

# מעבדה במבוא למעגלים

## דוח 5

**The CMOS Inverter**

שםות המגישיים + ת"ז:

רותם סילם | 206663437

עדי גryn | 324965946

תאריך הגשה:

22\05\2025

$$G = 7+6=13$$

$$V_{DD} = 1.5 + (G \bmod 10)/10 \Rightarrow V_{DD} = 1.8v$$

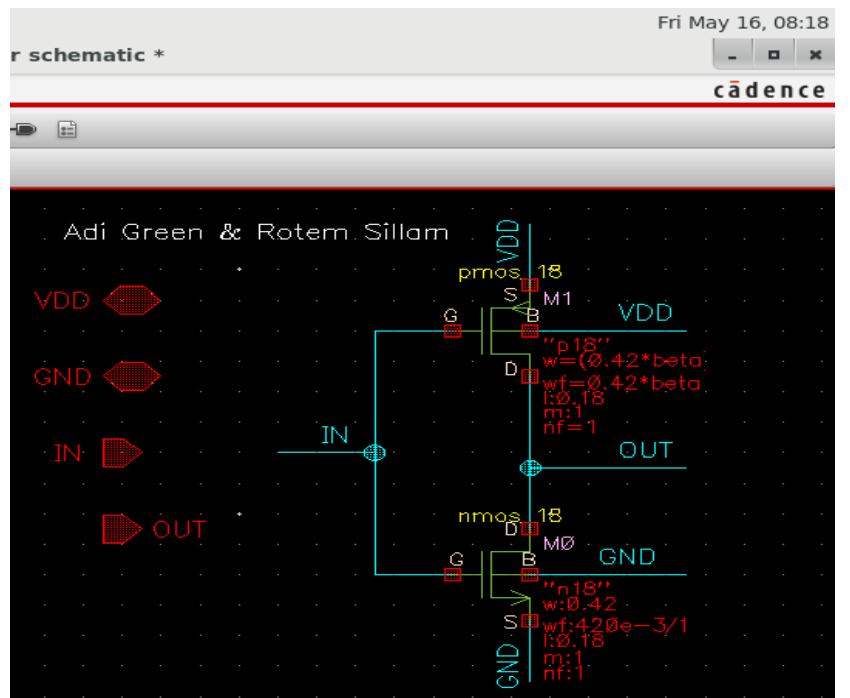
$$V_m = V_{DD}/2 = 0.9v$$

1. The last example in the booklet was finding  $V_m$  of an inverter. Simulate the circuit and find the  $\beta$  value which will derive  $V_m \approx V_{DD}/2$ . Use the Specifications as you learned in Lab 4. Explain the results.

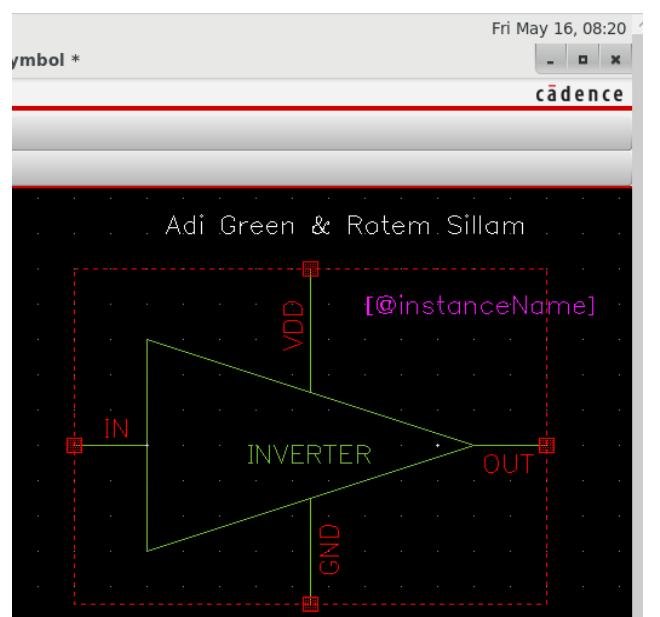
פתחנו תיקייה בשם "5Lab", ואז cell view בשם "Inverter".

צרכנו את המגל של המהף.

לשים לב כי הגדרנו את הפרמטר של  $\beta$  בטראנזיסטור של pmos. הגדרנו שה-finger width שווה ל- $\beta * 0.42$  כפי שנאמר בסרטון.

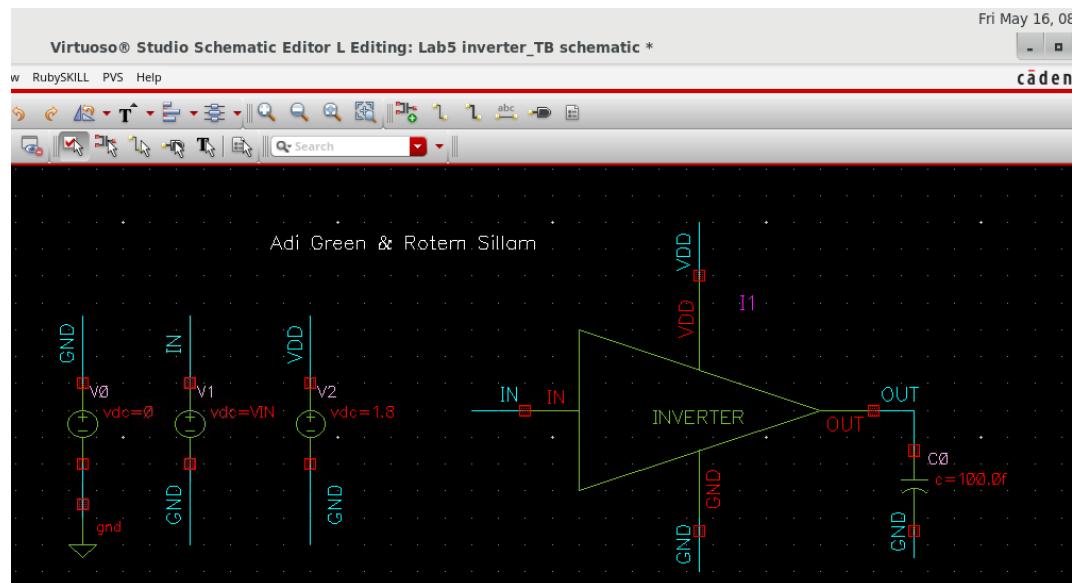


לאחר מכן, בנו symbol למעגל:



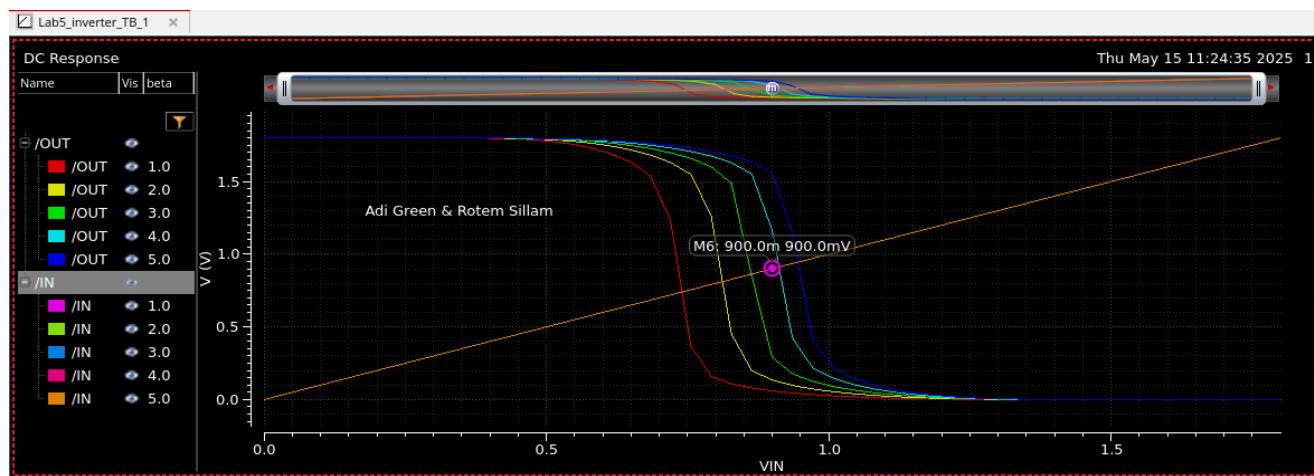
יצרנו test bench וקרנו לו "Inverter\_TB".

הוסףנו את ה-symbol של המהף, הגדרנו מתחים, הגדרנו ש- $V_{DD}=1.8V$  כפי שיצא בחישוב של המקרא שלנו. הוסףנו קבל שהגדרנו את קיבולו להיות  $1\text{ pF}$  (לפי הנאמר בסרטון).



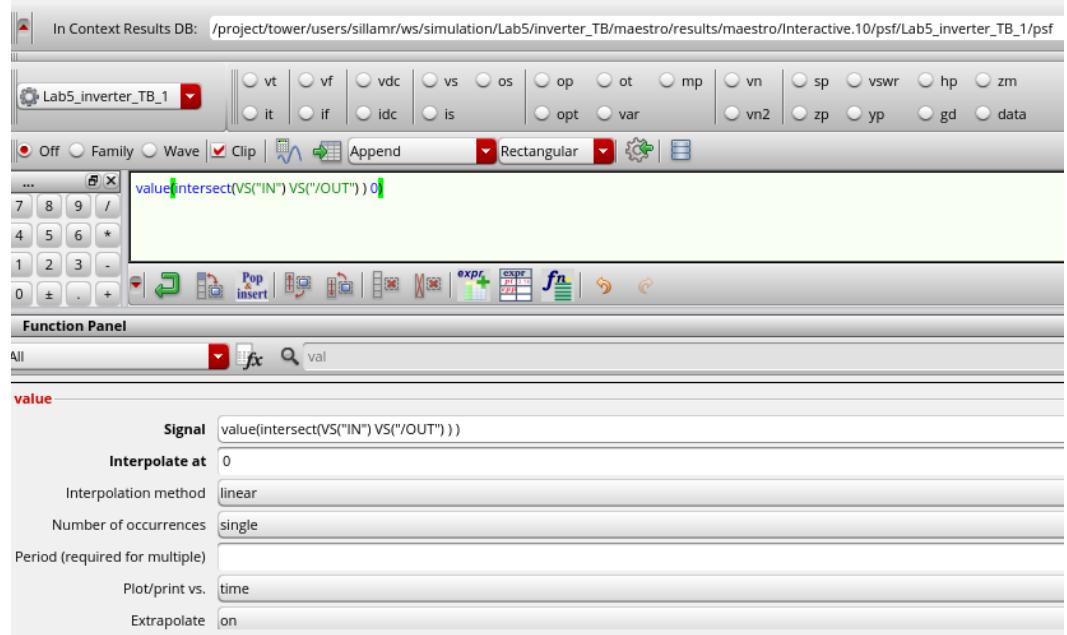
הגדרנו סימולציה על המתח  $\text{Ch}_0$  (אנליה של dc) כאשר שהוא משתנה 0 וולט ל-  $-V_{DD} = -1.8V$ , הגדרנו את המתח  $\text{Ch}_0$  להיות בעל ערך דיפולטיבי של 1 וולט. הגדרנו את beta להיות  $1:1.5$ , קלומר מ-1 עד 5 עם קבועות של 1 כך שנקבל את העקומות של beta כאשר היא שווה לערכים: 1,2,3,4,5.

יצרנו רצאה של הסימולציה על 2 גرافים, אחד הוא  $V_{out}$  כתלות ב- $\text{Ch}_0$  (שבו ניתן לראות את השינוי של beta), והשני הוא  $\text{Ch}_0$  כתלות ב- $\text{Ch}_{IN}$  (בו beta לא משתנה) על מנת שנוכל לבדוק עבור איזה beta מתקיים ש-  $V_m = V_{DD}/2 = 0.9V$ . ניתן לראות כי אנו מקבלים ערך זה עבור beta בתוווח הערכים בין 3 ל-4.



נרצה לחשב ערך זה במדוייק באמצעות הורטון, כפי שמפורט בסרטון ובקובץ booklet של Lab 5. השמשנו בפונקציה `intersect` שמוצאת את הקויה שבה  $V_{in}=V_{out}$ , ובאמצעות הפקודה `value` קיבלנו את הערך של קויה זו.

לבסוף לחצנו על הגלגל שניים כדי לזרף אותה להרצה שלנו:



- ראיינו בהרצה ואנו בגרף הקודם, שהערך 0.9 הוא בקירוב בין הערך  $\beta$  של 3 ל 4.7. הרצנו וקיבלו את ערכי `value` הבאים כאשר עבור  $\beta=3.7=\beta$  בין 3.7 ל 3.8 נקבל ערכים סבירים (שזה 0.9 עבורי נרצה למצוא את ה  $\beta$ ).

Point	Test	Output	Nominal	Spec	Weight	Pass/Fail
Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter
<b>Parameters: <math>\beta=3</math></b>						
1	Lab5_inverter_T...	/OUT				
1	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	863.2m			
<b>Parameters: <math>\beta=3.1</math></b>						
2	Lab5_inverter_T...	/OUT				
2	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	870.7m			
<b>Parameters: <math>\beta=3.2</math></b>						
3	Lab5_inverter_T...	/OUT				
3	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	876.3m			
<b>Parameters: <math>\beta=3.3</math></b>						
4	Lab5_inverter_T...	/OUT				
4	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	880.8m			
<b>Parameters: <math>\beta=3.4</math></b>						
5	Lab5_inverter_T...	/OUT				
5	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	884.7m			
<b>Parameters: <math>\beta=3.5</math></b>						
6	Lab5_inverter_T...	/OUT				
6	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	888.6m			
<b>Parameters: <math>\beta=3.6</math></b>						
7	Lab5_inverter_T...	/OUT				
7	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	892.8m			
<b>Parameters: <math>\beta=3.7</math></b>						
8	Lab5_inverter_T...	/OUT				
8	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	897.7m			
<b>Parameters: <math>\beta=3.8</math></b>						
9	Lab5_inverter_T...	/OUT				
9	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	903.6m			
<b>Parameters: <math>\beta=3.9</math></b>						
10	Lab5_inverter_T...	/OUT				
10	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	908.3m			
<b>Parameters: <math>\beta=4</math></b>						
11	Lab5_inverter_T...	/OUT				
11	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	912.2m			

הקטנו את טווח הערכים של beta כך שנבדוק את הערכים בין 3.7 ל-3.8 בקפיצות של 0.02, וזאת על מנת שנמצא את הערך הייתר מדויק שיתן ערך של 0.9 וולט.

Point	Test	Output	Nominal	Spec	Weight	Pass/Fail
Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter
Parameters: beta=3.7						
1	Lab5_inverter_T...	/OUT				
1	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	897.7m			
Parameters: beta=3.72						
2	Lab5_inverter_T...	/OUT				
2	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	898.8m			
Parameters: beta=3.74						
3	Lab5_inverter_T...	/OUT				
3	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	900m			
Parameters: beta=3.76						
4	Lab5_inverter_T...	/OUT				
4	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	901.3m			
Parameters: beta=3.78						
5	Lab5_inverter_T...	/OUT				
5	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	902.4m			
Parameters: beta=3.8						
6	Lab5_inverter_T...	/OUT				
6	Lab5_inverter_T...	value(intersect(...	903.6m			

כפי שנitin לראות, על מנת לקבל 0.9 וולט, ערכה של beta היא בקירוב 3.74.

לסיום, כפי שלמדנו בהרצאה, beta הוא ערך חסר יחידות שננותן את היחס בין רוחב לאורך הטרנזיסטור של סוסם ל-sosם:

$$\beta = \frac{\left(\frac{W_p}{L_p}\right)}{\left(\frac{W_n}{L_n}\right)}$$

קטן Beta	גדול Beta
<p>SosN חזק יותר הוא מסוגל להעביר זרם גדול יותר עברו אותו מתח Vin (bihch ל-beta גדול יותר).</p> <p>על מנת לקבל את נקודת האיזון <math>V_m</math>, צריך ש-SOS NMOS יקבל מתח <math>V_{in}</math> גבוה יותר על מנת שהוא יזרום זרם דומה לזה של PMOS, אך נקודת האיזון מתרחשת עברו <math>V_{in}</math> גבוה יותר.</p>	<p>Pmos חזק יותר הוא מסוגל להעביר זרם גדול יותר עברו אותו מתח Vin (bihch ל-beta קטן יותר).</p> <p>על מנת לקבל את נקודת האיזון <math>V_m</math>, צריך ש-NMOS יקבל מתח <math>V_{in}</math> גבוה יותר על מנת שהוא יזרום זרם דומה לזה של PMOS, שכן נקודת האיזון מתרחשת עברו <math>V_{in}</math> גבוה יותר.</p>

לסיום:  
 המוביליות של החורים בסוסם נמוכה מהמוביליות של האלקטרונים בסוסם(Clomar Pmos). יעביר פחות זרם עברו אותו מתח Vin  
 עברו אותו גודל טרנזיסטוריים.  
 על מנת "לחזק" את הסוסם נוכל להגדיל את הערך של beta, כלומר להגדיל את הרוחב של הסוסם ביחס לש-הסוסם.  
 אנחנו רצים לקבל מהפרק מאוזן, כלומר שהסוסם והסוסם יהיו חזקים באותה מידת, ויעבירו זרם שווה בגודלו.  
 כדי לקבל זאת אנחנו צריכים beta עבור  $V_{DD}/2 = V_m$  כאשר אנו מדירים את  $V_{out} = V_{in}$ .

**2. Set  $\beta = 2$ . Simulate the Propagation Delay ( $tpd$ ) as a function of VDD (from 0.1V to V DD with steps of 0.1V ). Explain the effect of VDD on tpd based on the results. Does the gate works for every VDD? If not, explain.**

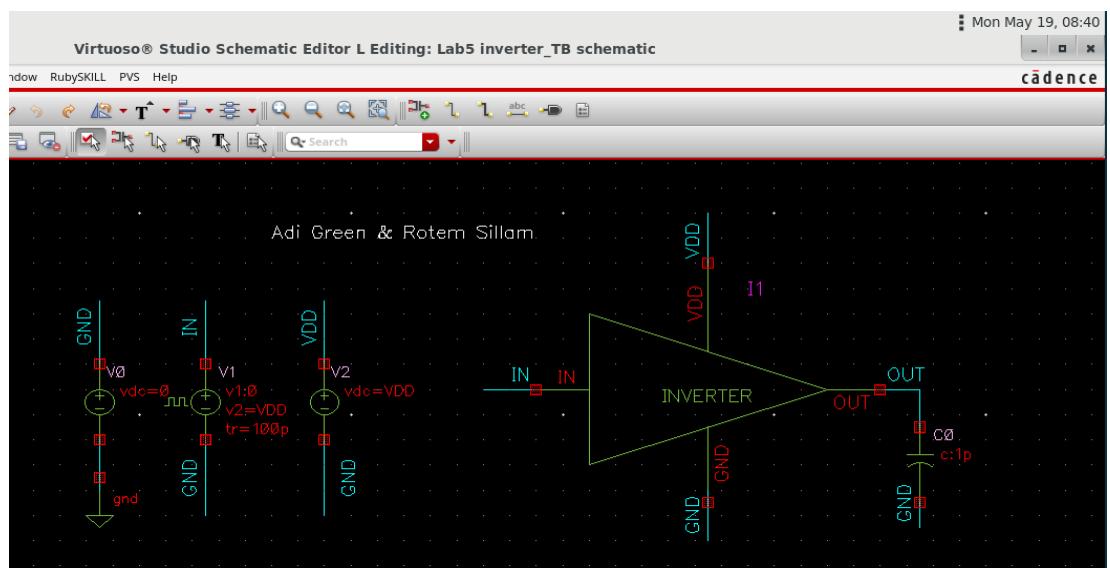
שנינו את מתח הכניסה להיות מסוג מדרגה.

בחרנו ערכים אלו לפי booklet:

period = 100ns

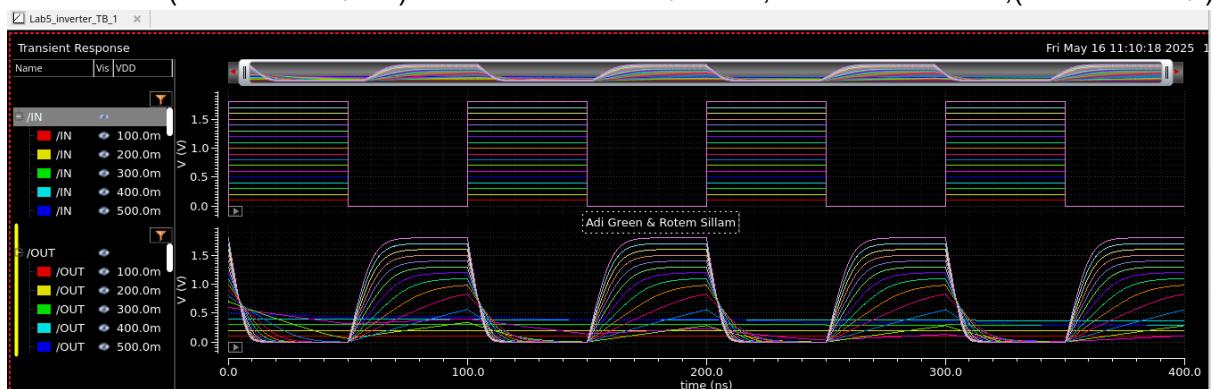
fall&rise time = 100ps

load capacitance = 1pF



עשינו אנהליזת tran, על מנת לראות את השינוי של  $V_{out}$  כתלות בשינוי בזמן של  $V_{in}$ , והגדכנו שמשך זמן הריצה הוא 400ns. שנינו את הערכים של ה-VDD מ-0.1 ל-1.8v, בקפיצות של 0.1 v כנדרש.

ניתן לראות את פעלות הפעולה inverttern בתרמוה של מטעה כך שאם  $V_{in}$  הוא ערך VDD כלשהו,  $V_{out}$  נראה ירידה לערך 0 v בהתאם (עם דילוי מסוים), וכך אשר  $V_{in}$  שווה 0v, נראה עלייה של  $V_{out}$  בהתאם (גם עם דילוי מסוים).

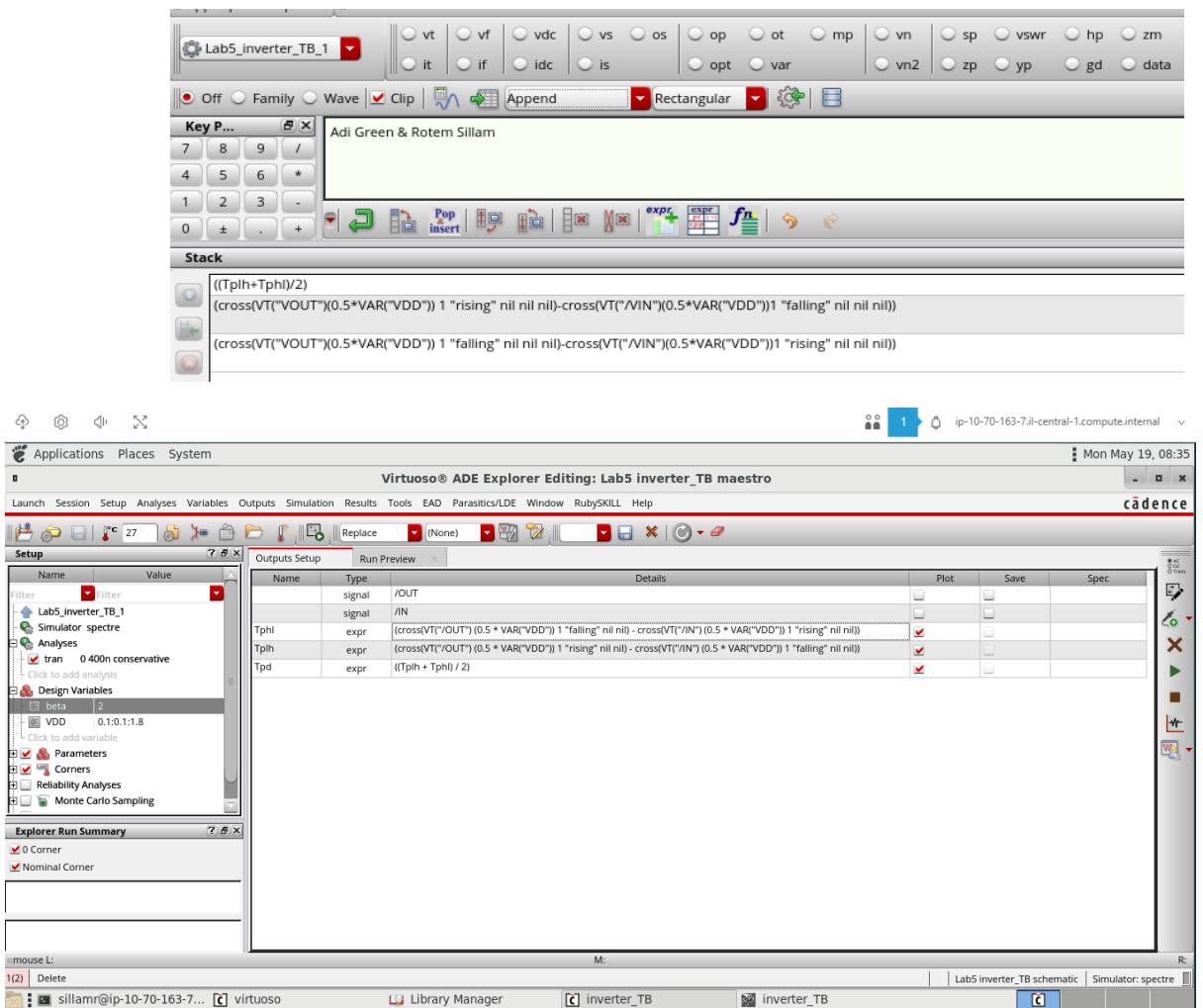


כעת, על מנת למצוא את  $tpd$  השתמשנו בcalculator, שם שמננו את המשוואות הנთונות ב-block, ועבור Tphl, ועבור  $Tpd = (Tphl + Tphl)/2$  כאשר  $Tphl$  תמונה מהבוקלט:

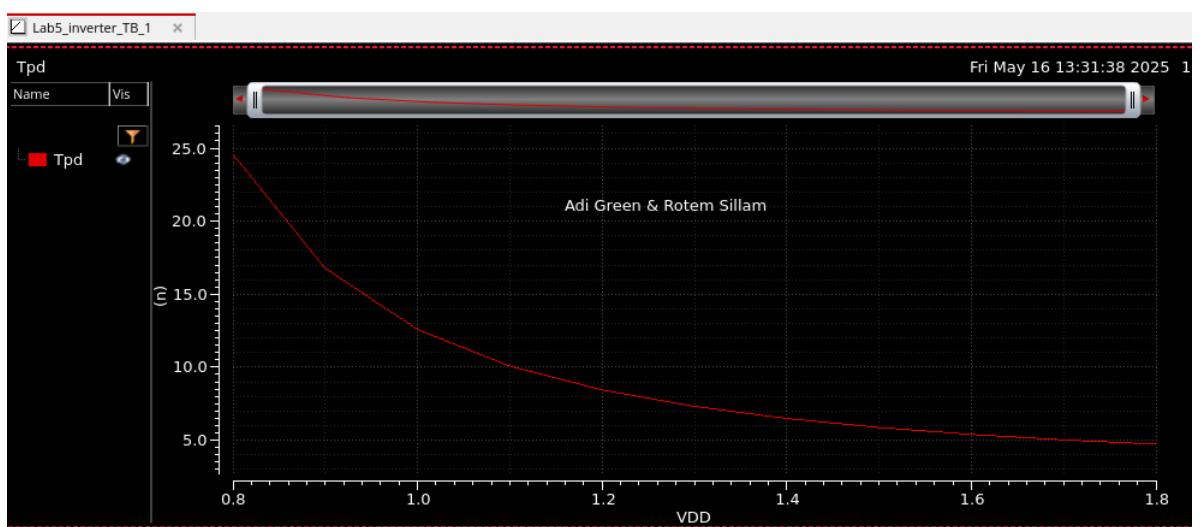
Name	Type	Details
/IN	signal	
/OUT	signal	
Tphl	expr	(cross(VT("/OUT") (0.5 * VAR("VDD")) 1 "falling" nil nil) - cross(VT("/IN") (0.5 * VAR("VDD")) 1 "rising" nil nil))
Tphl	expr	(cross(VT("/OUT") (0.5 * VAR("VDD")) 1 "rising" nil nil) - cross(VT("/IN") (0.5 * VAR("VDD")) 1 "falling" nil nil))
Tpd	expr	((Tphl + Tphl) / 2)

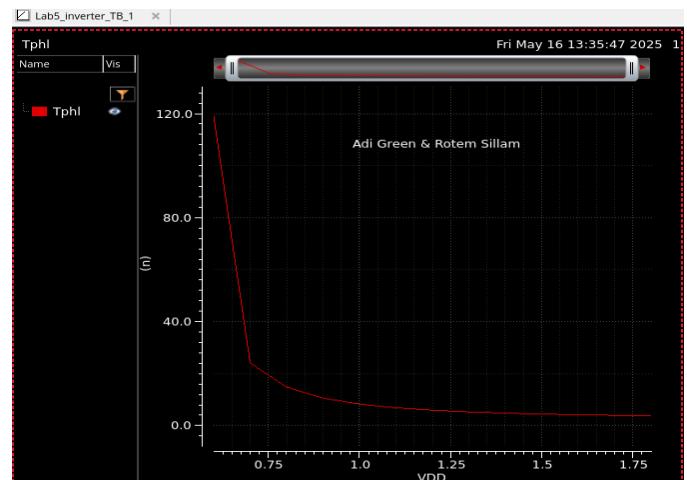
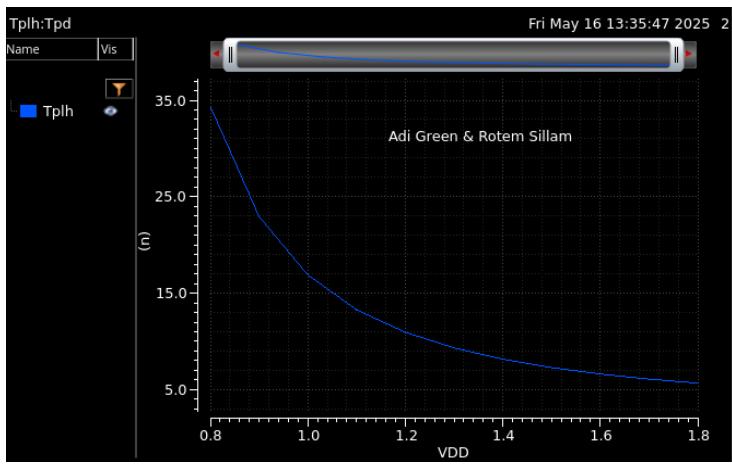
Figure 3.7: Propagation Delay Expressions

לאחר מכן לחצנו בcalculator על גלגל השינויים על מנת ליבא את הנוסחה לאנליה שולנו.  
הגדרנו לכל נוסחה צאת שם על מנת שנוכל לשימושו בחישוב הפקט.



לאחר מכן הריצנו את האנליה על הפרמטרים המופיעים בתמונה הקודמת, כך שקיבלנו את הגראפים והערכיכם הבאים:





Point	Test	Output	Nominal
Filter	Filter	Filter	Filter
Parameters: VDD=100m			
1	Lab5_inverter_TB_1	/OUT	
1	Lab5_inverter_TB_1	/IN	
1	Lab5_inverter_TB_1	Tphl	eval err
1	Lab5_inverter_TB_1	Tplh	eval err
1	Lab5_inverter_TB_1	Tpd	eval err
Parameters: VDD=200m			
2	Lab5_inverter_TB_1	/OUT	
2	Lab5_inverter_TB_1	/IN	
2	Lab5_inverter_TB_1	Tphl	eval err
2	Lab5_inverter_TB_1	Tplh	eval err
2	Lab5_inverter_TB_1	Tpd	eval err
Parameters: VDD=300m			
3	Lab5_inverter_TB_1	/OUT	
3	Lab5_inverter_TB_1	/IN	
3	Lab5_inverter_TB_1	Tphl	eval err
3	Lab5_inverter_TB_1	Tplh	eval err
3	Lab5_inverter_TB_1	Tpd	eval err
Parameters: VDD=400m			
4	Lab5_inverter_TB_1	/OUT	
4	Lab5_inverter_TB_1	/IN	
4	Lab5_inverter_TB_1	Tphl	eval err
4	Lab5_inverter_TB_1	Tplh	eval err
4	Lab5_inverter_TB_1	Tpd	eval err
Parameters: VDD=500m			
5	Lab5_inverter_TB_1	/OUT	
5	Lab5_inverter_TB_1	/IN	
5	Lab5_inverter_TB_1	Tphl	eval err
5	Lab5_inverter_TB_1	Tplh	eval err
5	Lab5_inverter_TB_1	Tpd	eval err
Parameters: VDD=600m			
6	Lab5_inverter_TB_1	/OUT	
6	Lab5_inverter_TB_1	/IN	
6	Lab5_inverter_TB_1	Tphl	118.9n
6	Lab5_inverter_TB_1	Tplh	eval err
6	Lab5_inverter_TB_1	Tpd	eval err
Parameters: VDD=700m			
7	Lab5_inverter_TB_1	/OUT	
7	Lab5_inverter_TB_1	/IN	
7	Lab5_inverter_TB_1	Tphl	24.13n
7	Lab5_inverter_TB_1	Tplh	eval err
7	Lab5_inverter_TB_1	Tpd	eval err
Parameters: VDD=800m			
8	Lab5_inverter_TB_1	/OUT	
8	Lab5_inverter_TB_1	/IN	
8	Lab5_inverter_TB_1	Tphl	14.79n
8	Lab5_inverter_TB_1	Tplh	34.37n
8	Lab5_inverter_TB_1	Tpd	24.58n
Parameters: VDD=900m			
9	Lab5_inverter_TB_1	/OUT	
9	Lab5_inverter_TB_1	/IN	
9	Lab5_inverter_TB_1	Tphl	10.59n
9	Lab5_inverter_TB_1	Tplh	22.94n
9	Lab5_inverter_TB_1	Tpd	16.77n

Parameters: VDD=1				
10	Lab5_inverter_TB_1	/OUT		
10	Lab5_inverter_TB_1	/IN		
10	Lab5_inverter_TB_1	Tphl		8.266n
10	Lab5_inverter_TB_1	Tplh		16.9n
10	Lab5_inverter_TB_1	Tpd		12.58n
Parameters: VDD=1.1				
11	Lab5_inverter_TB_1	/OUT		
11	Lab5_inverter_TB_1	/IN		
11	Lab5_inverter_TB_1	Tphl		6.874n
11	Lab5_inverter_TB_1	Tplh		13.28n
11	Lab5_inverter_TB_1	Tpd		10.08n
Parameters: VDD=1.2				
12	Lab5_inverter_TB_1	/OUT		
12	Lab5_inverter_TB_1	/IN		
12	Lab5_inverter_TB_1	Tphl		5.937n
12	Lab5_inverter_TB_1	Tplh		10.95n
12	Lab5_inverter_TB_1	Tpd		8.442n
Parameters: VDD=1.3				
13	Lab5_inverter_TB_1	/OUT		
13	Lab5_inverter_TB_1	/IN		
13	Lab5_inverter_TB_1	Tphl		5.296n
13	Lab5_inverter_TB_1	Tplh		9.331n
13	Lab5_inverter_TB_1	Tpd		7.313n
Parameters: VDD=1.4				
14	Lab5_inverter_TB_1	/OUT		
14	Lab5_inverter_TB_1	/IN		
14	Lab5_inverter_TB_1	Tphl		4.804n
14	Lab5_inverter_TB_1	Tplh		8.162n
14	Lab5_inverter_TB_1	Tpd		6.483n
Parameters: VDD=1.5				
15	Lab5_inverter_TB_1	/OUT		
15	Lab5_inverter_TB_1	/IN		
15	Lab5_inverter_TB_1	Tphl		4.446n
15	Lab5_inverter_TB_1	Tplh		7.289n
15	Lab5_inverter_TB_1	Tpd		5.868n
Parameters: VDD=1.6				
16	Lab5_inverter_TB_1	/OUT		
16	Lab5_inverter_TB_1	/IN		
16	Lab5_inverter_TB_1	Tphl		4.169n
16	Lab5_inverter_TB_1	Tplh		6.62n
16	Lab5_inverter_TB_1	Tpd		5.394n
Parameters: VDD=1.7				
17	Lab5_inverter_TB_1	/OUT		
17	Lab5_inverter_TB_1	/IN		
17	Lab5_inverter_TB_1	Tphl		3.949n
17	Lab5_inverter_TB_1	Tplh		6.094n
17	Lab5_inverter_TB_1	Tpd		5.022n
Parameters: VDD=1.8				
18	Lab5_inverter_TB_1	/OUT		
18	Lab5_inverter_TB_1	/IN		
18	Lab5_inverter_TB_1	Tphl		3.77n
18	Lab5_inverter_TB_1	Tplh		5.676n
18	Lab5_inverter_TB_1	Tpd		4.723n

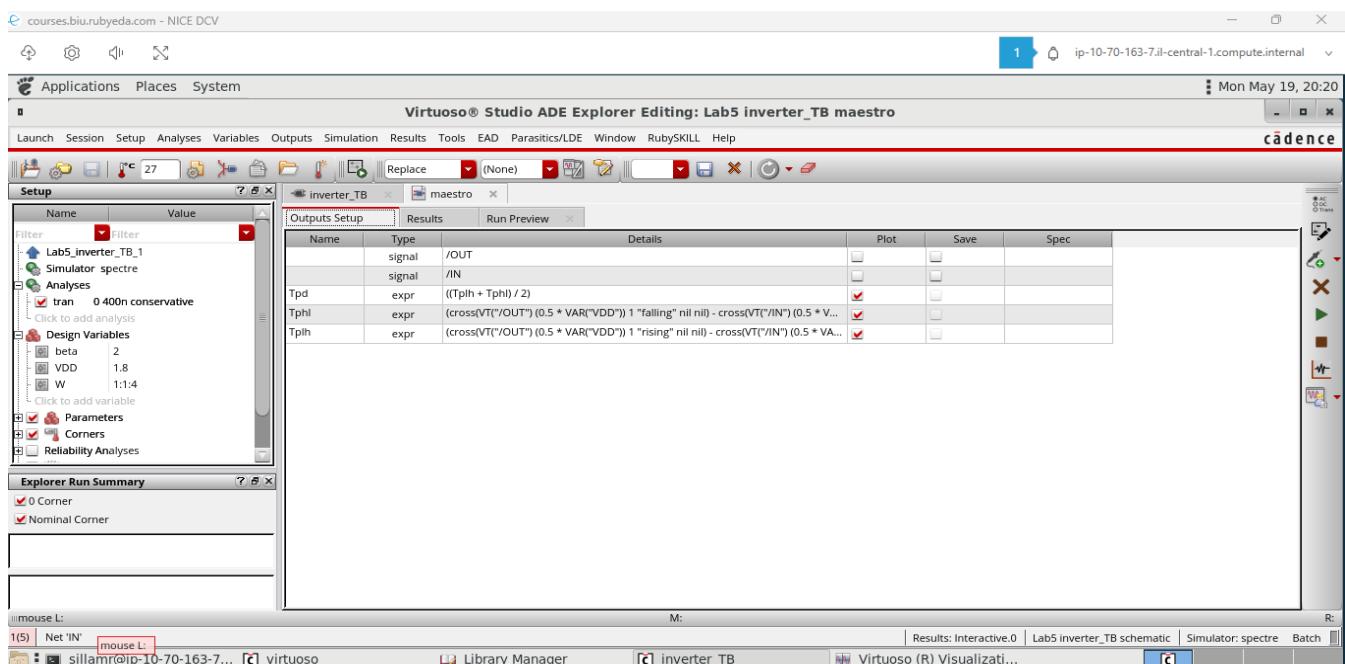
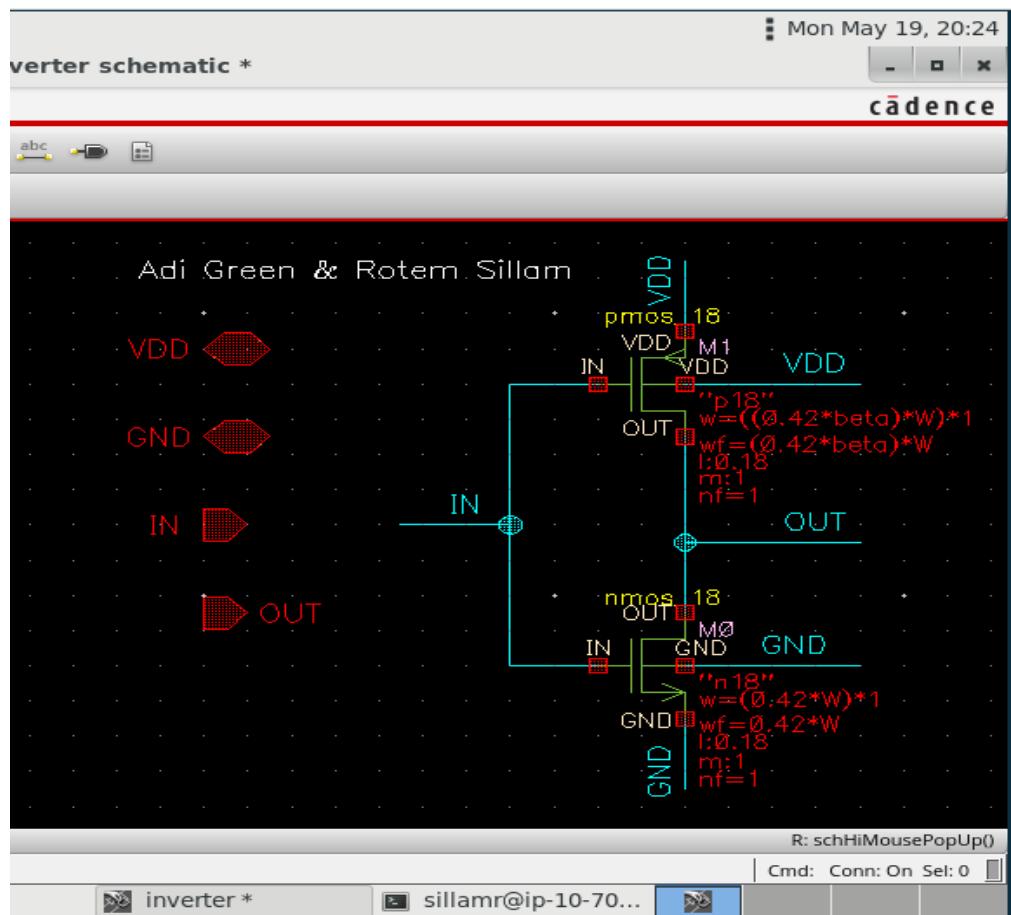
ניתנו:

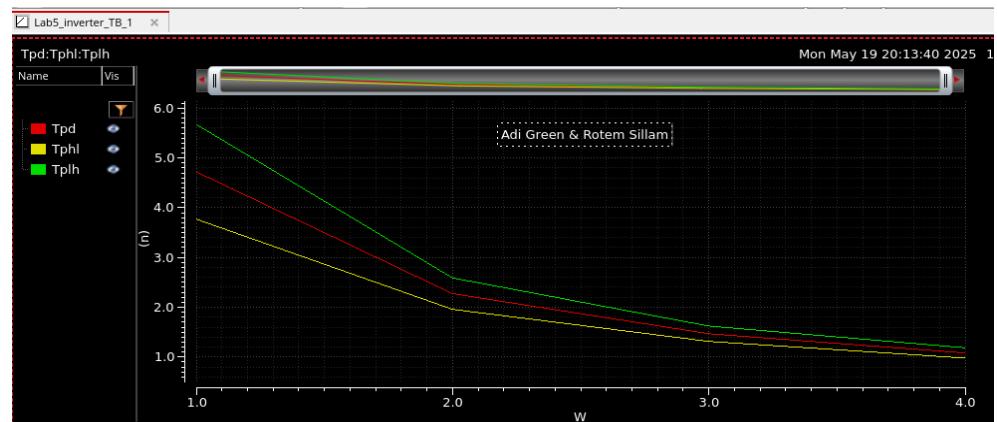
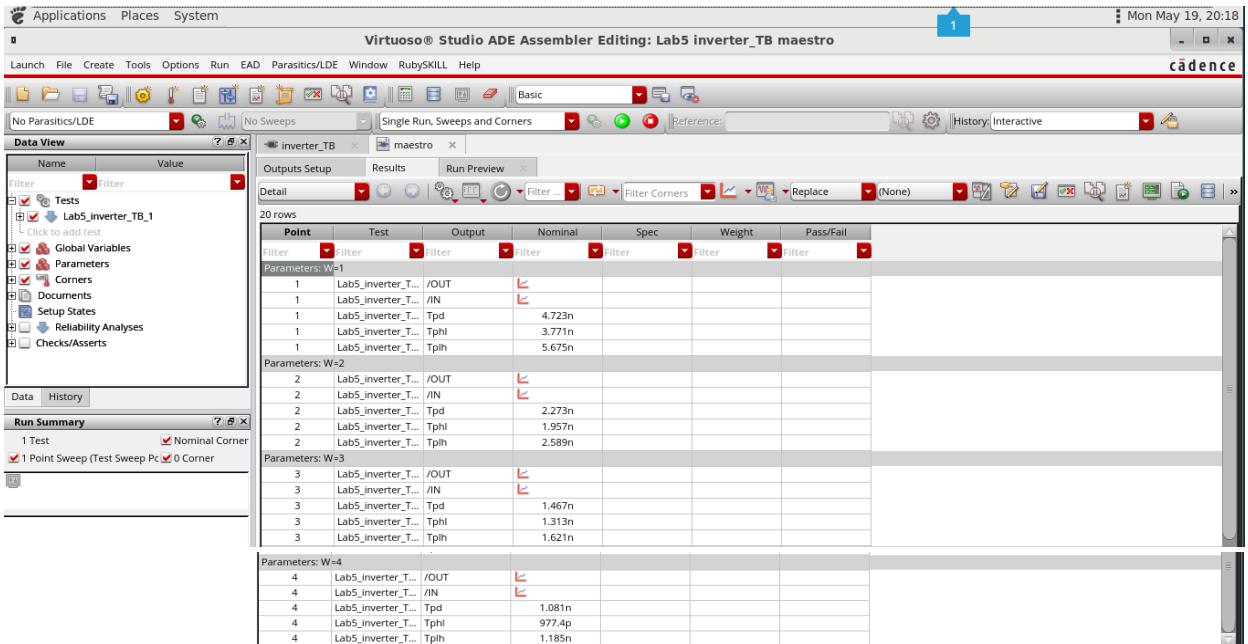
עד למתח  $VDD=600mV$ , אנו מקבלים error עבור הזמןנים, ולאחר מכן מקבלים רק את הערך של  $t_{phl}$ . כאשר מתח ה- $VDD$  עולה, הזמןנים  $t_{phl}, t_{pd}, t_{phl}$  יורדים.

- **זמן  $t_{phl}$**  - זהו הזמן שלוקח ליציאה לעלות מתח נמוך למתח גבוה. זהו ההפרש בין הזמן שלוקח ל- $V_{out}$  לעומת הזמן שלוקח ל- $V_{in}$  עבור אט 50% כאשר הוא עולה מתח נמוך לגובה, לבין הזמן שלוקח לחוזק  $V_{in}$  עבור אט 50% כאשר הוא יורדת מתח גבוה לנמוך.
  - **זמן  $t_{phl}$**  - זהו הזמן שלוקח ליציאה לרדת מתח גבוה למתח נמוך. זהו ההפרש בין הזמן שלוקח ל- $V_{out}$  לעומת הזמן שלוקח לחוזק  $V_{in}$  עבור אט 50% כאשר הוא יורדת מתח גובה לנמוך, לבין הזמן שלוקח לחוזק  $V_{in}$  עבור אט 50% כאשר הוא עולה מתח נמוך לגובה.
  - את החישוב הזה נעשה בעזרת הפונקציה שהגדרכנו עבורי `cross`, אשר היא משתמשת בפונקציית `calculator`, המחזירה את הזמן שבו האות חוצה את הערך שהגדרכנו לו (אנחנו הגדרנו  $0.5*VDD$ ), ואת ציוונו (כיוון עלייה או ירידת בהתאם לנדרש).
  - על מנת לקבל את  $t_{pd}$  נעשה ממוצע של שני הפרמטרים הללו ( $t_{phl}, t_{pd}$ ).
- כל ה- $VDD$  עולה, זרם גדול יותר עובר בסומן, הקבל נתען מהר יותר והזמןים  $t_{phl}$  ו- $t_{pd}$  מתקצרים, ובעקבותם - הממוצע ( $t_{pd}$ ) מתקצר.
- עבור ערכים נמוכים של  $VDD$ , המתח במנוצץ לא מגיע למתח  $0.9V$  ולכן מקבל `error`. זה קורה בגלל שהמתה  $V_{out}$  לא עבר את רמת המתח שהיא 50%  $VDD$  אשר נדרש לחישוב הפונקציות של  $t_{phl}$  ו- $t_{pd}$ .
- בנוסף נראה שעבור זמני מסויימים מקבל ערכים עבור  $t_{phl}$ , אבל עבור  $t_{pd}$  לא מקבל ערכים. הסיבה היא ש- $t_{phl}$  מושפע מ- $Nmos$ , ועבור  $\beta=2$  חזק יותר מ- $Pmos$  ולכן הוא צריך  $V_{dd}$  יותר נמוך על מנת להגיע למתח  $0.9V$ .
- נשים לב כי אנחנו יודעים ש- $Nmos$  חזק יותר עבור  $\beta$  זאת, לאחר שבסאלת 1 רأינו כי המצב המאזן ( $0.9V$ ) בין הרכיבים הוא כאשר  $\beta=3.74$ .
- כאשר  $\beta=2$ , ככלומר קטן מה מצב המאזן, מקבל ש- $Nmos$  יותר חזק מ- $Pmos$ , כפי שהסבירנו בשאלת 1.

3. Simulate the tpd as a function of transistor's width (NMOS and PMOS, increase it from 1X to 4X for both of them simultaneously). Explain the results

נקבע את  $VDD$  על 1.8 (בהתאם למתח שלנו).  
 התבקשו לשנות את רוחב הטרנזיסטורים פי 1 עד פי 4 מערכם המקורי. ולכן, הגדרנו משתנה  $W$  שאוטו הכפלנו ב- Finger Width של mosfets (שאותם הגדרנו בסעיף 1).  
 נריצ' את הסימולציה באנלייזה של tran (עם אותן הגדירות של סעיף 2), על מנת לראות את השינוי של היחס  $tph_{l,h}$  ביחס ל-  $tph_d$  מ-1 עד 4 בקביעות של 1.  
 השארנו את ערכיה של  $\beta$  להיות קבוע על 2, כמו בסעיף הקודם.





זמן ה- $t_{phl}$  - זה הזמן שלוקח לייצאה לעלות מתח נמוך למתח גבוה.

זמן ה- $t_{phh}$  - זה הזמן שלוקח לייצאה לרדת מתח גבוה למתח נמוך.

על מנת לקבל את ה- $t_{pd}$  נעשו ממצוא של שני הפרמטרים האלו ( $t_{phl}$ ,  $t_{phh}$ ). נראה זאת באמצעות העקומה האדומה בגרף.

אנחנו רואות בגרף (ובטבלה עם הנתונים המדוייקים) שהזמן  $t_{pd}$  יותר ארוך יותר מהזמן  $t_{phh}$ . זה קורה בגלל המבנה של cmos.

כדי שהיציאה תעלה (low to high) צריך שהמתח יתעורר מתח גבוה על מנת לטעון את הקבל - Pmos אחראי על פעולה זו.

כדי שהיציאה תרד (high to low) צריך שהקбл יפרק למתח אדמה - את זה עשו Nmos. לעומת זו הזרם בסומס P הוא של חורים, שהMOVILיות שלהם נמוכה יותר מאשר המבקרים את הזרם בסומס. ככלומר טוען את הקבל לפחות יותר וכן  $t_{phl}$  יותר ארוך מאשר  $t_{phh}$ . ניתן לראות זאת בגרף (הגרף הירוק של  $t_{phl}$ , גובהו יותר מהגובה של  $t_{phh}$ ).

ניתן לראות ש ככל שרוחב הטרנזיסטורים יותר גדול, ככלומר W יותר גדול, הזמן מתקצרים. מכיוון שעובר יותר זרם.

ניתן לראות במשוואת  $I_{DS} = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2$  כאשר מגדילים את הרוחב W הזרם גדל ביחס ישיר.

$$t_{phL} \approx t_{phH} \approx \frac{C_{load} \Delta V}{I_{DS,avg}}$$

ניתן לראות במשוואת  $t_{phL} \approx t_{phH} \approx \frac{C_{load} \Delta V}{I_{DS,avg}}$  שכאש הזרם גדול- הזמן  $t_{phl}$ ,  $t_{phh}$  קטנים, וכך המוצע שלהם שהינו ה-pdקטן אף הוא.

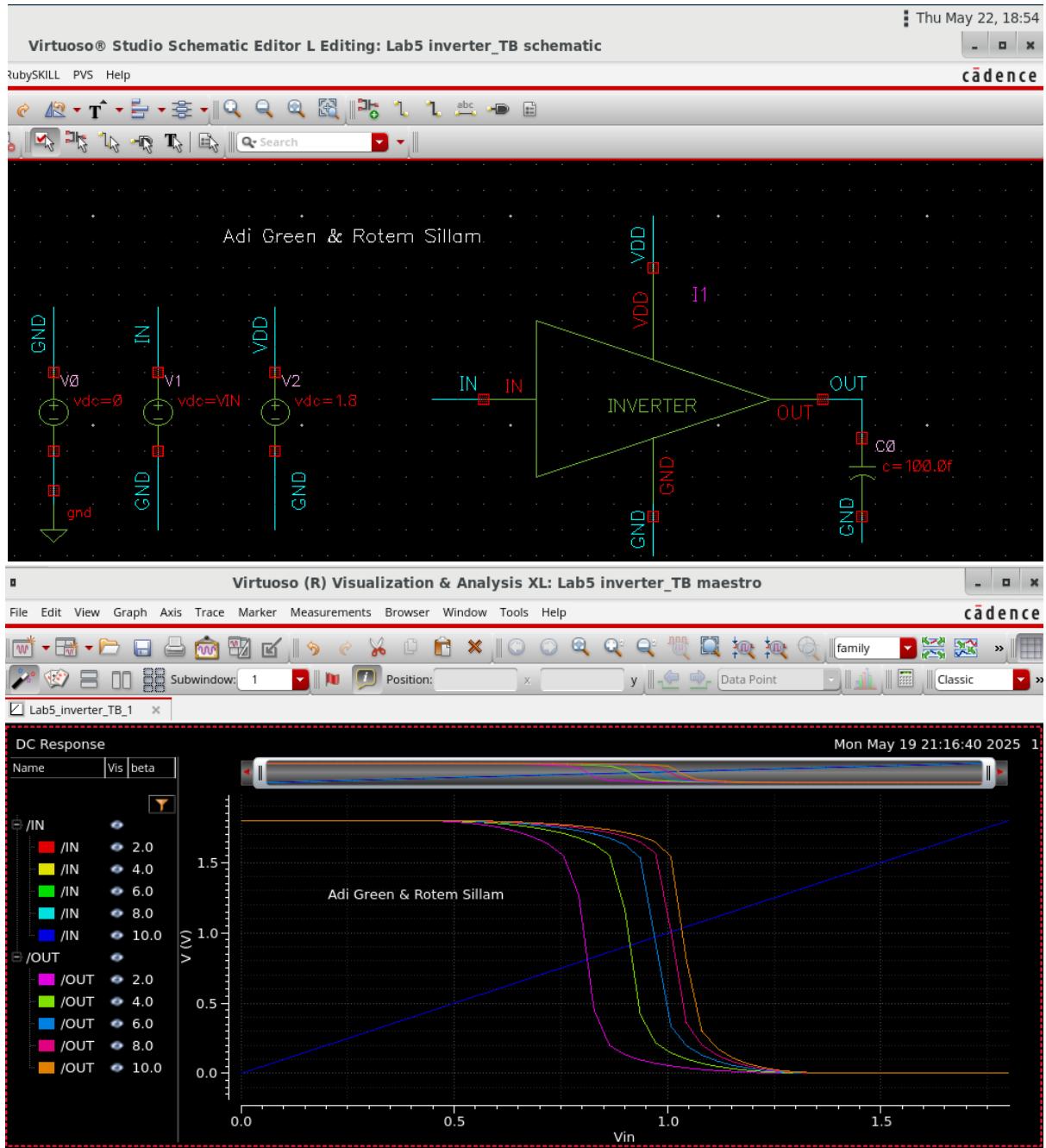
לסיכום, הטריז אוף כתוצאה מהגדלת W הוא:

יתרונות: זרם גובה יותר => טעינה/פריקה מהירה יותר של הקבל => זמן השהייה קטן יותר

חרסונות: שימוש בשטח שבב גדול יותר => יקר יותר לייצור.

4. Simulate VTC as a function of  $\beta$  (from 2 to 10 with steps of 2, for nominal VDD). Explain the results in terms of the Noise Margins (without calculations) and VM.

הזרנו את המעגל ההפוך  $\text{inverter}$  להגדרות כפ' שניינו בשאלת 1 כדי שנוכל להריץ סימולציה.  
הגדרכנו מתח כניסה DC כפרמטר  $V_{IN}$  והוא רצינו בסימולציה מ-0 עד  $VDD=1.8$  ננדרש.  
קיבענו מתח כניסה DC של המתח  $VDD$  ל-1.8.



• בנקודת  $V_{IN}$  מוגדר כי  $V_{OUT}=V_{IN}$

NM<sub>h</sub> - "Noise Margin high":  $NM_h = V_{OH} - V_{IH}$ .

NM<sub>l</sub> - "Noise Margin low":  $NM_l = V_{IL} - V_{OL}$ .

$NM = \min(NM_h, NM_l)$

$$\beta = \frac{\left(\frac{W_p}{L_p}\right)}{\left(\frac{W_n}{L_n}\right)}$$

ככל  $\beta_{\text{beta}}$  קטן NMOS חזק יותר, הוא מסוגל להעביר זרם גדול יותר מאשר מתח  $V_{\text{in}}$  כלשהו. על מנת לקבל את נקודת האיזון  $V_m$ , כולם רשהזרמים של NMOS והmos PMOS יתאוזנו, ציריך שNMOS יקבל מתח  $V_{\text{in}}$  נמוך יותר על מנת שהוא יזרם זרם דומה לזה של PMOS. וכך נקודת האיזון מתרחשת עבור  $V_{\text{in}} = V_{\text{out}}$  נמוך יותר ( $V_m = V_{\text{in}} = V_{\text{out}}$ ) – כלומר  $V_m$  קטן ככל  $\beta_{\text{beta}}$ . בגרף – נקודת האיזון היא נקודת החיתוך של הגרף  $V_{\text{in}}/V_{\text{out}}$  והגרף  $V_{\text{in}}/V_{\text{out}}$  גבוה יותר, ככל עבור  $\beta_{\text{beta}}$  גדול-PMOS חזק יותר, והוא דבר מתרחש רק הפור-כך ש-נקודת האיזון מתרחשת עבור  $V_{\text{in}}$  גבוה יותר, ככל  $V_m$  גדול ככל  $\beta_{\text{beta}}$  גדול.

בפועל נראה שככל  $\beta_{\text{beta}}$  קטנה, הנקודה  $V_m$  כאילוZZה ימינה ביחס עם הגרף.

### :Noise Margins

- ניתן לראות שככל  $\beta_{\text{beta}}$  גדול, שיפוע הגרף במעבר ממתח גובה לנמוך תלול יותר.
  - העבור  $\beta_{\text{beta}}$  שעוברת מתקבל  $V_m = \frac{V_{DD}}{2}$  מתקיים  $NM_h = NM_l = NM$  כפי שלמדו בהרצאה.
  - עבור  $\beta_{\text{beta}}$  שקטנה עם הזמן ( $\beta_{\text{beta}}$  Pmos נהייה יותר חזק Mosfet) מקבל:
- ניתן לראות מהגרף שעבור  $V_{IH}$  קטן, ולכן נוסחה זו  $V_{IH} - VIH = NM_h = VOL$ , מקבל  $NM_h$  גדול. בנוסף ניתן לראות מהגרף שכאשר  $V_{IL}$  גדול, ולכן נוסחה זו  $V_{IL} - VOL = NM_l = NM_l = NM$ , מקבל  $NM_l$  קטן.
- בזה  $NM_h > NM_l$
- ולכן מקבל מהנוסחה ( $NM = \min(NM_h, NM_l)$ )
- ולכן מקבל  $NM = NM_l$
- ולכן מקבל עבור יותר ערכיהם בחו"ן של "1" לוגי ערכי  $V_{\text{out}}$  של "0" לוגי (כלומר  $V_{DD}=1.8$ v). עבור פחות ערכיהם בחו"ן של "0" לוגי, מקבל ערכי  $V_{\text{out}}$  של "1" לוגי.

- עבור  $\beta_{\text{beta}}$  שגדלה עם הזמן ( $\beta_{\text{beta}}$  Pmos נהייה יותר חזק Mosfet) מקבל:
- לפי הגרף  $V_{IL}$  גדול, ולכן נוסחה זו  $VIH - V_{IH} = NM_h = NM_l$ , מקבל  $NM_h$  קטן. בנוסף ניתן לראות מהגרף  $V_{IL}$  גדול, ולכן נוסחה זו  $V_{IL} - VOL = NM_l = NM_l = NM$ , מקבל  $NM_l$  גדול.
- בזה  $NM_l > NM_h$
- ולכן מקבל מהנוסחה ( $NM = \min(NM_h, NM_l)$ )
- ולכן מקבל  $NM = NM_h$
- ולכן מקבל עבור יותר ערכיהם בחו"ן של "0" לוגי ערכי  $V_{\text{out}}$  של "1" לוגי (כלומר  $V_{DD}=1.8$ v). עבור פחות ערכיהם בחו"ן של "1" לוגי, מקבל ערכי  $V_{\text{out}}$  של "0" לוגי.