



בי"ס להנדסת חשמל

פרויקט מס' 3214

## **תכנית עבודה**

שם הפרויקט: מערכת אקטיבית להפחתת רעשים

ברכב

מבצעים:

שם: אריאל טורנובסקי ת.ז. 206483513

שם: יובל הורוביץ ת.ז. 206587719

מקום ביצוע הפרויקט: אוניברסיטה

### **לשימוש המנחה:**

הנני מאשר את תכנית העבודה המצורפת

שם: ד"ר ליאור ארבל \_\_\_\_\_

חתימה: ליאור ארבל \_\_\_\_\_

## 1 תקציר

### 1. רקע ומהות הפרויקט

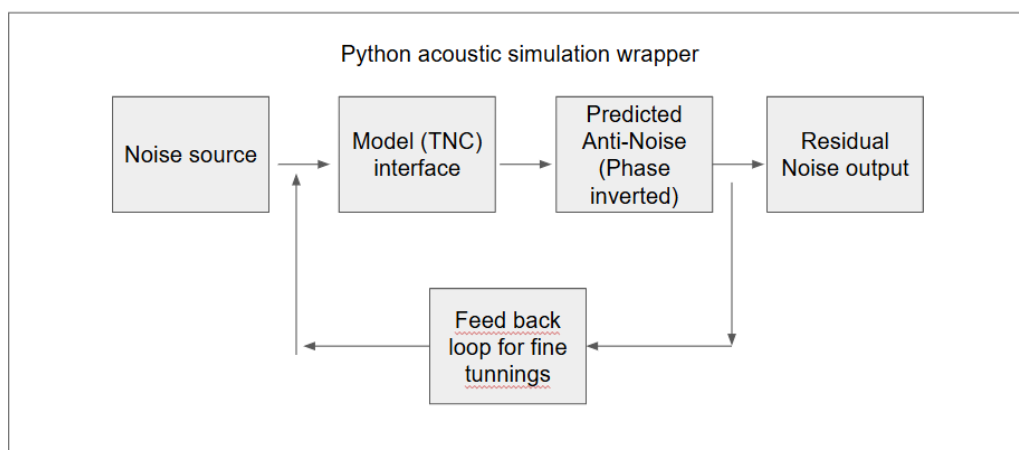
פרויקט זה עוסק בפיתוח סימולציה מקיפה של מערכת סינון רעשים אקטיבי (Active Noise Cancellation - ANC) המיועדת להפחתת רעשי סביבה לא רצויים בתוך חללים סגורים כגון רכב או חדר קטן וזאת באמצעות יצירת גל קול זהה בתדירותו לרעש המקורי, אך בהיפוך פאזה, מה שגורם לביטול הדדי (התאבכות הורסת) של גלי הקול ומפחית את עוצמת הרעש הנותר.

### 2. אופן מימוש הפרויקט וארכיטקטורה

הפרויקט ימומש באמצעות **"Python acoustic simulation wrapper"** המשלב את המודל האקוסטי עם תשתית סימולציה. תהליך הפיתוח כלל ארבעה שלבים עיקריים:

1. **יצירת סימולציית החדר/רכב** : בנייה מדויקת של סביבת הסימולציה האקוסטית, כולל הגדרת טווחי תדרים רלוונטיים (20Hz – 20kHz) ויצירת הפלט בתצורת השמע הנדרשת.
  2. **יצירת נתוני אימון (Training Data)** : הפקת נתונים אקוסטיים רלוונטיים (רעשים אורבניים שונים) לאימון מודל TCN אשר יספק פרמטרים מתאימים ליצירת הגלים בעלי הפאזה ההופכית.
  3. **אימון ומיטוב המודל** : אימון מודל TCN על מגוון רעשי סביבה ורעשים אורבניים, עם דגש על חתימת זכרון נמוכה וזמן תגובה נמוך.
  4. **אינטגרציה של המודל עם הסימולציה הכוללת משוב** : שילוב סימולציית החדר עם מודל ה-TCN והטמעת **לולאת משוב דינמית** המאפשרת כוונן עדין של המודל תוך כדי פעולת הסימולציה.
- מטרה כמותית** מרכזית של המערכת היא להשיג **הפחתה ממוצעת של לפחות 10dB** בעוצמת הרעש הכוללת בנקודות הקליטה הרצויות (כגון מושב הנהג והמושבים האחוריים). פירוט מלא של מטרות הפרויקט מופיע בהמשך.

## Block Diagram (technical)



## 2 מוטיבציה

הפרייקט מוטיבציה לעולמות העיבוד אותות דיגיטלי (DSP), אקוסטיקה ולמידת המכונה (Machine Learning). המערכת המפותחת משתמשת במודל רשתות נוירונים עמוקות מסוג TCN (Temporal Convolutional Network) אשר מצטיין בטיפול בסדרות זמן ובפעולה בזמן תגובה קצר (Low latency). יישומה של טכנולוגיה זו מביאה עמה פוטנציאל גדול לשיפור **נוחות הנסיעה והדיבור** ברכב, הגברת **בטיחות** (על ידי הפחתת עייפות הנגרמת מרעש מונטוני), ושיפור איכות הסביבה האקוסטית במשרדים או בבתים.

טכנולוגיית ANC נמצאת בשימוש נרחב כיום באוזניות מבטלות רעש, תאייס ובתעשיית הרכב להפחתת רעש כביש ומונע. הבחירה שלנו להשתמש מערכת למידה עמוקה ולא במימוש קלאסי של פילטר אקטיבי נובע ממספר סיבות: ראשית התחום הינו תחום חדשני בעל פוטנציאל מחקרי, שנית כיוון שהמטרה שלנו היא לייצר ביטול רעשים בחלל יחסית גדול ביחס לאוזניות / תא של מטוס קרב עלינו לקחת בחשבון שינוי במיקום של הנהג / הצרכן של המערכת וכתוצאה מכך על הפילטר האקטיבי להיות מסוגל לשנות את הפרמטרים שלו בצורה מהירה, דבר שניתן לעשות בצורה טובה יותר בעזרת ה-TCN.

## 3 תכולת העבודה

בשלב הראשון נבצע למידה וסקירה של היסודות התיאורטיים של הפרייקט:

- סינון רעשים אקטיבי: הבנה של העקרונות הפיזיקליים של התאבכות הורסת, מודלים של Primary and secondary paths סקירה של אלגוריתמים מסורתיים מסתגלים כגון, **Filtered-X LMS (FXLMS)** שימשו כנקודת ייחוס לביצועי המודל.
- אקוסטיקה של חדרים קטנים, לימוד והבנה של מודלים לסימולציה אקוסטית יציאת impulse response והבנת תופעות כגון הדוהדו והחזרה.
- רשתות נוירונים TCN ו CNN לימוד והבנה של TCN, היתרונות והחסרונות שלהם.

מקורות לימוד מרכזיים:

- ספרות: (Simon Haykin) "Adaptive Filter Theory" – אלגוריתמי DSP קלאסיים.
- מדריכים לשימוש ב API של ספרות Deep learning Coursera .
- מאמרים אודות TCN .
- סרטוני הדרכה ב-Youtube .

הפרייקט ימומש על פלטפורמת PC תוך שימוש בשפת התכנות Python ככלי מרכזי.

שליבים מרכזיים לפרייקט:

שלב עיקרי	תיאור הביצוע	כלים, שפות ורכיבים	תוצר
<b>שלב א</b> בניית סימולציית החדר	הגדרת מודל החדר (מידות, ספיגת קירות), יצירת מקורות רעש ומיקומי מיקרופונים, יצירת transfer function סימולטיבית	Python, NumPy, SciPy, ספרות אקוסטיקה pyroomacoustics	מודל סימולציה אקוסטית wrapper בעל Interface לשלבים הבאים
<b>שלב ב</b> איסוף ובחירת נתוני אימון למודל	דגימת / יצירת רעשים אורבניים שונים, הפעלת סימולציית החדר על הרעשים ליצירת זוגות קלט – פלט לצורך אימון המודל	Python, numpy	מאגר נתונים גדול ומעובד מוכן לאימון

מודל TCN מאומן ומוטב (Trained Model) העומד ביעדי החומרה	Python, numpy	בחירת מודל הTCN המתאים למטרה, אימון על המידע שאספנו בשלב הקודם וטיוב הפלט על פי איכות הפלט ומזעור ה memory footprint	<b>שלב ג</b> בחירה, תכן אימון המודל
קובצי Residual Noise Output ובדיקה כמותית של Noise Reduction לפחות 10dB	Python, numpy	שילוב מודל הTCN המאומן בתוך הסימולציה. הפעלת המערכת במצב Batch Processing על קובצי רעש חדשים (שלא נראו באימון). מימוש לולאת המשוב הדיסקרטית (Offline Tuning) באמצעות ניתוח פלט	<b>שלב ד</b> תכן ובדיקה

#### תשתית אלגוריתמית

יסודות האלגוריתמים של הפרויקט מתמקדים בשילוב של עיבוד אותות אקוסטי עם למידת מכונה עמוקה (Deep Learning) לצורך סינון רעשים אקטיבי (ANC).

במקום אלגוריתמים קלאסיים כמו FXLMS (Filtered-X LMS) המשתמשים במסננים אדפטיביים ליניאריים, הפרויקט משתמש במודל TCN (Temporal Convolutional Network).

- מטרה מתמטית: המודל מחשב את האות האנטי רעש  $A(t)$  הדרוש לביטול הרעש המקורי  $N(t)$  על ידי מזעור הרעש השירי  $e(t)$  לפי הנוסחה  $e(t) = N(t) + A(t)$ .
- היתרון: TCN מאפשר למידה ויצוג של קשרים לא ליניאריים, תוך שמירה על סיבתיות.

## **4 תוצרי הפרויקט**

#### תוצרי אמצע:

- (1) סביבת סימולציה אקוסטית – מימוש קוד הפיתוח שישמש כמעטפת  
תוכן: הגדרת מודל החדר, קביעת מיקומי המיקרופונים (נקודות הביטול) והגדרת טווחי תדרים לפעולה
- (2) מאגר נתונים ראשוני – הפקת קבצי אודיו מסומלצים \ אמיתיים של רעשים אוקבניים מונוטוניים לפני ואחרי הסינון
- (3) מודל TCN ראשוני מימוש ראשוני של המודל בעזרת pytorch כולל הגדרת שכבות הקונבולוציה

#### תוצרי סוף:

- (1) מודל TCN סופי ומאופטם – מודל שעבר אופטימיזציה ועומד בדרישות הפרויקט – בצד הפלט.
- (2) מערכת סימולציה סופית כוללת לולאת משוב – שילוב מלא של הסימולציה עם המודל, כולל יכולות כוונון, קוד פיתוח המאפשר קריאת קבצת רעש קלט הפעלת מודל TCN ושמירה קבצי הסימולציה הכוללים את הרעשים לאחר עיבוד.

## דרישות כמותיות:

(1) Noise reduction בסביבת הנהג / נוסעים: נחלק את המדדים לפי טווחי התדרים המתאימים.

$$\text{noise reduction} = 10 \log \frac{P_{\text{noise before}}}{P_{\text{noise after}}}$$

סוג הרעש	דוגמאות	טווח תדרים אופייני (Hz)	היעד הכמותי	הערות
רעש מנוע	צליל הבסיס של המנוע (Harmonics)	50Hz – 400Hz	ניחות של לכל הפחות dB15	יעד מרכזי לניחות, רעשים קבועים בעלי פס תדרים צר.
רעשי כביש	רעש שנוצר ממגע הצמיגים עם הכביש והרוח	20Hz – 2000Hz	ניחות של עד 10dB	רחבי פס אך עם רכיבים מונוטוניים
Cabin noise	רעש מיזוג אוויר או רכיבים רועשים בקבינה	משתנה ובלתי צפוי לרוב עד 1000Hz	ניחות של עד 10dB	פס צר / מונוטוני, שימוש בTCN לביטול.

(2) Memory footprint של עד MB150 של RAM. המערכת כולל מודל הTCN המאומן ומאגרי הנתונים (buffers) תצרוך זיכרון RAM זמין.

יעד זה יבדק על ידי מדידת צריכת ה RAM המקסימלית בתהליך.

רכיב הזיכרון	פירוט
גודל המודל	זיכרון הנדרש לאחסון פרמטרי המודל (המשקולות וה-Biases) ב-RAM.
זיכרון תהליכי הקובולוציה	זיכרון הנדרש להחזקת טנזורי הביניים (Activation Tensors) במהלך ההסקה (Inference).
מאגרי אודיו (דגימות)	זיכרון עבור האודיו הנקלט (Noise Source) והמוצא (Residual Noise Output) וכן עבור ה-Feedback Loop.

(3) דיוק המודל ע"ב MSE: נרצה לכמת את האיות של האנטי רעש שיצרנו בעזרת המודל אל מול האנטי רעש

האידיאלי שנחשב עצמאית עבור האודיו בכניסה (עבור ערכים מנורמלים).

היעד מצביע על דיוק בפאזה, דיוק באמפליטודה ובתזמון.

TCN OUTPUT VS ideal anti-noise, נשאף ל  $MSE \leq 0.001$ .

## שיטות בדיקה ואימות:

- הפחתת רעש
- יכולת הכללה – מקור רעש בלתי צפוי
- ניתוח במישור התדר של האותות לפני ואחרי העיבוד
- מדידת זמני המודל תוך כדי ריצת הסימולציה

## 5 לוח זמנים

הערות	תאריך יעד לביצוע	פירוט (2-3 שורות)	אבן דרך
בוצע	תחילת הסמסטר	Neural Networks and Deep Learning by Andrew Ng	ביצוע קורס אודות רשתות ניורונים באינטרנט
	09/11/2025	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temporal Convolutional Network — An Overview – by Amit Yadav</li> <li>Comparative Study of Recurrent Neural Networks for Virtual Analog Audio Effects Modeling – by Stefano Fasciani</li> <li>Temporal Convolutional Networks and Forecasting – by Francesco Lässig</li> <li>Selective Noise Cancellation using Machine Learning – by Akshat Kolekar</li> </ul>	סקירת מאמרים
	16/11/2025		בניית תוכנית עבודה
	15/12/2025	אפיון החלל אותו נרצה לסמלץ ולעבוד, מימדים ונקודות בהם נרצה לממש את ביטול הרעשים האקטיבי	אפיון מימדי החלל ומיקום הרמקולים (נקודות ביטול הרעשים) והגדרתם בקוד
	22/12/2025	למידת הספריה המאפשרת מידול אקוסטיקה בסימולציה	למידת ספריית adaptive pyroomacustics filtering בפרט
	20/01/2026		הרמת הסימולציה (בניית החלל) והוצאת תגובת הולם של החדר
	08/02/2026	הרמת המודל באופן לוקאלי ובדיקת שקלט נקלט במודל בצורה נכונה	הרמת תשתית למידה TCN
	08/02/2026		הכנת קצבי אודיו לאימון מודל TCN
	15/02/2026	בחינה אל מול יעדי המודל שהוגדרו	אימון המודל
	01/03/2026		הגשת מצגת האמצע
	12/04/2026		סיכום התקדמות אמצע סמסטר
	15/04/2026		אינטגרציה סופית בין המודל לסימולציה האקוסטית
	24/05/2026		הגשת הפוסטר וסיום העבודה בפרויקט
	08/2026		הגשת ספר הפרויקט ומצגת הסיום