

(علمی-ترویجی)

چالش‌های معدن‌کاوی سیارکی از دیدگاه فنی، اقتصادی و حقوقی

این مقاله به تحلیل ظرفیت بالقوه سیارک‌ها در تأمین مواد و منابع معدنی از سه دیدگاه فنی، اقتصادی و حقوقی پرداخته است. بدین منظور سیارک‌های نزدیک زمین که دسترس‌پذیری بهتری دارند، به عنوان کاندیدای معدن‌کاوی در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر مرور مسائل فنی، ارزیابی اقتصادی برای دو عنصر پلاتینیوم و طلا ارائه شده است که نتایج بیانگر به صرفه بودن صنعت معدن‌کاوی فضایی تحت شرایط مفروض است. مهمترین چالش پیش‌رو در شکل‌گیری این حوزه مسائل فنی و به صرفه بودن اقتصادی نیست، بلکه خلاءهای قانونی و حقوقی است که ریسک سرمایه‌گذاری را بالا برده و بهره‌برداران و سرمایه‌گذاران را دچار سردرگمی و ابهام می‌کند. با این وجود، بهره‌برداری از سیارک‌های نزدیک زمین از نظر فنی امکان‌پذیر بوده و این مسئله در آینده نزدیک با توجه به رشد و بلوغ فناوری فضایی، نیاز بشر به فلزات و مواد معدنی، کمبود آن بر روی زمین و افزایش هزینه‌های استخراج، مورد توجه طیف وسیعی از دولت‌ها و شرکت‌های خصوصی قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی: معدن‌کاوی سیارکی، سیارک‌های نزدیک زمین، مدل اقتصادی، رژیم حقوقی فضایی

ابراهیم امیری^{۱*} و مهدی جعفری
ندوشن^{۱**}

۱- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،
دانشکده مهندسی هوافضا، تهران، ایران، کدپستی:
۱۴۶۵۷۷۴۱۱۱

* دانشجوی کارشناسی ارشد

** استادیار (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

mjafari@kntu.ac.ir

Challenges of Asteroid Mining from Techno- economic and Legal Points of View

In this paper, the potential capacity of asteroids to provide minerals is investigated from technical, economic, and legal points of view. To this end, Near-Earth Asteroids, which are more accessible, are considered as asteroid mining candidates. Reviewing technical issues, as well as economic evaluations for plutonium and gold, are presented. The results prove the economic feasibility of the asteroid mining industry under the assumed conditions. The most critical challenges to realize asteroid mining are not technical or economic, but legal issues. These issues raise uncertainties and hence increase investment risks. Still, Near-Earth Asteroid exploitation is technically possible. With space technology's maturation in the near future, the demand for minerals on the one hand and their scarcity and increasing excavation costs on Earth, on the other hand, will make many governments and corporates interested in asteroid mining.

Keywords: Asteroid Mining, Near-Earth Asteroids, Economic Model, Space Law Regime

E. Amiri^{1*} and M. Jafari
Nadoushan^{1**}

1- Department of Aerospace
Engineering, K. N. Toosi University
of Technology, Postal Code:
1969764499, Tehran, IRAN

** M.Sc. Student

** Assistant Professor
(Corresponding Author): Email:

mjafari@kntu.ac.ir

(علمی-ترویجی)

ابراهیم امیری و مهدی جعفری ندوشن

۱- مقدمه

کربن، نیتروژن و اکسیژن برای تأمین سوخت پیشران فضاپیماها لازم هستند و عناصری مانند کبالت، آهن و نیکل برای ساخت و ساز در فضا مورد توجه هستند که همه این عناصر در فضا قابل استخراج بوده و با توسعه صنعت معدن کاوی فضایی و سیارکی نیازی به انتقال آن‌ها از زمین به فضا نخواهد بود [۲]. از نظر عملیاتی و فنی معدن کاوی سیارکی با چالش‌های بسیاری همچون معدن کاوی در محلی بدون گرانش یا گرانش ضعیف و یا در معرض تشعشعات کیهانی روبه‌رو است. با این حال، پیشرفت‌های بسیاری صورت گرفته و امروزه عملیات‌هایی برای شناسایی ترکیبات سیارک‌ها انجام می‌پذیرد [۶] و همچنین نمونه‌برداری از سطح این سیارک‌ها با موفقیت انجام شده است [۷].

اگرچه نمی‌توان زمانی را مشخص کرد و گفت تا دو یا سه دهه آینده معدن کاوی سیارکی وارد فاز صنعتی می‌شود، اما آنچه که انکار ناپذیر است نیاز روز افزون بشر به منابع و مواد اولیه معدنی و همچنین اراده و خواست بشر برای شناخت جهان پیرامون خود از طریق سفرهای بین سیاره‌ای است. معدن کاوی سیارکی می‌تواند تسهیل‌گر دستیابی به این خواسته‌ها باشد. برخی از سیارک‌ها تا چند ده برابر معادن موجود بر روی پوسته زمین حاوی عناصر گرانبها هستند. برای نمونه سیارک‌هایی در نزدیکی زمین وجود دارند که پلاتینیوم هر یک از آن‌ها دویست برابر پلاتینیوم موجود در زمین است [۸]. با کم شدن مقدار ذخیره فلزات کمیاب بر روی زمین و افزایش هزینه‌های استخراج آن‌ها از اعماق زمین، استخراج و استفاده از منابع سیارکی صرفه اقتصادی پیدا کرده است.

یکی از چالش‌های مهم و اساسی معدن کاوی فضایی فقدان ساختار و رژیم حقوقی جامع است که سبب می‌شود تعیین مالکیت سیارک‌ها و مواد استخراج شده با مشکل روبرو شود [۹]. بدیهی است که مشخص بودن چارچوب‌ها و قواعد تجاری عامل مهمی در تسریع رشد فعالیت‌های اقتصادی است، زیرا خطر و ریسک از دست رفتن سرمایه را برای سرمایه‌گذاران کاهش می‌دهد. اما اسناد و معاهدات موجود پاسخگوی این نیاز نیست. سال‌ها قبل، در بحبوحه جنگ سرد، توافق‌نامه ماه و معاهده فضای ماورای جو تدوین شد که تصویری از شرایط تجاری امروزی برای این صنعت وجود نداشت و امروزه نمی‌توان با ارجاع به آن، مشکلات و مسائل حقوقی حال حاضر را حل و فصل کرد. با ورود بخش خصوصی به عرصه فضا و معدن کاوی سیارکی این امر ضروری به نظر می‌رسد و باید رژیم حقوقی جدیدی برای بهره‌برداری از اجرام سماوی شکل بگیرد.

منظومه شمسی مملو از اجرام کوچکی همچون دنباله‌دارها و سیارک‌ها است. در بین سیارک‌ها، سیارک‌های نزدیک زمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. زیرا این سیارک‌ها از طرفی به واسطه احتمال برخوردشان با زمین خطرناک محسوب شده و از طرف دیگر به واسطه منابع معدنی و فلزی موجود در آنها ارزشمند هستند. سیارک‌ها اجرام آسمانی به جای مانده از شکل‌گیری منظومه شمسی هستند. بیش از دو میلیون سیارک در منظومه شمسی وجود دارد که بیشتر آنها در کمربند سیارکی مابین مریخ و مشتری قرار دارند. تاکنون بیش از ۱۵ هزار سیارک در نزدیکی زمین شناسایی شده است [۱] که با عنوان سیارک‌های نزدیک زمین از آنها یاد می‌شود. سیارک‌های نزدیک زمین در ابعادی از چندین سانتی‌متر تا چند کیلومتر وجود دارند و با توجه به ترکیبات تشکیل دهنده در سه گروه کربنی، فلزی و سیلیکاتی دسته‌بندی می‌شوند [۲]. سیارک‌های نزدیک زمین در مدارهای خود به دور خورشید در حرکت هستند که جالب توجه‌ترین آنها به جهت امکان دسترس‌پذیری سیارک‌های موجود در مدارهای آتن، آپولو و آمور هستند [۳].

به بهره‌برداری از منابع معدنی سیارک‌ها، معدن کاوی سیارکی اطلاق می‌شود. معدن کاوی سیارکی می‌تواند راهی برای توسعه تمدن بشری و گسترش آن به اعماق فضا باشد. زیرا به عنوان مثال، فضاپیماها در سفر به اعماق فضا با محدودیت در حمل سوخت و تجهیزات مورد نیاز برای سفرهای بلند مدت مواجه هستند. اما با توسعه و بلوغ صنعت معدن کاوی فضایی امید تازه‌ای برای سفرهای بین سیاره‌ای ایجاد می‌شود و می‌توان بسیاری از مواد مورد نیاز سفر فضایی و فضانوردان از جمله سوخت، آب و اکسیژن را از سیارک‌ها با هزینه کمتری نسبت به انتقال این اقلام از زمین تأمین کرد. همچنین، با افزایش مصرف برخی از فلزات و در مقابل کاهش منابع آن‌ها بر روی زمین و بالا رفتن هزینه استخراج آن‌ها، منابع معدنی و فلزی موجود در اجرام سماوی به ویژه سیارک‌ها جایگزین مناسب و به صرفه‌ای به نظر می‌رسند که به تازگی توجه شرکت‌های خصوصی را به این حوزه جلب کرده است [۴]. به واسطه هزینه بالای استخراج و انتقال منابع معدنی از سیارک‌ها، در ابتدای فعالیت‌های معدن کاوی سیارکی عناصر و مواد با ارزش بالاتر جذابیت بیشتری به عنوان هدف معدن کاوی دارند. به طور مشخص فلزات کمیاب بر روی زمین مانند پلاتینیوم و زیرگروه‌های آن شامل روتنیوم، رادیوم، اسمیوم و پالادیوم به عنوان اولین منابع معدنی فضایی مورد توجه بهره‌برداران قرار گرفته‌اند [۵]. فلزات کمیاب در شکل‌گیری فناوری‌های سبز همچون پیل سوختی، کاتالیزورها، باتری‌هایی با ظرفیت بالا و سلول‌های خورشیدی نقش دارند [۵]. عناصر هیدروژن،

1. Near-Earth Asteroids
2. Aten
3. Apollo
4. Amor

جدیدترین مأموریت در بین مأموریت‌ها به سیارک‌ها مربوط به فضایی‌های هایابوسا^۵ متعلق به اژانس فضایی ژاپن است. این فضاپیما در سال ۲۰۱۴ پرتاب شد و پس از سه سال و نیمسفر در فضا در ژوئن ۲۰۱۸ به سیارک ریوگو رسید. هایابوسا ۲ پس از چندین ماه از رسیدن به این سیارک، از سطح سیارک نمونه‌برداری کرد. در حال حاضر این نمونه در مسیر بازگشت به زمین است و پس از رسیدن مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت [۱۴]. فرایند استخراج معادن در فضایی‌چیدگی‌های خاص خود را دارد. چرا که به عنوان مثال نبود جاذبه کافی و یا وجود تشعشعات خورشیدی و کیهانی در فضا فرایند معدن‌کاری را سخت و پیچیده می‌کنند. با این وجود راه‌حل‌های خلاقانه‌ای برای غلبه بر این چالش‌ها پیشنهاد شده‌اند. به عنوان نمونه، برای استخراج منابع از سیارک‌های بزرگتر که بطور معمول نیاز به تاسیسات سنگین و پیچیده است، فرایند شیمیایی موند^۶ مطرح است که در طی آن با عبور گاز با دمای بین ۵۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد جداسازی نیکل و آهن رخ می‌دهد و سپس با بالاتر بردن دمای گاز این فلزات از گاز جدا می‌شوند [۱۵].

روش‌های استخراج و فرآوری مواد معدنی در فضا برای معدن‌کاوی سیارکی در مراحل ابتدایی خود قرار دارد و نیاز به تحقیق و توسعه بیشتری دارند. برای استفاده از منابع موجود در یک سیارک ابتدا باید مشخص شود که لازم است سیارک یا بخشی از آن به زمین آورده شود یا می‌توان فرایند معدن‌کاری را در فضا و بر روی سیارک انجام داد و بعد از فرآوری اولیه در محل، ماده فرآوری شده که خلوص بیشتری دارد به زمین منتقل شود. فرآوری در محل برای جداسازی مواد معدنی با ارزش، مصرف انرژی را برای حمل و نقل مواد کاهش می‌دهد. البته باید در نظر داشت که در این روش باید در ابتدای امر تاسیسات و زیرساخت‌های لازم به محل سیارک منتقل شود. معدن‌کاری در محل با روش‌هایی همچون حفاری و تزریق مایعات و گاز داغ انجام می‌شود. جاذبه کم ممکن است به عنوان یک مزیت در نظر گرفته شود، اما در فضا با نبود جاذبه، ابزار حفاری و مواد حفاری شده شناور می‌شوند و در اطراف سیارک‌ها با برخورد تجهیزات به سطح، گرد و خاک و قطعات کوچک تولید می‌شود که مشکلاتی مثل از بین رفتن افق دید و آسیب رسیدن به ماشین‌آلات حفاری را به دنبال خواهد داشت [۱۶]. منابع معدنی استخراج شده از یک سیارک می‌تواند منجر به تغییر در دینامیک و حرکت سیارک شده و مسیر یا وضعیت آن را تغییر دهد که برای پرهیز از این اتفاق باید اقدامات مؤثری مانند تدوین

۲- معدن‌کاوی فضایی

معدن‌کاوی سیارکی می‌تواند انقلابی در صنعت فضایی ایجاد کند. با تجزیه آب موجود در سیارک‌ها به دو عنصر هیدروژن و اکسیژن، سوخت مورد نیاز فضاپیماها ارزان‌تر تأمین می‌شود. با کاهش هزینه سوخت، حمل و نقل فضایی صرفه اقتصادی می‌یابد [۱۰]. علاوه بر هزینه سوخت که عامل مهمی در هزینه‌های کلی مأموریت‌ها است، ابعاد و اندازه سازه فضاپیما نیز عامل بسیار مهمی در هزینه مأموریت‌های فضایی به حساب می‌آید [۵].

با توجه به هزینه بالای مأموریت‌های فضایی، معدن‌کاوی سیارکی با بررسی و شناسایی ذخایر معدنی سیارک‌های مورد نظر که راهبری آن را ایستگاه‌های زمینی بر عهده دارند آغاز می‌شود. در حال حاضر، این بررسی‌ها با استفاده از تلسکوپ‌ها و ماهواره‌های سنجشی صورت می‌گیرد. پس از اتمام این بررسی و دسته‌بندی سیارک‌ها از لحاظ نوع و میزان منابع معدنی باید عملیات میدانی صورت گیرد و از سیارک نمونه‌برداری و به زمین آورده شود. تنها پس از تأیید وجود منابع معدنی کافی و وجود صرفه اقتصادی می‌توان مأموریت‌های معدن‌کاری که بخشی از فرایند معدن‌کاوی سیارکی است را در مقیاس بزرگ آغاز کرد. تا به امروز اقدامی جهت بازگرداندن منابع سیارکی در مقیاس بالا و با هدف تجاری به زمین صورت نگرفته است و تنها تعداد محدودی مأموریت به منظور شناسایی سیارک‌ها فرستاده شده‌اند که در جدول ۱ به تعدادی از این مأموریت‌ها اشاره شده است.

جدول (۱): برخی از مهمترین مأموریت‌های انجام گرفته جهت اکتشاف کره ماه [۱۲].

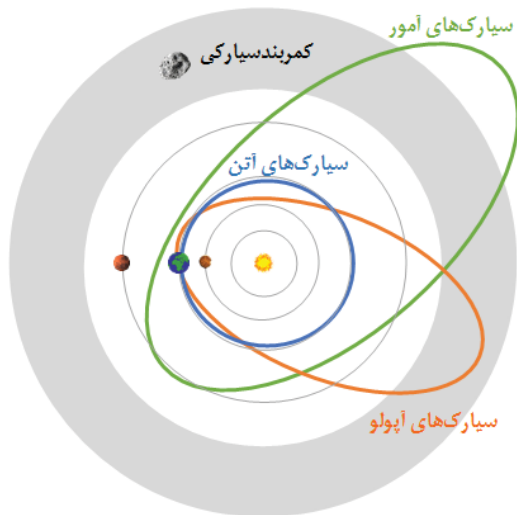
فضایی	سازمان	سال	مأموریت
گالیله	اسا / ناسا	۱۹۹۱	پرواز از کنار سیارک گاسپرا ۹۵۱ در مسیر مشتری [۱۲]
رزتا	اسا	۲۰۰۹	پرواز از کنار سیارک آستین ۲۸۶۷ [۱۳]
هایابوسا	اژانس فضایی ژاپن	۲۰۱۰	فرود آمدن و بازگرداندن نمونه از سیارک ایتوگاوا ۲۵۱۴۳ [۱۴]
اوسایروس	ناسا	۲۰۱۶	بازگرداندن نمونه ۶۰ گرمی از سیارک کربنی بنو ۱۰۳۱۵۵ [۱۲]
هایابوسا ۲	اژانس فضایی ژاپن	۲۰۱۸	نمونه‌برداری از سیارک ریوگو [۱۴]

5. Hayabusa II
6. Mond Process

(علمی-ترویجی)

ابراهیم امیری و مهدی جعفری ندوشن

موجود در اکثر آنها مشترک است و از این جهت سیارک‌های نزدیک زمین رامی‌توان به ۳ دسته کلی نوع C (کربنی)، نوع S (سیلیکاتی) و نوع M (فلزی) تقسیم کرد که ترکیبات اصلی آن‌ها در جدول ۲ قابل ملاحظه است.



شکل (۱): شماتیکی از مسیرهای بیضوی آتن، آپولو و آمور و عبور آن‌ها از کمربند سیارکی.

جدول (۱): برخی از مهمترین مأموریت‌های انجام گرفته جهت اکتشاف کره ماه [۱۲].

نوع	نام	ترکیبات اصلی
کربنی	C	H ₂ O, CO ₂ , CO, CH ₄ , NH ₃ , ترکیبات آلی و فلزات
سیلیکاتی	S	Fe, Ni, Co, Mg, [SiO ₄] ⁴⁻ , [Si ₂ O ₇] ⁶⁻ و فلزات گروه پلاتینیم
فلزی	M	Fe, Co, Ni, CaO, Al ₂ O ₃ و فلزات گروه پلاتینیم

چالش‌های فنی زیادی برای مأموریت‌های کنترل از راه دور بر روی سیارک‌ها وجود دارد. اول آنکه مدت زمان ارسال و دریافت پیام ممکن است ۵ تا ۳۰ دقیقه زمان ببرد. به همین جهت فضاییماهای بهره‌بردار باید هوشمند و خودکار ساخته شود تا مأموریت بصورت حداقل نیمه خودکار صورت پذیرد و اپراتور جنبه پشتیبانی را داشته باشد. مورد دیگر عدم آگاهی و تسلط بر نحوه فرود بر روی سیارک است. به عبارتی اتصال به یک سیارک در حال چرخش که ممکن است نامنظم هم باشد، مساله مهمی است. لازم به ذکر است میانگین زمان چرخش یک دور یک سیارک به طور تقریبی ۶ ساعت است [۱۹]. قدرت گرانث این سیارک‌ها

سناریوی استخراج انجام شود تا تغییر در مشخصات دینامیکی مانند ممان‌های اینرسی باعث ناپایداری در دوران سیارک نشود.

۳- دیدگاه فنی

سیارک‌های نزدیک زمین نسبت به دیگر اجرام سماوی که می‌توانند هدف معدن کاوی قرار بگیرند، دارای مزیت هستند. بطور مثال سرعت مورد نیاز برای انتقال به مدار ماه، فرود و برخاست از سطح آن و بازگشت به زمین نیاز به نیروی پیشران بالایی دارد و بنابراین انتخابی جز استفاده از موتورهای شیمیایی سوخت مایع و یا جامد در دسترس نخواهد بود. همچنین، بالا بودن گرانش اجرامی مثل ماه به معنای افزایش وزن سازه است. در مقابل، چالش‌های عنوان شده در معدن کاوی سیارکی بسیار محدودتر است. علاوه بر این، شناخت ما نیز نسبت به سیارک‌های نزدیک زمین و ترکیبات آن‌ها در مواردی بیشتر از سیارات و اجرام دیگر منظومه شمسی است و یا اینکه این شناخت راحت‌تر حاصل می‌شود. البته باید توجه داشت که در معدن کاری در محل سیارک، قبل از هر چیزی باید ماشین‌آلات معدن کاری با موفقیت به سطح سیارک متصل شوند. زیرا مقدار کم جاذبه نمی‌تواند تجهیزات را بر روی سیارک نگه دارد و یا جرم کم سیارک نمی‌تواند همه عکس‌العمل‌ها را خنثی کند. از نظر فنی امکان محقق شدن معدن کاری سیارکی برای سیارک‌هایی با جرم و قطر کمتر در آینده نزدیک محتمل‌تر است. زیرا تغییر دادن مدار آن‌ها توسط فضاییماها ساده‌تر است و یا امکان حمل آن‌ها با استفاده از یک محفظه به محل ایمن و معدن کاری آن‌ها آسان‌تر است.

در شکل ۱ سیارک‌های آپولو، آمور و آتن از دسته سیارک‌های نزدیک زمین در مدار تقریبی خود نشان داده شده‌اند [۱۷]. سیارک‌های آپولو مدار زمین را قطع می‌کنند و احتمال خطر برخورد با زمین را دارند. آمورها مدار زمین را قطع نمی‌کنند اما تا حدود ۰/۳ واحد نجومی به آن نزدیک می‌شوند. آن‌ها نیز نیمی از مسیر خود را در مدارهای زمین طی می‌کنند. این خانواده‌ها از سیارک‌ها گزینه‌های مناسبی برای انتخاب اهداف معدن کاوی سیارکی هستند. چراکه امکان دسترسی و بازگشت از این سیارک‌ها آسان‌تر به نظر می‌رسد و شامل طیف وسیعی از منابع مورد نیاز بشر است.

اگرچه ممکن است سیارک نزدیکتر جهت معدن کاوی انتخاب شود، اما منابع موجود در سیارک بیشترین اهمیت را دارد. استخراج منابع از معادن زمینی براساس کاهش حداکثری هزینه‌ها و خطرات و به حداکثر رساندن درآمدها انتخاب می‌شوند. همین روش را می‌توان در فضا در نظر داشت و با وجود اختلاف قابل ملاحظه‌ای که در شکل و نوع سیارک‌ها وجود دارد ترکیبات

مسیر سیارک‌ها است که راه را برای بهره‌برداری از سیارک باز می‌کند. البته این روش برای سیارک‌های کوچک قابل استفاده است. فرایند انتقال و جابه‌جایی سیارک بدین صورت است که ابتدا یک اتمسفر مصنوعی ایجاد کرده و با وارد کردن گاز زنون مانع از غلت خوردن سیارک در داخل محفظه می‌شوند. این کار برای تسهیل در کنترل وضعیت فضاپیما صورت می‌گیرد. سپس سیارک را در حالی که تحت فشار ثابت گاز زنون است، به حرکت در می‌آورند. توسعه این فناوری برای آینده مأموریت‌های استخراج منابع سیارکی مفید خواهد بود [۲۳].

با توجه به حساسیت‌ها و شرایط متفاوت مأموریت معدن‌کاوی سیارکی باید طراحی مأموریت مناسب و با ملاحظات خاص خود صورت گیرد. برای تغییر مسیر یک سیارک و بهره‌برداری از آن ابتدا فضاپیما باید به سیارک نزدیک شود که ممکن است ماه‌ها زمان ببرد. زیرا با فناوری موجود و لزوم صرفه‌جویی در سوخت مصرفی، حرکت مستقیم به سمت هدف به نوعی غیر ممکن است. به منظور کاهش انرژی لازم جهت انتقال مداری تا جای ممکن از انرژی‌های مجانی در فضا استفاده می‌شود که به عنوان نمونه می‌توان به استفاده از بادبان‌های خورشیدی [۲۵] برای فضاپیما اشاره کرد. بادبان‌های خورشیدی روش بسیار کارآمدی برای دستیابی به نقاط دور دست فضا است. اگرچه نیروی پیشران حاصل از یک بادبان خورشیدی از نیروی پیشران‌های شیمیایی متداول کمتر است اما بهترین مزیت بادبان‌های خورشیدی نسبت به دیگر سامانه‌های پیشران، ارزان‌تر بودن، مناسب بودن برای سفرهای طولانی و نامحدود بودن آن است. راه دیگر، استفاده از گرانش جسم سومی مانند ماه است. در این روش فضاپیما به کمک گرانش ماه و با انجام مانور گرانش‌یاری مدار خود را به سمت سیارک تغییر می‌دهد. بعد از تسخیر و گرفتن سیارک نیاز است که سیارک به محلی ایمنی برای بهره‌برداری منتقل شود که می‌تواند بر روی زمین و یا در فضا باشد. زمانی که سیارک تسخیر شد می‌توان آن را با استفاده از جاذبه ماه و خورشید به مدار زمین-ماه آورد و مکانی را جهت استقرار محیا کرد. نقاط لاگرانژی زمین-ماه گزینه مناسبی برای استقرار هستند [۲۶]. در شکل ۳ پروفایل پروازی برای سناریوی گفته شده، نشان داده شده است. در این مأموریت و پروفایل پروازی فضاپیما توسط پرتابگر به مدار زمین و سپس به مدار ماه منتقل می‌شود. در بخشی از مسیر از جاذبه ماه کمک گرفته می‌شود تا فضاپیما بتواند به جای سوخت، جرم بیشتری از مواد معدنی را با خود بازگرداند.

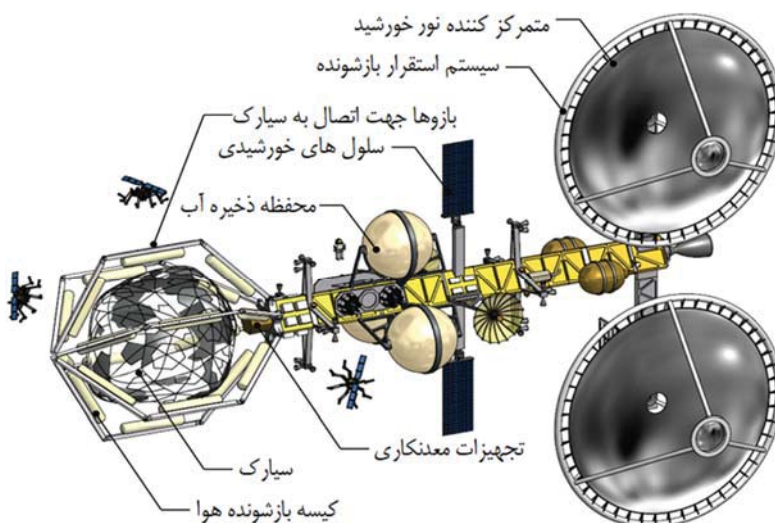
هرچند بسته به ابعاد و اندازه متغیر است ولی در حدود ۰/۰۰۱ برابر زمین است. بنابراین لازم است از نصب و بهره‌برداری ایمن تجهیزات و ابزارها در مدت عملیات معدن‌کاری اطمینان حاصل کرد. همچنین، فرایندهای معدن‌کاری برای شرایط بدون جاذبه طراحی شوند. چالش دیگر نبود اطلاعات زمین‌شناسی و تجزیه و تحلیل طیفی برای سیارک‌های نزدیک زمین است. اما همان‌طور که گفته شد در حالی که این موضوع را می‌توان با استفاده از تلسکوپ‌های زمینی و با هزینه کم محقق ساخت اما همچنان نیاز به نمونه‌برداری از سیارک جهت اطمینان از میزان مواد معدنی موجود و به صرف بودن اقتصادی مأموریت، وجود دارد [۲].

در مأموریت‌های معدن‌کاوی نیاز به طیف وسیعی از ابزارها و تجهیزات است [۲۰]. در فرایند معدن‌کاوی در ابتدا برای شناسایی از تلسکوپ‌های موجود در ماورای جو می‌توان استفاده کرد و در مرحله بعد برای بررسی سیارات از نزدیک از فضاپیماهایی مشابه ماهواره‌های سنجشی موجود در مدار زمین بهره برد و سپس برای نمونه‌برداری جهت تأیید ترکیبات سیارک مورد نظر اقدام نمود. از این‌رو، متناسب با این نیازمندی‌ها و شرایط مأموریت، فضاپیمای مورد نظر طراحی می‌شود. بعد از نهایی شدن تصمیم مبنی بر بهره‌برداری از سیارک، بسته به اندازه سیارک و مداری که سیارک در آن قرار دارد روش‌های متفاوتی جهت معدن‌کاوی پیشنهاد شده است [۲۶] که متناسب با آن فضاپیمای مناسب مورد استفاده قرار گرفته و یا برای آن مأموریت طراحی می‌شود. طبیعتاً طراحی و ساخت فضاپیمای مخصوص در افزایش هزینه‌ها موثر است.

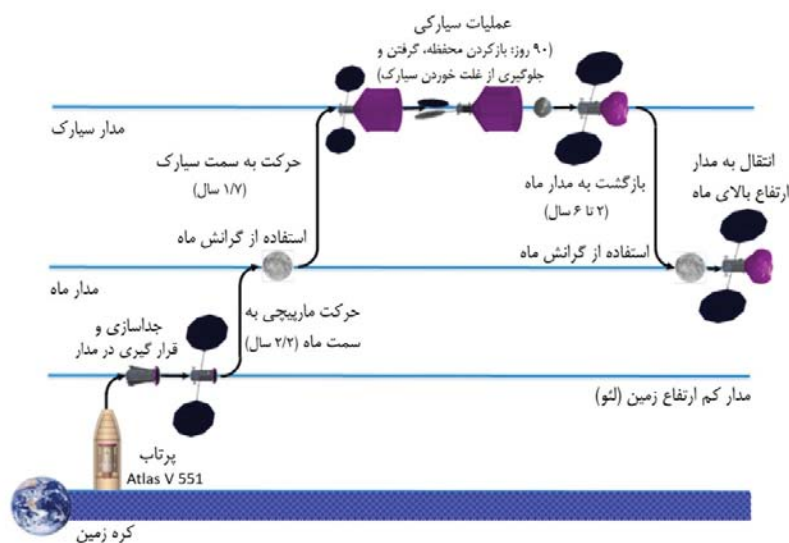
در سال ۲۰۱۲، موسسه کک^۲ به سفارش ناسا طراحی مفهومی مأموریتی را انجام داد که در آن هدف تغییر مسیر سیارک‌ها با استفاده از فضاپیمای رباتیک بود [۲۲]. در این مأموریت فضاپیما با گرفتن یک سیارک کوچک در مدارهای نزدیک زمین یا جداسازی قطعه‌ای از سطح سیارکی بزرگتر مسیر آن را به سمت مداری به دور ماه تغییر می‌داد. این فضاپیمای رباتیک معدن‌کاو سیارکی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است یک محفظه در جلوی آن قرار دارد که محل قرارگیری سیارک است و در انتهای آن کوره خورشیدی برای ایجاد گرما قرار دارد که هم در فرایند استخراج سیارک استفاده می‌شود و هم با انبساط آب داخل مخزن نیروی پیشران تولید می‌شود. در وسط فضاپیما سه مخزن جهت ذخیره آب استخراج شده تعبیه شده است. انتقال سیارک و تغییر مدار آن با قراردادن آن درون یک محفظه بسته روشی خلاقانه جهت تغییر

(علمی-ترویجی)

ابراهیم امیری و مهدی جعفری ندوشن



شکل (۲): ربات معدن کاو سیارکی [۲۴].



شکل (۳): پروفایل پروازی انتقال فضاپیما از زمین به سیارک، تسخیر و بازیابی آن [۲۷].

۴- منظر اقتصادی

همان‌طور که گفته شد بهره‌برداری از سیارک‌ها و به‌ویژه سیارک‌های نزدیک زمین، راهی برای تأمین منابع مورد نیاز بشر روی زمین و همچنین فراهم ساختن امکانات زندگی بشر در فضا اعم از ساخت و ساز و تأمین سوخت برای فضاپیماها است. با توجه به نزدیکی و دسترس‌پذیری سیارک‌های نزدیک زمین، گزینه مناسبی برای پشتیبانی از صنعتی‌سازی فضا هستند [۱۵]. با توجه به کاربردهای گسترده آب در فضا و فلزاتی مانند پلاتینیوم بر روی زمین، بررسی‌های اقتصادی زیادی بر روی آن‌ها صورت گرفته است. در این بخش مقاله به بررسی جنبه‌های اقتصادی و مالی

معدن‌کاوی فضایی با تمرکز بر ارزش برخی عناصر موجود در سیارک‌ها پرداخته می‌شود.

یکی از گام‌های مهم در معدن‌کاوی سیارکی مثل اکثر فعالیت‌های اقتصادی، امکان‌سنجی آن است. به این معنا که در یک مأموریت معدن‌کاوی سیارکی، نقطه سر به سر هزینه و درآمد کجاست و چه میزان سود در قبال سرمایه‌گذاری حاصل می‌شود. بالطبع موضوعات فنی در مدل اقتصادی دارای جایگاه بوده و بر روی ریسک و در نتیجه به صرفه بودن اقتصادی مؤثر هستند. بنابراین، اگر حتی از دیدگاه اقتصادی صرف به موضوع معدن‌کاوی سیارکی پرداخته شود نیز لازم است از نظر فنی به

استخراج شده از یک سیارک علاوه بر مصرف آشامیدنی می‌تواند جهت تأمین سوخت فضاپیماها و یا محافظت از فضاپیماها در مقابل پرتوهای خورشیدی استفاده شود. تأمین نیازهای بشر در فضا توسط منابع موجود در فضا و اجرام سماوی به جهت حذف هزینه انتقال آن‌ها از زمین، بسیار به صرفه‌تر است.

با توجه به بالا بودن هزینه‌های انتقال منابع و مواد معدنی به زمین، تنها آن دسته از منابع که در وزن مشابه ارزش بالاتری دارند، مورد توجه هستند. فلزات گرانبها مانند پلاتینیوم و زیر گروه‌های آن که بر روی زمین کمیاب هستند، به عنوان هدف معدن‌کاوی سیارکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. تأمین این فلزات برای صنایع با فناوری‌های روز از جمله صنعت هوافضا بسیار ضروری است.

به منظور بررسی و تحلیل اقتصادی معدن‌کاوی سیارکی از مدل ارائه شده در مرجع [۵] با تصحیحات جزئی استفاده شده است. به این شکل که ارزش زمانی پول ثابت در نظر گرفته شده است تا مخاطب نتایج مدل را بهتر درک کند. این مدل پارامترهای متعدد اقتصادی و فنی را شامل می‌شود و البته هزینه تحقیق و توسعه اولیه در آن لحاظ نشده است. با استفاده از مدل مذکور، هزینه، درآمد، نقطه سر به سر و همچنین سود حاصل از معدن‌کاوی سیارکی دو عنصر طلا، پلاتینیوم محاسبه شده است. سود حاصل از معدن‌کاوی سیارکی از تفاضل کل درآمد و کل هزینه محاسبه می‌شود. در این مدل، میزان درآمد رابطه مستقیمی با میزان جرم استخراج شده و قیمت عنصر به ازاء هر کیلوگرم دارد. هزینه‌های معدن‌کاوی شامل هزینه تحقیق و توسعه، انتقال، تولید و عملیات است. با اضافه کردن پارامترهای فنی و اقتصادی موثر در فرایند معدن‌کاوی سیارکی سود حاصل با استفاده از معادله (۱) قابل محاسبه است.

$$P_m = n[m_s c_m ptr - m_s \text{ceil}] \quad (1)$$

$$\left(\frac{n}{s+1}\right) \left(c_{p1} \left[k \cdot \text{ceil} \left(\frac{n}{s+1}\right)\right]^{\alpha} + c_t\right) [m_s c_m ptr - m_s \text{ceil} - c_0] - m_s \frac{c_D}{k}$$

در رابطه (۱)، P_m سود حاصل از مأموریت، n تعداد مأموریت‌های معدن‌کاوی، m_s جرم خشک فضاپیما، c_m ارزش هر کیلوگرم عنصر استخراج شده، p نرخ توان عملیاتی فضاپیما، t مدت زمان معدن‌کاوی، r نسبت مواد خالص‌سازی شده به منابع فرآوری شده، s تعداد دفعات استفاده از یک فضاپیما، c_{p1} هزینه تولید اولین فضاپیما، k تعداد فضاپیماها در یک مأموریت، α ضریب یادگیری یا تجربه، c_t هزینه انتقال بین زمین و فضا و بالعکس، c_0 هزینه عملیات و c_D هزینه تحقیق و توسعه هستند. با توجه به مدل و پارامترهای موثر در آن طبیعی است که اگر در هر مأموریت از چند فضاپیما استفاده شود هزینه توسعه کاهش می‌یابد. همچنین،

ضریب اطمینان مناسبی رسید تا میزان ریسک موجود برای بازگشت سرمایه قابل قبول باشد. از آن‌جاکه درآمد این صنعت حاصل از فروش منابع و مواد معدنی است، بایستی در ارزیابی، ارزش روز فلزات و مواد قابل استخراج از سیارک‌ها را مورد استفاده قرار گیرد. بررسی‌های اقتصادی با ارزیابی ترکیب عناصر موجود در سیارک و محاسبه درآمد حاصل از آن کامل می‌شود.

باید توجه داشت که میزان تقاضا عامل مهمی در بررسی اقتصادی است. این عامل می‌تواند با گذشت زمان تغییر کند. روندها حاکی از آن است که تقاضا برای کالاهای خاص، به‌ویژه منابع و مواد معدنی که مشابه آن‌ها در سیارک‌ها یافت می‌شود، با گذر زمان افزایش می‌یابد [۲۸]. همچنین، با توجه به وجود میزان محدود این منابع بر روی زمین، با گذر زمان از ذخایر آن‌ها کاسته می‌شود که کاهش آن‌ها افزایش قیمت را در پی خواهد داشت. در جدول ۳ ارزش فعلی برخی از این عناصر آورده شده است.

جدول (۳): ارزش روز (۲۰۱۹) برخی عناصر کمیاب [۲۹].

عدد اتمی	نماد	نام عنصر	هزار دلار آمریکا برای هر کیلوگرم
عناصر واسطه / گروه پلاتین			
۴۴	Ru	روتینیوم	۸
۴۵	Rh	رودیوم	۱۷۵/۸
۴۶	Pd	پالادیوم	۵۷
۷۷	Ir	ایریدیوم	۴۷
۷۸	Pt	پلاتینیوم	۳۰
۷۹	Au	طلا	۴۸/۴
لانتانیدهای کمیاب بر روی زمین			
۶۱	Pm	پرومتیوم	۶۰
۶۴	Gd	گادولینیوم	۰/۵
۷۰	Yb	یتربیوم	۱/۶
۷۱	Lu	لوتیتیوم	۶/۵
اکتیویدهای کمیاب بر روی زمین			
۹۰	Th	تولیوم	۵۰
۹۵	Am	امریکاتیوم	۱۵۰۰

نیاز روزافزون بشر به منابع انرژی و معدنی در کنار کمیاب شدن آن‌ها، یکی از دلایل اصلی مطرح شدن موضوع بهره‌برداری از سیارک‌ها است. اما فعالان آینده‌نگر این حوزه پا را فراتر گذاشته و به آینده بشر در فضا نیز فکر می‌کنند. معدن‌کاوی فضایی و سیارکی می‌تواند جنبه‌های جدیدی از فضای ماورای جو را نمایان سازد. به این صورت که منابع موجود در سیارک‌ها برای رفع نیازهای بشر در فضا مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال، آب

(علمی-ترویجی)

ابراهیم امیری و مهدی جعفری ندوشن

دو سناریو خوش‌بینانه و محافظه‌کارانه جهت استخراج پلاتینیوم در یک مأموریت بر روی سیارک در جدول ۴ آمده است. برای مقادیر برخی از ورودی‌های مدل از مرجع [۱] استفاده شده است. مقادیر پارامترهای مورد استفاده و نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل برای دو سناریو خوش‌بینانه و محافظه‌کارانه جهت استخراج پلاتینیوم در یک مأموریت بر روی سیارک در جدول ۴ آمده است. برای مقادیر برخی از ورودی‌های مدل از [۱] استفاده شده است.

جدول (۴): پلاتینیوم، سناریو محافظه‌کارانه و خوش‌بینانه.

هزینه سناریو خوش‌بینانه	هزینه سناریو محافظه‌کارانه	
۱۰,۰۰۰	۱,۰۰۰,۰۰۰	هزینه تولید (دلار به ازای هر کیلوگرم)
۳۵,۰۰۰	۳۵,۰۰۰	هزینه انتقال (دلار به ازای هر کیلوگرم)
۳۰,۰۰۰	۳۰,۰۰۰	ارزش پلاتینیوم (دلار به ازای هر کیلوگرم)
۱۰۰,۰۰۰	۵,۷۰۰,۰۰۰	هزینه عملیات (دلار)
۵۰,۰۰۰	۵,۴۵۳,۳۳۳	هزینه تحقیق و توسعه (دلار به ازای هر کیلوگرم)
۳,۵۳۶,۰۰۰	۳۱,۵۳۶,۰۰۰	مدت زمان معدنکاری ۳۶۵ روزه (ثانیه)
3×10^{-5}	3×10^{-5}	نسبت مواد خالص‌سازی شده به منابع فراوری شده
۰/۳۵	۰/۶۴	میزان توان عملیاتی (کیلوگرم بر ثانیه به هر کیلوگرم تجهیزات)
۲۵۰	۲۵۰	جرم فضاپیما (کیلوگرم)
۲۲/۸	۵/۷	سود (میلیارد دلار)
از سال اول	از سال ۱۸	زمان رسیدن به سود دهی (سال)

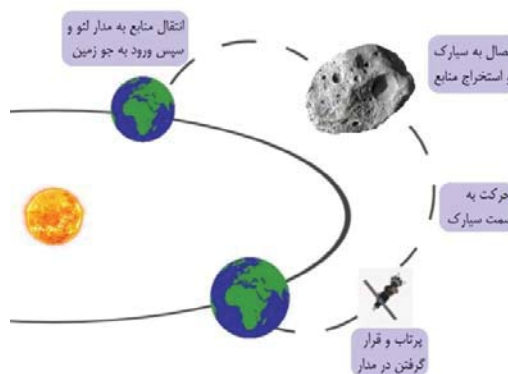
همان‌طور که از جدول ۲ و شکل ۵ قابل ملاحظه است، سود حاصل از ۱۰ مأموریت در رویکرد خوش‌بینانه ۲۲/۸ میلیارد دلار و در رویکرد محافظه‌کارانه برابر با ۵/۷ میلیارد دلار خواهد بود. همچنین، در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است که با قیمت ۳۰ هزار دلار برای هر کیلوگرم پلاتینیوم در سناریو محافظه‌کارانه در مأموریت هشتم به نقطه سوددهی می‌رسد. سود مجموع این سناریو ۵/۷ میلیارد دلار است. با در نظر گرفتن سناریو خوش‌بینانه این مأموریت می‌تواند در ابتدای امر و در اولین مأموریت نیز سودده باشد و مقدار سود ۲۲/۸ میلیارد دلار را در پایان ۱۰ مأموریت به همراه داشته باشد.

برای مأموریت مشابه جهت استخراج طلا با توجه به قیمت ۴۸,۴۰۰ دلاری هر کیلوگرم طلا، در رویکرد خوش‌بینانه سود حاصل از ۱۰ مأموریت ۳۸ میلیارد دلار و در رویکرد محافظه‌کارانه

در صورت استفاده مجدد و مکرر از یک فضاپیما هزینه‌ها کاهش می‌یابد. افزایش نرخ عملیاتی فضاپیما موجب افزایش درآمد می‌شود. با به کارگیری این مدل سوددهی یک سناریو پیشنهادی معدن کاوی سیارکی برای استخراج و بهره‌برداری از پلاتینیوم و طلا مورد بررسی قرار گرفته است. فرضیات در نظر گرفته شده در این ارزیابی عبارتند از:

- زمان معدن کاوی ۳۶۵ روز معادل یک سال در نظر گرفته شده است.
- در هر زمان یک فضاپیما در حال استخراج منابع بوده و ۱۰ عملیات بصورت سلسله‌وار انجام می‌گیرد.
- برای هر مأموریت یک فضاپیما با وزن ۲۵۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است.

شماتیکی از این مأموریت در شکل ۴ نشان داده شده است که در طی آن سیارک و یا بخشی از آن برای بهره‌برداری به مدار زمین منتقل می‌شود و در نهایت به زمین آورده می‌شود. البته سناریوهای متعددی در مورد مقصد نهایی سیارک وجود دارد. در برخی از این سناریوها سیارک قبل از معدن‌کاری به زمین آورده می‌شود. در برخی دیگر به نقاط لاگرانژی زمین-ماه منتقل می‌شود.



شکل (۴): شماتیک مأموریت پیشنهادی برای معدن کاوی سیارکی.

سناریو بیان شده با دو دیدگاه خوش‌بینانه و محافظه‌کارانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در دیدگاه خوش‌بینانه فرض بر این است که فضاپیماها به تولید انبوه رسیده‌اند که اثر مستقیمی در کاهش هزینه‌ها دارد. در سناریو محافظه‌کارانه یک نمونه فضاپیما وجود دارد و هزینه‌ها با قیمت‌های فعلی برآورد می‌شوند. همچنین، توان عملکردی فضاپیما حدوداً دو برابر توان عملکردی فضاپیما در دیدگاه خوش‌بینانه در نظر گرفته شده است. از این‌رو، هزینه‌های تحقیق و توسعه، تولید و عملیات در رویکرد محافظه‌کارانه بیشتر از رویکرد خوش‌بینانه است. مقادیر پارامترهای مورد استفاده و نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل برای

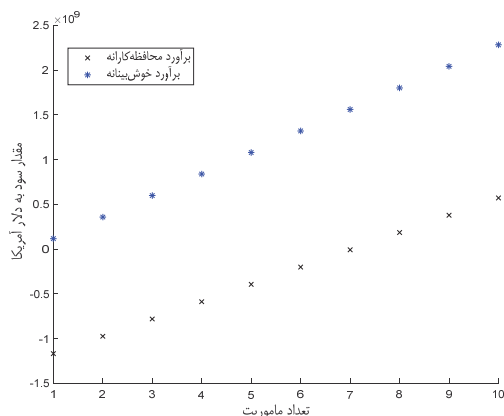
بخصوصی سودده خواهد بود. با توجه به شرایط موجود، این حقیقت باید در نظر گرفته شود که آیا شرکت‌های فعال در این حوزه توان مواجهه با نوسانات بازار جهانی را دارند. با توجه به مدل فوق می‌توان ادعا کرد که صنعت معدن‌کاوی فضایی می‌تواند سودده باشد. برای رسیدن به نقطه سوددهی در مدت زمان کمتر لازم است که از تعداد بیشتری فضاپیما در هر مأموریت استفاده شود. البته برای بالا بردن راندمان اقتصادی باید فضاپیماهای مورد نظر به تولید انبوه برسند و در فرایند معدن‌کاوی بصورت بهینه مورد استفاده قرار گیرد [۳۱-۳۰].

۵- چالش‌های حقوقی

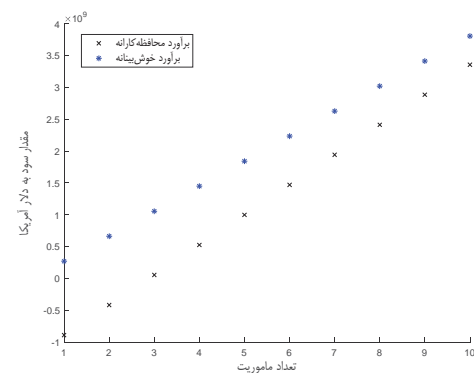
هر چند در ابتدای توسعه حوزه فضا به دلیل جنگ سرد، چارچوب‌های حقوقی جهت کند کردن سرعت پیشرفت رقیب پیشنهاد و به تصویب نهادهای بین‌المللی می‌رسید ولی امروزه وجود چنین مقررات و چارچوب‌های حقوقی جزء لاینفک هر کسب‌وکار و صنعتی است. با پیشرفت حوزه فضا و ورود کشورهای متعدد و حتی بخش خصوصی به آن، حقوقدانان و نهادهای حقوقی بدنبال سامان‌دهی و ایجاد رژیم‌های حقوقی به منظور کاهش خالهای قانونی بوده و هستند. در حال حاضر، چالش‌های حقوقی جدی در زمینه ماهواره‌های کوچک، زباله‌های فضایی و فعالیت‌های تجاری فضایی وجود دارد [۳۲]. در عرصه معدن‌کاوی فضایی و به‌ویژه سیارکی نهادهای حقوقی ملی و بین‌المللی در حال مذاکره و بررسی جنبه‌های مختلف آن هستند تا قبل از بلوغ کامل این صنعت، رژیم حقوقی مناسبی را پیشنهاد دهند [۳۳]. اهمیت موضوع وقتی مشخص می‌شود که بدانیم معدن‌کاوی سیارکی اثرات قابل توجهی بر تغییرات اقتصادی، اجتماعی و حتی روابط بین‌الملل خواهد داشت.

تاکنون کشورهای آمریکا و لوکزامبورگ قوانین ملی فضایی خود را در خصوص معدن‌کاوی فضایی برای تشویق بخش خصوصی به فعالیت و سرمایه‌گذاری در آن تصویب کرده‌اند. این کشورها به شرکت‌های خود حق مالکیت منابعی که از سیارک‌ها استخراج می‌کنند را تحت شرایطی داده‌اند [۳۴-۳۵]. هر چند در اوایل تسخیر فضا توسط بشر و در بجهت جنگ سرد معاهداتی مصوب شدند که فضا را میراث مشترک بشری می‌دانند که در حاکمیت و مالکیت دولتی در نمی‌آید ولی دو کشور فوق‌الذکر و حتی دیگر فعالان این حوزه معتقد هستند در معاهدات فضایی هیچ‌گونه جواز و یا مانعی در این خصوص تصریح نشده است و می‌توان برداشت و تفسیر خود از آن را مبنای عمل قرار داد. بنابراین، تا وقتی که قانون و مقرراتی از این فعالیت‌ها ممانعت نکرده و یا چارچوبی را برای آن مشخص نکند، طبیعی است که

۳۳/۵ میلیارد دلار خواهد بود. همانگونه که در نمودار شکل ۶ قابل مشاهده است، سناریو در رویکرد محافظه‌کارانه در مأموریت سوم به سوددهی می‌رسد ولی در رویکرد خوش‌بینانه این سناریو می‌تواند در ابتدای امر و در اولین مأموریت نیز سودده باشد. در این مدل تنها عامل اثرگذار بر روی قیمت پلاتینیوم و طلا در بازار، مقدار فلز موجود در بازار جهانی فرض شده است. این مدل نماینگر آن است که معدن‌کاوی سیارکی در شرایط بخصوصی سودده خواهد بود. با توجه به شرایط موجود، این حقیقت باید در نظر گرفته شود که آیا شرکت‌های فعال در این حوزه توان مواجهه با نوسانات بازار جهانی را دارند. با توجه به مدل فوق می‌توان ادعا کرد که صنعت معدن‌کاوی فضایی می‌تواند سودده باشد. برای رسیدن به نقطه سوددهی در مدت زمان کمتر لازم است که از تعداد بیشتری فضاپیما در هر مأموریت استفاده شود. البته برای بالا بردن راندمان اقتصادی باید فضاپیماهای مورد نظر به تولید انبوه برسند و در فرایند معدن‌کاوی بصورت بهینه مورد استفاده قرار گیرد [۳۱-۳۰].



شکل (۵): نمودار سود حاصل از معدن‌کاوی سیارکی برای پلاتینیوم با دو سناریو خوش‌بینانه و محافظه‌کارانه.



شکل (۶): نمودار سود حاصل از معدن‌کاوی سیارکی برای طلا با دو سناریو خوش‌بینانه و محافظه‌کارانه.

در این مدل تنها عامل اثرگذار بر روی قیمت پلاتینیوم و طلا در بازار، مقدار فلز موجود در بازار جهانی فرض شده است. این مدل نماینگر آن است که معدن‌کاوی سیارکی در شرایط

(علمی-ترویجی)

ابراهیم امیری و مهدی جعفری ندوشن

این منابع استخراج شده و به محل دیگری مثل زمین منتقل شود، آیا امکان مالکیت آن‌ها وجود دارد یا خیر. از طرفی، آن‌چه نگرانی بزرگتری ایجاد می‌کند آن است که هجده کشور این موافقت‌نامه را تصویب و یازده کشور آن را امضا کرده‌اند [۳۹]. بنابراین، این موافقت‌نامه حتی اگر جامع و مانع بود نیز اعتبار بین‌المللی چندانی نداشته و کشورها الزامی به تبعیت از آن ندارند. با این وجود، از این منظر که این موافقت‌نامه تنها معاهده بین‌المللی است که به صراحت از بهره‌برداری از منابع ماورای جو صحبت می‌کند، حائز اهمیت است و می‌تواند سنگ بنای اولیه چارچوب حقوقی حاکم بر بهره‌برداری از معادن فضایی و سیارکی باشد. هر چند از ابتدای تدوین معاهدات فضایی، اساس فکری بر تعلق فضا به همه انبای بشر بوده اما معرفی «اصل میراث مشترک» می‌تواند تهدید بزرگی برای اقتصادی شدن فعالیت‌های فضایی در حوزه معدن کاوی فضایی و سیارکی باشد. طبیعتاً از منظر فواید اقتصادی، اصل میراث مشترک بشری در بین کشورهای توسعه‌یافته و صاحبان فناوری بشری طرفدار نداشته و این کشورهای در حال توسعه و توسعه نیافته هستند که باید دغدغه نادیده انگاشتن این موضوع را داشته باشند.

باید توجه داشت که این معاهدات و توافق‌نامه‌ها زمانی تدوین شده‌اند که عملیاتی شدن معدن کاوی فضایی و سیارکی دور از ذهن بوده و کشورها به ویژه ایالات متحده آمریکا و اتحاد جماهیر شوروی به جهت بازدارندگی رقبا در توسعه صنعت فضایی و دستیابی به آن اقدام به طرح آن‌ها نموده‌اند. امروزه برای توسعه صنعت فضایی و افزایش رفاه بشری باید به این موضوع واقع‌گرایانه نگریست و اصول حاکم بر معاهدات و قوانین بین‌المللی فضایی را براساس راهگشایی و هموارسازی مسیر توسعه این صنعت تدوین نمود. با وجود چنین اصولی، وقتی معدن کاوی فضایی تحقق پیدا کند، بایستی رژیم حقوقی مناسبی ایجاد شود تا بهره‌برداری از منابع فضا را نظام‌مند کند. باید توجه داشت که هر چند وجود اصل میراث مشترک بشری می‌تواند دست‌آویزی برای مانع‌تراشی سر راه بهره‌برداری از منابع و معادن فضایی باشد، ولی نمی‌تواند مانع قانونی جدی برای این امر باشد. زیرا با توجه به عدم تبیین شفاف این اصل و نبود رژیم حقوقی متناسب با آن، روی دیگر این سکه این است که دست کشورها برای بهره‌برداری یک‌جانبه و دلخواه از منابع و معادن فضایی باز است.

در نبود رژیم حقوقی بین‌المللی ناظر بر معدن کاوی فضایی و سیارکی، کشورها بدون در نظر گرفتن این موضوع اقدام به تدوین قانون فضایی ملی نموده‌اند. بدیهی است که قانون‌های فضایی ملی با توجه به ماهیت فضا باید در راستای اجرای چارچوب‌های حقوقی بین‌المللی باشند تا نفع یک کشور به ضرر دیگر کشورها نباشد. بنا بر قانون فضایی ایالات متحده آمریکا شهروندان آمریکایی مجاز به تصرف، مالکیت، خرید و فروش منابع سیارکی هستند [۴۰]. هر چند

دولت‌ها و شرکت‌های تحت پوشش آن‌ها جهت تأمین منافع خود از هر فرصتی استفاده کنند.

نبود یک رژیم حقوقی بین‌المللی حاکم بر استخراج منابع فضایی و به‌ویژه سیارکی برای فعالیت دولت‌ها و بخش خصوصی می‌تواند محیطی بدون نظارت و خارج از کنترل را در فعالیت‌های فضایی ایجاد کند که نه تنها نظم جهانی، نظام‌های اقتصادی و صنعتی را به هم خواهد زد، بلکه می‌تواند تهدیدی برای امنیت دنیا نیز تلقی شود. بدیهی است که منظور از ایجاد رژیم حقوقی به معنی وضع مقررات و قوانین بیش از حد محدودکننده نیست. زیرا مقررات اضافی خود می‌تواند عاملی برای کند شدن رشد فعالیت شرکت‌ها، افزایش ریسک‌ها و در نتیجه بی میلی و بی اعتمادی سرمایه‌گذاران شود.

هر چند معاهده فضای ماورای جو [۳۶] بطور مستقیم به موضوع منابع در فضا از جمله ماه و سایر اجرام سماوی نمی‌پردازد ولی در اولین ماده به این مسئله که اکتشاف و بهره‌برداری از فضا باید در راستای منافع همه کشورها باشد، اشاره شده است. در این معاهده موارد و بندهایی وجود دارد که می‌توان از آن‌ها برای ایجاد چارچوب اولیه حقوقی در خصوص معدن کاوی فضایی استفاده کرد. این موارد عبارتند از:

- اکتشاف و بهره‌برداری برای همه کشورها در فضا آزاد است.
- اکتشاف و بهره‌برداری از فضا باید برای منافع همه کشورها باشد.
- ادعای مالکیت و حاکمیت بر فضا به واسطه تصرف و یا بهره‌برداری برای دولت‌ها ممنوع است.
- دولت‌ها مسئول فعالیت‌های فضایی توسط دولت و بخش خصوصی تحت حاکمیت خود در معدن کاوی ماه و اجرام سماوی هستند.

این معاهده به صراحت بیان می‌کند که فضا میراث مشترک بشری است و به همگان تعلق دارد و و بنا به مورد سوم از موارد فوق نمی‌تواند در حاکمیت و مالکیت کشوری در آید. با این وجود، این معاهده برای برخی مسائل پاسخی ارائه نمی‌کند. برای مثال در مورد اول نسبت آزادی را با مالکیت در اکتشاف و بهره‌برداری از فضا مشخص نمی‌کند و میزان حق و حقوق بهره‌بردار را تعیین نمی‌کند یا در مورد دوم مشخص نیست که الزام اکتشاف و بهره‌برداری از فضا در راستای منافع همه کشورها یک الزام قانونی است و یا یک الزام اخلاقی.

در موافقت‌نامه ماه تصریح شده است که حاکمیت بر اجرام سماوی از هیچ طریقیه دست نمی‌آید [۳۷-۳۸]. گرچه این موافقت‌نامه تصریح می‌کند که مالکیتی بر اجرام سماوی و منابع طبیعی آن‌ها وجود ندارد اما این مسئله کافی نبوده و ابهاماتی را به قوت خود باقی می‌گذارد. به طور مثال، مشخص نیست که اگر

در معاهدات فعلی موجب افزایش ریسک و کاهش انگیزه برای سرمایه‌گذاران شده است، اما این موضوع باید به‌گونه‌ای حل شود که منافع حاصل به طور انحصاری به کشورهای توسعه یافته تعلق نگیرد و کشورهای در حال توسعه و حتی کشورهای نوظهور فضایی متضرر شوند. در لوای رژیم حقوقی جدید، باید قوانین فضایی ملی کشورها وضعیت بخش خصوصی و رابطه آن‌ها با دولت‌های متبوعشان را شفاف کرده و مسئولیت هر یک را تصریح کنند. با توجه به وجود ایهامات متعدد، بروز اختلاف بین شرکت‌های خصوصی و حتی کشورها دور از ذهن نبوده و از این‌رو باید سازوکار مشخصی برای حل اختلافات و دعاوی در رژیم حقوقی پیش‌بینی شود. ناگفته نماند که در صورت وجود رژیم حقوقی نیز مادامی از سوی کشورها لازم الاجرا است که آن را امضا و تصویب کرده باشند.

۶- نتیجه‌گیری

با پیشرفت فناوری و نیاز روز افزون بشر به منابع و مواد معدنی، شرایط برای ایجاد موجی جدید از «جویندگان طلا» در فضای ماورای جو به لحاظ فنی محیا شده است و هرچه پیش می‌رود نشانه‌های بیشتری از توجیه اقتصادی مأموریت‌های معدن‌کاوی سیارکی دیده می‌شود. کاهش منابع بر روی زمین، افزایش هزینه‌های استخراج و همچنین بلوغ فناوری فضایی، معدن‌کاوی سیارکی را که در گذشته توجیه اقتصادی نداشته و امری فانتزی به نظر می‌آمده است را حتی برای شرکت‌های خصوصی نیز توجیه‌پذیر و سودآور می‌کنند. هر چند بسته به شرایط و نیاز مأموریت مشخص می‌شود که کجا و چگونه از منابع معدنی سیارکی استفاده شود ولی مدل اقتصادی و ارزیابی آن نشان می‌دهد که استخراج و بهره‌برداری از منابع معدنی پلاتینیوم و طلا از سیارک‌ها و انتقال آن‌ها به زمین از لحاظ اقتصادی به‌صرفه است. افزایش تعداد مأموریت‌ها و همچنین استفاده چندباره از فضاپیماها در کاهش زمان رسیدن به نقطه سربه‌سر و افزایش سود مؤثر است. اما در کنار این فرصت‌ها، وجود چالش حقوقی بر سر راه توسعه صنعت معدن‌کاوی فضایی تحقق آن را کند کرده است. بنابراین، ایجاد رژیم حقوقی بین‌المللی برای دسترسی آزاد و بهره‌برداری از منابع سیارکی راه‌گشای توسعه و بلوغ این صنعت است.

این امر با اصل میراث مشترک بشری در تضاد است ولی نبود چارچوب حقوقی بین‌المللی راه را برای اعتراض کشورها بسته است. قانون‌گذاری کشورها بصورت یک جانبه منجر به بروز تنش‌ها و چالش‌هایی در سطح بین‌الملل می‌شود. در این شرایط به جای تدوین رژیم حقوقی مناسب، انرژی و زمان کشورها صرف بررسی تضاد و تناقض قوانین فضایی ملی کشورها با معاهدات موجود می‌شود. آن هم معاهداتی که کارا نبوده و دارای نقایص و نقیصه‌هایی هستند.

نمونه‌های زیادی برای الگو گرفتن از مسائل حقوقی مشابه در صحنه بین‌المللی وجود ندارد و به موارد محدودی مثل حقوق حاکم بر آب‌های آزاد و یا پیمان جنوبگان می‌توان اشاره کرد. جنوبگان قاره‌ای در قطب جنوب زمین است که تقریباً همه سطح آن با یخ پوشیده شده و جمعیت بومی ساکن ندارد. جنوبگان به دلیل وجود منابع طبیعی و نفت خام منطقه اقتصادی مهمی به شمار می‌رود. ۵۴ کشور عضو رسمی این پیمان هستند که ۷ کشور ادعای مالکیت بر بعضی مناطق جنوبگان را دارند که در برخی موارد مناطق مورد ادعا با هم تداخل دارند. در ماده ۴ از مفاد چهارده‌گانه این پیمان بیان شده است که این پیمان، اختلافات یا ادعای تمامیت ارضی یا هیچ ادعای حاکمیتی را به رسمیت نمی‌شناسد [۴۱-۴۲]. همچنین، در زمان اجرای این پیمان هیچ گونه ادعای مالکیت جدیدی بر جنوبگان قابل قبول نیست. مهمترین هدف پیمان جنوبگان اطمینان از استفاده منابع طبیعی جنوبگان در جهت منافع بشر برای همیشه و اهداف صلح‌آمیز است. پیمان جنوبگان نمونه‌ای به نسبت موفق از اصل میراث مشترک بشریت شناخته می‌شود.

طبیعی است که توسعه بخش نوظهور معدن‌کاوی از حوزه فضایی در گرو وضع قوانین و مقررات است، زیرا موجب ایجاد انگیزه و جلب اطمینان سرمایه‌گذاران علاقه‌مند می‌شود. بنا به آنچه که از وضع کنونی گفته شد، واضح است که برای رفع چالش‌های حقوقی صنعت معدن‌کاوی فضایی نمی‌توان به هیچ یک از معاهدات و قوانین موجود بسنده کرد. مشکلات و نارسایی‌های معاهدات فضایی هم‌زمان با بوجود آمدن قوانین یک جانبه کشورها، ضرورت این امر را بیشتر نشان می‌دهد. بنابراین، به ایجاد یک رژیم حقوقی جدید نیاز است. به منظور تدوین و وضع رژیم حقوقی مناسب ابتدا باید قوانین بین‌المللی موجود مناسب‌سازی شوند. سپس، عزم جدی برای تدوین آن در قالب شکل‌گیری همکاری‌های بین‌المللی ایجاد شود. آن‌گاه برای بهره‌برداری از اجرام سماوی رژیم حقوقی مناسبی شکل گیرد که مورد توافق همه کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه باشد. بالطبع در رژیم حقوقی پیشنهادی باید منافع همه کشورها دیده شود و از تبعیض پرهیز شود. هر چند موضوع ممنوعیت مالکیت

۷- مراجع

- [1] Calla, P., Fries, D., and Welch, C., "Asteroid Mining with Small Spacecraft and Its Economic Feasibility", *arXiv preprint arXiv:1808.05099*, 2018.
- [2] Hellgren, V., "Asteroid Mining: A Review of Methods and Aspects", *Student Thesis Series INES*, 2016.
- [3] Sonter, M.A.R.K., "Near Earth Objects as Resources for Space Industrialization", *Solar System Development Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-31, 2001.
- [4] Sommariva, A., "Rationale, Strategies, and Economics for Exploration and Mining of Asteroids", *Astropolitics*, Vol. 13, pp.25-42, 2015.
- [5] Hein, A.M., Matheson, R., and Fries, D., "A Techno-Economic Analysis of Asteroid Mining", *International Astronautical Congress*, Bremen, Germany, 2018.
- [6] Abe, M., Takagi, Y., Kitazato, K., Abe, S., Hiroi, T., Vilas, F., Clark, B.E., Abell, P.A., Lederer, S.M., Jarvis, K.S., Nimura, T., Ueda, Y., and Fujiwara, A., "Near-infrared Spectral Results of Asteroid Itokawa from the Hayabusa Spacecraft", *Science* Vol. 312, No. 5778, pp. 1334-1338, 2006.
- [7] Grinstead, J., Jenniskens, P., Cassell, A., Albers, J., and Winter, M., "Airborne Observation of the Hayabusa Sample Return Capsule Re-Entry", *42nd AIAA Thermophysics Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, 2011.
- [8] Blair, B.R., *The Role of Near-Earth Asteroids in Long-Term Platinum Supply*, Space Resources Roundtable II, Lunar and Planetary Institute, Houston, USA, 2000.
- [9] Kazemi, H., "Legal Aspects of the Mining of Celestial Bodies and Its Challenges", *Journal of Space Sciences and Technologies*, Vol. 11, No. 4, pp. 51-64, 2018, (In Persian).
- [10] Sonter, M.J., "The Technical and Economic Feasibility of Mining the Near-Earth Asteroids", *Acta Astronautica*, Vol. 41, pp. 637-647, 1997.
- [11] Gajdos, M., "Economic Challenges of Exploitation of Celestial Bodies by 2030", *Bachelor Thesis*, Faculty of Economics and Administration, Masaryk University, Brno, Czech Republic, 2014.
- [12] "The National Aeronautics and Space Administration", eoPortal, <https://www.nasa.gov/> [retrieved Nov. 2020].
- [13] "The European Space Agency", eoPortal, <https://www.esa.int/> [retrieved Nov. 2020].
- [14] "The Japan Aerospace Exploration Agency", eoPortal, <https://global.jaxa.jp/> [retrieved Nov. 2020].
- [15] Ross, S.D., "Near-earth Asteroid Mining", *Space Industry Report*, Department of Control and Dynamical Systems, Pasadena, California, USA, 2001.
- [16] Kris, Z., Chu, P., Craft, J., Cohen, M.M., James, W.W., and Hilscher, B., "Asteroid Mining", *AIAA Space 2013 Conference and Exposition*, San Diego, California, USA, 2013.
- [17] Veeder, G.J., Hanner, M.S., Matson, D.L., Tedesco, E.F., Lebofsky, L.A., and Tokunaga, A.T., "Radiometry of Near-earth Asteroids", *The Astronomical Journal*, Vol. 97, pp. 1211-1219, 1989.
- [18] Jakhu, R.S., Pelton, J.N. and Nyampong, Y.O.M., *Space Mining and Its Regulation*. Springer International Publishing, New York, USA, 2017.
- [19] Pravec, P., Harris, A.W., Vokrouhlický, D., Warner, B.D., Kušnirák, P., Hornoch, K., Pray, D.P., Higgins, D., Oey, J., Galád, A., Gajdoš, Š., Kornoš, L., Világi, J., Husárik, M., Krugly, Yu.N., Shevchenko, V., Chiorny, V., Gaftonyuk, N., Cooney, W.R., Gross, J., Terrell, D., Stephens, R.D., Dyvig, R., Reddy, V., Ries, J.G., Colas, F., Lecacheux, J., Durkee, R., Masi, G., Koff, R.A., Goncalves, R., "Spin Rate Distribution of Small Asteroids", *Icarus*, Vol. 197, No. 2, 497-504, 2008.
- [20] Moore, Ch., "Technology Development for NASA's Asteroid Redirect Mission", *65th International Astronautical Congress*, Toronto, Canada, 2014.
- [21] Badescu, *Asteroids: Asteroids: Prospective Energy and Material Resources*, Springer Science & Business Media, New York, USA, 2013.
- [22] Mazanek, D.D., Brohpy, J.R., and Merrill, R.G., "Asteroid Retrieval Mission Concept-Traiblazing Our Future in Space and Helping to Protect Us from Earth Impactors", *Planetary Defence Conference*, Flagstaff, USA, 2013.
- [23] Jenniskens, P.V., Damer, B., Norkus, R., Pilorz, S., Nott, J., Grigsby, B., Adams, C., and Blair, B.R., "Shepherd: A Concept for Gentle Asteroid Retrieval With a Gas-Filled Enclosure", *New Space*, Vol. 3, No. 1, pp. 36-43, 2015.
- [24] James, W.W., "Robotic Asteroid Prospector (RAP) Niac Phase 1 Results", *7th Symposium on Space Resource Utilization*, National Harbor, Maryland, 2014.
- [25] Johnson, L., Whorton, M., Heaton, A., Pinson, R., Laue, G., and Adams, C., "Nanosail-D: A Solar Sail Demonstration Mission", *Acta astronautica*, Vol. 68, No. 5-6, pp. 571-575, 2011.
- [26] Truesdale, N., "Using Invariant Manifolds of the Sun-earth L2 Point for Asteroid Mining Operations", *ASEN 5050 Space Flight Dynamics Final Report*, University of Colorado. 2012.
- [27] Landau, D., Dankanich, J., Strange, N., Bellerose, J., Llanos, P., and Tantardini, M., "Trajectories to Nab a NEA (Near-Earth Asteroid)", *23rd AAS/AIAA Spaceflight Mechanics Meeting*, Kauai, Hawaii, USA, 2013.
- [28] "Mining Intelligence and Technology", eoPortal, <http://www.infomine.com/> [retrieved Nov. 2019].
- [29] MacWhorter, K., "Sustainable Mining: Incentivizing Asteroid Mining in the Name of Environmentalism", *William & Mary Environmental Law and Policy Review*, Vol. 40, No. 2, pp. 645-660, 2015.
- [30] Lewis, J.S., *Asteroid Mining 101: Wealth for the New Space Economy*, Deep Space Industries, Houston, Texas, USA, 2015.
- [31] Lee, R., *Law and Regulation of Commercial Mining of Minerals in Outer Space*, Springer Science & Business Media, New York, USA, 2012.
- [32] Hearshey, C.M., "A Review of Challenges to Corporate Expansion into Outer Space", *AIAA SPACE 2008 Conference & Exposition*, San Diego, California, USA, 2008.

- [33] Qizhi, H., "The Outer Space Treaty in Perspective", *Journal of Space Law*, Vol. 25, No. 2, pp. 93-100, 1997.
- [34] Heise, J., "Space, the Final Frontier of Enterprise: Incentivizing Asteroid Mining Under a Revised International Framework", *Michigan Journal of International Law*, Vol. 40, No. 1, pp. 189-213, 2018.
- [35] Masson-Zwaan, T. and Palkovitz, N., "Regulation of Space Resource Rights: Meeting the Needs of States and Private Parties", *Questions of International Law*, Vol. 35, pp. 14-25, 2017.
- [36] "United Nations Office for Outer Space Affairs", eoPortal, <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/outerspacetreaty.html/> [retrieved Nov. 2019].
- [37] Zell, J.L., "Putting a Mine on the Moon: Creating an International Authority to Regulate Mining Rights in Outer Space", *Minnesota Journal of International Law*, Vol. 15, pp. 489-519, 2006.
- [38] Minola, P., "Moon Treaty and the Law of the Sea", *San Diego Law Review*, Vol. 18, pp. 455-472, 1980.
- [39] "United Nations Treaty Collection", eoPortal, https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXIV-2&chapter=24&clanng=en/ [retrieved Nov. 2019].
- [40] "The Independent Newspaper", eoPortal, <https://www.independent.co.uk/> [retrieved Nov. 2019].
- [41] "The Antarctic Treaty", eoPortal, https://documents.ats.aq/ats/treaty_original.pdf. [retrieved Nov. 2019].
- [42] "Secretariat of the Antarctic Treaty", eoPortal, <https://www.ats.aq/e/ats.htm>. [retrieved Nov. 2019].