

המחלקה להנדסת תוכנה

פרויקט גמר – תשע"ט

פיתוח מודל לחיזוי מזג אוויר עבור לווייני LEO

Development of a weather forecasting
model for LEO satellites

From:

Michal Lasry 314994336

Malka Neusutadt 315560078

2019 June תמוז תשע"ט

המחלקה להנדסת תוכנה

פרויקט גמר – תשע"ט

פיתוח מודל לחיזוי מזג אוויר עבור לווייני LEO

Development of a weather forecasting model for LEO satellites

From:

Michal Lasry 314994336

Malka Neusutadt 315560078

מנחה אקדמי: ד"ר גיא לשם חתימה: תאריך:

רכז פרויקטים: מר אסף שפנייר חתימה: תאריך:

הצהרה:

העבודה נעשתה בהנחיית ד"ר גיא לשם, במחלקה להנדסת תוכנה, במכללת "עזריאלי"- המכללה להנדסה ירושלים.

העבודה התבצעה בזוג, מאחר שפרויקט מחקרי דורש חקירה משמעותית ורחבת היקף המצריכה זוג ידיים נוספות.

העבודה מציגה את עבודתנו האישית על הפרויקט ומהווה חלק מהדרישות לקבלת תואר ראשון בהנדסה.

תודות:

בתחילה נודה לבורא עולם על הסיעתא דשמיא שהעניק לנו בעבודה זו ובכלל.

**תודה ענקית למנחה ד"ר גיא לשם על כל התמיכה ההבהרה
והסבלנות ובעיקר על הנכונות לעזור בשמחה ובשיתוף פעולה מלא.**

**תודה ענקית להורינו שתמכו ונתנו את כל שביכולתם בכדי שנלמד בשלווה וברוגע,
בכל קושי במהלך כל התואר ובמיוחד במהלך הפרויקט.**

ותודה רבה לחברותינו לכיתה שגרמו ללימודים להיות מהנים ומלאים בתוכן.

תוכן עניינים:

6	תקציר
7	מילון מונחים:
8	1. תיאור מסגרת הפרויקט:
8	2. תיאור הבעיה:
8	2.1 עיקרי הבעיה:
9	2.2 דרישות:
9	2.3 הבעיה מבחינת הנדסת תוכנה:
9	3. תיאור הפתרון:
9	3.1 מודלים עבור הנחתות:
9	3.1.1 מודל להנחתה עקב שלג:
10	3.1.2 מודל להנחתה עקב סופות חול ואבק:
12	3.1.3 המודל להנחתה עקב גשם:
14	3.1.4 המודל להנחתה עקב עננות:
15	3.2 שלב 1 - איסוף נתונים:
17	3.3 שלב 2 - שימוש באלגוריתם המערכת הלומדת עבור חיזוי:
20	4. תיאור המערכת:
21	4.1 תיאור הכלים המשמשים לפתרון:
22	5. ספרות:
22	6. מסקנות ביניים:
23	7. ביבליוגרפיה:
24	8. נספחים:
24	8.1 תכנון הפרויקט:
24	8.2 בדיקות:

תקציר

הפרויקט הראשי הינו במסגרת מאגד Genesis - 'מאגד הטכנולוגיות לתקשורת לוויינית בכיסוי עולמי רחב סרט עם שיהוי נמוך'.

מטרת הפרויקט הכללי, הינה מחקר ופיתוח עבור ייעול ושיפור המשאבים בקונסטלציות LEO לווייניות. חלק זה בפרויקט מתמקד בפיתוח אלגוריתם לאמידה של דעיכת הערוץ עקב תופעות מזג האוויר. בזמן שידור תקשורת לוויינית ישנה דעיכה בערוצי התקשורת בנתיב חלל- כדור הארץ, ביחס לדעיכה כללית בחלל. הדעיכה נגרמת מסכום התרומות הבאות:

- הנחתה על ידי גשם, משקעים אחרים ועננים.
- הנחתה על ידי חול וסופות אבק.
- והשפעות של ריבוי נתיבי תקשורת.

השפעות אלו גורמות להפרעות בשידור כגון: איבוד חבילות, שליחה חוזרת של מידע, ועומס בנתיב התקשורת. על מנת להתגבר על הפרעות יש להגדיל את יעילותם של ערוצי התקשורת הלוויינית ולשם כך יש להגדיל את רוחב הפס ברשת. מטרה זו ניתנת להשגה בשני דרכים:

- הגדלת כמות תחנות הקרקע והלוויינים המשרתים את הרשת.
- הגדלת ניצול רוחב הפס (throughput) והעברת נתונים גבוהה.

מכיוון שהגדלת כמות תחנות הקרקע והלוויינים פוגע במודל ה**כלכלי** של הרשת נבחרה האופציה של ניצול רוחב פס השידור. העברת הנתונים מתבצעת בתקשורת לוויינית LEO.

פרויקט זה הינו פרויקט מחקרי אודות מודלי חישובי הנחתות המתרחשות עקב תופעות מזג אוויר כגון גשם, שלג, עננות, חול ואבק. המודלים שימשו לפיתוח אלגוריתם המנבא את תופעות מזג האוויר והשפעתו על התקשורת הלוויינית. בעזרתו ניתן יהיה לשדר ברוחב הפס המקסימלי לרגע הנתון. הפרויקט מתחלק לשלושה חלקים עיקריים:

- בניית מודלים לחישובי הנחתות עבור תופעות אטמוספריות.
- סימולן נתונים המדמים מצבים שמתארים הנחתה.
- פיתוח אלגוריתם לזיהוי הנחתה עקב ניבוי מזג אוויר.

מילון מונחים:

לווייני LEO: לוויינים הנמצאים במסלול לווייני נמוך (LEO - Low Earth Orbit) הם למעשה מרבית הלוויינים המקיפים את כדור הארץ, מגובה של 300 קילומטר ועד לגובה של 2,000 ק"מ. לוויינים הנמצאים במסלול LEO מקיפים את כדור הארץ כל 90–120 דקות. למעשה, רוב השימושים האפשריים של לוויינים נעשים באמצעות לוויינים הנמצאים במסלול LEO פרט לתפקיד אחד - לווייני תקשורת. לווייני תקשורת לעומת, לווייני LEO דורשים שימוש באנטנות המשנות את כיווןן באופן שוטף כך שהן תמיד יהיו מכוונות אל הלוויין.

לווייני Geo: לוויינים במסלול גאוסטציונרי. משך זמן ההקפה שלהם, שווה למשך זמן ההקפה של כדור הארץ סביב צירו, ולכן ייראו למתבונן מכדור הארץ כעומדים בנקודה קבועה. תכונה זו מהווה יתרון כאשר נדרש לספק שירות קבוע ורציף: האנטנות הקרקעיות שמתקשרות עם לוויינים מכוונות באופן קבוע אל לווייני ה-GEO-הנמצאים בנקודה קבועה ביחס לקרקע. רוב לווייני התקשורת הם GEO, ונותנים שירות קבוע כתחנת ממסר לקליטה ושידור של אותות ונתונים, כגון שיחות טלפון בינלאומיות או שידורי טלוויזיה.

תחנות קרקע: תחנות הקרקע יכולות להיות מסוגים רבים ומגוונים. התחנות יכולות להיות נייחות או ניידות, בעלת קיבולת שונה, או בעלות משטר תקשורת שונה וכדומה. במערכות המפיצות את שידורי הטלוויזיה לבית קיימת תחנה משדרת את התבניות ומספר רב של תחנות הקולטות את שידורי הלוויין.

הנחתה (ניחות): פיחות עוצמת אות התקשורת כאשר הוא עובר מהמשדר למקלט.

לוויין תקשורת: הינו לוויין מלאכותי המשמש למטרות תקשורת - העברת אותות בין שתי נקודות על פני כדור הארץ. לוויין כזה מתפקד בדרך כלל כתחנת ממסר בחלל ותפקידו לקלוט אותות שמשודרים אליו מנקודה אחת (או מספר נקודות) על פני כדור הארץ, ולשדר אותם בחזרה אל כדור הארץ תוך כיסוי שטח מרוחק או גדול יותר למוקדי קליטה שונים.

מערכת ניהול הפרויקט:

מיקום:	מערך:	
https://github.com/MichaLasry/Final-project	Repository	1
https://github.com/MichaLasry/Final-project/projects/1	Schedule	2
https://github.com/MichaLasry/Final-project/issues	Issues	3
https://embed.vidyard.com/share/yCcrv2GQQRyG1SAzNZERC?vyetoken=0cb85281-b4b6-4eef-b8a1-24ddaed7318c	Video	4

1. תיאור מסגרת הפרויקט:

במסגרת הפרויקט נדרשה חקירה וניתוח של מודלים מהספרות המקצועית לחישובי הנחתות עקב תופעות מזג אוויר שונות, חלקן מתבססות על אדי מים וחלקן מחלקיקי חול. בזמן ניתוח המודלים נבחרו המודלים המדויקים ביותר שיחשבו הנחתה בנתונים מסוימים. לאחר שנבחרו המודלים הטובים ביותר לצורך מטרה זו, נערך מיפוי הרכיבים עבור כל מודל לחישוב הנחתה מסוימת בטבלאות כך שניתן יהיה למלא את הטבלאות בנתוני אמת כפונקציה של זמן.

לאחר שנבנו טבלאות עבור מודלים של גשם, שלג, עננות וסופות חול ואבק, הופנתה בקשה למאגד ג'נסיס לקבלת נתוני אמת לצורך חישובי ההנחתות, אך הפניה לא נענתה. בקשה נוספת הופנתה לחברת אלביט, המהווה חלק מהמאגד. חברה זו נענתה לבקשה והריצה את נתונים עבור הנחתות גשם ועננות בלבד בסימולטור לוויין. עבור שאר תופעות מזג האוויר נעשה סימולציה בנתונים עצמאיים באלגוריתם "מונטה קרלו". אלגוריתם זה מדמה נתונים באופן רנדומלי בטווח נתון. ערכי הטווח של כל רכיב בחישוב הושגו מתוך הספרות המקצועית. לאחר שהנתונים הורצו, מולאו טבלאות החישוב של המודלים. הטבלאות והמודלים יוצגו עבור קירוב של 7 רמות שידור: 2.4, 10, 15, 23, 32, 48, ו-72 GHz, ובאופן זה ראינו את השינוי בגובה ההנחתה ביחס לגובה השידור.

הפרויקט כולל שלושה חלקים עיקריים:

- 1 מחקר וניתוח של מאמרים על מודלי החישוב ההנחתה.
- 2 איסוף נתונים לדימוי מצב אמיתי.
- 3 הליך אמידה וחיזוי.

הרציונל לבחירת מחקר הינו חוסר במנגנון המנבא מזג אוויר במהירות עבור שידורי לוויין.

אמנם, האלגוריתם לא מבטיח דיוק בחיזוי לזמן רחוק, אך במערכת זו אין צורך בחיזוי לטווח של יותר מ-15 דקות קדימה, מאחר שזמן התקשורת שניתן ליצור בין תחנת הקרקע והלוויין נע בין 5-15 דקות. לכן, הגבלה זו לא מהווה בעיה.

2. תיאור הבעיה:

במהלך שידור תקשורת לוויינית, ישנו קושי הנובע מתופעות אטמוספריות של מזג האוויר המשפיעות על התקשורת וגורמות ל:

- אובדן עוצמת האות במקלט.
 - אי ניצול של כוח השידור בניסיון להתגבר על צורה זו של הנחתה.
 - אובדן מלא של האות במקלט במקרים קיצוניים.
 - חוסר הזמינות של נתיב הלוויין עבור אחוז גדול מהזמן.
- השלכות אלה מפחיתות את איכות ההולכה של האות בזמן שידור בתדר של מעל 10GHz. על מנת לאפשר שידור חלק יותר ישנו צורך בפיתוח אלגוריתם מדויק ומהיר. התופעות האטמוספריות אקראיות ולכן כיום מנסים להימנע מהן ע"י חישוב שהייה לוויינית והורדת שוליים בתדר לכל חישוב, ללא ניצול של רוחב הפס הקיים.

2.1 עיקרי הבעיה:

- סיבוכיות זמן ריצה גבוהה מאחר שישנם חישובים מורכבים.
- מהירות: התוצאה צריכה להיות מהירה מאחר שהקשר עם הלוויין הוא בין 5 ל 10 דקות.

- מציאת המודלים המדויקים והקרובים ביותר למציאות.

2.2 דרישות:

- פיתוח אלגוריתם לאמידה של דעיכת הערוץ דרישה זו כוללת:
- לימוד ומחקר המונחים הקשורים לניבוי הנחתה שיכולים ליעל ולקדם את המחקר.
- חקירת המודלים והאלגוריתמים היכולים להתאים למטרה, ובחירת המודלים המתאימים ביותר.
- פיתוח האלגוריתם על סמך הממצאים שהשגנו.

2.3 הבעיה מבחינת הנדסת תוכנה:

- סימלון הנתונים על ידי אלגוריתם מונטה קרלו שנכתב ב-MATLAB.
- מימוש המודלים לחישובי ההנחתות גם בשפת MATLAB.
- בניית סט טבלאות נתונים עבור כל רמות שליחת התדר: 2.4, 10, 15, 23, 32, 48 ו-72 GHz.
- פיתוח אלגוריתם יעיל ומהיר לניבוי ההנחתות.

3. תיאור הפתרון:

הפתרון הינו פיתוח אלגוריתם שיאפשר חיזוי ושיפור הביצועים של מערכת תקשורת לוויינית. בתחילה נלמד ונחקר נושא הפרויקט לפרטיו, וסוגי המודלים לחישובי ההנחתות שנגרמות מתופעות אטמוספריות כמו גשם, עננות, שלג, סופות חול ואבק. במהלך המחקר נבדקה התאמתם של מספר מודלים עבור תופעה מסוימת. לאחר ניתוח המודלים, נבחר המודל הטוב ביותר. לדוגמא, עבור הנחתה נמצאו שני מודלים שמחשבים הנחתה של שלג שהם: Goldhirish Model ו-Helshaikeh Model ששניהם מחשבים הנחתות עבור שלג. אך לאחר שנלמדו לעומק, ותוצאותיהם הושושו עם מדידות של הנחתה אמיתית, נמצא כי Helshaikeh Model משיג תוצאות המקורבות ביותר להנחתה מציאותית, ולכן נבחר לחישוב הנחתה עקב שלג. בצורה זו נבחרו גם המודלים עבור הנחתה של גשם, עננות, סופות חול והאבק, הושוו המודלים האפשריים, נמצאו הקרובים ביותר ונבחרו לעבודה.

3.1 מודלים עבור הנחתות

3.1.1 מודל להנחתה עקב שלג:

ישנם שני סוגי שלג שהמודל מייחס להם חשיבות והם: dry snow, wet snow (Series,2012). wet snow - הוא פתית כבד יחסית, מכיל כמות מים גדולה יחסית, נקודת הנמסות שלו היא עד $10\mu\text{m}$ ובדרך כלל ימס יותר מהר מ-dry snow. dry snow - מכיל כמות מים נמוכה, ועומק הנמסות שלו היא עד $20\mu\text{m}$. נמס לאט ויורד לאט. ההנחתה הספציפית עקב השלג מיוצגת כפונקציה של שיעור קצב השלג היורד ב mm/h , ומחושבת על ידי היחס

$$\gamma_{\text{snow}} = a \cdot S^b$$

הבא:

כאשר: S - הוא שיעור קצב השלג.

- A ו-b הם פונקציונאליות לאורך הגל המשודר ומחושבות כך:

	A	B
Wet Snow	$0.0001023f_{nm} + 3.7855466$	0.72
Dry Snow	$0.0000542f_{nm} + 5.4958776$	1.38

- f היא אורך הגל וחושבה בפרויקט כ: 2.4, 10, 15, 23, 32, 48, 72 GHz.

להלן דוגמית מהטבלה על פי המודל: העמודה הסופית היא החישוב הסופי להנחתה בכל שורת חישוב.

Snow Attenuation	Power b	b	a	Wave length	Snow kind	Snow Rate
0.43562	0.60482	0.72	0.72024	2.3859	1	0.4974
0.21355	0.2965	0.72	0.72024	2.3336	1	0.1848
0.39887	0.55381	0.72	0.72024	2.3623	1	0.4401
0.14419	0.20019	0.72	0.72024	2.372	1	0.1071
0.77383	1.0744	0.72	0.72024	2.3848	1	1.1048
0.64223	0.89168	0.72	0.72024	2.3629	1	0.8528
1.46145	1.05884	1.38	1.38024	2.3623	0	1.0423
1.27808	0.92598	1.38	1.38024	2.3804	0	0.9458
0.09001	0.06521	1.38	1.38024	2.3631	0	0.1383
1.66222	1.20429	1.38	1.38024	2.3794	0	1.1442
0.47594	0.34482	1.38	1.38024	2.3495	0	0.4623
0.30498	0.42299	0.72	0.72102	9.9851	1	0.3027
0.575	0.79748	0.72	0.72102	9.9627	1	0.7303
0.63917	0.88648	0.72	0.72102	9.9764	1	0.8459
0.18976	0.26318	0.72	0.72102	9.9886	1	0.1566
0.74972	1.0398	0.72	0.72102	9.9744	1	1.0557
0.53313	0.73941	0.72	0.72102	9.9612	1	0.6575
0.74342	1.03106	0.72	0.72102	9.9687	1	1.0434
0.18581	0.25771	0.72	0.72102	9.9591	1	0.1521
0.16115	0.2235	0.72	0.72102	9.9974	1	0.1248
0.20182	0.27991	0.72	0.72102	9.9798	1	0.1706
0.22581	0.31319	0.72	0.72102	9.9575	1	0.1994

הטבלאות המלאות מופיעות ב-GitHub.

3.1.2 מודל להנחתה עקב סופות חול ואבק:

המודל מתייחס לגודל החלקיקים, להפצה של החלקיקים, ולנראות, ולשלושה סוגי חול, שהם: clay, loamy, sandy ההתייחסות לחול היא בכך שהמקדם הדיאלקטרי נבחר על פי סוג החול. ומחושב כך:

$$A = \frac{r_e f}{v} (x + y r_e^2 f^2 + z r_e^3 f^3) [dB/km]$$

כאשר:

- r_e הוא הרדיוס של חלקיקי האבק והחול.

- f הוא עוצמת שליחת התדר. (GHz..., 2.4, 10, 15, 23)

- v הוא הנראות בקילומטר.

$$x = \frac{1886 \times \epsilon''}{(\epsilon' + 2)^2 + \epsilon''^2}$$

$$y = 137 \times 10^3 \times \epsilon'' \left\{ \frac{6(7\epsilon'^2 + 7\epsilon''^2 + 4\epsilon' - 20)}{5[(\epsilon' + 2)^2 + \epsilon''^2]^2} + \frac{1}{15} + \frac{5}{3[(2\epsilon' + 3)^2 + 4\epsilon''^2]} \right\}$$

$$z = 379 \times 10^4 \left\{ \frac{((\epsilon' - 1)^2 (\epsilon' + 2) + [2(\epsilon' - 1)(\epsilon' + 2) - 9] + \epsilon''^4)}{[(\epsilon' + 2)^2 + \epsilon''^2]^2} \right\}$$

$$= Z -$$

באשר ϵ' , ϵ'' הם המקדמים הדיאלקטרים שתלויים ברמת השליחות ובסוג החול בסופה. ונתונים כך:

Band	Frequency Range (GHz)	Soil Type	Moisture Content % (g H ₂ O/g)	Dielectric Constant $\epsilon' - j\epsilon''$	Reported by
S	1 - 4	Sandy Soil	0	2.55-j0.016	Von Hippel [19]
			4	4.4-j0.2024	
			16.8	20-j2.6	
		Loamy	0	2.44-j0.003	
			2.2	3.5-j0.14	
			13.7	20-j2.4	
X	8 - 12	Sandy Soil	0	2.55-j0.016	Von Hippel [19]
			4	4.4-j0.2024	
			16.8	20-j2.6	
		Loamy	0	2.44-j0.003	
			2.2	3.5-j0.14	
			13.7	20-j2.4	
Ku	12 - 18	Sandy Soil	0	2.55-j0.016	Njoku and Kong [20]
			4	4.4-j0.2024	
			16.8	20-j2.6	
		Loamy	0	2.44-j0.003	
			2.2	3.5-j0.14	
			13.7	20-j2.4	
K	18 - 26.5	Silty Clay	0	2.55-j0.016	Schmugge, Gloersen, Wilheit and Geiger [21]
			4	4.4-j0.2024	
			16.8	20-j2.6	
		Loam	0	2.44-j0.003	
			2.2	3.5-j0.14	
			13.7	20-j2.4	
Ka	26.5 - 37	Sandy Soil	0.3	2.5-j0.028	Njoku and Kong [20]
			5	3.6-j0.65	
			10	5.1-j1.4	
			20	7.8-j5.3	
			30	9.8-j9.9	
			0	2.53 - j0.065	Geiger and Williams [22]
		Loamy Fine Sand	5	2.45-j0.375	
			10	4-j1.325	
			15	6.72-j3.188	
			20	7.375-j4.156	
			0	2.515-j0.073	
		Sandy Clay Loam	5	2.88-j0.353	
			10	3.290-j0.728	
			15	7.088-j3.5	
			20	8.588-j4.765	

להלן דוגמית מהטבלה על פי המודל:

DUSA Att	Z-midel α	Y-midel α	X-midel α	ε''-imagir	ε'-real des	Frequen	Soil type	Re	Visability
0.51541	222570	15204.2	14.5811	0.93947	8.98333	2.3532	1	0.00394	0.2888
0.37285	222570	15204.2	14.5811	0.93947	8.98333	2.3525	1	0.00297	0.2888
0.38134	222570	15204.2	14.5811	0.93947	8.98333	2.3953	1	0.00298	0.2888
0.45354	222570	15204.2	14.5811	0.93947	8.98333	2.3828	1	0.00388	0.32694
0.21693	222570	15204.2	14.5811	0.93947	8.98333	2.3623	1	0.00201	0.32694
0.53919	222570	15204.2	14.5811	0.93947	8.98333	2.3694	1	0.00449	0.32694
0.21211	222570	15204.2	14.5811	0.93947	8.98333	2.334	1	0.0025	0.41704
0.23204	222570	15204.2	14.5811	0.93947	8.98333	2.3607	1	0.00269	0.41704
0.17367	222570	15204.2	14.5811	0.93947	8.98333	2.3904	1	0.00203	0.41704
0.29916	222570	15204.2	14.5811	0.93947	8.98333	2.3666	1	0.00371	0.46695
0.23444	222570	15204.2	14.5811	0.93947	8.98333	2.3511	1	0.00302	0.46695
0.19683	236210	27171.2	34.2981	1.4295	6.75	2.3734	2	0.00269	1.77284
0.21291	236210	27171.2	34.2981	1.4295	6.75	2.3623	2	0.00433	1.79829
0.22903	236210	27171.2	34.2981	1.4295	6.75	2.3804	2	0.00457	1.79829
0.12444	236210	27171.2	34.2981	1.4295	6.75	2.3631	2	0.00267	1.79829
0.1591	236210	27171.2	34.2981	1.4295	6.75	2.3794	2	0.0034	1.8408
0.07752	226278	14023.3	14.0151	0.84767	8.64667	2.3532	3	0.00394	1.8408
0.05613	226278	14023.3	14.0151	0.84767	8.64667	2.3525	3	0.00297	1.8408
0.05661	226278	14023.3	14.0151	0.84767	8.64667	2.3953	3	0.00298	1.86681
0.07615	226278	14023.3	14.0151	0.84767	8.64667	2.3828	3	0.00388	1.86681
0.03649	226278	14023.3	14.0151	0.84767	8.64667	2.3623	3	0.00201	1.86681
0.09017	226278	14023.3	14.0151	0.84767	8.64667	2.3694	3	0.00449	1.87302
0.04534	226278	14023.3	14.0151	0.84767	8.64667	2.334	3	0.0025	1.87302
3.42289	238230	27566.9	36.7057	1.404	6.37667	9.9573	1	0.00465	1.61551
3.69467	238230	27566.9	36.7057	1.404	6.37667	9.9532	1	0.00447	1.35513
2.38574	238230	27566.9	36.7057	1.404	6.37667	9.9852	1	0.00317	0.95144
20.7659	227980	66053.6	54.2559	4.3375	9.4875	22.9744	2	0.00338	2.08461
10.7833	227980	66053.6	54.2559	4.3375	9.4875	22.9347	2	0.00282	2.34854
145.849	227980	66053.6	54.2559	4.3375	9.4875	22.9149	2	0.00483	0.89203
137.805	227980	66053.6	54.2559	4.3375	9.4875	22.927	2	0.00394	0.49776
16.606	227980	66053.6	54.2559	4.3375	9.4875	22.9412	2	0.00284	1.56404
13.1774	227980	66053.6	54.2559	4.3375	9.4875	22.9733	2	0.00233	1.1312
111.287	227980	66053.6	54.2559	4.3375	9.4875	22.9989	2	0.00318	0.32694

3.1.3 המודל להנחתה עקב גשם:

המידה שבה הגשם סופג או מפזר את עוצמת האות תלוי בכמות, בגודל ובצורה של הטיפות, שדרך עובר האות (Rehman,2017).

שלב 1- יש לחשב את גובה מפלס הקור במהלך ירידת גשמים אשר יקבע כך:

$$hf_R(\theta) = \begin{cases} 5.0, & 0^\circ \leq \theta < 23^\circ \\ 5.0 - 0.075(\theta - 23), & \theta \geq 23^\circ \end{cases}$$

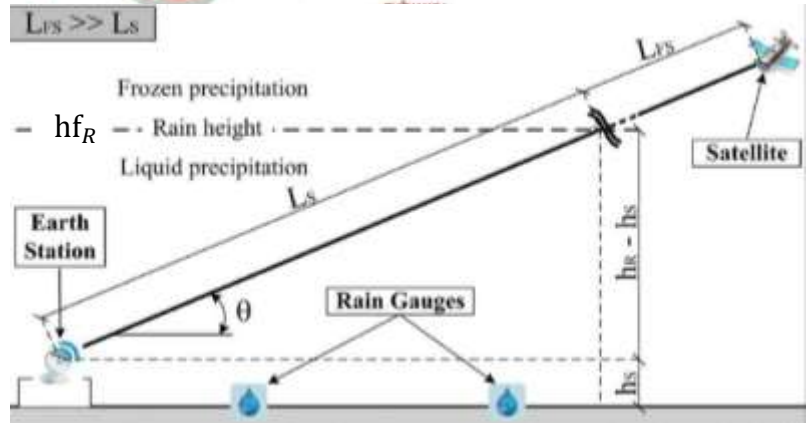
שלב 2- מחשב את אורך נתיב השיפוע l_s , מתחת לגובה מפלס הקור שנמדד ביחס להעלאת האנטנה של 5° , l_s יהיה:

$$l_s = \begin{cases} \frac{(hf_R - h_s)}{\sin \theta}, & \theta > 5^\circ \\ \frac{2(hf_R - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(hf_R - h_s)}{R_e}\right) 1/2 + \sin \theta}, & \theta \leq 5^\circ \end{cases}$$

כאשר: h_s הינו גובה תחנת הקרקע מעל מפלס הים ויוצג ב km.

R_e - הרדיוס היעיל של כדור הארץ (8,500 km)

$$L_{FS} \gg L_S$$



שלב 3- l_G ההטלה האופקית של אורך השיפוע שנמצא. (יתר)

שלב 4- חישוב l_o , האורך האופייני של 'תא גשם':

כאשר R הינו ערך שיעור הגשם. $l_o = 35e^{(-0.015R)}$

שלב 5- נחשב את גורם ההפחתה r : $r = \frac{1}{1 + \frac{l_G}{l_o}}$

שלב 6- נפצל את גורם ההפחתה לשני גורמים, הראשון הוא גורם הפחתה אופקי r_h והשני יהיה גורם הפחתה אנכי r_v .

$$r_h = \frac{1}{1 + l_G^{0.002(R)1.01}} \quad (1)$$

$$r_v = \frac{1}{1 + \frac{h f_R}{5 + 0.401.5}} \quad (2)$$

שלב 7- חישוב אורך המסלול העובר דרך הגשם l_e .

$$l_e = \frac{r_h x l_G}{\cos \varepsilon} \quad \text{כאשר} \quad \varepsilon = \tan^{-1} \left(\frac{h f_R r_v}{l_G r_h} \right)$$

שלב 8- ערך של ניחות ספציפי:

$$\gamma = K R^a$$

כאשר הערכים (k, α) הם מקדמים של הנחתת גשם בתדירות משתנה עבור פולינום לינארי ומחזורי, שיושג כך:

$$K = \frac{\kappa_H + \kappa_v + (\kappa_H - \kappa_v) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau}{2}$$

$$a = \frac{\kappa_H a_H + \kappa_v a_v + (\kappa_H a_H - \kappa_v a_v) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau}{2k}$$

כאשר $\alpha_H, \alpha_v, \kappa_H, \kappa_v$ הם מקדמים קבועים של קיטוב אנכי ואופקי בהתאמה. ומושגים מ ITR_U P.838-3 ונמצאים בנספחים.

שלב 9- ערך הנחתת הגשמים:

$$A = \gamma l_e r$$

להלן דוגמית מהטבלה על פי המודל:

Rain Loss	BER	Eb/No (dB)	C/N (dB)	C/No (dB)	Flux Dens	Rovd. Iso.	Frequenc	Freq. Dop	Prop Loss	Atmos Lo	Free Spa	Time (UTC)
0.3758	1.00E-30	33.7651	30.7548	105.806	-113.73	-142.79	2.40005	51.2858	172.793	1.8649	170.487	33:48.8
0.3765	1.00E-30	33.7777	30.7674	105.819	-113.72	-142.78	2.40005	51.2846	172.78	1.8545	170.484	33:49.0
0.3693	1.00E-30	33.8587	30.8484	105.9	-113.64	-142.7	2.40005	51.2778	172.699	1.7975	170.467	33:50.0
0.3597	1.00E-30	33.9401	30.9298	105.981	-113.56	-142.62	2.40005	51.271	172.618	1.7426	170.45	33:51.0
0.3493	1.00E-30	34.0203	31.01	106.061	-113.48	-142.54	2.40005	51.264	172.538	1.6899	170.433	33:52.0
0.3384	1.00E-30	34.0986	31.0883	106.14	-113.4	-142.46	2.40005	51.2569	172.459	1.6395	170.417	33:53.0
0.3275	1.00E-30	34.1749	31.1646	106.216	-113.32	-142.38	2.40005	51.2497	172.383	1.5913	170.4	33:54.0
0.3166	1.00E-30	34.2492	31.2389	106.29	-113.25	-142.31	2.40005	51.2425	172.309	1.5451	170.383	33:55.0
0.3059	1.00E-30	34.3215	31.3112	106.363	-113.18	-142.24	2.40005	51.2351	172.236	1.5009	170.366	33:56.0
4.4868	1.00E-30	22.7871	19.7768	94.8283	-112.32	-153.77	10.0001	133.364	183.771	0.1878	178.954	17:51.0
4.4699	1.00E-30	22.8218	19.8115	94.863	-112.28	-153.74	10.0001	132.835	183.736	0.187	178.938	17:52.0
4.4531	1.00E-30	22.8564	19.8461	94.8976	-112.25	-153.7	10.0001	132.303	183.702	0.1861	178.921	17:53.0
4.4363	1.00E-30	22.8909	19.8806	94.9321	-112.21	-153.67	10.0001	131.768	183.667	0.1853	178.905	17:54.0
4.4196	1.00E-30	22.9253	19.915	94.9665	-112.18	-153.63	10.0001	131.229	183.633	0.1845	178.889	17:55.0
4.403	1.00E-30	22.9595	19.9492	95.0007	-112.14	-153.6	10.0001	130.688	183.598	0.1837	178.872	17:56.0
4.3864	1.00E-30	22.9937	19.9834	95.0349	-112.11	-153.56	10.0001	130.143	183.564	0.183	178.856	17:57.0
4.3699	1.00E-30	23.0277	20.0174	95.0689	-112.07	-153.53	10.0001	129.595	183.53	0.1822	178.84	17:58.0
4.3534	1.00E-30	23.0616	20.0513	95.1028	-112.04	-153.5	10.0001	129.044	183.496	0.1814	178.824	17:59.0
4.3371	1.00E-30	23.0954	20.0851	95.1366	-112.01	-153.46	10.0001	128.489	183.463	0.1807	178.808	18:00.0
135.501	5.00E-01	-140.24	-143.25	-68.202	-265.24	-316.8	31.9993	-686.95	346.801	8.1608	192.784	48:31.0
137.558	5.00E-01	-142.64	-145.65	-70.601	-267.64	-319.2	31.9993	-687.06	349.2	8.4262	192.802	48:32.0
139.59	5.00E-01	-145.02	-148.03	-72.979	-270.02	-321.58	31.9993	-687.18	351.578	8.7054	192.819	48:33.0
141.567	5.00E-01	-147.35	-150.36	-75.305	-272.34	-323.9	31.9993	-687.29	353.904	8.9993	192.836	48:34.0
143.432	5.00E-01	-149.56	-152.57	-77.523	-274.56	-326.12	31.9993	-687.4	356.123	9.3089	192.853	48:35.0
145.046	5.00E-01	-151.54	-154.55	-79.497	-276.54	-328.1	31.9993	-687.52	358.096	9.6351	192.87	48:36.0
145.155	5.00E-01	-151.97	-154.98	-79.926	-276.97	-328.53	31.9993	-687.61	358.525	9.9368	192.885	48:36.9

3.1.4 המודל להנחתה עקב עננות:

הימצאות של עננים בנתיב ההתפשטות של האות גורמת לנפילה של עוצמת האות בגלל התפוצצות וקליטה של אנרגיה אלקטרומגנטית.

סוגים שונים של עננים גורמים לערכי הנחתה שונות. Icy cloud - לדוגמה הם עננים שמפוזרים בהם חלקיקי קרח, סוג זה של עננים גורמים לפחות הנחתה מאשר לעננים באזור אקלימי חמים יותר שגורמים להנחתה גבוהה יותר. הליקויים בתדר התקשורת נהיים משמעותיים יותר כאשר מדברים על מעבר של אותות מעל 10 GHz. בנוסף לפרמטרים של התדר כמו (f) וזווית הגובה (θ) , ההנחתה מהענן תלויה גם בפרמטרים שמייצגים ענכמו עובי, גובה, טמפרטורה ו LCW (תכולת המים הנזלים בענן).

שלבי המודל להנחתה של עננים:

שלב 1: לחשב את התדרים העיקריים והמשניים של הרגיעה ע"י המשוואות הבאות.

$$fr_{pri} = 20.09 - 142 \left(\frac{300}{T-1} \right) + 294 \left(\frac{300}{T-1} \right)^{-2}$$

$$fr_{sec} = 590 - 1500 \left(\frac{300}{T} \right)$$

כאשר T זה הטמפרטורה של העננים.

שלב 2: קובעים את הערך הדיאלקטרי המורכב שמציג את ההרכבה המים בעננים.

$$\mathcal{E}' = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{1 + \left(\frac{f}{fr_{pri}} \right)^2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{1 + \left(\frac{f}{fr_{sec}} \right)^2} + \epsilon_2$$

$$\varepsilon'' = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{fr_{pri}[1 + \left(\frac{f}{fr_{pri}}\right)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{fr_{sec}[1 + \left(\frac{f}{fr_{sec}}\right)^2]}$$

$$\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3\left(\frac{300}{T-1}\right) : \text{כאשר}$$

$$\varepsilon_1 = 5.48$$

$$\varepsilon_2 = 3.51$$

שלב 3: מקדם ניחות ספציפי לעננות:

$$\gamma_{clouds} = \frac{0.819 * f}{\varepsilon''[1 - \left(\frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}\right)^2]}$$

שלב 4: בשביל לקבל את LWC צריך לקחת מדידות רדיו מטריות עבור אזור מסוים.

$$A_{clouds} = \lambda_{clouds} \left(\frac{LWC}{\sin \theta} \right) \text{ הנחתה סופית-}$$

להלן דוגמית מהטבלה על פי המודל:

CloudsFox	BER	Eb/No (dB)	fr-sec	fr-pre	Flux Dens	Royd. Iso.	Royd. Freq	ε'	ε''	Atmos Loss	Free Space	Time (UTC)
0.0655	1.00E-30	33.7651	30.7548	105.806	-113.73	-142.79	2.40005	51.2858	172.793	1.8649	170.487	33:48.8
0.0655	1.00E-30	33.7777	30.7674	105.819	-113.72	-142.78	2.40005	51.2846	172.78	1.8545	170.484	33:49.0
0.0655	1.00E-30	33.8587	30.8484	105.9	-113.64	-142.7	2.40005	51.2778	172.699	1.7975	170.467	33:50.0
0.0654	1.00E-30	33.9401	30.9298	105.981	-113.56	-142.62	2.40005	51.271	172.618	1.7426	170.45	33:51.0
0.0652	1.00E-30	34.0203	31.01	106.061	-113.48	-142.54	2.40005	51.264	172.538	1.6899	170.433	33:52.0
0.0649	1.00E-30	34.0986	31.0883	106.14	-113.4	-142.46	2.40005	51.2569	172.459	1.6395	170.417	33:53.0
0.0646	1.00E-30	34.1749	31.1646	106.216	-113.32	-142.38	2.40005	51.2497	172.383	1.5913	170.4	33:54.0
0.0642	1.00E-30	34.2492	31.2389	106.29	-113.25	-142.31	2.40005	51.2425	172.309	1.5451	170.383	33:55.0
0.0638	1.00E-30	34.3215	31.3112	106.363	-113.18	-142.24	2.40005	51.2351	172.236	1.5009	170.366	33:56.0
0.0633	1.00E-30	34.3918	31.3815	106.433	-113.11	-142.17	2.40005	51.2276	172.166	1.4585	170.349	33:57.0
1.0304	7.52E-02	0.145	-2.8653	72.1862	-134.96	-176.41	10.0001	71.0701	206.413	1.6189	182.617	16:13.0
1.026	7.12E-02	0.3182	-2.6921	72.3594	-134.78	-176.24	10.0001	70.6323	206.24	1.6044	182.611	16:14.0
1.0216	6.73E-02	0.4889	-2.5214	72.5301	-134.61	-176.07	10.0001	70.1934	206.069	1.5902	182.605	16:15.0
1.0172	6.36E-02	0.6572	-2.3531	72.6984	-134.45	-175.9	10.0001	69.7536	205.901	1.5762	182.6	16:16.0
1.0127	6.00E-02	0.823	-2.1873	72.8642	-134.28	-175.74	10.0001	69.3129	205.735	1.5628	182.594	16:17.0
1.0083	5.66E-02	0.9864	-2.0239	73.0276	-134.12	-175.57	10.0001	68.8712	205.572	1.5492	182.588	16:18.0
0.3117	3.53E-10	12.7879	9.7776	84.8291	-118.79	-163.77	15.0003	298.875	193.77	0.2624	182.348	52:54.0
0.3097	2.38E-10	12.8751	9.8648	84.9163	-118.71	-163.68	15.0003	298.559	193.683	0.2607	182.323	52:55.0
0.3077	1.59E-10	12.9623	9.952	85.0035	-118.62	-163.6	15.0003	298.24	193.596	0.259	182.299	52:56.0
0.3056	1.05E-10	13.0495	10.0392	85.0907	-118.53	-163.51	15.0003	297.918	193.508	0.2574	182.274	52:57.0
0.3037	6.93E-11	13.1368	10.1265	85.178	-118.44	-163.42	15.0003	297.593	193.421	0.2557	182.249	52:58.0
0.3017	4.52E-11	13.2242	10.2139	85.2654	-118.36	-163.33	15.0003	297.264	193.334	0.2541	182.224	52:59.0
0.503	1.05E-02	4.251	1.2407	76.2922	-123.62	-172.31	22.9999	-81.587	202.307	0.8901	184.607	21:18.0
0.5036	1.08E-02	4.2182	1.2079	76.2594	-123.65	-172.34	22.9999	-83.711	202.34	0.8911	184.612	21:19.0
0.5041	1.10E-02	4.1846	1.1743	76.2258	-123.68	-172.37	22.9999	-85.832	202.373	0.8921	184.618	21:20.0

לאחר בחירת המודלים, העבודה עליהם מתחלקת ל-2 חלקים; איסוף נתונים, שימוש באלגוריתם.

3.2 שלב 1 - איסוף נתונים

עבור מילוי הטבלאות שיהיו סטים למערך הנתונים (מערך האימון והבדיקות), שנאספו עבור מערכת החיזוי (בהתבסס על מודלים של ההנחתות שהושגו), נדרש היה להשיג נתוני אמת מחברות המאגד. בשל קשיים בהשגת נתונים אלו, נבחר אלגוריתם מונטה-קרלו לסמלוח נתונים מקורבים, בטווח נבחר כל פעם לפי בחירה, בהתאמה לנדרש.

עקרונות אלגוריתם מונטה קרלו:

- הגדרת מרחב של ערכים אפשריים לאלגוריתם.
- ערכים נבחרים באופן רנדומלי ממרחב זה.
- נעשה חישוב הסתברותי על הערכים הנבחרים.
- מתבצע חישוב דטרמיניסטי מסוים.

במקרה שלנו:

עבור מילוי הנתונים בטבלה לעמודה של הנראות לדוגמא,

לפי המאמרים נמצא כי הנראות בזמן סופות חול ואבק היא בממוצע בסביבות [0.25,2.5], אך קיימים מקרים שהם קרובים לטווח זה, לכן הוגדר הקוד ל[2.9,0.1] ובכך בעצם מוגדרת התוצאה שתהיה כמו באמתי הסתברותית לערך קטן.

נבחרים 30 ערכים בטווח המוגדר באופן רנדומלי.

ולאחר שיש לנו 30 ערכים בטווח מוגדר, מורחב יותר מהמרחב הספציפי שאנחנו רוצים, אנחנו עושים חישוב

סטטיסטי וסוכמים כמה היו בתוך הטווח הרצוי וכמה מסביב.

- ועבור הטווח שבו חושבו הכמות הגבוהה של המספרים שהוגרלו, אנו בוחרים מספר מתחום זה.

```
for i=1:30
    rund_numbers(i)=get_rand_number(0.1,2.9);
end
for j=1:30
    if rund_numbers(j)>=0.25 && rund_numbers(j)<2.5
        field1=field1+1;
    elseif rund_numbers(j)>=2.5 && rund_numbers(j)<2.9
        field2=field2+1;
    elseif rund_numbers(j)>=0.1 && rund_numbers(j)<0.25
        field3=field3+1;
    end
end
if field1> field2 && field1> field3
    visibility(h)=get_rand_number(0.25,2.5);
elseif field2> field1 && field2> field3
    visibility(h)=get_rand_number(2.5,2.9);
elseif field3> field1 && field3> field2
    visibility(h)=get_rand_number(0.1,0.25);
end
```

J	I	H	G	F	E	D	C	B	A				
DUSA Atte	Z-midel	co	Y-midel	co	X-midel	co	ϵ'' -imagin	ϵ'' -real	dea	Frequency	Soil type	1-Re	Visability
0.06632	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3532	1	0.003938	2.244398				
0.049543	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3525	1	0.002972	2.173399				
0.044616	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3953	1	0.002979	2.468396				
0.116008	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3828	1	0.003876	1.278193				
0.037993	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3623	1	0.002009	1.866809				
0.186706	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3694	1	0.00449	0.944186				
0.18944	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.334	1	0.002503	0.466948				
0.048529	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3607	1	0.002688	1.994032				
0.050712	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3904	1	0.002025	1.428221				
0.141168	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3666	1	0.003711	0.989563				
0.067514	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3511	1	0.003018	1.621444				
0.041987	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3859	1	0.002678	2.321987				
0.094524	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3336	1	0.004575	1.87302				
0.10738	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3623	1	0.002876	0.971392				
0.343073	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.372	1	0.002733	0.288796				
0.254585	222570.2	15204.22	14.58106	0.939467	8.98333	2.3848	1	0.003231	0.47169				

כך מילאנו את הטבלה לאחר הרצה, כאשר עמודות A,B,D מורצות על אלגוריתמים בהתאמה.

טבלה זו חושבה לפי המודל לחישוב סופות חול ואבק, ומחושבת כך:

$$A = \frac{re}{v} (x + yre^2f^2 + zre^{3f^3}) [dB/km]$$

*פירוט המודל והטבלה המלאה מצורפים תחת הכותרת =תרשימים וטבלאות.

עמודות Rain/Cloud/Fog/Snow/Sand/Dust attenuation בטבלאות הן המשתנה המוסבר שלנו, אשר

מחושב ע"י מודלי ההנחתות (נוסחאות סופיות...).

סוג התווית ייצגנו בתווית כפולה גם כבינארי (לדוגמה, 1 (if attenuation = 0) או 0 (if attenuation ≠ 0)), או

רב מחלקתי (לדוגמא, 1 (if 0 < attenuation ≤ 0.3), 2 (if 0.3 < attenuation ≤ 0.6), ...).

3.3 שלב 2 - שימוש באלגוריתם המערכת הלומדת עבור חיזוי.

כעת אנו דנים כיצד ניתן להשתמש באלגוריתם המוצע על מנת לחזות את ניחות עוצמת האות מן הלוויין עקב מזג האוויר. הרעיון של תהליך החיזוי כולל את שני השלבים הבאים:

$$x_{m \times n, d, t} \rightarrow y_{m' \times 1, d, t + \Delta t} \text{ (Train file)}$$

$$x_{m \times n, d', t} \rightarrow y_{m' \times 1, d', t + \Delta t} \text{ (Test file)}$$

הליך האמידה המוצע מפורט כאן בארבעה שלבים:

- i. איסוף שני סטים של נתונים כך ש $x_{m \times n, d, t} \mid x_{m \times n, d, t + \Delta t}$, $\Delta t > 0$.
- ii. חישוב המשתנה המוסבר - העמודה של חישוב ההנחתה. $y_{m \times 1, d, t} \mid y_{m \times 1, d, t + \Delta t}$.
- iii. בניית סט אימון חדש $z_{m \times n + 1, d}$ וביצענו הצבה של $x_{m \times n, d, t} \mid y_{m \times n, d, t + \Delta t}$ בשרשרת התוצאה של x . כלומר, $z_{m \times n + 1, d} = [x_{m \times n, d, t} : y_{m \times n, d, t + \Delta t}]$.
- iv. איסוף מערך בדיקות $x_{\tilde{m} \times n, d + \Delta d, t}$ כאשר $\Delta d > 0$. וחישובנו את $y_{\tilde{m} \times 1, d + \Delta d, t + \Delta t}$ ע"י שימוש באלגוריתם המערכת הלומדת על הנתונים שחושבו $z_{m \times n + 1, d} \mid x_{\tilde{m} \times n, d + \Delta d, t}$.

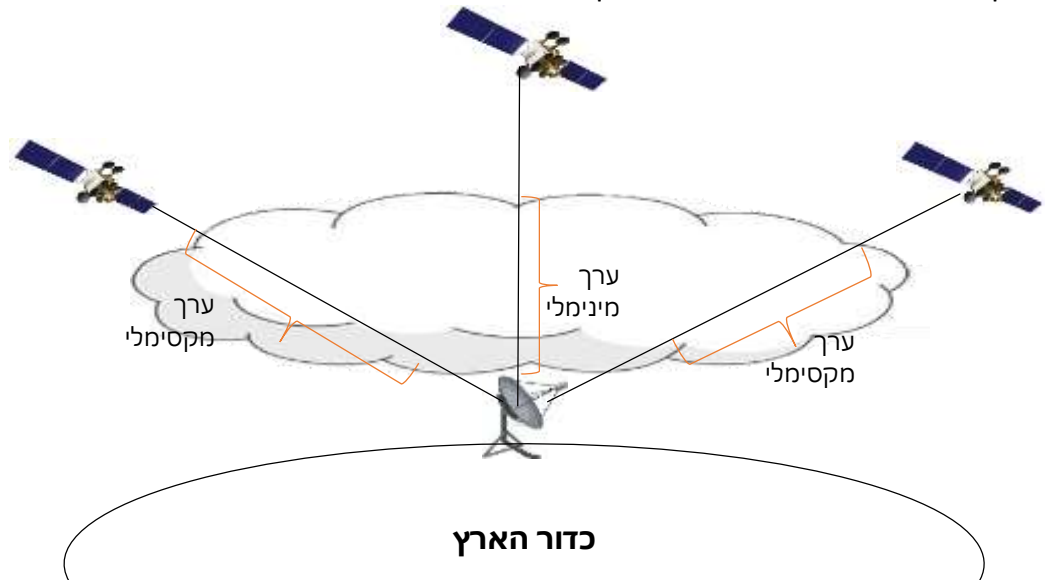
מימוש הפתרון בפירוט:

- מצאנו מודלים לחישובי הנחתות עבור גשמים, ערפל, עננות, שלג סופות חול, ואבק.
 - את רכיבי החישוב של המודלים, מייפנו לטבלאות ע"פ קטגוריות החישוב השונות.
- בשלב הראשון, הנקרא שלב האימון:
- לקחנו נתונים היסטוריים של 2 נקודות זמן עוקבות $t_i, t_{i + \Delta t}$ כאשר Δt בין 5-15 דק'. שזהו בעצם הזמן המוערך שניתן ליצור תקשורת עם הלוויין. וחישובנו להם את ההנחתות ע"פ המודלים.
 - נציב בטבלאות שבנינו עבור כל נקודת זמן.
 - אופן אימון המערכת מתבצע בכך שהטבלאות יכנסו למערכת שעבור על נקודת זמן, עמודת ההנחתה הסופית תהיה תוצאה של הנקודה העוקבת, צורה זו של ייצוג תגרום למערכת ללמוד עבור נתונים של נקודה ראשונה לקבל הנחתה סופית של הדקה העוקבת ובכך בעצם יתרחש ניבוי.
- בשלב השני, שלב הניסוי:
- נבנה טבלה חדשה, בה נציב את הנתונים של נק' הזמן הראשונה ונרצה שהמערכת תשלים את עמודת ההנחתה בתוצאות של עוד כמה דקות, כמו שאימנו אותה. לדוגמא אם נכניס לה טבלה עם נתונים של דקה 09:45:00 נרצה לקבל תוצאות הנחתה של 09:50:00 עד 09:55:00 בערך.

נקודה נוספת שמרחיבה את נושא החישוב של ההנחתה, היא אפיון ההנחתה. כלומר, נצטרך להבין שכאשר תחנת קרקע מתחילה לייצור קשר עם לוויין, הזווית הקיימת ביניהם היא 5 מעלות. אבל לאורך כל המסלול שהלוויין עובר הזווית משתנה עד לרמה של 90 מעלות, שהוא בדיוק מעל תחנת הקרקע. ובהמשך שהוא מתרחק, הזווית גדלה ל-175 מעלות. מה שאומר שאם קיימת הנחתה בזמן קשר עם הלוויין, לאורך כל המסלול פרופיל ההנחתה ישתנה בכל זווית.

ניתן להבין שבתחילת המסלול ובסופו ההנחתות יהיו גבוהות יותר מאשר באמצע המסלול כאשר הוא בדיוק מעל תחנת הקרקע. לכן נצטרך לאפיין את ההנחתה כתחום של מקסימום שיאפיין את הקצוות לבין מינימום שיאפיין את האמצע.

ניתן לראות לפי האיור את תיאור האפיון:



כלומר, 'חישוב הנחתה' הכוונה ל'טווח הנחתה' (אפיון ההנחתה), ניתן לייצג זאת כך:

ניקח לדוגמא בטבלה שמייצגת את מודל החישוב עבור עננות, נאמר שישנה תקשורת בין לוויין לתחנת קרקע מדקה 09:34:00 עד 09:48:59 (קשר מקסימאלי של 15 דק עם לוויין) והשידור מתקיים בתדר של 23 GHz. נראה את רמת ההנחתה לפי הטבלאות שהכנו,

חילקנו את זמן השידור לשלושה חלקים:

חלק ראשון : [09:34:00 , 09:38:59],

חלק שני: [09:39:00 , 09:43:59],

והחלק השלישי: [09:44:00 , 09:48:59].

וחישבנו את ערך ההנחתה המקסימלי עבור כל טווח;

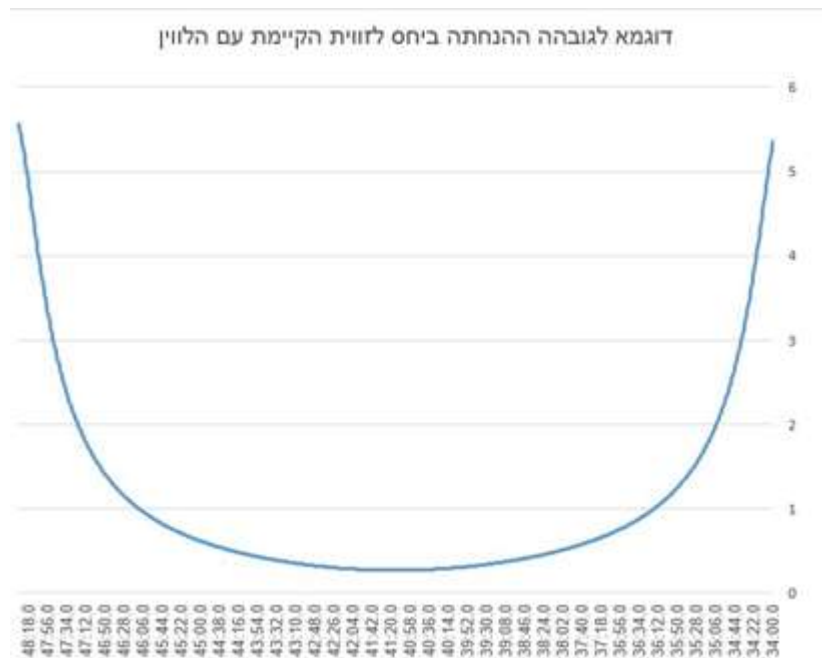
בחלק הראשון קיבלנו: 5.7109,

בחלק השני קיבלנו: 0.2699,

ובחלק השלישי קיבלנו 5.7082.

לפי תוצאות אלו אפשר לראות את נכונות ההגדרה שהנחנו באמת אפשר לראות שהחלק הראשון והשלישי בשידור הנמצא בקצוות והזווית שלו עם הלוויין רחוקה מ-90 וגבוהה מהחלק האמצעי שבו הזווית עם הלוויין היא בקרוב של 90 מעלות, ובאמת ההנחתה בנקודה זו היא המינימלית מבין שלושתם.

נראה זאת בגרף את ההנחתה כפונקציה של זמן תקשורת עם לוויין:



בחרנו בשפת MATLAB לכתובת הקוד מאחר שב-MATLAB טובה מאוד בחישובים קשים ומסובכים ומבצעת זאת במהירות מאחר שכל משתנה ב-MATLAB הינו מטריצה, ודבר זה גורם לחישוב מהיר.

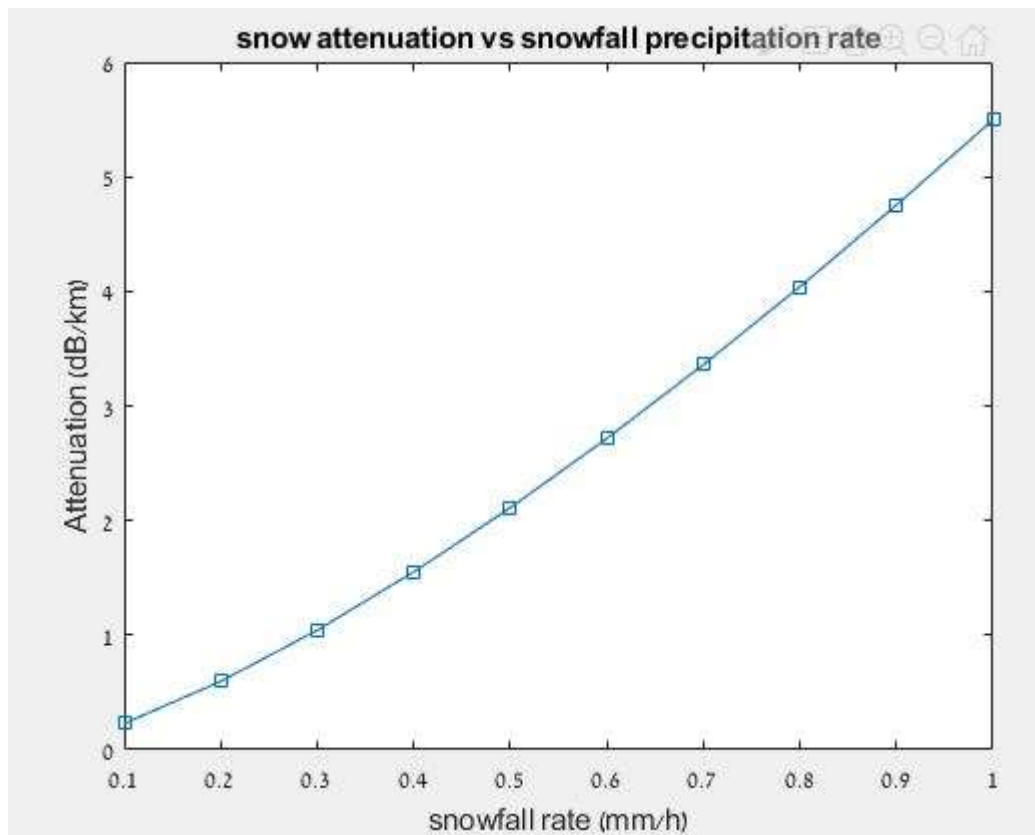
נראה את הרצת הקוד המחשב הנחתות הנגרמות עקב שלג שכתבנו על פי המודל:

```
function snow_att=snow_attenuation(snow_rate,snow_kind)

wevelength=get_rand_number(1.15,1.95);
S=snow_rate;
if snow_kind==1
    a=0.0000542*wevelength+5.4958776;
    b=1.38;
    snow_att=a*S^b;
elseif snow_kind==0
    a=0.0001023*wevelength+3.7855466;
    b=0.72;
    snow_att=a*S^b;
else
    warning('problem with the snow kind!');
    snow_att='Error!';
end
```

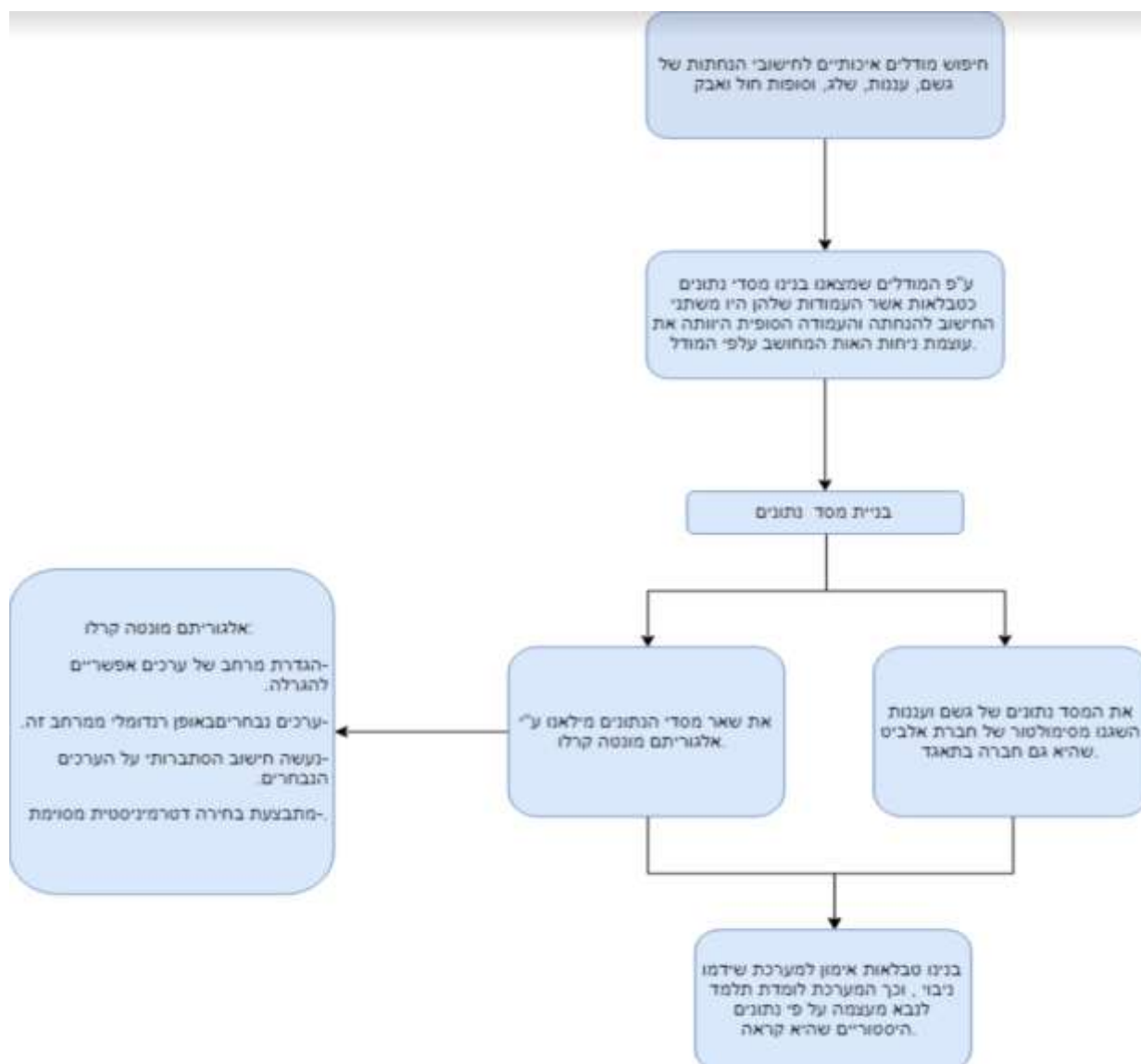
לאחר ההרצה קיבלנו דיאגרמה שממחישה את רמת ההנחתה ביחס לכמות ירידת השלג ב-mm/h:
ייצוג זה הוא עבור שלג מסוג Wet שהוא כבד יותר וכמות המים בו גבוהה יותר.

הרצה זו התבצעה על תדר בקרוב 2.4 GHz.



4. תיאור המערכת:

מציאת מודלים לחישוב ניחות אות תקשורת בין לוויין לתחנת הקרקע, המושפע מתופעות מזג אוויר. ע"פ המודלים שמצאנו, בנינו מסדי נתונים-datasets, אשר כוללים כמשתנה מסביר את תופעות מזג האוויר וכמשתנה מוסבר את עוצמת ניחות האות. על מנת לקבל ניבוי בפרויקט שמריץ על machine learning, עשינו שימוש בנתוני סימולטור לבניית מסדי הנתונים הנדרשים. בנוסף, נעשה שימוש באלגוריתמי מונטה-קרלו ליצירת מסדי נתונים המכילים פרמטרים הנדרשים עבור המודלים, והתאוריה לשימוש באלגוריתמי הניבוי שישמשו בפרויקט העוקב. מערכת הפרויקט הינה תשתית למערכת למידה עמוקה. התשתית בנויה מסט טבלאות אימון שמאפשרות לאלגוריתם לבנות עץ ניווט. הטבלאות מבוססות על המודלים שבנינו. להלן דיאגרמה המתארת את המערכת:



4.1 תיאור הכלים המשמשים לפתרון:

-אלגוריתם מונטה קרלו: מטרתו להפיק את הפתרון הטוב ביותר עם הסתברות מסוימת. נניח שאנחנו רוצים לקבל איזה שהוא ערך בטווח מסוים ואנחנו מגדירים טווח רחב יותר ומצפים מהאלגוריתם להשיג את הפתרון הטוב ביותר כלומר שהערך שיוגרל יהיה 99% מתוך הטווח שאנחנו רוצים, בפעם הראשונה הסיכוי שנגריל את הערך בטווח זה הוא $1/2\%$ בפעם הבאה שנגריל שוב זה יהיה $1/2$ כלומר: $1/2 * 1/2 * 1/2 \dots$ עבור כל פעם שנרץ את האלגוריתם.. מה שאומר שבפעם ה-10 שנגריל מספר, הסיכוי שלא נקבל מספר בטווח הוא 0.001% , לכן השתמשנו באלגוריתם מונטה קרלו בשביל לסמלך לנו נתונים לטבלאות נתונים. כך שהסיכוי לקבל את המספר בטווח הוא 99%.

את טווחי הגרלת המספרים השגנו מהמאמרים.

-נבחרה שפת MATLAB לכתיבת הקוד מאחר שהיא יעודית לחישובים קשים ומסובכים ומבצעת זאת במהירות מאחר שכל משתנה ב-MATLAB הינו מטריצה, ודבר זה גורם לחישוב מהיר.

5. ספרות:

- שיטות חיזוי מזג האוויר הקיימות היום מתחלקות לשתי קבוצות: הסתברותית ודטרמיניסטית, כאשר תחזית דטרמיניסטית חוזה אירוע מזג אויר כמו סופת הוריקן בזמן ובמקום מסוימים. השיטות הנפוצות ביותר, הן:
- שיטת קלימטולוגיה, משתמשת בשיטה פשוטה. היא מתבססת על הערכה הסתברותית של חיזוי על פי נתונים שנאספו במשך שנים. שיטה זו פועלת כאשר דפוסי מזג האוויר נשארים במקומם, אך במצבים בהם גורמים חיצוניים משנים את מזג האוויר לעתים קרובות, כמו בשינויי אקלים עקב התחממות כדור הארץ, שיטת האקלים אינה הבחירה הטובה ביותר לחיזוי מזג האוויר, שכן רמת דיוק החיזוי יורדת משמעותית.
 - שיטה אנלוגית, שיטה זו קשה לשימוש כאשר מנבאים את מזג האוויר כי זה דורש למצוא יום בעבר עם מזג האוויר הדומה לתחזית הנוכחית. החזאי יכול לנבא את אותו סוג של מזג אוויר על בסיס השוואה אנלוגי, אבל אפילו הבדלים קטנים בין העבר להווה יכול לשנות את התוצאה, ולכן השיטה האנלוגית לא יכול להיות הבחירה הנכונה לחיזוי מזג אויר מדויק.
 - חיזוי מזג אויר נומרי, תחזית מזג האוויר המספרי נשענת על מחשבים כדי לחזות את מזג האוויר. מחשבי על גדולים, עם מודלים לחיזוי תוכנה, מסייעים למטאורולוגים לבצע תחזיות מזג אוויר על בסיס מספר תנאים באטמוספירה, כגון טמפרטורות, מהירות רוח, מערכות לחץ גבוהות וגבוהות, גשמים, שלג ותנאים אחרים.
- חזאי מזג האוויר בודק את הנתונים כדי לקבוע את תחזית מזג האוויר ליום. התחזית איכותית לפי רמת הדיוק והנכונות של האלגוריתמים עליהם החישובים מתבססים. בסך הכול, תחזית מזג האוויר המספרי מספקת את האמצעים הטובים ביותר לחזות את התנאים המטאורולוגיים הקרובים בהשוואה לשיטות אחרות.
- בפרויקט אנו נתבסס על השיטה הנומרית, שכן יכולת הדיוק שלה היא הגבוהה ביותר מבין שיטות החיזוי הקיימות. על מנת להגיע לרמת דיוק מקסימלית נערך סדרת בדיקות וכיולים. נתבסס על שיטה חדשנית בתחום והיא מערכת לומדת, שתסייע לנו להגיע לרמת חיזוי מדויקת בעשרות אחוזים. המערכת הלומדת תתבסס גם על נתונים היסטוריים וכן תלמד על תופעות ארוכות טווח.

6. מסקנות ביניים:

- בפרויקט מחקרי בו התחלנו הכול מאפס, נדרש זמן רב למחקר ומאמץ ללמוד לפענח דברים באופן עצמאי בפעם הראשונה, ניתוח מערכות שהשתמשו בהם, ללמוד את השפה שכתבנו בה, הרבה לפני שמתחילים לכתוב קוד, ועדיין לא רואים תוצאות בשטח, נדרשת סבלנות. ועבודה רבה.
- עבודה בזוג בפרויקט מחקרי, מקילה על חלוקת העבודה, ובחשיבה משותפת שכל אחת מעלה את קו החשיבה שלה וכך אפשר להקיף שטח רחב יותר בפרויקט.
- למידה לעומק של טכנולוגיה חדשה דורשת זמן רב, לכן חשוב להכין לזו מפורט ומעודכן באופן שוטף, שיתכנן את חלוקת העבודה ואת הפגישות ואת מרווח הזמן הדרוש לכל דבר.
- עבודה מסודרת ותיעוד העבודה מיעל את התפוקה ואת הידע הנרכש, וממהירים את קצב העבודה.
- יש לפשט את משימות העבודה לפרטי פרטים, כך זה גורם להבנה דו צדדית, ולהתקדמות זורמת.

7. ביבליוגרפיה:

- Jinad, David. "Temperature Pattern Prediction." *Reconstructing an Image from Projection Data - MATLAB & Simulink Example*, Dec. 2016, www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/55884-temperature-pattern-prediction
- Series, P. (2012). Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links, http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1817-1-201202-I!!PDF-E.pdf
- Rehman, S., (2017). Performance analysis of millimeter wave in satellite-earth systems. *Ijcsns*, 17, 258- 266.
- De Faveri, Giorgio. "Improving Satellite Communications through Space Forecasting." *Royal Academy of Engineering*, Mar. 2015, www.raeng.org.uk/news/news-releases/2015/march/improving-satellite-communications-through-space-f.
- NAL, USDA. "Data From: Weather, Snow, and Streamflow Data from Four Western Juniper-Dominated Experimental Catchments in South Western Idaho, USA." *Datasets - Data.gov*, Publisher Centers for Disease Control and Prevention, 3 Dec. 2018, <https://catalog.data.gov/dataset/data-from-weather-snow-and-streamflow-data-from-four-western-juniper-dominated-experimenta>.
- Genesis." Edited by Israel Innovation Authority, *Israel Innovation*, Jan. 2018, מפגש התנעה למאגד, <https://innovationisrael.org.il/content/genesis>.
- גוון, יעקב. "ללוייני תקשורת במסלול נמוך" (LEO)." *New-Tech Online*, Mar. 2017, www.new-techonline.com/leo.
- ITU-R P.840-3, i., (1999). *Attenuation due to clouds and fog*. Retrieved February 22, 2019, from https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.840-3-199910-S!!PDF-E.pdf.
- Piretzidis, (2017). *Sat-lab: a matlab graphical user interface for simulating and visualizing Keplerian satellite orbits*. Retrieved February 22, 2019, from <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/63344-sat-lab-a-matlab-graphical-user-interface-for-simulating-and-visualizing-keplerian-satellite-orbits>.
- Brenner, L., (2018). *Four types of forecasting*. Retrieved February 22, 2019, from <https://sciencing.com/four-types-forecasting-8155139.html>.

8. נספחים:

8.1 תכנון הפרויקט:

משימה:	משך עבודת המשימה:	סיום:
פיתוח ראשוני של אלגוריתם להשפעת מזג האוויר באזור אחד	לא מוגבל	30.7.19
אפיון פרטי יותר של הנחתה	במקביל לעיל	30.7.19
הרחבת אלגוריתם להשפעות מזג האוויר על שתי יבשות מרכזיות	לא רלוונטי כל עוד אין תוצאות	לא ידוע

8.2 בדיקות

בדיקת אימות:

- הבדיקה המרכזית היא אימות חישובי ההנחות של המודלים לעולם האמתי.

בדיקת כיוול:

- לאחר האימון נרצה לכייל את כל המערכת בנתונים אמיתיים, תהליך זה נעשה בפרויקט המריץ את הנתונים על מערכת machine learning.

Abstract:

The main project is within the framework of Genesis - a consortium of satellite communication technologies under a wide global coverage with low latency. The goal of the general project is research and development for the optimization and improvement of resources in LEO satellite constellations. Our part of the project focuses on developing an estimation algorithm for channel decay due to weather phenomena.

During satellite communication, there is a decline in communication channels on the space-planet path, relative to the general decay in space. The decay is caused by the following contributions:

- Guided by rain, other precipitation, and clouds.
- Guided by sand and dust storms.

And the effects of multiple communication paths.

These effects cause transmission disturbances such as loss of packets, re-sending of information, and overload in the communication path. In order to overcome interference, the efficiency of the satellite communication channels should be increased, and for this purpose, the network bandwidth should be increased. This goal can be achieved by two ways:

- Increasing the number of ground stations and satellites serving the network.
- Increasing bandwidth utilization and high data transfer.

Since increasing the number of ground and satellite stations is detrimental to the economic model of the project, the option of utilizing transmission bandwidth has been chosen. Data transfer is carried out in LEO satellite communications.

This project is a research project on models of precipitation calculations that occur due to weather phenomena such as rain, snow, clouds, sand, and dust storms. The models were used to develop an algorithm that predicts weather phenomena and their effect on satellite communications. With this issue, it will be possible to transmit at maximum bandwidth for the given moment.

The project is divided into three main parts:

- Modeling of the computation calculations for atmospheric phenomena.
- Simulate data that simulate situations that describe attenuation.
- Development of an algorithm for attenuation due to weather forecasting.

Software Engineer Department

Final Project

Development of a weather forecasting
model for LEO satellites.

By:

Michal Lasry: 314994336

Malka Neusutadt : 315560078

June 2019

Tamoz H'TASHAT

Software Engineer Department

Final Project

Development of a weather forecasting
model for LEO satellites.

By:

Michal Lasry: 314994336

Malka Neusutadt: 315560078

מנחה אקדמי: ד"ר גיא לשם חתימה: ד"ר גיא לשם תאריך: 30.6.2019

רכז פרויקטים: מר אסף שפנייר חתימה: תאריך: