

## דו"ח על סיבות ההתרסקות של החללית בראשית

### מטלה 0- חלק ראשון

#### מגיש: לירון כהן

#### תקציר:

החללית בראשית הייתה גשושית שפותחה על ידי עמותת SpacelL, במטרה להיות החללית הישראלית הראשונה לנחות על הירח. במהלך ניסוי הנחיתה בתאריך 11.4.2019 בשעה 22:24 (שעון ישראל), אירעה תקלה באחד הרכיבים, מה שגרם לשרשרת תקלות שהובילה להתרסקות החללית על פני הירח.

תוכנית הנחיתה של החללית בוצעה באופן אוטונומי, ונוהלה על ידי מחשב החללית. תהליך הנחיתה כלל את השלבים הבאים:

- עם קבלת הפקודה, החללית התחילה בבדיקת מערכות וביצעה תמרון על מנת להתמקם לקראת תחילת השלב. אם מערכת הבקרה הייתה מוצאת בעיה בשלב זה, הנחיתה הייתה מבוטלת. אם לא נמצאה בעיה, הנחיתה הייתה מתחילה, וזוהי נקודת אל-חזור.

- במרחק של כ-850,000 מטר מנקודת הנחיתה ובגובה של כ-25,000 מטר, החללית התחילה בתמרון על מנת למקם את מנועיה בכיוון הנחיתה, כך שהם ישמשו להאטת החללית.

- תהליך הנחיתה היה צפוי לקחת בין 15 ל-21 דקות, כאשר מחשב הבקרה היה מפעיל את המנועים בהתאם לנתונים, מאט את החללית עד לעצירה מוחלטת בגובה של 5 מטרים מעל פני הירח. מגובה זה, החללית הייתה "נופלת" בנפילה חופשית במשך 2.5 שניות עד לנחיתה על פני הירח.



## הממצאים לסיבת ההתרסקות

1 הממצאים העיקריים מחקירת ההתרסקות:

1.1 דקות ספורות לפני השלמת הנחיתה כאשר החלית הייתה בגובה של 14,000 מטר מעל פני הירח, דווח שמכשיר IMU2 (יחידת מדידה אינרציאלית) "לא תקין". (33:00)  
מד התאוצה- מכונה IMU (קיצור של Inertial Measurement Unit)



1.2 מספר שניות לאחר מכן מדווח על ניסיון להדליק. במערכת הקשר שואלים האם הדלקתו לא תגרום לכשל ביחידה השנייה. (33:23)

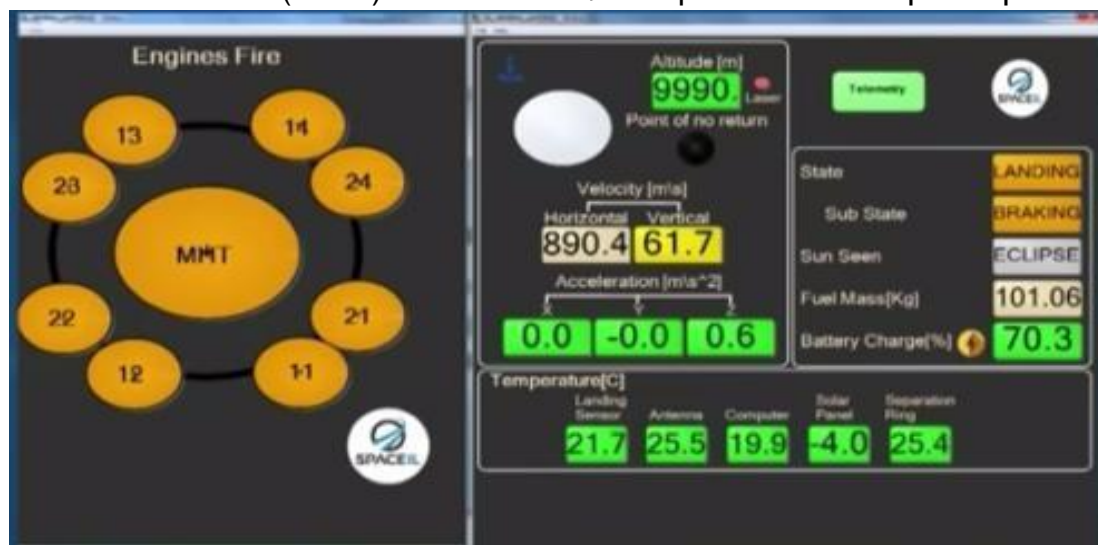


- 1.3. מספר שניות נוסף ודווח שאבד הקשר החברה שמספקת את התקשורת.  
(33:36)
- 1.4. כחצי דקה לאחר מכן מבקשים לא להדליק את המכשיר התקול. (34:05)



- 1.5. התקשורת עם החללית חזרה לפעול. הנתונים שהופיעו על הצג הראו שהחללית כרגע בגובה 11,040 מטר עם מהירות אנכית של 901 מטר בשניה ומהירות אופקית 47.2 מטר בשניה כאשר נתון זה צבוע בצהוב. (שזה לא סימן כלכך טוב ומראה חריגה ובעיה). (34:23)

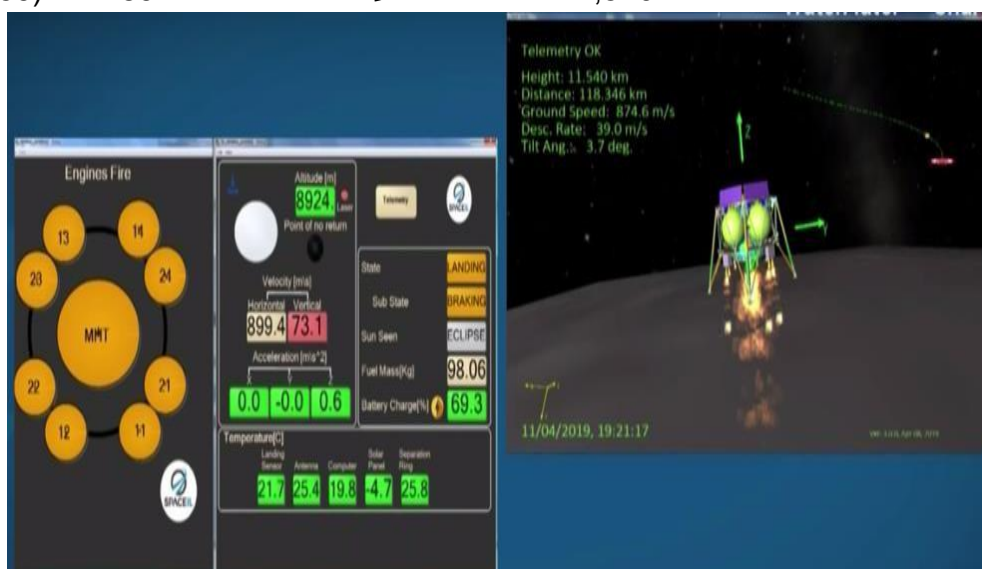
1.6. בנוסף, ניתן להבחין שהמנועים לא דולקים והמהירות האנכית גודלת. בגובה של כ-10,000 מטר ניתן להבחין שהמהירות האופקית כמעט ולא השתנתה. (34:43)



1.7. מספר שניות לאחר מכן הנתונים מראים שהמהירות האופקית גדלה ל-71.9 מטר בשניה והיא נצבעה באדום. (34:57).



1.8. ניתן להבחין שנתוני הסימולטור כבר אינם תואמים את הנתונים האמיתיים. בשלב זה הייתה החללית אמורה להיות בגובה 11,540 מטר אבל בפועל הייתה בגובה 8924 מטר. (34:59)





1.9 נשאלה שאלה בבקרה "האם מנוע ראשי דולק?" והתשובה הייתה "כן". הנתונים מראים שהמהירות האופקית גודלת וכן המהירות האנכית כבר עומדת על 80 מטר בשניה. (35:08)

1.10 מישהו מהבקרה מדווח שכנראה מנוע ראשי אינו דולק אף על פי שהטלמטריה מראה שהוא דולק. הוא מצוין שהתאוצות מראות שהחללית לא מאיטה אלא להיפך. (35:30)

1.11 מישהו מבקש לעשות Reset. (35:42)



1.12 הבקרה מדווחת שכנראה יש בעיה עם המנוע הראשי והחללית מאבדת גובה. (36:00)

1.13 נשאלת שאלה האם יש אישור לשלוח פקודת Reset? (36:36)

1.14 מדווח שמנוע ראשי עובד לפי לחצים. אבל ניתן לראות שהמהירות האנכית היא כבר

134 מטר בשניה בעוד החללית בגובה 150 מטר. זהו הנתון האחרון שהתקבל מהחללית. (36:42)



## 1.15.

מדווח שאבדה התקשרות וכנראה שהחללית לא נחתה כפי שציפו. כנראה שהיתרסקה. (37:41).

**ממצאים**

נראה כי היה בעיה בחיישן של התאוצה האופקית ולא היה ידוע אם אנחנו בתאוצה בציר הנ"ל לאחר שינוי הזווית לשם האטה הייתה קריסה של המערכת וגרמה לחוסר איזון. לפי הנתונים נראה כי החללית התהפכה עד כדי מצב של 30 מעלות מעלה, כך שכל שננסה להפעיל את המנועים נקבל האטה בציר האופקי כמו שאנו רוצים אבל כתוצאה מכך נקבל תאוצה חיובית לכיוון הירח בנוסף.

עקב חוסר חיישן התאוצה של ציר האנכי הם לא מודעים לאן החללית מכוונת ומאיצה. לבסוף – צוות הבקרה שלא הצליחו לעלות על הממצאים בזמן אמת, שגילו זה כבר היה מאוחר ויתרה מכך, בכל פעולת החייאה למצב שהם ניסו לעשות הם רק הרסו יותר, ובסוף בראשית התרסקה.

**סיכום הממצאים כפי שדווח בתקשורת:**

- 3.1. בדקות האחרונות לנחיתה החלה שרשרת תקלות כאשר התקלה הראשונה הייתה במערכת IMU. לאחר מכן אבדה התקשורת וכשחזרה נראה שהחללית איבדה גובה רב ונטתה בזווית לא אופטימלית לנחיתה.
- 3.2. לאחר ששבה התקשורת התגלה שהמנוע הראשי לא פועל והחללית ממשיכה לצנוח. לאחר אתחול מחשב החללית, חזר המנוע לפעול בגובה של כקילומטר אחד מפני הקרקע, כאשר מהירות נפילת החללית הייתה כ-947 מ"ש והבלימה כבר בלתי אפשרית.
- 3.3. נתון הגובה האחרון שהתקבל עמד על כ-150 מטר, ומיד אחר-כך התרסקה החללית על אדמת הירח.
4. מניתוח רצף האירועים אנו למדים כי:
  - 4.1. נתגלתה תקלה במערכת ה-IMU השני. החללית מצוידת בשני מערכות כאלו לכן אם מערכת אחת התקלקלה יש את המערכת השניה. אנו מסיקים כי אם המערכת השניה פעלה כראוי תקלה זו לא אמורה להשפיע על החללית.
  - 4.2. מספר שניות לאחר שניסו להדליקו אבד הקשר עם החללית. לכאורה לא תלוי בבעיה. אך יחד עם זאת יתכנו מספר אפשרויות:
    - 4.2.1. אפשרות 1: הניסיון להדליק את המכשיר התקול גרם לכשל במחשב החללית והחל תהליך restart. לכן בעצם נותק הקשר עימה.
    - 4.2.2. אפשרות 2: החללית הסתחררה כתוצאה מהמכשיר התקול וכך דלק לא הגיע למנועים שכן בתוכנית הנחיתה תכננו שהבלימה תגרום לדלק לנוע בכיוון המנוע וכך יזרום הדלק אל המנוע. כתוצאה מכך כבה המנוע הראשי.
    - 4.3. כאשר חזרה התקשורת ניתן להבחין שהיא איבדה 2,310 מטר גובה וכן תאוצתה האופקית גדלה פי 2. לפי אפשרות 1 וכן לפי אפשרות 2 המנוע הראשי כבה וגרם לכך שלא תהיה בלימה ולכן התאוצה האופקית גדלה.
    - 4.4. בשלב זה המנועים נראים דולקים אך ברשת הקשר נשאלה השאלה אם הם באמת דולקים כי התאוצות גוברות. התשובה הייתה שהמנוע הראשי דולק בהתאם

ללחצים. מכאן ניתן להסיק שאפשרות 2 היא אפשרות סבירה כי אם המנוע הראשי דולק בכיוון הפוך ממה שתכננו אזי המנוע בעצם מאיץ את החללית בכיוון הקרקע ולא מאיט אותה.

4.5. החללית התרסקה במהירות 134 מטר בשניה בקרקע כאשר לפי הנתונים האחרונים כל המנועים פועלים. הדחף שהמנועים מייצרים הוא 630 ניוטון. כלומר מאסת החללית הייתה משקל עצמי ועוד 76 ק"ג דלק שהם 240 ק"ג. בירח מאסת החללית הייתה כ-40 ק"ג ולכן דחף המנועים של כ-630 ניוטון היה אמור להאט אותה עד לכדי 0 קמ"ש.

### הגילויים החדשים לפי הקישור במטלה מכון דוידסון

## Beresheet Crash Landing Event

- **Star tracker malfunction on launch night:** A pair of cameras designed to determine the spacecraft's angle in space were apparently blinded by dust particles that landed on their shields as it separated from the launch vehicle. The team had to find creative solutions to get around this problem - including tilting the spacecraft on its side during maneuvers, and using accelerometers instead of the star trackers.
- **Unexpected spacecraft computer reboots:** Several days after launch, the spacecraft's computer rebooted unexpectedly, and the reboot problem continued to plague the spacecraft, apparently due to a malfunction in the electronics box that mediates between the computer and the spacecraft's systems, possibly due to exposure to radiation. The low cost materials were damaged by the sun radiations which caused the spaceship system to restart
- **Because there was only one computer,** software extensions designed to overcome problems were not burned into permanent memory and were erased at each reboot. And they had to be loaded again in a command file. Because of the low budget the spaceship had no redundant system
- **The spacecraft had two such accelerometers called IMU (short for Inertial Measurement Unit)** While landing, the acceleration sensor shutdown (IMU2), so the crew had to make a quick decision to rely on IMU1 or to restart IMU2. And they choose to restart
- **Activating IMU2 blocked data transmission from IMU1 because of some system logic,** Therefore the system did not receive any acceleration data for about a second. Therefore he declared a navigation failure, In such a case he was programmed to reboot himself  
NOTE- The reboot lasted less than two seconds, but the computer returned to activity without the software extensions, which according to the landing command file were supposed to be loaded every minute for safety. As a result, the computer rebooted itself over and over again, and only after about five such reboots did the extensions finally load.
- **The computer reboots caused the spacecraft's main engine to shut down,** which at this point was supposed to be running all the time and slowing down the landing. The computer was supposed to start the engine immediately, but here a malfunction occurred that the engineering team discovered before launch but did not have time to fix: to restart the engine, it must receive voltage from two sources, but following the reboot, only one of them worked – and the main engine did not start. The spacecraft continued its diagonal fall towards the moon, with only the small direction engines continuing to operate, and even maintaining its correct direction.
- **Crash -** The spacecraft hit the lunar surface at a speed of more than 3,000 km/h, and probably crashed into pieces.

## Causes of the spacecraft crash

---

- Mission rushed (more additional testing required)
- IMU2 issue
- Low cost materials
- Low experienced crew
- System restarts
- Data transfer block
- Critical control commands were not pre-programmed into the system but were instead loaded into RAM during the mission