Archive of SID.ir

JSST
Journal of Space Science and Technology

P-ISSN: 2008-4560
E-ISSN: 2423-4516

Journal of Space Science and Technology

Vol. 17, No. 1, pp. 63-70, 2024
https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1452
Journal Homepage: https://jsst.ias.ir

Original Research Paper

Cadmium Bioremoval from Water by Probiotics in Simulated Microgravity and Mars Gravity

Maryam Salavatifar

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

ARTICLE INFO

Article History:

Received 04 July 2023
Revised 04 September 2023
Accepted 25 September 2023
Available Online 06 January 2024

Keywords:

Cadmium
Lactobacillus Acidophilus
Probiotic
Microgravity
Mars Gravity

ABSTRACT

Changes in Earth's gravity can significantly affect the behavior and performance of organisms, leading to the discovery of new practical methods for various applications. Heavy metal toxicity poses substantial risks to human health. Cadmium (Cd), one of the most hazardous heavy metals, causes defects in genome repair following oxidative stress and DNA damage, potentially leading to cancer. Several strategies have been introduced to remove heavy metals from water, including surface adsorption, membrane filtration, ion exchange, chemical precipitation, and nanotechnology treatments. Among these, bioremediation using probiotics has been identified as a cost-effective, safe, and efficient method for heavy metal removal. This study measured the effect of Lactobacillus acidophilus on cadmium bioremoval under simulated microgravity and Mars gravity conditions. For the bioremoval tests, 52.5 µg/L of cadmium was added to bacterial biomass and subjected to microgravity conditions. Similar samples were also placed under Mars's gravity. Control samples were maintained under identical conditions but with Earth's gravity. At the end of the treatment period, the tubes were centrifuged, and the remaining cadmium concentration in the supernatant was measured. The results showed that a 24-hour water treatment by L. acidophilus removed 43.77% of the cadmium concentration under Earth's gravity, 54.74% under microgravity, and 54.84% under Mars's gravity. Statistical analysis demonstrated that L. acidophilus effectively facilitated cadmium bioremoval, and this capability was sustained even under different gravitational conditions. Therefore, this bacterium can mitigate heavy metal pollution during space missions, safeguarding astronauts' health.

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

How to Cite this Article:
M. Salavatifar, "Cadmium Bioremoval from Water by Probiotics in Simulated Microgravity and Mars Gravity," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 1, pp. 63-70, 2024, (in Persian), https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1452.

COPYRIGHTS
© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of The Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

OPEN ACCESS

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

JSST
علوم و فناوری فضایی

شاپای چاپی: ۴۵۶۰-۲۰۰۸
شاپای الکترونیکی: ۴۵۱۶-۲۴۲۳

علوم و فناوری فضایی

سال ۱۴۰۳، دوره ۱۷، شماره ۱، صفحه ۶۳-۷۰
https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1452
Journal Homepage: https://jsst.ias.ir

مقاله پژوهشی

حذف زیستی کادمیوم از آب توسط پروبیوتیک‌ها در جاذبه مریخ و میکروگراویتی شبیه‌سازی شده

مریم صلواتی‌فر

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

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۳۱ تیر ۱۴۰۲
بازنگری ۱۳ شهریور ۱۴۰۲
پذیرش ۳ مهر ۱۴۰۲
اولین انتشار ۱۶ دی ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

کادمیوم
لاکتوباسیلوس اسیدوفیلوس
پروبیوتیک
میکروگراویتی
جاذبه مریخ

چکیده

گرانش زمین یکی از نیروهایی است که به‌طور مداوم بر ساختار و عملکرد موجودات زنده تأثیر می‌گذارد. مطالعه تغییرات این نیرو می‌تواند منجر به کشف روش‌های کاربردی نوین شود. فلزات سنگین خطرات زیادی برای سلامت انسان دارند. آن‌ها به‌عنوان شبه عنصر عمل نموده و حتی ممکن است در فرآیندهای متابولیک اختلال ایجاد کنند. کادمیوم به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین فلزات، به دنبال القای استرس اکسیداتیو، باعث ایجاد نقص در ترمیم DNA، آسیب به DNA و گاهی منجر به سرطان می‌شود. روش‌های مختلفی برای حذف فلزات سنگین از آب آشامیدنی معرفی شده است. حذف زیستی توسط پروبیوتیک‌ها یکی از این روش‌های بی‌خطر می‌باشد. در این مطالعه لاکتوباسیلوس اسیدوفیلوس به مدت ۲۴ ساعت در معرض محلول آبی حاوی فلز کادمیوم در شرایط میکروگراویتی و گرانش مریخ قرار گرفت و سپس، باقیمانده فلز اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دادند که لاکتوباسیلوس اسیدوفیلوس قادر به حذف ۴۳/۷۷٪ از غلظت کادمیوم در گرانش زمین، ۵۴/۷۴٪ تحت میکروگراویتی و ۵۴/۸۴٪ در گرانش مریخ شد. آنالیز آماری نشان داد لاکتوباسیلوس اسیدوفیلوس در حذف زیستی کادمیوم مؤثر بوده و حتی با تغییرات جاذبه نیز این قابلیت حفظ گردید. بنابراین می‌توان از این باکتری در رفع آلودگی فلزات سنگین در زمان ماموریت‌های فضایی به منظور حفظ سلامت فضانوردان بهره جست.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: salavati@ari.ac.ir

How to Cite this Article:
M. Salavatifar, "Cadmium Bioremoval from Water by Probiotics in Simulated Microgravity and Mars Gravity," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 1, pp. 63-70, 2024, (in Persian), https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1452.

COPYRIGHTS
© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of The Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

OPEN ACCESS

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

علائم و اختصارات

دئوکسی ریبونوکلئیک اسید	DNA
پتانسیل هیدروژن	pH
طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی	ICP-MASS
یک واحد تشکیل کلنی	CFU
میلی‌لیتر	ml
مقدار احتمال	*p*-value
جاذبه زمین	g

مقدمه

جاذبه، نیرویی است که به‌صورت دائمی بر موجودات زنده ساکن بر روی کره زمین اعمال می‌شود و همه جانداران تحت تاثیر این نیرو، تشکیل، رشد و تکامل یافته‌اند. میکروارگانیسم‌ها نیز مانند سایر موجودات زنده، تحت تأثیر جاذبه قرار دارند. تحقیقات کمی در مورد فیزیولوژی، مورفولوژی و حتی تغییرات قدرت بیماری‌زایی میکروارگانیسم‌ها در شرایط بی‌وزنی موجود است. این تغییرات می‌تواند منتج از تغییر در ضخامت لایه سطحی و خواص تجمعی میکروارگانیسم‌ها باشد [۱]. هر گونه تغییر در نیروی جاذبه، منجر به برهم خوردن ترکیب میکروبیوم و همچنین سرعت رشد، تولید متابولیت‌های ثانویه، بیماری‌زایی، بیان ژن، تشکیل بیوفیلم و مقاومت آنتی‌بیوتیکی آن‌ها خواهد گردید [۲]. اما به وضوح مشخص نشده است که این تغییرات گرانشی تأثیر مثبت یا منفی بر سلامت انسان دارد. تحقیقات متعددی ثابت کرده‌اند که کاهش یا حذف گرانش (بی وزنی) بر ویژگی‌های میکروارگانیسم‌ها تأثیر داشته و بنابراین می‌تواند منجر به تغییراتی در هوموستاز و سلامت بدن شود [۳].

فلزات سنگین بخشی از عناصر جزیی طبیعت هستند که چگالی، جرم اتمی یا عدد اتمی بالایی داشته اما با ورود به اکوسیستم زنده می‌توانند سمی شوند. جیوه، سرب، کادمیوم و آرسنیک رایج‌ترین فلزات سنگینی هستند که باعث آلودگی محیط زیست می‌گردند. تولیدات صنعتی (ریخته‌گری، ذوب، پالایشگاه‌های نفت، پتروشیمی‌ها، آفت‌کش‌ها، صنایع شیمیایی)، استخراج معادن، پساب‌های تصفیه‌نشده صنایع، لوله‌های فلزی و محصولات فرعی احتراق نیروگاه‌های زغال‌سوز از عمده‌ترین منابع انتشار این فلزات می‌باشند. بخشی از فلزات سنگین توسط گیاهان جذب شده و همچنین در خاک تثبیت می‌شود. از این رو قرار گرفتن انسان در معرض آن‌ها از طریق غذا و آب آشامیدنی است [۴, ۵]. مطالعات حاکی از ایجاد برخی از انواع سرطان‌ها در مواجهه مزمن با این‌گونه فلزات به دلیل تغییرات نابه‌جا در ژنوم و بیان ژن به‌عنوان یک فرآیند اساسی می‌باشد. فلزات سرطان‌زا مانند آرسنیک، کادمیوم و کروم می‌توانند سنتز و ترمیم DNA را مختل کنند [۶, ۷].

کادمیوم از جمله فلزات سنگینی به‌شمار می‌آید که در صورت جذب، تا دهه‌ها و حتی سال‌ها در بدن موجودات زنده همچون انسان باقی می‌ماند. اگر انسان در مواجهه طولانی مدت با کادمیوم قرار بگیرد دچار مشکلات کلیوی خواهد شد. به علاوه سبب بروز مشکلات در ریه و سرطان و بروز نقص‌های استخوان خواهد گردید. علاوه بر این، افزایش فشار خون و بروز مشکلات قلبی را نیز می‌توان از جمله تاثیرات کادمیوم بر سلامت انسان برشمرد [۸]. این فلز به‌طور طبیعی در خاک و مواد معدنی مانند نمک‌های کربنات، کلرید، سولفید، سولفات و هیدروکسید و همچنین در آب وجود دارد. سطوح بالای کادمیوم در هوا، آب و خاک می‌تواند به دنبال فعالیت‌های صنعتی رخ دهد که انسان می‌تواند به میزان قابل توجهی در معرض آن قرار گیرد. علاوه بر این، مصرف مواد غذایی آلوده منجر به ورود کادمیوم به بدن می‌شود. قرار گرفتن در معرض کادمیوم ممکن است از طریق سیگار کشیدن نیز رخ دهد، که می تواند غلظت کادمیوم در خون و ادرار را افزایش دهد. غلظت کادمیوم خون در افراد سیگاری تقریباً دو برابر بیشتر از افراد غیرسیگاری در جمعیت بزرگسال است. به‌نظر می‌رسد که این عارضه به تجمع غلظت بالای کادمیوم در بافت‌های تنباکو به ویژه در برگ‌ها مربوط باشد [۹]. وجود کادمیوم در آب آلوده می‌تواند مکانیسم‌های لازم در بدن را مختل کرده و احتمالاً منجر به اختلالات کوتاه مدت یا طولانی مدت شود [۱۰]. علی‌رغم جذب اندک دستگاه گوارش، کادمیوم به‌طور چشم‌گیری از طریق گرد و غبار صنعتی وارد ریه‌ها می‌شود. استنشاق حاد یا مزمن کادمیوم در مناطق صنعتی ممکن است منجر به آسیب‌های ریوی و اختلال عملکرد کلیه‌ها شود. مطالعات حیوانی و انسانی موارد فوق را تایید می‌کند [۱۱].

استراتژی‌های مختلفی برای حذف فلزات سنگین از آب معرفی شده است. به‌عنوان مثال، جذب سطحی، فیلتراسیون غشایی، تبادل یونی، رسوب شیمیایی و تیمارهای نانوتکنولوژی برخی از این روش‌ها هستند [۱۲]. مطالعاتی چند بر زیست پالایی فلزات سنگین سموم و آفت کش‌ها توسط پروبیوتیک‌ها متمرکز شده‌اند. پروبیوتیک‌ها میکروارگانیسم‌های زنده مفیدی هستند که در بدن زندگی نموده و می‌توانند فوایدی بر سلامت مانند درمان عفونت ادراری، اسهال و عدم تحمل لاکتوز در میزبان داشته باشند [۱۳]. گزارش‌های بسیاری حاکی از زیست پالایی فلزات سنگین توسط پروبیوتیک‌ها هستند [۱۴]. استفاده از پروبیوتیک‌ها برای تصفیه

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

زیستی فلزات سنگین روشی ارزان، ایمن و اغلب مفید است [۱۵]. باکتری‌های خانواده لاکتوباسیلوس که اکثراً به‌عنوان "پروبیوتیک" معرفی می‌شوند می‌توانند با اتصال سطحی به فلزات، دسترسی زیستی آن‌ها را کاهش دهند [۱۶]. یکی از این باکتری‌های پروبیوتیک، *Lactobacillus acidophilus* است که در محصولات غذایی رایج است. سویه‌های مختلف لاکتوباسیلوس برای پتانسیل زیست پالایی فلزات سنگین مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند [۱۳]. استراتژی اصلی زیست پالایی فلزات سنگین توسط سلول‌های باکتریایی، تبادل یونی پپتیدوگلیکان و یا اسیدتیکوئیک دیواره سلولی با لیگاندها است [۱۷]. دیواره سلولی لاکتوباسیل‌ها، دارای محتوای زیادی از اسیدهای تیکوئیک و پپتیدوگلیکان هستند به‌طوری‌که ظرفیت بالایی برای تصفیه زیستی فلزات سنگین دارند [۱۸]. زیست پالایی فلزات سنگین به موارد مختلفی مانند غلظت فلز سنگین، غلظت زیست توده، pH و دما بستگی دارد. علاوه بر این، پیش تیمار سلول‌های باکتریایی ممکن است ظرفیت جذب فلز را افزایش دهد [۱۹].

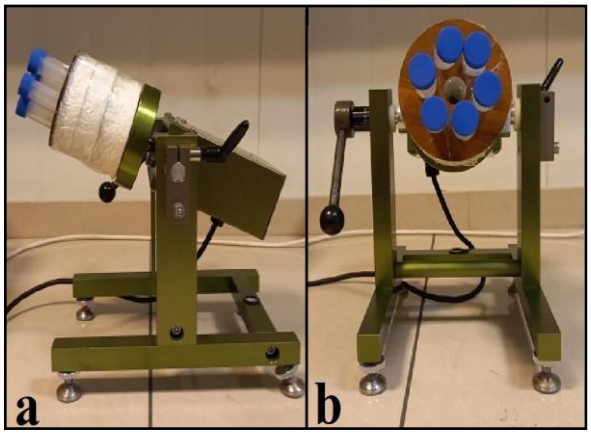
بر اساس دانش ما، مطالعات محدودی در مورد تأثیر تغییرات جاذبه بر زیست پالایی فلزات سنگین توسط باکتری لاکتوباسیلوس وجود دارد. بنابراین، در این مطالعه قدرت *L. Acidophilus* در زیست پالایی کادمیوم در شرایط جاذبه مریخ و هم‌چنین بی‌وزنی مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت و با شرایط جاذبه زمین مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

باکتری *L. acidophilus* ATCC 4356 از مجموعه میکروبی تک ژن زیست خریداری گردید و جهت تهیه زیست توده اصلی، در محیط کشت مایع MRS (Man-Rogosa-Sharpe) (مرک، آلمان) ، با pH= ۶/۲±۰/۲ در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت کشت داده شد. کشت باکتری تازه برای هر بار انجام جذب زیستی، از کشت اصلی تهیه شد. برای تهیه کشت تازه و فعال روزانه، ۵ میلی لیتر از کشت اصلی به ۵۰ میلی‌لیتر MRS مایع اضافه و به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد و چرخش ۷۵ دور در دقیقه نگهداری گردید. برای شمارش تعداد باکتری وارد شده جهت زیست پالایی از روش رقت سریالی استفاده شد [۲۰].

به‌منظور برطرف کردن آلودگی‌های فلزی احتمالی جهت انجام آزمایشات جذب زیستی، ابتدا کلیه ظروف شیشه‌ای به مدت ۲۴ ساعت در اسید نیتریک ۱۵ درصد غوطه‌ور گشته و سپس با آب دیونیزه شست‌وشو و خشک شدند. به علاوه تمامی ابزار فلزی و ظروف شیشه‌ای با فویل پوشانده شده و درون فور با دمای ۱۸۰ درجه به مدت ۳ ساعت سترون گردیدند. محلول‌ها و محیط‌های کشت نیز با حرارت مرطوب در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۲۰ دقیقه در فشار ۱/۴ اتمسفر اتوکلاو شدند.

آزمایشات جذب زیستی به این‌صورت انجام شد که ابتدا در ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری حجم مورد نیاز عنصر کادمیوم با غلظت نهایی ۵۲/۵ میکروگرم بر لیتر (ppb) در آب دیونیزه آماده گردید. انتخاب غلظت بر اساس بهینه‌سازی انجام پذیرفته در مطالعات پیشین بود [۱۷, ۲۱]. تنظیم pH توسط سود و اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال بر روی عدد ۴ انجام شد. سپس ۱۰ میلی‌لیتر از محلول حاوی کشت بذر تازه برای هر نمونه، به درون فالکون منتقل گشته و به مدت ۱۰ دقیقه با دور g ۴۰۰۰ سانتریفیوژ شد و محیط کشت خالی گشته به نحوی که ۱ میلی‌لیتر در انتهای فالکون باقی ماند. سپس ۹ میلی‌لیتر از محلول کادمیوم آماده شده، به رسوب اضافه شد به نحوی که میزان زیست توده در محلول نهایی ۲×۱۰^{۱۰} CFU/ml گردید. لوله‌ها هواگیری و عاری از حباب گشتند و در شرایط میکروگراویتی (g ۰) بر روی دستگاه کلینواستت (UN00SA, USA) مستقر گردیدند. هم‌چنین نمونه‌هایی مشابه آماده شدند و در شرایط شبیه‌سازی شده جاذبه مریخ (g ۰/۳۸) بر روی کلینواستت قرار گرفتند. دمای انکوباتور ۳۷ درجه سانتی‌گراد و سرعت چرخش دستگاه کلینواستت، ۱۵ دور در دقیقه تنظیم گردید [۱۹, ۲۲]. نمونه‌های کنترل درون انکوباتور در شرایط مشابه اما بر روی زمین (g ۱) قرار داشتند. آزمون جذب زیستی به مدت ۲۴ ساعت ادامه یافت. شکل شماره ۱، نحوه قرارگیری نمونه‌ها بر روی دستگاه کلینواستت برای شبیه‌سازی جاذبه‌های کاهش یافته را نشان می‌دهد.



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

Figure 1- Samples on clinostat device: a) Mars gravity simulation, b) Microgravity simulation

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

در پایان مدت زمان زیست پالایی، لوله‌ها به مدت ۱۰ دقیقه با شتاب ۴۰۰۰g سانتریفیوژ شدند. محلول‌های رویی با دقت برداشته و مقدار باقیمانده فلز کادمیوم توسط دستگاه ICP-MASS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectromrtry) (Perkin Elmer ELAN 6100 DRC-e) سنجش و تعیین گردید. پس از تعیین غلظت باقیمانده فلز و کسر نمودن آن از مقدار غلظت اولیه، میزان جذب محاسبه شد. رسم نمودارها و تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار GraphPad Prism software (version 9) انجام شد. به‌منظور مقایسه اعداد در تیمارهای مختلف و به‌دست آوردن سطح اطمینان و p-value، از آنالیز واریانس یک طرفه (One-way ANOVA) استفاده گشته و p-value کوچکتر از ۰/۰۵ معنی‌دار در نظر گرفته شد. تمامی آزمون‌ها با سه بار تکرار انجام شدند.

نتایج و بحث

در طول تاریخ، اکتشافات فضایی انسان را قادر به مطالعه مکانیسم‌های سازگاری با محیط و شرایط خارج از جو زمین نموده است. صرف‌نظر از مخاطرات و عوامل استرس‌زای دیگر مانند تشعشعات کیهانی و الکترومغناطیس، بودجه کلانی برای انجام این‌گونه آزمایشات نیاز می‌باشد. از این رو کاربرد شبیه‌سازهای زمینی، به پیشرفت این علم کمک نموده است. دستگاه کلینواستت (Clinostat) یکی از این گونه شبیه‌سازها است که با چرخش حول محوری ثابت، قادر به برقراری گرانش‌های متغیر می‌باشد. واژه میکروگراویتی که معادل "بی‌وزنی" در نظر گرفته می‌شود در واقع جاذبه کاملاً صفر نبوده بلکه بسیار نزدیک به صفر می‌باشد. هم‌چنین با تغییر زاویه چرخش کلینواستت، امکان برقراری جاذبه سایر کرات نیز فراهم می‌باشد. بنابراین با استفاده از این دستگاه، می‌توان رفتار مواد و موجودات زنده را در جاذبه‌های متغییر سنجید [۲۳, ۲۴].

آلودگی فلزات سنگین به عنوان یک خطر عمده برای سلامت عمومی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه شناخته شده است و تظاهرات سم‌شناسی آن‌ها به خوبی اثبات گردیده است. استراتژی‌های پالایشی مرسوم یا پر هزینه هستند و یا محصولات جانبی سمی تولید می‌کنند که بر محیط زیست تأثیر منفی می‌گذارد. بنابراین، ضرورت یک استراتژی ایمن از نظر زیست محیطی، علاقه به تکنیک‌های بیولوژیکی را برمی‌انگیزد. یکی از عمیق‌ترین رویکردها در سال‌های اخیر، جذب زیستی از طریق زیست توده میکروبی و محصولات آن است که به عنوان روشی مناسب و مقرون به‌صرفه معرفی شده است [۲۵]. در این میان باکتری‌های پروبیوتیک که جزء فلور روده انسان و برخی انواع موجودات زنده می‌باشند نیز در این مقوله پتانسیل بالایی از خود نشان داده‌اند به‌ویژه اینکه مراحل نهایی حذف جاذب نیز ضرورت نخواهد داشت [۱۹, ۲۶]. مواد پلیمری خارج سلولی میکروارگانیسم‌ها وزن مولکولی بالایی داشته و عمدتاً از پروتئین‌ها، پلی ساکاریدها، اسیدهای اورونیک، مواد هیومیک، لیپیدها و غیره تشکیل شده اند. یکی از اجزای اساسی آن اگزوپلی ساکارید است که به دلیل دفاع در برابر شرایط سخت قحطی، pH و دما آزاد می‌شود، از این رو فیزیولوژیکی مثال‌زدنی دارد. ویژگی‌های فیزیک-شیمیایی ساختار خالص آنیونی آن به بیوپلیمر اجازه می‌دهد تا به‌طور موثر یون‌های فلزات سنگین با بار مثبت را از محیط جدا کند. باکتری *L.acidophilus* یکی از این‌گونه میکروارگانیسم‌هاست [۲۵]. با توجه به تغییرات ساختارهای سطحی برخی باکتری‌ها در شرایط کاهش جاذبه در خارج از جو زمین [۲۷] و هم‌چنین افزایش قدرت جذب فلزات سنگین به‌دلیل این‌گونه تغییرات [۱۹]، در این مطالعه به مقایسه جذب فلز کادمیوم از آب در شرایط جاذبه مریخ و میکروگراویتی توسط *L. acidophilus* پرداخته شد. نتایج حاصل از باقیمانده غلظت فلز که توسط دستگاه ICP-MASS مورد سنجش قرار گرفت، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج جذب فلز

Table 1- Metal absorption results

	غلظت نهایی کادمیوم پس از تیمار (میکروگرم بر لیتر)		
غلظت اولیه کادمیوم (میکروگرم بر لیتر)	۰g (µg)	۰/۳۸ g	۱ g
۵۲/۵	۲۲/۵۲	۲۵/۵۷	۲۷/۴۳
	۲۳/۸۷	۲۳/۷۱	۲۸/۲۸
	۲۴/۸۹	۲۱/۸۵	۳۲/۸۵

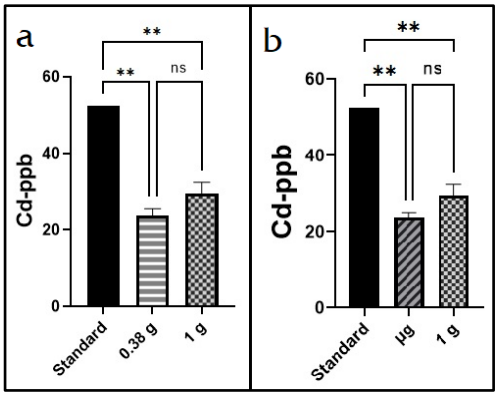
بر اساس نمودارهای اشکال ۲ و ۳ و محاسبه میزان جذب کادمیوم مشخص گردید که باکتری پس از ۲۴ ساعت مجاورت با محلول آبی، ۵۴/۸۴٪ فلز را در شرایط جاذبه مریخ، ۵۴/۷۴٪ را در شرایط میکروگراویتی و ۴۳/۷۷٪ را در شرایط جاذبه ۱g جذب نموده است.

آنالیزهای آماری نشان دادند که میزان جذب فلز در شرایط شبیه‌سازی شده جاذبه مریخ و هم‌چنین جاذبه زمین نسبت به غلظت اولیه فلز، تفاوت معنی‌داری وجود داشته و بنابراین *L acidophilus* موفق به جذب فلز بوده است. اما در میزان جذب کادمیوم توسط باکتری، در شرایط جاذبه مریخ با زمین تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (p-value> 0.05) (بخش a شکل ۲). هم‌چنین در محاسبه میزان جذب در شرایط میکروگراویتی نیز نسبت به غلظت اولیه فلز، شاهد تفاوت معنی داری بودیم (p-value< .05) اما در میزان جذب، میان شرایط میکروگراویتی

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

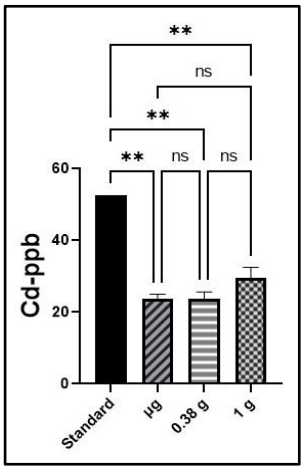
با جاذبه زمین تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (p-value> 0.05) (بخش b شکل ۲).



شکل ۲ – نمودارهای خوانش غلظت کادمیوم. a) نتایج در شرایط شبیه سازی شده جاذبه مریخ، b) نتایج در شرایط شبیه سازی شده میکروگرانویتی. (** indicate p- value< 0.01, ns: non-significant)

Figure 2- Cadmium concentration reading graphs. a) Results in simulated Mars gravity conditions, b) Results in simulated microgravity conditions. (** indicate *p-value* < 0.01, ns: non-significant)

در مقایسه کلی نتایج جذب زیستی مشخص گردید که باکتری پروبیوتیک *L. acidophilus* با موفقیت حدود ۵۰٪ ، قادر به جذب فلز سنگین کادمیوم بوده است. به علاوه، تغییرات گرانش، تاثیر چشم‌گیری در میزان زیست پالایی این باکتری نداشته است. آنالیز آماری با آزمون One way ANOVA نشان دهنده تفاوت‌های بدون معنی میان شرایط مختلف جاذبه‌ای بوده است (p-value> 0.05) (شکل ۳).



شکل ۳– نمودار مقایسه نتایج خوانش غلظت کادمیوم در شرایط جاذبه متغیر (** indicate p- value< 0.01, ns: non-significant)

Figure 3- Comparison chart of reading results of cadmium concentration under variable gravity conditions (** indicate *p-value* < 0.01, ns: non-significant)

نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج مطالعه افشاریان ۲۰۲۲ هم راستا بود که البته مقادیر حذف کادمیوم در شرایط جاذبه طبیعی زمین مربوط به مطالعه مذکور کمتر از نتایج مطالعه پیش‌رو بود که این تفاوت ممکن است به دلیل حضور سه فلز سنگین دیگر سرب، آرسنیک و جیوه در محیط و ایجاد رقابت بین آن‌ها باشد. علاوه بر این علت دیگر این تفاوت ممکن است به بهینه‌سازی غلظت فلز بر اساس مطالعه هادیان [۱۷, ۲۱] در پژوهش حاضر منوط باشد.

دیواره سلولی لاکتوباسیلوس‌ها که متعلق به خانواده باکتری‌های گرم مثبت می‌باشند غنی از ترکیباتی چون تیکوئیک‌اسید، پپتیدوگلیکان، لیپوتیکوئیک اسید، پروتئین S و برخی پروتئین‌های خنثی است. به‌دلیل منفی بودن شارژ این ترکیبات که مربوط به حضور گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل است این باکتری‌ها می‌توانند به خوبی به یون‌های فلزی که واجد بار مثبت هستند متصل گشته و آن‌ها را از محیط جذب کنند [۲۸, ۲۹]. قدرت جذب زیستی آن‌ها با افزایش ضخامت دیواره سلولی رابطه مستقیم دارد و هر تیماری که بتواند ضخامت دیواره را بالا ببرد قدرت زیست پالایی این باکتری‌ها را ارتقا خواهد داد. تغییرات جاذبه شرایطی را فراهم می‌نماید که به دلیل تغییر در نیروی تنش برشی، ممکن است تغییراتی در مورفولوژی، فیزیولوژی، تولید متابولیت‌های ثانویه، بیماری‌زایی، مقاومت به استرس‌های محیطی و ژنتیک سلول‌ها رخ دهد [۲۹, ۳۰]. نتایج مطالعات Mauclaire و همکاران ثابت نموده است که میکروگرانویتی شبیه‌سازی شده بر فرآیندهای فیزیولوژیکی باکتری میکروکوکوس لوتئوس تاثیر می‌گذارد تأثیر می‌گذارد. به‌علاوه این سویه در شرایط مذکور پلیمرهای سطح سلولی بیشتری تولید نموده و با سرعت بیشتری رشد می‌نماید. بر اساس دانش موجود اطلاعاتی در مورد تغییرات ضخامت غشای *L. acidophilus* در شرایط کاهش جاذبه موجود نمی‌باشد. اما با توجه به تغییرات پلی‌مرهای خارج سلولی برخی باکتری‌ها در شرایط میکروگرانویتی نسبت به جاذبه طبیعی زمین [۲۷]، این مطالعه طراحی گردید. نتایج، حاکی از عدم تفاوت در میزان زیست پالایی فلز کادمیوم هم در شرایط میکروگرانویتی و هم جاذبه مریخ، نسبت به جاذبه طبیعی سطح زمین بود. در واقع باکتری پروبیوتیک *L. acidophilus* با قدرتی برابر با شرایط زمینی، قادر به جذب و حذف فلز کادمیوم از آب بود.

نتیجه‌گیری

زیست پالایی فلزات سنگین توسط باکتری‌های پروبیوتیک در رفع آلودگی آب و مواد غذایی به‌عنوان راه‌حلی امن اثبات شده است. لایه‌های سطحی باکتری *L. acidophilus* به‌طور موثر به فلزات سنگین که بار مثبت دارند هم‌چون کادمیوم، متصل شده و آن‌ها را از محلول جدا می‌نمایند. نتایج

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

نشان داد که این قابلیت *L. acidophilus* حتی با تغییرات جاذبه نیز حفظ گشته و در زیست پالایی کادمیوم موفق باقی ماند. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در رفع آلودگی فلزات سنگین در زمان ماموریت‌های فضایی به‌منظور حفظ سلامت فضانوردان بهره‌برداری گردد. علاوه بر اینکه این مطالعات به‌منظور جلوگیری از آلودگی‌ها در ماموریت‌های فضایی حائز اهمیت است، می‌تواند درک عمیق‌تری از حیات در خارج از زمین فراهم کند. مطالعات بیشتر در ارتباط با بررسی ضخامت مواد خارج سلولی *L. acidophilus* در شرایط کاهش جاذبه پیشنهاد می‌گردد.

تشکر و قدردانی

نویسنده مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از پژوهشگاه هوافضا اعلام می‌دارد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسنده مقاله بیان نشده است.

مراجع

[1] 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*, vol. 23, no. 16, pp. 1608-1622, 2023, https://doi.org/10.2174/1389557523666230109160620.

[2] 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, 2018, Art. no. 18, https://doi.org/10.1186/s40779-018-0162-9.

[3] M. R. Benoit *et al.*, "Microbial antibiotic production aboard the international space station," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 70, pp. 403-411, 2006, https://doi.org/10.1007/s00253-005-0098-3.

[4] S. S. Sonone, S. Jadhav, M. S. Sankhla, and R. Kumar, "Water contamination by heavy metals and their toxic effect on aquaculture and human health through food chain," *Letters in Applied NanoBioScience*, vol. 10, no. 2, pp. 2148-2166, 2021, https://doi.org/10.33263/LIANBS102.21482166.

[5] I. Suhani, S. Sahab, V. Srivastava, and R. P. Singh, "Impact of cadmium pollution on food safety and human health," *Current Opinion in Toxicology*, vol. 27, pp. 1-7, 2021, https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.04.004.

[6] T.H. Kim *et al.*, "Exposure assessment and safe intake guidelines for heavy metals in consumed fishery products in the republic of korea," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 26, pp. 33042-33051, 2020, https://doi.org/10.1007/s11356-020-09624-0.

[7] W. Duan *et al.*, "Levels of a mixture of heavy metals in blood and urine and all-cause, cardiovascular disease and cancer mortality: a population-based cohort study," *Environmental Pollution*, vol. 263, part A, 2020, Art. no. 114630, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114630.

[8] D. Glicklich, C. T. Shin, and W. H. Frishman, "Heavy metal toxicity in chronic renal failure and cardiovascular disease: possible role for chelation therapy," *Cardiology in Review*, vol. 28, no. 6, pp. 312-318, 2020, https://doi.org/10.1097/CRD.0000000000000304.

[9] B. Fagerberg and L. Barregard, "Review of cadmium exposure and smoking-independent effects on atherosclerotic cardiovascular disease in the general population," *Journal of Internal Medicine*, vol. 290, no. 6, pp. 1153-1179, 2021, https://doi.org/10.1111/joim.13350.

[10] P. Sharma, H. M. Iqbal, and R. Chandra, "Evaluation of pollution parameters and toxic elements in wastewater of pulp and paper industries in india: a case study," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 5, 2022, Art. no. 100163, https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100163.

[11] M. Balali-Mood, K. Naseri, Z. Tahergorabi, M. R. Khazdair, and M. Sadeghi, "Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic," *Frontiers in Pharmacology*, vol. 12, 2021, Art. no. 643972, https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972.

[12] E. Bianchi *et al.*, "Improving the efficiency of wastewater treatment plants: bio-removal of heavy-metals and pharmaceuticals by azolla filiculoides and lemna minuta," *Science of the Total Environment*, vol. 746, 2020, Art. no. 141219, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141219.

[13] 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, https://doi.org/10.15586/qas.v14i3.1012.

[14] H. Kinoshita *et al.*, "Biosorption of heavy metals by lactic acid bacteria and identification of mercury binding protein," *Research in Microbiology*, vol. 164, no. 7, pp. 701-709, 2013, https://doi.org/10.1016/j.resmic.2013.04.004.

[15] K. A. Hussein, S. H. Hassan, and J. H. Joo, "Potential capacity of beauveria bassiana and metarhizium anisopliae in the biosorption of Cd^{2+} and Pb^{2+}," *The Journal of General and Applied Microbiology*, vol. 57, no. 6, pp. 347-355, 2011, https://doi.org/10.2323/jgam.57.347.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

United Nations, New York, Rep. ST/SPACE/63, 2013.

[24] 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, (in Persian).

[25] 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, https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.12.006.

[26] R. S. Mirmahdi, V. Mofid, A. Zoghi, K. Khosravi_Darani, and A. M. Mortazavian, "Risk of low stability saccharomyces cerevisiae ATCC 9763-heavy metals complex in gastrointestinal simulated conditions," *Heliyon*, vol. 8, no. 5, 2022, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09452.

[27] L. Mauclaire and M. Egli, "Effect of simulated microgravity on growth and production of exopolymeric substances of micrococcus luteus space and earth isolates," *FEMS Immunology & Medical Microbiology*, vol. 59, no. 3, pp. 350-356, 2010, https://doi.org/10.1111/j.1574-695X.2010.00683.x.

[28] S. Xing *et al.*, "Lead biosorption of probiotic bacteria: effects of the intestinal content from laying hens," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 24, pp. 13528-13535, 2017, https://doi.org/10.1007/s11356-017-8896-6.

[29] 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, https://doi.org/10.2217/fmb-2017-0251.

[30] 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, https://doi.org/10.1128/mmbr.68.2.345-361.2004.

[16] R. S. Mirmahdi *et al.*, "Biodecontamination of milk and dairy products by probiotics: boon for bane," *Italian Journal of Food Science*, vol. 33, no. sp1, pp. 78-91, 2021, https://doi.org/10.15586/ijfs.v33iSP2.2053.

[17] 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, https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.034.

[18] 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, https://doi.org/10.1002/fsn3.1825.

[19] Z. Afsharian, M. Salavatifar, and K. hosravi_Darani, "Impact of simulated microgravity on bioremoval of heavy-metals by *lactobacillus acidophilus* ATCC 4356 from water," *Heliyon*, vol. 8, no. 12, 2022, Art. no. e12307, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12307.

[20] S. Sieuwerts, F.A. De Bok, E. Mols, W. M. De Vos, and J.E 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, https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2008.02417.x.

[21] 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, https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.05.001.

[22] 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*, vol. 15, no. 4, pp. 97-106, 2022, (in Persian), https://doi.org/10.30699/jsst.2023.1396.

[23] "Programme on Space Applications: Teacher's Guide to Plant Experiments in Microgravity,"

Archive of SID.ir