

סקירה של לוויינים קטנים וזעירים ממבט של מהנדסי תקשורת רדיו

פרופסור יעקב גוון (SCE) ואירינה ברונפמן (BGU)

1. הקדמה

בתחילת המאה ה-17 גילה קפלר כי כוכבי מערכת השמש הינם לוויינים טבעיים סביב השמש וקבע את החוקיות במסלולים שלהם. לפני זה רוב האנושות חשב כי כדור הארץ שטוח, נייח והינו מרכז היקום. מדענים שחשבו אחרת, כגון גלילאו, אולצו להודות בכך וידועה אמרתו "בכל זאת נוע תנוע". אולם רק בשנת 1957 שולח הלוויין המלאכותי הראשון ע"י בני אדם ה-"SPUTNIK" של ברית המועצות. הלוויין שוגר מכדור הארץ למסלול נמוך (LEO - Low Earth Orbit), וזאת הודות להתקדמות בפיתוחי טילים בעיקר בתקופת מלחמת העולם השנייה. בשנת 1963 שולח הלוויין הנייח הגאוסטציונרי (GEO) הראשון לתקשורת רדיו ע"י ארה"ב בזכות רעיונו של המדען האנגלי ארתור קלארק בשנת 1945 שהסתמך על חוק קפלר השלישי הקובע כי קיים יחס קבוע בין רבוע זמן המחזור של לוויין למרחק בחזקת שלוש ממנו למרכז כדור הארץ. חשוב לציין כי נושא הלוויינים הינו רב תחומי ומקיף מקצועות רבים. אבל תחום תקשורת הלוויינים הוא בין החשובים ביותר כי ללא תקשורת רדיו ללוויין אין כל ערך.

מסלולי הלוויינים העיקריים, כפי שמוצג באיור 1, הינם LEO, MEO (Medium Earth Orbit), GEO (Geostationary Earth Orbit) - לוויין במסלול GEO מוצג באיור 2. גובה המסלולים העיקריים הינם:

2. גובה המסלולים העיקריים הינם: (300-2000) ק"מ עבור מסלולי ה-LEO, (4000-8000) ק"מ ו-20000 ק"מ עבור מסלולי ה-MEO, 36000 ק"מ במסלול מעל לקו המשווה עבור מסלול ה-GEO. כיום פועלים במסלולים ה מוזכרים כמה אלפי לווייני LEO, יותר מ-400 לווייני GEO ומספר עשרות של לווייני MEO. מסלולים אלה הינם השימושיים ביותר, כאשר כמעט כל הלוויינים הקטנים והזעירים הינם במסלול LEO (ראה טבלה 1). בעתיד ישתמשו גם בלוויינים במסלולים LPO (Low Planet Orbit) מסביב לירח ולכוכבי לכת שונים.

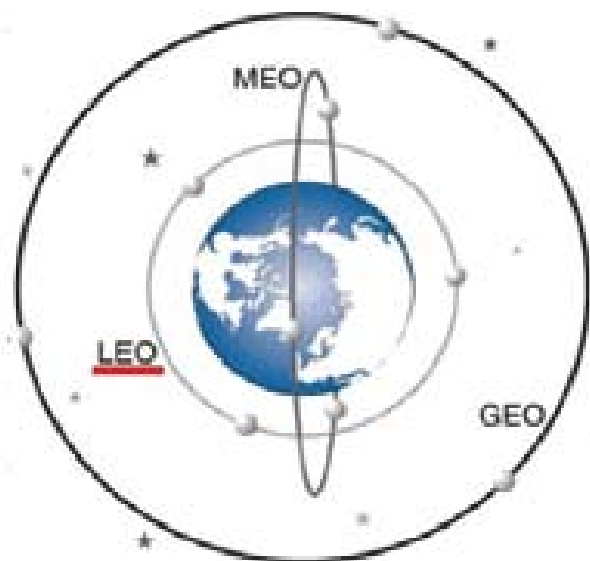
3. סיווגי הלוויינים לפי הגודל, המשקל והמחיר ואופניהם העיקריים

טבלה 1: סיווגי לוויינים לפי הגודל, המשקל והמחיר

Type	Weight	Sat. Price In \$M	Launch Price In \$M	Insurance Price In \$M	Total Price In \$M
Mega-Sat.	>5T	500	150	80	730
Large-Sat.	(2-5)T	200	100	50	350
Sat.	(1-2)T	150	80	40	270
Mini-Sat.	(100-1000)kg	100	40	25	165
Micro-Sat.	(10-100)kg	0.2-20	0-10	0-5	0.2-35
Nano-Sat.	(1-10)kg	0.1-5	0-2	0-1	0.1-8
Pico-Sat.	(0.1-1)kg	0.05-2	0-0.5	0-0.4	0.05-2.9
Femto-Sat.	<0.1kg				

עלויות הלוויין גדלות בדרך כלל עם משקלו, אבל משכורת המומחים ובדיקות אמינות הינם גם מרכיבים חשובים במחיר הלוויין. לכן עבור לוויינים קטנים יש שני סוגי מחירים נפרדים ללוויינים של חברות מקצועיות ושל סטודנטים.

2. מסלולי הלוויינים העיקריים



איור 1: מסלולי הלוויינים העיקריים

3.1 לוויינים גדולים מאוד Mega-Sat

Mega Sat.	Launch date	Manufacturer	Weight (T)	Power (kW)	Reflector diameter	Operation Zone
Sky Terra	11.10	Boeing	5.40	13	22m	North America
Thuraya3	1.08	Boeing	5.25	11	17m	Middle- East
Terra-star-1 *Bankrupt	7.09	Loral-Space	6.90	15	18m	North America

טבלה 2: אפייני לווייני Mega-Sat טיפוסיים

לווייני ה-Mega-Sat מאוד יקרים במחיר ובשילוח, אבל טובים לתקשורת ניידת וסלולארית ל-G3 ולדור ה-G4. כל הלוויינים בטבלה 2 הינם לווייני תקשורת במסלול GEO. הלוויינים הכבדים ביותר הקיימים הם תחנת החלל ISS, השוקלת כ-T520 בגובה של 350 ק"מ והלוויין KH12 של ארה"ב גם במסלול LEO למטרות תצפית צבאית ששוקל כ-T12.

3.2 לוויינים בינוניים

Sat.	Launch date	Manufacturer	Weight (kg)	Frequency Bands	Operation Zone
Intelsat-902	8.01	Loral-Space	1970	C; Ku	GEO America-Europe
Amos-2	12.03	IAI	970	Ku	GEO Europe, US, Middle-east
Iridium-2	2.02	Thales-Alenia	700	C; Ku; Ka	LEO Worldwide 66 satellites. H=785 km

טבלה 3: אפייני לוויינים בינוניים טיפוסיים

כל הלוויינים בטבלה 3 הינם לווייני תקשורת. בתכנון לווייני עמוס החליטו להקטין את המשקל ומחירי השילוח וגם לשמור על אמינות גבוהה. עמוס-1 שולח במאי 1996 ונמכר לארגון הלוויינים הבינלאומי בשנת 2010 בשם INTELSAT-26. לוויין עמוס-2 שומר על אמינות ואורך חיים גבוהים ועדיין פעיל. לווייני אירידיום הינם מן הדור השני.

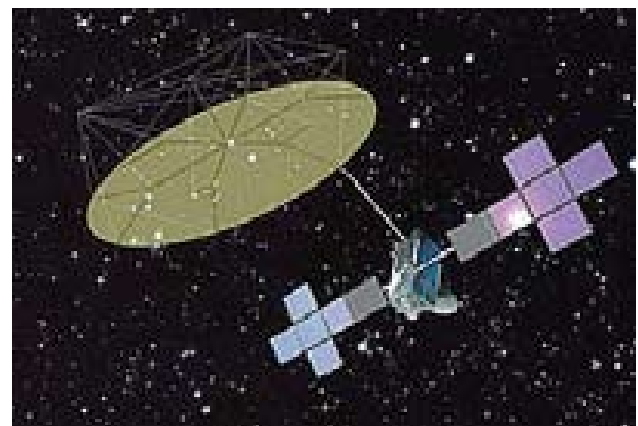
3.3 אפייני לוויינים קטנים Micro-Sat ו-Mini-Sat

Micro-Sat.	First launch	Manufacturer	Weight (kg)	Height (km)	Orbit	Function
ORBCOMM Small LEO	1998	Boeing	80	800	LEO Circular (35 sat.)	Communication Narrow band SMS
OFEK 5	5.02	IAI	300	370-600	LEO Elliptic	Intelligence, Remote sensing
GURWIN/	7.98	TECHNION, Haifa	60	815	LEO	Radio-Amateur Narrow band Communication

טבלה 4: אפייני לוויינים קטנים טיפוסיים



איור 3: לוויין Amos-2 במסלול GEO



איור 2: לוויין גדול מאוד Terra-Star-1

6. פיתוח ובניית לוויינים קטנים וזעירים ע"י חובבי רדיו

ארגון הלוויינים של חובבי הרדיו OSCAR (Orbital Satellites Carrying Amateurs Radio) הוקם בשנת 1960 ונקרא גם AMSAT. הארגון שלח לוויין LEO לא ממשלתי ראשון כבר בדצמבר 1961. הלוויין הינו Micro-Sat בשם OSCAR 10 ופעל רק 3 שבועות בתדר 145MHz ושידר רק אותות מורס. חלה התקדמות נכרת ובנובמבר 1974 חובבי הרדיו כבר שלחו לוויין OSCAR 7 במשקל 27 ק"ג. הלוויין נשלח לגובה של 1450 ק"מ ופעל במשך 3 שנים למטרות תקשורת דיבור בתדרים 145MHz ו-436MHz. במרץ 1978 הארגון שלח לוויין OSCAR 9 שמשקלו גם כן היה 27 ק"ג. הלוויין שולח למסלול אליפטי בגבהים בין 897 ל-910 ק"מ ושימש למטרות תקשורת דיבור, עקיבה וטלמטריה. ביולי 1978 שולח מהבסיס הרוסי Baikonur לוויין OSCAR 32 שנקרא גם על שם התורם (GURWIN) ונבנה בטכניון בחיפה. צורת הלוויין המוצגת באיור 4 הינה קובייה בעלת צלע של 44.5 ס"מ, משקלו 60 ק"ג ושוגר לגובה של 815 ק"מ. הלוויין הקטן OSCAR 32 פעל יותר מ-10 שנים בתדרים של 145MHz, 435MHz ו-1270MHz למטרות תקשורת עם צריכת הספק של 20W בלבד. באיור 4 מוצגים תאי השמש בכחול ואנטנת התיל הארוכה ל-VHF והקצרות ל-UHF.



איור 4: לוויין (GURWIN Oscar32)

בשנת 2002 הארגון שלח לוויין בשם OSCAR 50, אשר הינו ננו-לוויין שנבנה בסעודיה ומאוד מיוכלל גם בצורת קובייה במשקל של 10 ק"ג. בפברואר 2012 הארגון שלח לוויין OSCAR 72 שנבנה ע"י סטודנטים הונגריים. הלוויין הזה הינו פיקו-לוויין וגם בעל צורת קובייה Cube-Sat. יש לציין כי חלק ניכר מלווייני החובבים נכשל בשילוח או בהפעלה. חשוב לציין כי כל תחנת קרקע נמצאת בקשר רציף עם לוויין ה-LEO פחות מ-15 דקות כלומר כ-97% מן הזמן לא נמצאת בקשר עם אותו לוויין. לכן יש חשיבות ברשת תחנות קרקע לתקשורת רדיו הפועלות בתאום ל קשר ושליטה על הלוויינים לאורך זמן.

כל הלוויינים הקטנים שבטבלה 4 הינם במסלול LEO והתקשורת שלהם מוגבלת לרוחב סרט תדרים נמוך. חוק MOORE, החוזה הכפלת צפיפות האלמנטים על מעגל מוכלל בערך כל 18 עד 24 חודשים, מאפשר מזעור מערכות ובניית לוויינים יותר ויותר קטנים, יעילים ובעלות נמוכה. אבל קיימת הגבלה בביצועים, באורך חיים וברוחב סרט תדרים עבור לוויינים קטנים, כי יש מקום מצומצם לתאי שמש וקשה לבצע יתירות. בהמשך המאמר נדון רק בלוויינים קטנים וזעירים.

4. לוויינים קטנים וזעירים: יתרונות, חסרונות ויישומים עיקריים

יתרונות עיקריים	חסרונות
מחירים נמוכים יותר	Junk Space (זבל בחלל) - יותר פסולת מזיקה
בנייה והחלפה מהירים ופשוטים	הגבלה בהספק החשמלי הפנוי ובאפשרות יתירות
שילוח פשוט, זול יותר ועם פחות זיהום	פיקוח מופחת עבור לוויינים שנבנים ע"י סטודנטים שגורם לרעשים והפרעות הדדיות
משיכה והכשרת כוח אדם מקצועי בתחומי החלל	

טבלה 5: יתרונות וחסרונות של לוויינים קטנים וזעירים

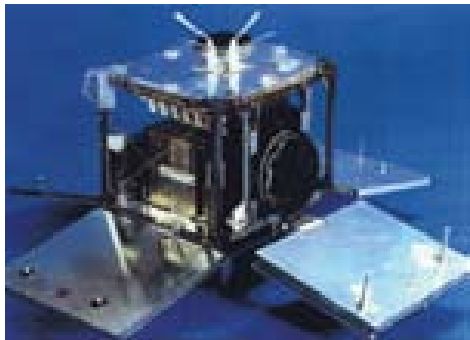
היישומים העיקריים של לוויינים קטנים וזעירים: תקשורת רדיו באיכות וברוחב סרט תדרים מוגבלים, כדוגמת תקשורת בין מכונות M2M, מערכות זיהוי אוטומטיות (AIS), חיזוי מזג אוויר, חישה למרחוק וחקר כדור הארץ והאטמוספירה, מחקר מדעי, פעולה של כמה לוויינים באשכול (Cluster) באמצאות קשר אלחוטי או כבל Tether, שימושים צבאיים וביטחוניים (בעיקר ISR), פעולות הצלה, ניסוי מערכות וטכניקות חלל חדשות, פיקוח והגנה על חלליות גדולות יותר והכשרת כוח אדם מקצועי ומדעי.

5. התדרים השימושיים עבור לוויינים קטנים וזעירים

לווייני LEO הקטנים והזעירים משתמשים לרוב בתחומי תדרים ה-VHF (Very High Frequency), מ-300-30 MHz, הנמוכים יותר מתדרים ה-UHF (Ultra High Frequency) מ-3000-300 MHz וה-SHF (Super High frequency), אשר מקובלים עבור לוויינים גדולים יותר. אבל ידוע כי תדרים ה-VHF פגיעים בשכבות היונספרה המצויות בגבהים של (400-50) ק"מ, בגלל אפקט FARADAY הרבה יותר מאשר תדרים גבוהים יותר. אפקט זה גורם לעיוותי האות ולהחזרות בלתי רצויות אבל פחות במקרים של רוחבי סרט צרים כפי שבדרך כלל מקובל בלוויינים קטנים וזעירים. לכן הבחירה בתדרים ה-VHF אכן טובה. יתרון נוסף של תדרים ה-VHF עבור לוויינים קטנים וזעירים הינו בהפסדי פיזור הרבה יותר נמוכים מבתחומי תדרים גבוהים יותר. לכן למרות הספקי תאי שמש ושידור נמוכים יותר בלוויינים קטנים וזעירים מתאפשרים איכות קשר ויחס אות לרעש S/N טובים גם עבור תדרים ה-VHF ב-UP-LINK בין תחנת הקרקע והלוויין וחשוב במיוחד בקשר בין הלוויין לתחנת הקרקע ב-DOWN-LINK כאשר הספקי השידור יותר מוגבלים.



איור 6: לוויין Tube-Sat עם גליל מגן



איור 6.1 : לוויין זעיר Cube-Sat מחברת IOS

כיום מספר אלפים של בני נוער וסטודנטים להנדסה מכמה עשרות מדינות בעולם בונים כמה מאות לוויינים זעירים. לאחרונה בנתה חברת Nanosatsfi LLC מארה"ב שני לוויינים זעירים Ardu1 ו-Ardu2 מאוד משוכללים עם מגוון חיישנים כדי לערוך מחקרים, מדידות מרחוק והעברת תמונות לאוניברסיטות ומכוני מחקר בעלות מאוד נמוכה. שני הלוויינים הראשונים שולחו באוגוסט 2013 ע"י חללית יפנית לתחנת החלל הבין לאומית ISS ובעזרת זרוע רובוטית תוצרת יפן, הוכנסו למסלול LEO בנובמבר 2013 והחלו לשדר בתדר המוקצב לחובבי רדיו של 437.325 MHz נתונים, בעיקר מדעיים, להרבה לקוחות.

קיימות מספר שיטות לשילוח לוויינים קטנים וזעירים: שילוח בעזרת משלחים סטנדרטים מסוג Falcon1, Vega, Dnepr ועוד. משלחים אלה משמשים גם לשילוח לוויינים זעירים עם kit בתור Piggy-back. השילוחים מתבצעים בעיקר מארה"ב, אירופה, רוסיה, סין, הודו ויפן. עלות השילוח ממחיר מלא ועד חנים (טרמפ) עבור סטודנטים מסויימים. שילוח מרוכז של מספר לווייני Cube-Sat ממוסדות שונים לתחנת החלל הבינלאומית ISS ומשם ישולחו למסלול ה-LEO באמצעות זרוע רובוטית מתוצרת יפן.

7. סוגים של לוויינים קטנים וזעירים ושיטות שילוחם

קיימים 3 סוגים עיקריים של לוויינים קטנים וזעירים: לוויינים משוכללים מאוד – לוויינים אלה נבנים ע"י חברות מקצועיות מומחות, בעיקר עבור כוחות הביטחון ומספר חברות ו ארגונים חשובים; לוויינים משוכללים – לוויינים אלה נבנים ע"י מוסדות ממשלתיים וביטחוניים במיוחד ע"י ה-NASA בשיתוף עם אוניברסיטאות מובילות בתחום ההנדסה; לוויינים פשוטים – לוויינים אלה נבנים ע"י חובבי רדיו, תלמידים וסטודנטים בעיקר למטרות לימוד, תחביבים והכשרת כוח אדם מקצועי.

בשנת 1999 Stanford and Polytechnic California State University פיתחו תקן קוד פתוח הנגיש לכל דורש לבניית kit (ערכה) ושיגור של ננו-לוויינים ופיקו-לוויינים שהוזיל במידה נכרת את עלותם. הלוויין התקני נקרא Cube-Sat 1U שהינה קובייה בעלת צלע של 10 ס"מ ומשקלה בסביבות 1 ק"ג. התקן פותח גם עבור פיקו-לוויין 0.5U ועבור ננו-לוויינים 2U ו-3U כפי שמוצגים באיור 5. הוסיפו גם תקן מיוחד לתת המערכת P-Pod-Poly-Push-Out מיוחדת להכנסת לווייני ה-Cube-Sat הזעירים למסלול LEO. מכון UTIAS בטורונטו פיתח בשנת 2011 X-Pod מתקדם יותר. כיום עלות הבנייה של Cube-Sat 1U לסטודנטים הינה פחות מ-\$100k.



איור 5: לוויינים Cube-Sat – 0.5U, 2U, 3U

חברת IOS (Inter Orbital Systems) מקליפורניה פיתחה ערכה בצורת גליל הנקראת Tube-Sat עבור פיתוח ושילוח של לוויינים זעירים בעלות של כ-\$8k, כולל המשלוח למסלול LEO. ערכה זו נמכרת בעיקר למוסדות חינוכיים.

החיסרון של ה-Tube-Sat הזול יותר על ה-Cube-Sat הוא בשטח הפנימי לתאי שמש, המשפיע גם על ביצועי ואורך חייו הלוויין. לכן פיתחה חברת IOS ב-2011 ערכה חדשה עבור ה-Cube-Sat עד משקל של 1.3 ק"ג במחיר של כ-\$20k כולל המשלוח, שמכיל גם מיקרופרוססור לבקרה. ישנן עוד מספר חברות שמוכרות ערכות לוויינים זעירים במיוחד ה-Cube-Sat Kit של חברת Pumpkin מארה"ב בעלת סניפים במספר ארצות בעולם.

באיור 8 מוצג sprite שפותח ב-Cornell University ממעגלים משולבים זעירים המודפסים על פיסת סיליקון אחת. ה-sprite מכיל מיקרו-בקר TI-MSP430, מסנן מתואם, אנטנות תיל דקות, מקלט-משדר רדיו, תאי שמש זעירים, קבלים צוברי אנרגיה וחיישנים זעירים, כגון: מצלמות מיני, מגנומטר, גלאי מתכות ושבבים של מקלט-משדר GPS. לוויין ה-Cube-Sat מסוגל לשאת מאות שדונים (sprites) שיכולים להיכנס למסלול באמצעות קפיץ זעיר והשפעת רוח שמש, כמו תנועת אבק קוסמי, ללא צורך באספקת דלק. תוך שימוש בטכניקות סינון ה-sprite יכול לקיים תקשורת עם תחנות קרקע ממסלול בגובה עד כ-500 ק"מ במשך מספר ימים. בעתיד יפעילו sprites עם ביצועים משופרים.

9. פעילויות בעולם בתחום הלוויינים הקטנים והזעירים

9.1. פעילויות של ה-NASA וה-DARPA בארה"ב

בין הפעילות העיקריות בתחומי לוויינים קטנים וזעירים ה-NASA, שהוקמה בשנת 1958 כדי לשמר את העליונות של ארה"ב בתחום חקר החלל והמדעים המדויקים. ה-NASA בשיתוף עם ה-DARPA וה-DOD מזרעות הביטחון של ארה"ב השקיעו בפרויקט ה-FASTSAT לפיתוח טילים ולוויינים קטנים וזעירים איכותיים כדוגמת ה-STPs המוצגים באיור 9.

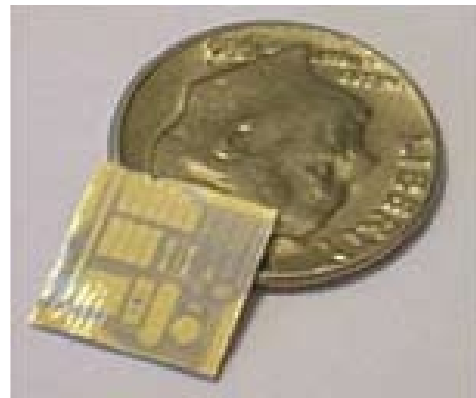
חברת Comtech-AeroAstro בשיתוף עם Utah state University פיתחו את המשלח CORAL P pad launcher ו-Cube-Sat kit 3U בעלי אמינות מאוד גבוהה. פלטפורמת הארכיטקטורה של Coral bus (איור 10) נבנתה לעיצוב ובדיקה של מערכות Cube-Sat איכותיות. החברה פתחה תוכנית בדיקה של חלליות המשתמשת במיני-לוויינים: ISTP- בעל משקל של 180 ק"ג ו-STs-2 בעל משקל של 230 ק"ג ששימשו



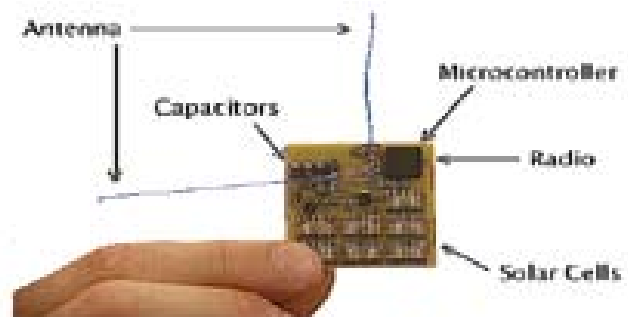
איור 9: FASTSAT satellites

שילוח בעזרת משלחים חדישים קטנים במיוחד כגון Neptune45 של חברת IOS. המשלח N45 יכול להכניס למסלול LEO באותו טיל 32 לווייני Tube-Sat ו-10 לווייני Cube-Sat עד משקל כולל של 45 ק"ג מטען. מחיר משלח זה הינו כ-\$115k בלבד ושילוחים כאלה צפויים בסוף 2013. כדי להוריד מן העלות, השילוח יכול להתבצע אפילו מבסיס באי Tonga ע"י אוסטרליה. חברת IOS פיתחה גם משלחים חדישים והקטן ביותר הוא N9 עם משקל מטען עד 9 ק"ג.

8. לוויינים זעירים מאוד

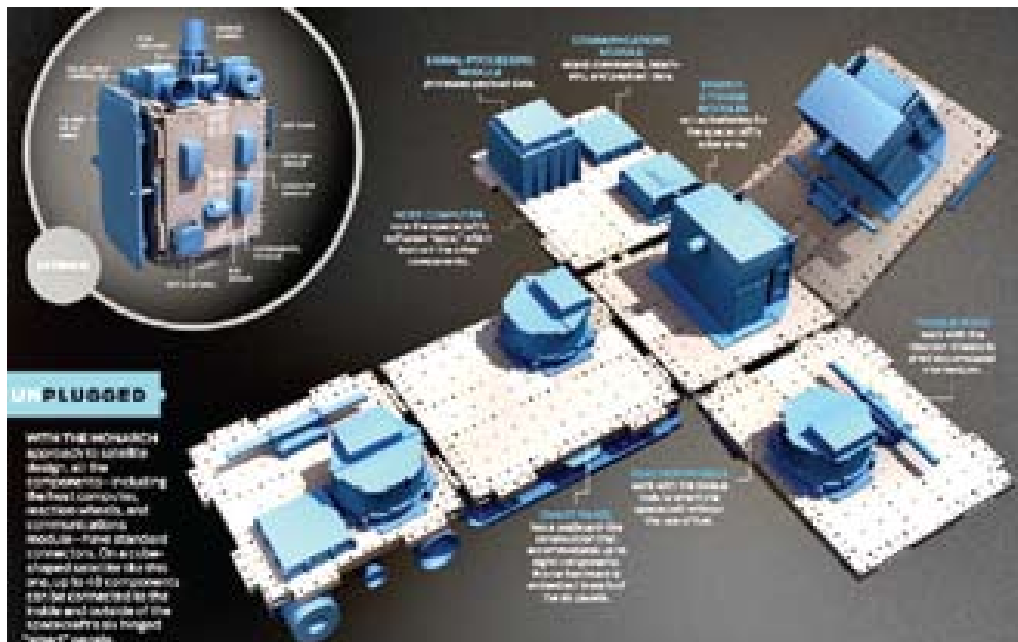


איור 7: לוויין Femto-Sat - דגם של Sprite המעגל המשולב של לוויין זעיר מאוד

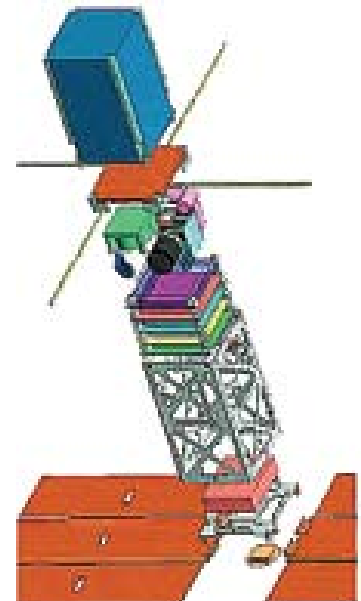


איור 8: מבנה לוויין זעיר מאוד (2 Sprite ס"מ x 2 ס"מ x 2 ס"מ) ולוויין Cube-Sat שיכול לשאת מאות sprites

טכניקות מזעור של רכיבים ומעגלים אלקטרוניים והשימוש בארכיטקטורה של מודול רב-שבבי מסיליקון מאפשרים לאחרונה פיתוח ובנייה של לוויינים זעירים מאוד Femto-Sat כדוגמת השדון הנקרא באנגלית sprite המוצג באיור 7. מימדי ה-sprite: 2 ס"מ x 2 ס"מ x 2 ס"מ וגודל הלוויין הזעיר השלם קטן ממטבע. מגמת המזעור המרבית הינה להגיע לעיצוב לוויין על פיסת סיליקון (SoC) Satellite-On-a-Chip.



איור 12: מבנה הלוויין הזעיר USAF Cube-Sat

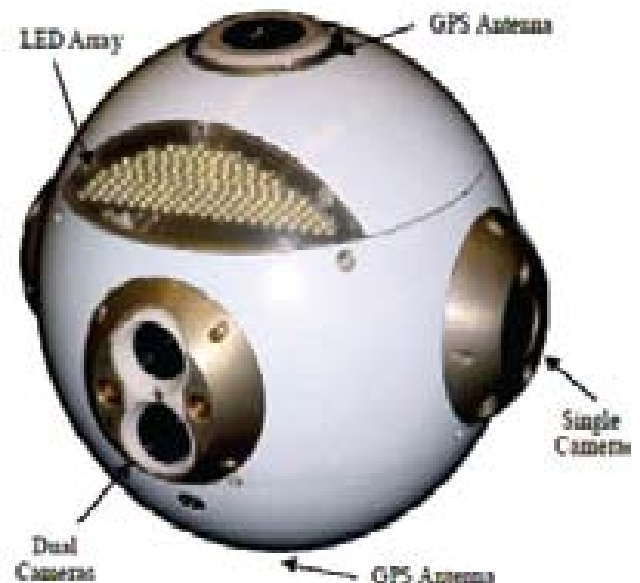


איור 10: Coral bus platform

לתקשורת ולבקרה, מכשירי GPS, סוללת Li-Ion ומקור דלק כפי שמוצג באיור 11. במידה והיו משתמשים בלוויין זה יותר מוקדם אולי היה יכול למנוע אסון מעבורת החלל STS-107 שבו נספו בשנת 2003 אילן רמון וחבריו האסטרונאוטים. כיום משתמשים בננו-לוויין זה לפיקוח והגנה על תחנת החלל הבין לאומית ISS.

למשימות מיוחדות. לווייני LEO אלה כללו בין השאר גשש כוכב, חיישני שמש, חיישני הדמיה זעירים ומערכת בקרה מאוד מדויקת. עם זאת חברת AeroAstro נסגרה בשנת 2012 בגלל עלות גבוהה מדי והשהיות בפרויקטים שלה.

Nano-Sat משובכל של ה-NASA



איור 11: ננו-לוויין משובכל של ה-NASA

US Air Force של MONARCH

חיל האוויר האמריקאי USAF פיתח את ארכיטקטורת הרשת הפתוחה המודולארית MONARCH (Modular Open Network Architecture) לבניית לוויינים קטנים בטכניקת Plug and Play שמאפשרת שימוש ברכיבים ומעגלים מסוימים מן המוכן ותכנון מודולארי. בארכיטקטורת ה-MONARCH תכננו ובנו במעבדות חיל האוויר של ארה"ב הלוויין הזעיר Cube-Sat (איור 12) במשך שבוע בלבד במקום בחדשים ובעלות מאוד נמוכה. השימוש ב-MONARCH, Plug and Play ובמדפסות תלת ממדיות מקצר במידה נכרת את זמן בניית הלוויינים הקטנים והזעירים ומוזיל בהרבה את התכנון והבנייה שלהם וגם של הרבה לוויינים גדולים, מערכות ומכשירים אחרים.

9.2 פעילויות באירופה בראשות סוכנות החלל האירופית

ה-ESA

משנת 2008 מאפשרים לסטודנטים ממוסדות אירופאים לשלח ככל שנה לפחות 2 טילים ו-2 בלונים לגובה עד 35 ק"מ למטרות למוד ומחקרים במסגרת פרויקט REXUS/BEXUS. השוק האירופי גם מממן פרויקט 1350Q לשנת 2013 לבניית 50 לוויינים זעירים ע"י סטודנטים באירופה למטרות חינוך ומדע. ביוזמת סוכנות החלל האירופית ESA הוקמה רשת בינלאומית ה-Hum-Sat של כמאה תחנות קרקע המקושרות באינטרנט הקולטות והמפקחות על הרבה

NASA שלחה ממעבורת החלל בשנת 2005 ננו-לוויין משובכל בשם Aercom במשקל של 4.5 ק"ג וקוטר של 19 ס"מ המיועד לפקוח על המעבורת או על חלליות אחרות ומכיל מצלמות, תת מערכות

למדעים התיכוני בהרצלייה נבנה פיקו-לוויין דוכיפת-1. כמו כן מתקיימת פעילות בכנסים הבינלאומיים השנתיים על שם אילן רמון. לסיכום רצוי מאוד להגדיל את הפעילות וההשקעות בתחום הלוויינים הקטנים והזעירים בארץ.

9.5. הפעילות הגלובלית בתחומי הלוויינים הקטנים והזעירים

חברת המחקר Euro consult פרסמה בדו"ח מיוני 2011 כי 90% מן המכרות של הלוחיינים הקטנים והזעירים בעולם הינם עבור פרויקטים אקדמיים והשאר הינם למטרות ממשלתיות, צבאיות ועסקיות. עם זאת מבחינת ההשקעות הכספיות המצב הפוך ורוב ההשקעות, יותר מ-90%, הינן למטרות צבאיות וממשלתיות. לפי חלוקה עדכנית של הפעילות הגלובלית בתחומי הלוחיינים הקטנים והזעירים: בצפון אמריקה כ-30% מן הפעילות בעיקר בזכות ה-NASA, ה-DOD (משרד ההגנה של ארה"ב) והסטודנטים. באירופה כ-25% בעיקר בזכות ה-ESA באסיה כ-22% בעיקר הודות לפעילות בסין, ביפן ובאוסטרליה, לרוסיה יש כ-13%, במזרח התיכון ובאפריקה כ-9% פעילות ובשאר העולם כ-5%.

10. תחזיות בתחומי הלוחיינים הקטנים והזעירים

התחזיות העיקריות הצפויות בתחומי הלוויינים הקטנים והזעירים הינן: פיתוח נחילי (CLUSTERS) SWAMP של לוויינים זעירים משוכללים שפועלים בצוות בעיקר למטרות ביטחונית ומחקריות. הגנה של לוויינים חשובים ע"י זקיפים זעירים. שכלול טכניקות MONARCH שפותחה ע"י מעבדות חיל האוויר של ארה"ב ושימוש מוגבר של מדפסות 3D בשלבי התכנון וה בניה. תכנון ושימוש של Femto-Sat. במזעור מרבי עד לרמת Sat-on-a-Chip. בניית ושימוש בלוויינים זעירים לחקר הירח והכוכבים. החלפת חלק מן הלוויינים הבינוניים לקטנים וזעירים בעלות נמוכה יותר ומבלי לגרוע בביצועים. פעילות לאומית ובינלאומית מוגברת של סטודנטים בתכנון ובניית לוויינים זעירים, ואפילו משוכללים כדי למשוך ולאמן מהנדסים ומדענים לתחומי ה-STEM (Science' Technology, Engineering and Mathematics) ובמיוחד במדעי החלל.

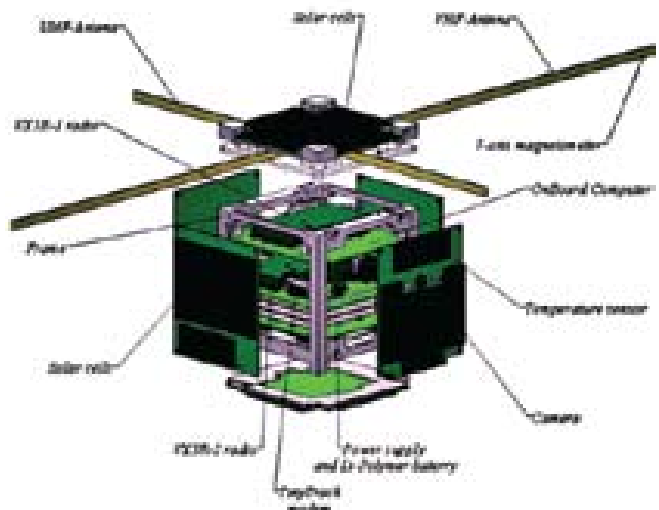
11. מסקנות

- בזכות התועלת והיתרונות של לוויינים קטנים וזעירים על הגדולים יותר, גוברת ההשקעה והשימוש בלוויינים קטנים וזעירים משוכללים ומתוחכמים למטרות צבאיות מתוחכמות ועד אזרחיות פשוטות לחינוך לסטודנטים, כאשר חשיבות מרובה לתת מערכות תקשורת הרדיו.
- העלויות הנמוכות והזמנים הקצרים הנדרשים לבניין ושילוח של לוויינים זעירים מאפשרים תכנונם ובנייתם ע"י מוסדות חינוך בתחומי ההנדסה והמדע, שיגרום לעליה במספר ובאיכות הסטודנטים ואנשי מקצוע במדעים, בהנדסה ובחקר החלל בכל תחומי ה- Science' Technology, Engineering and Mathematics (STEM) ובמיוחד במדעי החלל והנדסת תקשורת רדיו.
- לנוכח החשיבות וההתפתחות העצומה בעולם חייבת ישראל להגביר את ההשקעה והפיתוח בתחום לוויינים קטנים וזעירים.

לוויינים ברובם זעירים של סטודנטים וחובבי רדיו. הרשת מנוהלת ע"י אוניברסיטת Vigo בספרד שבונה גם מספר לוויינים ברובם זעירים. כיום כ- 25% מן הפעילות העולמית בנושא לוויינים זעירים מבוצעת ע"י מדינות השוק המשותף באירופה. ישנן בבריטניה ובדנמרק מספר חברות מובילות בתכנון ובניית לוויינים זעירים.

9.3. פעילויות במזרח הרחוק

במזרח הרחוק הפעילות בתחומי הלוויינים הקטנים והזעירים של כל מדינה הינה עצמאית, אבל המובילות הן סין, יפאן, אוסטרליה ועוד מדינות שבסך הכל שולטות על כ-22% מן הפעילות העולמית. תצוין לשבח וייטנאם - מדינה מתפתחת שתכננה ובנתה לוויין Pico-Sat משוכלל למספר יישומים, המוצג באיור 13. מפעילי הלוויין ניסו אותו בהצלחה על הקרקע ושלחו אותו באמצאות משלח יפני לתחנת החלל הבינלאומית - ISS. משם באוקטובר 2012 הוכנס למסלול LEO עם 7 לוויינים זעירים נוספים באמצאות זרוע רובוטית יפנית. הלוויין הוייטנאמי החיל לפעול וממלא כל משימותיו בהצלחה.



איור 13: לוויין Pico-Sat וייטנאמי

9.4. פעילויות בתכנון ובניית לוויינים קטנים וזעירים בארץ

בשנת 2006 נוסדה עמותת (Israel Nano-Satellite Association) INSA בראשות ד"ר רז יצחקי טמיר המשתפת פעולה עם מפעל מבת חלל של התעשייה האווירית (בה נמצא בשלבי בנייה הנו-לוויין Inklajn על שם ד"ר מרסל קליין שיבצע 7 ניסויים מדעיים בגובה של כ-650 ק"מ) ועם מכון אשר בטכניון. לטכניון שיתוף פעולה עם Cornell University בהקמת אוניברסיטה מחקרית בניו-יורק. כפי שנכתב לעיל Cornell מצטיינת גם בתחום הלוויינים המאוד זעירים (אזורים 7 ו-8) ובעתיד אולי תעבוד בשיתוף עם הטכניון בתחום. גם בטכניון נבנה והופעל הלוויין הקטן GURWIN (איור 4). כמו כן מתוכנן ובשלבי בנייה במכון אשר מקבץ של 3 לוויינים במשקל של 6 ק"ג כל אחד למטרות טיסות מבנה וחיפוש והצלה (איכון). השילוח לגובה 600 ק"מ צפוי בשנת 2015. המכון לביטחון המולדת באוניברסיטת בן גוריון בנגב - BGU קיבל תרומה של \$1M בדצמבר 2012 לשילוח של 2 לווייני פיקו למטרות חישה למרחוק, תקשורת ואיכון. במרכז

Prof. J. Gavan Fellow IEEE

Jacob Gavan earned the B.Sc. degree from the Haifa Technion in Israel 1961, the MEE degree in the field of radio and satellite communication from Eindhoven Technological University in the Nederland 1969 through a Philips Company scholarship, both, with distinction, and the Ph.D. degree in radio communication in ENSERG Grenoble (France) 1979 with congratulations of the Jury.



Jacob main tasks were as RF technician and engineer for the Israel army and PTT in the construction of a high power broadcasting transmitters center. Jacob has worked 1 year for MASHAV training projects in Africa, after as ITU expert for the Congolese Telecom. 5 years planning project and training of telecommunication technical people. Following his MEE graduation he worked from 1969 to 1971 as senior engineer for the IAI (ELTA) in Radio communication, Control and Radar. In 1971 he was asked by the ITU to participate in the founding of a telecommunication engineering school in cooperation with the ministry of PTT and the local university and was teaching radio and satellite communications. From 1972 to 1974 his function was head of the ITU mission in the Republic of Congo. From 1975 he has switched to the academy in Israel

Jacob Gavan was elected as IEEE fellow in 1995 and founded a department of Communication Engineering at the Holon Institute of Technology (HIT). He was elected to Dean of the HIT new Engineering school and nominated as Full Professor. From December 2001 till 2007 Prof. Jacob Gavan served as dean of the engineering faculty and lead the establishment of a MSc program without thesis in Electronic and Communication Engineering which was recognized by the MALAG and includes now around 130 students.

Jacob consulted several large Israeli and international companies. He has published over 150 papers shown in his CV "Jacob Gavan" or in Google for Jacob (Jacques) Gavan.

Professor Jacob Gavan is active in URSI Commission E, past Chairman of E9 working group on "Interference in Radio Systems above 30 MHz" and new Cochairman of E8 working group on "Electromagnetic Compatibility in Wire and Wireless Communication Systems". In 2009 he was nominated co-chair commission E for the inter-commission working group on solar power satellites and as guest editor for the Radio Science Bulletin special issue on High Altitude Platforms. Jacob was also associated editor of the IEEE Transactions on EMC for several years. He was elected as Distinguished Lecturer of the IEEE communication society in 2007 and reelected till 2010. From 2008 Jacob founded a new department of communication engineering in Sami-Shamoon college of engineering in the Negev, consulting there and teaching satellites and space communications. His biography is listed in the International Directory of Distinguished Leadership.

ספרות מובחרת בנושא לוויינים קטנים וזעירים

1. יעקב גוון, "לוויינים קשר התקשורת" עיתון מדע של מכון וייצמן ספטמבר 1984.
2. S.O. Keefe, "Pioneering the Future" NASA Facts December 2002 .pp (1-12)
3. J.C.Lyke, J.Mac Neill, "Plug and Play Satellites" IEEE Spectrum, Vol.49 August.2012 pp (30-36)
4. R.R Milliron, "Insight: Inter-orbital Fosters Small Satellite Surge" .Sat. Magazine 10.11
5. Comtech- Aeroastro, "Focus the Power of the Pico-satellites" Sat .Magazine 1.11
6. H Page, R.Walker; "Flying Students Experiments to the Edge of .Space" ESA Bulletin N144 February 2012 pp (33-38)
7. Casro, et All; "GENSO Pre-Operational Activities and Preparation for GEOID/HUMSAT Operations" ESA Bulletin N149, February 2012 pp (39-43)
8. J.Foust, "Emerging opportunities for low cost small satellites in .civil and commercial space" Futron report, 2011
9. H.Helvasian, S.W. Janson Editors, "Small Satellites : Past, Present .and Future" The Aerospace Press 2009
10. T. Bekey, "Advanced Space Systems Concepts and technologies: .2010-2030" The Aerospace Press 2009
11. J.A. Atchison, M.A.Peck ; "A Passive Sun-Pointing Millimeter- Scale Solar Sail" Acta Astronautico, Vol.67, 7/8 2010, pp (108-121)
12. M.A. Peck, "How Sat. the Size of Chips Could Revolutionize .the Way we Explore Space" IEEE Spectrum, August 2011, pp (39-43)
13. P.Fortescue, G.Swinerd, J.Stark, Editors, "Spacecraft Systems .Engineering", 4th edition, 2011
14. M.Harris, "Citizen-Science Satellite Allow Anyone to Run Experiments in Orbit", IEEE Spectrum, November 2013, pp (18-19)
15. www.aiaa.org
16. www.insasite.com
17. www.spacecraftresearch.com
18. www.cubesat.wikidot.com
19. www.nasa.gov/grail
20. www.nanosatsfi.com