים. מחשב שעובד על מכניקת הקוונטים לעומת זאת, עובד לפי פיזיקה שונה ממכניקה קלאסית. לפי מכניקת הקוונטים, עצם יכול להימצא במצב של סופרפוזיציה: שבו מצבו תלוי באם בדקו מהו מצבו. כלומר; עצם במצב סופרפוזיציה ייחשב כעצם שלא נמצא במצב אחד. לכן מחשב המכיל רכיבים קוונטיים יוכל לפרק מספר לגורמים על ידי חישוב כמה אפשרויות באותו הזמן. בסקירה זו לא ניכנס לפירוט מורחב באופן העבודה של מחשוב קוונטי, אך ניתן להמשיך לקרוא על כך בציטוטים הבאים<sup>[20-22]</sup>.

### 6.5.4 תנאי העבודה של מחשוב קוונטי

פיתוח המחשב הקוונטי התעשייתי מתעכב מסיבות כגון חוסר ידע בתחום ואי-הוודאות לגבי הצלחת תיאוריות וכיווני מחקר, אך גם יישומים קיימים מביאים קשיים משל עצמם. מחשב המבוסס על מכניקת קוונטים מאחסן מידע בקיוביטים (Qubit) במקום בביטים (Bits). כדי שהמחשב ינצל את תכונות הסופרפוזיציה, על הקיוביטים להיות חסומים מכל השפעה חיצונית<sup>[23]</sup>. רק כך הם יהיו במצב בו אי אפשר לדעת מהו ערכם עד שהם נבדקים.

הגעה למצב אטימות הקיוביטים מחייבת מניעת תזוזת אטומים- כלומר, על סביבת הקיוביטים להיות קרה. לשם כך נשמר המחשב הקוונטי בטמפרטורה קריוגנית. חלקים שונים של המחשב נשמרים בטמפרטורות שונות הנעות מטמפרטורת החדר ל-4K – 20mK (במעלות קלווין)<sup>[24]</sup>. מאחר ומדובר בטמפרטורה קרה קיצונית, אדם לא יוכל לשהות בה, כך שהמחשב מופרד לחלקים שונים בטמפרטורות נפרדות. חלוקה זו מאפשרת להציב בקור קיצוני רק את החלקים ההכרחיים. למרות זאת, עדיין ישנם רכיבי מחשב בסיסיים

שנדרשים לפעול בטמפרטורות הקריוגניות. על מנת לוודא כי רכיבים אלה יעבדו באופן יעיל, יש לאפיין את תכונותיהם במצבים שונים בטמפרטורות קריוגניות שונות. אפיון זה יאפשר להבין באילו תנאים תהיה אופטימיזציה של יעילות הרכיבים.



איור 10: חלקי מחשב קוונטי ופירוט הטמפרטורות בהן הם שרויים.

על מנת לאפשר תקשורת בין משתמש למחשב הקוונטי, המחשב מתחלק לשלוש מערכות מרכזיות, אשר נמצאות בתנאי קור שונים. להלן תרשים המתאר את המערכות; בעזרת חלוקה זו, המשתמש יוכל לתקשר עם המחשב ללא התחשבות בקור ומערכת הבקרה תשהה בטמפרטורה פחות קיצונית. אך גם כך ישנם שבבי מחשב שמחויבים לתפקד בקור שלא נבנו אליו. לכן ישנו צורך בלעצב מעגלים ושבבים אשר התאמתם למגוון טמפרטורות קריוגניות מוכחת.

## 7. שיטות וחומרים

### 7.1 כלים וכלי עבודה

- ספק מתח
- אמפרמטר
- שבב
- מעגל CMOS library farm
- Ring Oscillators
- קוד פייתון
- מיכל הליום נוזלי
- דיספטיק (Dipstick)
- Excel - לניתוח תוצאות

### 7.2 מדידות השערים הלוגיים

על מנת לבדוק את השפעת הטמפרטורות והמתחים השונים על תכונות שערים הלוגיים, הם נוסו בשבב שהריץ שרשראות שערים, בתנאי עבודה שונים. המעגל CMOS library farm, כפי שהוסבר בסקירת הספרות, מחזיר את פרמטר הדיליי של שרשראות השערים. פרמטר הזרם נמדד באמצעות אמפרמטר. המעגל הופעל ונבחרו המתחים המוזרמים אליו באמצעות קוד פייתון. השרשראות הינן של שערי Nand, inverter, Nor כאשר לכל שער ישנן שרשראות של שני גדלים (D0, D1) ושני סוגי מתחי סף (low VT, ultra-low VT)

הטמפרטורות הקריוגניות נוצרו באמצעות הכנסת השבב למיכל הליום נוזלי. הליום נוזלי הינו המצב הנוזלי של היסוד הכימי הליום לאחר שעבר תהליך ניזול. היסוד יכול להישאר במצבו הנוזלי רק בטמפרטורה של 4K, כך שבמצב זה ניתן להשתמש בו כמקפא קריוגני.

את המדידות בטמפרטורות השונות מבצעים באמצעות חיבור השבב לקצה של דיפסטיק (מקל טבילה), כך שהקצה מוכנס למיכל הליום נוזלי. ההכנסה מתבצעת בהדרגתיות, על מנת לבצע את המדידה בטמפרטורות קריוגניות מגוונות.

ערכי הטמפרטורות הקריוגניות שנבדקו הינם;

- 90k
- 55k
- 35k
- 9.5k
- 6.5k,
- 4.2k



- בנוסף לכך, השרשראות הורצו גם בטמפרטורת החדר, כלומר ב-300k.

כל שרשרת נוסתה בהצלחה של כל טמפרטורה עם כל מתח. המתחים, שניתנו באמצעות ספק ונבחרו באמצעות הרצת קוד, הן :

- 0.8v
- 0.75v
- 0.7v
- 0.65v
- 0.6v
- 0.55v
- 0.5v
- 0.46v
- 0.45v
- 0.44v
- 0.42v
- 0.4v
- 0.38v
- 0.36v

### 7.3 ניתוח תוצאות המדידות

לאחר ביצוע המדידות, נעזרתי בנתונים שהתקבלו על עוצמות הזרם בשרשראות והזמן שלקח לעבור עליהן על מנת לחשב את הדיליי וגודל בזבוז האנרגיה של השערים. הנתונים מסודרים באמצעות התוכנה אקסל, שם הכנתי על פי הם גרפים המסייעים להבין את התוצאות. לכל שרשרת ישנם 3 סוגי גרפים; ערך דיליי כתלות במתח, ערך בזבוז אנרגיה כתלות במתח וערך בזבוז אנרגיה כתלות בדיליי. לכל סוג ישנו גרף לטמפרטורות 300k-35k וגרף לטמפרטורות 9.5k-4.2k.

## 8. תוצאות

בשביל למצוא את ערכי מתחי השער האופטימליים עבור שרשראות השערים הלוגיים, השערים נמדדו בטמפרטורות ומתחים שונים. השערים הלוגיים קוררו באמצעות ההליום הנוזלי בהדרגה ובכל טמפרטורה נמדדו ערכי הדיליי ובזבוז האנרגיה במגוון מתחים. לאחר סיום מדידות השרשראות בכל המתחים והטמפרטורות שונות, נאספו נתוני הדיליי ובזבוז האנרגיה. אותם הצבתי בגרפים המציגים את תלות מהירות השערים הלוגיים (המיוצגת בגודל ערך הדיליי שלהם) במתח, תלות בזבוז האנרגיה של השרשרת במתח ותלות בזבוז האנרגיה בערך הדיליי. המתח האופטימלי של שרשרת מסוימת הינו מתח המספק לה תכונות מהירות וחיסכון סבירות ביחס למתחים אחרים, ולכן מנקודות אלה ניתן לקבוע את המתח האופטימלי של אותה שרשרת בטמפרטורה בה היא נמצאת. מתח זה ישמש לוודא יעילות העבודה של השרשרת בתנאים שונים ואך בתנאי טמפרטורה קריוגנית.

### 8.1 תוצאות המדידות עבור שרשראות Nand D0

כלל השערים הלוגיים פעלו בטמפרטורות שונות ובמתחים שונים והפרמטרים של מהירותם וחסכוניותם. הטבלאות הבאות מציגות את תוצאות ערכי הדיליי וגדלי בזבוז האנרגיה מן המדידות של Nand D0 בתנאי הטמפרטורות והמתחים המצוינים:

טבלה 5 מציגה גודל הדיליי של השער Nand D0 lvt לפי מתח הספק שניתן לו בטמפרטורות 35k, 4.2k ו-300k. ניתן לראות כי בהתאם להשערת המחקר, ככל שהמתח גדל, מהירות השער גדלה. כמו כן רואים שבמתח נתון דיליי כמעט ולא משתנה עבור טמפרטורות שונות. בטבלה 6 אשר מציגה גודל הדיליי של השער Nand D0 ulvt לפי מתח הספק שניתן לו, קיימת מגמה זהה.

Delay By Voltage - Nand D0 lvt - [ns]

Voltage [V]	300K	35K	4.2K
0.8	5701.743	5405.616	5388.460
0.75	6346.261	6182.095	6163.262
0.7	7212.336	7305.377	7284.685
0.65	8408.454	9032.151	9008.418
0.6	10141.746	11934.114	11915.101
0.55	12794.579	17476.649	17503.386
0.46		30407.230	30338.846
0.45		60819.082	
0.44		99772.235	

טבלה 5: גודל הדיליי של השער Nand D0 lvt לפי מתח הספק שניתן לו בטמפרטורות שונות.

Delay By Voltage - Nand D0 ulvt - [ns]

Voltage [V]	300K	35K	4.2K
0.8	4399.087	4010.653	3998.517
0.75	4768.453	4424.923	4411.322
0.7	5247.202	4992.968	4977.613
0.65	5884.913	5805.113	5784.915
0.6	6764.302	7038.249	7019.916
0.55	8029.575	9100.117	9078.850
0.46		12942.493	12895.015
0.45		19480.916	
0.44		25385.545	
0.42		33516.798	

טבלה 6: גודל הדיליי של השער Nand D0 ulvt לפי מתח הספק שניתן לו בטמפרטורות שונות.

טבלאות 7 ו-8 מציגות את בזבז האנרגיה של השערים Nand D0 lvt ו-Nand D0 ulvt. תוצאות הניסוי עוקבות אחר ההשערה שככל שהמתח גדל, בזבז האנרגיה גדל גם הוא. עבור מתח מסויים בזבז אנרגיה משתנה במקצת בטמפרטורות שונות.

Power Consumption By Voltage - Nand D0 lvt - [MW]

Voltage [V]	300k	35k	4.2k
0.8	392.443	355.958	353.207
0.75	369.724	331.529	330.1304
0.7	349.535	307.329	307.086
0.65	328.2001	285.857	285.909
0.6	309.859	261.26003	258.461
0.55	292.681	238.2807	236.199
0.46	197.425	217.071	209.521
0.45	182.634	192.221	
0.44		180.043	

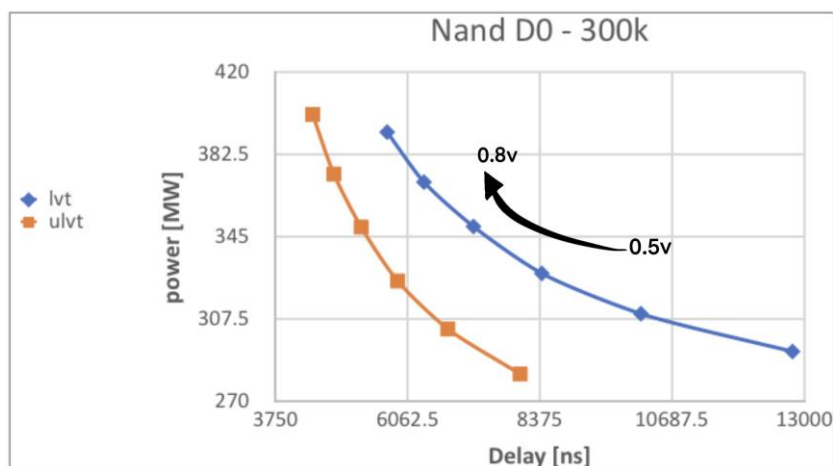
טבלה 7 : גודל בזבז האנרגיה של השער Nand D0 lvt לפי מתח הספק שניתן לו בטמפרטורות 4.2k, 35k, 300k.

Power Consumption By Voltage - Nand D0 ulvt - [MW]-1

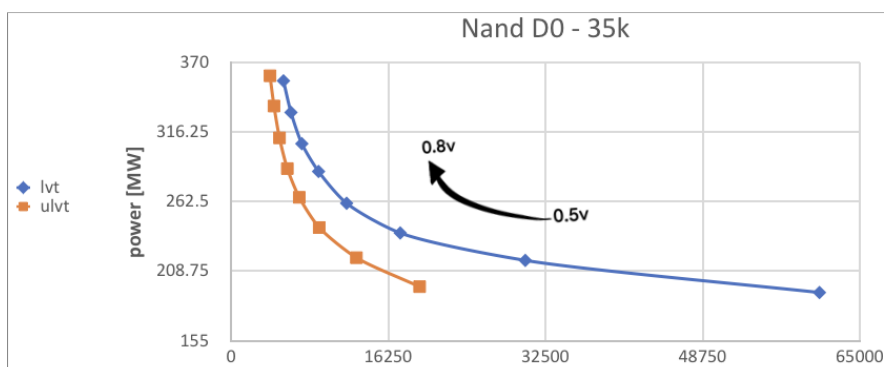
Voltage [V]	300k	35k	4.2k
0.8	400.474	359.864	358.968
0.75	373.431	336.462	334.874
0.7	349.272	311.836	311.386
0.65	324.765	288.0904	287.816
0.6	302.928	265.853	264.572
0.55	282.445	242.487	239.7208
0.46		219.166	215.963
0.45		196.765	
0.44		182.607	

טבלה 8 : גודל בזבז האנרגיה של השער Nand D0 ulvt לפי מתח הספק שניתן לו בטמפרטורות 4.2k, 35k, 300k.

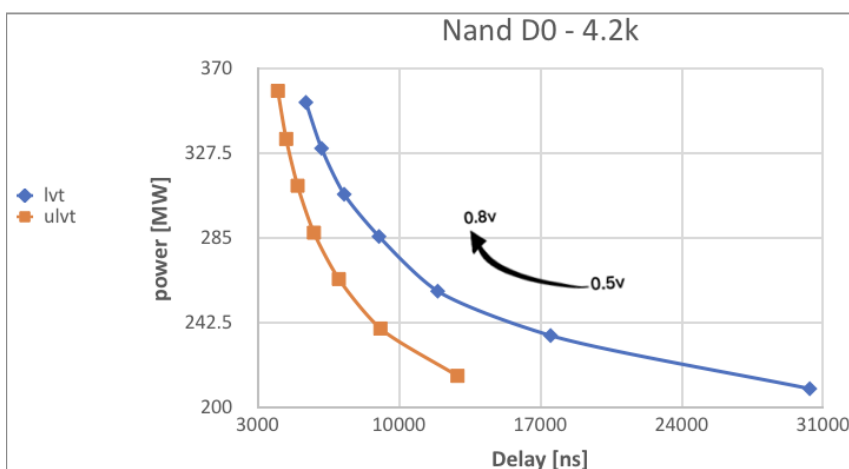
באיורים 11-13 מוצגת תלות ערך הדיליי של השער Nand D0, בטמפרטורות 300K, 35K, 4.2K, עבור טווח המתחים 0.5-0.8V. גרפים אלה משמשים להבנת משמעות והשלכות התוצאות.



איור 11: גודל בזבז האנרגיה (ציר Y) כתלות בגודל דיליי (ציר X) של השער nand D0 בטמפרטורה 300k.



איור 12: גודל בזבז האנרגיה (ציר Y) כתלות בגודל דיליי (ציר X) של השער nand D0 בטמפרטורה 35k.



$y = a/x$  (a קבוע). בצורה זו ישנן נקודות אשר נמצאות במעבר של הגרף מירידה חדה לירידה מתונה יותר. נקודות אלה ממוקמות במרכז הגרפים או קרוב למרכזם, כמשוער, כך שבהן ערך הדילי קטן יחסית. מעבר לכך, הן גם באמצע גובה הגרף, ולכן גם ערכי בזבז האנרגיה הינם אופטימליים לטמפרטורה זו. לכן, המתחים אשר הובילו לאותן נקודות מספקים לשרשרת תכונות מהירות וחסכון סבירות לטמפרטורה בה היא נמצאת.

מכאן ניתן לראות את המתחים שהובילו לאותן נקודות מעבר שבגרפים. כלומר, ניתן להסיק מכאן את המתחים האופטימליים לשרשראות Nand D0 לפי טמפרטורה. אותם מתחים מוצגים בטבלה 9:

**Optimal Voltage Operation Range - Nand D0 - [V]**

Temperature [K]	lvt	ulvt
300	0.8	0.8
35	0.5	0.6
4.2	0.55	0.6

טבלה 9: המתחים האופטימליים עבור השער nand D0 בטמפרטורות 4.2k, 35k, 300k

מתחים אלה הינם המתחים האופטימליים לשערים אלו בתנאי העבודה המצוינים, כלומר, עבורם השערים הלוגיים Nand D0 lvt, Nand ulvt מתפקדת באופן אופטימלי באותם תנאי עבודה.

## 8.2 המתחים האופטימליים לפי סוג שרשרת והטמפרטורה

באותה דרך בה מצאנו את נקודות המעבר של שרשראות Nand D0 בגרפים של תלות בזבז אנרגיה בערך הדילי של תוצאות מדיוותיהן ודרךן את המתחים האופטימליים שלהן בטמפרטורות 300k, 35k, 4.2k, ניתן למצוא את המתחים האופטימליים של שאר השרשראות בכל אחת מהטמפרטורות. להלן המתחים האופטימליים שנקבעו לכל סוגי השרשראות בטמפרטורות השונות.

**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 10: מתחים אופטימליים לשערים שונים מסוג lvt לפי הטמפרטורות 4.2-300k.

**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 11: מתחים אופטימליים לשערים שונים מסוג ulvt לפי הטמפרטורות 4.2-300k.

מתחים אלה מחייבים יעילות אופטימלית של אותן שרשראות, מבחינת איכות, מהירות וחסכון האנרגיה שלהן.

### 8.3 המתחים האופטימליים לפי טמפרטורה

נבדקו אילו מתחים אופטימליים הינם המועילים ביותר לכלל השערים הלוגיים בכל טמפרטורה. מכאן נקבעו המתחים האופטימליים לכלל השרשראות לפי הטמפרטורה בה הן נמצאות. להלן המתחים האופטימליים שנקבעו לפי טמפרטורה;

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 12 : מתחים אופטימליים לשערים שונים לפי הטמפרטורות 4.2-300K.

מתחים אלה נותנים יעילות אופטימלית של כלל השרשראות, מבחינת איכות מהירותן וחסכון האנרגיה שלהן.

## 9. דיון ומסקנות

תוצאות המחקר תאמו במידה גבוהה להשערת המחקר שלנו, התכונות שבחרנו – גודל הדיליי וכמות בזבז האנרגיה התנהגו כפי שציפינו בטמפרטורות ומתחים שונים. גרף התלות בין גודל הדיליי לכמות הבזבז באנרגיה דומה גם הוא לגרף בהשערת המחקר שלנו ואכן יכלנו למצוא בעזרתו את המתחים האופטימליים לכלל השערים הלוגיים בטמפרטורות שונות.

### 9.1 סקירת המתחים האופטימליים

מהסתכלות בטבלאות המתחים האופטימליים, ניתן למצוא כי כלל המתחים האופטימליים הינו בטווח 0.5-0.65v. המתחים 0.5v, 0.55v, 0.6v נבחרו כמתחים האידיאליים במספר הרב ביותר של מקרים, בעיקר בטמפרטורות הנמוכות מטמפרטורת החדר. מכאן ניתן להניח כי מתחים בטווח זה נוטים לגרור לאיזון בין איכות מהירות וחסכון האנרגיה של שערים.

### 9.2 השפעת טמפרטורה על המתח האופטימלי

בנתונים שהתקבלו מן המדידות, ניתן לראות כי לא קיימים הבדלים משמעותיים בין הדיליי וגודל בזבז האנרגיה של שער מסוים בטמפרטורה אחת לבין דיליי ובזבז אנרגיה 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 שאיננו תלוי בטמפרטורה בה הוא נמצא. מכאן נסיק כי לטמפרטורה השפעה קטנה מן המצופה על עבודת השערים הלוגיים. מסקנה זו חיונית על מנת להמשיך ולפיין 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<sup>[21]</sup>. עם זאת, ידוע שרעש תרמי קטן ככל שטמפרטורה בה מצוי שער לוגי קטנה. ניתן להניח שזאת הסיבה למקור של גודל המתחים בטמפרטורות הנמוכות.

### 9.3 שימושי תוצאות המחקר

מחקר זה נעשה על מנת לבדוק את השפעת טמפרטורות קריוגניות שונות על אופי המהירות וחסכון אנרגיה של שערים לוגיים. באמצעות המידע על ההשפעות, ניתן לבחור מבין המתחים שנוסו על השערים את המתח האופטימלי, ועבורו גם מהירות וגם חיסכון האנרגיה אופטימליים באיכות גבוהה או סבירה ביחס לאופי התכונות במתחים אחרים.

כפי שצוין בסקירת הספרות, המניע למחקר זה הגיע בעקבות פיתוח מחשוב קוונטי הדורש סביבת עבודה בטמפרטורות קריוגניות. מאחר ורצוי כי טיב המהירות וחסכון האנרגיה של כלל רכיבי המחשב יהיה אופטימלי, הפיתוח יצר צורך בהבנה של תגובת תכונות אלה לטמפרטורות קריוגניות. הממצאים שעלו מן המחקר מספקים תמונה נרחבת, ובאמצעות ניתוחם קבענו את המתחים אשר מובילים לתגובה הרצויה ביותר.

לכן, תוצאות המחקר הינן בעלות פוטנציאל לשפר את איכות הבקרה של המחשב ואת עלות עבודתו. אך מעבר לכך, ניתן להשתמש במתחים הפוטנציאליים מחוץ למחשוב קוונטי. המתחים אשר קבענו הינם מומלצים לכל שימוש בשערים לוגיים, מאחר והם מבטיחים איזון בין איכות המהירות וחסכון האנרגיה של שערים.

#### 9.4 מתחים נמוכים

שרשראות השערים נבדקו גם ב מתחים נמוכים מהמצוין ;  $0.3-0.38\text{V}$  אך מאחר שעבורם במרבית השערים נדרש מתח סף גבוה יותר, לא היה ניתן לקבל את זמן הדילי וגודל בזבוז האנרגיה עבורם בטמפרטורות שונות. בשערים אחרים התגלו שגיאות מדידה רבות עבור אותם מתחים. הוחלט לא להשתמש בהם בשביל אפיון השערים, כך שלא ניתן לדעת האם הם היו יכולים להיקבע כמתחים האופטימליים בתנאים מסוימים.

#### 9.5 מגבלות המחקר

באמצעות טבלאות המתחים האופטימליים שהוצגו בפרק התוצאות, ניתן לדעת באילו מתחים יש להשתמש על מנת לייעל שערים לוגיים, בתחומי מהירות וניצול אנרגיה הנמצאים בטמפרטורות קריוגניות שונות. עם זאת, יש לציין, כי המתחים האופטימליים שהוצגו התקבלו על ידי הניסויים שנעשו בשיטות שצוינו בפרק 'שיטות וחומרים' ואינם בהכרח המתחים האופטימליים שהיו מתקבלים עבור מיקסום תכונות אחרות. ניתן גם לקבוע שיטות אחרות לבחירת 'מתחים אופטימליים' ומגוון תכונות של שערים לוגיים. השימוש במתחים שהתקבלו במחקר זה מתייחסים אך ורק לתכונות שנבדקו ומומלצות על ידנו בשביל להגיע ליחס תכונות אופטימלי. מחקר זה, שעסק בייעול שימוש בשערים לוגיים, איננו מבטיח ייעול שלם של שערים בתנאים קריוגניים. השפעת טמפרטורות קריוגניות על מתחים ותכונות אחרות של שערים, כגון אופי עמידתם ברעש ועמידתם בטמפרטורות קיצוניות לא נבדקה. יש גם לציין כי נתקלנו בתקלה בשרשרת השערים מסוג Nor D0-lvt כך שלא נקבע מתח אופטימלי עבור שער זה כלל.

#### 9.6 המשך למחקר

כפי שהוסבר בסקירת הספרות, ניתן להשתמש בקירור קריוגני על מנת למנוע תזוזת אטומים בסביבות קיוביטים, שהינם רכיבים מרכזיים בהגדרת מחשב קוונטי. לכן, ישנם פיתוחים בתחום המחשוב הקוונטי אשר משתמשים בטמפרטורות אלו. על מנת לוודא ייעול 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, סוגי שערים שונים ועוד. המשך מחקר בתחום זה יוודא אופטימיזציה של רכיבים. אופטימיזציה זו הינה קריטית, מאחר ונושא המחשוב הקוונטי צובר תאוצה בקרב מעבדות, חברות ואף גורמים ממשלתיים. במידה ואכן סוג מחשוב זה ייהפך לסימן עידן המחשבים הבא, יש לוודא כי בידינו מידע אשר מאפשר עבודה אופטימלית לתנאי מחשוב זה. כמצוין בסקירת הספרות למבנה המחשב הקוונטי אשר רלוונטי למחקר זה ישנם 3 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 בה נוסו שרשראות השערים הלוגיים הינה  $4.2\text{K}$

לפיכך שיטת בחירת המתחים האופטימליים שנעשתה במחקר זה עבור תכונות מהירות וחיסכון אנרגיה לא נותנת המלצות לאופטימיזציה לכלל המחשב. בייחוד חשובה מציאת תנאים הגורמים לייעול רכיבים הנמצאים לצד קיוביטים, שכן רכיב זה מוחזק בטמפרטורה  $20\text{mK}$ . טמפרטורה זו קיצונית אף יותר מן הטמפרטורה שבחלק הבקרה והשפעתה על תכונות רכיבי המחשב נדרשת להיחקר לעומק (לפירוט ניתן לראות את איור 10 בסקירת הספרות)

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 מכתיבות את עלות ויעילות המחשבים במעבדות רבות. טמפרטורות קריוגניות הינן חיוניות לביצוע



פעולות ומחקרים שונים, כגון שימור עצמים ביולוגיים<sup>[22]</sup>. לכן נרצה להמשיך ולוודא אופטימיזציה של רכיבי מחשב בטמפרטורות אלה, גם עבור תכונות ופרמטרים שלא התמקדנו בהם במחקר זה.

1. Nishizawa J, Terasaki T, Shibata J. Field-effect transistor versus analog transistor (static induction transistor). *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1975; 22(4): 185-197. doi: 10.1109/T-ED.1975.18103
2. Fair RB. History of some early developments in ion-implantation technology leading to silicon transistor manufacturing. *Proceedings of the IEEE*. 1998; 86(1): 111-137. doi: 10.1109/5.658764
3. Kroemer H. Heterostructure bipolar transistors and integrated circuits. *Proceedings of the IEEE*. 1982; 70(1): 13-25. doi: 10.1109/PROC.1982.12226
4. C. T. Sah, "Characteristics of the metal-Oxide-semiconductor transistors," in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 11, no. 7, pp. 324-345, July 1964, doi: 10.1109/T-ED.1964.15336.
5. KAPLAN DA. Gordon Moore's Journey. *Fortune*. 2012; 166(6): 156-162. Accessed May 21, 2022.
6. Waldrop, M. Mitchell. "The chips are down for Moore's law." *Nature News* 530.7589 (2016): 144.
7. Edwards C. Moore's Law: What Comes Next? *Communications of the ACM*. 2021; 64(2): 12-14 doi: 10.1145/34409927.
8. Kumar, Suhas. "Fundamental limits to Moore's law." *arXiv preprint arXiv: 1511.05956* (2015).
9. Allen, Phillip E., and Douglas R. Holberg. *CMOS analog circuit design*. Elsevier, 2011. (book)
10. Brown, A. R., et al. "Logic gates made from polymer transistors and their use in ring oscillators." *Science* 270.5238 (1995): 972-974.
11. Rajendran, Jeyavijayan, et al. "Design and analysis of ring oscillator based design-for-trust technique." *29th VLSI Test Symposium*. IEEE, 2011

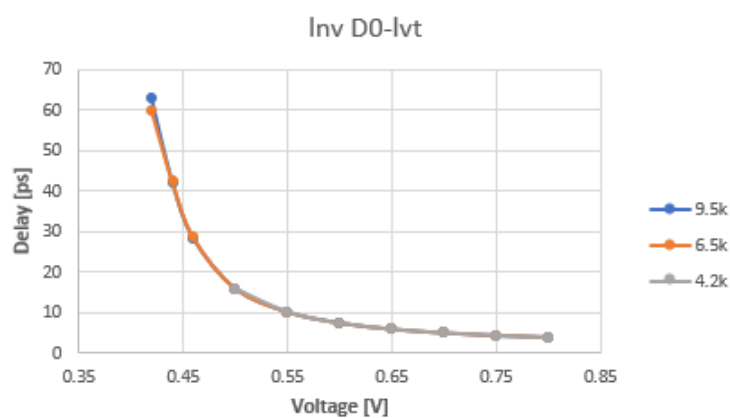
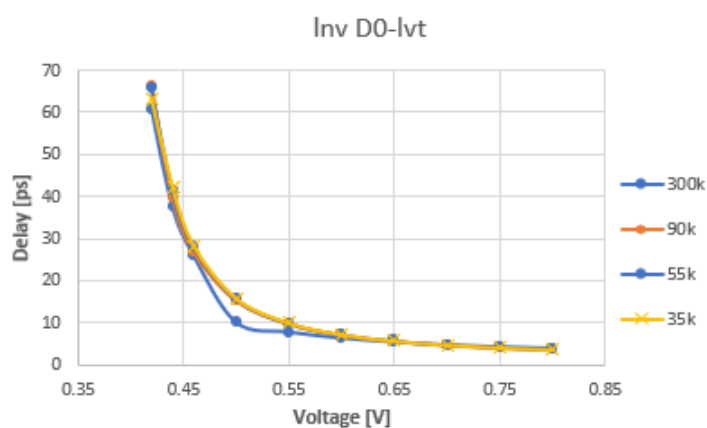
12. Duvall, Steven G. "Statistical circuit modeling and optimization." *2000 5th International Workshop on Statistical Metrology (Cat. No. 00TH8489)*. IEEE, 2000.
13. Gag, Martin, et al. "Temperature and on-chip crosstalk measurement using ring oscillators in FPGA." *2012 IEEE 15th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS)*. IEEE, 2012
14. Ramazani, Abbas, Sadegh Biabani, and Gholamreza Hadidi. "CMOS ring oscillator with combined delay stages." *AEU-International Journal of Electronics and Communications* 68.6 (2014): 515-519.
15. Heinkel, Ulrich, et al. "An Optimized Flow for Designing high-speed, large-scale CMOS ASIC SoCs." *Computer Systems: Architectures, Modeling, and Simulation: Third and Fourth International Workshops, SAMOS 2004, Samos, Greece, July 21-23, 2004 and July 19-21, 2004. Proceedings 3*. Springer Berlin Heidelberg, 2004.
16. MacQuarrie, Evan R., et al. "The emerging commercial landscape of quantum computing." *Nature Reviews Physics* 2.11 (2020): 596-598.
17. Williams, Colin P., and Scott H. Clearwater. *Explorations in quantum computing*. Santa Clara: Telos, 1998
18. Pérez-Delgado, Carlos A., and Pieter Kok. "Quantum computers: Definition and implementations." *Physical Review A* 83.1 (2011): 012303.
19. Preskill, John. "Quantum computing: pro and con." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 454.1969 (1998): 469-486.
20. Hey, Tony. "Quantum computing: an introduction." *Computing & Control Engineering Journal* 10.3 (1999): 105-112.
21. Aharonov, Dorit. "Quantum computation." *Annual Reviews of Computational Physics* VI(1999): 259-346.
22. Strubell, Emma. "An introduction to quantum algorithms." *COS498 Chawathe Spring* 13 (2011): 19.

23. Kjaergaard, Morten, et al. "Superconducting qubits: Current state of play." *Annual Review of Condensed Matter Physics* 11 (2020): 369-395.
24. Devoret, Michel H., Andreas Wallraff, and John M. Martinis. "Superconducting qubits: A short review." *arXiv preprint cond-mat/0411174* (2004).

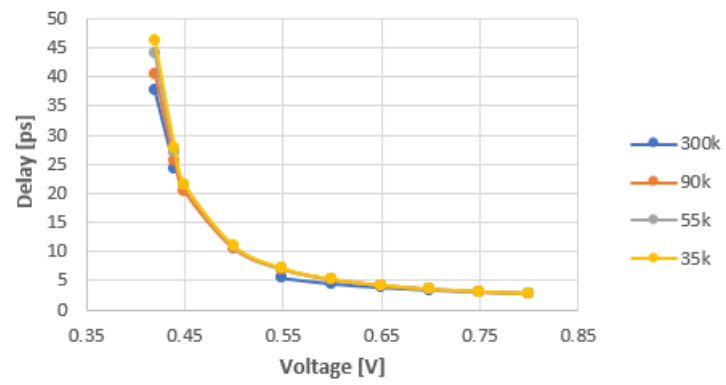
## 11. נספחים

### 11.1 גודל דיילי בתלות במתח

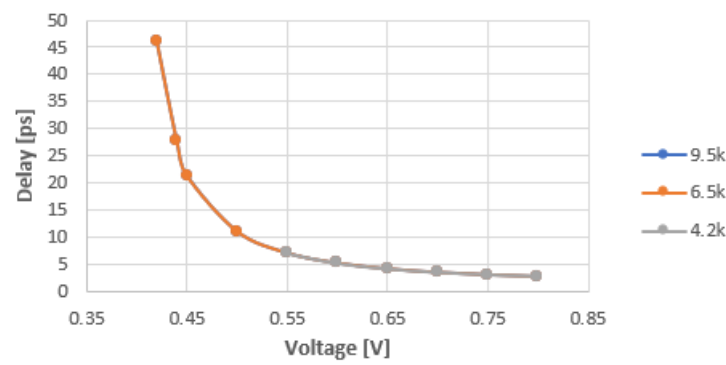
להלן כלל הגרפים אשר מציגים את תלות הדיילי במתח, לכל שער לוגי בכל טמפרטורה שנבדקה. ניתן לראות שגרפים אלה מקיימים את השערת המחקר לפיה מהירות השערים תגדל ככל שהמתח יגדל.



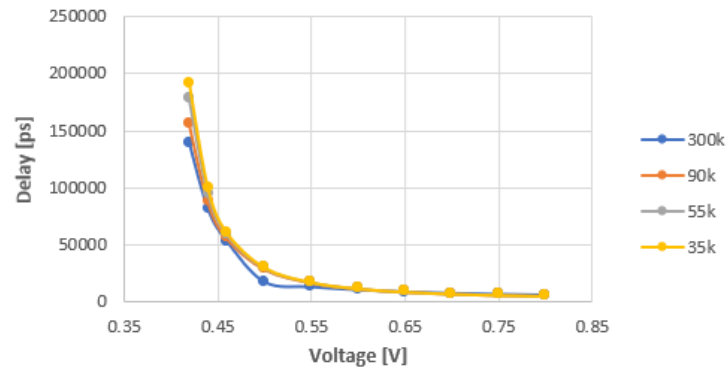
Inv D1-lvt



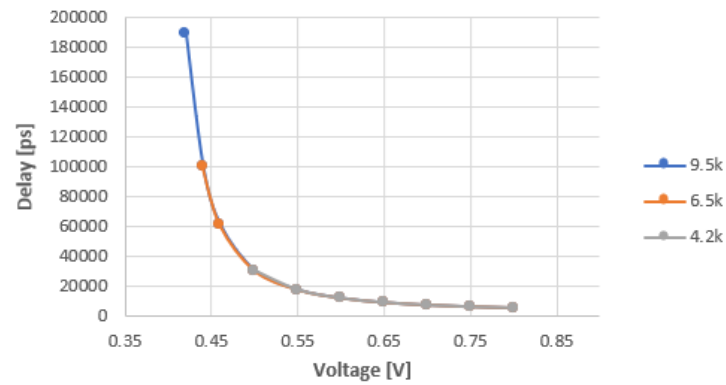
Inv D1-lvt



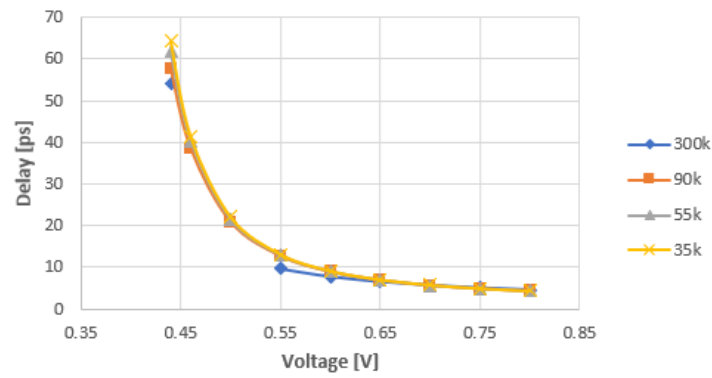
Nand D0-lvt



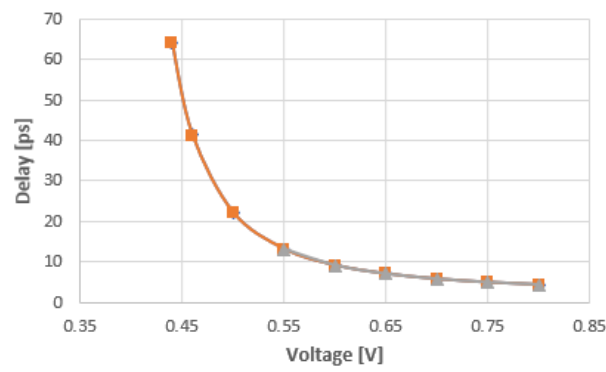
Nand D0-lvt



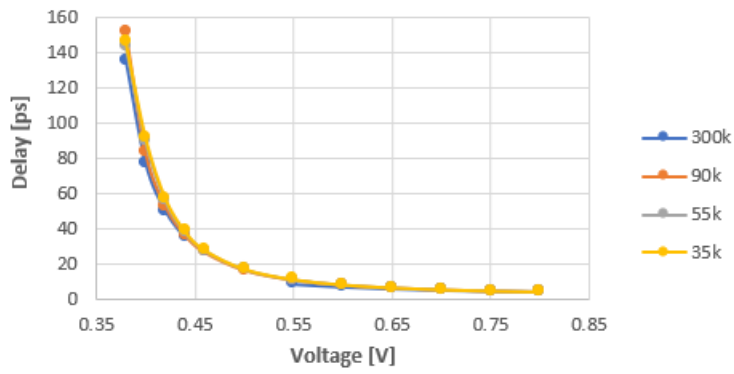
Nand D1-lvt



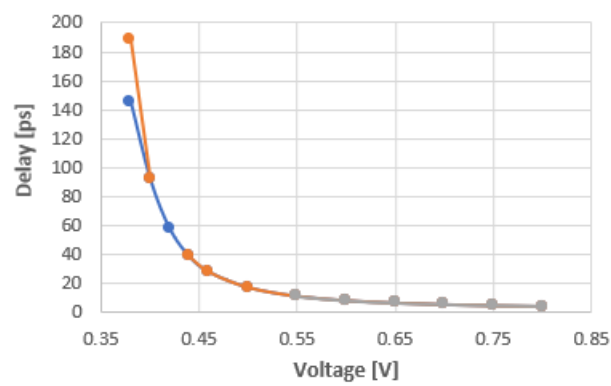
Nand D1-lvt

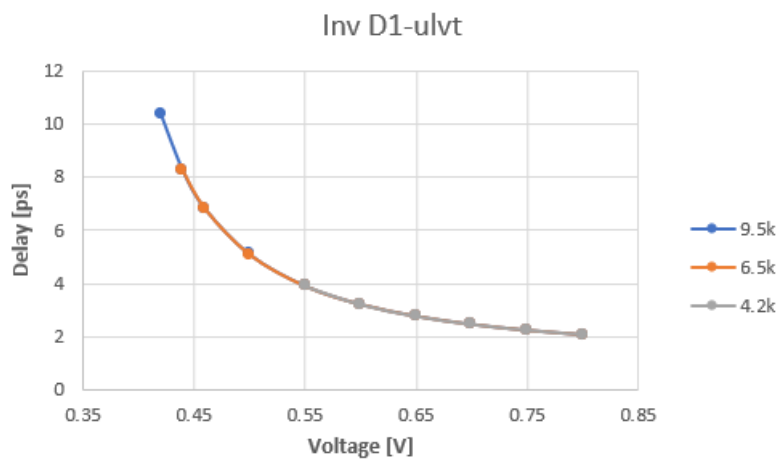
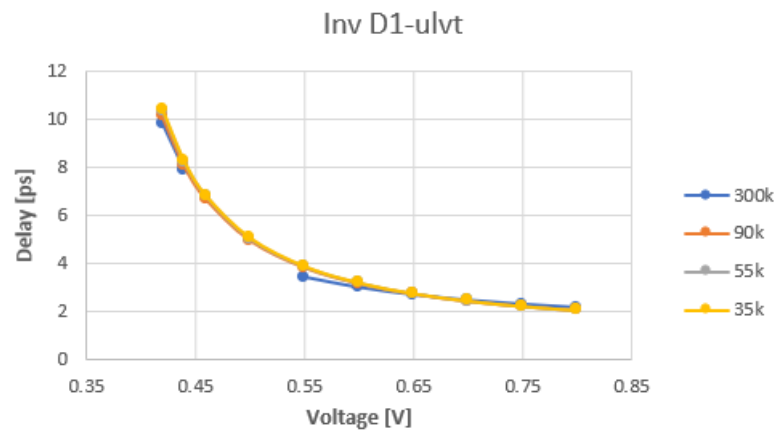
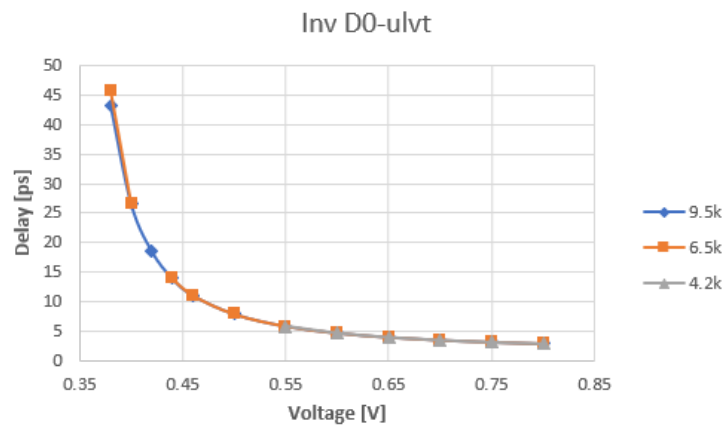
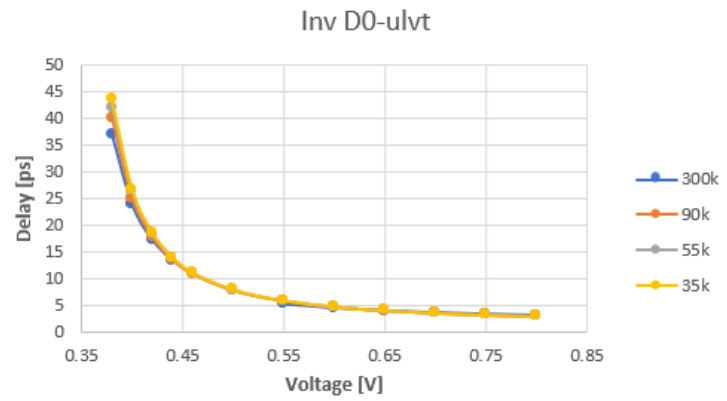


Nor D1-lvt



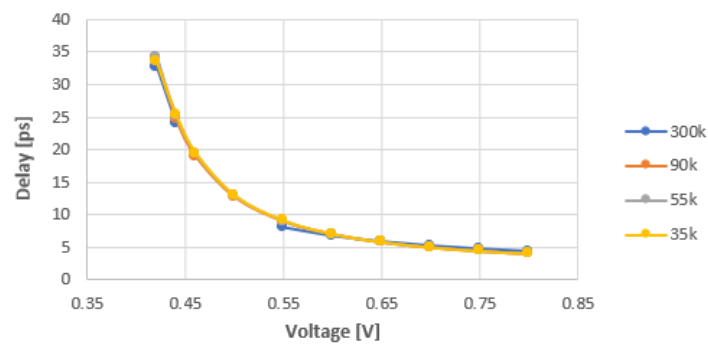
Nor D1-lvt



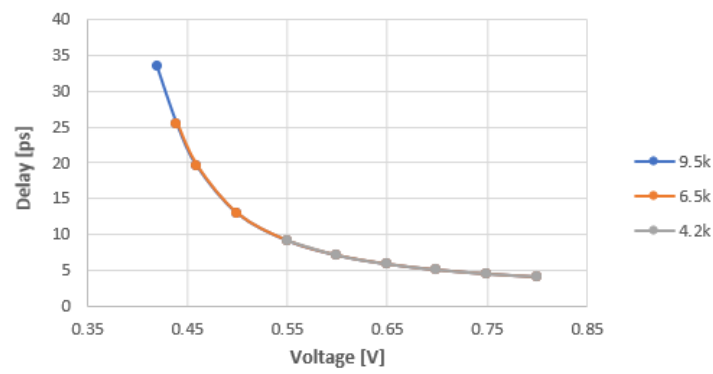




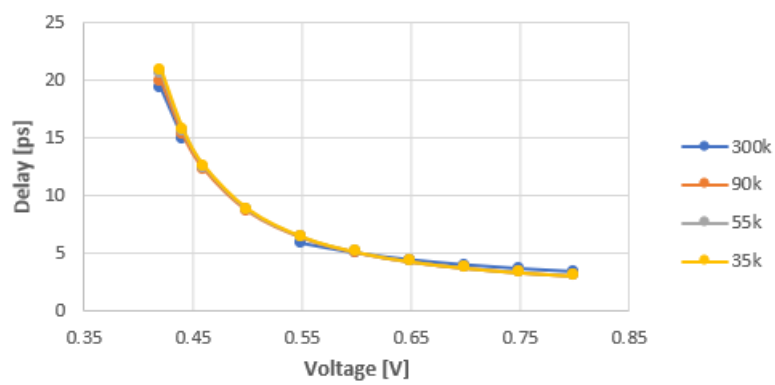
Nand D0-ulvt



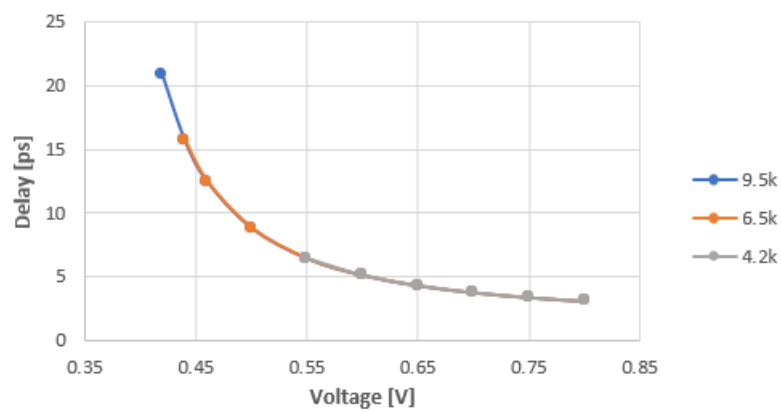
Nand D0-ulvt

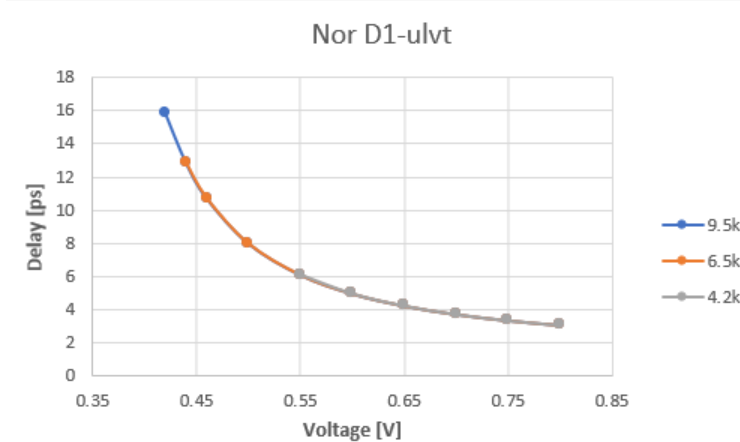
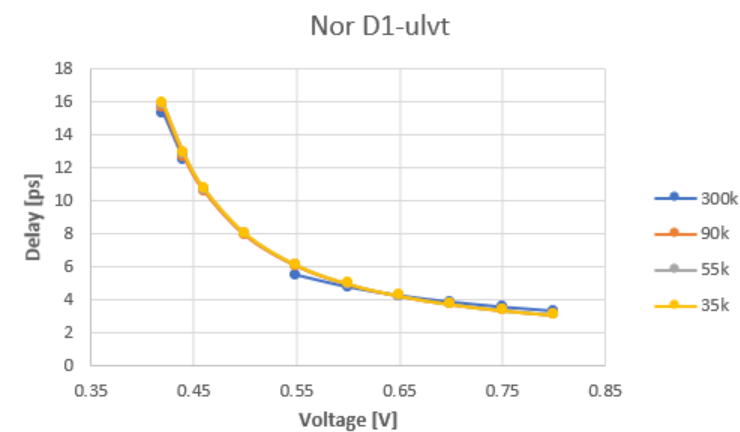
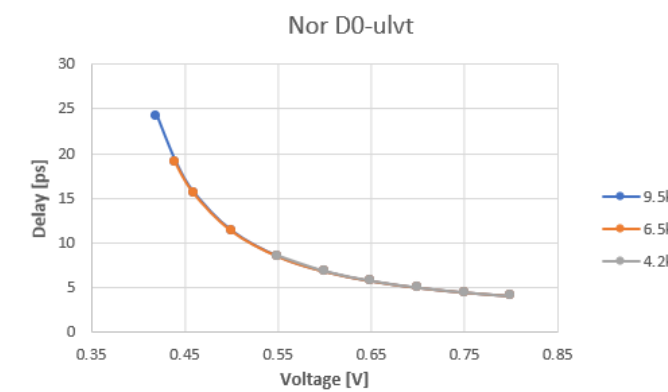
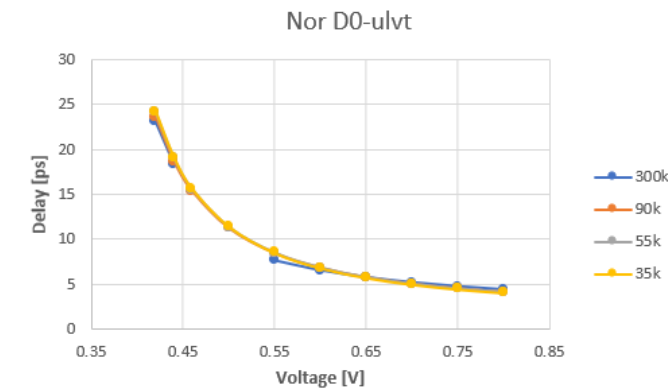


Nand D1-ulvt



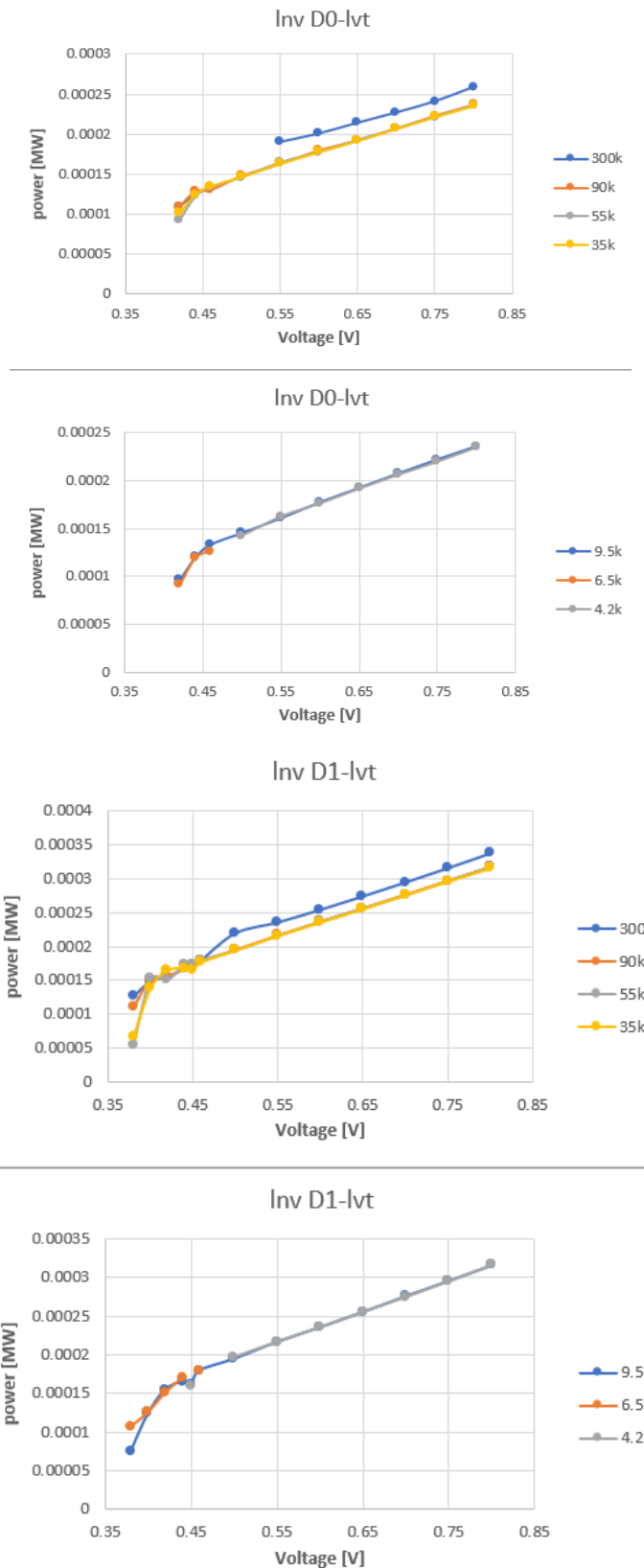
Nand D1-ulvt



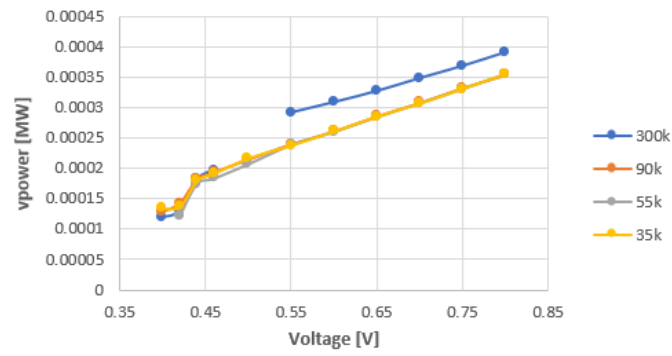


## 11.2 בזבז אנרגיה כתלות במתח

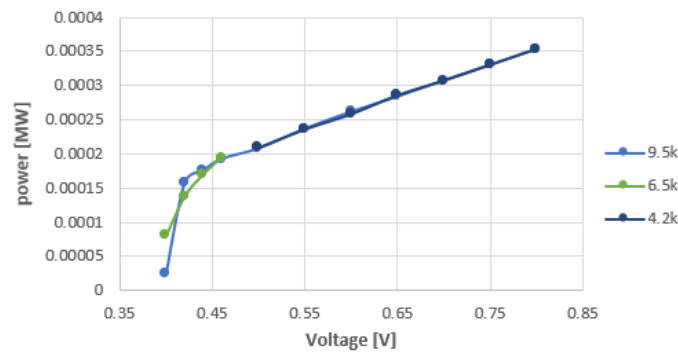
להלן כלל הגרפים אשר מציגים את תלות בזבז האנרגיה במתח, לכל שער לוגי בכל טמפרטורה שנבדקה. ניתן לראות שגרפים אלה מקיימים את השערת המחקר לפיה הבזבז יגדל ככל שהמתח שניתן לשער יגדל.



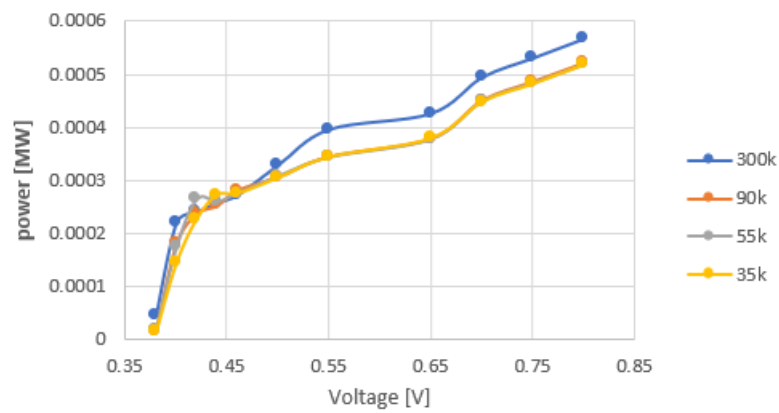
Nand D0-lvt



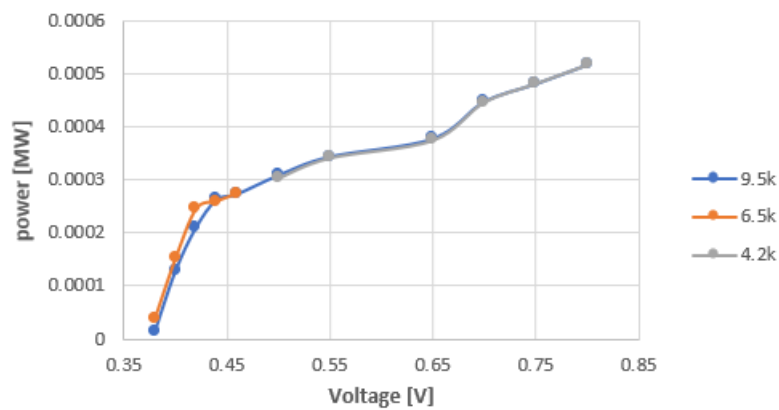
Nand D0-lvt



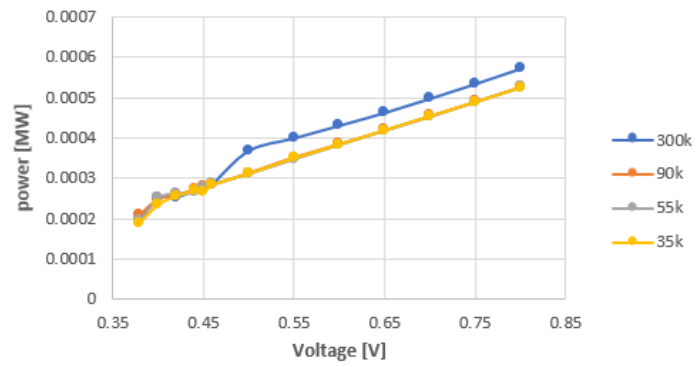
Nand D1-lvt



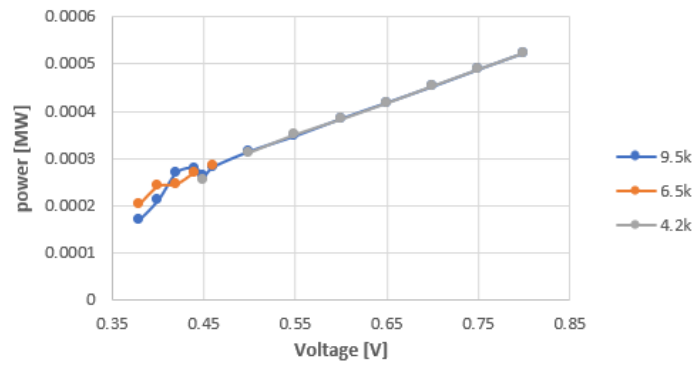
Nand D1-lvt



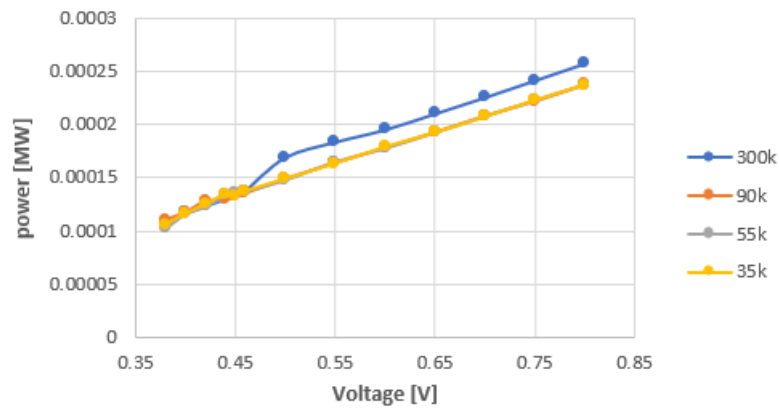
Nor D1-lvt



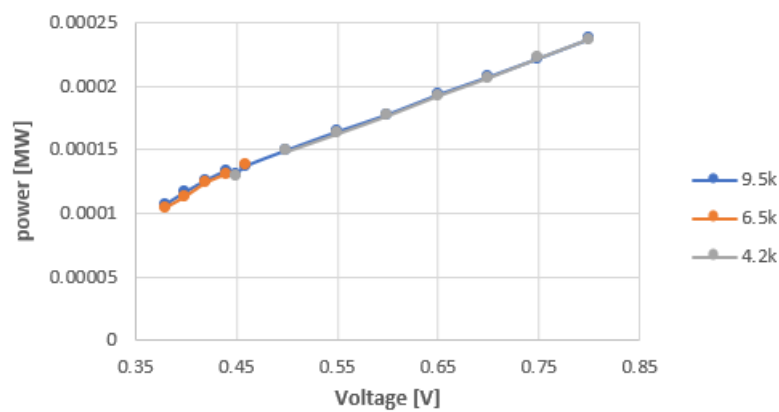
Nor D1-lvt



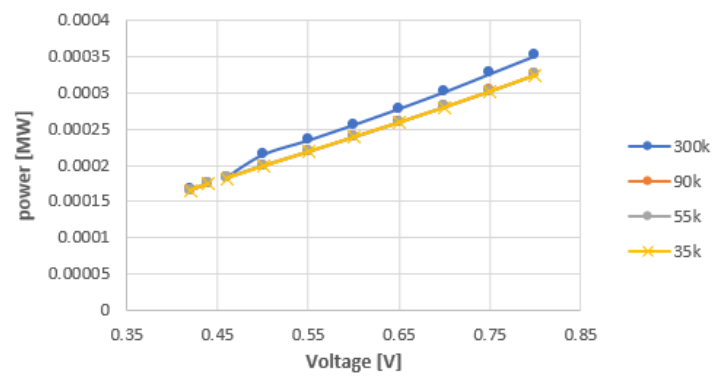
Inv D0-ulvt



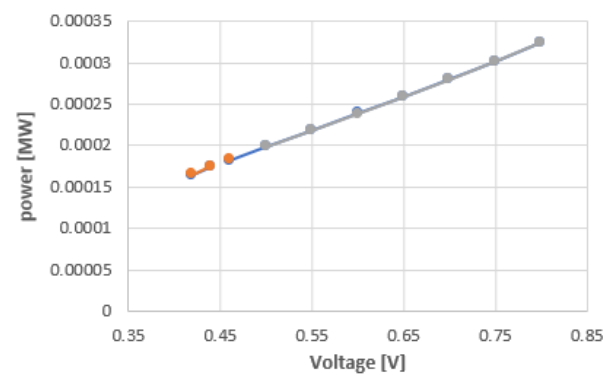
Inv D0-ulvt



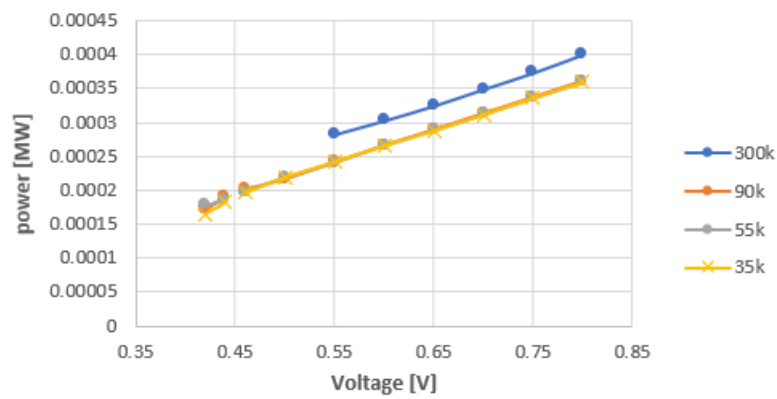
Inv D1-ulvt



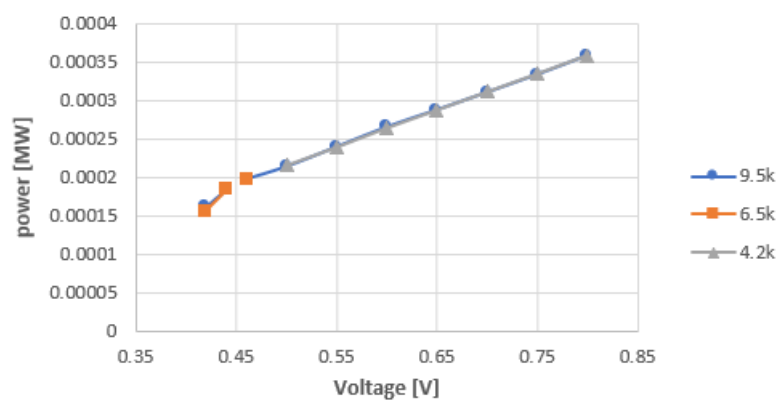
Inv D1-ulvt



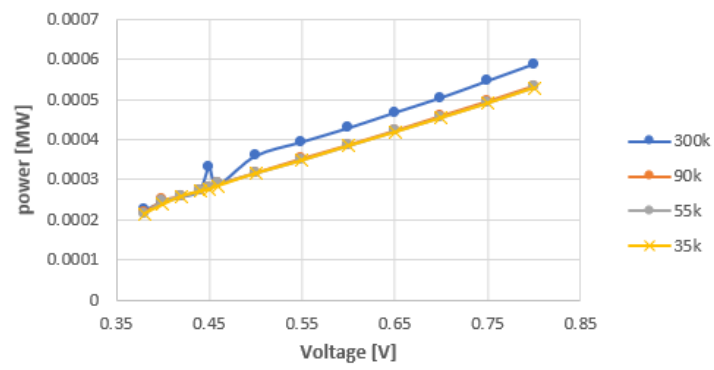
Nand D0-ulvt



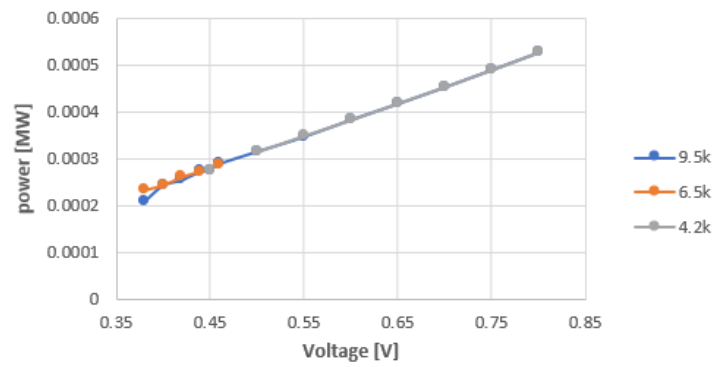
Nand D0-ulvt



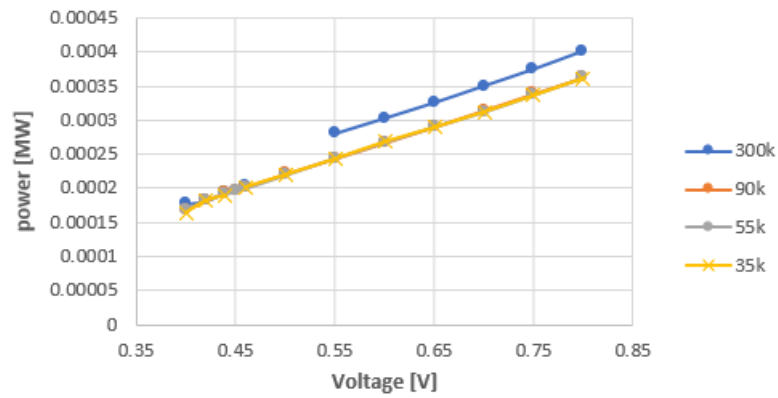
Nand D1-ulvt



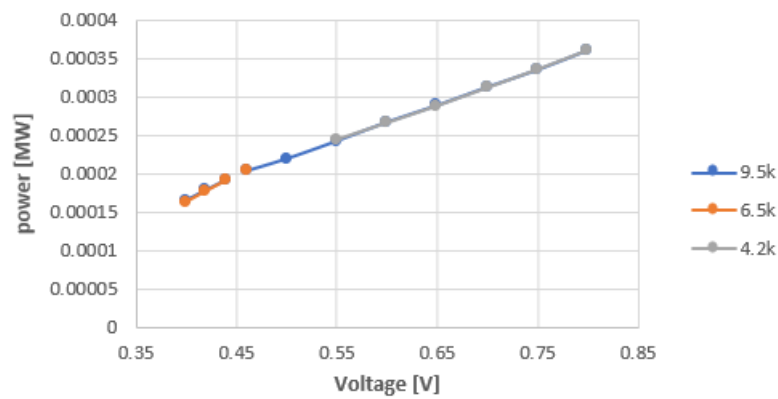
Nand D1-ulvt

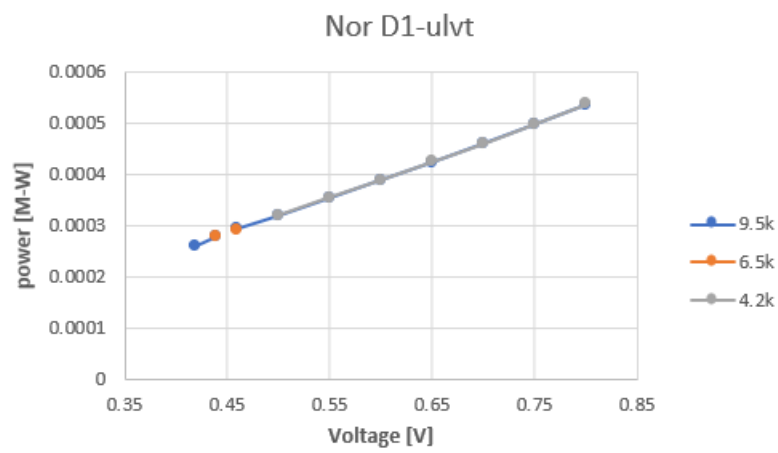
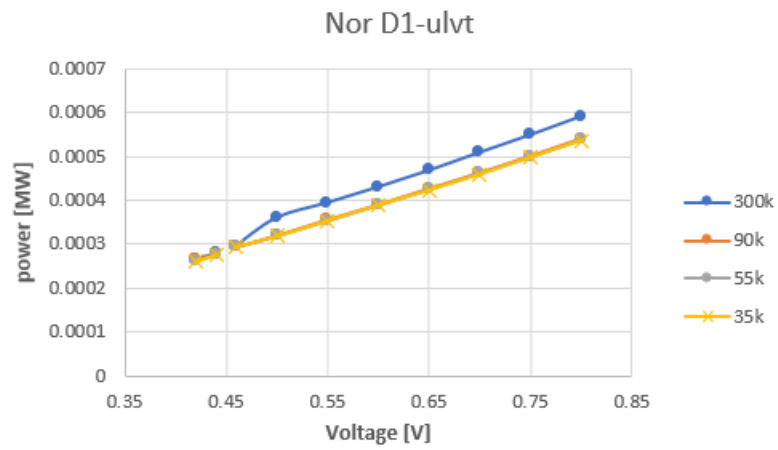


Nor D0-ulvt



Nor D0-ulvt



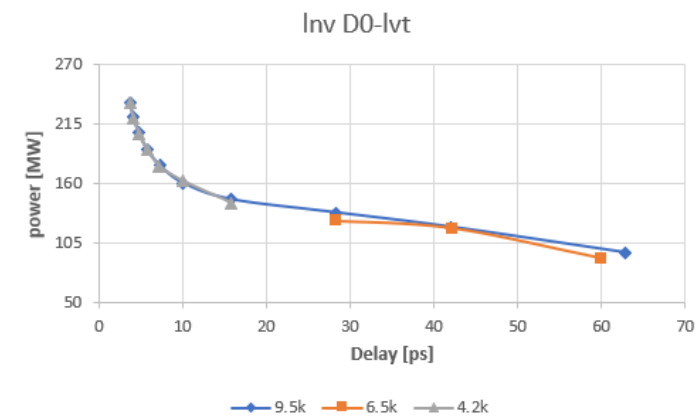
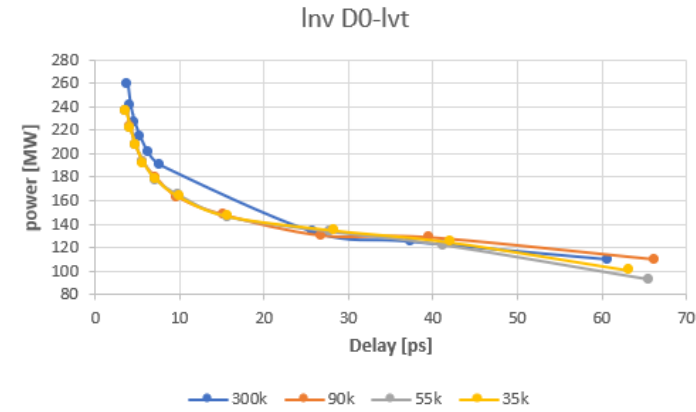




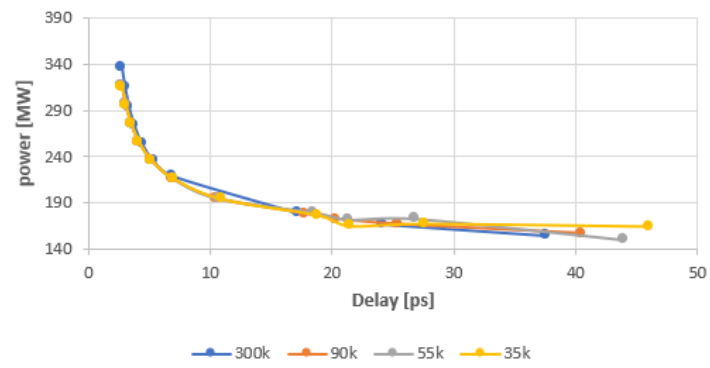
### 11.3 בזבז אנרגיה כתלות בגודל דיילי

להלן כלל הגרפים אשר מציגים את תלות בזבז האנרגיה בגודל דיילי, לכל שער לוגי בכל טמפרטורה שנבדקה. ניתן לראות שגרפים אלה מקיימים את השערת המחקר לפיה גרפים אלו יתנהגו כמו גרפים מסוג

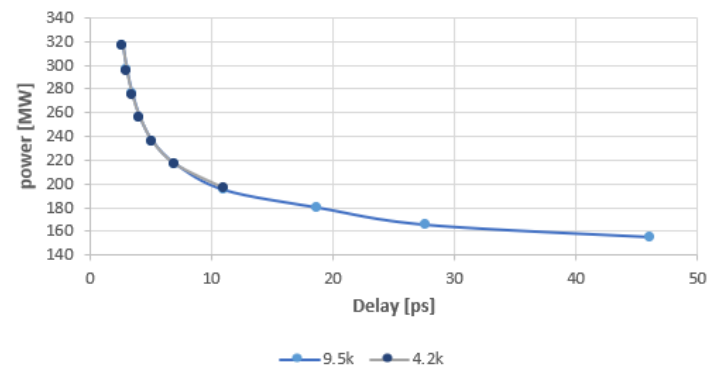
$$Y = \frac{a}{x}$$



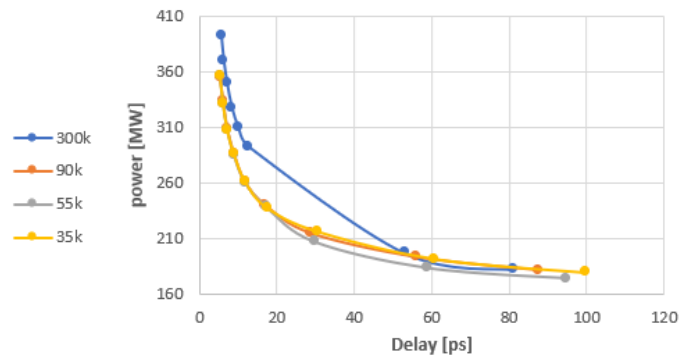
Inv D1-lvt



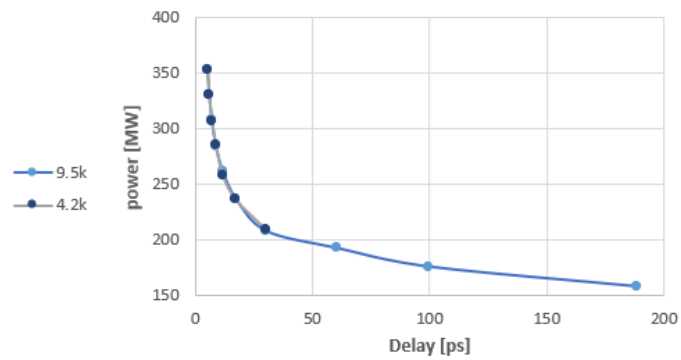
Inv D1-lvt



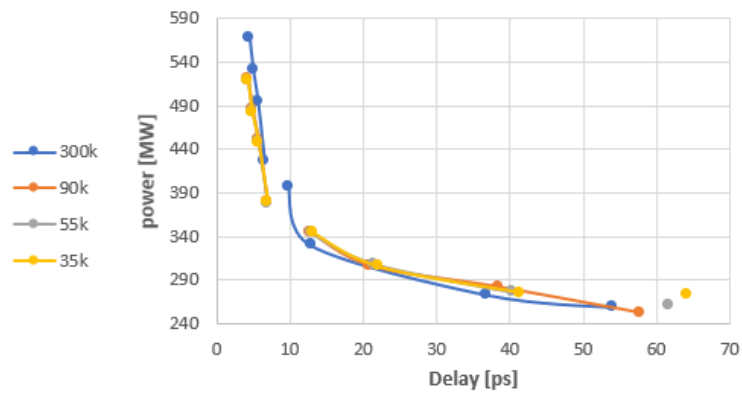
Nand D0-lvt



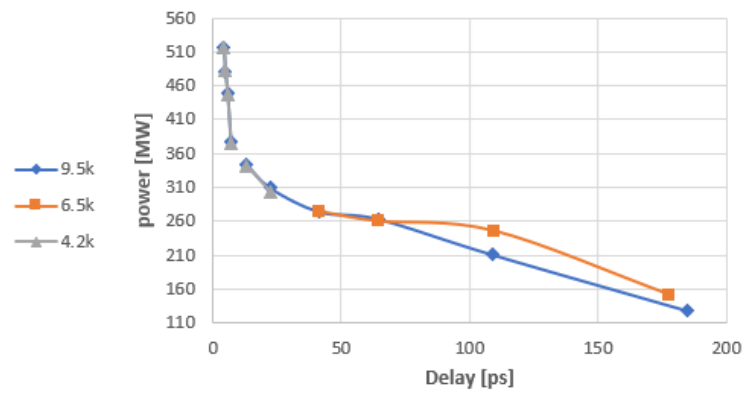
Nand D0-lvt



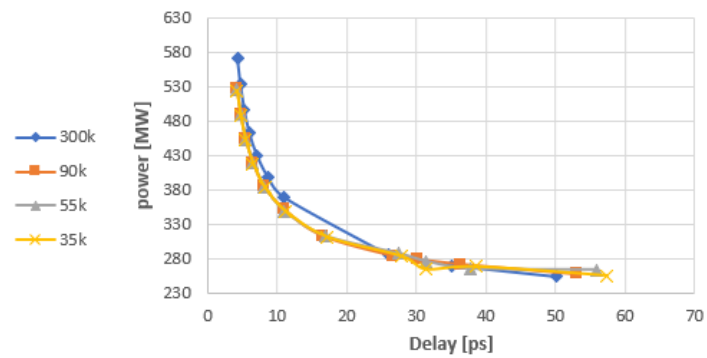
Nand D1-lvt



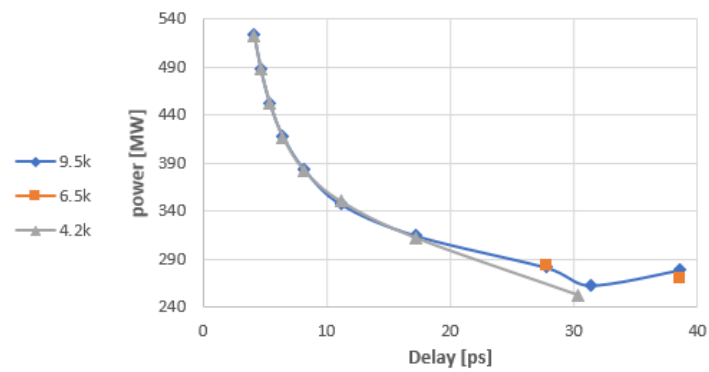
Nand D1-lvt



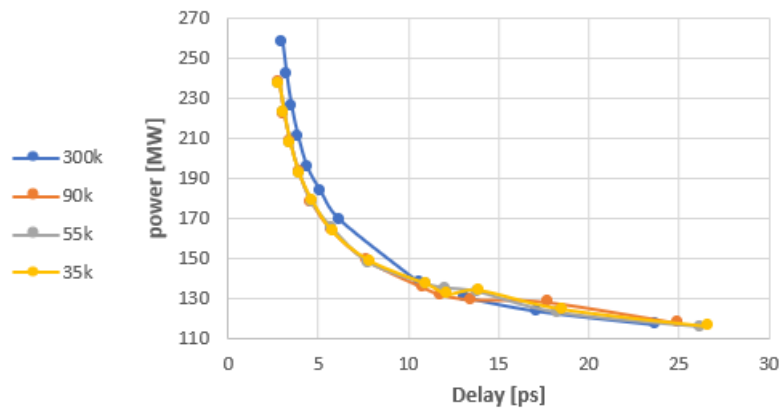
Nor D1-lvt



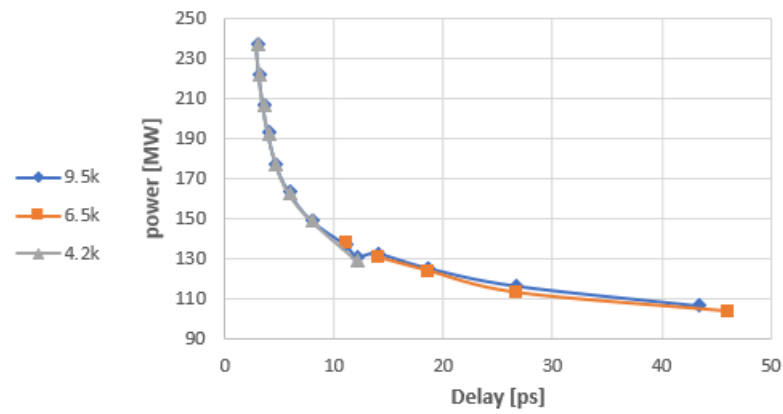
Nor D1-lvt



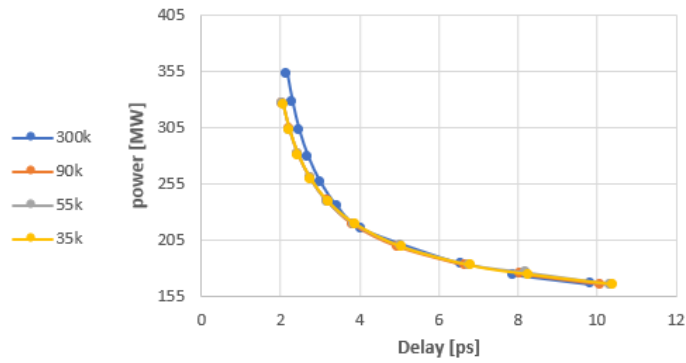
Inv D0-ulvt



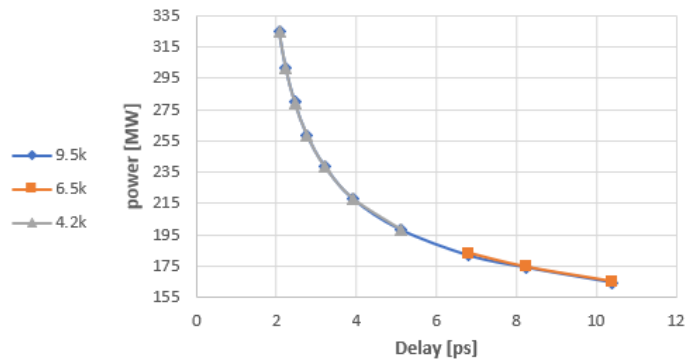
Inv D0-ulvt



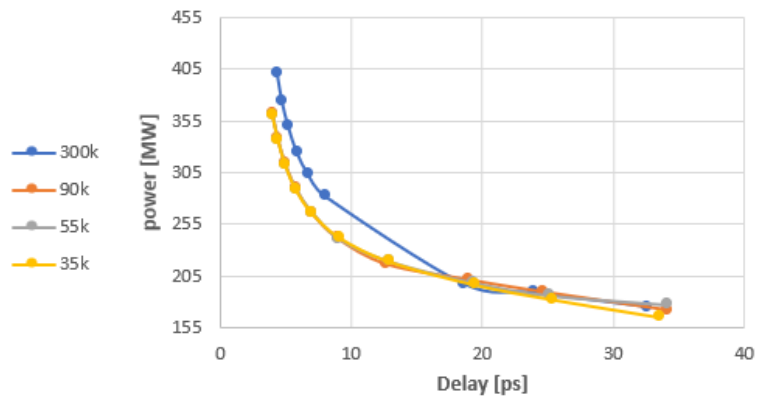
Inv D1-ulvt



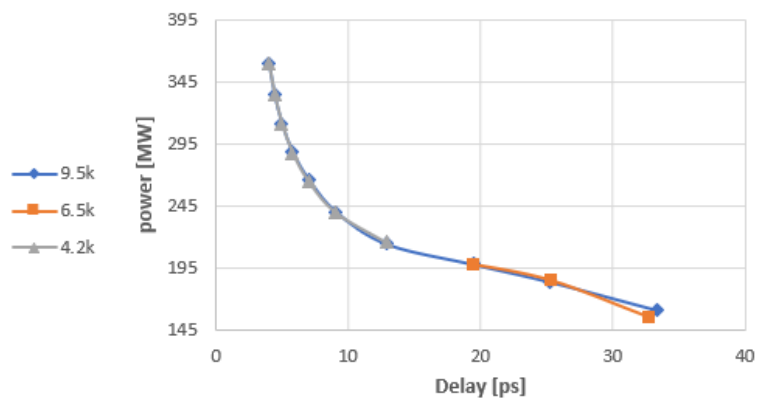
Inv D1-ulvt



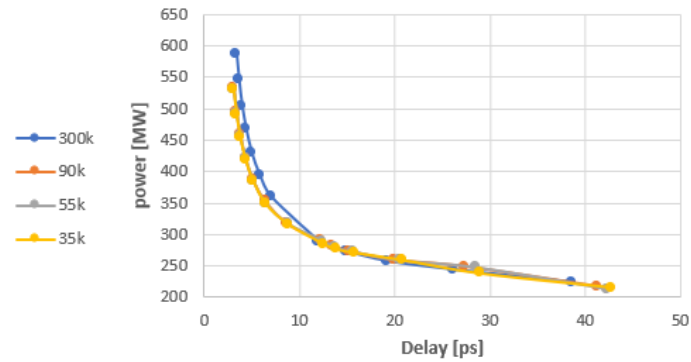
Nand D0-ulvt



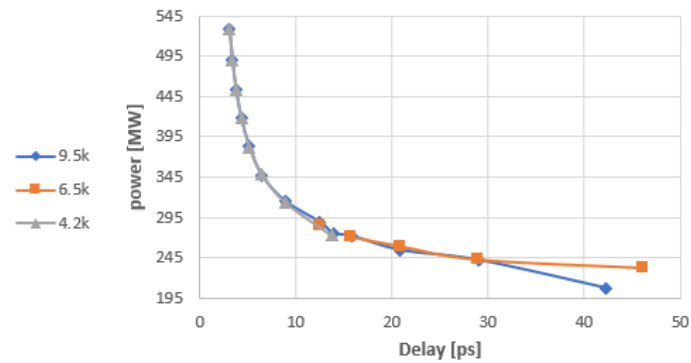
Nand D0-ulvt



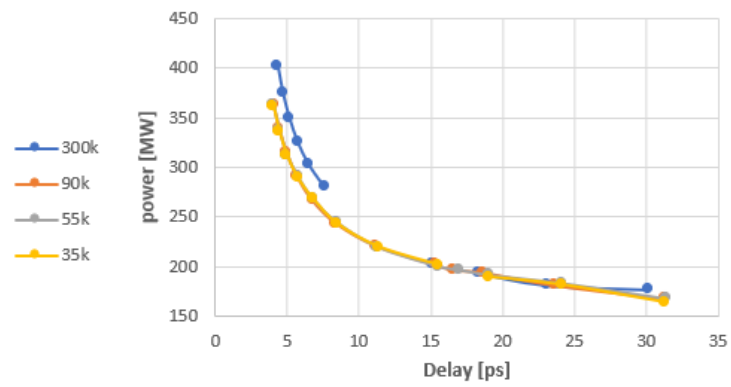
Nand D1-ulvt



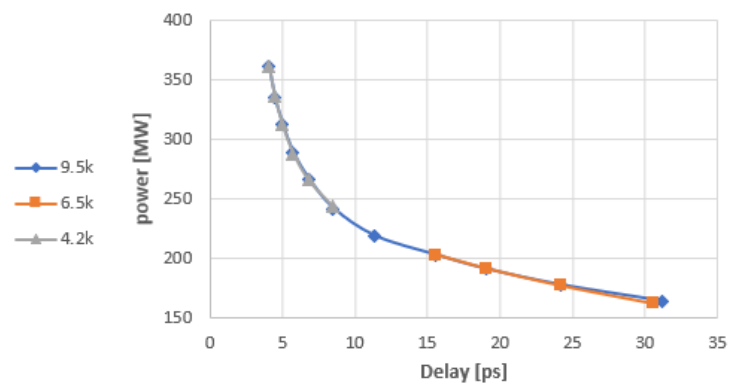
Nand D1-ulvt



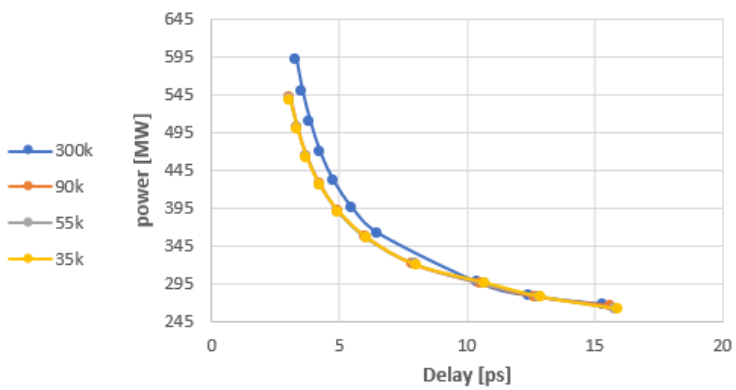
Nor D0-ulvt



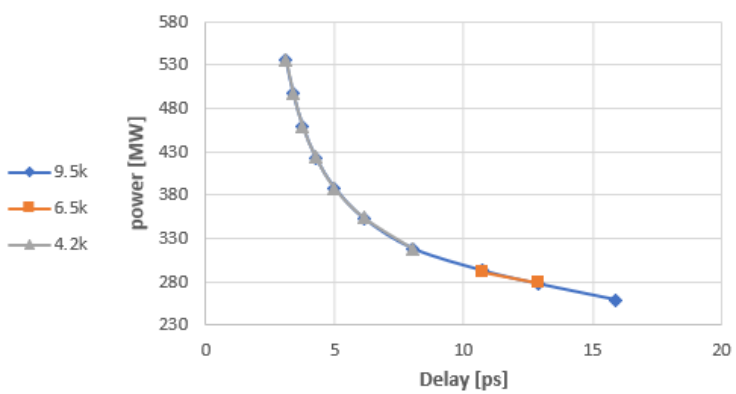
Nor D0-ulvt



Nor D1-ulvt



Nor D1-ulvt



# הצעת מחקר - עבודת גמר

## עבודה לא-צמודה במדעי המחשב

### מעגלים אופטימליים לעבודה עם מחשוב קוונטי

במסגרת תוכנית אלפא

אוניברסיטת בר-אילן

#### **פרטי התלמיד**

שם התלמיד: שרון מלטר

תעודת זהות: 327872347

כתובת: רחוב הפיק"א 13, בנימינה

מס' טלפון: 0526311806

כתובת דוא"ל: [Sharon.shor06@gmail.com](mailto:Sharon.shor06@gmail.com)

#### **פרטי בית הספר**

שם בית הספר: מקיף שפיה

סמל מוסד: 380028

כתובת: מאיר שפיה, בנימינה

טלפון מזכירות: 528351551

#### **פרטי מנחים**

##### **פרטי ראש מעבדה**

שם ראש המעבדה: פרופ' אלכס פיש

תעודת זהות: 305869562

תואר אקדמי: פרופסור מן המניין

עיסוק: חוקר

שם מוסד המחקר המלווה: אוניברסיטת בר-אילן

התמחות ראש המעבדה: מעגלים ומערכות משולבים, ננואלקטרוניקה

כתובת ראש המעבדה: הפקולטה להנדסה, אוניברסיטת בר-אילן

נייד: 0548044144

כתובת מייל: [alexander.fish@biu.ac.il](mailto:alexander.fish@biu.ac.il)

## **פרטי המנחים האישיים**

**מנחה אקדמי 1:** נועם רוקניאן

**תעודת זהות:** 322293564

**ארץ ושנת לידה:** 2000, ישראל

**כתובת:** העוגב 4 ראשון לציון

**תואר אקדמי:** תואר שני

**התמחות:** מעגלים ומערכות משולבים, נואלקטרוניקה

**שם מוסד המחקר המלווה:** אוניברסיטת בר אילן

**נייד להתקשרות:** 054-453-8153

**כתובת דוא"ל:** [noam.roknian@biu.ac.il](mailto:noam.roknian@biu.ac.il)

**מנחה אקדמי 2:** ענבל סטנגר

**תעודת זהות:** 203861240

**ארץ ושנת לידה:** 1993, ישראל

**כתובת:** נחל גלים 10 מודיעין-מכבים-רעות

**תואר אקדמי:** תואר שני

**התמחות:** מעגלים ומערכות משולבים, נואלקטרוניקה

**שם מוסד המחקר המלווה:** אוניברסיטת בר אילן

**נייד להתקשרות:** 526919936

**כתובת דוא"ל:** [inbal.stanger@biu.ac.il](mailto:inbal.stanger@biu.ac.il)

### **1. תחום הדעת**

מדעי המחשב

### **2. נושא העבודה**

מעגלים אופטימליים לעבודה עם מחשוב קוונטי.

### **3. מטרת העבודה**

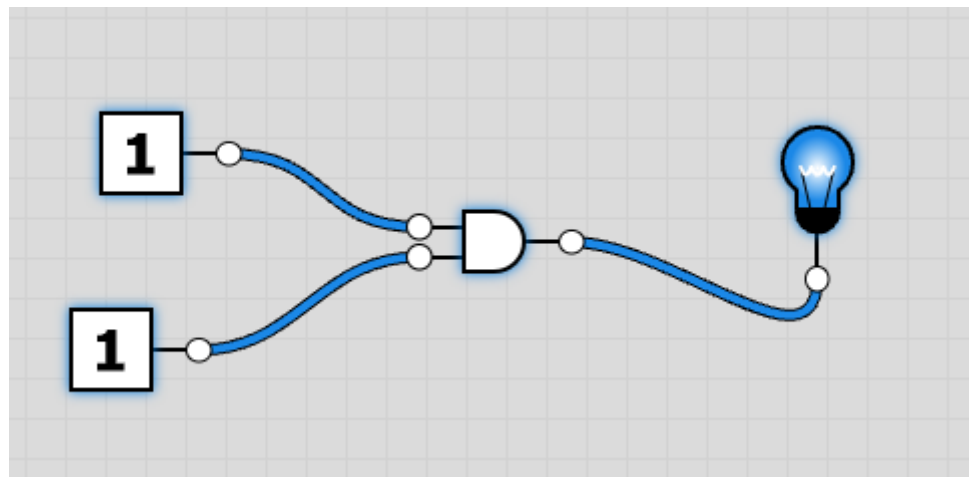
מטרת העבודה היא למצוא מבנה מעגל חשמלי המתאים לעבודה משותפת עם מחשוב קוונטי יותר ממעגלים קיימים.<sup>[8]</sup>

### **4. רקע עיוני**

מעגל חשמלי הוא רכיב בסיסי של כל מחשב מודרני<sup>[5]</sup>. 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.



תמונה 1 : שער לוגי פשוט מסוג AND

תמונה 1 מתארת שער לוגי פשוט מסוג AND. "1" מסמל שעובר זרם דרך המוליך (להלן החוט כחול), ו-"0" מסמל חוסר זרם חשמלי. בתרשים זה 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)<sup>[2]</sup>

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 קריטיות לתפקוד המכשיר<sup>[9]</sup>

- 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, טכנולוגית 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 צירלס סנדרס פירס תיאר במכתב איך מכונות יכולות לפעול בעצמן עם שימוש בהגיון בוליאני. [10] 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 המחשב[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 משומש כמבנה מעגל חשמלי דיגיטלי.<sup>[7]</sup> אך היום גם טכנולוגיית CMOS נחשבת לפחות יעילה בניצול אנרגיה, ככל שהדרישות למדדי איכות המעגל החשמלי גדלות.<sup>[6]</sup>

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 וחישובי 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 משומש 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 וחישובי 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

ענבל סטנגר ונועם רוקניאן, מומחי עיצוב שבבים, בנו מעגלים חשמליים לא סטנדרטיים. מעגלים לא סטנדרטיים הינם מעגלים בעלי תכונות עיצוב שונות מאלו הנפוצות כיום.<sup>[12]</sup> 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).<sup>[3]</sup> מעבר לקירור, המעגלים גם יחקרו בטמפרטורות קיצוניות גבוהות של 90 מעלות צלזיוס ומעלה, על מנת לראות את עמידותם בטווח רחב של תנאים.<sup>[11]</sup>

### 3. בדיקות תפקוד בסיסיות - עבודה ברמות הספק לא אידיאליות

סיקור איכות המעגלים במתחים שונים 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 והמתחים השונים, 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

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
- [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