

# מערכת איזון תורים ברכבת – IOT PROJECT

דו"ח שלב הסימולציה

הוגש ע"י :

בנאן אבו חלו

יאקות סאלם

קייס אבו שאח

תאריך הגשה:

28/10/2025

## 1. רקע ומטרה:

- מטרת שלב הסימולציה היא לבחון את יעילות מערכת איזון התורים בין קרונות רכבת. המערכת נועדה לצמצם את זמן ההמתנה הכולל של הנוסעים על הרציף על ידי חלוקה חכמה של הנוסעים בין הקרונות, במקום שכל נוסע יבחר באופן אקראי קרון. בשלב זה נבדקו שלושה תרחישים המדמים את שעות היום:
- Morning\_rush – עומס בוקר גבוה.
  - Midday – עומס מתון.
  - Evening\_peak – עומס בינוני.

## 2. שיטת הסימולציה:

- פרמטרים כלליים:
- מספר קרונות: 6.
  - זמן עלייה של נוסע אחד: 10 שניות.
  - הונח כי מספר העולים קטן ממספר המקומות הפנויים בכל קרון, ולכן זמן היציאה של הרכבת נקבע רק על-פי תהליך העלייה ללא אילוף קיבולת.
- לכל קרון נוצר אורך תור אקראי לפי התפלגות גאוסית (Normal) עם ממוצע  $\mu$  וסטיית תקן  $\sigma$  בהתאם לשעות היום:

תיאור	$\sigma$	$\mu$	תרחיש
עומס גבוה	10	40	Morning_rush
עומס מתון	6	18	Midday
עומס בינוני	9	32	Evening_peak

- ערכי הממוצע  $\mu$  וסטיית התקן  $\sigma$  נבחרו כך שישקפו את דפוסי העומס האופייניים לשלושת תרחישי היום:
  - בתרחיש הבוקר נקבע ממוצע תור גבוה וסטייה רחבה, המשקפים עומס גבוה ושונות משמעותית בין הקרונות.
  - בתרחיש הצהריים נקבע ממוצע נמוך וסטייה קטנה, המשקפים עומס מתון והתנהגות אחידה יחסית.
  - בתרחיש הערב נקבע ממוצע ביניים וסטייה בינונית, המשקפים עומס בינוני ותנאים יציבים יותר ביחס לשעות השיא.

## חישוב זמני היציאה של הרכבת (בשניות):

- ללא הפרויקט:  $T_{\text{without}} = \max(\text{queue}) * 10$ 
  - ❖ מייצג את זמן היציאה של הרכבת ללא איזון תורים, ונקבע לפי הקרון שבו העלייה ארוכה ביותר.
  - ❖ המשתנה queue מייצג את אורך התור, כלומר את מספר הנוסעים הממתינים לעלות לקרון.
- עם הפרויקט:  $T_{\text{with}} = \text{ceil}(\text{sum}(\text{queue})/6) * 10$ 
  - ❖ מייצג את זמן היציאה של הרכבת לאחר איזון תורים, שבו כלל העולים מתחלקים שווה בשווה בין הקרונות.
  - ❖ הפונקציה ceil מעגלת כל מספר כלפי מעלה למספר השלם הקרוב ביותר. השימוש בה נועד להבטיח שכל יחידת זמן מייצגת מחזור עלייה שלם של נוסעים, כך שלא תתקבל תוצאה חלקית (לדוגמה, "חצי נוסע" שעדיין לא עלה).
- אחוז השיפור:  $(T_{\text{without}} - T_{\text{with}}) / T_{\text{without}} * 100$ 
  - ❖ ההפרש בין הזמנים מבטא את החיסכון בזמן ההמתנה הכולל של הרכבת הודות למערכת האיזון.

**הערה:** בשלב זה נבחן רק זמן העלייה של הנוסעים לרכבת. זמן הירידה נותר קבוע ולא נכלל במודל, מאחר שהוא משפיע באופן זהה על שני המצבים ולכן אינו משנה את ההשוואה ביניהם.

לאחר הרצת קוד הסימולציה (train\_sim.py) נוצר קובץ הנתונים train\_sim.csv.

הקובץ מכיל 1500 שורות (500 לכל תרחיש) ומציג את התוצאות שחושבו בכל ריצה.

להלן צילום מסך לדוגמה מהנתונים בקובץ:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	day_scenario	run_idx	cars	board_sec	mu	sigma	q_lengths	T_without	T_with	improve_sec	improve_pct	
2	Morning_rush	1	6	10	40	10	39;38;39;47;39;25	470	380	90	19.15	
3	Morning_rush	2	6	10	40	10	43;37;38;41;42;52	520	430	90	17.31	
4	Morning_rush	3	6	10	40	10	47;41;33;30;42;53	530	410	120	22.64	
5	Morning_rush	4	6	10	40	10	40;39;45;25;37;45	450	390	60	13.33	
6	Morning_rush	5	6	10	40	10	49;38;44;42;48;29	490	420	70	14.29	
7	Morning_rush	6	6	10	40	10	46;25;14;34;31;49	490	340	150	30.61	
8	Morning_rush	7	6	10	40	10	47;28;48;30;39;37	480	390	90	18.75	
9	Morning_rush	8	6	10	40	10	41;48;46;43;46;45	480	450	30	6.25	
10	Morning_rush	9	6	10	40	10	34;33;35;45;37;63	630	420	210	33.33	

איור 1: דוגמה לרשומות מתוך train\_sim.csv – 1500 שורות נתונים (500 לכל תרחיש). העמודות המרכזיים: improve\_pct, improve\_sec, T\_with, T\_without, day\_scenario

הסבר לעמודות בקובץ הנתונים (train\_sim.csv):

- Day\_scenario – מציין את סוג התרחיש (בוקר, צהריים, ערב).
- Run\_idx – מספר הריצה (אחת מתוך 500 ריצות לכל תרחיש).
- Cars – מספר הקרונות ברכבת (6).
- Board\_sec – זמן העלייה של נוסע אחד (10 שניות).
- Sigma, Mu – ממוצע וסטיית תקן של אורך התורים בהתפלגות הנוסעים.
- Q\_lengths – מספר הנוסעים בתור בכל אחד מששת הקרונות.
- T\_without – זמן יציאת (בשניות) הרכבת ללא איזון תורים (הקרון האחרון מסיים).
- T\_with – זמן יציאת (בשניות) הרכבת לאחר איזון תורים (החלוקה מאוזנת).
- Improve\_sec – השיפור בזמן (שניות) בין שני המצבים.
- Improve\_pct – אחוז השיפור בזמן היציאה בזכות המערכת.

**הנחה:** בתרחיש עם הפרויקט הונח כי מערכת החיישנים מבצעת איזון מיטבי של הנוסעים בין הקרונות, כך שהתורים לאחר האיזון שווים בקירוב.

גם אם במציאות צפוי פיזור קל (התפלגות גאוסית סביב הממוצע), השפעתו על זמני היציאה נחשבת זניחה.

באופן זה הנתונים המוצגים בצילום המסך ובגרפים מייצגים את התרחיש האופטימלי של פעולת המערכת, כפי שמיועד להיבחן בשלב הסימולציה.

### 3. תוצאות וניתוח:

1. השוואת זמני יציאה בין שני המצבים:

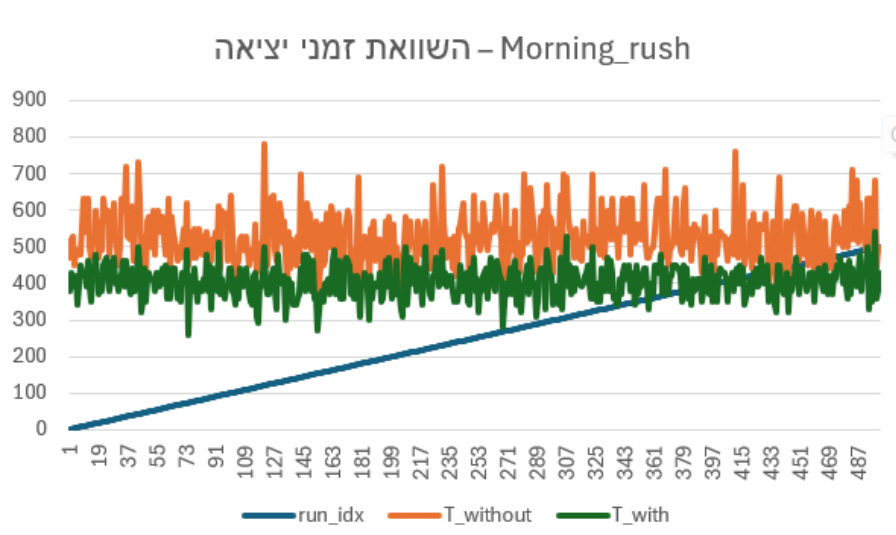
נבחנו שלושת התרחישים: Morning\_rush, Midday, Evening\_peak.

לכל אחד מהם הוצג גרף המתאר את זמני היציאה של הרכבת במצב ללא איזון תורים (T\_without) לעומת המצב עם איזון תורים (T\_with).

- Morning\_rush - שעות הבוקר:

בתרחיש הבוקר נרשם עומס גבוה במיוחד, כאשר חלק מהקרונוט עמוסים משמעותית יותר מאחרים.

הגרף מציג כי גם במצב זה, מערכת איזון התורים מצליחה לקצר את זמן היציאה של הרכבת, אם כי השיפור מוגבל יותר עקב הבדלים משמעותיים בעומס בין הקרונוט.



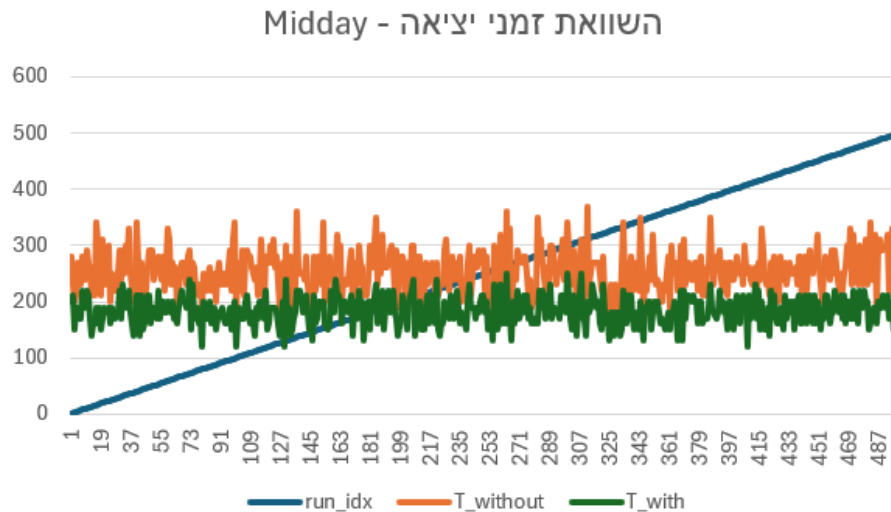
איור 2: השוואת זמני יציאה – Morning\_rush. נראה ש-T\_without גבוה באופן עקבי מ-T\_with, השיפור קיים אך מוגבל יותר עקב פערים גדולים בעומס בין הקרונוט. ציר Y: זמן יציאה של הרכבת (שניות), ציר X: מספר ריצה.

- Midday - שעות הצהריים:

בתרחיש הצהריים מתקבל השיפור הבולט ביותר.

הגרף מראה כי זמן היציאה במצב עם הפרויקט נמוך באופן עקבי וברור מהמצב ללא הפרויקט.

כאשר העומסים מתונים יותר, המערכת מצליחה לחלק את הנוסעים כמעט באופן שווה בין הקרונוט, מה שמביא לצמצום משמעותי בזמן ההמתנה הכולל.



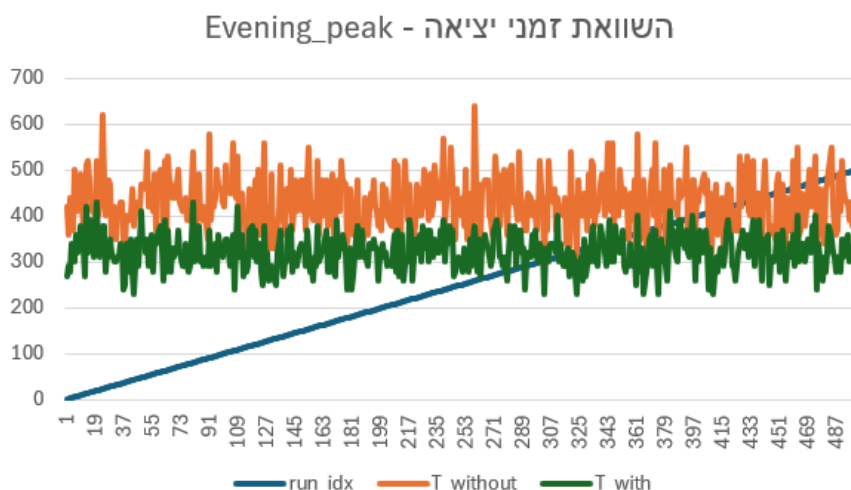
איור 3: השוואת זמני יציאה - Midday. השיפור הבולט ביותר:  $T_{with}$  נמוך משמעותי מ- $T_{without}$ . בזכות איזון תורים יעיל בתנאי עומס מתון. ציר Y: זמן יציאה של הרכבת (שניות), ציר X: מספר ריצה.

- Evening\_peak - שעות הערב:

בערב נצפתה רמת עומס בינונית.

גם כאן ניתן לראות שהפרויקט מוביל לשיפור עקבי בזמני היציאה, אם כי במידה מתונה יותר לעומת שעות הצהריים.

המערכת מצליחה להפחית את זמן ההמתנה הכולל, אך ההבדלים בעומסים בין הקרונות עדיין יוצר שונות קלה בין הריצות.

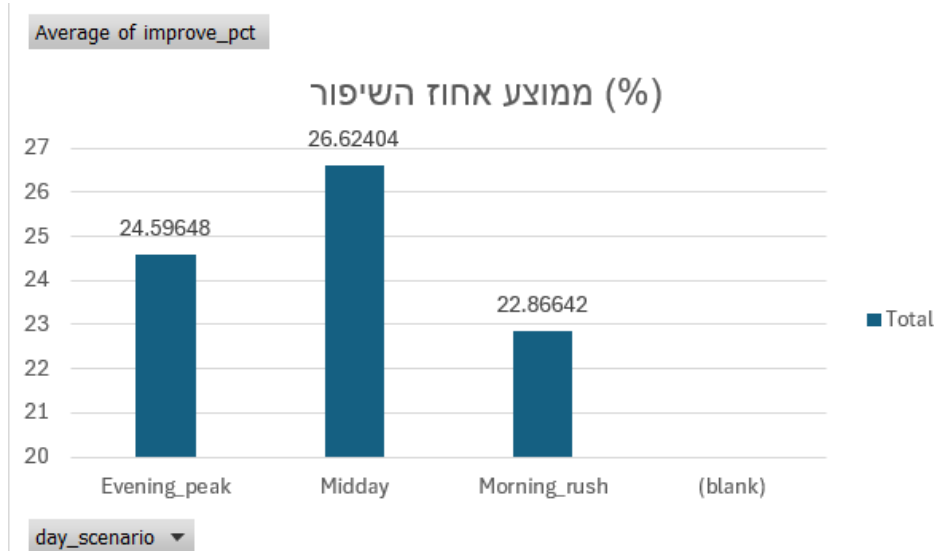


איור 4: השוואת זמני יציאה - Evening\_peak. שיפור עקבי בזמן היציאה, בעומס בינוני הפער בין המצבים נשמר אך מתון יותר מאשר צהריים.

ציר Y: זמן יציאה של הרכבת (שניות), ציר X: מספר ריצה.

## 2. ממוצע אחוז השיפור (%):

הגרף מציג את אחוז השיפור הממוצע בזמן היציאה של הרכבת בכל אחד משלושת התרחישים. ניתן לראות כי אחוז השיפור נע בין 22% ל-27%, כאשר בתרחיש הצהריים (Midday) נרשמה הירידה הגדולה ביותר בזמן ההמתנה. המסקנה היא כי המערכת יעילה במיוחד בתנאי עומס מתון, בהם היא מצליחה לבצע חלוקה מאוזנת יותר של נוסעים בין הקרונות.



איור 5: ממוצע אחוז השיפור לפי תרחיש. אחוז השיפור נע סביב 22%-27%, עם שיא בתרחיש Midday. המשמעות: בתנאי עומס מתון מתקבלת היעילות המרבית של המערכת.  
ציר Y: אחוז השיפור (%), ציר X: תרחיש

## 4. מסקנות:

תוצאות הסימולציה מצביעות באופן ברור על כך שמערכת איזון התורים מצליחה לשפר את יעילות תהליך העלייה לרכבת בכל אחד מהתרחישים שנבדקו. השוואת זמני היציאה בין המצבים (עם ובלי הפרויקט) הדגימה ירידה עקבית ומשמעותית בזמן ההמתנה, ואחוז השיפור הממוצע עמד על כ-25%. נמצא כי המערכת יעילה במיוחד בתנאי עומס מתון, כאשר הפיזור בין הקרונות אינו קיצוני מדי, והיא מסוגלת לחלק את הנוסעים בצורה שווה כמעט לחלוטין. לעומת זאת, בתנאי עומס גבוה מאוד (בוקר), הפערים בין הקרונות גדולים והמערכת מתקשה להגיע לאיזון מלא, אך עדיין מביאה להפחתה ניכרת בזמן הכולל. לסיכום, המערכת מציגה פוטנציאל ממשי לשיפור תפעול הרכבת, לייעול זרימת הנוסעים ולהפחתת זמני ההמתנה של הנוסעים.