

האוניברסיטה הפתוחה

המחלקה למתמטיקה ולמדעי המחשב

פרויקט מסכם בהנדסת תעשייה וניהול

צמצום נסיעות סרק בחברת בון תור בע"מ

חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת תואר ראשון בהנדסה

מאת

איליה יאצקו, ת.ז. 321745788

הצהרה

העבודה נעשתה בהנחיית רון וולף,
בחברת בון תור בע"מ בסניף אור יהודה,
האוניברסיטה הפתוחה – המחלקה למתמטיקה ולמדעי המחשב

החיבור מציג את עבודתי האישית
ומהווה חלק מהדרישות לקבלת תואר ראשון בהנדסה.
כל טקסט ו/או תוצאה המבוססים על עבודות מחקר אחרות,
מתועדים בציון המקור המדעי (Fully Referenced)

תודות

למנכ"ל חברת בון תור, מר ערן כץ, על אפשרות לבצע את הפרויקט בארגון ועל שיתוף הפעולה.

למנחה הפרוייקט, מר רון וולף, על הכוונה, תמיכה וסבלנות לאורך הפרוייקט.

תוכן העניינים

9..... תקציר מנהלים

10..... 1. תאור הארגון

10..... 1.1 מבנה הענף

11..... 1.2 תאור הארגון

13..... 2. מטרת הפרויקט

14..... 3. סקירת ספרות

14..... 3.1 VRP – תאור הבעיה

15..... 3.2 סקירת שיטות אופטימיזציות VRP

18..... 3.3 DARP

21..... 3.4 אלגוריתם VNS

21..... 3.4.1 הפתרון הראשוני

22..... 3.4.2 חיפוש בסביבה

23..... 3.4.3 חיפוש מקומי (Local Search)

24..... 3.4.4 קריטריון קבלה

24..... 3.4.5 עדכון מקדמי קנסות

24..... 3.4.6 סכימת אלגוריתם VNS

25..... 3.4.7 ניסויים פקטוריאליים וסימולציה

26..... 3.5 מתודולוגיית ADISSA לניתוח ועיצוב מערכות מידע

27..... 4. תאור המצב הקיים

27..... 4.1 משאבי עבודה

27..... 4.1.1 כלי רכב

27.....	4.1.2 נהגים.....
28.....	4.2 מבנה ארגוני של סניף אור יהודה.....
29.....	4.3 תהליך תכנון סידור עבודה.....
31.....	4.4 ניתוח נסיעות סרק.....
35.....	4.5 עלויות דלק ואחזקה.....
37.....	5. בעיות במצב הקיים.....
38.....	6. ניתוח חלופות.....
38.....	6.1 פיתוח מערכת אופטימיזציה בהתאמה אישית.....
38.....	6.1.1 התאמת מודל DARP ואלגוריתם VNS.....
38.....	6.1.1.1 פונקציית מטרה.....
39.....	6.1.1.2 ריבוי חניונים.....
40.....	6.1.1.3 הטרוגניות ציי הרכבים וקיבולת הניתנת להתאמה.....
41.....	6.1.1.4 סטוכסטיות ושונות משך נסיעה.....
44.....	6.1.1.5 הניסוח המעודכן.....
46.....	6.1.1.6 עדכון אלגוריתם VNS.....
47.....	6.1.2 אפיון מערכת אופטימיזציה.....
47.....	6.1.2.1 תרשימי DFD.....
60.....	6.1.2.2 בסיסי נתונים.....
62.....	6.1.2.3 מילון הנתונים.....
62.....	6.1.2.3.1 מילון הפונקציות.....
91.....	6.1.2.3.2 מילון רכיבי הנתונים.....
98.....	6.1.2.3.3 מילון קבוצות הנתונים.....
99.....	6.1.2.3.4 מילון זרמי המידע.....

106.....	6.1.2.4 קלטים, פלטים וממשקי משתמש
109.....	6.1.3 פיתוח תכנה
109.....	6.2 רכישת תכנת מדף
110.....	7. דיון בחלופות והמלציות
111.....	סיכום
112.....	נספחים
112.....	נספח א' – חישוב תוחלת מרחקי סרק
114.....	נספח ב' – חישוב עלויות הדלק והאחזקה של נסיעות סרק
115.....	מקורות

רשימת מוצגים

10.....איור 1.1.1 : התפלגות הכנסות ענף הסעות פרטיות.

11.....טבלה 1.1.1 : השחקנים הבולטים בענף הסעות פרטיות.

12.....תרשים 1.2.1 : מבנה ארגוני של בון תור בע"מ.

15.....טבלה 3.1.1 : סיווג בעיות VRP (Eksioglu et al. (2009)).

16.....טבלה 3.2.1 : הביצועים של מטה-היוריסטיקות הטובות ביותר בפתרון VRP על משתנים של Golden et al. (1998).

17.....טבלה 3.2.2 : מטה-היוריסטיקות היעילות ביותר לטיפול בתכונות נבחרות של MAVRP.

18.....גרף 3.2.1 : ביצועי טכניקות שונות על פתרון בעיית השמה בתחבורה יבשתית (Lopez et al. (2009)).

25.....טבלה 3.4.7.1 : ערכי פרמטרים שנבדקו בניסוי פקטוריאלי.

26.....איור 3.5.1 : שלבי מתודולוגיית ADISSA.

29.....תרשים 4.2.1 : מבנה ארגוני של סניף אור יהודה.

32.....איור 4.4.1 : חלק מדו"ח סידור עבודה לנהג.

33.....איור 4.4.2 : חלק מדו"ח איתוראן של רכב.

33.....טבלה 4.4.1 : סיכום נתוני קילומטראז'.

34.....איור 4.4.3 : שיעור כללי של נסיעות סרק.

34.....איור 4.4.4 : התפלגות סוגי נסיעות סרק.

35.....טבלה 4.5.1 : יחס צריכת דלק לפי סוגי רכבים.

40.....טבלה 6.1.1.2.1 : סיכום סימונים של מודל של Braekers et al. (2014).

42.....גרף 6.1.1.4.1 : מודל זמן נסיעה סטוכסטי.

45.....טבלה 6.1.1.5.1 : סיכום התאמות של DARP.

62.....איור 6.1.2.2.1 : תרשים ERD.

106.....איור 6.1.2.4.1 : תפריט "סידור עבודה" קיים של מערכת Fleet Control.

- 107.....Fleet Control חדש של מערכת 6.1.2.4.2 : תפריט "סידור עבודה" חדש של מערכת
- 107..... של מערכת אופטימיזציה 6.1.2.4.3 : מסך "עדכון פרמטרים" של מערכת אופטימיזציה
- 108..... של מערכת אופטימיזציה 6.1.2.4.4 : מסך קלט "שיבוץ סידור עבודה" של מערכת אופטימיזציה
- 108..... של מערכת אופטימיזציה 6.1.2.4.5 : מסך פלט "שיבוץ סידור עבודה" של מערכת אופטימיזציה
- 109.....טבלה 6.1.3.1 עלויות פיתוח מערכת אופטימיזציה

תקציר מנהלים

מטרתה של העבודה הנכחית הנה הורדת עלויות תפעול בבסניף אור יהודה של חברת בון תור באמצעות צמצום נסיעות סרק של רכבי החברה.

ניתוח נסיעות סרק הראה כי כיום, קילומטראז' סרק מהווה יותר מ-47% מקילומטראז' הכללי של רכבי החברה. נסיעות הרכבים בדרך להתייצבות בתחילת יום העבודה, נסיעות מנקודת שחרור של נסיעה לנקודת ההתייצבות של הנסיעה הבאה ונסיעה מנקודת שחרור של נסיעה למקום לינת הרכב – הן נסיעות סרק מסוג 1, 2 ו-3 בהתאמה שהוגדרו כסרק מבוקר – גורמות ל-83% מכלל נסיעות הסרק.

נמצא שעלויות הדלק והאחזקה בלבד של קילומטראז' סרק מבוקר בסניף אור יהודה נאמדות ביותר מ-1.15 מיליוני ש"ח בשנה.

הפוטנציאל העיקרי של צמצום נסיעות הסרק תמוך בשיפור תכנון סידור עבודה של נהגי החברה, שמתבצע במצב הקיים באופן נאיבי, על סמך ניסיונם האישי והערכותיהם הסובייקטיביות של המתכננים וללא כל סיוע של כלים מדעים או ממוחשבים.

העבודה הנוכחית מציעה לעשות תכנון סידור עבודה בשיטה ממוחשבת ולצורך כך בוחנת 2 חלופות – 1. פיתוח מערכת אופטימיזציה חדשה על בסיס אלגוריתם יעודי שבמסגרת העבודה הותאם במיוחד לחברות הסעות בישראל. או 2. רכישת תכנת מדף.

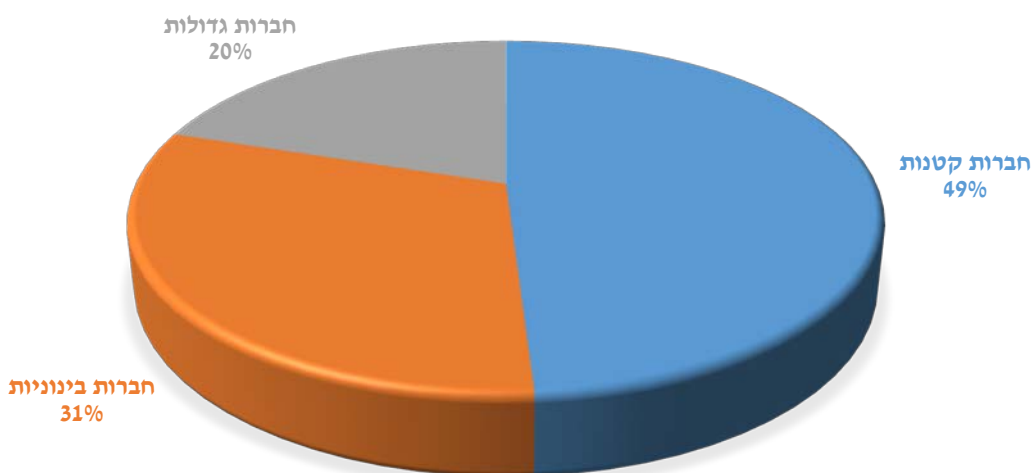
תקופת החזר ההשקעה בחלופה הראשונה נאמדת על כ-4.2 שנים – הערכה שמתבססת על הנחות של שימוש במערכת אופטימיזציה רק בסניף אור יהודה ושל תרומה לצמצום עלויות דלק ואחזקה הנובעות מנסיעות סרק מבוקר בלבד. עלות חלופה ב' נמצאת עדיין בבחינה.

1. תאור הארגון

1.1 מבנה הענף¹

סך ההכנסות של ענף הסעות פרטיות, אשר כולל הסעות באוטובוסים ואוטובוסים זעירים ואינו כולל תחבורה ציבורית, הסתכם בשנת 2012 בכ-3.75 מיליארדי שקלים המהווים גידול של 1% ביחס לשנת 2011. כ-65% מסך הכנסות הענף נבעו מנסיעות קבועות כגון הסעות עובדים למקומות העבודה והסעות תלמידים למוסדות החינוך. כ-80% מהנסיעות הקבועות מקורן בזכייה במכרזים פומביים. בענף פועלים מאות שחקנים וכ-49% מסך ההכנסות הינם בידי החברות הקטנות, אשר מחזור הכנסות השנתי שלהם אינו עולה על 15 מיליוני שקלים והשאר – בידי החברות הבינוניות והגדולות. הענף משתמש כיום בכ-10,000 אוטובוסים.

התפלגות הכנסות הענף



איור 1.1.1: התפלגות הכנסות ענף הסעות פרטיות

ענף ההסעות הפרטיות מאופיין בתחרותיות גבוהה. בין הסיבות לכך ניתן למנות את ריבוי השחקנים בענף המציעים שירותים בעלי טווח מחירים ומאפיינים דומים. על אף העליה במחירי התשומות (בין היתר, מחירי הדלק ושכר המינימום), התחרות הגבוהה בענף מובילה, בין היתר, ליציבות, ואף לירידה במחירים של שירותי ההסעות ולשחיקה ברווחיות החברות הפועלות בענף.

להלן השחקנים הבולטים בענף ההסעות הפרטיות בישראל (ע"פ סדר א"ב):

¹ע"פ סקירת BDI

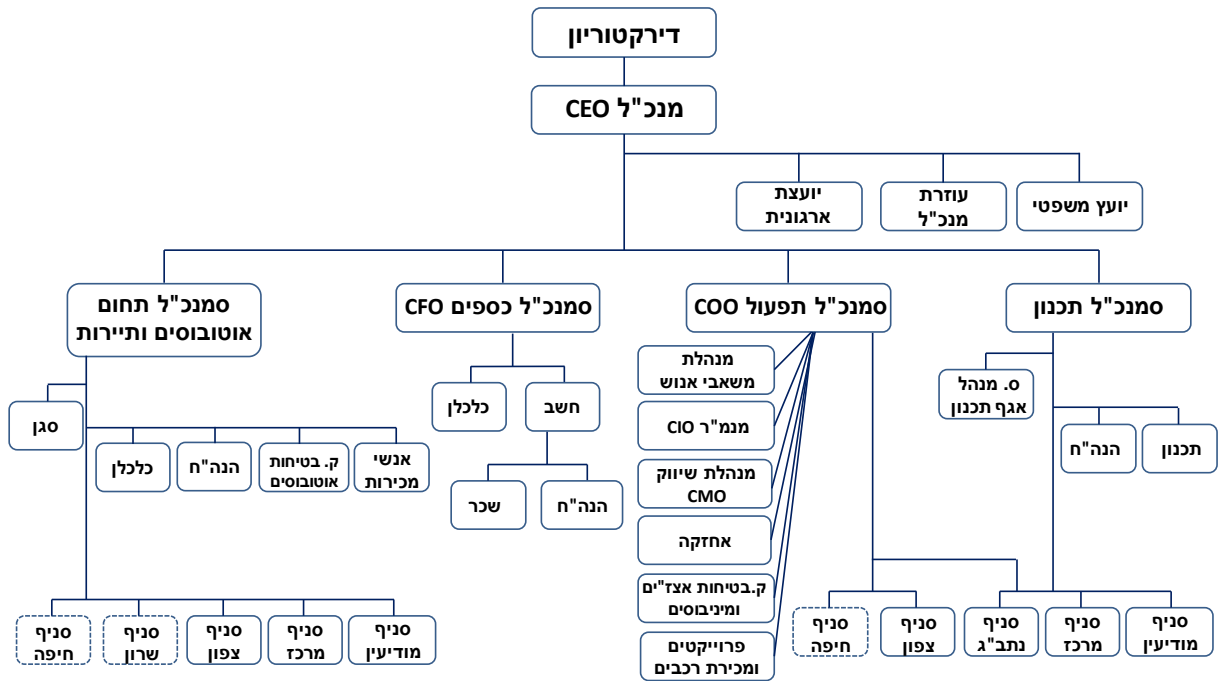
שם החברה	מס"ד
אגד היסעים בע"מ	1
אמנון מסילות בע"מ	2
בון תור בע"מ	3
הורך את ליבוביץ בע"מ	4
הסעות המוביל הדרומי צביקה (1990) בע"מ	5
הסעות מוני סיטון בע"מ	6
מאיה תור בע"מ	7
מובילי הורדים בע"מ	8
מובילי צפון הנגב (בן זקן) בע"מ	9
מסיעי אריה שאשא בע"מ	10
תור בוס – שרות המטייל בע"מ	11

טבלה 1.1.1: השחקנים הבולטים בענף הסעות פרטיות

1.2 תאור הארגון

בון תור בע"מ הינה חברה בבעלות פרטית, אשר נוסדה בשנת 1988 ונחשבת כיום לאחת החברות הגדולות בענף עם כ- 500 עובדים (כ-460 מתוכם – נהגים) וציי רכבים של 320 אוטובוסים ציבוריים זעירים (א.ז.ז.) ו-120 אוטובוסים בבעלותה. בנוסף לנהגים השכירים, החברה מפעילה גם נהגים קבלני משנה עם רכבים בבעלותם או תחת הסכמי ליסינג מול החברה.

החברה פועלת בתחום אוטובוסים ציבוריים זעירים (א.ז.ז.) בחלוקה מרחבית באמצעות 4 סניפים – מודיעין (אזור ירושלים והשפלה), נתבי"ג, אור יהודה (אזור המרכז והשרון), טבריה (אזור הצפון) ואילו בתחום האוטובוסים מפעילה אגף יעודי. מטה החברה ממוקם באור יהודה.



תרשים 1.2.1: מבנה ארגוני של בון תור בע"מ

בין לקוחות החברה נמנים גופים ציבוריים גדולים (משרדי ממשלה, רשויות ממשלתיות, חברות ממשלתיות, רשויות מקומיות, מרכזים רפואיים), מוסדות ללא כוונת רווח, חברות פרטיות רבות ולקוחות מזדמנים פרטיים (הסעות חד-פעמיות לארועים, נתב"ג וכו').

2. מטרת הפרוייקט

מטרתו של הפרוייקט הינה צמצום נסיעות סרק של רכבי החברה בשיעור של לפחות 5% באמצעות יעול תכנון סידור עבודה של הרכבים.

3. סקירת ספרות

VRP 3.1 – תאור הבעיה

הבעיה, אשר מציאת פתרון עבורה הוגדרה כמטרה של הפרוייקט הנוכחי, שייכת לתחום הקרוי בשם Vehicle Routing Problem (VRP) או בעיית ניתוב כלי הרכב. ככלל, בעיות מסוג זה ידועות במתמטיקה כלא-פולינומיות קשות (NP), כך שעבור בעיה עם מספר משתנים גדול, מציאת אופטימום אמיתי בדרך כלל אינה אפשרית והמטרה היא מציאת פתרון עם שגיאה מזערית ככל הניתן, כלומר כזה שקרוב לאופטימום האמיתי.

המושג VRP הופיע לראשונה בספרות בעבודתם של Johnson ו-Dantzig (1954), בה הציעו פתרון לבעיה גדולת מימדים של הסוכן הנוסע. ניסוח הבעיה של Clarke ו-Wright (1964) כלל לראשונה יותר מרכב אחד, כך שהם נחשבים בספרות המקצועית לחלוצים בחקר VRP קלאסית. Solomon (1983) הוסיף אילוצי חלונות-זמן, בהם הרכבים נדרשים לבקר בנקודות מסויימות. חקר VRP הואף באופן משמעותי בשנות ה-1990 וזאת עקב זמינות הולכת וגדלה של מחשבים אישיים - דבר שאיפשר פיתוח ויישום אלגוריתמים מסובכים יותר (Eksioglu et al. (2009)).

נהוג להציג את VRP הבסיסי בדרך גרפית-תאורתית הבאה (Eksioglu et al. (2009):

יהי $G=(V, A)$ גרף שלם עם $V=\{0, 1, \dots, n\}$ המייצג אוסף קודקודים ו- A המייצג אוסף קשתות. קודקודים $j=1, \dots, n$ מתייחסים ללקוחות, כל אחד עם ביקוש ידוע ואי-שלילי d_j . הקודקוד 0 מתייחס לחניון בו הרכבים "מאוכסנים". לכל קשת $(i, j) \in A$ ישנה עלות אי-שלילית c_{ij} המייצגת עלות נסיעה מקודקוד i אל קודקוד j . נהוג להניח שעלות c מקיימת אי-שוויון משולשי, כלומר $c_{ik} + c_{kj} \geq c_{ij}$.

פתרון הבעיה כרוך במציאת אוסף k מעגלים, אשר כל אחד מהם מתייחס לרכב נפרד, עם מינימום עלות שמוגדרת כסכום עלויות של קשתות המעגל ובהתקיים התנאים הבאים:

- כל מעגל מבקר בקודקוד 0, כלומר החניון;
- כל קודקוד $j \in V \setminus \{0\}$ מבוקר על ידי מעגל אחד בדיוק ו-
- סכום הביקושים של הקודקודים השייכים לאותו מעגל אינו חורג מקיבולת הרכב, C .

ככלל הספרות המקצועית כוללת מאות רבות של עבודות בנושא אופטימיזציית VRP, כאשר כל מאמר תוקף בעיה ספציפית שונה. במסגרת העבודה הנכחית נעשה שימוש בסיווג הנחשב למקיף ביותר הקיים כיום בספרות על מנת להגיע להגדרה פורמלית המדוייקת ביותר ולפתרון היעיל ביותר של בעיית תכנון סידור עבודה בהסעות. טבלה 3.1.1 מציגה את תכונות VRP מתוך הטקסונומיה של Eksioglu et al. (2009). התכונות הרלוונטיות ביותר לבעיית הסעות

מסומנות בטבלה. כפי שיוצג בהמשך, התכונות הרלוונטיות ניתנות לביטוי באמצעות אילוצים או במסגרת פונקציית

<p>3.9 הומוגניות רכבים (קיבולת)</p> <p>3.9.1 צי הומוגני</p> <p>3.9.2 מותאם סוג מטען</p> <p>3.9.3 צי הטרוגני</p> <p>3.9.4 מותאם סוג לקוח</p> <p>3.10 משכי נסיעה</p> <p>3.10.1 דטרמיניסטי</p> <p>3.10.2 פונקציית זמן נוכחי</p> <p>3.10.3 סטוכסטי</p> <p>3.10.4 לא ידוע</p> <p>3.11 עלות נסיעה</p> <p>3.11.1 תלוית משך</p> <p>3.11.2 תלוית מרחק</p> <p>3.11.3 תלוית סוג רכב</p> <p>3.11.4 תלוית תפעול</p> <p>3.11.5 פונקציית איחור</p> <p>3.11.6 תלוית סיכון</p> <p>4 אפיון לפי סוג מידע</p> <p>4.1 הופעת מידע</p> <p>4.1.1 סטטי</p> <p>4.1.2 דינמי חלקי</p> <p>4.2 איכות מידע</p> <p>4.2.1 דטרמיניסטי</p> <p>4.2.2 סטוכסטי</p> <p>4.2.3 חיזוי</p> <p>4.2.4 לא ידוע (זמן אמת)</p> <p>4.3 זמינות מידע</p> <p>4.3.1 מקומי</p> <p>4.3.2 גלובאלי</p> <p>4.4 עיבוד מידע</p> <p>4.4.1 מרכזי</p> <p>4.4.2 לא מרכזי</p> <p>5 אפיון נתונים</p> <p>5.1 נעשה שימוש בנתונים</p> <p>5.1.1 נתוני אמת</p> <p>5.1.2 נתונים מלאכותיים</p> <p>5.1.3 נתונים מעורבים</p> <p>5.2 לא נעשה שימוש בנתונים</p>	<p>2.8 העלה/הורדה</p> <p>2.8.1 דרישה לאיסוף והורדה בו זמניים</p> <p>2.8.2 העלה או הורדה, אך לא שניהם יחד</p> <p>2.9 אילוצי כיסוי צומת/קשת</p> <p>2.9.1 אילוצי קדימות וזוגיות</p> <p>2.9.2 סט אילוצי כיסוי</p> <p>2.9.3 סדר חופשי מותר</p> <p>3 אפיון לפי הגדרת הבעיה</p> <p>3.1 מבנה רשת תחבורתית</p> <p>3.1.1 עם כיוון</p> <p>3.1.2 ללא כיוון</p> <p>3.2 מיקום כתובות (לקוחות)</p> <p>3.2.1 על קודקודים</p> <p>3.2.2 על קשתות</p> <p>3.3 מיקום גאוגרפי של לקוחות</p> <p>3.3.1 עירוני</p> <p>3.3.2 כפרי</p> <p>3.3.3 מעורב</p> <p>3.4 מספר מקומות מוצא</p> <p>3.4.1 מוצא יחיד</p> <p>3.4.2 מוצאים מרובים</p> <p>3.5 מספר נקודות פריקה/טעינה</p> <p>3.5.1 יחידה</p> <p>3.5.2 מרובות</p> <p>3.6 סוג חלון זמן</p> <p>3.6.1 הגבלת לקוח</p> <p>3.6.2 הגבלת דרך</p> <p>3.6.3 הגבלת פריקה/טעינה</p> <p>3.6.4 הגבלת נהג/רכב</p> <p>3.7 מספר רכבים</p> <p>3.7.1 בדיוק n</p> <p>3.7.2 לא יותר מ-n</p> <p>3.7.3 לא מוגבל</p> <p>3.8 אילוצי קיבולת רכבים</p> <p>3.8.1 קיבולת מוגבלת</p> <p>3.8.2 קיבולת לא מוגבלת</p>	<p>1. סוג מאמר</p> <p>1.1 תאורתי</p> <p>1.2 שיטה ישומית</p> <p>1.2.1 שיטה מדויקת</p> <p>1.2.2 היוריסטיקה</p> <p>1.2.3 סימולציה</p> <p>1.2.4 שיטת פתרון זמן אמת</p> <p>1.3 תעוד הטמעה</p> <p>1.4 סקירה</p> <p>2. אפיון לפי תרחיש</p> <p>2.1 מספר עצירות במסלול</p> <p>2.1.1 דטרמיניסטי</p> <p>2.1.2 דטרמיניסטי חלקי</p> <p>2.2 אילוצי פיצול מטען</p> <p>2.2.1 הפיצול מותר</p> <p>2.2.2 הפיצול אסור</p> <p>2.3 כמות לקוחות (ביקוש)</p> <p>2.3.1 דטרמיניסטי</p> <p>2.3.2 סטוכסטי</p> <p>2.3.3 אינו ידוע</p> <p>2.4 זמני ביקוש של לקוחות חדשים</p> <p>2.4.1 דטרמיניסטי</p> <p>2.4.2 סטוכסטי</p> <p>2.4.3 אינו ידוע</p> <p>2.5 זמני שירות אצל לקוח</p> <p>2.5.1 דטרמיניסטי</p> <p>2.5.2 תלוי זמן</p> <p>2.5.3 תלוי סוג רכב</p> <p>2.5.4 סטוכסטי</p> <p>2.5.5 אינו ידוע</p> <p>2.6 מבנה חלון זמן</p> <p>2.6.1 גמיש</p> <p>2.6.2 קשיח</p> <p>2.6.3 מעורב</p> <p>2.7 אופק תכנון</p> <p>2.7.1 חד תקופתי</p> <p>2.7.2 רב תקופתי</p>
--	---	---

מטרה בשלב ניסוח הבעיה. את VRP המשלבות תכונות אחדות נהג לכוונת Multi-Attribute VRP או MAVRP.

טבלה 3.1.1 סיווג בעיות VRP (Eksioglu et al., 2009).

3.2 סקירת שיטות אופטימיזציית VRP

כפי שהוזכר קודם, עבור בעיה עם מספר גדול של משתנים, התואם את הבעיה בחיים האמיתיים, מציאת פתרון אופטימלי אינה אפשרית וכיום האופטימיזציה בתחום זה משתמשת במטה-היוריסטיקות. המושג "מטה-היוריסטיקה" הוצע לראשונה ע"י Glover (1986) על מנת לתאר סוג מיוחד של היוריסטיקות, אשר מבצעות חיפוש

מעבר לאופטימום מקומי ראשוני. לפי תאור פשטני, אך ממצא, מטה-היוריסטיקה הינה היוריסטיקה שמנחה היוריסטיקה אחרת.

Vidal et al. (2013) סוקרים את המטה-היוריסטיקות הנפוצות ביותר המיושמות כיום בפתרון VRP ומשווה בין הביצועים שלהן: Simulated Annealing (SA), Tabu Search (TS), Variable Neighborhood Search (VNS), Genetic Algorithms (GA), Iterated Local Search (ILS), Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS), Ant Colony Optimization (ACO), Scatter Search (SS), Path Relinking (PR), Evolutionary Algorithms (EA), מטה-היוריסטיקות היברידיות (המשלבות תפיסות של טכניקות שונות ובכך מתגברות על חסרונות של השיטות הספציפיות) ומטה-היוריסטיקות מקבילות (המתבססות על ביצוע מקביל של אופטימיזציה תת-בעיות המרכיבות את הבעיה הגדולה).

Acronym	Reference	Approach	Runs	Gap (%)	T (min)	CPU	T [#] (min)
VCGIR11s	Vidal et al. (2012) slow	Hybrid GA	Avg 10	0.161	113	Opt 2.4G	92.7
VCGIR11f	Vidal et al. (2012) fast	Hybrid GA	Avg 10	0.267	34.8	Opt 2.4G	28.5
NB09	Nagata and Bräysy (2009)	Hybrid GA	Avg 10	0.273	35.6	Opt 2.4G	29.2
GGW11	Groër et al. (2011)	Para. R-to-R	Best 5	0.296	5.00	8×Xe 2.3G	129
MB07s	Mester and Bräysy (2007) slow	EA+ELS	Single	0.327	24.4	P-IV 2.8G	22.4
ZK10	Zachariadis and Kiranoudis (2010a)	GIS+Tabu	Avg 10	0.430	40.5	T5500 1.6G	26.7
JCL11	Jin et al. (2011)	Guided Tabu	Avg 10	0.448	47.1	5×Xe 2.66G	180
MM11	Marinakis and Marinaki (2011)	Bees mating	Best 50	0.560	3.96	P-M 1.86G	117
JCL12	Jin et al. (2012)	Coop Tabu	Avg 10	0.600	41.9	8×Xe 3.0G	330
P09	Prins (2009a)	GRASP+ELS	Single	0.630	7.27	P-IV 2.8G	6.09
RDH04	Reimann et al. (2004)	ACO	Avg 10	0.930	49.3	P-III 900M	7.05
T05	Tarantilis (2005)	Ad.M.+Tabu	Single	0.931	45.5	P-II 400M	2.02
CM11	Cordeau and Maischberger (2012)	Iter. Tabu	Avg 10	0.939	31.3	Xe 2.93G	30.8
MM10	Marinakis and Marinaki (2010)	GA+PSO	Avg 50	0.987	4.20	P-M 1.86G	2.48
DK07	Derigs and Kaiser (2007)	ABHC	Single	1.017	113	Cel 2.4G	106
GGW10	Groër et al. (2010)	R-to-R + EC	Single	1.186	1.28	Xe 2.3G	0.82
MB07f	Mester and Bräysy (2007) fast	EA+ELS	Single	1.230	0.22	P-IV 2.8G	0.20
PR07	Pisinger and Ropke (2007)	ALNS	Avg 10	1.347	10.8	P-IV 3.0G	10.8
LGW05	Li et al. (2005)	R-to-R	Single	1.390	1.13	Ath 1.0G	0.33
MMP06	Marinakis et al. (2006)	Hybrid GA	Single	1.559	3.44	P-III 667G	0.23
P04	Prins (2004)	Hybrid GA	Single	1.662	66.6	P-III 1.0G	10.6

טבלה 3.2.1 הביצועים של מטה-היוריסטיקות הטובות ביותר בפתרון VRP על משתנים של Golden et al. (1998).

טבלה 3.2.1 מציגה את נתוני ריצה של האלגוריתמים השונים על סט נתונים שהוצגו על ידי Golden et al. (1998) וכוללים בין 200 ל-483 לקוחות. איכות הפתרון נמדדת כפער ממוצע (%) בין הפתרון הטוב הידוע לבין הפתרון שנמצא על ידי האלגוריתם הרלוונטי. T[#] מייצג את זמן הריצה המשוקלל המתחשב בדגם מעבד (PentiumIV 3.0 GHz נקבע כדגם בסיסי). יש לציין שנתוני הטבלה מתייחסים לפתרון בעיות VRP קלאסיות ולא MAVRP המתקשרות לבעיות העולם האמיתי. יחד עם זאת ניתן לקבל רושם כללי אודות איכות של ההיוריסטיקות המוצגות – הביצועים הטובים ביותר הושגו על ידי שיטות היברידיות המשלבות חיפוש-מרוכז-סביבה (neighborhood-centered search) ועל ידי שיטות מקבילות המבוססות TS.

באותה עבודה, על מנת לבחון את ביצועי מטה-היוריסטיקות על פתרון MAVRP, Vidal et al. (2013) סקרו גם תכונות הכי נפוצות והציעו סיווג MAVRP מבוסס טכניקות וזאת על ידי זיהוי שיטות המוצלחות הידועות כיום לפתרון VRP

הכוללות תכונות ספציפיות. מתוך הטקסונומיה של Vidal et al. (2013) נבחרו 7 תכונות שרלוונטיות לבעיית הסעות - השיטות היעילות ביותר כיום לטיפול בהן (ע"פ החוקרים) מוצגות בטבלה 3.2.2. ניתן לראות שאלגוריתם Tabu הושם בפתרונות היעילים ביותר של 5 מתוך 7 התכונות שבחרנו.

ACO	X							1
Adapt. M. + Tabu				X				1
ALNS	X		X			X		3
Attrib. driven LS	X							1
GA			X					1
Guided EA					X		X	2
HGA		X				X	X	3
HGA+Div.Man			X				X	2
ILS+SP		X	X		X			3
ILS+VNS		X						1
LNS + Col. Gen.							X	1
Path relinking							X	1
SA+LNS						X		1
Tabu	X	X	X	X	X	X		5
VNS					X	X		2

Heterogeneous
 Backhauls Fleet Multiple Depots Multiple Trips Open VRP Pickup and Deliveries Time Windows

טבלה 3.2.2 מטה-היוריסטיקות היעילות ביותר לטיפול בתכונות נבחרות של MAVRP

למרות שתרומת עבודתם של Vidal et al. (2013) חיונית מאוד להכרת הטכניקות המקובלות לטיפול בבעיות הדומות לבעיית הסעות, ישנם מספר חסרונות המגבילים ישום של המסקנות המתבקשות: הסיווג שעליו מתבססת בחינת מטה-היוריסטיקות, משמיט מספר תכונות מרכזיות הרלוונטיות לבעיית הסעות (כגון אפיון משך נסיעה וזמני שירות, גודל צי), כמו כן לא נותחה אף מטה-היוריסטיקה שמטפלת בבעיות הכוללות כל התכונות הרלוונטיות לבעיית הסעות, והחסרון המשמעותי ביותר הינו מספר משתנים מצומצם יחסית עליו בוצעו ריצות ניסיון (עד 483 לקוחות).

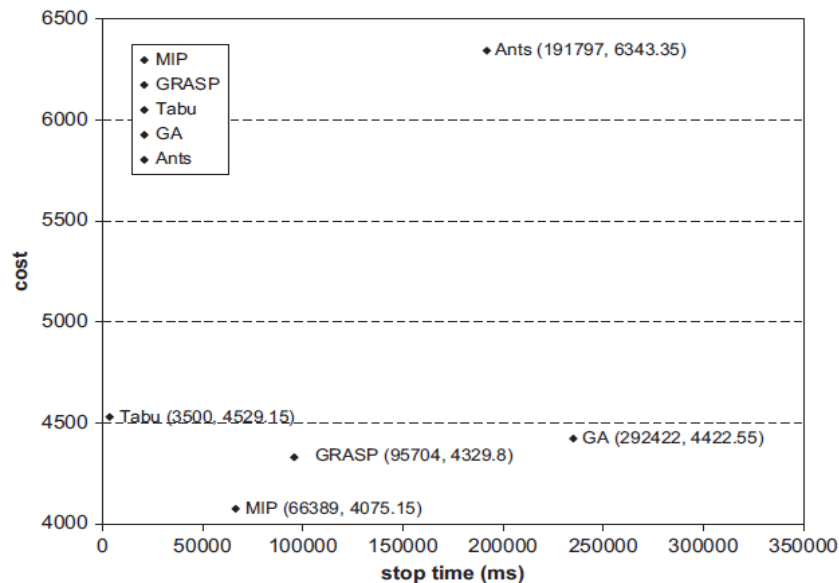
Lopez et al. (2009) בחנו את בעיית אופטימיזציה בתחבורה יבשתית כבעיית השמה, בה באמצעות אוסף משאבים (נהגים) $D = \{d_1, \dots, d_n\}$ יש לתת מענה לאוסף משימות (שירותי הסעה) $S = \{s_1, \dots, s_n\}$. הבעיה אם כך, גלומה במציאת ההשמה הטובה ביותר בהינתן פונקציית עלות ובכפוף לאוסף אילוצים. במסגרת עבודתם החוקרים בחנו גם גישה חלופית, אשר במסגרתה שירותי תחבורה שונים מסודרים ברצף לסט שיכול להיות מוקצה במלואו לנהג נפרד. הצגת הבעיה כאן כוללת גם נסיעות סרק הנובעות מצורך להעביר רכב מנקודת סיום של נסיעה מסויימת אל נקודת ההתחלה של הנסיעה הבאה – כפי שיוצג בהמשך, נסיעות סרק מהוות מקור עיקרי לפוטנציאל החסכון בבעיית הסעות.

החוקרים ביצעו ניתוח השוואתי של שיטות שונות (לא כולם היוריסטיות) על בסיס סטים של משתנים שכללו עד 70 לקוחות ורכבים (70 סטים שונים). מתוך 12 טכניקות שנבדקו, רק 5 הצליחו לפתור את כל 70 סטים – 4 מטה-

היוריסטיקות : GA ,Ants ,ACO), Tabu ו-GRASP (3 הראשונות הוזכרו כבר קודם בהקשר לעבודתם של Vidal et al. (2013)) ותכנון מעורב בשלמים (MIP) Mixed Integer Programming).

גרף 3.2.1 מציג השוואת ביצועים של טכניקות אלה במונחי זמן ריצה וערך פונקציית מטרה (מינימזציית עלויות התפעול). ניתן לראות שאלגוריתם Tabu משלים את החיפוש בזמן הקצר ביותר, אך ערך פונקציית המטרה שלו נמצא במקום הרביעי. לעומת זאת MIP מניב את הערך הנמוך ביותר של פונקציית מטרה במחיר סביר של זמן ריצה ובכך ניתן לראות בו האלגוריתם הטוב ביותר עבור ישום הבעיה שהוצגה ע"י החוקרים. יחד עם זאת יש לציין את החסרונות הבולטים של MIP – ניסוח הבעיה הינו מלאכה מסובכת, במיוחד עבור בעיות רבות משתנים ואילוצים, עבור אילוצים לא לינאריים נדרשת לינאריזציה.

גם העבודה של Lopez et al. (2009) לוקה בחסר עקב בחינת בעיות קטנות יחסית – דבר שמקשה לאמץ את מסקנותיהם והמלצותיהם של החוקרים בבעיית הסעות.



גרף 3.2.1 ביצועי טכניקות שונות על פתרון בעיית השמה בתחבורה יבשתית (Lopez et al. (2009))

DARP 3.3

על מנת להתגבר על חסרונותיהן של הטכניקות שהוצעו לעיל, נעשתה בחינת עבודתם של Cordeau J.F ו-Laporte G. (2007), אשר סוקרת בעיות המכונות Dial-a-Ride Problem (DARP) ושיטות אופטימיזציה שלהן.

מטרתה של DARP הינה תכנון ותזמון מסלולי נסיעה של רכבים בהינתן n דרישות, המוגדרות על ידי מקום ומועד איסוף והורדה, תוך מינימיזציית הוצאות תפעול ובכפוף לשורת אילוצים כגון שעות עבודה ומנוחה של נהגים, התאמת סוגי רכבים ללקוחות ספציפיים ועוד. DARP מניחה שניתן לשלב מספר נוסעים במהלך נסיעה אחת על בסיס קרבה גאוגרפית של מקום איסוף/הורדה שלהם או קרבת מועדי איסוף/הורדה שלהם.

ניתן לראות ב-DARP מקרים פרטיים של סוגי VRP אחדים, כגון PDVRP (Pickup and Deliveries VRP) ו-VRPTW (VRP with Time Windows) שהוזכרו קודם (ראה טבלה 3.2.2), אך ההבדל המייחד את DARP הוא דרך הטיפול ב"מטען האנושי", הרי שהורדת אי-נוחות של הנוסעים חייבת להיות מאוזנת עם מינימיזציית העלויות.

ככלל, נהוג להבדיל בין 2 תת-סוגים של DARP – הסטטי והדינמי. בניגוד למקרה הראשון, בו כלל ההזמנות ידועות מראש, במקרה השני רק חלק מהדרישות ידועות בזמן ביצוע התכנון ואילו שאר הנתונים מתקבלים במהלך יישום התכנון המקורי. יחד עם זאת חשוב לציין שבפועל ההבדל בין 2 התבניות השונות בדרך כלל מטושטש, מאחר ובמציאות בצורה הסטטית ייתכנו ביטולים של ההזמנות הקיימות ואילו בצורה הדינמית ישנה כמות גדולה של הזמנות שנתונה מראש. אם כך, האתגר בטיפול בבעיה הדינמית הינו מציאת שיבוץ אופטימלי של ההזמנות החדשות לסידור עבודה הקיים שנבנה במתכונת הסטטית.

כפי שניתן לראות מהתאור, ל-DARP הרבה תכונות משותפות לבעיית הסעות מאשר ל-VRP כללית. דמיון זה מאפשר להשתמש במטה-היוריסטיקות מוכוונות DARP.

כיום כל היוריסטיקות ומטה-היוריסטיקות בתחום DARP מתבססות על הניסוח התלת-אינדקסי של Cordeau (2006) (בניגוד לניסוח הדו-אינדקסי של Ropke et al. (2007) המשמש את השיטות המדוייקות). בדומה ל-VRP, DARP ניתנת להצגה על גבי גרף $G=(V,A)$, שבו $V = \{v_0, v_1, \dots, v_{2n+1}\}$ הינו אוסף הקודקודים המתארים נקודות מוצא ויעד של הרכבים (לרוב – נקודות איסוף והורדת הנוסעים), ו- $A = \{(v_i, v_j), v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ הינו אוסף קשתות. כל דרישה להסעה כוללת נקודת מוצא v_i ונקודת יעד v_{n+i} . קודקודים v_0 ו- v_{2n+1} מייצגים בהתאמה חניון שממנו הרכבים יוצאים בתחילת המסלול ואילו הרכבים חוזרים בסיומו. $V' = V \setminus \{v_0, v_{2n+1}\}$ מייצגת תת-קבוצה של V שקודקודי חניונים אינם חלק ממנה. T_k מייצג גבול עליון למשך מסלול המבוצע על ידי רכב k . כל קודקוד v_i מאופיין באמצעות מטען q_i המהווה כמות נוסעים, ומקיים $q_i = -q_{n+i}$, זמן שירות d_i וחלון זמן $[e_i, l_i]$. כל קשת (v_i, v_j) מאופיינת על ידי עלות נסיעה c_{ij} וזמן נסיעה t_{ij} . המסלול R_k של רכב k מוגדר על ידי קבוצת קשתות שבהן הוא עובר. כמו כן $J_k = \{v_i | \exists (v_i, v_j) \in R_k, v_j \in V\}$ הינה קבוצת קודקודים ש- R_k מבקר בהם. המשתנה הבינרי x_{ij}^k מקבל ערך 1 אם ורק אם רכב k מבצע נסיעה על גבי הקשת (v_i, v_j) . המשתנים הבאים מגדירים תזמון הרכבים. זמן הגעה של רכב k לקודקוד v_i מסומן על ידי A_i^k , זמן התחלת השירות של רכב k בקודקוד v_i שווה ל- $\max\{e_i, A_i^k\}$, וזמן עזיבת

קודקוד v_i על ידי רכב k מסומן על ידי $D_i^k = B_i^k + d_i$. זמן המתנה בקודקוד v_i הינו חיובי רק כאשר הגבול התחתון של חלון הזמן גדול מזמן ההגעה: $W_i^k = \max\{0, B_i^k - A_i^k\}$. זמן נסיעה של נוסע i ברכב k מוגדר כ- $H_i^k = B_{n+i}^k - D_i^k$ וערכו לא יכול לחרוג מעבר לזמן נסיעה מקסימלי מותר L . מסמן את העומס של רכב k בעזיבת קודקוד v_i . להלן ההגדרה הפורמאלית של הבעיה (ע"פ Cordeau (2006)):

$$\text{Minimize } \sum_{v_i \in V} \sum_{v_j \in V} \sum_{k=1}^m c_{ij} x_{ij}^k \quad (1)$$

$$\text{subject to: } \sum_{v_j=v_1}^{v_n} x_{oj}^k = 1 \quad (k = 1, \dots, m) \quad (2)$$

$$\sum_{v_j \in V'} x_{ji}^k - \sum_{v_j \in V'} x_{ij}^k = 0 \quad (v_i \in V', k = 1, \dots, m) \quad (3)$$

$$\sum_{v_i=v_{n+1}}^{v_{2n}} x_{i,2n+1}^k = 1 \quad (k = 1, \dots, m) \quad (4)$$

$$\sum_{v_j \in V'} \sum_{k=1}^m x_{ij}^k = 1 \quad (v_i \in V') \quad (5)$$

$$\sum_{v_j \in V'} x_{ij}^k - \sum_{v_j \in V'} x_{n+i,j}^k = 0 \quad (v_i \in \{v_1, \dots, v_n\}, k = 1, \dots, m) \quad (6)$$

$$B_j^k \geq (B_i^k + d_i + t_{ij}) x_{ij}^k \quad (v_i, v_j \in V', k = 1, \dots, m) \quad (7)$$

$$Q_j^k \geq (Q_i^k + q_j) x_{ij}^k \quad (v_i, v_j \in V', k = 1, \dots, m) \quad (8)$$

$$H_i^k = B_{n+i}^k - (B_i^k + d_i) \quad (v_i \in \{v_1, \dots, v_n\}, k = 1, \dots, m) \quad (9)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq Q_i^k \leq \min\{C^k, C^k + q_i\} \quad (v_i \in V', k = 1, \dots, m) \quad (10)$$

$$t_{i,n+i} \leq H_i^k \leq L \quad (v_i \in \{v_1, \dots, v_n\}, k = 1, \dots, m) \quad (11)$$

$$B_{2n+1}^k - B_0^k \leq T_k \quad (k = 1, \dots, m) \quad (12)$$

$$e_i \leq B_i^k \leq l_i \quad (v_i \in V', k = 1, \dots, m) \quad (13)$$

$$B_0^k \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m) \quad (14)$$

$$B_{2n+1}^k \leq T \quad (k = 1, \dots, m) \quad (15)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad (v_i, v_j \in V', k = 1, \dots, m) \quad (16)$$

3.4 אלגוריתם VNS

באשר לטכניקות לפתרון DARP, כפי שניתן ללמוד מעבודתם של Cordeau J.F. ו-Laporte G. (2007), רק 2 שיטות (Borndöfer et al. (1997) ו-Xiang et al. (2006)) שמטרתן הנה מינימיזציית הוצאות תפעול טיפלו בבעיות במימדים גדולים (1000 נסיעות ויותר), כלומר רוב היוריסטיקות ומטה-היוריסטיקות שקיימות נכון לשנת 2007, אינן מצליחות לטפל בבעיות גדולות, או טרם נוסו על בעיות גדולות.

לאחרונה Muelas et al. (2013) פיתחו אלגוריתם מבוסס VNS (Variable Neighborhood Search) שמצליח להתמודד עם בעיות DARP במימדים גדולים (בנות 1000 נסיעות) ומדווח על תוצאות הטובות ביותר הידועות עד כה.

הרעיון הכללי של האלגוריתם הוא להתחיל עם פתרון התחלתי s . לאחר מכן בכל איטרציה משנים את הפתרון ההתחלתי ומייצרים פתרון s' – מכיוון שבמסגרת השינוי מתקבל פתרון "קרוב", ה- s ואוסף הפתרונות ה"קרובים" האלו מכונים "שכונה" (neighborhood) – מכאן שם של האלגוריתם. בשלב הראשון, מתבצע חיפוש אחר s' – טווח החיפוש (או גודל השכונה) מוגדר כ- k . בשלב הבא מפעילים אלגוריתם לחיפוש מקומי (LS) על s' שמניב s'' . אם s'' טוב יותר מ- s , הוא מחליף את s ואם לא – מגדילים את k וממשיכים בחיפוש.

האלגוריתם מתבסס על פונקציית המטרה שמכילה שיטת קנסות עבור הפרת אילוצי עמידה בזמנים $w(s)$, משך מרבי להסעת נוסע $r(s)$ וקיבולת רכב $q(s)$ – לכל אחד מאילוצים אלה מקדם קנס משלו:

$$f(s) = c(s) + \alpha w(s) + \beta r(s) + \gamma q(s) \quad (17)$$

3.4.1 הפתרון הראשוני

יצירת הפתרון הראשוני מתבצע בשלבים הבאים:

- ראשית כלל ההזמנות (נסיעות) ממוינות בסדר עולה של זמני ההתחלה.
- על ידי בחירת m נסיעות ראשונות מייצרים סידור עבודה בעל נסיעה בודדת לכל m רכבים הזמינים.
- הנסיעות הבאות מוכנסות לסידורי העבודה הקיימים לפי ערך פונקציית המטרה המיטבי ובתנאי שהכנסתן אינה מפרה שום אילוץ. אם לא ניתן להימנע מהפרת האילוצים, הכנסת הנסיעות מתבצעת לפי הפרה

מינימלית אפשרית. הכנסת הזמנות חדשות למסלול קיים מתבצעת בדרך הבאה: תחילה מוסיפים את נקודת האיסוף של ההזנה במיקומה הטוב ביותר האפשרי, לאחר מכן מוסיפים את נקודת ההורדה של ההזמנה במיקום הטוב ביותר האפשרי (במונחי ערכי פונקציית מטרה והפרת אילוצים). תהליך זה חוזר על עצמו עד המצב בו לכל נסיעה מוקצה רכב (כלומר כל נסיעה משוייכת לסידור עבודה כלשהו).

3.4.2 חיפוש בסביבה

שינוי הפתרון ההתחלתי מתבצע באמצעות 7 שיטות המכונות neighborhood classes (או shakers):

Swap neighborhood (S) – 2 סידורי עבודה נבחרים אקראית. לאחר מכן נבחר רצף הזמנות בכל אחד מהם – בחירת הזמנה הראשונה ברצף מתבצעת אקראית, אורך הרצף נקבע על ידי פרמטר. ההזמנות שמהוות את הרצף הנבחר נמחקות מ-2 סידורי העבודה המקוריים ואז מוכנסות אחת-אחת לסידורי העבודה המיועדים. הכנסת הנסיעות מתבצעת בהתאם לשלבים של יצירת הפתרון ההתחלתי.

Chain neighborhood (C) – בשיטה זאת מספר הסידורים המושפעים הינו פרמטר המוגדר על ידי אורך המחלקה. בשלב הראשון בוחרים 2 סידורים ומעבירים מאחד רצף נסיעות (בחירתו של הרצף המיועד להעברה נעשית כמו ב-swap neighborhood) לשני. בשלב הבא נבחר רצף נסיעות בסידור השני שהשפעתו השלילית על פונקציית המטרה הינה מקסימאלית – רצף זה מועבר מהסידור השני לסידור השלישי (מספר סידורי עבודה המושפעים הנו כאורך המחלקה + 1). חוזרים על השלב השני עד להשגת מספר מקסימאלי של רצפים מועברים. גם כאן, הכנסת כל הרצפים לסידוריהם החדשים מתבצעת בהתאם לשלבים של יצירת הפתרון ההתחלתי. כל הסידורים שמושפעים בתהליך נבחרים אקראי.

Greedy worst origin move neighborhood (GWOM) – שיטה זאת בוחרת את רצף נסיעות הגרוע ביותר (במונחי ערך פונקציית מטרה) ומעבירה אותו לסידור הטוב ביותר האפשרי. השיטה תחילה מחשבת את כל הרצפים האפשריים של הסידור הנבחר כולל ערך של פונקציית מטרה עבור הסרתם מהסידור המקורי. לאחר מכן נבחר הרצף בעל ההשפעה הגרועה ביותר על פונקציית מטרה והוא מועבר לסידור עבודה שבעקבות ההעברה מניב ערך מינימאלי של פונקציית מטרה. אורך הרצף שמועמד להעברה מוגדר מראש, הכנסת נסיעות של הרצף המועבר אל הסידור החדש מתבצעת באופן שתואר ב-2 השיטות הקודמות.

Greedy best destination move neighborhood (GBDM) – בניגוד ל-GWOM, הרצף שמיועד להעברה הוא רצף שהעברתו תניב ערך הכי טוב לפונקציית המטרה. לבחירת שני מועמדים (סידורי עבודה) להעברת רצף נסיעות, משתמשים בשיטת "תחרות רולטה" (tournament roulette). מתוך שני המועמדים נבחר סידור עבודה בעל ערך נמוך יותר של פונקציית מטרה. בשיטה זאת לסידורי עבודה עם ערך נמוך יותר של פונקציית מטרה יש הסתברות גבוהה

יותר להיבחר ליעד ההעברה ולהיפך – הסידורים עם ערכים גבוהים של פונקציית המטרה ייבחרו בהסתברות גבוהה להיות "התורמים" של נסיעות. העברת הרצפים הגרועים ביותר מהסידורים הגרועים ביותר אל הסידורים הטובים ביותר עשויה להעניק שולי רווח גבוהים יותר לרצפים הגרועים.

Greedy origin swap (GOS) – מאמץ חלק מראיונותיהם של 2 השיטות הקודמות – GWOM ו-GBDM. ראשית, בעזרת קריטריון הבחירה של GBDM נבחרים 2 סידורי עבודה. שנית, בכל סידור עבודה, נבחר רצף הנסיעות הטוב ביותר והרצף הגרוע ביותר. עבור 4 הרצפים הנבחרים השיטה מבצעת 4 החלפות אפשריות בין הסידורים האפשריים ובוחרת לבסוף בפעולת החלפה המניבה את הערך הטוב ביותר לפונקציית מטרה.

Greedy destination swap (GDS) – הרחבת GOS על ידי שינוי קריטריון בחירה של הרצף הטוב והרצף הגרוע: במקום לבחור אותם כמועמדים *להסרה* מסידור העבודה, הם נבחרים כמועמדים *להכנסה* לסידור עבודה אחר. מרכיב בחינת 4 אפשרויות החלפה זהה ל-GOS.

All natural sequences combinations neighborhood (ANSC) – השיטה מתבססת על העברת רצף טבעי מסידור עבודה אחד למשנהו. רצף טבעי הנו רצף נקודות אשר בסיומו הרכב ריק מנוסעים. בניגוד לשיטות החלפה אחרות, השיטה הנוכחית לא דורשת הגדרת אורך הרצף.

מלבד הכלל שמנחה לבצע תחילה שיטות המצריכות פחות החלפות, ניתן ליישם את השיטות שצויינו לעיל בכל סדר ועם פרמטרים שונים של "גודל שכונה".

3.4.3 חיפוש מקומי (Local search)

בניגוד ל-7 הטכניקות שתוארו בפרק 3.4.2 ושמצעות פעולות החלפה בין סידורי העבודה, החיפוש המקומי מבצע שיפורים בתוך סידור העבודה על ידי שינוי סדר נקודות איסוף/הורדה. האלגוריתם מיושם על כל סידור עבודה בדרך הבאה. ראשית מתבצעת הסרה של נקודת איסוף ונקודת הורדה התואמת לה, לאחר מכן מתבצעת הכנסה מחדש של נקודת איסוף במיקום האפשרי הראשון בסידור העבודה (בהתאם לחלון הזמן של הנקודה). בשלב האחרון נקודת ההורדה מוכנסת במיקום האפשרי הראשון. אם השינוי משפר את פונקציית המטרה, האלגוריתם מטפל בזוג נקודות איסוף/הורדה הבא, אחרת נקודת הורדה מוכנסת במיקום האפשרי הבא וכך הלאה. אם במהלך התהליך לא מושג השיפור, זוג הנקודות מוחזר למיקומו ההתחלתי בסידור העבודה. האלגוריתם מיושם על כל סידורי העבודה.

כפי שניתן לראות, יישום LS מלווה במאמץ חישובי ניכר. בניגוד ל-VNS הקונבנציונאלי, בו מומלץ לבצע ריצת LS לאחר יישום של כל shaker (ראה 3.4.2), במטה-היוריסטיקה המוצעת, LS מיושם רק בפתרונות ה"מבטיחים" – כאלה שמקיימים $c(s') < lvalue1 \cdot c(s)$, כאשר $lvalue1$ מייצג אומדן לטווח ערכים לפתרונות מבטיחים. אומדן נוסף שמשמש בחינת פתרונות אפשריים הינו פרמטר $lsprobvalue$ המבטא הסתברות של פתרון אפשרי לעבור שלב LS.

כמו כן, האפשרות הנוספת לבחון האם הפתרון ראוי לעבור תהליך LS הינה שימוש בפרמטר $lvalue2$ – כל פתרון s'' , שעומד בקריטריון הקבלה (ראה בהמשך) יעבור LS אם

$$c(s'') \geq lvalue2 \cdot c(s)$$

3.4.4 קריטריון קבלה

קריטריון קבלה של הפתרון המוצע החדש s'' מבוסס על גישה המכונה הדמיית חישול (*simulated annealing*). לפי שיטה זאת, בהתחלה כל פתרון חדש יכול להחליף את הפתרון הקיים אם ערך פונקציית המטרה שלו טוב יותר. לאחר מכן הפתרון החדש יכול להחליף את הפתרון הקיים בהסתברות $e^{-\frac{f(s'')-f(s_{best})}{t}}$ ערך t (טמפרטורה) יורד לינארי עם כל שלב, החל מ- t_{init} המחושב עם מציאת הפתרון הפיזיבילי הראשון ובאמצעות פרמטרים $t_{initprob}$ ו- $t_{initratio}$ שערכם נקבע על 0.005 ו-0.2 בהתאמה. הפרמטרים $\#maxevals$ ו- $\#evalcalls$ מייצגים מקסימום קריאות לפונקציית המטרה ומספר קריאות בפועל בהתאמה.

3.4.5 עדכון מקדמי קנסות

בכל פעם שנמצא פתרון חדש, מתבצע עדכון מקדמי הקנסות (α, β, γ) . במידה והפתרון החדש מפר את אחד האילוצים, מקדמו גדל במכפלת $(1 + \delta)$ ואם לא – המקדם מחולק ב- $(1 + \delta)$. יתרה מזאת – על מנת להימנע ממחזוריות, בכל פעם שנבחר פתרון חדש, ערך המקדם מוחלף בערך שנבחר אקראי בין $mindelta$ ל- $maxdelta$.

3.4.6 סכימת אלגוריתם VNS

```

1: generate  $s_{init}$ 
2:  $s = s_{init}; k = 1$ 
3:  $t = 0$ 
4:  $\delta = random(mindelta, maxdelta)$ 
5:  $\alpha = \beta = \gamma = initpenalization$ 
6: while the stopping criteria is not satisfied do
7: //shaking
8: randomly compute  $s'$  with  $N_k(s)$ 
9: // local search
10: if  $c(s') < lvalue1 \cdot c(s)$  or  $p_{rand} < lsprobvalue$  then
11: Use the local search method over  $s'$  to create  $s''$ 
12: else
13:  $s'' = s'$ 
14: end if
15: //Move or not
16: if  $t$  is 0 and  $s_{best}$  is feasible then
17:  $t = t_{init} = \frac{t_{initratio} * f(s_{best})}{\ln(1/t_{initprob})}$ 
18:  $t_{stepratio} = t/\#maxevals$ 

```



```

19: end if
20:  $p_{SA} = e^{-((f(s'') - f(s_{best}))/t)}$ 
21: if  $f(s'') < f(s)$  or  $p_{rand} < p_{SA}$  then
22:   if  $c(s'') \geq lsvalue2 \cdot c(s)$  then
23:     Use the local search method to  $s''$ 
24:      $s = s''; k = 0$ 
25:   //Update penalty parameters
26:   for each associated penalty term  $penterm$  in  $\alpha, \beta$  and  $\gamma$  do
27:     if  $s$  vioalates the corresponding constraint of  $penterm$  then
28:        $penterm = penterm * (1 + \delta)$ 
29:     else
30:        $pentern = pentern / (1 + \delta)$ 
31:     end if
32:      $\delta = random(mindelta, maxdelta)$ 
33:   end for
34: end if
35: end if
36: if  $s''$  feasible and better than  $s_{best}$  then
37:    $s_{best} = s''$ 
38: end if
39:  $k = (k \bmod k_{max}) + 1$ 
40:  $t = t_{init} - (t_{stepratio} * \#evalcalls)$ 
41: end while
42: return  $s_{best}$ 

```

3.4.7 ניסויים פקטוריאליים וסימולציה

על מנת לבחון השפעתם של ערכים שונים של כל פרמטר על התוצאה הסופית ולבחור בסדר הטוב ביותר של הפעלת מחלקות האלגוריתם (neighborhood classes), בוצע ניסוי פקטוריאלי לפי שיטת Taguchi (Taguchi et al. (2005)). ערכי פרמטרים שנבדקו מוצגים בטבלה 3.4.7.1, בה הערכים המודגשים מייצגים את הערכים הנבחרים לכל פרמטר לפי תוצאות הניסויים. הסדר הנבחר של הפעלת מחלקות האלגוריתם הינו (משמאל לימין):

.C1-GWOM2-ANSC-C2-GBDM2-GWOM4-S1-GOS2

Parameter	Values
tinitratio	0.0025, 0.005 and 0.01
tinitprob	0.1, 0.2 and 0.4
lsvalue1	1.01 , 1.02 and 1.04
lsprobvalue	0.005, 0.01 and 0.02
lsvalue2	1.025, 1.05 and 1.1
min delta	0 , 0.05 and 0.1
max delta	0.1, 0.2 and 0.4
shakersScheme	first, second and third

טבלה 3.4.7.1 ערכי פרמטרים שנבדקו בניסוי פקטוריאלי

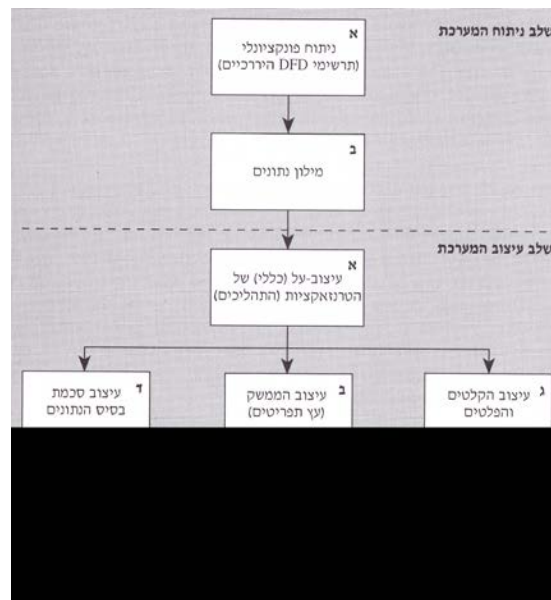
בשלב הסימולציה, האלגוריתם הציג תוצאות הכי טובות והשיג ערכי פונקציית המטרה הנמוכים ביותר בהתמודדות עם 7 מתוך 12 בעיות קטנות (בנות 100 נסיעות) בהשוואה ל-2 אלגוריתמים אחרים (VNS של Parragh et al. (2010) ו-TS של Cardeau & Laporte (2003)) הידועים עד כה כהכי טובים לפתרון בעית DARP. בריצת האלגוריתם על בעיות גדולות (בנות 1000 נסיעות), האלגוריתם היה היחיד שהגיע לפתרון ואילו 2 השיטות האחרות אפילו לא הצליחו לבנות פתרונות ראשוניים.

3.5 מתודולוגיית ADISSA לניתוח ועיצוב מערכות מידע

ADISSA (Architectural Design of Information Systems based on Structured Analysis) הינה מתודולוגיה לניתוח ועיצוב מערכות מידע שפותחה על ידי Shoval (1988). העיקרון המנחה במתודולוגיית ADISSA הוא שילוב ומעבר טבעי משלב לשלב, כך שמתחילים בהגדרת המערכת באמצעות תרשימי DFD ומסיימים בעיצוב מפורט של כל מרכיביה – עיצוב זה מאפשר מעבר חלק להקמת המערכת (שוכל (1998)). שלבי המתודולוגיה מוצגים באיור 3.5.1.

להלן כמה יתרונות של המתודולוגיה :

- יש הבחנה ברורה בין שלב הניתוח, שבו מגדירים את הפעילויות של מערכת המידע ואת הנתונים שהיא תכלול, לבין שלב העיצוב, שבו מעצבים את מרכיבי המערכת.
- יש רציפות והמשכיות טבעית בין שלבי הניתוח לבין העיצוב: כל הפלטים של שלב הניתוח הם קלטים של שלב העיצוב.
- תוצרי שלב העיצוב הם קלט להקמת מערכת המידע, דהיינו, לכתובת התכניות, להגדרת בסיס הנתונים ויתר מרכיבי המערכת ולהקמתם.



איור 3.5.1: שלבי מתודולוגיית ADISSA

4. תאור המצב הקיים

4.1 משאבי עבודה

4.1.1 כלי רכב

כלי הרכב הינם מסוג אוטובוס ציבורי זעיר (א.צ.ז.) השייכים למספר קטגוריות – א.צ.ז. 10, א.צ.ז. 14, א.צ.ז. 16, מיניבוס 20 (על פי מספר מקומות ישיבה רגילים), מעלון 4 ומעלון 5 (על פי מספר מקומות לעגלות נכים). כלי רכב מסוג א.צ.ז. מעלון הינם בעלי מושבים מתקפלים, כך שמספר מקומות ישיבה רגילים ומקומות לעגלות נכים ניתנים לשינוי על ידי פתיחה או כיפול מושבים אלה.

כלי הרכב מסווגים גם בהתאם לסוג הבעלות עליהם. רוב כלי הרכב בהם החברה עושה שימוש הינם בבעלותה (רכבים אורגניים) וכלל הוצאות התפעול הנובעות מהפעלתם מוטלות על החברה. רכבים אלה מאויישים על ידי נהגים שכירים.

בנוסף לרכבים שבבעלותה, החברה מפעילה קבלני משנה בעלי כלי רכב – הוצאות תפעול של רכבים אלה מוטלות על הקבלנים, אך ע"פ דרישת החוק, כלי הרכב עצמם נמצאים בפיקוח של קצין בטיחות בתעבורה של החברה.

במסגרת מיקור חוץ, אשר נהוג בין חברות הסעות, משתמשת בון תור בשירותיהן של חברות הסעות אחרות. רכבים של חברות הסעה אחרות הינה קטגוריה נוספת ע"פ סיווג בעלות על הרכבים. סוג זה של הרכבים דומה לרכבי קבלני משנה, אך פיקוח קצין בטיחות בתעבורה על רכביה ונהגיה של החברה החיצונית אינו מוטל על בון תור.

מוניות הנן משאב עבודה נוסף המשמש את החברה במסגרת מתן השירותים. מונית אינה מסווגת כא.צ.ז., אך באמצעותה ניתן לתת מענה לנסיעות עם עד 4 נוסעים ובמקרים בהם אין א.צ.ז. זים זמינים. הפעלת המוניות מתבצעת באמצעות תחנות מוניות בהסדר.

הפעלת קבלני משנה, חברות הסעות חיצוניות ומוניות מתבצעת בהתאם לצורך הן במסגרת סידור עבודה קבוע והן במסגרת הזמנות מזדמנות.

מאחר וחברה נושאת בהוצעות תפעול – עלויות דלק, אחזקה ושכר נהגים – הכרוכות בהפעלת הרכבים האורגניים, הפרוייקט מתמקד באופטימיזציית סידור עבודה רק של הרכבים האורגניים. בזמן ביצוע הפרוייקט, לרשותו של סניף אור יהודה עמדו 65 כלי רכב אורגניים. נתון זה גמיש ומשתנה לאורך הזמן בהתאם למכירת רכבים ישנים ורכישת רכבים חדשים, העברת הרכבים בין הסניפים, זכייה או הפסד במכרזים.

4.1.2 נהגים

על פי תקנות תעבורה נהג רכב מסוג א.צ.ז. (עד 16 נוסעים) חייב להחזיק ברישיון נהיגה בעל דרגה D1 (מונית, אוטובוס ציבורי זעיר) ואילו נהג רכב מסוג מיניבוס (20 נוסעים) חייב להחזיק ברישיון מסוג D (אוטובוס).

נהגי החברה משתכרים בשכר שעתי לפי תעריף של 24.5 ש"ח לשעה עבור נהג א.צ.ז. חדש ו-26 ש"ח לשעה עבור נהג מיניבוס חדש. קיימות מדרגות ותק, אשר מתבטאות בתוספת של 0.5 ש"ח לשעה פעם ב-3 שנים. בנוסף לשכר בסיס

הנהגים מתוגמלים בבונוס רבעוני בשווי 500 ש"ח המותנה בעמידה בדרישות התנהגות (עמידה בזמנים, לבוש מדי החברה, ניקיון הרכב, איסור עישון ברכב, היעדר תלונות מלקוחות). כמו כן, נהגים המועסקים על א.צ.ז. מעלון זכאים לבונוס חודשי בגובה של 300 ש"ח עבור מאמץ מיוחד הכרוך בטיפול בהעלה, פריקת וקשירת עגלות נכים.

אמנם שירותי הסעה ניתנים ללקוחות החברה במסגרת 24/7, אך הביקוש מאופיין על ידי התנהגות עונתית על פני יום עבודה, כאשר השיא הראשון נצפה בימים א' עד ו' בין השעות 06:00 ו-09:00 והשיא השני בימים א' עד ה' בין השעות 13:30 ו-17:00 וביום ו' מ-12:00 עד 13:30 לערך. עונתיות זאת מאלצת את החברה לנהוג על פי מדיניות יום עבודה מפוצל עבור רוב הנהגים. הביקוש מתנהג עונתי גם ברמה של ימים בשבוע ועונות השנה.

כלי הרכב של החברה צמודים לנהגים. בתחילת יום העבודה הנהגים נוסעים עם רכבי הסעות מבתיים אל נקודת ההתייצבות של הנסיעה הראשונה, וחוזרים עם הרכבים לבתיים בזמן הפסקה וכן בתום יום העבודה.

דיווח שעות עבודה של הנהגים מתבצע על ידי בעל תפקיד המיועד לכך במשרדי החברה באמצעות הזנה ידנית של שעות התחלה וסיום משמרת במערכת מחשב המיועדת לכך ("איסופית"). כאמור לעיל, יום עבודה של רוב הנהגים מפוצל ל-2 משמרות. משמרת בוקר מתחילה בין השעות 04:00 ל-06:00 ומסתיימת בשעה 09:00 לערך. משמרת אחר הצהריים מתחילה בין השעות 12:30 ל-13:30 לערך ומסתיימת בין השעות 17:00 ל-20:30 לערך. במידה וההפסקה בין 2 המשמרות עולה על שעתיים, היא לא משולמת ונהוג לקרוא לה "פיצול". במידה ולפחות 75% מימי עבודה של הנהג בעלי פיצול של 3 שעות ומעלה ושעת תחילת יום העבודה הינה לפני 05:00, הנהג זכאי לבונוס "פיצול" בגובה 125 ש"ח.

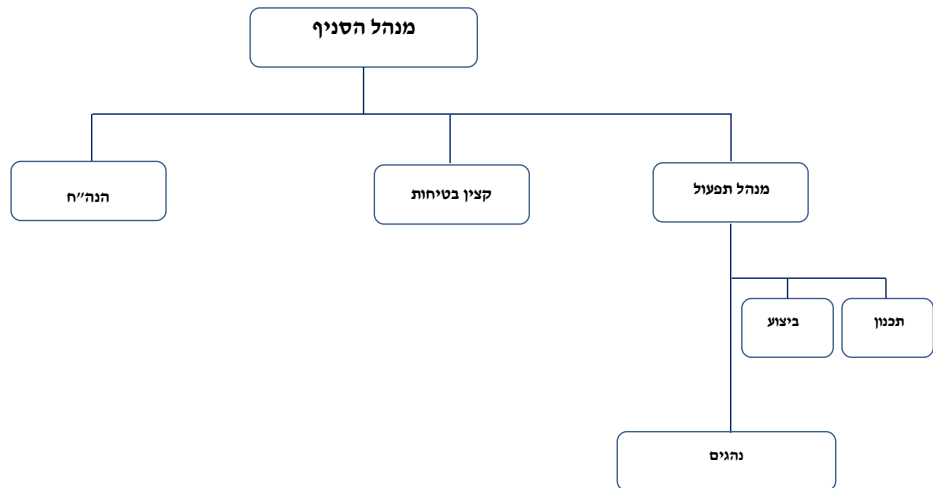
נוהל דיווח שעות העבודה קובע כי לנהג שעובד משמרת עם פיצול מדווחים את תחילת משמרת בוקר 15 דקות לפני התחלת הנסיעה בפועל ואת סיום משמרת בוקר – 15 דקות לאחר סיום הנסיעה בפועל. דיווח על התחלה וסיום משמרת אחר הצהריים מתבצע בהתאם לעיתויים שבפועל. בניגוד לנהגים שעובדים משמרת מפוצלת, נהגים שעובדים משמרת רצופה אינם זכאים לתוספת 30 דקות פיצוי ודיווח התחלה וסיום העבודה עבורם מתבצע בהתאם לעיתויים בפועל כפי שנעשה בדיווח שעות משמרת אחר הצהריים של נהגי משמרת מפוצלת.

4.2 מבנה ארגוני של סניף אור יהודה

באופן כללי, כל סניף של החברה כולל בין היתר 2 מחלקות ליבה – מחלקת תכנון ומחלקת ביצוע.

מחלקת ביצוע אחראית על תפעול שוטף של יום העבודה הנוכחי: וידוא ביצוע סידור עבודה, מתן פתרונות לתרחישים בלתי צפויים כגון איחורים, תקלות טכניות ברכבים, שינויים בהזמנות ועוד.

מחלקת תכנון אחראית על טיפול בנסיעות עתידיות החל משעה 01:00 של היום הבא והלאה – קבלת הזמנות והקלדת פרטי נסיעות למערכת מחשב, הקצאת נהגים לנסיעות המוזמנות ובניית סידור עבודה.



תרשים 4.2.1: מבנה ארגוני של סניף אור יהודה

4.3 תהליך תכנון סידור עבודה

סידור עבודה יומי כולל כ-1,500 נסיעות בממוצע, אשר כ-1,300 מתוכם קבועות – כאלה שמבוצעות בתדירות קבועה יומית, שבועית או אחרת ופרטי הזמנותיהן קבועים וידועים מראש. כ-200 מתוך מהנסיעות הקבועות ניתנות להגדרה כקבועות למחצה, כלומר עצם קיומן ידוע, אך הפרטים המלאים, כמו יעד הנסיעה, כמות נוסעים או אפילו המועד המדוייק, מתקבלים בסמוך למועד הביצוע. דוגמא לנסיעה קבועה למחצה יכולה להיות ארגון המזמין הסעות עבור עובדי שנסארו לעבוד שעות נוספות – אמנם שעת התייצבות הרכבים ידועה מראש, אך רשימת העובדים מועברת רק ביום הביצוע.

תכנון סידור עבודה ראשוני מתבצע בדרך כלל אחת לשנה, לקראת פתיחת שנת לימודים. תהליך התכנון מתבסס על הערכת מומחים ותחזית סובייקטיבית אודות משך ביצוע נסיעות שונות, מועדי שיחרור נהגים בתום ביצוע נסיעה ויכולת שלהם להתייצב במועד לנסיעה הבאה – כל זה בכפוף לאילוצים שונים, כגון סוג רכב הנדרש על ידי לקוח, תקנות תעבורה המגבילות את שעות עבודה של נהג, הסמכות ואישורים מיוחדים הנדרשים מנהגים ועוד – כך נקבעים חיבורים אפשריים של נסיעות, אשר מהווים שלד של סידור עבוד של כל נהג, אשר אליו עשויים להיתווסף נסיעות מזדמנות בעתיד. היעד המועדף בתכנון סידור העבודה הינו כמותי, כלומר ביצוע כמות מירבית ככל הניתן של הנסיעות על ידי כל נהג.

תכנון ראשוני כולל מרכיבים של ניסוי וטעיה – לאחר השלמת התכנון התאורטי, הנהגים מתבקשים לבצע את הנסיעות כאילו מסיעים נוסעים ולהחזיר משוב אודות היתכנות ביצוע סידור העבודה והעמידה בזמנים. אם קיים חשש סביר לאי-עמידה בזמנים, סידורי העבודה של נהגים עוברים שינויים ועדכונים במטרה לשפרם. השיפורים בתכנון הראשוני

ממשיכים להתבצע במשך מספר שבועות לאחר פתיחת שנת הלימודים, עד שמתקבלת תוצאה משביעת רצון בהיבט של עמידה בזמנים.

במסגרת תכנון משני, אשר מתבצע ברמה יומית לאורך כל השנה, נעשים שינויים הנובעים מקבלת הזמנות מזדמנות, היעדרות נהגים או עדכון פרטי הסעות קבועות על ידי הלקוחות. בדומה לתכנון הראשוני, כלל הפעילות המתבצעת במסגרת התכנון המשני, מתבססת על הערכה הסובייקטיבית, הניסיון המקצועי והידע האישי של העוסקים בדבר. הכלי הטכנולוגי היחיד שלעיתים רחוקות משמש את אנשי התכנון הינו גרסה חינוכית של מפות. גוגל האינטרנטי, אשר באמצעותו ניתן להעריך משך נסיעה ולקבוע את המסלול המהיר ביותר. המטרה של התכנון המשני הנה להקצות נהגים לביצוע כל הנסיעות הקיימות ביום הבא. בתהליך התכנון המשני קיימים 2 תרחישים עיקריים עבור הנסיעות להן טרם הוקצאו נהגים:

- א. במהלך חלון זמן בו צפויה להתבצע נסיעה יש לפחות נהג אחד פנוי. במקרה זה מקצים נהג פנוי לנסיעה.
- ב. אין אף נהג פנוי במהלך חלון זמן בו צפויה להתבצע הנסיעה. דרכי פעולה אפשריות להתמודדות עם תרחיש זה הן:

- אם במסגרת הנסיעה מוסעים פחות מ-5 נוסעים מעבירים את הנסיעה לביצוע על ידי תחנת מוניות בהסדר.
- אם במסגרת הנסיעה מוסעים 5 נוסעים ומעלה, בודקים האם באותו חלון זמן קיימות נסיעות אחרות, אשר במסגרתן מוסעים פחות מ-5 נוסעים ומוקצים להם א.צ.זים. אם כן – מקצים א.צ.ז. לנסיעה עם יותר נוסעים ואת הנסיעה עם פחות נוסעים מעבירים לביצוע על ידי תחנת מוניות.
- מעבירים את הנסיעה לביצוע ע"י קבלן משנה מזדמן או מיקור חוץ ע"י חברת הסעות אחרת. אפשרות זאת כרוכה בדרך כלל בניהול משא ומתן עם הקבלן בנושא גובה התשלום עבור ביצוע הנסיעה.

שלבי עבודה ותרחישים שהוזכרו זה עתה רלוונטיים גם עבור מחלקת ביצוע במקרים בהם מתקבלת הזמנת נסיעה מזדמנת או מתרחש ארוע בלתי צפוי אחר כגון תקלה טכנית ברכב או איחור נהג לנסיעה, אשר כתוצאה מכך נדרש לבצע הקצאה מחדש של רכב ונהג לנסיעה.

עובדה ראויה לציון היא מחסור קשה בנהגים בענף בכלל ובחברה בפרט. גובה השכר נתפסת בעיני הנהגים כלא מתגמלת – דבר שמקשה על גיוס נהגים חדשים מחד וגורם למוטיבציה ירודה בקרב הנהגים הקיימים מאידך. על רקע זה נוצר מצב בו התנהגות הנהגים מאופיינת בחוסר שיתוף הפעולה בסיסי עם סדרנים - גמישות נמוכה בביצוע שינויים בסידור העבודה שלהם, בררנות של נסיעות, הצבת דרישות הנוגעות לסידור העבודה (כגון אי כניסה לאזורים מסויימים, אי ביצוע סוגים מסויימים של נסיעות), שלעיתים קרובות נוגדות את אילוצי החברה. כמו כן נצפו מקרים רבים של אי-קיום הוראות החברה (כגון לבוש מדים, כיבוי מנוע בהמתנה, איסור עישון ברכב ועוד).

4.4 ניתוח נסיעות סרק

כפי שהוגדר קודם, כל נסיעה אשר אין בגינה הכנסה תוגדר כנסיעת סרק. במסגרת הפרוייקט נסיעות הסרק סווגו ל-9 קטגוריות עיקריות:

1. תנועה מבית הנהג לנקודת התייצבות הראשונה בתחילת יום העבודה או תנועה מנקודת סיום של הנסיעה האחרונה אל בית הנהג בתום יום העבודה.
2. תנועה מנקודת סיום של נסיעה לנקודת ההתחלה של הנסיעה הבאה במהלך יום העבודה.
3. תנועה מנקודת סיום של הנסיעה האחרונה לפני הפסקת הנהג שאינה בתשלום (הפיצול) אל בית הנהג או תנועה מבית הנהג אל נקודת ההתחלה של הנסיעה הראשונה לאחר הפסקה שאינה בתשלום (הפיצול). סוג זה של נסיעות סרק דומה במהותו לסוג 1, אך בשלב זה יופיע כסוג נפרד.
4. תנועה במהלך הפסקה שבתשלום. לעיתים קרובות ישנן הפסקות קצרות (עד שעתיים) בין נסיעה לנסיעה, אשר נהגים זכאים לשעות עבודה רצופות בגינן, אך מנצלים את הזמן לנסיעה הביתה או סידורים אחרים בסביבה.
5. תנועה למטרת תחזוקה, כגון למוסך, לקצין בטיחות למטרת בדיקה חודשית, לשטיפה וכו'.
6. תנועה למשרדי החברה או בחזרה במטרה להסדיר בעיות פרט או דומה (כגון הדרכה, קבלה או החלפת ציוד, שיחה עם מנהל וכו').
7. תנועה מנהלתית עבור החברה כגון שליחות, הסעת עובדי חברה או דומה.
8. נסיעה פרטית. נהגי החברה מורשים להשתמש בכלי הרכב למטרות פרטיות כולל נופש משפחתי. הנהגים נושאים בתשלום עבור נסיעות מסוג זה התלוי בסוג הרכב ובאורך הנסיעה, כמו כן הדבר כרוך באישור מראש.
0. אחר – כל התנועות שלא ניתן לסווג כאף אחד מ-8 הקטגוריות הראשונות. 2 הסיבות הנפוצות ביותר לקיום הנסיעות מסוג זה הן –
 - א. נסיעת "סיוע" עבור נסיעה שאינה סרק ושבההלכה התרחשה תקלה כלשהי כולל תקלות טכניות.
 - ב. נסיעת סרק מסוג 4, 5, 6 או 7 שאינה מתועדת כנדרש בסידור העבודה ולכן לא ניתנת לסיווג מדוייק.

מתוך הגדרת סוגי נסיעות סרק ניתן לראות שנסיעות מסוג 1, 2 ו-3 ניתנות לטיפול בכלים הנדסיים על ידי אופטימיזציית סידור עבודה של נהגים ואילו הטיפול בשאר הסוגים מצוי במישורים המשמעותי והניהולי. אי לכך, נגדיר קבוצה "סרק מבוקר" שכוללת נסיעות סרק מסוג 1, 2 ו-3.

בדיקת מצב קיים בהיבט נסיעות הסרק בוצעה באמצעות מערכת "איתוראן", בה החברה משתמשת למעקב ובקרת ציי הרכב שלה – היא כללה ניתוח דו"חות איתוראן של כלי רכב והשוואתם לסידור עבודה של הנהגים הרלוונטיים במטרה לאתר, לסווג ולאמוד אורכן של נסיעות הסרק – כך למשל בהינתן כתובת סיום של נסיעה מסויימת וכתובת התחלה של הנסיעה הבאה, אשר ידועות מתוך נתוני סידור העבודה של הנהג, הרי שמרחק בין 2 הנקודות האלה הינו נסיעת סרק

מסוג 2. בדומה לכך בוצע איתור של כל נסיעות הסרק במהלך יום העבודה של הנהג, מדידתן וסיכומן. להלן שלבי ביצוע ניתוח נסיעות סרק:

1. הצלבת דו"ח סידור עבודה של הנהג מול דו"ח איתורן של הרכב המתאים,
2. בדו"ח איתורן – חיפוש וזיהוי תחילת תנועת הרכב,
3. בדו"ח סידור עבודה – שיוך תנועת הרכב מסעיף 2 לנסיעה מתאימה (אפקטיבית/סרק),
4. סיווג התנועה מסעיף 2 לקטגורית סרק מתאימה (0-8),
5. בדו"ח איתורן – זיהוי מיקום סיום של נסיעת הסרק,
6. מדידת אורך נסיעת הסרק,
7. בסיום בדיקת תקופת הדיווח – סיכום אורך מצטבר של נסיעת סרק לפי סוגים

שעת התחלה	שם הלקוח	תאור	הערות	סוג הרכב
07:35 עיריית ת"א 2014-2015	קו 5 איסוף ת"א (תל כביר, ק"ש, שפירא) - ת"א ביה"ס תלמוד תורה (14)	כתובת בית הספר: ת"א שכונת התקווה רחוב מושע 21 טלפון בית הספר: 037304421 מנהל: הרב שניאור מנהל תב"ד 0524617279		אזור ב 14 מקומות
הערות לנהג: ***אין להוריד את התלמידים לפני השעה 07:30*** ***חובה לסרוק את הרכב בסיום הנסיעה*** ***קו ללא לציני***				
#	שעה	כתובת	נוסעים לתחנה	הערות
1	07:35	ת"א, אהלי יעקב 3	תלמוד תורה	522267
2	07:35	ת"א, מיניקובסקי 5	תלמוד תורה	32495
3	07:36	ת"א, הקשת 14	תלמוד תורה	599091 כיתה ד'
4	07:36	ת"א, הקשת 14	תלמוד תורה	599091 כיתה ב'
5	07:36	ת"א, הקשת 3	תלמוד תורה	57818 כיתה ד'
6	07:37	ת"א, אסידי ציון 19	תלמוד תורה	23927 כיתה ב'
7	07:39	ת"א, מאיר בלבן 11	תלמוד תורה	99495 כיתה ו'
8	07:40	ת"א, הקשת 3	תלמוד תורה	47751 כיתה א'
9	07:41	ת"א, ישראל מסלנט 21	תלמוד תורה	21429 כיתה א'
10	07:42	ת"א, מאור הגולה 41	תלמוד תורה	43025 כיתה ג'
11	07:43	ת"א, כרם חמד 20	תלמוד תורה	311361 כיתה ו'
12	07:43	ת"א, כרם חמד 20	תלמוד תורה	311361 כיתה ו'
13	07:43	ת"א, כרם חמד 20	תלמוד תורה	311366 כיתה א'
08:00 קשת האגודה למען קו 2 איסוף ת"א (מרס) - רמת אביב (10) חייב שרפרף ברכב				
קשיש בתל אביב-יפו(ע"ר) אביב-יפו(ע"ר)				
עד: ת"א רח' חיים לבנון 75				
#	שעה	כתובת	נוסעים לתחנה	הערות
1	08:01	ת"א, השופטים 25		55214
2	08:02	ת"א, צייטליץ 5		36485
3	08:03	ת"א, הקשת א6 6		83247 צהלון 10 להוריד רק בבית!!!
4	08:04	ת"א, ארלחורוב 166		77647
5	08:05	ת"א, שאול המלך 4		36734

איור 4.4.1 – חלק מדו"ח סידור עבודה לנהג

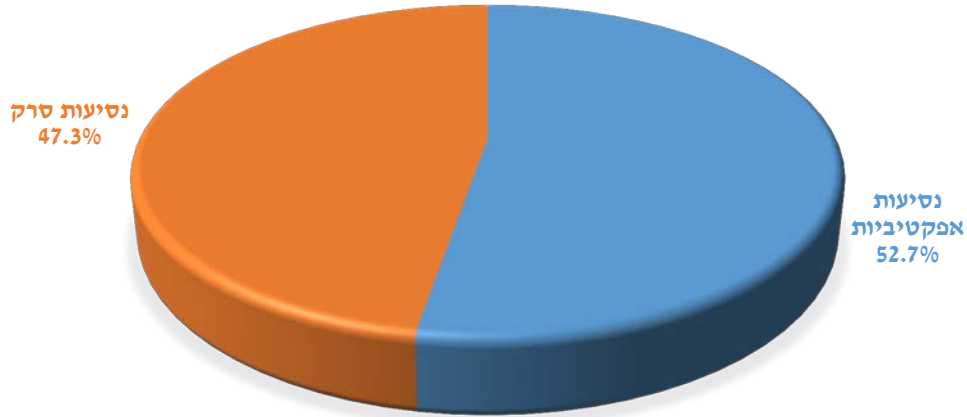
תג זיהוי	שם נהג	שם התור	שם מצב	מהירות	כמות	Idle Sum	Idle Type	קילומטר	זמן הודעה
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			22	גבעתי, תל אביב יפו			152868.1	02/11/2014 08:10
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			-	<u>מוטעין 20, תל אביב יפו</u>		2	152868.8	02/11/2014 08:13
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			8	ולון 29, תל אביב יפו		2	152868.7	02/11/2014 08:13
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			-	לפדות 4, תל אביב יפו		2	152868.8	02/11/2014 08:13
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			14	אצל 8, תל אביב יפו		2	152869.1	02/11/2014 08:14
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה		רכב בעצרה	-	אצל 2, תל אביב יפו		2	152869.2	02/11/2014 08:15
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			-	דרך ההגנה, תל אביב יפו		2	152869.2	02/11/2014 08:16
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			27	שדרות הח'ל 7, תל אביב יפו		2	152869.8	02/11/2014 08:17
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			8	יגאל אלון, תל אביב יפו		2	152869.8	02/11/2014 08:18
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			14	יגאל אלון, תל אביב יפו		2	152870.3	02/11/2014 08:19
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			16	יצחק שדה 39, תל אביב יפו		2	152870.7	02/11/2014 08:21
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			-	קרליבך, תל אביב יפו		2	152871.5	02/11/2014 08:24
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			12	קרליבך 41, תל אביב יפו		2	152872	02/11/2014 08:28
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			-	אבן גבירול, תל אביב יפו		2	152872.3	02/11/2014 08:29
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה			14	אבן גבירול, תל אביב יפו		2	152872.4	02/11/2014 08:30
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה		רכב בתנועה	9	<u>שדרות שאול המלך 2, תל אביב יפו</u>	3.82	2	152872.4	02/11/2014 08:34
4702513- ראדפר משה	ראדפר משה		רכב בעצרה	-	שדרות שאול המלך, תל אביב יפו			152872.7	02/11/2014 08:35

איור 4.2.4 – חלק מדו"ח איתורן של הרכב

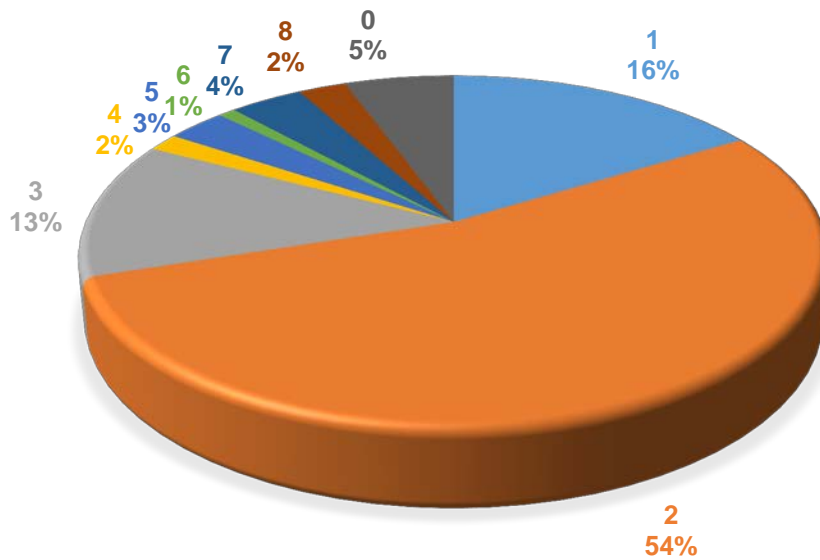
בסה"כ נדגמו דו"חות איתורן של 10 מתוך 65 כלי רכב בתקופה שבין ה-01/11/14 ל-07/11/14. להלן סיכום נתוני קילומטראז' בתקופת הבדיקה:

#	מס' רכב	סה"כ מד אוץ (ק"מ)	סרק 1 (ק"מ)	סרק 2 (ק"מ)	סרק 3 (ק"מ)	סרק 4 (ק"מ)	סרק 5 (ק"מ)	סרק 6 (ק"מ)	סרק 7 (ק"מ)	סרק 8 (ק"מ)	סרק 0 (ק"מ)	סה"כ סרק (ק"מ)	סה"כ סרק (%)	סרק מבוקר (ק"מ)	סרק מבוקר (%)
1	1052079	1770.3	72.5	469.4	0.0	17.9	39.0	14.4	0.0	98.6	0.0	711.8	40.2%	541.9	30.6%
2	1082974	843.4	91.0	93.8	125.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	290.2	600.4	71.2%	310.2	36.8%
3	1507412	1254.8	100.6	381.9	114.0	0.0	0.0	0.0	78.7	15.1	22.0	712.3	56.8%	596.5	47.5%
4	1588512	1029.4	53.2	234.6	83.1	0.0	50.2	0.0	0.0	0.0	8.8	429.9	41.8%	370.9	36.0%
5	4702513	1373.9	199.9	372.7	9.4	18.0	29.8	0.0	55.8	0.0	0.0	685.6	49.9%	582.0	42.4%
6	4702713	1874.9	59.9	565.5	155.3	0.0	21.9	0.0	0.0	0.0	0.0	802.7	42.8%	780.8	41.6%
7	5292274	1421.3	92.9	282.1	61.1	17.1	34.3	40.8	0.0	0.0	8.0	536.3	37.7%	436.1	30.7%
8	5513811	1156.5	104.3	185.9	131.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.9	19.2	480.3	41.5%	421.2	36.4%
9	5572511	1235.8	81.3	426.9	21.8	34.3	0.0	0.0	74.7	0.0	0.0	639.0	51.7%	530.0	42.9%
10	8565031	1237.0	158.0	343.0	88.0	14.0	16.0	0.0	24.0	0.0	0.0	643.0	52.0%	589.0	47.6%
		13197	1014	3356	789	101	191	55	233	154	348	6241	47.3%	5159	39.1%

טבלה 4.4.1: סיכום נתוני קילומטראז' /



איור 4.4.3: שיעור כללי של נסיעות סרק



איור 4.4.4: התפלגות סוגי נסיעות סרק

מעיון באיורים 4.4.3 ו-4.4.4 ניתן להתרשם שרק מחצית מכלל הנסיעות המבוצעות על ידי הרכבים הנה במסגרת הסעת נוסעים ושכ-83% מכלל נסיעות הסרק ו-39.3% מכלל כל הנסיעות הנם נסיעות סרק מסוג 1, 2 ו-3, המהוות שליש מכלל סוגי נסיעות סרק שהוגדרו.

4.5 עלויות דלק ואחזקה

במטרה לאמוד את השפעת נסיעות סרק על עלויות הדלק של החברה, בוצע ניתוח תצרוכת דלק של הרכבים, אשר מצויידיים בדלקנים המאפשרים להם תדלוק בתחנות דלק של חברות סנוול ודלק – נתוני תדלוקים עבור חודשים נובמבר ודצמבר 2014 שהתקבלו מחברות הדלק היוו מידע גולמי לחישובים.

החישובים בוצעו בהתבסס על כמויות תדלוק בין מספר זוגות של תדלוקים עוקבים:

1. בשלב ראשון בוצעה השוואת נתוני תדלוק לקילומטראז' שהרכב הרלוונטי עבר באותו פרק זמן – ע"י חלוקת הקילומטראז' במספר ליטרים התקבל ממוצע יחס צריכה עבור פרק זמן שבין כל זוג תדלוקים עוקבים.
2. בשלב שני, על בסיס ממוצעי יחס צריכה שחושבו בשלב ראשון, חושבו ממוצעים לכל סוג רכב בנפרד.

על סמך תשאול נהגים, נקבע כהנחת יסוד שבכל תדלוק הנהג מתדלק טנק דלק מלא. זמינות המידע אודות נתוני תדלוק אינה אחידה לכל רכב וזאת מאחר ונתוני תדלוק המסופקים ע"י חברת סנוול אינם מכילים שעת תדלוק, אלא רק תאריך, ומאחר וחישוב יחס צריכה מתבסס על דו"ח איתוראן המציג קילומטראז' ע"פ תקופה נתונה, הושמטו נתוני חברת סנוול. כתוצאה מכך הממוצעים של יחס צריכה חושבו על בסיס מדגמים בגודל שונה. יחסי צריכה לכל סוג רכב מוצגים בטבלה 4.5.1 ומתבססים על נתוני תדלוק של 3 רכבים שונים מאותו דגם, פרט לפולקסווגן קראפטר DI50 ופיאט דוקטו מסוג מעלון, אשר יחס צריכה שלהם חושב על בסיס נתוני תדלוק של רכב בודד. המשתנה "שכיחות יחסית" מתייחס לדגם נתון מכלל אוכלוסיית הרכבים בסניף.

מס"ד	דגם	סוג רכב	יחס צריכה (km/1L)	סטיית תקן	שכיחות יחסית
1	פיאט דוקטו	מעלון 4	8.294		0.0156
2	פיאט דוקטו	אזצ 13	7.296	0.927	0.1563
3	פולקסווגן קראפטר DI50	מעלון 4	7.149		0.0313
4	רנו מאסטר	אזצ 16	7.095	0.133	0.1250
5	מרצדס CDI516	אזצ 13	6.532	0.252	0.4219
6	מרצדס CDI516	אזצ 16	5.891	0.406	0.1406
7	מרצדס CDI519	מיניבוס 20	4.688	0.354	0.1094

טבלה 4.5.1. יחס צריכת דלק לפי סוגי רכבים.

מנתוני הטבלה ניתן ללמוד שרכבי פיאט הנם החיסכוניים ביותר וצריכת דלק של רכב מסוג מיניבוס-20 הינה הגבוהה ביותר. כמו כן ראוי לציין שסטיית תקן של פיאט דוקטו מסוג א.ז.צ 13 גדולה משמעותית לשער סוגי הרכבים שנדגמו – פער זה עלול לנבוע מנהיגה אגרסיבית של נהג או תקלה נקודתית ברכב. בנוסף, על בסיס נתוני הטבלה ניתן לחשב את יחס צריכה משוקלל של רכבי הסניף - 6.477 קילומטרים לליטר.

מחיר ליטר סולר בחודשים ינואר-מאי 2015 עומד על 5.1 ש"ח בממוצע. החברה מקבלת החזר חלקי של מס בלו – היטל עקיף שמגולם במחיר של כל ליטר סולר. החזר בלו מחושב לכל רכב בנפרד ונגזר מצריכת סולר החודשית שלו. גובה

ההחזר בחודשים ינואר-מאי הינו 63,000 ש"ח לחודש בממוצע. מחיר ממוצע של ליטר סולר בניכוי החזר בלו עומד על 4.002 ש"ח (ראה נספח א')

בהתאם להסכמי אחזקה של החברה עם ייבואני רכב, עלות אחזקה עומדת על 0.17 ש"ח לקילומטר. מחיר זה אינו כולל הוצאות אחזקת צמיגים.

הקילומטראז' הכולל שצברו הרכבים במדגם בתקופת הניתוח (01/11/14-07/11/14) מסתכם ל-13,197 קילומטרים, מתוכם 5,158 – על חשבון הסרק המבוקר. מסיכום נתוני קילומטראז' ניתן להסיק שרווח בר סמך לתוחלת הסרק המבוקר הינו $2,235 \pm 341.5$ ק"מ ברמת בטחון של 90% לכל רכב² לחודש, כלומר בהינתן צי של 65 רכבים במצבת הנוכחית ניתן לצפות לכ-145,125 ק"מ (עם סטייה של 22000 ק"מ) של נסיעות סרק שניתנות לבקרה לחודש (ראה נספח א'). לחישוב עלויות הדלק והאחזקה של נסיעות הסרק, נלקח הגבול התחתון של הרווח – 123,150 ק"מ, כך שברמת מחירי סולר הנוכחית ובהרכב הנוכחי של ציי הרכבים, עלות הדלק והאחזקה של הסרק המבוקר בסניף אור יהודה עומדת על יותר מ-97,000 ש"ח לחודש (ראה נספח ב').

לסכום זה יש להוסיף עלויות שכר נהגים והוצאות צמיגים. כמו כן צפוי חיסכון נוסף על חשבון עלויות קנסות בגין איחורים.

² רווח סמך לתוחלת כאשר σ לא ידועה

5. בעיות במצב הקיים

מניתוח המצב הקיים עולה שעלות הסרק המבוקר, המהווה כ-39% ממרחק של כלל הנסיעות, נאמדת ביותר מ-1,15 מיליון ש"ח בשנה – אומדן שמתייחס לעלויות דלק ואחזקה של רכבי סניף אור יהודה בלבד.

כפי שהוצג בפרק 4.3, במסגרת תהליך תכנון סידור עבודה, נהוג להתבסס על הערכה סובייקטיבית וניסיון אישי של המתכננים. למרות ריבוי אילוצים המשפיעים על בניית סידור עבודה, התהליך מתבצע באופן נאיבי וללא כל סיוע של כלים הנדסיים. ההערכה הסובייקטיבית המבוססת על ניסיון וידע אישיים אינה מסוגלת למצוא את הפתרון האופטימלי; יתרה מכך שיטה שכזאת לעיתים גורמת לאיחורים בהתייצבויות הרכבים וכתוצאה מכך – להטלת קנסות, חוסר שביעות רצונם של הלקוחות ופגיעה במוניטין החברה. כפי שצויין קודם, השאיפה היא להעמיס על כל נהג כמה שיותר נסיעות, אך המרחקים של נסיעות הסרק בדרך כלל אינם נלקחים בחשבון כלל – כל אלה מניבים עלויות תפעול מיותרות, הנגרמות מסידור עבודה המאופייין בריבוי מרכיבי עלות מיותרים - נסיעות סרק, שעות עבודה של נהגים, בלאי רכבים.

6. תאור חלופות

6.1 פיתוח מערכת אופטימיזציה בהתאמה אישית

6.1.1 התאמת מודל DARP ואלגוריתם VNS

באמצעות ניסוח מתאים של הבעיה והאילוצים ניתן לבטא אספקטים שונים התואמים את המציאות – הומוגניות/הטרוגניות של ציי הרכבים, ריבוי חניוני לילה, הגבלת שעות נהיגה של הנהגים וכן אפשרות שכירת רכבים ממיקור חוץ על מנת להיענות לכל הביקושים. תת פרקים 6.1.1.1-6.1.1.5 סוקרים התאמות שנדרש לבצע במודל DARP על מנת להביאו לתיאור מדויק ומציאותי יותר של בעיית הסעות – ביטוי מפורש לפונקציית עלות והתאמת פונקציית מטרה לאלגוריתם VNS הנבחר, ריבוי חניוני לילה, ציי רכבים הטרוגני וקיבולת רכבים הניתנת להתאמה, וסטוכסטיות זמני נסיעה. מעתה והלאה יעשה שימוש במונח DARP-IL לציון DARP בקונפיגורציה הישראלית. כפי שהוזכר בפרק 3, ל-DARP יש הרבה תכונות משותפות ל-DARP-IL, יחד עם זאת חשוב לציין את הפער המהותי הקיים בין 2 הבעיות – DARP נועדה לתזמן כלי רכב עבור הזמנות הסעה שכל אחת מוגדרת ע"י מועד ומקום איסוף והורדת נוסעים ומרחב האופטימיזציה גלום בשילוב הזמנות שונות במסלול נסיעה אחד. לעומת זאת, ב-DARP-IL כל הזמנה מוגדרת ע"י מועד ומיקום של מספר נקודות איסוף ונקודת הורדה אחת (או נקודת איסוף בודדת ומספר נקודות הורדה); מטרת DARP-IL אם כך הינה תזמון אופטימאלי של כלי הרכב עבור כלל הזמנות הסעה הקיימות. בניגוד ל-DARP, DARP-IL לא מאפשר שילוב נוסעים השייכים ל-2 הזמנות שונות בהסעה אחת.

6.1.1.1 פונקציית מטרה

על פונקציית מטרה בניסוח הבעיה להיות תואמת לזאת שמשמשת את אלגוריתם VNS (משוואה 17), כמו כן על מנת לתת ביטוי מציאותי ל-DARP-IL, יש צורך להרחיב ולרשום הצגה מפורשת של פונקציית עלות עצמה.

Xiang et al. (2008) מציגים את אומדן לעלות נסיעה המקיף ביותר שמורכב מעלות קבועה של הנסיעה, העלות המשתנה של הרכב הנובעת מקילומטראז', עלות נהיגה, עלות ההמתנה, עלות השירות, עלות שעות הנוספות לנהג ועלות האיחור:

$$c_{ij}x_{ij}^k = C_{fix} + C_{mileage} + C_{drive} + C_{wait} + C_{service} + C_{overwork} + C_{delay} \quad (18)$$

נרחיב ונפרט על מרכיבי המשוואה:

- C_{fix} מבטא את העלות הקבועה הנובעת מתשלומי בונוס מעלון, בונוס פיצול ובונוס רבעוני.
- $C_{mileage}$ מציין את העלות המשתנה הנובעת ממרחק שהרכב נסע. עלות זאת מגלמת עלות הדלק ועלות האחזקה, כפי שתואר בפרק 4.5.

- C_{drive} מייצג את עלות הנהג שנובעת משעות העבודה שלו.
- C_{wait} – עלות המתנה שיכולה להיגרם במקרים בהם הרכב ממתין לתחילת הנסיעה.
- $C_{service}$ – עלות שאינה רלוונטית ל-DARP-IL ולכן ניתן להשמיט את המרכיב הזה.
- $C_{overwork}$ – הינה עלות שעות עבודה נוספות של נהג. עלות זאת קיימת רק אם הנסיעה מבוצעת במסגרת שעות נוספות של הנהג.
- C_{delay} - עלות האיחור לנקודת i , אשר מחושבת על ידי Xiang et al. (2008) על בסיס 2 תעריפי קנסות r_1 ו- r_2 והנחה ש- r_2 גדול ממש מ- r_1 , כך שסידור עבודה סופי יימנע ככל האפשר ממצב $A_i > l'_i$:

$$C_{delay}^i = \begin{cases} 0 & \text{if } A_i \leq l_i, \\ r_1 \times (A_i - l_i) & \text{if } l_i < A_i \leq l'_i, \\ r_1 \times (l'_i - l_i) + r_2 \times (A_i - l'_i) & \text{if } A_i > l'_i \end{cases} \quad (19)$$

אך מאחר והאלגוריתם הנבחר (VNS) כבר עושה שימוש במקדמי קנסות על הפרת אילוץ זמן (משוואה 17), השימוש בפרמטר C_{delay} היה מהווה כפילות ולכן יש להשמיטו מפונקציית עלות. באופן כללי, השימוש בשיטת הקנסות מאפשרת להניח הנחה מציאותית של אפשרות האיחורים וכתוצאה מכך – להחליש את אילוץ (13) ולהציג אותו כך:

$$e_i \leq B_i^k \quad (v_i \in V', k = 1, \dots, m) \quad (20)$$

פונקציית עלות נסיעה מעודכנת הינה:

$$c_{ij}x_{ij}^k = C_{fix} + C_{mileage} + C_{drive} + C_{wait} + C_{overwork} \quad (18.1)$$

פונקציית המטרה המעודכנת הינה:

$$f(s) = c(s) + \alpha w(s) + \beta r(s) + \gamma q(s) = \sum_{v_i \in V} \sum_{v_j \in V} \sum_{k=1}^m c_{ij}x_{ij}^k + \alpha w(s) + \beta r(s) + \gamma q(s) \quad (21)$$

6.1.1.2 ריבוי חניונים

להתאמת המודל של Cordeau (2006) למצב בו הרכבים שייכים לחניוני לילה שונים (כפי שהוצג בפרק 4.1.2, הרכבים צמודים לנהגים וחונים ברחוב סמוך לבתייהם), אומצה השיטה של Braekers et al. (2014), המציעה לעשות שימוש בנקודות דמה של איסוף והורדה לכל רכב. נקודות אלה מהוות בפועל חניון לילה של כל רכב, אשר ממנו הוא יוצא בתחילת יום העבודה ואליו הוא חוזר בסיומו. שינוי זה מצריך הגדרה מחדש של סט הקודקודים:

$$V = \{0, 2(m+n) + 1\} \cup P^d \cup P^u \cup D^d \cup D^u$$

P^d מייצג את אוסף נקודות דמה לאיסוף (dummy pick-up), P^u – אוסף נקודות אמת לאיסוף (user pick-up), D^d – אוסף נקודות דמה להורדה (dummy delivery), ו- D^u – אוסף נקודות אמת להורדה. טבלה 6.1.2.1 מרכזת את סימונים הרלוונטיים.

הערות	תת קבוצה	סימון
סט קודקודים	$\{0, 2(m+n)+1\} \cup P^d \cup P^u \cup D^d \cup D^u$	V
חניון מלאכותי של תחילת יום עבודה		0
חניון מלאכותי של סיום יום עבודה		$2(m+n)+1$
אוסף נקודות דמה לאיסוף	$\{1, \dots, m\}$	P^d
אוסף נקודות אמת לאיסוף	$\{m+1, \dots, m+n\}$	P^u
אוסף נקודות דמה להורדה	$\{m+n+1, \dots, 2m+n\}$	D^d
אוסף נקודות אמת להורדה	$\{2m+n+1, \dots, 2(m+n)\}$	D^u

טבלה 6.1.2.1 – סיכום סימונים של מודל של Braekers et al. (2014)

הסימונים שמסדירים את היחסים בין החניונים המלאכותיים, נקודות דמה ונקודות אמיתיות מובאים להלן:

$$(i, 0), (2(m+n)+1, i) \quad \forall i \in V \quad (22)$$

$$(0, j) \quad \forall j \in V \setminus P^d \quad (23)$$

$$(i, 2n+1) \quad \forall i \in V \setminus D^d \quad (24)$$

$$(i, j) \quad \forall i \in P^d, j \in D^u \cup D^d, j \neq n+i \quad (25)$$

$$(i, j) \quad \forall j \in D^d, i \in P^u \cup P^d, j \neq n+i \quad (26)$$

הסימונים 22-24 מבטיחים שחניונים המלאכותיים (0 ו- $2(m+n)+1$) מחוברים רק לנקודות דמה של איסוף והורדה בהתאמה. מנקודת דמה לאיסוף ניתן להגיע רק לנקודת אמת לאיסוף או לנקודת דמה להורדה המתאימה (25). אל נקודת דמה להורדה ניתן להגיע רק מנקודת אמת להורדה או מנקודת דמה לאיסוף המתאימה (26). הסימונים 22-26 מחליפים את הסימונים 2-4 בניסוח המקורי.

6.1.1.3 הטרוגניות ציי הרכבים וקיבולת הניתנת להתאמה

כזכור מפרק 4.1.1, קיימים 2 סוגים עיקריים של נוסעים – נכים המתניידים באמצעות כסא גלגלים ונוסעים רגילים. לעומת זאת, המודל של Cordeau (2006) מניח קיום סוג בודד של נוסעים. Paquette et al. (2013) מציגים את הרחבה

של מודל של Cordeau (2006) שמוניחה קיום 2 סוגי נוסעים – כך שכל רכב k יכול להסיע עד C_1^k נוסעים לא מוגבלים ועד- C_2^k נוסעים המתניידים על גבי כסאות גלגלים. בניסוח של Paquette et al. (2013) האילוץ (8) של הניסוח המקורי מיוצג על ידי זוג אילוצים (אחד לכל סוג נוסע):

$$Q_{1j}^k \geq (Q_{1i}^k + q_{1j})x_{ij}^k \quad (v_i, v_j \in V', k = 1, \dots, m) \quad (27)$$

$$Q_{2j}^k \geq (Q_{2i}^k + q_{2j})x_{ij}^k \quad (v_i, v_j \in V', k = 1, \dots, m) \quad (28)$$

בדומה לכך, זוג האילוצים הבא מחליף את אילוץ (10) במודל של Cordeau (2006):

$$\max\{0, q_{1i}\} \leq Q_{1i}^k \leq \min\{C_1^k, C_1^k + q_{1i}\} \quad (v_i \in V', k = 1, \dots, m) \quad (29)$$

$$\max\{0, q_{2i}\} \leq Q_{2i}^k \leq \min\{C_2^k, C_2^k + q_{2i}\} \quad (v_i \in V', k = 1, \dots, m) \quad (30)$$

החיסרון של המודל של Paquette et al. (2013) הוא בהנחה שמקומות המיועדים לנוסע מסוג 1 אינם יכולים לשמש את הנוסעים מסוג 2 או הפוך. בפועל, רכבי מעלון המאפשרים התאמת קיבולת לכל אחד מסוגי נוסעים (r_1 -ו- r_2) בזמן קצר מאוד. ניתן להתגבר על חיסרון זה באמצעות ביטוי תלות הדדית של קיבולת משולבת על ידי המשוואה:

$$C_1^k = x - 2C_2^k, \quad C_2 \in \{0, \dots, y\} \quad (31)$$

שבה המשתנים x ו- y מייצגים בהתאמה את המספר המקסימאלי האפשרי של נוסעים מסוג 1 ו-2 ברכב k . הצבת ערכים מתאימים של x ו- C_2 מניבה קיבולת התואמת את הקונפיגורציית הנוכחית של רכב ספציפי.

6.1.1.4 סטוכסטיות ושונות משך נסיעה

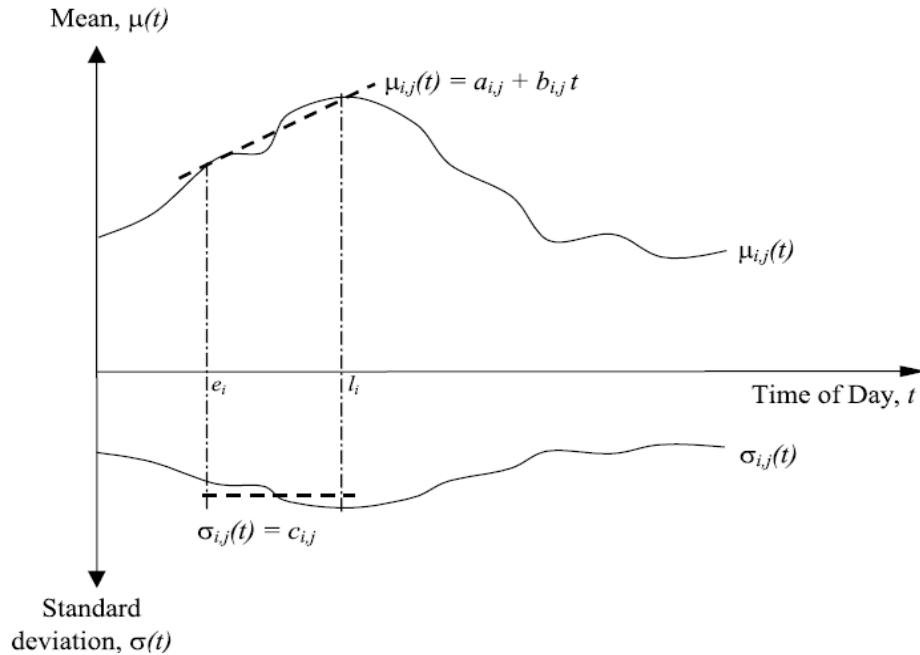
זמני נסיעה בסביבה אורבנית הינם סטוכסטיים ונתונים לשונות הנובעת מעומסי תנועה משתנים, תאונות דרכים, תקלות רמזור וארועים בלתי צפויים אחרים. עובדה זאת חייבת להילקח בחשבון בתהליך בניית סידור עבודה. Fu (2002) מציג דיון מעמיק בנושא השפעת שונות וסטוכסטיות של זמני נסיעה על תזמון כלי תחבורה ומציג DARPS (DARP with time varying (dynamic), stochastic times).

עבור כל זוג נקודות (i, j) נגדיר את $\{X_{ij}(t), t \in T\}$ המבטא תהליך סטוכסטי, אשר מייצג זמן נסיעה של רכב מנקודה i לנקודה j , בהינתן זמן יציאתו מנקודה i הינו t (הינו תחום הזמן). לכל משתנה t , ממוצע וסטיית תקן של $X_a(t)$ מיוצגים על ידי $\mu_{ij}(t)$ ו- $\sigma_{ij}(t)$ בהתאמה. ההנחה הינה שזמן נסיעה ממוצע ($\mu_{ij}(t)$) מיוצג בקירוב על ידי פונקציה ליניארית של זמן עזיבה (t) של הרכב את הנקודה i , וסטיית התקן ($\sigma_{ij}(t)$) מחושבת כקבוע (ראה גרף 6.1.1.4.1):

$$\mu_{ij}(t) = a_{ij} + b_{ij}t \quad (32)$$

$$\sigma_{ij}(t) = c_{ij} \quad (33)$$

הינם משתנים שניתנים לחישוב מתוך נתוני משך נסיעות. a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}



גרף 6.1.1.4.1. מודל זמן נסיעה סטוכסטי

במהלך יישום סידור עבודה נתון, זמן ההגעה (A) והעזיבה (D) ב-2 נקודות איסוף/הורדה עוקבות ניתן להגדרה על ידי המשוואות הבאות:

$$A_i = D_{i-1} + X_{i-1,i}(D_{i-1}) \quad (34)$$

$$D_i = \begin{cases} e_i, & A_i < e_i \\ A_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (35)$$

יש לציין את השפעתו של האופי הסטוכסטי של זמני נסיעה על זמן הגעה וזמן עזיבה של כל נקודת איסוף/הורדה, אשר ניתנים בעקבות כך להגדרה כמשתנים מקריים – התפלגותם של משתנים מקריים אלה תלויות בהתפלגות זמני נסיעה $X_{ij}(t)$, חלונות זמן של נקודות איסוף/הורדה ספציפיות (e_i, l_i) וסידור עבודה נתון. Fu & Rilett (1998) הראו שחישוב פונקציות התפלגות דומות הינה בעיה מתמטית סבוכה, לכן על מנת לפשט את הבעיה נדרשות ההנחות הבאות:

1. זמני הגעה ועזיבה של כל הנקודות בכל הנסיעות מתפלגים נורמלי עם הממוצעים וסטיות התקן התלויות רק בהתפלגויות זמני עזיבה של הנקודה הקודמת וזמן הנסיעה מנקודה הקודמת. הנחה זאת נתמכת על ידי משפט הגבול המרכזי ואומתה אמפירית בשלב הסימולציה של עבודתו של Fu (2002).
2. בסיום כל נסיעה (כלומר כשרכב ריק מנוסעים), השונות בזמן עזיבה אל נקודת ההתיצבות של הנסיעה הבאה, אשר תלוי בזמן עזיבה מתוכנן (ידוע) ובזמן ההגעה בפועל אל הנקודה האחרונה (מקרי), יכולה "להיספג" על ידי תגובה של הנהג על סטיה מסידור עבודה המתוכנן (לדוגמא הגברת מהירות במקרה של איחור בלוח הזמנים).

בהתבסס על הנחה (1), ניתן לחשב את התפלגות משתני זמן ההגעה (A) וזמן העזיבה (D) באמצעות ממוצעים וסטיות התקן שלהם, לכן נגדיר פונקציה $g_{i-1,i}(t)$ המחזירה זמן צפוי להגעת הרכב לנקודה i, אם הוא יוצא בזמן t מנקודה i-1:

$$g_{i-1,i}(t) = t + \mu_{i-1,i}(t) = t + a_{i-1,i} + b_{i-1,i}t = (1 + b_{i-1,i})t + a_{i-1,i} \quad (36)$$

כעת, בהתבסס על משוואות (32), (33), (34) ו-(36), ניתן להגדיר משוואות רקורסיביות לממוצע ושונות של זמני הגעה:

$$E[A_i] = E[D_{i-1}] + E[X_{i-1,i}(D_{i-1})] = E[D_{i-1}] + \mu_{i-1,i}(E[D_{i-1}]) = g_{i-1,i}(E[D_{i-1}]) \quad (37)$$

$$\begin{aligned} Var[A_i] &= \{1 + \mu'_{i-1,i}(E[D_{i-1}])\} \cdot Var[D_{i-1}] + \sigma_{i-1,i}^2(E[D_{i-1}]) \\ &= \{1 + b_{i-1,i}\} \cdot Var[D_{i-1}] + c_{i-1,i}^2 \end{aligned} \quad (38)$$

$\mu'_{ij}(t)$ מסמן נגזרת ראשונה של זמן נסיעה ממוצע מנקודה i לנקודה j.

תחת הנחות 1 ו-2, ניתן להפוך את משוואה (35) ל-2 קירובים הבאים:

$$E[D_i] = E[A_i] \quad (39)$$

$$Var[D_i] = Var[A_i] \quad (40)$$

על מנת לאמוד את הסתברות הגעת הרכב לנקודה נתונה בטווח הזמן המוגדר, נעשה שימוש במודל הסתברותי (β) מסמן את רמת סמך מינימלית נדרשת):

$$P(e_i \leq A_i \leq l_i) \geq \beta \quad (41)$$

$$P(e_i \leq A_i \leq l_i) = \Phi\left(\frac{l_i - E[A_i]}{\sqrt{Var[A_i]}}\right) - \Phi\left(\frac{e_i - E[A_i]}{\sqrt{Var[A_i]}}\right) \geq \beta \quad (42)$$

6.1.1.5 הניסוח המעודכן

על מנת להביא את הניסוח של המודל להתאמה סופית של בעיית הסעת נוסעים כפי שקיימת בישראל, מלבד השינויים שהוצגו בפרקים 6.1.1.1-6.1.1.4, נציג ניסוח מעט שונה שמתחשב בעובדה שכל הסעה מהווה רצף טבעי עצמאי. DARP-

IL ניתנת להצגה על גבי גרף $G=(V,A)$, שבו $V = \{v_0, v_1, \dots, v_{2n+1}\}$ הינו אוסף הקודקודים המתארים נקודות מוצא ויעד של הרכבים (לרוב – נקודות איסוף והורדת הנוסעים), ו-

$$A = \{(v_i, v_j), v_i, v_j \in V, i \neq j\}$$

הינו אוסף קשתות. כל הסעה o (order) כוללת נקודת מוצא v_i , נקודת יעד v_{n+i} , ואוסף נקודות ביניים

$V_o = \{v_{i+1}, v_{i+2}, \dots, v_{n+i-1}\}$. נקודות מוצא, יעד וביניים יכולות לשמש נקודות העלת נוסעים או הורדת נוסעים, אך לא יחד. נגדיר 2 סוגי נסיעות – איסוף ופיזור. בנסיעות מסוג איסוף הנוסעים נאספים בנקודת מוצא ונקודות הביניים

ומוסעים אל נקודת היעד בה כולם יורדים מהרכב (דוגמא אופיינית – הסעת עובדים מבתייהם למקום עבודתם בתחילת יום עבודה). בנסיעות מסוג פיזור כל הנוסעים עולים לרכב בנקודת מוצא ומוסעים אל נקודות ביניים ונקודת סיום

(דוגמא אופיינית – הסעת עובדים ממקום עבודה אל בתייהם בסיום יום העבודה). קודקודים v_0 ו- v_{2n+1} מייצגים

בהתאמה חניונים שמהם הרכבים יוצאים בתחילת המסלול ואליהם הרכבים חוזרים בסיומו. $V' = V \setminus \{v_0, v_{2n+1}\}$

מייצג תת-קבוצה של V שקודקודי חניונים אינם חלק ממנה. T_k מייצג גבול עליון למשך מסלול (סידור עבודה) המבוצע

על ידי רכב k . המודל מניח קיום 2 סוגי נוסעים r_1 ו- r_2 (resources). כל קודקוד v_i מאופיין על ידי מטען q_{1i} ו- q_{2i}

המהווה כמות נוסעים מכל סוג, ומקיים עבור נקודות מוצא ויעד $\sum_{r=1}^2 \sum_{j=i+1}^{i+n} q_{rj} = - \sum_{r=1}^2 q_{ri}$, זמן שירות d_i

וחלון זמן $[e_i, l_i]$. כל קשת (v_i, v_j) מאופיינת על ידי עלות נסיעה בביצוע על ידי רכב k - c_{ij}^k (כפי שצויין בפרק 4.5 עלויות

משתנות של רכבים מסוגים שונים אינן זהות) וזמן נסיעה t_{ij} . המסלול (או סידור העבודה) R_k של רכב k מוגדר על ידי

קבוצת הסעות אותן הוא מבצע. המשתנה הבינרי x_o^k מקבל ערך 1 אם ורק אם רכב k מבצע הסעה o . המשתנים הבאים

מגדירים תזמון הרכבים. **במהלך ביצוע הסעה** זמן הגעה של רכב k לקודקוד v_i מסומן על ידי A_i^k , זמן התחלת השירות

של רכב k בקודקוד v_i שווה ל- $B_i^k \geq \max\{e_i, A_i^k\}$, וזמן עזיבת קודקוד v_i על ידי רכב k מסומן על ידי

$D_i^k = B_i^k + d_i$. זמן המתנה בקודקוד v_i הינו חיובי רק כאשר הגבול התחתון של חלון הזמן גדול מזמן ההגעה:

$W_i^k = \max\{0, B_i^k - A_i^k\}$. זמן נסיעה של נוסע i ברכב k מוגדר כ- $H_i^k = B_{n+i}^k - D_i^k$ וערכו לא יכול לחרוג מעבר

לזמן נסיעה מקסימלי מותר L . Q_{ri}^k מסמן את תפוסת מקומות מסוג r של רכב k בעזיבת קודקוד v_i . **לאחר ביצוע הסעה**

o , זמן הגעת הרכב לנקודת ההתייצבות של ההסעה הבאה בסידור העבודה שלו $(o+1)$ הינו

$$A_{o+1}^k = D_o^k + t_{(n+i)o, i_{o+1}}$$

טבלה 6.1.1.5.1 מסכמת התאמות שבוצעו במודל המקורי ומציגה השוואת תכונות של DARP ו-DARP-IL.

DARP-IL	DARP	תכונה/מודל
העברת נוסעים מנקודת איסוף אל נקודת הורדה. מותר ריבוי נקודות איסוף ונקודות הורדה עבור אותה הזמנה. אסור שילוב נוסעים השייכים להזמנות שונות בנסיעה אחת.	העברת נוסעים מנקודת איסוף בודדת אל נקודת הורדה בודדת. מותר שילוב נוסעים השייכים להזמנות שונות בנסיעה אחת.	מהות השירות
מפורט – $c_{ij}x_{ij}^k = C_{fix} + C_{mileage} + C_{drive} + C_{wait} + C_{overwork}$	לא מפורט	ביטוי לעלות נסיעה
מותרת וכפופה למקדמי קנסות – $\alpha w(s) + \beta r(s) + \gamma q(s)$	אסורה	הפרת אילוצי זמן, קיבולת ומשך נסיעה
ריבוי חניונים	חניון יחיד	פריסת חניונים
מתאימה ל-2 סוגי נוסעים, ניתנת להתאמה $Q_{1j}^k \geq (Q_{1i}^k + q_{1j})x_{ij}^k$ $Q_{2j}^k \geq (Q_{2i}^k + q_{2j})x_{ij}^k$ $C_1^k = x - 2C_2^k, \quad C_2 \in \{0, \dots, y\}$	מתאימה לסוג אחד של נוסעים, קבועה $Q_j^k \geq (Q_i^k + q_j)x_{ij}^k$	קיבולת רכבים
סטוכסטי	דטרמיניסטי	משך נסיעה

טבלה 6.1.1.5.1 – סיכום התאמות של DARP

להלן ההגדרה הפורמאלית של DARP-IL :

$$\text{Minimize} \quad \sum_{v_i \in V} \sum_{v_j \in V} \sum_{k=1}^m c_{ij}x_{ij}^k + \alpha w(s) + \beta r(s) + \gamma q(s) \quad (1')$$

$$\text{Subject to:} \quad \sum_{o \in O} \sum_{k=1}^m x_o^k = 1 \quad (2')$$

$$B_j^k \geq (B_i^k + d_i + t_{ij})x_{ij}^k \quad (v_i, v_j \in V', k = 1, \dots, m) \quad (3')$$

$$Q_{1j}^k \geq (Q_{1i}^k + q_{1j})x_{ij}^k \quad (v_i, v_j \in V', k = 1, \dots, m) \quad (4')$$

$$Q_{2j}^k \geq (Q_{2i}^k + q_{2j})x_{ij}^k \quad (v_i, v_j \in V', k = 1, \dots, m) \quad (5')$$

$$H_i^k = B_{n+i}^k - (B_i^k + d_i) \quad (v_i \in \{v_1, \dots, v_n\}, k = 1, \dots, m) \quad (6')$$

$$\max\{0, q_{1i}\} \leq Q_{1i}^k \leq \min\{C_1^k, C_1^k + q_{1i}\} \quad (v_i \in V', k = 1, \dots, m) \quad (7')$$

$$\max\{0, q_{2i}\} \leq Q_{2i}^k \leq \min\{C_2^k, C_2^k + q_{2i}\} \quad (v_i \in V', k = 1, \dots, m) \quad (8')$$

$$t_{i,n+i} \leq H_i^k \leq L \quad (v_i \in \{v_1, \dots, v_n\}, k = 1, \dots, m) \quad (9')$$

$$B_{2n+1}^k - B_0^k \leq T_k \quad (k = 1, \dots, m) \quad (10')$$

$$e_i \leq B_i^k \quad (v_i \in V', k = 1, \dots, m) \quad (11')$$

$$B_0^k \geq 0 \quad (k = 1, \dots, m) \quad (12')$$

$$B_{2n+1}^k \leq T \quad (k = 1, \dots, m) \quad (13')$$

$$x_o^k \in \{0,1\} \quad (o \in O, k = 1, \dots, m) \quad (14')$$

$$(i, 0), (2(m+n) + 1, i) \quad \forall i \in V \quad (15')$$

$$(0, j) \quad \forall j \in V \setminus P^d \quad (16')$$

$$(i, 2n + 1) \quad \forall i \in V \setminus D^d \quad (17')$$

$$(i, j) \quad \forall i \in P^d, j \in D^u \cup D^d, j \neq n + i \quad (18')$$

$$(i, j) \quad \forall j \in D^d, i \in P^u \cup P^d, j \neq n + i \quad (19')$$

6.1.1.6 עדכון אלגוריתם VNS

כפי שהוצג בפרק 3.4.7, החלק העיקרי של האלגוריתם, הינו חיפוש בסביבת הפתרון ההתחלתי s. החיפוש מתבצע באמצעות הפעלת מחלקות האלגוריתם (shakers , neighborhood classes) וכפוף לסדר וערכי פרמטר k הבאים (משמאל לימין): C1-GWOM2-ANSC-C2-GBDM2-GWOM4-S1-GOS2.

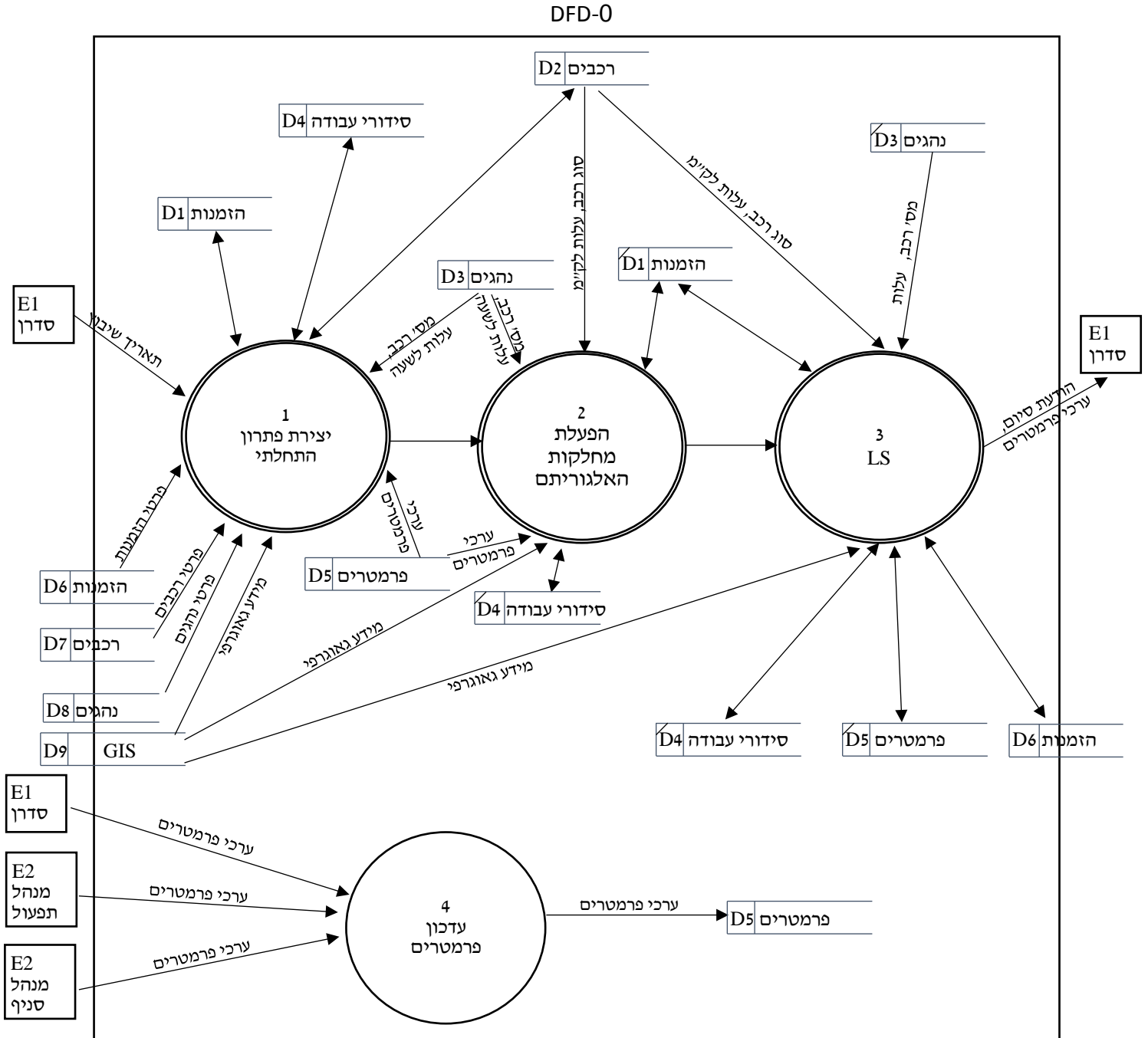
כזכור, המחלקה ANSC מבצעת החלפות של רצפים טבעיים בין כל סידורי העבודה, אך מאחר וב-DARP-IL כל הזמנה מהווה רצף טבעי בפני עצמו, הפעלת ANSC הופכת למיותרת וזאת מכיוון שכל העברות האפשריות מתקיימות על ידי שאר מחלקות האלגוריתם. היות ו-ANSC אינו חלק מאלגוריתם יותר, סדר הפעלת המחלקות החדש יהיה (משמאל לימין): C1-GWOM2-C2-GBDM2-GWOM4-S1-GOS2.

בנוסף, במסגת בניית פתרון התחלתי, ניתן להשמיט את השלב "הכנסת נקודת הורדה במקום הטוב ביותר האפשרי" בהקשר של הוספת נסיעות חדשות למסלול (כלומר, סידור עבודה) קיים, מאחר והוספת הזמנה חדשה למסלול קיים גוררת הוספת נקודת התחלה, כלל נקודות ביניים (איסוף/הורדה) ונקודת סיום המשוייכות לאותה נסיעה.

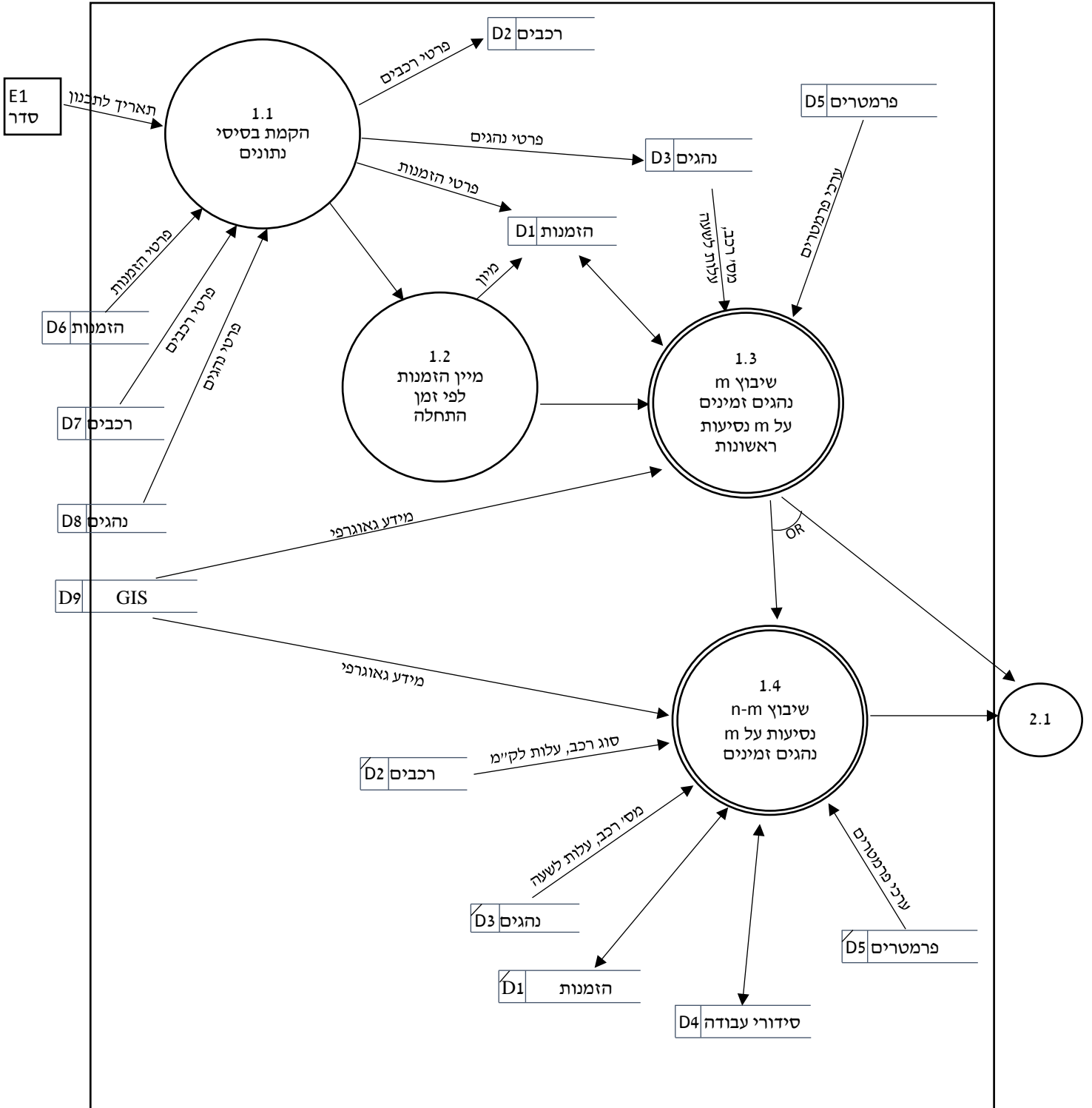
שני השינויים שהוצגו לעיל זניחים מבחינת מהות האלגוריתם, שיטת הפעלתו ואיכות התוצאות, אך צפויים לקצר את זמן הריצה מאחר וגורעים מסיבוכיות החישובית.

6.1.2 אפיון מערכת אופטימיזציה

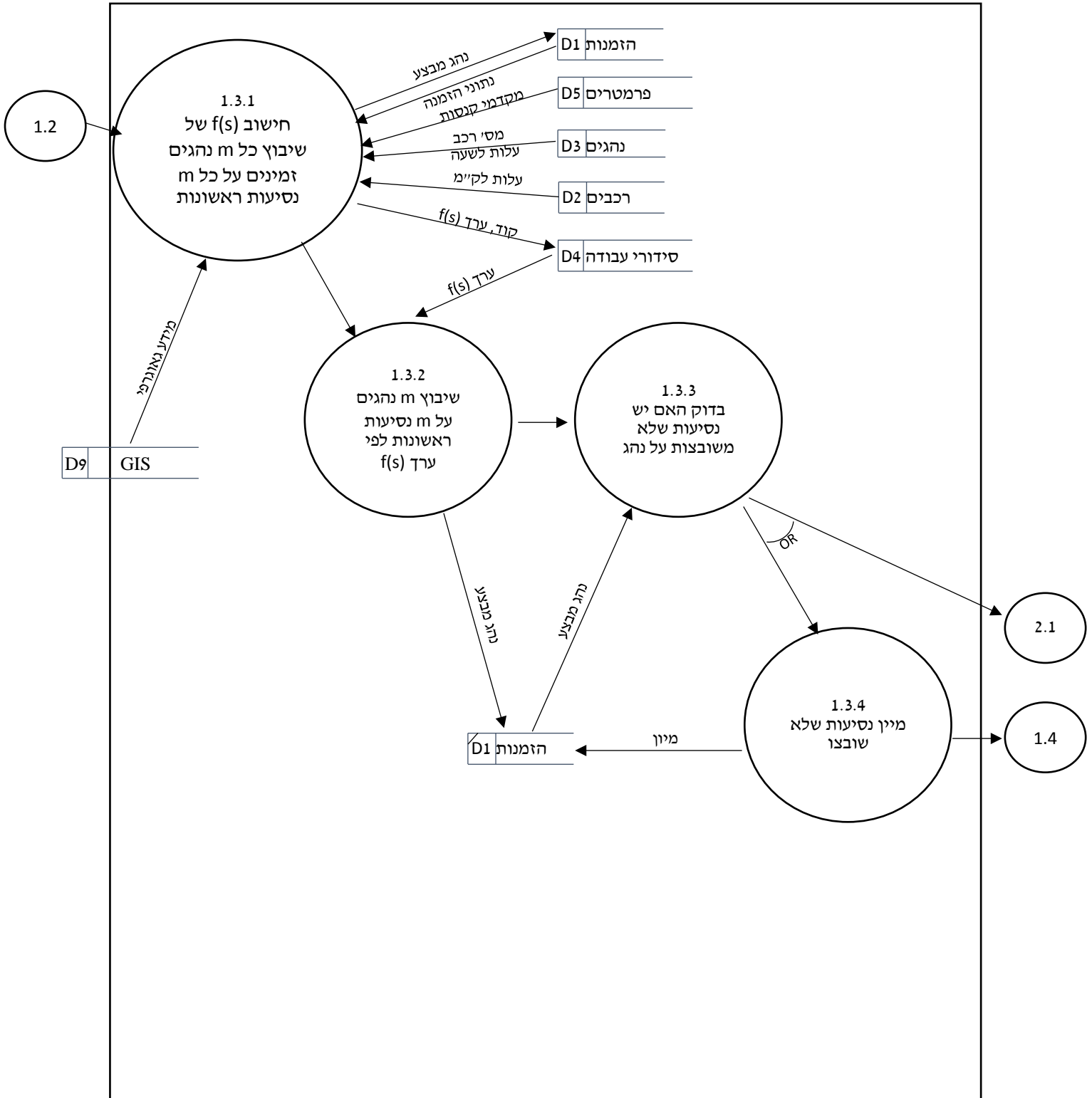
6.1.2.1 תרשימי DFD



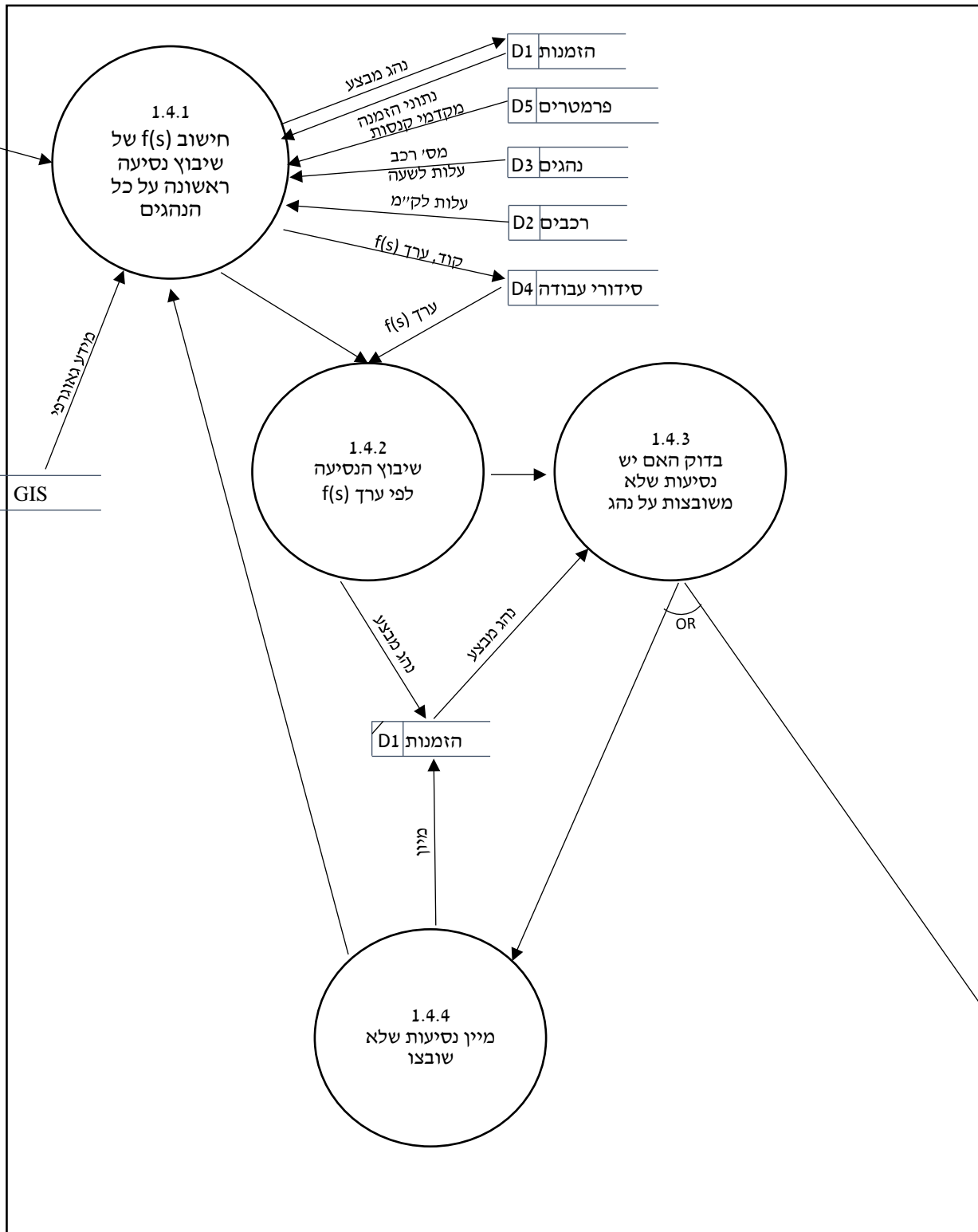
DFD-1



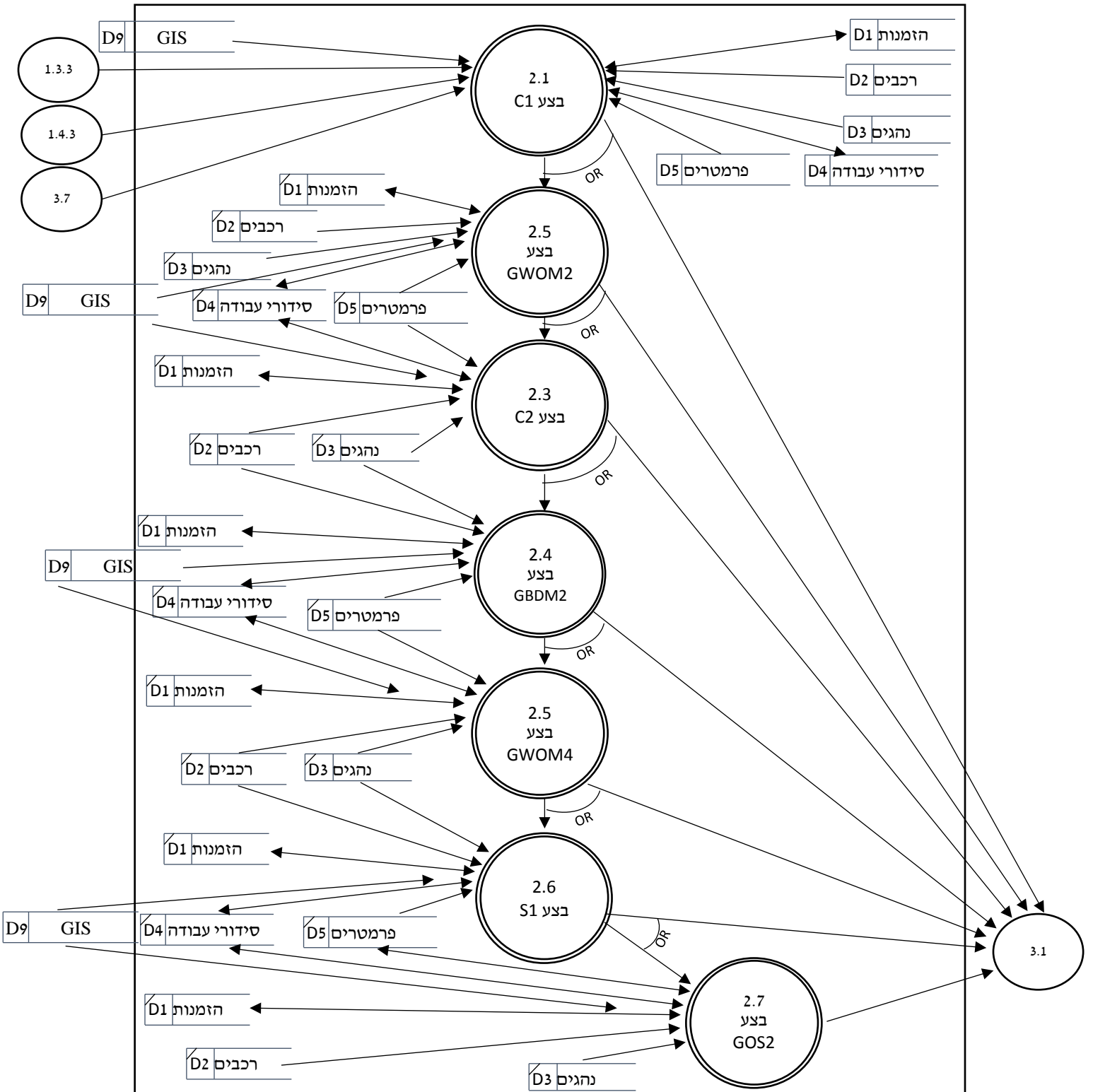
DFD-1.3



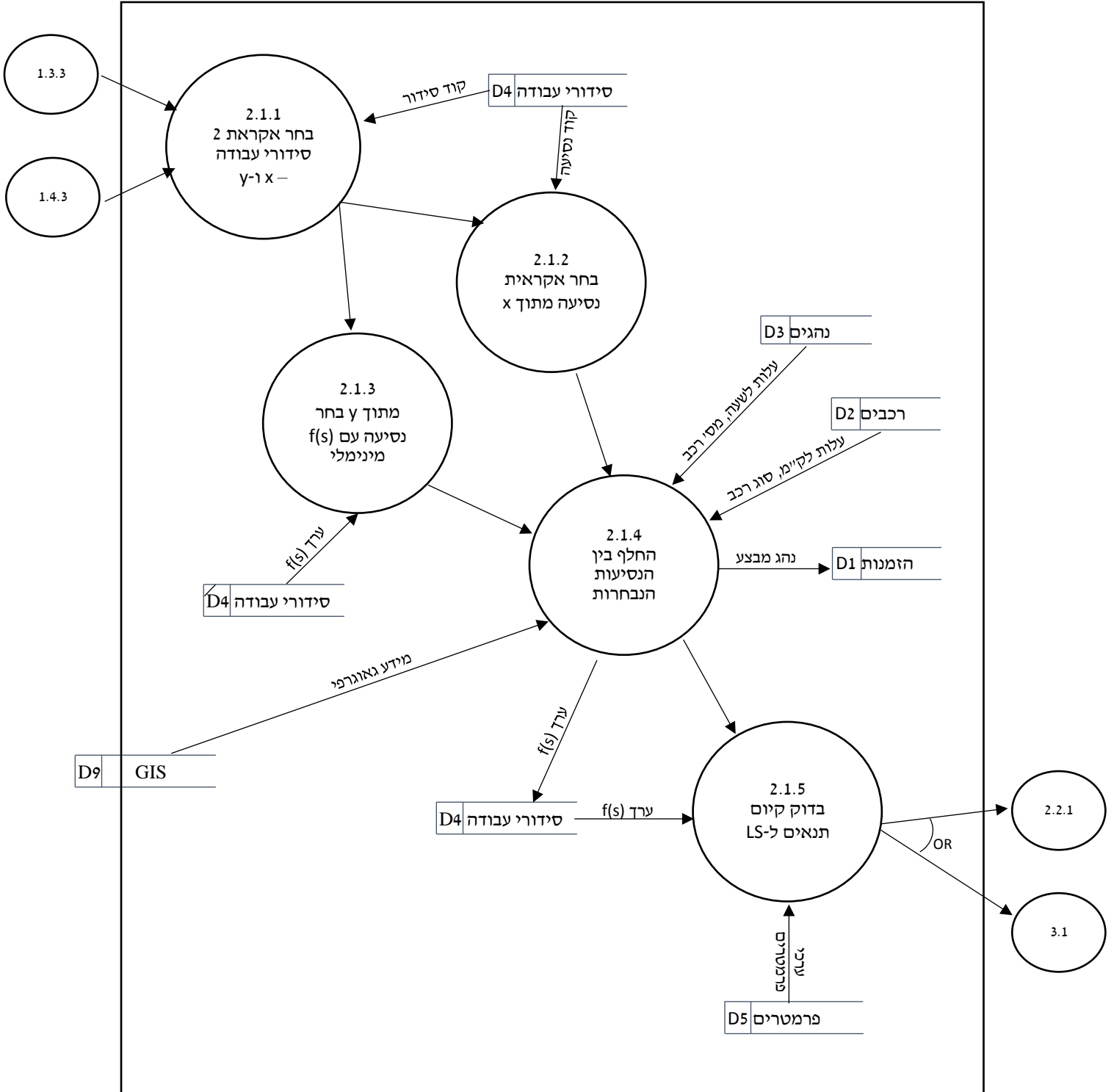
DFD-1.4



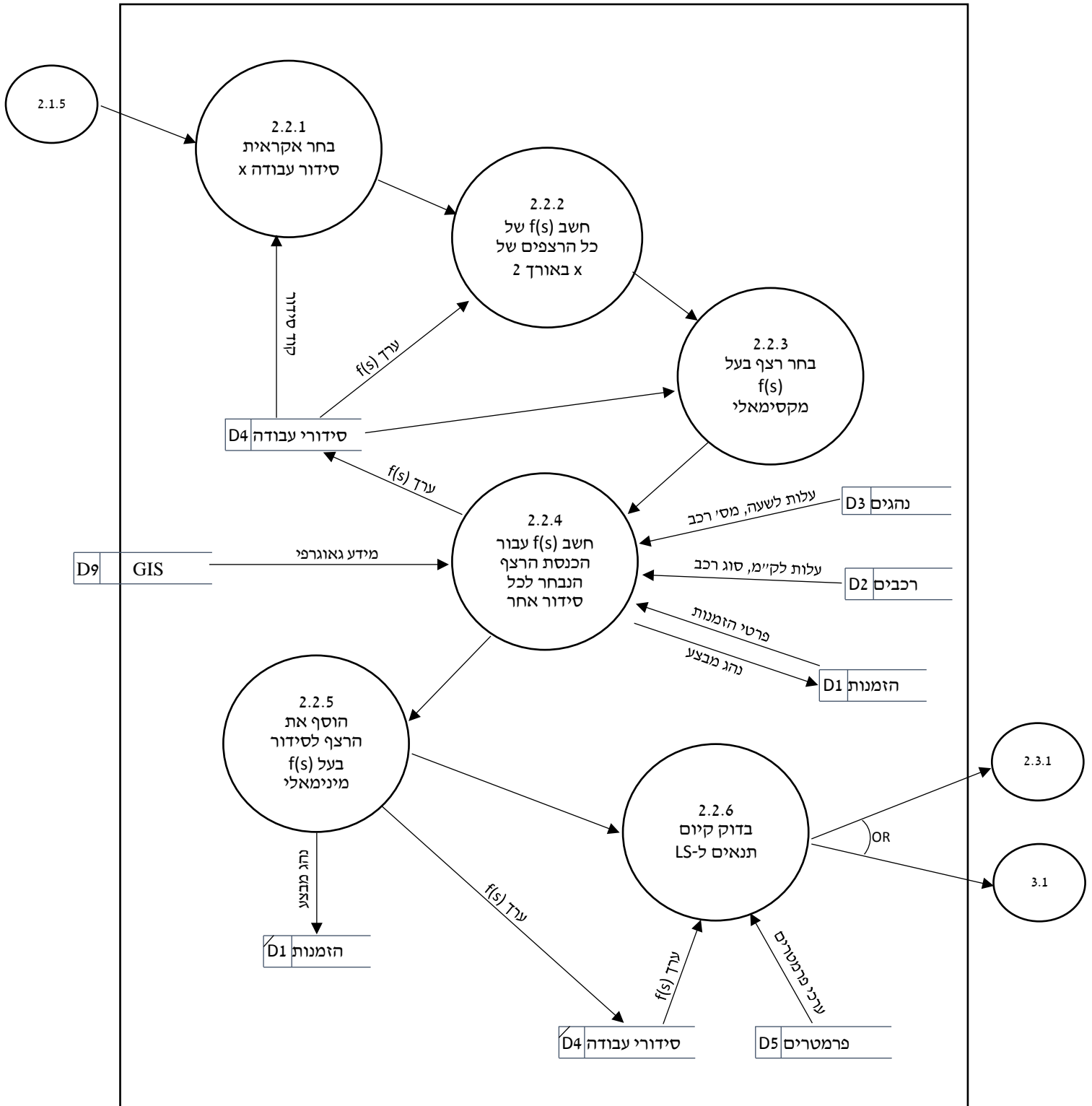
DFD-2



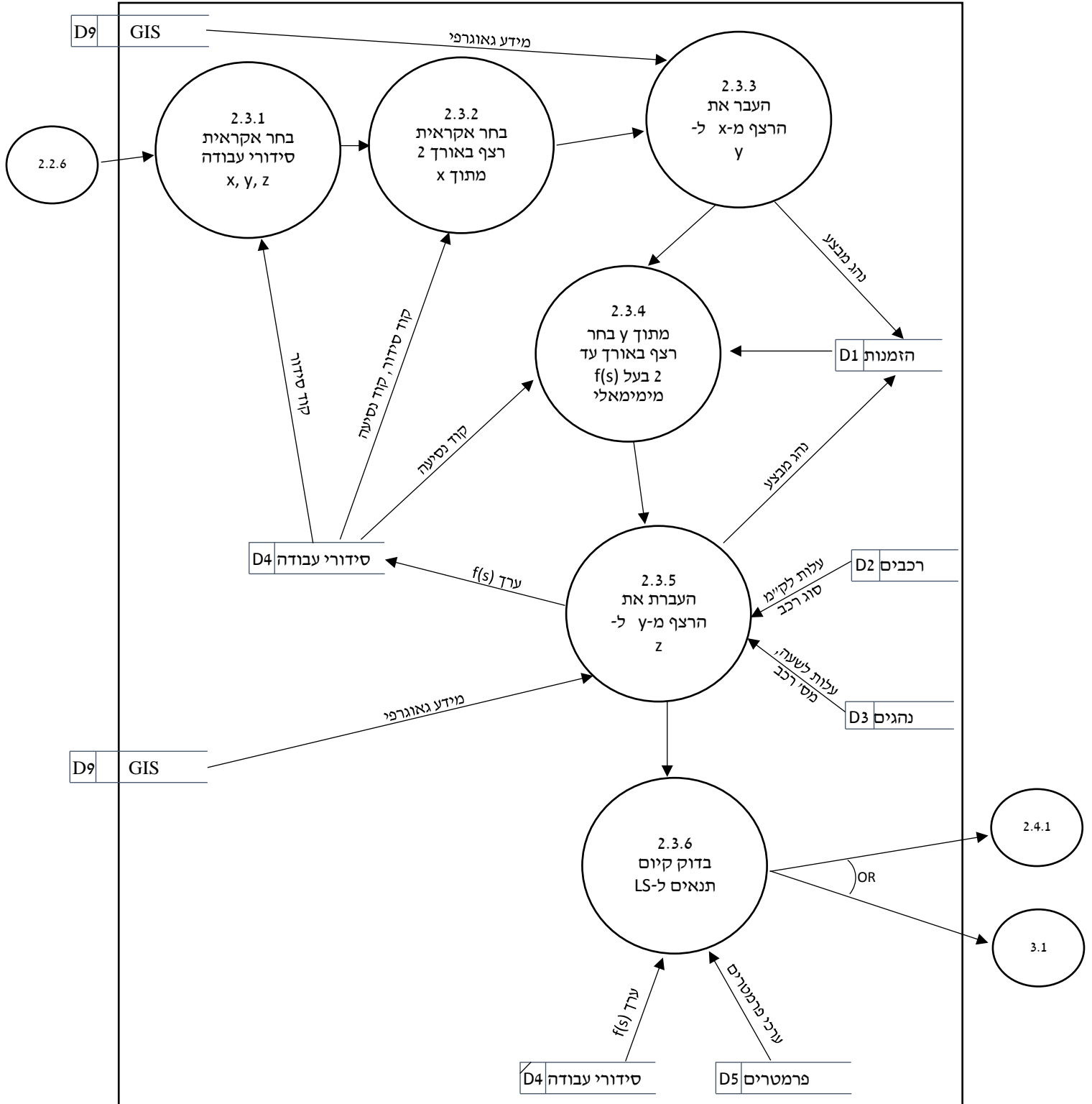
DFD-2.1



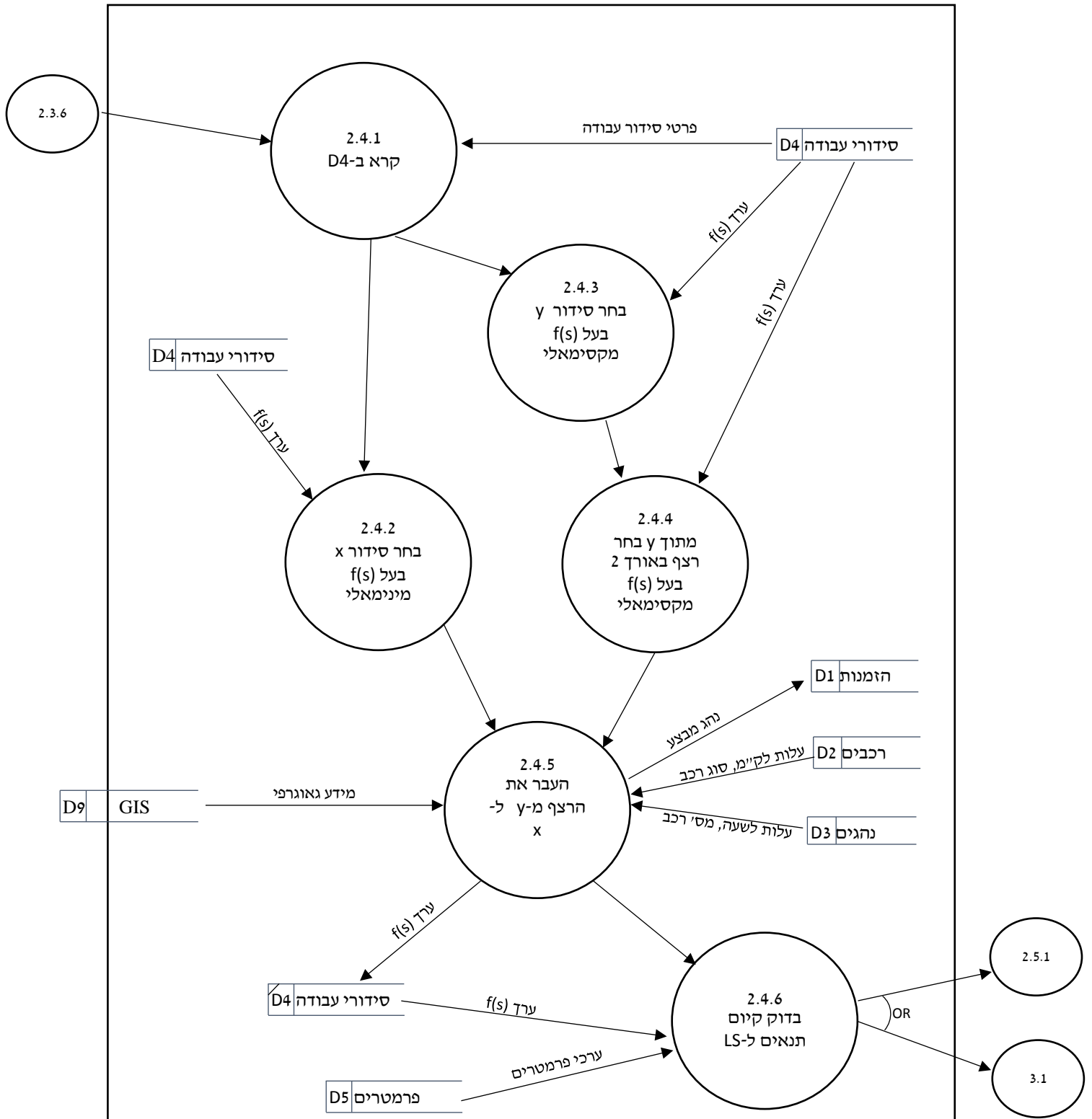
DFD-2.2



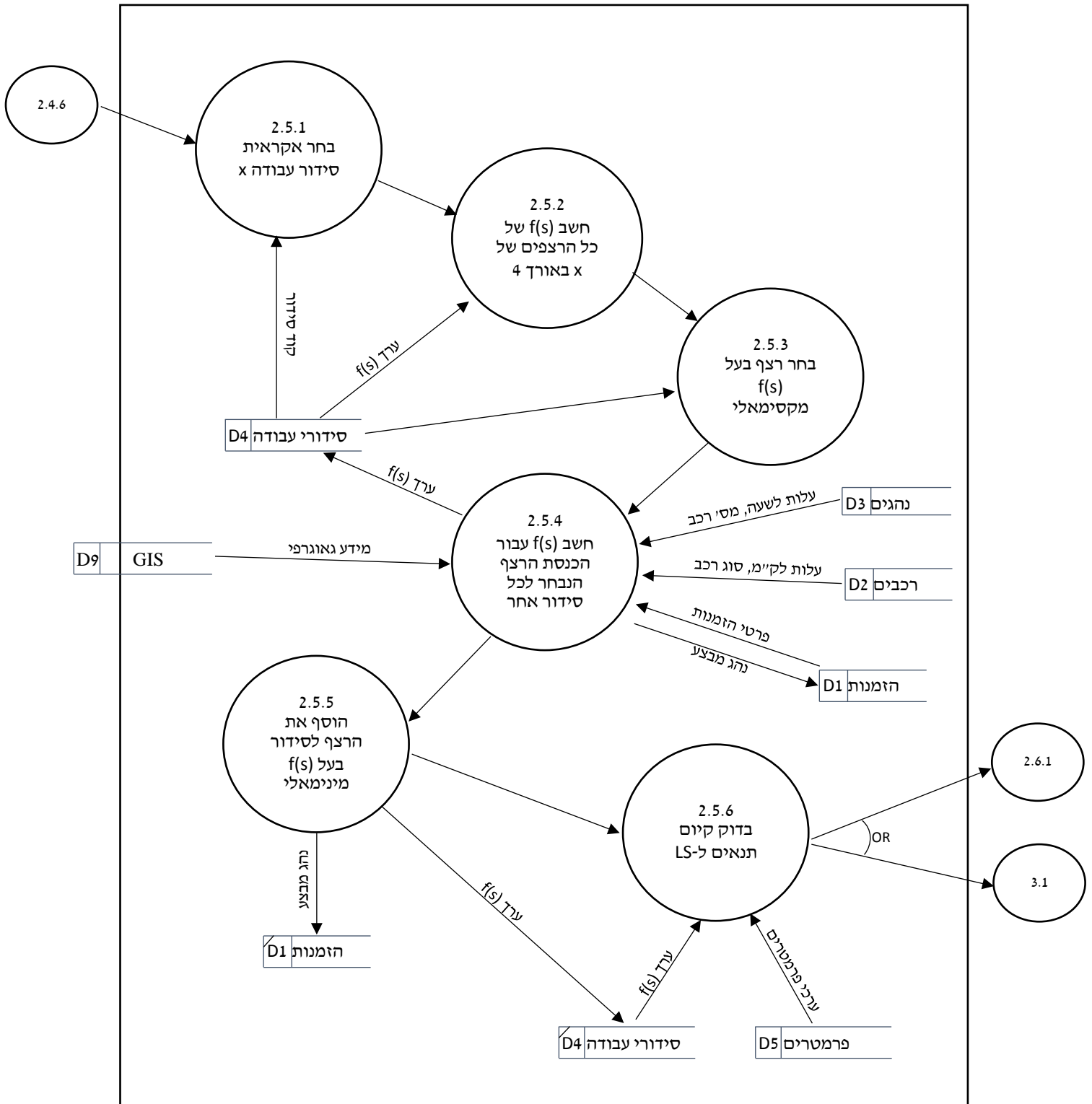
DFD-2.3



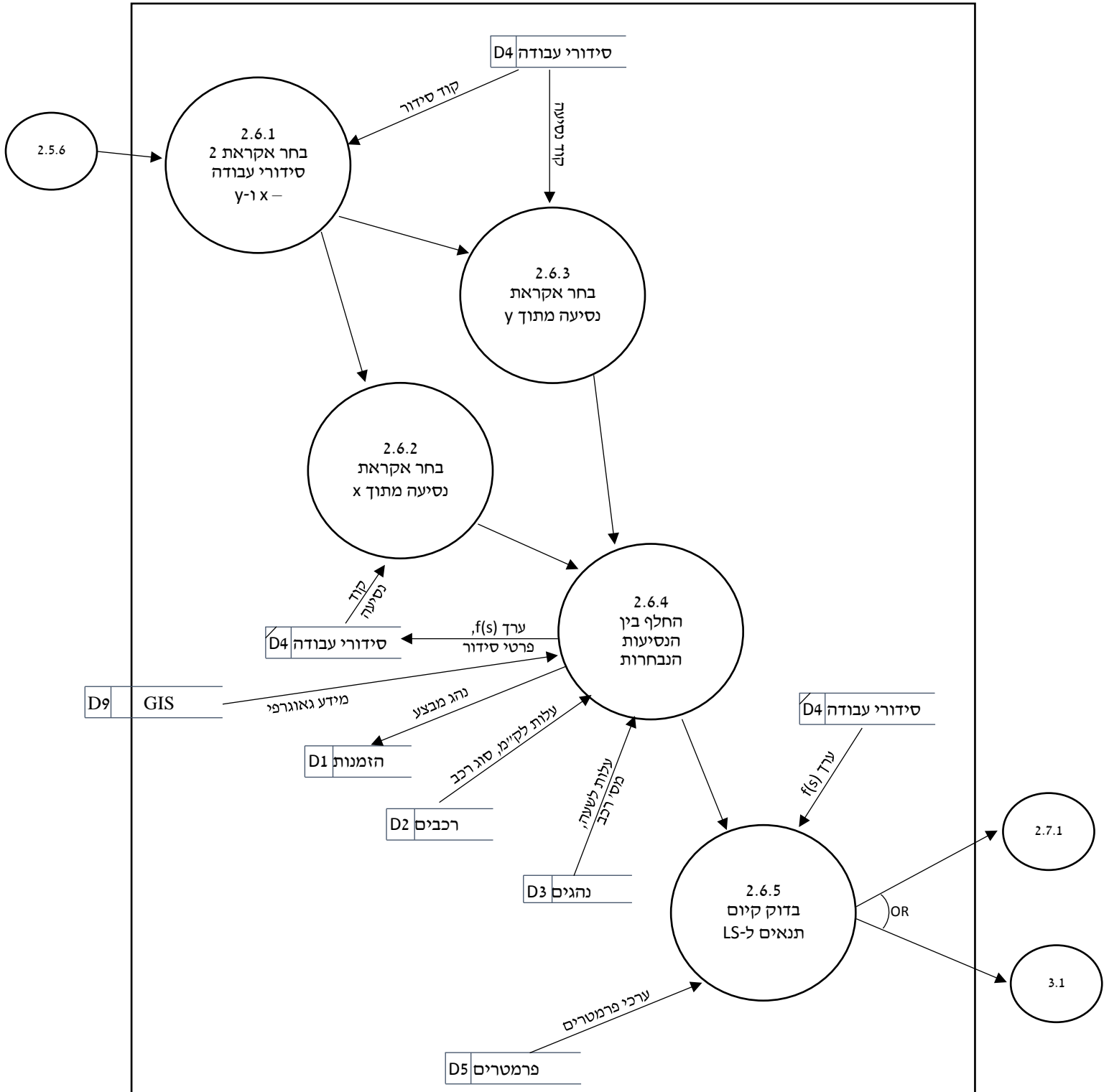
DFD-2.4



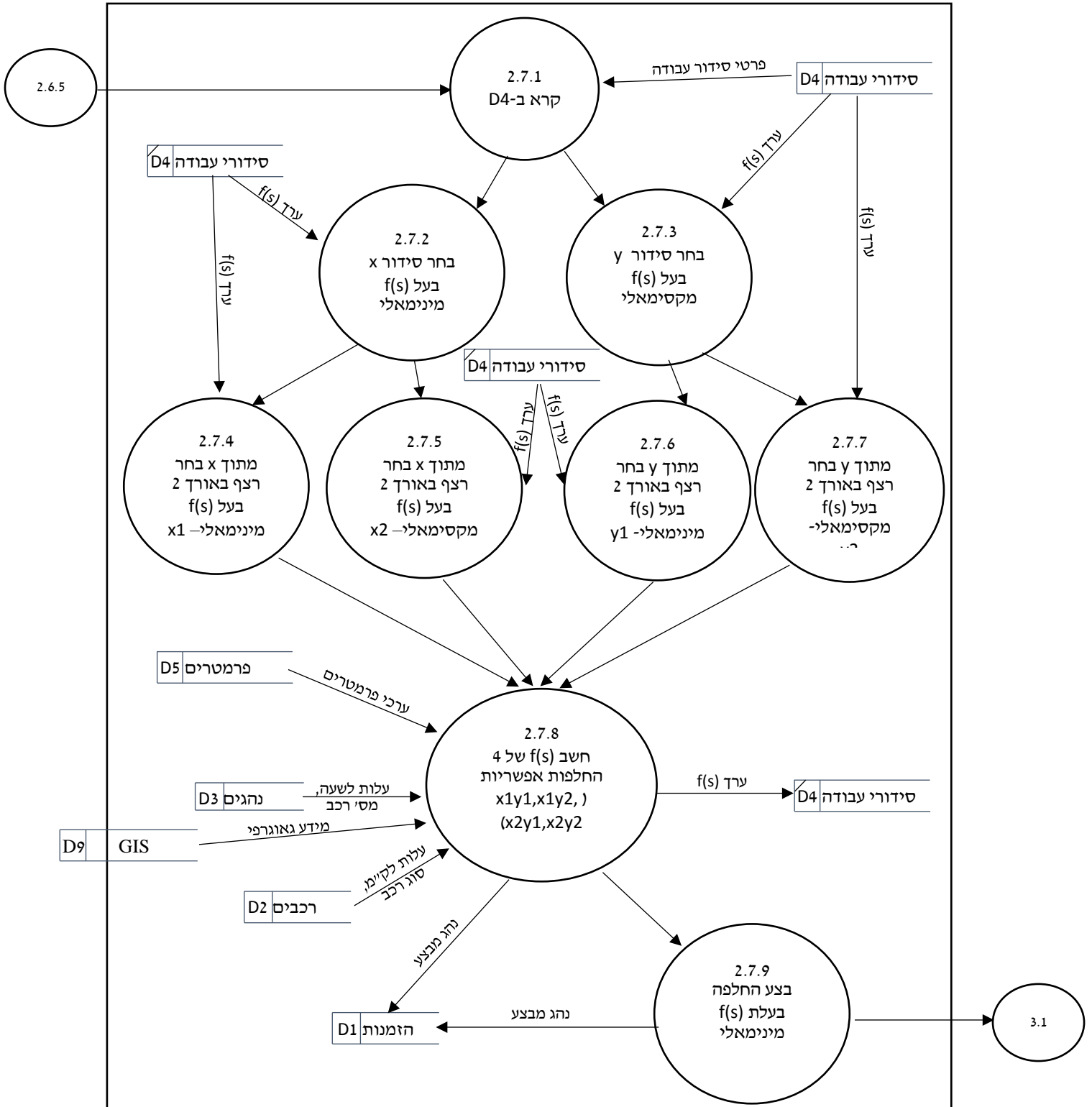
DFD-2.5



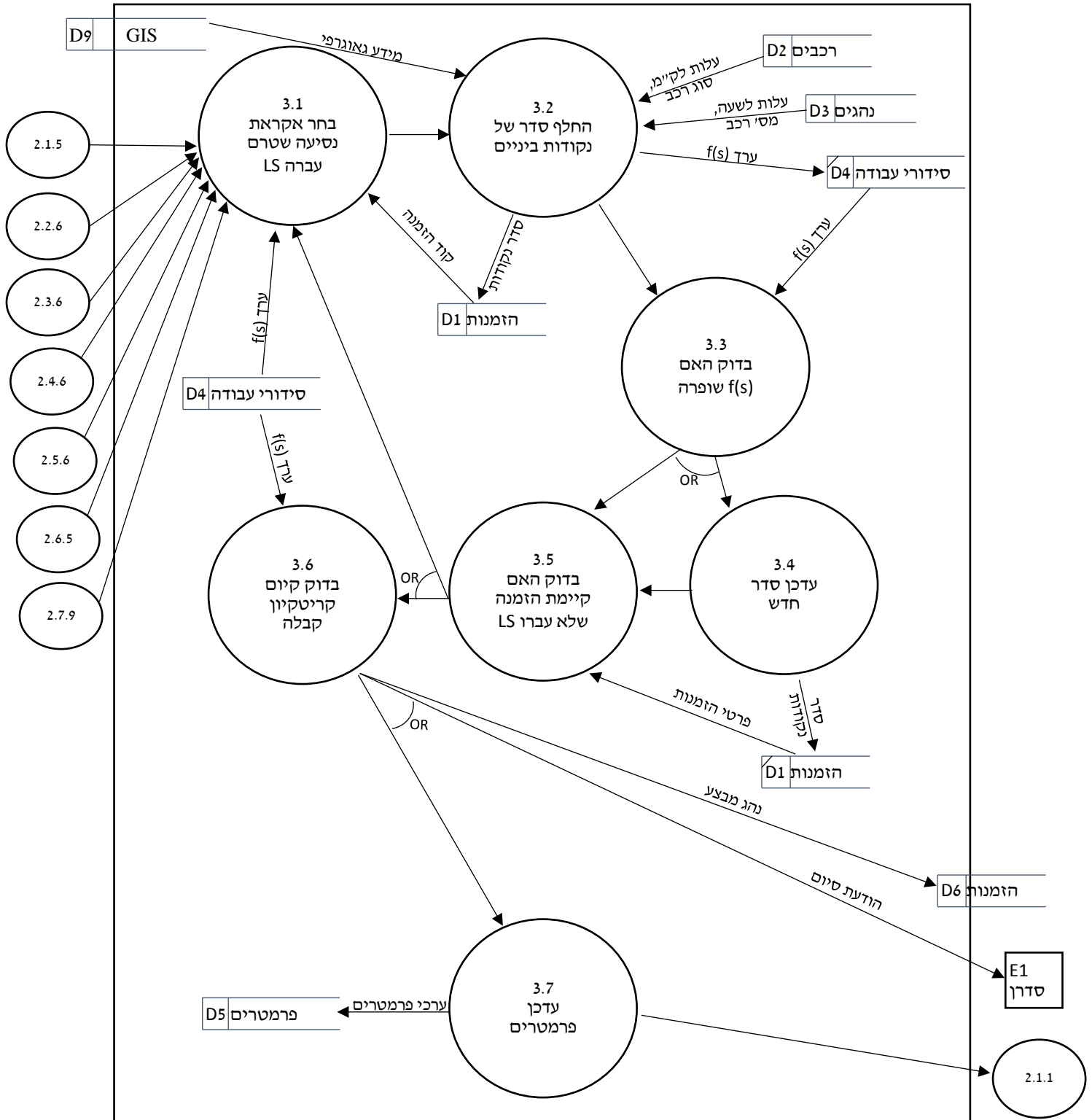
DFD-2.6



DFD-2.7



DFD-3

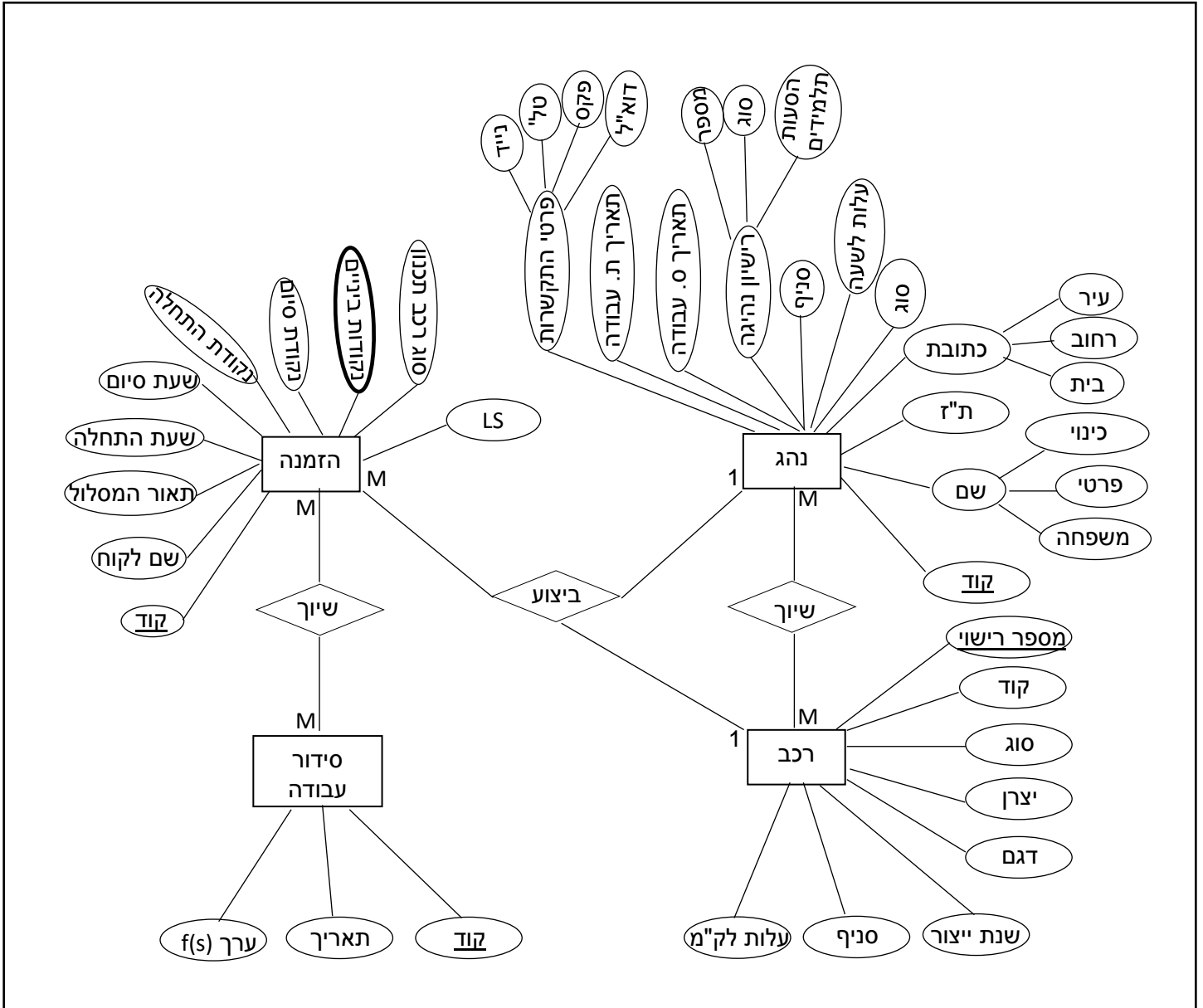


6.1.2.2 בסיסי נתונים

1. D1 הזמנות (קוד, שם לקוח, תאור מסלול, שעת התחלה, שעת סיום, נקודת התחלה-עיר, נקודת התחלה-רחוב, נקודת התחלה-מספר, נקודת סיום-עיר, נקודת סיום-רחוב, נקודת סיום-מספר, נקודות ביניים-עיר, נקודת ביניים-רחוב, נקודת ביניים-מספר, הסעות תלמידים, סוג רכב-תכנון, סוג רכב-ביצוע, נהג מבצע, מס' רכב מבצע, LS).
2. D2 רכבים (מספר רכב, קוד רכב, סוג רכב, יצרן, דגם, שנת ייצור, שם הנהג, סניף, עלות לק"מ).
3. D3 נהגים (קוד נהג, שם משפחה, שם פרטי, כינוי, ת"ז, סוג נהג, מספר רכב, תאריך התחלת עבודה, תאריך סיום עבודה, סניף, כתובת-עיר, כתובת-רחוב, כתובת-מס' בית, מספר טלפון, מספר טלפון נייד, מספר פקס, כתובת דוא"ל, הסעות תלמידים, דרגת רישיון נהיגה, מס' רישיון נהיגה, עלות לשעת עבודה).
4. D4 סידורי עבודה (קוד סידור, תאריך, קוד נהג, קודי נסיעות של הסידור, ערך פונקציית מטרה).
5. D5 פרמטרים (שם פרמטר, ערך פרמטר).
6. D6 הזמנות (מאגר מידע חיצוני) (קוד, שם לקוח, תאור מסלול, שעת התחלה, שעת סיום, נקודת התחלה, נקודת סיום, נקודות ביניים, הסעות תלמידים, סוג רכב-תכנון, סוג רכב-ביצוע, נהג מבצע, מס' רכב מבצע).
7. D7 רכבים (מאגר מידע חיצוני) (מספר רכב, קוד רכב, סוג רכב, יצרן, דגם, שנת ייצור, שם הנהג, סניף, עלות לק"מ).
8. D8 נהגים (מאגר מידע חיצוני) (קוד נהג, שם משפחה, שם פרטי, כינוי, ת"ז, סוג נהג, מספר רכב, תאריך התחלת עבודה, תאריך סיום עבודה, סניף, כתובת-עיר, כתובת-רחוב, כתובת-מס' בית, מספר טלפון, מספר טלפון נייד, מספר פקס, כתובת דוא"ל, הסעות תלמידים, דרגת רישיון נהיגה, מס' רישיון נהיגה, עלות לשעת עבודה).
9. GIS D9 (מאגר מידע חיצוני) (נ"צ מוצא, נ"צ יעד, זמן ביצוע נסיעה, ממוצע משך נסיעה, סטיית תקן למשך נסיעה, מרחק נסיעה).

מאגרי המידע החיצוניים – D6, D7 ו-D8 שייכים למערת לניהול ציי הרכב Fleet Control, בה החברה משתמשת לניהול ליבת פעילותה העסקית – הפעולות התפעוליות ופעולות אחרות שקשורות להן כולל הוצאת חשבוניות, פיקוח קציני בטיחות בתעבורה ועוד. מאגר מידע חיצוני (Geographic Information System) GIS שייך למערכת מידע גאוגרפית Google ומספק למערכת אופטימיזציה נתונים אודות מרחקים וזמני משך נסיעות.

תרשים ERD המייצג את היחסים בין סוגי ישויות שונים בבסיסי נתונים מוצג באיור 6.1.2.2.1



איור 6.1.2.2.1 – תרשים ERD

6.1.2.3 מילון הנתונים

6.1.2.3.1 מילון הפונקציות

מספר מזהה	שם הפונקציה	סוג הפונקציה	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	תאור
1	יצירת פתרון התחלתי	כללית	D5 ,D4 ,D3 ,D2 ,D1 ,E1 ,D8 ,D7 ,D6	D5 ,D4 ,D3 ,D2 ,D1	הפונקציה יוצרת פתרון התחלתי s, בהתאם לשלב ראשון של אלגוריתם VNS.
1.1	הקמת בסיסי נתונים	יסודית	E1 – תאריך תכנון D6 – פרטי הזמנות D7 – פרטי רכבים D8 – פרטי נהגים	D1 – פרטי הזמנות D2 – פרטי רכבים D3 – פרטי נהגים	Start Read PlanningDate from E1 Retrieve Orders for Planning Date from D6 Retrieve Vehicles from D7 Retrieve Drivers from D8 Write Orders for Planning Date to D1 Write Vehicles to D2 Write Drivers to D3 End
1.2	מיין הזמנות לפי זמן התחלה	יסודית	D1 – פרטי הזמנות	D1 – מיון	Start Retrieve Orders from D1 Sort Orders by StartTime ascending Write OrdersSorted to D1 End

מספר מזהה	שם הפונקציה	סוג הפונקציה	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	תאור
1.3	שיבוץ m נהגים זמינים על m נסיעות ראשונות	כללית	D1, D3, D5	D1	הפונקציה יוצרת סידור עבודה בעל נסיעה אחת לכל m נהגים זמינים
1.3.1	חישוב f(s) של שיבוץ כל m נהגים זמינים על כל m נסיעות ראשונות	יסודת	D1 – נתוני הזמנות D2 – עלות לק"מ D3 – מס' רכב, עלות לשעה D5 – מקדמי קנסות	D1 – נהג מבצע D4 – קוד, ערך f(s)	<p>Start</p> <p>Retrieve Orders from D1</p> <p>Retrieve AvailableDrivers from D3</p> <p>D=0 (Drivers), O=0 (Orders)</p> <p>Do while <O=Max_D></p> <p> Do while <D=Max_D></p> <p> OrderDriver=DriverCode</p> <p> Calculate EvalFun for O</p> <p> OrderDriver=NULL</p> <p> D=D+1</p> <p> End while</p> <p> O=O+1</p> <p>End while</p> <p>Write ItineraryCode and Val_EvalFun to D4</p> <p>End</p>

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
Start Retrieve Itineraries from D4 Sort Itineraries by Val_EvalFun ascending I=0 (Itineraries), O=0 (Orders) Do while I=Max_I Do while O=Max_D If <OrderDriver=Null> I_OrderDriver=OrderDriver O=O+1, I=I+1 Else O=O+1, I=I+1 ItineraryStatus=Inactive End If End while End while Write OrderDrivers to D1 End	D1 – נהג מבצע	D4 – ערך f(s)	יסודת	שיבוץ m נהגים על m נסיעות ראשונות לפי ערך f(s)	1.3.2

מספר מזהה	שם הפונקציה	סוג הפונקציה	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	תאור
1.3.3	בדוק האם יש נסיעות שלא משובצות על נהג	יסודת	D1 – נהג מבצע		<p>Start</p> <p>Retrieve Orders from D1</p> <p>O=0, UO=0 (Unmanned Orders)</p> <p>If <O_Driver=NULL></p> <p style="padding-left: 20px;">UO=+1, O=+1</p> <p style="padding-left: 20px;">Else O=+1</p> <p>End If</p> <p>If <UO>0></p> <p style="padding-left: 20px;">Invoke function 1.3.4</p> <p style="padding-left: 20px;">Else Invoke function 2.1</p> <p>End If</p> <p>End</p>
1.3.4	מיון נסיעות שלא שובצו	יסודת		D1 – מיון	<p>Start</p> <p>Retrieve Orders from D1</p> <p>Sort UnmannedOrders by StartTime ascending</p> <p>Write OrdersSorted to D1</p>
1.4	שיבוץ n-m נסיעות על m נהגים זמינים	כללית	D5 ,D4 ,D3 ,D2 ,D1	D4 ,D1	<p>הפונקציה מבצעת שיבוץ נסיעות שנותרו לא משובצות על הנהגים הזמינים.</p>

מספר מזהה	שם הפונקציה	סוג הפונקציה	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	תאור
1.4.1	חישוב $f(s)$ של שיבוץ נסיעה ראשונה על כל הנהגים	יסודית	D1 – נתוני הזמנות D2 – עלות לק"מ D3 – מס' רכב, עלות לשעה D5 – מקדמי קנסות	D1 – נהג מבצע D4 – ערך $f(s)$, קוד	Start Retrieve O=0 from D1 Retrieve AvailableDrivers from D3 Do while <D=Max_D> OrderDriver=DriverCode Calculate EvalFun for O OrderDriver=NULL D=D+1 End while Write ItineraryCode and Val_EvalFun to D4 End
1.4.2	שיבוץ הנסיעה לפי ערך $f(s)$	יסודית	D4 – ערך $f(s)$	D1 – נהג מבצע	Start Retrieve Itineraries from D4 Sort Itineraries by Val_EvalFun ascending I=0 (Itineraries), O=0 (Orders) Do while I=Max_I Do while O=Max_D If <OrderDriver=NULL>

מספר מזהה	שם הפונקציה	סוג הפונקציה	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	תאור
1.4.2					<pre> OrderDriver=I_OrderDriver O=O+1, I=I+1 Else O=O+1, I=I+1 ItineraryStatus=Inactive End If End while End while Write OrderDrivers to D1 End </pre>
1.4.3	בדוק האם יש נסיעות שלא משובצות על נהג	יסודית	D1 – נהג מבצע		<pre> Start Retrieve Orders from D1 O=0, UO=0 (Unmanned Orders) If <O_Driver=NULL> UO=UO+1, O=O+1 Else O=O+1 End If If <UO>0> </pre>

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
Invoke function 1.4.4 Else Invoke function 2.1 End If End					1.4.3
Start Retrieve Orders from D1 Sort UnmannedOrders by StartTime ascending Write orders to D1	D1 – מיון		יסודית	מיון נסיעות שלא שובצו	1.4.4
הפונקציה מפעילה מחלקות VNS כפי שמתואר בפרקים 3.4.2 ו-6.1.1.6	.D4 ,D1	.D5 ,D4 ,D3 ,D2 ,D1	כללית	הפעלת מחלקות האלגוריתם	2
הפונקציה מפעילה מחלקה C עם ערך הפרמטר השווה ל-1	.D4 ,D1	.D5 ,D4 ,D3 ,D2 ,D1	כללית	בצע C1	2.1
Start X, Y=null (random itineraries) X=RANDBETWEEN(1, Max_I) Do while <Y!=X> Y= RANDBETWEEN(1, Max_I) End while End		D4 – קוד	יסודית	בחר אקראית 2 סידורי עבודה – x ו-y	2.1.1

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
Start z=null (selected order from itinerary x) z= RANDBETWEEN(1, Max_O _x) End		D4 – קוד	יסודית	בחר אקראית נסיעה מתוך x	2.1.2
Start q=Y_Order with min Val_EvalFun End		D4 – ערך f(s)	יסודית	מתוך y בחר נסיעה עם f(s) מינימלי	2.1.3
Start q_Driver=X_Driver z_Driver=Y_Driver calculate Val_EvalFun for X _{new} calculate Val_EvalFun for Y _{new} write X _{new} , Y _{new} to D4 ItineraryStatus_X=Inactive ItineraryStatus_Y=Inactive End	D1 – נהג מבצע D4 – ערך f(s)	D2 – סוג רכב, עלות לק"מ D3 – מס' רכב, עלות לשעה	יסודית	החלף בין הנסיעות הנבחרות	2.1.4
Start Calculate c(s')		D5 – ערכי פרמטרים	יסודית	בדוק קיום תנאים ל-LS	2.1.5

מספר מזהה	שם הפונקציה	סוג הפונקציה	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	תאור
2.1.5					<p>If $\langle c(s') \rangle < \text{Ivalue1} * c(s) \rangle$ Invoke function 3.1 else Invoke function 2.2.1 end if End</p>
2.2	בצע GWOM2	כללית	.D5 ,D4 ,D3 ,D2 ,D1	.D4 ,D1	<p>הפונקציה מפעילה מחלקה GWOM עם ערך הפרמטר השווה ל-2</p>
2.2.1	בחר אקראית סידור עבודה x	יסודית	D4 – קוד סידור		<p>Start X=null (random itinerary) X=RANDBETWEEN(1, Max_I) End</p>
2.2.2	חשב $f(s)$ של כל הרצפים של x באורך 2	יסודית	D4 – ערך $f(s)$		<p>Start OrderX=0 (order at itinerary X) SumO=Val_EvalFun(OrderX)+Val_EvalFun(OrderX+1) Do while $\langle \text{OrderX}+1 = \text{Max_OrderX} \rangle$ Calculate SUM Order_X= Order_X +1 End while End</p>

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
Start S2=0 (selected 2-orders-length sequence with 1 st order=0) OrderX=0 (the 1 st order of selected sequence) OrderX=O_maxSumO End		f(s) ערך – D4	יסודית	בחר רצף בעל f(s) מקסימאלי	2.2.3
Start Retrieve Itinenaries from D4 I=0 Do while <I=Max_I> S2_Driver= I_Driver Calculate EvalFun for I S2_Driver=X_Driver I=I+1 End while End	D1 – נהג מבצע D4 – ערך f(s)	D1 – פרטי הזמנות D2 – סוג רכב, עלות לק"מ D3 – מס' רכב, עלות לשעה	יסודית	חשב f(s) עבור הכנסת הרצף הנבחר לכל סידור	2.2.4

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
Start Y=Min_EvalFun_I (selected itinerary) S2_Driver=Y_Driver calculate Val_EvalFun for X _{new} write X _{new} , Y _{new} to D4 ItineraryStatus_X=Inactive ItineraryStatus_Y=Inactive End	f(s) ערך – D4	D1 – נהג מבצע	יסודית	הוסף את הרצף לסידור בעל f(s) מינימאלי	2.2.5
Start Calculate c(s') If <c(s')<lsvalue1*c(s)> Invoke function 3.1 else Invoke function 2.3.1 end if End		f(s) ערך – D4 ערכי פרמטרים – D5	יסודית	בדוק קיום תנאים ל-LS	2.2.6
הפונקציה מפעילה מחלקה C עם ערך הפרמטר השווה ל-2	.D4 ,D1	.D5 ,D4 ,D3 ,D2 ,D1	כללית	בצע C2	2.3

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
<p>Start</p> <p>X, Y, Z=null (random itineraries)</p> <p>X=RANDBETWEEN(1, Max_I)</p> <p>Do while <Y!=X></p> <p style="padding-left: 20px;">Y= RANDBETWEEN(1, Max_I)</p> <p>End while</p> <p>Do while <Z!=X,Y></p> <p style="padding-left: 20px;">Z= RANDBETWEEN(1, Max_I)</p> <p>End while</p> <p>End</p>		D4 – קוד סידור	יסודית	בחר אקראית סידורי עבודה x, y, z	2.3.1
<p>Start</p> <p>S2=0 (selected 2-orders-length sequence with 1st order=0)</p> <p>OrderX=0 (the 1st order of selected sequence)</p> <p>OrderX= RANDBETWEEN(1, Max_O_x)</p> <p>End</p>		D4 – קוד סידור, קוד נסיעה	יסודית	בחר אקראית רצף באורך 2 מתוך x	2.3.2
<p>Start</p> <p>S2_Driver=Y_Driver</p>	D1 – נהג מבצע		יסודית	העבר את הרצף מ-x ל-y	2.3.3

מספר מזהה	שם הפונקציה	סוג הפונקציה	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	תאור
2.3.3					<p>calculate Val_EvalFun for X_{new}</p> <p>write X_{new}, Y_{new} to D4</p> <p>ItineraryStatus_X=Inactive</p> <p>ItineraryStatus_Y=Inactive</p> <p>End</p>
2.3.4	מתוך γ בחר רצף באורך עד 2 בעל $f(s)$ מינימאלי	יסודית	D1 – נתוני הזמנות D4 – קוד נסיעה		<p>Start</p> <p>S2=0 (selected 2-orders-length sequence at itinerary Y with 1st order=0)</p> <p>OrderY=0 (the 1st order of selected sequence at itinerary Y)</p> <p>SumO=Val_EvalFun(OrderY)+Val_EvalFun(OrderY+1)</p> <p>Do while <OrderY+1=Max_OrderY></p> <p> Calculate SumO</p> <p> Order_Y= Order_Y +1</p> <p>End while</p> <p>OrderY=O_minSumO</p> <p>End</p>

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
Start S2_Driver=Z_Driver calculate Val_EvalFun for Y_{new} calculate Val_EvalFun for Z_{new} write Y_{new}, Z_{new} to D4 ItineraryStatus_Y=Inactive ItineraryStatus_Z=Inactive End	D1 – נהג מבצע D4 – ערך $f(s)$	D2 – סוג רכב, עלות לק"מ D3 – מס' רכב, עלות לשעה	יסודית	העברת את הרצף מ- γ ל- z	2.3.5
Start Calculate $c(s')$ If $\langle c(s') \rangle < \text{lsvalue1} * c(s) \rangle$ Invoke function 3.1 else Invoke function 2.4.1 end if End		D4 – ערך $f(s)$ D5 – ערכי פרמטרים	יסודית	בדוק קיום תנאים ל-LS	2.3.6
הפונקציה מפעילה מחלקה GBDM עם ערך הפרמטר השווה ל-2	.D4 ,D1	.D5 ,D4 ,D3 ,D2 ,D1	כללית	בצע GBDM2	2.4

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
Start Retrieve Itineraries from D4 End		D4 – פרטי סידור עבודה	יסודית	קרא ב-D4	2.4.1
Start X=null (selected itinerary) X=minVal_EvalFun(I) End		D4 – ערך $f(s)$	יסודית	בחר סידור x בעל $f(s)$ מינימאלי	2.4.2
Start Y=null (selected itinerary) Y=maxVal_EvalFun(I) End		D4 – ערך $f(s)$	יסודית	בחר סידור y בעל $f(s)$ מקסימאלי	2.4.3
Start S2=0 (selected 2-orders-length sequence at itinerary Y with 1 st order=0) OrderY=0 (the 1 st order of selected sequence at itinerary Y) SumO=Val_EvalFun(OrderY)+Val_EvalFun(OrderY+1)		D4 – ערך $f(s)$	יסודית	מתוך y בחר רצף באורך 2 בעל $f(s)$ מקסימאלי	2.4.4

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
Do while <OrderY+1=Max_OrderY> Calculate SumO Order_Y= Order_Y +1 End while OrderY=O_maxSumO End					2.4.4
Start S2_Driver=X_Driver calculate Val_EvalFun for X _{new} calculate Val_EvalFun for Y _{new} write X _{new} , Y _{new} to D4 ItineraryStatus_Y=Inactive ItineraryStatus_Z=Inactive End	D1 – נהג מבצע D4 – ערך f(s)	D2 – סוג רכב, עלות לק"מ D3 – מס' רכב, עלות לשעה	יסודית	העבר את הרצף מ-y ל-x	2.4.5
Start Calculate c(s') If <c(s')<lsvalue1*c(s)> Invoke function 3.1		D4 – ערך f(s) D5 – ערכי פרמטרים	יסודית	בדוק קיום תנאים ל- LS	2.4.6

מספר מזהה	שם הפונקציה	סוג הפונקציה	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	תאור
2.4.6					else Invoke function 2.5.1 end if End
2.5	בצע GWOM4	כללית	.D5 ,D4 ,D3 ,D2 ,D1	.D4 ,D1	הפונקציה מפעילה מחלקה GWOM עם ערך הפרמטר השווה ל-4
2.5.1	בחר אקראית סידור עבודה x	יסודית	D4 – קוד סידור		Start X=null (random itinerary) X=RANDBETWEEN(1, Max_I) End
2.5.2	חשב f(s) של כל הרצפים של x באורך 4	יסודית	D4 – ערך f(s)		Start S4=0 (selected 4-orders-length sequence at itinerary X with 1 st order=0) OrderY=0 (the 1 st order of selected sequence at itinerary X) SumO=Val_EvalFun(OrderX)+Val_EvalFun(OrderX+1)+Val_EvalFun(OrderX+2)+Val_EvalFun(OrderX+3) Do while <OrderX+3=Max_OrderX> Calculate SumO

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
Order_X= Order_X +1 End while End					
Start OrderX=O_maxSumO End		f(s) – ערך D4	יסודית	f(s) בעל מקסימאלי	2.5.3
Start Retrieve Itinenaries from D4 I=0 Do while <I=Max_I> S4_Driver= I_Driver Calculate EvalFun for I S4_Driver=X_Driver I=I+1 End while End	D1 – נהג מבצע D4 – ערך f(s)	D1 – נתוני הזמנות D2 – סוג רכב, עלות לק"מ D3 – מס' רכב, עלות לשעה	יסודית	חשב f(s) עבור הכנסת הרצף הנבחר לכל סידור	2.5.4

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
Start Y=Min_EvalFun_I (selected itinerary) S4_Driver=Y_Driver calculate Val_EvalFun for X _{new} write X _{new} , Y _{new} to D4 ItineraryStatus_X=Inactive ItineraryStatus_Y=Inactive End	D1 – נהג מבצע	D4 – ערך f(s)	יסודית	הוסף את הרצף f(s) לסידור בעל מינימאלי	2.5.5
Start Calculate c(s') If <c(s')<lsvalue1*c(s)> Invoke function 3.1 else Invoke function 2.6.1 end if End		D4 – ערך f(s) D5 – ערכי פרמטרים	יסודית	בדוק קיום תנאים ל-LS	2.5.6
הפונקציה מפעילה מחלקה S עם ערך הפרמטר השווה ל-1	.D4 ,D1	.D5 ,D4 ,D3 ,D2 ,D1	כללית	בצע S1	2.6
Start X, Y=null (random itineraries)		D4 – קוד סידור	יסודית	בחר אקראית 2 סידורי עבודה – x ו-y	2.6.1

מספר מזהה	שם הפונקציה	סוג הפונקציה	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	תאור
2.6.1					X=RANDBETWEEN(1, Max_I) Do while <Y!=X> Y= RANDBETWEEN(1, Max_I) End while End
2.6.2	בחר אקראית נסיעה מתוך x	יסודית	D4 – קוד נסיעה		Start z=null (selected order from itinerary X) z= RANDBETWEEN(1, Max_O _x) End
2.6.3	בחר אקראית נסיעה מתוך y	יסודית	D4 – קוד נסיעה		Start q=null (selected order from itinerary Y) q= RANDBETWEEN(1, Max_O _y) End
2.6.4	החלף בין הנסיעות הנבחרות	יסודית	D2 – סוג רכב, עלות לק"מ D3 – מס' רכב, עלות לשעה D4 – ערך f(s), פרטי סידור	D1 – נהג מבצע	Start q_Driver=X_Driver z_Driver=Y_Driver calculate Val_EvalFun for X _{new} calculate Val_EvalFun for Y _{new}

מספר מזהה	שם הפונקציה	סוג הפונקציה	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	תאור
2.6.4					write X _{new} , Y _{new} to D4 ItineraryStatus_X=Inactive ItineraryStatus_Y=Inactive End
2.6.5	בדוק קיום תנאים ל-LS	יסודית	D4 – ערך f(s) D5 – ערכי פרמטרים		Start Calculate c(s') If <c(s')< svalue1*c(s)> Invoke function 3.1 else Invoke function 2.6.1 end if End
2.7	בצע GOS2	כללית	.D5 ,D4 ,D3 ,D2 ,D1	.D4 ,D1	הפונקציה מפעילה מחלקה GOS עם ערך הפרמטר השווה ל-2
2.7.1	קרא ב-D4	יסודית	D4 – פרטי סיור עבודה		Start Retrive Itineraries from D4 End

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
Start X=null (selected itinerary) X=minVal_EvalFun(I) End		f(s) ערך – D4	יסודית	בחר סידור x בעל f(s) מינימאלי	2.7.2
Start X=null (selected itinerary) X=maxVal_EvalFun(I) End		f(s) ערך – D4	יסודית	בחר סידור y בעל f(s) מקסימאלי	2.7.3
Start SX2.1=0 (selected 2-orders-length sequence at itinerary X with 1 st order=0) OrderX=0 (the 1 st order of selected sequence at itinerary X) SumO=Val_EvalFun(OrderX)+Val_EvalFun(OrderX+1) Do while <OrderX+1=Max_OrderX> Calculate SumO Order_X= Order_X +1 End while		f(s) ערך – D4	יסודית	מתוך x בחר רצף באורך 2 בעל f(s) מינימאלי – x1	2.7.4

מספר מזהה	שם הפונקציה	סוג הפונקציה	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	תאור
2.7.4					OrderX=O_minSumO End
2.7.5	מתוך x בחר רצף באורך 2 בעל f(s) מקסימאלי- x2	יסודית	f(s) ערך - D4		Start SX2.2=0 (selected 2-orders-length sequence at itinerary X with 1 st order=0) OrderX=0 (the 1 st order of selected sequence at itinerary X) SumO=Val_EvalFun(OrderX)+Val_EvalFun(OrderX+1) Do while <OrderX+1=Max_OrderX> Calculate SumO Order_X= Order_X +1 End while OrderX=O_maxSumO End
2.7.6	מתוך y בחר רצף באורך 2 בעל f(s) מינימאלי- y1	יסודית	f(s) ערך - D4		Start SY2.1=0 (selected 2-orders-length sequence at itinerary Y with 1 st order=0)

מספר מזהה	שם הפונקציה	סוג הפונקציה	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	תאור
2.7.6					<p>OrderY=0 (the 1st order of selected sequence at itinerary Y)</p> <p>SumO=Val_EvalFun(OrderY)+Val_EvalFun(OrderY+1)</p> <p>Do while <OrderY+1=Max_OrderY></p> <p> Calculate SumO</p> <p> Order_Y= Order_Y +1</p> <p>End while</p> <p>OrderY=O_minSumO</p> <p>End</p>
2.7.7	מתוך γ בחר רצף באורך 2 בעל $f(c)$ מקסימאלי- γ_2	יסודית	D4 – ערך $f(s)$		<p>Start</p> <p>SY2.2=0 (selected 2-orders-length sequence at itinerary Y with 1st order=0)</p> <p>OrderY=0 (the 1st order of selected sequence at itinerary Y)</p> <p>SumO=Val_EvalFun(OrderY)+Val_EvalFun(OrderY+1)</p> <p>Do while <OrderY+1=Max_OrderY></p> <p> Calculate SumO</p> <p> Order_Y= Order_Y +1</p>

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
End while OrderY=O_maxSumO End					2.7.7
Start SX2.1_Driver= Y_Driver SY2.1_Driver=X_Driver calculate Val_EvalFun for X1 _{new} calculate Val_EvalFun for Y1 _{new} Sum=EvalFun(X1 _{new} + Y1 _{new}) SX2.1_Driver= X_Driver SY2.1_Driver=Y_Driver SX2.1_Driver= Y_Driver SY2.2_Driver=X_Driver calculate Val_EvalFun for X2 _{new} calculate Val_EvalFun for Y2 _{new} Sum=EvalFun(X2 _{new} + Y2 _{new}) SX2.1_Driver= X_Driver SY2.1_Driver=Y_Driver	D1 – נהג מבצע f(s) – ערך	D2 – סוג רכב, עלות לק"מ D3 – מס' רכב, עלות לשעה D5 – ערכי פרמטרים, מקדמי	יסודית	חשב f(s) של 4 החלפות אפשריות (x1y1,x1y2, x2y1,x2y2)	2.7.8

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
SX2.2_Driver= Y_Driver SY2.2_Driver=X_Driver calculate Val_EvalFun for X3 _{new} calculate Val_EvalFun for Y3 _{new} Sum=EvalFun(X3 _{new} + Y3 _{new}) SX2.2_Driver= X_Driver SY2.2_Driver=Y_Driver SX2.2_Driver= Y_Driver SY2.1_Driver=X_Driver calculate Val_EvalFun for X4 _{new} calculate Val_EvalFun for Y4 _{new} Sum=EvalFun(X4 _{new} + Y4 _{new}) SX2.2_Driver= X_Driver SY2.1_Driver=Y_Driver End					2.7.8
Start Y _{new} =minSum_X,Y X _{new} =minSum_X,Y	D1 – נהג מבצע		יסודית	בצע החלפה בעלת f(s) מינימאלי	2.7.9

מספר מזהה	שם הפונקציה	סוג הפונקציה	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	תאור
2.7.9					write X_{new}, Y_{new} to D4 ItineraryStatus_X=Inactive ItineraryStatus_Y=Inactive End
3	LS	כללית	.D5 ,D4 ,D3 ,D2 ,D1	.E1 ,D6 ,D5 ,D4 ,D1	הפונקציה מבצעת חיפוש מקומי (Local Search) על הפתרון המוצע
3.1	בחר אקראית נסיעה שטרם עברה LS	יסודית	D1 – קוד הזמנות D4 – ערך $f(s)$		Start O=null (selected order) O=RANDBETWEEN(1, Max_O) End
3.2	החלף סדר של נקודות ביניים	יסודית	D2 – סוג רכב, עלות לק"מ D3 – מסי רכב, עלות לשעה	D1 – סדר נקודות D4 – ערך $f(s)$	Start Change O_points sequence Calculate $f(s_{O_{new}})$ LS_O=positive End
3.3	בדוק האם $f(s)$ שופרה	יסודית	D4 – ערך $f(s)$		Start If $< f(s_{O_{new}}) < f(s_O) >$ Invoke function 3.4

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
else Invoke function 3.5 end if End					3.3
Start O_points sequence=O _{new} _points sequence End	D1 – סדר נקודות		יסודית	עדכן סדר חדש	3.4
Start I=0 (Itinerary) Do while I=Max_I If <LS_I=Negative> Invoke function 3.1 else I=I+1 end if end while End		D1 – פרטי הזמנות	יסודית	בדוק האם קיימות הזמנות שלא עברו LS	3.5
Start If < f(s'')<f(s) > $p_{SA} = e^{-((f(s'')-f(s_{best}))/t)}$	D6 – נהג מבצע	D4 – ערך f(s)	יסודית	בדוק קיום קריטריון קבלה	3.6

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
<p>If $\langle p_{rand} \rangle < p_{SA} \rangle$ $s = s''$ invoke function 3.7 else return s end if else return s write Drivers to D6 end if return s write Drivers to D6 End</p>					3.6
<p>Start $\delta = \text{random}(\text{mindelta}, \text{maxdelta})$ for each associated penalty term $penterm$ α, β and γ do if s violates the corresponding constraint of $penterm$ then $penterm = penterm * (1 + \delta)$</p>	ערכי פרמטרים - D5		יסודית	עדכן פרמטרים	3.7

תאור	זרמי מידע יוצאים : (יעד + שם הזרם)	זרמי מידע נכנסים : (מקור + שם הזרם)	סוג הפונקציה	שם הפונקציה	מספר מזהה
<pre> else penterm = penterm/(1+ δ) end if end for End </pre>					3.7
<pre> Start Input from user entity E1/E2/E3 Write to D5 End </pre>	D5 – ערכי פרמטרים	E1 – ערכי פרמטרים, E2 – ערכי פרמטרים, E3 – ערכי פרמטרים	יסודית	עדכון פרמטרים	4

6.1.2.3.2 מילון רכיבי הנתונים

תחום ערכים	אורך הנתונים	תבנית תצוגה	סוג נתונים	שם רכיב	בסיס נתונים
0-999999999	9		integer numeric	קוד	D1
	50		text	שם לקוח	D1
	50		text	תאור מסלול	D1
00:00-23:59	5	hh:mm	time	שעת התחלה	D1
00:00-23:59	5	hh:mm	time	שעת סיום	D1

תחום ערכים	אורך הנתונים	תבנית תצוגה	סוג נתונים	שם רכיב	בסיס נתונים
	20		text	נקודת התחלה-עיר	D1
	40		text	נקודת התחלה-רחוב	D1
0-999	3		integer numeric	נקודת התחלה-מספר	D1
	20		text	נקודת סיום-עיר	D1
	40		text	נקודת סיום-רחוב	D1
0-999	3		integer numeric	נקודת סיום-מספר	D1
	20		text	נקודות ביניים-עיר	D1
	40		text	נקודות ביניים-רחוב	D1
0-999	3		integer numeric	נקודות ביניים-מספר	D1
	2		logical	הסעות תלמידים	D1
	9		text	סוג רכב – תכנון	D1
	9		text	סוג רכב – ביצוע	D1
0-9999	4		integer numeric	נהג מבצע	D1
0-9999999	7	xx-xxx-xx	integer numeric	מס' רכב מבצע	D1
("Positive", "Negative")	8		logical	LS	D1
0-9999999	7	xx-xxx-xx	integer numeric	מספר רכב	D2

תחום ערכים	אורך הנתונים	תבנית תצוגה	סוג נתונים	שם רכיב	בסיס נתונים
0-99999	5		integer numeric	קוד רכב	D2
(״מונית״, ״א.צ.ז.8״, ״א.צ.ז.13״, ״א.צ.ז.14״, ״א.צ.ז.16״, ״מיניבוס 20״, ״מעלון 3״, ״מעלון 4״, ״מעלון 5״, ״ממוגן אבן״, ״אוטובוס״, ״מידיבוס״)	10		text	סוג רכב	D2
	15		text	יצרן	D2
	15		text	זגם	D2
	4		integer numeric	שנת ייצור	D2
	21		text	כינוי (נהג)	D2
(״אור יהודה״, ״טבריה״, ״נתב״ג״, ״מודיעין״)	30		text	סניף	D2
0-99.99	2.2		real decimal	עלות לק״מ	D2
	4		integer numeric	קוד נהג	D3
	21		text	שם משפחה	D3
	21		text	שם פרטי	D3
	21		text	כינוי	D3
0-999999999	9		integer numeric	ת״ז	D3
(״שכיר״, ״קבלן״, ״קבלן ליסינג״, ״מונית״)	15		text	סוג נהג	D3
0-9999999	7	xx-xxx-xx	integer numeric	מספר הרכב	D3
	8	dd/mm/yy	date	תאריך ת.עבודה	D3
	8	dd/mm/yy	date	תאריך ס.עבודה	D3

תחום ערכים	אורך הנתונים	תבנית תצוגה	סוג נתונים	שם רכיב	בסיס נתונים
("אור יהודה", "טבריה", "נתב"ג", "מודיעין")	25		text	סניף	D3
	20		text	כתובת-עיר	D3
	30		text	כתובת-רחוב	D3
	3		text	כתובת-מס' בית	D3
	11		integer numeric	מס' טלפון	D3
	11		integer numeric	מס' טלפון נייד	D3
	11		integer numeric	מס' פקס	D3
	50		text	כתובת דוא"ל	D3
("כן", "לא")	2		logical	הסעות תלמידים	D3
("A", "A1", "A2", "B", "C", "C1", "D", "D1", "D2", "D3", "E", "1")	2		text	דרגת רישיון נהיגה	D3
0-9999999	7		integer numeric	מס' רישיון נהיגה	D3
0-99.99	2.2		real decimal	עלות לשעת עבודה	D3
0-999999999	9		integer numeric	קוד סידור	D4
	8	dd/mm/yy	date	תאריך	D4
0-9999	4		integer numeric	קוד נהג	D4
0-999999999	9		integer numeric	קודי נסיעות	D4
0-999999999.99	9.2		real decimal	ערך f(s)	D4

תחום ערכים	אורך הנתונים	תבנית תצוגה	סוג נתונים	שם רכיב	בסיס נתונים
	15		text	שם פרמטר	D5
	9.2		real decimal	ערך פרמטר	D5
0-999999999	9		integer numeric	קוד	D6
	50		text	שם לקוח	D6
	50		text	תאור מסלול	D6
00:00-23:59	5	hh:mm	time	שעת התחלה	D6
00:00-23:59	5	hh:mm	time	שעת סיום	D6
	20		text	נקודת התחלה-עיר	D6
	40		text	נקודת התחלה-רחוב	D6
0-999	3		integer numeric	נקודת התחלה-מספר	D6
	20		text	נקודת סיום-עיר	D6
	40		text	נקודת סיום-רחוב	D6
0-999	3		integer numeric	נקודת סיום-מספר	D6
	20		text	נקודות ביניים-עיר	D6
	40		text	נקודות ביניים-רחוב	D6
0-999	3		integer numeric	נקודות ביניים-מספר	D6
	2		logical	הסעות תלמידים	D6
		(״כן״, ״לא״)			

תחום ערכים	אורך הנתונים	תבנית תצוגה	סוג נתונים	שם רכיב	בסיס נתונים
"מונית", "א.צ.ז 8", "א.צ.ז 13", "א.צ.ז 14", "א.צ.ז 16", "מיניבוס 20", "מעלון 3", "מעלון 4", "מעלון 5", "ממוגן אבן", "אוטובוס", "מידיבוס")	9		text	סוג רכב – תכנון	D6
"מונית", "א.צ.ז 8", "א.צ.ז 13", "א.צ.ז 14", "א.צ.ז 16", "מיניבוס 20", "מעלון 3", "מעלון 4", "מעלון 5", "ממוגן אבן", "אוטובוס", "מידיבוס")	9		text	סוג רכב – ביצוע	D6
0-9999	4		integer numeric	נהג מבצע	D6
0-9999999	7		integer numeric	מס' רכב מבצע	D6
0-9999999	7		integer numeric	מספר רכב	D7
0-99999	5		integer numeric	קוד רכב	D7
"מונית", "א.צ.ז 8", "א.צ.ז 13", "א.צ.ז 14", "א.צ.ז 16", "מיניבוס 20", "מעלון 3", "מעלון 4", "מעלון 5", "ממוגן אבן", "אוטובוס", "מידיבוס")	9		text	סוג רכב	D7
	15		text	יצרן	D7
	15		text	דגם	D7
	4		integer numeric	שנת ייצור	D7
	21		text	כינוי (נהג)	D7
"אור יהודה", "טבריה", "נתב"ג", "מודיעין")	30		text	סניף	D7
0-99.99	2.2		real decimal	עלות לק"מ	D7
	4		integer numeric	קוד נהג	D8
	21		text	שם משפחה	D8

תחום ערכים	אורך הנתונים	תבנית תצוגה	סוג נתונים	שם רכיב	בסיס נתונים
	21		text	שם פרטי	D8
	21		text	כינוי	D8
0-999999999	9		integer numeric	ת"ז	D8
("שכיר", "קבלן", "קבלן ליסינג", "מונית")	15		text	סוג נהג	D8
0-9999999	7		integer numeric	מספר הרכב	D8
	8		date	תאריך ת.עבודה	D8
	8		date	תאריך ס.עבודה	D8
("אור יהודה", "טבריה", "נתב"ג", "מודיעין")	25		text	סניף	D8
	20		text	כתובת-עיר	D8
	30		text	כתובת-רחוב	D8
	3		text	כתובת-מס' בית	D8
	11		integer numeric	מס' טלפון	D8
	11		integer numeric	מס' טלפון נייד	D8
	11		integer numeric	מס' פקס	D8
	50		text	כתובת דוא"ל	D8
("כן", "לא")	2		logical	הסעות תלמידים	D8
("A", "A1", "A2", "B", "C", "C1", "D", "D1", "D2", "D3", "E", "1")	2		text	דרגת רישיון נהיגה	D8

תחום ערכים	אורך הנתונים	תבנית תצוגה	סוג נתונים	שם רכיב	בסיס נתונים
0-9999999	7		integer numeric	מס' רישיון נהיגה	D8
0-99.99	2.2		real decimal	עלות לשעת עבודה	D8
	17	(xx.xxxx, xx.xxxx)	real decimal	נ"צ מוצא	D9
	17	(xx.xxxx, xx.xxxx)	real decimal	נ"צ יעד	D9
	14	dd.mm.yy, hh:mm	date	זמן ביצוע הנסיעה	D9
		hh:mm:ss	time	ממוצא משך הנסיעה	D9
0-99.99	2.2		real decimal	סטית תקן למשך הנסיעה	D9
0-999.99	3.2		real decimal	מרחק הנסיעה	D9

6.1.2.3.3 מילון קבוצות הנתונים

שמות רכיבי נתונים	שם קבוצה	בסיס נתונים
נקודת התחלה-עיר, נקודת התחלה-רחוב, נקודת התחלה-מספר	נקודת התחלה (ק)	D1, D6
נקודת סיום-עיר, נקודת סיום-רחוב, נקודת סיום-מספר	נקודת סיום (ק)	D1, D6

שמות רכיבי נתונים	שם קבוצה	בסיס נתונים
נקודת ביניים-עיר, נקודת ביניים-רחוב, נקודת ביניים-מספר	נקודת ביניים (ק)	D1, D6
כתובת-עיר, כתובת-רחוב, כתובת-מספר בית	כתובת (ק)	D3, D8

6.1.2.3.4 מילון זרמי המידע

נפח הנתונים	רכיבי נתונים וקבוצות נתונים	שם זרם המידע	היעד	המקור
310 תווים ; 4 פעמים ביום	קוד, שם לקוח, שעת התחלה, שעת סיום, נקודת התחלה (ק), נקודת סיום (ק), [נקודת ביניים (ק)], *[[ק]], הסעות תלמידים, [נהג מבצע], [מס' רכב מבצע]	פרטי הזמנות	1.1	D6
121 תווים ; 4 פעמים ביום	מספר רכב, סוג רכב, יצרן, דגם, שנת ייצור, [כינוי (נהג)], סניף, עלות לק"מ	פרטי רכבים	1.1	D7
225 תווים ; 4 פעמים ביום	קוד נהג, כינוי, סוג נהג, [מספר רכב], תאריך ת.עבודה, סניף, כתובת (ק), הסעות תלמידים, עלות לשעת עבודה	פרטי נהגים	1.1	D8
121 תווים ; 4 פעמים ביום	מספר רכב, סוג רכב, יצרן, דגם, שנת ייצור, [כינוי (נהג)], סניף, עלות לק"מ	פרטי רכבים	D2	1.1
27 תווים ; 4 פעמים ביום	שם פרמטר, [ערך פרמטר]	ערכי פרמטרים	D5	1.1
225 תווים ; 4 פעמים ביום	קוד נהג, כינוי, סוג נהג, [מספר רכב], תאריך ת.עבודה, סניף, כתובת (ק), הסעות תלמידים, עלות לשעת עבודה	פרטי נהגים	D3	1.1
310 תווים ; 4 פעמים ביום	קוד, שם לקוח, שעת התחלה, שעת סיום, נקודת התחלה (ק), נקודת סיום (ק), [נקודת ביניים (ק)], *[[ק]], הסעות תלמידים, [נהג מבצע], [מס' רכב מבצע]	פרטי הזמנות	D1	1.1
310 תווים ; 4 פעמים ביום	קוד, שם לקוח, שעת התחלה, שעת סיום, נקודת התחלה (ק), נקודת סיום (ק), [נקודת ביניים (ק)], *[[ק]], הסעות תלמידים, [נהג מבצע], [מס' רכב מבצע]	מיון	D1	1.2
4 תווים ; 4 פעמים ביום	קוד נהג	נהג מבצע	D1	1.3.1
260 תווים ; 4 פעמים ביום	קוד, שם לקוח, שעת התחלה, שעת סיום, נקודת התחלה (ק), נקודת סיום (ק), [נקודת ביניים (ק)], *[[ק]], הסעות תלמידים, [נהג מבצע], [מס' רכב מבצע]	נתוני הזמנה	1.3.1	D1
27 תווים ; 4 פעמים ביום	שם פרמטר, ערך פרמטר	מקדמי קנסות	1.3.1	D5

המקור	היעד	שם זרם המידע	רכיבי נתונים וקבוצות נתונים	נפח הנתונים
D3	1.3.1	מס' רכב, עלות לשעה	מס' רכב, עלות לשעה	13 תווים ; 4 פעמים ביום
D2	1.3.1	עלות לק"מ	עלות לק"מ	5 תווים ; 4 פעמים ביום
D9	1.3.1	מידע גאוגרפי	ממוצא זמן נסיעה, סטיית תקן לזמן נסיעה, מרחק נסיעה	20 תווים ; 4 פעמים ביום
1.3.1	D4	קוד, ערך f(s)	קוד, ערך פרמטר	21 תווים ; 4 פעמים ביום
1.3.2	D1	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
D1	1.3.3	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
1.3.4	D1	מיון	קוד, שעת התחלה, שעת סיום, נקודת התחלה (ק), נקודת סיום (ק), [נקודת ביניים (ק)]*, הסעות תלמידים, [נהג מבצע], [מס' רכב מבצע]	260 תווים ; 4 פעמים ביום
1.4.1	D1	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
D1	1.4.1	נתוני הזמנה	קוד, שעת התחלה, שעת סיום, נקודת התחלה (ק), נקודת סיום (ק), [נקודת ביניים (ק)]*, הסעות תלמידים, [נהג מבצע], [מס' רכב מבצע]	260 תווים ; 4 פעמים ביום
D5	1.4.1	מקדמי קנסות	שם פרמטר, ערך פרמטר	21 תווים ; 4 פעמים ביום
D3	1.4.1	מס' רכב, עלות לשעה	מס' רכב, עלות לשעה	13 תווים ; 4 פעמים ביום
D2	1.4.1	עלות לק"מ	עלות לק"מ	5 תווים ; 4 פעמים ביום
	1.4.1	מידע גאוגרפי	ממוצא זמן נסיעה, סטיית תקן לזמן נסיעה, מרחק נסיעה	20 תווים ; 4 פעמים ביום
1.4.1	D4	קוד, ערך f(s)	קוד, ערך פרמטר	21 תווים ; 4 פעמים ביום
1.4.2	D1	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
D1	1.4.3	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
1.4.4	D1	מיון	קוד, שעת התחלה, שעת סיום, נקודת התחלה (ק), נקודת סיום (ק), [נקודת ביניים (ק)]*, הסעות תלמידים, [נהג מבצע], [מס' רכב מבצע]	260 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.1.1	קוד סידור	קוד סידור	9 תווים, 4 פעמים ביום
D4	2.1.2	קוד נסיעה	קוד	9 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.1.3	ערך f(s)	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום

המקור	היעד	שם זרם המידע	רכיבי נתונים וקבוצות נתונים	נפח הנתונים
D3	2.1.4	עלות לשעה, מס' רכב	מס' רכב, עלות לשעה	13 תווים ; 4 פעמים ביום
D2	2.1.4	עלות לק"מ, סוג רכב	עלות לק"מ, סוג רכב	15 תווים ; 4 פעמים ביום
D9	2.1.4	מידע גאוגרפי	ממוצא זמן נסיעה, סטיית תקן לזמן נסיעה, מרחק נסיעה	20 תווים ; 4 פעמים ביום
2.1.4	D1	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
2.1.4	D4	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D5	2.1.5	ערכי פרמטרים	שם פרמטר, ערך פרמטר	27 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.2.1	קוד סידור	קוד סידור	9 תווים, 4 פעמים ביום
D4	2.2.2	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.2.3	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D3	2.2.4	עלות לשעה, מס' רכב	מס' רכב, עלות לשעה	13 תווים ; 4 פעמים ביום
D2	2.2.4	עלות לק"מ, סוג רכב	עלות לק"מ, סוג רכב	15 תווים ; 4 פעמים ביום
D1	2.2.4	פרטי הזמנות	קוד, שעת התחלה, שעת סיום, נקודת התחלה (ק), נקודת סיום (ק), [נקודת ביניים (ק)]*, הסעות תלמידים, [נהג מבצע], [מס' רכב מבצע]	260 תווים ; 4 פעמים ביום
D9	2.2.4	מידע גאוגרפי	ממוצא זמן נסיעה, סטיית תקן לזמן נסיעה, מרחק נסיעה	20 תווים ; 4 פעמים ביום
2.2.4	D4	פרטי $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
2.2.5	D1	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.2.6	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D5	2.2.6	ערכי פרמטרים	שם פרמטר, ערך פרמטר	27 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.3.1	קוד סידור	קוד סידור	9 תווים, 4 פעמים ביום
D4	2.3.2	קו סידור, קוד נסיעה	קו סידור, קוד נסיעה	18 תווים, 4 פעמים ביום
2.3.3	D1	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום

המקור	היעד	שם זרם המידע	רכיבי נתונים וקבוצות נתונים	נפח הנתונים
D4	2.3.4	קוד נסיעה	קוד	9 תווים ; 4 פעמים ביום
2.3.5	D1	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
D9	2.3.3	מידע גאוגרפי	ממוצא זמן נסיעה, סטיית תקן לזמן נסיעה, מרחק נסיעה	20 תווים ; 4 פעמים ביום
D2	2.3.5	עלות לק"מ, סוג רכב	עלות לק"מ, סוג רכב	15 תווים ; 4 פעמים ביום
D3	2.3.5	עלות לשעה, מס' רכב	מס' רכב, עלות לשעה	13 תווים ; 4 פעמים ביום
D9	2.3.5	מידע גאוגרפי	ממוצא זמן נסיעה, סטיית תקן לזמן נסיעה, מרחק נסיעה	20 תווים ; 4 פעמים ביום
2.3.5	D4	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.3.6	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.3.6	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D5	2.3.6	ערכי פרמטרים	שם פרמטר, ערך פרמטר	27 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.4.1	פרטי סידור עבודה	קוד סידור, קוד נסיעה, ערך פרמטר	33 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.4.2	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.4.3	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.4.4	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
2.4.5	D1	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
D2	2.4.5	עלות לק"מ, סוג רכב	עלות לק"מ, סוג רכב	15 תווים ; 4 פעמים ביום
D3	2.4.5	עלות לשעה, מס' רכב	מס' רכב, עלות לשעה	13 תווים ; 4 פעמים ביום
D9	2.4.5	מידע גאוגרפי	ממוצא זמן נסיעה, סטיית תקן לזמן נסיעה, מרחק נסיעה	20 תווים ; 4 פעמים ביום
2.4.5	D4	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.4.6	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום

המקור	היעד	שם זרם המידע	רכיבי נתונים וקבוצות נתונים	נפח הנתונים
D5	2.4.6	ערכי פרמטרים	שם פרמטר, ערך פרמטר	27 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.5.1	קוד סידור	קוד סידור	9 תווים, 4 פעמים ביום
D4	2.5.2	ערך f(s)	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.5.3	ערך f(s)	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
2.5.4	D4	ערך f(s)	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D3	2.5.4	עלות לשעה, מס' רכב	מס' רכב, עלות לשעה	13 תווים ; 4 פעמים ביום
D2	2.5.4	עלות לק"מ, סוג רכב	עלות לק"מ, סוג רכב	15 תווים ; 4 פעמים ביום
D1	2.5.4	פרטי הזמנות	קוד, שעת התחלה, שעת סיום, נקודת התחלה (ק), נקודת סיום (ק), [נקודת ביניים (ק)]*, הסעות תלמידים, [נהג מבצע], [מס' רכב מבצע]	260 תווים ; 4 פעמים ביום
	2.5.4	מידע גאוגרפי	ממוצא זמן נסיעה, סטיית תקן לזמן נסיעה, מרחק נסיעה	20 תווים ; 4 פעמים ביום
2.5.4	D1	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
2.5.5	D1	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.5.6	ערך f(s)	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D5	2.5.6	ערכי פרמטרים	שם פרמטר, ערך פרמטר	27 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.6.1	קוד סידור	קוד סידור	9 תווים, 4 פעמים ביום
D4	2.6.2	קוד נסיעה	קוד	9 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.6.3	קוד נסיעה	קוד	9 תווים ; 4 פעמים ביום
2.6.4	D4	ערך f(s), פרטי סידור	קוד סידור, קוד נסיעה, ערך פרמטר	33 תווים ; 4 פעמים ביום
2.6.4	D1	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
D2	2.6.4	עלות לק"מ, סוג רכב	עלות לק"מ, סוג רכב	15 תווים ; 4 פעמים ביום
D3	2.6.4	עלות לשעה, מס' רכב	מס' רכב, עלות לשעה	13 תווים ; 4 פעמים ביום

המקור	היעד	שם זרם המידע	רכיבי נתונים וקבוצות נתונים	נפח הנתונים
D9	2.6.4	מידע גאוגרפי	ממוצא זמן נסיעה, סטיית תקן לזמן נסיעה, מרחק נסיעה	20 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.6.5	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D5	2.6.5	ערכי פרמטרים	שם פרמטר, ערך פרמטר	27 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.7.1	פרטי סידור עבודה	קוד סידור, קוד נסיעה, ערך פרמטר	33 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.7.2	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.7.3	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.7.4	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.7.5	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.7.6	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	2.7.7	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D5	2.7.8	ערכי פרמטרים	שם פרמטר, ערך פרמטר	27 תווים ; 4 פעמים ביום
D2	2.7.8	עלות לק"מ, סוג רכב	עלות לק"מ, סוג רכב	15 תווים ; 4 פעמים ביום
D3	2.7.8	עלות לשעה, מס' רכב	מס' רכב, עלות לשעה	13 תווים ; 4 פעמים ביום
D9	2.7.8	מידע גאוגרפי	ממוצא זמן נסיעה, סטיית תקן לזמן נסיעה, מרחק נסיעה	20 תווים ; 4 פעמים ביום
2.7.8	D1	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
2.7.8	D4	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	3.1	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D1	3.1	קוד הזמנה	קוד	9 תווים ; 4 פעמים ביום
3.2	D1	סדר נקודות	נקודת ביניים (ק)	65 תווים ; 4 פעמים ביום
D2	3.2	עלות לק"מ, סוג רכב	עלות לק"מ, סוג רכב	15 תווים ; 4 פעמים ביום

המקור	היעד	שם זרם המידע	רכיבי נתונים וקבוצות נתונים	נפח הנתונים
D3	3.2	עלות לשעה, מס' רכב	מס' רכב, עלות לשעה	13 תווים ; 4 פעמים ביום
D9	3.2	מידע גאוגרפי	ממוצא זמן נסיעה, סטיית תקן לזמן נסיעה, מרחק נסיעה	20 תווים ; 4 פעמים ביום
3.2	D4	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	3.3	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
3.4	D1	סדר נקודות	נקודת ביניים (ק)	65 תווים ; 4 פעמים ביום
D1	3.5	פרטי הזמנות	קוד, שעת התחלה, שעת סיום, נקודת התחלה (ק), נקודת סיום (ק), [נקודת ביניים (ק)]*, הסעות תלמידים, [נהג מבצע], [מס' רכב מבצע]	260 תווים ; 4 פעמים ביום
D4	3.6	ערך $f(s)$	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
3.6	D6	נהג מבצע	קוד נהג	4 תווים ; 4 פעמים ביום
3.6	E1	הודעת סיום	ערך פרמטר	12 תווים ; 4 פעמים ביום
3.7	D5	ערכי פרמטרים	שם פרמטר, ערך פרמטר	27 תווים ; 4 פעמים ביום
E1	4	ערכי פרמטרים	שם פרמטר, ערך פרמטר	450 תווים ; אחת לרבעון
E2	4	ערכי פרמטרים	שם פרמטר, ערך פרמטר	450 תווים ; אחת לרבעון
E3	4	ערכי פרמטרים	שם פרמטר, ערך פרמטר	450 תווים ; אחת לרבעון
4	D5	ערכי פרמטרים	שם פרמטר, ערך פרמטר	450 תווים ; אחת לחודש

6.1.2.4 קלטים, פלטים וממשקי משתמש

ניהול סידור עבודה מתבצע בחברת בון תור באמצעות Fleet Control – תכנה ייעודית מבית תכנה YIT. על מנת לא להקשות על המשתמשים על ידי שימוש במערכת מחשב נוספת, המערכת המיועדת תתממשק עם מערכת Fleet Control ותופעל מתוכה. כך גם בסיסי נתונים של המערכת המיועדת מוקמים על ידי העתקת בסיסי נתונים של Fleet Control – בתרשימי DFD הם מופיעים כבסיסי נתונים חיצוניים D6, D7 ו-D8.

כפי שמוצג באיורים הבאים, הפעלת התוכנה המיועדת תיעשה מתוך תפריט "סידור עבודה" של Fleet Control ע"י הוספת אפשרות "אופטימיזציה" ו-2 תתי אפשרויות – "עדכון פרמטרים" ו-"שיבוץ סידור עבודה". בבחירת האפשרות "אופטימיזציה" בתפריט הני"ל, ההמשתמש מועבר לממשק המערכת המתוכננת, שם נדרש להזין תאריך התכנון ולתת פקודת ההפעלה. באופן דומה, הבחירה באפשרות "עדכון פרמטרים" מפעילה את המערכת המתוכננת ומציגה חלון, בו המשתמש יכול להזין ערכי פרמטרים רלוונטיים, כגון מקדמי קנסות.

בתום הריצה, המערכת המתוכננת תקפיץ הודעת סיום שתכלול גם זמן ריצה וערך פונקציית המטרה של הפתרון שנמצא. סגירת החלון תחזיר את המשתמש למערכת Fleet Control.

The screenshot displays the Fleet Control application window. At the top, there's a title bar and a menu bar. Below that, a toolbar contains various icons for navigation and actions. The main area is divided into a top panel with filters and a large table below. The table has columns for 'תאור' (Description), 'מספר הרכב' (Vehicle ID), 'קוד' (Code), 'סוג הרכב' (Vehicle Type), 'תחילת נהג' (Driver Start), 'שם הנהג' (Driver Name), 'מספר הנהג' (Driver ID), 'מספר הרכב' (Vehicle ID), 'קוד' (Code), 'סוג הרכב' (Vehicle Type), and 'תאריך' (Date). The table lists multiple rows of vehicle assignments and routes. To the right of the table, there's a sidebar with a keyboard shortcuts menu, listing keys like Alt+F1, Alt+F2, etc., and their corresponding functions such as 'סידור עבודה יומי' (Daily Scheduling) and 'ריכוז סידור עבודה יומי' (Daily Scheduling Concentration).

איור 6.1.2.4.1 – תפריט "סידור עבודה" קיים של מערכת Fleet Control

The screenshot displays the Fleet Control application window. At the top, there are navigation and control buttons. Below that, a header section contains filters for date (20/06/2015) and time (02:00). The main area is a table with the following columns: מספר הרכב (Vehicle ID), קוד תחנת (Station Code), מספר הרכב (Vehicle ID), החליפה נהג (Driver), שם הנהג (Driver Name), כמות יוסעים (Passenger Count), and טיפוס הרכב (Vehicle Type). The table lists multiple routes and vehicles. On the right side, there is a sidebar with keyboard shortcuts and a list of vehicle status icons. The bottom of the window shows a Windows taskbar with the Start button and system tray.

איור 6.1.2.4.2 – תפריט "סידור עבודה" חדש של מערכת Fleet Control

This screenshot shows the same Fleet Control interface as above, but with a modal dialog box open in the center. The dialog box is titled "שם הפרמטר" (Parameter Name) and contains two input fields: "שם" (Name) and "ערך" (Value). At the bottom of the dialog, there are two buttons: "יציאה" (Exit) and "שמירה" (Save). The background table and sidebar are partially visible behind the dialog.

איור 6.1.2.4.3 – מסך "עדכון פרמטרים" של מערכת אופטימיזציה

בחר תאריך שיבוץ

יציאה אישור

איור 6.1.2.4.4 – מסך קלט "שיבוץ סידור עבודה" של מערכת אופטימיזציה

שיבוץ הסידור הסתיים בהצלחה,

- זמן ריצה - 10.75 דקות
- עלות התפעול - 78,563 ש"ח

יציאה

איור 6.1.2.4.5 – מסך פלט "שיבוץ סידור עבודה" של מערכת אופטימיזציה

6.1.3 פיתוח תכנה

פיתוח מערכת אופטימיזציה מורכב מפיתוח תכנה בהתאם לאלגוריתם VNS שתואר בפרקים 3.4.6 ו-6.1.1.6 ופיתוח ממשק שיאפשר הפעלת מערכת אופטימיזציה ממערכת Fleet Control. בנוסף יש לקחת בחשבון את עלות רישיון גישה לשרתים של Google. טבלה 6.1.3.1 מפרטת עלויות חלופת פיתוח מערכת אופטימיזציה.

מס"ד	מרכיב עלות	עלות	הערות
1	פיתוח מערכת אופטימיזציה	50,000 ש"ח	עלות חד פעמית
2	פיתוח ממשק למערכת Fleet Control	10,000 ש"ח	עלות חד פעמית
3	רישיון "מעקב נכסים" של Google	\$ 11,000	עלות שנתית

טבלה 6.1.3.1 עלויות פיתוח מערכת אופטימיזציה

6.2 רכישת מוצר מדף (תכנה)

בהמשך לסעיף 6.1.3, רכישת כלי אופטימיזציה כמוצר מדף מחליף רק את הצורך בפיתוח עצמי של מערכת אופטימיזציה, אך עלויות פיתוח ממשק של מערכת Fleet Control ורכישת רישיון "מעקב נכסים" של Google מהווים מרכיבי עלות גם בחלופה זאת.

מוצרי תכנה הבאים, שמצהירים על עצמם כמתמכים באופטימיזציית תחבורה, נבחנו כחלופת ב':

- א. eRoutelogistics® מבית ITT האמריקאית (<http://www.e-iit.com/PassengerTransportation.html>) המציע פתרון לתכנון סידור עבודה של הרכבים עם התחייבות ללפחות 10% חיסכון בעלויות תפעול. כל הפניות לבית התכנה נותרו ללא מענה.
- ב. PASS® מבית Trapeze הקנדית (<http://www.trapezegrup.com/demand-response-scheduling->[dispatching-solution](http://www.trapezegrup.com/demand-response-scheduling-dispatching-solution)) המסייעת בתכנון מסלולים של רכבים להסעת נוסעים מוגבלים. כל הפניות לבית התכנה נותרו ללא מענה.
- ג. SPIDER® שפותח במחלקה לאופטימיזציה תחבורתית במכון מחקרי למתמטיקה יישומית מנורבגיה SINTEF. המוצר מתמחה באופטימיזציה של ניתוב כלי רכב בתחבורה יבשתית ומתבסס על עקרונות אלגוריתם VNS. את התאור המפורט של המוצר ניתן למצוא במאמרם של Hasle, G. & Kloster, O. (2007) ובקישור - <http://www.sintef.no/projectweb/transportation-planning/software/spider/>. המכון הביע רצון לשתף פעולה, אך הצעתם טרם התקבלה עקב חופשת קיץ.

7. דיון בחלופות והמלצות

הספרות המדעית (Hasle, G. & Kloster, O.) (2007) מדווחת ששיעור החיסכון בעלויות תפעול הנובע משימוש בטכנולוגיות מידע לניתוב כלי רכב נע בין 5% ל-30%. בהנחה שפוטנציאל החיסכון של מערכת אופטימיזציה בסניף אור יהודה של חברת בון תור הינו 5% מהיקף סרק מבוקר בלבד (הספרות מציגה פוטנציאל חיסכון מעלויות תפעול כולן) – כלומר חיסכון של 58,000 ש"ח בשנה, משך התקופה להחזר ההשקעה מוערכת ב-4.2 שנים.

הצעת מחיר לרכישת תכנת SPIDER טרם התקבלה וזאת עקב חופשת קיץ שחלה במכון SINTEF.

ההמלצה היא להשלים את בחינת רכישת מוצר SPIDER ולצאת לפיתוח/רכישה של החלופה הזולה ביותר.

סיכום

העבודה הנוכחית סקרה את בעיית נסיעות סרק בסניף אור יהודה של חברת בון תור והציעה חלופות שונות לפתרון שמתבססות על שימוש במערכת מידע תומכת תהליכים תפעוליים.

שימוש במערכת מידע שוהצעה, עשוי להניב חיסכון של לפחות 5% בעלויות דלק ואחזקה של נסיעות סרק בסניף אור יהודה ולהחזיר את ההשקעה בכ-4.2 שנים. הרחבת השימוש במערכת האופטימיזציה לשאר סניפי החברה כולל אגף האוטובוסים עשויה לצמצם את טווח החזר ההשקעה ואף ולהניב חיסכון בהוצעות תפעול נוספות, כגון עלויות שכר נהגים ועוד.

בתהליך ההטמעה העתידי חשוב לקחת בחשבון את התנגדותם האפשרית של הנהגים לשינויים תכופים בסידור העבודה שלהם שנובעים משימוש במערכת אופטימיזציה. היבט זה עלול לשבש את השימוש במערכת ואף להפוך אותו לבלתי אפשרי. בעניין זה מומלץ לבחון הכנסת שכר עידוד כמרכיב שכר נהגים.

נספחים

נספח א' – חישובי עלויות הדלק והאחזקה של נסיעות סרק

#	מס' רכב	סה"כ מד אוף (ק"מ)	סה"כ סרק (ק"מ)	סה"כ סרק (%)	סרק 1 (ק"מ)	סרק 2 (ק"מ)	סרק 3 (ק"מ)	סרק 4 (ק"מ)	סרק 5 (ק"מ)	סרק 6 (ק"מ)	סרק 7 (ק"מ)	סרק 8 (ק"מ)	סרק 0 (ק"מ)	סרק מבוקר (1,2,3)
1	1052079	1770.31	711.82	40.21%	72.53	469.39	0.00	17.90	39.00	14.40	0.00	98.60	0.00	541.92
2	1082974	843.39	600.40	71.19%	91.00	93.81	125.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	290.21	310.19
3	1507412	1254.84	712.30	56.76%	100.59	381.90	114.01	0.00	0.00	0.00	78.71	15.09	22.00	596.50
4	1588512	1029.38	429.88	41.76%	53.20	234.56	83.12	0.00	50.25	0.00	0.00	0.00	8.76	370.88
5	4702513	1373.9	685.60	49.90%	199.93	372.66	9.41	18.00	29.81	0.00	55.79	0.00	0.00	582.00
6	4702713	1874.9	802.67	42.81%	59.93	565.53	155.30	0.00	21.91	0.00	0.00	0.00	0.00	780.76
7	5292274	1421.31	536.28	37.73%	92.85	282.09	61.12	17.09	34.31	40.82	0.00	0.00	8.00	436.06
8	5513811	1156.5	480.30	41.53%	104.30	185.90	131.00	0.00	0.00	0.00	0.00	39.90	19.20	421.20
9	5572511	1235.8	639.00	51.71%	81.3	426.9	21.8	34.3	0	0	74.7	0	0	530.00
10	8565031	1237	643.00	51.98%	158	343	88	14	16	0	24	0	0	589.00
		13197.33	6241.2528	47.29%	1013.63	3355.75	789.13	101.29	191.28	55.22	233.20	153.59	348.17	5158.51
	ממוצע	1319.733											ממוצע	515.85096
	S	312.7716795											S	135.7806591

טבלה א'-1: סיכום מדידת מרחקים בחלוקה לסוגי נסיעות סרק כולל חישוב סטטיסטיים של המדגם

רווח בר-סמך לתוחלת כאשר σ לא ידועה:

$$\bar{x} - t_{\alpha/2(n-1)} \cdot \frac{\hat{s}}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha/2(n-1)} \cdot \frac{\hat{s}}{\sqrt{n}}$$

רב"ס לקילומטראז' כללי חודשי בסניף ברמת בטחון 90%

רמת בטחון: $t=1.833 \leq 90\%$

$$1,319.733 - 1.833 \cdot \frac{312.772}{\sqrt{10}} < \mu < 1,319.733 + 1.833 \cdot \frac{312.772}{\sqrt{10}}$$

(תוחלת קילומטראז' שבועי של רכב בודד) $1,138.44 < \mu < 1,501.03$

(תוחלת קילומטראז' חודשי של רכב בודד לפי 4.333 שבועות בחודש) $4,932.86 < \mu < 6,503.96$

(תוחלת קילומטראז' חודשי של 65 רכבים) $320,635 < \mu < 422,758$

רב"ס לקילומטראז' סרק מבוקר חודשי בסניף ברמת בטחון 90%

$$515.851 - 1.833 \cdot \frac{135.781}{\sqrt{10}} < \mu < 515.851 + 1.833 \cdot \frac{135.781}{\sqrt{10}}$$

(תוחלת סרק מבוקר שבועי של רכב בודד) $437.15 < \mu < 594.56$

$1,894.71 < \mu < 2,576.23$ (תוחלת סרק מבוקר חודשי של רכב בודד לפי 4.333 שבועות בחודש)

$123,156 < \mu < 167,454$ (תוחלת קילומטראז' חודשי של 65 רכבים)

נספח ב' – חישובי עלויות הדלק והאחזקה של נסיעות סרק

ממוצע	5.2015	4.2015	3.2015	2.2015	1.2015
63,048	79,202	51,228	63,097	58,691	63,022

טבלה ב'-1: החזרי בלו בחודשים 01.15-05.15

מחיר ברוטו ממוצע לליטר סולר בחודשים 01.15-05.15 (לפני החזר בלו) : 5.1 ש"ח.

תוחלת קילומטראז' כללי חודשי : 371,696 ק"מ (ראה נספח א').

יחס צריכת דלק (ממוצע משוקלל) : 6.477 ק"מ/ליטר.

צריכת סולר ממוצעת חודשית (מחושבת) : 57,387 ליטרים $(\frac{371,696}{6.477})$.

גובה החזר בלו ממוצעת לחודש (ראה טבלה ב'-1) : 63,048 ש"ח.

גובה החזר בלו ממוצעת לליטר : 1.099 ש"ח/ליטר $(\frac{63,048}{57,387})$.

מחיר נטו ממוצע לליטר סולר בחודשים 01.15-05.15 (לאחר החזר בלו) : 4.001 ש"ח (1.099-5.1).

תוחלת קילומטראז' סרק מבוקר חודשי : 123,156 ק"מ (גבול תחתון של רבי"ס, ראה נספח א').

צריכת סולר ממוצעת חודשית של קילומטראז' סרק מבוקר : 19,014 ליטרים $(\frac{123,156}{6.477})$.

עלות סולר חודשית של קילומטראז' סרק מבוקר : 76,075 ש"ח.

עלות אחזקה חודשית של קילומטראז' סרק מבוקר : 20,936 ש"ח $(0.17 \times 123,156)$.

מקורות

- Borndöfer, R., Klostermeier, F., Grötschel, M., & Küttner, C. (1997). Telebus Berlin: vehicle scheduling in a dial-a-ride system, Technical report SC 97-23, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Berlin.
- Braekers, K., Caris, A. & Janssens, G. K. (2014). Exact and meta-heuristic approach for a general heterogeneous dial-a-ride problem with multiple depots. *Transportation Research, Part B*, 67, 166-186.
- BDiCoface. (2012). סקירה ענפית-הסעות פרטיות
- Clarke, G. & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12, 568-581.
- Cordeau, J.-F. (2006). A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem. *Operations Research*, 54 (3), 573-586.
- Cordeau, J.-F. & Laporte, G. (2003). A tabu search heuristics for the static multivehicle dial-a-ride problem. *Transportation Research, Part B: Methodological B*, 37, 579-594
- Cordeau, J.-F. & Laporte, G. (2007). The dial-a-ride problem: models and algorithms. *Annals of Operations Research*, 153, 29-46.
- Dantzig, G., Fulkerson, F. & Johnson, S. (1954). Solution of a large-scale travelling salesman problem. *Operations Research*, 2, 393-410.
- Eksioglu, B., Vural, A. V. & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57, 1472-1483.
- Fu, L. (2002). Scheduling dial-a-ride paratransit under time-varying, stochastic congestion. *Transportation Research, Part B*, 36, 485-506.
- Fu, L., Rilett, L.R. (1998). Shortest path problems in traffic networks with dynamic and stochastic link travel times. *Transportation Research, Part B: Methodological B* 32, 7, 499-515.

- Golden, B., Wasil, E., Kelly, J. & Chao, I. (1998). The impact of metaheuristics on solving the vehicle routing problem: algorithms, problem sets, and computational results. In: Crainic, T., Laporte, G. (Eds.), *Fleet Management and Logistics*. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, pp. 33-56.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13 (5), 533-549.
- Hasle, G., Kloster, O. (2007). Geometric Modelling, Numeric Simulation, and Optimization. *Applied Mathematics at SINTEF*, 3, 397-435.
- Lopez B., Munoz, V., Murillo, J., Barber, F., Salido, M. A., Abril, M., Cervantes, M., Caro, L, F., Villaret, M. (2009). Experimental analysis of optimization techniques on the road passenger transportation problem. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 22, 374-388.
- Muelas, S., LaTorre, A. & Pena, J.-M. (2013). A variable neighborhood search algorithm for the optimization of a dial-a-ride problem in a large city. *Expert Systems with Applications*, 40, 5516-5531.
- Parragh, S. N., Doerner, K. F., & Hartl, R. F. (2010). Variable neighborhood search for the dial-a-ride problem. *Computers & Operations Research*, 37, 1129-1138.
- Paquette, J., Cordeau, J.-F., Laporte, G. & Pascoal, M. (2013). Combining multicriteria analysis and tabu search for dial-a-ride problems. *Transportation Research, Part B*, 52, 1-16.
- Ropke, S., Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2007). Models and branch-and-cut algorithms for pickup and delivery problems with time windows. *Networks*, 49, 258-272.
- Shoval, P. (1988). ADISSA: Architectural Design of Information Systems based on Structured Analysis. *Information Systems*, 13, 193-210.
- Solomon, M. (1983). Vehicle Routing and scheduling with time window constraints: Models and algorithms. Technical report, College of Business Admin., Northeastern University, No. 42-83.
- Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2005). *Taguchi's quality engineering handbook*. John Wiley

Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M. & Prins, C. (2013). Heuristics for multi-attribute vehicle routing problems: A survey and synthesis. *European Journal of Operational Research*, 231, 1-21.

Xiang, Z., Chu, C. & Chen, H. (2006). A fast heuristic for solving a large-scale static dial-a-ride problem under complex constraints. *European Journal of Operational Research*, 174, 1117-1139.

Xiang, Z., Chu, C. & Chen, H. (2008). The study of a dynamic dial-a-ride problem under time-dependent and stochastic environments. *European Journal of Operational Research*, 185, 534-551.

שובל, פ. (1998). תכנון, ניתוח ועיצוב מערכות מידע. האוניברסיטה הפתוחה. כרך ב', 20.