

## (علمی-ترویجی)

# تاریخچه مأموریت‌های علمی اکتشافی گیاهی: اهداف و فناوری‌ها

فاطمه موسوی\*

۱- پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران، کدپستی: ۱۴۶۶۵۸۳۴

\* استادیار (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

moosavi@ari.ac.ir

پیشرفت‌های اخیر در زمینه فناوری و ساخت فضایی‌های جدید، راه را برای مطالعه دقیق‌تر گیاهان در محیط واقعی فضا هموار نمود. مطالعه رشد، نمو و تکوین گیاهان در فضا از دهه ۱۹۵۰ توسط روس‌ها و آمریکایی‌ها آغاز شده است. در دهه ۱۹۷۰، اولین آزمایش‌های گیاهی در رابطه با اثرات طولانی مدت میکروگرavیتی بر گیاهان در فضایی‌های اسکای لب ایالات متحده آمریکا و ایستگاه فضایی سالیوت روسیه انجام شد. به‌تازگی، ناسا زیستگاه گیاهی پیشرفته را بر روی ایستگاه بین‌المللی فضایی نصب نموده است. سیستم تصویربرداری پیشرفته طیف، سیستم تحویل مواد مغذی مداری منفعل و تحقیقات بیولوژیک در جعبه‌های ویژه- واحد تثبیت پتری‌دیش از جمله فناوری‌های نوین ناسا برای مطالعات گیاهی و پرورش گیاهان در فضا می‌باشند. بنابراین، هدف از مأموریت‌های علمی اکتشافی در حوزه علوم گیاهی: ۱- تحقیقات بنیادین به منظور گسترش مرزهای دانش در زمینه زیست‌شناسی گیاهی و ۲- توسعه یک سیستم پشتیبان حیات پایدار مبتنی بر گیاهان است.

واژه‌های کلیدی: فضایی‌ها، گیاه، میکروگرavیتی، ناسا، سیستم پشتیبان حیات

## History of Plant Exploration Scientific Missions: Goals and Technologies

Recent advances in technology and the construction of new spacecraft have paved the way for a more detailed study of plants under real space conditions. The study of the growth and development of plants in space began in the 1950s by the Russians and the Americans. In the 1970s, the first plant experiments on the long-term effects of microgravity on plants were conducted on the US Skylab spacecraft and the Russian Salyut space station. NASA recently installed Advanced Plant Habitat on the International Space Station. Multi-spectral Fluorescence Imager, Passive Orbital Nutrient Delivery Systems, and Biological Research in Canisters/Petri Dish Fixation Unit are among NASA's new technologies for plant studies and plant breeding in space. Therefore, the aims of scientific space exploration missions in the field of plant science are: 1. basic research to expand the frontiers of knowledge in plant biology and 2. To develop a sustainable life support system based on plants.

**Keywords:** Spacecraft, Plant, Microgravity, NASA, Life Supporting System

F. Mousavi\*

1- Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Postal Code: 1465774111, Tehran, IRAN

\* Assistant Professor (Corresponding Author): Email:

moosavi@ari.ac.ir

## (علمی-ترویجی)

فاطمه موسوی

### ۱- مقدمه

سفرها و مأموریت‌های فضایی شرایط آزمایشگاهی بی نظیری را برای زیست شناسان گیاهی فراهم آورده تا اثرات میکروگراویتی و دیگر تنش‌های حاکم بر محیط فضا را بر گیاهان مورد بررسی قرار دهند [۱]. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌هایی که در زمینه فناوری و ساخت فضایی‌های جدید حاصل شده است، راه را برای مطالعه دقیق‌تر گیاهان در فضا فراهم نموده است. ایستگاه بین‌المللی فضایی فرصتی برای دانشمندان جهت نظارت بر آزمایش‌هایشان در شرایط واقعی فضا ارائه کرده است. آزمایش‌هایی که تاکنون در ایستگاه بین‌المللی فضایی انجام شده توانسته است دیدگاه‌های ارزشمندی را در رابطه با پاسخ‌های نموی، نوری، تغییرات ترانسکریپتوم و پروتئوم گیاهان تحت شرایط میکروگراویتی فضا ارائه دهد [۲].

گیاهان به دلیل تواناییشان در تولید غذا و تصفیه آب و هوا به عنوان بخش اصلی یک سیستم پشتیبان حیات، همیشه موضوع مورد علاقه در رابطه با سفرهای فضایی طولانی مدت انسانی بوده‌اند. مدت مدیدی از انجام اولین مأموریت‌های سرنشین دار فضایی می‌گذرد. مأموریت‌های طولانی مدت فضایی در کلاس اکتشافی، تنها با انتقال تمام منابع مورد نیاز فضانوردان از زمین محقق نمی‌شوند. آنها نیاز به ایجاد یک محیط شبه زمین با امکان بازآفرینی منابع و تقویت سلامت روانشناختی فضانوردان دارند. هر خدمه در ایستگاه بین‌المللی فضایی به حدود ۸۰۰ گرم غذا در هر وعده غذایی در هر روز احتیاج دارد. یک سفر به مریخ در یک مسیر بهینه بین ۶ تا ۸ ماه زمان نیاز خواهد داشت. علاوه بر این، به منظور بازگشت از مریخ، فضانوردان هر بار به ناچار باید منتظر لحظه‌ای باشند که مدار دو سیاره در نزدیکترین حالت به یکدیگر قرار گیرند. بدین ترتیب ۱۸ ماه دیگر هم روی مریخ سپری خواهد شد و در این شرایط هر فضانورد به ۲/۶ تن غذا نیاز خواهد داشت. به هر حال، حمل و نقل این حجم مواد غذایی عملی نیست و در حال حاضر روش ترکیبی استفاده از غذاهای آماده با ماندگاری طولانی مدت و پرورش گیاهان خوراکی در مریخ راه حل مطلوب است. همچنین، پرورش گیاهان از نظر روانشناختی مزایای فوق العاده‌ای برای خدمه دارد [۳]. از آنجاکه مأموریت‌های فضایی تنش‌زا هستند، علاوه بر اثرات جسمی که محیط میکروگراویتی بر فضانوردان تحمیل می‌نماید، فضانوردان مجبورند مدت مدیدی را در محفظه‌های کوچک نزدیک به هم و دور از سیاره مادری سپری نمایند به طوری که فعالیت‌های معمول آنها (نظیر غذا خوردن، خوابیدن و ...) با چالشی دائمی روبرو است. در عین حال، دوره‌های طولانی بی تحرکی می‌تواند

منجر به بروز افسردگی در فضانوردان شود. مطالعات نشان داده است کشت گیاهان در فضا همان آرامش خاطری را برای فضانوردان به ارمغان آورد که در روی زمین تجربه کرده‌اند و بنابراین در بهبود روحیه و کاهش تنش فضانوردان نقش مهمی ایفا می‌کنند. علاوه بر این، زندگی فضایی فاقد چرخه‌های معمول روز و شب و تغییر فصول زمینی است. این امر موجب برهم خوردن ریتم شبانه‌روزی بدن فضانوردان شده و اختلالات خواب را ایجاد می‌نماید. بنابراین، مشاهده چرخه زندگی در حال تغییر گیاهان در فضا، جایی که به نظر می‌رسد هیچ چیز دیگری تغییر نمی‌کند می‌تواند به مقابله با این مسئله کمک نماید [۴]. در مقاله حاضر، به تاریخچه و اهداف مأموریت‌های علمی اکتشافی گیاهی سازمان‌های فضایی شاخص حال حاضر جهان (ناسا (ایالات متحده آمریکا) و روس کاسموس (روسیه)) و فناوری‌های ایجاد شده توسط آنها به منظور انجام آزمایش‌های و مأموریت‌های اکتشافی فضایی خواهیم پرداخت.

### ۲- تاریخچه و اهداف

مطالعه رشد، نمو و تکوین گیاهان در فضا از دهه ۱۹۵۰ توسط روس‌ها و آمریکایی‌ها آغاز شده است. اولین آزمایش گیاهی در فضا در سال ۱۹۴۶ با پرتاب موشک V2 حاوی بذرهای گیاه ذرت توسط سازمان فضایی ناسا تا ارتفاع ۱۷۱ کیلومتری از سطح زمین انجام شد که هیچکدام از بذرهای بازیابی شده نتوانستند رویش یابند [۳]. اولین آزمایش‌های در فضا به منظور ارزیابی اینکه آیا گیاهان می‌توانند در خارج از جو زمین رشد و تکوین یابند و اینکه چه تفاوت‌هایی بین گیاهان رشد یافته در فضا و در روی زمین وجود دارد، انجام گرفت. با توسعه محفظه‌ها و اتاقک‌های رشد گیاهی فضایی، فرصت بیشتری برای انجام تحقیقات گیاهی در فضا فراهم شد [۵] (جدول ۱). پورترفیلد<sup>۱</sup> و همکاران [۶] مطالعه مروری گسترده‌ای روی تکامل آزمایش‌های رشد گیاه در فضا و سخت‌افزارها و تجهیزات مربوط به آن در بازه زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۰ انجام دادند. بذرهای خفته بسیاری از گونه‌های گیاهی طی سال‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۶۱ به ترتیب در مأموریت‌های دیسکاورر ۱۷<sup>۲</sup> و اسپوتنیک ۴<sup>۳</sup> به فضا ارسال شدند [۷]. در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی، اولین آزمایش‌های گیاهی در فضایی اسکای لب<sup>۴</sup> ایالات متحده آمریکا و ایستگاه فضایی سالیوت<sup>۵</sup> روسیه با تمرکز

1. Porterfield  
2. Discoverer 17  
3. Sputnik 4  
4. Skylab  
5. Salyut

[۱۳]. در طی آزمایش‌های گیاهی پرواز با شاتل، گیاهانی که از بذر به بذر در طول پرواز فضایی پرورش یافته بودند، نمو با تأخیر را نشان دادند. در مأموریت‌های بعدی، با طراحی اتاقک‌های رشد گیاهی که شامل یک سیستم تهویه هوا و دی اکسید کربن مکمل بود، گیاهان قادر به انتقال گرده‌ها و بارور نمودن آنها و تولید بذر بودند. بنابراین، این آزمایش‌های اجازه بهینه‌سازی شرایط رشد گیاه را تحت شرایط واقعی فضا به دانشمندان داد [۱۴-۱۹].

بر تأثیر طولانی مدت میکروگراویتی و محیط فضا بر تغییرات ژنی زیان‌آور در بذرها و دانه‌رست‌ها انجام شد [۸-۱۱]. تأخیر در رویش بذرها، تصادفی بودن جهت رشد گیاه، عدم وجود پدیده فتوتروپیسم در ساقه‌ها از جمله نتایج آزمایش‌های اسکای لب بودند [۱۲]. ساخت شاتل فضایی در سال ۱۹۸۱ اجازه انجام پروژه‌های بزرگتر، سخت‌افزار رشد گیاه پیشرفته و امکان انجام آزمایش‌های مکرر را به‌طور مستقیم توسط فضانوردان فراهم آورد

جدول (۱): نمایی کلی از آزمایش‌های گیاهی، اهداف، تجهیزات و سخت‌افزارهای مورد استفاده در مأموریت‌های علمی اکتشافی سازمان‌های فضایی شاخص دنیا.

کشور	هدف آزمایش	اتاقک‌های رشد گیاهی	نمونه گیاهی	اولین پرتاب	فضاپیما
آمریکا	بررسی تأثیر تشعشعات بر دی ان ای	---	بذر ذرت	۱۹۴۶	راکت V2
آمریکا	اثرات محیط فضا بر رشد گیاه، فتوتروپیسم و جریان‌های سیتوپلاسمی	اولین محفظه رشد گیاهی	(گیاه آبی) Elodea برنج	۱۹۶۵	اسکای لب
روسیه	بررسی قابلیت رشد گیاهان در محیط فضا	Oasis 1	تره فرنگی، پیاز و کلم چینی	۱۹۷۱	سالیوت ۱
روسیه	بررسی امکان پرورش گیاهان در فضا با هدف تامین غذای فضانوردان در مأموریت‌های طولانی مدت فضایی	Oasis 1 M	نخود سبز و پیاز	۱۹۷۴	سالیوت ۴
روسیه	تقویت روحیه فضانوردان	Oasis 1AM Vazon Svetoblock Fiton Malachite	پیاز، گل لاله، درخت، جو، گوجه، سیر، هویج، قارچ، آرابیدوپسیس، گندم کوتوله، تربچه-بذرهای خیار، کاهو و جعفری	۱۹۷۷	سالیوت ۶
روسیه	مطالعه تکوین گیاهان عالی تحت شرایط بی وزنی و مطالعه چرخه کامل زندگی آرابیدوپسیس تحت شرایط فضاپیما	Phyton Magnetograv istat Biogravistat Vazon	کاهو، گوجه فرنگی، نخود، گشنیز، پیاز، آرابیدوپسیس، پنبه	۱۹۸۲	سالیوت ۷
روسیه-آمریکا	مطالعه چرخه زندگی کامل گیاه تحت شرایط بی وزنی	SVET Vazon	تربچه، کلم چینی	۱۹۹۰	Mir
روسیه-آمریکا	مطالعه چرخه زندگی کامل گیاه تحت شرایط بی وزنی	SVET- GEMS	گندم پاکوتاه	۱۹۹۵	Mir
آمریکا	مطالعه رشد دانه رست و سنتز لیگنین	PGU	ماش- جو	۱۹۸۲	STS
آمریکا	بررسی زیرسیستم‌های تحویل آب و مواد مغذی برای رشد گیاه	ASC	؟؟؟ (اطلاعاتی در مورد نوع گیاه یافت نشد)	۱۹۹۲	STS
آمریکا	بررسی متابولیسم ترپنوئید، الکلونید، متابولیسم اولیه و مورفولوژی گیاه، سنتز لیگنین، برهمکنش ریزوبیوم ها/ تثبیت نیتروژن و مسیر فنیل پروپانوئید	PGBA	Artemisia annua- Catharanthusroseus- Spinaciaoleracea- PinusTaeda- Trifoliumreprens- Piper Aduncum	۱۹۹۶	STS
آمریکا	بررسی تولید مثل گیاه در میکروگراویتی	Plant Growth Facility (PGF)	Brassica rapa	۱۹۹۷	STS
آمریکا	بررسی چرخه تولیدمثلی بذر به بذر در گیاهان	ADVASC	آرابیدوپسیس تالیانا	۲۰۰۱	ISS
آمریکا	بررسی نرخ فتوسنتز و نرخ تبادل گازی تاج پوشش گیاه تحت میکروگراویتی	BPS	گندم پاکوتاه	۲۰۰۲	ISS
آمریکا	مطالعه اثرات برهمکنش بین گیاهان و فضانوردان	Lada	Mizuna	۲۰۰۲	ISS
آمریکا	مطالعه مکانیسم فتوتروپیسم ریشه و اثرات جاذبه روی دریافت نور در گیاهان	EMCS	آرابیدوپسیس تالیانا	۲۰۰۶	ISS
آمریکا	مطالعه رشد گیاه از بذر به بذر تحت شرایط متفاوت	PEU	آرابیدوپسیس تالیانا	۲۰۰۹	ISS
آمریکا	تولید غذای تازه برای فضانوردان	VEGGIE	کاهو، چغندر، تربچه، کلم چینی و نخود	۲۰۱۴	ISS
آمریکا	بررسی جامع فنومیکس، متابولومیکس، ترانسکریپتومیکس و پروتئومیکس گیاه آرابیدوپسیس تحت شرایط فضاپیما	APH (Advanced Pl ant Habitat)	آرابیدوپسیس تالیانا گندم کوتوله	۲۰۱۷	ISS

## (علمی-ترویجی)

فاطمه موسوی

راه‌اندازی و در بخش روسی ایستگاه بین‌المللی ماژول زوزدا<sup>۸</sup> نصب شد. این واحد شامل دو ماژول گلخانه‌ای مستقل است که تحت کنترل دما نیستند و به سمت کابین برای تبادل هوا باز می‌شوند. این واحد به عنوان یک ابزار برای بررسی تولید و ایمنی غذا طراحی شد [۲۵]. همچنین، ناسا یک اتاقک مشابه را برای رشد گیاه به نام سیستم تولید سبزیجات و گی<sup>۹</sup> طراحی نمود. مهندسان نورهای LED را در این واحد نصب کردند که نور بهینه را برای رشد گیاه تولید نمایند. مانند واحد تولید سبزیجات لادا، وگی تحت کنترل دما نیست و به سمت ایستگاه بین‌المللی فضایی برای تبادل گازی باز می‌باشد [۲۵].

به‌تازگی، ناسا یک زیستگاه پرورشی جدید را بر روی ایستگاه بین‌المللی فضایی نصب نموده است که زیستگاه گیاهی پیشرفته<sup>۱۰</sup> نامیده می‌شود. این سیستم رشد حاوی محفظه بزرگی به منظور مطالعات چندگانه است. جو و نور این محفظه در طول آزمایش‌های به شدت کنترل و تنظیم می‌شود [۲۵]. بنابراین، سازمان‌های فضایی در سرتاسر جهان تسهیلات مربوط به پرورش گیاه در فضا را طراحی و در ایستگاه بین‌المللی فضایی راه‌اندازی نموده‌اند. این تجهیزات به زیست‌شناسان گیاهی کمک خواهد نمود تا درک بهتری از نقش گرانش و دیگر شرایط حاکم بر فضا بر فرآیندهای نمو گیاهان داشته باشند. همچنین، موجب ارتقا سیستم‌های پشتیبان حیات در مأموریت‌های سرشنین دار طولانی مدت فضایی خواهند شد.

### ۳- فناوری‌ها

در این بخش فناوری‌های موجود را مورد بررسی قرار می‌دهیم که عبارتند از:

**سیستم تصویربرداری پیشرفته طیف<sup>۱۱</sup> یا تصویرساز فلورسانس چند طیفی<sup>۱۲</sup>:** طیف یک سیستم تصویربرداری فلورسانس پیشرفته است که برای تصویربرداری از بیان ژنتیکی تحت شرایط در زیوه در محیط گرانش کم یا صفر ایستگاه بین‌المللی فضایی طراحی شده است (شکل ۱). ارگانسیم‌های مدلی که می‌توانند از این روش تصویربرداری بهره ببرند شامل ارگانسیم‌های تک سلولی (نظیر ساکارومایسس سرویزیه)<sup>۱۳</sup>

پس از انجام موفقیت‌آمیز مأموریت‌های شاتل فضایی، ایالات متحده در سال ۱۹۹۸ به منظور انجام آزمایش‌های علمی پیشرفته‌تر تحت شرایط حقیقی فضا، یک ایستگاه فضایی بهتر و بزرگتر را راه‌اندازی نمود. راه‌اندازی و مونتاژ ایستگاه بین‌المللی فضایی، مسیر را برای توسعه تجهیزات مرتبط با تحقیقات گیاهی تسهیل نمود. آژانس فضایی اروپا نیز یک سکوی تحقیقات گیاهی حاوی سیستم کشت مقیاس اروپایی<sup>۱</sup> و بیولب<sup>۲</sup> را راه‌اندازی نموده است [۲۰]. هر دو این تسهیلات رشد گیاهی شامل انکوباتورهای مجهز به یک سانتیفریوژ برای تنظیم شتاب از یک هزارم تا دو جی و تجهیزات روشنایی و تصویری به منظور امکان جمع آوری تصاویر و ویدئوهای مربوط به آزمایش‌های رشد گیاهی می‌باشند. نصب و راه‌اندازی این تسهیلات رشد گیاهی همچنین موجب بهبود توانایی محققان برای نظارت و تنظیم پارامترهای محیطی شد. هر دوی این اتاقک‌های رشد گیاهی مجهز به سیستم پشتیبان حیات به منظور تنظیم سطوح اکسیژن، دی‌اکسیدکربن و رطوبت بودند. قابلیت دیگر سیستم پشتیبان حیات مذکور کاهش سطوح دی‌اکسیدکربن و اتیلن در طول آزمایش‌های گیاهی بود [۲۰]. در سیستم رشد EMCS، آزمایش‌های القا جاذبه گرایی<sup>۳</sup> [۲۱]، جنبش‌های اندام<sup>۴</sup> [۲۲]، جنبش‌های برگ رزت [۲۲-۲۳] در فضا و واکنش فتوتروپیک مثبت آراییدوپسیس به نور قرمز در میکروگروایتی [۲۳] مورد بررسی قرار گرفتند [۲۰ و ۲۴].

ناسا با الهام از ایده EMCS، سیستم تحقیقات زیستی پیشرفته<sup>۵</sup> را بر روی ایستگاه بین‌المللی طراحی و راه‌اندازی نمود. هدف از راه‌اندازی این سیستم، پشتیبانی از آزمایش‌های زیست‌شناسی با گیاهان کوچک، میکروارگانسیم‌ها و بی‌مهرگان کوچک بود [۵ و ۲۵]. سیستم مذکور مجهز به یک پایه فوم هیدراته و یک سیستم تصویربرداری پروتئین فلورسنت سبز (GFP) می‌باشد. دو ابزاری که توسط زیست‌شناسان گیاهی برای هدایت آزمایش‌های در فضا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۵]. این سیستم رشد قابلیت تنظیم شرایط آزمایشگاهی و نوری و ثبت داده‌های مربوطه را در سرتاسر آزمایش‌های دارا می‌باشد [۵ و ۲۵]. علاوه‌براین، دو واحد طراحی شده برای پرورش سبزیجات، به‌تازگی در ایستگاه بین‌المللی نصب شده است. واحد تولید سبزیجات لادا<sup>۷</sup> که در سال ۲۰۰۲ توسط آژانس فضایی روسی

8. Module Zvezda

9. Veggie-Vegetable Production System (Veggie-VPS)

1 . Advanced Plant Habitat (APH) 0

1 . Spectrum 1

1 . Multi Spectral Fluorescence Image<sup>2</sup> (MSFI)

1 . Saccharomyces Cerevisiae 3

1. European Modular Cultivation System (EMCS)

2. Biolab

3. Gravitropism

4. Circumnutation

5. Advanced Biological Research System (ABRS)

6. Arthropods

7. Lada

محققین زمینی اجازه پایش سطوح دی اکسیدکربن، نورپردازی، میزان رشد و سطوح اتیلن را در طول آزمایش‌های می‌دهد [۲۶].

**لوله‌های تثبیت مرکز فضایی کندی<sup>۱</sup>:** یکی از چالش‌های اصلی آزمایش‌های زیستی در فضا بهینه‌سازی فرآیند تثبیت نمونه‌ها برای آنالیزهای سلولی و مولکولی پس از برگشت به زمین می‌باشد. در ابتدا برای حفظ انسجام و یکپارچگی سلولی، نمونه‌های زیستی به صورت شیمیایی تثبیت شده یا به منظور حفظ کیفیت بالای اسیدهای نوکلئیک و پروتئین‌ها منجمد می‌شدند. به‌تازگی، دانشمندان با توجه به مشکلات مرتبط با انجماد ناگهانی و حفظ دمای بسیار سرد در طول برگشت به زمین، یک تثبیت‌کننده شیمیایی به نام RNAlater™ (Ambion) را به منظور حفظ یکپارچگی مولکولی نمونه‌ها مورد استفاده قرار دادند. استفاده از این تثبیت‌کننده به همراه لوله‌های مخصوص تثبیت مرکز فضایی کندی<sup>۱</sup> به زیست‌شناسان مولکولی اجازه می‌دهد تا مطالعات ترانسکریپتومیکیس [۲۶ و ۲۸]، پروتئومیکیس [۲۹] و همچنین مطالعات مورفولوژیکی را با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نگاره روی نمونه‌های بافتی حفاظت شده در فضا و برگشت داده شده به زمین انجام دهند [۳۰]. لوله‌های مخصوص تثبیت مرکز فضایی کندی شامل یک لوله اصلی پلی کربناته که تثبیت‌کننده قبل از پرواز به درون آن ریخته می‌شود، لوله نمونه برای ذخیره نمونه‌های بیولوژیکی، دو عدد واشر و یک پیستون در قسمت دستگیره می‌باشند (شکل ۴) [۳۱].

**سیستم تحویل مواد مغذی مداری منفعل<sup>۱۲</sup>:** سیستم تحویل مواد مغذی مداری منفعل یا به اصطلاح PONDs، یک طرح رشد گیاهی جدید است که شامل یک بستر کشت گیاه، یک مخزن برای آب و محلول‌های مغذی مورد نیاز گیاه است. PONDs یک سیستم کاملا منفعل می‌باشد و فاقد هر گونه نیروی برق، پمپ و یا قطعات متحرک است که جایگزین سیستم تحویل مواد مغذی در سیستم رشد گیاهی وگی در ایستگاه بین‌المللی شد. تولید واحدهای PONDs کم هزینه‌تر است، ظرفیت ذخیره آب بیشتری را داشته و فضای بیشتری را برای رشد ریشه فراهم می‌آورد. PONDs می‌تواند هوادهی کافی و آب مورد نیاز برای ریشه را تحت شرایط ۱ جی و میکروگراویتی بدون نیاز به هیچگونه انرژی اضافی فراهم نماید. شکل ۳ طرح شماتیکی از PONDs و اجزای آن را نشان می‌دهد [۳۲].

گیاهان (نظیر آرابیدوپسیس تالیانا) و بی‌مهرگان (نظیر کرم الگانس<sup>۱</sup>) هستند. طراحی طیف به نحوی است که چهار پتری دیش بر روی چرخاننده طیف سوار شده و چرخاننده درون محفظه تحقیقات محیطی<sup>۳</sup> قرار می‌گیرد. سیستم نورپردازی (شامل ال‌ای‌دی‌های آبی، قرمز، سفید و قرمز دور) درون محفظه زیستی و در بالای چرخاننده به نحوی تعبیه شده است که انرژی لازم برای فرآیند فتوسنتز را فراهم آورد. همچنین، طیف دارای گزینه‌ای برای تنظیم پارامترهای محیطی رشد گیاه است. طیف دارای یک دوربین مونوکروماتیک ۷۱ مگاپیکسل برای استخراج تصاویر از بیان ژن در زمان واقعی و ارسال همزمان آن به محققین زمینی است. نرم‌افزار فرماندهی داده طیف نیز به محققین زمینی اجازه پایش سطوح دی اکسیدکربن، نورپردازی، میزان رشد و سطوح اتیلن را در طول آزمایش‌های می‌دهد [۲۶].

**سیستم تصویربرداری پیشرفته طیف<sup>۴</sup> یا تصویرساز فلورسانس چند طیفی<sup>۵</sup>:** طیف یک سیستم تصویربرداری فلورسانس پیشرفته است که برای تصویربرداری از بیان ژنتیکی تحت شرایط در زیوه در محیط گرانش کم یا صفر ایستگاه بین‌المللی فضایی طراحی شده است (شکل ۱). ارگانیسیم‌های مدلی که می‌توانند از این روش تصویربرداری بهره ببرند شامل ارگانیسیم‌های تک سلولی (نظیر ساکارومایسس سرویزیه<sup>۶</sup>)، گیاهان (نظیر آرابیدوپسیس تالیانا) و بی‌مهرگان (نظیر کرم الگانس<sup>۱</sup>) هستند. طراحی طیف به نحوی است که چهار پتری دیش بر روی چرخاننده طیف سوار شده و چرخاننده درون محفظه تحقیقات محیطی<sup>۳</sup> قرار می‌گیرد. سیستم نورپردازی (شامل ال‌ای‌دی‌های آبی، قرمز، سفید و قرمز دور) درون محفظه زیستی و در بالای چرخاننده به نحوی تعبیه شده است که انرژی لازم برای فرآیند فتوسنتز را فراهم آورد. همچنین، طیف دارای گزینه‌ای برای تنظیم پارامترهای محیطی رشد گیاه است. طیف دارای یک دوربین مونوکروماتیک ۷۱ مگاپیکسل برای استخراج تصاویر از بیان ژن در زمان واقعی و ارسال همزمان آن به محققین زمینی است. نرم‌افزار فرماندهی داده طیف نیز به

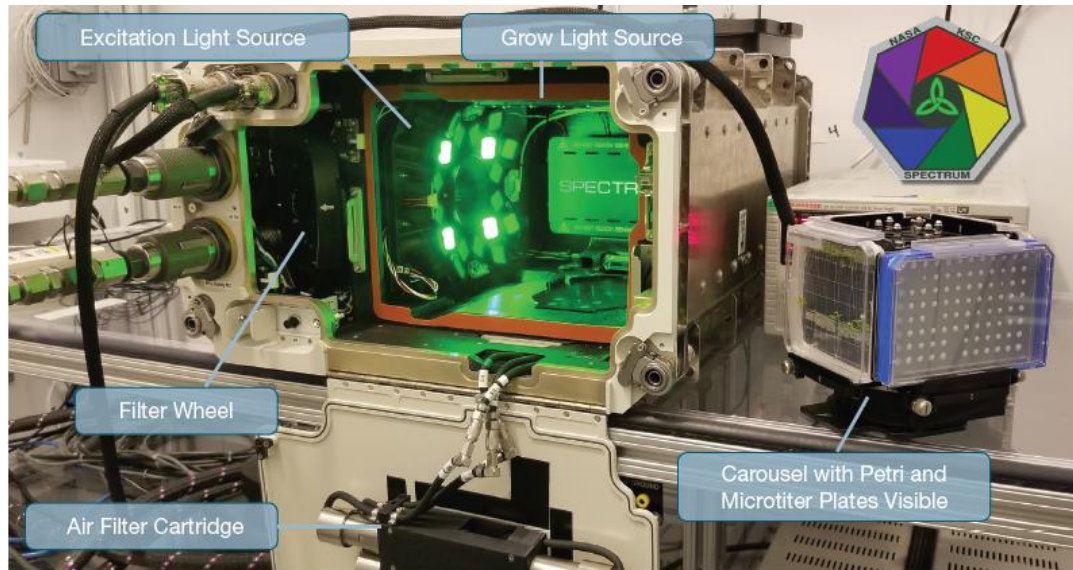
---

1. Arabidopsis Thaliana
2. Caenorhabditis elegans
3. Environmental Research Chamber (ERC)
4. Spectrum
5. Multi Spectral Fluorescence Imager (MSFI)
6. Saccharomyces Cerevisiae
7. Arabidopsis Thaliana
8. Caenorhabditis elegans
9. Environmental Research Chamber (ERC)

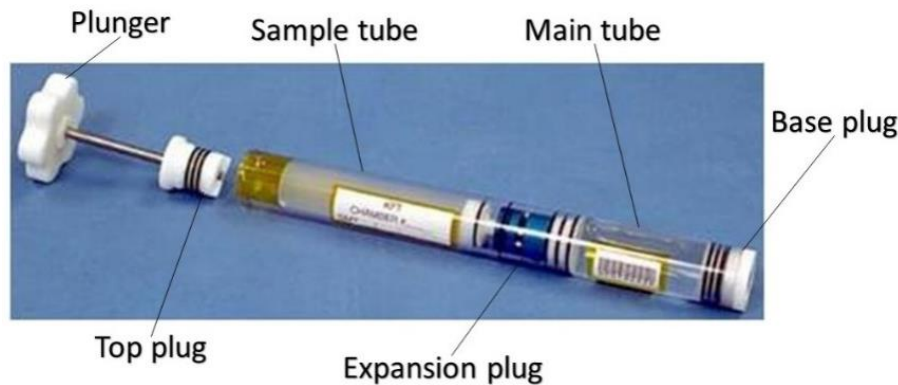
1 . Kennedy Space Center Fixation Tubes (KFTs)  
 1 . Kennedy Space Center 1  
 1 . Passive Orbital Nutrient Delivery System (PONDs)

## (علمی-ترویجی)

فاطمه موسوی



شکل (۱): سیستم تصویربرداری پیشرفته طیف و زیر سیستم‌های آن برگرفته از مرجع [۲۷].



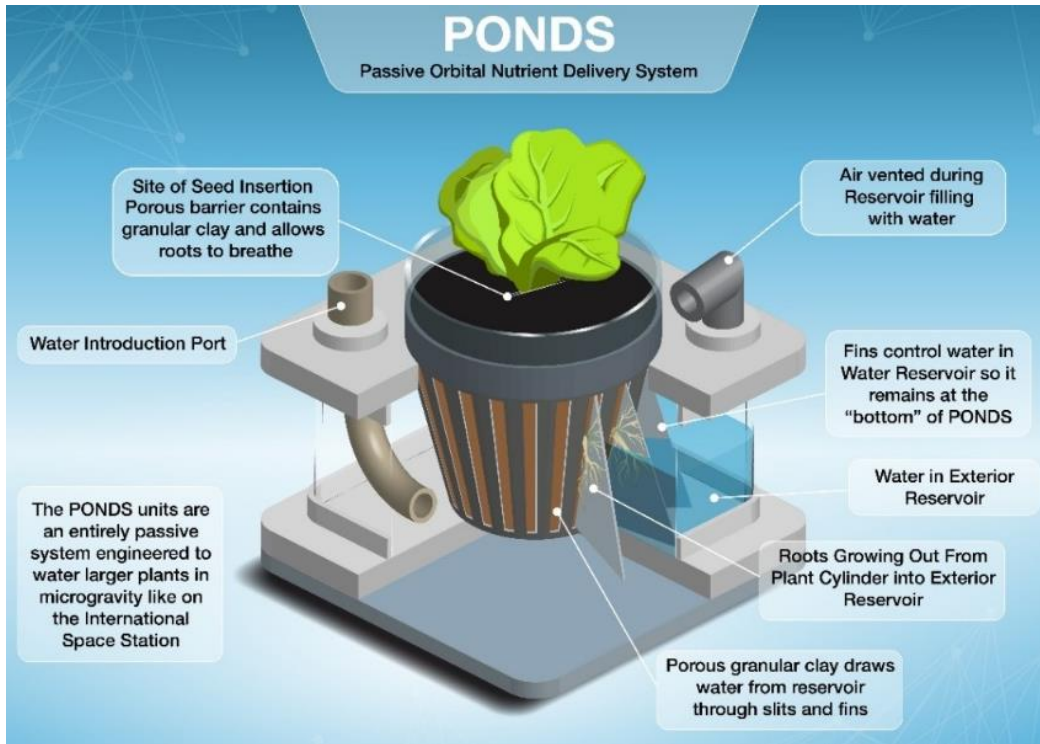
شکل (۲): لوله تثبیت مرکز فضایی کندی و اجزا تشکیل دهنده آن برگرفته از مرجع [۳۱].

فرمالدهید) نیز می‌باشند. درون هر جعبه، شش واحد تثبیت پتری دیش (PDFU) یا پنج واحد تثبیت پتری دیش بعلاوه یک تثبیت‌کننده دما (با توجه به نیاز محقق) تعبیه می‌شود. در تمام طول پرواز فضایی، PDFUها درون جعبه‌ها باقی می‌مانند (شکل ۴) [۳۴]. در شکل ۴ بخش A یک واحد تثبیت پتری دیش مهر و موم شده (PDFU) در سمت چپ و یک مدل نمایشی شفاف از یک PDFU (سمت راست) قابل رؤیت است. یک پتری دیش ۶۰ میلی‌متری درون PDFU (پیکان) قرار گرفته و مهر و موم می‌شود. یک مایع (محلول غذایی، آب یا تثبیت‌کننده شیمیایی) درون مخزن (استوانه سمت راست) ریخته شود. تحویل این مایع از طریق ورودی‌های تزریق درون BRIC-PDFU انجام می‌شود تا در زمان مشخص مورد مصرف قرار گیرند. در شکل ۴ بخش B، PDFUها درون جعبه ویژه (BRIC) تعبیه می‌شوند که می‌تواند بسته به نیاز محقق ۶ PDFU و یا ۵ تا بعلاوه یک ثبت‌کننده دما را در خود جای دهد.

**تحقیقات بیولوژیک در جعبه‌های ویژه- واحد تثبیت**

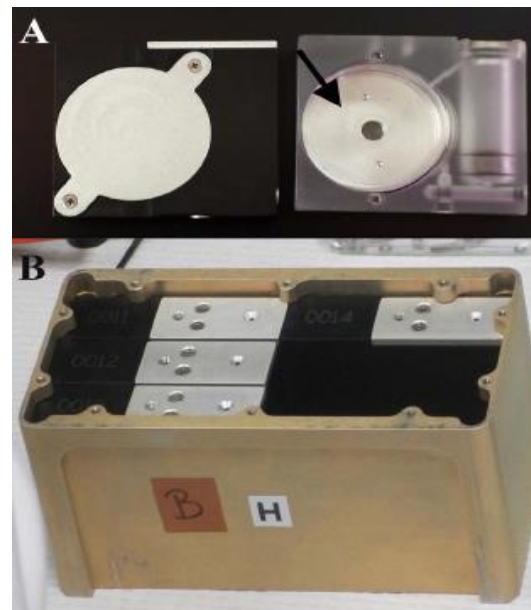
**پتری دیش:** به طور کلی BRIC-PDFUها برای میزبانی انواع آزمایش‌های زیستی تحت شرایط میکروگراویتی فضا طراحی شده‌اند و به‌تازگی آزمایش‌های مرتبط با دانه رست‌های گیاهی، کشت‌های کالوس و میکروب‌ها درون آنها انجام شده است. در طول پرواز فضایی، پتری دیش‌های ۶۰ میلی‌متری حاوی محیط کشت جامد آگار درون یک واحد تثبیت پتری دیش (PDFU) قرار داده و PDFUها درون جعبه‌های ویژه (BRIC) تعبیه می‌شوند. هر پتری دیش و هر جعبه دارای چهار دیود قابل تنظیم برای انتشار طول موج‌های مجزای نور LED (آبی، قرمز، قرمز دور، و سفید) می‌باشد. واحدهای تثبیت پتری دیش دارای یک مخزن با گنجایش حداکثر ۱۷ میلی‌لیتر برای ورود یک یا دو مایع (محلول‌های غذایی و یا فیکساتورهای شیمیایی نظیر گلو تارآلدهید، RNALater و

1. Biological Research in Canisters/Petri Dish Fixation Unit (BRIC-PDFU)



شکل (۳): POND و اجزای تشکیل دهنده آن برگرفته از مرجع [۳۳].

بیان شده، هدف از انجام مأموریت‌های علمی اکتشافی در زمینه علوم گیاهی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود: ۱- تحقیقات بنیادین به منظور گسترش مرزهای دانش در رابطه با چگونگی پاسخ گیاهان و سازگاری آنها به شرایط فضا و فضاپیما که قادر است جنبه‌های جدیدی از تکوین، فیزیولوژی و متابولیسم گیاه که تاکنون ناشناخته بوده است، را کشف نماید و ۲- توسعه فناوری‌های جدید در رابطه با کشت گیاهان در فضا به منظور تولید بذر گیاهان با کاربرد در سیستم پشتیبان حیات فضاپیما و تأمین غذای فضانوردان در مأموریت‌های طولانی مدت فضایی. به هر حال، همانطور که اشاره شد تاکنون تنها آزمایش‌هایی در مقیاس کوچک در رابطه با تکوین گیاهان در مدار زمین (ایستگاه بین‌المللی فضایی) انجام گرفته است که داده‌های کافی را برای عملکرد گیاهان تحت شرایط منحصر به فرد فضا فراهم نمی‌آورد و اثرات طولانی مدت محیط فضا بر رشد و تولیدمثل گیاهان به خوبی مشخص نشده است. بنابراین، به نظر می‌رسد با طراحی فضاپیماهای بین سیاره‌ای به منظور سفر به ماه و مریخ و نیز توسعه سخت‌افزارها و فناوری‌های مرتبط با کشت و مطالعه گیاهان تحت شرایط فضا و گزینش گونه‌های گیاهی مناسب بتوان به درک بهتری از مکانیسم پاسخ و سازگاری گیاهان به شرایط فضا دست یافت و گونه‌های گیاهی مناسب را جهت به کارگیری در سیستم پشتیبان حیات گزینش نمود.



شکل (۲): BRIC-PDFU [۳۴].

### ۶- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، تاریخچه نسبتاً جامعی از مهمترین مأموریت‌های علمی اکتشافی سازمان‌های فضایی شاخص دنیا (روسیه و آمریکا) در زمینه علوم گیاهی و اهداف مورد نظر آنها ارائه شد. همچنین، به فناوری‌های مورد استفاده در پرتاب محموله‌های گیاهی توسط سازمان فضایی ناسا اشاره شد. با توجه به مطالبی

## ۷- مراجع

- [1] Wolff, S.A., Coelho, L.H., Karoliussen, I., and Jost, A.-I.K., "Effects of the Extraterrestrial Environment on Plants: Recommendations for Future Space Experiments for the MELiSSA Higher Plant Compartment", *Life*, Vol. 4, No. 2, pp. 189-204, 2014.
- [2] Cannon, A.E., Salmi, M.L., Clark, G., and Roux, S., "New Insights in Plant Biology Gained from Research in Space", *Gravitational and Space Research*, Vol. 3, No. 2, pp. 189-204, 2015.
- [3] Böhmer, M. and Schleiff, E., "Microgravity Research in Plants: a Range of Platforms and Options Allow Research on Plants in Zero or Low Gravity That Can Yield Important Insights into Plant Physiology", *EMBO Reports*, Vol. 20, No. 7, p. e48541, 2019.
- [4] Haeuplik-Meusburger, S., Paterson, C., Schubert, D., and Zabel, P., "Greenhouses and Their Humanizing Synergies", *Acta Astronautica*, Vol. 96, pp.138-150, 2014.
- [5] Poulet, L., Fontaine, J.-P., and Dussap, C.-G., "Plant's Response to Space Environment: a Comprehensive Review Including Mechanistic Modelling for Future Space Gardeners", *Botany Letters*, Vol. 163, No. 3, pp. 337-347, 2016.
- [6] Porterfield, D.M., Neichitailo, G.S., Mashinskic, A.L., and Musgraved, M.E. "Spaceflight Hardware for Conducting Plant Growth Experiments in Space: The Early Years 1960-2000", *Advances in Space Research*, Vol. 31, No. 3, pp. 183-193, 2003.
- [7] Halstead, T.W., "Status and Prospects: Experiments on Plants in Space", *Ann. Bot.*, Vol. 54, No. 3, pp. 3-18, 1984.
- [8] Dubinin, N.P., Vaulina, E.N., Kosikov, K.V., Anikeeva, I.D., Moskvitin, E.V., Zapadnaya, A.A., Kostina, L.N., Shtrauh, G.A., Kryzhanovskaya, L.M., Gubareva, I.G., Nechitailo, G.S., and Mashinsky, A.L., "Effects of Space Flight Factors on the Heredity of Higher and Lower Plants", *Life Sciences and Space Research*, Vol. 11, pp. 105-113, 1973.
- [9] Vaulina, E.N., Anikeeva, I.D., Kostina, L.N., Kogan, I.G., Palmakh, L.R., and Mashinsky, A.L., "The Role of Weightlessness in the Genetic Damage from Preflight Gamma-Irradiation of Organisms in Experiments Aboard the Salyut 6 Orbital Station", *Advances in Space Research*, Vol. 1, No. 14, pp. 163-169, 1981.
- [10] Kordyum, E., Sytnik, K., and Chernyaeva, I., "Peculiarities of Genital Organ Formation in Arabidopsis Thaliana (L) Heynh. Under Spaceflight Conditions", *Advances in Space Research*, Vol. 3, No. 9, pp. 247-250, 1983.
- [11] Kostina, L., Anikeeva, I., and Vaulina, E., "The Influence of Space Flight Factors on Viability and Mutability of Plants", *Advances in Space Research*, Vol. 4, No. 10, pp. 65-70, 1984.
- [12] Summerlin, L.R., *Skylab, Classroom in Space*. National Aeronautics and Space Administration, Huntsville, AL., George, C. Marshall Space Flight Center, 1977.
- [13] Paul, A.-L., Wheeler, R.M., Levine, H.G., and Ferl, R.J., "Fundamental Plant Biology Enabled by the Space Shuttle", *American journal of botany*, Vol. 100, No. 1, pp. 226-234, 2013.
- [14] Kuang, A., Musgrave, M.E., and Matthews, S.W., "Modification of Reproductive Development in Arabidopsis Thaliana Under Spaceflight Conditions", *Planta*, Vol. 198, No. 4, pp. 588-597, 1996.
- [15] Musgrave, M.E., Kuang, A., and Matthews, S.W., "Plant Reproduction During Spaceflight: Importance of the Gaseous Environment", *Planta*, Vol. 203, No. 1, pp. 177-184, 1997.
- [16] Morrow, R.C., Bula, R.J., Tibbitts, T.W., Dinauer, W.R., "The ASTROCULTURE™ Flight Experiment Series, Validating Technologies for Growing Plants in Space", *Advances in Space Research*, Vol. 14, No. 11, pp. 29-37, 1997.
- [17] Kuang, A., Xiao, Y., and Musgrave, M.E., "Cytochemical Localization of Reserves during Seed Development in Arabidopsis thaliana under Spaceflight Conditions", *Annals of Botany*, Vol. 78, No. 3, pp. 343-351, 1996.
- [18] Musgrave, M.E., Kuang, A., Brown, C., and Matthews, S.W., "Changes in Arabidopsis Leaf Ultrastructure, Chlorophyll and Carbohydrate Content during Spaceflight Depend on Ventilation", *Annals of Botany*, Vol. 81, No. 4, pp. 503-512, 1998.
- [19] Porterfield, D.M., Barta, D.J., Ming, D.W., Morrow, R.C., and Musgrave, M.E., "ASTROCULTURE™ Root Metabolism and Cytochemical Analysis", *Advances in Space Research*, Vol. 26, No. 2, 315-318, 2000.
- [20] Brinckmann, E., "ESA Hardware for Plant Research on the International Space Station", *Advances in Space Research*, Vol. 36, No. 7, 1162-1166, 2005.
- [21] Driss-Ecole, D., Legué, V., Carnero-Díaz, E., and Perbal, G., "Gravisensitivity and Automorphogenesis of Lentil Seedling Roots Grown on Board the International Space Station", *Physiologia Plantarum*, Vol. 134, No. 1, 191-201, 2008.
- [22] Johnsson, A., Solheim, B., and Iversen, T.H., "Gravity Amplifies and Microgravity Decreases Circumnutations in Arabidopsis Thaliana Stems: Results from a Space Experiment", *New Phytologist*, Vol. 182, No. 3, pp. 621-629, 2009.
- [23] Millar, K.D., Kumar, P., Correll, M.J., Mullen, J.L., Hangarter, R.P., Edelmann, R.E., and Kiss J.Z., "A Novel Phototropic Response to Red Light Is Revealed in Microgravity", *New Phytologist*, Vol. 186, No. 3, pp. 648-656, 2010.
- [24] Kittang, A.-I., Iversen, T.-H., Fossum, K.R., Mazars, C., Carnero-Diaz, E., Boucheron-Dubuisson, E., Le Disquet, I., Legué, V., Herranz, R., Pereda-Loth, V., and Medina, F.J., "Exploration of Plant Growth and Development Using the European Modular Cultivation System Facility on the International Space Station", *Plant Biology*, Vol. 16, No. 3, pp. 528-538, 2014.
- [25] Paul, A.-L. and Ferl, R.J., "Spaceflight Exploration in Plant Gravitational Biology", *Plant Gravitropism*, Vol. 68, pp. 285-305, 2015.
- [26] Paul, A.-L., Zupanska, A.K., Schultz, E.R., and Ferl, R.J., "Organ-Specific Remodeling of the Arabidopsis Transcriptome in Response to



- Spaceflight”, *BMC Plant Biology*, Vol. 13, No. 1, pp. 112-120, 2013.
- [27] [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/iss\\_spectrum\\_flyer\\_9091020191.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/iss_spectrum_flyer_9091020191.pdf).
- [28] Kwon, T., Sparks, J.A., Nakashima, J., Allen, S., Tang, Y., and Blancaflor, E., “Transcriptional Response of Arabidopsis Seedlings During Spaceflight Reveals Peroxidase and Cell Wall Remodeling Genes Associated with Root Hair Development”, *American Journal of Botany*, Vol. 102, No. 1, pp. 21-35, 2015.
- [29] Ferl, R.J., Koh, J., Denison, F., and Paul1, A.-L., “Spaceflight Induces Specific Alterations in the Proteomes of Arabidopsis”, *Astrobiology*, Vol. 15, No. 1, pp. 32-56, 2015.
- [30] Schultz, E.R., Kelley, K.L., Paul1, A.-L., and Ferl, R.J., “A Method for Preparing Spaceflight RNAalater-fixed Arabidopsis Thaliana (Brassicaceae) Tissue for Scanning Electron Microscopy”, *Applications in Plant Sciences*, Vol. 1, No. 8, P. 1330004, 2013.
- [31] Ferl, R.J., Koh, J., Denison, F., and Paul1, A.-L., “The Performance of Ksc Fixation Tubes with Rnalater for Orbital Experiments: a Case Study in Iss Operations for Molecular Biology”, *Advances in Space Research*, Vol. 48, No. 1, pp. 199-206, 2011.
- [32] Levine, H.G., Richards, J.T., and Koss, L.L., “Early Prototype Development of the Passive Orbital Nutrient Delivery System (PONDS)”, *American Society for Gravitational and Space Research (ASGSR) Meeting*, Denver, CO, USA, 2019.
- [33] [https://images.nasa.gov/details-KSC-20200304-PH-NAS01\\_0001](https://images.nasa.gov/details-KSC-20200304-PH-NAS01_0001).
- [34] Basua, P., Kruse, C.P.S., Luesse, D.R., Wyatt, S.E., “Growth in Spaceflight Hardware Results in Alterations to the Transcriptome and Proteome”, *Life Sciences in Space Research*, Vol. 15, pp. 88-96, 2017.