מבוא לחישוביות וקוגניציה

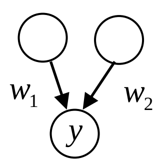
תרגיל מסכם

להגשה עד:
21/02/2021

הוראות כלליות

1. עבור החלק הראשון (האנליטי), יש להגיש פיתוח מתמטי מלא של התשובות. ניתן להגיש פתרון מוקלד דרך מערכת המודל. **יש להגיש קובץ docx או tex יחיד הניתן לעריכה** כך שנוכל להוסיף לו הערות (רצוי לצרף גם עותק ב-PDF). שם הקובץ (או הקבצים) יהיה final_ex_part1_ID1_ID2. נא לא להגיש פתרונות סרוקים.
2. עבור החלק השני (התכנותי), יש להגיש מסמך PDF **יחיד** בשם final_ex_part2_ID1_ID2.pdf (ניתן להשתמש ב-word ולשמור כ-PDF), וכן **קובץ zip יחיד** בשם final_ex_part2_ID1_ID2.zip **המכיל את כל קבצי הקוד**. הוראות הגשה נוספות מפורטות בהמשך.
3. שאלות בנוגע למטלה יש להעלות בפורום המתאים באתר הקורס במודל. שאלות שיופנו אלינו במייל **לא יענו** (פרט לשאלות ובקשות חריגות).

חלק I – שאלות אנליטיות (25 נק' לכל שאלה)



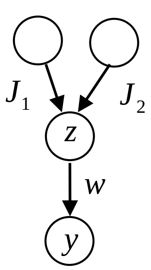
1. נתונה רשת נוירונים לינארית בעלת שני נוירוני קלט ונוירון פלט יחיד, כמתואר בתרשים. הגירויים שמקבלת הרשת, u_1 ו-u_2, הם מספרים ממשיים כלשהם והפלט של הרשת הוא מהצורה $y = w_1u_1 + w_2u_2$. לאחר כל הצגה של קלט המערכת מקבלת גמול r ומטרת הלמידה היא לחזות את הגמול.
הגירויים והחוק הקובע את הגמול מאופיינים על-ידי הנתונים הסטטיסטיים הבאים:
$$\langle ru_1\rangle = \alpha_1 \ ,\langle ru_2\rangle = \alpha_2 \ ,\langle u_1u_2\rangle = \beta \ ,\langle u_1^2\rangle = \gamma_1 \ ,\langle u_2^2\rangle = \gamma_2 \ ,\langle u_1\rangle = \langle u_2\rangle = 0$$

א. (6 נק') פתחו כללי למידה (און-ליין) לקשרים w_1 ו-w_2 אשר מביאים למינימום את השגיאה הריבועית הרגעית:
$$\varepsilon = \frac{1}{2}(r-y)^2 = \frac{1}{2}(r - w_1u_1 - w_2u_2)^2$$

ב. (8 נק') בעזרת ניתוח של התכנסות בממוצע, מצאו את הקשרים בסוף הלמידה בשני המקרים הבאים (אין צורך למצוא את התנאי להתכנסות, אלא רק את הקשרים הסופיים). בכל אחד מהמקרים, מצאו ביטוי מפורש לפלט y כתלות ב-u_1 וב-u_2.

i. $\alpha_2 = 2\alpha \ ,\alpha_1 = \alpha \ ,\gamma_2 = 2\gamma \ ,\gamma_1 = \gamma \ ,\beta = 0$

ii. $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha \ ,\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma \ ,\beta > 0$

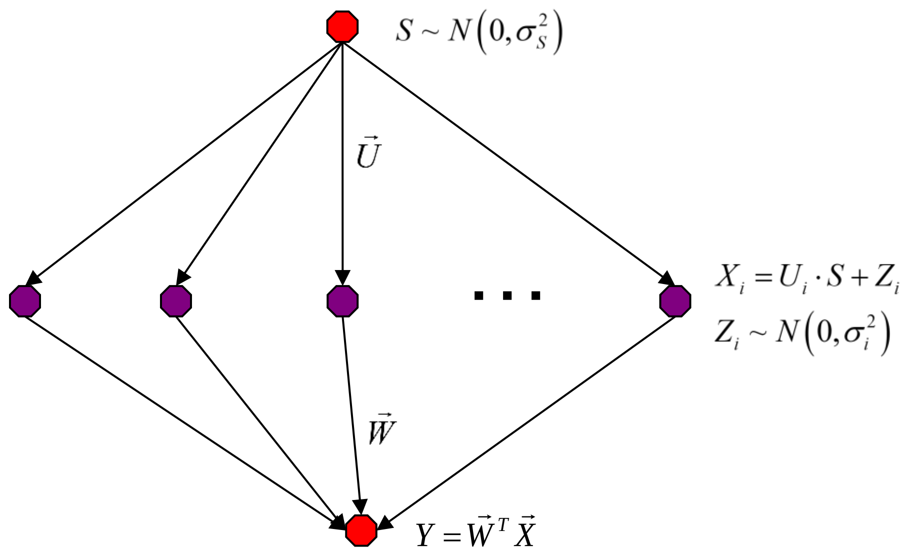


ג. במקרים מסוימים, בגלל מגבלות חישוביות יש להוריד את ממד הקלט לפני חיזוי הגמול. נתונה רשת אשר מפחיתה תחילה את הממד בעזרת PCA ואז מבצעת חיזוי לינארי של הגמול לפי רכיב יחיד (ראו תרשים). בשלב ה- PCA וקטור הקשרים לאחר הלמידה מנורמל ל-1. משוואות הרשת הן:
$$z = J_1u_1 + J_2u_2$$
$$y = wz$$
גם כאן, כלל הלמידה ל-w נגזר מהשגיאה הריבועית.

i. (3 נק') רשמו כלל למידה ל-w ובעזרת ניתוח של התכנסות בממוצע רשמו ביטוי לערך של w בסוף הלמידה כתלות בגדלים $\langle rz\rangle$ ו-$\langle z^2\rangle$.

ii. (8 נק') השוו את התנהגות רשת זו (בהנחה שכבר למדה והגיעה לקשרים האופטימליים) לרשת המקורית עבור שני המקרים שבסעיף ב'. בכל אחד מהמקרים קבעו תחילה מה יהיו הקשרים בשני שלבי העיבוד ומצאו ביטוי מפורש לפלט y כתלות ב-u_1 וב-u_2. דונו בקצרה בתוצאות.

2. נתונה רשת feed-forward כמתואר בציור:



האות המתקבל בשכבת הקלט מתפלג נורמלית עם תוחלת 0 ושונות σ_S^2. פעילות הנוירונים בשכבת הביניים נקבעת על ידי הקלט ורעש גאוסי בלתי תלוי עם ממוצע 0 ושונות σ_h^2 כך ש-$X_i = U_i S + Z_i$ ו-$Z_i \sim N(0,\sigma_h^2)$. שונות הרעש זהה לכל נוירוני הביניים. נוירון הפלט הוא לינארי ופעילותו היא צירוף לינארי של הפעילויות בשכבת הביניים, כלומר $Y = \vec{W}^T \vec{X}$. מטרת הרשת למזער את שגיאת השחזור הריבועית כך שהפלט יהיה כמה שיותר קרוב לקלט.
בסעיפים א' ו-ב' נניח כי וקטור הקשרים משכבת הקלט לשכבת הביניים הוא אחיד כך ש- $U_i = 1\ \forall i$.

א. נניח כעת שממד שכבת הביניים הוא 1 (נוירון אחד בשכבת הביניים) כך ש $U_1 = 1$.

i. (7 נק') מהו ערכו של W הממזער את שגיאת השחזור הריבועית?

<u>הדרכה:</u> רשמו תחילה את הביטוי לשגיאה הריבועית וזכרו כי יש למצע הן על התפלגות הקלט והן על הרעש בנוירון הביניים.

ii. (6 נק') ציירו תרשים איכותי עם שלושה גרפים, המתארים את ערכו הממוצע של Y כפונקציה של S עבור שלושת המקרים הבאים:

(1) $\sigma_S^2 \gg \sigma_h^2$ (2) $\sigma_S^2 = \sigma_h^2$ (3) $\sigma_S^2 \ll \sigma_h^2$.

הסבירו בקצרה את התוצאות.

ב. (7 נק') מהו ערכו של $\vec{W}$ הממזער את שגיאת השחזור הריבועית כאשר ממד שכבת הביניים הוא 2, כך ש-$U_1 = U_2 = 1$?

ג. (5 נק') נניח כי ישנם M נוירוני ביניים. בהנחה שאין אילוצים על וקטורי הקשרים, כיצד כדאי לבחור את הוקטורים $\vec{U}$ ו-$\vec{W}$ כדי להקטין את שגיאת השחזור הריבועית?

<u>רמז:</u> התשובה לשאלה זו אינה דורשת חישובים מתמטיים מפורשים.

חלק II – מימוש כלל ה-E-learning עבור בעיית הכרונוטרון (50 נק')

מבוא

בבעיית הכרונוטרון[1] מנסים לאמן נוירון I&F לירות עבור דוגמאות נתונות **בדיוק בזמנים הנתונים** על ידי המורה. למשל, עבור כרונוטרון בעל 3 נוירוני קלט, אחת מדוגמאות האימון יכולה לכלול את זמני הירי הבאים בקלט (במילישניות):

$$\{t_1^j\}_j = \{12.3,33.5,50.7\}$$

$$\{t_2^j\}_j = \{24.1,35.8,44.7,55.2,64.6\}$$

$$\{t_3^j\}_j = \{8.6,29.5,50.7,77.8\}$$

והפלט שהמורה דורש בתגובה הוא ירי של הנוירון בזמנים הבאים (במילישניות):

$$\{\tilde{t}_f^k\}_k = \{10.1,20.2,30.3,40.4,50.5,60.6,70.7,80.8\}$$

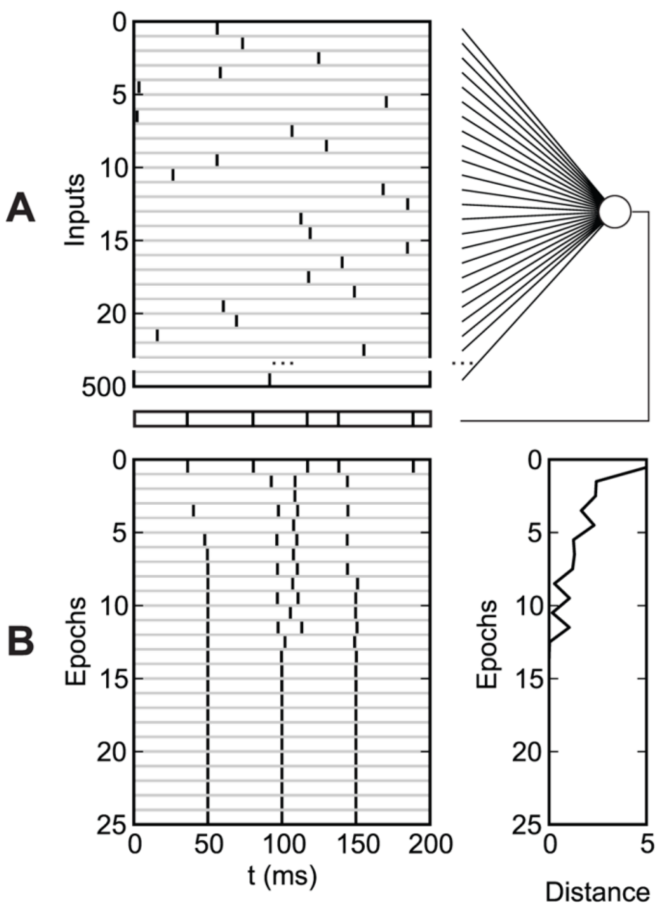
בגרף המצורף תוכלו לראות למידה של כרונוטרון על דוגמה יחידה.

A: הנוירון הפוסט סינפטי באיור מקבל קלט מ-500 נוירוני קלט. במטריצה משמאל, כל שורה i מתארת זמני ירי של נוירון מסויים $\{t_i^j\}_j$, כאשר כל קו שנמצא בתוך השורה מתאר את הספייק ה-j של נוירון הקלט, המתרחש בזמן t_i^j. לדוגמא הנוירון הראשון (השורה העליונה) ירה רק בזמן $\sim 60\text{ms}$ ואפשר לייצג את זמני הירי שלו באמצעות הקבוצה: $\{t_1^j\}_j = \{60\text{ms}\}$.

מימין למטריצה מוצגת הרשת: כל נוירון קלט i תורם לשינוי מתח הנוירון הפוסט סינפטי לפי הצורה $\lambda_i(t)$ (ראו בהמשך) אשר מוכפלת במשקל הנוירון w_i. בנוירון הפלט מתבצעת סכימה של שינוים אלו. בהנחה של מודל SRM_0 אנו מקבלים את זמני הספייקים של הנוירון הפוסט סינפטי, אותו ניתן לראות בשורה שמתחת לנוירוני הקלט (בדומה לטמפוטרון).

B: במהלך תהליך הלמידה, הכרונוטרון משנה את המשקולות כדי שזמני הירי של נוירון הפלט $\{t_f^j\}_j$, יהיו דומים לזמני הירי של המורה $\{\tilde{t}_f^k\}_k$. כאן נראה שהפלט הרצוי של המורה עבור הדוגמה הינו $\{\tilde{t}_f^k\}_k = \{50,\ 100,\ 150\}$ (במילישניות). אפשר לראות שככל שהלמידה מתקדמת, כלומר ככל שעוברים יותר *epochs*, הפלט של הכרונוטרון הולך ונהיה דומה למורה והכרונוטרון לומד לירות בזמן הנכון.

בגרף מימין למטה ניתן לראות את המרחק (Victor-Purpura) בין זמני הירי של הכרונוטרון ביחס לזמני הירי של המורה. נשים לב שבמהלך הלמידה המרחק יורד וכאשר הכרונוטרון מגיע לתזמון הרצוי, המרחק מתאפס.



[1] Florian, R. The chronotron: a neuron that learns to fire temporally-precise spike patterns. *Nat Prec* (2010). https://doi.org/10.1038/npre.2010.5190.1
Florian RV (2012) The Chronotron: A Neuron That Learns to Fire Temporally Precise Spike Patterns. PLOS ONE 7(8): e40233. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040233

פונקציית השגיאה

לשם כך, יש להגדיר פונקציית שגיאה מתאימה בין זמני הספייקים של הפלט של הכרונוטרון (עבור הדוגמה הנתונה) לבין $\left\{t_f^j\right\}_j$ זמני הספייקים של המורה (עבור הדוגמה הנתונה) $\left\{\tilde{t}_f^k\right\}_k$. פונקציה מתאימה היא, למשל, מרחק Victor-Purpura בין זמני ספייקים (ראו שאלה 5 בתרגיל 1). פונקציית מרחק זו מבוססת על בחירה מתאימה של:

- ספייקים קיימים שצריך להסיר $\mathcal{F}_{rm} \subseteq \left\{t_f^j\right\}_j$ ($rm = \text{remove}$).
- ספייקים חדשים שצריך ליצור $\mathcal{F}_{add} \subseteq \left\{\tilde{t}_f^k\right\}_k$.
- ספייקים שמספיק להזיז מעט $\mathcal{F}_{mv} \subseteq \left\{t_f^j\right\}_j \times \left\{\tilde{t}_f^k\right\}_k$ (שימו לב שכל איבר ב-$\mathcal{F}_{mv}$ הוא זוג סדור, למשל $\left(t_f^3, \tilde{t}_f^7\right)$ מייצג הזזה של t_f^3 ל-$\tilde{t}_f^7$).

החלוקה לקבוצות השונות נקבעת באמצעות הפרמטר $\tau_q > 0$, אשר קובע את ה"מחיר" שיש לשלם על הזזת ספייק: $\sigma\left(\frac{\left|t_f^j-\tilde{t}_f^k\right|}{\tau_q}\right)$, כאשר σ היא פונקצייה עולה ממש בקטע $[0,\infty)$ (הבחירה המקורית היא $\sigma(x) = x$). כיוון שה"מחיר" על הוספת או מחיקת ספייק הוא קבוע (שערכו 1), נעדיף להזיז ספייק רק אם ה"מחיר" המתאים מקיים $\sigma\left(\frac{\left|t_f^j-\tilde{t}_f^k\right|}{\tau_q}\right) < 2$ – אחרת נעדיף למחוק את הספייק הקיים ולהוסיף ספייק חדש במקום המתאים. בסימונים האלה, השגיאה המתאימה לבעיית הכרונוטרון היא:

$$\varepsilon_{VP} = \sum_{t_f^j \in \mathcal{F}_{rm}} 1 + \sum_{\tilde{t}_f^k \in \mathcal{F}_{add}} 1 + \sum_{\left(t_f^j, \tilde{t}_f^k\right) \in \mathcal{F}_{mv}} \sigma\left(\frac{\left|t_f^j - \tilde{t}_f^k\right|}{\tau_q}\right)$$

פונקציית השגיאה הזו אינה גזירה כאשר יש להסיר או להוסיף ספייק. לכן, נגדיר פונקציית שגיאה מעט שונה:

$$\varepsilon = \sum_{t_f^j \in \mathcal{F}_{rm}} V\left(t_f^j\right) + \sum_{\tilde{t}_f^k \in \mathcal{F}_{add}} \left(\theta - V\left(\tilde{t}_f^j\right)\right) \quad + \gamma_d \sum_{\left(t_f^j, \tilde{t}_f^k\right) \in \mathcal{F}_{mv}} \sigma\left(\frac{\left|t_f^j - \tilde{t}_f^k\right|}{\tau_q}\right)$$

כאשר $\gamma_d > 0$ הוא קבוע לתיאום יחידות ו-$V(t)$ הוא מתח הממברנה בזמן t. המטרה היא להעלות את מתח הממברנה לעבר מתח הסף כאשר רוצים ליצור ספייק חדש (האיברים מהצורה $\left(\theta - V\left(\tilde{t}_f^k\right)\right)$) ולהוריד אותו כאשר רוצים להסיר ספייק קיים (האיברים מהצורה $V\left(t_f^j\right)$). שימו לב שהסרת ספייק מתייחסת למתח הממברנה בדיוק ברגע שהמתח מגיע למתח הסף, ולכן עדיין אין צורך להתייחס למנגנון הירי עצמו (בניגוד למצב בבעיית הטמפוטרון).

כלל הלמידה

נניח שהזרם הסינפטי בעקבות פוטנציאל פעולה פרה-סינפטי הוא מהצורה $I_s(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau_s}} \Theta(t)$, ושהוא גורם ליצירת פוטנציאל פוסט-סינפטי מהצורה $K(t)$ (כפי שלמדנו בפרק הטמפוטרון). כמו כן, נניח מודל SRM_0 עבור מתח הממברנה (בדומה לשאלה 4 מתרגיל 1), המאפשר טיפול אנליטי בבעיה. עבור מודל זה, נקבל:

$$V(t) = \sum_i w_i \sum_{t_i^j} K\left(t - t_i^j\right) - \theta \sum_{t_f^j < t} e^{-\frac{t - t_f^j}{\tau_m}}$$

לשם נוחות, נגדיר בנפרד את התרומה (ללא המשקל) של כל נוירון פרה-סינפטי למתח הכולל $\lambda_i(t) \equiv \sum_{t_i^j} K\left(t - t_i^j\right)$. בסימון זה:

$$V(t)=\sum_i w_i\lambda_i(t)-\theta\sum_{t_f^j<t} e^{-\frac{t-t_f^j}{\tau_m}}$$

תחת הנחות וקירובים מסויימים ניתן לגזור את פונקציית השגיאה שהגדרנו לפי המשקלים $\vec{w}$. בהנחה שבחרנו $\sigma(x)=\frac{x^2}{2}$, כלל הירידה במורד הגראדיינט יהיה:

$$\Delta w_i=\eta\left(\sum_{\tilde{t}_f^j\in\mathcal{F}_{add}}\lambda_i\left(\tilde{t}_f^j\right)-\sum_{t_f^k\in\mathcal{F}_{rm}}\lambda_i\left(t_f^j\right)\quad+\frac{\gamma_r}{\tau_q^2}\sum_{\left(t_f^j,\tilde{t}_f^k\right)\in\mathcal{F}_{mv}}\left(t_f^j-\tilde{t}_f^k\right)\lambda_i\left(t_f^j\right)\right)$$

כאשר $\gamma_r>0$ הוא קבוע (המחליף בתפקידו את γ_d) ו-$\eta>0$ הוא קצב הלמידה. כלל למידה זה נקרא כלל ה-E-learning של הכרונוטרון.

סיווג הספייקים

כל שנותר לנו לעשות הוא להחליט אילו ספייקים יש להסיר, אילו ליצור ואילו להזיז. לשם כך, נשתמש בגרסה מעט שונה של האלגוריתם של Victor-Purpura (שמימשתם בתרגיל 1). ***מומלץ לעבור על חלק זה בזמן כתיבת הקוד***.

הקלט: סדרת זמני ספייקים $\mathcal{F}^{\text{source}}$, סדרת זמני ספייקים של המורה $\mathcal{F}^{\text{target}}$ הפרמטר τ_q והפונקציה σ.
נניח שסדרות זמני הספייקים ממויינות מהזמן המוקדם למאוחר.

1. נסמן ב-$n_{\text{source/target}}$ את כמות הספייקים עבור הסדרה $\mathcal{F}^{\text{source/target}}$.
2. ניצור את המבנים הבאים:
   2.1 מטריצה D שמספר השורות בה הוא $n_{\text{source}}+1$ ומספר העמודות בה הוא $n_{\text{target}}+1$.
   2.2 מטריצה S^{add} שמספר השורות בה הוא $n_{\text{source}}+1$ ומספר העמודות בה הוא $n_{\text{target}}+1$, כאשר כל איבר בה הוא וקטור המייצג קבוצה של ספייקים (נאתחל את האיברים בווקטורים ריקים).
   2.3 מטריצה S^{rm} שמספר השורות בה הוא $n_{\text{source}}+1$ ומספר העמודות בה הוא $n_{\text{target}}+1$, כאשר כל איבר בה הוא וקטור המייצג קבוצה של ספייקים (נאתחל את האיברים בווקטורים ריקים).
   2.4 מטריצה S^{mv} שמספר השורות בה הוא $n_{\text{source}}+1$ ומספר העמודות בה הוא $n_{\text{target}}+1$, כאשר כל איבר בה הוא מטריצה בעלת שתי שורות המייצגת קבוצה של זוגות ספייקים (נאתחל את האיברים במטריצות ריקות).
3. נאתחל את השורה הראשונה:
   3.1 של D בערכים $\left(0,1,2,\dots,n_{\text{target}}\right)$, כלומר $D_{1j}=j-1$.
   3.2 של S^{add} בווקטורים הבאים: $S_{1j}^{add}=\{1,2,\dots,j-1\}$.
   3.3 של S^{rm} בוקטורים ריקים.
   3.4 של S^{mv} במטריצות ריקות.
4. עבור כל שורה i (למעט השורה הראשונה):
   4.1. נאתחל את ערכי העמודה הראשונה:
      4.1.1. של D ב-$i-1$, כלומר $D_{i1}=i-1$.
      4.1.2. של S^{add} בוקטור ריק.
      4.1.3. של S^{rm} בוקטור זהה לזה שבתא הראשון בשורה הקודמת, אך בתוספת איבר נוסף השווה ל-$(i-1)$, כלומר: $S_{i1}^{rm}=S_{(i-1)1}^{rm}\cup\{i-1\}$.
      4.1.4. של S^{mv} במטריצה ריקה.
   4.2. עבור העמודה ה-j (למעט העמודה הראשונה):
      4.2.1. נחשב את שלושת הגדלים הבאים:
         4.2.1.1. $a_1=D_{i-1,j}+1$
         4.2.1.2. $a_2=D_{i,j-1}+1$
         4.2.1.3. $a_3=D_{i-1,j-1}+\sigma\left(\left|\mathcal{F}_{i-1}^{\text{source}}-\mathcal{F}_{j-1}^{\text{target}}\right|/\tau_q\right)$

4.2.2. אם $a_1 \leq a_2$ וגם $a_1 \leq a_3$:
4.2.2.1. נציב $D_{ij} = a_1$.
4.2.2.2. נציב $S_{ij}^{add} = S_{i-1,j}^{add}$.
4.2.2.3. נציב $S_{ij}^{rm} = S_{i-1,j}^{rm} \cup \{i-1\}$ (נוסיף איבר לוקטור).
4.2.2.4. נציב $S_{ij}^{mv} = S_{i-1,j}^{mv}$.
4.2.3. אחרת, אם $a_2 \leq a_3$:
4.2.3.1. נציב $D_{ij} = a_2$.
4.2.3.2. נציב $S_{ij}^{add} = S_{i,j-1}^{add} \cup \{j-1\}$ (נוסיף איבר לוקטור).
4.2.3.3. נציב $S_{ij}^{rm} = S_{i,j-1}^{rm}$.
4.2.3.4. נציב $S_{ij}^{mv} = S_{i,j-1}^{mv}$.
4.2.4. אחרת:
4.2.4.1. נציב $D_{ij} = a_3$.
4.2.4.2. נציב $S_{ij}^{add} = S_{i-1,j-1}^{add}$.
4.2.4.3. נציב $S_{ij}^{rm} = S_{i-1,j-1}^{rm}$.
4.2.4.4. נציב $S_{ij}^{mv} = S_{i-1,j-1}^{mv} \cup \{i-1, j-1\}$ (נוסיף עמודה למטריצה).

5. האינדקסים של הספייקים שיש להוסיף, להסיר ולהזיז נמצאים בווקטורים ובמטריצה שבתאים האחרונים במטריצות המתאימות: $\mathcal{F}^{add} = S_{n_{\text{source}}+1,n_{\text{target}}+1}^{add}$, $\mathcal{F}^{rm} = S_{n_{\text{source}}+1,n_{\text{target}}+1}^{rm}$, $\mathcal{F}^{mv} = S_{n_{\text{source}}+1,n_{\text{target}}+1}^{mv}$.
(כבונוס, קיבלנו גם את מרחק Victor-Purpura בתא האחרון במטריצה D: $d = D_{n_{\text{source}}+1,n_{\text{target}}+1}$.)

<u>הערה:</u> הפלט של האלגוריתם יחזיר את ה*אינדקסים* של הספייקים שיש להוסיף/להסיר/להזיז, בהתאם לווקטורי הספייקים ה*ממויינים*. לקבלת זמני הספייקים עצמם יש להציב את האינדקסים שהתקבלו בווקטורי הקלט המתאימים.

כתיבת הקוד

<u>הערה:</u> ניתן (ואף מומלץ) **להיעזר בקבצי הקוד שקיבלתם וכתבתם במהלך הסמסטר בעבודות הקודמות**.

היעזרו בקבצי העזרה של Matlab (או בגוגל), ולמדו על הנושאים הבאים ב**למידה עצמית**:

- Structure arrays
- Cell arrays
- Anonymous functions

<u>הבהרה:</u> הקישורים לעיל הם נקודת פתיחה טובה, אך במידת הצורך כדאי לחפש מידע נוסף באינטרנט.

הכנה ובדיקת הפונקציות

1. **צרו קובץ קוד חדש בשם** final_ex_part2_test_ID1_ID2.m**. קובץ זה יכיל בדיקות תקינות פשוטות עבור הפונקציות שתכתבו בתרגיל זה (בדומה לתרגיל 1).**
   א. **בתחילת הקובץ, נקו משתנים שנשארו מהרצות קודמות.**
   ב. הפרידו את הבדיקות של כל פונקציה לתא נפרד (השתמשו ב-%% ליצירת תא חדש). בכותרת התא כתבו את שם הפונקציה שאותה אתם בודקים. כל תא יכול להכיל מספר בדיקות.
   ג. בכל תא הגדירו את כלל הפרמטרים הדרושים לבדיקת הפונקציה (כך שהקוד של כל תא לא יהיה תלוי בתאים האחרים). ניתן להיעזר בהגדרות הפרמטרים שמופיעות בהמשך.
   ד. עבור כל בדיקה הדפיסו הודעה מתאימה לחלון הפקודות (command window) עם שם הפונקציה שאותה אתם בודקים ונתוני הבדיקה.
   ה. בהתאם לפונקציה שאתם בודקים, הפלט יכול להיות **טקסט המודפס לחלון הפקודות או גרף המוצג על גבי המסך** (או שילוב של השניים). אם בחרתם להציג גרף, צרו חלון נפרד לכל פונקציה וכתבו בכותרת הגרף את שם הפונקציה שאותה הגרף בודק.

2. צרו קובץ קוד חדש בשם VP_spike_classify.m. קובץ זה יכיל פונקציה שתממש את סיווג הספייקים לאלו שיש להסיר, להוסיף או להזיז עבור דוגמה נתונה (לפי האלגוריתם שתואר במבוא לחלק זה). חתימת הפונקציה תהיה:
```
function [F_add, F_rm, F_mv, d] = VP_spike_classify(F_source, F_target, tau_q, sigma)
```
   <u>הדרכה:</u> היעזרו ב-cell array או ב-structure array.

3. צרו קובץ קוד חדש בשם IF_get_lambdas.m. קובץ זה יכיל פונקציה שתחשב את פונקציות המתח $\lambda_i(t)$ של נוירון מסוג I&F כפי שהוגדרו במבוא לחלק זה, בזמנים נתונים ובתגובה לקלט נתון (בדומה לתרגיל 4). חתימת הפונקציה תהיה:
```
function [lambdas] = IF_get_lambdas(N, input_times, input_neurons, t, K)
```
   כאשר N הוא מספר נוירוני הקלט, `input_times` הם זמני הספייקים של נוירוני הקלט (ממויינים מהמוקדם למאוחר), `input_neurons` הם האינדקסים של נוירוני הקלט המתאימים לזמני הספייקים הנתונים, `t` הוא וקטור זמנים, ו-K היא פונקציית קרנל המתח של הנוירון. המשתנה `lambdas` יכיל מטריצה שבה כל שורה מתארת את המתח המתאים לנוירון קלט אחר כפונקציה של הזמן.

4. צרו קובץ קוד חדש בשם IF_sim.m. קובץ זה יכיל פונקציה שתממש מודל SRM_0 כדי לדמות את המתח של נוירון מסוג I&F בתגובה לקלט נתון (בדומה לתרגילים 1 ו-4). חתימת הפונקציה תהיה:
```
function [V, spk_times] = IF_sim(input_times, input_neurons, t, W, K, tau_m, theta)
```
   כאשר W הם המשקלים הסינפטיים, `tau_m` הוא קבוע הזמן הממברנלי של הנוירון, `theta` הוא מתח הסף, V הוא וקטור המכיל את מתח הנוירון בזמנים הנתונים ב-`t` ו-`spk_times` הם זמני הירי של הנוירון ($\left\{t_f^j\right\}_j$). שאר הפרמטרים מוגדרים באופן זהה לפונקציה `IF_get_lambdas`.
   <u>הדרכה:</u> היעזרו בפונקציה `IF_get_lambdas` שכבר מימשתם ובשאלה 4 מתרגיל 1.

5. צרו קובץ קוד חדש בשם chronotron_learn.m. קובץ זה יכיל פונקציה שתממש את כלל הלמידה של הכרונוטרון בתגובה לקלט נתון בהתאם לכלל ה-E-learning שהוגדר במבוא לחלק זה. חתימת הפונקציה תהיה:

```
function [deltaW] = chronotron_learn(input_times, input_neurons, y0, t, W, K, tau_m, theta, tau_q, eta, gamma_r)
```

כאשר y0 מכיל את זמני הספייקים של המורה ($\{\tilde{t}_f^k\}_k$), tau_q הוא קבוע הזמן של אלגוריתם Victor-Purpura, eta הוא קצב הלמידה, gamma_r הוא הפרמטר γ_r המופיע בכלל הלמידה של הכרונוטרון ו-deltaW הם העדכונים של המשקלים הסינפטיים. לצורך סיווג הספייקים הניחו $\sigma(x) = x^2/2$. שאר הפרמטרים מוגדרים באופן זהה לפונקציות IF_get_lambdas ו-IF_sim.
<u>**הדרכה:**</u> היעזרו בפונקציות VP_spike_classify, IF_get_lambdas ו-IF_sim שכבר מימשתם.

6. במידת הצורך, ניתן (ואף <u>מומלץ</u>) ליצור קבצי קוד נוספים המכילים **פונקציות נוספות** לפי שיקול דעתכם (למניעת שכפול קוד, למשל). הקפידו על שמות מתאימים לפונקציות השונות ועל הערות לאורך הקוד. עבור כל פונקציה חדשה הוסיפו בדיקות מתאימות לקובץ final_ex_part2_test_ID1_ID2.m.

7. הורידו מאתר הקורס את קבצי הנתונים first_test_data.mat ו-train_data.mat. כל אחד מהקבצים מכיל שני משתנים:
   - משתנה בשם 'N' המייצג את מספר נוירוני הקלט של הכרונוטרון.
   - מערך בשם 'Samples' המכיל סט דוגמאות לאימון הכרונוטרון. כל איבר במערך הדוגמאות מכיל שלושה שדות:
     - השדה 'times' מכיל וקטור המייצג את כל זמני הספייקים של הנוירונים הפרה-סינפטיים (בשניות).
     - השדה 'neurons' מכיל וקטור בגודל זהה לזה של השדה 'times', וכל איבר בו מכיל את האינדקס של נוירון הקלט שירה את הספייק המתאים מהשדה 'times'.
     - השדה 'y0' מכיל את הפלט של המורה (זמני ספייקים, בשניות).

תהליך הלמידה

8. **צרו קובץ קוד חדש בשם** final_ex_part2_ID1_ID2.m**. זה יהיה קובץ הקוד הראשי שלכם.**

<u>***שמרו את כל הקבצים באותה התיקיה.***</u>

9. כתבו את הקוד הראשי. הוא יכיל את שלבי העיבוד הבאים:
   א. **ניקוי משתנים שנשארו מהרצות קודמות.**
   ב. טעינת קובץ הנתונים.
   במהלך כתיבת ובדיקת הקוד היעזרו בקובץ הנתונים first_test_data.mat. קובץ זה מכיל דוגמה פשוטה שניתנת לאימון בזמן מהיר (יחסית).
   בסיום כתיבת הקוד, החליפו את הקובץ הנטען לקובץ הנתונים train_data.mat.
   ג. הגדרת הפרמטרים:
      i. קבועי הזמן τ_m, τ_s, τ_q.
      בחרו את τ_m כרצונכם (היצמדו לערכים סבירים מבחינה ביולוגית), והגדירו $\tau_q = \tau_m$ וכן $\tau_s = \tau_m/4$.
      ii. מתח הסף של הממברנה θ (הניחו שמתח המנוחה הוא 0mV).
      iii. פרמטרי הלמידה η (קצב הלמידה), γ_r (המוגדר בכלל הלמידה של הכרונוטרון) ומספר ה-epochs.
      בחרו $\gamma_r = \tau_q$. *את קצב הלמידה ומספר ה-epochs התאימו בנפרד לכל קובץ נתונים.*
      iv. וקטור הזמנים t.
      הוקטור יוגדר מזמן $t_{init} = 0$ ועד $t_{final} = 0.5\text{sec}$ בקפיצות קבועות של $\Delta t = 0.1\text{msec}$ (גדלים אלו יהיו פרמטרים בקוד).
   ד. הגדרת פונקציית קרנל המתח $K(t)$ (בדומה לתרגיל 4).
   הקפידו שהמקסימום של הפונקציה יהיה $1V$.
   ה. אתחול המשקלים הסינפטיים $\vec{w}$.

הגרילו את המשקלים ההתחלתיים באופן אקראי ללא תלות בין המשקלים השונים, כך שכל אחד מהמשקלים ידגם מתוך התפלגות אחידה התלויה בסף הירי: $w_i \sim \mathcal{U}(0, \theta/2)$.

ו. עברו על כל הדוגמאות ב<u>סט האימון</u> מספר פעמים (בהתאם לפרמטר epochs שהגדרתם) בסדר אקראי. עבור כל דוגמה, עדכנו את ערכי המשקלים הסינפטיים בהתאם לכלל הלמידה של הכרונוטרון.
<u>הדרכה:</u> היעזרו בפונקציה `chronotron_learn` שכתבתם.

ז. נתחו את התוצאות:
הציגו את המתח של הכרונוטרון לאורך הזמן עבור 3 דוגמאות אקראיות (לאחר האימון) ב figure יחיד.
היעזרו בפונקציה `IF_sim` שכתבתם. עבור כל דוגמה:
- סמנו על הגרף את זמני הירי של הכרונוטרון ואת זמני הירי של המורה.
- כתבו על גבי הגרף את מרחק Victor-Purpura בין זמני הספייקים בפועל לאלו של המורה. היעזרו בפונקציה `VP_spike_classify` שכתבתם ובפונקציה text.
- הקפידו להוסיף לגרף *כותרת* מתאימה, וכן כותרות מתאימות *לצירים* (כולל *יחידות*, אם יש כאלה).
- הקפידו להוסיף לגרף <u>מקרא</u> מתאים (היעזרו בפונקציה legend).

ח. הדפיסו למסך את מרחק Victor-Purpura הממוצע עבור כל דוגמאות האימון, כולל סטיית התקן של השערוך.

<u>המלצות:</u>

- מומלץ לעצור את תהליך האימון בשלבים שונים ולבחון את השינוי בגרף המתואר עם התקדמות האימון.
- באופן דומה מומלץ לבחון את השינוי במרחק Victor-Purpura הממוצע בשלבים שונים של האימון.

מזל טוב! הקוד שלכם מוכן. כעת החליפו את קובץ הנתונים הנטען לקובץ train_data.mat והתאימו את הפרמטרים השונים (כגון קצב הלמידה ומספר ה-epochs) במידת הצורך.

כתיבת הדוח

ענו על השאלות הבאות. את התשובות כתבו בדוח (מסמך PDF):

1. מדוע כלל ה-E-learning של הכרונוטרון מניח שה"מחיר" על הזזת ספייק גדל ריבועית עם המרחק בין זמני הספייקים (כלומר, $\sigma(x) = \frac{x^2}{2}$)? מה יקרה אם נבחר $\sigma(x) = x$ (כמו בתרגיל 1)? מה יקרה אם נבחר $\sigma(x) = \frac{x^3}{3}$?
2. הוסיפו לדוח את הגרף שהתקבל עבור הפרמטרים שבחרתם עם תיאור מתאים. היעזרו בתפריט 'Edit->Copy figure' כדי להעתיק את הגרף למסמך שלכם. ציינו את הפרמטרים שבהם השתמשתם.
3. הוסיפו לדוח את מרחק Victor-Purpura הממוצע בין זמני הירי של הכרונוטרון (לאחר האימון) לבין זמני הירי של המורה. האם המרחק הממוצע גדול או קטן? נמקו!
<u>הדרכה:</u> השוו את המרחק הממוצע שקיבלתם ל-1.
4. האם הכרונוטרון למד בהצלחה? הסבירו בעזרת הגרף ומרחק Victor-Purpura הממוצע שקיבלתם. אם הלמידה לא הסתיימה בהצלחה, שערו מדוע.

<u>הנחיות הגשה לחלק התכנותי:</u>

1. הקוד צריך לרוץ על Matlab בגרסה R2020b כמות שהוא ב<u>לחיצה על F5</u> בקובץ הריצה הראשי. **קוד שלא ירוץ לא יבדק, והציון בחלק התכנותי יהיה אפס**. ודאו שהקוד רץ עבור כל ערכי הפרמטרים שהתבקשתם לבדוק.
2. **ודאו שזמן הריצה קצר מעשר דקות.**
3. **הקפידו לכתוב הערות בקוד**:
   א. הערות בקוד יש לכתוב <u>באנגלית בלבד</u>. כתיבת הערות בעברית תגרור הורדת ניקוד.
   ב. הניחו שמי שקורא את הקוד יודע לתכנת היטב ב-Matlab, אך אינו מבין דבר במודלים של נוירונים או בלמידה.
   ג. **בתחילת כל פונקציה כתבו הערה המתארת את הפונקציה ואת הפרמטרים שהיא מקבלת ומחזירה.**

4. **הקפידו לתת למשתנים שמות בעלי משמעות**. למשתנים שמופיעים בנוסחאות יש לקרוא באותו שם כמו הסימון בנוסחה. לשאר המשתנים יש לקרוא בשמות שמסבירים את תפקידם.
5. **אין להגיש את קבצי הנתונים**, רק את קבצי הקוד (בקובץ zip) ואת הדוח (מסמך PDF).
6. **ודאו שבקובץ שאתם מגישים קובץ הנתונים הנטען הוא** train_data.mat**.**
7. ודאו שלכל *גרף* יש כותרת המתארת את מה שמופיע בו.
ודאו שלכל אחד מה*צירים* יש כותרת מתאימה, כולל *יחידות* (אם יש כאלה).
8. **ודאו שהדוח שלכם מכיל את הגרף.**
ודאו שלגרף מצורף תיאור מתאים.

בהצלחה 😊