

**דו"ח תקציר התרסקות חללית "בראשית" על הירח**  
**בתאריך: 11.4.2019 בשעה 22:00**

מגישים:  
רוני רונן

## 1. תקציר:

1.1. החללית בראשית הייתה גשושית שפותחה ע"י עמותת SpaceIL במטרה להיות החללית הישראלית הראשונה שנחתת על הירח. במהלך נחיתה החללית בתאריך 11.4.2019 בשעה 22:24 (שעון ישראל) כשל אחד הרכיבים וכתוצאה משרשרת אירועים התרסקה החללית על פני הירח.

1.2. תוכנית הנחיתה של החללית על הירח פעלה בצורה אוטונומית ובוצעה ע"י מחשב החללית לפי השלבים הבאים:

1.2.1. כאשר תתקבל הפקודה, החללית תחל בביצוע בדיקת מערכות וכן תמרון על מנת להביאה לתחילת השלב. אם מחשב הבקרה ימצא בעיה בשלב זה תבוטל הנחיתה. אם לא תמצא בעיה תחל הנחיתה וזוהי נקודת אל-חזור.

1.2.2. כ-850,000 מטר מנקודת הנחיתה ובגובה של כ-25,000 מטר תחל החללית בביצוע התמרון כך שבסופו תתייצב עם מנועיה בכיוון הנחיתה על מנת שישמשו להאטה.

1.2.3. תהליך הנחיתה יתבצע בין 15 דקות ל-21 דקות כאשר מחשב הבקרה של החללית יפעיל את מנועיה בהתאם לנתונים ויאט את החללית עד לעצירה מוחלטת בגובה של 5 מטר מעל פני הירח. מגובה זה "טיפול" החללית בנפילה חופשית ותעגון על הירח. נפילה זו תיקח 2.5 שניות.

## 2. הממצאים העיקריים מחקירת ההתרסקות:

2.1. דקות ספורות לפני השלמת הנחיתה כאשר החללית הייתה בגובה של 14,000 מטר מעל פני הירח, דווח שמכשיר IMU2 (יחידת מדידה אינרציאלית) "לא תקין". (33:00)



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



2.3. מספר שניות נוסף ודווח שאבד הקשר עם JPL שהיא החברה שמספקת את התקשורת. (33:36)

2.4. כחצי דקה לאחר מכן מבקשים לא להדליק את המכשיר התקול. (34:05)

2.5. התקשורת עם החללית חזרה לפעול. הנתונים שהופיעו על הצג הראו שהחללית כרגע בגובה 11,040 מטר עם מהירות אנכית של 901 מטר בשנייה ומהירות אופקית 47.2 מטר בשנייה כאשר נתון זה צבוע בצהוב. (אנו מניחים שהנתון חורג מהטווח שהוקצה לו). (34:23)



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



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



2.8. 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)



2.9. 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)



2.10. מישהו מהבקרה מדווח שכנראה מנוע ראשי אינו דולק אף על פי שהטלמטריה מראה שהוא דולק. הוא מציין שהתאוצות מהחללית לא מאיטה אלא להיפך. (35:30)



2.11. מישהו מבקש לעשות Reset. (35:42)



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

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

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

134 מטר בשניה בעוד החללית בגובה 150 מטר. זהו הנתון האחרות שהתקבל מהחללית.

(36:42)



- 2.15. מדווח שאבדה התקשורת וכנראה שהחללית לא נחתה כפי שציפו. כנראה שהיתרסקה. (37:41).
3. סיכום הממצאים כפי שדווח בתקשורת:
- 3.1. בדיקות 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 להדליק 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.

גילויים חדשים על בראשית

אתחולי המחשב גרמו לכיבוי המנוע הראשי של החללית, שבשלב הזה היה אמור לפעול כל הזמן ולהאט את הנחיתה. המחשב היה אמור להפעיל מיד את המנוע, אבל כאן השפיעה תקלה שהצוות ההנדסי גילה לפני השיגור אך לא הספיק לתקן: כדי להפעיל מחדש את המנוע, עליו לקבל מתח משני מקורות, אבל בעקבות האתחול רק אחד מהם עבד – והמנוע הראשי לא נדלק. החללית המשיכה בנפילה אלכסונית לעבר הירח, כשרק מנועי הכיוון הקטנים ממשיכים לפעול, ואף שומרים על הכיוון הנכון שלה. היא פגעה בקרקע הירח במהירות של יותר מ-3,000 קמ"ש, וכנראה התרסקה לרסיסים.