

# דוח חקירה בטיחותית

(דוח סופי)

תיק תקרית חמורה מס' 107-14

- כשל מנוע בטיפוס לאחר המראה וחזרה -

7.9.2014	בתאריך
B-767-300ER	כלי הטיס
4X-EAK	סימן רישום
מערבית לנתב"ג	מקום האירוע

לצורכי בטיחות בלבד

## **הדין ביחס החקירה הבטיחותית ותוצריה**

**(מחוק הטיס, התשע"א-2011 ומנספח 13 לאמנת התעופה)**

**חקירה בטיחותית** - חקירה של אירוע בטיחותי לפי פרק זה היא הליך הכולל איסוף מידע וניתוחו, הסקת מסקנות, לרבות קביעת הסיבות לאירוע הבטיחותי או הגורמים שתרמו להתרחשותו, ומתן המלצות הנוגעות לעניין לצורך שיפור בטיחות התעופה, ככל שלדעת החוקר הראשי יש בכך צורך. (סעיף 104 לחוק).

**מטרת חקירה בטיחותית** - מטרתה הבלעדית של חקירה בטיחותית היא מניעת אירועים בטיחותיים, ואין תכליתה ייחוס אחריות אזרחית, פלילית או משמעטית לאירועים כאמור. (סעיף 105 לחוק).

**תפקידי החוקר הראשי** - החוקר הראשי יהיה ממונה על ביצוע חקירות בטיחותיות לפי הוראות פרק זה. במילוי תפקידו יפעל החוקר הראשי בהתאם להוראות נספח 13 לאמנה, ככל שהן ישימות בישראל, למעט הוראות כאמור שלגביהן הודיע המנהל לארגון התעופה הבין-לאומי, לפי הוראות סעיף 4(ב) לחוק רשות התעופה האזרחית, כי ישראל פועלת באופן שונה. (סעיף 108 לחוק).

**אי-תלות** - בביצוע חקירה בטיחותית לפי פרק זה אין מרות על החוקר הראשי ועל ממלא מקומו, זולת מרותו של הדין; הוראות סעיף זה יחולו גם על חוקר שהוסמך לפי סעיף 115, בכפוף להוראות סעיף קטן (ג) של הסעיף האמור. (סעיף 109 לחוק).

**פרסום הדוח הסופי** - החוקר הראשי יפרסם את הדוח הסופי באתר האינטרנט של משרד החוקר הראשי וכן יעמיד את הדוח לעיון הציבור, ללא תשלום, במשרד התחבורה והבטיחות בדרכים, ובלבד שלא יפרסם את הדוח או חלק ממנו ולא יעמידו לעיון הציבור כאמור, אם יש בכך כדי לפגוע בבטיחות המדינה או ביחסי החוץ שלה. (סעיף 119 לחוק).

**המלצות החוקר הראשי** - המנהל וכל מי שהחוקר הראשי כלל לגביו המלצות בדוח הסופי יבחן את ההמלצות כאמור הנוגעות אליו, יחליט באשר ליישומן ויודיע על החלטתו המנומקת בכתב לחוקר הראשי; המנהל יעביר את החלטתו המנומקת כאמור גם לשר. (סעיף 104 לחוק).

**אי-קבילות הדוח הסופי** - הדוח הסופי לא יתקבל כראיה במשפט, למעט בערר לפי סעיף 39, בעתירה מנהלית או בערעור מנהלי על החלטות לפי חוק זה, לפי חוק בתי משפט לעניינים מנהליים, התש"ס-2000, ולא ישמש בהליך שנוקט מעביד כלפי עובדו. (סעיף 124 לחוק).

**חיסיון ואי-קבילות של חומר חקירה בטיחותית** - חומר חקירה בטיחותית לא יימסר ולא יתקבל כראיה במשפט ולא ישמש בהליך משמעתי, בהליך מנהלי או בהליך שנוקט מעביד כלפי עובדו. (סעיף 123 לחוק).

- "Also, discuss and analyze any issue that came to light during the investigation which was identified as a safety deficiency, although such issue may not have contributed to the accidents".
- The investigation may also reveal other hazards of deficiencies within the aviation system not directly connected with the causes of the accident".
- "When drafting the Final Report, the writer should not assume that everyone who reads the report is familiar with the technical detail".
- "The writer's responsibility is to present the reader with a word picture of the accident and the investigation. The writer should assume that the reader is intelligent but uninformed and will analyze the facts presented in order to test the conclusion of the Final Report".
- "If the Final Report must delve into complicated areas such as aerodynamics, metallurgy, and the operation of aircraft systems, the subject should be explained in a way that it is easy to understand".

(ICAO / ANNEX 13 / DOC. 9756 / PART I & IV)

**הדוח הועבר לפרסום עפ"י סעיף 119 לחוק הטיס, התשע"א – 2011.**

## דוח חקירה בטיחותית (דוח סופי)

### תיק תקרית חמורה מס' 107-14

#### תקציר האירוע

ביום ראשון, בתאריך 7 בספטמבר 2014, בשעה 01:43 (ז"מ), מטוס בואינג 767 של חברת אל על, בטיסה LY029, המריא ליעדו בטורונטו כשעל סיפונו היו 208 נוסעים ואנשי צוות. בשעה 02:00 (ז"מ), בטיפוס לאחר ההמראה מנתב"ג, כאשר היה המטוס במרחב פיקוח ניקוסיה, צוות הטיסה חש ברעידות ורעשים חריגים. חיוויים בתא הטייס הצביעו על כשל במנוע שמאל. צוות הטיסה ביצע פעולות בהתאם ל – QRH ("הזדקרות מדחס"), לרבות העברת מנוע שמאל לסרק. משחזרו על עצמן התופעות החריגות הצוות סיווג את התקלה כתקלה חמורה במנוע (Severe Damage), כיבה את המנוע עם סימני הכשל, הכריז חירום (MAYDAY), חזר לנחיתה בנתב"ג ובהנמכה לשדה רוקן דלק. בשדה התעופה הוכרז מצב "חירום 2". המטוס נחת על מסלול 12 בנתב"ג, בשעה 02:37, עם משקל נחיתה מעט גבוה ממשקל הנחיתה המרבי המותר. במהלך הנחיתה לא התרחשו אירועים חריגים. לאחר עצירת המטוס ופינוי המסלול, כוחות הכיבוי קיררו את גלגלי כני הנסע של המטוס, תוך שהתרחשו פריקות אוויר מארבעה גלגלים. נוסעי המטוס נלקחו לטרמינל ומצב השדה הוחזר לשגרה. האירוע דווח לחוקר הראשי במהלכו. כשעה לאחר נחיתה שוחח החוקר הראשי עם הקברניט והודיע על פתיחה בחקירה.



המטוס נשוא התקרית

## 1. מידע עובדתי

### 1.1 היסטוריה של הטיסה (הזמנים בזמן מקומי)

ביום ראשון, בתאריך 7 בספטמבר 2014, בשעה 01:43 לפנות בוקר, מטוס בואינג 767-300 של חברת אל על, שרישומו 4X-EAK, המריא מנתב"ג, בטיסה LY029 שיעדה שדה התעופה פירסון בטורנטו. משקל המטוס בעת ההמראה היה 183 טון. על סיפון המטוס היו 194 נוסעים, 4 טייסים ו-10 דיילים. סה"כ היו על כלי הטיס 208 נפשות.

בשעה 02:00, כאשר המטוס היה במרחב ניקוסיה, בטיפול בכיוון מערב, ברום טיסה FL260, הטייסים שמעו שני פיצוצים חלשים, מלווים ברעידות קלות ורעש הדומה לרעש הנשמע בשטיפת שירותים. בנוסף לכך, הצוות אבחן במנוע שמאל עליית טמפרטורה (EGT) של 50 מעלות ורעידות, עד לערך של 1.3.

האבחנה הראשונית של צוות הטיסה הייתה שמדובר בהזדקרות מדחס, ללא כיבוי מנוע. צוות הטיסה המשיך בטיפול, ללא שינוי בנתוני המנוע, תוך כדי שהתייצב ברום טיסה FL300. לאחר התייצבות בגובה, שלוש דקות מהאבחנה הראשונית במצב החריג של המנוע, צוות הטיסה חווה שלושה אירועים נוספים של הזדקרות מדחס, בהפרשי זמן קצרים, תוך שנצפו בתא הטייס שינויים ב-N1 וב-EPR.

הצוות הכריז על מצב ENGINE LIMIT OR SURGE OR STALL, ופעל לפי ה-QRH. פעולות הצוות כללו סגירת מנוע לסרק, הכרזת חרום (MAYDAY) והנמכה, בתיאום עם פיקוח ניקוסיה, תוך כדי פניה חזרה לנתב"ג.

במהלך הטיפול בתקלה ותוך כדי ההנמכה, כאשר המנוע היה במצב סרק, הצוות איבחן התרחשות נוספת של הזדקרות מנוע והורגשו בסטיק רעידות מתמשכות. הקברניט הכריז על ENGINE SEVERE DAMAGE ופעל על פי ה-QRH, במסגרתו כיבה את המנוע והפעיל ידית אש. זמן קצר לאחר מכן, הצוות החל בריקון דלק לצורך הקטנת משקל הנחיתה.

בשעה 02:37, הצוות נחת על מסלול 12, במשקל 155 טון (10 טון מעל משקל נחיתה מרבי, MLW). מצב הבלמים בנחיתה היה MAX AUTO. היקף כוחות החילוץ וההצלה שנערכו לנחיתה המטוס בנתב"ג היה: 28 אמבולנסים, 3 ניידות תארו"ן, 11 ניידות נט"ן ו-20 רכבי כיבוי.

לאחר הנחיתה, הצוות פינה את המטוס מהמסלול דרך קושרת Y. כוחות כיבוי והצלה, הגיעו למטוס לאחר עצירתו. כבאי השדה בדקו חיצונית את המטוס והחלו בקירור הבלמים בעזרת אוויר. הנוסעים הורדו במדרגות חיצוניות והוסעו לטרמינל.

גלגלים 1 ו-3 ובהמשך 5 ו-6 פרקו אוויר, עקב חימום יתר.

האירוע דווח לחוקר הראשי במסרון ממרכז תיאום בשעה 02:21. החוקר הראשי עמד בקשר עם גורמים בשדה ובמרכז שליטה אל על, שוחח עם קברניט הטיסה, שעה וחצי לאחר הנחיתה ולאחר מכן הודיע על פתיחה בחקירה.

## 1.2 המעורבים

### הקברניט

- בן 59.
- ניסיון טיסה כללי – 22,000 שעות, מתוכן 15,000 שעות על מטוסי 767.
- מועסק בחברה משנת 1997.

### הקצין הראשון

- בן 39.
- ניסיון טיסה כללי – 12,000 שעות, מתוכן 6,000 שעות על מטוסי 767.
- מועסק בחברה משנת 2007.

## 1.3 המטוס

- מטוס בואינג מדגם 767-300ER.
- שנת ייצור: 1997.
- משקלים מירביים: המראה - 185,065 ק"ג, נחיתה - 145,149 ק"ג.
- תעודת C.of.A: בתוקף, עד לתאריך 20.6.2015.

## 1.4 המנוע

- מנוע תוצרת חברת Pratt & Whitney.
- דגם PW4060-3, מספר סידורי 724718.
- המנוע צבר סה"כ 67,640 שעות פעילות ב - 11,295 מחזורים.
- מאז טיפול התחזוקה האחרון של המנוע, במכון הבדק (shop visit), בוצעו 14,910 שעות פעולה ב - 2,455 מחזורים.
- התחזוקה האחרונה בוצעה באוקטובר 2009 בשווייץ, ע"י חברת SR Technics (SRT), וכללה שיפוץ של ליבת המנוע (Core Heavy Maintenance, CHM).

## 1.5 מז"א

### ברום טיסה FL260-FL300

- מז"א יציב.
- ללא עננות.
- ראות: טובה, מעל 10 ק"מ.

### בנחיתה בנתב"ג

- מז"א נאה – CAVOK.
- רוח קלה – כיוון 190, 2 קשרים.
- טמפרטורה - 24 מעלות צלזיוס.
- לחץ – 1010 מיליבר.

## 1.6 תקשורת בתא הטייסים

הטיסה הייתה קצרה, ונמשכה בפועל כשעה. מאחר שהקלטת ה-CVR כוללת את השעותיים האחרונות של כל טיסה, עלה בידי צוות החקירה לנתח את ההתנהלות בתא הטייסים, בין השאר, גם על פי הקלטה זו. יצוין כי מדובר בהקלטה של המיקרופון המקליט את אוירת השמע בתא הטייסים.

הטבלה שלהלן מתארת באופן כרונולוגי את ההתרחשות בתא הטייסים.

הערה: הכללת תמליל הקשר המובאת להלן היא עפ"י קביעתו של החוקר הראשי, כי הדבר חיוני להמחשת ממצאי החקירה הבטיחותית ו/או מסקנותיה.

מס"ד	זמן מקומי	התרחשות	הערות
1	01:42:00	המראה	
2	01:59:13	אבחנה ראשונה בכשל מנוע	הקברניט והקצין הראשון דנים בערך EGT גבוה של מנוע שמאל
3	02:01:50	התייצבות בגובה FL300	
4	02:02:00	דיון בתא הטייס על רעשים חריגים	
5	02:02:20	הכרזת Serge or Stall במנוע שמאל	בליווי רעידות קבועות
6	02:03:10	הכרזת חירום MAYDAY	לפיקוח ניקוסיה, בצירוף דיווח על בעיה במנוע
7	02:03:45	בקשה מפיקוח ניקוסיה למרשה חזרה לנחיתה בנתב"ג	מלווה בדיון קצר בתא הטייס לגבי צד הפניה, החלטה על צד ימין
8	02:04:10	כניסת צוות כפול	נשמעת טריקת הדלת בתא הטייס
9	02:04:25	דיווח לפיקוח תל אביב על חזרה לנחיתה בגלל תקלת מנוע	
10	02:04:33	קברניט מנחה להפסיק שירות בקבינה	
11	02:05:30	בקשת הנמכה לגובה 15,000 וקבלת אישור	תקשורת עם פיקוח ניקוסיה
12	02:11:45	בקשה מהפיקוח לביצוע ריקון דלק, הפקח מאשר	תקשורת עם פיקוח ניקוסיה
13	02:12:30	מעבר קשר מניקוסיה לפיקוח תל אביב	
14	02:12:50	הקמת תקשורת עם פיקוח תל אביב	כיוון טיסה 180
15	02:13:30	דיווח סטטוס דלק: 60 אלף פאונד, מודיעים על ריקון 25 אלף פאונד	תקשורת עם פיקוח תל אביב

מס"ד	זמן מקומי	התרחשות	הערות
16	02:14:10	קברניט מטיס מבקש מקברניט משקיף לבדוק את המנוע ויזואלית מהקבינה	קברניט משקיף יוצא מתא הטייס
17	02:15:49	קברניט המשקיף חוזר מבדיקת מנוע ומדווח "הכל נראה בסדר"	
18	02:16:07	קברניט מציין אפשרות נחיתה על מסלול 26	מלווה בדיון קצר על משקל גבוה בנחיתה
19	02:16:55	ק. ראשון מדווח שהרעידות הפסיקו עם תחילת ההנמכה	
20	02:17:11	הכרזה על משקל 174 טון	דיווח של ק. ראשון
21	02:17:30	דיון בתא הטייס לגבי מסלול לנחיתה	קברניט משקיף מציין שמבחינת אורך, מסלול 12 אמור להספיק, קברניט מטיס מבקש לוודא
22	02:17:50	קברניט מטיס מבקש להכניס גישת ILS למסלול 12	
23	02:18:20	קברניט מטיס מבקש להודיע לפיקוח ת"א שייתכן שיזדקקו להמתנה לריקון דלק	
24	02:19:20	פיקוח ת"א מציע לבצע את הריקון מעל MERVA	
25	02:19:35	הצוות מבקש לבצע ריתוק קרוב יותר לנתב"ג	תקשורת עם פיקוח תל אביב
26	02:19:50	קברניט משקיף מציין שניתן לנחות על מסלול 12 במשקל 155 טון	
27	02:20:50	תקשורת לגבי ריתוק בנקודה SOLIN	תקשורת עם פיקוח תל אביב, בהנמכה לגובה 15 א"ר
28	02:21:30	דיון קצר ואחריו החלטה על נחיתה ללא ביצוע ריתוק	
29	02:22:55	בקשה מהפקח לגישה ישירה ללא המתנה דרך SOLIN לנתב"ג	תקשורת עם פיקוח תל אביב
30	02:24:55	קבלת מרשה הנמכה לגובה 6,000 רגל	תקשורת עם פיקוח תל אביב
31	02:25:30	קבלת רוח בנתב"ג 190/2	תקשורת עם פיקוח תל אביב
32	02:26:50	הכרזה על 40 מייל לנגיעה	דיווח של ק. ראשון
33	02:27:00	מעבר קשר לבן גוריון	תקשורת עם פקח גישה
34	02:28:00	דיון בתא הטייס לגבי מהירויות	
35	02:28:30	הכרזה על 9 טון דלק נוספים לריקון	דיווח של ק. ראשון
36	02:28:50	קברניט מתחיל בתדריך לקראת נחיתה	אוזכרה הליכה סביב, הוגדר מצב מדפים
37	02:29:20	בקשה לגרירה ואבחון על הקרקע של הגלגלים	תקשורת של ק. ראשון עם פקח גישה בן גוריון

מס"ד	זמן מקומי	התרחשות	הערות
38	02:29:40	ק. ראשון מודיע לבן גוריון שינסו לפנות את המסלול אך ייתכן שיישארו עליו	תקשורת של ק. ראשון עם פקח גישה בן גוריון
39	02:30:40	Localizer Green	דיווח של ק. ראשון
40	02:31:11	הכרזת אלף רגל בהנמכה לגובה (חוצים 7,000 רגל)	דיווח של ק. ראשון
41	02:31:30	20 מייל מהמפתן	דיווח של ק. ראשון
42	02:31:30	Flaps 1	דיווח של הקברניט
43	02:32:00	Glide slope green	דיווח של ק. ראשון
44	02:32:30	Flaps 5	דיווח של הקברניט
45	02:32:55	חוזרים לבצע בד"ח decent	דיווח של הקברניט
46	02:33:20	מציינים מצב בלמים auto max	
47	02:33:44	פקח הגישה בנתב"ג מעביר לתדר פקח ההקפה	
48	02:34:00	Gear down	דיווח של הקברניט
49	03:34:10	Flaps 20	דיווח של הקברניט
50	02:34:40	הכרזה מהירות 159 קשר	מלווה בדיון בין הקברניט וק. ראשון, אזכור של הליכה סביב
51	02:35:00	Landing checklist	
52	02:36:15	הודעה לקבינה "היכון לנחיתה"	
53	02:36:22	500 רגל לנחיתה	
54	02:36:33	300 רגל לנחיתה	
55	02:36:56	נגיעה במסלול	
56	02:37:15	עצירה	



## 1.7 החקירה

כבר בתחילת החקירה הובן, כי עיקר החקירה נסבה סביב הכשל הטכני, כגורם המרכזי לאירועים בטיסה ולסיכונים הנלווים אליהם.

מתוך רצון להתעמק בתחומים שהינם בעלי פוטנציאל גבוה לסייע במניעת הישנות מקרים מסוכנים, ומתוך הבנה שפעולות צוות הטיסה היו מותאמות במהותן לסיטואציה, החליט החוקר הראשי להורות על סדרה של בדיקות טכניות מקיפות.

החוקר הראשי נעזר במפעל המנועים בתעשייה האווירית, אליו הועבר המנוע על ידי חברת אל על, יחד עם דגימות שמן לבדיקה, וחומר השבבים אשר נלקח מגלאי השבבים שבמגופות, לצורך ביצוע בדיקות.

הבדיקות נחלקות לבדיקות ראשוניות, שנערכו בסמיכות לתאונה, ובדיקות המשך, שבוצעו במעבדות ייעודיות, בחודשים שלאחר התאונה.

סדרת הבדיקות נועדה לסמן את גורמי הכשל המרכזיים ולבסס את תרחיש הכשל הסביר, כל זאת, כאמור, במטרה להמליץ על פעולות מניעה מתאימות.

לאחר הבדיקות הראשוניות, נערכה התייעצות עם יצרן המנוע לגבי היסטוריה של כשלים מסוג זה, מתוך כוונה למקד את הבדיקות המעמיקות בהמשך.

במהלך החקירה, נציגי יצרן המנוע הגיעו לארץ, התייעצו עם צוות החקירה לגבי ממצאי הבדיקות הטכניות עד לשלב זה, וביצעו בחינה של המנוע (דוח יצרן המנוע הוגש בתאריך 15 בינואר 2015).

בנוסף, החוקר הראשי פנה לחוקר הראשי השוויצרי בבקשה לקבל את ההיסטוריה של הלהבים אשר הורכבו בשיפוץ האחרון של המנוע על ידי בחברת SRT השוויצרית.

באמצעות החוקר השוויצרי התקבלו דוחות האחזקה והתקנה של המנוע הרלוונטי.

בתחום ההטסה, צוות החקירה בחן את הקלטות ה-CVR, וניתח על בסיסן, יחד עם המידע שהתקבל בגרסאות אנשי הצוות, את התפעול והטיפול בתקלה, כמו גם ההתרחשויות בתא הטייסים.

יצוין, כי ממצאי החקירה הטכנית של כשל המנוע מקובלים על הגורמים הטכניים המעורבים, אתם נשמר קשר רציף כל משך החקירה.

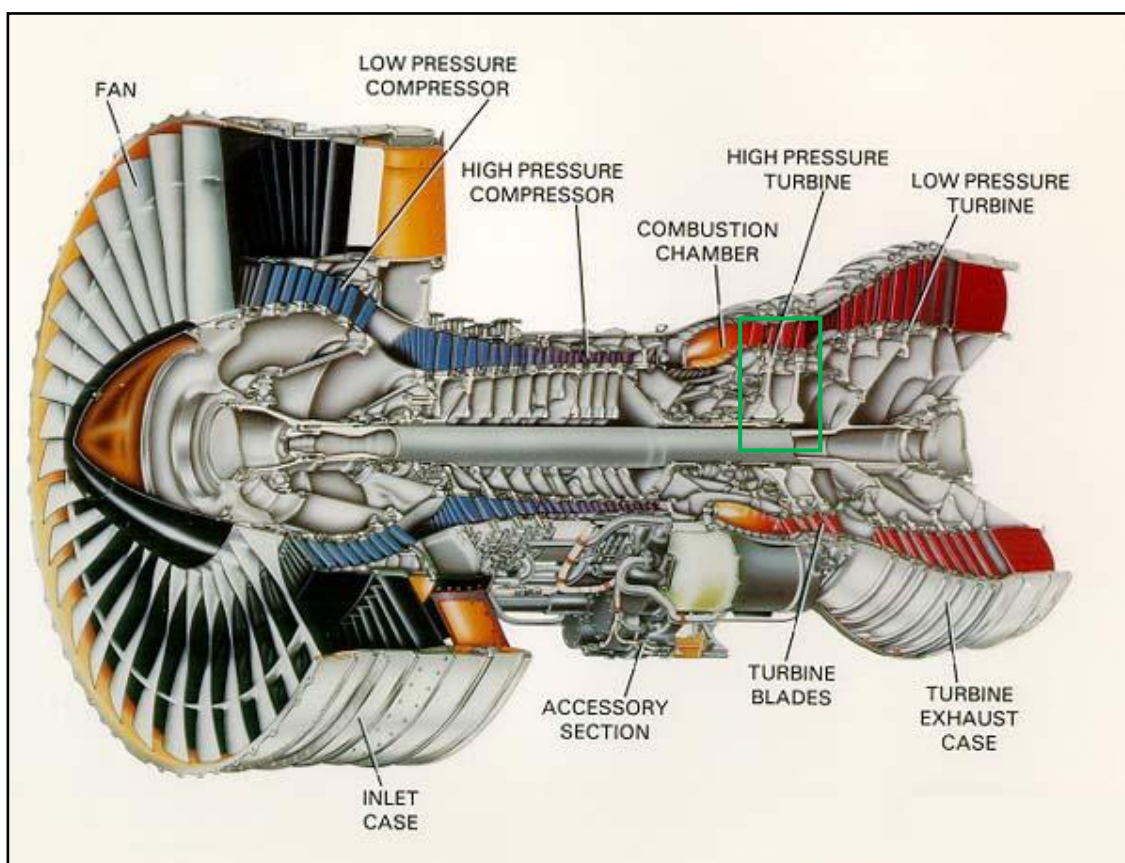
ראוי לציין, כי העובדה שהחקירה הטכנית נעשתה במפעל המנועים של התעשייה האווירית ובסמוך למשרדי החוקר הראשי ותחזוקה אל על, היה בה כדי להוביל נכון ובצורה ישירה את כל שלבי החקירה, בשונה מחקירה הנעשית בשלט-רחוק אצל היצרן או גורמים אחרים בחו"ל.

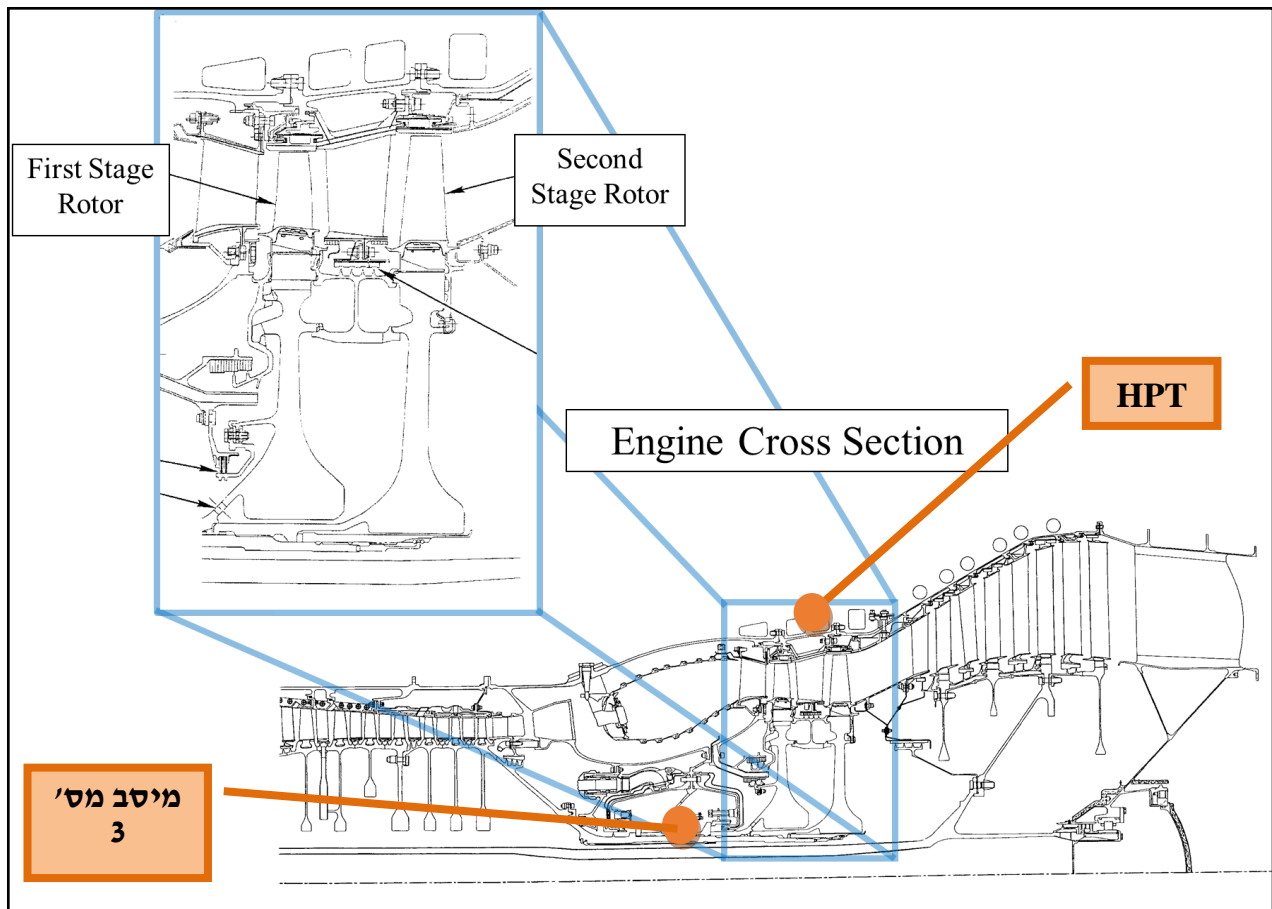
## 2. ניתוח

החקירה התמקדה, כאמור, בזיהוי הגורם לכשל המנוע והמנגנון שבו הכשל התפתח עד כדי הצורך המידי לכבות את המנוע באוויר. בנוסף, החוקרים בחנו על סמך הגרסאות והקלטת השמע של תא הטייסים את התנהלות הצוות באירוע, החל מהאבחנה הראשונית, דרך תהליך קבלת ההחלטות בכל מהלך האירוע ועד להשלמת המשימה והחזרה לנחיתה בשלום בנתב"ג.

### 2.1 רכיבי המנוע הרלוונטיים ואזור הכשל

כשל המנוע התרחש בחלקו האחורי של המנוע, בסמיכות לטורבינת הלחץ הגבוה (High Pressure Turbine, HPT). ה-HPT מניע את מדחס הלחץ הגבוה של המנוע: High Pressure Compressor, HPC. הטורבינה בעלת שתי דרגות, הדרגה הראשונה בעלת 60 להבים, והדרגה השנייה בעלת 82 להבים.





**חתך צד, תרשים חלקו העליון של המנוע וה - HPT (מיסב 3)**

הכשל בלהבי המנוע, התרחש בדרגה השנייה, וכלל נזק ברמות שונות לכל הלהבים. ה - Spool N2 (הכולל HPC ו - HPT) נתמך על ידי שני מיסבים ראשיים המכונים "מיסב מס' 2" ו - "מיסב מס' 3". מיסב מס' 2 תומך את ה - Spool N2 מלפנים של ה - HPC (לכיוון חזית המנוע), בעוד שמיסב מס' 3 תומך את ה - Spool N2, בסמוך ל - HPT.

## 2.2 חקירה טכנית של המנוע

### 2.2.1 בדיקות ראשוניות

#### בדיקת המנוע

המנוע הוכנס בתאריך 28 בספטמבר 2014 לחקירה בחטיבת בדק מטוסים של תע"א. בחקירה השתתפו נציגי אל-על ויצרן המנוע פראט אנד וויטני (להלן: "PW").

בתיאום עם החוקר הראשי בוצעה על ידי תע"א חשיפה של האזור החשוד (קרי, אזור מיסב 3), הפירוק החל מחלקו האחורי של המנוע לכיוון קדמתו. להלן הממצאים העיקריים מבדיקת המנוע:

#### ממצאים חיצוניים לפני פירוק המנוע

☒ ה - N2 spool "תפוס" (Seized).

☒ בגללים המגנטיים של תיבת האביזרים התגלו שבבים מחומר שמקורו במיסב 3. הממצא הצביע, בסבירות גבוהה, על כשל הכולל נזק חמור למיסב 3.

#### ממצאי בדיקת שמן המנוע

חברת אל על העבירה למעבדת החומרים של תע"א את מסנן השמן הראשי ואת גלאי השבבים המגנטיים (Magnetic Chip Detector - MCD). הממצא העיקרי שעלה מבדיקת חלקים אלו הוא כמות גבוהה של פלדת מיסבים M50, במסנן ובגלאי השבבים של מיסב 3.

#### תחילת פירוק המנוע

פירוק החלקים האחוריים, בתוכם ה - Low Pressure Turbine, LPT, חשף נזקים כתוצאה מפגיעת חלקי מתכת שנשברו מחלקי מנוע קדמיים יותר. חשיפת ה - HPT בצידו האחורי גילתה נזק חמור בכל סט הלהבים של דרגה שנייה של ה - HPT.

הסרת ה - HPT חשפה נזק חמור, בכל סט הלהבים בדרגה הראשונה של ה - HPT, ואת אזור מיסב 3. בכך, איששה את החשד המקורי לגבי נזק חמור למיסב 3.

הנזקים המרכזיים שהתגלו במהלך פירוק המנוע:

☒ נגרם נזק ראשוני חמור למנוע, ובעקבותיו נזקים משניים.

☒ טורבינת לחץ גבוה:

✓ 5 להבים סמוכים בדרגה השנייה של הטורבינה – שבורים, ונזק כבד לשאר הלהבים (קצות הלהבים נקטעו).

✓ טבעת אטם אוויר בדרגה הראשונה של הטורבינה – חסר חומר.

☒ חטיבת הדיפיוזר / מיסב מס' 3

✓ אום אבטחה - השתחרר ונפל. מסמרת האבטחה – נשברה.

✓ מיסב מס' 3 - כשל והתפרק. הטבעת החיצונית – זזה אחורה, כלוב המיסב נשבר, וכתוצאה נוצרה שחיקה חמורה של הגלילים ומסלולי המיסב.

✓ במכלול אטם הפחם נמצאו שלושה פני הכוונה שבורים. נמצאו חתיכות שבורות נוספות.

בשלב זה פורקו כל להבי טורבינה דרגה 2 ונשלחו למעבדה מטאלורגית של תע"א, יחד עם שברי חלקי מכלול מיסב 3.

החשד שעלה בבדיקה הראשונית הוא שמקור הכשל יכול להיות מוסבר על ידי אחד משני התרחישים האפשריים:

☒ כשל מיסב 3 שהוביל לכשל בטורבינה HPT.

☒ כשל בלהב של הדרגה השנייה של ה – HPT, שהוביל לכשל במיסב מס' 3. צוות החקירה קבע, כי הנזקים לשאר רכיבי המנוע יכולים להיות מוסברים על ידי שני התרחישים השונים של מקור הכשל.

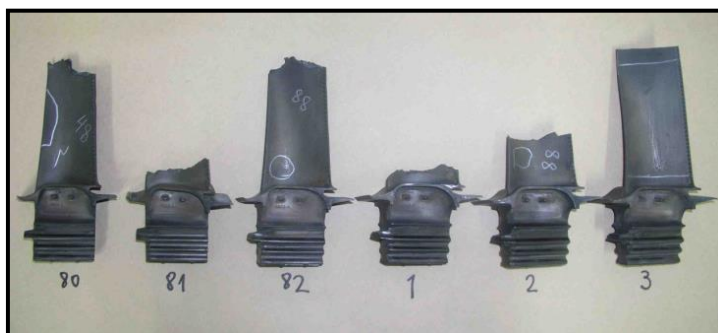
בשלב זה, הצטרף לתהליך הבדיקה צוות טכני בכיר מטעם חברת PW, בעל מומחיות במנועי PW4000.

## 2.2.2 בדיקות המעבדה המטלורגית של תע"א

עם סיום הבדיקות הראשוניות במנוע הועברו החלקים הבאים לחקירה במעבדת החומרים של תע"א: חמישה להבי הטורבינה השבורים (להבי דרגה 2), אום אבטחה של מיסב מס' 3, בית מיסב מס' 3, שלושה חלקי פני הכוונה שבורים, מיסב מס' 3 וחלקיו, אטם האוויר של דרגה הראשונה של הטורבינה.

### בדיקות ראייה וסטראוסקופיה של להבי טורבינה דרגה 2

הלהבים עברו תהליך של ניקוי אולטראסוני.



איור 1 - 5 הלהבים השבורים ולהב נוסף (להב מס' 3, הסמוך ללהב מס' 2, בכיוון השעון).  
להב מס' 3 נראה בלאי חזק רק באזור הקצה.

## להב מס' 2 שנשבר (מספר סידורי CKLBET 1904)

☒ הלהב נמצא שבור לרוחב, בערך בשליש גובהו. זוהו סולפידיציה (Sulfidation) חמורה וסדקים רוחביים בדפנות הפנימיות, פסי הכוונת אוויר (trip strips) אוכלו לחלוטין ועובי דופן הצלע הוקטן, עד כדי 0.62 מ"מ (המחשת הממצאים מוצגת באיורים 1 ו- 2).

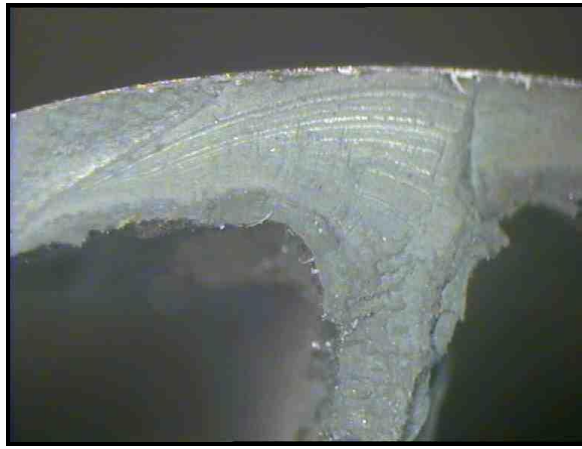
☒ בחתך השבר בלהב ניכרו סימני התעייפות ליד אזור הסולפידיציה ועובי הדופן המופחת. יתרת השטח מאופיין בשבר כתוצאה מעומס יתר (המחשת הממצאים מוצגת באיורים 3 ו- 4).



איור 2 – להב מס' 2. סולפידיציה חמורה בדפנות הפנימיות



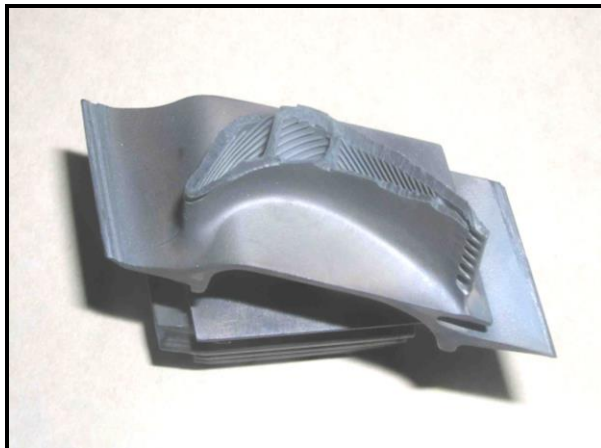
איור 3- פני השבר בלהב מס' 2.  
מבט מכיוון שפת ההתקפה על אזור ההתעייפות ועל הצלע.  
אזור ההתעייפות בדופן הקמור מסומן בעיגול. החיצים מראים סידוק רוחבי בצלע.  
סולפידיציה חמורה שאיכלה את הדפנות הפנימיות. ירידה



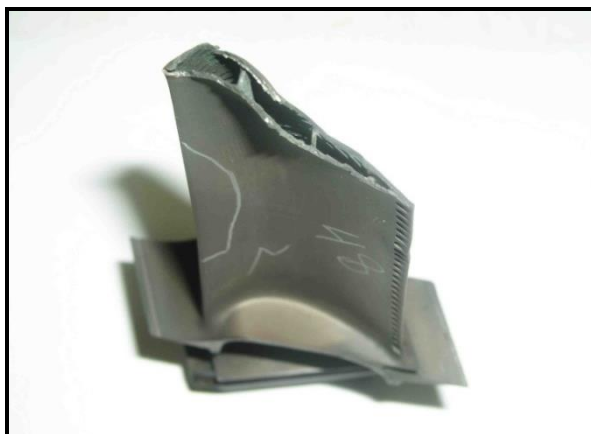
איור 4 - פני השבר בלהב מס' 2. מבט בהגדלה על אזור ההתעייפות. נראים קווי חוף. סולפידיזיה חמורה.

#### ארבעת הלהבים האחרים שנשברו (מס' 1, 80, 81, 82)

- ☒ נמצאו שברים אופייניים לעומס-יתר ונזק מפגיעה מכאנית. ניתן לראות שאין סולפידיזיה בדפנות הפנימיות של הלהבים 1 ו- 81. פסי הכוונת האוויר שלמים (המחשת הממצאים מוצגת באיורים 7 ו- 8).
- ☒ בלהבים 80 ו- 82 זהו סימני פגיעה, קרוב לוודאי מחלקי הלהבים שכשלו.



איור 7 - להב מס' 81. שבר עומס יתר. אין סולפידיזיה



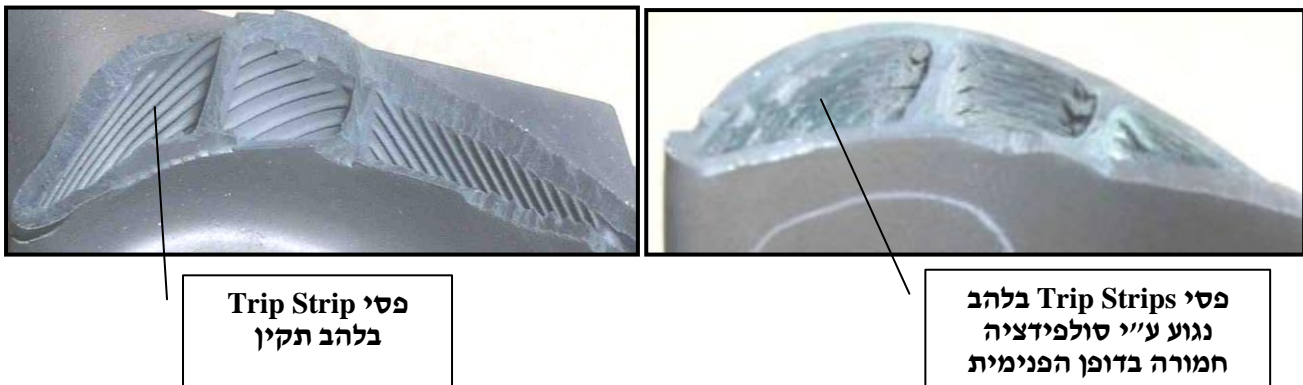
איור 8 - להב מס' 80. שבר עומס יתר. פגיעות מכאניות

## בדיקת שאר הלהבים

- ☒ בלהבים מס' 76, 77, 78, 79, הסמוכים ללהבים שכשלו (נגד כיוון השעון) – נמצאו סימני נזק מישני בצורת פגיעות קלות ביחס ללהבים שנשברו, בלאי ושברים בקצות הלהבים.
- ☒ בלהב מס' 3, הסמוך ללהב מס' 2 שנשבר (בכיוון השעון) - נמצא רק בלאי קצה.
- ☒ בכל הלהבים נמצא בלאי קצה חמור ונחשפו החללים הפנימיים. ברוב הלהבים נמצאו סימני פגיעות מכאניות משניות.
- ☒ בחלק מהלהבים זוהתה תבנית גלית והיצרות (necking) על פני שטח הזרימה, בערך באמצע גובה הלהב. תופעות אלה נובעות מהקטנה של עובי דופן הלהב עקב הסולפידיציה הפנימית, שגורמת לעלייה במאמצים ולדפורמציה פלסטית מקומית בזמן פעולת המנוע.

סולפידיציה: השוואה בין הדופן הפנימית של להב מס' 2 אשר הותקף בסולפידיציה מול להב תקין.

בתמונות מומחש האיכול בדופן הפנימית, כתוצאה מסולפידיציה. בתמונה הימנית, מוצג להב שעבר תהליך סולפידיציה. בתמונה השמאלית מוצגת הדופן הפנימית של להב שלא הותקף (ראה איור 9).



איור 9 - השוואה בין להב בעל דופן פנימית מאוכלת לבין להב בעל דופן פנימית תקינה



### מיסב מס' 3

- ☒ במסמרת האבטחה של אום נעילת מיסב מס' 3 נמצא שבר כתוצאה מעומס יתר.
- ☒ בטבעות מיסב (חיצונית, פנימית) מסלולים וגלילים, התגלו סימני שחיקה, מריחת חומר, שקעים, מעיכות וחריצים, שנובעים קרוב לוודאי מפעולת המיסב לאחר כשל הכלוב.
- ☒ לא נמצאה במסלולים ובגלילים עדות לכשל המתפתח בהדרגה בזמן ארוך (Spalling).
- ☒ בכלוב המיסב נמצא שכל המוטות הצולבים שבורים. פני השבר תואמים את המאפיינים של שבר התעייפות, שמתרחש כתוצאה מרעידות חריגות עקב פעולה לא סימטרית של המיסב (אקסצנטריות). נמצאה שחיקה חזקה ודפורמציה בשתי טבעות הכלוב.
- ☒ לא נמצאה עדות לסיכה בלתי תקינה.
- ☒ בדיקת קשיות (Rockwell C) – העלתה תוצאות תקינות.
- ☒ נמצאו פינים שבורים באטם הפחם - קרוב לוודאי שנשברו עקב הרעידות החזקות במהלך כשל המיסב.
- ☒ מניתוח הממצאים עולה, כי הנזקים למיסב מס' 3 הינם משניים והם התרחשו כתוצאה מהכשל הראשוני של המנוע, כתוצאה מכשל להבי טורבינה דרגה 2.

### אטם אוויר בדרגה 1 של הטורבינה

- ☒ הטבעת נמצאה שבורה, כמעט בכל היקפה. אטם מסתובב זה נחשד כגורם אפשרי, נוסף, לאי-איזון הסיבובי, ולכן נבדק לאפשרות של התפתחות מוקדמת של נזק. נמצאו בלאי חמור ושבר עקב עומס יתר, המובילים למסקנה שהכשל של טבעת אטם האוויר היה מישני.

### בדיקות מיקרוסקופ אלקטרוניים SEM-EDS

(Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive Spectrometer)

- ☒ להב מס' 2 כשל כתוצאה מהתעייפות החומר, ואחריו עומסי יתר במתיחה ובגזירה. ההתעייפות החלה בדופן פנימית, ככל הנראה בגלל הסולפידיציה שגרמה נזק בפני השטח, הקטנה בעובי הדופן ומאמצי יתר כתוצאה מכך.
- ☒ להב מס' 1 כשל בגזירה, עקב עומס יתר.
- ☒ נבדק בכלוב מיסב מס' 3 מוט צולב שבור. זוהה שבר מהתעייפות ואחריו שבר מעומס יתר. אופי משטח השבירה מעיד על כך שהשבר אירע תוך פרק זמן קצר יחסית, עקב רעידות חריגות. אופי השבר בפין המוביל של אטם הפחם מביא למסקנה דומה. השבר היה משני.

### 2.2.3 בדיקות פרמאביליות של להבי הטורבינה ע"י מגנטוסקופ

להבי טורבינה דרגה 2 נשלחו למעבדת אל-הרס בתעש"א, לבדיקת רמת הסולפידיציה הפנימית, באמצעות בדיקת פרמאביליות מגנטית. נמצא שבלהב מס' 2 היו רמות גבוהות מהמותר של פרמאביליות מגנטית והרמה הגבוהה ביותר של סולפידיציה פנימית, מכל להבי דרגה 2 של הטורבינה.

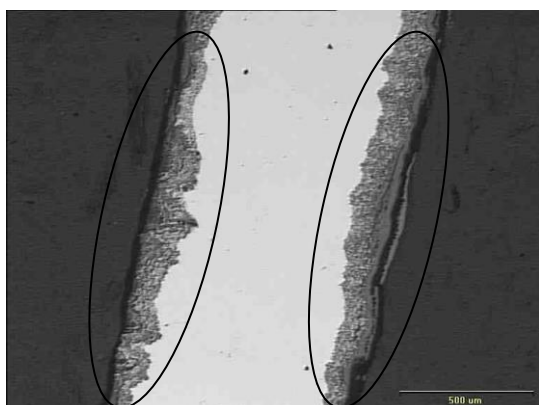
להב מס' 2 הוא אחד מ- 14 להבים בסדרת ייצור A (Batch) שהוסרו ממנוע מס' 717797 והורכבו על מנוע מס' 724718 (נשוא התקרית), במהלך פעולת התחזוקה האחרונה.

בסדרת להבים זו נמצא שיעור חריג של פסילה עקב פרמאביליות, ביחס לשאר להבי הטורבינה. שיעור הפסילה בסדרת הייצור המדוברת עמד על 50% (7 להבים מתוך 14), לעומת 12% ביתר הלהבים של הסט.

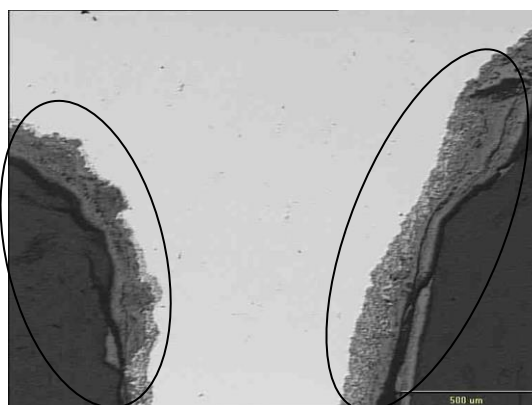
### 2.2.4 בדיקות מטאלוגרפיות

#### פירוט תוצאות הבדיקות המטאלוגרפיות בלהבי דרגה 2

להב מס' 2 שנשבר – נחתך לצורך הבדיקה, מספר מילימטרים מתחת לשבר. בדפנות הפנימיות נמצאה סולפידיציה חמורה שאיכלה את פסי הכוונת האוויר והקטינה את עובי דופן הצלע עד כדי 0.58 מ"מ. עובי הסולפידיציה הפנימית היה כ- 0.25-0.30 מ"מ (ראה איורים 10, 11).



איור 11 – להב 2. חתך מטלוגרפי רוחבי מספר מ"מ מתחת לשבר. סולפידיציה חמורה בפני השטח הפנימיים בצלע שפת ההתקפה. ראה סימונים. עובי הצלע המינימלי כ- 0.58 mm. מיקרוסקופ אופטי (X50) ללא איכול



איור 10 – להב 2. חתך מטלוגרפי רוחבי. אזור המפגש בין צלע שפת ההתקפה לדופן הקמור של הלהב. סולפידיציה חמורה בפני השטח הפנימיים (חללי הקירור). ראה סימונים. מיקרוסקופ אופטי (X50) ללא איכול

לצורך השוואה, מלבד הלהב שנשבר, להב מס' 2, נבדקו באותה שיטה להבים נוספים:

- ☒ להב מס' 4: מקורי ממנוע 724718, אשר בעבר שופץ 3 פעמים.
- ☒ להב מס' 23: מסדרת ייצור A שהוסרה ממנוע 717797 והורכבה על 724718.
- הערה: להב 23 שופץ בעבר פעמיים, כמו להב מס' 2 שנשבר.
- ☒ להב מס' 52: נבחר לצורך בדיקת טמפרטורת יתר. להב זה שייך לקבוצת להבים ממלאי חברת SRT (לשעבר "KELLSTROM"), ובעבר שופץ פעמיים.
- ☒ להב מס' 25: מסדרת ייצור A (לשעבר ממנוע 717797). נבחר גם הוא לצורך בדיקת טמפרטורת יתר. גם להב זה שופץ בעבר פעמיים.

#### בנוסף

- ☒ עובי הדופן של להב מס' 2 היה קטן ב - 30% מעובי הדופן של להבים אחרים שנבדקו, בבדיקה לאחר התאונה.
- ☒ רמת הסולפידיציה בלהבים מס' 4 ו - מס' 23 הייתה נמוכה בהרבה מזו של להב מס' 2.
- ☒ מבדיקה ויזואלית של להבים מס' 25 ו - 52 עלה שמצבם טוב, רמות סולפידיציה פנימית נמוכות מאוד בבדיקת פרמאביליות. בבדיקת שני הלהבים, נמצא שלא הייתה חשיפה לטמפרטורת יתר.
- ☒ בדפנות הפנימיות של להב מס' 52 נמצא ציפוי דיפוזיה אלומינידי (Aluminide Diffusion Coating) דומה לזה שקיים בדפנות החיצוניות.
- ☒ בלהבים מס' 4 ו - מס' 23, הציפוי הפנימי היה פגוע, ע"י סולפידיציה שחדרה אל מתחת לציפוי. גם בלהב שנשבר (להב מס' 2) היו סימני ציפוי פנימי באזור שפת הזרימה.

#### סיכום תוצאות הבדיקות של המעבדה המטלורגית

משני התרחישים שהועלו בבדיקות הראשוניות נמצא, כי מוקד הכשל היה קרוב לוודאי בלהב של הדרגה השנייה של ה - HPT, אשר גרם לשבר של להבים סמוכים. כתוצאה מכך, נוצר אי איזון דינמי של הרוטור N2 שהוביל לכשל במיסב מס' 3.

ניתוח כולל של הבדיקות (סטריאוסקופיה, פרקטוגרפיה ומטאלוגרפיה) מלמד שהסולפידיציה הפנימית החמורה היא גורם השורש לכשל. הסולפידיציה גרמה לנזק ואיכול בפני השטח של חללי הקירור בלהב מס' 2. חלה ירידה משמעותית בעובי הדופן וכתוצאה מכך חלה עלייה משמעותית במאמצי המתיחה בלהב בזמן פעולת המנוע. סדקי התעייפות התפתחו בפני השטח הפנימיים ובעקבותיהם כשל סופי בעומס יתר.

## סיכום נתוני להבים ותוצאות בדיקות מטאלוגרפיות

(הלהבים מדרגה 2 של טורבינת לחץ גבוה)

ציפוי פנימי הערות	פרמאביליות - סולפידיזציה *CC/CV	עובי דופן (מ"מ)		מקור הלהב	מספר שיפוצים קודמים	מס' להב
		A אזור (CV)	B אזור (צלע)			
באזור שפת הזרימה. ציפוי פגום. סולפידיזציה חמורה בשאר האזורים	1.088/1.072 פסול	0.78 מ"מ ספורים מתחת לשבר	0.58 מ"מ ספורים מתחת לשבר	מנוע מס' 717797 (סדרת ייצור A)	2	2 נשבר
כן. ציפוי פגום.	1.002/1.002 קביל	1.10	0.81	מקורי ממנוע מס' 724718	2	4
כן. ציפוי פגום.	1.001/1.001 קביל	1.12	0.84	מנוע מס' 717797 (סדרת ייצור A)	3	23
כן. עובי השכבה החיצונית של הציפוי, כ - 20 מיקרון.  אין טמפרטורת יתר.	1.001/1.001 קביל	N.A.	N.A.	ממלאי של SRT KELSTR) (OM	2	52 טמפ' יתר
לא נבדק ציפוי  אין טמפרטורת יתר.	1.002/1.002 קביל	N.A.	N.A.	סדרה "A"	2	25 טמפ' יתר

\* הערה: המגבלה לפסילה הינה 1.060 ומעלה

## 2.3 שיפוץ הלהבים כמקור כשל

- ☒ מנוע מס' 724718, נשוא התקרית, תוחזק בפעם האחרונה בחברת SR Technics בשווייץ, וצבר מאז 14,910 שעות ו-2,455 מחזורים. SRT העבירה את הלהבים לשיפוץ ב-TOS (Turbine Overhaul Services בסינגפור).
- ☒ בבדיקה ראשונית נראה, כי להב מס' 2 (CKLBET1904) שופץ בעבר פעמיים ועד השיפוץ השני, ב-TOS, צבר סה"כ 3,630 מחזורים (CSN – Cycles Since New). בשורש הלהב היה הסימון "TC: 36".
- ☒ להב מס' 2 שייך לסדרת ייצור A שהוסרה ממנוע מס' 717797. סדרת הייצור שהוסרה שופצה פעמיים, לפי הרשומות, וצברה מספר נמוך יחסית של 3,630 מחזורים.
- 7 מתוך - 14 הלהבים בסדרת הייצור נפסלו בבדיקת הפרמאביליות בתע"א, לאחר התאונה.
- ☒ חקירה ע"י SRT העלתה שלהב מס' 2 צבר בפועל 5,832 מחזורים (CSN), ושהרשומות והסימון בבסיס הלהב TC: 36 שגויים.
- השיפוץ הראשון בוצע בחברת ESA (Eagle Services Asia בסינגפור), כאשר עד אז הלהב צבר 2,202 מחזורים (CSN). נתון זה לא תועד.
- ☒ בדיקות הפרמאביליות והמטאלוגרפיה של להב מס' 4 (מקורי ממנוע התקרית) ושל להב מס' 23 (מסדרת ייצור A וממנוע 717797) מצאו אותם במצב טוב מאוד, ביחס ללהב מס' 2, קרי: רמת סולפידיציה פנימית נמוכה מאוד ועובי דפנות גדול יותר.
- ☒ בבדיקות מיקרוסקופ אלקטרוניים (SEM-EDS) ומטאלוגרפיה, של להבי דרגה 2, של הטורבינה, מס' 52, 23 ו-4 (מס' חלק: 54L332-002) נמצא, כי יש ציפוי דיפוזיה אלומינידי פנימי.
- בבירור עם המפעל המשפץ TOS נמצא, כי החללים והדפנות הפנימיים עוברים ניקוי בלבד, ולא מתבצע בה בפועל חידוש של ציפוי פנימי.

### סיכום

הממצאים שהוצגו לעיל מלמדים על מצבו הגרוע של להב מס' 2, ביחס ללהבים האחרים (סולפידיציה פנימית ועובי דופן), על טעות ברישום ההיסטוריה שלו ועל אחוז הפסילה הגבוה בסדרת להבים A, אליה הוא שייך. ממצאים אלו מעידים על הצורך במעקב נוסף אחר להבי סדרה A.

## 2.4 חומר הגלם של להבי טורבינה דרגה 2 כגורם כשל

PW התגברה על הסולפידיזציה הפנימית של להבי דרגה 2, בטורבינת לחץ גבוה, ע"י החלפת החומר ממנו היו עשויים, PWA1484, בסגסוגת משופרת PWA1480, על פי עלון שירות PWA SB 72-716.

לטענת מהנדסי חברת PW שליוו את החקירה :

- ☒ הכשלים במהלך התאונה לא היוו סכנה לבטיחות טיסה מפני שהיו כולם Contained Failure, כלומר לא לוו בפריצת/שחרור חלקים פנימיים של המנוע מחוץ למעטפות (Cases) ולכן הסכנה לגרימה נזק למטוס, הייתה קטנה מאוד.
- ☒ בשנת 2001, PW הפסיקה את ייצור אותם החלקים, העשויים מחומר PWA1484, הרגיש לסולפידיזציה פנימית. לגרסת המומחים, המלאי העולמי של להבים אלו יילך וייעלם, בגין פסילה טבעית של החלקים, בעת שיפוצם (בד"כ לא ניתן לשפץ את הלהבים עם אחוז גבוה של הנצלה יותר משלושה שיפוצים, כאשר אורך שירות ממוצע בין שיפוצים הוא סביב 6 שנים).
- ☒ עפ"י חברת PW, מאז כניסתם לשירות של הלהבים המשופרים, המורכבים מחומר PWA1480, לא דווחו תופעות של סולפידיזציה בלהבים אלו.
- ☒ אין בכוונת חברת PW לפרסם הוראות תחזוקה ספציפיות לבדיקות מיוחדות חדשות או נוספות ללהבים מסוג זה.

## 2.5 שיחזור תהליך הכשל

- ☒ כשל המנוע החל בכשל של להב מס' 2, בדרגה 2 של טורבינת לחץ גבוה. מנגנון השבר בלהב היה התעייפות ואחריה עומס יתר.
- ☒ ההתעייפות החלה בדופן הפנימית של הלהב, ליד אזור חיבור הצלע הקדמית לדופן הקמור. בסבירות גבוהה, שבר ההתעייפות נבע מסולפידיזציה פנימית, שגרמה להקטנת עובי הדופן, ועקב כך, למאמצים גבוהים בזמן פעולת המנוע.
- ☒ כשל להב מס' 2 גרם לכשל בעומס יתר של ארבעה להבים סמוכים - מס' 1, 82, 81 ו- 80, עקב פגיעות מכאניות.
- ☒ במיסב 3, לא נמצאו סימנים לסיכה בלתי תקינה או לשינויי צבע עקב חימום יתר. קשיות הטבעות והגלילים נמצאה תקינה, ולא היו תופעות של נזק התעייפות המתפתח בהדרגה (Spalling).
- ☒ במסמרת טבעת האבטחה, של אום נעילה מיסב מס' 3, נמצאו סימני שבר "טרי", עקב עומס יתר. בתבריגי האום היו סימני בלאי מקוטעים, שמתאימים כנראה למחזורי סיבוב N2.
- ☒ בסבירות גבוהה, כשל חמשת הלהבים גרם לאי-איזון סיבובי, לתנועה אקסצנטרית ולרעידות של ציר N2, ומכאן לרעידות חריגות במיסב מס' 3.

- ☒ הרעידות שנוצרו בעקבות הכשל הראשוני גרמו, קרוב לוודאי, לשבר התעייפות במוטות הצולבים של כלוב מיסב מס' 3 ומכאן לכשל כולל של המיסב ולהתפרקותו. אופי משטח השבירה של הכלוב, של מיסב 3, מעיד על שבר שהתרחש בפרק זמן קצר יחסית, כתוצאה מרעידות.
- ☒ בדיקת רשם נתוני הטיסה של המטוס (DFDR) הראתה, כי העלייה ברמת הרעידות של N2 קדמה לשינויים בנתוני מערכת השמן של המנוע. הדבר תומך בניחות הממצאים בבדיקות המעבדה של חלקי המנוע – כלומר, אובדן השמן עקב הנזק למיסב ארע לאחר שבר הלהבים, כתוצאה מאי האיזון הסיבובי והרעידות.
- ☒ התפרקות המיסב גרמה להטיה של ציר N2 ומכאן לנזקים המישניים שנמצאו במכלולי המנוע האחרים, בין היתר לשבר של טבעת אטם אוויר דרגה 1.

## 2.6 תפקוד צוות הטיסה באירוע

### כללי

צוות הטיסה פעל באופן תכליתי, בטיפול בתקלה ובכך צמצם משמעותית את הנזקים שנגרמו למנוע שכשל, ואת הסיכונים האפשריים. החלטת הצוות, לפנות חזרה לנחיתה בנתב"ג, הייתה נכונה מבחינה מבצעית, והובילה, יחד עם החלטות ופעולות נוספות, לנחיתה בשלום בשדה המוכן לקבלת המטוס. יודגש, כי הצוות פעל בתחום רחב של שיקולים ולקח מקדמי ביטחון.

יחד עם זאת, צוות החקירה מצא לנכון, כחלק ממדיניותו בנושא, לבדוק פרטנית את פעולות הצוות באירוע, כדי לבחון אם ניתן ללמוד ולהגיע לתובנות שיסייעו בעתיד לשפר את בטיחות התעופה.

### עבודת צוות הטיסה

הצוות כלל ארבעה טייסים - שני קברניטים ושני קצינים ראשונים. 5 דקות אחרי זיהוי התקלה והכרזת החירום היו כל אנשי הצוות בתא הטייסים. מניתוח הקלטות תא הטייסים ועדויות אנשי הצוות, התברר, שפעולות צוות הטיסה היו במקרים מסוימים, חלקיות ומאוחרות:

- ☒ הצוות לא סקר את כל החומר המקצועי הנדרש לפני הנחיתה, ולא יוּשמו כל המלצות ה - FCTM לנחיתה במשקל מעל משקל נחיתה מירבי (Overweight Landing).
- ☒ לא תודרכה כלל הליכה סביב – בדגש על הליכה סביב, עם מנוע אחד, במשקל מעל משקל נחיתה מירבי.

☒ בשני מקרים, ביצוע פעולות הכלולות בנורמל QRR היה מאוחר : במקרה הראשון, QRR DESCENT בוצע במהלך הצלע הסופית של גישת ה - ILS, בגובה 4,000 רגל מעפ"י בקירוב (אמור היה להסתיים לפני תחילת הנמכה). במקרה השני, התרעת "היכון לנחיתה" לצוות הקבינה ניתנה מאוחר, בגובה 500 רגל לערך.

התקלה במנוע סווגה תחילה, על ידי צוות הטיסה, כ - Surge or Stall ובהמשך, לאחר שהופיעה שוב ולוותה ברעידות גוף וסטיק, סווגה כ - Engine Severe Damage. לאחר שהצוות כיבה את המנוע, ניטור הנתונים הצביע על כך שהתקלה הוכלה, ומצבו של כלי הטיס הוערך כיציב.

בשלב זה, כעשר דקות לאחר האבחון הראשוני של התקלה, היה ברור למעורבים שהתקלה אינה מסווגת כ - Time is a Factor. משמעות המקרים, בהם הזמן אינו גורם קריטי היא, כי יש לנחות בשדה הקרוב, אך יש לקחת את הזמן הנדרש לתפעול מיטבי של המטוס עם התקלה, תוך ביצוע עבודה מסודרת ובטוחה שעיקר מטרתה לצמצם סיכונים הנלווים לנחיתה לא מתוכננת לאחר תקלה.

תקנה 484 לתקנות ההפעלה מתייחסת למצב שבו מנוע מטוס חדל לפעול או הודמם כדי למנוע נזק אפשרי, והיא מנחה: "ינחית הטייס המפקד את המטוס בשדה תעופה מתאים הקרוב ביותר מבחינת זמן טיסה, שבו ניתן לבצע נחיתה בטוחה".

תקריות מהעבר, בהן זמן לא היווה גורם קריטי מלמדות, כי לעיתים, גישת צוותי טיסה לתפעול האירוע מתאפיינות בחזרה מיידית ומהירה לנחיתה, שיש בה כדי להטות ולהשפיע על שיקול דעת צוותי הטיסה, עד כדי ביצוע נחיתה לא בטוחה. תופעה זו גורמת לעיתים, באופן לא מודע, לזירוז הפעולות הקודמות לנחיתה, הגם שבפועל - קצב פעולות מתון יותר, ככל שמתאפשר, אינו כרוך בד"כ בסיכונים נוספים, אלא להיפך, מאפשר מיצוי טוב יותר של הפעולות והסתמכות על מירב מקורות המידע, שעומדים לרשות הצוות.

תפעול אירועי תקלה, באופן שמנסה להביא את המטוס לקרקע בזמן מינימלי, כרוך לעיתים קרובות בהזנחת ביצוע מלא של כל המטלות הקשורות לטיפול בתקלה ובנחיתה הבטוחה, זאת אף על פי שגם לפי תקנה 484 לעיל - צוות הטיסה רשאי לבצע פעולות הנדרשות לצורך הבטחת הנחיתה הבטוחה בשדה המתאים.

באירוע המדובר, לאחר סיווג התקלה וביצוע הפעולות הראשוניות, הקברניט החליט על פנייה חזרה לנחיתה, ובהמשך, הצוות ביצע גישה ישירה ונחת ללא ביצוע ריתוק או הקצאת זמן להתארגנות, מעבר לזמן שעמד לרשותו עד לנחיתה. כאמור, אף על פי שעמדו לרשות הצוות משאבי כוח אדם מספיקים, ואפשרות להשהות את הנחיתה, לצורך מיצוי ההתארגנות, שינוי ההחלטה לנחות מיידית לא נשקל, וחלק מהפעולות שקדמו לנחיתה בוצעו באופן חלקי.



השוואה בין פעולות הצוות ובין המלצות ה – FCTM לגבי Overweight Landing  
 התדריך לנחיתה מעל מגבלת המשקל בוצע עפ"י הזיכרון. צוות הטיסה לא קרא את  
 ה – FCTM, וכתוצאה מכך, בסוגיות הבאות, נמצאו פערים בין פעולות הצוות לבין  
 ה – FCTM, כמו למשל:

נושא	FCTM	פעולות הצוות באירוע
בחירת מסלול לנחיתה	יש לעשות שימוש במסלול הארוך ביותר.	נחיתה על מסלול 12 (3,112 מטרים), ולא על מסלול 08/26 הארוך ממסלול 12/30 (3,570 מטרים).
		נחיתה על מסלול 12 ללא שימוש בכל אורכו (פינוי ב - Y). בפועל, שימוש בערך ב – 60% מהמסלול.
Brake Energy Limits	בנחיתה עם מדפים במצב 20, בלימה מקסימלית עלולה לעבור את BRAKE ENERGY LIMITS, ולכן מומלץ לנחות על המסלול הארוך ביותר ובמהירות שלא מעל המינימום הנדרש.	לא נעשה שימוש במסלול הארוך ביותר. במסלול שנבחר, לא נוצל כל אורך המסלול.
פרופיל נחיתה	ביצוע נחיתה רגילה, ללא הצפה, תוך נגיעה רגילה של המטוס במסלול.	החלטה על נחיתה עדינה.
Reverse Thrust	מנחה על הפעלה מקסימאלית (במגבלות האסימטריה) לאחר נגיעה.	ללא התייחסות.
בלמים	מנחה להסתמך על טבלאות Performance Inflight-QRH לגבי עוצמת בלמים. לא נדרשת תוספת של 60% לאורך מסלול הנחיתה. אורך מסלול מינימאלי נדרש הוא 1,106 מטר במצב Max Manual. נדרשת בדיקה מסודרת של ביצועי נחיתה.	לא בוצעה בדיקה מלאה של ביצועי נחיתה, על פי הטבלאות. מצב הבלמים היה Max Auto Brakes. בפועל, ניתן היה לנחות במוד 3 AUTO BRAKE או 2 AUTO BRAKE, ללא חימום הבלמים וללא פריקת האוויר מארבעה גלגלים.

## 2.7 סוגיות נוספות שלא קיבלו התייחסות

- ☒ **תכנון הליכה סביב:** הצוות לא תידרך הליכה סביב עם מנוע אחד. הדבר נדרש במיוחד במקרה של נחיתה מעל MLW, והליכה סביב בכיוון מזרח, לעבר פני קרקע גבוהים. לופטנזה ואל על ממליצים, למשל, על הליכה סביב במשקל מעל – MXLW, בעיקר עם מנוע אחד, בפרופיל EFP.
- ☒ **תקשורת עם גורמי מקצוע נוספים:** משך האירוע לא נוצר קשר עם גורם מקצועי בחברה, באגף או בצי. תקשורת כזו, הן ישירה והן באמצעות ממסור של מרכז השליטה של החברה, יכול היה להניב מידע חיוני. למען הסר ספק יצוין, כי הצוות כשיר ומסוגל לטפל בתקלה ולהביא לנחיתה בטוחה, אך מידע שמתקבל מאנשי מקצוע, יכול לסייע לאשש את החלטות הצוות ולהוביל להקטנת סיכונים.
- ☒ **תקשורת תא טייסים – קבינה:** זרימת מידע מהקבינה לתא הטייסים, לגבי התופעות שנחוות בקבינה בהקשר למנוע, היה חסר.

### סיכום

צוות הטיסה פעל, באירוע הנחקר, באופן שהוביל לתוצאה סופית טובה, ועשה זאת באופן בטוח ויעיל יחסית. ניתוח מעמיק של הפעולות שבוצעו, לאור הבנת הסיטואציה, בדיעבד, ותוך התחשבות במשאבי כוח האדם שהיו זמינים בתא הטייסים בעת האירוע, מציף דילמה שעולה מעת לעת בחקירת תקריות ותאונות, ומהותה התפיסה והגישה לטיפול בחירום שבו אין סיכון מיידי לכלי הטיס ולנפשות עליו.

במקרים שבהם זמן הוא לא גורם קריטי בתפעול התקלה (תקלה שאינה מוגדרת כ - Time is a factor), נכון שצוות הטיסה יזהה ויסתמך על מירב מקורות המידע הרלוונטיים העומדים לרשותו וינצלם, במטרה לבנות מודעות מצבית מלאה, להעריך את הסיכונים הטמונים במצב ולקבל החלטות נכונות, שלמות ומדויקות ככל שניתן. תהליך זה מנוגד, לעיתים, לאינטואיציה של צוות הטיסה, שדוחקת באופן טבעי ומובילה לטיפול אינסטינקטיבי ומואץ בתקלה ולהנחתת המטוס בהקדם האפשרי. בנוסף, צוות הטיסה עלול למצוא את עצמו, שלא לצורך, "ברדיפה" אחר המטוס ואחר הסיטואציה. יודגש, כי הבהרת הגישה נוגעת למקרים ולפעולות שסובלות דיחוי, וההתייחסות בדוח הינה בהקשר הכללי ולא בהכרח ספציפית לאירוע הנדון בדוח החקירה, במהלכו. החשיבות של קריאה יסודית של הספרות המקצועית, התייעצות בגורמי מקצוע ושאיבת מידע ממקורות נוספים, מתבטאת בפוטנציאל להקטנת הסיכונים הנגזרים מהתקלה.

### 3. מסקנות

- 3.1 האירוע מסווג ככשל טכני של מנוע שמאל, שהחל בשבר של להב מס' 2 בטורבינת לחץ גבוה, אשר הוביל לשרשרת של כשלים משניים, שהתבטאו בחוסר איזון וברעידות של המנוע, בעטיים כיבה צוות הטיסה את המנוע שכשל באוויר וחזר לנחיתה.
- 3.2 השבר בלהב מס' 2 בטורבינת הלחץ הגבוה, דרגה 2, הוא תוצאת תהליך מתמשך של סולפידיזיה פנימית וירידה בעובי הדופן של הלהב. הסולפידיזיה המואצת התרחשה בלהבים העשויים סגסוגת PWA1484. סגסוגת זו התגלתה, לאורך השנים, כלא עמידה דיה בפני סולפידיזיה. חברת PW הפסיקה בשנת 2001 לייצר את הלהבים, עם סגסוגת PWA1484, אך לא קבעה זמן מוגדר להוצאתם משירות.
- הערה: לא מן הנמנע שלהבים נוספים באותה סדרת השיפוץ, של להב מס' 2, מותקנים במנועים אחרים, ומתוך כך מתקיים החשש לכשל דומה נוסף.
- 3.3 כתוצאה מכשל להב מס' 2, בדרגה 2 של טורבינת לחץ גבוה, כשלו גם ארבעה להבים סמוכים. חמשת הלהבים הובילו לאי-איזון סיבובי ולרעידות של ציר N2 ושל מיסב מס' 3. הכלוב של מיסב מס' 3 והמסב עצמו התפרקו וגרמו לשקיעה של ציר N2.
- 3.4 צוות הטיסה פעל באופן תכליתי, טיפול בתקלה וצמצם את הסיכונים. החלטת הצוות לחזור לנחיתה בנתב"ג, הייתה נכונה מבצעית. יחד עם זאת, צוות הטיסה הכניס עצמו ללוח זמנים דחוק, שלא לצורך, אשר הוביל לתפעול לא היה מיטבי (לדוגמה, בחירת המסלול המתאים ביותר). פעולות הצוות, הגם שהובילו להכלת האירוע ולנחיתה בטוחה, לא תאמו, בקצב ובבהילות, לתפעול תקלה שאינה מוגדרת Time is a Factor.
- 3.5 צוות הטיסה טעה, במידה מסוימת, בכך שלא נעזר במרכז השליטה של החברה, ובגורמי מקצוע חיצוניים, בחברה או בצי, לצורך סיוע וקבלת מידע תומך. הגם שהצוות היה כשיר ומסוגל לטפל בתקלה ולהביא לנחיתה בטוחה, נכון היה לקבל מידע מאנשי מקצוע, כדי לסייע לאשש את החלטות הצוות ולהוביל להקטנת סיכונים.
- 3.6 הדחיפות בתפעול התקלה וניהול לא מיטבי מלא של משאבי צוות הטיסה, בזמן החזרה לנחיתה בנתב"ג, תרמו למספר טעויות: הכנה חלקית לנחיתה, קבלת החלטות שאינן תואמות את ה-FCTM, ביצוע חלקי/מאוחר של מספר מטלות (ביצוע מאוחר של נורמל QRH, תדרוך הליכה סביב וחישובי ביצועים מלאים לנחיתה).
- 3.7 צוות הקבינה שגה בכך שנמנע מהעברת מידע על אש ופיצוצים לצוות הטיסה, מתוך הנחה, כי ברגע שהטייסים הודיעו על תקלת מנוע הם מודעים למצב באופן מלא. הזרמת המידע על ידי צוות הקבינה, יכולה הייתה לתרום למודעות מצבית מעודכנת יותר, של צוות הטיסה.

#### 4. המלצות

4.1 לנסות לאתר את הלקוחות הנוספים שבמנועיהם הותקנו להבים מסדרת הלהב שכשל באירוע הנחקר, ולשקול אם יש מקום להנחות על בדיקה מונעת של הלהבים או הסרה מוקדמת של הלהבים.

הערה: להב מס' 2 שכשל וגרם לכשל המנוע הוא אחד מתוך סדרה של 15 להבים שסופקו על ידי חב' SRT, מתוך קבוצה גדולה יותר של 82 להבים.

**אחריות:** מנכ"ל חברת SRT **מועד ביצוע מומלץ:** 1.11.2015

4.2 למפות את צי המנועים של אל על לאיתור להבים העשויים מסגסוגת PWA1484 ולשקול מדיניות הסרה יזומה להחלפתם בסגסוגת המשופרת, PWA1480.

הערה: במהלך החקירה, החברה פעלה בנושא, איתרה מנוע נוסף עם להבים מסגסוגת PWA1484 והרכיבה אותו על מטוס B747, במטרה להקטין את הסיכון לכלי הטיס.

**אחריות:** מנכ"ל אל על **מועד ביצוע מומלץ:** 1.11.2015

4.3 לבדוק, במסגרת שיפוץ טורבינות לחץ גבוה של מנועי PW4000, אם קיימים להבים עשויים סגסוגת PWA1484, לפסול את המשך השימוש בהם ולהימנע מלשלוח אותם לשיפוץ נוסף.

**אחריות:** מנכ"ל אל על **מועד ביצוע מומלץ:** 1.11.2015 ושוטף

4.4 לבחון מיסוד מדיניות תחזוקה מחמירה, הכוללת בדיקות Non-Destructive Test (כמו מגנטוסקופ), בעת עבודה בבתי המלאכה השונים על מנועי PW4000, במיוחד במקרים בהם מבוצעת חשיפה של להבי טורבינה דרגה 2, גם כאשר מהות העבודה איננה שיפוץ טורבינה לחץ גבוה.

הערה: מדובר במקרים בהם ייצרן המנוע לא דרש בדיקות אלו במסגרת תחולת עבודה.

**אחריות:** מנכ"ל אל על **מועד ביצוע מומלץ:** 1.11.2015

**4.5** לכלול בתכני ההדרכה של צוותי הטיסה בחברה דיון מקצועי בהיבטים, בדרישות ובהנחיות ההפעלה, המומלצות לביצוע בתקלות מסוג Land as Soon ושעדיין אינן בבחינת Time is a Factor, לעומת תקלות בהן נדרשת נחיתה מיידית ובהקדם. הערה: מוצע לדון בהדרכות אלו, באפשרות להתייעץ ולהסתייע בגורמי המקצוע על הקרקע, על מנת לקבל "יריעה" רחבה יותר של הסוגיות והסיכונים הקשורים בתקלה ובכך להבטיח מענה מקצועי מיטבי.

**אחריות**: מנכ"ל אל על **מועד ביצוע מומלץ**: 1.12.2015

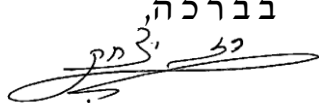
**4.6** להדגיש בתכני ההדרכה של אצד"א בחברה, את מחויבותו המקצועית של צוות הקבינה, ליידע את צוות הטיסה על תופעות חריגות ועל תקלות שעלולות לפגוע מהותית בבטיחות הטיסה, גם אם נדמה שהן ידועות לו. להדגיש את הצורך לאזן בין המידע קריטי אותו רוצים לדווח לבין הפרעה האפשרית לתא הטייסים, בדגש לשלבים קריטיים של הטיסה.

**אחריות**: מנכ"ל אל על **מועד ביצוע מומלץ**: 1.12.2015

**4.7** להעביר את עיקרי ההמלצה 4.4 ליצרן המנוע, כמו גם לרשות החוקרת השוויצרית ולחברת SRT, על מנת שיבחנו אם יש מקום לאמץ אותה באופן כולל ולהנחות בהתאם מפעילים רלוונטיים אחרים בעולם, של מנועים אלו.

הערה: ממצאי החקירה וההמלצה יועברו גם ל – ICAO ול – ECAC.

**אחריות**: החוקר הראשי **מועד ביצוע מומלץ**: 1.10.2015

ב ב ר כ ה,  


עו"ד רז יצחק (רזצ'יק)  
החוקר הראשי

**תאריך**: 3.8.2015 **סימוכין**: 02937215

**החזרת חפצים שנתפסו במהלך חקירה בטיחותית**

בהתאם לסעיף 114(ב)(5) – (7) לחוק הטיס, התשע"א – 2011, החוקר הראשי יחזיר חפצים שנתפסו, למעט שברי כלי טיס, תוך 45 ימים ממועד פרסום דו"ח החקירה הסופי. החפצים יוחזרו לידי מי שמידיו נתפסו החפצים, או לידי בעליהם. שברי כלי טיס לא יוחזרו אלא לבקשת בעליו של כלי הטיס ועל חשבוננו. בקשה להשבתם יש להגיש לחוקר הראשי, לא יאוחר מ – 45 ימים ממועד פרסום הדוח. **אדם המעוניין, כי חפצים שנתפסו לא יוחזרו לידי בעליהם, רשאי להגיש בקשה מתאימה לבית משפט השלום, שבתחום שיפוטו נתפס החפץ.**