الأمم المتحدة

A/AC.105/707

الجمعية العامة

Distr. General
14 December 1998
ARABIC
Original: English

لجنة استخدام الفضاء الخارجي
في الأغراض السلمية

مشروع التقرير التقني للجنة الفرعية العلمية والتقنية بشأن الحطام الفضائي

المحتويات

	الفقرات	الصفحة
مقدمة	١-٩	٣
١- قياسات الحطام الفضائي	١٠-٥٩	٤
١-١ القياسات الأرضية	١٠-٣٠	٤
١-١-١ القياسات الرادارية	١١-٢٤	٥
١-١-٢ القياسات البصرية	٢٥-٣٠	٦
١-٢ القياسات الفضائية	٣١-٤٤	٩
١-٢-١ الأسطح المسترجعة ومكاشيف الارتطام	٣١-٣٩	٩
١-٢-٢ قياسات الحطام من الفضاء	٤٠-٤٤	١١
١-٣ ملخص القياسات	٤٥	١١
١-٤ الفهرسة وقواعد البيانات	٤٦-٥٢	١١
١-٥ تأثير بيئة الحطام الفضائي على تشغيل المنظومات الفضائية	٥٣-٥٨	١٥
١-٥-١ تأثير الأجسام الحطامية الكبيرة على تشغيل المنظومات الفضائية	٥٤	١٥
١-٥-٢ تأثير الأجسام الحطامية الصغيرة على تشغيل المنظومات الفضائية	٥٥-٥٨	١٦
١-٥-٢-١ الأضرار التي تلحق بالأسطح أو المنظومات الفرعية	٥٦	١٦
١-٥-٢-٢ تأثير الحطام الفضائي على العمليات الفضائية البشرية	٥٧-٥٨	١٧
١-٦ آثار الحطام الفضائي الأخرى	٥٩	١٧
٢- نمذجة بيئة الحطام الفضائي وتقدير المخاطر	٦٠-٩٣	١٧
٢-١ نمذجة بيئة الحطام الفضائي	٦٠-٧٧	١٧
٢-١-١ المقدمة والمنهجية	٦٠-٦٦	١٧
٢-١-٢ النماذج القصيرة الأمد	٦٧-٦٨	٢٠
٢-١-٣ النماذج الطويلة الأمد	٦٩-٧٧	٢٢
٢-٢ تقييمات مخاطر الحطام الفضائي	٧٨-٩٣	٢٤
٢-٢-١ مقدمة	٧٨-٧٩	٢٤
٢-٢-٢ تقييمات تقدير مخاطر الاصطدام في المدارات الأرضية المنخفضة	٨٠-٨٥	٢٤

V.98-58028

	الفقرات	الصفحة
٢-٢-١ المنهجية	٨٠-٨٢	٢٤
٢-٢-٢ نتائج تقييمات المخاطر	٨٣-٨٥	٢٦
٢-٢-٣ تقييمات مخاطر الاصطدام في المدار الثابت بالنسبة للأرض	٨٦-٨٨	٢٧
٢-٢-٤ تقييمات المخاطر الخاصة بالحطام الفضائي العائد	٨٩-٩٣	٢٨
٣- تدابير تخفيف مخاطر الحطام الفضائي	٩٤-١٢٩	٢٨
٣-١ الحد من تزايد الحطام مع مرور الزمن	٩٤-١٠٣	٢٨
٣-١-١ تفادي نشوء الحطام أثناء التشغيل الاعتيادي	٩٤	٢٨
٣-١-١-١ الأجسام ذات الصلة بالبعثات الفضائية	٩٤	٢٨
٣-١-١-٢ الحبال	٩٥	٢٩
٣-١-١-٣ دوافق المحركات الصاروخية ذات الوقود الصلب ، ومواد الطلاء وغيرها من مواد السطوح الخارجية	٩٦	٢٩
٣-١-٢ منع حوادث التكسر في المدار	٩٧-١٠٠	٢٩
٣-١-٢-١ الانفجارات في المدار	٩٨-٩٩	٢٩
٣-١-٢-٢ الاصطدامات في المدار	١٠٠	٣٠
٣-١-٣ انزال الأجسام الفضائية من المدار ونقلها الى مدار آخر	١٠١-١٠٣	٣٠
٣-١-٣-١ انهاء بعثة المنظومات الفضائية	١٠١-١٠٢	٣٠
٣-١-٣-٢ في حالة حدوث أعطال	١٠٣	٣٠
٣-٢ استراتيجيات الحماية	١٠٤-١١٨	٣٠
٣-٢-١ التدريع	١٠٥-١١١	٣١
٣-٢-١-١ التحليق الفضائي البشري	١٠٨-١١٠	٣١
٣-٢-١-٢ المركبات الفضائية غير المأهولة	١١١	٣٢
٣-٢-٢ تفادي الاصطدام	١١٢-١١٨	٣٢
٣-٢-٢-١ في المدار	١١٤-١١٧	٣٢
٣-٢-٢-٢ الاطلاق	١١٨	٣٣
٣-٣ فعالية تدابير تخفيف مخاطر الحطام	١١٩-١٢٩	٣٣
٣-٣-١ سيناريوهات تدابير التخفيف	١٢٢-١٢٤	٣٣
٣-٣-٢ تكلفة تدابير التخفيف أو آثارها الأخرى	١٢٥-١٢٩	٣٤
٣-٣-٢-١ تكاليف انشاء النظم	١٢٦	٣٤
٣-٣-٢-٢ أداء الاطلاق والجزاء الكتلي	١٢٧	٣٤
٣-٣-٢-٣ عمر البعثة	١٢٨	٣٤
٣-٣-٢-٤ الموثوقية	١٢٩	٣٥
٤- الخلاصة	١٣٠-١٣٥	٣٥
المرفق - قائمة الوثائق ذات الصلة بموضوع "الحطام الفضائي"		٣٧

مقدمة

١ - أدرج البند المتعلق بالحطام الفضائي في جدول أعمال اللجنة الفرعية العلمية والتقنية في دورتها الحادية والثلاثين المعقودة في شباط/فبراير ١٩٩٤ ، وفقا لقرار الجمعية العامة ٣٩/٤٨ المؤرخ ١٠ كانون الأول/ديسمبر ١٩٩٣ . وأعربت اللجنة الفرعية في دورتها الحادية والثلاثين عن ارتياحها لادراج موضوع الحطام الفضائي كبند منفصل في جدول الأعمال بعد سنوات عديدة من النقاش في محافل دولية شتى ، منها اللجنة الفرعية ولجنة استخدام الفضاء الخارجي في الأغراض السلمية . واتفقت اللجنة الفرعية على أهمية النظر في مسألة الحطام الفضائي وعلى ضرورة التعاون الدولي من أجل وضع استراتيجيات مناسبة وقابلة للتنفيذ بهدف تقليل آثار الحطام الفضائي المحتملة على البعثات الفضائية المقبلة (A/AC.105/ 571 ، الفقرة ٦٤) . وفي دوراتها اللاحقة ، واصلت اللجنة الفرعية نظرها في ذلك البند من جدول الأعمال على سبيل الأولوية .

٢ - واتفقت اللجنة الفرعية على ضرورة وجود أساس علمي وتقني متين للأعمال المقبلة بشأن الجوانب المعقدة للحطام الفضائي ، وعلى أنه ينبغي لها ، ضمن جملة أمور ، أن تركز على فهم الجوانب البحثية المتعلقة بالحطام الفضائي ، بما في ذلك : تقنيات قياس الحطام ؛ والنمنجة الرياضية لبيئة الحطام ؛ وتحديد خواص بيئة الحطام ؛ والتدابير الرامية الى تخفيف مخاطر الحطام الفضائي ، بما في ذلك التدابير المتعلقة بتصميم المركبات الفضائية بهدف حمايتها من الحطام الفضائي (A/AC.105/605 ، الفقرة ٧٩) . وبغية احراز تقدم في تناولها مسألة الحطام الفضائي ، اعتمدت اللجنة الفرعية في دورتها الثانية والثلاثين خطة العمل التالية (A/AC.105/605 ، الفقرة ٨٣) :

١٩٩٦ : قياسات الحطام الفضائي وفهم البيانات الخاصة ببيئة وآثار هذه البيئة على المنظومات الفضائية . تشمل قياسات الحطام الفضائي جميع العمليات التي يتحصل بها على معلومات عن بيئة الجسيمات القريبة من الأرض ، باستخدام أجهزة استشعار أرضية وفضائية . وينبغي وصف تأثير هذه البيئة (مفعول جسيماتها وما يحدثه من أضرار) على المنظومات الفضائية ؛

١٩٩٧ : نمنجة بيئة الحطام الفضائي وتقييم المخاطر . نموذج الحطام الفضائي هو تمثيل رياضي لتوزع الحطام في الفضاء حاضرا ومستقبلا كدالة لحجم جسيماته وغير ذلك من البارامترات الفيزيائية . والجوانب المراد تناولها هي : تحليل لنماذج التشظي ؛ تطور عدد جسيمات الحطام الفضائي في المديين القصير والطويل ؛ مقارنة النماذج . وينبغي اجراء استعراض نقدي لمختلف طرائق تقييم مخاطر الاصطدام ؛

١٩٩٨ : تدابير تخفيف مخاطر الحطام الفضائي . يشتمل تخفيف آثار الحطام الفضائي على الحد من تزايد جسيماته والحماية من أثرها . وتشمل تدابير الحد من تزايد الحطام الفضائي طرائق لمنع تكوّن الحطام وازالة الحطام الموجود . أما الحماية من الحطام الفضائي فيشمل الحماية المادية بالتدريع والحماية بتفادي الاصطدام .

٣ - وقضت الخطة بأن تستعرض كل دورة الممارسات الراهنة لتخفيف الحطام التشغيلي ، وبأن تنظر في طرائق تخفيف مستقبلية تراعى فيها نجاعة التكاليف . واتفقت اللجنة الفرعية على توخي المرونة في تنفيذ خطة العمل وعلى أنه بالرغم من اختيار موضوع معين للدورة القادمة ينبغي أن تتاح للوفود الراغبة في مخاطبة اللجنة الفرعية بشأن جوانب أخرى من البحوث العلمية المتعلقة بالحطام الفضائي فرصة لفعل ذلك (A/AC.105/605 ، الفقرتان ٨٣ و ٨٤) .

٤ - ولاحظت اللجنة الفرعية أن بعض البلدان قد أجرى بالفعل قدرا معينا من البحوث بشأن الحطام الفضائي ، مما أتاح فهما أفضل لمصادر الحطام ولمناطق المدار القريب من الأرض التي تبلغ فيها كثافة الحطام الفضائي درجات عالية ، ولاحتمالات الاصطدام وآثاره ، ولضرورة تقليل تكوّن الحطام الفضائي الى أدنى حد ممكن (A/AC.105/605 ، الفقرة ٨٨) . واتفقت اللجنة الفرعية على أنه ينبغي للدول الأعضاء أن تولي مزيدا من الاهتمام لمشكلة اصطدام الحطام الفضائي

بالأجسام الفضائية ، بما فيها الأجسام التي تحمل على متنها مصادر قدرة نووية ، ولسائر جوانب ذلك الحطام . واتفقت أيضا على ضرورة استمرار البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ، وعلى أنه ينبغي للدول الأعضاء أن تتيح نتائج تلك البحوث لجميع الأطراف المهتمة بذلك (A/AC.105/605 ، الفقرة ٨٥) .[١]

٥ - وشجعت اللجنة الفرعية الدول الأعضاء والمنظمات الدولية ذات الصلة على توفير معلومات عن الممارسات التي اعتمدتها وثبتت فاعليتها في تقليل تكوّن الحطام الفضائي (A/AC.105/605 ، الفقرة ٨٨) ، وقامت الأمانة بتصنيف تلك المعلومات وأتاحتها في وثائق صادرة عن الأمم المتحدة . وترد في مرفق هذا التقرير قائمة بالوثائق ذات الصلة بموضوع "الحطام الفضائي" .

٦ - ومن أجل التوصل الى فهم مشترك لمصطلح "الحطام الفضائي" ، اقترحت اللجنة الفرعية في دورتها الثانية والثلاثين تعريفا لذلك المصطلح عدلته في دورات لاحقة ليصبح كما يلي : "الحطام الفضائي هو جميع الأجسام الناشئة عن النشاط البشري ، بما في ذلك شظاياها وأجزاؤها ، سواء تيسر التعرف على أصحابها أم لا ، التي توجد في مدار حول الأرض أو تعاود الدخول الى طبقات الغلاف الجوي الكثيفة ، والتي هي عاطلة عن العمل دون أمل معقول في تمكنها من أداء أو استئناف مهامها المستهدفة أو أي مهام أخرى موكلة أو يمكن أن توكل اليها" (A/AC.105/672 ، الفقرة ١١٢) . بيد أنه لم يتسن حتى الآن التوصل الى توافق في الآراء على هذا التعريف .

٧ - وفي دورتها الثالثة والثلاثين ، شرعت اللجنة الفرعية في وضع تقريرها التقني عن الحطام الفضائي ، من أجل ارساء فهم مشترك يمكن أن يصلح أساسا لمداولات أخرى في اللجنة حول هذا الموضوع الهام . وقد أعد هيكل التقرير التقني وفقا للمواضيع المحددة التي تناولتها خطة العمل أثناء الفترة ١٩٩٦-١٩٩٨ ، كما جرى استكماله وتحديثه كل سنة . وتولى صياغة النص أثناء دورات اللجنة الفرعية فريق غير رسمي من الخبراء الذين وفرت خدماتهم الدول الأعضاء . ولدى صياغة التقرير التقني ، جرى تقييم ورقات عمل أعدت لدورات اللجنة الفرعية وعروض علمية وتقنية مقدمة من خبراء بارزين في ميدان الحطام الفضائي .

٨ - وقدمت الهيئات التالية مساهمات بالغة القيمة في جميع أجزاء التقرير التقني ، وخصوصا الرسوم البيانية والبيانات الرقمية : لجنة التنسيق المشتركة بين الوكالات والمعنية بالحطام الفضائي (يادك) ، التي أسست رسميا في عام ١٩٩٣ من أجل تمكين وكالات الفضاء من تبادل المعلومات عن الأنشطة البحثية المتعلقة بالحطام الفضائي ، واستعراض سير الأنشطة التعاونية الجارية ، وتسهيل فرص التعاون في بحوث الحطام الفضائي ، واستبانة الخيارات المتاحة لتخفيف مخاطر الحطام . والأعضاء المؤسسون للجنة "يادك" هم وكالة الفضاء الأوروبية (الايسا) واليابان والادارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا) بالولايات المتحدة الأمريكية ووكالة الفضاء الروسية . وانضمت الصين في عام ١٩٩٥ ؛ ثم تبعها المركز الوطني البريطاني لشؤون الفضاء والمركز الوطني للدراسات الفضائية بفرنسا والمؤسسة الهندية لبحوث الفضاء في عام ١٩٩٦ ، والمؤسسة الألمانية لبحوث الفضاء الجوي في عام ١٩٩٧ . وفي الآونة الأخيرة ، قدمت وكالة الفضاء الايطالية طلبا للانضمام الى عضوية اللجنة .

٩ - وفي دورتها الخامسة والثلاثين ، اتفقت اللجنة الفرعية على أن تعتمد تقريرها التقني المتعلق بالحطام الفضائي في دورتها السادسة والثلاثين ، التي ستعقد عام ١٩٩٩ ، بعد اجراء تنقيح نهائي له أثناء فترة ما بين الدورات ودراسته من جانب المنظمات المعنية (مثل "يادك" والأكاديمية الدولية للملاحة الفضائية) .

١ - قياسات الحطام الفضائي

١-١- القياسات الأرضية

١٠ - يندرج استشعار الحطام الفضائي عن بعد بواسطة القياسات الأرضية بوجه عام في فئتين ، هما القياسات الرادارية والقياسات البصرية . وتستخدم القياسات الرادارية نمطيا لقياس الحطام الفضائي الموجود في المدارات الأرضية المنخفضة ، أما القياسات البصرية فتستعمل للمدارات الأرضية العالية . وفي القياسات البصرية المنفعلة ، تكون شدة الاشارات المرتدة

عكسية التناسب مع مربع مسافة الجسم أو ارتفاعه ، لأن الاضاءة الساقطة من الشمس مستقلة أساسا عن الارتفاع . أما في القياسات الرادارية ، فتكون شدة الاشارات المرتدة عكسية التناسب مع الأس الرابع للمسافة ، لأنه يجب على الرادارات أن توفر اضاءتها الذاتية . ومن ثم فان بامكان مقراب بصري متواضع الحجم أن يفوق في الأداء معظم الرادارات المخصصة لكشف الحطام في الارتفاعات العالية . وقد أجريت بعض القياسات البصرية للحطام الصغير في المدارات الأرضية المنخفضة ، لكن أداء الرادارات يفوق بوجه عام أداء المقاريب فيما يتعلق بالقياسات في المدارات الأرضية المنخفضة .

١-١-١- القياسات الرادارية

١١ - الرادارت الأرضية مناسبة الى حد بعيد لرصد الأجسام الفضائية ، بسب قدرتها على أداء عملها ليلا/ نهارا وفي جميع أحوال الطقس . غير أن مدى قدرة الرادار وطول الموجة التشغيلي يمثلان عاملين مقيدين لكشف الأجسام الصغيرة على مسافات بعيدة .

١٢ - ويستخدم في قياس الأجسام الفضائية أساسا نوعان من الرادارات ، هما :

(أ) الرادارات التي يمكن التحكم في اتجاه حزمتها الاشعاعية ميكانيكيا باستخدام هوائيات عاكسة مكافئية . ولا يمكن أن يرصد ويقاس بها سوى الأجسام الموجودة في مجال الرؤية الفعلي ، الذي يتيحه التوجيه الميكانيكي للهوائي العاكس المكافئي ؛

(ب) الرادارات التي يمكن التحكم في اتجاه حزمتها الاشعاعية الكترونيا باستخدام هوائيات صفيفية ممرحلة . ويمكن أن تكشف وتقاس بها في آن واحد أجسام عديدة في اتجاهات متباينة .

١٣ - ويستخدم النوع الأول من الرادارات أساسا في تتبع و/أو تصوير السواتل ، أما النوع الثاني فيستخدم أساسا لمهمتي تتبع الأجسام والبحث عنها .

١٤ - وتستخدم الوضعيات الرادارية التالية في رصد الحطام الفضائي : وضعية التتبع ؛ ووضعية تثبيت اتجاه الحزمة الاشعاعية ؛ والوضعية المختلطة (وهي تسمى أحيانا وضعية التحديق والمطاردة) .

١٥ - ففي وضعية التتبع ، يتتبع الرادار الجسم الفضائي لمدة بضع دقائق ، ويحصل على بيانات عن الاتجاه الزاوي للأصداء الرادارية ومداها وسرعة تغير مداها وسعتها وطورها . ومن تقييم الاتجاه ، والسرعة (السرعة الزاوية وسرعة تغير المدى) كدالة للزمن ، يمكن استخلاص العناصر المدارية .

١٦ - وفي وضعية تثبيت اتجاه الحزمة الاشعاعية ، يبقى الهوائي ثابتا في اتجاه معين وتستقبل الأصداء القادمة من الأجسام التي تمر ضمن مجال رؤيته . ويحصل بذلك على معلومات احصائية عن عدد الأجسام المكتشفة وحجمها ، ولكن يحصل على بيانات أقل دقة عن مدار تلك الأجسام .

١٧ - وفي الوضعية المختلطة ، يبدأ الرادار بوضعية تثبيت اتجاه الحزمة الاشعاعية ثم يتحول الى وضعية التتبع عندما يمر جسم عبر الحزمة الاشعاعية ، وبذلك يحصل على بيانات مدارية أكثر دقة . وحالما تجمع البيانات ، يمكن أن يعود الرادار الى وضعية تثبيت اتجاه الحزمة الاشعاعية .

١٨ - وجرى استخدام الرادارات في شكلين : أحادي (هوائي واحد لجهازي الارسال والاستقبال) وازدواجي (هوائي للارسال وهوائي ثان للاستقبال) . وفي الوضعية الازدواجية ، يستخدم هوائي مستقبل اضافي منفصل عن هوائي الارسال . وهذا يتيح مزيدا من الحساسية ، اذ يمكّن من اكتشاف أجسام أصغر كما يكفل المرونة في تشبيك أنواع مختلفة من الهوائيات .

١٩ - ويمكن بواسطة القياسات الرادارية أساسا استخلاص الخصائص التالية للأجسام الفضائية (كل هذه البارامترات يشوبها قدر من التشكك) :

(أ) العناصر المدارية التي تبين حركة مركز كتلة الجسم حول الأرض ؛

(ب) الوضع الاتجاهي ، الذي يبين حركة الجسم حول مركز كتلته ؛

(ج) حجم الجسم وشكله ؛

(د) العمر المداري ؛

(هـ) معامل الانقذاف ، كما هو معرّف في الفقرة ٤٧ (ز) أدناه ، الذي يحدد سرعة اضمحلال نصف المحور المداري الأكبر ؛

(و) كتلة الجسم ؛

(ز) خواص مادته .

٢٠ - ويمكن ادراج البيانات القطعية في فهرس للأجسام الفضائية ، وكذلك المعلومات الاحصائية عن عدد الأجسام المكتشفة من حجم معين في منطقة معينة في وقت معين .

٢١ - ويشغّل كل من الاتحاد الروسي والولايات المتحدة (القيادة الفضائية للولايات المتحدة) شبكات من الرادارات (والمقاريب البصرية) لاكتشاف وتتبع وفهرسة الأجسام الفضائية السيارة . ويعود تاريخ هذه الفهارس الى وقت اطلاق الساتل الاصطناعي الأول عام ١٩٥٧ ، وهي تشمل الحطام الفضائي الصغير الذي يتراوح قطره ما بين ١٠ و ٣٠ سم .

٢٢ - وقد أجرى كل من الولايات المتحدة ، باستخدام رادارات هيستاك وهيستاك المساعد (HAX) وغولدستون ، والاتحاد الروسي ، باستخدام بعض الرادارات الروسية ، وألمانيا ، باستخدام رادار المؤسسة البحثية للعلوم التطبيقية في فاختبرغ - فيرتهوفن (FGAN) ومقراب "ايفيلسبرغ" الراديوي ، قياسات رادارية لاحصائيات أعداد الحطام المداري الذي يقل مقاسه عن ٣٠ سنتيمترا (الحد الأدنى الاسمي لفهرسي الاتحاد الروسي والولايات المتحدة) . ووفرت رادارات هيستاك و HAX وغولدستون صورة احصائية لبيئة الحطام الفضائي حتى مقاسات تصل الى ٥ر٠ سنتيمتر (وأحيانا ٢ر٠ من السنتيمتر) في المدار الأرضي المنخفض . ولم تتوصل قياسات رادار "فغان" تماما الى مثل هذه الأحجام الصغيرة ، ولكنها تتفق عموما مع النتائج التي خلصت اليها وكالة ناسا . والصورة التي ترسمها هذه القياسات هي أن أعداد الحطام الفضائي تزيد على أعداد الأجسام النيزكية الطبيعية بجميع أحجامها (باستثناء تلك التي يتراوح مقاسها بين ٣٠ و ٥٠٠ ميكرومتر) .

٢٣ - وقد رصد رادار الغلاف الجوي الأوسط والعلوي (رادار MU) بجامعة كيوتو اليابانية ، تغايرا لأجسام مجهولة لمدة ٢٠ ثانية في المقطع الراداري المستعرض (RCS) . وثمة نظام راداري ازدواجي بمعهد علوم الفضاء والملاحة الفضائية (ISAS) في اليابان يمكنه كشف أجسام لا يزيد مقاسها على سنتيمترين على ارتفاع ٥٠٠ كيلومتر .

٢٤ - ويرد في الجدول ١ بيان بالقدرات الرادارية الموجودة أو المخططة لرصد الحطام الذي يقل قطره عن ١٠ الى ٣٠ سم .

١-١-٢- القياسات البصرية

٢٥ - يمكن كشف الحطام بواسطة مقراب عندما يسقط ضوء الشمس على الجسم الحطامي بينما تكون خلفية السماء مظلمة . وبالنسبة للأجسام الموجودة في مدار أرضي منخفض ، تقتصر هذه المدة على ساعة أو ساعتين بعيد غروب الشمس أو قبيل شروقها . أما بالنسبة للأجسام الموجودة في مدار أرضي مرتفع ، مثل الأجسام الموجودة في مدار متزامن مع الأرض ، فيمكن في كثير من الأحيان مواصلة عمليات الرصد طوال الليل . وثمة معوق آخر للقياسات البصرية هو ضرورة أن تكون السماء صافية ومظلمة .

الجدول ١
المرافق الرادارية لرصد الحطام

البلد	المؤسسة	المرفق	النوع	وضعية التشغيل الأولية	الشكل	مجال الرؤية	طول الموجة (بالأمتار)	الحساسية (القطر) (بالأمتار)	الحالة
ألمانيا	FGAN	TIRA	طبق	مختلط	أحادي	٥ر٠	٢٣ر٠	٠٢ر٠ على مسافة ١٠٠٠ كم	عامل
ألمانيا	MPIfR	ايفيلسبرغ	طبق	تحديق	ازدواجي مع TIRA	١٦ر٠	٢٣ر٠	٠٠٩ر٠ على مسافة ١٠٠٠ كم	قيد التجريب
اليابان	جامعة كيوتو	رادار MU	صفيفة ممرحلة	تحديق	أحادي	٣ر٧	٦ر٤	٢ر٠ على مسافة ٥٠٠ كم	عامل
اليابان	ISAS	اوتسينورا	طبق	مختلط	ازدواجي	٤ر٠		٠٢ر٠ على مسافة ٥٠٠ كم	قيد التجريب
اليابان	ISAS	أوسودا	طبق	مختلط	ازدواجي	١٣ر٠	١٣ر٠	٠٢ر٠ على مسافة ٥٠٠ كم	قيد التجريب
أوكرانيا/الاتحاد الروسي		ايفباتوريا	طبق	تحديق	ازدواجي	٠٥ر٠	٠٦ر٠	٠٠٣ر٠ على مسافة ١٠٠٠ كم	قيد التطوير
الولايات المتحدة	NASA/NSF	أريسيبو	طبق	تحديق	ازدواجي	٠٣ر٠	١٣ر٠	٠٠٤ر٠ على مسافة ٥٧٥ كم	تجريب لمرة واحدة
الولايات المتحدة	NASA/DoD	هيستاك	طبق	تحديق	أحادي	٠٥ر٠	٠٣ر٠	٠٠٦ر٠ على مسافة ١٠٠٠ كم	عامل
الولايات المتحدة	NASA/DoD	HAX	طبق	تحديق	أحادي	١ر٠	٠٢ر٠	٠٥ر٠ على مسافة ١٠٠٠ كم	عامل
الولايات المتحدة	NASA	غولدستون	طبق	تحديق	مزدوج	٠٢ر٠	٠٣٥ر٠	٠٠٢ر٠ على مسافة ٥٠٠ كم	عامل
الولايات المتحدة	DoD	TRADEX	طبق	مختلط	أحادي	٦١ر٠/٣٠ر٠	٢٣ر٠/١٠ر٠	٠٣ر٠ على مسافة ٥٠٠ كم	عامل

٢٦ - وتستخدم القيادة الفضائية للولايات المتحدة مقرابا ذا فتحة قدرها متر واحد ، مزودا بمكاشيف ذات صمامات مصورة مقوّاة ، لتتبع الأجسام الموجودة في مدار أرضي مرتفع . وتستخدم هذه القياسات لاستكمال الجزء الخاص بالمدارات الأرضية المرتفعة من فهرس القيادة الفضائية . وتقتصر قدرة هذه المقاريب على كشف الأجسام التي يبلغ مقاسها مترا واحدا على ارتفاعات المدارات المتزامنة مع الأرض ، والتي تناظر سطوعا نجميا حديا قدره ١٦ . ويعتزم تزويد هذه المقاريب بمكاشيف من نوع الأجهزة المتقارنة الشحنات ، مما سيحسن أداءها . ولدى وكالة الفضاء الروسية مقراب مماثل القدرة يستخدم لتحديث فهرسها الخاص بأجسام المدارات الأرضية المرتفعة .

٢٧ - وعلى وجه العموم ، يعنى فهرس القيادة الفضائية للولايات المتحدة وفهرس الاتحاد الروسي الخاص بالمدار الثابت بالنسبة للأرض بأجسام المركبات الفضائية والصواريخ السالمة . غير أن هناك ما يدعو الى الاعتقاد بأن أجساما حطامية مدارية صغيرة ، ناتجة عن انفجارات ، توجد أيضا في منطقة المدار الثابت بالنسبة للأرض . فقد رصد في عام ١٩٧٨ انفجار ساتل روسي من طراز "ايكران" في المدار الثابت بالنسبة للأرض . وشوهد عدد كبير من الأجسام غير المفهرسة في مدارات إهليلجية مرتفعة ، بميل قدره ٧ درجات ، ربما نشأت عن تكسر مرحلة صاروخية من طراز "آريان" استخدمت في نقل ساتل من مدار انتقالي الى المدار الثابت بالنسبة للأرض . وبمحض الصدفة ، رصد مقراب القيادة الفضائية للولايات المتحدة ، الكائن في ماوي بجزر هاواي، تكسر المرحلة الانتقالية من صاروخ "تيتان" (1968-081 E) في شباط/فبراير ١٩٩٢ . وثمة مراحل صاروخية أخرى قريبة من المدار الثابت بالنسبة

للأرض قد تكون قابلة للانفجار . ويبدو أن بعض هذه المراحل الصاروخية مفقود ، وربما تكون قد انفجرت .

٢٨ - ويلزم وجود توليفة استثنائية من الحساسية ومجال الرؤية لمسح منطقة المدار الثابت بالنسبة للأرض بهدف كشف أي أجسام حطامية مدارية صغيرة يشتبه في وجودها هناك . ويلزم توفر سطوع نجمي حدي قدره ١٧ أو أكثر لكشف الحطام الذي يقل مقاسه عن متر واحد ويوجد على ارتفاع قريب من المدار المتزامن مع الأرض ، كما يلزم توفر مجال رؤية واسع قدر الامكان ليتسنى اجراء مسح سريع لمناطق كبيرة . ومعظم المقاريب الفلكية ذات الحساسية الكافية لها مجال رؤية صغير . وهذا مفيد لتحديد مواضع السواتل بدقة (متى عرف موقعها التقريبي) ، لكنه ليس مفيدا لمسح مناطق كبيرة من السماء .

٢٩ - وقد أجريت بضعة قياسات أولية لمسح المنطقة القريبة من المدار الثابت بالنسبة للأرض بحثا عن الأجسام الحطامية التي يقل مقاسها عن متر واحد . واستخدمت "ناسا" مقرابا صغيرا قادرا على كشف أجسام باهتة لا يزيد سطوعها النجمي على ١٧ر١ (ما يعادل جسما قطره ٦ر٠ مترا على ارتفاع المدار المتزامن مع الأرض) ، بمجال رؤية يناهز ٥ر١ درجة . وبينت النتائج أن هناك فعلا أعداد لا بأس بها من الحطام بالقرب من تلك الارتفاعات . وثمة ما يسوغ اجراء مسوح أخرى . وتقوم لجنة "يادك" في الوقت الحاضر بتنظيم حملة استكشافية للحطام المداري الموجود في المدار الثابت بالنسبة للأرض .

٣٠ - ويرد في الجدول ٢ ملخص للقدرات البصرية الموجودة والمخططة لرصد الحطام بالوسائل البصرية .

الجدول ٢
المرافق البصرية لرصد الحطام الفضائي

البلد	المؤسسة	فتحة المقراب (بالأمتار)	مجال الرؤية (بالدرجات)	نوع المكشاف	السطوع الحدي	الحالة
	الايسا	١ر٠	١ر٠	جهاز متقارن الشحنات (CCD)	١٩ر٠	قيد التطوير
فرنسا	المركز الوطني الفرنسي للبحوث العلمية	٩ر٠	٥ر٠	جهاز متقارن الشحنات (CCD)	١٩ر٠	قيد التطوير
اليابان	"سوندای" SUNDAI	٧٥ر٠	٠٤ر٠	جهاز متقارن الشحنات (CCD)	١٧ر٠	عامل
اليابان	مختبر بحوث الاتصالات (CRL)	٥ر١	٢٨ر٠	جهاز متقارن الشحنات (CCD)	١٨ر٧	عامل
الاتحاد الروسي	أكاديمية العلوم الروسية	١ر٠	٢ر٠	جهاز متقارن الشحنات (CCD)	١٩ر٠	عامل
	أكاديمية العلوم الروسية	٦ر٠	٢ر٠	جهاز متقارن الشحنات (CCD)	١٨ر٠	عامل
الاتحاد الروسي	وكالة الفضاء الروسية	٦ر٠	٢ر٠	تلفزة	١٩ر٠	عامل
سويسرا	جامعة بيرن	١ر٠	٥ر٠	جهاز متقارن الشحنات (CCD)	١٩ر٥	عامل
المملكة المتحدة لبريطانيا العظمى وايرلندا الشمالية	مرصد غرينتش الملكي/MOD	٤ر٠	٦ر٠	جهاز متقارن الشحنات (CCD)	١٨ر٠	مقرابان عاملان ، المملكة المتحدة وأقاليم ما وراء البحار
الولايات المتحدة	ناسا	٣ر٠	٥ر١	جهاز متقارن الشحنات (CCD)	١٧ر١	عامل
الولايات المتحدة	ناسا	٣ر٠	٣ر٠	جهاز متقارن الشحنات (CCD)	٢١ر٥	عامل

١-٢- القياسات الفضائية

١-٢-١- الأسطح المسترجعة ومكاشيف الارتطام

٣١ - يمكن الحصول على معلومات عن الجسيمات التي يقل مقاسها عن ملليمتر واحد بتحليل أسطح المركبات الفضائية العائدة الى الأرض بعد تعرضها للبيئة الفضائية . كما يمكن الحصول على معلومات مماثلة بواسطة مكاشيف للحطام والغبار مكرسة لهذا الغرض . ومعظم هذه المكاشيف يحتوي ، كعنصر رئيسي ، على سطح كاشف . وبعضها مصمم لاصطياد الجسيم المرتطم لكي يجري عليه مزيدا من التحليل . ولأسباب تتعلق بالتكلفة ، لا تسترد الأسطح لتحليلها لاحقا إلا من المدار الأرضي المنخفض .

٣٢ - وترد في الجدول ٣ أمثلة لمركبات فضائية وأسطح مسترجعة .

الجدول ٣
أمثلة لمركبات فضائية وأسطح مسترجعة

الاسم	المدار	مدة الوجود في المدار	طريقة التثبيت	المساحة المعرضة
سالوت ٤ وسالوت ٦	٣٥٠ كم ٥١ر٦ درجة	١٩٧٤ الى ١٩٧٩	طرائق مختلفة	~ ٧ م^2 من أجهزة الاستشعار والكاسيتات
STS-7 Window (NASA)	٢٩٥-٣٢٠ كم ٢٨ر٥ درجة	١٩٨٣/٦	طرائق مختلفة	~ ٢ ، ٥ م^2
Solar Maximum Satellite (NASA)	٥٠٠-٥٧٠ كم ٢٨ر٥ درجة	١٩٨٠/٢ الى ١٩٨٤/٤	صوب الشمس	٣ ، ٢ م^2
مرفق دراسة التعرض الطويل الأمد (LDEF) (الناسا)	٣٤٠-٤٧٠ كم ٢٨ر٥ درجة	١٩٨٤/٤ الى ١٩٩٠/١	الجانبية - الممال	١٥١ م^2
يوريكا (الإيسا)	٥٢٠ كم ٢٨ر٥ درجة	١٩٩٢/٧ الى ١٩٩٣/٦	صوب الشمس	٣٥ م^2 بالمركبة ، الفضائية + ٩٦ م^2 صفائف شمسية
صفيفة الخلايا الشمسية بمقراب هابل الفضائي (الناسا/الإيسا)	٦١٠ كم ٢٨ر٥ درجة	١٩٩٠/٥ الى ١٩٩٣/١٢	صوب الشمس	٦٢ م^2
مير/يورومير ٩٥ (وكالة الفضاء الروسية/الإيسا)	٣٩٠ كم ٥١ر٦ درجة	١٩٩٥/١٠ الى ١٩٩٦/٢	الجانبية - الممال	٢٠ × ٣٠ سنتيمترا (كاسيت)
مير	٣٩٠ كم ٥١ر٦ درجة	١٩٨٦ الى ١٩٩٨	طرائق مختلفة	~ ١٥ م^2 من الكاسيتات والعناصر الأخرى
الوحدة الفضائية الطائرة (SFU) (اليابان)	٤٨٠ كم ٢٨ر٥ درجة	١٩٩٥/٣ الى ١٩٩٦/١	صوب الشمس (باستثناء شهر واحد تثبت فيه بواسطة مقراب الأشعة تحت الحمراء)	٥٠ م^2
المكوك الفضائي المدوار (الناسا)	٣٠٠-٦٠٠ كم ٢٨ر٥-٥١ر٦ درجة	١٩٩٢ الى الوقت الحاضر	طرائق مختلفة	١٠٠ م^2

٣٣ - وبعد التعرض للبيئة الفضائية ، تصبح أسطح المركبات الفضائية مغطاة بعدد كبير من النقوب الناشئة عن الارتطامات بالنيازك وأجسام الحطام . ويتراوح مقاس بعض النقوب والثقوب الناشئة عن الارتطام من عدة ميكرومترات الى عدة ملليمترات . ومن المشاكل الأساسية كيفية التمييز بين ارتطامات النيازك وارتطامات الحطام الاصطناعي . والتحليل الكيميائي طريقة ثبت نجاحها لتحديد منشأ الارتطامات . غير أن هناك بعض الصعوبات التي تقترن بهذه الطريقة . فبسبب سرعة الارتطام الفائقة ، لا يبقى على حاله من المادة المرتطمة سوى القليل . فالجسيمات تتبخر ثم تتكثف مرة أخرى على الأسطح المجاورة . لذلك ، يتعذر في كثير من الحالات تحديد منشأ الجسيم المرتطم تحديدا قاطعا . ومن أجل تحديد الصلة بين حجم أثر الارتطام وحجم الجسيم ، أجريت على مختلف المواد اختبارات معايرة أرضية (اختبارات ارتطام فائق السرعة) .

٣٤ - ومن احصائيات الارتطام وتجارب المعايرة ، يمكن تحديد تدفق النيازك والحطام كدالة لحجم الجسيم . وثمة مسألة هامة ينبغي النظر فيها وهي مسألة الارتطامات الثانوية . واذا لم تعالج هذه الارتطامات معالجة سليمة فستقدر قيم التدفق بأكثر من القيم الحقيقية .

٣٥ - وقد اكتسى سطح "مرفق دراسة التعرض الطويل الأمد" (LDEF) بأكثر من ٠٠٠ ٣٠ نقب يرى بالعين المجردة ، منها ٠٠٠ ٥ نقب يزيد قطر كل منها على ٠ر٥ ملليمتر . وكان قطر أكبر نقب ٥ ملليمترات ، ويرجح أن يكون سببه جسيم مقاسه ملليمتر واحد . وأظهر المرفق أن بعض الارتطامات كانت متجمعة زمنيا ، كما أشار الى وجود جسيمات يقل مقاسها عن ملليمتر واحد تدور في مدارات إهليلجية .

٣٦ - وكان قطر أكبر نقب ارتطامي على سطح الناقل الأوروبي القابل للاسترجاع (يوريكا) ٦ر٤ مم . ومن بين الأسطح المسترجعة ، كانت صفيفة الخلايا الشمسية المسترجعة من مرقاب هابل الفضائي هي الصفيفة ذات الارتفاع المداري الأعلى . ومن الاستنتاجات المثيرة للاهتمام أن تدفق الارتطامات على مقراب هابل الفضائي كان أعلى (بمقدار ٢ - ٨ مرات) منه في حالة "يوريكا" ، فيما يتعلق بالنقوب التي يزيد مقاسها على ٢٠٠ - ٣٠٠ ميكرون .

٣٧ - وقد استرجع المكوك الفضائي في كانون الثاني/يناير ١٩٩٦ "الوحدة الفضائية الطائرة" (SFU) ، التي كانت قد أطلقت بصاروخ من طراز H-II في آذار/مارس ١٩٩٥ . ويجري تحليل جسم الوحدة بعد ذلك التحليق .

٣٨ - وتثبت الحالات التي نوقشت أعلاه ما لبيئة الجسيمات من تأثير على المركبات الفضائية في المدار . ولم يلاحظ في جميع الحالات أي تدهور وظيفي لدى المركبات الفضائية . وتفتقر المعلومات المتاحة عن الأجسام التي يقل حجمها عن ملليمتر واحد على ارتفاعات دون ٦٠٠ كيلومتر . وبصفة خاصة ، لا تتوفر معلومات عن المناطق ذات الكثافة القصوى من الحطام الفضائي في المدار الأرضي المنخفض (على ارتفاع يناهز ٨٠٠ - ٠٠٠ ١ كيلومتر) وكذلك في المدار الثابت بالنسبة للأرض . وفي عام ١٩٩٦ ، وضع على متن المركبة الفضائية الروسية "اكسبرس - ٢" (Express-2) في المدار الثابت بالنسبة للأرض مكشاف للحطام والغبار تابع للإيسا . وفي عام ١٩٩٩ ، سوف يضع المركز الوطني الفرنسي للدراسات الفضائية على متن المحطة الفضائية "مير" مكاشيف فاعلة ومنفعلة . ويعتزم هذا المركز استخدام المكاشيف ذاتها على متن الساتل الفرنسي "ستينتور" (STENTOR) في المدار الثابت بالنسبة للأرض (عام ١٩٩٩) وعلى متن ساتل اسرائيلي في مدار متزامن مع الشمس (عام ١٩٩٩) .

٣٩ - وتجرى بانتظام منذ عام ١٩٧١ قياسات للنيازك والجسيمات الحطامية التي يقل مقاسها عن ملليمتر واحد ، وعلى متن المحطات الفضائية الروسية "سالوت ١ و ٢ و ٣ و ٤ و ٦ و ٧" و "مير" . وقد أجريت تلك القياسات بواسطة أجهزة استشعار وسعوية ذات مساحة معرضة اجمالية تناهز ٣ م^{٢} ، وكذلك بواسطة كاسيتات مسترجعة وقابلة للتغيير تبلغ المساحة المعرضة لكل منها ١ر٠ م^{٢} . وخلال رحلة المكوك الفضائي في كانون الثاني/يناير ١٩٩٨ ، أعيدت الى الأرض من المحطة الفضائية "مير" ، لغرض اجراء مزيد من التحريات ، ثمانية قواطع من الألواح الشمسية تبلغ

مساحتها الاجمالية قرابة ١٠ م^{٢} ومدة تعرّضها قرابة ١٠ سنوات .

١-٢-٢- قياسات الحطام من الفضاء

٤٠ - تتسم عمليات القياس من الفضاء عموما بأنها ذات استبانة أعلى ، وبسبب قصر المسافة بين الراصد والجسم . وعلاوة على ذلك ، ينعدم تأثير الغلاف الجوي المشوش (باخماده الاشارات الكهرومغنطيسية وامتصاصها) . وتكاليف الأنظمة العاملة في الفضاء أعلى عموما من تكاليف الأنظمة العاملة على الأرض ، مما يستلزم الموازنة الدقيقة بين التكلفة والأداء .

٤١ - وكان ساتل الدراسات الفلكية بالأشعة دون الحمراء (ايراس) ، الذي أطلق في عام ١٩٨٣ بغرض اجراء مسح للسماء في أطوال موجية تتراوح بين ٨ و ١٢٠ ميكرومترا ، يعمل على مدى عشرة أشهر في مدار متزامن مع الشمس على ارتفاع يناهز ٩٠٠ كيلومتر . وكان الساتل مصوبا في اتجاه معاكس لاتجاه الأرض ويمسح الكرة السماوية . وقد قامت بتحليل المجموعة الكاملة للبيانات غير المجهزة التي أرسلها لساتل "ايراس" مؤسسة البحوث الفضائية الهولندية (SRON) بمدينة غرونينغن ، بغرض تحديد خواص انبعاثات الأشعة دون الحمراء من الأجسام الحطامية واستخراج مجموعة شاملة من المشاهدات الحطامية . وتستند الطريقة المتبعة في تحديد بصمات الحطام الفضائي الى التعرف على مسارها على المستوى البؤري لساتل "ايراس" . وجرى تخزين المشاهدات الحطامية المحتملة ، البالغ عددها ٠٠٠ ٢٠٠ مشاهدة ، في قاعدة بيانات . وتعزى قرابة ٠٠٠ ١٠ مشاهدة الى أجسام حقيقية . وانطلاقا من المشاهدات الحطامية ، يتعذر حساب العناصر المدارية لجسم حطامي بطريقة وحيدة .

٤٢ - وفي عام ١٩٩٦ ، أطلقت الولايات المتحدة المركبة الفضائية MSX الى مدار على ارتفاع ٩٠٠ كم . ويجري استخدام أجهزة استشعارها العاملة بالأشعة المرئية والأشعة دون الحمراء لرصد الحطام الصغير القريب .

٤٣ - وفي أيلول/سبتمبر ١٩٩٦ ، وضع في المدار الثابت بالنسبة للأرض مكشاف التأين الناتج عن الارتطام ، المسمى "مكشاف الارتطام في المدار الثابت بالنسبة للأرض" (غوريد) ، على متن ساتل الاتصالات اللاسلكية الروسي "اكسبرس - ١٢" . ويوجد الساتل الآن على خط الطول ٨٠ درجة شرقا ، وهو يقيس أعداد النيازك والأجسام الحطامية التي يقل مقاسها عن ملليمتر واحد .

٤٤ - ولقياس أعداد الجسيمات الصلبة الصغيرة في مختلف المدارات وبانتظام أكثر ، يجري استحداث مكشاف موقعي نمونجي بسيط ، اسمه "ديبي" (DEBIE) . ويعتزم أن تكون الرحلة الأولى لمكشاف "ديبي" على متن ساتل "بروبا" (PROBA) التكنولوجي الصغير التابع للايسا في مدار قطبي .

١-٣- ملخص القياسات

٤٥ - يمثل الشكل ١ تجميعا لنتائج نظم القياس العديدة المذكورة في الأبواب السابقة . وهو يبين التدفق المقطعي المستعرض (عدد الأجسام في المتر المربع سنويا) لأجسام لا تقل عن حجم معين . ويلخص الشكل القياسات التي أجريت في المدار الأرضي المنخفض على ارتفاع يناهز ٥٠٠ كم .

١-٤- الفهرسة وقواعد البيانات

٤٦ - الفهرس هو سجل لخصائص الأجسام المدارية ، مستمد من القياسات أو من السجلات . (وفي هذا التقرير ، يشمل مصطلح "الفهرس" مجموعة العناصر المدارية .) وأغراض الفهرس هي : تبيان العناصر المدارية الحالية التي يمكن استخدامها للتنبؤ بالحركة المدارية ، وتبيان الترابط مع عمليات رصد الأجسام السيارة ؛ وتوفير سجل تاريخي للنشاط المداري لأغراض رصد البيئة ؛ وأن يكون بمثابة مدخل لنمذجة سلوك الأجسام السيارة ؛ وتوفير أساس للتكهن بأنشطة الاطلاق والتشغيل المقبلة .

٤٧ - ويمكن تسجيل الخصائص التالية للأجسام السيارة :

(أ) متجهات الحالة المحدثة بانتظام : وهي الخصائص المدارية للجسم ، المستمدة في لحظة معينة والمستخدمة لغرض الانتشار المداري ؛

(ب) الكتلة : كتلة الاطلاق وكتلة بداية الحياة والكتلة الجافة (كتلة نهاية الحياة) ؛

(ج) المقطع المستعرض الراداري : وهو البصمة الراجعة للجسم السيار التي يمكن بواسطتها تحديد شكله وتوجهه وحجمه ؛ (يتوقف المقطع المستعرض الراداري على الطول الموجي للرادار . لذلك يجب أيضا تسجيل الطول الموجي المستخدم في القياس) ؛

(د) النصوع : وهو مقياس انعكاسية الجسم التي تميز قابلية الجسم للرؤية ؛

(هـ) الأبعاد ؛

(و) التوجهات ؛

(ز) معامل الانقذاف : وهو مقياس خصائص الجسم المتعلقة بديناميته الهوائية ونسبة مساحته الى كتلته ، التي سوف تؤثر على العمر المداري للجسم حتى دخوله الغلاف الجوي العلوي ؛

(ح) التركيبة المادية : مع أن هذه الخاصية ليست ذات أهمية في الوقت الراهن ، فان التمثيل الفعال لانطراح الأجسام الحطامية الصغرية يستلزم تحديد خصائص السطح ؛

(ط) خصائص الاطلاق : وهي تشمل أداة الاطلاق وموعده وموقعه .

٤٨ - وهناك فهرسان للأجسام الفضائية كثيرا ما يجري تحديثهما بواسطة عمليات الرصد ، هما : فهرس القيادة الفضائية للولايات المتحدة ، وفهرس الاتحاد الروسي للأجسام الفضائية . وتحفظ البيانات أيضا في قاعدة البيانات ونظام المعلومات المتعلقان بخصائص الأجسام الموجودة في الفضاء (ديسكوس) التابعان للإيسا والمستندان الى ذينك الفهرسين . ويبين الشكل الثاني تزايد عدد الأجسام في فهرس الولايات المتحدة مع مرور الزمن (مع الاقتصار على الأجسام التي يزيد مقاسها على ١٠ - ٣٠ سم) .

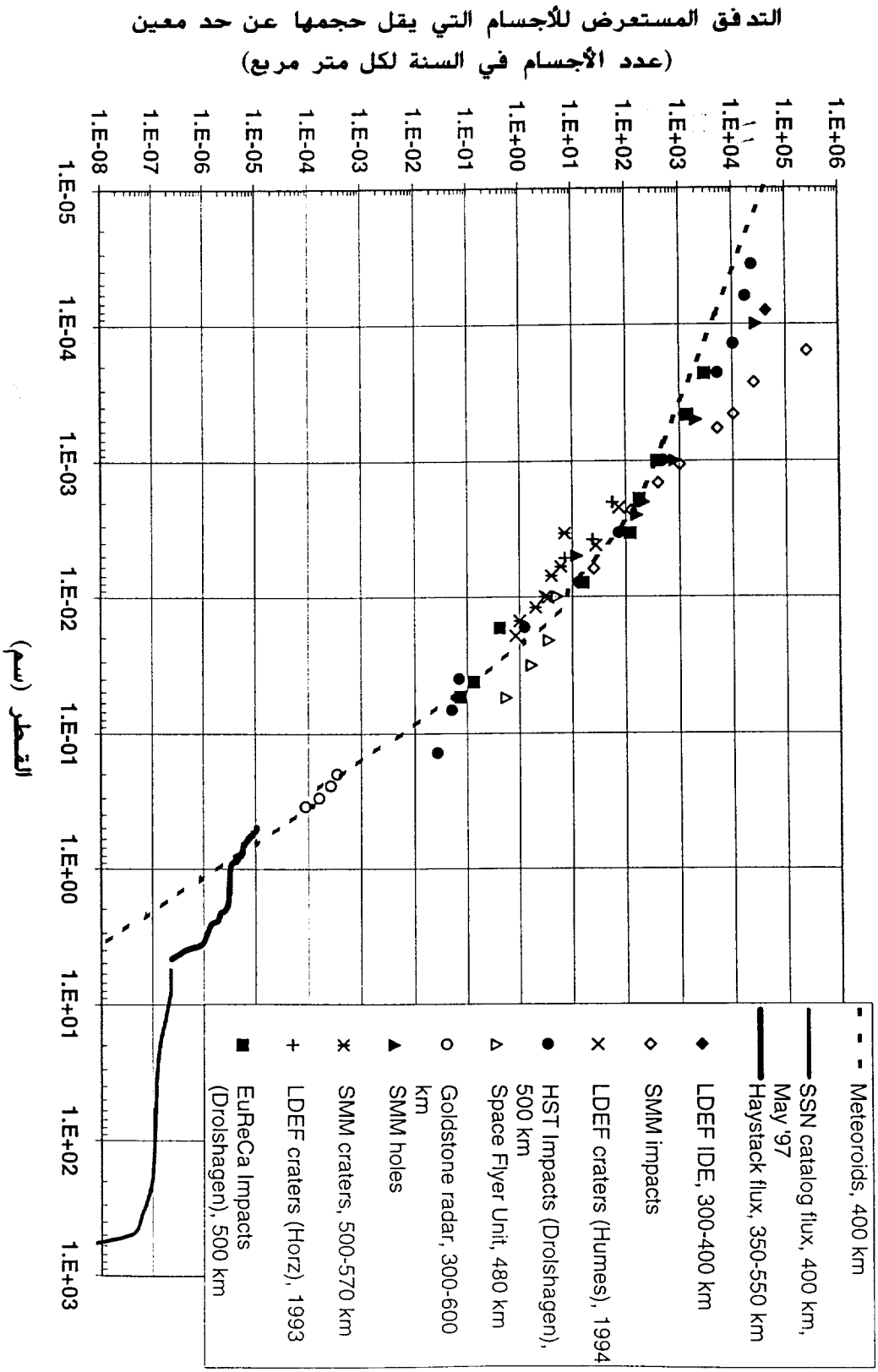
٤٩ - وتدرس الوكالة الوطنية للتنمية الفضائية (ناسدا) باليابان امكانية استحداث قاعدة بيانات خاصة بالحطام يمكن أن توفر بيانات لقاعدة بيانات الحطام الدولية المشتركة التي تجري مناقشتها في لجنة "يادك" ؛ وتعكف "ناسدا" أيضا على دراسة تحليل للتنبؤ بمسار الأجسام العائدة وتحليل لتجنب اصطدام الحطام بالأجسام المطلقة الجديدة .

٥٠ - وتعتمد "ناسدا" في الوقت الراهن على بيانات العناصر المدارية المتوفرة لدى القيادة الفضائية للولايات المتحدة كمصدر لقاعدة بياناتها الخاصة بالحطام . وستضيف "ناسدا" الى تلك البيانات البيانات المدارية التي تحصل عليها مركبتها الفضائية من خلال عمليات الرصد التي يجريها المرصد الفلكي الوطني .

٥١ - ويمكن حفظ سجل فهرسي في عدد من الوسائط . والحفظ في شكل نسخ مطبوعة (ورقية) لا يناسب الطبيعة الدينامية للأجسام المدارية . أما الحفظ الالكتروني فمناسب لتسجيل تلك المعلومات ، وتعديل الخصائص وتحديثها ، ومعالجة البيانات لأغراض المقارنة واعداد المدخلات لوضع النماذج ، وتيسير وصول المستعملين اليها عن طريق الشبكات لأغراض الاستعلام والاسهام .

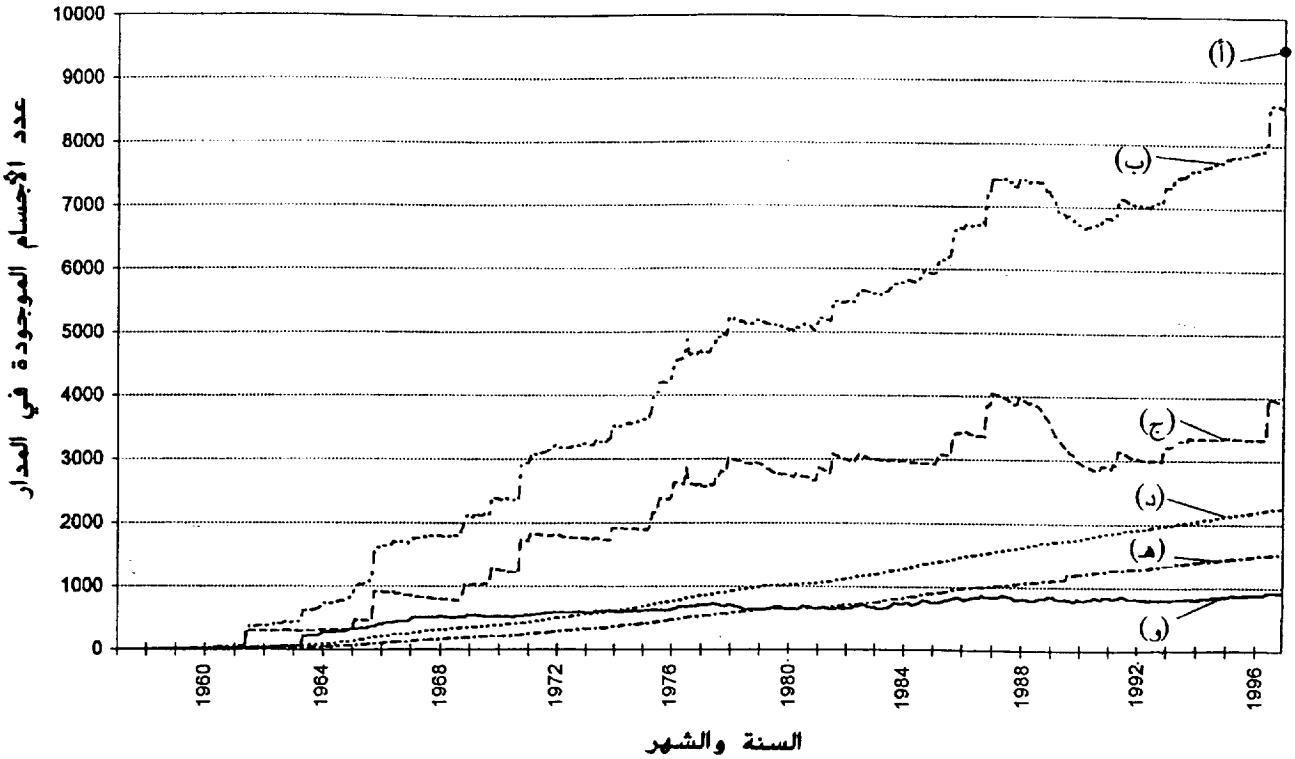
٥٢ - وتحتوي الفهارس الحالية على معلومات عن السواتل وعن الأجسام الحطامية التي لا يقل قطرها عن ١٠ - ٣٠ سم . وتهدف بعض الأنشطة المضطلع بها مؤخرا في الولايات المتحدة الى تحسين حساسية فهرس الولايات المتحدة بحيث يتسنى كشف الأجسام البالغ قطرها ٥ سم على ارتفاعات دون ٦٠٠ كم . وتناولت بعض الدراسات ادخال تحسينات تتيح كشف الأجسام التي يبلغ مقاسها سنتيمترا واحدا . غير أنه لا يرجح أن تدخل على الفهارس في المستقبل القريب تحسينات تتيح كشف الأجسام التي يقل مقاسها عن ٥ سم . لذلك ، لابد لواضعي النماذج من مواصلة استخدام القياسات

الشكل الأول
تدفقات الحطام المقيسة التقريبية في المدار الأرضي المنخفض ، حسب حجم الجسم



الشكل الثاني

عدد الأجسام في فهرس الولايات المتحدة ، حسب النوع ، ١٩٥٩-١٩٩٦



(أ)	العدد الاجمالي للأجسام ، بما فيها الأجسام غير الواردة في الفهرس
(ب)	العدد الاجمالي للأجسام ، استنادا الى الفهرس الرسمي
(ج)	الحطام الناشئ عن التشظي ؛ تحصى الشظايا منذ السنة التي حدث فيها التشظي ؛ أما الأجسام الأم فتحصى كأجسام سليمة حتى تاريخ حدوث التشظي ؛ واعتبارا من ذلك التاريخ تحصى الأجسام الأم باعتبارها شظايا
(د)	المركبات الفضائية
(هـ)	أجسام الصواريخ
(و)	الحطام التشغيلي ؛ ويحصى الحطام التشغيلي المتعلق بأي اطلاق منذ سنة الاطلاق ؛ ولا يحصى الحطام التشغيلي الناشئ عن سالوت-٤ وسالوت-٥ وسالوت-٦ وسالوت-٧ ومحطة مير منذ تاريخ اطلاق الجسم الأم بل منذ تاريخ أكثر واقعية

١-٥- تأثير بيئة الحطام الفضائي على تشغيل المنظومات الفضائية

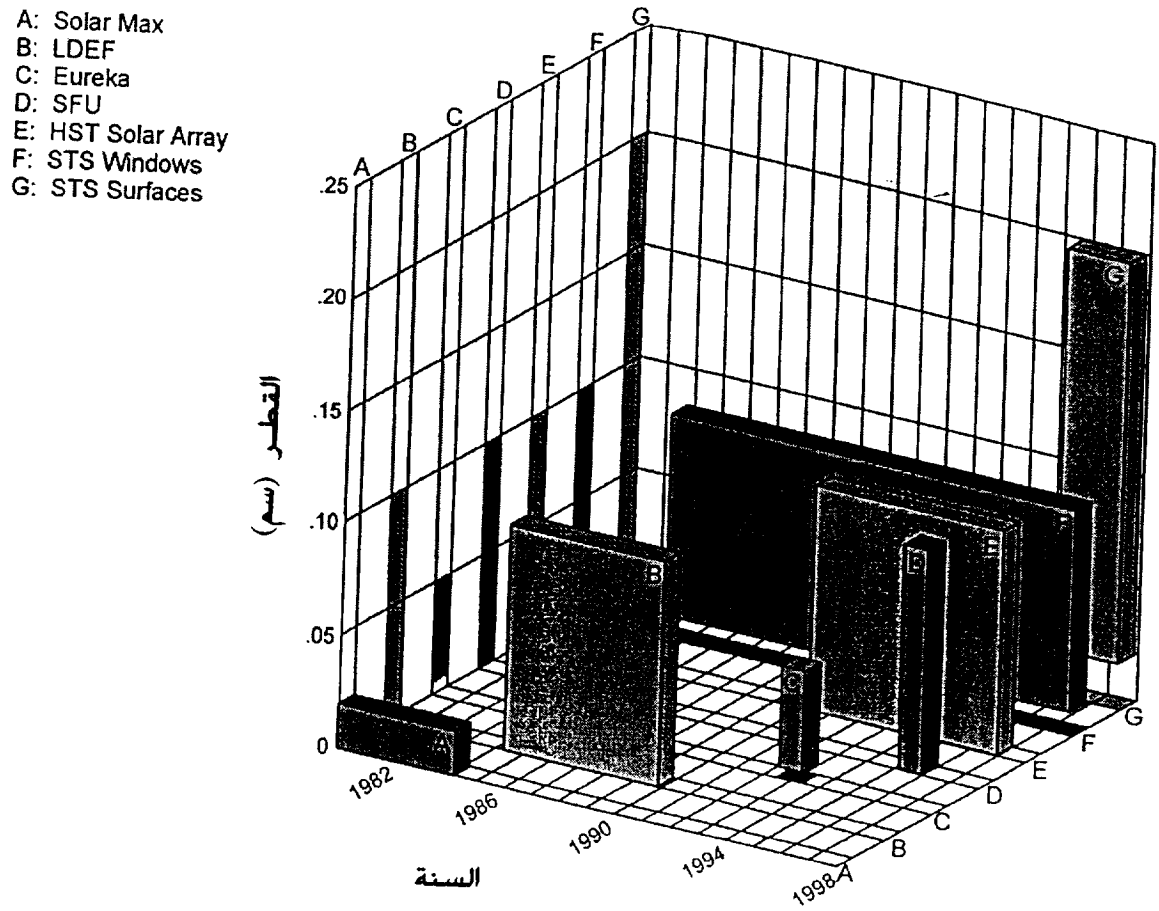
٥٣ - هناك أربعة عوامل تحدد الكيفية التي تؤثر بها بيئة الحطام الفضائي على عمليات المنظومات الفضائية ، وهي مدة المكوث في المدار ، والمساحة المعرضة ، والارتفاع المداري ، والميل المداري . والعوامل الأكثر تأثيرا هي مدة المكوث في المدار والمساحة المستهدفة والارتفاع المداري .

١-٥-١- تأثير الأجسام الحطامية الكبيرة على تشغيل المنظومات الفضائية

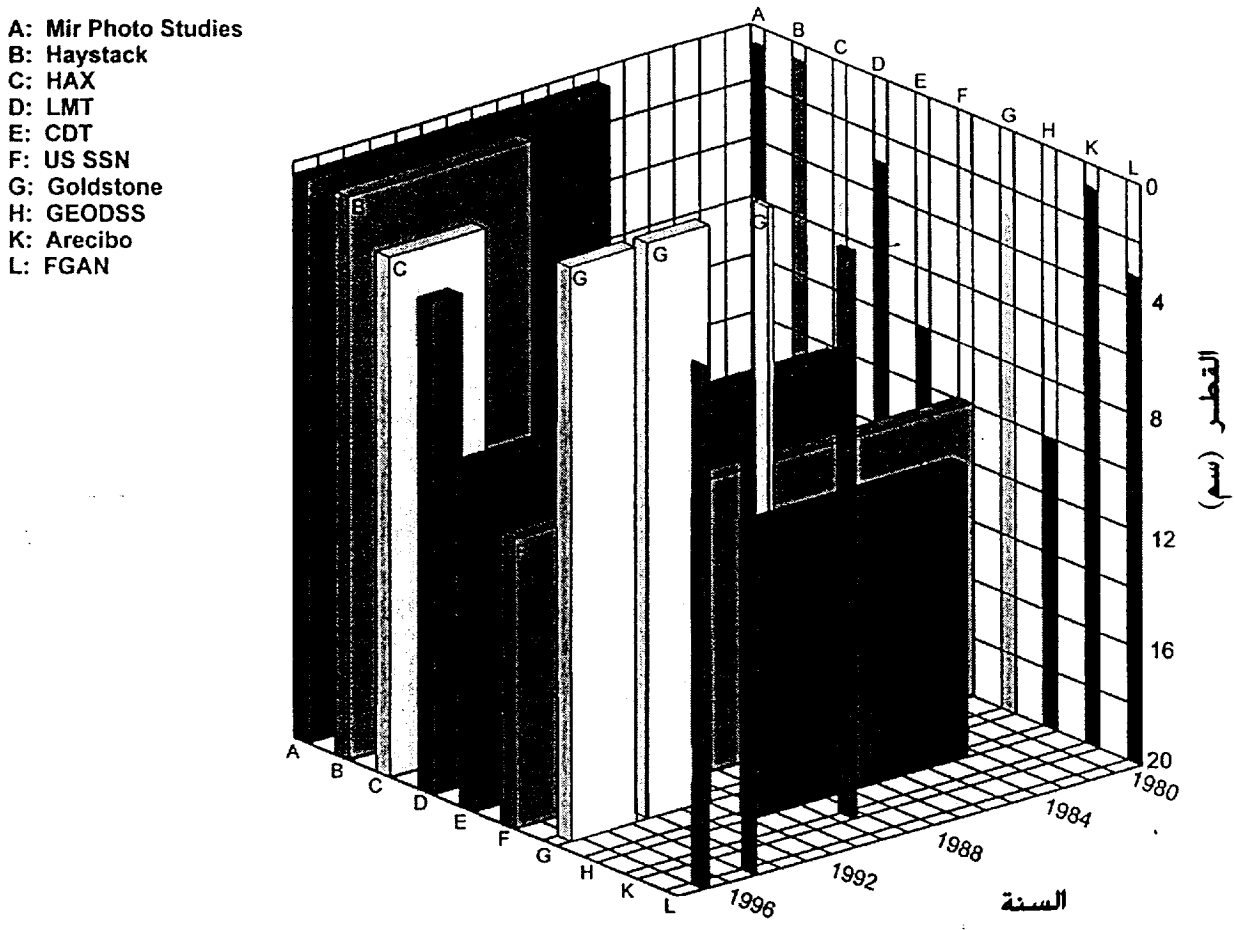
٥٤ - تعرَّف الأجسام الحطامية الكبيرة نمطيا بأنها أجسام يتجاوز مقاسها ١٠ سنتيمترات . وتتسم هذه الأجسام بقابليتها للتتبع وباحتفاظها بعناصرها المدارية . وقد قامت المركبات المدارية ابان البعثات المكوكية بمناورات لتفادي التصادم منعا لحدوث اصطدامات مفجعة بتلك الأجسام الحطامية الكبيرة . كما قام ساتلان غير مأهولين بمناورات لتفادي الاصطدام بالأجسام الحطامية الكبيرة ، وهما الساتل الأوروبي للاستشعار عن بعد (ERS-1) في حزيران/يونيه ١٩٩٧ وساتل رصد الأرض "سبوت - ٢" في تموز/يوليه ١٩٩٧ . وفي عام ١٩٩٦ ، حدث أول اصطدام طبيعي مسجل بين جسمين مفهرسين ، هما ساتل سيريز (Cerise) العامل وشظية ناشئة عن انفجار مرحلة صاروخية عليا من طراز أريان .

الشكل الثالث

مدى تغطية نطاقات أحجام الحطام ومدة التعرض : البيانات المستمدة من مصادر فضائية ، ١٩٨٠-١٩٩٨



الشكل الرابع
مدى تغطية نطاقات أحجام الحطام ومدة التعرض : البيانات المستمدة من مصادر أرضية ، ١٩٨٠-١٩٩٨



١-٥-٢- تأثير الأجسام الحطامية الصغيرة على تشغيل المنظومات الفضائية

٥٥ - ألحقت الأجسام الحطامية الصغيرة (التي يقل قطرها عن بضعة ملليمترات) حتى الآن أضرارا بمنظومات فضائية عاملة . ولم يكن لتلك الارتطامات أي تأثير معروف على نجاح الرحلة . ويمكن تقسيم تلك الأضرار الى فئتين ، أولاهما فئة الأضرار التي تلحق بالأسطح أو المنظومات الفرعية ، والثانية فئة الأضرار التي تؤثر على العمليات .

١-٥-٢-١- الأضرار التي تلحق بالأسطح أو المنظومات الفرعية

٥٦ - فيما يلي أمثلة على الأضرار التي تلحق بأسطح المنظومات العاملة :

(أ) أضرار لحقت بنوافذ المكوك ؛

(ب) أضرار لحقت بهوائية الكسب العالي لمرقاب هابل الفضائي ؛

(ج) انقطاع حبل الطراز الثاني من منظومة الوزع الصغيرة الثانية القابلة للاستهلاك (سيدس - ٢) ؛

(د) أضرار لحقت بأسطح المكوك المكشوفة الأخرى .

فيما يتعلق بالأضرار المذكورة في الفقرات الفرعية (أ) و (ب) و (د) ، ثمة دليل واضح على تسبب الحطام المداري في حصول الضرر . أما بشأن المثال المذكور في الفقرة الفرعية (ج) ، فليس واضحا ما اذا كان الضرر ناجما عن حطام اصطناعي أم عن نيزك بالغ الصغر .

١-٥-٢-٢- تأثير الحطام الفضائي على العمليات الفضائية البشرية

٥٧ - اعتمدت اجراءات تشغيلية تستهدف حماية أفراد الطواقم من الحطام أثناء التحليق . ففي حالة المكوك الفضائي ، كثيرا ما توجه المركبة المدارية أثناء التحليق بحيث يكون ذيلها مصوبا نحو متجه السرعة . واعتمد اتجاه التحليق هذا لحماية أفراد الطاقم والأجهزة الحساسة في المركبة المدارية من الأضرار التي تحدثها الاصطدامات بالأجسام الحطامية الصغيرة .

٥٨ - وفرضت أيضا قيود تشغيلية على الأنشطة المضطلع بها خارج المركبة . ويضطلع بهذه الأنشطة ، حيثما أمكن ، بما يكفل حماية الطاقم المكلف بها من الأجسام الحطامية الناشئة عن المركبة .

١-٦- آثار الحطام الفضائي الأخرى

٥٩ - يلاحظ علماء الفلك أثناء التصوير الواسع المجال عددا متزايدا من الوخطات في كل لوح تصويري ناتجا عن الحطام المداري . وهذه الآثار تقلل من نوعية الرصد . والآثار الناجمة عن الحطام المداري تلغي تماما جدوى الرصد الفوتومتري عندما يعبر الحطام المجال الفوتومتري الضيق .

٢ - نمذجة بيئة الحطام الفضائي وتقدير المخاطر

٢-١- نمذجة بيئة الحطام الفضائي

٢-١-١- المقدمة والمنهجية

٦٠ - توفر نماذج الحطام الفضائي تمثيلا رياضيا لتوزع الأجسام في الفضاء ، وحركة الأجسام وتدفقها ، والخصائص الفيزيائية للأجسام (مثل الحجم والكتلة والكثافة والخواص الانعكاسية والحركة الذاتية) . ويمكن أن تكون هذه النماذج تحديدية الطابع (أي أن كل جسم يوصف على انفراد وفقا لبارامتراته المدارية وخصائصه الفيزيائية) أو احصائية النوع (أي بتحديد خصائص مجموعة من الأجسام استنادا الى عينة تضم عددا منها) أو تجمع بين الاثنين (أي هجينة) . ويمكن استخدام هذه النماذج في عمليات تقدير المخاطر والأضرار ، وفي التنبؤ بمعدلات كشف الحطام بأجهزة الاستشعار الأرضية ، وفي التنبؤ بمناورات تفادي الاصطدام التي تقوم بها المركبات الفضائية العاملة ، وفي التحليل الطويل الأمد لفعالية تدابير تخفيف مخاطر الحطام .

٦١ - ويجب أن تأخذ نماذج الحطام الفضائي في الاعتبار اسهام الآليات المصدرة التالية في زيادة عدد الأجسام الفضائية :

(أ) عمليات الاطلاق (بما في ذلك المراحل الصاروخية العليا من مركبة الاطلاق والحمولات النافعة والأجسام ذات الصلة بالبعثات) ؛

(ب) المناورات (لكي تؤخذ في الاعتبار نواتج احتراق الوقود الصلب للمحركات الصاروخية) ؛

(ج) التكسر (الناجم عن الانفجارات والاصطدامات) ؛

(د) انفصال مواد عن السطوح (آثار الشيخوخة ، مثل تقشر الطلاء) ؛

(هـ) المواد الناتجة عن التسرب (مثل السائل المبرد لمصدر القدرة النووية) .

٦٢ - ويجب أن تؤخذ أيضا في الاعتبار آليات الغوران التالية :

(أ) الاضمحلال المداري الناتج عن السحب الجوي أو غير ذلك من الاضطرابات الجوية ؛

(ب) عمليات الاسترجاع من المدار ؛

(ج) الانزال من المدار ؛

(د) التشظي (الذي يؤدي الى فقدان أجسام كبيرة) .

ولا بد لأي نموذج للبيئة الحطامية أن يتضمن كل هذه العناصر أو بعضها .

٦٣ - وتستخدم نماذج الحطام الفضائي كل مصادر البيانات المتوفرة . وهي تشمل :

(أ) البيانات القطعية عن الأجسام التي لا يقل مقاسها عن ديسيمتر واحد ، الواردة في فهرس سواتل القيادة الفضائية بالولايات المتحدة والفهرس الروسي لمراقبة الفضاء (انظر الشكل الخامس للاطلاع على توزع الكثافة الحيزية ذات الصلة) ؛

(ب) البيانات الاحصائية عن الأجسام التي يبلغ مقاسها سنتيمترا واحدا ، المستمدة من الحملات الرادارية المخصصة لهذا الغرض في المدارات الأرضية المنخفضة ؛

(ج) البيانات الاحصائية عن الحطام الذي يقل مقاسه عن ملليمتر واحد ، المستمدة من تحليل السطوح المسترجعة ومن أجهزة استشعار الارتطام الموجودة في الموقع ؛

(د) البيانات الاحصائية عن الأجسام التي لا يقل مقاسها عن ديسيمتر واحد والموجودة في المدارات الأرضية المنخفضة ، المتأتية باستخدام مقاريب أرضية ؛

(هـ) المحاكاة الأرضية للارتطامات الفائقة السرعة بأجسام ساتلية وصاروخية ؛

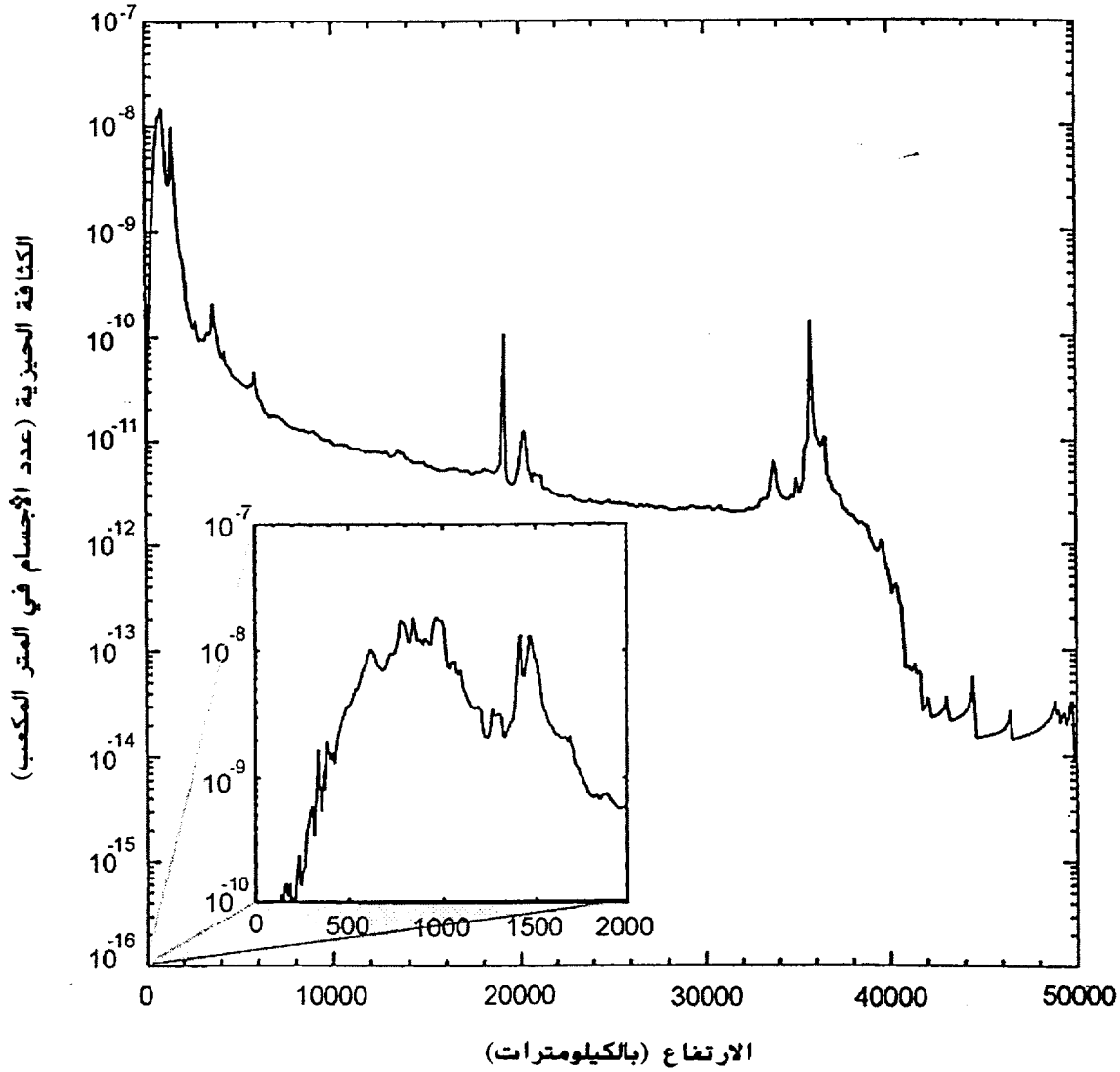
(و) المحاكاة الأرضية للتشظيات الانفجارية.

٦٤ - وهذه النماذج مقيدة بندرة البيانات المتوفرة للتثبت من صحة العلاقات المستخلصة . ويجب أن تستند النماذج الى السجلات التاريخية لخصائص السواتل وأنشطة الاطلاق وعمليات التحطم في المدار ؛ واضافة الى ذلك ، لا توجد سوى بيانات محدودة عن تأثر مواد المركبات الفضائية بالارتطام والتعرض للبيئة المدارية . وعلاوة على ذلك ، يجب وضع افتراضات رئيسية عند استخدام هذه النماذج في التنبؤ بأحوال تلك البيئة مستقبلا . وبوجه خاص ، سيكون لسيناريوهات حركة السير في المستقبل وتطبيق تدابير تخفيف المخاطر تأثير رئيسي على نتيجة التنبؤات المستمدة من النماذج . ويجب تحديث نماذج الحطام الفضائي والتثبت من صحتها باستمرار ، كيما تجسد التحسينات المدخلة على حجم مجموعات بيانات الرصد وبيانات التجارب ودرجة تفصيلها .

٦٥ - ويمكن أن تتخذ النماذج البيئية أحد شكلين : نماذج متفرقة تمثل أجسام الحطام في شكل مفصل ، أو نماذج تقريب هندسي . وعلاوة على ذلك ، يمكن أن تكون هذه النماذج ذات طابع قصير الأمد (تعنى باطار زمني أقصاه عشر سنوات) أو طويلة الأمد (تعنى باطار زمني يتجاوز عشر سنوات) . وعند اعداد جميع هذه النماذج ، يجري تمثيل مجموعة الحطام الأولية في نقطة بدء زمنية محددة ثم تسقط أماميا على مدى الزمن خطوة فخطوة ، مع مراعاة آليتي المصدر والغوران والاضطرابات المدارية ذات الصلة . ولا تعنى النماذج القصيرة الأمد ولا النماذج الطويلة الأمد بتفسير التركزات الدورية للحطام الذي يوجد لمدة تتراوح من عدة ساعات الى عدة أشهر بعد التحطم ؛ وهذه النماذج "ذات الأمد البالغ القصر" تستخدم أحيانا لتقدير المخاطر التي تهدد منظومات فضائية معينة ، لكنها لا تناقش أدناه .

٦٦ - وترد في الجدول ٤ مقارنة لخصائص النماذج ذات الصلة .

الشكل الخامس
الكثافة الحيزية للأجسام المفهرسة (حتى ٢١ آب/أغسطس ١٩٩٧)



الجدول ٤
نماذج بيئة الحطام

اسم النموذج	المصدر	الفترة التطورية	النموذج الهندسي	المقاس الأدنى	النظام المداري
CHAIN	NASA	طويلة الأمد	غير متوفر	١ سم	المدار الأرضي المنخفض
CHAINEE	ESA	طويلة الأمد	غير متوفر	١ سم	المدار الأرضي المنخفض
EVOLVE	NASA	طويلة الأمد وقصيرة الأمد	غير متوفر	١ مم	المدار الأرضي المنخفض
IDES	DERA	قصيرة الأمد وطويلة الأمد	غير متوفر	٠ر١ مم	المدار الأرضي المنخفض
LUCA	جامعة براونشفايغ التقنية	طويلة الأمد	غير متوفر	١ مم	المدار الأرضي المنخفض/المدار الأرضي المتوسط
MASTER	ESA	قصيرة الأمد	متوفر	٠ر١ مم	المدار الأرضي المنخفض/المدار الثابت بالنسبة للأرض
Nazarenko	وكالة الفضاء الروسية	قصيرة الأمد وطويلة الأمد	غير متوفر	٠ر٦ مم	المدار الأرضي المنخفض
ORDEM, 96	NASA	قصيرة الأمد	متوفر	١ مكم	المدار الأرضي المنخفض
SDM/STAT	CNUCE/ESA	طويلة الأمد	غير متوفر		المدار الأرضي المنخفض/المدار الثابت بالنسبة للأرض

٢-١-٢- النماذج القصيرة الأمد

٦٧ - تتوفر في الأوساط العلمية والهندسية النماذج القصيرة الأمد التالية :

(أ) **"ايفولف"** (EVOLVE) : هذا النموذج استحدثه مركز جونسون للفضاء التابع لوكالة "ناسا" لتزويد كل من التنبؤات القصيرة الأمد والطويلة الأمد الخاصة ببيئة المدار الأرضي المنخفض بنطاقات مصدرية واسعة ونماذج مفصلة لحركة السير ، استنادا الى تقنيات شبه تحديدية لانتشار جسيمات الحطام ملائمة لنمنجة بيئة المدارين الأرضي المنخفض والثابت بالنسبة للأرض على السواء ؛

(ب) **"أوردم ٩٦"** - (ORDEM 96) : هو نموذج هندسي شبه تجريبي استحدثه مركز جونسون للفضاء التابع لوكالة "ناسا" . وهو يقوم على عمليات رصد مستفيضة عن بعد وموضعية ، ويستخدم لدعم تصميم وتشغيل مكوك الفضاء الأمريكي والمحطة الفضائية الدولية ؛

(ج) **"ماستر"** - (MASTER) : هو نموذج بيئي شبه قطعي وضعته وكالة الفضاء الأوروبية ، ويقوم على تفريد ثلاثي الأبعاد للكثافات الحيزية والسرعات الانتقالية . هذا النموذج قابل للتطبيق على ارتفاعات تتراوح بين المدار الأرضي المنخفض والمدار الثابت بالنسبة للأرض ، مقدما تقديرات بيئية الأمد القصير . وتتوفر صيغة من نموذج ماستر أقل تفصيلا ، على شكل هندسي . وقد استحدث كلا النموذجين في جامعة براونشفايغ التقنية بموجب عقد مبرم مع وكالة الفضاء الأوروبية ؛

(د) **"ايديس"** - (IDES) : هو نموذج شبه قطعي للبيئة يستند الى نماذج مفصلة لخصائص حركة السير في الماضي والمستقبل من أجل توفير تنبؤات بشأن بيئة الحطام الفضائي في الأمدين القصير والطويل وما تمثله تلك البيئة من تدفق اصطدامي لسواتل معينة . وقد استحدثت هذا النموذج وكالة التقييمات والبحوث الدفاعية "ديرا" (DERA) في فارنبورو ، المملكة المتحدة ؛

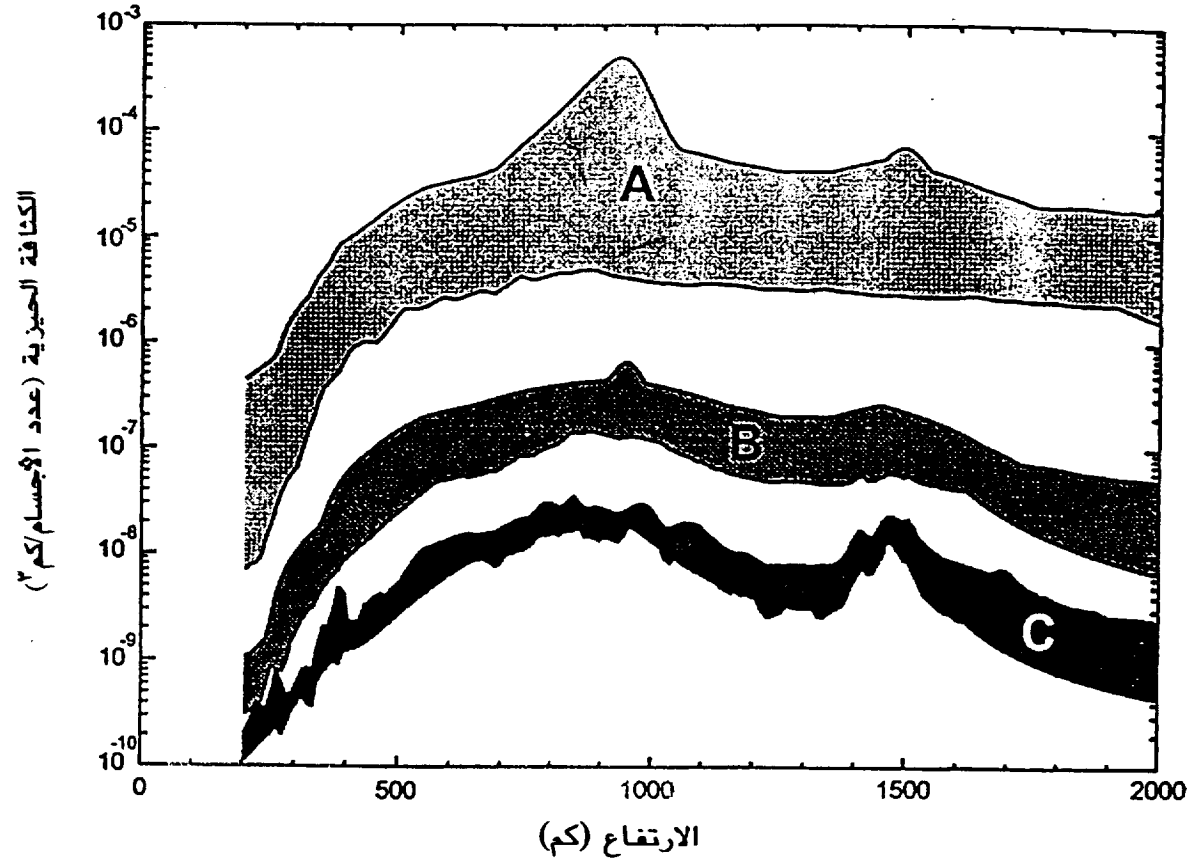
(هـ) "نازارنكو" - (Nazarenko) : هو نموذج استحدثه مركز الدراسات البرنامجية بوكالة الفضاء الروسية ، وهو نموذج عشوائي شبه تحليلي للتنبؤ ببيئة الحطام في المدار الأرضي المنخفض في الأمدين القصير والطويل ، يبين الكثافة الحيزية وتوزعات السرعة وتدفقات الجسيمات . ويأخذ النموذج في الاعتبار ، في شكل وسطي ، مصادر الحطام (باستثناء تأثير الشلشلة) والسحب الجوي ؛ وقد صحح على أساس بيانات الفهرسين الروسي والأمريكي والقياسات المنشورة لشظايا أصغر نوعا ما (أكبر من مليمتر واحد) ، مع أخذ المعلومات الافتراضية في الاعتبار أيضا ؛

(و) "النموذج شبه القطعي " (SDM) : وهو يستعمل لتوفير تنبؤات بشأن بيئة الحطام المداري في الأمدين القصير والطويل . ويستعمل هذا البرنامج الحاسوبي ، الذي استحدث في معهد المجلس الوطني للبحوث ، نموذجا مفصلا لحركة السير يشمل تشكيلات السواتل ويأخذ في الاعتبار عدة خيارات نموذجية للمصادر المرتبطة بالانفجارات والاصطدامات والتسربات من ساتل "رورسات" (RORSAT) . وقد استحدث نموذج SDM بمقتضى عقود أبرمتها الايسا ووكالة الفضاء الايطالية .

٦٨ - ويمكن استخدام هذه النماذج "للتنبؤ" بالبيئة الراهنة . وقد استخدمت عدة نماذج مختلفة لوضع "مخططات حلول" بشأن البيئة الراهنة ، مثلما هو مبين في الشكل السادس .

الشكل السادس

القيم النموذجية للكثافة الحيزية الحالية



المصادر :

NASA (ORDEM96)	ناسا (اوردم٩٦)
DERA(IDES)	ديرا (ايديس)
ESA (MASTER)	الايسا (ماستر)
CNUCE (SDM)	معهد المجلس الوطني للبحوث
(NAZARENKO)	وكالة الفضاء الروسية (نازارنكو)

A : ≤ ١ مم
B : ≤ ١ سم
C : ≤ ١٠ سم

٢-١-٣- النماذج الطويلة الأمد

٦٩ - ان نطاق النمنجة الطويلة الأمد لبيئة الحطام الفضائي هو التنبؤ الطويل الأمد (حتى ١٠٠ سنة) بعدد الأجسام كدالة للزمن والارتفاع والميل الزاوي وحجم الجسم . وهذه الاسقاطات هامة لتقدير مدى الحاجة الى تقنيات التخفيف من الحطام ومدى فعاليتها وأثر الأنشطة الفضائية الجديدة .

٧٠ - واضافة الى مصادر الحطام الفضائي التي تؤخذ في الاعتبار عند نمنجة مجموعة الحطام الراهنة ، يلزم أن تؤخذ في الاعتبار الاصطدامات بين الأجسام الكبيرة (التي يزيد مقاسها على ١٠ سم) . وفي الوقت الحاضر ، ليس للاصطدامات بين الأجسام الكبيرة دور هام في ازدياد عدد الأجسام ، لأن احتمالات حصولها ضعيفة . أما في المستقبل ، فيمكن أن تزداد المخاطر التفاعلية لما يسمى الاصطدامات المدمرة ، أي الاصطدامات التي تولد شظايا كبيرة . ويتناسب خطر الاصطدام التفاعلي هذا بين جميع أجسام المجموعة طردا مع مربع عدد الأجسام . وبالتالي ، ينبغي أن تتمثل تدابير التخفيف المقبلة الطويلة الأمد في ازالة كتل الحطام من المدار وتقليل المقاطع المستعرضة لجسيماته .

٧١ - ومن أجل تقدير نتائج الاصطدامات بين الأجسام الكبيرة ، من الضروري أن تتوفر نماذج تحطم موثوقة بشأن مثل هذه الاصطدامات . ولكن ، من الصعب جدا محاكاة الاصطدامات التي تحدث في المدار دون توفر بيانات اختبارية لأغراض التثبت . ومن ثم ، تتضمن النماذج قدرا معينا من التشكك ناشئا عن محاكاة الاصطدامات .

٧٢ - والى جانب نمنجة مجموعة الحطام الموجودة ، تتطلب النمنجة الطويلة الأمد بضعة افتراضات تتناول أنشطة التحليق الفضائي المقبلة ، بما في ذلك آليات تولد الحطام ، من حيث الجوانب التالية مثلا :

(أ) عدد عمليات الاطلاق المقبلة والمدارات ذات الصلة ؛

(ب) عدد الحمولات النافعة وحجمها في كل عملية اطلاق مقبلة ؛

(ج) عدد الأجسام الناشئة عن البعثات المقبلة (أدوات تعزيز الانسياب ، الأرتجة ، الخ) :

(د) عدد انفجارات المركبات الفضائية والمراحل الصاروخية العليا في المستقبل ؛

(هـ) مجالات استخدام الفضاء الجديدة (مثل مجموعات سواتل الاتصالات التجارية في المدار الأرضي المنخفض) .

٧٣ - وكل هذه البارامترات عرضة لتغيرات مع الزمن بفعل عوامل تقنية/علمية ومالية وسياسية . مما يضيف أوجه تشكك أخرى الى أوجه التشكك الناشئة عن النموذج الرياضي ذاته (نماذج التحطم ، الخ) .

٧٤ - وقد استحدثت لغرض النمنجة الطويلة الأمد للبيئة الحطامية عدة نماذج ، يمكن تلخيص خصائصها على النحو التالي :

(أ) **"تشين" ، و "تشيني"** : استحدث نموذج "تشين" في جامعة براونشفايغ التقنية بموجب عقد حكومي . وتقوم وكالة ناسا الأمريكية منذ عام ١٩٩٣ بصون هذا النموذج وتحسينه . أما "تشيني" ، الذي يمثل امتدادا أوروبيا لنموذج "تشين" ، فتستخدمه الايسا . ويقدم هذا النموذج ، وهو نموذج تحليلي من نوع "صندوق الجسيمات" ، وصفا لمجموعة الجسيمات وشظايا الاصطدامات حتى ارتفاع ٠٠٠ ٢ كم باستخدام ٤ خانات استبانة ارتفاعية في المدار الأرضي المنخفض و ٥ فئات كتلة . ونموذجا "تشين" و "تشيني" هما رمزان حاسوبيان فائقا السرعة . وهو يتيح تحديد الاتجاهات النسبية المقترنة بسياسات معينة لتخفيف المخاطر . والقدرة الاستبانية لنموذج "تشين" محدودة بسبب الطريقة المستخدمة في توزيع الخانات .

(ب) **"ايفولف"** : استحدثت هذا النموذج وكالة ناسا . وهو نموذج شبه تحديدي ، أي أن الأجسام الحطامية توصف منفردة بواسطة مجموعة من البارامترات . والى جانب قدرته على نمنجة بيئة الحطام

الحالية ، يمكن استخدام هذا النموذج في تقصي الخصائص التطورية المستقبلية في اطار الممارسات المختلفة لتخفيف المخاطر باستخدام تقنيات "مونت كارلو" . وتستخدم لهذا الغرض بيانات نماذج البعثات ؛

(ج) **"النسق المتكامل لدراسة تطور الحطام"** (ايديس) : استحدث هذا النسق قسم الفضاء بوكالة التقييمات والبحوث الدفاعية (ديرا) . وتجري فيه محاكاة المصادر التاريخية للحطام ، مثل عمليات الاطلاق والتكسر وتقشر الدهان ، ثم تطور تلك المصادر لتنتج بيئة الحطام الراهنة . ويستعمل هذا النموذج ، الى جانب نموذج مفصل للبعثات ، كشرطين أوليين لمحاكاة تطور بيئة الحطام في المستقبل . ويمكن استخدام "ايديس" لدراسة التفاعلات الاصطدامية لعدة تشكيلات من سواتل المدار الأرضي المنخفض ومدى فعالية تدابير تخفيف مخاطر الحطام ؛

(د) **"المرفق الطويل الأمد لتحليل الاصطدامات"** (لوكا) : استحدث "لوكا" ، وهو رمز حاسوبي شبه تحديدي ، في جامعة براونشفايغ التقنية لاجراء تحليل مفصل للسيناريوهات المستقبلية ، خصوصا اذا كان الأمر يتطلب درجة عالية من الاستبانة فيما يتعلق بارتفاع المدار ودرجة الميل . ويجمع هذا الرمز الحاسوبي بين مزيتين هما علو درجة الاستبانة الحيزية ومقبولية الوقت الحاسوبي اللازم . ومن أجل حساب احتمالات الاصطدام المرتبطة بالزمن ، استخدمت أداة خاصة ، تبين ازدياد احتمالات الاصطدام عند درجات الميل الأعلى (كما في حالة القرب من المناطق القطبية ، مثلا) ؛

(هـ) **"النموذج شبه القطعي/النهج العشوائي"** (SDM/STAT) : يستخدم النموذج شبه القطعي (SDM) والنهج العشوائي (STAT) نفس المجموعة الأولية من الأجسام ، حسبما يوفرها نموذج حاسوبي ، ونفس الافتراضات الخاصة بالمصدر والغوران ، بما في ذلك الاصطدامات . وتستخدم في النموذج شبه القطعي ، مدارات مجموعة فرعية ممثلة من الأجسام الحطامية لرسم خرائط استباقية لمواقع تلك الأجسام في المستقبل ؛ اذ يمكن بواسطة دراسات بارامترية تحليل آثار سياسات الاطلاق وتدابير تخفيف مخاطر الاصطدام . أما نموذج "النهج العشوائي" ، الذي يقوم على مفهوم "صندوق الجسيمات" ، فيمثل بديلا للنموذج شبه القطعي يتسم بالكفاءة في استخدام وقت الحاسوب . وهو يرتكز على منظومة معادلات تفاضلية مترابطة تصف الأجسام الموجودة في ٨٠ ٠٠٠ خانة من حيث الكتلة والمحور شبه الرئيسي ودرجة اللامركزية . ويمكن مقارنة البرنامجين الحاسوبيين والحصول على نتائج متماثلة ؛

(و) **"صندوق الجسيمات المزدوج الحجم"** : هو عبارة عن نموذجين لهما قدرة على معالجة التشكيلات الموجودة في المدار الأرضي المنخفض ؛

(ز) **"نازارنكو"** : استحدث هذا النموذج مركز الدراسات البرنامجية (الاتحاد الروسي) ، وهو نموذج عشوائي شبه تحليلي للتنبؤ ببيئة المدارات الأرضية المنخفضة في الأمدين القصير والطويل ، يبين الكثافة الحيزية وتوزعات السرعة ويقيّم احتمالات الاصطدام . ويستند النموذج الى بيانات الفهرس الروسي وفهرس الولايات المتحدة والى البيانات المنشورة عن الحطام الفضائي الصغير (< ١ مم) . ويستخدم هذا النموذج مجموعة الأجسام الأولية ذاتها ، استنادا الى الفهارس الساتلية ، ومصدرا موسطا للحطام الفضائي . وتقوم خصائص المصدر على التحليل التاريخي للتلوث بالحطام الفضائي . ويجرى التنبؤ بمكاملة المعادلات التفاضلية الجزئية لتوزع الحطام الفضائي كدالة للارتفاع . ويؤخذ في الاعتبار لدى التقدير الاستباقي للمدارات كل من السحب الجوي وتوزع معاملات الانقذاف ودرجة لامركزية المدار .

٧٥ - ويمكن تلخيص النتائج الرئيسية لنماذج الحطام الطويلة الأمد المذكورة أعلاه على النحو التالي :

(أ) يمكن لعدد جسيمات الحطام أن ينمو بشكل متسارع في المستقبل اذا استمر التحليق الفضائي على ما كان عليه في الماضي ، ويعزى هذا الى تزايد عدد الاصطدامات التي ستحدث بين الأجسام الأكبر حجما؛

(ب) في الوقت الحاضر ، تمثل شظايا الانفجارات ، تبعا لحجمها ، المصدر الرئيسي للحطام

الفضائي . وبعد وقت معين ، قد تصبح شظايا الاصطدامات هي المهيمنة بين أجسام الحطام ؛

(ج) في حال حدوث المرحلة الثانية من هذا التطور ، يمكن أن ينشأ ما يسمى بتأثير الشلشلة الاصطدامية . وهذا يعني أن شظايا الاصطدام ستؤدي الى زيادة عدد الاصطدامات اللاحقة . وعند ذلك ، سيزداد عدد أجسام الحطام ازديادا أسيّا ؛

(د) من شأن الحد من الانفجارات أن يقلل من عدد الأجسام في المدار ، لكنه لن يحول دون حدوث الشلشلة الاصطدامية ، التي تتأتى من الكتلة الاجمالية الموجودة في المدار ومن عدد الأجسام الكبيرة ؛

(هـ) لا يمكن تفادي الشلشلة الاصطدامية الا بالحد من تراكم الكتلة في المدار الأرضي المنخفض ؛

(و) في وقت ما في المستقبل ، يمكن أن تهيمن الشظايا الاصطدامية على بيئة الحطام . وبدون بعض التطور في التكنولوجيا لن تتوفر قدرة عملية على وقف نمو تلك البيئة ؛ ولذلك ، لا بد من اتخاذ تدابير تخفيفية قبل بلوغ ذلك الوقت .

٧٦ - والنتائج المستخلصة من نماذج الحطام الطويلة الأمد لا تتوافق كميا بسبب تباين الافتراضات والظروف الأولية . أما الاتجاهات والمناحي الأساسية المستنتجة من تلك النماذج فتتوافق نوعيا . ويبين الشكل السابع عدد الاصطدامات الكبرى التي تتنبأ بها عدة نماذج (ايفولف وتشين وتشيني وايديس) في صورة أغلفة تنبؤات . وتنحو التنبؤات المتعلقة بعدد الشظايا التي تولدها المصادر المستقبلية ، الى أن تكون أقل اتساقا فيما يتعلق بالشظايا الصغيرة .

٧٧ - وتكون احتمالات الاصطدام بين الأجسام الأكبر حجما منخفضة في البداية . ومن ثم ، يلزم تحليل عدد من عمليات "مونت كارلو" الأحادية ، أو استعمال نهوج القيمة الوسطى للحصول على اتجاهات ومناح موثوقة . والنماذج المذكورة أعلاه تراعي ذلك الأثر .

٢-٢- تقييمات مخاطر الحطام الفضائي

٢-٢-١- مقدمة

٧٨ - تشمل تقييمات المخاطر مدى احتمال وقوع حادثة ما ، وكذلك النتائج المترتبة على وقوعها . ويمكن تقييم احتمال الاصطدام بين المركبات الفضائية العاملة وأجسام الحطام المداري بالاستعانة بنماذج لبيئة ذلك الحطام . وكثيرا جدا ما ترتطم المركبات الفضائية الموجودة في المدار الأرضي المنخفض بوابل من الجسيمات صغيرة جدا (< ١٠٠ ميكرومتر) بسبب ضخامة عدد تلك الجسيمات ، ولكن آثار تلك الاصطدامات تكون في العادة طفيفة بسبب صغر كتل تلك الجسيمات وطاقاتها الحركية . وبما أن عدد أجسام الحطام الكبيرة أصغر من عدد تلك الجسيمات ، فان احتمال الاصطدام يتناقص بسرعة مع تزايد حجم الجسم . بيد أن شدة الاصطدام بين الأجسام الكبيرة تزداد .

٧٩ - والعوامل الرئيسية في احتمالات الاصطدام هي الكثافة الحيزية لأجسام الحطام ومتوسط السرعة الاصطدامية النسبية للجسم الفضائي المعني على طول المدار (الارتفاع ودرجة الميل) ، ومساحة المقطع المستعرض للجسم الفضائي ، ومدة التحليق . وتتوقف نتائج أي اصطدام على كتلة وتركيبة كل من الأجسام المعنية . وفي حين أن احتمال حدوث اصطدام بين جسم سيّار ونيزك ما لا يتوقف أساسا على الارتفاع فان احتمال حدوث اصطدام بين الأجسام المدارية يتوقف الى حد بعيد على الارتفاع ، اذ يكون عموما أعلى درجة في المدار الأرضي المنخفض منه في المدار الثابت بالنسبة للأرض .

٢-٢-٢- تقييمات تقدير مخاطر الاصطدام في المدارات الأرضية المنخفضة

٢-٢-٢-١- المنهجية

٨٠ - تجرى تقييمات المخاطر بصورة روتينية منذ الستينات على المركبات الفضائية الموجودة في المدار الأرضي المنخفض . ويستخدم نموذج بواسون (Poisson) في الحالات التي يقع فيها عدد كبير من الحوادث المستقلة ويكون احتمال وقوع كل حادث صغيرا . وتنطبق معايير الاستقلالية هذه على الحطام الفضائي الاصطناعي وعلى النيازك الصغرى ، باستثناء حالات التكسر القريبة العهد أو العواصف النيزكية .

٨١ - ولحساب احتمال حدوث أثر سطحي نتيجة

للارتطام بحطام فضائي ، يلزم وجود نموذج لبيئة النيازك/الحطام المداري ومعرفة هيئة المركبة الفضائية ونبذة مجملة عن البعثة . أما حساب احتمال حدوث اختراق و/أو عطل بسبب الحطام الفضائي فيتطلب معرفة مفصلة بهيئة المركبة الفضائية ، بما في ذلك :

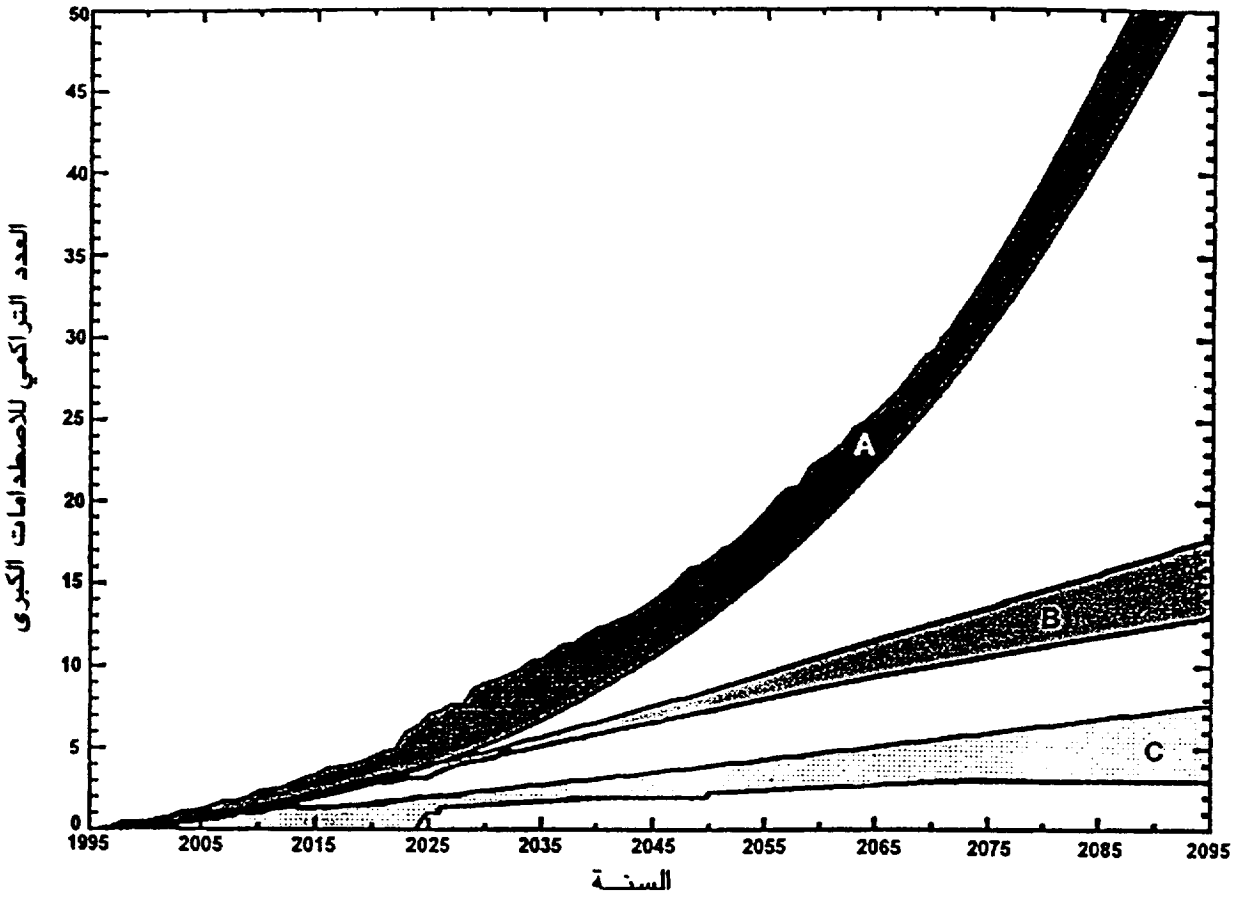
(أ) الخصائص الهندسية لأهم المنظومات الفرعية ؛

(ب) مدى قدرة كل منظومة فرعية على مقاومة الاختراق ، أو معادلة الحد الانقذافي لتلك المنظومة الفرعية ؛

(ج) بيانات عن قدرة كل منظومة فرعية على تحمل الضرر .

الشكل السابع

النطاقات النمطية لعدد الاصطدامات الكبرى في ثلاثة سيناريوهات ، ١٩٩٥-٢٠٠٥



ألف - في حال استمرار الأمور على ما هي عليه

باء - في حال استمرار الأمور على ما هي عليه لعشرين سنة قادمة ، ثم الامتناع عن اطلاق مزيد من الأجسام

جيم - الامتناع عن أي اطلاق في المستقبل

٨٢ - واستنادا الى هذه المعلومات يمكن للبرامج الحاسوبية أن تحسب ما يلي :

(أ) احتمالات الارتطام لجسيمات حطام فضائي من حجم معين ؛

(ب) احتمال تسبب الارتطام في ضرر بمنظومة فرعية معينة ؛

(ج) التمييز بين الضرر الناشىء عن الحطام الاصطناعي والضرر الناشىء عن النيازك الصغرى .

٢-٢-٢-٢- نتائج تقييمات المخاطر

٨٣ - تستخدم تقييمات المخاطر بصورة روتينية في المدار الأرضي المنخفض لتعزيز أمان العمليات الفضائية . وفي الحالات التي تشتمل على تحليق فضائي بشري أثبتت تقييمات المخاطر فائدتها القصوى في ضمان أمان العمليات المكوكية . ويعاد تشكيل عمليات البعثات المكوكية كلما تبين من عملية تقييم المخاطر قبل التحليق أن مخاطر الحطام الفضائي تبلغ درجة غير مقبولة .

٨٤ - وتستخدم تقييمات المخاطر حاليا لتحديد موضع ونوع الدروع الواقية من الحطام الفضائي الكفيلة بحماية طاقم المحطة الفضائية الدولية وكذلك أهم المنظومات الفرعية الموجودة على متنها .

٨٥ - وتستخدم تقييمات المخاطر أيضا في تصميم المركبات الفضائية غير المأهولة . كما يستعان بها في توضيع أهم المنظومات الفرعية والمكونات وتصميم الدروع الواقية لها ، وكذلك في تصميم نظم تشكيلات سواتل الاتصالات الكبيرة . ويرد في الجدول ٥ مثال لتقييم المخاطر في المدارات الأرضية المنخفضة .

الجدول ٥

الفاصل الزمني الوسطي بين الارتطامات التي تصيب ساتلا ذا مساحة مقطع مستعرض قدرها ١٠ أمتار مربعة

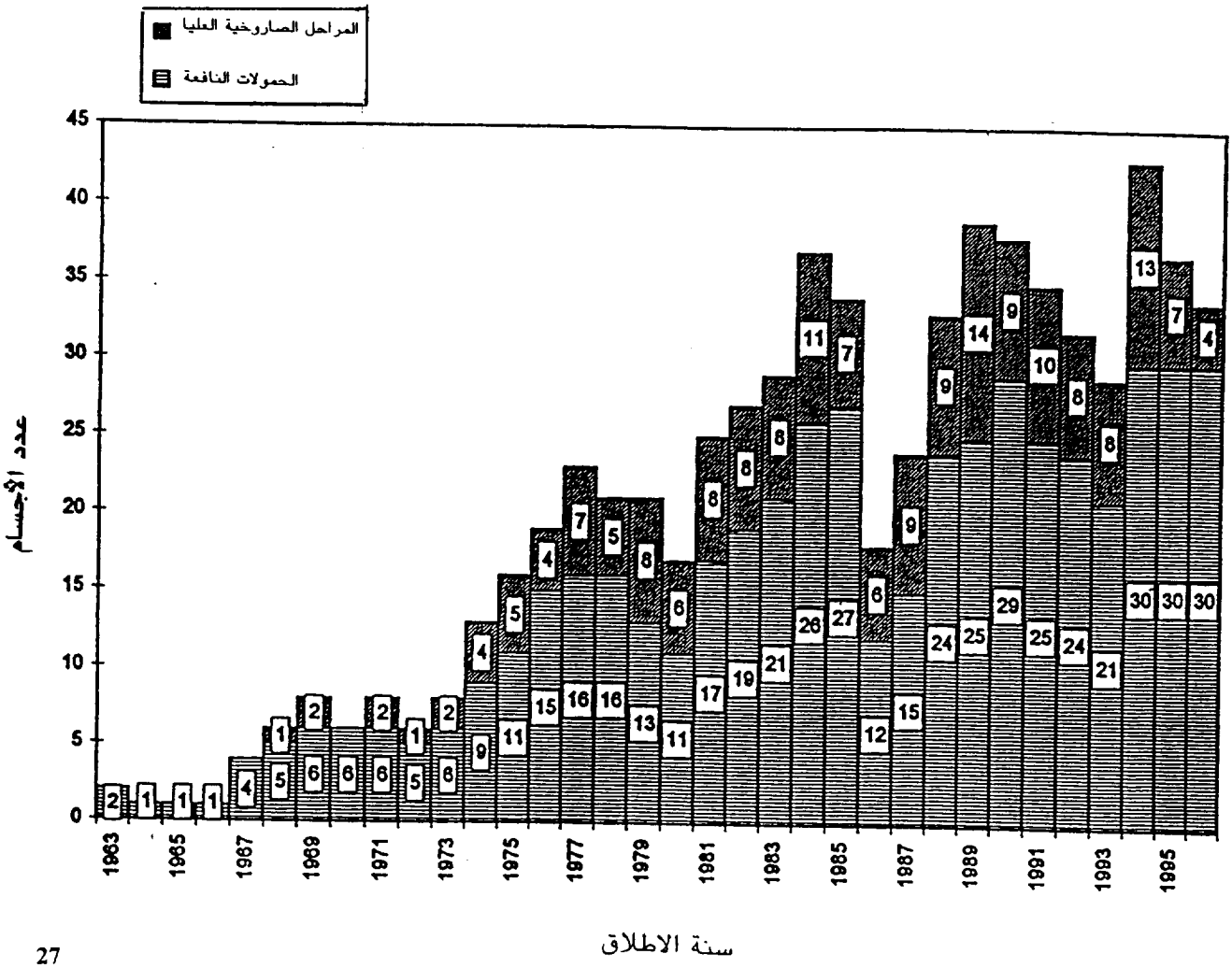
	الأجسام ار٠ - ٠ر١ سم	الأجسام ١ - ١٠ سم	الأجسام > ١٠ سم
	نتيجة الارتطام المرجحة		
ارتفاع المدار الدائري (كم)	احتمال فقدان الساتل	احتمال فقدان الساتل	تشظي الساتل
٥٠٠	١٠ - ١٠٠ سنة	٥٠٠ ٣ - ٠٠٠ ٧ سنة	٠٠٠ ١٥٠ سنة
٠٠٠ ١	٣ - ٣٠ سنة	٧٠٠ - ٤٠٠ ١ سنة	٠٠٠ ٢٠ سنة
٥٠٠ ١	٧ - ٧٠ سنة	٠٠٠ ١ - ٠٠٠ ٢ سنة	٠٠٠ ٣٠ سنة

٢-٢-٣- تقييمات مخاطر الاصطدام في المدار الثابت بالنسبة للأرض

٨٦ - ليس معروفا في الوقت الحاضر عدد الأجسام الفضائية الموجودة في منطقة المدار الثابت بالنسبة للأرض وقربه (انظر الشكل الثامن) الا فيما يتعلق بالمركبات الفضائية والمراحل الصاروخية العليا . ونتيجة لقلة عدد هذه الأجسام واتساع توزعها الحيزي وانخفاض متوسط سرعاتها النسبية (٥٠٠ م/ث) فان احتمال حدوث اصطدام في المدار الثابت بالنسبة للأرض يقل كثيرا عن احتمالاته في المدارات الأرضية المنخفضة . كما أنه مع تزايد عدد المركبات الفضائية والمراحل الصاروخية العليا المتروكة في مدارات فوق المدار الثابت بالنسبة للأرض أو دونه ، يتزايد عدد الأجسام السليمة غير القابلة للسيطرة التي تمر عبر منطقة ذلك المدار تزايدا بطيئا جدا . وتوجد في المدار الثابت بالنسبة للأرض احتمالات اصطدام خاصة بسبب شدة قرب المركبات الفضائية العاملة فوق خطوط طول مختارة ، ولكن يمكن القضاء على أخطار الاصطدام هذه بواسطة اجراءات التحكم بالمركبة الفضائية . كما أن قلة عدد الأجسام الكبيرة قرب المدار الثابت بالنسبة للأرض يتيح التنبؤ بالاقترابات اللصيقة بين المركبة الفضائية العاملة وأجسام الحطام المداري المتتبعة قبل وقت كاف يتيح اجراء مناورة لتفادي الاصطدام .

الشكل الثامن

الحمولات النافعة والمراحل الصاروخية العليا التي أطلقت الى المدار الثابت بالنسبة للأرض



٨٧ - وعدد أجسام الحطام المداري التي يقل قطرها عن متر واحد والواقعة قرب المدار الثابت بالنسبة للأرض ليس معروفا على وجه الدقة . وقد تبين حدوث عمليتي تكسر (واحدة تتعلق بمركبة فضائية وواحدة تتعلق بصاروخ مرحلة عليا) . وثمة شواهد على امكانية حدوث مزيد من عمليات التكسر . وستكون حركة هذا الحطام مضطربة فتؤدي الى انتقاله الى مدار جديد ، وهذا قد يقلل من مدة مكوثه في المدار الثابت بالنسبة للأرض ولكنه يزيد من سرعة الاصطدام النسبية ، مما يجعل الاسهام التدفقي ثابتا تقريبا مع تغير درجة الميل . وفي كثير من الحالات تتناثر شظايا الحطام على نطاق واسع من حيث الارتفاع والميل . ويلزم اجراء قياسات اضافية للحطام الفضائي الموجود في المدار الثابت بالنسبة للأرض قبل أن يتسنى اجراء تقييمات أدق للمخاطر . كما قد يلزم استحداث تقنيات جديدة للتكهن باحتمالات الاصطدام لكي تؤخذ في الاعتبار الطبيعة غير العشوائية للاقترابات اللصيقة في المدار الثابت بالنسبة للأرض .

٨٨ - وليست هناك آلية طبيعية لازالة السواتل الموجودة في المدار الثابت بالنسبة للأرض . ومن ثم فان المركبات الفضائية العاملة معرضة لأن يصيبها ضرر من المركبات الفضائية المنغلقة . وفي الوقت الحاضر ، يقدر الاحتمال السنوي لاصطدام ساتل عامل بنحو 10^{-2} .

٢-٢-٤- تقييمات المخاطر الخاصة بالحطام الفضائي العائد

٨٩ - يقتصر تقييم المخاطر في هذا السياق على العودة المنغلقة من المدار الأرضي .

٩٠ - ويبلغ عدد الحالات المعروفة لعودة أجسام فضائية مفهرسة أكثر من ١٦ ٠٠٠ حالة في قرابة ٤٠ سنة . ولم يبلغ عن وقوع أي أضرار أو اصابات ذات شأن نتيجة لذلك . ويمكن أن يعزى هذا الى حد بعيد الى شدة اتساع سطح المحيطات والى قلة الكثافة السكانية في كثير من مناطق العالم . وفي السنوات الخمس الأخيرة ، شهد كل اسبوع تقريبا عودة جسم ذي مقطع مستعرض قدره متر مربع واحد أو أكثر الى الغلاف الجوي للأرض ، وثمة معلومات عن تبقي بضعة شظايا منها .

٩١ - واحتمال العودة لا ينشأ بفعل الارتطام الميكانيكي فحسب ، ولكن بفعل تلوث البيئة الكيميائي أو الاشعاعي أيضا . وقد يتأتى الضرر الميكانيكي من الأجسام التي تتحمل التسخين الايروديناميي . ويتوقف هذا الاحتمال على خصائص المدار الأخير وشكل الجسم وخواص مادته .

٩٢ - وينبغي لعملية تقييم مخاطر العودة أن تشمل نمذجة الأجسام ، وتحليل الارتفاع الذي يحدث عنده التكسر الايروديناميي ، وتحديد المكونات التي يمكن أن تبقى بعد العودة ، وحساب المساحة الكلية للمنطقة المتضررة من سقوط الشظايا .

٩٣ - وليس هناك توافق في الآراء على الصعيد الدولي بشأن الاصابات البشرية الناشئة عن عودة الأجسام الفضائية . ويرد في البند ١٤٠-١٧٤٠ من معايير الأمان المعتمدة لدى وكالة ناسا المعنون "المبادىء التوجيهية واجراءات التقييم الخاصة بالحد من الحطام المداري" ، احتمال اصابة قدره 10^{-2} .

٣ - تدابير تخفيف مخاطر الحطام الفضائي

٣-١- الحد من تزايد الحطام مع مرور الزمن

٣-١-١- تفادي نشوء الحطام أثناء التشغيل الاعتيادي

٣-١-١-١- الأجسام ذات الصلة بالبعثات الفضائية

٩٤ - يتألف حوالي ١٢ في المائة من مجموع الأجسام الحطام المداري المفهرسة الموجودة حاليا من أجسام طرحت أثناء اطلاق السواتل وتشغيلها الاعتيادي . والأجسام المعتادة في هذه الفئة هي المشابك وأثقال الانعراج وأغطية المنافث وأغطية العدسات وآليات الحمولات النافعة المتعددة ، وما الى ذلك . وعادة ما يسهل ، من الناحيتين التقنية والاقتصادية ، اتخاذ تدابير تخفيفية ضد تلك الأجسام . وقد أفيد أن وكالات عديدة

قد اتخذت مثل هذه التدابير . مثال ذلك أن أشرطة الشبك وأغطية أجهزة الاستشعار ينبغي أن تبقى مع الأجسام الأم ، كما ينبغي التقاط جميع شظايا الترابيس المتفجرة . بيد أن هناك بضعة قطع ستنغلق لأسباب لا يمكن تجنبها ، مثل أي عنصر هيكل متروك في المدار الانتقالي الثابت بالنسبة للأرض أثناء بعثة ذات حمولات نافعة متعددة . ويجدر بكل وكالة أن تقلل هذه الأنواع من الحطام الى أدنى حد ، حيثما كان ذلك ممكنا ، باستخدام أحدث المعدات أو التقنيات .

٣-١-١-٢- الحبال

٩٥ - يمكن أن تصبح الحبال حطاما مداريا اذا رميت بعد استخدامها أو اذا قطعت نتيجة ارتطامها بجسم ما (حطام اصطناعي أو نيزك) . والحبال ، التي يصل طولها الى عدة آلاف من الأمتار وقطرها الى بضعة ملليمترات ، قد لا تعمر لفترات طويلة . ويمكن لتصاميم الحبال الجديدة المتعددة الجدائل أن تقلل من خطر الانقطاع . وفي نهاية البعثات ، يمكن سحب الحبال لتقليل احتمال اصطدامها بأجسام أخرى ، أو افلات كتلتي الحبل الطرفيتين بغية تسريع اضمحلاله في المدار .

٣-١-١-٣- دوافق المحركات الصاروخية ذات الوقود الصلب ، ومواد الطلاء وغيرها من مواد السطوح الخارجية

٩٦ - ثمة جسيمات أخرى ذات صلة بالبعثات يمكن أن تتولد دون قصد ، كما في حالة اطلاق الخبث (الذي قد يصل قطره الى عدة سنتيمترات) أثناء وبعد اشتعال المحركات الصاروخية ذات الوقود الصلب . وليس واضحا على وجه الدقة طبيعة هذه الطراحة الخبثية ومقدارها وتوزعها ، ومن الصعب تحسين الوقود الداسر الصلب وعزل المحركات للتقليل من الأجسام الصلبة المنطرحة الى أدنى حد ممكن . وينبغي بذل محاولات لكبح تولد الحطام الصغير جدا الناشىء عن تأثيرات البيئة الفضائية ، مثل التآكل بفعل الأكسجين الذري ، وآثار الاشعاع الشمسي ، ووابل النيازك الصغيرة . ومن شأن استخدام مواد طلاء وأغطية واقية أطور عمرا أن يكون تدبيرا علاجيا فعالا .

٣-١-٢-١- الانفجارات في المدار

٩٨ - ان ٣٦ في المائة من مجموع حوادث تكسر الأجسام الفضائية المقيمة في الفضاء يتعلق بمراحل صاروخية عليا أو مكونات لها عملت بنجاح ولكنها هجرت بعد انجاز مهمة توصيل المركبات الفضائية . وقد تأثرت بتلك الحوادث مجموعة كبرة من مركبات الاطلاق التي تشغلها الولايات المتحدة والاتحاد الروسي والصين والايسا . ويمكن أن تنشأ الانفجارات العرضية أيضا عن أجهزة سرة سيئة الأداء أو بطاريات مفرطة الشحن أو شحنات متفجرة . كما أجريت حوادث تكسير متعمدة .

٣-١-٢-٢- منع حوادث التكسر في المدار

٩٧ - تشكل الشظايا الناشئة عن المراحل الصاروخية العليا والمركبات الفضائية قرابة ٤٣ في المائة من مجموع الأجسام الحطامية المعروفة حاليا وقد تشكل ما يصل الى ٨٥ في المائة من جميع الأجسام الحطامية المدارية التي يزيد قطرها على ٥ سنتيمترات . ومن المعروف أن ما لا يقل عن ١٤٥ جسما فضائيا ، تربو كتلتها الجافة الاجمالية على ٠٠٠ ٣٥٠ كيلوغرام ، قد تكسرت في مدار الأرض حتى أيلول/سبتمبر ١٩٩٨ . ومن حسن الطالع أن ٦٠ في المائة من الأجسام الحطامية المفهرسة التي نشأت عن تلك الحوادث قد سقطت عائدة الى الأرض . وتتأتى هذه الشظايا في المقام الأول نتيجة لانفجارات أو اصطدامات .

٩٩ - وقد بينت تحاليل التشظيات العرضية لكل من المركبات الفضائية والمراحل الصاروخية العليا أن انزال المركبة من المدار أو تخميلها ، أي ازالة جميع أشكال الطاقة المخزنة ، من شأنه أن يقضي على معظم تلك الحوادث . وثمة تدابير فعالة تشمل التخلص من الدواسر المتبقية عن طريق الحرق أو التنفيس ، وتفريغ أجهزة تخزين الكهرباء ، وطرح الموائع المضغوطة ، والضبط الحراري ، وابطال مفعول أجهزة الاتلاف غير المستعملة ، وتفريغ (تخفيض دوران) عجلات التدوير وما يشابهها من أجهزة ضبط الوضع الاتجاهي . وينبغي اتخاذ هذه التدابير فور انجاز المركبة مهمتها .

٣-١-٢-٢- الاصطدامات في المدار

١٠٠ - ان احتمال حدوث اصطدامات عرضية في مدار الأرض ضئيل حاليا ، غير أنه يتزايد بازدياد عدد السواتل وحجمها . ففي عام ١٩٩٦ ، أصيبت المركبة الفضائية الفرنسية سيريس (CERISE) وتعطلت جزئيا نتيجة ارتطامها بشظية جاءت ، وفقا لشبكة المراقبة التابعة للقيادة الفضائية بالولايات المتحدة ، لصاروخ من طراز آريان . وبالاضافة الى ذلك ، لا يمكن نفي امكانية وقوع حوادث تكسر أخرى بفعل الاصطدامات لأن كثيرا من حوادث التكسر لا تزال مجهولة السبب . ومن التدابير الفعالة للتخفيف من عواقب حوادث التكسر الناجمة عن الاصطدامات تحسين تصميم المركبات الفضائية ، واختيار مدار يقل فيه احتمال الاصطدام ، والقيام بمناورات لتفادي الاصطدام (انظر الفقرات ١١٢-١١٨ أدناه) .

٣-١-٣- انزال الأجسام الفضائية من المدار ونقلها الى مدار آخر

٣-١-٣-١- انهاء بعثة المنظومات الفضائية

١٠١ - فيما يتعلق بالأجسام الفضائية الموجودة في المدارات الأرضية المنخفضة والتي بلغت نهاية بعثتها ، ينبغي انزال كل مركبة من المدار أو وضعها في مدار أقصر عمرا لتقليل احتمال حدوث اصطدام عرضي . وقد دلت الدراسات على أن تزايد الحطام المداري يمكن ابطاؤه بالحد من الأعمار المدارية ويمكن فعل ذلك باجراء مناورة منضبطة لاعادة المركبة الى الأرض أو بنقلها الى مدار أقل ارتفاعا .

١٠٢ - أما فيما يتعلق بالأجسالم الفضائية الموجودة على ارتفاعات أعلى ، فيمكن أن يكون نقل المركبات الى مدارات تخلص وسيلة فعالة أيضا على المدى القريب . فعلى سبيل المثال ، من شأن نقل مركبة فضائية موجودة في المدار الثابت بالنسبة للأرض الى مدارات فوق ذلك المدار ألا يحمي المركبة الفضائية العاملة فحسب بل أن يقلل أيضا من احتمال اصطدام الأجسام المهجورة بعضها ببعض وتكوين حطام قد يهدد منطقة المدار الثابت بالنسبة للأرض . وينبغي تحديد مسافة قياسية دنيا للنقل من المدار بأن تؤخذ في الاعتبار عوامل مثل آثار الترجاف الناتجة عن القوة التجاذبية للشمس والقمر ، وضغط الاشعاع الشمسي . ويمكن تحريك المراحل العليا لمركبات الاطلاق أو مكوناتها المتروكة في المدار الانتقالي الثابت بالنسبة للأرض من المدار ، منعا لتداخلها مع المنظومات الموجودة في المدار الثابت بالنسبة للأرض . ويمكن اختيار الارتفاع الحضيضي للمرحلة العليا بما يكفل عمرا مداريا محدودا .

٣-١-٣-٢- في حالة حدوث أعطال

١٠٣ - ينبغي مراقبة المنظومات الفضائية الموجودة في المدار مراقبة مستمرة ، ولاسيما منعا لتحدوث تعطل خطير يمكن أن يؤدي الى تكوّن مقادير كبيرة من الشظايا أو الى فقدان القدرة على اتخاذ تدابير تخفيفية . وينبغي في هذا السياق مراقبة نظام الدسر والبطاريات والنظام الفرعي للتحكم في الوضع الاتجاهي والمدار . واذا حدث عطل وتعذرت مواصلة البعثة ، فينبغي تنفيذ الاجراءات اللازمة للحيلولة قدر الامكان دون حدوث تداخل مع المدارات النافعة .

٣-٢- استراتيجيات الحماية

١٠٤ - نظرا لعدد أجسام الحطام المداري في الوقت الراهن ، ينبغي لمصممي المركبات الفضائية أن ينظروا في تضمين مركباتهم الفضائية مفاهيم وقائية ضمنية وصريحة . فمن الأخطار التي تتهد الأجسام الفضائية والمحطام المدارية ارتطامها الفائق السرعة بنيازك وجسيمات حطام فضائي يبلغ قطرها ١-٢مم أو أكثر . اذ ان الارتطام الفائق السرعة بجسيمات صغيرة لا يزيد قطرها على ١مم يمكن أن يؤدي الى تعطل في الأجهزة وربما الى فشل البعثة . بل ان الارتطامات البسيطة بأوعية الضغط قد تؤدي الى حدوث تصدعات في تلك الأوعية . وهذا الضرر قد يحول أيضا دون تنفيذ تدابير التخميل أو خيارات التخلص المقررة عند انتهاء البعثة . وفي حالات كثيرة ، يمكن أن يؤدي تغيير مواضع المكونات المعرضة للارتطام الى زيادة كبيرة في قدرة المركبة الفضائية على البقاء . وثمة استراتيجيات وقائية ممكنة أخرى ، هي حسن اختيار النظام المداري وتفادي الاصطدام .

٣-٢-١- التدريع

١٠٥ - يمكن أن تكون دروع وقاية المركبات الفضائية المأهولة وغير المأهولة من الحطام المداري فعالة جدا ضد الجسيمات الصغيرة . اذ يمكن حماية المركبات الفضائية من الجسيمات ال تي يبلغ قطرها ١ر٠-١م وبتدريع هياكلها . أما الأجسام التي يبلغ قطرها ١ ١٠سم فلا يمكن في الوقت الحاضر معالجتها بتكنولوجيا التدريع في المدار ، كما لا يمكن أن تتبعها روتينيا شبكات مراقبة العمليات . ومن جهة أخرى ، يمكن الحماية من الجسيمات التي يبلغ قطرها ١-١٠سم باستحداث سمات خاصة في تصميم النظم الفضائية (نظم فرعية رديفة وهياكل قابلة للانفصام وقدرات عزل أوعية الضغط درجة قصوى من الفصل المادي بين المكونات الرديفة وممرات خطوط الكهرباء والموائع ، الخ) . أما الحماية الفيزيائية من الأجسام التي يزيد قطرها على ١٠ سم فهلا تزال متعذرة من الناحية التقنية .

١٠٦ - يمكن أن تتفاوت تصميمات التدريع من مجرد واقيات اصطدام بسيطة ذات صفيحة واحدة من طراز "ويبل" (Whipple) توضع أمام جدار المركبة الفضائية الى طبقات مركبة من أنسجة فلزية وخزفية /بوليميرية مصممة أولا لتفتيت الجسيم المرتطم بالمركبة ثم امتصاص طاقة المقذوفات الناتجة . وينبغي وضع الدروع الواقية على مسافة كافية من الجسم المحمي تكفل تبعثرا واسع النطاق لوابل الشظايا الناجم عن ارتطام جسيمات الحطام بالدرع . وبذلك ، تتوزع الأحمال الصدمية على مساحة كبيرة من الجسم المحمي . ويمكن لتصميمات الدروع الناجحة أن تستفيد من هيكل المركبة وتوجهية الحطام المداري في حماية المكونات البالغة الأهمية . وعلاوة على ذلك يمكن تصميم المركبة الفضائية بحيث توضع المكونات البالغة الأهمية في الظل الهندسي للاتجاه السائد لتدفق الحطام . ومن شأن استخدام عازل خفيف الوزن متعدد الطبقات أن يوفر حماية من الحطام الصغير ، كما أن وضع المعدات الحساسة خلف الهياكل الموجودة للمركبة يمكن أن يعزز قدرة المركبة على البقاء .

١٠٧ - يتوقف عمق الاختراق الناشىء عن الجسم المرتطم ، أو ضرره المحتمل على كتلته وكثافته وسرعته وشكله وعلى الخواص المادية للدرع . وتوجد أدوات نمنجة ومحاكاة مختلفة للتنبؤ بما ينجم عن الارتطامات من اضرار بالدروع من مختلف التصاميم (مثل نموذج "BUMPER" الذي استحدثته وكالة ناسا ، ونموذج "ESABASE" الذي استحدثته الايسا ، ونموذج "BUFFER" الروسي ، وعدة نماذج حاسوبية مائية لاجراء عمليات محاكاة في ظروف يتعذر توفيرها باستخدام مرافق الاختبار الأرضية) . والاختبارات الأرضية لدروع المركبات الفضائية محدودة نظرا لتعذر اجراء اختبارات تشمل جميع سرعات الارتطام المحتملة . فالمسرعات الأرضية قاصرة حاليا على سرعات في حدود ١٣ كم/ثانية (باستخدام أجهزة شحن محددة الشكل ، مثلا) ، لكن معظم البيانات الموجودة يتعلق بسرعة قدرها ٧ كم/ثانية . ويجري استنباط طرائق جديدة ومواصلة تنقيحها لحساب العمليات التي تنطوي عليها الاصطدامات الفائقة السرعة بين جسيمات الحطام الفضائي والدروع ، بسرعات ارتطام تتراوح بين ٥ و ١٥ كم/ثانية .

٣-٢-١-١- التحليق الفضائي البشري

١٠٨ - عادة ما تكون المركبات الفضائية المأهولة ، ولاسيما المحطات الفضائية ، أكبر من معظم المركبات غير المأهولة ، ويجب أن تفي بمعايير أمان أعلى ، ويجدر باستراتيجيات حماية البعثات المأهولة أن تتضمن تدابير للتدريع وتدابير لاصلاح أضرار الاختراقات أثناء وجود المركبة في المدار . وتوفر تصاميم الدروع الحالية حماية من الأجسام التي يقل قطرها عن ١سم . واحتمال عدم الاختراق (PNP) هو المعيار الرئيسي لتصميم الدرع . وتستند حسابات احتمال عدم الاختراق الى نماذج بيئة النيازك والحطام ، والى منحنيات حدود الانقذاف المتحصل عليها في عمليات المحاكاة بالنماذج الحاسوبية المائية وتجارب الارتطام الفائق السرعة . وترتبط موثوقية حسابات احتمال عدم الاختراق ارتباطا شديدا بدقة نموذج بيئة الحطام والنيازك . وتتوقف درجة التدريع اللازمة الى حد بعيد على طبيعة السطح المراد حمايته (مادة السطح وسماكته ، الخ) وتوجهه . ومن ثم ، سوف تستخدم المحطة الفضائية الدولية ما يزيد على ٢٠٠ نوع مختلف من الدروع المضادة للحطام المداري والنيازك الصغرى .

١٠٩ - ويمكن أن تركب على متن المركبات الفضائية

المأهولة نظم كشف آلية لتحديد موضع الضرر . وفي حالة حدوث ثقب في نميطة منضغطة ، يكون لعزل النميطة أو لسرعة تصرف الطاقم في لحام الثقب أهمية قصوى . ويتوقف الوقت المتاح على حجم الثقب ، كما يتوقف الوقت اللازم للاصلاح على الوسيلة المستخدمة والاستراتيجية المتبعة .

١١٠ - ويحتاج أفراد الأطقم الذين يقومون بأنشطة خارج المركبات (EVA)الى حماية من الحطام الطبيعي والاصطناعي . ولبدلات الفضاء سمات كثيرة تنطوي على خصائص تدريع متأصلة لتوفير الحماية من الأجسام التي يبلغ قطرها ١ر٠ مم . وبواسطة توجيه مركباتهم الفضائية توجيها سليما ، قد يتمكن رواد الفضاء من استخدام تلك المركبات كدروع تحميهم من معظم جسيمات الحطام المداري ومن التدفقات النيزكية المباشرة .

٣-٢-١-٢- المركبات الفضائية غير المأهولة

١١١ - فيما يتعلق بالمركبات الفضائية غير المأهولة ، يمكن قبول درجات أدنى من "احتمال عدم الاختراق" (PNP) . ويمكن بلوغ مستوى مقبول من الحماية من الأجسام الحطامية والنيزكية الصغيرة (أصغر من ١مم واحد) باستخدام مواد عزل مقواة متعددة الطبقات ، وبادخال تعديلات على التصميم ، مثل التركيب الداخلي لخطوط الوقود ، والأسلاك والمكونات الحساسة الأخرى (على النحو المنفذ في ساتل "رادارسات" الكندي) . ويمكن لتصاميم الصفيفة أن تقلل كثيرا من آثار الضرر الناشيء عن الاصطدامات بالجسيمات الصغيرة ، باستخدام تصاميم تحتوي على ممرات متعددة لخطوط الكهرباء وتقلل الكتلة الهيكلية الى أدنى حد ممكن ، أي باستخدام أشكال قابلة للانفصام .

٣-٢-٢- تفادي الاصطدام

١١٢ - لا تستطيع نظم مراقبة الفضاء الحالية تتبّع الأجسام الموجودة في المدار الأرضي المنخفض التي يقل مكافيء القطر الاسمي لمقطعها المستعرض الراداري عن ١٠ سم . واضافة الى ذلك ، يصعب الاحتفاظ بالبارامترات المدارية الخاصة بالأجسام المفهرسة الصغيرة بسبب عوامل مثل علو نسبة المساحة الى الكتلة ، وبالتالي ارتفاع قابلية التأثر بتغيرات كثافة الغلاف الجوي . أما الأجسام الفضائية الكبيرة بدرجة كافية بحيث يمكن تتبعها بواسطة نظم مراقبة الفضاء الأرضية فيمكن من الناحية التقنية تفادي الاصطدام بها أثناء ولوج المدار وأثناء العمليات المدارية .

١١٣ - وتؤثر مناورات تفادي الاصطدام على عمليات السواتل بعدة سبل (مثل ازدياد استهلاك الوقود الداسر واضطراب بيانات وخدمات الأجهزة المحمولة وحدوث انخفاض مؤقت في دقة التتبع ودقة تحديد المدار) ، وينبغي بالتالي تقليلها الى أدنى حد ممكن ، بما يتسق مع أمان المركبة الفضائية وأهداف البعثة . ويلاحظ أن استراتيجيات تفادي الاصطدام تكون أكثر نجاعة عندما يحرص على ابقاء هامش التشكك المتعلق بجسامة الاقتراب الداني ضئيلا ، ويفضل أن يكون ذلك الهامش أقل من ١ كيلومتر . وتفادي الاصطدام يقوم دائما على دراسة الاحتمالات . وتستخدم وكالة "ناسا" درجة مخاطرة معيارية قدرها ١ على ٠٠٠ ١٠٠ ، عند النظر في اجراء مناورة لتفادي الاصطدام بخصوص بعثة المكوك الفضائي الأمريكي .

٣-٢-٢-١- في المدار

١١٤ - تقوم شبكة مراقبة الفضاء التابعة للولايات المتحدة (SSN) والنظام الروسي لمراقبة الفضاء بمراقبة بيئة المدارات الأرضية المنخفضة من أجل انذار المركبات الفضائية في حال توقع اقتراب جسم ضمن مسافة قدرها بضعة كيلومترات . فاذا كانت التنبؤات تشير الى مرور جسم عبر خانة فضائية أبعادها ٥ كم × ٢٥ كم × ٥ كم على مسار تحليق المكوك الفضائي الأمريكي ، تبادر شبكة أجهزة الاستشعار التابعة لشبكة مراقبة الفضاء الأمريكية (SSN) الى تكثيف تتبعها للجسم ذي الخطر المحتمل . واذا دل التنبؤ المحسَّن بمسار التحليق المقارب احتمال حدوث اقتران ضمن خانة أبعادها ٢ كم × ٥ كم × ٢ كم ، وجب القيام بمناورة لتفادي الاصطدام. وأثناء الفترة ١٩٨٦-١٩٩٧ ، نفذ المكوك الفضائي أربع مناورات مراوغة من هذا النوع . ويقوم النظام الروسي لمراقبة الفضاء بتقييمات مشابهة من أجل تفادي الاصطدامات لصالح محطة مير الفضائية .

١١٥ - وقد وضع الأخصائيون الروس فهرسا للاقترابات الخطرة من الأجسام الفضائية (عدة ملايين اقتراب) مع خوارزمية للبت اذا كان يلزم اجراء مناورة لتفادي الاصطدام . ويستهدف الفهرس تحديد الحالات الخطرة التي ينطوي عليها الاقتراب المتنبأ به ، وتكثيف التغطية البياناتية لمثل هذه الحوادث وتكثيف مراقبة تحليق المركبة الفضائية التي تحتاج الى حماية . ويجري العمل على انشاء شبكة اتصالات خاصة تربط بين ادارة وكالة الفضاء الروسية ومركز مراقبة البعثات في مدينة كوروليف .

١١٦ - وتستخدم الإيسا والمركز الوطني للدراسات الفضائية وبيانات تحديد المدار الخاصة بمركباتهما الفضائية ذات المدارات الأرضية المنخفضة لأجل التنبؤ بحوادث الاقتران وبدء مناورات مراوغة في حال تجاوز حدود نطاق التحليق المقارب أو المستويات المقدرة لاحتمال الاصطدام . وباحتمال اصطدام مقبول قدره ١ من ٠٠٠ ١٠ ، تحتاج مركبتا الإيسا الفضائيتان "إيرس-١" و "إيرس-٢" الى القيام بمناورة أو اثنتين كل سنة . فقد قام ساتل الإيسا "إيرس-١" بمناورة لتفادي الاصطدام في حزيران/يونيه ١٩٩٧ ، كما قام ساتل رصد الأرض "سبوت-٢" التابع للمركز الوطني الفرنسي للدراسات الفضائية بمناورة مشابهة في تموز/يوليه ١٩٩٧ .

١١٧ - ومع اطلاق المزيد من المركبات الفضائية الى منطقة المدار الثابت بالنسبة للأرض ، يصبح الاحتفاظ المنسق بالمحطات الفضائية متزايد الفائدة . ويمكن استخدام استراتيجيات الفصل بين متجهات الميل واللامركزية استخداما فعالا للابقاء على مسافات مأمونة بين المركبات الفضائية الموجودة معا في المدار الثابت بالنسبة للأرض . ويمكن أيضا استخدام التحكم بمتجه انحراف المركز للتقليل من احتمال الاصطدام بين سواتل تشكيلة ساتلية معينة في المدار الأرضي المنخفض .

٣-٢-٢-٢- الاطلاق

١١٨ - تتيح الحسابات التي تجرى قبل اطلاق المركبات الفضائية الأمريكية تحديد منافذ اطلاق مأمونة ، تكفل عدم مرور المركبة الفضائية بالقرب من مركبة فضائية مأهولة مقيمة (أي المكوك الفضائي أو محطة مير أو المحطة الفضائية الدولية) . ففيما يتعلق بالمكوك الفضائي ، تستخدم اجراءات تنبه مشابهة للاجراءات المتبعة في تحليل احتمالات الاقتران في المدار . وفي حال التنبؤ بحدوث اقتران ما ، يرجأ موعد الاطلاق ؛ وحتى هذا التاريخ أرجئ موعد اطلاق المكوك الفضائي مرتين تفاديا لاصطدام محتمل .

٣-٣- فعالية تدابير تخفيف مخاطر الحطام

١١٩ - ربما كان من أهم تدابير التخفيف زيادة الوعي بالمخاطر الناجمة عن بيئة الحطام المداري وبمصادر الحطام المداري العديدة . وادماج تدابير لتخفيف مخاطر الحطام في مرحلة مبكرة من تصميم المركبة يمكن أن يكون ناجع التكلفة . وقد قطفت جهود التوعية المبذولة لصناعات الفضاء الجوي ووكالات الفضاء الوطنية ثمار التدابير الطوعية التي استرشدت بمبادئ حسن التصرف في الفضاء القريب من الأرض .

١٢٠ - منذ أوائل الثمانينات ، أحدث اعتماد تدابير التخفيف أثرا في نمو بيئة الحطام المداري . فقد انخفض تواتر التشظيات الساتلية ذات الشأن ، العرضية منها والمتعمدة ، مما خفض معدل تزايد الحطام المداري . بل يلاحظ نقصان في الحطام الطويل الأمد الناشئ عن البعثات . وقد أتت التكنولوجيات والتصاميم الجديدة للدروع الواقية من الحطام الى انخفاض كبير في وزن الدروع الواقية مع زيادة فعاليتها .

١٢١ - وتعمل الأوساط المعنية بالفضاء الجوي على توضيح فاعلية وتكاليف سيناريوهات التخفيف النمطية . ولنماذج محاكاة البيئة الطويلة الأمد فائدة في هذا العمل . وليس بمقدور النماذج توفير تنبؤات دقيقة ببيئة الحطام بعد عدة عقود من الآن ، ولكن يمكنها تقييم التأثيرات النسبية لمختلف الممارسات التشغيلية .

٣-٣-١- سيناريوهات تدابير التخفيف

١٢٢ - تمثل الأجسام الناشئة عن البعثات وتشظيات السواتل وممارسات التخلص عند انتهاء البعثات عوامل هامة في التزايد المحتمل لأعداد الحطام المداري . ويرد أدناه عرض لسيناريوهات التخفيف النمطية الخمسة

لجميع البعثات الفضائية ، يبين الفاعلية المحتملة لتدابير التخفيف ؛ ولا يقصد بالسيناريوهات أن تكون تقريرية الطابع ، بل ينبغي استخدامها لأغراض المحاكاة فحسب . وهذه السيناريوهات هي :

(أ) سيناريو مرجعي يقوم على تدابير التخفيف الحالية ؛

(ب) الازالة الشاملة للأجسام الناشئة عن البعثات ؛

(ج) التخميل الشامل لجميع السواتل عند انتهاء بعثاتها ؛

(د) التخلص الشامل من جميع السواتل الموجودة في المدار الثابت بالنسبة للأرض عند انتهاء بعثتها ؛

(هـ) انزال السواتل من المدار عند انتهاء بعثتها في المدار الأرضي المنخفض والمدار الانتقالي الثابت بالنسبة للأرض : وهذا يشمل نقل السواتل الى مدار أخفض من أجل تقصير أعمارها (الى ما يقل عن ٢٥ سنة مثلا) والاعادة فورا الى الغلاف الجوي .

١٢٣ - ثمة دراسات أولية بينت أنه يمكن تحقيق أقصى منفعة قريبة الأجل بالقضاء على الانفجارات العرضية للمركبات الفضائية والمراحل الصاروخية العليا . والوسيلة المثلى لضبط عمليات التكسر هذه هي تخميل المركبة عند انتهاء البعثة ، حسبما أثبته كثير من مشغلي المركبات الفضائية وعربات الاطلاق .

١٢٤ - أما على المدى البعيد ، فيمكن لتراكم الأجسام في المدار أن يزيد كثيرا من الخطر الذي يتهدد العمليات الفضائية في المدارات المنخفضة والعالية على السواء . وبدون علاج لبيئة الحطام أو تغيير في أساليب التشغيل ، سيؤدي تزايد عدد الأجسام الفضائية المقيمة والمساحة الاجمالية لمقاطعها المستعرضة الى ازدياد احتمال حدوث الاصطدامات ، التي يمكن أن تتسبب بدورها في توليد حطام جديد . ومن شأن موضع المركبات الفضائية الموجودة في المدار الأرضي المنخفض والمدار الانتقالي الثابت بالنسبة للأرض في مدارات تصريف ذات أعمار مدارية محدودة (٢٥ سنة مثلا أو أقل) أن يكون له أثر واضح في كبح تزايد جسيمات الحطام . ويبين الشكل التاسع العدد الاجمالي لجسيمات الحطام التي يزيد قطرها على ١ سم والموجودة في المدار الأرضي المنخفض ، في عدد من السيناريوهات .

٣-٣-٢- تكلفة تدابير التخفيف أو آثارها الأخرى

١٢٥ - يمكن لتدابير تخفيف مخاطر الحطام أن تؤثر في تصميم وتكلفة المركبات الفضائية وعربات الاطلاق وكذلك في عملياتها .

٣-٣-٢-١- تكاليف انشاء النظم

١٢٦ - من شأن تعديل تصاميم المركبات الفضائية وعربات الاطلاق ، من أجل تنفيذ تدابير التخفيف ، أن يزيد عموما من تكاليف انشاء النظم . غير أن ادماج تدابير التخفيف في مرحلة مبكرة من عملية التصميم أنجع تكلفة من تعديل التصميم لاحقا . ومع أن العربات يمكن أن تصبح أكثر تعقدا ، فقد يؤدي بعض تدابير التخفيف الى تصاميم أبسط والى وفورات في الوزن .

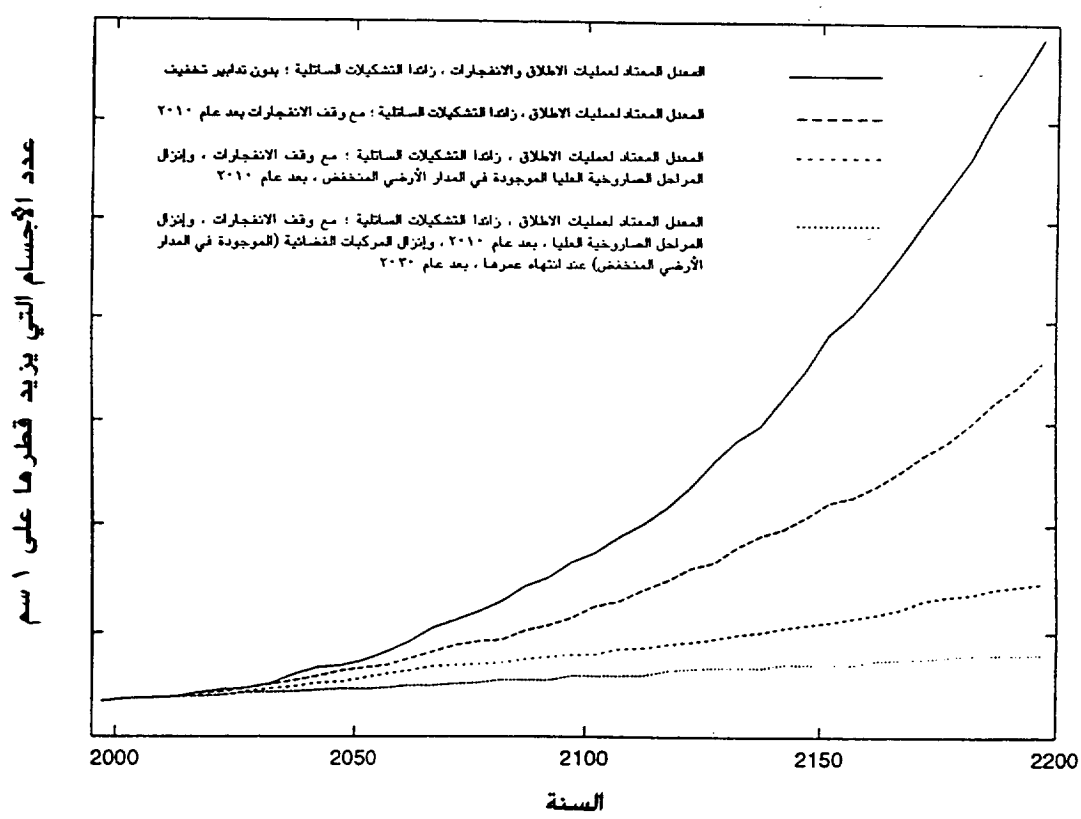
٣-٣-٢-٢- أداء الاطلاق والجزاء الكتلي

١٢٧ - من شأن توفير امكانية عودة المراحل الصاروخية العليا وعربات الاطلاق الى الغلاف الجوي أن يؤثر على مسار الاطلاق وأدائه . وبالمثل ، من شأن اضافة وزن الى عربة الاطلاق أو المركبة الفضائية من أجل تحقيق أهداف التخفيف أن يقلل من السعة المتاحة للحمولة النافعة . فقد تلزم موارد اضافية من الوقود الداسر أو من الطاقة الكهربائية . ويتباين مقدار هذه العواقب تبعا لنوع التدبير التخفيفي المختار ونوع المركبة .

٣-٣-٢-٣- عمر البعثة

١٢٨ - قد تؤدي استراتيجيات الانزال من المدار ، فيما يتعلق بتصميم معين ، الى تقليص العمر الفعلي للبعثة . وقد تقبل كثير من مشغلي مركبات المدار الثابت بالنسبة

الشكل التاسع
العدد الاجمالي لجسيمات الحطام التي يزيد قطرها على سنتيمتر واحد في المدار الأرضي المنخفض ، لمختلف السيناريوهات ، ٢٠٠٠ - ٢٢٠٠



للأرض هذا الجزاء حفاظا على نظمهم المدارية . واذا أخذ هذا الجزاء بعين الاعتبار أثناء عملية التصميم فيمكن أن تظل كل متطلبات البعثة من حيث العمر قابلة للتحقيق ، وان كان قد يترتب على ذلك زيادة في الوزن أو التكلفة .

٣-٣-٢-٤- الموثوقية

١٢٩ - قد يؤدي ادماج تدابير تخفيف مخاطر الحطام في المركبة الفضائية والمراحل الصاروخية العليا الى زيادة أو انقاص الموثوقية الاجمالية . فعلى سبيل المثال ، توفر تدابير التدريع حماية من الحطام الصغير ومن الاشعاع ، مما قد يحسِّن موثوقية المركبة . أما اضافة صمامات تفريغ من أجل التخلص من الوقود الداسر المتبقي فقد يقلل من موثوقية النظام ، ولكن هذه الآثار كثيرا ما تكون ضئيلة .

٤ - الخلاصة

١٣٠ - نظرت اللجنة الفرعية العلمية والتقنية التابعة للجنة استخدام الفضاء الخارجي في الأغراض السلمية ، أثناء دراستها المتعددة السنوات لموضوع الحطام الفضائي ، في الجوانب التالية : (أ) حالة المعارف المتعلقة بأجسام الحطام القريبة من الأرض والمتأتية من أجهزة استشعار موضعية وأرضية ؛ (ب) قدرة النماذج الحاسوبية على تقييم مخاطر الحطام وعلى التنبؤ بتزايد الحطام الفضائي ؛ (ج) مجموعة منوعة من تدابير تخفيف مخاطر الحطام الفضائي .

١٣١ - باستخدام نظم مراقبة بصرية ورادارية أرضية

في مختلف أنحاء العالم ، يمكن رصد وتتبع الأجسام الفضائية التي يزيد قطرها على ١٠ سم في المدار الأرضي المنخفض وعلى ١ م في المدار الثابت بالنسبة للأرض . ويوجد في مدارات الأرض ما يزيد على ٥٠٠ ٨ جسم مفهرس . وقد تزايد عدد الأجسام المفهرسة الموجودة في المدارات بمعدل خطي نسبيا على مدى العقود القليلة الماضية .

١٣٢ - استحدث بعض البلدان نماذج حاسوبية للحطام المداري استنادا الى فهارس الأجسام الكبيرة والى البيانات الاحصائية المتحصل عليها من مجموعة واسعة من أجهزة الاستشعار . وعلى الرغم من اختلاف التقنيات المستخدمة في تلك النماذج ، فثمة توافق نوعي في الاتجاهات والمناحي المتنبأ بها لتطور بيئة الحطام المداري في المستقبل .

١٣٣ - ومن بين التدابير المحددة لتخفيف مخاطر الحطام ، وجد أن الحد من الحطام الناشىء عن البعثات ومنع الانفجارات العرضية قد أثبتا فاعليتهما وبدأ تنفيذهما فعلا الى حد ما . كما أن نقل المركبات الفضائية الموجودة في المدار الثابت بالنسبة للأرض الى مدارات تصريف عند أنتهاء مدة عملها قد أخذ يصبح ممارسة معتادة تتبع كتدبير وسيط منعا لحدوث مشاكل مستقبلية في المدار الثابت بالنسبة للأرض . وقد اقترحت لجنة "يادك" خوارزمية لتحديد الارتفاع الأدنى لمدار التصريف فوق المدار الثابت بالنسبة للأرض . وبالنسبة لبعض السواتل الموجودة على مدارات أرضية منخفضة ذات عمر طويل ، يعتزم نقل تلك السواتل الى مدارات أقصر عمرا عند انتهاء مدة عملها . ومن شأن هذه الاجراءات اجمالا أن تكون بالغة الفاعلية في الحد من كثافة الأجسام في النطاقات الارتفاعية التي توجد فيها حاليا أعلى كثافة من أجسام الحطام . وبما أن معظم تدابير التخفيف تحمل البعثات قدرا من التكاليف الاضافية ، فمن الضروري أن تطبق نفس الاجراءات الخاصة بتفادي نشوء الحطام على نطاق عالمي .

١٣٤ - وقد أصبح كثير من المؤسسات العاملة في ميدان الفضاء على وعي بمخاطر الحطام الفضائي المحتملة ، وشرع بعض تلك المؤسسات في بذل جهود لتقليل تولد الحطام ولتقاسم نتائج تلك الجهود مع المجتمع الدولي . وقد كان لأنشطة منظمات دولية مثل لجنة "يادك" والأكاديمية الدولة للملاحة الفضائية مساهمات ايجابية في بحوث الحطام الفضائي والتوعية بمخاطره . ويمثل أعضاء لجنة "يادك" جميع الدول التي لديها قدرات اطلاق والدول التي تصمم وتبني معظم المنظومات الفضائية .

١٣٥ - وفي معظم الحالات ، يمثل الحطام الفضائي الاصطناعي في الوقت الحاضر خطرا ضئيلا على نجاح عمليات المركبات الفضائية العاملة حاليا في مدار حول الأرض ، والتي يناهز عددها ٦٠٠ مركبة . بيد أن عدد أجسام الحطام المعروفة والمقدرة يتزايد ، وبالتالي ستزداد احتمالات حدوث اصطدامات تنطوي على أضرار . ونظرا لصعوبة تحسين بيئة الفضاء بالتكنولوجيات الموجودة ، يعتبر تنفيذ بعض التدابير الرامية الى تخفيف مخاطر الحطام خطوة حصيفة صوب الحفاظ على الفضاء للأجيال المقبلة . وفي بعض الحالات ، لا يزال يتعين القيام بأعمال تقنية لتحديد أكثر الحلول فاعلية وأنجعها تكلفة .

الحواشي

(١) سوف تعرض على اللجنة الفرعية في دورتها السادسة والثلاثين أحدث وثيقة تتضمن تلك المعلومات (A/AC.105/708) .

المرفق

قائمة الوثائق ذات الصلة بموضوع "الحطام الفضائي"

تقارير دورات اللجنة الفرعية العلمية والتقنية

تقرير اللجنة الفرعية العلمية والتقنية عن أعمال دورتها الحادية والثلاثين (A/AC.105/571 ، ١٠ آذار/مارس ١٩٩٤)

تقرير اللجنة الفرعية العلمية والتقنية عن أعمال دورتها الثانية والثلاثين (A/AC.105/605 ، ٢٤ شباط/فبراير ١٩٩٥)

تقرير اللجنة الفرعية العلمية والتقنية عن أعمال دورتها الثالثة والثلاثين (A/AC.105/637 و Corr.1 ، ٤ آذار/ مارس ١٩٩٦)

تقرير اللجنة الفرعية العلمية والتقنية عن أعمال دورتها الرابعة والثلاثين (A/AC.105/672 ، ١٠ آذار/مارس ١٩٩٧)

تقرير اللجنة الفرعية العلمية والتقنية عن أعمال دورتها الخامسة والثلاثين (A/AC.105/697 و Corr.1 ، ٢٥ شباط/فبراير ١٩٩٨)

تقارير عن البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي

استخدام مصادر الطاقة النووية في الفضاء الخارجي (A/AC.105/C.1/WG.5/L.24 ، ١٥ كانون الثاني/ يناير ١٩٩٠)

استخدام مصادر الطاقة النووية في الفضاء الخارجي (A/AC.105/C.1/WG.5/L.24/Add.1 ، ١٤ شباط/ فبراير ١٩٩٠)

استخدام مصادر الطاقة النووية في الفضاء الخارجي (A/AC.105/C.1/WG.5/L.24/Add.2 ، ٢٦ شباط/ فبراير ١٩٩٠)

استخدام مصادر الطاقة النووية في الفضاء الخارجي (A/AC.105/C.1/WG.5/L.24/Add.3 ، ٢٨ شباط/ فبراير ١٩٩٠)

الحطام الفضائي : حالة العمل في ألمانيا : ورقة عمل مقدمة من ألمانيا (A/AC.105/C.1//L.170 ، ١٢ شباط/فبراير ١٩٩١)

البحوث الوطنية المتعلقة بمسألة الأنقاض الفضائية (A/AC.105/510 ، ٢٠ شباط/فبراير ١٩٩٢)

البحوث الوطنية المتعلقة بمسألة الأنقاض الفضائية (A/AC.105/510/Add.1 ، ٢١ شباط/فبراير ١٩٩٢)

البحوث الوطنية المتعلقة بمسألة الأنقاض الفضائية (A/AC.105/510/Add.2 ، ٢٦ شباط/فبراير ١٩٩٢)

البحوث الوطنية المتعلقة بمسألة الأنقاض الفضائية (A/AC.105/510/Add.3 ، ٢٦ شباط/فبراير ١٩٩٢)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/542 ، ٨ شباط/فبراير ١٩٩٣)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/542/Add.1 ، ١٧ شباط/فبراير ١٩٩٣)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/542/Add.2 ، ١٩ شباط/فبراير ١٩٩٣)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/565 و Corr.1 ، ١٦ كانون الأول/ديسمبر ١٩٩٣)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/565/Add.1 ، ٢١ شباط/فبراير ١٩٩٤)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/565/Add.2 ، ٢٣ شباط/فبراير ١٩٩٤)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/593 ، ١ كانون الأول/ديسمبر ١٩٩٤)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/593/Add.1 ، ٢٤ كانون الثاني/يناير ١٩٩٥)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/593/Add.2 ، ٦ شباط/فبراير ١٩٩٥)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/593/Add.3 ، ٧ شباط/فبراير ١٩٩٥)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/593/Add.4 ، ٢٤ شباط/فبراير ١٩٩٥)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/619 ، ٢١ تشرين الثاني/نوفمبر ١٩٩٥)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/619/Add.1 ، ١ شباط/فبراير ١٩٩٦)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/659 ، ١٣ كانون الأول/ديسمبر ١٩٩٦)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/659/Add.1 ، ٦ شباط/فبراير ١٩٩٧)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/659/Add.2 ، ١٤ شباط/فبراير ١٩٩٧)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/680 ، ١ كانون الأول/ديسمبر ١٩٩٧)

البحوث الوطنية المتعلقة بالحطام الفضائي ؛ سلامة السواتل التي تعمل بالطاقة النووية ؛ مشاكل اصطدامات مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي (A/AC.105/680/Add.1 ، ٢ شباط/فبراير ١٩٩٨)

الوثائق المتعلقة بخطوات التخفيف التي اتخذتها وكالات الفضاء

الخطوات التي اتخذتها وكالات الفضاء لتقليل امكانية تزايد الحطام الفضائي أو تسببه في أضرار (A/AC.105/620 ، ٢١ تشرين الثاني/نوفمبر ١٩٩٥)

الخطوات التي اتخذتها وكالات الفضاء لتقليل امكانية تزايد الحطام الفضائي أو تسببه في أضرار (A/AC.105/663 ، ١٣ كانون الأول/ديسمبر ١٩٩٦)

الخطوات التي اتخذتها وكالات الفضاء لتقليل امكانية تزايد الحطام الفضائي أو تسببه في أضرار (A/AC.105/681 ، ١٧ كانون الأول/ديسمبر ١٩٩٧)

العروض العلمية والتقنية

العروض العلمية والتقنية المقدمة الى اللجنة الفرعية العلمية والتقنية (A/AC.105/487 ، ٩ أيار/مايو ١٩٩١)

العروض العلمية والتقنية المقدمة الى اللجنة الفرعية العلمية والتقنية (A/AC.105/516 ، ٢٩ أيار/مايو ١٩٩٢)

العروض العلمية والتقنية المقدمة الى اللجنة الفرعية العلمية والتقنية (A/AC.105/546 ، ١٨ أيار/مايو ١٩٩٣)

العروض العلمية والتقنية المقدمة الى اللجنة الفرعية العلمية والتقنية في دورتها الحادية والثلاثين (A/AC.105/574 ، ١٢ أيار/مايو ١٩٩٤)

العروض العلمية والتقنية المقدمة الى اللجنة الفرعية العلمية والتقنية في دورتها الثانية والثلاثين (A/AC.105/606 ، ٢٧ نيسان/أبريل ١٩٩٥)

العروض العلمية والتقنية المقدمة الى اللجنة الفرعية العلمية والتقنية في دورتها الثالثة والثلاثين (A/AC.105/638 ، ٧ أيار/مايو ١٩٩٦)

العروض العلمية والتقنية المقدمة الى اللجنة الفرعية العلمية والتقنية في دورتها الرابعة والثلاثين (A/AC.105/673 ، ٧ أيار/مايو ١٩٩٧)

العروض العلمية والتقنية المقدمة الى اللجنة الفرعية العلمية والتقنية في دورتها الخامسة والثلاثين (A/AC.105/699 ، ٢٠ نيسان/أبريل ١٩٩٨)

ورقات العمل والتقارير

الأنقاض الفضائية : تقرير حالة مقدم من لجنة أبحاث الفضاء (A/AC.105/403 ، ٦ كانون الثاني/يناير ١٩٨٨)

الآثار البيئية للأنشطة الفضائية : تقرير مقدم من لجنة أبحاث الفضاء والاتحاد الدولي للملاحة الفضائية (A/AC.105/420 ، ١٥ كانون الأول/ديسمبر ١٩٨٨)

مشكلة الأنقاض الفضائية : ورقة عمل مقدمة من استراليا وألمانيا (جمهورية - الاتحادية) وبلجيكا والسويد وكندا ونيجيريا وهولندا (A/AC.105/L.179 ، ١ حزيران/يونيه ١٩٨٩)

استخدام مصادر القدرة النووية في الفضاء الخارجي ؛ الحطام الفضائي : وثيقة عمل مقدمة من الاتحاد الروسي (A/AC.105//C.1/L.193 ، ٢١ شباط/فبراير ١٩٩٤)

الحطام الفضائي : تقرير الاتحاد الدولي للملاحة الفلكية (A/AC.105/570 ، ٢٥ شباط/فبراير ١٩٩٤)

ارتطام مصادر الطاقة النووية بالحطام الفضائي : ورقة عمل مقدمة من الاتحاد الروسي (A/AC.105/C.1/L.204 ، ١٣ شباط/فبراير ١٩٩٦)

عرض موجز للأعمال التي قام بها العلماء الروس بشأن مشكلة التلوث التقني المنشأ للفضاء القريب : ورقة عمل مقدمة من الاتحاد الروسي (A/AC.105/C.1/L.205 ، ١٣ شباط/فبراير ١٩٩٦)

الحطام الفضائي : ورقة عمل مقدمة من الأكاديمية الدولية للملاحة الفضائية (A/AC.105/C.1/L.217 ، ١٢ كانون الثاني/يناير ١٩٩٨)

الحطام الفضائي : ورقة عمل مقدمة من الاتحاد الروسي (A/AC.105/C.1/L.219 ، ١٠ شباط/فبراير ١٩٩٨)

التنقيحات المدخلة على التقرير التقني

تنقيحات على التقرير التقني للجنة الفرعية العلمية والتقنية بشأن الحطام الفضائي (A/AC.105/C.1/L.214 ، ٢٦ شباط/فبراير ١٩٩٧)

تنقيحات على التقرير التقني للجنة الفرعية العلمية والتقنية بشأن الحطام الفضائي (A/AC.105/C.1/L.224 ، ١٩ شباط/فبراير ١٩٩٨)

- - - - -