

דו"ח בסימולציה

פרויקט חלק א



תוכן עניינים

1	עמ' 1	תקציר
1	עמ' 1	מבוא
2	עמ' 2	מודל סימולציה
4	עמ' 4	ניתוח מצב קיים
5	עמ' 5	סיכום
6	עמ' 6	נספחים

תקציר

בדו"ח זה נבחן מודל סימולציה עבור חברת "משלוחים מעופפים" המפעילה שירות משלוח חבילות באמצעות רחפנים. אל המערכת מגיעות הזמנות בימים ראשון-חמישי, ומסגרת הסימולציה היא שבוע. המודל בוחן ארבעה מרכזי שירות כאשר בכל אחד מהם מצוי מערך רחפנים משלושה סוגים: בסיסי המטפל בחבילות בסיסיות, רגיל המטפל בחבילות בסיסיות ורגילות, ורחפן על המטפל בכל סוגי החבילות.

במסגרת המודל נבחנות 2 מדיניות הקצאת הזמנות שונות:

המדיניות הראשונה מתאימה את סוג הרחפן המתאים לסוג החבילה במרכז השירות הקרוב ביותר, תוך התחשבות

בזמינות הרחפן המיועד לסוג החבילה ובסוג הרחפן הבא המתאים בלבד (אם קיים).
המדיניות השנייה מתאימה את סוג הרחפן המתאים לסוג החבילה מכל מרכזי השירות, מהקרוב ביותר ועד הרחוק ביותר מיעד השילוח, תוך התחשבות בזמינות הרחפן המיועד לסוג החבילה ובכל סוגי הרחפנים הבאים (אם קיימים). על מנת לבחון במדיניות אלו, נבחנו מדדי הביצוע הבאים במסגרת 100 שבועות בלתי תלויים: התפלגות משך אספקת ההזמנות, תוחלת מספר ההזמנות שלא מסופקות במהלך היום שבו הוזמנו והעלות התפעולית של החברה.
עבור מדיניות 1, התוצאות שהתקבלו הם תוחלת של 1263 הזמנות שלא סופקו ביום בו הוזמנו, תוחלת עלות של 635,866 ש"ח לשבוע וכן 60% הזמנות שסופקו תוך לכל היותר שתיים מרגע קבלתן. כ-7.6% הזמנות סופקו תוך למעלה מ-10 שעות מרגע קבלתן. עבור מדיניות 2, התוצאות שהתקבלו הם תוחלת של 1214 הזמנות שלא סופקו ביום בו הוזמנו, תוחלת עלות של 632,562 ש"ח לשבוע וכן 63% הזמנות שסופקו תוך לכל היותר שתיים מרגע קבלתן. כ-7% הזמנות סופקו תוך למעלה מ-10 שעות מרגע קבלתן.

מבוא

חברת "משולחים מעופפים" מפעילה שירות משלוח חבילות באמצעות רחפנים. השטח בו החברה מספקת את השירות הוא עיר ששטחה 36 קמ"ר. אל המערכת מגיעות הזמנות בימים ראשון-חמישי בין השעות 05:00-22:00 המסופקות במהלך 7 ימים קלנדריים המהווים שבוע. כל הזמנה שמגיעה אל המערכת מכילה חבילה שגודלה קטן, בינוני או כבד. לרשות המערכת שלושה סוגי רחפנים שיכולים לטפל בהזמנות אלו:

1. רחפן בסיסי – עלות רכישתו היא 10,000 ₪ והוא משרת חבילות קטנות בלבד. בהגיעו ליעד משך תהליך השירות (נחיתה, שחרור חבילה, המראה) מתפלג $uni(10,30)$ דקות.
2. רחפן רגיל – עלות רכישתו 15,000 ₪ והוא משרת חבילות קטנות ובינוניות בלבד. בהגיעו ליעד משך תהליך השירות מתפלג $(5 + \exp(0.2))$ דקות.
3. רחפן על – עלות רכישתו 30,000 ₪ והוא משרת את כל סוגי החבילות. בהגיעו ליעד משך תהליך השירות מתפלג $(10 + \exp(0.1))$ דקות.

לרשות המערכת 4 מרכזי שירות הממוקמים בנקודות $(2,2)$, $(2,4)$, $(4,4)$, $(4,2)$ (בק"מ) ולרשות כל מרכז שירות 14 רחפנים בסיסיים, 5 רחפנים רגילים ו-2 רחפני על. מהירות כל רחפן קבועה ושווה ל-30 קמ"ש. המערכת מבחינה בין שני אזורי ביקוש: מרכז העיר ופאתי העיר. כל הזמנה מטופלת במרכז שירות אחד שבחירתו נקבעת בהתאם למדיניות המערכת.

המערכת שומרת את זמן קבלת ההזמנה, הזמן בו היא סופקה ועלויות שילוח המורכבות מ: המרחק בין מרכז השירות שבו התקבלה ההזמנה ובין היעד ומשך טיפול ההזמנה המורכב מזמן טיסתו אל היעד וזמן השירות ביעד. לטובת הערכת הצלחת החברה, תיבחן לפי יכולתה לספק שירות זמן אמת ללקוחותיה. עבור כל הזמנה שאספקתה אורכת יותר משעתיים, מציעה החברה קופונים ללקוח עבור הזמנות עתידיות, כתלות בזמן שחולף עד לאספקת המשלוח מעת ביצוע ההזמנה. למטרת חקר המערכת, יוגדרו המדדים הבאים:

1. התפלגות משך אספקת ההזמנות
2. תוחלת מספר ההזמנות שלא מסופקות במהלך היום שבו התקבלו
3. העלות התפעולית של החברה שכוללת עלויות תפעול ישירות וכן עלויות שנגרמות מאיכות שירות ירודה

מודל הסימולציה

למטרת בחינת מדדי המערכת שהוזכרו לעיל, נבנה מודל סימולציה המתאר את פעילות החברה באופן הבא:

1. הגדרת המודל

- זמן ריצת המודל: מתחילת יום ראשון ב-00:00 עד לסוף יום חמישי ב-00:00 או עד סיום הטיפול בלקוחות, המאוחר מבין השניים.
- התפלגות הגעת הזמנות הינה פואסונית ומשתנה בהתאם לשעות היום: (קצב ההגעה בדקות)
 - בין השעות 05:00-10:00: $X \sim \text{Pois}(2.5)$, בין השעות 10:00-16:00: $X \sim \text{Pois}(3.33)$ ובין השעות 16:00-22:00: $X \sim \text{Pois}(1.33)$. בשאר השעות אין הגעת הזמנות במערכת. עבור כל הזמנה מתבצעת הגרלה בין מרכז העיר לפאתי העיר בהסתברות שווה, ובאזור המוגרל מתפלגת אחיד גם כן.
- משך השירות של הרחפנים מתפלג בהתאם לסוג הרחפן (בדקות): עבור רחפן בסיסי משך השירות הוא $Y \sim \text{Uni}(10,30)$, עבור רחפן רגיל משך השירות הוא $Y \sim (5 + \exp(0.2))$ ועבור רחפן על משך השירות הוא $Y \sim (10 + \exp(0.1))$.

- שעות הסימולציה מתקדם לפי יומן אירועים.

2. הנחות המודל

- הזמנים בסימולציה הינם בדקות, המרחקים האוקלידיים במטרים והמהירות במטר לשעה.
- ביום חמישי בשעה 22:00 מתקיים אירוע סוף שבוע בו החל ממנו מטופלות כל ההזמנות שנותרו במערכת, ואין יותר הגעת הזמנות למערכת.
- מדיניות הפיצוי במערכת מופעלת עבור זמן אספקה של למעלה משעתיים המורכב מרגע קבלת ההזמנה ועד הגעתה אל היעד ופריקתה, וגובהה נקבע לפי פונקציה מדרגה באופן הבא:
 - בין 2 ל-5 שעות: 22.10 ₪, בין 5 ל-10 שעות: 28.20 ₪, בין 10 ל-20 שעות: 35.30 ₪, למעלה מ-20 שעות: 70.6 ₪.
 - מחירים אלו נקבעו בהתאם למתואר בנספח 1.
- עלות הרחפנים הינה עלות שקועה ואינה מושפעת מפעילות המערכת, ומיקומי מרכזי השירות קבועים.
- לקוח שביצע הזמנה לא יכול לנטוש באמצע
- לכל מרכז שירות 3 משאבים. כל משאב הוא מערכת $M/M/k$ כאשר k מייצג את מספר הרחפנים מכל סוג כמתואר במבוא.
- כל קופון (פיצוי) שווה ערך לעלות תפעול וזמן מימושו מיידי (מתווסף לכלל עלויות התפעול).
- רחפנים ממשיכים לתת שירות כל עוד הסימולציה רצה וקיימים לקוחות במערכת.
- עבור מרכז העיר או פאתי העיר, כל הזמנה מוגרלת באזור הרלוונטי בעיר.
- מרכזי השירות ממוספרים בכיוון השעון: מרכז שירות 1 – (2,2), מרכז שירות 2 – (2,4), מרכז שירות 3 – (4,4), מרכז שירות 4 – (4,2).
- כל תרשים במודל שלהלן מתייחס להזמנה בודדת.

3. מטרת המחקר

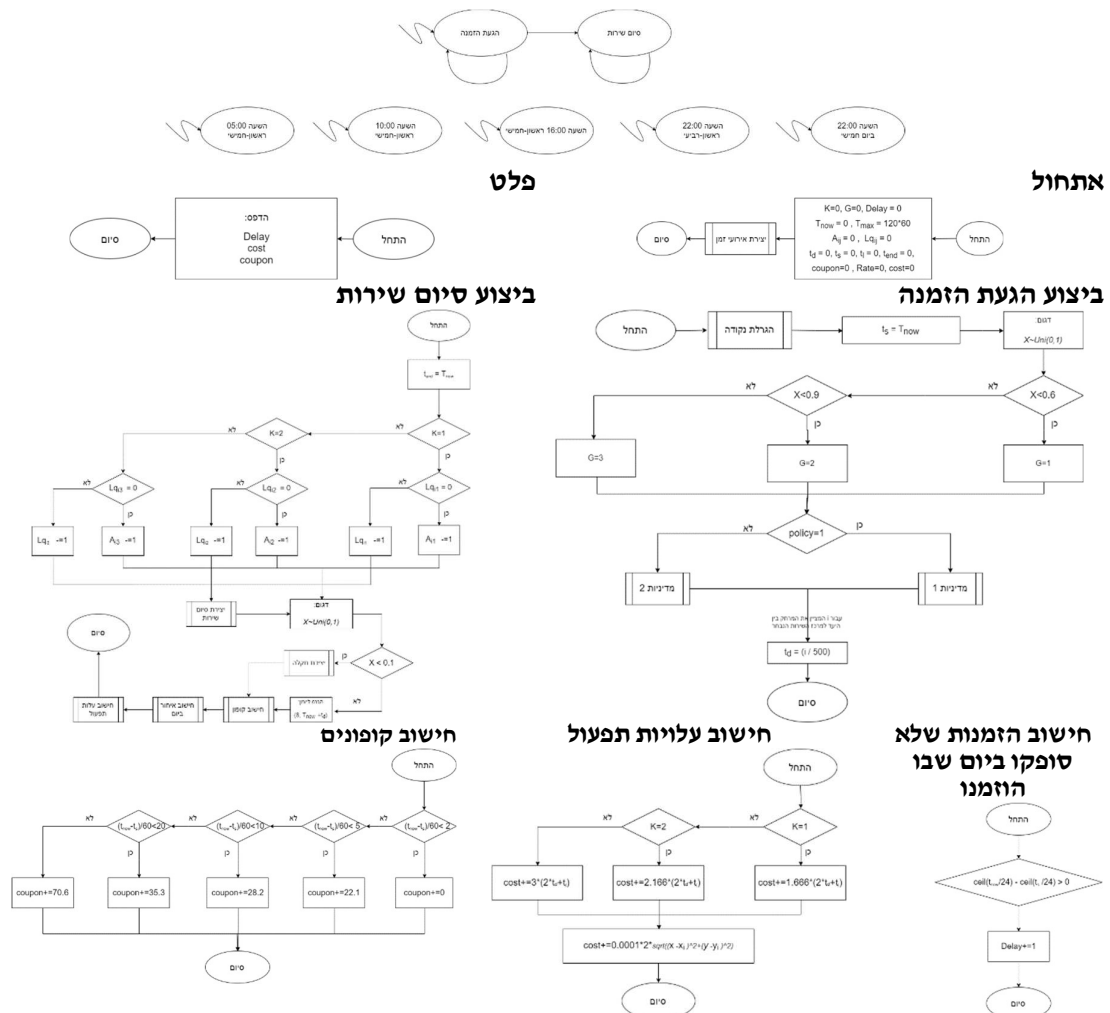
הערכת מדדים, בחינת תצורת המערכת הקיימת ומדיניות הקצאת הזמנות.

4. מצבי המערכת וסימונים רלוונטים

גודל החבילה המתאים בהתאם למה שהוגרל: $G \in \{1,2,3\}$ 1 – קטנה, 2 – רגילה, 3 – כבדה	תפוסת מרכז שירות i עבור $A_{ij} \begin{cases} \forall i \in \{1,2,3,4\} \\ \forall j \in \{1,2,3\} \end{cases}$ סוג רחפן j
כמות החבילות שכרגע בתור למשלוח $L_{qij} \begin{cases} \forall i \in \{1,2,3,4\} \\ \forall j \in \{1,2,3\} \end{cases}$ במרכז השירות i עבור סוג רחפן j	סוג הרחפן שנקבע להזמנה $K \in \{1,2,3\}$ בהתאם למדיניות

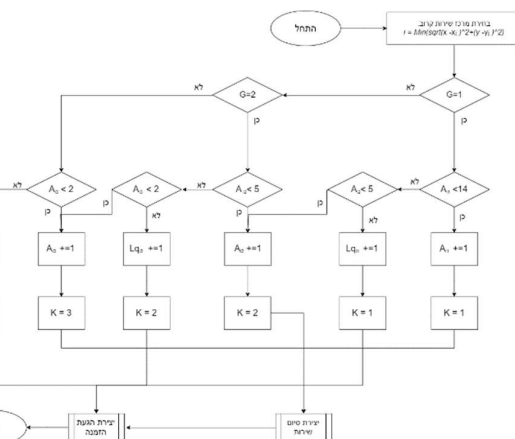
קצב הגעות ההזמנות למערכת: 1 – 150 הזמנות לשעה בין 00:00-05:00, 2 – 200 הזמנות לשעה בין 00:00-16:00, 3 – 80 הזמנות לשעה בין 00:00-22:00, 4 – 0 הזמנות לשעה בין 00:00-22:00, 5 – סוף הגעת הזמנות החל מיום חמישי בשעה 22:00			$Rate \in \{1,2,3,4,5\}$
t_d הזמן שלוקח להגיע ליעד ממרכז השירות	t_s הזמן שבו ההזמנה התקבלה במערכת	t_l הזמן שהחבילה עוזבת את מרכז השירות בדרכה ליעד	t_{end} הזמן בו השירות להזמנה הסתיים
$Delay$ מספר הלקוחות שהזמנתם לא סופקה ביום בו בוצעה	$coupon$ עלויות פיצוי בגין אי אספקת הזמנה בזמן	$cost$ עלויות התפעול של החברה	

להלן הפרוצדורות העיקריות במערכת (כלל תרשימי המערכת מצורפים בנספחים):

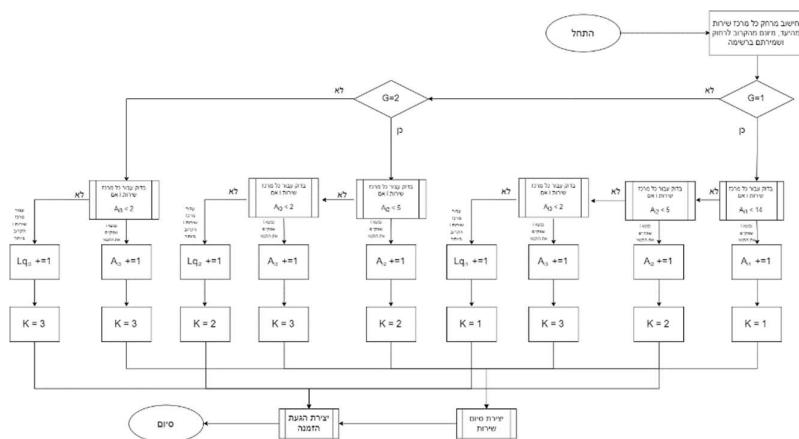


במסגרת הסימולציה, נבחנו את המדיניות הבאות: (גרסאות בגודל מלא נמצאות גם בנספח 4)

מדיניות 1



מדיניות 2



מדיניות 1: כל הזמנה מועברת למרכז התפעול הקרוב אליה ביותר. כברירת מחדל, חבילה קטנה תטופל על ידי חפן בסיסי, אם אין רחפן בסיסי זמין במרכז התפעול, תטופל ההזמנה על ידי רחפן רגיל ואם גם אין רחפן רגיל זמין, ההזמנה תמתין לרחפן בסיסי. באופן דומה, כברירת מחדל, חבילה בינונית תטופל על ידי רחפן רגיל, אם אין רחפן רגיל זמין במרכז התפעול, תטופל ההזמנה על ידי רחפן-על ואם גם אין רחפן-על זמין, ההזמנה תמתין לרחפן רגיל.

מדיניות 2: כל הזמנה מועברת למרכז התפעול מהקרוב אליה ביותר ועד הרחוק ביותר לפי העקרון הבא: נסה להיכנס לתור הפנוי המתאים ביותר עבור סוג הרחפן המתאים, ואם אין מקום פנוי, נסה בסדר יורד את התורים האחרים. עבור חבילה קטנה, נסה להיכנס לתור של הרחפן הבסיסי ממרכז השירות הכי קרוב למרכז השירות הכי רחוק. אחרת, נסה להיכנס לתור של העל ממרכז השירות הכי קרוב למרכז השירות הכי רחוק. אחרת, היכנס לתור של הרחפן הבסיסי במרכז השירות הקרוב ביותר. באופן דומה לוגיקה זו מבוצעת עבור חבילות בינוניות וגדולות. הפסודו-קוד המתאים למדיניות זו נמצא בנספח 3.

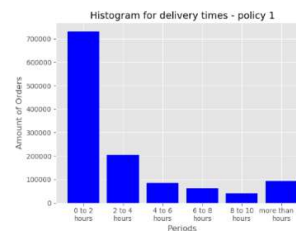
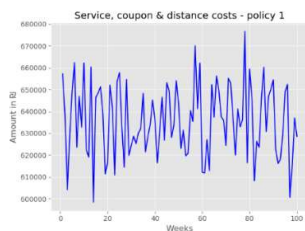
ניתוח המצב הקיים

מהתבוננות בתוצאות הסימולציה ניתן להבחין כי ישנם שבועות ריצה שבהם זמן ריצת הסימולציה חרג מעבר לשבוע עבודה (7 ימים קלנדריים), וזאת כתוצאה משירות הלוקוחות במערכת. על מנת לא להטות את תוצאות הסימולציה, שבועות אלו הורצו פעם נוספת, עד שלא נרשמה חריגה של מעבר לשבוע. חשוב לציין כי מצב זה התרחש בכ-5% מכלל ריצות הסימולציה. להלן מדדי הנתונים שהתקבלו עבור המדיניות הראשית וכן מדדי הנתונים שהתקבלו עבור המדיניות החלופית המוצעת:

מדיניות	תוחלת מספר הזמנות שלא סופקו ביום בו הוזמנו בשבוע	תוחלת עלויות לשבוע (₪)
מדיניות 1	1263.08	635,866.09
מדיניות 2	1214.88	632,562.65
פער	4%	0.5%

טבלה 1: תוצאות עבור מדדי הסימולציה

היות וריצות הסימולציה הינן בלתי תלויות, ממשפט הגבול המרכזי נסיק שהממוצע הוא האמד הטוב ביותר לתיאור המדדים המבוקשים: תוחלת מספר ההזמנות שלא סופקו ביום בו הוזמנו וכן תוחלת עלויות תפעול כוללות. כעת ננתח את המדיניות לגופן עבור 100 השבועות הבלתי-תלויים בהם הסימולציה רצה:



מדיניות 1: מהגרפים הנ"ל ניתן לראות כי מספר ההזמנות המקסימלי שלא סופקו ביום שבו הוזמנו בריצה של 100 שבועות עבודה הוא כ- 1900 הזמנות לשבוע. כמו כן, מספר ההזמנות המינימלי שלא סופקו ביום שבו הוזמנו עמד על כ- 600 הזמנות לשבוע. על פי הנתונים נמצא כי ממוצע ההזמנות שלא סופקו ביום בו הוזמנו הוא 1263.08 הזמנות לשבוע. וכן, התשלום הכולל (עלויות שירות, משלוח, קופונים במידת הצורך) המירבי לשבוע עבודה עומד על כ- 677,000 ש"ח לשבוע והתשלום הכולל המינימלי לשבוע עבודה עומד על כ- 580,000 ש"ח לשבוע, ממוצע עלויות התפעול הכוללות לשבוע הוא 635,866.09 ש"ח. כמו כן, מההיסטוגרמה הנ"ל נבחין כי 60.16% מההזמנות סופקו תוך שעתיים מרגע קבלתן, וכ- 7.6% מסה"כ ההזמנות סופקו לאחר 10 שעות מרגע קבלתן.



מדיניות 2: מהגרפים הנ"ל ניתן לראות כי במדיניות זו מספר ההזמנות המקסימלי שלא סופקו ביום שבו הוזמנו בריצה של 100 שבועות עבודה הוא כ- 1800 הזמנות לשבוע. כמו כן, מספר ההזמנות המינימלי שלא סופקו ביום שבו הוזמנו עמד על כ- 800 הזמנות לשבוע. על פי הנתונים נמצא כי ממוצע ההזמנות שלא סופקו ביום בו הוזמנו הוא 1214.88 הזמנות לשבוע. וכן, התשלום הכולל (עלויות שירות, משלוח, קופונים במידת הצורך) המירבי לשבוע עבודה עומד על כ- 662,000 ש"ח לשבוע והתשלום הכולל המינימלי לשבוע עבודה עומד על כ- 590,000 ש"ח לשבוע, ממוצע עלויות התפעול הכוללות לשבוע הוא 632,562.65 ש"ח. כמו כן, מההיסטוגרמה הנ"ל נבחין כי 62.88% מההזמנות סופקו תוך שעתיים מרגע קבלתן, וכ- 7% מסה"כ ההזמנות סופקו לאחר 10 שעות מרגע קבלתן.

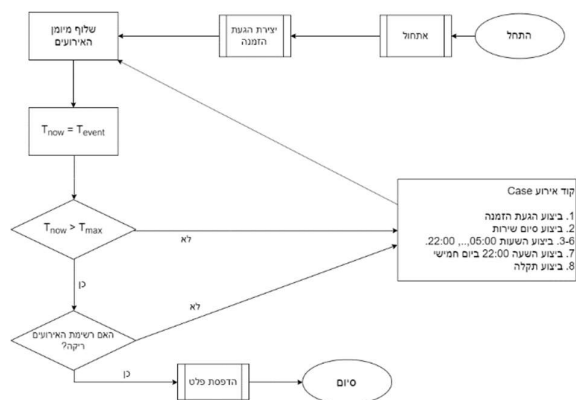
סיכום

בתוצאות שהתקבלו נבחין כי המדדים של המדיניות השנייה (המוצעת) טובים במעט מהדדים של המדיניות הראשונה: קיים פער של 4% בין תוחלת מספר ההזמנות שלא סופקו ביום בו הוזמנו לשבוע, ופער קטן יותר של 0.5% מתוחלת העלויות לשבוע. היתרון העיקרי במדיניות זו הוא ניצול טוב יותר של הרחפנים לצורך שילוח החבילות. ניצול זה מאפשר הקטנה של זמן הבטלה שמתבטא בשילוח מהיר יותר, ולראייה גם העלות קטנה במעט כתוצאה מכך. על אף ההבדלים בין המדיניות, באופן כללי התשלום לשבוע עומד על כ- 635,000 ש"ח אליהן נוסף את העלויות השקועות (עלות רכישת הרחפנים) השוות 275,000 ש"ח. בהתחשב בכך שמתקבלות 12,150 הזמנות בשבוע, נמצא כי העלות הממוצעת למשלוח חבילה עומדת על כ- 75 ש"ח. מכאן שהמערכת הנבחנת עלולה להיות לא משתלמת כלכלית ופוטנציאל הרווח שלה אינו ברור דיו כדי להחליט באופן חד משמעי שהמערכת רווחית. על מנת לייעל ולשפר את המערכת, וכן השינויים שיש לבחון למטרת טיוב המודל, יש להתייחס לנקודות הבאות:

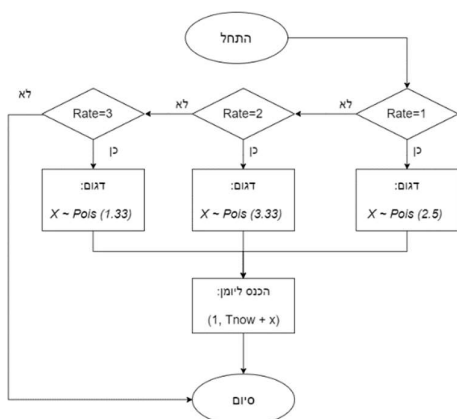
- **מדיניות מיקומי מרכזי השירות:** יש לבחון בסימולציה את פיזור המיקומים של מרכזי השירות באופן שימטב את התפלגות הגעת ההזמנות, ולבחון הגדלה או הקטנה של מספר מרכזי השירות.
- **ניתוב עלויות הפיצוי לטובת הגדלת צי הרחפנים:** מפלט הסימולציה נבחין כי עלויות הקופונים מהוות חלק נכבד מהוצאות החברה, ועל כן יש לבחון גישה שונה: במקום להילחם באיכות שירות ירודה, ניתן נגדיל את צי הרחפנים (עלויות שקועות) ובכך להביא לשיפור איכות השירות ואף לירידה בעלויות התפעול.
- **בחינת תורים בעייתיים:** פילוח של הסימולציה על פי מספר ההזמנות שלא סופקו ביום בו הוזמנו לפי סוג הרחפן הוא מדד משמעותי שלא נלקח בחשבון במודל. מדד זה יאפשר לבחון את המשאבים שזקוקים לתגבור, ויסות כמויות הרחפנים ואף שינוי שלהם, באופן כזה שיאפשר את טיוב ניהול התורים.
- **הגדלת זמן ריצת הסימולציה:** זמן הסימולציה הנבחר למודל זה הינו שבוע קלנדרי. הבחנו כי ב- 5% מהמקרים הסימולציה חרגה ממסגרת זמן זו, ועל כן הסימולציה לא הגיעה למצבה היציב. לכן יש לבחון את שינוי זמן ריצת הסימולציה לזמן ארוך יותר, ולבחון אף יותר מ- 100 ריצות של הסימולציה.

נספח 2 – תרשימים נוספים

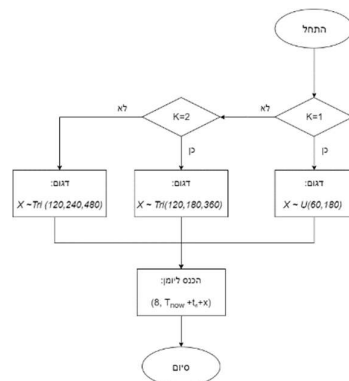
תוכנית ראשית



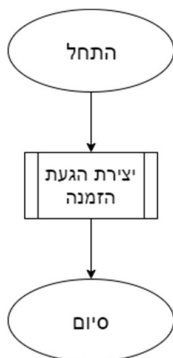
יצירת הגעת הזמנה



יצירת תקלה

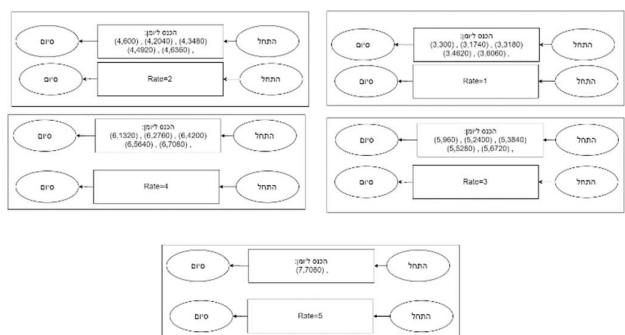


ביצוע תקלה

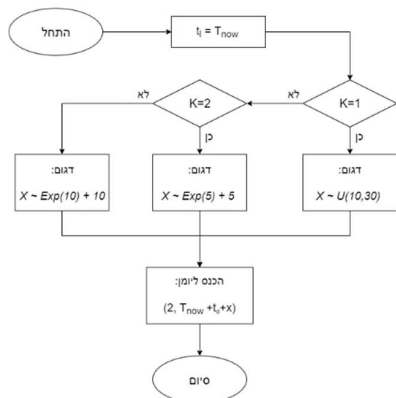


יצירה וביצוע שעות 05:00,10:00,16:00,22:00 בימים ראשון-חמישי

ראשון-חמישי



יצירת סיום שירות



נספח 3 – פסודו-קוד לפרוצדורות במערכת

הגרלת נקודה:

$Z \sim U(0,1)$
אם $Z < 0.5$:
 $X, Y \sim U(2000, 4000)$
אחרת:
 $X, Y = 3000$
כל עוד $2000 \leq X \leq 4000$ & $2000 \leq Y \leq 4000$:
 $X, Y \sim U(0, 6000)$
החזר X, Y

בחירת מרכז שירות במדיניות 2:

קלוט G וקלוט רשימת מרכזי שירות ממויינים מהקרוב לרחוק
אם $G = 1$:
קבע $j = 1$
עבור כל מרכז שירות i ועבור $j \leq 3$:
אם קיים רחפן פנוי j במרכז שירות i החזר i
 $j += 1$
אחרת:
החזר את i מרכז השירות הקרוב ביותר
אם $G = 2$:
קבע $j = 2$
עבור כל מרכז שירות i ועבור $j \leq 3$:
אם קיים רחפן פנוי j במרכז שירות i החזר i
 $j += 1$
אחרת:
החזר את i מרכז השירות הקרוב ביותר
(המשך בעמ' הבא)

אם $G = 3$:

קבע $j = 3$

עבור כל מרכז שירות i ועבור $j \leq 3$:

אם קיים רחפן פנוי j במרכז שירות i החזר i

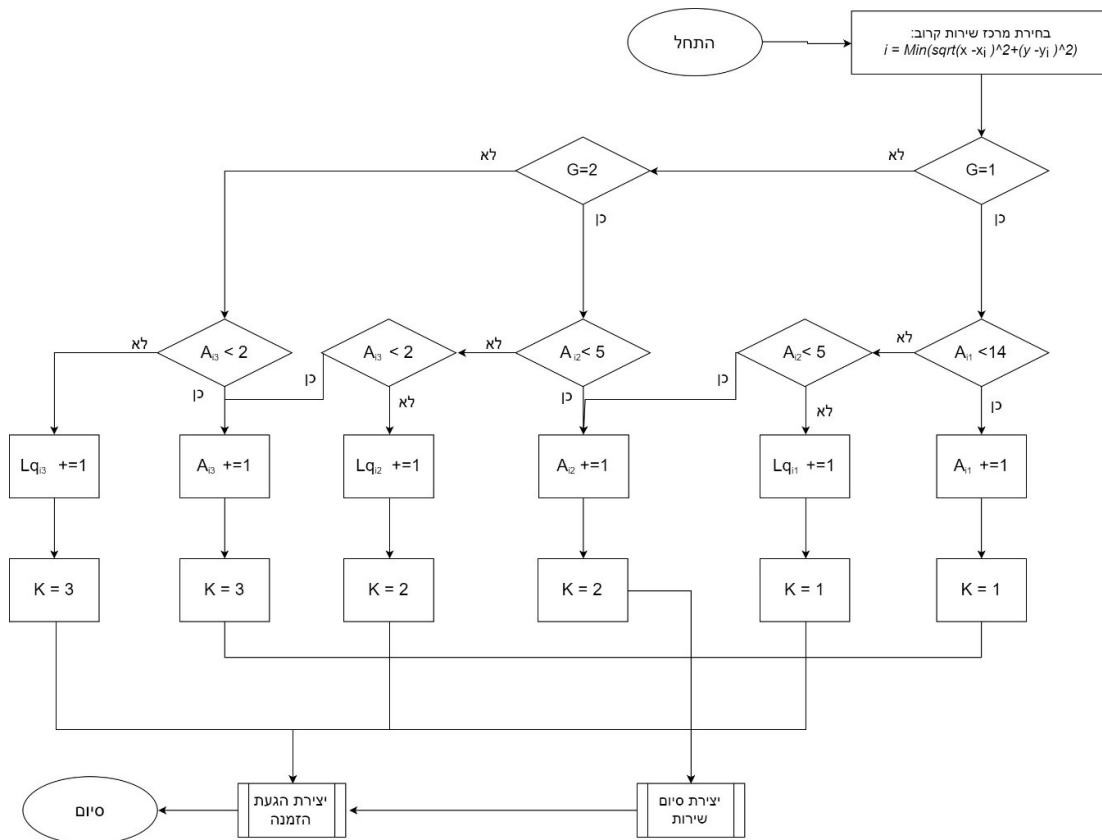
$j += 1$

אחרת:

החזר את i מרכז השירות הקרוב ביותר

נספח 4: תרשימים למדיניות

מדיניות 1:



מדיניות 2:

