



## تحقیقات گیاهی در شاتل‌های فضایی و چالش‌های آن

حلیمه حسن پور

استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

\*نویسنده مخاطب: hassanpour@ari.ac.ir

بررسی رشد و نمو گیاهان طی پرواز فضایی اهمیت زیادی در ارتقای دانش بنیادی و کاربردی زیستی و نیز سیستم پشتیبان حیات دارد. هدف از این تحقیق، بررسی جنبه‌های علمی و فنی آزمایشات گیاهی و سخت‌افزارهای طراحی شده برای پرتاب است. برای تحقیقات علمی در فضا نیاز به بررسی و تایید علمی پروپوزال‌ها، روش‌های اجرایی عملیات و سخت‌افزارهای مرتبط با شرایط پروازی برای ارسال نمونه زیستی است. تاکنون از تسهیلات پرتابی مختلفی از جمله شاتل‌های فضایی، ماهواره‌های فضایی، ایستگاه فضایی میر و ایستگاه بین‌المللی فضایی برای اجرای آزمایشات کوتاه مدت و بلند مدت در فضا استفاده شده است که با چالش‌ها و محدودیت‌های مختلفی از جمله مدت زمان پرتاب، حجم نمونه، تنظیمات دمایی، اثرات غیرمستقیم محیط پرواز، دریافت داده‌ها و غیره همراه بوده است. از طرفی، هر پرتاب نیازمند توسعه سخت‌افزار قرارگیری نمونه با توجه به آزمایش طراحی شده می‌باشد. بررسی تجربیات کسب شده از پرتاب‌ها در پروژه‌های مختلف می‌تواند برای بهبود تحقیقات گیاهی در فضا کمک نماید. در این مطالعه روش‌های اعمال بی وزنی، سخت‌افزارهای طراحی شده و چالش‌های عملیاتی و اجرایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: تحقیقات علمی-اکتشافی، پروژه‌های فضایی، میکروگرواویتی، محدودیت‌های آزمایشات گیاهی

## Plant Research in Space and its Challenges

H. Hassanpour

Assistant Professor, Aerospace research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

\*Corresponding Author: hassanpour@ari.ac.ir

*The study of plant growth and development during spaceflight is very important in promoting fundamental and applied biological knowledge as well as the life support system. The purpose of this study was to investigate the scientific and technical aspects of plant experiments and designed hardware for launch. Scientific research in space flights requires scientific review of proposals, implementation methods of operations, and hardwares related to flight conditions for sending biological samples. Various launch facilities such as space shuttles, space satellites, Mir space station, and International Space Station have been used to perform short and long-term experiments in space which have included various challenges such as launch duration, sample volume, temperature settings, indirect effects of the flight environment, data reception, etc. In addition, each launch requires the hardware development of the sample placement module according to the designed experiment. Examining the experiences gained from various launches and projects can help to improve plant research in space in the future. In this study, weightlessness application methods, designed hardware and operational and implementation challenges are investigated..*

**Keywords:** Scientific-Exploratory Research, Space Projects, Microgravity, Limitations of Plant Experiments



COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

### How to Cite this Article:

H. Hassanpour, "Plant Research in Space and Its Challenges", *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, (in Persian).

## ۱ مقدمه

گرچه تا به امروز تحقیقات متعددی در مورد زیست گیاهی در فضا انجام شده است، اما تحقیقات منحصر به فرد پرواز فضایی بخش اندکی از چالش‌های فنی و علمی مطالعات فضایی را پوشش داده است. گزارشات کمی، چشم اندازهای تحقیقات پرتاب فضایی و محدودیت‌های آزمایشات گیاهی را در شاتل‌های فضایی بیان نموده‌اند [۶]. برخی از انتشارات فنی سازمان ملی هوانوردی و فضایی (ناسا)، آژانس فضایی اروپا (ایسا)، چین، روسیه و ژاپن وجود دارند که موضوع انجام آزمایش‌های زیستی در فضا را مورد بررسی قرار داده‌اند [۸]. بطوریکه نیاز به طراحی پروژه‌های علمی و سخت افزارهای مناسب پرتاب با شاتل‌های فضایی می‌باشد و در سخت افزارها بایستی دوربین، سیستم نوری مناسب و واحد تثبیت نمونه تعبیه شود [۹ و ۶]. در این مطالعه جنبه‌های فنی و علمی آزمایشات، روش‌های اعمال بی وزنی، سخت‌افزارهای مناسب کشت نمونه در شاتل‌های فضایی و چالش آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲ روش‌های اعمال بی وزنی روی نمونه‌های گیاهی

در آزمایشات فضایی، به دست آوردن شرایط تقریباً نزدیک به بی‌وزنی مهم است که در آن اثرات جاذبه روی اجسام به طور موثری کاهش می‌یابد [۹]. به طوری که بتوان پدیده‌های زیستی را بدون بردار ثابت جاذبه مطالعه کرد. برخی از روش‌ها برای ایجاد شرایط سقوط آزاد یا میکروگرواویتی در تحقیقات گیاهی شامل پروازهای سهمی شکل هواپیماها، موشک‌ها و تسهیلات فضایی در مدار پایین زمین مانند شاتل فضایی، سایوز روسی و ایستگاه فضایی بین‌المللی است [۸]. طبق تعریف، شتاب گرانشی روی سطح زمین  $g_1$  است (بر حسب واحد SI،  $9/8$  متر مربع بر مجذور ثانیه) و شرایط میکروگرواویتی را می‌توان در محدوده  $g_1$  تا  $g_1 \times 10^{-6}$  تعریف کرد [۶].

## ۳ پروژه‌های علمی - اکتشافی و سخت افزارها

تاکنون چندین پروژه‌ی پرتابی در مدار پائین زمین انجام شده است. در این پروژه‌ها از شاتل فضایی و اسپیس-ایکس برای پرتاب استفاده شد و با همکاری ایسا و ناسا اجرا شد. جدول ۱ تعدادی از پروژه‌های پرتابی با شاتل‌های فضایی را نشان می‌دهد.

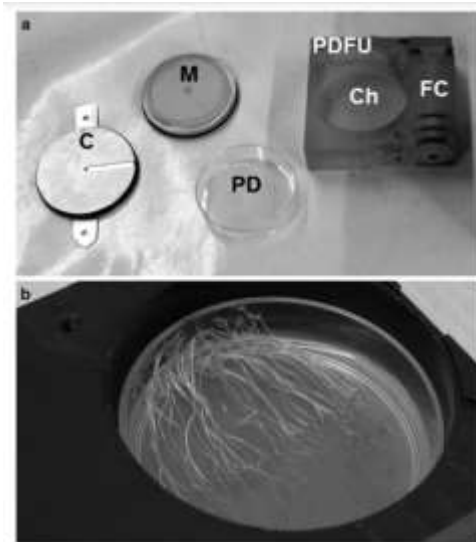
مطالعه گیاهان به عنوان بخش مهمی از تحقیقات زیست-فضایی، از آغاز عصر پرتاب‌های فضایی شروع شد و اولین پروژه تحقیقات زیست گیاهی حامل بذرهایی از جمله ذرت، نخود، گندم و پیازچه بود که در ماه می ۱۹۶۰ با اسپوتنیک ۴ به فضا ارسال شد [۱]. تحقیقات زیست گیاهی در فضا را می‌توان به دو حوزه گسترده و مرتبط تقسیم کرد: الف) مطالعه گیاهان برای استفاده در سیستم پشتیبان حیات زیستی و ب) استفاده از میکروگرواویتی به عنوان یک ابزار تحقیقاتی جدید برای مطالعه جنبه‌های بنیادی و علمی زیست گیاهی است [۲]. تاکنون محققین به کشفیات جالبی در ارتباط با مطالعه گیاهان در فضا دست یافته‌اند. به عنوان مثال، مطالعه در سیستم پشتیبان حیات زیستی نشان داد که امکان رشد چندین نسل از گیاه به صورت بذر تا بذر وجود دارد و میکروگرواویتی تاثیر مخربی بر چرخه زندگی گیاه ندارد [۳]. حرکات چرخشی که نوعی الگوی رشد نوسانی یا مارپیچی حول یک محور می‌باشد، توسط چارلز داروین [۹] به عنوان یک ویژگی با منشا درونی گیاه فرض شد. در حالی که برخی محققین پیشنهاد کردند که یک پدیده وابسته به جاذبه است [۴]. در آزمایشات پرتاب فضایی شرایطی برای حل این اختلافات فراهم شد که در آن حرکات چرخشی بدون بردار جاذبه ایجاد شد. جانسون و همکاران (۲۰۰۹) در آزمایشی در ایستگاه فضایی بین‌المللی نشان دادند که مطابق پیش‌بینی داروین، حرکات چرخشی با منشا درونی در ساقه‌ها رخ می‌دهد و شتاب‌های جاذبه‌ای می‌تواند این حرکات چرخشی را تقویت نمایند [۵]. نمونه دیگری از تحقیقات فضایی روی تروپیس‌ها بود و نشان دادند که نورگرایی ساقه در معرض نور قرمز در گیاهچه‌های رشد یافته تحت میکروگرواویتی اتفاق افتاد و این پاسخ نورگرایی در شتاب  $g_1$  در روی زمین در بسیاری از گیاهان مشاهده نشد. ولی اجداد گیاهان قدیمی نظیر خزه‌ها و سرخس‌ها، پاسخ جهت دار به نور قرمز تحت شتاب  $g_1$  را نشان دادند که بیانگر تکامل گیاهان زمینی طی سالیان متمادی است [۶]. همچنین برای مطالعه سلول‌های گیاهی در فضا نیاز به سیستم‌های کشت سه بعدی در هیدروژل می‌باشد. این سیستم‌های کشت می‌تواند برای تثبیت سلول‌ها و ارسال سلول‌ها به فضا استفاده شود [۶].

ساختار سلول‌های کلوملای درک کننده جاذبه در کلاهک ریشه نشان نداد [۱۰].

ماژول Biorack علاوه بر تحقیقات گیاهی می‌توانست به عنوان یک آزمایشگاه کوچک برای مطالعات سلولی و تکوینی در تک سلولی‌ها و بی‌مهرگان کوچک نیز استفاده شود و در شش مأموریت شاتل فضایی استفاده گردید. این ماژول دارای دو انکوباتور با سانتیفریوژهای با سرعت متغیر (برای استفاده به عنوان کنترل g 1)، محفظه دستکش دار و دوربین بود [۱۱].

### ۲.۳ پروژه BRIC-16

پروژه BRIC-16 در سال ۲۰۱۰ توسط ناسا و ایسا در مأموریت شاتل فضایی STS-130 اجرا شد. سیستم سخت افزاری واحد تثبیت نمونه در پتری‌دیش آن در مقایسه با Biorack نسبتاً ساده‌تر بود (شکل ۱). سیستم BRIC، فاقد سیستم تصویربرداری، کنترل اتمسفری و قابلیت‌های ارتباطی ویدیوی بود. بعلاوه، یکی دیگر از تفاوت‌های کلیدی BRIC در مقایسه با آزمایش‌های Biorack این بود که سانتیفریوژ وجود نداشت. این ابزار برای تمایز بین اثرات پرتاب فضایی و میکروگراویتی واقعی بر روی موجودات زنده بسیار مهم بود [۱۲]. به طور کلی، بسیاری از تسهیلات آزمایشگاهی ناسا، فاقد سانتیفریوژ (آزمایش کنترل) بود، در حالی که ایسا این ابزار را در آزمایشگاه‌های پرتاب فضایی خود گنجانده بود [۱۳].



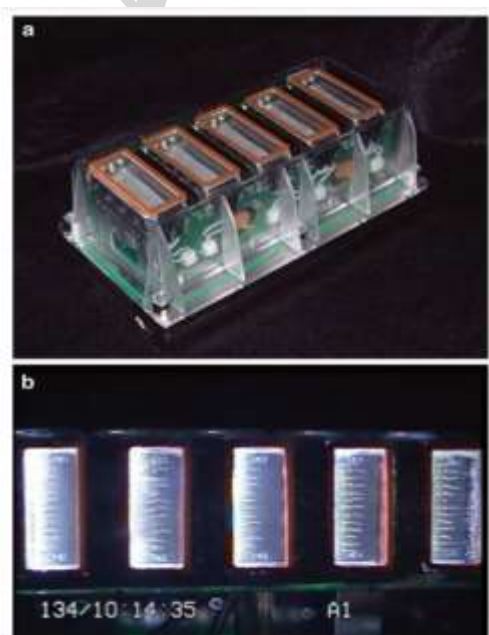
شکل ۱- واحد تثبیت نمونه در پتری‌دیش مربوط به سخت‌افزار استفاده شده در پروژه BRIC-16. (a) پتری‌دیش پلی‌استرن با یک محفظه پتری‌دیش (۶۰ میلی‌متری با عمق ۱۵ میلی‌متر) و یک محفظه مایع (FC) که پر از محلول تثبیت کننده است. پتری‌دیش با درب آن (M) و یک پوشش اضافی (C) به بدنه PDFU وصل می‌شود. (b) گیاهچه‌های آرابیدوپسیس رشد یافته روی آگار مغذی در شرایط تاریکی در یک PDFU در طی آزمایش کنترل زمینی که درب آن برای نمایش رشد گیاهچه‌ها برداشته شده است [۱۴].

جدول ۱- خلاصه ای از پروژه‌های پرتاب فضایی با تسهیلات استفاده شده در مدار پایین زمین [۱۰-۱۵].

عنوان پروژه	سال	موضوع	روش اجرایی	سخت افزار	پرتاب
PLASTID	۱۹۹۷	درک جاذبه	نور ویدئویی، تثبیت شیمیایی	Biorack-Space hub	STS-81
TROPI-1	۲۰۰۶	تروییس م، میکرو گراویتی	نور ویدئویی، فریز کردن نمونه	EMS-ISS	STS-121, 115
TROPI-2	۲۰۱۰	تروییس م، میکرو گراویتی	نور ویدئویی، فریز کردن نمونه	EMS-ISS	STS-130
BIRC-16	۲۰۱۰	مورفولژی، گیاه، بیان ژن	تثبیت شیمیایی	BRIC-Space Shuttle	STS-130
Seedling Growth-1	۲۰۱۳-۲۰۱۴	نورگرایی، چرخه سلولی، بیان ژن	نور ویدئویی، فریز کردن نمونه	EMC S-ISS	Space X2

### ۱.۳ پروژه PLASTID

محموله گیاهی در پرتاب‌های STS-81 و STS-84 در سال ۱۹۹۷، در ماژول Biorack و Spacehub انجام شد که هدف آن بررسی مکانیسم‌های درک جاذبه در گیاه بود [۱۰]. از بذره‌های وحشی و جهش‌یافته‌های فاقد نشاسته آرابیدوپسیس استفاده شد و در Biorack ایسا آزمایش انجام شد. Biorack یک وسیله با چند کاربرد برای تحقیقات بیولوژیکی بود [۱۱]. در این پروژه‌ها، به گیاهچه‌های رشد یافته تحت میکروگراویتی، پالس‌های جاذبه‌ای توسط سانتیفریوژ اعمال می‌شد. هیپوکوتیل گیاهچه‌های نوع وحشی به این پالس‌ها پاسخ دادند، در حالیکه در گیاهچه‌های جهش‌یافته‌های فاقد نشاسته پاسخ‌ها کم و یا هیچ پاسخی مشاهده نشد. نتایج این پژوهش از مدل نشاسته-استاتولیت برای درک جاذبه پشتیبانی نمود. بعلاوه، امکان تثبیت گیاهچه‌ها در فضا وجود داشت. مطالعات میکروسکوپ الکترونی، اثرات تخریبی میکروگراویتی را بر



شکل ۲- سخت افزار TROPI استفاده شده برای رشد گیاهچه‌ها در آزمایشات پرتابی EMCS [۱۷].

در آزمایش TROPI-2، مطالعه نورگرایی تحت میکروگروایتی و کاهش جاذبه ایجاد شده توسط سانتریفیوژ موجود در سیستم کشت EMCS در نظر گرفته شد. نورگرایی تحت نور قرمز تأیید شد و مطالعات کاهش جاذبه نشان داد که با افزایش شتاب جاذبه از ۰/۱ تا ۰/۳ g، نورگرایی قرمز ضعیف می‌شود [۱۰]. آنالیز ترانسکریپتومی ژن‌های گیاهچه‌های رشد یافته در فضا در TROPI-2 انجام شد و مشخص شد که ۲۸۰ ژن در نمونه‌های فضایی نسبت به کنترل زمینی بیان متفاوت داشتند [۱۰].

#### ۴ چالش‌های مطالعات فضایی

مطالعات موجودات زنده فضا دارای چالش‌های زیادی است، زیرا کار تحقیقاتی در خارج از آزمایشگاه و توسط خدمه پروازی انجام می‌شود و محقق اصلی کنترل بسیار کمی بر سرنوشت آزمایش دارد. تاکنون چندین مطالعه پرتابی انجام شده است و بسیاری از مشکلات تحقیقات علمی-اکتشافی مشخص شده است که در زیر به آن پرداخته می‌شود.

#### ۱.۴ انتخاب پروژه پرتابی و بررسی فنی

معمولاً برای انتخاب پروژه فراخوان داده شد، پروپوزال‌ها جمع‌آوری و پس از داوری با شرایط و تسهیلات پرتابی تحت امکان‌سنجی تکنیکی قرار می‌گیرند. با این حال، برخی از پروژه‌ها با درجه‌ی بالایی علمی، بدلیل عدم امکان‌پذیری از نظر

سخت‌افزار شامل یک محفظه با یک پتری دیش ساده (که در آن گیاهچه‌ها رشد می‌کردند) و مایع تثبیت کننده بود که در زمان مشخص از ظرف دیگری به نمونه‌ها اضافه می‌شد تا نمونه‌ها تثبیت شوند (شکل ۱). در آزمایش ماموریت STS-131، از سه محلول تثبیت کننده شامل پارافرم‌آلدهید، گلو تار آلدهید و RNA later برای مطالعه رشد، نمو و بیان ژن استفاده شد [۱۴].

#### ۳.۳ پروژه TROPI<sup>۳</sup>

برهمکنش بین نورگرایی و جاذبه گرایی، از اهداف اصلی دو پروژه فضایی TROPI-1 و TROPI-2 به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۰ در ایستگاه بین‌المللی بود. در این پروژه‌ها از سیستم کشت مدولار اروپا (EMCS) در ایستگاه بین‌المللی استفاده شد. EMCS، حاوی یک انکوباتور با قابلیت کنترل شرایط محیطی و سیستم دوربین فیلمبرداری با وضوح بالا بود [۱۵]. همچنین سانتریفیوژ دارای دو روتور متغیر بوده که به طوری که می‌توانست کنترل ۱g و نیز سطوح جاذبه پایین‌تر را روی نمونه‌ها اعمال کند. محفظه آزمایشی دارای کاست‌های ۵ تایی بوده که برای رشد گیاهچه‌ها استفاده می‌شود. ابعاد هر کاست بصورت (ارتفاع) ۹۰ × (عرض) ۱۰۰ × (طول) ۱۸۶ میلی‌متر بود. شکل ۲، نمایی از کاست‌های رشد گیاهچه‌های آراییدوپسیس را در طی آزمایشات فضایی نشان می‌دهد. برای دست آوردن تصاویر با کیفیت بالا نیاز به مطالعه رشد، نمو و نورگرایی گیاه بود. پوشش پلاستیکی شفاف روی کاست‌های پنج تایی گیاهچه دارای غشای با قابلیت گرمایشی ضد مه شفاف بود، بطوریکه در مشاهدات ویدئویی اختلال ایجاد نمی‌کرد. علاوه بر این، پوشش پلاستیکی دارای چهار شکاف با یک غشای قابل نفوذ گاز بود که اجازه تبادل گازی با حداقل از دست دادن رطوبت را می‌داد [۱۶].

در آزمایش TROPI-1 نوعی پاسخ نورگرایی جدید و مثبت به نور قرمز در هیپوکوتیل‌های گیاهچه‌های رشد یافته تحت میکروگروایتی مشاهده شد. این نورگرایی مبتنی بر نور قرمز، در شرایط معمولی 1g زمینی و همچنین در کنترل 1g پرتابی مشاهده نشد [۱۴]. این نتایج بیانگر تکامل سیستم‌های حسگر نوری در گیاهان می‌باشد.

در واقع، مفهوم افزونگی<sup>۴</sup> که توسط ناسا برای موشک‌ها و سایر وسایل نقلیه فضایی استفاده می‌شود، می‌تواند در مقیاس کوچکتر برای طراحی آزمایشات زیستی فضایی اعمال شود [۱۶]. در واقع، وقتی یک مولفه به اندازه کافی قابل اعتماد برای انجام آزمایش نباشد، از مولفه دوم برای تجزیه و تحلیل بهتر و قابلیت اطمینان استفاده می‌شود.

مدت زمان عملیات اجرایی پرتاب و فعالیت خدمه برای آزمایش در فضا اهمیت دارد. بطوریکه در آزمایش TROPI-1 مدت زمان قرار گیری نمونه‌ها در سایت پرتاب طولانی بود، اکثر بذرها دهدراته شدند و درصد جوانه‌زنی کاهش یافت. همچنین مشکل انتقال سرما طی پرواز رخ داد که در آزمایش TROPI-2 این مشکل رفع شد. از طرفی فرآیندهای انجماد و سرمایش نمونه‌های پرتابی بعد از برداشت نمونه‌ها در آزمایش TROPI-2 اجرا شد که برای دستیابی به کیفیت بالای RNA در آنالیز میکروآری مهم بود [۱۸]. مدت زمان فعالیت خدمه پرواز برای انجام آزمایش نیز مهم است. هرچه نیاز به زمان کمتر خدمه برای اجرای آزمایش زیستی و نمونه برداری باشد، بهتر است. حالت بهینه آن است که آزمایشات فضایی توسط سیستم‌های تله متری و صدور فرامین انجام شود.

#### ۳.۴ استانداردهای ایمنی و کارگروه پرتاب

تمامی استانداردهای ایمنی در طول عملیات بایستی اجرا شوند. مستندسازی ریسک‌ها در ناسا در مقایسه با وضعیت اکثر آزمایشگاه‌های دانشگاه بسیار سخت‌گیرانه است. بطوریکه برگه داده‌های ایمنی مواد بایستی برای کلیه مواد آزمایشگاهی، حتی برای آب تهیه شود. قبل از پرتاب بایستی مجموعه‌ای از تست‌های آزمایش زیستی و سایر آزمایشات مرتبط در مرحله تعریف و توسعه سخت‌افزاری پروژه انجام شود. در این تست‌ها فاکتورهای متعددی از جمله جنس مواد استفاده شده در محفظه رشد، بهینه‌سازی نور ال‌ای‌دی (از نظر کمی و کیفی)، دما، رطوبت، دوره نوری برای بهینه‌سازی جوانه‌زنی، سمیت مواد شیمیایی، مطالعات ویدئویی، کیفیت سطح نور برای تصویربرداری و فاکتورهای متعدد دیگر بررسی می‌شود [۱۰]. لامپ‌های ال‌ای‌دی بدلیل ایجاد گرمای کم، مصرف انرژی پایین و طول عمر طولانی برای تحقیقات فضایی مناسب‌اند [۹].

کارگروه اجرای آزمایش در تسهیلات ناسا قبل از آزمایش و پس از بازگشت به زمین بایستی وجود داشته باشد. همه مواردی که معمولاً به آن نیاز است بایستی به وضوح مشخص شوند، زیرا اگر نیاز به وسیله‌ای باشد که قبلاً تهیه نشده باشد، سفارش و دستیابی سریع به اقلام آزمایشگاهی دشوار است [۱۸].

سخت‌افزارهای مورد نیاز و یا دلایل دیگر (به عنوان مثال، زمان مورد نیاز برای عملکرد خدمه) پذیرش نمی‌شوند. هنگامی که یک پروژه مرحله داوری، امکان‌سنجی فنی و معیارهای مربوط به برنامه اجرایی را طی می‌کند، پس از آن یک دوره تعریف و توسعه سخت‌افزاری وجود دارد و ممکن مدت زمان زیادی را سپری نماید. بنابراین، مهم است که محققین به امکان سخت‌افزاری و قابلیت‌های موجود طی پرتاب فضایی هنگام ارائه پروپوزال توجه ویژه‌ای داشته باشند. به طور کلی، پس از مطالعه فنی و تکنیکی، یک بازبینی برنامه‌ای نیز صورت می‌گیرد. در بازنگری‌های علمی و فنی ممکن است گروهی از این داوران و یا همه اعضای پنل، دانشمندان و مهندسان نقش داشته باشند. بطوریکه از سه نمونه پرواز فضایی ارائه شده، پروژه‌های (Biorack یک سال) و (BRIC-16 دو ماه) زمان تعریف و توسعه آنها طول کشید که سریع بود، در حالی که پروژه EMCS یک دوره طولانی توسعه فنی ۶/۵ ساله را به همراه داشت. پروژه EMCS دارای چندین مرحله از جمله: پیش- فاز A، فاز B و فاز C/D بود. بنابراین، علیرغم اینکه به نظر می‌رسید یک فرآیند عادی برای اجرای آزمایشات پرواز فضایی وجود دارد، الزامات و رویه‌های مورد نظر از پروژه‌ای به پروژه دیگر متغیر است [۱۰].

#### ۲.۴ محدودیت‌های عملیاتی و مدت زمان اجرای آزمایش

پروژه TROPI-1 موفقیت‌هایی داشت و فرایند نورگرایی مبنی بر نور قرمز تحت میکروگراویتی کشف شد، اما در این پروژه نگرانی‌های جدی وجود داشت. به عنوان مثال، بدلیل محدودیت‌های عملیاتی ناسا و برنامه ایستگاه بین‌المللی، بذرها در واحد کشت به ترتیب برای چندین ماه (۷ و ۸ ماه) مهر و موم شده بودند. طی آزمایشات پرتابی، جوانه‌زنی بذر در آزمایش ۱ (۵۸٪) و آزمایش ۲ (۲۳٪) کاهش یافت و حتی در آزمایش ۳ به ۱۱٪ رسید. عامل اصلی کاهش درصد جوانه زنی، ذخیره طولانی مدت بذرها و تجمع گاز (احتمالاً اتیلن) در داخل محفظه کشت بود [۱۴].

اما در پروژه بعدی، TROPI-2، یک سیستم جانبی برای سنجش هیدراتاسیون بذرها و فعال‌سازی آزمایش فضایی در نظر گرفته شد. وقتی که یکی از آنها (تله متری) از کار می‌افتاد، هنوز سیستم دوم (لینک پایین دست ویدیویی) برای نظارت بر وقایع هیدراتاسیون وجود داشت.

بایستی برنامه‌های زیست-فضایی سایر کشورها از جمله ایران، چین، هند و غیره نیز توسعه یابد.

## ۶ تشکر و قدردانی

از حمایت مالی پژوهشگاه هوا فضا برای اجرای این پژوهش قدردانی می‌گردد.

## ۷ مراجع

1. Ferl, R., Wheeler, R., Levine, H.G., Paul, A.L. "Plants in space." Current opinion in plant biology, vol. 5, no. 3, pp.258-263, 2002.
2. Hassanpour, H., Pourhabibian, R. "Study of cellular and molecular responses in plants under microgravity." Journal of Technology in Aerospace Engineering, vol. 3, no. 4, pp.57-65, 2020.
3. De Micco, V., Pascale, S., Paradiso, R., Aronne, G. "Microgravity effects on different stages of higher plant life cycle and completion of the seed-to-seed cycle." Plant Biology, vol. 16, pp. 31-38, 2014.
4. Darwin, C., Darwin, F. "The power of movement in plants." John Murray, London, 1880.
5. Johnsson, A., Solheim, B. G. B., Iversen, T. H. "Gravity amplifies and microgravity decreases circumnutations in Arabidopsis thaliana stems: results from a space experiment." New Phytologist, vol. 182, pp. 621-629, 2009.
6. Krikorian, A. D. "Strategies for "minimal growth maintenance of cell cultures: a perspective on management for extended duration experimentation in the microgravity environment of a space station." Botanical Review, vol. 62, pp. 41-108, 1996.
7. Hassanpour, H. "Investigation of plant cell culture models for space studies." Technology in Aerospace Engineering, 7(1), pp.17-23, 2023.
8. Looft, F. J. "The design of flight hardware." In NASA conference publication. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC, 1986, pp. 109-116.
9. Hassanpour, H. "Designing an optical system for plant research in space." Technology in Aerospace Engineering, vol. 7, no. 4, pp.1-8, 2023.
10. Kiss, J.Z., Kumar, P., Bowman, R.N., Steele, M.K., Eodice, M.T., Correll, M.J. and Edelman, R.E. "Biocompatibility studies in

## ۴.۴ تفسیر و انتشار داده‌ها

یکی از مشکلات آزمایشات اولیه پرتابی، عدم وجود نمونه شاهد بود. انتشار تحقیقات علمی با مشکل مواجه بود و در مقالات داخلی منتشر می‌گردید. در واقع بایستی دو نمونه شاهد زمینی و پرتابی (ایجاد شتاب 1g با سانتریفیوژ) برای مطالعات پرتاب فضایی در نظر گرفت و نمونه‌های رشد یافته تحت فضا با این نمونه‌های شاهد مقایسه شوند. در پروژه BRIC در مقایسه با آزمایش‌های Biorack و EMCS، سانتریفیوژ وجود نداشت. وجود نمونه شاهد برای تمایز بین اثرات پرتاب فضایی و میکروگروایتی واقعی بر روی موجودات زنده بسیار مهم بود. به طور کلی، بسیاری از تسهیلات آزمایشگاهی ناسا، فاقد سانتریفیوژ (آزمایش کنترل) بود، در حالی که ایسا این ابزار را در آزمایشگاه‌های پرتاب فضایی خود گنجانده بود [۱۹ و ۱۳].

تکرار و اصلاح آزمایشات پرتاب‌های فضایی برخلاف آزمایشگاه‌های معمولی زمینی دشوار است که به دلیل کمبود فرصت‌های پروازی است. این رویکرد فشار زیادی را بر محقق اصلی برای داشتن یک آزمایش بدون نقص وارد می‌کند. با این حال، در چندین فرصت پروازی ایجاد شده توسط ناسا و شرکای بین المللی، امکان تکرار و اصلاح آزمایشات نظیر پروژه‌های زیستی نموی و تولید مثل فراهم شد [۲۰].

## ۵ نتیجه‌گیری

زیست-گیاهی فضایی سهم قابل توجهی را در زیست شناسی بنیادی و کاربردی دارد. گیاهان به عنوان بخشی از سیستم پشتیبان حیات در طول سفرهای فضایی بلند مدت و همچنین کلون‌سازی دیگر سیارات نظیر مریخ نقش دارند. برای تحقیقات زیست فضایی نیاز به طراحی آزمایشات زیستی با امکانات شرایط پرتابی است. در آزمایشات علمی-اکتشافی با شاتل‌های فضایی بایستی نمونه‌ها بعد از عبور از مدار و اعمال بی وزنی با محلول‌های تثبیت کننده تثبیت شوند و مازول استفاده شده در پروژه BRIC-16 برای ارسال نمونه توصیه می‌شود. ارسال نمونه زیستی با محدودیت‌هایی از جمله شرایط محیط پروازی، زمان، شرایط نمونه شاهد، تکرار نمونه‌ها، محدودیت‌های سایت پرتاب، بازیابی نمونه‌ها و غیره همراه است که نیازمند یک برنامه دقیق اجرای روش‌های آزمایش زمینی و فضایی است. تحقیقات آتی آژانس‌های فضایی در ایستگاه بین‌المللی فضایی تمرکز خواهد داشت و

16. Correll, M. J., Edelmann, R. E., Hangarter, R. P., Mullen, J. L., Kiss, J. Z. "Ground-based studies of tropisms in hardware developed for the European Modular Cultivation System (EMCS)." *Advces in Space Research* vol. 36, pp. 1203–1210, 2005.
17. Shymanovich, T., Kiss, J.Z., 2022. Conducting plant experiments in space and on the moon. *Plant Gravitropism: Methods and Protocols*, pp.165-198.
18. Millar, K. D. L., Kumar, P., Correll, M. J., Mullen, J. L., Hangarter, R. P., Edelmann, R. E., Kiss, J. Z. "A novel phototropic response to red light is revealed in microgravity." *New Phytologist*, vol. 186, pp. 648–656, 2010.
19. Musgrave, M. E., Kuang, A. "Reproduction during spaceflight by plants in the family Brassicaceae." *Journal of Gravitational Physiology*, vol. 8, pp. 29–32, 2001.
20. Porterfield, D. M., Neichitailo, G. S., Mashinski, A. L., Musgrave, M. E. "Spaceflight hardware for conducting plant growth experiments in space: the early years 1960–2000." *Advances in Space Research*, vol. 31, pp. 183–193, 2003.
- preparation for a spaceflight experiment on plant tropisms (TROPI)." *Advances in Space Research*, vol. 39, no. 7, pp.1154-1160, 2007.
11. Manieri, P., Brinckmann, E., Brillouet, C. "The Biorack facility and its performance during the IML-2 Spacelab mission." *Journal of Biotechnology*, vol. 47, pp. 71–82, 1996.
12. Shymanovich, T., Kiss, J.Z. "Conducting plant experiments in space and on the moon." *Plant Gravitropism: Methods and Protocols*, pp.165-198, 2022.
13. De Micco, V., Aronne, G., Caplin, N., Carnero-Diaz, E., Herranz, R., Horemans, N., Legué, V., Medina, F.J., Pereda-Loth, V., Schiefloe, M. and De Francesco, S. "Perspectives for plant biology in space and analogue environments." *npj Microgravity*, vol. 9, no. 1, p.67, 2023.
14. Millar, K. D. L., Johnson, C. M., Edelmann, R. E., Kiss, J. Z. "An endogenous growth pattern of roots is revealed in seedlings grown in microgravity." *Astrobiology*, vol. 11, pp. 787–797, 2011.
15. Molas, M. L., Kiss, J. Z. "Phototropism and gravitropism in plants." *Advances in Botanical Research* vol. 49, pp. 1–34, 2009.