



Pages:???/Research Paper/Submit: 03 Nov. 2023/Revised: 10 Dec. 2023/Accepted: 16 Dec. 2023

Journal Homepage: <https://jsst.ias.ir>

Economic analysis of Exploitation of Lunar Resources

Ebrahim Amiri¹, Masoome Khani Chamani², Mahdi Jafari-Nadoushan^{3*}, Sajjad Ghazanfarinia⁴,
Masoud Khoshhsima⁵

1. M.Sc., Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2. M.Sc., Physics Department, Zanjan University, Zanjan, Iran

3. Assistant Professor, Space Research Laboratory, Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

4. M.Sc., Satellite Systems Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

5. Assistant Professor, Satellite Systems Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

*Corresponding Author's E-mail: mjafari@kntu.ac.ir

ABSTRACT

The economic model generally expresses the mechanisms used to earn money from a business, and if it does not generate income, its failure will be certain. Therefore, the decision to carry out a mission is not only based on technical specifications, and besides that, economic profitability is another part of decision-making and will be one of the main factors for commercial investments. Space projects, as well as moon mining projects, are no exception to this rule and require an all-round approach to compare financial and technical feasibility. Analyzing the economic feasibility of any project can be summed up in the evaluation of its economic model. In this regard, a model is needed to compare, rank and determine the available options, which is economically justified. According to this, in this article, the economic evaluation of moon mining based on the materials available on the moon and sending them to the earth is discussed. Materials with economic priority are categorized and selected in a fuzzy evaluation and using an economic model suitable for space mining, an economic evaluation for the business of selling materials on the surface of the earth is carried out and according to economic efficiency, the type of material and also the high-level specifications of the project has been extracted.

Keywords: Moon, Moon Resources, Economic Analysis, Exploitation, Moon Economy

1. Introduction

Space mining is a relatively new aspect of the space industry; once a science fiction concept, it is now on the verge of becoming a reality. In recent years, many countries and large commercial companies worldwide have plans to exploit the resources available on the Moon [1]. The moon is known as the most accessible source of space mining. It offers numerous economic opportunities; the moon is one of the attractions of supplying the necessary materials on earth [1].

The moon, the only natural satellite of the Earth, has a diameter of nearly a quarter of that of the Earth and orbits around the Earth at an average distance of 384,400 kilometres. The moon does not have any atmosphere and has only about one-sixth of Earth's surface gravity [5]. Mineral studies on moon samples have shown that in terms of elemental composition, the moon's crust is primarily composed of oxygen, silicon, magnesium, iron, calcium and aluminium. It also contains rare elements such as titanium, uranium, thorium, potassium, and hydrogen [6].

Exploitation of asteroids and moons has been proposed numerous times as a valuable resource for Earth and space. Water, metals, and volatile materials can be used as resources in various applications, including construction, life support systems, and propulsion. Hein et al., [2] have examined the economic evaluation of extracting volatile substances and water for use on Earth and in space. Calla and et al., [3] have investigated the feasibility and economic viability of mining and using water from near-Earth asteroids and the moon for transport to the cislunar orbit.

The high value-to-mass ratio of materials extracted from space is very interesting and thought-provoking due to additional costs such as launching and landing on the moon or asteroid, launching and landing from the Earth, and creating suitable operating conditions for the cargo. Considering these challenges, investing in extracting materials, particularly rare and valuable metals such as the platinum group metals, from moons and near-Earth asteroids has become the main subject of mining studies [4].



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 \(CC BY 4.0\)](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

How to cite this article:

E. Amiri, M. Khani Chamani, M. Jafari-Nadoushan, S. Ghazanfarinia and M. Khoshhsima, " Economic Analysis of Exploitation of Lunar Resources , " *Journal of Space Science and Technology*, vol. ??, no. ?, pp. ????, 2024 (in Persian). <http://doi.org/10.22034/jsst.2024.1465>

2. Economic analysis

The foundation of this analysis is based on Hein's article [2]. The economic analysis of asteroid mining is based on Sonter's approach and can be extended to the economic analysis of lunar mining. Sonter's approach is currently one of the most detailed analyses to relate technical and economic parameters to each other. It is only designed for a mining mission without considering the cost of returning to the surface and the cost of research and development. Therefore, Sonter's approach was developed by people, including Halin, to enhance the results and include all the influential parameters.

Hein developed the profit and loss as Equation (1) by dividing the income based on the sales price and mass of the mineral and separating the costs. According to Equation (1), the calculation of profit and loss has been implemented using a computer program developed in the Python language. The value of each parameter in Equation (1) has been quantified for economic analysis.

$$P_{tot_PV} = \sum_{i=1}^T n_i \sum_{j=1}^{ceil(\frac{n_i}{s_i + 1})} c_{prod_j} \left(\frac{c_{price_{mat}} f_{tr}}{(1+I)^j} - \frac{ceil(\frac{n_i}{s_i + 1}) c_{ops}}{(1+I)^j} - \frac{c_{dev} m_{sc}}{(1+I)^{j-t_m}} \right) \quad (1)$$

In Equation (1), P_{tot_PV} represents the current value of the total profit in all missions, n is the number of mining missions,

m_{sc} is the dry mass of the spacecraft in kilograms, $c_{price_{mat}}$ is the value of each kilogram of extracted material, f is the throughput rate of the spacecraft in kilograms of extraction per kilogram of equipment per day, t the duration of mining in days, r the ratio of purified materials to extracted materials,

s is the number of times a spacecraft is used, c_{prod_j} is the cost of the spacecraft in dollars (per kilogram of spacecraft mass), P is the number of spacecraft in each mission, α is the learning coefficient (experience), $c_{transport}$ is the cost of

transportation in space, c_{ops} is the operation cost and c_{dev} is the research and development costs. The ceil function is an integer function used to round the algebraic product within it to the nearest integer value greater than or equal. The time value of money is calculated by incorporating the parameter $(1+I)^j$, where I is the discount rate of money, and i is the number of years of mining. The counter j represents the j th mission, and t_j is the income-generating time. By subtracting the t_m parameter, the mission's duration is determined from the value of $t_j - t_m$, and $t_j - t_m$ also specifies the time when the mission started.

3. Profit calculation based on the analysis method

Suitable materials for exploitation were divided into three categories: oxides, metals, and fuels, and from each of these categories, silicon oxide, magnesium, and helium-3

materials were selected for profitability analysis. In this analysis, it was assumed that only one target material would be mined. For each material, three modes, optimistic, conservative and arbitrary values, have been considered to calculate profit and loss.

In an optimistic scenario, spacecraft have reached the stage of mass production that has a direct effect on reducing costs. In the conservative scenario, a spacecraft exists, and the costs are estimated at current prices. Therefore, the costs of research and development, production and operations in the conservative scenario are more than those in the optimistic scenario.

The arbitrary state perspective is based on the limitations of each country's technology level, as well as the reduction in the selling price of mining materials. This article also considers the reduction in the selling price of materials.

The analysis for two-time scenarios and two cargo masses using Equation (1) in Python has been investigated as follows.

10 missions, with each mission lasting 365 days.

- 10 missions, with each mission lasting 100 days.
- Cargo mass is approximately equal to the mass of the spacecraft.
- Cargo mass is four times the mass of the spacecraft.

According to the above explanation, there are 12 profit and loss evaluation modes for each item.

4. Results and Discussion

Based on the profitability analysis method presented in the article, a conservative scenario with only 6000 kg of cargo mass of two oxide substances, Silicon and magnesium, will be profitable with the increase of mission time and the number of missions by determining the selling price of the material at least \$20,000 per kilogram (taking into account the cost of transporting each kilogram in space). In optimistic scenarios, all three materials with both mass modes (1500 kg and 6000 kg) are entirely profitable. Even in scenarios with arbitrary price reductions for materials, they maintain profitability.

This article, focusing on economic analysis for lunar mining, starts from the initial selection of the materials available on the moon and ends with evaluating the mining scenarios, the profitability and the selection of the most suitable mission. Based on the criteria of operational efficiency that shows the simplicity of extraction and processing of materials and the operational costs of mining. Silicon oxide material was chosen as the target material for lunar mining.

5. References

- [1] L. P. Keszthelyi, J. A. Coyan, K. A. Bennett, L. R. Ostrach, L. R. Gaddis, T. S. Gabriel, and J. Hagerty, "Assessment of Lunar Resource Exploration in 2022," *U.S. Geological Survey*, 2023, <https://doi.org/10.3133/cir1507>.
- [2] A. M. Hein, R. Matheson, and D. Fries, "A techno-economic analysis of asteroid mining," *Acta Astronautica*, vol. 168, pp. 104-115, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.05.009>.
- [3] P. Calla, D. Fries, and C. Welch, "Asteroid mining with small spacecraft and its economic feasibility," *arXiv preprint arXiv:1808.05099*, 2018, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1808.05099>.
- [4] T. E. Graedel, E.M. Harper, N.T. Nassar, P. Nuss, B.K. Reck, "Criticality of metals and metalloids," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, no. 14, pp. 4257-4262, 2015, <https://doi.org/10.1073/pnas.1500415112>.
- [5] NASA, "Earth's Moon – NASA Solar System Exploration," NASA, 2021, [Online]. Available: <https://solarsystem.nasa.gov/moons/earths-moon/by-the-numbers/>.
- [6] M. A. Wieczorek, B. L. Jolliff, A. Khan, M. E. Pritchard, et al, "The constitution and structure of the Lunar interior," *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 6, no. 1, pp. 221-364, 2006, <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.60.3>.



تحلیل اقتصادی بهره‌برداری از منابع ماه

ابراهیم امیری^۱، معصومه خانی چمنی^۲، مهدی جعفری ندوشن^{۳*} سجاد غضنفری نیای^۴ و مسعود خوش‌سیما^۵

۱- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- دانشکده فیزیک، دانشگاه زنجان، ایران

۳- آزمایشگاه تحقیقات فضایی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۴ و ۵- پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مخاطب: mjafari@kntu.ac.ir

مدل اقتصادی به طور کلی بیانگر مکانیزم‌های مورد استفاده در کسب درآمد از یک تجارت است و در صورت عدم درآمدزایی، شکست آن قطعی خواهد بود؛ بنابراین تصمیم بر انجام یک مأموریت تنها بر اساس مشخصات فنی نبوده و در کنار آن سوددهی اقتصادی جز دیگری از تصمیم‌گیری است و یکی از عوامل اصلی برای سرمایه‌گذاری‌های تجاری خواهد بود. پروژه‌های فضایی و همچنین پروژه معدن کاوه ماه نیز از این قاعده مستثنی نیست و نیاز به رویکردی همه‌جانبه جهت مقایسه میان امکان مالی و فنی دارد. انجام تجزیه و تحلیل امکان‌پذیری اقتصادی هر پروژه می‌تواند به ارزیابی مدل اقتصادی آن خلاصه شود. در این راستا مدلی جهت مقایسه و رتبه‌بندی و تعیین گزینه‌های موجود در پروژه مورد نیاز است تا آن پروژه به لحاظ اقتصادی توجیه داشته باشد. با توجه به این در مقاله حاضر به ارزیابی اقتصادی معدن کاوه بر اساس مواد موجود در ماه و ارسال آن به زمین پرداخته شده است. مواد با اولویت اقتصادی در یک ارزیابی فازی دسته‌بندی و انتخاب شده و با استفاده از مدل اقتصادی مناسب برای معدن کاوه فضایی، ارزیابی اقتصادی جهت تجارت فروش مواد بر روی سطح زمین انجام شده و با توجه به صرفه اقتصادی، نوع ماده و همچنین مشخصات سطح بالای پروژه استخراج شده است.

واژه‌های کلیدی: ماه، منابع ماه، نمونه‌برداری، تحلیل اقتصادی، بهره‌برداری، اقتصاد ماه.

علائم و اختصارات

f	نرخ توان عملیاتی فضایپیما	مجموعه هزینه
I	نرخ تنظیل پول	هزینه تحقیق و توسعه
i	تعداد سال‌های انجام معدن کاوه	هزینه عملیات
j	شمارنده مأموریت	ارش هر کیلوگرم ماده
m_{sc}	جرم خشک فضایپیما	هزینه فضایپیما
n	تعداد مأموریت‌های معدن کاوه	هزینه انتقال در فضا
P	سود و زیان	
C		
C_{dev}		
C_{ops}		
$C_{pricemat}$		
C_{prod_1}		
$C_{transport}$		

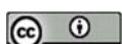
^۱ کارشناسی ارشد

^۲ کارشناسی ارشد

^۳ استادیار (نویسنده مخاطب)

^۴ کارشناسی ارشد

^۵ استادیار



ماه می‌پردازد. این مطالعه تأکید دارد که علاقه‌مندی بهره‌برداران به استفاده از منابع بر روی خود ماه خواهد بود [2]. در مطالعه‌ای دیگر جامانکا-لینو توضیح می‌دهد که در مرحله اکتشاف، حفاری و حمل و نقل از جمله چالش‌های اصلی دمای پایین و توپوگرافی سطح ماه خواهد بود علاوه بر این، تحلیل عمیقی از روش‌های ممکن استخراج عناصر حیاتی مانند آب، اکسیژن و فلزات ارائه می‌دهد و فرآیند مورد نیاز برای پردازش آن‌ها را معرفی می‌کند [3].

بهره‌برداری از سیارک‌ها و قمرها، بهخصوص نزدیک به زمین بارها به عنوان منبعی برای زمین و فضا پیشنهاد شده است. آب، فلزات و مواد فرار به عنوان منابعی در کاربردهای مختلفی از جمله ساخت و ساز، سیستم‌های پشتیبان حیات و پیشرانش قابل استفاده است. هاین و همکاران [4] ارزیابی اقتصادی استخراج مواد فرار و آب را برای استفاده در زمین و در فضا مورد بررسی قرار داده است. کالا و همکارانش [5] امکان‌پذیری و ارزیابی اقتصادی تأمین و استفاده آب از قمرها و سیارک‌های نزدیک به مدار فضای مابین زمین و ماه را بررسی کرده است. نسبت بالای ارزش به جرم مواد استخراج شده از فضا به دلیل هزینه‌های اضافی همچون پرتاب و فرود به قمر یا سیارک، پرتاب و فرود از زمین و فراهم نمودن شرایط عملیاتی مطلوب برای محموله نیاز به بررسی بیشتر دارد. با توجه به این موضوع، سرمایه‌گذاری جهت استخراج مواد همچون فلزات کمیاب و با ارزش بر روی زمین، زیرگروه فلزات پلاتینی موضوع اصلی مطالعات معدن کاوی قمرها و سیارک‌های نزدیک زمین است [6]. اهمیت فلزات کمیاب جهت استفاده در فناوری‌های سیز همچون تولید سلول‌های سوختی، کاتالیزورها، باتری‌های با طرفیت بالاتر و سلول‌های خورشیدی بسیار مهم و حیاتی است [7]. سوماریوا در سال ۲۰۲۰ با استفاده از روش ارزش خالص فلی (NPV) به ارزیابی سودآوری و امکان‌پذیری اقتصادی استخراج از ماه پرداخت او در این مطالعه دو استراتژی کسب‌وکار را بررسی می‌کند: یکی که تنها توسط سرمایه‌گذاران خصوصی تأمین مالی شده و دیگری که شامل یک همکاری خصوصی- عمومی می‌شود و با استفاده از شبیه‌سازی موت کارلو به تجزیه و تحلیل عدم قطعیت‌ها در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی، سودآوری و امکان‌پذیری پژوهش‌های استخراج ماه می‌پردازد [8].

در این مقاله ابتدا موروری بر منابع ماه و توزیع آن بر سطح کره ماه ارائه شده، پس از آن در تحلیل اقتصادی، با استفاده از روش‌های [4] تشریح داده شده است. در ادامه مقاله، معدن کاوی فضایی برای کره ماه و روند تحلیل اقتصادی از انتخاب اولیه ماده‌های موجود بر ماه شروع و با ارزیابی طرح معدن کاوی، سوددهی و انتخاب مناسب‌ترین ماده و مأموریت به اتمام می‌رسد. در پایان مقاله، نتیجه‌گیری ارائه شده و در

p	تعداد فضایی‌ها
P_{tot}	سود و زیان کل
$P_{tot_{PV}}$	ارزش فعلی کل سود
r	نسبت خلوص مواد
$R_{mat_{sold}}$	درآمد حاصل از فروش مواد
S	تعداد دفعات استفاده از یک فضایی‌ها
t	مدت زمان معدن کاوی
t_j	زمان درآمدزایی
α	ضریب یادگیری (تجربه)

مقدمه

معدن کاوی فضایی جنبه جدیدی از صنعت فضایی است، ایده استخراج از ماه که زمانی کاملاً علمی- تخلیلی بود، اکنون در آستانه تحقق است. در سال‌های اخیر بهره‌برداری از منابع موجود در ماه بخشی از برنامه‌های بسیاری از کشورها و برخی شرکت‌های بزرگ تجاري و اقتصادي فعال دنیا است [1]. با توجه به نزدیک‌ترین جرم سماوی به زمین؛ ماه در کنار سیارک‌های نزدیک به زمین، به عنوان قابل دسترس‌ترین منبع معدن کاوی فضایی شناخته شده است. ماه با توجه به فرصت‌های اقتصادی متعدد خود، یکی از جذابیت‌های تأمین مواد موردنیاز بر روی زمین است. این جذابیت‌ها دلیلی بر بازگشت مجدد کشور آمریکا به ماه بعد از آخرین مأموریت آپولو در سال ۱۹۷۲ شده است. نشان دادن استفاده از منابع در محل (بر روی ماه) در نزدیکی قطب جنوب ماه، هدف اصلی برنامه آرتیمیس ایالات متحده آمریکا است [1]. با توجه به تجربیات زمین‌شناسی و ماه‌شناسی، روش‌های کلی برای انجام ارزیابی‌های کمی منابع ماه پیشنهاد شده است. منابع ماه را می‌توان به سه دسته انرژی‌ها، مواد معنی و آب طبقه‌بندی کرد. همچنین می‌توان با توجه به قطعیت و قابلیت بازیابی مواد، طبقه‌بندی دیگری برای منابع موجود ماه انجام داد. منابع انرژی به‌ویژه انرژی خورشیدی در ارتفاعات نزدیک قطب‌های ماه فراوان است و فناوری بهره‌برداری آن نیز به بلوغ رسیده است. منابع معدنی نیز به‌طور عمده به شکل پودر سنگ (رگولیت) در ماه قابل دسترسی و فناوری‌های مختلف برای تبدیل رگولیت‌های ماده‌های هدف و ارزشمند در حال توسعه است. وجود یخ آب نیز در مناطق قطبی ماه اثبات شده ولی سوالات بسیار زیادی در مورد کمیت، کیفیت و توزیع یخ آب ماه وجود دارد [1]. دی‌لاجراته روش‌های کاوش و پیش‌بینی لازم قبل از ایجاد صنعت معدن کاوی در ماه را بررسی و به گزینه‌هایی برای استخراج معدن در ماه می‌پردازد سپس با بررسی نیازهای سهامداران، به‌ویژه در نقشه‌برداری منابع ماه برای استفاده احتمالی در ساخت یک پایگاه در ماه و حفظ حضور انسان در

باروت مصرف شده است. ضخامت لایه رگولیت از ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر در ارتفاعات و ۳ تا ۵ کیلومتر در ماریا متغیر است. در زیر لایه رگولیت، مکاگرولیت لایه‌ای از سنگ بستر شکسته و به ضخامت چندین کیلومتر وجود دارد [20].

ترکیب عناصری ماه

حدود ۱۴ هزار کیلومتر مربع از سطح ماه ناشی از ناهمواری محل اصابت شهاب‌سنگ‌ها در تاریکی دائمی قرار دارد [21]. مناطق نزدیک به قطب‌های ماه که در تاریکی دائمی قرار دارد، حاوی غلظت قابل توجهی از يخ آب است [22].

اکسیژن نه تنها از يخ آب بر روی ماه در دسترس بوده، بلکه در رگولیت ماه نیز موجود و تقریباً از همه جای ماه قابل استخراج است [23]. ایلمینیت، فراوان ترین اکسید در نمونه‌های قمری از ۴۷ درصد وزنی FeO و ۵۳ درصد وزنی TiO₂ تشکیل شده و منبع بالایی از اکسیژن در ماه به خصوص در ماریا ماه است [24].

فراوان ترین عناصر که به دلیل عوامل خارجی در ماه وجود دارد می‌توان به هیدروژن و هلیوم اشاره کرد [24]. هیدروژن یک عنصر مفید در سطح ماه بوده و از طریق بادهای خورشیدی به ماه وارد شده است [25]. در عمق یک متري از رگولیت ماه در نزدیکی مناطق قطبی غلظت بالایی از هیدروژن وجود دارد. وجود هیدروژن به عنوان یک منبع سوخت مهم در کره ماه بسیار حائز اهمیت است [26]. بادهای خورشیدی عامل ابیاثت هیدروژن، هلیوم و سایر عناصر در سطح رگولیت ماه است. یکی دیگر از عناصر موجود بر روی سطح ماه و کمیاب بر روی سطح زمین، هلیوم -۳ (ایزوتوپ هلیوم) بوده که این عنصر نیز توسط باد خورشیدی روی سطح ماه رسوب کرده است [24]. استفاده از هلیوم -۳ ماه به عنوان یک منبع سوخت برای نیروگاه‌های هسته‌ای بر روی زمین در آینده نزدیک، دور از انتظار نخواهد بود. با یکه در مطالعه‌ای جنبه‌های فناورانه، تجاری و کسب و کاری مرتبط با ایجاد یک عملیات استخراج هلیوم -۳ از ماه را مورد بررسی قرار داده و به چالش‌های استخراج منابع ماه، پتانسیل ریسک‌های تجاری، سرمایه‌گذاری‌های موردنیاز پژوهه و تأثیرات مالی چشمگیر چنین پژوهه‌ای پرداخته است [27]. ماتر نیز با تأکید بر پتانسیل‌های استخراج هلیوم -۳ از ماه به عنوان یک منبع انرژی جایگزین و بسیار کارآمد به بررسی بحران جهانی انرژی پرداخته است، او در این مطالعه امکان‌پذیری فنی را بررسی می‌کند و مشکلات فنی را اذعان می‌کند اما با وجود محدودیت‌ها بر پتانسیل هلیوم -۳ در رفع نیازهای جهانی انرژی تأکید دارد [28].

درصد عناصر تشکیل‌دهنده مواد ماه در مناطق مختلف، مقدارهای متفاوتی را دارد. با این حال در همه مناطق اکسیژن

آن ماده هدف نهایی جهت استخراج و سوددهی آن با توجه به طرح مأموریت معدن کاوی ماه بیان شده است.

مرواری بر منابع معدنی ماه و توزیع آن

ماه تنها ماهواره طبیعی زمین، دارای قطری تقریباً یک چهارم قطر زمین بوده و در فاصله متوسط ۳۸۴/۴ هزار کیلومتری به دور زمین می‌چرخد. ماه قادر هرگونه اتمسفر و دارای گرانش سطحی حدود یک ششم گرانش زمین است [9]. میدان مغناطیسی خارجی ماه به صورت کلی کمتر از ۰/۰ نانوتسل [10] و دمای سطح آن بین ۱۷۱ - ۱۴۰ درجه سلسیوس تغییر می‌کند [11]. ماه دارای ترکیبات ایزوتوپی تقریباً یکسان با زمین است [12].

از شش مأموریت موفق برنامه آپولو آمریکا با حضور انسان، مجموع ۳۸۲ کیلوگرم نمونه‌برداری شامل سنگ ماه، سنتگریزه، ماسه و گرد و غبار از مناطق مختلف سطح ماه به زمین آورده شد. از سه مأموریت موفق بدون حضور انسان برنامه لونا اتحاد جماهیر شوروی نیز مجموع ۰/۳ کیلوگرم نمونه در مکان‌های متفاوت از مأموریت‌های لونا به زمین آورده شده است [13]. تمامی نمونه‌برداری‌های انجام شده توسط دو برنامه فوق، از سطح قابل رؤیت ماه بوده است. علاوه بر نمونه‌های جمع‌آوری شده از روی سطح ماه؛ شهاب‌سنگ‌هایی از ماه که بر روی سطح زمین فرود آمده، نمونه‌هایی از هر دو بخش ماه (سطح قابل رؤیت و سطح غیر قابل رؤیت ماه از دید زمین) در دسترس قرار گرفته شده است [14]. همچنین داده‌های طیفسنجی اشعه گاما کاوشگر ماه نیز اطلاعات مفیدی را از ترکیب سطح ماه ارائه کرده است [15].

بسترشناسی ماه

مطالعات معدنی بر روی نمونه‌های ماه نشان داده است که سنگ ماه شامل پیروکسن، پلاژیوکلاز، ایلمینیت، الیوین همراه با دانه‌های کمیاب کریستوبالیت، تربیدیمیت، کرومیت، تانیت و تروولیت است [16]. سن رادیومتری نمونه‌های جمع‌آوری شده در مأموریت‌های آپولو بین ۳/۸ تا ۴/۱ میلیارد سال قدمت دارد [17]. همچنین نمونه‌های برنامه آپولو دارای ترکیبات ایزوتوپی مشابه سنگ‌های زمین است [12].

پوسته ماه از نظر ترکیب تا حد زیادی آنورتوزیتی است [18]. از نظر ترکیب عناصری، پوسته ماه در درجه اول از اکسیژن، سیلیکون، منیزیم، آهن، کلسیم و آلومینیوم تشکیل شده است، اما عناصر جزئی و کمیاب مانند تیتانیوم، اورانیوم، توریم، پتاسیم و هیدروژن نیز در آن وجود دارد [19].

در بالای پوسته ماه لایه‌ای بسیار خرد شده و سطحی تحت عنوان رگولیت وجود دارد. رگولیت بافتی شبیه برف و بویی شبیه

فنی و اقتصادی به یکدیگر است. رویکرد سوترا تنها برای یک مأموریت معدن کاوی بدون لحاظ کردن هزینه بازگشت به سطح زمین و هزینه تحقیق و توسعه است؛ بنابراین رویکرد سوترا به منظور بهینه‌سازی نتایج و لحاظ شدن تمامی پارامترهای مؤثر، توسط افرادی از جمله هالین توسعه داده شد.

محاسبه سود و زیان

به صورت ساده محاسبه سود یا زیان، حاصل کسر هزینه‌ها از درآمدها است. برای سودآور بودن یک مأموریت معدن کاوی باید درآمد حاصل از فروش منابع بیش از هزینه‌های آن شود، یعنی:

$$P = R_{mat_{sold}} - C \quad (1)$$

در فرمول (۱)، نحوه محاسبه سود و زیان بیان شده است. در این فرمول P میزان سود یا زیان، $R_{mat_{sold}}$ میزان درآمد حاصل از فروش منابع و C میزان هزینه‌های صورت گرفته است. هاین با تفکیک درآمد بر اساس قیمت فروش و جرم ماده معدنی و تفکیک هزینه‌ها، فرمول سود یا زیان را به صورت فرمول (۲) توسعه داد:

$$\begin{aligned} P_{tot} &= n[m_{sc}c_{price_{mat}}ftr \\ &- m_{sc}ceil\left(\frac{n}{s+1}\right)\left(c_{prod_1}\left[p.ceil\left(\frac{n}{s+1}\right)\right]^\alpha \right. \\ &\left. + c_{transport}\right) - c_{ops}] - m_{sc}\frac{c_{dev}}{p} \end{aligned} \quad (2)$$

در فرمول (۲)، سود و زیان حاصل از مأموریت، n تعداد مأموریت‌های معدن کاوی، m_{sc} جرم خشک فضاییما بر حسب کیلوگرم، $c_{price_{mat}}$ ارزش هر کیلوگرم ماده استخراج شده، f نرخ توان عملیاتی فضاییما بر حسب کیلوگرم استخراج شده ماده معدنی بر کیلوگرم تجهیزات بر روز، t مدت زمان معدن کاوی بر حسب روز، r نسبت مواد خالص شده به مواد استخراج شده، s تعداد دفعات استفاده از یک فضاییما، c_{prod_1} هزینه فضاییما بر حسب دلار (به ازای هر کیلوگرم جرم فضاییما)، p تعداد فضاییماها در هر مأموریت، α ضریب یادگیری (تجربه)، c_{ops} هزینه انتقال در فضا، $c_{transport}$ هزینه عملیات و c_{dev} هزینه تحقیق و توسعه است. تابع $ceil$ تابع جز صحیح بوده و خروجی آن یک مقدار عددی صحیح که بزرگ‌تر یا مساوی حاصل جبری داخل آن است.

در گام بعدی هاین با توجه به عدم وجود ارزش زمانی پول در معادله (۲)، ارزش فعلی کل سود در تمام مأموریت‌ها P_{tot_PV} را با افزودن پارامترهای دیگری به آن معادله توسعه داد و فرمول (۳) را به دست آورد. در فرمول (۳)، با اضافه شدن پارامتر I (۱) ارزش زمانی پول محاسبه می‌شود که I نرخ تنزیل پول و t تعداد سال‌های انجام معدن کاوی است. در فرمول (۳)، شمارنده Z نشان دهنده

فراوان ترین عنصر در سطح ماه بوده و بیش از ۶۰ درصد مواد ماه از اکسیژن تشکیل شده، اما همه آن از نظر شیمیایی با عناصر دیگر ترکیب شده است. دومین عنصر فراوان در ماه سیلیسیم با ۱۷/۵ تا ۱۷/۵ درصد فراوانی است. آلومینیوم با حدود ۴/۵ تا ۱۰ درصد سومین عنصر فراوان است. کلسیم و منیزیم تقریباً به یک اندازه و حدود ۴/۵ تا ۵ درصد از مواد را تشکیل می‌دهد. آهن نیز ۲/۵ الی ۶ درصد از مواد ماه را در مناطق مختلف تشکیل می‌دهد. عناصرهای تیتانیوم و سدیم نیز تقریباً درصد باقی‌مانده مواد ماه را تشکیل می‌دهد [۲۰]. در جدول‌های (۱) و (۲)، درصد اکسیدهای و عناصر موجود در ماه برای محدوده جغرافیایی برنامه‌های آپولو و لونا نشان داده شده است.

جدول ۱- درصد و محدوده جغرافیایی اکسیدهای عناصر موجود در ماه [۱۶]

عنصر	سدیم	سطح ماه	ماریاها	ارتفاعات
Sio_2	۴۵/۵	۴۵/۴	۵۰	
Al_2O_3	۲۴	۱۴/۹	۱۵	
Tio_2	۰/۶	۳/۹	۵	
Feo	۵/۹	۱۴/۱	۵-۱۰	
Mgo	۷/۵	۹/۲	۱۰	
Cao	۱۵/۹	۱۱/۸	۱۰	
Na_2O	۰/۶	۰/۶	-	

جدول ۲- درصد و محدوده جغرافیایی عناصر موجود در ماه [۱۶]

عنصر	تیتانیوم و سدیم	درصد تقریبی اتمی	درصد تقریبی اتمی	ارتفاعات	ارتفاعات	ماریاها	ارتفاعات	ماریاها	ارتفاعات
اکسیژن	۴۵	۴۵	۶۰	۶۰					
سیلیسیوم	۲۱	۲۱	۱۷	۱۷/۵					
آلومینیوم	۱۳	۵	۱۰	۴/۵					
کلسیم	۱۰	۸	۵	۴/۵					
منیزیم	۵	۵	۵	۵					
آهن	۶	۱۵	۲/۵	۶					
تیتانیوم و سدیم	~۰	~۱	~۰/۵	~۲/۵					

تحلیل اقتصادی

در این بخش تحلیل اقتصادی معدن کاوی ارائه شده است. مبنای تحلیل بر اساس مقاله‌های [۴] است. این تحلیل تحت عنوان تحلیل اقتصادی معدن کاوی سیارکی مبتنی بر رویکرد سوترا بوده و قابل تعمیم به تحلیل اقتصادی معدن کاوی ماه نیز است. رویکرد سوترا، در حال حاضر یکی از با جزئیات‌ترین تحلیل‌ها جهت ارتباط پارامترهای

• وزن هر فضاییما

در تحلیل اقتصادی معدن کاوی دو دیدگاه خوش‌بینانه و محافظه‌کارانه قابل ارزیابی است. در دیدگاه خوش‌بینانه فضاییماها به تولید انبوه رسیده و اثر مستقیمی در کاهش هزینه‌ها دارد. در دیدگاه محافظه‌کارانه یک فضاییما وجود داشته و هزینه‌ها با قیمت‌های فعلی برآورد می‌شود. از این‌رو هزینه‌های تحقیق و توسعه، تولید و عملیات در دیدگاه محافظه‌کارانه بیش‌تر از دیدگاه خوش‌بینانه است.

انتخاب ماده معدن کاوی

ماه با توجه به فرصت‌های اقتصادی متعدد، یکی از جذابیت‌های تأمین مواد مورد نیاز بشر است. از مواد ماه به شیوه‌های متعددی از جمله موارد زیر می‌توان استفاده کرد.

- استفاده بر روی سطح زمین
- جهت اسکان و توسعه شهرک‌نشینی بر روی ماه
- تامین و ارسال سوخت به فضاییماها
- تامین سوخت و اکسیژن مأموریت‌های بین سیاره‌ای و تبدیل ماه به ایستگاه میان راهی
- تبدیل ماه به مرکز علمی و تحقیقاتی
- تبدیل ماه به مرکز ارتباطات بین سیاره‌ای و تلسکوپ‌های رادیویی

از میان مواد معروفی شده در جدول‌های (۱) و (۲)، از سه دسته اکسیدها، سوخت‌ها و فلزات، برای از دسته با استفاده از تحلیل فازی با پارامترهای مورد بررسی در جدول (۳)، یک ماده هدف انتخاب شده است. تحلیل فازی ارائه شده در جدول (۳) بر اساس ضریب‌دهی به پارامترهای مؤثر در انتخاب ماده است. پارامترها شامل آن دسته از الزامات، محدودیت‌ها و فعالیت‌های حیاتی سطح بالا و مأموریت بوده و قابلیت گسترش نیز دارد. ضریب تصمیم‌گیری نیز تنها با مقادیر ۱ تا ۴ ملاک قرار گرفته شده است. مقدار ۱ برای حالتی که هزینه عملیاتی بالا، پیچیدگی طراحی و عملیات، درصد پایین فرآوری و ارزش پایین ماده را نشان می‌دهد. مقدار ۴ نیز برای حالتی که هزینه عملیاتی پایین، سادگی در طراحی و عملیات، درصد بالاتر فرآوری و ارزش بیش‌تری از ماده را نشان می‌دهد؛ بنابراین پارامترهای دارای هزینه‌های عملیاتی، مالی و زمانی بالاتر، امتیاز کمتری را کسب و در عوض پارامترهای دارای هزینه‌های عملیاتی، مالی و زمانی پایین‌تر، امتیاز بیش‌تری را در تحلیل فازی کسب کرده است. با توجه به مجموع امتیاز کسب شده از تمامی پارامترهای جدول (۳) برای مواد موجود بر روی ماه با در نظر گرفتن ضریب تصمیم‌گیری هر پارامتر و وزن هر پارامتر، هر ماده که دارای بیش‌ترین امتیاز بوده، واحد انتخاب به عنوان ماده هدف است.

زمین مأموریت و t_j زمان درآمدزایی است. با کسر پارامتر t_m ، از مقدار t_j . t_m مدت زمان مأموریت مشخص می‌شود و $t_j - t_m$ نیز مشخص کننده زمانی است که مأموریت شروع شده است. مطابق با فرمول (۳)، محاسبه میزان سود یا زیان با استفاده از برنامه کامپیوترا توسعه داده شده در زبان برنامه‌نویسی پایتون اجرا شده است. در جدول (۳)، مقدار هر یک از پارامترهای موجود در فرمول (۳)، جهت بررسی اقتصادی مقداردهی شده است.

$$\begin{aligned} P_{tot_PV} &= \sum_{i=1}^T n_i \sum_j \left[m_{sc} c_{price_{mat}} \left(\frac{ftr}{(1+I)^{t_j}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - ceil\left(\frac{n_i}{s_i + 1}\right) \frac{\left(c_{prod1} [p \cdot ceil\left(\frac{n_i}{s_i + 1}\right)]^\alpha + c_{transport}\right)}{c_{price_{mat}} (1+I)^{t_j - t_m}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{c_{ops}}{(1+I)^{t_j}} \right] - c_{dev} \frac{m_{sc}}{p} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

معدن کاوی فضایی

معدن کاوی فضایی جنبه جدیدی از فضا است. به این صورت که منابع موجود در سیارک‌ها، قمرها و سایر سیاره‌ها جهت رفع نیازهای بشر در فضا یا زمین مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال آب استخراج شده از اجرام سماوی علاوه بر رفع نیازهای حیات بشر، می‌تواند جهت تأمین سوخت و یا محافظت در مقابله پرتوهای خورشیدی در فضاییماها استفاده شود. تأمین نیازهای بشر در فضا توسط منابع موجود در فضا و اجرام سماوی به جهت حذف هزینه انتقال آن از زمین، بسیار با اهمیت است. همچنین با توجه به هزینه‌های زیاد انتقال منابع به زمین، تنها منابعی مورد توجه بوده که در وزن مشابه ارزش بالاتری داشته باشد. فلزات گران‌بها و مواد کمیاب بر روی زمین به عنوان اهداف معدن کاوی در فضا و انتقال آن به زمین مورد توجه است. تأمین این فلزات برای صنایع با فناوری‌های نو همچون هوافضا حیاتی است. هاین در مقاله خود با بهره‌گیری از فرمول (۳)، به ارزیابی معدن کاوی برای استخراج دو عنصر آب و پلاتینیوم پرداخته است.

به صورت کلی در هر معدن کاوی فضایی، فرضیات لازم جهت ارزیابی اقتصادی آن شامل موارد زیر است.

- زمان معدن کاوی
- تعداد فضاییماهای عملیاتی
- تعداد عملیات معدن کاوی

جدول ۳- تحلیل فازی انتخاب مواد

ضریب تصمیم‌گیری				پارامتر
۴	۳	۲	۱	
سطح ماه رو به زمین	ارتفاعات	Mare (ماریا)	پشت ماه، قطب‌ها	موقعیت بر روی ماه
مستقیم با ماه	واسطه با منظومه مدارگرد ارتفاع پایین	واسطه با منظومه مدارگرد نقاط لاغرانزی	واسطه با منظومه مدارگرد ارتفاع بالا	نحوه ارتباط با زمین
سلول خوشیدی، پیوسته (قطب‌ها)	سلول خوشیدی	سلول خوشیدی و ذخیره انرژی	راکتورهای اتمی	نحوه تامین انرژی
۴۵ تا ۶۰	۴۵ تا ۳۰	۳۰ تا ۱۵	۱۵ تا ۰	میزان فراوری (درصد فرآوری)
بدون تفکیک	تفکیک به صورت جامد (غربال‌گری)	تفکیک میانی	تفکیک تبخیری	نحوه تفکیک مواد
بدون سیستم ویژه	سیستم ویژه تحت فشار	سیستم ویژه کنترل حرارتی	سیستم ویژه کنترل حرارتی و تحت فشار	نحوه ذخیره‌سازی
حفاری سطحی در مناطق هموار	حفاری سطحی و عمق در مناطق هموار	حفاری سطحی و عمق در ارتفاعات	حفاری سطحی و عمق در Mare	نحوه استخراج
بدون سیستم ویژه	سیستم ویژه تحت فشار	سیستم ویژه کنترل حرارتی	سیستم ویژه کنترل حرارتی و تحت فشار	نحوه انتقال به زمین
۱۰۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰	۵۰۰۰ تا ۰	ارزش مواد
PPM کمتر از ۱	PPM بین ۱ تا ۱۰	PPM بین ۱۰ تا ۱۰۰	PPM بیشتر از ۱۰۰	فراوانی مواد در زمین

نتایج برای دسته سوخت و فلزات تغییری نداشته و در دسته اکسیدهای اکسید تیتانیوم در برخی مواد به عنوان ماده هدف استخراج شد. بالین حال با توجه به فراوانی انتخاب بالای اکسید سیلیسیم در تحلیل حساسیت این ماده به عنوان ماده هدف دسته اکسیدها نهایی شد.

محاسبه سود و زیان بر اساس روش تحلیل

با توجه به ماده‌های انتخابی و همچنین فرض استفاده از تنها یک ماده هدف جهت معدن کاوی، برای هر ماده سه حالت، خوشبینانه، محافظه‌کارانه و مقادیر دلخواه در محاسبه سود و زیان در نظر گرفته شده است. هاین [۴] در مقاله خود دو حالت خوشبینانه و محافظه‌کارانه را استفاده کرده که بر اساس شرایط حاکم و رو به رشد سطح فناوری جهان است. در این مقاله حالت سوم با مقادیر دلخواه نیز لحاظ شده تا تحلیل‌ها از جامعیت بیشتری برخوردار باشند. مزیت مقادیر دلخواه وارد کردن مقادیر بر اساس محدودیت‌های سطح فناوری هر کشور و همچنین کاهش قیمت فروش مواد معدن کاوی شده است. در این مقاله کاهش قیمت فروش مواد نیز مورد توجه است.

تحلیل برای دو سناریو زمانی و دو جرم محموله با استفاده از معادله (۳) در بستر زیان برنامه‌نویسی پایتون به صورت زیر بررسی شده است.

مواد انتخابی برای دو وضعیت کمترین تفکیک مواد و تفکیک دقیق مواد به صورت جدول (۴) به دست آمده است. منظور از کمترین تفکیک مواد در واقع عدم غربال‌گری ماده هدف از سایر مواد موجود در ماه است. همچنین منظور از تفکیک دقیق مواد نیز غربال‌گری و تفکیک ماده هدف از سایر مواد بوده و ماده با خلوص بالا ذخیره‌سازی و ارسال می‌شود.

جدول ۴- مواد انتخابی جهت معدن کاوی در ماه

ماده	کمترین تفکیک مواد	تفکیک دقیق مواد
اکسیدها	اکسید سیلیسیم	اکسید سیلیسیم
سوخت	هليوم - ۳	هليوم - ۳
فلزات	منیزیم	منیزیم

نتایج برای دسته فلزات یکسان بوده ولی با توجه به این که منیزیم ارزش اقتصادی بالاتری داشته به عنوان انتخاب نهایی در نظر گرفته شده است.

نتایج جدول (۴) با اعمال ضرایب تأثیر یکسان از پارامترهای جدول (۳) به دست آمده است، جهت اطمینان از انتخاب‌ها با استفاده از تحلیل حساسیت بر روی ضرایب تأثیر پارامترهای تحلیل فازی،

در جدول (۵)، حداقل مقادیر ممکن جهت ارزش‌گذاری مواد با توجه به سوددهی طرح است.

در جدول (۵) مقادیر پارامترهای به رنگ مشکی به غیر از نسبت مواد خالص سازی شده به منابع فرآوری شده از مرجع [۴] مورد استفاده قرار گرفته است. پارامتر نسبت مواد خالص سازی شده به منابع فرآوری شده با توجه به جدول ۱ انتخاب شده است. پارامترهای به رنگ قرمز نیز ورودی‌های فرمول سوددهی بوده و توسط کاربر تعیین می‌شود. تفاوت ستون ۱۰۰ روزه اول با ستون ۱۰۰ روزه دوم با تمامی شباهت‌ها، در مقدار میزان توان عملیاتی بوده که باعث تفاوت در جرم محموله هر فضاییما می‌شود. در ستون ۱۰۰ روزه اول با میزان توان عملیاتی ۶-۲۴۶ ۲،۶۱۷ کیلوگرم و در ستون ۱۰۰ روزه دوم با میزان توان عملیاتی ۹،۸۵۰-۶ ۶۰۰۰ کیلوگرم ماده جهت ارسال به زمین آماده می‌شود.

- ۱۰۰ مأموریت و هر مأموریت ۳۶۵ روز
 - ۱۰۰ مأموریت و هر مأموریت ۱۰۰ روز
 - جرم محموله تقریباً برابر با جرم فضاییما
 - جرم محموله چهار برابر جرم فضاییما
- با توجه به توضیحات بالا، برای هر ماده ۱۲ حالت ارزیابی سود و زیان وجود دارد. با در نظر گرفتن محدودیت‌های زمانی در مأموریت‌های فضایی، نتایج ستاریو دوم زمانی (۱۰۰ مأموریت و هر مأموریت ۱۰۰ روز) برای ماده اکسید سیلیسیم در جدول (۵) ارائه شده است.

در تمامی حالت‌های ارزیابی به دلیل هزینه ۲۰ هزار دلاری جابه‌جایی هر کیلوگرم ماده در فضا فارغ از نوع و جنس آن؛ ارزش فروش هر کیلوگرم از مواد ۲۰ هزار دلار در نظر گرفته شده است. مطابق مطالب گفته شده در تحلیل مقادیر دلخواه، هدف کاهش قیمت مواد برای حداقل کردن قیمت فروش مواد بوده و مقادیر دلخواه

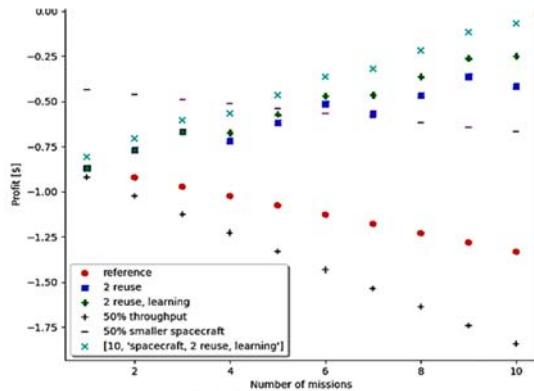
جدول ۵- نتایج بررسی سوددهی ماده اکسید سیلیسیم برای ستاریو دوم زمانی مأموریت

۱۰۰ روزه				۱۰۰ روزه				پارامتر
دلخواه	خوش‌بینانه	محافظه کارانه	محافظه کارانه	دلخواه	خوش‌بینانه	محافظه کارانه	محافظه کارانه	
۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	هزینه ویژه تولید (دلار بهزای هر کیلوگرم)
۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	هزینه ویژه انتقال (دلار بهزای هر کیلوگرم)
۵۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	ارزش ماده (دلار بهزای هر کیلوگرم)
۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۵۷۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۵۷۰۰۰۰	۵۷۰۰۰۰	هزینه عملياتی (دلار)
۵۰۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰	۵۴۵۳۳۳۳	۵۰۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰	۵۴۵۳۳۳۳	۵۴۵۳۳۳۳	هزینه ویژه تحقیق و توسعه (دلار بهزای هر کیلوگرم)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	مدت زمان معدن کاوی (روز)
۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴	۰/۴	نسبت مواد خالص سازی شده به منابع فرآوری شده
۹/۸۵۰-۶	۹/۸۵۰-۶	۹/۸۵۰-۶	۲/۴۶۰-۶	۲/۴۶۰-۶	۲/۴۶۰-۶	۲/۴۶۰-۶	۲/۴۶۰-۶	میزان توان عملیاتی
۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	جرم فضاییما (کیلوگرم)
۲۰	۱۰	۱۰	۲۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	تعداد مأموریت‌ها
۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	تعداد استفاده مجدد از فضاییما
-۰/۲۳۴	-۰/۲۳۴	-۰/۲۳۴	-۰/۲۳۴	-۰/۲۳۴	-۰/۲۳۴	-۰/۲۳۴	-۰/۲۳۴	پارامتر یادگیری
۳	۱۰	۱۰	۳	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	تعداد فضاییماها در یک مأموریت
نتایج								
۵۹۹۹۸/۳۲	۵۹۹۹۸/۳۲	۵۱۰۶۲/۴	۱۴۹۸۴/۳۵	۱۴۹۸۴/۳۵	۱۲۷۵۲/۶۴	۱۲۷۵۲/۶۴	۱۲۷۵۲/۶۴	جرم مواد تولیدی در هر مأموریت (کیلوگرم)
۵۹۹۹/۸۳۲	۵۹۹۹/۸۳۲	۵۱۰۶/۲۴	۱۴۹۸/۴۳۵	۱۴۹۸/۴۳۵	۱۲۷۵/۲۶۴	۱۲۷۵/۲۶۴	۱۲۷۵/۲۶۴	جرم محموله هر فضاییما (کیلوگرم)
۵۹۹۹۹۸۳/۲	۵۹۹۹۹۸۳/۲	۵۱۰۶۲۴	۱۴۹۸۴۳/۵	۱۴۹۸۴۳/۵	۱۲۷۵۶/۴	۱۲۷۵۶/۴	۱۲۷۵۶/۴	جرم کل مواد تولیدی در کل مأموریت (کیلوگرم)

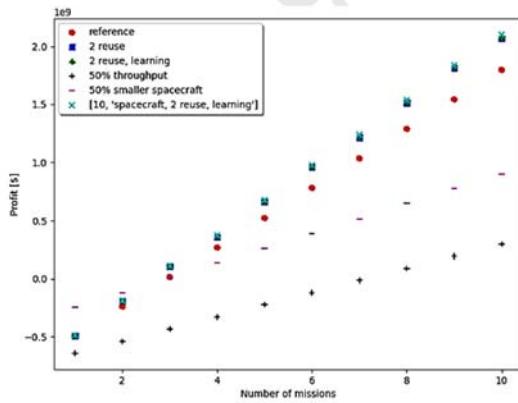
قیمت در حالت محموله با جرم ۱۵۰۰ کیلوگرم حداقل قیمت ۱۰ هزار دلار و در حالت محموله با جرم ۶۰۰۰ کیلوگرم حداقل قیمت ۵ هزار دلار نیز بررسی شده است.

نمودارهای تحلیل سود ماده اکسید سیلیسیم در شکل‌های (۱ تا ۴) برحسب تعداد مأموریت‌ها استخراج شده و زمان مأموریت در نزخ

با توجه به مقادیر یکسان جرم قابل حمل و ارزش مواد، در حالات‌های ارزیابی سه ماده انتخابی، رفتارهای مشابه‌ای در تولید درآمد و سود مشاهده شد. دلیل این موضوع عدم مرغ مناسب در تعیین قیمت فروش مواد است؛ بنابراین حداقل قیمت فروش ۲۰ هزار دلار برای هر کیلوگرم ماده انتخاب شده است. لیته برای بررسی کاهش



شکل ۳- حالت محافظه کارانه، جرم ۶۰۰۰ کیلوگرم، سناریو ۱۰۰ روزه، ارزش مواد ۲۰ هزار دلار



شکل ۴- حالت دلخواه، جرم ۶۰۰۰ کیلوگرم، سناریو ۱۰۰ روزه، ارزش مواد ۵ هزار دلار

نتایج تحلیل اقتصادی برای ماده اکسید سیلیسیم به صورت

شکل های (۱ تا ۴) است. با توجه به مقادیر نمودارها در شکل (۱) مشخص است در حالت محافظه کارانه با جرم محموله ۱۵۰۰ کیلوگرم طرح زیان ده ولی در حالت محافظه کارانه با جرم محموله ۶۰۰۰ کیلوگرم طرح در انتهای مأموریت خود به نقطه سربه سری می رسد. در حالت های خوش بینانه و مقدار دلخواه طرح کاملاً سوددهی دارد.

تحلیل حساسیت سود و زیان

به منظور ارزیابی دقیق تر سود، تحلیل حساسیت با اعمال ۲۰ درصد تغییر افزاینده و کاهنده بر پارامترهای زیر انجام شد.

- مدت زمان مأموریت

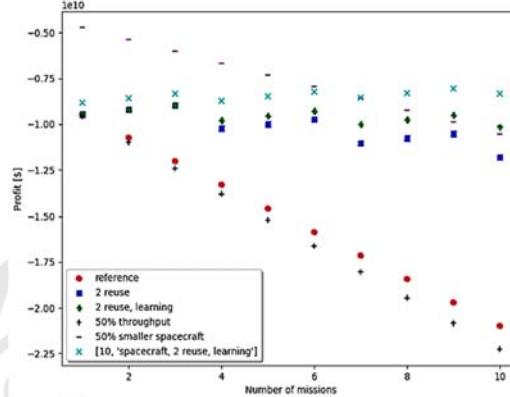
- تعداد عملیات پیوسته

- جرم محموله

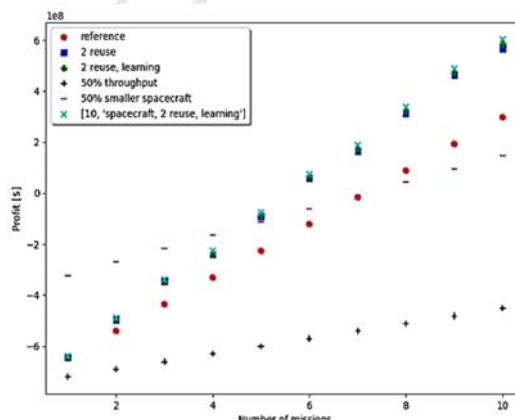
با توجه به حالت های مختلف قابل ایجاد تنها برخی از حالت ها بررسی شده در جدول (۶) ارائه شده است.

بهره برداری و جرم مواد استخراج شده تأثیرگذار است. در هر شکل پنج نمودار با مشخصات زیر ارائه شده است.

- (Refrence) (مدل بدون هیچ افزونه)
- (2 reuse) (هر فضایپیما دوبار استفاده)
- (2 reuse, learning) (هر فضایپیما دوبار استفاده به همراه پارامتر یادگیری)
- (50% smaller spacecraft) (کاهش ۵۰٪ درصدی جرم فضایپیما)
- (10, spacecraft, 2 reuse, learning) (فضایپیما، هر فضایپیما دو بار استفاده به همراه پارامتر یادگیری)
- منظور از پارامتر یادگیری، کاهش هزینه توسعه در زمانی که فضایپیمایی یکبار ساخته شده و مجدد مشابه آن ساخته شود، است.



شکل ۱- حالت محافظه کارانه، جرم ۱۵۰۰ کیلوگرم، سناریو ۱۰۰ روزه، ارزش مواد ۲۰ هزار دلار



شکل ۲- حالت دلخواه، جرم ۱۵۰۰ کیلوگرم، سناریو ۱۰۰ روزه، ارزش مواد ۱۰ هزار دلار

جدول ۸- نتایج تحلیل حساسیت سناریو ۱۰۰ روز با جرم ۶۰۰ کیلوگرم

دلخواه	خوشبینانه	محافظه کارانه	حالت
۲/۱۰	۱۱/۱۰	-۰/۶۸	.
۴/۱۱	۱۹/۶۶	۴/۵۸	G
۰/۸۵	۵/۴۵	-۳/۰۶	N
۲/۷۴	۱۳/۱۱	۳/۰۳	O
۲/۴۲	۱۲/۷۹	-۰/۶۴	P
۲/۳۸	۱۲/۷۵	-۱/۳۰	Q
۱/۲۷	۸/۱۸	-۴/۵۶	R
۱/۵۹	۸/۵	-۰/۸۹	S
۱/۶۱	۸/۵۳	-۰/۴۴	T

جدول ۹- اعمال نتایج حالت O، تحلیل حساسیت در مأموریت

واحد	مقدار	پارامتر
روز	۱۲۰	زمان مأموریت
-	۱۲	تعداد مأموریت‌های پیوسته
کیلوگرم	۱۲۰۰	جرم محموله

با توجه به این که محدودیت جرم قابل انتقال برای دو حالت ۱۵۰۰ کیلوگرم و ۶۰۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است، برای ماده‌های اکسید سیلیسیم و منیزیم رفتار کاملاً مشابه‌ای در تمامی حالتها وجود دارد. این رفتار نیز برای ماده هلیوم -۳ نیز وجود داشته ولی در حالت‌هایی که نسبت مواد خالص سازی شده به منابع فراوری شده متفاوت است (حالت محافظه کارانه) تفاوت‌هایی در رفتار کلی نتایج دیده می‌شود.

با توجه به جرم محموله قابل انتقال توسط فضایپما (۱۵۰۰ یا ۶۰۰۰ کیلوگرم)، زمان مأموریت (۳۶۵ یا ۱۰۰ روز) و همچنین نسبت مواد خالص سازی شده به منابع فراوری شده در حالت خوشبینانه (متناسب با جدول‌های ۱ و ۲)، میزان توان عملیاتی استخراج شده است.

انتخاب ماده معدن کاوی

با در نظر گرفتن عدم وجود مرجع مناسب جهت تعیین قیمت فروش مواد استخراج شده در فضا، حداقل قیمت فروش برای هر کیلوگرم ماده انتخاب شد (۲۰ هزار دلار) که برای هر سه ماده یکسان است. با توجه به این انتخاب ماده هدف با معیار میزان سوددهی غیرقابل توجیه است؛ بنابراین جهت انتخاب ماده هدف از معیار میزان توان عملیاتی بهره برده شد. این معیار نشان‌دهنده سادگی استخراج و فراوری مواد و هزینه‌های عملیاتی معدن کاوی است. این معیار با عددی بین ۰ تا ۱ تعیین می‌شود، هر چه این عدد کوچک‌تر باشد میزان توان عملیاتی کمتر بوده و در نتیجه آن هزینه‌های عملیاتی و تجهیزات مورد استفاده کمتر خواهد بود.

جدول ۶- تحلیل حساسیت پارامترهای ارزیابی سود

حالت	مأموریت	مدت زمان	تعداد عملیات پیوسته	جرم محموله
.
G	+٪۲۰	+٪۲۰	+٪۲۰	-٪۲۰
N	-٪۲۰	-٪۲۰	-٪۲۰	-٪۲۰
O	-٪۲۰	+٪۲۰	+٪۲۰	-٪۲۰
P	+٪۲۰	-٪۲۰	+٪۲۰	-٪۲۰
Q	+٪۲۰	+٪۲۰	-٪۲۰	-٪۲۰
R	+٪۲۰	-٪۲۰	-٪۲۰	-٪۲۰
S	-٪۲۰	+٪۲۰	-٪۲۰	-٪۲۰
T	-٪۲۰	-٪۲۰	+٪۲۰	-٪۲۰

نتایج حاصل از جدول (۶) برای ماده اکسید سیلیسیم در جدول‌های (۷ و ۸) ارائه شده است. مقدارهای جدول‌های (۷ و ۸) بر حسب میلیارد دلار بوده و مقدار سود و زیان در انتهای مأموریت را نشان می‌دهد. این مقدارها به صورت مستقل تحلیل شده ولی رنگ‌های جدول در مقایسه با حالت سود و زیان ایجاد شده است.

حالت ۰ نیز حالت مرجع (بدون تغییرات تحلیل حساسیت) است.

نتایج حاصل شده در جدول‌های (۷ و ۸) برای ماده منیزیم نیز روندی مشابه داشته ولی در مورد ماده هلیوم -۳ در تمام حالت‌های محافظه کارانه، سوددهی به وجود نمی‌آید.

با نگاه در جدول‌های (۷ و ۸) مشاهده می‌شود حالت‌های G و O جزء گزینه‌های افزایش سوددهی و کاهش زیان است. برای وضعیت سوددهی گزینه G بسیار مناسب بوده ولی در حالت کلی و در دیدگاه سیستمی برای ایجاد همزمان کاهش زیان در وضعیت‌های زیان ده و افزایش سود در حالت‌های سودده، گزینه O بسیار مناسب و حالت میانی بین تمامی حالت‌های بررسی شده است. در نتیجه انتخاب گزینه O، پارامترهای مأموریت به صورت جدول (۹) خواهد بود.

جدول ۷- نتایج تحلیل حساسیت سناریو ۱۰۰ روز با جرم ۱۵۰۰ کیلوگرم

حالت	محافظه کارانه	خوشبینانه	دلخواه
.	-۸/۳۴	۲/۱۰	۰/۶۰
G	-۸/۶۶	۴/۱۰	۱/۵۱
N	-۶/۹۸	۰/۸۵	۰/۰۸
O	-۵/۷۹	۲/۷۳	۱/۰۱
P	-۹/۴۷	۲/۴۲	۰/۶۹
Q	-۱۰/۱۳	۲/۳۸	۰/۶۵
R	-۱۰/۴۵	۱/۲۷	۰/۱۲
S	-۶/۷۷	۱/۵۸	۰/۴۳
T	-۶/۳۳	۱/۶۱	۰/۴۶

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در مقاله حاضر ابتدا بر اساس ساختار ماه و نتایج مأموریت‌های انجام شده گذشته، مواد و درصد تشکیل‌دهنده آن تعیین و پس از آن بر اساس یک تحلیل فازی و تحلیل حساسیت با اعمال ضرباب تأثیر مختلف، مواد مناسب جهت بهره‌برداری مشخص شد. بر همین اساس مواد به سه دسته اکسیدها، فلزها و سوخت‌ها تقسیم و از هر گروه به ترتیب ماده‌های اکسید سیلیسیم، منیزیم و هلیوم -۳ با اولویت بالا به لحاظ تحلیل فازی و ارزش (قیمت در صورت مساوی بودن نتایج تحلیل فازی) و فراوانی نتایج تحلیل حساسیت، برای بررسی تحلیل سوددهی انتخاب شد. با تحلیل سوددهی بر اساس روش ارائه شده در مقاله، با تعیین قیمت فروش مواد به میزان حداقل ۲۰ هزار دلار در هر کیلوگرم (با توجه به هزینه جابه‌جاوی هر کیلوگرم در فضا) در حالت‌های محافظه کارانه تنها با جرم محموله قابل حمل ۶۰۰۰ کیلوگرم دو ماده اکسید سیلیسیم و منیزیم با افزایش زمان مأموریت و تعداد مأموریت‌ها، سودده خواهد بود و در حالت‌های خوش‌بینانه نیز هر سه ماده با هر دو حالت جرمی (۱۵۰۰ و ۶۰۰۰ کیلوگرم) کاملاً سوده بوده و در حالت‌های با مقادیر دلخواه (کاهش قیمت فروش مواد) نیز سوددهی وجود دارد. با انجام تحلیل حساسیت بر روی سه پارامتر؛ مدت زمان مأموریت، تعداد عملیات پیوسته و جرم محموله، حالت مناسب انجام مأموریت برای این سه پارامتر شامل ۱۲۰ روز مأموریت، ۱۲ عملیات پیوسته و ۱۲۰۰ کیلوگرم جرم محموله حاصل شد؛ و در انتهای بر اساس معیار توان عملیاتی، ماده اکسید سیلیسیم به عنوان ماده هدف معدن کاوی ماه انتخاب شد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندهای بیان نشده است.

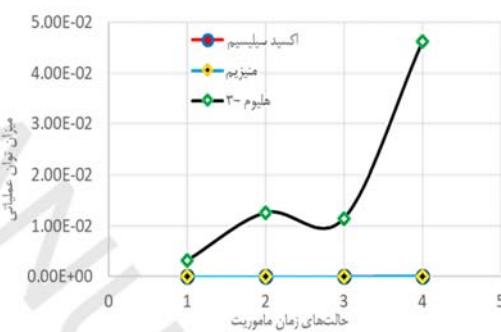
مراجع

- [1] L. P. Keszthelyi, J. A. Coyan, K. A. Bennett, L. R. Ostrach, L. R. Gaddis, T. S. Gabriel, and J. Hagerty, "Assessment of Lunar Resource Exploration in 2022," *U.S. Geological Survey*, 2023, <https://doi.org/10.3133/cir1507>.
- [2] D. Hachez, A. de Lajarte, V. Vierge, and M. Udrriot, "Value Proposition Design – Space Mining: Scouting and prospecting for volatiles prospecting on the Moon," 2020, <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.27443.04642>.
- [3] G. Jamanca-Lino, "Space Resources on the Moon and Space Mining," in *21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, Buenos Aires, Argenitna, 2023, DOI: 10.18687/LACCEI2023.1.1.560.

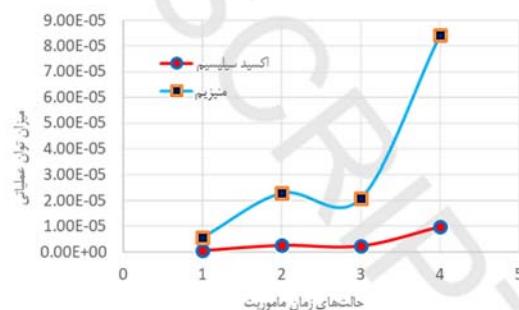
در جدول (۱۰) مقدار توان عملیاتی مواد در حالت‌های مختلف مأموریت ارائه شده است. در شکل (۵) میزان توان عملیاتی هر سه ماده در جدول (۱۰) به صورت نمودار نشان داده شده است. قابل مشاهده است ماده هلیوم -۳ نسبت به دو ماده دیگر نیاز به توان عملیاتی بسیار بالایی است. در شکل (۵) با توجه به عدم قابل تکمیک بودن میزان توان عملیاتی دو ماده اکسید سیلیسیم و منیزیم نسبت میزان توان عملیاتی این دو ماده با هم در شکل (۶) ارائه شده است. در شکل (۶) مشخص است میزان توان عملیاتی موردنیاز جهت استخراج و فرآوری ماده اکسید سیلیسیم بسیار کمتر از ماده منیزیم بوده و در نتیجه این ماده را می‌توان به عنوان ماده هدف جهت معدن کاوی ماه در نظر گرفت.

جدول ۱۰- توان عملیاتی معدن کاوی ماده‌های انتخابی

ردیف	حال	اکسید سیلیسیم	منیزیم	هلیوم -۳
۱	روز ۳۶۵ کیلوگرم ۱۵۰۰	۶/۷۵e-۷	۵/۷۶e-۶	۳/۱۷e-۳
۲	روز ۳۶۵ کیلوگرم ۶۰۰۰	۲/۷e-۶	۲/۳e-۵	۱/۲۶e-۲
۳	روز ۱۰۰ کیلوگرم ۱۵۰۰	۲/۴۶e-۶	۲/۱e-۵	۱/۱۵e-۲
۴	روز ۱۰۰ کیلوگرم ۶۰۰۰	۹/۸۵e-۶	۸/۴۲e-۵	۴/۶۲e-۲



شکل ۵- میزان توان عملیاتی سه ماده مورد بررسی قرارگرفته در یک نگاه



شکل ۶- میزان توان عملیاتی دو ماده اکسید سیلیسیم و منیزیم.

- [16] D. J. Loftus, E. M. Tranfield, J. C. Rask, and C. McCrossin, "The Chemical Reactivity of Lunar Dust Relevant to Human Exploration of the Moon," *NASA Ames Research Center*, 2008, Available: <https://citeserx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=652ad568d89e835705c9f528a3e1d0f6fc811129>.
- [17] W. K. Hartmann, C. Quantin, and N. Mangold "Possible long-term decline in impact rates. 2. Lunar impact-melt data regarding impact history," *Icarus*, vol. 186, no. 1, pp. 11-23, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.09.009>.
- [18] P. Lucey, et al, "Understanding the lunar surface and space-Moon interactions," *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 60, no. 1, pp. 83-219, 2006, <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.60.2>.
- [19] M. A. Wieczorek, B. L. Jolliff, A. Khan, M. E. Pritchard, et al, "The constitution and structure of the Lunar interior," *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 6, no. 1, pp. 221-364, 2006, <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.60.3>.
- [20] G. Heiken, D. Vaniman, and B. M. French, *Lunar Sourcebook*, Cambridge University Press, 1991.
- [21] D. B. J. Bussey, P. G. Lucey, D. Steutel, M. S. Robinson, P. D. Spudis, and K. D. Edwards, "Permanent shadow in simple craters near the lunar poles," *Geophysical Research Letters*, vol. 30, no. 6, pp. 1-5, 2003, <https://doi.org/10.1029/2002GL016180>.
- [22] D. Sivolella, *Space Mining and Manufacturing Off-World Resources and Revolutionary Engineering Techniques*, Springer Cham, 2019, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30881-0>.
- [23] S. M. Technologies, "Space Mining Technologies," UK Ltd, 2023. [Online]. Available: <https://space-mining.tech/moon-resources-challenge-opportunity/>.
- [24] J. D. Burke, "Lunar Materials and Processes," in *Materials Processing*, 1986.
- [25] G. J. Taylor, "Mining the Moon, Mars, and Asteroids," *Planetary Science Research Discoveries Report*, vol. 43, 2000.
- [26] W. C. Feldman, S. Maurice, A. B. Binder, B. L. Barraclough, R. C. Elphic and D. J. Lawrence, "Fluxes of fast and epithermal neutrons from lunar prospector: Evidence for water ice at the lunar poles," *Science*, vol. 281, no. 5382, pp. 1496-1500, 1998, <https://doi.org/10.1126/science.281.5382.1496>.
- [27] D. Beike, "Mining of Helium-3 on the Moon: Resource, Technology, and Commerciality—A Business Perspective," 2013, <https://doi.org/10.1306/13361575M1013542>.
- [28] S. Matar, "Energy analysis of extracting helium-3 from the Moon," *Politecnico di Torino, Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering*, 2021.
- [4] A. M. Hein, R. Matheson, and D. Fries, "A techno-economic analysis of asteroid mining," *Acta Astronautica*, vol. 168, pp. 104-115, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.05.009>.
- [5] P. Calla, D. Fries, and C. Welch, "Asteroid mining with small spacecraft and its economic feasibility," *arXiv preprint arXiv:1808.05099*, 2018, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1808.05099>.
- [6] T. E. Graedel, E.M. Harper, N.T. Nassar, P. Nuss, B.K. Reck, "Criticality of metals and metalloids," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, no. 14, pp. 4257-4262, 2015, <https://doi.org/10.1073/pnas.1500415112>.
- [7] Dana G. Andrews, K.D. Bonner, A.W. Butterworth, H.R. Calvert, et al, "Defining a successful commercial asteroid mining program," *Acta Astronaut*, vol. 108, pp. 106-118, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.10.034>.
- [8] A. Sommariva, L. Gori, B. Chizzolini, and M. Pianorsi, "The economics of moon mining," *Acta Astronautica*, vol. 170, pp. 712-718, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.042>.
- [9] NASA, "Earth's Moon – NASA Solar System Exploration," NASA, 2021, [Online], Available: <https://solarsystem.nasa.gov/moons/earths-moon/by-the-numbers/>.
- [10] S. Mighani, H. Wang, D. L. Shuster, C. S. Borlina, C. I. Nichols, and B. P. Weiss, "The end of the lunar dynamo," *Science advances*, vol. 6, no. 1, pp. eaax0883, 2020, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0883>.
- [11] A. C. Schuerger, J. E. Moores, D. J. Smith, and G. Reitz, "A Lunar Microbial Survival Model for Predicting the Forward Contamination of the Moon," *Astrobiology*, vol. 19, no. 6, pp. 730-756, 2019, <https://doi.org/10.1089/ast.2018.1952>.
- [12] K. Pahlevan and D. J. Stevenson, "Equilibration in the aftermath of the lunar-forming giant impact," *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 262, no. 3-4, p. 438-449, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.055>.
- [13] R. Tartese, M. Anand, J. Gattacceca, K. H. Joy, et al, "Constraining the Evolutionary History of the Moon and the Inner Solar System: A Case for New Returned Lunar Samples," *Space Science Reviews*, vol. 215, no. 8, 2019, <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0622-x>.
- [14] S. Demidova, M. Nazarov, C. Lorenz, G. Kurat, et al, "Chemical composition of lunar meteorites and the lunar crust," *Petrology*, vol. 15, no. 4, pp. 386-407, 2007, <https://doi.org/10.1134/S0869591107040042>.
- [15] T. H. Prettyman, J. Hagerty, R. Elphic, W. Feldman, D. Lawrence, G. McKinney, and D. Vaniman, "Elemental composition of the lunar surface: Analysis of gamma ray spectroscopy data from Lunar Prospector," *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, no. E12, pp. 1-41, 2006, <https://doi.org/10.1029/2005JE002656>.