

דו"ח בסימולציה

--פרויקט חלק ב--

מגישים:

טל אילון

עמיחי כלב

אביהו מנחם



תוכן עניינים

אימות ותיקוף	עמ' 1
תצורות	עמ' 1
מבנה הניסוי	עמ' 2
תוצאות והשוואת חלופות	עמ' 3
סיכום	עמ' 5

אימות ותיקון

בחלק א' במסגרת הרצת מודל הסימולציה, מתקיים כי לעיתים ריצת הסימולציה אורכת יותר משבוע אחד (למעלה מ-7 ימים), וזאת כתוצאה מסיום הטיפול בהזמנות שנותרו במערכת. כדי להתייחס למקרה זה, בכל פעם שהסימולציה חרגה מ-7 הימים, בוצעה הרצה חוזרת של הסימולציה עבור אותו שבוע עד שזמן הרצת הסימולציה החדש שהתקבל לא חצה את רף 7 הימים.

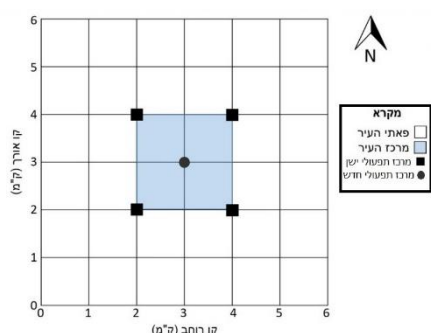
במסגרת המשוב לחלק א', הוסבר לנו כי טיפול זה הינו שגוי כיוון שהוא פוגעת באמינות הסטטיסטית של התוצאות. על מנת לטפל בסוגיה זו, הגבלנו את ריצת הסימולציה ל-7 ימים. הקוד המתוקן מצורף למסמך זה. לאחר הגבלה זו בחנו מחדש את המדדים עבור 2 המדיניות, ולחלן התוצאות שהתקבלו:

לפני השינוי			אחרי השינוי		
מדיניות	תוחלת מספר הזמנות שלא סופקו ביום בו הוזמנו בשבוע	תוחלת עלויות (₪)	מדיניות	תוחלת מספר הזמנות שלא סופקו ביום בו הוזמנו בשבוע	תוחלת עלויות (₪)
מדיניות 1	1263.08	635,866.09	מדיניות 1	1260.51	634,825.93
מדיניות 2	1214.88	632,562.65	מדיניות 2	1213.12	633,941.52
פער	4%	0.5%	פער	3.9%	0.13%

מהתוצאות שהתקבלו, ניתן לראות כי קיימים הבדלים קטנים עד זניחים ביחס לתוצאות שהתקבלו בחלק א'. אנו סבורים כי הסיבה העיקרית לכך היא שמספר המקרים בהם הסימולציה רצה יותר מ-7 ימים מהווה אחוז קטן עד זניח ממספר המקרים בהם הסימולציה אכן הסתיימה עד 7 ימים, וכתוצאה מכך השוני בין התוצאות בהתאם.

תצורות המערכת

תצורה ראשונה

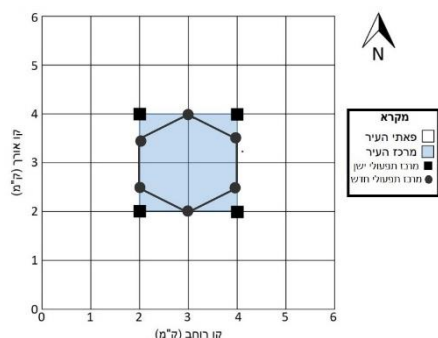


תצורת המערכת הראשונה שנבחרה היא מרכז שירות יחיד, הממוקם במרכז העיר בנקודה (3000,3000), מיקום זה נבחר מתאמי סימטריה ומתחשב בגודל העיר ומרחבי התפעול: מרכז העיר ופאתי העיר. כמו כן, מספר הרחפנים הנבחר הוא: 68 רחפנים בסיסיים, 26 רחפנים בינוניים ו-11 רחפני על - הרכב רחפנים זה נבחר על מנת לתת מענה מיטבי לפילוח ההזמנות שמגיעות (60% הזמנות קטנות, 30% הזמנות בינוניות ו-10% הזמנות גדולות) למרכז תוך התחשבות במגבלות התקציב. בחירת

תצורה זו נבעה כתוצאה מהתחשבות ב-3 גורמים: מהירות הרחפנים (30 קמ"ש), גודל העיר (36 קמ"ר) ועלות מרחק הטיסה (0.1 ש"ח לק"מ). בחלק א' של פרויקט זה הבחנו כי מרבית העלות שמשולמת עשויה להיות כתוצאה ממשכי המתנה לרחפן שיתפנה ולא כתוצאה מזמן השילוח של הרחפן (זמן השילוח לנקודות קצה העיר מהנקודה (3000,3000) הינו כ-8.5 דק') ועל כן ריכוז והגדלת צי הרחפנים במרכז שירות אחד עתיד לשפר את משכי זמן ההמתנה לרחפנים.

לטובת בדיקת תצורה זו אל מול האחרות, מדיניות ההקצאה של תצורה זו נבחרה להיות מדיניות 1 מחלק א' של הפרויקט.

תצורה שניה

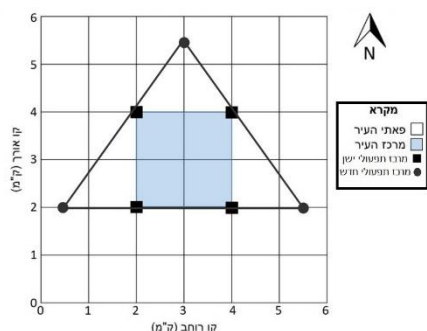


תצורת המערכת השנייה שנבחרה היא 6 מרכזי שירות הממוקמים בנקודות: (2000,2500), (2000,3500), (3000,4000), (4000,3500), (4000,2500), (3000,2000) מיקומים אלו נבחרו על מנת ליצור חלוקה סימטרית סביב מרכז ופאתי העיר. כמו כן, מספר הרחפנים בכל מרכז שירות הוא: 7 רחפנים בסיסיים, 3 רחפנים בינוניים ורחפן על - בדומה לתצורה הראשונה הרכב רחפנים זה נבחר על מנת לתת מענה לפילוח ההזמנות שמגיעות למערכת בהתחשב במגבלות התקציב, בדומה מספר מרכזי השירות שנבחר הוא

נגזרת של עלות הרכב הרחפנים ומגבלות התקציב – כלומר זהו המספר הרב ביותר של מרכזים הניתנים להקמה במסגרת הרכב רחפנים זה. בבחירת תצורה זו אנו רוצים לבדוק האם הקטנת העומסים על מרכזי השירות כתוצאה מהוספת מרכזים וקיצור זמן השילוח כתוצאה משיוך מרכזים קרובים יותר עתיד לשפר את משכי זמן ההמתנה לרחפן ועל ידי כך שיפור בתפוקת המערכת והקטנת הפיצוי כתוצאה מזמני המתנה ארוכים. יש לציין כי ישנו תקציב שנותר והוא עומד על 30,000 ש"ח – תקציב זה לא שימש לקניית רחפנים שכן אנו רוצים לשמור על מערכת מאוזנת ולא ליצור מרכזים בעלי מספר לא זהה של רחפנים.

לטובת בדיקת תצורה זו אל מול האחרות, מדיניות ההקצאה של תצורה זו נבחרה להיות מדיניות 1 מחלק א' של הפרויקט.

תצורה שלישית



תצורת המערכת השלישית שנבחרה היא 3 מרכזי שירות הממוקמים בנקודות: (500,2000), (3000,5500), (5500,2000) מיקומים אלו נבחרו על מנת ליצור חלוקה סימטרית סביב מרכז ופאתי העיר. כמו כן, מספר הרחפנים בכל מרכז שירות הוא: 20 רחפנים בסיסיים, 7 רחפנים בינוניים ו3 רחפני על - בדומה לתצורות לעיל הרכב רחפנים זה נבחר על מנת לתת מענה לפילוח ההזמנות שמגיעות למערכת בהתחשב במגבלות התקציב, מספר מרכזי השירות שנבחר הוא ממוצע מספר מרכזי השירות בתצורות 1 ו-2 מעוגל כלפי מטה וזאת

על מנת לבחון האם מיצוע של תצורות 1 ו-2 עשוי להביא למדדים מיטביים. יש לציין כי ישנו תקציב שנותר והוא עומד על 5000 ש"ח – תקציב זה לא שימש לקניית נוספת משום שלא ניתן לקנות בסכום זה רחפנים נוספים. לטובת בדיקת תצורה זו אל מול האחרות, מדיניות ההקצאה של תצורה זו נבחרה להיות מדיניות 1 מחלק א' של הפרויקט.

מבנה הניסוי

על מנת להחליט אילו מבין התצורות שפורטו לעיל היא התצורה העדיפה ביותר, נשווה בין המדדים כפי שהוגדרו בחלק א' של הפרויקט המתקבלים לפי כל אחת מהתצורות, וכפי שהם מתקבלים ממדיניות 1 בחלק א'. המדד שישמש להשוואה בין התצורות השונות ודירוגיהן הינו תוחלת העלות, משום שהוא מייצג את ההבדל העיקרי בין התצורות בעקבות מספר מרכזי השירות וצי הרחפנים השונה הקיים בתצורה. כדי להימנע ממבחן לא מאוזן וכדי להפחית את הרעש, כל תצורה בנפרד הורצה במשך 20 שבועות תחת גרעין אקראי משותף, ומכל תצורה הופק אמד לסטית תקן של מדד תוחלת העלות. להלן הממצאים, עבור רמת מובהקות של 5%:

תצורה	s	α	ε	$z_{1-\frac{\alpha}{2}}$	n_i
תצורה 1	11606.693	0.05	1000	1.96	517.46
תצורה 2	23248.398	0.05	1500	1.96	922.81
תצורה 3	14807.623	0.05	1000	1.96	824.33

טבלה 1: חישוב מספר החזרות הרלוונטי לכל תצורה

$$n_i = \left(z_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s}{\varepsilon} \right)^2$$

האופן בו חושב מספר החזרות הרלוונטי לכל תצורה הינו לפי הנוסחה:

לכל תצורה נבחרה רמת דיוק ε גדולה מספיק כדי להימנע ממספר הרצות גדול מידי, בעקבות הערכים שהתקבלו עבור סטיות התקן בהרצות הראשוניות. מבין מספר החזרות שהתקבל עבור כל תצורה נבחר במספר המקסימלי מביניהם, כלומר מספר החזרות עבור כל התצורות שנקבע הוא: $N = 923$ חזרות. הרצת כל תצורה נעשית באופן בלתי תלוי ביחס לתצורות האחרות שנבדקות.

תוצאות הניסוי והשוואת חלופות

הערה: כל תצורה יושמה בקובץ פייתון המתאים לה. קבצי הקוד הרלוונטיים מצורפים למסמך זה. להלן תוצאות הניסוי לאחר 923 חזרות בכל תצורה:

תוצאת מספר הזמנות שלא סופקו ביום בו הוזמנו בשבוע	תוחלת עלויות לשבוע (₪)	תצורה
126.57	598,849.86	1
2874.61	750,428.32	2
1258.72	708,641.25	3

טבלה 2: תוצאות עבור מדדי הסימולציה לכל תצורה

היות וריצות הסימולציה עבור כל תצורה 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.

להלן הממצאים עבור תצורה 1:



מהגרפים הנ"ל ניתן לראות כי בתצורה זו, מספר ההזמנות המקסימלי שלא סופקו ביום שבו הוזמנו הוא כ- 500 הזמנות לשבוע. כמו כן, מספר ההזמנות המינימלי שלא סופקו ביום שבו הוזמנו עמד על קרוב לאפס. על פי הנתונים נמצא כי ממוצע ההזמנות שלא סופקו ביום בו הוזמנו הוא 126.57 הזמנות לשבוע. התשלום הכולל (עלויות שירות, משלוח, קופונים במידת הצורך) המירבי לשבוע עבודה עומד על כ- 640,000 ₪ לשבוע והתשלום הכולל המינימלי לשבוע עבודה עומד על מעט מתחת ל- 570,000 ₪ לשבוע. ממוצע עלויות התפעול הכוללות לשבוע הוא 598,849.86 ₪. כמו כן, מההיסטוגרמה הנ"ל נבחין כי 83.83% מההזמנות סופקו תוך שעתיים מרגע קבלתן, וכמעט שאין הזמנות כלל שסופקו לאחר 10 שעות מרגע קבלתן.

להלן הממצאים עבור תצורה 2 :



בתצורה זו, מספר ההזמנות המקסימלי שלא סופקו ביום שבו הוזמנו הוא כ- 3800 הזמנות לשבוע. כמו כן, מספר ההזמנות המינימלי שלא סופקו ביום שבו הוזמנו עמד על כ-2000 הזמנות לשבוע. על פי הנתונים נמצא כי ממוצע ההזמנות שלא סופקו ביום בו הוזמנו הוא 2874.61 הזמנות לשבוע. התשלום הכולל (עלויות שירות, משלוח, קופונים במידת הצורך) המירבי לשבוע עבודה עומד על כ-810,000 ₪ לשבוע והתשלום הכולל המינימלי לשבוע עבודה עומד על מעט מתחת ל-700,000 ₪ לשבוע. ממוצע עלויות התפעול הכוללות לשבוע הוא 750,428.32 ₪. כמו כן, מההיסטוגרמה הנ"ל נבחין כי 27.8% מההזמנות סופקו תוך שעתיים מרגע קבלתן, ו-17.79% מההזמנות סופקו לאחר 10 שעות מרגע קבלתן.

להלן הממצאים עבור תצורה 3 :



בתצורה זו, מספר ההזמנות המקסימלי שלא סופקו ביום שבו הוזמנו הוא כ- 2100 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 1258.72 הזמנות לשבוע. התשלום הכולל (עלויות שירות, משלוח, קופונים במידת הצורך) המירבי לשבוע עבודה עומד על כ-770,000 ₪ לשבוע והתשלום הכולל המינימלי לשבוע עבודה עומד על מעט מתחת ל-660,000 ₪ לשבוע. ממוצע עלויות התפעול הכוללות לשבוע הוא 708,641.25 ₪. כמו כן, מההיסטוגרמה הנ"ל נבחין כי 58.52% מההזמנות סופקו תוך שעתיים מרגע קבלתן, ו-7.68% מההזמנות סופקו לאחר 10 שעות מרגע קבלתן.

כעת על מנת להחליט אילו מן החלופות, נשתמש בניתוח שונות חד כיווני עם מדידות חוזרות. ננסח באופן הבא את מבחן ההשערות המתאים. התוחלת במקרה זה הינה תוחלת העלות המופקת כמדד בסימולציה.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3, \quad H_1: \text{else}$$

בוצע ניתוח לנתונים שהתקבלו עבור מדד תוחלת העלות. הניתוח מצורף כקובץ אקסל. לאחר ניתוח הנתונים, התקבלה טבלת ניתוח שונות הבאה :

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F_{emp}
Treatments	1.13149E+13	2	5.65743E+12	23777.68214
Subjects	2.66172E+11	922	288689316.1	
Error	4.38743E+11	1844	237930134.5	
Total	1.20198E+13	2768		

טבלה 3: תוצאות ניתוח שונות חד כיווני עם מדידות חוזרות עבור מדד תוחלת העלות ב3 התצורות

עבור רמת מובהקות של 5%, מתקבל: $F_{0.05}(2,1844) = 3.00$

כלומר: $F_{emp} > F_{0.05}(2,1844)$ ולכן נדחה את השערת האפס, כלומר קיים הבדל בין התצורות.

כעת נותר לבדוק מי מבין התצורות היא התצורה העדיפה ביותר. נבצע מבחן הפרשי תוחלת ע"י בניית רווח בר-סמך עבור כל זוג תצורות, ונבחן מי מבין זוג התצורות עדיף. מבחן ההשערות במקרה זה:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0, \quad H_1: \text{else}$$

$$\bar{d} \pm \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} : \text{את הרב"ס נבנה באופן הבא:}$$

את הניתוח והחישובים הרלוונטיים ניתן לראות בקובץ האקסל המצורף. להלן סיכום הממצאים:

תצורה 1 מול תצורה 3	תצורה 2 מול תצורה 3	תצורה 1 מול תצורה 2
$D \in \{-111016, -108566\}$	$D \in \{40205.68, 43368.46\}$	$D \in \{-152979.1, -150178\}$
תצורה 1 עדיפה	תצורה 3 עדיפה	תצורה 1 עדיפה

טבלה 4: ניתוח הרב"ס שהתקבל עבור כל זוג תצורות

ניתן לראות מהממצאים כי התצורה העדיפה מבין ה-3 היא תצורה מספר 1, בה תוחלת העלות היא הנמוכה ביותר מבין התוחלות שהתקבלו עבור התצורות האחרות.

סיכום

לאחר ביצוע 2 מבחנים סטטיסטיים התקבל שוני בממוצעי העלויות, כך שממוצע העלויות הגבוה ביותר התקבל בתצורה 2 והממוצע הנמוך ביותר התקבל עבור תצורה 1. תוצאות 2 המבחנים מעידים שמבחינה סטטיסטית תצורה 1 היא העדיפה ביותר. גם מבחינה אבסולוטית ניתן לראות כי תצורה 1 עדיפה מבחינת שלושת המדדים בפער משמעותי ביחס לשאר התצורות, שעלויות התפעול של תצורה 1 הן 598,849.86 ₪, עלויות התפעול של תצורה 2 הוא 750,428.32 ₪ ועלויות התפעול של התצורה השלישית הן 708,641.25 ₪. התצורה הראשונה עדיפה בשל העיקרון שהופנו התקציבים ששימשו להקמת 3 מרכזי שירות לקניית רחפנים נוספים, התקציב שנחסך מאי פתיחת 3 מרכזים הוא 300,000 ₪ ותקציב זה אפשר הרחבת צי הרחפנים לצי גדול מאוד שנותן מענה מהיר לכל הזמנה שמתקבל במרכז. עוד עיקרון שנלקח בחשבון הוא שמהירות הרחפנים גבוהה וזמן הטיסה שלהם בעיר הוא קצר מאוד כך שמשך זמן האספקה מהווה את צוואר הבקבוק ולא זמן הטיסה. כפי שניתן לראות על תצורה 1 83.3% מההזמנות מתקבלות תוך שעתיים ומספר ההזמנות שממתנות מעבר ליום הוא אפסי מה שאכן מבטא זמן אספקה יחסית מהיר. הצעה לפתרון היא שימוש גם במרכז שירות יחיד שימוקם בנקודה (3000,3000) עם אותו מספר וסוג רחפנים אך המדיניות בו תהיה, חבילה קטנה תועבר ע"י רחפן בסיסי, אם אין רחפן בסיסי פנוי אז שימוש ברחפן רגיל, אם אין גם רחפן רגיל פנוי שימוש ברחפן על, אם אין רחפן על פנוי אז החבילה תמתין לרחפן בסיסי. עבור חבילה בינונית, היא תועבר ע"י רחפן רגיל ואם אין רחפן רגיל פנוי אז תועבר ברחפן על, אם אין רחפן על אז תמתין לרחפן רגיל. חבילה גדולה תעשה שימוש רק ברחפן על ותמתין במרכז עד שיתפנה רחפן על. המדיניות תאפשר לנצל את הרחפנים הפנויים ולהקטין את זמן ההמתנה של החבילות במרכז השירות שיתבטא בעלויות נמוכות.