

מעבדה במבוא למעגלים

דוח 7

Simple Current mirror

שמות המגיבים + ת"ז:

רותם סילם | 206663437

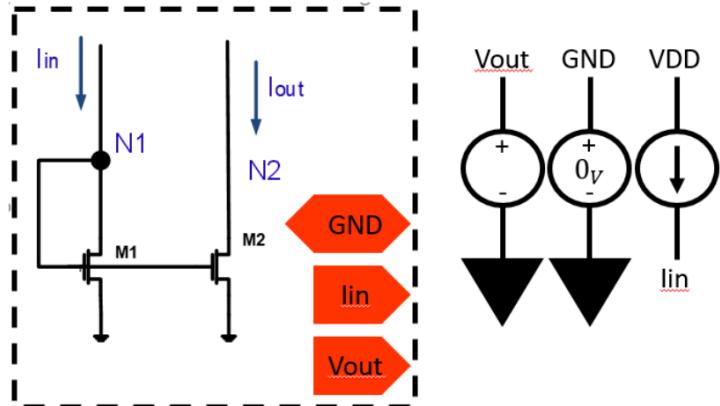
עדן גריין | 324965946

תאריך הגשה:

19.6.25

- Build simple current mirror as shown in the figure below:
- Place current source (idc) at input N1.
 - Place voltage source (vdc) at output N2.
 - The output voltage should be a parameter and will be swept during the DC simulation.
 - The output current can be measured either at the transistor drain or the voltage source.

עשינו מודל כמתבקש בשאלתך:



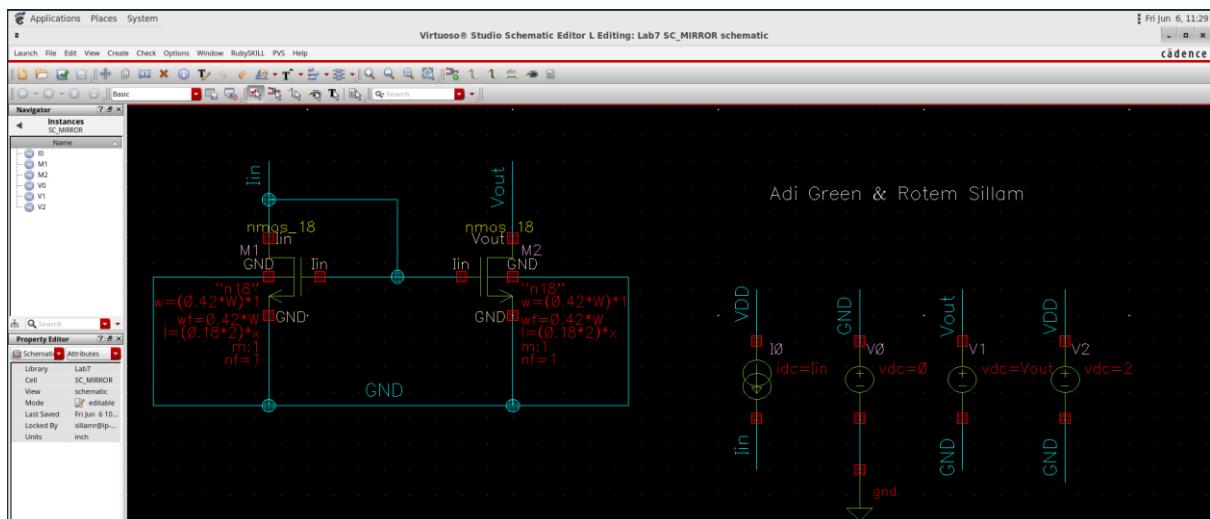
התבוקשנו להגדיר W ו-L להכפלת רוחב הטרנזיסטור ואורך הטרנזיסטור בהתאם.

ולכן הגדרנו:

$$Wf = 0.42 * W$$

(נתון שה- L המינימלי יהיה לפחות פי 2 מהערך הדיפולטיבי ולכן הגדרנו כך).

$$I = 0.18 * L = 0.18 * 2x$$



- Run DC sweep on output voltage, extract the following parameters: vth, gm, vds, rout, vdsat and vds-vdsat (spare) using Shawn's script (PPT explaining how to extract can be found in the moodle).

הרצינו TB ל-schematic הנ"ל.

הגדרנו אנהיזט dc כאשר Vout רץ בין המתחים 0 ו-Vdd=2V.

בנוסף, הגדרנו: X=1[A], W=1[in].

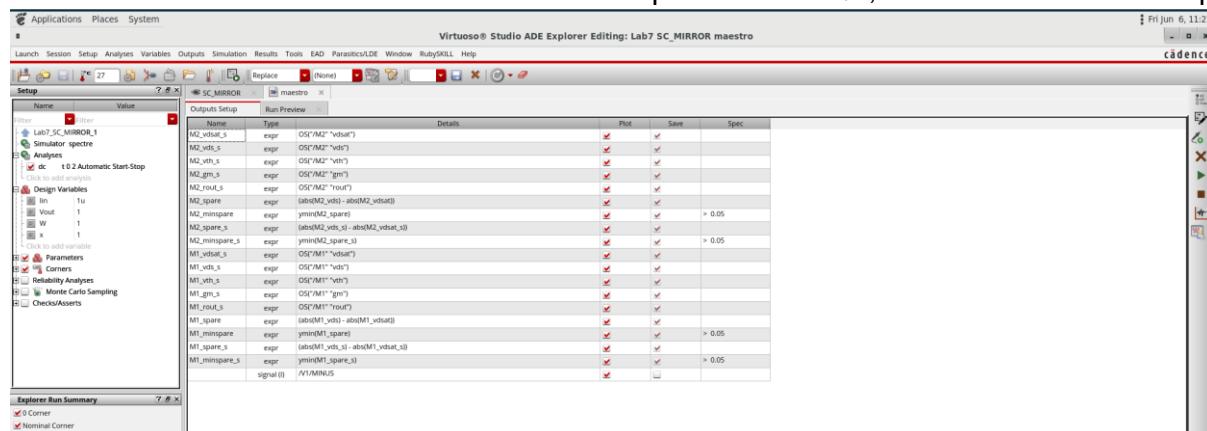
נשים לב כי הערך של הזרם שבחרנו עומד בתנאי שהוא צריך להיות בטווח של 10-10A.

לאחר מכן נכנסנו לחילון של (log.CDS) virtuoso וריצנו לפי ההוראות את הסקריפט של שאנן. ניתן לראות אילו פרמטרים רצינו שיופיעו בTB.

```
ENICSSaveOpPoint( "M" list( "vdsat" "vds" "vth" "gm" "rout" ) ?spare t ?spec 0.05  
?sweeptype "dc")
```

```
Fri Jun 6, 11:34  
File Tools Options RubySKILL Help  
Virtualuo® Studio IC23.1 - Log :/data/home/sillamr/CDS.log  
  
Setting var temperature = "27"  
Setting tempIT7 = 27  
Setting t = 0.05  
Reseting ANOL Data dir  
  
*Info*  Data Directory = /project/tomer/users/sillamr/ms/simulation/Lab7/SC_MIRROR/maestro/results/maestro/Interactive.0/pst/Lab7_SC_MIRROR_1  
  
Resetting statistical vars  
  
*Info*  Setting parameter values ...  
  
Setting var Iin = "1u"  
Setting var Vout = "1"  
Setting var W = "1"  
Setting var temperature = "27"  
Setting tempIT7 = 27  
Setting t = 0.05  
  
*Info*  Netlist Directory = /project/tomer/users/sillamr/ms/simulation/Lab7/SC_MIRROR/maestro/results/maestro/Interactive.0/l/Lab7_SC_MIRROR_1/netlist  
  
*Info*  Data Directory = /project/tomer/users/sillamr/ms/simulation/Lab7/SC_MIRROR/maestro/results/maestro/Interactive.0/l/Lab7_SC_MIRROR_1  
  
Resuting ANOL Data dir  
generate netlist...  
Design netlist done. Netlisting Jun 6 11:18:20 2025  
End netlisting Jun 6 11:18:20 2025  
  
The netlist is up to date.  
Time taken to compare the design with netlist: 0.0s  
Successfull  
compose simfile input file...  
.....successful  
Optimize Single Point Run netlisting done. Simulation started...  
Loading mvt.net  
Ready ?  
  
#NETSweepPoint "W" 1000 ("vdsat" "vds" "vth" "gnd" "rou") ?spare t 7 spec 0.05 0.05 ?sweptype "dc")
```

קיבלו את כל הביטויים הבאים, עליהם נרצה להריץ את האנליזה שלנו:



לאחר מכן ייבנו את הקובץ include.scs על מנת שנקבל תוצאות בהרצאה, לפי ההגדרות במצגת שקיבלו:

- לחצנו מקש ימינו על ה lab 7 שלנו (הצהר הכלול)
- בחרנו model Libraries
- נפתח חלון model file שם בחרנו את הקובץ include.scs

הסברים על הערכיהם:

- המתח V_{th} - מתח הסף, כאשר V_{gs} גדול ממתח זה, התעללה פתואה.
 - המתח V_{ds} - המתח המיצג את ההפרש: $V_d = V_s$. כאשר במקרה שלנו $V_s = 0V$ מאחר שהוא מחובר לאדמה, ולכן $V_d = V_s$. נשים לב כי ב-*current mirror* ברכיב M1 מתקיים ש- $V_{ds} = V_{gs}$, מאחר שהמתוח V_g והמתוח V_d מחוברים לאותו צומת, ומתקיים $V_g = V_s$.
 - המתח V_{dsat} - ההפרש: $V_{gs} - V_{th}$.
 - הפרמטר $m-g$ - באופן כללי זה הגביר האינטראציional של הטרנזיסטור - יכולומר כמה הזרם משתנה כאשר יש שינוי קטן ב- V_{gs} . יכולומר גזרת. לכן הנוסחה היא:

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}$$

התנגדות rout- התנגדות המוצא של הטרנזיסטור. $r_{ds} = \frac{\partial V_{ds}}{\partial I_{ds}}$, הנוסחה מתארת עבור שניי בזרם, מה שישו רמתם נומבה בREL איזורי. ליאורו ואנווראי. מעהל שלנו יוציא הוא אמצע של הרכיב?

$$r_{ds} = \frac{1}{\lambda I_{ds}}$$

באזרע הסטורציה נקבל גם את הקשר:

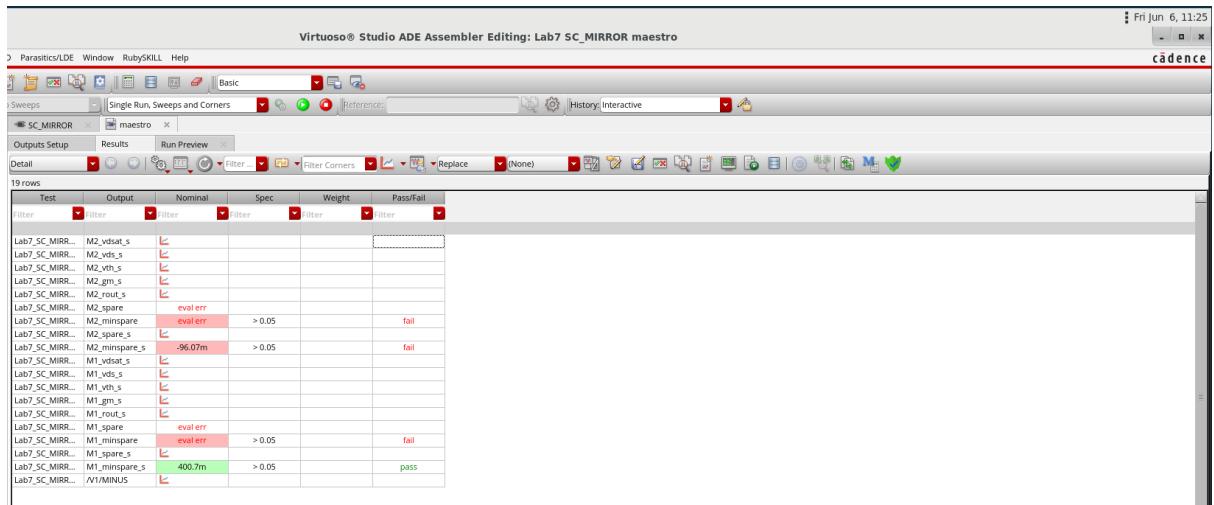
נסביר הגעה לקשר זה:

- זרם במצב סטורציה: $I_{ds} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{ds})$

- נגזרות: $\frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{ds}} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_t)^2 \lambda$

- נציב את הנגזרת שמצאנו בנוסחה של r_{ds}

$$r_{ds} = \frac{\partial V_{ds}}{\partial I_{ds}} = \frac{1}{\frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{ds}}} = \frac{1}{\frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_t)^2 \lambda} = \frac{1}{\lambda I_{ds}}$$



הערכתים ברכיב M1:



רכיב M1 נמצא תמיד במצב של סטורציה.

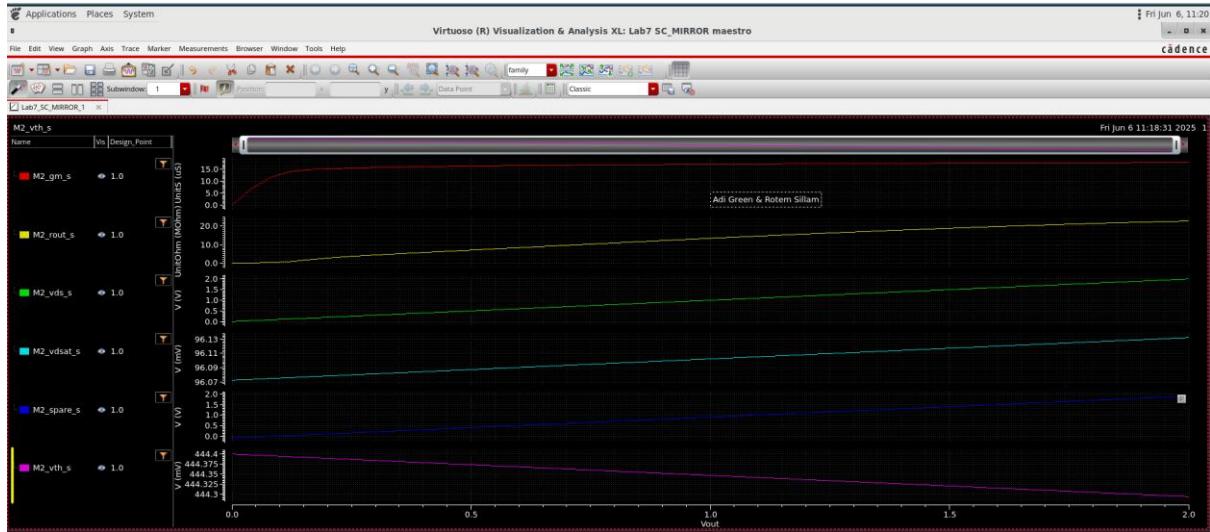
ניתן לראות זאת לאחר שכפי שאמרנו - ברכיב M1 מתקיים $V_{ds} = V_{gs}$, אחר שהמתה V_g והמתה V_d מחוברים לאותו צומת, ומתקיים $V_s = 0$.

רכיב נמצא במצב סטורציה כאשר מתקיים התנאי: $V_{ds} > V_{gs} - V_{th}$

כפי שאמרנו $V_{ds} = V_{gs}$. ולכן: התנאי $V_{ds} > V_{gs} - V_{th}$ מתקיים, ולכן הרכיב תמיד במצב של סטורציה כאשר הוא דלוק, כלומר כאשר $V_{gs} > V_{th}$.

ניתן לראות שאנו בסאטורציה מאחר שה- $V_{ds} = V_{dsat}$ חיובי, ולכן $V_{ds} > V_{dsat}$.

הערכות ברכיב M2:



- המתח V_{gs} של רכיב M2 שווה למתח V_{gs} של רכיב M1, לאחר וה-gate-ים של 2 הרכיבים מחוברים וה-source שליהם מוארך.
- ולכן שקווע את הזרם I_{out} הוא המתח $V_{out} = V_{ds} = V_{dsat}$. כאשר $V_{ds} < V_{dsat}$, יהיה באזורי הלינאר. וכאשר $V_{ds} > V_{dsat}$, יהיה באזורי הסאטורציה.
- gm - אין שינוי ב- V_{gs} מאשר מתח קבוע מרכיב M1. בהתחלה ניתן לראות שיש עליה בקירוב לינארית, מאחר שהזרם I_{ds} באזורי הלינאר, ולאחר מכן ננסים לאזורי הסאטורציה שבו הזרם בקירוב קבוע, וכך נקבל לפ' הנוסחה $-gm \cdot V_{ds}$ קבוע.
- rout - ניתן לראות שה- $rout$ גדול לעומת שינוי זרם גורם לשינוי במתח. ניתן לראות שקווע למתח $V_{out}=2V$ מתחילה התיצבות, ככלומר ניכר בזרם גורם לשינוי בסאטורציה (בסאטורציה הזרם I_{ds} נשאר קבוע בקירוב, בהתאם לג' שקוועת כתוצאה מאפקט התקוצרות התעללה).
- $V_{ds} - V_{dsat} = V_{spare}$ - זה בעצם חיסור של הגראף הירוק פחות הגראף התכלת. ניתן לראות שהשינוי של V_{ds} הרבה יותר גדול מהשינוי ב- V_{dsat} (בעור V_{out} שנע בין 0-2V), וכך נקבל גראף עולה.
- V_{th} - יש שינוי ממש קטן, יכול להגיד בקירוב שהוא קבוע.

(b) Display I_{ds} vs. V_{ds} (V_{out}) curve and explain your results. When does M2 go out of saturation? Show on graph and explain

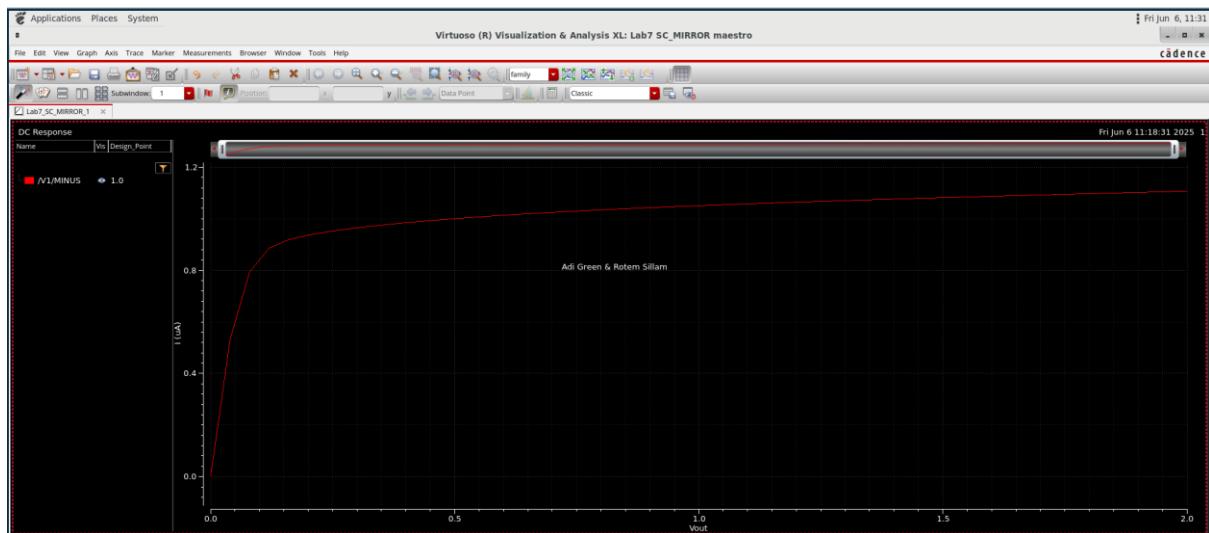
המתוך V_{out} מייצג את המתוך V_{ds} ברכיב M2.

כאשר $V_{out} < V_{dsat}$, נקבל שיפוע ליניארי בזרם. וכך, כאשר $V_{out} > V_{dsat}$, נהייה במצב סטורציה.

ניתן לראות בגרף שבערך V_{out} גדולים נהייה במצב סטורציה - עד כדי שיפוע קטן שנבע מAFXקט התקוצרות

$$I_{ds} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} * \frac{W}{L} (V_{gs} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{ds})$$

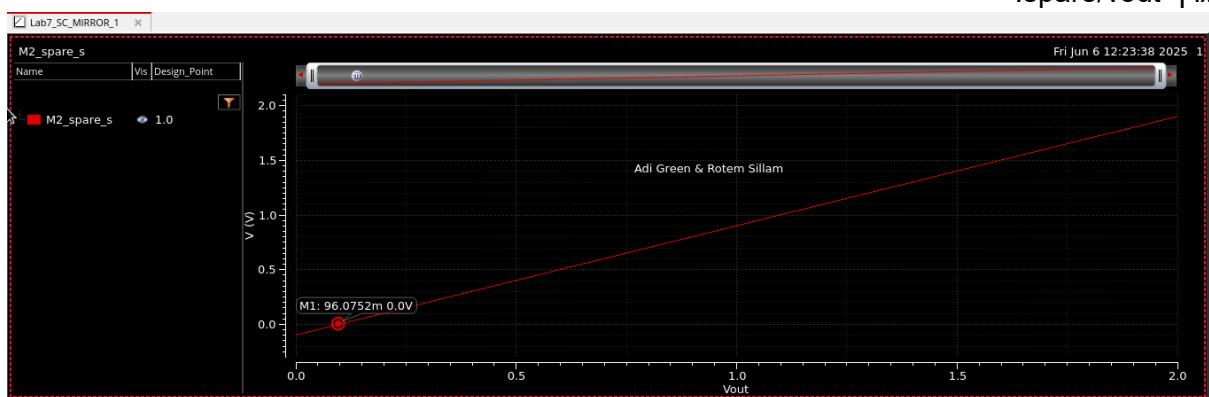
התוצאה לפיה הנוסחה שלמדו (השינוי שהוספנו הוא λ):



מצב סטורציה מתרחש כאשר: $V_{ds} - V_{dsat} > 0$ כלומר: $V_{ds} > V_{dsat}$

ניתן לראות שכאש השיפוע שנקבל חיובי, אז V_{ds} גדול מ- V_{dsat} , כלומר עבור V_{out} גדול מ- $96.0752m$ נהייה במצב סטורציה (לפננו נקודה זו נהייה במצב ליניארי, כלומר "מצא" מסטורציה).

גרף :spare/vout



(c) Plot R_{OUT} vs. v_{out} (HINT, what is the R_{OUT} of this circuit, also, Ohm's law...). Note that R_{OUT} drops drastically when v_{ds} – v_{dsat} < 50mV .

$$r_{ds} = \frac{\partial V_{ds}}{\partial I_{ds}}$$

ההתנגדות R_{out} כפי שאמרנו הינה: r_{ds} זהי ההתנגדות מה-drain של רכיב M2.

הוצאנו plot של R_{out} כתלות ב-v_{out}, ו- $sparse=V_{ds}-V_{dsat}$ כתלות ב-v_{out}.
סימנו במרקך את הנקודה שבה $sparse=50\text{mV}$, $sparse=50\text{mV}$, כפי שהתקבשנו.
נשים לב כי עבור $v_{ds} < 50\text{mV}$, נקבל שערכו של R_{out} משתנה בצורה דרסטית, כלומר ש-R_{out} קטן משמעותית באזור זה.

$r_{ds} = \frac{\partial V_{ds}}{\partial I_{ds}}$
בסטורציה (כאשר $V_{ds} > V_{dsat}$) למדנו כי מתקיים $r_{ds} = \infty$ (אוهم), מאחר שהזרם בסטורציה הוא בקירוב נשיר על ערך קבוע (עד כדי שיפוע קטן כתוצאה מאפקט התקוצרות התעללה). לעומת זאת, קיבלנו שכאשר נשנה את המתח V_{out} (שווה ל- V_{ds}), הזרם לא מודד יושפע מכך.
לפי חוק אוhem המקיים: $R_{out} = V_{ds}/I_{ds}$, ניתן לראות שכאשר $sparse$ נשיר על זרם קבוע והמתח V_{ds} גדל, אז ההתנגדות גדלה בצורה לאニアרית.

כלומר שיפוע הגраф הינו $\frac{1}{I_{ds}}$, וכך אשר $sparse$ (בקירוב) לא משתנה, קיבלנו שיפוע קבוע, כלומר גраф לאニアרי.

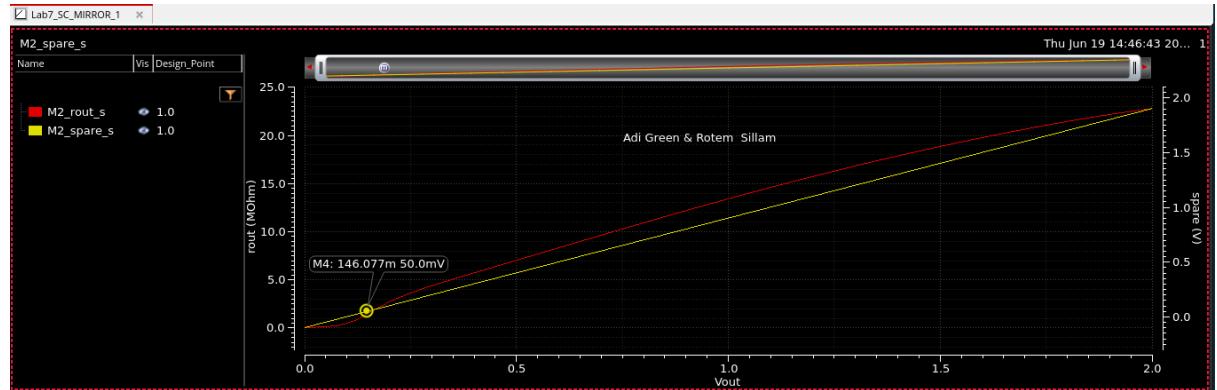
כאשר $V_{ds} - V_{dsat} > 50\text{mV}$, אנחנו נמצאים במצב שהוא על הסוף בין לאニアרי לסטורציה (כי כאשר $sparse < 0$ אנחנו נמצאים במצב לאニアרי).

בגרף שהוא לא scale log: ניתן לראות שעבור תחום זה השיפוע של R_{out} אינו לאニアרי, אלא גדול בשיפוע שנראה אקספוננציאלי. נסיק מכך שחוק אוhem כבר לא מתקיים עבור sparse קטן מאד (כשהוא קרוב לאפס - לתוך הleinarian).
למדנו כי גраф אקספוננציאלי יתנהג כlienarian ב-scale log.

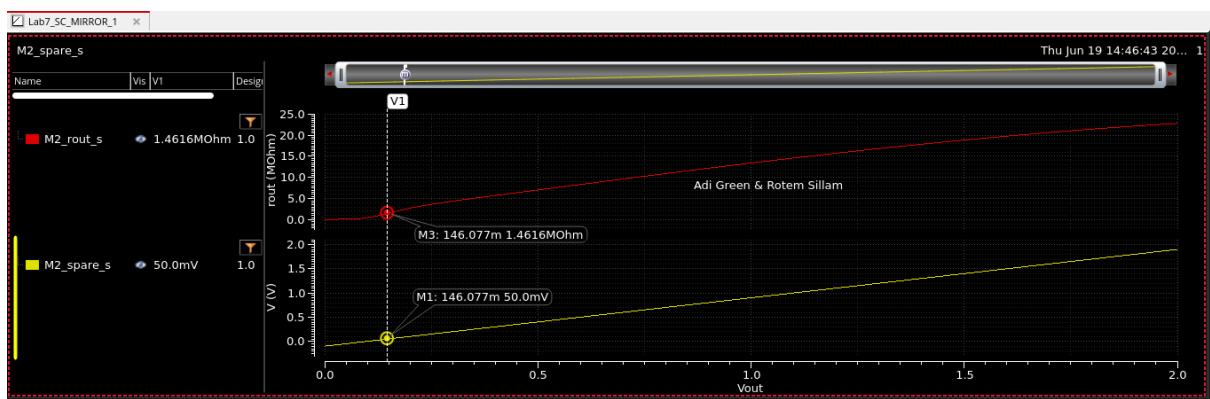
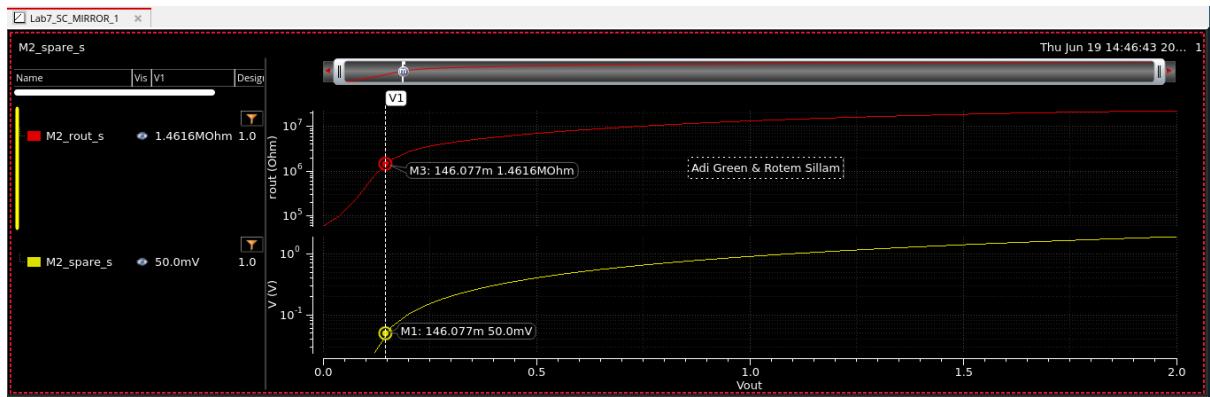
$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} ((V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2)$ משתנה בצורה לאニアרית בתחום הleinarian, הזרם לפי הנוסחה

$$\frac{1}{I_{ds}}$$

($V_{out} = V_{ds}$ זניח וכן ההעלאה בריבוע שלו תתן ערך זניח), ולכן השיפוע $\frac{1}{I_{ds}}$ לא יהיה קבוע, והgraf בחלק זה אינו לאニアרי, עבור $V_{ds} - V_{dsat} < 50\text{mV}$.



כאשר נסתכל על הגרף שלנו ב-scale log, ניתן לראות שעבור $V_{ds} = 50\text{mV}$ נקבל מעבר בין מצב לאニアרי למצב סטורציה.



(d) Current ratio: Vary input current and check the relationship between I_{in} and I_{out} (i.e. I_{out}/I_{in} vs. V_{out})

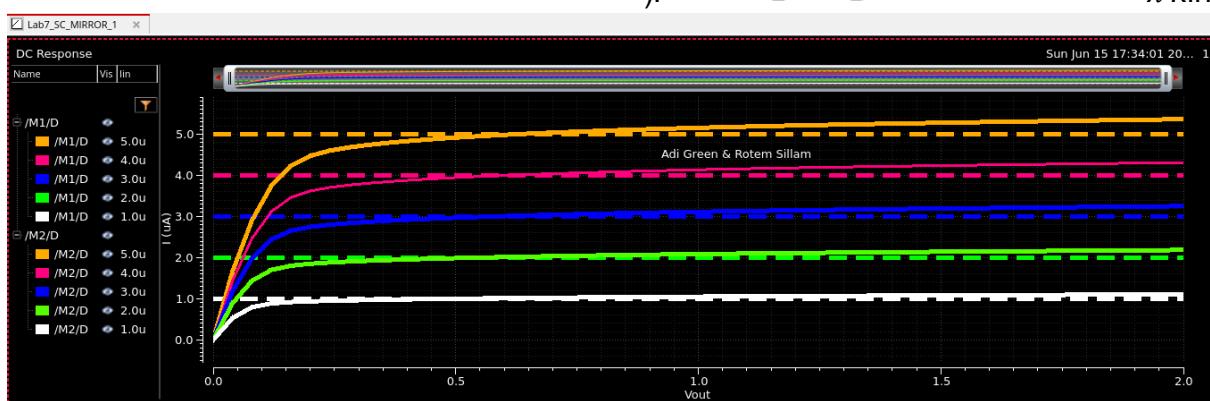
הגדכנו את I_{in} (הזרם M1/D) עבור ערכים מ-1A עד 5A בקצבות של 1A - קיבלנו כתוצאה לכך 5 גרפים של זרם קבוע ללא תלות במתה.

בנוסף הוסיףנו גרפים של I_{out} (הזרם M2/D) שימושתנים כתלות במתה V_{out} - ובהתאם להן. המתה V_{out} מייצג את המתה V_{ds} ברכיב M2. כתוצאה מהזרם I_{in} קיבלנו מתח מסוים ל- $-V_{ds}$, ו- V_{gs} של רכיב M1 (שכפי שכבר הסבכנו הם שוים אחד לשני ב-current mirror). וכן מקבלים גם את המתה V_{gs} ברכיב M2, לאחר שהיא-gate של הרכיבים מחובר.

כאשר $V_{out} < V_{dsat}$, קיבלנו שיפוע לינארי בזרם. וכאשר $V_{out} > V_{dsat}$, נהייה במצב סטוריוזיה. ניתן לראות שעבור כל כניסה של זרם בגודל מסוים, קיבלנו התיצבות בקרירוב על אותו הערך ב- $-V_{ds}$ (עבור עד כדי שיפוע קטן שנובע מAFXט התקצרות התעלה לפני הנוסחה של מדמנו) (השני שנוספנו

$$I_{ds} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} * \frac{W}{L} (V_{gs} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{ds})$$

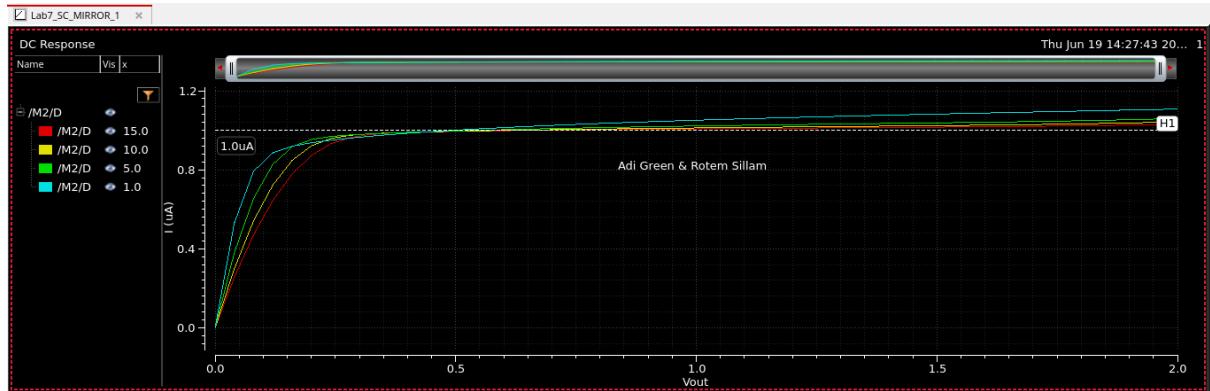
הוא λ



(e) W/L effects: Vary W and L of both transistors simultaneously and explain the results. What is R_{OUT} under these conditions?

עשינו סימולציות שבהן בחרנו אנליזת dc של הזרם I_{out_M2} כתלות ב-V_{out}.

תחילה, נראה את ההשפעה של L על הזרם I_{out}.
הגדרנו זרם הכניסה הוא A1 וורך התעללה משתנה (1,5,10,15=x), וכתוואה מkr L משתנה (L=2x).



ניתן לראות שבאזור הילינארי - לפי הנוסחה:

$$I_{ds} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{ds})$$

ובאזור של הסטורציה - לפי הנוסחה:

ככל שא יותר גודל, ככל יותר L, אז הזרם יותר קטן. ואכן ניתן לראות זאת בגרף, בשני אזורים אלו.

בנוסף, אם ידועיםCi כל של마다 יותר קטנה כך הזרם משתקף בצורה יותר מדויקת לפי הנוסחה

$$\frac{I_{out}}{I_{ref}} = \frac{1 + \lambda V_{DS2}}{1 + \lambda V_{DS1}}$$

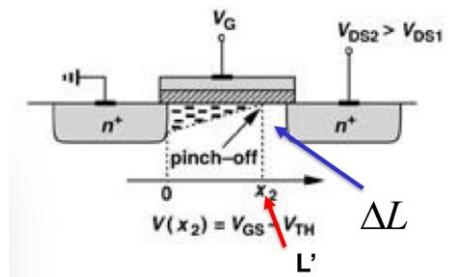
, כאשר ref (זרם "חיו") הוא הזרם שモزن ל-*sosm* הראשון במראה, והוא זה "שמכתי" את הזרם שיועתק הלאה. במקרה שלנו, ref הכוונה לזרם חיו.

כמו כן, למדנו Ci $\frac{1}{L}$ מההרצאה לפי הנוסחאות הבאות:

$$L' = L - \Delta L$$

$$1/L' = \frac{1}{L} (1 + \Delta L / L)$$

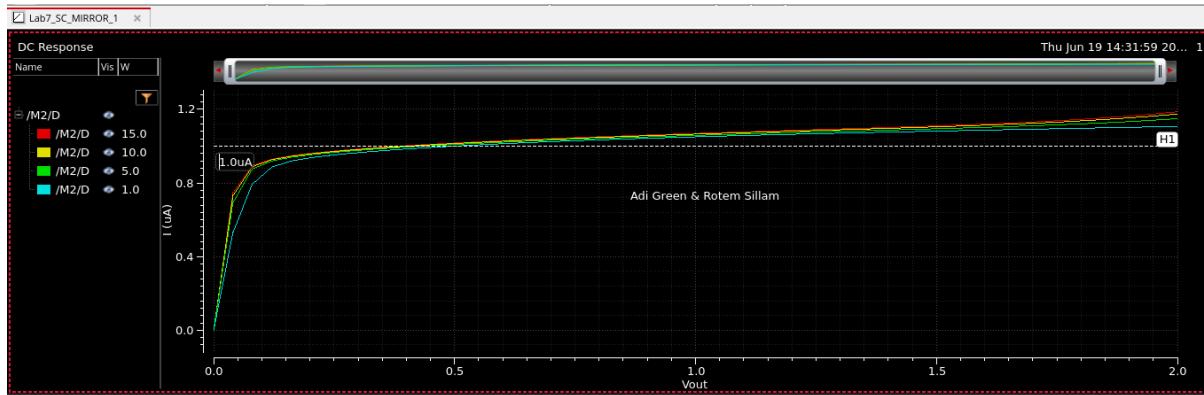
$$1/L' = \frac{1}{L} (1 + \lambda V_{DS}), \quad \lambda V_{DS} = \Delta L / L$$



ככל ש-L גדול, כך גם קטן.

אמרנו שככל ש-L קטן יותר, כך זרם המראה משתקף בצורה יותר מדויקת למקור. ניתן לראות בגרפים שצירפנו, שככל שא גודל AZ L גדול, כך אנחנו מקבלים שהזרם מתיצב על ערך יותר קרוב לא1A, שזהו ערך זרם המקור שלנו.

- נראית את ההשפעה של W על הזרם I_{out} .
אנו מגדירים כת שזרם הכניסה הוא A_1 ורוחב התעלה משתנה $(1,5,10,15=W)$.



$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right)$$

ניתן לראות שבאזור הלינארי - לפי הנוסחה:

$$I_{ds} = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{ds})$$

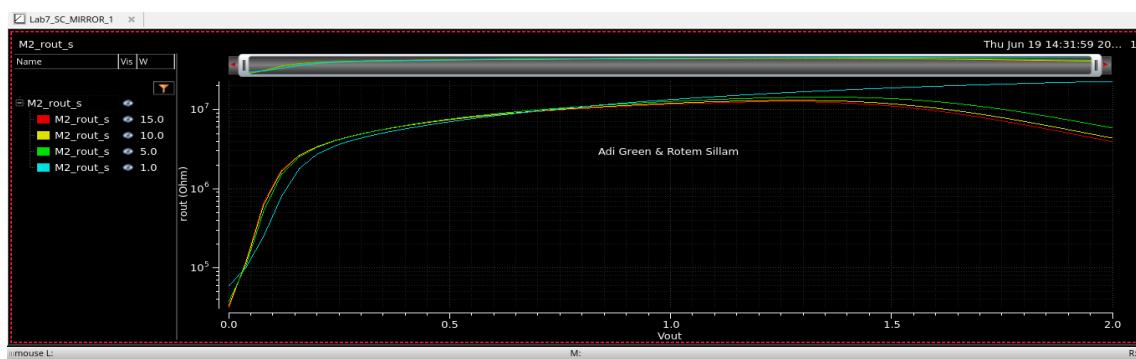
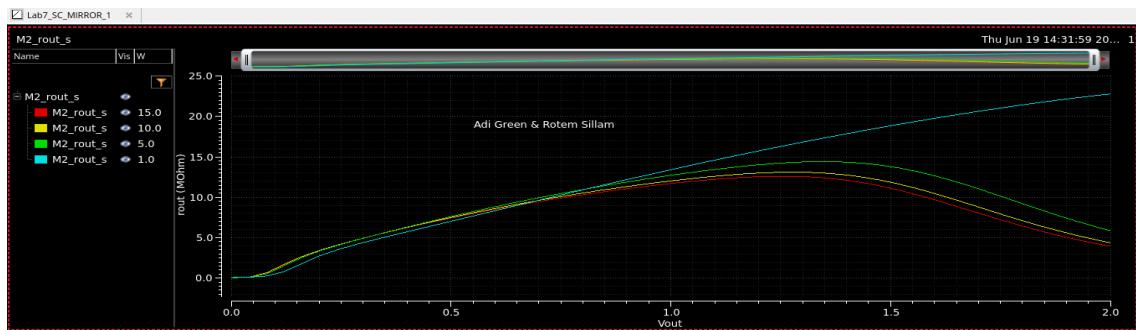
ובאזור של הסטורציה - לפי הנוסחה:

כל W יותר גדול, אז הזרם יותר גדול. ואכן ניתן לראות זאת בגרף, בשני אזורים אלו.

rout:

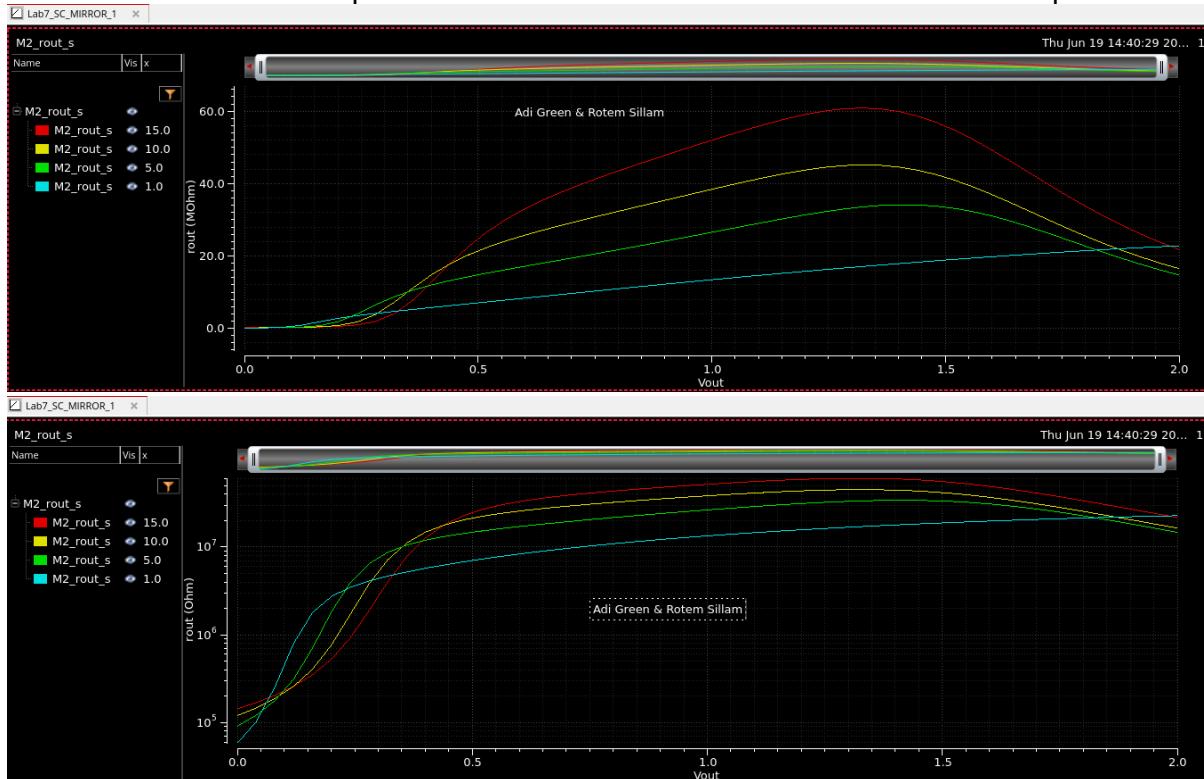
- הערה: לאחר בדיקה עם מתרגלים, נתיחס לגרפים מנוקודת ההתחלת שלהם עד הנקודה בה הם מתחילה לרדת. בנקודהה בה הם מתחילה לרדת מתרחשות תופעות מסדר שני.

נבדוק את השפעת ערכי W על R_{out} . הגדרנו את הערכים בדומה למקודם.



כפי שאמרנו, ככל ש-W יותר גדול, הזרם יותר גדול. ולפי הנוסחה $r_{ds} = \frac{\partial V_{ds}}{\partial I_{ds}}$, כאשר מסתכלים על V_{ds} זהה, ככל שהזרים יותר גדול, כך Rout יותר קטן. ואכן ניתן לראות לפחות לפי הגרף, שככל W יותר גדול Rout יותר קטן.

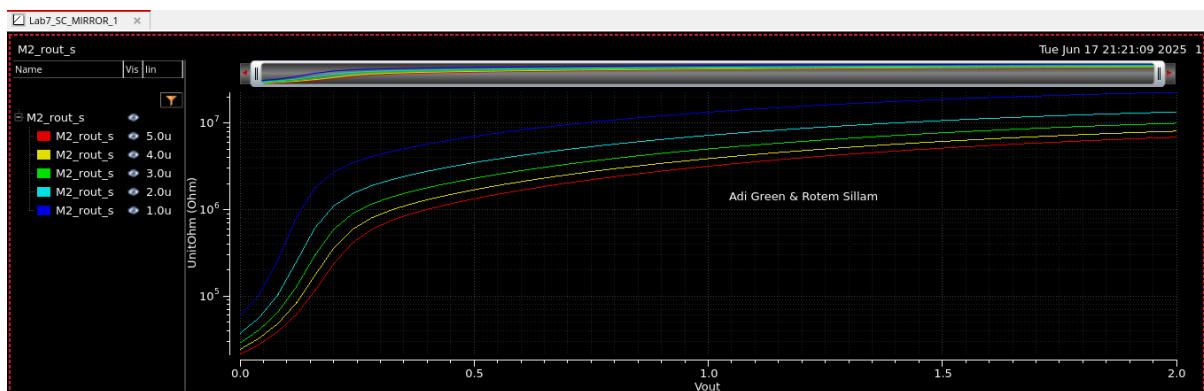
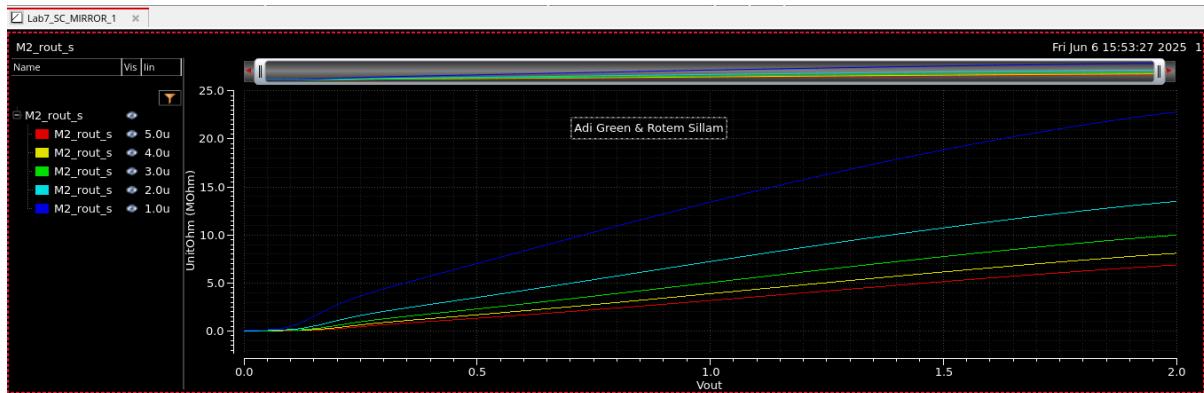
- נבדוק את השפעת ערכי L על Rout. הגדרנו את הערכים בדומה למקודם.



כפי שאמרנו, ככל ש-L יותר גדול (כלומר X יותר גדול), הזרם יותר קטן. ולפי הנוסחה $r_{ds} = \frac{\partial V_{ds}}{\partial I_{ds}}$, אשר מסתכלים על V_{ds} זהה, ככל שהזרים יותר קטן, כך Rout יותר גדול. ואכן ניתן לראות לפחות לפי הגרף, שככל X יותר גדול, Rout יותר גדול.

(f) **ROUT vs. current:** Plot ROUT vs. VOUT for different values of lin. What is the value of λ (see chapter 2)?

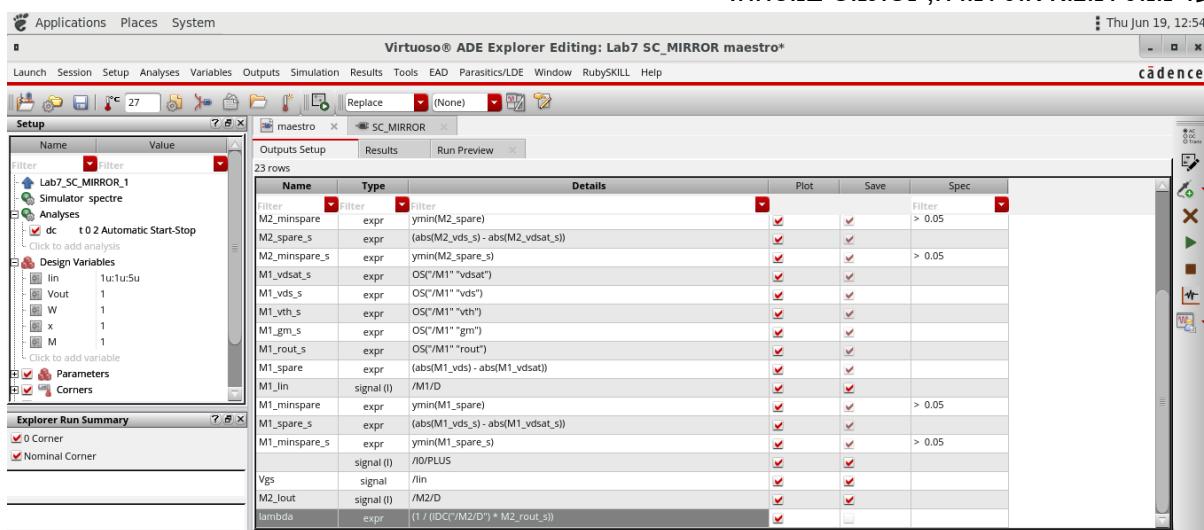
שינו את הזרם lin לערכים 5-10 uA, כפי שהתבקשנו.

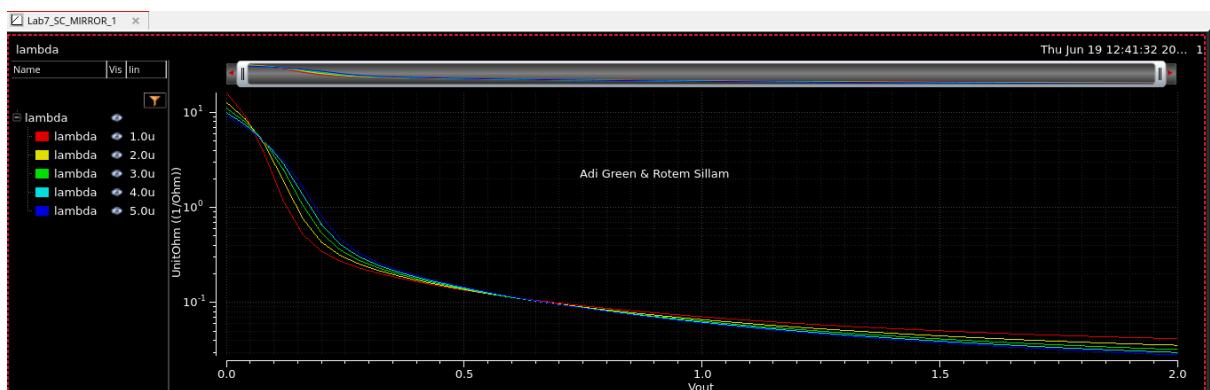
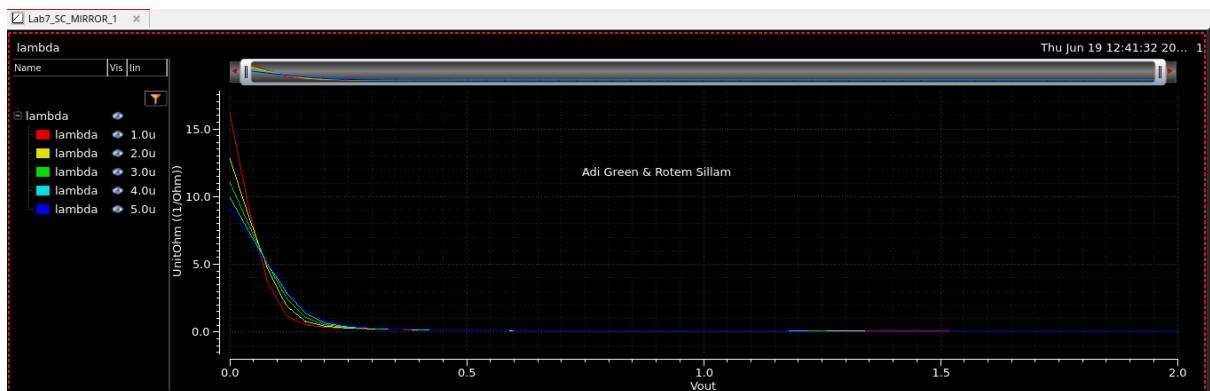


לפי הנוסחה $r_{ds} = \frac{\partial V_{ds}}{\partial I_{ds}}$, ניתן לראות כאשר אנו מסתכלים על $V_{ds} (=v_{out})$ זהה, ככל שאנו מגדילים את הערך של הזרם I_{ds} , ההתנגדות r_{ds} קטנה. ניתן לראות זאת לפי הגרף שכאשר הזרם lin גדול אז הזרם i_{out} גדול (זרם מראה) וההתנגדות קטנה.

$$\lambda \approx \frac{1}{R_{ds} I_{ds}} = \frac{1}{R_{ds} i_{out}}$$

על מנת למצוא את למדה, נשתמש בנוסחה:





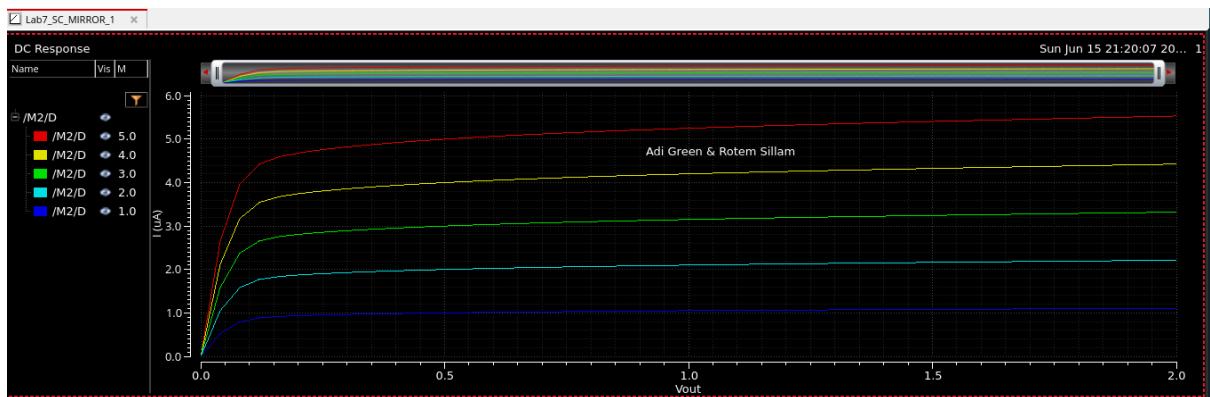
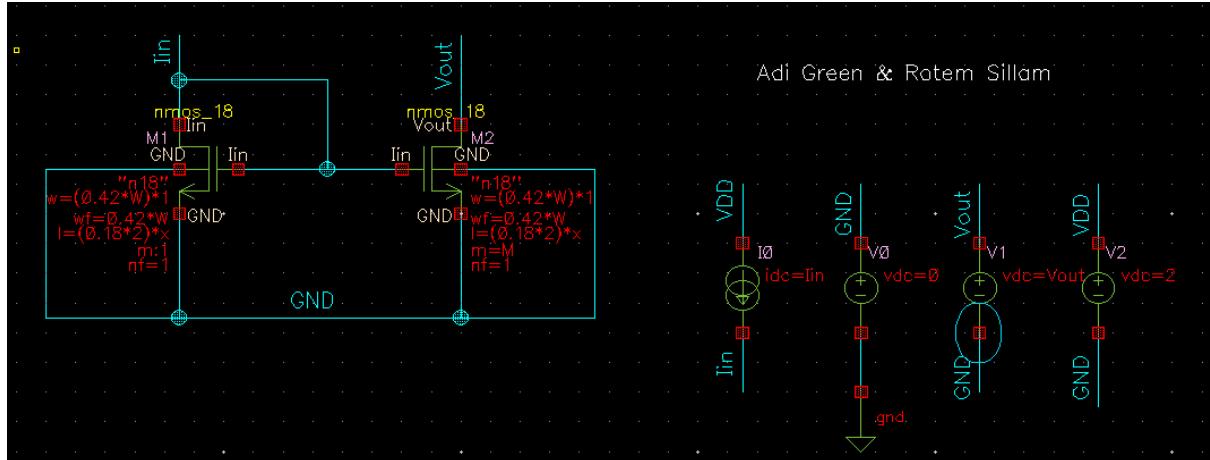
$$\lambda \approx \frac{1}{R_{ds} I_{ds}} = \frac{1}{R_{ds} I_{out}} \quad (\text{באזור הסאטורציה})$$

כפי שאמרנו, ככל שגדילים את הזרם I_{in} , הזרם I_{ds} גדל מכך שמדובר בזרם מראה, אבל ההתנגדות R_{ds} קטנה, ולכן עם השינוי הייתר גדול הוא זה שיותר ישפיע על למדה.

ניתן לראות מהגרף שבאזור הסאטורציה, ככל שהזרם I_{in} גדול, כך הלמדת יתר קטנה, ומכאן אנחנו מסיקים שלזרם I_{ds} יש השפעה יותר גדולה על למדה.

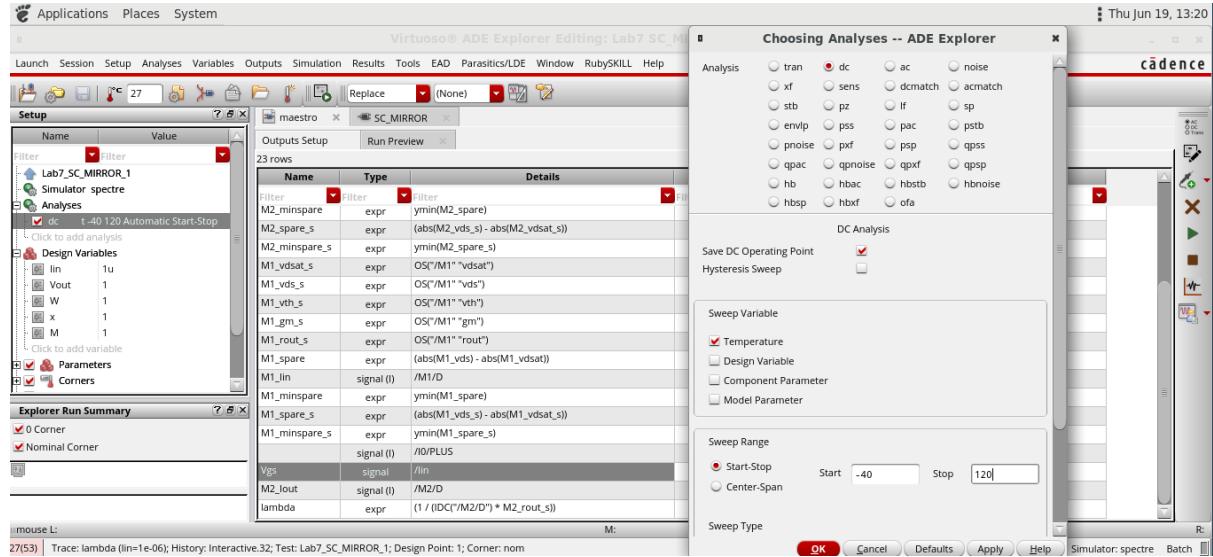
(g) CURRENT MULTIPLIER: Scale the current between M1 and M2. W/L of M2 should be a multiple of W/L of M1. To do this, set the multiplier parameter in the device – this scales the number of devices being used.

הוסףנו ב-schematic את הparameter M ב-rcib M. ה-parameter M מגדה חיבור של כמה טרנזיסטורים זהים במקביל, וכך הזרם של rcib M2 מוכפל פי M, וכך נקבל כפ' שנדרש ש-L/W של rcib 2M יהיה כפולו של L/W של rcib M. עשינו סימולציה שבה שינו את הparameter M לערכים 1-5, בקפיצות של 1.

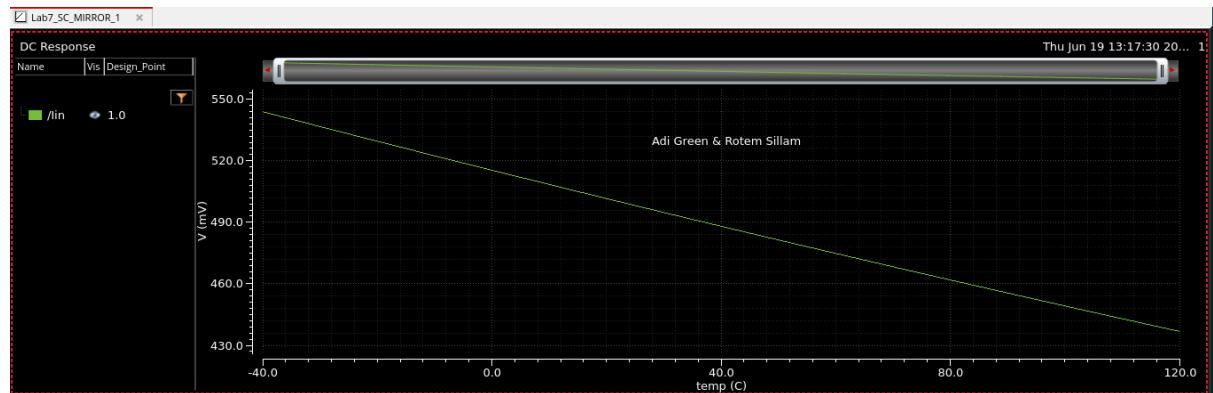


ניתן לראות שככל ש-M יותר גדול, כך הזרם יוסה גדול אף הוא, מאחר שכפי שאמרנו זה מכפיל את L/W של rcib M. בנוסף, ניתן לראות ש-M הוא כמו מעין מגבר, כלומר כאשר M=1 נקבל בקירוב את הזרם חסועober דרך M. עבור כל ערך שנשים ב-M, קיבל את הזרם חסועober באותו ערך M (לדוגמה M=2, נראה התוצאות של הזרם בערך על 2mA).

(h) **Vgs vs. temperature:** Plot Vgs of the input device (M1) vs. temperature. Explain the behavior.



V_{GS}=V_G-V_S הינו שמן החוט בכניסת gate של NMOS-ים. הגדרנו כניסה source GND ו- $I_{in}=0$, אך מושך זרם מ- I_{in} .



כל שהМОבילים יותר טובה, יהיה לאלקטרונים יותר קל לעבור בתעלת. אך הטרנזיסטור ירצה לשמור על זרם כניסה שקבענו, אך יתאים את מתח הכניסה בהתאם. בטמפרטורה יותר גבוהה, המובילות יותר טובת, אך נוצר מתח כניסה נמוך יותר כדי לשמור על הזרם שקבענו שיכנו.

ניתן לראות זאת בגרף:
טמפרטורה יותר גבוהה->מתח כניסה יותר גבוהה
טמפרטורה יותר גבוהה->מתח כניסה יותר נמוך