Journal of Space Science, Technology& Applications (Persian)
Vol. 4, No. 2, pp.: 127-134
2025

Available in:
Journal.isrc.ac.ir

DOI:
10.22034/jssta.2024.472689.1203

Article Info

Received: 2024-08-10
Accepted: 2025-01-07

Keywords

Simulated microgravity, Magnetic levitation, Plant cell, Magnetophoresis, Gene expression

How to Cite this article

Halimeh Hassanpour, ”A review on Simulated Microgravity with Magnetic Levitation in Plant Research: experimental design and cellular responses”, *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 4 (2), p.:127-134, 2025.

Reviewed Article

A review on Simulated Microgravity with Magnetic Levitation in Plant Research: experimental design and cellular responses

Halimeh Hassanpour

Assistant Professor, Aerospace research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran, hassanpour@ari.ac.ir

Abstract

Studying the microgravity effect on biological samples requires biological experiments using flight facilities such as space shuttle, biological satellites, and the International Space Station, but biological studies in space are expensive and rare, and requires simulation techniques on the ground. Therefore, ground facilities such as two-dimensional clinostat, random position machine, and magnetic levitation are used to create simulated microgravity. The biological sample is suspended under a high gradient magnetic field and simulated microgravity is applied. Using this method, environments with low or high gravity can be created and the effect of magnetic field and microgravity can be investigated on biological samples. This technique has many advantages compared to other methods for achieving microgravity, including unlimited testing time and fast achievement of microgravity. Also, by changing the intensity of magnetic field, it is possible to simulate gravity on the surface of the moon or Mars. In this research, different types of magnetic levitation using electromagnetic field and magnet and the challenges of designing biological experiments will be investigated. Also, the gene expressions in response to magnetic levitation and the mechanism of cell growth through different phases of the cell cycle will be studied.

مقاله مروری

مروری بر شبیه‌سازی میکروگرانویتی با شناوری مغناطیسی در تحقیقات گیاهی: طراحی آزمایش و پاسخ‌های سلولی

حلیمه حسن پور

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

دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی

سال چهارم، شماره ۲، صفحه ۱۳۴-۱۲۷

پاییز و زمستان ۱۴۰۳

دسترس‌پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

DOI:

10.22034/jssta.2024.472689.1203

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸/

واژه‌های کلیدی

میکروگرانویتی شبیه‌سازی شده، شناوری مغناطیسی، سلول گیاهی، مگنتوفورز، بیان ژن

نحوه استناد به مقاله

حلیمه حسن پور، "مروری بر شبیه‌سازی میکروگرانویتی با شناوری مغناطیسی در تحقیقات گیاهی: طراحی آزمایش و پاسخ‌های سلولی"، *دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی*، جلد چهارم، شماره دوم، صفحات ۱۳۴-۱۲۷، ۱۴۰۳.

چکیده

مطالعه اثر میکروگرانویتی روی نمونه های زیستی، نیاز به انجام آزمایشات زیستی با استفاده از تسهیلات پروازی نظیر راکت های کاوشی، ماهوارهای زیستی و ایستگاه بین المللی فضایی دارد، اما آزمایشات زیستی در فضا پرهزینه و نادر بوده و نیاز به تکنیک‌های شبیه‌سازی روی زمین دارد. بنابراین از تسهیلات زمینی نظیر کلینواستت دوبعدی، ماشین چرخش تصادفی و شناوری مغناطیسی برای شبیه‌سازی میکروگرانویتی استفاده می‌نمایند. نمونه زیستی تحت میدان مغناطیسی با گرادیان بالا بصورت معلق قرار گرفته و میکروگرانویتی شبیه‌سازی اعمال می شود. با استفاده از این روش می‌توان محیط‌هایی با سطح جاذبه پائین و یا بالا ایجاد نمود و تاثیر میدان مغناطیسی و میکروگرانویتی را روی نمونه‌های زیستی بررسی نمود. این تکنیک دارای مزایای بسیاری در مقایسه با روش‌های دیگر برای دستیابی به میکروگرانویتی است که از جمله آن زمان نامحدود آزمایش و دستیابی سریع به میکروگرانویتی است. همچنین با تغییر شدت میدان، امکان شبیه‌سازی جاذبه در سطح ماه یا مریخ فراهم می شود. در این پژوهش، انواع مختلف شناوری مغناطیس با استفاده از میدان الکترومغناطیس و آهن ربا و چالش های طراحی آزمایشات زیستی بررسی خواهد شد. همچنین به بررسی پاسخ های ژنی و پروتئومیکی تحت شناوری مغناطیسی و مکانیسم رشد سلولی از طریق فازهای مختلف چرخه سلولی پرداخته خواهد شد.

۱- مقدمه

از زمان پیدایش حیات روی زمین، موجودات زنده تحت تأثیر جاذبه تقریباً ثابت g ۱ و میدان مغناطیسی قرار دارند و طی تکامل مکانیسم‌های مختلفی برای مقابله با چالش وزن موجود زنده بکار گرفته شده است. تاثیر جاذبه بر فیزیولوژی موجود زنده با افزایش وزن موجود افزایش می یابد، اما در موجودات آبزی، اثر جاذبه تا حدودی توسط شناوری کاهش می‌یابد. در گیاهان تاثیر جاذبه از طریق سلول‌های تخصصی استاتوسیت و ته نشین شدن استاتولیت‌ها درک می‌شود، گرچه گزارشاتی از درک جاذبه توسط سلول های غیر تخصصی نیز ارائه شده است [۱].

برای ایجاد میکروگراویتی و خنثی‌سازی نیروی جاذبه، می‌توان روش‌های تکنولوژیکی مختلفی را انتخاب نمود که بر پایه‌ی دو اصل فیزیکی مکانیک و مغناطیس هستند، البته انتخاب نهایی روش به نوع نمونه زیستی و آنالیزهای آزمایشگاهی بستگی دارد. برای مطالعه اثر محیط میکروگراویتی، نمونه ها بایستی تحت پرتاب های فضایی، راکت های کاوشی و یا تسهیلات زمینی شبیه ساز میکروگراویتی قرار گیرند. بعلاوه، تسهیلات زمینی نظیر شبیه‌سازهای میکروگراویتی در دسترس بوده و امکان ایجاد کاهش جاذبه و یا حتی جاذبه صفر را با استفاده از کلینواستت سه بعدی فراهم می‌کنند که در چندین دهه مورد استفاده قرار گرفته است [۲]. اما همچنان این سوال مطرح می شود که آیا استفاده از چنین ماشین‌هایی می‌تواند یک محیط بی‌وزنی را ایجاد نمایند و با ایجاد اختلال مکانیکی نوعی تحریک جاذبه‌ای همه جانبه را فراهم می نماید؟

جاذبه سطح ماه g ۰/۱۷ و مریخ g ۰/۳۸ با شدت بالای میدان مغناطیسی است و می‌تواند نه تنها بدن فضانورد، بلکه نمو گیاهان، از اجزای ضروری سیستم پشتیبان حیات را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۳]. شدت میدان مغناطیسی سطح زمین از ۳۰ تا ۶۰ میکروتسلا متغیر بوده، ولی در تکنیک‌های تشخیصی پزشکی نظیر تصویربرداری روزونانس مغناطیسی از میدان هایی با شدت بالا در زمان کوتاه تا ۱۳ تسلا نیز استفاده می‌شود، بدون آنکه آثار سوء ظاهری طولانی مدت روی سلول‌ها داشته باشد [۴]. با این وجود، گزارشاتی هم وجود دارد که بیانگر اثر قابل توجه میدان مغناطیسی قوی بر رفتار و رشد موجود زنده [۵]، تخمک زایی مگس سرکه [۶] و بیان ژن آرابیدوپسیس [۷] است. شایان ذکر است که حساسیت مغناطیسی مواد در سطح ملکولی (نظیر آب، پروتئین و غیره) اساس پدیده شناوری دیامغناطیس و میکروگراویتی شبیه‌سازی است. سلول‌ها تحت نیروی میدان مغناطیسی با انرژی و گرادیان بالا از میدان دور شده که بدلیل حضور آب به عنوان ترکیب اصلی سلول و یا دیگر ماکروملکول‌ها است. البته بایستی اشاره نمود که بدلیل حساسیت متفاوت مواد دیامغناطیس سلولی، اثرات ثانویه میدان مغناطیسی متفاوت بوده و بایستی مورد بررسی قرار گیرد [۲].

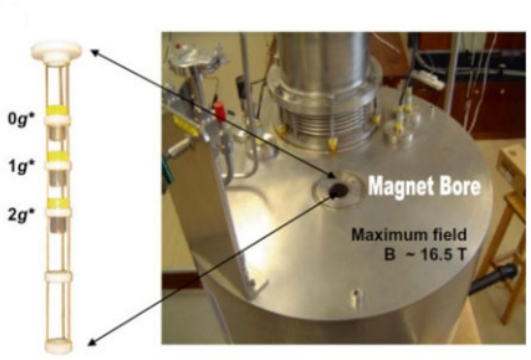
شناوری مغناطیسی را می توان با استفاده از دستگاه الکترومغناطیسی و یا آهن ربا (مگنتورفورز) ایجاد نمود. در تکنیک شناوری مغناطیسی با الکترومغناطیس می توان جاذبه پائین (میکروگراویتی) و بالا (هایپرگراویتی) را مورد مطالعه قرار داد. این تکنیک دارای مزایایی از جمله ایجاد میکروگراویتی پایدار و سهولت ایجاد میکروگراویتی است که در تحقیقات بیوتکنولوژی و مهندسی بافت کاربرد دارد [۸ و ۹]. با توجه به اینکه گیاهان از عناصر ضروری سیستم پشتیبان حیات هستند، طراحی این سیستم می تواند اثر برهم کنشی میکروگراویتی و میدان مغناطیسی را برای مطالعات زیستی ماه و مریخ فراهم نماید. بنابراین هدف از این پژوهش آشنایی با اصول کار شبیه سازی میکروگراویتی با استفاده از دستگاه الکترومغناطیسی یا مگنتوفورز، بررسی چالش ها و محدویت های آزمایش هریک از روش ها و همچنین بررسی پاسخ های سلولی و ملکولی می باشد.

۲- اصول کار شناوری مغناطیسی با روش الکترومغناطیس

رویکرد نسبتا جدید برای مطالعه پاسخ موجودات زنده به تغییر جاذبه، استفاده از شناوری دیامغناطیسی است [۱۰]. از آنجایی که مواد دیامغناطیس توسط میدان مغناطیسی دفع می شوند، هنگام قرار گیری یک نمونه دیامغناطیس در مرکز میدان مغناطیسی با شدت بالا، نمونه از ناحیه مرکز با شدت بالای میدان مغناطیسی دور شده، سطح میدان مغناطیسی کمتری روی نمونه اعمال گشته و در یک نقطه حالت شناوری (شتاب جاذبه صفر) ایجاد می شود. اندازه این نیرو متناسب با حاصلضرب شدت میدان ضربدر گرادیان میدان (مشتق فضایی میدان) است [۲]. هنگامیکه این نیرو به اندازه کافی قوی باشد، می تواند منجر به تعادل و شناوری نمونه شود. البته با تنظیم شدت میدان مغناطیسی می توان نیروی میدان را تغییر داد. از آنجائیکه بخش

عمده ای از سلول زنده از مواد دیامغناطیس تشکیل شده است، ارگانیسم‌ها را می توان با استفاده از نیروی مغناطیس معلق نمود. این تکنولوژی از سال ۲۰۰۵ در دسترس محققین زیست فضا برای انجام میکروگراویتی شبیه‌سازی شده قرار گرفت [۱۱]. مدت زمان آزمایش یک فاکتور کلیدی و مهم است و بسته به نوع نمونه متفاوت است. شدت‌های میدان مغناطیسی می تواند از ۱۵ تا ۳۰ تسلا باشد. این شدت از میدان، برق زیادی مصرف نموده و نیاز به خنک‌سازی دارد. تکنولوژی کرایوژنیک می‌تواند در طول آزمایش دمای نمونه را تنظیم نماید. از طرفی، معمولا فضای قرار گیری نمونه دارای قطر کوچک، در حدود ۴-۵ سانتی‌متر است. بنابراین بایستی اندازه نمونه کوچک باشد و ظروف قرار گیری نمونه نیز جنس غیر مغناطیس داشته باشد. همچنین می‌بایست نمونه‌ها در محل دقیق (مرکز میدان) قرار گیرند که در آن اثر جاذبه‌ای موثر g ۱ وجود داشته باشد (شکل ۱) [۱۲].

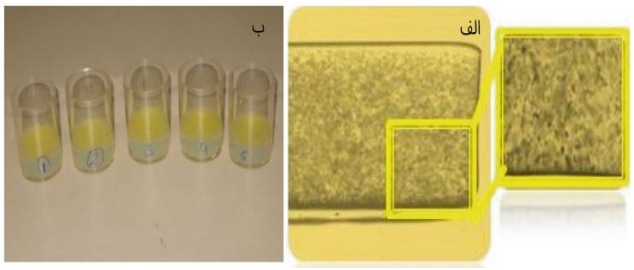
در آزمایش شناوری مغناطیسی روی گیاه آرابیدوپسی، نمونه در مرکز میدان با شدت ۱۶/۵ تسلا و نیروی جاذبه g ۱ قرار گرفت (بدون شناوری). نمونه در فاصله ۸۰ میلی‌متری بالای مرکز میدان شناور شد که در آن جاذبه صفر بود. از طرفی در ۸۰ میلی‌متر زیر مرکز میدان، جاذبه g ۲ نیز ایجاد می شود [۱۲ و ۱۳].



شکل ۱. تصویر دستگاه شناوری مغناطیسی برای مطالعه گیاهچه‌ها [۱۲].

در آزمایشات سلولی، سلول‌ها بایستی به سطح چسبیده باشند و در لوله‌هایی به ارتفاع تقریبی ۴۰/۸ میلی‌متر و به قطر ۲۵ میلی‌متر کشت شوند. کشت‌ها بایستی از بالا تا پایین به شکل نواری باشند. بهتر است کشت کالوس در ضخامت ۱ تا ۲ میلی‌متر در سطح محیط کشت با قطر ۱ سانتی‌متر انجام شود. زیرا ضخامت خیلی کم کشت سلولی سبب شده تا تغییر میدان مغناطیسی و نیروی جاذبه بسیار جزئی باشد. کالوس‌ها بایستی یک هفته قبل از شروع آزمایش روی سطح آگار کشت شوند و در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد قرار گیرند تا تثبیت گردند. بعد از اعمال تیمار میکروگراویتی شبیه سازی شده تحت شناوری مغناطیسی، سلول‌ها به سرعت در نیتروژن مایع و در ۸۰- درجه سانتی‌گراد فریز شوند [۲].

در کشت مایع سوسپانسیون سلولی نیز محدودیت‌هایی وجود دارد. سلول‌ها تحت تسهیلات شناوری مغناطیسی با الکترومغناطیس ممکن است رسوب شوند. رسوب حتی در نمونه ی صفر g هم اتفاق می‌افتد. در این صورت بایستی شدت میدان مغناطیسی را افزایش داد تا مانع رسوب سلول‌ها شود و یا برای غلبه بر این مشکل، سلول‌ها در آگارز با نقطه ذوب پایین تثبیت شوند و سپس تحت تیمار قرار گیرند. روش غیرمتحرک کردن سلول‌ها با آگارز نقطه ذوب پایین در آزمایشات پرواز فضایی به کار می‌رود [۱۴].



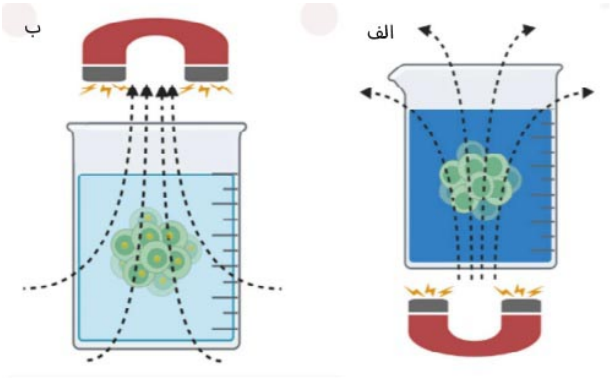
شکل ۲. کشت سلولی در محیط جامد در بستر آگارز (الف) و محیط مایع (ب) برای تیماردهی در دستگاه شناوری مغناطیسی با الکترومغناطیس [۷].

۳- اصول کار شناوری مغناطیس با آهن ربا (مگنتوفورز) در کشت سه بعدی سلول

کشت سه بعدی سلول دارای کاربرد های زیادی در تحقیقات پیوند سلول و بافت، سلول های سرطانی، تحقیقات داروئی و درمان بیماری ها دارد. در گیاهان داروئی، کشت سه بعدی سلولی با هدف القای تولید پایدار متابولیت های داروئی در سلول ها انجام می شود. در سال های اخیر از فناوری شناوری مغناطیسی برای کشت سه بعدی با آهن ربا استفاده می نمایند که ضمن حفظ الگوی طبیعی رشد، تجسم خوبی را از تعاملات بین سلولی ارائه می دهد. از این روش می توان برای دستکاری ژنتیکی، آماده سازی بسترهای پیچیده کشت سلولی و یا جداسازی سلول ها بر حسب تراکم (نوعی جسگر جداسازی سلولی) استفاده نمود. جداسازی سلول ها بر حسب تراکم می

تواند بیانگر انواع مختلف تمایز سلولی باشد. این تکنیک هزینه پائین تری نسبت به روش های دیگر برای جداسازی سلولی است [۱۵].

مگنتوفورز می تواند به دو صورت مثبت و منفی روی سلول ها اعمال شود. در مگنتوفورز منفی از ذرات مغناطیسی استفاده نمی شود (شکل ۳-الف). در واقع تفاوت بیوشیمیایی و ژنتیکی سلول ها سبب اختلاف تراکم شده و تک سلول ها در میدان مغناطیسی از یکدیگر جدا می شوند. سلول ها به سمت مرکز، جائیکه کمترین اثر میدان را دارد حرکت می نمایند. در آنجا ساکن شده و تعادل بین میدان مغناطیس و سلول منجر به ایجاد شناوری می شود. البته نقطه تعادل سلول ها بدلیل اختلاف تراکم آنها مساوی نیست. سلول هایی با تراکم بالا در پائین تر قرار گرفته و سلول های با تراکم کمتر در ارتفاع بالاتر قرار گرفته و سلول ها بر حسب تراکم جدا شده و حالت اسپروئیدی به خود می گیرند [۱۶].



شکل ۳. مگنتوفورز منفی (الف) و مثبت (ب) برای ایجاد شناوری مغناطیسی در کشت سه بعدی سلولی [۱۶].

در مگنتوفورز مثبت، از ذرات مغناطیسی نظیر اکسید آهن استفاده می نمایند. سلول ها در داربست هیدروژل حاوی نانوذرات مغناطیسی قرار گرفته و تحت محیط میدان مغناطیسی قرار می گیرند. یک آهن ربا روی سلول ها مطابق شکل قرار گرفته و سپس سلول ها در مدت زمان کمی حالت اسپروئیدی به خود می گیرند (شکل ۳-ب).

مقایسه دو روش مگنتوفورز مثبت و منفی نشان داد که مگنتوفورز منفی می تواند به عنوان حسگر تراکم سلولی عمل نماید و روش بهتری برای کشت سه بعدی سلولی است. مگنتوفورز مثبت بدلیل استفاده نانوذرات مغناطیسی می تواند برای سلول ها سمیت ایجاد نماید [۱۷].

۴- شناوری مغناطیسی و الگوی بیان ژن ها

در گیاه آرابیدوپسیس، شناوری مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی با گرادیان بالا (۱۵ تسلا) سبب تغییر بیان تعداد زیادی از ژن ها شد. این ژن ها مرتبط با تحمل تنش، متابولیسم ثانویه، دیواره سلولی، اسکلت سلولی و نیز تغییر جهت سلولی بودند. در واقع ژن های مورد نیاز در سیستم دفاع سلولی تحریک شدند که در ارتباط با اثر سینرژیک دو فاکتور میدان مغناطیسی و میکروگرایویتی بودند [۷]. مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر کشت سوسپانسیون سلولی گیاه عروسک پشت پرده نشان داد که بیان ژن های مرتبط با متابولیت های ثانویه و دفاع آنتی اکسیدانی سلول ها افزایش یافت. این تغییر بیان ژن ها در ارتباط با اثر تنش میدان بر تنظیم سطح ملکول های سیگنالینگ نظیر هیدروژن پراکسید و نیتریک اکسید بود [۱۸].

مطالعه Herranz و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که میکروگرایویتی حاصل از میدان مغناطیسی می تواند سبب القای تغییرات کمی پروتئومیکی شود. طیف سنجی جرمی ۱۹ نقطه همپوشانی پروتئین ها را در شرایط شناوری مغناطیسی نشان داد که بیان پروتئین های مرتبط با تنش های غیرزیستی و متابولیسم ثانویه القا شد. این پروتئین ها شامل پروتئین های چپرون (۴/۹۱ برابر)، پروتئین بتاگلوکوزیداز (۱۰ برابر) و Hsp70 همراه با ATP سنتاز و اکسیدوردوکتاز بودند. فعالیت آنزیم‌های مرتبط با متابولیسم ثانویه و اولیه نیز افزایش یافت [۲].

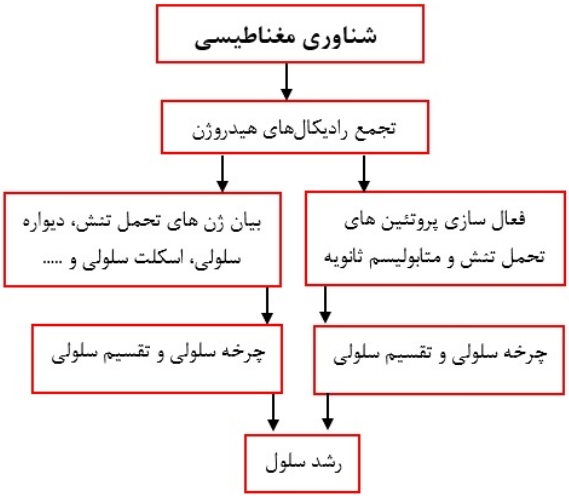
در شرایط تغییر نیروی جاذبه (میکروگرایویتی) نیز بیان ژن های مرتبط با دیواره سلولی، اسکلت سلولی و ساختارهای حساس به تغییر جهت سلولی به طور معنی داری تغییر می یابد [۱۹]. Darigh و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که میکروگرایویتی با تغییر تجمع رادیکال های هیدروژن پراکسید منجر به فعال سازی بیان فاکتورهای رونویسی و آنزیم های مسیر بیوسنتری متابولیت های ثانویه شد [۲۰].

۵- پاسخ‌های رشد و تکثیر سلولی

مطالعه کشت سلولی گیاه آرابیدوپسیس تحت میکروگرایویتی شبیه سازی شده با شناوری مغناطیسی نشان داد که تکثیر سلولی افزایش یافت، اما رشد کاهش یافت. مطالعه فازهای چرخه سلولی تحت شناوری مغناطیسی (جاذبه صفر/ شناوری مغناطیسی) نشان داد که افزایش فاز S چرخه سلولی همراه با کاهش در اندیس میتوز منجر به افزایش تکثیر سلولی شد. هسته سلول ها کوچک بوده و سهم فاز G2 سلولی به طور

معنی داری کاهش یافت. اما در میکروگراویتی ایجاد شده با کلینواستت (جاذبه صفر) فاز G1 و S کاهش یافت و سهم G2 کمی بالاتر از نمونه های شناوری مغناطیسی بود. در نمونه های کنترل (۱ g) نیز سهم فاز S کم بود، اما سهم فاز G2 افزایش معنی‌دار را نشان داد [۱۸]. Lewis و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که بیان ژن های مرتبط با پروتئین های سایکلین و کینازهای مرتبط با سایکلین تحت میدان مغناطیسی تغییر یافته و نقش مهمی را در تنظیم چرخه سلولی دارند [۲۱ و ۲۲].

بررسی اثر میدان مغناطیسی بر رشد سلول های بابونه نشان داد که تاثیر میدان وابسته به مراحل رشد سلولی است. در فاز لگاریتمی، میدان مغناطیسی سبب افزایش تکثیر سلولی شد و در فاز ثابت رشد اکثر سلول‌ها از حالت کشیده به صورت کروی در آمدند و محتوای متابولیت‌های فلاونوئیدی آن‌ها افزایش یافت [۲۳]. این تغییر شکل سلولی می تواند در ارتباط با کاهش مواد غذایی، تجمع مواد سمی و یا شرایط تنش باشد. در فاز ثابت رشد، دیواره سلولی بسیار سخت شده، جریانات غشایی کاهش یافته و مکانیسم های دفاعی برای بقای سلولی افزایش می یابد [۲۴].



شکل ۴. نمایی از مکانیسم اثر شناوری مغناطیسی بر رشد سلول گیاهی

شناوری مغناطیسی با افزایش سطح رادیکال های آزاد هیدروژن پراکسید می تواند با فعال سازی بیان ژن های مرتبط با تحمل تنش و پروتئین ها می تواند منجر به القای متابولیت های آنتی اکسیدانی و القای فاز S چرخه سلولی [۷ و ۱۸] و در نهایت سبب القای تقسیم سلولی و حفظ رشد سلول ها شود (شکل ۴).

۶- نتیجه‌گیری

سیستم‌های زیستی به تغییرات فیزیکی محیط نظیر میکروگراویتی و میدان مغناطیسی از طریق تنظیم رونویسی کل ژنوم پاسخ می دهند که بیانگر سازش سیستم های زیستی از زمان شروع حیات روی کره زمین است. بررسی اثر میکروگراویتی واقعی بر سیستم های زنده بایستی در فضا انجام شود، اما تسهیلات شبیه‌ساز مکانیکی و مغناطیسی روی زمین می توانند شرایط بی وزنی را ایجاد نمایند. این در صورتی محقق خواهد شد که اثرات مغناطیسی از اثرات جاذبه‌ای قابل تشخیص باشد. شناوری مغناطیسی با استفاده از روش الکترومغناطیس می تواند شرایط میکروگراویتی را مشابه آنچه که درسطح ماه و مریخ وجود دارد ایجاد نماید. مطالعه ژنی، تکنیک بسیار حساس به تغییرات حتی کوچک شرایط محیطی است. اثر شناوری مغناطیسی می تواند در کشت سه بعدی سلولی برای القای متابولیت های ثانوی در گیاهان بکار رود. میکروگراویتی به تنهایی می تواند با تاثیر بر بیان ژن های مرتبط با آنزیم های مسیر بیوسنتز متابولیت های ثانوی، تجمع ترکیبات ارزشمند دارویی و اقتصادی را افزایش دهد [۱۷]. از طرفی میدان مغناطیسی نیز با تاثیر بر بیان ژن های درگیر در سنتز متابولیت های ثانویه، محتوای ترکیبات دارویی گیاهان را بهبود می بخشد [۱۵]. بنابراین تحقیقات زیستی تحت شناوری مغناطیسی می تواند به عنوان یک تکنیک برای بهبود تولید متابولیت های ثانوی در گیاهان بکار رود. البته تاثیر شناوری مغناطیسی بر متابولیت های ثانویه نیاز به مطالعه بیشتر در آینده دارد و نتایج آن در طراحی سیستم پشتیبان حیات و کشت گیاه اهمیت دارد.

تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

تشکر و قدردانی

از حمایت مالی مسئولین محترم پژوهشگاه هوافضا برای اجرای این پژوهش قدردانی می گردد.

مراجع

[1] M. Babbick, C. Dijkstra, O.J. Larkin, P. Anthony, M.R. Davey, J. B. Power, K. C. Lowe, M. Cogoli-Greuter, R. Hampp, “Expression of transcription factors after short-term exposure of Arabidopsis thaliana cell cultures to hypergravity and simulated microgravity (2-D/3-D clinorotation, magnetic levitation),” *Adv Space Res*, 2007, vol. 39, pp. 1182-1189, 2007.

[2] R. Herranz, R. Anken, J. Boonstra, M. Braun, P.C.M. Christianen, M.D. Geest, J. Hauslage, R. Hilbig, R.J.A. Hill, M. Lebert, F.J. Medina, "Ground-based facilities for simulation of microgravity, including terminology and organism-specific recommendations for their use." *Astrobiology*, vol. 13, no. 1, pp. 1-17, 2013.

[3] A. Mittelholz, C.L. Johnson, “The martian crustal magnetic field,” *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, vol. 9, pp. 895362, 2022.

[4] R. Weissleder, A. Moore, U. Mahmood, R. Bhorade, H. Benveniste, E.A. Chiocca, J.P. Basilion, “In vivo magnetic resonance imaging of transgene expression,” *Nat Med*, vol. 6, pp. 351–5, 2000.

[5] P.M. Glover, I. Cavin, W. Qian, R. Bowtell, P.A. Gowland, “Magnetic-field-induced vertigo: a theoretical and experimental investigation,” *Bioelectromagnetics*, vol. 28, pp. 349–61, 2007.

[6] R. Herranz, O.J. Larkin, C.E. Dijkstra, R.J. Hill, P. Anthony, M.R. Davey, L. Eaves, J.J.W.A. van Loon, F.J. Medina, R. Marco, “Microgravity simulation by diamagnetic levitation: effects of a strong gradient magnetic field on the transcriptional profile of *Drosophila melanogaster*,” *BMC Genomics*, vol. 13, pp. 52, 2012.

[7] A.L. Manzano, J.J. van Loon, P.C. Christianen, J.M. Gonzalez-Rubio, F.J. Medina, R. Herranz, “Gravitational and magnetic field variations synergize to cause subtle variations in the global transcriptional state of Arabidopsis in vitro callus cultures,” *BMC genomics*, vol. 13, pp.1-3, 2012.

[8] A.B. Subramaniam, D. Yang, H.D. Yu, A. Nemiroski, S. Tricard, A.K. Ellerbee, S. Soh, G.M. Whitesides, “Noncontact orientation of objects in three-dimensional space using magnetic levitation,” *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 111 no. 36, pp. 12980-5, 2014.

[9] W. Zhao, T. Zhu, R. Cheng, Y. Liu, J. He, H. Qiu, H, L. Wang, T. Nagy, T.D. Querec, E.R. Unger, L. Mao, “Label-Free and Continuous-Flow Ferrohydrodynamic Separation of HeLa Cells and Blood Cells in Biocompatible Ferrofluids,” *Adv Funct Mater*, vol. 26, no. 22, pp. 3990-3998, 2016.

[10] J.M. Valles, H.J. Maris, G.M. Seidel, J. Tang, W. Yao, “Magnetic levitation-based martian and lunar gravity simulator,” *Adv Space Res*, vol. 36, pp. 114–118, 2005.

[11] M. Martzivanou, R. Hampp, "Hyper-gravity effects on the Arabidopsis transcriptome," *Physiologia Plantarum* vol. 118, no. 2, 2003, pp. 221-231.

[12] R. Herranz, M.A. Valbuena, A. Manzano, Y.K. Kamal, F.J. Medina, “Use of microgravity simulators for plant biological studies,” *Plant Gravitropism: Methods and Protocols*, pp. 239-254, Springer, 2015.

[13] A.I. Manzano, O.J. Larkin, C.E. Dijkstra, P. Anthony, M.R. Davey, L. Eaves, Hill, R.J. R. Herranz, F.J. Medina, “Meristematic cell proliferation and ribosome biogenesis are decoupled in diamagnetically levitated Arabidopsis seedlings,” *BMC plant biology*, vol. 13, pp. 1-15, 2013.

[14] J.G. Kiss, G.I. Garab, Z.M. Tóth, A. Faludi-Dániel, “The light-harvesting chlorophyll a/b protein acts as a torque aligning chloroplasts in a magnetic field,” *Photosynth Res*, vol. 10, pp. 217-222, 1986.

[15] J.T. Caleffi, M.C. Aal, H.D. Gallindo, G.H. Caxali, B.P. Crulhas, A.O. Ribeiro, G.R. Souza, F.K. Delella, “Magnetic 3D cell culture: State of the art and current advances”. *Life Sciences*, vol. 286, pp. 120028, 2021.

[16] U. Tepe, B. Aslanbay Guler, E. Imamoglu, “Applications and sensory utilizations of magnetic levitation in 3D cell culture for tissue Engineering,” *Molecular Biology Reports*, vol. 50(8), pp. 7017-25, 2023.

[17] M.A. Abakumov, A.S. Semkina, A.S. Skorikov, D.A. Vishnevskiy, A.V. Ivanova, E. Mironova, G.A. Davydova, A.G. Majouga, V.P. Chekhonin, “Toxicity of iron oxide nanoparticles: Size and coating effects,” *Journal of biochemical and molecular toxicology*, vol. 32(12), pp. e22225, 2018.

[18] H. Hassanpour, Establishment of *Physalis alkekengi* cell suspension culture: time-dependent behavior of genes related to the steroidal compounds, key enzymes, and physalins under static magnetic field. *Protoplasma*, pp. 1-14, 2024.

[19] M. Martzivanou, M. Babbick, M. Cogoli-Greuter, R. Hampp, “Microgravity-related changes in gene expression after short-term exposure of *Arabidopsis thaliana* cell cultures,” *Protoplasma* , vol. 229, pp. 155-162, 2016.

COPYRIGHTS
© 2025 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. 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) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

[20] F. Darigh, A. Iranbakhsh, Z.O. Ardebili, M. Ebadi, H. Hassanpour, "Simulated microgravity contributed to modification of callogenesis performance and secondary metabolite production in Cannabis Indica," *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 186, pp. 157-68, 2022.

[21] K.Y. Kamal, R. Herranz, J.J. van Loon, P.C. Christianen, F.J. Medina, "Evaluation of simulated microgravity environments induced by diamagnetic levitation of plant cell suspension cultures," *Microgravity Science and Technology*, vol.28, pp. 309-17, 2016.

[22] N.S. Lewis, E.E Lewis, M. Mullin, H. Wheadon, M.J. Dalby, C.C. Berry, "Magnetically levitated mesenchymal stem cell spheroids cultured with a collagen gel maintain phenotype and quiescence," *Journal of tissue engineering*, vol. 8, PMID. 28616152, 2017.

[23] H. Hassanpour, V. Niknam, "Establishment and assessment of cell suspension cultures of Matricaria chamomilla as a possible source of apigenin under static magnetic field," *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, vol. 142, pp. 583-93, 2020.

[24] T. Nyström, "Stationary-phase physiology," *Annu Rev Microbiol.*, vol. 58, no. 1, pp. 161-181, 2004.