

# מעבדה במבוא למעגלים

## דוח 7

### Simple Current mirror

שמות המגישים + ת"ז:

רותם סילם | 206663437

עדי גרין | 324965946

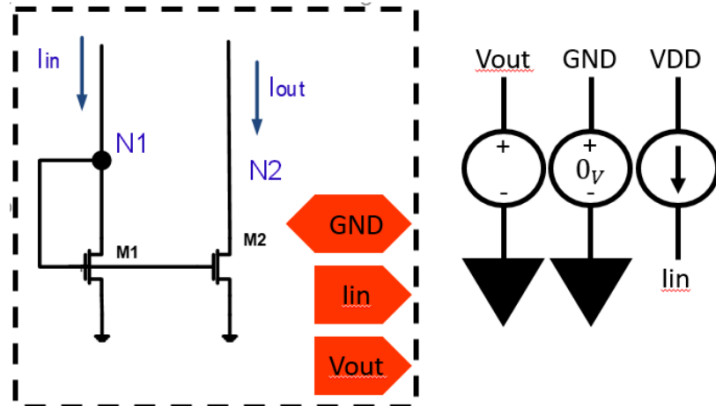
תאריך הגשה:

19.6.25

1. 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 מעגל כמתבקש בשאלה:

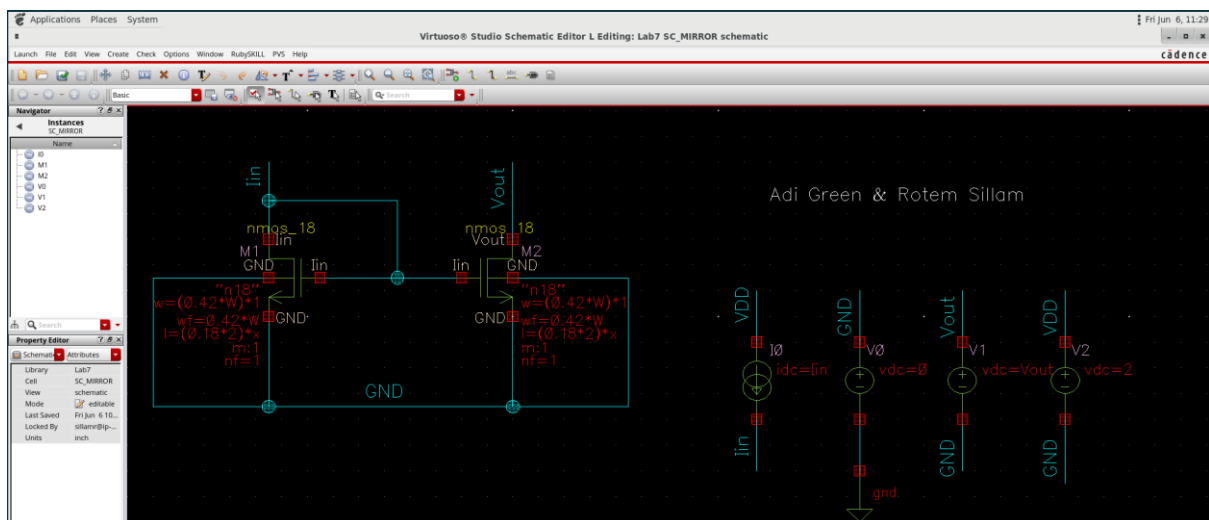


התבקשנו להגדיר  $W$  ו- $L$  להכפלת רוחב הטרנזיסטור ואורך הטרנזיסטור בהתאמה. ולכן הגדרנו:

$$w_f = 0.42 * W$$

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

$$l = 0.18 * L = 0.18 * 2x$$



(a) Run DC sweep on output voltage, extract the following parameters:  $v_{th}$ ,  $g_m$ ,  $v_{ds}$ ,  $r_{out}$ ,  $v_{dsat}$  and  $v_{ds}-v_{dsat}$  (spare) using Shawn's script (PPT explaining how to extract can be found in the moodle).

הרצנו TB schematic הנ"ל.

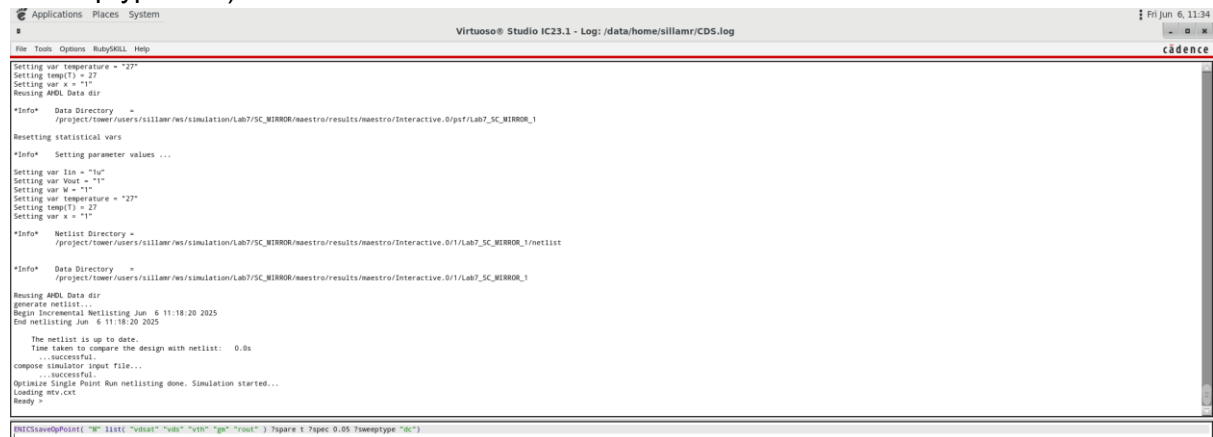
הגדרנו אנליזת dc כאשר  $V_{out}$  רץ בין המתחים  $v_0$  ל- $2V_{dd}$ .

בנוסף, הגדרנו:  $1 = I_{in} = 1 \mu A$ ,  $W = 1$ ,  $X$ .

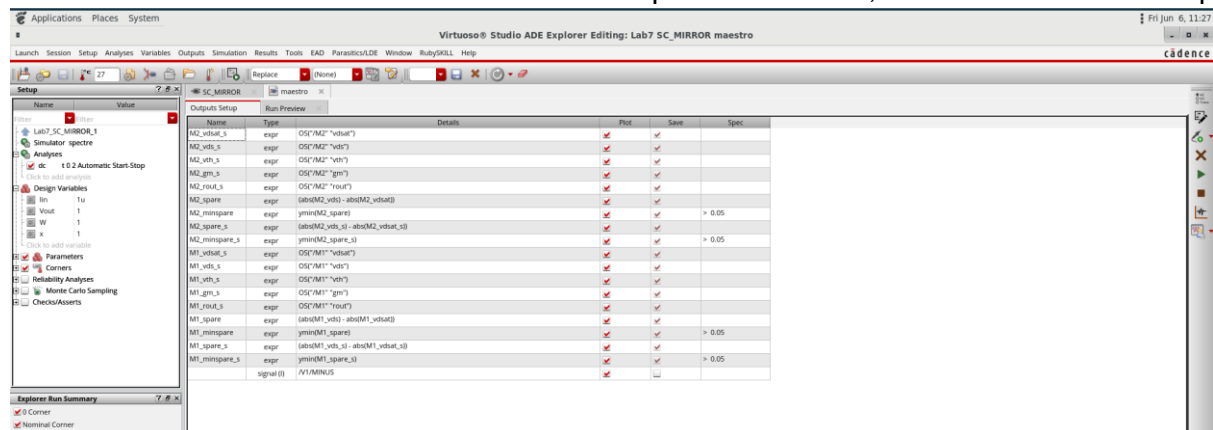
נשים לב כי הערך של הזרם שבחרנו עומד בתנאי שהוא צריך להיות בטווח של 10-100  $\mu A$ .

לאחר מכן נכנסנו לחלון של ה(CDS.log) virtuoso והרצנו לפי ההוראות את הסקריפט של שאנון. ניתן לראות אילו פרמטרים רצינו שיהיו בTB.

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



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



- לאחר מכן ייבאנו את הקובץ include.scs על מנת שנקבל תוצאות בהרצה, לפי ההגדרות במצגת שקיבלנו:
- לחצנו מקש ימני על ה lab7 שלנו (החץ הכחול)
  - בחרנו model Libraries
  - נפתח חלון model file שם בחרנו את הקובץ include.scs

הסברים על הערכים:

- המתח  $V_{th}$  - מתח הסף, כאשר  $V_{gs}$  גדול ממתח זה, התעלה פתוחה.
- המתח  $V_{ds}$  - המתח המייצג את ההפרש:  $V_d - V_s$ . כאשר במקרה שלנו  $V_s = 0V$  מאחר שהוא מחובר לאדמה, ולכן  $V_{ds} = V_d$ . נשים לב כי ב-current mirror ברכיב 1M מתקיים ש-  $V_{ds} = V_{gs}$ , מאחר שהמתח  $V_g$  והמתח  $V_d$  מחוברים לאותו צומת, ומתקיים  $V_s = 0V$ .
- המתח  $V_{dsat}$  - ההפרש:  $V_{gs} - V_{th}$ .
- הפרמטר  $g_m$  - באופן כללי זה ההגבר האינטרינזי של הטרנזיסטור - כלומר כמה הזרם משתנה כאשר

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

יש שינוי קטן ב $V_{gs}$ , כלומר נגזרת. לכן הנוסחה היא:

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

ההתנגדות  $r_{out}$  - התנגדות המוצא של הטרנזיסטור. הנוסחה מתארת עבור שינוי בזרם, מה השינוי במתח. נוסחה בכלל האזורים - לינארי וסאטורציה. במעגל שלנו  $r_{out}$  הוא  $r_{ds}$  של הרכיב 2M.

באזור הסטורציה נקבל גם את הקשר:  $r_{ds} = \frac{1}{\lambda I_{ds}}$   
 נסביר הגעה לקשר זה:

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

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

• נציב את הנגזרת שמצאנו בנוסחה של  $r_{ds}$ :  

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

Virtuoso® Studio ADE Assembler Editing: Lab7 SC\_MIRROR maestro

Parasitics/LDE Window RubySkill Help

Basic

Sweeps: Single Run, Sweeps and Corners

SC\_MIRROR maestro

Outputs Setup Results Run Preview

Detail

Test	Output	Nominal	Spec	Weight	Pass/Fail
Lab7_SC_MIRROR... M2_vdsat_s					
Lab7_SC_MIRROR... M2_vds_s					
Lab7_SC_MIRROR... M2_vth_s					
Lab7_SC_MIRROR... M2_gm_s					
Lab7_SC_MIRROR... M2_rout_s					
Lab7_SC_MIRROR... M2_spare	eval err				
Lab7_SC_MIRROR... M2_minspare	eval err		> 0.05		fail
Lab7_SC_MIRROR... M2_minspare_s					
Lab7_SC_MIRROR... M2_minspare_s		-96.07m	> 0.05		fail
Lab7_SC_MIRROR... M1_vdsat_s					
Lab7_SC_MIRROR... M1_vds_s					
Lab7_SC_MIRROR... M1_vth_s					
Lab7_SC_MIRROR... M1_gm_s					
Lab7_SC_MIRROR... M1_rout_s					
Lab7_SC_MIRROR... M1_spare	eval err				
Lab7_SC_MIRROR... M1_minspare	eval err		> 0.05		fail
Lab7_SC_MIRROR... M1_spare_s					
Lab7_SC_MIRROR... M1_minspare_s		400.7m	> 0.05		pass
Lab7_SC_MIRROR... /v1/MINUS					

## הערכים ברכיב 1M:



רכיב 1M נמצא תמיד במצב של סטורציה.

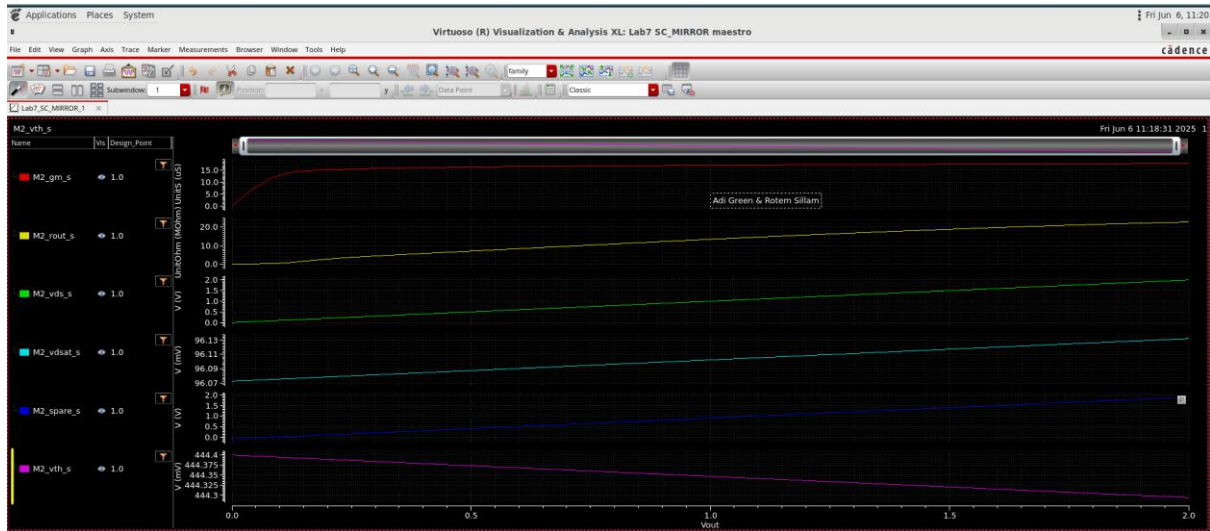
ניתן לראות זאת מאחר שכפי שאמרנו- ברכיב 1M מתקיים ש-  $V_{ds}=V_{gs}$ , מאחר שהמתח  $V_g$  והמתח  $V_d$  מחוברים לאותו צומת, ומתקיים  $V_s=0V$ .

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

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

ניתן לראות שאנחנו בסארטורציה מאחר שה- $V_{ds} - V_{dsat} = \text{spare}$  חיובי, ולכן  $V_{ds} > V_{dsat}$ .

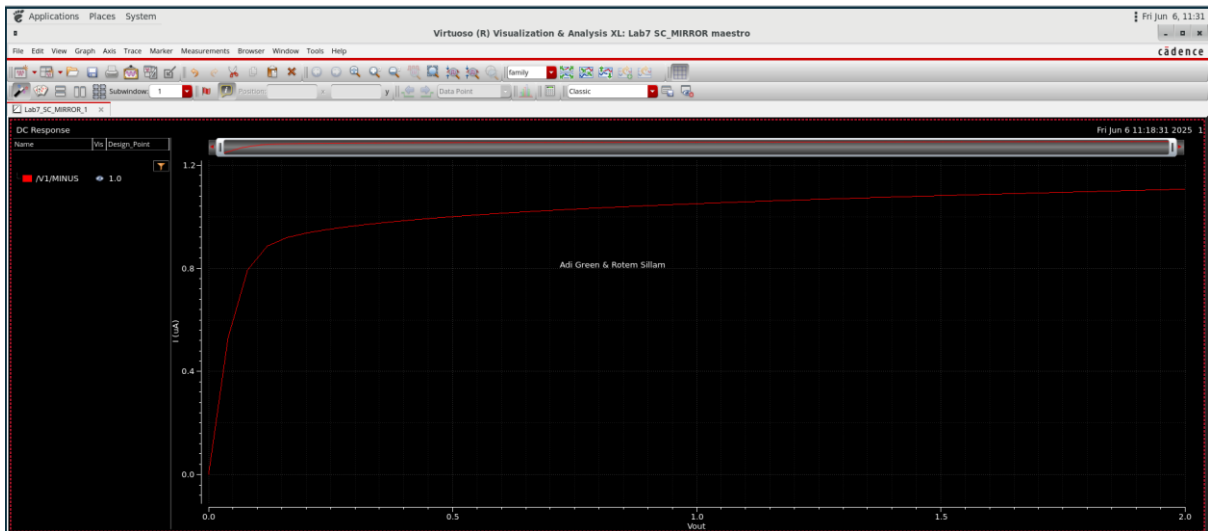
הערכים ברכיב 2M:



- המתח  $V_{gs}$  של רכיב 2M שווה למתח  $V_{gs}$  של רכיב 1M, מאחר וה-gate-ים של 2 הרכיבים מחוברים וה- source שלהם מוארק.  
ולכן מה שקובע את הזרם  $I_{out}$  הוא המתח  $V_{ds} = V_{out}$ . כאשר  $V_{out} < V_{dsat}$ , נהיה באזור הלינארי. וכאשר  $V_{out} > V_{dsat}$ , נהיה באזור הסארטורציה.
- $g_m$  - אין שינוי ב- $V_{gs}$  מאחר שזהו מתח קבוע מרכיב 1M. בהתחלה ניתן לראות שיש עליה בקירוב לינארית, מאחר שהזרם  $I_{ds}$  באזור הלינארי, ולאחר מכן אנחנו נכנסים לאזור הסארטורציה שבו הזרם בקירוב קבוע, ולכן נקבל לפי הנוסחה ש- $g_m$  קבוע.
- $r_{out}$  - ניתן לראות ש  $r_{out}$  גדל כלומר שינוי בזרם גורם לשינוי במתח. ניתן לראות שקרוב למתח  $V_{out} = 2V$  מתחילה התייצבות, כלומר ניכנס לסארטורציה (בסארטורציה הזרם  $I_{ds}$  נשאר קבוע בקירוב, בהתאם לג שקורית כתוצאה מאפקט התקצרות התעלה).
- $\text{spare} = V_{ds} - V_{dsat}$  - זה בעצם חיסור של הגרף הירוק פחות הגרף התכלת. ניתן לראות שהשינוי של  $V_{ds}$  הרבה יותר גדול מהשינוי ב- $V_{dsat}$  (עבור  $V_{out}$  שנע בין  $2V_0$  ו- $v$ ), ולכן נקבל גרף עולה.
- $V_{th}$  - יש שינוי ממש ממש קטן, נוכל להגיד בקירוב שהוא קבוע.

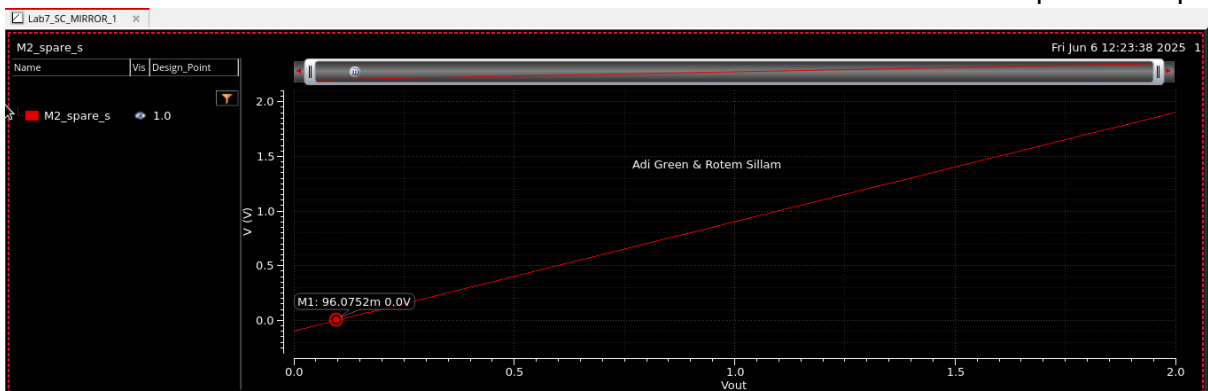
(b) Display  $I_{ds}$  vs.  $V_{ds}$  ( $v_{out}$ ) curve and explain your results. When does M2 go out of saturation? Show on graph and explain

המתח  $V_{out}$  מייצג את המתח  $V_{ds}$  ברכיב  $2M$ .  
 כאשר  $V_{out} < V_{dsat}$ , נקבל שיפוע ליניארי בזרם. וכאשר  $V_{out} > V_{dsat}$ , נהיה במצב סטורציה.  
 ניתן לראות בגרף שבערכי  $V_{out}$  גדולים נהיה במצב סטורציה - עד כדי שיפוע קטן שנובע מאפקט התקצרות התעלה לפי הנוסחה שלמדנו (השינוי שהוספנו הוא  $\lambda$ ):

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


מצב סטורציה מתרחש כאשר:  $V_{ds} > V_{dsat}$  כלומר:  $V_{ds} - V_{dsat} > 0$   
 ניתן לראות שכאשר  $v_{out}$  גדול מ-96.0752mV, כלומר עבור  $V_{out}$  גדול מ-96.0752mV, נהיה במצב סטורציה (לפני נקודה זו נהיה במצב ליניארי, כלומר "נצא" מסטורציה).

גרף  $v_{out}/spare$ :



(c) Plot ROUT vs. vout (HINT, what is the ROUT of this circuit, also, Ohm's law...). Note that ROUT drops drastically when  $v_{ds} - v_{dsat} < 50\text{mV}$ .

ההתנגדות Rout כפי שאמרנו הינה:  $r_{ds} = \frac{\partial V_{ds}}{\partial I_{ds}}$ . זוהי ההתנגדות מה-drain של רכיב 2M.

הוצאנו plot של Rout כתלות ב-Vout, ו-spare=Vds-Vdsat כתלות ב-Vout. סימנו במרקר את הנקודה שבה spare=50mV, כפי שהתבקשנו. נשים לב כי עבור spare<50mV, נקבל שערכו של Rout משתנה בצורה דרסטית, כלומר ניתן לראות ש-Rout קטן משמעותי באזור זה.

בסטורציה (כאשר  $V_{ds} > V_{dsat}$ ) למדנו כי מתקיים  $r_{ds} = \frac{\partial V_{ds}}{\partial I_{ds}}$  (אווהם), מאחר שהזרם בסטורציה הוא בקירוב נשאר על ערך קבוע (עד כדי שיפוע קטן כתוצאה מאפקט התקצרות התעלה). כלומר, קבלנו שכאשר נשנה את המתח Vout (שווה ל- $V_{ds}$ ), הזרם לא מאד יושפע מכך. לפי חוק אוהם המקיים:  $R_{out} = V_{ds} / I_{ds}$ , ניתן לראות שכאשר  $I_{ds}$  נשאר על זרם קבוע והמתח  $V_{ds}$  גדל, אז ההתנגדות גדלה בצורה ליניארית.

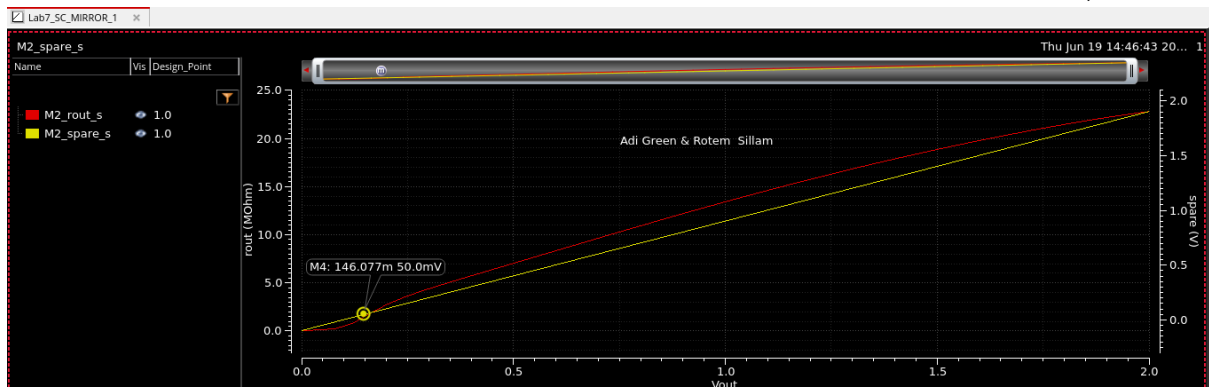
כלומר שיפוע הגרף הינו  $\frac{1}{I_{ds}}$ , וכאשר  $I_{ds}$  (בקירוב) לא משתנה, קיבלנו שיפוע קבוע, כלומר גרף ליניארי.

כאשר  $v_{ds} - v_{dsat} = 50\text{mV}$ , אנחנו נמצאים במצב שהוא על הסף בין ליניארי לסטורציה (כי כאשר  $v_{ds} - v_{dsat} > 50\text{mV}$  אנחנו נמצאים במצב ליניארי).

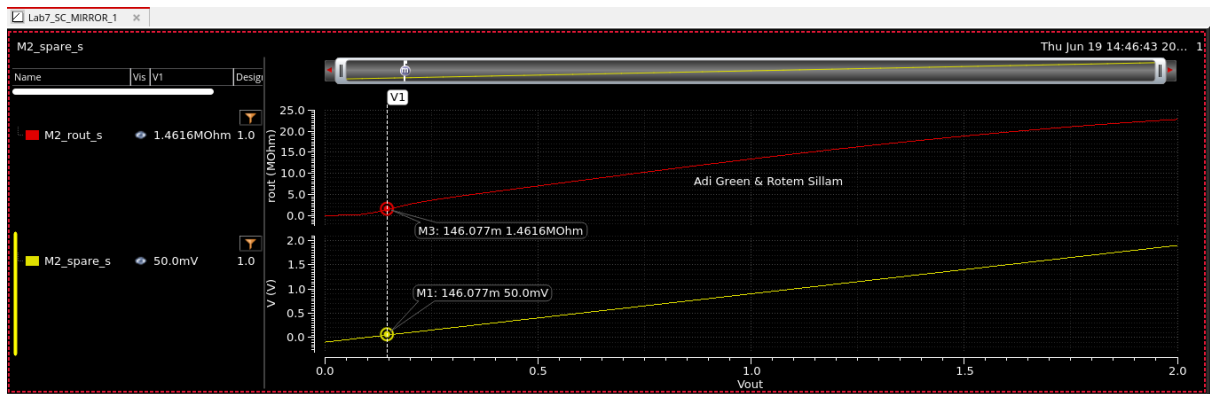
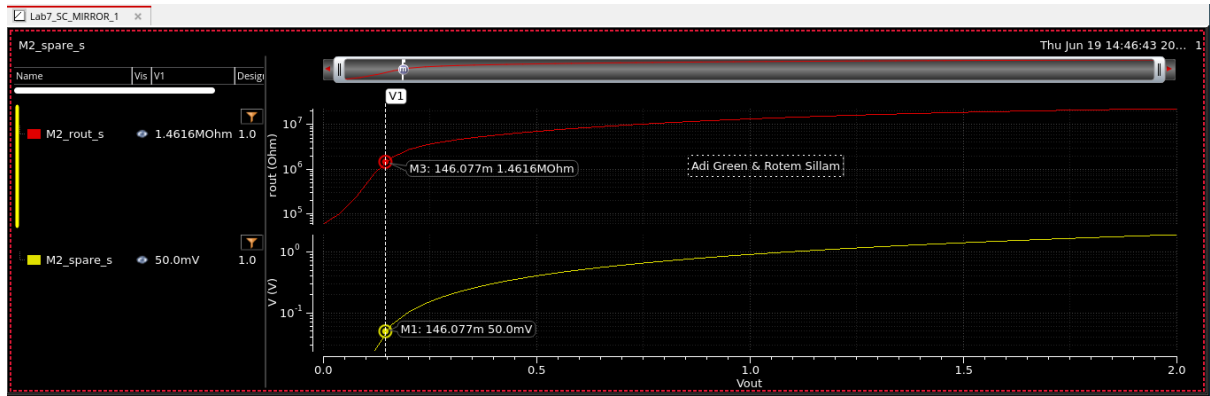
בגרף שהוא לא log scale: ניתן לראות שעבור תחום זה השיפוע של Rout אינו ליניארי, אלא גדל בשיפוע שנראה אקספוננציאלי. נסיק מכך שחוק אוהם כבר לא מתקיים עבור spare קטן מאד (כשהוא קרוב לאפס- לתחום הליניארי). למדנו כי גרף אקספוננציאלי יתנהג כליניארי ב-log scale.

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

( $V_{out} = V_{ds}$ ) זניח ולכן ההעלאה בריבוע שלו תתן ערך זניח, ולכן השיפוע לא יהיה קבוע, והגרף בחלק זה אינו ליניארי, עבור  $v_{ds} - v_{dsat} < 50\text{mV}$ .



כאשר נסתכל על הגרף שלנו ב-log scale, ניתן לראות שעבור Spare=50mV נקבל מעבר בין מצב ליניארי 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.  $V_{out}$ )**

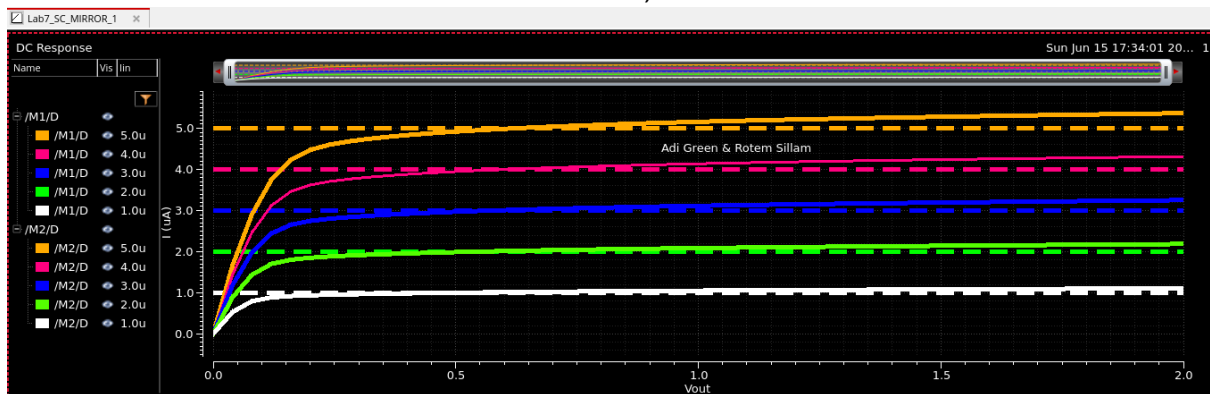
הגדרנו את  $I_{in}$  (הזרם  $M1/D$ ) עבור ערכים מ  $1\mu A$  עד  $5\mu A$  בקפיצות של  $1\mu A$  - נקבל כתוצאה מכך 5 גרפים של זרם קבוע ללא תלות במתח.

בנוסף הוספנו גרפים של  $I_{out}$  (הזרם  $M2/D$ ) שמשתינים כתלות במתח  $V_{out}$  - ובהתאם ל  $I_{in}$ . המתח  $V_{out}$  מייצג את המתח  $V_{ds}$  ברכיב  $2M$ . כתוצאה מהזרם  $I_{in}$  נקבל מתח מסוים ל- $V_{ds}$  ו- $V_{gs}$  של רכיב  $1M$  (שכפי שכבר הסברנו הם שווים אחד לשני ב-current mirror). וכך מקבלים גם את המתח  $V_{gs}$  ברכיב  $2M$ , מאחר שה- $gate$  של הרכיבים מחובר.

כאשר  $V_{out} < V_{dsat}$ , נקבל שיפוע לינארי בזרם. וכאשר  $V_{out} > V_{dsat}$ , נהיה במצב סטורציה. ניתן לראות שעבור כל כניסה של זרם בגודל מסוים, נקבל התייצבות בקירוב על אותו הערך ב- $I_{out}$  (עבור  $V_{ds} > V_{dsat}$ ) עד כדי שיפוע קטן שנובע מאפקט התקצרות התעלה לפי הנוסחה שלמדנו (השינוי שהוספנו

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

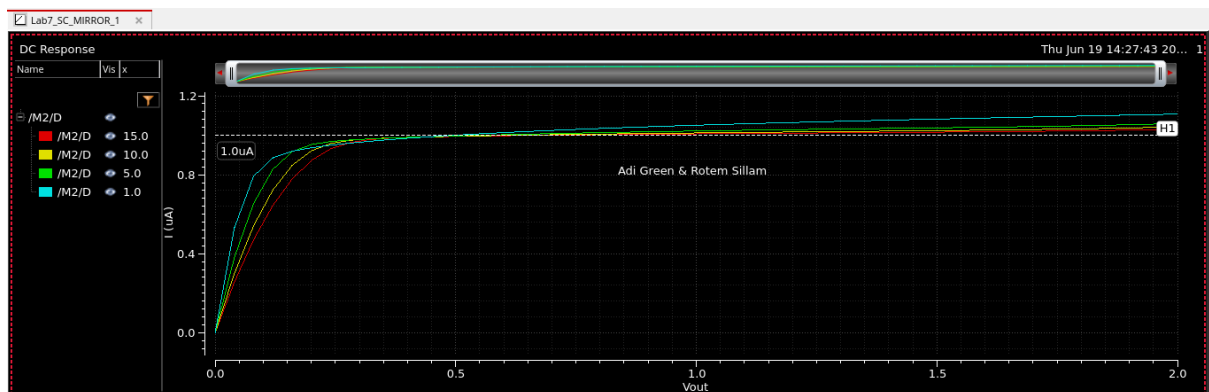
הוא  $\lambda$



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

עשינו סימולציות שבהן בחרנו אנליזת dc של הזרם M2\_lout כתלות ב-Vout.

תחילה, נראה את ההשפעה של L על הזרם Iout. הגדרנו שזרם הכניסה הוא 1uA ואורך התעלה משתנה (1,5,10,15=x), וכתוצאה מכך L משתנה (L=2x).



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

ניתן לראות שבאזור הלינארי - לפי הנוסחה:

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

ובאזור של הסטורציה - לפי הנוסחה:

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

בנוסף, אנו יודעים כי ככל שלמדה יותר קטנה כך הזרם משתקף בצורה יותר מדויקת לפי הנוסחה

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

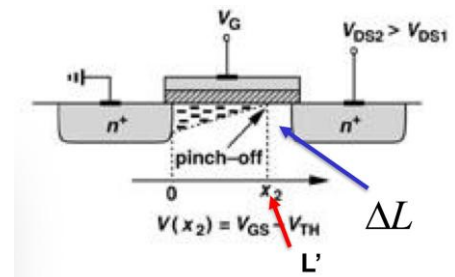
כאשר Iref (זרם ייחוס) הוא הזרם שמוזן ל-PMOS הראשון במראה, והוא זה "שמכתיב" את הזרם שיועתק הלאה. במקרה שלנו, Iref הכוונה לזרם Iin.

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

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

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

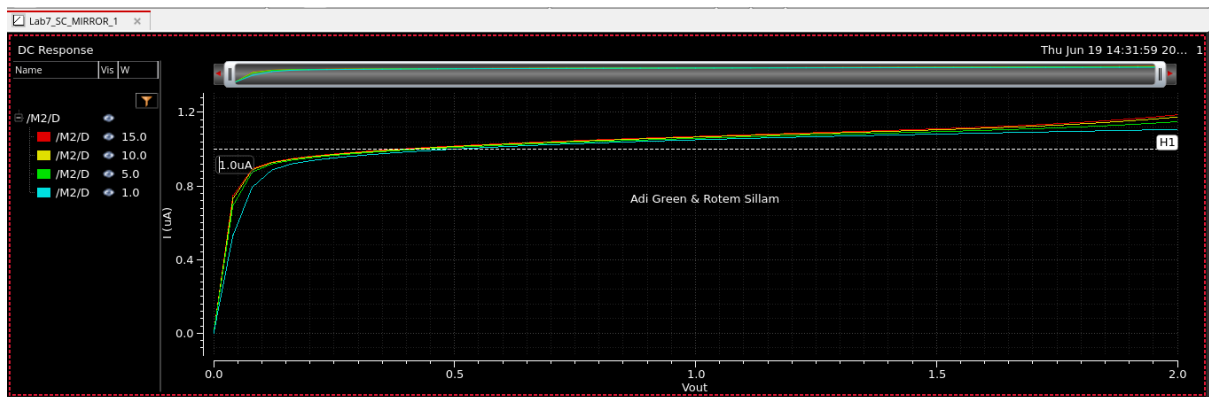
$$\frac{1}{L'} = \frac{1}{L} (1 + \lambda V_{DS}), \quad \lambda V_{DS} = \Delta L / L$$



כלומר ככל שL גדל, כך λ קטן.

אמרנו שככל ש λ קטן יותר, כך זרם המראה משתקף בצורה יותר מדויקת למקור. ניתן לראות בגרפים שצירפנו, שככל שא גדל אז L גדל, כך אנחנו מקבלים שהזרם מתייצב על ערך יותר קרוב ל1uA, שזהו ערך זרם המקור שלנו.

- כעת, נראה את ההשפעה של  $W$  על הזרם  $I_{out}$ .  
אנו מגדירים כעת שזרם הכניסה הוא  $1\mu A$  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:

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

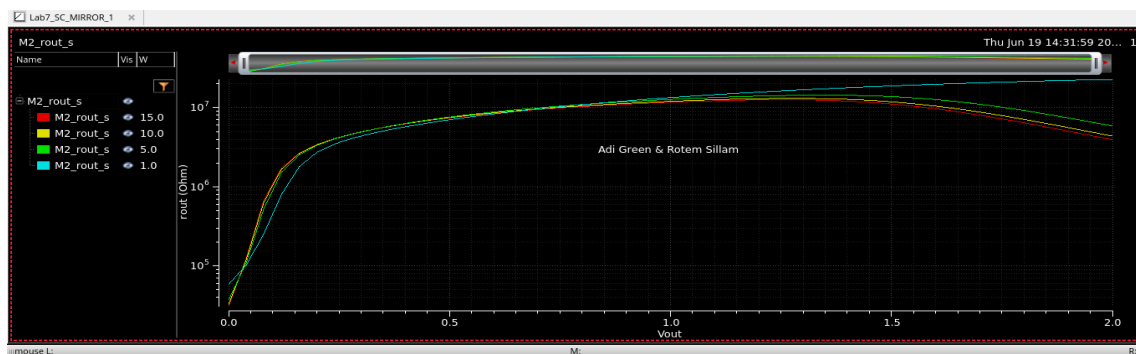
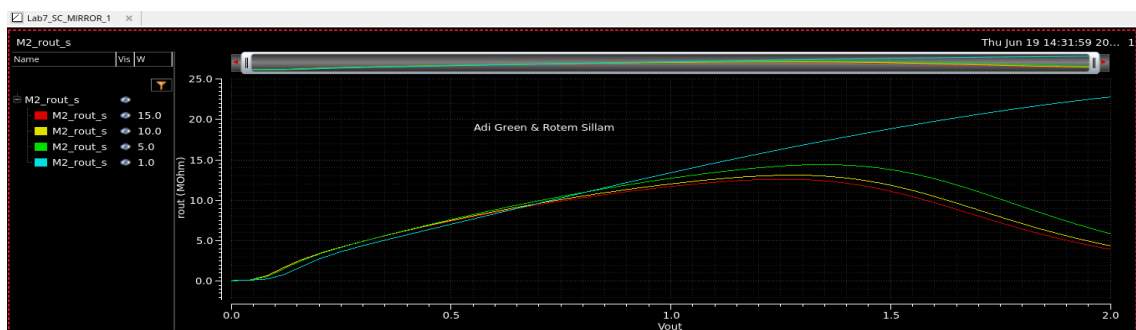
ובאזור של הסטורציה - לפי הנוסחה:

ככל ש  $W$  יותר גדול, אז הזרם יותר גדול. ואכן ניתן לראות זאת בגרף, בשני אזורים אלו.

### route:

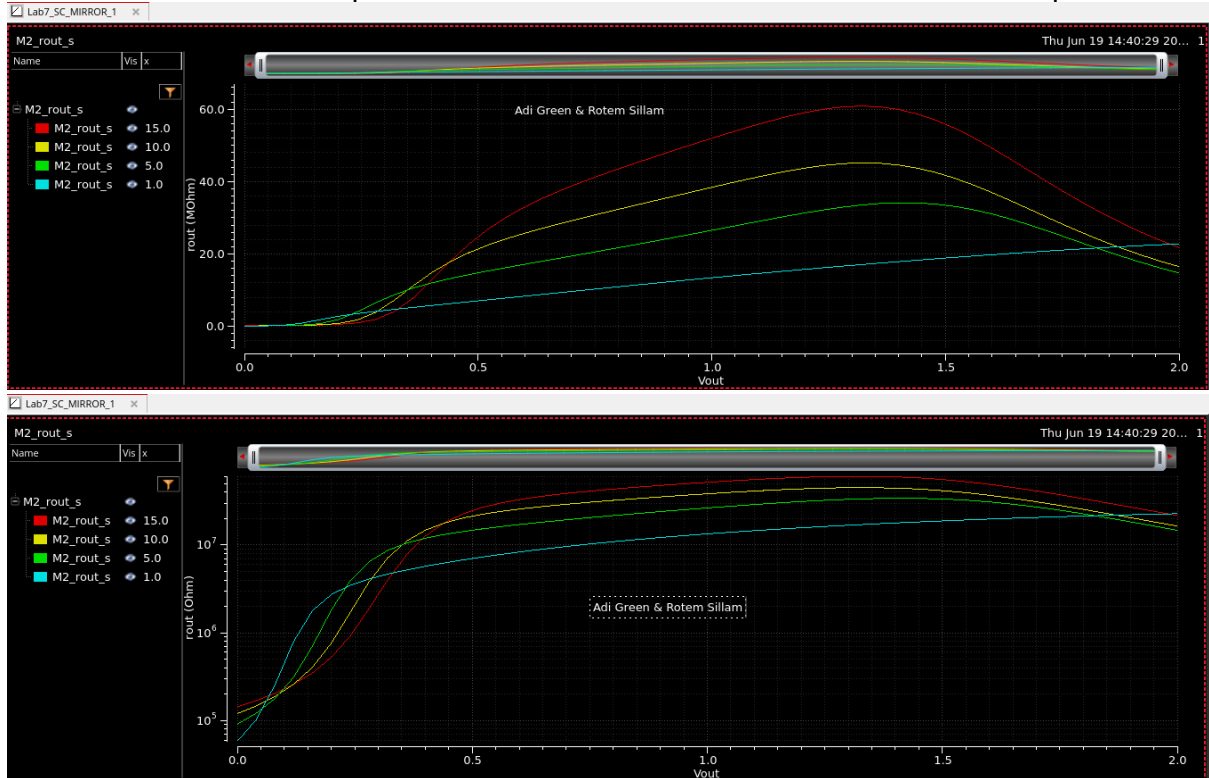
- הערה: לאחר בדיקה עם מתרגלים, נתייחס לגרפים מנקודת ההתחלה שלהם עד הנקודה בה הם מתחילים לרדת. בנקודה בה הם מתחילים לרדת מתרחשות תופעות מסדר שני.

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 שהזרם יותר גדול, כך  $R_{out}$  יותר קטן. ואכן ניתן לראות לפי הגרף, שככל W יותר גדול,  $R_{out}$  יותר קטן.

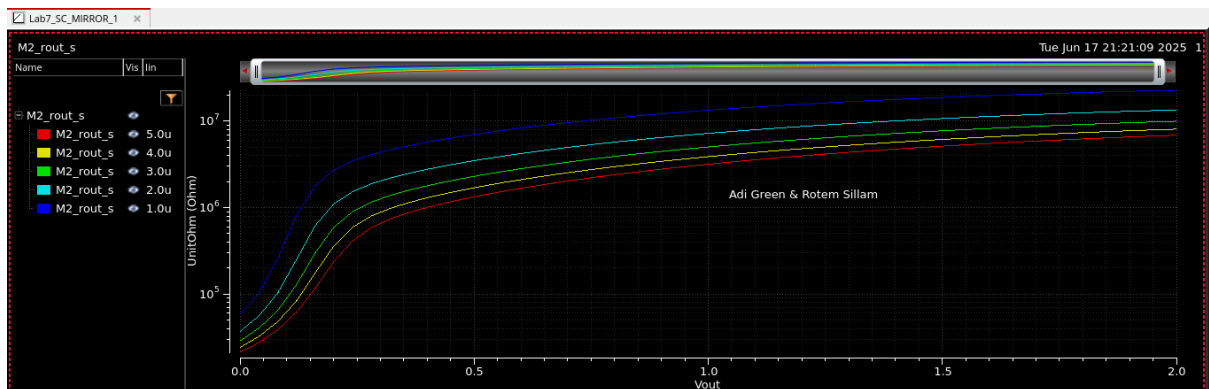
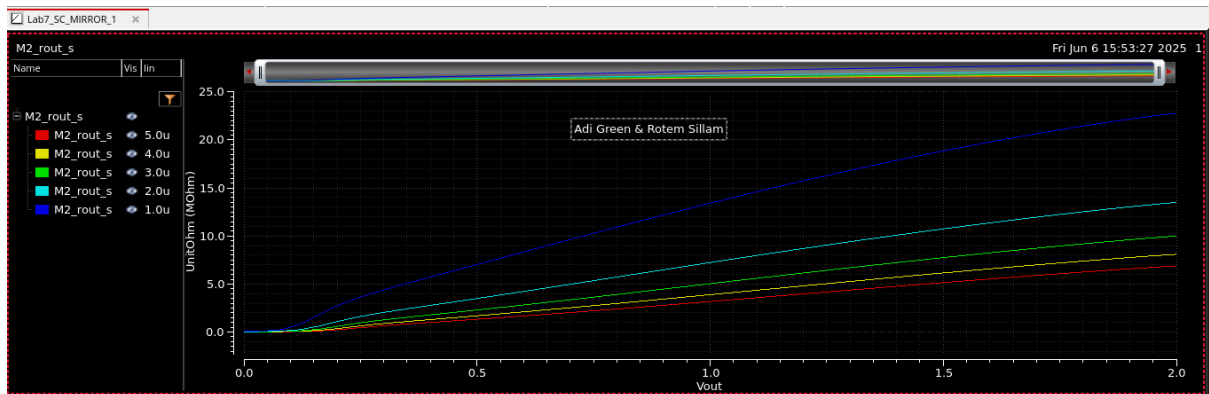
- נבדוק את השפעת ערכי L על  $R_{out}$ . הגדרנו את הערכים בדומה למקודם.



כפי שאמרנו, ככל ש-L יותר גדול (כלומר x יותר גדול), הזרם יותר קטן. ולפי הנוסחה  $r_{ds} = \frac{\partial V_{ds}}{\partial I_{ds}}$ , כאשר מסתכלים על  $V_{ds}$  זהה, ככל שהזרם יותר קטן, כך  $R_{out}$  יותר גדול. ואכן ניתן לראות לפי הגרף, שככל x יותר גדול,  $R_{out}$  יותר גדול.

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

שינינו את הזרם  $I_{out}$  לערכים 5A-1, כפי שהתבקשנו.

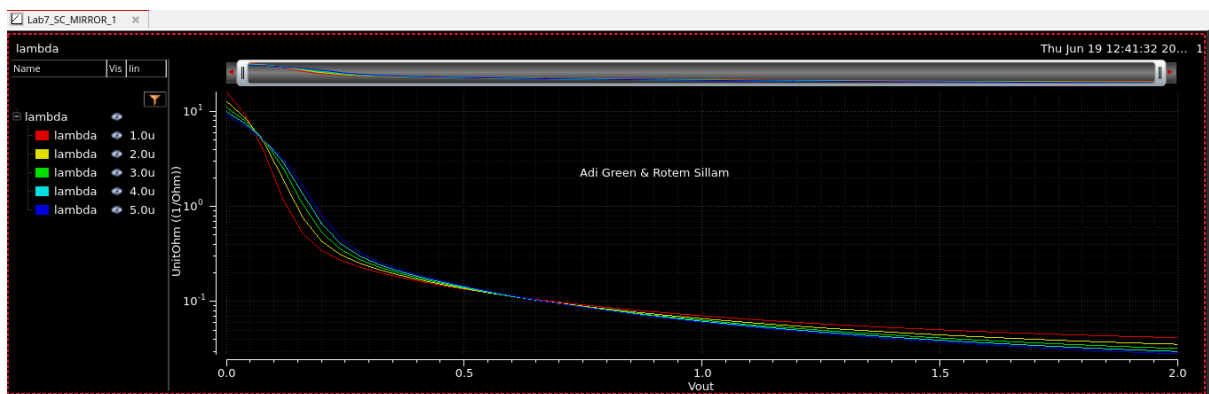
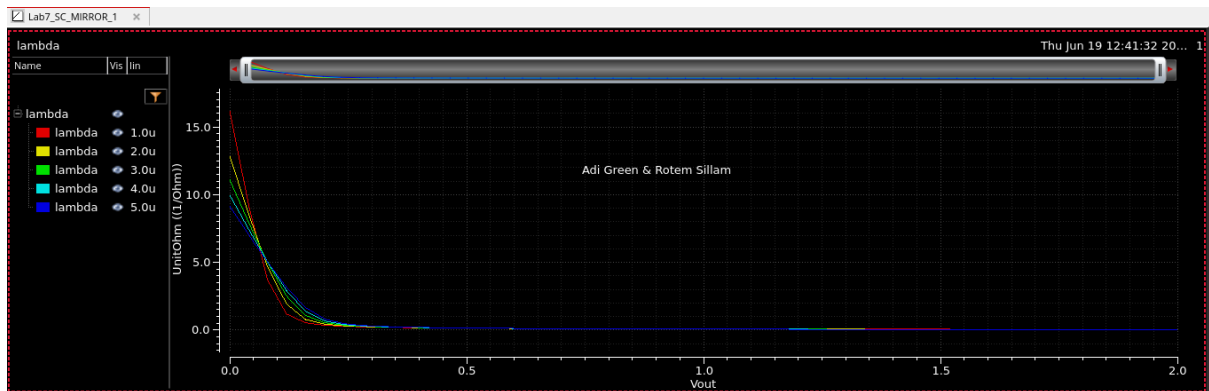


לפי הנוסחה  $r_{ds} = \frac{\partial V_{ds}}{\partial I_{ds}}$ , ניתן לראות כאשר אנו מסתכלים על  $V_{ds}$  (=vout) זהה, ככל שאנו מגדילים את הערך של הזרם  $I_{ds}$ , ההתנגדות  $R_{ds}$  קטנה. ניתן לראות זאת לפי הגרף שכאשר הזרם  $I_{out}$  גדל אז הזרם  $I_{out}$  גדל (זרם מראה) וההתנגדות קטנה.

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

על מנת למצוא את למדה, נשתמש בנוסחה:

Name	Type	Details	Plot	Save	Spec
Filter	Filter				
M2_minspare	expr	ymin(M2_spare)			> 0.05
M2_spare_s	expr	(abs(M2_vds_s) - abs(M2_vdsat_s))			
M2_minspare_s	expr	ymin(M2_spare_s)			> 0.05
M1_vdsat_s	expr	OS("/M1" "vdsat")			
M1_vds_s	expr	OS("/M1" "vds")			
M1_vth_s	expr	OS("/M1" "vth")			
M1_gm_s	expr	OS("/M1" "gm")			
M1_rout_s	expr	OS("/M1" "rout")			
M1_spare	expr	(abs(M1_vds) - abs(M1_vdsat))			
M1_lin	signal (f)	/M1/D			
M1_minspare	expr	ymin(M1_spare)			> 0.05
M1_spare_s	expr	(abs(M1_vds_s) - abs(M1_vdsat_s))			
M1_minspare_s	expr	ymin(M1_spare_s)			> 0.05
signal (f)	signal (f)	/0/PLUS			
Vgs	signal	/lin			
M2_lout	signal (f)	/M2/D			
lambda	expr	(1 / (IDC("/M2/D") * M2_rout_s))			

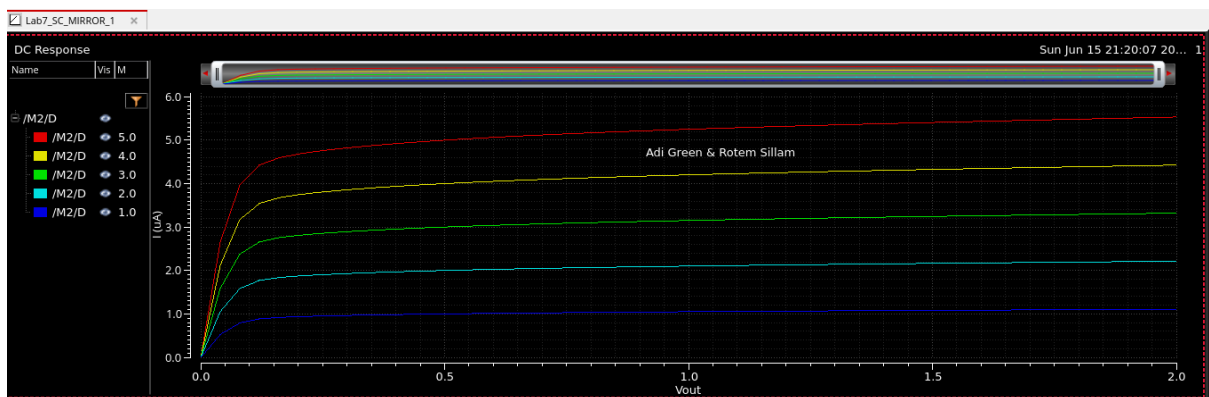
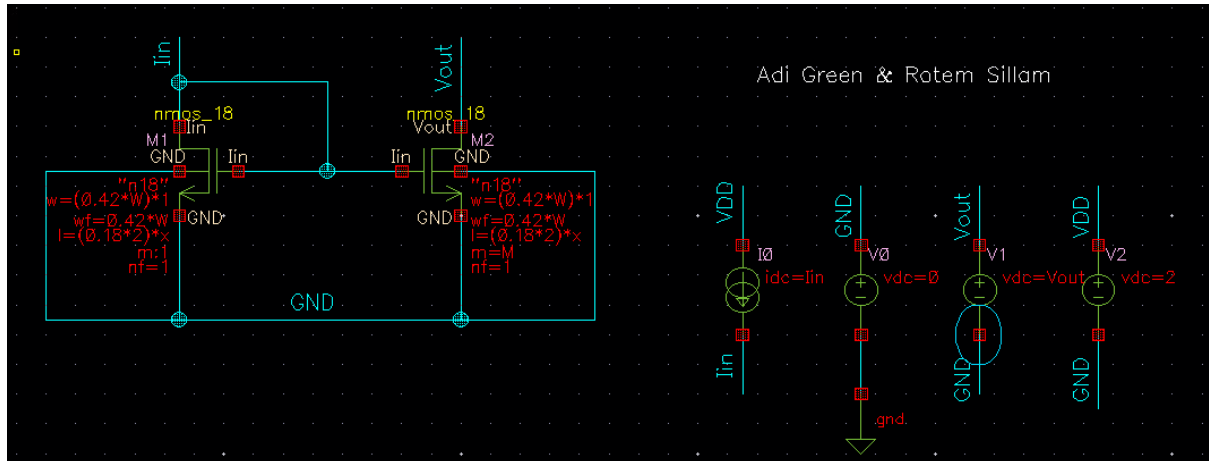


ניתן לראות מהנוסחה:  $\lambda \approx \frac{1}{R_{ds} I_{ds}} = \frac{1}{R_{ds} I_{out}}$  (באזור הסאטורציה)

כפי שאמרנו, ככל שמגדילים את הזרם  $I_{out}$ , הזרם  $I_{ds}$  גדל מאחר שמדובר בזרם מראה, אבל ההתנגדות  $R_{ds}$  קטנה, ולכן זה עם השינוי היותר גדול הוא זה שיותר ישפיע על למדה. ניתן לראות מהגרף שבאזור הסאטורציה, ככל שהזרם  $I_{out}$  גדול, כך הלמדה יותר קטנה, ומכאן אנחנו מסיקים שלזרם  $I_{ds}$  יש השפעה יותר גדולה על למדה.

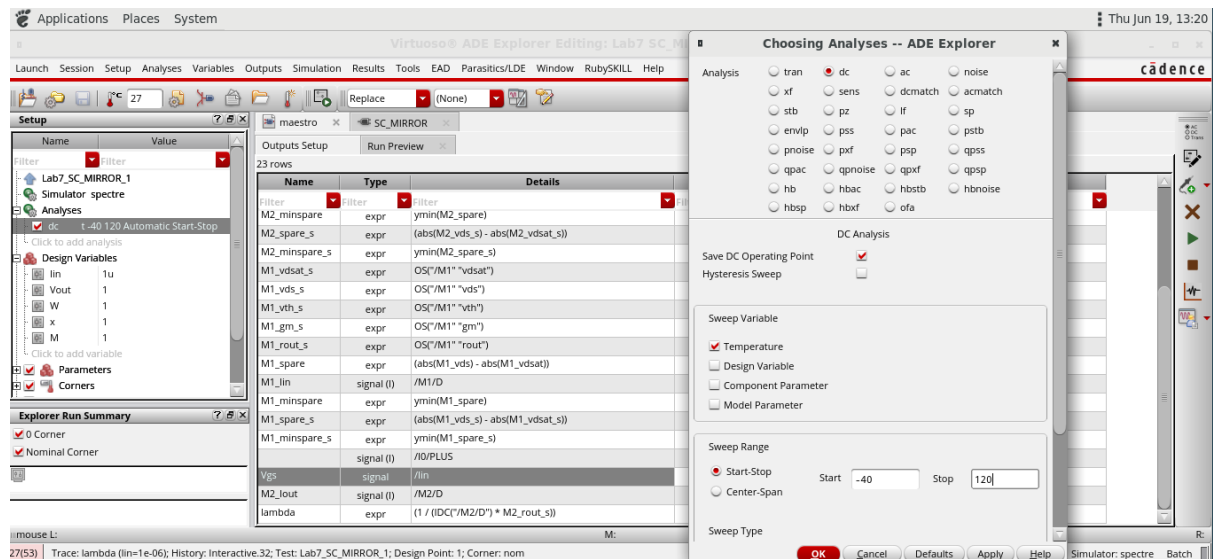
(g) **CURRENT MULTIPLIER:** Scale the current between M1 and M2. W/L of M2 should be a multiple of W/L of M1. To do this, set the multiplier parameter in the device – this scales the number of devices being used.

הוספנו ב-schematic את הפרמטר M ב-multiplier ברכיב 2M. ה-multiplier מדמה חיבור של כמה טרנזיסטורים זהים במקביל, ולכן הזרם של רכיב 2M מוכפל פי M, וכך נקבל כפי שנדרש ש-W/L של רכיב 2M יהיה כפולה של W/L של רכיב 1M. עשינו סימולציה שבה שינינו את הפרמטר M לערכים 1-5, בקפיצות של 1.

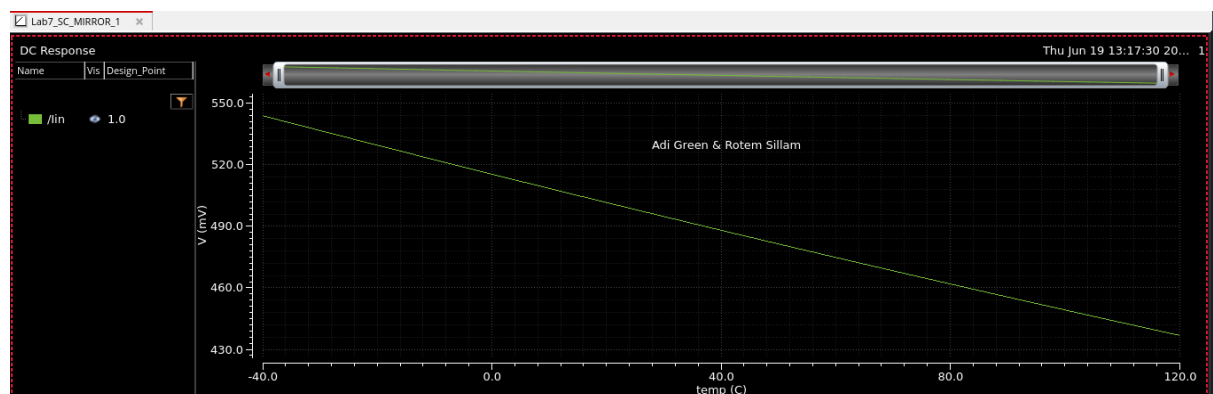


ניתן לראות שככל ש-M יותר גדול, כך הזרם  $I_{out}$  גדל אף הוא, מאחר שכפי שאמרנו זה מכפיל את W/L של רכיב 2M. בנוסף, ניתן לראות ש-M הוא כמו מעין מגבר, כלומר כאשר  $M=1$  נקבל בקירוב את הזרם  $I_{in}$  שעובר דרך 1M. עבור כל ערך שנשים ב-M, נקבל את הזרם  $I_{in}$  מוכפל באותו ערך M (לדוגמה  $M=2$ , נראה התייצבות של הזרם בערך על 2 uA).

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



lin - זהו שם החוט בכניסת gaten של NMOS-ים. הגדרנו כניסת source כGND ולכן  $V_{gs} = V_g - V_s = \text{lin}$ .  
 $\text{lin} = 0$ , לכן רואים שלקחנו כניסת lin.



כל שהמוביליות יותר טובה, יהיה לאלקטרונים יותר קל לעבור בתעלה. אך הטרנזיסטור ירצה לשמור על זרם כניסה שקבענו, לכן יתאים את מתח הכניסה בהתאם.  
 בטמפרטורה יותר גבוהה, המוביליות יותר טובה, ולכן נצטרך מתח כניסה נמוך יותר כדי לשמור על הזרם שקבענו שיכנס.  
 ניתן לראות זאת בגרף:  
 טמפרטורה יותר נמוכה -> מתח כניסה יותר גבוהה  
 טמפרטורה יותר גבוהה -> מתח כניסה יותר נמוך