

דוח חקירה בטיחותית סופי (דוח ממצאים)

תיק תאונה מס' 8-18

- אש, אובדן כוח ונחיתת חירום בשטח -

22.1.2018	בתאריך
טורבו טראש	כלי הטיס
4X-AQS	סימן רישום
היוגב	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 שתורמו 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 משמעית לאירועים כאמור. (סעיף 105 לחוק).

תפקידי החוקר הראשי - החוקר הראשי יהיה ממונה על ביצוע חקירות בטיחותיות לפי הוראות פרק זה. במילוי תפקידיו 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 בביטחון 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 122 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 סופי (דוח ממצאים)

תיק תאונה מס' 8-18

תקציר האירוע

ביום שני, בתאריך 22.1.2018, בשעה 11:15 לערך, טייס מטוס מסוג טורבו טראש, בעל סימן רישום 4X-AQS, המריא ממנחת מגידו לביצוע משימת ריסוס בשדות הסמוכים למושב היוגב. הטייס ביצע טיסה קצרה, מהמנחת לשדה העבודה הסמוך למנחת, בסופה ביצע יעף בדיקה, והוא נכנס ליעף הריסוס הראשון. מיד עם היציאה מיעף הריסוס הראשון, הטייס הבחין באש היוצאת מצינורות הפליטה של המנוע, וחש באובדן כוח. הטייס ביצע פעולות מיידיות, דיווח למגדל רמת דוד, וביצע נחיתה אונס בשטח. במהלך הנחיתה, המטוס נגע מספר פעמים בקרקע, ונעצר כשהוא מונח על חלקו הקדמי - הטייס לא נפגע באירוע.

למטוס נגרם נזק לכני הנסע, המדחף, נזק מבני בחלקו הקדמי ונזקים למערכת הריסוס. האירוע דווח מיידית לחוקר הראשי שפתח בחקירה ושלח חוקרים למקום התאונה.

הובלת החקירה וניסוחה דוח בוצעו על ידי החוקר המוביל מר גיל ארנון.



כלי הטיס נשוא האירוע

1. מידע עובדתי

1.1 היסטוריה של הטיסה

ביום שני, בתאריך 22.1.2018, בשעה 10:40, הטייס הגיע למשרדי החברה המפעילה במנחת מגידו והמתין למטוס האירוע שהיה אותה העת בטיסת עבודה קודמת. על פי תכנית העבודה, הטייס היה אמור לבצע גיחה עם מטען ריסוס אחד, ולאחריה לשוב לנחיתה, להחלפת תצורת המטוס מתצורת ריסוס לתצורת דישון. בזמן ההמתנה, הטייס תוודך על ידי מנהל האזור אודות חלקת הריסוס. התדריך כלל מידע כללי אודות אזור הריסוס, מיקום החלקה, סוג הגידול, והמכשולים (חלקת שום שבחלקה הצפוני מאגר מים וקו מתח גבוה המגיע עד למאגר) עם נחיתה המטוס, הוא תודלק על ידי צוות הקרקע לכמות של 140 גלון. במקביל, הטייס, לאחר שביצע סריקה חיצונית של המטוס בראיה ובדק כמות דלק, ביצע החלפה עם הטייס שנחת. המטוס מולא בחומר ריסוס בכמות של 275 גלון ולאחר שביצע את הבדיקות לפני ההמראה, המריא מתחילת מסלול 27 לחלקת העבודה. לאחר ההמראה, הטייס שמר כיוון כללי, עקף את מושב היוגב ממערב, ביצע יעף לבדיקת שטח העבודה, ולאחריה ביצע את יעף הריסוס הראשון, בצידה המערבי של החלקה לריסוס.

לאחר שיצא מפס הריסוס, הטייס החל בפניה עדינה שמאלה, תוך שהביט לאחור כדי לבדוק את השפעת הרוח על הטלת חומר הריסוס. מיד אחר כך, לאחר שחש שהמטוס כבד, הטייס השהה את הפניה בכדי לצבור פוטנציאל, ומספר שניות אח"כ, בהיותו בגובה שמתחת מאה רגל מעפ"ש ומהירות של כמאה מי"ש, הבחין באש היוצאת מצינורות הפליטה של המנוע, שמע רעש וחש באובדן כוח מסיבי (לדבריו). הטייס חיפש שדה לנחיתה, העביר מצערת לסרק, סגר את ברז הדלק, הבין שהוא שניות מנגיעה, שיכך את הנגיעה בקרקע והחזיק את הסטיק בשתי ידיו. המטוס ביצע מספר נגיעות בקרקע וסיים בנגיעה כבדה, תוך שנפל על חרטומו ונעצר. הטייס סגר את המתח החשמלי במטוס, פתח את דלת שמאל ופינה עצמו מהמטוס. לאחר הנחיתה, הטייס דיווח לחוקר הראשי, שפתח בחקירת האירוע.



נתיב הטיסה

1.2 הטייס

- גיל : בן 37.
- רישיון טיס מסחרי כולל הגדר חקלאי והגדר מכשירים.
- תעודה רפואית סוג אחד – בתוקף, עד לתאריך 2.7.2018.
- ניסיון טיסה : 4,000 שעות טיסה לערך, מתוכן 1,900 על מטוסי ריסוס.
- מבחן רמה – בוצע 02/2017.
- טיסה קודמת לטיסה האירוע בוצעה יום קודם לאירוע.

1.3 המטוס

- מטוס ריסוס : טורבו טראש.
- יצרן : Ayers.
- דגם : S2R – T34.
- שנת ייצור : 1986.
- סימן רשום : 4X-AQS.
- תאריך רישום : 29.11.2005.
- משקל מרבי להמראה : 7,859 ליב'.
- תעודת כושר טיסה מיוחדת : עד לתאריך 24.1.2019.

מנוע

- דגם : PT6A-34AG.
- מס' סידורי : PCE56704.
- סה"כ שעות מנוע לאחר שיפוץ : 20 : 2,873.
- טיפול אחרון מתועד של המנוע אצל מכון משפץ כלל את ביצוע "הגזרה החמה".
- (Hot section Inspection) בשעות מנוע 1,698 לאחר האו*ברול. באותו הטיפול נבדקו להבי טורבינת המדחס (CT blades) והותקנו מחדש במנוע.
- ביקורת מנוע אחרונה : בתאריך 20.12.2017, מסוג 100 שעות.

1.4 נתוני מז"א

- ראות : טובה, מעל 10 ק"מ.
- רוח : דרום מערבית, 8 קשרים.
- טמפרטורה : 20 מעלות צלזיוס.
- עננות : ללא.

1.5 ממצאים באתר התאונה

☒ מיקום המטוס ומצבו במנח האחרון

- ✓ המטוס נמצא כשהוא מונח על חרטומו ומצביע לכיוון 009.
- ✓ כיוון נתיב ריצת הנחיתה הוא 357, אורכו 260 מטר.

☒ הסימנים בשטח

- ✓ מנקודת הנגיעה הראשונה בקרקע, נצפו חמש נגיעות וחזרה לאוויר, עד נקודת העצירה הסופית של המטוס.

- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| ✓ נגיעה ראשונה – 12 מטר | ✓ לאחריו דילוג של – 34 מטר |
| ✓ נגיעה שנייה – 9 מטר | ✓ " – 29 מטר |
| ✓ נגיעה שלישית – 13 מטר | ✓ " – 17 מטר |
| ✓ נגיעה רביעית – 85 מטר | ✓ " – 24 מטר |
| ✓ נגיעה חמישית – 22 מטר | ✓ " – 15 מטר |
| ✓ נקודת עצירה המטוס. | סה"כ מרחק שעבר – 269 מטרים |



המטוס בנקודת העצירה הסופית



נקודת הנגיעה הראשונה



המטוס בשטח

☒ נזקים למטוס

- ✓ נזק לכני הנסע – נשברו.
- ✓ נזק ללהבי המדחף – שלושת הלהבים נמצאו מכופפים בדרגות שונות.
- ✓ נזק מבני בחלקו הקדמי – עיוותי גוף.
- ✓ נזקים למערכת הריסוס – שבירה של מערכת הריסוס.
- ✓ בבדיקה ראשונית של המנוע בראיה באתר התאונה, התגלו סימני שבר בלהבים המיוחסים לרוטור המדחס (CT blades).
- ✓ המנוע פורק והועבר לבדיקה חיצונית.



שברים של להבי רוטור המדחס



כני נסע שבורים ונזקים חיצוניים רבים

1.6 הבדיקות שבוצעו במנוע

הבדיקה הטכנית של המנוע בארץ

המנוע פורק מהמטוס ונשלח לפירוק יסודי במסגרת החקירה ולבדיקה ראשונית במפעל מנועי בית שמש וזאת בתיאום בין המפעל, מפעל המנועים בארץ, קרי מפעל מנועי בית שמש, ויצרן המנוע P&W שבקנדה, כאשר החוקר הראשי מחבר בין שלושת הגורמים ("בעלי העניין/המעורבים"), מעורב ומנהל את תהליך קבלת ההחלטות באשר לאופן מיצוי החקירה בהיבט הטכני.

סוכם שהפירוק היסודי של המנוע יבוצע כאמור במפעל מנועי בית שמש, בנוכחות מומחה של יצרן המנוע, שהגיע בהזמנת משרד החוקר הראשי לטובת החקירה הטכנית של המנוע ולמציאת סיבת הכשל במנוע שהוביל לתאונה. עוד סוכם, כי בעקבות הפירוק ובמידה ויימצאו ראיות שידרשו בחינה/בדיקה מעמיקה במעבדות היצרן ו/או רשות החקירה הקנדית, אזי החלקים הרלוונטיים ישלחו עם מומחה החקירה הקנדי.



המנוע במפעל מנוע בית שמש



תווית המנוע

בתום שלב פירוק המנוע וניתוח הממצאים, עלה, כי מרבית (כמעט כל) הנזקים (הרבים) שאובחנו במנוע, הינם תוצאתיים למכה הנגיפה החזקה שספג המנוע בעת פגיעת המטוס בקרקע במהלך נחיתת האונס, וכן תוצאתיים בעקבות הכשל הראשוני שנמצא בהמשך.

הבדיקה הטכנית של חלקי מנוע בחו"ל

בניסיון להבין את הגורם/הסיבה שהובילו לכשל המנוע, בניגוד לנזק שנמצא בחלקים רבים במנוע, מספר פריטים שהעלו חשד כגורמים אפשריים נלקחו להמשך בדיקה במעבדות יצרן המנוע בקנדה, כמו:

- ✓ חלקים מה – Shroud
- ✓ CT Disk
- ✓ CT Blades – להבי טורבינת המדחס
- ✓ Fuel Nozzles – מזרקי דלק

תוצאות הבדיקה המעבדה המטלורגית של יצרן המנוע בקנדה, וכן במעבדה המטלורגית של הרשות החוקרת הקנדית, TSB, העלו, כי סוף הכשל ממוקם בשני להבי טורבינת המדחס שנשברו ושהובילו לאובדן הכוח במנוע שחש הטייס, כולל האש שפרצה דרך צינורות הפליטה והמשך קריסת המנוע ונחיתת האונס.

במקביל וללא קשר לעבודת הבדיקה שבוצעה במעבדות השונות בחו"ל, צוות החקירה התחקה אחר היסטוריית התחזוקה של המנוע על פי הביקורות העיתיות והטיפוליים הגדולים המשמעותיים מנקודת הזמן האחרונה, קרי הטיפול האחרון שבוצע למנוע, טיפול 100 שעות, ואחורה לעבר הטיפול הגדול שכלל שיפוץ היחידה החמה, בה חלק מהרכיבים שנלקחו שייכים לחטיבה זו.

1.7 היסטוריית טיפולים שוטפים בתחזוקת המטוס על פי ספר המנוע (Engine Logbook)

תאריך	שעות מנוע (מאז שיפוץ)	סוג ביקורת	פירוט ייחודי בביקורת
29.9.2015	1,663: 00	100	400 שעות מזרקי דלק
10.11.2015	1,698: 05	ביקורת חטיבה חמה	
8.12.2015	1,771: 00	100	400 שעות סטרטר גנרטור
1.2.2016	1,866: 10	100	מיסבי מזגן
25.2.2016	1,962: 05	100	
20.4.2016	2,058: 00	100	
4.7.2016	2,157: 05	100	
19.9.2016	2,249: 00	100	
12.1.2017	2,345: 30	100	
19.4.2017	2,439: 10	100	400 שעות מזרקי דלק
20.6.2016	המנוע הורכב על מטוס האירוע 4X-AQS ובוצעה ביקורת 100 בשעות מנוע: 2,483: 00		
30.8.2017	2,576: 00	100	
10.11.2017	2,676: 35	100	
20.12.2017	2,772: 35	100	

הטיפולים שבוצעו במנוע

הערה: החברה המציאה למשרד החוקר מסמך/טופס בדיקה המתוארך לתאריך 20.4.2016 בו מצוין שבוצע טיפול במזרקי הדלק, אך לא ניתן היה לקבל מהם את מערך הבדיקה ופירוט העשייה שבוצעה.

1.8 נוהל בדיקת מזרקי הדלק במנוע

בדיקת מזרקי הדלק במנוע הינה חלק ממערך הבדיקות הכולל שהמנוע עובר במהלך אורך חייו, הנמשך על פני 3,000 שעות. במהלך אורך חייו זה, על המנוע לעבור בדיקות עיתיות בכול 100 שעות, כאשר רכיבים ספציפיים, הרשומים במערך הבדיקה של יצרן המנוע, מאפשרים בדיקות במרווחי זמן אחרים, לדוגמה: מזרקי הדלק - כל 400 שעות.

יצרן המנוע מנחה את בעלי המנועים מתוצרתו לפעול על פי מנחה תחזוקה (Maintenance Manual) עפ"י סוג המנוע, ובמקרה הנחקר דגם המנוע: PT6A-34AG. במנחה התחזוקה, בפרק "מנוע - בדיקה/ביקורת" - Inspection - Engine - 72-00-00, מעוגנת ההנחיה לאופן בדיקת מזרקי הדלק וזאת על פי סימוכין Ref: 73-10-05 כול 400 שעות, עם אפשרות מותנית להארכה נוספת של 200 שעות, עפ"י ניסיון המפעיל ושיעורי כשלים בעמידות המזרקים.

במקביל וביחד עם בדיקת המזרקים, היצרן מורה באמצעות "מכתב שירות", קרי, S.I.L NO - PT6A-116R3 משנת 2013, לבדוק באמצעות בורוסקופ את שורשי להבי ה- CT זאת לאחר שבבדיקות שבוצעו בלהבי CT, במנועים של חברות מפעילות שלא ביצעו בדיקות בורוסקופ כנדרש על פי ה- EMM (Engine Maintenance Manual), נמצאו שברים.

תיעוד תחזוקת המנוע

- ☒ עפ"י ספרות האחזקה של המטוס בספרות המנוע נמצא התיעוד להלן:
 - ✓ אישור על ביצוע בדיקת מזרקי דלק בתאריך 29.9.2015 בשעות מנוע: 1,663: 00
 - ✓ אישור על ביצוע בדיקת מזרקי דלק בתאריך 19.4.2017 בשעות מנוע: 2,439: 10
- ☒ לא נמצא תיעוד של "מערך ביקורת מזרקי דלק" עם חתימות המבצעים.
- ☒ לא נמצא תיעוד של ביצוע בדיקת בורוסקופ ללהבים במועד בדיקת המזרקים. לצוות החקירה נאמר שאין ברשות החברה בורוסקופ המסוגל לתעד (בצילום) ולנתח את הבדיקה על ממצאיה, דבר היכול לעזור למכונאי לזהות כשלים בלהבים על ידי עיבוד והגדלה של הצילום המתקבל בבורוסקופ. עלות מכשיר שכזה יקרה באופן יחסי, וחסרון נוסף שלו שהדבר מצריך "השבתה של כלי הטיס בביקורת למשך זמן ארוך יותר.

2. ניתוח

כללי

עם קרות האירוע והגעת חוקרי משרד החוקר הראשי לזירת התאונה, החוקרים החלו לתעד את הזירה על מאפייניה השונים, כמו: השטח, כלי הטיס והמעורבים שנכחו ובכללם טייס המטוס. צוות החוקרים החל בבדיקת שתי סוגיות עיקריות:

✓ סוגיה תפעולית – טייס.

✓ סוגיה טכנית – תקלה.

כבר בשלב מקדמי זה, צוות החקירה הבין, כי עליו להתמקד בסוגיה הטכנית. אשר על כן, צוות החקירה יזם לשתף חוקר מטעם יצרן המנוע, ומאוחר יותר גם שיתוף של מעבדות הרשות החוקרת הקנדית, ה – TSB.

2.1 הסוגיה התפעולית

על פי תשאול הטייס, הטיסה הייתה שגרתית, כשקדמה לה, הכנת המטוס לטיסה על ידי הטייס, בדיקתו טרם טיסה, תדלוקו, והטענת חומר הריסוס. עד לרגע התאונה, המטוס פעל באופן תקין. מההמראה ועד לתאונה, הטיסה נמשכה דקות ספורות. הטייס ביצע פס ריסוס אחד כשבמהלך היציאה מהפס, כשהמטוס היה בטיפוס בגובה מוערך הנמוך מ – 100 רגל מעפ"ש ובמהירות שסביב 100 מי"ש, הטייס שמע קול פיצוץ ("פוף"), ולהבות אש נראו יוצאות מהמפלטים, כשהטייס חש במקביל, בירידת כוח מנוע דרסטית שהובילה אותו למסקנה ולהבנה המידית שעליו לבצע נחיתת חירום מיטבית, בשטח המתאים הקרוב ביותר, קודם שיאלץ לבצע נחיתת אונס.

הטייס סגר מצערת לסרק והעביר ידית דלק "לחדל", ובהמשך סגר ברז דלק כשהוא שניות מהנגיעה/פגיעה בקרקע. עם הנגיעה, הטייס אחז במוט ההיגוי בשתי ידיו והמטוס רץ על גבי רגבי הקרקע כשהוא מקפץ על הקרקע, בהתאם לפני הקרקע הגליים. בסוף הריצה, המטוס ניתר מעט לאוויר ונחת בכבדות חזרה, תוך שנפל על "האף" והוא נעצר במנח הסופי.

הגובה הנמוך בו היה המטוס לא אפשר לטייס, למעשה, לחפש שדה אלטרנטיבי אחר ונראה, כי הטייס, בנסיבות האירוע, פעל בקור רוח ובמקצועיות, תוך קבלת החלטות מהירה שהובילו להצלחת נחיתת החירום ולמינימום נזק לכלי הטיס ולטייס.

משכך, צוות החקירה קבע שהסוגיה התפעולית לא היוותה גורם לכשל או להחרפת נזק כלשהו באירוע.

2.2 הסוגיה הטכנית

כאמור, מיקוד החקירה על ידי צוות החוקרים נבע מההבנה, כי הסיבה המיידית לתאונה הינה כשל במנוע המטוס. עדות לכך התקבלה הן מתשאול הטייס והן מזיהוי שני להבי טורבינה שבורים, שנמצאו עם הכנסת היד לאחד המפלטים. מרבית הנזק שנראה בשטח התברר כנזק תוצאתי לאירוע ולנחיתה, ולא כגורם לנחיתה החירום. מיד עם החזרה מהזירה הוחלט וסוכם בין משרד החוקר הראשי לבין החברה המפעילה ויצרן המנוע, על פירוק המנוע מהמטוס והעברתו למפעל מנועי בית שמש, לפירוק כללי במטרה להבין את סיבת הכשל, שהתאפיין ברעש פיצוץ ולהבה גדולה של אש היוצאת מהמפלטים.

במקביל לפעילות זו, החוקר הראשי יצר קשר עם יצרן המנוע, P&W, והזמין ארצה חוקר מומחה מטעמם, שיצטרף לצוות החקירה במנועי בית שמש אשר ילווה ויוביל את פירוק המנוע במפעל המנועים בארץ. בנוסף הוחלט, כי אם ימצא צורך בהוצאת חלקים חשודים לבדיקות מעבדה ייעודיות, הדבר יבוצע ביחד ובאמצעות החוקר המומחה הקנדי.

פירוק על פי חטיבות המנוע והבדיקה בארץ שבוצעה בראשותו של החוקר מומחה מטעם P&WC כללה פירוק של:

- ✓ רכיבים חיצוניים למנוע - External components,
- ✓ חטיבת החום - Gas Generator,
- ✓ חטיבת הכוח - Power Section Module,
- ✓ חטיבת ההפחתה – Reduction Gearbox Module.

באופן חד משמעי נקבע, כי המנוע ספג בנחיתה פגיעות רבות שהתאפיינו בשברים מרובים ביותר, בכול חטיבות המנוע. יחד עם זאת, הובן ששברים אלו הינם תוצאתיים, זאת בניגוד לארבעה חלקים שנחשדו בסוג כשל שאינו מאופיין בעומסים חד-פעמיים רגועים אלא חשד לכשלים תלויי זמן, קרי, אינם מיוחסים לפגיעה בקרקע. בנוסף, לאחר זיהוי של הלהבים, הוברר כי להבי טורבינת המדחס לא יוצרו על ידי יצרן המנוע, אלא על ידי יצרני להבים חליפיים - PMA Parts, אשר אומנם מאושרים כחוק על ידי ה - FAA. בשל כך, וכמדיניות יצרן המנוע, הוא נמנע מלקחת אחריות עליהם, ולכן, בעת אירוע בו נדרשת בדיקה לקביעת סיבת כשל בחלק שכזה, אזי הוא נאלץ לשלוח אותם למעבדת הרשות החוקרת הקנדית.

החלקים שנלקחו לבדיקה במעבדות יצרן המנוע ובמעבדות ה - TSB:

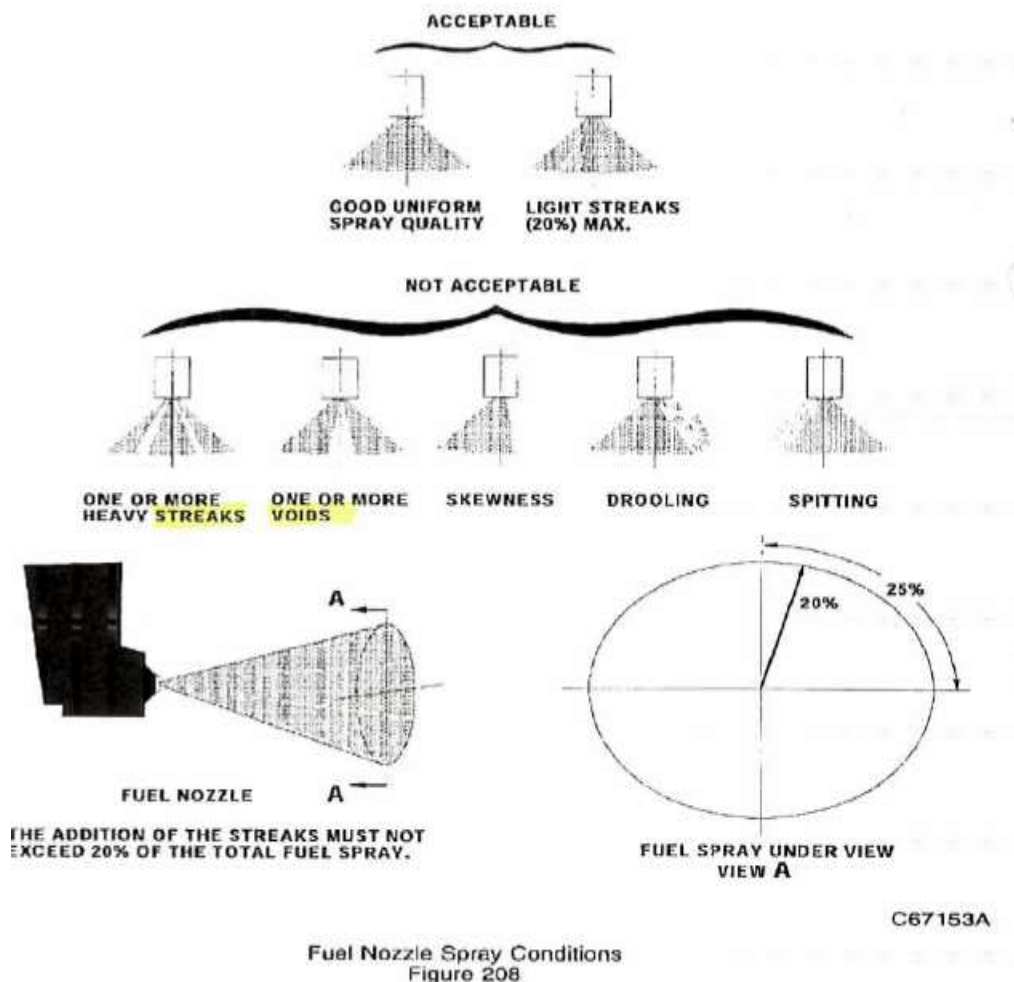
1. CT Blades – להבי טורבינת מדחס.
2. CT Disk - דיסקת להבי הטורבינה.
3. מזרקי הדלק – Fuel Nozzle.
4. LED (Large Exit Duct) – מכונה "כובע מקסיקני" / "סומבררו".

תוצאות בדיקת המעבדה

Fuel Nozzles – מזרקי הדלק

מזרקי הדלק שנבדקו במעבדת PWC בקנדה כללו בחינה וניסוי של נחירי הדלק. בביקורת נמצאו פיח ופחמן בכול הנחירים, על השורש ועל הקצה של כול נחיר. בנוסף, נמצא שדסקיות האבטחה עם הלשונית (Tab washers) הותקנו שלא כהלכה על הנחירים, למעט בנחיר מס' 10, שהותקן נכון - מצב זה השפיע באופן מזיק על איכות הזרקת הדלק. מכאן, שאם תופעות איכות ההזרקה היו קיימות בנחירי הדלק, משך זמן ניכר (טרם לתאונה), אזי יכלה להיות להן השפעה מזיקה על תא השריפה של המנוע ועל רכיבי החלקים החמים שלו.

בבדיקה הועברה זרימה בנחירי הדלק, עפ"י ספר שיפוץ המנוע של P&WC מס' 3011243, הוצאה 44, וככלל נרשמו עד 50% פסי אור (Streaks) וחללים (Voids) המצביעים על זרימה ופיזור דלק באופן לא שווה ולא נכון, מכפי שנדרש.



קצות הנחירים נוקו באמצעות מברשת רכה כדי להסיר הצטברות פיח על פני השטח, והניסויים בוצעו שנית. תוצאות הניסוי לא הראו כול שיפור באיכות הזרימה.



Figure 2
Typical fuel nozzle condition as received



Figure 1
Fuel nozzles as received.

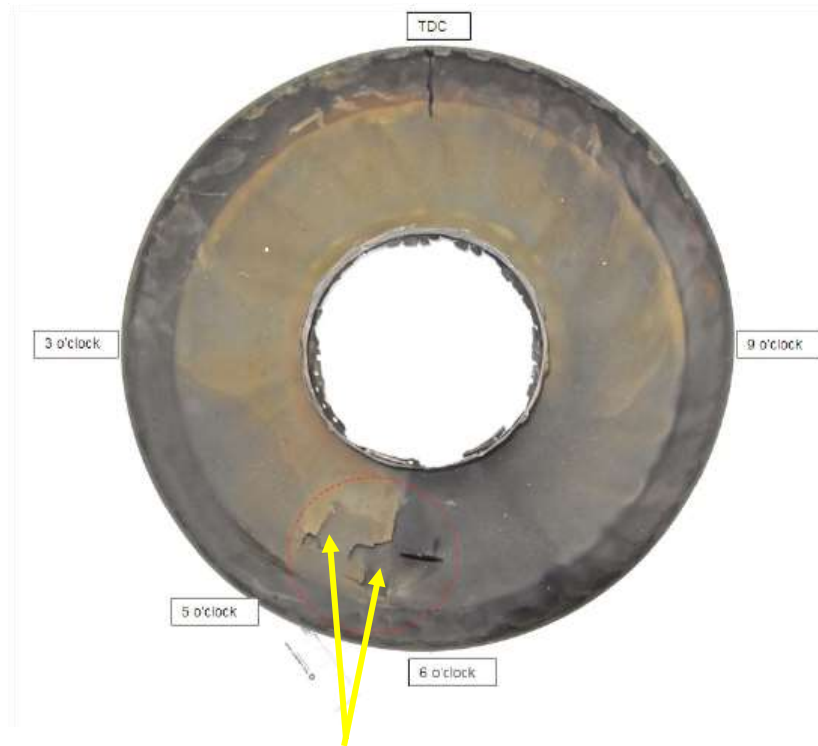


Figure 3
Nozzle tip tab washer correctly applied (left) and incorrectly applied (right).

לסיכום, נוכח תוצאות הבדיקה ניתן לקבוע, כי בסבירות גבוהה שהדלק שיצא לתא השריפה מהמזרקים, שאמור לצאת בצורה של רסס אחיד ושווה, יצא בסוג של השפרצה, בעוצמה ממוקדת על שטחים קטנים יותר, במקום מפוזרת. אותם רכיבים שספגו קילוחים אלו, נחשפו לטמפרטורות חמות, הרבה יותר מהרצוי.

LED – "כובע מקסיקני" (סומבררו)

בדיקת ה-LED אישרה שהמעטה הפנימי היה מנוקב בשני מקומות. במגן החום נמצאו סדקים במקומות שתאמו את הנקבים הנ"ל. אחד הסדקים התארך עד תיקון בריתוך. לא היו כל סדקים מסביב לתיקון ריתוך זה, מה שהוביל למסקנה שהסדק התפשט עד הריתוך, ולא נבע ממנו. על המשטח הפנימי של מגן החום החיצוני נמצאה התחמצנות מתקדמת.



"הסומברו" מנוקב בשני מקומות

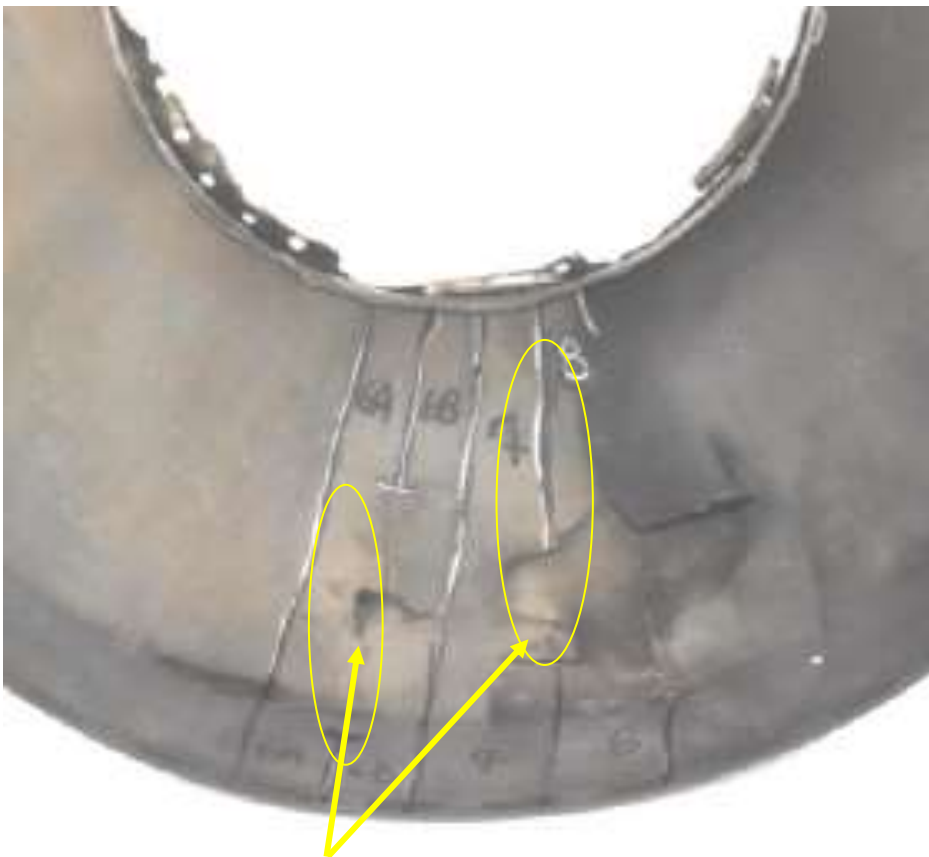


הריתוך והסדק

ה - LED נחתך למקטעים כדי לנסות להבין את מנגנון ההידרדרות (degradation). לצרכי ייחוס נבדק חתך שהיה בשעה 12 ובאזור שלא ניזוק. חתכים אחרים בוצעו דרך האזור שניזוק.

בחיתוך שנעשה בדגימה מס' 7 ניראה שיתוך (קורוזיה) של טמפרטורה גבוהה. המידות של עובי המתכת ושל הציפוי תאמו את דרישות השרטוט.

בוצעה השוואה של חתכים עם חריטה מטלוגראפית בדגימה מס' 1 ובדגימה מס' 7. בדגימה מס' 7 נראית הדרדרות (deterioration) ברורה של המיקרו-מיבנה (microstructure).



האזור ב – LED שניזוק , אזורים עם חתימת טמפ' גבוהה
(אזורים בהירים)

חנתך מטלוגרפי של דגימת המעטה הפנימי מהאזור המנוקב מס' 8 הראה היצרות של ציפוי האלומיניד (aluminide) אל כיוון השפה המנוקבת, ככל הנראה תופעה משנית של הניקוב. סימני שיתוך בטמפרטורה גבוהה ניכרים בשני צדי המעטה הפנימי, ליד הניקוב – הן הצד המקורר והן צד זרימת הגז. זוהי תוצאה של חשיפה לגזים בטמפרטורה גבוהה.

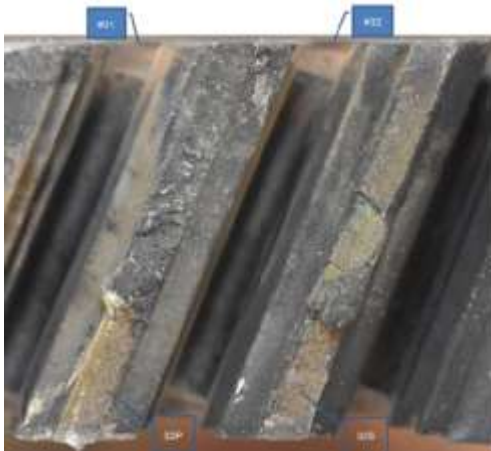
לסיכום, החוקרים סוברים שבצינור היציאה הגדול (L.E.D) שהינו חלק ממכלול תא הבעירה, נראו במגן החום הפנימי, בשעה 6, חריכה משמעותית וניקוב (Perforation) הקשור אליה. חתיכה/חלק ממגן החום הפנימי נמצאה מפותלת פנימה במצב המפריע לזרימת הגז בתא הבעירה.

מכלול דיסקת טורבינת המדחס – CT Disk assembly

בבדיקת להבי הטורבינה נראו שני להבים סמוכים השבורים בתוך השינון הראשון (First Serration). הלהבים התגלו מייצור FAA/PMA ומשכך בבדיקתם וניתוח הממצאים בוצע כאמור על ידי ה – TSB (הרשות החוקרת הקנדית) ולא ע"י יצרן המנוע, שלא לקח אחריות על החלקים שאינם בייצורו. במהלך אנליזת להבי ה – CT ע"י ה – TSB, נמצאו עוד שלושה להבים סדוקים: מס' 22, 27 ו - 50.

העובדה שלהבים אלה התגלו כסדוקים, במקומות אקראיים, מעידה שכל מערך הלהבים היה נתון לעומסי תפעול דומים. כמו כן, העובדה שבשני להבים סמוכים 32P, ו- 32S, התפתחו סדקים (בשינון האמצעי), גרמה קרוב לוודאי להעברת עומס אל חיבורי דיסקת CT (שינון עליון), שהובילה לשבר בהם. הדבר עולה בקנה אחד עם מנגנון של שבר בהתעייפות-זחילה (Creep assisted fatigue fracture).

זחילה, הינו בדרך כלל תהליך של בלאי מתמשך (aging) שקורה עם הצטברות של טמפרטורה, מאמצים וזמן. אם אחד משלושה גורמים אלה נהיה חריג, במקרה זה, המאמץ בחיבורים כתוצאה מהעברת העומס, אזי, תהליך ההזדקנות מואץ, מה שעלול לגרום לשברים כדוגמת אלה שנמצאו בחקירה.



החיבורים השבורים



מראה כללי של דיסקת CT והשיניים השבורות

על בסיס הבדיקה שבוצעה על ידי ה- TSB ניתן לקבוע, כי אובדן הכוח במנוע, שחוה הטייס, נגרם בשל שבירת שני להבי הטורבינה (CT blades) הסמוכים זה לזה. השבירה נגרמה בתהליך התעייפות שנוצר כתוצאה מתנאי מאמצים באזור חיבורי הלהבים ולא ממצב מקדמי של קיום פגמי טיב בפני השטח שבמקורות הסדק. מבחינת PWC, בחינת השברים של חיבורי דיסקת CT (במרווח שבין 2 הלהבים השבורים) ראתה התעייפות המאופיינת בזחילה, מה שעולה בקנה אחד עם העברת עומסים אל השינון (Serration) שבחיבורי הלהבים שב- CT disk, לאחר התחלת היסדקות להבי ה- CT.

סיכום

נוכח שלושת הממצאים לעיל, בהתחקות אחר ממצאים במנוע שאינם קשורים בעומס חד פעמי ורגעי אשר עשויים להיות מיוחסים בסבירות גבוהה לזמן הפגיעה בקרקע של המטוס עד לעצירתו ולשברים ונזק אחר שהינם תוצאתיים לגורם הישיר לכשל, ניתן בסבירות גבוהה לקבוע את תרחיש הכשל במנוע שגרם לאובדן הכוח ולביצוע נחיתת החירום בשטח.

2.3 התרחיש המסביר ומנגנון הכשל

התרחיש מתואר בסדר התרחשות הפוך

☒ הגורם הסביר ביותר לכשל המנוע, קרי סוף התהליך, הינו כשל המאופיין בשבירה של שני להבי טורבינת המדחס (CT blades), אשר גרם לאובדן הכוח המסיבי של המנוע ובדיעבד לנחיתת החירום שביצע הטייס. על מנת להבין את מנגנון הכשל בצורה לוגית קל לתאר את המנגנון, מרגע כשילת/שבירת הלהבים תוך תיאור לאחור.

אם כן, הכשל החל בשבירת שני להבי הטורבינה כתוצאה מעירור מחזורי של הלהבים, קרי הגדלת עומס, שהוביל לשבר התעייפות.

☒ קדם לשבר ההתעייפות שבלהבים, כשל באזור מסוים של ה-LED, על ידי חתיכה שהתפתלה (התכרבלה) כלפי מעלה והפריעה לזרימת האוויר בנתיב הגז בכיוון להבי הטורבינה, שמצדם הובילו לעירור המחזורי של הלהבים.

☒ קדמה לשלב זה של התכרבלות חלק מה-LED, זרימת דלק לא אחידה ממזרקי הדלק שחיממו בצורה לא שווה את תא הבעירה ובעיקר את החלק הפנימי ("בשעה 6") של ה"סומבררו" - שהוביל לטמפרטורות קיצוניות בחלק זה ולשבירה והתקפלות המתכת.

☒ ניתן לנסות ולתארך את תחילת התדרדרות מצב מזרקי הדלק, בשלב שבין ביצוע "טיפול 400" המוקדם לזה שאחריו, לאחר 776 שעות, אם כי לא ניתן לפסול אפשרות של תחילת תהליך, במהלך 300 השעות שבין הטיפול השני למועד האירוע.

חסרונות אל מול יתרון מחיר-עלות למשתמש

בנוגע ללהבי PMA, למעשה רק לאחרונה השלימו במפעלי P&WC את מתודולוגיית ה - SMS בנושא זה, וניתוח המשוב מהשטח תומך בכך שאין הגדרה של "מצב מסוכן", שנובע משימוש בלהבי PMA במנועי ה - PT6. כדי שיתקיים סיכון כזה, להבי ה - PMA צריכים להוביל לשבר בדסקה, וכתוצאה מכך לשחרור של שברים עתירי-אנרגיה מהמנוע (כישלון בלתי-מוכל, uncontained failure). יצרן המנוע משתמש במתודולוגיית רישוי המביאה למרווח ביטחון ניכר בדסקה. עם זאת, הגם שנמצאו להבי PMA כבדים יותר ממשקל הלהבים של יצרן המנוע, המצמצמים במידת מה את יכולת התרחשות LCF (low cycle fatigue) בלהבים, ידוע, כי בכול מקרה, הם אינם מתקרבים לאורך החיים המוצהר של הלהבים המיוצרים במפעלי P&WC.

בנוסף, ייתכנו גורמים נוספים הקשורים ללהבי PMA, כגון: התאמת ההרכבה, צורת חיבור הלהב והמשטח האווירודינמי, מרווחים בלתי מספיקים וכיו"ב, שעלולים לגרום לעומסים חריגים על הדסקה, שמצדם עלולים להוביל לשחיקה חריגה ולסידוק בחיבורים. עם זאת, המנוע מתוכנן להכיל השתחררות רדיאלית של שני להבים ושל מקטע "עץ-האשוח", בדסקה שבין להבים אלה, אך הדבר עלול בהחלט להוביל לכיבוי מנוע, אם כי מצב זה לא יסווג בד"כ כמסוכן (hazardous).

משכך, הסיכונים שלהם נחשפים מפעילי המנועים הבוחרים בשימוש בחלקי PMA, קשורים בעיקר לפוטנציאל של ירידת אמינות המנוע. הגם שאין הבנה מלאה של שיעור הכשלים בלהבי PMA, המציאות היא שקשה להשוות אותם ללהבים של יצרן המנוע. בנוסף ולמיטב ידיעתו של יצרן המנוע, אין הוא מכיר יצרן PMA כלשהו קיים, אשר עוקב ומנטר אחרי המוצר שלו. לעומת זאת, P&WC מבצעת בשגרה ניטור של שיעור הכשלים, וכשצריך, נוקטת בצעדי שיפור ושדרוג. דוגמה טובה לכך, היא התיכון מחדש של להבי ה - CT עבור מנוע ה - PT6 הקטן (דגמי A-114A ו - 34/34AG), ששיפר בצורה אקספוננציאלית את התנגדותם/עמידותם לתופעה של התעייפות בזחילה. מאחר וככול הידוע, יצרני PMA אינם מנטרים את הפריטים המיוצרים על ידם, בעצמם, ייתכן שבעיות פוטנציאליות יישארו סמויות. יש לזכור ששיעורי האמינות הינם חשובים למדי כשמדובר במטוס חד-מנועי. גם אם, כפי שהוסבר לעיל, אין הגדרה של "מצב מסוכן", הרי כיבוי מנוע במטוס חד-מנועי עלולה להסתיים לעתים קרובות בצורה לא טובה. הגם שברור שחלקי ה - PMA מאושרים על ידי ה - FAA, לשימוש בכלי הטיס ככלל, קיים מידע מבוסס בידי יצרן המנוע שבחלק מהפריטים מאושרי FAA אלו נמצאו סטיות משמעותיות שיכלו ואף גרמו בעבר לכיבוי מנוע באוויר.

3. ממצאים עיקריים

- 3.1** האירוע מסווג ככשל טכני, שאופיין באובדן כוח מנוע חמור תוך שלהבה פרצה ממפלטי המנוע אשר הובילה לנחיתת חירום בשטח החקלאי הצמוד לשטח המרוסס, עם תרומה אפשרית של עבודת תחזוקה חסרה.
- 3.2** קדם לשבירת שני הלהבים, תהליך כשל טכני מתמשך, שהחל עקב הזרקת דלק לא אחידה אשר פגמה ביעילות זרימת האוויר הדחוס החם לעבר שני הלהבים שנשברו.
- 3.3** יעילות זרימת האוויר נפגמה לאחר שנוצר שבר והתכרבלות בחלק פנימי של מעטפת ה-LED, כתוצאה של חימום יתר, עקב התזה ממוקדת של מזרקי דלק על שטחים קטנים יותר מהנדרש.
- 3.4** בסבירות גבוהה, על פי הרישומים בספר המנוע, שבדיקת מזרקים אחת בין השעות 1,663:00 ל- 2,439:10 נשכחה, כך שבניסיון להתחקות אחר תיארוך אפשרי לתחילת הכשל ומאחר שמזרקי הדלק אינם אמורים להחזיק מעמד באינטרוולים של 776 שעות בין בדיקות, ניתן להניח שיעילותם (של חלק מהם) ירדה ונפגמה במהלך פרק זמן זה, מצב שעשוי להסביר את תפקודם הלקוי בהמשך.
- הערה: חוסר בתיעוד בספר המנוע והעובדה שלא ניתן היה לקבל את מערך העבודה ופירוט העבודה שבוצעה לכאורה בשעות המנוע 2,058 שעות, ואשר כללה ביקורת 400 בה המזרקים היו צריכים להיבדק, למרות שקיים תיעוד בטופס בדיקה עם איזכור על ביצוע בדיקה, צוות החקירה קבע, כי לא מן הנמנע שמערך העבודה לא בוצע במלואו.
- 3.5** תיעוד חסר ולקוי של מערך הבדיקה ושל חתימת המבצעים, בבדיקות שבוצעו, אינו מאפשר למעשה להתחקות אחר מצבם ואופן הטיפול שעברו בביקורות העיתיות.
- 3.6** תיעוד חסר של בדיקה בבורוסקופ, בין שבוצעה ובין אם לאו, אינו מאפשר לצוות הטכני לזהות ביעילות כשלים בשפת הזרימה של להבי טורבינת המדחס.

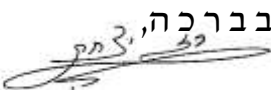
4. המלצות

4.1 לוודא קיום וביצוע של "מערכי ביקורת למזרקי דלק" ותיעודם במסגרת החברה, כאמצעי ניטור פעולות ביקורת ככלל, ותקינות ביצועם בפרט.

באחריות : חברות הריסוס מועד ביצוע מומלץ : 30.8.2019

4.2 לוודא קיום וביצוע בדיקות בורוסקופ במועד בדיקת מזרקי הדלק, תוך שימוש ביכולת תיעוד בצילום, כאמצעי ליכולת ניתוח של הצוות הטכני באשר למצב להבי טורבינת המדחס.

באחריות : חברות הריסוס מועד ביצוע מומלץ : 30.8.2019

בברכה,

עו"ד רז יצחק (רזצ'יק)
החוקר הראשי

תאריך: 19.6.2019 סימוכין: 4000-0098-2019-0014459

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 חשבונו. 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.