

اتاق‌های رشد گیاهی برای مطالعات فضایی

کشت گیاهان در فضا، نقش مهمی در سیستم پشتیبان حیات برای تولید غذا و اکسیژن، کاهش دی‌اکسیدکربن و دفع آب‌های زائد دارد. همچنین، گیاهان در فضا می‌توانند اثرات مثبت روانی برای فضانوردان داشته باشند. فضا دارای شرایط منحصر به فردی برای مطالعات زیستی است. نمونه‌های زیستی در فضا با تنش‌های گوناگونی از جمله بی‌وزنی، تشعشعات، ارتعاشات، میدان‌های مغناطیسی و میکرواورگانیسم‌ها مواجه‌اند. بررسی اثر این تنش‌ها بر موجودات زنده برای مأموریت‌های طولانی مدت انسان به فضا، پیشرفت تکنولوژی و علوم از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. برای ارسال نمونه‌های زیستی گیاهی به فضا نیاز به طراحی و ساخت تجهیزات رشد گیاهی است. این سیستم‌ها در ابتدای مطالعات فضایی طراحی و ساختار ساده‌ای داشتند و سپس در طی پروازهای متمادی پیشرفته‌تر شدند. بررسی این سیستم‌ها از نظر شکل ظاهری، سیستم نوری، گردش غذایی، سیستم تهویه و دما از اهمیت به‌سزایی برخوردارند. این مقاله سیستم‌های کشت گیاهی به‌کار گرفته شده در ایستگاه‌های فضایی سالیوت، میر، شاتل‌های فضایی و ایستگاه‌های فضایی بین‌المللی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های کشت گیاه، ایستگاه فضایی بین‌المللی، شاتل فضایی

حلیمه حسن پور*، استادیار، پژوهشگاه

هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

فاطمه موسوی، استادیار، پژوهشگاه

هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

*نویسنده مخاطب، آدرس تهران، کد پستی:

۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱

hassanpour@ari.ac.ir

Plant Growth Chamber for Space Studies

The cultivation of higher plants plays an essential role in bioregenerative life support systems for food production, CO₂ reduction, O₂ production, as well as for waste recycling and water management. Fresh crops are also expected to have a positive impact on the crew psychological health. Space has unique conditions for biological studies. Biological samples in the space are subject to various stresses including zero gravity, microgravity, irradiation, vibrations, magnetic fields and microorganisms. The effect of space stresses that living organisms are important for human long-duration missions to space and for the improvement of science and technology. Sending plant biological samples to the space needs the design and construction of plant growth systems. At first, these systems had a simple structure, and then they became more advanced during the flight. The study of these systems is important in terms of their appearance, lighting system, food circulation, ventilation system and temperature. In this paper, plant cultivation systems are studied in Salyut Space Station, Mir, Space Shuttle and International Space Station.

Keywords: Plant cultivation systems, International space station, Space shuttle

H. Hassanpour*, Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Science Research and Technology

F. Mousavi, Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Science Research and Technology

*Corresponding Author, Postal Code: 1465774111, Tehran, IRAN
hassanpour@ari.ac.ir

مقدمه

سیستم رشد گیاهی اوسیسی اولین اتاقک رشد طراحی شده بود که در مأموریت‌های ایستگاه فضایی سالیوت شوروی مورد استفاده قرار گرفت و به صورت اوسیسی ۱، اوسیسی 1M، 1A و 1AM توسعه یافت. در اتاقک‌های رشد سری اوسیسی گیاهچه‌های کتان، تره فرنگی، پیاز، نخود و کلم چینی رشد یافتند. در اوسیسی 1M، سیستم نوری فلورسنت برای روشنایی و سیستم جدید انتقال مواد غذایی استفاده شد (شکل ۱). سیستم نوری طراحی شده اوسیسی برای گیاه نخود مناسب نبود و گیاهچه‌ها را به سمت مرگ سوق داد. اما، این سیستم برای کشت گیاهچه‌های پیاز موفقیت‌آمیز بود و تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر رشد نمودند، به طوری که این گیاهچه‌ها توسط فضانوردان مصرف شدند [۲]. در اوسیسی 1AM، سیستم آبیاری اصلاح شد و در اوسیسی 1A، قابلیت هوادهی ریشه بهبود یافت [۳].



شکل ۱- تصاویری از (الف) اوسیسی 1M و (ب) اوسیسی 1A [۱]

تاکنون، مطالعات زیادی در رابطه با ارزیابی اثر محیط فضا بر روی فرآیندهای رشد گیاه صورت گرفته است. این مطالعات در قالب آزمایش‌های پروازی آزاد، مأموریت‌های کوتاه مدت (شاتل^۱ و شنزو^۲) و بلند مدت پروازی (سالیوت، میر و ایستگاه فضایی بین المللی^۳) انجام شده است. از زمان مأموریت سالیوت ۱، این آزمایش‌ها بخش مهمی از برنامه ایستگاه‌های فضایی بوده است [۱]. گیاهان به عنوان موجودات مدل برای تحقیقات زیستی فضایی به شمار می‌آیند و می‌توانند در تأمین اکسیژن و مواد غذایی برای فضانوردان نقش ایفا نمایند. از طرفی، مطالعات گیاهی در فضا دارای کاربردهای زمینی از جمله ایجاد گونه‌های مقاوم به تنش‌های محیطی، افزایش تولید محصولات زراعی، مقاومت به آفات کشاورزی و افزایش تولیدات دارویی گیاهان می‌باشند. همچنین، تحقیقات گیاهی در فضا با توسعه فناوری همراه بوده است و می‌تواند بستر مناسبی برای درآمدزایی کشور باشد. برای ارسال نمونه‌های گیاهی به فضا، نیاز به سیستم‌ها یا اتاقک‌های مناسب برای رشد گیاهی می‌باشد که در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در ارتباط با این اتاقک‌ها صورت گرفته است و می‌توان آن را به صورت سیستم‌های رشد ایستگاه فضایی سالیوت، ایستگاه فضایی میر، شاتل‌های فضایی و ایستگاه بین‌المللی فضایی تقسیم‌بندی کرد. مطالعه حاضر سیستم‌های رشد گیاهان در فضا را طی مأموریت‌های مختلف فضایی مورد بررسی قرار می‌دهد.

سیستم‌های رشد ایستگاه فضایی سالیوت

در این بخش به اتاقک‌های رشد طراحی شده در مأموریت‌های ایستگاه فضایی سالیوت اشاره می‌شود که شامل اتاقک‌های سری اوسیسی^۴، وازون^۵، مالاکیت^۶، بایوگراوی استت^۷ / مگنتوبایواستت^۸، ستوبلاک^۹ و فیتون^{۱۰} هستند.

سری اوسیسی

وازون
وازون سیستم رشد دیگری بود که در مأموریت‌های سالیوت مورد استفاده قرار گرفت و برخلاف اوسیسی، سیستم نوردهی جداگانه‌ای نداشت و نورپردازی توسط سیستم نورپرداز فضاپیما انجام می‌شد. این سیستم برای رشد گیاهان بایونه طراحی و چندین بار اصلاح شد. در سیستم رشد وازون گیاهچه‌های پیاز، لاله و کالانکوا^{۱۱} به منظور افزایش روحیه فضانوردان کشت یافتند [۴].

مالاکیت

در این سیستم رشد گیاهچه‌ها و بذره‌های ارکیده برای بررسی اثرات روان‌شناختی تعامل فضانوردان با گیاهان انتخاب شدند و در چهار سیستم رشد مالاکیت کشت یافتند (شکل ۲). سیستم مذکور مجهز به یک رزین تبادل یونی، منبع آب و یک سیستم روشنایی بود [۵]. گیاهچه‌ها پس از ارسال به فضا زنده نماندند و پس از مدت کوتاهی از بین رفتند. بذرها

- ۱ Shuttle
- ۲ Shenzhou
- ۳ International Space Station (ISS)
- ۴ Oasis
- ۵ Vazon
- ۶ Malachite
- ۷ Biogravistat/Magnetobiostat
- ۸ Svetoblok
- ۹ Phytton

روزه، اولین گلدهی موفق گیاه در فضا را در این سیستم رشد گزارش کردند، اما هیچ بذر زیست‌پذیری تولید نشد. نسخه‌های به‌روز شده ستوبلاک در ایستگاه فضایی میر نیز مورد استفاده قرار گرفت.

سری فیتون

سیستم‌های رشد سری فیتون اولین بار در مأموریت سالیوت ۶ مورد استفاده قرار گرفتند. سری فیتون شامل فیتون ۱، ۲ و ۳ می‌شد. فیتون ۱ دارای یک عدد لامپ خیلی قوی، محیط تغذیه‌ای و فیلتر برای جذب آلاینده‌های هوا بود. گیاهچه‌های پیاز، خیار، گوجه فرنگی، سیر، هویج، آرابیدوپسیس^۱ و ارقامی از گندم در آن کشت داده شدند که مرحله دوم رشد در آن‌ها موفقیت‌آمیز نبود. فیتون ۲ برای پرورش گیاهچه‌های نخود فرنگی و گندم مورد استفاده قرار گرفت. این سیستم رشد شامل سه منبع نور و محفظه‌های غلاف مانند با قابلیت تبادل تغذیه‌ای برای رشد گیاه بود و گیاهچه‌ها به‌طور خودکار با مقادیر مشخصی آبیاری می‌شدند. [۶]. فیتون ۳ برای پرورش گیاهچه‌های آرابیدوپسیس مورد استفاده قرار گرفت و منجر به گلدهی موفقیت‌آمیز گیاهچه‌ها و تولید بذر شد. این سیستم رشد شامل پنج استوانه شیشه‌ای متحرک برای رشد گیاهچه‌ها بود. همچنین، فیتون دارای یک دستگاه کشت بذر خودکار، یک سیستم تهویه شامل فیلترهای باکتریایی و یک منبع روشنایی مجزا بود [۵-۷].

سیستم‌های رشد گیاهی ایستگاه فضایی میر

ایستگاه فضایی میر روسیه برای طراحی حجم زیادی از آزمایش‌های علمی مورد استفاده قرار گرفت. برنامه فضایی شاتل میر شامل مأموریت مشترک روسیه و ایالات متحده آمریکا روی شاتل فضایی و ایستگاه فضایی میر بود که از سال ۱۹۹۴ آغاز شد. در ایستگاه فضایی میر مطالعات گیاهی صورت گرفت و سیستم‌های رشد گیاهی مختلفی از جمله اسوت^۲ و اسوت-جمز^۳ طراحی و ساخته شد.

اسوت

گلخانه فضایی اسوت اولین بار در تاریخ ۱۵ ژوئن ۱۹۹۰ پس از تعدادی آزمایش‌های سیستمی در ایستگاه فضایی میر مورد استفاده قرار گرفت. این سیستم رشد حاوی یک محفظه گیاهی به مساحت رشد تقریبی ۰/۱ متر مربع، یک سیستم نوری شامل

رشد کردند و به گل نشستند، اما نهایتاً بذری تولید نکردند و از بین رفتند [۲].



شکل ۲- سیستم رشد گیاهی مالاکیت [۱]

بایوگروای استت/مگنتو بایو استت

بایوگروای استت برای بررسی اثرات بی‌وزنی روی اندام‌های هوایی گیاهان عالی در مأموریت سالیوت ۵، ۶ و ۷ مورد استفاده قرار گرفت [۲]. در این سیستم رشد بذرهای خیار، کاهو و دانه‌های جمع‌فرو کشت داده شدند. بایوگروای استت به شکل یک ستاره دریایی عریض ساخته شده بود و می‌توانست با چرخش خود سطوح مختلف جاذبه را ایجاد کند. گیاهچه‌های خیار در این سیستم رشد، برگ‌های کوچکی را ایجاد نمودند و سپس به تدریج خشک شدند. در طی این مأموریت، بهبود سیستم آبیاری توسط فضانوردان نتوانست این مشکل را حل نماید و آب کافی در شرایط میکروگروایتی (بی‌وزنی) در دسترس گیاه قرار ننگرفت. در مأموریت سالیوت ۶، بایوگروای استت به مگنتوبایواستت ارتقا یافت که با استفاده از یک میدان مغناطیسی در اطراف بایوگروای استت اعمال شد. محققین امیدوار بودند که با این تغییر اعمال شده بتوانند فرآیند رشد را در این سیستم بهبود دهند و شرایط رشد گیاهچه‌های کاهو، جو و قارچ را فراهم نمایند [۴].

ستوبلاک

سیستم رشد گیاهی ستوبلاک در مأموریت سالیوت ۷ مورد استفاده قرار گرفت. در این سیستم رشد گیاهچه‌های گوجه فرنگی کشت داده شدند که پس از سه هفته تنها حدود ۷/۵ سانتی‌متر رشد طولی را نشان دادند. ستوبلاک اولین سیستم رشد گیاهی بود که محیطی استریل را برای پرورش گیاه فراهم می‌نمود. پرترفیلد^۴ و همکاران [۵] در یک مأموریت فضایی ۶۵

^۱Arabidopsis

^۲SVET

^۳SVET-GEMS

^۴Porterfield

شاتل فضایی ستون اصلی برنامه پرواز فضایی آمریکا بود. این شاتل نقش کلیدی در ایجاد ایستگاه بین‌المللی فضایی و بسیاری از دیگر مأموریت‌های علمی فضایی (برای مثال تلسکوپ فضایی هابل و ایستگاه فضایی) ایفا نمود. در طول چندین مأموریت، تعدادی از محفظه‌های رشد گیاهی با طراحی‌های مختلف در این شاتل فضایی استفاده شدند که در ادامه به تشریح آن خواهیم پرداخت.

واحد رشد گیاهی (PGU)

اتاقک رشد واحد رشد گیاهی^۶ یا PGU در مأموریت‌های STS-3 و STS-5 شاتل فضایی مورد استفاده قرار گرفت. هدف از طراحی آن بررسی فرآیند رشد و اصلاح گیاهچه‌ها بود. ابعاد هر واحد رشد گیاهی، ۵۱×۳۶×۲۷ سانتی‌متر بود و در یک قفسه کوچک قرار می‌گرفت. هر واحد رشد گیاهی شامل شش اتاقک رشد گیاه و سیستم‌های پشتیبانی کننده رشد گیاه می‌شد. سیستم روشنایی شامل لامپ‌های فلورسانت بود که توسط یک زمان‌سنج کنترل می‌شد. علاوه بر این، دمای محیط توسط فن‌ها و گرم‌کننده‌ها تنظیم می‌شد. اتاقک‌های رشد واحد رشد گیاهی بیش از ۱۵ سال برای آزمایش‌های مختلف فضایی مورد استفاده قرار گرفت [۵، ۱۲].

تسهیلات رشد گیاهی (PGF)

سیستم رشد گیاهی^۷ یا PGF برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ در مأموریت STS-87 شاتل فضایی مورد استفاده قرار گرفت. این تجهیزات رشد گیاهی در واقع یک واحد رشد گیاهی به‌روز شده با همان ابعاد، اما با امکانات پیشرفته بود. در این اتاقک رشد خروجی سیستم روشنایی به میزان زیادی بهبود یافت. علاوه بر این، سیستم مدیریت هوا، قادر به کنترل رطوبت، CO₂، دما و یک فیلتر اتیلن بود [۵، ۱۳].

آستروکالچر

اتاقک‌های رشد سری آستروکالچر^۸ یا ASC در سال ۱۹۹۲ برای اولین بار در مأموریت STS-50 شاتل فضایی مورد استفاده قرار گرفت، از مهمترین این اتاقک‌های آستروکالچر، آستروکالچر ۸ و آستروکالچر TM بودند [۱۴]. این سیستم‌های رشد یک بار هم در ایستگاه فضایی میر مورد استفاده قرار گرفتند. سه آزمایش اول آستروکالچر برای انجام آزمایش‌های سیستمی طراحی شدند و زیرسیستم‌های انتقال آب، مواد غذایی، روشنایی، کنترل رطوبت و دما به آن اضافه شدند [۱۵].

دوازده لامپ کوچک فلورسنت، یک سیستم تهویه هوا برای اکسیژن‌دهی به ریشه‌های گیاه، یک فن با هدف تعدیل دما، یک سیستم تأمین آب، منبع تغذیه و یک واحد کنترلی بود. محفظه گیاهی دارای یک مازول ریشه‌ای متحرک بود که در آن گیاهچه‌ها کشت داده می‌شدند و علاوه بر این دارای مجموعه‌ای از حسگرها برای اندازه‌گیری پارامترهای محیطی مختلف بود. این سیستم قادر به نمایش دمای هوا محفظه پایینی، دمای هوا درون تاج پوشش گیاه، رطوبت و مدت زمان روشنایی بود. حسگرهایی قرار داده شده درون محیط کشت گیاه، قادر به اندازه‌گیری سطح رطوبت و دما بودند [۸، ۹]. گیاهچه‌های تربچه و کلم چینی در سیستم رشد اسوت رشد یافتند. این گیاهچه‌ها ظاهر سالمی داشتند اما در مقایسه با گیاهچه‌های کنترل زمینی رشد کمتری را نشان دادند [۸].

اسوت-جمز

در طول مأموریت شاتل میر، برخی از تجهیزات قدیمی گلخانه فضایی اسوت به‌روز شدند و سیستم‌های جدیدی توسط آمریکایی‌ها به آن اضافه شد. تجهیزات جدید شامل یک سیستم اندازه‌گیری محیطی^۴ یا EMS، یک سیستم نمایشگر تبادلات گازی^۵ یا GEMS و یک سیستم کنترلی جدید بود که منجر به شکل‌گیری سیستم رشد اسوت-جمز شد. در این سیستم رشد، EMS جایگزین حسگر قدیمی شد و تعداد حسگرها به میزان قابل توجهی افزایش یافت. این حسگرها برای کنترل شرایط آب و خاک، دمای برگ، اشعه و اکسیژن مورد استفاده قرار گرفتند. در سیستم رشد جمز، تنها از جریان اصلی هوا برای خنک کردن لامپ‌ها و ایجاد تبادل گازی گیاهان استفاده شد که این جریان به دو جریان هوای ورودی و خروجی جداگانه تقسیم می‌شد. این امر با قرار دادن مازول‌های ریشه گیاه در یک کیسه شفاف با ورودی و خروجی‌های هوای جداگانه حاصل شد. جمز قادر به تجزیه و تحلیل هوای ورودی و خروجی برای تعیین مقدار آب، دی‌اکسیدکربن و فشار مطلق و نسبی بود [۱]. بین سال‌های ۱۹۹۵ و ۱۹۹۷ چندین آزمایش با گندم انجام شد و گلخانه اسوت با هر آزمایش به‌روزرسانی شد [۱۰]. یافته‌های دیگر در طی آزمایش‌های سال‌های ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۷ نشان داد که سطوح بالای اتیلن منجر به تولید بذر عقیم در گندم می‌شد. در نتیجه در آزمایش‌های بعدی گیاهی از فیلترهای اتیلن و ردیابی کنترل آلودگی استفاده شد [۱۱].

سیستم‌های رشد گیاهی شاتل فضایی

۱ Plant Growth Unit (PGU)

۲ Plant Growth Facility (PGF)

۳ Astroculture (ASC)

۴ Environmental Measurement System (EMS)

۵ Gas Exchange Monitoring System (GEMS)

مواد را دارد. در ISS سیستم‌های رشد گیاهی گوناگونی طراحی و اجرا شده است که به بررسی آنها می‌پردازیم.

آستروکالچر پیشرفته (ADVASC)

سیستم رشد آستروکالچر پیشرفته^{۲۱} یا ADVASC اولین سیستم رشد مورد استفاده در ISS بود. طراحی این سیستم برگرفته از سیستم رشد آستروکالچر اصلی بود. اما، اندازه آن دو برابر بود و نیاز به دو حامل آزمایشگاهی استاندارد برای حمل در فضاپیما داشت [۲۰ و ۵]. آستروکالچر پیشرفته به‌طور خودکار قادر به ایجاد شرایط محیطی ثابت برای کشت گیاه تحت شرایط بی‌وزنی بود. بخش پایینی این سیستم رشد حاوی تمامی سیستم‌های پشتیبانی از جمله اتاقک رشد گیاهی، ماژول کنترل نور، واحد کنترل دما و رطوبت، یک سیستم انتقال مواد مغذی مایع و کنترل جوی اتاقک بود و بخش بالایی اتاقک رشد گیاهی را شامل می‌شد (شکل ۴) [۲۱]. انواع مختلفی از سیستم‌های رشد آستروکالچر پیشرفته برای آزمایش‌های بذر به بذر، بررسی چرخه زندگی کامل نسل دوم و همچنین نحوه بیان ژن‌ها در آراییدوپسیس و سویا تحت شرایط بی‌وزنی مورد استفاده قرار گرفتند [۲۱].



شکل ۴- اتاقک رشد گیاهی آستروکالچر پیشرفته [۱]

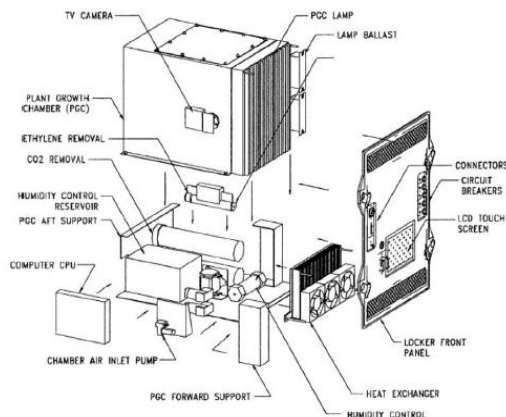
سیستم تولید بیومس (BPS)

سیستم تولید بیومس^{۲۲} یا BPS، در واقع نوعی اتاقک رشد گیاهی بود که در سال ۲۰۰۲ در طی مأموریت ایکسپدیشن^{۴۳} در ISS مورد استفاده قرار گرفت. این سیستم برای تأیید زیرسیستم‌ها تحت شرایط مداری طراحی شد. BPS حاوی چهار محفظه اختصاصی رشد گیاه بود. هر محفظه سیستم کنترل مستقل به خودش را برای دما، رطوبت، نور و CO₂ داشت. یک

۱۷]. زیرسیستم کنترل PH، کنترل ترکیبات مواد غذایی، کنترل CO₂ و آلودگی اتمسفری نیز به‌تدریج به این سیستم رشد اضافه شدند. برای منطقه کشت آستروکالچر، محدوده‌ای به وسعت ۱۷۷ سانتی‌متر مربع، ارتفاع ۲۳ سانتی‌متر برای ساقه و ۴/۵ سانتی‌متر برای ریشه در نظر گرفته شد. آستروکالچر شامل سیستم کنترل رطوبت و دما، سیستم نورپردازی LED، سیستم کنترل انتقال سیال و یک واحد حذف اتیلن بود. در این سیستم رشد بوته‌های رز رشد یافتند و اثرات بی‌وزنی روی تولید اسانس طبیعی بررسی شد [۱۴].

دستگاه فراوری زیستی عمومی گیاه (PGBA)

دستگاه فراوری زیستی عمومی گیاه^۱ یا PGBA که از دستگاه فراوری زیستی عمومی^۲ یا GBA مشتق شده است، در چندین مأموریت شاتل فضایی (STS-50، STS-54، STS-57، STS-60، STS-62، STS-63، STS-69، STS-73، STS-77، STS-83 و STS-94) مورد استفاده قرار گرفت. مانند آستروکالچر TM، این سیستم رشد درون دو حامل آزمایشگاهی استاندارد قرار می‌گرفت. ساختار خود کنترلی، اتاقک رشد گیاهی، سیستم کنترل دما و زیرسیستم الکتریکی بخشی از دستگاه فراوری زیستی عمومی گیاه بودند (شکل ۳) [۱۸ و ۱۹].



شکل ۳- طرح مونتاژی گسترده از PGBA اکتشافی [۱]

سیستم‌های رشد گیاهی ایستگاه بین‌المللی فضایی (ISS)

ایستگاه بین‌المللی فضایی بزرگترین آزمایشگاه ساخته شده دست بشر در مدار زمین است و قابلیت‌های منحصر به فردی برای طیف گسترده‌ای از آزمایش‌های علوم زیستی و فیزیک

^{۲۱}Advanced Astroculture (ADVASC)

^{۲۲}Biomass Production System

^{۲۳}Expedition

^۱Plant Generic Bioprocessing Apparatus (PGBA)

^۲Generic Bioprocessing Apparatus (GBA)

ویدئویی برای آزمایش‌ها بود. مخزن آزمایشگاهی این سیستم، ۶۰ میلی‌متر ارتفاع، ۶۰ میلی‌متر عرض و ۱۶۰ میلی‌متر طول داشت و حجم داخلی آن ۰/۵۸ لیتر بود [۲۹]. سیستم کشت ماژول اروپایی برای انجام آزمایش‌های مختلف فیزیولوژی و رشد گیاه استفاده می‌شد [۳۰].

واحد آزمایش گیاهی (PEU)

اتاقک رشد واحد آزمایش گیاهی^۸ (PEU) در مأموریت STS-128 ایستگاه بین‌المللی فضایی مورد استفاده قرار گرفت [۳۱]. هر واحد آزمایش گیاهی، ۹۵ میلی‌متر ارتفاع، ۲۴۰ میلی‌متر عرض و ۱۷۰ میلی‌متر عمق داشت و حاوی سیستم روشنایی LED با نورهای قرمز و آبی، اتاقک رشد، سیستم آبیاری خودکار و دوربین CCD بود. این اتاقک رشد، فضایی به ارتفاع ۴۸ میلی‌متر، عرض ۵۶ میلی‌متر و عمق ۴۶ میلی‌متر فراهم می‌نمود (شکل ۵). بخش پایین‌تر محفظه، بستری برای تأمین رطوبت گیاه بود.



شکل ۵- مدل پروازی PEU [۱]

سیستم تحقیقات زیستی پیشرفته (ABRS)

سیستم تحقیقات زیستی پیشرفته^۹ یا ABRS در سال ۲۰۰۹ در مأموریت STS-129 ایستگاه بین‌المللی فضایی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۶). این سیستم درون یک عدد حامل آزمایشگاهی استاندارد به‌صورت مجزا قرار می‌گرفت. بخش اصلی سیستم تحقیقات زیستی پیشرفته دو اتاقک تحقیقاتی آزمایشگاهی^۳ برای انجام آزمایش‌های گیاهی، میکروبی و دیگر نمونه‌های کوچک بود. هر اتاقک تحقیقاتی دارای مساحت رشد ۲۶۸ سانتی‌متر مربع با ۵ سانتی‌متر ارتفاع برای ناحیه ریشه و ۱۹ سانتی‌متر برای ناحیه ساقه بود. اتاقک‌ها مجهز به پانل کنترل محیطی، سیستم تصفیه هوای ورودی و یک ماژول

سیستم انتقال مواد غذایی نیز بخشی از این محفظه رشد بود. این سیستم با عمق ۵۲ سانتی‌متر، عرض ۴۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۵ سانتی‌متر بود. جرم کل ۵۴/۴ کیلوگرم و مساحت کل رشد ۱۰۴۰ سانتی‌متر مربع بود که به‌طور مساوی بین چهار محفظه، هر کدام ۲۶۰ سانتی‌متر مربع تقسیم می‌شد [۲۲].

لادا

سیستم رشد گیاهی لادا^۴ در سال ۲۰۰۲ در ISS مورد استفاده قرار گرفت [۲۳]. این سیستم به‌طور تقریبی حاوی تجهیزات سیستم رشد اسوت-جمز بود. زیرسیستم‌های لادا شامل چهار ماژول بودند که عبارتند از: ماژول کنترل و نمایش، دو ماژول رشد و یک مخزن آب. دو ماژول رشد می‌توانستند به‌طور مستقل کنترل شوند و شامل یک مخزن نور، یک محفظه برگ و یک ماژول ریشه‌ای می‌شدند [۲۴]. مخزن نور دارای لامپ‌های فلورسنت یا LEDها و یک حسگر نصب شده بر روی مخزن بود [۲۵]. حسگر قادر به اندازه‌گیری دمای هوا و نور در سه سطح مختلف بود. اتاقک ۲۵ سانتی‌متر ارتفاع داشت و دارای محفظه‌هایی با ارتفاع متفاوت برای غلات مختلف بود. برای بهبود سیستم روشنایی، دیواره‌های اتاقک با یک فیلم انعکاسی پوشانده شده بود. ماژول ریشه‌ای که وظیفه حفظ مواد برای ریشه را بر عهده داشت و عمق آن ۹ سانتی‌متر بود. چندین گیرنده داخل این ماژول داشت تا رفتار ریشه گیاه را مورد بررسی قرار دهد. شش رطوبت‌سنج و شش کشش‌سنج کوچک در سه سطح تنظیم می‌شدند تا اطلاعات را در سرتاسر منقطه ریشه جمع‌آوری نمایند. علاوه‌براین، دو جفت رطوبت‌سنج و چهار حسگر O₂ در ماژول ریشه قرار داشتند. در این سیستم رشد اثرات روانشناختی برهمکنش بین گیاهان و فضانوردان بررسی شد و گیاهچه‌های نخود اصلاح شده ژنتیکی نیز در طی پنج آزمایش در لادا رشد یافتند [۲۶].

سیستم کشت ماژول اروپایی (EMCS)

سیستم کشت ماژول اروپایی^۵ یا EMCS برای انجام تحقیقات گیاهی در مأموریت STS-121 ایستگاه بین‌المللی فضایی و همچنین توسط آژانس اکتشاف فضایی ژاپن^۷ مورد استفاده قرار گرفت [۲۷، ۲۸]. سیستم کشت ماژول اروپایی دارای دو چرخاننده برای اعمال سطوح مختلف جاذبه (۰/۰۰۱-۰/۲) متر بر مجذور ثابته بود. هر چرخاننده قادر به پشتیبانی چهار مخزن آزمایشگاهی بود. همچنین، این سیستم رشد دارای سیستم پشتیبان حیات ساده، مخازن، لامپ‌ها و سیستم دوربین

^۴Lada

^۵European Modular Cultivation System

^۶European Modular Cultivation System (EMCS)

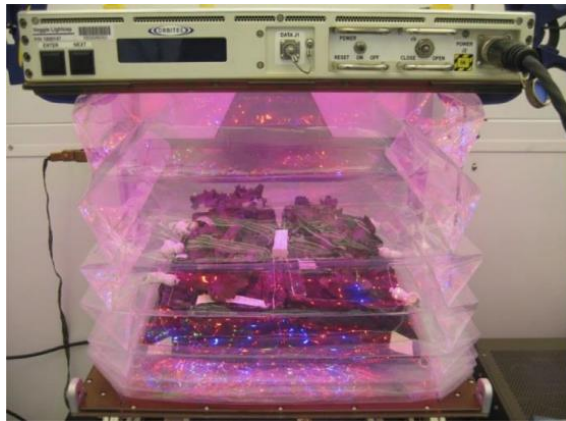
^۷The Japanese Aerospace Exploration Agency

^۲Plant experiment unit (PEU)

^۳Advanced Biological Research System (ABRS)

^۳Experimental Research Chambers (ERCs)

نمی‌کرد و لازم بود که فضاوردان گیاه را با محلول آب و مواد مغذی تغذیه نمایند [۳۳]. محصولات تولید شده در سیستم وگی از جمله کاهو که مطابق با استانداردهای میکروبیولوژی ناسا پرورش یافته بودند، برای اولین بار در دهم آگوست ۲۰۱۵، توسط فضاوردان به صورت رسمی مورد استفاده قرار گرفتند.

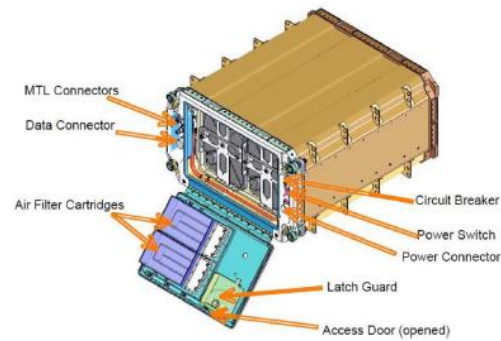


شکل ۷- سیستم رشد وگی در ایستگاه بین‌المللی [۱]

نتیجه گیری

در طول چند دهه گذشته اتاقک‌های رشد زیادی برای مطالعات گیاهی فضایی طراحی شده است. اندازه، شکل و امکانات این اتاقک‌ها در هر مأموریت نسبت به مأموریت قبلی تغییر نموده است و فناوری‌های ایجاد شده در زیرسیستم‌های مختلف اتاقک‌ها موجب توسعه بیشتر آن‌ها شد. همچنین، مساحت رشد در دسترس در هر سیستم کشت با گذشت زمان افزایش یافت. اما، با این وجود برای افزایش تولید بیوماس در ایستگاه بین‌المللی فضایی نیاز به توسعه بیشتر سیستم‌های رشد فضایی می‌باشد. از طرف دیگر، اگرچه اتاقک‌های رشد در مقیاس بزرگتر منجر به تولید بیشتر محصول خواهند شد، اما امروزه سیستم‌های رشد کوچک مقیاس به دلیل تمرکز مطالعات در زمینه علوم پایه گیاهی و درک فیزیولوژی و عملکرد گیاه ترجیح داده می‌شوند. آبیاری بهینه در ریشه تحت شرایط بی‌وزنی همواره به‌عنوان یک چالش مهم سیستم آبیاری اتاقک‌های رشد فضایی مطرح بوده است. بدین منظور در برخی از اتاقک‌های رشد فضایی از قبیل ABRS و EMCS از سیستم‌های انتقال آب و مواد غذایی استفاده شد. به هر حال، تولید سیستم‌های انتقال با مقیاس کوچکتر در تحقیقات فضایی آینده اهمیت زیادی دارد. راهکارهای کاهش انرژی مصرفی در سیستم‌های تولید مواد غذایی فضایی می‌تواند به‌عنوان یک اولویت تحقیقاتی مهم در آینده به‌شمار آید. هدف مهم دیگر اتاقک‌های

نوری LED (حاوی ۳۰۳ عدد LED قرمز و آبی و تعدادی سبز و سفید) با قله طیفی ۴۷۰ و ۶۶۰ نانومتر بودند. پانل کنترل محیطی قادر به کنترل دما، رطوبت نسبی و سطح CO₂ بود. یکی از اتاقک‌های تحقیقاتی مجهز به سیستم تصویربرداری پروتئین فلورسانت سبز^۳ (GFP) برای بررسی ارگانیسم‌ها با ژن‌های تغییر یافته بود [۳۲].



شکل ۶- نمای کلی از سیستم تحقیقاتی زیستی پیشرفته (ABRS) [۱]

وگی

سیستم تولید مواد غذایی وگی^۳ (شکل ۷)، پیشرفته‌ترین اتاقک رشد طراحی شده توسط ناسا می‌باشد که در اوایل سال ۲۰۱۴ راه اندازی شد. وگی اولین سیستم برای تولید غذا تحت شرایط بی‌وزنی بود. یک طراحی قابل انعطاف به وگی اجازه می‌داد تا ۱۰٪ حجمش کوچک شود. در بازگشت به زمین، شش واحد وگی می‌توانست در یک عدد حامل آزمایشگاهی استاندارد قرار داده شود. هر واحد وگی شامل سه زیرسیستم اصلی، زیرسیستم روشنایی، محفظه سیلندر^۳ و ماتریس ریشه بود که مساحت منطقه رشد آن ۰/۱۷ سانتی‌متر مربع و ارتفاع آن متغیر بین ۵ تا ۴۵ سانتی‌متر بود. یک پانل LED شامل LED های قرمز، آبی و سبز برای زیرسیستم روشنایی مورد استفاده قرار می‌گرفت. پانل قادر به ارائه بیش از ۳۰۰ میکرومول بر مجذور ثانیه روشنایی به گیاهان بود. محفظه سیلندر، محیط رشد گیاه را از کابین فضاپیما جدا می‌کرد تا نوعی خود کنترلی برای گیاهچه‌ها ایجاد و رطوبت بالای محفظه رشد حفظ شود. این محفظه توسط یک ساختار قابل انعطاف احاطه می‌شد که اجازه تنظیم فاصله بین زیرسیستم نورپردازی و ماتریس ریشه را می‌داد. ماتریس ریشه نقش مهمی در انتقال مواد مغذی ایفا

^۳Green Fluorescent Protein (GFP)

^۳VEGGIE

^۳Bellows Enclosure

Development in Brassica Rapa L. in Microgravity," *The International Journal of Plant Sciences*, Vol. 161, 2000, pp. 203–211.

- [14] Zhou, W., Duffie, N.A. and Mookherjee, B., "Performance of the Astroculture TM Plant Growth unit (ASC-8) During the STS-95 Mission," *30th International Conference on Environmental Systems*, Toulouse, 2000.
- [15] Bula, R.J., Tennessen, D.J., Morrow, R.C., and Tibbitts, T.W., "Light Emitting Diodes as a Plant Lighting Source," *International Lighting in Controlled Environments Workshop, University of Wisconsin*, 1994.
- [16] Duffie, N.A. and et al., "Humidity and Temperature Control in the ASTROCULTURE TM Flight Experiment," *24th International Conference on Environmental Systems, Friedrichshafen*, 1994.
- [17] Morrow, R.C., Bula, R.J., Tibbitts, T.W. and Dinauer, W.R., "The Astroculture Flight Experiment Series, Validating Technologies for Growing Plants in Space," *Advances in Space Research*. Vol. 14, 1994, pp. 29–37.
- [18] Musgrave, M.E., Kuang, A. and Porterfield, D.M., "Plant Reproduction in Spaceflight Environments," *Gravitational and Space Biology Bulletin*, Vol. 10, 1997, pp. 83–90.
- [19] Hoehn, et al., "Mass Transport in a Spaceflight Plant Growth Chamber," *28th International Conference on Environmental Systems. Danvers, Massachusetts*. 1998.
- [20] Zhou, W. and et al. "Performance of the Advanced Astruculture TM Plant Growth unit During ISS-6A/7A Mission," *32nd International Conference on Environmental Systems. San Antonio*, 2002.
- [21] Zhou, W., "Advanced Astroculture TM Plant Growth unit: Capabilities and Performances," *35th International Conference on Environmental Systems, Rome*, 2005.
- [22] Evans, C.A. and et al., "International Space Station Science Research Accomplishments During the Assembly Years: an Analysis of Results from 2000-2008," http://www.nasa.gov/pdf/389388main_ISS%20Science%20Report_20_090_030907.pdf, 2009.
- [23] Ivanova, T., "Greenhouse aboard Mir Shows Plants Can Survive in Space," *21st Century*, 2002, pp. 41–49.
- [24] Bingham, G.E., Topham, T.S., Mulholland, J.M., and Podolsky, I.G., "Lada: the ISS Plant Substrate Microgravity Tested," *32nd International Conference on Environmental Systems. San Antonio*, 2002.
- [25] Bingham, G.E. and et al., "Lada: ISS Plant Growth Technology Checkout," *33rd International Conference on Environmental Systems, Vancouver*, 2003.

رشد گیاهی آینده، بهبود سیستم اتوماسیون برای نظارت بر سلامت و رشد گیاه خواهد بود.

مراجع

- [1] Zabel, P., Bamsey, M., Schubert, D. and Tajmar, M., "Review and Analysis of over 40 Years of Space Plant Growth Systems," *Life Sciences in Space Research*, Vol. 10, 2016, pp. 1-16.
- [2] Harvey, B. and Zakutnyaya, O., *Russian Space Probes: Scientific Discoveries and Future Missions*, Springer, New York, 2011.
- [3] Halstead, T.W. and Dutcher, F.R., "Experiments on Plants Grown in Space. Status and Prospects," *Annals of Botany*, Vol. 54, 1984, pp. 3–18.
- [4] Zimmerman, R., *Leaving Earth: Space Stations, Rival Superpowers, and the Quest for Interplanetary Travel*. J. Henry Press, Washington, D.C., 2003.
- [5] Porterfield, D.M., Neichitailo, G.S., Mashinski, A.L., and Musgrave, M.E., "Spaceflight Hardware for Conducting Plant Growth Experiments in Space: the Early Years 1960 – 2000," *Advances in Space Research*. Vol. 31, 2003, pp. 183–193.
- [6] Harland, D., *The Story of the MIR Space Station*, Springer, Dordrecht, 2004.
- [7] Salisbury, F.B., "Growing Crops for Space Explorers on the Moon, Mars, or in Space", *Advances in Space Biology and Medicine*, Vol. 7, 1999, pp. 131-132.
- [8] Ivanova, T.N., Bercovich, Y., Mashinskiy, A.L., and Meleshko, G.I., "The First Space Vegetables Have Been Grown in the SVET Greenhouse Using Controlled Environmental Conditions," *Acta Astronautica*, Vol. 29, 1993, pp. 639–644.
- [9] Ivanova, T. and et al. "SVET Space Greenhouse Onboard Experiment Data Received from 'MIR' Station and Future Prospects," *Advances in Space Research*, Vol 14, No. 11 1994, pp. 343–346.
- [10] Ivanova, T., "Plant Biology under Space Factors: Microgravity," *4th International AgroSpace Workshop. Sperlonga*, 2010.
- [11] Campbell, W.F. and et al., "Comparative Floral Development of Mir-grown and Ethylene-treated, Earth-grown Super Dwarf Wheat," *The Journal of Plant Physiology* Vol. 158, 2001, pp. 1051–1060.
- [12] Cowles, J.R., Scheld, H.W., Lemay, R. and Peterson, C., "Growth and Lignifications in Seedlings Exposed to Eight Days of Microgravity," *Annals of Botany* Vol. 54, 1984, pp. 33–48.
- [13] Kuang, A., Popova, A., Xiao, Y., and Musgrave, M.E., "Pollination and Embryo

- Advances in Space Research*, Vol. 36, 2005, pp. 1162–1166.
- [31] Yano, S., et al., “Improvements in and Actual Performance of the Plant Experiment Unit Onboard Kibo, the Japanese Experiment Module on the International Space Station,” *Advances in Space Research*, Vol. 51, 2013, pp. 780–788.
- [32] Levine, H., et al. “The Advanced Biological Research System (ABRS): a Single Middeck Payload for Conducting Biological Experimentation on the International Space Station,” *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Orlando, 2009.
- [33] Morrow, R.C. and et al., “A Low Equivalent System Mass Plant Growth Unit for Space Exploration,” *35th International Conference on Environmental Systems*. Rome, 2005.
- [26] Sychev, V.N. and et al., “Spaceflight Effects on Consecutive Generations of Peas Grown Onboard the Russian Segment of the International Space Station,” *Acta Astronautica*, Vol. 60, 2007, pp. 426–432.
- [27] Solheim, B., “3D Information from 2D Images Recorded in the European Modular Cultivation System on the ISS,” *Advances in Space Research*, Vol. 44, 2009, pp. 1382–1391.
- [28] Kamada, M., et al., “JAXA Space Plant Research on the ISS with European Modular Cultivation System,” *Biological Sciences in Space*, Vol. 21, 2007, pp. 62–66.
- [29] Brinckmann, E., “Spaceflight Opportunities on the ISS for Plant Research —The ESA Perspective,” *Advances in Space Research*, Vol. 24, 1999, pp. 779–788.
- [30] Brinckmann, E., “ESA Hardware for Plant Research on the International Space Station,”