JSST
Journal of Space Science and Technology

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

Journal of Space Science and Technology

Vol. 17, No. 3, pp. 1-14, 2024
https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1465
Journal Homepage: https://www.jsstpub.com

Original Research Paper

Economic Analysis of Exploitation of Lunar Resources

Ebrahim Amiri[1], Masoome Khani Chamani[2], Mahdi Jafari-Nadoushan[3*], Sajjad Ghazanfarinia[4], and Masoud Khoshsima[5]

1. Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2. Physics Department, Zanjan University, Zanjan, Iran
3. Space Research Laboratory, Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
4, 5. Satellite Systems Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 03 November 2023
Revised 10 December 2023
Accepted 16 December 2023
Available Online 16 December 2023

Keywords:

Moon resources
Moon mining
Economic analysis
Moon economy
Exploitation

ABSTRACT

An economic model generally describes the mechanisms used to generate revenue from a business. If it fails to generate income, its failure is inevitable. Therefore, decisions regarding missions are not based solely on technical specifications; economic profitability is also a crucial factor in decision-making and is a primary consideration for commercial investments. This consideration becomes particularly important in high-cost and long-duration projects, such as space missions, where the return on investment and economic justification are more complex. Lunar mining projects are no exception and require a comprehensive financial and technical feasibility assessment approach. To analyze the economic feasibility of any project, it is essential to evaluate its economic model. This paper conducts an economic valuation of lunar mining, focusing on materials available on the Moon, using fuzzy analysis and sensitivity analysis to identify suitable materials for exploitation. The materials are categorized into oxides, metals, and fuels. Using an appropriate economic model for space mining, the study evaluates the economic potential of selling these materials on Earth. Based on the economic feasibility analysis, each group identifies SiO_2, Mg, and helium-3 (3He) as high-priority materials. SiO_2 and Mg are expected to be profitable in conservative scenarios with increased mission duration and frequency. In optimistic scenarios, all three materials could be profitable. Ultimately, SiO_2 is selected as the target material for lunar mining.

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

How to Cite this Article:
E. Amiri, M. Khani Chamani, M. Jafari-Nadoushan, S. Ghazanfarinia, and M. Khoshsima, "Economic analysis of exploitation of lunar resources," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 1-14, 2024, (in Persian), https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1465.

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

JSST
علوم و فناوری فضایی

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

علوم و فناوری فضایی

سال ۱۴۰۳، دوره ۱۷، شماره ۳، صفحه ۱-۱۴
https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1465
Journal Homepage: https://www.jsstpub.com

مقاله پژوهشی

تحلیل اقتصادی بهره‌برداری از منابع ماه

ابراهیم امیری[۱]، معصومه خانی‌چمنی[۲]، مهدی جعفری‌ندوشن[۳*]، سجاد غضنفری‌نیا[۴] و مسعود خوش‌سیما[۵]

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۲- کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
۳- استادیار، آزمایشگاه تحقیقات فضایی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۴- کارشناسی ارشد، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران
۵- استادیار، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۲ آبان ۱۴۰۲
بازنگری ۱۹ آذر ۱۴۰۲
پذیرش ۲۵ آذر ۱۴۰۲
اولین انتشار ۲۵ آذر ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

منابع ماه
معدن‌کاوی ماه
تحلیل اقتصادی
اقتصاد ماه
بهره‌برداری

چکیده

مدل اقتصادی به‌طورکلی 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. این مسئله به‌ویژه در پروژه‌های با هزینه‌های بسیار بالا و بازه زمانی طولانی‌مدت همچون پروژه‌های فضایی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا بازگشت سرمایه و توجیه اقتصادی در این پروژه‌ها بسیار پیچیده‌تر است. پروژه‌های معدن‌کاوی ماه نیز از این قاعده مستثنی نیستند و نیازمند رویکردی همه‌جانبه برای مقایسه امکان مالی و فنی می‌باشند. 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. در این مقاله، به ارزیابی اقتصادی معدن‌کاوی ماه بر اساس مواد موجود در آن پرداخته شده و با استفاده از تحلیل فازی و تحلیل حساسیت، مواد مناسب جهت بهره‌برداری شناسایی شده‌اند. بر همین اساس، مواد به سه دسته اکسیدها، فلزها و سوخت‌ها تقسیم شدند. با استفاده از مدل اقتصادی مناسب برای معدن‌کاوی فضایی، ارزیابی اقتصادی جهت فروش مواد بر روی سطح زمین انجام شده و با توجه به صرفه اقتصادی، از هر گروه به ترتیب مواد اکسید سیلیسیم، منیزیم و هلیوم-۳ با اولویت بالا انتخاب شدند. در حالت‌های محافظه‌کارانه، مواد اکسید سیلیسیم و منیزیم با افزایش زمان مأموریت و تعداد مأموریت‌ها سودده خواهند بود، و در حالت‌های خوش‌بینانه هر سه ماده سودده خواهند بود. در نهایت، ماده اکسید سیلیسیم به‌عنوان ماده هدف معدن‌کاوی ماه انتخاب شد.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mjafari@kntu.ac.ir

How to Cite this Article:
E. Amiri, M. Khani Chamani, M. Jafari-Nadoushan, S. Ghazanfarinia, and M. Khoshsima, "Economic analysis of exploitation of lunar resources," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 1-14, 2024, (in Persian), https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1465.

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

علائم و اختصارات

C	مجموع هزینه
c_{dev}	هزینه تحقیق و توسعه
c_{ops}	هزینه عملیات
$c_{price_{mat}}$	ارزش هر کیلوگرم ماده
c_{prod_1}	هزینه فضاپیما
$c_{transport}$	هزینه انتقال در فضا
f	نرخ توان عملیاتی فضاپیما
I	نرخ تنزیل پول
i	تعداد سال‌های انجام معدن‌کاوی
j	شمارنده مأموریت
m_{sc}	جرم خشک فضاپیما
n	تعداد مأموریت‌های معدن‌کاوی
P	سود و زیان
p	تعداد فضاپیماها
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 فضاپیما
t	مدت زمان معدن‌کاوی
t_j	زمان درآمدزایی
α	ضریب یادگیری(تجربه)

مقدمه

معدن‌کاوی فضایی جنبه جدیدی از صنعت فضایی است، ایده استخراج از ماه که زمانی کاملاً علمی- تخیلی 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 تجاری و اقتصادی فعال دنیا است [۱]. با توجه به نزدیک‌ترین جرم سماوی به زمین؛ ماه در کنار سیارک‌های نزدیک به زمین، به‌عنوان قابل دسترس‌ترین منبع معدن‌کاوی 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 آرتمیس ایالات متحده آمریکا است[۱]. 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 معدنی 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 رگولیت[1] به ماده‌های هدف و ارزشمند در حال توسعه است. وجود یخ آب نیز در مناطق قطبی ماه اثبات شده ولی سؤالات بسیار زیادی در مورد کمیت، کیفیت و توزیع یخ آب ماه وجود دارد [۱]. دی لاجارته روش‌های کاوش و پیش‌بینی لازم قبل از ایجاد صنعت معدن‌کاوی در ماه را بررسی می‌کند و به گزینه‌هایی برای استخراج معادن 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 ماه می‌پردازد. این مطالعه تأکید دارد که علاقه‌مندی بهره‌برداران به استفاده از منابع بر روی خود ماه خواهد بود [۲]. 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 [۳].

بهره‌برداری از سیارک‌ها و قمرها، به‌خصوص نزدیک به زمین بارها به‌عنوان منبعی برای زمین و فضا پیشنهاد شده است. آب، فلزات و مواد فرار به‌عنوان منابعی در کاربردهای مختلفی ازجمله ساخت و ساز، سیستم‌های پشتیبان حیات و پیشرانش قابل استفاده است. هاین و همکاران [۴] ارزیابی اقتصادی استخراج مواد فرار و آب را برای استفاده در زمین و در فضا مورد بررسی قرار داده است. کالا و همکارانش [۵] 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 پلاتین موضوع اصلی مطالعات معدن‌کاوی قمرها و سیارک‌های نزدیک زمین است [۶]. اهمیت فلزات کمیاب جهت استفاده در

1. Regolith

فناوری‌های سبز همچون تولید سلول‌های سوختی، کاتالیزورها، باتری‌های با ظرفیت بالاتر و سلول‌های خورشیدی بسیار مهم و حیاتی است [۷]. سوماریوا در سال ۲۰۲۰ با استفاده از روش ارزش خالص فعلی (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 مونت کارلو به تجزیه و تحلیل عدم قطعیت‌ها در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی، سودآوری و امکان‌پذیری پروژه‌های استخراج ماه می‌پردازد [۸].

در این مقاله ابتدا مروری بر منابع ماه و توزیع آن بر سطح کره ماه ارائه شده، پس از آن در تحلیل اقتصادی، با استفاده از روش هاین [۴] تشریح داده شده است. در ادامه مقاله، معدن‌کاوی فضایی برای کره ماه و روند تحلیل اقتصادی از انتخاب اولیه ماده‌های موجود بر ماه شروع و با ارزیابی طرح معدن‌کاوی، سوددهی و انتخاب مناسب‌ترین ماده و مأموریت به اتمام می‌رسد. در پایان مقاله، نتیجه‌گیری ارائه شده و در آن ماده هدف نهایی جهت استخراج و سوددهی آن با توجه به طرح مأموریت معدن‌کاوی ماه بیان شده است.

مروری 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 فاقد هرگونه اتمسفر و دارای گرانش سطحی حدود یک ششم گرانش زمین است [۹]. میدان مغناطیسی خارجی ماه به‌صورت کلی کمتر از ۰/۲ نانوتسلا [۱۰] و دمای سطح آن بین ۱۷۱- تا ۱۴۰ درجه سلسیوس تغییر می‌کند [۱۱]. ماه دارای ترکیبات ایزوتوپی تقریباً یکسان با زمین است [۱۲].

از شش مأموریت موفق برنامه آپولو آمریکا با حضور انسان، مجموع ۳۸۲ کیلوگرم نمونه‌برداری شامل سنگ ماه، سنگریزه، 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 [۱۳]. 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 [۱۴]. همچنین داده‌های طیف‌سنجی اشعه گاما کاوشگر ماه نیز اطلاعات مفیدی را از ترکیب سطح ماه ارائه کرده است [۱۵].

بسترشناسی ماه

مطالعات معدنی بر روی نمونه‌های ماه نشان داده است که سنگ ماه شامل پیروکسن، پلاژیوکلاز، ایلمنیت، الیوین همراه با دانه‌های کمیاب کریستوبالیت، تریدیمیت، کرومیت، تانیت و ترولیت است [۱۶]. سن رادیومتری نمونه‌های جمع‌آوری شده در مأموریت‌های آپولو بین ۳/۸ تا ۴/۱ میلیارد سال قدمت دارد [۱۷]. همچنین نمونه‌های برنامه آپولو دارای ترکیبات ایزوتوپی مشابه سنگ‌های زمین است [۱۲].

پوسته ماه از نظر ترکیب تا حد زیادی آنورتوزیتی است [۱۸]. 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 [۱۹].

در بالای پوسته ماه لایه‌ای بسیار خرد شده و سطحی تحت عنوان رگولیت وجود دارد. رگولیت بافتی شبیه برف و بویی شبیه 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، مگاگرولیت لایه‌ای از سنگ بستر شکسته و به ضخامت چندین کیلومتر وجود دارد [۲۰].

ترکیب عناصری ماه

حدود ۱۴ هزار کیلومتر مربع از سطح ماه ناشی از ناهمواری محل اصابت شهاب‌سنگ‌ها در تاریکی دائمی قرار دارد [۲۱]. مناطق نزدیک به قطب‌های ماه که در تاریکی دائمی قرار دارد، حاوی غلظت قابل توجهی از یخ آب است [۲۲].

اکسیژن نه تنها از یخ آب بر روی ماه در دسترس بوده، بلکه در رگولیت ماه نیز موجود و تقریباً از همه جای ماه قابل استخراج است [۲۳]. ایلمنیت، فراوان‌ترین اکسید در نمونه‌های قمری از ۴۷ درصد وزنی Feo و ۵۳ درصد وزنی Tio2 تشکیل شده و منبع بالایی از اکسیژن در ماه به‌خصوص در ماریا ماه است [۲۴].

فراوان‌ترین عناصر که به دلیل عوامل خارجی در ماه وجود دارد می‌توان به هیدروژن و هلیوم اشاره کرد [۲۴]. هیدروژن یک عنصر مفید در سطح ماه بوده و از طریق بادهای خورشیدی به ماه وارد شده است [۲۵]. در عمق یک متری از رگولیت ماه در نزدیکی مناطق قطبی غلظت بالایی از هیدروژن وجود دارد. وجود هیدروژن به‌عنوان یک منبع سوخت مهم در کره ماه بسیار حائز اهمیت است [۲۶]. بادهای خورشیدی عامل

انباشت 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 [۲۴]. استفاده از هلیوم–۳ ماه به‌عنوان یک منبع سوخت برای نیروگاه‌های هسته‌ای بر روی زمین در آینده نزدیک، دور از انتظار نخواهد بود. بایکه 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 مورد نیاز پروژه و تأثیرات مالی چشمگیر چنین پروژه‌هایی پرداخته است [۲۷]. ماتر نیز با تأکید بر پتانسیل‌های استخراج هلیوم–۳ از ماه به‌عنوان 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 [۲۸].

درصد عناصر تشکیل‌دهنده مواد ماه در مناطق مختلف، مقدارهای متفاوتی را دارد. با این حال در همه مناطق اکسیژن فراوان‌ترین 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 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 ماه را تشکیل می‌دهد. آهن نیز ۲/۵ الی ۶ درصد از مواد ماه را در مناطق مختلف تشکیل می‌دهد. عنصرهای تیتانیوم و سدیم نیز تقریباً درصد باقی‌مانده مواد ماه را تشکیل می‌دهد [۲۰]. در جدول‌های (۱ و ۲)، درصد اکسیدها 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].

Table 1. Percentage and geographical location of available elements oxides on the Moon [16].

Oxide	Lunar Surface	Maria	Highlands
Sio_2	50	45.4	45.5
Al_2o_3	15	14.9	24
Tio_2	5	3.9	0.6
Feo	5-10	14.1	5.9
Mgo	10	9.2	7.5
Cao	10	11.8	15.9
Na_2o	-	0.6	0.6

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

Table 2. Percentage and geographical location of available elements on the Moon [16].

Element	Approximate Atomic Percentage		Approximate Weight Percentage	
	Lunar Maria	Highlands	Lunar Maria	Highlands
Oxygen	60	60	45	45
Silicon	17.5	17	21	21
Aluminum	4.5	10	5	13
Calcium	4.5	5	8	10
Magnesium	5	5	5	5
Iron	6	2.5	15	6
Titanium and Sodium	≈ 2.5	≈ 0.5	≈ 1	≈ 0

تحلیل اقتصادی

در این بخش تحلیل اقتصادی معدن‌کاوی ارائه شده است. مبنای تحلیل بر اساس مقاله هاین [۴] است. این تحلیل تحت عنوان تحلیل اقتصادی معدن‌کاوی سیارکی مبتنی بر رویکرد سونتر بوده و قابل تعمیم به تحلیل اقتصادی معدن‌کاوی ماه نیز است. رویکرد سونتر، در حال حاضر یکی از با جزئیات‌ترین تحلیل‌ها جهت ارتباط پارامترهای فنی و اقتصادی به یکدیگر است. رویکرد سونتر تنها برای یک مأموریت معدن‌کاوی بدون لحاظ کردن هزینه بازگشت به سطح زمین و هزینه تحقیق و توسعه است؛ بنابراین رویکرد سونتر به‌منظور بهینه‌سازی نتایج و لحاظ شدن تمامی پارامترهای مؤثر، توسط افرادی از جمله هالین توسعه داده شد.

محاسبه سود و زیان

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

$$\boldsymbol{P = R_{mat_{sold}} - C} \qquad (۱)$$

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 به‌صورت فرمول (۲) توسعه داد:

$$\begin{aligned} P_{tot} &= n[m_{sc}c_{price_{mat}}ftr \\ &- m_{sc}ceil\left(\frac{n}{s+1}\right)\left(c_{prod_1}\left[p.ceil\left(\frac{n}{s+1}\right)\right]^{\alpha}\right. \\ &\left.+ c_{transport}\right) - c_{ops}] - m_{sc}\frac{c_{dev}}{p} \end{aligned} \qquad (۲)$$

در فرمول (۲)، P_{tot} سود و زیان حاصل از مأموریت، n تعداد مأموریت‌های معدن‌کاوی، m_{sc} جرم خشک فضاپیما برحسب کیلوگرم، $c_{price_{mat}}$ ارزش هر کیلوگرم ماده استخراج شده، f نرخ توان عملیاتی فضاپیما برحسب کیلوگرم استخراج شده ماده معدنی بر کیلوگرم تجهیزات بر روز، t مدت زمان معدن‌کاوی برحسب روز، r نسبت مواد خالص شده به مواد استخراج شده، s تعداد دفعات استفاده از یک فضاپیما، c_{prod_1} هزینه فضاپیما برحسب دلار (به ازای هر کیلوگرم جرم فضاپیما)، p تعداد فضاپیماها در هر مأموریت، α ضریب یادگیری (تجربه)، $c_{transport}$ هزینه انتقال در فضا، c_{ops} 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 به‌دست آورد. در فرمول (۳)، با اضافه شدن پارامتر $(1+I)^i$ ارزش زمانی پول محاسبه می‌شود که I نرخ تنزیل پول و i تعداد سال‌های انجام معدن‌کاوی است. در فرمول (۳)، شمارنده j نشان دهنده jامین 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 مشخص‌کننده زمانی است که مأموریت شروع شده است. مطابق با فرمول (۳)، محاسبه میزان سود یا زیان با استفاده از برنامه کامپیوتری 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.

$$\boldsymbol{P_{tot_PV}} = \sum_{i=1}^{T} \boldsymbol{n_i} \sum_{j} \left[\boldsymbol{m_{sc}\, c_{price_{mat}}} \left(\frac{\boldsymbol{ftr}}{\boldsymbol{(1+I)^{t_j}}} - \boldsymbol{ceil}\left(\frac{\boldsymbol{n_i}}{\boldsymbol{s_i+1}}\right) \frac{\left(\boldsymbol{c_{prod1}}\left[\boldsymbol{p}\ \boldsymbol{ceil}\left(\frac{\boldsymbol{n_i}}{\boldsymbol{s_i+1}}\right)\right]^{\boldsymbol{\alpha}} + \boldsymbol{c_{transport}}\right)}{\boldsymbol{c_{price_{mat}}(1+I)^{t_j - t_m}}} \right) - \frac{\boldsymbol{c_{ops}}}{\boldsymbol{(1+I)^{t_j}}} \right] - \boldsymbol{c_{dev}} \frac{\boldsymbol{m_{sc}}}{\boldsymbol{p}} \quad (۳)$$

معدن‌کاوی فضایی

معدن‌کاوی 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. به‌عنوان مثال آب استخراج شده از اجرام سماوی علاوه بر رفع نیازهای حیات بشر، می‌تواند جهت تأمین سوخت و یا محافظت در مقابل پرتوهای خورشیدی در فضاپیماها 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 به‌عنوان اهداف معدن‌کاوی 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 معدن‌کاوی برای استخراج دو عنصر آب و پلاتینیوم پرداخته است.

به‌صورت کلی در هر معدن‌کاوی فضایی، فرضیات لازم جهت ارزیابی اقتصادی آن شامل موارد زیر است.

- زمان معدن‌کاوی
- تعداد فضاپیماهای عملیاتی
- تعداد عملیات معدن‌کاوی
- وزن هر فضاپیما

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

انتخاب ماده معدن‌کاوی

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

- استفاده بر روی سطح زمین
- جهت اسکان و توسعه شهرک‌نشینی بر روی ماه
- تامین و ارسال سوخت به فضاپیماها
- 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 معرفی 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، واجد انتخاب به‌عنوان ماده هدف است.

جدول ۳- تحلیل فازی انتخاب مواد.

Table 3. Fuzzy analysis of material selection.

Parameter	Decision Coefficient			
	1	2	3	4
Location on the Moon	Far Side the Moon, Poles	Maria	Heights	The Surface of the Moon Facing the Earth
Communication with Earth	Interface with High Altitude Orbiter System	Interface with Lagrange Point Orbiter System	Interface with Low Altitude Orbiter System	Directly Facing The Moon
Energy Supply Method	Nuclear Reactor	Solar Cell and Energy Storage	Solar Cell and Energy Storage	Solar Cell, Continuous (Poles)
Processing Rate (Percent)	0-15	15-30	30-45	45-60
Material Separation Method	Vapor Separation	Condensation Separation	Solid Separation (Screening)	Without Separation
Storage Method	Specialized Thermal & Pressurized System	Specialized Control Thermal System	Specialized Pressurized System	Without Special System
Extraction Method	Surface and Deep Drilling in Mare	Surface and Deep Drilling in Elevated Areas	Surface Drilling and Deep in Flat Areas	Surface Drilling in Flat Areas
Transport to Earth	Specialized Thermal & Pressurized System	Specialized Thermal System	Specialized Pressurized System	Without Special System
Material Value	0-5000	5000-500000	50000-100000	100000-300000
Material Abundance on Earth	>100 PPM	10-100 PPM	1-10 PPM	<1 PPM

مواد انتخابی برای دو وضعیت کم‌ترین تفکیک مواد و تفکیک دقیق مواد به‌صورت جدول (۴) به‌دست 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.

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

جدول ۴- مواد انتخابی جهت معدن‌کاوی در ماه.

Table 4. Selected materials for Moon mining.

Material	Minimum Material Separation	Precise Material Separation
Oxides	Silicon Oxide	Silicon Oxide
Fuel	Helium-3	Helium-3
Metals	Magnesium	Magnesium

نتایج جدول (۴) با اعمال ضرایب تأثیر یکسان از پارامترهای جدول (۳) به‌دست آمده است، جهت اطمینان از انتخاب‌ها با استفاده از تحلیل حساسیت بر روی ضرایب تأثیر پارامترهای تحلیل فازی، نتایج برای دسته سوخت و فلزات تغییری نداشته و در دسته اکسیدها، اکسید تیتانیوم در برخی مواد به‌عنوان ماده هدف استخراج شد. بااین‌حال با توجه به فراوانی انتخاب بالای اکسید سیلیسیم در تحلیل حساسیت این ماده به‌عنوان 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 معدن‌کاوی، 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، واردکردن مقادیر بر اساس محدودیت‌های سطح فناوری هر کشور و همچنین کاهش قیمت فروش مواد معدن‌کاوی 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 زبان برنامه‌نویسی پایتون به‌صورت زیر بررسی شده است.

- ✓ ۱۰ مأموریت و هر مأموریت ۳۶۵ روز
- ✓ ۱۰ مأموریت و هر مأموریت ۱۰۰ روز
- ✓ جرم محموله تقریباً برابر با جرم فضاپیما
- ✓ جرم محموله چهار برابر جرم فضاپیما

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 سناریو دوم زمانی (۱۰ 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 نظرگرفته شده است.

مطابق مطالب گفته شده در تحلیل مقادیر دلخواه، هدف کاهش قیمت مواد برای حداقل کردن قیمت فروش مواد بوده و مقادیر دلخواه در جدول (۵)، حداقل مقادیر ممکن جهت ارزش‌گذاری مواد با توجه به سوددهی طرح است.

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

Table 5. Profitability analysis results of silicon oxide material for the second scenario of the mission.

Parameter	100 Days			100 Days		
	Conservative	Optimistic	Custom	Conservative	Optimistic	Custom
Specific Production Cost (USD/kg)	1000000	10000	10000	1000000	10000	10000
Specific Transport Cost (USD/kg)	20000	20000	20000	20000	20000	20000
Material Value (USD/kg)	20000	20000	10000	20000	20000	5000
Operational Cost (USD)	5700000	100000	100000	5700000	100000	100000
R&D Cost (USD/kg)	5453333	500000	500000	5453333	500000	500000
Mining Duration (days)	100	100	100	100	100	100
Purification to Processed Material Ratio	0.4	0.47	0.47	0.4	0.47	0.47
Operational Throughput	2.46e-6	2.46e-6	2.46e-6	9.85e-6	9.85e-6	9.85e-6
Spacecraft Mass (kg)	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Number of Missions	10	10	20	10	10	20
Reuse Rate per Spacecraft	2	2	2	2	2	2
Learning Parameter	-0.234	-0.234	-0.234	-0.234	-0.234	-0.234
Number of Spacecrafts per Mission	10	10	3	10	10	3

Parameter	100 Days			100 Days		
	Conservative	Optimistic	Custom	Conservative	Optimistic	Custom
Results						
The Mass of Produced Materials in each Mission	12752.64	14984.35	14984.35	51062.4	59998.32	59998.32
Payload Mass of Each Spacecraft	1275.264	1498.435	1498.435	5106.24	5999.832	5999.832
Total Mass of Produced Materials in the entire Mission (kg)	127526.4	149843.5	149843.5	510624	599983.2	599983.2

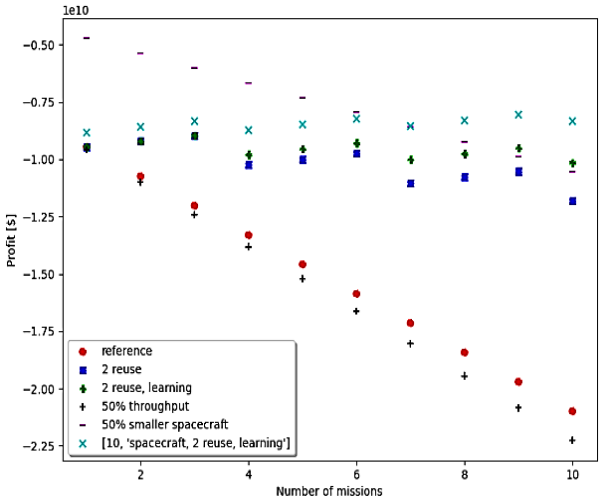
در جدول (۵) مقادیر پارامترهای به رنگ مشکی به غیر از نسبت مواد خالص‌سازی شده به منابع فرآوری شده از مرجع [۴] مورد استفاده قرار گرفته است. پارامتر نسبت مواد خالص‌سازی شده به منابع فرآوری شده با توجه به جدول ۱ انتخاب شده است. پارامترهای به رنگ قرمز نیز ورودی‌های فرمول سوددهی بوده و توسط کاربر تعیین می‌شود. 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 فضاپیما می‌شود. در ستون ۱۰۰ روزه اول با میزان توان عملیاتی ۲.۴۶e−۶ حداکثر ۱۵۰۰ کیلوگرم و در ستون ۱۰۰ روزه دوم با میزان توان عملیاتی ۹.۸۵e−۶ حداکثر ۶۰۰۰ کیلوگرم ماده جهت ارسال به زمین آماده می‌شود.

با توجه به مقادیر یکسان جرم قابل‌حمل و ارزش مواد، در حالت‌های ارزیابی سه ماده انتخابی، رفتارهای مشابه‌ای در تولید درآمد و سود مشاهده شد. دلیل این موضوع عدم مرجع مناسب در تعیین قیمت فروش مواد است؛ بنابراین حداقل قیمت فروش ۲۰ هزار دلار برای هر کیلوگرم ماده انتخاب شده است. البته برای بررسی کاهش 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 نرخ بهره‌برداری و جرم مواد استخراج‌شده تأثیرگذار است. در هر شکل پنج نمودار با مشخصات زیر ارائه شده است.

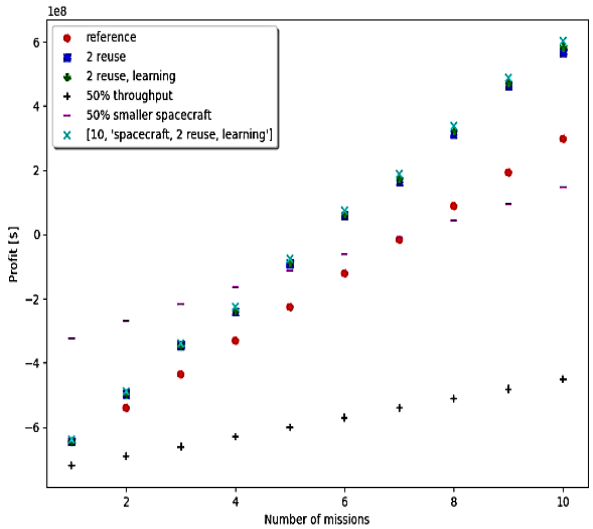
- Refrence (مدل بدون هیچ افزونه)
- 2 reuse (هر فضاپیما دوبار استفاده)
- 2 reuse, learning (هر فضاپیما دوبار استفاده به همراه پارامتر یادگیری
- 50% smaller spacecraft (کاهش ۵۰ درصدی جرم فضاپیما)
- 10, spacecraft, 2 reuse, learning (۱۰ فضاپیما، هر فضاپیما دو بار استفاده به همراه پارامتر یادگیری)

منظور از پارامتر یادگیری، کاهش هزینه توسعه در زمانی که فضاپیمایی یکبار ساخته شده و مجدد مشابه آن ساخته شود، است.



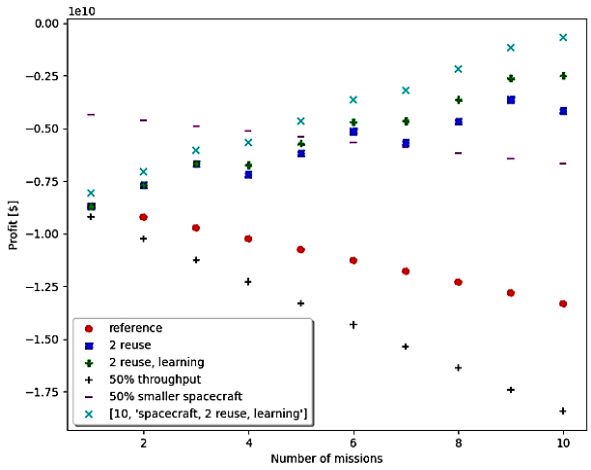
شکل ۱– حالت محافظه‌کارانه، جرم ۱۵۰۰ کیلوگرم، سناریو ۱۰۰ روزه، ارزش مواد ۲۰ هزار دلار.

Fig. 1. Conservative scenario, 1500 kilograms mass, 100-day scenario, material value $20K.



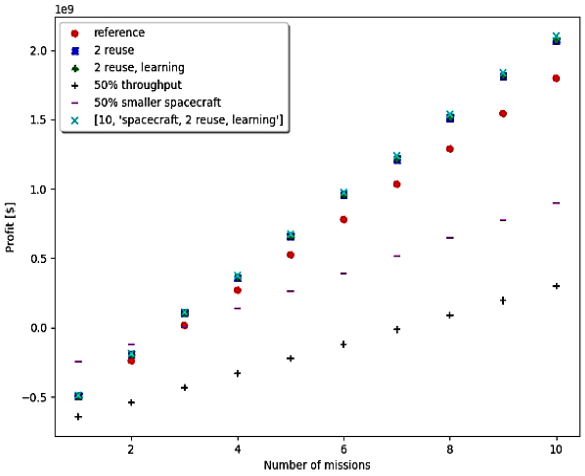
شکل ۲– حالت دلخواه، جرم ۱۵۰۰ کیلوگرم، سناریو ۱۰۰ روزه، ارزش مواد ۱۰ هزار دلار.

Fig. 2. Arbitrary scenario, 1500 kilograms mass, 100-day scenario, material value $10K.



شکل ۳– حالت محافظه‌کارانه، جرم ۶۰۰۰ کیلوگرم، سناریو ۱۰۰ روزه، ارزش مواد ۲۰ هزار دلار.

Fig. 3. Conservative scenario, 6000 kilograms mass, 100-day scenario, material value $20K.



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

Fig. 4. Arbitrary scenario, 6000 kilograms mass, 100-day scenario, material value $5K.

نتایج تحلیل اقتصادی برای ماده اکسید سیلیسیم به‌صورت شکل‌های (۱ تا ۴) است. با توجه به مقادیر نمودارها در شکل (۱) مشخص است در حالت محافظه‌کارانه با جرم محموله ۱۵۰۰ کیلوگرم طرح زیان‌ده ولی در حالت محافظه‌کارانه با جرم محموله ۶۰۰۰ کیلوگرم طرح در انتهای مأموریت خود به نقطه سربه‌سری می‌رسد. در حالت‌های خوش‌بینانه و مقدار دلخواه طرح کاملاً سوددهی دارد.

تحلیل حساسیت سود و زیان

به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر 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 حالت‌های مختلف قابل ایجاد تنها برخی از حالت‌ها بررسی شده در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶– تحلیل حساسیت پارامترهای ارزیابی سود.

Table 6. Sensitivity analysis of the profit evaluation parameters.

Scenario	Mission Duration	Continuous Operations	Payload Mass
0	0	0	0
G	+20%	+20%	+20%
N	-20%	-20%	-20%
O	+20%	+20%	-20%
P	+20%	-20%	+20%
Q	-20%	+20%	+20%
R	-20%	-20%	+20%
S	-20%	+20%	-20%
T	+20%	-20%	-20%

نتایج حاصل از جدول (۶) برای ماده اکسید سیلیسیم در جدول‌های (۷ و ۸) ارائه شده است. مقدارهای جدول‌های (۷ و ۸) برحسب میلیارد دلار بوده و مقدار سود و زیان در انتهای مأموریت را نشان می‌دهد. این مقدارها به‌صورت مستقل تحلیل شده ولی رنگ‌های جدول در مقایسه با حالت سود و زیان ایجاد شده است. حالت 0 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 محافظه‌کارانه، 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 زیان‌ده و افزایش سود در حالت‌های سودده، گزینه O بسیار مناسب و حالت میانه بین تمامی حالت‌های بررسی شده است. در نتیجه انتخاب گزینه O، پارامترهای مأموریت به‌صورت جدول (۹) خواهد بود.

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

Table 7. Sensitivity analysis results for the 100-day scenario with a mass of 1500 kilograms.

Scenario	Conservative	Optimistic	Custom
0	-8.34	2.1	0.6
G	-8.66	4.1	1.51
N	-6.98	0.85	0.08
O	-5.79	2.73	1.01
P	-9.47	2.42	0.69
Q	-10.13	2.38	0.65
R	-10.45	1.27	0.12
S	-6.77	1.58	0.43
T	-6.33	1.61	0.46

جدول ۸– نتایج تحلیل حساسیت سناریو ۱۰۰ روز با جرم ۶۰۰۰ کیلوگرم.

Table 8. Sensitivity analysis results for the 100-day scenario with a mass of 6000 kilograms.

Scenario	Conservative	Optimistic	Custom
0	-0.68	11.1	2.1
G	4.58	19.66	4.11
N	-3.06	5.45	0.85
O	3.03	13.11	2.74
P	-0.64	12.79	2.42
Q	-1.3	12.75	2.38
R	-4.56	8.18	1.27
S	-0.89	8.5	1.59
T	-0.44	8.53	1.61

جدول ۹– اعمال نتایج حالت O، تحلیل حساسیت در مأموریت.

Table 9. Application of results from case O, sensitivity analysis in the mission.

Parameter	Value	Unit
Mission Duration	120	Day
Number of Continuous Missions	12	-
Payload Mass	1200	Kg

با توجه به این‌که 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 خالص‌سازی شده به منابع فراوری شده متفاوت است (حالت محافظه‌کارانه) تفاوت‌هایی در رفتار کلی نتایج دیده می‌شود.

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

انتخاب ماده معدن‌کاوی

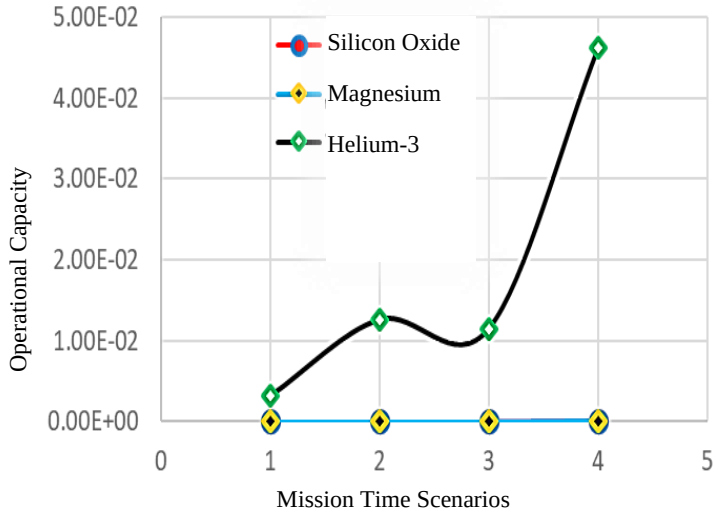
با در نظر گرفتن عدم وجود مرجع مناسب جهت تعیین قیمت فروش مواد استخراج شده در فضا، حداقل قیمت فروش برای هر کیلوگرم ماده انتخاب شد (۲۰ هزار دلار) که برای هر سه ماده یکسان است. با توجه به این انتخاب ماده هدف با معیار میزان سوددهی غیرقابل توجیه است؛ بنابراین جهت انتخاب ماده هدف از معیار میزان توان عملیاتی بهره برده شد. این معیار نشان‌دهنده سادگی استخراج و فراوری مواد و هزینه‌های عملیاتی معدن‌کاوی 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.

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) به‌صورت 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 تفکیک 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 به‌عنوان ماده هدف جهت معدن‌کاوی ماه در نظر گرفت.

جدول ۱۰– توان عملیاتی معدن‌کاوی ماده‌های انتخابی.

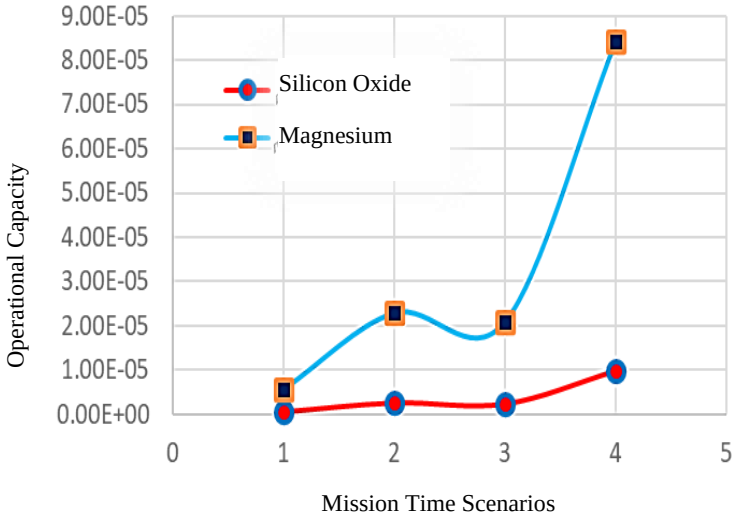
Table 10. Operational capacity of mining the selected materials.

Row	Scenario	Silicon Oxide	Magnesium	Helium-3
1	365 Days, 1500 kg	6.75e-7	5.76e-6	3.17e-3
2	365 Days, 6000 kg	2.7e-6	2.3e-5	1.26e-2
3	100 Days, 1500 kg	2.46e-6	2.1e-5	1.15e-2
4	100 Days, 6000 kg	9.85e-6	8.42e-5	4.62e-2



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

Fig. 5. Operational capacity of the three analyzed materials at a glance.



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

Fig. 6. Operational capacity of the Silicon Oxide and Magnesium.

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 ضرایب 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 مساوی‌بودن 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 جابه‌جایی هر کیلوگرم در فضا) در حالت‌های محافظه‌کارانه 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 پارمتر شامل ۱۲۰ روز مأموریت، ۱۲ عملیات پیوسته و ۱۲۰۰ کیلوگرم جرم محموله حاصل شد؛ و در انتها بر اساس معیار توان عملیاتی، ماده اکسید سیلیسیم به‌عنوان ماده هدف معدن‌کاوی ماه انتخاب شد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

[1] L. P. Keszthelyi *et al.*, "Assessment of lunar resource exploration in 2022," U.S. Geological Survey, Rep. Circular 1507, 2023, https://doi.org/10.3133/cir1507.

[2] D. Hachez, A. de Lajarte, V. Vierge, and M. Udriot, "Space mining - value proposition design: Scouting capabilities for volatiles prospecting on the Moon," ResearchGate, Rep., 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, Argentina, 2023, https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.560.

[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:1808.05099*, 2018, https://doi.org/10.48550/arXiv.1808.05099.

[6] T. E. Graedel, E.M. Harper, N.T. Nassar, P. Nuss, and 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] D G. Andrews *et al.*, "Defining a successful commercial asteroid mining program," *Acta Astronautica*, 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, 2020, Art. no. eaax088, 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, pp. 438–449, 2007, https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.055.

[13]R. Tartèse *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, 2019, Art. no. 54, https://doi.org/10.1007/s11214-019-0622-x.

[14] S. I. Demidova, M. Nazarov, C. Lorenz, G. Kurat, F. Brandstätter, and T. Ntaflos, "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 *et al.*, "Elemental composition of the lunar surface: Analysis of gamma ray spectroscopy data from Lunar Prospector," *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, no. E12, 2006, https://doi.org/10.1029/2005JE002656.

[16] D. J. Loftus, E. M. Tranfield, J. C. Rask, and C. McCrosssin, "The chemical reactivity of lunar dust relevant to human exploration of the moon," *NASA Ames Research Center*, 2008.

[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 *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, 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] T. Webber. "Moon resources: Challenge or opportunity?," space mining technologies, 2020. [Online]. Available: https://space-mining.tech/moon-resources-challenge-opportunity/

[24] J. D. Burke, "Lunar materials and processes," NTRS-NASA Tech. Rep. Server, Document ID. 19870025838, 1986.

[25] G. J. Taylor, "Mining the Moon, Mars, and asteroids," *Featured online at Planetary Science Research Discoveries (PSRD): Hot Idea*, vol. 21, 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," in *Energy Resources for Human Settlement in the Solar System and Earth's Future in Space*, vol. 101, W. A. Ambrose, J. F. Reilly, II, and D. C. Peters, Eds. American Association of Petroleum Geologists, 2013, https://doi.org/10.1306/13361575M1013542.

[28] S. Matar, "Energy analysis of extracting helium-3 from the moon," Ph.D. dissertation, Politecnico di Torino, Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering, 2021.