7

تقرير ريتشارد بي فينمان

حول التحقيق في فشل مكوك الفضاء «تشالنجر»

لقي ستة علماء فضاء ومعلمة مدرسة حتفهم عندما انفجر مكوك الفضاء «تشالنجر» بعد إطلاقه بفترة وجيزة في 28 كانون الثاني عام 1986. شعر الشعب بالكارثة واهتزّت ثقة ناسا بنفسها - تلك الثقة التي بُنيت نتيجة سنوات من رحلات الفضاء الناجحة أو غير المميتة على الأقل. وقد تم تشكيل لجنة برئاسة وزير الدولة وليام روجرز مكوَّنة من سياسيين وعلماء فضاء ورجال من الجيش وعالم واحد للبحث في سبب الحادث ولتقديم توصيات للحيلولة دون حصول مثل هذه الكارثة مرة أخرى. وحقيقة أن ريتشارد فينمان كان ذلك العالم الوحيد ربماالذي أوجد الفرق بين إجابة السؤال حول سبب فشل تشالنجر وبقائه

obeikandl.com

سراً غامضاً أبدياً. لقد كان فينمان أكثر شجاعة من غالبية الرجال ولا يخشى أن يقول الحقيقة في كافة أنحاء البلد ويتحدث إلى الناس وإلى المهندسين الذين أدركوا حقيقة أن الدعاية تطغى على الحذر والسلامة في برنامج المكوك. وتقريره الذي رأته اللجنة مُحرجاً لناسا كان قد طُمس تقريباً من اللجنة ولكن فينمان حارب من أجله. وقد خفضت مرتبة التقرير إلى ملحق. وعندما عقدت اللجنة مؤتمراً صحفياً حياً للإجابة على الأسئلة قام فينمان بإجراء أشهر تجربة له لطوق المكوك أو حلقات 5 وكأس من ماء مثلج. وقد أثبت بشكل مُذهل أن الأطواق الرئيسية قد فشلت لأن تحذير المهندسين بأن الجو كان بارداً في الخارج ولا يُمكن المضي قدماً في إطلاق المكوك لم يؤخذ به من قبل المدراء المتلهفين للحصول على إعجاب رؤسائهم لدقة برنامجهم، وفيما يلي ذلك التقرير التاريخي.

مقدمة

يبدو أن هناك خلافات كبيرة في الرأي لاحتمال الفشل بخسارة العربة وحياة البشر. وتتراوح التقديرات من 1 بالمئة إلى 1 في المئة ألف. والأرقام العليا تأتي من المهندسين العاملين والأرقام المتدنية جداً من الإدارة. ما هي أسباب ونتائج عدم الاتفاق؟ حيث أن جزءاً واحداً من 100.000 يعني أن الإنسان يستطيع أن يُطلق مكوكاً كل يوم لمدة 300 سنة ويتوقع أن يخسر

واحداً فقط، بإمكاننا أن نسأل «ما هو سبب ثقة الإدارة الخيالية في هذه العربة؟».

كما وجدنا أن معايير المصادقة المستعملة في مراجعة جاهزية الطيران غالباً ما تُعطي صرامة تتناقص تدريجيا. والقول بأن الطيران سابقاً بنفس المخاطرة دون فشل غالباً ما يُقبل لتدعيم سلامة هذه المُخاطرة مرة ثانية دون محاولة جادة أحياناً لمعالجة هذا الخطر أو لتأخير الإنطلاق نتيجة استمرار وجود الخطر.

هناك عدة مصادر للمعلومات. وهناك معايير مصادقة صادرة بما في ذلك تاريخ التعديلات بشكل تنازلات أو انحرافات. وفضلاً عن ذلك فإن سجلاّت مراجعة جاهزية الطيران لكل رحلة توثق النقاشات الداعية لقبول مخاطر الرحلة. وقد تمَّ الحصول على معلومات من الأقوال المباشرة وتقارير مسئول السلامة لويس جي. أوليان فيما يخص تاريخ نجاح الصواريخ الصلبة. وهناك دراسة أخرى له (كرئيس للجنة سلامة فشل الطيران) في محاولة لتحديد المخاطر المشمولة في الأحداث المحتملة التي تقود إلى تلوُّث إشعاعي جرَّاء محاولة إطلاق مصدر طاقة بلاتين لرحلات فضائية مستقبلية. كما تتوفر دراسة ناسا حول المسألة ذاتها. ومن أجل الحصول على تاريخ المحركات الرئيسية لمكوك الفضاء فقد تم إجراء مقابلات مع الإدارة والمهندسين في مارشال ومقابلات غير رسمية في وحدة

الصواريخ. كما أُجريت مقابلة غير رسمية مع مهندس ميكانيكي (كاليتك) كان مستشاراً لناسا حول المحركات. وقد قمنا بزيارة لجونسون لجمع المعلومات حول مصداقية إلكترونيات الطيران (الحواسيب، المجسَّات، المستجيبات). وأخيراً فإن هناك تقرير «مراجعة لممارسات المصادقة المطبَّقة على محركات الصواريخ المأهولة» المُعَد في مختبر جيت بروباليشن أعده إن. مور في شباط 1986 لناسا، مكتب رحلات الفضاء. وهو يبحث في الطرق المستعملة من قبل إف. إي. إي. والجيش للمصادقة على توربينات الغاز ومحركات الصواريخ وقد أُجريت مقابلات غير رسمية مع هؤلاء الكتَّاب.

صواريخ الوقود الصلبة (إس. آر. بي.)

قام مسئول سلامة الفضاء بتقدير مصداقية صواريخ الوقود الصلبة من خلال دراسة جميع تجارب رحلات الصواريخ السابقة. فمن بين إجمالي ما يقارب 2900 رحلة فشلت 121 رحلة (واحدة من كل 25). وهذا يشمل ما يمكن أن يسمى الأخطاء المبكرة، صواريخ أُطلقت للمرة الأولى وتم اكتشاف وتصحيح أخطاء في التصميم. وهناك رقم أكثر عقلانية للصواريخ الناضجة ربما يكون واحد في كل 50. ومع عناية خاصة في اختيار القطع والتفتيش يمكن تحقيق رقم واحد من كل 100 إلا أن واحداً من كل ألف ربما يكون غير قابل للتحقيق بتقنية هذه الأيام. (بما أن هناك صاروخان في المكوك فإن نسبة

فشل الصاروخ لا بد وأن تتضاعف للحصول على نسب فشل الصاروخ الصلب).

يقول مسئولو ناسا أن الرقم أقل من ذلك بكثير. فهم يوضّحون إن هذه الأرقام لصواريخ غير مأهولة بالبشر، ولكن حيث أن المكوك عربة مأهولة «فإن احتمال نجاح المهمة بالضرورة قريب جداً من 1.0. وليس من الواضح ما الذي تعنيه هذه العبارة، فهل تعني أنه قريب من 1 أو من الضروري أن تكون 1؟ ويمضون في الشرح «تاريخياً، هذه الدرجة العالية جداً من نجاح الرحلات نشأ عنها اختلاف في الفلسفة بين برامج طيران رحلات الفضاء المأهولة والبرامج غير المأهولة أي استعمال الاحتمال الرقمي مقابل الحكم الهندسي» هذه المقتبسات من «بيانات مكوك الفضاء لتحليل سلامة الرحلات إلى الكواكب» الصفحات 3 ـ 1، 3 ـ 2، 15 شباط 1985، ناسا جي. إس. سي.) صحيح إن كان احتمال الفشل متدنياً لدرجة واحد في المئة ألف فإن رقماً مغالى فيه من الاختبارات يلزم لتقرير ذلك (لأنك لن تحصل على شيء سوى سلسلة من الرحلات التامة التي لا تحصل منها على رقم دقيق باستثناء أن الاحتمال هو ربما أقل من عدد تلك الرحلات) ولكن إن كان الاحتمال الحقيقي غير ضئيل جداً فإن ارتباكاً سيظهر في الرحلات قريباً من الفشل وربما فشل فعلي بتقدير معقول. وفي الحقيقة فإن تجربة ناسا السابقة قد بيّنت أحياناً مثل تلك

الصعوبات القريبة من الحوادث، وكلها تحذّر من أن احتمال فشل الرحلة لم يكن ضئيلاً بتلك الدرجة. إن عدم تساوي الجدل في عدم تحديد الموثوقية من خلال التجربة التاريخية، كما فعل مسئول سلامة الفضاء، هي أن ناسا تعود إلى التاريخ وتبدأ بقولها «تاريخياً هذه الدرجة العالية من نجاح الرحلات...» وأخيراً، إذا كان لنا أن نستبدل استعمال الاحتمال الرقمي كمقياس بالحكم الهندسي، فلماذا نجد هذا الفرق الهائل بين تقديرات الإدارة وحكم المهندسين؟ وسيتبيَّن أياً كان الغرض سواء أكان للاستهلاك المحلي أو الخارجي وأن إدارة ناسا تُبالغ في موثوقية إنتاجها لدرجة الخيال.

إن تاريخ المصادقة ومراجعات جاهزية الطيران لن يتكرَّر هنا (انظر الأجزاء الأخرى من تقارير اللجنة). إن ظاهرة قبول ختم الطيران التي أثبتت تآكلاً وخللاً في الرحلات السابقة واضحة جداً، ورحلة تشالنجر خير مثال على ذلك. فهناك إشارات عديدة لرحلات سبقت ذلك. إن قبول ونجاح تلك الرحلات يؤخذ على أنه دليل على السلامة. إلا أن التآكل والخلل غير متوقع من التصميم وهي تحذيرات خاطئة أحياناً فالمعدات لا تعمل كما هو متوقع ولذلك فإن هناك خطراً من أنها قد تعمل لكن مع انحرافات أكبر بهذه الطريقة غير المتوقَّعة وغير المفهومة. وحقيقة أن هذا الخطر لم يؤدي إلى كارثة في السابق لا يُعتبر ضماناً أنها لن تتكرر مرة ثانية مالم يُفهم

بالكامل. فعند لعب الروليت الروسية نجد أن الضربة الأولى مرت بسلام هو بمثابة تعزية للضربة التي تليها. فمصدر ونتائج التآكل والخلل لم تكن مفهومة. لأنها لم تحصل بالتساوي في جميع الرحلات والوصلات، أحيانا أكثر وأحياناً أقل. لماذا ليس أحياناً، عندما تتقرر الظروف أياً كانت بأنها صحيحة ولكنها أيضا تقود الى كارثة؟

وعلى الرغم من هذه المفارقات من حالة لأخرى، فقد تصرّف المسؤلون كما لو أنهم يفهمونها وكانوا يقدمون تفسيراً منطقياً لبعضهم الآخر يعتمد غالباً على «نجاح» الرحلات السابقة. فمثلاً في تقرير إن. كانت الرحلة 51 ـ إل. آمنة للطيران في ظل وجود تآكل الحلقة في رحلة 51 ـ ج لوحظ أن عمق التآكل كان فقط ثلث نصف القطر. وقد لوحظ في تجربة قص الحلقة أن قصها بعمق نصف قطر كان ضرورياً قبل فشل الحلقة. وبدلاً من الاهتمام من أن التباين في الظروف المفهمومة بشكل سيء قد يخلق تآكلا أعمق هذه المرة، فقد تم التأكيد على وجود «عنصر سلامة من ثلاث». وهذا استعمال غريب لمصطلح المهندس «عنصر السلامة» فإذا كان هناك جسراً مبنياً لتحمل حمل معين دون أن يؤدّي إلى انهيار الدعامات والتشقُّق والانهيار فربما يكون مصمماً من مواد تُستعمل لتحمل فعلياً ثلاثة أضعاف الحمل. إن «عنصر السلامة» هذا سوف يسمح بأحمال زائدة أو أحمال زائدة غير معروفة أو ضعف في

المواد التي قد يكون فيها عيوب غير متوقعة. والآن إذا جاء الحمل المتوقَّع على الجسر وظهر تشقُّق في الدعامة فإن هذا يُعتبر فشل في التصميم. إذ لم يكن هناك عنصر سلامة أبداً حتى وإن لم ينهار الجسر فعلياً، لأن التشقُّق أصاب فقط ثلث الطريق خلال الدعامة. إن حلقات أو أطواق 5 لمقويات الصاروخ الصلبة لم تصمم كي تتآكل. والتآكل كان إيماءة لوجود شيء خطأ، والتآكل لم يكن شيئاً يمكن أن تخمِّن منه السلامة.

بدون فهم كامل، لم يكن هناك أي طريقة يستطيع الإنسان أن يثق من خلالها أن الاحوال في المرة القادمة لن تؤدي إلى تآكل أشد بثلاثة أضعاف المرة السابقة. ومع ذلك فإن المسئولين يستغبون أنفسهم بالاعتقاد بأن لديهم مثل هذا الفهم والثقة على الرغم من التباين الغريب من حالة لأخرى. وقد أُجري نموذج رياضي لحساب التآكل وكان نموذجاً غير قائم على الفهم الفيزيائي بل على مطابقة المنحى التجريبي وبتفصيل أكثر افترضنا أن بخاراً من الغاز الحار كان يقطر على مادة حلقة 5 وأنه تم تحديد الحرارة عند نقطة الركود (حتى الآن بقواعد حركة حرارية معقولة). ولكن لتحديد مقدار المطاط الذي تآكل افترضنا أن هذا يعتمد فقط على هذه الحرارة بمعادلة مفترضة من بيانات على مادة مماثلة. وقد بيَّنت نقطة لوغاريتمية خطاً مستقيماً لذلك افترض أن التآكل كان متبايناً حسب 0.58 من قوة

الحرارة وتم تحيد 0.58 بأقرب شيء مناسب. إلا إنه وبتعديل أرقام أخرى تحدَّد أن النموذج كان متفقاً مع التآكل (بعمق ثلث نصف قطر الحلقة). ولا خطأ هناك بالاعتقاد بالجواب! فالشك ظاهر في كل مكان. ولم يكن ممكناً أن نتنبَّأ بقوة تيار الغاز إذ أنه كان يعتمد على الثقوب المتكوِّنة في المعجون. وقد بيَّن الخَلَل أن الحلقة قد تفشل على الرغم من عدم تآكلها أو تآكلها جزئياً. من المعروف أن المعادلة التجريبية لم تكن أكيدة لأنها لم تكن تسير في نقاط البيانات مباشرة بذاتها التي حددت فيها. كان هناك كثير من النقاط أعلى بمرتين وأدنى بمرتين من المنحنى لذلك فإن التآكل المتوقع مرتين كان من المعقول أنه ناجم عن ذلك السبب كما أن هناك شكوكاً مماثلة كانت تُحيط بالنقاط الثابتة في المعادلة. وعند استعمال نموذج رياضي لا بد من بذل اهتمام حذر بالشكوك في النموذج.

محرك الوقود السائل (SSME)

أثناء رحلة 51 ـ إل. عملت المحركات الرئيسية الثلاثة لمكوك الفضاء بشكل جيد حتى في اللحظة الأخيرة التي بدأ فيها إغلاق المحركات مع بدء فشل التزويد بالوقود. والسؤال الذي يبرز هو فيما إذا تعطَّل ذلك، وكان علينا أن نبحث في ذلك بالتفصيل كما فعلنا في مقوِّي الصاروخ الصلب فوجدنا نقصاً مماثلاً في الاهتمام بالأخطاء ونقصاً في المصداقية. وبمعنى آخر، هل كانت نقاط ضعف التنظيم التي ساهمت في

الحادث محصورة في قطاع مقوِّي الصاروخ الصلب أم كانت خصائص أكثر عمومية لناسا؟ ولهذه الغاية فقد تم التدقيق في المحركات الرئيسية لمكوك الفضاء والالكترونيات ولم يتم إجراء دراسة مماثلة للجهاز المداري أو الخزّان الخارجي.

إن المحرِّك هو بُنية معقَّدة أكثر بكثير من مقوِّي الصاروخ الصلب ويحتوي على هندسة تفصيلية أكثر. وعلى العموم، فإنه يبدو أن الهندسة ذات جودة عالية ومن الواضح أن هناك عناية ملحوظة قد بذلت في العيوب والأخطاء التي وجدت في تشغيله.

والطريقة العادية التي يتم فيها تصميم هذه المحرِّكات (للطيران الحربي أو المدني) يمكن أن تُسمَّى نظام المكوِّنات أو التصميم من أسفل إلى أعلى. ومن الضروري أولاً أن نفهم بالكامل خصائص وحدود المواد التي تُستعمل (لشفرات التوربين مثلاً) ويتم البدء في الاختبارات في أجهزة تجريبية لتقرير ذلك. وانطلاقاً من هذه المعرفة فإن أجزاء المكونات الكبرى (مثال المحملات) يتم تصميمها واختبارها بشكل فردي. وعند ملاحظة العيوب وأخطاء التصميم يتم تصحيحها والتحقق منها بمزيد من الاختبار. وبما أن الشخص يختبر أجزاء فقط في كل مرة فإن هذه الاختبارات والتعديلات ليست مُكلفة. وأخيراً يعمل شخص حتى التصميم النهائي للمحرك بكامله وحسب المواصفات الضرورية. وهناك فرصة جيدة هذه المرة في نجاح

المحرّك عموماً أو أن يتم بسهولة عزل وتحليل نقاط الفشل لأن أنماط الفشل وحدود المادة..... الخ، أصبحت مفهومة بشكل جيد. وهناك فرصة جيّدة لأن تكون التعديلات على المحرك (للتغلُّب على الصعوبات النهائية) ليست صعبة لان معظم المشكلات الخطيرة قد تمَّ اكتشافها ومعالجتها في المراحل المبكرة الأقل تكلفة من العملية.

لقد تمَّت معالجة المحرّك الرئيسي لمكوك الفضاء بطريقة مختلفة، يمكن أن نقول إنها من الأعلى إلى الأسفل. لقد تم تصميم المحرك وتجميعه مرة واحدة بتفصيل أوّلي قليل نسبياً للمادة والمكونات. بعدئذ وعند اكتشاف مشكلات في المحملات وشفرات التوربين وأنابيب التبريد أصبح اكتشاف الأسباب وإجراء التغييرات أكثر كلفة وصعوبة. مثلاً تمَّ اكتشاف شقوق في شفرات التوربين لمضخة توربين الضغط العالي للأوكسجين. فهل هذا ناجم عن عيوب في المادة أو تأثير جو الأوكسجين على خصائص المادة أم الضغط الحراري للبدء والإغلاق، أم ذبذبة وضغط التشغيل الثابت أم عند رنين معين، بصفة رئيسية عند سرعات معينة؟ فكم هي مدة التشغيل الممكنة بدءاً من ظهور التشقُّق الى فشل التشقُّق؟ وكيف يعتمد هذا على مستوى الطاقة؟ إن استعمال المحرك الكامل كحقل تجارب لحل مثل تلك المسائل مُكلِف للغاية. والإنسان لا يرغب في فقدان محرك بكامله من أجل أن يكتشف مكان وكيفية حصول العطل.

إلا أن المعرفة الدقيقة لهذه المعلومات ضروري لتكوين ثقة في مصداقية المحرّك المستعمل. إذ لا يمكن الحصول على هذه الثقة بدون فهم تفصيلي.

من المساوئ الأخرى للطريقة من الأعلى إلى الأسفل هي أنه إذا فهمنا الخطأ فإن حلاً بسيطاً مثل شكل جديد لمكان التوربين قد يكون مستحيل التنفيذ بدون إعادة تصميم المحرك بكامله.

إن المحرك الرئيسي لمكوك الفضاء آلة بارزة جداً. ومعدَّل دفعه للوزن أكبر من أي محرّك سابق. وهو قائم على حد أو خارج حد لتجربة هندسية سابقة. لذلك وكما هو متوقع، فقد ظهرت أنواع عديدة من العيوب والصعوبات. ولأنه لسوء الحظ، قد تم بناؤه بطريقة من الأعلى إلى الأسفل فإنه يصعب العثور عليها وإصلاحها. إن هدف التصميم وهو الحصول على عمر يساوي 55 طلقة للرحلات (27000 ثانية من التشغيل إما في رحلة 500 ثانية أو على أساس الاختبار) لم يتم تحقيقه. ويتطلَّب المحرك الآن صيانة متكرّرة جداً واستبدالاً للقطع الضرورية مثل مضخّات التوربين والحاملات والأغطية من الألواح المعدنية... الخ. كما إن مضخات الوقود التوربينية بحاجة إلى استبدال كل ثلاث أو أربع مهمات (على الرغم من أن هذا ربما يكون قد تم ترتيبه الآن) ومضخّة التوربين للضغط العالي للأوكسجين كل خمس أو ست مهمات. وهذا في أقصى

حالاته يمثل عشرة بالمئة من المواصفات الأصلية. ولكن اهتمامنا الرئيسي هنا هو تقرير المصداقية.

في ما مجموعه حوالي 250.000 ثانية من التشغيل تعطَّل المحرك بشكل خطير حوالي 16 مرة. والهندسة تُولي اهتماماً كبيراً لهذه الأعطال وتحاول معالجتها بأقصى سرعة ممكنة. إذ تقوم بذلك بواسطة دراسات اختبار على معدات خاصة مصمَّمة تجريبياً للعطل موضع البحث بفحص دقيق للمحرك بحثاً عن إيماءات إرشادية (مثل الشقوق) وبدراسة وتحليل ملحوظين. وبهذه الطريقة، وعلى الرغم من الصعوبات المشمولة في التصميم من أعلى للأسفل، فإنه قد تم التغلُّب على كثير من المشكلات بالعمل الجاد.

فيما يلي قائمة بالمُشكلات وربما قد تم حل الكثير منها:

تشقُّق في شفرة التوربين في مضخة توربين الضغط العالي للوقود (ربما قد تكون حُلَّت).

تشقُّق في شفرة التوربين في مضخة توربين الضغط العالي للأوكسجين.

تمزُّق في خط مقوّي مشعل الشرارة.

عطل في صمَّام التنظيف.

تآكل في حجرة خط مقوّي مشعل الشرارة.

تشقُّق اللوح المعدني التوربيني لشفرة التوربين في مضخَّة توربين الضغط العالي للوقود.

عطل خطوط التبريد لشفرة التوربين في مضخَّة توربين الضغط العالي للوقود.

عطل في وصلة منفذ غرفة الاحتراق الرئيسية.

التواء في لحام الوصلة المؤدية إلى غرفة الاحتراق الرئيسية.

دوران غير متزامن لشفرة التوربين في مضخَّة توربين الضغط العالي للاوكسجين.

نظام القطع لسلامة تسريع الطيران (عطل جزئي في نظام الفائض).

تشظِّي الحاملات (محلول جزئياً).

ذبذبة عند 4000 هِرتز مما يجعل بعض المحركات غير عاملة.

إن الكثير من هذه المُشكلات المحلولة هي الصعوبات المبكرة لتصميم جديد لأن 13 منها حصلت في خلال الـ125.000 ثانية الأولى وثلاثة فقط في خلال 125.000 ثانية الثانية. ومن الطبيعي أن لا يكون الإنسان واثقاً من أن جميع المشكلات قد انتهت وأن بعضها قد تكون غير معالجة من حيث

السبب الرئيسي. لذلك فإنه من غير العقلاني أن نخمّن أنه ربما يكون هناك مفاجأة واحدة على الأقل خلال الـ250000 ثانية الثانية وهو احتمال يساوي 1/50 لكل محرّك لكل رحلة. وفي الرحلة هناك ثلاث محركات ولكن ربما يكون هناك بعض الحوادث تؤثر فقط على محرك واحد. والنظام يمكن أن يجهض بمحركين فقط. لذلك دعنا نقول إن المفاجآت غير المعروفة لا تسمح لنا بحد ذاتها أن نخمّن أن احتمال فشل الرحلة يعود إلى أن المحرّك الرئيسي لمكوك الفضاء أقل من 1/500 كما يمكن أن نضيف لهذا فرصة العطل من مشكلات معروفة ولكنها غير محلولة بعد وسنناقشها فيما بعد (المهندسون في Rocket -dyne والشركة المصنّعة يقدّرون إجمالي الاحتمال بأنه 1/10.000. والمهندسون في مارشال يقدّرون بأنه 1/300. في حين أن إدارة ناسا التي يتبعها هؤلاء المهندسون تدّعي أنها 1/100.000. ويعتقد مهندس مستقل مستشار لناسا أن 1 أو 2 في المئة هو تقدير معقول).

إن تاريخ مبادئ المصادقة لهذه المحركات مُربك وصعب التفسير. مبدئياً يبدو أن القاعدة كانت أن يعمل محركين نموذجين ضعفي الزمن، بدون عطل، لزمن تشغيل المحرّك الذي يجب المصادقة عليه وهو (قاعدة 2 ×). على الأقل هذه هي الممارسة في FAA ويبدو أن ناسا قد تبنّته متوقعة مبدئياً أن يكون زمن المصادقة 10 رحلات (وبالتالي 20 رحلة لكل عينة).

من الواضح أن أفضل محرّك نستعمله بغرض المقارنة هو ذي المجموع الأكبر (طيران مضافاً إليه الاختبار) لزمن التشغيل والمسمَّى «رائد الأسطول» ولكن ماذا لو تعطَّلت عيِّنة ثالثة وعيِّنات أخرى عديدة في زمن قصير؟ بالتأكيد لن نكون آمنين لأنه كان هناك إثنان غير طبيعيين في استدامتهم طويلا. فالزمن القصير قد يمثِّل الاحتمالات الحقيقية أكثر ومن منطلق روح السلامة لاثنين فإننا ينبغي أن نشغل العينات قصيرة الأمد نصف الزمن.

ويمكن أن نرى الانتقال البطيء نحو عنصر السلامة المتناقص في أمثلة عديدة. فلنأخذ مثالاً على ذلك شفرات توربين مضخة الضغط العالي للوقود. أولاً وقبل كل شيء نجد أن فكرة اختبار المحرّك بأكمله قد تمّ التخلّي عنه. ولكل محرك قطع مهمة عديدة (مثل مضخات التوربين نفسها) تستبدل على فترات متكررة، لذلك يجب أن تتحول القاعدة من المحركات إلى القطع. إننا نقبل مضخات توربين الضغط العالي للوقود كزمن مصادقة لو أنه تم تشغيل عينتين بنجاح لضعف الزمن (وبطبيعة الحال، وكناحية عملية، لم يعد هناك إصرار أن يكون هذا الزمن بمقدار 10 رحلات) ولكن ما هو «الناجح»؟ إن FAA تسمي تشقُّق شفرة التوربين عطلاً من أجل أن تقدم عمليا عامل سلامة حقيقي أكثر من 2 وهناك أوقاتاً يمكن أن يعمل المحرك خلال الزمن بين بدء الشرخ أولياً إلى أن يكبر بدرجة كبيرة.

(تفكر FAA بقوانين جديدة تضع في اعتبارها الزمن الإضافي للسلامة ولكن إن تم تحليله بدقة متناهية من خلال أنماط معروفة ضمن تجارب معروفة ومواد مختبرة بالكامل ولا شيء من هذه الشروط ينطبق على المحرّك الرئيسي لمكوك الفضاء).

لقد عُثر على تشقُّقات في كثير من شفرات التوربين لمضخة التوربين للضغط العالي للوقود في المرحلة الثانية. وفي حالة واحدة، وبعد 1900 ثانية عُثر على ثلاثة في حين أنه في حالة أخرى وبعد 4200 ثانية وُجدت هذه التشقُّقات على الرغم أن هذا التشغيل الأطول عادة يُظهر تشقُّقات. ولمتابعة هذه القصة لأبعد من ذلك علينا أن نُدرك أن الضغط يعتمد إلى درجة كبيرة على مستوى الطاقة. كان يُفترض أن تكون رحلة تشالنجر وكافة الرحلات السابقة أيضاً، على مستوى طاقة يسمى 104٪ من معدل مستوى الطاقة أثناء معظم وقت تشغيل المحركات. وبالحكم من واقع بيانات بعض المواد فإنه يُفترض أن الزمن اللازم للتشقُّق عند مستوى 104٪ من معدل الطاقة هو حوالي الضعف مما هو عليه عند مستوى 109٪ أو مستوى الطاقة الكامل. وكانت الرحلات المستقبلية ستكون عند هذا المستوى بسبب الوزن الصافي الأثقل. وقد أُجريت اختبارات عديدة عند هذا المستوى. لذلك وبتقسيم الزمن عند 104٪ على 2 فإننا نحصل على وحدات تسمَّى مستوى طاقة كامل مكافئ (ومن الواضح أن هناك نوعاً من الشك في هذا ولكن لم تتم دراسته؟

والتشقُّقات المُبكرة المذكورة أعلاه حصلت عند مستوى طاقة كاملة تقديريه 375/ 1).

والآن تصبح قاعدة المصادقة «حددت جميع شفرات المرحلة الثانية لحد أقصى عند مستوى طاقة كامل قدره 1375 ثانية. فإذا اعترف الإنسان بأن معامل السلامة 2 قد ضاع عندئذ يُقال إن التوربين الواحد قد عمل لمدة 3800 ثانية من مستوى طاقة تقديرية كاملة دون تشقُّق ونصف ذلك هو 1900 ولذلك فإننا محافظون أكثر. لقد سخرنا من أنفسنا بثلاثة طرق. أولاً، إن لدينا عينة واحدة فقط وهي ليست الرائدة في الطيران لأنه يوجد في العينتين الأخرتين لـ3800 ثانية أو أكثر 17 شفرة متشقّقة بينها (هناك 59 شفرة في المحرك). ثانياً، لقد تجاهلنا قاعدة 2 × واستبدلناها بزمن مكافئ. وأخيراً فإننا رأينا التشقُّق عند 1375 ويمكننا القول بأنه لم يتم العثور على تشققات عند حد أدنى من 1375 ولكن المرة الاخيرة التي نظرنا فيها ولم نجد تشققات كانت 1100 ثانية من مستوى القوة الكاملة المقدَّرة. ولا ندري متى يكون التشقق بين هذين الزمنين. مثلاً ربما تكون التشققات قد تشكلت عند 1150 ثانية من مستوى القوة الكاملة المقدرة (تقريبا 2/3 من مجموعات الشفرات المختبرة وزيادة عن 1375 ثانية كان فيها تشقُّقات. وبعض التجارب الأخيرة أظهرت في الحقيقة تشقُّقات عند فترة 1150 ثانية) وكان من الضروري الإبقاء على الرقم مرتفعاً لأن تشالنجر كانت ستقلع بمحرك قريب جداً

من الحد عندما يكون زمن الرحلة قد انتهى.

وأخيراً فإن هناك ادعاء بأنه لم يتم التخلّي عن المعايير وأن النظام آمن بالتخلّي عن تقليد FAA الذي يقضي بعدم وجود تشقُّقات واعتبار أن الشفرة التالفة بالكامل فقط تمثل عطل. وبهذا التعريف فلا يوجد عطل في أي محرك. والفكرة هي أنه طالما هناك وقت كاف لاتساع التشقق لكي يكبر إلى شرخ، فإننا يمكن أن نضمن بأن كل شيء آمن، والتفتيش في جميع الشفرات بحثاً عن تشقُّقات، فإن وُجدت نستبدلها، وإن لم نجد شيئا فلدينا وقتاً كافياً لرحلة آمنة. وهذا يخلق مشكلة تشقُّقات وليس مشكلة سلامة رحلة ولكن مشكلة صيانة.

وهذا قد يكون صحيحاً في الواقع. ولكن كيف نعرف أن التشقّقات تتزايد بدرجة بطيئة بحيث لا يحصل شرخ في الرحلة؟ لقد عملت ثلاث محركات لمدة زمنية أطول بشفرات متشقّقة قليلة (حوالي 3000 ثانية من مستوى قوة الضغط) دون انكسار لأي من الشفرات ولكن ربما كان يُمكن معالجة هذا التشقق، بتغيير شكل الشفرة وتسوية السطح وتغطيته بعازل تلافياً للصدمات الحرارية فإن الشفرات لا تتشقق.

وقصة مماثلة نجدها في تاريخ المصادقة على المضخات التوربينية للضغط العالي للأوكسجين ولكننا لن نورد التفاصيل هنا.

باختصار، من الواضح أن مراجعة جاهزية الطيران وقواعد

المصادقة تُبيِّن انحطاطاً في مشكلات المحرك الرئيسي لمكوك الفضاء شبيه تماماً بالانحطاط الحاصل في مقوِّي الصاروخ الصاب.

إلكترونيات الطيران

نعني بإلكترونيات الطيران نظام الحاسوب الموجود في المدور الفضائي ومدخلاته من المجسَّات ومخرجاته ومن المشغلات الميكانيكية. وفي البداية سنقيِّد بحثنا في الحواسيب ولا يعنينا الموثوقية بالمعلومات المدخلة من مستشعرات الحرارة والضغط... الخ. أو فيما إذا كانت مُخرجات الحاسوب تطبق بدقَّة من المشغلات الميكانيكية لإطلاق الصاروخ والضوابط الميكانيكية والعرض لرواد الفضاء... الخ.

إن نظام الحاسوب مستفيض جداً وله ما يزيد عن 250.000 خط من الرموز. وهو مسئول من بين أمور عديدة، عن التحكم الآلي بالصعود إلى المدور والنزول إلى الغلاف الجوي بشكل جيِّد (دون ماخ 1) بمجرد الضغط على زر واحد لتقرير موقع الهبوط المرغوب فيه. ومن الممكن جعل الهبوط بكامله أوتوماتيكياً (باستثناء إزالة إشارة تخفيض ذراع الهبوط من ضبط الحاسوب ويجب عندئذ عمل ذلك من قبل رائد الفضاء بدواعي السلامة) إلا أن مثل هذا الهبوط الآلي ربما لا يكون آمناً كالهبوط الذي يتحكَّم به الطيار. ويُستعمل أثناء الطيران في

ضبط إجمالي الوزن وعرض المعلومات لرواد الفضاء وتبادل المعلومات مع المحطة الأرضية. ومن الواضح أن سلامة الرحلة تتطلَّب دقة مضمونة لهذا النظام التفصيلي لمعدات وبرامج الحاسوب.

وباختصار فإن الموثوقية بمعدات الحاسوب يتم ضمانها بالحصول على أربع أنظمة حاسوب متماثلة مستقلة أساساً، ويكون لكل مستشعر عدة نسخ حيثما أمكن وهي عادة أربعة، وكل نسخة تغذِّي جميع الخطوط الأربعة للحاسوب، فإن كانت المدخلات من المستشعرات غير متطابقة، حسب الظروف، فإن معدَّلات معيَّنة أو مختارات الأغلبية تُستعمل كمدخلات فاعلة. واللوغارتمية المستعملة من قبل الحواسيب الأربعة هي ذاتها كي تكوِّن مدخلاتها (طالما أن كل واحد يرى جميع نسخ المستشعرات) هي ذاتها. ولذلك يجب أن تكون النتائج في كل خطوة وفي كل حاسوب متماثلة. وتجري المُقارنة فيما بينها من حين لآخر ولكن نظراً لاحتمال عملها بسرعات مختلفة وبشكل بسيط يتم وضع نظام للتوقف والانتظار في مواعيد محدَّدة قبل إجراء كل مقارنة. فإن كان أحد الحواسيب غير متطابق أو تأخَّر كثيراً في الجواب فإن الثلاثة المتطابقة تُعتبر صحيحة ويُستبعد الحاسوب الخاطئ بالكامل من النظام. وإذا تعطَّل حاسوب آخر، ومن واقع الحكم عليه من المطابقة مع جهازي الحاسوب الآخرين، يُستبعد من النظام وتُلغى بقية الرحلة ويتم تقرير

الهبوط في مكان الهبوط بواسطة التحكُّم بالحاسوبين المتبقيين. وهذا نظام متكرّر طالما أن عطل حاسوب واحد لا يؤثّر على الرحلة. وأخيراً، كميزة إضافية للسلامة، فإن هناك حاسوب مستقل خامس يتم تحميل ذاكرته فقط ببرامج الصعود والهبوط ويكون قادراً على التحكُّم بالهبوط إذا كان هناك عطل في أكثر من حاسوبين في الخط الرئيسي للحواسيب الأربعة.

لا يوجد متّسع كاف في ذاكرة حواسيب الخط الرئيسي لجميع برامج الصعود والهبوط وبرامج الحمل في الرحلة لذلك يتم تحميل الذكراة حوالي أربع مرات من الأشرطة بواسطة روّاد الفضاء.

ونظراً للجهد الهائل المطلوب لاستبدال البرامج الجاهزة لمثل هذا النظام المستفيض ولفحص النظام الجديد لم يتم إجراء تغيير في الجهاز طالما أن النظام قد بدأ منذ حوالي خمسة عشر عاماً. فالجهاز الفعلي قد عفا عليه الزمن. مثلاً، الذاكرات مصنوعة من حديد قديم وقد أصبح من الصعب أن نجد شركة صانعة تُورد مثل هذه الحواسيب القديمة ذات جودة عالية. والحواسيب الحديثة يُعوَّل عليها أكثر بكثير ويمكن أن تعمل بسرعة أكثر وتبسط الدارات وتسمح بعمل أشياء أكثر ولا تتطلب تحميلاً كثيراً للذاكرة نظراً لاتّساع ذاكرتها.

ويتم فحص البرامج الجاهزة بدقة بطريقة تصاعدية. أولاً

يتم فحص كل خط جديد من الرموز ثم أقسام الرموز أو المجموعات التي يتم التحقق منها. وتتم زيادة النطاق خطوة خطوة إلى أن يتم دمج التغييرات الجديدة في نظام كامل وتُفحص. هذه المخرجات الكاملة تعتبر المنتج النهائي الصادر حديثاً.

ولكن باستقلالية تامة، فإن هناك مجموعة تدقيق مستقلة تأخذ موقفاً معاكساً لمجموعة تطوير البرامج الجاهزة وتختبر البرامج الجاهزة وتتحقق منها كما لو أنها زبون لمنتج يتم تسليمه. وهناك تحقُّق إضافي باستعمال البرامج الجديدة في نظام المحاكاة. واكتشاف خطأ أثناء عملية اختبار التحقق يُعتبر خطيراً جداً، وتتم دراسة أصله بدقة متناهية تلافياً لمثل تلك الأخطاء في المستقبل. وقد تمَّ العثور على مثل هذه الأخطاء غير المتوقعة حوالي ست مرات في البرمجة بكاملها وتغيير البرامج (لأحمال جديدة أو معدَّلة) التي تم إجراؤها. والمبدأ المتَّبع هو أن المراجعة بكاملها لا تنبع من سلامة البرامج بل هي مجرَّد اختبار لتلك السلامة في تدقيق لا ينطوي على احتمال كوارث، وسلامة الطيران لا بد وأن يُحكم عليها فقط انطلاقاً من جودة عمل البرامج في اختبارات التحقق. إذ أن العطل هنا يقود إلى شأن ملحوظ.

وإيجازاً لما سلف، فإن نظام وطريقة فحص برامج الحاسوب الجاهزة كان جيداً للغاية، ويبدو أنه كان خالياً من

الضحك على الذات في أثناء هبوط المقاييس كما هو حاصل في مقوّي الصاروخ الصلب أو المحرك الرئيسي لمكوك الفضاء. وضماناً لذلك فإن هناك مقترحات أخيرة للإدارة في تقليص مثل هذه الاختبارات التفصيلية المُكلفة نظراً لكونها غير لازمة في هذه الفترة الأخيرة من تاريخ المكوك. ولكن يجب مقاومة ذلك لأنها لا تنطوي على تقدير للتأثيرات الغامضة ومصادر الخطأ الناشئة حتى عن تغيير بسيط من جزء من البرنامج على الآخر. وهناك طلبات دائمة للتغيير نظراً لاقتراح أحمال جديدة وطلبات جديدة وتعديلات من قبل المستعملين. والتغييرات مكلفة لأنها تتطلب اختبارات مكثّفة. والطريقة الصحيحة لتوفير المال هي تقليل عدد التغييرات المطلوبة لا نوعية الاختبار لها.

ويمكن للإنسان أن يُضيف أنه يمكن تحسين النظام المستفيض بإدخال أجهزة حديثة وأساليب برمجة. ومن مزايا أي مسابقة خارجية أن تبدأ من البداية وعلى ناسا أن تدرس بدقة فيما اذا كانت هذ فكرة جيّدة أم لا.

وأخيراً، عودة إلى المستشعرات والمشغلات الميكانيكية لنظام إلكترونيات الطيران، فإننا نجد أن الموقف إزاء عطل النظام والموثوقية ليس بنفس جودة نظام الحاسوب. مثلاً، وجدت صعوبة في مستشعرات معينة للحرارة التي كانت تتعطّل أحياناً. ومع ذلك وبعد 18 شهراً فإن نفس المستشعرات لا زالت قيد الاستعمال وتتعطّل أحياناً إلى درجة وجوب إلغاء

الإطلاق نظراً لتعطُّل اثنين في وقت واحد. وحتى في رحلة لاحقة فإن هذا المستشعر المتعطِّل قد استُعمل مرة ثانية. وكذلك فإن نظام ضبط التفاعل وحاقنات الصواريخ المستعملة للتعديل والتحكم في الرحلة لا يعول عليها إلى درجة ما. وهناك تكراراً تاريخاً طويلاً من الأعطال التي لم يكن أحد منها شديداً بدرجة كافية ليؤثر على الرحلة بشكل خطير. ويتم الكشف على عمل أدوات الحقن بواسطة المجسَّات فإذا لم تقم بالإشتعال فإن الحاسوب يختار واحدة أخرى للإشتعال. إلا أنها ليست مصمَّمة لكي تتعطَّل ولا بد من حل المشكلة.

الخلاصة

إذا أردنا المحافظة على جدول إطلاق معقول فإن الهندسة غالباً لا يمكن أن تتم بسرعة كافية لتتماشى مع توقُّعات معايير المصادقة المحافظة أصلاً والمصمَّمة لضمان مركبة آمنة جداً. وفي هذه الحالات فإن المعايير وبشكل غامض وبرأي منطقي واضح، يتم تعديلها بحيث تتم المصادقة على الرحلات في موعدها. ولذلك فانها تنطلق في حالة غير آمنة نسبياً مع وجود فرصة للعطل بنسبة مئوية (من الصعب أن نكون أكثر دقة).

ومن ناحية أُخرى فإن الإدارة الرسمية تدَّعي بالاعتقاد أن احتمال الفشل أقل من ذلك ألف مرة. وربما يكون سبب ذلك هو محاولة التأكيد للحكومة بكمال ناسا ونجاحها لضمان توريد

الأموال. وربما يكون هناك سبب آخر وهو أنهم يعتقدون مخلصين أن هذا صحيح وبذلك يظهرون نقصاً واضحاً في الاتصال بينهم وبين المهندسين العاملين لديهم.

وعلى أي حال فإن لهذا نتائج غير مواتية أبداً، وأخطرها هو تشجيع المواطن العادي على الطيران في مثل هذه الآلة الخطيرة كما لو أنها وصلت إلى درجة السلامة لطائرة عادية. ورواد الفضاء مثل طياري الاختبار يجب أن يعرفوا المخاطر المحيطة بهم ونحن نقدِّرهم لشجاعتهم. فمن يستطيع أن يشك في أن ملك أوليف كان ذو شجاعة فائقة وكان مدركاً للخطر الحقيقي أكثر مما كانت إدراة ناسا تريدنا أن نعتقد؟.

دعونا نضع توصيات كي نضمن أن مسئولي ناسا يتعاملون في عالم من الواقعية في فهم نقاط الضعف والعيوب التقنية بدرجة كافية كي يحاولوا إنهاء هذه العيوب ونقاط الضعف بفعالية.

وعليهم أن يعيشوا الحقيقة في مقارنة تكاليف واستعمال المكوك في طرق أخرى لدخول الفضاء. وعميهم أن يكونوا واقعيين في إبرام العقود وتقدير التكاليف وصعوبة المشاريع. ويجب اقتراح جداول الطيران الواقعية التي يمكن الوفاء بها بدرجة معقولة. فإذا لم تساعدهم الحكومة بهذه الطريقة فليكن ذلك. ومن واجب سانا أن تكون صريحة مع المواطنين الذين

تطلب دعمهم ومخلصة بتقديم المعلومات الكافية كي يتخذ المواطنون قرارات حكيمة في استعمال مواردهم المحدودة.

فبالنسبة للتقنية الناجحة لا بد وأن تعطى الواقعية أولوية على العلاقات العامة لأنه لا يمكن الاستهزاء بالطبيعة.

obeikandl.com