

2,500 ק"מ מהירח. צולם בצד הרחוק של הירח.  
קרדיט: צילום בראשית



# תעשיית החלל בישראל: העתיד כבר כאן!

החללית "בראשית", ששוגרה לירח ביום 22.02.2019, מהווה אבן דרך חשובה בתעשיית החלל הישראלית, והישג לאומי יוצא-דופן! בראשית היא החללית הישראלית, הראשונה ששוגרה לירח, וגם פרויקט ייחודי במיגוון היבטים: תקציב נמוך ביותר למשימה מרוחקת בחלל (100 מיליון דולר בלבד); רוב התקציב הושג ממקורות מימון לא ממשלתיים; היא החללית הקטנה ביותר בממדיה ובמשקלה, שתוכננה לנחות על הירח; המערכת הישראלית המהירה ביותר אי-פעם (36 אלף קמ"ש); שיגור עם שני לוויינים נוספים ("טרמפ" ראשון לחלל); והמסע הארוך ביותר לירח (6.5 מיליוני ק"מ). למרות יתירותה המועטה, בראשית הצליחה להפוך את ישראל לאחת משבע מדינות, שביצעו הקפה של הירח, והציבה אותה במרכז מפת תעשיית החלל העולמית

אדווה כלף ואלי יצחקוב

של ארה"ב/נאס"א (National Aeronautics Space Administration) [NASA]. נוסף על-כך, הפרויקט יוצר הזדמנויות רבות לקידום המדע והמחקר, ומביא אתו אופק כלכלי חדש".

## התחרות להנחתת רובוט על הירח

המניע לפרויקט בראשית היה תחרות "Google Lunar XPRIZE" (GLXP), שארגנה הנהלת קרן "XPRIZE" בחסות גוגל. המארגנים פנו ליזמים במימון פרטי והציבו בפניהם אתגר: להנחית רובוט על הירח, להסיעו למרחק של 500 מ', ולשלוח נתונים ותמונות אל כדור הארץ. הפרסים בתחרות כללו: 20 מיליון

\* קרן XPRIZE מקדמת פתרונות ופריצות-דרך, כדי ליצור עולם של שפע. מאז שנת 1994, הקרן עיצבה והשיקה 17 פרסים בתחומים הבאים: חלל, אוקיינוסים, למידה, בריאות, אנרגיה, סביבה, תחבורה, בטיחות ורובוטיקה.

"לפרויקט בראשית היו שתי מטרות עיקריות: האחת, להנחית חללית ישראלית ראשונה על הירח; והשנייה, לעורר השראה בקרב הדור הצעיר ללימודי מדעים, טכנולוגיה, הנדסה ומתמטיקה (Science, Technology, Engineering and Mathematics) [STEM]. כך אומרת אסתי רוזן, מנהלת התקשורת ויחסי הציבור במפעל מבת חלל, התעשייה האווירית לישראל (תע"א), והיא מוסיפה: "אפקט בראשית הוא הצלחה מסחררת: כמיליון ילדים ובני נוער נחשפו להרצאות של מתנדבי עמותת 'SpaceIL' ולערכת חינוך דיגיטלית באתר העמותה, וכן לפעילויות של משרד החינוך, ושל סוכנות החלל הישראלית במשרד המדע והטכנולוגיה, בשיתוף התע"א. החשיפה הביאה מאות ילדים להתחפש לחלליות ולאסטרונאוטים בחג הפורים, ואף לבקש לתרום דמי כיס ומתנות יום הולדת לפרויקט. פרויקט בראשית הוא הישג טכנולוגי אדיר, היוצר תהודה עולמית, ומביא לידי ביטוי את יכולותיה של ישראל בתחום החלל. הפרויקט מהדק את הקשר עם סוכנויות החלל בעולם, ובהן מינהל האווירונאוטיקה והחלל הלאומי



החללית בשלב ההרכבה, בחדר הנקי. צילום: אלכס פולו

הגורם לחומרים (כולל מוצקים) להתנדף, והוא מאופיין בטמפרטורות קיצוניות, בקרינה חזקה, ובאבק מטאורידיים הטסים במהירות עצומה. תנאים אלה הובאו בחשבון בבחירת חומרי הבנייה של החללית, ובבחירת אמצעי ההגנה עליה ועל מערכותיה. נוסף על-כך, החללית נדרשת לניווט מורכב בחלל ללא מערכת איכון גלובלית (GPS)\*\*\*\*.

● תמרון ולכידת הירח: תמרון זה נדרש, כדי שהחללית תעבור מהקפת כדור הארץ להקפת הירח. החללית חייבת להגיע למקום הנכון, בזמן הנכון, במהירות ובכיוון המתאימים, כדי שכוח הכבידה של הירח ילכוד אותה. התמרון הוא קריטי להצלחת המשימה, ואם הוא לא היה מבוצע כראוי, החללית הייתה עלולה להישאר במסלול סביב כדור הארץ, או לעוף למסלול סביב השמש.



הכנסת החללית לתא ואקום. צילום: אלון רון

● נחיתה אוטונומית על הירח: שלב זה הוא המורכב ביותר, ומקום הנחיתה חייב להיות מדויק (שטחו כ-30 קמ"ר). החללית צריכה להאט את מהירותה האופקית ביחס לקרקע, ואחר-כך לבלום את מהירותה האנכית מכ-6,000 קמ"ש למהירות 0. כל זאת, מגובה של כ-30 ק"מ מפני הירח ועד לגובה של 5 מ' מפניו. בגובה זה, מנועי החללית תוכננו להפסיק לפעול, והיא הייתה אמורה ליפול בנפילה חופשית אל פני הירח.

### פיתוח החללית ובנייתה

בשנת 2011, הפרויקט הושק במעמד של הנשיא שמעון פרס ושל רוני רמון. בשנים 2011-2013 בוצעו סקרים טכנולוגיים לביקורת על התכנון הראשוני של החללית, ובחודש נובמבר 2013 נחתם חוזה לפיתוח מערכת ההנעה. בחודש אוגוסט 2014 הושלם סקר תכן ראשוני (Preliminary Design Review) [PDR] לאנטנת החללית, ובחודש ינואר 2015 החל פיתוח המלא. הפיתוח התבצע

\*\*\*\* מערכת מיקום גלובלית (GPS) (Global Positioning System) היא מערכת ניווט לוויינית, המשמשת לקביעת המיקום המדויק של המכשיר.

דולר לצוות הזוכה, 5 מיליוני דולר לצוות שיגיע למקום השני, ועוד 5 מיליוני דולר בונוסים. ביום 13.09.2007, המארגנים הכריזו על התחרות, ומועד השיגור האחרון נקבע לסוף שנת 2014. המועד הוארך עד ליום 31.12.2017, ואחר-כך עד ליום 31.03.2018. במועד זה, התחרות הסתיימה ללא שיגור וללא זוכים. עם זאת, עמותת SpaceIL החליטה להמשיך לנסות להגיע לירח עם החללית בראשית\*\*.

מייסדי עמותת SpaceIL הם היזמים יריב בן, כפיר דמרי ויהונתן ויינטראוב, ששאפו להגשים חלום ונרשמו לתחרות סמוך למועד סגירת ההרשמה. לדברי כפיר ויהונתן: "הסיפור של SpaceIL החל בסוף שנת 2010, כאשר שלושתנו ישבנו בפאב בחולון, והתחלנו לתכנן איך אנו הולכים לבנות את החללית ולשגר אותה לחלל. החללית תוכננה להיות בגודל של בקבוק קוקה קולה, אך ככל שהתכנון הפך למפורט יותר - ממדיה גדלו (הממדים הסופיים: הקוטר כ-2 מ' והגובה כ-1.5 מ'), ובדומה, גדלו כמות המיכלים (ממיכל אחד לארבעה מיכלים גדולים) ומשקל החללית (מ-5 ק"ג ליותר מ-500 ק"ג). צוות המשימה בפרויקט צמח ממתנדבים אחדים לכ-40 עובדים ב-SpaceIL ולכמות דומה בתע"א; ותקציב הפרויקט גדל מ-8 מיליוני דולר לכ-100 מיליון דולר".



הצגת מודל החללית בבית הנשיא. צילום: עמוס בן גרשום

"הנדסת מערכת היא כמו 'מנצח על תזמורת': גוף, שמרכז את כל תחומי המומחיות בפרויקט (כגון: הנדסת חשמל, הנדסת מבנה, הנדסת מערכות בקרה, הנדסת תוכנה, וכו'), תפקידו להבטיח שכל המומחים בפרויקט 'נגנו אותה מנגינה', כדי לקבל מכלול אחד שלם"

### אתגרי הפרויקט

המסע של בראשית לירח כלל חמישה אתגרים עיקריים:

- **שיגור החללית לחלל:** שלב השיגור הוא עתיר סיכונים בפני עצמו. במהלך השיגור, החללית עוברת טלטלות חזקות מאוד, המסכנות את המשך תפקודה, והן מחייבות אותה לעמידות גבוהה ביותר. עמידות החללית נבחנה בניסויים מקיפים, במיתקן הרעדה מיוחד בתע"א.
- **איתור מיקום החללית וניהול הקשר איתה בדרך לירח:** הדרישה לאיתור מדויק של החללית ולניהול הקשר איתה בחלל מחייבת תקשורת במרחקים ארוכים, התקשורת התבססה על "רשת החלל העמוק" (Deep Space Network) [DSN]\*\*. שיתוף הפעולה עם נאס"א גם איפשר לשפר את יכולת המעקב והתקשורת עם החללית לקראת הנחיתה על הירח.
- **עמידות החללית בתנאי קיצון בחלל:** החלל החיצון מצוי בריק (Vacuum),

\*\* ביום 28.03.2019, מארגני התחרות XP השיקו פרס "Moonshot Award" של מיליון דולר על הישגים טכנולוגיים מחוץ לתחרות, וכעבור ימים אחדים הם העניקו את הפרס לעמותת "SpaceIL", כהוקרה על הישגיה.

\*\*\* רשת עולמית, התומכת במשימות החלל של נאס"א. הרשת מאפשרת למפעילי המשימות לקבל נתונים סוג החלליות ולשדר בחזרה אליהן. הרשת כוללת מיתקני תקשורת, הממוקמים בארה"ב, בספרד ובאוסטרליה.

ב-SpaceIL ובתע"א (במפעל מבת חלל\*\*\*\*), והוא נמשך עד שנת 2018.



העמסת המכולה על מטוס מטען. צילום: אליהו אביטל

על הירח), ניסוי כני נחיתה (בדיקת יציבות החללית בזמן הנחיתה, השקיעה הצפויה באדמת הירח, ויכולת רגלי החללית לספוג את "מכת הנחיתה" ולמנוע פגיעה ברכיבי החללית), ניסוי אנטנות תקשורת (בדיקת ביצועי האנטנות וניסוי יכולתן להתגבר על הפרעות של רכיבי החללית), ניסויים בתא ואקום (בדיקת עמידות החללית בתנאי הסביבה הקיצוניים בחלל), וכו'.

בחודש דצמבר 2018, החללית צוידה בקפסולת זמן, המכילה סמלים לאומיים, היסטוריים ותרבותיים, כדוגמת מגילת העצמאות, שירים ישראליים, תפילת הדרך, אוסף ציורים של ילדי ישראל, וחומרים נוספים, שנאספו מן הציבור הרחב. הקפסולה נשמרה על שלושה דיסקטים מיוחדים, שאפשר לפרוק ולהוציא מן החללית.

אחד מן הנושאים הקריטיים בפיתוח החללית הוא הנדסת המערכת. לדברי יואב לנדסמן, מהנדס מערכות בכיר בעמותת SpaceIL: "הנדסת מערכת היא כמו 'מנצח על תזמורת': גוף, שמרכז את כל תחומי המומחיות בפרויקט (כגון: הנדסת חשמל, הנדסת מבנה, הנדסת מערכות בקרה, הנדסת תוכנה, וכו'), תפקידו להבטיח שכל המומחים בפרויקט 'ינגנו אותה מנגינה', כדי לקבל מכלול אחד שלם. זאת, כי אם כל מומחה יבנה את הפרויקט, על-פי ראות עיניו, תתקבל חללית שאולי תדע לצלם מצוין, אבל לא תוכל להתחבר למערכת החשמל, או שמערכת החשמל תהיה מסוגלת לשרוד לילה על הירח, אבל היא לא תצליח להתחבר לגוף החללית בגלל משקלה, או מידותיה החריוגות".

התליך הבנייה כלל את הרכיבים הבאים:



ארזת החללית במכולה ייחודית. צילום: תומר לוי

## פרויקט השינוע היה מבצע לוגיסטי מורכב, הן בגלל רגישות החללית שמחייבת את הובלתה בסביבה מבוקרת טמפרטורה ובאזור סטרילי מבוקר לכלוך ואבק, והן מפני שהיא הכילה חומרים מסוכנים, המחייבים אישורים מיוחדים להטסתה ולהכנסתה לארה"ב

- **ייצור מערכות החללית:** המערכות נבנו במפעלי תע"א ואצל קבלני-משנה. הן כללו: שני מיכלי דלק ושני מיכלי חמצן, מיכלי לחץ הליום, מנוע ראשי ומנועים משניים, ארבעה כני נחיתה, מייצבי חללית, אנטנות, פאנלים סולאריים (ראשיים ומשניים), מצלמות, מערכת הנעה, מערכת בקרה, מערכת תקשורת, וכו'.
- **הרכבת מערכות החללית:** בחודש אוגוסט 2015, רכיבים ראשונים, שנרכשו ופיתוחם הושלם (כגון חיישן הניווט\*\*\*\*\*) ועוקב הכוכבים) החלו להגיע למעבדת האינטגרציה. בשנת 2017 החלה בניית החללית (ההרכבה בוצעה בחדרים נקיים), ובחודש יוני 2018 הושלמו מערכות האווירונאוטיקה, החיישנים, הקשר והחשמל.
- **בדיקות פונקציונליות ובדיקות סביבה:** בחודש יולי 2018 החלו להתבצע בדיקות החללית. סדרת ניסויי הסביבה בחנה את עמידות החללית בתנאי סביבה קיצוניים, והיא כללה: ניסוי הרעדה (בדיקת עמידות החללית לרעידות ולטלטלות בזמן השיגור לחלל, בזמן ההיפרדות מטיל השיגור, ובזמן הנחיתה



שיגור החללית לחלל. קרדיט: SpaceX

\*\*\*\* מפעל מבת חלל ביהוד התפרסם לראשונה ביום ה-19.09.1988, כאשר הלוויין הישראלי הראשון "אופק 1" שוגר בהצלחה לחלל. במהלך השנים הבאות, תע"א המשיכה בפיתוח "סדרת לויני אופק" (שני הלוויינים הראשונים היו לויני ניסוי, והיתר הם לוייני תצפית לצורך איסוף מודיעין צבאי) ובבנייתם, וכן בפיתוח הלוויינים הראשונים ב"סדרת לויני עמוס" (לווייני תקשורת אזרחיים) ובבנייתם.

\*\*\*\*\* חיישן הניווט הוא יחידת מדידה אינרציאלית (Inertial Measurement Unit) [IMU], המשלבת מדי תאוצה, ג'ירוסקופים ולפעמים גם מגנומטר. היחידה משמשת, בעיקר, לניווט כלי-טיס, לויינים וחלליות.



ראש הממשלה בחדר הבקרה, במפעל מבת חלל. צילום: אלירן אביטל

והנקודה הרחוקה ביותר ("Apolune") היא במרחק של כ-10,000 ק"מ מפני הירח. החללית הקיפה את הירח במשך שבוע.

### תמרון הנחיתה: מדינה קטנה עם חלומות גדולים

ביום 11.04.2019 בוצע תמרון הנחיתה על הירח. עשרות מכובדים התכנסו במרכז הבקרה של מפעל מבת חלל, במעמד ראש הממשלה ורעייתו. ראשון בירך הראל לוקר, יו"ר התעשייה האווירית, שאמר: "בשנת 1942, ילד יהודי בשם פטר גינו צייר איור, הנקרא 'נוף הירח', וכעבור שנתיים הוא נרצח באושוויץ. בשנת 2003, האסטרונאוט אילן רמון לקח את העתק הציור לחלל, אך הוא לא שב. אני מקווה, שהיום חלומי של פטר יתגשם". מוריס קאהן, יו"ר SpaceIL, אמר: "בתחילת הפרויקט לא חלמנו, שהוא יגיע לאן שהגיע. הפרויקט ייתן תחושת גאווה לכל יהודי בעולם". בנימין נתניהו, ראש הממשלה, אמר: "עוד צעד חשוב לאנושות וצעד ענק למדינת ישראל". ד"ר עידו אנתבי, מנכ"ל SpaceIL; ועפר דורון, מנהל מפעל מבת חלל, הנחו את תמרון הנחיתה בזמן-אמת. בשלב הראשון, החללית הפנתה את מנועיה לכיוון התנועה, ואז היא החלה לבדוק את מערכותיה (בשלב זה, מערכת הבקרה של החללית יכלה לעצור את הנחיתה ולהמשיך להקפה נוספת של הירח). בשלב השני, החללית עברה את נקודת האל-חזור, והמנוע הראשי החל לעבוד. החללית הספיקה לשדר כמה תמונות (כולל תמונה ממצלמת ה"סלפי" בגובה של 22 ק"מ), אך בגובה של כ-15 ק"מ מפני הירח התגלתה תקלה (IMU2 לא תקין). הניסיון לאתחל את המערכת הביא לרצף אירועים, שבסיומם החללית התרסקה על הירח. אולם, עם זאת, עדיין מדובר בהישג לאומי אדיר: ישראל היא המדינה השביעית, שהקיפה את הירח, והמדינה הרביעית שהגיעה אליו; לאחר התרסקות החללית, נתניהו פנה לקאהן, שהיה התורם העיקרי לפרויקט, ואמר לו: "If at first you not succeed - you try again". יומיים לאחר מכן, קאהן הכריז על פרויקט "בראשית 2", והוא אף העביר את המסר לבני הנוער: "אם בהתחלה זה לא הולך, צריך לקום מחדש ולהשלים את המשימה!".

התמונות בכתבה הן באדיבות SpaceIL ותע"א.



תמונת סלפי של החללית בתמרון הנחיתה על הירח

### המסע הארוך אל הירח

בחודש ינואר 2019, המסע הארוך אל הירח יצא לדרך. המסע החל בשינוע החללית לאתר השיגור בארה"ב, והוא בוצע במכולה ייחודית, שהותאמה מבנית והנדסית למשימתה. פרויקט השינוע היה מבצע לוגיסטי מורכב, הן בגלל רגישות החללית שמחייבת את הובלתה בסביבה מבוקרת טמפרטורה ובאזור סטרילי מבוקר לכלוך ואבק, והן מפני שהיא הכילה חומרים מסוכנים, המחייבים אישורים מיוחדים להטסתה ולהכנסתה לארה"ב. הפרויקט כלל גם שתי מכולות ציוד נוספות. החללית הועברה לנתב"ג והועמסה על מטוס מטען מבוקר-טמפרטורה בטיסת מטען ייעודית. המטוס נחת נחיתה ביניים באירופה, והוא המשיך אל אורלנדו בארה"ב. שם המכולות נפרקו מן המטוס, והן הובלו לאתר השיגור בנמל החלל "קייפ קנוורל" (Cape Canaveral Air Force Station) (CCAFS), בפלורידה, ארה"ב. מהנדסי החלל של תע"א התלוו אל החללית בטיסה. באתר השיגור, הצטרפו אליהם צוותי הנדסה של SpaceIL ושל תע"א, כדי לבצע את סדרת הבדיקות ואת ההכנות האחרונות לקראת הרכבת החללית על משגר הטילים של חברת "SpaceX".



הקפות כדור הארץ והירח (סימולציה)

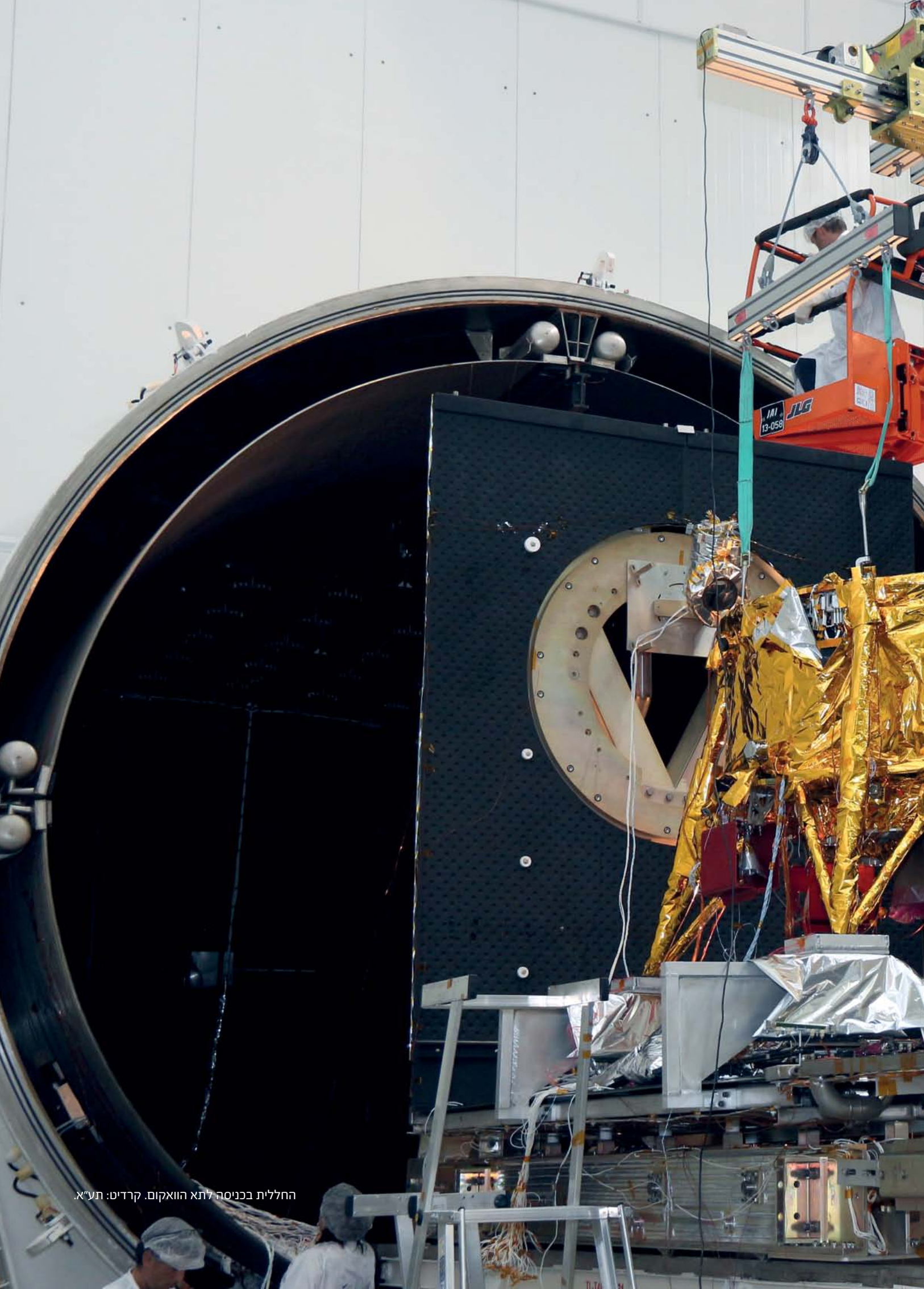
החללית בראשית שוגרה לחלל ביום 22.02.2019, בשעה 03:45, על-פי שרון ישראל. השיגור בוצע באמצעות טיל "Falcon 9", שנשא גם לוויין תקשורת אינדונזי וגם לוויין תקשורת של חיל האוויר האמריקאי. נקודת ההיפרדות מן הטיל הייתה בגובה של 60 אלף ק"מ. בשעה 04:23 החלו להתקבל נתונים ראשונים מן החללית; ובשעה 04:25, רגליה נפרסו כמתוכנן. החללית הקיפה 12.5 פעמים את כדור הארץ (שבע הקפות במסלול, בגובה של 70 אלף ק"מ; שתי הקפות בגובה של 131 אלף ק"מ; שתי הקפות בגובה של 265 אלף ק"מ; ו-1.5 הקפות בגובה של 410 אלף ק"מ).

ביום 04.04.2019, בשעה 17:17, צוותי הנדסה של SpaceIL ושל תע"א ביצעו בהצלחה את התמרון ללכידת הירח. בשלב התמרון, החללית הייתה במרחק של כ-400 ק"מ מפני הירח, והיא האטה את מהירותה מ-8,500 קמ"ש למהירות של 7,500 קמ"ש. התמרון הכניס את החללית למסלול אליפטי סביב הירח כאשר הנקודה הקרובה ביותר ("Perilune") היא במרחק של כ-500 ק"מ מפני הירח,



חדר הבקרה במהלך תמרון הנחיתה על הירח





החללית בכניסה לתא הוואקום. קרדיט: תע"א.