



אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
הפקולטה למדעי ההנדסה
המחלקה להנדסת תעשייה וניהול

איזון עבודה בבעיית ניתוב רכבים בשרותי ההזרעה המלאכותית בישראל

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת תואר מגיסטר בהנדסה
ע"י

בועז שניידר

מנחים: דר' משה אבן חיים
דר' אילן הלחמי

.....תאריך

.....תאריך

.....תאריך

.....תאריך

.....חתימת המחבר

.....אישור המנחים

.....

.....אישור יו"ר ועדת תואר שני מחלקתית

תקציר

בעת תכנון העבודה בשרותי ההזרעה המלאכותית בישראל מתעוררת בעיה הידועה כבעיית ניתוב הרכבים. זו בעיה של חלוקת לקוחות לסוכנים שנוצרת כאשר הדרישה של כלל הלקוחות גדולה מהקיבולת של סוכן בודד/נסיעה בודדת מבחינת גודל המטען ואו עומס העבודה. שרותי ההזרעה ניתנים על ידי סוכנים (להלן יקראו "מזריעים") ביישובים (קיבוץ או מושב) למספר שונה של פרות המוגשות להזרעה מידי יום, בכפוף לאילוצים הבאים: (1) כל הפרות המוגשות להזרעה מקבלות שירות באותו יום; (2) ממוצע הפרות ביום; ו- (3) משך יום העבודה מאוזנים בין המזריעים. בעבודה זו, פותחו כלים לתכנון עבודת המזריעים. המחקר נערך בחברת "שיאון", ספקית שרותי הזרעה מלאכותית (חפץ חיים, 79800, ישראל). החברה מעסיקה כ- 40 מזריעים המבקרים בכל יום כ- 1090 פרות, ב- 412 רפתות הפזורות ב- 283 יישובים ברחבי הארץ. עבודת המזריע כוללת הזרעות שבוצעו ובדיקות הפרות שלא הוזרעו (להלן יקרא "הכנסות ידיים"), הכנה להזרעה, נסיעה בין רפתות ביישוב ונסיעות בין היישובים. שיטת העבודה: (1) שימוש ברגרסיה מרובת מתנים לפיתוח מודל לחיזוי משך זמן העבודה בתוך יישוב; (2) ניסוח מודל אופטימיזציה מתמטית להקצאה אופטימאלית של היישובים למזריעים ולתכנון מסלול הנסיעה המיטבי בין היישובים בכל אזור; (3) פיתוח כלים לתכנון העבודה – פתרון המודל. נאספו נתונים על כ- 150,000 טיפולים בפרות (הכנסות ידיים) מהמסופונים האישים של המזריעים. כל מזריע הקליד: מספר הכנסות ידיים, מספר רפתות, סוג יישוב (קיבוץ/מושב) ומספר הכנות להזרעה. נתונים אלו שימשו קלט למודל הרגרסיה. הפלט של הרגרסיה הוא מודל להערכת משך העבודה ביישוב. מודל זה הוא חלק מהקלט למודל ההקצאה האופטימאלית שהקלט שלו כולל גם טבלאות מרחקי נסיעה ומהירות נסיעה בין יישובים. תכנון עבודת המזריעים נעשה ב- 4 שלבים: (1) הקצאה ראשונית של יישובים למזריעים; (2) שיפור משך זמן הנסיעה על ידי החלפת יישובים בין מזריעים שכנים; (3) איזון מספר ההזרעות ומשך יום העבודה על ידי העברת יישובים בין מזריעים שכנים; ו- (4) מציאת מסלול נסיעה מיטבי לכל מזריע בעזרת אלגוריתם גנטי. תוצאות המחקר:

1. פותח מודל לחיזוי משך העבודה של מזריע ביישוב, שאינו תלוי בסוג היישוב או בעונות השנה אלא במספר הרפתות ביישוב ובמספר הפרות המוגשות בו להזרעה, בלבד!
2. פותח מודל של אופטימיזציה מתמטית לתכנון עבודת המזריעים. המודל שייך למשפחת מודלים של ניתוב רכבים אך כולל מרכיב של איזון עומסים שלו נכלל במודלים אלו בעבר.
3. הפחתה של 21.4% במשך זמן הנסיעה הכולל של כל המזריעים.
4. ההפרש בין משך יום העבודה של המזריע בעל יום העבודה הארוך ביותר לזה של המזריע בעל היום הקצר ביותר ירד מ- 4 שעות ל- 1.8 שעות. הקטנה של 55% של תחום משכי יום העבודה.
5. ההפרש במספר הכנסות הידיים בין המזריע בעל ממוצע הכנסות ידיים המקסימאלי ביום והמזריע בעל ממוצע הכנסות ידיים המינימאלי ביום ירד מ- 24.1 ל- 19 הכנסות ידיים ביום – הקטנה של 20% של תחום הממוצעים של מספר הכנסות הידיים ביום.
6. הבנה שאיזון העבודה בין מזריעים תלוי במיקום הגיאוגרפי של היישובים והמזריעים, ובכמות העבודה ביישובים. המודל מאפשר לכמת את התועלת של שינוי מקום מגורי המזריעים.
7. הבנה וכימות ה- Trade Off בין איזון עבודה במונחי הכנסות ידיים למשך יום העבודה. אילוץ הדוק יותר על מספר הכנסות ידיים מגדיל את משך זמן הנסיעה ולהפך.

תוכן עניינים

6		1
11		2
11	2.1 בעיית ניתוב רכבים – VRP	
12	2.2 מדדי ביצוע לאיזון פס ייצור	
13	2.3 בעיית הסוכן הנוסע – TSP	
13	2.4 אלגוריתמים גנטיים	
15		3
15	3.1 חומרים ושיטות	
19	3.2 תוצאות	
26	3.3 דיון	
27		4
27	4.1 חומרים ושיטות	
36	4.2 תוצאות	
41	4.3 דיון	
43		5
43	5.1 השפעת שינוי משך העבודה המינימאלי על משך זמן הנסיעה הכולל	
44	5.2 השפעת שינוי האילוצים על כמות העבודה המקסימאלית על משך זמן הנסיעה הכולל	
47		6
49		7
52		8
52	נספח א – "סרגל און"	
53	נספח ב – אזורי עבודה – מאי 2007	
62	נספח ג – כמות העבודה ביישובים	
69	נספח ד – פירוט עבודת המזריעים במצב הקיים	
70	נספח ה – השינוי באילוף משך יום מינימאלי	
74	נספח ו – השינוי באילוף ממוצע הכנסות הידיים	
78	נספח ז – השינוי באילוף משך יום מקסימאלי	
82	נספח ח – מדריך למשתמש	
88	נספח ט – תיעוד תוכנה	

רשימת טבלאות

טבלה 1	נתוני עבודה במצב קיים	9
טבלה 2	מקדם פירסון בין המשתנים המסבירים והמשתנה המוסבר	19
טבלה 3	אחוז השונות המוסברת על ידי הכנסת משתנים מסבירים	22
טבלה 4	ריכוז נתוני חקר עבודה ביישוב	23
טבלה 5	מבחן ANOVA לתקפות המודל	23
טבלה 6	מקדמי מודל הרגרסיה	24
טבלה 7	מבחן T – מזווג	24
טבלה 8	הקצאת יישובים למזריעים בשלב 1	36
טבלה 9	הקצאת יישובים למזריעים ב - 2 שלבים	38
טבלה 10	הקצאת יישובים למזריעים ב - 3 שלבים	39
טבלה 11	הקצאת יישובים למזריעים ב - 4 שלבים	40
טבלה 12	פירוט עבודת המזרעים המתקבל מאלגוריתם maxmin	42

רשימת איורים

איור 1	תרשים זרימה ביצוע הזרעות ביישוב.	8
איור 2	ייצוג מסלול בגרף על ידי מחרוזת ביטים.	14
איור 3	גרף Q-Q.	20
איור 4	גרף Q-Q לאחר ניפוי יישובים בעלי שגיאה מעל חצי שעה.	21
איור 5	התפלגות המודל לתוצאות בסטיות תקן.	21
איור 6	ההפרשים בין הזמנים המדודים לזמנים החזויים לאורך ציר הזמן.	22
איור 7	גרף מבחן גרסיה – משך זמן חזוי מול משך זמן בפועל.	25
איור 8	גרף מבחן D – Kleijnen מול Q.	25
איור 9	משך זמן עבודה בתלות במספר הכנסות ידיים.	26
איור 10	דוגמא לפיתרון של מסלול נסיעה.	35
איור 11	מוטציות.	35
איור 12	הכלאה בין שני פתרונות.	35
איור 13	איזון משך יום עבודה בתלות באילוף משך יום עבודה מינימאלי.	43
איור 14	גרף משך זמן נסיעה כולל בתלות באילוף משך יום עבודה מינימאלי.	44
איור 15	גרף משך זמן נסיעה כולל תלוי באילוף ממוצע הכנסות ידיים יומי מקסימאלי.	45
איור 16	גרף משך זמן נסיעה כולל תלוי באילוף משך יום עבודה מקסימאלי.	45

1. מבוא

שרותי ההזרעה המלאכותית בישראל מבצעים הזרעות ב – 283 יישובים שמחולקים ל-29 אזורי עבודה, על ידי סוכנים היוצאים וחוזרים למקום מגוריהם ומשרתים כל אחד אזור אחד. לכל סוכן - מזרע מגבלה על כמות שרותי ההזרעה המסופקים על ידו, ומגבלה של משך יום העבודה שלו. מגבלות אלו גורמות לכך שבעת תכנון עבודת המזריעים מתעוררת בעיה הידועה כבעיית ניתוב הרכבים. בעיית ניתוב הרכבים קשורה לבעיית הסוכן הנוסע – מציאת המסלול הקצר ביותר לביקור כלל הלקוחות. בעיה זו מתעוררת כאשר קיימות מגבלות שלא מאפשרות את מתן כל השרות על ידי סוכן יחיד – למשל: (1) קיבולת כלי רכב יחיד קטנה מהביקוש של כלל הלקוחות; (2) קיימת הגבלה על מרחק הנסיעה; ו(או) (3) קיימת הגבלה על משך העבודה הכולל של סוכן. מרכיב משמעותי בעבודה הן נסיעות ולפיכך מציאת מסלולי הנסיעה הקצרים הכרחית. יתירה מזאת, כמתואר להלן, הגעה מוקדמת לפרה מיוחמת מגדילה מאוד את סיכויי ההתעברות שלה מה שמגדיל עוד יותר את הצורך בקיצור זמני הנסיעות.

1.1. הזרעה מלאכותית בישראל

חלב פרות מלווה את האדם משחר ההיסטוריה. הפרה מניבה חלב אחרי המלטה, התנובה עולה לשיא כחודשיים אחרי ההמלטה ויורדת לאורך זמן. הזרעת הפרה והכנסתה להריון במועד מבטיחות את המשכיות ייצור החלב. בארץ ישראל מעל ל 95% מההזרעות, כ – 350,000 הזרעות בשנה, מבוצעות בהזרעה מלאכותית – שיטה בה מפיקים זרע מן הזכר (להלן יקרא "זרמה") בתנאי מעבדה מבוקרים ומחדירים את הזרמה למערכת הרבייה של הנקבה בעת הייחום ברפתות השונות. יתרונות ההזרעה המלאכותית הם (אתר אינטרנט – <http://www.sion-israel.com>):

- השבחה גנטית עם תכונות של הפר ממנו נתקבלה הזרמה.
- חיסכון כלכלי מאי החזקת זכרים רבים לצורך הרבייה.
- ניתן לשמר את הזרע המוקפא לתקופות ארוכות ולשלוח אותו לכל מקום בעולם, הסרת מוגבלויות הכרוכות בהפגשת זכרים ונקבות.
- הימנעות מהעברת מחלות, ובפרט מחלות מין. פעולת הרבייה הופכת להיות סטרילית, באופן יחסי.
- שליטה בעיתוי ההריון והלידה.

מספר גורמים משפיעים על שיעור ההצלחה של הזרעות מלאכותיות. שני גורמים שיש להם השלכה על עבודה זו הם משך הזמן מהתייחמות הפרה ועד להזרעה וטמפרטורת הזרמה בעת ההזרעה. שיעורי ההצלחה גדלים ככל שהפרה מוזרעת סמוך יותר להתייחמותה, וכשטמפרטורת הזרמה היא בתחום מתאים.

ההזרעה המלאכותית בארץ החלה בתחילת שנות ה-30 על ידי דר' פוקס. בשנת 1948 הוזרעו 14,000 פרות באמצעות 21 מרכזי הזרעה. בשנת 1952 החל תהליך איחוד אגודות ההזרעה המקומיות והקטנות לאגודות אזוריות גדולות. בסיומו של תהליך נשאר בארץ שתי אגודות גדולות: "און" בצפון ו"השרות" בדרום. בשנת 2001 אוחדו שתי האגודות לחברת "שיאון" בע"מ, חברה העוסקת בטיפוח ובהזרעה מלאכותית של פרות (אתר אינטרנט – <http://www.sion-israel.com>). שרותי הזרעה ניתנים לרוב רפתני ישראל, הפזורים במושבים, קיבוצים, מושבות ובתי ספר חקלאיים – כ – 1090 פרות ביום, ב –

412 רפתות. מספר היישובים המקבלים שירות הינו 283 המחולקים ל 29 אזורים, בכל אזור סוכן (להלן יקרא "מזריע") קבוע המספק שרותי הזרעה מלאכותית לפרות (להלן יקרא "הכנסות ידיים).

1.2. תאור הבעיה

1.2.1. "סרגל און"

תכנון עבודת המזריעים נעשה בעזרת "סרגל און" (נספח א) שפותח בשנות ה – 50 של המאה הקודמת על ידי דר' חיים שטורמן. "סרגל און" משמש את החברה לחישוב פרמיות עבודה לכל מזריע. ב"סרגל און" שלושה מרכיבים:

1. שעות זיכוי מרחק נסיעה – מרחק הנסיעה בקילומטרים אותם עובר המזריע ביום מתורגם למספר שעות עבודה לפיהם מקבל המזריע שכר. דוגמא: מזריע הנוסע בין 51 – 55 קילומטר ביום מקבל זיכוי חודשי של 23 שעות עבודה.

2. שעות זיכוי הזרעות במושב – מספר ההזרעות בחודש המבוצעות על ידי מזריע במושבים מתורגמות למספר שעות עבודה לפיהם מקבל המזריע שכר. דוגמא: מזריע המבצע במושב יחיד בין 41 – 48 הזרעות בחודש מקבל זיכוי חודשי של 11 שעות עבודה.

3. שעות זיכוי הזרעות בקיבוץ – מספר ההזרעות בחודש המבוצעות על ידי מזריע בקיבוצים מתורגמות למספר שעות עבודה לפיהם מקבל המזריע שכר. דוגמא: מזריע המבצע בקיבוץ יחיד בין 41 – 48 הזרעות בחודש מקבל זיכוי חודשי של 9 שעות עבודה.

חקר העבודה לפיתוח "סרגל און" בוצעה לפני כ – 40 שנים ומאז בנייתו חלו שינויים בתנאי העבודה, הוכנסו שיטות חדשות להזרעה על פי תקני איכות (ISO), אוחדו רפתות, שופרו כבישים וכלי תחבורה. בעיקר, התקדמה מאוד טכנולוגיית המחשוב והאפשרויות שהיא מציעה בהקשר הנוכחי. למשל, "סרגל און" הינו סרגל בדיד, אותו מספר שעות זיכוי לכמויות שונות של הזרעות ללא התייחסות לערכי הביניים. עד 16 הזרעות ביום מזריע המבצע הזרעות במושב מקבל פחות שעות זיכוי ממזריע המבצע הזרעות בקיבוץ למרות שההזרעה במושב מורכבת יותר – בקיבוץ מבוצעות הזרעות באצווה גדולה באותה רפת ובמושב מפוזרות ההזרעות ברפתות שונות. בטכנולוגיית המחשוב הנוכחית, אין שום מניעה להתייחס לערכים מדויקים ונקודתיים.

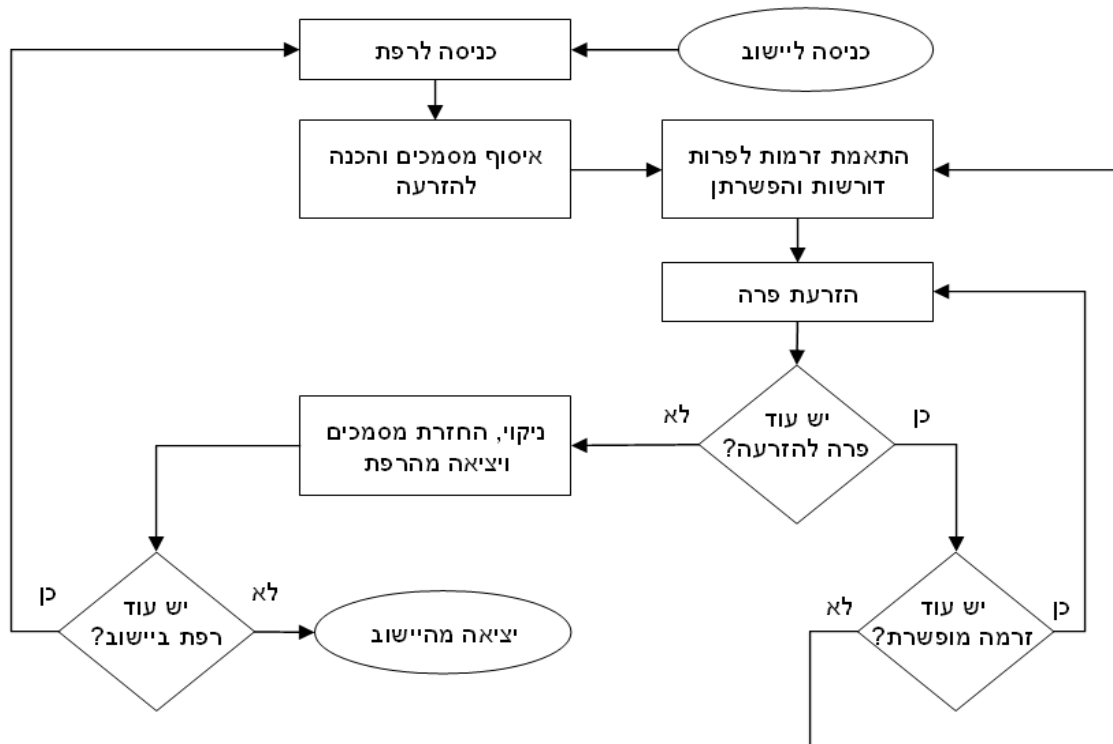
ב"סרגל און" קיימת הפרדה בין משך זמן עבודה בקיבוץ ומשך זמן עבודה במושב, אך נראה ש"סרגל און" לא מתאר נכון את ההבדל ביניהם. קיבוץ הוא יישוב בעל רפת אחת עם מספר גדול של פרות וניתן אם כן לראותו כמקרה פרטי של מושב. ניתן להגדיר את עומס העבודה כתלות במספר הרפתות ביישוב ומספר הפרות בכל רפת.

ב"סרגל און" אין התייחסות לעומסי תנועה בכבישים. מזריע הנוסע בכביש בו התנועה עומדת מבלה זמן רב יותר בכביש בנסיעה איטית לעומת מזריע הנוסע בכביש בו התנועה דלילה, כביש בו ניתן לנסוע במהירות גבוהה יותר.

ב"סרגל און" אין התייחסות לעונות בשנה, באזורים שונים יש שונות גבוהה בכמות ההזרעות בתקופות השנה. ב"סרגל און" אין התייחסות לסנכרון ההזרעות (תזמון הזרעות של כלל הפרות לתקופה מסוימת) סנכרון ההזרעות יוצר מצב בו המלטות מרוכזות בתקופה מסוימת.

1.2.2. תהליך עבודה ביישוב

סדר הפעולות של מזריע מוצג באיור 1 ומתחיל בכניסת המזריע ליישוב. ביקור ברפת מתחיל בכניסת מזריע לרפת ואיסוף מסמכים של פרות דורשות הנמצאים בתיקיה בסמוך לנקודת כניסה לרפת (במסמכים מצוין שם הפרה הדורשת ושם ההורים והסבים). על סמך נתוני הפרות נבחרת ומופשרת זרמה להזרעתן. בינתיים, מתכונן המזריע להזרעה: לובש סינר ושרול ניילון ולוקח את מבחנות הזרמה. כאמור, יש חשיבות גדולה לטמפרטורת הזרמה בעת ההזרעה – טמפרטורה מתאימה מגדילה את אחוזי ההתעברות של הפרות. לפיכך, בעת ביצוע הזרעת הפרות המזריע יכול לקחת עימו עד 5 זרמות מופשרות. אם קיימות מעל ל- 5 פרות המוגשות להזרעה המזריע חוזר לרכב ומבצע הפשרה של זרמות נוספות ל- 5 פרות נוספות, וכך הלאה, עד שכל הפרות המוגשות להזרעה מוזרעות. בגמר העבודה ברפת, המזריע מנקה את מגפיו, מבצע רישום ההזרעות שבוצעו, מחזיר את מסמכי הפרות לתיקיה ועובר לרפת הבאה, או ליישוב הבא.



איור 1. תרשים זרימה ביצוע הזרעות ביישוב.

1.2.3. נתוני עבודת המזריעים במצב הקיים

חברת "שיאון" מעסיקה כ- 40 מזריעים ב- 29 אזורים המבצעים בכל יום הזרעות ב- 283 יישובים. בטבלה 1 מופיעים הנתונים באים: מרחקי הנסיעה אותם המזריעים עוברים ביום עבודה, ממוצע הכנסות הידיים ביום עבודה, המספר הממוצע של רפתות בהם מבקרים המזריעים ביום עבודה, ומשך יום עבודה (משך יום העבודה הוא סכום משך הנסיעה ומשך זמן העבודה ביישוב). מסלולי הנסיעה, מספר הכנסות ידיים ומספר הרפתות מבוססים על נתוני חודש מאי 2007. הנתונים הם של ימים ראשון עד שישי. זמני הנסיעה חושבו לפי ההנחות הבאות: מזריע מבקר בכל היישובים במסלול הנסיעה שלו במשך היום, מהירות נסיעה ממוצעת מביתו של המזריע ליישוב הראשון המקבל שרותי הזרעה

ומהיישוב האחרון המקבל שרותי הזרעה אל ביתו של המזריע היא 70 קמ"ש, מהירות נסיעה ממוצעת בין היישובים 42 קמ"ש.

בטבלה 1 רואים כי סטיות התקן של אורך מסלול הנסיעה ומשך זמן הנסיעה ביום גבוהות, 60 ק"מ ו – 1.2 שעות בהתאמה. סטיות התקן של ממוצע הכנסות הידיים הוא 6.1 ביום וסטיות התקן של משך יום עבודה כולל הוא 1.2 שעות. סטיות התקן באות לידי ביטוי בהפרשים בין המזריעים.

טבלה 1. נתוני עבודה במצב קיים.

מסלול נסיעה (כולל ביום (ק"מ))	משך זמן נסיעה (כולל ביום (שעות))	ממוצע מספר הכנסות ידיים ביום	ממוצע מספר רפתות ביום	משך יום עבודה (כולל (שעות))	
4408	92.2	1089.6	412.1	175.6	סכום כולל של כלל המזריעים
152	3.2	37.6	14.2	6.1	ממוצע למזריע
60	1.2	6.1	2.6	1.2	סטיות תקן למזריע
261	5.4	50	19	8	המזריע בעל הערך המקסימאלי
53	1.1	25.9	9.4	4	המזריע בעל הערך המינימאלי

לדוגמא: המזריע בעל מרחק הנסיעה המקסימאלי (261 ק"מ) נוסע פי 5 מאשר המזריע בעל מרחק הנסיעה המינימאלי (53 ק"מ), המזריע בעל ממוצע הכנסות הידיים הגבוהה ביותר (50 הכנסות ידיים) מבצע פי שניים הכנסות ידיים ביום מאשר המזריע בעל ממוצע הכנסות הידיים המינימאלי (25.9 הכנסות ידיים), הפרש בין המזריע בעל משך יום עבודה כולל מקסימאלי (8 שעות) למזריע בעל משך יום עבודה כולל מינימאלי (4 שעות) הפרש של 4 שעות. המשך הכולל של יום העבודה של המזריע הוא סכום משכי העבודה ביישובים ומשכי הנסיעה בין היישובים, כולל מקום מגורי המזריע. משך העבודה הכולל ביישובים המבוצע על ידי כל המזריעים תלוי רק במספר הפרות המוגשות להזרעה ולא בתכנית העבודה. ולכן, השיפור המתקבל על ידי הקצאה מחדש של היישובים למזריעים מתבטא כולו בקיצור משך זמן הנסיעה הכולל ביום של כל המזריעים, איזון ממוצע הכנסות הידיים ומשך יום העבודה בין המזריעים. הזרעת פרה תוך 12 שעות מרגע הייחום מגדילה את סיכויי ההתעברות של הפרה. לכן, הגעה אל כל פרה מיוחמת מהר ככל האפשר מרגע זיהוי הייחום תשפר את השירות.

1.3. מטרת המחקר

לאור הדיון הקודם, מטרת המחקר היא פיתוח כלים לתכנון יעיל יותר של עבודת המזריעים: חיזוי עומס העבודה שלהם והקצאה אופטימאלית של יישובים ביניהם כך שמשך הנסיעה הכולל של כל המזריעים בארץ יהיה מינימאלי. האילוצים הם: (1) כל הפרות המוגשות להזרעה מקבלות שירות באותו יום; (2) ממוצע הכנסות הידיים ביום; ו – (3) משך יום העבודה מאוזנים בין המזריעים. ביתר פירוט:

1. פיתוח מודל לחיזוי משך העבודה ביישוב.
2. הקצאת יישובים למזריעים ומציאת מסלול נסיעה מיטבי לכל מזריע.
3. בחינת השפעת איזון העבודה בין מזריעים על משך זמן הנסיעה היומי של כל המזריעים.

1.4. מבנה הדו"ח

בהתאם להגדרת המטרות, העבודה כללה שני מרכיבים עיקריים: פיתוח מודל לחיזוי משך העבודה של מזריע ביישוב, ופיתוח כלי, שמבוסס גם על מודל חיזוי משך העבודה, לתכנון עבודת המזריעים. בהתאם, בנוי הדו"ח באופן הבא. בפרק הבא נסקרת בקצרה ספרות רלוונטית בנושא ניתוב רכבים, ואח"כ מתוארים תהליכי הפיתוח של שני המרכיבים. בפרק 3 מתואר פיתוח המודל לחיזוי משך העבודה ביישוב. מודל זה משמש חלק מהקלט לתהליך תכנון העבודה – הקצאת יישובים ותכנון מסלולים, שמתואר בפרק 4. כלים שונים ושיטות עבודה שונות שימשו לטיפול בכל מרכיב. לפיכך, בכל פרק מתוארים בנפרד החומרים ושיטת העבודה ששימשו לתהליך הפיתוח המתואר באותו פרק. בעזרת כלי התכנון שמתוארים בפרק 4, נבחנים בפרק 5, קשרים בין גורמים שונים והשפעתם על מדדי הערכה שונים של טיב הפתרון. סיכום ומסקנות ניתנים בפרק 6 וכיוונים למחקר עתידי בפרק 7.

2. סקר ספרות

2.1. בעיית ניתוב רכבים – VRP

בגלל מגבלת הזמן, לא יכול מזריע יחיד לספק את כל השרות ולכן, כאמור, מחולקים היישובים ל-29 אזורים והשרות מסופק על ידי 30 – 40 מזריעים – מספר המזריעים גדול ממספר האזורים לצורך גיבוי. לפיכך, מרכיב מרכזי בתכנון עבודת המזריעים הוא חלוקת הרפתות ביניהם – בעיה שניתן לראותה כבעיה המוכרת בשם בעיית ניתוב רכבים – VRP (Toth and Vigi, 2002). משתני הבעיה הם: מספר הרכבים, קיבולת הרכבים והכמות שיש להעביר אל כל לקוח. בעיית ניתוב רכבים נוצרת כשהקיבולת של רכב יחיד קטנה מהקיבולת הדרושה או כאשר יש הגבלה על מרחק הנסיעה או זמן הנסיעה. המקרה הפרטי בו הקיבולת של רכב יחיד גדולה מהדרישה, הוא בעיית הסוכן הנוסע (Clark and Wright, 1962), שתדון בהמשך. בחלוקת המסלולים בין הרכבים חייבים להתחשב באילוצים הבאים:

- הדרישה של כל לקוח תסופק.
- כל לקוח משורת על ידי רכב אחד.
- סך הקיבולת במסלול קטן או שווה לקיבולת הרכב.
- כל מסלול מתחיל ומסתיים באותה נקודה.

תכנון נכון של ניתוב רכבים יכול להניב חיסכון של עד 20% בעלויות השינוע (Toth and Vigi, 2002). בעיית ניתוב רכבים היא בעיה קומבינטורית מסוג NP-Hard ונפתרת בעזרת אלגוריתמים יוריסטיים האלגוריתמים לפיתרון בעיית ניתוב רכבים. (Lenstra and Rinnooy Kan, 1981). Toth and Vigi (2002) מספקים סקירה רחבה של כל האלגוריתמים לפיתרון בעיית ניתוב רכבים. בתכנון העבודה של המזריעים, הנדון בעבודה זו, ניתן לראות את ביתו של כל מזריע כמרכז הפצה. בעיית ניתוב רכבים עם מספר מרכזי הפצה נקראת MDVRP (Multi-Depot Vehicles Routing Problem). בספרות, קיימים מספר פרסומים הפותרים את בעיית MDVRP. Laporte et. al. (1988) מציגים פיתרון אופטימאלי באמצעות הסתעף וחיסום של בעיות עם עד 80 ערים. Renuad et. al. (1996) ו- Cordeau et. al. מציגים אלגוריתם חיפוש לפתרון הבעיה. Gillett and Johnson (1976), Tillman (1969), Golden et. al. (1977), Raft (1982), ו- Giosa et. al. (2002) מציגים אלגוריתמים לפיתרון MDVRP בשני שלבים: (1) הקצאת יישובים למרכזי הפצה; (2) פתרון VRP לכל מרכז הפצה בנפרד. Chao et. al. (1993) מציגים פתרון המשלב בשלב הראשון אלגוריתם התחלתי פשוט ובשלב השני אלגוריתם שיפור. שילוב זה של אלגוריתמים טוב יותר מהאלגוריתמים בשני השלבים (Lim and Wang, 2005).

בבעיית MDVRP קיימת ההנחה כי בכל מרכז הפצה קיימים אין סוף כלי רכב, הנחה שאינה תקפה במציאות. כאשר כמות כלי הרכב מוגבלת בכל מרכז הפצה הבעיה נקראת MDVRPFD (Multi-Depot Vehicles Routing Problem Fixed Distribution). Lim and Wang (2005) מציגים פתרון בשלב אחד של בעיית MDVRPFD כאשר בכל מרכז הפצה קיים כלי רכב אחד בלבד, כמו בבעיית תכנון העבודה של המזריעים.

2.2. מדדי ביצוע לאיזון פס ייצור

כדי לאזן את עבודת המזריעים ניתן לדמות כל אזור עבודה כקו ייצור. לכן, ניתן להשתמש בעקרונות איזון קווים ומדדי הביצוע כדי לאמוד את איכות איזון העבודה בבעיית MDVRPFD. להלן מוצג סקירה של בעיית איזון הקווים ומדדי הביצוע.

בעיית איזון קו ייצור היא בעיה המאופיינת על ידי n מטלות מוגדרות שיש לבצע ובמקרה זה מספר ההזרעות. הזמן הדרוש לכל מטלה i הוא משתנה ידוע t_i . המטרה היא ארגון המטלות בקבוצות כאשר כל קבוצת מטלות מבוצעת בתחנת עיבוד אחת (Nahmias, 2001).

בעבר, חלוקת המטלות לתחנות הייתה בעיה חד פעמית שהתקבלה בזמן הקמת המפעל. אלא שאופייה של התעשייה השתנה ומפעלים חדשים מתוכננים מתוך חשיבה על גמישות. בסביבה זו נעשה איזון פס הייצור לפעולה דינאמית כל זמן שיש ביצוע של שינויים במפעל (Nahmias, 2001).

מציאת האיזון האופטימאלי של פס ייצור היא בעיה קומבינטורית קשה (Nahmias, 2001). מספר יוריסטקות פותחו על מנת לקבוע איזון מקורב לבעיה: Helgeson and Birnie (1961) טכניקה המקצה משקולות לכל המטלות העוקבות ומתזמנת את ההקצאה לפי סדר המשקלים, COMSOAL שיטה מבוססת מחשב אשר פיתח Arcus (1966), Kilbridge and Wester (1961) מציעים שיטה דומה המדרגת לפי משקלי מיקום המטלה. Held et al (1963) מצגי פתרון אופטימאלי באמצעות תכנון דינאמי ו-Thangavelu and Shetty (1971) מצייגים פיתרון אופטימאלי באמצעות תכנון בשלמים, שני האלגוריתמים האחרונים אופטימאליים אך דורשים חישובים ארוכים ומסובכים (Nahmias, 2001). מדדי ביצוע לבחינת איזון פס ייצור:

- מדדי פיזור (זמיר ומרום 2003), שכוללים:
 - טווח – ההפרש בין התחנה בעלת משך זמן העיבוד המקסימאלי לתחנה בעלת משך זמן העיבוד המינימאלי.
 - גודל סטייה מקסימאלי – מקסימום הערך המוחלט של ההפרש בין זמן העיבוד בתחנה לממוצע זמן העיבוד בתחנה.
 - סטית תקן של זמני העיבוד בתחנות השונות.
- זמן בטלה (Nahmias, 2001) – סכום ההפרשים בין זמן העיבוד המקסימאלי לזמני העיבוד בתחנות.
- מינימום עלות – Rosenblatt and Carlson (1985) הראו כי איזון מקסימאלי לא מבטיח מקסימום רווח, קיים Trade Off בין מספר התחנות זמן המחזור והרווח המתקבל משילוב של גורמים אלו. Rosenblatt and Carlson (1985) מצייגים את האלגוריתם הבא למציאת רווח מקסימאלי:

$$1. \text{ הצב את הערך הנמוך ביותר ב } n \text{ כך } nc \geq \sum t_i \text{ כאשר } c \text{ הוא מקסימום } t_i.$$

2. בהינתן n מצא את האיזון הטוב ביותר בעזרת אחד מהאלגוריתמים הקיימים לאיזון (הנחה מתקבל c מינימאלי).

3. הקטן את n באחד, הגדל את c בהתאם עד אשר מתקבל איזון קו אפשרי.

4. עצור כאשר $n=1$ או פונקצית הרווח $\eta(n) = 1$.

$$\max_{n,c} \sum \eta(n) = \frac{f_1}{c} - nf_2$$

n – מספר תחנות, c – זמן מחזור, ti משך העבודה של גיב i .
 f_1 – תרומה פר יחידה מיוצרת, f_2 – עלות שימוש בתחנת ייצור פר יחידה.

2.3. בעיית הסוכן הנוסע – TSP

מרכיב נוסף בתכנון העבודה של המזריעים הוא תכנון מסלול הנסיעה של כל מזריע. בעיה זו מוכרת בספרות כבעיית הסוכן הנוסע TSP, ומוצגת בד"כ במונחים של תורת הגרפים. גרף מורכב מאוסף V של קודקודים (נקודות) וקשתות – $E = \{e_{ij}, i, j \in V\}$, המחברות ביניהם, ומסומן $G = \{V, E\}$. כוון החיבורים יכול להיות בר משמעות או חסר משמעות, והגרף נקרא גרף מכוון או לא מכוון, בהתאם. מעגל בגרף הוא אוסף של קודקודים שניתן לעבור ביניהם דרך הקשתות המחברות ביניהם כך שנבקר בכל קודקוד פעם אחת בלבד וקודקוד ההתחלה הוא קודקוד הסיום. מעגל המכיל את כל הקודקודים בגרף נקרא מעגל המילטון. שאלת קיומו של מעגל המילטון בגרף הינה בעיה קומבינטורית מסוג NP-Complete, לא נמצא אלגוריתם פולינומיאלי הפותר את הבעיה (Garey and Johnson, 1979).

בהינתן בגרף $G = \{V, E\}$ קשתות E באורכים שונים $C = \{c_{ij}\}$ (בהקשרים שונים c_{ij} יכול להיות מרחק נסיעה, עלויות נסיעה או משך זמן נסיעה (Laporte, 1992)) מציאת מעגל המילטון בעל האורך המינימאלי נקראת בעיית הסוכן הנוסע – TSP (Traveling Salesman Problem). מעגל המילטון הוא מקרה פרטי של בעיית הסוכן הנוסע (Lawler et. al., 1990). לכן, בעיית הסוכן הנוסע היא בעיה קומבינטורית מסוג NP-Hard וטבעי לחפש לה פתרון על ידי אלגוריתמים יוריסטים. Lawler et. al. (1990) מספקים סקירה רחבה של אלגוריתמים לפיתרון בעיית הסוכן הנוסע: אלגוריתמים אופטימאליים של הסתעף וחסום ואלגוריתמים יוריסטים ואלגוריתמי שיפור. מציאה של פיתרון אופטימאלי אפשרית רק בבעיות קטנות של בערך 85 יישובים ולכן באופן מעשי משתמשים ביוריסטיקות. Golden et al. (1980) השוו אלגוריתמים יוריסטים ואלגוריתמי השיפור. Chatterjee et. al. מציגים פיתרון של בעיית הסוכן הנוסע באמצעות אלגוריתם גנטי, כמתואר בהמשך.

2.4. אלגוריתמים גנטיים

לתכנון מסלולי הנסיעה של המזריעים אנו משתמשים באלגוריתם גנטי. הבירור הטבעי או השארת המסוגלים ביותר (Darwin, 1859), עקרונות התורשה המשפרים את האורגניזם החי מדור לדור המופיעים בתורת האבולוציה של Darwin מהווים בסיס לאלגוריתם הגנטי. Holland (1975) פיתח את רעיון האלגוריתם הגנטי והוכיח התכנסות הפתרונות לאופטימום (עבור מודלים מסוימים). Kaza (1992) יישם את הרעיונות ופיתח את התכנות הגנטי. אלגוריתם גנטי הוא סוג של אלגוריתם חיפוש הסתברותי המאחד שני פתרונות אפשריים לפיתרון אחד (Russele and Norvig, 2003). באלגוריתם הגנטי מיוצג הפתרון (כרומוזום) ממחרזות של תאים (גנים)

בעלת פונקציה ערך, הייצוג הטוב ביותר הוא ייצוג באמצעות מחרוזת ביטים (Holland, 1975). האלגוריתם מתחיל עם אוכלוסיית פתרונות אפשריים, יצירת X דורות חדשים באמצעות פעולות אלמנטאריות (העתקה, הכלאה, מוטציות) ופרסום התוצאה הטובה ביותר (Kaza, 1992). אלגוריתם גנטי (Kaza, 1992):

1. צור אוכלוסיית פתרונות בגודל K באופן אקראי. מחרוזת בה הייצוג הוא מחרוזת ביטים. לדוגמה איור 2 מציאת מסלול בגרף, המספרים הם הצמתים והמסלול נקבע לפי הסדר (2 ← 12 ← 15 ← 8 ← 3).

3	8	15	12	2
---	---	----	----	---

איור 2. ייצוג מסלול בגרף על ידי מחרוזת ביטים.

2. חזור על הפעולות הבאות Y פעמים (דורות).

- א. לכל פתרון חשב את פונקציית הערך של הפתרון.
- ב. צור אוכלוסייה חדשה על ידי ביצוע הפעולות האלמנטאריות הבאות:
 - העתק O פתרונות הטובים ביותר לאוכלוסייה החדשה.
 - בחר P פתרונות מהאוכלוסייה ובצע בהם מוטציות (שינוי הקראי בפיתרון) והעתק לאוכלוסייה החדשה.
 - השלם את האוכלוסייה החדשה על ידי בחירת שני פתרונות באופן אקראי ויצירת פיתרון חדש המכיל באופן אקראי חלקים משני הפתרונות.
- ג. פרסום הפיתרון בעל התוצאה הטובה ביותר.

הפרמטרים P, O, Y הם פרמטרים שניתן לשנות מבעיה לבעיה והשפעתם תהיה על משך זמן ריצת האלגוריתם, Chatterjee, at. (1996) יצרו מספר בעיות של הסוכן הנוסע בגדלים שונים (מספר שונה של ערים) ובהתאם מצאו את ערכי הפרמטרים אשר הביאו את האלגוריתם להתכנסות אופטימאלית של הפתרון. אלגוריתם גנטי לא מספק פתרון אופטימאלי לבעיית הסוכן הנוסע, אבל מספק תוצאה מצוינת הקרובה לאופטימום. בבעיות סימטריות אלגוריתם גנטי הגיע לקירוב של 3.2% מאופטימום ידוע לבעיה (Chatterjee, at. 1996).

3. משך יום העבודה ביישוב

איזון עבודת המזריעים מורכב משני קריטריונים: (1) איזון מספר הכנסות הידיים; ו- (2) משך יום עבודה. כאשר, משך יום העבודה הוא סכום זמני הנסיעה וזמני העבודה ביישוב. פיתוח מודל לחישוב זמני העבודה ביישוב הוא נושא בפני עצמו, שאינו תלוי בשאר המרכיבים של עבודה זו, ובהתאם, הוא מתואר פה כמרכיב נפרד ועצמאי – חמרים ושיטות, תוצאות וניתוח. הפלט, משך יום העבודה בכל יישוב הוא קלט לתהליך הקצאת היישובים למזריעים במינימום זמני נסיעה ואיזון עבודה מרבי, שמתואר בפרק הבא.

3.1. חומרים ושיטות

3.1.1. איסוף נתונים

נתוני עבודת המזריעים נלקחו מבסיס מידע של התאחדות מגדלי הבקר (אתר אינטרנט – <http://www.icba.org.il/upmenu.html>), בסיס מידע זה מעודכן באמצעות מסופים הנמצאים אצל כל מזריע. עדכון המידע מבוצע על ידי המזריע בעת כניסה לרפת (מבוצעת פתיחת כרטיס, התאמת זרמות פרים לפרות דורשות) ובעת יציאה מהרפת (ביצוע סגירת כרטיס, הקלדת ההזרעות שבוצעו ברפת). המידע הנאגר בבסיס הנתונים הוא לכל רפת בנפרד ומכיל את הנתונים הבאים:

- קוד מזריע
- תאריך הזרעה
- שם יישוב
- שם משק
- מספר הכנסות ידיים במשק
- שעת התחלה
- שעת סיום

הנתונים בהם השתמשנו במחקר הם מחודשים ינואר – אוגוסט 2007 שהם 243 ימי עבודה. סך הכל 229,024 הכנסות ידיים ב- 87,551 כניסות מזריעים לרפתות ב- 48,057 יישובים.

3.1.2. ניפוי חריגים

הנתונים הבאים נוקו מבסיס הנתונים בהנחיית מומחי חברת שיאון:

1. שבתות – נוקו 35 ימים שהם נתונים של 2,302 יישובים.
 2. ביקורים ביישובים שנמשכו פחות משבע דקות – ביצוע טיפול ברפת כולל: לקיחת מסמכים, הכנה להזרעה, ביצוע הזרעה, ניקוי והחזרת מסמכים. משך זמן ארוך משבע דקות. נוקו נתונים של 12,209 יישובים.
 3. הכנסות ידיים שנמשכו פחות מדקה וחצי – צעדי הזמן של המסופון הם 1 דקה, מומחי החברה הגדירו טיפול קצר מ-1.5 דקה כלא אפשרי. נוקו נתונים של 122 יישובים.
 4. הכנסות ידיים שמשכו מעל עשר דקות – מומחי החברה הגדירו טיפול ארוך מ-10 דקות כלא אפשרי. נוקו נתונים של 2,484 יישובים.
- מומחי החברה הסבירו כי מקרים חריגים כמתואר בסעיפים 2,3 ו-4 מצביעים על שגיאות בהקלדת הנתונים.

בנוסף, נופו מעט חריגים סטטיסטים :

5. יישובים בהם ההפרש בין הזמן החזוי (לפי מודל הרגרסיה, ראה להלן סעיף 3.2.2) לזמן בפועל גדול מחצי שעה. נוקו 407 יישובים.

סך הכול לאחר ניקוי נותרו 30,533 מתוך 48,057 נתונים על יישובים שהם 64% מסך הנתונים. 14,663 נתונים של חודשים ינואר – אפריל שימשו לכוול מקדמי הרגרסיה, ו- 15,870 נתונים של חודשים מאי – אוגוסט שימשו למבחני התקפות.

3.1.3 רגרסיה מרובה (multi variable regression analysis)

רגרסיה מרובה מאפשרת בניית מודלים לחיזוי ערכו של משתנה מסוים – המשתנה התלוי/מוסבר, מתוך ערכיהם של מספר משתנים אחרים – המשתנים הבלתי – תלויים/המסבירים. בנייתו הרגרסיה מושווים מודלים שונים ומהם בוחרים את המודל המסביר בצורה מקסימאלית את השונות של המשתנה התלוי. מודל הרגרסיה הבסיסי הנפוץ ביותר הוא המודל הליניארי :

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n + e$$

כאשר :

Y – המשתנה המוסבר.

X – המשתנים המסבירים הבלתי תלויים – X_1, X_2, \dots, X_n .

a – קבוע הרגרסיה. הנקודה בה חותך קו הרגרסיה את ציר ה- Y . הקבוע הוא ערכו של Y כאשר X הוא אפס.

b_i – מקדמי הרגרסיה, השיפוע של קו הרגרסיה. כאשר X_i (משתנה מסביר) עולה ביחידה אחת, Y עולה ב- b_i יחידות.

e – שארית, ניבוי המשתנה המוסבר מתוך המשתנים המסבירים כרוך בטעות, זהו ההבדל בין הערך האמיתי של התצפית בפועל לערך החזוי על סמך המשתנים המסבירים. השוני בין הערך האמיתי והערך החזוי הוא טעות הניבוי, מודל טוב הוא מודל בו e קטן ככל האפשר. ישנן חמש שיטות להכנסת המשתנים המסבירים למודל הרגרסיה (איזנברג, 2006):

1. Enter – הכנסת כל המשתנים המסבירים בעת ובעונה אחת למודל הרגרסיה.
2. Stepwise – רגרסיה בצעדים. מכניסים משתנים מסבירים בזה אחר זה למודל הרגרסיה לפי מידת התרומה, ובתנאי שהתרומה של המשתנה המסביר להסברת המשתנה המוסבר מובהקת סטטיסטית. משתנה שהוכנס קודם ונמצא שאינו מובהק סטטיסטית לאחר הכנסת משתנים נוספים מוצא מהמודל.
3. Forward – הכנסת המשתנים המסבירים זהה לשיטת Stepwise, בשיטה זו בניגוד לשיטת Stepwise לא מוציאים משתנים שתרומתם אינה מובהקת סטטיסטית.
4. Remove – הכנסת כל המשתנים המסבירים למודל הרגרסיה והוצאת כל המשתנים שאינם תורמים למודל בשלב אחד.
5. Backward – הכנסת כל המשתנים המסבירים למודל הרגרסיה והוצאת המשתנים המסבירים שאינם תורמים למודל בזה אחר זה.

בעבודה זו, השיטה שנבחרה להכנסת המשתנים המסבירים היא Stepwise.

3.1.4. הנחות מודל רגרסיה מרובה (Montgomery, 1997)

- כל המשתנים צריכים להיות כמותיים רציפים. אם רוצים לכלול משתנים אחרים – שמיים, איכותיים או קטגוריאליים, יש להפוך אותם למשתני דמה בעלי שתי קטגוריות (0,1).
- למשתנים המסבירים צריכה להיות שונות גדולה מאפס.
- אסורה קורלציה מושלמת או גבוהה בין המשתנים המסבירים (multicollinearity). קורלציה גבוהה בין המשתנים המסבירים עלולה להגביל את אחוז השונות המוסברת במודל (R^2). כאשר יש קורלציה גבוהה בין המשתנים המסבירים קשה לדעת את המשקל האמיתי של כל אחד מהם בניבוי המשתנה המוסבר, כל אחד מסביר חלק וביניהם מתקיים שיתוף שמתבטא במקדם המתאם.
- שונות ערכי המשתנים המוסברים צריכה להיות קבועה בכל אחד מערכי המשתנה המוסבר.
- אי תלות בין ערכי השארית של המשתנים המסבירים.
- שגיאות הניבוי צריכות להתפלג נורמאלית עם תוחלת אפס.
- אי תלות בין ערכי המשתנה המוסבר. הערכים של המשתנה המוסבר צריכים להיות של נבדקים שונים בזמנים שונים.
- ליניאריות. הקשר בין המשתנה המוסבר למשתנים המסבירים הינו ליניארי. במידה והקשר לא ליניארי הרגרסיה לא תשקף את הקשר הזה.

3.1.5. מבחני תקפות

מבחני תקפות מטרתם לקבוע האם תוצאות מודל מייצגות את המצב האמיתי. תקפות המודל מבוצעת על ידי השוואה בין תצפיות של המצב האמיתי ותוצאות חזויות על פי המודל לפי אותם קריטריונים. להלן מוצגים שלושה מבחני תקפות ששימשו לאימות המודל: (1) מבחן T – מזווג; (2) מבחן רגרסיה; ו- (3) מבחן Kleijnen.

3.1.5.1. מבחן T – מזווג (Montgomery, 1997)

מבחן T – מזווג הינו מבחן להשוואה בין תוחלות של שתי אוכלוסיות. ההשערה שנבחנה:

הפרש התוחלות של משך הזמן בפועל ביישוב ומשך הזמן החזוי ביישוב זהה: H_0

התוחלות של משך הזמן בפועל ביישוב ומשך הזמן החזוי ביישוב אינו זהה: H_1

\bar{X} – ממוצע הפרשים בין הזמן בפועל והזמן החזוי.

S – סטיית תקן הפרשים בין הזמן בפועל והזמן החזוי.

$t_{n-1,1-\alpha/2}$ – ערך התפלגות t עם n-1 דרגות חופש ורמת מובהקות α .

n – מספר התצפיות – היישובים.

בונים רווח סמך לממוצע הפרשים $\left(\bar{x} - t_{n-1,1-\alpha/2} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_{n-1,1-\alpha/2} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \right)$ המודל מאומת אם רווח

הסמך מכיל את 0.

3.1.5.2. מבחן רגרסיה (Kleijnen et al., 1998)

מבחן השוואה בין משך הזמן בפועל ומשך הזמן החזוי. התאמה מושלמת בגרף בו ציר X הוא משך הזמן החזוי ו- Y משך הזמן בפועל תיצור זווית של 45^0 ($b_1 = 1$) וחותך 0 ($b_0 = 0$). במבחן הרגרסיה משווים בין משך הזמן בפועל ומשך הזמן הצפוי לפי משוואת רגרסיה של הזמן בפועל והזמן החזוי.

b_0 – החותך המתקבל מביצוע רגרסיה של משך זמן בפועל (y) ומשך זמן חזוי (x).

b_1 – השיפוע המתקבל מביצוע רגרסיה של משך זמן בפועל (y) ומשך זמן חזוי (x).

N – מספר התצפיות.

$$ForcY_i = X_i \cdot b_1 + b_0$$

$$SSE_{full} = \sum_i (Y_i - ForcY_i)^2$$

$$SSE_{reduced} = \sum_i (Y_i - X_i)^2$$

$$F_{stat.} = \left(\frac{N-2}{2} \right) \times \left(\frac{SSE_{reduce} - SSE_{Full}}{SSE_{Full}} \right)$$

אם $F_{stat} < F_{table}_{0.05, N-1, 2}$ המודל מאומת.

3.1.5.3. מבחן Kleijnen (Kleijnen et al., 1998)

מבחן המשוואה בין משך הזמן בפועל ומשך הזמן החזוי. במבחן Kleijnen מאפשרים חופש למקדמי הרגרסיה של המבחן הקודם: $0 < b_0 < \mu, 0 < b_1 < 1$.

$$D_i = X_i - Y_i$$

$$Q_i = X_i + Y_i$$

b_0 – החותך המתקבל מביצוע רגרסיה של משתנה D ומשתנה Q.

b_1 – השיפוע המתקבל מביצוע רגרסיה של משתנה D ומשתנה Q.

N – מספר התצפיות.

$$ForcD_i = D_i \cdot b_1 + b_0$$

$$SSE_{full} = \sum_i (D_i - ForcD_i)^2$$

$$SSE_{reduced} = \sum_i D_i^2$$

$$F_{stat.} = \left(\frac{N-2}{2} \right) \times \left(\frac{SSE_{reduce} - SSE_{Full}}{SSE_{Full}} \right)$$

אם $F_{stat} < F_{table}_{0.05, N-1, 2}$ המודל מאומת.

3.2. תוצאות

3.2.1 משתני הרגרסיה

מאיור 1 ניתן לזהות מספר גורמים המשפיעים על משך זמן העבודה ביישוב: מספר הרפתות, מספר הכנסות הידיים, מספר הזרמות שהמזריע נושא עימו. גורמים אלו וסוג היישוב מרכיבים את משתני המודל המוצגים להלן:

Y – המשתנה המוסבר, משך זמן העבודה ביישוב (דקות).

X_1 – מספר הרפתות הכולל ביישוב שקיבלו שירות מהמזריע ביום עבודה.

X_2 – מספר הרפתות הכולל ביישוב שקיבלו שירות מהמזריע ביום עבודה, בריבוע.

X_3 – מספר הכנסות הידיים הכולל ביישוב ביום.

X_4 – מספר הכנסות הידיים הכולל ביישוב ביום, בריבוע.

X_5 – אינטראקציה בין X_1 ו X_3 , מכפלה של מספר הרפתות הכולל ומספר הכנסות הידיים הכולל ביישוב ביום.

X_6 – סוג היישוב, משתנה דמי בעל שני ערכים: 0 – מושב, 1 – קיבוץ.

X_7 – מספר חזרות נוספות לרכב לצורך הכנת זרמה נוספת להזרעת הפרות, ביישובים בעלי רפת אחת. (מספר החזרות לרכב הוא מספר הכנסות הידיים מחולק ב – 5 מעוגל כלפי מעלה).

3.2.2 בדיקת הנחות הרגרסיה

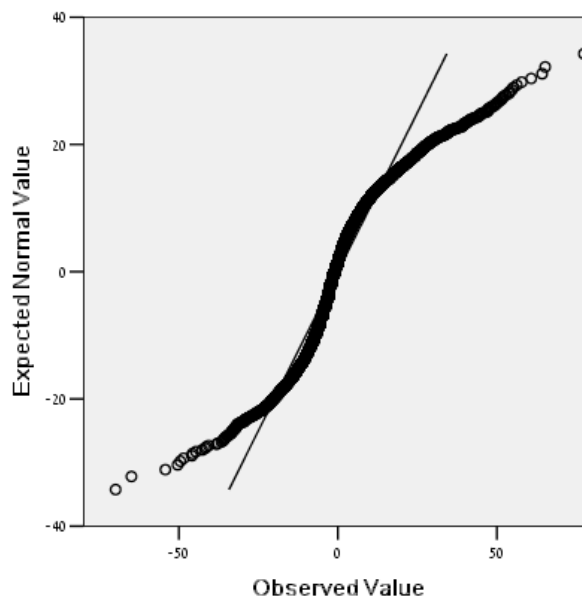
בדיקת מקדם המתאם בין המשתנים המסבירים והמשתנה המוסבר בוצעה באמצעות מקדם מתאם פירסון. מתאם פירסון מודד את עוצמת הקשר הליניארי בין שני משתנים כמותיים, מתאם פירסון מקבל ערכים בין 1 לבין -1 (ככל שערך פירסון קרוב ל – 1 או ל – 1- כך הקשר הליניארי בין המשתנים חזק יותר) (איזנברג, 2006). תוצאות מתאם פירסון בין המשתנים מופיעות בטבלה 2.

טבלה 2. מקדם פירסון בין המשתנים המסבירים והמשתנה המוסבר.

		Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Pearson Correlation	Y	1.000	.889	.860	.893	.823	.862	-.414	.059
	X1	.889	1.00	.939	.772	.751	.894	-.596	-.222
	X2	.860	.939	1.00	.782	.840	.970	-.416	-.155
	X3	.893	.772	.782	1.00	.917	.845	-.278	.293
	X4	.823	.751	.840	.917	1.00	.934	-.250	.142
	X5	.862	.894	.970	.845	.934	1.00	-.372	-.104
	X6	-.414	-.596	-.416	-.278	-.250	-.372	1.00	.361
	X7	.059	-.222	-.155	.293	.142	-.104	.361	1.00
Sig. (1-tailed)	Y	.	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
	X1	.000	.	.000	.000	.000	.000	.000	.000
	X2	.000	.000	.	.000	.000	.000	.000	.000
	X3	.000	.000	.000	.	.000	.000	.000	.000
	X4	.000	.000	.000	.000	.	.000	.000	.000
	X5	.000	.000	.000	.000	.000	.	.000	.000
	X6	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.	.000
	X7	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.

מטבלה 2 ניתן לראות כי $\alpha = 0 < 0.05$ ולכן, קיים קשר ליניארי בין המשתנים המסבירים (מספר הכנסות הידיים, מספר רפתות ביישוב והקשרים ביניהם) ובין המשתנה המוסבר (משך זמן העבודה ביישוב). אמנם, גם בין המשתנים המסבירים קיימים קשרים דומים אך מקדמי המתאם נמוכים יותר – מקדמי המתאם בין $X_1 - X_5$ ל- Y גבוהים מ-0.82 בעוד שהמתאם בין X_1 ל- X_3 או ל- X_4 , נמוך מ-0.8. כמובן, המתאם בין משתנים מסבירים שהם תוצאה של קשרים בין המשתנים - כמו X_3 ו- X_4 , גבוה. בדיקת נורמאליות של השאריות בוצעה באמצעות גרף התפלגות נורמאלית של השגיאה (גרף Q-Q) והסטוגרמה של השאריות המתוקננות. גרף Q-Q היא שיטה גראפית לקביעה האם נתונים באים מהתפלגות נורמאלית. באמצעות שיטה זו מציירים את הנתונים מול הנתונים הצפויים לפי התפלגות נורמאלית, אם הנקודות נעות סביב קו 45° הנתונים באים מהתפלגות נורמאלית (Montgomery, 1997). באיור 3 מופיע גרף Q-Q המציג את התצפיות מול התוצאות הצפויות.

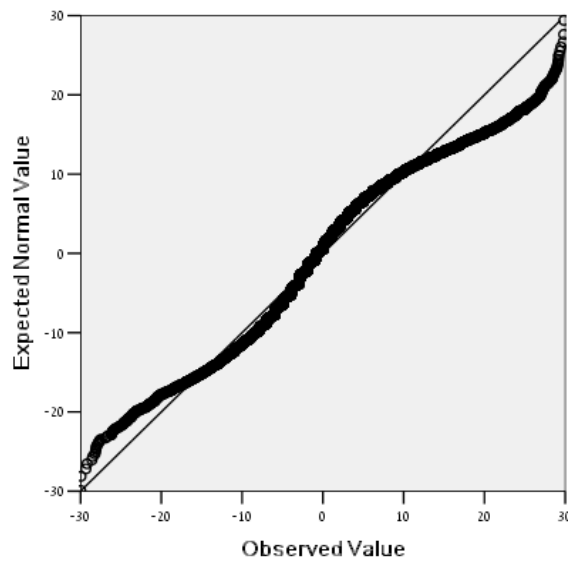
Normal Q-Q Plot of Unstandardized Residual



איור 3. גרף Q-Q.

ניתן לראות כי השגיאות אינן מתפלגות נורמאלית בניגוד להנחות הרגרסיה, אך הסטייה נובעת ממספר תצפיות בהן ההפרש בין הזמן החזוי לזמן הנצפה גדול מחצי שעה. יש רק 407 תצפיות כאלו, מתוך כ-31,000, ולפיכך הוחלט, כאמור, לנפותן. באיור 4 מופיע גרף Q-Q לאחר הניפוי.

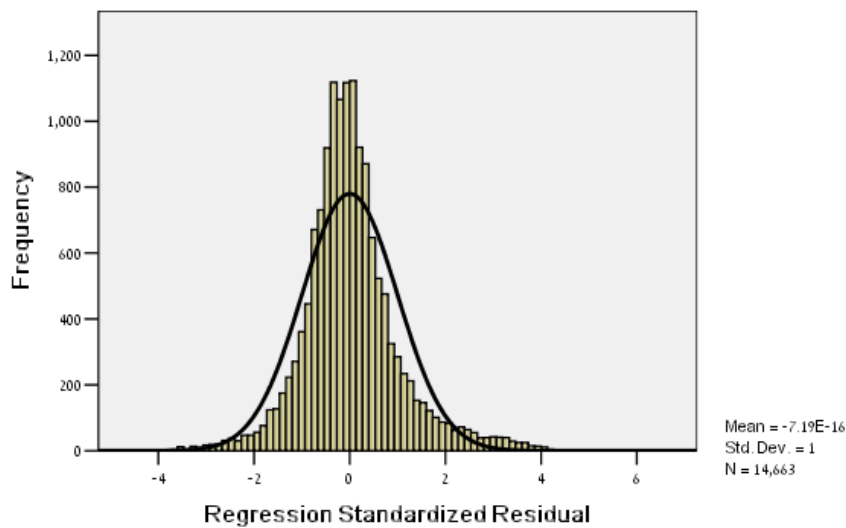
Normal Q-Q Plot of Unstandardized Residual



איור 4. גרף Q-Q לאחר ניפוי יישובים בעלי שגיאה מעל חצי שעה.

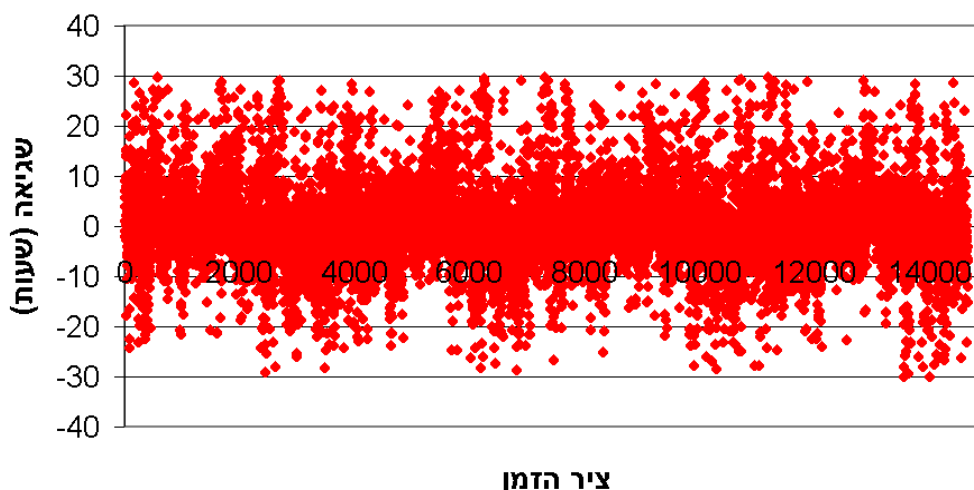
באיור 4 ניתן לראות כי השגיאה מתפלגת נורמאלית סביב קו 45° .
באיור 5 מופיעה הסטוגרמה של השאריות המתוקנות – במונחים של סטיות תקן.

Dependent Variable: Y



איור 5. התפלגות המודל לתוצאות בסטיות תקן.

באיור 5 רואים כי התפלגות השאריות דומה להתפלגות נורמאלית עם תוחלת אפס. בדיקת אי תלות בין ערכי השאריות של המשתנה התלוי בוצעה על ידי תאור השגיאות על פני ציר הזמן – מצירים את השגיאה – ההפרש בין הזמן החזוי לנצפה, לאורך ציר הזמן. אם אין תבניות בגרף – ריצה של שגיאה חיובית או ריצה של שגיאה שלילית, ניתן לומר כי אין תלות בין ערכי השגיאה (Montgomery, 1997). באיור 6 מופיעה גרף השגיאה לאורך ציר הזמן.



איור 6. ההפרשים בין הזמנים המדודים לזמנים החזויים לאורך ציר הזמן.

באיור 6 לא רואים רצף של ריצות חיוביות או שליליות ולכן, אין תלות בין ערכי השגיאות של המשתנה המוסבר.

נתוני התצפיות של משך זמן ביישוב מקיימים את הנחות הרגרסיה. ניתן לבצע רגרסיה מרובה לקבלת נוסחא אשר תנבא את משך זמן העבודה ביישוב.

3.2.3 בחירת משתנים מסבירים

בחירת המשתנים המסבירים בוצעה בשיטת Stepwise. בטבלה 3 מוצג סדר הכנסת המשתנים המסבירים, והתוספת להסבר שונות זמני העבודה הנתרמת על ידי כל משתנה מסביר.

טבלה 3. אחוז השונות המוסברת על ידי הכנסת משתנים מסבירים.

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.895 ^a	.801	.801	11.23304	.801	59118.9	1	14661	.000
2	.953 ^b	.908	.908	7.63957	.107	17037.2	1	14660	.000
3	.953 ^c	.909	.909	7.59704	.001	165.577	1	14659	.000
4	.954 ^d	.910	.910	7.54314	.001	211.267	1	14658	.000
5	.954 ^e	.911	.911	7.53164	.000	45.795	1	14657	.000
6	.954 ^f	.911	.911	7.52651	.000	20.987	1	14656	.000

a. Predictors: (Constant), X3

b. Predictors: (Constant), X3, X1

c. Predictors: (Constant), X3, X1, X6

d. Predictors: (Constant), X3, X1, X6, X4

e. Predictors: (Constant), X3, X1, X6, X4, X7

f. Predictors: (Constant), X3, X1, X6, X4, X7, X2

g. Dependent Variable: Y

- Y – משך זמן העבודה ביישוב
- X_1 – מספר רפתות ביישוב
- X_2 – מספר רפתות ביישוב בריבוע
- X_3 – מספר הכנסות ידיים ביישוב
- X_4 – מספר הכנסות ידיים ביישוב בריבוע
- X_6 – סוג היישוב
- X_7 – מספר חזרות לרכב

מטבלה 3 ניתן להסיק כי שימוש בשישה משתנים מסבירים בלבד – X_1, X_2, X_3, X_4, X_6 ו- X_7 מסביר 91.1% מהשונות של התצפיות, אך למעשה, די בשניים לחיזוי משך זמן העבודה ביישוב: מספר רפתות ביישוב ביום (X_1) ומספר הכנסות הידיים ביישוב ביום (X_3). מסבירים אלו מנבאים את משך הזמן ביישוב ב 90.8% וסטית תקן של 7.63. המשתנים המסבירים: סוג היישוב (X_6) ומספר חזרות נוספות לרכב (X_7) אינם משפרים את איכות החיזוי ולכן, בנוסחה הסופית לא יהיה שימוש במשתנים מסבירים אלו לחיזוי משך זמן העבודה ביישוב (Y).

3.2.4 המודל לחיזוי משך העבודה – סיכום

טבלה 4. ריכוז נתוני חקר עבודה ביישוב.

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
Y	27.3529	25.19822	14663
X1	2.1725	2.28275	14663
X3	5.8513	4.54811	14663

Y – משך זמן העבודה ביישוב X_1 – מספר רפתות ביישוב X_3 – מספר הכנסות ידיים ביישוב ממוצע משך יום העבודה ביישוב (Y) הוא 27.3 דקות, יש בממוצע 2.1 רפתות ביישוב (X_1) ובממוצע 5.8 הכנסות ידיים (X_3).

כדי לאמת את הקשר בין המשתנה המוסבר למשתנים המסבירים נבדקה ההשערה הבאה:

H_0 : המשתנים המסבירים אינם מנבאים את המשתנה המוסבר

H_1 : המשתנים המסבירים מנבאים את המשתנה המוסבר

מטבלה 5 נלקחה α מינימאלית לדחייה.

טבלה 5. מבחן ANOVA לתקפות המודל.

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	8454043	2	4227021.711	72426.430	.000 ^a
	Residual	855601.2	14660	58.363		
	Total	9309645	14662			

a. Predictors: (Constant), X3, X1

b. Dependent Variable: Y

$\alpha = 0.05 > 0$ ולכן דוחים את השארת האפס ברמת מובהקות של 95%, וניתן להסיק כי מודל הרגרסיה מנבא את המשתנה המוסבר. מקדמי מודל הרגרסיה נתונים בטבלה 6.

טבלה 6. מקדמי מודל הרגרסיה.

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-1.423	.103		-13.836	.000
	X1	5.500	.042	.498	130.527	.000
	X3	2.876	.021	.519	135.985	.000

a. Dependent Variable: Y

X_1 – מספר רפתות ביישוב X_3 – מספר הכנסות ידיים ביישוב

מטבלה 6 מתקבלת המשוואה הבאה המנבאת את משך העבודה (דקות) ביישוב כתלות במספר הכנסות הידיים ומספר הרפתות ביישוב.

$$Y = -1.423 + 5.5 \cdot n + 2.876 \cdot \sum_1^n z_i$$

כאשר:

Y – משך זמן העבודה ביישוב.

$n - X_1$, מספר הרפתות ביישוב ($n \geq 1$).

$X_3 = \sum_1^n z_i$, מספר הכנסות הידיים ביישוב ($\sum_1^n z_i \geq 1$).

z_i – מספר הפרות ברפת i ביישוב המכיל n רפתות.

3.2.5 תקפות מודל למציאת משך זמן העבודה ביישוב

תקפות המודל בוצעה על נתוני חודשים מאי יוני יולי ואוגוסט 2007. משכי העבודה בפועל בחודשים אלו השוו לזמנים החזויים לפי מודל הרגרסיה.

מבחן T – מזווג:

טבלה 7. מבחן T – מזווג.

Paired Samples Test

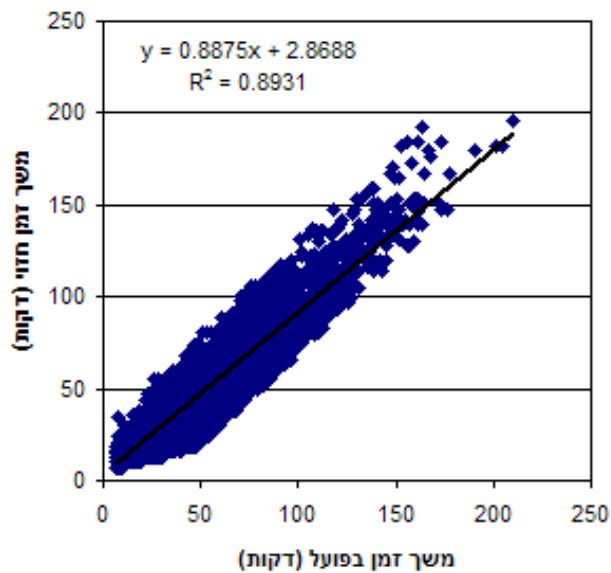
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	real_time - predict_time	-.04732	7.41603	.05892	-.16282	.06817	-.803	15840	.422

מטבלה 7 ניתן לראות כי $\alpha = 0.422 < 0.05$ ולכן לא דוחים את השארת האפס ברמת מובהקות של 95%, לא נמצא הבדל מובהק סטטיסטית בין תוחלת משך הזמן בפועל ותוחלת משך הזמן החזוי.

מבחן רגרסיה :

באיור 7 ניתן לראות את משך הזמן הצפוי מול משך הזמן בפועל.

גרף משך זמן בפועל מול משך זמן חזוי



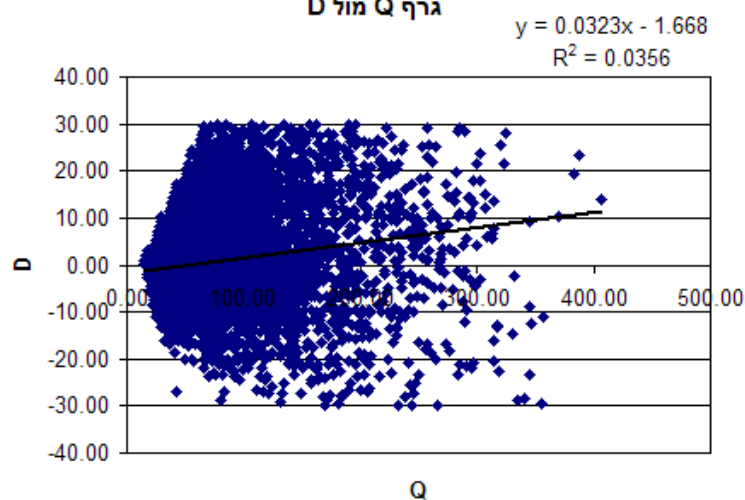
איור 7. גרף מבחן רגרסיה – משך זמן חזוי מול משך זמן בפועל.

.מבחן הרגרסיה לא עבר. $F_{stat} = 1062 > 19.5 = F_{table}$

מבחן Kleijnen:

באיור 8 ניתן לראות את גרף מבחן Kleijnen של D מול Q.

גרף Q מול D

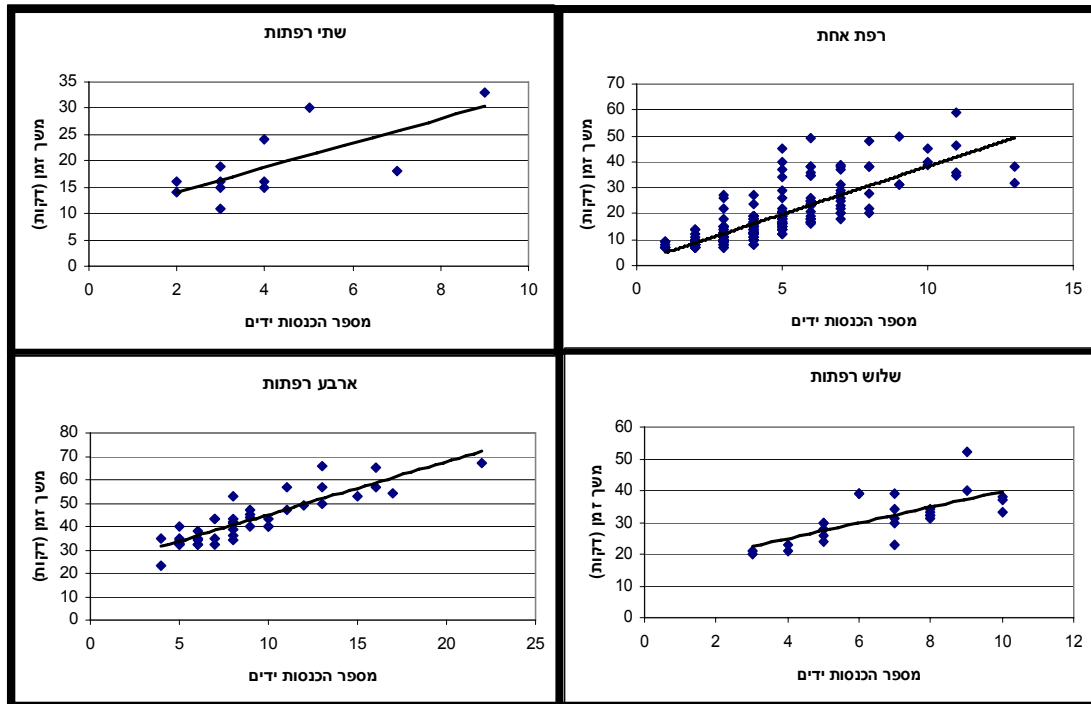


איור 8. גרף מבחן Kleijnen – D מול Q.

.מבחן Kleijnen לא עבר. $F_{stat} = 292 > 19.5 = F_{table}$

3.3. דיון

תוצאות מבחני התקפות: מבחן הרגרסיה והמבחן של Kleijnen, מצביעות על כך שלכאורה לא ניתן לחזות בעזרת המודל את משך העבודה ביישוב. הסבר אפשרי לתוצאות אלו מצוי בטבלה 4 בה בולטת השונות הגבוהה של משכי העבודה ביישובים. יתכן כי מבחני התקפות רגרסיה ו-Kleijnen נכשלו בגלל השונות הגבוהה הזו. כדי לבדוק אפשרות זו פולחו הנתונים של מזריעים בודדים לפי מספר רפתות ביישוב, ולפי מספר ההזרעות בכל רפת, כמתואר באיור 9.



איור 9. משך זמן עבודה בתלות במספר הכנסות ידיים.

איור 9 מתאר מזריע אחד, אך התיאור אופייני לכל המזריעים וניתן לראות בו כי גם כאשר אותו מזריע מבקר ביישובים עם אותו מספר רפתות ואותם מספרי הכנסות ידיים קיימת שונות במשך זמן העבודה ביישוב – למשל טווח הזמנים הגדול של 5 הכנסות ידיים ביישובים עם רפת אחת. סטיית התקן במשך הזמן אינה נובעת רק מקצבי עבודה שונים של מזריעים או יישובים שונים. סטיית התקן נובעת גם מגורמים רעש בלתי צפויים כגון: שיחות עם בעל הרפת, שיחות עם וטרינר, הזרעה לא מתוכננת, חזרה בלתי צפויה לרפת, הזרעה במקום אחר ברפת וכו'.

למרות זאת, ולמרות השונות הגבוהה של משכי העבודה – טבלה 4, המודל נמצא מובהק, הוא מסביר כ-91% מהשונות, ועבר את המבחן המקובל של T-מזווג. מבחן הרגרסיה והמבחן של Kleijnen, הוצעו לבדיקת סימולציות ולא ניתוחי רגרסיה. לפיכך, ישמש המודל שפותח לחיזוי משכי העבודה ביישובים.

4. הקצאת יישובים למזריעים

4.1. חומרים ושיטות

4.1.1. איסוף נתונים

הנתונים המשמשים את המודל להקצאת היישובים הם:

- משך זמן העבודה ביישוב המתקבל כפלט מהרגרסיה המרובה משמש כקלט למודל להקצאת היישובים.
- ממוצע הכנסות הידיים ביישוב ביום.
- טבלת מרחקים בין מרכזי היישובים נקנתה על ידי חברת "שיאון" מחברת "סיסטמטיקס" (אתר אינטרנט – <http://www.systematics.co.il>). המרחקים הם מרחקי נסיעה על כביש (מרחק הנסיעה של הכביש הקצר ביותר המחבר בין היישובים) ומתחשבים באיסורי כניסה ופניה. החישוב מבוסס על מאגר GISrael של חברת מפה (אתר אינטרנט – <http://www.gisrael.co.il>).
- טבלת שמות היישובים ומיקומם הגיאוגרפי לפי צירים Y, X . התקבלה מדרי' יפית כהן מהמכון להנדסה חקלאית, מינהל המחקר החקלאי (מרכז וולקני, בית דגן).

4.1.2. ניסוח הבעיה באמצעות תכנות מתמטי

לצורך תכנון עבודת המזריעים נבנה מודל מתמטי המתאר את הבעיה, בשני שלבים. בשלב הראשון נתאר את הבעיה כגרף – אוסף של נקודות, המכונות קודקודים, וקוים שמחברים ביניהם ומכונים קשתות, ובשלב השני על בסיס התיאור בגרף, ינוסח מודל המתמטי שמורכב ממשתנים המייצגים את ההחלטות שאותן יש לקבל – משתני החלטה. גרף הוא תיאור מאד אינטואיטיבי של הבעיה כאשר קודקודי הגרף מייצגים את היישובים בהם יש רפתות או מתגוררים בהם מזריעים, והקשתות מייצגות את הכבישים בין היישובים – אורך הקשת הוא משך זמן הנסיעה בין היישובים. אם אין כביש ישיר בין שני יישובים לא תהיה ביניהם קשת. מאחר וכבישים בין עירוניים דו-סטריים, ניתן לעבור בכל קשת בגרף בשני הכיוונים. במונחים של תורת הגרפים נקרא גרף כזה גרף לא מכוון והוא מסומן: $G(V, E)$, כאשר V היא קבוצת הקודקודים ו- E היא קבוצת הקשתות המחברות ביניהם. בעיית המזריעים, קבוצת הקודקודים היא איחוד של שתי קבוצות: C – יישובים המקבלים שרות, ו- D – יישובים בהם מתגוררים המזריעים. המודל המתמטי המתאים (בשלב השני), כולל פונקצית מטרה ומערכת משוואות המייצגות את האילוצים הקיימים בבעיה וקשרים בין משתנים. פונקצית המטרה והאילוצים מבוטאים במונחים של משתני ההחלטה, ומשתני עזר נוספים במידת הצורך (Hillier and Lieberman, 1990). פונקצית המטרה והאילוצים כוללים גם פרמטרים שונים שערכם ידוע מראש. להלן מודל מתמטי של בעיית תכנון העבודה של המזריעים.

4.1.2.1 פרמטרים

C – קבוצת כל היישובים המקבלים שרות מהמזריעים. n , מספר היישובים המקבלים שרות.
 D – קבוצת היישובים מהם יוצאים המזריעים. מזריע מסומן באות $k, k=1, \dots, m$, מספר המזריעים. מכל יישוב יוצא מזריע אחד. אם מיישוב מסוים יוצאים יותר ממזריע אחד, ממירים

את היישוב במספר יישובים (כמספר המזריעים) כאשר מכל יישוב יוצא מזריע אחד ומרחק הנסיעה בין היישובים הוא אפס.

$C \cup D$ מרחב הקודקודים המייצג את כל היישובים בגרף.

e_{ij} – משך זמן הנסיעה מיישוב i ליישוב j .

q_i – ממוצע הכנסות ידיים ביישוב i .

Q – ממוצע הכנסות ידיים ביום למזריע, $Q = \frac{\sum_i q_i}{m}$.

t_i – משך זמן העבודה ביישוב i , על פי מודל החיזוי שתואר בסעיף הקודם.

T – ממוצע משך זמן יום העבודה למזריע, $T = \frac{\sum_{i,j,k} e_{ij} x_{ijk} + \sum_{i,k} t_i y_{ik}}{m}$.

4.1.2.2. משתני החלטה ופונקציית המטרה

משתני החלטה:

$$\left. \begin{array}{l} \text{אם מזריע } k \text{ מבקר את יישוב } j \text{ אחרי יישוב } i \\ \text{אחרת} \end{array} \right\} = x_{ijk}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{אם יישוב } i \text{ מבוקר על ידי מזריע } k \\ \text{אחרת} \end{array} \right\} = y_{ik}$$

פונקציית המטרה:

המוטיבציה לעבודה זו היא שיפור השירות ואיזון משך יום העבודה בין המזריעים. שיפור השירות מתקבל על ידי הגעה מהירה יותר של מזריעים לפרות מיוחמות ולכן, פונקציית המטרה היא מינימום משך יום העבודה הכולל של כל המזריעים ואיזון העבודה בין המזריעים הוא אילוץ.

זמן עבודה כולל ביום מורכב ממשך זמן נסיעה כולל בין היישובים $\sum_{i,j \in C \cup D} e_{ij} \sum_{k \in D} x_{ijk}$ ומשך זמן העבודה

כולל ביישובים $\sum_{i \in C, k \in D} t_i y_{ik}$, כלומר, משך זמן העבודה הכולל ביום של כל המזריעים הוא

$\sum_{i,j \in C \cup D} e_{ij} \sum_{k \in D} x_{ijk} + \sum_{i \in C, k \in D} t_i y_{ik}$. משך זמן עבודה הכולל ביישובים המבוצע על ידי כלל המזריעים אינו

תלוי בחלוקת היישובים למזריעים (ההנחה היא שלכל המזריעים קצב עבודה זהה) ולכן פונקציית המטרה כוללת רק את משך זמן הנסיעה הכולל בין היישובים.

4.1.2.3. המודל

ניסוח הבעיה באמצעות תכנון ליניארי בשלמים מבוסס על הניסוח של Toth and Vigo (2002) עם תוספת אילוצים של איזון העבודה בין המזריעים.

$$(1) \quad \min \sum_{i,j \in C \cup D} e_{ij} \sum_{k \in D} x_{ijk}$$

s.t

$$(2) \quad \sum_{k \in D} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in C \cup D$$

$$(3) \quad \sum_{i,j \in C \cup D} e_{ij} \sum_{k \in D} x_{ijk} + \sum_{i \in C} t_i y_{ik} \leq T + \varepsilon_1 \quad \forall k \in D$$

$$(4) \quad \sum_{i,j \in C \cup D} e_{ij} \sum_{k \in D} x_{ijk} + \sum_{i \in C} t_i y_{ik} \geq T - \varepsilon_2 \quad \forall k \in D$$

$$(5) \quad \sum_{i \in C} q_i y_{ik} \leq Q + \varepsilon_3 \quad k = 1, \dots, m$$

$$(6) \quad \sum_{j \in C \cup D} x_{ijk} = \sum_{j \in C \cup D} x_{jik} = y_{ik} \quad \forall i \in D \cup C \quad \forall k \in D$$

$$(7) \quad \sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq \{2, \dots, n\} \quad \forall k \in D$$

$$(8) \quad y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in D \cup C \quad \forall k \in D$$

$$(9) \quad x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in D \cup C \quad \forall k \in D$$

משוואה (1) : פונקציית המטרה – מינימום משך זמן נסיעה כולל של כל המזריעים ביום.
 משוואה (2) : אילוף בו כל יישוב חייב לקבל שרות על ידי מזריע אחד בלבד.
 משוואה (3) ומשוואה (4) : אילוצים על משך יום עבודה כולל של המזריעים. משוואות המאלצות את משך היום של מזריע בין ערך מקסימאלי וערך מינימאלי סביב הממוצע במרחק של $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$, ככל ש- $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ קטן יותר איזון משך יום עבודה כולל בין המזריעים יהיה טוב יותר. אלו אילוצים שנוספו בעבודה הנוכחית לאילוצים המופיעים בניסוח הבעיה של Toth and Vigo (2002).
 משוואה (5) : אילוף על ממוצע מספר הכנסות ידיים מקסימאלי מותר למזריע ביום. במשוואה ישנו פרמטר ε_3 , ככל ש- ε_3 קטן יותר, ממוצע מספר הכנסות הידיים של מזריע k יהיה קרוב יותר לממוצע הכללי.
 משוואה (6) : אילוף בו מספר הכניסות ליישוב שווה למספר היציאות מהיישוב. לכל יישוב נכנס מזריע בודד. לכן, למזריע זה מספר הכניסות שווה למספר היציאות שווה ל- $y_{ik} = 1$, ולכל האחרים $y_{ik} = 0$.
 משוואה (7) : אילוף של בעיית הסוכן הנוסע (TSP) בו המזריע חייב לבקר בכל היישובים במסלול אחד ללא תתי-מסלולים.
 משוואה (8) ומשוואה (9) : משתני ההחלטה בשלמים בלבד עם ערכים של 0 או 1.
 כל המשוואות המופיעות במודל ליניאריות ומשתני ההחלטה (משוואות 8 ו-9) הם שלמים ולכן, הבעיה היא בעיית תכנון ליניארי בשלמים. בגלל כמות המשוואות של תתי המסלולים (אילוף 7) ומפני שהבעיה היא בעיית תכנון ליניארי בשלמים (משוואות 8 ו-9) לא ניתן לפתור את הבעיה בזמן סביר ולכן, נמצא פתרון לבעיה באמצעות שיטות יוריסטיות המתוארות להלן.

4.1.3. אלגוריתמים להקצאת היישובים למזריעים

הקצאת היישובים למזריעים בוצעה באמצעות תוכנה שפותחה כחלק מהמחקר (נכתבה בשפת JAVA). תוך שימוש בקבצי טקסט בצורה המאפשרת שמירת נתוני קלט ופלט בין ריצות של חלופות שונות, עדכון נתונים בצורה קלה ומשתני קלט רבים המאפשרים גמישות מקסימאלית למקבלי ההחלטות. התכנה והתיעוד הנלווה מצורפים בדיסק המצורף לעבודה. משתני הקלט הם:

- שם וקוד היישובים המקבלים שרותי הזרעה.
 - מידע על כמות ההזרעות. התכנון יכול להתבסס על נתוני עבר – הזרעות שבוצעו בתקופה מקבילה, או לפי כמות הזרעות חזויות.
 - מידע על פיו מבקשים לבצע את הקצאת היישובים: מספר רפתות ביישוב ומספר ימי עבודה. באמצעות מידע זה מחושב לכל יישוב ממוצע מספר הכנסות ידיים ביום עבודה וממוצע מספר הרפתות ביום עבודה.
 - פלט המודל לחישוב משך זמן העבודה ביישוב (מקדמי הרגרסיה). באמצעות מקדמי הרגרסיה, ממוצע מספר הכנסות ידיים ביישוב ביום עבודה וממוצע מספר רפתות ביישוב ביום עבודה מחושב לכל יישוב משך יום עבודה צפוי.
 - מיקום גיאוגרפי של היישובים על פי קואורדינטות Y, X .
 - טבלת מרחקים בין יישובים.
 - טבלת מהירויות בין יישובים. מהירויות הנסיעה בכבישים דינאמית ומשתנה מתקופה לתקופה (עבודות בכבישים, פתיחת מחלפים ועוד) ערכי הטבלה הם מהירות ממוצעת בין שני יישובים וניתנת לשינוי בהתאם לשינוי המהירות הממוצע בכביש. בעזרת טבלת המרחקים וטבלת המהירויות מחושב משך זמן הנסיעה בין היישובים.
 - מהירות הנסיעה ממקום מגורי המזריע ליישוב ההזרעה הראשון, מהירות הנסיעה מיישוב ההזרעה האחרון למקום מגורי המזריע. מהירות זו היא מקרה פרטי בו המזריעים נוסעים במהירות שונה ממהירות הנסיעה בין היישובים המקבלים שירותי הזרעה. מהירות זו היא פרמטר שערכו נקבע על ידי מומחי חברת "שיאון".
 - מספר המזריעים, מקום מגורי המזריע, אחוז משרה (משך יום עבודת מקסימאלי של מזריע הוא משך יום מקסימאלי מוכפל באחוז המשרה, מספר הכנסות ידיים מקסימאלי של המזריע הוא מספר הכנסות ידיים מקסימאלי מוכפל באחוז המשרה. מאפשר גמישות בכמות העבודה של כל מזריע בנפרד), יישובים בהם מזריע חייב לתת שרותי הזרעה ויישובים בהם המזריע אינו נותן שרותי הזרעה.
 - מקסימום משך יום עבודה מותר למזריע.
 - מינימום משך יום עבודה רצוי למזריע.
 - מקסימום ממוצע הכנסות ידיים ביום למזריע.
- הפלט המתקבל מהתוכנה:
- הקצאת היישובים למזריעים השונים ומסלול הנסיעה.
 - משך זמן נסיעה כולל של כל המזריעים ביום עבודה.
 - מרחק נסיעה כולל של כל המזריעים ביום עבודה.

- ממוצע משך יום עבודה למזריע.
 - סטיית תקן משך יום העבודה למזריע.
 - ממוצע של ממוצע הכנסות ידיים למזריע.
 - סטיית תקן של ממוצע הכנסות ידיים למזריע.
- כפי שצוין קודם, תכנון עבודת המזריעים – פתרון המודל דלעיל, מבוצע באמצעות אלגוריתם יוריסטי. האלגוריתם מורכב מארבע שלבים:

1. הקצאה ראשונית של היישובים למזריעים השונים (פתרון התחלתי).
2. שיפור פיתרון התחלתי באמצעות אלגוריתמים של חיפוש המחליפים יישובים, הנמצאים על הגבול של אזורי העבודה, בין מזריעים שכנים לפי קריטריון מינימום משך זמן הנסיעה (מבוצעת החלפה של יישובים רק אם יש שיפור במשך זמן הנסיעה הכולל של המזריעים).
3. איזון משך יום עבודת המזריעים על ידי העברת יישובים בין מזריעים.
4. מציאת מסלול הנסיעה בעל משך זמן נסיעה הקצר ביותר לכל מזריע באמצעות אלגוריתם גנטי.

4.1.3.1. אלגוריתמים להקצאה ראשונית של יישובים למזריעים

להקצאה ראשונית של יישובים למזריעים נבחנו 4 אלגוריתמים שונים מהספרות המתוארת בפרק 2 של דו"ח זה: (1) אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר; (2) אלגוריתם maxmin; (3) אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר; ו – (4) אלגוריתם מרכז מסה. אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר, אלגוריתם maxmin, ואלגוריתם המזריע הקרוב ביותר מקצים היישובים למזריעים במקביל, באותו זמן לכל המזריעים – כל יישוב מוקצה למזריע בעל הקריטריון הנמוך ביותר מבין כל המזריעים (לכל אלגוריתם הקריטריון שלו). אלגוריתם מרכז מסה מבצע בנייה של אזורי עבודה אחד אחרי השני. בכל פעם נבחרים יישובים שישתייכו לאותו אזור עד אשר משך יום העבודה הכולל ביום או ממוצע הכנסות ידיים ביום חורג מהמקסימום המותר, כל אזור מוקצה למזריע הפנוי הקרוב אליו ביותר. בכל האלגוריתמים הקצאת יישוב למזריע מקיימת את האילוצים: ממוצע הכנסות הידיים ביום ומשך יום העבודה אינם חורגים מהערך המקסימאלי המותר. משך יום העבודה הוא סכום משכי זמן העבודה ביישובים וזמן הנסיעה בין היישובים. חישוב משך יום עבודה מבוצע אחרי כל הקצאה של יישוב למזריע. מסלול הנסיעה בין היישובים מחושב לצרכים אלו לפי אלגוריתם השכן הקרוב ביותר, אלגוריתם בעל רמת סיבוכיות נמוכה של $O(n^2)$ והוא רחוק 16% מאופטימום ידוע (Golden et al., 1980).

4.1.3.1.1. אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר.

אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר הוא אלגוריתם של Lim and Wang (2005):

1. אתחל מספר אזורי עבודה כמספר המזריעים.
2. הוסף לכל אזור עבודה את מגורי המזריע בראש הרשימה.
3. מצא את היישוב שהוספתו לאחד מאזורי העבודה כרוכה בתוספת הקטנה ביותר לזמן הנסיעה הכולל.
4. הוסף את היישוב לרשימת היישובים של המזריע המתאים.
5. כל עוד נשארו יישובים חזור ל – 3

4.1.3.1.2. אלגוריתם maxmin

האלגוריתם מתבסס על עקרונות של אלגוריתם החיסכון (Clark and Wright, 1962) ורעיונות של אלגוריתמים לאיזון קווים המתבססים על משקלים. באלגוריתם maxmin מבצעים קודם את ההקצאה של היישובים הרחוקים ממגורי המזריעים באופן הבא:

1. אתחל מספר אזורי עבודה כמספר המזריעים.
2. חשב לכל יישוב את זמן הנסיעה למגורי המזריע אשר הקצאת היישוב אליו לא תעבור את החסמים על משך יום העבודה ומספר הכנסות הידיים ביום עבודה, ומצא את המזריע הקרוב ביותר.
3. מיין את היישובים לפי זמני הנסיעה ממגורי המזריע בסדר יורד – היישוב בעל משך זמן הנסיעה הארוך ביותר בראש הרשימה.
4. הקצה את היישוב בעל משך זמן הנסיעה הארוך ביותר למזריע.
5. כל עוד נשארו יישובים חוזר ל – 2.

4.1.3.1.3. אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר

אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר הינו אלגוריתם דו-שלבי מקובל לבעיות – MDVRP. בשלב הראשון מוקצים יישובים לנקודות ההפצה הקרובות ביותר ובשלב השני מייצרים מסלולי נסיעה לכל נקודת הפצה על ידי אלגוריתמים של VRP. בעבודה הנוכחית נקודת הפצה היא מגורי המזריע וממנה יוצא רק רכב אחד. לאחר הקצאת היישובים בשלב הראשון, מחושב מסלול נסיעה בשלב השני על ידי אלגוריתם השכן הקרוב. הקצאת היישובים מבוצעת באופן הבא:

1. אתחל מספר אזורי עבודה כמספר המזריעים.
2. מצא לכל יישוב את המזריע הקרוב ביותר אליו, בתנאי שהקצאת היישוב למזריע לא תעבור את החסמים על משך יום העבודה ומספר הכנסות הידיים ביום עבודה.
3. מיין את היישובים לפי זמני הנסיעה ממגורי המזריע בסדר עולה – היישוב בעל זמן הנסיעה הקצר ביותר בראש הרשימה.
4. הקצה את היישוב בעל משך זמן הנסיעה הקצר ביותר למזריע.
5. כל עוד נשארו יישובים חוזר ל – 2.

4.1.3.1.4. אלגוריתם מרכז מסה

אלגוריתם מרכז מסה הינו אלגוריתם המקצה יישובים מהקצוות – המעטפת החיצונית של הגרף (צפון, דרום) לכיוון מרכז. הקצאת היישובים מבוצעת לפי אזורי עבודה (בחירת אזור עבודה, היישוב הצפוני ביותר)הדרומי ביותר לסירוגין מבין היישובים שלא הוקצו למזריעים) ולכל אזור עבודה משויך המזריע הקרוב ביותר. היישוב שמוסף לאזור העבודה הוא היישוב הקרוב ביותר למרכז המסה של היישובים שכבר הוקצו לאזור. המרחקים לצורך החישובים הם מרחקי הנסיעה, ומרכז המסה מחושב בעזרת קואורדינאטות (Y,X). הקצאת היישובים מבוצעת באופן הבא:

1. מיין את היישובים מהיישוב הדרומי ליישוב הצפוני לפי קואורדינאטות Y,X.
2. בחר מבין היישובים שלא הוקצו את היישוב הדרומי ביותר לצפוני לסירוגין.
 - 2.1. הקצה ליישוב את המזריע הקרוב ביותר.
 - 2.2. חשב מרכז מסה.

2.3. הוסף לאזור העבודה את היישוב הקרוב ביותר למרכז המסה.

2.4. כל עוד קיים יישוב שניתן להוסיפו לאזור עבודה מבחינת משך יום העבודה וממוצע הכנסות הידיים, חזור ל – 2.2.

3. כל עוד נשארו יישובים חזור ל – 2.

4.1.3.2. אלגוריתמי החלפת יישובים בין שכנים

האלגוריתמים להקצאה ראשונית של יישובים למזריעים הינם אלגוריתמים מקורבים (יוריסטים). אלגוריתמים יוריסטים תלויים במבנה הבעיה, גיאוגרפיה וחסמי הבעיה ולעיתים נותנים פתרונות מקומיים ולא אופטימאליים. ניסיון לשיפור הפתרון הראשוני נעשה בעזרת שלושה אלגוריתמי חיפוש המבוצעים אחד אחרי השני: (1) החלפת יישוב אחד בשני יישובים ממזריע שכן; (2) החלפת יישוב אחד ביישוב ממזריע שכן; ו- (3) העברת יישוב מזריע למזריע שכן. החלפת היישובים מבוצעת בין מזריע לאחד משלושת שכניו, כאשר שכנים הם מזריעים אשר המרחק בין מרכזי המסה של אזורי העבודה הוא מינימאלי. החלפת היישובים מבוצעת בתנאי שקיים שיפור במשך זמן הנסיעה הכולל ובתנאי שמשך יום העבודה ומספר הכנסות הידיים של אף מזריע לא חורג מהמקסימום המותר.

4.1.3.2.1. אלגוריתם החלפת יישוב אחד בשני יישובים ממזריע שכן

אלגוריתם המבצע החלפה של יישוב אצל מזריע בשני יישובים שהוקצו לאחד משכניו. מטרת האלגוריתם הוא שיפור משך הזמן הכולל על ידי החלפה של יישוב בעל מספר הכנסות ידיים רב בשני יישובים בעלי ממוצע הכנסות ידיים מועט מאחד השכנים.

1. חזור על הפעולות הבאות לכל מזריע:

1.1. חשב מרכז מסה לכל המזריעים.

1.2. מצא את שלושת השכנים הקרובים ביותר למזריע.

1.3. מצא את היישוב שהחלפתו בשני יישובים מאחד מהמזריעים השכנים היא בעלת השיפור המקסימאלי במשך זמן הנסיעה הכולל.

1.4. החלף את היישוב בשני היישובים של המזריע השכן.

2. אם בוצעה החלפה של יישובים בין שכנים חזור ל – 1.

4.1.3.2.2. אלגוריתם החלפת יישוב ביישוב ממזריע שכן

אלגוריתם המבצע החלפה בכל שלב יישוב של מזריע עם יישוב של מזריע שכן.

1. חזור על הפעולות הבאות לכל מזריע:

1.1. חשב מרכז מסה לכל המזריעים.

1.2. מצא את שלושת השכנים הקרובים ביותר למזריע.

1.3. מצא את היישוב שהחלפתו ביישוב מהמזריעים השכנים היא בעלת השיפור המקסימאלי במשך זמן הנסיעה הכולל.

1.4. החלף את היישוב ביישוב של המזריע השכן.

2. אם בוצעה החלפה של יישובים בין שכנים חזור ל – 1.

4.1.3.2.3. אלגוריתם העברת יישוב ממזריע למזריע שכן

אלגוריתם המבצע העברה של יישוב למזריע מאחד משלושת שכניו, מטרת כל העברה היא הפחתה של משך זמן הנסיעה הכולל.

1. חזור על הפעולות הבאות לכל מזריע:
 - 1.1. חשב מרכז מסה לכל המזריעים.
 - 1.2. מצא את שלושת השכנים הקרובים ביותר למזריע.
 - 1.3. מצא את היישוב שהעברתו למזריע מאחד מהמזריעים השכנים היא בעלת השיפור המקסימאלי במשך זמן הנסיעה הכולל.
 - 1.4. העבר את היישוב למזריע השכן.
2. אם בוצעה העברה של יישובים בין שכנים חזור ל – 1.

4.1.3.3. אלגוריתם איזון משך יום עבודה בין מזריעים

איזון משך יום עבודת המזריעים מבוצע על ידי העברת יישובים למזריע בעל משך יום עבודה קצר משכנים (לפי מרכז מסה) בעלי משך יום עבודה ארוך. העברת יישובים מבוצעת ממזריעים בעלי משך יום עבודה גבוה ממשך יום העבודה המינימאלי ובתנאי, שהעברת היישוב לא תפחית את משך יום עבודת המזריע מתחת למינימום (מניעת העברת יישובים האחד לשני בצורה מעגלית). מזריע אליו מועבר יישוב חייב לעמוד באילוף משך יום עבודה מקסימאלי וממוצע הכנסות ידיים מקסימאלי (מניעה ממזריע שמקום מגוריו קרוב ליישובים המקבלים שרות לקבל מספר הכנסות ידיים רב כפיצוי על משך זמן נסיעה קצר בין יישובים).

1. חשב מרכז מסה לכל המזריעים.
2. מצא את שלושת השכנים הקרובים לכל מזריע.
3. דרג את המזריעים לפי משך יום העבודה.
4. סרוק את רשימת המזריעים מהמזריע בעל משך יום העבודה הקצר ביותר למזריע בעל משך יום העבודה הארוך ביותר.
 - 4.1. מצא יישוב מאחד משלושת השכנים אשר העברתו למזריע הוא בעל התוספת השולית הנמוכה ביותר למשך זמן הנסיעה הכולל.
 - 4.2. אם נמצא יישוב העומד בתנאים
 - i. העבר מהשכן את היישוב למזריע
 - ii. חזור ל – 1.

4.1.3.4. אלגוריתמים למציאת המסלול בעל משך זמן הנסיעה הקצר ביותר

מציאת מסלול הנסיעה בעל משך זמן הנסיעה הקצר ביותר מבוצעת באמצעות שני אלגוריתמים:
א. השכן הקרוב ביותר (Rosenkrantz at., 1974).

1. הכנס למסלול הנסיעה את היישוב בו מתגורר המזריע.
2. מצא את היישוב הקרוב ביותר ליישוב האחרון שנכנס למסלול הנסיעה.

3. כל עוד נשארו יישובים חזור ל - 2.
4. חבר את היישוב האחרון שהוכנס עם היישוב בו מתגורר המזריע.
- ב. אלגוריתם גנטי (Chatterjee, at. 1996).

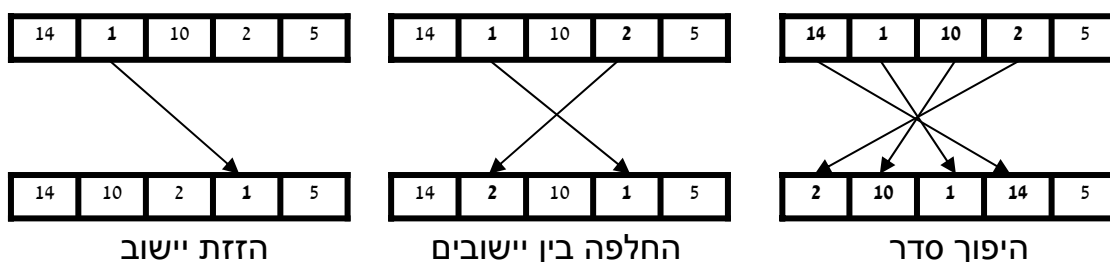
1. צור אוכלוסיית פתרון של 1000 מסלולים באופן אקראי. מסלול אחד מתוך ה - 1000 נבנה לפי אלגוריתם השכן הקרוב ביותר, הוספת הפיתרון לפי השכן הקרוב ביותר לאוכלוסיית הפתרונות מקטינה את זמן הריצה של האלגוריתם הגנטי בחצי ללא פגיעה באיכות הפיתרון (Chatterjee, at. 1996).

3	8	15	12	2
---	---	----	----	---

איור 10. דוגמא לפיתרון של מסלול נסיעה.

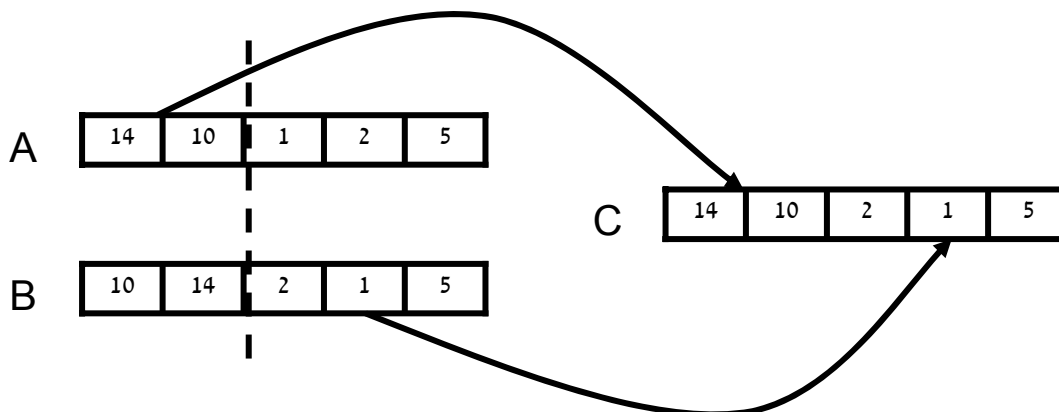
- באיור 10 פיתרון אפשרי של מסלול נסיעה, מסלול נסיעה של מזריע הוא $2 \leftarrow 12 \leftarrow 15 \leftarrow 8 \leftarrow 3$ ערך הפיתרון הוא סכום זמני הנסיעות בין היישובים.
2. חזרה על הפעולות הבאות 500 פעמים (דורות):
- העתקת 50 המסלולים בעלי משך זמן הנסיעה הקצר ביותר לאוכלוסייה החדשה.
 - יצירת 150 מוטציות מאוכלוסיית הפתרונות.

באיור 11 מוצגים שלושה סוגים של מוטציות: הזזת יישוב בסדר המסלול, החלפת צמד יישובים בתוך המסלול והיפוך סדר היישובים במסלול, מכל סוג, נוצרו 50 מוטציות.



איור 11. מוטציות.

- השלמת אוכלוסיית הפתרונות על ידי הכלאה אקראית בין שני פתרונות.



איור 12. הכלאה בין שני פתרונות.

באיור 12 מתקבל פתרון חדש C שהוא הכלאה בין A ו B, מקום החיתוך בין הפתרונות נבחר באופן אקראי. אם לא ניתן לבצע הכלאה בין שני פתרונות (נוצר פתרון חדש בו יישוב מופיע יותר מפעם אחת מייצרים פתרון חדש באופן אקראי).

3. פרסום המסלול בעל משך זמן הנסיעה הקצר ביותר.

4.2. תוצאות

הקצאת היישובים למזריעים בוצעה ב – 4 שלבים. הקצאה ראשונית, שיפור ההקצאה הראשונית באמצעות החלפת יישובים בין שכנים, איזון משך יום העבודה בין מזריעים באמצעות העברת יישובים בין מזריעים ומציאת מסלול אופטימאלי על ידי שימוש באלגוריתם גנטי. התרומה של כל שלב מוצגת בטבלאות. 8 – 11 בכל שלב קיימת השוואה בין המצב הקיים והמצב החדש. הערכים של $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ שקובעים את החסמים על משך יום העבודה ומספר הכנסות הידיים ביום עבודה, צד ימין של משוואות (3), (4) ו-(5) נמצאו על ידי ניסוי וטעייה.

טבלה 8. הקצאת יישובים למזריעים בשלב 1.

אלגוריתם מרכז מסה	אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר	אלגוריתם maxmin	אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר	מצב קיים	
4037.6	3853.4	5034	4087.6	4408.5	מרחק נסיעה יומי של כל המזריעים (ק"מ)
83	80.6	103.4	83.5	92.2	משך זמן נסיעה של כל המזריעים (ביום אחד (שעות))
6.2	7.6	7.2	7.1	8	משך יום עבודה הארוך ביותר (שעות) של מזריע אחד
2.6	1.3	3.4	0.2	4	משך יום עבודה הקצר ביותר (שעות) של מזריע אחד
5.7	5.7	6.4	5.8	6.1	המשך הממוצע של יום העבודה של מזריע אחד (שעות)
0.7	1.7	0.9	1.4	1.2	סטיית תקן של משך יום עבודה (שעות), השוואה בין המזריעים
5.9	7.2	6.9	7	7.6	רמת שירות – זמן ההגעה (שעות) של מזריע אחד לפרה האחרונה
42.5	48.8	43	44	50	ערך מקסימאלי של הממוצע היומי של הכנסות ידיים של מזריע אחד
18.9	9	16.9	2.2	25.9	ערך מינימאלי של הממוצע היומי של הכנסות ידיים של מזריע אחד
37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	ממוצעי הכנסות ידיים ביום במשך חודש אחד של מזריע אחד
6.3	11.6	6.1	10.7	6.1	סטיית תקן של הממוצע היומי של הכנסות ידיים של מזריע אחד

כל אלגוריתם ראשוני החל בערכים גבוהים לחסמים, ובכל ריצה הופחתו החסמים עד שלא ניתן לבצע הקצאה של יישובים למזריעים. בטבלה 8 מופיעות תוצאות שלב 1 – הקצאה ראשונית של יישובים למזריעים. ניתן לראות כי באלגוריתם מרכז מסה נמצא פתרון עם החסמים הנמוכים ביותר: משך יום עבודה מקסימאלי 6.2 שעות ו- 42.5 הכנסות ידיים ביום.

משך זמן נסיעה של כל המזריעים שופר בשלושה מארבעת האלגוריתמים: אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר (83.5 שעות), אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר (80.6 שעות) ואלגוריתם מרכז מסה (83 שעות). באלגוריתם maximin משך זמן הנסיעה גדל (103.4 שעות) בגלל מבנה הגיאוגרפי של הבעיה וגודל החסמים. אלגוריתם maximin מקצה את היישובים הרחוקים מהמזריע קודם, כאשר נשארים יישובים הקרובים למזריע אבל, מכסת משך יום העבודה/מכסת הכנסות הידיים מלאה מוקצה היישוב הקרוב למזריע אחר רחוק יותר. מקרים אלו מגדילים את פונקצית משך זמן הנסיעה. האלגוריתמים להקצאה ראשונית הם אלגוריתמים יוריסטים אשר אינם מבטיחים אופטימאליות, כדי לשפר את הפיתרון ההתחלתי בוצע בשלב השני החלפת יישובים בין אזורים שכנים. תוצאות שלב זה מופיעות בטבלה 9.

בטבלה 9 רואים שיפור במשך זמן הנסיעה של כל המזריעים בכל האלגוריתמים ששימשו להקצאה ראשונית – אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר שיפור של תשע שעות, אלגוריתם maximin שיפור של עשרים ואחד שעות, אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר שיפור של שמונה וחצי שעות ואלגוריתם מרכז מסה שיפור של שמונה וחצי שעות. בנוסף לשיפור במשך זמן הנסיעה של כל המזריעים שופר גם מרחק הנסיעה הכולל וממוצע משך יום העבודה של מזריע אחד. שאר הפרמטרים לא השתנו באופן מובהק. בטבלה 9 ניתן להבחין בהבדלים גדולים במשכי יום העבודה של המזריעים, הבאים לידי ביטוי בטווח משכי יום העבודה של המזריעים, ובסטיות התקן של משך יום העבודה. טווח משכי יום העבודה: אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר טווח של שבע שעות, אלגוריתם maximin טווח של ארבע וחצי שעות, אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר טווח של שש שעות ואלגוריתם מרכז מסה טווח של שעתיים וחצי שעות. סטיות התקן: אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר סטיית תקן של 1.5 שעות, אלגוריתם maximin סטיית תקן של 1.2 שעות, אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר סטיית תקן של 1.7 שעות ואלגוריתם מרכז מסה סטיית תקן של 0.6 שעות. איזון משכי יום העבודה בוצעו בשלב השלישי של תהליך תכנון העבודה בו הועברו יישובים למזריע בעל משך יום קצר ממזריעים שכנים בעלי משך יום עבודה ארוך. תוצאות שלב זה מופיעות בטבלה 10.

בטבלה 10 ניתן לראות שיפור באיזון של משך יום העבודה (טווח וסטיות תקן) ושל ממוצע הכנסות הידיים (טווח וסטיות תקן). משך יום העבודה של מזריע מורכב מזמן נסיעה בין יישובים ומשך זמן העבודה ביישוב. בגלל שמשך זמן העבודה ביישוב הוא פונקציה של מספר הכנסות הידיים איזון משך יום העבודה מאזן את ממוצע הכנסות הידיים – העברת יישוב למזריע בעל משך יום עבודה קצר מגדילה את משך זמן נסיעה ליישוב, משך זמן העבודה ביישוב ואת מספר הכנסות הידיים ביישוב. בכל האלגוריתמים שיפור האיזון בעומס העבודה בא על חשבון פונקצית המטרה, בכל אלגוריתמים זמן הנסיעה הכולל ומרחק הנסיעה הכולל גדלו.

לאחר בנית אזורי עבודה, נמצא בשלב 4 מסלול נסיעה מיטבי – שמשכו הוא הקצר ביותר, לכל מזריע. התוצאות מופיעות בטבלה 11 ומראות שיפור במשך זמן הנסיעה הכולל, וממילא בזמן העבודה הכולל בכל האלגוריתמים. מספרי הכנסות הידיים נשארו, כמובן, ללא שינוי.

טבלה 9. הקצאת יישובים למזריעים ב – 2 שלבים.

אלגוריתם מרכז מסה		אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר		אלגוריתם maxmin		אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר		מצב קיים	
2 שלבים	שלב 1	2 שלבים	שלב 1	2 שלבים	שלב 1	2 שלבים	שלב 1		
3662.4	4037.6	3492.2	3853.4	4117.6	5034	3785.1	4087.6	4408.5	מרחק נסיעה יומי של כל המזריעים (ק"מ)
74.2	83	72.1	80.6	82.6	103.4	76.4	83.5	92.2	משך זמן נסיעה של כל המזריעים ביום אחד (שעות)
6.2	6.2	7.6	7.6	7.2	7.2	7.2	7.1	8	משך יום עבודה הארוך ביותר (שעות) של מזריע אחד
3.7	2.6	1.7	1.3	2.7	3.4	0.2	0.2	4	משך יום עבודה הקצר ביותר (שעות) של מזריע אחד
5.4	5.7	5.4	5.7	5.7	6.4	5.5	5.8	6.1	המשך הממוצע של יום העבודה של מזריע אחד (שעות)
0.6	0.7	1.7	1.7	1.2	0.9	1.5	1.4	1.2	סטיית תקן של משך יום עבודה (שעות), השוואה בין המזריעים
5.9	5.9	7.3	7.2	6.7	6.9	6.7	7	7.6	רמת שירות – זמן ההגעה (שעות) של מזריע אחד לפרה האחרונה
42.4	42.5	48.9	48.8	42.9	43	43.8	44	50	ערך מקסימאלי של הממוצע היומי של הכנסות ידיים של מזריע אחד
23.4	18.9	14.5	9	19.7	16.9	2.2	2.2	25.9	ערך מינימאלי של הממוצע היומי של הכנסות ידיים של מזריע אחד
37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	ממוצעי הכנסות ידיים ביום במשך חודש אחד של מזריע אחד
4.9	6.3	11.3	11.6	5.8	6.1	10	10.7	6.1	סטיית תקן של הממוצע היומי של הכנסות ידיים של מזריע אחד

טבלה 10. הקצאת יישובים למזריעים ב - 3 שלבים.

אלגוריתם מרכז מסה		אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר		אלגוריתם maxmin		אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר		מצב קיים	
3 שלבים	2 שלבים	3 שלבים	2 שלבים	3 שלבים	2 שלבים	3 שלבים	2 שלבים		
3682.3	3662.4	3631.4	3492.2	4322.6	4117.6	3988.2	3785.1	4408.5	מרחק נסיעה יומי של כל המזריעים (ק"מ)
74.7	74.2	75.1	72.1	86.9	82.6	80.4	76.4	92.2	משך זמן נסיעה של כל המזריעים ביום אחד (שעות)
6.2	6.2	7.6	7.6	7.2	7.2	7.2	7.2	8	משך יום עבודה הארוך ביותר (שעות) של מזריע אחד
4.5	3.7	1.7	1.7	4.7	2.7	3.8	0.2	4	משך יום עבודה הקצר ביותר (שעות) של מזריע אחד
5.5	5.4	5.5	5.4	5.9	5.7	5.7	5.5	6.1	המשך הממוצע של יום העבודה של מזריע אחד (שעות)
0.5	0.6	1.4	1.7	0.8	1.2	0.9	1.5	1.2	סטיית תקן של משך יום עבודה (שעות), השוואה בין המזריעים
5.9	5.9	6.9	7.3	6.7	6.7	6.7	6.7	7.6	רמת שירות - זמן ההגעה (שעות) של מזריע אחד לפרה האחרונה
42.4	42.4	48.9	48.9	42.9	42.9	43.9	43.8	50	ערך מקסימאלי של הממוצע היומי של הכנסות ידיים של מזריע אחד
23.4	23.4	15.3	14.5	19.7	19.7	14.6	2.2	25.9	ערך מינימאלי של הממוצע היומי של הכנסות ידיים של מזריע אחד
37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	ממוצעי הכנסות ידיים ביום במשך חודש אחד של מזריע אחד
5	4.9	9.9	11.3	5.5	5.8	8.1	10	6.1	סטיית תקן של הממוצע היומי של הכנסות ידיים של מזריע אחד

טבלה 11. הקצאת יישובים למזריעים ב - 4 שלבים.

אלגוריתם מרכז מסה		אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר		אלגוריתם maxmin		אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר		מצב קיים	
4 שלבים	3 שלבים	4 שלבים	3 שלבים	4 שלבים	3 שלבים	4 שלבים	3 שלבים		
3606.7	3682.3	3527.7	3631.4	4280.8	4322.6	3845.4	3988.2	4408.5	מרחק נסיעה יומי של כל המזריעים (ק"מ)
72.4	74.7	72	75.1	84.8	86.9	75.8	80.4	92.2	משך זמן נסיעה של כל המזריעים ביום אחד (שעות)
6.2	6.2	7.6	7.6	7.2	7.2	7.2	7.2	8	משך יום עבודה הארוך ביותר (שעות) של מזריע אחד
4.4	4.5	1.7	1.7	4.7	4.7	3.8	3.8	4	משך יום עבודה הקצר ביותר (שעות) של מזריע אחד
5.4	5.5	5.4	5.5	5.8	5.9	5.5	5.7	6.1	המשך הממוצע של יום העבודה של מזריע אחד (שעות)
0.5	0.5	1.4	1.4	0.8	0.8	0.9	0.9	1.2	סטיית תקן של משך יום עבודה (שעות), השוואה בין המזריעים
5.9	5.9	6.9	6.9	6.7	6.7	6.7	6.7	7.6	רמת שירות – זמן ההגעה (שעות) של מזריע אחד לפרה האחרונה
42.4	42.4	48.9	48.9	42.9	42.9	43.9	43.9	50	ערך מקסימאלי של הממוצע היומי של הכנסות ידיים של מזריע אחד
23.4	23.4	15.3	15.3	19.7	19.7	14.6	14.6	25.9	ערך מינימאלי של הממוצע היומי של הכנסות ידיים של מזריע אחד
37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	ממוצעי הכנסות ידיים ביום במשך חודש אחד של מזריע אחד
5	5	9.9	9.9	5.5	5.5	8.1	8.1	6.1	סטיית תקן של הממוצע היומי של הכנסות ידיים של מזריע אחד

לאחר ביצוע הקצאת יישובים ב – 4 שלבים מתקבל שאלגוריתם מרכז מסה הוא האלגוריתם שמביא לרמת איזון העבודה הגבוהה ביותר – החסמים הנמוכים ביותר על מספר הכנסות הידיים ומשך יום העבודה, וכתוצאה מכך, סטיות התקן של משך יום העבודה ומספר הכנסות הידיים בין המזריעים הנמוכות ביותר. בערך פונקצית המטרה אלגוריתם מרכז מסה הוא שני בטיבו, אלגוריתם מקום מגורי המזריע הקרוב ביותר הוא בעל משך זמן נסיעה המינימאלי אבל, משך זמן הושג על חשבון חוסר איזון העבודה בין המזריעים.

הפרמטרים ששופרו באמצעות אלגוריתם מרכז מסה בהשוואה למצב הקיים :

1. משך זמן נסיעה כולל ביום של כל המזריעים הוא 72.4 שעות, שיפור של 21.4%.
2. מרחק נסיעה כולל ביום של כל המזריעים הוא 3606.7 ק"מ, שיפור של 18.1% במרחק הנסיעה שנוסעים המזריעים ביום עבודה. מרחק הנסיעה הכולל אותו עוברים המזריעים ביום עבודה אינו חלק מפונקצית המטרה. השיפור התקבל כחלק מהשיפור במשך זמן הנסיעה, מרחק הנסיעה הוא תוצאת הכפלה של זמן הנסיעה בקבוע המהירות. ולכן קיצור זמן הנסיעה מושג על ידי קיצור מרחק הנסיעה ואת העלויות הנובעות מכך.
3. ההפרש בין משך יום העבודה המקסימאלי למשך יום עבודה המינימאלי קטן מ- 4 שעות ל- 1.8 שעות. שיפור של 55%.
4. סטיית תקן של משך יום העבודה בין המזריעים קטנה ל- 0.5 שעות. שיפור של 56%.
5. ההפרש בין הממוצע היומי המקסימאלי של הכנסות ידיים לממוצע היומי המינימאלי של הכנסות ידיים קטן ל- 19 הכנסות ידיים. שיפור של 20%.
6. סטיית התקן של ממוצע הכנסות הידיים בין המזריעים קטנה ל- 5 הכנסות ידיים. שיפור של 18.5%. השיפור הושג על ידי הגבלת המספר הממוצע של הכנסות ידיים ל- 42.5 הכנסות ידיים ביום – אילוץ (5) במודל.
7. זמן הגעה לפרה האחרונה – רמת השירות הוא 5.9 שעות. שיפור של 1.7 שעות שהם 22.3 אחוז.

4.3. דיון

באמצעות אלגוריתם מרכז מסה התקבל איזון העבודה הטוב ביותר בין המזריעים גם של משך יום העבודה וגם של המספר הממוצע של הכנסות ידיים ביום. אך האיזון אינו מושלם, כפי שנתן לראות בטבלה 11 – הפרש של 1.8 שעות בין משך יום העבודה של המזריע בעל משך יום עבודה מקסימאלי לזה של המזריע בעל משך יום מינימאלי, והפרש של 19 הכנסות ידיים בין המזריע בעל ממוצע הכנסות ידיים מקסימאלי ומזריע בעל ממוצע הכנסות ידיים מינימאלי. להבנת השונות בין המזריעים ניעזר בטבלה 12 בה מפורטות תוצאות אלגוריתם maximin לפי מזריעים. הפירוט מכיל את הנתונים הבאים: משך יום עבודה, ממוצע הכנסות הידיים ביום ומרחק הנסיעה ביום עבודה, ממוינים לפי משך יום העבודה, מהקצר ביותר לארוך ביותר. משך יום עבודה מקסימאלי מותר הוא 6.2 שעות (אילוץ), משך יום עבודה מינימאלי הוא 4.8 שעות (אילוץ) וממוצע הכנסות ידיים מקסימאלי מותר הוא 42.5 (אילוץ).

טבלה 12. פירוט עבודת המזרעים המתקבל מאלגוריתם maxmin.

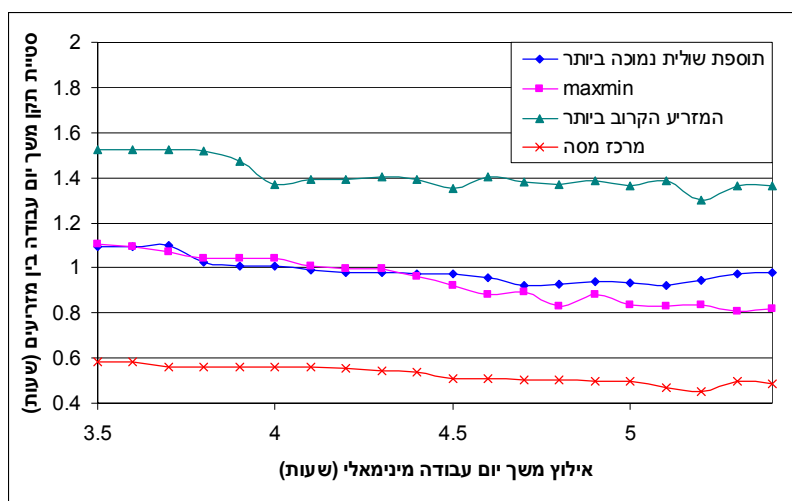
מזריע	משך יום עבודה (שעות)	זמן הגעה לפרה אחרונה (שעות)	ממוצע הכנסות ידיים ביום	מרחק נסיעה יומי (ק"מ)
1	4.4	4.1	41.3	77
2	4.5	4.2	42.2	61
3	4.8	4.6	41	92
4	4.9	4.4	34	106
5	4.9	4.6	42.1	75
6	4.9	4.6	39.3	107
7	4.9	4.4	31	137
8	4.9	4.3	38	125
9	4.9	4.6	40.1	90
10	5	4.8	37.9	63
11	5	4.4	31.9	135
12	5.2	5	36.3	105
13	5.2	4.9	42.1	73
14	5.2	5.1	37.8	87
15	5.3	4.8	41.3	109
16	5.5	4.6	36.3	154
17	5.6	5.1	37.3	142
18	5.7	5.1	42.3	123
19	5.7	4.7	34.9	174
20	5.8	5.3	39.2	150
21	5.8	5.5	42.4	95
22	5.8	5.4	39	155
23	5.8	5.4	37.9	145
24	5.8	5.1	40.7	143
25	5.9	5.8	41.6	100
26	5.9	4.6	23.4	214
27	6	4.9	38.2	196
28	6.1	4.7	23.4	225
29	6.2	5.9	36.8	149

בטבלה 12 מזריעים 1 ו-2 הם בעלי משך יום העבודה הנמוך ביותר – מתחת לאילוץ של 4.8 שעות, אבל לא ניתן להוסיף להם יישובים נוספים מפני שהוספה של יישובים תיצור מצב בו ממוצע מספר הכנסות הידיים יעבור את הרף המקסימאלי (42.5 הכנסות ידיים). מזריעים שלהם יישובים רחוקים ממקום המגורים מבצעים פחות הכנסות ידיים, פיצוי על הנסיעות הארוכות. לדוגמא: באזורים 26 ו-28 מספר הכנסות ידיים נמוך ומשך יום העבודה כמעט מקסימאלי בגלל זמן הנסיעה הארוך עקב מרחקי נסיעה של מעל 200 ק"מ ביום. לא ניתן להוסיף למזריעים אלו עוד הכנסות ידיים מיישובים נוספים בגלל אילוץ משך היום המקסימאלי המותר (6.2 שעות). למזריעים הנמצאים בתווך, יום העבודה מתחלק בצורה מאוזנת בין משך העבודה עקב הכנסות ידיים ומשך עבודה עקב זמני נסיעה. מפירוט העבודה לפי מזריעים ניתן לראות כי איזון העבודה תלוי בגיאוגרפיה של מגורי המזריעים והיישובים המקבלים שרות ובכמות העבודה ביישובים.

5. השפעת איזון העבודה על משך זמן הנסיעה הכולל

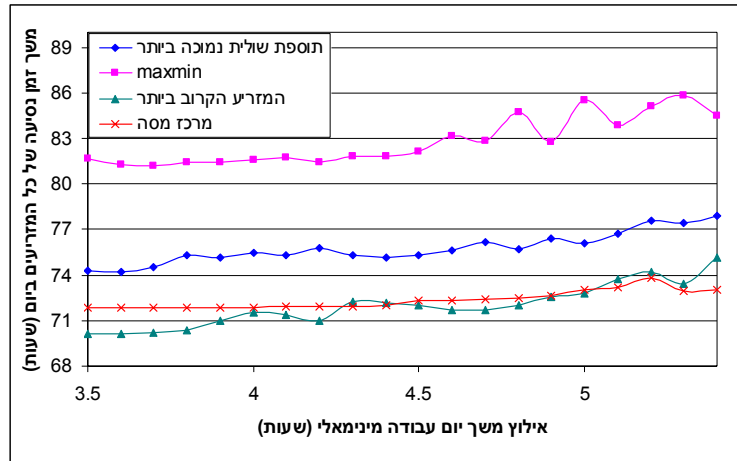
5.1. השפעת שינוי משך העבודה המינימאלי על משך זמן הנסיעה הכולל

הקצאת היישובים למזריעים מתבצעת ב- 4 שלבים. בשלב השלישי, מועברים יישובים בין מזריעים שכנים כדי לשפר את איזון העבודה. יישובים מועברים ממזריעים שמשך יום עבודה שלהם גבוה מגבול התחתון של משך יום העבודה למזריעים שמשך יום עבודתם נמוך מגבול זה. באיור 13 ניתן לראות את השפעת ערך האילוץ על איזון העבודה שנמדד לפי סטית התקן של משך יום העבודה בין המזריעים. השפעת האילוץ על המשך המינימאלי של יום העבודה נבחנה בכל האלגוריתמים להקצאה ראשונית, לכל אלגוריתם אילוץ אחר למשך יום עבודה מקסימאלי ואילוץ אחר לממוצע הכנסות הידיים מקסימאלי, כמפורט בפרק התוצאות: אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר – משך יום עבודה מקסימאלי 7.3 שעות (אילוץ), ממוצע הכנסות ידיים מקסימאלי 44 (אילוץ), אלגוריתם maxmin – משך יום עבודה מקסימאלי 7.2 שעות (אילוץ), ממוצע הכנסות ידיים מקסימאלי 43 (אילוץ), אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר – משך יום עבודה מקסימאלי 7.7 שעות (אילוץ), ממוצע הכנסות ידיים מקסימאלי 49 (אילוץ), אלגוריתם מרכז מסה – משך יום עבודה מקסימאלי 6.2 שעות (אילוץ), ממוצע הכנסות ידיים מקסימאלי 42.5 (אילוץ).



איור 13. איזון משך יום עבודה בתלות באילוץ משך יום עבודה מינימאלי.

בגרף שבאיור 13 (ראה נתונים בנספח ה) ניתן לראות את תרומתו של אלגוריתם האיזון בשלב 3 – הקטנת סטיית התקן של משך יום העבודה ככל שהחסם על המשך המינימאלי של יום העבודה עולה. לדוגמה, באלגוריתם maxmin סטית התקן יורדת מ- 1.1 כאשר משך יום העבודה יכול להיות קצר – 3.5 שעות, ל- 0.8 כאשר משך יום העבודה לא יכול להיות קצר מ- 5.5 שעות. יש לזכור כי ל- 4 האלגוריתמים להקצאה ראשונית חסמים מקסימאליים שונים – הערך הנמוך ביותר של החסם על המשך המקסימאלי של יום העבודה, שמאפשר מציאת פתרון על ידי אותו אלגוריתם. סטית התקן הנמוכה ביותר – איזון העבודה הטוב ביותר מתקבל מאלגוריתם ההקצאה הראשוני בעל החסם הנמוך ביותר על המשך המקסימאלי של יום העבודה. כפי שניתן לראות באיור 13, ההבדלים בין האלגוריתמים גדולים יותר מתרומת האיזון בשלב – 3 לכל אלגוריתם – אין חיתוך בין הקווים באיור. באיור 14 (ראה נתונים בנספח ה) מתוארת השפעת אותו אילוץ – המשך המינימאלי של יום העבודה, על משך זמן הנסיעה הכולל של כל המזריעים.



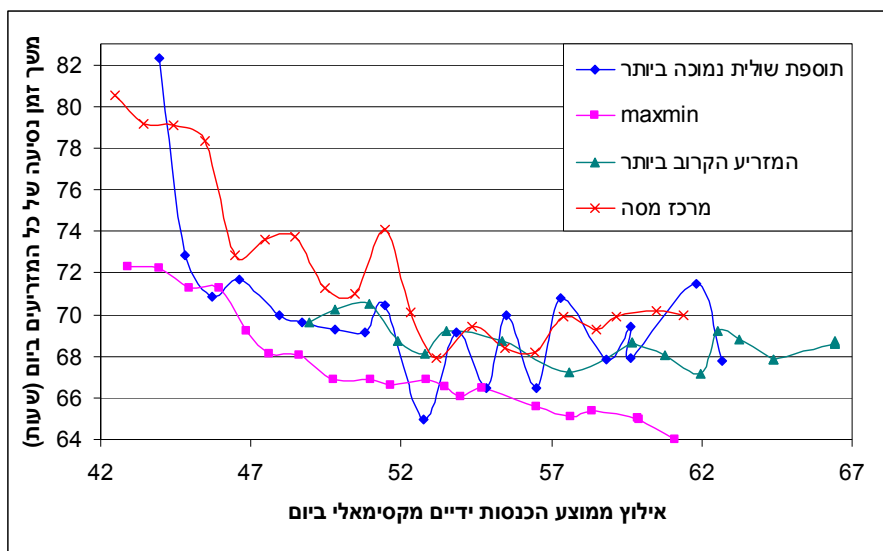
איור 14. גרף משך זמן נסיעה כולל בתלות באילוף משך יום עבודה מינימאלי.

התמונה באיור 14 הפוכה מזו של איור 13 – משך זמן הנסיעה הכולל של המזריעים עולה ככל שהחסם על המשך המינימאלי של יום העבודה עולה - איזון העבודה מושג על חשבון פונקצית המטרה – סטית התקן – באיור 13, קטנה אך זמן הנסיעה הכולל – איור 14, גדל.

כאשר ההקצאה הראשונית נעשית באלגוריתם מרכז מסה, ההשפעה של החסם על משך יום העבודה המינימאלי הכי קטנה – השינוי הנמוך ביותר בזמן הנסיעה. בשאר האלגוריתמים השינוי בזמן הנסיעה גדול יותר. ניתן לראות באיור 14 כי כשהחסם התחתון על משך יום העבודה עולה על 4.25 שעות נמחק הפער במשך הנסיעה הכולל של אלגוריתם מרכז המסה לזה של אלגוריתם השכן הקרוב, וכשהחסם התחתון עולה בעוד שעה – 5.25 שעות, אלגוריתם מרכז המסה משיג זמן נסיעה כולל קצר יותר! ההבדל בין אלגוריתם מרכז מסה ושאר האלגוריתמים האילוף על המשך המקסימאלי של יום העבודה. ככל שהחסם על המשך המקסימאלי של יום העבודה נמוך יותר מתקבל איזון עבודה טוב יותר ושוב, על חשבון פונקצית המטרה – זמן הנסיעה הכולל גדל מעט. כאשר רוצים לבצע איזון עבודה יש לבצע הקצאה ראשונית בעזרת האלגוריתם המאפשר את החסם הנמוך ביותר על המשך המקסימאלי של יום העבודה, ובהקשר זה, אלגוריתם מרכז המסה מוביל בפער של שעה ויותר על שאר האלגוריתמים, כמראה בטבלאות 8-11. נושא זה נדון עוד בסעיף הבא.

5.2. השפעת שינוי האילוצים על כמות העבודה המקסימאלית על משך זמן הנסיעה הכולל

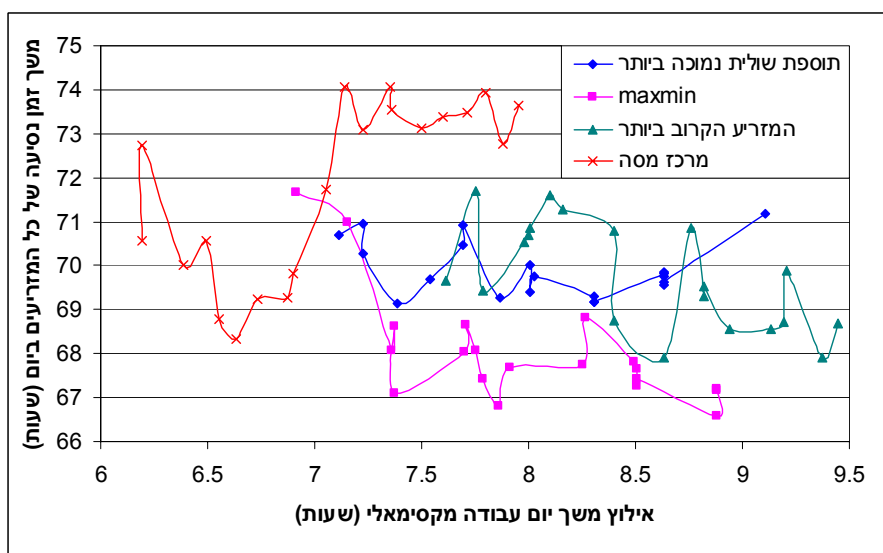
Rosenblatt and Carlson (1985) הראו כי איזון מקסימאלי של קווי ייצור אינו מבטיח מקסימום רווח, קיים Trade Off בין מספר התחנות, זמן המחזור והרווח המתקבל משילוב של גורמים אלו. בהתאם לבעיית איזון הקווים נבדקה השפעת החסמים המקסימאליים על משך יום עבודה וממוצע הכנסות ידיים על פונקצית המטרה – משך זמן נסיעה כולל של כל המזריעים. באותו אופן ניתן לבדוק את השפעת גורמים אלו על כל פונקצית רווח בעלת מרכיבי עלויות הכוללים שעות נוספות, מרחקי נסיעה, קנסות על איחורים ועוד. שחרור האילוצים נבדק ללא שלב 3 – אלגוריתם איזון משך יום עבודה בין מזריעים באמצעות אילוף מינימאלי, נבדקה רק השפעת שחרור האילוצים. באיור 15 (ראה נתונים בנספח ו) מופיע גרף של משך זמן הנסיעה הכולל של כל המזריעים כנגד האילוף של ממוצע הכנסות ידיים. כדי לאפשר את ההשוואה, האילוף של משך יום עבודה הוא 7.7 שעות – ערך בו כל האלגוריתמים להקצאה ראשונית מצליחים לייצר פיתרון התחלתי.



איור 15. גרף משך זמן נסיעה כולל תלוי באילוף ממוצע הכנסות ידיים יומי מקסימאלי.

מאיור 15 ניתן לראות שהגדלת האילוף של ממוצע הכנסות הידיים מקטין את זמן הנסיעה הכולל בכל האלגוריתמים להקצאה ראשונית. בהתאם לפונקציה רווח יתכן ולחברה יהיה כדאי כלכלית לשלם למזריע תוספת על כמות הזרעות חריגה ולהרוויח את עלויות הנסיעה ושיפור השירות אותו נותנת החברה. אך יש גבול לשיפור האפשרי – מעבר ל- 52 הכנסות ידיים בממוצע יומי למזריע הגרפים נהיים "שטוחים" – אין יותר השפעה למספר הכנסות הידיים על זמן הנסיעה. (52 הכנסות ידיים ביום הן כ- 10 יותר מהפתרון הטוב ביותר שנמצא, אך רק 2 יותר מהמצב הקיים – ראה טבלה 11).

באיור 16 (ראה נתונים בנספח ז) מתואר משך זמן הנסיעה הכולל של כל המזריעים כנגד האילוף של משך יום העבודה. שוב, לצורך ההשוואה נבחר חסם על ממוצע הכנסות הידיים של 49 ביום – ערך בו כל האלגוריתמים להקצאה הראשונית מצליחים לייצר פיתרון התחלתי.



איור 16. גרף משך זמן נסיעה כולל תלוי באילוף משך יום עבודה מקסימאלי.

מאיור 16 רואים כי אלגוריתם מרכז מסה הוא היחיד שמצליח לייצר פתרון כאשר המשך המקסימאלי של יום העבודה מוגבל ל- 6.7 שעות ופחות! כאשר מגדילים את החסם על משך יום העבודה המקסימאלי האלגוריתמים האחרים טובים יותר ואלגוריתם maxmin הוא בעל התוצאות הטובות ביותר. הקטנת

משך יום העבודה גם מקטינה את עלויות העבודה וגם מגדילה את איזון העבודה בין המזריעים. אלגוריתם מרכז המסה מאפשר הקטנה של שעה ויותר במשך יום העבודה, כ- 13%, במחיר של הוספת שעתיים – פחות מ- 1.5% לזמן הנסיעה הכולל. לאור זאת, הידרדרות הביצועים של אלגוריתם מרכז המסה בימין הגרף – משך יום עבודה מקסימאלי גדול מ-7 שעות, חסרת משמעות – השימוש בו בימי עבודה קצרים עדיף.

6. סיכום, מסקנות והצעות להמשך מחקר

מטרת המחקר הייתה פיתוח כלים לתכנון עבודת המזריעים בשרותי ההזרעה המלאכותית בישראל. לצורך זה: (1) פותח מודל לחיזוי משך העבודה של מזריע ביישוב, בעזרת רגרסיה מרובת משתנים. מודל החיזוי מחשב את משך העבודה ביישוב כפונקציה של מספר הרפתות והמספר הכולל של הכנסות הידיים ביישוב. לפיכך, **המודל אינו מושפע מעונות השנה ומסוג היישוב** – השפעתם של גורמים אלו באה לידי ביטוי על ידי שינוי מספר הרפתות ואזו מספר הפרות ביישוב. (2) נוסח מודל של אופטימיזציה מתמטית לתכנון עבודת המזריעים כך שמשך זמן הנסיעה הכולל הוא מינימאלי. המודל שייך לקבוצת המודלים של ניתוב כלי רכב (VR), אך יש לו **מרכיב חדש** – איזון עומסים, שלא נכלל עד היום בבעיות אלו. לכן, נדרש פיתוח של כלי מתאים לפתרון – לתכנון העבודה. (3) נבנתה מערכת לתכנון העבודה – פתרון המודל, ב-4 שלבים: (א) הקצאה ראשונית של יישובים למזריעים על ידי אלגוריתם מרכז מסה; (ב) שיפור משך הנסיעה על ידי העברת יישובים בין מזריעים שכנים; (ג) איזון מספר ההזרעות ומשך יום העבודה על ידי העברת יישובים בין מזריעים שכנים; ו – (ד) מציאת מסלול נסיעה מיטבי לכל מזריע בעזרת אלגוריתם גנטי.

התוצאות העיקריות שהתקבלו מתכנון יעיל של עבודת המזריעים הם: (1) הקטנת זמני הנסיעות של כל המזריעים ביום עבודה ב – 21.4%; (2) הקטנת הפרש המשכים בין יום העבודה הארוך ביותר ליום העבודה הקצר ביותר ב – 55%; (3) הקטנת ההפרש בין הממוצע היומי המקסימאלי של הכנסות ידיים לממוצע היומי המינימאלי של הכנסות ידיים ב 20%.

מסקנות המחקר הן:

1. תכנון יעיל של אזורי עבודה וחלוקתם למזריעים משפרת את השירות על ידי הגעה מהירה של מזריעים לפרות מיוחמות.
 2. יעילותם של כלי תכנון העבודה שפותחו בעבודה זאת מתבטאת בכך שלמרות ההשפעות המנוגדות של זמני הנסיעה ואיזון העבודה, הכלים שפותחו מאפשרים השגה בו זמנית של שתי המטרות – איזון תכנון אזורי מאוזנים יותר תוך הקטנת זמני הנסיעה של כל המזריעים. בולט בהקשר זה השימוש באלגוריתם מרכז המסה להקצאה ראשונית בו החסמים על משך יום עבודה המקסימאלי, וממוצע הכנסות הידיים המקסימאלי הם הנמוכים ביותר.
 3. קיים TRADEOFF בין שמירה על איזון עבודת המזריעים (ממוצע הכנסות הידיים) לעומת יום העבודה. בחלוקת עבודה בין מזריעים צריך לקחת בחשבון בנוסף לאיזון העבודה גם את העלויות הנובעות מאיזון העבודה.
 4. איזון העבודה בין מזריעים תלוי במיקום הגיאוגרפי של מגורי המזריעים, המיקום הגיאוגרפי של היישובים בהם מבצע המזריע הזרעות וכמות הכנסות הידיים בכל יישוב.
 5. סוג היישוב (מושב, קיבוץ) אינו משפיע על משך העבודה ביישוב.
- להלן מספר **כיוונים להמשך מחקר**:

1. הקמת מערכת ממוחשבת לקבלת הזמנות אוטומטיות (Call Center) ושיבוץ דינאמי של יישובים בין מזריעים על בסיס יומי, השוואת העלויות מול חלוקת עבודה על בסיס ממוצע תקופתי.
2. תכנון אזורי המתחשבים בקצב העבודה של המזריע.

3. הוספת גורמים סטוכסטיים למודל:
- הנחת המודל היא כי בכל יום מבקרים המזריעים בכל 283 היישובים. בחינת איזון העבודה בין המזריעים כאשר קיימת הסתברות p לביקור ביישוב.
 - משך זמן המעבר מיישוב ליישוב חושב על פי מרחק נסיעה ומהירות נסיעה קבועה. במחקר נוסף ניתן לבחון הקצאת יישובים כאשר משך מהירות הנסיעה היא משתנה אקראי עם תוחלת וסטית תקן. שימוש במהירות נסיעה בעלת פרמטרים הסתברותיים קרובה למציאות בה יש עומסי תנועה ומהירויות משתנות במשך היום.
4. בחינת שינוי מספר המזריעים והשפעתם על משך זמן הנסיעה הכולל.
5. בניית "אשכולות" עבודה (הקצאת יישובים לאזורי עבודה עם מספר מזריעים) ובחינת השפעת מופע הכנסות הידיים היומי על איזון העבודה.
6. בניית פונקציות מטרה שונות עם מרכיבי עלויות לחברה (שעות נוספות לעובד, עלות קיבולת כלי רכב, עלות כלי רכב, עלות העסקת עובד נוסף, קנסות על איחורי הגעת עובדים) ובחינה של חוסר איזון העבודה על פונקצית עלות של החברה.
7. בחינה של אלגוריתם מרכז מסה על בעיות נוספות של ניתוב רכבים עם מספר שונה של ערים, מבנה גיאוגרפי שונה. במחקר אלגוריתם מרכז מסה הופעל על יישובים המסודרים בצורה הדומה למלבן (ארץ ישראל), בדיקת האלגוריתם על יישובים המסודרים בצורה סימטרית (ריבוע, מעגל) ובחינת אלגוריתם להקצאה של היישובים מהמעטפת (ההיקף) לכיוון מרכז הצורה.
8. יישום הפיתרון בתחומים נוספים של בעיות ניתוב רכבים (מרכזי הפצת סחורות, סוכנים המספקים שרותים וכו').

7. ביבליוגרפיה

- Arcus A. L., 1966, COMOSOL: A Computer Method for Sequencing Operations for Assembly Lines, *International Journal of Production Research*, vol. 4, pp. 259-277.
- Baker B. M., and M. A. Ayechev, 2003, A Genetic Algorithm for the Vehicle Routing Problem, *Computers and Operations Research*, vol. 30, pp. 787 – 800.
- Chatterjee S., C. Carrera, and L. A. Lynch, 1996, Genetic Algorithms and Traveling Salesman Problems, *European Journal of Operational Research*, vol. 93, pp. 490-510.
- Choa I. M., B. Golden, and E. Wasil, 1993, A New Heuristic for the Multidepot Vehicle Routing Problem that Improves Upon Best – Known Solutions, *American Journal of Math Management Science*, vol. 13, pp. 371 – 406.
- Clarke G., and W. Wright, 1964, Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points, *Operations Research*, vol. 12, pp. 568 - 581.
- Cordeau J. F., M. Gendreau, and G. Laporte, 1997, A Tabu Search Heuristic for Periodic and Multi – Depot Vehicle Routing Problem, *Networks*, vol. 30, pp. 105 – 119.
- Darwin C., 1859, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*, John Murray.
- Gillett B., and J. Johnson, 1976, Multi – Terminal Vehicle – Dispatching Algorithm, *Omega*, vol. 4, pp. 711 – 718.
- Giosa I., I. Tansini, and I. Viera, 2002, New Assignment Algorithms for the Multi – Depot Vehicle Routing Problem, *Journal of Operations Research Society*, vol. 53, pp. 984 – 997.
- Golden B., T. Magnanti, and H. Nguyen, 1977, Implementing Vehicle Routing Algorithms, *Networks*, vol. 7, pp. 113 – 148.
- Golden B., L. Bodin, T. Doyle, and W. Stewart, 1980, Approximate Traveling Salesman Algorithms, *Operations Research*, vol. 28, pp. 694-712.
- Graey M. R., and D. S. Johnson, 1979, *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP – Completeness*, Freeman, San Francisco.
- Held M., R. M. Karp, and R. Shreshian, 1963, Assembly Line Balancing – Dynamic Programming with Precedence Constraints, *Operations Research*, vol. 11, pp. 442-459.
- Helgeson W. P., and D. P. Birnie, 1961, Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weight Technique, *Journal of Industrial Engineering*, vol. 12, pp. 394-398.
- Hillier F. S., and G. J. Lieberman, 1990, *Introduction to Mathematical Programming*, McGraw-Hill, New York.

- Holland J. M., 1975, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, the University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Kilbridge M. D., and L. Wester, 1961, A Heuristic Method of Line Balancing, *Journal of Industrial Engineering*, vol. 12, pp. 292-298.
- Kleijnen J. P. C., B. Bettonvil, and W. Van Groenendall, 1998, Validation of Trace-Driven Model: a Novel Regression Test, *Management Science*, vol. 44, no. 6, pp. 812-819.
- Koza J. K., 1992, *Genetic Programming*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Laporte G., Y. Nobert, and S. Taillefer, 1988, Solving a Family of Multi-Depot Vehicle Routing and Location-Routing Problems, *Transportation Science*, vol. 22, no.3, pp. 161-172.
- Laporte G., 1992, The Traveling Salesman Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms, *European Journal of Operational Research*, vol. 59, pp. 231-247.
- Laporte G., 1992, The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms, *European Journal of Operational Research*, vol. 59, pp. 345-358.
- Lawler E. L., J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan, and D. B. Shomoys, 1990, *The Traveling Salesman Problem*, John Wiley, New York.
- Lenstra J. K., and A. H. G. Rinnooy Kan, 1981, Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems, *Networks*, vol. 11, pp. 235 – 247.
- Lim A., and F. Wang, 2005, Multi – Depot Routing Problem: A One – Stage Approach, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 2, pp. 397-402.
- Montgomery D. C., 1997, *Design and Analysis of Experiments*, Fourth Edition, John Wiley&Sons, New York.
- Nahmias S., 2001, *Production and Operations Analysis*, Fourth Edition, McGraw-Hill.
- Raft O., 1982, A Modular Algorithms for an Extended Vehicle Scheduling Problem, *European Journal of Operational Research*, vol. 11, pp. 67 – 76.
- Renaud J., G. Laporte, and F. F. Boctor, 1996, A Tabu Search Heuristic for the Multi – Depot Vehicle Routing Problem, *Computers & Operations Research*, vol. 3, pp. 229 – 235.
- Rosenblatt M. J., and R. C. Carlson, 1985, Designing a Production Line to Maximize Profit, *IIE Transactions*, vol. 17, no. 2, pp. 117-121.
- Rosenkrantz D., R. Stearns, and P. Lewis, 1974, Approximate Algorithms for the Traveling Salesman Problem, *Proceeding of the 15th Annual IEEE Symposium of Switching and Automata Theory*, pp. 33-42.

Russell S., and P. Norvig, 2003, Artificial Intelligence a Modern Approach, Prentice Hall, New Jersey.

S. R. Thangavelu S. R., and C. M. Shetty, 1971, Assembly Line Balancing by Zero One Integer Programming, IIE Transactions, vol. 3, pp. 61-68.

Tillman F., 1969, The Multiple Terminal Delivery Problem with Probabilistic Demands, Transportation Science, vol. 3, pp. 192 – 204.

Toth P., and D. Vigo, 2002, The Vehicle Routing Problem, Society for Industrial and Applied Mathematics, 3600 University City Science Center, Philadelphia.

Wu T. H., C. Low, and J. W. Bai, 2002, Heuristic Solutions to Multi-Depot Location Routing Problems, Computers & Operations Research, vol. 29, pp. 1393-1415.

איזנברג מ. מ., 2006, SPSS בדרך הקלה, הוצאת לומדון.

זמיר ש., ר.ב. מרום, 1993, מבוא לסטטיסטיקה לתלמידי מדעי החברה – א, כרך ראשון סטטיסטיקה תיאורית, יחידות 1-5, האוניברסיטה הפתוחה.

נספח ב – אזורי עבודה – מאי 2007

מזריע - 143

מקום מגורים	דפנה
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	דפנה
	כפר_גלעדי
	בית_הלל
	עמיר
	רפת_צפון_הגולן
	אלוני_הבשן
	קשת
	קדמת_צבי
	איילת_השחר
	כפר_בלום
	גינוסר

מזריע - 139

מקום מגורים	אלי_עד
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	נוב
	אבני_איתן
	אלי_עד
	גשור
	יונתן
	כנף
	נטור
	רמת_מגשימים
	כפר_חרוב

מזריע - 146

מקום מגורים	אפיקים
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	אפיקים
	בית זרע
	דגניה_א'
	דגניה_ב'
	אשדות_יעקב_מאוחד
	עין_גב
	רמות
	גבעת_יואב
	נאות_גולן
	מיצר
	כינרת_קבוצה
	שער_הגולן

מזריע - 154

שער_הגולן	מקום מגורים
ירדנה	יישובים המקבלים שרותי הזרעה
נווה_איתן	
מעוז_חיים	
שדה_אליהו	
עין_הנציי"ב	
שלוחות	
מסילות	
תל_יוסף	
עין_חרוד_מאוחד	
רשפים	
חפצי_בה	
בית_אלפא	
בית_השיטה	
כינרת_מושבה	
נווה_אור	

מזריע - 141

יבנאל	מקום מגורים
יבנאל	יישובים המקבלים שרותי הזרעה
שרונה	
שדמות_דבורה	
עין_דור	
גזית	
כפר_קיש	
כדורי	
שדה_אילן	
אילניה	
הזורעים	
מורן	

מזריע - 156

אילניה	מקום מגורים
רמת_צבי	יישובים המקבלים שרותי הזרעה
עין_חרוד_איחוד	
כפר_יחזקאל	
מרחביה_מושב	
בלפוריה	
מזרע	
גיניגר	

מזריע - 157

שדות_ים	מקום מגורים
יוקנעם	יישובים המקבלים שרותי הזרעה
בית_שערים	
נהלל	
נהלל_בה"ס_חקלאי	
רמת_דוד	
יפעת	
גבת	
שריד	
כפר_ברוך	
תל_עדשים	

מזריע - 117

כפר_ראש_הנקרה	מקום מגורים
כפר_ראש_הנקרה	יישובים המקבלים שרותי הזרעה
אילון	
סער	
רגבה	
בצת	
בוסתן_הגליל	
תובל	
אחיהוד	

מזריע - 127

אחיהוד	מקום מגורים
עין_המפרץ	יישובים המקבלים שרותי הזרעה
בית_העמק	
עמקה	
אושה	
רמת_יוחנן	
לוחמי_הגיטאות	
כפר_מסריק	
יסעור	

מזריע - 144

מצפה_אבי"ב	מקום מגורים
חנתון	יישובים המקבלים שרותי הזרעה
אלון_הגליל	
מצפה	
ארבל	
כפר_זיתים	
כפר_חיטים	
לביא	
בית_רימון	
הרדוף	
כפר_ביאליק	
אפק	

מזריע - 129

מקום מגורים	כפר_חסידים
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	כפר_חסידים
	כפר_חסידים_בית_הספר
	יגור
	שער_העמקים
	ציפורי
	כפר_יהושע
	אלוני_אבא
	בית_לחם_הגלילית

מזריע - 125

מקום מגורים	עפולה
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	היוגב
	הזורע
	מדרך_עוז
	גבע
	כפר_הנוער_ניר_העמק

מזריע - 132

מקום מגורים	מאיר_שפיה
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	גלעד
	עין_השופט
	רמת_השופט
	מאיר_שפיה
	רמות_מנשה
	מעגן_מיכאל
	בית_חנניה
	רגבים
	כפר_גליקסין
	הבונים
	ניר_עציון
	כפר_גלים
	עין_איילה

מזריע - 135

מקום מגורים	חדרה
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	שדות_ים
	גבעת_חיים_מאוחד
	גבעת_חיים_איחוד
	המעפיל
	גן_יאשיה
	אומץ
	מאור
	מענית
	גן_שמואל
	עין_עירון
	עין_שמר
	מצר
	פרדס_חנה_כרכור

מזריע - 119

מקום מגורים	נתניה
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	כפר_מונש
	כפר_הרא"ה
	עין_החורש
	העוגן
	כפר_ויתקין
	נורדיה

מזריע - 128

מקום מגורים	חופית
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	בית_יצחק_שער_חפר
	כפר_ידידיה
	שפיים
	הכפר_הירוק
	כפר_הס
	רמת_הכובש
	שער_אפרים
	ניצני_עוז
	בארותיים
	תנובות

מזריע - 166

מקום מגורים	גן_נר
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	אביטל
	מיטב
	פרזון
	דבורה
	יזרעאל
	מולדת
	מעלה_גלבע
	מירב
	שדמות_מחולה

מזריע - 201

מקום מגורים	להבים
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	פטיש
	פדויים
	שומריה
	מצדות_יהודה_בית_יתיר
	מעון

מזריע - 205

מקום מגורים	פתח_תקווה
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	חורשים
	ירחיב
	כפר_טרומן
	מצליח
	אחיסמך
	מבוא_חורון
	צרעה
	נתיב_הל"ה
	ראש_צורים
	מגדל_עוז

מזריע - 224

מקום מגורים	גדרה
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	ניר_ישראל
	עזריקם
	תימורים
	משואות_יצחק
	נגבה
	ניר_גלים
	יבנה
	כנות
	חפץ_חיים
	בצרון

מזריע - 210

מקום מגורים	רחובות
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	תלמי_יחיאל
	כפר_אחים
	כפר_ורבורג
	משען
	ברכיה
	גברעם
	ארז
	רבדים
	כפר_מנחם
	יסודות

מזריע - 213

מקום מגורים	רחובות
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	גן_שלמה_קבוצת_שילר
	בית_אלעזרי
	קדרון
	כפר_אביב
	בניה
	בן_זכאי
	בית_גמליאל
	נצר_סרני
	נחלת_יהודה
	בית_דגן_ - מכון_ולקני
	מקווה_ישראל
	כפר_חב"ד

מזריע - 216

מקום מגורים	גדרה
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	חצרים
	גילת
	אשל_הנשיא_בי"ס_אזור
	שובל
	משמר_הנגב
	בית_קמה
	דבירה
	פעמי_תש"ז
	דורות
	אור_הנר
	יד_מרדכי

מזריע - 217

מקום מגורים	אביגדור
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	זיקים
	כרמיה
	עלומים
	מפלסים
	חולית
	ניר_יצחק
	גבולות
	מגן
	נירים
	עין_השלושה
	כיסופים
	נחל_עוז
	סעד
	גיאה

מזריע - 223

מקום מגורים	גדרה
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	שפיר
	אביגדור
	עין_צורים
	ניר_בנים
	קוממיות
	מנוחה
	עוזה
	שלוה
	גת
	גלאון
	לכיש

מזריע - 202

מקום מגורים	גדרה
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	טללים
	חוות_שחפים
	רביבים
	צאלים
	אורים
	בטחה
	יכיני
	גבים

מזריע - 227

מקום מגורים	אשדוד
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	ניצנים
	גבעתי
	שתולים
	אורות
	באר_טוביה
	קטיף_באר_טוביה
	כפר_סילבר

מזריע - 225

מקום מגורים	באר טוביה
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	אלמוג
	קליה
	מעלה_החמישה
	בן_שמן
	גנתון
	גזר
	משמר_איילון
	כפר שמואל
	עזריה
	בית_חלקיה
	בני_ראם
	ינון

מזריע - 160

מקום מגורים	אלישיב
יישובים המקבלים שרותי הזרעה	בורגתה
	נחשונים
	גבעת כוח
	בארות יצחק
	נחלים
	גבעת השלושה
	אלישמע
	אייל
	שדה_יעקב
	משמר העמק

נספח ג – כמות העבודה ביישובים

שם יישוב	ממוצע מספר הכנסות ידיים ביום	ממוצע מספר רפתות ביום	ממוצע משך עבודה צפוי ביום (דקות)
מקווה_ישראל	0.81	0.44	3.36
לכיש	0.56	0.41	2.42
יבנאל	2.30	1.00	10.68
אילניה	0.59	0.41	2.52
כינרת_קבוצה	4.37	0.96	16.44
מצפה	1.93	1.30	11.25
דגניה_א'	1.96	0.78	8.50
כינרת_מושבה	0.22	0.15	0.03
אור_הנר	2.63	0.89	11.03
גן_שמואל	3.96	0.81	14.46
נחלת_יהודה	0.70	0.30	2.23
כפר_גלעדי	2.93	0.96	12.29
איילת_השחר	2.81	0.74	10.75
דגניה_ב'	4.37	1.22	17.87
נהלל	7.00	4.26	42.13
נהלל_בה"ס_חקלאי	0.37	0.26	1.07
עין_חרוד_מאוחד	3.30	0.85	12.74
תל_יוסף	3.70	0.85	13.91
כפר_יחזקאל	7.89	5.59	52.02
גבע	2.26	0.81	9.56
עין_חרוד_איחוד	2.15	0.67	8.42
חפצי_בה	2.00	0.78	8.61
גיניגר	2.11	0.78	8.93
בלפוריה	1.19	0.70	5.86
בית_אלפא	1.85	0.59	7.16
יגור	5.11	1.00	18.78
מרחביה_מושב	2.63	1.78	15.92
מאיר_שפיה	1.04	0.63	5.02
תל_עדשים	5.78	2.30	27.82
מזרע	6.04	1.59	24.70
כפר_סילבר	0.93	0.52	4.09
כפר_חסידים	6.19	1.74	25.94
שריד	2.26	0.74	9.15
משמר_העמק	3.11	0.85	12.21
כפר_ברוך	1.00	0.52	4.30
גבת	1.96	0.81	8.70
יפעת	7.00	1.56	27.26
רמת_דוד	4.07	0.89	15.18
עין_שמר	2.85	0.70	10.65
כפר_יהושע	12.15	7.59	75.27
שדה_יעקב	5.74	3.00	31.59
בית_זרע	3.00	0.89	12.09
גן_שלמה_קבוצת_שילר	3.41	0.89	13.27
דבורה	1.33	0.67	6.08
באר_טוביה	21.67	11.33	123.22

שם יישוב	ממוצע מספר הכנסות ידיים ביום	ממוצע מספר רפתות ביום	ממוצע משך עבודה צפוי ביום (דקות)
תימורים	5.37	0.89	18.91
עין_החורש	3.07	0.85	12.10
גבעת_חיים_מאוחד	6.52	0.93	22.42
אפיקים	4.96	0.93	17.94
רמת_יוחנן	4.70	0.96	17.40
רמת_הכובש	2.04	0.81	8.92
כפר_הס	0.85	0.44	3.47
אשדות_יעקב_חאוחד	5.00	1.00	18.46
כפר_ויתקין	17.81	9.67	102.98
העוגן	6.04	0.96	21.24
כפר_הרא"ה	4.78	2.41	25.56
כפר_ביאליק	2.26	1.44	13.02
עין_עירון	0.70	0.44	3.05
כפר_ידידיה	3.26	1.37	15.49
בצרון	2.44	1.52	13.96
שער_העמקים	3.15	0.93	12.72
יוקנעם	3.74	2.15	21.15
בית_השיטה	2.37	0.89	10.28
בית_שערים	4.26	2.81	26.31
הזורע	4.96	0.89	17.74
כפר_חיטים	3.74	0.96	14.63
גינוסר	2.63	0.89	11.03
שער_הגולן	2.44	0.89	10.50
מולדת	6.85	0.93	23.38
עין_השופט	3.44	0.89	13.37
מעוז_חיים	2.30	0.89	10.07
עין_גב	2.41	0.81	9.98
כפר_מנחם	3.93	0.89	14.76
אושה	2.48	0.78	9.99
מעלה_החמישה	2.07	0.74	8.62
עין_המפרץ	12.00	1.00	38.59
שרונה	5.93	2.96	31.92
אילון	5.67	0.89	19.76
נווה_איתן	2.70	1.00	11.85
כפר_מסריק	3.26	0.81	12.43
מסילות	2.78	0.78	10.84
דפנה	3.78	0.89	14.33
שדה_אליהו	3.22	0.85	12.53
שדמות_דבורה	4.44	2.89	27.25
הזורעים	1.41	0.67	6.29
כפר_גליקסון	5.56	0.96	19.85
אפק	1.56	0.70	6.92
נגבה	4.52	0.93	16.66
עמיר	1.85	0.70	7.77
כפר_ורבורג	11.81	7.00	71.06
בית_הלל	4.96	2.67	27.52
בית_יצחק_שער_חפר	6.44	3.48	36.26

שם יישוב	ממוצע מספר הכנסות ידיים ביום	ממוצע מספר רפתות ביום	ממוצע משך עבודה צפוי ביום (דקות)
שדות_ים	2.22	0.96	10.26
יבנה	4.19	0.89	15.50
רמת_השופט	1.89	0.70	7.88
דורות	4.22	0.96	16.02
רמת_צבי	11.41	7.37	71.92
גת	4.22	0.96	16.02
גברעם	3.37	0.93	13.36
מענית	3.07	0.85	12.10
גבולות	10.33	0.96	33.59
רביבים	7.96	1.00	26.98
חורשים	3.96	0.93	15.07
כפר_בלום	3.37	0.85	12.96
יד_מרדכי	3.63	0.85	13.70
ניצנים	2.44	1.11	11.72
חפץ_חיים	4.22	0.89	15.61
גלעד	2.93	0.89	11.88
גזר	2.07	0.78	8.82
כדורי	0.48	0.30	1.59
המעפיל	6.78	1.52	26.42
עין_הנצי"ב	4.52	0.89	16.46
כפר_מונש	1.70	0.85	8.16
כפר_קיש	1.22	0.56	5.15
רגבה	6.63	0.96	22.94
גלאון	1.96	0.81	8.70
שובל	6.67	0.96	23.05
חצרים	3.59	0.81	13.39
ניר_יצחק	2.11	0.63	8.11
אורים	2.15	0.96	10.05
צאלים	3.30	0.89	12.95
סעד	2.30	0.89	10.07
גבים	1.74	0.70	7.45
כפר_גלים	0.93	0.52	4.09
אלוני_אבא	2.70	0.78	10.63
בית_לחם_הגלילית	2.11	1.19	11.17
נצר_סרני	1.00	0.56	4.51
עין_דור	3.59	0.96	14.21
רשפים	2.30	0.85	9.87
שלוחות	3.44	0.89	13.37
יסודות	2.15	0.81	9.24
רגבים	6.67	0.96	23.05
רמות_מנשה	3.15	0.78	11.91
נורדיה	0.11	0.07	0.00
נחלים	2.15	1.11	10.87
בארות_יצחק	2.37	0.85	10.08
יזרעאל	2.74	0.81	10.94
סער	3.74	0.89	14.22
גזית	2.85	0.89	11.67

שם יישוב	ממוצע מספר הכנסות ידיים ביום	ממוצע מספר רפתות ביום	ממוצע משך עבודה צפוי ביום (דקות)
ניר_בנים	5.96	3.81	36.71
בוסתן_הגליל	1.74	1.11	9.69
בית_אלעזרי	5.70	2.93	31.07
רבדים	3.78	0.93	14.53
צרעה	11.52	1.00	37.20
בית_גמליאל	1.04	0.52	4.41
בית_העמק	3.78	0.89	14.33
יסעור	5.30	0.96	19.11
כפר_ראש_הנקרה	2.89	0.78	11.16
זיקים	3.33	0.89	13.05
לביא	2.52	0.70	9.69
בני_ראם	0.81	0.48	3.57
בצת	0.19	0.19	0.13
נווה_אור	4.59	0.96	17.08
לוחמי_הגיטאות	8.70	0.96	28.91
בית_קמה	4.56	1.15	17.99
נירים	2.04	0.81	8.92
ציפורי	3.48	1.74	18.16
קדרון	1.67	0.56	6.43
משואות_יצחק	5.33	0.93	19.01
עין_צורים	2.48	0.67	9.38
מצר	2.04	0.70	8.31
שער_אפרים	0.96	0.44	3.79
מפלסים	3.81	0.89	14.44
משמר_איילון	1.19	0.48	4.63
כפר_טרומן	0.63	0.41	2.63
הבוניס	2.74	0.78	10.74
עין_השלושה	4.07	0.89	15.18
אומץ	7.74	3.63	40.80
היוגב	7.81	4.74	47.13
בניה	8.00	3.81	42.57
עין_איילה	5.26	1.93	24.30
כפר_אחים	1.15	0.78	6.16
שפיר	2.96	1.52	15.45
מעגן_מיכאל	2.33	0.85	9.97
כפר_חב"ד	0.22	0.07	0.00
בארותיים	5.41	2.48	27.78
בורגתה	1.04	0.44	4.00
ניר_ישראל	2.63	1.52	14.49
שפיים	6.44	0.96	22.41
ארבל	2.07	1.37	12.08
נחשונים	3.74	0.78	13.61
גיאה	1.33	0.81	6.89
עמקה	9.74	5.93	59.18
עזריה	5.41	1.78	23.91
ארז	2.07	0.74	8.62
אייל	2.85	0.85	11.46

שם יישוב	ממוצע מספר הכנסות ידיים ביום	ממוצע מספר רפתות ביום	ממוצע משך עבודה צפוי ביום (דקות)
ירחיב	0.37	0.26	1.07
נר_גלים	1.37	0.52	5.37
שדה_אילן	7.63	4.59	45.78
תלמי_יחיאל	1.19	0.81	6.47
גן_יאשיה	2.00	0.74	8.40
גילת	9.85	4.48	51.56
כפר_שמואל	3.78	1.70	18.81
ברכיה	2.52	1.07	11.73
פטיש	23.11	11.37	127.58
פדויים	13.30	5.37	66.35
מצליח	2.04	0.63	7.90
בן_זכאי	1.30	0.56	5.36
בטחה	9.04	5.30	53.70
שתולים	1.56	1.07	8.96
קוממיות	0.59	0.41	2.52
כרמיה	2.93	0.93	12.08
נר_עציון	5.48	0.93	19.43
אחיהוד	10.11	6.48	63.30
כפר_זיתים	2.33	1.67	14.45
משען	4.07	2.22	22.52
גבעתי	2.67	1.33	13.58
בית_חנניה	0.11	0.07	0.00
גבעת_כ"ח	1.15	0.56	4.93
אחיסמך	18.96	8.81	101.60
יכיני	8.67	4.93	50.59
עזריקם	4.33	2.89	26.93
אביגדור	12.22	6.00	66.73
עוזה	2.04	1.33	11.77
כיסופים	1.81	0.70	7.67
אלישמע	0.48	0.19	0.98
נחל_עוז	2.59	0.81	10.51
דבירה	2.37	0.78	9.67
ניצני_עוז	6.07	2.89	31.93
כפר_אביב	1.44	0.70	6.60
גינתון	1.59	0.67	6.82
גבעת_השלושה	3.26	0.81	12.43
שלוה	2.04	0.74	8.51
כפר_חסידיים_בית_הספר	1.37	0.48	5.17
בן_שמון	0.93	0.52	4.09
מעלה_גלבע	2.52	0.81	10.30
עלומים	2.00	0.81	8.81
בית_רימון	6.89	0.89	23.28
מורן	2.30	0.85	9.87
תובל	5.44	0.93	19.33
טללים	3.37	0.89	13.16
אלון_הגליל	1.81	1.04	9.50
חולית	5.37	0.96	19.32

שם יישוב	ממוצע מספר הכנסות ידיים ביום	ממוצע מספר רפתות ביום	ממוצע משך עבודה צפוי ביום (דקות)
הרדוף	1.19	0.56	5.04
חנתון	2.22	0.85	9.65
שומריה	1.93	0.74	8.19
מירב	7.59	1.56	28.97
תנובות	1.15	0.67	5.55
כנות	1.00	0.33	3.29
ינון	4.15	2.26	22.93
אורות	4.52	2.30	24.20
גבעת חיים_איחוד	3.96	0.93	15.07
אשל_הנשיא_בי"ס_אזור	0.48	0.26	1.39
ירדנה	0.78	0.44	3.26
מדרך_עוז	16.15	8.89	93.91
מנוחה	1.07	0.74	5.74
בית_חלקיה	1.93	1.15	10.43
אביטל	4.37	2.67	25.81
פרזון	11.93	7.44	73.82
מיטב	3.59	2.07	20.32
מאור	1.67	0.93	8.46
פעמי_תשי"ז	3.81	1.74	19.12
מצדות_יהודה_בית_יתיר	1.74	0.67	7.25
מעון	3.74	0.81	13.82
אלמוג	1.59	0.81	7.64
מגדל_עוז	2.63	0.78	10.42
שדמות_מחולה	5.26	0.93	18.80
קליה	2.81	0.78	10.95
ראש_צורים	2.04	0.78	8.71
מבוא_חורון	4.22	0.85	15.41
אורטל_רפת_צפון_הגולן	7.19	0.93	24.33
אלי_עד	5.93	3.85	36.81
כפר_חרוב	3.63	0.89	13.90
קשת	6.44	0.89	22.00
יונתן	8.11	0.93	27.00
אבני_איתן	3.74	2.07	20.74
נטור	1.26	0.63	5.66
אלוני_הבשן	4.81	0.93	17.52
מיצר	4.78	0.96	17.61
גבעת_יואב	7.22	4.85	46.03
גשור	1.22	0.52	4.94
קדמת_צבי	1.04	0.81	6.04
כנף	2.56	1.63	14.89
נוב	6.07	3.56	35.60
נאות_גולן	2.22	1.19	11.49
רמת_מגשימים	4.52	0.93	16.66
רמות	0.96	0.81	5.83
חוות_שחפים	0.81	0.44	3.36
קטיף_באר_טוביה	4.37	0.93	16.24
כפר_הנוער_ניר_העמק	0.37	0.22	0.86

שם יישוב	ממוצע מספר הכנסות ידיים ביום	ממוצע מספר רפתות ביום	ממוצע משך עבודה צפוי ביום (דקות)
פרדס_חנה_כרכור	0.93	0.52	4.09
הכפר_הירוק	0.93	0.56	4.30
בית_דגן_-_מכון_ולקני	3.11	0.85	12.21

נספח ד – פירוט עבודת המזריעים במצב הקיים

סך משך יום (עבודה דקות)	אורך מסלול נסיעה (ק"מ)	מספר רפתות	מספר הכנסות ידיים	מזריע
482	242	11.3	41.8	143
337	120	15.0	37.0	139
343	106	15.3	43.7	146
389	176	11.7	40.1	154
342	137	16.1	32.7	141
280	85	18.5	33.4	156
321	130	16.3	37.4	157
339	135	12.2	36.4	117
341	104	12.3	50.0	127
338	157	11.5	28.5	144
278	75	15.4	36.3	129
269	77	15.6	31.6	125
431	203	10.9	41.5	132
330	109	13.7	44.4	135
237	53	14.8	33.5	119
325	126	14.1	33.6	128
395	145	17.9	46.2	166
428	175	19.0	43.8	201
471	225	14.4	46.4	205
337	145	11.3	35.4	224
379	157	16.2	36.0	210
273	105	12.2	28.4	213
461	246	12.9	41.8	216
475	233	11.0	44.0	217
351	140	17.4	36.1	223
437	242	15.1	37.0	202
288	73	18.6	38.1	227
452	262	12.1	28.3	225
403	226	9.4	25.9	160

נספח ה – השינוי באילוץ משך יום מינימאלי

אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר:

סטיית תקן הכנסות ידיים	ממוצע הכנסות ידיים	פלט - מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	פלט-מספר הכנסות ידיים מינימאלי	אילוץ מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	סך מרחק הנסיעה (ק"מ)	סך משך זמן הנסיעה (שעות)	סטיית תקן משך יום העבודה (שעות)	ממוצע משך יום העבודה (שעות)	פלט - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	פלט - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)
8.32	37.57	43.81	14.56	44	3763	74.27	1.09	5.44	7.21	3.49	7.3	3.5
8.32	37.57	43.81	14.56	44	3761	74.24	1.09	5.44	7.21	3.49	7.3	3.6
8.30	37.57	43.81	14.56	44	3777	74.48	1.10	5.44	7.21	3.55	7.3	3.7
7.96	37.57	43.81	14.56	44	3817	75.30	1.02	5.47	7.21	3.82	7.3	3.8
7.95	37.57	43.81	14.56	44	3794	75.16	1.01	5.47	7.21	3.99	7.3	3.9
7.95	37.57	43.81	14.56	44	3825	75.49	1.01	5.48	7.21	3.99	7.3	4.0
7.95	37.57	43.81	14.56	44	3803	75.30	0.99	5.47	7.21	3.97	7.3	4.1
7.95	37.57	43.81	14.56	44	3821	75.80	0.98	5.49	7.21	3.97	7.3	4.2
8.13	37.57	43.81	14.56	44	3812	75.33	0.98	5.47	7.21	4.24	7.3	4.3
7.83	37.57	43.81	14.56	44	3793	75.15	0.97	5.47	7.21	4.32	7.3	4.4
7.84	37.57	43.81	14.56	44	3811	75.28	0.97	5.47	7.21	4.30	7.3	4.5
7.97	37.57	43.93	14.56	44	3832	75.64	0.95	5.48	7.21	4.29	7.3	4.6
8.17	37.57	43.93	14.56	44	3853	76.17	0.92	5.50	7.21	4.02	7.3	4.7
8.05	37.57	43.93	14.56	44	3844	75.71	0.93	5.49	7.21	3.82	7.3	4.8
7.90	37.57	43.93	14.56	44	3866	76.41	0.94	5.51	7.21	3.69	7.3	4.9
7.96	37.57	43.81	14.56	44	3866	76.10	0.93	5.50	7.21	3.73	7.3	5.0
8.09	37.57	43.96	14.56	44	3889	76.70	0.92	5.52	7.21	3.56	7.3	5.1
8.27	37.57	43.96	14.56	44	3928	77.57	0.95	5.55	7.21	3.14	7.3	5.2
8.83	37.57	43.96	9.56	44	3929	77.44	0.97	5.55	7.21	2.67	7.3	5.3
8.73	37.57	43.96	10.37	44	3944	77.86	0.98	5.56	7.21	2.64	7.3	5.4

אלגוריתם maxmin:

סטיית תקן הכנסות ידיים	ממוצע הכנסות ידיים	פלט - מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	פלט-מספר הכנסות ידיים מינימאלי	אילוץ מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	סך מרחק הנסיעה (ק"מ)	סך משך זמן הנסיעה (שעות)	סטיית תקן משך יום העבודה (שעות)	ממוצע משך יום העבודה (שעות)	פלט - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	פלט - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)
5.24	37.57	42.93	19.70	43	4101	1.11	81.69	5.69	7.15	3.59	7.2	3.5
5.15	37.57	42.93	19.70	43	4108	1.09	81.24	5.68	7.15	3.63	7.2	3.6
5.41	37.57	42.93	19.70	43	4109	1.07	81.23	5.68	7.15	3.63	7.2	3.7
5.38	37.57	42.93	19.70	43	4122	1.04	81.42	5.68	7.15	3.96	7.2	3.8
5.38	37.57	42.93	19.70	43	4121	1.04	81.40	5.68	7.15	3.96	7.2	3.9
5.44	37.57	42.93	19.70	43	4108	1.04	81.62	5.69	7.15	4.05	7.2	4
5.47	37.57	42.93	19.70	43	4115	1.01	81.77	5.70	7.15	4.08	7.2	4.1
5.81	37.57	42.93	19.70	43	4121	1.00	81.44	5.68	7.15	4.26	7.2	4.2
5.81	37.57	42.93	19.70	43	4116	1.00	81.83	5.70	7.15	4.26	7.2	4.3
5.57	37.57	42.93	19.70	43	4143	0.96	81.86	5.70	7.15	4.33	7.2	4.4
5.35	37.57	42.93	19.70	43	4150	0.92	82.16	5.71	7.15	4.47	7.2	4.5
5.40	37.57	42.93	19.70	43	4207	0.88	83.15	5.74	7.15	4.53	7.2	4.6
5.42	37.57	42.93	19.70	43	4198	0.89	82.85	5.73	7.15	4.51	7.2	4.7
5.50	37.57	42.93	19.70	43	4281	0.83	84.77	5.80	7.15	4.65	7.2	4.8
5.48	37.57	42.93	19.70	43	4186	0.88	82.80	5.73	7.15	4.51	7.2	4.9
5.42	37.57	42.96	19.70	43	4321	0.84	85.50	5.82	7.15	4.46	7.2	5
5.55	37.57	42.96	19.70	43	4245	0.83	83.84	5.77	7.15	4.46	7.2	5.1
5.42	37.57	42.96	19.70	43	4300	0.84	85.13	5.81	7.15	4.46	7.2	5.2
5.80	37.57	42.96	19.70	43	4332	0.81	85.84	5.84	7.15	4.46	7.2	5.3
5.31	37.57	42.96	19.70	43	4274	0.82	84.49	5.79	7.15	4.46	7.2	5.4

אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר :

סטיית תקן הכנסות ידיים	ממוצע הכנסות ידיים	פלט - מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	פלט-מספר הכנסות ידיים מינימאלי	אילוץ מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	סך מרחק הנסיעה (ק"מ)	סך משך זמן הנסיעה (שעות)	סטיית תקן משך יום העבודה (שעות)	ממוצע משך יום העבודה (שעות)	פלט - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	פלט - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)
9.72	37.57	48.93	21.30	49	3435	1.53	70.15	5.29	7.61	2.43	7.7	3.5
9.72	37.57	48.93	21.30	49	3435	1.53	70.15	5.29	7.61	2.43	7.7	3.6
9.74	37.57	48.93	21.30	49	3436	1.53	70.18	5.30	7.61	2.43	7.7	3.7
9.81	37.57	48.93	21.30	49	3446	1.52	70.35	5.30	7.61	2.43	7.7	3.8
9.32	37.57	48.93	21.30	49	3468	1.47	70.99	5.32	7.61	2.36	7.7	3.9
9.03	37.57	48.93	22.22	49	3500	1.37	71.55	5.34	7.61	2.36	7.7	4
9.02	37.57	48.93	20.63	49	3479	1.39	71.34	5.34	7.61	2.36	7.7	4.1
9.11	37.57	48.93	19.44	49	3474	1.39	70.96	5.32	7.61	2.36	7.7	4.2
9.53	37.57	48.93	15.33	49	3510	1.40	72.25	5.37	7.61	2.30	7.7	4.3
9.40	37.57	48.93	15.33	49	3536	1.39	72.14	5.36	7.61	2.30	7.7	4.4
9.62	37.57	48.93	16.63	49	3513	1.35	72.03	5.36	7.61	2.14	7.7	4.5
9.96	37.57	48.93	14.52	49	3498	1.40	71.73	5.35	7.61	1.84	7.7	4.6
9.95	37.57	48.93	14.52	49	3487	1.38	71.66	5.35	7.61	1.84	7.7	4.7
9.91	37.57	48.93	15.33	49	3528	1.37	71.98	5.36	7.61	1.74	7.7	4.8
10.11	37.57	48.93	14.63	49	3546	1.38	72.55	5.38	7.61	1.74	7.7	4.9
9.88	37.57	48.74	14.63	49	3573	1.36	72.78	5.39	7.61	1.74	7.7	5
9.82	37.57	48.56	14.52	49	3598	1.39	73.75	5.42	7.61	1.74	7.7	5.1
9.59	37.57	48.59	17.81	49	3602	1.30	74.24	5.44	7.61	1.74	7.7	5.2
9.92	37.57	48.96	14.52	49	3586	1.36	73.42	5.41	7.61	1.74	7.7	5.3
9.95	37.57	48.96	14.52	49	3664	1.36	75.12	5.47	7.61	1.74	7.7	5.4

אלגוריתם מרכז מסה :

סטיית תקן הכנסות ידיים	ממוצע הכנסות ידיים	פלט - מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	פלט-מספר הכנסות ידיים מינימאלי	אילוץ מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	סך מרחק הנסיעה (ק"מ)	סך משך זמן הנסיעה (שעות)	סטיית תקן משך יום העבודה (שעות)	ממוצע משך יום העבודה (שעות)	פלט - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	פלט - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)
4.89	37.57	42.37	23.37	42.5	3583	0.58	71.83	5.35	6.18	3.66	6.2	3.5
4.89	37.57	42.37	23.37	42.5	3582	0.58	71.88	5.35	6.18	3.66	6.2	3.6
4.77	37.57	42.37	23.37	42.5	3581	0.56	71.84	5.35	6.18	4.09	6.2	3.7
4.77	37.57	42.37	23.37	42.5	3582	0.56	71.86	5.35	6.18	4.09	6.2	3.8
4.77	37.57	42.37	23.37	42.5	3583	0.56	71.86	5.35	6.18	4.09	6.2	3.9
4.77	37.57	42.37	23.37	42.5	3579	0.56	71.86	5.35	6.18	4.09	6.2	4
4.77	37.57	42.37	23.37	42.5	3577	0.56	71.90	5.36	6.18	4.09	6.2	4.1
4.83	37.57	42.37	23.37	42.5	3585	0.55	71.90	5.36	6.18	4.22	6.2	4.2
4.88	37.57	42.37	23.37	42.5	3583	0.54	71.95	5.36	6.18	4.37	6.2	4.3
4.89	37.57	42.37	23.37	42.5	3587	0.54	72.03	5.36	6.18	4.39	6.2	4.4
4.87	37.57	42.37	23.37	42.5	3604	0.51	72.32	5.37	6.18	4.40	6.2	4.5
4.87	37.57	42.37	23.37	42.5	3604	0.51	72.32	5.37	6.18	4.40	6.2	4.6
4.96	37.57	42.37	23.37	42.5	3609	0.50	72.40	5.37	6.18	4.40	6.2	4.7
4.96	37.57	42.37	23.37	42.5	3607	0.50	72.47	5.37	6.18	4.40	6.2	4.8
4.96	37.57	42.37	23.37	42.5	3619	0.50	72.61	5.38	6.18	4.40	6.2	4.9
5.03	37.57	42.37	23.37	42.5	3637	0.50	73.04	5.39	6.18	4.40	6.2	5
4.99	37.57	42.37	23.37	42.5	3641	0.47	73.17	5.40	6.07	4.37	6.2	5.1
4.96	37.57	42.37	23.37	42.5	3680	0.45	73.85	5.42	6.07	4.37	6.2	5.2
4.98	37.57	42.37	23.37	42.5	3632	0.50	72.93	5.39	6.07	4.18	6.2	5.3
4.99	37.57	42.37	23.37	42.5	3645	0.49	73.06	5.40	6.07	4.18	6.2	5.4

נספח ו – השינוי באילוץ ממוצע הכנסות הידיים

אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר :

סטיית תקן הכנסות ידיים	ממוצע הכנסות ידיים	פלט - מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	פלט-מספר הכנסות ידיים מינימאלי	אילוץ מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	סך מרחק הנסיעה (ק"מ)	סך משך זמן הנסיעה (שעות)	סטיית תקן משך יום העבודה (שעות)	ממוצע משך יום העבודה (שעות)	פלט - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	פלט - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)
9.21	37.57	43.93	5.59	44	4105	1.19	82.30	5.71	7.52	3.63	7.7	4.8
10.06	37.57	44.81	2.22	45	3623	1.51	72.82	5.39	7.67	0.17	7.7	4.8
9.07	37.57	45.70	2.22	46	3548	1.42	70.87	5.32	7.69	0.17	7.7	4.8
12.21	37.57	46.63	2.22	47	3617	1.51	71.66	5.35	7.68	0.17	7.7	4.8
14.36	37.57	47.93	0.00	48	3476	1.96	69.98	5.29	7.62	0.00	7.7	4.8
14.46	37.57	48.70	0.00	49	3470	2.11	69.65	5.28	7.54	0.00	7.7	4.8
14.80	37.57	49.78	0.00	50	3449	2.06	69.31	5.27	7.67	0.00	7.7	4.8
15.89	37.57	50.78	0.00	51	3422	2.18	69.14	5.26	7.47	0.00	7.7	4.8
15.52	37.57	51.44	0.00	52	3493	2.10	70.46	5.31	7.46	0.00	7.7	4.8
17.43	37.57	52.74	0.00	53	3200	2.28	64.97	5.12	7.32	0.00	7.7	4.8
16.48	37.57	53.81	0.00	54	3400	2.23	69.15	5.26	7.53	0.00	7.7	4.8
18.50	37.57	54.85	0.00	55	3288	2.36	66.50	5.17	7.69	0.00	7.7	4.8
17.40	37.57	55.52	0.00	56	3406	2.45	69.97	5.29	7.67	0.00	7.7	4.8
19.35	37.57	56.48	0.00	57	3289	2.43	66.46	5.17	7.54	0.00	7.7	4.8
19.71	37.57	57.30	0.00	58	3479	2.46	70.78	5.32	7.54	0.00	7.7	4.8
18.66	37.57	58.81	0.00	59	3321	2.39	67.87	5.22	7.68	0.00	7.7	4.8
19.51	37.57	59.63	0.00	60	3424	2.53	69.45	5.27	7.55	0.00	7.7	4.8
19.19	37.57	59.63	0.00	61	3322	2.46	67.94	5.22	7.67	0.00	7.7	4.8
20.99	37.57	61.81	0.00	62	3549	2.60	71.45	5.34	7.54	0.00	7.7	4.8
20.76	37.57	62.67	0.00	63	3367	2.60	67.80	5.21	7.59	0.00	7.7	4.8

אלגוריתם maxmin :

סטיית תקן הכנסות ידיים	ממוצע הכנסות ידיים	פלט - מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	פלט-מספר הכנסות ידיים מינימאלי	אילוץ מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	סך מרחק הנסיעה (ק"מ)	סך משך זמן הנסיעה (שעות)	סטיית תקן משך יום העבודה (שעות)	ממוצע משך יום העבודה (שעות)	פלט - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	פלט - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)
7.72	37.57	42.93	14.52	43	3519	1.52	72.30	5.37	7.67	1.84	7.7	4.8
7.55	37.57	43.93	14.52	44	3543	1.51	72.21	5.37	7.63	1.84	7.7	4.8
8.20	37.57	44.93	14.52	45	3501	1.55	71.27	5.33	7.47	1.84	7.7	4.8
9.87	37.57	45.96	14.52	46	3488	1.73	71.29	5.33	7.45	1.84	7.7	4.8
9.87	37.57	46.85	14.52	47	3376	1.67	69.24	5.26	7.67	1.74	7.7	4.8
10.55	37.57	47.59	14.52	48	3324	1.74	68.10	5.22	7.63	1.74	7.7	4.8
11.49	37.57	48.63	14.52	49	3313	1.80	68.05	5.22	7.70	1.74	7.7	4.8
12.65	37.57	49.74	13.48	50	3235	1.84	66.87	5.18	7.47	1.74	7.7	4.8
12.90	37.57	51.00	8.15	51	3247	1.94	66.91	5.18	7.63	1.23	7.7	4.8
13.50	37.57	51.63	5.70	52	3234	2.05	66.60	5.17	7.67	0.69	7.7	4.8
13.96	37.57	52.85	5.70	53	3235	2.09	66.89	5.18	7.67	0.69	7.7	4.8
14.07	37.57	53.44	5.70	54	3228	2.08	66.55	5.17	7.67	0.69	7.7	4.8
13.64	37.57	54.00	5.70	56	3199	2.00	66.06	5.15	7.63	0.69	7.7	4.8
14.65	37.57	54.67	5.70	55	3204	2.09	66.50	5.17	7.63	0.69	7.7	4.8
15.16	37.57	56.48	5.70	57	3164	2.14	65.58	5.14	7.63	0.69	7.7	4.8
16.09	37.57	57.63	5.70	58	3134	2.10	65.09	5.12	7.63	0.69	7.7	4.8
17.54	37.57	58.33	1.67	59	3167	2.32	65.40	5.13	7.67	0.18	7.7	4.8
17.32	37.57	59.89	1.67	60	3139	2.29	65.01	5.12	7.67	0.18	7.7	4.8
16.65	37.57	59.93	5.70	61	3127	2.13	64.95	5.12	7.63	0.69	7.7	4.8
17.29	37.57	61.11	5.70	62	3081	2.22	64.02	5.08	7.60	0.69	7.7	4.8

אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר :

סטיית תקן הכנסות ידיים	ממוצע הכנסות ידיים	פלט - מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	פלט-מספר הכנסות ידיים מינימאלי	אילוץ מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	סך מרחק הנסיעה (ק"מ)	סך משך זמן הנסיעה (שעות)	סטיית תקן משך יום העבודה (שעות)	ממוצע משך יום העבודה (שעות)	פלט - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	פלט - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)
11.27	37.57	48.93	14.52	49	3409	1.65	69.63	5.28	7.61	1.74	7.7	4.8
12.69	37.57	49.78	8.56	50.1	3437	1.58	70.22	5.30	7.61	1.74	7.7	4.8
13.56	37.57	50.93	5.22	51	3486	1.69	70.52	5.31	7.30	1.22	7.7	4.8
14.06	37.57	51.89	2.30	52	3358	1.93	68.71	5.25	7.38	0.18	7.7	4.8
14.45	37.57	52.78	4.59	53	3343	1.93	68.11	5.22	7.56	0.54	7.7	4.8
13.30	37.57	53.52	14.52	54.3	3407	1.64	69.23	5.26	7.56	1.74	7.7	4.8
16.11	37.57	55.37	2.30	57	3389	2.06	68.75	5.25	7.63	0.18	7.7	4.8
15.48	37.57	57.59	14.52	58.1	3324	1.83	67.23	5.19	7.69	1.74	7.7	4.8
17.84	37.57	59.70	4.59	59.8	3454	2.07	68.67	5.24	7.45	0.54	7.7	4.8
17.84	37.57	59.70	4.59	60	3455	2.07	68.64	5.24	7.45	0.54	7.7	4.8
19.39	37.57	60.78	4.59	61	3395	2.17	68.06	5.22	7.45	0.54	7.7	4.8
18.83	37.57	61.96	4.04	62	3358	2.14	67.18	5.19	7.45	0.89	7.7	4.8
18.55	37.57	62.56	2.30	63	3449	2.10	69.19	5.26	7.68	0.18	7.7	4.8
18.62	37.57	63.22	2.30	64	3432	2.10	68.77	5.25	7.68	0.18	7.7	4.8
18.35	37.57	64.41	7.96	65	3388	2.06	67.83	5.21	7.68	0.93	7.7	4.8
18.35	37.57	64.41	7.96	66	3388	2.06	67.83	5.21	7.68	0.93	7.7	4.8
18.50	37.57	66.41	7.96	67	3440	2.06	68.62	5.24	7.68	0.93	7.7	4.8
18.50	37.57	66.41	7.96	68	3440	2.06	68.62	5.24	7.68	0.93	7.7	4.8
18.50	37.57	66.41	7.96	69	3437	2.06	68.66	5.24	7.68	0.93	7.7	4.8
18.50	37.57	66.41	7.96	70	3435	2.06	68.71	5.25	7.68	0.93	7.7	4.8

אלגוריתם מרכז מסה :

סטיית תקן הכנסות ידיים	ממוצע הכנסות ידיים	פלט - מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	פלט-מספר הכנסות ידיים מינימאלי	אילוץ מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	סך מרחק הנסיעה (ק"מ)	סך משך זמן הנסיעה (שעות)	סטיית תקן משך יום העבודה (שעות)	ממוצע משך יום העבודה (שעות)	פלט - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	פלט - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)	אילוץ יום עבודה מקסימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)
10.53	37.57	42.48	2.22	42.5	3978	1.73	80.52	5.65	7.54	0.17	7.7	4.8
9.42	37.57	43.41	11.74	43.5	3852	1.73	79.13	5.60	7.57	1.42	7.7	4.8
13.06	37.57	44.44	0.00	44.5	3808	2.23	79.09	5.60	7.60	0.00	7.7	4.8
13.67	37.57	45.48	0.00	45.5	3758	2.29	78.34	5.58	7.64	0.00	7.7	4.8
13.04	37.57	46.48	3.96	46.5	3487	2.12	72.87	5.39	7.68	0.39	7.7	4.8
15.67	37.57	47.44	0.00	47.5	3531	2.39	73.62	5.41	7.64	0.00	7.7	4.8
16.45	37.57	48.48	0.00	48.5	3576	2.38	73.77	5.42	7.61	0.00	7.7	4.8
16.59	37.57	49.48	0.00	49.5	3446	2.39	71.25	5.33	7.37	0.00	7.7	4.8
17.45	37.57	50.48	0.00	50.5	3450	2.54	71.01	5.32	7.50	0.00	7.7	4.8
17.85	37.57	51.48	0.00	51.5	3595	2.61	74.08	5.43	7.50	0.00	7.7	4.8
19.96	37.57	52.33	0.00	52.5	3357	2.87	70.14	5.29	7.57	0.00	7.7	4.8
19.54	37.57	53.19	0.00	53.5	3264	2.70	67.93	5.22	7.68	0.00	7.7	4.8
20.26	37.57	54.37	0.00	54.5	3415	2.84	69.40	5.27	7.70	0.00	7.7	4.8
22.02	37.57	55.44	0.00	55.5	3327	3.00	68.40	5.23	7.53	0.00	7.7	4.8
20.60	37.57	56.44	0.00	56.5	3300	2.87	68.20	5.23	7.53	0.00	7.7	4.8
20.79	37.57	57.41	0.00	57.5	3383	2.91	69.87	5.29	7.53	0.00	7.7	4.8
21.62	37.57	58.48	0.00	58.5	3353	2.99	69.28	5.26	7.65	0.00	7.7	4.8
22.70	37.57	59.15	0.00	59.5	3377	3.12	69.88	5.29	7.59	0.00	7.7	4.8
22.58	37.57	60.48	0.00	60.5	3415	3.11	70.18	5.30	7.53	0.00	7.7	4.8
22.44	37.57	61.37	0.00	61.5	3392	3.12	69.97	5.29	7.56	0.00	7.7	4.8

נספח ז – השינוי באילוץ משך יום מקסימאלי

אלגוריתם תוספת שולית נמוכה ביותר :

סטיית תקן הכנסות ידיים	ממוצע הכנסות ידיים	פלט - מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	פלט-מספר הכנסות ידיים מינימאלי	אילוץ מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	סך מרחק הנסיעה (ק"מ)	סך משך זמן הנסיעה (שעות)	סטיית תקן משך יום העבודה (שעות)	ממוצע משך יום העבודה (שעות)	פלט - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	פלט - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)
13.28	37.57	48.44	2.22	49	3607	1.51	70.69	5.31	7.11	0.17	7.3	4.8
13.72	37.57	48.93	2.22	49	3599	1.71	70.96	5.32	7.23	0.17	7.4	4.8
14.43	37.57	48.93	0.00	49	3497	1.93	70.29	5.30	7.23	0.00	7.5	4.8
14.89	37.57	48.70	0.00	49	3452	2.03	69.15	5.26	7.39	0.00	7.6	4.8
14.46	37.57	48.70	0.00	49	3470	2.11	69.68	5.28	7.54	0.00	7.7	4.8
14.54	37.57	48.70	0.00	49	3505	2.13	70.46	5.31	7.69	0.00	7.8	4.8
15.57	37.57	48.70	0.00	49	3512	2.28	70.92	5.32	7.69	0.00	7.9	4.8
15.95	37.57	48.96	0.00	49	3408	2.42	69.28	5.26	7.87	0.00	8	4.8
15.83	37.57	48.81	0.00	49	3421	2.44	70.01	5.29	8.00	0.00	8.1	4.8
15.85	37.57	48.70	0.00	49	3424	2.45	69.41	5.27	8.00	0.00	8.2	4.8
15.89	37.57	48.70	0.00	49	3440	2.47	69.76	5.28	8.03	0.00	8.3	4.8
15.98	37.57	48.93	0.00	49	3425	2.47	69.30	5.27	8.31	0.00	8.4	4.8
15.98	37.57	48.93	0.00	49	3427	2.47	69.19	5.26	8.31	0.00	8.5	4.8
15.98	37.57	48.93	0.00	49	3427	2.47	69.19	5.26	8.31	0.00	8.6	4.8
15.72	37.57	48.70	0.00	49	3419	2.51	69.83	5.28	8.63	0.00	8.7	4.8
16.09	37.57	48.96	0.00	49	3437	2.50	69.84	5.28	8.63	0.00	8.8	4.8
16.09	37.57	48.96	0.00	49	3432	2.50	69.76	5.28	8.63	0.00	8.9	4.8
16.09	37.57	48.96	0.00	49	3411	2.50	69.56	5.27	8.63	0.00	9	4.8
16.09	37.57	48.96	0.00	49	3427	2.50	69.62	5.28	8.63	0.00	9.1	4.8
16.10	37.57	48.78	0.00	49	3526	2.57	71.18	5.33	9.11	0.00	9.2	4.8

אלגוריתם maxmin :

סטיית תקן הכנסות ידיים	ממוצע הכנסות ידיים	פלט - מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	פלט-מספר הכנסות ידיים מינימאלי	אילוץ מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	סך מרחק הנסיעה (ק"מ)	סך משך זמן הנסיעה (שעות)	סטיית תקן משך יום העבודה (שעות)	ממוצע משך יום העבודה (שעות)	פלט - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	פלט - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)
11.60	37.57	48.89	14.52	49	3507	1.60	71.00	5.32	7.15	1.74	7.2	4.8
11.39	37.57	48.93	14.52	49	3523	1.58	71.66	5.35	6.91	1.74	7.3	4.8
11.59	37.57	48.89	14.52	49	3345	1.77	68.61	5.24	7.37	1.74	7.4	4.8
10.48	37.57	48.78	14.52	49	3327	1.68	68.08	5.22	7.36	1.74	7.5	4.8
10.80	37.57	48.85	14.52	49	3272	1.66	67.10	5.19	7.37	1.74	7.6	4.8
11.49	37.57	48.63	14.52	49	3313	1.80	68.05	5.22	7.70	1.74	7.7	4.8
11.39	37.57	48.85	14.52	49	3257	1.82	67.41	5.20	7.79	1.74	7.8	4.8
10.61	37.57	48.63	14.52	49	3343	1.72	68.65	5.24	7.71	1.74	7.9	4.8
11.14	37.57	48.63	14.52	49	3300	1.84	67.67	5.21	7.92	1.74	8	4.8
11.08	37.57	48.70	14.52	49	3302	1.79	68.09	5.22	7.75	1.74	8.1	4.8
12.91	37.57	48.70	6.48	49	3278	2.00	66.81	5.18	7.86	1.07	8.2	4.8
13.91	37.57	48.89	5.70	49	3348	2.25	68.83	5.25	8.27	0.69	8.3	4.8
13.92	37.57	48.89	5.70	49	3287	2.21	67.74	5.21	8.25	0.69	8.4	4.8
12.70	37.57	48.85	5.70	49	3266	2.07	67.83	5.21	8.50	0.69	8.5	4.8
11.84	37.57	48.89	14.52	49	3279	1.95	67.64	5.21	8.50	1.74	8.6	4.8
12.87	37.57	48.89	5.70	49	3246	2.12	67.25	5.19	8.50	0.69	8.7	4.8
12.96	37.57	48.96	7.37	49	3258	2.11	67.42	5.20	8.50	0.94	8.8	4.8
13.07	37.57	48.96	5.70	49	3214	2.09	66.57	5.17	8.88	0.69	8.9	4.8
13.07	37.57	48.96	5.70	49	3246	2.13	67.21	5.19	8.88	0.69	9	4.8
13.07	37.57	48.96	5.70	49	3246	2.12	67.17	5.19	8.88	0.69	9.1	4.8

אלגוריתם המזריע הקרוב ביותר :

סטיית תקן הכנסות ידיים	ממוצע הכנסות ידיים	פלט - מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	פלט-מספר הכנסות ידיים מינימאלי	אילוץ מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	סך מרחק הנסיעה (ק"מ)	סך משך זמן הנסיעה (שעות)	סטיית תקן משך יום העבודה (שעות)	ממוצע משך יום העבודה (שעות)	פלט - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	פלט - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)
11.27	37.57	48.93	14.52	49	3409	1.65	69.65	5.28	7.61	1.74	7.7	4.8
11.95	37.57	48.93	14.52	49	3512	1.70	71.69	5.35	7.75	1.74	7.8	4.8
10.87	37.57	48.93	14.52	49	3421	1.63	69.45	5.27	7.79	1.74	7.9	4.8
10.94	37.57	48.93	14.52	49	3482	1.73	70.54	5.31	7.98	1.74	8	4.8
11.40	37.57	48.85	14.52	49	3428	1.75	70.68	5.31	8.00	1.74	8.1	4.8
11.34	37.57	48.85	14.52	49	3453	1.75	71.29	5.33	8.16	1.74	8.2	4.8
11.03	37.57	48.70	14.52	49	3467	1.75	71.62	5.35	8.10	1.74	8.3	4.8
10.74	37.57	48.70	14.52	49	3472	1.71	70.85	5.32	8.01	1.74	8.4	4.8
10.90	37.57	48.70	14.52	49	3469	1.73	70.80	5.32	8.40	1.74	8.5	4.8
12.29	37.57	48.85	7.74	49	3373	1.72	68.74	5.25	8.40	1.74	8.6	4.8
12.99	37.57	48.85	7.74	49	3314	1.78	67.90	5.22	8.63	1.74	8.7	4.8
13.37	37.57	48.85	7.74	49	3471	1.89	70.85	5.32	8.76	1.74	8.8	4.8
13.35	37.57	48.85	7.74	49	3382	1.96	69.30	5.27	8.82	1.74	8.9	4.8
13.35	37.57	48.85	7.74	49	3387	1.97	69.54	5.27	8.82	1.74	9	4.8
13.47	37.57	48.85	7.19	49	3332	1.96	68.57	5.24	8.94	1.74	9.1	4.8
12.99	37.57	48.85	7.74	49	3376	1.83	68.71	5.25	9.19	1.74	9.2	4.8
13.53	37.57	48.85	6.67	49	3342	1.96	68.56	5.24	9.13	1.74	9.3	4.8
13.36	37.57	48.85	7.74	49	3404	1.97	69.90	5.29	9.21	1.74	9.4	4.8
13.54	37.57	48.85	6.67	49	3353	1.96	68.70	5.24	9.44	1.74	9.5	4.8
12.16	37.57	48.85	7.74	49	3299	2.13	67.90	5.22	9.37	1.74	9.6	4.8

אלגוריתם מרכז מסה :

סטיית תקן הכנסות ידיים	ממוצע הכנסות ידיים	פלט - מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	פלט-מספר הכנסות ידיים מינימאלי	אילוץ מספר הכנסות ידיים מקסימאלי	סך מרחק הנסיעה (ק"מ)	סך משך זמן הנסיעה (שעות)	סטיית תקן משך יום העבודה (שעות)	ממוצע משך יום העבודה (שעות)	פלט - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	פלט - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מקסימאלי (שעות)	אילוץ - משך יום עבודה מינימאלי (שעות)
11.07	37.57	48.89	5.26	49	3601	1.26	72.73	5.38	6.19	0.69	6.2	4.8
11.78	37.57	48.37	3.96	49	3485	1.46	70.58	5.31	6.19	0.39	6.3	4.8
11.00	37.57	48.37	3.96	49	3429	1.53	70.02	5.29	6.39	0.39	6.4	4.8
11.80	37.57	48.59	3.96	49	3463	1.68	70.57	5.31	6.49	0.39	6.5	4.8
12.58	37.57	48.59	0.00	49	3383	1.68	68.77	5.25	6.55	0.00	6.6	4.8
15.50	37.57	48.93	0.00	49	3336	2.08	68.32	5.23	6.63	0.00	6.7	4.8
14.56	37.57	48.78	0.00	49	3373	1.94	69.25	5.26	6.73	0.00	6.8	4.8
14.45	37.57	48.96	0.00	49	3384	2.01	69.27	5.26	6.87	0.00	6.9	4.8
15.53	37.57	48.89	0.00	49	3366	2.21	69.82	5.28	6.90	0.00	7	4.8
14.71	37.57	48.81	0.00	49	3459	2.16	71.72	5.35	7.05	0.00	7.1	4.8
14.91	37.57	48.67	0.00	49	3628	2.20	74.06	5.43	7.14	0.00	7.2	4.8
14.87	37.57	48.85	5.26	49	3629	2.17	73.08	5.40	7.23	0.47	7.3	4.8
14.94	37.57	48.85	0.00	49	3564	2.19	73.53	5.41	7.36	0.00	7.4	4.8
14.87	37.57	48.96	0.00	49	3606	2.12	74.05	5.43	7.35	0.00	7.5	4.8
16.25	37.57	48.96	0.00	49	3585	2.32	73.13	5.40	7.50	0.00	7.6	4.8
16.06	37.57	48.89	2.30	49	3568	2.31	73.38	5.41	7.60	0.18	7.7	4.8
15.74	37.57	48.96	2.30	49	3530	2.38	73.47	5.41	7.71	0.17	7.8	4.8
16.56	37.57	48.96	0.00	49	3495	2.50	72.76	5.38	7.88	0.00	7.9	4.8
17.63	37.57	48.85	0.00	49	3539	2.66	73.92	5.42	7.80	0.00	8	4.8
16.40	37.57	48.96	0.00	49	3524	2.50	73.65	5.42	7.95	0.00	8.1	4.8

נספח ח – מדריך למשתמש

work areas builder הינה תוכנה לבנית אזורי עבודה בחברת שיאון. התוכנה נבנתה לצורך מחקר/ תזה לקבלת תואר שני MS.c במחלקה להנדסת תעשייה וניהול - אוניברסיטת בן גוריון בנגב.

התוכנה נבנתה על ידי :

בועז שניידר – המחלקה להנדסת תעשייה וניהול – אוניברסיטת בן גוריון בנגב.

מנחים אקדמים :

דרי' משה אבן חיים – המחלקה להנדסת תעשייה וניהול – אוניברסיטת בן גוריון בנגב.

דרי' אילן הלחמי – המכון להנדסה חקלאית – מינהל המחקר החקלאי.

מנחים מקצועיים :

דני גלעד – חברת שיאון.

רועי גרנות – חברת שיאון.

תוכנת work area builder מכילה את הקבצים הבאים :

- קובץ התקנת סביבת עבודה JAVA במחשב.

- o jdk-6u1-windows-i586-p.exe

- קיבצי הרצה.

- o work_area_builder.jar

- o work_area_builder_with_genetic_algorithm.jar

- o start.bat

- o start_with_genetic_algorithm.bat

- קיבצי קלט גרסת *.txt.

- o parameters.txt

- o distance_table.txt

- o velocity_table.txt

- o site_data.txt

- o workers_living_site.txt

- o data_of_enter_hand_in_sites.txt

- קיבצי קלט גרסת *.xls.

- o parameters.xls

- o distance_table.xls

- o velocity_table.xls

- o site_data.xls

- o workers_living_site.xls

- קיבצי פלט

- o output_summary.txt

תוכנת work area builder נבנתה בשפת JAVA. את התוכנה ניתן להריץ בכל מחשב בו מותקנת סביבת עבודה של JAVA. אם לא מותקנת סביבת עבודה יש לבצע התקנה במחשב של הקובץ jdk-6u1-windows-i586-p.exe המצורף לתוכנה.

הרצת התוכנה וקבלת אזורי עבודה – לפני הרצה וקבלת אזורים חדשים יש לעדכן את משתני הקלט בקבצים (יפורט בהמשך) להריץ את הקובץ start_with_genetic_algorithm.bat / start.bat וקבלת הנתונים בקבצי הפלט (יפורט בהמשך).

קיימים שני גירסאות ריצה start.bat (גירסה רזה ובעלת זמן ריצה נמוך) ו start_with_genetic_algorithm.bat (גירסה הכוללת אלגוריתם משופר למציאת מסלול נסיעה בעל משך הזמן הקצר ביותר בכל אזור, זמן הריצה הוא ארוך 30 דקות בקירוב). מומלץ לבחור את החלופה הטובה ביותר על ידי ריצה של הגירסה הקלה (start.bat). לאחר הריצה של הגירסה הקלה, הרצת הגירסה המלאה עם אותם משתני קלט (start_with_genetic_algorithm.bat) וקבלת אזורי עבודה עם מסלולי נסיעה הקצרים ביותר (הגרסה המלאה אינה משנה את אזורי העבודה, רק את סדר הנסיעה בתוך האזור).

משתני הקלט של התוכנה מעודכנים באמצעות קבצי טקסט (סיומת *.txt). לכל קובץ טקסט מוצמד קובץ אקסל בעל אותו שם, באמצעות אותו קובץ ניתן לעדכן בקלות את משתני הקלט. בסיום העדכון, העתקת המידע לקובץ הטקסט. פירוט המידע בקבצי הקלט:

1. parameters – קובץ עידכון הפרמטרים לריצות שונות. השדות השונים:

- מספר אזורי עבודה – שינוי מספרי אזורי העבודה הרצוי. שינוי של פרמטר זה מחייב עידכון של מגורי העובדים בקובץ workers_living_site (מספר אזורי העבודה צריך להיות זהה לשמות העובדים ומקום מגוריהם).
- ממוצע מספר הכנסות ימים יומי מקסימאלי למזריע - ממוצע הכנסות ידיים יומי מקסימאלי ביישוב אותו יבצע מזריע ביום.
- ממוצע מספר הכנסות ידיים יומי מינימאלי למזריע- ממוצע הכנסות ידיים יומי מינימאלי ביישוב אותו יבצע מזריע ביום (פונקציה זו אינה פעילה בגירסה זו של התוכנה).
- ממוצע משך יום עבודה מקסימאלי למזריע – משך יום העבודה הכולל את משך העבודה ביישוב ומשך זמן הנסיעה (שעות).
- ממוצע משך יום עבודה מינימאלי למזריע – משך יום העבודה הכולל את משך העבודה ביישוב ומשך זמן הנסיעה (שעות).
- מספר ימי עבודה בתקופה – התוכנה מחשבת את הממוצע היומי של מספר הכנסות הידיים ביישוב ומספר הרפתות. בשדה זה יש לעדכן את מספר ימי העבודה של הנתונים המוכנסים לתוכנה בקובץ data_of_enter_hand_in_sites.
- חותך הרגרסיה.
- מקדם משך זמן לרפת (דקות).
- מקדם משך זמן לפרה (דקות).
- מהירות נסיעה מהבית ליישוב הראשון ומהיישוב האחרון חזרה הביתה (קמ"ש).

לאחר עידכון השדות יש להעתיק את עמודה B לקובץ טקסט parameters.txt משורה 2 עד שורה 11.

2. distance_table – טבלת מרחקים בין כל היישובים.

הערכים בטבלת המרחקים הם במטרים. בסיום עידכון הערכים יש לפתוח שולחן עבודה חדש ולהעתיק אליו את הערכים (בלבד) של חצי הטבלה הראשונה. בשורה מתחת לטבלה בתא הראשון לכתוב "****", ולהעתיק מתחת את ערכי הטבלה השנייה. לסמן את כל שולחן העבודה ולהעתיק אותו לקובץ distance_table.txt.

3. velocity_table – טבלת מהירויות הם בקמ"ש.

הערכים בטבלת המהירויות הם בקמ"ש. בסיום עידכון הערכים יש לפתוח שולחן עבודה חדש ולהעתיק אליו את הערכים (בלבד) של חצי הטבלה הראשונה. בשורה מתחת לטבלה בתא הראשון לכתוב "****", ולהעתיק מתחת את ערכי הטבלה השנייה. לסמן את כל שולחן העבודה ולהעתיק אותו לקובץ velocity_table.txt.

4. workers_living_site – שם המזריע ומקום המגורים.

כמספר המזריעים יש לרשום בעמודה B את קוד המזריע, שורה מתחת את קוד היישוב בו גר המזריע, שורה מתחת אחוז העבודה המותר למזריע (ערך 1 שווה למאה אחוז), שורה מתחת "****". לאחר עידכון כל המזריעים יש להעתיק את עמודת B לקובץ workers_living_site.txt.

5. site_data – מידע על היישובים. השדות השונים:

○ קוד יישוב – קוד היישוב התקבל מבסיס הנתונים של התאחדות מגדלי הבקר. הקוד הוא חלק השלם של המספר מהתאחדות מגדלי הבקר חלקי 1000. יישוב שלא היה מידע קיבל מספר סידורי 10000 ומעלה. דוגמא: יישוב שמספרו 123465 הקוד שלו הוא 123.

○ שם יישוב – השדה צריך להכיל ערכים ללא רווח, ניתן להשתמש בקו תחתי (_) כדי להפריד בין שני מילים בשם היישוב.

○ פקטור תיקון למשך זמן עבודה ביישוב – משך זמן העבודה ביישוב נקבע לפי משוואה שנתקבלה על ידי רגרסיה. יישובים חריגים ניתן לתת מקדם הכפלה למשך זמן העבודה ביישוב (רפתות לא מסודרות, מספר מוקדי קשירת פרות וכו').

○ קורדינטת X.

○ קורדינטת Y.

○ כניסת מזריע ליישוב – ניתן להגדיר ליישוב אלו מזריעים חייבים לבצע הזרעה ואלו אינם יכולים לבצע בו הזרעות. ערך -1, מזריע חייב לבצע הזרעה ביישוב. ערך 0, מזריע יכול לבצע הזרעה ביישוב, 1, מזריע אינו יכול לבצע הזרעה ביישוב. אם משנים את מספר המזריעים יש לשנות בהתאם האם המזריע יכול להזריע ביישוב או לא. סדר שמות המזריעים (העמודות) צריך להיות זהה לסדר בו הוכנסו בקובץ workers_living_site.txt.

בסיום עידכון הקובץ יש להעתיק את כל הטבלה ללא הכותרת לקובץ site_data.txt.

6. data_of_enter_hand_in_sites – נתונים על כמות הכנסות הידיים בתקופה בה נמדדו.

השדות השונים:

זהו קובץ הנבנה מקובץ נתונים המתקבל מהתאחדות מגדלי הבקר.

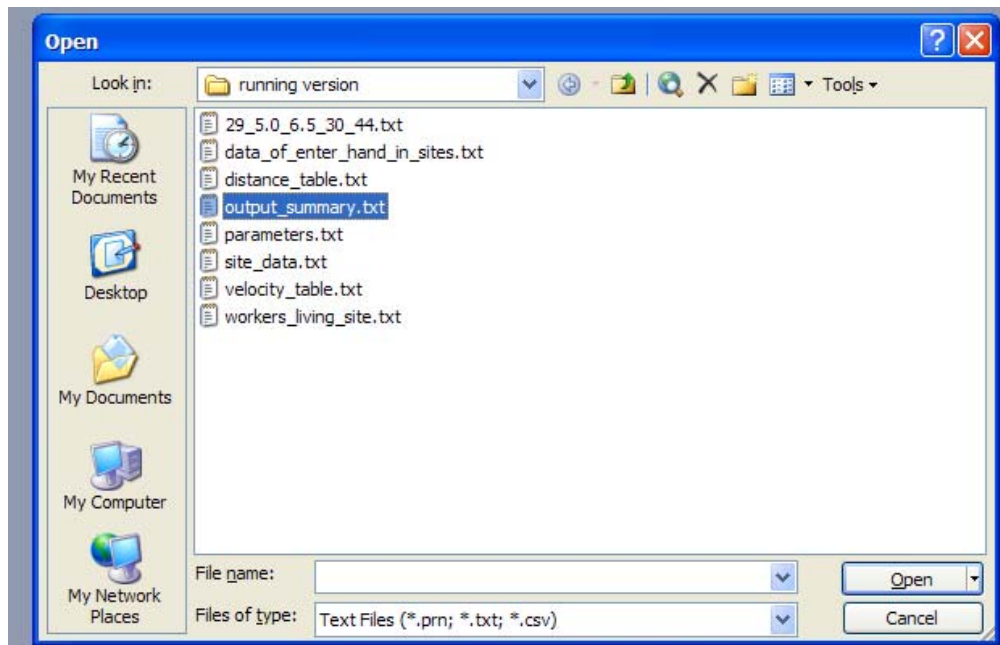
- יום בשבוע – התוכנה יודעת להתעלם לבד משבתות, ערכים מ 1 - 7 (יום 7).
 - קוד יישוב – היישוב בו בוצעה ההזרעה. יש לבדוק כי נמצאים רק יישובים אשר נמצאים בקובץ site_data.txt. קודים של יישובים אשר אינם נמצאים בקובץ site_data.txt יגרמו לטעות ריצה.
 - מספר הכנסות ידיים.
- לאחר יצירת קובץ אקסל עם העמודות הנ"ל יש להוסיף שורה ובה "****". להעתיק את הנתונים לקובץ data_of_enter_hand_in_sites.txt.
- תוכנת work areas builder מייצרת שני סוגי קבצים להצגת הנתונים:
1. output_summary.txt – קובץ טקסט המרכז את את נתוני ההרצות השונות.
 2. *.*.*.*.txt – לכל חלופה מיוצר קובץ נפרד בו נשמר פירוט המידע על כל אזור עבודה. שם הקובץ הוא ערכי החסם (חלופה) שלפיה נבנו אזורי העבודה.

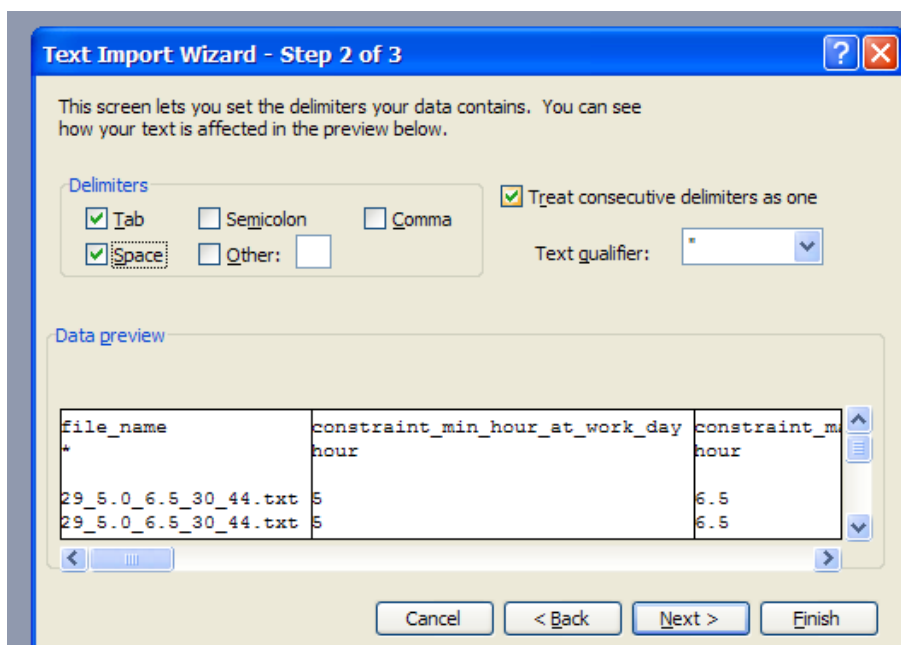
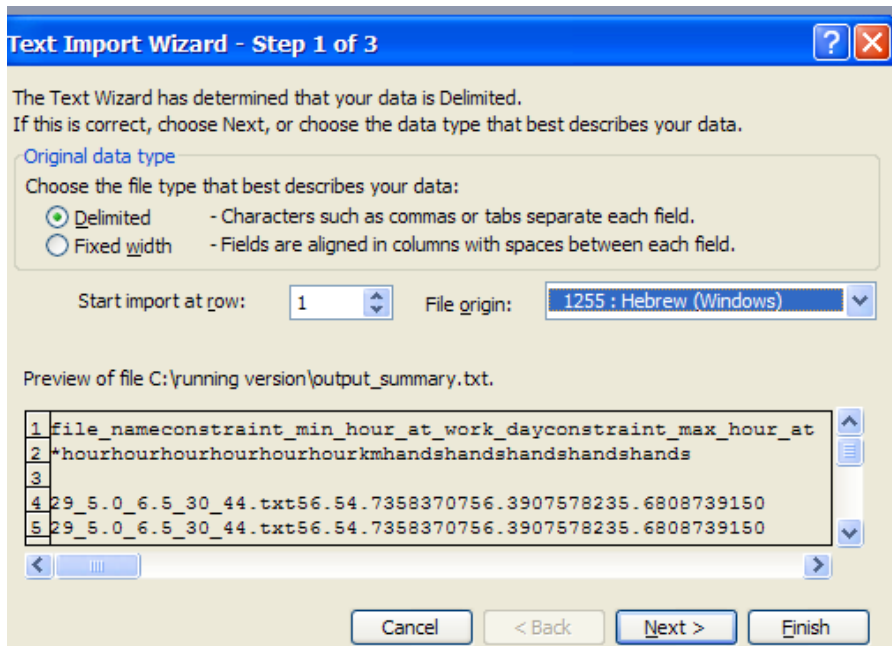
את הקבצים הנ"ל רצוי לפתוח באמצעות EXCEL.

השדות המופיעים בקבצים הנ"ל:

1. output_summary.txt:

פתיחת הקובץ באמצעות EXCEL





- file_name – שם הקובץ בו מאוחסן פירוט המידע על כל אזור של החלופה שנבחרה.
- constraint_min_hour_at_work_day – אילוץ ממוצע משך יום מינימאלי.
- constraint_max_hour_at_work_day - אילוץ ממוצע משך יום מקסימאלי.
- result_min_hour_at_work_day – ממוצע משך יום העבודה של המזריע הבטל ביותר בפועל.
- result_max_hour_at_work_day - ממוצע משך יום העבודה של המזריע העמוס ביותר בפועל.
- average_hour_at_work_day – ממוצע משך יום עבודה.
- std_hour_at_work_day – סטית תקן משך יום עבודה.
- total_road_length_at_day – מרחק נסיעה של כל המזריעים ביום.

- constraint_min_average_enter_hand_at_work_day_for_worker – אילוץ ממוצע הכנסות ידיים מינימאלי ביום.
- constraint_max_average_enter_hand_at_work_day_for_worker - אילוץ ממוצע הכנסות ידיים מקסימאלי ביום.
- result_min_of_average_enter_hand_at_work_day_for_worker – ממוצע מספר הכנסות ידיים של המזריע הבטל ביותר.
- result_max_of_average_enter_hand_at_work_day_for_worker - ממוצע מספר הכנסות ידיים של המזריע העסוק ביותר.
- result_average_of_average_enter_hand_at_work_day_for_worker – ממוצע הכנסות ידיים למזריע ביום.
- result_std_of_average_enter_hand_at_work_day_for_worker – סטית תקן מספר הכנסות ידיים למזריע ביום.

כל ריצה של חלופה היא שורה בקובץ. ניתן למחוק שורות, **דגש לא למחוק את שתי השורות הראשונות של הכותרות.**

2. *.**.*.*.txt – פתיחת קובץ באמצעות EXCEL באותם שלבים כמו פתיחת קובץ output_summary.txt. לכל חלופה קובץ משלה, שם הקובץ מורכב מערכי הקלט של החלופה. לכל מזריע מפורט ממוצע משך יום העבודה, ממוצע הכנסות הידים ביום, מרחק הנסיעה ומסלול הנסיעה (היישובים בהם מבקר המזריע, מספר הכנסות הידיים ביישוב ומשך הזמן הצפוי ביישוב).

נספח ט – תיעוד תוכנה