



המחלקה למתמטיקה
Department of Mathematics

**פרויקט מסכם לתואר בוגר במדעים (B.Sc)
במתמטיקה שימושית**

**אופטימיזציה של תהליך תכן ותכנון
המוצר בהדפסת תלת מימד**

אילה אלקובי

**Optimization of product design
and planning in 3D printing**

Ayala Elkoby

פרויקט מסכם לתואר בוגר במדעים (B.Sc)

במתמטיקה שימושית

אופטימיזציה של תהליך תכן ותכנון המוצר בהדפסת תלת מימד

אילה אלקובי

Optimization of product design and planning in 3D printing

Ayala Elkoby

Advisor:

Assoc. Prof. Aviv
Gibali

Dr. Hussein Naseraldin

מנחה:

פרופ"ח אביב גיבלי

ד"ר חוסיין נסראלדין

Karmiel

כרמיאל

2021

תוכן עניינים

8.....	תקציר המחקר	
9.....	תקציר מנהלים מורחב	
11.....	מבוא	
13.....	שאלת המחקר ומטרתו	1
14.....	הייחודיות של המחקר	1.1
14.....	סקר ספרות	2
14.....	קשר בין פרמטרי הדפסה לזמן הדפסה וטיב שטח	2.1
15.....	גישת הנדסה משולבת	2.2
16.....	קיבוץ אובייקטים למנות בהדפסת תלת מימד	2.3
16.....	קשר ללמידת מכונה	2.4
17.....	רקע על CART	2.4.1
19.....	רקע על ANN	2.4.2
25.....	אופטימיזציה מרובת מטרת	2.5
27.....	מתודולוגיית המחקר	3
28.....	תיאור המודל הראשוני – מודל עם אובייקט אחד	4
28.....	הגדרת הבעיה ופרמטרים	4.1
29.....	מידול זמן הדפסה	4.2
31.....	מידול החספוס, זמן תכן וזמן post process	4.3
32.....	CART	4.3.1
41.....	רשת ANN	4.3.2
43.....	מודל סופי לבעיה 1	4.4
45.....	כיול הפרמטרים של המודל	4.5
46.....	פתרון למודל עם אובייקט יחיד באמצעות אופטימיזציה	5
54.....	תיקוף בעזרת ניתוח רגישות לאובייקט 1	6
55.....	קוטר לייזר	6.1
56.....	עוצמת לייזר	6.2
58.....	גובה מדפסת	6.3
59.....	טווח מהירות סריקה	6.4
60.....	טווח ערכים לגובה שכבה	6.5
62.....	תיקוף בעזרת פיילוט	7
62.....	אובייקט 1	7.1
69.....	אובייקט 2	7.2
72.....	אובייקט 3	7.3
74.....	בעיה 2 – ייצור סדרת מוצרים שונים, קיבוץ אובייקטים למנות	8
74.....	הגדרת הבעיה, הפרמטרים והמודל המתמטי	8.1
77.....	מימוש המודל	8.2

80.....	פיתוח אלגוריתם היוריסטי	8.3
80.....	ניסוח האלגוריתם	8.3.1
83.....	מימוש האלגוריתם	8.3.2
90.....	בחינת איכות ביצועי האלגוריתם ההיוריסטי	8.4
94.....	שיפור של האלגוריתם עם כלל ההחלטה האלטרנטיבי	8.5
96.....	מגבלות המודל, צעדים נדרשים לדיוקן ומחקר עתידי	9
97.....	סיכום	
98.....	מסקנות	
99.....	תודות	
100.....	ביבליוגרפיה	
103.....	נספחים	
103.....	נספח 1 – תכנות מתמטי אופטימלי לבעיית הדפסת אובייקט יחיד – אובייקט פיילוט מס' 2	
106.....	נספח 2 – תכנות מתמטי אופטימלי לבעיית קיבוץ אובייקטים למנות – דוגמת 3 האובייקטים	
109.....	נספח 3 – מימוש אלגוריתם היוריסטי עם כלל החלטה 1 – דוגמת שישה אובייקטים	
117.....	נספח 4 – מימוש אלגוריתם היוריסטי עם כלל החלטה 2 – דוגמת 6 אובייקטים	
126.....	נספח 5 – שיפור אלגוריתם היוריסטי עם כלל החלטה 2	

טבלת ראשי תיבות

AM	Additive manufacturing
PBF	Powder bed fusion
CART	Classification and regression tree
ANN	Artificial neural network
3DP	Three dimensional printing
SM	Subtractive manufacturing
CAD	Computer aided design
SLS	Selective laser sintering
FDM	Fused deposition modeling
SLM	Selective laser melting
DMLS	Direct metal laser sintering
CE	Concurrent engineering
DFMA	Design for manufacturing and assembly
DFAM	Design for additive manufacturing
FAHP	Fuzzy analytic hierarchy process
TOPSIS	Technique for order preference by similarity to an ideal solution
EDD	Earliest due date
BF	Best fit
ABF	Adapted best fit
RMSE	Root mean square error
SSE	Sum of squared estimate of errors
Mean abs dev	Mean absolute deviation
RSquare	Root square
Ra	roughness

רשימת תרשימים

15.....	תרשים 1- תרשים איכותני של הקשרים בין פרמטרי הדפסה למדדים שונים
19.....	תרשים 2 - דוגמא לעץ סיווג בינארי עבור משתנה תלוי קטגוריאלי
20.....	תרשים 3 - דוגמא לרשת נירונים עם שכבת קלט ונירון פלט
20.....	תרשים 4 - דוגמא לרשת נירונית עם שכבות חביות
25.....	תרשים 5 - מפת חשיבה של הדפסת תלת מימד
25.....	תרשים 6 - סיווג קלטים, הצגת משתני החלטה ופירוט מדדי ביצוע עבור בעיית אובייקט יחיד ובעיית קיבוץ אובייקטים למנות עבודה
28.....	תרשים 7 - CART ראשוני של חספוס, מינימום 5 אובייקטים בקבוצה
32.....	תרשים 8 - CART ראשוני של חספוס, מינימום 5 אובייקט 1 בקבוצה
33.....	תרשים 9 - CART ראשוני של זמן תכן, מינימום 5 אובייקטים בקבוצה
34.....	תרשים 10 - CART ראשוני של זמן תכן, מינימום 5 אובייקט 1 בקבוצה
35.....	תרשים 11 - CART ראשוני של זמן post process, מינימום 5 אובייקטים בקבוצה
36.....	תרשים 12 - CART ראשוני של זמן post process, מינימום 5 אובייקט 1 בקבוצה
37.....	תרשים 13 - CART סופי של חספוס, מינימום 5 אובייקטים בקבוצה
38.....	תרשים 14 - CART סופי של זמן תכן, מינימום 5 אובייקטים בקבוצה
39.....	תרשים 15 - CART סופי של זמן post process, מינימום 5 אובייקטים בקבוצה
40.....	תרשים 16 - חלופית הזנת הגדרות הרשת ב- JMP Pro ו- JMP
41.....	תרשים 17 - דיאגרמות רשתות הנירונים והנתונים הסטטיסטיים שלהן
43.....	תרשים 18 - סיווג הקלטים במודל והאופן שבו התקבל הקשר בינם לבין מדדי הביצוע
44.....	תרשים 19 - חזית יעילות עבור אובייקט מס' 1
51.....	תרשים 20 - חזית יעילות עבור אובייקט מס' 2
54.....	תרשים 21 - התפלגות פעמון
54.....	תרשים 22 - התפלגות אחידה
55.....	תרשים 23 - התפלגות עם ערכים קיצוניים בקצוות
55.....	תרשים 24 - חזית יעילות עבור התפלגות נורמלית של קוטר הלייזר
55.....	תרשים 25 - חזית יעילות עבור התפלגות אחידה של קוטר הלייזר
56.....	תרשים 26 - חזית יעילות עבור התפלגות קיצונית של קוטר הלייזר
56.....	תרשים 27 - חזית יעילות עבור התפלגות נורמלית של עוצמת הלייזר
56.....	תרשים 28 - חזית יעילות עבור התפלגות אחידה של עוצמת הלייזר
57.....	תרשים 29 - חזית יעילות עבור התפלגות קיצונית של קוטר הלייזר
57.....	תרשים 30 - חזית יעילות עבור התפלגות נורמלית של טווח גובה המדפסת
58.....	תרשים 31 - חזית יעילות עבור התפלגות אחידה של טווח גובה המדפסת
58.....	תרשים 32 - חזית יעילות עבור התפלגות קיצונית של טווח גובה המדפסת
59.....	תרשים 33 - חזית יעילות עבור התפלגות נורמלית של טווח מהירות הסריקה
59.....	תרשים 34 - חזית יעילות עבור התפלגות אחידה של טווח מהירות הסריקה
60.....	תרשים 35 - חזית יעילות עבור התפלגות קיצונית של טווח מהירות הסריקה
60.....	תרשים 36 - חזית יעילות עבור התפלגות נורמלית של טווח גבהי השכבה
61.....	תרשים 37 - חזית יעילות עבור התפלגות אחידה של טווח גבהי השכבה
61.....	תרשים 38 - חזית יעילות עבור התפלגות קיצונית של טווח גבהי השכבה
62.....	תרשים 39 - חזית יעילות עבור אובייקט פיילוט מס' 1
67.....	תרשים 40 - גידול באחוזים בזמן הכולל כפונקציה של הגידול באחוזים בטיב השטח עבור אובייקט פיילוט מס' 1
68.....	תרשים 41 - אחוז הגידול בזמן הכולל כפונקציה של צד ימין של אילוף החספוס עבור אובייקט פיילוט מס' 1
68.....	תרשים 42 - חזית יעילות עבור אובייקט פיילוט מס' 2
71.....	תרשים 43 - גידול באחוזים בזמן הכולל כפונקציה של אחוזי הגידול בטיב השטח עבור אובייקט פיילוט מס' 2
71.....	תרשים 44 - גידול באחוזים בזמן הכולל כפונקציה של צד ימין של אילוף טיב השטח עבור אובייקט פיילוט מס' 2
72.....	

תרשים 45 – תיאור סכמתי של האלגוריתם ההיוריסטי לפתרון בעיית קיבוץ אובייקטים למנות.....83
 תרשים 46 – אלגוריתם עם כלל החלטה אלטרנטיבי ועדכון באופן בחירת האובייקט הראשון במנה94

רשימת איורים

49.....	איור 1 – אובייקט מס' 1
52.....	איור 2 – אובייקט מס' 2
62.....	איור 3 – אובייקט פיילוט מס' 1
69.....	איור 4 – אובייקט פיילוט מס' 2
73.....	איור 5 – אובייקט פיילוט מס' 3
90.....	איור 6 – בעיית קיבוץ של 3 אובייקטים
92.....	איור 7 – בעיית קיבוץ של 6 אובייקטים

רשימת טבלאות

47.....	טבלה 1 – תאים של פונקציות מטרה ומשתני החלטה באקסל
47.....	טבלה 2 – תאים של פרמטרים ואילוצי המודל באקסל
post	טבלה 3 – תאים של ערכים מקסימליים ומינימליים וערכים מכוילים עבור חספוס, זמן תכן וזמן
48.....	process באקסל
49.....	טבלה 4 – פרמטרים של אובייקט מס' 1
50.....	טבלה 5 – זמן תכן מינימלי ומקסימלי עבור אובייקט מס' 1
50.....	טבלה 6 – טיב שטח מינימלי ומקסימלי עבור אובייקט מס' 1
50.....	טבלה 7 – זמן post process מינימלי ומקסימלי עבור אובייקט מס' 1
52.....	טבלה 8 – פרמטרים של אובייקט מס' 1
53.....	טבלה 9 – זמן תכן מינימלי ומקסימלי עבור אובייקט מס' 2
53.....	טבלה 10 – טיב שטח מינימלי ומקסימלי עבור אובייקט מס' 2
53.....	טבלה 11 – זמן post process מינימלי ומקסימלי עבור אובייקט מס' 2
63.....	טבלה 12 – תוצאות מהמודל ללא כיול עבור אובייקט פיילוט מס' 1
64.....	טבלה 13 – תוצאות מכוילות מהמודל עבור אובייקט פיילוט מס' 1
70.....	טבלה 14 – תוצאות מהמודל ללא כיול עבור אובייקט פיילוט מס' 2
70.....	טבלה 15 – תוצאות מכוילות מהמודל עבור אובייקט פיילוט מס' 2
73.....	טבלה 16 – תוצאות מהמודל ללא כיול עבור אובייקט פיילוט מס' 3
73.....	טבלה 17 – תוצאות מכוילות מהמודל עבור אובייקט פיילוט מס' 3

סימונים מתמטיים

סימונים עבור בעיית הדפסת אובייקט יחיד

d - קוטר לייזר

p - עוצמת לייזר

t_p - זמן הדפסה

t_d - זמן תכן

t_c - זמן post process (עיבוד משלים)

$t_s = t_d + t_p + t_c$ - זמן אספקה,

th - זמן פיזור אבקה של שכבה אחת.

H_k – גובה האובייקט באוריינטציה k

Y_k – רוחב האובייקט באוריינטציה k

X_k – אורך האובייקט באוריינטציה k

V_object – נפח האובייקט

V_sup_k – נפח התמיכות עבור אוריינטציה k

V – נפח כולל (אובייקט ותמיכות)

h – גובה שכבה, $h \in [h_0, h_f]$

v – מהירות סריקה של האובייקט, $v \in [v_0, v_f]$

O – אוריינטציה של האובייקט, $O \in \{O_1, O_2, O_3\}$

סימונים עבור בעיית קיבוץ אובייקטים למנות

h_j – גובה שכבה של מנה j , $h_j \in [h_0, h_f]$

v_i – מהירות בריקה של אובייקט i , $v_i \in [v_0, v_f]$

O_{ki} – אוריינטציה של אובייקט i , $O_{ki} \in \{O_{1i}, O_{2i}, O_{3i}\}$

X_{ij} – משתנה בינארי שמקבל 1 אם אובייקט i משובץ למנה j ו-0 אחרת, $X_{ij} \in \{0,1\}$

t_{dij} – זמן תכן של אובייקט i במנה j .

t_{cij} – זמן post process של אובייקט i במנה j .

t_{pj} – זמן הדפסה של מנה j .

t_{dj} – זמן תכן כולל של כל האובייקטים המשובצים במנה j .

t_{cj} – זמן post process כולל של כל האובייקטים המשובצים במנה j .

Ra_{ij} – ציון טיב שטח של אובייקט i במנה j .

J_n – מספר מנות העבודה.

תקציר המחקר

גישת הייצור AM (additive manufacturing), שמושמת בעזרת הדפסת תלת מימד (3DP), תפסה תאוצה בשנים האחרונות הודות ליתרונותיה הכוללים ייצור אובייקטים בעלי גאומטריה מורכבת, הקטנת בזבז חומרים, צמצום עלות שינוע וגמישות בייצור. אחת הדרכים הנפוצות ביותר להדפסה בתלת מימד היא SLS (selective laser sintering) שכוללת פיזור אבקה (מתכת או פלסטיק) על משטח ההדפסה, בגובה מסויים והתכתה במקומות הרצויים, במהירות מסויימת, ע"י מקור אנרגיה תרמית (כמו לייזר) ובה המחקר מתמקד. התהליך כולל שלושה שלבים: תכן המוצר, תכן תהליך ההדפסה ותהליך העיבוד שלאחר ההדפסה. המדפסת הנה משאב יקר והערכת זמן כולל היא דבר קריטי לשיפור התחרותיות והגדלת הניצולת של המדפסת. מאחר וקיימת אינטראקציה בין החלטות שקשורות לתכן המוצר והחלטות שקשורות לתכן תהליך ההדפסה ולתהליך העיבוד שלאחר ההדפסה, עבודה זו עוסקת באינטגרציה של השלבים הנ"ל על מנת לתת הערכה מתכללת של הזמן הכולל בהתבסס על נתונים אמפיריים וקשרים אנליטיים ופיזיקליים. בהיבט של תכן המוצר אני מסתכלים על אוריינטציית החלק – הזווית שבה מונח על משטח ההדפסה. הפרמטרים של ההדפסה כוללים קביעת גובה שכבה, ומהירות סריקה. הנ"ל משפיעים על מדדים תפעוליים כדוגמת זמני הדפסה, זמני עיבוד שלאחר הדפסה (post process) ועלות כמו גם על מדדים מכניים – חוזק, חספוס, עמידה בטורנסים ועוד. לרוב, ישנו טרייד אוף בין סוגי המדדים הנ"ל. מטרת המחקר היא למדל באופן מתמטי את הבעיה מרובת מטרות של מזעור זמן האספקה, מהתכן ועד העיבוד שלאחר הדפסה, כמו מזעור מידת החספוס (שמביא לטיב פני שטח טובים יותר), כתלות בפרמטרים הנ"ל (אוריינטציה, מהירות סריקה, גובה שכבה). המידול של בעיית האובייקט היחיד התבסס בחלקו על תכנות מתמטי עם פונקציות אנליטיות ואילוצים, על בסיס הספרות ובחלקו על יצירת קשר בין פרמטרים ומשתני החלטה למדדי התפעול והמכניקה באמצעות רשת נוירונים ANN. לשם יצירת הרשת, נאספו נתונים מארגון המתמחה בהדפסות תלת מימד ונבחנה מידת השפעתם על המדדים הרלוונטיים באמצעות עצי סיווג (CART). הפרמטרים שנמצאו כבעלי השפעה הוכנסו לרשת והתקבלו קשרים בין פרמטרי ההדפסה ומשתני ההחלטה למדדים השונים. לאחר השלמת המודל, התבצע תהליך אופטימיזציה לפתרון בעיה מרובת מטרות שכלל את הצגת חזית היעילות ונערך תיקוף למודל ע"י ניתוח רגישות לכמה מהפרמטרים שלו, עבור אובייקט לדוגמא ובאמצעות מימוש המודל עבור מס' אובייקטים במסגרת פיילוט והשוואת המדדים שסיפק המודל עם המדדים שהתקבלו בפועל. לאחר שמדלנו את הבעיה עבור מקרה של מוצר יחיד במנת ייצור אחת, הרחבנו את המודל לתיאור מתמטי כללי של מספר מנות ייצור שכל אחת מהן מורכבת מכמה מוצרים שונים, כך שבבעיה זו, בנוסף לקביעת אוריינטציות האובייקטים מהירות ההדפסה וגובה השכבה, נדרש גם לקבל החלטה באשר לאובייקטים שישוּבצו בכל מנה כדי לצמצם במידת האפשר את זמן האספקה, מבלי לפגוע באופן משמעותי בטיב פני השטח של המוצרים. הבעיה מודלה באמצעות תכנות מתמטי שמספק פתרונות אופטימליים ובשל זמני ריצה ארוכים שהגיעו לכדי שעות רבות, הוצג גם אלגוריתם היוריסטי לפתרון הבעיה בזמן קצר של שניות ובתוצאות שקרובות לפתרון האופטימלי עד כדי סטייה של אחוזים בודדים.

תקציר מנהלים מורחב

גישת הייצור AM (additive manufacturing), הידועה גם כהדפסת תלת מימד (3DP), תפסה תאוצה בשנים האחרונות הודות ליתרונותיה הכוללים ייצור אובייקטים בעלי גאומטריה מורכבת, הקטנת בזבז חומרים, צמצום עלות שינוע וגמישות בייצור. אחת הדרכים הנפוצות ביותר להדפסה בתלת מימד היא PBF (powder bed fusion) שכוללת פיזור אבקת מתכת על משטח ההדפסה, בגובה מסוים והתכתה במקומות הרצויים, במהירות מסוימת, ע"י מקור אנרגיה תרמית (כמו לייזר). אמנם מחקר זה מתמקד בטכנולוגיה ספציפית זו אך בהחלט יכול לעזור בהבנת טכנולוגיות אחרות. הפרמטרים של ההדפסה כמו קביעת גובה שכבה, אוריינטציית החלק – הזווית שבה מונח על משטח ההדפסה, מהירות וכדומה משפיעים על מדדים תפעוליים כדוגמת זמני הדפסה ועלות כמו גם על מדדים מכניים – חוזק, טיב פני שטח (רמת החספוס), עמידה בטולרנסים ועוד, כאשר לרוב, ישנו טרייד אוף בין סוגי המדדים הנ"ל. כמו כן, פרמטרים אילו נוגעים לתכן המוצר, תכן תהליך ההדפסה ו- post process – ולכן, במסגרת הנדסה משולבת, יש להתחשב בהשפעתם על אילו בקבלת החלטות לגבי ערכי הפרמטרים. בעבודה זו אנו מציעים מודל הנדסי שעונה לצורך זה ומאפשר מציאת יחס הגומלין הטוב ביותר שמתחשב בכלל ההיבטים.

שאלת המחקר היא כיצד לקבוע את **אוריינטציית האובייקט** ואת ערכיהם של **מהירות הסריקה וגובה השכבה** כך **שזמן האספקה** (שכולל זמן תכן המוצר, זמן ההדפסה וזמן עיבוד שלאחר הדפסה) ימוזער **וטיב פני השטח** ימוקסם. כדי לתת מענה לשאלה זו, נדרש למדל באופן מתמטי את בעיית המזעור של זמן האספקה ומידת החספוס (טיב פני שטח), כתלות במשתני החלטה המשתייכים לתכן מוצר (אוריינטציה) ותכן תהליך ההדפסה (מהירות סריקה וגובה שכבה). בשלב הראשון, הבעיה מודלה עבור מקרה פרטי שבמסגרתו נדרש לייצר מוצר אחד בלבד במנת ייצור אחת (בהמשך תיקרא בעיה של מוצר יחיד). לאחר המידול היחידני הנ"ל, המקרה הפרטי הורחב לתיאור מתמטי כללי של בעיה למקבץ מוצרים שונים שיש להחליט על מנות הייצור שלהם שכל אחת מהן מורכבת מכמה מוצרים, כך שבבעיה זו נדרש גם לקבל החלטה באשר לאובייקטים שישוּבצו בכל מנה כדי לצמצם במידת האפשר את זמן האספקה מבלי לפגוע באופן משמעותי בטיב פני השטח של המוצרים.

במחקר זה, המידול שלנו מתבסס בחלקו על תכנות מתמטי עם פונקציות אנליטיות ואילווצים, תוך שימוש במידע שהתקבל מסקר הספרות, ובחלקו על יצירת קשר בין פרמטרים ומשתני החלטה למדדי התפעול והמכניקה באמצעות רשת ANN. הרשתות נבנו עבור שלושה מדדים שונים המהווים את המשתנים המגיבים (תלויים): זמן תכן, חספוס (טיב פני שטח) וזמן post process. לשם יצירת הרשתות, נאספו נתונים אמיתיים מארגון המתמחה בהדפסות תלת מימד בטיטניום Ti64 ונבחנה מידת השפעתם על המדדים הרלוונטיים באמצעות עצי סיווג (CART). הפרמטרים שהוכנסו לרשתות הם אילו שנמצאו כבעלי השפעה ומבחינה לוגית הגיוני להכניס אותם כקלטים לרשתות הנוירוניות. מהירות סריקה, גובה שכבה, עוצמת לייזר, נפח אובייקט ואוריינטציה הוכנסו כקלטים לשלוש הרשתות. עבור הרשת שהמשתנה המגיב שלה הוא חספוס, גם זמן התכן הוכנס כקלט ועבור הרשת שהמשתנה המגיב שלה הוא זמן post process, זמן התכן והחספוס הוכנסו גם הם כקלטים. כמו גם זמן תכן לרשת של חספוס וזמן תכן וחספוס ל-post process – ולאחר הכנסתם התקבלו קשרים בין פרמטרי ההדפסה ומשתני ההחלטה למדדים השונים.

השימוש ברשתות נוירונים כאמצעי לניבוי זמנים וציון טיב שטח, עלול ליצור מצב שיתקבלו זמנים (תכן ו-post process) שליליים או לחלופין, ציון טיב שטח שחורג מהסקאלה שהוגדרה עבורו, בעיקר עבור אובייקטים ששונים מאוד מאילו שעל בסיס נתוניהם נבנתה הרשת. לשם כך, הרשתות כוילו כך שהזמנים/ציון טיב השטח שיתקבלו מהרשתות, יועתקו בהעתקה לינארית לטווח מתאים. הרעיון הוא להגדיר את טווח הערכים שכל ערך מכויל יכול לקבל (עבור ציון טיב שטח הטווח קבוע מ-1 ל-4 ועבור זמני התכן ו-post process, תלוי במאפייני האובייקט), למצוא את הערכים המקסימליים והמינימליים שמתקבלים מכל רשת (זמן תכן, זמן post process וחפוס) ולהציב בנוסחת ההעתקה. חשוב להקפיד שסדר הכיול יהיה כסדר התלות – זמן תכן, חספוס וזמן post process.

לאחר השלמת המודל והכיול לרשתות הניורוניות, כפי שתואר לעיל, ייושם תהליך אופטימיזציה לפתרון בעיה מרובת מטרות, עבור מס' אובייקטים, באמצעות פלטפורמות Lingo ו-Palisade שכלל בניית חזית היעילות ומזה התקבל יחס הגומלין (tradeoff) שקיים בין טיב השטח לזמן האספקה.

בוצע תיקוף למודלים בשני מישורים: ניתוח רגישות ופיילוט. התבצע ניתוח רגישות לפרמטרי המודל שהעלה כי עבור האובייקט שעליו בוצע הניתוח, קוטר הלייזר ועוצמתו, כמו גם ערכים קיצוניים שלו הם המשפיעים ביותר על טווח הזמנים המתקבל בחזית היעילות ועל ציון החספוס שהחל ממנו ישנה רגישות גבוהה לכל שיפור בטיב פני השטח המתבטאת בעליה חדה בזמן האספקה.

בהמשך, התבצע פיילוט שבמסגרתו המודל מומש על שלושה אובייקטים חדשים, שפרטיהם לא כלולים ברשת הניורונים, כאשר עבור שניים מהאובייקטים, התוצאות שסיפק המודל, עבור נתוני ההדפסה האמיתיים שבהם הודפסו (מהירות, גובה שכבה, אוריינטציה), היו בסדר גודל דומה לתוצאות בפועל ואילו עבור האובייקט השלישי, בשל ממדיו החריגים ומורכבותו יוצאת הדופן, התגלה פער בין טיב השטח שהמודל סיפק לטיב השטח בפועל. הסטיות והפערים במדדים השונים נובעים מהיעדר סיווג של אובייקטים לקבוצות מוצרים ומשימוש בנוסחת זמן הדפסה המתייחסת לאובייקט כמכלול אחד ללא פירוק לשכבות, עובדה המחייבת התאמות בנוסחה שעלולות לעוות את התוצאות ובשונה מהאופן שבו האובייקט מודפס ומצורת החישוב בסימולציית המחשב.

הבעיה הכללית יותר היא בעיית מקבץ המוצרים השונים. פותח מודל לבעיה המורחבת שכולל קיבוץ אובייקטים למנות, על בסיס המודל שנבנה עבור אובייקט יחיד, והוא מומש עבור שתי דוגמאות באמצעות Lingo. מאחר והבעיה לא ליניארית וכוללת משתנים מעורבים, ברור שזמן הריצה גדול אקספוננציאלית בגודל הבעיה והופך אותה לבעיה שלא ניתן לפתור אותה בזמן פולינימיאלי בגודל הבעיה (NP Hard).

על מנת להתמודד עם המורכבות של הבעיה הכללית, פיתחנו אלגוריתם היוריסטי שעיקר צעדיו: קיבוע גובה שכבה אחיד לכל מנה, מציאת אוריינטציה ומהירות סריקה לכל אובייקט תחת גובה השכבה הנ"ל ואילוץ טיב שטח לכל אובייקט, בחירת האובייקט בעל סכום זמן הסריקה ויתרת זמן פיזור האבקה הנמוך ביותר או בעל סכום הפרשי הגבהים מהאובייקטים ששובצו שהינו הנמוך ביותר, בדיקה שהוספת האובייקט לא גורמת לחריגה משטח מגש ההדפסה ועצירת קיבוץ האובייקטים למנה במידה ולא ניתן להוסיף עוד אובייקטים מבלי לחרוג משטח המגש או במקרה שכל האובייקטים שובצו. הפתרון שהתקבל מהאלגוריתם ההיוריסטי עבור שתי הדוגמאות היה לכל היותר גרוע בכ-9.6% ולאחר שיפורו התקבלו תוצאות דומות לפתרון האופטימלי. זמן הריצה שלו, לעומת זאת, היה קצר משמעותית מול זמן הריצה של התכנות המתמטי (שניות מול עשרות שעות).

התובנה העיקרית שעולה מהמחקר היא הפוטנציאל העצום שקיים בכלי ממוחשב, המבוסס על נוסחאות אנליטיות ולמידת מכונה, שמאפשר לקבוע משתני החלטה קריטיים, עבור הדפסת אובייקט יחיד ועבור שיבוץ קבוצת אובייקטים למנות עבודה, בלחיצת כפתור, תוך התייחסות להשפעה על מרכיבי תכן, תפעול ומכניקה ועל שלבי הייצור השונים. בשל ההשפעה הנרחבת שיש לכלי הנ"ל על קבלת החלטות, ישנה חשיבות מיוחדת לחלוקת האובייקטים למשפחות מוצרים, לשימוש במאגר נתונים נרחב ומקיף כבסיס לבניית רשתות הניורונים, כמו גם לצורך במדידה מדויקת של כלל הפרמטרים שנכללים במודל, בדגש על זמני תכן, זמני post process וטיב שטח והכל במטרה למקסם את דיוק המודל ולמזער את הצורך בביצוע כיוולים. כמו כן, מהמחקר עולה שביצוע ניתוח רגישות של פרמטרי המודל, עבור כל אובייקט בנפרד, הוא מהותי, אם ברצוננו לקבל החלטות תוך התחשבות בגורמי אי ודאות ובסטיות מערכים הנומינליים המוזנים למדפסת. נקודה נוספת חשובה שעולה מהמחקר היא שהכלי הנ"ל, עבור בעיית קיבוץ אובייקטים למנות עבודה, צריך להתבסס על אלגוריתמים היוריסטיים טובים ככל שניתן כדי להפחית זמני ריצה ולאפשר קבלת פתרונות טובים מספיק בזמן קצר.

מבוא

ייצור בהוספה (AM) Additive Manufacturing, הוא כינוי לתהליך שבמהלכו מייצרים אובייקט תלת מימדי באמצעות צירוף של חומרים שכבה על גבי שכבה. לעומת ייצור בהסרה (SM) Subtractive Manufacturing שלפיו מתחילים בגוש חומר גלם ומסירים ממנו חומר בעזרת עיבוד וכרסום.

הטכנולוגיה למימוש גישה ה-AM נקראת הדפסת תלת מימד 3 Dimensional Printing (3DP). היסטורית, גישה זו התחילה בפיתוח אבות טיפוס למוצרים תלת מימדיים בסיוע מחשב – (CAD) computer aided design [1], [2].

בשנת 1984 הומצאה מדפסת תלת המימד הראשונה. באותה תקופה, ייצור באמצעות הדפסת תלת מימד היה יקר מאוד ומשום כך לא היה פיזיבילי לשימוש בתעשייה. במהלך השנים ובעיקר בשנים האחרונות ממש, העלויות הכרוכות בהדפסת תלת מימד פחתו באופן דרסטי, עובדה שגרמה לשיטת ייצור זו להיות נחלתם של ענפי ייצור רבים, כאמצעי לייצור ישיר של מוצרים ולא רק כפיתוח של אבות טיפוס [3].

ההבדל בין AM לייצור מסורתי לפי SM בא לידי ביטוי במספר אופנים: ראשית, גישה AM המתבססת על ייצור שכבה על גבי שכבה מאפשרת ליצור מוצרים בעלי גאומטריה מורכבת כמעט ללא צורך בעבודת יד ותיקונים נוספים הכרוכים בייצור מסורתי. בנוסף, הקלטים הנחוצים לייצור ב-AM הם חומרי הגלם הרלוונטיים והמודל הממוחשב של האובייקט אותו יש להדפיס. יתר על כן, יש לבצע פעולות קודם ההדפסה כדוגמת קביעת תכן המוצר, כלומר האופן שבו הוא יודפס - האוריינטציה (במאונך, במאוזן, בזווית וכדומה) והתמיכות הנדרשות כדי שניתן יהיה להדפיס באוריינטציה הנ"ל (ז"א שלא יוצר מצב ששכבה מונחת באוויר) כמו גם הסרת משטח הייצור הקודם והטענת משטח חדש. לעיתים נדרש לנקוט בפעולות שונות לאחר הייצור (post process) כמו ניקוי, ליטוש ועיבוד נוסף ב-CNC כדי לשפר את איכות המוצר בפרמטרים כדוגמת טיב פני שטח [1], [2].

לטכנולוגיית הדפסת תלת מימד יש יתרונות במישורים הבאים:

מישור הייצור – תכן מורכב שלא ניתן לייצר בשיטות הרגילות, פישוט תהליך הייצור, האצת ייצור אבות טיפוס, ייצור במנות קטנות, יכולת ייצור של מערכת שלמה, צמצום הצורך בהרכבה המאפשר חיסכון בעלות עבודה, גמישות בייצור – ניתן להדפיס כל מוצר שמתוכנן ב-CAD, תגובה מהירה לשינויים בביקושים ו/או בתכן המוצר, ייצור על בסיס התאמה אישית, הקטנת בזבז חומרים כתוצאה מייצור ללא חיתוך, גמישות בייצור, אפשרות ייצור מוצרים קלים וחזקים [4].

מישור האספקה – הקטנת שטחי ייצור, ייצור קרוב ללקוח – הקטנת עלות אספקה ושינוע, הפחתת טביעת רגל פחמנית, צמצום זמני אספקה, הורדת כמות מלאי בתהליך, צמצום הזמן בין עיצוב ופיתוח לייצור, ייצור חלקי שירות והפחתת הצורך באחזקת מלאים גדולים.

על אף האמור, קיימות מספר מגבלות ייצור בהדפסת תלת מימד הכוללות שימוש בחומרים וצבעים מוגבלים, עלות גבוהה לריצות ייצור גדולות, דיוק מוגבל, לא נבדק ייצור של מוצרים מסוכנים, מימדי ייצור מוגבלים. כמו כן, לעיתים נדרש עיבוד משלים כמו טיפול תרמי, הסרת תומכים וכדומה [4].

באופן כללי, שימוש בטכנולוגיית AM הוא אופטימלי כאשר: ייצור בנפח קטן, מוכוון ומותאם ללקוח, עלות ייצור בינונית וזמן אספקה נדרש קצר. כמו כן, מוצרים ייחודיים ומותאמים בעלי מורכבות גבוהה הם בעלי עדיפות להדפסה בתלת מימד. הנ"ל יכול לעזור בקבלת החלטה לגבי בעיית ההקצאה הראשונית אם לקבל הזמנה או לאו [3].

טכנולוגיות הדפסה בתלת מימד

ישנן מדפסות תלת מימד מגוונות שהשונויות ביניהן נובעת בעיקר במתודה שבה מדפיסים את שכבות החומר כדי ליצור את האובייקט הסופי. שתי הדרכים הנפוצות ביותר להדפסה בתלת

מימד הן Selective Laser Sintering (SLS) ו-Fused Deposition Modeling (FDM). SLS יוצרים את שכבות האובייקט באמצעות פיזור שכבת אבקה של פלסטיק, מתכת, קרמיקה או זכוכית, על משטח הייצור, והתכתה ע"י קרן לייזר. במתודה זו ניתן לייצר מספר אובייקטים שונים, בעלי גובה שונה, בו זמנית, כלומר במנה אחת. בשלב הראשון מפזרים אבקה בגובה מוגדר מראש על פני כל משטח הייצור. לאחר מכן, בהסתמך על שטח החתך של המוצר/ים שמתקבל ממודל הייצור הממוחשב, מגבשים את האבקה רק במקומות הרצויים לכדי שכבה אחת מוצקה באמצעות לייזר הנע במהירות מסויימת על פני המשטח, ומנקים את האבקה שנותרה. חוזרים על תהליך פיזור האבקה והתכתה עד לסיום ייצור השכבה האחרונה במנת הייצור. שיטות נפוצות שעושות שימוש בגישה זו הן selective laser melting (SLM) ו-direct metal laser sintering (DMLS) הנבדלות במקור האנרגיה ובסוג אבקת המתכת.

בשיטת ה-FDM, לעומת זאת, מזריקים חומר תרמופלסטי על משטח הייצור באמצעות זרבובית שמתכה אותו. בגישה זו, המדפסת מורכבת ממכונת הזרקה (extruder) שמוזנת ע"י סליל של החומר המשמש להדפסה, החומר מועבר לזרבובית, שם הוא מחומם בטמפרטורה שמתכה אותו ולבסוף החומר המותך מונח בשכבות על משטח ההדפסה.

רקע להגדרת הבעיה הנחקרת

בשני סוגי הטכנולוגיות שתוארו, על אף שיש שוני ביניהם, פרמטרי ההדפסה כמו קביעת גובה שכבה, אוריינטציית החלק, צפיפות המילוי, דפוס התנועה של הזרבובית/לייזר, מהירותו וכדומה משפיעים על מדדים תפעוליים כדוגמת זמני הדפסה, זמני pre/post process ועלות כמו גם על מדדים מכניים – חוזק, חספוס, עמידה בטולרנסים ועוד. לרוב, ישנו יחס גומלין (Tradeoff) בין סוגי המדדים הנ"ל, ז"א קומבינציית פרמטרים שמביאה לאופטימום מדד תפעולי כלשהוא, עלולה במקביל לפגוע באופן משמעותי במדדים המכניים ולהפך. משתי השיטות עולה כי ככל שגובה השכבה של החומר נמוך יותר ומהירות ההתכה נמוכה יותר, זמן ההדפסה ארוך יותר. כמו כן, האוריינטציה שבה החלק מודפס משפיעה גם היא על זמן התכן, זמן ההדפסה וזמן post process. הפרמטרים הנ"ל משפיעים גם על איכות המוצר המודפס בהיבטים של דיוק, חוזק, חספוס וכדומה [2], [5], [3]. האינטראקציה בין כלל הפרמטרים למדדים תפעוליים חשובים הוא נושא עבודה זו.

הפרמטרים של ההדפסה נוגעים לתכן המוצר ותכן תהליך ההדפסה ותהליך ה-post-processing כאחד, למשל קביעת אוריינטציית החלק משפיעה על תכן המוצר מאחר והיא עשויה לשנות את התצורה שלו במהלך ההדפסה כתוצאה מהוספת תמיכות, קביעת גובה השכבה וצפיפות המילוי (רלוונטי להדפסה בפלסטיק) נוגעים לתהליך ההדפסה עצמו. בנוסף, הפרמטרים השונים משפיעים על זמן התכן הראשוני וזמן post process, לדוגמה קבלת החלטה בנוגע לאוריינטציה משפיעה על כמות התמיכות וסוגן ובהתאם לכך – לזמן שנדרש לתכנן אותן בטרם ההדפסה. בנוסף, קביעת האוריינטציה, המהירות וגובה השכבה משפיעים על חלקות האובייקט וחוזקו ובהתאם לכך – לזמן post process הדרוש להשלמת ייצור המוצר והסרת התמיכות. קבלת החלטות במקביל באשר לתכן המוצר ותכן ההדפסה, כמו גם בחינת ההשפעה של הפרמטרים על זמני התכן, ההדפסה ו-post process – נעשית במסגרת גישת הנדסה משולבת – Concurrent Engineering (CE). המתודולוגיה שתומכת בגישה זו היא תיכון לייצוריות והרכבה Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) [3], [6]. גישה זו דוגלת בקבלת החלטות בנוגע לשלבים השונים של הייצור עוד בשלבי התכן של המוצר כדי לזרז את תהליך הייצור ולהימנע מקבלת החלטות שהן אופטימליות באופן מקומי ולא גלובלי (למשל החלטה שטובה מאוד בהקשר לתכן המוצר אבל גרועה מבחינת תכן תהליך הייצור או החלטה שטובה מבחינת זמן הייצור אך גרועה מבחינת האיכות). מתודולוגיה זו קיימת כמה עשורים ולאחרונה, לאור ההדפסה בתלת מימד, התפתחה גישת התיכון להדפסה בהוספה Design for Additive Manufacturing (DFAM) [7].

ההנדסה המשולבת, מאחר ובמסגרתה נלקחים בחשבון שיקולי תכן מוצר ותהליך כאחד, מפחיתה את הצורך בחזרה לשלבים מוקדמים של התכן מחד, אך מחייבת שימוש בפונקציות מטרה משולבות ומורכבות יותר, בעלות אילוצים רבים יותר, מאידך וזה בהחלט מאוד רלוונטי

בסביבה של הדפסה תלת מימד. כמו כן, במסגרת ההנדסה המשולבת, נעשה שיתוף פעולה בין מומחים ממחלקות שונות בארגון כדי לתכן את המוצר והתהליך באופן האופטימלי ביותר. שיתוף פעולה כזה עלול ליצור קונפליקטים בין המחלקות בשל העובדה שכל מחלקה מעוניינת בהשגת המטרה הלוקלית שלה.

בחירת הפרמטרים בהדפסת תלת מימד לוקה בבעיה זו משום שכפי שצוין קודם, הפרמטרים משפיעים על מדדי תפעול ומדדים מכניים במקביל, כאשר לרוב קיים יחס גומלין ביניהם, לפיכך המהנדסים האמונים על אופטימיזציה של מדדי התפעול ומהנדסי המכונות האחראיים על מיקסום מדדי האיכות והמכניקה, עלולים להתמקד במטרה המקומית שלהם בלבד. משום כך, ישנה חשיבות במציאת פרמטרים שימצאו את האיזון האולטימטיבי בין שני סוגי המדדים [8], [6]. זהו הייחוד והתרומה של עבודה זו כפי שמוסבר בפרק הבא.

בפרק הבא, כפי שצוין, נציג את שאלת המחקר ומטרתו. בפרק שלאחריו, נסקור מאמרים שקשורים לבעיות הנחקרות, האופנים שבהם ניתן למדלן וגישות לפתרונן. לאחר מכן, בפרק השלישי, נפרט את מתודולוגיית המחקר והאמצעים שנכללו בו כדי ליצור כלי שייתן מענה לבעיות שמועלות במחקר. בפרק הרביעי נציג בפרוטרוט את צורת המידול המתמטי של בעיית הדפסת אובייקט יחיד שמורכבת מנוסחאות אנליטיות שנמצאו בסקר הספרות כמו גם מלמידת מכונה על בסיס נתונים שנאספו מחברה המתמחה בהדפסת תלת מימד. בפרקים שלאחר מכן, נדגים את השימוש במודל על אובייקטים שעל בסיס נתוניהם נבנה המודל ונראה דוגמא לניתוח רגישות של פרמטרי המודל והשפעת אי הוודאות של הערך האמיתי של פרמטרים אילו על התוצאות המתקבלות. בפרק נוסף, ננתח את ביצועי המודל על אובייקטים חדשים שנתוניהם לא כלולים בבניית המודל, נשווה את התוצאות המתקבלות מהמודל לתוצאות בפועל וננסה לעמוד על הסיבות להבדלים. בפרק שלאחריו, נרחיב את בעיית הדפסת אובייקט יחיד לבעיית קיבוץ אובייקטים למנות עבודה, נציג את מודל התכנות המתמטי, נציג אלגוריתם היוריסטי ומימושו במטרה לקצר זמני ריצה ונבחן את ביצועיו בהשוואה לתכנות המתמטי האופטימלי. לבסוף, נציע צעדים לשיפור הכלי המידולי הן מצד הארגון והן מצדו כחוקרים, נסכם את מה שנעשה במחקר את הממצאים שהתגלו ואת המסקנות שעלו.

1 שאלת המחקר ומטרתו

שאלת המחקר היא כיצד לקבוע את ערך הפרמטר של תכן המוצר – אוריינטציה - ביחד עם פרמטרי ההדפסה – מהירות סריקה וגובה שכבה - כדי למזער את זמן האספקה ולמקסם טיב שטח, תוך התחשבות בזמני תכן ועיבוד משלים, עבור אובייקט בודד ומנת אובייקטים. מכאן, שמטרת המחקר היא למדל באופן מתמטי את בעיית מזעור זמן האספקה ומידת החספוס (טיב פני שטח), כתלות בפרמטרים של ההדפסה ומתוכו לגזור את ערכי הפרמטרים הנ"ל. בשלב הראשון, נמדל את הבעיה עבור מקרה פרטי שבמסגרתו נדרש לייצר מוצר אחד בלבד במנת ייצור אחת. לאחר המידול הראשוני של מוצר יחידני, נרחיב את המקרה הפרטי לתיאור מתמטי כללי של מספר מנות ייצור שכל אחת מהן מורכבת מכמה מוצרים, כך שבבעיה זו נדרש גם לקבל החלטה באשר לאובייקטים שישוּבצו בכל מנה כדי לצמצם במידת האפשר את זמן האספקה מבלי לפגוע באופן משמעותי בטיב פני השטח של המוצרים.

שאלת מחקר ראשונית – כיצד לקבוע את אוריינטציית האובייקט, מהירות סריקתו וגובה השכבה שבו יודפס כאשר נדרש לייצר אובייקט זה בלבד, במנה אחת, תוך התחשבות בהשפעתם על זמני התכן, ההדפסה והעיבוד המשלים.

שאלת מחקר מורחבת עבור סדרת אובייקטים – כיצד לקבוע את זהות האובייקטים בכל מנה, במקביל לקביעת האוריינטציה ומהירות הסריקה של כל אובייקט וגובה שכבה של כל מנה, במטרה למזער זמן אספקה ולעמוד בדרישות טיב השטח, תוך התחשבות בהשפעתם על זמני התכן, ההדפסה והעיבוד המשלים.

1.1 הייחודיות של המחקר

- מציאת אופטימום למדד תפעולי (זמן אספקה) ומדד מכני (טיב שטח) בו זמנית.
- מידול האינטראקציה בין היבטי תכן המוצר והיבטי תכן התהליך של ההדפסה.
- בדיקת השפעת פרמטרי הדפסה מסויימים על קיבוץ החלקים למנות – במאמרים שנסקרו ויפורטו בסקר הספרות ושעסקו בבעיית קיבוץ המנות ושיבוץ, פרמטרי ההדפסה קובעו ולא נבדק כיצד שינוי הערכים של חלק מהפרמטרים עשוי להשפיע על אופן הקיבוץ והשיבוץ.
- התייחסות למרכיבי התכן ו-post process בתהליך המידול.
- שילוב בין למידת מכונה לאופטימיזציה.

2 סקר ספרות

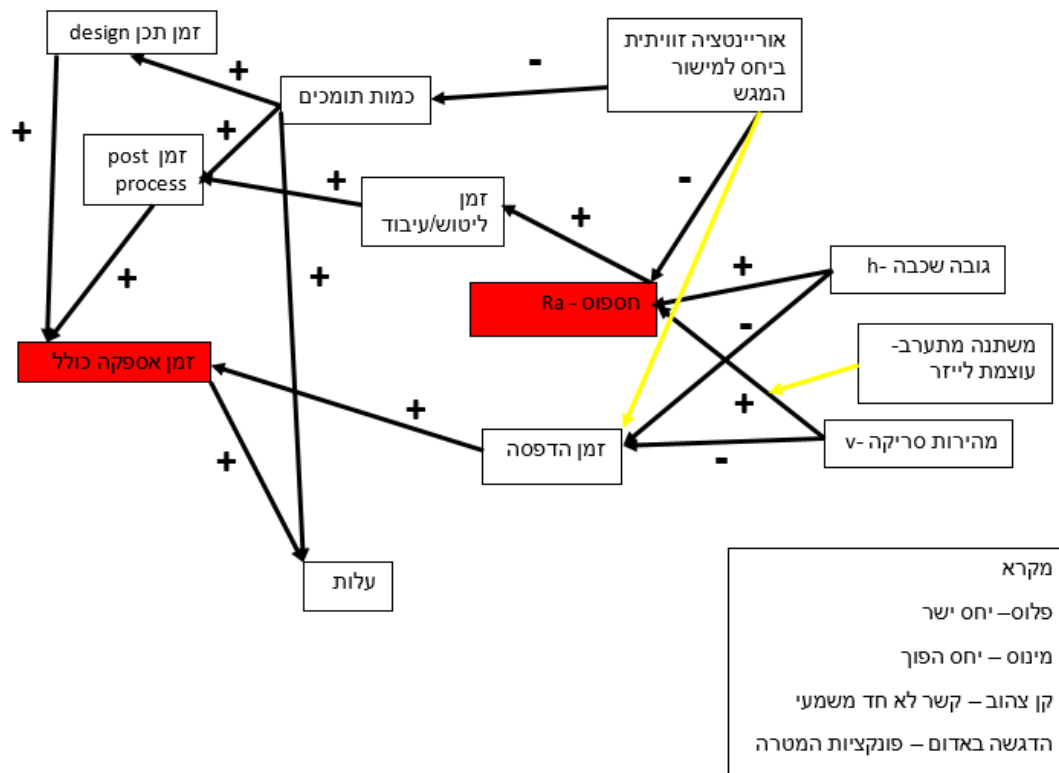
סקר הספרות מתפרש על פני שישה תחומים שקשורים לבעיות הנידונות בפרוייקט, למידולן ולאופן פתרון: קשר בין פרמטרי ההדפסה לזמן הדפסה וטיב שטח, הנדסה משולבת, ANN, CART, קיבוץ אובייקטים למנות בהדפסת תלת מימד וגישות לפתרון אופטימיזציה מרובת מטרות.

2.1 קשר בין פרמטרי הדפסה לזמן הדפסה וטיב שטח

בשלב הראשון נסקור את הקשר בין פרמטרי ההדפסה לזמן הדפסה וטיב שטח במטרה לקבל תובנות על השפעת הפרמטרים על המדדים ואף לנסות לאתר קשרים אנליטיים ביניהם. כמו כן, באמצעות הקשרים שיתגלו, נוכל לתקף את תוצאות המודל ולבחון את ההיגיון מאחורי התוצאות שהוא מספק. קיימים מאמרים רבים שמנסים לעמוד על השפעת פרמטרי הדפסה כמו מהירות סריקה, עוצמת לייזר ומרחקים בין סריקות לאיחוי האבקה (hatching) על מדדים מכניים כמו חספוס ודיוק ואף מדדים תפעוליים כמו זמן הדפסה.

מהמחקרים עולה שככל שגובה השכבה נמוך יותר, זמן ההדפסה מתארך ופני השטח חלקים יותר. ככל שמהירות הסריקה נמוכה יותר, זמן ההדפסה מתארך ופני השטח חלקים יותר. אך המגמה הזו אינה ליניארית: הגידול בחספוס, עבור אוריינטציה מסויימת, יכול להיעצר והחל מערך מסוים של מהירות הסריקה החספוס עשוי להתחיל לקטון. מידת הגידול בחספוס תלויה בעוצמת הלייזר. כמו כן, נבחנה השפעת אוריינטציה מקומית על חספוס פנימי ברמות שונות והסתבר שהחספוס הממוצע גדל עם ירידה בזווית שבין משטח ההדפסה והקו המשיק למוצר (אוריינטציה משופעת לעומת אנכית) [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19].

התרשים הבא מתאר את הקשרים בין הפרמטרים והמדדים השונים, כפי שעולה מסקר הספרות עד כה:



תרשים 1- תרשים איכותני של הקשרים בין פרמטרי הדפסה למדדים שונים

בתרשים **Error! Bookmark not defined.** אנו רואים שכל שגובה השכבה נמוך יותר, החספוס קטן ופני השטח חלקים יותר. ככל שמהירות הסריקה נמוכה יותר, החספוס קטן ופני השטח חלקים יותר. נדגיש שלפי אחד המאמרים הגידול בחספוס, עבור אוריינטציה מסוימת, נעצר, עבור ערך מסויים של מהירות שהחל ממנו החספוס עשוי לקטון. כמו כן, מידת הגידול בחספוס תלויה בעוצמת הלייזר. ככל שפני השטח חלקים יותר, זמן הליטוש נמוך יותר, זמן post process נמוך יותר.

ככל שגובה השכבה נמוך יותר, או מהירות הסריקה נמוכה יותר, זמן ההדפסה וזמן האספקה הכולל גדלים.

ככל שהאוריינטציה זוויתית יותר ביחס למגש (מתקרבת ל-90 מעלות), נדרשים פחות תומכים, כתוצאה מכך טיב פני השטח עולה וזמן התכנ post process מתקצרים. לגבי זמן האספקה – מצד אחד הוא בעל פוטנציאל לקטון בשל ירידה בזמני התכנ post process, מצד שני, בשל שימוש באוריינטציה בעלת גובה גבוה יותר, נדרש זמן רב יותר לפיזור האבקה ולכן זמן האספקה עלול להתארך.

אוריינטציה בעלת זווית גדולה יותר, יחסית למישור המגש, מצד אחד, תגרום להדפסה עם גובה גבוה יותר ולכן נדרש לפזר את שכבת האבקה יותר פעמים ולכן זמן הדפסה מתארך. מצד שני, עבור אוריינטציה זו נדרשות פחות תמיכות ולכן, מהיבט הזה, זמן ההדפסה עשוי להתקצר. יחס הגומלין בין הנ"ל הוא ליבת עבודה זו שכן מציאת האיזון בין כלל ההיבטים דורש פתרון של בעיה אופטימיזציה שמשקללת את כלל ההיבטים.

ככל שזמן ההדפסה מתארך, עלות המוצר גדלה. ככל שיש יותר תומכים, מצד אחד, נדרשת הוצאה גדולה יותר על ח"ג ולכן העלות גדלה.

2.2 גישת הנדסה משולבת

בשלב הבא, ננסה להכיר את גישת ההנדסה המשולבת והמידול שנעשה במסגרתה כדי להכיר שיטות שבמסגרתן ניתן יהיה לקבוע פרמטרי החלטה שיביאו לאופטימום גלובלי ולא מקומי

ושבחלקם נוכל להשתמש במודל שלנו בהקשר של שילוב זמן תכן הייצור, זמן ההדפסה וזמן העיבוד המשלים שלאחריו – post process. ישנם מאמרים שונים שעוסקים בהנדסה משולבת ובאופן בניית מודלים שקושרים בין שלבי הייצור והאספקה השונים:

המאמרים כוללים שילוב בין שלבי ייצור שונים שבניהם: תכן מוצר, תכן תהליך, קיבוצ מנות עבודה ושיבוצ, הרכבות ושרשראות אספקה. השילוב התבצע באמצעות מודלים שבמסגרתם הוגדרו מטרות שמתכללות את השלבים השונים ושעבורם נמצאו פתרונות ע"י גישות שונות: באחד המאמרים שיטת תכנות לפי מטרות מומשה כדי לפתור את הבעיה [8]. במאמר אחר נעשה שימוש בשלוש מתודולוגיות כדי להבטיח פתרון שיענה בצורה מיטבית על המטרות שהוגדרו: תכנות מתמטי, fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) ו- technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) [6]. במאמר נוסף הוצג תכנות מתמטי לפתרון הבעיה אבל בשל מורכבותו נבנה גם אלגוריתם אבולוציוני מותאם [20]. בפרוייקט הנ"ל נשתמש בשיטת תכנות מתמטי כדי למדל את שלבי הייצור השונים – זמן תכן, זמן הדפסה וזמן post process – ע"י ייצוג שלבי הייצור השונים בפונקציות מטרה וביטויים מתמטיים שונים שהיו שזורים לאורך מודל התכנות.

2.3 קיבוצ אובייקטים למנות בהדפסת תלת מימד

כעת, נסקור מאמרים שעיקרם הוא קיבוצ אובייקטים למנות בהדפסת תלת מימד במגמה לזהות פרמטרים, משתני החלטה ופונקציות מטרה שנלקחו בחשבון בהחלטה על חלוקת האובייקטים למנות שנוכל להשתמש בהם בתהליך המידול. בנוסף, נחלץ מהמאמרים גישות מידוליות אופטימליות והיוריסטיות לפתרון הבעיה וכן קשרים מתמטיים שיעשה בהם שימוש בפיתוח המודל של עבודה זו. קיימים מספר מאמרים שעוסקים בקיבוצ חלקים לעבודות ושיבוצ העבודות על מדפסות תלת מימד, כאשר בכל מאמר מוצגת זווית שונה במקצת של הבעיה, תוך שימוש בפונקציות מטרה שונות. בכל המאמרים הבעיה ממודלת כבעיית תכנות מתמטי ובחלקן מוצגים גם פתרונות היוריסטיים לצד התכנות: באחד המאמרים משתמשים בפתרון היוריסטי שממומש ב-Python. הפתרון ההיוריסטי מתבסס על עקרון earliest due date (EDD) [1]. במאמר נוסף נבחנים שני פתרונות היוריסטיים - Best Fit (BF) ו- (ABF) Adapted Best Fit. הפתרונות ההיוריסטיים מתבססים על יצירת רשימת חלקים שעדיין לא שובצו לעבודה כלשהיא, בחירת חלק מתוך הרשימה לעבודה זמנית על אחת המכונות על בסיס חוק מסויים - כמות עלות ליחידת זמן או נפח ועדכון הקיבולת הנוותרת במכונה הנבחרת [2]. במאמר אחר האלגוריתם ההיוריסטי מורכב ממערכת קבלת החלטות מקומית לכל מכונה ומערכת קבלת החלטות כללית. בתחילת ובמהלך התהליך יוצרים רשימה של חלקים שעדיין לא שובצו. כל מכונה מנסה לצרף חלקים לעבודה הנוכחית מרשימה זו על בסיס כלל החלטה מקומי מאילו המוצעים כך שעל כל מכונה ישנה בדיוק עבודה אחת שעדיין זמינה לקבל חלקים נוספים. מערכת קבלת ההחלטות הכללית מסייעת לקבל החלטה איזו עבודה לאשר על בסיס אחד אחד מכללי ההחלטה הגלובליים המוצעים [21]. במאמר שונה הסתפקו במודל תכנות מתמטי לפתרון [22] ובמחקר אחר יישמו אלגוריתם אבולוציוני [23]. גם במחקר שלנו נציג תכנות מתמטי אופטימלי לבעיית קיבוצ אובייקטים למנות לצד פיתוח אלגוריתם היוריסטי בהתאם לשני כללי החלטה אלטרנטיביים שיפורטו בפרק המודל המורחב.

2.4 קשר למידת מכונה

סקר הספרות שמוצג עד כה, לא העלה קשרים אנליטיים בין טיב שטח למשתני ההחלטה ופרמטרי ההדפסה. כמו כן, לא נמצאו קשרים בין זמני התכן ו-post process למשתנים ולפרמטרים הנ"ל. מסיבה זו, נדרש לאסוף נתוני הדפסה של אובייקטים שכוללים פרמטרי הדפסה שונים ונתונים על זמן התכן ו-post process שנדרש עבור כל אחד מהם, כמו גם טיב השטח שהתקבל, לזהות את הפרמטרים העיקריים שמשפיעים על המדדים הנ"ל והבנת אופן השפעתם והכנסתם למודל מיוחד שישמש לבניית קשרים אנליטיים בין הפרמטרים למדדים הרלוונטיים באמצעות למידת מכונה. כלי שמשמש לסיווג פרמטרים הוא CART ומיד נסביר את העקרונות שעומדים מאחוריו. בהמשך, נציג את גישת ANN שמאפשרת ליצור קשרים אנליטיים בין פרמטרים למשתנים תלויים ונעמוד על ההבדלים בינה לבין רגרסיה.

2.4.1 רקע על CART

עץ רגרסיה וסיווג (CART – classification and regression tree) זו גישה סטטיסטית שמטרתה להצביע על פקטורים חשובים במודל במונחים של יכולת הסבר הקשרים במודל ושונות המשתנה התלוי. מתודה זו עושה שימוש בטכניקות רגרסיה מוכרות אך מציגה את הקשרים בין המשתנים העולים מהן באמצעי ויזואלי (עץ) שמובן יותר גם לכאלו ללא ידע בסטטיסטיקה.

עבור משתנה תלוי כלשהוא, נרצה לארגן את סט הנתונים לפי השפעתם על המשתנה התלוי. ארגון הנתונים וחלוקתם לקבוצות מתבסס על הומוגניות כאשר בכל קטגוריה מרוכזים נתונים דומים בהשפעתם על המשתנה התלוי בהפחתת ה"רעש" כדי לצמצם שונות. CART עושה שימוש בחלוקה רקורסיבית כדי ליצור עץ שבו כל צומת מייצגת תוצאה של המשתנה התלוי עבור טווח ערכים כלשהוא של המשתנים (התניה על משתנים). נתמקד בעצים בינאריים, כלומר כאלה שלכל "אב" ישנם שני "בנים" בלבד – בכל נקודות פיצול מתקבלים שני צמתים חדשים. ככל שמתקדמים במורד העץ, נעשות עוד ועוד התניות על משתנים וכתוצאה מכך יש יותר פיצולים ונוצרים עוד צמתים. המשתנה הראשוני, שעל בסיס ערכיו הנתונים מתחלקים לשתי קבוצות, הוא המשפיע ביותר. אח"כ, כל קבוצת נתונים מהפיצול הקודם מתפצלת לשתי קבוצות נוספות על בסיס משתנה אחר או אותו משתנה, בחלוקה פרטנית יותר בטווח הערכים שהוגדר בחלוקה הראשונית. ככל שהחלוקה ראשונית יותר, הפרמטר שעל פיו מתבצעת החלוקה בעל השפעה גדולה יותר על המשתנה התלוי. הפיצול הסופי, כלומר הקבוצות האחרונות בעץ שכבר לא מתפצלות לקבוצות נוספות נקראות עלים, ז"א פיצול נוסף שלהן, לא מסביר מספיק את השונות של משתנה התגובה וכל אחד מהם מכיל את קבוצת הפרמטרים ההומוגניים ביותר האפשרית מבחינת ערכו של המשתנה התלוי [24].

ב-CART עושים הבחנה בין משתנה מגיב **קטגוריאלי לרציף**, כאשר לכל אחד מהם מוגדרים חוקי פיצול שונים – חוקים שעל פיהם מפצלים את העץ לצמתים.

עבור משתנה מגיב קטגוריאלי [25], [26]:

נניח שהמשתנה המגיב יכול לקבל K ערכים בדידים וישנם M משתנים בלתי תלויים $x_i, i = 1, \dots, M$

כזכור נרצה לצמצם שונות בצומת ולמקסם הומוגניות, לשם כך נגדיר פונקציית רעש בצומת t כ- $i(t)$. כדי שהפיצול יהיה יעיל ויצמצם שונות, נרצה שההפרש בין השונות של ה"אב", t_p , יהיה גדול ככל האפשר מתוחלת השונות של ה-"בנים", t_c , וזו למעשה הגדרה שקולה לכך שהצמתים שיתקבלו מהפיצול יהיו ההומוגניים ביותר האפשריים. אנו מניחים ששונות האב ידועה והשונות של הבנים תלויה בבחירת סט הנתונים שיכללו בכל צומת ולכן משתמשים בתוחלת. הניסוח המתמטי של זה:

$\Delta_i = i(t_p) - E(t_c)$ וזה שקול ל- $\Delta_i = i(t_p) - P_l * i(t_l) - P_r * i(t_r)$, כאשר t_l ו- t_r הם צמתי הבנים השמאלי והימני, בהתאמה ו- P_l ו- P_r הם ההסתברויות להימצאות בצומת הבן השמאלי והימני, בהתאמה. לפיכך, בעיית האופטימיזציה המתקבלת היא:

$$\max_{x_j \leq x_j^R, j=1 \dots M} [i(t_p) - P_l * i(t_l) - P_r * i(t_r)]$$

כאשר x_j זהו פרמטר החלוקה שיש לבחור כך שיביא ליצירת הקבוצות ההומוגניות ביותר.

כעת, נרצה להגדיר את פונקציית הרעש $i(t)$ באמצעות מדד ג'יני. מדד זה מגדיר את פונקציית הרעש כסכימה של מכפלות ההסתברות שערך המשתנה התלוי של צומת t יהיה j . p_{mj} בהסתברות המשלימה, ז"א $\sum_{j=1}^K p_{mj} * (1 - p_{mj})$. מדד שערכו 0 מצוין שכל נתוני קלט-פלט שמשויכים לצומת זו מביאים את המשתנה התלוי לאותו ערך קטגוריאלי.

אפשרות נוספת לזיהוי המשתנה הבלתי תלוי והערכים שיקבל בכל קבוצה לאחר הפיצול הוא קריטריון twoing שמתאים למקרים שבהם מספר הקטגוריות שערך המשתנה המגיב יכול

לקבל גדולות מ-2. לפי קריטריון זה יש לאתר שתי קטגוריות של המשתנה התלוי שביחד מהוות 50% מכלל הנתונים בצומת הנ"ל. הניסוח המתמטי של מקרה זה:

$$\Delta_i = \frac{P_l P_r}{4} * [\sum_{j=1}^K p_{rj} - p_{lj}]^2$$

ז"א נרצה למצוא משתנה בלתי תלוי שיפצל את צומת ה"אב" כך שכל "בן" ינפיק עבור המשתנה התלוי קטגוריה j מובהקת ושונה מהקטגוריה של ה"בן" השני ולכן נדרש שיהיה פער משמעותי בין $p_{rc} - p_{lc}$ עבור קטגוריה c , כך שעבור ה"בן" השמאלי רוב הנתונים יהיו משוייכים לקטגוריה הנ"ל ופער משמעותי נוסף $p_{rd} - p_{ld}$ קטגוריה נוספת d כך שעבור ה"בן" הימני רוב הנתונים יהיו משוייכים לקטגוריה זו. כך למעשה מתקבלות נתוני צומת ה"אב" מתחלקים לשתי קטגוריות, c ו- d .

לפיכך נדרש לבצע את האופטימיזציה הבאה:

$$\max_{x_j \leq x_j^R, j=1 \dots M} [\frac{P_l P_r}{4} * [\sum_{j=1}^K p_{rj} - p_{lj}]^2]$$

עבור משתנה מגיב רציף [25], [26]:

ישנן מספר שיטות לביצוע הפיצול עבור משתנה תלוי רציף:

(1) מזעור סכום השוננויות בקבוצות ה"בנים". בניסוח מתמטי:

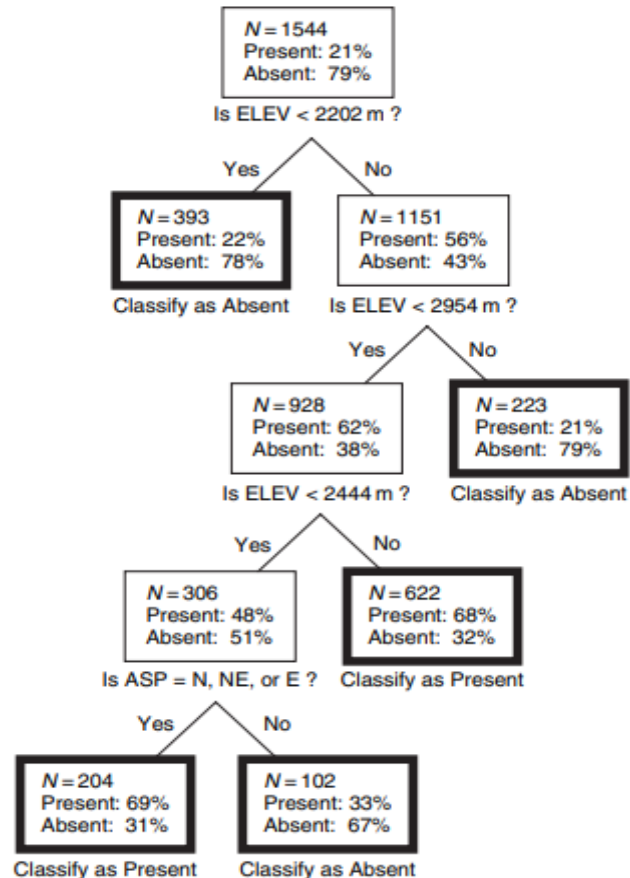
כאשר Y_l ו- Y_r הם משתני התגובה הרציפים, $\min_{x_j \leq x_j^R, j=1 \dots M} [P_l * Var(Y_l) + P_r * Var(Y_r)]$ המתקבלים ב"בן" השמאלי והימני, בהתאמה.

גישה נוספת היא:

(2) גישת ריבועים מינימליים שבמסגרתה ממזערים את סכום ריבועי ההפרשים בין תוצאת תצפית (משתנה תלוי) המשוייכת לצומת מסויימת לבין ערך המשתנה התלוי בממוצע באותה צומת.

גישה אחרת ממזערת את הסטיה המוחלטת של תוצאת תצפית המשוייכת לצומת מסויים מהחציון (ולא מהממוצע) עבור אותו צומת. גישה זו הרבה פחות רגישה לחריגה מהגישה הקודמת שעושה שימוש בממוצע אך עלולה להיות מושפעת במקרה שתוצאות של תצפיות רבות בצומת הינן 0.

בתרשים הבא ניתן לראות עץ סיווג קטגוריאלי, כאשר בכל צומת העץ מתפצל לשני "בנים" לפי ערך מסויים של אחד מפרמטרי המודל והעלים הסופיים של העץ מסווגים לפי הערכים הקטגוריאליים שהמשתנה התלוי יכול לקבל:



תרשים 2 - דוגמא לעץ סיווג בינארי עבור משתנה תלוי קטגוריאלי

2.4.2 רקע על ANN

כדי להציג קשר אנליטי בין מדדים תפעוליים ומכניים לפרמטרים שונים, ניעזר ברשת נוירונים.

המונח רשת נוירונים (ANN – artificial neural network) מתייחס למערכת חישובית שפועלת בדומה לרשתות נוירונים ביולוגיות. כמו בכל רשת, גם רשת נוירונים מורכבת מצמתים וקשתות (נוירונים וסינפסות, באנלוגיה לרשת עצבית ביולוגית, בהתאמה) שמקשרות ביניהן. ברשת זו, בכל צומת מתבצע חישוב והקשתות מעבירות אות מצומת אחת לאחרת, באמצעות משקל, w , שמציין את עוצמת הקשר בין זוג הצמתים הנ"ל. רשת הנוירונים מורכבת משכבת צמתי קלט, שכבות חביות ושכבת צמתי פלט. שכבת הקלט מכילה את הקלטים שמתקבלים מנתוני הבעיה, שכבת הפלט שמנפיקה את הפלט של פתרון הבעיה והשכבות החביות מסייעות בקביעת הקשרים בין הקלטים לפלטים. כל צומת בכל שכבה יכול להיות מקושר רק לצמתים שבשכבה העוקבת. מספר שכבות חביות, כמו גם מספר הנוירונים בכל שכבה, נקבע בהתאם ליישום, למורכבות הבעיה, למספר הקלטים והפלטים ובאמצעות ניסוי וטעיה.

ברשת נעשה שימוש בשלושה אלמנטים ליצירת הקשרים: המשקלים בין כל שני צמתים, צירוף לינארי של הקלטים ופונקציית אקטיבציה שנועדה להגבלת הערך של הפלט לערך סופי.

המשקלים מציינים את עוצמת הקשר בין שני נוירונים. משקל שלילי משקף קשר מעכב לעומת משקל חיובי שמייצג קשר מחזק.

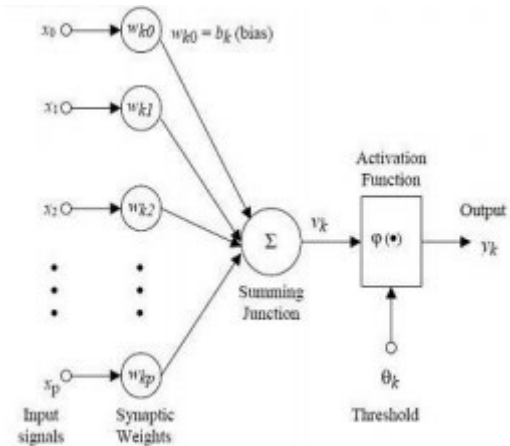
החישוב בתוך הצומת:

בצירוף הלינארי עבור צומת k בשכבה i סוכמים את ערכי הצמתים המשוקללים בשכבה $i - 1$ עם צומת k .

לבסוף, פונקציית האקטיבציה שולטת באמפליטודה שמתקבלת מנירון k וממירה את הצירוף הלינארי שהתקבל לערכים בטווח מוגדר. טווח ערכים מקובל הוא בין 0 ל-1 או בין -1 ל-1.

כמו כן, ניתן להגדיר משתנה החלטה נוסף, יחד עם המשקולות, שנקרא "הטייה", b , ומהווה את ערך הסף שביחס אליו נבחן את החיוביות/ שליליות של הסכימה הלינארית עבור צומת k ובדומה למשקולות, נדרש לקבוע את ערכו כך שהרשת תפעל היטב.

בתרשים הבא נראה דוגמא לרשת שבה יש שכבת קלט ושכבת פלט בעלת ניורון אחד בלבד:

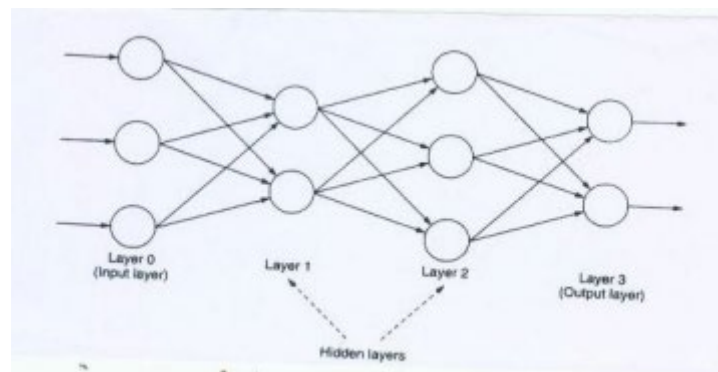


תרשים 3 – דוגמא לרשת ניורונים עם שכבת קלט וניורון פלט

צירוף לינארי של ערכי הניורונים המשוקללים בשכבת הקלט עם ניורון k בשכבה העוקבת (שכבת הפלט במקרה זה). $v_k = \sum_{j=1}^p w_{kj} * x_j$

פלט המתקבל מהצבת ערך הצירוף הלינארי המשוקלל בפונקציית האקטיבציה. $y_k = \phi(v_k - b)$

דוגמא לרשת ניורונים עם שכבות חביונות:



תרשים 4 – דוגמא לרשת ניורנית עם שכבות חביונות

תהליך הלמידה:

הלמידה ברשת ניורונים מתייחסת להתאמת המשקלים בין הצמתים (וערכי ההטיות – אם יש) באמצעות תהליך רציף של סימולציות. סוג הלמידה מגדיר את האופן שבו הפרמטרים – המשקלים (וההטיות – אם יש) – משתנים לאורך תהליך הלמידה.

ברשת ניורונים נדרש להתאים את המשקולות (וההטיות) כך שעבור סט קלטים מסויים יתקבל הפלט הרצוי. ישנן מספר שיטות לקביעת ערך המשקולות:

1. קביעת המשקולות באופן מפורש, תוך שימוש בידע קודם.
2. לאמן את הרשת באמצעות הזנה של דפוסי למידה כך שהמשקולות משתנים לפי חוק מסויים.

סוגי הלמידה יכולים להתחלק לפי הקטגוריות הבאות:

1. למידה מונחת (supervised learning) - למידה שמתבצעת באמצעות הזנה של נתוני קלט – פלט מהעבר כך שעל סמך נתונים אילו ניתן לאבחן את השפעת הפרמטרים על הפלט ולהשליך את הקשרים שהתגלו על קלטים חדשים שמתקבלים במטרה להגיע לפלטים המתאימים.
 2. למידה לא מונחת (unsupervised learning) – למידה שבה הפלטים מאומנים להגיב לקבוצות של דפוסים בקלטים והיא כוללת הערכה של עוצמת ההבדלים בין קלטים שונים. בניגוד ללמידה מונחת, אין נתוני עבר קודמים שניתן להסתמך עליהם.
- למידה מחזקת (reinforced learning) – מנגנון למידה שכולל ביצוע פעולה על הסביבה וקבלת משוב מהסביבה. המערכת מקבלת משוב חיובי או שלילי (ענישה) בהתאם לביצוע שלה ולפיו מתאימה את המשקלים. תהליך זה נמשך עד להגעה למצב של שיווי משקל.
- אלגוריתם פפופע לאחר: בתהליך זה האותות מועברים משכבה לשכבה – "קדימה" והשגיאות מפעפעות אחורה. בשלב הראשון, מתקבלים קלטים משכבת הקלט, הצמתים בשכבה זו מעבירים את האותות לשכבות החביות והן מעבירות לשכבת הפלט שמנפיקה את התוצאה של המערכת. האלגוריתם עושה שימוש בלמידה המונחת, כלומר מספקים למערכת זוגות של קלטים ופלטים, המערכת צריכה לחשוב את הפלט על סמך קלט מסויים ולהשוות את התוצאה המתקבלת עם התוצאה האמתית. הרעיון הוא לצמצם את הפער הזה, כלומר את השגיאה עד שהרשת תלמד את נתוני האימון. האימון מתחיל עם משקלים רנדומליים כך שהמטרה היא להתאים אותם כך שהטעות תהיה מינימלית.

לפני שנסביר על מימוש האלגוריתם, נגדיר:

L – מספר שכבות ברשת.

N_l – מספר ניוונים בשכבה l .

w_l^n – וקטור משקלים של הקשתות שיוצאות מנירון n בשכבה l .

b_l^n – ערך ההטיה (bias) של ניוון n בשכבה l .

באופן מתמטי, נגדיר:

$$\Theta = \{\theta_l\}_{1 \leq l \leq L} \rightarrow \theta_l = \{\theta_l^n\}_{1 \leq n \leq N_l} \rightarrow \theta_l^n = [w_l^n, b_l^n]$$

כלומר Θ מגלם בתוכו את כל המשקולות וההטיות הנוכחיים ברשת [17].

מימוש האלגוריתם כולל שני שלבים:

1. שלב האימון (Training). בשלב זה משתמשים בחלק מנתוני קלט-פלט שבסט הנתונים. בהינתן סט נתוני אימון הכולל N זוגות של קלט – פלט, לימוד פרמטרי הרשת נעשה באמצעות מזעור השגיאות הריבועיות עבור כל זוג בסט נתוני האימון, כלומר מזעור של פונקציית ההפסד הממוצעת לזוג נתוני קלט - פלט הבאה:

$$L(\Theta) = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (y_{real}(i) - y_{predicted}(i))^2$$

כאשר $y_{real}(i)$ מבטא את ערך הפלט האמיתי של זוג נתוני הקלט-פלט ה- i ו- $y_{predicted}(i)$ מבטא את ערך הקלט שחושב ע"י הרשת, עבור Θ הנוכחי.

המשקולות מתעדכנים ע"י אלגוריתם gradient descent, שמשנה את המשקולות ע"י סכימה של המשקולות הנוכחיים עם מינוס וקטור הגרדיאנט של השגיאה, וכך מפחית את טעויות המערכת. הזזת המשקולות בניגוד לכיוון הגרדיאנט מאפשרת מציאת ערכי משקולות שיובילו למינימום מקומי במהירות הגדולה ביותר. ניתן לבטא זאת באופן הבא:

$$w_l^n = w_l^n - \eta * \frac{\partial L(\theta)}{\partial w_l^n}$$

$$b_l^n = b_l^n - \eta * \frac{\partial L(\theta)}{\partial b_l^n}$$

כאשר $\eta > 0$ הוא גודל הצעד. מחשבים עבור המשקולות וההטיות החדשים את ערך פונקציית ההפסד ושוב מכוונים את המשקולות וההטיות [27], [28].

ממשיכים בתהליך עד להתכנסות המשקולות (מציאת מינימום מקומי) או עד לירידה מערך סף מסוים של פונקציית ההפסד או עד הגעה למספר נתוני אימון שנקבעו מראש.

2. שלב התיקוף (הולידציה Validation) - בחינת המודל שכולל את ערכי המשקולות המותאמים, שהתקבלו בפרק האימון, על נתוני קלט – פלט הנותרים והשוואת הפלטים המתקבלים לפלטים האמיתיים.

בעיית התאמת יתר (Overfitting) – לעיתים קורה שבשלב האימון הטעות היא קטנה מאוד ואילו עבור נתונים חדשים, הטעות גדולה. הדבר נגרם מאחר והרשת משננת את הדוגמאות שכלולות בסט האימון אך לא לומדת להכליל את פרמטרי הרשת לנתונים חדשים ואחרים. אחת הדרכים להתמודד עם בעיה זו היא להשתמש ברשת גדולה ככל האפשר כך שניתן יהיה ליצור פונקציות מורכבות יותר שיבצעו תחזית טובה יותר [29]. דרך נוספת היא להשתמש בביטוי שימזער את המשקולות עד כמה שניתן, דבר שיכריח את הרשת להגיב בצורה חלקה יותר (אין משקולות מאוד גבוהות ולאחר מכן מאוד נמוכות) וכתוצאה מכך להפחית את הסיכוי להתאמת יתר. לשם כך, נגדיר את הפונקציה שעליה יש לבצע את האופטימיזציה באופן הבא:

יתרונות בשימוש ב-ANN לעומת רגרסיה [30]

- האימון יכול להתבצע על בסיס נתוני קלט - פלט רציפים וקטגוריאליים כאחד.
- נדרשת הבנה בסיסית בנוגע למבנה הרשת, לזיהוי הפרמטרים בעלי ההשפעה הפוטנציאלית על הפלט ונרמול שלהם, בטרם פיתוח המודל ולא נדרשת הבנה בנוגע ל"קופסה השחורה" שכוללת את אלגוריתמי אימון. לא נדרשת הכשרה סטטיסטית פורמלית, בניגוד לשימוש ברגרסיה שדורש הבנה נרחבת במונחים סטטיסטיים כמו p-value, אינטראקציות, השפעת גורמים ראשיים וכדומה.
- רשתות נוירונים הן בעלות פוטנציאל לזיהוי חד משמעי של קשרים לא ליניאריים בין הקלטים לפלטים באמצעות התאמת משקולות. בנוסף, רשת נוירונים יכולה להמיר כל נוירון בשכבות הפנימיות באמצעות טרנספורמציות לא ליניאריות שונות וכתוצאה מכך, הרשת מסוגלת למדל קשרים לא ליניאריים מאוד מורכבים, בניגוד לרגרסיה שכוללת רק פונקציה לא ליניארית לוגיסטית אחת ובשל כך מוגבלת ביכולתה למדל קשרים לא ליניאריים. בשל כך, תצפיות אמפיריות מראות שעבור סט נתונים שכולל קשרים לא ליניאריים, רשת נוירונים מספקת מודל מתאים והדוק יותר מאשר רגרסיה. אומנם גם רגרסיה רגילה יכולה להיות שימושית במידול קשרים לא ליניאריים אך נדרש חיפוש של המפתח לקשרים המתאימים עבור סט הנתונים.
- רשת נוירונים, באמצעות השכבות החבויות, מסוגלת לאתר קשרים פנימיים – אינטראקציות- בין נתוני הקלט. אם מודל הרגרסיה לא כלל קשרים כאילו במפורש, רשת הנוירונים צפויה לספק תחזית טובה יותר מרגרסיה לוגיסטית.
- קיומם של מגוון אלגוריתמי לימוד, מלבד פעפוע לאחור, כך שניתן להתאים אלגוריתם אופטימלי לנתונים ספציפיים.

חסרונות בשימוש ב-ANN לעומת רגרסיה [30]

- ברגרסיה ניתן לזהות את המשתנים העיקריים שמשפיעים על הפלט באמצעות הגודל של מקדמי הרגרסיה ובכך יש לה עליונות על רשת נוירונים. בנוסף, באמצעות תהליך בחירת משתנים אוטומטית, ניתן לבחור מראש את המשתנים שהם בעלי ההשפעה הגדולה על המשתנה התלוי ולשלול משתנים בעלי השפעה זניחה. ברשת נוירונים, המפתח מכין את סט הנתונים ונותן לרשת לאמן את עצמה ולקבוע את המשתנים החשובים כך שהתוצאה עלולה לכלול גם פרמטרים בעלי השפעה זניחה. ניתן, אומנם, להתגבר על כך באופן חלקי ע"י הסרה של קלט אחד בכל פעם ובדיקה ההשפעה על המודל או לחלופין לבחון את המשקלים מכל קלט ולזהות את הקלטים בעלי המשקלים חסרי ההשפעה אך שיטות אילו אינן קלות ליישום כמו אילו שנעשה בהן שימוש ברגרסיה.
- משוואת החיזוי של הרגרסיה הרבה יותר פשוטה, נגישה וקלה לשימוש וחיזוי מאשר רשת הנוירונים שכוללת שכבות ונוירונים רבים עם פונקציות אקטיבציה ומשקלים רבים או לחלופין פונקציה מאוד מורכבת שקושרת בין משתני הקלט לפלטים.
- ברשתות נוירונים, בבעיות גדולות, נדרשת יכולת חישובית גבוהה מצד המחשב, בשל מורכבות המודל והרצת המודל עלולה להימשך זמן רב, בניגוד למודלי רגרסיה, שעבור סט נתונים גדול, יכולים להנפיק תוצאה במהירות.
- האפשרות של רשת הנוירונים למדל אינטראקציות בין המשתנים וקשרים לא ליניאריים עלולה לגרום להתאמת יתר כך שבפועל, תוצאות החיזוי של נתונים מחוץ לסט הנתונים יהיו גרועות. ניתן להתמודד עם זאת ע"י צמצום הנוירונים בשכבות החביות, הוספת קנס על משקולות גבוהים (כפי שהוסבר קודם) והגבלת כמות נתוני האימון ע"י ולידציה.
- נדרש להחליט לגבי מספר השכבות החביות ואת זה ניתן לבצע רק בניסוי וטעייה.

על החיסרון הראשון התגברנו באמצעות CART שסייע בזיהוי הפרמטרים העיקריים המשפיעים על כל אחד מהמדדים.

החסרונות השני והשלישי פחות רלוונטיים כי סט הנתונים שלנו קטן יחסית וכמו שנראה בהמשך, המידול נעשה עם שכבה חבויה אחת ולכן הפונקציה שמתקבלת אינה מאוד מסובכת.

על החיסרון הרביעי נתגבר באמצעות הרצה מיוחדת הנקראת K-fold שמחלקת את בסיס הנתונים ל- k קבוצות, כאשר $k = (k-1)/k$ מהנתונים משמשות לאימון והחלק הנותר לולידציה. מבצעים את התהליך k פעמים, כל פעם עם קבוצה אחרת שעבורה נעשית הולידציה והנוסחה שמתקבלת משקלת את התוצאות של כל k ההרצות. כך אפשר להקטין את התאמת היתר עבור סט אימון מסויים.

קביעת מספר שכבות ומספר נוירונים – ארכיטקטורת הרשת

במאמר מסויים נבדקו כמות השכבות והנוירונים הנדרשים עבור מקרה פרטי של זיהוי דפוסיות אוטיות וצורות. בשלב הראשון מספר הנוירונים בכל שכבה קובע ועבורו, בכל הרצה, נקבע מספר שכבות שונה ונבדקה מידת הדיוק של התחזית של הרשת. התברר שמספר שכבות הנע בין 1 ל-5 הוא הטוב ביותר. בשלב הבא, מספר השכבות החביות קובע ל-1 ובכל הרצה, שונו מספר הנוירונים בשכבה ונבחנה מידת הדיוק של החיזוי. התברר כי מספר הנוירונים הטוב ביותר הוא 19. הבעייתיות בגישה זו היא שלא נבחנה אינטראקציה בין מספר השכבות ובין מספר הנוירונים אלא בכל פעם אחד מהפרמטרים קובע. בנוסף, גישה זו בחנה ספציפית רשתות נוירונים שנועדו לזיהוי דפוסים ולא רשתות שנועדו לפיתוח קשרים אנליטיים, כמו במחקר הנ"ל [31].

במאמר אחר מציגים גישה לקביעת מספר נוירונים מינימלי נדרש, שבמסגרתה כוללים בפונקציית ההפסד (שאותה רוצים למזער ברשת הנוירונים) גם פונקציית רגולציה, שמטרתה לנטרל נוירונים בעלי משקלים נמוכים מאוד ושבעלי השפעה זניחה מאוד על המשתנה התלוי.

לפי השיטה, לאחר ביצוע אלגוריתם gradient descent עבור פונקציית ההפסד הרגילה, מבצעים תהליך דומה עבור מה שהתקבל gradient descent בשלב הקודם ועוד פונקציית הרגולציה. לאחר השלב הזה מתקבלים נירונים בעלי משקולות המתכנסים ל-0 ואותם מורידים מהרשת, כמו גם נירונים שמובילים לאותם נירונים וכעת אין להם השפעה על הרשת והמשתנה התלוי. לבסוף מתקבלת רשת עם מספר נירונים מינימלי שמבטיחה דיוק כמו ברשת המקורית [32].

מאמר נוסף מציג אלגוריתם שמשלב תכנון של ארכיטקטורת הרשת ואימון שלה. האלגוריתם מתחיל עם מבנה בסיסי של רשת – שכבת קלט, שכבת פלט ושכבה חבויה עם נירון אחד. בהמשך, מתבצע אימון לנירון הבודד שנוסף לשכבה החבויה הנוכחית, עבור מספר ריצות קבוע, כך שהמשך האימון תלוי בקצב ההתכנסות של שגיאות האימון והולידציה. במידה ובמהלך האימון, השגיאות של שלב האימון והולידציה עומדות בקריטריון שהוגדר מראש, האימון נפסק והארכיטקטורה הנוכחית מתקבעת וסופית, יחד עם המשקולות שהתקבלו. אם לא, ממשיכים לאמן את הרשת עד שההפרש בין שגיאת האימון בין ריצה אחת לעוקבת לא קטן ביותר מאפסילון ואז בוחנים הוספת נירון נוסף לרשת ע"י השוואה בין גודל השגיאה של הרשת ללא הנירון הנוכחי לגודל השגיאה שלה עם הנירון ובמידה והשגיאה לא קטנה, מקבעים את המשקולות שהתקבלו עבור הנירון הקודם שהתווסף ויוצרים שכבה חדשה עם נירון נוסף, אחרת, מוסיפים נירון נוסף לשכבה הנוכחית ומקבעים את כל המשקולות שהתקבלו עד כה. שוב מתחילים לאמן את הנירון הנוסף (בין אם בשכבה חדשה ובין אם בשכבה הנוכחית) וממשיכים בתהליך עד לעמידה בקריטריון ההתכנסות של שגיאות האימון והולידציה [33]. האלגוריתם הנ"ל מסובך ליישום, ארוך וכמובן לא מבטיח אופטימליות.

נראה שאין אלגוריתם או הליך קצר לקביעת מספר שכבות ונירונים ולכן ניעזר בברירת המחדל בתוכנה ואם מספר השכבות והנירונים בברירת המחדל יובילו לתוצאות מספקות מבחינת R^2 , נסתפק בכך.

להלן תרשים המסכם את ההיבטים שונים של הדפסת תלת מימד שעולים מהמאמרים שנסקרו עד כה:



תרשים 5 – מפת חשיבה של הדפסת תלת מימד

לבסוף, מאחר ובעיית האופטימיזציה כוללת שתי פונקציות מטרה, נציג גישות שונות להתמודדות עם מודל מרובה מטרות:

2.5 אופטימיזציה מרובת מטרות

כעת, נציג גישות לאופטימיזציה של בעיה מרובת מטרות [34]:

שיטת הסכום המשוקלל – מעבר ממספר פונקציות מטרה לפונקציית מטרה אחת ע"י מתן משקל מנורמל לכל מטרה. ישנו קושי בקביעת המשקלים ובפתרון בעיה שאינה קמורה.

שיטת אילוח אפסילון – הפיכה של כל פונקציות המטרה, למעט אחת, לאילוחים בהתאם לאופי פונקציית המטרה (פונקציות מינימום יומרו לאילוחי גבול עליון ופונקציות מטרה מסוג מקסימום יוחלפו באילוחי גבול תחתון). הקושי נעוץ בקביעת הגבולות העליונים/תחתונים.

השיטה הלקסיקוגרפית – מקבלי החלטות מדרגים את המטרות לפי החשיבות שלהם. בשלב הראשון מוצאים קבוצת פתרונות אופטימליים לבעיה החשובה ביותר. מתוך קבוצת הפתרונות הנ"ל, מחפשים קבוצת פתרונות אופטימליים לבעיה השניה בחשיבותה וכן הלאה.

גישת תכנות לפי מטרות – בגישה זו מוגדר ערך שאליו שואפים להגיע בכל פונקציית מטרה ומשתני החלטה שמהווים את הסטיה מערך זה עבור כל פונקציה. לכל סטייה כזו נותנים משקל ויוצרים פונקציית מטרה משותפת שממזערת את הסכום המשוקלל של הסטיות.

הגישות המרכזיות שדנים בהן במסגרת המאמר:

לוט.

גישת הסקלריזציה

בגישה זו, הפונקציה מרובת המטרות מומרת לפונקציה סקלרית יחידה שבה לכל פונקציה ניתן משקל לפני תהליך האופטימיזציה, בהתאם לחשיבות שלה. פונקציות מינימום יקבלו סימן מינוס ואילו פונקציות מקסימום יקבלו סימן חיובי כדי שכאשר נרצה למקסם את הפונקציה המשוקללת, פונקציות המינימום ימוזערו (כי לפנייהם יש מינוס) ופונקציות המקסימום ימוקסמו (כי לפנייהם יש פלוס).

ישנן מספר דרכים לקביעת המשקלים:

- משקלים שווים.
- משקלים שקטנים בקצב הולך וגדל.
- משקלים שקטנים בקצב קבוע.

גישת פארטו – חזית היעילות

ראשית נגדיר מספר מושגים חשובים שיאפשרו להסביר את הגישה:

פתרון שולט – פתרון של פונקציית מטרה שלא ניתן לשפרו מבלי לפגוע בערכן של אחת מפונקציות המטרה.

פתרונות נשלטים – פתרון של אחת מפונקציות המטרה שניתן לשפרו מבלי לפגוע בערכן של פונקציות המטרה האחרות.

נקודה x נחשבת כשולטת על נקודה y אם נקודה x לא גרועה מנקודה y בכל אחת מפונקציות המטרה ואם היא טובה מ- y לפחות עבור פונקציית מטרה אחת.

נקודת עיגון – הערך הטוב ביותר שכל פונקציית מטרה יכולה לקבל בנפרד.

נקודת אוטופיה – נקודת החיתוך בין אופטימום של פונקציית מטרה אחת לשניה.

מישור פארטו הוא המישור שכולל את ערכי פונקציות המטרה שנובעים מפתרונות שאינם נשלטים (שולטים), כלומר לא ניתן לקבוע מי מהפתרונות הנ"ל טוב יותר ולכן בחירת הפתרון הטוב ביותר מתבצעת ע"י מציאת המרחק המינימלי מנקודות האוטופיה.

בהינתן n פונקציות מטרה, מישור פארטו הוא מסדר $n-1$.

המאמר מציג אלגוריתם למציאת הנקודות הנמצאות על מישור פארטו שבמסגרתו משווים בין נקודות שבסך הנקודות שאינן נשלטות לנקודות שעדיין אינן מוגדרות בקבוצה זו: אם נקודה שמחוץ לקבוצה שולטת על מספר מסוים של נקודות בסט של הנקודות שאינן נשלטות, נקודות

אילו לא נכללות יותר בסט. אם הנקודה שולטת על כל הנקודות שבסט (כלומר היא גרמה לכל שאר הנקודות בסט לצאת ממנו) או שאינה נשלטת ע"י אף אחת מהן, היא נכנסת בעצמה.

מבין הגישות הנ"ל נבחר את מתודת חזית היעילות מהסיבות הבאות:

1. בניגוד לשיטות אחרות, גישה זו אינה עושה שימוש במשקלים, שמטבעם הם סובייקטיבים והערכה לא נכונה שלהם, עלולה להטות את התוצאות.
2. בשונה משאר המתודות, חזית היעילות מספקת מגוון פתרונות שאינם טובים אחד מהשני, אך טובים בהשוואה לפתרונות אחרים, כך שבעל הבעיה יכול לבחור את הפתרון המתאים ביותר עבורו מבחינת סדרי עדיפויות.

3 מתודולוגיית המחקר

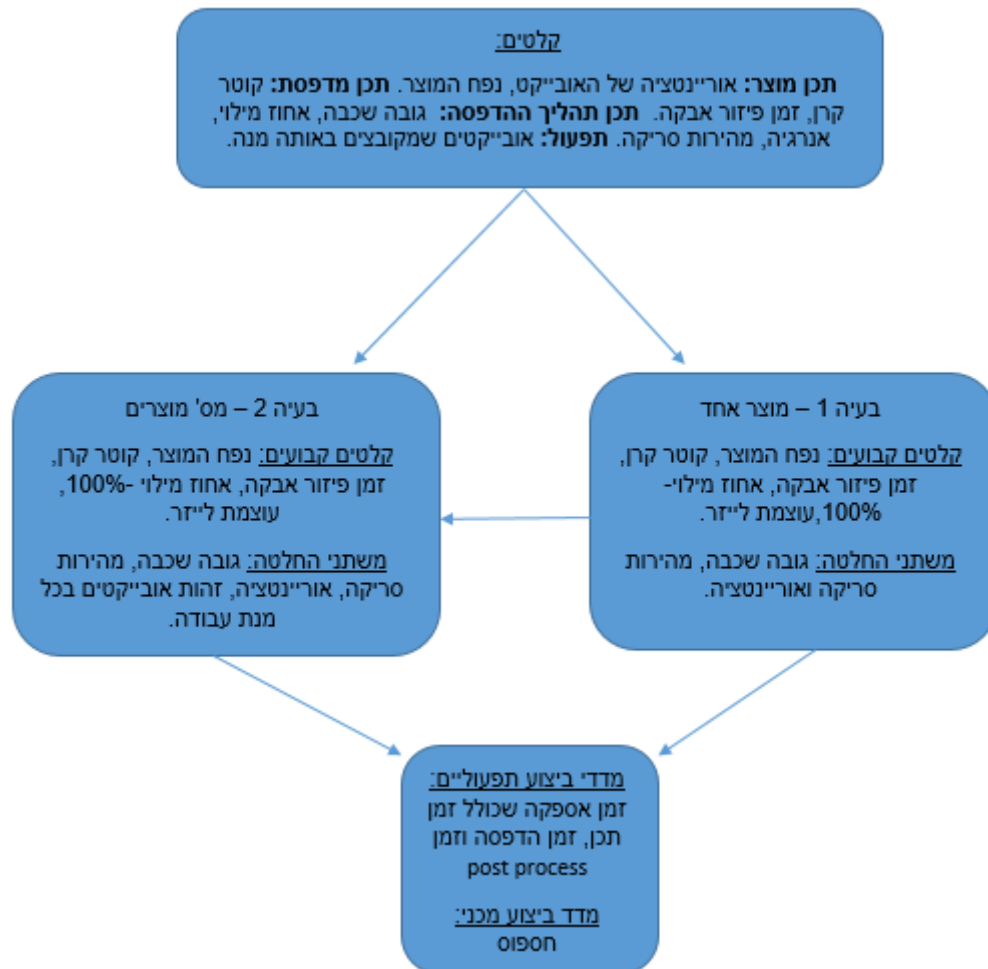
זמן האספקה מורכב מזמן התכן, זמן ההדפסה וזמן post process. על כן, גישת פתרון הבעיה מורכבת משלושה חלקים: תכן המוצר – קביעת האוריינטציה והתמיכות הנדרשות להדפסת המוצר כאשר קביעות אילו הן בעלות השלכות משמעותיות על תצורת האובייקט המודפס והתכונות המכניות שלו. תכן הדפסה – קביעת פרמטרי הדפסה כמו גובה שכבה ומהירות סריקה במטרה למזער זמני הדפסה ולמקסם טיב שטח. Post process – עיבוד משלים שמידת נחיצותו ומשכו מושפעים מהפרמטרים שנקבעו בחלקים הקודמים.

המודל שנוציג מחולק לשתי בעיות: הבעיה הראשונה – בעיה של מוצר יחיד, מקרה פרטי של הבעיה הכללית, מתמקדת בהדפסת אובייקט אחד בלבד על מגש ההדפסה כאשר נדרש לקבוע את מהירות הסריקה, גובה השכבה והאוריינטציה של האובייקט כדי למקסם את טיב השטח שלו ולמזער את זמן האספקה הנדרש. הבעיה השנייה, הבעיה המורחבת – בעיה של מקבץ מוצרים שונים – היא הרחבה של הבעיה הראשונה כאשר הפעם, ישנם מס' אובייקטים שונים להדפסה ועבורם נדרש לקבוע, בנוסף למהירות הסריקה, גובה השכבה והאוריינטציה, גם את זהות האובייקטים שיודפסו יחד באותה מנה, במטרה למקסם את טיב השטח של האובייקטים המודפסים ולמזער את זמן האספקה הכולל של כל המנות.

כדי לקבוע את סוג האוריינטציה, מהירות הסריקה, גובה השכבה ובבעיית קיבוץ האובייקטים למנות – גם את זהות האובייקטים בכל מנה – נבנה מודל תכנות מתמטי שממנו ייגזרו ערכי הפרמטרים הנ"ל.

המידול של בעיית המוצר היחיד מתבסס בחלקו על תכנות מתמטי עם פונקציות אנליטיות ואילוצים, תוך שימוש במידע שהתקבל בסקר הספרות, ובחלקו על יצירת קשר בין פרמטרים ומשתני החלטה למדדי התפעול והמכניקה באמצעות רשת נוירונים ANN. לשם יצירת הרשת, נאספו נתונים אמיתיים מארגון המתמחה בהדפסות תלת מימד ונבחנו מידת ואופן השפעתם על המדדים הרלוונטיים – חספוס, זמן תכן וזמן post process – באמצעות עצי סיווג (CART). הפרמטרים שנמצאו כבעלי השפעה הוכנסו לרשת והתקבלו קשרים בין פרמטרי ההדפסה ומשתני ההחלטה למדדים השונים. לאחר השלמת המודל, התבצע תהליך אופטימיזציה לפתרון בעיה מרובת מטרות שכלל את הצגת חזית היעילות הדטרמיניסטית. לאחר מכן נערך ניתוח רגישות לפרמטרי המודל ונבדקה השפעתן של התפלגויות שונות של ערכי הפרמטרים על חזית היעילות, עבור אובייקט מסוים. בנוסף, התבצע תיקוף של המודל במסגרת פיילוט עם אובייקטים חדשים שבו הושגו מדדי תכן, זמן וחספוס שהתקבלו בפועל עבור קומבינציות משתני החלטה עם ערכי המדדים שמנבא המודל עבור אותן קומבינציות וממנו ניתן להסיק על מהימנות המודל ומקצה השיפורים הנדרש. בהמשך, על בסיס המודל למוצר יחידני שכולל את הקשרים האנליטיים שפותחו עצמאית ובאמצעות הרשת, המודל הורחב לבעיית קיבוץ אובייקטים למנות עבודה באמצעות תכנות מתמטי אופטימלי. לבסוף, הוצג פיתוח אלגוריתם היוריסטי לבעיית קיבוץ אובייקטים למנות שעושה שימוש במודל היחידני, במטרה לצמצם זמני ריצה.

התרשים הבא מסווג את הקלטים לפי סוג תכן, מציג את משתני ההחלטה ופורט את מדדי הביצוע עבור כל אחת משתי הבעיות שתוארו קודם:



תרשים 6 – סיווג קלטים, הצגת משתני החלטה ופירוט מדדי ביצוע עבור בעיית אובייקט יחיד ובעיית קיבוץ אובייקטים למנות עבודה

4 תיאור המודל הראשוני – מודל עם אובייקט אחד

תחילה, נגדיר את בעיה והפרמטרים שלה, נציג את מידול זמן ההדפסה על בסיס סקר הספרות ונמדל את הקשר בין פרמטרי ההדפסה ומשתני ההחלטה לטיב השטח, זמן התכן וזמן ה-post process באמצעות CART ורשת ANN.

4.1 הגדרת הבעיה ופרמטרים

משתני ההחלטה הם גובה שכבה (h), מהירות סריקה (v) ואוריינטציה (O) ונבדקת השפעתם על **מדדי הביצוע** הבאים: זמן אספקה (t_s) וחפוס (Ra) המטרה היא לבחור גובה שכבה, אוריינטציה ומהירות סריקה כך שזמן האספקה יהיה קצר ככל האפשר והחפוס יהיה מינימלי ככל הניתן.

כפי שהוסבר לעיל, יש יחס גומלין בין המטרות: זמן אספקה מינימלי דורש גובה שכבות גבוה ומהירות סריקה גבוהה. בנוגע לאוריינטציה, מצד אחד, עבור זמן ההדפסה קצר נדרשת אוריינטציה כזו שגובה המוצר קטן ואז זמן ההדפסה מצטמצם, מצד שני אוריינטציה שכזו עלולה לחייב שימוש בתמיכות שיאריך את זמן התכן ו-post process ובנוסף תגדיל את העלויות בשל שימוש ביותר אבקה (ח"ג) ובעלות כ"א גבוהה יותר. פני שטח טובים, לעומת זאת, דורשים שכבות נמוכות ומהירות סריקה נמוכה יותר (כאשר עוצמת הלייזר נמוכה יותר). הגדרת אוריינטציה שתכלול שימוש בתמיכות, עלולה לפגוע במידת החפוס.

אילוצים:

האובייקט מודפס באוריינטציה אחת בלבד.

האוריינטציה שנקבעת צריכה להתאים לממדי המדפסת ומשטח ההדפסה ולא לחרוג מהם. מהירות הסריקה וגובה השכבה צריכים להיקבע בהתאם לקיבולת של המדפסת.

סימונים:

d - קוטר לייזר

p - עוצמת לייזר

t_p - זמן הדפסה

t_d - זמן תכן

t_c - זמן post process (עיבוד משלים)

$t_s = t_d + t_p + t_c$ - זמן אספקה,

th - זמן פיזור אבקה של שכבה אחת.

H_k - גובה האובייקט באוריינטציה k

Y_k - רוחב האובייקט באוריינטציה k

X_k - אורך האובייקט באוריינטציה k

V_{object} - נפח האובייקט

V_{sup_k} - נפח התמיכות עבור אוריינטציה k

V - נפח כולל (אובייקט ותמיכות)

משתני החלטה:

$h \in [h_0, h_f]$ - גובה שכבה,

$v \in [v_0, v_f]$ - מהירות סריקה של האובייקט,

$O \in \{O_1, O_2, O_3\}$ - אוריינטציה של האובייקט,

4.2 מידול זמן הדפסה

מינימום זמן אספקה מוגדר כ- $\min(t_d + t_p + t_c)$.

זמן הדפסה לפי מאמר [7] מחישוב בצורה הבאה:

$$t_p = VT * V + th * H$$

כאשר VT זה זמן הדפסה ליחידת נפח. כלומר לפי נוסחה זו, זמן ההדפסה מחושב לפי זמן סריקה של האובייקט כתלות בנפחו ועוד הזמן המוקצה לפיזור האבקה שתלוי בכמות השכבות הנדרשות להדפסת האובייקט- כלומר בגובה של האוריינטציה שנבחרה ובגובה שכבה.

התאמה לפרמטרים ומשתני החלטה שלנו, עבור מקרה פרטי של שלוש אוריינטציות:

$$t_p = \frac{1}{v \cdot h \cdot d} * V + th * \frac{O_1 * H_1 + O_2 * H_2 + O_3 * H_3}{h}$$

המכפלה של המהירות בגובה שכבה ובקוטר הלייזר נועדה כדי לבצע מעבר ממהירות קווית למהירות ליחידת נפח (כי עבור יחידת אורך שנסרקת, למעשה נסרקת בקירוב רצועה ברוחב הקוטר של הלייזר ובעומק שעומקו כגובה שכבה ולכן מדובר במהירות ליחידת נפח).

יש לכלול בנוסחת ההדפסה, מלבד נפח האובייקט, גם את נפח התמיכות, כתלות באוריינטציה שנבחרה, במידה ויש נתונים כאילו. יש לעשות זאת באופן הבא:

$$V = V_{object} + V_{sup1} * O_1 + V_{sup2} * O_2 + V_{sup3} * O_3$$

כמובן שיש להגדיר את האוריינטציות כמשתנים בינאריים ולהוסיף אילוץ באופן הבא:

$$O_i \in \{0,1\}, i = 1,2,3$$

$$O_1 + O_2 + O_3 = 1$$

הבעיה בנוסחה היא שאין התייחסות לשטח הפנים של כל שכבה בנפרד אלא לנפח האובייקט, שזהו דבר המשותף לכל האוריינטציות (נפח הוא קבוע ולא משתנה לפי סוג האוריינטציה) ולכן אין הבדל מבחינת האוריינטציות השונות בזמן סריקת האבקה אלא רק בזמן פיזור (שתלוי בגובה האובייקט באותה אוריינטציה).

דרך נוספת למדל את **זמן ההדפסה** – עבור אובייקט יחיד, במקרה פרטי של שלוש אוריינטציות אפשריות:

$$t_p = O_1 * \left(\sum_{m=1}^{\frac{H_1}{h}} \frac{Slayer_m}{v \cdot d} + th * \frac{H_1}{h} \right) + O_2 * \left(\sum_{m=1}^{\frac{H_2}{h}} \frac{Slayer_m}{v \cdot d} + th * \frac{H_2}{h} \right) + O_3 * \left(\sum_{m=1}^{\frac{H_3}{h}} \frac{Slayer_m}{v \cdot d} + th * \frac{H_3}{h} \right)$$

$$O_i \in \{0,1\}, i = 1,2,3$$

$$O_1 + O_2 + O_3 = 1$$

הסבר: הביטוי $\frac{Slayer_m}{v \cdot d}$ מבטא שטח פנים של שכבה לחלק למכפלת מהירות סריקה בקוטר הלייזר, כלומר הזמן שנדרש להדפיס שטח פנים של שכבה אחת. חשוב להכפיל את המהירות בקוטר הלייזר כדי שמהירות הסריקה תהיה ליחידת שטח ולא מהירות קווית והיחידות שיתקבלו מהביטוי יהיו יחידות של זמן. סוכמים את זמן ההדפסה של שטחי הפנים של כל השכבות כך שכל שיש יותר שכבות, נסכמים יותר איברים וזמן ההדפסה מתארך. ככל שיש יותר תמיכות, שטח הפנים עבור שכבות מסוימות גדל, כי נדרש להדפיס גם את משטחי התמיכות, וזמן ההדפסה מתארך. לאיבר הנ"ל מוסיפים את $th * \frac{H_1}{h}$ המבטא את זמן פיזור האבקה לכל שכבה כך שכל שיש יותר שכבות, נדרש לפזר יותר פעמים את האבקה וזמן ההדפסה מתארך. קיימות שלוש אופציות עבור האוריינטציה ועבור כל אופציה, גובה האובייקט שונה, לכן מוגדר H_1 עבור אוריינטציה 1, H_2 עבור אוריינטציה שניה ו- H_3 . עבור אוריינטציה 3. מאחר והאוריינטציה היא משתנה בינארי (מסומן ע"י 0), רק אחד מהסכומים הנ"ל אפשרי. הביטוי המתמטי הנ"ל, בניגוד לביטוי הקודם מהמאמר, כולל התייחסות להשפעת האוריינטציה על זמן הסריקה עצמו מאחר ואוריינטציות שונות ינפיקו וקטורי שטחי פנים המשתנים בין אוריינטציה אחת לאחרת. הבעיה בניסוח זה היא שמספר האיברים בסכימה תלוי במשתנה החלטה ועובדה זו מקשה על ביצוע אופטימיזציה. ניתן להתגבר על בעיה זו באמצעות הגדרת גובה שכבה כמשתנה החלטה שמקבל ערכים דיסקרטיים ואז מספר האיברים בסכימה יהיה

תלוי בקומבינציות של האוריינטציה שנבחרה והגובה של האובייקט באוריינטציה זו וגובה השכבה שנבחר.

מבין שתי האפשרויות, נבחר את המודל שמבוסס על נוסחת זמן ההדפסה מהמאמרים שהובאו בסקר הספרות (המודל הראשון) וכולל שימוש בנפח האובייקט במקום בשטח פנים של כל שכבה. הסיבה לכך היא העובדה שהמודל השני דורש שימוש בוקטור של שטח פנים לכל שכבה וזהו נתון שלא זמין לנו. בנוסף, גודל הוקטור משתנה בהתאם לגובה השכבה - משתנה החלטה רציף, שקובע את מספר השכבות. בשל הרציפות של משתנה החלטה זה, נדרש להזין למודל אינסוף וקטורי שטחי פנים, עבור כל גובה שכבה. אפשר להתגבר על בעיה זו באמצעות דיסקרטיזציה של הערכים שגובה השכבה יכול לקבל וכתוצאה מכך יהיה מס' וקטורי שטחי פנים מוגבל בהתאם למספר הערכים שגובה השכבה יכול לקבל, אך גישה זו מגבילה את מרחב הפתרונות שיכולים להתקבל.

נותר להגדיר את זמני התכן ו-post process ובחלק הבא נסביר כיצד הדבר יתבצע.

4.3 מידול החספוס, זמן תכן וזמן post process

חיפוש בספרות לא העלה קשרים אנליטיים בין משתני ההחלטה שלנו לבין החספוס. אומנם בחלק מהמחקרים השתמשו ברגרסיות כדי לקשר בין משתנים מסויימים לחספוס אך קשרים אילו לא כוללים את כל משתני ההחלטה שאנחנו מעוניינים בהם ומנגד, כוללים פרמטרים שפחות רלוונטיים למקרה שלנו.

מסיבות אילו, כדי להעריך את הקשר בין משתני ההחלטה ופרמטרים נוספים – ידועים מראש – לטיב פני השטח, אספנו נתונים מחברת Kanfit3D המתמחה בהדפסת תלת מימד. חברת Kanfit 3D מספקת פתרונות הדפסה במתכת בהתאמה אישית כמו שתלים, כלי ניתוח חד פעמיים ומוצרים אורתופדיים כמו גם חלקים לתעשייה האווירית. חברת Kanfit 3D משתמשת במערכת הדפסה של חברת EOS ובאבקת מתכת מסוג טיטניום 64 [35].

הנתונים כוללים כ-50 פריטים שהודפסו בתלת מימד ועבורם ידועים: נפח האובייקטים, נפח התמיכות, היחס בין נפח התמיכות לנפח האובייקט, אוריינטציית ההדפסה, גובה האובייקט - H , אורכו לאורך ציר x ורוחבו לרוחב ציר y של מגש ההדפסה, מהירות הסריקה, עוצמת הלייזר, גובה השכבה שנבחרה ושטח פנים ממוצע לשכבה בגובה שכבה h (מחושב ע"י נפח האובייקט שמחולק במספר שכבות). האוריינטציה של המוצרים שהודפסו חולקה ל-3 קטיגוריות:

אוריינטציה עומדת – מגע מצומצם יחסית עם משטח הדפסה רק כגודל שטח הבסיס של המוצר, לכן הזווית בין המשיק של דופן המוצר למישור משטח ההדפסה הוא 90 מעלות, ולרוב גם בעלת הגובה הגבוה ביותר מבין האוריינטציות השונות ונדרשת לה תמיכה מינימלית, שלרוב מהווה אחוזים בודדים מנפח האובייקט.

אוריינטציה משופעת – מגע מינימלי עם משטח הדפסה, הזווית בין מישור המשיק לדופן המוצר ולמשטח ההדפסה היא בין 0 ל-90 מעלות. עבור זווית הקטנה מ-42 מעלות (בטכנולוגיות הדפסה של טיטניום) נדרשת תמיכה מסיבית.

אוריינטציה שוכבת – מקסימום מגע עם משטח ההדפסה, הזווית בין המשיק של המוצר למישור משטח ההדפסה הוא אפס, לרוב גם בעלת הגובה הנמוך ביותר מבין האוריינטציות, ועל כן נדרש תמיכה מסיבית הכרחית, לרוב בגודל נפח האובייקט ואף יותר.

מאחר ולא קיימים נתונים מדויקים לגבי רמת החספוס של המוצר ולא ידוע כמה זמן המוצר טופל בעיבוד לאחר ההדפסה, היינו צריכים לתת אומדנים מבוססים על נתוני עבר. המטרה לזהות את סט הפרמטרים העיקריים שמשפיעים ולאחר מכן לבנות רשת עצבית שמתארת את עוצמת הקשר כך שנוכל להשתמש באותה פונקציה שמתבססת על למידת הקשר מהנתונים.

לכל הדפסה, ניתן ציון ע"י בעלי העניין מהחברה בין 1 ל-4 עבור טיב פני שטח כאשר ציון 4 מבטא טיב פני שטח מעולים (חספוס נמוך מאוד) וציון 1 מבטא טיב פני שטח גרועים (חספוס

גבוה). כמו כן, עבור כל פריט ניתנה הערכה לגבי זמן התכן שלו וזמן post process שנדרש עבורו, כך נוכל למדל גם את זמנים אילו ביחס לפרמטרים ולמשתני ההחלטה. הנתונים מובאים בנספח 1.

כדי למדל את הקשר בין הפרמטרים שנאספו לטיב פני שטח, נרצה לזהות את הפרמטרים העיקריים שמשפיעים על החספוס, זמן התכן וזמן post process. לשם כך, ניעזר בגישת CART. לצורך בניית העצים, נעשה שימוש בתוכנת JMP שכוללת כלים סטטיסטיים מגוונים ובניהם גם בניית עצי סיווג.

CART 4.3.1

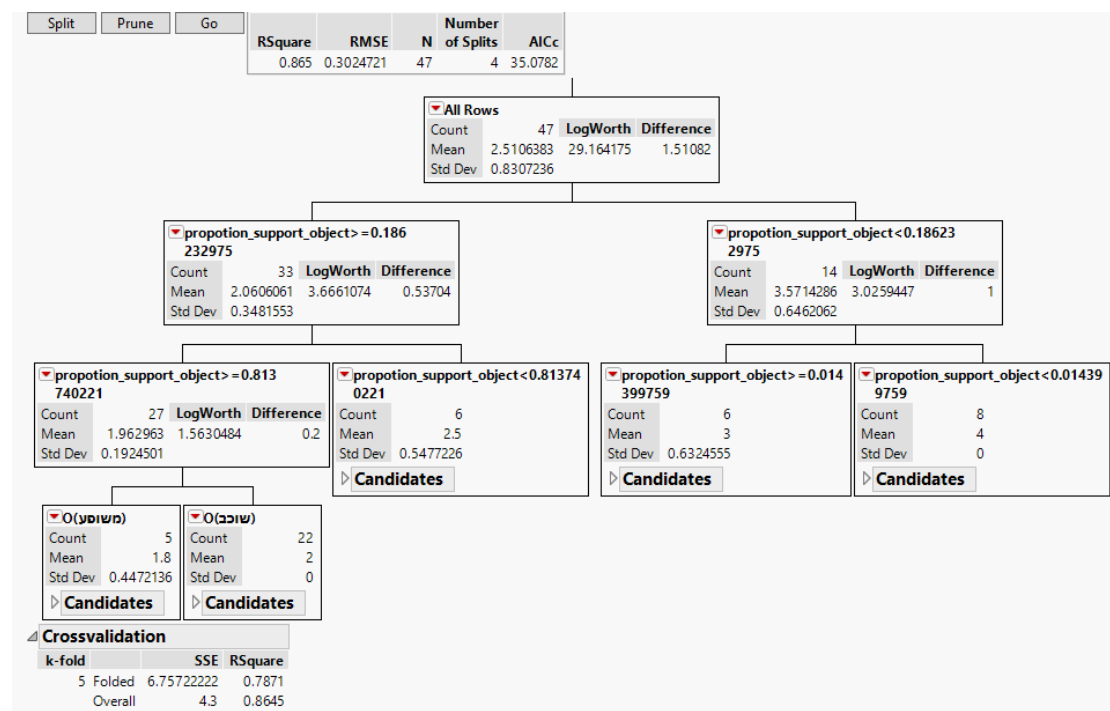
ניתוח ה-CART שנבצע מתחלק לשניים: הניתוח הראשוני יכלול את כל הפרמטרים שנאספו כדי להצביע על כל הפקטורים החשובים במודל שיכולים להסביר את הקשרים במודל ושונות המשתנה התלוי. הניתוח הסופי יכלול רק את הפרמטרים שמבחינה לוגית ניתן להכניסם למודל, בהתחשב במאפייני המודל ובמשתני ההחלטה שלו, כפי שיפורט בהמשך.

CART 4.3.1.1 ראשוני

ניתוח ה-CART הראשוני, כמו הסופי, יתבצע עבור כל משתנה תלוי שעבורו נבנית רשת נורונים: חספוס, זמן תכן וזמן post process.

4.3.1.1.1 חספוס

התרשים הבא מציג את עץ הסיווג עבור המשתנה התלוי חספוס (Ra), מינימום של 5 אובייקטים ב – "בן":



תרשים 7 – CART ראשוני של חספוס, מינימום 5 אובייקטים בקבוצה

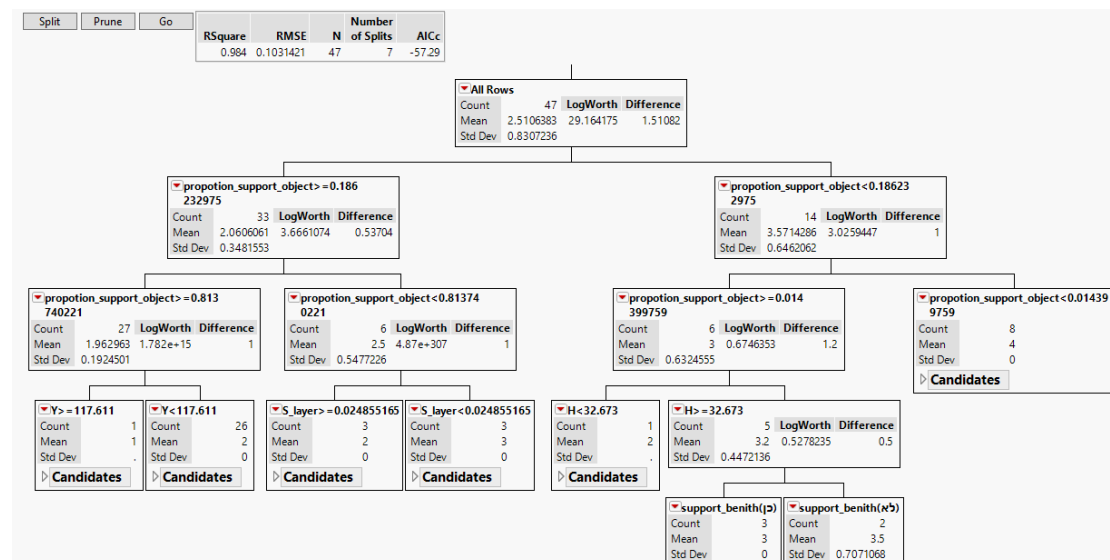
מסקנות:

1. חלוקה ראשונה לפי יחס בין נפח תמיכות לנפח אובייקט – ערך סף של 0.186.
2. חלוקה שניה שוב לפי יחס תמיכות – אובייקט.
3. חלוקה שלישית לפי סוג אוריינטציה.

ניתן לראות שעבור יחס גבוה, נקבל ציון חספוס ממוצע נמוך יותר (כלומר טיב פני שטח לא טוב), ככל שהיחס קטן, הציון טוב יותר ופני השטח חלקים יותר. ניתן לקשר זאת לעובדה שכלל שהיחס קטן יותר, נדרשות פחות תמיכות שהסרתן פוגעת בחלקות פני האובייקט.

בנוסף, נמצא שעבור יחס תמיכות – אובייקט גבוה מ-0.813, יש חלוקה לפי אוריינטציות משופעות ושוכבות, כאשר לאילו השוכבות יש יתרון קל מבחינת טיב שטח ממוצע.

התרשים הבא מציג את עץ הסיווג עבור המשתנה התלוי חספוס (Ra), מינימום של אובייקט 1 ב – "בן":



תרשים 8 – CART ראשוני של חספוס, מינימום אובייקט 1 בקבוצה

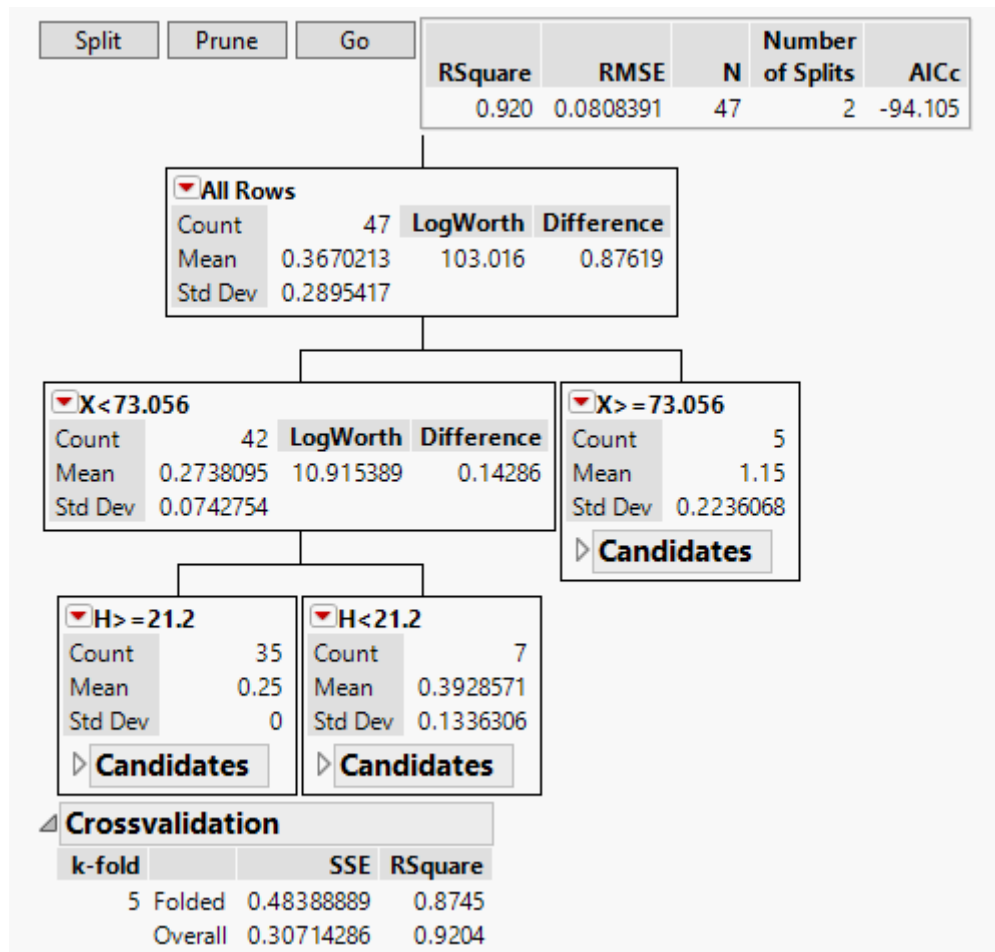
מסקנות:

1. חלוקה ראשונה לפי יחס בין נפח תמיכות לנפח אובייקט – ערך סף של 0.186.
2. חלוקה שנייה שוב לפי יחס תמיכות – אובייקט.
3. חלוקה שלישית לפי גובה אוריינטציה, שטח פנים או Y .

ניתן לראות שעבור יחס גבוה, נקבל ציון חספוס ממוצע נמוך יותר (כלומר טיב פני שטח לא טוב), ככל שהיחס קטן, הציון טוב יותר ופני השטח חלקים יותר. עבור שאר החלוקות, קשה לומר באופן מובהק מה השפעתן כי יש מעט מאוד פריטים לפחות באחת הקבוצות.

4.3.1.1.2 זמן תכן

התרשים הבא מציג את עץ הסיווג עבור המשתנה התלוי זמן תכן (t_d), מינימום של 5 אובייקטים ב – "בן":



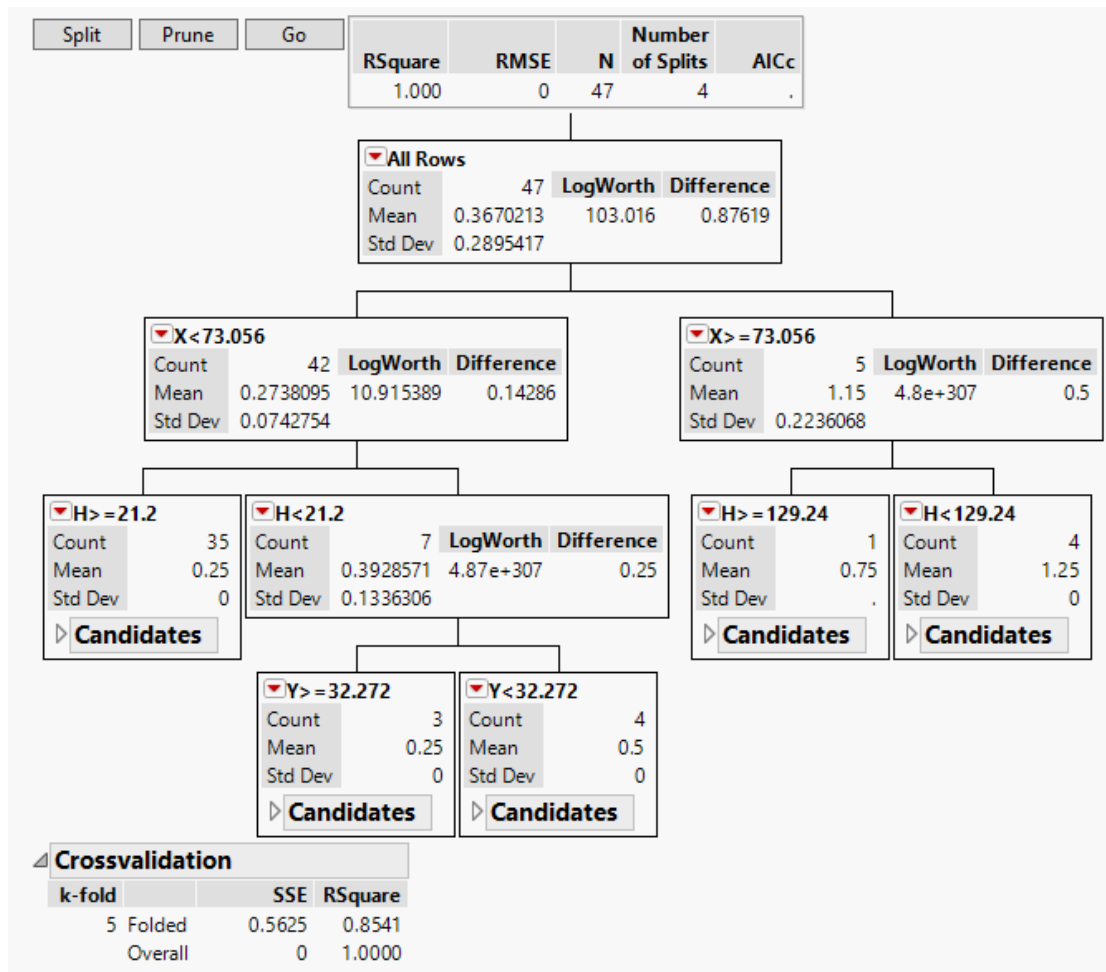
תרשים 9 – CART ראשוני של זמן תכן, מינימום 5 אובייקטים בקבוצה

מסקנות:

1. חלוקה ראשונה לפי X של האוריינטציה.
2. חלוקה שניה לפי גובה האובייקט באוריינטציה.

עבור ערכי X גדולים יותר מ-73.056, זמן התכן גדול יותר (ככל הנראה אוריינטציה משופעת יותר שמגדילה את ערכי X ונדרש יותר זמן כדי לתכן אותה, או לחלופין אובייקט גדול יותר בממדיו שנדרש זמן רב יותר לתכנן תמיכות שיספיקו כדי להחזיק אותו) ועבור ערכי X שקטנים מערך זה, גובה אובייקט באוריינטציה נמוך יותר מביא לזמן תכן ארוך יותר במעט (שוב, יכול להיות שגובה נמוך יותר מגדיל את ערכי X ו- Y דבר שמצביע על אוריינטציה משופעת יותר שקשה לתכן אותה).

התרשים הבא מציג את עץ הסיווג עבור המשתנה התלוי זמן תכן (t_d) , מינימום של אובייקט 1 ב – "בן":



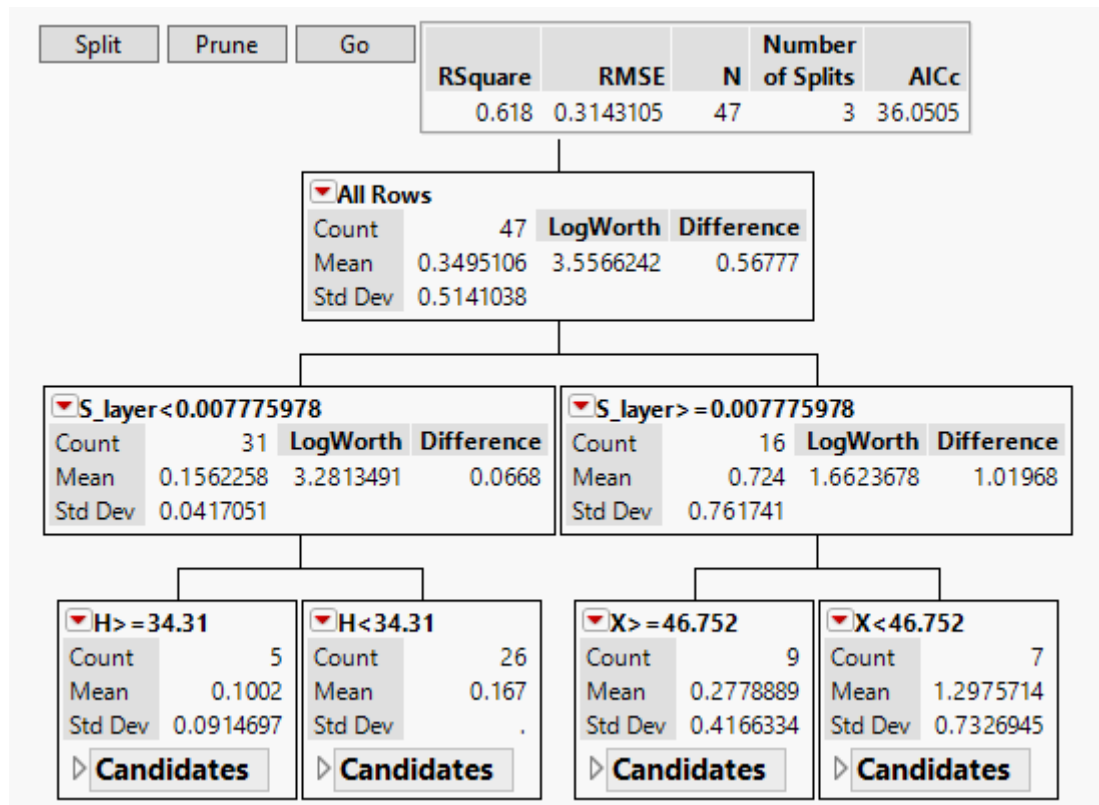
תרשים 10 – CART ראשוני של זמן תכן, מינימום אובייקט 1 בקבוצה

מסקנות דומות רק כשהפעם מוסיפים גם חלוקה של Y : עבור $X < 73$ ו- $H < 21.2$, ערך $Y < 32.272$ יוביל לזמן תכן ארוך יותר. ועבור $X > 73$ יש חלוקה נוספת לפי H. עם זאת, יש מעט פריטים בחלוקה לפי ערך Y ולכן קשה להסיק מסקנה מובהקת.

מסקנות כלליות: ערכי X יותר מערך סף שערכו כ-70, יביאו לזמן תכן ארוך יותר. ערכי גובה אובייקט באוריינטציה, H קטנים יותר, יביאו לזמן תכן ארוך יותר, כנראה מאחר וערכי X גדולים וערכי H נמוכים מעידים על אוריינטציה משופעת יותר שקשה יותר לתכן אותה.

4.3.1.1.3 post process

התרשים הבא מציג את עץ הסיווג עבור המשתנה התלוי זמן post process (t_c), מינימום של 5 אובייקטים ב – "בן":



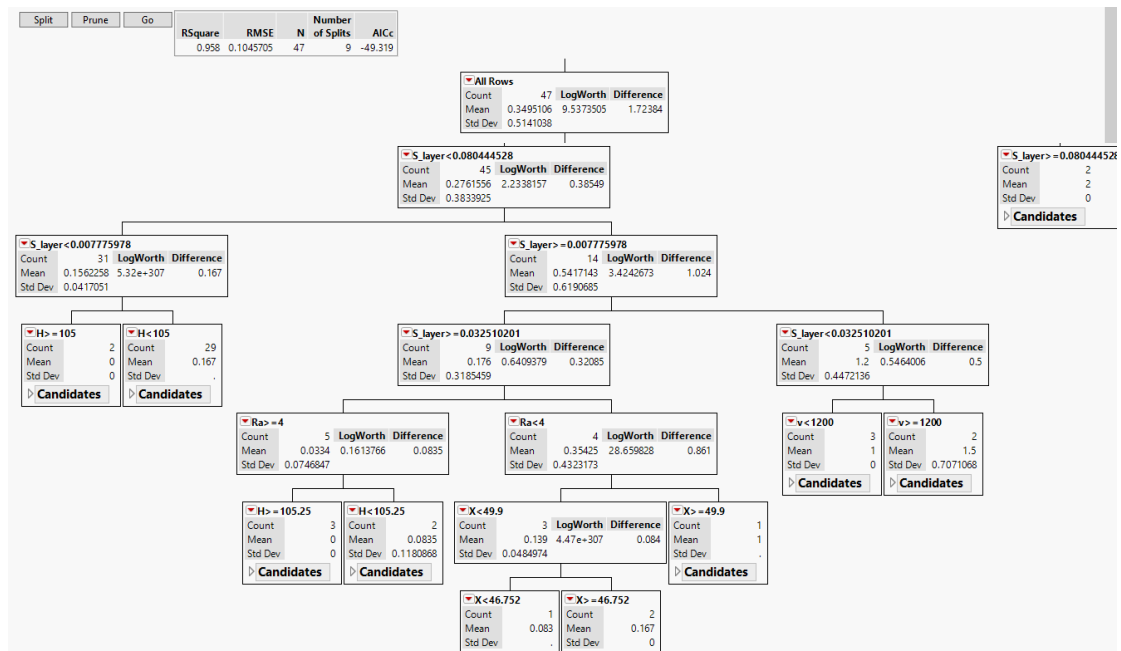
תרשים 11 – CART ראשוני של זמן post process, מינימום 5 אובייקטים בקבוצה

מסקנות:

1. חלוקה ראשונה לפי שטח פנים ממוצע בשכבה.
2. חלוקה שניה לפי גובה אובייקט של האוריינטציה או לפי X .

שטח פנים ממוצע לשכבה שגדול מ-0.00777, יביא לזמן post ארוך יותר, כנראה בשל העובדה ששטח פנים גדול יותר מעיד על נפח אובייקט גדול יותר שעלול להתעוות יותר בשל תמיכות שלא מחזיקות אותו באופן מספק ולכן נדרש זמן post ארוך יותר. עבור שטח פנים שקטן מערך זה, גובה אוריינטציה שקטן מ-34 יביא לזמן post מעט ארוך יותר, לא באופן משמעותי, אולי בשל אוריינטציה משופעת או שכובה יותר שבה נדרשות יותר תמיכות ושהסרתן פוגעת בטיב השטח ולכן נדרש post process ארוך יותר. עבור שטח פנים שגדול מערך הסף, ערך X שגדול מ-46 יביא לזמן post קצר יותר משמעותית.

התרשים הבא מציג את עץ הסיווג עבור המשתנה התלוי זמן post process (t_c), מינימום של אובייקט 1 ב – "בן":



תרשים 12 – CART ראשוני של זמן post process, מינימום אובייקט 1 בקבוצה

מסקנות:

1. חלוקה ראשונה לפי שטח פנים ממוצע לשכבה.
2. חלוקה שניה שוב לפי שטח פנים ממוצע לשכבה.
3. חלוקה שלישית לפי חספוס או מהירות.
4. חלוקה רביעית לפי X או לפי גובה האובייקט באוריינטציה.
5. חלוקה חמישית שוב לפי גובה האובייקט של האוריינטציה.

שטח פנים ממוצע של שכבה שגדול מ-0.08 יביא לזמן post מעט ארוך יותר. שטח פנים שקטן מסף זה וקטן גם מ-0.0077 יביא לזמן post נמוך יותר. אם הוא גדול מ-0.0077 וקטן מ-0.08, מבצעים חלוקה נוספת לפי שטח פנים ממוצע לשכבה – שטח שקטן מ-0.032, זמן post שלו ארוך יותר והחלוקה הפנימית בו נעשית לפי מהירות הסריקה, אך יש מעט מידי נתונים בקבוצה כדי להגיע למסקנה חד משמעית. אם שטח הפנים גדול מ-0.032, ישנו פיצול נוסף לפי טיב פני השטח – אם הציון 4 – זמן post קטן יותר וגודלו מוכרע לפי גובה האובייקט באוריינטציה אך בשל מיעוט נתונים בקבוצות, שוב קשה להגיע למסקנה. אם הציון קטן מ-4, יש חלוקה לפי X , אך שוב יש מעט מידי נתונים בשביל להמשיך במורד העץ.

מסקנות כלליות: ערכי שטח פנים ממוצע של בשכבה הקטנים מ-0.0077 יזכו לזמני post קטנים יותר, כאשר עבור ערכי H קטנים יותר מכ-34, הזמן מעט ארוך יותר, אולי מעיד על אוריינטציה או שוכבת שדורשת הסרת יותר תמיכות ולכן זמני הליטוש מתארכים. ערכים גדולים מערך זה, מתחלקים לפי ערך X – עבור ערכים הקטנים מ-46, זמן post מתארך משמעותית.

למרות הממצאים, ישנה בעייתיות בהכנסה של X , Y ו- H כפרמטרים ידועים למודל מהסיבה שהפרמטרים הללו קובעים בצורה חד-חד ערכית את האוריינטציה – כלומר את הזווית של האובייקט ביחס למגש ההדפסה, כלומר אם נקבע אותם מראש, גם האוריינטציה תהיה ידועה וכך למעשה נוריד דרגת חופש. לא ניתן לכלול את שטח הפנים הממוצע לשכבה כי הוא מחושב כתלות בגובה האוריינטציה.

גם הכנסה של נפח תמיכות או יחס בין נפח תמיכות לנפח אובייקט כפרמטרים ידועים מראש למודל בעייתית מבחינה לוגית מאחר ויש לקבוע את האוריינטציה בטרם קביעת נפח התמיכות

ולכן לא ניתן מראש להחליט על הנפח שלהן לפני בחירת האוריינטציה. יתר על כן, ישנן אוריינטציות שמחייבות תמיכות ואם ייקבע שנפח התמיכות הוא אפסי ותבחר אוריינטציה שמחייבת תמיכות, הפתרון שיתקבל יהיה לא פיזיבילי.

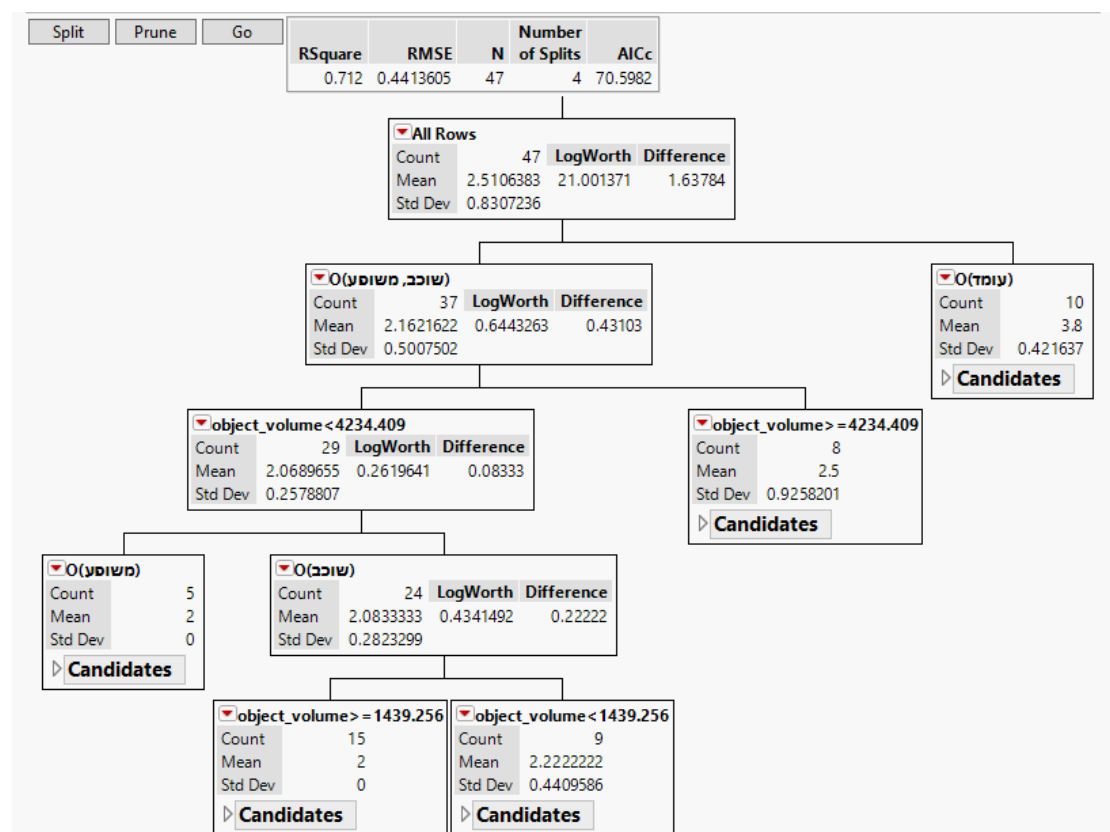
למרות הממצאים, אין צורך להכניס את X ו- Y מהסיבות הבאות: הם נגזרים מהאוריינטציה שנבחרה, H מושפע מהתמיכות ולא הגיוני להגדיר תמיכות לפני שמחליטים על אוריינטציה (ולכן גם אין צורך להכניס את יחס נפח התמיכות-אובייקט), ובנוסף, חשוב לזכור ש- X ו- Y מקבילים לצירי המגש, כלומר הם לוקחים בחשבון גם את זווית הנחת האובייקט **ביחס לצירי המגש** ואילו אנחנו באוריינטציה מכוונים רק לזווית של האובייקט **ביחס למישור המגש**. למעשה הגדלים האילו מכניסים היבט אחר של האוריינטציה שאנחנו לא נוגעים בו, לכן כדאי לוותר עליהם.

לאור זאת, נבנה עצי החלטה שכוללים רק את משתני ההחלטה והפרמטרים הידועים מראש שתואמים את הסדר הלוגי של קבלת ההחלטות בנוגע לתכן תהליך ההדפסה:

4.3.1.2 CART סופי

4.3.1.2.1 חספוס

התרשים הבא מציג את עץ הסיווג עבור המשתנה התלוי חספוס (Ra), מינימום של 5 אובייקטים ב – "בן":



תרשים 13 – CART סופי של חספוס, מינימום 5 אובייקטים בקבוצה

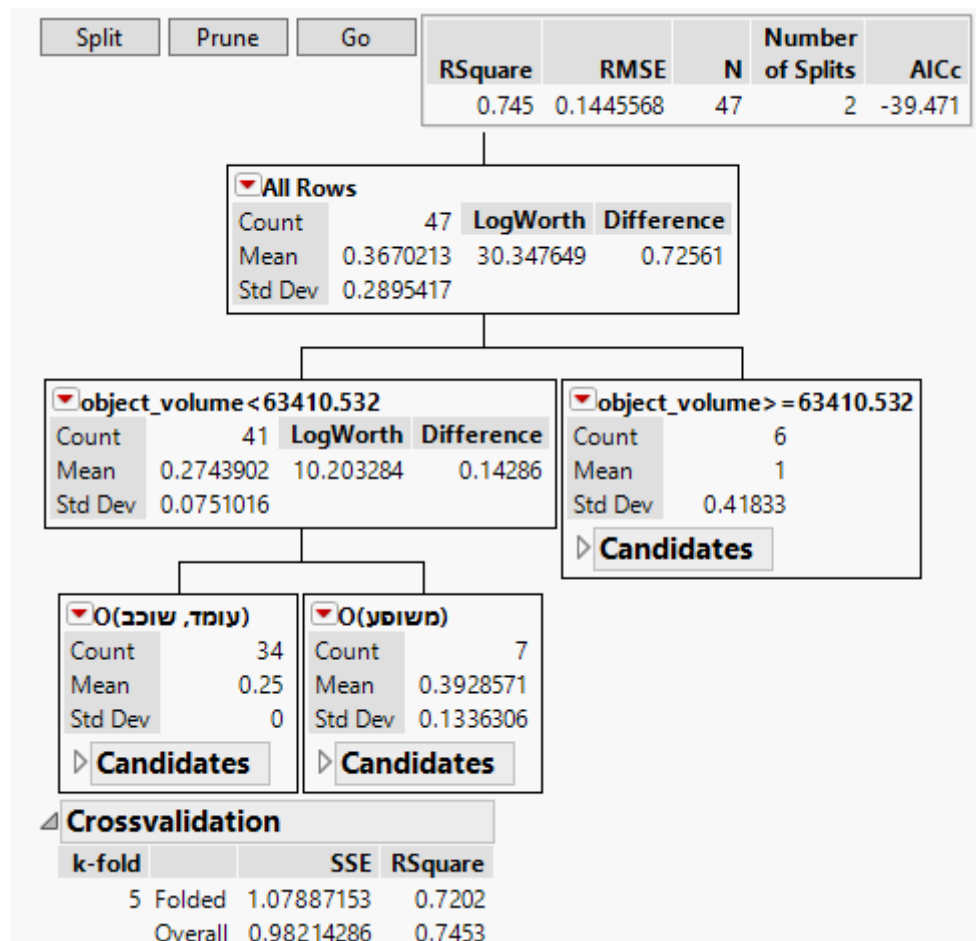
הפרמטרים החשובים: אוריינטציה ונפח אובייקט.

בחלוקה הראשונה נראה שלאוריינטציות שוכבות ומשופעות טיב פני השטח הרבה פחות טוב, כנראה בשל הצורך ביותר תמיכות עבור אוריינטציות אילו, שהסרתן פוגעת בחלקות השטח. האוריינטציות המשופעות והשוכבות מתחלקות לפי נפח אובייקט, כאשר לנפחים הגדולים מ-4234, טיב השטח טוב יותר. עבור נפחים הקטנים מערך זה, מתבצעת חלוקה לפי אוריינטציה

שוכבת או משופעת, כאשר ההבדל ביניהם מבחינת טיב שטח – זניח. האוריינטציה השכובה מתחלקת שוב לפי נפח אובייקט.

4.3.1.2.2 זמן תכן

התרשים הבא מציג את עץ הסיווג עבור המשתנה התלוי זמן תכן (t_d), מינימום של 5 אובייקטים ב – "בן":



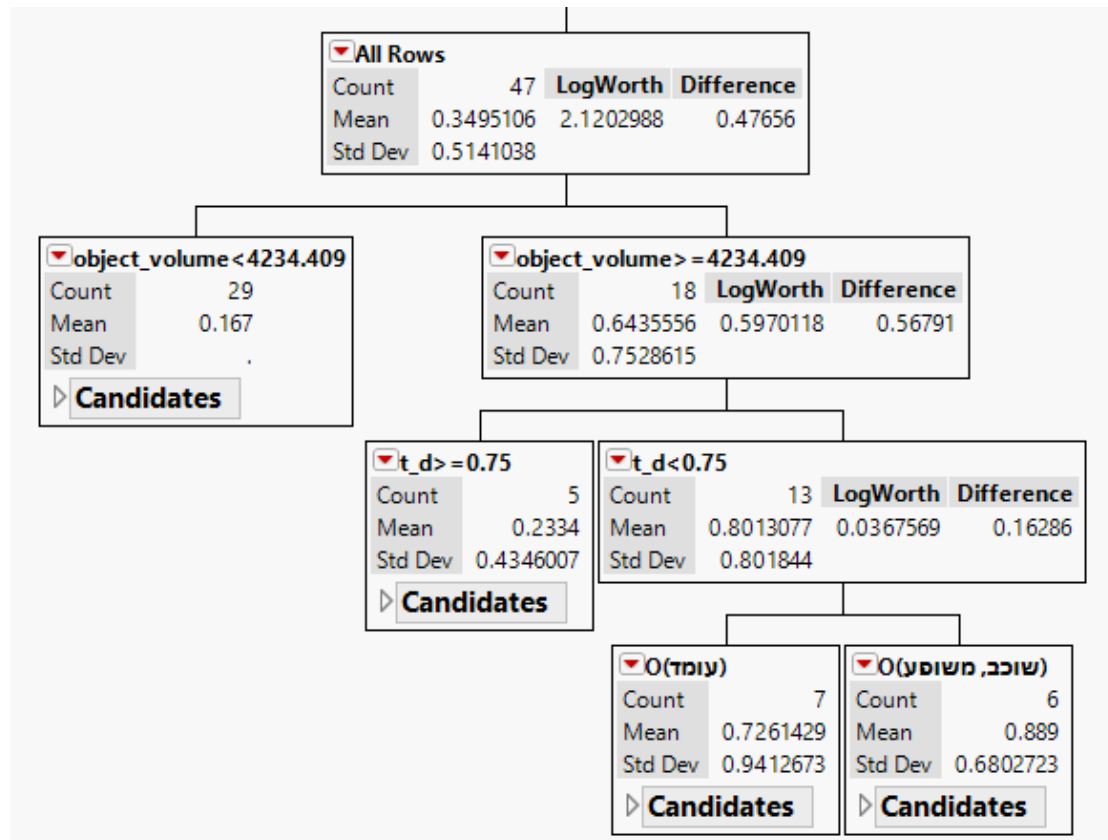
תרשים 14 – CART סופי של זמן תכן, מינימום 5 אובייקטים בקבוצה

הפרמטרים החשובים: נפח תמיכות ואוריינטציה.

1. בחלוקה הראשונה נראה שעבור נפחים קטנים יותר, נדרש זמן תכן קצר יותר, ייתכן בשל הסיבה שעבור נפחים קטנים יותר נדרש תכנון פחות מדוקדק של התמיכות שיחזיקו את האובייקט מבלי שיווצרו עיוותים ועומסים.
2. בחלוקה השנייה, לפי אוריינטציות, נראה שעבור אוריינטציה משופעת נדרש זמן תכן ארוך יותר, ייתכן בשל העובדה שעבור אוריינטציה זו נדרש להשקיע יותר זמן בתיכון התמיכות כך שיחזיקו את האובייקט מבלי שיהיו עומסים ויווצרו עיוותים, בניגוד לאוריינטציות עומדות ושוכבות שבהן הצבת התמיכות יותר טריוויאלית.

4.3.1.2.3 post process זמן

התרשים הבא מציג את עץ הסיווג עבור המשתנה התלוי זמן post process (t_c), מינימום של 5 אובייקטים ב – "בן":



תרשים 15 – CART סופי של זמן post process, מינימום 5 אובייקטים בקבוצה

פרמטרים חשובים:

1. חלוקה ראשונה- נפח אובייקט.
2. חלוקה שניה - זמן תכן.
3. חלוקה שלישית - אוריינטציה.

עבור אובייקטים בעלי נפח קטן יותר, זמן post process קצר יותר, ייתכן בשל הנפח הקטן יחסית שמוריד את העומסים שגורמים לעיוותים באובייקט ובהתאם לכך – את הצורך בביצוע תיקונים. עבור זמני תכן ארוכים יותר, זמני post process המתקבלים הם קצרים יותר, כנראה בשל תכנון טוב ומעמיק יותר בטרם ההדפסה שמביא לפחות עיוותים באובייקט. עבור אוריינטציה עומדת, נדרש פחות post process מאשר אוריינטציה משופעת ושוכבה, כנראה בשל מיעוט התמיכות באוריינטציה זו והפחתת הצורך בpost process לאחר הסרתן.

לסיכום, ראשית נכניס למודל את משתני ההחלטה – גובה שכבה, מהירות סריקה ואוריינטציה. בנוסף, נכניס את עוצמת הלייזר שכפי שהוסבר בסקר הספרות, היא בעלת אינטראקציה עם מהירות הסריקה המשפיעה על החספוס. נוסיף גם את נפח האובייקט שנמצא כמשפיע על מהמדים ונוסיף את זמן התכן במידול ההשפעה על חספוס ו-post process. כמו כן, נכניס את החספוס כגורם משפיע על post process.

לשם ביצוע המידול עצמו, ניעזר ברשת נוירונים שעיקריה פורטו בסקר הספרות.

4.3.2 רשת ANN

לצורך בניית הרשת, שוב נעשה שימוש בתוכנת JMP ונציג כמה מההגדרות שנדרש לקבוע בטרם הרצת האלגוריתם וקבלת הרשת. הייחודיות של התוכנה בהקשר של רשת נוירונים היא מתן האפשרות להצגת הקשרים האנליטיים שהתקבלו עבור כל נירון. ב-JMP Pro היא הגרסה המקצועית יותר של תוכנת JMP, ישנם אפיונים נוספים שניתן להגדיר עבור הרשת שאין ב-JMP ונציג גם אותם.

4.3.2.1 הגדרות התוכנה

להלן החלונית שנפתחת לשם הזנת הגדרות הרשת, עבור JMP ו-JMP Pro [36]:

Layer	TanH	Linear	Gaussian
First	3	0	0
Second	0	0	0

תרשים 16 – חלונית הזנת הגדרות הרשת ב-JMP ו-JMP Pro

Validation method – אופן חלוקת הנתונים לנתונים שעליהם ייערך אימון הרשת ולנתוני ולידציה:

בחירה אקראית של פרופורציית נתונים שתשמש כבחינת המודל.

קביעת k כך שסט הנתונים יחולק ל- k חלקים שווים ו- $k-1$ חלקים ישמשו לאימון הרשת ואילו החלק ה- k ישמש לולידציה. על התהליך הזה חוזרים k פעמים, כאשר בכל פעם חלק אחר נבחר לביצוע הולידציה.

מספר שכבות

מספר נוירונים בשכבה

פונקציית אקטיבציה – ישנן מספר פונקציות שהבחירה בכל אחת מהן תלויה בסט הנתונים ובאופי המודל:

1. לינארית – מאפשרת לצמצם קלטים כמו רגרסיה מרובת משתנים (ע"י מקדמי רגרסיה נמוכים מאוד) ולכן יעיל בסט שכולל נתוני קלט רבים שיש לצמצם.

2. לוגיסטית ($\tanh$) – ממירה ערכי x גדולים לערכי y גדולים וערכי x קטנים לערכי y קטנים אך רגישה מאוד לשינויים בערכי x שהם בטווח. הפונקציה הנ"ל מתאימה לנתונים שכוללים פרמטרים ששינויים בסביבת ערכי הקצה שלהם לא משפיעים על y לעומת ערכים שלהם במרכז טווח הנתונים, שכל שינוי שלהם קריטי להערכת y .
3. גאוסיינית – ממירה ערכי נתוני קלט הסימטריים ביחס לציר הפונקציה לערכי y דומים ויעילה במקרה שקיים ערך x אידיאלי כך שערכי x שמובילים לערך y שרחוק מהערך האופטימלי, לא משנה מאיזה כיוון של הפונקציה, יקבלו ערך y זהה ואילו ערכים שקרובים לערך y האידיאלי, יקבלו ערכי y זהים, לא משנה מאיזה כיוון.

אופציות עריכת הנתונים כדי לבנות פונקציית ניבוי מדויקת יותר

Transform cov – ביצוע טרנספורמציה לנתונים כך שיהיו בקירוב נורמליים, כדי למתן את השפעת הנתונים החריגים על תוצאת הניבוי.

Robust fit – גישה נוספת למיתון השפעת הנתונים החריגים.

Tours – קביעת מספר הפעמים שהמודל ירוץ. **neural network** מספקת מינימום מקומי שתלוי בנקודת ההתחלה, לכן התוכנה, באמצעות פרמטר זה, מאפשרת להריץ כמה פעמים את המודל עם נקודות התחלה שונות (משקלים התחלתיים שונים) אם כל הריצות מספקות אותה תוצאה – אז המינימום שהתקבל, קרוב לוודאי גלובלי.

בחירת פונקציית עונש לשגיאות

1. פונקציה ריבועית – מודל רגיש מאוד לחריגות, מאחר והוא מעלה אותן בריבוע ולכן הממוצע יכלול גם סטיות גדולות, במקום להתייחס רק לממצאים השכיחים, מסיבה זו, הגישה הנ"ל טובה עבור סט נתונים שבו כל הפרמטרים חשובים.
2. פונקציית ערכים מוחלטים – פחות רגיש לשגיאות, בהשוואה לפונקציה הריבועית ולכן הגישה טובה עבור סט נתונים שכולל פרמטרים בעלי השפעה מועטה על y .
3. ללא פונקציית עונש – טוב עבור מקרה שבו יש סט נתונים גדול וישנה משמעות לזמן הריצה אך המודל אינו נחשב מדויק.

Boosting – פרמטר שמאפשר בניה של סדרת מודלים כך שכל מודל מנבא את השגיאות של המודל הקודם, כלומר המודל הראשון מנבא את y כפונקציה של x , המודל השני מנבא את השגיאות ב- y כפונקציה של x , המודל השלישי מנבא את השגיאות של המודל השני כפונקציה של x אכן הלאה. לבסוף נבנה מודל שמשלב את כל המודלים הנ"ל. עשוי להביא להתכנסות מהירה יותר. שיעור למידה – מדד למהירות ההתכנסות שבא על חשבון התאמת יתר – ככל שקרוב יותר ל-1, ההתכנסות מהירה יותר אך גם ישנה התאמת יתר חריפה יותר.

אלגוריתם פפוע לאחר – ניבוי ערך y באמצעות המשקולות הנוכחיות ברשת והשוואת ערך הניבוי לערכו האמיתי של y עבור סט הנתונים הנוכחי. לאחר מציאת השגיאה, מבצעים כיוון למשולות ע"י אלגוריתם **gradient descent**.

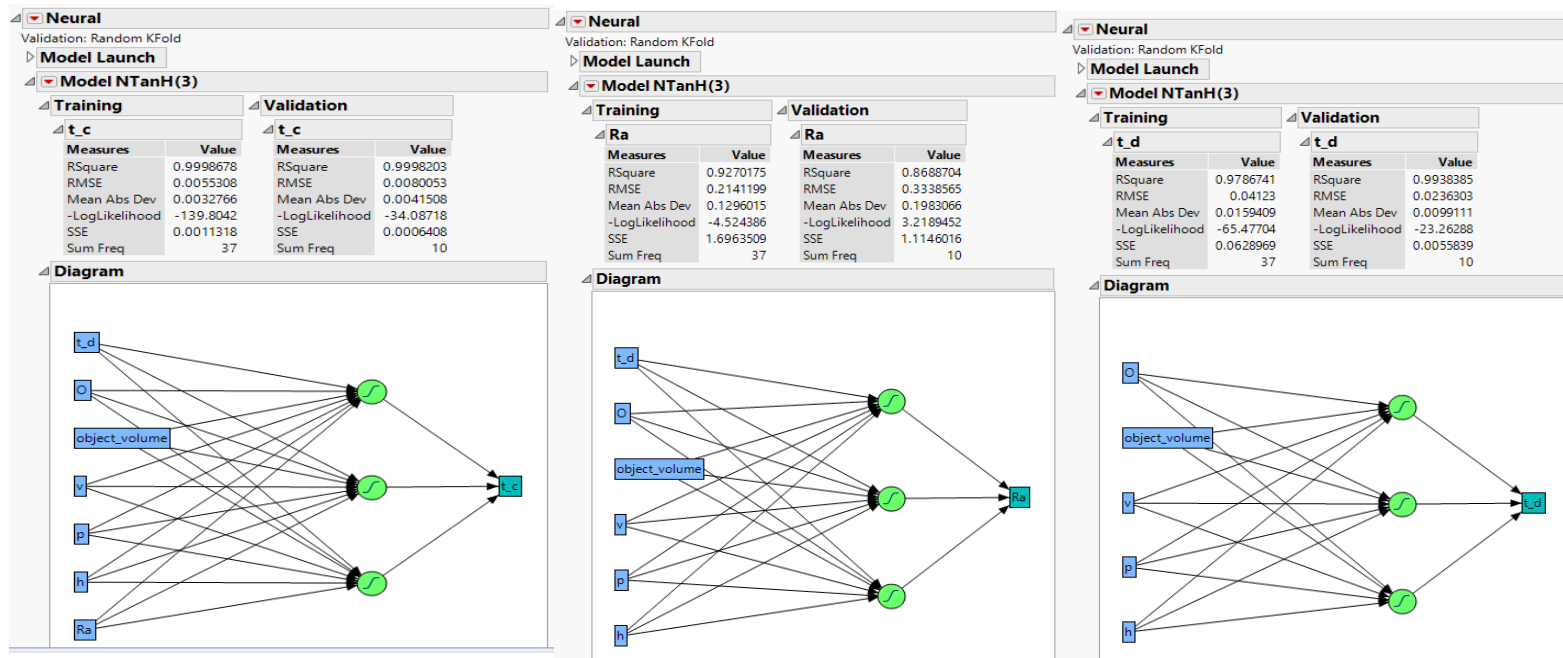
אפשר אחרי כל נקודה ואפשר לבצע אחרי סריקה של כל הנקודות.

4.3.2.2 מימוש

בגרסת התוכנה שבה נעשה שימוש, פונקציית האקטיבציה האפשרית היחידה היא $\tanh$. בנוסף, בגרסה זו לא ניתן להגדיר פרמטרי **boosting**, **tours**, פונקציות ענישה ואופן עריכת הנתונים. מבחינת מספר השכבות ומספר הנירונים בכל שכבה הרצו לפי ברירת המחדל – שכבה חבויה אחת עם 3 ניורונים ווידאנו שהנתונים הסטטיסטיים שמבטאים את מידת הדיוק של הרשת (כפי שיפורט מייד) מספיק טובים, למשל $R^2 > 0.7$ בשלב האימון והולידציה. בנוסף, השתמשנו בגישת **K-fold** כדי להקטין את התאמת היתר שלעיתים מאפיינת רשתות ניורונים.

בתרשימים הבאים מוצגים נתונים סטטיסטיים על רשת הנירונים המתקבלת שמשקפים את מידת הדיוק של הרשת כמו R^2 , **RMSE** (root mean square deviation), **Mean Abs**

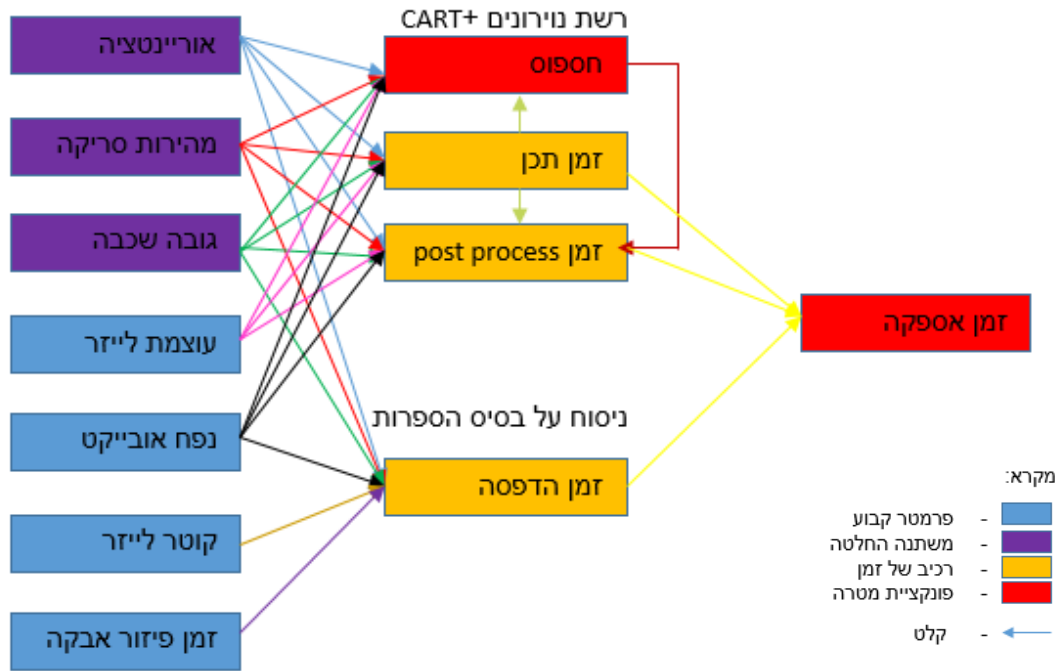
Dev, SSE (sum of squared estimate of errors), עבור שלב האימון ועבור שלב הולידציה. הרשתות נבנו במטרה למקסם את מידת הדיוק בשני השלבים, כלומר למזער את RMSE, Mean Abs Dev ו-SSE ולהגדיל את R^2 כך שיהיה קרוב ל-1. בנוסף, מצורף תרשים של הרשת עם פרמטרי הקלט, שכבת הניורונים החבויה עם תרשים איכותי של פונקציית האקטיבציה ונירונ הפלט.



תרשים 17 – דיאגרמות רשתות הניורונים והנתונים הסטטיסטיים שלהן

4.4 מודל סופי לבעיה 1

התרשים הבא מסכם את הקלטים שהוכנסו למודלים וסיווגם כמו גם את מדדי הביצוע והאופן שבו התקבלה נוסחתם האנליטית:



תרשים 18 – סיווג הקלטים במודל והאופן שבו התקבל הקשר בינם לבין מדדי הביצוע

להלן תיאור כללי של המשוואות שהתקבלו מרשת הנירונים:

$$Ra = \alpha_2 + \sum_{l=1}^3 \beta_{2l} * \tanh_{2l}(\gamma_{2l}, \delta_{2l} * O_1, \mu_{2l} * O_2, \rho_{2l} * O_3, \sigma_{2l} * V, \tau_{2l} * v, \varphi_{2l} * p, \omega_{2l} * h, \theta_{2l} * t_d)$$

$$t_d = \alpha_1 + \sum_{l=1}^3 \beta_{1l} * \tanh_{1l}(\gamma_{1l}, \delta_{1l} * O_1, \mu_{1l} * O_2, \rho_{1l} * O_3, \sigma_{1l} * V, \tau_{1l} * v, \varphi_{1l} * p, \omega_{1l} * h)$$

$$t_c = \alpha_3 + \sum_{l=1}^3 \beta_{3l} * \tanh_{3l}(\gamma_{3l}, \delta_{3l} * O_1, \mu_{3l} * O_2, \rho_{3l} * O_3, \sigma_{3l} * V, \tau_{3l} * v, \varphi_{3l} * p, \omega_{3l} * h, \theta_{3l} * t_d)$$

הנוסחה של כל רשת עבור כל משתנה תלוי מורכבת ממקדם חופשי המיוצג ע"י α , מקדם של פונקציית האקטיבציה $\tanh$ של נירון i בשכבה החבויה המיוצג ע"י β_i , מקדם חופשי בתוך פונקציית האקטיבציה המיוצג ע"י γ_i ומכפלה בין מקדמי הקלטים לקלטים עצמם בתוך פונקציית האקטיבציה. הסיגמא שבנוסחה מבטאת את הסכימה בין פונקציות האקטיבציה עבור כל נירון ברשת החבויה (ישנם 3 נירונים כאילו לפי תרשים 18).

מודל שכולל 3 אוריינטציות

$$\min t_s$$

$$\max Ra$$

$$t_s = t_d + t_p + t_c$$

$$t_p = \frac{1}{v * h * d} * V + th * \frac{O_1 * H_1 + O_2 * H_2 + O_3 * H_3}{h}$$

אעיר שזמן post process כולל גם משך קבוע של הפחתת מאמצים אך בשל העובדה שמדובר במשך שערכו קבוע עבור כל האובייקטים ואינו תלוי בפרמטרי ההדפסה, לא כללנו אותו בנוסחת זמן האספקה הכולל.

$$Ra = 3.396 + 1.831 * \tanh(0.5 * ((-12.9308) + 1.727 * t_d - O_1 * 0.663 - O_2 * 1.576 - O_3 * ((-0.663) + (-1.576))) + 0.000001 * V_object + 0.0112 * v + 0.0183 * p -$$

$$88.893 * h)) - 3.702 * \tanh(0.5 * ((-2.066) + 1.695 * t_d - O_1 * 0.005 - O_2 * 1.135 - O_3 * ((-0.005) + (-1.135)) - 0.000057 * V_{object} + 0.0057 * v + 0.008 * p - 66.213 * h)) - 3.593 * \tanh(0.5 * ((-3.574) + 1.396 * t_d - O_1 * 0.281 - O_2 * 0.357 - O_3 * ((-0.281) + (-0.357)) + 0.00005 * V_{object} + 0.0003 * v + 0.0027 * p - 6.493 * h))$$

$$t_d = 0.587 + 1.199 * \tanh(0.5 * ((-46.273) - O_1 * 2.612 - O_2 * 6.280 - O_3 * ((-2.612) + (-6.280)) - 0.0000008 * V_{object} + 0.0171 * v + 0.115 * p + 0.0136 * h)) + 0.929 * \tanh(0.5 * ((-7.0926) + O_1 * 0.134 + O_2 * 8.249 - O_3 * (0.134 + 8.249) - 0.00008 * V_{object} + 0.0127 * v + 0.008 * p - 104.932 * h)) + 0.613 * \tanh(0.5 * (40.239 + O_1 * 1.174 + O_2 * 0.283 - O_3 * (1.174 + 0.283) + 0.0001 * V_{object} - 0.0344 * v - 0.1017 * p + 281.467 * h))$$

$$t_c = 0.463 + 4.251 * \tanh(0.5 * ((-2.268) - 0.023 * t_d + O_1 * 4.382 - O_2 * 4.563 - O_3 * (4.382 + (-4.563)) + 0.0003 * V_{object} + 0.009 * v + 0.021 * p + 30.605 * h - 7.766 * Ra)) + 0.953 * \tanh(0.5 * (10.709 + 2.221 * t_d + O_1 * 0.882 + O_2 * 0.648 - O_3 * (0.882 + 0.648) + 0.000006 * V_{object} - 0.0024 * v - 0.0037 * p - 4.541 * h - 2.761 * Ra)) - 4.665 * \tanh(0.5 * (8.527 + 1.501 * t_d + O_1 * 3.498 - O_2 * 3.229 - O_3 * (3.498 + (-3.229)) + 0.0001 * V_{object} + 0.009 * v + 0.018 * p - 167.707 * h - 6.675 * Ra))$$

האובייקט מודפס באוריינטציה אחת בלבד:

$$O_1 + O_2 + O_3 = 1$$

התאמת האוריינטציה לממדי מגש ההדפסה וגובה המדפסת:

$$O_1 * X_1 * Y_1 + O_2 * X_2 * Y_2 + O_3 * X_3 * Y_3 \leq X_{printer} * Y_{printer}$$

$$O_1 * H_1 + O_2 * H_2 + O_3 * H_3 \leq Z_{printer}$$

גובה שכבה ומהירות סריקה בהתאם לקיבולת של המדפסת:

$$h_0 \leq h \leq h_f$$

$$v_0 \leq v \leq v_f$$

$$O_i \in \{0,1\}, i = 1,2,3$$

$$O_1 \rightarrow \text{משופע}$$

$$O_2 \rightarrow \text{עומד}$$

$$O_3 \rightarrow \text{שוכב}$$

4.5 כיוול הפרמטרים של המודל

הנוסחאות שהתקבלו מרשת הנירונים לממדי זמן תכן, זמן post process וחפוס, לא מבטיחות קבלת זמנים חיוביים או חפוס בטווח של 1 עד 4, לשם כך, נדרש לבצע כיוול באופן הבא:

לקבוע טווח ערכים שאותו הערך המכוייל יכול לקבל בפועל $[a, b]$.

למצוא את ערכי המינימום והמקסימום של הערך שאותו יש לכייל, min -ו- max , בהתאמה.

להציב את הערך שאינו מכוייל, m , שהתקבל מנוסחת רשת הניורונים, בטרנספורמצית הכיול הבאה:

$$\frac{m-min}{max-min} * (b - a) + a$$

כדי שהכיולים יבטיחו עמידה בדיוק בטווח הנתון, חשוב לבצע אותם בסדר התלות בין שלוש המדדים הנ"ל: חספוס תלוי בזמן תכן ו- $post\ process$ תלוי בזמן תכן ובחספוס, לכן, תחילה נכייל את זמן התכן ונציב את הערך המכוייל בנוסחת החספוס ו- $post\ process$. לאחר מכן, נכייל את החספוס ונציב את הערך המכוייל בנוסחת $post\ process$ ולבסוף נכייל את זמן $post\ process$. רק לאחר כל הכיולים הנ"ל, ניתן לבצע את ההרצה עבור האובייקט הנוכחי. על תהליך זה יש לחזור עבור כל אובייקט יחיד שנדרש להדפיס.

אציין שעבור נוסחת זמן שהתקבלה באופן אנליטי, אין חשש שיתקבל זמן שלילי.

עבור טיב שטח הטווח הוא $[1, 4]$ – זהו טווח הציונים שניתן לטיב השטח.

עבור זמן תכן הטווח הוא $[0, t_1]$ – אינדיבידואלי לכל אובייקט.

עבור זמן $post\ process$ הוא $[0, t_2]$ – אינדיבידואלי לכל אובייקט.

תיקון המודל:

$$Ra_{cal} = \frac{Ra - Ra_{min}}{Ra_{max} - Ra_{min}} * (Ra_b - Ra_a) + Ra_a$$

$$t_{d_{cal}} = \frac{t_d - t_{d_{min}}}{t_{d_{max}} - t_{d_{min}}} * (t_{d_b} - t_{d_a}) + t_{d_a}$$

$$t_{c_{cal}} = \frac{t_c - t_{c_{min}}}{t_{c_{max}} - t_{c_{min}}} * (t_{c_b} - t_{c_a}) + t_{c_a}$$

ופונקציות המטרה:

$$\min t_s$$

$$\max Ra_{cal}$$

$$t_s = t_{d_{cal}} + t_p + t_{c_{cal}}$$

5 פתרון למודל עם אובייקט יחיד באמצעות אופטימיזציה

מימוש המודל ופתרונו במסגרת גישת חזית היעילות, תעשה באמצעות אקסל ותוכנת palisade שמותקנת כתוסף לאקסל. תוכנה זו מאפשרת לקבוע את ערכיהם של משתני ההחלטה באמצעות סימולציות תוך התחשבות בסטוכסטיות של פרמטרים במודל, עובדה המאפשרת עריכת ניתוחי רגישות וזהו יתרונו היחסי על פני סביבות עבודה אחרות. כמו כן, התוכנה מאפשרת לפתור בעיות אופטימיזציה מרובות מטרות במגוון גישות, שביניהן – חזית יעילות. בהמשך, המודל מומש גם בלינגו, בשל יתרון הפלטפורמה הנ"ל בקבלת פתרונות אופטימליים גלובליים ובמימוש מודלים בעלי אילוצים רבים, כמו המודל המורחב שנציג, באופן פשוט יחסית, באמצעות לולאת for , בניגוד לאקסל שדורש הגדרה ידנית של האילוצים.

מבנה כללי של קובץ האקסל:

פונקציות מטרה ומשתני החלטה:

ערכי המרכיבים השונים בפונקציית המטרה:

פונקציית מטרה			
זמן כולל			
חספוס			
זמן תכן			
זמן הדפסה			
post זמן			

הגדרת פונקציות המטרה ומשתני החלטה:

objective	MAX	חספוס	
	MIN	זמן כולל	
DV			
משתני החלטה			
אוריינטציה	O1	O2	O3
מהירות סריקה	v		
גובה שכבה	h		

טבלה 1 – תאים של פונקציות מטרה ומשתני החלטה באקסל

בתאים הירוקים לצד חספוס, זמן תכן וזמן post process מזינים את הנוסחאות שהתקבלו מרשת הניורונים והוצגו בפרק הקודם ובתא הירוק לצד זמן ההדפסה מזינים את נוסחת זמן ההדפסה שהתקבלה מסקר הספרות ושבוצעו עבורה התאמות. הנוסחאות הנ"ל תלויות בערכי משתני ההחלטה שיוצגו בתאים האדומים ובפרמטרי ההדפסה שמוזנים לתאים הוורודים בטבלה המוצגת מטה.

אם רוצים לבצע אופטימיזציה ולמצוא את ערכי משתני ההחלטה שיובילו לפתרונות אופטימליים, לא מזינים לתאים דבר. אם, לעומת זאת, רוצים לבדוק מה המודל מנבא עבור קומבינציית משתני החלטה מסויימת, כפי שנרצה לבדוק בפרק התיקוף, מזינים את הערכים הרצויים לתאים האדומים שתחת משתני ההחלטה.

אילוצים ופרמטרים:

Constraints		LHS		RHS
סכום אוריינטציות		0	=	1
סכום איקסים		0	<=	
סכום וואי		0	<=	
סכום גבהים		0	<=	
תיחום מהירות			$=v \leq$	
יחום גובה שכבה			$=h \leq$	

parameters
נפח אובייקט
עוצמת לייזר
קוטר לייזר
זמן פיזור אבקה
אורך של אוריינטציה 1 X1
אורך של אוריינטציה 2 X2
אורך של אוריינטציה 3 X3
רוחב של אוריינטציה 1 Y1
רוחב של אוריינטציה 2 Y2
רוחב של אוריינטציה 3 Y3
גובה של אוריינטציה 1 H1
גובה של אוריינטציה 2 H2
גובה של אוריינטציה 3 H3
אורך מקסימלי של מגש הדפסה (x)
רוחב מקסימלי של מגש הדפסה (y)
גובה מקסימלי של מדפסת (z)
גובה שכבה מקסימלי אפשרי
גובה שכבה מינימלי אפשרי
מהירות סריקה מקסימלית אפשרית
מהירות סריקה מינימלית אפשרית

טבלה 2 – תאים של פרמטרים ואילוצי המודל באקסל

בטבלה השמאלית, מתחת ל-LHS מזינים את צד שמאל של האילוצים, כתלות במשתני ההחלטה ובפרמטרי ההדפסה ואילו מתחת ל-RHS מזינים את צד ימין שלהם.

נציין שבפרמטרי הגובה שתלויים באוריינטציה, יש לכלול גם את הגובה של התמיכות, עבור כל אוריינטציה (במידה והנתון קיים) ולא רק של האובייקט עצמו מאחר והן תורמות למס' השכבות הכולל ולזמן שנדרש לפיזור האבקה.

כילים:

כילוס חספוס לסולם 1 עד 4	ערך הכי גבוה
	ערך הכי נמוך
	ערך מכויל
כילוס זמן תכן	ערך הכי גבוה
	ערך הכי נמוך
	ערך מכויל
כילוס post process	ערך הכי גבוה
	ערך הכי נמוך
	ערך מכויל

טבלה 3 – תאים של ערכים מקסימליים ומינימליים וערכים מכוילים עבור חספוס, זמן תכן וזמן post process באקסל

בתאים הכתומים שלצד הערך המכויל, עבור כל מדד, נזין את נוסחת הטרנספורמציה שתלויה בערך הנומינלי המתקבל מהרשת ובערכים המינימליים והמקסימליים של כל מדד.

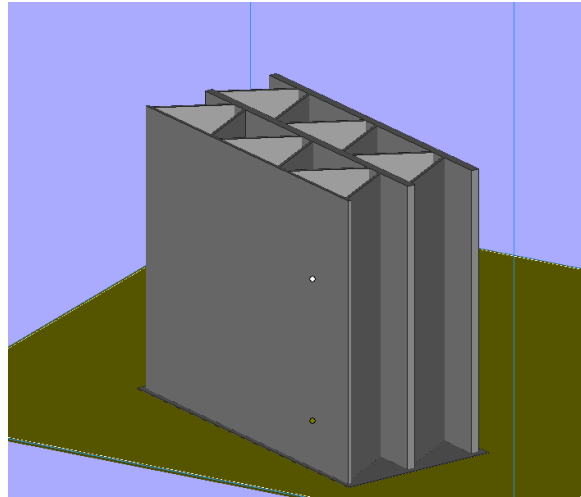
נריך את המודל עבור שני אובייקטים שכלולים ברשת, כלומר ננסה לקבוע את ערכי מהירות הסריקה, גובה שכבה והאוריינטציה של האובייקט שיובילו לקבוצת הפתרונות שבחזית היעילות. לשם כך, נזין את נתוני האובייקט ופרמטרי המדפסת לקובץ האקסל כפי שיפורט מיד.

עבור שתי הדוגמאות:

עבור זמן תכן הטווח הוא $[0,2]$ – מבוסס על הערכות כלליות של זמני תכן ועל כלל הנתונים שנאספו.

עבור זמן post process הוא $[0,2]$ – מבוסס על הערכות כלליות של זמני post process ועל כלל הנתונים שנאספו.

הרצה עבור אובייקט מס' 1:



איור 1 – אובייקט מס' 1

פרמטרים:

פרמטרים		
124637	נפח אובייקט	
266	עוצמת לייזר	
0.5	קוטר לייזר	
8	זמן פיזור אבקה	
74.24	X1 אורך של אוריינטציה 1	45 זווית
70	X2 אורך של אוריינטציה 2	
105	X3 אורך של אוריינטציה 3	
120	Y1 רוחב של אוריינטציה 1	
120	Y2 רוחב של אוריינטציה 2	
120	Y3 רוחב של אוריינטציה 3	
74.24	H1 גובה של אוריינטציה 1	
105	H2 גובה של אוריינטציה 2	
70	H3 גובה של אוריינטציה 3	
200	(x) אורך מקסימלי של מגש הדפסה	
200	(y) רוחב מקסימלי של מגש הדפסה	
200	(z) גובה מקסימלי של מדפסת	
60	גובה שכבה מקסימלי אפשרי	
30	גובה שכבה מינימלי אפשרי	
1200	מהירות סריקה מקסימלית אפשרית	
500	מהירות סריקה מינימלית אפשרית	

טבלה 4 – פרמטרים של אובייקט מס' 1

כיוולים:

זמן תכן מינימלי – 0.93, זמן תכן מקסימלי – 1.47

Adjustable Cell Values							
	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
Best	57	-0.9277	1	0	0	500	0.0600
Original	1	-0.8786	1	0	0	836.6849	0.0600
Last	1000	-0.9277	1	0	0	500	0.0572

Adjustable Cell Values							
	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
Best	156	1.4716	0	0	1	956.3129	0.0600
Original	1	-0.9277	1	0	0	500	0.0600
Last	1000	1.4716	0	0	1	956.7738	0.0600

טבלה 5 – זמן תכן מינימלי ומקסימלי עבור אובייקט מס' 1
מבצעים כיוול לזמני התכן

חספוס מינימלי – 0.61, חספוס מקסימלי – 4.37

Adjustable Cell Values							
	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
Best	88	0.6097	0	0	1	1200	0.0300
Original	1	3.3145	0	0	1	956.3129	0.0600
Last	1000	1.9092	1	0	0	502.2138	0.0496

Adjustable Cell Values							
	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
Best	413	4.3681	0	1	0	1200	0.0408
Original	1	0.6097	0	0	1	1200	0.0300
Last	1000	4.3675	0	1	0	1200	0.0403

טבלה 6 – טיב שטח מינימלי ומקסימלי עבור אובייקט מס' 1
מבצעים כיוול לחספוס

זמן post process מינימלי – -0.42, זמן post process מקסימלי – 1

Adjustable Cell Values							
	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
Best	994	-0.4210	0	1	0	1171.3583	0.0340
Original	1	-0.2797	0	1	0	1200	0.0408
Last	1000	-0.4210	0	1	0	1171.3583	0.0340

Adjustable Cell Values							
	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
Best	219	1.0016	0	0	1	968.6755	0.0349
Original	1	-0.4210	0	1	0	1171.3583	0.0340
Last	1000	1.0016	0	0	1	968.8001	0.0351

טבלה 7 – זמן post process מינימלי ומקסימלי עבור אובייקט מס' 1

חזית היעילות

כדי למצוא קבוצת פתרונות שאינם נשלטים, ממירים את אחת מפונקציות המטרה לאילוף ומוצאים אופטימום של פונקציית המטרה תחת האילוף הנ"ל. לאחר מכן, מגדילים או מקטינים (תלוי באופי האילוף) את צד ימין של האילוף בצעד מסוים ושוב פותרים בעיית אופטימיזציה. ממשיכים בתהליך עד שמגיעים לגבול העליון או התחתון (תלוי באופי האילוף) של פונקציית המטרה שהומרה לאילוף. במקרה שלנו, המטרה של מקסימום טיב שטח שונתה לאילוף גדול שווה. בשלב הראשון נמזער את הזמן הכולל תחת האילוף שטיב שטח גדול שווה מ-1, כלומר אין אילוף כי זהו הערך המינימלי ממילא של טיב שטח. אח"כ נדרש למזער את הזמן הכולל תחת שטיב השטח יהיה גדול שווה 1.25 (ראו טבלה למטה, עמודה שמאלית) וכן הלאה. באופן

זה, במעבר משלב לשלב, הזמן האופטימלי הכולל יתארך, או לכל הפחות, לא ישתנה, כי האילוף משלב לשלב יהפוך למגביל יותר, אך טיב השטח יהיה טוב יותר, או לכל הפחות, לא יהיה גרוע יותר. כך נוצרים פתרונות שאינם שולטים אחד על השני והכי טובים, במסגרת האילוף על טיב השטח (ושאר האילוצים).

Result – זמן כולל בשעות (זמן תכן, הדפסה ו-post process).

C1 – ערך צד ימין של אילוף טיב השטח.

C2 – זמן האספקה הכולל בשעות.

B8 – אוריינטציה משופעת.

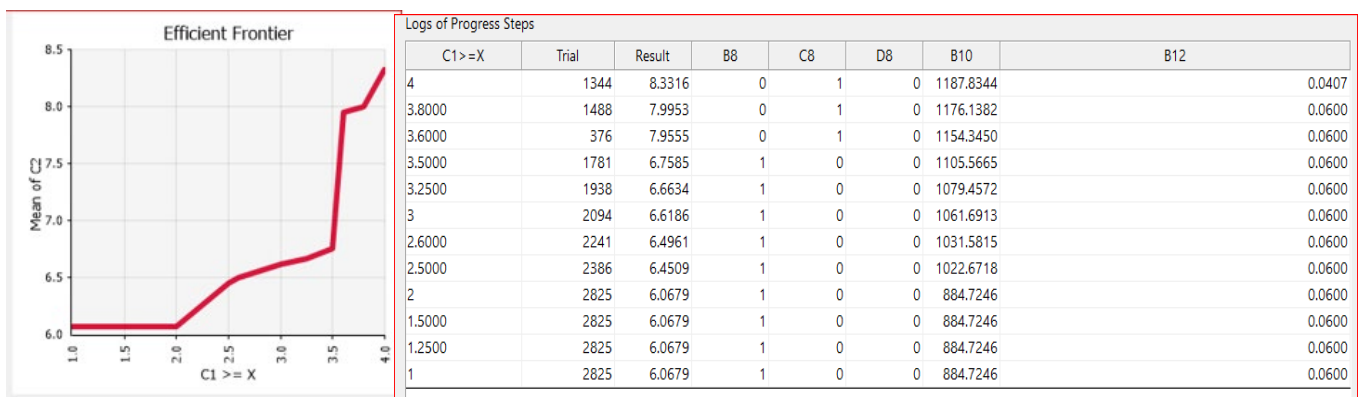
C8 – אוריינטציה עומדת.

D8 – אוריינטציה שוכבת.

B10 – מהירות סריקה במ"מ לשניה.

B12 – גובה שכבה במ"מ.

להלן התוצאות:



תרשים 19 – חזית יעילות עבור אובייקט מס' 1

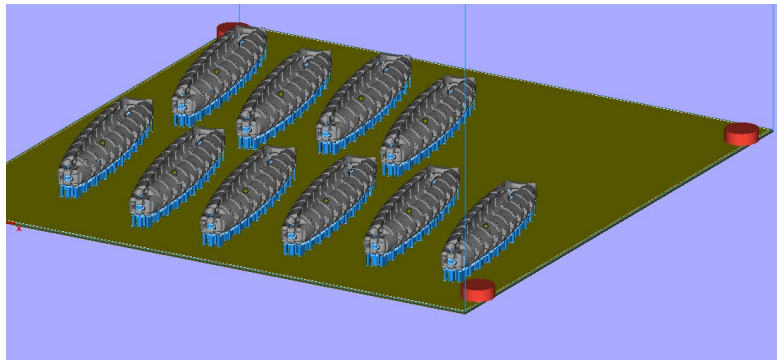
ציר x מציין את ערך הסף של טיב השטח כך שטיב השטח שמתקבל בתהליך האופטימיזציה, יהיה גדול מערך זה או שווה לו. ציר y מציין את זמן האספקה שמתקבל עבור ערך סף מסוים של טיב שטח.

ראשית, אפשר להבחין שקיים טרייד אוף בין ציון החספוס לזמנים הכוללים: ככל שציון הטיב השטח גדל, גם הזמן הכולל גדל.

ניתן לראות שחזית היעילות מתחילה מערך חספוס 2 וזמן כולל של כ-6 שעות (הנקודות קודם לכן לא יעילות כי הן מספקות ציון חספוס נמוך יותר עבור אותו זמן). מציון חספוס 2 עד 2.5 יש עליה בזמנים, מחספוס 2.5 עד 3.5 ישנה עליה מתונה יותר בזמנים, מציון חספוס 3.5 עד 3.6 יש עליה חדה מאוד בזמנים, מציון חספוס של 3.6 עד 3.8 ישנה עליה מתונה יותר בזמנים ומ-3.8 עד 4 שוב עליה חדה. העליות החדות בסוף משקפות את העובדה שכדי להגדיל את רמת השירות, עבור רמות שירות גבוהות (רמת שירות במקרה שלנו היא טיב פני השטח), נדרש לשלם מחיר גבוה – במקרה שלנו בזמנים כוללים ארוכים יותר, משמעותית. ז"א לעליה בטיב השטח ברמות הגבוהות של טיב השטח, יש רגישות גבוהה שמתבטאת בעליה חדה בזמנים הכוללים הנדרשים לשם השגת טיב פני שטח מעולה.

נשים לב שהקטע האופקי בין $C1=1$ ל- $C1=2$, יעיל רק בנקודה שבה $C1=2$ מאחר וכל הנקודות עד לערך זה מקבלות טיב שטח פחות טוב עבור אותו זמן כולל.

הרצה עבור אובייקט מס' 2:



איור 2 – אובייקט מס' 2

פרמטרים:

פרמטרים	
6621	נפח אובייקט
175	עוצמת לייזר
0.1	קוטר לייזר
8	זמן פיזור אבקה
29	X1 אורך של אוריינטציה 1
29	X2 אורך של אוריינטציה 2
29	X3 אורך של אוריינטציה 3
63.64	Y1 רוחב של אוריינטציה 1
12	Y2 רוחב של אוריינטציה 2
90	Y3 רוחב של אוריינטציה 3
63.64	H1 גובה של אוריינטציה 1
90	H2 גובה של אוריינטציה 2
16	H3 גובה של אוריינטציה 3
200	אורך מקסימלי של מגש הדפסה (x)
200	רוחב מקסימלי של מגש הדפסה (y)
200	גובה מקסימלי של מדפסת (z)
60	גובה שכבה מקסימלי אפשרי
30	גובה שכבה מינימלי אפשרי
1200	מהירות סריקה מקסימלית אפשרית
500	מהירות סריקה מינימלית אפשרית

טבלה 8 – פרמטרים של אובייקט מס' 1

כיולים:

זמן תכן מינימלי – -0.99, זמן תכן מקסימלי – 0.93

Adjustable Cell Values							
	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
Best	829	-0.9919	0	0	1	857.8102	0.0325
Original	1	-0.9225	1	0	0	500	0.0600
Last	1000	-0.7359	0	0	1	857.8102	0.0488

Adjustable Cell Values							
	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
Best	198	0.9303	0	1	0	693.7350	0.0313
Original	1	-0.9919	0	0	1	857.8102	0.0325
Last	1000	0.9303	0	1	0	706.8393	0.0329

טבלה 9 – זמן תכן מינימלי ומקסימלי עבור אובייקט מס' 2

מבצעים כיוול לזמני התכן

חספוס מינימלי – -1.153, חספוס מקסימלי – 7.716

Adjustable Cell Values							
	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
Best	977	-1.1526	0	1	0	685.4984	0.0300
Original	1	-1.1354	0	1	0	693.7350	0.0313
Last	1000	-1.1526	0	1	0	685.4984	0.0300

Adjustable Cell Values							
	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
Best	69	7.7165	1	0	0	500	0.0600
Original	1	-1.1526	0	1	0	685.4984	0.0300
Last	1000	-0.5357	0	1	0	770.8266	0.0538

טבלה 10 – טיב שטח מינימלי ומקסימלי עבור אובייקט מס' 2

מבצעים כיוול לחספוס

זמן post process מינימלי – -7.317, זמן post process מקסימלי – 1.827

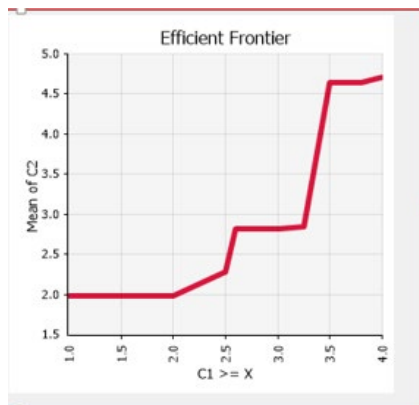
Adjustable Cell Values							
	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
Best	7	-7.3174	0	1	0	500	0.0300
Original	1	0.2977	1	0	0	500	0.0600
Last	1000	-7.3173	0	1	0	500.5225	0.0300

Adjustable Cell Values							
	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
Best	566	1.8266	0	1	0	507.1214	0.0600
Original	1	-7.3174	0	1	0	500	0.0300
Last	1000	0.9610	0	0	1	619.5778	0.0453

טבלה 11 – זמן post process מינימלי ומקסימלי עבור אובייקט מס' 2

חזית היעילות

להלן התוצאות:



Logs of Progress Steps							
C1 >= X	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
4	286	4.7066	1	0	0	500	0.0600
3.8000	1453	4.6418	1	0	0	602.3028	0.0600
3.6000	1642	4.6400	1	0	0	620.4078	0.0600
3.5000	1642	4.6400	1	0	0	620.4078	0.0600
3.2500	1857	2.8476	0	0	1	557.0088	0.0600
3	1418	2.8186	0	0	1	627.4933	0.0600
2.6000	2222	2.8164	0	0	1	652.0880	0.0600
2.5000	2395	2.2821	0	0	1	972.7394	0.0300
2	2966	1.9739	0	0	1	908.9298	0.0300
1.5000	2966	1.9739	0	0	1	908.9298	0.0300
1.2500	2966	1.9739	0	0	1	908.9298	0.0300
1	2966	1.9739	0	0	1	908.9298	0.0300

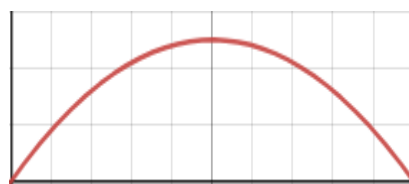
תרשים 20 – חזית יעילות עבור אובייקט מס' 2

6 תיקוף בעזרת ניתוח רגישות לאובייקט 1

לעיתים, קיימים אי דיוקים במכשיר המדידה המובנה של המדפסת הגוררים אי וודאות לגבי ערכם האמיתי של הפרמטרים שמוזנים למדפסת או לערכי הקצה שהפרמטר יכול לקבל בהתאם לקיבולת המדפסת. מסיבה זו, נבצע ניתוח רגישות לפרמטרים שונים בתוך התהליך ותכן המדפסת, נבדוק כיצד ההתפלגות שלהם משפיעה על חזית היעילות הדטרמיניסטית ונברר עבור אילו פרמטרים הם הרגישים ביותר להשתנות הערך הנומינלי שלהם.

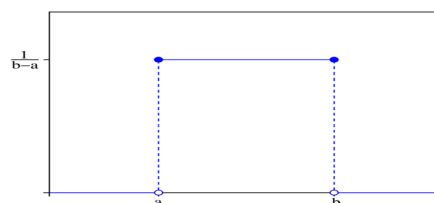
נשתמש בהתפלגות ביתא כדי לתאר התפלגויות שונות של הפרמטר הנשלט סביב הערך הנומינלי שנקבע לו, שעשויות לשקף את מה שקורה במציאות:

1. [פיזור בצורת פעמון] התפלגות ביתא עם פרמטרים 2,2, דומה להתפלגות נורמלית כך שהתפלגות היא סביב הערך הדטרמיניסטי שהופיע בהרצות הקודמות וכלל שהערך רחוק מהממוצע, הסיכוי שיוגרל קטן.



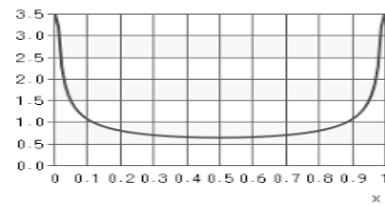
תרשים 21 – התפלגות פעמון

2. [פיזור אחיד] התפלגות ביתא עם פרמטרים 1,1 דומה להתפלגות אחידה כך שלכל הערכים בטווח שהוגדר, יש סיכוי זהה להיות מוגרלים.



תרשים 22 – התפלגות אחידה

3. [פיזור קיצוני] התפלגות ביתא עם פרמטרים 0.5,0.5 היא התפלגות שמקבלת ערכים קיצוניים בקצוות ובעלת השונות הגדולה ביותר.

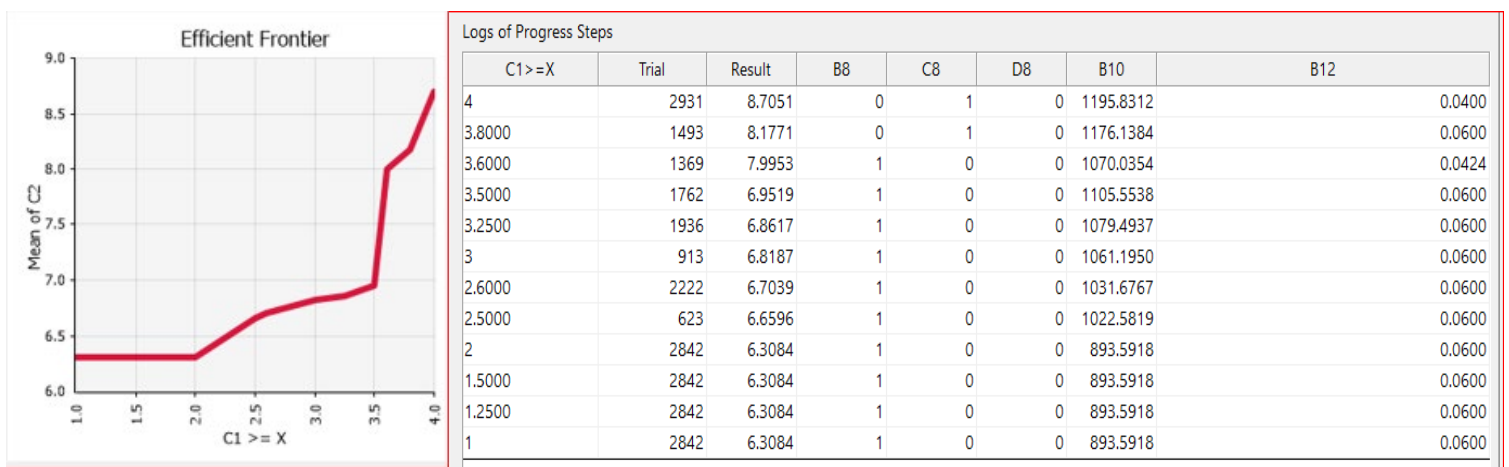


תרשים 23 – התפלגות עם ערכים קיצוניים בקצוות

6.1 קוטר לייזר

פיזור פעמון: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 2,2 עבור קוטר הלייזר בין 0.1 מ"מ ל- 0.9 מ"מ.

להלן התוצאות:

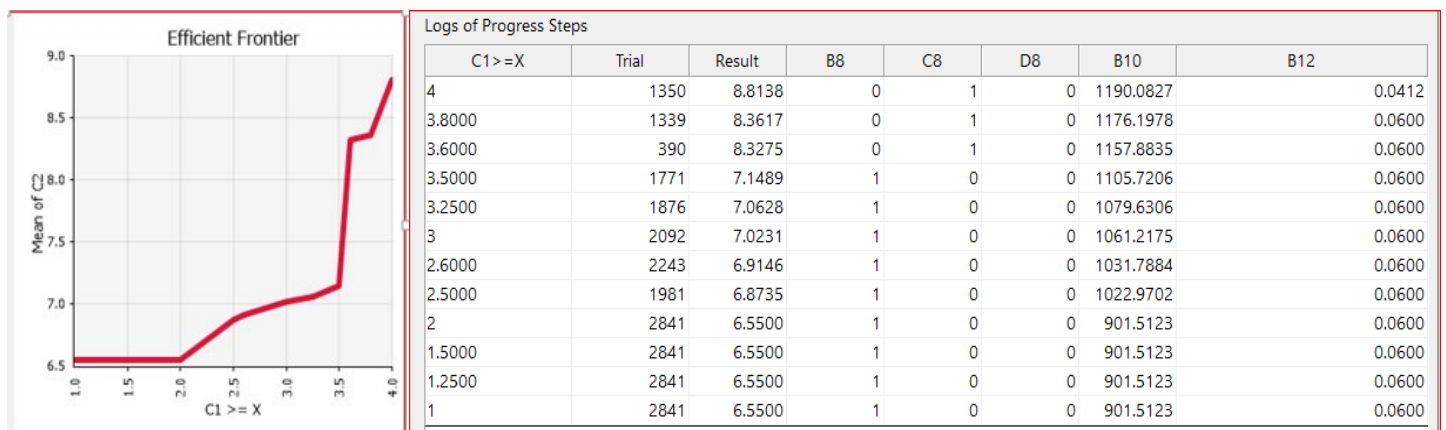


תרשים 24 – חזית יעילות עבור התפלגות נורמלית של קוטר הלייזר

ניתן לראות שהתוצאות דומות לחזית היעילות הדטרמיניסטית, מלבד העובדה שהגרף מתחיל מזמן גבוה יותר ברבע שעה ולכן גם כל הנקודות בגרף, ערכי הזמן שלהן גדולים ברבע שעה.

פיזור אחיד: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 1,1, עבור קוטר הלייזר בין 0.1 מ"מ ל- 0.9 מ"מ

להלן התוצאות:

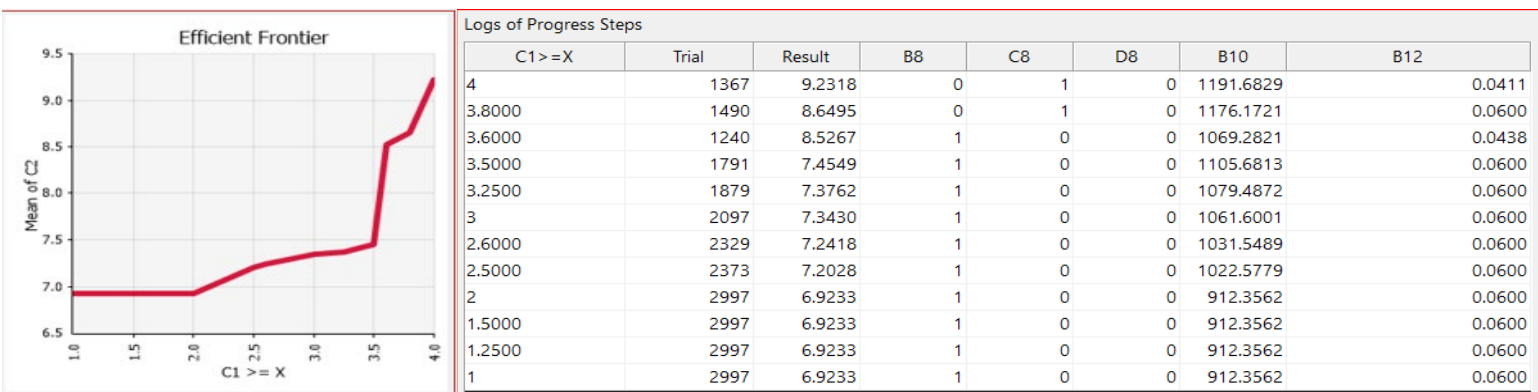


תרשים 25 – חזית יעילות עבור התפלגות אחידה של קוטר הלייזר

גם כאן, צורת הגרף דומה לחזית היעילות במצב הדטרמיניסטי אך הפעם הגרף מתחיל מזמן גבוה אף יותר - בחצי שעה יותר מהמצב הדטרמיניסטי ולכן גם כל הנקודות בגרף, ערכי הזמן שלהן גדולים בחצי שעה.

פיזור קיצוני: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 0.5, 0.5, עבור קוטר הלייזר בין 0.1 מ"מ ל-0.9 מ"מ.

להלן התוצאות:



תרשים 26 – חזית יעילות עבור התפלגות קיצונית של קוטר הלייזר

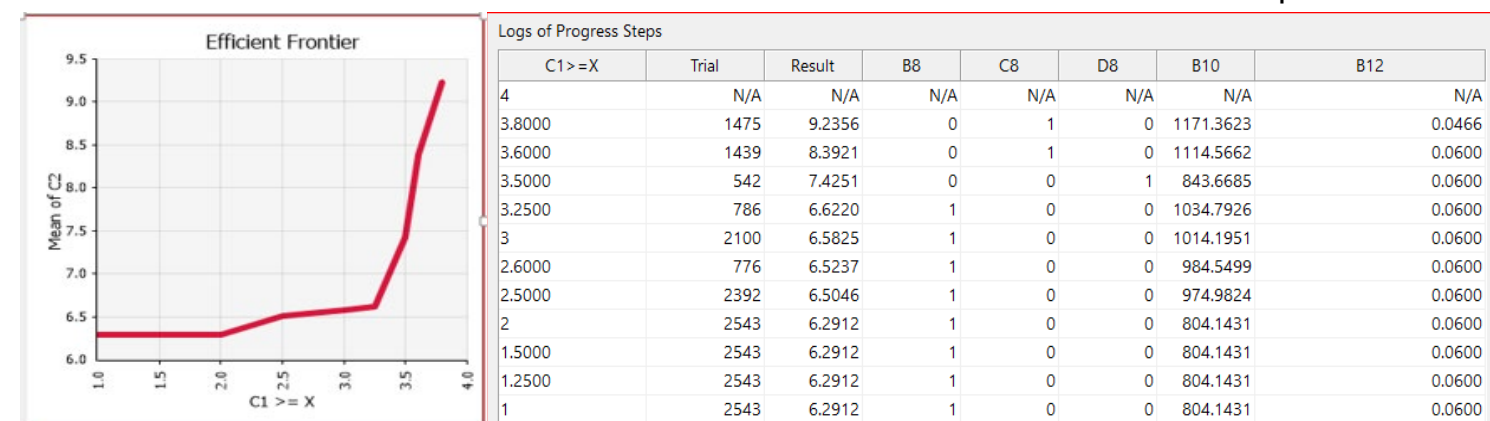
גם כאן, צורת הגרף דומה למצב הדטרמיניסטי ושוב, הגרף מתחיל מנקודת זמן גבוהה יותר ב-50 דקות מהמצב הדטרמיניסטי, ולכן גם כל הנקודות בגרף, ערכי הזמן שלהן גדולים בכ-50 דקות.

לסיכום: ניתן לראות שככל שהשונות גדלה, הזמנים המתקבלים עבור כל ציון חספוס, מתארכים.

6.2 עוצמת לייזר

פיזור פעמון: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 2, 2, עבור עוצמת לייזר בין 216 ל-316 וואט.

להלן התוצאות:



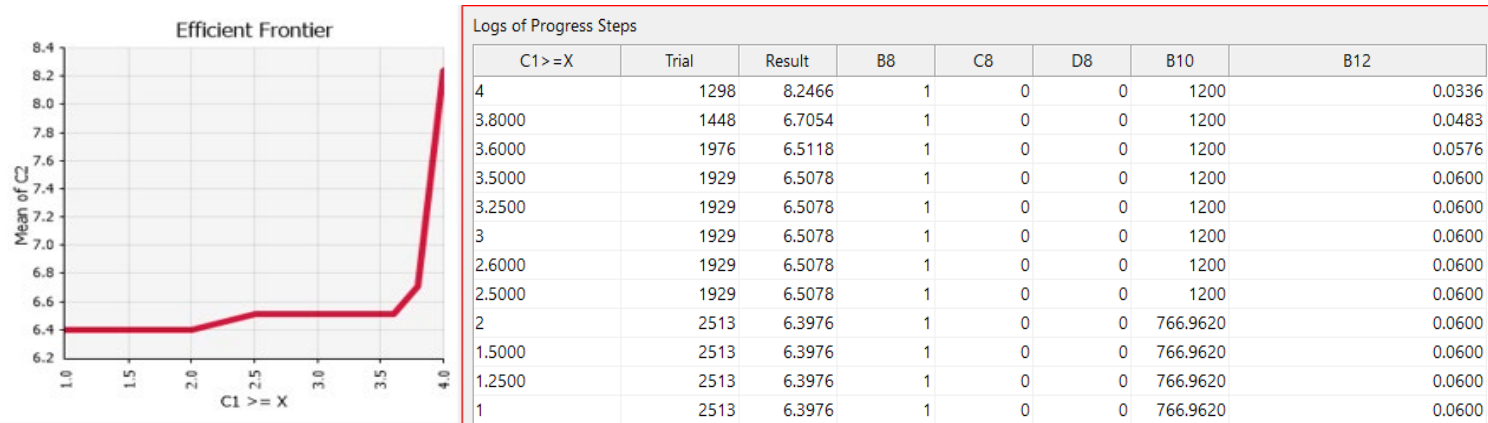
תרשים 27 – חזית יעילות עבור התפלגות נורמלית של עוצמת הלייזר

ניתן לראות שהגרף השתנה ביחס למצב הדטרמיניסטי. חזית היעילות מתחילה שוב מציון חספוס 2 אך מזמן כולל מעט גבוה יותר העומד על כ-6 שעות ועשרים דקות. ישנה עליה מתונה בזמנים עד ציון חספוס 2.5 ואז עליה מתונה עוד יותר עד ציון חספוס 3.25 והחל מציון זה

ישנה עליה חדה בזמנים עד ציון חספוס 3.8. לא ניתן להגיע לציון גבוה יותר עבור הכיולים הנוכחיים.

פיזור אחיד: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 1,1 עבור עוצמת לייזר בין 216 ל-316 וואט.

להלן התוצאות:

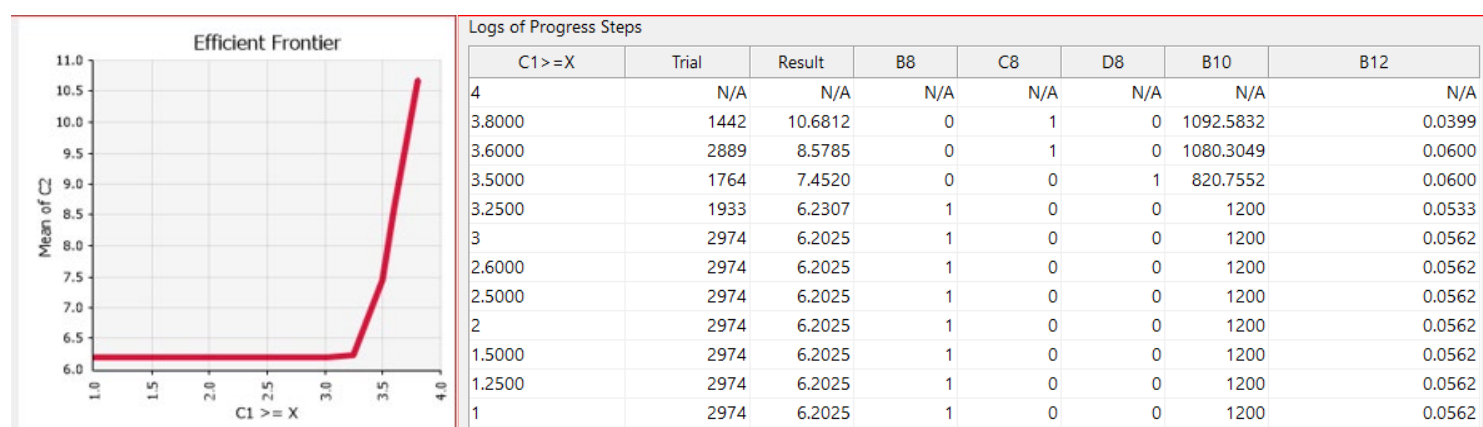


תרשים 28 – חזית יעילות עבור התפלגות אחידה של עוצמת הלייזר

ניתן לראות שהגרף השתנה באופן קיצוני יותר ביחס למצב הדטרמיניסטי. חזית היעילות מתחילה שוב מציון חספוס 2 אך מזמן כולל מעט גבוה יותר העומד על כ-6 שעות ועשרים וארבע דקות. ישנה עליה מתונה בזמנים עד ציון חספוס 2.5 ואז הנקודה היעילה הבאה היא בציון חספוס 3.25 ואז עליה חדה מאוד בזמנים עד ציון חספוס 4.

פיזור קיצוני: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 0.5,0.5 עבור עוצמת לייזר בין 216 ל-316 וואט

להלן התוצאות:



תרשים 29 – חזית יעילות עבור התפלגות קיצונית של קוטר הלייזר

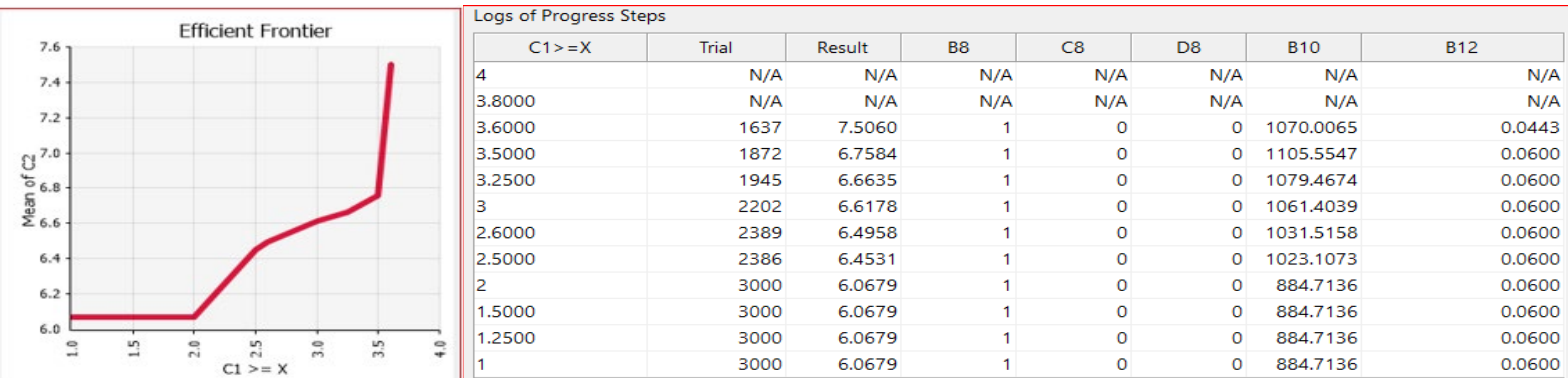
במקרה הזה הגרף השתנה באופן הקיצוני ביותר ביחס למצב הדטרמיניסטי. חזית היעילות מתחילה שוב מציון חספוס 3.25 אך מזמן כולל מעט גבוה יותר העומד על כ-6 שעות ו-12 דקות והחל מציון חספוס זה ישנה עליה חדה מאוד בזמנים הכוללים עד ציון חספוס של 3.8. לא ניתן להגיע לציון חספוס 4 מאחר והכיולים לא מדויקים.

לסיכום, ניתן לראות שבהתפלגות ביתא עם פרמטרים 0.5,0.5, העליה החדה בזמנים מתחילה בציון החספוס הנמוך מבין 3 ההתפלגויות שנבדקו.

6.3 גובה מדפסת

פיזור פעמון: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 2,2 עבור גובה בין 80 ל-130 מ"מ.

להלן התוצאות:

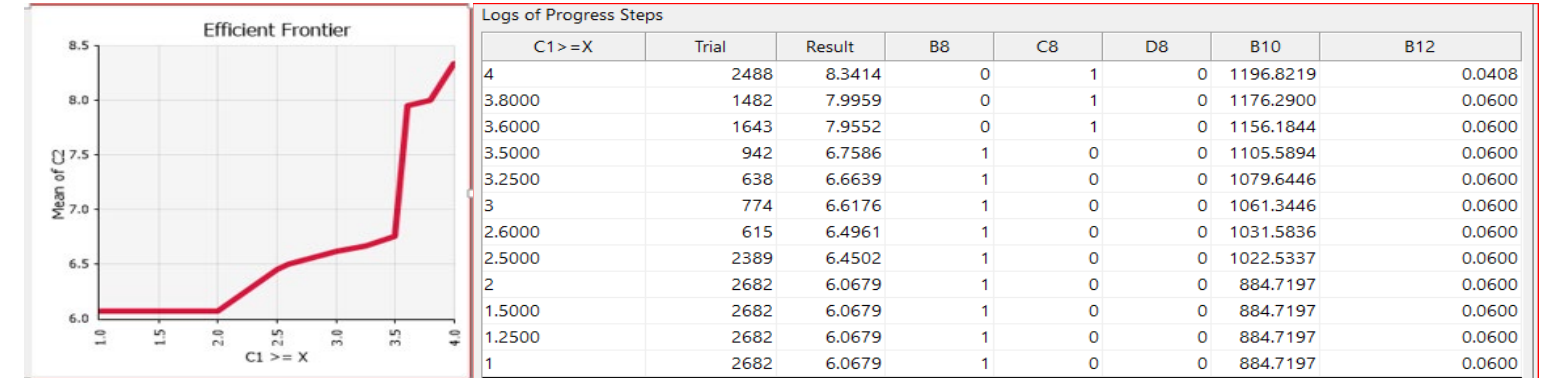


תרשים 30 – חזית יעילות עבור התפלגות נורמלית של טווח גובה המדפסת

חזית היעילות מתחילה מציון חספוס 2 וזמן כולל זהה לחזית היעילות במצב הדטרמיניסטי. עד ציון חספוס 2.5 חלה עליה בזמנים הכוללים, מ-2.5 עד 3.5 חלה עליה מתונה יותר בזמנים ואילו מציון חספוס 3.5 עד 3.6 חלה עליה חדה מאוד בזמנים. לא ניתן להגיע לציון חספוס של 3.8 ו-4 מאחר והכיוולים לא מדויקים.

פיזור אחיד: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 1,1 עבור גובה בין 80 ל-130 מ"מ.

להלן התוצאות: חזית היעילות מתחילה מציון חספוס 2 עם זמן זהה למצב הדטרמיניסטי. עד

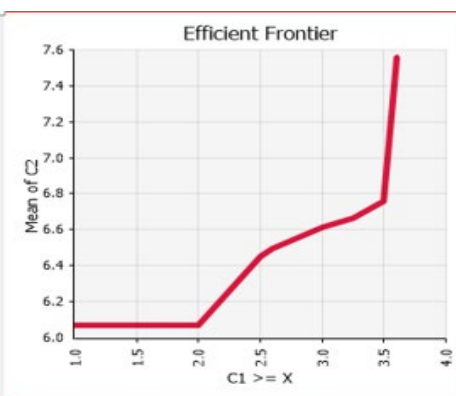


תרשים 31 – חזית יעילות עבור התפלגות אחידה של טווח גובה המדפסת

ציון חספוס 2.5 חלה עליה בזמנים הכוללים, מ-2.5 עד 3.5 חלה עליה מתונה יותר בזמנים ואילו מציון חספוס 3.5 עד 3.6 חלה עליה חדה מאוד בזמנים. מ-3.6 עד 3.8 חלה עליה מתונה יותר בזמנים ואילו מ-3.8 עד 4 חלה עליה חדה בזמנים.

פיזור קיצוני: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 0.5,0.5 עבור גובה בין 80 ל-130 מ"מ.

להלן התוצאות:



	C1 >= X	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
4		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
3.8000		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
3.6000		603	7.5620	1	0	0	1058.3071	0.0422
3.5000		1770	6.7584	1	0	0	1105.5608	0.0600
3.2500		2042	6.6652	1	0	0	1080.1821	0.0600
3		2094	6.6173	1	0	0	1061.2646	0.0600
2.6000		716	6.4958	1	0	0	1031.5227	0.0600
2.5000		825	6.4504	1	0	0	1022.5812	0.0600
2		2673	6.0679	1	0	0	884.7222	0.0600
1.5000		2673	6.0679	1	0	0	884.7222	0.0600
1.2500		2673	6.0679	1	0	0	884.7222	0.0600
1		2673	6.0679	1	0	0	884.7222	0.0600

תרשים 32 – חזית יעילות עבור התפלגות קיצונית של טווח גובה המדפסת

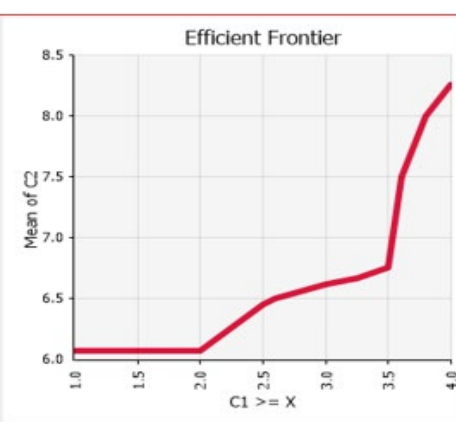
חזית היעילות מתחילה מציון חספוס 2 עם זמן זהה למצב הדטרמיניסטי. עד ציון חספוס 2.5 חלה עליה בזמנים הכוללים, מ-2.5 עד 3.5 חלה עליה מתונה יותר בזמנים ואילו מציון חספוס 3.5 עד 3.6 חלה עליה חדה מאוד בזמנים. מ-3.6 עד 3.8 חלה עליה חדה מאוד בזמנים. לא ניתן להגיע לציוני חספוס של 3.8 ו-4 מאחר והכיוולים לא מדויקים.

לסיכום: לא נראה שהתפלגות אגף ימין של האילוף משפיעה באופן מהותי על חזית היעילות.

6.4 טווח מהירות סריקה

פיזור פעמון: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 2,2 עבור מהירות מינימלית שנעה בין 400 ל-600 ומהירות מקסימלית בין 1100 ל-1300.

להלן התוצאות:



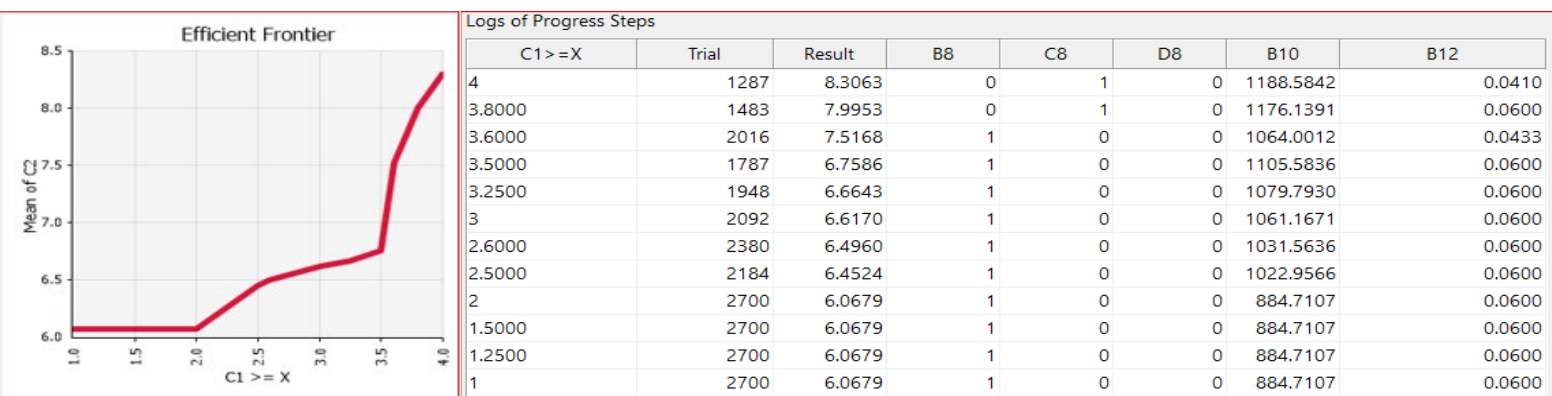
	C1 >= X	Trial	Result	B8	C8	D8	B10	B12
4		1338	8.2682	0	1	0	1194.2858	0.0414
3.8000		1494	7.9953	0	1	0	1176.1431	0.0600
3.6000		1643	7.5017	1	0	0	1069.7075	0.0443
3.5000		1727	6.7584	1	0	0	1105.5496	0.0600
3.2500		1945	6.6635	1	0	0	1079.4615	0.0600
3		2297	6.6172	1	0	0	1061.2086	0.0600
2.6000		2234	6.4960	1	0	0	1031.5571	0.0600
2.5000		2400	6.4506	1	0	0	1022.6124	0.0600
2		2997	6.0679	1	0	0	884.7252	0.0600
1.5000		2997	6.0679	1	0	0	884.7252	0.0600
1.2500		2997	6.0679	1	0	0	884.7252	0.0600
1		2997	6.0679	1	0	0	884.7252	0.0600

תרשים 33 – חזית יעילות עבור התפלגות נורמלית של טווח מהירות הסריקה

הגרף דומה לחזית היעילות הדטרמיניסטית, מלבד העובדה שאין עליה מתונה בזמנים בין ציוני חספוס 3.5 ל-3.6 שמופיעה בחזית היעילות הדטרמיניסטית.

פיזור אחיד: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 1,1 עבור מהירות מינימלית שנעה בין 400 ל-600 ומהירות מקסימלית בין 1100 ל-1300.

להלן התוצאות:

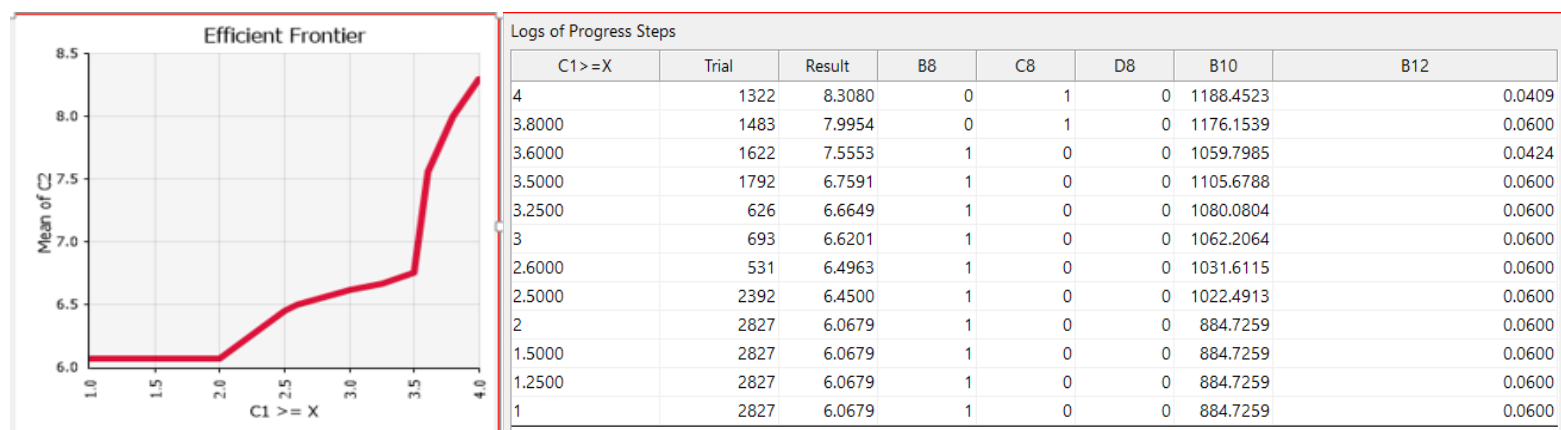


תרשים 34 – חזית יעילות עבור התפלגות אחידה של טווח מהירות הסריקה

בדומה למסקנה הקודמת.

פיזור קיצוני: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 0.5,0.5 עבור מהירות מינימלית שנהה בין 400 ל-600 ומהירות מקסימלית בין 1100 ל-1300.

להלן התוצאות:



תרשים 35 – חזית יעילות עבור התפלגות קיצונית של טווח מהירות הסריקה

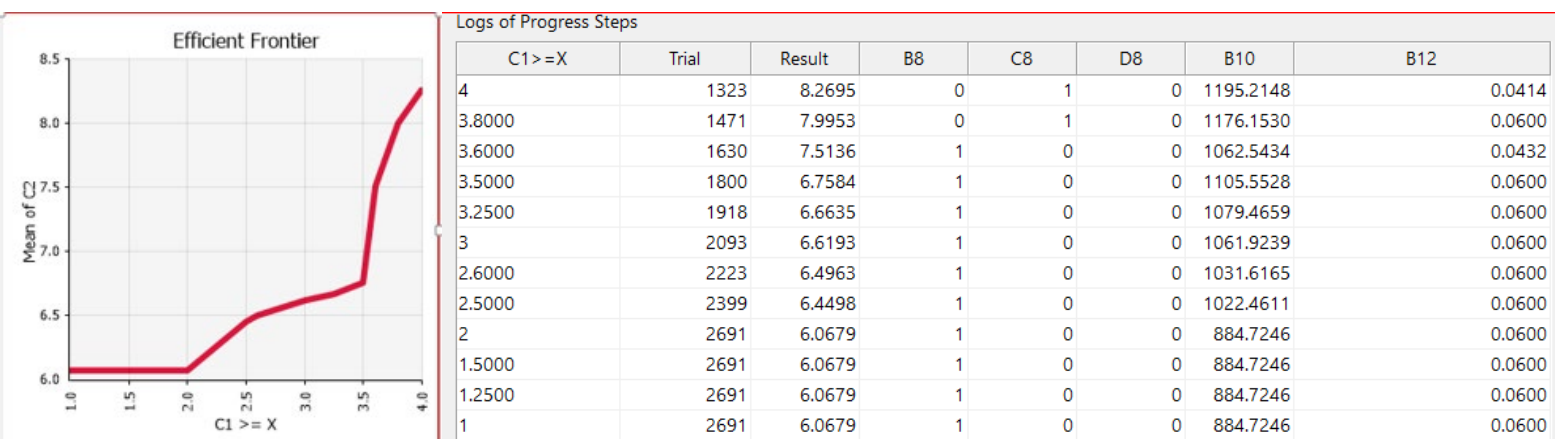
בדומה למסקנה הקודמת.

לסיכום: לא נראה שיש הבדל משמעותי מחזית היעילות הדטרמיניסטית, עבור כל אחד מסוגי הפיזור של מהירות הסריקה המינימלית והמקסימלית

6.5. טווח ערכים לגובה שכבה

פיזור פעמון: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 2,2 עבור גובה מינימלי שנע בין 0.02 ל-0.04 מ"מ וגובה מקסימלי שנע בין 0.05 ל-0.07.

להלן התוצאות:

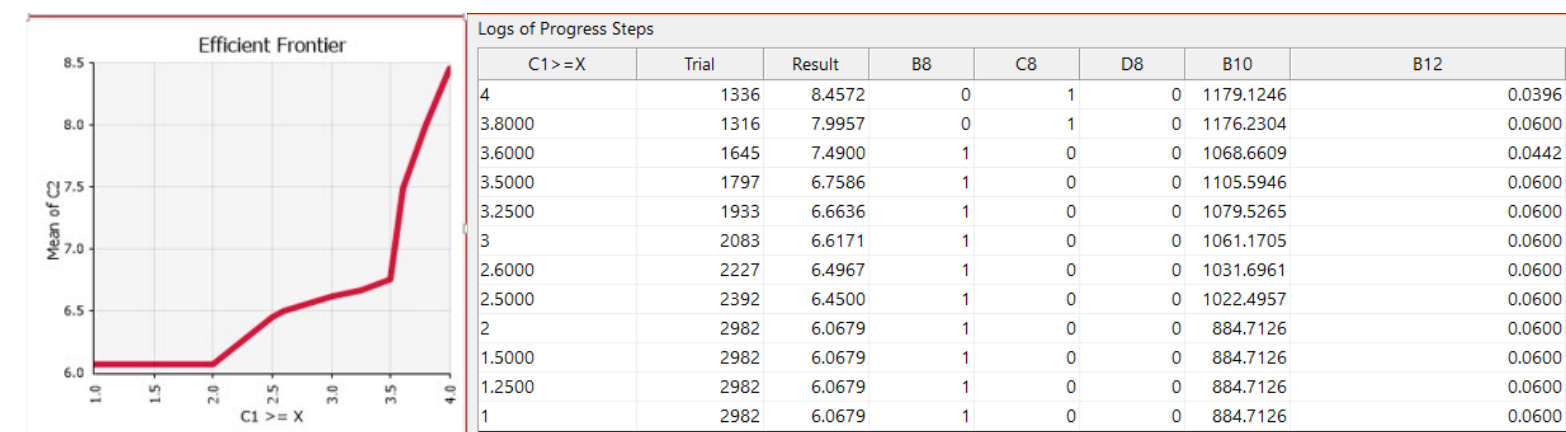


תרשים 36 – חזית יעילות עבור התפלגות נורמלית של טווח גבהי השכבה

דומה למסקנה של שינוי התפלגויות החסמים של מהירות הסריקה.

פיזור אחיד: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 1,1 עבור גובה מינימלי שנע בין 0.02 ל-0.04 מ"מ וגובה מקסימלי שנע בין 0.05 ל-0.07.

להלן התוצאות:

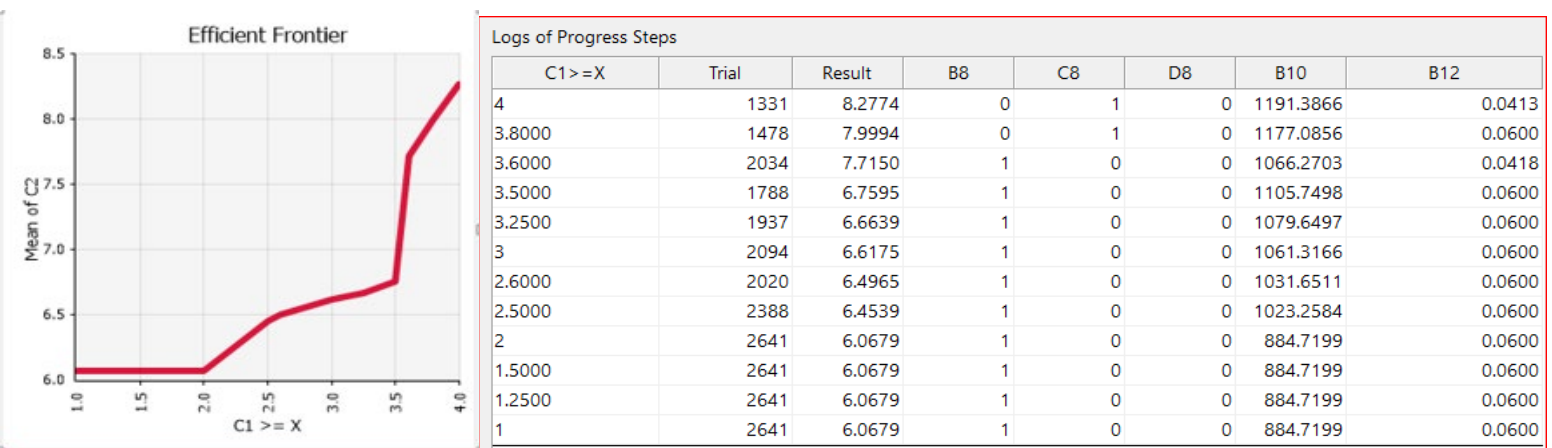


תרשים 37 – חזית יעילות עבור התפלגות אחידה של טווח גבהי השכבה

דומה למסקנה הקודמת, אם כי הזמן הכולל עבור ציון חספוס 4, גדול יותר.

פיזור קיצוני: שימוש בהתפלגות ביתא עם פרמטרים 0.5,0.5 עבור גובה מינימלי שנע בין 0.02 ל-0.04 מ"מ וגובה מקסימלי שנע בין 0.05 ל-0.07.

להלן התוצאות:



תרשים 38 – חזית יעילות עבור התפלגות קיצונית של טווח גבהי השכבה

מסקנה דומה להתפלגות עם פרמטרים 2,2.

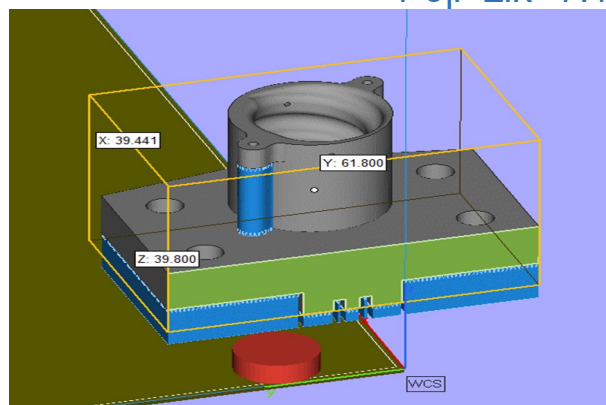
המסקנות הכלליות הן שעבור האובייקט שעליו בוצע הניתוח, אי הוודאות בהקשר לקוטר הלייזר ועוצמתו, כמו גם ערכים קיצוניים שלו הם המשפיעים ביותר על טווח הזמנים המתקבל בחזית היעילות ועל ציון החספוס שהחל ממנו ישנה רגישות גבוהה לכל הטבה בטיב השטח המתבטאת בעליה חדה בזמן הכולל.

7 תיקוף בעזרת פיילוט

פרק הפיילוט מנתח את ביצועי המודל עבור שלושה אובייקטים חדשים שלא כלולים ברשת הנוירונית. הניתוח כולל את השוואת התוצאות שהמודל מספק עבור משתני ההחלטה שבהם האובייקטים הודפסו בפועל אל מול ערכי המדדים שהתקבלו בפועל ובסימולציית המחשב. בנוסף, הפרק מציג את אופן מימוש המודל ב-Lingo ואת חזית היעילות עבור אובייקטי הפיילוט.

הרצת המודל מחייבת את קבלת הנתונים הבאים: נפח האובייקט, נפח התמיכות הנדרשות בכל אוריינטציה, אורכי האובייקט לאורך 3 הצירים בכל אוריינטציה, עוצמת הלייזר המתאימה לאובייקט והקוטר של הלייזר.

7.1 אובייקט 1



איור 3 – אובייקט פיילוט מס' 1

נתונים בפועל

הודפס בשכיבה, מהירות 1200 וגובה שכבה 0.06.

זמן הדפסה בפועל של 25 יחידות: זמן הדפסה של כל האובייקטים כ- 32 שעות.

בידוד של אובייקט אחד:

ראשית נחשב את הזמן של פיזור האבקה שלא תלוי בכמות האובייקטים במנה אלא רק בגובה המקסימלי: הגובה הוא 43.8 מ"מ כ-39.8 מ"מ של האובייקט ועוד כ-4 מ"מ תמיכות. עבור גובה שכבה של 0.06 מ"מ נקבל כ-730 שכבות. פיזור אבקה עבור שכבה אחת נמשך כ-8 שניות לכן סך זמן פיזור השכבות עומד על 1.622 שעות.

נוריד מסך זמן ההדפסה הכולל את משך פיזור האבקה ונקבל 30.378 שעות. נחלק זמן זה בין 25 האובייקטים כדי לקבל את זמן הסריקה של כל אובייקט בנפרד ונקבל 1.215 שעות לסריקה. נוסיף לזמן זה את הזמן של פיזור האבקה ונקבל זמן הדפסת אובייקט יחיד של 2.837 שעות (פיזור אבקה + סריקה).

לפי הסימולציה, זמן הדפסה של כ-5 שעות.

זמן תכן של כחצי שעה.

זמן post process של 25 יחידות עומד על כ-4 שעות (שעתיים הסרת תמיכות + שעתיים עיבוד שבבי). ליחידה- 0.16 שעות – כ-10 דקות.

טיב שטח - תלוי איפה – בחלק המעוגל - מעולה, בחלק התחתון של התמיכות – לא כ"כ טוב.

נתונים מהמודל

הצבה של הערכים שבהם הודפס בפועל האובייקט – אוריינטציה שוכבת, מהירות של 1200 מ"מ לשניה וגובה שכבה של 0.06 מ"מ.

תוצאות ללא כיול:

פונקציית מטרה	
זמן כולל	חספוס
2.154	
זמן תכן	0.24864
זמן הדפסה	3.09589
זמן post	0.26164

טבלה 12 – תוצאות מהמודל ללא כיול עבור אובייקט פיילוט מס' 10

תוצאות עם כיול

כילול חספוס לסולם 1 עד 4	
7.45	ערך הכי גבוה
-0.781	ערך הכי נמוך
2.069738131	ציון טיב שטח
כילול זמן תכן	
1.906	ערך הכי גבוה
-0.924	ערך הכי נמוך
0.414359447	זמן תכן מכויל
post process כילול	
6.606	ערך הכי גבוה
-5.758	ערך הכי נמוך
0.196848414	זמן post process מכויל

טבלה 13 – תוצאות מכוילות מהמודל עבור אובייקט פיילוט מס' 1

ניתן לראות שזמני post process דומים – סביב 10-12 דקות (0.16-0.198). זמני התכן בפועל ולפי המודל נעים סביב 25-30 דקות (0.41-0.5). זמני ההדפסה בסדר גודל דומה של שעות בודדות אך יש הבדל גדול יחסית בין הזמן שהתקבל מהסימולציה – 5 שעות- לזמן הצפוי לפי המודל – 3 שעות. ציון טיב השטח שהתקבל הוא 2 על סקאלה בין 1 ל-4, והדבר תואם את העובדה שהתקבל טיב שטח ירוד יחסית בתחתית האובייקט.

אופטימיזציה בלינגו

הגדרת פרמטרי האובייקט:

```
sets:
    object/1/: object_volume, v, h, p, td, tp, tc, Ra, td_cal, tc_cal, Ra_cal;

    orientation/1 2 3/;
    object_orientation(orientation,object): 0, z_a, x_a, y_a;
    parameters/1 2 3 4 5 6 7/;
    solution/1..16/;
    criteria/1..2/:cr;
    solution_crit(solution,criteria): sol_crit;
    sol_par(solution,parameters): sol_parameter;

end sets

Data:
    object_volume=24232;
    z_a=56.11 43.441 43.8;
    x_a=49.921 39.8 39.441;
    y_a=61.8 61.8 61.6;
    p=266;
    f=0.8;
enddata
```

כאשר x_a, y_a, z_a הם וקטורי אורכי האובייקט לאורך ציר x, y, z בהתאמה, לפי סוג האוריינטציה, p מייצג את עוצמת הלייזר ו- f הוא גודל הקפיצה בערך הסף באילוח על טיב השטח.

בהמשך התוכנית נגדיר תת מודל שבמרכזו נדרש למזער את זמן האספקה עבור אילוף על ערך טיב השטח המינימלי שתלוי ב- f . הריצה על תת המודל חוזרת על עצמה כאשר בכל ריצה f גדל בערך מסויים, כלומר בכל ריצה נדרש למצוא מינימום זמן אספקה בתנאי שפני השטח יהיו חלקים יותר (או לכל הפחות לא גרועים יותר מהריצה הקודמת).

```
submodel efficient_front:
min=td_cal(1)+tp(1)+tc_cal(1);
Ra_cal(1)>f;

tp(1)=1/(v(1)*h(1)*0.08)*(object_volume(1)+O(1,1)*2337+O(2,1)*8223+O(3,1)*6326)/3600 +8/3600*(O(1,1)*z_a(1,1)+O(2,1)*z_a(2,1)+O(3,1)*z_a(3,1))/h(1);

@for(orientation(k):@bin(o(k,1)));

O(1,1)+O(2,1)+O(3,1)=1;

(O(1,1)*x_a(1,1)+O(2,1)*x_a(2,1)+O(3,1)*x_a(3,1))<=200;
(O(1,1)*y_a(1,1)+O(2,1)*y_a(2,1)+O(3,1)*y_a(3,1))<=200;
(O(1,1)*z_a(1,1)+O(2,1)*z_a(2,1)+O(3,1)*z_a(3,1))<=400;
{
v(1)>=500;
v(1)<=1200;
h(1)>=0.03;
h(1)<=0.06;

td(1)=0.587742187577933 + 1.19988039797718 *
@Tanh(
0.5 * ((-46.2731404940786)
-O(1,1)*2.61297704368347
-O(2,1)*6.28097798813535
-O(3,1)*((-2.61297704368347) + (-6.28097798813535))
-0.000008570635281531 *object_volume(1) + 0.0171492355295428 *v(1) + 0.115704191180346 *p(1) + 0.0136183760265197 *h(1))
) + 0.92965275153762 * @Tanh(
0.5 * ((-7.09262172556369)
+O(1,1)*0.13481244449648
+O(2,1)*8.24972363273465
-O(3,1)*(0.13481244449648 + 8.24972363273465)
-0.0000081143480951409 *object_volume(1) + 0.0127925162391357*v(1) + 0.00881484933377671 *p(1) -104.932309364425 *h(1))
) + 0.61389827259967 * @Tanh(
0.5 * (40.2395852359506
+O(1,1)*1.17416926271473
+O(2,1)*0.28343606308238
-O(3,1)*(1.17416926271473 + 0.28343606308238)
+ 0.00011263462590932 *object_volume(1) -0.034462954917106 *v(1) -0.101706823642161 *p(1) + 281.467516333282 *h(1))
)

td_cal(1)=1*(td(1)-(-0.924))/(1.906-(-0.924));

Ra(1)=3.39672482982828 + 1.83128450778475 *
@Tanh(
0.5 * ((-12.930877325312) + 1.72718299685478 *td_cal(1)
-O(1,1)*0.663741976276295
-O(2,1)*1.57647249952583
-O(3,1)*((-0.663741976276295) + (-1.57647249952583))
+ 0.0000013102141822719 *object_volume(1) + 0.0112647459291987*v(1) + 0.0183881927299335 *p(1) -88.8933999096528 *h(1))
) -3.70249674321046 * @Tanh(
0.5 * ((-2.0668988374401) + 1.69505460704179 *td_cal(1)
-O(1,1)*0.00557420917382805
-O(2,1)*1.13578215955483
-O(3,1)*((-0.00557420917382805) + (-1.13578215955483))
-0.0000574312210991677 *object_volume(1) + 0.00571082834601422*v(1) + 0.00801957244866501 *p(1) -66.2130922616914 *h(1))
) -3.59396729852524 * @Tanh(
0.5 * ((-3.57447484215349) + 1.39692369161833 *td_cal(1)
-O(1,1)*0.281251042509843
-O(2,1)*0.357499140060259
-O(3,1)*((-0.281251042509843) + (-0.357499140060259))
+ 0.0000533028173220297 *object_volume(1) + 0.000344013671797698 *v(1) + 0.00277465524023591 *p(1) -6.49353484635804 *h(1))

Ra_cal(1)=1+3*(Ra(1)-(-0.643))/(7.45-(-0.643));

tc(1)=0.463006821893106 + 4.2518410919931 *@Tanh(
0.5 * ((-2.26807458730899) -0.023281958929414 *td_cal(1)
+O(1,1)*4.3828905765068
-O(2,1)*4.56398094032229
-O(3,1)*(4.3828905765068 + (-4.56398094032229))
+ 0.000332730795997377 *object_volume(1) + 0.00914883773932156*v(1) + 0.0210542143813408 *p(1) + 30.6057424591073 *h(1)
-7.76652673222902 *Ra_cal(1))
) + 0.953377173688829 * @Tanh(
0.5 * (10.7091201046443 + 2.22150856550781 *td_cal(1)
+O(1,1)*0.882110483515168
+O(2,1)*0.648184694964362
-O(3,1)*(0.882110483515168 + 0.648184694964362)
+ 0.0000062363943963168 *object_volume(1) -0.00243043604398776 *v(1) -0.00378679282175237 *p(1) -4.54142383658083 *h(1)
-2.7619011786434 *Ra_cal(1))
) -4.66572445007879 * @Tanh(
0.5 * (8.52777790960608 + 1.50189191993906 *td_cal(1)
+O(1,1)*3.49887387453554
-O(2,1)*3.22928647641813
-O(3,1)*(3.49887387453554 + (-3.22928647641813))
+ 0.000137601572567658 *object_volume(1) + 0.0098507785929258*v(1) + 0.0186779582945122 *p(1) -167.707196085646 *h(1)
-6.6753483907535 *Ra_cal(1));
tc_cal(1)=0.24*(tc(1)-(-0.893))/(6.622-(-0.893))+0.08;
@free(td(1));
@free(Ra(1));
@free(tc(1));
@free(td_cal(1));

endsubmodel
```

תחת תבנית cal מזמנים את תת המודל ומריצים אותו בכל פעם עם ערך f שגדול יותר מהריצה הקודמת. לאחר כל ריצה, שומרים את ערכי פרמטרי ההחלטה, שהביאו למינימום זמן

תחת אילוץ טיב השטח, במטריצה ולבסוף מדפיסים את כל הערכים הנ"ל ע"י פונקציית
@write(@format())

```
calc:
@for(solution(s):
f=f+0.2;
@solve(efficient front);
sol_crit(s,1)=td_cal(1)+tp(1)+tc_cal(1);
sol_crit(s,2)=Ra_cal(1);
sol_parameter(s,1)=td_cal(1);
sol_parameter(s,2)=tc_cal(1);
sol_parameter(s,3)=tp(1);
sol_parameter(s,4)=0(1,1);
sol_parameter(s,5)=0(2,1);
sol_parameter(s,6)=0(3,1);
sol_parameter(s,7)=v(1);
sol_parameter(s,8)=h(1);
);
@WRITE('      num_sol      total time      roughness', @NEWLINE(1));
d=1;
@WRITE(@FORMAT( s,'4.0f'),' ');
@FOR( solution(sol):
@WRITE(@FORMAT( d,'14.5g'));
@for(criteria(c):
@WRITE( @FORMAT(sol_crit(sol,c) , '14.5g'));
@WRITE( @NEWLINE(1));
d=d+1);
d=1;
@WRITE( @NEWLINE(1));
@WRITE('      num_sol      design time      post process      print time      incline      stand      recline      speed      layer height      ', @NEWLINE(1));
@FOR( solution(sol):
@WRITE(@FORMAT( d,'14.5g'));
@for(parameters(par):
@WRITE( @FORMAT(sol_parameter(sol,par) , '14.5g')));

@WRITE( @NEWLINE(1));
d=d+1;
endcalc
```

פלט: בטבלה העליונה נתונים ציוני טיב השטח והזמנים הכוללים עבור כל פתרון, ז"א עבור כל ערך f ובטבלה התחתונה מוצגים ערכי משתני ההחלטה שמביאים לערכי המדדים הנ"ל, עבור כל פתרון.

פתרונות שמתקבלים ללא כיול:

num_sol	total time	roughness							
1	2.5964	3.3355							
2	2.5964	3.3355							
3	2.5964	3.3355							
4	2.5964	3.3355							
5	2.5964	3.3355							
6	2.5964	3.3355							
7	2.5964	3.3355							
8	2.5964	3.3355							
9	2.5964	3.3355							
10	2.5964	3.3355							
11	2.5964	3.3355							
12	2.5964	3.3355							
13	2.8062	3.4							
14	3.0751	5.4387							
15	3.0751	5.4387							
16	3.0751	5.4387							

num_sol	design time	post process	print time	incline	stand	recline	speed	layer height	energy
1	-0.4822	-4.5573	7.6358	1	0	0	883.78	0.03	125.41
2	-0.4822	-4.5573	7.6358	1	0	0	883.78	0.03	125.41
3	-0.4822	-4.5573	7.6358	1	0	0	883.78	0.03	125.41
4	-0.4822	-4.5573	7.6358	1	0	0	883.78	0.03	125.41
5	-0.4822	-4.5573	7.6358	1	0	0	883.78	0.03	125.41
6	-0.4822	-4.5573	7.6358	1	0	0	883.78	0.03	125.41
7	-0.4822	-4.5573	7.6358	1	0	0	883.78	0.03	125.41
8	-0.4822	-4.5573	7.6358	1	0	0	883.78	0.03	125.41
9	-0.4822	-4.5573	7.6358	1	0	0	883.78	0.03	125.41
10	-0.4822	-4.5573	7.6358	1	0	0	883.78	0.03	125.41
11	-0.4822	-4.5573	7.6358	1	0	0	883.78	0.03	125.41
12	-0.4822	-4.5573	7.6358	1	0	0	883.78	0.03	125.41
13	-0.49871	-4.3442	7.6491	1	0	0	880.41	0.03	125.89
14	-0.16967	-0.075734	3.3205	0	1	0	1097.3	0.06	50.502
15	-0.16967	-0.075734	3.3205	0	1	0	1097.3	0.06	50.502
16	-0.16967	-0.075734	3.3205	0	1	0	1097.3	0.06	50.502

ניתן לראות בטבלה התחתונה שזמני התכן ו-post process הם שליליים, לכן נדרש לכייל אותם.

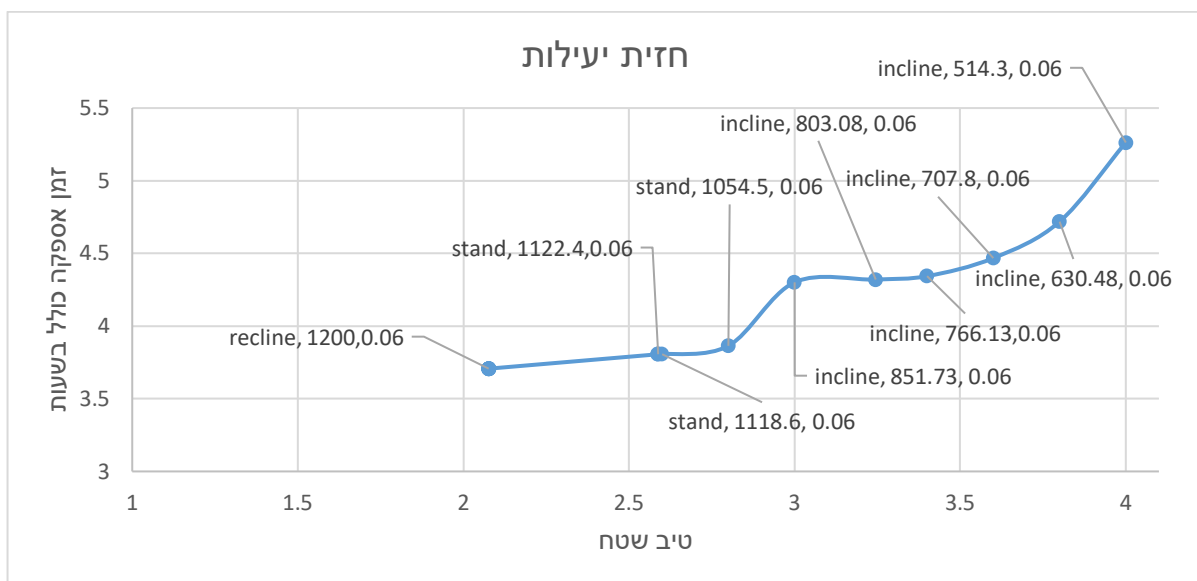
פתרונות שמתקבלים עם כיול:

num_sol	total time	roughness
1	3.707	2.0763
2	3.707	2.0763
3	3.707	2.0763
4	3.707	2.0763
5	3.707	2.0763
6	3.707	2.0763
7	3.8062	2.588
8	3.8062	2.588
9	3.8064	2.6
10	3.8642	2.8
11	4.3012	3
12	4.3202	3.2449
13	4.3437	3.4
14	4.4678	3.6
15	4.7186	3.8
16	5.2631	4

num_sol	design time	post process	print time	incline	stand	recline	speed	layer height	energy
1	0.41436	0.19673	3.0959	0	0	1	1200	0.06	46.181
2	0.41436	0.19673	3.0959	0	0	1	1200	0.06	46.181
3	0.41436	0.19673	3.0959	0	0	1	1200	0.06	46.181
4	0.41436	0.19673	3.0959	0	0	1	1200	0.06	46.181
5	0.41436	0.19673	3.0959	0	0	1	1200	0.06	46.181
6	0.41436	0.19673	3.0959	0	0	1	1200	0.06	46.181
7	0.28484	0.2391	3.2823	0	1	0	1122.4	0.06	49.374
8	0.28484	0.2391	3.2823	0	1	0	1122.4	0.06	49.374
9	0.28149	0.237	3.2879	0	1	0	1118.6	0.06	49.539
10	0.25799	0.21627	3.39	0	1	0	1054.5	0.06	52.551
11	0.10024	0.31761	3.8834	1	0	0	851.73	0.06	65.064
12	0.054977	0.27254	3.9927	1	0	0	803.08	0.06	69.005
13	0.033853	0.22476	4.0851	1	0	0	766.13	0.06	72.333
14	0.015147	0.20224	4.2505	1	0	0	707.8	0.06	78.294
15	0.0046288	0.19707	4.5169	1	0	0	630.48	0.06	87.896
16	-5.9294e-005	0.1954	5.0678	1	0	0	514.3	0.06	107.75

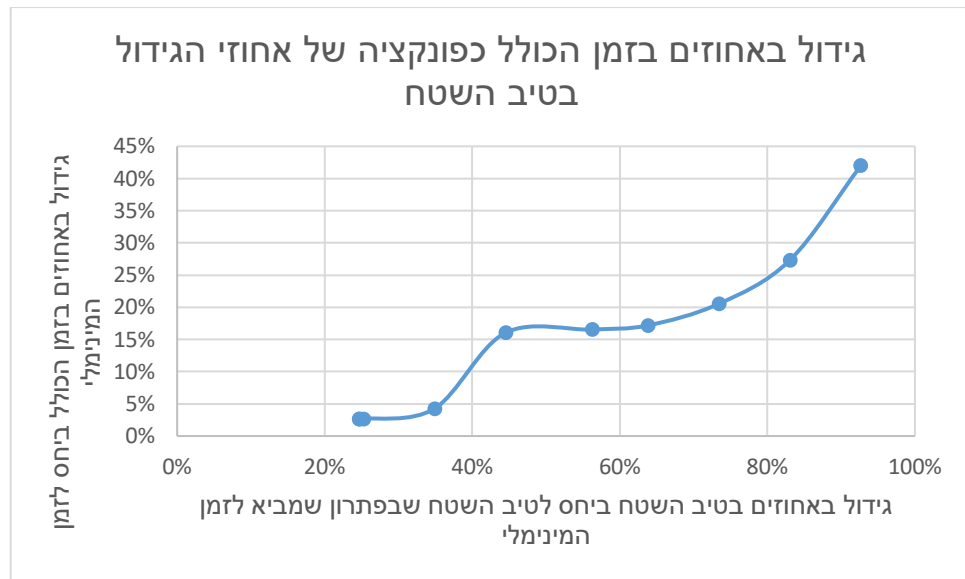
נבחר שמתקבל זמן תכן שלילי שקרוב מאוד ל-0 עבור פתרון מס' 16, כתוצאה מעיגול של ערכי max ו-min.

כל נקודה בחזית היעילות מלווה בתווית עם ערכי משתני ההחלטה באופן הבא: (orientation, speed, layer height).

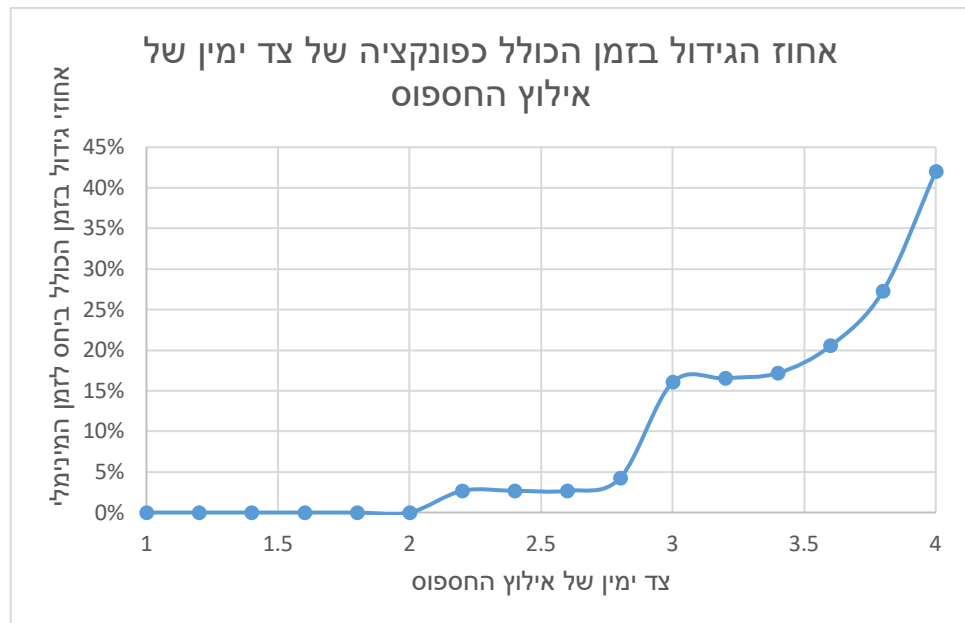


תרשים 39 – חזית יעילות עבור אובייקט פיילוט מס' 1

ניתן לראות שככל שטיב השטח גדל, זמן ההדפסה גדל גם הוא. העלייה העיקרית בזמנים נרשמת עבור ציוני טיב שטח גבוהים, החל מ-3.4.



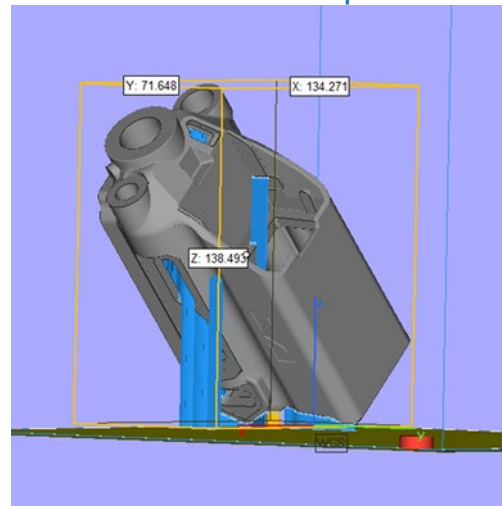
תרשים 40 – גידול באחוזים בזמן הכולל כפונקציה של הגידול באחוזים בטיב שטח עבור אובייקט פיילוט מס' 1



תרשים 41 – אחוז הגידול בזמן הכולל כפונקציה של צד ימין של אילוף החספוס עבור אובייקט פיילוט מס' 1

שני הגרפים מראים שעד ציון טיב שטח 3.6, פונקציית הגידול בזמן היא פונקציית מדרגה, כלומר עליה בזמן עם עליה בטיב השטח שלאחריה הזמן מתקבע ואז שוב עליה בזמן שלאחריה הזמן שוב מתקבע והחל מטיב שטח 3.6 הפונקציה כמעט אקספוננציאלית והגידול בזמן האספקה נעשה משמעותי מאוד.

7.2 אובייקט 2



איור 4 – אובייקט פיילוט מס' 2

נתונים בפועל

הודפס בעמידה, מהירות 1200 וגובה שכבה 0.06.

זמן הדפסה בפועל של 9 יחידות: זמן הדפסה של כל האובייקטים - 48 שעות.

בידוד של אובייקט אחד:

ראשית נחשב את הזמן של פיזור האבקה שלא תלוי בכמות האובייקטים במנה אלא רק בגובה המקסימלי: הגובה הוא 142.49 מ"מ כ-138.49 מ"מ של האובייקט ועוד כ-4 מ"מ תמיכות. עבור גובה שכבה של 0.06 מ"מ נקבל כ-2374 שכבות. פיזור אבקה עבור שכבה אחת נמשך כ-8 שניות לכן סך זמן פיזור השכבות עומד על 5.277 שעות.

נוריד מסך זמן ההדפסה הכולל את משך פיזור האבקה ונקבל 42.722 שעות. נחלק זמן זה בין 9 האובייקטים כדי לקבל את זמן הסריקה של כל אובייקט בנפרד ונקבל 4.747 שעות לסריקה. נוסיף לזמן זה את הזמן של פיזור האבקה ונקבל זמן הדפסת אובייקט יחיד של 10.024 שעות (פיזור אבקה + סריקה).

לפי הסימולציה, זמן הדפסה של כ-10 שעות וחצי.

זמן תכן כחצי שעה עבור כל אוריינטציה כאשר נשקלו שתי אוריינטציות – שכיבה ועמידה.

זמן post process של 9 יחידות עומד על כ-7 שעות (3 שעות הסרת תמיכות + 4 שעות עיבוד שבבי). ליחידה - 0.778 שעות – כ-47 דקות.

טיב שטח מצויין.

נתונים מהמודל

הצבה של הערכים שבהם הודפס בפועל האובייקט – אוריינטציה עומדת, מהירות של 1200 מ"מ לשניה וגובה שכבה של 0.06 מ"מ.

תוצאות ללא כיוול:

פונקציית מטרה	
זמן כולל	2.28805
חספוס	
זמן תכן	0.35002
זמן הדפסה	11.5665
זמן post	4.98595

טבלה 14 – תוצאות מהמודל ללא כיול עבור אובייקט פיילוט מס' 2

תוצאות עם כיול:

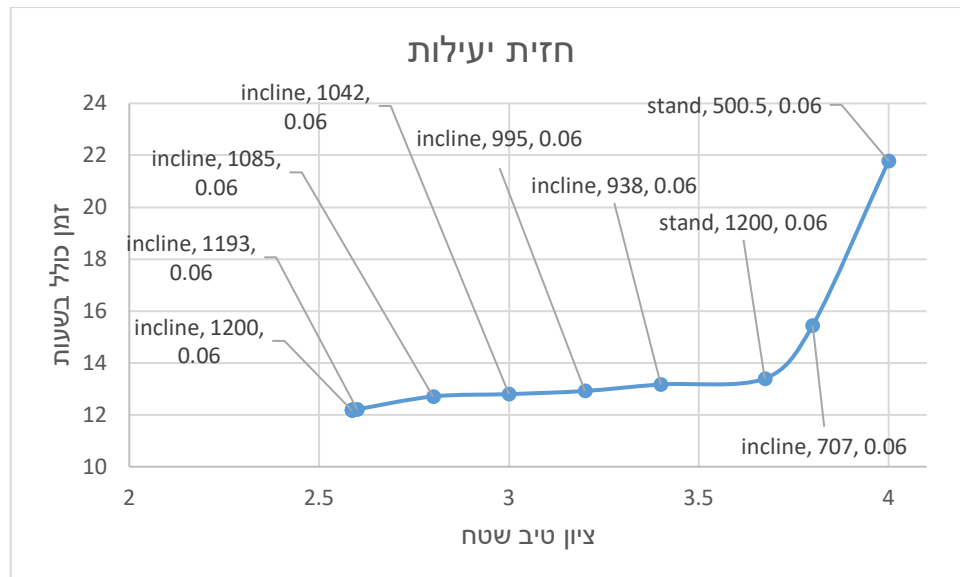
כיול חספוס לסולם 1 עד 4	
2.768	ערך הכי גבוה
-1.642	ערך הכי נמוך
3.673504231	ציון טיב שטח
כיול זמן תכן	
1.519	ערך הכי גבוה
-1.293	ערך הכי נמוך
1.084289165	זמן תכן מכויל
כיול post process	
9.692	ערך הכי גבוה
0.144	ערך הכי נמוך
0.753558491	זמן post process מכויל

טבלה 15 – תוצאות מכוילות מהמודל עבור אובייקט פיילוט מס' 2

אופטימיזציה בלינגו

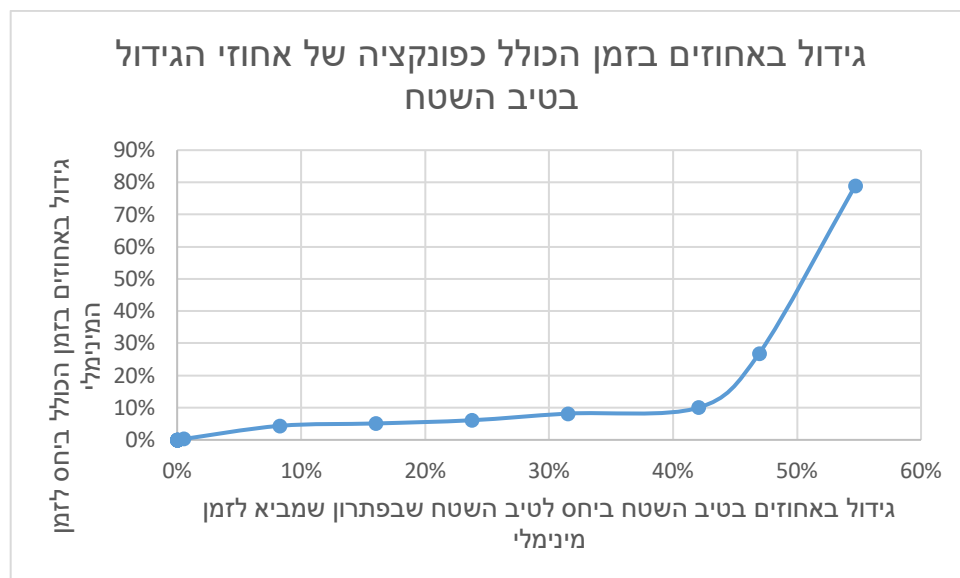
total time	roughness							
0	12.176	2.5859						
12.176	2.5859							
12.176	2.5859							
12.176	2.5859							
12.176	2.5859							
12.176	2.5859							
12.176	2.5859							
12.21	2.6							
12.707	2.8							
12.797	3							
12.918	3.2							
13.17	3.4							
13.397	3.6737							
15.449	3.8							
21.784	4							
design time	post process	print time	incline	stand	recline	spped	layer height	energy
1.1609	0.52899	10.486	1	0	0	1200	0.06	46.181
1.1609	0.52899	10.486	1	0	0	1200	0.06	46.181
1.1609	0.52899	10.486	1	0	0	1200	0.06	46.181
1.1609	0.52899	10.486	1	0	0	1200	0.06	46.181
1.1609	0.52899	10.486	1	0	0	1200	0.06	46.181
1.1609	0.52899	10.486	1	0	0	1200	0.06	46.181
1.1609	0.52899	10.486	1	0	0	1200	0.06	46.181
1.1609	0.52899	10.486	1	0	0	1200	0.06	46.181
1.1609	0.52899	10.486	1	0	0	1200	0.06	46.181
1.1645	0.52894	10.516	1	0	0	1193	0.06	46.452
1.1428	0.52755	11.037	1	0	0	1085.2	0.06	51.065
0.99869	0.52237	11.276	1	0	0	1042	0.06	53.185
0.84844	0.513	11.556	1	0	0	995.4	0.06	55.673
0.72721	0.502	11.94	1	0	0	938.02	0.06	59.078
1.0841	0.74701	11.566	0	1	0	1200	0.06	46.181
0.63175	0.70482	14.112	1	0	0	707.44	0.06	78.334
0.67358	0.75558	20.355	0	1	0	500.51	0.06	110.72

ניתן לראות שזמני post process דומים – סביב שלושת רבעי שעה (0.75-0.78). זמן התכן שהתקבל מהמודל עומד על כשעה בעוד שבפועל התיכון של כל אוריינטציה עומד על כחצי שעה (ונבדקו שתי אוריינטציות). זמני ההדפסה דומים גם הם עד כדי הפרש של בין שעה לשעה וחצי (מתוך 10-11 שעות). ציון טיב השטח שהתקבל הוא 3.67 על סקאלה בין 1 ל-4, כלומר ציון של כ-90 והדבר תואם את העובדה שאכן התקבל טיב שטח מצויין.

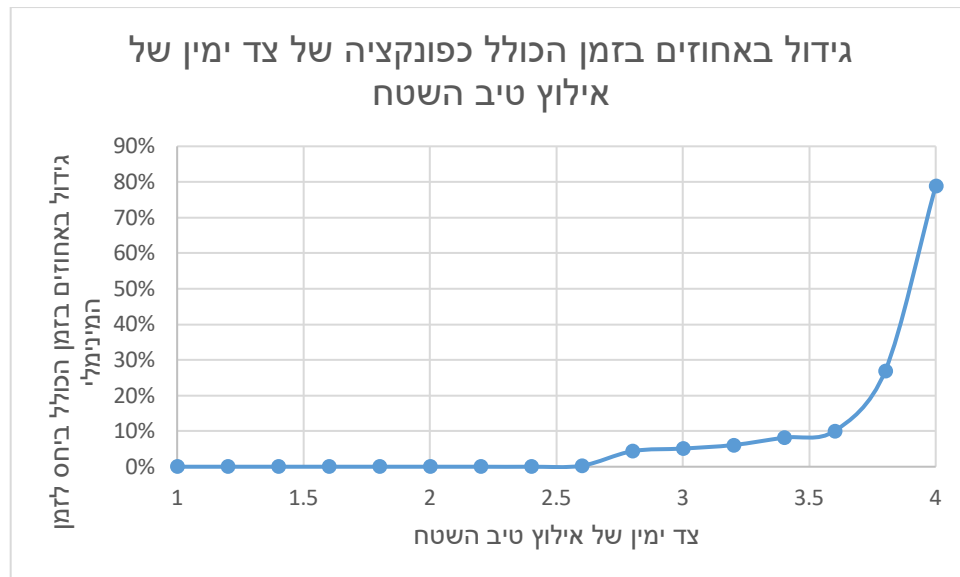


תרשים 42 – חזית יעילות עבור אובייקט פיילוט מס' 2

ניתן לראות שעד טיב שטח 3.67, אין עליה משמעותית בזמן הכולל, אך במעבר מטיב שטח 3.67 ל-4, השיפוע של חזית היעילות גדל משמעותית, כלומר המחיר שנדרש לשלם בדמות עליה בזמן הכולל תמורת שיפור טיב השטח הוא גבוה.



תרשים 43 – גידול באחוזים בזמן הכולל כפונקציה של אחוזי הגידול בטיב השטח עבור אובייקט פיילוט מס' 2



תרשים 44 – גידול באחוזים בזמן הכולל כפונקציה של צד ימין של אילוף טיב השטח עבור אובייקט פיילוט מס' 2

משני הגרפים ניתן לראות שעד ציון טיב שטח של 3.8 ישנה עליה מתונה מאוד בגידול בזמני האספקה ואילו החל מציון טיב שטח של 3.8 ישנו גידול משמעותי באחוזים בזמן הכולל.

דיון בנוגע להבדלים בין זמני ההדפסה במודל לזמני הסימולציה

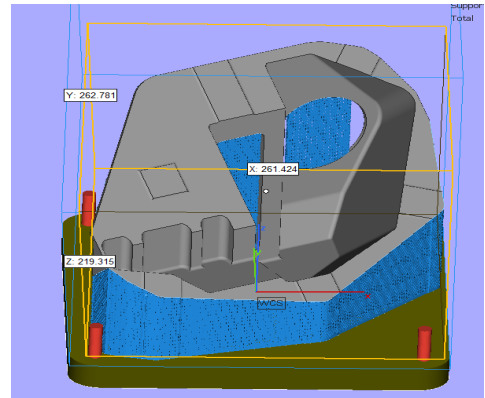
ההבדלים עשויים לנבוע מהעובדה שהסימולציה בונה את האובייקט שכבה על גבי שכבה, בהתאם לשטחי החתך, ומחשבת את זמן הסריקה (שכלול בזמן ההדפסה) עבור כל שכבה. נוסחת זמן ההדפסה שנעשה בה שימוש במודל, לעומת זאת, לא מפרקת את האובייקט לשכבות אלא מתייחסת לכל האובייקט כמקשה אחת ועל בסיס הנפח הכולל שלו מחושב זמן הסריקה. אם ניזכר בדרך הנוספת שבה הצגנו את נוסחת ההדפסה בפרק המידול הראשוני (פרק 4.2), נשים לב שגם הנוסחה הנ"ל מתייחסת לכל גובה שכבה בנפרד אך בשל שיקולים פרקטיים של היעדר נתוני וקטורי שטח פנים לשכבה ותהליך אופטימיזציה מסובך, בחרנו לבסוף להשתמש בנוסחה מהספרות, למרות החיסרון שלה בתיאור לא מדויק של אופן החישוב. נוסף לכך, בשל העובדה שחישוב זה אינו פר שכבה אלא פר נפח כולל, נדרשנו לבצע התאמות כדי שהיחידות שיתקבלו מהנוסחה יהיו יחידות של זמן. ההתאמות כללו הכפלה של מהירות הסריקה בגובה השכבה ובקוטר הלייזר כדי ליצור זמן הדפסה ליחידת נפח. ייתכן והתאמות כפוינות אילו עיוותו במעט את התוצאות.

נציין גם שהרשת, המושתתת על מסד נתונים קטן בהשוואה למה שנהוג, לא נבנתה על בסיס קבוצות מוצרים אלא כללה סוגי מוצרים שמאפייניהם שונים מאוד אחד מהשני כך שהמודל כשלעצמו לא ברמת הדיוק המירבית שלו. יתרה מזאת, שני האובייקטים הנ"ל לא ממש משתייכים לקבוצות המוצרים שהוכנסו לרשת, שחלק גדול מהם היו שתלים, בעלי מאפיינים ייחודיים וזוהי עובדה שעשויה להסביר אי דיוקים בתוצאות שהתקבלו מהרשת – טיב שטח, זמני תכן ו-post process. תוצאות אילו מדגימות את הצורך בביצוע קלסיפיקציה של מוצרים אך כעת נראה את ההכרח בעריכת סיווג שכזה, באופן מובהק, באמצעות האובייקט הבא.

7.3 אובייקט 3

ממחיש באופן מובהק יותר את הצורך בביצוע קלסיפיקציה של משפחות מוצרים:

נתמקד בציון טיב השטח



איור 5 – אובייקט פיילוט מס' 3

נתונים בפועל

טיב שטח שהתקבל היא גרוע.

נתונים מהמודל

תוצאות מהמודל (זמנים בשעות) עבור הדפסה בעמידה, מהירות 1200 וגובה שכבה 0.06:

פונקציית מטרה	
זמן כולל	5.29093
חספוס	
זמן תכן	-0.50655
זמן הדפסה	34.8272
זמן post	0.99504

טבלה 16 – תוצאות מהמודל ללא כיוול עבור אובייקט פיילוט מס' 3

כיוול חספוס לסולם 1 עד 4	
5.336	ערך הכי גבוה
1.69	ערך הכי נמוך
3.962912075	ציון טיב שטח
כיוול זמן תכן	
1.472	ערך הכי גבוה
-0.927	ערך הכי נמוך
3.051555722	זמן תכן מכויל
כיוול post process	
1.002	ערך הכי גבוה
0.968	ערך הכי נמוך
22.56699494	זמן post process מכויל

טבלה 17 – תוצאות מכוילות מהמודל עבור אובייקט פיילוט מס' 3

דיון בנוגע לפער הגדול בין טיב השטח שהתקבל בפועל לניבוי של המודל

ראשית, האובייקט הנ"ל חריג בגודלו ביחס לאובייקטים אחרים, בפרט אילו שנתונים הוכנסו לרשת הניורונים. גודלו, כמו גם מורכבותו של האובייקט חייבו זמן תכן ארוך מאוד ביחס לזמני התכן של האובייקטים שהוכנסו לרשת הניורונים ויותר מזה, מבין האובייקטים שהוכנסו לרשת, עבור אובייקטים שזמני התכן שלהם ארוכים יחסית לאחרים, טיב השטח היה טוב כך שלמעשה הרשת יצרה קשר כך שעבור זמני תכן ארוכים יחסית- טיב השטח יהיה מעולה ואכן, אם

מקטינים את זמני התכן, טיב השטח של האובייקט קטן. המסקנה היא שברשת אין ייצוג לאובייקטים בעלי זמני תכן גדולים מאוד, בעיקר כאלה שעבורם טיב השטח המתקבל הוא לא טוב למרות זמן התכן הארוך שהושקע בהם. עם זאת, הכנסה של האובייקט החריג הנ"ל לרשת הנירונים הנוכחית, עלולה לעוות את תוצאות הניבוי עבור האובייקטים האחרים, שכפי שנוכחנו לדעת מהממצאים הסטטיסטיים בתרשים 17, טובים מאוד. מסיבה זו, נדרש לייצר קבוצות של מוצרים דומים ועבור כל קבוצה לפתח מודל באופן זהה לפיתוח שהוצג. עם קבלת אובייקט חדש, יש לסווגו למשפחת האובייקטים המתאימה ובהתאם למודל הייחודי לה, לבנות את חזית היעילות שלו.

8 בעיה 2 – ייצור סדרת מוצרים שונים, קיבוץ אובייקטים למנות

ראשית נגדיר את הבעיה והפרמטרים הרלוונטיים, נציג תכנות מתמטי אופטימלי לבעיה, נפתח אלגוריתם היוריסטי ואת מימושו בלינגו כדי לקצר זמני ריצה ולבסוף נבחן את ביצועיו בהשוואה לתכנות המתמטי האופטימלי.

8.1 הגדרת הבעיה, הפרמטרים והמודל המתמטי

בבעיה הקודמת טיפלו בבעיה של הדפסת מוצר יחיד. לרוב יש כמה מוצרים מאותו סוג וכמה סוגי מוצרים שיש להדפיס. נשאלת השאלה מה הקומבינציות הכדאיות, אם בכלל.

בעיית קיבוץ (selection) של אובייקטים למנה (עבודה), כאשר משתני ההחלטה הם לאיזו עבודה j לשבץ את מוצר i (X_{ij}), גובה שכבה (h), מהירות סריקה (v) ואוריינטציה (0) ונבדקת השפעתם על מדדי הביצוע הבאים: זמן אספקה (t_s) וחספוס (Ra). המטרה היא לקבץ את המוצרים למנות עבודה, לקבוע את אוריינטציית החלקים, לבחור גובה שכבה ומהירות תנועה כך שזמן האספקה יהיה מינימלי, טיב פני השטח יהיה מיטבי ונצילות שטח המדפסת תהיה מירבית.

קיים טרייד אוף בין המטרות: מצד אחד, ייצור מספר אובייקטים במנה מגדיל את נצילות המכונה ומפחית בצורך לרכוש מכונות נוספות ומקצר את זמן האספקה הממוצע ליח' מוצר, מצד שני השפעתו על ההסתברות של הצלחת ההדפסה (מבחינת מדדי איכות כמו חספוס) אינה ברורה. ייצור מספר אובייקטים במקביל, מצד אחד הופך את ההדפסה למורכבת יותר מבחינת קביעת אוריינטציות של האובייקטים שיעמדו במגבלת השטח והגובה ומצד שני מאפשר לייצר מוצרים בו זמנית במקום בייצור סדרתי ארוך מאוד ומקצר זמנים. יתר על כן, האוריינטציה של המוצרים במנה משפיעה על כמות המוצרים שניתן להדפיס במנת עבודה ועל איכותם, בניגוד לייצור של אובייקט אחד במנה התורם לגמישות רבה מבחינת האוריינטציה האופטימלית שניתן לבחור עבורו. גובה השכבה ומהירות התנועה, במקרה ומדפיסים מספר מוצרים באותה הדפסה, עשויים להיות ערכים שהם לא האופטימליים לכל מוצר בנפרד וכעת, כשמדובר בערכים שמתאימים לכלל המוצרים, ייתכן ותהיה פגיעה באיכות המוצרים המודפסים.

אילוצים:

האובייקט מודפס באוריינטציה אחת בלבד.

התאמת האוריינטציה לממדי מגש ההדפסה וגובה המדפסת.

כל מוצר משובץ בעבודה אחת בלבד.

שיבוץ מנות בסדר אינקרמנטלי החל מעבודה 1, כלומר לא ניתן לשבץ אובייקטים לעבודה $j+1$ אם לא שובצו אובייקטים לעבודה j .

מהירות סריקה וגובה שכבה בהתאם לקיבולת של המדפסת:

מספר המנות הוא לכל היותר כמספר האובייקטים שיש להדפיס.

עדכון סימונים:

X_{ij} – משתנה בינארי שמקבל 1 אם אובייקט i משובץ למנה j ו-0 אחרת, $X_{ij} \in \{0,1\}$
 t_{dij} – זמן תכן של אובייקט i במנה j .

t_{cij} – זמן post process של אובייקט i במנה j .

t_{pj} – זמן הדפסה של מנה j .

t_{dj} – זמן תכן כולל של כל האובייקטים המשובצים במנה j .

t_{cj} – זמן post process כולל של כל האובייקטים המשובצים במנה j .

Ra_{ij} – ציון טיב שטח של אובייקט i במנה j .

J_n – מספר מנות העבודה.

משתני החלטה:

h_j – גובה שכבה של מנה j , $h_j \in [h_0, h_f]$

v_i – מהירות בריקה של אובייקט i , $v_i \in [v_0, v_f]$

O_{ki} – אוריינטציה של אובייקט i , $O_{ki} \in \{O_{1i}, O_{2i}, O_{3i}\}$

האופציה שמבוססת על נוסחה ממאמר:

$$t_{pj} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_j h_j d} * V_j X_{ij} + th * \frac{\max_i \{X_{ij} * (O_{1i} * H_{1i} + O_{2i} * H_{2i} + O_{3i} * H_{3i})\}}{h_j}, \forall j$$

כאשר n הוא מספר האובייקטים שיש להדפיס.

הסבר: זמן הדפסה של מנת ייצור j מורכב מזמני הסריקה של האובייקטים שמשובצים למנה זו, כתלות בנפחם ועוד זמן פיזור האבקה. בחישוב משך זמן פיזור האבקה לוקחים בחשבון את האוריינטציות האפשריות עבור כל אובייקט שמשובץ למנה ומבין כל המוצרים שמשובצים והאוריינטציה שנבחרה עבור כל אובייקט משובץ, בוחרים את הגובה המקסימלי, מחלקים בגובה שכבה של המנה ומקבלים את מספר השכבות שאותו יש לכפול במשך פיזור האבקה לשכבה בודדת.

נעיר שבשל מורכבות הבעיה הנובעת בעיקר מריבוי משתני החלטה שבניהם משתני החלטה בינאריים, המרנו את פונקציית המטרה של מקסום טיב שטח לאילוץ גדול שווה כך שכל אובייקט יידרש לעמוד בסטנדרט טיב שטח משלו (f_i), לפי דרישות הלקוח והפונקציונליות שעל האובייקט לממש.

פונקציית המטרה במודל הנוכחי כוללת זמני תכן של כל עבודה שמחושבים ע"י סכום זמני התכן של האובייקטים הכלולים בה. במידה ויש אובייקטים זחים, זמני התכן שלהם לא בהכרח צריכים להסכם מאחר והתכן של אובייקט מסוים עשוי להיות מתאים לאובייקט זהה לו – במידה ויש מקום על מגש ההדפסה ואין מגבלות אחרות – ולכן זמן התכן ייחסך בעבור האובייקט הנוסף. מסיבה זו, המודל הנ"ל מתאים יותר לאובייקטים שונים זה מזה.

$$t_{dj} = \sum_{i=1}^n X_{ij} * t_{dij}, \forall j$$

$$t_{cj} = \sum_{i=1}^n X_{ij} * t_{cij}, \forall j$$

$$t_j = t_{dj} + t_{pj} + t_{cj}, \forall j$$

$$\min \sum_{j=1}^{J_n} t_j$$

$$Ra_{i,j} \geq f_i, \forall j$$

$$t_{dij} = \alpha_1 + \sum_{l=1}^3 \beta_{1l} * \tanh_{1l}(\gamma_{1l}, \delta_{1l} * O_{1i}, \mu_{1l} * O_{2i}, \rho_{1l} * O_{3i}, \sigma_{1l} * V_i, \tau_{1l} * v_j, \varphi_{1l} * p_j, \omega_{1l} * h_j)$$

$$Ra_{ij} = \alpha_2 + \sum_{l=1}^3 \beta_{2l} * \tanh_{2l}(\gamma_{2l}, \delta_{2l} * O_{1i}, \mu_{2l} * O_{2i}, \rho_{2l} * O_{3i}, \sigma_{2l} * V_i, \tau_{2l} * v_j, \varphi_{2l} * p_j, \omega_{2l} * h_j, \theta_{2l} * t_{dij})$$

$$t_{cij} = \alpha_3 + \sum_{l=1}^3 \beta_{3l} * \tanh_{3l}(\gamma_{3l}, \delta_{3l} * O_{1i}, \mu_{3l} * O_{2i}, \rho_{3l} * O_{3i}, \sigma_{3l} * V_i, \tau_{3l} * v_j, \varphi_{3l} * p_j, \omega_{3l} * h_j, \theta_{3l} * t_{dij})$$

הנוסחאות שפותחו באמצעות ANN עבור אובייקט יחיד משמשות גם במודל זה לתיאור הקשרים האנליטיים בין פרמטרי ההדפסה למדדים השונים, תוך התאמה למשתני ההחלטה ולפרמטרים במודל המורחב:

$$Ra_{ij} = 3.396 + 1.831 * \tanh(0.5 * ((-12.930) + 1.727 * t_{dij} - O_{1i} * 0.663 - O_{2i} * 1.576 - O_{3i} * ((-0.663) + (-1.576))) + 0.000001 * V_object_i + 0.011 * v_i + 0.018 * p_i - 88.893 * h_j) - 3.702 * \tanh(0.5 * ((-2.066) + 1.695 * t_{dij} - O_{1i} * 0.005 - O_{2i} * 1.135 - O_{3i} * ((-0.005) + (-1.135))) - 0.000005 * V_object_i + 0.005 * v_i + 0.008 * p_i - 66.213 * h_j) - 3.593 * \tanh(0.5 * ((-3.574) + 1.396 * t_{dij} - O_{1i} * 0.281 - O_{2i} * 0.357 - O_{3i} * ((-0.281) + (-0.357))) + 0.000005 * V_object_i + 0.0003 * v_i + 0.002 * p_i - 6.493 * h_j)$$

$$t_{dij} = 0.587 + 1.199 * \tanh(0.5 * ((-46.273) - O_{1i} * 2.612 - O_{2i} * 6.280 - O_{3i} * ((-2.612) + (-6.280))) - 0.0000008 * V_object_i + 0.017 * v_i + 0.115 * p_i + 0.013 * h_j) + 0.929 * \tanh(0.5 * ((-7.092) + O_{1i} * 0.134 + O_{2i} * 8.249 - O_{3i} * (0.134 + 8.249) - 0.000008 * V_object_i + 0.012 * v_i + 0.008 * p_i - 104.932 * h_j)) + 0.613 * \tanh(0.5 * (40.239 + O_{1i} * 1.174 + O_{2i} * 0.283 - O_{3i} * (1.174 + 0.283) + 0.0001 * V_object_i - 0.034 * v_i - 0.101 * p_i + 281.467 * h_j)$$

$$t_{cij} = 0.463 + 4.251 * \tanh(0.5 * ((-2.268) - 0.023 * t_{dij} + O_{1i} * 4.382 - O_{2i} * 4.563 - O_{3i} * (4.382 + (-4.563))) + 0.0003 * V_object_i + 0.009 * v_i + 0.021 * p_i + 30.605 * h_j - 7.766 * Ra_{ij}) + 0.953 * \tanh(0.5 * (10.709 + 2.221 * t_{dij} + O_{1i} * 0.882 + O_{2i} * 0.648 - O_{3i} * (0.882 + 0.648) + 0.000006 * V_object_i - 0.002 * v_i - 0.003 * p_i - 4.541 * h_j - 2.761 * Ra_{ij})) - 4.665 * \tanh(0.5 * (8.527 + 1.501 * t_{dij} + O_{1i} * 3.498 - O_{2i} * 3.229 - O_{3i} * (3.498 + (-3.229))) + 0.0001 * V_object_i + 0.009 * v_i + 0.018 * p_i - 167.707 * h_j - 6.6753483907535 * Ra_{ij})$$

$$O_{1i} + O_{2i} + O_{3i} = 1, \forall i$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} * \sum_{k=1}^3 O_{ki} * x_{ki} * y_{ki} \leq X_{printer} * Y_{printer}, \forall j$$

$$X_{ij} * \sum_{k=1}^3 O_{ki} * H_{ki} \leq Z_{printer}, \forall i, j$$

$$\sum_{j=1} X_{ij} = 1, \forall i$$

$$M, \sum_{i=1}^n X_{i(j+1)} \leq M \sum_{i=1}^n X_{ij}, \forall j = 1, 2, \dots, J_n - 1$$

הסבר האילוס: אין אפשרות שבמנה j לא ישובץ אף מוצר ובמנה $j+1$ ישובצו מוצרים, כלומר שאגף שמאל יהיה שווה 0 ואגף ימין יהיה שווה ל-1 או גדול ממנו. אם אגף שמאל גדול מ-1 או שווה לו, כלומר מנה j משובצים אובייקטים, אז בהכרח אגף ימין יהיה שונה מ-0 ובמנה j ישובצו אובייקטים.

$$v_0 \leq v_i \leq v_f, \forall j$$

$$h_0 \leq h_j \leq h_f, \forall j$$

$$J_n \leq n$$

$$O_i \in \{0,1\}, i = 1,2,3$$

$$O_1 \rightarrow \text{משופע}$$

$$O_2 \rightarrow \text{עומד}$$

$$O_3 \rightarrow \text{שוכב}$$

תיקון המודל ע"י כיוולים:

$$Ra_{cal_{ij}} = \frac{Ra_{ij} - Ra_{min_{ij}}}{Ra_{max_{ij}} - Ra_{min_{ij}}} * (Ra_{a_i} - Ra_{b_i}) + Ra_{a_i}, \forall i, j$$

$$t_{d_{cal_{ij}}} = \frac{t_{d_{ij}} - t_{d_{min_{ij}}}}{t_{d_{max_{ij}}} - t_{d_{min_{ij}}}} * (t_{d_{b_i}} - t_{d_{a_i}}) + t_{d_{a_i}}, \forall i, j$$

$$t_{c_{cal_{ij}}} = \frac{t_{c_{ij}} - t_{c_{min_{ij}}}}{t_{c_{max_{ij}}} - t_{c_{min_{ij}}}} * (t_{c_{b_i}} - t_{c_{a_i}}) + t_{c_{a_i}}, \forall i, j$$

ופונקציות המטרה:

$$t_{d_j} = \sum_{i=1}^n X_{ij} * t_{d_{cal_{ij}}}, \forall j$$

$$t_{c_j} = \sum_{i=1}^n X_{ij} * t_{c_{cal_{ij}}}, \forall j$$

$$t_j = t_{d_j} + t_{p_j} + t_{c_j}, \forall j$$

$$\min \sum_{j=1}^{J_n} t_j$$

$$Ra_{cal_{i,j}} \geq f_i, \forall j$$

8.2 מימוש המודל מימוש בלינגו

הגדרת הנתונים:

```
Data:
object_volume=78000 124000 24232;
object_supp=8159 760 2337
          95416 0 8233
          209958 50400 6326;
z_a=143 103 56
      143 105 43
      82 64 43;
x_a= 135 150 50
      130 60 40
      139 105 40;
y_a=72 120 62
      72 120 62
      72 120 62;
td_min=-1.293 -0.927 -0.924;
td_max=1.519 1.472 1.906;
Ra_min=-1.642 0.52 -0.781;
Ra_max=2.768 4.36 7.4;
tc_min=-0.397 -0.32 -5.758;
tc_max=9.692 0.995 6.606;
td_0=0.5 0.5 0;
td_ran=1 1 1;
tc_0=0.5 0 0.08;
tc_ran=0.5 1 0.24;

p=266 266 266;

enddata
```

Object_volume הוא וקטור נפחי האובייקטים, object_supp היא מטריצת התמיכות של כל אובייקט עבור כל אוריינטציה, z_a, x_a, y_a הן מטריצות הגבהים והאורכים של כל אובייקט לאורך הצירים, עבור כל אוריינטציה.

כזכור, זמני התכן, post process וטיב השטח של כל אובייקט, כויילו לפי הנוסחה הבאה:

$$\frac{m-min}{max-min} * (b - a) + a$$

td_min, td_max הם וקטורי זמני התכן המינימליים והמקסימליים של כל אובייקט, tc_min, tc_max הם וקטורי זמני ה-post process המינימליים והמקסימליים של כל אובייקט, Ra_min, Ra_max הם וקטורי טיב השטח המינימליים והמקסימליים של כל אובייקט.

td_0 זהו וקטור ערכי a של זמני התכן עבור כל האובייקטים ו-tc_ran זהו וקטור ערכי b של זמני ה-post process עבור כל האובייקטים, tc_0 זהו וקטור ערכי a של זמני ה-post process עבור כל האובייקטים ו-td_ran זהו וקטור ערכי b של זמני ה-post process עבור כל האובייקטים.

פונקציית מטרה ואילוצים:

```

min=@sum(job(j):t_tot(j));
!@for(job(j):avg_Ra(j)>2);
@for(object(i):@for(job(j):Ra_cal(i,j)>2));

@for(job(j):tp(j)=@sum(object(i):1/(v(i)*h(j)*0.08)*(object_volume(i)+object_supp(1,i)*O(1,i)+object_supp(2,i)*O(2,i)+
Object_supp(3,i)*O(3,i))*x(i,j))/3600+8/3600*@max(object(i):x(i,j)*(O(1,i)*z_a(1,i)+O(2,i)*z_a(2,i)+O(3,i)*z_a(3,i))/h(j)));

@for(job(j):tot_td(j)=@sum(object(i):x(i,j)*td_cal(i,j)));
@for(job(j):tot_tc(j)=@sum(object(i):x(i,j)*tc_cal(i,j)));
@for(job(j):tot_td(j)+tp(j)+tot_tc(j)=t_tot(j));

@for(job(j):avg_Ra(j)=@sum(object(i):x(i,j)*Ra_cal(i,j))/@sum(object(i):x(i,j)));

@for(object(i):O(1,i)+O(2,i)+O(3,i)=1);

@for(job(j):@sum(object(i):x(i,j)*(O(1,i)*x_a(1,i)*y_a(1,i)+O(2,i)*x_a(2,i)*y_a(2,i)+O(3,i)*x_a(3,i)*y_a(3,i)))<=100*100);
@for(job(j):@for(object(i):x(i,j)*(O(1,i)*z_a(1,i)+O(2,i)*z_a(2,i)+O(3,i)*z_a(3,i))<=400));

@for(object(i):@sum(job(j):x(i,j))=1);

@for(job(j)|j #LT# 2:@sum(object(i):x(i,j+1))<=10000*@sum(object(i):x(i,j)));

@for(object(i):v(i)>=500);
@for(object(i):v(i)<=1200);
@for(job(j):h(j)>=0.03);
@for(job(j):h(j)<=0.06);

```

רשת נירונים וכולים:

```

@for(object(i):@for(job(j):td(i,j)=0.587742187577933 + 1.19988039797718 *
@Tanh(
0.5 * ((-46.2731404940706)
-O(1,i)*2.61297704368347
-O(2,i)*6.28097798813535
-O(3,i)*((-2.61297704368347) + (-6.28097798813535))
-0.000008570635281531 *object_volume(i) + 0.0171492355295428 *v(i) + 0.115704191180346 *p(i) + 0.0136183760265197 *h(j))
) + 0.929652752153762 * @Tanh(
0.5 * ((-7.09262172556369)
+O(1,i)*0.13481244449648
+O(2,i)*8.24972363273465
-O(3,i)*(0.13481244449648 + 8.24972363273465)
-0.0000801143480951409 *object_volume(i) + 0.0127925162391357*v(i) + 0.00881484933377671 *p(i) -104.932309364425 *h(j))
) + 0.613898277259967 * @Tanh(
0.5 * (40.2395852359506
+O(1,i)*1.17416926271473
+O(2,i)*0.28343606308238
-O(3,i)*(1.17416926271473 + 0.28343606308238)
+ 0.000112634862590932 *object_volume(i) -0.03446295497106 *v(i) -0.101706823642161 *p(i) + 281.467516333282 *h(j))

@for(object(i):@for(job(j):td_cal(i,j)=td_ran(i)*(td(i,j)-(td_min(i)))/(td_max(i)-(td_min(i)))+td_0(i)));

@for(object(i):@for(job(j):Ra(i,j)=3.39672482982828 + 1.83128450778475 *
@Tanh(
0.5 * ((-12.930877325312) + 1.72718299685478 *td_cal(i,j)
-O(1,i)*0.663741976276295
-O(2,i)*1.57647249952583
-O(3,i)*((-0.663741976276295) + (-1.57647249952583))
+ 0.0000013102141822719 *object_volume(i) + 0.0112647459291987*v(j) + 0.0183881927299335 *p(j) -88.8933999096528 *h(j))
) -3.70249674321046 * @Tanh(
0.5 * ((-2.0660898374401) + 1.69505460704179 *td_cal(i,j)
-O(1,i)*0.00557420917382805
-O(2,i)*1.13578215955483
-O(3,i)*((-0.00557420917382805) + (-1.13578215955483))
-0.0000574312210991677 *object_volume(i) + 0.00571082834601422*v(j) + 0.00801957244866501 *p(j) -66.2130922616914 *h(j))
) -3.59396729852524 * @Tanh(
0.5 * ((-3.57447404215349) + 1.39692369161833 *td_cal(i,j)
-O(1,i)*0.281251042509843
-O(2,i)*0.357499140060259
-O(3,i)*((-0.281251042509843) + (-0.357499140060259))
+ 0.000053302817320297 *object_volume(i) + 0.000344013671797698 *v(j) + 0.00277465524023591 *p(j) -6.49353484635804 *h(j))

@for(object(i):@for(job(j):Ra_cal(i,j)=1+3*(Ra(i,j)-(Ra_min(i)))/(Ra_max(i)-(Ra_min(i)))));

@for(object(i):@for(job(j):tc_cal(i,j)=tc_ran(i)*(tc(i,j)-(tc_min(i)))/(tc_max(i)-(tc_min(i)))+tc_0(i)));

```

8.3 פיתוח אלגוריתם היוריסטי

מימוש המודל בלינגו מחייב שימוש במשתנה בינארי x_{ij} שמקבל 1 אם אובייקט i מודפס במנה j ו-0 אחרת. הוספת משתנה בינארי מרחיבה באופן משמעותי את מספר הקומבינציות הקיימות שנדרש לבדוק ולכן זמן הריצה, במיוחד עבור דוגמאות גדולות הכוללות אובייקטים רבים, צפוי להתארך דרמטית, כפי שנראה בהמשך. אי לכך, נציג אלגוריתם היוריסטי שכולל תכנות מתמטי ללא המשתנה הבינארי הנ"ל וצפוי להפחית את זמני הריצה.

8.3.1 ניסוח האלגוריתם

ראשית נגדיר סימונים שנעשה בהם שימוש במהלך תיאור האלגוריתם:

סימונים וחישובים

N - קבוצה של אובייקטים.

As - קבוצת אובייקטים ששובצו עד כה.

As_j - קבוצת אובייקטים ששובצו לעבודה j עד כה, $A_j \subseteq A$.

R_j - קבוצה של אובייקטים שנדחו מהימצאות בעבודה j בשל היעדר מקום על מגש ההדפסה.

S_j - השטח המנוצל הנוכחי בעבודה j .

$S_{pallaet}$ - שטח מגש ההדפסה.

HG - קבוצת גבהי שכבה אופטימליים שמחושבים ע"י פתרון בעיית אופטימיזציה של הדפסת אובייקט יחיד.

h_i - גובה שכבה אופטימלי של אובייקט i שחושב מפתרון בעיית אופטימיזציה של הדפסת אובייקט יחיד עבור אובייקט i , $h_i \in HG$.

H_{kj} - תת קבוצה של HG שבה כל גבהי השכבה השווים ל- h_k , מבין כל האובייקטים שלא שובצו עד כה - עד העבודה הנוכחית j .

$$k \in N/As, H_{kj} = \{h_k = h_i | i \in N/As\}. H_{kj} \subseteq HG$$

$H_{max,j}$ - תת קבוצה של גבהי שכבה בעלת המספר הגבוה ביותר של אלמנטים עבור עבודה j , $|H_{max,j}| = \max_{k \in N/As} \{|H_{kj}|\}$.

$h_{max,j}$ - גובה השכבה האופטימלי שהוא הנפוץ ביותר מבין האובייקטים שלא שובצו עד כה - עד העבודה הנוכחית j , כלומר שמתקיים $h_k \in H_{max,j}, k \in N/As$.

O_{kij} - הערך הבינארי של אוריינטציה k של אובייקט i עבור מנה j תחת המגבלה $h_{max,j}$ משמש כגובה שכבה וערך סף מינימלי של טיב שטח נדרש עבור אובייקט i .

v_{ij} - הערך של מהירות הסריקה של אובייקט i עבור מנה j תחת המגבלה $h_{max,j}$ משמש כגובה שכבה וערך סף מינימלי של טיב שטח נדרש עבור אובייקט i .

$t_{scan_{i,j}}$ - הזמן הדרוש לסריקת אובייקט i במנה j .

$$t_{scan_{i,j}} = \frac{1}{v_{ij} * h_{max,j} * d} * V_{object} + V_{sup1} * O_{1ij} + V_{sup2} * O_{2ij} + V_{sup3} * O_{3ij}$$

$t_{powder_{ij}}$ - הזמן שנותר לפיזור אבקה לשם הדפסת אובייקט i במנה j ,

$$t_{powder_{ij}} = \max\{0, (H_i - \max_{m \in A_j} \{H_m\})\} * \frac{8}{3600} * \frac{1}{h_{max,j}}$$

עבור כלל החלטה 1:

$$t_{i,j} = t_{scan_{ij}} + t_{powder_{ij}}$$

עבור כלל החלטה 2:

$$t_{i,j} = \sum_{m \in A_j} |H_m - H_i| / |A_j|$$

$P_{min,j}$ - האובייקט בעל ערך $t_{i,j}$ הנמוך ביותר (תלוי בכלל ההחלטה הנבחר) מתוך האובייקטים

$$P_{min,j} = \min_{i \in (N/As)/R_j} t_{i,j}, \text{ שלא שובצו עד כה,}$$

$Area_{P_{min,j}}$ - השטח הנדרש על משטח ההדפסה עבור אובייקט $P_{min,j}$,

$$Area_{P_{min,j}} = O_{1P_{min,j}} * X_{1P_{min,j}} * Y_{1P_{min,j}} + O_{2P_{min,j}} * X_{2P_{min,j}} * Y_{2P_{min,j}} + O_{3P_{min,j}} * X_{3P_{min,j}} * Y_{3P_{min,j}}$$

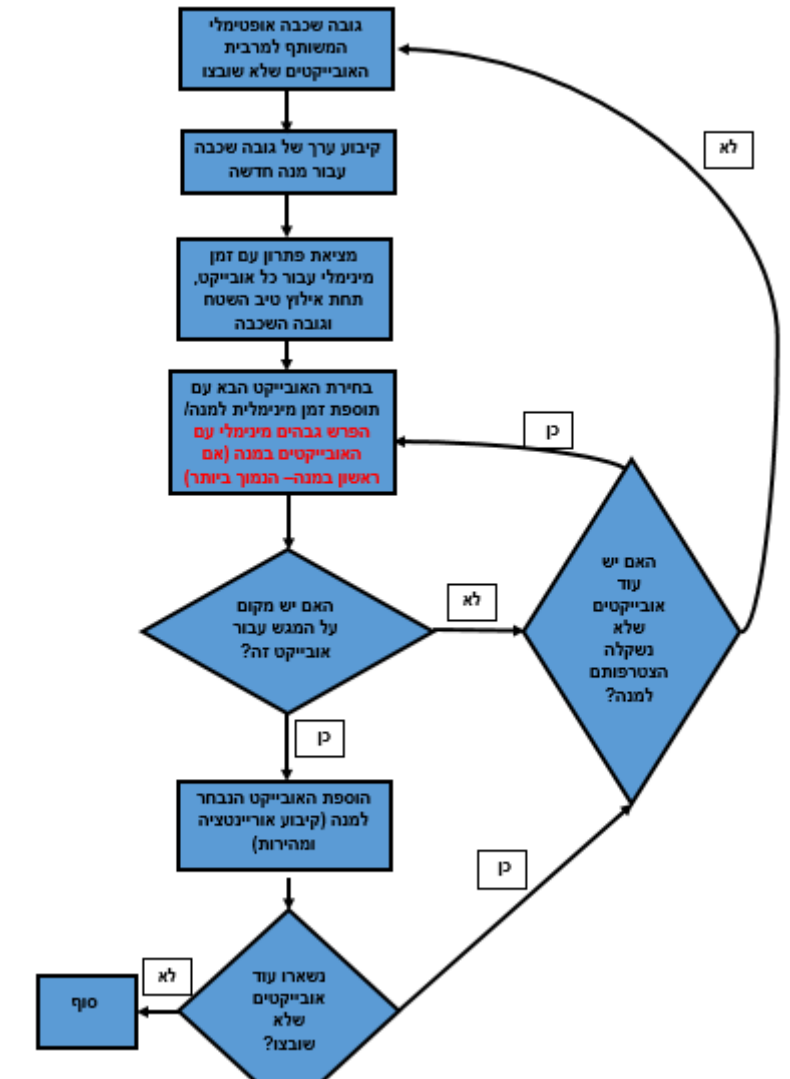
הרציונל מאחורי האלגוריתם: ראשית, נזכיר כי גובה השכבה אינו אינדיווידואלי לכל אובייקט אלא אחיד לכל האובייקטים באותה מנה. מסיבה זו, תחילה יש לקבע את גובה האובייקט למנה הנוכחית. תחילה, נדרש למצוא עבור כל אובייקט את גובה השכבה האופטימלי עבורו "פתרון התכנות המתמטי של בעיית הדפסת אובייקט יחיד, h_i . בהמשך, יש ליצור תתי קבוצות של כל האובייקטים שלהם גובה שכבה אופטימלי זהה, $k \in N/As$, $H_{kj} = \{i \in N/As | h_k = h_i\}$. הקיבוע ייעשה על בסיס גובה השכבה האופטימלי שמשותף למרבית האובייקטים שלא שובצו, $H_{max,j}$ שעבורו $|H_{max,j}| = \max_{k \in N/As} \{|H_{kj}|\}$ כדי למקסם את האופטימליות של האובייקטים המשובצים מבחינת זמן אספקה וטיב שטח. לאחר הקיבוע, יש למצוא את האוריינטציה (O_{kij}) ומהירות הסריקה (v_{ij}) של כל אובייקט, תחת גובה השכבה שנקבע ותחת אילוץ טיב שטח בהתאם לדרישות מכל אובייקט. כך מבטיחים קומבינציה אופטימלית של שלוש משתני ההחלטה הנ"ל, בניגוד למצב שבו היינו מקבעים תחילה את האוריינטציה או המהירות ורק לאחר מכן כופים גובה שכבה אחיד לכולם ואז השילוב ביניהם, לפחות עבור חלק מהאובייקטים, לא היה אופטימלי. עבור כלל החלטה 1: חישוב זמן הסריקה, $t_{scan_{ij}}$ ויתרת זמן פיזור האבקה, $t_{powder_{ij}}$ ובחירת האובייקט עם זמן ההדפסה (זמן סריקה + זמן נותר פיזור אבקה), המינימלי, $P_{min,j}$. הזמן הנותר לפיזור אבקה מחושב בהתאם להפרש הגובה בין האובייקט המועמד לשיבוץ למנה לבין האובייקט בעל הגובה המקסימלי ביותר במנה. חישוב זה נותן ביטוי מסוים להעדפה של שיבוץ אובייקטים בעלי גבהים דומים לאותה מנה, שכן פער גדול בגבהים יוביל ליתרה ארוכה של זמן פיזור אבקה ולצמצום הסיכוי שאובייקט זה ישובץ במנה. עם זאת, זמן הסריקה נותן ביטוי גם לנפח האובייקט ולמתאר שלו ולכן בקבלת ההחלטה על שיבוץ אובייקט משקללים את השפעת נפח האובייקט עם הגובה שלו.

כלל החלטה 2 (אלטרנטיבי): חישוב סכום ההפרשים, בערך מוחלט, בין גובה האובייקט המועמד (באוריינטציה שנבחרה עבורו) לגובה האובייקטים המשובצים למנה הנוכחית, $t_{i,j}$

ובחירת האובייקט בעל סכום הפרשי הגבהים מהאובייקטים ששובצו למנה הנוכחית, הנמוך ביותר, $P_{min,j}$. הרעיון הוא לקבץ אובייקטים בעלי גובה דומה למנה אחת כדי לחסוך בזמן פיזור אבקה, ז"א במקום שהאובייקטים הגבוהים יפוזרו בין המנות ויגרמו להארכת זמני ההדפסה של המנות בשל זמן פיזור האבקה הארוך הנדרש עבורן, כל האובייקטים הגבוהים ירוכזו, עד כמה שניתן, במנה אחת.

לאחר בחירת האובייקט, מוודאים שיש עבורו מקום במנה, אם מתקיים $Area_{P_{min,j}} + S_j \leq S_{pallaet}$, ז"א שנותר מקום עבורו במנה, מצרפים אותו למנה $A_{sj} = A_s \cup P_{min,j}$ ומסווגים אותו כאובייקט ששובץ $A_s = A_s \cup P_{min,j}$ ואם הדבר לא מתקיים, מצרפים את האובייקט לקבוצה של האובייקטים שנדחו מהמנה הנוכחית בשל היעדר מקום $R_j = R_j \cup P_{min,j}$ ומאתרים את האובייקט הבא שזמן ההדפסה שלו הוא המינימלי ביותר. ממשיכים בתהליך עד שכל האובייקטים נסרקים ונבדקת עבורם האפשרות להכניסם למנה, כלומר עד ש- $|R_j| = 0$. $|N| - |A_s|$ ואז ממשיכים למנה הבאה או עד שכל האובייקטים משובצים, כלומר כשמתקיים: $|A_s| = |N|$.

התרשים הבא מתאר באופן סכמתי את האלגוריתם:



תרשים 45 – תיאור סכמתי של האלגוריתם ההיוריסטי לפתרון בעיית קיבוץ אובייקטים למנות

8.3.2 מימוש האלגוריתם

ראשית, יש לפתור את בעיית אובייקט יחיד, כלומר למצוא את האוריינטציה, מהירות הסריקה וגובה השכבה האופטימליים עבור כל אובייקט בנפרד כדי לאתר את גובה השכבה המשותף למרבית האובייקטים. לשם כך, נעשה שימוש בפונקציית $@solve$ שקוראת לתת המודל $optimization$, הכולל את התכנות המתמטי לאובייקט יחיד, ופותרת אותו ופותרת עבור אובייקט m כלשהוא. שמירת את ערכי המשתנים והמדדים המתקבלים מפתרון תת המודל $:sol_obj, (h(1), v(1), O(1,1) \dots)$ במטריצה

```

@for(object(i):
m=i;
@solve(optimization);
layer_height(i)=h(1);
sol_obj1(i,1)=h(1);
sol_obj1(i,2)=v(1);
sol_obj1(i,3)=O(1,1);
sol_obj1(i,4)=O(2,1);
sol_obj1(i,5)=O(3,1);
sol_obj1(i,6)=O(1,1)*z_a(1,m)+O(2,1)*z_a(2,m)+O(3,1)*z_a(3,m);
sol_obj1(i,7)=t_powder(1);
sol_obj1(i,8)=t_scan(1);
sol_obj1(i,9)=td_cal(1);
sol_obj1(i,10)=tc_cal(1);
sol_obj1(i,11)=Ra_cal(1);
sol_obj1(i,12)=0;
);

```

יצירת וקטור ממיון של גבהי שכבה של האובייקטים שעוד לא שובצו - *sort2*. האובייקטים ששובצו - גובה השכבה שלהם יוגדר כ- 100 - כדי "לנטרל" אותם ולהתחיל את ספירת מופעי גבהי השכבה החל ממספרים חיוביים. הגדרת ווקטור נוסף שיספור את מספר המופעים של כל גובה שכבה - *count_layer* - כך שעבור האינדקס של המופע הראשון של גובה שכבה כלשהוא בוקטור *sort2* הוא יציג את מספר המופעים של אותו גובה שכבה. בשלב הבא, נדרש למצוא את האינדקס בוקטור *count_layer* שעבורו מתקבל מספר המופעים הגבוה ביותר - *max_index* - ובאמצעותו לחלץ מוקטור *sort2* את גובה השכבה עצמו.

```

@for(object(i)|assign(i)#EQ#1:
layer_height(i)=-100;
);
sort1=@sort(layer_height);
@for(object(i):
sort2(i)=layer_height(sort1(i));
);
i=1;
@while((sort2(i))#LT#0:
count_layer(i)=1;
i=i+1;
);
d=i;
s=i;
@while (i#LT#@size(object):
@ifc(sort2(i) #EQ# sort2(i+1):
count_layer(s)=count_layer(s)+1;
i=i+1;
@else
i=i+1;
s=i;
);
);

```

```

max_count=count_layer(d);
max_index=d;
@for(object(b)|b#GE#d:
@ifc(max_count#LE#count_layer(b):
max_count=count_layer(b);
max_index=b;
);
);
h(1)=sort2(max_index);
@for(object(b):
count_layer(b)=1;
);

```

מציאת האוריינטציה ומהירות הסריקה האופטימליים, לכל אובייקט בנפרד, תחת גובה השכבה שנקבע, שוב באמצעות פונקציית *@solve* ושמירת הערכים במטריצה *sol_obj2*:

```

@for(object(b)|assign(b)#LT#1:
m=b;
@solve(optimization);
sol_obj2(b,1)=h(1);
sol_obj2(b,2)=v(1);
sol_obj2(b,3)=O(1,1);
sol_obj2(b,4)=O(2,1);
sol_obj2(b,5)=O(3,1);
sol_obj2(b,6)=O(1,1)*z_a(1,m)+O(2,1)*z_a(2,m)+O(3,1)*z_a(3,m);
sol_obj2(b,7)=t_powder(1);
sol_obj2(b,8)=t_scan(1);
sol_obj2(b,9)=td_cal(1);
sol_obj2(b,10)=tc_cal(1);
sol_obj2(b,11)=Ra_cal(1);
sol_obj2(b,12)=0;
real_scan(b)=t_scan(1);
);

```

כלל החלטה 1 - שיבוץ של אובייקט ראשון למנה החדשה מתוך האובייקטים שטרם שובצו: בוחרים את האובייקט בעל זמן ההדפסה המינימלי, כלומר את מינימום הסכום של זמן הסריקה וזמן פיזור האבקה $sol_obj2(b,7) + sol_obj2(b,8)$

```

k=1;
@while(assign(k)#EQ#1:
@ifc(k#LT#@size(object):
k=k+1;
@else
@break;
);
);
min_t=sol_obj2(k,7)+sol_obj2(k,8);
min_index=k;
@for(object(b)| assign(b)#LT#1:
@ifc((sol_obj2(b,7)+sol_obj2(b,8))#LT#min_t:
min_t=sol_obj2(b,7)+sol_obj2(b,8);
min_index=b;
);
);

```

כלל החלטה אלטרנטיבי – שיבוץ של אובייקט ראשון למנה החדשה מתוך אובייקטים שטרם שובצו: בחירת האובייקט בעל הגובה הגבוה ביותר (גבהים האובייקטים נשמרו ב- $sol_obj2(b, 6)$), שמירתו ב- min_t ושמירת האינדקס שלו ב- min_index :

```
k=1;
@while(assign(k)#EQ#1:
@ifc(k#LT#@size(object):
k=k+1;
@else
@break;
);
);
min_t=sol_obj2(k,6);
min_index=k;
@for(object(b) | assign(b)#LT#1:
@ifc((sol_obj2(b,6))#LT#min_t:
min_t=sol_obj2(b,6);
min_index=b;
);
);
```

קיבוע השיבוץ של האובייקט הנבחר למנה j וסימון שאובייקט זה שובץ ע"י שימוש בוקטור אפסים $assign$ כך שעם שיבוץ האובייקט, ערך הוקטור עבור האינדקס שמייצג את האובייקט הנ"ל מקבל 1. שומרים את נתוני ההדפסה הסופיים של האובייקט. מעדכנים את סך השטח המנוצל בהתאם לאוריינטציה הנבחרת של האובייקט.

```
@ifc(sum_area(j)#LT#area:
@ifc(assign(min_index)#LT#1:
x(min_index,j)=1;
assign(min_index)=1;
finale_sol(min_index,1)=sol_obj2(min_index,1);
finale_sol(min_index,2)=sol_obj2(min_index,2);
finale_sol(min_index,3)=sol_obj2(min_index,3);
finale_sol(min_index,4)=sol_obj2(min_index,4);
finale_sol(min_index,5)=sol_obj2(min_index,5);
finale_sol(min_index,6)=sol_obj2(min_index,6);
finale_sol(min_index,7)=sol_obj2(min_index,7);
finale_sol(min_index,8)=sol_obj2(min_index,8);
finale_sol(min_index,9)=sol_obj2(min_index,9);
finale_sol(min_index,10)=sol_obj2(min_index,10);
finale_sol(min_index,11)=sol_obj2(min_index,11);
finale_sol(min_index,12)=sol_obj2(min_index,12);
t_job_no_powder(j)=t_job_no_powder(j)+finale_sol(min_index,8)+finale_sol(min_index,9)+finale_sol(min_index,10);

sum_temp(j)=sum_area(j);
sum_area(j)=sum_area(j)+sol_obj2(min_index,3)*x_a(1,min_index)*y_a(1,min_index)+
sol_obj2(min_index,4)*x_a(2,min_index)*y_a(2,min_index)+
sol_obj2(min_index,5)*x_a(3,min_index)*y_a(3,min_index);
```

עבור כלל ההחלטה ה-1: עדכון הגובה המקסימלי במנה הנוכחית, עדכון זמני פיזור האבקה של האובייקטים שטרם שובצו, במידה וישובצו במנה, בהתאם לגובה זה ושמירתו ב- $sol_obj2(b, 12)$. נשים לב שאם הגובה המקסימלי גבוה מהגובה של האובייקט שמועמדותו לשיבוץ נבחנת, יתרת זמן פיזור האבקה שווה ל-0:

```

max_height=@max(object(b):x(b,j)*sol_obj2(b,6));
@for(object(b)|assign(b)#LT#1:
@ifc(sol_obj2(b,6)#LT#max_height:
sol_obj2(b,12)=0;
@else
sol_obj2(b,12)=(sol_obj2(b,6)-max_height)/h(1)*8/3600;
);
);
);
@else
sum_area(j)=sum_temp(j);

```

עבור כלל ההחלטה האלטרנטיבי: עדכון סכום הפרשי הגבהים בין כל אובייקט שלא שובץ לאובייקטים ששובצו למנה הנוכחית, חלוקה במספר האובייקטים ששובצו במנה הנוכחית (כדי ליצור ממוצע הפרש) ושמירה ב- $sol_obj2(b,12)$:

```

@for(object(b)|assign(b)#LT#1:
sol_obj2(b,12)=@sum(object(y)|x(y,j)#EQ#1:@abs(sol_obj2(b,6)-finale_sol(y,6)))/cur_num_j(j);
);

```

יצירת לולאה להוספת אובייקטים למה כל עוד נותר מקום - $area \geq sum_area(j)$ ולא כל האובייקטים שובצו - $num_assign < @size(object)$:

```

num_assign2=0;
@for(object(b):
num_assign2=num_assign2+assign(b);
);

@ifc(num_assign2#LT#@size(object):
@while(area#GE#sum_area(j):

```

בתוך הלולאה, עבור כלל החלטה 1: שוב מאתרים את האובייקט בעל זמן ההדפסה המינימלי ביותר, מבין האובייקטים שלא שובצו, כאשר כעת, זמן פיזור האבקה הוא הזמן שנותר בהתחשב בגובה האובייקטים שכבר שובצו למנה הנוכחית, ז"א הזמן שנשמר ב- $sol_obj2(b,12)$

```

k=1;
@while(assign(k)#EQ#1:
@ifc(k#LT#@size(object):
k=k+1;
@else
@break;
);
);
@ifc(assign(k)#LT#1:

min_t=sol_obj2(k,12)+sol_obj2(k,8);
min_index=k;

@for(object(b)|assign(b)#NE#1:
@ifc((sol_obj2(b,12)+sol_obj2(b,8))#LT#min_t:
min_t=sol_obj2(b,12)+sol_obj2(b,8);
min_index=b;
);
);

```

בתוך הלולאה, עבור כלל ההחלטה האלטרנטיבי: מאתרים את האובייקט בעל סכום הפרשי הגבהים מהאובייקטים ששובצו למנה הנוכחית, הנמוך ביותר, ז"א הסכום שנשמר ב-
 $sol_obj2(b, 12)$

```
k=1;
@while(assign(k)#EQ#1:
@ifc(k#LT#@size(object):
k=k+1;
@else
@break;
);
);
@ifc(assign(k)#LT#1:

min_t=sol_obj2(k,12);
min_index=k;

@for(object(b)|assign(b)#NE#1:
@ifc((sol_obj2(b,12))#LT#min_t:
min_t=sol_obj2(b,12);
min_index=b;
);
);
```

שומרים את השטח הנוכחי שנעשה בו שימוש ע"י משתנה זמני ומחשבים את השטח בתוספת לאובייקט בעל זמן ההדפסה המינימלי:

```
sum_temp(j)=sum_area(j);
sum_area(j)=sum_area(j)+sol_obj2(min_index,3)*x_a(1,min_index)*y_a(1,min_index)+
sol_obj2(min_index,4)*x_a(2,min_index)*y_a(2,min_index)+
sol_obj2(min_index,5)*x_a(3,min_index)*y_a(3,min_index);
```

עשויות להיות שתי אופציות:

אופציה 1 - לא ניתן להוסיף את האובייקט הנ"ל מבלי לחרוג מהשטח של משטח ההדפסה. במקרה זה, נאותת שנבדקה מועמדותו של האובייקט הנ"ל למנה הנוכחית והיא נפסלה. נעשה זאת ע"י המשתנה $fisible(i, j)$ שקובע כי אובייקט i אינו יכול להיות משובץ במנה j בשל אילוצי מקום. בנוסף, עבור אובייקט זה, נגדיל זמנית, עבור מנת העבודה הנוכחית בלבד, את זמן הסריקה לזמן גדול מאוד $sol_obj2(min_index, 8) = 100000$ ועבור כלל ההחלטה האלטרנטיבי נגדיל את סכום הפרשי הגבהים כדי שלא ייבחר שוב כאובייקט בעל הזמן המינימלי או סכום הפרשי הגבהים המינימלי $sol_obj2(min_index, 12) = 100000$, בהתאמה. אם האובייקט שנבחר הוא כזה שמועמדותו עבור המנה הנוכחית נפסלה כבר, המשמעות היא שכל האובייקטים שלא שובצו נפסלו למנה זו (כי הרי זמן הסריקה של מי שנפסל הוגדל מאוד באופן מלאכותי כדי שלא ייבחר שוב כאובייקט בעל הזמן המינימלי ואם הוא נבחר שוב ניתן להסיק שכל שאר האובייקטים גם הוגדלו, ז"א שמועמדותם למנה זו נפסלה) ולכן, במקרה זה, נגדיל משמעותית את השטח $sum_area(j) = 1000000$ וכך יתאפשר לצאת מהלולאה, להימנע מלולאה אינסופית ולעבור לשיבוץ אובייקטים במנה הבאה:


```

@ifc(area#LT#sum_area(j):
@ifc(fisible(min_index,j)#EQ#0:
sum_area(j)=1000000;
@else
sum_area(j)=sum_temp(j);
fisible(min_index,j)=0;
real_scan(min_index)=sol_obj2(min_index,8);
sol_obj2(min_index,12)=100000;
);

```

עדכון סכום הפרשי הגבהים עבור כלל ההחלטה האלטרנטיבי:

```
sol_obj2(min_index,12)=100000;
```

אופציה 2 – ניתן להוסיף את האובייקט ה"ל" i מבלי לחרוג משטחו של משטח ההדפסה. במקרה זה, משבצים את האובייקט למנה j , מעדכנים את וקטור האובייקטים המשובצים ע"י $assign(i) = 1$ כמו גם את השטח המנוצל ע"י הוספת שטחו של האובייקט שהתווסף, בהתאם לאוריינטציה הנבחרת שלו ושוב שומרים את נתוני ההדפסה הסופיים של האובייקט.

```

@else
@ifc(fisible(min_index,j)#EQ#1:

x(min_index,j)=1;
assign(min_index)=1;
cur_num_j(j)=cur_num_j(j)+1;
finale_sol(min_index,1)=sol_obj2(min_index,1);
finale_sol(min_index,2)=sol_obj2(min_index,2);
finale_sol(min_index,3)=sol_obj2(min_index,3);
finale_sol(min_index,4)=sol_obj2(min_index,4);
finale_sol(min_index,5)=sol_obj2(min_index,5);
finale_sol(min_index,6)=sol_obj2(min_index,6);
finale_sol(min_index,7)=sol_obj2(min_index,7);
finale_sol(min_index,8)=sol_obj2(min_index,8);
finale_sol(min_index,9)=sol_obj2(min_index,9);
finale_sol(min_index,10)=sol_obj2(min_index,10);
finale_sol(min_index,11)=sol_obj2(min_index,11);
finale_sol(min_index,12)=sol_obj2(min_index,12);
t_job_no_powder(j)=t_job_no_powder(j)+finale_sol(min_index,8)+finale_sol(min_index,9)+finale_sol(min_index,10);

```

עבור כלל החלטה 1 - שוב מעדכנים את גובה השכבה המקסימלי במנה הנוכחית ואת יתרת זמן פיזור השכבה של האובייקטים שלא שובצו בהתאם לגובה מקסימלי זה (דורסים את הערך הקודם):

```

max_height=@max(object(b):x(b,j)*sol_obj2(b,6));
@for(object(b)|assign(b)#LT#1:
@ifc(sol_obj2(b,6)#LT#max_height:
sol_obj2(b,12)=0;
@else
sol_obj2(b,12)=(sol_obj2(b,6)-max_height)/h(1)*8/3600;
);
);
@else
sum_area(j)=sum_temp(j);

```

עבור כלל ההחלטה האלטרנטיבי - שוב מעדכנים את סכום הפרשי הגבהים בין כל אובייקט שלא שובץ לאובייקטים ששובצו למנה הנוכחית וחלוקה במספר האובייקטים ששובצו במנה הנוכחית (כדי ליצור ממוצע הפרש):

```
@for(object(b) | assign(b) #LT#1:
sol_obj2(b,l2)=@sum(object(y) | x(y,j) #EQ#1:@abs(sol_obj2(b,6)-finale_sol(y,6)))/cur_num_j(j);
```

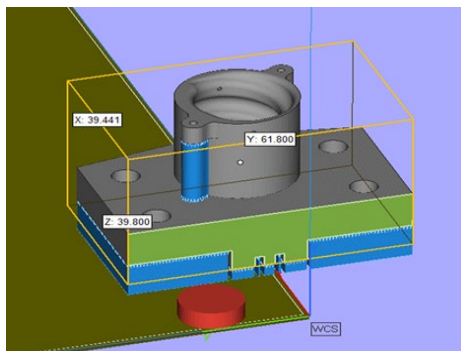
אם מספר האובייקטים ששובצו זהה למספר האובייקטים הקיימים, נגדיל מאוד, באופן מלאכותי את השטח המנוצל כדי שיתאפשר לצאת מהלולאה:

```
num_assign=0;
@for(object(b) :
num_assign=num_assign+assign(b);
);

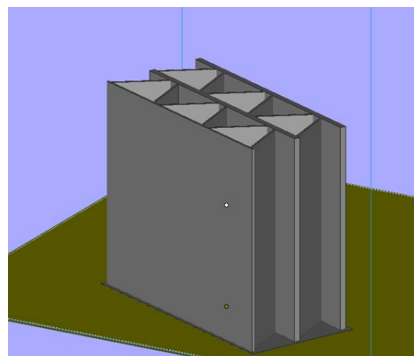
@ifc(num_assign#EQ#@size(object) :
sum_area(j)=100000000;
);
```

8.4 בחינת איכות ביצועי האלגוריתם ההיוריסטי דוגמא 1:

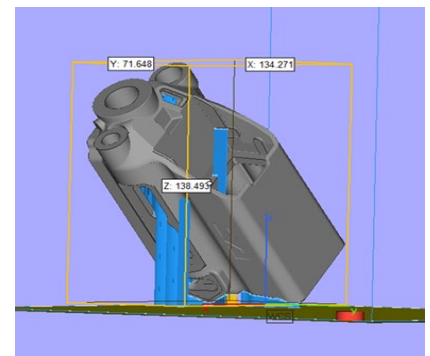
שטח המדפסת הוגדר כ-17000 מ"מ בריבוע.



אובייקט 3



אובייקט 2



אובייקט 1

איור 6 – בעיית קיבוץ של 3 אובייקטים

תוצאות התכנות המתמטי (פתרון אופטימלי):

לא ניתן להכניס את כל האובייקטים במנה אחת.

עבור שתי מנות, מתקבל הפלט הבא:

Global optimal solution found.

Objective value: 23.76908

Objective bound: 23.76906

H(1)	0.60000000E-01
H(2)	0.60000000E-01

X(1, 1)	0.000000
X(1, 2)	1.000000
X(2, 1)	0.000000
X(2, 2)	1.000000
X(3, 1)	1.000000
X(3, 2)	0.000000

V(1)	1200.000
V(2)	1200.000
V(3)	1200.000
O(1, 1)	1.000000
O(1, 2)	0.000000
O(1, 3)	0.000000
O(2, 1)	0.000000
O(2, 2)	1.000000
O(2, 3)	0.000000
O(3, 1)	0.000000
O(3, 2)	0.000000
O(3, 3)	1.000000
TOT_TD(1)	0.4143594
TOT_TD(2)	2.571915
TOT_TC(1)	0.1967311
TOT_TC(2)	1.035241
TP(1)	3.066262
TP(2)	16.48457
T_TOT(1)	3.677352
T_TOT(2)	20.09172

עבור שלוש מנות מתקבלים זמנים ארוכים יותר.

כלומר, כדי להבטיח זמן אספקה מינימלי, יש להדפיס את אובייקט 1 ו-2 יחד ואת אובייקט 3 בנפרד. אובייקט 1 יודפס בשיפוע, אובייקט 2 יודפס בעמידה ואובייקט 3 יודפס בשכיבה, מהירות הסריקה של כל 3 האובייקטים הן 1200 מ"מ לשניה. גובה השכבה בשתי המנות יהיה 0.06 מ"מ.

תוצאות האלגוריתם ההיוריסטי (עבור שני כללי ההחלטה):

זמן כולל של כל האובייקטים בכל מנה (זמן הדפסה + זמן תכן + זמן post process):

total time of jobs			
	1	2	3
	13.858	12.207	-1. #IND

סך זמן כולל: 26.065 שעות.

שיבוץ אובייקטים למנות:

object	job 1	job 2	job 3
1	0	1	0
2	1	0	0
3	1	0	0

גובה שכבה של כל מנה:

job height			
	1	2	3
	0.06	0.06	0

נתוני הדפסה של האובייקטים:

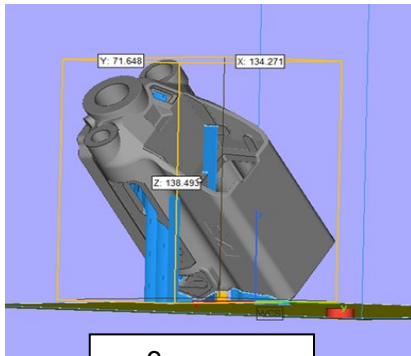
	layer_height	speed	incline	stand	recline	object height	t_powder_alone	t_scan	design	post process	Ra
1	0.06	1200	1	0	0	143	5.2963	5.2083	1.161	0.54147	2.5857
2	0.06	1200	0	1	0	105	3.8889	5.9799	1.4109	0.49377	3.8125
3	0.06	1200	0	0	1	43	1.5926	1.4737	0.41436	0.19673	2.0763

נציין ש- $t_{\text{powder_alone}}$ מתייחס לזמן פיזור האבקה עבור אובייקט יחיד על מגש.

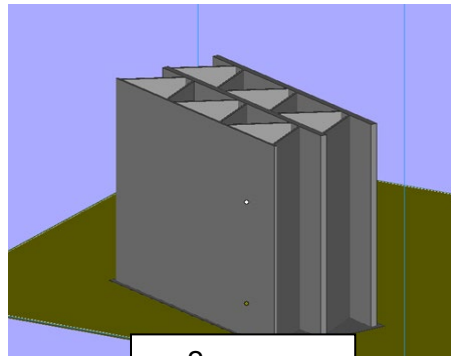
כלומר ההבדל בין האלגוריתם היוריסטי לפתרון האופטימלי מסתכם בכ-2.3 שעות, כלומר כשעתיים ו-18 דקות והזמן המתקבל באלגוריתם ההיוריסטי גבוה ב-9.6% בלבד מהזמן המתקבל בפתרון האופטימלי.

נעיר שלתכנות המתמטי נדרשו כ-3 דקות להגיע לפתרון כאשר נדרש מראש לקבוע את מס' המנות ואילו לאלגוריתם ההיוריסטי נדרשו כ-5 שנות לפתור, מבלי להגדיר מראש את כמות המנות.

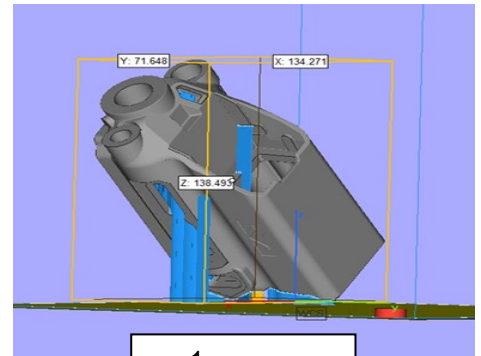
דוגמא 2



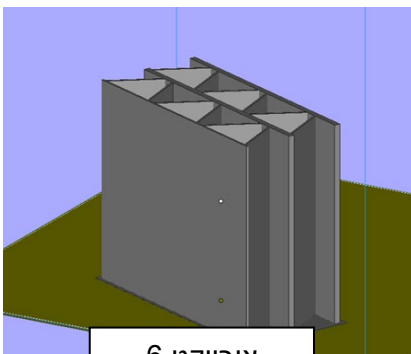
אובייקט 3



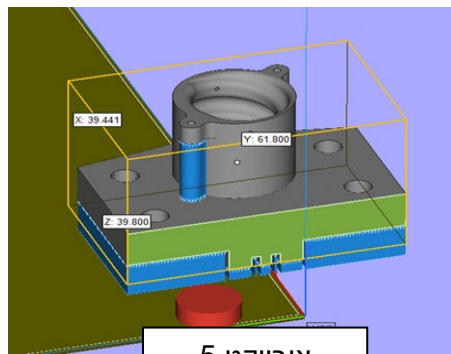
אובייקט 2



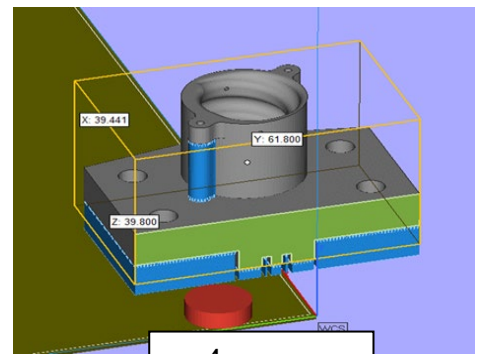
אובייקט 1



אובייקט 6



אובייקט 5



אובייקט 4

איור 7 – בעיית קיבוץ של 6 אובייקטים

הדוגמא הנ"ל כוללת אובייקטים זהים, למרות ההנחה שעדיף שהמודל יכלול אובייקטים שונים, בשל היעדר כמות מספקת של אובייקטים עם כל הנתונים הדרושים למימוש המודל. המטרה העיקרית היא לבדוק את ביצועי האלגוריתם ההיוריסטי מול הפתרון האופטימלי ולכן נתעלם בשלב זה מההנחה זו.

תוצאות התכנות המתמטי:

בשל מגבלות של טווחי נתונים, הפעם השטח של מגש ההדפסה הוגדר כ-17000 מ"מ בריבוע.

Solver Status		Variables	
Model Class:	MINLP	Total:	168
State:	Local Opt	Nonlinear:	99
Objective:	45.5056	Integers:	36
Infeasibility:	0	Constraints	
Iterations:	228289634	Total:	195
Extended Solver Status		Nonlinear:	87
Solver Type:	Global	Nonzeros	
Best Obj:	45.9456	Total:	954
Obj Bound:	45.5056	Nonlinear:	669
Steps:	152716	Generator Memory Used (K)	
Active:	75377	81	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss)	
		29:08:15	

אציין שעצרנו את התוכנית באופן עצמאי בשל זמן הריצה הארוך שלה – מעל 29 שעות, כאשר עדיין לא נמצא פתרון סופי ולכן לא התקבלו ערכיהם של משתני ההחלטה.

ניתן לראות שהפתרון עם הזמן הטוב ביותר עד לזמן עצירת הריצה הוא 45.94 שעות והחסם התחתון עומד על 45.5 שעות. גם בדוגמא זו, נדרש לקבוע מראש את מס' המנות.

תוצאות האלגוריתם ההיוריסטי (עבור שני כללי ההחלטה):

object		job 1	job 2	job 3			
1	0	1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0	0
job height							
1	2	3					
0.06	0.06	0.06	0	0	0	0	
total time of jobs							
1	2	3					
15.943	20.092	12.207	-1.#IND	-1.#IND	-1.#IND		

	layer_height	speed	incline	stand	recline	object height	t_powder_alone	t_scan	design	post process	Ra
1	0.06	1200	1	0	0	143	5.2963	5.2083	1.161	0.54147	2.5857
2	0.06	1200	0	1	0	105	3.8889	5.9799	1.4109	0.49377	3.8125
3	0.06	1200	1	0	0	143	5.2963	5.2083	1.161	0.54147	2.5857
4	0.06	1200	0	0	1	43	1.5926	1.4737	0.41436	0.19673	2.0763
5	0.06	1200	0	0	1	43	1.5926	1.4737	0.41436	0.19673	2.0763
6	0.06	1200	0	1	0	105	3.8889	5.9799	1.4109	0.49377	3.8125

לפי האלגוריתם ההיוריסטי במנה הראשונה ישובצו אובייקטים מס' 4, 5 ו-2, במנה השניה ישובצו אובייקטים 1 ו-6 ואילו במנה השלישית ישובץ אובייקט 3. גובה השכבה של כל מנה הוא 0.06 מ"מ. אובייקטים 1 ו-3 (זהים) יודפסו בשיפוע ובמהירות 1200 מ"מ לשניה, אובייקטים 2 ו-6 (זהים) יודפסו בעמידה ובמהירות 1200 מ"מ לשניה ואילו אובייקטים 4 ו-5 (זהים) יודפסו בשכיבה ובמהירות 1200 מ"מ לשניה.

זמן האספקה הכולל של כל העבודות הוא 48.24 הגבוה ב-6% מהחסם התחתון של הפתרון האופטימלי.

גם כאן, לא נדרש לקבוע מראש את מס' המנות.

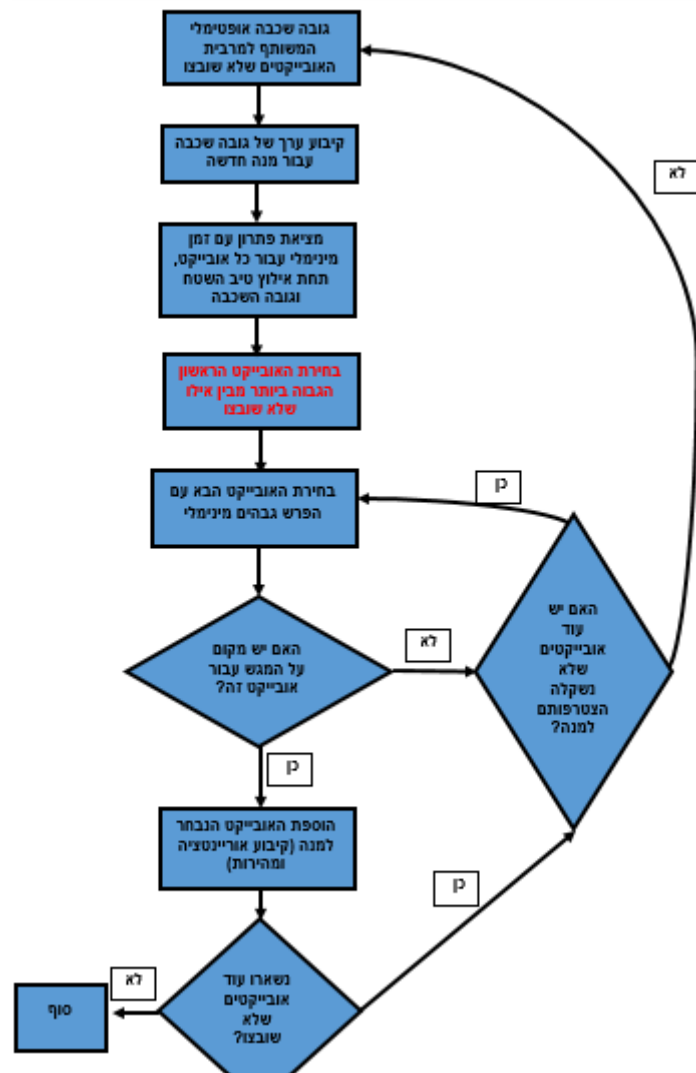
זמן הריצה עומד על 14 שניות:

Elapsed Runtime (hh:mm:ss)

00:00:14

8.5 שיפור של האלגוריתם עם כלל ההחלטה האלטרנטיבי

האובייקט הראשון שישוּבץ למנה יהיה האובייקט בעל הגובה הגבוה ביותר מתוך העדפה שהאובייקטים האחרונים שיישארו ללא מנה, בשל הפרשי גבהים גדולים והיעדר מקום על הפלטה, יהיו האובייקטים בעלי הגובה הנמוך והמנה החדשה שתיווצר עבורם לא תחייב זמן הדפסה ארוך כתוצאה מהגובה שלהם.



תרשים 46 – אלגוריתם עם כלל החלטה אלטרנטיבי ועדכון באופן בחירת האובייקט הראשון במנה

שינוי המימוש עבור האובייקט הראשון במנה - שיבוץ של אובייקט ראשון למנה החדשה מתוך אובייקטים שטרם שובצו: בחירת האובייקט בעל הגובה הגבוה ביותר (גבהים האובייקטים נשמרו ב- $sol_obj2(b, 6)$, שמירתו ב- max_t ושמירת האינדקס שלו ב- max_ind).

```

max_t=sol_obj2(k,6);
max_ind=k;
@for(object(b) | assign(b)#LT#1:
@ifc((sol_obj2(b,6))#GT#max_t:
max_t=sol_obj2(b,6);
max_ind=b;
);
);
sum_temp(j)=sum_area(j);
sum_area(j)=sum_area(j)+sol_obj2(max_ind,3)*x_a(1,max_ind)*y_a(1,max_ind)+
sol_obj2(max_ind,4)*x_a(2,max_ind)*y_a(2,max_ind)+
sol_obj2(max_ind,5)*x_a(3,max_ind)*y_a(3,max_ind);

```

הרצה מחודשת עבור הדוגמא עם 3 האובייקטים

object	job 1	job 2	job 3
1	1	0	0
2	1	0	0
3	0	1	0

ניתן לראות שהאובייקטים הראשון והשני, הגבוהים יותר, שובצו תחילה ולבסוף, עבור המנה הנותנת, נשאר האובייקט הנמוך ביותר שעבורו נדרש זמן ההדפסה הקצר ביותר. באלגוריתם המקורי, האובייקט הגבוה והגדול ביותר (אובייקט 1) נותר למנה האחרונה ולכן האריך משמעותית את זמן ההדפסה של מנה זו, בעוד זמן ההדפסה של המנה הראשונה לא התקצר באותה מידה.

job height		
1	2	3
0.06	0.06	0
total time of jobs		
1	2	3
20.092	3.6774	-1. #IND

סך זמן כולל: 23.769 שעות בדומה לפתרון האופטימלי.

	layer_height	speed	incline	stand	recline	object height	t_powder_alone	t_scan	design	post process	Ra
1	0.06	1200	1	0	0	143	5.2963	5.2083	1.161	0.54147	2.5857
2	0.06	1200	0	1	0	105	3.8889	5.9799	1.4109	0.49377	3.8125
3	0.06	1200	0	0	1	43	1.5926	1.4737	0.41436	0.19673	2.0763

הרצה מחודשת עבור הדוגמא עם 6 האובייקטים

object	job 1	job 2	job 3			
1	1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0
5	0	0	1	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0

ניתן לראות שהאובייקטים הגבוהים שהם 1 ו-3, 2 ו-6, מרוכזים בשתי מנות ואילו האובייקטים שנותרו הם הנמוכים ביותר, 4 ו-5 ועבורם מוקצית מנה נפרדת. באלגוריתם המקורי לעומת

זאת, בכל אחד משלוש המנות נמצא לפחות אובייקט אחד גבוה, עובדה שגורמת להארכת זמן ההדפסה.

```

job height
1          2          3          0          0          0
0.06      0.06      0.06          0          0          0
total time of jobs
1          2          3          -1.#IND      -1.#IND      -1.#IND
20.092    20.092    5.7621

```

סך זמן כולל: 45.946 שעות, בדומה לפתרון האופטימלי.

	layer_height	speed	incline	stand	recline	object height	t_powder_alone	t_scan	design	post process	Ra
1	0.06	1200	1	0	0	143	5.2963	5.2083	1.161	0.54147	2.5857
2	0.06	1200	0	1	0	105	3.8889	5.9799	1.4109	0.49377	3.8125
3	0.06	1200	1	0	0	143	5.2963	5.2083	1.161	0.54147	2.5857
4	0.06	1200	0	0	1	43	1.5926	1.4737	0.41436	0.19673	2.0763
5	0.06	1200	0	0	1	43	1.5926	1.4737	0.41436	0.19673	2.0763
6	0.06	1200	0	1	0	105	3.8889	5.9799	1.4109	0.49377	3.8125

נעיר שבדוגמאות הנ"ל הוגדר סטנדרט טיב שטח מינימלי אחיד עבור כל האובייקטים. במידה ורוצים להגדיר לכל אובייקט סטנדרט משלו, יש להגדיר וקטור שישמור עבור כל אובייקט את ערך טיב השטח המינימלי הנדרש עבורו. בכל קריאה לתת המודל *optimization* עבור אובייקט מסוים, טיב השטח יידרש להיות שווה או גדול מערך הווקטור באינדקס המתאים לאובייקט הנ"ל:

הגדרה ב-*data*:

```
Ra_stand=2 2.5 3;
```

עדכון האילוף בתכנות המתמטי:

```
@for (object(i) : @for (job(j) : Ra_cal(i,j) > Ra_stand(i)) );
```

עדכון האילוף באלגוריתם ההיוריסטי:

```
Ra_cal(1) >= Ra_stand(m);
```

9 מגבלות המודל, צעדים נדרשים לדיוק ומחקר עתידי

ראשית, כמות הנתונים שנאספו ושנעשה בהם שימוש ברשת ANN קטן יחסית, בטח בהשוואה לכמות הנתונים שנהוג להשתמש בה בבניית רשת נוירונים. שנית, חלק מהנתונים מבוססים על הערכה של אחד ממנהלי הארגון, על סמך ניסיונו האישי, ולא על בסיס מדידה מדויקת, דבר שעלול להטות את הממצאים. בנוסף, חלק מהמדידים שעבורם נבנתה נוסחה על בסיס רשת הנוירונים, אינם יכולים לקבל ערכים שליליים (כמו זמני post process ותכן) אך הנוסחאות שהתקבלו מהרשת עלולות להביא לערכים שליליים ולכן נאלצנו לבצע כיוול של הערכים על בסיס חסמים עליונים ותחתונים, עובדה שעלולה לעוות את הערכים האמיתיים שיתקבלו במציאות, בשונה מהמודל. בנוסף, המודל נבנה על בסיס על כל נתוני האובייקטים שהיו זמינים, ללא סיווג בהתאם למאפייניהם בעוד שכפי שמשתקף בפרק הפיילוט, נדרש לבצע קלסיפיקציה של האובייקטים ולכלל קבוצה לבנות מודל נפרד כדי להבטיח דיוק מירבי.

לפיכך, כדי לבנות כלי מדויק יותר, אמין ורב תכליתי, אנחנו, כחוקרים וחברת כנפית צריכים לבצע מס' צעדים:

מצד חברת כנפית נדרש:

1. לבנות בסיס נתונים גדול שיכלול מגוון מוצרים רחב ומקיף ועל בסיסו לבנות רשת נוירונים. באופן זה הניבוי צפוי להיות מדויק יותר וגם הסבירות שיתקבלו זמנים שליליים תהיה קטנה יותר ואולי ניתן יהיה להימנע מכיוול.

2. למדוד באופן מדויק את זמני תכן, זמני post process, טיב שטח וכל פרמטר ומדד שנכלל במודל.

- מצדנו, כחוקרים, נדרש בעתיד:1. לקבוע קריטריונים שבהתאם להם האובייקטים יסווגו לקבוצות מוצרים.
2. להגדיר באופן חד משמעי יותר כיצד לקבוע את סוג האוריינטציה, בעיקר עבור אובייקטים שאינם סימטריים. כמו כן, כדאי להרחיב את מספר סוגי האוריינטציות האפשרי, מעבר ל-3 שהוגדרו במחקר זה, כדי להגדיל את מידת הדיוק בסיווג.
3. להרחיב את המודל כך שיכלול פונקציות מטרה של תכונות מכניות נוספות כמו חוזק, קשיות, אלסטיות ומדדי תפעול נוספים כמו עלויות, פיגורים באספקה וכדומה.
4. להרחיב את המודל כך שיאפשר לקבוע גם את סדר הדפסת המנות האופטימלי, בעיקר עם פונקציות המטרה נוגעות לעמידה בזמני אספקה או לחיסכון בעלויות.
5. פיתוח אלגוריתם היוריסטי פחות חמדני.

סיכום

הדו"ח פתח בהצגת גישת ייצור בהדפסת תלת מימד (AM) בהצגת יתרונותיה הכוללים ייצור אובייקטים בעלי גאומטריה מורכבת, הקטנת בזבז חומרים, צמצום עלות שינוע וגמישות בייצור ובסקירת שתי גישות מרכזיות להדפסה – SLS ו-FDM. בהמשך, פורטו פרמטרי ההדפסה השונים שיש לקחת בחשבון טרם ההדפסה, השייך שלהם לשלבים שונים בתהליך ההדפסה וה-tradeoff שקיים בהשפעתם על מדדים מכניים ותפעוליים. יחסים אילו והעובדה שהם מחייבים שימוש בגישת הנדסה משולבת, הכינו את הקרקע שעל גביה נבנתה שאלת המחקר - כיצד לקבוע ערכים של פרמטרים שונים בתוך המוצר – אוריינטציה- ותכן התהליך – מהירות סריקה וגובה שכבה- כך שזמן האספקה ימוזער וטיב השטח ימוקסם. בנוסף, כחלק מהשימוש בגישת הנדסה משולבת, זמן האספקה חולש על תהליכים שונים בתהליך הייצור והוגדר כסכום של זמן התכן, זמן ההדפסה וזמן post process. שאלת המחקר חולקה לשתי בעיות: בעיה קטנה של הדפסת מוצר אחד על משטח ההדפסה ובהמשך הורחבה לבעיית הדפסת מספר מוצרים, כך שבנוסף למשתני ההחלטה שהופיעו בבעיה הקטנה, נדרש גם לקבל החלטה בנוגע לזהות המוצרים שיודפסו בכל מנת עבודה.

המידול של בעיית הדפסת אובייקט יחיד התבסס בחלקו על תכנות מתמטי עם פונקציות אנליטיות ואילוצים, תוך שימוש במידע שהתקבל בסקר הספרות בהקשר לזמן ההדפסה, ובחלקו על יצירת קשר בין פרמטרים ומשתני החלטה למדדי זמן תכן, זמן post process וחספוס, באמצעות רשת ANN. לשם יצירת הרשת, נאספו נתונים אמיתיים מארגון המתמחה בהדפסות תלת מימד ונבחנה מידת השפעתם על המדדים הרלוונטיים באמצעות עצי סיווג (CART). הפרמטרים שנמצאו כבעלי השפעה ומבחינה לוגית הגיוני להכניס אותם כקלטים לרשתות הניורונים, מבלי לפגוע בדרגות החופש של משתני ההחלטה הם: מהירות סריקה, גובה שכבה, עוצמת לייזר, נפח אובייקט ואוריינטציה. כמו כן, זמן התכן הוכנס כקלט לרשת שפותחה עבור המשתנים התלויים טיב שטח וזמן post process וטיב השטח הוכנס כקלט לרשת שפותחה עבור post process. כדי להימנע מקבלת זמנים שליליים או טיב שטח שחורג מהסקאלה שהוגדרה, בוצעו כיוולים למדדים שהתקבלו מהרשת ע"י הגדרת טווח מתאים, מציאת מינימום ומקסימום עבור כל מדד שעבורו נבנתה רשת ניורונים, יצירת העתקה לינארית לכל מדד על בסיס טווח הנתונים וערכי המינימום והמקסימום והצבת הערך המתקבל מהרשת בנוסחת ההעתקה הלינארית. לאחר השלמת המודל והוספת כיוולים לרשת הניורונים, התבצע תהליך אופטימיזציה לפתרון בעיה מרובת מטרות שכלל את הצגת חזית היעילות עבור שני אובייקטים שנתוני ההדפסה שלהם נכללו ברשת הניורונים וניתוח רגישות. חזית היעילות שיקפה באופן ברור את ה-tradeoff הקיים בין טיב שטח לזמן האספקה כך שכלל שציון טיב השטח גדול יותר, גם זמן האספקה הנדרש גדול יותר. ניתוח הרגישות העלה שעבור האובייקט שעליו בוצע הניתוח, אי הוודאות בהקשר לקוטר הלייזר ועוצמתו, כמו גם ערכים קיצוניים שלו הם המשפיעים ביותר על טווח הזמנים המתקבל בחזית היעילות ועל ציון החספוס שהחל ממנו ישנה רגישות גבוהה לכל הטבה בטיב השטח המתבטאת בעליה חדה בזמן הכולל.

בהמשך, כחלק מפיילוט, המודל מומש על שלושה אובייקטים חדשים, שפרטיהם לא נכללו ברשת הניורונים. במסגרת הפיילוט הוזנו נתוני ההדפסה האמיתיים של האובייקטים (מהירות סריקה, גובה שכבה ואוריינטציה) והתוצאות שהתקבלו מהמודל הושוּו לתוצאות שהתקבלו בפועל ולזמני הסימולציה. עבור שניים מהאובייקטים, זמני post process והערכת טיב השטח שיקפו באופן סביר את המציאות וזמני ההדפסה היו בסדר גודל דומה לסימולציה ולזמנים בפועל, אם כי היו סטיות שמקורן בנוסחה שבה נעשה שימוש ובוצעו בה התאמות שעלולות לגרום לסטיות ושכללה התייחסות לנפח כמקשה אחת, ללא חלוקה לשכבות, בניגוד לאופן חישוב הזמן בסימולציות. עבור שני האובייקטים הנ"ל הוצגו גם חזית היעילות וגרף המשקף את השינוי בזמן האספקה כפונקציה של השיפור של טיב השטח ומהם עולה שיש עליה דרמטית בזמני האספקה עבור כל שיפור קל בטיב שטח עבור טיב שטח גבוהים. עבור האובייקט השלישי, שהיה חריג מאוד במידותיו ובמורכבותו מהאובייקטים שהוכנסו לרשת הניורונים, בוצע ניתוח נפרד שגילה פער בין טיב השטח שהתקבל בפועל לטיב השטח שהתקבל מהמודל והדגיש את הנחיצות בביצוע קלסיפיקציה של מוצרים לפי מאפיינים שונים כך שעבור כל קבוצת מוצרים יידרש לבנות מודל באופן דומה לזה שהוצג בעבודה.

לבסוף, פותח מודל לבעיה המורחבת שכולל קיבוץ אובייקטים למנות, על בסיס המודל שנבנה עבור אובייקט יחיד, והוא מומש עבור שלושה אובייקטים ושישה אובייקטים באמצעות Lingo. לאור זמן הריצה הארוך שנגרם בשל הוספת משתנה בינארי נוסף למודל - x_{ij} , הוצע אלגוריתם היוריסטי לפתרון הבעיה. האלגוריתם מתחיל במציאת גובה שכבה אופטימלי שמשותף למרבית האובייקטים, קיבוע שלו ומציאת אוריינטציה ומהירות סריקה לכל אובייקט בנפרד, תחת אילוץ גובה השכבה הנבחר ואילוץ טיב שטח ייחודי לכל אובייקט. בהמשך, הוצעו שני כללי החלטה לבחירת האובייקט שייכנס למנה – במסגרת הכלל הראשון, בוחרים את האובייקט בעל סכום זמני הסריקה עם יתרת זמן פיזור האבקה הנמוך ביותר. לפי כלל ההחלטה האלטרנטיבי, בוחרים את האובייקט בעל סכום הפרשי הגבהים מהאובייקטים ששובצו למנה הנוכחית, שהינו הנמוך ביותר. במידה והוספת האובייקט הנבחר לא גורמת לחריגה משטחו של משטח ההדפסה, האובייקט מתווסף למנה, אחרת, מאתרים את האובייקט הבא לפי אחד מכללי ההחלטה. תהליך קיבוץ האובייקטים למנה הנוכחית מסתיים כאשר לא ניתן להוסיף עוד אובייקט מבלי לחרוג משטח המגש ואז עוברים ליצירת המנה הבאה או במידה וכל האובייקטים כבר שובצו. התהליך חוזר על עצמו עבור כל מנה עד שכל האובייקטים משובצים. עבור שלושה אובייקטים, התוצאות שהתקבלו עבור שני כללי ההחלטה היו זהות וזמן האספקה שהתקבל היה גבוה בכ-9.6% מהזמן האופטימלי ואילו עבור שישה אובייקטים, זמן האספקה שהתקבל היה פחות טוב בעד כ-6% מהפתרון האופטימלי אך בזמן ריצה של מס' שניות בודדות אל מול זמן ריצה של עשרות שעות בפתרון האופטימלי. לאחר שינוי של האלגוריתם עם כלל ההחלטה האלטרנטיבי כך שהאובייקט הראשון שייבחר לכל מנה יהיה הגבוה ביותר, הזמנים שהתקבלו היו זהים לזמנים האופטימליים בזמן ריצה של שניות.

מסקנות

- המחקר מציג אב טיפוס לכלי שמאפשר לקבוע את זהות האובייקטים שיודפסו יחד, את אוריינטציית ההדפסה, מהירות הסריקה וגובה מנות ההדפסה, על בסיס נוסחאות אנליטיות ולמידת מכונה, כדי למזער זמן אספקה ולמקסם טיב שטח, לפי דרישות הלקוח.
- הכלי כולל שני אופני ביטוי – תכנות מתמטי אופטימלי עבור מס' אובייקטים קטן ואלגוריתם היוריסטי עבור מס' מוצרים נרחב יותר שפותח כדי לצמצם זמני ריצה ארוכים המאפיינים את התכנות המתמטי.
- המעבר מאב טיפוס לכלי שימושי מדויק ואמין מחייב בניית רשתות ניורונים על בסיס מסד נתונים רחב ומקיף של מגוון אובייקטים, חלוקה של האובייקטים למשפחות מוצרים לפי מאפייניהם ומדידה מדויקת של הפרמטרים השונים במודל כולל זמני תכן, זמני post process וטיב שטח. כמו כן, יש חשיבות להרחבת סוגי האוריינטציות הכלולות במודל המטרה לשפר את איכות הסיווג.

- נדרש לגבש נוסחת זמן הדפסה פרקטית ובעלת פוטנציאל מימוש שמבוססת על חישוב זמני סריקה שכבתיים במקום זמן סריקה של האובייקט כמקשה אחת על מנת לשקף באופן המדויק ביותר את האופן שבו האובייקט מודפס בפועל וכתוצאה מכך – את זמן הדפסתו.
- המחקר מעלה על נס את הצורך בעריכת ניתוח רגישות לפרמטרי המודל כדי להתחשב בגורמי אי ודאות בנוגע לערכם האמיתי של הפרמטרים המוזנים, בתהליך קבלת ההחלטות.

תודות

ראשית, תודה לצחי שטמלר ושמואל רוזנבאום מחברת Kanfit 3D על שיתוף הפעולה ההדוק, על הידע הרב שהקנו לנו במהלך הפרוייקט, על הזמן הממושך שהקדישו להסברים וחידודים ועל מתן גישה נרחבת לנתוני הארגון והכל בשמחה, סבלנות ומאור פנים.

תודה רבה למנחים – חוסיין נסראלדין ואביב גיבלי על הליווי הצמוד לאורך כל הפרוייקט, על הזמן הרב שהוקדש לפגישות, פיתוח רעיונות, הסברים, הערות והארות, למידה של כלים חדשים ועל הנכונות לקדם ולדחוף את הפרוייקט (ואותי) עד הקצה.

- [1] A. Chergui, K .Hadj – Hamou I F .Vognat“ Production Scheduling and Nesting in Additive Manufacturing ”,*Computers & Industrial Engineering* 126 ,p. 292-301 .2018
- [2] Q. Li, I. Kucukkoc I D. Zhang“ Production planning in additive manufacturing and 3D printing ”,*Computers and Operations Research* 83 ,p. 157-172 .2017
- [3] M. Attaran“ Additive Manufacturing: The Most Promising Technology to Alter the Supply Chain and Logistics ”,*ournal of Service Science and Management* ,pp. 189-205, 2017 .
- [4] “Impact Lab .[מקוון] ”,Available :<https://www.impactlabs.tech/the-complete-guide-to-3d-printing-ch-13/>
- [5] C. Pisarciuc“ Analysis and Evaluation of the Main Parameters for the 3D Printing Process ”,*Nonconventional Technologies Review Romania* .2019
- [6] H. Shidpour, M .Shahrokhi I A .Bernard“ A Multi-Objective Programming Approach, Integrated into the TOPSIS Method, in order to Optimize Product Design; in Three-Dimensional Concurrent Engineering ”,*Computers & Industrial Engineering* 64 ,p. 875-885 .2013
- [7] M .Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja I F. Martina“ Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, consideration ”,*CIRP Annals - Manufacturing Technology* ,65 כרך ,pp. 737-760, 2016
- [8] C. Fine, B .Golany I H .Naseraldin“ Modeling Tradeoffs in Three-Dimensional Concurrent Engineering: A Goal Programming approach ”,*Journal of Operations Management* 23 ,p. 389-402 .2005
- [9] F. Calignano, D .Manfredi, E .Ambrosio I L. Iuliano“ Influence of Process Parameters on Surface Roughness of Aluminum Parts produced by DMLS ”,*Int J Adv Manuf Technol* ,p. 67:2743-2751 .2013
- [10] A. De Souza, K .Al- Rubaie, S .Marques, B. Zluhan I E .Santos“ Effect of Laser Speed, Layer Thickness and Part Position on the Mechanical Properties of Maraging 300 Parts Manufactured by Selective Laser melting ”,*Materials Science & Engineering A* 767 .2019
- [11] T. Yang, D .Tomus, X .Wu I P. Romestch“ Influences of Processing Parameters on Surface Roughness of Hastelloy X Produced by Selective Laser Melting ”,*Additive Manufacturing* 13 ,p. 103-112 .2017
- [12] X. Shi, C .Yan, W .Feng, Y .Zhang I Z .Leng“ Effect of High Layer Thickness on Surface Quality and Defect Behavior of Ti-6Al-4V Fabricated by Selective Laser Melting ”,*Optics and Laser Technology* 132 .2020

- [13] S. Greco, K .Gutzeit, H .Hotz, B .Kirsch I J. C. Aurich“ Selective Laser Melting (SLM) of AISI 316L—Impact of Laser Power, Layer Thickness and Hatch Spacing on Roughness, Density and Microhardness at Constant Input Energy Density ”,*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* ,p. 108:1551-1562 .2020
- [14] E. Mahmoud, G .Mootaz, Y .Youssef I E. khamis“ Optimization of SLM Process Parameters for Ti6Al4V Medical Implant ”,*Rapid Prototyping Journal* .2018
- [15] H. Gajera I G. Dave“ An Effect of DMLS Process Parameter on Surface Roughness And Dimensional Accuracy Of CL50WS Material ”,*International Journal for Research in Engineering Application & Management* ,pp. 2454-9150 Vol-03, Issue-09, 2017 .
- [16] N. Sateesh, G .Mohankumar I P. Krishna“ Effect of Process Parameters on Surface Roughness of Laser Processed Inconel Superalloy ”,*International Journal of Scientific & Engineering Research* ,pp. Volume 5, Issue 8, August-2014 ISSN 2229-5518, 2014 .
- [17] H. Gajera, K .Dave, V .Darji I K. Abhishek“ Optimization of process parameters of direct metal laser sintering process using fuzzy-based desirability function approach ”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* ,p. 41:124, 2019 .
- [18] C. Klingaa, T .Dahmen, S .Baier, S. Mohanty I J .Hattel“ Build Orientation Effects on the Roughness of SLM Channels ”,*Conference Paper · September 2019*
- [19] A. Charles, H .Elkaseer, L .Thijs, V. Hagenmeyer I S .Scholz“ Effect of Process Parameters on the Generated Surface Roughness of Down-Facing Surfaces in Selective Laser Melting ”,*Appl. Sci* ,pp. 9, 1256; doi:10.3390/app9061256, 2019 .
- [20] X. L.Gao, X .Shao, S .Zhang I C. Wang“ Mathematical modeling and evolutionary algorithm-based approach for integrated process planning and scheduling ”, *Computers & Operations Research* 37 ,pp. 656 -- 667, 2010 .
- [21] Q. Li, D .Zhang, S .Wang I I .Kucukkoc“ A Dynamic Order Acceptance and Scheduling Approach for Additive Manufacturing on-Demand Production ”,*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* ,p. 105:3711-3729 .2019
- [22] I. Kucukkoc“ MILP Models to Minimise Makespan in Additive Manufacturing Machine Scheduling Problems ”,*Computers and Operations Research* 105 ,p. 58-67 .2019
- [23] J. Long— Zhang, Z .Zhang I Y .Han“ ,Research on Manufacturability Optimization of Discrete Products with 3D Printing Involved and Lot-Size Considered ”,*Journal of Manufacturing Systems* 43 ,p. 150-159 .2017
- [24] J. Morgan“ Classification and Regression Tree Analysis ”,*Boston University School of Public Health, Department of Health and Policy, Technical Report No. 1* .2014
- [25] W. Hardle I R .Timofeev“ Classification and Regression Trees (CART) Theory and Applications ”,A Master Thesis, CASE - Center of Applied Statistics and Economics, Humboldt University, Berlin, 2004.

- [26] G. Moisen“ ,Classification and Regression Trees ”,*Ecological Informatics* .2008
- [27] S. Du, J .Lee, H .Li, L .Wang I X .Zhai“ Gradient Descent Finds Global Minima of Deep Neural Networks -ב ”,*Proceedings of the 36 the International Conference on Machine Learning* ,Long Beach, California, 2019 .
- [28] S. Du, X .Zhai, B .Poczos I A. Singh“ Gradient Descent Provably Optimizes Over-parametrized Neural Networks -ב ”,*Published as a conference paper at ICLR 2019*
- [29] A. Dongare, R .Kharde I A .Kachare“ Introduction to Artificial Neural Network ”, *International Journal of Engineering and Innovative Technology* ,pp. Volume 2, Issue 1, 2012 .
- [30] J. Tu“ Advantages and Disadvantages of Using Artificial Neural ”,*J Clin Epidemid* ,pp. Vol. 49, No. 11, pp. 1225-1231, 1996
- [31] F. Arifin, H .Robbani, T .Annisa I N. Ma'arof“ ,Variations in the Number of Layers and the Number of Neurons in Artificial Neural Networks: Case Study of Pattern Recognition -ב ”,*Journal of Physics: Conference Series 1413* .2019
- [32] J. Alvarez I M .Salzmann“ Learning the Number of Neurons in Deep Networks -ב ”, *30th Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2016)* ,Barcelona, Spain, 2016 .
- [33] A. Sattar, M. Islam I K. Murase“ A New Constructive Algorithm for Designing -ב ”, *Neural Information Processing* ,Kitakyushu, Japan, 2007 ,pp. 317-327.
- [34] N. Gunantara“ ,A review of multi-objective optimization: Methods ”*Cogent Engineering* ,p. 5: 1502242, 2018 .
- [35] “Kanfit3D .[מקוון] ”,Available :<http://www.kanfit3d.com>.
- [36] “An Animated Guide:An Introduction to Neural Nets .[מקוון] ”Available: https://www.lexjansen.com/nesug/nesug13/37_Final_Paper.pdf.

נספחים

נספח 1 – תכנות מתמטי אופטימלי לבעיית הדפסת אובייקט יחיד – אובייקט פיילוט מס' 2

sets:

```
object/1/: object_volume, v, h, p, td, tp, tc, Ra, td_cal, tc_cal,  
Ra_cal;
```

```
orientation/1 2 3/;
```

```
object_orientation(orientation,object): 0, z_a, x_a, y_a;
```

```
parameters/1 2 3 4 5 6 7 8 9/;
```

```
solution/1..16/;
```

```
criteria/1..2/:cr;
```

```
solution_crit(solution,criteria): sol_crit;
```

```
sol_par(solution,parameters): sol_parameter;
```

end sets

Data:

```
object_volume=78000;
```

```
z_a=142.493 142.493 82;
```

```
x_a=134.271 140 150;
```

```
y_a=71.648 71.648 71.648;
```

```
p=266;
```

```
f=0.8;
```

```
enddata
```

submodel efficient_front:

```
min=td_cal(1)+tp(1)+tc_cal(1)
```

```
Ra_cal(1)>f;
```

```
tp(1)=1/(v(1)*h(1)*0.08)*(object_volume(1)+O(1,1)*8159+O(2,1)*95416+O  
(3,1)*209958)/3600
```

```
+8/3600*(O(1,1)*z_a(1,1)+O(2,1)*z_a(2,1)+O(3,1)*z_a(3,1))/h(1)
```

```
@for(orientation(k@:(bin(o(k,1))) ;{
```

```
O(1,1)+O(2,1)+O(3,1)=1;
```

```
(O(1,1)*x_a(1,1)*y_a(1,1)+O(2,1)*x_a(2,1)*y_a(2,1)+O(3,1)*x_a(3,1)*y_  
a(3,1))<=1000*1000;
```

```
(O(1,1)*z_a(1,1)+O(2,1)*z_a(2,1)+O(3,1)*z_a(3,1))<=1000;
```

```
v(1)>=500;
```

```
v(1)<=1200;
```

```
h(1)>=0.03;
```

```
h(1)<=0.06;
```

```

td=(1)0.587742187577933 + 1.19988039797718 *
@TanH(
    0.5 * ((-46.2731404940706)
        -0(1,1)*2.61297704368347
        -0(2,1)*6.28097798813535
        -0(3,1)*((-2.61297704368347) + (-6.28097798813535))
        -0.000008570635281531 *object_volume(1) + 0.0171492355295428 *v(1)
+ 0.115704191180346 *p(1) + 0.0136183760265197 *h(1))
) + 0.929652752153762 * @TanH(
    0.5 * ((-7.09262172556369)
        +0(1,1)*0.13481244449648
        +0(2,1)*8.24972363273465
        -0(3,1)*(0.13481244449648 + 8.24972363273465)
        -0.0000801143480951409 *object_volume(1) + 0.0127925162391357*v(1)
+ 0.00881484933377671 *p(1) -104.932309364425 *h(1))
) + 0.613898277259967 * @TanH(
    0.5 * (40.2395852359506
        +0(1,1)*1.17416926271473
        +0(2,1)*0.28343606308238
        -0(3,1)*(1.17416926271473 + 0.28343606308238)
        + 0.000112634862590932 *object_volume(1) -0.034462954917106 *v(1) -
0.101706823642161 *p(1) + 281.467516333282 *h(1))
);

```

```

;td_cal(1)=0.5+1*(td(1)-(-1.293))/(1.519-(-1.293))

```

```

=Ra(1)3.39672482982828 + 1.83128450778475 *
@TanH(
    0.5 * ((-12.930877325312) + 1.72718299685478 *td_cal(1)
        -0(1,1)*0.663741976276295
        -0(2,1)*1.57647249952583
        -0(3,1)*((-0.663741976276295) + (-1.57647249952583))
        + 0.0000013102141822719 *object_volume(1) + 0.0112647459291987*v(1)
+ 0.0183881927299335 *p(1) -88.8933999096528 *h(1))
) -3.70249674321046 * @Tanh(
    0.5 * ((-2.0668988374401) + 1.69505460704179 *td_cal(1)
        -0(1,1)*0.00557420917382805*
        -0(2,1)*1.13578215955483
        -0(3,1)*((-0.00557420917382805) + (-1.13578215955483))
        -0.0000574312210991677 *object_volume(1) + 0.00571082834601422*v(1)+
0.00801957244866501 *p(1) -66.2130922616914 *h(1))
) -3.59396729852524 * @Tanh(
    0.5 * ((-3.57447484215349) + 1.39692369161833 *td_cal(1)
        -0(1,1)*0.281251042509843
        -0(2,1)*0.357499140060259
        -0(3,1)*((-0.281251042509843) + (-0.357499140060259))
        + 0.0000533028173220297 *object_volume(1) + 0.000344013671797698
*v(1) + 0.00277465524023591 *p(1) -6.49353484635804 *h(1))
);

```

```

Ra_cal(1)=1+3*(Ra(1)-(-1.642))/(2.768-(-1.642));

```

```

tc(1)=0.463006821893106 + 4.2518410919931 *

```

```

@TanH(
    0.5 * ((-2.26807458730899) -0.023281958929414 *td_cal(1)
        +0(1,1)*4.3828905765068
        -0(2,1)*4.56398094032229

```



```

-0(3,1)*(4.3828905765068 + (-4.56398094032229))
+ 0.000332730795997377 *object_volume(1) + 0.00914883773932156*v(1)
+ 0.0210542143813408 *p(1) + 30.6057424591073 *h(1)
-7.76652673222902 *Ra_cal(1))
) + 0.953377173688829 * @TanH(
0.5 * (10.7091201046443 + 2.22150856550781 *td_cal(1)
+0(1,1)*0.882110483515168
+0(2,1)*0.648184694964362
-0(3,1)*(0.882110483515168 + 0.648184694964362)
+ 0.0000062363943963168 *object_volume(1) -0.00243043604398776
*v(1) -0.00378679282175237 *p(1) -4.54142383658083 *h(1)
-2.7619011786434 *Ra_cal(1))
) -4.66572445807879 * @TanH(
0.5 * (8.52777790960608 + 1.50189191993906 *td_cal(1)
+0(1,1)*3.49887387453554*
-0(2,1)*3.22928647641813
-0(3,1)*(3.49887387453554 + (-3.22928647641813))
+ 0.000137601572567658 *object_volume(1) + 0.00985077859297258*v(1)
+ 0.0186779582945122 *p(1) -167.707196085646 *h(1)
-6.6753483907535 *Ra_cal(1)));
tc_cal(1)=0.5*(tc(1)-(0.397))/(9.692-(0.397))+0.5;
@free(td(1));
@free(Ra(1));
@free(tc(1));
@free(td_cal(1));

endsubmodel

```

```

:calc
:for(solution(s)@
;f=f+0.2
;solve(efficient_front)@
;sol_crit(s,1)=td_cal(1)+tp(1)+tc_cal(1)
;sol_crit(s,2)=Ra_cal(1)
;sol_parameter(s,1)=td_cal(1)
;sol_parameter(s,2)=tc_cal(1)
;sol_parameter(s,3)=tp(1)
;sol_parameter(s,4)=0(1,1)
;sol_parameter(s,5)=0(2,1)
;sol_parameter(s,6)=0(3,1)
;sol_parameter(s,7)=v(1)
;sol_parameter(s,8)=h(1)
;sol_parameter(s,9)=p(1)/(h(1)*v(1)*0.08)
;(
WRITE('          num_sol@      ;(total time      roughness', @newline(1)
;d=1
;WRITE(@FORMAT( s, '4.0f'), ' ' )@
:FOR( solution(sol)@
;WRITE(@FORMAT( d, '14.5g'))@
:for(criteria(c)@
;(WRITE( @FORMAT(sol_crit(sol,c) , '14.5g'))@
;WRITE( @NEWLINE(1))@
;(d=d+1
;d=1
;WRITE( @NEWLINE(1))@
WRITE('          num_sol      design time      post process      print@
time          incline          stand          recline          speed          layer
;(height      energy ', @newline(1)

```

```

:for(solution(sol))@
;WRITE(@FORMAT( d,'14.5g'))@
:for(parameters(par))@
;(WRITE( @FORMAT(sol_parameter(sol,par) , '14.5g'))@

;WRITE( @NEWLINE(1))@
;(d=d+1
endcalc

```

נספח 2 – תכנות מתמטי אופטימלי לבעיית קיבוע אובייקטים למנות – דוגמת 3 האובייקטים

```

sets:
job/1 2/: h, avg_Ra, tot_td, tot_tc, tp, t_tot;
object/1 2 3/: object_volume, td_min, td_max, Ra_min, Ra_max, tc_min,
tc_max, v, p, tc_0, tc_ran, td_0, td_ran, Ra_stand;
object_in_job(object, job): x,td,tc, Ra, td_cal, tc_cal, Ra_cal;
orientation/1 2 3/;
object_orientation(orientation,object): O, z_a, x_a, y_a,
object_supp;

end sets

Data:
object_volume=78000 124000 24232;
object_supp=30000 760 2337
              52402 0 8233
              101000 50400 6326;
z_a=143 103 56
43 105 143
;43 64 82
x_a= 135 150 50
40 60 130
;40 105 139
y_a=72 120 62
62 120 72
;62 120 72
td_min=-1.293 -0.927 -0.924;
;td_max=1.519 1.472 1.906
;Ra_min=-1.642 0.52 -0.781
;Ra_max=2.768 4.36 7.4
;tc_min=0.144 -0.32 -5.758
;tc_max=9.692 0.995 6.606
;td_0=0.5 0.5 0
;td_ran=1 1 1
;tc_0=0.5 0 0.08
;tc_ran=0.5 1 0.24

;p=266 266 266
Ra_stand=2 2 2;

enddata

;min=@sum(job(j):t_tot(j))+2
;for(job(j):avg_Ra(j)>2)@!
;for(object(i):@for(job(j):Ra_cal(i,j)>Ra_stand(i)))@

```

```

for(job(j):tp(j)=@sum(object(i):1/(v(i)*h(j)*0.08)*(object_volume(i)@
+object_supp(1,i)*O(1,i)+object_supp(2,i)*O(2,i)+
Object_supp(3,i)*O(3,i))*x(i,j))/3600+8/3600*@max(object(i):x(i,j)*(O
;(i)*z_a(1,i)+O(2,i)*z_a(2,i)+O(3,i)*z_a(3,i)))/h(j), (1

;for(job(j):tot_td(j)=@sum(object(i):x(i,j)*td_cal(i,j)))@
;for(job(j):tot_tc(j)=@sum(object(i):x(i,j)*tc_cal(i,j)))@
;for(job(j):tot_td(j)+tp(j)+tot_tc(j)=t_tot(j))@

)for(job(j):avg_Ra(j)=@sum(object(i):x(i,j)*Ra_cal(i,j))/@sum(object@
;(i):x(i,j)

@for(object(i):O(1,i)+O(2,i)+O(3,i)=1);

_for(job(j):@sum(object(i):x(i,j)*(O(1,i)*x_a(1,i)*y_a(1,i)+O(2,i)*x@
;(a(2,i)*y_a(2,i)+O(3,i)*x_a(3,i)*y_a(3,i)))<=17000
)for(job(j):@for(object(i):x(i,j)*(O(1,i)*z_a(1,i)+O(2,i)*z_a(2,i)+O@
;(i)*z_a(3,i))<=400,3

;for(object(i):@sum(job(j):x(i,j))=1)@

#for(job(j)| j #LT@
;(sum(object(i):x(i,j+1))<=10000*@sum(object(i):x(i,j))@:2

;for(object(i):v(i)>=500)@
;for(object(i):v(i)<=1200)@
;for(job(j):h(j)>=0.03)@
;for(job(j):h(j)<=0.06)@

=for(object(i):@for(job(j):td(i,j)@0.587742187577933 + 1.19988039797718
*
@TanH(
0.5 * ((-46.2731404940706)
-0(1,i)*2.61297704368347
-0(2,i)*6.28097798813535
-0(3,i)*((-2.61297704368347) + (-6.28097798813535))
-0.000008570635281531 *object_volume(i) + 0.0171492355295428 *v(i)
+ 0.115704191180346 *p(i) + 0.0136183760265197 *h(j))
)+ 0.929652752153762 * @TanH(
0.5 * ((-7.09262172556369)
+0(1,i)*0.13481244449648
+0(2,i)*8.24972363273465
-0(3,i)*(0.13481244449648 + 8.24972363273465)
-0.0000801143480951409 *object_volume(i) + 0.0127925162391357*v(i)
+ 0.00881484933377671 *p(i) -104.932309364425 *h(j))
)+ 0.613898277259967 * @TanH(
0.5 * (40.2395852359506
+0(1,i)*1.17416926271473
+0(2,i)*0.28343606308238
-0(3,i)*(1.17416926271473 + 0.28343606308238)
+ 0.000112634862590932 *object_volume(i) -0.034462954917106 *v(i) -
0.101706823642161 *p(i) + 281.467516333282 *h(j))
)))));

-for(object(i):@for(job(j):td_cal(i,j)=td_ran(i)*(td(i,j)@
;(((td_min(i)))/(td_max(i)-(td_min(i)))+td_0(i)

=for(object(i):@for(job(j):Ra(i,j)@3.39672482982828 + 1.83128450778475 *
@TanH(
0.5 * ((-12.930877325312) + 1.72718299685478 *td_cal(i,j)

```

```

-0(1,i)*0.663741976276295
-0(2,i)*1.57647249952583
-0(3,i)*((-0.663741976276295) + (-1.57647249952583))
+ 0.0000013102141822719 *object_volume(i) + 0.0112647459291987*v(j)
+ 0.0183881927299335 *p(j) -88.8933999096528 *h(j))
) -3.70249674321046 * @tanh(
0.5 * ((-2.0668988374401) + 1.69505460704179 *td_cal(i,j)
-0(1,i)*0.00557420917382805*
-0(2,i)*1.13578215955483
-0(3,i)*((-0.00557420917382805) + (-1.13578215955483))
-0.0000574312210991677 *object_volume(i) + 0.00571082834601422*v(j)+
0.00801957244866501 *p(j) -66.2130922616914 *h(j))
) -3.59396729852524 * @tanh(
0.5 * ((-3.57447484215349) + 1.39692369161833 *td_cal(i,j)
-0(1,i)*0.281251042509843
-0(2,i)*0.357499140060259
-0(3,i)*((-0.281251042509843) + (-0.357499140060259))
+ 0.0000533028173220297 *object_volume(i) + 0.000344013671797698
*v(j) + 0.00277465524023591 *p(j) -6.49353484635804 *h(j))
)))));

-for(object(i):@for(job(j):Ra_cal(i,j)=1+3*(Ra(i,j)@
;((Ra_min(i)))/(Ra_max(i)-(Ra_min(i)))

@for(object(i):@for(job(j):tc(i,j)=0.463006821893106 + 4.2518410919931 *
@TanH(
0.5 * ((-2.26807458730899) -0.023281958929414 *td_cal(i,j)
+0(1,i)*4.3828905765068
-0(2,i)*4.56398094032229
-0(3,i)*(4.3828905765068 + (-4.56398094032229))
+ 0.000332730795997377 *object_volume(i) + 0.00914883773932156*v(i)
+ 0.0210542143813408 *p(i) + 30.6057424591073 *h(j)
-7.76652673222902 *Ra_cal(i,j))
) + 0.953377173688829 * @TanH(
0.5 * (10.7091201046443 + 2.22150856550781 *td_cal(i,j)
+0(1,i)*0.882110483515168
+0(2,i)*0.648184694964362
-0(3,i)*(0.882110483515168 + 0.648184694964362)
+ 0.0000062363943963168 *object_volume(i) -0.00243043604398776
*v(i) -0.00378679282175237 *p(i) -4.54142383658083 *h(j)
-2.7619011786434 *Ra_cal(i,j))
) -4.66572445807879 * @TanH(
0.5 * (8.52777790960608 + 1.50189191993906 *td_cal(i,j)
+0(1,i)*3.49887387453554*
-0(2,i)*3.22928647641813
-0(3,i)*(3.49887387453554 + (-3.22928647641813))
+ 0.000137601572567658 *object_volume(i) + 0.00985077859297258*v(i)
+ 0.0186779582945122 *p(i) -167.707196085646 *h(j)
-6.6753483907535 *Ra_cal(i,j))
)))));

@for(object(i):@for(job(j):tc_cal(i,j)=tc_ran(i)*(tc(i,j)-(tc_min(i)))/(tc_max(i)-
(tc_min(i)))+tc_0(i)));

```

```
;for(orientation(k):@for(object(i):@bin(o(k,i))))@
;for(object(i):@for(job(j):@bin(x(i,j))))@
```

נספח 3 – מימוש אלגוריתם היוריסטי עם כלל החלטה 1 – דוגמת שישה אובייקטים

```
sets:
job/1 2 3 4 5 6/: sum_area, sum_obj, sum_temp, finale_height,
t_job_no_powder, t_job;
object/1 2 3 4 5 6/: object_volume, td_min, td_max, Ra_min, Ra_max,
tc_min, tc_max, v, p, h, tc_0, tc_ran, td_0, td_ran, t_scan,
t_powder,
td,tc,Ra, td_cal, tc_cal, Ra_cal, layer_height, sort1, sort2,
count_layer, real_scan, temp_scan, assign;
object_in_job(object, job):x, fisible;
orientation/1 2 3/;
object_orientation(orientation,object): O, z_a, x_a, y_a,
object_supp;
parameters/1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12/;
solution_object(object,parameters):sol_obj1, sol_obj2, finale_sol;
check/1 2 3 4 5 6 7 8 9 10/: height_vec, count, sort_height,
sort_height2;
```

end sets

```
Data:
object_volume=78000 124000 78000 24232 24232 124000;
object_supp=30000 760 30000 2337 2337 760
52402 0 52402 8233 8233 0
101000 50400 101000 6326 6326 50400;
z_a=143 103 143 56 56 103
105 43 43 143 105 143
;64 43 43 82 64 82
x_a= 135 150 135 50 50 150
60 40 40 130 60 130
;105 40 40 139 105 139
y_a=72 120 72 62 62 120
120 62 62 72 120 72
;120 62 62 72 120 72
td_min=-1.293 -0.927 -1.293 -0.924 -0.924 -0.927;
;td_max=1.519 1.472 1.519 1.906 1.906 1.472
;Ra_min=-1.642 0.52 -1.642 -0.781 -0.781 0.52
;Ra_max=2.768 4.36 2.768 7.4 7.4 4.36
;tc_min=0.144 -0.32 0.144 -5.758 -5.758-0.32
;tc_max=9.692 0.995 9.692 6.606 6.606 0.995
;td_0=0.5 0.5 0.5 0 0 0.5
;td_ran=1 1 1 1 1 1
;tc_0=0.5 0 0.5 0.08 0.08 0
;tc_ran=0.5 1 0.5 0.24 0.24 1

;height_vec=4 6 5 5 6 6 2 5 4 5
;count=1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
;max_count2=1

;count_layer=1 1 1 1 1 1
;p=266 266 266 266 266 266
m=0;
max_count=1;
;max_index=1
```

```

;max_height=1
;min_t=1
;min_index=1
x=0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
;0 0 0 0 0 0
;sum_obj=0 0 0 0 0 0
;sum_area=0 0 0 0 0 0
;area=17000
;count_loops=0
fisible=1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1
;1 1 1 1 1 1
;assign=0 0 0 0 0 0
;num_assign=0
;num_assign2=0
;found=1
;t_job_no_powder=0 0 0 0 0 0
;t_job=0 0 0 0 0 0
enddata

:submodel optimization

;min=td_cal(1)+t_scan(1)+t_powder(1)+tc_cal(1)
;Ra_cal(1)>=2

t_scan(1)=1/(v(1)*h(1)*0.08)*(object_volume(m)+O(1,1)*object_supp(1,m)
;O(2,1)*object_supp(2,m)+O(3,1)*object_supp(3,m))/3600+(
t_powder(1)=8/3600*(O(1,1)*z_a(1,m)+O(2,1)*z_a(2,m)+O(3,1)*z_a(3,m))/
;(1)h

;for(orientation(k):@bin(o(k,1)))@

O(1,1)+O(2,1)+O(3,1)=1;

_O(1,1)*x_a(1,m)*y_a(1,m)+O(2,1)*x_a(2,m)*y_a(2,m)+O(3,1)*x_a(3,m)*y
;a(3,m))<=area
;(O(1,1)*z_a(1,m)+O(2,1)*z_a(2,m)+O(3,1)*z_a(3,m))<=400

;v(1)>=500
;v(1)<=1200
;h(1)>=0.03
;h(1)<=0.06

=td(1)0.587742187577933 + 1.19988039797718 *
@TanH(
0.5 * ((-46.2731404940706)
-0(1,1)*2.61297704368347
-0(2,1)*6.28097798813535
-0(3,1)*((-2.61297704368347) + (-6.28097798813535))
-0.0000008570635281531 *object_volume(m) + 0.0171492355295428 *v(1)
+ 0.115704191180346 *p(m) + 0.0136183760265197 *h(1))
)+ 0.929652752153762 * @TanH(
0.5 * ((-7.09262172556369)

```

```

+0(1,1)*0.13481244449648
+0(2,1)*8.24972363273465
-0(3,1)*(0.13481244449648 + 8.24972363273465)
-0.0000801143480951409 *object_volume(m) + 0.0127925162391357*v(1)
+ 0.00881484933377671 *p(m) -104.932309364425 *h(1))
) + 0.613898277259967 * @TanH(
0.5 * (40.2395852359506
+0(1,1)*1.17416926271473
+0(2,1)*0.28343606308238
-0(3,1)*(1.17416926271473 + 0.28343606308238)
+ 0.000112634862590932 *object_volume(m) -0.034462954917106 *v(1) -
0.101706823642161 *p(m) + 281.467516333282 *h(1))
);

-td_cal(1)=td_ran(m) * (td(1) - (td_min(m))) / (td_max(m)
; (td_min(m))) + td_0(m)

=Ra(1) 3.39672482982828 + 1.83128450778475 *
@TanH(
0.5 * ((-12.930877325312) + 1.72718299685478 *td_cal(1)
-0(1,1)*0.663741976276295
-0(2,1)*1.57647249952583
-0(3,1)*((-0.663741976276295) + (-1.57647249952583))
+ 0.0000013102141822719 *object_volume(m) + 0.0112647459291987*v(1)
+ 0.0183881927299335 *p(m) -88.8933999096528 *h(1))
) -3.70249674321046 * @Tanh(
0.5 * ((-2.0668988374401) + 1.69505460704179 *td_cal(1)
-0(1,1)*0.00557420917382805*
-0(2,1)*1.13578215955483
-0(3,1)*((-0.00557420917382805) + (-1.13578215955483))
-0.0000574312210991677 *object_volume(m) + 0.00571082834601422*v(1)+
0.00801957244866501 *p(m) -66.2130922616914 *h(1))
) -3.59396729852524 * @Tanh(
0.5 * ((-3.57447484215349) + 1.39692369161833 *td_cal(1)
-0(1,1)*0.281251042509843
-0(2,1)*0.357499140060259
-0(3,1)*((-0.281251042509843) + (-0.357499140060259))
+ 0.0000533028173220297 *object_volume(m) + 0.000344013671797698
*v(1) + 0.00277465524023591 *p(m) -6.49353484635804 *h(1))
);

Ra_cal(1)=1+3*(Ra(1)-(Ra_min(m)))/(Ra_max(m)-(Ra_min(m)));

```

```

tc(1)=0.463006821893106 + 4.2518410919931 *@TanH(
0.5 * ((-2.26807458730899) -0.023281958929414 *td_cal(1)
+0(1,1)*4.3828905765068
-0(2,1)*4.56398094032229
-0(3,1)*(4.3828905765068 + (-4.56398094032229))
+ 0.000332730795997377 *object_volume(m) + 0.00914883773932156*v(1)
+ 0.0210542143813408 *p(m) + 30.6057424591073 *h(1)
-7.76652673222902 *Ra_cal(1))
) + 0.953377173688829 * @TanH(
0.5 * (10.7091201046443 + 2.22150856550781 *td_cal(1)
+0(1,1)*0.882110483515168
+0(2,1)*0.648184694964362
-0(3,1)*(0.882110483515168 + 0.648184694964362)

```

```

+ 0.0000062363943963168 *object_volume(m) -0.00243043604398776
*v(1) -0.00378679282175237 *p(m) -4.54142383658083 *h(1)
-2.7619011786434 *Ra_cal(1))
) -4.66572445807879 * @TanH(
0.5 * (8.52777790960608 + 1.50189191993906 *td_cal(1)
+0(1,1)3.49887387453554*
-0(2,1)*3.22928647641813
-0(3,1)*(3.49887387453554 + (-3.22928647641813))
+ 0.000137601572567658 *object_volume(m) + 0.00985077859297258*v(1)
+ 0.0186779582945122 *p(m) -167.707196085646 *h(1)
-6.6753483907535 *Ra_cal(1)));
tc_cal(1)=tc_ran(m)*(tc(1)-(tc_min(m)))/(tc_max(m)-(tc_min(m)))+tc_0(m);
@free(td(1));
@free(Ra(1));
@free(tc(1));
@free(td_cal(1));

```

```
endsubmodel
```

```

:calc
:for(object(i)@
;m=i
:solve(optimization)@
;layer_height(i)=h(1)
;sol_obj1(i,1)=h(1)
;sol_obj1(i,2)=v(1)
;sol_obj1(i,3)=0(1,1)
;sol_obj1(i,4)=0(2,1)
;sol_obj1(i,5)=0(3,1)
;sol_obj1(i,6)=0(1,1)*z_a(1,m)+0(2,1)*z_a(2,m)+0(3,1)*z_a(3,m)
;sol_obj1(i,7)=t_powder(1)
;sol_obj1(i,8)=t_scan(1)
;sol_obj1(i,9)=td_cal(1)
;sol_obj1(i,10)=tc_cal(1)
;sol_obj1(i,11)=Ra_cal(1)
;sol_obj1(i,12)=0
;(

:for(job(j)@
;num_assign=0
:for(object(b)@
;num_assign=num_assign+assign(b)
;(
:ifc(num_assign#LT#@size(object)@

:for(object(i)|assign(i)#EQ#1@
;layer_height(i)=-100
;(
;sort1=@sort(layer_height)
:for(object(i)@
;sort2(i)=layer_height(sort1(i))
;(
;i=1
:while((sort2(i))#LT#0@
;count_layer(i)=1
;i=i+1
;(
;d=i
;s=i
:while (i#LT#@size(object)@

```



```

:ifc(sort2(i) #EQ# sort2(i+1))@
;count_layer(s)=count_layer(s)+1
;i=i+1
else@
;i=i+1
;s=i
;(
;(

;max_count=count_layer(d)
;max_index=d
;for(object(b) |b#GE#d@
:ifc(max_count#LE#count_layer(b))@
;max_count=count_layer(b)
;max_index=b
;(
;(
;h(1)=sort2(max_index)

:for(object(b))@
;count_layer(b)=1
;(

;finale_height(j)=h(1)
:for(object(b) |assign(b) #LT#1@
;m=b
;solve(optimization)@
;sol_obj2(b,1)=h(1)
;sol_obj2(b,2)=v(1)
;sol_obj2(b,3)=0(1,1)
;sol_obj2(b,4)=0(2,1)
;sol_obj2(b,5)=0(3,1)
;sol_obj2(b,6)=0(1,1)*z_a(1,m)+0(2,1)*z_a(2,m)+0(3,1)*z_a(3,m)
;sol_obj2(b,7)=t_powder(1)
;sol_obj2(b,8)=t_scan(1)
;sol_obj2(b,9)=td_cal(1)
;sol_obj2(b,10)=tc_cal(1)
;sol_obj2(b,11)=Ra_cal(1)
;sol_obj2(b,12)=0
;real_scan(b)=t_scan(1)
;(

;WRITE(' ', @newline(1))@
;d=1
;WRITE(@FORMAT( s,'4.0f'),' ' )@
:FOR( object(f))@
;WRITE(@FORMAT( d,'14.5g'))@
:for(parameters(e))@
;(WRITE( @FORMAT(sol_obj2(f,e) , '14.5g'))@
;WRITE( @NEWLINE(1))@
;(d=d+1

;k=1
:while(assign(k) #EQ#1@
:ifc(k#LT#@size(object))@
;k=k+1
else@
;break@

```

```

; (
; (
; min_t=sol_obj2(k,7)+sol_obj2(k,8)
; min_index=k
; for(object(b) | assign(b)#LT#1@
; ifc((sol_obj2(b,7)+sol_obj2(b,8))#LT#min_t@
; min_t=sol_obj2(b,7)+sol_obj2(b,8)
; min_index=b
; (
; (
; sum_temp(j)=sum_area(j)
sum_area(j)=sum_area(j)+sol_obj2(min_index,3)*x_a(1,min_index)*y_a(1,
+ (min_index
+sol_obj2(min_index,4)*x_a(2,min_index)*y_a(2,min_index)
; sol_obj2(min_index,5)*x_a(3,min_index)*y_a(3,min_index)

; ifc(sum_area(j)#LT#area@
; ifc(assign(min_index)#LT#1@
; x(min_index,j)=1
; assign(min_index)=1
; finale_sol(min_index,1)=sol_obj2(min_index,1)
; finale_sol(min_index,2)=sol_obj2(min_index,2)
; finale_sol(min_index,3)=sol_obj2(min_index,3)
; finale_sol(min_index,4)=sol_obj2(min_index,4)
; finale_sol(min_index,5)=sol_obj2(min_index,5)
; finale_sol(min_index,6)=sol_obj2(min_index,6)
; finale_sol(min_index,7)=sol_obj2(min_index,7)
; finale_sol(min_index,8)=sol_obj2(min_index,8)
; finale_sol(min_index,9)=sol_obj2(min_index,9)
; finale_sol(min_index,10)=sol_obj2(min_index,10)
; finale_sol(min_index,11)=sol_obj2(min_index,11)
; finale_sol(min_index,12)=sol_obj2(min_index,12)
_t_job_no_powder(j)=t_job_no_powder(j)+finale_sol(min_index,8)+finale
; sol(min_index,9)+finale_sol(min_index,10)

; max_height=@max(object(b):x(b,j)*sol_obj2(b,6))
; for(object(b) | assign(b)#LT#1@
; ifc(sol_obj2(b,6)#LT#max_height@
; sol_obj2(b,12)=0
else@
; sol_obj2(b,12)=(sol_obj2(b,6)-max_height)/h(1)*8/3600
; (
; (
; (
else@
; sum_area(j)=sum_temp(j)

; (

; WRITE(' ', @newline(1))@
; d=1
; WRITE(@FORMAT( s,'4.0f'),' ' )@
; FOR( object(f)@
; WRITE(@FORMAT( d,'14.5g'))@
; for(parameters(e)@
; (WRITE( @FORMAT(sol_obj2(f,e) , '14.5g'))@
; WRITE( @NEWLINE(1))@
; (d=d+1

```

```

;num_assign2=0
:for(object(b)@
;num_assign2=num_assign2+assign(b)
;(

:ifc(num_assign2#LT#@size(object)@
:while(area#GE#sum_area(j)@
;k=1
:while(assign(k)#EQ#1@
:ifc(k#LT#@size(object)@
;k=k+1
else@
;break@
;(
;(
:ifc(assign(k)#LT#1@

;min_t=sol_obj2(k,12)+sol_obj2(k,8)
;min_index=k

:for(object(b)|assign(b)#NE#1@
:ifc((sol_obj2(b,12)+sol_obj2(b,8))#LT#min_t@
;min_t=sol_obj2(b,12)+sol_obj2(b,8)
;min_index=b
;(
;(
;sum_temp(j)=sum_area(j)
sum_area(j)=sum_area(j)+sol_obj2(min_index,3)*x_a(1,min_index)*y_a(1,
+(min_index
+sol_obj2(min_index,4)*x_a(2,min_index)*y_a(2,min_index)
;sol_obj2(min_index,5)*x_a(3,min_index)*y_a(3,min_index)

:ifc(area#LT#sum_area(j)@
:ifc(fisible(min_index,j)#EQ#0@
;sum_area(j)=1000000
else@
;sum_area(j)=sum_temp(j)
;fisible(min_index,j)=0
;real_scan(min_index)=sol_obj2(min_index,8)
sol_obj2(min_index,8)=100000;
;(

else@
:ifc(fisible(min_index,j)#EQ#1@

;x(min_index,j)=1
;assign(min_index)=1
;finale_sol(min_index,1)=sol_obj2(min_index,1)
;finale_sol(min_index,2)=sol_obj2(min_index,2)
;finale_sol(min_index,3)=sol_obj2(min_index,3)
;finale_sol(min_index,4)=sol_obj2(min_index,4)
;finale_sol(min_index,5)=sol_obj2(min_index,5)
;finale_sol(min_index,6)=sol_obj2(min_index,6)
;finale_sol(min_index,7)=sol_obj2(min_index,7)
;finale_sol(min_index,8)=sol_obj2(min_index,8)
;finale_sol(min_index,9)=sol_obj2(min_index,9)
;finale_sol(min_index,10)=sol_obj2(min_index,10)
;finale_sol(min_index,11)=sol_obj2(min_index,11)
;finale_sol(min_index,12)=sol_obj2(min_index,12)
_t_job_no_powder(j)=t_job_no_powder(j)+finale_sol(min_index,8)+finale
;sol(min_index,9)+finale_sol(min_index,10)

```

```

;max_height=@max(object(b):x(b,j)*sol_obj2(b,6))
;for(object(b)|assign(b)#LT#1@
;ifc(sol_obj2(b,6)#LT#max_height@
;sol_obj2(b,12)=0
else@
;sol_obj2(b,12)=(sol_obj2(b,6)-max_height)/h(1)*8/3600
;(
;(

;WRITE(' ', @newline(1))@
;d=1
;WRITE(@FORMAT( s,'4.0f'),' ' )@
:FOR( object(f)@
;WRITE(@FORMAT( d,'14.5g'))@
:for(parameters(e)@
;(WRITE( @FORMAT(sol_obj2(f,e) , '14.5g'))@
;WRITE( @NEWLINE(1))@
;(d=d+1
;k=1
;(
;(
;(
;num_assign=0
:for(object(b)@
;num_assign=num_assign+assign(b)
;(

:ifc(num_assign#EQ#@size(object)@
;sum_area(j)=10000000
;(

;WRITE( @NEWLINE(1))@

;(
;(
;(

:for(job(j)@
_t_job(j)=t_job_no_powder(j)+@max(object(b):x(b,j)*(finale_sol(b,3)*z
a(1,b)+finale_sol(b,4)*z_a(2,b)+finale_sol(b,5)*z_a(3,b))/finale_hei
;ght(j)*8/3600
;(

;for(object(b):sol_obj2(b,8)=real_scan(b))@
;(

WRITE('          object          job 1          job 2          job@
;(newline(1)@ , '3
;d=1
:FOR( object(f)@
;WRITE(@FORMAT( d,'14.5g'))@
:for(job(j)@
;(WRITE( @FORMAT(x(f,j) , '14.5g'))@
;WRITE( @NEWLINE(1))@
;(d=d+1
;d=1

;WRITE('          job height ', @newline(1))@

```

```

WRITE('          1          2          3@
;(newline(1))@ , '6          5          4
;for(job(j):@write(@format(finale_height(j), '14.5g'))@

;WRITE('          ', @newline(1))@

;WRITE('          total time of jobs', @newline(1))@

WRITE('          1          2          3@
;(newline(1))@ , '6          5          4
:for(job(j))@
;(WRITE( @FORMAT(t_job(j) , '14.5g'))@
;WRITE( @NEWLINE(1))@

;for(job(j):@WRITE( @FORMAT(t_job(j) , '14.5g'))@!

;WRITE( @NEWLINE(1))@
WRITE('          layer_height          speed@
incline          stand          recline          object height          t_powder_alone
;(t_scan          design          post process          Ra ', @newline(1)
:for(object(f))@
;WRITE(@FORMAT( d, '14.5g'))@
:for(parameters(par) |par#LT#12@
;(WRITE( @FORMAT(finale_sol(f,par) , '14.5g'))@

;WRITE( @NEWLINE(1))@
;(d=d+1
endcalc

```

נספח 4 – מימוש אלגוריתם היוריסטי עם כלל החלטה 2 – דוגמת 6 אובייקטים

```

sets:
job/1 2 3 4 5 6/: sum_area, sum_obj, sum_temp, finale_height,
t_job_no_powder, t_job, cur_num_j;
object/1 2 3 4 5 6/: object_volume, td_min, td_max, Ra_min, Ra_max,
tc_min, tc_max, v, p, h, tc_0, tc_ran, td_0, td_ran, t_scan,
t_powder,
td,tc,Ra, td_cal, tc_cal, Ra_cal, layer_height, sort1, sort2,
count_layer, real_scan, temp_scan, assign;
object_in_job(object, job):x, fisible;
orientation/1 2 3/;
object_orientation(orientation,object): 0, z_a, x_a, y_a,
object_supp;
parameters/1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12/;
solution_object(object,parameters):sol_obj1, sol_obj2, finale_sol;
check/1 2 3 4 5 6 7 8 9 10/: height_vec, count, sort_height,
sort_height2;

end sets

```

```

Data:
object_volume=78000 124000 78000 24232 24232 124000;
object_supp=30000 760 30000 2337 2337 760
52402 0 52402 8233 8233 0

```

```

101000 50400 101000 6326 6326 50400;
z_a=143 103 143 56 56 103
105 43 43 143 105 143
;64 43 43 82 64 82
x_a= 135 150 135 50 50 150
60 40 40 130 60 130
;105 40 40 139 105 139
y_a=72 120 72 62 62 120
120 62 62 72 120 72
;120 62 62 72 120 72
td_min=-1.293 -0.927 -1.293 -0.924 -0.924 -0.927;
;td_max=1.519 1.472 1.519 1.906 1.906 1.472
;Ra_min=-1.642 0.52 -1.642 -0.781 -0.781 0.52
;Ra_max=2.768 4.36 2.768 7.4 7.4 4.36
;tc_min=0.144 -0.32 0.144 -5.758 -5.758-0.32
;tc_max=9.692 0.995 9.692 6.606 6.606 0.995
;td_0=0.5 0.5 0.5 0 0 0.5
;td_ran=1 1 1 1 1 1
;tc_0=0.5 0 0.5 0.08 0.08 0
;tc_ran=0.5 1 0.5 0.24 0.24 1

;height_vec=4 6 5 5 6 6 2 5 4 5
;count=1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
;max_count2=1

;count_layer=1 1 1 1 1 1
;p=266 266 266 266 266 266
m=0;
max_count=1;
;max_index=1
;max_height=1
;min_t=1
;min_index=1
x=0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
;0 0 0 0 0 0
;sum_obj=0 0 0 0 0 0
;sum_area=0 0 0 0 0 0
;area=17000
;count_loops=0
fisible=1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1
;1 1 1 1 1 1
;assign=0 0 0 0 0 0
;num_assign=0
;num_assign2=0
;found=1
;t_job_no_powder=0 0 0 0 0 0
;t_job=0 0 0 0 0 0
;cur_num_j=0 0 0 0 0 0
enddata

:submodel optimization

```

```

;min=td_cal(1)+t_scan(1)+t_powder(1)+tc_cal(1)
;Ra_cal(1)>=2

t_scan(1)=1/(v(1)*h(1)*0.08)*(object_volume(m)+O(1,1)*object_supp(1,m
;O(2,1)*object_supp(2,m)+O(3,1)*object_supp(3,m))/3600+(
t_powder(1)=8/3600*(O(1,1)*z_a(1,m)+O(2,1)*z_a(2,m)+O(3,1)*z_a(3,m))/
;(1)h

;for(orientation(k):@bin(o(k,1)))@

O(1,1)+O(2,1)+O(3,1)=1;

_O(1,1)*x_a(1,m)*y_a(1,m)+O(2,1)*x_a(2,m)*y_a(2,m)+O(3,1)*x_a(3,m)*y
;a(3,m))<=area
;(O(1,1)*z_a(1,m)+O(2,1)*z_a(2,m)+O(3,1)*z_a(3,m))<=400

;v(1)>=500
;v(1)<=1200
;h(1)>=0.03
;h(1)<=0.06

=td(1)0.587742187577933 + 1.19988039797718 *
@TanH(
0.5 * ((-46.2731404940706)
-O(1,1)*2.61297704368347
-O(2,1)*6.28097798813535
-O(3,1)*((-2.61297704368347) + (-6.28097798813535))
-0.0000008570635281531 *object_volume(m) + 0.0171492355295428 *v(1)
+ 0.115704191180346 *p(m) + 0.0136183760265197 *h(1))
) + 0.929652752153762 * @TanH(
0.5 * ((-7.09262172556369)
+O(1,1)*0.13481244449648
+O(2,1)*8.24972363273465
-O(3,1)*(0.13481244449648 + 8.24972363273465)
-0.0000801143480951409 *object_volume(m) + 0.0127925162391357*v(1)
+ 0.00881484933377671 *p(m) -104.932309364425 *h(1))
) + 0.613898277259967 * @TanH(
0.5 * (40.2395852359506
+O(1,1)*1.17416926271473
+O(2,1)*0.28343606308238
-O(3,1)*(1.17416926271473 + 0.28343606308238)
+ 0.000112634862590932 *object_volume(m) -0.034462954917106 *v(1) -
0.101706823642161 *p(m) + 281.467516333282 *h(1))
);

-td_cal(1)=td_ran(m)*(td(1)-(td_min(m)))/(td_max(m)
;(td_min(m))+td_0(m)

=Ra(1)3.39672482982828 + 1.83128450778475 *
@TanH(
0.5 * ((-12.930877325312) + 1.72718299685478 *td_cal(1)
-O(1,1)*0.663741976276295
-O(2,1)*1.57647249952583
-O(3,1)*((-0.663741976276295) + (-1.57647249952583))
+ 0.0000013102141822719 *object_volume(m) + 0.0112647459291987*v(1)
+ 0.0183881927299335 *p(m) -88.8933999096528 *h(1))
) -3.70249674321046 * @TanH(
0.5 * ((-2.0668988374401) + 1.69505460704179 *td_cal(1)
-O(1,1)*0.00557420917382805*
-O(2,1)*1.13578215955483

```

```

-0(3,1)*((-0.00557420917382805) + (-1.13578215955483))
-0.0000574312210991677 *object_volume(m) + 0.00571082834601422*v(1)+
0.00801957244866501 *p(m) -66.2130922616914 *h(1))
) -3.59396729852524 * @Tanh(
    0.5 * ((-3.57447484215349) + 1.39692369161833 *td_cal(1)
    -0(1,1)*0.281251042509843
    -0(2,1)*0.357499140060259
    -0(3,1)*((-0.281251042509843) + (-0.357499140060259))
    + 0.0000533028173220297 *object_volume(m) + 0.000344013671797698
*v(1) + 0.00277465524023591 *p(m) -6.49353484635804 *h(1))
);

Ra_cal(1)=1+3*(Ra(1)-(Ra_min(m)))/(Ra_max(m)-(Ra_min(m)));

tc(1)=0.463006821893106 + 4.2518410919931 *@TanH(
    0.5 * ((-2.26807458730899) -0.023281958929414 *td_cal(1)
    +0(1,1)*4.3828905765068
    -0(2,1)*4.56398094032229
    -0(3,1)*(4.3828905765068 + (-4.56398094032229))
    + 0.000332730795997377 *object_volume(m) + 0.00914883773932156*v(1)
+ 0.0210542143813408 *p(m) + 30.6057424591073 *h(1)
-7.76652673222902 *Ra_cal(1))
) + 0.953377173688829 * @Tanh(
    0.5 * (10.7091201046443 + 2.22150856550781 *td_cal(1)
    +0(1,1)*0.882110483515168
    +0(2,1)*0.648184694964362
    -0(3,1)*(0.882110483515168 + 0.648184694964362)
    + 0.0000062363943963168 *object_volume(m) -0.00243043604398776
*v(1) -0.00378679282175237 *p(m) -4.54142383658083 *h(1)
-2.7619011786434 *Ra_cal(1))
) -4.66572445807879 * @Tanh(
    0.5 * (8.52777790960608 + 1.50189191993906 *td_cal(1)
    +0(1,1)*3.49887387453554*
    -0(2,1)*3.22928647641813
    -0(3,1)*(3.49887387453554 + (-3.22928647641813))
    + 0.000137601572567658 *object_volume(m) + 0.00985077859297258*v(1)
+ 0.0186779582945122 *p(m) -167.707196085646 *h(1)
-6.6753483907535 *Ra_cal(1)));
tc_cal(1)=tc_ran(m)*(tc(1)-(tc_min(m)))/(tc_max(m)-(tc_min(m)))+tc_0(m);
@free(td(1));
@free(Ra(1));
@free(tc(1));
@free(td_cal(1));

endsubmodel

:calc
:for(object(i)@
;m=i
;solve(optimization)@
;layer_height(i)=h(1)
;sol_obj1(i,1)=h(1)
;sol_obj1(i,2)=v(1)
;sol_obj1(i,3)=0(1,1)
;sol_obj1(i,4)=0(2,1)
;sol_obj1(i,5)=0(3,1)
;sol_obj1(i,6)=0(1,1)*z_a(1,m)+0(2,1)*z_a(2,m)+0(3,1)*z_a(3,m)

```



```

;sol_obj1(i,7)=t_powder(1)
;sol_obj1(i,8)=t_scan(1)
;sol_obj1(i,9)=td_cal(1)
;sol_obj1(i,10)=tc_cal(1)
;sol_obj1(i,11)=Ra_cal(1)
;sol_obj1(i,12)=0
;(

:for(job(j))@
;num_assign=0
:for(object(b))@
;num_assign=num_assign+assign(b)
;(
:ifc(num_assign#LT#@size(object))@

:for(object(i)|assign(i)#EQ#1@
;layer_height(i)=-100
;(
;sort1=@sort(layer_height)
:for(object(i))@
;sort2(i)=layer_height(sort1(i))
;(
;i=1
:while((sort2(i))#LT#0@
;count_layer(i)=1
;i=i+1
;(
;d=i
;s=i
:while (i#LT#@size(object))@
:ifc(sort2(i) #EQ# sort2(i+1))@
;count_layer(s)=count_layer(s)+1
;i=i+1
else@
;i=i+1
;s=i
;(
;(

;max_count=count_layer(d)
;max_index=d
:for(object(b)|b#GE#d@
:ifc(max_count#LE#count_layer(b))@
;max_count=count_layer(b)
;max_index=b
;(
;(
;h(1)=sort2(max_index)
:for(object(b))@
;count_layer(b)=1
;(

;finale_height(j)=h(1)
:for(object(b)|assign(b)#LT#1@
;m=b
:solve(optimization)@
;sol_obj2(b,1)=h(1)
;sol_obj2(b,2)=v(1)
;sol_obj2(b,3)=0(1,1)
;sol_obj2(b,4)=0(2,1)
;sol_obj2(b,5)=0(3,1)

```

```

;sol_obj2(b,6)=O(1,1)*z_a(1,m)+O(2,1)*z_a(2,m)+O(3,1)*z_a(3,m)
;sol_obj2(b,7)=t_powder(1)
;sol_obj2(b,8)=t_scan(1)
;sol_obj2(b,9)=td_cal(1)
;sol_obj2(b,10)=tc_cal(1)
;sol_obj2(b,11)=Ra_cal(1)
;sol_obj2(b,12)=0
;real_scan(b)=t_scan(1)
;(

;WRITE(' ', @newline(1))@
;d=1
;WRITE(@FORMAT( s,'4.0f'),' ' )@
:FOR( object(f)@
;WRITE(@FORMAT( d,'14.5g'))@
:for(parameters(e)@
;(WRITE( @FORMAT(sol_obj2(f,e) , '14.5g'))@
;WRITE( @NEWLINE(1))@
;(d=d+1

;k=1
:while(assign(k)#EQ#1@
:ifc(k#LT#@size(object)@
;k=k+1
else@
;break@
;(
;(
;min_t=sol_obj2(k,6)
;min_index=k
:for(object(b)| assign(b)#LT#1@
:ifc((sol_obj2(b,6))#LT#min_t@
;min_t=sol_obj2(b,6)
;min_index=b
;(
;(
;sum_temp(j)=sum_area(j)
sum_area(j)=sum_area(j)+sol_obj2(min_index,3)*x_a(1,min_index)*y_a(1,
+(min_index
+sol_obj2(min_index,4)*x_a(2,min_index)*y_a(2,min_index)
;sol_obj2(min_index,5)*x_a(3,min_index)*y_a(3,min_index)

;WRITE(' ', @newline(1))@
;WRITE( @FORMAT(sum_area(j) , '14.5g'))@
;WRITE(' ', @newline(1))@

:ifc(sum_area(j)#LT#area@
:ifc(assign(min_index)#LT#1@
;x(min_index,j)=1
;assign(min_index)=1
;cur_num_j(j)=cur_num_j(j)+1
;finale_sol(min_index,1)=sol_obj2(min_index,1)
;finale_sol(min_index,2)=sol_obj2(min_index,2)
;finale_sol(min_index,3)=sol_obj2(min_index,3)
;finale_sol(min_index,4)=sol_obj2(min_index,4)
;finale_sol(min_index,5)=sol_obj2(min_index,5)
;finale_sol(min_index,6)=sol_obj2(min_index,6)
;finale_sol(min_index,7)=sol_obj2(min_index,7)
;finale_sol(min_index,8)=sol_obj2(min_index,8)

```

```

;finale_sol(min_index,9)=sol_obj2(min_index,9)
;finale_sol(min_index,10)=sol_obj2(min_index,10)
;finale_sol(min_index,11)=sol_obj2(min_index,11)
;finale_sol(min_index,12)=sol_obj2(min_index,12)
_t_job_no_powder(j)=t_job_no_powder(j)+finale_sol(min_index,8)+finale
;sol(min_index,9)+finale_sol(min_index,10)

:for(object(b)|assign(b)#LT#1@
sol_obj2(b,12)=@sum(object(y)|x(y,j)#EQ#1:@abs(sol_obj2(b,6)-
;finale_sol(y,6)))/cur_num_j(j)
;(

;(
else@
;sum_area(j)=sum_temp(j)

;(

;num_assign2=0
:for(object(b)@
;num_assign2=num_assign2+assign(b)
;(

:ifc(num_assign2#LT#@size(object)@
:while(area#GE#sum_area(j)@
;k=1
:while(assign(k)#EQ#1@
:ifc(k#LT#@size(object)@
;k=k+1
else@
;break@
;(
;(
:ifc(assign(k)#LT#1@

;min_t=sol_obj2(k,12)
;min_index=k

:for(object(b)|assign(b)#NE#1@
:ifc((sol_obj2(b,12))#LT#min_t@
;min_t=sol_obj2(b,12)
;min_index=b
;(
;(
;sum_temp(j)=sum_area(j)
sum_area(j)=sum_area(j)+sol_obj2(min_index,3)*x_a(1,min_index)*y_a(1,
+(min_index
+sol_obj2(min_index,4)*x_a(2,min_index)*y_a(2,min_index)
;sol_obj2(min_index,5)*x_a(3,min_index)*y_a(3,min_index)

:ifc(area#LT#sum_area(j)@
:ifc(fisible(min_index,j)#EQ#0@
;sum_area(j)=1000000
else@
;sum_area(j)=sum_temp(j)
;fisible(min_index,j)=0
;real_scan(min_index)=sol_obj2(min_index,8)
sol_obj2(min_index,12)=100000;

```

```

; (

else@
:ifc(fisible(min_index,j)#EQ#1@
;x(min_index,j)=1
;assign(min_index)=1
;cur_num_j(j)=cur_num_j(j)+1
;finale_sol(min_index,1)=sol_obj2(min_index,1)
;finale_sol(min_index,2)=sol_obj2(min_index,2)
;finale_sol(min_index,3)=sol_obj2(min_index,3)
;finale_sol(min_index,4)=sol_obj2(min_index,4)
;finale_sol(min_index,5)=sol_obj2(min_index,5)
;finale_sol(min_index,6)=sol_obj2(min_index,6)
;finale_sol(min_index,7)=sol_obj2(min_index,7)
;finale_sol(min_index,8)=sol_obj2(min_index,8)
;finale_sol(min_index,9)=sol_obj2(min_index,9)
;finale_sol(min_index,10)=sol_obj2(min_index,10)
;finale_sol(min_index,11)=sol_obj2(min_index,11)
;finale_sol(min_index,12)=sol_obj2(min_index,12)
_t_job_no_powder(j)=t_job_no_powder(j)+finale_sol(min_index,8)+finale
;sol(min_index,9)+finale_sol(min_index,10)

:for(object(b)|assign(b)#LT#1@
:sol_obj2(b,12)=@sum(object(y)|x(y,j)#EQ#1
;abs(sol_obj2(b,6)-finale_sol(y,6)))/cur_num_j(j)@

;WRITE(' ', @newline(1))@
;WRITE( @FORMAT(cur_num_j(j) , '14.5g'))@
; (

;WRITE(' ', @newline(1))@
;d=1
;WRITE(@FORMAT( s, '4.0f'), ' ' )@
:FOR( object(f)@
;WRITE(@FORMAT( d, '14.5g'))@
:for(parameters(e)@
;(WRITE( @FORMAT(sol_obj2(f,e) , '14.5g'))@
;WRITE( @NEWLINE(1))@
;(d=d+1
;k=1
; (
; (
; (
;num_assign=0
:for(object(b)@
;num_assign=num_assign+assign(b)
; (

:ifc(num_assign#EQ#@size(object)@
;sum_area(j)=10000000
; (

;WRITE( @NEWLINE(1))@

; (
; (
; (

:for(job(j)@

```

```

_t_job(j)=t_job_no_powder(j)+@max(object(b):x(b,j)*(finale_sol(b,3)*z
a(1,b)+finale_sol(b,4)*z_a(2,b)+finale_sol(b,5)*z_a(3,b)))/finale_hei
ght(j)*8/3600
; (

;for(object(b):sol_obj2(b,8)=real_scan(b))@
; (

WRITE('          object          job 1          job 2          job@
; (newline(1))@ , '3
;d=1
:FOR( object(f))@
;WRITE(@FORMAT( d, '14.5g'))@
:for(job(j))@
; (WRITE( @FORMAT(x(f,j) , '14.5g'))@
;WRITE( @NEWLINE(1))@
; (d=d+1
;d=1
;WRITE('          job height ', @newline(1))@
;WRITE('          1          2          3', @newline(1))@
;for(job(j):@write(@format(finale_height(j), '14.5g'))@

;WRITE('          ', @newline(1))@

;WRITE('          total time of jobs', @newline(1))@

;WRITE('          1          2          3', @newline(1))@
:for(job(j))@
; (WRITE( @FORMAT(t_job(j) , '14.5g'))@
;WRITE( @NEWLINE(1))@

;WRITE( @NEWLINE(1))@
WRITE('          layer_height          speed@
incline          stand          recline          object height          t_powder_alone
; (t_scan          design          post process          Ra ', @newline(1)
:for(object(f))@
;WRITE(@FORMAT( d, '14.5g'))@
:for(parameters(par) |par#LT#12@
; (WRITE( @FORMAT(finale_sol(f,par) , '14.5g'))@

;WRITE( @NEWLINE(1))@
; (d=d+1
endcalc

```

נספח 5 - שיפור אלגוריתם היוריסטי עם כלל החלטה 2

```
sets:
job/1 2 3/: sum_area, sum_obj, sum_temp, finale_height,
t_job_no_powder, t_job, cur_num_j;
object/1 2 3/: object_volume, td_min, td_max, Ra_min, Ra_max, tc_min,
tc_max, v, p, h, tc_0, tc_ran, td_0, td_ran, t_scan, t_powder,
td,tc,Ra, td_cal, tc_cal, Ra_cal, layer_height, sort1, sort2,
count_layer, real_scan, temp_scan, assign;
object_in_job(object, job):x, fisible;
orientation/1 2 3/;
object_orientation(orientation,object): 0, z_a, x_a, y_a,
object_supp;
parameters/1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12/;
solution_object(object,parameters):sol_obj1, sol_obj2, finale_sol;
check/1 2 3 4 5 6 7 8 9 10/: height_vec, count, sort_height,
sort_height2;
```

end sets

Data:

```
object_volume=78000 124000 24232;
object_supp=30000 760 2337
              52402 0 8233
              101000 50400 6326;

z_a=143 103 56
43 105 143
;43 64 82
x_a= 135 150 50
40 60 130
;40 105 139
y_a=72 120 62
62 120 72
;62 120 72
td_min=-1.293 -0.927 -0.924;
;td_max=1.519 1.472 1.906
;Ra_min=-1.642 0.52 -0.781
;Ra_max=2.768 4.36 7.4
;tc_min=0.144 -0.32 -5.758
;tc_max=9.692 0.995 6.606
;td_0=0.5 0.5 0
;td_ran=1 1 1
;tc_0=0.5 0 0.08
;tc_ran=0.5 1 0.24

;height_vec=4 6 5 5 6 6 2 5 4 5
;count=1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
;max_count2=1

;count_layer=1 1 1
;p=266 266 266
m=0;
max_count=1;
;max_index=1
;max_height=1
;min_t=1
;min_index=1
;max_t=1
;max_ind=1
```

```

x=0 0 0
0 0 0
;0 0 0
;sum_obj=0 0 0
;sum_area=0 0 0
;area=17000
;count_loops=0
fisible=1 1 1
1 1 1
;1 1 1
;assign=0 0 0
;num_assign=0
;num_assign2=0
;found=1
;t_job_no_powder=0 0 0
;t_job=0 0 0
enddata

:submodel optimization

;min=td_cal(1)+t_scan(1)+t_powder(1)+tc_cal(1)
;Ra_cal(1)>=2

t_scan(1)=1/(v(1)*h(1)*0.08)*(object_volume(m)+O(1,1)*object_supp(1,m
;O(2,1)*object_supp(2,m)+O(3,1)*object_supp(3,m))/3600+(
t_powder(1)=8/3600*(O(1,1)*z_a(1,m)+O(2,1)*z_a(2,m)+O(3,1)*z_a(3,m))/
;(1)h

;for(orientation(k):@bin(o(k,1)))@

O(1,1)+O(2,1)+O(3,1)=1;

_O(1,1)*x_a(1,m)*y_a(1,m)+O(2,1)*x_a(2,m)*y_a(2,m)+O(3,1)*x_a(3,m)*y
;a(3,m))<=area
;(O(1,1)*z_a(1,m)+O(2,1)*z_a(2,m)+O(3,1)*z_a(3,m))<=400

;v(1)>=500
;v(1)<=1200
;h(1)>=0.03
;h(1)<=0.06

=td(1)0.587742187577933 + 1.19988039797718 *
@TanH(
0.5 * ((-46.2731404940706)
-0(1,1)*2.61297704368347
-0(2,1)*6.28097798813535
-0(3,1)*((-2.61297704368347) + (-6.28097798813535))
-0.0000008570635281531 *object_volume(m) + 0.0171492355295428 *v(1)
+ 0.115704191180346 *p(m) + 0.0136183760265197 *h(1))
) + 0.929652752153762 * @TanH(
0.5 * ((-7.09262172556369)
+0(1,1)*0.13481244449648
+0(2,1)*8.24972363273465
-0(3,1)*(0.13481244449648 + 8.24972363273465)
-0.0000801143480951409 *object_volume(m) + 0.0127925162391357*v(1)
+ 0.00881484933377671 *p(m) -104.932309364425 *h(1))
) + 0.613898277259967 * @TanH(
0.5 * (40.2395852359506
+0(1,1)*1.17416926271473

```

```

+0(2,1)*0.28343606308238
-0(3,1)*(1.17416926271473 + 0.28343606308238)
+ 0.000112634862590932 *object_volume(m) -0.034462954917106 *v(1) -
0.101706823642161 *p(m) + 281.467516333282 *h(1))
);

-td_cal(1)=td_ran(m)*(td(1)-(td_min(m)))/(td_max(m)
;(td_min(m))+td_0(m)

=Ra(1)3.39672482982828 + 1.83128450778475 *
@TanH(
0.5 * ((-12.930877325312) + 1.72718299685478 *td_cal(1)
-0(1,1)*0.663741976276295
-0(2,1)*1.57647249952583
-0(3,1)*((-0.663741976276295) + (-1.57647249952583))
+ 0.0000013102141822719 *object_volume(m) + 0.0112647459291987*v(1)
+ 0.0183881927299335 *p(m) -88.8933999096528 *h(1))
) -3.70249674321046 * @Tanh(
0.5 * ((-2.0668988374401) + 1.69505460704179 *td_cal(1)
-0(1,1)0.00557420917382805*
-0(2,1)*1.13578215955483
-0(3,1)*((-0.00557420917382805) + (-1.13578215955483))
-0.0000574312210991677 *object_volume(m) + 0.00571082834601422*v(1)+
0.00801957244866501 *p(m) -66.2130922616914 *h(1))
) -3.59396729852524 * @Tanh(
0.5 * ((-3.57447484215349) + 1.39692369161833 *td_cal(1)
-0(1,1)*0.281251042509843
-0(2,1)*0.357499140060259
-0(3,1)*((-0.281251042509843) + (-0.357499140060259))
+ 0.0000533028173220297 *object_volume(m) + 0.000344013671797698
*v(1) + 0.00277465524023591 *p(m) -6.49353484635804 *h(1))
);

Ra_cal(1)=1+3*(Ra(1)-(Ra_min(m)))/(Ra_max(m)-(Ra_min(m)));

```

```

tc(1)=0.463006821893106 + 4.2518410919931 *@TanH(
0.5 * ((-2.26807458730899) -0.023281958929414 *td_cal(1)
+0(1,1)*4.3828905765068
-0(2,1)*4.56398094032229
-0(3,1)*(4.3828905765068 + (-4.56398094032229))
+ 0.000332730795997377 *object_volume(m) + 0.00914883773932156*v(1)
+ 0.0210542143813408 *p(m) + 30.6057424591073 *h(1)
-7.76652673222902 *Ra_cal(1))
) + 0.953377173688829 * @TanH(
0.5 * (10.7091201046443 + 2.22150856550781 *td_cal(1)
+0(1,1)*0.882110483515168
+0(2,1)*0.648184694964362
-0(3,1)*(0.882110483515168 + 0.648184694964362)
+ 0.0000062363943963168 *object_volume(m) -0.00243043604398776
*v(1) -0.00378679282175237 *p(m) -4.54142383658083 *h(1)
-2.7619011786434 *Ra_cal(1))
) -4.66572445807879 * @TanH(
0.5 * (8.52777790960608 + 1.50189191993906 *td_cal(1)
+0(1,1)3.49887387453554*
-0(2,1)*3.22928647641813
-0(3,1)*(3.49887387453554 + (-3.22928647641813))

```



```

+ 0.000137601572567658 *object_volume(m) + 0.00985077859297258*v(1)
+ 0.0186779582945122 *p(m) -167.707196085646 *h(1)
-6.6753483907535 *Ra_cal(1));
tc_cal(1)=tc_ran(m)*(tc(1)-(tc_min(m)))/(tc_max(m)-(tc_min(m)))+tc_0(m);
@free(td(1));
@free(Ra(1));
@free(tc(1));
@free(td_cal(1));

endsubmodel

:calc
:for(object(i)@
;m=i
;solve(optimization)@
;layer_height(i)=h(1)
;sol_obj1(i,1)=h(1)
;sol_obj1(i,2)=v(1)
;sol_obj1(i,3)=0(1,1)
;sol_obj1(i,4)=0(2,1)
;sol_obj1(i,5)=0(3,1)
;sol_obj1(i,6)=0(1,1)*z_a(1,m)+0(2,1)*z_a(2,m)+0(3,1)*z_a(3,m)
;sol_obj1(i,7)=t_powder(1)
;sol_obj1(i,8)=t_scan(1)
;sol_obj1(i,9)=td_cal(1)
;sol_obj1(i,10)=tc_cal(1)
;sol_obj1(i,11)=Ra_cal(1)
;sol_obj1(i,12)=0
;(

:for(job(j)@
;num_assign=0
:for(object(b)@
;num_assign=num_assign+assign(b)
;(
:ifc(num_assign#LT#@size(object)@

:for(object(i)|assign(i)#EQ#1@
;layer_height(i)=-100
;(
;sort1=@sort(layer_height)
:for(object(i)@
;sort2(i)=layer_height(sort1(i))
;(
;i=1
:while((sort2(i))#LT#0@
;count_layer(i)=1
;i=i+1
;(
;d=i
;s=i
:while (i#LT#@size(object)@
:ifc(sort2(i) #EQ# sort2(i+1)@
;count_layer(s)=count_layer(s)+1
;i=i+1
else@
;i=i+1
;s=i
;(
;(

```

```

;max_count=count_layer(d)
;max_index=d
:for(object(b)|b#GE#d@
:ifc(max_count#LE#count_layer(b)@
;max_count=count_layer(b)
;max_index=b
;(
;(
;h(1)=sort2(max_index)
:for(object(b)@
;count_layer(b)=1
;(

;finale_height(j)=h(1)
:for(object(b)|assign(b)#LT#1@
;m=b
;solve(optimization)@
;sol_obj2(b,1)=h(1)
;sol_obj2(b,2)=v(1)
;sol_obj2(b,3)=O(1,1)
;sol_obj2(b,4)=O(2,1)
;sol_obj2(b,5)=O(3,1)
;sol_obj2(b,6)=O(1,1)*z_a(1,m)+O(2,1)*z_a(2,m)+O(3,1)*z_a(3,m)
;sol_obj2(b,7)=t_powder(1)
;sol_obj2(b,8)=t_scan(1)
;sol_obj2(b,9)=td_cal(1)
;sol_obj2(b,10)=tc_cal(1)
;sol_obj2(b,11)=Ra_cal(1)
;sol_obj2(b,12)=0
;real_scan(b)=t_scan(1)
;(

;k=1
:while(assign(k)#EQ#1@
:ifc(k#LT#@size(object)@
;k=k+1
else@
;break@
;(
;(
;max_t=sol_obj2(k,6)
;max_ind=k
:for(object(b)| assign(b)#LT#1@
:ifc((sol_obj2(b,6))#GT#max_t@
;max_t=sol_obj2(b,6)
;max_ind=b
;(
;(
;sum_temp(j)=sum_area(j)
sum_area(j)=sum_area(j)+sol_obj2(max_ind,3)*x_a(1,max_ind)*y_a(1,max
+(ind
+sol_obj2(max_ind,4)*x_a(2,max_ind)*y_a(2,max_ind)
;sol_obj2(max_ind,5)*x_a(3,max_ind)*y_a(3,max_ind)

;WRITE(' ', @newline(1))@
;WRITE( @FORMAT(sum_area(j) , '14.5g'))@
;WRITE(' ', @newline(1))@

:ifc(sum_area(j)#LT#area@

```

```

:ifc(assign(max_ind)#LT#1@
;x(max_ind,j)=1
;assign(max_ind)=1
;cur_num_j(j)=cur_num_j(j)+1
;finale_sol(max_ind,1)=sol_obj2(max_ind,1)
;finale_sol(max_ind,2)=sol_obj2(max_ind,2)
;finale_sol(max_ind,3)=sol_obj2(max_ind,3)
;finale_sol(max_ind,4)=sol_obj2(max_ind,4)
;finale_sol(max_ind,5)=sol_obj2(max_ind,5)
;finale_sol(max_ind,6)=sol_obj2(max_ind,6)
;finale_sol(max_ind,7)=sol_obj2(max_ind,7)
;finale_sol(max_ind,8)=sol_obj2(max_ind,8)
;finale_sol(max_ind,9)=sol_obj2(max_ind,9)
;finale_sol(max_ind,10)=sol_obj2(max_ind,10)
;finale_sol(max_ind,11)=sol_obj2(max_ind,11)
;finale_sol(max_ind,12)=sol_obj2(max_ind,12)
t_job_no_powder(j)=t_job_no_powder(j)+finale_sol(max_ind,8)+finale_so
;l(max_ind,9)+finale_sol(max_ind,10)

:for(object(b)|assign(b)#LT#1@
sol_obj2(b,12)=@sum(object(y)|x(y,j)#EQ#1:@abs(sol_obj2(b,6)-
;finale_sol(y,6)))/cur_num_j(j)
;(

;(
else@
;sum_area(j)=sum_temp(j)

;(

;WRITE(' ', @newline(1))@
;d=1
;WRITE(@FORMAT( s,'4.0f'),' ' )@
:FOR( object(f)@
;WRITE(@FORMAT( d,'14.5g'))@
:for(parameters(e)@
;(WRITE( @FORMAT(sol_obj2(f,e) ,'14.5g'))@
;WRITE( @NEWLINE(1))@
;(d=d+1

;num_assign2=0
:for(object(b)@
;num_assign2=num_assign2+assign(b)
;(

:ifc(num_assign2#LT#@size(object)@
:while(area#GE#sum_area(j)@
;k=1
:while(assign(k)#EQ#1@
:ifc(k#LT#@size(object)@
;k=k+1
else@
;break@
;(
;(
:ifc(assign(k)#LT#1@

;min_t=sol_obj2(k,12)
;min_index=k

```

```

:for(object(b)|assign(b)#NE#1@
:ifc((sol_obj2(b,12))#LT#min_t@
;min_t=sol_obj2(b,12)
;min_index=b
;(
;(
;sum_temp(j)=sum_area(j)
sum_area(j)=sum_area(j)+sol_obj2(min_index,3)*x_a(1,min_index)*y_a(1,
+(min_index
+sol_obj2(min_index,4)*x_a(2,min_index)*y_a(2,min_index)
;sol_obj2(min_index,5)*x_a(3,min_index)*y_a(3,min_index)

:ifc(area#LT#sum_area(j)@
:ifc(fisible(min_index,j)#EQ#0@
;sum_area(j)=1000000
else@
;sum_area(j)=sum_temp(j)
;fisible(min_index,j)=0
;real_scan(min_index)=sol_obj2(min_index,8)
sol_obj2(min_index,12)=100000;
;(

else@
:ifc(fisible(min_index,j)#EQ#1@

;x(min_index,j)=1
;assign(min_index)=1
;cur_num_j(j)=cur_num_j(j)+1
;finale_sol(min_index,1)=sol_obj2(min_index,1)
;finale_sol(min_index,2)=sol_obj2(min_index,2)
;finale_sol(min_index,3)=sol_obj2(min_index,3)
;finale_sol(min_index,4)=sol_obj2(min_index,4)
;finale_sol(min_index,5)=sol_obj2(min_index,5)
;finale_sol(min_index,6)=sol_obj2(min_index,6)
;finale_sol(min_index,7)=sol_obj2(min_index,7)
;finale_sol(min_index,8)=sol_obj2(min_index,8)
;finale_sol(min_index,9)=sol_obj2(min_index,9)
;finale_sol(min_index,10)=sol_obj2(min_index,10)
;finale_sol(min_index,11)=sol_obj2(min_index,11)
;finale_sol(min_index,12)=sol_obj2(min_index,12)
_t_job_no_powder(j)=t_job_no_powder(j)+finale_sol(min_index,8)+finale
;sol(min_index,9)+finale_sol(min_index,10)

:for(object(b)|assign(b)#LT#1@
:sol_obj2(b,12)=@sum(object(y)|x(y,j)#EQ#1
;abs(sol_obj2(b,6)-finale_sol(y,6))/cur_num_j(j)@

;WRITE(' ', @newline(1))@
;WRITE( @FORMAT(cur_num_j(j) , '14.5g'))@
;(

;WRITE(' ', @newline(1))@
;d=1
;WRITE(@FORMAT( s, '4.0f'), ' ' )@
:FOR( object(f)@
;WRITE(@FORMAT( d, '14.5g'))@
:for(parameters(e)@
;(WRITE( @FORMAT(sol_obj2(f,e) , '14.5g'))@
;WRITE( @NEWLINE(1))@
;(d=d+1

```

```

;k=1
;(
;(
;(
;num_assign=0
:for(object(b))@
;num_assign=num_assign+assign(b)
;(

:ifc(num_assign#EQ#@size(object))@
;sum_area(j)=10000000
;(

;WRITE( @NEWLINE(1))@

;(
;(
;(

:for(job(j))@
_t_job(j)=t_job_no_powder(j)+@max(object(b):x(b,j)*(finale_sol(b,3)*z
a(1,b)+finale_sol(b,4)*z_a(2,b)+finale_sol(b,5)*z_a(3,b)))/finale_hei
;ght(j)*8/3600
;(

;for(object(b):sol_obj2(b,8)=real_scan(b))@
;(

WRITE('          object          job 1          job 2          job@
;(newline(1))@ , '3
;d=1
:FOR( object(f))@
;WRITE(@FORMAT( d, '14.5g'))@
:for(job(j))@
;(WRITE( @FORMAT(x(f,j) , '14.5g'))@
;WRITE( @NEWLINE(1))@
;(d=d+1
;d=1

;WRITE('          job height ', @newline(1))@
;WRITE('          1          2          3', @newline(1))@
;for(job(j):@write(@format(finale_height(j), '14.5g'))@

;WRITE('          ', @newline(1))@

;WRITE('          total time of jobs', @newline(1))@

;WRITE('          1          2          3', @newline(1))@
:for(job(j))@
;(WRITE( @FORMAT(t_job(j) , '14.5g'))@
;WRITE( @NEWLINE(1))@

;WRITE( @NEWLINE(1))@
WRITE('          layer_height          speed@
incline          stand          recline          object height          t_powder_alone
;(t_scan          design          post process          Ra ', @newline(1)
:for(object(f))@
;WRITE(@FORMAT( d, '14.5g'))@
:for(parameters(par) |par#LT#12@
;(WRITE( @FORMAT(finale_sol(f,par) , '14.5g'))@

```

```
;WRITE( @NEWLINE(1))@  
;(d=d+1  
endcalc
```

