JTAE

E-ISSN: 2676-4253

Journal of Technology in Aerospace Engineering

Vol. 9, No. 1, pp. 75-82, 2025

https://doi.org/10.22034/jtae.2025.9.1.6

Journal Homepage: https://jtae.ari.ac.ir

Scientific Extension Paper

Plant Research in Space Shuttle and its Challenges

Halimeh Hassanpour

Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 13 September 2023
Revised 25 October 2023
Accepted 21 November 2023
Available Online 19 February 2024

Keywords:

Scientific-exploratory research
Space projects
Microgravity
Limitations of plant experiments

ABSTRACT

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 hardware 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.

Corresponding Author's E-mail: hassanpour@ari.ac.ir

How to Cite this Article:
H. Hassanpour, "Plant research in space shuttle and its challenges," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 75-82, 2025, (in Persian), https://doi.org/10.22034/jtae.2025.9.1.6.

COPYRIGHTS
Authors retain the copyright and full publishing rights.
Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

OPEN ACCESS

فناوری در مهندسی هوافضا

سال ۱۴۰۴، دورهٔ ۹، شمارهٔ ۱، صفحهٔ ۷۵-۸۲

https://doi.org/10.22034/jtae.2025.9.1.6

Journal Homepage: https://jtae.ari.ac.ir

شاپای الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۲۵۳

مقاله ترویجی

تحقیقات گیاهی در شاتل‌های فضایی و چالش‌های آن

حلیمه حسن‌پور

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

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۲ شهریور ۱۴۰۲

بازنگری ۰۳ آبان ۱۴۰۲

پذیرش ۳۰ آبان ۱۴۰۲

اولین انتشار ۳۰ بهمن ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

تحقیقات علمی-اکتشافی

پروژه‌های فضایی

میکروگراویتی

محدودیت‌های آزمایشات گیاهی

چکیده

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 سخت افزارهای 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 شده‌است 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 سخت افزار 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 بی‌وزنی، سخت افزارهای طراحی شده و چالش‌های عملیاتی و اجرایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پست الکترونیکی نویسندهٔ مسئول: hassanpour@ari.ac.ir

How to Cite this Article:

H. Hassanpour, "Plant research in space and its challenges," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, (in Persian), Vol. 9, No. 1, pp. 75-82, 2025, (in Persian), https://doi.org/10.22034/jtae.2025.9.1.6.

COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of The Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

OPEN ACCESS

۱ مقدمه

مطالعه گیاهان به‌عنوان 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 میکروگراویتی به‌عنوان 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. به‌عنوان مثال، مطالعه در سیستم پشتیبان حیات زیستی نشان داد که امکان رشد چندین نسل از گیاه به‌صورت بذر تا بذر وجود دارد و میکروگراویتی 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] به‌عنوان یک ویژگی با منشا درونی گیاه فرض شد. درحالی 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[1] 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 تروپیسم‌ها بود و نشان دادند که نورگرایی ساقه در معرض نور قرمز در گیاهچه‌های رشد یافته تحت میکروگراویتی اتفاق افتاد و این پاسخ نورگرایی در شتاب 1 g 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 1 g 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].

گرچه تا به امروز تحقیقات متعددی درمورد زیست گیاهی در فضا انجام شده‌است، 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]. به‌طوری که 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، ۶]. در این مطالعه جنبه‌های فنی و علمی آزمایشات، روش‌های اعمال بی‌وزنی، سخت‌افزارهای مناسب کشت نمونه در شاتل‌های فضایی و چالش آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲ روش‌های اعمال بی‌وزنی روی نمونه‌های گیاهی

در آزمایشات فضایی، به دست آوردن شرایط تقریباً نزدیک به بی‌وزنی مهم است که در آن اثرات جاذبه روی اجسام به‌طور موثری کاهش می‌یابد [۹]. به‌طوری که بتوان پدیده‌های زیستی را بدون بردار ثابت جاذبه مطالعه کرد. برخی از روش‌ها برای ایجاد شرایط سقوط آزاد یا میکروگراویتی 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 1 g است (بر حسب واحد SI، ۹/۸متر مربع بر مجذور ثانیه) و شرایط میکروگراویتی را می‌توان در محدوده g 10^{-4} تا g 10^{-6} تعریف کرد [۶].

۳ پروژه‌های علمی–اکتشافی و سخت افزارها

تاکنون چندین پروژهٔ پرتابی در مدار پائین زمین انجام شده‌است. 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[۷].

1. Circumnutation

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

Table 1. Summary of space launch projects with facilities used in low Earth orbit [15-10].

Project title	Year	Subject	Method	Facility	Launched
PLASTID	1997	Gravity perception	Video tapes, chemical fixation	Biorack-Spacehub	STS-81
TROPI-1	2006	Tropism, microgravity	Video tapes, freezing	EMS-ISS	STS-121, 115
TROPI-2	2010	Tropisms, microgravity	Video tapes, freezing	EMS-ISS	STS-130
BIRC-16	2010	Plant morphology, gene profi ling	Chemical fixation	BRIC-Space Shuttle	STS-130
Seedling Growth-1	2013-2014	Phototropism, cell cycle, gene profi ling	Video tapes, freezing	EMCS-ISS	Space X2

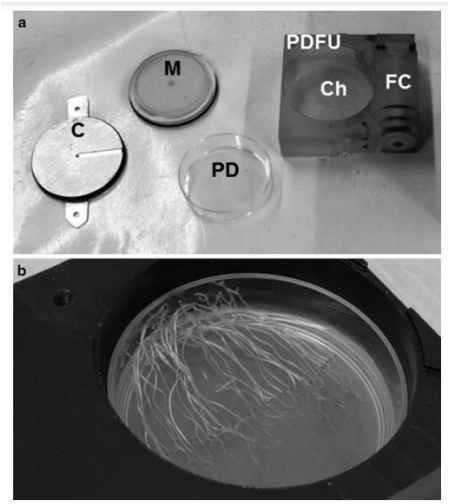
۳. ۱ پروژه PLASTID

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 بذرهای 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 سانتریفیوژ 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. به‌علاوه، امکان تثبیت گیاهچه‌ها در فضا وجود داشت. مطالعات میکروسکوپ الکترونی، اثرات تخریبی میکروگراویتی را بر ساختار سلول‌های کلوملای درک کننده جاذبه در کلاهک ریشه نشان نداد [۱۰]. ماژول Biorack علاوه بر تحقیقات گیاهی می‌توانست به‌عنوان 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 سانتریفیوژهای با سرعت متغیر (برای استفاده به‌عنوان کنترل (1 g، محفظه دستکش دار و دوربین بود [۱۱].

۳. ۲ پروژه BRIC-16[1]

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

1. Biological Research in Canisters



شکل ۱– واحد تثبیت نمونه در پتری‌دیش (PDFU) مربوط به سخت‌افزار استفاده شده در پروژه BRIC-16 (a). محفظه پتری‌دیش پلی استرن با یک پتری‌دیش (۶۰ میلی متری با عمق ۱۵ میلی‌متر) و یک محفظه مایع (FC) که پر از محلول تثبیت کننده است. پتری دیش با درب آن (M) و یک پوشش اضافی (C) 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 شده‌است [۱۴].

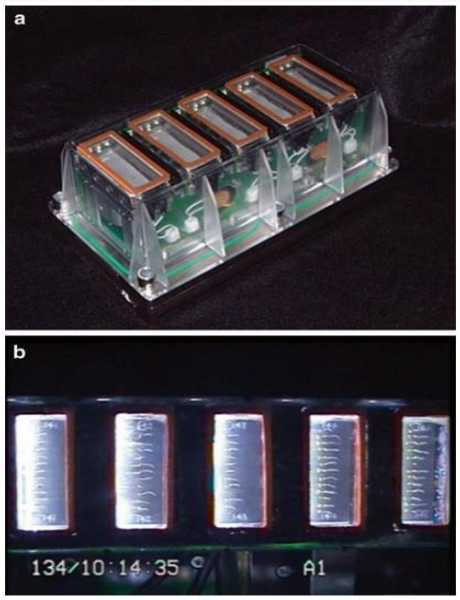
Fig. 1. Petri Dish Fixation Unit (PDFU) hardware used in the BRIC-16 project (a). The polystyrene Petri dish chamber with a Petri dish chamber (the dimensions of 60 mm in diameter with a depth of 15 mm) and a liquid chamber (FC) filled with fixative.The Petri dish with a manifold (M) and an additional cover (C) were attached to the PDFU body. (b) Seedlings of Arabidopsis thaliana were grown on nutrient agar in the dark in a PDFU during a ground control, which its cover was removed to show that seedlings exhibited growth [14].

سخت‌افزار شامل یک محفظه با یک پتری‌دیش 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، گلوتارآلدهید و RNAlater برای مطالعه رشد، نمو و بیان ژن استفاده شد [۱۴].

۳. ۳ پروژه TROPI[1]

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 به‌طوری که می‌توانست کنترل g۱ 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 میلی متر بود. شکل ۲، نمایی از کاست‌های رشد گیاهچه‌های آرابیدوپسیس 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، به‌طوری که 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 میکروگراویتی 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.



شکل ۲– سخت افزار TROPI استفاده شده برای رشد گیاهچه‌ها در آزمایشات پرتابی EMCS [۱۲].

Fig. 2. TROPI hardware used for seedling growth in EMCS launch experiments [12].

در آزمایش TROPI-2، مطالعه نورگرایی تحت میکروگراویتی و کاهش جاذبه ایجاد شده توسط سانتریفیوژ موجود در سیستم کشت

1. Tropism

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 شده‌است و بسیاری از مشکلات تحقیقات علمی- اکتشافی مشخص شده‌است که در زیر به آن پرداخته می‌شود.

۴. ۱ انتخاب پروژه پرتابی و بررسی فنی

معمولا 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 بالای علمی، عدم امکان‌پذیری از نظر سخت‌افزارهای مورد نیاز و یا دلایل دیگر (به‌عنوان 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 سخت افزاری و قابلیت‌های موجود طی پرتاب فضایی هنگام ارائه پروپوزال توجه ویژه‌ای داشته باشند. به‌طور 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. به‌طوری که از سه نمونه پرواز فضایی ارائه شده، پروژه‌های Biorack (یک سال) و BRIC-16 (دو ماه) زمان تعریف پروژه و توسعه آن‌ها طول کشید که سریع بود، درحالی 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 A، فاز B و فاز C/D بود. بنابراین، علیرغم اینکه به نظر می‌رسید یک فرآیند عادی برای اجرای آزمایش‌های پرواز فضایی وجود دارد، الزامات و رویه‌های مورد نظر از پروژه‌ای به پروژه دیگر متغیر است [۱۰].

۴. ۲ 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. به‌عنوان مثال، به‌دلیل 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 (احتمالا" 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 (تله‌متری) از کار می‌افتاد، هنوز سیستم دوم (لینک پایین دست ویدیویی) برای نظارت بر وقایع هیدراتاسیون وجود داشت. در واقع، مفهوم افزونگی[1] 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. به‌طوری که در آزمایش TROPI-1 مدت زمان قرار گیری نمونه‌ها در سایت پرتاب طولانی بود، اکثر بذرها دهیدراته 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 [۱۷]. 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.

1. Redundancy

۴. ۳ 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. به‌طوری که برگه داده‌های ایمنی مواد بایستی برای کلیه مواد آزمایشگاهی، حتی برای آب تهیه شود. قبل از پرتاب بایستی مجموعه ای 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 به‌دلیل 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 معمولا به آن نیاز است بایستی به وضوح مشخص شوند، زیرا اگر نیاز به وسیله‌ای باشد که قبلا تهیه نشده باشد، سفارش و دستیابی سریع به اقلام آزمایشگاهی دشوار است [۱۷].

۴. ۴ تفسیر و انتشار داده‌ها

یکی از مشکلات آزمایش‌های 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 g1 با سانتریفوژ) 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 میکروگراویتی واقعی بر روی موجودات زنده بسیار مهم بود. به‌طور کلی، بسیاری از تسهیلات آزمایشگاهی ناسا، فاقد سانتریفیوژ (آزمایش کنترل) بود، درحالی که ایسا این ابزار را در آزمایشگاه‌های پرتاب فضایی خود گنجانده بود [۱۸، 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 بین‌المللی، امکان تکرار و اصلاح آزمایشات نظیر پروژه‌های زیستی نموی و تولید مثل فراهم شد [۱۹].

۵ نتیجه‌گیری

زیست–گیاهی فضایی سهم قابل توجهی را در زیست شناسی بنیادی و کاربردی دارد. گیاهان به‌عنوان 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 بی‌وزنی با محلول‌های تثبیت کننده تثبیت شوند و ماژول 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 بایستی برنامه‌های زیست–فضایی سایر کشورها از جمله ایران، چین، هند و غیره نیز توسعه یابد.

تشکر و قدردانی

از حمایت مالی پژوهشگاه هوافضا برای اجرای این پژوهش قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسنده بیان نشده‌است.

مراجع

[1] R. Ferl, R. Wheeler, H. G. Levine, and A.L. Paul, "Plants in space," *Current Opinion in Plant Biology*, vol. 5, no. 3, pp. 258-263, https://doi.org/10.1016/S1369-5266(02)00254-6.

[2] H. Hassanpour and R. Pourhabibian, "Study of cellular and molecular responses in plants under microgravity," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 57-65, 2019.

[3] V. De Micco, S. De Pascale, R. Paradiso, and G. Aronne, "Microgravity effects on different stages of higher plant life cycle and completion of the *seed-to-seed* cycle," *Plant Biology*, vol. 16, no. S1, pp. 31–38, 2013, https://doi.org/10.1111/plb.12098.

[4] C. W. Whippo and R. P. Hangarter, "The sensational power of movement in plants: A darwinian system for studying the evolution of behavior," *American Journal of Botany*, vol. 96, no. 12, pp. 2115-2127, 2009, https://doi.org/10.3732/ajb.0900220.

[5] A. Johnsson, B. G. B. Solheim, and T. H. Iversen, "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, https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02777.x.

[6] A. D. Krikorian, "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, https://doi.org/10.1007/BF02868920.

[7] H. Hassanpour, "Investigation of plant cell culture models for space studies," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 17-23, 2023, https://doi.org/10.30699/jtae.2023.7.1.2.

[8] J. Z. Kiss, "Conducting plant experiments in space," in *Plant Gravitropism, Methods and Protocols*," vil. 1309, E. B. Blancaflor, Ed. New York, NY: Humana Press, 2015, pp. 255-283, https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2697-8_19.

[9] H. Hassanpour, "Designing an optical system for plant research in space," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 51-58, 2023, https://doi.org/10.30699/jtae.2023.7.4.5.

[10] J. Z. Kiss *et al*., "Biocompatibility studies in preparation for a spaceflight experiment on plant tropisms (TROPI)," *Advances in Space Research*, vol. 39, no. 7, pp. 1154-1160, 2007, https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.12.017.

[11] P. Manieri, E. Brinckmann, and C. Brillouet, "The Biorack facility and its performance during the IML-2 Spacelab mission," *Journal of Biotechnology*, vol. 47, pp. 71–82, 1996, https://doi.org/10.1016/0168-1656(96)01365-x.

[12] T. Shymanovich and J. Z. Kiss, "conducting plant experiments in space and on the moon," in *Plant Gravitropism: Methods and Protocols*, E. B. Blancaflor, Ed. New York, NY: Springer US, 2022, pp. 165-198, https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1677-2_12.

[13] V. De Micco *et al*., "Perspectives for plant biology in space and analogue environments," *Npj Microgravity*, vol. 9, 2023, Art. no. 67, https://doi.org/10.1038/s41526-023-00315-x.

[14] K. D. L. Millar, C. M. Johnson, R. E. Edelmann, and J. Z. Kiss, "An endogenous growth pattern of roots is revealed in seedlings grown in microgravity," *Astrobiology*, vol. 11, no. 8, pp. 787-797, 2011, https://doi.org/10.1089/ast.2011.0699.

[15] M. L. Molas and J. Z. Kiss, "Phototropism and gravitropism in plants," *Advances in Botanical Research*, vol. 49, pp. 1–34, 2009, https://doi.org/10.1016/S0065-2296(08)00601-0.

[16] M. J. Correll, R. E. Edelmann, R. P. Hangarter, J. L. Mullen, and J. Z. Kiss, "Ground-based studies of tropisms in hardware developed for the European Modular Cultivation System (EMCS)," *Advances in Space Research*, vol. 36, no. 7, pp. 1203–1210, 2005, https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.11.003.

[17] K. D. L. Millar *et al*., "A novel phototropic response to red light is revealed in microgravity," *New Phytologist*, vol. 186, no. 3, pp. 648–656, 2010, https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03211.x.

[18] M. E. Musgrave and A. Kuang, "Reproduction during spaceflight by plants in the family Brassicaceae," *Journal of Gravitational Physiology*, vol. 8, pp. 29–32, 2001.

[19] D. M. Porterfield, G. S. Neichitailo, A. L. Mashinski, and M. E. Musgrave, "Space fllight hardware for conducting plant growth experiments in space: The early years 1960–2000," *Advances in Space Research*, vol. 31, no. 1, pp. 183–193, 2003, https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00752-4.