

## אחזקה ממוקדת אמינות (RCM) – חלק 1

נכתב על ידי **Mike Busch**, תורגם על ידי **איציק מה-יפית**, מתוך **AVweb** מתאריך 2.8.07.

הערת המתרגם: בחרתי הפעם לתרגם מאמר שאינו עוסק דווקא במטוס זה או אחר או במערכת מסוימת. המאמר עוסק בתפיסת אחזקה של העידן המודרני. המאמר עניין אותי לצורך עיסוקי ויכול לעניין את בעלי הרקע הטכני בתחום האחזקה בתעופה. לא בטוח שהמאמר יגרום לשינוי תפיסת האחזקה אצל קובעי המדיניות בארץ, אולם אני מניח שגם הם ילמדו משהו שאינו שגרתי בתחום זה. למאמר שני חלקים המקובצים יחדיו לקובץ אחד. המאמר על שני חלקיו ארוך, אולם אלה שיבחרו לקוראו עד סופו בוודאי ירכשו ידע נוסף בתחום שאינו יום יומי.

לפני למעלה משלושים שנה, בשנת 1974, משרד ההגנה האמריקאי הטיל על United Airlines להכין דו"ח לגבי הטכניקות שתעשיית המטוסים השתמשה בהן לפיתוח תוכניות אחזקה יעילות-עלות לתעופה האזרחית. הדו"ח המסכם, שנשא את הכותרת (F.S. Nowla & H. Heap, National) Reliability Centered Maintenance (Technical Information Service, 1978) תיאר דרך שונה בצורה רדיקאלית לבחינה של אחזקת מטוסים, בהתבסס על ניתוח קפדני של ניסיון אחזקה מעשי והערכה של מגרעותיה.

באופן מסורתי, הושם דגש ניכר בתוכניות אחזקת מטוסים להגדרת מרווחים מפורטים לשיפוץ והחלפה (TBO – Time Between Overhaul) בכדי להשיג רמה משביעת רצון של אמינות. מכל מקום, ניתוחים הנדסיים של כמויות מידע תפעולי ממספר חברות תעופה עיקריות, הפיקו תובנות מרתקות לתנאים החייבים לשרור בכדי שתחזוקה מתוכננת תהיה יעילה. שני ממצאים היו מפתיעים במיוחד:

- לגבי פריט מסובך (כמו מנוע), לשיפוץ מתוכנן מראש יש השפעה מועטה על אמינות השיפוץ, אלא אם לפריט יש אופן כשל דומיננטי ובודד.
- קיימים פריטים רבים שלגביהם בפשטות אין כל צורה של אחזקה מונעת, מתוכננת מראש, ברת ביצוע טכנית וכלכלית.

למשל, נקבע ששיפוץ מתוכנן מראש על מנועי טורבינה אינו מפיק שום רווח אמינותי או כלכלי כלל, ושאחזקה יחידת כוח שכזו על תנאי (On-Condition) מספקת אורך חיים ארוך, מפחיתה עלויות אחזקה ומשפרת אמינות. (אני מתחיל להשתכנע שהדבר נכון גם לגבי מנועים של מטוסי בוכנה, ואדון בכך בהמשך.)

RCM גרם לחסכון עצום לחברות התעופה. להלן כמה דוגמאות:

- תוכנית האחזקה הראשונית למטוס DC-8 (שפותחה לפני הופעת RCM) דרשה שיפוץ מתוכנן ל – 339 פריטים. מטוס DC-10 הגדול והמורכב יותר (שתוכנית האחזקה שלו פותחה בהשתמש ב – RCM) דורש שיפוץ מתוכנן של רק 7 פריטים, אף אחד מהם אינו מנוע.
- ה – DC-8 שלפני ה – RCM דרש 4,000,000 שעות אדם לביקורת מבנה במהלך 20,000 שעות התפעול הראשונות. בואינג 747 שלאחר ה – RCM דרש רק 66,000 שעות אדם במהלך אותה התקופה.

לא רק שהמתואר למעלה הינו חיסכון עלויות עצום, הוא גם הושג ללא הקטנת האמינות. להיפך, האמינות השתפרה למעשה במרבית המקרים בהם הדגש הוסט מאחזקה מונחית עיתוי (Time Directed Maintenance – TDM) כגון שיפוצים מתוכננים מראש, לאחזקה מונחית מצב (Condition Directed Maintenance – CDM).

ביתרת מאמר זה אדבר על מספר עקרונות בסיסיים של RCM. בהמשך אדון כיצד עקרונות אלו עשויים להיות מיושמים למטוסים מנועי בוכנה שלנו.

### **תפקודים וכישלונות**

כל מערכת ורכיב של מטוס מבצע תפקיד אחד או יותר. מטרת התחזוקה הינה לוודא שפריטים אלו ממשיכים לבצע את התפקודים שלהם בביצועים סטנדרטיים מקובלים. במספר מקרים (למשל – יכולת לעמוד בעומסי G), הסטנדרטים המקובלים של ביצועים מוסדו על ידי ה – FAA במהלך רישיון המטוס. במקרים אחרים (למשל – שיגור אמין), הסטנדרטים המקובלים מוסדו על ידי בעלי המטוסים או מפעיליהם. אנחנו מבצעים תחזוקה בכדי לוודא שהמטוס, וכל אחת ממערכותיו ורכיביו, ממשיכים לעמוד בסטנדרטים המקובלים.

לפני שנוכל לבסס סטנדרט ביצוע הגיוני לפריט, עלינו לבחון את התוצאות של כישלון פריט זה. לגבי פריט אשר כישלונותיו עשויים לגרום מוות או פגיעה (למשל – קורת כנף ראשית), הסבירות לכישלון חייבת להיות קרובה לאפס. מצד שני, לגבי פריט שכישלונו הוא פשוט אי נוחות (למשל – רדיו מספר 2), סבירות כישלון גבוהה יותר מקובלת.

לעתים, חשיבות הכישלון תלויה בהקשר לתפעול הפריט. כישלון אלטרנאטור קריטית הרבה פחות אם למטוס יש אלטרנאטור נוסף. הכישלון של מנוע הינו הרבה פחות קריטי במטוס בעל ארבעה מנועים מאשר במטוס חד מנועי. הכישלון של קורת כנף קריטית פחות אם לכנף תכנון המבטיח מפני כישלון, עם כמה קורות.

RCM מסווג את חשיבות הכישלון לארבע קטגוריות, בסדר יורד של חשיבות:

- **חשיבות בטיחותית** – לכישלון יש חשיבות בטיחותית אם הוא יכול להרוג או לפגוע במישהו.
- **חשיבות תפעולית** – לכישלון יש חשיבות תפעולית אם הוא מונע תפעול המטוס (קרקוע – AOG).
- **חשיבות נסחרת** – לכישלון יש חשיבות נסחרת אם אינו חשוף לצוות הטיסה, אולם עלול לגרום לכישלון עוקב תוצאות חמורות יותר (למשל – כישלון של אלטרנאטור נוסף, וסת מתח או משאבת יניקה).
- **חשיבות בלתי תפעולית** – כישלון בקטגוריה זו חשוף לצוות הטיסה, אולם אינו משפיע לא על בטיחות ולא על תפעול, אולם כרוך רק בעלות התיקון (למשל – כישלון רדיו מספר 2).

### בר ביצוע? שווה לעשות?

RCM מכיר בכך שיש למקד את משאבי התחזוקה בהקטנת כישלונות שאכן חשובים. לפיכך, RCM אינו דורש מניעת כל הכישלונות. במקום זה, הוא מתמקד במניעת כישלון של פריטים בעלי חשיבות גדולה בטיחותית ותפעולית, ואיתור כישלונות חבויים כך שניתן יהיה לתקנם על בסיס זמן. לכישלונות ללא חשיבות תפעולית, הנתב האופטימאלי לפעולה הינו בדרך כלל תגובתי ולא מניעתי: איתור התקלה ותיקון הפריט רק לאחר שניכשל.

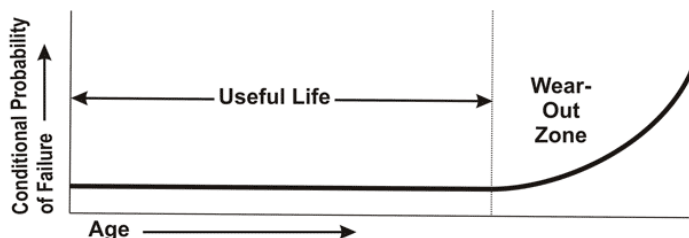
לגבי תקלות עם משמעות בטיחותית או תפעולית רצינית, RCM מנסה למנוע את הכישלון על ידי זיהוי מטלה תחזוקתית מונעת שתינקט לפני התרחשות הכישלון. מטלות מונעות שכאלו עשויות לערב שיפוץ מתוכנן מראש או החלפה (TDM) או תחזוקה על תנאי (CDM). מכל מקום, על מנת לאמץ מטלות מונעות כאלו, יש להציג תחילה שהן גם ברות ביצוע טכנית גם שוות ביצוע:

- מטלה נחשבת ברת ביצוע אם היא מפחיתה את חשיבות הכישלון הקשור לרמה שהיא מקובלת על הבעלים או המפעיל של המטוס (במלים אחרות, התפקיד מתבצע).
- מטלה נחשבת שוות ביצוע אם היא מקטינה את חשיבות הכישלון הקשור לרמה המצדיקה את העלויות הישירות והעקיפות של ביצוע המטלה (במלים אחרות, יעילות כלכלית).

אם אין זה אפשרי למצוא מטלה מונעת שהיא גם ברת ביצוע טכנית ושוות ביצוע, אזי יש לטפל בכישלון באמצעות מטלות תחזוקתיות תגובתיות, כולל תחזוקה מתקנת (תקן זאת רק כאשר זה נשבר), איתור תקלה (בדיקות פונקציונאליות מתוכננות מראש לאיתור תקלות חבויות), ותיכון מחדש (למשל – התקנת גיבוי).

### כישלונות תלויות גיל

הרבה בעלי מטוסים, טכנאים, ואפילו מהנדסים אווירונאוטים, עדיין מאמינים שהדרך הטובה ביותר לאופטימיזציה של אמינות למערכות מטוסים מורכבות (למשל – מנוע) הינה לבצע צורה מסוימת של תחזוקה מונעת על בסיס שגרת. ההיגיון הפשוט הינו שדבר זה חייב לכלול שפוץ או החלפה במרווחים קבועים. התרשים מתאר מבט על מרווח קבוע של כישלון.



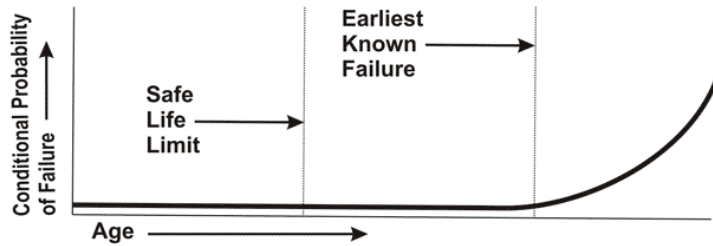
מבט מסורתי זה מניח שמרבית

הפריטים פועלים באמינות לתקופת זמן קבועה מסוימת, שלאחריה הסבירות לכישלון מתחילה לעלות במהירות. ניתוח זה של כישלונות יאפשר לנו לחזות בחיים המועילים של פריט, ולנקוט פעולה מתוכננת מראש לשיפוץ או החלפתו לפני הגיעו ל"אזור השחיקה" ("wear-out zone") בו סיכון לכישלון הופך בלתי קביל.

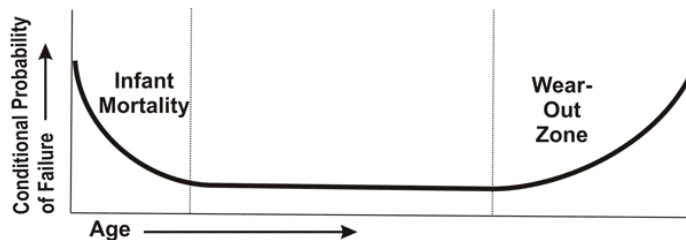
מסתבר שמבט מסורתי זה תקף לפריטים פשוטים מסוימים, ולפריטים מורכבים שיש להם אופן כישלון דומיננטי יחיד. למשל, תבנית הכישלון המתוארת בתרשים למעלה מתאימה כאשר מתחשבים בפריט שנכשל בדרך כלל עקב עייפות מתכת בעקבות מאמצים חוזרים. הדוגמאות כוללות קורת כנף וראש צילינדר.

במבט מסורתי זה, הסבירות לכישלון במהלך החיים השימושיים של פריט הינה בדרך כלל קטנה אולם לא אפסית. לפיכך, מספר צנוע של כישלונות חוסר בגרות יכול להיות צפוי, לפני שהפריט מגיע לתום חייו השימושיים, ובנקודה זו הסבירות לכישלון מתחילה לגדול.

לפריט קריטי כמו קורת כנף שלכישלונה יש משמעות בטיחותית רבה (אם היא נכשלת, אתה עלול למות), הגישה המסורתית היא לייצר "מגבלת חיים בטוחה" שמרנית המוודאת שהפריט יסיים חייו לפני שהסבירות לכישלון מגיעה לסף נמוך מאד. הדבר מתואר בתרשים הבא:



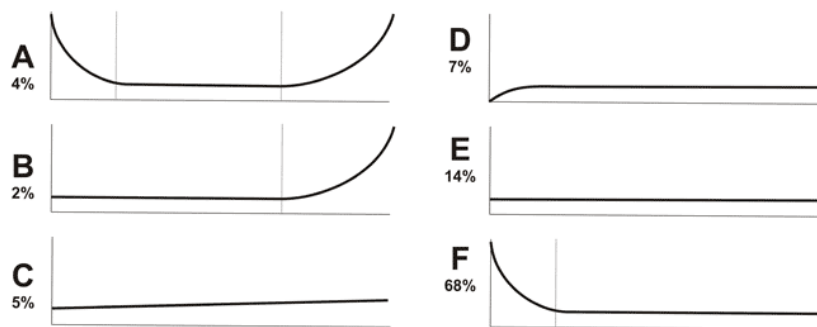
חוקרי ה-RCM, מכל מקום, החליטו שמעט מאד רכיבי מטוס ומערכות שאינם מבנה מציגים תבנית כישלון שמתאימה למבט המסורתי. למשל, לפריטים מסובכים אחרים יש תבנית כישלון הנראית כדלהלן:



בתבנית זו, הידועה בשם "עקומת האמבטיה", הפריט מציג סיכון גבוה לכישלון כאשר הפריט מוכנס לשירות, דבר הידוע כ"מחלות ילדות". כאשר תקופת מחלות הילדות חולפת, הסבירות לכישלון נופלת לרמה נמוכה במשך שארית תקופת השירות השימושית, שלאחריה היא עולה ככל שהפריט ממשיך בשירות לתוך אזור השחיקה. זוהי תבנית הכישלון המקובלת המקושרת למנועי מטוסי בוכנה, למרות שאני מאמין שאזור השחיקה המשמעותי למנועים כאלו נוטה להיות מופרז.

### ששת תבניות הכישלון

אחד מהממצאים המרתקים של חוקרי ה-RCM הינו שיש למעשה שש תבניות כישלון המוצגות על ידי רכיבי מטוס חשמליים, אלקטרוניים ומכאניים שונים. תבניות אלו מוצגות להלן:

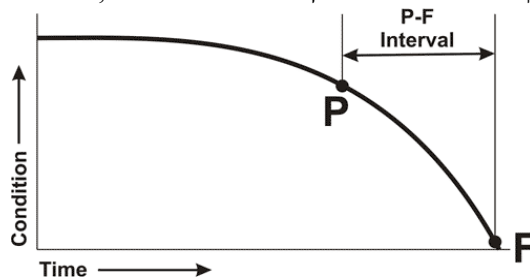


- תבנית B** מתאימה למבט המסורתי של כישלונות תלויי-גיל. היא מתארת סבירות קבועה, או הגדלה באיטיות רבה, שלאחריה "אזור שחיקה" מובהק שבו סבירות הכישלון גדלה במהירות. הדבר מתאים למבט המסורתי של כישלונות תלויי-גיל, והוא תקף לרכיבי מבנה כגון קורות כנף, שאופן הכשל החולש בו הינו התעייפות מתכתית עקב עומסים חוזרים. מכל מקום, מחקרי RCM של מטוסים אזרחיים מצאו שרק 2% מפריטים לא מבניים מתאימים לתבנית כישלון זו. לפריטים שכאלו, מגבלת אורך חיים (TBO) תתאים ותהיה רצויה.
- תבנית A**, עקומת האמבטיה, מתייחסת ל- 4% אחרים של פריטים לא מבניים. תבנית כישלון זו מתארת תקופת חוסר בעלת סיכון גבוה, הממשיכה בסבירות קבועה או הגדלה באיטיות רבה, ואז ממשיכה ל"אזור שחיקה" מובהק. פריטים כאלה מסתייעים במגבלת אורך חיים, בתנאי שמספר הכישלונות המוקדמים הינו מספיק קטן כך שמרבית הפריטים שורדים עד TBO.
- תבנית C** מתארת סבירות כישלון הגדלה בהדרגה עם הגיל, אולם ללא אזור שחיקה ברור או חיים שימושיים. 5% בקירוב של פריטים לא מבניים מציגים תבנית זו. אין זה רצוי בדרך כלל לכפות מגבלת אורך חיים על פריטים שכאלו.
- תבנית D** מתארת סבירות כישלון נמוכה כאשר הפריט חדש או משופץ, ואז גדלה לרמה קבועה הממשיכה כל עוד הפריט נשאר בשירות. תבנית זו מתאימה ל- 7% מפריטים לא מבניים.
- תבנית E** מתארת סבירות כישלון קבועה; במלים אחרות, הסבירות המותנית לכישלון לא קשורה לגיל. 14% של פריטים לא מבניים מציגים תבנית זו.
- תבנית F** מתארת תקופת חוסר בסיכון גבוה, הממשיכה בסבירות קבועה או הגדלה באיטיות רבה, ללא אזור שחיקה או חיים שימושיים. מחקרי RCM הראו ש- 68% מפריטים לא מבניים במטוסים אזרחיים מציגים תבנית זו, כולל מנועי טורבינה. (אני מאמין שמנועי בוכנה גם הם מציגים תבנית כישלון זו.)

- מחקרי RCM מצביעים שמגבלות אורך חיים ושיפוצים מתוכננים מראש (TDM) אפשריים טכנית רק כאשר:
  - יש גיל מזהה (TBO) שלאחריו הפריט מראה גידול מהיר בסבירות המותנית לכישלון (כלומר אזור שחיקה מובהק);
  - מרבית הפריטים שורדים עד גיל זה; כלומר, ישנם מעט יחסית כישלונות מוקדמים.

### אחזקה מותנית (Condition-Directed Maintenance- CDM)

למרות ש- RCM מגלה שישנם לעתים יחסים מועטים, או בכלל לא, בין זמן בשירות וסבירות לכישלון, מרבית הכישלונות נותנים צורה מסוימת של אזהרה שהם עומדים להתרחש. אם נוכל להבחין באזהרות אלו בזמן, נהיה מסוגלים לנקוט בפעולות תחזוקתיות למניעת הכישלון ולהימנע מתוצאותיו; ראו את התרשים הבא:



אם כישלון מתפתח יכול להתגלות באיזשהו מקום בין נקודה P (בה הוא לראשונה ניתן לגילוי) ונקודה F (בה כישלון מוחלט מתרחש), יתאפשר לנקוט בפעולה למניעת תוצאות הכישלון. אם זה אפשרי טכנית או לא לבצע

זאת, תלוי עד כמה מהר מתרחש הכישלון, עד כמה מוקדם הוא ניתן לגילוי, ועד כמה קשה לגלות את הכישלון הפוטנציאלי. CDM מכיל בדיקות לכישלונות פוטנציאליים, כך שפעולה למניעת כישלונות פונקציונאליים יכולה להינקט לפני שהם מתרחשים.

תקופת האזהרה בין התרחשות הכישלון הפוטנציאלי הניתן לגילוי והתפתחותו לכישלון פונקציונאלי מוחלט ידוע כ"מרווח P-F". הוא יכול להימדד בשעות, מחזורים, חודשים קלנדאריים, או מדידה עשרונית נאותה אחרת. בכדי לגלות כישלונות בצורה אמינה לפני התרחשותם, יש לבצע את מטלות ה- CDM במרווחים שהינם פחות ממרווחי P-F. באופן מעשי, מספיק בדרך כלל ליישם תדירות מטלה המתאימה למחצית של מרווח P-F. לדוגמה, אם מרווח P-F הינו 100 שעות, עלינו לבצע ביקורת כל 50 שעות בכדי לוודא שנגלה את הכישלון הפוטנציאלי זמן רב מראש בכדי למנוע את הכישלון המוחלט.

ניטור מותנה שכזה נחשב מעשי טכנית אם:

- ניתן לזהות מצב כישלון פוטנציאלי הניתן לגילוי באמינות ובצורה ברורה.
- מרווח P-F הינו עקבי בצורה הגיונית וניתן לחיזוי.
- זה מעשי לבדוק או לנטר את הפריט במרווח של בערך מחצית מרווח P-F.

### בואו נהייה מעשיים

עד כאן הפילוסופיה והתיאוריה של אחזקה ממוקדת אמינות. בהמשך אני אבדוק כיצד אנחנו יכולים ליישם עקרונות אלו לתחזוקת מטוסי תעופה כללית מונעי בוכנה, בדגש מיוחד על המנועים של מטוסי הבוכנה שלנו.

## אחזקה ממוקדת אמינות (RCM) – חלק 2

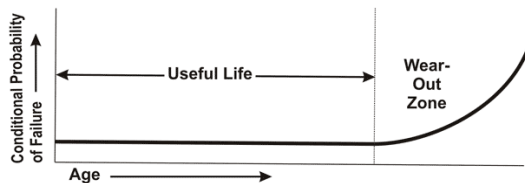
נכתב על ידי Mike Busch, תורגם על ידי איציק מה-יפית, מתוך AVweb מתאריך 30.8.07.

במשך שלושה עשורים, חברות התעופה והצבא משתמשים בעקרונות CRM להשגת הפחתה דרסטית בעלות התחזוקה, בעודם למעשה משפרים את האמינות. חלק הארי של שיפור זה בעלות-יעילות של התחזוקה בא ממעבר ממרווחי שיפוץ קבועים, מרווחי החלפה או הוצאה משירות לאחזקת שבר (on-condition).

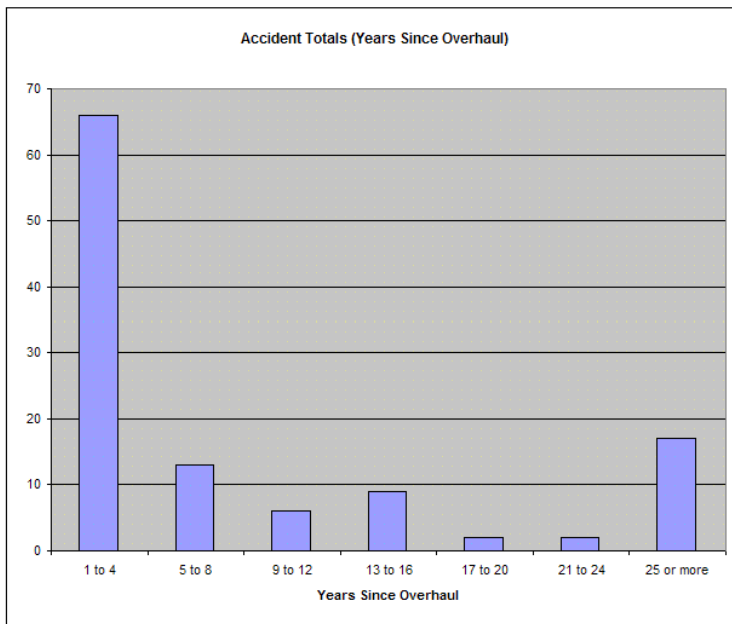
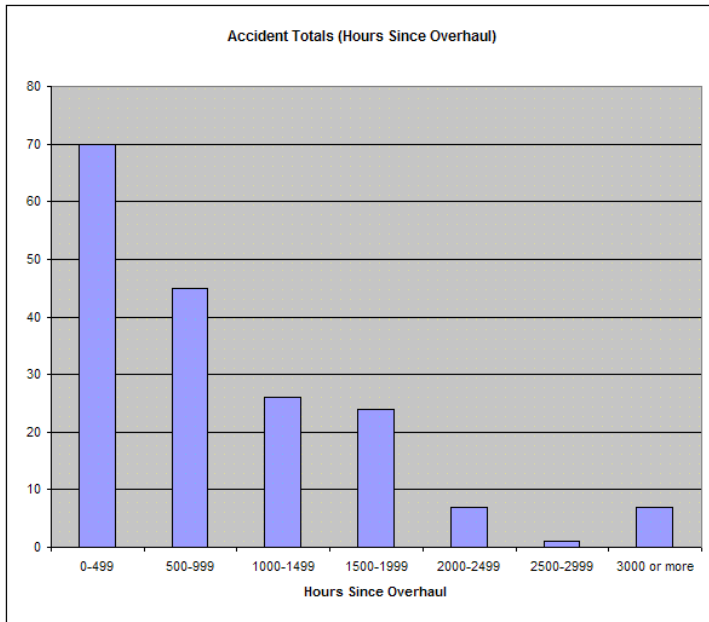
לרוע המזל, נוהג תחזוקתי של RCM מעורר השראה זה נראה שלא תלחל מטה לקצה התחתון של שרשרת המזון התעופותית: מטוסים מונעי בוכנה. מרבית בעלי מטוסים משפצים או מחליפים את המנועים במטוסי הבוכנה בציינות כאשר הם מגיעים להמלצות ה- TBO של TCM או לייקומינג (בעלות של \$20,000 עד \$35,000), אפילו שהמנועים פועלים כראוי ללא כל סימן לבעיות מכאניות. הם משפצים את המדחפים שלהם כל חמש או שש שנים כיוון שזה מה ש- Hartzell או McCauley ממליצים. מספר מפעילים משפצים או מחליפים רכיבי מבנה שונים במרווחים קבועים, ללא תלות במצבם, כיוון שזה מה שספר השירות למטוס מציע. חלקם מחליפים באופן מונע משאבות יניקה ומחוללים כל 500 שעות, כיוון שמספר מכונאים אמרו להם שזה רעיון טוב.

האם נוהג תחזוקתי זה הגיוני? לאחר ניתוח חבילה של נתונים תפעוליים ממספר חברות תעופה עיקריות, חוקרי RCM סיכמו ששיפוץ במרווח קבוע או החלפה הגיוניים לעתים נדירות בלבד, ולעתים מחמירים את המצב על ידי הגדלת עלות בעוד האמינות יורדת.

### מתי TBO הגיוני?



בכדי ששיפוץ במרווח קבוע או החלפה של רכיב יהיו הגיוניים, צריך שהרכיב יהיה בעל תבנית כישלון הנראה בדומה לתרשים שמשמאל, שבו ניתן לצפות שהרכיב יפעל באמינות באורך חיים קבוע מסוים, שמעברו הסבירות לכישלון מתחילה לגדול במהירות לרמות בלתי קבילות.

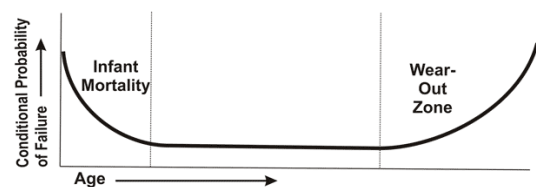


האם המנועים של מטוסי הבוכנה שלנו מציגים סוג זה של תבנית כישלון? לא, הם לא. קל להוכיח שמנועים אלו סובלים מהסיכון הגבוה ביותר של כישלון קטסטרופאלי לא כאשר הם חולפים TBO, אלא כאשר הם יוצאים ממפעל TCM או לייקומינג או בית מלאכה לשיפוץ. העיפו מבט בהיסטוגרמות הללו שנשאבו מנתוני NTSB לגבי 180 תאונות כישלון מנוע בתקופה של חמש שנים מ-2001 עד 2005. (התרחימים באדיבותו של Dr. Nathan Ulrich).

נתוני NTSB אלו אינם יכולים לספר לנו הרבה לגבי הסיכון של כישלון מנוע מעבר ל-TBO, כיוון שמעט יחסית מנועי בוכנה מורשים להישאר בשירות מעבר ל-TBO (ואין לנו אפילו מידע סביר לגבי כמותם). מה שזה כן מראה לנו בצורה ברורה, הינו שמנועים נכשלים בתדירות מדאיגה במהלך שנותיהם הראשונות ומספר מאות שעות בשירות לאחר הייצור, הרכבה או שיפוץ. ההיגיון הפשוט הינו שלמנועי הבוכנה שלנו יש תבנית כישלון הדומה יותר לתבנית הבאה:

זוהי "עקומת האמבטיה" הידועה היטב, שבה הפריט מציג סיכון גבוה לכישלון כאשר הוא מוכנס

לשירות ("מחלות ילדות"), שלאחריה הסבירות לכישלון נופלת לרמה נמוכה במהלך שארית אורך החיים, ואז מתחיל לעלות שוב כאשר הפריט ממשיך בשירות אל תוך אזור השחיקה.



האם החלפה או שיפוץ על בסיס מרווח קבוע הגיוניים למנוע עם תבנית כישלון של עקומת האמבטיה? זוהי שאלה מכשילה כיוון ששיפוץ מנוע ב-TBO הופך לחרב פיפיות. מצד אחד, זה שומר אותנו מחוץ לאזור השחיקה בו הסבירות לכישלון מנוע אמורה להתחיל לגדול לרמות בלתי קבילות (למרות שאין בידנו הרבה מידע לתמיכה בטענה שאזור שחיקה מותנה גיל אכן קיים). מצד שני, זה מחזיר אותנו חזרה לתוך חלון מחלות הילדות, בו הנתונים מראים לנו בבירור שהסבירות לכישלון מנוע גבוהה בצורה מדאיגה.

האם תרגישו בנוח לקחת את משפחתכם במטוס בוכנה חד-מנועי עם מנוע בעל חמש שעות לאחר השיפוץ? בלילה? מעל אזור הררי או מים? בתנאי IMC? מה לגבי עשר שעות? או 25 שעות? (אלו אינן שאלות קלות.)

האם שיפוץ מנוע, לכאורה תקין, ב – TBO קבוע מסייע לאמינות יותר מאשר מזיק? איננו יכולים להיות בטוחים כיוון שיש כה מעט מידע לגבי אמינות מנועי בוכנה כאשר הם פועלים מעבר ל – TBO (כיוון שכה מעט אכן עושים כך). אולם ההוכחות שאני ראיתי רומזים בבירור ששיפוץ במרווח קבוע למנועים אלו אינו הגיוני.

העובדה שבידנו כה מעט נתונים לגבי מנועים הפועלים מעבר ל – TBO מציגה מכשול עיקרי לאימוץ אחזקת שבר מושרית RCM במקומות בהם שיפוץ במרווח קבוע הפך לנורמה. חוקרי RCM מכנים זאת "חידת רזניקוף" ("The Resnikoff Conundrum") הקובעת בפשטות שבכדי לאסוף נתוני תקלות, צריך שיהיו תקלות בצידו. אולם כישלונות של פריטים קריטיים כגון מנועים נחשבים בלתי קבילים, כיוון שכישלונות שכאלו יכולים לגרום לפגיעה ולמוות. המשמעות הינה שתוכנית התחזוקה לפריט קריטי חייבת להיות מתוכננת ללא התועלת של נתוני כישלונות, שהתוכנית אמורה למנוע.

(התנגדות ה – FAA מלפני עשורים לביטול "חוק גיל 60" לטייסי חברות התעופה הינה דוגמה מצוינת לחידת רזניקוף. מומחים ברפואה תעופתית היו מאוחדים מזמן בדעה שאין בסיס מדעי למדיניות הנכבדה של ה – FAA בכפייה על טייסי חברות התעופה לפרוש בגיל 60. הטיעון עתיק היומין של ה – FAA היה שאין ברשותם נתוני בטיחות המראים שהרשאה לטייסי חברות התעופה להמשיך לטוס מעבר לגיל 60 הינה בטוחה. נו, טוב.)

אנחנו כן יודעים ללא ספק, ששיפוץ במרווח קבוע הינו לא מועיל למנועי מטוסי סילון, כיוון שחברות התעופה והצבא התחילו לבטל לפני עשורים שיפוצים במרווח קבוע לטובת אחזקת שבר. כך שיש לנו טונות של נתונים לגבי מנועי סילון בעלי אורך חיים ארוך (אורך חיים מדהים), וניתוחי הנתונים הללו מבהירים ששיפוץ במרווח קבוע פוגעים באמינות יותר מאשר מסייעים לה, מבלי להזכיר שזה מגדיל מאד את עלויות האחזקה ומשך ההשבתה.

הניסיון והאינטואיציה שלי מובילים אותי להאמין שהדבר נכון גם למנועי בוכנה, אולם פשוט אין לנו מספיק מידע תפעולי למנועי בוכנה בעלי אורך חיים גבוה להוכיח זאת.

### האם זו השאלה הנכונה?

בהמשך לרעיון, הייתי טוען שזו אפילו אינה השאלה הנכונה שעלינו לשאול. זאת כיוון שמנוע מטוס בוכנה אינו רכיב בודד עם אופן כשל דומיננטי בודד ותבנית כישלון מוגדרת היטב (כמו עקומת האמבטיה). דוחות ה – NTSB מגלים שכישלונות מנוע מתרחשים עקב הרבה סיבות שונות. מנוע בוכנה הינו מערכת מורכבת העשויה ממאות רכיבים שונים – בית גל ארכובה, גל ארכובה, גל זיזים, טלטלים, בוכנות, טבעות בוכנה, גלילי הצילינדר, ראשי הצילינדר, שסתומים, מובילי שסתום, זיזים, מוטות דחיפה, גלגלי שיניים, מיסבים, חפים, מגנטו, מצתים, וכו' – לכל אחד מהם יש תבנית ואופן כשל ייחודיים. כישלון מנוע יכול להיגרם עקב כישלון של כל אחד מחלקים אלו, ולכל אחד מחלקים אלו יש מאפייני כשל שונים ומיוחדים.

בכדי לרכוש תובנה כלשהי לגבי כיצד, מתי ובאיזו תדירות מנוע נכשל – וכיצד תבצע התחזוקה הטובה ביותר למנועים בכדי למנוע כישלונות אלו – עלינו לנתח את אופני הכשל והתבניות של כל אחד מהרכיבים הקריטיים של המנוע, ולא לנסות לגבשם לתבנית כישלון בודדת למנוע כמכלול.



התייחסו לשסתומי פליטה, למשל. ידוע לנו מהניסיון ששסתומי פליטה לעתים אינם שורדים עד ל – TBO. כאשר הם מתחילים להיכשל, לפעמים אנחנו מספיק ברי מזל לתפוס את הכשל הפוטנציאלי בביקורת השנתית לפני שמתרחש הכישלון הפונקציונאלי המלא (כלומר, "שסתום נבלע" ["swallowed valve"]) באמצעות בדיקת דחיסה (קומפרסיה) או בדיקת בורוסקופ (בדיקה באמצעות מתקן אופטי זעיר המוכנס לחלל הנבדק). אם המטוס מצויד בצג מנוע דיגיטאלי, ואם הטיס יודע כיצד לתרגמו, אנחנו יכולים לעתים לתפוס את הכישלון הפוטנציאלי של שסתום הפליטה לפני שייכשל לחלוטין. אולם אם לא התמזל מזלנו והשסתום נכשל בטיסה, זהו בדרך כלל מצב חרום המסתיים לעתים בנחיתה מחוץ לשדה או גרוע מכך.

האם המשמעות היא שעלינו להקטין את ה – TBO של המנוע למשהו שפחות מאורך החיים של שסתום פליטה? האם עלינו לשפץ את המנועים כל 500 או 1,000 שעות בכדי למנוע כישלונות שסתומי פליטה? כמובן שלא!

מדוע לא? ראשית, תיקון שסתום פליטה לקוי אינו דורש בהכרח הסרת המנוע מהמטוס ופירוקו לגורמים; התיקון יכול להיעשות פשוט על ידי הסרת הצילינדר. דבר אחר, יש לנו כלים מעולים (כגון בורוסקופ וצג מנוע דיגיטאלי) המאפשרים לנו לגלות בצורה אמינה כישלונות פוטנציאליים של שסתום פליטה לפני שמתרחש כישלון מוחלט – בתנאי שמשתמשים בכלים אלו בצורה ובתדירות נאותה. (הייתי מעריך שהזמן בין היכולת לגלות כישלון שסתום פליטה וכישלון למעשה – מרווח P-F שהזכרתי בחלק הראשון – הינו משהו בסדר גודל של 100 שעות, דבר המרמז שיתכן ועלינו לבדוק את השסתומים עם בורוסקופ כל 50 שעות – במיוחד במטוסים שאינם מצוידים בצג מנוע דיגיטאלי.)

### ניתוח תקלות

כזוה בזיכרונו, הבה נבחן כמה מהרכיבים הקריטיים ביותר של מנוע הבוכנה שלנו, קשבו כיצד רכיבים אלו נכשלים ומה המשמעות של כישלונם על פעולת המנוע, ומה סוג פעולות התחזוקה שעלינו לנקוט בכדי להתמודד עם כישלונות אלו בצורה שהינה גם מעשית וגם כדאית.

### גל ארכובה

קשה לחשוב על אופן כשל מנוע בוכנה חמור יותר מאשר כישלון גל ארכובה. למנוע יש רק גל ארכובה אחד, ואם הוא נכשל, המנוע חדל לייצר כוח מיידית ובאופן מוחלט. כישלונות גל ארכובה גורמים להשלכות בטיחותיות שפשוט איננו יכולים לשאת.

ואף על פי כן, גלי ארכובה אינם מוחלפים בדרך כלל אפילו בשיפוץ מנוע. למעשה, הם מוסרים לעתים נדירות מאד. לייקומינג טוענים שגלי הארכובה שלהם נשארים בשירות באופן טיפוסי במשך 14,000 שעות והרבה מעבר ל – 50 שנים קלנדאריות! בהתאם לייקומינג, גל ארכובה נשאר בשירות באופן טיפוסי במשך 7,000 שעות עד שהוא נכשל בבדיקות ממדיות בשיפוץ, יתר על כן, גל הארכובה מעובד לתת-מידה (undersize) מאושרת וממשיך בשירות לעוד 7,000 שעות, עד שנכשל בבדיקת מידות בשיפוץ השני. TCM לא פרסמו סוג כזה של מידע לגבי גלי הארכובה שלהם, אבל הייתי מנחש שגלי הארכובה של TCM חווים מחזור חיים דומה מאד.

ישנם שלושה סוגים של כישלון גל ארכובה: (1) כישלונות ילדות עקב חומר לא מתאים או ייצור; (2) כישלונות בהמשך למכות מדחף בלתי מדווחות; ו (3) תקלות משנה עקב חוסר שמן ו/או כישלון מיסבים.

ראינו כישלונות נמהרים מהסוג הראשון בשנים האחרונות. הן TCM והן לייקומינג החזירו גלי ארכובה שהיו או מחושלים מפלדה גרועה או שניזוקו פיסית במהלך הייצור. כישלונות אלו התרחשו תמיד בתחום ה – 200 שעות לאחר שגל ארכובה חדש מהייצור הוכנס לשירות – כישלון ילדות קלאסי. ההיסטוריה מראה שאם גל ארכובה שורד את מאתיים השעות הראשונות, אנחנו יכולים להיות סמוכים ובטוחים שהוא יוצר כמות ויעמוד בצורה אמינה בהרבה TBO של מנוע.

סוג הכישלון השני נראה שהופך נדיר, כיוון שבעלים ומכונאים הפכו לנבונים ביחס לסיכון הגבוה הכרוך בהפעלת מנוע אחרי מכת מדחף. גם TCM וגם לייקומינג הכריזו שכל תקרית הגורמת נזק למדחף, המספיק בכדי להסירו לתיקון, מצדיקה פירוק מנוע לביקורת, כולל בדיקות חלקיקים מגנטיים ואולטרה-סוניות (סוגים של בדיקות אל-הרס) של גל הארכובה לסדקים על ומתחת לפני השטח. הדבר ישים אפילו לנזק מדחף שהתרחש כאשר המנוע אינו פועל. הביטוח ישלם עבור פירוק המנוע וכל תיקון נדרש, ללא כל שאלה, כך שאין כל סיבה לבעלים להסס לעשות זאת ולמנוע את תוצאות הסיכון החמור אם לא יעשה כך.

הדבר משאיר אותנו עם סוג הכישלון השלישי עקב חוסר שמן ו/או כישלון מיסב. נדון בכך כאשר נביט במשאבות ובמיסבים.



### *בית גל הארכובה*

כמו גלי ארכובה, בתי גל ארכובה אינם מוחלפים בדרך כלל בשיפוץ, ולעתים מספקים שירות אמין להרבה TBO. מכל מקום, אם בתי גל ארכובה נשארים בשירות מספיק זמן, הם יפתחו בסופו של דבר סדקים. מספר סדקים קטנים באזורים נמוכי עומס של בית גל הארכובה קבילים, אולם מרבית הסדקים בבית גל ארכובה דורשים פירוק מנוע.

החדשות הטובות הינן שסדקים בבית גל ארכובה נוטים להתפתח די לאט, כך שבדיקת ראייה קפדנית אחת לשנה נחשבת בדרך כלל מספקת בכדי לגלות סדקים כאלו, לפני שהם מציגים איום לבטיחות. כישלונות מנוע קטסטרופאליים הנגרמים על ידי סדקים בלתי גלויים בבית גל ארכובה הינם נדירים מאד.

למרות שבתי גל ארכובה אינם מוחלפים בדרך כלל בשיפוץ, הם עוברים תהליכי חידוש הכוללים השחזה של פני שטח מחורצים עד שהם ישרים וחלקים, ואז תיאום קדחי צירי גל הארכובה ובית גל הארכובה. תהליך זה יכול לחזור מספר מוגבל של פעמים לפני שבית גל הארכובה יחרוג ממפרטי המידות. כך שבתי גל ארכובה, שאינם מפתחים סדקי התעייפות, יוחלפו לבסוף עקב סיבות של מידות. אולם אורך החיים הטיפוסי שלהם הינו הרבה TBO.

### *גל זיזים ומרימים*

הממשק בין זיזי הגל ופני המרימים נושא יותר לחץ וחיכוך מאשר כל חלק נע אחר במנוע. זיזי הגל ופני המרימים חייבים להיות מאד קשים וחלקים בצורה מושלמת בכדי לתפקד ולשרוד. הליקוי הקטן ביותר במשטחים אלו (כגון נקודות שיתוך קטנות הנגרמות עקב תקופות ללא שימוש, או היווצרות תחמוצת בשמן) יכול להוביל להרס מהיר (שבבים) של הגל והמרימים, והצורך לפירוק טרם זמנו. שיבוב גל ומרימים הינו אחת מהסיבות הנפוצות לכישלון מנוע להגיע ל – TBO. בעיה זו משפיעה בעיקר על מטוסים המוטסים על ידי בעליהם, כיוון שהם נוטים לטוס בצורה לא סדירה ולהישאר על הקרקע לתקופות זמן משמעותיות.

החדשות הטובות הן שבעיות גל זיזים ומרימים גורמות רק לעתים נדירות לכישלונות מנוע קטסטרופאליים. המנוע ימשיך בדרך כלל ליצר הספק, אפילו עם זיזי גל משובבים בצורה חמורה, ופני מרימים שאיבדו די הרבה חומר, למרות שיהיה מעט אובדן ביצועים. באופן טיפוסי, הבעיה מתגלה בעת החלפת שמן, כאשר פותחים את מסנן השמן ומוצאים שהוא מכיל כמות חריגה של חומר מתכתי, שנשר מגל הזיזים והמרימים ההרוסים.

אם לא פותחים ובודקים את מסנן השמן בצורה סדירה, כישלון הגל והמרימים יתכן וימשיך ללא גילוי עד לנקודה שבה חומר מתכתי סובב דרך מערכת השמן ומזהם את מסבי המנוע. במקרים נדירים, הדבר עלול לגרום לכישלון מנוע קטסטרופאלי. הדרך הטובה ביותר למנוע כישלונות כאלו הינה בדיקה סדירה של מסנן השמן (לפחות כל 50 שעות). ניתוח מעבדתי סדיר של השמן יכול גם הוא לסייע באיתור מוקדם של בעיות כאלו.

אם המנוע מוטס בצורה סדירה, כך שהגל והמרימים לא סובלים משיתוך או שחיקה, הגל והמרימים יכולים להישאר במצבם הראשוני במשך אלפי שעות. הרבה בתי מלאכה מוכרים מחליפים באופן שיגרתי את הגל והמרימים בחדשים בעת השיפוץ, למרות שכמה בתי מלאכה משתמשים בגלי זיזים ומרימים מושחזים.

### *גלגלי שיניים*

במנוע הרבה גלגלי שיניים: גלגלי שיניים של גל הארכובה וגל הזיזים, גלגלי שיניים של משאבת הדלק והשמן, גלגלי שיניים של המגנטו והאבזורים, גלגלי שיניים של מקבע המדחף, ולעתים גלגלי שיניים לאלטרנאטור. לגלגלי שיניים אלו יש בדרך כלל אורך חיים ארוך ואינם מוחלפים בדרך כלל בשיפוץ, אלא אם נמצא נזק ברור. גלגלי השיניים כמעט אף פעם אינם גורמים לכישלונות מנוע קטסטרופאליים.

### *משאבת שמן*

כישלון משאבת השמן לעתים קרובות הינו האחראי לכישלונות מנוע קטסטרופאליים. אם אובד לחץ שמן, המנוע ייתפס די מהר. משאבת השמן הינה משאבת גלגלי שיניים מאד פשוטה, עם גלגל שיניים מניע אחד וגלגל שיניים סרק, הנמצאים בתוך בית בעל אפיצויות קטנות. היא בדרך כלל נטולת בעיות, אולם כאשר בעיה אכן מתרחשת, היא מתחילה בדרך כלל ליצר שבבי מתכת הרבה לפני שמתרחש כישלון מושלם. בדיקת מסנן שמן סדירה ואנליזת שמן, יגלו במרבית המקרים בעיות משאבת שמן הרבה לפני שהן מגיעות לנקודת הכישלון.

### *מיסבים*

כישלון מיסב הוא האחראי למספר משמעותי של כישלונות מנוע קטסטרופאליים. בתנאים רגילים, למיסבים יש אורך חיים ארוך. הם תמיד מוחלפים בשיפוץ מנוע (זה נדרש), אולם טיפוסים למיסבים שהם מוסרים בשיפוץ במצב מצוין, עם בלאי ניתן למדידה קטן מאד. ישנם שלושה סוגי סיבות שבעטיין מיסבים נכשלים טרם זמנם: (1) הם מזדהמים במתכת מכישלון אחר (למשל, שבבי גל זיזים/מרים); (2) כאשר אובדן לחץ השמן הם מתייבשים; או (3) הם מתייבשים בגלל תזוזה וחורי אספקת השמן שלהם הופכים בלתי חשופים ("spun bearing").

כשלון מסוג 1 (זיהום) ניתן במרביתו להימנע על ידי שימוש במסנן שמן, ובדיקה של המסנן למתכת על בסיס סדיר. כל עוד המסנן מוחלף לפני שיכולת הסינון שלו חורגת, חלקיקים של מתכות בלאי יתפסו על ידי המסנן ולא יזהמו את המסבים. אם נמצאת כמות משמעותית של מתכת במסנן, אין להפעיל את המנוע עד אשר מקור המתכת מאותר ומתוקן, ובדיקות מודעות שהמיסבים לא הזדהמו.

כישלונות מסוג 2 (אובדן לחץ שמן) נדירים למדי. טייסים מאומנים היטב להגיב לאובדן לחץ שמן על ידי הפחתת כוח ונחיתה בהזדמנות הראשונה. המיסבים ימשיכו לתפקד בצורה נאותה אפילו עם לחץ שמן נמוך למדי (למשל, PSI 10).

כישלונות מסוג 3 (spun bearings) הינם בדרך כלל כישלונות ילדות, הן מיד לאחר שמנוע משופץ (כיוון שהמנוע לא הורכב כראוי), או מיד לאחר החלפת צילינדר (כיוון שגל הארכובה הסתובבה בעוד שבורגי החיזוק לא הודקו כראוי). הם יכולים להתרחש גם לאחר תקופה ארוכה של שחיקת בית גל ארכובה (שניתן לגילוי דרך בדיקת מסנן השמן ואנליזת שמן) או לאחר התנעות קרות בצורה קיצונית ללא חימום קדם.

כישלונות מסוג 1 ו- 2 הינם כישלונות משניים לכישלונות אחרים, המזהמים או סוגרים את אספקת השמן למיסב. כישלונות מסוג 3 הינם ראשוניים, אולם בדרך כלל אינם קשורים לשעות או שנים לאחר שיפוץ.

#### טלטלים

כישלון טלטלים אחראי למספר משמעותי של כישלונות מנוע קטסטרופאליים. כאשר טלטל נכשל בטיסה, הוא לעתים מנקב חור בבית גל הארכובה וגורם לאובדן שמן מנוע, וכתוצאה לחוסר שמן. כישלונות הטלטל ידועים גם כגורמים לשבירת גל הזיזים. התוצאה הינה תמיד אובדן מהיר של כוח מנוע.

לטלטלים יש בדרך כלל אורך חיים ארוך, והם אינם מוחלפים בדרך כלל בשיפוץ. (מיסבי הטלטל, כמו כל המיסבים, תמיד מוחלפים בשיפוץ). הרבה כישלונות טלטל הינם כישלונות ילדות הנגרמים על ידי הידוק לא נאות של בורגי הטלטל. כישלונות טלטל יכולים להיגרם גם על ידי כישלון מיסבי הטלטל (הסיבות נדונו למעלה תחת "מיסבים"), ולזה אין בדרך כלל קשר לשעות או שנים מאז השיפוץ.

#### בוכנות וטבעות

כישלון בוכנה וטבעת יכול לגרום לכישלונות מנוע קטסטרופאליים, בדרך כלל הדבר כרוך רק באובדן כוח חלקי, אולם לעתים באובדן כוח מוחלט. כישלונות בוכנה וטבעת הינם משני סוגים: (1) כישלונות ילדות עקב ייצור או התקנה לא נאותים; ו (2) כישלונות מצוקת חום (heat-distress) הנגרמים על ידי הצתה מוקדמת או אירועי דטונציה הרסניים. כישלונות מצוקת חום יכולים להיגרם על ידי דלק מזוהם או פעולת מנוע בלתי תקינה, אולם אין הם קשורים לשעות או שנים מאז השיפוץ. שימוש בצג מנוע דיגיטאלי יכול בדרך כלל לאתר הצתה מוקדמת או מקרי דטונציה הרסניים, ומאפשר לטייס לנקוט בפעולה מונעת לפני שמתרחש נזק מצוקת חום. למעט אם יש נזק מקביל משמעותי, ניתן להחליף בוכנות וטבעות עם נזק ללא הסרת מנוע או פירוקו.

#### צילינדרים

כישלונות צילינדר יכולים לגרום לכישלונות מנוע קטסטרופאליים, בדרך כלל הם כרוכים באובדן כוח חלקי אולם מדי פעם באובדן כוח מוחלט. צילינדרים מורכבים מגליל פלדה מחושלת המותאם לראש סגסוגת אלומיניום. גלילי הצילינדר מתבלים בדרך כלל לאט, ובלאי עודף מתגלה בביקורת שנתית על ידי בדיקות דחיסה ובורוסקופ. מכל מקום, ראשי צילינדר יכולים לסבול מכישלונות התעייפות, ולעתים הראש יכול להינתק מהגליל. צילינדרים עם גלילים בלויים ניתנים לחידוש תוך שימוש במספר תהליכים (לדוגמה, מידת יתר [oversize], ציפוי) ולהישאר בשירות במספר שיפוצי מנוע. מכל מקום, מרבית בתי מלאכה מוכרים לשיפוץ מרכיבים צילינדרים חדשים בשיפוץ, וצילינדרים מהודשים המשמשים בעיקר להארכת אורך חיים. ניתן לתקן או להחליף צילינדרים ללא הסרת מנוע או פירוקו.

## שסתומים ומובילי שסתום

כפי שנדון מוקדם יותר, די נפוץ ששסתומים ומובילים (בעיקר שסתומי פליטה ומוביליהם) מפתחים בעיות מיד לאחר השיפוץ. פוטנציאל בעיות שסתומים ניתן לאיתור בדרך כלל לפני כשל מוחלט על ידי בדיקת דחיסה שנתית ובורוסקופ, ובהמשך באמצעות צג מנוע דיגיטאלי (בתנאי שהטיס יודע לתרגם את נתוני צג המנוע). אם שסתום כושל לחלוטין, יכול להתרחש אובדן כוח משמעותי שלעיתים עלול להסתיים בנחיתת אונס מחוץ לשדה. ניתן להחליף שסתומים ומובילים לקויים ללא הסרת מנוע או פירווק.

## נדנדים ומוטות דחיפה

לנדנדים ומוטות דחיפה (המפעילים את השסתומים) יש בצורה אופיינית אורך חיים ארוך מאד, והם אינם מוחלפים שגרתית בשיפוץ. (תותבי נדנד תמיד מוחלפים בשיפוץ). כישלון נדנד נדיר למדי. כישלונות מוטות דחיפה נגרמים עקב שסתומים תקועים, וכמעט תמיד ניתן למנוע זאת על ידי בדיקות שסתום חוזרות ושימוש בצג מנוע דיגיטאלי, כפי שנדון למעלה.

## מגנטו

כישלונות מגנטו הינם למעשה שיגרה לא נעימה. למרבה המזל, מנועי מטוסים מצוידים בצמד מגנטו לצורך יתירות, והסבירות ששניהם יכשלו בו זמנית נדיר מאד. בדיקות מגנטו במהלך בדיקת הרצה לפני טיסה עשויים לאתר כישלונות מגנטו בגדול, אולם בדיקות מגנטו במהלך טיסה הרבה יותר טובות באיתור התחלתי או עדין של כישלונות. צגי מנוע דיגיטאליים יכולים לאתר בצורה אמינה כישלונות מגנטו בזמן אמיתי, במידה והטיס יודע כיצד לתרגם את הנתונים. יש לפרק, לבדוק ולשרת את המגנטו כל 500 שעות – דבר זה מקטין בצורה דראסטית את הסבירות לכישלון מגנטו בטיסה.

## השורה התחתונה

לאחר ביצוע ניתוח תקלות לכל מרכיב מנוע קריטי, שיש לו היסטוריה של תרומה לכישלונות מנוע קטסטרופאליים, איני יכול להימנע ולאחוז במספר אבחנות בסיסיות.

הרכיבים "התחתונים" של מנועים אלו – בית גל ארכובה, גל ארכובה, גל זיזים, מיסבים, תמסורות, משאבת שמן, וכו' – הינם חסונים. הם מציגים בדרך כלל אורך חיים ארוך מאד, שבהרבה פעמים ארוך כמו ה-TBO המומלץ. מרבית רכיבים אלו (למעט המיסבים) מחודשים בשיפוץ, ואינם מוחלפים על בסיס שגרתית. כאשר פריטים אלו כן נכשלים טרם זמנם, הכישלונות הם כישלונות ילדות המתרחשים מיד לאחר שיפוץ, או כישלונות אקראיים שאינם קשורים לשעות או שנים מאז השיפוץ. הרוב הנרחב של כישלונות אקראיים ניתן לגילוי הרבה לפני שמצב הפריט יורע ויגרם לכישלון מנוע קטסטרופאלי, פשוט באמצעות בדיקת מסנן שמן שגרתית ואנליזת שמן מעבדתית. נראה שאין ממצאים שרכיבים "תחתונים" אלו הראו צורה כלשהי של אזור שחיקה המצדיק שיפוץ במרווח קבוע או החלפה ב-TBO.

הרכיבים "העליונים" (או רכיבי "חטיבה חמה" אם תעדיפו) – בוכנות, צילינדרים, שסתומים, וכו' – הינם חסונים פחות בצורה ניכרת, ואין זה בלתי רגיל עבורם להיכשל לפני TBO. מכל מקום, מרבית כישלונות אלו ניתנים להימנע על ידי בדיקות שגרתיות (בדיקות דחיסה, בורוסקופ, וכו') ועל ידי שימוש בצגי מנוע דיגיטאליים (על ידי טייסים שהודרכו כיצד לתרגם את הנתונים). יתר על כן, כאשר מתגלים כישלונות פוטנציאליים, הרכיבים העליונים ניתנים לתיקון או החלפה די בקלות, ללא הצורך בהסרה או פירווק מנוע. ושוב, הכישלונות הינם ברובם כישלונות ילדות או כישלונות אקראיים שאינם קשורים לשעות או שנים מאז השיפוץ.

השורה התחתונה הינה שניתוח מפורט לכישלון במנועים של מטוסי בוכנה, תוך שימוש בעקרונות RCM, מרמז שמה שחברות התעופה והצבא מצאו כנכון לגבי מנועי מטוסי סילון, נכון גם למנועי מטוסי בוכנה: המנהג המסורתי של החלפה או שיפוץ במרווח קבוע לא מועיל. ביישום עקבי של תוכנית לאחזקת שבר, הכוללת ביקורות מסנן שמן סדירות, אנליזת שמן, בדיקות דחיסה, בדיקות בורוסקופ ושימוש בעת טיסה בצג מנוע דיגיטאלי, ניתן לצפות לאמינות משופרת והפחתה רבה בהוצאות תחזוקה והשבתה.

נראה שההריג היחיד הינו המגנטו. הם אכן זקוקים למחזור תחזוקה עמוקה במרווח קבוע (לא שיפוץ, אולם קרוב לכך) כל 500 שעות, כיוון שאין ברשותנו אמצעי יעיל לאיתור כישלונות מגנטו פוטנציאליים ללא פרוק ובדיקה. החזקות הטובות הינן שיש לנו שניים מהם על כל מנוע, לצורך יתירות.

## האין הם מבינים זאת?

מדוע יצרני המנוע והמבנה שלנו אינם ממליצים על תחזוקת שבר מבוססת RCM במקום שיפוצים במרווח קבוע מאד יקרים? ובכן, ראשית, מנועי הלייקומינג ו- TCM שלנו היו מרושיינים תחת הוראות CAR 7 שפותחו הרבה לפני ש- RCM הומצא. אותו הדבר ישים לרוב המכריע של מטוסי תעופה כללית מנועי בוכנה של היום, שרושיינו תחת CAR 3 הישן. אפילו לגבי מטוסים חדשים יותר כמו הצירוס, קולומביה והדיימונד, היצרנים ברובם מגדירים תחזוקה מונחית זמן (TDM) ולא תחזוקה מונחית מצב (CDM) בגלל, לרוע המזל, שאין מסורת לשימוש בעקרונות תחזוקה RCM למטוסים קטנים.

הדבר ידרוש הרבה עבודה הנדסית מ- TCM ולייקומינג לפתח תוכניות תחזוקה מושרות RCM למנועי הבוכנה שלנו, ובכנות, יש להם מעט מאד תמריץ לעשות עבודה זו. אפילו אם היו עושים זאת, זה היה כנראה מאבק לא קטן עבורם לאשרם על ידי ה- FAA. ככלות הכול, יש מעט מאד מידע תפעולי לגבי מנועים של מטוסי בוכנה המופעלים מעבר להמצות TBO הנוכחיים (כיוון שמעט מאד מהם מתופעלים כך). חידת ריזינקוף נשארת חיה והיטב בתעופה כללית של מנועי בוכנה.

למרבה המזל, אנחנו, המפעילים תחת PART 91, איננו תחת חובה נהלית לשפץ את המנועים שלנו ב- TBO המומלץ על ידי היצרן. שום דבר אינו מונע מאיתנו מליישם את נוהלי התחזוקה מושרית RCM שלנו, ולתחזק את המנועים והמבנה שלנו בקפדנות באחזקת שבר ולא לפי זמן. עשיתי זאת במשך עשורים במטוסי הבוכנה שלי, והשגתי אמינות טיסות יוצאת מהכלל, בצמוד להורדה דראסטית בעלות התחזוקה. במהלך 20 שנה של טיסה ואחזקה של מטוסי הנוכחי - דו-מנועי, בוכנה, מגודש - רשמתי יותר זמן מנוע מעבר ל- TBO מאשר לפניו.

לפעמים קשה לשכנע מכונאים שזה בטוח, הגיוני וחכם לאפשר למנוע תקין להמשיך שירות הרבה מעבר ל- TBO המומלץ. לאחרונה סירב בית מלאכה לחתום לחבר טוב שלי על הביקורת השנתית של הצסנה T310R שלו (אותו דגם מטוס שאני מטיס) כיוון שמנועו הימני היה בעל יותר מ- 300 שעות מעבר ל- TBO. (אני מחשיב מנוע זה כפרגית צעירה יחסית, כיוון שלשני המנועים שלי - בספטמבר 2007 - יש יותר מ- 800 שעות מעבר ל- TBO והם פועלים נהדר.) בית המלאכה סירב אפילו לעזור לחבר שלי להשיג אישור לטיסת העברה כך שיוכל להטיס את המטוס לבית מלאכה אחר לבדיקת המנוע! התוצאה הייתה לחץ רגשי וכלכלי לבעל המטוס. לבסוף, המנוע שלו פורק על ידי בית מלאכה מוכר לשיפוץ, ולא נמצא מאומה שירמוז שהמנוע לא יכול היה להיות מתופעל בבטיחות להרבה מאד שנים ומאות שעות.

יש כאן לקח חשוב: אם אתם מאמינים מאד באחזקה מונחית מצב (כמוני) והמנוע שלכם "בוגר" (כמו שלי), תנהגו בחוכמה אם תבדקו את נושא תחזוקה מונחית מצב ותפעול מעבר ל- TBO עם המבקר הראשי במוסך התחזוקה שלכם, לפני שאתם מאשרים לו להתחיל ביקורת שנתית או 100 שעות. אם תגלו שתפיסת התחזוקה שלו שונה משלכם, תנהגו בחוכמה בבחירת מוסך אחר לביצוע הביקורת.