



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 3, No. 1, pp.: 97-104
2023

DOI:
10.22034/jssta.2023.391960.1118

Article Info

Received: 2023-04-05
Accepted: 2023-005-31

Keywords

Lead, *Lactobacillus acidophilus*, Microgravity, Mars gravity, Clinostat.

How to Cite this article

Maryam Salavatifar, "Investigating the Effect of Microgravity and Gravity of Mars on the Absorption of Lead by *Lactobacillus acidophilus*", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 3 (1), p.: 97-104, 2023.

Investigating the Effect of Microgravity and Gravity of Mars on the Absorption of Lead by *Lactobacillus acidophilus*

Maryam Salavatifar^{1*}

^{1*}Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran,
Corresponding Author

salavati@ari.ac.ir

Abstract

One of the most serious problems of the industrialized world is heavy metal contamination. As a heavy metal, lead has very harmful effects on human health even in small amounts. Therefore, removing it from water is one of the most important challenges in public health system. Microorganism application is very useful and safe in this field. Creatures living on Earth are constantly under the influence of gravity, and if it changes, they will be affected by a unique shock. Such a change has effects on the structure and function of cells by interfering with biochemical pathways and gene expression. Investigating these changes, in addition to maintaining the health of astronauts, will also be useful for improving the quality of human life on earth. In this study, the efficiency of *Lactobacillus acidophilus* ATCC 4356 bacteria in the bioremoval of lead from aqueous solution was investigated in microgravity and Mars gravity conditions. The results showed a decrease in lead concentration after 24-hour treatment by 82.1% under microgravity conditions, 79.6% under simulated Mars gravity conditions and 70.6% under natural Earth gravity conditions. Therefore, by reducing the gravity, it is possible to increase the efficiency of *L. acidophilus* in the bioremoval of lead metal.



بررسی تاثیر میکروگراویتی و جاذبه مریخ بر جذب فلز سرب توسط لاکتوباسیلوس / اسیدوفیلوس

مریم صلواتی فر*

۱- پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران salavati@ari.ac.ir

* نویسنده مسئول

دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه

علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال سوم، شماره ۱، صفحه ۹۷-۱۰۴
بهار و تابستان ۱۴۰۲

DOI:
10.22034/jsssta.2023.391960.1118

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

واژه‌های کلیدی

سرب، لاکتوباسیلوس اسیدوفیلوس،
میکروگراویتی، جاذبه مریخ،
کلینواست.

نحوه استناد به این مقاله

مریم صلواتی فر. "بررسی تاثیر میکروگراویتی و جاذبه مریخ بر جذب فلز سرب توسط لاکتوباسیلوس اسیدوفیلوس"، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد سوم، شماره اول، صفحات ۹۷-۱۰۴، ۱۴۰۲.

چکیده

یکی از جدی‌ترین معضلات دنیای صنعتی، آلودگی فلزات سنگین است. سرب به عنوان یک فلز سنگین، حتی در مقادیر اندک، اثرات بسیار مخربی بر سلامت انسان دارد. از این رو، حذف آن از آب، از مهم‌ترین چالش‌های سیستم سلامت عمومی است. کاربرد میکروارگانیسم‌ها در این زمینه بسیار مفید و بی‌خطر است. موجودات ساکن بر روی زمین به طور مداوم تحت تاثیر نیروی جاذبه قرار دارند و در صورت تغییر آن، تحت تاثیر شوکی منحصر به فرد قرار خواهند گرفت. چنین تغییری از طریق مداخله با مسیرهای بیوشیمیایی و بیان ژن، اثراتی را بر ساختار و عملکرد سلول‌ها دارد. بررسی این تغییرات علاوه بر حفظ سلامت فضاوردان، برای بهبود کیفیت زندگی انسان بر روی زمین نیز مفید خواهد بود. در این مطالعه، کارایی باکتری *Lactobacillus acidophilus* ATCC 4356 در حذف زیستی سرب از محلول آبی در شرایط میکروگراویتی و جاذبه مریخ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان دهنده کاهش غلظت سرب پس از تیمار ۲۴ ساعته به میزان ۸۲/۱٪ تحت شرایط میکروگراویتی، ۷۹/۶٪ در شرایط شبیه‌سازی شده جاذبه مریخ و ۷۰/۶٪ در شرایط جاذبه طبیعی زمین بود. از این رو، با کاهش جاذبه می‌توان به افزایش کارایی *L. acidophilus* در حذف زیستی فلز سرب کمک نمود.

۱- مقدمه

فلزات سنگین عناصر طبیعی در پوسته زمین هستند که می‌توانند از طریق فرآوری صنعتی یا کشاورزی، با استفاده از کود و آفت‌کش‌ها وارد غذای انسان شوند. از جمله اثرات مخربی که این فلزات بر سلامتی انسان دارند، کاهش رشد اندام‌ها، سرطان، اختلال در سیستم عصبی و سیستم دفاعی بدن است و در موارد حاد می‌تواند خطر مرگ را به همراه داشته باشد. بیش‌ترین و خطرناک‌ترین آثار مسمومیت به وسیله فلزات سنگین، در مراحل رشد و نمو انسان اتفاق می‌افتد. رشد سریع سیستم‌های بدن در جنین، نوزاد و کودکان خردسال، در این اثرپذیری بسیار حائز اهمیت است [۱، ۲].

سرب به عنوان یک فلز سنگین، فلزی بسیار سمی است که استفاده گسترده از آن باعث آلودگی گسترده محیطی و مشکلات بهداشتی در بسیاری از نقاط جهان شده است. منابع قرار گرفتن در معرض سرب عمدتاً شامل فرایندهای صنعتی، غذا، دخانیات، آب آشامیدنی و منابع خانگی است. هم‌چنین بنزین، لوله کشی منازل، ظروف مفرقی، باتری‌ها، اسباب بازی‌ها و شیرآلات سایر منابع سرب هستند [۳]. ورود سرب به طبیعت منجر به جذب بخشی از آن توسط گیاهان شده و در خاک تثبیت می‌شود. هم‌چنین به چرخه آب وارد شده و از این‌رو، قرار گرفتن انسان در معرض سرب در جمعیت عمومی، از طریق غذا یا آب آشامیدنی است. گیاهی با غلظت بالای سرب تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را تسریع می‌کند و باعث آسیب غشای لیپیدی می‌شود که در نهایت منجر به آسیب کلروفیل و فرایندهای فتوسنتزی شده و رشد کلی گیاه را سرکوب می‌کند [۴].

برای حذف فلزات سنگین روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی وجود دارند. محدودیت این روش‌ها شامل گزینش‌پذیری محدود، هزینه بالا، مصرف انرژی زیاد و انتشار محصولات جانبی سمی است. بنابراین، یک روش کم هزینه و کارآمد برای حذف فلزات سنگین مانند پالایش زیستی ترجیح داده می‌شود. روش‌های زیستی به دلایل اقتصادی بودن و حفظ کیفیت تغذیه‌ای روش‌های مناسب‌تری هستند [۵]. در رویکرد زیست پالایی فلزات سنگین که از چند دهه پیش آغاز شده است، از یک موجود زنده به منظور جذب آلاینده‌ها استفاده می‌شود. در روش زیستی برای حذف فلزات سنگین تاکنون از گیاهان و قارچ‌ها و میکروارگانیسم‌هایی نظیر مخمرها، باکتری‌ها، جلبک‌ها، سیانوباکتری‌ها و حتی ضایعات

حاصل از آن‌ها استفاده شده است. در این میان، استفاده از میکروارگانیسم‌ها^۲ از مقبولیت بیش‌تری برخوردار است زیرا کشت و کار کردن با آن‌ها ساده‌تر و از نظر هزینه و ایمنی مناسب‌تر است [۶، ۷]. یک گروه شاخص از این میکروارگانیسم‌ها، پروبیوتیک‌ها هستند [۸]. پروبیوتیک‌ها میکروارگانیسم‌های زنده‌ای هستند که با حفظ یا بهبود تعادل میکروبی بدن می‌توانند اثرات سلامت بخشی برای میزبان خود به همراه داشته باشند. باکتری‌های تولیدکننده اسید لاکتیک به ویژه گونه‌های لاکتوباسیلوس^۳ امروزه در کانون توجه قرار گرفته‌اند. فلزات سنگین به دلیل داشتن بار مثبت، به عوامل N^{3-} و O^{2-} موجود در پپتیدوگلیکان^۴ و تیکوئیک اسیدها^۵ که به وفور در دیواره سلولی آن‌ها وجود دارد، متصل می‌شوند [۹-۱۱].

جاذبه زمین به عنوان یک عامل فیزیکی پر اهمیت، تأثیر زیادی بر ساکنان آن دارد. میکروارگانیسم‌ها نیز مانند سایر موجودات زنده تحت تأثیر این نیرو پدید آمده و توسعه یافته‌اند. باکتری‌های هم‌زیست روده مانند سایر موجودات تحت تأثیر این نیرو قرار گرفته و با آن سازگار شده‌اند. هر گونه تغییر در جاذبه، می‌تواند منجر به تغییر در ترکیب، سرعت رشد، تولید متابولیت‌های ثانویه، تشکیل بیوفیلم، بیماری‌زایی و بیان ژن در آن‌ها شود [۱۲]. مطالعات متعددی ثابت نموده که کاهش یا حذف جاذبه می‌تواند بر عملکرد سلولی، فیزیولوژی و مورفولوژی میکروارگانیسم‌ها تأثیر بگذارد [۱۰، ۱۳، ۱۴]. در پروژه MARS500 که شش خدمه به مدت ۵۲۰ روز در شرایط شبیه‌سازی شده مریخ قرار گرفتند ثابت شد، هفت ماه پس از شروع آزمایش، ترکیب میکروبیوم روده و متابولیت‌های تولید شده توسط آن‌ها تغییر یافته و تعداد نیز به ۹٪ کاهش یافت. بازگشت این تغییرات به حالت قبل پس از پایان پروژه، به ویژگی‌های فردی افراد مرتبط بود [۱۵]. نظر به خطرات مواجهه طولانی مدت با فلزات سنگین حتی در مقادیر اندک، دستیابی به روش‌هایی به منظور افزایش ظرفیت جذب این فلزات توسط میکروارگانیسم مورد نیاز است.

با توجه به تغییرات رخ داده در ترکیب میکروبیوم مسافران فضایی در فضای خارج از جو زمین [۱۶، ۱۷] و مریخ [۱۵، ۱۸]، و هم‌چنین افزایش جذب زیستی فلزات سنگین در میکروگراویتی [۱۰]، در مطالعه پیش‌رو به بررسی و مقایسه حذف زیستی فلز سنگین سرب از آب توسط باکتری لاکتوباسیلوس اسیدوفیلوس^۶ در شرایط میکروگراویتی و جاذبه مریخ پرداخته شده است.

⁴ Peptidoglycan

⁵ Teichoic acid

⁶ Lactobacillus acidophilus

¹ Reactive Oxygen Species

² Microorganism

³ Lactobacillus

۲- مواد و روش‌ها

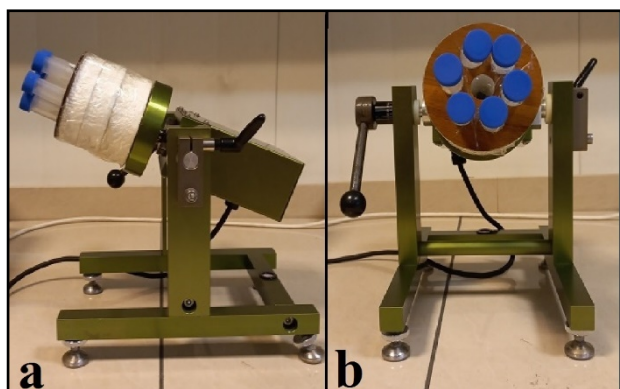
پیش از انجام آزمایشات جذب زیستی ابتدا تمامی ظروف شیشه‌ای به منظور برطرف کردن آلودگی‌های فلزی احتمالی، به مدت ۲۴ ساعت در اسید نیتریک ۱۵ درصد به مدت ۲۴ ساعت خیسانده و سپس با آب دیونیزه شست‌وشو داده شده و خشک شدند. همچنین، تمامی ابزار و ظروف با فویل پوشانده شده و درون فور با دمای ۱۸۰ درجه به مدت ۳ ساعت ضدعفونی شدند. محلول‌ها و محیط‌های کشت نیز با حرارت مرطوب در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۲۰ دقیقه در فشار ۱/۴ اتمسفر سترون شدند.

به منظور تهیه زیست توده اصلی، باکتری *L. acidophilus* ATCC 4356 از کلکسیون میکروبی تک ژن زیست، تهران، ایران تهیه شد و در محیط کشت مایع MRS^۱ (مرک، آلمان)، انکوباتور ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت کشت داده شد. کشت بذر تازه برای هر بار انجام جذب زیستی، از کشت اصلی تهیه شد. برای تهیه کشت بذر، ۵ میلی‌لیتر از کشت اصلی به ۵۰ میلی‌لیتر مایع MRS (pH ۶/۲±۰/۲) اضافه شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد و دور ۷۵ در دقیقه نگهداری شد. برای شمارش کشت بذر از روش رقت سریالی استفاده شد [۱۹].

به منظور انجام جذب زیستی، ابتدا در ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری حجم مورد نیاز عنصر سرب با غلظت نهایی ۵۲/۵ میکروگرم بر لیتر (ppb: Parts per billion) در آب دیونیزه آماده شد [۲۰، ۲۱]. تنظیم pH بر روی عدد ۴، توسط سود و اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال انجام شد. سپس برای هر نمونه، ۱۰ میلی‌لیتر از محلول حاوی کشت بذر تازه به درون فالکون منتقل شده و با دور ۴۰۰۰ g به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد و محیط کشت خالی گشته به نحوی که ۱ سی‌سی در انتهای فالکون باقی ماند. سپس، از محلول سرب آماده شده، به رسوب اضافه شد به نحوی که میزان زیست توده در محلول نهایی CFU/ml 4×10^{10} شد. به منظور حذف نیروی تنش برشی، لوله‌ها هواگیری و عاری از حباب شدند و سپس بر روی دستگاه کلینواستت تک محوره^۲ (UN00SA, USA) در شرایط میکروگراویتی (۰ g) مستقر شدند. در تستی مشابه، نمونه‌ها در شرایط شبیه‌سازی شده جاذبه مریخ (۰/۳۸ g) بر روی کلینواستت قرار گرفتند. در کلینواستت تک محوره، چرخش حول یک محور انجام می‌پذیرد که جهت محور، میزان جاذبه وارد بر نمونه را تعیین می‌کند. به منظور شبیه‌سازی میکروگراویتی، چرخش حول محور افقی یا به عبارت

دیگر، عمود بر محور جاذبه زمین است. در صورتی که برای شبیه‌سازی جاذبه مریخ، لازم است محور چرخش کلینواستت با افق، زاویه ۲۲ درجه داشته باشد. مزیت استفاده از کلینواستت تک محوره، سادگی آن در شبیه‌سازی است [۲۲].

سرعت چرخش دستگاه کلینواستت، ۱۵ rpm تنظیم شد و دمای انکوباتور نیز ۳۷ درجه سانتی‌گراد بود [۱۰، ۱۴]. به منظور مقایسه میزان جذب زیستی، نمونه‌های کنترل در شرایط مشابه درون انکوباتور اما بر روی زمین قرار داشتند. تمامی تست‌ها به مدت ۲۴ ساعت در معرض فلزات سنگین قرار گرفتند. شکل شماره ۱، نحوه قرارگیری نمونه‌ها بر روی دستگاه کلینواستت را نشان می‌دهد.



شکل ۱. قرارگیری نمونه‌ها بر روی دستگاه کلینواستت. (a) شبیه‌سازی جاذبه مریخ، (b) شبیه‌سازی میکروگراویتی

پس از پایان زمان جذب زیستی، نمونه‌ها با شتاب ۴۰۰۰ g و به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. محلول‌های رویی با دقت جداسازی و به منظور تعیین مقدار باقی‌مانده فلز سرب توسط دستگاه ICP-MASS^۳ (Perkin Elmer ELAN 6100 DRC-e) مورد خوانش قرار گرفتند. با مشخص شدن غلظت باقیمانده فلز، درصد جذب زیستی مشخص شد. به منظور کاهش میزان خطا، تمامی آزمون‌ها با سه بار تکرار انجام شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها و رسم نمودارها با کمک نرم‌افزار GraphPad Prism software (version 9) انجام شد. برای مقایسه داده‌ها و برای به دست آوردن *p-value* و سطح اطمینان، از آنالیز واریانس یک طرفه^۴ استفاده شده و *p-value* کوچک‌تر از ۰/۰۵ معنادار در نظر گرفته شد.

³ Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

⁴ One-way ANOVA

¹ Man-Rogosa-Sharpe

² One axis clinostat

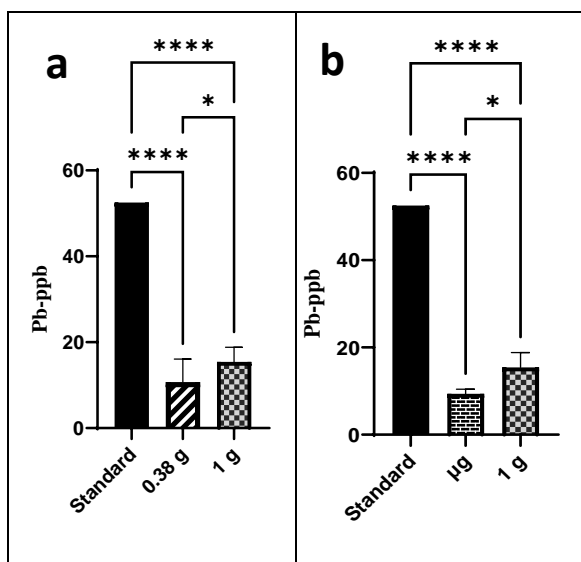
۳- نتایج و بحث

نمودارهای شکل‌های ۲ و ۳، نشان دهنده میزان کاهش غلظت فلز سرب پس از تیمار ۲۴ ساعته است. میزان کاهش غلظت فلز سرب توسط *L. acidophilus* تحت شرایط میکروگراویتی ۸۲/۱ درصد، شرایط شبیه‌سازی شده جاذبه مریخ ۷۹/۶ درصد و در شرایط جاذبه طبیعی زمین ۷۰/۶ درصد بود.

فضای خارج از جو کره زمین، محیط و شرایط منحصر به فردی دارد که مطالعه آن نه تنها به منظور حفظ سلامت مسافران فضایی اهمیت دارد بلکه می‌توان از آن حیث، ارتقای کیفیت زندگی انسان بر روی زمین نیز بهره جست. با توجه به این‌که مطالعات در شرایط واقعی فضایی به دلیل هزینه‌های گزاف و محدودیت تکرارپذیری، مقرون به صرفه نیست، دانشمندان سعی در شبیه‌سازی این محیط‌های خاص بر روی زمین دارند. از این‌رو، انواع دستگاه‌های شبیه‌ساز ابداع شدند. دستگاه‌های شبیه‌ساز، با چرخاندن نمونه حول محوری افقی، بی‌وزنی را شبیه‌سازی می‌نمایند [۲۳].

رفع آلودگی‌های موجود در آب و مواد غذایی، از مهم‌ترین چالش‌ها در حفظ سلامت عمومی است. روش‌های متعددی در این زمینه مورد مطالعه و کاربرد قرار گرفته‌اند که به‌کارگیری میکرو ارگانیسم‌ها یکی از این روش‌های ایمن است. با توجه به حضور پلیمرهای زیستی بر روی سطح میکرو ارگانیسم‌ها، فلزات دارای بار مثبت را به خود جذب نموده و از محیط خارج می‌نمایند [۲۴]. به دلیل وجود گزارشاتی مبنی بر تغییرات کاربردی در ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی میکرو ارگانیسم‌ها در شرایط کاهش جاذبه از جمله ساختارهای سطحی [۲۵] و همچنین افزایش قدرت جذب فلزات سنگین به دلیل این‌گونه تغییرات، مطالعه حاضر طراحی شد.

همان‌گونه که از نتایج حاصل از خوانش غلظت فلزی توسط دستگاه ICP-MASS (جدول ۱) مشخص است، غلظت فلز سنگین سرب پس از ۲۴ ساعت قرار گرفتن در معرض زیست توده *L. acidophilus* کاهش یافت.



شکل ۲. نتایج خوانش غلظت فلز سرب. (a) در شرایط شبیه‌سازی شده جاذبه مریخ، (b) در شرایط شبیه‌سازی شده میکروگراویتی
ppb: Parts per billion, Standard: Initial concentration, µg: Microgravity, 0.38 g: Mars gravity, 1 g: ground gravity.
*, and **** indicate p -value < 0.05 , and < 0.0001 respectively.

بر اساس نتایج حاصله، میزان کاهش غلظت فلز سرب در شرایط شبیه‌سازی شده جاذبه مریخ نسبت به جاذبه طبیعی زمین به وضوح مشهود بود و میزان این تفاوت معنادار بود (بخش a شکل ۲). همچنین این میزان کاهش، در شرایط میکروگراویتی نیز نسبت به جاذبه طبیعی زمین تفاوت معناداری داشت (بخش b شکل ۲).

از مقایسه مقادیر عددی و نمودار غلظت فلز سرب باقی‌مانده در محلول آبی پس از تیمار میکروگراویتی با شرایط شبیه‌سازی شده جاذبه مریخ، تصور می‌شود که *L. acidophilus* در شرایط میکروگراویتی به صورت کارآمدتری به حذف زیستی فلز سرب پرداخته است اما آنالیز آماری با آزمون One way ANOVA مشخص نمود که تفاوت معناداری میان این دو حالت نسبت به جاذبه طبیعی زمین وجود نداشت (p -value > 0.05) (شکل ۳).

جدول ۱. نتایج حاصل از خوانش غلظت فلزی

غلظت نهایی سرب پس از تیمار (ppb)			غلظت اولیه سرب (ppb)
۱ g	۰/۳۸ g	(µg) ۰ g	
۱۴/۱	۹/۱۵	۹/۸۷	۵۲/۵
۱۵/۳۷	۹/۸۷	۹/۱۵	
۱۶/۸۳	۱۳/۱۷	۹/۱۵	

بود که دلیل آن به احتمال زیاد مربوط به بهینه‌سازی غلظت فلز بر اساس مطالعه هادیان [۲۰، ۲۱] در پژوهش حاضر بود.

بخش عمده ساختار دیواره سلولی لاکتوباسیلوس‌ها که متعلق به خانواده باکتری‌های گرم مثبت هستند شامل پپتیدوگلیکان، تیکوئیک اسید، لیپوتیکوئیک اسید^۱، پروتئین S و برخی پروتئین‌های خنثی است. چنین ساختارهایی به دلیل داشتن بار منفی فراوان به واسطه حضور گروه‌هایی چون کربوکسیل^۲ و هیدروکسیل^۳ می‌توانند به خوبی به یون‌های فلزی که واجد بار منفی هستند متصل شده و آن‌ها را از محیط برداشت کنند [26, 27]. هر عاملی که منجر به افزایش ضخامت دیواره سلولی باکتری‌ها شود به افزایش قدرت جذب زیستی آن‌ها کمک می‌نماید. میکروگروایتی شرایط خاص و منحصر به فردی را برای سلول‌ها فراهم می‌نماید که به دلیل حذف نیروی تنش برشی و هم‌چنین تلاطم اندک محیط، تغییراتی در تولید متابولیت‌های ثانویه، بیماری‌زایی، مقاومت به استرس‌های محیطی، مورفولوژی، فیزیولوژی و ژنتیک اتفاق می‌افتد [۱۲، ۲۸]. با توجه به افزایش پلیمرهای خارج سلولی برخی باکتری‌ها در شرایط میکروگروایتی نسبت به جاذبه طبیعی زمین [۲۵]، این مطالعه طراحی شد که افزایش میزان جذب فلز سرب هم در شرایط میکروگروایتی و هم جاذبه مریخ نسبت به جاذبه طبیعی زمین تفاوت معناداری داشت.

۴- نتیجه گیری

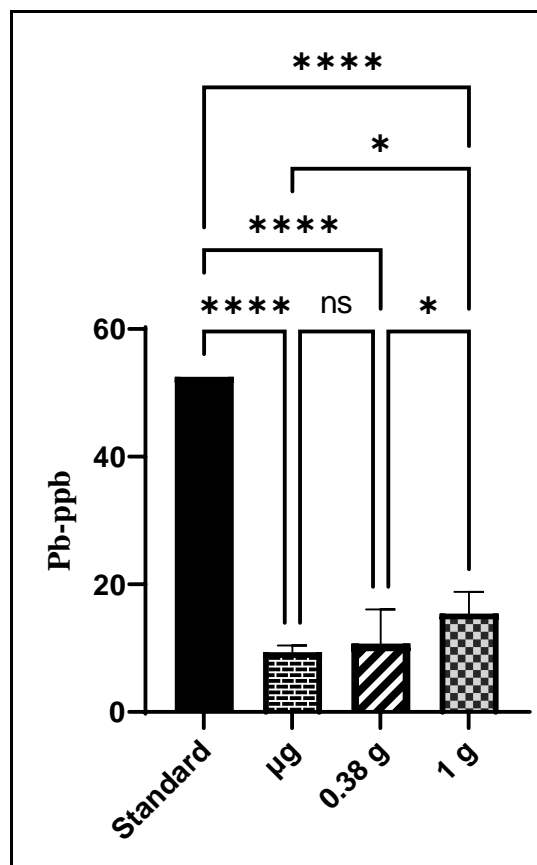
کاهش جاذبه شرایطی را فراهم آورد که باکتری *L. acidophilus* به صورت موثرتری فلز سرب را از آب حذف نمود. نتایج حاصل از این پژوهش علاوه بر کاربردهای زمینی در رفع آلودگی فلزات سنگین در صنایع آب و غذای انسان و دام، می‌تواند در رفع این‌گونه آلودگی‌ها به منظور حفظ سلامت فضانوردان در ماموریت‌های فضایی بهره‌برداری شود.

تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافی در این پژوهش وجود ندارد"

مراجع

- [۱] K. Arun *et al.*, "Probiotics and gut microbiome— Prospects and challenges in remediating heavy metal toxicity," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 420, p. 126676, 2021.



شکل ۳. مقایسه نتایج خوانش غلظت فلز سرب در شرایط شبیه‌سازی شده جاذبه مریخ و شرایط شبیه‌سازی شده میکروگروایتی

ppb: Parts per billion, Standard: Initial concentration, µg: Microgravity, 0.38 g: Mars gravity, 1 g: ground gravity. *, and **** indicate p -value < 0.05 , and < 0.0001 respectively. Ns: non-significant

از دیدگاه کلی، مقایسه آماری مشخص نمود که *L. acidophilus* در هر دو تیمار کاهش جاذبه نسبت به شرایط جاذبه زمین، به میزان معناداری میزان بیش‌تری از سرب را جذب و از محلول جدا نموده است. در حقیقت، روند کاهش جاذبه با میزان حذف فلز رابطه معکوس داشته و به این فرایند کمک نموده است. نتایج مربوط به شرایط بی وزنی این مطالعه با پژوهش افشاریان ۲۰۲۲ هم راستا بود که البته نتایج حذف سرب در بی وزنی مربوط به مطالعه مذکور کم‌تر از نتایج مطالعه پیش‌رو

³ Hydroxyl

¹ Lipoteichoic acid

² Carboxyl

- from water," *Heliyon*, vol. 8, no. 12, p. e12022-2307.
- [۱۱] A. Zoghi *et al.*, "Effect of pretreatments on bioremoval of metals and subsequent exposure to simulated gastrointestinal conditions," *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, vol. 14, no. 3, pp. 145-155, 2022.
- [۱۲] G. Senatore, F. Mastroleo, N. Leys, and G. Mauriello, "Effect of microgravity & space radiation on microbes," *Future Microbiology*, vol. 13, no. 07, pp. 831-847, 2018.
- [۱۳] B. Huang, D.-G. Li, Y. Huang, and C.-T. Liu, "Effects of spaceflight and simulated microgravity on microbial growth and secondary metabolism," *Military Medical Research*, vol. 5, no. 1, pp. 1-14, 2018.
- [۱۴] M. Salavatifar, N. Mosallaei, and A. H. Salmanian, "Heterologous Expression of Shiga-Like Toxin Type 2 in Microgravity Condition," *Journal of Space Science and Technology*, 2022.
- [۱۵] S. Turroni *et al.*, "Temporal dynamics of the gut microbiota in people sharing a confined environment, a 520-day ground-based space simulation, MARS500," *Microbiome*, vol. 5, pp. 1-11, 2017.
- [۱۶] M. Salavatifar, S. M. Ahmadi, S. D. Todorov, K. Khosravi-Darani, and A. Tripathy, "Impact of microgravity on virulence, antibiotic resistance, and gene expression in beneficial and pathogenic microorganisms," *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 2023.
- [۱۷] L. Yuan *et al.*, "Long-term simulated microgravity alters gut microbiota and metabolome in mice," *Frontiers in Microbiology*, vol. 14, 2023.
- [۱۸] D. Pearce, C. Moissl-Eichinger, T. Kuehnast, C. Abbott, and A. Mahnert, "The crewed journey to Mars and its implications for the human microbiome," *44th COSPAR* [۲] D. R. Wallace and A. B. Djordjevic, "Heavy metal and pesticide exposure: A mixture of potential toxicity and carcinogenicity," *Current Opinion in Toxicology*, vol. 19, pp. 72-79, 2020.
- [۳] K. Thurmer, E. Williams, and J. Reutt-Robey, "Autocatalytic oxidation of lead crystallite surfaces," *Science*, vol. 297, no. 5589, pp. 2033-2035, 2002.
- [۴] J. Oosthuizen, *Environmental health: Emerging issues and practice*. BoD-Books on Demand, 2012.
- [۵] P. Arora, R. Paliwal, N. Rani, and S. Chaudhry, "Recent Trends in Bioremediation of Heavy Metals: Challenges and Perspectives," *Omic Insights in Environmental Bioremediation*, pp. 103-131, 2022.
- [۶] A. Basit, S. T. Shah, I. Ullah, S. T. Muntha, and H. I. Mohamed, "Microbe-assisted phytoremediation of environmental pollutants and energy recycling in sustainable agriculture," *Archives of Microbiology*, pp. 1-27, 2021.
- [۷] A. Zoghi *et al.*, "Role of the lactobacilli in food bio-decontamination: Friends with benefits," *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 150, p. 109861, 2021.
- [۸] R. M. Abdel-Megeed, "Probiotics: a promising generation of heavy metal detoxification," *Biological trace element research*, vol. 199, no. 6, pp. 2406-2413, 2021.
- [۹] R. Massoud, K. Khosravi-Darani, A. Sharifan, G. Asadi, and A. Zoghi, "Lead and cadmium biosorption from milk by *Lactobacillus acidophilus* ATCC 4356," *Food Science & Nutrition*, vol. 8, no. 10, pp. 5284-5291, 2020.
- [۱۰] Z. Afsharian, M. Salavatifar, and K. Khosravi_Darani, "Impact of simulated microgravity on bioremoval of heavy-metals by *Lactobacillus acidophilus* ATCC 4356

- isolates," *FEMS Immunology & Medical Microbiology*, vol. 59, no. 3, pp. 350-356, 2010.
- [۲۶] Z. Chen, X. Pan, H. Chen, X. Guan, and Z. Lin, "Biom mineralization of Pb (II) into Pb-hydroxyapatite induced by *Bacillus cereus* 12-2 isolated from Lead-Zinc mine tailings," *Journal of hazardous materials*, vol. 301, pp. 531-537, 2016.
- [۲۷] S. Xing *et al.*, "Lead biosorption of probiotic bacteria: effects of the intestinal content from laying hens," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 24, no. 15, pp. 13528-13535, 2017.
- [۲۸] C. A. Nickerson, C. M. Ott, J. W. Wilson, R. Ramamurthy, and D. L. Pierson, "Microbial responses to microgravity and other low-shear environments," *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, vol. 68, no. 2, pp. 345-361, 2004.
- Scientific Assembly. Held 16-24 July, vol. 44, p. 3278, 2022.
- [۲۹] S. Sieuwerts, F. A. De Bok, E. Mols, W. M. De Vos, and J. van Hylckama Vlieg, "A simple and fast method for determining colony forming units," *Letters in applied microbiology*, vol. 47, no. 4, pp. 275-278, 2008.
- [۳۰] M. R. Hadiani, K. Khosravi-Darani, N. Rahimifard, and H. Younesi, "Assessment of mercury biosorption by *Saccharomyces cerevisiae*: response surface methodology for optimization of low Hg (II) concentrations," *Journal of environmental chemical engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 4980-4987, 2018.
- [۳۱] M. R. Hadiani, K. K. Darani, N. Rahimifard, and H. Younesi, "Biosorption of low concentration levels of Lead (II) and Cadmium (II) from aqueous solution by *Saccharomyces cerevisiae*: Response surface methodology," *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, vol. 15, pp. 25-34, 2018.
- [۳۲] K. H. Hasenstein, J. Van Loon, and D. Beysens, "Clinostats and other rotating systems—design, function, and limitations," *Generation and applications of extra-terrestrial environments on earth*, vol. 14, pp. 147-156, 2015.
- [۳۳] Z. Hajebrahimi, "3-D clinostat for microgravity simulation in cellular and molecular studies," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 27-33, 2017.
- [۳۴] P. Gupta and B. Diwan, "Bacterial exopolysaccharide mediated heavy metal removal: a review on biosynthesis, mechanism and remediation strategies," *Biotechnology Reports*, vol. 13, pp. 58-71, 2017.
- [۳۵] L. Mauclaire and M. Egli, "Effect of simulated microgravity on growth and production of exopolymeric substances of *Micrococcus luteus* space and earth



COPYRIGHTS

© 2023 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/>)