نانوماهواره‌برها: روندها و چالش‌ها

سیما سپتان[۱*]، مسعود ابراهیمی کچویی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، sima.septan@modares.ac.ir

۲- دانشیار گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، ebrahimikm@modares.ac.ir

*نویسنده مخاطب

چکیده

تقاضا برای حامل‌های فضایی کوچک و در عین حال مقرون به صرفه، از اولین روزهای «عصر رقابت فضایی» مطرح شد. در سالهای اخیر، با ایجاد تنوع در ماموریت‌های فضایی و امکان ارائه خدمات فضاپایه به حوزه‌های مختلف علوم و فناوری، پرتاب ماهواره‌های کوچک بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته، و به موازات آن، شاهد سرمایه‌گذاری دولت‌ها و بخش خصوصی در زمینه توسعه و ساخت ماهواره‌برهایی هستیم که با کاهش هزینه پرتاب و افزایش قابلیت اطمینان، بستر لازم برای رشد صنعت فضایی و خدمات فضاپایه را فراهم کنند. حذف تاخیرهای زمانی در پرتاب ماهواره‌های سبک، که بالاجبار به عنوان محموله جانبی یک ماهواره‌بر متوسط یا سنگین پرتاب می‌شوند، و رفع محدودیت‌های مدار مقصد را می‌توان از مهمترین انگیزه‌های فعالان صنعت فضایی در توسعه ماهواره‌برهای سبک دانست. در این میان، دسته خاصی از موشک‌های ماهواره‌بر سبک، موسوم به «نانوماهواره‌برها» (Nano Launch Vehicles) وارد عرصه شدند تا به عنوان حامل مخصوص مجموعه‌های پرتعداد ماهواره‌های کوچک، به تسریع و تسهیل پرتاب‌های فضایی (خصوصا در حوزه تشکیل منظومه‌های ماهواره‌ای) کمک کنند. در پژوهش پیش رو، ضمن بیان ضرورت توسعه نانوماهواره‌برها و مزایا و چالش‌هایی که به همراه دارند، تعدادی از آنها معرفی شده‌اند. همچنین تلاش شده با نگاهی جامع، اطلاعات به‌روز و دقیقی درباره روندها، مشخصات فنی و چشم‌انداز توسعه این حامل‌های فضایی ارائه گردد. امید است نتایج حاصل از آن در تنظیم و تدوین راهبردها و اسناد توسعه صنعت فضایی کشور مفید و موثر واقع شود.

واژه‌های کلیدی: *نانوماهواره‌بر – منظومه ماهواره‌ای – حامل فضایی کوچک.*

۱- مقدمه

روز ۴ اکتبر ۱۹۵۷، اتحاد جماهیر شوروی در بحبوحه جنگ سرد با ایالات متحده آمریکا، اولین ماهواره تاریخ (اسپوتنیک) را به مدار زمین فرستاد تا آغاز عصر رقابت فضایی را رقم بزند [۱]. موشک آر-۷، که اولین موشک بالستیک قاره‌پیما به شمار می‌رفت، وظیفه حمل این ماهواره را به عهده داشت. دولت آمریکا در سوی دیگر این میدان رقابت، با تشکیل گروهی که اکثر اعضای آن مهندسان آلمانی متخصص توسعه موشک‌های بالستیک بودند، فعالیت‌های فضایی خود را آغاز کرد. این گروه با رهبری ورنر ون براون (Wernher von Braun) که بعدها به عنوان پدر صنعت موشکی جهان شناخته شد، موشک آلمانی وی-۲ (V2) را ارتقا داد تا به موشک قویتر ژوپیتر – سی (Jupiter C) تبدیل شود و ماهواره اکسپلورر را در ۳۱ ژانویه ۱۹۵۸ در مدار قرار دهد [۲].

این رقابت ادامه یافت و در دهه ۶۰ و ۷۰ میلادی طیف حامل‌های فضایی از لحاظ ابعاد، جرم محموله و مدار مقصد به شکل قابل توجهی گسترش پیدا کرد. از موشک‌های غول‌پیکر ساترن و سایوز تا نمونه‌های کوچکتری مثل دلتا و تور، در این طیف جای می‌گرفتند. در همین زمان بود که به تدریج کشورهای دیگری مثل کشورهای عضو اتحادیه اروپا، چین و هند نیز وارد باشگاه فضایی‌ها شدند.

دهه ۸۰ و ۹۰ میلادی نمودار رشد فناوری پرتابگرها شیب تندتری گرفت و تشکیل منظومه‌های ماهواره‌ای به یکی از موضوعات جذاب در محافل علمی و صنعتی دنیای هوافضا تبدیل شد. دو منظومه ORBCOMM و ایریدیوم (Iridium) پرچم‌دار جنبشی شدند که لزوم توجه به توسعه ماهواره‌برهای کوچک را به مسئولان عالی‌رتبه کشورها و کارشناسان صنعت فضایی یادآور شد. یکی از نتایج مستقیم این جنبش، توسعه موشک پگاسوس (Pegasus) بود. این روند ادامه پیدا کرد و در سالهای اخیر، با ظهور ماهواره‌های مکعبی و منظومه‌های پیشرفته‌ای مانند وان وب (OneWeb)، هاوک آی ۳۶۰ (HawkEye 360) و پلنت (Planet)، موج جدیدی از تقاضا برای حامل‌های فضایی کوچک و سبک ایجاد شد.

به منظور شناخت بهتر آنچه به عنوان «نانوماهواره‌بر» در این مقاله مطرح می‌شود، جدول ۱، حامل‌های فضایی را بر حسب جرم محموله‌ای که تا مدار پایینی زمین (LEO) یا مدار خورشیدآهنگ (SSO) حمل می‌کنند در شش گروه تقسیم کرده است. براساس این تقسیم‌بندی، عنوان «نانوماهواره‌بر» به موشک‌هایی با جرم محموله کمتر از ۲۰ کیلوگرم اطلاق می‌شود.

جدول ۱- دسته‌بندی حامل‌های فضایی برحسب جرم محموله (قابل حمل تا مدار پایینی زمین یا خورشیدآهنگ)

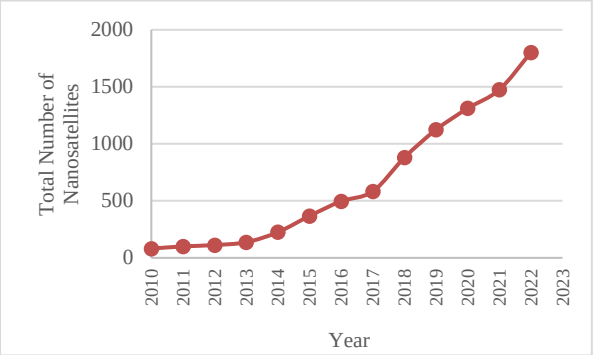
ردیف	نام دسته حامل فضایی	جرم محموله (کیلوگرم)
۱	نانوماهواره‌بر	< ۲۰
۲	میکروماهواره‌بر	۲۰ - ۲۰۰
۳	مینی‌ماهواره‌بر	۲۰۰ - ۵۰۰
۴	ماهواره‌بر کوچک	۵۰۰ - ۱۰۰۰
۵	ماهواره‌بر متوسط	۱۰۰۰ - ۱۵۰۰۰
۶	ماهواره‌بر سنگین	> ۱۵۰۰۰

۲- ضرورت توسعه نانوماهواره‌برها

در سال‌های اخیر، صنعت فضایی شاهد رشد قابل توجه تقاضا در بازار پرتاب ماهواره‌های کوچک بوده است. این ماهواره‌ها با کاربردهایی نظیر رصد زمین، مخابرات و جمع‌آوری داده‌های هواشناسی به فضا پرتاب می‌شوند. در واقع

پیشرفت فناوری‌های فضایی امکان کاهش اندازه ماهواره‌ها بدون افت عملکرد و کارایی آنها را به ارمغان می‌آورد.

پیش‌بینی می‌شود طی ۴ سال آینده، ارزش بازار جهانی ماهواره‌های کوچک از ۳ میلیارد دلار به ۷.۱ میلیارد دلار برسد. به عبارت دیگر، در این بازه زمانی سالانه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ ماهواره کوچک پرتاب خواهد شد که بیش از ۸۰٪ آنها نانوماهواره‌ها و ماهواره‌های مکعبی هستند. مهمترین دلیل این رشد چشمگیر را افزایش منظومه‌های ماهواره‌ای ذکر کرده‌اند [۳]. شکل ۱، نمای کلی روند رشد پرتاب نانوماهواره‌ها از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمودار رشد پرتاب نانوماهواره‌ها از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ [۴]

رشد انفجاری تعداد نانوماهواره‌ها، افزایش تقاضا برای پرتاب آنها را به دنبال داشته است. اما همچنان آنها را به عنوان محموله «ثانویه» در کنار محموله‌های اصلی قرار می‌دهند. این امر، برای نهادهای فعال در حوزه نانوماهواره‌ها و ماهواره‌های مکعبی چالش‌هایی را به دنبال داشته که عبارتند از:

الف) عدم کنترل بر برنامه زمانی پرتاب: محموله ثانویه، باید تابع برنامه پرتاب محموله اصلی باشد. به این ترتیب، تاخیر در توسعه و آماده‌سازی محموله اصلی بر آن تاثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، برنامه ارسال ماهواره‌های مکعبی به ایستگاه فضایی بین‌المللی را ماموریت‌های ارسال محموله‌های تدارکاتی و مایحتاج ساکنان آنجا تعیین می‌کند. معمولا این ماموریت‌ها به دلیل انجام بررسی‌های ایمنی دقیق با تاخیر همراه‌اند.

ب) محدودیت در انتخاب مدار: پارامترهای مدار مقصد هر پرتاب را الزامات محموله اصلی دیکته می‌کند. بنابراین، گزینه‌های پیش روی صاحبان محموله ثانویه به مدارهایی که معمولا مقصد پرتابهای فضایی هستند، کاملا محدود است. این محدودیت مداری، فرصت توسعه‌دهندگان نانوماهواره‌ها برای طراحی ماموریت‌های نوآورانه‌ای که به پارامترهای مداری منحصربه‌فردی نیاز دارند را از آنان سلب می‌کند.

ج) رعایت الزامات سطح بالا (و غیرضروری): جهت محافظت از ایمنی محموله اصلی و موشک ماهواره‌بر، اغلب الزامات مربوط به ایمنی و تست که برای سیستم‌های گران‌قیمت محموله اصلی بیان شده، بر محموله ثانویه نیز اعمال می‌گردد. این امر، باعث افزایش هزینه و پیچیدگی مستندسازی شده و با فرایندهای ساده رایج در ساخت نانوماهواره‌ها در تضاد است.

د) هزینه بالای سفارشی‌سازی پرتاب: استانداردسازی شرایط، عامل اصلی موفقیت ماموریت نانوماهواره‌هاست. اما با افزایش قابلیت‌های ماهواره‌برهای کوچک، بسیاری از توسعه‌دهندگان نانوماهواره‌ها خواهان تسهیلات ویژه در طی پرتاب، از جمله تخلیه نیتروژن، عایق ارتعاش، کنترل حرارتی و ... هستند. پاسخ به این خواسته‌ها در شرایطی که محموله در بخش ثانویه قرار می‌گیرد، بسیار پرهزینه است؛ چرا که اصلاح تجهیزات استانداردی که مطابق الزامات محموله اولیه و یک موشک ماهواره‌بر معمولی هستند، را ایجاب می‌کند [۵].

با توجه به موارد فوق‌الذکر، صنعت حمل‌ونقل فضایی به دسترسی «کم‌هزینه» و «قابل اطمینان» به فضا نیازمند بوده و رفع این نیاز، مستلزم ارائه خدمات پرتاب «متناسب با تقاضا» است. طی دو دهه گذشته، این نیازمندی‌ها توسط نهادهای دولتی و خصوصی شناسایی شده و آنها را به سمت توسعه سامانه‌های پرتابگر کوچک سوق داده است. اما در توسعه هر سامانه جدید، ریسک فنی و هزینه‌ای وجود دارد که انگیزه سرمایه‌گذاران بخش خصوصی برای ورود به این بخش نوپا از صنعت فضایی را کاهش می‌دهد. در مقابل، امید به توسعه این سامانه‌ها و اجرای پرتاب‌های منظم با فواصل زمانی کم و قابلیت اطمینان بالا، استقبال شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات فضاپایه از این پرتاب‌ها را افزایش خواهد داد و به نوبه خود باعث رشد انگیزه سرمایه‌گذاران خواهد شد.

۲-۱- مزایا

مقایسه نانوماهواره‌برها با سایر پرتابگرها، نتایج زیر را به دست می‌دهد:

- هزینه تولید و زیرساخت کمتر؛
- چرخه تولید کوتاه‌تر؛
- آماده‌سازی سریع‌تر برای پرتاب؛
- تعداد پرتاب بیشتر در یک بازه زمانی معین؛ و
- الزامات کمتر برای سایت پرتاب و مناسب‌سازی محل.

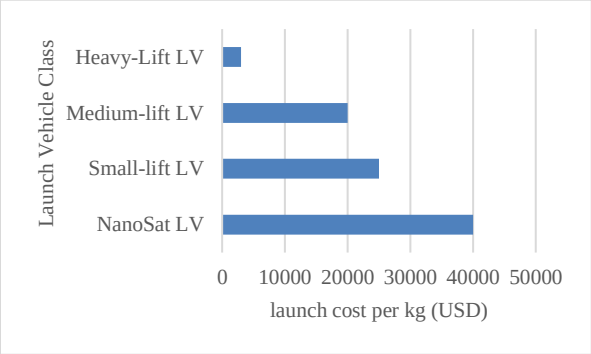
این تفاوت‌ها، مزایایی را برای مشتریان پرتاب‌های مداری و سایر طرف‌های دخیل در یک ماموریت فضایی به همراه خواهد داشت؛ از جمله:

۱) کاهش هزینه پرتاب: هزینه پرتاب، یکی از گلوگاه‌های زنجیره ارزش صنعت فضایی است و برایند همه موارد فوق‌الذکر، کاهش هزینه پرتاب برای مشتری خواهد بود. قبل از توسعه نانوماهواره‌برها، کمترین ظرفیت حمل محموله تا مدار پایینی زمین، ۱۵۰ کیلوگرم بوده و هزینه هر پرتاب از ۵ میلیون دلار (برای موشک الکترون شرکت راکت‌لب) شروع می‌شد [۶]. بنابراین، به عنوان مثال برای پرتاب یک ماهواره ۱۰ کیلوگرمی، مشتری یا باید کل هزینه پرتاب را پرداخت می‌کرد، یا با اپراتوری قرارداد می‌بست که خدمات پرتاب مشترک چند محموله (که در دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند) را ارائه دهد. راه‌حل دوم، هزینه را کاهش داده، اما مشکل دیگری به نام «زمان انتظار طولانی» را به وجود می‌آورد. به منظور حل این مشکلات، ایده توسعه نانوماهواره‌برها مطرح شد. جدول ۲، هزینه پرتاب چند نمونه از نانوماهواره‌برهای عملیاتی یا در حال توسعه را ارائه کرده است. شکل ۲ نیز به مقایسه میانگین هزینه پرتاب هر کیلوگرم محموله به مدار پایینی زمین با انواع پرتابگرها می‌پردازد.

جدول ۲- هزینه پرتاب نانوماهواره‌برها به ازای هر کیلوگرم از محموله [۷]

ردیف	نام نانوماهواره‌بر	جرم محموله (کیلوگرم)	هزینه پرتاب به ازای هر کیلوگرم از محموله (دلار)
۱	SS-520-4	۴	۸۷۵.۰۰۰
۲	EcoRocket	۱۰	۱۰۰.۰۰۰
۳	Aventura I	۱۰	۵.۰۰۰

۴	EOS SmallLauncher	۱۰	۱۵.۰۰۰
۵	Taymyr-1A	۱۲	۴۱.۶۷۰
۶	Bagaveev	۱۰	۲۵.۰۰۰
۷	Spyder Orbital	۱۰	۱۰۰.۰۰۰
۸	S/One	۱۰	۴.۰۰۰
۹	VALT	۲۵	۶۸.۰۰۰
۱۰	CAB-3A	۵	۵۰.۰۰۰
۱۱	MINSAT-2000	۲۰	۵۰.۰۰۰



شکل ۲- مقایسه هزینه پرتاب هر کیلوگرم محموله به مدار پایینی زمین با انواع ماهواره‌برها

شکل ۲، در نگاه اول نشان‌دهنده هزینه بیشتر پرتاب با نانوماهواره‌برها نسبت به سایر پرتابگرهاست، اما سرعت در انجام ماموریت، این اختلاف هزینه را تا حد زیادی جبران می‌کند. در واقع پرتاب با ماهواره‌برهای متوسط و بزرگ، فقط در صورتی مقرون به صرفه است که ظرفیت محموله آنها تکمیل شود. علاوه بر آن، سازندگان نانوماهواره‌برها با افزودن قابلیت استفاده مجدد به بوستر این پرتابگرها، به دنبال کاهش هر چه بیشتر هزینه پرتاب هستند.

برخی صاحب‌نظران معتقدند به دلیل آنکه حامل‌های فضایی برای دستیابی به مدارهایی با ارتفاع و شیب متفاوت طراحی می‌شوند و پرتاب آنها از پایگاه‌های مختلفی صورت می‌گیرد، نباید عملکرد (یا هزینه کلی) آنها را به شیوه‌های سنتی و با پارامترهای نادرست مقایسه نمود. یکی از پارامترهای جدید، مومنتوم کل تامین‌شده برای محموله (Payload Impulse) است [۸].

ب) کاهش زمان انتظار و پنجره پرتاب منعطف: با توسعه نانوماهواره‌برها، امکان پرتاب اختصاصی محموله‌هایی با وزن ۲۰ کیلوگرم یا کمتر فراهم شده و زمان انتظار مشتری به حداقل مقدار ممکن می‌رسد. در تشکیل منظومه‌های ماهواره‌ای (که محل کاربرد اصلی نانوماهواره‌ها و ماهواره‌های مکعبی در دنیای امروز هستند) تاخیر در پرتاب آثار مخرب قابل توجهی به دنبال دارد. علاوه بر آن، اختلال در برنامه زمانی پرتاب یک ماهواره کوچک که برای توسعه فناوری پرتاب می‌شود، موجب ضرر مالی مستقیم شرکت‌های دخیل در ماموریت است، زیرا تاخیر در انجام آزمایش فناوری‌های جدید، سرعت ساخت دستگاه‌های تجاری مبتنی بر آن فناوری را به شدت کاهش می‌دهد و شرکت‌ها را در اجرای تعهداتشان با مشکل مواجه می‌کند. مدت انتظار برای پرتاب محموله‌های کوچک با ماهواره‌برهای بزرگ، گاهی به ۱ تا ۲ سال می‌رسد. اما با توسعه حامل‌های فضایی کوچک، زمان انتظار برای پرتاب به ۳ تا ۶ ماه کاهش یافته و برخی بررسی‌ها نشان می‌دهد انجام پرتاب‌های منظم ماهانه با این سامانه‌ها هدف دور از دسترسی نخواهد بود.

ج) تنوع بیشتر در ماموریت: استفاده از نانوماهواره‌برها و ماهواره‌برهای بزرگتر برای پرتاب نانوماهواره‌ها را به استفاده مسافران از تاکسی دربست و اتوبوس تشبیه می‌کنند. در واقع پرتاب اختصاصی با نانوماهواره‌برها، امکان تعیین پارامترهای مدار مقصد را برای مشتری فراهم کرده و به طراحی انواع ماموریت‌ها کمک می‌کند (البته با توسعه بلوک‌های انتقال مداری که قابلیت تزریق چند محموله به چند مدار را دارند، امکان توقف اتوبوس در ایستگاه‌های مختلف فراهم شده، اما هنوز هزینه این دو رویکرد به خوبی مقایسه نشده است).

د) به حداقل رسیدن پیامدهای منفی پرتابهای ناموفق: هر موشک ماهواره‌بر قابلیت اطمینان مشخصی داشته و امکان عدم موفقیت در اجرای ماموریت آن وجود دارد. اما میزان ضرر ناشی از این عدم موفقیت، برای همه ماهواره‌برها یکسان نیست. در غیاب نانوماهواره‌برها، موشک‌های سنگین وظیفه حمل تعداد بیشتری از محموله‌های کوچک را به عهده می‌گیرند و در صورت عدم موفقیت در اجرای ماموریت، حجم بیشتری از محموله از دست می‌رود. اما شکست احتمالی یک نانوماهواره‌بر در انجام ماموریتش، زیان بسیار کمتری را متوجه توسعه‌دهندگان محموله و موشک حامل می‌کند.

ه) افزایش ایمنی پرتاب: در سامانه‌های پرتاب متوسط و سنگین، به دلایل فنی مختلف معمولا بوستر مرحله اول کمی بعد از پرتاب و در نزدیکی پایگاه پرتاب جدا شده و در مکان معینی سقوط می‌کند. وزن سبک نانوماهواره‌برها، نیاز به این کار را مرتفع کرده و ایمنی پرتاب‌ها را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد.

و) امکان پرتاب از انواع پایگاه‌ها: اکثر موشک‌ها از سکوهای زمینی و به صورت عمودی پرتاب می‌شوند. در این روش، خود موشک همه مسیر زمین تا مدار مورد نظر را طی می‌کند تا محموله را در مدار مورد نظر مستقر سازد. اما برای پرتاب موشک‌های کوچک و سبک نانوماهواره‌بر می‌توان از فناوری پرتاب افقی یا هوایی نیز استفاده کرد. در پرتاب هوایی، موشک به بال یک هواپیمای ترابری متصل می‌شود. هواپیما موشک را تا ارتفاع چند هزار فوتی و لایه‌های کم‌تراکم جو بالا برده و از آنجا پرتاب می‌کند. این روش پرتاب، به سکوی ویژه و تعداد زیادی نیروی انسانی نیاز ندارد. کافیست یک باند مناسب برای هواپیماهای ترابری بزرگ تدارک دیده شود.

۳- سامانه‌های موجود

از آغاز قرن ۲۱ برنامه‌ریزی و تامین مالی پروژه‌های طراحی و توسعه نانوماهواره‌برها در دستور کار برخی کشورها قرار گرفت. در جدول ۳ برخی از آنها معرفی شده‌اند.

جدول ۳- نانوماهواره‌برهای جهان در سال ۲۰۲۲ میلادی

ع	نام نانوماهواره‌بر	جرم محموله (kg)	اولین پرتاب	وضعیت فعلی	کشور / شرکت سازنده

۱	SS-520-4	۴	۲۰۱۷	بازنشسته	ژاپن / سازمان فضایی ژاپن (JAXA)
۲	EcoRocket (Haas 2CA)	۱۰	۲۰۲۲	در حال توسعه	آمریکا / ARCA Space
۳	Aventura I	۲۵	۲۰۲۲	در حال توسعه	آرژانتین / TLON Space
۴	SMA - 2	۲۲	۲۰۲۳	در حال توسعه	آمریکا / Space Mission Architects
۵	EOS SmallLauncher	۱۰	۲۰۲۳	در حال توسعه	ایتالیا / Sidereus Space Dynamics
۶	Taymyr-1A	۱۲	۲۰۲۵	در حال توسعه	روسیه / Lin Industrial
۷	Bagaveev	۱۰	؟	در حال توسعه	آمریکا / Bagaveev Corporation
۸	Spyder Orbital	۱۰	؟	در حال توسعه	آمریکا / UP Aerospace
۹	S/One	۱۰	؟	در حال توسعه	آمریکا، اسپانیا، روسیه / SpaceDarts
۱۰	Rudra 1	۲۵	؟	در حال توسعه	هند / Vellon Space
۱۱	VALT	۲۵	؟	در حال توسعه	آمریکا / VALT Enterprise
۱۲	CAB-3A	۵	؟	در حال توسعه	آمریکا/ Cubecab
۱۳	MINSAT-2000	۲۰	؟	در حال توسعه	انگلیس / Masterra Space
۱۴	Helios	۲۰	۲۰۱۹	فعال	آمریکا / Aphelion Orbitals

نانوماهواره‌برهای موجود را می‌توان از چند جنبه مختلف دسته‌بندی کرد:

الف) نحوه پرتاب: حامل‌های فضایی دسته نانو از سکوهای زمینی و هوایی (هواپیما، بالون و ...) قابل پرتاب هستند؛

ب) قابلیت استفاده مجدد (Reuseability): به نظر می‌رسد در اولین گام‌های توسعه نانوماهواره‌برها، با توجه به هزینه پایین ساخت این پرتابگرها توجه خاصی به ایجاد قابلیت استفاده مجدد در آنها وجود نداشت، اما تقریبا همه مواردی که کار توسعه آنها از سال ۲۰۱۴ به بعد آغاز شده، با این قابلیت همراه هستند. بازیابی این ماهواره‌برهای سبک به شیوه‌های مختلف انجام می‌گیرد. به عنوان مثال، با کمک هلیکوپتر، بوسترهای جدا شده از ماهواره‌برهای سبک را هنگام فرود، روی هوا می‌گیرند تا در پرتابهای بعدی از آنها استفاده کنند.

جدول ۴، مشخصات فنی چند نمونه از نانوماهواره‌برهای فعال را ارائه کرده است.

جدول ۴- مشخصات فنی چند نمونه از نانوماهواره‌برها

مشخصات فنی	Helios	EcoRocket	SMA-2
جرم کل (kg)	۳۵۱۰	۴۹۳۰	۱۰۱۰
طول (m)	۱۰.۳	۱۳.۲	۹.۴
قطر (m)	۰.۸۰	۱.۲	۰.۴۶
ظرفیت محموله تا مدار LEO (kg)	۲۰	۱۰	۲۲
نوع محموله	ماهواره مکعبی 12U	نانوماهواره	نانوماهواره

٤- فناوری‌ها

ساخت ماهواره‌برهای سبک و کوچک، مستلزم ایجاد تغییراتی در زیرسیستم‌های پرتابگرهای رایج بود که در ادامه به چند مورد از آنها اشاره می‌شود:

- ساخت موتورهای کوچکتر با تراست کافی، صنعتگران این حوزه را به سمت موتورهای ۱۰۰٪ اکولوژیک با پیشران سبز (مانند موتور Ventura I) سوق داد.
- توسعه یک زیرسیستم اویونیک نوین برای حامل‌های فضایی سبک، کاهش جرم و هزینه، و افزایش انعطاف در معماری این زیرسیستم را به دنبال داشت.
- استفاده از کنترل مقاوم سوئیچینگ برای طراحی بهینه زیرسیستم کنترل وضعیت، از ایده‌هایی بود که در برنامه توسعه ماهواره‌برهای فوق‌سبک CALVEIN مطرح شد و به مرحله اجرا درآمد [۹].

٤-۱- الزامات طراحی و توسعه

در اسناد ناسا به این موضوع اشاره شده که پس از بررسی فناوری‌های مورد نیاز برای توسعه و ساخت نانوماهواره‌برهایی که کارایی و بازدهی فنی و اقتصادی مطلوب را داشته باشند، لازم است نکات فنی زیر در توسعه آنها مورد توجه قرار بگیرند:

الف) طراحی بوسترها باید به شکلی باشد که هزینه‌های پرتاب محموله‌های نانوابعادی (کمتر از ۲۰ کیلوگرم) به مدار LEO را کاهش دهد. طرح مذکور باید بر موارد زیر تمرکز کند:

- توسعه و پیاده‌سازی فناوری بسته‌های اویونیک کوچک، سبک و مقاوم جهت کنترل حامل فضایی، مانیتورینگ سامانه‌ها، پایان پرواز مستقل (خاموشی موتور)، سامانه‌های جدایش و فرستنده TDRS برای پشتیبانی از تست پرتاب؛
- الزامات مربوط به سامانه پایان پرواز مستقل برای نانوماهواره‌برها؛
- توسعه و آزمایش سامانه پیشرانش به منظور اطمینان از کاهش هزینه‌ها؛
- توسعه نمونه عملیاتی زمینی، جهت نمایش نحوه ادغام اجزا، پردازش و پرتاب نانوماهواره‌بر؛

ب) پیشبینی شاخص‌های عملکرد، هزینه‌ها و طرح توسعه و آزمایش نانوماهواره‌بر؛

ابعاد نانوماهواره‌بر نمونه، باید از ماهواره‌برهای دسته سبک (مانند پگاسوس) کوچکتر باشد. فاز اول فرایند توسعه، که طراحی مفهومی سامانه را ارائه می‌دهد باید شامل شبیه‌سازی‌ها و اندازه‌گیری‌های مربوطه باشد و به اثبات این موضوع که رویکرد پیشنهادی به محصول مورد اشاره منتج خواهد شد، بپردازد. همچنین لازم است فرمول‌بندی و ارائه ماتریس صحه‌گذاری

اندازه‌گیری‌هایی که باید در فاز دوم انجام شوند، به همراه محدوده کمّی خاص pass – fail هر کمیت تهیه و ارائه شود [۱۰].

۵- نمونه‌های ناموفق

در مسیر توسعه نانوماهواره‌برها، نمونه‌های ناموفقی نیز وجود دارند که ادامه توسعه آنها به کلی متوقف شده یا به تعویق افتاده است. به عنوان مثال، موشک N-SOLV شرکت آمریکایی Space Transport Corporation که روند توسعه آن از سال ۲۰۰۲ شروع و بدون انجام هیچ پرتابی پروژه لغو شد. در برخی موارد نیز پروژه در حالت تعلیق قرار گرفته تا تلاش برای رفع عوامل شکست پرتاب‌ها، ادامه یابد.

٦- چالش‌ها

بررسی برنامه‌های طراحی و ساخت نانوماهواره‌برها نشان می‌دهد فعالان این حوزه با چند چالش عمده روبرو هستند:

- کاهش ابعاد و جرم زیرسیستم‌ها، در عین حفظ عملکرد مطلوب و توانایی اجرای ماموریت‌های متنوع؛
- ساده‌سازی فرایند ساخت و آماده‌سازی پرتابگر به منظور تسریع این فرایند و افزایش فرکانس پرتاب‌ها؛
- رعایت استانداردهای پرتاب ایمن؛
- نوآوری در سیستم‌های پیشرانش سبک و پرقدرت؛ و
- کاهش هزینه پرتاب تا حدی که با پرتاب‌های رایج (که محموله‌های سبک را به عنوان محموله ثانویه در نظر می‌گیرند) قابل رقابت باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در سالهای اخیر، توسعه ماهواره‌های کوچک در سراسر دنیا روند رو به رشدی را طی کرده و جمهوری اسلامی ایران نیز به عنوان یکی از ۱۰ کشور دارای فناوری فضایی و رتبه یازدهم جهان در حوزه علوم فضایی، با این روند همگام شده است. مصوبات برنامه ۱۰ ساله دوم فضایی کشور در زمینه توسعه منظومه‌های ماهواره‌ای و خدمات فضاپایه، شاهدی بر این مدعاست.

بنابر آنچه در بخش‌های قبل ذکر شد، توسعه ماهواره‌های کوچک، تقاضا برای پرتاب‌های مقرون به صرفه و دارای قابلیت اطمینان بالا را ایجاد کرده و به دنبال آن، نیاز به ماهواره‌برهای فوق‌سبکی که این دو ویژگی مهم را دارا باشند، اهمیت می‌یابد. با توجه به پیشگامی ایران در صنعت فضایی در منطقه و وجود بازار و مشتریان بالقوه در کشورهای همسایه (و حتی سایر کشورهایی که به دلیل اعمال تحریم یا کمبود منابع مالی و فنی قادر به توسعه مستقل یا خرید خدمات پرتاب‌های فضایی نیستند) لازم است برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در این حوزه به یکی از راهبردهای صنعت فضایی کشور تبدیل شود.

۸- مراجع

[1] H. Editors, "History," 13 October 2021. [Online]. Available: https://www.history.com/this-day-in-history/sputnik-launched. [Accessed 20 November 2022].

[2] A. Sahil, "Space Exploration," 26 July 2022. [Online]. Available: http://spaceexploration.freecluster.eu/2022/07/26/space-history/?i=1. [Accessed 22 September 2022].

[3] E. Thorpe, "Orbital Today," 12 May 2021. [Online]. Available: https://orbitaltoday.com/2021/05/12/small-satellite-launch-market-trends-whats-to-come-in-2021-2025/. [Accessed 24 September 2022].

[4] E. Kulu, "Nanosatellite Launch Forecasts 2022 - Track Record and Latest Prediction," in *36th Annual Small Satellite Conference*, 2022.

[5] J. P.-S. M. V. Austin Williams, "Low-Cost, Low Mass Avionics System for a Dedicated Nano-Satellite Launch Vehicle," in *IEEE Aerospace Conference*, 2015.

[6] "RocketLab," 2022. [Online]. Available: https://www.rocketlabusa.com/updates/rocket-lab-usa-poised-to-change-the-space-industry/. [Accessed 15 September 2022].

[7] "NewSpace Index," 2022. [Online]. Available: https://www.newspace.im/launchers. [Accessed 2022].

[8] K. S. a. P. H. Nicholas Crisp, "Small Satellite Launch to LEO: a Review of Current and Future Launch Systems, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, p. 5, 2014.

[9] D. F. E. I. E. B. Bei Lu ∗, "Switching robust control for a nanosatellite launch vehicle," *Aerospace Science and Technology*, p. 1, 2015.

[10] "SBIR Program," 2012. [Online]. Available: https://sbir.nasa.gov/. [Accessed 2022].