

# עבודת גמר – פרויקט 5 יחידות לימוד

שנה: תשס"ט 2009

שם בית הספר אורט תעופה וחלל, מעלה אדומים.

מגמה מדעית הנדסית – התמחות: אוויר-חלל.

נושא הפרויקט: אלגוריתם לבקרת הכוון ללווין הזעיר הישראלי הראשון.



שם המנחה: אלי כהן	תואר: M.A.
תפקיד: מורה למדעי-המחשב ורכז מגמה מדעית הנדסית.	
יועץ מלווה: נתנאל לוי	תואר: מהנדס אוויר-חלל בתעשייה האווירית ומורה בבית הספר לאוויר-חלל.
שמות התלמידים:	
1. מתן חסון	ת"ז: 305616872
2. אבי אזולאי	ת"ז: 204020382
3. מיכל אבקוב	ת"ז: 305497034
4. ליאור טורגימן	ת"ז: 304941412

## תודות

בתחילת הדרך היה עלינו לבחור נושא לפרויקט כראות עינינו. הבענו רצון והתעניינות בשילוב הנושא המרכזי במגמה המדעית הנדסית, אוויר-חלל, בתוך הפרויקט. פנינו אל נתנאל לוי, מורה לאוויר-חלל בבית ספרנו, בעל תואר שני בהנדסה אווירונאוטית, במטרה לבדוק אם יש לו רעיונות לפרויקטים המשלבים בתוכם את הנושא ואכן נתנאל חזר אלינו עם מספר הצעות לפרויקטים שהבולט בהם היה האלגוריתם לבקרת הכוון הלוויין הזעיר הישראלי הראשון. ברצוננו להודות לנתנאל לוי שעזר בבחירת הפרויקט, על העזרה המדעית בלימוד הנושאים, על השקעת זמנו הפרטי ודפי ההנחיה שתרמו לנו רבות בקידום הפרויקט. כמו כן ברצוננו להודות לעמותה הישראלית ללוויינות זעירה – INSA, שבראשה ד"ר רוז טמיר, שסייעה לנו בבחירת הפתרון ובהדרכה ראשונית. בנוסף, רצינו להודות לחברי העמותה, ד"ר אנה הלר מבית ספר להנדסאים – הרצליה, ד"ר דניאל פורטנוי ממפעל מבת (חבר מייסד), דניאל רוכברגר ויהונתן ויינטראוב העושה את שרותו הצבאי במבת וערך אף הוא פרויקט בנושא בקרת הכוון לווין. בית ספרנו, גם הוא תמך בנו רבות, הן המנהל, ניסים ילוז, שהעניק אישור לעבוד במעבדה ביד חופשית, והן צוות המורים, ליליה אנדרונוב – בתחום הפיסיקה, מיכאל חלמנסקי ויהודית אילוק – בתחום האלקטרוניקה. תודה מיוחדת למנחה הפרויקט, אלי כהן – רכו המגמה המדעית הנדסית, על ההנחיה הצמודה, על התמיכה הרבה גם בזמנו הפרטי, ועל הרצון העז בהצלחתנו.

## תקציר עבודה

המיזם עוסק בפיתוח אלגוריתם מערכת בקרת הכוון, עבור הלוויין הזעיר הישראלי הראשון. אלגוריתם זה, בעזרת חישובי המערכת ובאמצעות מפעיליה, ידאג לכוון את פנליו הסולאריים של הלוויין בניצב לקרני השמש. המיזם נעשה בשיתוף פעולה עם עמותת INSA - העמותה הישראלית ללווינות זעירה.

כדי שלווין ישהה בחלל תקופה ממושכת, הוא זקוק למקור אנרגיה, אשר יעניק לו את האנרגיה הדרושה לפעולת מערכתיו השונות במהלך שהותו בחלל. כאשר חפצים במקור-עד ובמקור אשר ישתלם לנו, בני האדם, גם מבחינה כלכלית (במיוחד כשמדובר בחלל), השמש היא מקור האנרגיה האידיאלי, שכן היא מקור קבוע אשר לא יתכלה (לפחות לא בתקופתינו...). אין הלוויין נאלץ לנשוא אותה, כך שהיא חסכונית במקום (גם המערכות הממירות את האנרגיה שפולטת, מצומצמות-מימדים), ואין היא משתכרת לפי שעה- מקור חינם. משום כך, בלוויינים הקיימים שכיחה המרת האנרגיה הסולארית של השמש, לאנרגיה חשמלית, בה משתמש הלוויין.

חשיבות בקרת הכוון אל השמש טמונה בעובדה כי בהמרת האנרגיה הסולארית ע"י הפנלים הסולאריים, מתקבלת אנרגיה חשמלית מרבית כאשר הפנלים הסולאריים של הלוויין נמצאים בניצב לקרני השמש. אולם, קשה להביא לקיום מתמיד של מצב זה, מכיוון שהלוויין אינו מסוגל לכוון בכוחות עצמו את פנליו הסולאריים בניצב לקרני השמש, ולכן הוא זקוק למערכת בקרת הכוון. מערכת בקרת הכוון צריכה להשתמש בסביבת הלוויין, כדי לקבוע את מיקומו והכוונו של הלוויין, וכן במערכת מפעילים המותאמים לסביבה זו כדי לכוון להכוון הרצוי. מכיוון שמדובר בלוויין זעיר, מערכת בקרת הכוון צריכה להיות פרופורציונאלית לדגם הלוויין מבחינת אמצעי ההכוונה, גודלם, משקלם, צורתם וכדומה. מסיבה זו, אין משתמשים במערכות הקיימות בלוויינים רגילים.

לוויינים זעירים אין כיום מערכות בקרת הכוון מובנות אל השמש. מרביתם מצופים בפנלים סולאריים, ולכן אין ההכוון משמעותי בעבורם. אולם, העמותה עימה אנו עובדים דורשת הספק חשמלי גבוה יותר ממה שניתן מפנלים צמודי גוף, וזאת יתקבל ע"י הכוונה ה"פרח" הראשי של הפנלים הסולאריים בניצב לקרני השמש.

המטרה המרכזית של הפרויקט שלנו היא לפתח אלגוריתם של מערכת בקרת הכוון בחוג סגור, אשר ישמור שפנליו הסולאריים הראשיים של הלוויין הזעיר יכוונו אל השמש (עד כדי קבלת זווית אפס – כלומר ניצבים לקרני השמש) בכל רגע נתון. לשם כך, נערכה פגישה עם העמותה הישראלית ללווינות זעירה – INSA שמטרתה הייתה לבחור פיתרון מוביל לפתרון הבעיה לפי צרכי העמותה והמשאבים הקיימים.

באופן כללי, הפתרון שנבחר הוא הכוונה הלוויין ע"י סלילים אלקטרומגנטיים (מגנטוטורקרים), תוך שימוש בחישובים: מגנטומטר - אשר מודד את עוצמת השדה המגנטי המקומי (במקרה זה, של כדה"א); בפנלים הסולאריים, אשר בעזרת אלגוריתם קיים, יאפשרו קביעת זווית השמש מהלוויין (הזווית אותה יש לאפס). באופן שותף, תבדוק מערכת הבקרה את הכוון הלוויין ביחס לשמש, ותספק מתח למגנטוטורקרים בהתאם (סיבת התזוזה והסברים מעמיקים יותר מפורטים בגוף הפרויקט).

לשם פיתוח האלגוריתם, קיימנו מספר פגישות עם נתנאל לוי. נתנאל סייע לנו ברכישת הידע הדרוש לפיתוח האלגוריתם ולהבנת המערכת בצורה הטובה ביותר, עזרה מהותית ביותר בשל דלות מקורות המידע הרלוונטיים בתחום בו אנו מתעסקים. בנוסף, קיימות שתיים שבועיות

במסגרת בית הספר, בהן ישבנו עם המנחה, אלי כהן, שהדריך אותנו בפיתוח נכון של הפרויקט ובקידומו. כמו כן, נפגשנו גם לאחר שעות הלימודים במטרה לקדם את הפרויקט ולבצעו בצורה הטובה ביותר.

חלק בלתי נפרד מהפרויקט הוא בניית מדגים, אשר ימחיש את רעיון המערכת ובעיקר את עקרונות הפעולה של החיישנים והמפעילים. אימות נכונות האלגוריתם ייעשה בהדמיית האקסל המלאה. על המדגים לדמות את תנועת הלוויין והכוון הפנלים הסולאריים אל השמש על ידי המגנטוטורקרים והשדה המגנטי של כדור הארץ. אולם, במקרה זה אין ביכולתנו לבנות מדגים אותנטי, אשר שהוי בחלל, מצויד במפעילים ויחידת חישה מקוריים (מגנטוטורקרים ופנלים סולאריים) "אלחוטי" הנע בדרגת חופש שלוש(תנועה תלת מימדית) מטעמים ברורים. לכן אנו יוצרים מדגים בדרגת חופש אחת, כלומר, תנועה חד מימדית שתכוון את הלוויין אל מקור האור המצוי. ניסוי אמת יתבצע בעת שיגור הלוויין לחלל.

## חלוקת תפקידים :

להלן חלוקת התפקידים של החומר העיוני :

נושאים	מתן	אבי	ליאור	מיכל
<b>היבטים חברתיים:</b>				
לוינות מהי?	X			
מרכיבי הליוון				X
מאפייני הליוון			X	
לוינים הקיימים כיום			X	
שימושי הליוון		X		
<b>היבטים מדעיים:</b>				
סביבת הליוון	X			
לוינים רגילים			X	
שדה מגנטי				X
תנועה זוויתית		X		
לוינים זעירים	X	X	X	X
<b>היבטים טכנולוגיים:</b>				
מצפן				X
מערכת בקרה כללית	X			
מערכת בקרת הכוון בלוינים	X			
חיישנים במערכות בקרת הכוון שונות של לוינים רגילים		X		X
מפעילים במערכות בקרת הכוון שונות של לוינים רגילים			X	
החיישן מגנטומטר		X		X
הפנלים הסולאריים	X			
המפעיל מגנטוטורקר			X	
תורת האלגוריתמיקה ושפת התכנות	X	X	X	X
פיתוח האלגוריתם	X			
תוכנות סימולציה, אקסל	X	X	X	X

להלן חלוקת התפקידים במדגים :

מתן חסון – מתמקד בתחום האלגוריתמיקה, פיתוח וכתובת האלגוריתם.

מיכל אבקוב – מתמקדת בתחום הפיזיקה - מגנטיות.

ליאור תורג'מן – מתמקד בתחום בכל חלקי האלקטרוניקה.

אבי אזולאי – מתמקד בתחום המעשי, בניית הדגם הסופי.

## תוכן עניינים

### מבוא

- 8..... ❖ תיאור המצב הקיים
- 8..... ❖ תיאור הבעיות במצב הקיים
- 9..... ❖ הצרכים והדרישות שעבורם נדרש פיתרון
- 10..... ❖ סקר שוק של קהל היעד
- 11..... **סקר ספרות**
- 14..... ❖ לוויונות מהי?
- 16..... ❖ סביבת הלוויין
- 17..... ❖ שימושי הלוויין
- 18..... ❖ מרכיבי הלוויין
- 20..... ❖ לוויונים הקיימים כיום
- 21..... ❖ לוויונים זעירים
- 24..... ❖ חוגי בקרה
- 26..... ❖ מערכת בקרת ההכוון בלוויין
- 29..... ❖ תנועה זוויתית
- 33..... ❖ המצפן והשדה המגנטי של כדור הארץ
- 39..... ❖ המגנטוטורקר
- 40..... ❖ הפנלים הסולאריים
- 42..... ❖ תורת האלגוריתמיקה
- 43..... **סקירת מוצרים דומים**
- 44..... **בחירת פתרון מוביל ושיקולים בבחירת הפתרון מימוש הפתרון**
- 46..... ❖ תרשימי אקסל
- 47..... ▪ תרשים מספר 1 – תנועה קווית
- 49..... ▪ תרשים מספר 2 – תנועה זוויתית
- 52..... ▪ תרשים מספר 3 – זמן וזווית סופית
- 55..... ▪ תרשים מספר 4 – האצה ובלימה
- 57..... ▪ תרשים מספר 5 א' – מומנט מרבי
- 60..... ▪ תרשים מספר 5 ב' – זמן וזווית סופית (מומנט מרבי)
- 63..... ▪ תרשים מספר 6 – תנועה זוויתית סגירת חוג

68.....	תרשים מספר 7 – תנועה זוויתית סגירת חוג וריסון.....	▪
72.....	הגדרות וחישובים בסיסיים.....	❖
76.....	פעולת מערכת בקרת ההכוון באופן שנבחר.....	❖
78.....	תרשים מספר 8 – הדמיה מלאה.....	❖
86.....	אלגוריתם מערכת בקרת ההכוון.....	❖
89.....	המדגים.....	❖
91.....	<b>סיכום</b> .....	
94.....	<b>ביבליוגרפיה</b> .....	
97.....	<b>הצעה לעבודת הגמר ואישור הפיקוח</b> .....	
117.....	<b>נספחים</b> .....	
118.....	דפי הנחיות.....	❖
125.....	יומן פגישות.....	❖
139.....	נספח מגנטוטורקר.....	❖
143.....	עלון INSA.....	❖

## מבוא

### **תיאור המצב הקיים**

ללויין בחלל אין יכולת לעגון את עצמו בנקודה מסוימת ולכן קל לו לאבד את מיקומו בחלל (תווך תלת-ממדי) הן ביחס לכדור-הארץ והן מבחינת כיוון "ההסתכלות" של המטען הייעודי אותו הוא נושא.

תחום הלוויינות הזעירה הוא תחום חדש בעולם כולו ובישראל בפרט. עד כה שוגרו כ- 30 לוויינים זעירים לחלל וכמחציתם מתפקדים. כמעט בכל הלוויינים הרגילים ישנן מערכות בקרת הכוון כלפי השמש, אשר מזהות את הכוון השמש ביחס ללוויין, ולרוב, באמצעות מערכת בחוג סגור מכוונות את הפנלים הסולריים לכוון השמש. למרות זאת, מהעמותה הישראלית ללוויינות זעירה נמסר לנו, כי ללוויינים זעירים כיום אין מערכות מובנות לבקרת הכוון אל השמש. מרבית הלוויינים הזעירים מצופים בפנלים סולאריים, כלומר, בכל הכוון מתקבלת המרת אנרגיה סולארית כלשהי לאנרגיה חשמלית, ולכן להכוון אין משמעות בעבורם. ההספק החשמלי המתקבל בשיטה זו, ללא הכוון מסוים, מתאים לצרכיהם ולתפעול מערכתיהם, כלומר, אין הם זקוקים לניצול מרב האנרגיה הסולארית לשם המרתה למרב האנרגיה החשמלית היכולה להתקבל. אולם, אין הספק זה מתאים ללוויין שהעמותה צפויה להשיק לחלל.

### **תיאור הבעיות במצב הקיים**

תחום הלוויינות הזעירה בישראל בפרט ובעולם ככלל עדיין בחיתוליו, וניכר פיתוח ושכלול מתמשך של המערכות השונות שבו. אולם, טרם תוכננה מערכת בקרת הכוון מובנית עבור ננו-לוויינים. מרבית הלוויינים הזעירים מצופים בפנלים סולאריים צמודי גוף, אשר מספקים להם את האנרגיה החשמלית הדרושה לתפעול מערכתיהם השונות. באופן זה, אין דרישה להכוון מסוים, כל הכוון יאפשר הפקת אנרגיה מספקת לשם פעילותיהם. ברם, אנרגיה זו אינה האנרגיה המקסימאלית שיכולה להתקבל מהמרת האנרגיה הסולארית ע"י הפנלים הסולאריים. העמותה שואפת להתקנת מערכות בלוויין הזעיר הישראלי, אשר יצרכו אנרגיה חשמלית רבה יותר מזו המוצעת בשיטה הקיימת. נדרש הספק גבוה יותר מההספק החשמלי הניתן מהפנלים המצפים את הלוויין, כשהם ללא הכוונה מיוחדת. כדי להפיק הספק רב יותר, הלוויין הזעיר הישראלי יכול "פרח" של פנלים סולאריים ראשיים, בנוסף לאלה המצפים את גוף הלוויין, אשר בהכוונה בניצב לקרני השמש, יספקו את האנרגיה החשמלית הדרושה. לשם כך, יש לתכנן מערכת בקרת הכוון אל השמש, אשר תדאג כי הכוון הפנלים הסולאריים הראשיים ישמר בניצב לקרני השמש. אולם על הלוויין הזעיר להיות במשקל מסוים ולכלול רכיבים רבים בנפחו המצומצם. על כן, על כל מערכותיו של הלוויין, כך גם מערכת בקרת הכוון אל השמש, להיות קלות וקטנות ככל הניתן. כך לדוגמה חיישנים כמו "עוקב כוכבים" (נעזר בכוכבי הספירה השמימית למציאת הכוון הלוויין), או כמו "מד אופק" (מזהה את הכוון הלוויין ביחס לאופק כדור הארץ) כבדים מדי עבור לוויין זעיר, ועל אף דיוקם הרב לא ניתן להשתמש בהם במערכת בקרת הכוון שלו. גם נושא המפעילים מוגבל ורק המפעילים המתאימים בגודלם ובמשקלם למבנה הסטנדרטי של הלוויין הזעיר ולמשקל המרבי שעליו לשאת, יכולים להיכלל במערכת בקרת הכוון שלו. כך לדוגמה גלגלים וסביבונים קצב לא יכולים להיות מיושמים בלוויין הזעיר בשל גודלם הרב והיותם כבדים. מסיבות אלו, לא ניתן ליישם מערכת בקרת הכוון כלפי השמש של לוויינים רגילים בלוויינים זעירים-

המזעור הרב מגביל מאוד את הצע הרכיבים שניתן להשתמש בהם. בנוסף, תמיד קיימת שאיפה ליעול ולפיתוח טכנולוגי, בכל תחום ובתחום זה במיוחד, שכן היצע השימושים והתועלות הרבות שבתחום הלוויינות בכלל, והלוויינות הזעירה בפרט, הוא עצום. כמו כן, תכנון מערכת חשובה מסוג זה, תאפשר פעילות נרחבת יותר של הלוויינים הזעירים, וכלילת מערכות הצורכות הספק חשמלי גדול יותר מהמוצע.

## **הצרכים והדרישות שעבורם נדרש פיתרון**

אנרגיה לא נוצרת יש מאין, על כן כל עבודה שנעשית כרוכה ב"בזבוז" אנרגיה. בכדי לדאוג כי ללווין בחלל תהיה כל האנרגיה הדרושה לפעולותיו השונות, ניתן לצידו מראש באנרגיה זו (מקור כוח), או לגרום לו "לרכוש" אנרגיה במהלך שהותו בחלל (מצבר) – דרך שעדיפה יותר, משום שכך מאריכים את "תוחלת החיים" של הלוויין. הדרך השמישה כיום להענקת אנרגיה ללוויין היא באמצעות פנלים סולאריים. על מנת להפיק את מירב אנרגיה החשמלית מהאנרגיה הסולרית, כנדרש ע"י העמותה, על הפנלים להיות מכוונים בפוזיציה מסוימת, בניצב לקרני השמש. הלוויין לא מסוגל לכוון את עצמו באופן עצמאי ולכן דרושה מערכת בקרת הכוון, במקרה שלנו, אל המטע"ד – שמש.

על מערכת בקרת הכוון להתאים לסביבה בה היא תפעל, ולהשתמש בנתונים חיצוניים בכדי לקבוע את מיקום והכוון הלוויין וכן לכוונו לאופן הרצוי. ממדיה צריכים להתאים לדגם הלוויין (במקרה שלנו ננו לוויין) מבחינת גודל, משקל, צורה וכדומה. זו אחת הסיבות שלא מיישמים את מערכת בקרת הכוון הקיימת על הלוויין החדש – ממדיה והאמצעים הטכנולוגים בהם משתמשת אינם מתאימים למזעור הניכר שנעשה.

## סקר שוק של קהל היעד

בשל ראשוניותו, קהל היעד בתחום הלוויינות הזעירה, בשונה מתחום הלוויינות המצויה, מיועד בעיקר לחברות פרטיות או ממשלתיות, המעוניינות להשתמש במטרתו העכשווית – בחינת תפקוד רכיבים חדשים במקום אמת, בחלל.

האלגוריתם אותו נפתח מיועד לעמותה הישראלית ללוויינות זעירה, INSA, ועתיד להיות מושק בלווין הזעיר הישראלי הראשון. בשל ייחוד זה, והגדרתו המדויקת של קהל היעד, סקר השוק יסתכם בהבנת צרכי העמותה, דרישותיה והכלים שהיא נותנת ברשותנו. לאלגוריתם זה חשיבות רמה, הוא יאפשר פעילות תקינה וממושכת של לוויינים זעירים ישראלים. בכך, מצוי יתרוננו הכלכלי שכן לווין שמאריך ימים, חוסך כספים שיושקעו בשיגור לווין חלופי. זאת ועוד, אלגוריתם מסוג זה יאפשר חסיכת אנרגיה, וכן יטיב עם סביבתו מבחינה אקולוגית – ניצול אנרגית שמש כמקור לאנרגיה חשמלית, במקום שימוש בדלקים ומזהמים נוספים. למרות שהלוויין שרוי בחלל, ישנם מסלולי לוויינים אשר נמצאים בתחום האטמוספירה, ומפאת זאת ניתן להתייחס להשלכתם האקולוגית.

האלגוריתם שלנו מהווה חלק מרכזי בלווין הזעיר וחשיבות תפקידו רבה. לכן, כשמדברים על תרומת הפרויקט לחברה, ניתן להתייחס לתרומת הלוויינים הזעירים לחברה, שכן להם (ולפיתוח התחום ככלל) מיועד האלגוריתם.

העמותה הישראלית צופה ביקוש רב ללוויינות זעירה ומדגישה את חשיבות פיתוחה של ישראל והתקדמותה, גם בתחום זה.

הלוויינים הזעירים יאפשרו אלטרנטיבה ללוויינים הרגילים, אשר יתרונותיה על השיטה הקיימת ברורים. לוויינות זעירה נותנת מענה לפלח שוק רחב יותר בשל עלותה המצומצמת בהשוואה ללוויינות רגילה. יתרונותיה הכלכליים באים לידי ביטוי גם בנתינת מענה לחברות רבות המעוניינות להביא לפיתוח בתחום הלוויינות בישראל ולבחון רכיבים טכנולוגיים מתקדמים וחדשים מבלי חשש מעלות הכרוכה בדבר, ובתדירות גבוהה יותר. בדיקה זו תביא ליתרונות נוספים כלכלית וטכנולוגית שכן הקדמה מטבעה "מקלה" את חיינו ועל כיוונו. ללוויינים זעירים יתרונות אקולוגיים – הן בזמן שהותם בחלל (כפי שכבר צוין), והן בשעת השיגור, שכן דרושה פחות אנרגיה לשיגורם שמשמעה פחות דלק או חומרים כימיים אחרים שנושרפים בעת השיגור ומזהמים את הסביבה האקולוגית, תחום רב משמעות בימינו. חשיבות הלוויינים הזעירים ניכרת גם בתחום הצבאי אשר בעתיד צפוי להשתמש בטכנולוגיה מתפתחת זו.

## סקר ספרות

על מנת ליצור בסיס יציב וחזק בכל הנוגע לתחום הלוויינות ככלל והלוויינות הזעירה בפרט, פתחנו בסקר ספרות ראשוני, ובאיסוף מידע עיוני ממקורות שונים וכן מאנשי העמותה הישראלית ללוויינות זעירה, עמה אנו עובדים. במהלך איסוף המידע הראשוני התמקדנו בבסיס ובמבוא לעבודתנו המרכזית בפרויקט, והעלנו נושאים עתידיים שנצטרך. להלן רשימת הנושאים שכבר חקרנו, או שנחקר בהמשך (רשימה זו אינה סופית, יתכן כי יתווספו נושאים נוספים לפי הצורך ולפי הדרכים אליהן נפנה תוך כדי חקירה מעמיקה):

נושא	תיאור תמציתי	רלוונטיות לפרויקט
לוויינות מהי?	חקירה כללית של תחום הלוויינות.	הפרויקט מבוסס על נושא הלוויינות ותלוי באופן ישיר במקומו של תחום הלוויינות בישראל. על מנת לדעת לאילו גורמים עלינו לפנות, ומה בדיוק נעשה עד כה בתחום זה, דרושה חקירה ראשונית וכללית של התחום.
שימושי הלוויין	לאילו שימושים עיקריים מנצלים את הלוויין כיום? באילו תחומים משתמשים בהם באופן ישיר או עקיף וכיצד הוא תורם בתחומי החיים השונים?	על מנת לעמוד על טיבו של הפרויקט שלנו, אנו צריכים להבין מהי חשיבותם של הלוויינים בתחומי החיים שלנו כאזרחי מדינת ישראל וכיושבי כדור הארץ.
סביבת הלוויין	מהם מאפייני ותנאי הסביבה בה שוהה הלוויין? כיצד משפיעים גורמים פיזיקאליים התקפים בחלל עליו?	חקירה כללית של סביבת הלוויין, תוך התייחסות למאפיינים השונים המשפיעים עליו, בעיקר בתחום המסלולים המיועד לננו-לוויינים. חקירת סביבת הלוויין תאפשר הבנה טובה יותר של "מקומו הטבעי", וכן את הבעיות שעומדות בפניו להיתקל בחלל.
לוויינים רגילים	מהם השימושים הנעשים בלוויינים רגילים כיום? כיצד הם בנויים ומה אופן פעילותם, כיצד מתבצע הליך השיגור, מה מקומה של ישראל בתחום הלוויינות והחלל ומהם הלוויינים הקיימים כיום?	נחקר נושא זה על מנת לבסס ולהרחיב ידיעותינו אודות מבנה הלוויינים. מבנה הלוויין ואופן פעילותו חיוניים לצורך תכנון האלגוריתם למערכת בקרת ההכוון, אשר מתחשבת במבנה זה ובהשפעתם הפיזיקאלית על תנועת הלוויין. בנוסף כחומר רקע לעבודה רצוי שנדע מהו מקומה של ישראל בעולם בתחום הלוויינות ומהן שאיפותיה לעתיד.
שדה מגנטי ומצפן	ממה מורכב השדה המגנטי של כדור הארץ? מהי צורתו ביחס לכדור הארץ ולשמש, האם היא משתנה אם בכלל? אילו גורמים פיזיקאליים או מכשירים מושפעים ממנו?	במערכת בקרת ההכוון של הלוויין אל השמש קיימת אפשרות של שימוש בחיישנים ו/או מפעילים הנעזרים בשדה המגנטי לשם פעולתם ועובדים לפיו. על כן נצטרך לחקור את השדה המגנטי ופעולת המצפן אשר דומה לפעולת חיישנים ומפעילים שייכתן ויושמו בפרויקט.
תנועה זוויתית	מהם משפיעי התנועה	תנועת הלוויין בחלל הינה תנועה זוויתית. מערכת בקרת

ההכוון שלנו אמורה להניע את הלוויין להכוון רצוי, כלומר לגרום לו לנוע בתנועה זוויתית. על כן נאלץ לחקור תנועה זו ואופן פעילותה, על מנת שנדע איך להתחשב בה בנוסחאות האלגוריתם לבקרת ההכוון ובשימוש במפעילים.	הזוויתית? כיצד גוף הנע בה מתנהג? אילו נוסחאות והיבטים פיזיקאליים קשורים בה?	
הלוויינים הזעירים הם תחום חדש בעולם כולו ובישראל בפרט, על כן הישגיו לא ידועים לכל וקיימות שאיפות רבות לגביו. בתור תלמידים אשר עוסקים במערכת בקרת הכוון עבור הלוויין הזעיר הישראלי הראשון, מן הראוי שנדע את מקומה של ישראל בתחום. בנוסף נחקור מסלולים, מבנה, שימושים ותתי מערכות חיוניות בלוויין אשר משפיעות על אופן פעילותו ותנועתו ומתוקף כך על הפעילות שתידרש ממפעילי מערכת הבקרה לבצע. נחקור גם האם ישנם תנאים המגבילים את מגוון החיישנים והמפעילים שיהיה ניתן להשתמש בהם.	מה מקומו של תחום הלוויינות הזעירה בעולם כולו ובישראל בפרט? אילו הישגים הושגו עד כה בתחום זה ומה שאיפות ומטרות התחום להמשך? מה מבנה הלוויינים הזעירים המצויים כיום? באילו שימושים משתמשים בהם ולאילו שימושים מיעדים אותם?	לוויינים זעירים
הבנת חשיבות ומהות מערכת בקרה כללית בתהליך אותו היא מבקרת. הכרת סוגיה השונים (חוג סגור/חוג פתוח) ורכיביה העיקריים.	מהי מערכת בקרה? האם היא אחידה לכל? לשם מה זקוקים לה?	מערכת בקרה כללית
כדי שנוכל ליצור אלגוריתם יעיל ביותר, נצטרך ללמוד אודות מערכות בקרת ההכוון של הלוויינים כיום, והגורמים שיש להתחשב בהם במערכות הבקרה. כמו כן, נבדוק האם קיימת מערכת בקרת בלוויין הזעיר. במידה ומערכת כזו קיימת, נבדוק מה מרכיביה, ננסה לעמוד על חסרונותיה ועל הפגמים בה וננסה ככל הניתן להתגבר עליהם וליצור מערכת בקרה יעילה וטובה יותר.	כיצד עובדת מערכת בקרת הכוון אל השמש בלוויינים?	מערכת בקרת הכוון בלוויין
במערכת בקרת ההכוון שלנו אנו זקוקים לחיישנים אשר הרמה התפעולית שלהם טובה, והם יעילים ביותר עבור הצרכים שלנו. באמצעות חקר זה נגיע לחיישנים האופטימאליים ביותר, בהם נשתמש בפרויקט.	מהו מגוון החיישנים המצויים בשימוש כיום במערכות בקרת הכוון שונות בלוויינים רגילים? כיצד הם פועלים? באילו גורמים הם תלויים? ומהי רמת דיוקם?	חיישנים במערכות בקרת הכוון שונות של לווויינים
במערכת בקרת ההכוון שלנו אנו זקוקים למפעילים אשר הרמה התפעולית שלהם טובה, והם יעילים ביותר עבור הצרכים שלנו. באמצעות חקר זה נגיע למפעילים האופטימאליים ביותר, בהם נשתמש בפרויקט. מפעילים אלה יצטרכו לתאום את שאר המערכות של הלוויין הזעיר, הן מבחינת כמות האנרגיה שהם דורשים, הן מבחינת התפקודים שהם מסוגלים לבצע וכדומה.	מהו מגוון המפעילים המצויים בשימוש כיום במערכות בקרת הכוון שונות בלוויינים רגילים? כיצד הם פועלים? באילו גורמים הם תלויים? ומהי רמת דיוקם?	מפעילים במערכות בקרת הכוון שונות של לווויינים
העמותה עימה אנו עובדים מיקדה אותנו לבניית	כיצד פועל חיישן המגנטומטר?	החיישן

מגנטומטר	מה הוא מפיק? כיצד מושפעת תפוקתו מתנאים פיסיקאליים שונים?	אלגוריתם למערכת בקרה שאחד מחישניה הוא המגנטומטר. נצטרך לדעת מהם הגורמים המשפיעים עליו, ואת הנוסחאות הקשורות בו, בכדי שנוכל לשלבן באלגוריתם.
מערכת פנלים סולריים כחיישני שמש	מה הקלט והפלט של מערכת זו (נחקרה בפרויקט קודם בתחום)?	מתוכנן שימוש במערכת זו כחיישן אשר ייתן את כוון השמש ביחס ללוויין. נצטרך לדעת מה מקבלת ומה מפיקה המערכת, ואיך להשתמש במידע המופק לצורך חישובים הכרחיים באלגוריתם (איתור הכוון הלוויין ביחס לשמש).
המפעיל מגנטוטורקר	כיצד פועל מפעיל המגנטוטורקר? כיצד מגיב לפקודות שונות המגיעות ממחשב מערכת הבקרה? באילו מידה משפיע על תנועת הלוויין?	העמותה עימה אנו עובדים מיקדה אותנו לבניית אלגוריתם למערכת בקרה שאחד מחישניה הוא המגנטוטורקר. נצטרך לדעת מהם הגורמים המשפיעים עליו, ואת הנוסחאות הקשורות בו, בכדי שנוכל לשלבן באלגוריתם.
תורת האלגוריתמיקה ושפת התכנות	כיצד יש לבנות אלגוריתם בצורה יעילה ביותר? כיצד משלבים בו את נתוני הקלט והפלט ואת הנוסחאות הדרושות? מהי שפת התכנות של מחשבי הלוויינים?	כדי שאלגוריתם יכתב בצורה היעילה והנכונה ביותר, אנו זקוקים לידע בסיסי בתורת האלגוריתם ובכתיבתו. ייתכן ואנו נבצע את המרת האלגוריתם לשפת התכנות של הלוויין, ולכן אנו זקוקים לידע בשפה זו.
תוכנות סימולציה, אקסל	כיצד עורכים הדמיות של האלגוריתם בתוכנות מסוימות, (דגש על אקסל)?	אנו זקוקים לידע בסיסי בעריכת גרפים והדמיות ממחשבות, על מנת שנוכל לאמת את נכונות האלגוריתם ולבסס את הפרויקט (ייתכן ולא נוכל לממשו באופן מעשי-בלוויין אמיתי).

## לווינות מהי?

מאז ומעולם שאף האדם להשיג את מה שמחוץ להישג ידו, ובכלל זה החלל. האדם הראשון תר אחר פשר השמיים השחורים ופשר הכדורים הזוהרים הנעוצים בהם. ככל שתפתח האדם, ועימו הטכנולוגיה, כך גם התפתחה תפישתו בנוגע לחלל, מתוך שאיפה להגיע לחלל ולחקרו לעומק ו"מקרוב". לווינות היא למעשה התחום העוסק בלוויינים, הן בפן המחקרי (חקר החלל בעזרת לוויינים), והן בפן הטכנולוגי (פיתוח מערכות לוויין, ניצול לוויינים לשימושים שונים). לוויין הוא גוף שמימי, טבעי או מלאכותי, המסתובב סביב עצם שמימי אחר גדול יותר (בד"כ כוכב או כוכב לכת). הגוף המסתובב נמשך על ידי כוח המשיכה, כוח הגרוויטאציה, של הגוף הגדול (כוח צנטריפטאלי) ובשל מהירותו, הוא ממשיך להסתובב ולא נעצר. יש לציין כי כוח המשיכה מופעל ע"י כל אחד מהגופים על משנהו, אולם מורגש יותר בגוף הקטן (בשל הפרשי המסות). ניוטון קבע כי הכוח בין הגופים המושכים, נתון בנוסחא הבאה, כאשר ניתנת התייחסות לכוח בין כדה"א ללוויינו:

$F$  [N] - כוח המשיכה ההדדי, המושך את הלוויין כלפי כדה"א.

$M=5.98 \cdot 10^{24}$  [kg] - מסת כדה"א.

$$F = G \frac{Mm}{R^2}$$

$m$  [kg] - מסת הלוויין.

$r$  [m] - המרחק בין הלוויין למרכז כדה"א.

$G=6.67 \cdot 10^{-11}$  [ $m^3/(kg \cdot sec^2)$ ] - קבוע הגרוויטאציה האוניברסאלי של ניוטון.

נהוג לכנות לוויינים טבעיים בשם "ירחים". הם עצמים טבעיים המקיפים כוכבי לכת, כוכבי לכת ננסים או עצמים אחרים הגדולים מהם כתוצאה מהשפעת כוח הכבידה. טכנית, גם כוכבי לכת יכולים להיחשב ירחים של הכוכב אותו הם מקיפים (במערכת שלנו - את השמש), או כוכבים המקיפים את מרכז הגלקסיה, אולם לא מקובל לכנותם במונח "ירח". הודות למהירותו הגבוהה הלוויין (הטבעי או המלאכותי) הוא אינו זקוק להתגבר על כוח הכבידה. הוא שרוי במצב של נפילה מתמדת, וכך נשאר במסלול שצורתו, עבור לווייני כדה"א, בדרך כלל אליפטית (בשל פחיסות כדה"א).

כאמור, כוח המשיכה שמפעיל כדה"א על הלוויין יוצר כוח מרכזי (צנטריפטאלי) המצביע לכיוון מרכז כדה"א, ובשילוב עם המהירות המאונכת לכוח זה, נוצרת התנועה המעגלית. המהירות הזוויתית הדרושה לתנועה במסלול מסוים, תלויה בגובהו מעל פני כדה"א (מרחק ממרכז כדה"א - מרכז הכובד) - ככל שהמסלול נמוך יותר (קרוב יותר לכדה"א), על הלוויין לנוע במהירות גבוהה יותר כדי להישאר במסלול.

כיום קיימים סוגים שונים של לוויינים מלאכותיים, כאשר מסלולם נקבע ע"פ ייעודם:

### Low Earth Orbit LEO - מסלול נמוך

לוויין הנמצא במסלול מסוג זה סובב את כדור הארץ במרחק של 300-1000 ק"מ מעל פני כדה"א. בשל קרבת הלוויין לכדה"א, עליו לנוע במהירות גבוהה יחסית, אחרת כוחות המשיכה של כדה"א ימשכו ופילו אותו על פני הארץ. מהירות לוויין במסלול זה היא כ-28,000 קמ"ש, והשלמת הקפה אחת סביב כדה"א מתבצעת תוך כ-90-120 דקות. מרבית השימושים הנעשים בלוויינים מתבצעים בלוויינים נמוכי מסלול, כאשר התחום העיקרי הוא צילום, ריגול. הקרבה נדרשת לשם השגת רזולוציה טובה.

### Medium Earth Orbit - MEO

התחום שבין ה-LEO ל-GEO. גובהו 2000 - 36,000 ק"מ מעל פני כדה"א. זמן החקפה השל לוויינים בתחום זה הוא בין שעתיים ל-12 שעות. במסלולים אלה נמצאות מערכות הניווט הלווייניות. כמו כן, גם לווייני תקשורת המכסים את הקוטב הצפוני והקוטב הדרומי נמצאים בגובה בינוני, ובגלל שמסלולם של לוויינים אלה גדול מאלה של נמוכי המסלול, הם נמצאים בנקודת ראייה ממושכת יותר של תחנות הקליטה שלהם על פני כדור הארץ.

### Geostationary Earth Orbit – GEO

גובה מסלול של כ-36,000 ק"מ מעל פני כדה"א, כעשירית המרחק בין כדה"א והירח. בגובה זה הלוויין מסתובב סביב כדה"א במהירות המאפשרת השלמת הקפה פעם ב-24 שעות - בדיוק כמו מהירותו של כדה"א סביב צירו. כך, יראה לצופה מן הקרקע כאילו הלוויין עומד במקום. מסלול זה נקרא מסלול גיאוסטציונרי ("נייח מול הארץ"). לוויין כזה נמצא בקשר עין תמידי עם הנקודה שהוא נמצא מעליה ולכן נוצר כיסוי רציף, כך ששלושה לוויינים מסוגלים לכסות למעשה את כל פני כדור הארץ, פרט לקטבים. הלוויינים העיקרים הנמצאים במסלולים אלה הם לווייני תקשורת, המשמשים בעיקר לצרכים אזרחיים (חזאות, שידורי טלוויזיה וכדומה) של העברת תקשורת בין יבשות דרך החלל ללא צורך בכבלים ו/או בקו ראייה בין תחנות קרקע. הלוויין בעצם משמש אנטנת מקלט-משדר (מקמ"ש) שנמצאת גבוה מאוד בחלל, דבר הנותן לה טווח "ראייה" נרחב. לגובה הרב יש גם חסרונות עקב הצורך ב"מיקוד" אלומת האותות לאזור מסוים כדי שמתמש הנמצא באזור יוכל לקלוט את האותות מהלוויין בעוצמה מספקת. ניתן לשים לוויין תקשורת במסלול נמוך הדורש הספק נמוך אך בצורה כזו נצטרך עשרות לוויינים כדי לספק כיסוי רציף לאזור מסוים, ולכן מעדיפים לשים את הלוויין בגובה גבוה מאד כך שיכסה אזור גדול ככל האפשר.

### High Earth Orbit-HEO

התחום שמעבר ל-GEO (כלומר יותר מ-36,000 ק"מ מכדור הארץ).

## סביבת הלוויין:

סביבת הלוויין מאופיינת על ידי גורמים שונים המשפיעים על תנועת הלוויין ותפקודו בחלל. חלקם אף יכולים לגרום ללוויינים נזק רב, ולכן על הלוויינים להיות עמידים בפניהם. מטרת פרק זה היא לספק מידע כללי אודות סביבת הלוויין, והשפעתה עליו. בראש ובראשונה, הלוויין מצוי בחלל-תווך תלת ממדי שהוא כמעט ריק לחלוטין אמנם, למעשה הלוויינים פועלים בתנאים סביבתיים קשים ביותר, כפי שנפרט בהמשך. כאשר לוויין חשוף לשמש, הוא עלול להתחמם מאוד. פיזור החום נעשה באמצעות מערכת בקרה תרמית, השומרת על חום הלוויין ותת מערכתיו. בחלל הטמפרטורות יכולות לנוע בין 170- ל-120 מעלות. כמו כן, במהלך החשיפה הוא אוגר אנרגיה רבה מהקרינות המצויות בחלל. בנוסף, הלוויין עצמו מייצר חום על ידי פעילותו ואין דרך באופן המוכר לנו (כמו מאורר) כדי להתגבר על בעיה זו, בין היתר בשל הימצאותו בריק. שיטה נפוצה היא באמצעות הקרנה, כלומר, הלוויין פורק את הקרינה מהרכיבים בצורה חכמה כדי שלא ישרפו מהחום של עצמם. בנוסף, מערכת זו שומרת גם על המשך עבודה תקינה ללא קפיאה, שכן באזורים מסוימים (בעיקר מקומות בהם מוסתרת השמש וקרינתה) הטמפרטורה נמוכה מאוד. לכן, כל הלוויין עטוף ב"שמיכות תרמיות" כדי לשמור על חום.

גורם נוסף המהותי בסביבת הלוויין ומשפיע עליו רבות הוא הקרינות המצויות בחלל. קרינות אלה נובעות מגורמים שונים כמו "רוח השמש", המכונה גם הרוח הסולרית, והתפרצויות בשמש (flare). הן למעשה תנועת חלקיקים טעונים בעלי אנרגיה גדולה מאוד ומהירות גבוהה, אשר עלולים לגרום לשיבושים במערכות הלוויין. הבעיה העיקרית שנגרמת כתוצאה מחשיפת הלוויין לקרינה היא שינויי זיכרון בתוכנה. שינויי המתבצע על ידי מעבר חלקיקי הקרינה דרך דפנות הלוויין העלולים לפגוע בזיכרון ה-RAM, זיכרון דינאמי, ולשנות נתונים שטמונים בו. לעומת זאת, הקרינה אינה יכולה לפגוע בזיכרון ROM משום שהוא זיכרון קבוע, ולכן חלק מהמערכות הקריטיות נכתבות בזיכרון ROM. למרות ששיטה זו מורידה את יעילות החישוב, כי הזיכרון עובד עם הנתונים הקבועים והשמורים אצלו בזיכרון, ולא עם הנתונים הרלוונטיים באותו הזמן, שיטה זו נדרשת על מנת להבטיח את אמינות המערכות. בנוסף, ישנם שיבושים בתקשורת, ועלול להיגרם אף חימום יתר של רכיבים אלקטרוניים, שעשוי להביא לתקלה קבועה שלא ניתנת לתיקון. אחת הדרכים להתמודד עם חימום זה היא בעזרת חיישנים המודדים זרם, ובעת התחממות-מכבים את המערכת.

המגנטוספירה, המורכבת מתערובת של יונים ושל אלקטרונים חופשיים נוצרת מקים רוח השמש ושדה מגנטי. למעשה, השדה המגנטי של כדה"א מגן עליו וכן על הלוויינים, מפני נזקי רוח השמש. בנוסף, במסלולי לוויין LEO, מסלולים נמוכים יחסית בהם ינוע הנו-לוויין, ישנה השפעה של שאריות חלקיקי האטמוספירה על הלוויין. חיכוך מועט זה גורע ממהירותו של הלוויין, ועם הזמן, אף מוריד אותו לתוך האטמוספירה.

חשיבות הנו-לוויין באה לידי ביטוי בבדיקת מערכות אלקטרוניות (קווליפיקציה) בדיקת התאמה למשימה) בסביבת החלל. הבדיקה נחוצה כי החלל אינו שקט, כפי שראינו, ובדיקת המערכות תאפשר בדיקת אמינות של מערכות חדשות ופיתוח וייעול של מערכות, לשם התגברות על גורמי סביבת הלוויין המשבשים פעילות סדירה. בשל העלות הנמוכה של הנו-לוויינים וזמינותם, תתאפשרנה בדיקות רבות-מה שיביא לפיתוח מואץ של מערכות יעילות ואמינות יותר עבור לוויינים.

## שימושי הלוויין:

כיום, עם מספר רב של לוויינים הנמצאים בחלל וסובבים את כדור הארץ יש שימושים רבים ללוויינים והם נכללים כמעט ובכל תחום בחיינו:

### ❖ לווייני חיזוי מזג אוויר

לוויינים אלה חוזים את מזג האוויר בזכות הנתונים ונתונים שהם אוספים מגבהים שונים מעל פני כדור הארץ. לוויינים אלה מכילים בדרך כלל מצלמות שיכולות לצלם תופעות של מזג אוויר כגון תנועת עננים. לוויינים אלה נמצאים במסלולים מעל נקודה קבועה על כדור הארץ שנקראים מסלולים גיאוסטטיים.

### ❖ לווייני תקשורת

לוויינים אלה מאפשרים מעבר שיחות טלפון ומידע אחר מכדור הארץ אל הלוויין ומהלוויין חזרה אל כדור הארץ. אחד המרכיבים החשובים של לוויין תקשורת הוא מערכת שקולטת שיחה בתדירות מסוימת, מגבירה אותה ומשדרת אותה בחזרה אל כדור הארץ בתדירות אחרת. למערכת הזו קוראים טרנספונדר ובכל לוויין יש מאות או אלפי טרנספונדרים. גם לוויינים כאלה נשארים במקום קבוע ביחס לכדור הארץ.

### ❖ לווייני שידור

אלה דומים ללווייני תקשורת ותפקידם לשדר אותות טלוויזיה מנקודה אחת לאחרת. אותות הטלוויזיה מגיעים אל הלוויין מנקודה מסוימת על כדור הארץ ומשם הם מוחזרים למקומות אחרים.

### ❖ לווייני מחקר

לוויינים אלה ממלאים תפקידים מדעיים בחלל. המפורסם שבלווייני המחקר הוא הטלסקופ האבל שמקיף את כדור הארץ במסלול קבוע ומשדר אל כדור הארץ צילומים של גופים בשמיים. לוויינים אחרים מצלמים את פני כדור הארץ ועוקבים אחר שינויים שמתרחשים בו - למשל שינוי בגודל האזורים המכוסים בקרח, היווצרות איים חדשים ועוד. מידע זה מנוצל גם ליצירת מפות מדויקות יותר של כדור הארץ.

### ❖ לווייני ניווט

לוויינים מהסוג הזה מסייעים לנווט על כדור הארץ. אותות שנשלחים מכדור הארץ אל הלוויינים, בדרך כלל מסוג GPS מאפשרים למטיילים, לספינות ולמטוסים לדעת בצורה מדויקת את מיקומם.

### ❖ לוויינים צבאיים

הרבה מהלוויינים בחלל הם לוויינים צבאיים סודיים ביותר. ללוויינים אלה יש תפקידים חשובים מאוד, שמבוצעים באמצעות טכנולוגיה מתקדמת ביותר. למשל: העברת אותות מוצפנים, מעקב אחר תנועת כוחות צבא ופריסת כלי נשק, התראה מוקדמת על שיגור טילים, צילום, קליטת שידורים ומסרים של מדינות אויב ועוד.

## מרכיבי הלוויין:

משקל הלוויינים יכול לנוע מ-100 ק"ג למספר טונות. משקל הלוויינים קריטי בנושאים אלו, כי ככל שהמשקל עולה, והמכשירים שנמצאים בלוויין (כמו בלוויין צילום – הטלסקופ) שוקלים יותר כך יצטרכו יותר אנרגיה חשמלית, רקטות יותר חזקות לשיגור וכך מתייקר עניין הלוויינים. כל לווין בנוי מתת מערכות, כך שאם מערכת כושלת, מערכת שנייה עוברת לעבוד במקומה. כל לווין מורכב מה:

- **מחשב**, שהוא מנהל את פעולת שאר תת המערכות, הוא מקבל נתוני פעולה, מעבד ושולח פקודות. המחשבים שבלוויינים לא צריכים להיות מחשבים חזקים אך צריכים לעמוד בטמפרטורות גבוהות מאוד, נמוכות מאוד ובעוצמת קרינה גבוהה שלפעמים דבר זה גורם לשיבוש פעולותיו של המחשב.
- **פאנלים סולריים** שתפקידם להפוך את עוצמת האנרגיה של השמש לחשמל, כדי לספק חשמל לכל התת מערכות בלוויין. הפאנלים אוגרים אנרגיה כך שב"תקופות החושך" (תקופות בהם כדור הארץ מסתיר את הלוויין מהשמש והלוויין לא מקבל שמש ולא יכול לייצר אנרגיה) הלוויין ימשיך לעבוד באופן תקין על ידי ניצול האנרגיה שנאגרה.
- **מערכת בקרה תרמית** זוהי מערכת בקרה ששומרת על חום הלוויין ותת מערכתיו בתוך טווח של טמפרטורות שמאפשרות המשך עבודה ללא קפיאה או המסה. בחלל הטמפרטורות יכולות לנוע בין 170- ל-120 מעלות. הלוויין עצמו מייצר חום על ידי עבודתו ואין דרך באופן המוכר לנו (כמו מאוורר) ובעיה זו דורשת שנגרום לחום לצאת החוצה בקרינה מהרכיבים בצורה חכמה כדי שלא יישרפו מהחום של עצמם. כל הלוויין עטוף ב"שמיכות תרמיות" כדי לשמור על חום הלוויין שלא יקפא.
- מערכות הלוויין הם מערכות חשמליות היוצרות השראות אלקטרומגנטיות העלולות להשפיע על תפקוד מערכות שונות, בנוסף על כך בחלל הכל הרבה יותר צפוף ויש חלקיקים מוליכים הפוגעים בלוויין כך שהם יכולים להטעין את הלוויין במטען גבוה שעלול לפגוע בפעולת הלוויין ולכן יש ליצור מצב שהמטען שנוצר יבודד. מאפייני הלוויין:
- **מבנה הלוויין** - צריך לעמוד בכוחות ורעידות כדי לשרוד את השיגור (בעת השיגור יכולים להיווצר כוחות גדולים עד כמעט פי 10 ממשקל הלוויין). בחלל יכולים להיווצר רעידות שיפריעו ללוויין לתפקד.
- **משקל הלוויין** - כולל את מערכות המרכב ואת המטען יעד כך שיש להתחשב במשקל הלוויין לפני השיגור כדי לבחור את השיגור המתאים. משקל הלוויין משתנה בחלל בעקבות הדלק שהולך ויורד.
- **תקשורת פנימית** – ללוויין יש תקשורת פנימית כדי שהמערכות הפנימיות יוכלו להעביר נתונים ופקודות ביניהם, התקשורת הפנימית נעשית על ידי כבלי תקשורת הקושרים בין כל המערכות ברשת פנימית.
- **תקשורת חיצונית** – במטרה להעביר נתונים לתחנת קרקע וכן לקבל פקודות מהתחנה לשינוי מסלול, חוגי בקרה, שינוי הטענת סוללות ועוד... הלוויינים גם מקבלים פקודות עבודה ולשדר לקרקע את הנתונים שנקלטו (לדוגמא: במקרה של לווין צילום תחנת הקרקע מעבירה מיקום לצילום, הלוויין מתמקם, מצלם ומעביר את המידה לתחנת הקרקע להמשך העבודה).

- **בקרת הכוון** – בחלל אין יכולת אחיזה והלוויין יכול ללכת לאיבוד, יש מספר מערכות לטיפול בבעיה זו:
    1. מד-שמש ומד אופק – מד השמש מודד זווית ביחס לשמש ומד האופק מודד את הזווית ביחס לאופק הנראה לו בכדור הארץ.
    2. עוקב הכוכבים – שמשווה תמונה האגורה אצלו בזיכרון עם מה שהוא מצליח לראות מהמקום שלו.
    3. מגנטומטר – שמטרתו למדוד את גודל וכיוונו של השדה המגנטי של כדור הארץ ומשווה לנתונים שנמצאים אצלו בזיכרון.
 תת המערכות שאחריות על הכוון הלוויין הם סילוני גז קר או חס הנפלטים במהירות ו"זורקים" את החלק בלוויין שממנו מפלטו אחורה, גלגלי תגובה הנמצאים בתוך הלוויין המשנים את מהירות סיבובם ובכך משנים את התנע הזוויתי שלו, מגנטוטורקר שעל ידי השדה המגנטי משנה את מהירות סיבובו יוצר תופעה דומה לגלגל תגובה.
  - **הנעה** – לאחר השיגור כשהלוויין נכנס אל מסלולו הראשוני הלוויין צריך להתאים את עצמו למסלול המתוכנן לו, תהליך זה קורה במשך מספר ימים או שבועות. ללוויין יש מערכת הנעה שמורכבת ממנועים חזקים הנועדים למסלול ולשליטה על גובה המסלול במהלך כל ימי הלוויין. הלוויין כשהוא מאבד את מהירותו הוא מאבד מהגובה שלו והמנועים של הלוויין מעלים את המהירות ובכך מעלים את הלוויין שוב לגובה המיועד. בלוויין יש גם 3 מנועים חלשים שנועדו להניע אותו בצירי תנועה שונים (גלגול, עלרוד, סבסוב), כדי להביאו לכיוון הרצוי.
- בעקבות זה שהמחירים בשוק הלוויינים גבוה ומספר כישלונות בשיגורים יכול להביא לפשיטות רגל של חברות לוויינים, החברות משתמשות ברכיבים שכבר הוכיחו את עצמם בחלל שהם עובדים.
- יש לדאוג שכל הרכיבים יעמדו בקרינה גבוהה כי בחלל ככל שמתרחקים מכדור הארץ הקרינה מסוגיה השונים נהיית חזקה יותר וקטלנית יותר.

## לוויינים הקיימים כיום:

ישראל החלה את פעילות החלל בתחילת שנות ה-80, ושיגרה לחלל לוויינים אחדים. הלוויינים הצבאיים שוגרו מישראל, באמצעות משגר שפותח ויוצר בישראל, והאזרחיים שוגרו מבסיסי שיגור זרים. הלוויינים של ישראל הם:

- "אופק 1" שוגר ב-19 בספטמבר 1988 ו"אופק 2" ב-1992. אלה היו לוויינים טכנולוגיים.
- "אופק 3" היה לוויין הצילום הראשון, ששוגר ב-1995 וסיים את חייו בדעיכה חזרה לאטמוספירת כדור-הארץ בשנת 2000.  
נכון לאפריל 2008 הלוויינים הבאים מרחפים בחלל:
- טקסט 2, לוויין ניסויי ששוגר לחלל ביולי 1998, הוא לוויין שפותח בטכניון. הוא אחד הלוויינים הקטנים ביותר בעולם. הוא בנוי כקובייה שאורך צלעה 45 ס"מ, ומשקלו 48 ק"ג. מותקנים עליו גלאי אוזון, מחשב זעיר ומערכת ניווט ובקרה.
- לוויין התקשורת "עמוס 1",
- לוויין הצילום הצבאי "אופק 5" (28 במאי 2002)
- לוויין הצילום האזרחי "ארוס A1" שוגר ב-5 בדצמבר 2000.
- לוויין התקשורת "עמוס 2" שוגר ב-27 בדצמבר 2003.
- לוויין הצילום האזרחי "ארוס B" שוגר ב-25 באפריל 2006.
- הלוויין הצבאי אופק 7, שוגר ב-11 ביוני 2007.
- לוויין התקשורת עמוס 3 שוגר ב-28 באפריל 2008.

## לוויינים זעירים:

הלוויינים הרגילים הם פרי נהדר של ההתפתחות הטכנולוגית והתפתחות המדע ברקע האנושי, אך ניתן לראות שדרוג מיוחד בלוויינים בעידן זה – הקמת הלוויינים הזעירים. תופעת התפתחות מזעור הרכיבים האלקטרוניים, ובראשם מעבדי המחשב, נוגעת גם בתחום הלוויינות- הלוויינים החלו "להתכווץ". כך נוצרו הלוויינים הזעירים אשר פתחו דרך להעלאה במספר משימות החלל, בעלויות נמוכות, ולשימוש במשגרי לוויינים קטנים וחלשים יותר אשר גרמו להוזלת משימת החלל.

הלוויינים הזעירים מתאפיינים במשקלם הנמוך ובהתאם גם מכירם, וזה אחד ההבדלים המהותיים שנתונים לנו בין הלוויינים הזעירים לבין הלוויינים הרגילים.

- לוויין גדול - משקלו מעל 1,000 ק"ג ומחירו נע בסביבות \$100,000,000.
- לוויין בינוני - משקלו בין 500 ק"ג ל-1,000 ק"ג ומחירו נע בסביבות \$50,000,000.
- מיני-לוויין - משקלו בין 100 ק"ג ל-500 ק"ג ומחירו נע בסביבות \$10,000,000.
- מיקרו-לוויין - משקלו בין 10 ק"ג ל-100 ק"ג ומחירו נע בסביבות \$2,000,000.
- ננו-לוויין - משקלו בין 1 ק"ג ל-10 ק"ג ומחירו נע בסביבות \$200,000.
- פיקו-לוויין - משקלו בין 100 גרם ל-1 ק"ג ומחירו נע בסביבות \$20,000.
- פֶּמְטו-לוויין - משקלו נמוך מ-100 גרם ומחירו נע בסביבות \$100.

קיובסאט (Cubesat) הוא שם כללי לפלטפורמה לוויינית זעירה, שפותחה בשיתוף פעולה בין אוניברסיטת סטנפורד והמכון הפוליטכני של קליפורניה, כשיטה חדשנית שתאפשר לסטודנטים לשגר לוויין במהירות ובזול. התצורה של הלוויין הבסיסי במשפחה זו היא קובייה, שאורך פאתה 10 ס"מ.

שיגור לווייני קיובסאט מתבצע באמצעות משגר גנרי, מעין תיבה שלתוכה מוכנסים עד שלושה לוויינים בבת-אחת. משהגיע המשגר לחלל, נפתח המארז וקפיץ הודף את הלוויינים החוצה, לחלל.

כוונתם של מפתחי פלטפורמת קיובסאט הייתה להוריד למינימום את מחיר הרכב הלוויין, ולפטור את המעונוינים בשיגור לוויין מחקר זעיר מן הצורך לתכנן את גוף הלוויין וחלק ממערכת ההפעלה שלו, המגיעה כיום יחד עם הגוף.

עשרות לווייני קיובסאט שוגרו עד כה לחלל, ועשרות פרויקטים נוספים נמצאים בשלבים שונים של תכנון, אך רק כ-30 לוויינים נמצאו בשימוש ואכן פועלים כראוי בחלל.

הלוויינים הזעירים מכילים בתוכם רכיבים זעירים אשר זולים במחירם ובהתאם לכך גם הלוויינים הזעירים לא יקרים, ואפשר לשגר לחלל מספר לוויינים זעירים בשביל ניסויים שונים מה שאי אפשר לעשות עם לוויינים רגילים בשל גודלם, ביטוח היקר עבורם, השיגור היקר, מרכיביהם הבולטים מבחינה כספית ומבחינת גודלם.

מכיוון שלוויינים פועלים בתנאים סביבתיים קשים ביותר (טמפרטורות של מאות מעלות צלזיוס, קרינה, שדה מגנטי חזק) ואי-אפשר לספק להם שירותי תיקון ותחזוקה, נבנות בהם מערכות גיבוי



שונוות, המאפשרות יתרות - כלומר המשך תפקוד הלוויין באורח תקין גם אם מתרחש כשל במערכת הראשית.

בלוויינים רבים מאוד היתרות היא מלאה, ובדרך-כלל היא כפולה. במערכות מסוימות, היתרות היא אף משולשת. החיסרון הגדול ביותר של לווויינים זעירים הוא היעדר כמעט מוחלט של יתרות, מסיבה פשוטה - אין בלוויין מקום לכך. בין יוצאי הדופן הוא הלוויין הזעיר הישראלי ISAT-1, שבו קיימת יתרות מלאה בכל מערכותיו.

לוויינים זעירים נבחנים בעשור האחרון כמועמדים לטיסות של שני לווויינים או יותר תוך שמירה על מיקום הדדי במרחב ושינויים בתצורה הגיאומטרית של המבנה. לנחילי לווויינים עתידיים, שיוכלו להכיל עשרות או מאות לווויינים זעירים, יכולים להיות שימושים מרובים במחקר, כמו למשל בחיפוש אחר גלי כבידה, במחקר אסטרונומי, בסקר מהיר של כוכבי-לכת וירחים ובמשימות צבאיות.

בין האתגרים הניצבים בפני המפתחים של רעיון נחילי הלוויינים אפשר לציין את מערכת ניהול המבנה, את אמצעי השליטה והבקרה של כל לווין ומערכת התקשורת שלו עם לווויינים אחרים, את הצורך להימנע מהתנגשות עם עצמים אחרים בחלל ועוד. נחיל של לווויינים זעירים יכלול לווויינים רבים בעלי יתרות נמוכה, אך היתרות הכוללת של הנחיל תהיה גבוהה - הלוויינים התקינים יוכלו לבצע את משימותיהם של לווויינים מקולקלים, בלא פגיעה במשימה שלשמה שוגרו לחלל.

הלוויינים הזעירים מאופיינים בכמה מאפיינים טכניים חשובים:

- ❖ מסתם נעה בין 1-10 ק"ג
- ❖ היתרות והסיבוכיות מוגבלות
- ❖ הם בעלי רכיבי COTS מסחריים, ו-MEMS
- ❖ הם בעלי מעטפת מוגבלת (נפח, קרינת חום)
- ❖ הם מודולרים וגמישים
- ❖ הספקם מוערך לפחות מ-30 W
- ❖ הוא בעל פנלים סולאריים

ניתן לראות שתחום הלוויינות הזעירה כבש גם את מדינת ישראל כאשר כיום נבנים בה שני לווויינים, הנמצאים בשלב השילוב של חלקי הלוויין (אינטגרציה) במתקני מפעל מבת-חלל של התעשייה האווירית. את הלוויינים תכננו מומחי העמותה ללוויינות זעירה בישראל ( INSA : Israeli Nano Satellite Association).

הננו-לוויין הישראלי הראשון, המכונה ISAT-1, ישמש להוכחת תפקודם של רכיבי לווין בתנאי אמת - כלומר בחלל. תעשיית הלוויינים היא כאמור שמרנית ביותר, בעיקר משום שאי-אפשר לתקן רכיבים שחלה בהם תקלה בחלל ובשל העלות העצומה של פרויקטים לוווייניים. לכן, רכיבים שאנחנו עושים בהם שימוש בחיי היומיום, דוגמת מעבדי פנטיום, טרם הגיעו לחלל, פשוט מכיוון ששום יצרן אינו רוצה להסתכן בשיגור רכיב שטרם נוסה בחלל. השימוש בננו-לוויינים מביא את האפשרות להעלות לחלל מעבדות זעירות הבוחנות התנהגות של רכיבים חדשים בחלל.

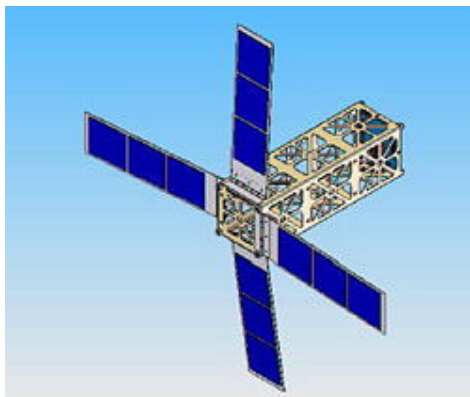
לוויין להוכחת רכיבי חלל נועד לבדוק את הרכיבים בתנאי חלל תוך שילובם בתחום של הלוויינית הזעירה. התהליך יהיה מהיר יותר וזול יותר מאשר בחינות במעבדות, ויתרוננו הגדול-הדגמה שרכיבים מסוימים פועלים ופעלו בחלל.

מגוון היישומים האפשריים לננו-לוויינים הוא עצום, אך חשוב לזכור שנו-לוויין אינו מהווה בדרך-כלל תחליף ללוויין גדול ממנו. חשיבותם של לווייני צילום ותקשורת לא תפחת למרות פעולתם של הננו-לוויינים. ננו-לוויינים יכולים לשמש למגוון משימות מדעיות, להוכחת טכנולוגיות, להגנה על נכסי חלל, לפרסום חללי, להדגמת טכנולוגיות חדשניות ועוד. אחד היישומים המעניינים, הוא הצבת לוויינים זעירים אלה כזקיפים, לשם הגנה על נכסי חלל חיוניים דוגמת לווייני צילום או תקשורת.

בהתקרב איום על הלוויין, בדמות נשק חלל מסוג כלשהו, יוכל לוויין זעיר לנוע למסלול התנגשות עם האיום, ובכך להגן על הלוויין הגדול. לוויינים זעירים אלה יוכלו להיות מוצבים מסביב ללוויין ובמרחק-מה ממנו, או להיות משולבים בפגיעות הייעודיות בתוך הלוויין. שילוב כזה אף יאפשר להם לקבל ממנו חשמל לצורך פעולתם.

אולם, למרות כל החידוש, אין כיום מערכות בקרת הכוון מובנות לננו-לוויינים. מרביתם מצופים בפנלים סולאריים צמודי גוף, ומסתדרים עם האנרגיה החשמלית המתקבלת מהם, ללא צורך בהכוון מיוחד. דגם הלוויין הזעיר, המתוכנן ע"י ישראל, כולל "פרח" של פנלים סולאריים ראשיים, בנוסף לפנלים הסולאריים הכרוכים בציפוי, אותו יש לכוון בניצב לקרני השמש. כך, תופק אנרגיה חשמלית מקסימאלית, אנרגיה אשר תספק את צרכי מערכות הלוויין. הצורך במערכת בקרת ההכוון טמון הן במערכות הדגם הישראלי הזקוקות להספק חשמלי רב יותר מהמצוי, והן בשאיפת ישראל להיות מוצבת בחזית הקדמה הטכנולוגית, ולסייע בשגשוג תחום הננו-לוויינות, תחום הנראה מבטיח למדי.

להלן מבנה הדגם הישראלי (תוך התייחסות לגורמים הרלוונטיים לפרוייקט):



גודלו כגודל קרטון מיץ- 30X10X10 ס"מ.

ניתן להבחין ב"פרח" הפנלים הסולאריים, שלהכוונו נצטרך לדאוג.

גם יתר הגוף יכוסה בפנלים סולאריים שנצילותם 25%, כלומר, 25% מהאנרגיה הסולארית הפוגעת, מומרת לאנרגיה חשמלית.

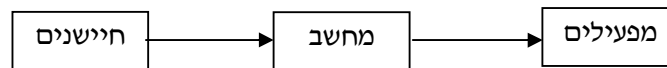
## חוגי בקרה :

מערכת בקרה הינה מנגנון או מערכת של מנגנונים, השומרת (מבקרת) על יציבותו של פרמטר או תהליך רצוי וקבוע מראש של מערכת אחרת (מהירות סיבוב, טמפרטורה, לחץ, מפלס נוזל, כיוון וכו').

מערכת זו ואופן תפקודה, הינם חלק חשוב בפרויקט כשלנו אשר ייעודו הוא לספק אלגוריתם עבור מערכת בקרת הכוון, אשר תשמור על הטיית הלוויין כשפנליו הסולאריים מופנים כלפי השמש.

מערכת בקרה מורכבת משלושה מרכיבים עיקריים :

1. **יחידת מדידה** - מודדת באמצעות חיישנים {חיישן- התקן קלט הממיר ערכים פיסיקאליים לאות חשמלי בהתאם לערך הפיסיקאלי} שינויים במשתנה או בתהליך שאותו היא מבקרת. מדידות אלו נשלחות אל הבקר שהוא למעשה מעין מחשב.
2. **בקר** – מחשב אשר מעריך את גודל השגיאה או הסטייה בין הערך הנמדד לערך הרצוי של המשתנה או התהליך המבוקר, וע"פ תוכנית מוגדרת מראש שולח אות תיקון למנגנון ההפעלה.
3. **מנגנון תיקון או הפעלה** – מפעילים אשר מבצעים פעולת התיקון הדרושה על פי ההוראות הניתנות מהבקר ומתקנים את השגיאה, במטרה להביא את הערך הנמדד לערך הרצוי.



יחידת הבקרה (בקר) היא לב מערכת הבקרה ופעולתה כוללת שלוש פעולות בסיסיות : קבלת מידע (input), עיבוד המידע ונקיטת פעולה (output). המידע אודות הפעולה והסביבה של המערכת המבוקרת מועבר ע"י חיישנים ליחידת הבקרה בשפת המחשב. יחידת הבקרה בודקת את הנתונים הנמסרים לה בעזרת נתונים האגורים בזיכרונה ובעת הצורך באמצעות אלגוריתמים(תהליכים לוגיים מסוימים) נוקטת בפעולה לתיקון או לשמירת מצב קיים של מערכות המבוקרות על ידה. על מנת לבצע כל אחת מהפעולות הבסיסיות מצוידת יחידת הבקרה :

- ❖ ממיר אנלוגי/דיגיטלי (A/D) המתרגם את האותות האנלוגיים(רציפים, בד"כ מתח חשמלי מחיישנים) לערכים דיגיטליים (ספרתיים, לא רציפים, בעלי ערך מוגדר ומרווח ידוע בין שני ערכים סמוכים).
- ❖ מעבד זעיר אשר שמעבד את הנתונים המתקבלים ומבצע חישובים נחוצים לצורך נקיטת פעולה.
- ❖ בזיכרונות כמו :

1. ROM- זיכרון קריאה בלבד בו מאוחסנים נתונים בסיסיים ותכנית עבודה שלפיה יחידת הבקרה פועלת.
2. RAM- זיכרון בעל גישה אקראית בו יחידת הבקרה יכולה לאגור נתונים, תוצאות חישובי ביניים, קודי תקלות או כל מידע זמני אחר.
3. PROM- זיכרון ספציפי למערכת מסוימת.
4. Clock- שעון לצורך תזמון התקשורת בין הזיכרונות למעבד.

נבדיל בין שני סוגים של מערכות בקרה :

❖ מערכת בקרה בחוג פתוח :

במערכת מסוג זה אין משוב מיחידת המדידה אל מנגנון ההפעלה באשר לתוצאות הביצוע של התהליך, לכן אין השפעה של תוצר המשתנה המבוקר על פעולת המערכת כלומר אין אפשרות תיקון במערכות אלה. הבקרה במערכת חוג פתוח מאפשרת למנוע את הופעת הסטייה בין הערך המצוי לערך הרצוי על ידי חיזוי מראש של הסטייה. מערכות אלה אינן מדויקות, הן מושפעות משינויים סביבתיים(כמו רוח) ולא מתוצר התהליך, ולכן משתמשים בהם כאשר אין דרישות גבוהות לביצועי התהליך המבוקר. דוגמא : מערכת הרמזורים הינה מערכת בעלת חוג פתוח. היא פועלת לפי זמנים קצובים הנקבעים מראש, ולא לפי כמות המכוניות בצומת או זרם התנועה.

❖ מערכת בקרה בחוג סגור :

במערכת מסוג זה פעולת התיקון של הבקר מושפעת מהמשוב של יחידת המדידה לגבי תוצאות התהליך המבוקר, לכן יש אפשרות תיקון במערכות אלה. הבקרה במערכת חוג סגור היא בהיזון חוזר, הנקרא גם משוב (feedback), המאפשר לתקן את הסטייה בזמן אמת על ידי המפעילים במטרה לבטל את הסטייה או לצמצמה. מערכות אלה מדויקות, מהירות, בטיחותיות ואינן מושפעות משינויים סביבתיים ולכן משתמשים בהם כאשר הדרישות גבוהות לביצוע התהליך המבוקר. דוגמא : למחס חשמלי מערכת בקרה בעלת חוג סגור. באמצעות מערכת זו נשמרים מי המחס בטמפרטורה הרצויה. בכל פעם שהבקר מבחין בסטייה בערך המתקבל מיחידת המדידה (במקרה זה חיישני טמפרטורה), הוא מורה למפעילים (גופי החימום) כיצד לפעול. אם הטמפרטורה נמוכה מהרצוי- להידלק ולחמם את המים, ואם הטמפרטורה גבוה מהערך הרצוי- להפסיק את פעולת החימום.

כפי שנראה בהמשך, מערכת בקרת ההכוון בלוויין הינה בקרה בחוג סגור. היא אוספת נתונים מיחידת המדידה, קובעת את מיקום והכוון הלוויין, עורכת השוואה בין הכוון הנוכחי של בלוויין להכוון הרצוי ומפעילה את מנגנון התיקון לשם צמצום עד כדי איפוס הפער שביניהם.

## מערכת בקרת ההכוון בלוויין:

ללוויין בחלל אין יכולת לעגון את עצמו בנקודה מסוימת ולכן קל לו מאוד לאבד את מיקומו בחלל (תווך תלת-ממדי) הן ביחס לכדור-הארץ והן מבחינת כיוון "ההסתכלות" של המטען הייעודי אותו הוא נושא.

מערכת בקרת ההכוון בלוויין הינה מערכת בקרה שמטרתה לזהות את הכוון הלוויין בחלל ביחס לכדור-הארץ (או למערכת יחוס אחרת), ובמידת הצורך להטות את הלוויין לכוון רצוי בחלל. בקרה זו דרושה כדי להבטיח שתהיה הצבעה מדויקת של המטע"ד (המטען הייעודי) אשר הלוויין נושא לעבר המטרה המיועדת על פני כדור-הארץ או בחלל. בלווייני תקשורת, לדוגמה, האנטנות חייבות להיות מכוונות לתחנות בקרקע, שמהן עולים האותות ואליהן הם מוחזרים. בדומה לכך, בלווייני צילום מערכת הבקרה תידרש להכתיב תנועה מתאימה לגוף הלוויין כך שהטלסקופ המוטס יצביע לשטח אותו מבקשים לצלם וגם יסרוק אותו. גם בפרויקט שלנו תידרש מערכת בקרה להכוון לוויין בחלל. במקרה זה המטע"ד הינו הפנלים הסולריים אשר צריכים להצביע כלפי השמש, לשם ניצול מרבי של אנרגיה סולרית שתומר לאנרגיה חשמלית.

במערכת בקרת ההכוון ישנם רכיבים שבעזרתם מזהה הלוויין את מיקומו והטייתו (הכוונו) בחלל וישנם רכיבים שמטרתם להביא את הלוויין לכיוון הרצוי לו.

כדי לדעת את מיקומו, הלוויין נעזר בסימנים מבחוץ בעזרת חיישנים שונים כמו:

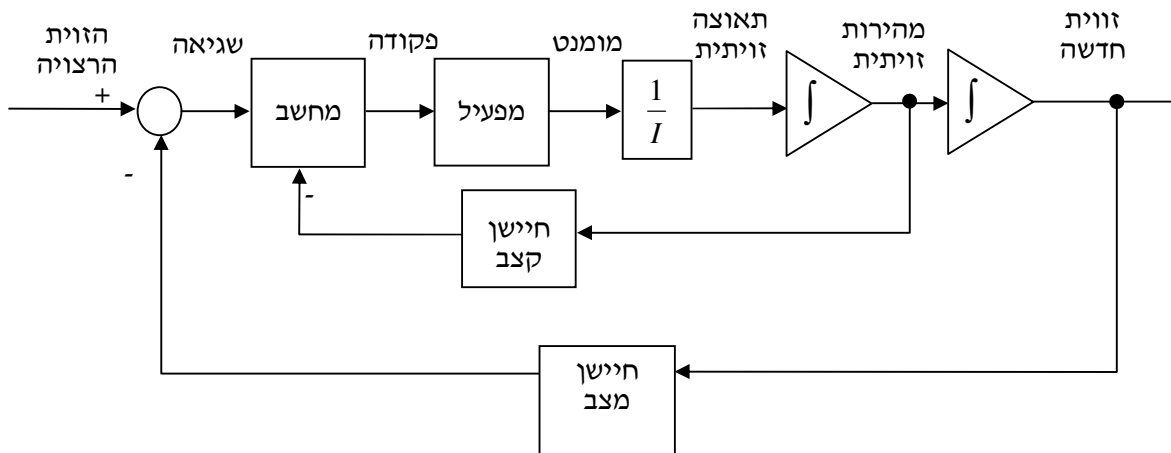
- ❖ מד- שמש המודד זווית ביחס לשמש (אינו פעיל בזמן לילה כשכדה"א מכסה את השמש).
- ❖ מד- אופק המודד את סטיית הלוויין מהנאדיר (קו המחבר את מיקום הלוויין למרכז כדה"א), בהסתמך על קליטת קרני אינפרה-אדום מכדה"א. מד- אופק מאפשר שתיערך זווית עלרוד וזווית גלגול, אך לא זווית סבסוב. (עלרוד- מעלה/מטה של החלק הקדמי יחסית למישור האופקי; גלגול- מעלה/מטה של צד הלוויין יחסית למישור האופקי; סבסוב- ימינה/שמאלה במישור האופקי. מישור אופקי- מישור המקביל לפני כדה"א).
- ❖ עוקב כוכבים שמשווה תמונה האגורה אצלו בזיכרון של תמונת הכוכבים עם מה שהוא רואה ממיקומו. כך, תוך שימוש בעובדה שמיקום הכוכבים על הספירה השמימית קבוע, הוא נותן את הכוון הגוף יחסית למערכת אינרציאלית בה חוקי המכאניקה הקלאסית מתקיימים במלואם.
- ❖ מגנטומטר שמטרתו למדוד את גודל וכיוון השדה המגנטי המקומי של כדור-הארץ ולהשוות לנתונים שנמצאים אצלו בזיכרון. הכוון הלוויין מתקבל ביחס לשדה המגנטי.
- ❖ מכשיר GPS שמקבל נתונים מלווייני GPS הנותנים מידע די מדויק על מיקום הלוויין.
- ❖ סביבונני קצב (גירוסקופים)- מכשירים המשמשים לשיפור תכוונות מערכת הבקרה, תוך התבססות על עקרונות שימור התנע הזוויתי (ביטוי לכוון ועוצמת התנועה הזוויתית). לא לכל לוויין יש את כל המערכות הללו. רמת הדיוק של כל מערכת שונה. מערכות שונות מתבססות על נתונים שונים, ולכן בכל לוויין נמצאות המערכות החיוניות לו ע"פ מטרת תפקידו.

דוגמאות לתת-המערכות שאחראיות על הכוונת הלוויין והבאתו למצב הרצוי לו הן :

- ❖ מנועים רקטיים- מופעלים באמצעות דלק מוצק או באמצעות דלק נוזלי. הם מייצרים גזים בלחץ גבוה בתוך גוף המנוע באמצעות תהליכים כימיים משחררי אנרגיה. סילוני הגז הקר או החם הנפלטים במהירות גבוהה "זורקים" את החלק בלוויין שממנו נפלטו בכיוון הפוך לכיוון זרימת הגזים. המנועים יוצרים מומנטים חיצוניים על גוף הלוויין, הגורמים לשינוי התנע הזוויתי של המערכת.
  - מערכות ההנעה של הלוויין- ניתן להשתמש בהן ע"מ להניעו סביב ציריו, אך תפעול זה בזבזני מאוד בדלק ולכן מנוצל רק כדי להחזיר את גלגלי התגובה למהירות נמוכה ע"י הצתת המנועים בניגוד לכיוון סיבוב הגלגלים והאטה מתמשכת של הגלגלים.
  - ❖ גלגלי תגובה הנמצאים בתוך הלוויין המשנים את מהירות סיבובם ובכך משנים את התנע הזוויתי של הלוויין, כך שהתנע הזוויתי הכולל של הלוויין יחד עם הגלגלים נשמר קבוע.
  - ❖ מגנטוטורקר- הזרמת חשמל בסליל המגנטוטורקר גורמת ליצירת שדה מגנטי ויחד איתו נטייה להתלכדות עם כוון שדה המגנטי המקומי. הוא משנה ע"י שדה מגנטי את מהירות סיבובו ויוצר תופעה דומה לגלגל תגובה.
- גם פה, לא כל לווין מצויד בכל המערכות האפשריות ולכל מערכת יש את יכולת הדיוק שלה.

מערכת בקרת הכוון בלוויין הינה מערכת בקרה בחוג סגור, מפני שכפי שכבר נוכחנו לדעת, מערכת בקרה מסוג זה הינה מדויקת, איכותית ומבצעת תיקונים בזמן אמת ללא צורך בחיזוי מראש, ובכך עונה על הדרישות הנחוצות למערכת בקרת הכוון הלוויין.

להלן תרשים מלבנים כללי של מערכת בקרת הכוון של לווין :



הסבר התרשים :

אל מערכת הבקרה, נכנסת הזווית הרצויה של הכוון הלוויין ביחס למערכת יחוס אינרציאלית. זווית זו מתקבלת מיחידת החישה\*, המעבדת את נתוני הקלט מחישה וקובעת בעזרת אלגוריתמים את ערך הזווית (מספרית). זווית זו משווה עם הזווית הנוכחית של הלוויין, אף היא מתקבלת מיחידת החישה, ובמקרה שהן אינן זהות מתקבלת שגיאה. שגיאה זו מועברת אל מחשב הבקרה, מחשב הטיס, אשר מעבד את הנתונים באמצעות אלגוריתמים המצויים בו. עם סיום תהליך העיבוד, מפיק מחשב הטיס פקודה למפעילים. מפעילי מערכת בקרת הכוון יוצרים מומנט, לפי להוראת המחשב, בהתאם לאינרציה הסיבובית שלו. מומנט זה גורם להתפתחות תאוצה ומהירות, ומסובב את גוף הלוויין בזיקה לזווית הרצויה. כך משתנה הזווית המצויה כל העת, ומדידתה (חיישן מצב) משפיעה על פעולת המערכת- עד להתמזגות הזווית המצויה עם הזווית הרצויה. ניתן להבחין כי קצב הסיבוב נלקח בחשבון בתהליך הפקת הפקודה למפעיל. המהירות נמדדת, נאמד הקצב, ובאמצעות הגבר נכנס לחישובי המערכת. תהליך זה נחוץ לשם ריסון המערכת והתכנסות, כלומר ריסון תנודות הלוויין והפסקת תנועתו עם הגעתו להכוון הרצוי. מלבני התרשים מיצגים אופרטורים מתמטיים. הגורמים הרשומים מעל קווי החיבור בין המלבנים- משתנים עם הזמן t.

הסבר מתמטי ופיסיקאלי מורחב ומפורט יותר יינתן בהתייחסות הספציפית אל מערכת בקרת הכוון שלנו, במקום המתאים בחוברת.

★ בפועל, יחידת החישה לא מעבדת את נתוני החיישנים, אלא מעבירה אותם למחשב המערכת בייצוג דיגיטלי, ושם מחושב ערכי הזווית. אולם, לשם הפשטות, והיות שלא נתעסק באלגוריתם לחישוב זווית- אלא נשתמש באחד קיים, נוח יהיה לשייך את עיבוד ערך הזווית ליחידת החישה.

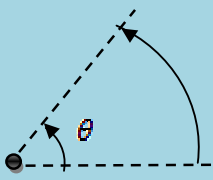
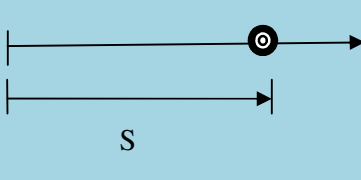
נציין כי מבחינת שיטת ההכוונה, ישנם לוויינים בהם משתמשים בשיטת ה"בנג-בנג", כלומר האצה מקסימאלית לאורך מחצית הדרך, ובמחצית השנייה בלימה בתאוצה מקסימאלית שלילית. שיטה זו רווחת בקרב לווייני התצפית. שיטה נוספת היא שיטת החוג הסגור והמשוב הרציף, בה קיים תחום משוב ליניארי בעל תגובה ליניארית ורציפה בהתאם.

עוד נציין, כי אלגוריתמי בקרת הכוון בלוויין נכתבים לרוב בשפת C כשפת תכנות (כך בלוויין עמוס לדוגמא). במקרה שלנו, שפת התכנות בה אמור להיכתב האלגוריתם היא C, ולאחר מכן הוא יעבור הידור (קימפול) למעבד הלוויין (מסוג MSP430 של TI). אולם, אנו נתמקד בכתיבת אלגוריתם מילולי, אשר יכול לשמש אלגוריתם "אוניברסאלי", כלומר כללי, ולהיות מתורגם לכל שפת תכנות. כך למעשה קהל היעד של האלגוריתם שלנו יוכל להיות רחב יותר, והתרגום לשפות התכנות יתבצע ע"י המשתמשים החפצים בו, במקרה שלנו- עמותת INSA.

## תנועה זוויתית:

לשם קליטה מרבית של אנרגיית השמש יש צורך לסובב את הלוויין. בפרק זה נלמד על התנועה הזוויתית, נוסחאותיה, מאפייניה והגורמים הפיזיקאליים המשפיעים עליה. בכדי לדון בתנועה זוויתית יש לדעת מהו מרכז המסה של הגוף הנע בתנועה זו, משום שהתנועה הזוויתית מתבצעת סביב מרכז זה. מרכז המסה מצוי על פי רוב קרוב למרכז הגאומטרי של הלוויין. אנו נצטרך לדאוג שהלוויין יסתובב סביב מרכז המסה שלו כך שפנליו הסולאריים יפנו כלפי השמש. הלוויין ינוע בתנועה זוויתית בעזרת המפעילים שבחרנו- מגנטוטורקרים. הגדרות בנושא תנועה זוויתית:

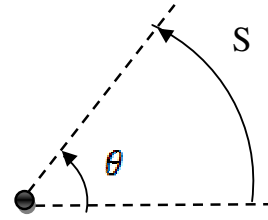
- מהירות זוויתית – של גוף הנע בתנועה מעגלית קבועה מוגדרת כזווית שהקו המחבר את הגוף עם מרכז המעגל עובר ביחידות זמן.
- תאוצה זוויתית – השפעה של גורם חיצוני גורמת לשינוי גודל המהירות וכיוון המהירות. ישנה אנלוגיה בין תנועה קווית לתנועה זוויתית:

תנועה זוויתית	תנועה קווית	
		מיקום
$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ <p>סימון מקובל:</p> $\dot{\theta} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$	$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ <p>סימון מקובל:</p> $\dot{s} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	מהירות (נגזרת מקום)
$\ddot{\theta} = \frac{\Delta\dot{\theta}}{\Delta t}$	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ <p>סימון מקובל:</p> $\ddot{s} = \frac{\Delta\dot{s}}{\Delta t}$	תאוצה (נגזרת מהירות)
$M[\text{N} \cdot \text{m}]$	$F[\text{N}]$	כוח, מומנט
$M = I \cdot \ddot{\theta}$	$F = m \cdot a$ $F = m \cdot \ddot{s}$	דינמיקה: חוק שני של ניוטון
$I[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$m[\text{kg}]$	התמד (אינרציה)

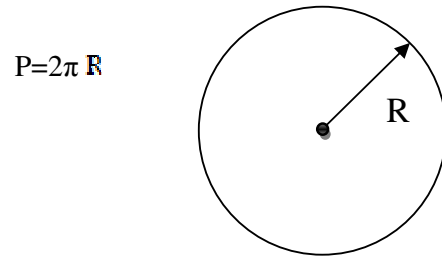
$$I = 2 \cdot m \cdot d^2$$

בתנועה הסיבובית:

יחס ליניארי בין  $s$  ל- $\theta$



היקף מעגל:



אחרי סיבוב:

(מרחק - היקף המעגל)  $s = 2\pi R$

$$\theta = 360^\circ$$

בתנועה סיבובית:

$$s = \frac{\theta}{360^\circ} \cdot 2\pi R$$

$$= \theta[\text{deg}] \cdot R \cdot \frac{2\pi}{360^\circ}$$

כאשר  $\theta$  במעלות (deg).

ישנם שני סוגים של יחידות זוויתיות שבהן אפשר למדוד את התנועה הזוויתית:  
מעלות - [°] ←  
רדיאנים - [rad] ←

רדיאנים:

סיבוב שלם ( $360^\circ$ ) :  $2\pi$  [rad]

$$\theta[\text{rad}] = \theta[\text{deg}] \cdot \frac{2\pi}{360^\circ}$$

$$= \theta[\text{deg}] \cdot \frac{\pi}{180^\circ}$$

$$\theta[\text{deg}] = \theta[\text{rad}] \cdot \frac{180^\circ}{\pi}$$

דוגמא: זווית:  $\theta = 90^\circ$

רדיאנים=? , בדוגמא זו נראה כיצד משנים יחידות של זווית ממעלות לרדיאנים.

$$\theta[\text{rad}] = 90^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} = \frac{\pi}{2}$$

מרחק -  $s = \theta[\text{rad}] \cdot R$

$$\dot{s} = \dot{\theta} \cdot R$$

כשהרדיוס קבוע, הקשר בין מהירות קווית לזוויתית שווה לקשר בין מרחק קווי וזווית

$\dot{s}$  - מהירות קווית  
 $\dot{\theta}$  - מהירות זוויתית  
 R - רדיוס המסלול הסיבובי

דוגמא:

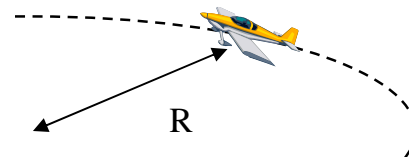
טיסן:

$$R = 15\text{m}$$

$$v = \dot{s} = 90 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

$$\omega = \dot{\theta} - ?$$

$$\dot{\theta} = \frac{\dot{s}}{R} = \frac{90}{15} = 6 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$



כלומר, בקירוב סיבוב בשנייה !

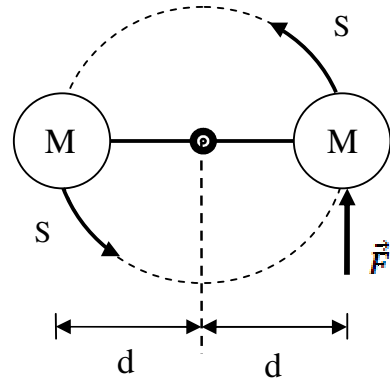
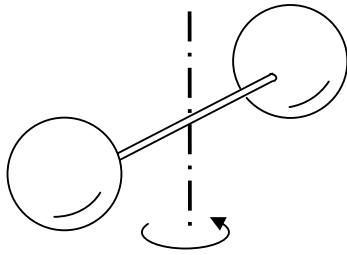
תאוצה -  $\ddot{s} = \ddot{\theta} \cdot R$

אינרציה - לא קשור לכוח הכבידה !

מציאת מומנט האינרציה I של צורה גאומטרית פשוטה (משקולת)

$$M = I \cdot \ddot{\theta}$$

מומנט  
 |  
 תאוצה (במדדת)



$$F = m \cdot a = m \cdot \ddot{s}$$

$$\ddot{s} = \frac{F}{m}$$

$$\ddot{\theta} \cdot R = \frac{F}{m}$$

$$M = 2d \cdot F$$

מומנט כולל

(על שני צידי המשקולת)

$$\ddot{\theta} \cdot d = \frac{M}{2 \cdot m}$$

$$M = 2 \cdot m \cdot d^2 \cdot \ddot{\theta}$$

$$I [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

לסיכום, מצאנו שמומנט האינרציה של המשקולת הוא :

$$I = 2 \cdot m \cdot d^2$$

ובזה ביססנו את נכונות האנלוגיה בין התנועה הקווית של נקודת מסה לבין התנועה הזוויתית של

גוף מסביב לציר העובר דרך מרכז המסה שלו.

## המצפן והשדה המגנטי של כדור הארץ :

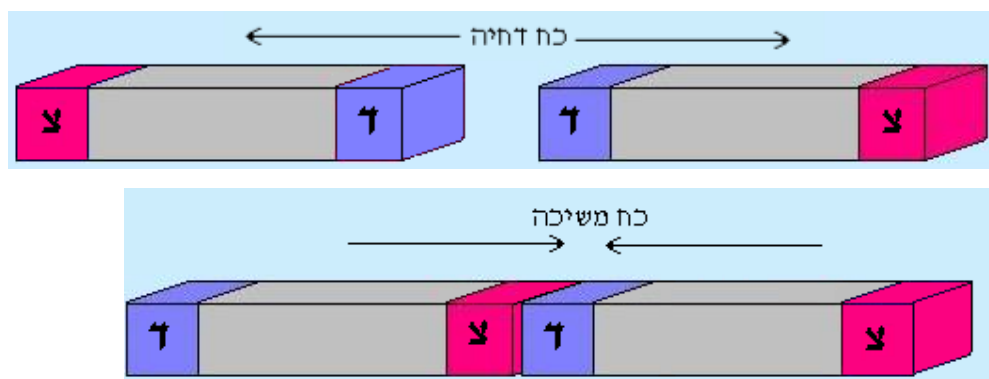
המצפן -

המצפן הוא מכשיר לקביעת הצפון ולמדידת זוויות במשור האופק לצורך ניווט, באמצעות השדה המגנטי של כדור הארץ.

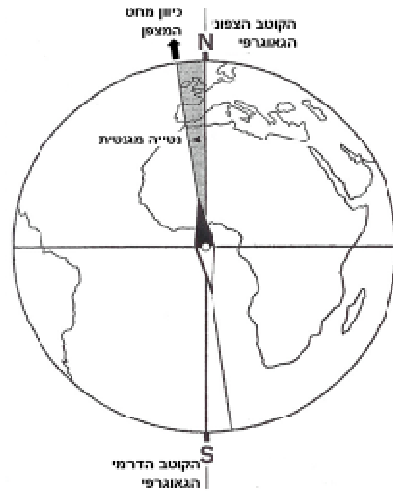
השדה המגנטי של כדור הארץ הוא בעצם אחת התכונות הפיסיקליות המאפיינות את כוכב הלכת ארץ. לשדה המגנטי ישנה השפעה על תופעות שונות אשר מתבטאות על פני כדור הארץ, באטמוספירה ובחלל הקרוב אליו.

השדה המגנטי נוצר בגלעין החיצוני של כדור הארץ, ורק חלק קטן ממנו נמדד על פני השטח או בחלל. (בהמשך תוכלו לקרוא בהרחבה על נושא זה).

המצפן מצביע בקירוב רב אל כיוון הקטבים המגנטיים שמיקומם שונה מאשר הקטבים הגיאוגרפיים: בניגוד לקטבים הגיאוגרפיים, מיקומם של הקטבים המגנטיים משתנה בהתאם לשדה המגנטי של כדור הארץ. הקטבים המגנטיים האמיתיים נמצאים בשתי הנקודות בהן כיוון השדה המגנטי של כדור הארץ בגובה פני הקרקע מהווה אנך לפני כדור הארץ. השמות קוטב מגנטי צפוני וקוטב מגנטי דרומי נבחרו בהתאמה לשמות של הקטבים הגיאוגרפיים הסמוכים להם, אך מבחינה פיזיקאלית, הקוטב המגנטי הצפוני של כדור הארץ הוא למעשה קוטב מגנטי דרומי, ולהפך. קוטבי השדה המגנטי של כדור הארץ, דוחים קטבים מגנטיים דומים להם ומושכים קטבים שונים מהם.



השדה המגנטי של הארץ אינו חזק עד כדי כך שיוכל להזיז ממקומם מגנטיים רגילים, אך כאשר שמים מחט מגנטית דקה על ציר, אז ימשך אחד הקטבים שלה אל הקוטב המגנטי הצפוני, והאחר אל הקוטב המגנטי הדרומי, כך שהמחט תצביע על כיוון השדה המגנטי וזהו בעצם המצפן. כדי לאתר את כיוון הצפון הגיאוגרפי באמצעות שימוש במצפן, צריך לדעת מה הנטייה המגנטית (הזווית שבין מחט המצפן לבין הקוטב הצפוני הגיאוגרפי) ולבצע תיקון זוויתי. קיימות מפות מיוחדות המציגות את הנטייה המגנטית בכל מקום על פני כדור הארץ.

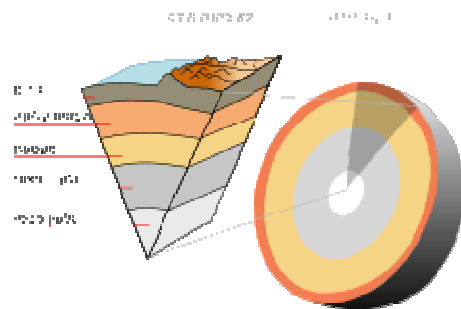


ישנם 3 סוגים של מצפנים:

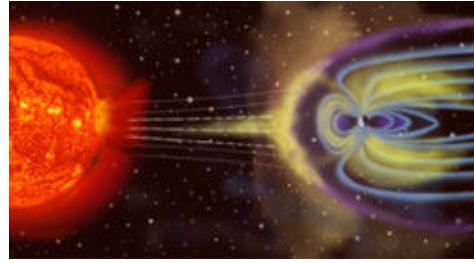
מצפן מגנטי- מצפן הבנוי ממחט מגנטית המצביעה בקירוב רב אל כיוון הקוטב המגנטי הצפוני, על גבי שושנת הרוחות שהיא בעצם עיגול של רוחות השמיים ובו בדרך כלל שנתות של המעלות. מצפן שטף מגנטי- מצפן מגנטי שבו הוחלפה המחט המגנטית ב"סלילי חישה" אלקטרו מגנטיות. מצפן גירוסקופי- מבוסס על התכונות של מתקן המכונה "גירוסקופ חופשי ומאוזן". מצפן זה אינו מושפע ממגנטיות כדור הארץ.

שדה המגנטי של כדור הארץ-

לשדה המגנטי ישנה השפעה על תופעות שונות אשר מתבטאות על פני כדור הארץ, באטמוספירה ובחלל הקרוב אליו. השדה המגנטי נוצר בגלעין החיצוני של כדור הארץ, ורק חלק קטן ממנו נמדד על פני השטח או בחלל.



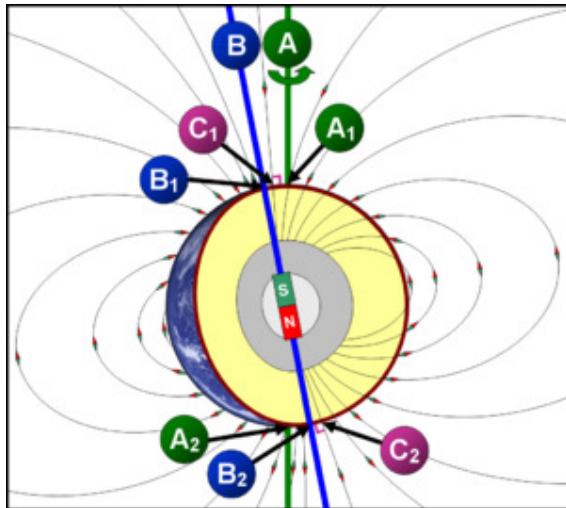
השפעת השדה המגנטי של כדור הארץ מורגשת עד למרחק גדול בחלל, ובעקבות השפעתו על רוח השמש (רוח השמש היא שטף של חלקיקים טעונים אשר נפלטים מן השכבה העליונה של השמש, ומהירותם נעה בין 300 ל-800 ק"מ/שנייה) נוצר אזור הקרוי מגנטוספירה. לרוח השמש יש השפעה קטנה על מיקום הקטבים המגנטיים של כדור הארץ. המגנטוספירה של כדור הארץ היא איזור נרחב בחלל סביב כדור הארץ, ואיזור זה מושפע מהשדה המגנטי של כדור הארץ, מרוח השמש ומהשדה המגנטי הבין פלנטרי.



המגנטוספירה מגנה על פני כדור הארץ מפגיעת החלקיקים שמכילה רוח השמש, והיא מונעת מהם לחדור לאטמוספירה ובכך היא מאפשרת את קיום החיים על כדור הארץ. פגיעת רוח השמש במגנטוספירה גורמת לניתוב חלקיקים טעונים, כמו אלקטרונים, לאורך קווי השדה המגנטי. בזמן פעילות מוגברת של השמש נוצרים שינויים מהירים בשדה המגנטי של המגנטוספירה שגורמים לתופעה הקרויה סערה גאומגנטית, ודבר זה עלול להשפיע על השדה המגנטי במקומות רבים, ובמקרים קיצוניים אף לגרום הפרעות ללוויינים, לשידורי רדיו, לקווי מתח גבוה ולמכשירים רגישים.

בשנת 1919 הפיזיקאי והמתמטיקאי ג'וזף לרמור העלה את הרעיון שכתמי השמש (תופעה אשר מתרחשת בפוטוספירה (השכבה המהווה את פניה הנראים של השמש), ותופעה זו היא אזור שבו מתרחשות מערבולות מגנטיות עצומות), הם עדות לפעילות של מעין דינמו על פני השמש, עקב תנועת נוזל בעל מוליכות חשמלית. במהלך המאה ה-20 התפתחו רעיונותיו של ג'וזף לרמור לתיאוריה מקיפה אשר מסבירה את היווצרותו של שדה מגנטי בתוך כדור הארץ כתוצאה מזרימת נוזל מתכתי, עשיר בברזל, בתוך הגלעין החיצוני. תאוריית הדינמו מאוד ידועה במקצוע אסטרופיזיקה כאשר היא מסבירה את היווצרות שדה מגנטי לא רק בכדור הארץ, אלא גם בשמש ובגרמי שמיים רבים. תאוריית הדינמו מסבירה כיצד נוצר השדה המגנטי בתוך הגלעין החיצוני אשר עשיר בנוזלים מתכתיים.

החוקרים מקבלים את תאוריית הדינמו כהסבר לשדה המגנטי של כדור הארץ, כי הממצאים הגאולוגיים מתאימים לתאוריה ואין תאוריה מתחרה.



זהו תרשים סכמטי של כדור הארץ אשר מתאר את מיקומי הקטבים והצירים:

- $A =$  ציר הסיבוב של כדור הארץ (מסומן בקו ירוק)
- $A_1 A_2 =$  הקטבים הגאוגרפיים - הנקודות שבהן "חותך" ציר הסיבוב את פני כדור הארץ.
- הגלעין החיצוני (נוזלי) (מסומן בצבע אפור) - שכבה בכדור הארץ שבה נוצר השדה המגנטי, על פי תאוריית הדינמו.

- $B =$  ציר הדו-קוטביות (מסומן בקו כחול) - הציר המגנטי הדו-קוטבי, המדמה מעין מוט מגנטי, שחלקו הצפוני הוא מגנט שמבחינה פיזיקלית נחשב ל"דרומי" (מסומן ב-S = South = דרום), ואילו חלקו הדרומי נחשב ל"צפוני" (North = N = צפון) מבחינה פיזיקלית. כיום, הזווית בין ציר זה לבין ציר הסיבוב של כדור הארץ היא  $11.3^\circ$ .

- $B_1 B_2 =$  הקטבים הגאומגנטיים - הנקודות שבהן "חותך" ציר הדו-קוטביות את פני כדור הארץ.

- קווי השדה המגנטי (קווים שחורים דקים) - מתארים את כיוון השדה המגנטי מחוץ לגלעין.

- $C_1 C_2 =$  הקטבים המגנטיים - הנקודות שבהן קווי השדה המגנטי (מסומנים בקווים שחורים) מאונכים לפני כדור הארץ (זווית של  $90^\circ$  בדיוק בגובה פני הקרקע). הקטבים המגנטיים אינם חופפים לקטבים הגאומגנטיים.

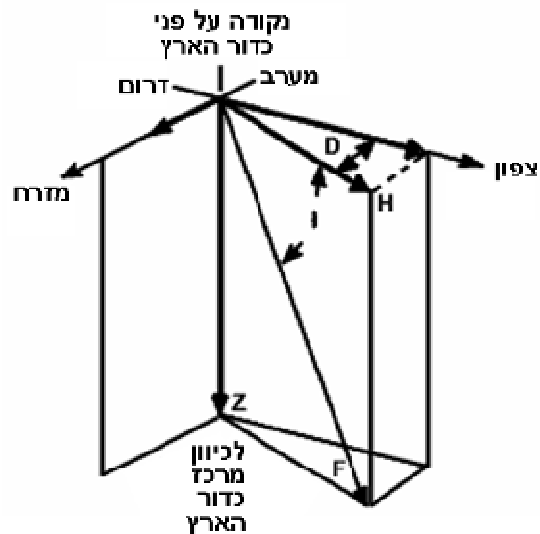
תכונות השדה המגנטי של כדור הארץ-

סוגי קטבים מגנטיים:

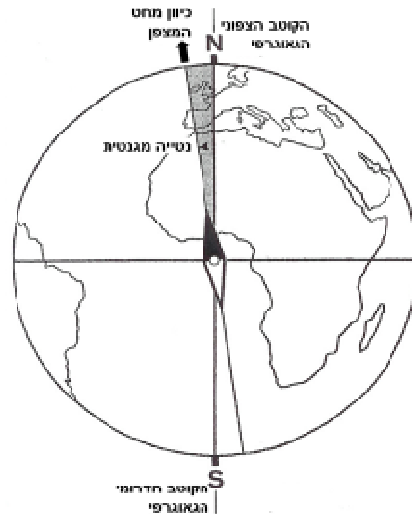
(1) הקטבים המגנטיים: הם שתי נקודות על פני כדור הארץ, שבהן השדה המגנטי בגובה פני הקרקע מאונך לפני כדור הארץ. מבחינה פיזיקלית, הנקודה הקרויה קוטב מגנטי צפוני היא בעצם קוטב דרומי של מגנט, ועל כן מחט המצפן המהווה קוטב צפוני של מגנט נמשכת לכיוון צפון.

(2) הקטבים הגאומגנטיים: הם שתי נקודות נגדיות על פני כדור הארץ והקו המחבר בין שני הקטבים עובר דרך מרכז כדור הארץ.

רכיבי השדה המגנטי:



את השדה המגנטי בכל נקודה על פני כדור הארץ ניתן להפריד לרכיב אופקי ולרכיב אנכי. מחט המצפן תצביע בכיוון הרכיב האופקי. הזווית בין הרכיב האופקי של השדה המגנטי ובין הקוטב המגנטי הצפוני נקראת נטייה מגנטית והזווית בין כיוון השדה המגנטי המוחלט ובין הרכיב האופקי נקראת זווית הרכנה.



### עוצמת השדה המגנטי:

עוצמת השדה המגנטי בגובה פני הקרקע משתנה מאזור לאזור, החל מאזורים על פני כדור הארץ שהעוצמה בהם קטנה מ-30 מיקרוטסלה ועד לאזורים שבהם גודלה מגיע עד 60 מיקרוטסלה. בדרך כלל באזורים הקרובים לקטבים עוצמת השדה גדולה יותר ובנוסף, ככל שמתקרבים לקטבים המגנטיים, הרכיב האנכי הולך וגדל, ואילו הרכיב האופקי הולך וקטן. מדידת עוצמת השדה המגנטי וכיוונו מבוצעות באמצעות מגנטומטר, מכשיר שמודד ורושם את עוצמת השדה המגנטי המקומי ואת כיוונו לאורך הזמן. המדידה מבוצעת באמצעות כ-200 תחנות מדידה קרקעיות קבועות בכל העולם ועוד כמה ניידות וגם באמצעות לוויינים.

השינויים שחלים בשדה המגנטי-

### נדידת הקטבים המגנטיים:

הקטבים המגנטיים אינם קבועים, אלא נעים ללא הפסקה ממקום למקום. בשנים האחרונות, הקוטב המגנטי הצפוני נע לכיוון צפון מערב בקצב של כ-40 ק"מ בשנה. שני הקטבים המגנטיים אינם נמצאים בנקודות גאוגרפיות מנוגדות זו לזו, וכיום המרחק בין הקוטב המגנטי ובין הקוטב הגאוגרפי גדול יותר בדרום. בכיוון השמש השדה המגנטי מעוגל ומשתרע למרחק של 64,000 ק"מ עד המקום שבו גוברת השפעת השדה המגנטי של השמש על השדה המגנטי של כדור הארץ, אך בצד השני של כדור הארץ יש לשדה המגנטי של כדור הארץ צורה מוארכת המשתרעת למעמקי החלל.

### שינויים יומיים:

קיימת תנועתיות מחזורית יומית אשר באה לידי ביטוי בתנועת הקטבים המגנטיים לאורך עשרות קילומטרים ביממה אחת. הגורם לכך הם זרמים חשמליים בצד ה"יום" של המגנטוספירה שנוצרים בעקבות פגיעת רוח השמש בצד זה. הזרמים יוצרים שדות מגנטיים שמשיעים מעט על השדה המגנטי של כדור הארץ. שינויים אלה הם אחת הסיבות לשימוש בחיישן מגנטומטר (עליו פורט בהמשך), הואיל ולא ניתן להתקבע למפה קבועה ולמצב סטטי של השדה המגנטי.

מדידת השדה המגנטי של כדור הארץ :

(1) מגנטומטר : המגנטומטר הוא כלי רגיש מאוד, שמודד את עוצמתו וכיוונו של השדה המגנטי ועוקב אחרי שינויו. ישנם שני סוגים עיקריים של המגנטומטר :

1. מגנטומטרים סקלריים : מודדים את העוצמה הכללית של השדה המגנטי.

2. מגנטומטרים וקטוריים : מודדים את העוצמה ואת כיוונו של השדה המגנטי , ומהם

ניתן לחשב את עוצמת רכיבי הכוח המגנטי, את הנטייה המגנטית ואת השיפוע המגנטי.

המגנטומטר אשר מותקן בלוויינים עוזר ללוויין עצמו למצוא את מקומו בכך שהוא מודד את גודל וכיוונו של השדה המגנטי של כדור הארץ והלוויין עצמו משווה את הנתונים הללו לנתונים שנמצאים אצלו בזיכרון.

(2) מגנטוטורקר : המגנטוטורקר הוא כלי אשר עשוי מסליל שעשוי מנחושת או מאלומיניום ודרכו זרם זרם חשמלי ובעקבות פעולה זו, נוצר שדה מגנטי סביב הסליל ובכך, כאשר מפעילים את המגנטוטורקים נוצר מומנט בשל האינטראקציה עם השדה המגנטי של כדור הארץ.

שימושים מעשיים בשדה המגנטי של כדור הארץ :

השימוש השכיח ביותר שעושה האדם בשדה המגנטי של כדור הארץ הוא השימוש במצפן לאיתור כיוון הצפון, וישנם עוד כמה שימושים אשר חלקם עדיין בשלבי מחקר :

בכדי שהלוויין ידע את מיקומו, הוא נעזר בשדה המגנטי של כדור הארץ בכך שהמגנטומטר מודד את גודל וכיוון השדה המגנטי של כדור הארץ ומשווה את הנתונים הללו לנתונים שנמצאים אצלו בזיכרון.

שימושים אפשריים בחלל יכולים לכלול הפקת זרם חשמלי על ידי תנועה של רכיבים אלקטרומגנטיים דרך שדה מגנטי במגנטוספירה. כך ניתן יהיה להמיר אנרגיה קינטית לאנרגיה חשמלית או להיפך.

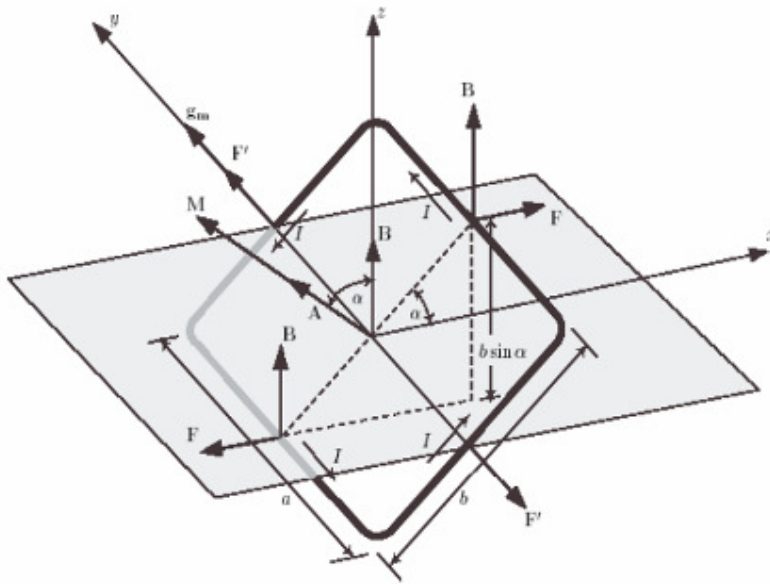
## המגנטוטורקר:

המגנטוטורקר הוא סליל נחושת/אלומיניום, אשר דרכו מועבר זרם חשמלי. כאשר זרם זה עובר דרך הסליל, נוצר שדה מגנטי מסביב לסליל. כשאנו רוצים לכוון את הלוויין לנקודה מסוימת, אנו מפעילים את המגנטוטורקר (אחד או יותר) ובכך מייצרים מומנט, בשל האינטראקציה עם השדה המגנטי של כדור הארץ נוצרת תנועה מעגלית.

בלווין שלנו ישנם שלושה מגנטוטורקרים, כך שהם מאונכים זה לזה, ובכך אנו יכולים לשנות את כיוון הלוויין, ולהפנותו לכל מקום שאנו נרצה.

### חישוב הפרמטרים של המגנטוטורקרים

הלוויין מכוון ע"י שלושה מגנטוטורקרים הנמצאים על פאות  $x$ ,  $y$ ,  $z$  כך ששלושתם מאונכים זה לזה. המגנטוטורקרים בנויים כסליל נחושת/אלומיניום, אשר לפי הגדרותיו של הלוויין, בנויים בצורה ייחודית לכל לוויין לפי נחיצותם.



בציור זה מתואר מגנטוטורקר מלבני אשר בנוי בצורת לולאה אשר בא באינטראקציה עם השדה המגנטי של כדור הארץ.

בצורה וקטורית, המומנט הנוצר שווה ל:

$$T = m \times B \times \sin(\theta)$$

כש:

$m$  - מומנט הדיפול המגנטי הנוצר

$B$  - הערך הוקטורי של השדה המגנטי של כדור הארץ

$\theta$  - הזווית בין וקטור  $M$  לוקטור  $B$

$$m = NiA$$

כש:

$N$  - מספר הליפופים במגנטוטורקר אחד

$A$  - השטח הכלוא בתוך המגנטוטורקר

$i$  - הזרם העובר בתוך המגנטוטורקר

## הפנלים הסולאריים:

כאמור, מערכת הבקרה שלנו אמור לכוון את הלוויין, כך שפנליו הסולאריים יופנו בניצב לקרני השמש. בצורה כזו ממורת מירב האנרגיה הסולארית הנקלטת, לאנרגיה חשמלית. כך נאגרת יותר אנרגיה המשמשת לצרכי הלוויין, ותורמת בהגדלת "תוחלת החיים" שלו.

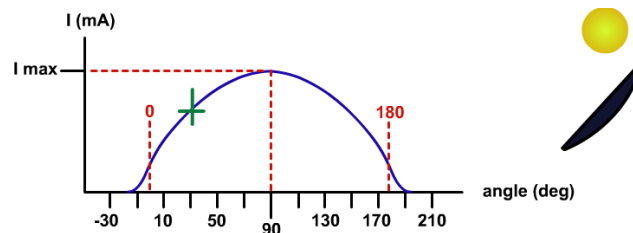
באופן כללי, האנרגיה הסולארית, שמקורה בקרינת השמש, היא מקור של אנרגיה חלופית ומתחדשת. מתקני אנרגיה סולארית ממירים את הקרינה האלקטרומגנטית שמגיעה מהשמש לאנרגיה תרמית או לחשמל.

השימוש באנרגיית השמש לצרכים תעשייתיים או לצורך יצירת חשמל ייתכן בהמרה לאחת האנרגיות האלה:

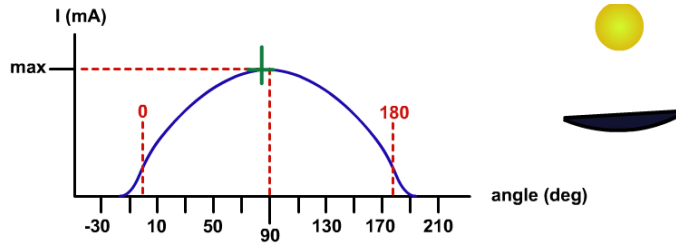
אנרגיה תרמו-סולארית - חימום נוזל לצורך הפעלת מנוע חום שמייצר חשמל או עבודה מכאנית.  
אנרגיה פוטו-ואלטאית (אנרגיה פוטו-חשמלית) - שימוש בתאים פוטו-ואלטאיים לצורך המרת אור לאנרגיה חשמלית באופן ישיר.

במקרה שלנו, הפנלים הסולאריים מבצעים המרה ישירה של אנרגיית השמש לחשמל. הם מכונים גם בשם תא פוטו-ואלטאי (תא שמש). עשויים מסיליקון בטכנולוגיה של עשיית שבבים, בנויים מסרט מוליך למחצה הנתון בין שתי אלקטרודות. כך בעת החשיפה לאור, ניתקים האלקטרונים ממקומם ויוצרים תנועה חשמלית. בד"כ הניצולת של תאים כאלה נמוכה (כ-15 אחוז) ומחירים יקר, בשל טכנולוגיית הייצור המורכבת. לכן, ישנה חשיבות לניצול המקסימום האפשרי והאנרגיה המרבית מהם, שכן בכה וכה ניצולתם נמוכה. הפנלים הסולאריים שיהיו על הלוויין שלנו יהיו בעלי ניצולת של כ-25%.

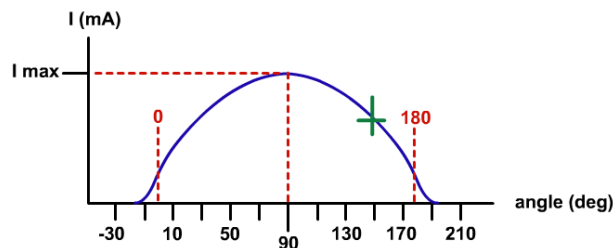
לא נחקור בצורה מעמיקה את נושא התאים, אלא נתמקד בתחום הרלוונטי לפרויקט. מבחינתנו, השימוש בתאים אלה נעשה מתוך שיקולים מחושבים של העמותה, ומתוך ידיעה כי האנרגיה שמפיקים תספיק בעבור הלוויין לשם קיום מערכותיו השונות. לכן, נעסוק בהם ללא ערכים מדויקים, אלא ברמה איכותית יותר, תוך התייחסות להשפעת זווית קרני האור ביחס אליהם, על האנרגיה המופקת בניהם. התרשימים הבאים מתארים השפעה זו, כאשר הזווית ניתנת בין מישור התאים לבין קרני השמש, והזרם הנוצר נותן ביטוי לאנרגיה החשמלית המופקת. החץ הירוק מציין את הנקודה בגרף המתארת את הסיטואציה המופיעה מימין.



בתרשים זה ניתן לראות כי בזווית של כ-20 מעלות, הזרם המופק מהפנלים הסולאריים שווה לכמחצית מהזרם המקסימאלי, כלומר, במצב המתואר מומרת האנרגיה הסולארית לכמחצית מהאנרגיה החשמלית המקסימאלית שניתן להפיק.



בתרשים זה ניתן לראות כי בזווית של 90 מעלות ובזוויות קרובות לה, הזרם המופק מהפנלים הסולאריים מקסימאלי, כלומר, במצב המתואר מומרת האנרגיה הסולארית לאנרגיה החשמלית המקסימאלית שניתן להפיק.



בתרשים זה ניתן לראות כי בזווית של כ-150 מעלות, הזרם המופק מהפנלים הסולאריים שווה לכמחצית מהזרם המקסימאלי, כלומר, במצב המתואר מומרת האנרגיה הסולארית לכמחצית מהאנרגיה החשמלית המקסימאלית שניתן להפיק.

מתרשימים אלו נגזרת חשיבות מערכת בקרת ההכוון כלפי השמש, וכן חשיבות המצאות הפנלים הסולאריים בניצב לקרני השמש לשם הפקת תועלת מקסימאלית (שכן, כאמור, נצילותם נמוכה...).

כמו כן, נוכל להסיק כי סטייה של כ-5 מעלות מ"ניצבות מוחלטת" תהווה גם כן פתרון הולם. מסקנה זו תתרום בכתיבת האלגוריתם וברמת דיוקו, והיא נחוצה משום שסטיות מזעריות קיימות. הלוויין איננו גוף סטאטי, הוא נע כל העת בחלל. לכן התובנה כי סטייה של כ-5 מעלות תהיה עדיין טובה דייה עבור המערכת, היא תובנה חשובה לגבי יעילות המערכת.

## תורת האלגוריתמיקה:

אלגוריתם הוא מתכון לביצוע משימה. אלגוריתם מורכב תמיד מקבוצת הוראות חד משמעיות ואפשריות לביצוע, אשר סדר ביצוען מוגדר היטב.

שלושת המאפיינים החשובים לאלגוריתם הם

חד משמעיות – הוראה המופיע באלגוריתם חייבת להיות חד משמעית. כלומר, כל ביצוע שלה צריך להסתיים באותה תוצאה. כך, למשל, ההוראה "חסר את ספרות המסר", היא חד משמעית, לעומתה "זוז קצת הצידה" אינה חד משמעית; אנשים שונים יזוז לפיה למקומות שונים וייתכן גם כי אותו אדם יזוז לפיה אחרת בפעמים שונות.

אפשר לבצע – הוראה באלגוריתם צריכה להיות אפשרית לביצוע, ועליה להתאים למבצע המיועד שלה. למשל טבח יכול לבצע את ההוראה "הרתח 10 כוסות מים" אך אינו יכול לבצע "הנחת את המטוס".

סדר ביצוע – סדר ביצוע הוראות האלגוריתם הוא לפי סדר הופעתן, אם לא נאמר אחרת. הביצוע של האלגוריתם מסתיים כאשר אין יותר הוראות. כאשר ביצוע של הוראה מסתיים, ממשיכים להוראה הבאה.

צורת הכתיבה שכותבים בה אלגוריתם נקראת כתיבה בפסאודו-קוד כלומר במילים ובמשפטים בשפה חופשית אבל ברורה וחד משמעית.

המונח אלגוריתם נגזר משמו של מתמטיקאי מוחמד אל-חואריזמי, שהשתבש לאל-גואריזמי. אל-חואריזמי ניסח כללים לביצוע פעולות החשבון הבסיסיות.

במאה ה-14 החל המונח "אלגוריתם" להיות שגור בפי המתמטיקאים, ככינוי ל"מתכון מתמטי". מתכונים מתמטיים כאלו הם למשל אלגוריתם להכפלת שני מספרים, אלגוריתם להעלאת בחזקה של מספר אחד באחר, אלגוריתם למציאת המחלק המשותף הגדול ביותר של שני מספרים שלמים חיוביים.

### עקרונות חשובים בתורת האלגוריתמיקה:

תכנות מודולרי – כדי שאלגוריתם יהווה פתרון גם לבעיות גדולות ומסובכות, אנו צריכים לעמוד בתנאים הקודמים לביצוע אלגוריתם לכן ניתן לחלק את התוכנה לחלקת המשימה לתת-משימות וכתיבת תת מערכת עבור כל תת-משימה. המשימה הראשית מתפרקת באופן היררכי לתת משימות. יחידת תוכנה עבור תת-משימה קטנה כזו נקראת מודול, וארגון תוכנה כאוסף מודולים נקרא תכנות מודולרי.

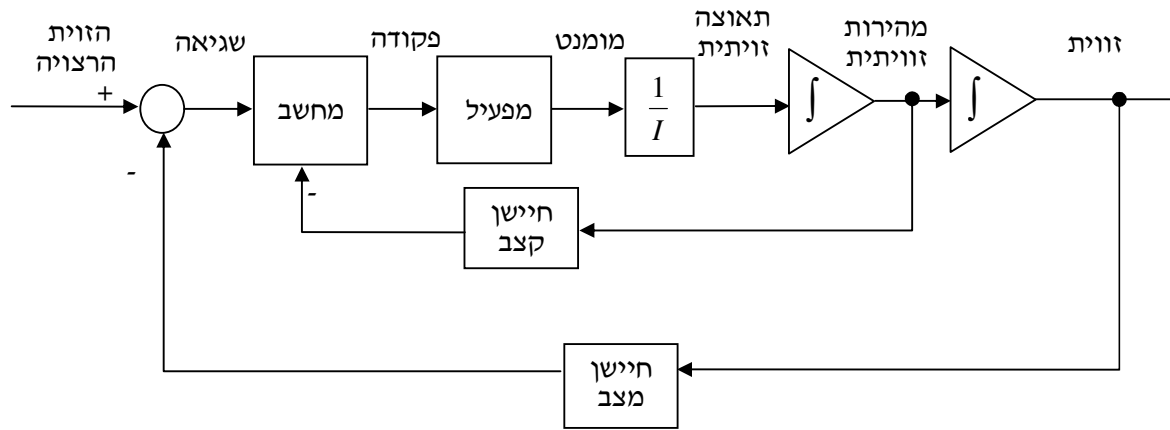
הסתרת מידע – הסתרת מידע מכוונת להפרדה בין ממשק למימוש. המשתמש רואה את הממשק ולא את המימוש, הממשק כולל את הנתונים שהתוכנית מקבלת ואת הנתונים התוכנית מחזירה, לא מפורט המימוש, רק הכותב התוכנית יודע מהו המימוש.

## סקירת מוצרים דומים

כיום, בכל לוויין קיימת מערכת בקרת הכוון. מערכות בקרת הכוון בלוויינים משמשות לצרכים שונים, ביניהם הפניית הפנלים הסולאריים של הלוויין כלפי השמש לשם אגירת אנרגיה. הואיל ומערכת בקרת הכוון מסוג זה (הכוון שמש) לא קיימת בנו-לוויינים כיום, נתמקדם בלוויינים הרגילים.

מערכות בקרת הכוון פועלות ע"פ רוב בחוג סגור, המאפשר תיקון תמידי של הכוון הלוויין. אופן פעילותן של מערכות בקרת הכוון דומה ומתנהל באופן הבא:

קיימים חיישנים שמזהים את זווית ההכוון הרצויה ואת זווית ההכוון הקיימת. החיישנים מעבירים את הנתונים אל המחשב, והוא פועל על פי אלגוריתם כתוב ומורה למפעילים באיזה אופן לעבוד ולאורך כמה זמן, עד שהזווית הרצויה והזווית הקיימת ישתוו כמה שניתן. להלן תרשים מלבנים כללי של מערכת בקרת הכוון של הלוויין:



חיישנים נפוצים במערכות בקרת הכוון אל השמש הם מד-שמש המודד זווית ביחס לשמש; מד-אופק המודד את סטיית הלוויין מהנאדיר (קו המחבר את מיקום הלוויין למרכז כדה"א); מד-אופק מאפשר עריכת זווית עלרוד וזווית גלגול, אך לא זווית סבסוב; עוקב כוכבים שנותן את הכוון הלוויין תוך שימוש בעובדה שמיקום הכוכבים על הספירה השמימית קבוע; מגנטומטר שמספק את הכוון הלוויין ביחס לשדה המגנטי המקומי של כדור-הארץ; מכשיר GPS שמקבל מידע די מדויק על מיקום הלוויין מלווייני GPS; סביבונני קצב (גירוסקופים) שמשמשים לשיפור תכונות מערכת הבקרה.

מפעילים נפוצים במערכות בקרת הכוון אל השמש הם מנועים רקטיים היוצרים סילוני גז (קר או חס) הנפלטים במהירות גבוהה ויוצרים מומנטים חיצוניים על גוף הלוויין; מערכות ההנעה של הלוויין; גלגלי תגובה המשנים את מהירות סיבובם ואת התנע הזוויתי של הלוויין; מגנטוטורקר היוצר שדה מגנטי ויחד איתו נטייה להתלכדות עם כוון שדה המגנטי המקומי של כדה"א.

## בחירת פתרון מוביל ושיקולים בבחירת הפתרון

הפרויקט נעשה בשיתוף עם העמותה הישראלית ללוחיינות זעירה INSA, אשר מחזיקה בתחום הלוחיינות הזעירה בישראל ומקדמת אותו. העמותה צפויה להשיק בקרוב את הלוחיינים הזעירים הישראליים הראשונים, והמיזם שלנו מיועד עבור הלוחיין הראשון מביניהם שישוגר. המיזם עוסק בפיתוח אלגוריתם למערכת בקרת הכוון של לוחיין זעיר. האלגוריתם יקשר בין נתונים המגיעים אליו מחיישני הלוחיין ובעזרת תהליכים לוגיים ומתמטיים יפעיל מפעילים מסוימים בכדי להגיע למצבו הרצוי. בפרויקט שלנו נעבוד על פיתוח הנוסחאות והליכים הלוגיים המתאימים לפעילות מוצלחת ותקינה של מערכת הבקרה.

מערכת בקרת הכוון תזהה את הכוון הלוחיין בחלל ביחס לשמש, ובמידת הצורך תטה את הלוחיין לכיוונה. בקרה זו דרושה כדי להבטיח שתהיה הצבעה של הפנלים הסולאריים כלפי השמש, לשם ניצול מרבי של אנרגיה סולארית שתומר לאנרגיה חשמלית. במערכת בקרת הכוון יעשה שימוש בחיישנים הבאים:

❖ פנלים סולאריים שישמשו כחיישנים באמצעות התוכנית שנכתבה מראש בפרויקט דומה, ויתנו "וקטור שמש" ביחס לגוף הלוחיין כלומר את הזוויות בהן נמצאת השמש ביחס ללוחיין.

❖ מגנטומטר, חיישן שיזהה את הכוון הלוחיין ביחס לשדה המגנטי המקומי של כדור הארץ. המגנטומטר דרוש בכדי שנדע כיצד להפעיל את המגנטוטורקר (מפעיל שפועל בהתאם לשדה המגנטי – ראה מפעילים).

במערכת בקרת הכוון נשתמש במגנטוטורקר כמפעיל. הזרמת חשמל בסליל המגנטוטורקר גורמת ליצירת שדה מגנטי ויחד איתו נטייה להתלכדות עם כוון שדה המגנטי המקומי. הוא משנה ע"י שדה מגנטי את מהירות סיבובו וכך משפיע על הכוון הלוחיין. האלגוריתם שנכתוב יפעיל את המגנטוטורקר על פי נתוני המגנטומטר ווקטור השמש.



בפתרונינו לצורך בקרת הכוון יעילה, קלה וקטנה יותר, אנו משתמשים במגנטומטר ובמגנטוטורקר בשל היותם קטנים וקלים יחסית לשאר החיישנים והמפעילים הקיימים, מתוקף ההגבלה שיש בתכנון מערכת כלשהי ללוחיין זעיר (בשל מידותיו המוגבלות, נפחו ומשקלו המצומצם). אנו אמנם מוגבלים על ידי עמותת INSA, מבחינת בחירת החיישנים והמפעילים עבור מערכת הבקרה, אך מבינים היטב את שיקוליה וההיגיון שמאחורי הדברים. כמו כן, מוצג בפרויקט שכלול וחידוש טכנולוגי אשר טרם יושם בעולם במערכות בקרת הכוון שמש של לוחיינים. השכלול שאנו מציגים כולל שימוש במערכת מיוחדת שתוכנה בפרויקט אחר, אשר מאפשרת ציפוי מלא של הלוחיין בפנלים סולאריים ושימוש בהם כחיישני שמש על ידי השוואת עוצמות מתחים המתקבלים על פניהם. מערכת זו מביאה ליעילות רבה ותורמת לכלל מערכות

הלוויין הזעיר, מפני שבמצב כזה יש ניצול של חיישני מערכת בקרה (פנלים סולאריים) גם ליצירת אנרגיה חשמלית נוספת עבור כל מערכותיו. בנוסף, בפתרונינו אנו משתמשים בסביבון קצב מסוג MEMS לצורך מדידת קצב תנועת הכוון הלוויין, ריסון תנודותיו (הנוצרות בעת תזוזה זוויתית שלו). זהו סביבון קצב חדיש הכולל רק אלקטרוניקה ואופטיקה (ללא חלקים נעים) ולכן קל וקטן, ומאפשר יישום שלו בלוויין הזעיר.

המערכת תיבנה באופן זה מכמה סיבות: בשל המזעור הרב, ישנה חשיבות רבה למאפייני הרכיבים שהלוויין נושא. מפת הרכיבים ומיקומם בלוויין תוכננו בקפידה, שכן עליו לכלול מערכות רבות, תוך ניצול מרבי של נפחו- שכן הוא מצומצם מאוד. לכן, נבחר החיישן מגנטומטר והמפעיל מגנטוטורקר, אשר משקלם ונפחם תאמו את הדרישות המוכתבות ע"י מאפייני הלוויין וצרכיו. כמו כן, ניצול הפנלים הסולאריים כחיישנים מהווה חסכון משמעותי במקום. יתרה מזאת, השימוש בחיישנים ובמפעילים אלה הינו חשמלי, ואינו כולל מערכת דלק (כמו במנועים רקטיים), מה שמונע התעסקות עם דלק, השפעת מיכל דלק על תכונות הלוויין (מסה משתנה), וכן שימוש בדלק כמקור אנרגיה למפעילים יגביל את הלוויין- כשיאזל הדלק, תושבת מערכת בקרת הכוון. לעומת זאת, שימוש בחשמל להפעלת המערכת יאריך חייה וידגיש את המחזוריות שבה- המערכת משמשת להפקת אנרגיה חשמלית מקסימאלית מהמרת אנרגיה סולארית, ומשתמשת באנרגיה חשמלית זו (בחלק ממנה) לשם תפעולה. בנוסף, אלה נחשבים רכיבים פשוטים יחסית.

כאמור, לא ניתן לנו חופש בתחום בחירת הפתרון המוביל, הואיל ורכיבי המערכת הוכתבו לנו ע"י צרכי העמותה עימה אנו עובדים. אולם, יש לנו מידת חופש מסוימת בדרך מימוש הפתרון המוביל, כלומר בדרך מימוש האלגוריתם. כך למעשה, בסיוע הדמיות האקסל, נוכל לבחון אל האלגוריתם שייכתב, לבחון גורמים מסוימים טרם כתיבתו, לבצע תיקונים במידת הצורך ולעצב את הפתרון הסופי. כל זאת יינתן בתהליך הפיתוח והמימוש.

## מימוש הפתרון

### **תרשימי אקסל:**

תרשימי האקסל הם חלק מהותי בתהליך פיתוח האלגוריתם. באמצעות תרשימים אלה, נוכל לבחון תכונות פיזיקאליות שונות שקשורות במיזם, והם יסייעו לנו ללמוד את השפעתן של תכונות אלה על התנהגותם של גופים שונים. בנוסף, הם יסייעו לנו בהבנה ברורה יותר ומעמיקה יותר של התחומים השונים הכרוכים במיזם, כאשר יושם דגש על תחום התנועה הזוויתית. כמו כן, הם יאפשרו לנו לדמות את אופן פעילות האלגוריתם הסופי שנפתח בלויין, ובכך לאמת תקינותו, או לתקנו בהתאם, באופן המוחשי ביותר שניתן בתחום העיוני (לפני שלב הניסויים הממשיים).

תרשימים אלו יסייעו לנו לבחור את הקבועים השונים הקשורים באלגוריתם, ולהביאו לרמת יעילות גבוהה ככל שניתן. גם תוצאות הניסויים בעבור המדגים יערכו בתרשימי אקסל, ומתרשימים אלה נוכל להסיק מסקנות ולהפיק דרכי ייעול בדרך לבחירת המדגים היעיל והאותנטי ביותר שנוכל לבנות. את תרשימי האקסל ערכנו בהתאם לנושא המסוים אותו רצינו לחקור, ובעזרת דפי ההנחיות שניתנו לנו מאיש המקצוע המלווה, נתנאל לוי.

\* החלק הפיתוחי בשלבי האלגוריתם וכתיבת ההדמיות יעשו בשיטת האנליזה הנומרית, כמקובל בפיתוחים מסוג זה. גישה זו מאפשרת ביצוע ניתוח מתמטי בצורה מדויקת יותר ובאופן הקרוב ביותר לפעולת אלגוריתם הלוויין- חישוב "בזמן אמת" ולא מראש.

## תרשים מספר 1 – תנועה קווית:

### מטרת התרשים:

חקירת הנפילה החופשית, תחום המוכר לכל חברי הקבוצה. תרשים זה נועד בכדי "להשתפשף" בתוכנה, להבין את אופן פעילותה ולהכירה ברמה טובה יותר. כך, נתרגל עבודה עם נוסחאות מובנות, יצירת תרשימים והפקת גרפים מנתונים קבועים ומחושבים.

כמו כן, בשל האנלוגיה בין התנועה הקווית לבין התנועה הזוויתית (המוצגת בפרק "תנועה זוויתית"), יסייע התרשים בהפקת מסקנות גם לגבי התנועה הזוויתית ויישומה בתרשימי אקסל הבאים.

### מה בתרשים:

בתרשים זה יצרנו הדמיה של נפילה חופשית, תוך שימוש בנוסחאות הבאות:

$$S = S_0 + V_0 \cdot \Delta t + \frac{a \cdot \Delta t^2}{2} \qquad v = \dot{s} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \qquad a = \ddot{s} = \frac{\Delta \dot{s}}{\Delta t}$$

$$S = S_0 + \dot{S}_0 \cdot \Delta t + \frac{\ddot{S} \cdot \Delta t^2}{2}$$

$a(\ddot{s}) \left[ \frac{m}{sec^2} \right]$ - תאוצה	$S[m]$ - דרך
$g = 9.81 \left[ \frac{m}{sec^2} \right]$ - תאוצת הכבידה	$v(\dot{s}) \left[ \frac{m}{sec} \right]$ - מהירות
	$t[sec]$ - זמן

אולם, בהתאם לאינטגרציה הנומרית, נשתמש בקירוב הסטנדרטי של אוילר:

$$S = S_0 + V \cdot \Delta t \qquad V = V_0 + a \cdot \Delta t$$

$$S = S_0 + \dot{S} \cdot \Delta t \qquad \dot{S} = \dot{S}_0 + \ddot{S} \cdot \Delta t$$

נוסחאות אלה נלמדו במסגרת שיעורי הפיסיקה בבית ספרנו, בחלק "מכאניקה".

בתרשים ישנו זמן רץ, כאשר זמן 0 נקבע כזמן תחילת ה"צפייה". ניתן להכניס שינויי זמן שונים, וכן מהירות התחלתית ומיקום התחלתי. בתרשים מופיעים שני גרפים, האחד מתאר את המהירות כפונקציה של הזמן, והשני מתאר את הדרך כפונקציה של הזמן. התנועה היא תנועה בתאוצה קבועה, כך גם התנועה הזוויתית שאנו מייעדים ללויין, ולכן גרף מהירות – זמן ליניארי, וגרף העתק – זמן פרבולי.

### מסקנות:

בשל האנלוגיה בין התנועה הקווית לתנועה הזוויתית, אנו מצפים לגרפים דומים בתרשימי האקסל הבאים, אשר יתארו את תנועת הלויין. כמו כן, נבצע הסבה לנוסחאות אלה, כדי שיתאימו לתיאור תנועה זוויתית.

ראה נספח דף הנחיות מספר 3, עמוד 121.



## תרשים מספר 2 – תנועה זוויתית:

### מטרת התרשים:

שימוש באנלוגיה בין הנפילה החופשית לתנועה הזוויתית, תוך הסבת הנוסחאות הרלוונטיות. (האנלוגיה מוצגת בפרק "תנועה זוויתית"). מתרשים זה נוכל להבין בצורה מוחשית יותר את אופן התנהגותו של גוף הנע בתנועה זוויתית, נושא בסיסי ומהותי בפרויקט.

### מה בתרשים:

בתרשים זה יצרנו הדמיה של תנועה זוויתית, תוך שימוש בנוסחאות הבאות:

$$\theta = \theta_0 + \dot{\theta}_0 \cdot \Delta t + \frac{\ddot{\theta} \cdot \Delta t^2}{2}$$

$$\theta[deg] = \theta[rad] \cdot \frac{180}{\pi}$$

$\theta[rad]$  - זווית

$$\ddot{\theta} = \frac{M}{I} \left[ \frac{rad}{sec^2} \right]$$

$\dot{\theta} \left[ \frac{rad}{sec} \right]$  - מהירות זוויתית

מומנט כולל מוערך -  $M = 0.0001 [N \cdot m]$

תאוצה זוויתית -  $\ddot{\theta} \left[ \frac{rad}{sec^2} \right]$

התמד הלוויין -  $I = 0.002 \left[ \frac{kg}{m^2} \right]$

זמן -  $t[sec]$

אולם, בהתאם לאינטגרציה הנומריית, נשתמש בקירוב הסטנדרטי של אוילר:

$$\theta = \theta_0 + \dot{\theta} \cdot \Delta t$$

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_0 + \ddot{\theta} \cdot \Delta t$$

נוסחאות אלה פותחו בהתאם לאנלוגיה המדוברת, ובעזרתו של איש המקצוע המלווה, נתנאל לוי.

בתרשים ישנו זמן רץ, כאשר זמן 0 נקבע כזמן תחילת ה"צפייה".

ניתן להכניס שינויי זמן שונים, על מנת לשנות את "רזולוציית הבדיקה". כמו כן ניתן להכניס מהירות זוויתית התחלתית וכן זווית התחלתית - זאת בכדי לכלול מקרים בהם הגוף מצוי בתנועה זוויתית, ולכלול מגוון זוויות התחלתיות על מנת לבחון את השפעת הדבר על ההדמיה, הואיל ומצבים אלה יתכנו בזמן אמת ואף הם חלק בלתי נפרד מתנועת הלוויין בחלל. בנוסף, יש אפשרות להכניס מומנט מרבי משוער של המפעילים ( $M$ ) - נתונים טרם נתנו לנו, והתמד ( $I$ ), גורמים פיזיקאליים המאפיינים את הלוויין, ובכך לתת מענה למגוון סוגי לוויינים ומפעילים (מגנטוטורקרים), וכן לאפשרות שהנתונים שניתנו לנו אודות הלוויין מהעמותה ישתנו במעט.

בתרשים מופיעים שני גרפים, האחד מתאר את המהירות כפונקציה של הזמן, והשני מתאר את הדרך כפונקציה של הזמן.

התנועה היא תנועה בתאוצה קבועה, תאוצה מקסימאלית עבור הלוויין הנידון (מומנט כוח) מרבי חלקי התמד), ולכן גרף מהירות - זמן ליניארי, וגרף העתק - זמן פרבולי.

## מסקנות:

מתרשים זה ניתן לראות כי מומנט המפעילים והתמד הלוויין משפיעים משמעותית על תנועת הלוויין ותאוצתו. ניתן להבחין כי בתאוצה קבועה, ובזמן של שתי שניות, עובר הלוויין זווית של כ- 6 מעלות. זמן זה נראה לנו סביר ביותר עבור המערכת הייעודית, הואיל והשאיפה היא ליצור מערכת בחוג סגור, כך שתיקוני הזווית יהיו מינימאליים (של זוויות קטנות). זמן של שניות עד דקות בודדות הינו זמן סביר ביותר, בהתחשב במהירות הלוויין סביב כדור הארץ, ובשינויי הזווית שלו מהשמש.

עם זאת, יש לשים לב כי התאוצה המתקבלת היא התאוצה המקסימאלית שיכולה להתקבל, שכן הוכנס מומנט מרבי מוערך של המפעילים.

מקרה של תאוצה מקסימאלית תואם מערכת "בנג-בנג"- שינוי מיקום/הכוון ע"י תאוצה מקסימאלית, ומיד אחריה תאוטה מקסימאלית (תאוצה מקסימאלית שלילית). שימוש בשיטה זו ייעשה בתרשימים הראשונים בתהליך הפיתוח, וזאת כדי לבצע בדיקת היתכנות- כלומר, לבדוק שהתמרון שאמור להתבצע אכן אפשרי בהתחשב בגורמים הנתונים- תכונות הלוויין, תכונות המפעילים וכדומה. לכשזאת תצליח ונדע כי הדבר אפשרי, נפנה לתכנון מערכת רציפה, בה יותאם המומנט הניתן למפעילים, לזווית שעל הלוויין לצמצם. תהליך זה יהיה ארוך יותר, אך סבורים אנו כי יהיה בטוח יותר, וימנע תנודות קיצוניות- מה שיקל על ריסון המערכת. מערכת ה"בנג-בנג" תובא לידי ביטוי בזוויות הגדולות- "מקרי הקצה".

ראה נספח דף הנחיות מספר 3, עמוד 121.



### תרשים מספר 3 – זמן זווית סופית:

#### מטרת התרשים:

כחמשך לתרשים הקודם, בתרשים זה נבדק פרמטר הזמן. נבדק מהו הזמן הדרוש לזווית להשלמת זווית מסוימת, וכן מהו הזמן הדרוש לזווית לצבירת מהירות מסוימת. הזמן הינו פרמטר מהותי במערכת בקרת הכוון. הזווית חג סביב כדה"א כל העת, ולכן גם הזווית בין פנליו לבין השמש משתנה כל העת. ביצוע השלמת הזווית שלא בזמן הדרוש יפגום באפקטיביות המערכת. איטיות יתר תהפוך את המערכת למיותרת, ומהירות יתר עלולה לפגוע בריסון המערכת ולהוציאה מאיזון. מתרשים זה נוכל לבחון את פרמטר הזמן המגוון זוויות ומהירויות, ולגלות מהן מגבלות המערכת, אם יש כאלה, באשר לזמן. האם ישנן זוויות שבעבורם הזמן יהיה איטי מדי? האם יש מהירויות שצבירתן תארך יתר על המידה? נבחין כי גם כעת התאוצה קבועה, ומותאמת למערכת "בנג-בנג". כאמור, שימוש במערכת זו בשלב זה נועד בעיקר לבדיקת היתכנות.

#### מה בתרשים:

בתרשים זה יצרנו חישוב של זמן השלמת הזווית ושל זמן צבירת מהירות, תוך שימוש בנוסחאות הבאות:

$t(\dot{\theta}) = \frac{\dot{\theta} \cdot I}{M}$	$\ddot{\theta} = \frac{M}{I} \left[ \frac{rad}{sec^2} \right]$	$\theta$ [rad] - זווית
	$M = 0.0001 [N \cdot m]$	$\dot{\theta}$ $\left[ \frac{rad}{sec} \right]$ - מהירות זוויתית
	$I = 0.002 \left[ \frac{kg}{m^2} \right]$	$\ddot{\theta}$ $\left[ \frac{rad}{sec^2} \right]$ - תאוצה זוויתית
- מומנט כולל מוערך		$t$ [sec] - זמן
- התמד הזווית		
- מומנט כולל מוערך		

להלן פיתוח הנוסחאות העיקריות:

$\theta = \theta_0 + \dot{\theta} \cdot \Delta t$	$\theta = \theta_0 + \dot{\theta}_0 \cdot \Delta t + \frac{\ddot{\theta} \cdot \Delta t^2}{2}$
$\dot{\theta} = \ddot{\theta} \cdot \Delta t$	$\Delta \theta = \frac{\ddot{\theta} \cdot \Delta t^2}{2}$
- בהנחה שהמהירות ההתחלתית 0	- בהנחה שהמהירות ההתחלתית 0
$\Delta t = \frac{\dot{\theta}}{\ddot{\theta}} = \frac{\dot{\theta}}{\frac{M}{I}}$	$\Delta t^2 = \frac{2 \cdot \Delta \theta}{\ddot{\theta}}$
$t(\dot{\theta}) = \frac{\dot{\theta} \cdot I}{M}$	$\Delta t = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta \theta \cdot I}{M}}$
	$t \left( \frac{\Delta \theta}{2} \right) = \sqrt{\frac{\Delta \theta \cdot I}{M}}$
	$t_T = 2t \left( \frac{\Delta \theta}{2} \right) = 2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta \theta \cdot I}{M}}$

נוסחאות אלה פותחו בהתאם לאנלוגיה המדוברת, ובעזרתו של היועץ המלווה, נתנאל לוי. בתרשים ניתן להכניס שינוי זווית שעל הגוף (הלוויין) להשלים, וכן מהירות זוויתית רצויה (תוך הנחה כי המהירות הנוכחית היא אפסית). המומנט המרבי המוערך של המפעילים וההתמד של הלוויין קבועים. סדר גודל של מומנט המפעילים, והתמד הלוויין ניתנו לנו על ידי העמותה הישראלית ללוויינות זעירה, בהתאם לתכונות הלוויין שבו תשתמש. בתרשים זה, מחולקת הזווית הרצויה לשניים, כאשר החלק הראשון נעשה בתאוצה מקסימאלית, והחלק השני בתאוצה (תאוצה שלילית) מקסימאלית. מחושב הזמן הדרוש להשלמת חצי זווית, וכן הזמן הכולל להשלמת כל הזווית הנתונה. כמו כן מחושב בתרשים זה זמן לצבירת מהירות זוויתית מסוימת, וזאת כדי להבטיח שטווח המהירות וטווח הזמנים יהלום את דרישות המערכת- שפיתוח המהירות לא יהיה מהיר מדי, אך גם לא איטי מדי. תרשים זה הינו שלב מקדים לתרשים הבא, שבו מתבצעת הדמיה של תנועה מלאה בשיטת ה"בנג-בנג".

### **מסקנות:**

נמצא כי עבור שינוי זווית של 180 מעלות (השינוי הגדול ביותר שעשוי להתבצע ע"י הלוויין במקרה קיצוני, שכן מערכת בחוג סגור לא מאפשרת פערים כאלה), יגיע הלוויין בסוף חלק ההאצה למהירות של כ-23 מעלות בשנייה, וישלים את הזווית בתום 16 שניות. זמן זה נראה לנו מהיר מדי עבור עצם בחלל. תנועת גופים בחלל בד"כ איטית, כדי לשמור על ריסון ואיזון. אולם, יש לשים לב כי מדובר בתאוצה המקסימאלית האפשרית, וכן מובא בחשבון המומנט המרבי המוערך של המפעילים. לכן, יש להניח שהתנועה תהיה איטית יותר, הן בשל אי הדיוק בנוגע למגנטוטורקרים, והן בשל השימוש במערכת רציפה. זאת ייבדק בתרשימים הבאים.

ראה נספח דף הנחיות מספר 3, עמוד 121.



## תרשים מספר 4 – האצה ובלימה:

### מטרת התרשים:

בתרשים זה נוכל לדמות את הכוונת הלוויין בשיטת ה"נג-בנג", ע"י האצה ובלימה, במסגרת בדיקת ההיתכנות. בשיטה זו הלוויין יאיץ בתאוצה מקסימאלית מחצית הדרך, ובמחצית השנייה יבלום את עצמו בתאוצה מקסימאלית שלילית.

### מה בתרשים:

בתרשים זה יצרנו הדמיה של תאוצה ובלימה, תוך שימוש בנוסחאות הבאות:

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_0 + \dot{\theta}_0 \cdot \Delta t + \frac{\ddot{\theta} \cdot \Delta t^2}{2} & \dot{\theta} &= \dot{\theta}_0 + \ddot{\theta} \cdot \Delta t & \theta [\text{rad}] & \text{- זווית} \\ \theta &= \theta_0 + \dot{\theta} \cdot \Delta t & & & \dot{\theta} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right] & \text{- מהירות זוויתית} \\ \theta [\text{deg}] &= \theta [\text{rad}] \cdot \frac{180}{\pi} & & & \ddot{\theta} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}^2} \right] & \text{- תאוצה זוויתית} \\ & & & & t [\text{sec}] & \text{- זמן} \end{aligned}$$

נוסחאות אלה פותחו בהתאם לאנלוגיה המדוברת, ובעזרתו של איש המקצוע המלווה, נתנאל לוי.

בתרשים ישנו זמן רץ, כאשר זמן 0 נקבע כזמן תחילת ה"צפייה". ניתן להכניס שינויי זמן שונים, על מנת לשנות את "רזולוציית הבדיקה". כמו כן ניתן להכניס מהירות זוויתית התחלתית וכן זווית התחלתית- זאת בכדי לכלול מקרים בהם הגוף מצוי בתנועה זוויתית, ולכלול מגוון זוויות התחלתיות על מנת לבחון את השפעת הדבר על ההדמיה, הואיל ומצבים אלה יתכנו בזמן אמת ואף הם חלק בלתי נפרד מתנועת הלוויין בחלל. המומנט המרבי המוערך של המפעילים וההתמד של הלוויין קבועים. בתרשים מופיעים שני גרפים. האחד מתאר את המהירות כפונקציה של הזמן שבו רואים בבירור את תהליך האצה ובלימה. האחר מתאר את זווית הגוף כפונקציה של הזמן ומראה את תנועת הגוף בתהליך האצה ובלימה.

יש לציין כי בתום התהליך, הגוף חוזר למהירות הזוויתית ההתחלתית שלו, שאינה בהכרח אפסית. מצב זה ייתכן בחלל ובעת תנועתו של הלוויין, שכן הוא שרוי כל העת בתנועה סביב כדה"א, וזו אחת הבעיות שבתכנון המערכת בשיטת ה"נג-בנג", אותה יש לקחת בחשבון בבקרה הרציפה.

### מסקנות:

ניתן להבחין כי נחוצות 2 שניות בכדי שהלוויין ישלים זווית בת 3 מעלות. כמו בתרשים הקודם, גם כאן זמן זה נראה לנו מהיר מדי עבור עצם בחלל. תנועת גופים בחלל בד"כ איטית, כדי לשמור על ריסון ואיזון.

ראה נספח דף הנחיות מספר 3, עמוד 121.



## תרשים מספר 5.א – מומנט מרבי :

### מטרת התרשים :

בתרשים זה נתייחס למומנט הכולל הנוצר ע"י המפעילים (המגנטוטורקרים). נמצא מהו המומנט הכולל המקסימאלי שיוכל להיווצר ע"י המגנטוטורקרים בגובה מסוים, תוך התמקדות בגובה של 500 ק"מ מעל פני כדור הארץ- גובה המסלול המיועד ללוויין הזעיר, לפחות בשלב ההתחלתי. מציאת מומנט זה, והצבתו בתרשים הבא, תשלים את בדיקת ההיתכנות שהחלה בתרשימים הקודמים, ותעשה אותה ספציפית יותר, תוך התייחסות ליכולת המפעילים ולמסלול הלוויין.

### מה בתרשים :

בתרשים זה יצרנו הדמיה המחשבת את המומנט הכולל הנוצר ע"י המגנטוטורקרים בגובה מסוים

מעל פני כדה"א, תוך שימוש בנוסחה :  $T = M \cdot B \cdot \sin \alpha$

$T$  [N·m] - המומנט הכולל. נמדד בניוטון(כוח) כפול מטר(אורך).

$B$  - השדה המגנטי של כדה"א.

$M$  - השדה המגנטי (דיפול, מומנט מגנטי) הנוצר ע"י המגנטוטורקר.

$\alpha$  - הזווית שבין הווקטורים הנ"ל.

השדה המגנטי של כדה"א, והדיפול (המומנט) המגנטי של המגנטוטורקרים, קבועים עבור גובה אחיד מעל כדה"א, כלומר, הגורם המשפיע על ערכו של המומנט הכולל,  $T$ , בגובה אחיד, הוא הזווית  $\alpha$ . לכן, ערכנו טבלה, בה מצאנו את ערך המומנט הכולל כפונקציה של זוויות שונות, תוך סימון המומנט המקסימאלי.

ערך השדה המגנטי של כדה"א מחושב תוך שימוש בנוסחה

$m$  [Wb m] - קבוע חוזק הדיפול המגנטי של כדה"א, נמדד בובר (כוח) כפול מטר(אורך).

ערכו :  $8 \cdot 10^{15}$  [Wb m].

$R$  [m] - המרחק ממרכז כדה"א, נמדד במטרים.

הדיפול המגנטי של המגנטוטורים סופק ע"י העמותה.

בתרשים ישנן זוויות שונות, כאשר תחום הזוויות הנבדק הוא בין 0 ל-180 מעלות. תחום זה נבחר היות שהמומנט הוא למעשה פונקציה התלויה ב- $\alpha \sin$ , כלומר, תחום הזוויות שבין 180 ל-360 מעלות יספק תוצאות דומות, בסימן שלילי (כלומר, מומנט בכיוון שנבחר שלילי).

בתרשים הוכנסו נתונים קבועים : רדיוס כדה"א,  $R_e$ , במטרים, קבוע  $m$ .

ניתן להכניס כקלט גובה מסלול,  $H$ , ובכך למעשה לבחון את המומנט הכולל שיתקבל במגוון

מסלולים אפשריים, וכן ניתן להכניס דיפול מגנטי של המגנטוטורקרים,  $M$ .

ערך השדה המגנטי של כדה"א מחושב, וכך נמצא המומנט הכולל - $T$ .

בתרשים מופיע גרף המתאר את המומנט הכולל,  $T$ , כפונקציה של  $\alpha$ . כמו כן, מסומן המומנט המקסימאלי המתקבל כאשר  $\alpha=90$ .

### מסקנות:

ניתן להבחין, כי המומנט הכולל המתקבל קטן מאוד, ותואם לתנועת הכוון האופיינית בחלל-תנועה איטית. בנוסף, ככל שרדיוס המסלול יהיה גדול יותר- המומנט שיתקבל יהיה קטן יותר, ובכך מובעת תכונת השדה המגנטי המקומי של כדה"א- ערכו (עוצמתו) הולך וקטן עם ההתרחקות מכדה"א.

כמו כן, נמצא כי ערכו המקסימאלי של המומנט הכולל בגובה של 500 ק"מ הוא  $1.23 \cdot 10^{-5}$  [N·m].

ראה נספח דף הנחיות מספר 5, עמוד 123.



## תרשים מספר 2.5 – זמן וזווית סופית (מומנט מרבי):

### מטרת התרשים:

כחמשך לתרשים הקודם, בתרשים זה נבדק פרמטר הזמן, תוך התייחסות למומנט הכולל הרבי שיכול להיווצר ע"י המגנטוטורקרים בגובה 500 ק"מ. נבדק מהו הזמן הדרוש ללוויין להשלמת זווית מסוימת, וכן מהו הזמן הדרוש ללוויין לצבירת מהירות מסוימת. כאמור, הזמן הינו פרמטר מהותי במערכת בקרת הכוון. הלוויין חג סביב כדה"א כל העת, ולכן גם הזווית בין פנליו לבין השמש משתנה כל העת. ביצוע השלמת הזווית שלא בזמן הדרוש יפגום באפקטיביות המערכת. איטיות יתר תהפוך את המערכת למיותרת, ומהירות יתר עלולה לפגוע בריסון המערכת ולהוציאה מאיזון. מתרשים זה נוכל לבחון את פרמטר הזמן המגוון זוויות ומהירויות, ולגלות מהן מגבלות המערכת, אם יש כאלה, באשר לזמן. האם ישנן זוויות שבעבורם הזמן יהיה איטי מדי? האם יש מהירויות שצבירתן תארך יתר על המידה? נבחין כי גם כעת התאוצה קבועה, ומותאמת למערכת "בנג-בנג". שימוש במערכת זו בשלב זה נועד בעיקר לבדיקת היתכנות, תוך התייחסות לפרמטר הזמן.

### מה בתרשים:

בתרשים זה יצרנו חישוב של זמן השלמת הזווית ושל זמן צבירת מהירות, תוך שימוש בנוסחאות הבאות:

להסבר פיתוח הנוסחאות ראה תרשים 3 - זמן וזווית סופית.

$$t \left( \frac{\Delta\theta}{2} \right) = \sqrt{\frac{\Delta\theta \cdot I}{T_{\max}}} \qquad t_r = 2t \left( \frac{\Delta\theta}{2} \right) = 2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta\theta \cdot I}{T_{\max}}}$$

$T_{\max} [N \cdot M]$  מומנט כולל מקסימלי כפי שנמצא בתרשים 2.5 א.

נוסחאות אלה פותחו בהתאם לאנלוגיה המדוברת, ובעזרתו של היועץ המלווה, נתנאל לוי. בתרשים ניתן להכניס שינוי זווית שעל הגוף (הלוויין) להשלים, וכן מהירות זוויתית רצויה (תוך הנחה כי המהירות הנוכחית היא אפסית). התמד של הלוויין קבוע- ניתן לנו על ידי העמותה הישראלית ללוויינות זעירה, בהתאם לתכונות הלוויין שבו תשתמש. המומנט המרבי,  $T$ , שיכול להיווצר ע"י המגנטוטורקרים נמצא בתרשים הקודם (2.5 א). בתרשים זה, מחולקת הזווית הרצויה לשניים, כאשר החלק הראשון נעשה בתאוצה מקסימאלית, והחלק השני בתאוצה (תאוצה שלילית) מקסימאלית. מחושב הזמן הדרוש להשלמת חצי זווית, וכן הזמן הכולל להשלמת כל הזווית הנתונה. כמו כן מחושב בתרשים זה זמן לצבירת מהירות זוויתית מסוימת, וזאת כדי להבטיח שטווח המהירות וטווח הזמנים יהלום את דרישות המערכת- שפיתוח המהירות לא יהיה מהיר מדי, אך גם לא איטי מדי.

תרשים זה מהווה סיום של סדרת בדיקות ההיתכנות בשיטת ה"בנג-בנג".

### מסקנות:

נמצא כי שינוי זווית של 180 מעלות (השינוי הגדול ביותר שעשוי להתבצע ע"י הלוויין במקרה קיצוני, שכן מערכת בחוג סגור לא מאפשרת פערים כאלה), יתבצע בשיטת ה"בנג-בנג" תוך 165.8 שניות, כלומר תוך כ-2.76 דקות.

נזכיר כי במסלול LEO (שגובהו כמסלול הנידון - 500 ק"מ), זמן הקפת הלוויין את כדה"א הוא כ-120 דקות. לכן, במקרה הגרוע ביותר, "זמן לילה" (בו מוסתר הלוויין מקרני השמש) יארך כמחצית זמן הסיבוב - שעה, כלומר, התמרון וההכוון יתבצע אף הוא במשך מחצית זמן סיבוב, שעה. לכן, תמרון שיארך עד דקות בודדות מהווה תמרון טוב דיו, בהתחשב בשינוי מיקומו המהיר של הלוויין ביחס לשמש.

מתרשים זה הסקנו כי בדיקת ההיתכנות הצליחה. אמנם במערכת שנתכנן התהליך יהיה מעט איטי יותר הואיל ותהיה בקרה רציפה, בה יותאם המומנט הניתן למפעילים, לזווית הספציפית שעל הלוויין לצמצם (כלומר, לכל מקרה, זווית, יינתן פתרון ייחודי בהתאם), אך עדיין זמן התמרון צפוי להתאים. המערכת תהיה רציפה, כדי לתת מענה לתמרון בזוויות קטנות, כדי להיות חסכונית יותר באנרגיה (בזוויות קטנות, משתלם פחות להגיע לתאוצה מקסימאלית, ולאחר מכן לתאוצה מקסימאלית), וכדי שתהיה יותר יציבה, מאוזנת, עם ריסון מתאים. בנוסף, האצה ובלימה דורשת "צפייה מראש" של הזמן שיידרש, המהירות וכדומה, ואילו אנו מעוניינים ליצור מערכת בחוג סגור, המתבססת בעיקר על רציפות משוב.

מטעמים אלה, ולאחר שנסתיימה בדיקת ההיתכנות, נתמקד בתכנון המערכת הרציפה. סימנים לשיטת ה"בנג-בנג" יבואו לידי ביטוי במקרי הקצה - בזוויות גדולות, בהן על המומנט הנוצר להיות מקסימאלי (חיובי או שלילי).

ראה נספח דף הנחיות מספר 5, עמוד 123.



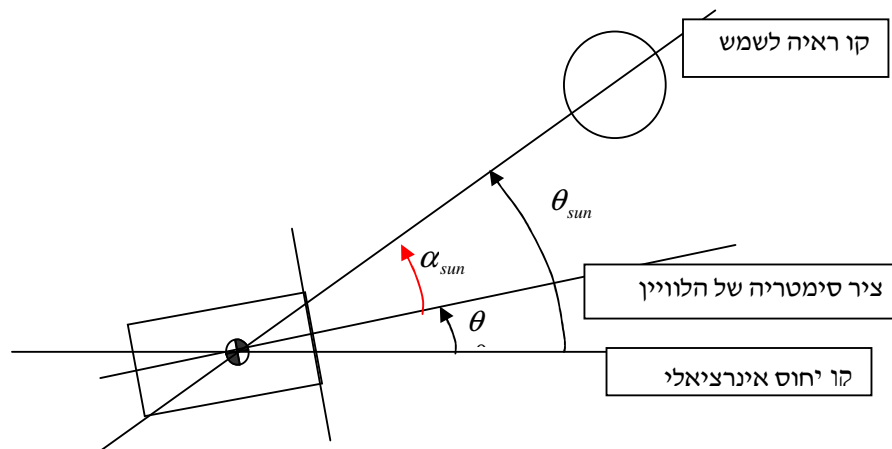
## תרשים מספר 6 – תנועה זוויתית – סגירת חוג:

### מטרת התרשים:

לאחר שהצליחה בדיקת ההיתכנות בשיטת ה"האצה ובלימה", פנינו לתכנון מערכת רציפה בחוג סגור. מטרת תרשים זה היא סגירת המערכת ללא ריסון, תוך הוספת הגבר זווית. הגבר זה הוא הביטוי לרציפות המערכת. תרשים זה הינו שלב מטרים לשלב הבא – סגירת חוג כולל ריסון. מתרשים זה נוכל להסיק מסקנות לגבי מהות הגבר הזווית, לגבי השפעתו על זמן המחזור של תנועת הלוויין, ולבחור בהגבר אשר יתאים לצרכינו – זמן מחזור (של גל תנודות הלוויין) מינימאלי ככל שניתן.

### מה בתרשים:

בתרשים זה יצרנו הדמיה של מערכת הבקרה המיועדת, עם הגבר זווית. להלן הגדרת הזוויות:

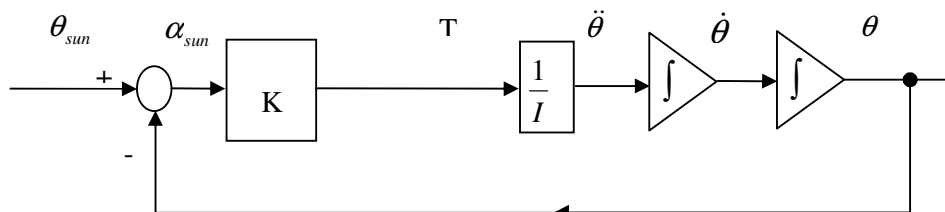


$\theta$  זווית ציר הלוויין ביחס למערכת ייחוס אינרציאלית.

$\theta_{sun}$  זווית השמש ביחס למערכת ייחוס אינרציאלית.

$\alpha_{sun}$  ההפרש ביניהן, כלומר, זווית ציר גוף הלוויין ביחס לשמש

להלן שרטוט המערכת המוצגת בתרשים זה:



נכנסת זווית השמש ביחס למערכת אינרציאלית, וע"י חיסור זווית הלוויין ביחס לאותה המערכת, מתקבלת זווית השגיאה- הזווית שבין הפנלים הסולאריים של הלוויין לבין השמש- אותה הזווית שעל הלוויין לצמצם.

שגיאה זו מוגברת ע"י הגבר הזווית, וכך מחושב המומנט הכולל שעל מערכת ההפעלה ליצור. עקרון ההגברה נפוץ במערכות בקרה רבות, ומשמש כמתאם בין נתוני הקלט לנתוני הפלט, בכדי לשמור על תכונת הרציפות.

מומנט זה יוצר תאוצה זוויתית, שגוררת התפתחות של מהירות זוויתית וכן שינוי זווית הלוויין. כך מצטמצמת זווית השגיאה עד לכדי איפוס.

הואיל ואין ריסון, בשלב זה לאחר איפוס השגיאה, היא מתפתחת מחדש, בסימן הופכי (בכוון השני). כך נוצרת תנודה, שציר האפס שלה הוא הזווית הרצויה- זווית שגיאה אפסית.

בתרשים זה לא הגבלנו את המומנט T, ולא התאמנו אותו למגבלת המגנטוטורקרים, כי רצינו בעיקר לבדוק את השפעת הגבר הזווית על זווית השגיאה.

הדמיה זו נעשתה תוך שימוש בנוסחאות הבאות:

$$\theta = \theta_0 + \dot{\theta} \cdot \Delta t$$

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_0 + \ddot{\theta} \cdot \Delta t$$

$$\theta[deg] = \theta[rad] \cdot \frac{180}{\pi}$$

$\theta[rad]$  - זווית

$\dot{\theta} \left[ \frac{rad}{sec} \right]$  - מהירות זוויתית

הגבר נגזרת  $K_\theta \left[ \frac{N \cdot M}{rad} \right]$

מומנט  $T = K_\theta * \alpha_{SUN}$

תאוצה זוויתית  $\ddot{\theta} = \frac{T}{I} \left[ \frac{rad}{sec^2} \right]$

בתרשים ישנו זמן רץ, כאשר זמן 0 נקבע כזמן תחילת ה"צפייה".

ניתן להכניס שינויי זמן שונים, על מנת לשנות את "רזולוציית הבדיקה". כמו כן ניתן להכניס מהירות זוויתית התחלתית, זווית לווין התחלתית וזווית שמש התחלתית- זאת בכדי לכלול מקרים בהם הגוף מצוי בתנועה זוויתית, ולכלול מגוון זוויות התחלתיות על מנת לבחון את השפעת הדבר על ההדמיה, הואיל ומצבים אלה יתכנו בזמן אמת ואף הם חלק בלתי נפרד מתנועת הלוויין בחלל.

בנוסף, יש אפשרות להכניס את מומנט-האינרציה (התמד) של הלוויין, גורם פיזיקאלי המאפיין אותו, ובכך לתת מענה למגוון סוגי לוויינים, וכן לאפשרות שהנתונים שניתנו לנו אודות הלוויין מהעמותה ישתנו במעט.

ניתן להכניס הגברי זווית שונים, וכך לבחון את השפעת הגבר הזווית על התנועה, ולנסות לתחום את טווח ההגברים האפשריים והמתאימים ביותר עבור המערכת. קביעת ערך מדויק תעשה לאחר הוספת הריסון.

בתרשים מופיע גרף של זווית השגיאה כפונקציה של הזמן. ניתן להבחין בתנודת הלוויין, ובהשפעת הגבר הזווית על תנודה זו.

### מסקנות:

מתרשים זה ניתן לראות כי הגבר הזוויתי משפיע רבות על תנועת הלוויין. ככל שערכו גדול יותר, תנודת הלוויין מהירה יותר. לכן נסיק כי על ערכו להיות קטן, בכדי שתתקבל תנודה איטית הניתנת לריסון.

לדוגמא, כאשר זווית השגיאה היא 90 מעלות:

זמן מחזור של הגל המוצג בגרף (זמן חזרה להכוון התחלתי בשניות)	הגבר זווית K
6.4	0.002
4.5	0.004
3.8	0.006
3.2	0.008
2.9	0.01
2.6	0.012
2.4	0.014
2.2	0.016
2.1	0.018
2	0.02

ניתן להבחין כי התנודות מהירות מדי, וכי על הגבר זה להיות קטן מאוד. אולם, יש לצפות כי בשילוב הגבר הנגזרת (בתרשים הבא) השפעתו תהיה שונה.

ראה נספח דף הנחיות מספר 4, עמוד 122.





## תרשים מספר 7 – תנועה זוויתית – סגירת חוג וריסון:

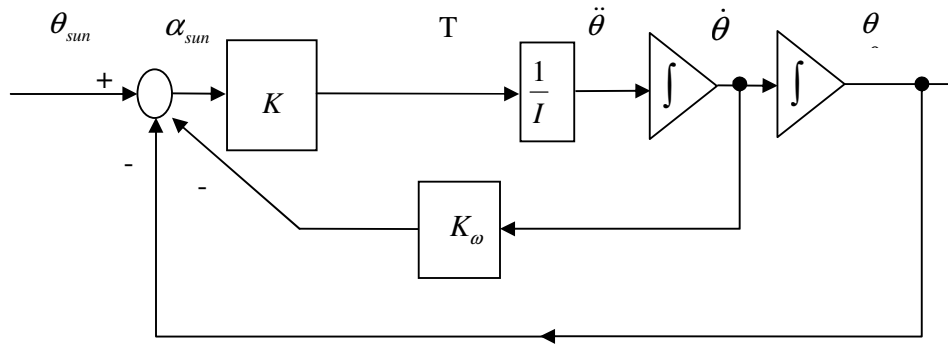
### מטרת התרשים:

חלק מהותי במערכת הבקרה המתוכננת הוא הריסון. חלק זה מאפשר את כינוס תנודת הלוויין הנוצרת ע"י מערכת ההפעלה, וכך עצירת הלוויין בהכוון הרצוי. ריסון זה מונע תנודה אינסופית. על הריסון אחראי הגבר הנגזרת (הגבר קצב), אשר לוקח בחשבון את המהירות הזוויתית של הלוויין, וכך מביא לריסון התנודות.

מתרשים זה נוכל להסיק מסקנות לגבי מהות הגבר הנגזרת וכן הגבר הזווית. נלמד אודות השפעתם על זמן המחזור של תנועת הלוויין, ונבחר בצמד ההגברים אשר יתאים לצרכינו – זמן מחזור (של גל תנודות הלוויין) מינימאלי ככל שניתן, ריסון איטי- אך לא מדי.

### מה בתרשים:

בתרשים זה יצרנו הדמיה של מערכת הבקרה המיועדת, עם הגבר זווית והגבר נגזרת.



נכנסת זווית השמש ביחס למערכת אינרציאלית, וע"י חיסור זווית הלוויין ביחס לאותה המערכת, מתקבלת זווית השגיאה- הזווית שבין הפנלים הסולאריים של הלוויין לבין השמש- אותה הזווית שעל הלוויין לצמצם. לזווית זו מצורפת בסימן שלילי מכפלת הגבר הנגזרת במהירות הזוויתית. כך בכל פעם יפחת ערכה המוחלט של זווית השגיאה, המומנט הנוצר והמהירות המתפתחת- מה שיביא לריסון המערכת.

שגיאה זו מוגברת ע"י הגבר הזווית, וכך מחושב המומנט הכולל שעל מערכת ההפעלה ליצור. עקרון ההגברה נפוץ במערכות בקרה רבות, ומשמש כמתאם בין נתוני הקלט לנתוני הפלט, בכדי לשמור על תכונת הרציפות.

מומנט זה יוצר תאוצה זוויתית, שגוררת התפתחות של מהירות זוויתית וכן שינוי זווית הלוויין. כך מצטמצמת זווית השגיאה עד לכדי איפוס.

בתרשים זה לא הגבלנו את המומנט  $T$ , ולא התאמנו אותו למגבלת המגנטוטורקרים, כי רצינו בעיקר לבדוק את השפעות ההגברים על זווית השגיאה.

הדמיה זו נעשתה תוך שימוש בנוסחאות הבאות:

$$\theta = \theta_0 + \dot{\theta} \cdot \Delta t$$

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_0 + \ddot{\theta} \cdot \Delta t$$

$$\theta[deg] = \theta[rad] \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$K_\omega$$

$$K_\theta \left[ \frac{N \cdot M}{rad} \right]$$

$$\alpha_{SUN} = \theta_{SUN} - \theta - K_\omega \cdot \dot{\theta}$$

זווית -  $\theta[rad]$

$$\dot{\theta} \left[ \frac{rad}{sec} \right] \text{ - מהירות זוויתית}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{T}{I} \left[ \frac{rad}{sec^2} \right] \text{ - תאוצה זוויתית}$$

$$t[sec] \text{ - זמן}$$

$$T = K_\theta * \alpha_{SUN} \text{ מומנט}$$

בתרשים ישנו זמן רץ, כאשר זמן 0 נקבע כזמן תחילת ה"צפייה". ניתן להכניס שינויי זמן שונים, על מנת לשנות את "רזולוציית הבדיקה". כמו כן ניתן להכניס מהירות זוויתית התחלתית, זווית לזווית התחלתית וזווית שמש התחלתית- זאת בכדי לכלול מקרים בהם הגוף מצוי בתנועה זוויתית, ולכלול מגוון זוויות התחלתיות על מנת לבחון את השפעת הדבר על ההדמיה, הואיל ומצבים אלה יתכנו בזמן אמת ואף הם חלק בלתי נפרד מתנועת הלוויין בחלל.

בנוסף, יש אפשרות להכניס את מומנט-האינרציה (התמד) של הלוויין, גורם פיזיקלי המאפיין אותו (בעזרתו מחושבת התאוצה), ובכך לתת מענה למגוון סוגי לוויינים, וכן לאפשרות שהנתונים שניתנו לנו אודות הלוויין מהעמותה ישתנו במעט.

כמו כן, ניתן להכניס הגברי זווית ונגזרת שונים, וכך לבחון את השפעתם על התנועה, ולנסות לתחום את טווח צמד ההגברים האפשרי והמתאים ביותר עבור המערכת. קביעת ערך מדויק תעשה בהדמיה המלאה של המערכת.

בתרשים מופיע גרף של זווית השגיאה כפונקציה של הזמן. ניתן להבחין בתנודת הלוויין המתרסנת, ובהשפעת ההגברים עליה.

### מסקנות:

ניתן להבחין, כי הגבר הזווית משפיע על זמן המחזור של הגל המוצג בגרף, וככל שהוא קטן, זמן המחזור גדל. כמו כן, ניתן להבחין, כי הגבר הנגזרת משפיע על ריסון התנועה, וככל שהוא גדול יותר הריסון מהיר יותר.

מציאת ההגברים המתאימים ביותר למערכת תעשה לאחר כתיבת ההדמיה המלאה של המערכת, בה יכללו כל הפרמטרים המשפיעים על המערכת.

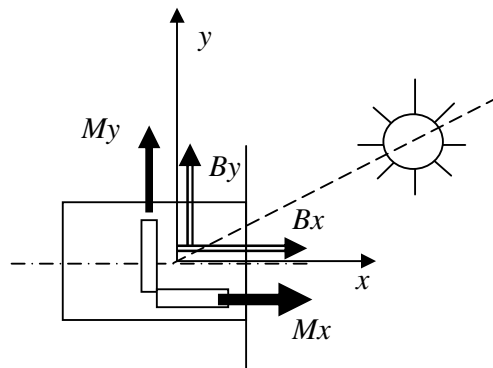
ראה נספח דף הנחיות מספר 6, עמוד 124.





## הגדרות וחישובים בסיסיים:

עבודתנו מתבצעת במקרה המישורי, דרגת חופש אחת. נקבע שני צירים בלויין, X ו-Y. X הוא הציר החוצה את הלוויין לאורכו, ו-Y הוא ציר הרוחב של הלוויין. בלויין יוצבו מגנטוטורקרים בכיוון כל ציר, וע"י כך יתאפשר סיבוב הלוויין בכיוון רצוי (בדרגת חופש אחת- ימינה/שמאלה). המומנט נוצר בידי המגנטוטורקרים בשל שאיפת השדה המגנטי הנוצר על-ידם, להתלכד עם השדה המגנטי המקומי- השדה של כדור הארץ.



המומנט שנוצר ע"י המגנטוטורקר נתון לפי הנוסחה:

$$T = M \cdot B \cdot \sin \alpha$$

כאן,

B- השדה המגנטי של כדה"א.

M- השדה המגנטי (דיפול, מומנט מגנטי) הנוצר ע"י המגנטוטורקר.

$\alpha$  – הזווית שבניהם.

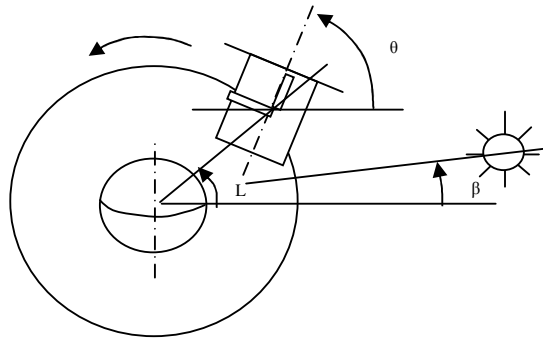
המומנט הכולל הוא למעשה המומנט שיגרום לתזוזת הלוויין וליצירת ההכוון החדש. הואיל והמומנט בציר X מנוגד בכוונו למומנט בציר Y, המומנט הכולל נתון לפי הנוסחה:

$$T = M_x \cdot B_y \cdot \sin \alpha - M_y \cdot B_x \cdot \sin \beta$$

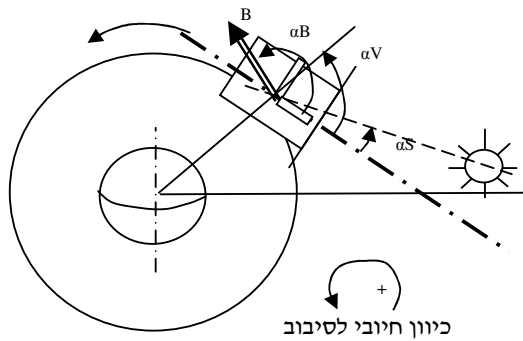
היות שרכיבי ה-B וה-M של כל מומנט מאונכים זה לזה,  $\sin \alpha = \sin \beta = 1$ , לכן:

$$T = M_x \cdot B_y - M_y \cdot B_x$$

בכדי לפתח את האלגוריתם המבוקש למערכת בקרת ההכוון, נגדיר תחילה מספר זוויות:  
 $L$  מיקום הלוויין ביחס לקו המשווה (קואורדינטת רוחב של כדה"א)  
 $\beta$  זווית השמש ביחס לקו המשווה.  
 $\theta$  זווית גוף הלוויין ביחס לקו המשווה.

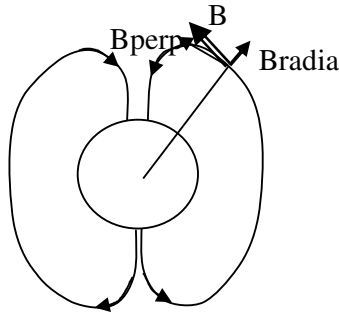


$\alpha_V$  הזווית בין ציר הגוף לבין האנך המקומי (אנך מקומי- קו המחבר את מרכז כדה"א עם מרכז גוף הלוויין).  
 $\alpha_B$  הזווית בין ציר הגוף לבין השדה המגנטי המקומי של כדה"א.  
 $\alpha_S$  הזווית בין ציר הגוף לבין השמש. מטרת האלגוריתם היא לאפס זווית זו, כך שתהיה חשיפה מרבית של הפנלים הסולריים לאור השמש.



לשם שימוש בערך הזוויות, יש לחשבן באמצעות נתונים קיימים (יגיעו מיחידת החישה).  
 $\alpha_S$  תתקבל ע"י יחסי הזרמים מהפנלים הסולריים המותקנים במקומות שונים בלוויין, ובמדגים מיחס ההתנגדויות של תאים פוטו-חשמליים המותקנים על גבי פאות שונות שלו.  
 $\alpha_B$  תתקבל מקריאת המגנטומטרים, ובמדגים היא תחושב מידיעת מיקום הגוף יחסית לשדה המגנטי המדמה את השדה המקומי של כדור הארץ.

כעת, נציג באופן בסיסי את מודל השדה המגנטי של כדה"א- לשם פירוט נרחב יותר, יש לעיין בפרק "השדה המגנטי של כדה"א".



להלן מספר נוסחאות שימושיות הקשורות בשדה המגנטי :

$$\begin{aligned}
 B_{radial} &= 2B_0 \sin L \\
 B_{perp} &= B_0 \cos L \\
 B_0 &= \frac{m}{r^3} \\
 B &= B_0 \sqrt{1 + 3 \sin^2 L}
 \end{aligned}$$

$B_{radial}$  רכיב השדה המגנטי בציר הרדיאלי (האנך המקומי).

$B_{perp}$  רכיב השדה המגנטי במאונך לציר הרדיאלי.

$B_0$  השדה המגנטי של כדה"א בקו המשווה המגנטי

$m$  [Wb m] - קבוע חוזק הדיפול המגנטי של כדה"א, נמדד בוובר (כוח) כפול מטר(אורך).

ערכו :  $8 \cdot 10^{15}$  [Wb m]

$r$ [m] - המרחק ממרכז כדה"א, נמדד במטרים.

$B$  ערך השדה המגנטי המקומי של כדה"א.

❖ ערכי השדה המגנטי מחושבים ביחידות טסלה [Tesla].

נוסחאות אלה שמישות עבור ההדמיה בלבד. כאמור, את נתוני השדה המגנטי תקבל המערכת מיחידת החישה, המגנטומטרים.

נמצא כעת ביטוי אלגברי לכל אחת מזוויות האמורות לעיל :

$\alpha_s = \beta - \theta$  - נמדדת מציר גוף הלוויין אל הישר המחבר את מרכז הלוויין עם השמש. ניתן להגדירה כזווית מציר הלוויין אל הישר המקביל לקו המשווה ( $-\theta$ ), ומישר זה אל הישר המחבר את מרכז הלוויין עם השמש ( $\beta$ ).

$\alpha_v = L - \theta$  - נמדדת מציר הלוויין אל האנך המקומי.  $\theta$  נמדדת מישר המקביל לקו המשווה השמימי, אל ציר הלוויין.  $L$  הינה זווית מתאימה לזווית בין ישר המקביל לקו המשווה, לבין האנך המקומי. על כן זווית  $\alpha_v$  מהווה חיסור בין שתי הזוויות,  $L$  ו- $\theta$ . הסבר סימני הזוויות : את כוון  $\alpha_v$  ניתן להגדיר מציר לוויין אל הישר המקביל לקו המשווה ( $-\theta$ ), ומהישר המקביל אל האנך המקומי ( $L$ ).

$$-\alpha_B = \alpha_V + \tan^{-1}\left(\frac{B_{perp}}{B_{radial}}\right)$$
 נמדדת מציר הלוויין אל השדה המקומי של כדה"א. ניתן להגדירה כזווית מציר הלוויין אל האנך המקומי ( $\alpha_v$ ), ומהאנך המקומי אל השדה המגנטי (בהתאם לפונקציית הטנגס במשולש ישר זווית).

$$\alpha_B = \tan^{-1}\left(\frac{B_y}{B_x}\right)$$
 באלגוריתם של הלוויין האמיתי, מתקבלים נתוני השדה המגנטי בצירי X ו-Y מיחידת החישה- מגנטומטרים, ולכן מחושבת זווית זו כך.

הזווית המשמעותית והמרכזית ביותר היא  $\alpha_M$ , הזווית שבה יש להפעיל את מומנט הדיפול הכולל של המגנטוטורקרים (M), בכדי שייווצר מומנט T שיביא לתזוזה המתאימה. נמדדת מהכוון החיובי של ציר X (ציר הלוויין).  
 בכדי לחסוך באנרגיה ולהביא למקסימום יעילות וניצול המשאבים הקיימים, נשאף ליצור מומנט T מרבי ככל שניתן, לכן נדאג ליצירת מומנט M ניצב לשדה המגנטי המקומי B (  $T = M \cdot B \cdot \sin\alpha$  ), שניצבים- סינוס מקסימאלי).

לשם כך, עלינו לדאוג כי  $\alpha_M$  תשלים את הזווית בין B ל-M ל- $90^\circ$ .

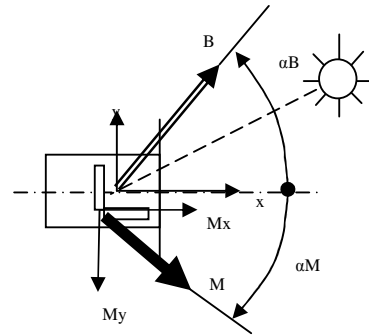
זאת נעשה ע"י שימוש בלוגיקה  $\alpha_M = \alpha_B - 90 \text{sign}(M_{perp})$

כאשר  $M_{perp}$  הוא מכפלת זווית השמש,  $\alpha_s$ , בהגבר מסויים (מטרותיו תוסברנה בהמשך).

כך, אם השמש תהיה מעל ציר X, סימן  $M_{perp}$  יהיה חיובי:  $\alpha_M = \alpha_B - 90$

אם השמש תהיה מתחת ציר X, סימן  $M_{perp}$  יהיה שלילי:  $\alpha_M = \alpha_B + 90$

בצורה כזו מובטח כי בין B ל-M תשמר זווית בת  $90^\circ$ , וכי הסיבוב יעשה תמיד לכוון הרצוי.





ליכולת הפיסיקאלית של המפעילים. הגבלה זו דרושה כדי לא להעמיס על המפעילים, ולא לפגוע בתקינותם. ערכו זהה לערך  $M_{perp}$ , אולם כשישנה חריגה מן המגבלות הפיסיקאליות ומהתחום הליניארי של מומנט המפעילים כפונקציה של המתח עליהם, נאמד ערכו של  $M_{perp\_lim}$  על הערך המרבי  $M$  אשר מאפיין את המפעילים. מטעם כך, נעשה בו שימוש בשאר המערכת. כעת מתבצעות מספר פעולות חישוב. נביאם ע"פ רצף- את דרך החישוב (ביטוי אלגברי) יש לראות בביטויים שנמצאו קודם לכן, בפרק "מימוש הפיתרון".

מתקבלים רכיבי ה- $X$  וה- $Y$  של השדה המגנטי המקומי מיחידת החישה- מגנטומטרים. לפיהם מחושבות  $\alpha_B$  ו- $\alpha_M$ . כעת נמצאים רכיבי ה- $X$  וה- $Y$  של הדיפול המגנטי הדרוש של המפעילים,  $M$ . לשם ביצוע התיקון, נשלח האות למפעילים, אות אשר יגרום להיווצרות מומנט, בהתאם לרכיבים שחושבו. אות זה הוא מתח חשמלי, הניתן לפי הקשר:  $V=M \cdot 4.2/0.5$ . כאשר  $V$  הוא המתח הניתן בוולטים, ו- $M$  הוא הדיפול המגנטי הדרוש. האות נשלח בהתאמה בציר  $X$  ובציר  $Y$ . (נימוק הקשר מתואר באלגוריתם עצמו בעמוד 85).

מתח זה גורם ליצירת שדה מגנטי ע"י המגנט וטורקים (דיפול מגנטי), אשר שואף להתלכד עם השדה המגנטי המקומי של כדה"א. כך נוצר המומנט הכולל  $T$ , אשר מביא לתזוזת הלוויין. מתפתחת תאוצה זוויתית, הגורמת לצבירת מהירות ולשינוי הכוונה של הלוויין. מוצא המערכת,  $\theta$ , ההכוון החדש של הלוויין ביחס לשמש (מתקבל מיחידת החישה- האלגוריתם לחישוב זווית), נכנס אליה שוב, כמשוב רציף- המאפיין מערכת בקרה בחוג סגור, וכך מחל התהליך מחדש- עד לצמצום זווית השגיאה.

כך ממשיכה פעולת המערכת עד לאיפוס הפרש הזוויות. כמו כן, מתבצע תהליך ריסון, ובכל פעם מופעל מומנט קטן וקטן יותר, בכדי לתקן תנודות סטייה קטנות.

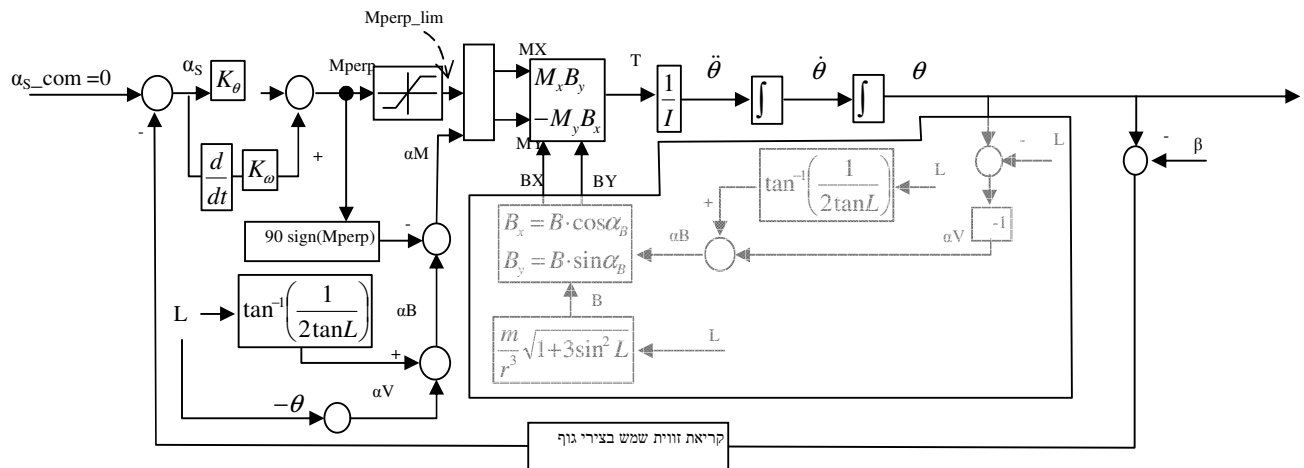
## תרשים מספר 8 – הדמיה מלאה:

### מטרת התרשים:

תרשים זה מהווה הדמיה מלאה של המערכת המתוכננת, ומדמה את האלגוריתם שנכתב במלואו. מטרת תרשים זה היא להוכיח את נכונות האלגוריתם, לנתר תקלות (אם יש כאלה), וכן לקבוע סופית את ערכי ההגברים (הגבר הזווית והגבר הנגזרת).

### מה בתרשים:

בתרשים זה יצרנו הדמיה מלאה של מערכת הבקרה המיועדת:



### הסבר ההדמיה:

נתונים קבועים: רדיוס כדה"א ( $R_e$ ); קבוע חוזק הדיפול המגנטי של כדה"א ( $m$ ); מומנט האינרציה של הלוויין ( $I$ ); מומנט דיפול מרבי של המגנטוטורקרים ( $M$ ). נתוני קלט: פרק זמן למדידות ( $\Delta t$ ); גובה מסלול הלוויין מעל פני כדה"א ( $h$ ); זווית השמש מישר המקביל לקו המשווה ( $\beta$ ); זווית התחלתית של הלוויין ( $\theta$ ); מהירות זוויתית התחלתית ( $\dot{\theta}$ ); קואורדינטת הרחב  $L$ ; הגבר זווית שמש  $K_\theta$ , והגבר נגזרת  $K_\omega$ . נתונים מחושבים: רדיוס מסלול הלוויין ממרכז כדה"א (ע"י סכימת רדיוס כדה"א וגובה מסלול הלוויין); עוצמת השדה המגנטי בקו המשווה ( $B_0$ ).

אל מערכת הבקרה נכנס  $\alpha_s=0$  כמצב רצוי (בפועל, ההדמיה מפסיקה כשזווית זו מתאפסת לחלוטין, הואיל ותלויים בה מספר גורמים שיובאו בהמשך, אשר מתאפסים עם איפוסה וגורמים למערכת לחדול מפעולתה).

מתבצע חיסור של זווית השמש מקו המשווה,  $\beta$ , מזווית גוף הלוויין ביחס לאותו קו,  $\theta$ . תוצאת החיסור היא למעשה הזווית שעל הלוויין להשלים בכדי שפנליו ימצאו בהכוון הרצוי ( $\alpha_s$ ). זווית זו מוגברת בהתאם להגבר הזווית הנתון (עד שיקבע הגבר סופי שימצא כנכון וכיעיל ביותר), ובנוסף

מובאים לשיקול נתוני הגבר נגזרת (מהירות), אשר תפקידם לרסן את התנודות. הגברים אלה דרושים לשם קביעת ערכי  $M_{perp}$ , מומנט הדיפול שעל המפעילים (המגנטוטורקרים) לספק. נבחין כי אם הלוויין הגיע, או כבר נמצא בהכוון הנכון,  $\alpha_s$  אפסי, מה שמאפס גם את הנגזרת ומביא לשמירת המצב הקיים- אי התערבות מצד מערכת הבקרה.

קביעת ערך  $M_{perp}$  כוללת השוואתו עם  $M$ , מומנט הדיפול המרבי שיכולים לספק המפעילים, וקביעת  $M_{perp\_lim}$ . משמש כ"שומר גבול". הוא מגביל את מומנט הדיפול הנדרש בהתאם ליכולת הפיסיקאלית של המפעילים. ערכו זהה לערך  $M_{perp}$ , אולם כשישנה חריגה מן המגבלות הפיסיקאליות, נעצר ערכו על הערך המרבי  $M$  אשר מאפיין את המפעילים. מטעם כך, נעשה בו שימוש בשאר המערכת.

כעת מתבצעות מספר פעולות חישוב. נביאם ע"פ רצף- את דרך החישוב (ביטוי אלגברי) יש לראות בביטויים שנמצאו קודם לכן, בפרק "מימוש הפתרון".

זווית  $\alpha_v$  מחושבת וכך גם  $B_{radial}$  ו- $B_{perp}$ , ולפיהם מחושבות  $\alpha_B$  ו- $\alpha_M$ . בנוסף, מחושב  $B$  ונמצאים רכיבי ה- $X$  וה- $Y$  של מומנט הדיפול של המפעילים,  $M$ , ושל השדה המגנטי,  $B$ . כאן למעשה נשלח האות למפעילים, אות אשר יגרום להיווצרות מומנט (דיפול) מגנטי, בהתאם לרכיבים שחושבו.

מחושב המומנט הכולל  $T$ , אשר מביא לתזוזת הלוויין. לפיו מוצאים את התאוצה הזוויתית של הלוויין,  $\ddot{\theta}$ , לפי  $\ddot{\theta} = \frac{T}{I}$ , וכן את מהירותו,  $\dot{\theta}$ , לפי  $\dot{\theta}_i = \dot{\theta}_{i-1} + \ddot{\theta}_i \cdot \Delta t$ , ואת הכוונה (זוויתו) החדש,  $\theta$ , לפי  $\theta_i = \theta_{i-1} + \dot{\theta}_i \cdot \Delta t$ .

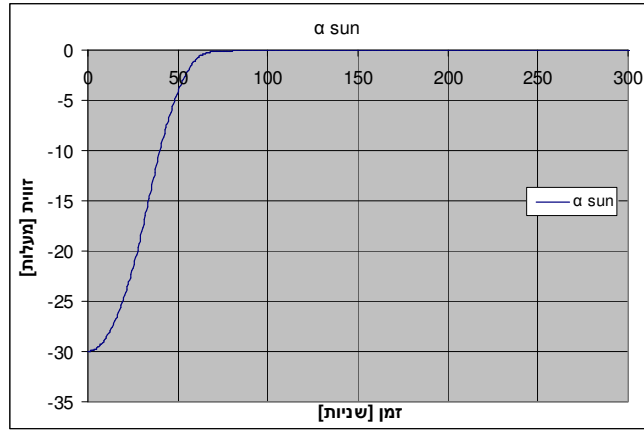
יש לציין כי דבר זה אינו דרוש באלגוריתם האמיתי, היות ונתוני הזווית מגיעים מיחידת החישה.

כך ממשיכה פעולת ההדמיה עד לאיפוס הפרש הזוויות. כמו כן, מתבצע תהליך ריסון, ובכל פעם מופעל מומנט קטן וקטן יותר, בכדי לתקן תנודות סטייה קטנות.

### מסקנות:

ניתן להבחין, כי הגבר הזווית משפיע על זמן המחזור של הגל המוצג בגרף, וככל שהוא קטן, זמן המחזור גדל. כמו כן, ניתן להבחין, כי הגבר הנגזרת משפיע על ריסון התנועה, וככל שהוא גדול יותר הריסון מהיר יותר.

נמצא את צמד ההגברים המתאים, כאשר התנועה הרצויה היא תנועה ללא תגובת יתר, כלומר, ריסון המערכת מונע יצירת תנודה וחציית הזווית הרצויה. זו הדרך הטובה ביותר לריסון המערכת, הן מבחינת הזמן, הן מבחינת היציבות והאיזון. התנועה הרצויה:



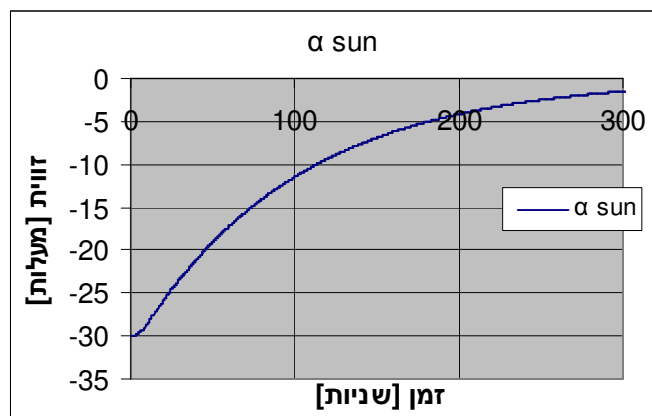
תנועה מסוג זה מתקבלת במספר צמדי הגברים, כאשר ההבדלים בניהם הם במשך הזמן. להלן מספר צמדי הגברים, כאשר זווית השגיאה היא -30 מעלות, והמהירות הזוויתית ההתחלתית היא 0:

$t$	$K_\omega$	$K_\theta$
90	2.4	0.1
79	3.8	0.2
80	5.5	0.3
68	7.2	0.4
80	9	0.5
70	10	0.56

לאחר שהגבר הזוויתי עובר את הערך 0.6, הגבר הנגזרת לא מצליח לרסן את תנועת הלויין בצורה הרצויה.

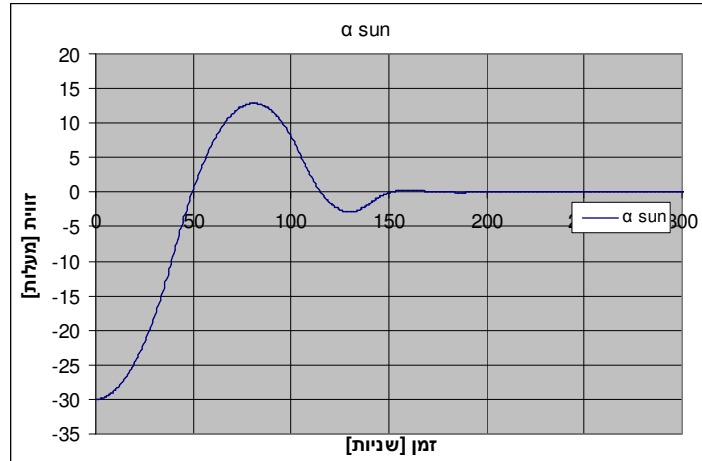
תנועה שאינה רצויה מתקבלת ביתר צירופי ההגברים, ובה יש תגובה איטית מדי, תגובת יתר, או תגובה שמשרעת התנודות הולכת וגדלה.

תגובה איטית:

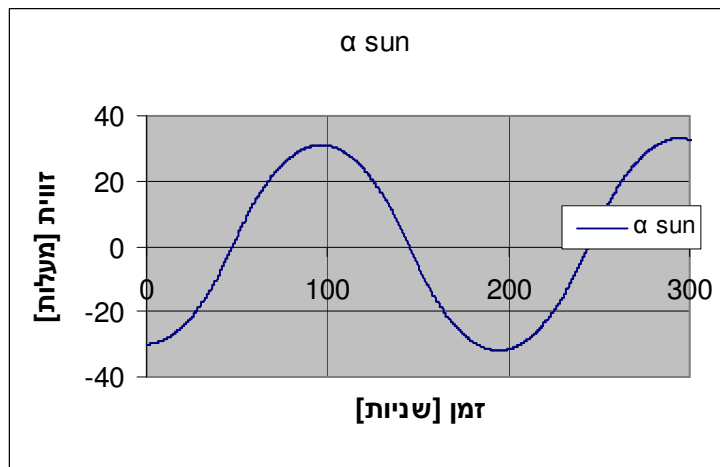


מתקבלת במצב שבו הגבר הזוויתי נמוך מאוד, והגבר הנגזרת גבוה מאוד. (כאן, הגבר הזוויתי: 0.1, הגבר הנגזרת: 10).

תגובת יתר :



מתקבלת במגוון אפשרויות. (כאן, הגבר הזוויתי : 0.34, הגבר הנגזרת : 3).  
 משרעת הולכת וגדלה (המערכת מתבדרת, היא אינה יציבה) :



מתקבלת במצב שבו הגבר הזוויתי גדול מאוד לעומת הגבר הנגזרת. (כאן, הגבר הזוויתי : 1, הגבר הנגזרת : 0.1).

לשם בחירת ההגבר המתאים, יש להתייחס לזמן התנועה (עד לריסון מוחלט), ולהתחשב גם במקרים בהם ישנה מהירות זוויתית התחלתית.  
 אולם, אנו נבדוק את זוג ההגברים היעיל ביותר עבור מהירות זוויתית התחלתית אפסית, ונבחן את תחום המהירויות ההתחלתית שהמערכת בצורה זו תקפה לגביהם.

נבחר בהגבר זוויתי שערכו 0.4, ובהגבר נגזרת שערכו 7.2. במצב כזה, התנועה מתרסנת בזמן הטוב והקצר ביותר (68 שניות). עבור הגברים אלה, המערכת נותנת מענה עבור תנועה זוויתית התחלתית של עד 2 מעלות בשנייה. מענה נחשב לריסון בזמן סביר- עד כ-400 שניות (כ-7 דקות)- הסבר ניתן בתרשים 5. ב "זמן וזווית סופית (מומנט מרביל)" בעמוד, 59.

מתן מענה לתנועות זוויתיות מהירות יותר יגרור תגובת יתר כאשר עבור אותם הגברים תהיה המהירות הזוויתית ההתחלתית אפס.

❖ נציין כי כתיבת הדמיה זו נעשתה ע"י נתנאל לוי, מהנדס מבת המלווה את הפרויקט. כתיבת הדמיה כדוגמת זו דורשת ידע מעמיק בתוכנת האקסל, ולכן מתוקף הזמן, העדפנו שלא לכותבה מחדש בעצמנו. בחרנו להתמקד בתכנון והבנת המהות, ולא בפן הטכני. בהזדמנות זו, נודה שנית לנתנאל על התמיכה הרבה!





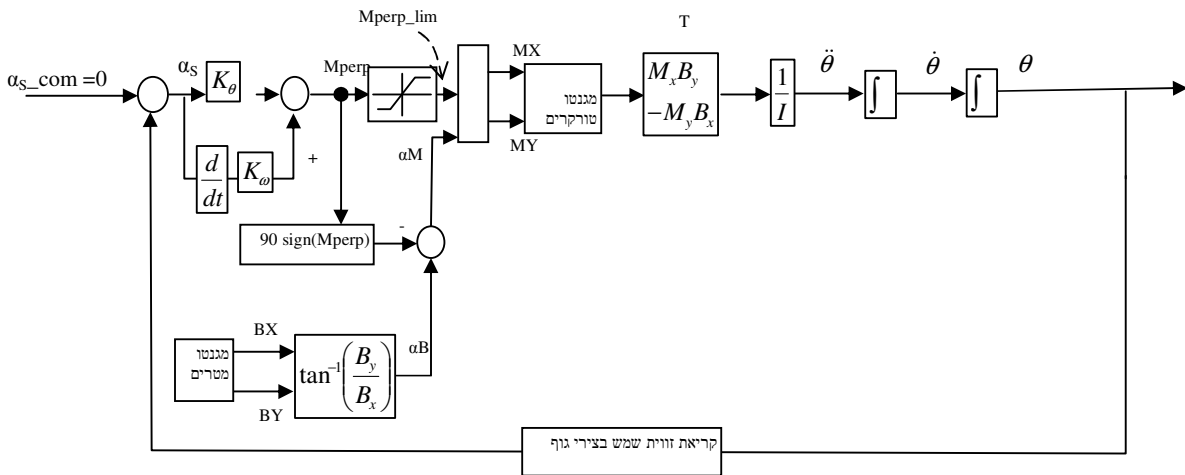


## האלגוריתם למערכת בקרת הכוון:

נזכיר, כי אלגוריתמי בקרת הכוון בלוויין נכתבים לרוב בשפת C כשפת תכנות (כך בלוויין עמוס לדוגמא). במקרה שלנו, שפת התכנות בה אמור להיכתב האלגוריתם היא C, ולאחר מכן הוא יעבור הידור (קימפול) למעבד הלוויין (מסוג MSP430 של TI).

אולם, אנו נתמקד בכתיבת אלגוריתם מילולי, אשר יכול לשמש אלגוריתם "אוניברסאלי", כלומר כללי, ולהיות מתורגם לכל שפת תכנות. כך למעשה קהל היעד של האלגוריתם שלנו יוכל להיות רחב יותר, והתרגום לשפות התכנות יתבצע ע"י המשתמשים החפצים בו, במקרה שלנו- עמותת INSA.

להלן תרשים המערכת, אליו מתייחס האלגוריתם:



נציין כי האלגוריתם מתבסס על כל תהליך פיתוח ומימוש הפתרון, והבנתו דרושה הבנה וקריאה של הפרקים הקודמים בתהליך.

## האלגוריתם:

נתוני זיכרון קבועים:

$$K_{\theta} = 0.4, \text{ הגבר זווית שמש,}$$

$$K_{\omega} = 7.2, \text{ הגבר נגזרת,}$$

$$M_{perp\_lim} = 0.5 [A \cdot m^2], \text{ מומנט דיפול מרבי של המגנטוטורקרים,}$$

$$I = 0.027 \text{ kg} \cdot m^2, \text{ מומנט האינרציה של הלוויין,}$$

$$m = 8E15 \text{ Wb} \cdot m, \text{ קבוע } m,$$

שורת פקודות (מתבצעת כל העת, פרט ל"זמן לילה"):

קבל זווית שמש  $\alpha_s$  מפעולת זווית-שמש

כל עוד ( $|\alpha_s| \geq 5$ ) בצע:

קבל מהירות זוויתית,  $\dot{\theta}$ , מחיישן מהירות זוויתית MEMS.

$$M_{perp} = K_{\theta} \cdot \alpha_{sun} + K_{\omega} \cdot \dot{\theta}, \text{ חשב מומנט נדרש לפי:}$$

אם ( $M_{perp} > M_{perp\_lim}$ ) בצע:

$$M_{perp} = M_{perp\_lim}$$

קבל רכיבי שדה מגנטי מהמגנטומטרים ( $B_y, B_x$ ).

$$\alpha_B = \tan^{-1} \left( \frac{B_y}{B_x} \right), \text{ חשב זווית שדה מגנטי מציר הלוויין לפי:}$$

$$\alpha_M = \alpha_B - 90 \text{ sign}(M_{perp}), \text{ חשב זווית להפעלת המומנט הרצוי לפי:}$$

$$M_x = M_{perp} \cdot \cos \alpha_M, \text{ חשב רכיבי מומנט להפעלה ע"י:}$$

$$M_y = M_{perp} \cdot \sin \alpha_M$$

זמן את הפעולה פקודה-למגנטוטורקרים ( $M_y, M_x$ ).

קבל זווית שמש  $\alpha_s$  מפעולת זווית-שמש

פעולת זווית-שמש:

(לפי אלגוריתם של התלמידים מתיכון "הנדסאים").

פעולת sign (ערך מתמטי ממשי n):

החזר: (ערך-מוחלט-n)/n

פעולת פקודה-למגנטוטורקרים (2 מספרים ממשיים:  $M_x, M_y$ )

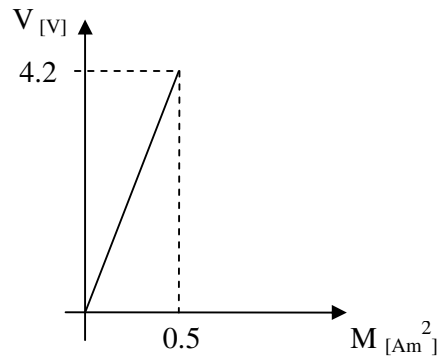
$$V_x = M_x * 4.2 / 0.5$$

$$V_y = M_y * 4.2 / 0.5$$

ספק מתח  $V_x$  למגנטוטורקר X.

ספק מתח  $V_y$  למגנטוטורקר Y.

הסבר אודות פעולת פקודה-למגנטוטורקרים:  
ההתאמה בין המתח שעל מערכת הבקרה לספק, לבין מומנט הדיפול הדרוש של המגנטוטורקר, נעשתה בהסתמך על מסמכי יצרן המגנטוטורקר, "Stras Space", טורונטו.  
במסמך נכתב כי עבור מגנטוטורקר ממודל MTR-RAFAEL-07 תחום הליניאריות מגיע עד  $0.5 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ , כשמתח הדקי הסליל נע מ-  $0 \text{ V}$  עד  $4.2 \text{ V}$ .  
ניתן לתאר זאת באופן הבא:



מגרף זה ניתן להסיק את הקשר הליניארי:  $V = M \cdot 4.2 / 0.5$   
קשר זה מיושם באלגוריתם.

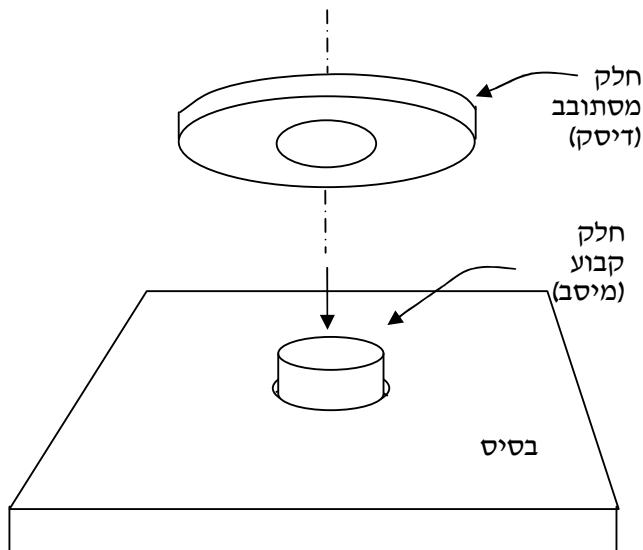
המסמך עליו בוסס חישוב זה מצורף כנספח- ראה עמוד 139.

## המדגים

חלק מהותי בפרויקט הוא החלק המעשי – המדגים. מטרתו העיקרית של המדגים היא לדמות את סביבת הלוויין ואת מערכת בקרת ההכוון שכתבנו בצורה הקרובה ביותר למציאות, תוך השמת דגש על דימוי אופן פעילות החיישנים והמפעילים, שכן אופן פעילות האלגוריתם מודגם ונבדק בהדמיית האקסל המלאה. המדגים ידמה את השלכות האלגוריתם, את תוצאות החישובים, את פעולות המגנטוטורקרים (סלילים), ואת סביבת הלוויין שכוללת בעיקר תאורה, המשמשת "שמש תורנית", מגנטים, היוצרים שדה מגנטי שלמעשה מדמה את זה של כדה"א (בשל חיכוך וכוחות אחרים, אין אפשרות להתבסס על תנועה על פני כדה"א בהשפעת השדה המגנטי המקומי, לפחות לא בסליל הניתן). כמו כן, יותקנו במדגים חיישני אור, אשר ידמו את פעולת הפנלים הסולאריים, וסליל, שידמה את פעולת המגנטוטורקר. המדגים אף יעוצב בסימן החלל. בשל הסיבוך שבשימוש האלגוריתם שנכתב במדגים (המצאות סליל אחד ולא שניים, אי אפשרות לקלוט נתוני שדה מגנטי, קושי בשימוש באלגוריתם של תלמידי תיכון הנדסאים בחיישנים שניתנו וכדומה) אלגוריתם המדגים צפוי להיות שונה מהאלגוריתם שנכתב. נתקלנו בקשיים רבים בבניית המדגים, ולכן הוא עדיין אינו גמור. יש מערכת בנויה, מספר ממצאי ניסויים, מעגלים חשמליים ורעיון לאלגוריתם, אולם בחוברת זו בחרנו להציג רק את התוכניות לבנייתו, וזאת במטרה להציג את פירוט העבודה על המדגים כיחידה אחת, שתצורף ביום הבחינה.

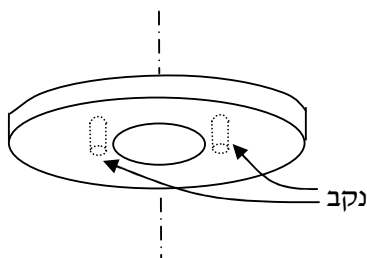
### 1. הבסיס והשולחן המסתובב

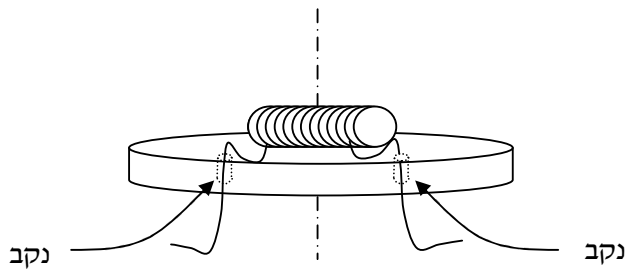
לקחנו בסיס פלסטיק שקוף בצורת ריבוע שבמרכזו חיברנו מיסב שלקחנו מדיסק-מן ישן. על המיסב שמנו דיסק שעליו יהיה הלוויין.



### 2. התקנת הסליל

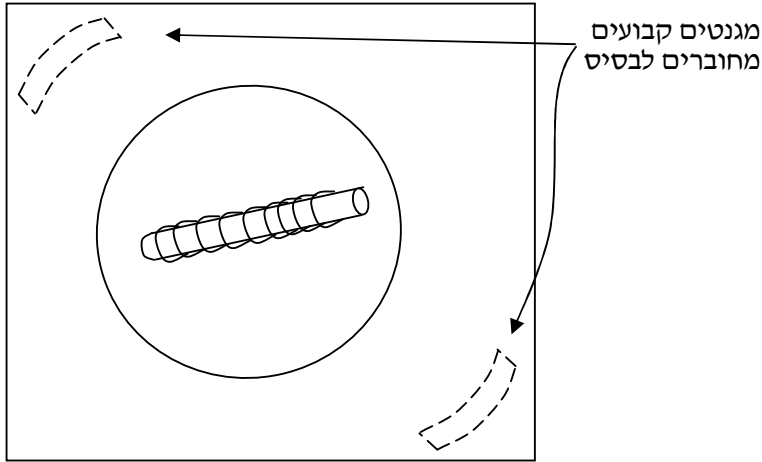
קודחים נקב להעברת חוטי החשמל מהדיסק אל הבסיס. רצוי שהנקב יהיה קרוב לציר הסיבוב, ככל שהדבר אפשרי.





מחברים את הסליל על הדיסק המסתובב ומעבירים את החוטים שלו דרך הנקב, אל מתחת לדיסק.

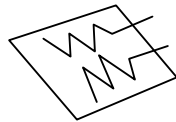
### 3. התקנת המגנטים הקבועים



### 4. הכנת חיישנים והתקנתם על הדיסק

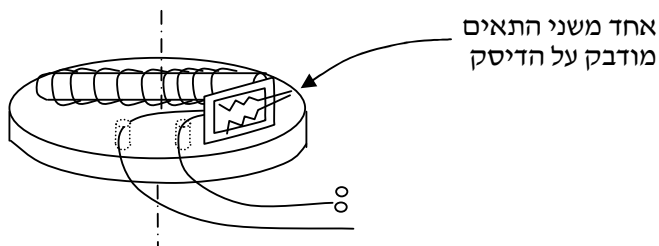


טרנזיסטור אור



תא פוטו-אלקטרי

בתור חישני אור נוכל להשתמש בטרנזיסטור אור או בתאים פוטו-אלקטריים. זאת יקבע על ידי ניסויים, שבהם נבחן את תחום הליניאריות של רכיבים אלה בזוויות שנשתמש בהם.



חוטי חשמל דקים משני התאים עוברים דרך הנקב אל מתחת לדיסק.

**כאמור, המשך פרוט העבודה על המדגים יצורף ביום הבחינה!**

## סיכום

במיזם זה עסקנו בפיתוח אלגוריתם עבור מערכת בקרת הכוון אל השמש, של הלוויין הזעיר הישראלי הראשון. חשוב לציין, כי המיזם עוסק בפיתוח אלגוריתם בדרגת חופש אחת, וכדי שיושם בלוויין הזעיר, יש להסבו לדרגת חופש שלוש (תלת ממד). ההתעסקות בדרגת חופש אחת נבעה מהסיבוך הרב הטמון בתכנון אלגוריתם בדרגת חופש שלוש.

נוכחנו לדעת, שלוויין תלוי במקור אנרגיה, אשר יעניק לו את האנרגיה הדרושה לפעילות מערכתיו השונות במהלך שהותו בחלל, כדי ששהות זו תהיה ממושכת ככל שניתן. השמש מהווה מקור-עד ומקור משתלם עבורנו, בני האדם, גם מבחינה כלכלית (במיוחד כשמדובר בחלל). משום כך, בלוויינים הקיימים, שכיחה המרת האנרגיה הסולארית של השמש, לאנרגיה חשמלית, שבה משתמש הלוויין. המרת אנרגיה זו מתבצעת ע"י פנלים סולאריים, המורכבים על הלוויין, ויעילה ביותר כאשר קרני השמש ניצבות להם, כלומר, במצב זה מתקבלת מקסימום אנרגיה חשמלית. לכן, יש שאיפה לשמר את ההכוון, כך שהפנלים הסולאריים יופנו בניצב לקרני השמש כל העת. אולם, ללוויין בחלל אין יכולת לעגון את עצמו בנקודה מסוימת, ולכן ללא אמצעי עזר, קל לו לאבד את מיקומו ואת הכוון בחלל, זאת אומרת, לא יוכל לשמור על המצב אותו אנו חפצים לשמר. מכאן נגזרת חשיבותה הרבה של מערכת בקרת ההכוון בלוויין, וכן חשיבותו של האלגוריתם שבליבה.

מכיוון שמדובר בלוויין זעיר, מערכת בקרת ההכוון צריכה להיות פרופורציונאלית לדגם הלוויין מבחינת אמצעי ההכוונה, גודלם, משקלם, צורתם וכדומה. מסיבה זו, אין משתמשים במערכות הקיימות בלוויינים רגילים. במיזם חקרנו אודות המערכות הקיימות בלוויינים הרגילים, כדי שנקבל פרספקטיבה על מערכת בקרת הכוון של לוויין, וזאת משום שתחום הלוויינות הזעירה חדש בעולם בכלל ובישראל בפרט, ולא קיימות עדיין מערכות כאלו בלוויינים הזעירים.

המטרה המרכזית של הפרויקט שלנו היא לפתח אלגוריתם של מערכת בקרת הכוון בחוג סגור, אשר ישמור שפנליו הסולאריים של הלוויין הזעיר יכוונו אל השמש (עד כדי קבלת זווית אפס – כלומר ניצבים לקרני השמש) בכל רגע נתון. כך נענה לצרכי העמותה- כוון הפנלים הראשיים כלפי השמש, ובכך הגדלת ההספק החשמלי המומר- לשם תפעול מערכות הצורכות אנרגיה חשמלית גדולה יותר מזו המסופקת כיום בלוויינים זעירים. בחירת הפתרון המוביל נעשתה במהלך פגישה עם העמותה הישראלית ללוויינות זעירה – INSA אשר הציגה בפנינו את צרכי העמותה והמשאבים הקיימים.

באופן כללי, הפתרון שנבחר הוא הכוונת הלוויין ע"י סלילים אלקטרומגנטיים (מגנטוטורקרים), תוך שימוש בחיישנים: מגנטומטר - אשר מודד את עוצמת השדה המגנטי המקומי (במקרה זה, של כדה"א); פנלים סולאריים, אשר בעזרת אלגוריתם קיים, יאפשרו קביעת זווית השמש מהלוויין (הזווית אותה יש לאפס). באופן שותף, תבדוק מערכת הבקרה את הכוון הלוויין ביחס לשמש, ותספק מתח למגנטוטורקרים בהתאם.

כאמור, אין מערכות בקרת הכוון בלוויינים זעירים, ומכאן חשיבות הפרויקט שלנו, בחידוש בתחום הלוויינות. עיקר הפרויקט הוא בתחום ההנדסי בפיתוח האלגוריתם והנוסחאות הקשורות בו, בכלילת שיקולים מדעיים הנדסיים, בעיקר בחלק המדגים.

במיזם מוצג חידוש נוסף בשל השילוב של אלגוריתם קיים כחלק מיחידת החישה. אלגוריתם זה נכתב בידי קבוצת תלמידים, במסגרת פרויקט STMC, בהנחיית ד"ר אנה הלר (אחת מחברות עמותת INSA), בתיכון הנדסאים הרצליה. אלגוריתם זה משתמש בפנלים הסולאריים המצפים את הלוויין, וקובע לפיהם את זווית הלוויין מהשמש- זו הזווית שנפעל לצמצומה. כך משמשים

הפנלים הסולאריים כחיישנים, וכממרי אנרגיה כאחד- מה שחוסך במקום, מצרך יקר מאוד בנו- לוווינים. במזמנו לא התעמקנו באלגוריתם זה, מלבד ידיעה כללית של הגורמים הנכנסים אליו, והגורמים שמספק- זאת בהתאם לעקרון המודולריות, הדוגל בחלוקת תוכניות למודולים, וכן בהתאם לעקרון הסתרת המידע, הדוגל בהפרדה בין מימוש לממשק; עקרונות מהותיים ועמודי יסוד בתורת האלגוריתמיקה ובכתיבת תוכנה.

המערכת נבנתה באופן זה מכמה סיבות: בשל המזעור הרב, ישנה חשיבות רבה למאפייני הרכיבים שהלוויין נושא. מפת הרכיבים ומיקומם בלוויין תוכננו בקפידה, שכן עליו לכלול מערכות רבות, תוך ניצול מרבי של נפחו- שכן הוא מצומצם מאוד. לכן, נבחר החישן מגנטומטר והמפעיל מגנטוטורקר, אשר משקלם ונפחם תאמו את הדרישות המוכתבות ע"י מאפייני הלוויין וצרכיו. כמו כן, ניצול הפנלים הסולאריים כחיישנים מהווה חסכון משמעותי במקום. יתרה מזאת, השימוש בחיישנים ובמפעילים אלה הינו חשמלי, ואינו כולל מערכת דלק (כמו במנועים רקטיים), מה שמונע התעסקות עם דלק, השפעת מיכל דלק על תכונות הלוויין (מסה משתנה), וכן שימוש בדלק כמקור אנרגיה למפעילים יגביל את הלוויין- כשיאזל הדלק, תושבת מערכת בקרת ההכוון. לעומת זאת, שימוש בחשמל להפעלת המערכת יאריך חייה וידגיש את המחזוריות שבה- המערכת משמשת להפקת אנרגיה חשמלית מקסימאלית מהמרת אנרגיה סולארית, ומשתמשת באנרגיה חשמלית זו (בחלק ממנה) לשם תפעולה. בנוסף, אלה נחשבים רכיבים פשוטים יחסית.

טרם תכנון האלגוריתם, נעשה סקר ספרות במהלכו למדנו על מגוון נושאים הקשורים בפרויקט: לוווינים רגילים ולוווינים זעירים, מערכות בקרה, מערכת בקרת הכוון בלוויין, תנועה זוויתית, השדה המגנטי של כדה"א, מגנטומטר, מגנטוטורקר, פנלים סולאריים וכדומה. אלה סייעו לנו רבות ברכישת הידע הנחוץ לשם תכנון האלגוריתם.

בתהליך פיתוח האלגוריתם נעשה שימוש רב בהדמיות אקסל, מהן הוסקו מסקנות לקראת כתיבת האלגוריתם הסופי. הדמיות אלה באו לידי ביטוי גם ברישום הניסויים שהתבצעו בשביל המדגים. הדמיה מלאה של האלגוריתם למעשה אימתה נכונותו, תרמה לקביעת פרמטרים סופיים ולניתוח תקלות. נתגלה כי האלגוריתם מצומצם בנוגע למהירויות הזוויתיות ההתחלתיות שהוא יכול לתת להן מענה. הוא מספק מענה למהירויות התחלתיות של עד כ-2 מעלות בשנייה. תתכן אפשרות שהלוויין ימצא במהירות זוויתית גדולה מזו- אולם במקרה זה יש לשכלל את המערכת. מטרת הפרויקט הייתה לעסוק במקרים בהם המהירות הזוויתיות ההתחלתיות היא 0, ולכן חסרונה באי יכולתה להתמודד עם מגוון רחב יותר של מקרים.

לשם פיתוח האלגוריתם, קיימנו מספר פגישות עם נתנאל לוי. נתנאל סייע לנו ברכישת הידע הדרוש לפיתוח האלגוריתם ולהבנת המערכת בצורה הטובה ביותר, עזרה מהותית ביותר בשל דלות מקורות המידע הרלוונטיים בתחום בו אנו מתעסקים. בנוסף, קיימות שתיים שבועיות במסגרת בית הספר, בהן ישבנו עם המנחה, אלי כהן, שהדריך אותנו בפיתוח נכון של הפרויקט ובקידומו. כמו כן, נפגשנו גם לאחר שעות הלימודים במטרה לקדם את הפרויקט ולבצעו בצורה הטובה ביותר.

חלק בלתי נפרד מהפרויקט הוא בניית מדגים, אשר ממחיש את רעיון המערכת ובעיקר מדגים את פעולת המגנטוטורקר כמפעיל ואת פעולת חיישני האור. על המדגים לדמות את תנועת הלוויין והכוון הפנלים הסולאריים אל השמש על ידי המגנטוטורקרים והשדה המגנטי של כדור הארץ. אולם, במקרה זה אין ביכולתנו לבנות מדגים אותנטי, אשר שהוי בחלל, מצויד במפעילים ויחידת חישה מקוריים (מגנטוטורקרים ופנלים סולאריים) "אלחוטי" הנע בדרגת חופש שלוש(תנועה תלת

ממדית) מטעמים ברורים. לכן אנו יוצרים מדגים בדרגת חופש אחת, כלומר, תנועה חד ממדית שתכוון את הלוויין אל מקור האור המצוי. ניסוי אמת יתבצע בעת שיגור הלוויין לחלל. בחלק המדגים אנו נתקלים בקשיים רבים, בעיקר בתכנון המעגלים האלקטרוניים המרכיבים אותו, וכן בתקלות עם הסליל. מסיבה זו מובאות בחוברת התוכניות לבניית המדגים, אולם אין הן שלמות וסופיות ובניית המדגים עדיין לא הושלמה. אנו מקווים להתגבר על בעיות אלה עד לבחינת הבגרות, אולם בכל מקרה ההדגמה העיקרית נעשתה בהדמיית האקסל המלאה. לשם פשטות, האלגוריתם של המדגים לא זהה לזה שתוכנן, וזאת בשל מורכבותו, והואיל ולא התאפשר להמיר את האלגוריתם שבו נשתמש ביחידת החישה (למציאת זווית שמש) לשפת תכנות המדגים.

## מקורות ביבליוגרפיים

- בחקירת הנושאים שנתבצעה עד כה, נעשה שימוש במספר מקורות עיוניים, ועזרה מאנשים. להלן רשימה חלקית של המקורות בהם השתמשנו עד כה :
- ❖ נתנאל לוי (2006), קובץ פעילויות בנושאי תעופה וחלל לתלמידי כיתות י' ו-י"א (במקצוע אוויר-חלל, המגמה המדעית-הנדסית), המרכז למחקר ופיתוח ע"ש מושינסקי.
  - ❖ עדי רוזן (2006), מכניקה ניוטונית כרד א, מכון ויצמן למדע, משרד החינוך התרבות והספורט.
  - ❖ מחבר : דודי זסימן.  
כותרת : לוויינות- החלל למעשה.  
תוכן : מאמר ובו סקירה על מושגים הקשורים לחלל ולוויינות. במאמר מתוארים סוגי לוויינים שונים ושימושיהם השונים בשוק הצבאי והאזרחי, וכן תקציר על מערכות שונות בלוויין. התמקדות בחלק בו מתוארת מערכת בקרת ההכוון של בלוויין.  
כתובת האתר : "תפוז" מאמרים  
עדכון אחרון : 17/12/2002  
<http://www.tapuz.co.il/tapuzforum/main/articles/article.asp?forumId=261&a=16285&c=1842&sc=0&ssc=0>
  - ❖ תוכן מידע אודות חוגי בקרה, מישור לפלס ופונקציות תמסורת.  
מידע אודות המצפן, השדה המגנטי של כדור הארץ, רוח השמש ופוטוספרה.  
מידע על לוויינים (לוויינים ישראלים, מבנם הכללי, מטרותיהם).  
נוסחה של חוק המשיכה של ניוטון.  
כתובת האתר : ויקיפדיה  
<http://he.wikipedia.org/wiki>
  - ❖ דפי הנחיות מהיועץ המדעי נתנאל לוי.  
דפי הנחיות נועדו ליצירת בסיס בפרויקט ולהבנת מטרתו : הצגת הבעיה, חומרי רקע (תנועה זוויתית של גוף, חוג בקרה, לוויינים זעירים) בנוסף התקיים שיעור עם נתנאל לוי בנושא תוכנת האקסל וההיקש שבין תנועה קווית לזוויתית.
  - ❖ תוכן : מידע אודות חוגי בקרה, מישור לפלס ופונקציות תמסורת.  
כתובת האתר : ויקיפדיה  
<http://he.wikipedia.org/wiki>

❖ מחבר: עודד רייכספלד.

כותרת: מערכות בקרה החוג פתוח ובחוג סגור.  
תוכן: מאמר לימודי העוסק במערכות בקרה בחוג פתוח ובחוג סגור. במאמר הסבר  
אודות הסוגים השונים של חוגי הבקרה, אופן פעילותם והשימושים הנעשים בהם.  
כתובת האתר: "חומרי עזר ולימוד"

<http://www.mkm-haifa.co.il/robotica/study/studyhome.htm>

❖ כותרת: מערכת בקרה.

תוכן: מאמרים העוסקים במערכות בקרה. במאמרים סוגים של חוגי בקרה, ומידע על  
הרכיבים השונים של מערכת בקרה (חיישנים, מפעילים ויחידת הבקרה).  
כתובת האתר: "מכס"

[http://web.macam.ac.il/~ltami/dror\\_eran/part44.htm](http://web.macam.ac.il/~ltami/dror_eran/part44.htm)

❖ כותרת: מה זה לוויין ?

תוכן: מאמר העוסק בלוויינים, מרכיביהם, מאפייניהם ומסלולם.  
כתובת האתר: "מט"ח" – הספרייה הוירטואלית

<http://lib.cet.ac.il/pages/item.asp?item=7444>

❖ כותרת: השדה המגנטי של כדור הארץ.

תוכן: היווצרות השדה המגנטי, תכונותיו, שינויים החלים בשדה המגנטי ושימושים  
שונים של האדם בשדה המגנטי.

כותרת האתר: ויקיפדיה

<http://he.wikipedia.org/wiki>

❖ כותרת: השדה המגנטי של כדור הארץ.

כותרת האתר: אוניברסיטת תל-אביב

<http://muse.tau.ac.il/publications/larticle.html>

❖ כותרת : Map: The magnetic Earth

תוכן : מפת השדה המגנטי של כדור הארץ.

כותרת האתר : NEW BBC

[http://news.bbc.co.uk/2/hi/in\\_depth/629/629/7072715.stm](http://news.bbc.co.uk/2/hi/in_depth/629/629/7072715.stm)

❖ כותרת : סוגי לווינים ומגוון השידורים.

תוכן : סוגי לווינים ושימושים.

כותרת האתר : G.M.L – מערכות תקורת לווינים

<http://www.gml.co.il/channelsinfo.asp>

❖ כותרת : לוויין

תוכן : רקע פיזיקלי, שימושים בלווינים מלאכותיים, סוגי מסלולי לווינים ולווינים ישראליים.

כותרת האתר : ויקיפדיה

<http://he.wikipedia.org/wiki>

❖ כותרת : לוויין קטן שלי...

תוכן : סוגי לווינים, גודלם ומשקלם, לוויינים זעירים ושימושיהם.

כותרת האתר : "הידען" – אתר המדע המוביל בישראל

<http://www.hayadan.org.il/wp/my-small-sat-2805081>

❖ כותרת : יום עיון ראשון ללוויינות זעירה (15.5) .

תוכן : ננו לוויין, מאפייניו ומרכיביו.

כותרת האתר : היעד : חלל

<http://www.sikurmemukad.com/space/?p=122>

## הצעה לעבודת הגמר ואישור הפיקוח

המינהל למדע וטכנולוגיה

המגמה המדעית הטכנולוגית

**טופס אישור הצעה לעבודת גמר במגמה המדעית-טכנולוגית**

תאריך: 6.8.2008

שם ביה"ס: אורט מעלה אדומים

שם הפרויקט: אלגוריתם לבקרת הכוון ללווין הזעיר הישראלי הראשון

שמות התלמידים	תעודת זהות
תלמיד א' מתן חסון	305616872
תלמיד ב' אבי אזולאין	204020382
תלמיד ג' מיכל אבקוב	305497034
תלמיד ד' ליאור טורגימן	304941412
תלמיד ה'	

שמות המנחים	תואר	תחום התמחות
מנחה א' אלי כהן	תואר שני	
מנחה ב' נתנאל לוי	תואר ראשון	
מנחה ג'	מדריך מקצועי	

סקירת הרעיון	הערכת תוכן	הערכת השפה
	4 3 2 1	6 5
תאור מצב קיים:	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
סקירת הנקודות הבעייתיות במצב הקיים:	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
תאור הרעיון:	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
תאור הפיתרון:	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<b>סקר ספרות ראשוני:</b>
הערות:		

S.T.S (3 הרגליים: מדע, טכנולוגיה, חברה)	הערכת תוכן	הערכת השפה
	4 3 2 1	6 5
ההיבט המדעי בעבודה:	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
ההיבט הטכנולוגי בעבודה:	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
ההיבט החברתי בעבודה:	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
הערות:		

6 5 4 3 2 1

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>מוצרים דומים:</b>
הערות:					

6 5 4 3 2 1

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<b>חלוקת העבודה:</b>
הערות: חלוקת המטלות אינה מאוזנת, נדרש שכל חבר צוות יבצע מטלות בכל היבט, אין לרכז את רב מטלות ההיבט הטכנולוגי בידי חבר צוות אחד. לכל מטלה אחראי חבר צוות אחד, אם המטלה מורכבת יש לחלקה למטלות משנה. (ראו מדריך לעבודת גמר בטכנולוגיה מוכללת עמוד 35).					

6 5 4 3 2 1

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<b>רשימה ביבליוגרפית רלוונטית:</b>
הערות:					

<input checked="" type="checkbox"/>	אב טיפוס	<input type="checkbox"/>	אחר	<input type="checkbox"/>	אין תוצר סופי מוגדר	<b>תוצר סופי:</b>
הערות: יש להיות יותר ברורים בהגדרת התוצר הסופי.						

<input checked="" type="checkbox"/>	הצעה מאושרת	<input type="checkbox"/>	הצעה מאושרת בתנאי	<input type="checkbox"/>	הצעה לא מאושרת	<b>אישור הפיקוח</b>
הערות: הצעה טובה ומאורגנת היטב. ההצעה מכילה הרבה מונחים לא שגורים יש לשלוט במונחים אלו. לוח הזמנים כללי מדי, כדאי לקבוע את מטלות הפרויקט ולהציב להן לוח זמנים. מוצע לפרק את משימת הפיתוח למשימות אישיות ומפורטות יותר ולקבוע להן לוח זמנים. יש לאזן את חלוקת מטלות הפרויקט ולוודא שלכל תלמיד תכולת עבודה מספקת.		ראובן ששון		תאריך הבדיקה		שם בודק העבודה
בהצלחה		6.8.08				מפמ"ר המגמה
						ראובן ששון

<b>מקרא:</b>	1. מעמיק וממצא 2. טוב 3. לא מספק 4. דל ולא רלוונטי 5. שגיאות כתיב
	6. ניסוח לוקה בחסר
	ניתן לסמן יותר מתיבת בחירה אחת.

# הצעה לעבודת גמר – פרויקט 5

## יחידות לימוד

שנה: 2008

שם בית הספר אורט תעופה וחלל, מעלה אדומים.

מגמה מדעית הנדסית – התמחות: אוויר-חלל.

נושא הפרויקט: אלגוריתם לבקרת הכוון ללווין הזעיר הישראלי הראשון.



שם המנחה: אלי כהן	תואר: M.A.
יועץ מלווה: נתנאל לוי	תפקיד: מורה למדעי-המחשב ורכז מגמה מדעית הנדסית.
שמות התלמידים:	תואר: מהנדס אוויר-חלל בתעשייה האווירית ומורה בבית הספר לאוויר-חלל.
1. מתן חסון	ת"ז: 305616872
2. אבי אזולאי	ת"ז: 204020382
3. מיכל אבקוב	ת"ז: 305497034
4. ליאור טורגימן	ת"ז: 304941412

## טופס הצעה לעבודת גמר

### 1. פרטי המוסד ורכז עבודות הגמר

025902605	025900923	88	דרך קדם 70, מעלה אדומים.	אורט תעופה וחלל.	170803
מס' פקס'	טלפון	ת"ד	כתובת	שם ביה"ס	סמל

e.elicohen@gmail.com	052-2639573	02-6560020	אלי כהן	
דואר אלקטרוני	טל' סלולרי	טלפון בבית	שם רכז מגמה	דואר אלקטרוני (ביה"ס)

### 2. פרטי התלמידים

02-5354957	305497034	מיכל	אבקוב
02-5837777	204020382	אבי	אזולאי
02-5909324	305616872	מתן	חסון
02-5353148	304941412	ליאור	טורג'מן
טלפון בבית	מ"ז	שם פרטי	שם משפחה

### 3. פרטי המנחה/ים

02-6560020	מדעי-המחשב	M.A	אלי	כהן
טלפון בבית	תחומי התמחות	תואר אקדמי	שם פרטי	שם משפחה

### 4. פרטי העבודה

נושא/ שם העבודה המוצעת	אלגוריתם לבקרת הכוון עבור הלוויין הזעיר הישראלי הראשון
תחומי דעת עיקריים בעבודה	אוויר-חלל, אלגוריתמיקה, אלקטרוניקה, פיסיקה.

### 5. ההצעה

שם קובץ ההצעה	אלגוריתם לבקרת הכוון ללוויין הזעיר הישראלי הראשון
---------------	---

### 6. התחייבות התלמידים: אני מתחייב כי אבצע את עבודת-הגמר תוך שמירה על כללי ההגיונות

אבקוב מיכל	אזולאי אבי	חסון מתן	טורג'מן ליאור			
שם	שם	שם	שם	שם	שם	שם
חתימה	חתימה	חתימה	חתימה	חתימה	חתימה	חתימה

### 7. אישור מנחה, רכז מגמה ומנהל ביה"ס להגשת ההצעה ולביצוע עבודת הגמר

מנחה	הריני מאשר בזאת כי התלמיד הכין את ההצעה בהנחיית.	29/02/08	אלי כהן
רכז מגמה	הריני מאשר בזאת את כל הפרטים הכלולים בהצעה.	29/02/08	אלי כהן
מנהל ביה"ס	הריני מאשר בזאת את כל הפרטים הכלולים בהצעה.	29/02/08	ניסים ילוז
תפקיד	אישור	תאריך	חתימה

### 8. הערות ואישור הפיקוח

שם:	תאריך:	חתימה:

## תיאור המצב הקיים

ללויין בחלל אין יכולת לעגון את עצמו בנקודה מסוימת ולכן קל לו לאבד את מיקומו בחלל (תווך תלת-ממדי) הן ביחס לכדור-הארץ והן מבחינת כיוון "ההסתכלות" של המטען הייעודי אותו הוא נושא.

תחום הלוויינות הזעירה הוא תחום חדש בעולם כולו ובישראל בפרט. עד כה שוגרו כ- 30 לוויינים זעירים לחלל וכמחציתם מתפקדים. ללוויינים זעירים כיום ישנן מערכות בקרת הכוון אל השמש, אך הן מוגבלות ביחס לרכיבים (חיישנים, מפעילים, מעבדים) המרכיבים אותם. מערכות בקרה אלה מזהות את הכוון השמש ביחס ללוויין ובאמצעות מערכת בחוג סגור מכוונות את הפנלים הסולריים אליה. נעשה שימוש בעיקר במגנטומטר ובמד שמש כחיישנים, ובמגנטוטורקר כמפעיל, בעיקר בשל גודלם המצומצם ומשקלם המועט.

המגנטומטר הינו חיישן שמטרתו למדוד את גודל וכיוון השדה המגנטי המקומי של כדור-הארץ ולהשוות לנתונים שנמצאים אצלו בזיכרון. הכוון הלוויין מתקבל ביחס לשדה המגנטי. מד-שמש הינו חיישן המודד זווית ביחס לשמש (אינו פעיל בזמן לילה כשכדה"א מכסה את השמש). הזרמת חשמל בסליל המגנטוטורקר גורמת ליצירת שדה מגנטי ויחד איתו נטייה להתלכדות עם כוון שדה המגנטי המקומי. הוא משנה ע"י שדה מגנטי את מהירות סיבובו וגורם לנתועה זוויתית של הלוויין.

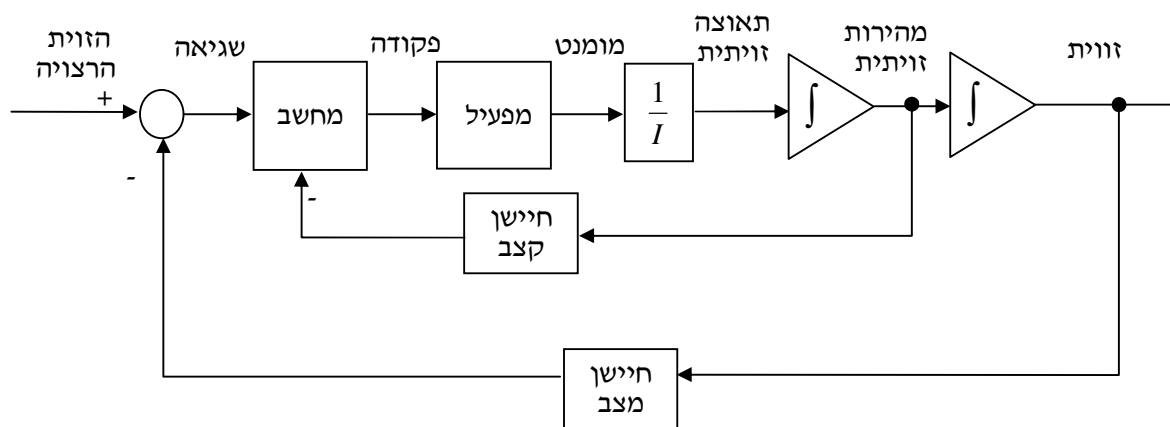
## סקירת מוצרים דומים

כיום, בכל לוויין (זעיר או רגיל) קיימת מערכת בקרת הכוון. מערכות בקרת הכוון בלוויינים משמשות לצרכים שונים, ביניהם הפניית הפנלים הסולאריים של הלוויין כלפי השמש לשם אגירת אנרגיה.

מערכות בקרת הכוון פועלות ע"פ רוב בחוג סגור, המאפשר תיקון תמידי של הכוון הלוויין. אופן פעילותן של מערכות בקרת הכוון דומה ומתנהל באופן הבא:

קיימים חיישנים שמזהים את זווית הכוון הרצויה ואת זווית הכוון הקיימת. החיישנים מעבירים את הנתונים אל המחשב, והוא פועל על פי אלגוריתם כתוב ומורה למפעילים באיזה אופן לעבוד ולאורך כמה זמן, עד שהזווית הרצויה והזווית הקיימת ישתוו כמה שניתן.

להלן תרשים מלבנים כללי של מערכת בקרת הכוון של הלוויין:



חיישנים נפוצים במערכות בקרת ההכוון אל השמש הם מד-שמש המודד זווית ביחס לשמש; מד-אופק המודד את סטיית הלוויין מהנאדיר (קו המחבר את מיקום הלוויין למרכז כדה"א); מד-אופק מאפשר עריכת זווית עלרוד וזווית גלגול, אך לא זווית סבסוב; עוקב כוכבים שנותן את הכוון הלוויין תוך שימוש בעובדה שמיקום הכוכבים על הספירה השמימית קבוע; מגנטומטר שמספק את הכוון הלוויין ביחס לשדה המגנטי המקומי של כדור-הארץ; מכשיר GPS שמקבל מידע די מדויק על מיקום הלוויין מלווייני GPS; סביבונני קצב (גירוסקופים) שמשמשים לשיפור תכונות מערכת הבקרה.

מפעילים נפוצים במערכות בקרת ההכוון אל השמש הם מנועים רקטיים היוצרים סילוני גז (קר או חס) הנפלטים במהירות גבוהה ויוצרים מומנטים חיצוניים על גוף הלוויין; מערכות ההנעה של הלוויין; גלגלי תגובה המשנים את מהירות סבסובם ואת התנע הזוויתי של הלוויין; מגנטוטורקר היוצר שדה מגנטי ויחד איתו נטייה להתלכדות עם כוון שדה המגנטי המקומי של כדה"א.

## **תיאור הבעיות במצב הקיים**

תחום הלוויינות הזעירה בישראל בפרט ובעולם ככלל עדיין בחיתוליו, וניכר פיתוח ושכלול מתמשך של המערכות השונות שבו, כדוגמת מערכת בקרת ההכוון. מערכות בקרת ההכוון אל השמש של הלוויינים הזעירים הקיימים כיום, מוגבלות מאוד ומוכתבות על ידי מאפייני הלוויין. על הלוויין הזעיר להיות במשקל מסוים ולכלול רכיבים רבים בנפחו המצומצם. על כן, על כל מערכותיו של הלוויין, כך גם מערכת בקרת ההכוון אל השמש, להיות קלות וקטנות ככל הניתן. כך לדוגמה חיישנים כמו "עוקב כוכבים" (נעזר בכוכבי הספירה השמימית למציאת הכוון הלוויין), או כמו "מד אופק" (מזהה את הכוון הלוויין ביחס לאופק כדור הארץ) כבדים מדי עבור לוויין זעיר, ועל אף דיוקם הרב לא ניתן להשתמש בהם במערכת בקרת ההכוון שלו. גם נושא המפעילים מוגבל ורק המפעילים המתאימים בגודלם ובמשקלם למבנה הסטנדרטי של הלוויין הזעיר ולמשקל המרבי שעליו לשאת, יכולים להיכלל במערכת בקרת ההכוון שלו. כך לדוגמה גלגלים וסביבונני קצב לא יכולים להיות מיושמים בלוויין הזעיר בשל גודלם הרב והיותם כבדים. מערכות בקרת ההכוון של הלוויין הזעיר כיום אמנם לוקחות בחשבון חלק מהפריטים שהועלו לעיל, אך תמיד קיימת שאיפה ליעל אותם כמה שניתן, להפוך אותן לקלות וקטנות יותר ולהשתמש בחידושים טכנולוגיים שיניבו תוצאה טובה יותר. בישראל קיימת שאיפה לפתח ולשכלל תחום זה כמה שניתן.

## **תיאור הרעיון הכללי לפתרון הבעיה**

הפרויקט נעשה בשיתוף עם העמותה הישראלית ללוויינות זעירה INSA, אשר מחזיקה בתחום הלוויינות הזעירה בישראל ומקדמת אותו. העמותה צפויה להשיק בקרוב את הלוויינים הזעירים הישראליים הראשונים, והמיזם שלנו מיועד עבור הלוויין הראשון מביניהם שישוגר. המיזם עוסק בפיתוח אלגוריתם למערכת בקרת הכוון של לוויין זעיר. האלגוריתם יקשר בין נתונים המגיעים אליו מחיישני הלוויין ובעזרת תהליכים לוגיים ומתמטיים יפעיל מפעילים מסוימים בכדי להגיע למצבו הרצוי. בפרויקט שלנו נעבוד על פיתוח הנוסחאות והליכים הלוגיים המתאימים לפעילות מוצלחת ותקינה של מערכת הבקרה.

מערכת בקרת ההכוון תזהה את הכוון הלוויין בחלל ביחס לשמש, ובמידת הצורך תטה את הלוויין לכיוונה. בקרה זו דרושה כדי להבטיח שתהיה הצבעה של הפנלים הסולאריים כלפי השמש, לשם ניצול מרבי של אנרגיה סולארית שתומר לאנרגיה חשמלית. במערכת בקרת ההכוון יעשה שימוש בחיישנים הבאים:

❖ פנלים סולאריים שישמשו כחיישנים באמצעות התוכנית שנכתבה מראש בפרויקט דומה, ויתנו "וקטור שמש" ביחס לגוף הלוויין כלומר את הזוויות בהן נמצאת השמש ביחס ללוויין.

❖ מגנטומטר, חיישן שיזהה את הכוון הלוויין ביחס לשדה המגנטי המקומי של כדור הארץ. המגנטומטר דרוש בכדי שנדע כיצד להפעיל את המגנטוטורקר (מפעיל שפועל בהתאם לשדה המגנטי – ראה מפעילים).

במערכת בקרת ההכוון נשתמש במגנטוטורקר כמפעיל. הזרמת חשמל בסליל המגנטוטורקר גורמת ליצירת שדה מגנטי ויחד איתו נטייה להתלכדות עם כוון שדה המגנטי המקומי. הוא משנה ע"י שדה מגנטי את מהירות סיבובו וכך משפיע על הכוון הלוויין. האלגוריתם שנכתוב יפעיל את המגנטוטורקר על פי נתוני המגנטומטר ווקטור השמש.



בפתרונינו לצורך בקרת הכוון יעילה, קלה וקטנה יותר, אנו משתמשים במגנטומטר ובמגנטוטורקר בשל היותם קטנים וקלים יחסית לשאר החיישנים והמפעילים הקיימים, מתוקף ההגבלה שיש בתכנון מערכת כלשהי ללוויין זעיר (בשל מידותיו המוגבלות, נפחו ומשקלו המצומצם). אנו אמנם מוגבלים על ידי עמותת INSA, מבחינת בחירת החיישנים והמפעילים עבור מערכת הבקרה, אך מבינים היטב את שיקוליה וההיגיון שמאחורי הדברים. כמו כן, מוצג בפרויקט שכלול וחדוש טכנולוגי אשר טרם יושם בעולם במערכות בקרת הכוון שמש של לוויינים זעירים. השכלול שאנו מציגים כולל שימוש במערכת מיוחדת שתוכנה בפרויקט אחר, אשר מאפשרת ציפוי מלא של הלוויין בפנלים סולאריים ושימוש בהם כחיישני שמש על ידי השוואת עוצמות מתחים המתקבלים על פניהם. מערכת זו מביאה ליעילות רבה ותורמת לכלל מערכות הלוויין הזעיר, מפני שבמצב כזה יש ניצול של חיישני מערכת בקרה (פנלים סולאריים) גם ליצירת אנרגיה חשמלית נוספת עבור כל מערכותיו. בנוסף, בפתרונינו אנו משתמשים בסביבון קצב מסוג MEMS לצורך מדידת קצב תנועת הכוון הלוויין, ריסון תנודותיו (הנוצרות בעת תזוזה זוויתית שלו). זהו סביבון קצב חדיש הכולל רק אלקטרוניקה ואופטיקה (ללא חלקים נעים) ולכן קל וקטן, ומאפשר יישום שלו בלוויין הזעיר.

## סקר ספרות ראשוני:

על מנת ליצור בסיס יציב וחזק בכל הנוגע לתחום הלוויינות ככלל והלוויינות הזעירה בפרט, פתחנו בסקר ספרות ראשוני, ובאיסוף מידע עיוני ממקורות שונים וכן מאנשי העמותה הישראלית ללוויינות זעירה, עמה אנו עובדים. במהלך איסוף המידע הראשוני התמקדנו בבסיס ובמבוא לעבודתנו המרכזית בפרויקט, והעלנו נושאים עתידיים שנצטרך. להלן רשימת הנושאים שכבר חקרנו, או שנחקר בהמשך (רשימה זו אינה סופית, יתכן כי יתווספו נושאים נוספים לפי הצורך ולפי הדרכים אליהן נפנה תוך כדי חקירה מעמיקה):

נושא	תיאור תמציתי	רלוונטיות לפרויקט
לוויינות מהי?	חקירה כללית של תחום הלוויינות בגזרה הבינלאומית והמקומית (ישראלית).	הפרויקט מבוסס על נושא הלוויינות ותלוי באופן ישיר במקומו של תחום הלוויינות בישראל. על מנת לדעת לאילו גורמים עלינו לפנות, ומה בדיוק נעשה עד כה בתחום זה, דרושה חקירה ראשונית וכללית של התחום.
שימושי הלוויין	לאילו שימושים עיקריים מנצלים את הלוויין כיום? באילו תחומים משתמשים בהם באופן ישיר או עקיף וכיצד הוא תורם בתחומי החיים השונים?	על מנת לעמוד על טיבו של הפרויקט שלנו, אנו צריכים להבין מהי חשיבותם של הלוויינים בתחומי החיים שלנו כאזרחי מדינת ישראל וכיושבי כדור הארץ.
סביבת הלוויין	מהם מאפייני ותנאי הסביבה בה שוהה הלוויין? מה צורת מסלולו וכיצד משפיעים גורמים פיזיקאליים התקפים בחלל עליה?	נצטרך לדעת באילו דרכים ומידה יש להתייחס אל מאפייני ותנאי סביבת הלוויין כגורם משפיע על תנועת הלוויין, ומתוקף כך על התמרון שיבצע בעת הכוונה. בנוסף נצטרך להבין את מיקומו והכוונו ביחס למטרה המיועדת (השמש) וביחס לגורמים פיזיקאליים נוספים בהם ישתמשו מפעילי מערכת הבקרה (כמו שדה מגנטי).
לוויינים רגילים	מהם השימושים הנעשים בלוויינים רגילים כיום? כיצד הם בנויים ומה אופן פעילותם, כיצד מתבצע הליך השיגור, מה מקומה של ישראל בתחום הלוויינות והחלל ומהם הלוויינים הקיימים כיום?	נחקר נושא זה על מנת לבסס ולהרחיב ידיעותינו אודות מבנה הלוויינים. מבנה הלוויין ואופן פעילותו חיוניים לצורך תכנון האלגוריתם למערכת בקרת ההכוון, אשר מתחשבת במבנה זה ובהשפעתם הפיזיקאלית על תנועת הלוויין. בנוסף כחומר רקע לעבודה רצוי שנדע מהו מקומה של ישראל בעולם בתחום הלוויינות ומהן שאיפותיה לעתיד.
שדה מגנטי ומצפן	ממה מורכב השדה המגנטי של כדור הארץ? מהי צורתו ביחס לכדור הארץ ולשמש, האם היא משתנה אם בכלל? אילו גורמים פיזיקאליים או מכשירים מושפעים ממנו?	במערכת בקרת ההכוון של הלוויין אל השמש קיימת אפשרות של שימוש בחיישנים ו/או מפעילים הנעזרים בשדה המגנטי לשם פעולתם ועובדים לפיו. על כן נצטרך לחקור את השדה המגנטי ופעולת המצפן אשר דומה לפעולת חיישנים ומפעילים שייתכן ויושמו בפרויקט.
תנועה זוויתית	מהם משפיעי התנועה הזוויתית? כיצד גוף הנע בה מתנהג? אילו נוסחאות	תנועת הלוויין בחלל הינה תנועה זוויתית. מערכת בקרת ההכוון שלנו אמורה להניע את הלוויין להכוון רצוי, כלומר לגרום לו לנוע בתנועה זוויתית. על כן נאלץ לחקור

והיבטים פיזיקאליים קשורים בה?	תנועה זו ואופן פעילותה, על מנת שנדע איך להתחשב בה בנוסחאות האלגוריתם לבקרת הכוון ובשימוש במפעילים.	
לוויינים זעירים	מה מקומו של תחום הלוויינות הזעירה בעולם כולו ובישראל בפרט? אילו הישגים הושגו עד כה בתחום זה ומה שאיפות ומטרות התחום להמשך? מה מבנה הלוויינים הזעירים המצויים כיום? באילו שימושים משתמשים בהם ולאילו שימושים מייעדים אותם?	הלוויינים הזעירים הם תחום חדש בעולם כולו ובישראל בפרט, על כן הישגיו לא ידועים לכל וקיימות שאיפות רבות לגביו. בתור תלמידים אשר עוסקים במערכת בקרת הכוון עבור הלוויין הזעיר הישראלי הראשון, מן הראוי שנדע את מקומה של ישראל בתחום. בנוסף נחקור מסלולים, מבנה, שימושים ותתי מערכות חיוניות בלוויין אשר משפיעות על אופן פעילותו ותנועתו ומתוקף כך על הפעילות שתידרש ממפעילי מערכת הבקרה לבצע. נחקור גם האם ישנם תנאים המגבילים את מגוון החיישנים והמפעילים שיהיה ניתן להשתמש בהם.
מערכת בקרה כללית	מהי מערכת בקרה? האם היא אחידה לכל? לשם מה זקוקים לה?	הבנת חשיבות ומהות מערכת בקרה כללית בתהליך אותו היא מבקרת. הכרת סוגיה השונים (חוג סגור/חוג פתוח) ורכיביה העיקריים.
מערכת בקרת הכוון בלוויין רגיל	כיצד עובדת מערכת בקרת הכוון אל השמש בלוויינים רגילים כיום?	כדי שנוכל ליצור אלגוריתם יעיל ביותר, נצטרך ללמוד אודות מערכות בקרת הכוון של הלוויינים כיום, והגורמים שיש להתחשב בהם במערכות הבקרה.
מערכת בקרת הכוון בלוויין זעיר	האם קיימת מערכת בקרת הכוון בלוויין הזעיר כיום? אם כן, איך היא עובדת ומדוע זקוקים למערכת חדשה?	כדי להעמיק ולהבין טוב יותר את מטרת הפרויקט, יש לחקור את מערכת בקרת הכוון הקיימת בלוויין הזעיר. כמו כן, במידה ומערכת כזו קיימת, נעמוד על חסרונותיה ועל הפגמים בה ונסה ככל הניתן להתגבר עליהם וליצור מערכת בקרה יעילה וטובה יותר.
חיישנים במערכות בקרת הכוון שונות של לוויינים רגילים כיום	מהו מגוון החיישנים המצויים בשימוש כיום במערכות בקרת הכוון שונות בלוויינים רגילים? כיצד הם פועלים? באילו גורמים הם תלויים? ומהי רמת דיוקם?	במערכת בקרת הכוון שלנו אנו זקוקים לחיישנים אשר הרמה התפעולית שלהם טובה, והם יעילים ביותר עבור הצרכים שלנו. באמצעות חקר זה נגיע לחיישנים האופטימאליים ביותר, בהם נשתמש בפרויקט.
מפעילים במערכות בקרת הכוון שונות של לוויינים רגילים כיום	מהו מגוון המפעילים המצויים בשימוש כיום במערכות בקרת הכוון שונות בלוויינים רגילים? כיצד הם פועלים? באילו גורמים הם תלויים? ומהי רמת דיוקם?	במערכת בקרת הכוון שלנו אנו זקוקים למפעילים אשר הרמה התפעולית שלהם טובה, והם יעילים ביותר עבור הצרכים שלנו. באמצעות חקר זה נגיע למפעילים האופטימאליים ביותר, בהם נשתמש בפרויקט. אלה יצטרכו לתאום את שאר המערכות של הלוויין הזעיר, הן מבחינת כמות האנרגיה שהם דורשים, הן מבחינת התפקודים שהם מסוגלים לבצע וכדומה.
חיישנים במערכת בקרת הכוון של	אילו חיישנים קיימים היום בתעשיית הלוויינים הזעירים? מה תפקידם במערכת בקרת	חקירה שתתבצע בכדי שנוכל להבין מהם החיישנים המתאימים ביותר לשימוש בפרויקט. למרות ההגבלה המסוימת מצד העמותה עימה אנו עובדים, חקירה זו

הלוויין הזעיר	ההכוון? מדוע משתמשים דווקא בחיישנים אלה, ובאילו גורמים הם תלויים?	דרושה כדי שנוכל להבין מדוע דווקא חיישנים מסוימים נבחרו בידי העמותה, ואולי אף להציע אלטרנטיבה אחרת.
החיישן מגנטומטר	כיצד פועל חיישן המגנטומטר? מה הוא מפיק? כיצד מושפעת תפוקתו מתנאים פיסיקאליים שונים?	העמותה עימה אנו עובדים מיקדה אותנו לבניית אלגוריתם למערכת בקרה שאחד מחיישניה הוא המגנטומטר. נצטרך לדעת מהם הגורמים המשפיעים עליו, ואת הנוסחאות הקשורות בו, בכדי שנוכל לשלבו באלגוריתם.
מערכת פנלים סולריים כחיישני שמש	מה הקלט והפלט של מערכת זו (נחקרה בפרויקט קודם בתחום)?	מתוכנן שימוש במערכת זו כחיישן אשר ייתן את כוון השמש ביחס ללוויין. נצטרך לדעת מה מקבלת ומה מפיקה המערכת, ואיך להשתמש במידע המופק לצורך חישובים הכרחיים באלגוריתם (איתור הכוון הלוויין ביחס לשמש).
מפעילים במערכת בקרת ההכוון של הלוויין הזעיר	אילו מפעילים קיימים היום בתעשיית הלוויינים הזעירים? מה תפקידם במערכת בקרת ההכוון? מדוע משתמשים דווקא בחיישנים אלה, ובאילו גורמים הם תלויים?	אנו אמנם מוגבלים מבחינת העמותה למפעילים מסוימים, אך בכל זאת דרושה חקירה מקיפה של מפעילים בהם משתמשים במערכת בקרת הכוון של לוויין זעיר. כך נוכל להסיק מסקנות לגבי המפעילים האופטימאליים והיעילים ביותר בהם נשתמש. כך גם נבין כיצד המפעילים איתם נעבוד מתפקדים ולהתאים אליהם את האלגוריתם.
המפעיל מגנטוטורקר	כיצד פועל מפעיל המגנטוטורקר? כיצד מגיב לפקודות שונות המגיעות ממחשב מערכת הבקרה? באילו מידה משפיע על תנועת הלוויין?	העמותה עימה אנו עובדים מיקדה אותנו לבניית אלגוריתם למערכת בקרה שאחד מחיישניה הוא המגנטוטורקר. נצטרך לדעת מהם הגורמים המשפיעים עליו, ואת הנוסחאות הקשורות בו, בכדי שנוכל לשלבו באלגוריתם.
תורת האלגוריתמיקה ושפת התכנות	כיצד יש לבנות אלגוריתם בצורה יעילה ביותר? כיצד משלבים בו את נתוני הקלט והפלט ואת הנוסחאות הדרושות? מהי שפת התכנות של מחשבי הלוויינים?	כדי שאלגוריתם ייכתב בצורה היעילה והנכונה ביותר, אנו זקוקים לידע בסיסי בתורת האלגוריתם ובכתיבתו. ייתכן ואנו נבצע את המרת האלגוריתם לשפת התכנות של הלוויין, ולכן אנו זקוקים לידע בשפה זו.
תוכנות סימולציה, אקסל	כיצד עורכים הדמיות של האלגוריתם בתוכנות מסוימות, (דגש על אקסל)?	אנו זקוקים לידע בסיסי בעריכת גרפים והדמיות ממחשבות, על מנת שנוכל לאמת את נכונות האלגוריתם ולבסס את הפרויקט (ייתכן ולא נוכל לממשו באופן מעשי-בלוויין אמיתי).

## השדה המגנטי של כדור הארץ

השדה המגנטי נוצר בגלעין החיצוני של כדור הארץ, ורק חלק קטן ממנו נמדד על פני השטח או בחלל. לשדה המגנטי ישנה השפעה על תופעות שונות אשר מתבטאות על פני כדור הארץ, באטמוספירה ובחלל הקרוב אליו.

### תכונות השדה המגנטי של כדור הארץ:

סוגי קטבים מגנטיים:

1. הקטבים המגנטיים: שתי נקודות על פני כדור הארץ, שבהן השדה המגנטי בגובה פני הקרקע מאונך לפני כדור הארץ. מבחינה פיזיקלית, הנקודה הקרויה קוטב מגנטי צפוני היא בעצם קוטב דרומי של מגנט, ועל כן מחט המצפן המהווה קוטב צפוני של מגנט נמשכת לכיוון צפון.
2. הקטבים הגאומגנטיים: שתי נקודות נגדיות על פני כדור הארץ והקו המחבר בין שני הקטבים עובר דרך מרכז כדור הארץ.

את השדה המגנטי בכל נקודה על פני כדור הארץ ניתן להפריד לרכיב אופקי ולרכיב אנכי. מחט המצפן תצביע בכיוון הרכיב האופקי. הזווית בין הרכיב האופקי של השדה המגנטי ובין הקוטב המגנטי הצפוני נקראת נטייה מגנטית, והזווית בין כיוון השדה המגנטי המוחלט ובין הרכיב האופקי נקראת זווית הרכנה. עוצמת השדה המגנטי בגובה פני הקרקע משתנה מאזור לאזור, החל מאזורים על פני כדור הארץ שהעוצמה בהם קטנה מ-30 מיקרוטסלה ועד לאזורים שבהם גודלה מגיע עד 60 מיקרוטסלה. בדרך כלל, באזורים הקרובים לקטבים, עוצמת השדה גדולה יותר ובנוסף, ככל שמתקרבים לקטבים המגנטיים, הרכיב האנכי הולך וגדל, ואילו הרכיב האופקי הולך וקטן. מדידת עוצמת השדה המגנטי וכיוונו מבוצעות באמצעות מגנטומטר, מכשיר שמודד ורושם את עוצמת השדה המגנטי המקומי ואת כיוונו לאורך הזמן. המדידה מבוצעת באמצעות כ-200 תחנות מדידה קרקעיות קבועות בכל העולם ועוד כמה נידות וגם באמצעות לווינים. מדידת השדה המגנטי של כדור הארץ:

- **מגנטומטר:** המגנטומטר הוא כלי רגיש מאוד, שמודד את עוצמתו וכיוונו של השדה המגנטי ועוקב אחרי שינויו. ישנם שני סוגים עיקריים של המגנטומטר:
  1. מגנטומטרים סקלריים: מודדים את העוצמה הכללית של השדה המגנטי.
  2. מגנטומטרים ווקטוריים: מודדים את עוצמתו וכיוונו של השדה המגנטי, ומן הנתונים ניתן לחשב את עוצמת רכיבי הכוח המגנטי, את הנטייה המגנטית ואת השיפוע המגנטי.המגנטומטר אשר מותקן בלוויינים עוזר ללוויין עצמו למצוא את מקומו בכך שהוא מודד את גודל וכיוונו של השדה המגנטי של כדור הארץ והלוויין עצמו משווה את הנתונים הללו לנתונים שנמצאים אצלו בזיכרון.

**מגנטוטורקר:** המגנטוטורקר הוא כלי אשר עשוי מסליל שעשוי מנחושת או מאלומיניום ודרכו זרם חשמלי. בעקבות זאת, נוצר שדה מגנטי סביב הסליל ובכך, כאשר מפעילים את המגנטוטורקרים נוצר מומנט בעקבות פעולה הדדית עם השדה המגנטי של כדור הארץ.

## לוויינים

לוויין הוא עצם מסוים המסתובב סביב עצם אחר גדול יותר. קיים כוח משיכה בין שני גופים על פי חוק ניוטון הקובע שהגוף הקטן נמשך לגוף הגדול יותר..ניתן לחשב את גודל כוח זה על פי הנוסחא:

$$F = G \frac{Mm}{R^2}$$

$F$  [N] - הכוח על הלוויין, המושך אותו אל כדור"א

$M=5.98 \cdot 10^{24}$  [kg] - מסת כדור"א

$m$  [kg] - מסת הלוויין

$r$  [m] - המרחק בין הלוויין למרכז כדור"א

$G=6.67 \cdot 10^{-11}$  [ $m^3/(kg \cdot sec^2)$ ] - קבוע המשיכה של ניוטון

הודות למהירותו הגבוהה הלוויין אינו זקוק להתגבר על כוח הכבידה והוא במצב של נפילה לאורך כל הדרך וכך הוא נשאר במסלול קבוע, בדרך כלל אליפטי. לכל גוף המסתובב סביב גוף אחר קיים מישור דמיוני, שעליו הוא מבצע את המסלול האליפטי. כוח המשיכה שמפעיל כדור הארץ על הלוויין יוצר כוח מרכזי (צנטריפטאלי) שהוא וקטור המצביע לכיוון מרכז כדור הארץ. משקל הלוויינים כיום יכול לנוע מ-100 ק"ג למספר טונות, בעקבות משקל זה, השיגור יקר יותר. הרכיבים של הלוויין יקרים גם הן בגלל גודלם. כל הלוויינים מורכבים ממספר רכיבים:

מחשב- המנהל את שאר המערכת, מקבל נתונים, מעבד אותם ושולח פקודות אם צריך. פאנלים סולארים – שתפקידם לקלוט את אנרגיית השמש ולהפוך אותה לחשמל, ובכך הם מספקים חשמל לשאר המערכת.

מערכת בקרה תרמית- מערכת זו שומרת על טמפרטורות שבו הלוויין יכול לעבוד. מערכת בקרת הכוון – בחלל אין ללוויין יכולת לדעת היכן הוא נמצא והוא יכול ללכת "לאיבוד", ולכן קיימת מערכות שונות המוצאות את מיקום הלוויין בדרכים שונות, ובעקבות זה כל מערכת צריכה נתונים שונים וכן תשלח פקודות שונות למפעילים שונים.

מפעילים – מפעילים אלו נקבעים בהתאם לנתוני הלוויין והן מבחינה כלכלית של מפתח הלוויין. קיימים מפעילים שונים, אך כל המפעילים פועלים בהתאם לפקודות המערכת בקרת הכוון. מערכת הנעה – לכל לוויין קיימת מערכת הנעה. מערכת זו מובילה את הלוויין לאחור השיגור אל הגובה המתאים ואל המקום הרצוי בהתאם לשימוש. הלוויינים יכולים להימצא במספר מסלולים, על פי מסלולים אלה ניתן להבין גם את שימושם של הלוויינים:

LEO (Low Earth Orbit) – מסלול נמוך, במרחק של 160-480 ק"מ, לוויינים אלה נעים במהירות

של כ- 28000 קמ"ש ומשלימים הקפה של כדור הארץ בכ-90 דקות בלבד!

MEO (Medium Earth Orbit) – מסלול בינוי, במרחק של כ-9000-18000 ק"מ.

GEO (Geostationary earth Orbit) – מסלול גבוה, במרחק של כ-35600 ק"מ. לוויינים במסלול זה מקיפים את כדור הארץ ב-24 שעות, גם כדור הארץ מסתובב ב-24 שעות סביב עצמו ולכן מכדור הארץ זה ייראה כאילו הלוויינים עומדים במקום. לוויינים במסלול זה משמשים בעיקר לתקשורת.

ללויין שימושים רבים, הן באזרחות והן בתחום הצבאי. הלויינים היום משמשים לתקשורת, כך יכולים ממקום אחד על פני כדור הארץ לשדר אותו דבר לכל נקודה אחרת כל כדור הארץ. יש ללויינים שמשמשים היום לריגול, ללויינים אלה מצלמים את פני השטח ומעבירים נתונים לתחנת קרקע על פני כדור הארץ שנועדה לקלוט מידע מהלויין ולפענח אותו. לישראל יש מקום נכבד בעולם בלויינים, יש לישראל כ-7 לויינים, חלקם לצרכים אזרחיים וחלקם לצרכי הצבא.

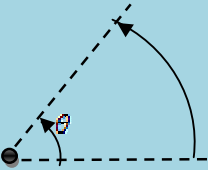

## תנועה זוויתית

ללויין זעיר, כמו לויין רגיל, נע בחלל בתנועה זוויתית כלומר לא בקו ישר אלא בתנועה מעגלית. בכדי לדון בתנועה זוויתית יש לדעת מהו מרכז הכובד של הגוף הנע בתנועה זו, משום שהתנועה הזוויתית מתבצעת סביב מרכז זה. מרכז הכובד של הלויין הוא בעצם מרכז המסה שלו ומצוי על פי רוב במרכז הלויין. אנו נצטרך לדאוג שהלויין יסתובב סביב מרכז המסה שלו כך שפנליו הסולאריים יפנו כלפי השמש. הלויין ינוע בתנועה זוויתית בעזרת המפעילים שבחרנו-מגנטוטורקרים.

הגדרות בנושא תנועה זוויתית:

- מהירות זוויתית – של גוף הנע בתנועה מעגלית קבועה מוגדרת כזווית שהקו המחבר את הגוף עם מרכז המעגל עובר ביחידות זמן.
- תאוצה זוויתית – השפעה של גורם חיצוני גורמת לשינוי גודל המהירות וכיוון המהירות.

ישנה אנלוגיה בין תנועה קווית לתנועה זוויתית:

תנועה זוויתית	תנועה קווית	
		מיקום
$\dot{\theta} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$	$\Delta\dot{s} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	מהירות (נגזרת מקום)
$\ddot{\theta} = \frac{\Delta\dot{\theta}}{\Delta t}$	$\ddot{s} = \frac{\Delta\dot{s}}{\Delta t}$	תאוצה (נגזרת מהירות)
		כוח, מומנט

$M[N \cdot m]$	$F[N]$	
$M = I \cdot \ddot{\theta}$ $I = 2 \cdot m \cdot d^2$	$F = m \cdot \ddot{s}$	דינמיקה: חוק שני של ניוטון
$I[kg \cdot m^2]$	$m[kg]$	התמד (אינרציה)

### מערכת בקרת ההכוון בלויין

בלויין בחלל אין יכולת לעגון את עצמו בנקודה מסוימת ולכן קל לו מאוד לאבד את מיקומו בחלל (תווך תלת-ממדי) הן ביחס לכדור-הארץ והן מבחינת כיוון "ההסתכלות" של המטען הייעודי אותו הוא נושא.

מטרת מערכת בקרת ההכוון בלויין היא לזהות את הכוון הלוויין בחלל ביחס לכדור-הארץ (או למערכת יחוס אחרת), ובמידת הצורך להטות אותו לכוון רצוי בחלל. בקרה זו דרושה כדי להבטיח שתהיה הצבעה מדויקת של המטע"ד (המטען הייעודי) אשר הלוויין נושא לעבר המטרה המיועדת על פני כדור-הארץ או בחלל.

בפרויקט שלנו יש חלק במערכת בקרה להכוון לויין בחלל. במקרה זה המטע"ד הינו הפנלים הסולריים אשר צריכים להצביע כלפי השמש, לשם ניצול מרבי של אנרגיה סולרית שתומר לאנרגיה חשמלית.

במערכת בקרת ההכוון ישנם רכיבים שבעזרתם מזהה הלוויין את מיקומו והטייתו (הכוונו) בחלל וישנם רכיבים שמטרתם להביא את הלוויין לכיוון הרצוי לו.

כדי לדעת את מיקומו, הלוויין נעזר בסימנים מבחץ בעזרת חיישנים שונים כמו:

- ❖ מד-שמש המודד זווית ביחס לשמש (אינו פעיל בזמן לילה כשכדה"א מכסה את השמש).
  - ❖ מד-אופק המודד את סטיית הלוויין מהנאדיר (קו המחבר את מיקום הלוויין למרכז כדה"א), בהסתמך על קליטת קרני אינפרה-אדום מכדה"א.
  - ❖ עוקב כוכבים שמשווה תמונה האגורה אצלו בזיכרון של תמונת הכוכבים עם מה שהוא רואה ממיקומו, ונותן את הכוון הגוף יחסית למערכת אינרציאלית.
  - ❖ מגנטומטר שמטרתו למדוד את גודל וכיוון השדה המגנטי המקומי של כדור-הארץ ולהשוות לנתונים שנמצאים אצלו בזיכרון. הכוון הלוויין מתקבל ביחס לשדה המגנטי.
  - ❖ מכשיר GPS שמקבל נתונים מלווייני GPS הנותנים מידע די מדויק על מיקום הלוויין.
  - ❖ סביבוני קצב (גירוסקופים) - מכשירים המשמשים לשיפור תכונות מערכת הבקרה, תוך התבססות על עקרונות שימור התנע הזוויתי (ביטוי לכוון ועוצמת התנועה הזוויתית).
- רמת הדיוק של כל מערכת שונה. מערכות שונות מתבססות על נתונים שונים, לכן בכל לויין נמצאות המערכות החיוניות לו ע"פ מטרת תפקידו.

דוגמאות לתת-המערכות שאחראיות על הכוונת הלוויין והבאתו למצב הרצוי לו הן :

- ❖ מנועים רקטיים - מופעלים באמצעות דלק מוצק או באמצעות דלק נוזלי. סילוני הגז הקר או החם (המיוצר בלחץ גבוה בתוך גוף המנוע) נפלטים במהירות גבוהה ו"זורקים" את החלק בלוויין שממנו נפלטו בכיוון הפוך לכיוון זרימת הגזים. המנועים יוצרים מומנטים חיצוניים על גוף הלוויין, הגורמים לשינוי התנע הזוויתי של המערכת.
  - מערכות ההנעה של הלוויין - ניתן להשתמש בהן ע"מ להניעו סביב ציריו, אך תפעול זה בזבזי מאוד בדלק ולכן מנוצל רק כדי לרסן את גלגלי התגובה ע"י הצתת המנועים בניגוד לכיוון סיבוב הגלגלים והאטה מתמשכת של הגלגלים.
  - ❖ גלגלי תגובה הנמצאים בתוך הלוויין המשנים את מהירות סיבובם ובכך משנים את התנע הזוויתי של הלוויין, כך שהתנע הזוויתי הכולל של הלוויין יחד עם הגלגלים נשמר קבוע.
  - ❖ מגנטוטורקר - הזרמת חשמל בסליל המגנטוטורקר גורמת ליצירת שדה מגנטי ויחד איתו נטייה להתלכדות עם כוון שדה המגנטי המקומי. הוא משנה ע"י שדה מגנטי את מהירות סיבובו ויוצר תופעה דומה לגלגל תגובה.
- גם פה, לא כל לווין מצויד בכל המערכות האפשריות ולכל מערכת יש את יכולת הדיוק שלה. מערכת בקרת ההכוון בלוויין הינה מערכת בקרה בחוג סגור, מפני שכפי שכבר נוכחנו לדעת, מערכת בקרה מסוג זה הינה מדויקת, איכותית ומבצעת תיקונים בזמן אמת ללא צורך בחיזוי מראש, ובכך עונה על הדרישות הנחוצות למערכת בקרת הכוון הלוויין. עורכת מערכת הבקרה אוספת נתונים מיחידת המדידה, קובעת את מיקום והכוון הלוויין, עורכת השוואה בין הכוון הנוכחי של בלוויין להכוון הרצוי ומפעילה את מנגנון התיקון לשם צמצום עד כדי איפוס הפער שביניהם.
- בסעיף "סקירת מוצרים דומים" מתואר תרשים מלבנים כללי של מערכת בקרת הכוון של לווין.

## **גישת STS - היבטים במיזם**

תחום הלוויינות הזעירה חדש בישראל, כמו בעולם כולו, מה שהופך את ההתעסקות בתחום לראשונית ולא וודאית. כמו הלוויינים הרגילים, הלוויינים הזעירים זקוקים לאנרגיה על מנת לתפעל את מערכותיהם השונות. אנרגיה זו מתקבלת ע"י הפניית פנליהם הסולאריים אל השמש. האנרגיה נאגרת במצבר כך שתתאפשר פעולת הלוויין גם בלילה הלווייני (מצב שבו הלוויין אינו רואה את השמש).

כדי לעמוד על טיבה של מערכת בקרת ההכוון בלוויין ועל תרומתה לחברה הישראלית והבינלאומית יש לדון בתרומת המערכת הכוללת אליה היא משתייכת - הלוויין הזעיר עצמו. נשאלת השאלה מדוע בכלל זקוקים ללוויינים זעירים ומדוע לא להסתפק בלוויינים העומדים לרשותנו כיום? התשובה לשאלה זו משלבת מספר היבטים :

- ❖ ההיבט הראשון הוא כלכלי. מחיר הלוויינים הזעירים מהווה אחוז מזערי ממחירם של הלוויינים הרגילים, הן מבחינת ייצורם, הן מבחינת תפעולם והן מבחינת שיגורם לחלל. לשם השוואה, ייצור לווין רגיל עולה כ-10 מיליון דולר ושיגורו עולה כמה מיליוני דולרים נוספים, ואילו ייצור לווין זעיר עולה בין 200 אלף דולר למיליון דולר ושיגורו זול בהרבה משיגור לווין רגיל. ההבדל נובע מהבדלי הגודל והמסות של שני סוגי הלוויינים. בעוד שלווין רגיל מכיל רכיבים גדולים ויקרים, לווין זעיר מכיל מספר מצומצם יותר של רכיבים קטנים יותר וזולים יותר, כך גם מערכת בקרת ההכוון שלו. הפרש המסות בין שני סוגי הלוויינים מביא ליתרון של הלוויין הזעיר על הלוויין הרגיל במספר תחומים.

מבחינת השיגור, שיגור הלוויין הזעיר פשוט וזול בפני עצמו. בנוסף לכך הוא יכול להיווסף לשיגורים מסוגים אחרים כלומר, במקום לשים משקולות במשגר כאשר משגרים רכיב כלשהו לחלל, ניתן לשים לוויין זעיר וכאשר יגיע המשגר לחלל הוא ישחרר גם את הלוויין הזעיר. בעקבות מחירם הזול של הלוויינים הזעירים אפשר לוותר על ביטוח או לקבל ביטוח מוזל עליהם-חיסכון כלכלי נוסף.

❖ **ההיבט השני הוא ההיבט החברתי.** כיום הלוויינים שקיימים בארץ ובעולם בכלל, מכילים טכנולוגיות ישנות ולא מתקדמות בעקבות הידיעה שהלוויין הוא דבר יקר מאוד ואם ישימו בו מערכת חדשה שלא נוסתה בחלל הוא יכול להביא לנזק כלכלי. היבט זה מתבטא בתחום הצבאי בכך שהטכנולוגיה מתפתחת ומשתפרת, רכיבים מתקדמים וחדשים שהוכחו ע"י הלוויינים הזעירים, יוכלו להיות מיושמים בלוויינים רגילים לשימושי צבא או במכשירים צבאיים נוספים, ובכך לשכלל ולפתח את יכולות הצבא, ולהעצים את תחום הביטחון בישראל כמו טילים בליסטיים שיוצאים מהאטמוספירה וגם הם מתכווננים על פי השדה המגנטי. הטכנולוגיות החדשות יכולות להביא להרחבת פעולותיהם של הלוויינים ואולי לפתוח בפנינו אפשרויות נוספות שעדיין לא חשבו עליהן. גם בתחום האזרחי העניין החברתי מתבטא בכך שהאמצעים הטכנולוגיים שפותחו בהקשר להנדסת חלל משפרים את חיי האדם על כדור פני כדור הארץ. פירותיו של פיתוח טכנולוגיות חלל נמצאים כיום בתחומים שונים כמו במכוניות (מערכת ה-GPS ששימשה בעבר להכוון לוויינים, משמשת כיום לניווט נסיעות ממקום למקום על פני כדור הארץ). גם בתחום התקשורת הוכחת רכיבים חדשים ומתקדמים יכולה להביא לשיפור בהעברת נתונים, תקשורת אלחוטית, ובאופן כללי באיכות החיים.

האלגוריתם של מערכת בקרת ההכוון שנתכנן מלווה בתחומים נוספים מגישת ה-STIS.

❖ **ההיבט המדעי:** במהלך הפרויקט נצטרך לחקור נושאים מדעיים ולהשתמש בידע קיים בנושאים שונים כמו מסלולי הלוויינים, שדה מגנטי, זווית שמש, סביבת החלל ועוד. כמו כן נעבוד עם נוסחאות פיזיקאליות בנושא התנועה המעגלית, בנוסף נחקר גורמים פיזיקאליים הנמצאים בנוסחאות השונות כמו מסה, מהירות קווית, תנועה זוויתית ותאוצה זוויתית. עם נוסחאות אלו נצטרך לעבוד ולהתאימן לצרכינו בצורה מתמטית. כמו כן, נצטרך לחקור חישנים הנמצאים על לוויינים שיוכלו לעזור לנו במיקום ובהכוון הלוויין ובכך להעביר מידע אל המפעילים. את אותם המפעילים נצטרך גם כן לחקור: באיזה אופן הם עובדים, מה כוחם המקסימאלי והמינימאלי ואיך הם משפיעים על הכוון הלוויין. בנוסף, נצטרך להכיר את התנהגות הלוויין בחלל. עם כל המידע הנתון והמידע שנחקר נגיע אל נוסחאות חדשות ברורות ובכך נוכל לפתח אלגוריתם שיביא להכוון הלוויין אל השמש. בכדי לבדוק את הנוסחאות ואת טיב האלגוריתם שנכתוב, עלינו להשתמש ולתפעל תוכנות הדמיה כמו אקסל שתעזור לנו באימות הנוסחאות, ובגיבוש אלגוריתם סופי שיביא להכוון מדויק ככל הניתן של פאנלי הלוויין אל השמש.

❖ **ההיבט הטכנולוגי:** האלגוריתם שנתכנן למערכת בקרת ההכוון ללוויין הזעיר, הינו חלק ממערכת טכנולוגית (מערכת הבקרה). הפרויקט משלב חישנים ומפעילים, רכיבים טכנולוגיים, תוך התייחסות והבנת הטכנולוגיה והפיזיקה הכרוכה בהם (אופן פעילותם, המיקום הטוב ביותר על הלוויין שיש למקמם כדי שייתנו את המיקום ואת המידע הכי טוב וכדומה). טכנולוגיה בהגדרתה היא "תורת האומנות" ומורכבת מרצף פעולות

שיטתיות. היא עוסקת בחיפוש פתרונות מעשיים, תוך ניצול חידושי מידע, בתשובה לצרכים אנושיים. לפיכך, האלגוריתם בו נעשה שימוש בידע ובטכנולוגיה חדישה, תוך עשיית תהליכים לוגיים ושיטתיים, עשוי להוות מערכת טכנולוגית בפני עצמו. בנוסף, נצטרך להשתמש ולתפעל תוכנות הדמיה, תוך יצירת גרפים וטבלאות רלוונטיות. תוכנת ההדמיה העיקרית תהיה כתובה בצורת גיליון עבודה (אקסל) והיא תסייע לאימות הנוסחאות שתפותחנה ובגיבוש האלגוריתם הסופי. כמו כן, אנו שואפים לבנות דגם (מדגים טכנולוגיה) שיראה את פעולותיה של מערכת בקרת הכוון ותדגים את העלרוד, הסבסוב והגלגול של הלוויין, כמובן בתנאים מגבילים של כדור הארץ.

### חלוקת העבודה בין חברי הצוות

נושאים	מתן	אבי	ליאור	מיכל
<b>היבטים חברתיים:</b>				
לוויינות מהי?			X	
לוויינים הקיימים כיום			X	
שימוש הלוויינים בתחום האזרחי והתקשורתי			X	
שימוש הלוויינים בתחום הצבאי			X	
<b>היבטים מדעיים:</b>				
סביבת הלוויין		X		
לוויינים רגילים			X	
שדה מגנטי				X
תנועה זוויתית		X		
לוויינים זעירים	X	X	X	
<b>היבטים טכנולוגיים:</b>				
מצפן				X
מערכת בקרה כללית	X			
מערכת בקרת הכוון בלוויין רגיל	X			
מערכת בקרת הכוון בלוויין זעיר	X			
חיישנים במערכות בקרת הכוון שונות של לוויינים רגילים כיום	X			
מפעילים במערכות בקרת הכוון שונות של לוויינים רגילים כיום	X			
חיישנים במערכות בקרת הכוון של הלוויין הזעיר	X			
החיישן מגנטומטר	X			
מפעילים במערכות בקרת הכוון של הלוויין הזעיר	X			
המפעיל מגנטומטר	X			
תורת האלגוריתמיקה ושפת התכנות	X	X	X	X
פיתוח האלגוריתם	X	X	X	X
תוכנות סימולציה, אקסל	X	X	X	X

## לוח זמנים לביצוע

כיתה י"ב			כיתה י"א				שלבים
מאי יוני	ספט-מאי	ספט'	יוני	פבר' מאי	ינואר	דצמבר	
							א. בחירת נושא ✓
					✓	✓	ב. הכנת ההצעה ואישורה
					✓	✓	ג. סקר ספרות ובדיקת חלופות
		✓	✓	✓	✓		ד. מחקר ופיתוח
	✓	✓					ה. מימוש הפיתרון והערכתו
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	ו. עריכת החוברת
✓							ז. מבחן "הגנה" על עבודת הגמר

## מקורות ביבליוגרפיים ראשוניים

בחקירת הנושאים שנתבצעה עד כה, נעשה שימוש במספר מקורות עיוניים, ועזרה מאנשים. להלן רשימה חלקית של המקורות בהם השתמשנו עד כה :

- ❖ נתנאל לוי (2006), קובץ פעילויות בנושאי תעופה וחלל לתלמידי כיתות י' ו-י"א (במקצוע אוויר-חלל, המגמה המדעית-הנדסית), המרכז למחקר ופיתוח ע"ש מושינסקי.
- ❖ עדי רוזן (2006), מכניקה ניוטונית כרך א, מכון ויצמן למדע, משרד החינוך התרבות והספורט.
- ❖ מחבר : דודי זוסימן.  
 כותר : לוויינות- החלל למעשה  
 תוכן : מאמר ובו סקירה על מושגים הקשורים לחלל ולוויינות. במאמר מתוארים סוגי לוויינים שונים ושימושיהם השונים בשוק הצבאי והאזרחי, וכן תקציר על מערכות שונות בלוויין. התמקדות בחלק בו מתוארת מערכת בקרת ההכוון של בלווין.  
 כתובת האתר : תפוז מאמרים

<http://www.tapuz.co.il/tapuzforum/main/articles/article.asp?forumId=261&a=16285&c=1842&sc=0&ssc=0>

עדכון אחרון : 17/12/2002

❖ תוכן מידע אודות חוגי בקרה, מישור לפלס ופונקציות תמסורת. מידע אודות המצפן, השדה המגנטי של כדור הארץ, רוח השמש ופוטוספרה. מידע על לוויינים (לוויינים ישראלים, מבנם הכללי, מטרותיהם). נוסחה של חוק המשיכה של ניוטון.

כתובת האתר : ויקיפדיה

<http://he.wikipedia.org/wiki>

❖ דפי הנחיות מהיועץ המדעי נתנאל לוי.

דפי הנחיות נועדו ליצירת בסיס בפרויקט ולהבנת מטרתו : הצגת הבעיה, חומרי רקע (תנועה זוויתית של גוף, חוג בקרה, לוויינים זעירים) בנוסף התקיים שיעור עם נתנאל לוי בנושא תוכנת האקסל וההיקש שבין תנועה קווית לזוויתית.



# דפי הנחיות

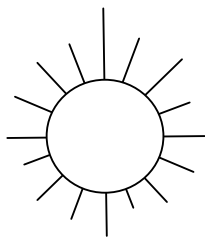
בס"ד כ"ח תשרי תשס"ח 10 אוקטובר 2007

לתלמיד מתן ולחבריו לקבוצה שלום.

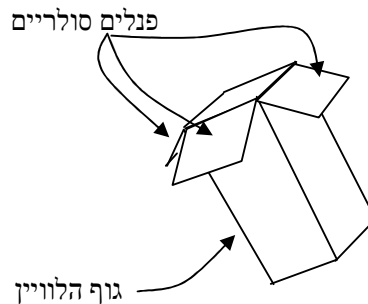
ישבתי היום עם אנשי העמותה ללוויינים זעירים, עברנו ביחד על דף שהכנתי לקראת המפגש וסגרנו כל מה שצריך, לצורך התנעת המיזם אצלכם.

אין בכוונתי לפרט לכם, בשלב זה את כל אותם הדברים שאתם צריכים לשם הכנת ההצעה. את זה נעשה במפגש הראשון שלנו (אנא, לזמן אותי). שימו לב לדברים הבאים:

1. במה מדובר?



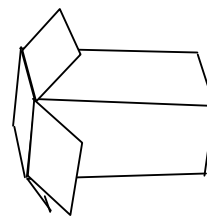
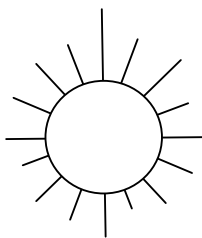
שמש



פגלים סולריים

גוף הלוויין

מצב התחלתי



המצב הרצוי

## 2. חומרי רקע (בינתיים!)

### א. תנועה זוויתית של גוף

$$linear : F = m \cdot a_{linear}$$

ישנה אלוגיה בין תנועה קווית של נקודת מסה לבין תנועה זוויתית של גוף:

$$angular : M = I \cdot a_{angular}$$

יש לחפש הסברים על כך בספרי פיסיקה ובאינטרנט, ולתרגל היטב את הנושא!

### ב. חוג בקרה

יש לחזור על סעיף "ביות" בפעילות תמרונים, בספר שלי. כמו כן, יש לחפש חומר אנציקלופדי על חוגי בקרה של מטוסים ולוויינים.

### ג. לוויינים זעירים

יש להמשיך לאסוף חומר (ולקרוא!) על הנושא, החל מאתר העמותה ועד אתרים באנגלית. צריכים לדעת היטב לענות על "בשביל מה זה טוב?!"

### ד. מהלך המיזם

לקרוא בעיון את ספר הפרויקטים של "טכנולוגיה מוכללת".

זהו, בינתיים. כאמור, במפגש שלנו אוכל לפרט את הפעולות הדרושות לכתיבת ההצעה.

בבקשה לעדכן את אלי כהן ואותי בהתקדמות שלכם, באופן שוטף...

...ולעבודה!!!

נתנאל

מכותב:

אלי כהן – המנחה מטעם בית ספר

בס"ד ו' חשון תשס"ח 17 אוקטובר 07

דף הנחיות מס' 2

לתלמיד מתן ולחברי הקבוצה, שלום.

אני מקווה שאתם מנצלים את השביתה כדי להתקדם בהכנות למיזם. אשמח לפגוש אתכם ביום שישי ומקווה שגם המורה אלי יוכל להגיע.

דף זה מפרט את המשך חומרי הרקע עבור המיזם הקשור לעמותה ללוויינות זעירה.

1. כתבתי חומר על בקרת לוויינים. הוא ברמה קצת גבוהה מדי, כי קהל היעד שלו הם בוגרי תיכון, אך עם השקעה מספקת גם אתם תפיקו תועלת ממנו. (ראו את הקובץ המצורף, ושננו אותו!)
2. עליכם ללמוד על פעולת המצפן ועל השדה המגנטי של כדור הארץ (מתוך אנציקלופדיה).
3. פעילות "לוויינים" בספר שלי.
4. אנחנו בחדשות! הסתכלו ב-  
<http://www.hayadan.org.il/wp/insa-nomad-ebay-1210075/>
5. לחזור על דף ההנחיות הקודם, ולהמשיך להתקדם בחומרים הללו!

בהצלחה!

נתנאל

עותק:

אלי כהן

### מיזם לוויין זעיר – דף הנחיות מס' 3

לתלמידים מתן, מיכל, אבי וליאור, שלום.

#### 1. תנועה זוויתית של גוף קשיח

א. נא להדפיס את מהלך השיעור שלי ולשלוח אליי לתיקונים. שיעור זה יצורף כנראה כנספח לדו"ח.

ב. נא להמשיך לפתח את העניין, מתוך אנלוגיה לתנועה הקווית, לפי הבעיות הבאות:

גוף בעל מומנט אינרציה ידוע נתון למומנט חיצוני קבוע.

- כתבו נוסחה הנותנת את התפתחות המהירות הסיבובית שלו (רדיאנים לשנייה) עם הזמן.
- כתבו נוסחה עבור הזווית, כתלות בזמן.
- כתבו נוסחה עבור הזמן שלוקח לו להגיע למהירות מסוימת.
- כתבו נוסחה עבור הזמן שלוקח לו להגיע לזווית מסוימת.

מהלך האצה ובלימה

- הניחו שמומנט חיובי קבוע פועל במשך פרק זמן ידוע, ולאחר מכן המומנט מתהפך ופועל בכיוון הנגדי, באותו השיעור ובאותו פרק זמן. מה תהיה המהירות הסופית?
- מהי הזווית הסופית.
- מצא את הזמן שלוקח להביא את הגוף מזווית לזווית אחרת, כשבשתייהן הוא במנוחה.

#### 2. אקסל

א. הכינו גרפים של נפילה חופשית של נקודת מסה, עבור גבהים התחלתיים שונים.

ב. הכינו גיליון עבור תנועה סיבובית, ובאמצעות דוגמאות מספריות בדקו את הממצאים שלכם בסעיף 1.ב.

#### 3. איסוף חומר

א. לוויין זעיר – לחפש לפי nano satellite, cube sat

ב. שדה מגנטי – למצוא מפה של השדה בגובה 400 ק"מ

ג. מסלולים – מהו מסלול heliosynchronous?

#### 4. הערכות למפגש עם חברי העמותה

א. להכין קלסר עם כל החומרים שאספתם, כולל דפי הנחיות, חוברת הנחיות של המגמה וטופס ההצעה.

ב. להכין רשימת שאלות

- פרמטרים

- מה מצפים מכם?

- לוח זמנים

יש כאן הרבה עבודה... אך אני יודע שתתמודדו יפה עם האתגר!

בהצלחה,

נתנאל

מיזם לוויין זעיר – דף הנחיות מס' 4

לתלמידים מתן, מיכל, אבי וליאור, שלום.

1. השלמת עבודות  
מבדיקת הכתוב בדף הנחיות מס' 3, מתברר שעוד לא הכל נעשה...

2. בניית הדמיית הלוויין באקסל – סגירת חוג

בשלב זה, עדיין אין התייחסות מפורטת למפעילים.

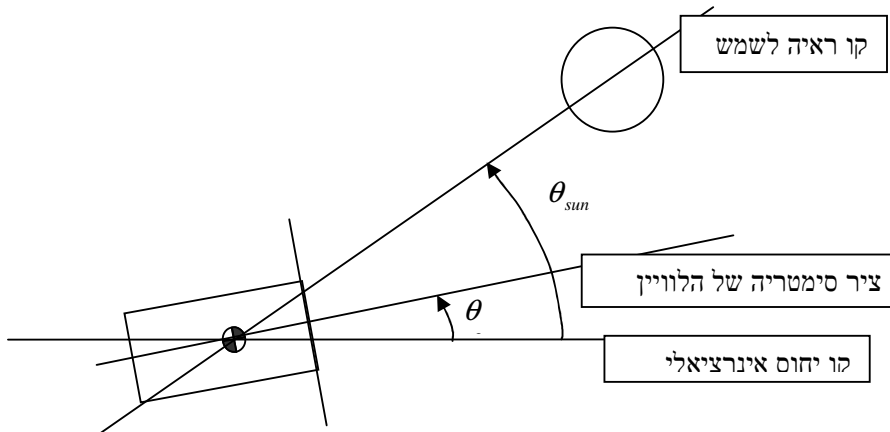
א. סמנו בתרשים הגאומטריה את  $\alpha_{sun}$ . זווית זו נקראת "שגיאת החוג".

ב. בנו הדמיית אקסל לפי תרשים המלבנים שבהמשך. אפשר להתקשר אליי, אם עוד לא הבנתם מה לעשות.

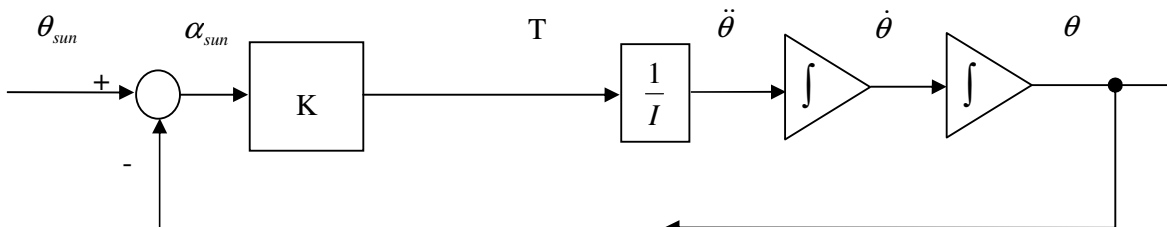
יש לזכור שאם נותנים את המומנט T בניוטון כפול מטר, ואת מומנט האינרציה בקילוגרם כפול מטר בריבוע, התאוצה הזוויתית מתקבלת ברדיאנים לשנייה בריבוע.

ג. הניחו זווית שמש מסויימת, שחקו עם ההגבר K ובדקו את השפעתו על הזווית המתקבלת.

ד. שלחו אליי את הקובץ שבניתם!



בהצלחה,  
נתנאל



## מיזם לוויין זעיר – דף הנחיות מס' 5

לתלמידים מתן, מיכל, אבי וליאור, שלום.

1. כללי

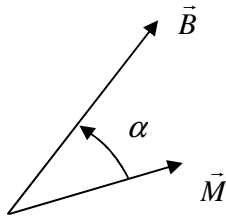
את הגיליון הזה יש לבצע במקביל עם גיליון 4.

## הקדמה כללית:

הנתון מהיצרן הוא:

The torque will produce a linear dipole of up to  $0.5 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ .

נשתמש בסימנים הבאים:

גודל שדה מגנטי של כדור הארץ, בגובה הנתון  $B$  [Tesla] earth's magnetic fieldדיפול מגנטי הנוצר ע"י סליל  $M$  [ $\text{A}\cdot\text{m}^2$ ] magnetic dipole produced by torque-rod coil  
המגנטוטורקרצמד כוחות (מומנט) של הבקרה  $T$  [ $\text{N}\cdot\text{m}$ ] control torqueבמקרה המישורי שלנו,  $B$  ו- $M$  הם וקטורים על המישור. הצמד מחושב לפי:

$$T = M \cdot B \cdot \sin \alpha$$

לפי התרשים:

הזווית  $\alpha$  נמדדת מ- $M$  ל- $B$ . כיוון הצמד שנוצר הוא הכיוון הזה.

2. חישוב צמד המומנטים שמפיק המגנטוטורקר

א. מצא (באנציקלופדיה) נוסחה לחישוב  $B$  מידיעת גובה מסלול הלוויין.ב. הכן גיליון אקסל שיכלול את הנוסחה שמצאת בסעיף הקודם, וגם נוסחת הצמד  $T$  המובאית לעיל. שים לב שבקובץ אקסל חישובי SIN הם ביחידות רדיאן!

ג. מהו צמד המומנטים המרבי שניתן להפיק מהמגנטוטורקר שלנו, בגובה 500 ק"מ?

ד. מהו המומנט המתקבל באותו הגובה כשוקטורים  $B$  ו- $M$  נמצאים מסובבים ב-30 מעלות זה לזה?

3. עדכון חישובי התנועה הזוויתית שבדף הנחיות 3, עם המומנט המרבי שנמצא כאן.

קח, לצורך העניין,  $\alpha = 90^\circ$ . כמה זמן לוקח ללוויין להסתובב סביב צירו ב- $\Delta\theta = 20^\circ$ ?חזקו ואמצו!  
נתנאל

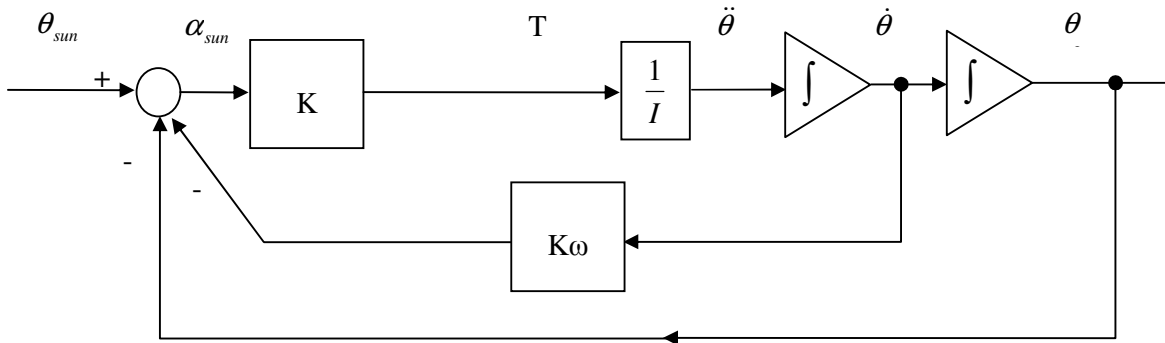
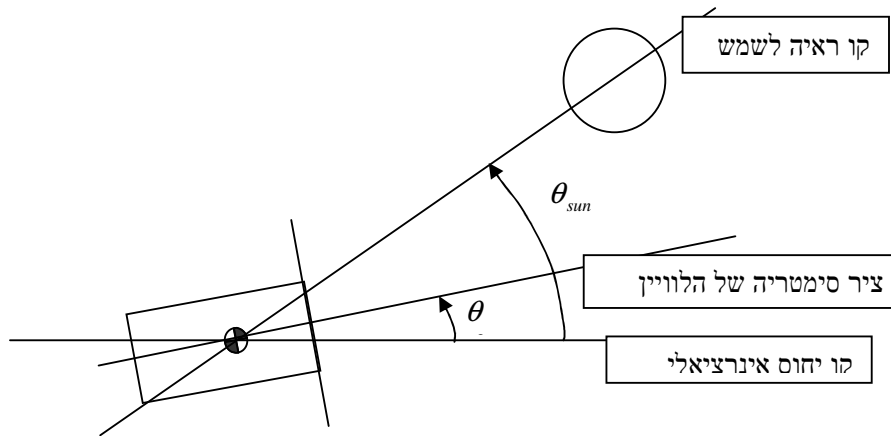
## מיזם לוויין זעיר – דף הנחיות מס' 6

לתלמיד מתן שלום.

1. בהמשך לדף הנחיות 4

הסימולציה שהכנת בהתאם לדף 4 הביאה לתנודות מחזוריות. יש לרסן תנודות אלה. אחת הדרכים המועדפות לעשות זאת היא ע"י "משוב קצב" המכונה גם "משוב נגזרת". מדובר במדידת המהירות הזוויתית של גוף הלוויין ביחס למערכת ייחוס אינרציאלית. מדידה זו נותנת את קצב שינוי הזווית, ומנצלים נתון זה כדי לווסת בהתאם את הפקודה לחוג.

בתרשים המלבנים שבהמשך, הוספתי את המשוב הנ"ל.



א. עליך לעדכן את הסימולציה כדי שהיא תכלול משוב נגזרת, לפי התרשים הנ"ל.

ב. עליך לבחון את השפעתם של ערכים שונים של הגבר משוב הנגזרת  $K\omega$ .

בהצלחה!  
נתנאל

# יומן פגישות:

מספר פגישה: 1.

תאריך: 20.9.07

תוכן הפגישה:

פגישה ראשונה של חברי הקבוצה עם המנחה, אלי כהן.  
בפגישה הצגנו בפניו לראשונה את רעיונותינו לפרויקט:

1. צמיד רטט. הבעיה:

בעת צלצול בדלת או בטלפון, חרשים לא מסוגלים להבחין בו.

הצעת פתרון:

צמיד רטט-אור אשר אותו יענדו החרשים, שיהיה מקושר לדלת ולטלפון (או רק לאחד מהם) באמצעות אותות שיקלוט ממכשיר המחובר אליהם, ויהבהב וירטוט בעת הצלצול. במידה והצמיד יהיה מקושר לשניהם, תדלק נורה אחרת ויהיה רטט שונה לכל אחד מהם.

2. גז-טיימר. הבעיה:

קיימים אנשים רבים אשר שוכחים את גז הבישול דולק בתום הבישול, דבר שמלבד הפגיעה במזון המתבשל(במידה ואף הוא נשכח על הגז) עלול להוות סכנה ממשית (פיצוץ).

הצעת פתרון:

מכשיר שיהיה מורכב לגז ויהיה ניתן לכוונו מראש לזמן מוגבל, וכך נוכל להיות בטוחים שבתום פרק הזמן יסגור המכשיר את הגז.

3. מתריע גז. הבעיה:

אחד הגורמים המסכנים ביותר בבתינו הוא הגז הבישול. כשזה דולף, קיימת סכנת חיים ממשית לדיירי הבית ולשכנים.

הצעת פתרון:

מכשיר חשמלי אשר יורכב בסביבת הגז ויזהר דליפה. במקרה של דליפה יתריע המכשיר או גם יסגור את צינורות הגז הראשיים המגיעים לבית אשר נמצאים מתחת לפלטת השיש.

4. רמזקול. הבעיה:

ברמזורים רבים במעברי חצייה בארץ לא קיימים אמצעי איתות לחרשים.

הצעת פתרון:

אוזנייה אשר תקלוט תדרים ממכשירים שיורכבו על הרמזורים, ולפיכך תורה לעוור מתי ניתן לחצות ומתי לא.

5. רמפת אוטובוס. הבעיה:

נכים המשתמשים בכסא גלגלים מתקשים לעלות לאוטובוס. כיום קיימים אמנם אוטובוסים נמוכים בעלי רמפה, אך היא ידנית ויוצרת סרבול בעת השימוש.

הצעת פתרון:

רמפה אוטומטית שתישלף ע"י הנהג, בלחיצת כפתור.

החלטנו לחקור ולהתמקד ברעיון הראשון והשני משום שהצרכים עליהם הם עונים חשובים יותר מהצרכים של שאר הרעיונות בעינינו. בנוסף, אנו שוקלים פרויקט עם "העמותה הישראלית ללוויינות זעירה" אשר יהיה מיזם תלמידים עבור הלוויין הזעיר הישראלי הראשון.

## מספר פגישה: 2.

תאריך: 19.10.07

## תוכן הפגישה:

פגישה עם היועץ המלווה נתנאל לוי, מהנדס אוויר-חלל בתעשייה האווירית ומורה בבית ספר.

נפגשנו עם נתנאל לאחר שביקשנו לשמוע מספר רעיונות לפרויקט שיכללו את הנושא בו הוא מתמחה, אוויר-חלל. בחרנו לבחון גם את תחום זה מתוך התעניינות בו, מתוך רצון לתרום לקידום בו ומתוך רצון לשלב בפרויקט גם את נושא החלל אשר אף הוא דומיננטי בבית-ספרינו אורט תעופה וחלל.

נתנאל הציג בפנינו כמה וכמה רעיונות לפרויקטים:

1. שיפור מזל"ט – מזל"ט בר אפשרות נסיעת קרקע או מזל"ט שעליו יורכב רובוט. המזל"ט יוטס למקום המיועד שממנו נדרש מידע מסוים וינחת בעצמו או ינחת את הרובוט. במידה והמזל"ט ינחת הוא ישלף גלגלים או כלי אחר לנסיעת קרקע, יתאים את צורתו אליה, ויוכל לנוע בשטח ולשדר לתחנה מסויימת מידע כגון תצלומים, הקלטות וכדומה. במידה וינחת רובוט, הוא יהפוך לעצמאי, ינוע בשטח, ילקט מידע ויעבירו היישר למזל"ט(שיעביר לתחנה נוספת) או למקום אחר.
2. מיזם בשיתוף העמותה לננו לויינות: השוואת בין השעון האטומי של לוויין לבין ה-GPS. נתנאל הזכיר מיזם זה שהוא אחת הפעילויות המתוכננות להתבצע ע"י העמותה, ושחבריה העלו את האפשרות שהיא תיעשה אצלנו. המיזם נראה ממוקד מידי ופחות מעניין מאשר ההצעה מספר 3.
3. מיזם בשיתוף העמותה לננו לויינות: אלגוריתם ללוויין זעיר (ננו-לוויין) אשר יאפשר הפקת אנרגיה חשמלית מרבית של הפנלים הסולריים של הלוויין מקרני השמש. זאת באמצעות מציאת כוון השמש והכוונת הפנלים הסולריים לעברו ע"י הטיית הלוויין. הוחלט כי בינתיים זהו נושא הפרויקט ובפגישה נתנאל הסביר לנו את התחומים והנושאים העיקריים בפרויקט לעת עתה:
  - חשיבות נכונות תוכנה למערכת לויינית - בשיגור לוויין שמים דגש על יעילות הלוויין תוך הבנה כי לא ניתן לתקנו בהמשך בעיקר בשל העלות הכספית, על כן מערכותיו צריכות להיבדק בעזרת הדמיות.
  - רקע כללי של חומר קיים בנושא הרצוי שישתלב בפרויקט.
  - הנחיות להמשך הדרך והתחלת איסוף חומר רקע (מצורפות 2 דפי ההנחיות שנכתבו עד כאן).
  - לוח זמנים של העמותה ותאריך היעד -העמותה מצפה ממנו להגיש את האלגוריתם עד מרץ 2008. כמובן שגם אם לא נעמוד בזמנים, נמשיך לעבוד עליו במלוא המרץ.
  - הצעת פתרון אפשרית – שימוש באלגוריתם תוך ניצול אופן פעילות המגנטוטורקרים לצורך כיוון הלוויין ושימוש בשדה המגנטי של כדור הארץ.

### מספר פגישה: 3.

תאריך: 13.12.07

### תוכן הפגישה:

פגישה עם היועץ אלי כהן, מורה ומנהל המגמה "מדעית הנדסית", במסגרת שעה קבועה בבית ספר.

בתום שבידת המורים שנערכה כחודשיים, נפגשנו עם אלי כהן, במסגרת השעה הקבועה במערכת השעות בבית ספר. לאחר שכל אחד מחברי הקבוצה התבקש לבחור נושא מרשימת הנושאים אשר נתנאל הציג בפנינו בפגישה הקודמת, הבאנו את הסיכומים בכדי שאלי כהן יעיין בהם וייתן עצות/המלצות ויכוון אותנו לקראת השלבים הבאים. מתוך הסתכלותו של אלי כהן בסיכומים הוא הדריך אותנו לגבי הטעויות אשר היו בכתבת הסיכומים כגון:

1. כאשר מכינים את הסיכומים, הדבר הכי חשוב הוא לא לעשות את פעולת "העתק-הדבק", גם אם אין אפשרות לסכם יותר ממה שסוכם מהמקור מידע עלינו לקרוא היטב את המידע שמוצג בפנינו ולסכם אותו במילים שלנו בכדי שיהיו לסיכומים פן אישי, ככה זה יהיה מובן יותר ואכן ייראה בפני הקורא שהבנו את הנושא שחקרנו.
2. כאשר אנו מביאים מקור מידע מהאינטרנט חשוב שיהיו כמה שיותר מקורות ולא רק ממקור אחד מרכזי. אלי כהן הביא לנו דפי הכנה – שלב ב' הכנה להצעת עבודת גמר ואישורה. הוא עבר איתנו על דפי ההנחיה והסביר לנו איך הצעת הפרויקט אמורה להיראות, מה אמור להיכלל בה ואיך הצעת הפרויקט ופרוטוקול עבודת הגמר צריכים להיכתב (מבחינת כתיבה תקנית של גוף העבודה, הנושאים השונים, ציון ביבליוגרפיה וכדומה).

במקביל נשלח החומר שכל אחד מחברי הקבוצה חקר גם לנתנאל, היועץ המלווה, בכדי שיאמוד את מצבנו וייתן הערות והארות על מה שעשינו עד כה, בנוסף להערותיו של אלי. כמו כן נבחנו פגישה עם ראש העמותה ללוויינות זעירה ואנשים נוספים מהתחום בתעשייה האווירית ביהוד "מבת" יום שלישי, 18.12.07, לשם איסוף מידע חיוני לגבי הפרויקט (מטרתו, דברים הקיימים בעמותה, תאום צפיות וכדומה), אך זו נדחתה מפני שהני"ל לא יכלו לקיימה. בנוסף נקבעה פגישה עם נתנאל ביום שישי, 28.12.07, לצורך באור נוסחאות בסיסיות בתנועה סיבובית, וכן בירור מידע חיוני לצורך הצעת הפרויקט לגבי העמותה הישראלית ללוויינות זעירה, עימה אנו עובדים בשיתוף.

#### **מספר פגישה: 4.**

**תאריך:** 28.12.07

#### **תוכן הפגישה:**

פגישה עם היועץ המלווה, נתנאל לוי, מורה במגמה "מדעית הנדסית" ומהנדס בתעשייה האווירית, בבית הספר.

נפגשו עם נתנאל ועברנו על מספר נושאים. נתנאל חזר איתנו על פעולת הכוון הלווין באופן כללי ובאיזה מפעילים העמותה רוצה ששיתמש. הוזכרו פעולות שהלווין יצטרך לבצע כדי שיתכוון לכיוון השמש. הלווין יצטרך לנוע בתנועה זוויתית לכיוון השמש, לכן בפגישה עם נתנאל הוא הציג בפנינו את האנלוגיה בין התנועה הזוויתית לתנועה הקווית, ובעזרתה כיצד ניתן לפתח נוסחאות הקשורות למדידת התנועה הזוויתית.

בנוסף נתנאל לימד אותנו כיצד להשתמש בפעולות בסיסיות בתוכנת "אקסל", ביניהן בניית פיתוח נוסחאות וחישובי רצף ובניית גרפים.

אנו שוקלים להפוך פגישות אלה לקבועות, על מנת לתרום לפיתוח הפרויקט וליצור הדמיות שיבססו את הפרויקט ב"אקסל".

נתנאל הוסיף דף הנחיות לפגישה הבאנה אליה נצטרך לפתח מספר נוסחאות ולחקור נושאים נוספים (ראה דף הנחיות מספר 3).

נקבעה פגישה ב"מב"ת", התעשייה האווירית ביהוד, ב - 10.1.08 בהשתתפות אלי המנחה, נתנאל היועץ המלווה, דר' רז טמיר ממפעל מב"ת (יו"ר), דר' אנה הלר מבית ספר להנדסאים – הרצליה, דר' דניאל פורטנוי ממפעל מב"ת (חבר מייסד), יהונתן ויינטראוב העושה את שרותו הצבאי במב"ת, (בהיותו תלמיד תיכון זכה בפרס על מיזם הכוון לוויין שקידם תחת הנחיית דר' הלר).

## **מספר פגישה: 5.**

### **תאריך: 10.1.08**

#### **תוכן הפגישה:**

פגישה ב"מבתי", בשעות הערב, במפעל התעשייה האווירית ביהוד.

בפגישה השתתפו אלי כהן המנחה, נתנאל לוי היועץ המלווה, דר' רז טמיר ממפעל מבתי (יו"ר), דר' אנה הלר מבית ספר להנדסאים – הרצליה, דר' דניאל פורטנוי ממפעל מבתי (חבר מייסד), יהונתן ויינטראוב העושה את שרותו הצבאי במבתי, (בהיותו תלמיד תיכון זכה במקום שני בארץ ונשלח לייצגנו ברוסייה על מיזם הכוון לווין שקידם תחת הנחיית דר' הלר).

מטרת הפגישה הייתה תיאום ציפיות, שנוכל להבין מה בעצם מטרתנו המדויקת על פי העמותה ולמה נבחר דווקא הפתרון אותו אנו עומדים לפתח.

הפגישה נפתחה עם הצגתנו בפני הנוכחים. סיפרנו קצת על בית ספרנו, על מסלול השוחרות, מגמתנו והפרויקט. סיפרנו כי הפרויקט צריך להיות מאושר ע"י משרד החינוך ויו"ר העמותה הציע שגם העמותה תיתן חוות דעת מקצועית על דוח הפרויקט.

יו"ר העמותה החל בדברי פתיחה לגבי העמותה וצורכה. צוין כי נשתף פעולה לפיתוח מערכת בקרת הכוון ללוויין הזעיר הישראלי הראשון. הוא ציין בפנינו את החיוניות של הלוויינים הזעירים בעולם הלוויינים אשר הצורך העיקרי בהם הוא הוכחת בניסוי רכיבים שאין להם ניסיון קודם בחלל.

**מספר פגישה: 6**  
**תאריך פגישה: 12.9.08**

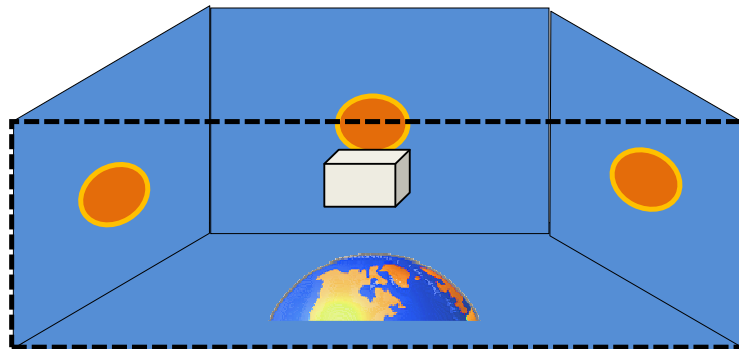
**תוכן הפגישה:**

עם תחילת שנת הלימודים נפגשנו עם אלי כהן, המנחה, ונתנאל לוי, המלווה, בכדי לקדם את הפרויקט ולקבוע צעדים לזירוז תהליכים בעבודה נכונה וברורה יותר לעשיית הפרויקט על הצד הטוב ביותר.

בפגישה שוחחנו על אופן הפעולה הייחודי לפרויקט ועל כך שאין בו מצב של "ללכת על בטוח" ואנחנו צריכים להיות מעט פחות פדנטיים. דיברנו על הדמיית האקסל והמדגים אשר יראה את פעולת מערכת בקרת ההכוון ללוויין הזעיר. העלנו שלושה רעיונות אפשריים למדגים:

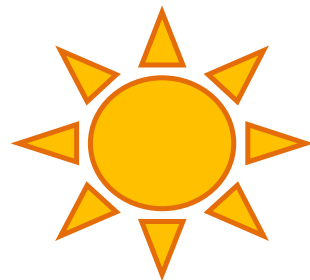
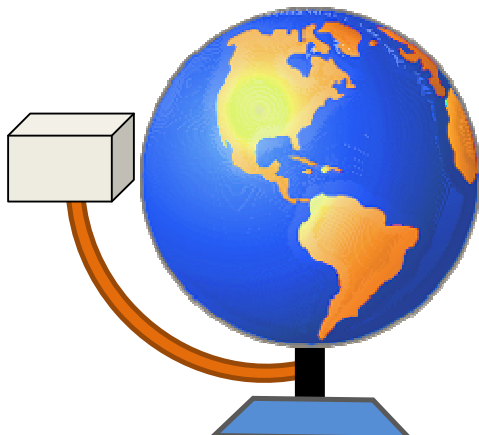
**רעיון א' - פרגוד:**

נשתמש בפרגוד ליצירת "חלל מדומה" שבו שלוש "שמשות", נורות הנדלקות בהתאם ללחצן בו יבחר המשתמש. הלוויין, שיהיה תלוי באוויר או נתמך מזרוע צדדית, יתכוונן כך שפנליו הסולריים יצביעו אל עבר אור "השמש" הנדלקת.



**רעיון ב' - גלובוס:**

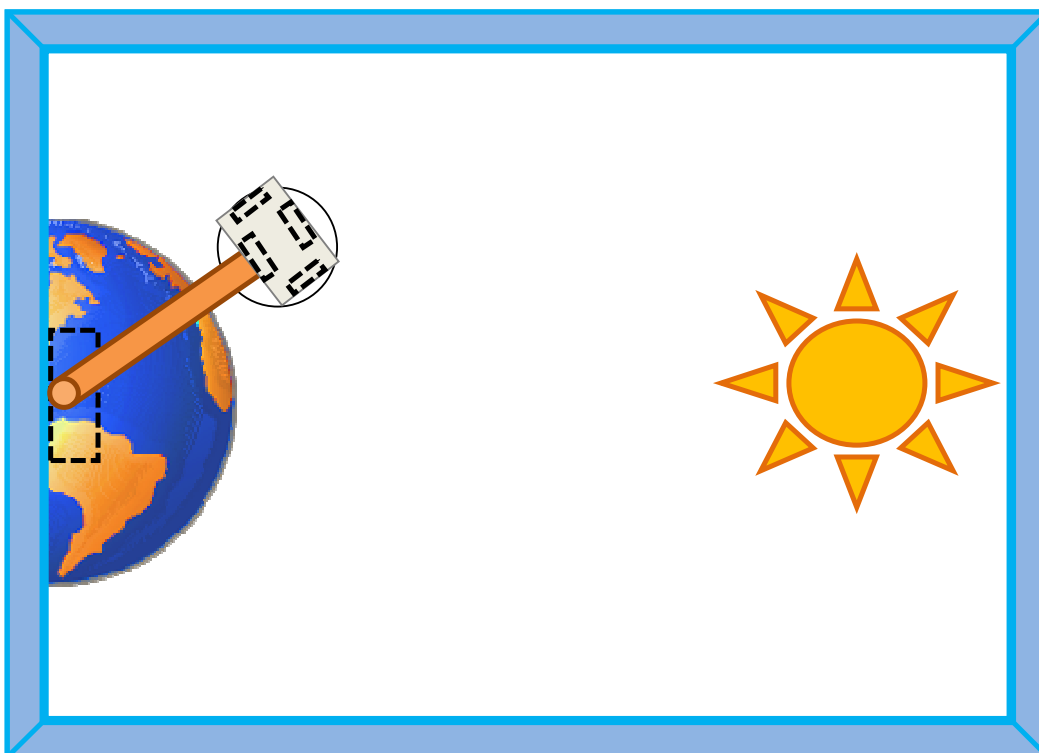
לרעיון זה דרוש גלובוס בעל רגל גבוהה (ציר) אשר מחוברת למוט מעוגל שבקצהו יחובר הלוויין. המוט יסתובב סביב הציר והגלובוס, ובכך ידמה את תנועת הלוויין. ליד הגלובוס תונח "שמש" שאליה יכוון הלוויין את החלק שיקבע כפנלים סולריים, כיוון שיתבצע כל העת.



**רעיון ג' - ויטרינה:**

ניצור חצי כדור שידמה את כדור הארץ, במרכזו יימצא סליל או מגנט חזק ביותר שיצור שדה מגנטי מדומה.

על הלוויין שיחובר לציר שיחובר למרכז כדור הארץ יהיו שלושה מגנטוטורקרים שיזדמו את פעולת ההכוון בצורה הכי מדויקת והכי דומה למה שיהיה בתוכנית המקורית.



בשלושת הרעיונות יושמו בתוך הלוויין המדומה מגנטוטורקרים ומגנטומטר (החיישן והמפעילים האוטנטיים בהם נשתמש) אשר יפעלו בהתאם למגנט גדול או סליל שנמקם בסביבה אשר ידמה את השדה המגנטי של כדור הארץ וכך נתקרב לתנאי אמת. "ראש הלוויין" במדגים ימוקם מחוץ לגוף הלוויין, מחשב חיצוני עם ממשק USB, היות ולא נוכל להשיג בקר אמיתי. כך המחשב יוכל להראות נתונים בזמן אמת למשתמש.

#### סיכום:

לקראת סיום הפגישה הוחלט לקחת את הרעיונות שהועלו וליצור רעיון אחד משלב במגמה ליצור מדגים הקרוב כמה שניתן ליישום המערכת בלוויין האמיתי.

פגישה מספר : 7

תאריך : 12.12.08

תוכן הפגישה :

פגישה עם רם צמח, בוגר בית הספר ומגמה המדעית הנדסית.

ביום שישי נקבעה פגישה לשם ביצוע מספר ניסויים :

- ניסוי על הסליל האלקטרומגנטי שרם בנה בעצמו, לבדוק כמה מתח נצטרך וכמה זרם נצטרך כדי ליצור שדה מגנטי חזק ובכך לסובב את הלוויין לכיוון הנכון.
  - ניסוי של השוואת מתחים. המטרה הייתה ליצור גרף של זווית ביחס למתח המתקבל על הסליל.
- תוצאות הניסויים :

- כאשר נתבקשנו לבדוק כמה מתח וכמה זרם נצטרך בכדי ליצור שדה מגנטי חזק ובכך לסובב את הסליל נתקלנו בכמה בעיות. בתחילת הניסוי הסליל לא הסתובב כמו שצריך בגלל שהתנגדותו קטנה היה עליו מתח חלש וזרם חלש ולכן השדה המגנטי שנוצר היה קטן וחלש יחסית לשדה הרצוי ולא נוצר הסיבוב הרצוי. לאחר ניסיון כושל עם הסליל של רם, חזרנו לסליל המקורי של מהרן (עמית של נתנאל מהתעשייה האווירית) שהוא בעל התנגדות גדולה יותר, ועליו עשינו את אותו ניסוי, להפתעתנו, סליל זה הצליח להסתובב וליצור שדה מגנטי מספק, כאשר היה עליו זרם של 3 אמפר, ומכך הסקנו שעלינו ליצור סליל אלקטרומגנטי עם התנגדות יותר גדולה מהסליל שרם הרכיב, וכעת רם מרכיב את הסליל וטרם קבענו פגישה לניסוי נוסף.
- ניסוי זה לא החל, בעקבות כשל של הניסוי הקודם. ניסוי זה יכול להתקיים רק לאחר הרכבת האלקטרומגנט שיהיה מספיק חזק.