JSST
Journal of Space Science & Technology

Vol. 9/ No. 3/ 2016

Identification of Space Deployable Mechanisms

H. Mansori-Nezhad[1*], K. Daneshjo[2] and M. Shahravi[3]

1, 2. School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology

3. School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology

[*]Postal Code: 168413114, Tehran, IRAN

mansoory@elec.iust.ac.ir

The mechanism is a set of mechanical components that are connected and can move relative to each other. If it can be used in space, it is called space mechanism. The space mechanisms are widely used in space missions. Many space missions have been failed due to malfunction of space mechanisms. This clears the importance in research and development of space mechanism. The deployable mechanisms are categorized based on geometry and performance. A variety of space deployable mechanisms are investigated and their advantages and limitations are introduced in this paper. All types of space mechanisms which have been used since the beginning of space travels are covered in this paper, hence this paper is a thorough review paper on this topic. This feature of paper, makes it unique in the field of information about new space mechanisms and usable in the country space industry.

Keyword: Space deployable mechanism, Space boom, Spacecraft Deployable antenna, Space Inflatable devices

1. M. Sc. (Corresponding Author)
2. Professor
3. Assistant Professor

Received: 2016.05.04 , Accepted: 2017.01.25

JSST
فصلنامهٔ علمی - پژوهشی علوم و فناوری فضایی

جلد ۹ / شمارهٔ ۳/ پاییز ۱۳۹۵
ص. ص . ۷۱- ۵۳

(مقالهٔ مروری)

شناسایی انواع مکانیزم‌های بازشوندهٔ فضایی

حسین منصوری‌نژاد [۱*]، کامران دانشجو [۲] و مجید شهروی [۳]

۱، ۲. دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳. دانشکدهٔ مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

*تهران، علم و صنعت، کدپستی: ۱۶۸۴۱۳۱۱۴

mansoory@elec.iust.ac.ir

به مجموعه‌ای از اجزای مکانیکی که به یکدیگر متصل یا در تماس است و می‌تواند نسبت به هم حرکت کند مکانیزم گفته می‌شود. حال اگر این مکانیزم‌ها قابلیت استفاده در محیط فضا را داشته باشد، مکانیزم‌های فضایی نامیده می‌شود. از مکانیزم‌های فضایی در مأموریت‌های فضایی استفاده گسترده‌ای می‌شود. اهمیت تحقیق و توسعهٔ طراحی و ساخت این مکانیزم‌ها ازآنجا مشخص می‌شود که تاکنون بسیاری از مأموریت‌های فضایی بر اثر نقص عملکرد مکانیزم‌ها با شکست روبه‌رو شده است. مکانیزم‌های باز شوندهٔ فضایی براساس هندسه و کارایی به انواع مختلفی تقسیم می‌شود. در این مقاله، انواع مکانیزم‌های بازشوندهٔ فضایی بررسی و مزیت‌هاو محدودیت‌های هریک معرفی می‌شود. از امتیازهای این مقاله، اشاره به تمامی انواع مدل‌های مکانیزم‌های فضایی از آغاز سفرهای فضایی تاکنون است و از این جنبه مرور کامل و جامعی به شمار می‌آید. این ویژگی مقاله، آن را به عنوان یک مرجع منحصربه‌فرد و دارندهٔ اطلاعات مکانیزم‌های جدید در زمینهٔ فضایی برای استفاده در صنعت فضایی کشور مطرح می‌کند.

واژه‌های کلیدی: مکانیزم‌های بازشوندهٔ فضایی، بوم‌های فضایی، آنتن‌های بازشوندهٔ فضاپیما، وسایل بادشوندهٔ فضایی

علائم و اختصارات

نیروی کشش سیم برحسب نیوتن	T_w
طول سیم برحسب متر	L
جرم انتهایی برحسب کیلوگرم	m
جرم سیم بر واحد طول (kg/m)	μ
سرعت زاویه‌ای ماهواره	ω

مقدمه

از اولین روزهای پرتاب ماهواره‌ها و فضاپیماها به فضا، از مکانیزم‌های بازشونده در برنامه‌های فضایی استفاده گسترده‌ای شده است، زیرا این مکانیزم‌ها برای افزایش عملکرد و کارایی ماهواره‌ها بسیار ضروری هستند. ازآنجاکه فضای در نظر گرفته‌شده برای ماهواره در پرتابگر محدود است، بسیاری از وسایل و تجهیزات ماهواره مانند آنتن‌های فضایی و پنل‌های سلول‌های خورشیدی به حالت جمع‌شده[۴] در داخل پرتابگر قرار می‌گیرد و سپس، هنگام قرارگرفتن ماهواره در مدار، با استفاده از مکانیزم‌های بازشونده، این تجهیزات باز و گسترده می‌شود [۱]. شکل (۱) قرار گرفتن ماهواره درون محفظهٔ پرتابگر و باز شدن آن را در مدار نشان می‌دهد [۲].

اصول طراحی مکانیزم‌های فضایی با انواع مکانیزم‌های استفاده‌شده در وسایل زمینی متفاوت است. در طراحی مکانیزم‌های فضایی باید فاکتورهایی مانند سبک بودن، کارآمدی و سازگاری مواد در شرایط خلأو برخورداری از قابلیت اطمینان بالا لحاظ شود.زیرا وقتی فضاپیما در مدار قرار می‌گیرد، سرویس‌دهی و تعمیر اجزای آن

۱. کارشناسی ارشد (نویسندهٔ مخاطب)
۲. استاد
۳. استادیار

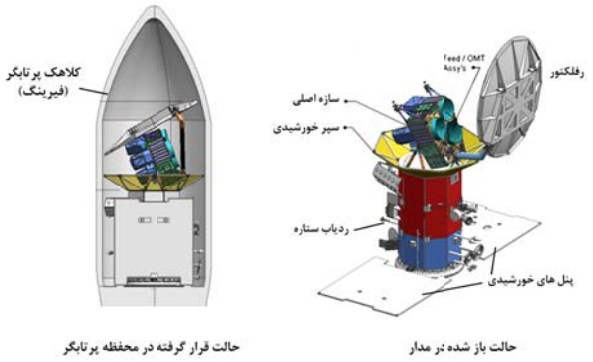
4. Stowed

دریافت مقاله: ۹۵/۰۲/۲۵ ، تأیید مقاله: ۹۵/۱۱/۰۶

غیرممکن یا فقط در شرایط خاصی امکان‌پذیر خواهد بود. برخی دیگر از شرایطی که در طراحی مکانیزم‌های فضایی باید به آن توجه کرد عبارت است از:

- وجود ارتعاشات نیرومند در طول پرتاب
- نبود نیروی جاذبه در فضا
- وجود خلأ در فضا
- توان الکتریکی محدود در ماهواره[۳]

همان‌طورکه در شکل (۱) مشخص است، در بسیاری از مأموریت‌های فضایی معمولاً حجم ماهواره بزرگ‌تر از ظرفیت در دسترس در پرتابگر است. یکی دیگر از عوامل محدودکنندهٔ طراحی، حداکثر وزن مجاز فضاپیماست که به نوع پرتابگر و مقصد ماهواره بستگی دارد و برخلاف محدودیت حجم، به طورکلی قابل مذاکره است [۴].



شکل ۹- فضای محدود پرتابگر برای قرارگیری ماهواره

انواع مکانیزم‌های بازشوندهٔ فضایی

محدودهٔ تعریف وسایل بازشوندهٔ فضایی بسیار گسترده است؛ به‌طوری‌که این تعریف شامل کوچک‌ترین مکانیزم‌های ماهواره مانند پوشش روی عدسی دوربین تا بزرگ‌ترین مکانیزم‌ها مانند رفلکتورهای بازشونده می‌شود [۵]. ازاین‌رو، دسته‌بندی مکانیزم‌های بازشوندهٔ ماهواره بسیار ضروری به‌نظر می‌رسد. مکانیزم‌های بازشوندهٔ فضایی براساس نحوهٔ باز شدن به چهار دستهٔ کلی تقسیم می‌شود:

۱. مکانیزم‌های بازشوندهٔ مفصل‌شده[۵]
۲. مکانیزم‌های بازشوندهٔ خطی[۶]
۳. مکانیزم‌های بازشوندهٔ سطحی[۷]
۴. مکانیزم‌های بازشوندهٔ حجمی[۸]

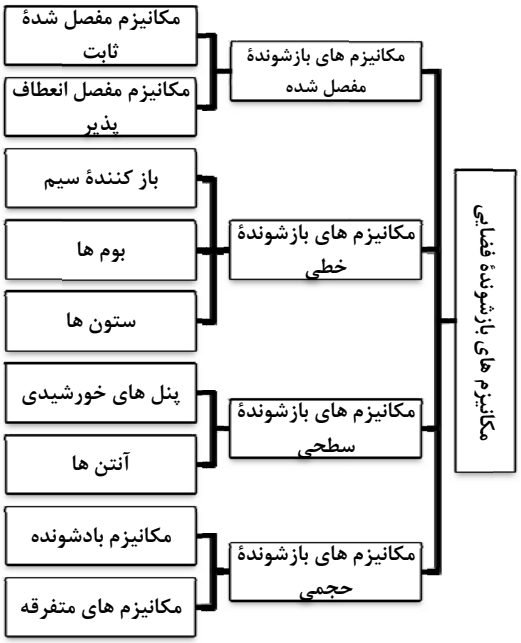
در شکل (۲) انواع مکانیزم‌های فضایی و تنوع آنها نشان داده شده است. در ادامه، هرکدام از این مکانیزم‌ها بررسی می‌شود.

5. Hinged deployable mechanism
6. Linear deployable mechanism
7. Surface deployable mechanism
8. Volume deployable mechanism

مکانیزم‌های بازشوندهٔ مفصل‌شده

بیشتر عملیات بازشدن در مکانیزم‌های فضایی، شامل چرخشی سادهیا انتقال مجموعه‌ای از مکانی به مکان دیگر است که می‌تواند به‌وسیلهٔ مفصلی ساده اتفاق افتد. به طوریکه وسیلهٔ بازشونده توسط اتصالات لولایی یا انتقالی به بدنهٔ ماهواره مفصل می‌شود و هنگام باز شدن، با چرخش حول مفصل یا حرکت در راستای اتصال عمل می‌کند[۶].

برای مثال، یک آنتن انعطاف‌پذیر و شلاقی[۹] می‌تواند تنها به‌وسیلهٔ یک مفصل فنریِ بارگذاری‌شده‌اش حالت جمع‌شدهٔ روی بدنهٔ ماهواره رها شود و با چرخشی کامل، به حالت بازشده برسد. در مثالی پیچیده‌تر، پوشش دریچه‌ای در ماهواره می‌تواند توسط چهار میلهٔ ارتباطی[۱۰] حرکت داده و از دریچه دور شود.



شکل ۱۰- انواع مکانیزم‌های بازشوندهٔ فضایی

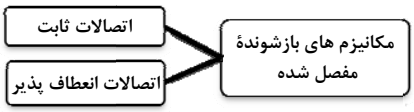
نکته‌ای که در رابطه با اتصالات انتقالی باید اشاره کرد، امکان حرکت رفت و برگشتی آنها در حجم مشخصی از فضاست که این حجم اشغالی بسیار کمتر از حجم اشغالی توسط یک بوم بازشوندهٔ لوله‌ای (برای مثال) است [۷].

برای تأمین انرژی باز شدن اتصالات و مفاصل می‌توان از منابع انرژی مختلفی در ماهواره استفاده کرد. انتخاب نیروی محرک

9. Whip
10. Bar linkage

به هندسهٔ مکانیزم و همچنین، به شرایط دینامیکی آن بستگی دارد. در بعضی اتصالات مانند اتصالات فنر نواری[11] به انرژی خارجی برای باز شدنِ اتصال نیاز نیست و از انرژی الاستیک ذخیره‌شده در خود اتصال استفاده می‌شود. در اتصالات دیگر، برای بازشدن از فنرها، عملگرها و موتورهای مختلف استفاده می‌شود.

هنگامی‌که حرکت‌دهندهٔ اصلی یک فنر باشد، باز شدن ممکن است به‌صورت سریع و ناگهانی باشد و در انتهای حرکت، بار ضربه‌ای بر وسیله وارد شود. برای جلوگیری از بروز این مشکل باید مکانیزمی برای میرا کردن حرکت پیش‌بینی شود. بنابراین، می‌توان از صفحات فوم و رزین یا میراکننده ویسکوز چرخشی استفاده کرد [۸]. مکانیزم‌های بازشوندهٔ مفصل‌شده به دو دستهٔ اتصالات ثابت[12] و اتصالات انعطاف‌پذیر[13] تقسیم می‌شود.



شکل ۱۱- انواع مکانیزم‌های بازشوندهٔ مفصل‌شده

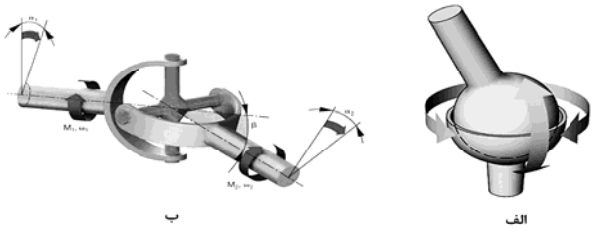
اتصالات ثابت

اتصالات ثابت استفادهٔ گسترده‌ای در مکانیزم‌های فضایی دارد. تاکنون اتصالات ثابت در هندسه‌های گوناگونی طراحی و ساخته شده‌است. هندسهٔ اتصالات به تعداد درجات آزادی مورد نیاز مکانیزم بستگی دارد. ساده‌ترین اتصال ثابت، مفصل لولایی تک‌محوره است[۹]. در شکل (۴) نمونه‌ای از این اتصال نشان داده شده است. این اتصال در مفصل بازشوندهٔ آنتن گالیله[14] به کار رفته است[۱۰]. در این مفصل از میراکننده‌ای استفاده نشده است، زیرا وزن آنتن بسیار کم و حجم آن زیادبوده است.

شکل ۱۲- مفصل باز شوندهٔ آنتن گالیله (ساخته‌شده در مرکز اِ ای سی- اِیبل[15]) [۴]

هنگامی‌که به بیش از یک مفصل ثابت نیاز است، در طراحی و تنظیم مفاصل باید دقت و ظرافت زیادی لحاظ کرد تا حرکت باز شدن با موفقیت کامل همراه شود. به‌طور مثال اگر از چند مفصل لولایی تک‌محوره در باز شدن پنل‌های خورشیدی استفاده شود، محورهای این مفاصل باید باهم موازی باشد تا از بروز هرگونه ناهماهنگی در باز شدن جلوگیری شود [۱۱].

اگر تعداد درجات آزادی لازم برای مکانیزم بازشونده بیش از یک باشد، می‌توان از مفاصل چندمحوره مانند مفصل توپی[16] و مفصل یونیورسال[17] استفاده کرد. در شکل (۵) یک نمونه از مفصل توپی و یونیورسال نشان داده شده است.



شکل ۱۳-(الف) مفصل توپی، (ب) مفصل یونیورسال

اتصالات انعطاف‌پذیر

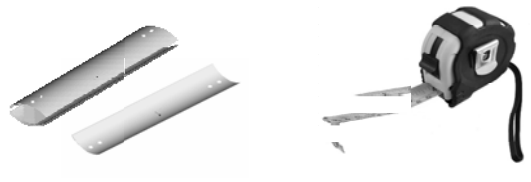
استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر، یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای اتصال دو جزء برای چرخش یا انتقال آها نسبت به هم است. در این مکانیزم اغلب از یک بازوی انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود که در یک نقطه قابلیت ارتجاع دارد و به‌صورت یک لولا در آن نقطه عمل می‌کند [۱۲]. یکی از رایج‌ترین اتصالات انعطاف‌پذیر فنر نواری[18]است. در ادامه، این مکانیزم معرفی خواهد شد.

مفصل‌های فنر نواری

در سیستم‌های فضایی برای باز کردن آنتن‌ها و پنل‌های خورشیدی از فنر نواری استفادهٔ گسترده‌ای می‌شود. استفاده از این نوارها برای جایگزینی مکانیزم‌های قدیمی مفصلی رو به افزایش است، زیرا تکرارپذیری و دقت نقطه‌ای آنها بالاست. از مزیت‌های استفاده از فنرهای نواری می‌توان به گشتاور بازشوندگی[19] آنها که هنگام خم شدن تولید می‌شود و همچنین، گشتاور قفل‌شوندگی[20] اشاره کردکه هنگام باز شدن کامل آنهاحاصل می‌شود و سبب حفظ پایداری آن خواهد شد. به علاوه، فنرهای نواریساده و بسیار سبک است و دقت عملکرد بالایی دارد. یک نمونهٔ ساده از فنرهای نواری، نوار متر نجاری[21] است[۱۳].

11. Tape spring
12. Rigid linkage
13. Flexible linkage
14. Galiloe antenna
15. AEC-ABLE

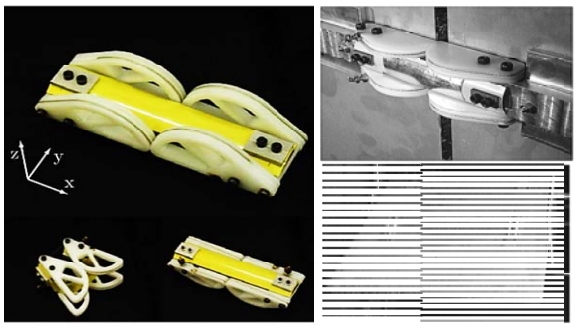
16. Ball joint
17. Universal joint
18. Tape spring
19. Deployment moment
20. Locking moment
21. Carpenter Tape



شکل ۱۴–فنرهای نواری

عیب اصلی استفاده از فنرهای نواری، مشکلات کنترل حرکت آن است. مثلاً وقتی فنر نواری باز می‌شود، ممکن است برگشت و حرکت داشته باشد، بنابراین، باید مکانیزمی برای کنترل و میرا کردن حرکت آن تعبیه شود[۱۴].

یکی از مکانیزم‌های موفق که تاکنون با استفاده از فنرهای نواریساخته شده است،مکانیزم TSR است که توسط دکتر پلگرینو[۲۲] طراحی و تهیه شده و هدف از آن، اتصال دوپنل به یکدیگر است و با به‌کارگیری آن چرخش ۱۸۰ درجه یک پنل روی پنل دیگری ممکن می‌شود. در این مکانیزم پنل‌ها به شکل لانه‌زنبوری ساخته شده است[۱۵].از مزیت‌های مکانیزم TSRمی‌توان به اصطکاک بسیار کم هنگام باز شدن، نیاز نداشتن به موتور محرکه و روغن‌کاری، تولید محدودیت در حرکت باز شدن (از حرکات اضافهٔفنر نواری جلوگیری می‌کند)، وزن کم، دقت بالا و توانایی در میرا کردن نوسانات فنر نواری اشاره کرد.



شکل ۱۵– مکانیزم TSR[۱۵]

مکانیزم‌های بازشوندهٔ خطی

مکانیزم‌های بازشوندهٔ خطی، مکانیزم‌هایی است که جهت باز شدن آنها در یک راستای طولی است و معمولاً سطح وسیعی تولید نمی‌کند. به علت جلوگیری از تداخل الکترومغناطیسی باید بعضی از تجهیزات ماهواره تا حد امکان دور از هم و بدون تأثیر از یکدیگر قرار گیرد. از طرفی، حجم محفظهٔ درون پرتابگر نیز محدود است، با توجه با این نیازمندی و محدودیت، استفاده از مکانیزم‌های بازشوندهٔ خطی روش مناسبی برای حل این مسئله است. معمولاً هدف از استفادهٔ مکانیزم‌های بازشوندهٔ خطی، انتقال شیئی در ماهواره از مکانی به مکان دیگر است. مکانیزم‌های بازشوندهٔ خطی شامل سه دستهٔ کلی است:

۱. بازکننده‌های سیم
۲. بوم‌ها
۳. ستون‌ها

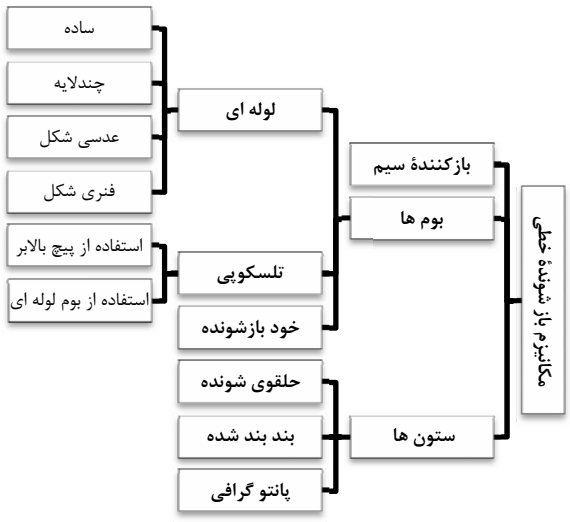
هرکدام از این دسته‌ها شامل انواع مختلفی است. در شکل (۸) انواع مکانیزم‌های بازشوندهٔ خطی نشان داده‌شده است. این انواع به‌طورکلی براساس افزایش سختی و مقاومت، نوع سطح مقطع و حجم مجاز طراحی تقسیم‌بندی و طراحی می‌شود. البته در بعضی موارد طراح ناچار است فقط از یک نمونه استفاده کند. مثلاً برای دستیابی به آنتن‌های شعاعی بلند در ماهواره‌های چرخان، تنها می‌توان از مکانیزم بازکنندهٔ سیم استفاده کرد [۴].

بازکننده‌های سیم

در این نوع مکانیزم‌ها، یک سیم با استفاده از نیروی گریز از مرکز ناشی از چرخش ماهواره باز می‌شود. درنتیجه، استفاده از این مکانیزم تنها در ماهواره‌های چرخان میسر است. این نیروی گریز از مرکز که به‌صورت یک نیروی کششی بوده، از رابطهٔ (۱) محاسبه می‌شود [۱۶]:

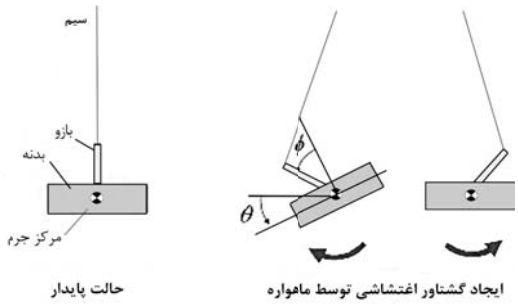
$$T_w = ml\omega^2 + {}^1\!/_2\,\mu L^2\omega^2 \qquad (۱)$$

هرگونه انحراف این سیم از راستای مرکز جرم، موجب تولید گشتاور اغتشاشی برای ماهواره می‌شود. در شکل (۹) اثر امتداد سیم بازشونده روی پایداری ماهواره نشان داده شده است.



شکل ۱۶– انواع مکانیزم‌های بازشوندهٔ خطی

22. Sergio Pellegrino



شکل ۱۷– اثر امتداد سیم بازشونده روی پایداری ماهواره[۱۶]

بوم‌ها

بوم به استوانه‌ای گفته می‌شود که نسبت طول به قطر آن زیاد باشد. در صنعت فضایی از بوم‌های بازشونده استفاده زیادی شده است[۱۷]. بوم‌های بازشونده فضایی به سه دستهٔ کلی زیر تقسیم می‌شود:

۱. بوم‌های لوله‌ای
۲. بوم‌های تلسکوپی
۳. بوم‌های خودبازشونده

در ادامه، جزئیات هریک تشریح خواهد شد.

بوم‌های لوله‌ای

بوم‌های لوله‌ای به دسته‌ای از بوم‌های گسترش‌یابنده گفته می‌شود که بر اثر باز شدن و رسیدن به هندسهٔ نهایی، سختی خود را به دست می‌آورد. بوم‌های لوله‌ای دیوار نازک از قدیمی‌ترین سازه‌های گسترش یابندهٔ فضایی به شمار می‌آید. تاکنون از بوم‌های لوله‌ای در نقش آنتن‌های مونوپل[۲۳] ودی‌پل[۲۴]، بوم‌های گرادیان جاذبه‌ای و نگهدارندهٔ حسگرها و دوربین‌ها در ماهواره‌های فراوانی استفاده‌شده است[۱۸]. تابه‌حال درخصوص بوم‌های لوله‌ای طراحی‌های بسیار زیادی ارائه شده استکه تفاوت آنها عمدتاً در هندسهٔ شکل گسترش‌یافته و همچنین، نحوهٔ قرارگیری لوله‌ها داخل یکدیگر است. انتخاب هندسهٔ بوم در حالت گسترش‌یافته به نوع باری بستگی دارد که در مسیر باز شدن یا بعد از باز شدن روی آن اعمال می‌شود. برای مثال اگر بار اعمالی غالب بر مکانیزم خمشی باشد، بوم باید صلبیت خمشی بالایی داشته باشد، پس می‌توان از بوم‌های خودقفل‌شونده استفاده کرد. از موادی که برای ساخت این بوم‌ها استفاده می‌شود می‌توان به فولاد سخت‌شده، برلیم ـ مس و فیبر کربن مسلح اشاره کرد [۴].

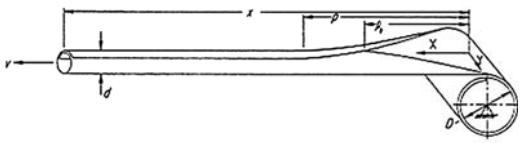
روش‌های باز شدن بوم‌های لوله‌ای

تاکنون برای بوم‌های لوله‌ای طراحی‌های متفاوتی ارائه شده است که در هرکدام نحوهٔ اتصال و نشستن لایه‌های بوم روی یکدیگر متفاوت است. انتخاب هریک از این نوع بوم‌ها به مقدار بار اعمالی، فضای اشغالی توسط بوم، مسیر باز شدن و هندسهٔ بوم بازشدهبستگی دارد. این نوع از بوم‌ها قابلیت جمع شدن و برگشت به حالت اولیه را نیز دارند وبا استفاده از تغییر شکل الاستیک پوستهٔ نازک به هندسهٔ نهایی خود می‌رسد. در حالت کلی، این بوم‌ها به دور یک استوانه پیچیده می‌شود و برای باز یا جمع شدن آن، این استوانه باید چرخش داشته باشد؛ بنابراین، از روش‌های مختلفی برای گسترش این بوم‌ها استفاده می‌شود:

أ. با غلتک ابتدایی
ب. با غلتک انتهایی
ج. روش باز شدن حلقوی

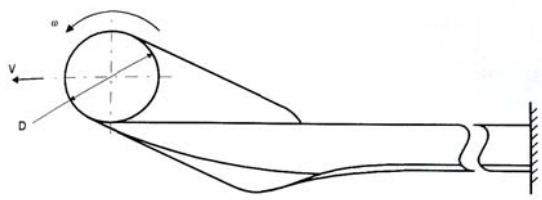
در ادامه، مکانیزم هرکدام از این روش‌ها بررسی خواهد شد.

الف) روش باز شدن با غلتک ابتدایی: در این روش که ساده‌ترین نوع است، بوم به دور یک غلتک پیچیده می‌شود و با چرخش این غلتک بوم گسترش می‌یابد. مطابق شکل (۱۰) محل غلتک چرخان ثابت است و بوم پس از باز شدناز آن دور می‌شود. این روش قابل اعتمادترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌هاست. با استفاده از این روش می‌توان بوم را به حالت اولیه و جمع‌شده برگرداند و همچنین، سرعت باز شدن را نیز به‌راحتی کنترل کردد، پس این روش نسبت به دیگر روش‌های شناخته‌شده کارآمدتر است. در این روش از طرح‌های گوناگونی برای روی هم قرار گرفتن لبه‌های بوم استفاده می‌شود که اساس این طرح‌ها بر پایهٔ تنظیم استحکام و مقاومت بوم بازشونده است [۱۹].



شکل۱۸– روش باز شدن بوم با غلتک ابتدایی[۲۰]

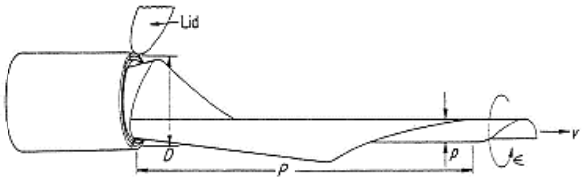
ب) روش باز شدن با غلتک انتهایی: مطابق شکل (۱۱) در این روش قسمت بازنشدهٔ بوم در انتهای بوم قرار دارد. این قسمت با دوران حول محور پیچش خود به سمت بیرون حرکت می‌کند و سبب گسترش بوم می‌شود.



شکل ۱۱–روش باز شدن بوم با غلتک انتهایی[۲۰]

23. Monopole
24. Dipole

ج) روش خودبازشوندهٔ حلقوی: همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده در این روش مسیر باز شدن بوم یک مسیر پیچشی است. این روش برای بوم‌های با ابعاد کوچک ایمن است. در حالی که در بوم‌های طویل، استفاده از این روش به علت افزایش تعداد صفحات روی یکدیگر حین باز شدن، موجب تغییر محور چرخش از محور اصلی بوم و بی‌دقتی در عملکرد آن می‌شود. در نتیجه، اغلب از این روش برای بوم‌های زیر ۱۰ متر استفاده می‌شود.



شکل ۱۲–روش باز شدن حلقوی بوم[۲۰]

انواع بوم‌های لوله‌ای

برحسب هندسهٔ سطح مقطع می‌توان بوم‌های لوله‌ای را به چهار دستهٔ کلی تقسیم کرد:

۱. بوم لوله‌ای ساده[۲۵]
۲. بوم لوله‌ای چندلایه[۲۶]
۳. بوم لوله‌ای عدسی‌شکل[۲۷]
۴. بوم لوله‌ای فنری‌شکل[۲۸]

در جدول (۱) مشخصات انواع بوم‌های لوله‌ای و شکل هندسی آنها فهرست شده است[۴].

جدول ۲–انواع بوم‌های لوله‌ای [۴]

نوع	مشخصات	تک حلقه	دو حلقه	سه حلقه
ساده	ساده مناسب برای مکانیزم های طویل			
چند لایه	سفتی و سختی پیچشی بالا صلبیت بالا			
عدسی شکل	درز جوش داده شده خواص مقاومتی بالا			
فنری شکل	بازشدن بصورت حلزونی، سفتی محوری پایین			

25. Thin-wall tube boom
26. Multi element thin-wall tube boom
27. Lenticular boom
28. Spring helix boom

بوم‌های تلسکوپی

این نوع بوم‌ها معمولاً در شرایطی به کار گرفته می‌شود که سختی و استحکام بوم‌های لوله‌ای کافی نباشد و از طرفی دیگر، به‌سختی بسیار زیاد مانند بوم‌های بندبندشده نیاز نیست که حجم زیادی را اشغال می‌کند. از معایب این بوم‌ها در مقایسه با بوم‌های لوله‌ای، طول کمتر آنهاست که به علت محدودیت در استفاده از اتصال‌های بی‌شمار است که باید در یک قطر مشخص فشرده شود.

لوله‌های یک بوم تلسکوپی می‌تواند فلزی یا کامپوزیتی باشدکه البته نوع ماده متناسب با عملکردی است که از بوم انتظار می‌رود. اصولاً بوم‌های تلسکوپی بادوام‌تر از بوم‌های لوله‌ای است و به همین دلیل در مواردی که انسان نیز همراه وسیله پرتاب شود، از این نوع بومبیشتر استفاده می‌شود. طراح می‌تواند برای کاهش وزن بوم‌های تلسکوپی و اثرات دمایی بوم مانند انبساط‌های غیرمجاز، بوم را سوراخ‌دار یا دارای خلل و فرج طراحی کند. عوامل محدودکنندهٔ طراحی بوم تلسکوپی شامل طول، ضخامت لوله و طول هم‌پوشانی است [۲۱].

مطابق شکل (۱۳) بوم تلسکوپی به‌طورمعمول از مجموعه‌ای از لوله‌های جدار نازک استوانه‌ای شکل متحدالمرکز تشکیل شده است که به‌صورت تودرتو داخل یکدیگر قرار گرفته‌است [۲۲].

شکل ۱۳–بوم تلسکوپی[۲۲]

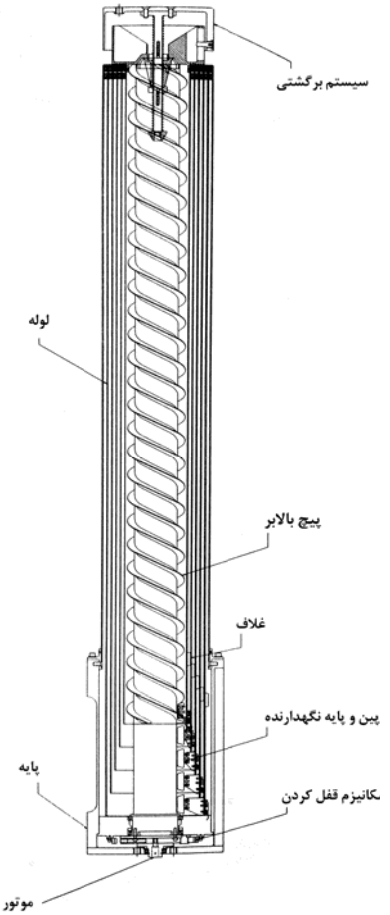
بوم‌های تلسکوپی از نظر سیستم بالابرنده به دو دسته تقسیم می‌شود:

۱. با استفاده از پیچ بالابر
۲. با استفاده از بوم لوله‌ای

در مکانیزم پیچ بالابر، استوانهٔ رزوه‌شده‌ای در مرکز بوم قرار دارد و هر قسمت از بوم تلسکوپی با استفاده از پین و پایهٔ نگهدارنده به این استوانه متصل است[۲۲]. با حرکت دورانی این استوانه توسط موتور، به‌طور مرتب پین‌های داخل رزوه‌ها حرکت می‌کند و به دنبال آن خود لوله‌ها به سمت بالا فرستاده می‌شود. در شکل(۱۴) شماتیک مکانیزم بوم تلسکوپی با استفاده از پیچ بالابر نشان داده شده است.

مطابق شکل (۱۵)، در روش دیگر برای بالابردن لوله‌های بوم تلسکوپی از بازکردن یک بوم لوله‌ای در مرکز مکانیزم استفاده می‌شود. مطابق شکل (۱۵) در این مکانیزم موتور الکتریکی بوم لوله‌ای را باز می‌کند و این بوم به ترتیب لوله‌های بوم تلسکوپی را باز می‌گرداند. معمولاً در این سیستم از یک مکانیزم ترمز نیز برای ساکن‌کردن بوم تلسکوپی پس از باز شدن استفاده می‌شود. در این

طراحی علاوه بر سختی تک‌تک لوله‌های بوم تلسکوپی، سختی بوم لوله‌ای مرکزی بر محاسبهٔ سختی کل مکانیزم تأثیرگذار است [۴].



شکل ۱۴- مکانیزم بوم تلسکوپی با استفاده از پیچ بالابر [۴]

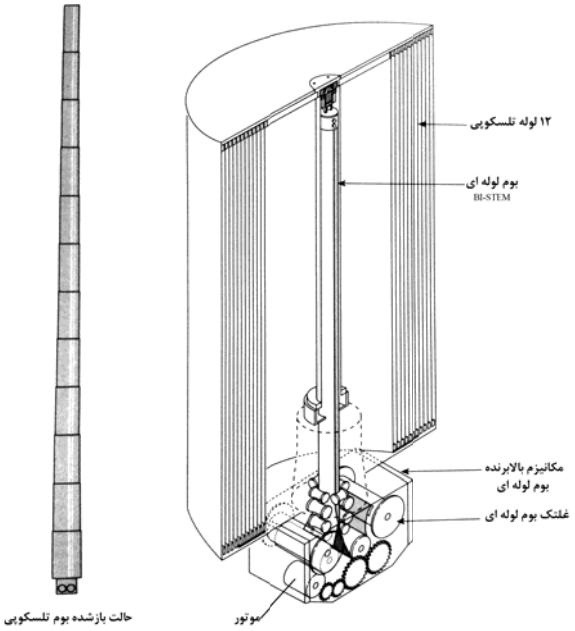
بوم‌های خودبازشونده

بوم‌های خودبازشونده یکی از جدیدترین تجهیزات استفاده‌شده در مکانیزم‌های فضاپیماست[۲۳].این بوم‌ها طوری طراحی می‌شود که به‌صورت الاستیک بسته و با آزاد کردن انرژی ذخیره‌شده در ساختارشان به‌صورت خودبه‌خودی باز شود. توانایی آنها برای خودبازشوندگی و رسیدن به وضعیت اولیه بدون تغییر شکل عمده، ویژگی بسیار مهم آنهاست. از مزیت‌های این بوم می‌توان به سبکی، بسته‌بندی مؤثر و کارآمد[۲۹]، قیمت پایین و باز شدن بدون تولید اصطکاک اشاره کرد[۲۴].مکانیزم بوم‌های خود بازشونده به دو صورت است:

۱. بوم خود باز شوندهٔ گسسته

۲. بوم خود بازشوندهٔ پیوسته

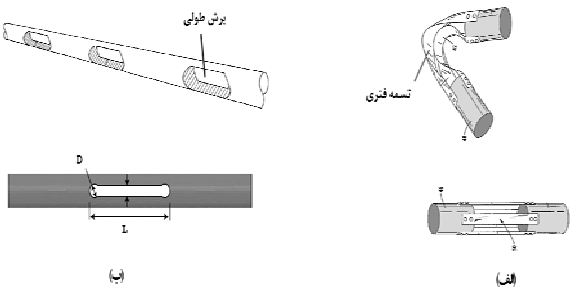
در حالت گسسته، بوم‌ها لوله‌های سبکی است که با استفاده از مفصل فنر نواری[۳۰] به هم متصل شده است. در این حالت معمولاً از آلیاژهای آلومینیوم برای ساخت لوله‌ها استفاده می‌شود[۲۵-۲۶].



شکل ۱۵- مکانیزم بوم تلسکوپی با استفاده از بوم لوله‌ای [۴]

در حالت بوم خودبازشوندهٔ پیوسته، بوم لوله‌ای یکپارچه است و مفاصل انعطاف‌پذیر از برش قسمت‌هایی از آن و حفر شکاف‌های طولی و کوچک در آن حاصل می‌شود. با ساخت این مفاصل، بوم می‌تواند در این نقاط تا و جمع شود.هنگام باز شدن، انرژی ذخیره‌شدهٔ الاستیک ناشی از تا شدن بوم در مفاصل سبب باز شدن خودبه‌خودی بوم خواهد شد [۲۷]. در این حالت، جنس بوم انعطاف‌پذیر و معمولاً از کامپوزیت CFRP ساخته شده است. از این بوم در آنتن ماهوارهٔ مارسیس[۳۱] استفاده شده است[1].

در شکل (۱۶) نمایی از بوم خودبازشونده در دو حالت گسسته و پیوسته نشان داده شده است.



شکل ۱۶- بوم خودبازشونده در دو حالت (الف) گسسته و (ب) پیوسته

29. Efficient packaging

30.tape-spring

31. Marsis

ستون‌های بازشوندهٔ فضایی

ستون‌های بازشونده بخش زیادی از مکانیزم‌های بازشونده فضایی را دربرمی‌گیرد [۲۹]. این ستون‌ها سختی زیادی تولید می‌کند و پایداری بالاییدارد. ازلحاظ هندسه و نحوهٔ بازشدن ستون‌های بازشوندهٔ فضایی به سه دستهٔ کلی تقسیم می‌شود:

۱. ستون‌های حلقوی‌شونده[۳۲]
۲. ستون‌های بندبندشده[۳۳]
۳. ستون‌های پانتوگرافی[۳۴]

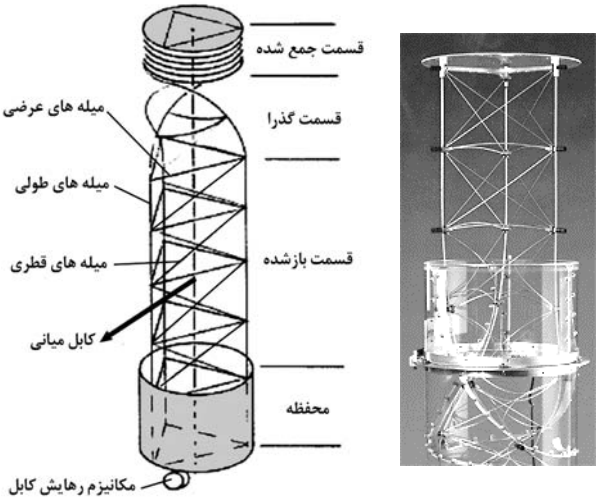
در ادامه،هرکدام از این مکانیزم‌ها تحلیل و بررسی خواهد شد:

ستون‌های حلقوی‌شونده

مطابق شکل (۱۷) ستون‌های حلقوی‌شونده از میله‌های قطری[۳۵]، میله‌های عرضی[۳۶]، میله‌های طولی[۳۷] و تعدادی اتصال تشکیل شده است[۳۰]. حین جمع شدن ستون، میله‌های طولی به‌صورت حلقه روی یکدیگر قرار می‌گیرد که این فشردگی حاصله اغلب نقش نیروی محرک برای بازکردن مکانیزم را برعهده دارد. ستون‌های حلقوی‌شونده کاربردهای زیادی در مأموریت‌های فضایی دارد. این مکانیزم برای باز شدن از انرژی کرنشی ناشی از جمع شدن حلقوی میله‌ها روی یکدیگر کمک می‌گیرد. هنگام باز شدن، میله‌های عرضی کمانش می‌کند و با اعمال نیرو، میله‌های طولی را از یکدیگر دور خواهد کرد. این اعمال نیرو بین قطعات، سبب نیروی کششی در میله‌های قطری می‌شود و در مجموع ستون را استوار نگه می‌دارد. این ستون‌ها می‌تواند در انواع مربعی و مثلثی ساخته شود. در فرایند باز شدن، مکانیزم سه محدودهٔ حالت دینامیکی دارد که به ترتیب عبارت است از:

۱. قسمت جمع‌شده
۲. قسمت گذرا
۳. قسمت بازشده

حین باز شدن ستون حلقوی‌شونده، قسمت گذرا کمترین پایداری را دارد و قسمت بحرانی طراحی خواهد بود. بنابراین، همواره در طراحی سعی می‌شود که قسمت گذرا گستردگی کمتری در راستای محور کل ستون داشته باشد تا سختی ستون را در راستای محوری کاهش ندهد. پس، سعی خواهد شد از ستون‌های حلقوی‌شونده با قطر پایهٔ بیشتر استفاده شود، هرچند با افزایش قطر پایه، فضای بیشتری از سیستم ماهواره اشغال می‌شود که این خود از قیود طراحی است. از دیگر نکات طراحی این بوم‌ها می‌توان به شوک اعمالی بر اجزای آن در لحظهٔ نهایی مکانیزم اشاره کرد [۳۱].



شکل ۱۷–ستون حلقوی‌شونده[2]

از مزایای ستون‌های حلقوی‌شونده می‌توان به حجم کم آنها در حالت بسته نسبت به حالت گسترش‌یافته اشاره کرد. اغلب بدون محاسبهٔ ارتفاع قطعات اتصال ستون به ماهواره، ارتفاع این نوع ستون‌ها در حالت بسته دو درصد از ارتفاع در حالت باز بیشتر است. از مزیت دیگر این ستون‌ها می‌توان به پایهٔ ثابت آنها اشاره کرد که بدون واسطه به ماهواره وصل می‌شود. از معایب ستون‌های حلقوی‌شونده، سفتی پایین آنها در قسمت گذرا است؛ طوریکه اگر حین باز شدن نیروی عرضی به ستون وارد شود یا چرخش ستون در نتیجهٔ جرم انتهایی آن مسئله‌ساز باشد، این ستون از مقطع گذرا ناپایدار می‌شود.

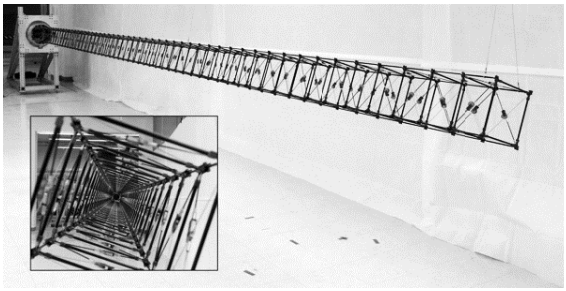
ستون‌های بندبندشده

از ستون‌های بندبندشده به‌طور گسترده‌ای در برنامه‌های فضایی استفاده می‌شود. این نوع از ستون‌ها نسبت به ستون‌های حلقوی، سفتی بیشتر، عملکرد سازه‌ای بهتر و دقت بالاتری دراد. مکانیزم ستون‌های بندبندشده مشابه سازهٔ خرپاهاست. با توجه به اینکه اغلب این خرپاها در برخی مقاطع قابلیت تاشوندگی دارد، دست طراح برای طراحی انواع مکانیزم‌های مفصل‌بندی‌شده با وزن و طول گسترش متفاوت باز است. همچنین، محاسبهٔ نیروهای اعضا پس از باز شدن به‌راحتی محاسبه خواهد شد [۳۲].

در انواع مکانیزم‌های بندبندشده اغلب میله‌های طولی تحت بارهای محوری و خمشی است، درحالی‌که میله‌های عرضی و قطری تحت بارهای برشی و پیچشی قرار دارد. سختی کل مکانیزم در این حالت به سختی اعضا و اتصالات وابستگی بسیار زیادی دارد.

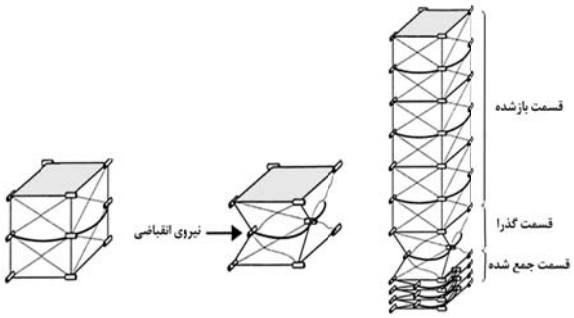
32.Coilable Mast
33. Articulated Mast
34. Pantograph Mast
35. diagonal
36. batten
37. longeron

در این مکانیزم، به علت وزن زیاد ستون‌ها از موتور در نقش نیروی ورودی محرک کمک گرفته می‌شود [۳۳]. در شکل (۱۸) نمونه‌ای از ستون‌های بندبندشده نشان داده شده است.



شکل ۱۸- ستون‌های بندبندشده[2]

از جمله پارامترهای مهم در طراحی و ساخت این نوع ستون‌ها، لقی و اصطکاک بین پین‌های اتصالات است، زیرا با انتخاب ماده نامناسب یا ساخت غیردقیق، این دو عامل می‌تواند حالت غیرخطی به معادلات مقاومتی سازه اعمال کند که سبب دشواری کنترل باز شدن ستون می‌شود. شکل (۱۹) مکانیزم ستون‌های بندبند شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹- مکانیزم ستون‌های بندبندشده [۳۰]

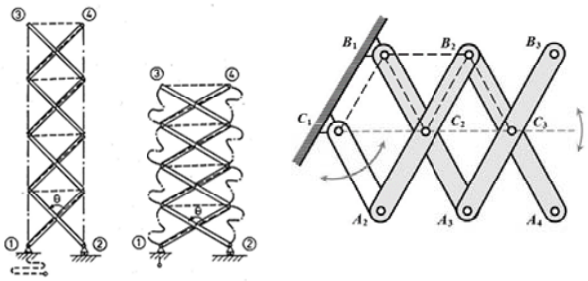
مطابق شکل (۱۹)، این ستون‌ها شامل سه قسمت بازشده، جمع‌شده و قسمت گذراست. دو قسمت ابتدایی و انتهایی، صلبیت بیشتری دارد و قسمت میانی، قاب کمانش‌کننده است که خاصیت جمع‌شوندگی روی یکدیگر را دارد. در این نوع از ستون‌ها از لوله‌های قطری و کابل‌ها برای دست‌یابی به انعطاف‌پذیری و کنترل‌پذیری بیشتر در قسمت کمانش‌کننده استفاده می‌شود [۳۴].

در این مکانیزم، سازه‌ها به ترتیب گسترش می‌یابد، ازاین‌رو، می‌توان آنها را طوری ساختکه سفتی خود را در طول استقرار حفظ کند. چرخش نوک ستون بستگی به نوع پیکربندی آن دارد. بسته به نوع سیستم بازکننده، مساحت و حجم سیستم تاشده تغییر می‌کند.

ستون‌های پانتوگرافی

نوع سوم از ستون‌های بازشوندهٔ فضایی، ستون‌های پانتوگرافی است. این نوع سازه‌ها از تعدادی میله‌های پانتوگراف تشکیل شده است کهدر بعضی از مواقع با کابل‌های غیرفعال به مفاصل پانتوگراف متصل می‌شود. کابل‌های غیرفعال در حالت تمام گسترش‌یافته به‌صورت پیش‌تنیده درمی‌آید و سختی سازه را افزایش می‌دهد. در مدت‌زمان گسترش یافتن (حالت گذرا)، تمام بار سازه روی پانتوگراف است که سختی آن بسیار ناچیز است [۳۵].در بعضی از طراحی‌ها این مکانیزم‌ها با مقاطع مربعی و مثلثی در نظر گرفته شده است. افزایش تعداد سری مکانیزم‌های پانتوگرافی سبب بروز سختی بیشتر و کنترل‌پذیری بالاتر حین باز شدن می‌شود، طوری‌که علاوه بر سختی حاصله در راستای باز شدن، در جهت‌های دیگر نیز مقاومت خوبی خواهد داشت [۴].

با کمک مکانیزم‌های پانتوگرافی مثلثی و مربعی می‌توانمقاومت مکانیزم را در برابر بارهای اعمالی ناگهانی در جهتی بجز جهت حرکت محوری افزایش داد. طراحی و ساخت ستون‌های پانتوگرافی از نوع مثلثی و مربعی به‌مراتب پیچیده‌تر از نمونهٔ تکی پانتوگراف است. این پیچیدگی اغلب درون طراحی اتصالات و تلورانس‌های مربوطه آنها دیده می‌شود، طوری‌که در صورت نبود دقت کافی در طراحی و ساخت اتصالات، احتمالبروز خرابی یا گیرکردن لینک‌ها حین باز شدنافزایش می‌یابد. در شکل (۲۰) نمایی از ساختار عمومی مکانیزم ستون‌های پانتوگرافی نشان داده شده است.



شکل ۲۰- ستون‌های پانتوگرافی

مکانیزم‌های بازشوندهٔ سطحی

وسایل بازشوندهٔ سطحی، سازه‌هایی است که در ابتدا به‌صورت جمع‌شده در پرتابگر قرار می‌گیرد و سپس، در زمان مناسبیکه برای هدف خاصی در مأموریت ماهواره تعریف شده است، باز می‌شود و سطح مشخصی را فراهم می‌کند. پنل‌های آرایه‌های خورشیدی و آنتن‌ها دو نوع از سازه‌هاییاست که بخش وسیعی از سطوح بازشونده را دربرمی‌گیرد [۳۶].

هدف از طراحی پنل‌های آرایه‌های خورشیدی، فراهم‌سازی بستری مناسب برای نگهداری سلول‌های خورشیدی و حصول شرایط مناسب برای دریافت انرژی خورشید است. همچنین،این مکانیزم باید بتواند تا حد امکان سلول‌ها را روبه‌روی خورشید قرار دهد. برای اطمینان از باز شدن آرام و کامل این مکانیزم‌ها، عمل رهایش می‌تواند توسط

عملگرهای پایروتکنیک یا غیر پایروتکنیک، موتور محرک یا با استفاده از فنرها و میراکننده اجراشود. در ادامه، انواع مکانیزم‌های ساخته‌شده برای آنتن‌ها و آرایه‌های خورشیدی بررسی خواهد شد.

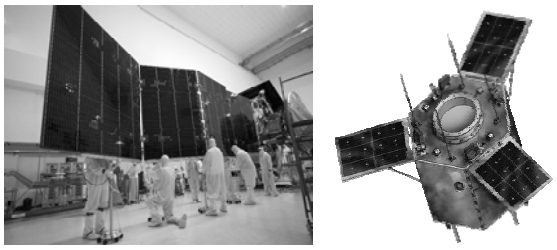
آرایه‌های خورشیدی

سال‌هاست که برای افزایش کارآیی و به حداقل رساندن ریسک باز شدن آرایه‌های خورشیدی، مکانیزم‌های مختلفی طراحی و آزمایش‌های گوناگونی تعریف و اجرا می‌شود. برای آسیب نرسیدن به بدنهٔ حساس سلول‌های آرایهٔ خورشیدی و پوستهٔ شیشه‌ای آنها در شرایط ارتعاشات پرتاب و باز شدن در مدار، مکانیزم‌های پنل خورشیدی باید سطح اتکای مناسبی داشته باشد و به‌صورت آرام باز گردد. در طراحی و ساخت آرایه‌های خورشیدی، آنها را به دو دستهٔ کلی آرایه‌های خورشیدی با سطوح صلب و سطوح انعطاف‌پذیر تقسیم می‌کند. در ادامه این دو دسته بررسی می‌شود.

آرایه‌های خورشیدی با سطوح صلب

برای نگهداری آرایه‌های خورشیدی با سطوح صلب[۳۸]، سازهٔ اصلی معمولاً از پنل کامپوزیتی با هستهٔ لانه‌زنبوری ساخته می‌شود. این سازه با صفحاتی از جنس اپوکسی ـ گرافیت پوشانده و سلول‌های خورشیدی در آن نصب می‌شود. پنل‌های صلب می‌تواند به هر شکل ساخته شود، اما اغلب مستطیل شکل است و ضخامت آنها با توجه به سفتی باز شدن موردنیاز و ملاحظات گرمایی به‌دست می‌آید [۳۷]. سلول‌های خورشیدی و مدارهای الکتریکی آنها به‌طور مستقیم روی صفحاتینصب شده است که در یک طرف هر پنل قرار دارد و پنل در نقش یک تکیه‌گاه سازه‌ای مناسب به شمار می‌رود [۳۸].

در طراحی مکانیزم باز شدن پنل‌های صلب، روش‌های گوناگونی به کار رفته است. ساده‌ترین نوع مکانیزم پنل‌های صلب بازشونده، استفاده از لولا و مفصل است. در این مکانیزم‌ها پنل‌ها به حالت بسته درون پرتابگر قرار می‌گیرد و در مدار با استفاده از نیروی پیش‌بار فنرهای پیچشی یا محرک‌های دیگر باز می‌شود. در شکل (۲۱) چند نمونه از این مکانیزم‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲۱- مکانیزم بازکنندهٔ پنل سلول‌های خورشیدی با سطح صلب [۳۹]

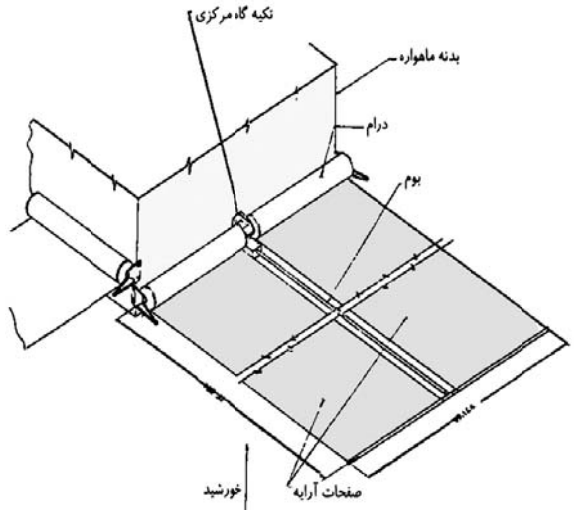
آرایه‌های خورشیدی با سطوح قابل‌انعطاف

آرایه‌های خورشیدی قابل انعطاف نسبت به آرایه‌های پنل صلب سبک‌تر است و به علاوه، طبیعت آرایهٔ خورشیدی قابل انعطاف اجازه می‌دهد که بیشتر در جایگذاری فشرده شود[۴۰].

ساختارهای متفاوتی از آرایه‌های خورشیدی قابل‌انعطاف توسعه‌یافته و در دسترس است. این آرایه‌ها به سه دستهٔ کلی سطوح کرکره‌ای، سطوح آکاردئونی و سطوح دایروی مسطح تقسیم می‌شود.

سطوح کرکره‌ای

شناخته‌شده‌ترین مکانیزم برای باز شدن آرایه‌های انعطاف‌پذیر، مکانیزم بازشونده با ساختار کرکره‌ای[۳۹] است که به‌وسیلهٔ یک بوم لوله‌ای روی هر طرف پوشش، حمایت و نگهداری می‌شود. مکانیزم بازکنندهٔ سطوح کرکره‌ای به دو شکل یکطرفه و دوطرفه طراحی می‌شود. در حالت یکطرفه، سطوح کرکره‌ای با استفاده از مکانیزم‌های بازشوندهٔ خطی مانند بوم‌های لوله‌ای، از یک طرف گسترش می‌یابد. این مکانیزم در شکل (۲۲) نشان داده شده است.

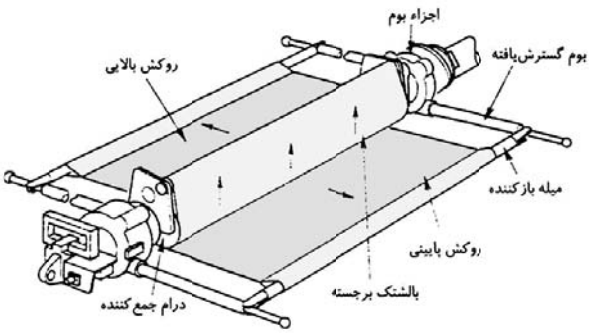


شکل ۲۲- مکانیزم بازکنندهٔ یکطرفهٔ سطوح کرکره‌ای [۱]

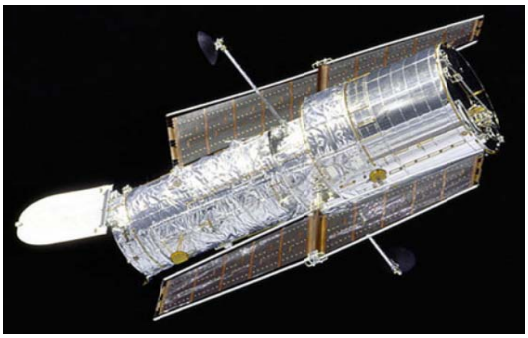
در حالت دوطرفه، بوم‌ها در دو جهت مخالف گسترش می‌یابد. نمونه‌ای از این مکانیزم در تلسکوپ فضایی هابل[۴۰]HST استفاده شده است[۴۱]. در شکل(۲۳) مکانیزم بازکنندهٔ دوطرفه سطوح کرکره‌ای همراه عملگر بوم لوله‌ای استفاده‌شده در آن و همچنین، در شکل(۲۴) استفاده از سطوح کرکره‌ای برای باز شدن آرایه‌های خورشیدی در تلسکوپ فضایی هابل نشان داده شده است[۴۲].

38.Rigid Surfaces

39. Windowshade
40.Hubbled Space Telescope



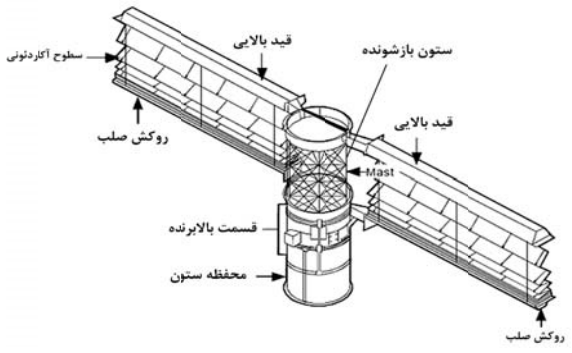
شکل ۲۳–مکانیزم بازکنندهٔ دوطرفه سطوح کرکره‌ای[۴۱]



شکل ۲۴–استفاده از سطوح کرکره‌ای برای باز شدن آرایه‌های خورشیدی در تلسکوپ فضایی هابل[۴۲]

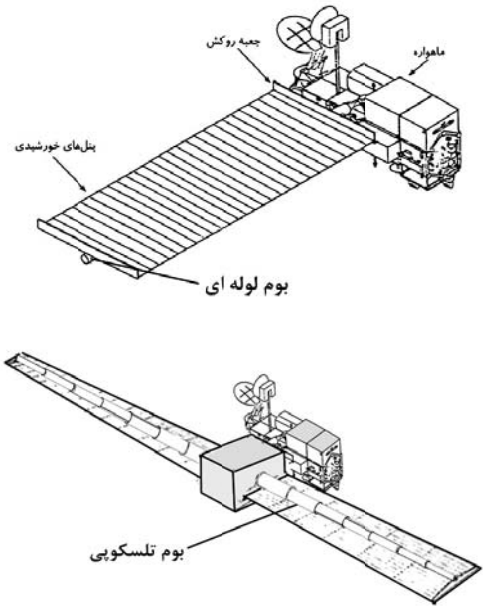
سطوح آکاردئونی

نوع دیگری از آرایه‌های خورشیدی قابل‌انعطاف، سطوح آکاردئونی است. مطابق شکل (۲۵) در این مکانیزم آرایه‌های جمع‌شدهٔ پنل‌ها به حالت آکاردئونی باز و با استفاده از یک ستون نگهداری می‌شود که معمولاً از مرکز محفظه عبور می‌کند [۴۳]. مثلاً در آزمایش پروازی آرایهٔ خورشیدی (SAFE)[۴۱]، از یک ستون بلند برای بازکردن پوشش آرایهٔ خورشیدی با طول ۳۳ متر در ایستگاه فضایی بین‌المللی در سال ۱۹۸۴ استفاده شد[۴۴].



شکل ۲۵– استفاده از ستون بازشونده برای باز شدن سطوح آکاردئونی آرایه‌های خورشیدی [۴۵]

در مکانیزم‌های طراحی‌شدهٔ دیگر، از بوم‌های لوله‌ای و تلسکوپی برای باز شدن سطوح آکاردئونی استفاده می‌شود. در شکل (۲۶) دو مدل از ماهواره‌هایی نشان داده شده است که از این بوم‌ها برای باز شدن سطوح آکاردئونی آرایه‌های خورشیدی استفاده کرده است.



شکل ۲۶– استفاده از بوم‌های لوله‌ای و تلسکوپی برای باز شدن سطوح آکاردئونی[۱]

سطوح دایروی مسطح

ساختار جدیدی از آرایهٔ خورشیدی قابل‌انعطاف، به نام آرایه‌های فوق منعطف[۴۲] ساخته‌شده است که خصوصیات آنها ترکیبی از چندین طراحی رایج برای آرایه‌های خورشیدی است؛ نمایی از این طرح جدید در شکل (۲۷) دیده می‌شود [۴۶]. این سیستم تحت تأثیر چندین فنر پیچشی باز می‌شود و می‌تواند با جمع‌کردن یک طناب توسط موتور محرک، بسته شود. با استفاده از این روش می‌توان وزن سازه را کمتر کرد. ازجمله معایب این طرح سفتی و صلبیت نسبتاً کم سازهٔ بازشده است.

شکل ۲۷– آرایه خورشیدی بازشوندهٔقابل‌انعطاف[3]

41.Solar Array Flight Experimen

42. Ultraflex

آنتن‌ها

آنتن‌های فضایی را می‌توان به انواع گوناگونی دسته‌بندی کرد. یکی از عمومی‌ترین دسته‌بندی‌ها در این حوزه، تقسیم آنتن‌ها به دو دستهٔ فضایی (آنتن‌های مستقر در فضا) و زمینی (آنتن‌های مستقر در ایستگاه‌های زمینی) است. باید توجه داشت که آنتنِ یک گیرندهٔ جیپی جی‌پی‌اس هم می‌تواند یک آنتن زمینی باشد. آنتن‌های بشقابی تلویزیون‌های ماهواره‌ای نیز، نوعی آنتن زمینی است. آنتن‌های بشقابی عظیم چندین متری که با فضا در ارتباط است، از همین رده به‌حساب می‌آید. هردو دستهٔ آنتن‌های زمینی و فضایی، اصول و مبانی یکسانی دارد. تنها تفاوت اساسی آنها در نوع سازه و شرایط محیطی متفاوتشان است. آنتن‌هایی که در محیط فضا به کار گرفته می‌شود، باید از لحاظ سازه‌ای شرایط فضا (اختلاف دما، برخورد انواع ذرات، بارهای دینامیکی و ...) را تحمل کند. همچنین، به دلیل حجم محدود در نظر گرفته‌شده برای ماهواره در پرتابگر، معمولاً آنتن‌های فضایی به‌صورت بازشونده ودر صورت امکان با کمترین وزن و حجم ممکن طراحی می‌شود. طراحی آنتن یکی از مهم‌ترین و پرچالش‌ترین مسائل در طراحی ماهواره به شمار می‌آید [۴۸].

آنتن نیز مانند هر سامانهٔ مهندسی دیگر، عوامل و مشخصه‌های عملکردی و توانایی‌های مختلفی دارد. مهم‌ترین این عوامل و همچنین، برخی مفاهیم مرتبط با آنتن عبارت است از:

بهرهٔ آنتن: عبارت است از نسبت توان سیگنال خروجی از آنتن به توان ورودی آن. این کمیت با واحد دسی‌بل اندازه‌گیری می‌شود.

الگوی تشعشعی آنتن: عبارت است از اندازه‌ای از حساسیت آنتن در جهات مختلف.

توان سمت‌گیری: عبارت است از قدرت آنتن در نشانه‌روی به سمت ماهواره (یا به سمت آنتن زمینی). این سمت‌گیری ممکن است به‌صورت مکانیکی یا الکترونیکی (تغییر جهت پخش موج با استفاده از خواص الکترونیکی موج و بدون تغییر جهت مکانیکی) آنتن باشد.

دمای نویز آنتن: این مفهوم بیانگر نویزی (اغتشاشاتی) است که آنتن دریافت می‌کند و سبب بروز اخلال در کار آن می‌شود. در آنتن‌های نصب‌شده روی ماهواره‌ها، منبع اصلی این نویز، تشعشعات زمینی و محیط فضاست.

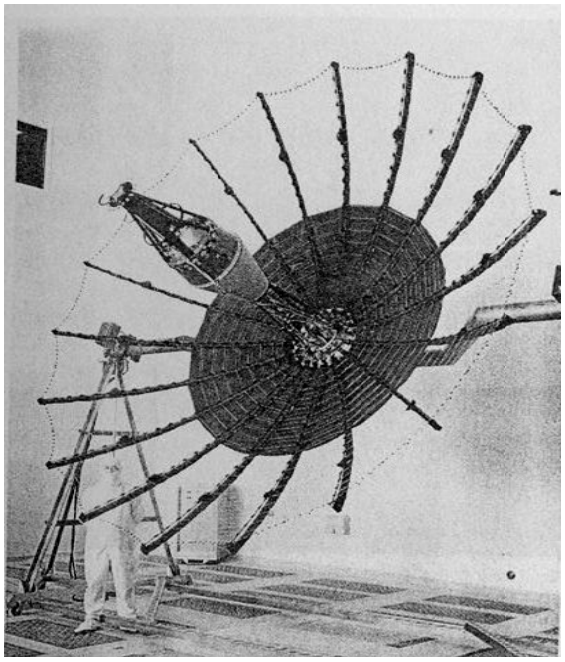
دسته‌بندی آنتن‌های بازشوندهٔ فضایی

به‌طورکلی، سه نوع مختلف از آنتن‌های گسترش‌پذیر عبارت است از:

۱. مش آنتن‌ها
۲. آنتن‌های سطح جامد
۳. آنتن‌های بادشونده

مش آنتن‌ها

متداول‌ترین نوع آنتن‌های بازشونده، آنتن‌های رفلکتوری مشی با سطح فلزیِ بسیار سبک و خاصیت کش‌مانند است. اگرچه مش‌ها ناپیوسته است، می‌تواند فرکانس‌های رادیویی تا حدود ۴۰ گیگاهرتز را منعکس کند. آنتن‌های مشی در شکل‌های مختلفی به‌کاربرده می‌شود. یکی از مشهورترین مش آنتن‌های بازشوندهٔ فضایی که تاکنون ساخته شده است، آنتن ماهوارهٔ گالیله[43] است [۴۹]. این آنتن دیشی با قطر ۴/۸ متر دارد که با استفاده از یک سیستم دنده‌ای جمع می‌شود که در سازهٔ پایه و تکیه‌گاه مرکزی آن قرارگرفته است.این سازه توسط یک عملگر دومحرکه باز می‌شود که می‌تواند تمامی ۱۸ دندهٔ استفاده‌شده در آن را هم‌زمان بعد از توقف‌ها رها کند (شکل ۲۸).



شکل ۲۸–آنتن با بهرهٔ بالای گالیله [۴۸]

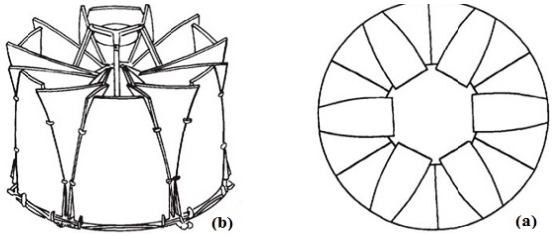
آنتن‌های سطح جامد

عملکرد کاربردی آنتن‌ها برای فرکانس‌های بیش از ۶۰GHz به‌دقت زیادنیاز دارد. در این موارد معمولاً مواد جامد برای سطح منعکس‌کننده‌ها انتخاب می‌شود. اکثر رفلکتورهای گسترش‌پذیر با سطح جامد از یک هاب مرکزی صلب با صفحه‌های منحنی‌شکل سفت تشکیل‌شده است. اغلب از صفحات CFRP روی یک هستهٔ لانه زنبوری آلومینیومی به‌صورت گلبرگ‌های شعاعی تشکیل می‌شوند [۵۰].

اولین طرح آنتن‌هایی با سطح جامد (سفت)، طرح آفتابگردان است که توسط شرکت تی‌آردبلیو[44]طراحی و ساخته شد. مطابق

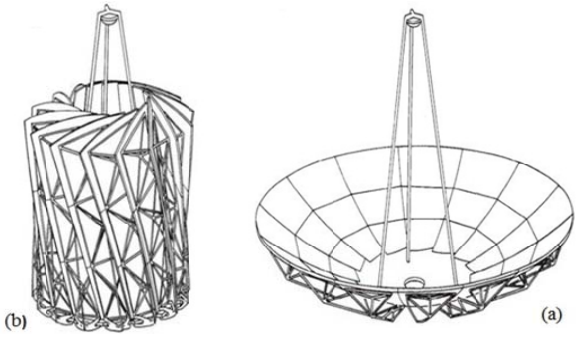
43. Galileo
44. TRW

شکل (۲۹) این طرح با استفاده از مفاصل پیچشی ساده تا می‌خورد ولی اندازهٔ آن در حالت تاخورده خیلی کم نمی‌شد [۵۱].



شکل ۲۹- طرح آفتابگردان آنتن سطح جامد، a) گسترش‌یافته b) جمع‌شده [۵۱]

آنتن سطح جامد دیزی[45] طرح دیگری از آنتن‌های سطح جامد فضایی است. مطابق شکل (۳۰) در این طرح، هر پنل توسط مفاصل پیچشی به هاب مرکزی متصل می‌شود و اجازه می‌دهد که پنل‌ها به‌صورت تودرتو به دور هاب جمع شود. موقعیت و جهت لولاها برای دستیابی به یک بسته‌بندی خوب و جلوگیری از تداخل پنل‌ها در طول باز شدن، مشخص می‌شود [۵۰].



شکل ۳۰- آنتن سطح جامد طرح دیزیa) حالت بازشده، b) حالت جمع‌شده [۵۰]

مکانیزم‌های بازشوندهٔ حجمی

مکانیزم‌های بازشوندهٔ حجمی، سازه‌هایی است که هنگام باز شدن، حجم زیادی را دربرمی‌گیرند. گسترش حجمی سازه، ایدهٔ جذابی برای طراحان فضایی است، زیرا در این روش، سازه ابتدا ابعاد کوچک‌تر و حجم کمتری دارد که برای جایگذاری و پرتاب مناسب‌تر است؛ ولی در زمان باز شدن،حجم و ابعاد بسیار بزرگ خواهد شد و می‌توان از افزایش حجم و ابعاد آن در راستای مأموریت ماهواره استفاده کرد. مهم‌ترین مکانیزم‌های بازشونده، مکانیزم‌های بادشونده[46] است. تاکنون از سازه‌های بادشونده، استفاده‌های زیادی در مأموریت‌های فضایی شده است و این سازه‌ها نقش مهمی را در کاربردهای آیندهٔ فضایی ایفا می‌کند. در ادامه، اصول طراحی مکانیزم‌های بادشونده بررسی می‌شود.

45. DAISY
46. Inflatable Structure

اصول طراحی مکانیزم‌های بادشونده

نزدیک به ۵۰ سال است که از مکانیزم‌های بادشونده در مأموریت‌های فضایی استفاده می‌شود. در گذشته این مأموریت‌ها گاهی با شکست روبه‌رو شده است، اما با پیشرفت علم و بهبود خواص مواد سازه‌های بادشونده، این مکانیزم‌ها در زمرهٔ مکانیزم‌هایی با کارآمدی بالا قرار گرفته است [۵۲]. مکانیزم‌های بادشونده کاربردهای فراوانی دارد که می‌توان به استفادهٔ آنها در آنتن‌های فضایی، صفحات رادار، سازه‌های غشایی، سلول‌های خورشیدی، بادبان‌های خورشیدی، اقامتگاه‌های فضایی، سپرهای حرارتی، بوم‌ها و ستون‌های بازشونده اشاره کرد. ابعاد این مکانیزم‌ها می‌تواند از چند متر تا صدها متر باشد. مکانیزم‌های بادشونده شامل سه بخش اساسی است:

۱. سازهٔ بادشونده
۲. سیستم تزریق گاز
۳. مکانیزم کنترل باز شدن[۵۳]

سازهٔ بادشونده

به‌طور کلی، سازه‌های بادشونده فضایی از مواد انعطاف‌پذیر (غشای نازک یا بافت پوشش‌دار) ساخته می‌شود. از طرفی، تهدیدات محیطی مانند زباله‌های فضایی و سنگ‌های آسمانی می‌تواند موجب بروز مشکلاتی مانند رخنه و سوراخ در سازه‌های بادشونده شود. به‌علاوه، ممکن است گازی استفاده‌شده برای انبساط، نشت کند. سازه‌های بادشونده به دو دستهٔ زیر تقسیم می‌شود:

۱. سازه‌های بادشونده برای مأموریت‌های کوتاه‌مدت

۲. سازه‌های بادشونده برای مأموریت‌های بلندمدت

معمولاً عمدهٔ مشکلات برای سازه‌های بادشونده در مأموریت‌های بلندمدت اتفاق می‌افتد. محققان برای حل این مشکلات، پیشنهادهایی درخصوص به‌کارگیری مواد صلب‌شونده[47] در این سازه‌ها ارائه کردند [۵۴]. در نتیجه، به استفاده از طرح خود صلب شدن سازهٔ بادشونده بعد از باز شدن در محیط فضا توجه شده است [۵۵-۵۶].

سیستم تزریق گاز

در مکانیزم سازه‌های بادشونده، سیستم‌های تزریق گاز نقش اساسی و مهمی برعهده دارد. این سیستم‌ها گاز درون سازهٔ بادشونده را تهیه و درون آن پمپ می‌کند. سیستم‌های تزریق گاز به دو روش مأموریت خود را انجام می‌دهد:

- تصعید پودر یا مایع
- فشرده‌سازی گاز

47. RigidizedMaterial

از سیستم‌های تصعید پودر یا مایع، در بادکردن سازه‌های بزرگی استفاده می‌شود که به دلیل پوستهٔ نازک آنها فشار گاز بسیار کمی نیاز دارد. در سال ۱۹۶۱، از سیستم تصعید مواد برای تولید گاز انبساطی در بالن ۳۰ متری ماهوارهٔ اِکو[48] استفاده شده است. امروزه این سیستم در مأموریت‌های فضایی کاربرد زیادی ندارد، زیرا جرم آنها زیاد است و همچنین، کنترلشان دشوار است.

سیستم‌های فشرده‌ساز گاز به دلیل جرم بسیار کم و سازگاری بالای آنها، بیشترین استفاده را در مأموریت‌های فضاییِ مجهز به سازهٔ بادشونده دارد. این سیستم‌ها شامل سیلندر گاز تیتانیومی، رگلاتور، شیرها وسیستم کنترل است. سیستم کنترل، میزان دبی خروجی گاز را برای باز شدن مطلوب سازه، کنترل می‌کند. در سیستم فشرده‌ساز گاز، خطای عملکردی بسیار پایین‌تر از سیستم‌های تصعید و تولیدکنندهٔ گاز است [۵۳].

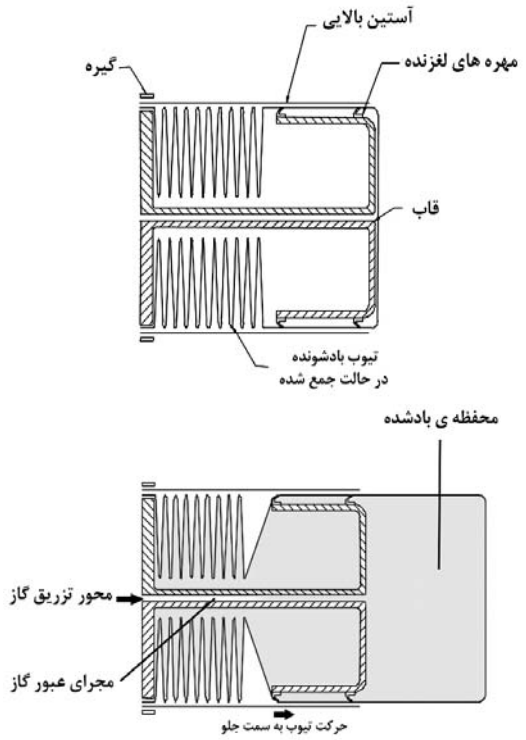
مکانیزم‌های کنترل باز شدن سازهٔ بادشونده

برای کنترل باز شدن سازهٔ بادشونده، مکانیزم‌های زیادی طراحی و ساخته شده است [۵۷]. هدف کاربردی این مکانیزم‌ها، حفاظت و نگه‌داشتن سازهٔ بازشوندهٔ داخل بستهٔ مخصوص آن، افزایش قابلیت اعتماد سازهٔ بازشونده با دور نگه‌داشتن آن از قطعات مجاور و کاهش تأثیرات ناشی از باز شدن سازه روی فضاپیما مانند گشتاورها، شوک‌ها و ...است [۵۸]. مکانیزم‌های کنترل سازهٔ بادشونده به سه دسته تقسیم می‌شود:

۱. مکانیزم‌ستون‌بندی[49]
۲. مکانیزم‌های غلتک چرخان
۳. مکانیزم غشای داخلی

مکانیزم ستون‌بندی

مکانیزم‌های ستون‌بندی سازهٔ بادشونده، باز شدن محوری تیوب بادشونده را در یک حرکت تلسکوپی شکل ممکن می‌کند. مطابق شکل (۳۱)، در این روش در حالت جمع‌شده، تیوب بادشونده به‌صورت محوری روی‌هم تا و انباشته شده است. در داخل این تیوب، قابی با سطح مقطع T شکل قرارگرفته است که سبب فشرده شدن تیوب تاشده می‌شود و همچنین، حالت استوانه‌ای شکل تیوب را حفظ می‌کند. در داخل محور قاب، مجرای محوری برای تزریق گاز در نظر گرفته شده است که گاز را به جلوی قاب هدایت می‌کند. بین این قاب و دیوارهٔ داخلی تیوب، مهره‌های لغزنده‌ای هست که سبب حفظ فاصلهٔ بین قاب و دیوارهٔ تیوب و نیز، حرکت روان تیوب روی قاب در مرحلهٔ باز شدن می‌شود. این مهره‌ها منفذی برای عبور گاز دارد. هنگام باز شدن این مکانیزم، گاز تزریق‌شده از مجرای قاب وارد می‌شود و به دیوارهٔ تیوب در جلوی قاب فشار وارد می‌کند. فشار ناشی از گاز تزریق‌شده، بر مقاومت اصطکاکی بین تیوب و مهره‌های لغزندهٔ قاب، غلبه خواهد کرد و سبب حرکت تیوب‌ها به سمت جلو و باز شدن منظم آنها در جلوی قاب خواهد شد [۵۳].

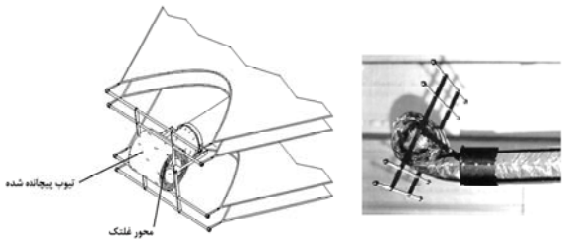


شکل ۳۱- مکانیزم ستون‌بندی برای باز شدن سازهٔ بادشونده[۵۳]

مکانیزم غلتک چرخان

این مکانیزم بسیار ساده، قابل اطمینان و کم‌حجم است. در این روش، تیوب‌های بادشونده دور غلتکی چرخانده می‌شود و با چرخش آن باز خواهد شد. در این مکانیزم، از اجزایی مانند فنر برای نگه‌داشتن غلتک در حالت جمع‌شده استفاده می‌شود. این فنر به کنترل سرعت باز شدن تیوب کمک می‌کند. هنگامیکه گاز به درون تیوب تزریق می‌شود، تیوب به غلتک فشار می‌آورد و سبب چرخیدن آن می_شود. با چرخش غلتک، تیوب آزاد و باز خواهد شد.یکی از معایب این روش، اندرکنش و فشار دیواره‌های تیوب به یکدیگر در حالت پیچانده‌شده است. این اندرکنش می‌تواند به دیواره‌های تیوب آسیب وارد کند و سبب بروز اختلال در باز شدن آنها شود. شکل (۳۲) مکانیزم چرخان برای باز شدن سازه‌های بادشونده را نشان می‌دهد [۵۷].

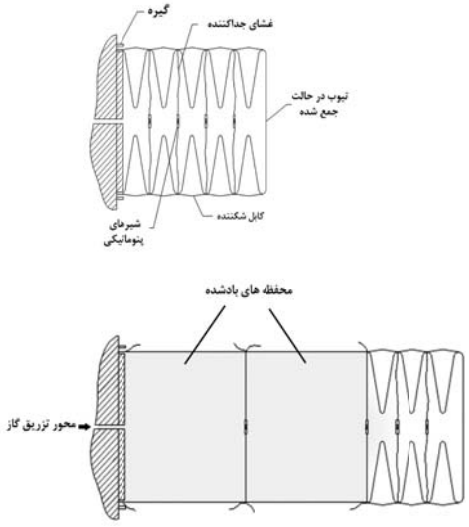
48.ECHO
49. Columnation



شکل ۳۲- مکانیزم غلتک چرخان برای باز شدن سازهٔ بادشونده [۵۷]

مکانیزم غشای داخلی

مطابق شکل (۳۳) در این روش تیوب بادشونده توسط غشاهای جداکنندهٔ داخلی به چند قسمت تقسیم می‌شود. روی این غشاها شیرهای پنوماتیکی تعبیه‌شده است که با مقدار فشار گاز معینی، باز می‌شود. در حالت جمع‌شده، تیوب به حالت تاشده و محوری روی‌هم انباشته شده است و برای حفظ شکل سازه، کابل‌های شکننده‌ای لبه‌های محفظه‌های تیوب را به هم متصل می‌کند. هنگام تزریقِ گاز، ابتدا محفظهٔ اول پر می‌شود و پس از رسیدن فشار گاز به مقدار معین، شیرِ رابط بین محفظهٔ اول و دوم باز و گاز وارد محفظهٔ دوم خواهد شد و آن را پر می‌کند. در این زمان، کابل بین محفظهٔ اول و دوم پاره می‌شود. به همین ترتیب، با تزریق مداوم گاز تمامی محفظه‌های تیوب با فشار یکسان پر می‌شود و سازه گسترش می‌یابد [۵۳].



شکل ۳۳- مکانیزم غشای داخلی برای باز شدن سازهٔ بادشونده [۵۳]

انواع سازه‌های بادشونده

سازه‌های بادشونده استفاده فراوان و متنوعی در مکانیزم‌های فضایی دارد. به‌طورکلی، این سازه‌ها شامل آنتن‌های بادشونده، بوم‌های بادشونده و سپرهای بادشونده است. در ادامه، این مکانیزم‌ها بررسی می‌شود.

آنتن‌های بادشونده

آنتن‌های بادشونده به‌صورت ذاتی وزن و حجم بسته‌شدهٔ کمیدارد. این آنتن‌ها از مواد نازک انعطاف‌پذیر ساخته می‌شود تا قبل از پرتاب تا و سپس، با باد شدن باز شود. سازهٔ رفلکتور شبیه متکای دایره‌ای با سطح سهموی است که طرف رویی آن شفاف است و طرف پشتی آن در نقش منعکس‌کننده استفاده می‌شود [۵۹].

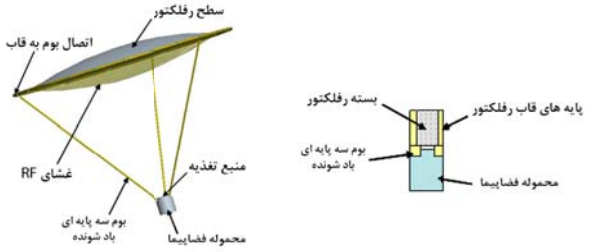
این آنتن توسط عضوهایی در امتداد لبه سفت می‌شود و می‌توان سازه را با ترکیبی از پوسته‌های رزینی سفت کرد که در دمای بالا در برخورد اشعهٔ فرابنفش به‌آرامی پخته خواهد شد. عیب اصلی آنتن‌های بادشونده، دستیابی بسیار سخت به دقت سطح بالاست. به علت سادگی و تعداد کم مودهای ناموفق، سازه‌های بادشونده توانایی گسترش‌پذیری بسیار بالایی دارد. برای آزمایش این سازه‌هاروی زمین می‌توان محیط خلأ را با استفاده از هلیم شبیه‌سازی کرد [۵۰].

یکی از بزرگ‌ترین شرکت‌های سازندهٔ تجهیزات بادشوندهٔ فضایی، شرکت اِلگارد[50] است. در سال ۱۹۹۶، این شرکت با همکاری ناسا، رفلکتور بادشونده بزرگی با نام آی‌اِی‌ای[51] را طراحی و آزمایش و در کاربردهای فضایی استفاده کرده است [۶۰]. در شکل (۳۴) نمایی از این رفلکتور نشان داده شده است.

در طرح جدیدی از ناسا، آنتن بادشوندهٔ به قطر ۳۵ متر طراحی و آزمایش شده است [۶۲]. در شکل (۳۵) مکانیزم آنتن بادشوندهٔ فضاپیمای نکسراد[52] نشان داده شده است. مطابق این شکل، بوم بادشوندهٔ سه‌پایه‌ای سطح آنتن را به بدنهٔ ماهواره متصل می‌کند (مشابه رفلکتورهای بادشوندهٔ آی‌اِی‌ای). پس از قرار گرفتن فضاپیما در مدار، با ورود گاز به داخل بوم‌های بادشونده، بوم‌ها باز و سبب گسترش صفحهٔ آنتن می‌شود. در این مکانیزم قابی تاشونده، غشای آنتن را دربرمی‌گیرد که جنس آن غیربادشونده است. توجه شود که برخلاف رفلکتورهای بادشوندهٔ آی‌اِی‌ای، در این سیستم غشای آنتن از نوع بادشونده نیست و فقط بوم‌ها خاصیت بادشوندگی دارد. پس، حجم گاز بسیار کمتری برای گسترش آنتن نیاز است و همچنین، مساحت حاصل از آن بیشتر خواهد بود.

شکل ۳۴- رفلکتورهای بادشوندهٔ IAE [۶۱]

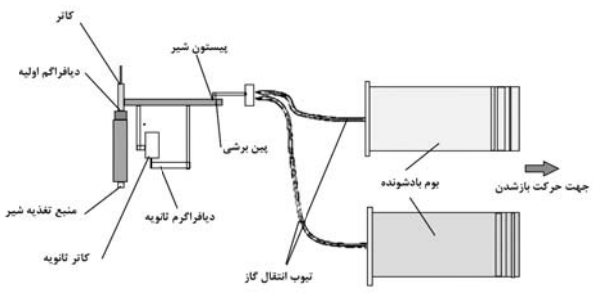
50. L'Garde Inc
51. IAE
52. NEXRAD



شکل ۳۵- مکانیزم آنتن بادشوندهٔ فضاپیمای نکسراد [۶۲]

بوم بادشونده

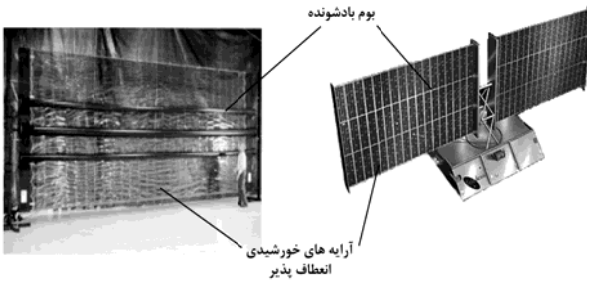
بوم‌های بادشونده مکانیزم مناسبی برای صفحات بازشوندهٔ خورشیدی است. این بوم‌ها از یک دیوارهٔ نازک تشکیل‌شده است که با ورود گاز از دستگاه تعبیه‌شده به آن، شروع به گسترش و باز شدن می‌کند [۶۳]. در این مکانیزمبه وسیله پمپاژ نمودن گاز در لوله، صلبیت بوم‌ها افزایش می‌یابد. یکی از گازهای مورد استفاده برای پر نمودن بوم‌ها نیتروژن است. کپسول‌های نیتروژن خشک، لوله‌ها را طوری پر می‌کند که سطح آنها صاف و بدون چروک باشد تا در این نقاط مشکل نشتی یا نازک شدن بیش از حد سطوح رخ ندهد [۶۴]. در شکل (۳۶) سیستم تزریق گاز و نحوهٔباز شدن این مکانیزم نشان داده شده است. در این سیستم با فرمان واحد کنترل، کاتر سوراخ‌کن پایروتکنیک، دیافراگم آلومینیومی را برای تولید جریان گاز از مخزن سوراخ خواهد کرد.جریان از میان یک نازل محدودکننده[۵۳]عبور می‌کند که وظیفهٔ کنترل شدت جریان گاز را برعهده دارد. جزء بعدی مونتاژ یک شیر[۵۴] است که وظیفهٔ آن کنترل جریان و باد شدن کامل محفظه است. زمانی که گاز از مخزن جریان می‌یابد، فشار آن کاهش و شدت‌جریان نیز، کاهش بیشتری خواهد داشت. برای اجتناب از این امر و باقی ماندن لوله‌ها در حالت صلب، به حضور مدار ثانویه نیاز است. در این مکانیزمِ نمونه، زمان باد شدن لوله‌ها یک دقیقه است [۶۵].



شکل ۳۶- مکانیزم تزریق گاز در بوم‌های بادشونده [۱]

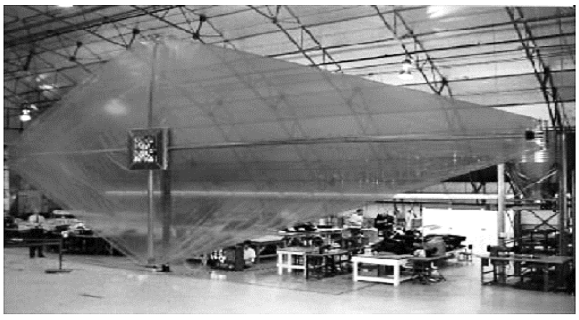
53. Restrictor
54. Vent

تاکنون از این مکانیزم در ماهواره‌های زیادی استفاده شده است. مثلاً برای باز شدن آرایه‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر در ماهوارهٔ تلدسید[۵۵] از مکانیزم بوم‌های بادشونده استفاده شده است کهدر شکل (۳۷) این مکانیزم نشان داده شده است[۵۹].

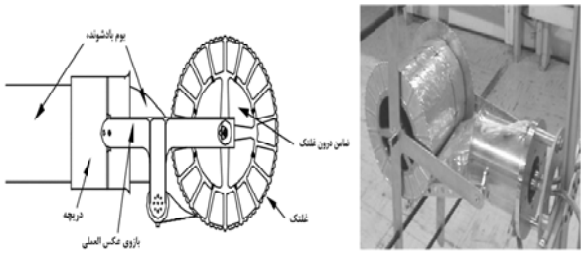


شکل ۳۷- استفاده از مکانیزم بوم‌های بادشونده برای باز شدن آرایه‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر در ماهوارهٔ تلدسید [۵۹]

با به‌کارگیری بوم‌های بادشونده، مکانیزم‌های متنوعی طراحی و ساخته شده است. به عنوان مثال مطابق شکل (۳۸) برای باز شدن سپر خورشیدی[۵۶] در تلسکوپ فضایی[۵۷] از بوم‌های بادشونده استفاده می‌شود [۶۶]. مطابق شکل (۳۹) طریقهٔ عملکرد این بوم به این صورت است که بوم بادشونده دور غلتکی پیچیده و مجرای ورود گاز به انتهای آن وصل می‌شود. با ورود گاز، بوم حول غلتک می‌چرخد و باز می‌شود و در نتیجه، غشای انعطاف‌پذیر سپر خورشیدی باز خواهد شد که توسط پایه‌ای به کنار غلتک متصل است[۵۷].



شکل ۳۸- سپر خورشیدی همراه بوم‌های بازشده [۶۵]



شکل ۳۹- مکانیزم بازکنندهٔ بوم بادشونده برای استفاده در سپر خورشیدی [۶۵]

55. Teledesic
56. Sunshield
57. Inflatable Sunshield In Space (ISIS)

سپرهای حرارتی بادشونده

سپر حرارتی نوعی محافظ برای فضاپیماست که برای بازگشت به جو زمین استفاده می‌شود. این سپر طوری طراحی شده است که در مقابل حرارت بالای جو زمین هنگام بازگشت بتواند از فضاپیما محافظت کند. سپرهای حرارتی اولیه مانند سپر حرارتی ماهواره وستوک[۵۸] طوری طراحی شده بود که هنگام پایین آمدن فرسایش یافتند و از بین رفتند. سپرهای حرارتی بعدی از موادی ساخته شده‌است که در حرارت‌های بسیار بالا بدون خراب شدن مقاومت می‌کند[۶۷].

یکی از جدیدترین کاربردهای سازه‌های بادشوندهٔ فضایی، استفاده در نقش سپر حرارتی فضاپیما برای بازگشت به جوّ زمین است. در سال ۲۰۱۴، در تحقیقات جدید ناسا، استفاده از سپرِ بادشونده برای تحمل میدان حرارتی ورود به جو و فشارهای آکوستیک فرود آزمایش شد [۶۸]. از آنجاکه سرعت ورود به جو بیش از ۵ ماخ پیش‌بینی شده است، فشار آکوستیک زیادی به فضاپیما وارد می‌شود و درنتیجه، این سپرهای حرارتی باید مقاومت لازم را داشته باشد. در شکل (۴۰) نمایی از سپر حرارتی بادشوندهٔ پرتاب‌شده با پرتابگر بلک‌برانت[۵۹] نشان داده شده است.

شکل ۴۰- سپر حرارتی بادشونده (ناسا-۲۰۱۴) [۶۹]

نتیجه‌گیری

طراحی و ساخت مکانیزم‌های بازشوندهٔ فضایی یکی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی ماهواره‌ها و فضاپیماهاست. محدودیت‌های جرم و حجم قابل‌استفاده در پرتابگر به استفادهٔ گسترده از مکانیزم‌های بازشوندهٔ فضایی در ماهواره‌ها منجر شده است و دقت و صحت عملکرد این مکانیزم‌ها یکی از مهم‌ترین مسائل سفر فضایی به شمار می‌آید. در این مطالعه، انواع مکانیزم‌های فضایی استفاده‌شده در فضاپیماها از آغاز سفرهای فضایی تاکنون بررسی شده است.می‌توان گفت تاکنون در هیچ مقاله و کتابی با این جامعیت انواع مکانیزم‌های فضایی بررسی نشده است وبنابراین می‌توان از آندر قالب مرجعی برای استفادهٔ مکانیزم‌های فضایی در صنعت فضایی کشور استفاده کرد. نوع استفاده از انواع این مکانیزم‌ها براساس نیازمندی‌های عملکردی مانند حجم و جرم موردنیاز، سختی سازهٔ بازشونده، سرعت و جهت باز شدن، طول و سطح مورد نیاز، هزینه و امکانات در دسترس انتخاب می‌شود. پس می‌توان با توجه به امکانات و نیازمندی‌های داخل کشور، از انواع مختلف مکانیزم‌های فضایی برای استفاده در ماهواره‌ها و فضاپیماهای آیندهٔ کشور عزیزمان بهره برد.

58. Vostok
59. Black Brant

مراجع

[1] Daneshjou, K. Nami, M. Fakoor, M. Daneshjou, Z., Design principles of satellite deployable devices, Islamic Azad University, 2013. (in Presian)

[2]Ley, W., *Handbook of Space Technology*, (Library of Flight), AIAA, 2009.

[3]Wertz, J.R., *Spacecraft Attitude Determination and Control*, Springer Science & Business Media, 1978.

[4]Conley, P.L., *Space Vehicle Mechanisms*,Sedona: Wiley, 1998.

[5]Fusalo, R.L., *Nasa Space Mechanism Handbook*: NASA/TP, 1999

[6]Boesiger, E.A.,"*37th Aerospace Mechanisms Symposium.*" 2004.

[7]Nakaya, K. and et.al.,"Tokyo Tech CubeSat: CUTE-I," *Presented at the AIAA 21st International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit,* 2003.

[8]Dugundji, M.L.B.J., "Joint Damping and Nonlinearity in Dynamics of Space Structure," *Proceedin of the Structures, Dynamics and Materials Conference,* Apr, 1988.

[9]Höhn, P., *Design, Construction and Validation of an Articulated Solar Panel for CubeSats*, 2010.

[10]Gralewski,M.R., Adams,L. and Hedgepeth, J.M., "Deployable Extendable Support Structure for the RADARSAT Synthetic Aperture Radar Antenna," *IAF, International Astronautical Congress, 43rd Washington,* Aug. 28-Sept. 5, 1992. 18 p

[11]MARTIN, K., "Evaluation from Hinge Actuator Mechanism to an Amenna Deploymem Mechanism for Use on the European Large Communiction Satellite," *18th Aerospace Mechanisms Symposium,*1984

[12]Vyvyan, W.W., "Self-Actuating, Self-Locking Hinge," U.S. Patent US3,386,12804-Juni,1968

[13]Baghdasarian,V.G., "Hybrid Solar Panel Array,"U.S. Patent EP0754625A1.

[14]Duperray, A.D.B. and Sicre, J., "Automotive, Self-Locking and Damping Articulated Joint and Articulation Equipped With Same," U.S. Patent US 2001/0037538 A108-Nov-2001.

[15]Pellegrino, S. and Watt, M., "Tape-Spring Rolling Hinges," *Proceedings of the 36 Aerospace*

Mechanisms Symposium, Glenn Research Center, 2002.

[16]Lorenzini, M. L. C. a. E. C., *Tethers In Space Handbook*, NASA Marshall Space Flight Center, Third Edition, 1997

[17]Herzl, G.G., *Tubular Spacecraft Booms: Extendible, ReelStored*: Lockheed Missiles & Space Company, 1970.

[18]Heber, M. L.-B., "Heliopause Explorer – A Sailcraft Mission to the Outer Boundaries of the Solar System", 2001

[19]Zhong, Y., Chu, Y.L. and Dan, Li, "Dynamics and Robust Adaptive Control of a Deployable Boom for a Space Probe,"*Acta Astronautica,* Vol. 97, *April–May 2014, P.P. 138-150.*

[20]Jensen, F. and Pellegrino, S., "Arm Development Review Of Existing Technologies", Cambridge Univ. (United Kingdom), Dept. of Engineering, 2001.

[21]Herzi, G.G., "Tubular Spacecraft Booms (Extendible, Reel Stored)," *Lockheed Missiles and Space company,* 1970.

[22]Bourrec,L., "Telescopic Boom for Space Applications Engineering Model," Presented at the 14th European Space Mechanisms & Tribology Symposium – ESMATS Constance ,Germany, 2011.

[23]Pelegrino, S., "Foldable Composite Structures," *Department of Engineering, University of Cambridge,* Vols. CB21PZ*, UK, 2003.*

[24]Meyers, S.,"Development of a Strain Energy Deployable Boom for the Space Technology 5 Mission," *37th Aerospace Mechanisms Symposium, Johnson Space Center, 2004*

[25]Soykasap,O.,"Micromechanical Models for Bending Behaviour of Woven Composites," *Journal of Spacecraft and Rockets,* Vol. 43, 2009, pp. 1093-1100.

[26]Sefen,K.A. and Pellegrino,S.,"Deployment Dynamics of Tape Springs",*Proceedings of the Royal Society of London Series A,* Vol. 455, 1999, pp. 1003-1048.

[27]Daniel, C. Williams, M., USAF, "Empirical Characterization of Unconstrained Tape Spring Deployment Dynamics," *Department of the EPARTMENT Air Force*AFIT/ GSS/ENY/ 12-M07.

[28]Marks, G. W.,"The Lightweight Deployable Antenna for the MARSIS Experiment on the Mars Express Spacecraft,"*Proceedings of the 36th Aerospace Mechanisms Symposium, Glenn Research Center, May 14-17, 2002.*

[29]Puig, B. L. andRando,N.,"A Review on Large Deployable Structures for Astrophysics Missions", *Acta Astronautica,* Vol. 67, Issues 1–2, 2010, pp. 12-26

[30]Tibert, G., "Deployable Tensegrity Structures for Space Applications," (PhD Thesis), 2002.

[31]Warden, R.M. and Jones, P.A., "Carousel Deployment Mechanism for Coilable Lattice Truss," *23^{rd,} Aerospace Mechanisms Symposium,* 1989.

[32]Pellegrino, S. and Stohlman, O. R. "Shape Accuracy of a Joint-Dominated Deployable Mast,"*California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125.*

[33]Tan, Z.Q., "Analysis of Mechanism Reliability in Anti-Dislocation Locking of Space Cable-Strut Deployable Articulated Mast," *Advanced Materials Research,* Vol. 753-755, 2013, pp.1145-1150.

[34]Hongwei Guoa, R.L., Deng, Z., Zhang, J., "Dynamic Characteristic Analysis of Large Space Deployable Articulated Mast," *Procedia Engineering,* Vol. 16, 2011, pp. 716-722.

[35]Nagaraj, B.P., Pandian, R. and Ghosal, A., "Kinematics of Pantograph Masts," *Mechanism and Machine Theory,* Vol. 44, Issue 4,2009, pp. 822-834.

[36]Joachim Block, M.S. and Wiedemann, M., "Ultralight Deployable Booms for Solar Sails and other Large Gossamer Structures in Space," *Acta Astronautica,* Vol. 68, Issues 7–8, 2011, pp. 984-992.

[37]Morozov, E.V. and Lopatin, A.V.,"Design and Analysis of the Composite Lattice Frame of a Spacecraft Solar Array," *Composite Structures,* Vol. 93, Issue 7, 2011, pp. 1640-1648.

[38]Xin Zhang, L., Feng Bai, Zh., Zhao, Y. and Bin Cao, X., "Dynamic Response of Solar Panel Deployment on Spacecraft System Considering Joint Clearance," *Acta Astronautica,* Vol. 81, Issue 1, 2012, pp. 174-185.

[39]Fortescue, P., *Spacecraft System Engineering*: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, Fourth Edition. 2011.

[40]Morozov, E. and Lopatin A., "Analysisand Design of The Flexible Composite Membrane Stretched on the Spacecraft Solar Array Frame," *Composite Structures,* Vol. 94, 2012, pp. 3106-3114.

[41]Foster,C. L., Tinker,M. L., Nurre,G. S. and Till,W. A, "Solar-Array-Induced Disturbance of the Hubblespace Telescope Pointing System,"*Journal of Spacecraft and Rockets,* Vol. 32, 1995, pp. 634-644.

[42]Wiedemann,M. and Sinapius, M.,*Adaptive, Tolerant and Eficient Composite Structures,* Springer Science & Business Media, 2012.

[43]Kojima,Y., "Dynamic Simulation of Stick–Slip Motion of a Flexible Solar Array",*Control Engineering Practice,* Vol. 16, Issue 6, 2008, p.p. 724-735.

[44]Winslow,C., "Space Station Freedom Solar Array Design Development,"*IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine,* Vol. 8, 1993, pp. 3-8.

[45]Available, [On-line]: http://iss.jaxa.jp/iss/13a/ mission/payload/s3_s4truss./

[46]Benson, S.W., "Solar Power for Outer Planets Study", in *Presentation to Outer Planets Assessment Group*, /NASA Glenn Research Center.

[47]Available, [On-line]:https://www.nasa.gov/pdf/ 491544 main_orion book_web.pdf.

[48]Imbriale, W.A., *Space Antenna Handbook*, wiley, 2012.

[49]Imbriale, W.A., *Spaceborne Antennas for Planetary Exploration*, John Wiley & Sons, Inc, 2006

[50]Yuen, J.H. and Imbriale,W.A., *Spaceborne Antennas for Planetary exploration*, Vol. 12: John Wiley & Sons, 2006

[51]Hachkowski, M. and Peterson, L., "A Comparative Study of the Precision of Deployable Spacecraft Structures", CU-CAS-951995.

[52]Brandon, E.J., "Structural Health Management Technologies for Inflatable/Deployable Structures: Integrating Sensing and Self-Healing",*Acta Astronautica,* Vol. 68, Issues 7–8, April–May 2011, pp. 883-903.

[53]Cadogan, M. G. D., "Inflatable Space Structures: A New Paradigm For Space Structure Design,"*49th International Astronautical Congress*, 1998.

[54]Schenk, M., Viquerat, A. D., Seffen, K. A. and Guest,S. D., Review of Inflatable Booms for Deployable Space Structures: Packing and Rigidization," *Journal of Spacecraft and Rockets,* Vol. 51, 2014, pp. 762-778.

[55]Bernasconi, W.J. R. M.C., "Inflatable, Space-Rigidized Support Structures for Large Spaceborne Optical Interferometer Systems,"*Acta Astronautica,* Vol. 22, 1990, pp. 145-153.

[56]Bernasconi, M.C., "Inflatable, Space-Rigidized Structures. Overview of Applications And Their Technology Impact," *Acta Astronautica,* Vol. 14, 1986, pp. 455–465.

[57]Cadogan, D. P. "Deployment Control Mechanisms for Inflatable Space Structures," *33 Aerospace Mechanisms Conference – May 1999.*

[58]D., Cui, "An Overview of Dynamics Modeling of Inflatable Solar Array," *2nd International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE)*, 2011.

[59]Available, [On-line]: http://www.witpress.com/Secure /elibrary/papers/9781853129414/9781853129414010 FU1.pdf

[60]Freeland, R., Bilyeu,G.,Veal, G.,Steiner, M. and Carson, D.,"Large Inflatable Deployable Antenna Flight Experiment Results," *Acta Astronautica,* Vol. 41, 1997, pp. 267-277.

[61]"Spartan 207/Inflatable Antenna Experiment,"*NASA Goddard Space Flight Center,* February 14, 1997.

[62]Lin, J. K. H.,"Concept Study of a 35-m Spherical Reflector System for NEXRAD in Space Application,"*47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2006.

[63]Katsumata, N.,"Analysis of Dynamic Behaviour of Inflatable Booms in Zigzag and Modified Zigzag Folding Patterns,"*Acta Astronautica,* Vol. 93, January 2014, Pages 45-54.

[64]Szyszkowski,W. andGlockner,P.G.,"Inflatable Booms and Pneumatic Hinges: An Application in Deployment of Satellite Sensors,"*Engineering Structures,* Vol. 13, Issue 4, 1991, pp. 357-365.

[65]Sapna, G.H.,"Inflatable Boom Controlled Deployment Mechanism for the Inflatable Sunshield In Space (ISIS) Flight Experiment,"*34th Aerospace Mechanisms Conference*, 2000.

[66]Sandy, C.R.,"Next Generation Space Telescope Inflatable Sunshield Development,"*0-7803-5846-5/00/$10.00 © 2000 IEEE*.

[67]Marraffa,D. K. L. andBaglioni, P.,"Inflatable Re-Entry Technologies: Flight Demonstration and Future Prospects,"*Esa,* Bulletin 103, 2000.

[68]Marraffa L. and Kassing,K.,"Inflatable Re-Entry Technologies: Flight Demonstration and Future Prospects,"*Esa,* Bulletin 103, august 2000.

[69]Available, [On-line]: "Inflatable Re-entry Demonstrator Technology (IRDT)," www. spaceflight. esa.int/irdt/ factsheet.pdf.