

نگاهی جامع به زیست-فضا با رویکرد بررسی آزمایشگاهی تنش های مکانیکی بر گیاهان

نرگس قدیانی^۱، ایمان شفیعی نژاد^۲، شراره قاسمی^۳، سینا رستمیان^۴، علی محمودی^۵

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد هوا فضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

^۲ استادیار و عضو هیئت علمی پژوهشگاه هوا فضا، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

^۳ دکتری بیوتکنولوژی و ژنتیک گیاهی، دانشگاه پلی تکنیک مادرید، اسپانیا.

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد هوا فضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

^۵ استادیار گروه مهندسی هوا فضا، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

چکیده

در طی سال های اخیر علم میان رشته ای جدیدی مانند گیاه-فضا نیز به بحث میان رشته های جدید اضافه شده که به مطالعه در خصوص کشت و به کارگیری انواع گیاهان در شرایط فضا جهت بهره برداری مفید برای انسان می پردازد. در این مقاله به بررسی عملکرد یکی از دستگاه های آزمایشگاهی در حوزه زیست فضا به نام کلینواستات پرداخته شده است. این دستگاه نقش موثری در ایجاد تنش های مکانیکی گرانشی دارد و به طور گسترده در آزمایشگاه های زیست فضا مورد استفاده قرار می گیرد. لذا در این مقاله به بررسی و نحوه عملکرد کلینواستات جهت شبیه سازی تنش های گرانشی بر گیاهان در سفرهای فضایی پرداخته شده است.

واژه های کلیدی: زیست-فضا، تنش های مکانیکی، گیاهان، مطالعات آزمایشگاهی

۱. مقدمه

امروزه لزوم گسترش علوم میان رشته ای با به کارگیری متخصصان هر رشته در جهت پیشگام بودن در تکنولوژی بر هیچ کس پوشیده نیست. زیست-فضا یک دانش میان رشته ای جدید در علم زیست شناسی و فضا است که به بررسی منشا، تکامل و توزیع آینده حیات و زندگی در سیارات دیگر، بیرون از زمین بحث می کند. اعمال نیروی جاذبه بر موجودات زنده در سطح زمین موجب تطبیق ساختار و نحوه رشد آنها با این شرایط شده است. حذف نیروی جاذبه در فضا باعث تغییر در ساختار و عملکرد موجودات زنده می شود [۱-۳].

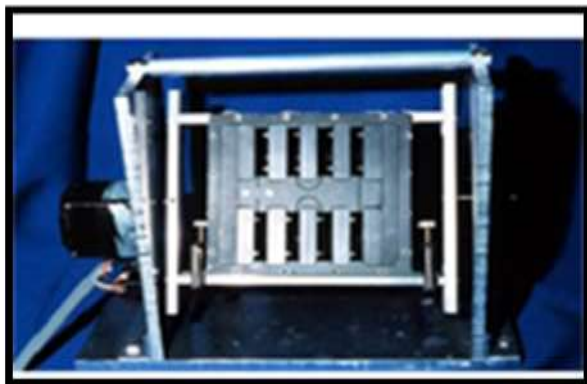
هدف از زیست شناسی فضایی تعیین اثرات جاذبه بر سلول جانوران و گیاهان، تعیین اثرات ترکیبی بی وزنی و دیگر تنش های محیط فضا (پرتوها و نبود سیکل روز و شب) بر سیستم های زیستی، اصلاح کیفیت زندگی روی زمین با استفاده از محیط فضا و همچنین افزایش دانش زیست شناسی است. تحقیقات در این زمینه در سطوح مختلف (از تحقیقات مولکولی گرفته تا مطالعه سلول، بافت، ارگان، موجود زنده، اکولوژی، تکوین و تکامل) ادامه دارد. از آنجاکه سلول واحد ساختار و عمل موجودات زنده است، تغییرات در موجودات و فیزیولوژی آن ها در محیط فضا ناشی از تغییرات در سطح سلول است. پاسخ فضاوردان و موجودات زنده به بی وزنی حاصل پاسخ سلول های بدن آن ها به بی وزنی است. بنابراین، تمامی تغییراتی که در فضا و شرایط بی وزنی در ارگانیسم های زنده و فیزیولوژی بدن آن ها رخ می دهد، ناشی از تغییرات ایجاد شده در سطح سلول های آن ها است [۴ و ۵].

با توجه به سفرهای فضایی آینده، روبرو شدن با تغییرات بسیار زیاد تنش های غیر زنده (مانند گرانش و پرتوهای کیهانی باعث بیماری زایی در گیاهان می شود. لذا تنش های مکانیکی سفرهای فضایی باعث کاهش عملکرد گیاه می شود و تأثیر معنی داری بر توانایی آن در درک مناسب و پاسخ به تنش ها دارد. از تنش های مکانیکی غیر زنده می توان به تنش های مکانیکی ارتعاشی اشاره نمود. تنش های غیر زنده ارتعاشی به واسطه عواملی مانند دامنه ارتعاش، فرکانس ارتعاش و شتاب می توانند بذر گیاهان را مورد تنش و نرخ جوانه زنی نسبی آن را دستخوش تغییر قرار دهند [۶].

از طرف دیگر، غلبه بر تنش های محیطی وارده از فضا مانند میکرو گرانش و هایپر گرانش، تشعشعات فضایی و ارتعاش مورد توجه تحقیقات اخیر سازمان های فضایی است. در واقع میکرو گرانش به شتاب بسیار کوچکتر از یک واحد g یا ۹.۸۱ متر بر مجذور ثانیه گفته می شود. در کنار آن هایپر گرانش بیان کننده شتاب بسیار بیشتر از یک واحد g است. تشعشعات فضایی متضمن تشعشعات خورشیدی و کیهانی است که در محیط فضا قرار دارد (برای توضیحات بیشتر به مرجع [۲] رجوع شود). تغییرات نیروی گرانشی یکی از عوامل محیطی است که بر رشد گیاهان تأثیر می گذارد. تغییرات در نیروی گرانشی، از جمله میکرو گرانش، یکی از عوامل تنش های مکانیکی وارد شده بر گیاهان در سفرهای فضایی است. میکرو گرانش تأثیرات اجتناب-ناپذیری بر گیاهان در طول سفرهای فضایی دارد. همچنین می تواند به عنوان عامل مهم برای ایجاد خطرات بالقوه سلامت در نظر گرفته شود. از طرف دیگر تنشهای فوق اثرات مخربی بر بذرهای گیاهانی دارد که قرار است جهت ادامه حیات به فضا برده شوند و مورد پژوهش قرار گیرند. لذا گیاهان باید برای مقابله با آن سازگار شوند. این نوع تنش می تواند منجر به تغییرات ظاهری مختلف در ساختارهای گیاهی شود. به عنوان مثال، تغییرات ژنی، تغییرات مورفولوژیکی و یا تغییر در بیان ژن را می توان اشاره کرد. نتایج آزمایشهای سفرهای فضایی با مأموریت بررسی عملکرد گیاهان در فضا به وضوح نشان می دهد که تنش های محیطی وارده مانند میکروگرانش، تأثیر قابل توجهی بر رشد و فیزیولوژی گیاهان داشته و موجب تغییراتی در بیان ژن های گیاهی می شوند. لذا میکروگرانش تأثیر بالقوه ای بر فرآیندهای رشدی و نمو گیاه دارد [۷ و ۸].

۲. کلینواستات و انواع آزمایشگاهی آن

کلینواستات^۲ دستگاهی است که با استفاده از چرخش، اثرات کششی جاذبه را بر روی رشد^۳ و توسعه جانداران ساکن زمین^۴ خنثی می‌کند. همچنین از این وسیله برای مطالعه اثرات بی‌وزنی بر بافت سلول‌ها و جنین حیوانات استفاده می‌شود (شکل ۱).



شکل (۱) نمونه‌ی ساده و یک‌بعدی دستگاه کلینواستات [۹].

در نمونه دیگری از دستگاه کلینواستات یک‌بعدی (شکل ۲) چرخش به کمک تسمه صورت می‌گیرد و در این مدل امکان چرخش هم‌زمان چندین نمونه وجود دارد. این دستگاه قادر است نمونه‌های مختلفی را با سرعت چرخشی یک دور بر دقیقه حول محوری افقی یا عمودی (در صورتی که دستگاه مایل باشد) بگرداند.



شکل (۲) دستگاه کلینواستات یک بعدی تسمه‌ای [۱۰]

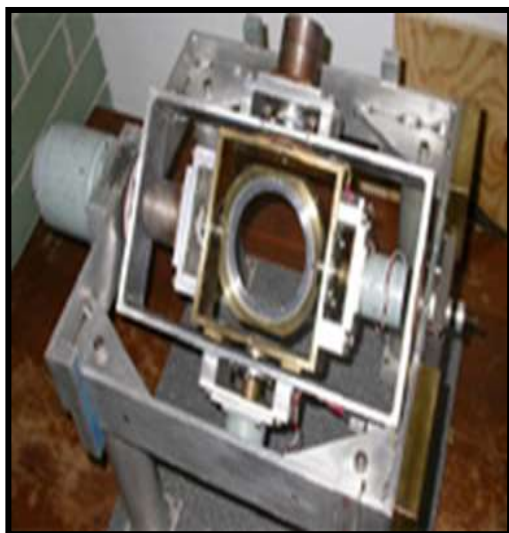
اگر شتاب گرانش اجسام بیشتر از مقدار شتاب آن بر روی زمین باشد، به شبیه‌سازی نیروی جانب مرکز نیاز است و در این شرایط دستگاه کلینواستات تبدیل به یک دستگاه چرخش دوار می‌شود. مقدار این نیرو به سرعت زاویه‌ای و شعاع دستگاه بستگی دارد. دستگاه کلینواستات تنها برای نمونه‌های کوچک - مانند بافت‌های سلولی که معمولاً در داخل محیط مایع هستند مناسب است. سرعت چرخش نمونه‌ها که در داخل آمپول‌هایی با قطر چند میلی‌متر قرار گرفته‌اند حدود ۳۰ تا ۱۵۰ دور بر دقیقه است.

^۲clinostat

^۳gravitropism

^۴gravimorphism

کلینواستات تک‌محوری تنها برای تولید اثرات بی‌وزنی بر روی محور چرخش مناسب است. یک کلینواستات سه‌بعدی یا دو‌محوری که اصطلاحاً دستگاه موقعیتیابی تصادفی^۱ نامیده می‌شود، می‌تواند کشش جاذبه را روی تمام محورها اعمال کند (شکل ۳). این دستگاه معمولاً متشکل از دو صفحه است که یکی در داخل دیگری جاسازی شده است و می‌توانند مستقل از یکدیگر بچرخند.



شکل (۳) نمونه دستگاه کلینواستات سه بعدی [۱۱].

نمونه کامل‌تر دستگاه کلینواستات که برای شبیه‌سازی بی‌وزنی استفاده می‌شود دستگاه سقوط آزاد^۲ نام دارد. در این دستگاه، نمونه‌های کوچک مانند مخلوط‌های معلق سلولی، تحت جاذبه از ارتفاع حدود یک متری سقوط آزاد می‌کنند و این سقوط در کسری از ثانیه اتفاق می‌افتد. سپس با استفاده از نیرویی در حدود ۲۰ برابر شتاب جاذبه طی مدت ۲۰ میلی‌ثانیه به بخش بالایی دستگاه منتقل می‌شوند، و دوباره برای سقوط آزاد رها می‌شوند و این عمل به دفعات تکرار می‌شود. قانون فیزیکی حاکم بر این دستگاه این است که بیشتر این زمان سقوط آزاد در شتاب صفر به وقوع می‌پیوندد. فرض می‌شود مدت زمانی که طی آن انتقال تحت نیروی بزرگ‌تر از شتاب جاذبه رخ می‌دهد، آنقدر کوچک است که توسط مکانیسم‌های فیزیولوژیک درک نمی‌شود و از این رو، کل این زمان را می‌توان سقوط آزاد فرض کرد.

شکل ۳ کلینواستاتی سه‌بعدی را نشان می‌دهد که در حقیقت نمونه کامل حذف اثر جاذبه است. در این نمونه که حول یک سیستم تعلیق کارتزینی ساخته می‌شود، در سه محور چرخش به طور مستقل و کامل بردار جاذبه ی تصادفی را ایجاد می‌کنند و قادرند بهترین شبیه‌سازی از بی‌وزنی را برای آزمایش‌های زمینی فراهم کنند.

۳. ساختار کلینواستات

محور افقی کلینواستات شامل دیسکی است که به یک موتور متصل است. در گذشته این دیسک به صورت مکانیکی کار می‌کرد ولی امروزه برای چرخش آن از موتورهای الکتریکی استفاده می‌شود. در حالی که دیسک در وضعیت قائم قرار دارد، موتور به آرامی با سرعت یک دور بر دقیقه می‌گردد. یک موجود زنده به صورت افقی به این دیسک دوار متصل است. چرخش آرام

^۱RPM

^۲FFM

دیسک منجر می‌شود که موجود زنده کشش جاذبه را درک نکند؛ به این ترتیب، محیطی بی‌وزن شبیه‌سازی می‌شود. همچنین، این دستگاه قادر است علاوه بر جاذبه، اثرات نور خورشید و دیگر محیط‌ها را نیز خنثی کند. برای شبیه‌سازی این نوع شرایط بی‌وزنی، دستگاه کلینواستات باید کاملاً افقی باشد. در صورتی که این دستگاه با افق زاویه‌ای بسازد، بردار جاذبه خالصی که مقدار آن متناسب با این زاویه است تولید می‌شود. به کمک همین ویژگی است که این دستگاه می‌تواند جاذبه سطح ماه را که تقریباً یک‌ششم سطح زمین است با ۱۰ درجه زاویه نسبت به افق ایجاد کند.

موجودات زنده نسبت به جاذبه واکنش نشان می‌دهند مشروط به اینکه در یک بازه زمانی معین که به اصطلاح (حداقل زمان حضور) گفته می‌شود و برای موجودات مختلف متفاوت است، تحت نیروی جاذبه قرار گیرند. برای بسیاری از موجودات زنده این زمان حدود ۱۰ الی ۲۰۰ ثانیه است؛ بنابراین، دستگاه لازم است در مقیاس زمانی متناسب با وضعیت جاندار بچرخد تا از پاسخ رشد جاندار ممانعت به عمل آید. شایان ذکر است که زمان حضور انباشتگی دارد، یعنی اگر چرخش دستگاه کلینواستات به دفعات در یک مکان منفرد حتی به ازای کسری از ثانیه - مثلاً ۵/۰ ثانیه - متوقف شود، منجر به پاسخ رشد جاندار می‌شود. زمان حضور برای حیوانات دو تا سه برابر کوتاه‌تر است که بنابراین منجر به استفاده از چرخش آهسته این دستگاه بر روی بیشتر حیوانات می‌شود. از چرخش سریع‌تر دستگاه کلینواستات می‌توان برای مطالعه بافت‌های سلولی و جنین حیوانات استفاده کرد.

۴. ساخت دستگاه بایوراکتور کلینواستات

یکی از روش‌های ایجاد مسیر تصادفی حرکت جسم برای شبیه‌سازی شرایط کم‌وزنی، دوران آن حول دو محور عمود بر هم است که مقدار سرعت زاویه‌ای دوران حول هر محور به صورت تصادفی تغییر می‌کند. تغییر تصادفی مقدار سرعت زاویه‌ای هر محور، از ایجاد مسیر حرکت متناوب جلوگیری می‌کند. از طرف دیگر، شتاب شعاعی در هر ذره از جسم بر اثر حرکت بر روی سطح کره ایجاد می‌شود که مقدار آن متناسب با فاصله از مرکز دوران و مجذور سرعت زاویه‌ای دوران است. پس در ذراتی که از مرکز دوران فاصله دارند نیرویی مجازی ناشی از این شتاب ایجاد می‌شود که از دیدگاه هر ذره، جهت آن ثابت و در امتداد شعاع کره است. بنابراین با تغییر پیوسته راستای حرکت ذرات جسم در سطح کره می‌توان رفتار آن را تحت اثر شتاب‌های جاذبه مختلف بررسی کرد. دستگاه بایوراکتور کلینواستات پیشنهادی، مسیر حرکت تصادفی را برای شبیه‌سازی شرایط کم‌وزنی در هر ذره از نمونه آزمایشگاهی ایجاد می‌کند. در این دستگاه ذرات جسم مورد نظر حول دو محور عمود بر هم با سرعت زاویه‌ای متغیر دوران می‌کنند و مقدار سرعت زاویه‌ای هر محور به صورت تصادفی تغییر داده می‌شود. اگرچه حرکت جسم در سیستم موقعیت‌دهی تصادفی، موجب تغییر پیوسته راستای حرکت نمونه نسبت به بردار جاذبه می‌شود، تغییر راستای نمونه، موجب ایجاد شتاب و نیروی مجازی در نمونه می‌گردد که محاسبه انتگرال آنها در مدت زمان انجام آزمایش اهمیت دارد. برای اطمینان از ایجاد شرایط بی‌وزنی نیاز است علاوه بر تغییر پیوسته مسیر حرکت، مقدار انتگرال نیروی اعمالی بر هر ذره، صفر یا مقدار بسیار ناچیزی باشد؛ برای ایجاد شرایط کم‌وزنی نیز باید مقدار و راستای نیروی اعمالی به هر ذره از جسم، در حین حرکت از دیدگاه هر ذره ثابت باشد.

برای بررسی اثر تغییرات سرعت دوران موتورهای الکتریکی محرک سیستم به منظور ایجاد شرایط کم‌وزنی، نیاز به مدلی سینماتیکی برای حرکت یک ذره در این سیستم است که با استفاده از این مدل می‌توان راستای بردار جاذبه را از دیدگاه هر ذره و بردار شتاب هر ذره از جسم را در هر لحظه تعیین کرد و با محاسبه انتگرال آن در بازه زمانی معین، مطابقت شرایط ایجادشده در جسم را با شرایط کم‌وزنی بررسی کرد. این دستگاه به صورت رومیزی است که حداکثر ابعاد نمونه آزمایشگاهی، مکعبی به ابعاد ۳۰، ۳۰، ۳۰ سانتی‌متر خواهد بود [۱۶-۱۲]. به منظور تغییر پیوسته راستای نمونه نسبت به بردار جاذبه، نمونه آزمایشگاهی به قابی نصب می‌شود که حول یک محور توسط موتور الکتریکی دوران می‌کند و محور این قاب بر روی قاب دیگری نصب شده است که توسط موتور الکتریکی دیگری دوران داده می‌شود. به منظور دوران در دو قاب و تنظیم مستقل مقدار دوران هریک از آنها مطابق با الگوریتم کنترل حرکت، از دو سیستم محرک مجزا استفاده می‌شود. گشتاور محرک موتور

الکتریکی با استفاده از جریان برق مستقیم تأمین شده و برای کاهش دور و افزایش گشتاور خروجی موتور، جعبه دنده کاهنده دور در نظر گرفته می‌شود. برای اندازه‌گیری مقدار دوران هر قاب نیز انکودر دورانی برای هر سیستم محرک پیش‌بینی می‌شود [۱۷-۲۲].

۵. کاربرد بایوراکتور کلینواستات در زیست‌فناوری (بیوتکنولوژی):

از مهم‌ترین کاربردهای دستگاه کلینواستات در زیست‌فناوری می‌توان به تغییر آرایش پروتئین‌ها در سلول‌ها و دانه‌های تولیدشده در گیاهان پرورش داده شده در شرایط کم‌وزنی، تغییر بیان ژن‌ها در تک‌یاخته‌ها، سلول‌های گیاهی و جانوری، تغییر الگوهای رشد و تکثیر جانداران، و دگرگونی اثر عوامل ایجادکننده جهش ژنی (مانند تشعشع) برای ایجاد گونه‌هایی با جهش‌های مفید اشاره کرد. بنابراین، کاربرد این دستگاه در زیست‌فناوری موارد زیر را شامل می‌شود:

- ۱- تغییر ساختار ماکرومولکول‌ها بدون تغییر محتوای ژنتیکی، مانند تغییر آرایش ساختار پروتئین‌ها در دانه‌های گیاهان.
 - ۲- تغییر محتوای ژنتیکی یا نحوه بروز صفات توارث‌یافته، مانند تغییر تأثیر عوامل جهش‌زا و همچنین تغییر بیان ژن‌ها.
- ایجاد یک محیط کاملاً بسته قابل پای و کنترل که این ویژگی به‌خصوص در زمینه باغبانی فضایی بسیار حائز اهمیت است، زیرا وجود حسگرهای ویژه در این محیط‌ها و ایجاد شرایط شبیه‌سازی شده فضا این امکان را برای محققان فراهم می‌کند تا تأثیر عوامل مختلف بر رشد، تکثیر و دانه‌سازی را به نحو جداگانه یا گروهی تجزیه و تحلیل کنند [۲۶-۲۲].

۶. نتیجه‌گیری

سرعت چرخش در نوع متداول دستگاه کلینواستات آهسته بوده و به آن «کلینواست چرخش آهسته» می‌گویند؛ این عملکرد برای جلوگیری از اثرات نیروی جانب مرکز است. سرعت مناسب چرخش بحث‌برانگیز است چراکه اگر دستگاه بیش از حد آهسته بگردد، جاندار برای پاسخ فیزیولوژیک به جاذبه فرصت خواهد داشت؛ و در صورتی که دستگاه خیلی سریع بچرخد، نیروهای جانب مرکز و کشش مکانیکی مصنوعی وارد عمل می‌شوند. سرعت چرخش بهینه از طریق مقایسه پاسخ‌های واقعی موجودات ۰/۳ تا ۳ دور بر دقیقه برای اکثر موجودات زنده است. نمونه ساده و یک‌بعدی دستگاه کلینواستات مجهز به اتاقک میدان مغناطیسی موضوعی پیشنهادی برای بررسی تنش‌های ترکیبی است. دستگاه کلینواستات و کاربرد های موثر آن در علم زیست فناوری (بیوتکنولوژی) در افزایش تکثیر سلول‌های بنیادی و تسهیل تمایز آنها به بافت‌های مورد استفاده در پیوندهای بافتی موثر است. به طور کلی باید در نظر داشت که امروزه زیست‌فناوری اساس و پایه رویکردها و تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه تولید و ذخیره‌سازی غذا و انرژی در سفرهای فضایی است و دستگاه کلینواستات، شرایط لازم برای انجام این تحقیقات را فراهم می‌کند.

منابع و مراجع

- [۱] شفیعی نژاد، ایمان و قاسمی، شراره، تاثیرات تنشهای گرانشی و تشعشعی بر گیاهان در سفرهای فضایی. مجله فناوری در مهندسی هوا فضا، دوره ۲، شماره ۴ - شماره پیاپی ۷، صفحه ۱-۵، زمستان ۱۳۹۸.
- [۲] شفیعی نژاد، ایمان و قاسمی، شراره و صفرزاده، رضا و محمودی، علی، آینده پژوهی در گیاه-فضا و سفرهای آینده فضایی، مجله فناوری در مهندسی هوا فضا، پذیرفته شده. ۱۳۹۹.
- [۳] شفیعی نژاد، ایمان، قاسمی، شراره، نوری، نادیا. کمربندهای تشعشعی ون آلن: چالش مهم مأموریت های زیست-فضا، فصلنامه فناوری در مهندسی هوا فضا، دوره ۴، شماره ۳ - شماره پیاپی ۱۴، زمستان ۱۳۹۹.
- [۴] شفیعی نژاد، ایمان و قاسمی، شراره و قدیانی، نرگس، گسترش زیست-فضا و به کارگیری گیاهان دارویی در جهت سلامت فضانوردان در سفرهای فضایی، پنجمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک و هوافضا، تهران، ۱۳۹۹.
- [۵] شفیعی نژاد، ایمان و قاسمی، شراره و صفرزاده، رضا، گیاه-فضا و تنش های غیر زنده در شرایط فضا، پنجمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک و هوافضا، تهران، ۱۳۹۹.
- [۶] قاسمی، شراره. شفیعی نژاد، ایمان. صفرزاده، رضا. شروعی نوین در علم زیست-فضا مطالعه موردی: بازگشت به ماه نویسندگان: شراره قاسمی -ایمان شفیعی نژاد -رضا صفرزاده ۱۳۹۸، چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک و هوافضا.
- [۷] شفیعی نژاد، ایمان و قاسمی، شراره و محمودی، علی و میرصیافی، امیر هوشنگ، مروری بر پژوهش های اخیر مأموریت های فضایی با رویکرد کمربندهای ون آلن و زیست-فضا، بخش اول، چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک و هوافضا، تهران، ۱۳۹۸.
- [۸] شفیعی نژاد، ایمان و قاسمی، شراره و محمودی، علی و میرصیافی، امیر هوشنگ، مروری بر پژوهش های اخیر مأموریت های فضایی با رویکرد کمربندهای ون آلن و زیست-فضا، بخش دوم، چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک و هوافضا، تهران، ۱۳۹۸.
- [9] Clement, G. and Slenzka, K., Fundamentals of Space Biology, Research on Cells, Animals, and Plant in Space, Microcosm Press, New York, NY: Springer, 2006.
- [10] Dehart, R.L. and Davis, J.R., Fundamentals of Aerospace Medicine, 3rd ed., Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2002.
- [11] Burgess, C. and Dubbs, C., Animals in Space from Research Rocket to the Space Shuttle, Springer, 2007.
- [12] Space Studies Board, Committee on Space Biology and Medicine, Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications, A strategy for Research in Space Biology and Medicine in the New Century, National Academy Press, Washington, D.C., 1998.
- [13] Hemmersbach, R., von der Wiesche, M. and Seibt, D., "Ground-based Experimental Platforms in Gravitational Biology and Human Physiology," Signal Transduction, Vol. 6, No. 6, 2006, pp. 381-387.
- [14] Van Loon, J. J. W. A., "Some History and Use of the Random Positioning Machine, RPM, in Gravity Related Research," Advances in Space Research, Vol. 39, No. 7, 2007, pp. 1161-1165.
- [15] Borst, G. and Van Loon, J. J. W. A., "Technology and Developments for the Random Positioning Machine, RPM," Microgravity Science and Technology, Vol. 21, No. 4, 2009, pp. 287-292.
- [16] Hoson, T., Kamisaka, S., Masuda, Y., and Yamashita, M., "Changes in Plant Growth Processes under Microgravity Conditions Simulated by a Threedimensional Clinostat," The Botanical Magazine Tokyo, Vol. 105, No. 1, 1992, pp. 53-70.
- [17] Hoson, T. et al., "Evaluation of the Three-dimensional Clinostat as a Simulator of Weightlessness," Planta, Vol. 203, No. 1, 1997, pp. S187-S197.

- [18] Huijser, R.H., Desktop RPM, FS-MG-R00-017 © Fokker Space (August 2000), available: [online], <http://www.desc.med.vu.nl/Publications/Other/RP>
- [19] Klaus, D. M., Todd, P., and Schatz, A., "Functional Weightlessness During Clinorotation of Cell Suspensions," *Advances in Space Research*, Vol. 21, No. 8-9, 1998, pp. 1315–1318.
- [20] Benavides Damm, T., et al., "Cell Cultivation under Different Gravitational Loads using a Novel Random Positioning Incubator," *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 111, No. 6, 2014, pp. 1180–1190.
- [21] Heathcote, D.G., Chapman D.K., Brown, A.H., "Nastic curvatures of wheat coleoptiles that develop in true microgravity," *Plant Cell Environ*, 1995, pp. 18:818–822.
- [22] Hammond T. and Allen, P., "The Bonn Criteria: Minimal Experimental Parameter Reporting for Clinostat and Random Positioning Machine Experiments with Cells and Tissues," *Microgravity Science and Technology*, Vol. 23, No. 2, 2011, pp. 271–275.
- [23] Brown, A. H., Dahl, A. O., and Chapman, D.K., "Limitation on the Use of the Horizontal Clinostat as a Gravity Compensator. Plant Centrifuge Laboratory, University City Science Center and Department of Biology, University of Pennsylvania, Philadelphia, Pennsylvania 19174," *Plant Physiology*, Vol. 58, 1996, pp. 127-130.
- [24] Mesland, D., "Novel ground-based facilities for research in the effects of weight," *ESA Microgravity News*, Vol. 9, 1996, pp. 5–10.
- [25] Wuest, S. L., et al., "A Novel Microgravity Simulator Applicable for Three-dimensional Cell Culturing," *Microgravity Science and Technology*, Vol. 26, No. 2, 2014, pp. 77–88.
- [26] Soga, K., Wakabayashi, K., Kamisaka, S. and Hoson, T., "Perception Mechanism of Gravity Stimuli in Hypergravity-induced Growth Inhibition of Azuki Bean Roots," *BiolSci Space*. Vol. 17, No. ۳, ۲۰۰۳, pp. ۱۷۹–۸۰.