

# ננו-לוויינים

לוויינים על המשקל

## מידד פריינטא

התחום החם לאחרונה בתעשיית החלל הוא לוויינים זעירים. מה שהחל כפרויקט חינוכי הפך להיות הדבר האמיתי שגרר מהפכה של ממש.

מתברר שלמשימות שונות יש יתרון ללוויינים קטנים. נסקור איפה את הרקע ואת החדשות האחרונות בתחום. ראשית, נבחין בין סוגי הלוויינים השונים על פי משקלם:

קובייה בעלת צלע של עשרה ס"מ ובנפח של ליטר. ליחידה בסיסית זו קוראים CubeSat 1U, כלומר, יחידה אחת של לוויין הקובייה שמכילה כמעט את כל מערכת הלוויין הגדול: מחשב משימה, מערכת תקשורת, מערכת חשמל ושמיכות תרמיות להגנה על הלוויין מסביבת החלל הקיצונית. יחידה כזו שוגרה לראשונה בשנת 2003. מאז נוספו לסטנדרט עוד לוויינים בגדלים שונים - כולם מכפלות של הלוויין הבסיסי.

עלותו הנמוכה של הלוויין והיתרון העצום שהפיקו הסטודנטים מעבודה מעשית על פרויקט חלל, הפכה את הרעיון לסיפור הצלחה. העובדה שפרויקט בניית לוויין מחייבת ידע נרחב בפיזיקה, אלקטרוניקה, תוכנה, מכניקה, תרמודינמיקה ותקשורת, הפכה את הלוויינים הקטנים למקור משיכה לסטודנטים מכל מגמות ההנדסה והמדעים ולמקור גאוה לא מבוטל לאוניברסיטאות ומכוני המחקר. תוך שנה מהשיגור הראשון, היו כבר עשרות פרויקטים בארצות הברית. הבשורה פשטה ברחבי העולם והיום יש כבר כ-300 פרויקטים של ננו-לוויינים, מהם כמה בישראל. שנת 2013 היתה שנת שיא ובה שוגרו יותר מ-70 ננו-לוויינים.

שם הקבוצה	משקל	שימושים עיקריים
מגה לוויינים	מעל 10 טון	לווייני תקשורת גדולים לאלפי ערוצי טלוויזיה
לוויינים גדולים	בין 5-10 טון	לווייני תקשורת למאות ערוצי טלוויזיה
לוויינים בינוניים	1-5 טון	לווייני תקשורת קטנים ולווייני מזג אוויר
מיני-לוויינים	100 ק"ג - 1 טון	לווייני תצפית חזותית ותצפית מכ"ם ברזולוציה גבוהה
מיקרו-לוויינים	10-100 קילוגרם	לווייני תצפית קטנים ברזולוציה נמוכה
ננו-לוויינים	1-10 קילוגרם	לווייני מחקר טכנולוגי, משימות תקשורת צרת סרט, משימות בקרה אווירית, טיסות מבנה
פיקו-לוויינים	עד קילוגרם	לווייני סטודנטים, משימות בקרה אווירית, ו"אכסן והעבר" (Store and Forward)
פמטו-לוויינים	עד 100 גרם	בדיקת יכולת עבור נחילים

## לוויין קובייה (CubeSat)

בשנת 1999 החליטו פרופ' הוברט (בוב) טוויגס מאוניברסיטת סטנפורד ופרופ' ג'ורדי פיו סאורי מהמכון הפוליטכני בקליפורניה, להציע לסטודנטים להנדסה לבנות לוויין במקום לכתוב עבודת גמר שתסתכם בספר עב כרס של עבודה תיאורטית.

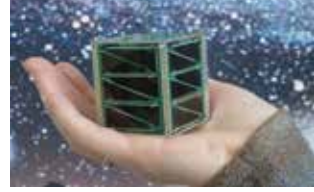
כארבע שנים פיתחו בוב וג'ורדי עם הסטודנטים סטנדרט ללוויין קטן וקל משקל שעלות ייצורו והבדיקות שלו יהיו כמה עשרות אלפי דולרים. לשם הפשטות הם החליטו שהלוויין יהיה בצורת קובייה, וקראו לסטנדרט החדש CubeSat לוויין קובייה.

בוב, שבעבר היה מעורב בבניית לוויינים, חשש שמרוב התלהבות יכניסו הסטודנטים יכולות נוספות ללוויין והוא יגדל, יתייקר ויגרום לעיכוב בלוח הזמנים. הוא החליט שזאת ההזדמנות להכריח את המהנדסים בארצות הברית לעבור לשיטה המטרית, וקבע שהלוויין הבסיסי יהיה

## מה אפשר לעשות עם לוויינים כל כך קטנים?

תוך זמן קצר התפתחה קהילה פעילה של מפתחי רכיבים ומערכות לננו-לוויינים, אשר שיתפה את חבריה בקשיי הפיתוח, בתוכניות בדיקה ובפתרונות. העובדה שהיה קיים סטנדרט שבו כולם עבדו, אפשרה לתלמידים ולחוקרים להתרכז בפיתוח משימות חלל שונות המותאמות למגבלות הפיזיקליות של לוויינים קטנים. במקביל התפתחה תעשייה של חברות קטנות שנוסדו בעיקר על ידי בוגרי פרויקטים של לוויינים באוניברסיטאות אירופה וארצות הברית (מה שנקרא באנגלית spin-off), שנתנו מענה לצורך במערכות בסיסיות אמינות.

העובדה שמרבית הפרויקטים עבדו באותו תקן, אפשרה לפתח שוק של כמה מאות לקוחות, שוק ענק יחסית לתעשיית החלל המסורתית.



לוויין SwissCube השוויצרי

### לווייני מחקר סביבת כדור הארץ

ננו-לוויינים קטנים מכדי להכיל עדשות ומצלמות לצילום צבאי ברזולוציה קטנה ממטר, אך הם בהחלט יכולים לספק תמונות איכותיות של כדור הארץ בצבע וברזולוציה של כמה מטרים. תמונות אלה מצוינות ליישומים הקשורים לניטור כדור הארץ ואיכות הסביבה כמו זיהוי זיהומי מים, כתמי שמן ונפט בים, מקורות שריפה ואפילו חקלאות חכמה.

בנוסף, לוויינים אלו יכולים למדוד תופעות שונות בקצה האטמוספירה ולעזור בחקר תופעות פיזיקליות מהחלל. להלן כמה דוגמאות ללוויינים מסוג זה:

**לוויין QuakeSat** האמריקאי תוכנן למדוד שינויים קלים בשדה המגנטי של כדור הארץ כדי לעזור למדענים לחזות רעידות אדמה.

**לוויין SwissCube** השוויצרי נועד למדוד תופעה אטמוספירית "זוהר אוויר" (Air Glow) המתרחשת בשכבת המגע של האטמוספירה עם קרינת השמש.

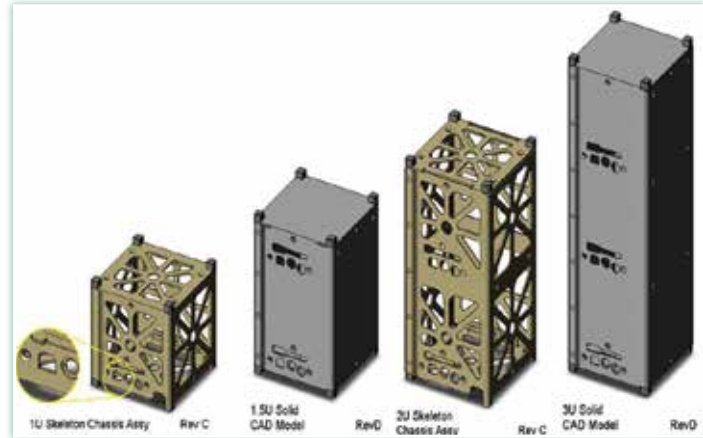
**לוויין Plume** הבריטי שוגר למדידת האבק הקוסמי המקיף את כדור הארץ ונכלא בשדה הכבידה שלו.

**לוויין Firefly** של נאס"א נועד למדוד פליטת קרני גאמא המגיעות לכדור הארץ במטרה לזהות את מקור הקרינה.

**לווייני Dove** של חברת Planet Labs מיועדים לגישה מסחרית פשוטה וזמינה לצילום מהחלל לכל דורש, באיכות המתאימה לשימושים אזרחיים.

### מחקר ביולוגי

בעתיד בוודאי תרצה האנושות לצאת למסע בין מכבים, אך לשם כך הכרחי להבין טוב יותר את השפעות סביבת החלל על חומרים אורגניים ויצורים חיים. לשם כך שיגרה נאס"א לוויין GeneSat (לוויין בראשית) שנועד לבדוק את קצב גידול חיידקי אי-קולי בהשפעת קרינת חלל. הלוויין שידר תמונות ממשטח גידול החיידקים ומאפשר למדענים לנתח את התוצאות בהשוואה לאוכלוסייה זהה



גדלים של ננו לוויינים

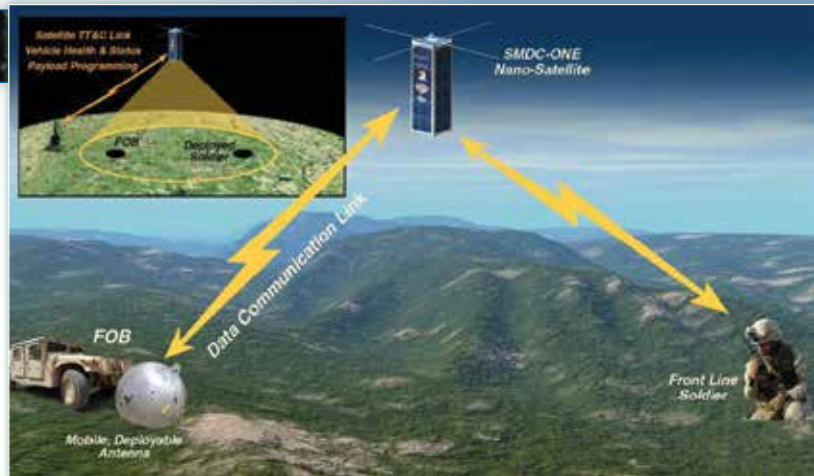
בנוסף, משקלם הקטן של הלוויינים מאפשר שיגור כמה עשרות בפעם אחת, כך ששימת החלל יכולה להתחלק בין כמה לוויינים שטסים בטיסת מבנה. בנובמבר 2013 נשבר שיא כאשר משגר דנייפר שיגר לחלל שלושים ושניים לוויינים בשיגור אחד. ביוני 2015 מתוכנן שיגור אירופי של 50 לוויינים בשיגור אחד. להלן כמה מהשימושים היותר נפוצים לננו-לוויינים.

### מעבדות מעופפות

ננו-לוויינים משמשים כמעבדות מעופפות להוכחת טכנולוגיות ובדיקת רכיבים חדשים עבור לוויינים. השילוב של קרינה חזקה, הפרשי טמפרטורה קיצוניים וריק מוחלט, מקשה על רכיבים אלקטרוניים לעבוד היטב בחלל. יש לזכור שללא תכנון מתאים, רכיבים אלו עלולים להינזק, להתקלקל ואפילו להישרף. בדיקת הרכיבים במעבדות הקיימות על פני כדור הארץ עולה הון ובנוסף, רק חלק מתנאי החלל משוחזרים בהן, לכן הן אינן מדמות את סביבת החלל באמת. היכולת לבנות ולשגר לוויין קטן וזול, מאפשרת הרכבת חלק מהרכיבים החדשים על ננו-לוויין ולבצע ניסוי בפועל בחלל.

אחד החידושים המעניינים ביותר בתחום החלל הוא השימוש בטלפונים חכמים כמחשבי משימה ומטעדים בננו-לוויינים.

לאחרונה אנו עדים להצטרפות תעשיית החלל המסורתית לפיתוחי ננו-לוויינים. חברת בואינג האמריקאית היתה הראשונה שזיהתה את הפוטנציאל המסחרי ושיגרה כבר ב-2007 את הלוויין CSTB-1 (CubeSat Test Bed-1). מאז נכנסו לתחום רוב תעשיות האירוספייס העולמיות. בישראל הצטרפו למגמה גם התעשייה האווירית ואלביט מערכות אוויר, ושתי החברות מפתחות בשנים האחרונות תוכניות המבוססות על ננו-לוויינים.



לוויין SMDC-ONE, באדיבות צבא ארה"ב

ייחודי זה איפשר הקמת חנות רשת מקוונת לקניית רכיבי ננו-לוויינים. החנות הנקראת The Cubesat Shop מרכזת רכיבים של יצרנים מאירופה ומארצות הברית ומאפשרת לכל המעוניין לתכנן ולשגר ננו-לוויין להתחיל את הפרויקט תוך ידיעה מוקדמת באילו מערכות ורכיבים הוא ישתמש, מה יהיה משקלם, מה תהיה צריכת ההספק שלהם וכמובן, מה יהיה המחיר.

## מה נעשה בארץ?

עד כתיבת מסמך זה לא שוגר אף ננו-לוויין ישראלי לחלל, אך יש כמה תוכניות בשלבים שונים שאותם נסקור במאמר זה.

### פרויקט "דוכיפת 1"

**שם הלוויין:** דוכיפת 1

**הגוף האחראי:** המרכז למדעים בהרצליה - לוויין התיכון הראשון בארץ ובאירופה

**סוג:** פיקו לוויין 1U

**משקל:** כ-1 קילוגרם

**משימה:** העברת הודעות מצוקה

**תחילת הפרויקט:** 2002

**מצב הפרויקט:** בשלבי סיום בדיקות, לקראת ניסויי סביבה

**תאריך שיגור מתוכנן:** אפריל 2014

### פרויקט "InKlaim-1"

**שם הלוויין:** InKlaim-1

**הגוף האחראי:** מבת-חלל התעשייה האווירית

**סוג:** ננו-לוויין 3U

**משקל:** כ-4 קילוגרם

**משימה:** מעבדה להוכחת טכנולוגיות חדשות

**תחילת הפרויקט:** 2006

**מצב הפרויקט:** בדיקות סופיות לפני שיגור

**תאריך שיגור:** לא ידוע

### פרויקט "SAMSON"

**שמות הלוויינים:** Abraham, Issac and Jacob

**הגוף האחראי:** מכון אשר לחקר החלל - הטכניון

**סוג:** שלושה ננו-לוויינים 6U

**משקל:** 8 קילוגרם כל לוויין

**משימה:** הוכחת יכולת לטיסת מבנה, חילוץ והצלה של שייטים

**תחילת הפרויקט:** 2012

**מצב הפרויקט:** לקראת סקר תיכון קריטי

**תאריך שיגור:** מתוכנן ליוני 2016

על פני כדור הארץ. בנוסף, לוויין PharmaSat, עוד פיתוח של נאס"א, נועד לבחון יעילות של תרופות אנטיביוטיות בחיסול חיידקים בחלל.

## לווייני שיתוף פעולה אקדמי

ננו-לוויינים הם כר פורה לשיתופי פעולה אקדמיים שבהם כל צד מביא לשותפות את יתרונותיו. דוגמה אחת מני רבות לשיתוף פעולה שכזה הינו לוויין CINEMA (CubeSat for Ions, Neutrals, Electrons, & MAgnetic fields) שנועד לניטור מזג האוויר החללי, והוא פרויקט שיתוף פעולה בין אוניברסיטאות מארצות הברית, אנגליה ודרום קוריה ופורטו ריקו.

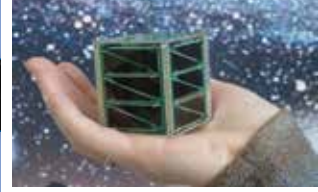
## לווייני תקשורת

צבא ארה"ב שיגר בדצמבר 2010 את הלוויין SMDC-ONE (Space Missile Defense Command-Operational Nanosatellite Effect) במטרה לאפשר תקשורת M2M - Machine to Machine צרת סרט בין שני בסיסים המרוחקים זה מזה למעלה מ-1500 ק"מ (אחת באלבמה ואחת בקולורדו). במשך חודש שלם תיקשרו הבסיסים, העבירו הודעות ותמונות אך ורק דרך הלוויין. הניסוי הוכתר בהצלחה ובמהלך שנת 2011 בנה הצבא האמריקאי עוד שמונה לוויינים זהים כדי לשגר אותם יחד ולאפשר כיסוי תקשורת רציף. ואכן, בדצמבר 2012 שוגרו ארבעה ננו-לוויינים מוונדרבנג - בסיס חיל האוויר בקליפורניה על גבי משגר אטלס V. שיגור זה הוא חלק מהמאמצים הנמשכים של צבא ארה"ב לפתח יכולות חלליות זולות באמצעות התפתחות התפיסה והטכנולוגיות של הננו-לוויינים.

## חנות מקוונת -

### הזמן לך לוויין להרכבה עצמית

כאמור, תוך זמן קצר החלו לצוץ חברות מסחריות שהתמחו בייצור רכיבים לננו-לוויינים. העובדה שרובם המכריע של הננו-לוויינים מתוכננים בתקן קיובסאט, אפשרה גמישות רבה למתכננים וקרקע פורייה ליזמים לקיים מודל מסחרי ייחודי בו כולם שותפים של כולם, ובמקום להתחרות זה בזה, יצרני הרכיבים והלוויינים משתפים פעולה. שיתוף



### סיכום

פרויקט ננו-לוויינים הוא פרויקט הנדסי רב-תחומי. גודל הלוויין לא משנה את הצורך בהנדסת חלל כדי לייצר מוצר שעומד בביצועים הנדרשים. פרויקט אופייני של ננו-לוויין נמשך 24-30 חודשים. רכיבי ננו-לוויינים הם "מוצרי מדף" שניתן להזמין, לקנות ולהשתמש בהם כאבני בניין לתכנון משימה מדעית או טכנולוגיות בדרך שתאפשר להתרכז בנושאים הבאים:

- תכנון המשימה
- תכנון לוויין ותחנת הקרקע
- בנייה של הלוויין ותחנת הקרקע
- בדיקות ללוויין ולתחנת הקרקע
- שיגור ותפעול

### עקרונות שיגור ננו-לוויינים איך ננו-לוויינים מגיעים לחלל

ננו-לוויינים לא שוגרו עד היום באופן עצמאי לחלל. משקלם הקטן מאפשר לבעלי הלוויינים לשגר אותם לחלל כטרמפיסטים על משגר שמיועד לשגר לוויין גדול. לוויין זה הנקרא גם "נוסע ראשי" או "מטען ראשי" קובע את נתוני השיגור (לאיזה מסלול ישוגרו הלוויינים?). מאחר שאפשר לשגר יחד עם נוסע ראשי אחד כמה וכמה "נוסעי משנה" (או טרמפיסטים), קמו חברות מסחריות אשר משדכות ננו-לוויינים ממקומות שונים לשיגור אחד. הצבא האמריקאי הציג תוכנית לבניית משגר מבוסס טיל הנקרא MinuteMan.

### ממשק שיגור פשוט - הפוד

הלוויינים עצמם משוגרים מתוך "פוד". למעשה מדובר בתיבת אחסון עם קפיץ וכאשר המשגר מגיע למקום המיועד, נשלחת אליו פקודה חשמלית שפותחת את דלת התיבה והקפיץ דוחף את הלוויינים החוצה, אחד אחרי השני.

שיגור מתוך פוד מפשט בצורה משמעותית את תהליך השילובים עם המשגר מכיוון שהממשק המכני והחשמלי ידוע וקבוע, לא משנה מה משימת הלוויין.

כמעט כל חברות השיגור המובילות שומרות כיום מקום לפודים עבור שיגורי ננו-לוויינים. בכל שיגור מסחרי שמבוצע למסלולים נמוכים (עד לגובה 900 קילומטרים) סביב כדור הארץ.

### שיגור משותף - יתרונות וחסרונות

שיגור משותף, יחד עם לוויין ראשי ועוד לוויינים משניים, הוא תהליך ידוע שבוצע פעמים רבות בעבר. יש לו הרבה

יתרונות שהעיקרי שבהם הוא כמונח המחיר הנמוך. אך יש גם חסרונות כגון:

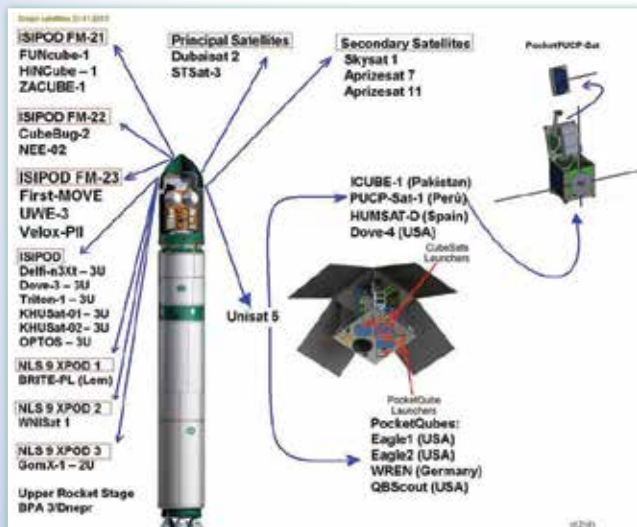
- אין יכולת לבחור מסלול ייעודי למשימה
- תלות בלוח הזמנים של הלוויין הראשי

עיכוב בלוח הזמנים של הלוויין הראשי יעכב את שיגור הלוויין המיועד

עיכוב בלוח הזמנים של הלוויין המיועד יגרור הפסד הזדמנות שיגור, שכן השיגור של הלוויין הראשי לא יתעכב

### המזעור מכה שנית

לאור העובדה שננו-לוויינים משמשים היום חברות מסחריות, סוכנויות חלל וגופי מחקר, פותח לאחרונה סטנדרט חדש, קטן וזול יותר הנקרא "לוויין כיס" (Pocket Qube). נפח הלוויין הוא חמישה סמ"ק והוא נועד לשימוש אישי (לוויין לכל פועל - על משקל אוטו לכל פועל של הנרי פורד).



שיגור פיקו-לוויינים מתוך ננו-לוויין שמשוגר מתוך מיקרו-לוויין

המטרה המוצהרת של מפתחי התקן החדש, וביניהם פרופ' בוב טוויגס ממציא התקן הקודם, לאפשר פרויקט לוויין שעלותו הכוללת (כולל שיגור) לא תעלה על 35,000 דולר. אוניברסיטת מורדה בארה"ב ואוניברסיטת רומא מאיטליה פיתחו יחד מתקן מיוחד המאפשר לשגר את הלוויינים הקטנים מתוך לוויינים גדולים יותר וכך מאפשר להוזיל את עלות השיגור למחיר הנמוך ביותר ששולם אי פעם עבור שיגור לוויין לחלל.

\* הכותב הוא מנכ"ל חברת SPACEIALIST, מהנדס חלל ויזם, מומחה בתכנון ופיתוח לוויינים ומשימות חלל, שותף מוביל בכמה פרויקטי לוויינים, ומומחה להערכת סיכונים עבור חברות ביטוח לוויינים