



Bozok Journal of Engineering and Architecture

e-ISSN: 3023-4298

Araştırma Makalesi/Research Article

Dünya dışı ortamlarda madencilik yapma olasılıkları: Ay ve Mars örneği

Hüseyin SENDİR¹, *, Zahraa Khalid MOHAMMED ALI²

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri:

Geliş tarihi

02.10.2024

Kabul tarihi

23.10.2024

Yayın tarihi

31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Madencilik

Ay

Mars

Krater

Uzay

Ö Z E T

Uzay madenciliği, dünya dışı materyallere erişimi kolaylaştırarak Dünya'nın sınırlı doğal kaynaklarına olan bağımlılığı azaltabilecek umut verici bir alan olarak ortaya çıkmaktadır. Ay ve Mars gibi göksel gezegenlerden elde edilebilecek kaynaklar, uzun vadede sürdürülebilir ekonomik büyümeyi kolaylaştırabilir ve insanlığın gelecekteki enerji ve hammadde gereksinimlerini karşılayabilir. Ay'daki su buzu astronotların yaşam desteği ve uzay yolculuğu için yakıt üretilmesinde bir kaynak olarak kullanılabilir. Helyum-3, gelecekteki füzyon enerjisi reaktörleri için olası bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Demir, magnezyum ve alüminyum gibi metaller Mars'ta inşaat ve imalat uygulamaları için hayati kaynaklar olarak hizmet edebilir. Bununla birlikte, uzay madenciliği şu anda çok sayıda engelle karşılaşmaktadır. Bu engellerin başında bu faaliyetlerin yüksek maliyetleri gelmektedir. Madencilik ekipmanlarının Dünya'dan Ay'a ya da Mars'a taşınmasının maliyeti oldukça yüksektir. Dahası, bu gök cisimlerinin zorlu ortamı (aşırı sıcaklık değişimleri, düşük yerçekimi, radyasyon) madencilik yöntem ve ekipmanlarını ciddi şekilde zorlamaktadır. Dünya'daki madencilik tekniklerinin bu koşullara uyarlanması için önemli ölçüde yenilik yapılması gerekmektedir. Bununla birlikte, teknolojik ilerlemeler (robotik, yapay zekâ ve 3D baskı gibi) bu sorunların zaman içinde aşılabilirliğini göstermektedir. Uzay madenciliği sektörü, yalnızca Dünya'nın kaynak sorunlarını çözmekle kalmayıp, aynı zamanda uzay ekonomisinin temel taşlarından biri haline gelebilecektir.

Mining possibilities in extraterrestrial environments: The case of the Moon and Mars

ARTICLE INFO

Article history:

Received

02.10.2024

Accepted

23.10.2024

Published

31.12.2024

Keywords:

Mining

Moon

Mars

Crater

Space

ABSTRACT

Space mining is developing as a viable domain that may diminish reliance on Earth's finite natural resources by enabling access to extraterrestrial elements. Resources from celestial bodies like the Moon and Mars could promote sustainable economic development over the long run and fulfil humanity's future energy and raw material needs. Water ice on the Moon may serve as a resource for fuel to sustain astronaut life support and facilitate space travel. Helium-3 is regarded as a potential energy source for forthcoming fusion energy reactors. Metals such iron, magnesium, and aluminium may function as essential materials for construction and manufacturing purposes on Mars. Nevertheless, space mining presently has many challenges. The primary impediment is the elevated expense of these operations. The expense of transferring mining apparatus from Earth to the Moon or Mars is significantly elevated. Furthermore, the inhospitable conditions of these celestial bodies (extreme temperature fluctuations, reduced gravity, radiation) significantly impede mining techniques and apparatus. Substantial innovation is necessary to modify terrestrial mining techniques for these conditions. Nevertheless, technical advancements, like robotics, artificial intelligence, and 3D printing, indicate that these challenges can be surmounted over time. The space mining business will address Earth's resource challenges while simultaneously benefiting space exploration.

ORCID ID: Yazar1: <https://orcid.org/0000-0001-7252-7117>, Yazar1: <https://orcid.org/0009-0002-6748-7661>

*Sorumlu yazar(lar)/Corresponding author(s): Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

Tel:+90 505 7564393.

Fax: +90 222 2393613

E-mail:hsendir@ogu.edu.tr

1. GİRİŞ

Dünyadaki doğal kaynaklar sınırlı olup artan nüfus ve tüketim ile hızla tükenmektedir. Bu durum, gelecekte kritik hammaddelerin kıtlığına ve fiyat artışlarına yol açabilir. Bu nedenle, alternatif kaynaklara olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Ay ve Mars, dünyaya yakın konumları ve zengin mineral kaynakları ile uzay madenciliği için ideal adaylardır. Ay'da su buzu, helyum-3, nadir toprak elementleri ve metaller gibi değerli kaynaklar bulunurken, Mars'da da su buzu, demir, magnezyum, alüminyum ve diğer metaller mevcuttur. Uzaydan elde edilen bu kaynaklar, Dünya'daki kaynak açığını kapatabilir ve yeni teknolojik gelişmelere katkıda bulunabilir.

Bu çalışmada, Ay ve Mars'ta madencilik yapmanın olasılığını ve potansiyelini ortaya koyarken aynı zamanda Ay ve Mars'ın jeolojik yapısını, mineral kaynaklarını ve bu kaynakları çıkartmak ve kullanmak için kullanılan teknolojileri, bu teknolojiler kullanıldığında karşımıza çıkacak zorluklar incelenmiştir. Bunun yanı sıra uzay madenciliğinin ekonomik analizine de değinilerek, uzay madenciliğinin Dünya ekonomisine ve uzay araştırmalarına katkısı da değerlendirilmiştir.

2. AY'DA MADENCİLİK

Ay'ın jeolojik özellikleri karmaşık ve gezegenin tarihi boyunca meydana gelen birçok farklı jeolojik olaya işaret etmektedir. Ay'ın jeolojisini anlamak, güneş sistemimizin ve içindeki gezegenlerin oluşumu ve evrimi hakkında bilgi edinmemize yardımcı olabilecektir. Ay yüzeyini şekillendiren üç ana jeolojik süreç; çarpmalar, volkanizma ve tektonik faaliyetlerdir. Ayın hem görünen yüzü hem de arka yüzü, Güneş Sistemi'ndeki bilinen en büyük çarpma yapısı olan Ay yüzeyindeki Güney Kutbu-Aitken Havzası dahil olmak üzere büyük çarpma havzalarını barındırmaktadır. Ay yüzeyinde bulunan bu havza, Güney Kutbu'ndan uzak güney enlemlerine kadar uzanmaktadır [1].

Ay, çeşitli büyüklüklerde asteroit ve kuyruklu yıldız gibi cisimlerin çarpmalarına maruz kalmıştır. Bu çarpışmaların hızları bazı durumlarda 30 km/sn'yi geçmektedir. Bu olaylar, çapları mikrometrelerden 2500 km'ye kadar değişen çarpma kraterleri oluşturmuştur [1,2]. Bir kraterin şekli (morfolojisi) üç faktöre bağlıdır:

1. Belirli kraterin büyüklüğü.
2. Yüzeyin reolojik özellikleri (akma davranışı).
3. Aşınma ve bozunma süreçleri.

Yüksek çözünürlüklü ay keşif yörünge aracı kamerası, Ay'ın 100 m/piksel ölçeğinde küresel olarak görüntülenmesini sağlayan bir cihazdır. Bu kamera, 50 km'lik bir yörüngeden 57 km'lik bir alanda yedi renk bandı (321, 360, 415, 566, 604, 643 ve 689 nm) ve monokrom modda 105 km'lik bir alan yakalayan bir push-frame kameradır. Bu kamera yardımıyla elde edilen görüntüler, farklı aydınlatma koşulları altında küresel haritalar oluşturmak için mozaiklenmekte ve bu sayede daha önce görülmemiş bir ayrıntı seviyesinde ay kraterlerinin incelenmesi sağlanmaktadır [3]. Yatay ve düşeyde 0,5 m/pixel çözünürlükte elde edilen bu görüntülerden yola çıkarak, çarpma kraterlerinin morfolojisi hakkında bilgiler elde edilmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde çarpma enerjisinin artması ve buna bağlı olarak krater boyutlarının büyümesiyle kraterlerin morfolojilerinin de karmaşıklaştığı belirlenmiştir [3]. Karmaşık kraterler aşağıdaki özelliklerle tanımlanmaktadır:

1. Düz tabanlar ve basit kraterlere kıyasla daha düşük derinlik ve çapa sahiptir [3].
2. Duvar terasları.
3. Merkezi yükseltiler.
4. İyi gelişmiş sürekli ve süreksiz ejecta (fırlatma materyali).
5. Krater içerisinde biriken ve dışarı püskürtülen katılaşmış çarpma eriyiği (Şekil 1).

Bilinen en küçük krater formları, Ay kaya örneklerinde bulunan mikrokraterlerdir. Line ve Taruntius H kraterleri basit, kâse şeklindeki krater tipine örnektir [1,3]. Euler, Tycho ve Gassendi kraterleri ise karmaşık krater tipini temsil etmektedir. Schrödinger Ori-entale ise çok halka içeren çanak yapısı sergilemektedir. Oriental kraterinin halka çapı 930 km' dir. [1,3].

Basit kraterlere benzer şekilde, karmaşık kraterler de krater kenarlarının kısmen aşınmasına ve daha sonraki bazaltik lav malzemesi birikintileriyle kısmen veya tamamen dolmasına neden olan yüzey yenileme süreçlerine maruz kalmıştır [1,2,4,5].

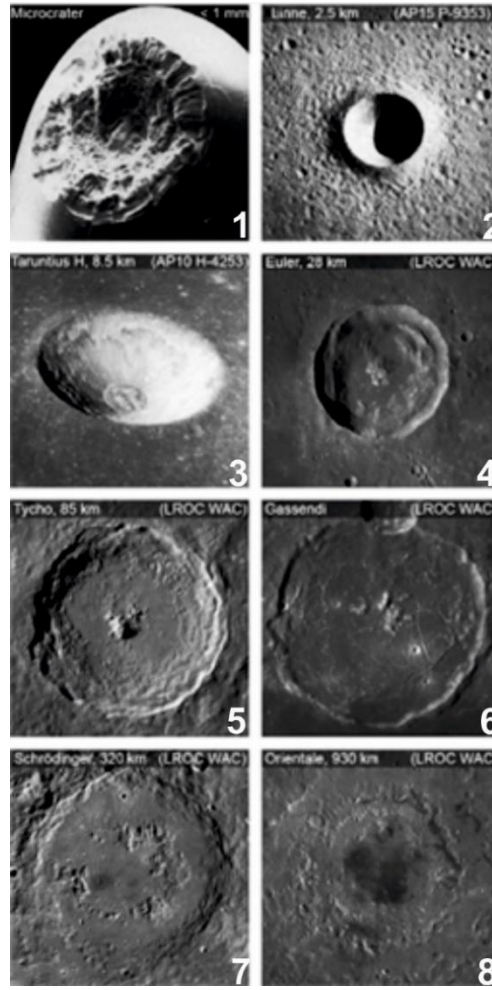
Bir milyar yıldan daha genç olan kraterler genellikle parlak, radyal ejecta ışınlarını korumaktadır. Bu ışınlar, büyük kraterlerde (çapı onlarca kilometre) Ay yüzeyinde birkaç yüz kilometreye kadar uzanmaktadır. Çok halkalı kraterler, Ay yüzeyindeki en eski arazi şekillerini temsil etmektedir ve Ay tarihinin ilk 800 milyon yılında meydana gelen büyük çarpma olayları ile oluşmuştur. Dünya'nın

aksine, Ay levha hareketlerinden yoksundur ve bu sayede erken dönem volkanik geçmişine ait kanıtlar korunmuştur. Ay'daki bazaltlar, Ay'ın görünen yüzünde yoğun olup, çoğunlukla alçakta bulunan krater havzası dolgusunun iç kısmında bulunmakta ve toplam ay yüzeyinin %17'sini kaplamakta, bu da ay kabuk hacminin %1'ine denk gelmektedir [1,2,6,7]. Ay denizlerindeki volkanik kökenli jeomorfoloji lav akıntıları, kıvrımlı vadiler, volkanik kubbeler ve konileri, piroklastik birikintileri içermektedir.

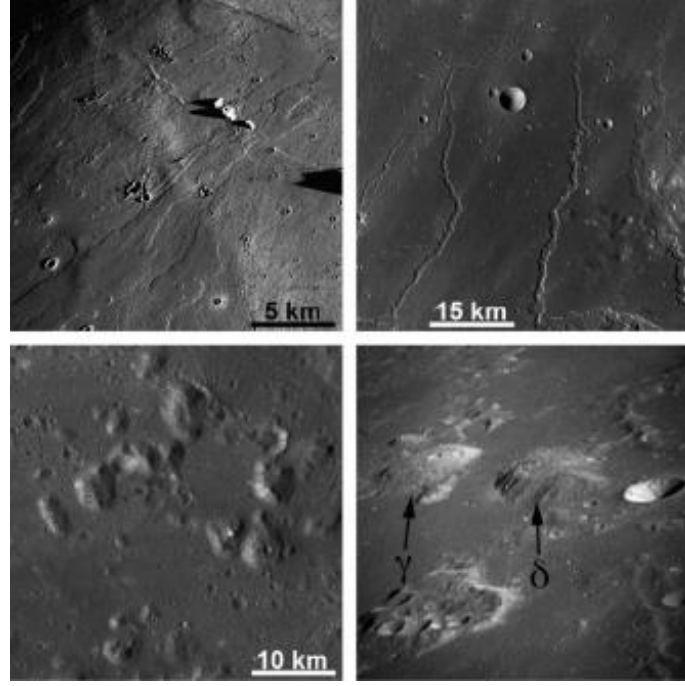
Düşük viskoziteli, yüksek sıcaklıklı bazaltik lavlar, topografik olarak alçakta bulunan krater havzası iç kısımlarında püskürmüş ve geniş alanları yeniden şekillendirmiştir. Bu oluşumlar Ay'ın görünen yüzünün yaklaşık %30'unu kaplamaktadır (Şekil 2).

U ve Th gibi radyoaktif elementlerin neden olduğu ısınma, 60-500 kilometre derinliklerde ultramafik manto maddesinin kısmi erimelerine yol açarak bazaltik bileşimli magma üretmiştir. Devasa havza oluşturan çarpmalar, görünen yüzünde, düşük yoğunluklu üst kabuk malzemelerini sıyrarak, yoğun bazaltik magmaların yüzeye yükselmesine izin vermiştir [1,8].

Yüksek çözünürlüklü kamera görüntüleri sayesinde, deniz yüzeylerindeki bazalt katmanları detaylı bir şekilde incelenebilmektedir. Birçok deniz bölgesinde, yüzeyde 100-150 metre çaplarında çukur veya delikler tespit edilmiştir [1,9,10].

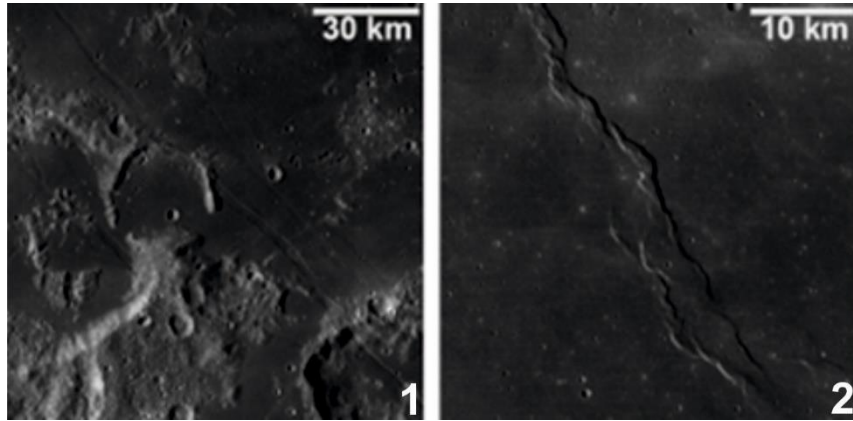


Şekil 1. Farklı ölçeklerde Ay kraterleri: 1. Microcrater, 2. Linne, 3. Tarantius, 4. Euler, 5. Tycho, 6. Gassendi, 7. Schrödinger, 8. Orientale [1]



Şekil 2. Apollo 15 metrik kamera ile Ay'dan alınan volkanik izler [1]

Ay'ın tektonik özellikleri hem çarpma olaylarına hem de volkanizmaya bağlıdır ve fay, graben, dayk ve kırışık sırtlar gibi genişleme ve sıkışma özellikleriyle kendini göstermektedir (Şekil 3).



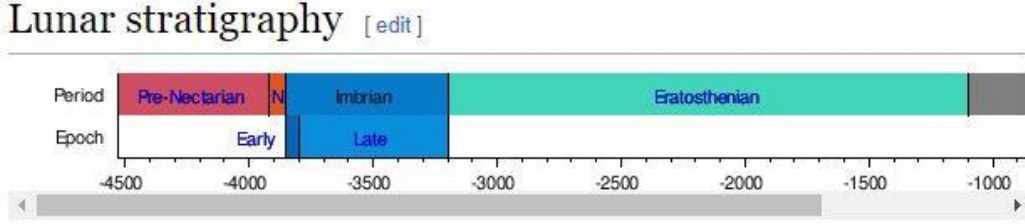
Şekil 3. Ay'daki tektonik yapılar: 1. Genişleme grabeni yapısı, 2. Sırt yapısı [1].

Yeryüzü ile karşılaştırıldığında Ay'da tektonik gerilmelerden kaynaklanan arazi şekilleri daha az yaygındır. Ay, hareketsiz örtülü gezegensel bir cisim olarak adlandırılmaktadır [1,2,11,12]. Bu hareketsiz örtü, büyük ölçekli bir magmanın katılaşmasıyla Ay tarihine göre erken dönemde oluşan düşük yoğunluğa sahip bir kabuktan ibarettir. Ay, iç ısısının çoğunu, hareketsiz konveksiyon akımlarıyla birlikte kaybetmiştir [1,12]. Ay'daki tektonik özellikler çoğunlukla; çarpma kaynaklı gerilmeye ve çarpma havzaları içindeki bazaltik malzemelerin yükünden kaynaklanan gerilmeye bağlanmaktadır [1,2].

Güneş-Ay kütle çekim etkileşiminin yarattığı gelgit etkileri, Apollo sismometreleri tarafından kaydedilen günümüz Ay depremlerinin ana kaynağını oluşturmaktadır. Gelgit gerilmesinden kaynaklanan deformasyon, Ay Dünya'ya daha yakinken, daha yoğun olmuştur. Ay yüzeyinde haritalanan çizgisel yapıların uzamsal dağılımı hem yakın hem de uzak yüzlerde benzerdir ve gelgit kuvvetlerinin neden olduğu çöküntü kaynaklı bir oluşumu desteklememektedir [1,13].

Yapılan bir çalışmada Ay ortamında 400 yılda yalnızca bir kez 4,5' ten büyük sığ bir depremin olabileceği tahmin edilmiştir. Ay'da oluşan depremlerin çoğu, termal döngülerin neden olduğu büzülmenin oluşturduğu çatlama, yeraltı magmalarında patlama veya 20-70 km/s hıza ulaşabilen meteorit etkilerinden kaynaklanmaktadır [14,15].

Yapılan çalışmalar sonucunda Ay'ın stratigrafik olarak beş döneme ayrıldığı belirlenmiştir. Bu dönemler sırasıyla; Pre-Nectarian (4.1-3.9) milyar yıl, Nectarian (3.9-3.8) milyar yıl, Imbrian (3.8-3.1) milyar yıl, Eratosthenian (3.1-1.0) milyar yıl, Copernican (1.0-günümüz) şeklindedir [1,6,16]. Imbrian dönemi, erken ve geç Imbrian olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu ayırım, erken Imbrian döneminin sonunda oluşan Oreintale Havzası'nın oluşumuna dayanmaktadır. Oreintale olayının tarihini kesin olarak belirleyen kaya örnekleri olmadığı için, bu ayırım stratigrafik olarak ve krater sıklığına göre yapılmaktadır. Bununla birlikte, belirli bir kaya örneğine kesin bir yaş atamada tek bir çözüm olmadığı için, bu dönemlerin ve çağların sınırları araştırmacılar arasında farklılık göstermekte, her bir kaya örneğinden farklı yaş dağılımları elde edilmektedir [1,6,16]. Bazı araştırmacılar, havza oluşturan bir olayı kaya örneğinde temsil edilen en genç yaş ile ilişkilendirmeyi tercih ederken, diğerleri ise havza oluşma yaşı olarak "tepe noktasını" (en sık görülen yaş) tercih etmektedirler [1,17]. Imberian Havzası ve ona dayanan zaman sınırlarının oldukça değişken olduğunu savunan araştırmacılar, Nectaris Havzası'nın muhtemelen örneklerle tarihlendirilmediğini öne sürmektedir [1,18] (Şekil 4).

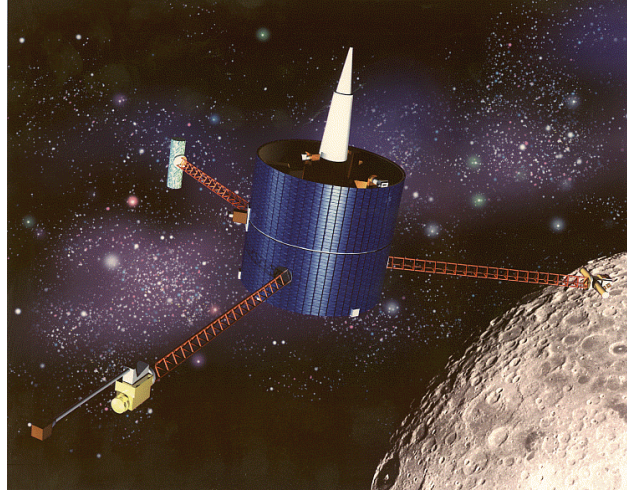


Şekil 4. Ay stratigrafisi [19]

Uzay şirketleri, kaynak çıkarma, işleme, ticari ürünlere dönüştürme ve bu ürünleri uzayda, Dünyada ve hatta daha ötelede dağıtmak için Ay ve asteroit madenciliği lokasyonları kurmak ve işletmek için aktif olarak çalışmaktadır. 45 yıl önce, Apollo insanlı Ay görevleri Dünya'ya kaya ve regolit (Ay toprağı) getirmiştir. Yapılan çalışmalar ve analizler, Ay'ın değerli mineraller ve kaynaklar içerdiğini ortaya koymuştur. Bu mineraller büyük ölçüde milyarlarca yıl boyunca gerçekleşen meteor ve asteroit çarpmalarının sonucu oluşan mineral açısından zengin regolit'i oluşturmuştur. Benzer şekilde Dünya'da da milyarlarca yıl boyunca, özellikle Güneş sisteminin oluşumunun erken dönemlerinde bu tür çarpışmalar yaşanmıştır. Ancak Dünya'da rüzgar, su ve bitki örtüsü bu çarpışmaların çoğunun izlerini silmiştir. Ay'da ise aşınma yalnızca sonraki çarpışmalar ve Güneş rüzgarı ile gerçekleşmektedir [20]. Ay'ın hem insanlı hem de insansız görevlerinden elde edilen sonuçlar, Ay'da Helyum-3, nadir toprak elementleri, platin ve diğer değerli metaller gibi birçok kaynağın varlığını göstermektedir. Bu kaynaklara ek olarak, su buzunu da bulunmaktadır. Kısa ve orta vadede, en umut verici kaynaklar, yakıt olarak kullanılacak hidrojen ve oksijen için gerekli olan (buz) kaynaklarıdır. Ay'ın dünyaya göre düşük yerçekimi ve Dünya ile Ay arasındaki çeşitli yörüngelerde ve ötesinde yaşam destek sistemleri için su ve oksijen açısından yeni ekonomik fırsatlar yaratmaktadır [20].

Uzay'da, yakıt olarak kullanılacak hidrojen ve oksijen ihtiyacı halihazırda mevcuttur. Planlanan hem insanlı hem de insansız görevlerin sayısı, potansiyel ihtiyacın tahmin edilmesine izin vermektedir. NASA ve uluslararası ortakların Mars'a ve ötesine yolculukları sırasında, yakıt ikmal noktalarında araçların yakıtlanması uygulanabilir ve sürdürülebilir bir keşif programı oluşturmada çok önemli olacaktır [20].

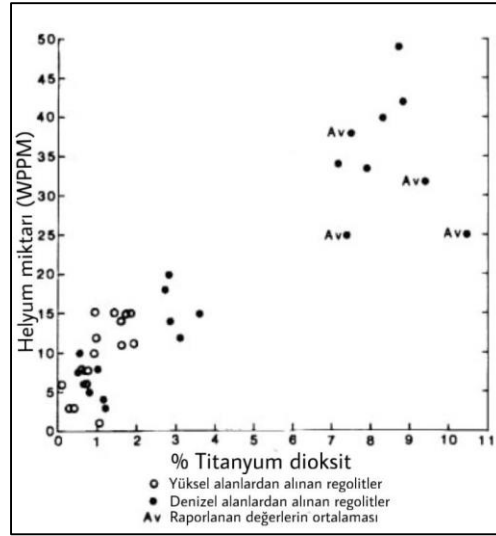
Ay'da buz varlığını tahmin etmek için birkaç keşif görevi gerçekleştirilmiştir. Bunlardan en önemlileri Celestine ve Lunar Prospector görevleridir. 25 Ocak 1994'te fırlatılan Celestine aracının görevi, askeri uydular ve balistik füzeler için geliştirilen yeni kızılötesi sensörleri, jiroskop lazerlerini, fiber optik sistemlerini ve yüksek kapasiteli katı hal hafızasını test etmek olarak planlanmıştır. Araç, Lazer radar (LIDAR) ve ultraviyole, görünür ve kızılötesi ışıkta çalışan dört kamera ile günde 25.000 görüntü olmak üzere toplamda bir milyondan fazla görüntü elde etmiştir. Bu görüntüler birleştirilerek kutup bölgeleri için 40 metreye düşen çözünürlükle 100 ila 200 metre arasında değişen bir çözünürlüğe sahip eksiksiz bir Ay atlası oluşturulmuştur. Celestine'in verilerine göre, 2 buz içeren regolit, Ay'daki Kuzey Kutbu'na doğru 530 km, Güney Kutbu'na doğru ise 6360 km uzanmaktadır [21]. Ay'daki keşifler, 1998 yılında Lunar Prospector aracının fırlatılmasıyla devam etmiştir (Şekil 5). Bu aracın gönderdiği verilere göre Ay'daki su kaynağının tahmini olarak 300 milyon ton olduğu düşünülmektedir ki bu rakam daha önce düşünülen miktarın yaklaşık 100 katıdır. Madencilik ve yakıt üretim tesislerine yatırım yapmadan önce buzun varlığını doğrulamak ve madencilik ve geri kazanım teknolojilerini test etmek gerekmektedir [21].



Şekil 5. Ay Araştırmacısı [22].

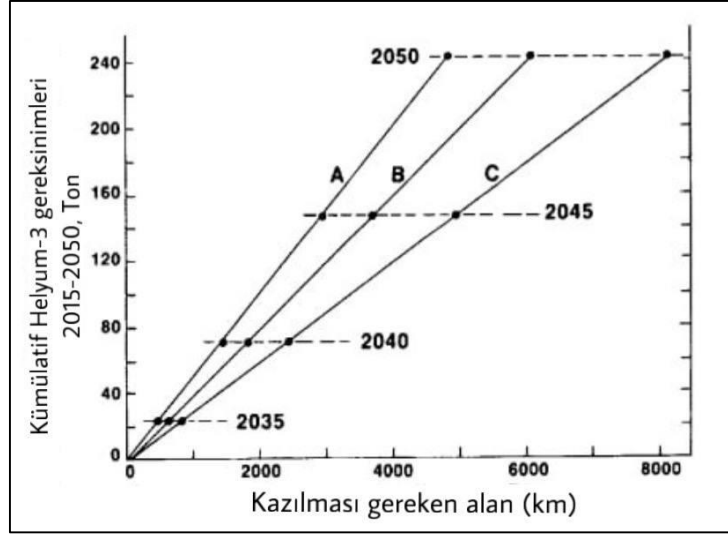
Ay'dan alınan regolitlerin içerisindeki helyum (He) miktarı ve titanyum dioksit (TiO_2) miktarı incelenmiştir ve grafikleri çizilmiştir [23] (Şekil 6). İncelemeler sonucunda regolitlerin içerdiği element miktarının değişiklik gösterdiği gözlenmiştir.

Yüksek alanlardan alınan regolitlerin hem helyum hem de titanyum dioksit içerikleri düşük olduğu saptanmıştır. Deniz alanlarından alınan regolitler ise iki gruba ayrılmıştır: Birinci grup regolitlerin hem helyum hem de titanyum dioksit açısından zengin oldukları, ikinci gruptakilerin ise her iki element bakımından fakir olduğu belirlenmiştir. Birinci gruptakilerin volkanik patlamalar sonucu oluşan bazaltik kayalardan türediği, He ve TiO_2 bakımından zengin magmanın bu patlamalarla yüzeye çıkarak regoliti oluşturduğu saptanmıştır. Araştırmacılar, İkinci gruptakilerin ise daha eski ve aşınmış bazaltik kayalardan türediğini, bu aşınmanın, He ve TiO_2 'nin kaybolmasına neden olduğunu belirlemişlerdir [23].



Şekil 6. Ay'da helyum ve titanyum dioksit dağılımı [23].

Wisconsin Üniversitesi araştırma grubu, 2015-2050 yılları arasında gerekli Helyum-3 miktarını karşılamak için bir madencilik senaryosu öngörmüştür [23]. Bu senaryoda; 3 metre kazma derinliği, ortalama 30 ppm He-3 içeriği ve %100 He-3 geri kazanımı varsayılmıştır (Şekil 7). A çizgisi, bu varsayımlara göre He-3 ihtiyacını karşılamak için kazılması gerek alanın (kilometrekare) cinsinden zaman içerisindeki değişimini gösterdiğini, B çizgisinin ise, kazma ve işleme sırasında geri kazanım oranı %80 olduğunda kazılması gereken alanı temsil ettiğini belirlemişlerdir. Daha gerçekçi olduğu düşünülen %60 geri kazanım oranı için gerekli alan ise C çizgisi ile gösterilmiştir. Eğer geri kazanım oranı %10 olursa, 2030 yılına kadar 123 km², 2050 yılına kadar ise yıllık 20.000 kg He-3 üretimi sağlanacak toplam 8110 km² alan kazılması gerekecektir. Bu senaryoda 2050 yılından sonra her yıl yaklaşık 665 km² alanın kazılması gerekecektir. Bu veriler, He-3 ihtiyacını karşılamak için geniş alanlarının kazılmasının zorunlu olduğunu göstermektedir [23].



Şekil 7. (2015-2050) yılları arasındaki Helyum-3 miktarını karşılanması grafiği [23].

Ay'da He ve TiO_2 'nin yanı sıra birçok başka madenler de bulunmaktadır. Bunlar:

Metaller: Demir (Fe), Magnezyum (Mg), Alüminyum (Al), Kalsiyum (Ca), Sodyum (Na), Potasyum (K).

Oksitler: Silisyum dioksit (SiO_2), Alüminyum dioksit (AlO_2), Demir oksit (FeO), Magnezyum oksit, (MgO), Kalsiyum Oksit (CaO).

Nadir Toprak Elementleri (NTE): Samaryum (Sm), Neodimyum (Nd), Seryum (Ce).

Mineraller: Plajiyoklaz, Piroksen, Olivin, İlmenit, Apatit şeklinde sıralanabilir [24].

2.1. Ay'da Madencilik Yapmanın Zorlukları

Ay'da madencilik yapmak, Dünya'dan madencilik yapmaktan çok daha zorlayıcı ve karmaşık bir süreçtir. Bunun başlıca nedenleri şunlardır:

1) Uzaklık ve Zorlu Çevre: Ay, Dünyadan 384.400 kilometre uzaklıktadır. Bu durum, madencilik ekipmanlarının ve personelinin taşınmasını ve iletişim kurulmasını zorlaştırmaktadır. Ay'da atmosfer ve sıvı su bulunmamaktadır. Gündüzleri aşırı sıcaklıklar, geceleri ise aşırı soğuklar hakimdir. Bu durum, madencilik faaliyetleri için özel olarak tasarlanmış ekipmanlar ve barınma tesisleri gerektirmektedir. Aynı zamanda, Ay'da radyasyon seviyesi Dünya'dakinden çok daha yüksek olduğundan, madencilerin sağlığı için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır [25].

2) Jeolojik Zorluklar: Ay toprağı (regolit), Dünyadaki topraktan çok daha ince ve tozlu olduğundan geleneksel madencilik ekipmanlarının ve tekniklerinin kullanılması zordur. Öte yandan Ay'daki mineraller, Dünya'daki minerallerden daha farklı dağılım gösterdiklerinden, değerli madenlerin bulunmasını ve çıkarılması daha zordur [25].

3) Teknolojik Zorluklar: Ay'da madencilik yapmak için yeni ve özel teknolojiler geliştirilmesi gerekmektedir. Bu teknolojiler, zorlu çevre koşullarına dayanıklı olmalı ve uzaktan kumanda ile çalıştırılabilir olmalıdır. Aynı zamanda, Ay'dan çıkarılan madenlerin Dünya'ya taşınması için de yeni ve güvenilir taşıma yöntemleri geliştirilmesi gerekmektedir [25].

4) Ekonomik Zorluklar: Ay'da madencilik yapmak, Dünya'da madencilik yapmaktan çok daha pahalıdır. Yüksek taşıma ve altyapı maliyetleri, madencilik faaliyetlerinin karlılığını düşürmektedir. Aynı zamanda, çıkarılacak madenlerin pazarlanması da bir sorundur. Bu madenlerin Dünya'da kullanılacak ticari bir değeri olması gerekmektedir [25].

5) Yasal ve Etik Zorluklar: Ay'ın mülkiyeti ve kaynaklarının kullanımı ile ilgili uluslararası bir anlaşma bulunmamaktadır. Bu durum, madencilik faaliyetlerinin yasal çerçevesini belirsizleştirmektedir. Ay'da madencilik yapmanın çevresel ve etik etkileri de tartışılmaktadır [25].

Sonuç olarak, Ay'da madencilik yapmak birçok zorluk ve risk içeren bir girişimdir. Bu zorlukların üstesinden gelinmesi için önemli bir teknolojik ve ekonomik yatırım gerekmektedir. Ayrıca, Ay'ın mülkiyeti ve kaynaklarının kullanımı ile ilgili yasal ve etik çerçeve de netleştirilmelidir [25].

3. MARS'TA MADENCİLİK

Mars'ın jeolojisi, Dünya'dan birçok benzerlik ve farklılık göstermektedir. Her iki gezegen de katmanlı bir yapıya sahip olsalar da Mars'ın kabuğu Dünya'dakinden daha incedir. Mars'ın jeolojik geçmişi de Dünya'ninkine benzer şekilde volkanik aktivite, tektonik hareketler ve meteor çarpışmaları ile şekillenmiştir [26]. Genel olarak Mars'taki kraterlere baktığımızda, güneş sistemindeki diğer gezegenlere kıyasla oldukça zengin olduğu göze çarpmaktadır. Tahminlere göre, çapı bir kilometreyi aşan 43,000'den fazla krater Mars yüzeyini kaplamaktadır. Bu kraterler, Mars'ın jeolojik geçmişi hakkında bilgi edinmek için önemli bir kaynak oluşturmaktadır [26].

Bilim insanları, kraterlerin boyutlarını, şekillerini ve kompozisyonlarını inceleyerek Mars'a çarpan göktaşlarının ve kuyruklu yıldızların boyutlarını, hızlarını ve yörüngelerini tahmin edebilmektedirler [26].

Mars'taki en büyük kraterlerden bazıları şunlardır (Şekil 8):

1.Utopia Krateri: 3,300 kilometre çapa sahip bu krater, Mars ve Güneş Sisteminde bulunan en büyük çarpışma krateridir.

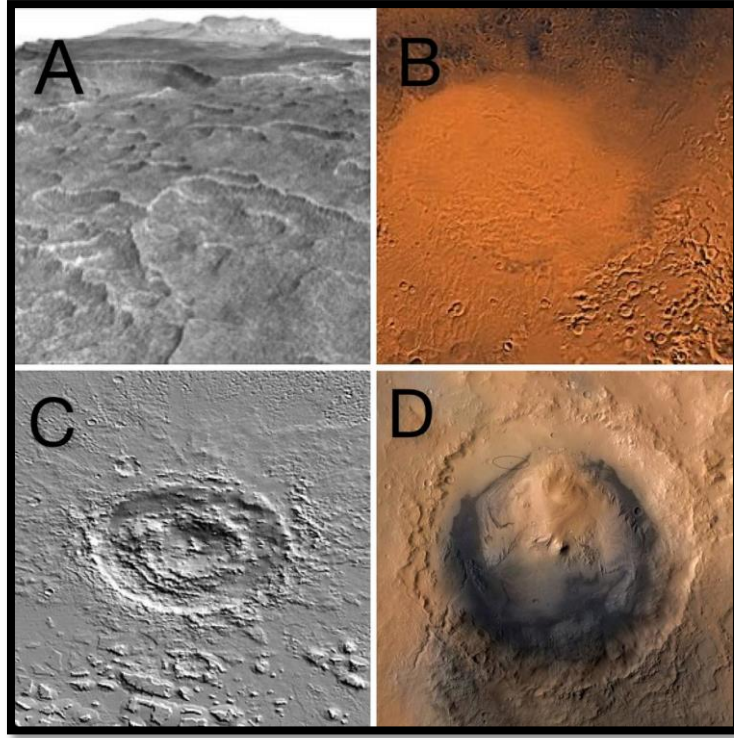
2.Hellas Krateri: 2,300 kilometre genişliğinde ve sekiz kilometre derinliğinde olan bu dev krater, yaklaşık 4,1-3,8 milyar yıl önce büyük bir asteroidin Mars yüzeyine çarpışmasıyla oluştuğu düşünülmektedir.

3.Agyra Krateri: 1,700 kilometre genişliğinde ve 5 kilometre derinlikte Güneş Sistemi'nin erken dönemlerinde büyük bombardıman sonucu oluştuğu düşünülmektedir.

4.Gale Krateri: 154 kilometre genişliğinde ve beş kilometre derinliğinde olan bu kraterin muhtemelen kuru bir göl olduğu, yaklaşık 3.8-3.5 milyar yıl önce oluştuğu tahmin edilmektedir (science.nasa.gov).

Yoğun kraterler, büyük ihtimalle gezegenin en eski yüzeylerini oluşturmaktadır. İlk bakışta bu arazi, Ay'ın yüksek kesimlerindeki kraterlere benzese de daha yakından incelendiğinde, Mars'ın yüksek kesimlerindeki kraterlerin, Ay'dakilerden çok daha farklı ve karmaşık olduğu anlaşılmaktadır [22]. Marine 6 ve 7 görevlerinde görev alan araştırmacılar, kraterlerin hem morfolojisi hem de sayısı açısından iki moda sahip olduğunu tespit etmişlerdir [27,28]. Beş kilometreden büyük kraterlerin nispeten düşük kenarlara sahip ve sığ olma eğiliminde olduğunu, daha küçük kraterlerin ise genellikle çanak şeklinde olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 9).

2021 yılında Mars'ın kraterleri hakkında yapılan araştırmalara göre, Mars yüzeyindeki kraterler 1. Ejekta örtülerinin sürekli olduğu ve kıvrımlı uçlara sahip olanlar [29,30,31], 2. Ana krater çarpışmasına bağlı oluşanlar (LERS), 3. Düşük boyutlu katmanlı ejekta (LARLE)' lar olarak sınıflandırılmışlardır. LERS kraterleri ayrıca standart sınıflamaya göre, tek (SLERS), çift (DLERS) ve çoklu ejekta katmanı (MLERS) olmak üzere alt sınıflara ayrılmıştır [29,30].



Şekil 8. Mars'ta bulunan büyük kraterler: A) Utopia Krateri. B) Hella Krateri. C) Agyra Krateri. D) Gale Krateri [22]

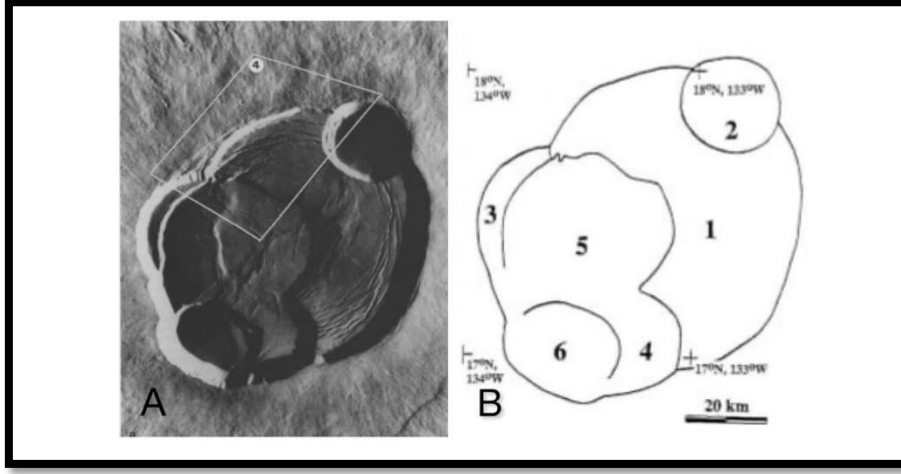


Şekil 9. Mars yüzeyindeki eski kraterler [27]

Mars'ın gelişiminde volkanik aktivitenin önemli bir rol oynadığı biliniyorsa da bu aktivite zaman ve mekânsal olarak düzensiz bir şekilde gerçekleşmiştir. Volkanik faaliyetin izleri neredeyse gezegenin tamamında görülse de bu volkanik yapıların üzerinde bulunan kraterlerin boyut ve sıklık dağılımı farklı bölgelerde önemli ölçüde değişmektedir. Bu da volkanizmanın zamana yayılışının eşit olmadığını düşündürmektedir [32,33,34,35,36,37,38].

Mars'taki çok genç yüzeyler sadece Tharsis ve Elysium olmak üzere iki büyük volkanik bölgede görülmektedir. Bu durum, zaman geçtikçe volkanik aktivitenin bu iki bölgede yaygınlaştığını göstermektedir. Bu bölgeler, sayısız genç lav akıntısının ortaya çıktığı çok sayıda volkanik baca içermektedir. Bu durum özellikle Mars'ın geçmişinin sonlarında viskozitesi düşük volkanizmanın baskın olduğunu göstermektedir [5,32,39].

Mars'ta Tharsis bölgesinde bulunan Olympus Mons, Güneş Sisteminde bulunan en büyük volkanik yapıdır. Bu yanardağın taban çapı 600 kilometreden fazla olup, çevresindeki ovalardan 26 kilometreden yükseğe çıkmaktadır. Bazı yerlerde yüksekliği altı kilometreyi aşan bir eğime sahiptir [40,41]. 80x65 kilometre çapındaki yapı içerisinde, yanardağın geçmişte birçok çökme olayı geçirdiğini gösteren altı adet iç içe krater bulunmaktadır [40,41] (Şekil 10).



Şekil 10. A) Olympus Mons'un zirve kalderası. Altı iç içe geçmiş krater ve belirgin kırışık sırtlar ve grabenler bulunmaktadır. B) Mougini-Mark tarafından tasarlanmış kroki harita. 1 en eski ve 6 en genç [40]

Olympus Mons'un tabanını çevreleyen belirgin dik yamaç, belki de en şaşırtıcı özelliğidir. Çünkü yer üstü karasal volkanlarda buna benzer bir yapı görülmemektedir. Ancak yamaç, su altındaki volkanik yapılara benzerlik göstermektedir. Bu benzerlik;

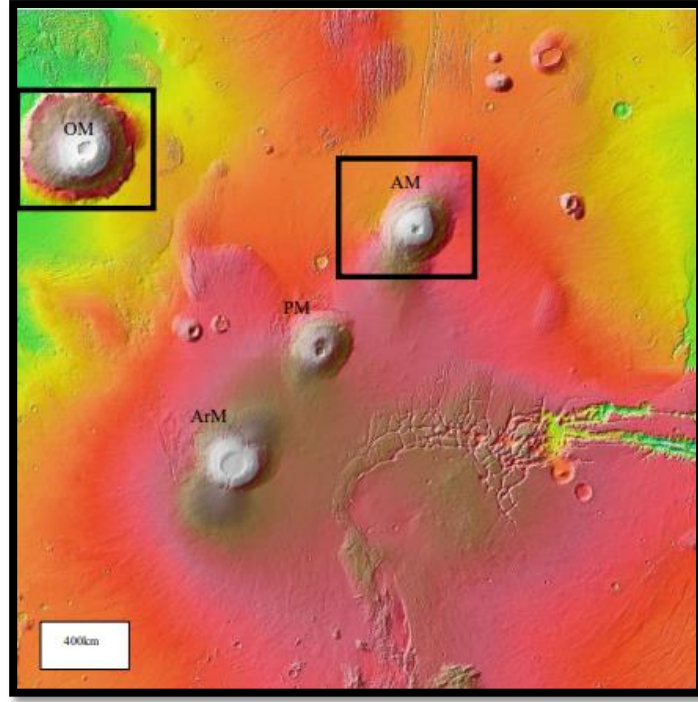
1. Püskürmeler başladığında Olympus Mons civarında buzun var olduğunu,
2. Havalandırma deliği veya deliklerin sonunda buzun üstünde yüzeye çıktığını ve
3. Devasa yerüstü kalkanının buzul ile sınırlı platformun üzerine yerleştirildiğini düşündürmektedir.

Volkanik yamaçın üzerinden aşağı doğru akan lav akıntıları, Olympus Mons'un buzulların çekildiğinden çok daha sonra büyümeye devam ettiğini göstermektedir. Bu akıntılar, yamaçın kalkanın (Olympus Mons) son dönem büyümesi sırasında var olduğunu ve sadece volkan sonrası bir aşınma ürünü olmadığını kanıtlamaktadır. İzlanda'da da benzer bir durum görülür [42].

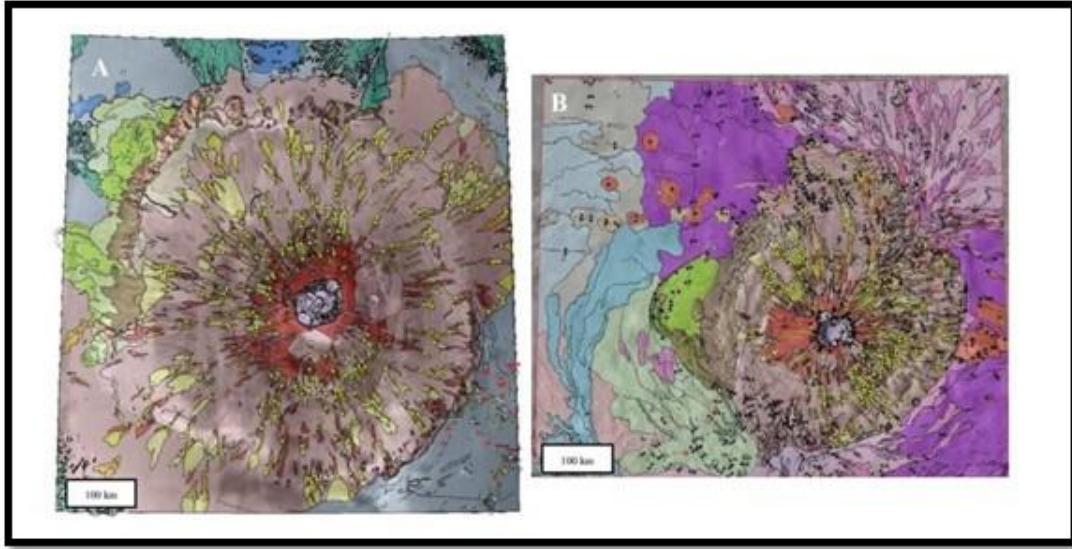
Olympus Mons'un etrafındaki çukurlukta bulunan lav ovaları, tipik olarak düşük eğimli olup ($<0,5^\circ$) ve onlarca-yüzlerce kilometre uzunluğunda kıvrımlı, birbirine paralel sayısız lav akıntısıyla karakterize edilmektedir. Bu akıntılar, havzanın güneydoğu ve güneyinde belirgindir (Şekil 11).

2019 yılında MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) kullanarak, Mars'ın Tharsis bölgesinde bulunan Olympus Mons (OM) ve Arscaeus Mons (AM) isimli iki büyük yanardağ yakın zamanda 1:1.000.000 ölçekli yüksek çözünürlüklü haritalanmıştır (Şekil 12). Olympus ve Arscaeus Mons yanlarında daha eski akışları kesen yan kanal akışları ile karakterize edilmektedir. Bu durum, lavın akışkanlığının (viskozitesi) azaldığını göstermektedir. Ayrıca, her iki yanardağ, ani bir eğim değişikliği ile yelpaze biçimli akışlardır [43].

Olympus Mons ve Arscaeus Mons volkanlarında, daha az viskoz lav akıntılarının yerini daha viskoz akıntılara bıraktığını gösteren ilginç bir durum söz konusudur. Bu durum, yan kanal akıntılarının daha eski yan sırt akıntılarını örtmesiyle anlaşılmaktadır. Bu akışkanlık değişiminin kanıtı, her iki volkanın yamaçlarında bulunan lav fanlarıdır. Bu yapılar, eğimin aniden değiştiği yerlerde tüp beslemeli akıntılar veya püskürtme noktalarının lavı delta biçiminde dışarı atmasıyla oluşan yelpaze benzeri yapılardır. Genellikle yan basamaklarda (volkan tabanına doğru eğimde ani kırılmalar) bulunan bu yapılar, hafif dışbükey bir topografik profile sahiptir [43].



Şekil 11. MOLA fotoğrafı, Olympus Mons ve Ascaeus Mons yanardağları [43]



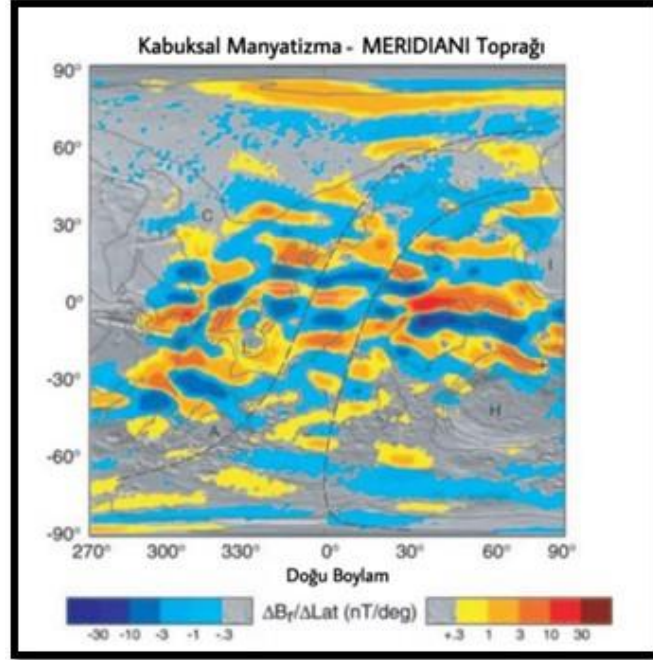
Şekil 12. A) 1:1M ölçekli Olympus Mons yanardağı. B) 1:1M Ascaeus Mons yanardağı. Yeşil nokta ise hava kanallarıdır [43]

Mars'ın volkanik aktivitesindeki patlama sayısının zamanla azalmasının, gezegenin atmosferi üzerinde doğrudan bir etkisi olmuştur [32,44]. Volkanik gazların atmosfere salınımının azalması, küresel ölçekte iklimi etkilemiştir. Yüzey basıncı ve sıcaklık, Amazonian döneminde önemli ölçüde düşmüştür. Şu anki iklim, Mars yüzeyinde sıvı suyun varlığına izin vermemektedir. Fakat jeolojik ve mineralojik kanıtlar, Mars'ın Noachian döneminde çok daha nemli olduğuna işaret etmektedir [32,45]. Bu dönemde nemli iklimin nasıl oluştuğu hala tartışılmaktadır [32,46]. Ancak patlayıcı volkanizmadan kaynaklanan gaz salınımının bu konuda anahtar faktör olduğu konusunda bilim insanları hemfikirdir. Dolayısıyla, patlayıcı volkanizmanın azalması, Mars'ın tüm evrimini etkilemiştir [32].

Mars, orta büyüklükteki karasal gezegenler arasında geçmişi boyunca tektonik ve genel jeolojik aktiviteyi sürdürmüş ve bu sürecin izlerini yüzeydeki kayalar ve arazilerde muhafaza etmiştir [47]. Mars yüzeyinin yaklaşık %25'i, çapı yaklaşık 8.000 km ve yüksekliği 11 km olan dairesel bir kabarıklık tarafından kaplanmıştır. Tharsis bölgesi, muhteşem radyal kırık ve grabenlerden oluşan bir sistemdir. Bu radyal fay sistemi, en uç noktaları 10.000 km uzaklıkta olan kuzeydoğu ve güneybatı uzantılarında belirgindir [48].

Mars'ın tektonik tarihini araştıran bilim adamları beş aşama belirlemişlerdir: 1. Aşama, Noachian döneminde gerçekleşen tektonizmadır. Bu dönemde, Tharsis yükseltisinin yüksek kesimlerinde genişleyen faylanmalar ve çok sayıda radyal dayk kaynaklı hendek oluşumu gözlemlenmiştir. 2. Aşama, Geç Neochian ve Erken Hesperian döneminde genişleme tektoniği şeklinde olsa da bu aktivite büyük ölçüde Valles Marineris kanyonları ve Tharsis'in doğusuyla güneyiyle sınırlı kalmıştır. Hesperian döneminin 3. aşamasında Tharsis'in batısında dayk kaynaklı graben oluşumu devam etmiştir. 4. ve 5. aşama gerilme tektoniği ise ağırlıklı olarak Tharsis Montes ve yükselti üzerindeki diğer volkanik yapılarda gerçekleşmiştir. Tharsis'in batısında ise bu dönemde nispeten daha az aktivite gözlenmiştir [49].

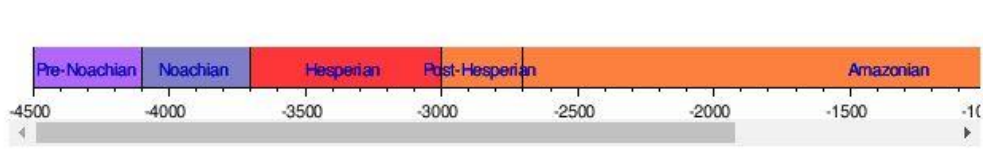
Daha önce görüntü veya topoğrafyada görülmemiş başka bir fay tipi, Meridiani'de manyetik konturların incelenmesiyle tespit edilmiştir (Şekil 13). Haritada kesikli iki çizgi, manyetik alan modelinin kaymış gibi görüldüğü iki fayın konumunu göstermektedir. Bu çizgiler, ortak bir dönüş eksenini boyunca bir yarıçap vektörünün dönüşü ile çizilmiştir. Bu dönüş eksenini, Hellas Havzasının hemen kuzeyinde 23°S ve 80,5°E konumlandırılmış bir kutup (artı işareti ile işaretlenmiş) tarafından tanımlanmıştır. Manyetik iz, haritanın yaklaşık 15°N ve 30°S arasında uzanan, iki kesikli çizgi arasında değişen polariteye sahip bir dizi doğu-batı eğilimli özellik gösterdiği 0° enlem ve 0° boylam civarında iyi korunmuştur. Fayların yakınında, 15°N ile 30°S enlem arasında geniş bir yerkaşığı kesiminde tutarlı fakat kusurlu bir desen devam etmektedir. Önerilen iki paralel büyük fayın arası yaklaşık 1.400 km'dir ve benzer bir manyetik alan deseni, doğu fayının her iki tarafında 2.700 km boyunca izlenebilmektedir [50].



Şekil 13. Meridiani'nin Manyetik Alan Haritası [50]

Mars'ın stratigrafisi, gezegenin oluşumundan günümüze kadar uzanan jeolojik olayların bir kaydını sunmakta ve bize Mars'ın geçmişindeki iklim, tektonik ve su aktivitesi hakkında bilgi vermektedir [22].

Mars'ın jeolojik tarihi Noachian, Hesperian ve Amazonian olmak üzere üç ana döneme ayrılmıştır: Bu dönemler, jeolojik aktivitedeki değişikliklere ve yüzey şekillerindeki değişikliklere dayanarak tanımlanmıştır [51] (Şekil 14).

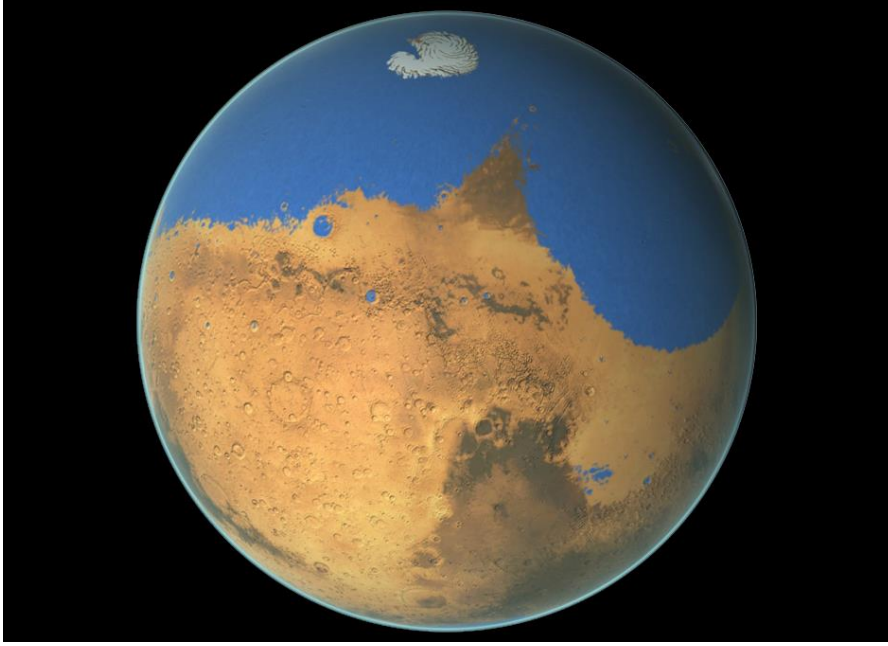


Şekil 14. Mars stratigrafisi [51]

1. Neochian Dönemi (4,5 milyar yıl önce- 3,5 milyar yıl önce): Bu dönem, Mars'ın oluşumundan sonraki ilk jeolojik dönemdir. Gezegen yüzeyinin büyük volkanik patlamalar ve meteor çarpmaları ile şekillendiği, Mars'ın aktif bir plaka tektoniğine sahip olduğu

ve bu plakaların hareketinin jeolojik aktiviteye katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Neochian Dönemi'nden Mars'a ait çok az jeolojik kayıt kalmıştır. Bu durum, bu dönemin jeolojisini tam olarak anlamak için zorluklar teşkil etmektedir [22].

2.Hesperian Dönemi (3,5 milyar yıl önce- 1 milyar yıl önce): Mars'ın jeolojik tarihinde büyük değişimlerin gerçekleştiği bir dönemdir. Bu dönemde, Mars'ın manyetik alanının zayıflaması ve atmosferinin büyük bir kısmının uzaya kaybolması gerçekleşmiştir. Bu durum, Mars'ın yüzeyinin radyasyona ve güneş rüzgarına daha fazla maruz kalmasına neden olmuştur. Hesperian Dönemi'nde Mars'ta suyun varlığına dair güçlü kanıtlar bulunmaktadır. Bu dönemde, Mars'ın yüzeyini büyük su kütlelerinin kapladığı ve akarsuların aktığı düşünülmektedir. Hesperian Dönemi'ne ait jeolojik kayıtlar, Neochian Dönemi'ne nazaran daha fazladır. Bu durum, bu dönemin jeolojisini daha iyi anlamamızı sağlamıştır (Şekil 15) [22].



Şekil 15. Hesperian Döneminde Mars'ın Şekli [52]

3.Amazonian Dönem (1 milyar yıl önce- günümüz): Mars'ın jeolojik tarihindeki en son dönemdir. Bu dönemde, Mars'ın jeolojik aktivitesi önemli ölçüde azalmıştır. Volkanik patlamalar ve meteor çarpmaları nadir hale gelmiş, Mars'ta suyun varlığına dair kanıtlar azalmıştır. Bu durum, Mars'ın yüzeyinin kuruduğunu ve soğuduğunu göstermektedir. Amazonian Dönemi'ne ait jeolojik kayıtlar, Neochian ve Hesperian Dönemleri'ne nazaran çok daha fazladır. Bu durum, bu dönemin jeolojisini en iyi anladığımız dönem olmasını sağlamıştır [22].

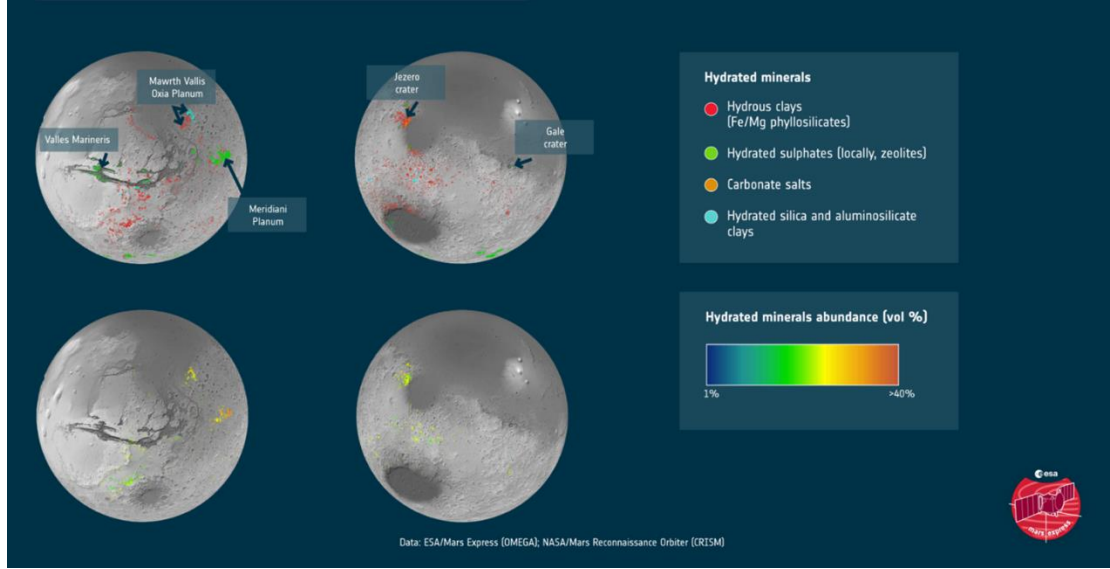
Mars, Dünya'ya en çok benzeyen gezegenlerden biri olarak kabul edilmekte ve bu nedenle uzun zamandır insanlığın ilgisini çekmektedir. Mars'ın jeolojik geçmişi ve mevcut durumu, gezegende çeşitli madenlerin bulunma potansiyeli olduğunu göstermektedir. Bu madenler, uzay araştırmaları ve potansiyel Mars yerleşimleri için önemli kaynaklar sağlayabilir. Mars'ta gelecekteki keşiflerin maliyetini düşürmek için Mars kaynaklarını kullanma girişimleri, "Yerinde Kaynak Kullanımı" veya kısaca İSKU olarak adlandırılmaktadır. Düşük Dünya yörüngesine bir kilogram malzemeyi göndermenin maliyeti 4.000 dolar iken, aynı malzemeyi Mars'a göndermek çok daha pahalıdır. Bu yüzden Mars kaynaklarını yerinde kullanmak kritik bir önem arz etmektedir [22].

Araştırmacılar, Mars yüzeyinden mineral toplama yöntemleri üzerinde çalışmaktadır. Bu mineraller, Mars'ta yaşayanları zararlı güneş radyasyonundan, aşırı soğuk gece sıcaklıklarından ve göktaşı bombardımanından koruyacak barınak altyapısı oluşturmada kullanılacaktır. Bu yenilikçi fikirler arasında Mars killerinden tuğla ve seramik üretimi, kuvars ve demir içermeyen opal kayaçlarından cam ve fiberglas elde edilmesi, perkloratlardan antifriz yapılması yer almaktadır [52].

Su buzu, içme suyu sağlamanın yanı sıra elektroliz ile elde edilen hidrojeni de sağlayabilir. Bu hidrojen, atmosferdeki CO₂ ile birleştirilerek yakıt veya 3 boyutlu yazıcılar için plastik haline getirilerek ekipman ve yedek parça üretiminde kullanılabilir. Kil hidratlar hem yakıt hem de su temin edebilir. Evaporit yataklarından elde edilen magnezyum, hidrojeni depolamak için magnezyum hidrid oluşturmada kullanılabilir. Zeolitler, pillerde enerji depolama ve Mars atmosferinden su çekmek için kullanılabilir. Nikel-demir göktaşlarından elde edilen nikel, metan ve etan yakıtlarının üretiminde katalizör olarak kullanılabilirken, cevherler ekipman

yapmak için metal haline getirilebilir. Nadir toprak elementleri (NTE) ise elektronik ve motorlar için magnetlerin yanı sıra ekranlarda ve LED ışıklarında fosfor olarak kullanılabilir. Nadir toprak elementlerinden toryum genellikle nükleer enerji kaynaklarını beslemek için kullanılabilir.[52].

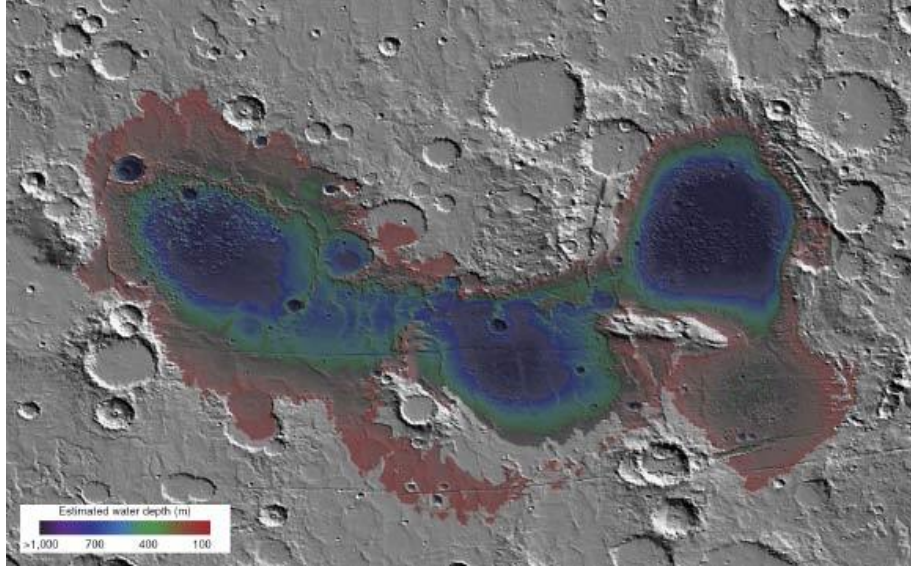
Mars'ta yerinde kaynakların keşfi devam ediyor olsa da potansiyel yaşam alanlarını bu kaynaklara yakın mesafelerde bulma görevi emekleme aşamasındadır. Kızıl Gezegen'in yüzey alanının Dünya'nın kara alanına neredeyse eşit olduğu düşünüldüğünde, gezici araçlar kullanarak bu kaynakları aramak bir samanlıkta iğne aramaya benzemektedir. Buna karşılık, Mars yörüngesinden yapılan uzaktan algılama, yüzeye ayak basmadan bu kaynakları bulmanın uygun maliyetli bir yoludur. Yörünge spektrometreleri Mars yüzeyinde 40'tan fazla mineral tespit etmiştir. Geçtiğimiz on yılda, NASA MRO CRISM görüntüleme spektrometresi, gelecekteki Mars keşifleri ve nihai olarak kolonileştirme için gerekli olan mineral yataklarının haritasını çıkarmak için kullanılacak gezegen çapında bir VSWIR-MIR (0,4 ila 4 μm) hiper spektral veri seti oluşturmuştur. Bu benzersiz veri seti, NASA Planetary Data System üzerinden erişilebilir olup, değişken spektral çözünürlüğe sahip 554 kanala kadar 17 x 17 m piksellik uzamsal çözünürlüğü kapsamaktadır. MRO CTX, Mars Express HRSC ve MRO HiRISE araçlarından elde edilen mevcut geniş bantlı görünür görüntü verileri, sırasıyla 6, 2 ve 0,5 m/piksele kadar uzamsal bağlam sağlayabilir. Bu veri setlerinin tümü, gelecekteki insan keşifleri ve Mars'ta nihai olarak kolonileştirme için gerekli altyapıyı inşa etmek için ihtiyaç duyulan mineral kaynaklarını bulmak için elverişlidir [52]. Mars keşif görevlerinden elde edilen veriler kullanılarak, Mars'taki hidratlı mineral yataklarının ilk detaylı küresel haritası oluşturulmuştur (Şekil 16). Çoğunlukla killer ve tuzlardan oluşan bu mineraller gezegenin farklı bölgelerindeki su geçmişi hakkında bilgi vermektedir. Killerin büyük bölümü Mars'ın erken nemli döneminde oluşmuşken, halen görülebilen tuzların çoğu suyun yavaş yavaş kuruması ile birlikte oluşmuştur [52].



Şekil 16. Mars'ta Bulunan Hidratlı Minerallerin Haritası [52]

Eridania havzasına ait (Güney Mars) harita Şekil 17'de verilmiştir. Haritada gösterilen devasa eski deniz tabanı hidrotermal birikintileri olasılık dahilindedir. Eğer bu doğrulanırsa, 3,7 milyar yıl önce var olan derin, uzun ömürlü bir deniz ve derin deniz hidrotermal ortamının kanıtı olacaktır. NASA'nın 2001 Mars Odyssey uzay aracı ve Avrupa Uzay Ajansı'nın (ESA) Mars Express uzay aracından yapılan gözlemler, ekvator bölgesinde Mars regolitinin şu anki su içeriğinin ağırlıkça %2-15 oranında olduğunu ortaya koymuştur. Bu yeni keşif, sıvı suyun Mars üzerinde uzun ve önemli bir etkiye sahip olduğunu düşündürmektedir [52].

İlginç bir şekilde, Mars'ın her tarafına yayılmış çok sayıda evaporit (klorür tuzları) tespit edilmiştir. Bu evaporitler, Noachian dönemi arazilerinde, özellikle güney yüksek düzlüklerinde kil içeren malzemeyi örten fillosilikatların birikmesinden sonra oluşmuştur. Bu evaporitler, alkali ortamdan asidik ortamlara kadar değişen kimyasal ortamlarda yerinde oluşmuş olabilir. Oluşumları, tuzlu sudan nehir vadilerine kadar çeşitli jeolojik ortamlarda gerçekleşebilir ve buharlaşmaya bağlı olarak buz/kar erimesi, yağış ve/veya yeraltı suyu yükselişi nedeniyle oluşan sınırlı miktarda sıvı suyu gerektirmektedir. Klorürler, Mars'taki stratigrafik sütunda genellikle en üstteki mineralleri oluşturmakta ve nadiren aşınma ve bozunma izlerini göstermektedir. Böylesi klorür bakımından zengin üst tabakanın, Mars'taki biyoimzaların korunmasına yardımcı olması mümkün olabilir [53].



Şekil 17. Mars'ta Bulunan Eridania Havzası [52]

4. SONUÇLAR

Ay ve Mars, uzay madenciliği için önemli potansiyele sahip gök cisimleridir. Ay'da su buzu, helyum-3, nadir toprak elementleri ve metaller gibi değerli kaynaklar bulunurken, Mars'ta su buzu, demir, magnezyum, alüminyum ve diğer metaller mevcuttur. Bu kaynaklar, gelecekteki uzay araştırmaları ve potansiyel Mars yerleşimleri için önemli kaynaklar sağlayabilir.

Ay ve Mars'ın jeolojik yapısı, madencilik faaliyetlerini etkileyebilir. Ay'ın jeolojisi karmaşık ve çeşitlidir, çarpma kraterleri, volkanizma ve tektonik süreçler Ay'ın yüzeyini şekillendirmiştir. Mars ise Dünya'ya en çok benzeyen gezegenlerden biri olarak kabul edilmekte ve jeolojik geçmişi madenlerin bulunma potansiyelini göstermektedir.

Uzay madenciliği, Ay ve Mars gibi gök cisimlerinden kaynak çıkarma, işleme ve ticari ürünlere dönüştürme süreçlerini içermektedir. Bu süreçler, uzayda, Dünya'da ve hatta daha uzak noktalarda kaynakların dağıtımını sağlamaktadır. Ay ve Mars'taki madencilik potansiyeli, gelecekteki uzay keşifleri ve insanlı uzay seyahatleri için önemli bir rol oynayabilir.

Ay ve Mars'ta madencilik yapmanın zorlukları arasında teknolojik engeller, uzay ortamının zorlu koşulları ve kaynakların çıkarılması ve işlenmesi için gereken yüksek maliyetler bulunmaktadır. Ancak, bu zorluklar, gelecekteki teknolojik gelişmeler ve uzay endüstrisinin ilerlemesiyle aşılabilecek potansiyele sahiptir.

Sonuç olarak, Ay ve Mars gibi gök cisimlerindeki madencilik potansiyeli, uzay keşifleri ve insanlı uzay seyahatleri için önemli bir kaynak olabilir. Gelecekteki çalışmalar ve yatırımlar, Ay ve Mars'taki kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayarak uzay madenciliğinin gelişimine katkıda bulunabilir.

TEŞEKKÜR

Makale incelemesindeki değerli yorum ve yönlendirmelerinden dolayı tüm hakem hocalarımıza teşekkürü borç biliriz.

YAZAR KATKILARI

Bu araştırma, yazarlarımızdan, Yazar 2 tarafından hazırlanan Lisans Bitirme Tezinin verilerinin bir kısmının kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar makale hazırlanmasındaki tüm aşamalarda ortak katkı sağlamışlardır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

ETİK

Bu makalenin yayınlanmasında herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] K. Krohn, R. Jaumann, K. Otto, T. Hoogenboom, R. Wagner, D.L. Buczkowski, B. Garry, D.A. Williams, R.A. Yingst, J. Scully, M.C. De Sanctis, T. Kneissl, N. Schmedemann, E. Kersten, K. Stephan, K.D. Matz, C.M. Pieters, F. Preusker, T. Roatsch, P. Schenk, C.T. Russell and C.A. Raymond, "Mass Movement on Vesta at Steep Scarps and Crater Rims", *Icarus*, vol.244, pp. 120-132, Dec.2014, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.03.013>.
- [2] H. Hiesinger and J.W. Head, "New Views of Lunar Geoscience: An Introduction and Overview", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol.60, no.1, pp. 1-81, Jan.2006, <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.60.1>.
- [3] E.J. Speyerer, M.S. Robinson, B.W. Denevi, and LROC Science Team, "Lunar Reconnaissance Orbiter Camera Global Morphological Map of the Moon", 42nd Annual Lunar and Planetary Science Conference, 2011, no.1608.
- [4] H.J. Melosh, "Impact Cratering. A Geologic Process", *Oxford Monographs on Geology and Geophysics Series no.11*. ix+245, Oxford: Clarendon Press, 1989.
- [5] E. Hauber and R. Wagner, "Planetary Geology: Craters and Chronology, Volcanism, Tectonics", *Solar System, Springer Materials*, 2009, Doi: 10.1007/978-3-540-88055-4_20.
- [6] D.E. Wilhelms, J.F. McCauley and N.J. Trask, "The Geologic History of the Moon", *USGS Publications*, s.1348, pp. 302, 1987.
- [7] J.W. Head and L. Wilson, "Lunar Mare Volcanism: Stratigraphy, Eruption Conditions and the Evolution of Secondary Crusts", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.56-6, pp.2155-2175, Jun 1992, [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90183](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90183).
- [8] M.A. Wieczorek, M.T.Zuber and R.J. Phillips, "The Role of Magma Buoyancy on the Eruption of Lunar Basalts", *Earth and Planetary Science Letters*, Elsevier, v.185-1-2, pp. 71-83, Feb. 2001, [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00355-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00355-1).
- [9] J.Haruyama, T.Matsunaga, M.Ohtake, T.Morata, C.Honda, Y.Yokota, M.Torii, Y.Ogawa and the LISM Working Group, "Global Lunar-Surface Mapping Experiment Using the Lunar Imager/Spectrometer on SELENE", *Earth Planets Space*, v.60, pp.243-255, 2008, <https://doi.org/10.1186/BF03352788>.
- [10] M.S.Robinson, E.J.Speyerer, A.Boyd, D.Waller, R.V. Wagner and K.N Burns, "Exploring the Moon with the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera", *ISPRS*, pp. 501-504, Aug 2012.
- [11] S.C. Solomon and J.W. Head, "Vertical Movement in Mare Basins: Relation to Mare Emplacement, Basin Tectonics and Lunar Thermal History", *JGR Solid Earth*, v.84-B4, pp. 1667-1682, Apr 1979, <https://doi.org/10.1029/JB084iB04p01667>.
- [12] T. Spohn, W. Konrad, D. Breuer and R. Ziethe, "The Longevity of Lunar Volcanism: Implications of Thermal Evolution Calculations with 2D and 3D Mantle Convection Models", v.149-1, pp. 54-65, Jan 2001, <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6514>.
- [13] N.L Chabot and M.J. Drake, "Crystallisation of Magmatic Iron Meteorites: The Effects of Phosphorus and Liquid Immiscibility", *Meteoritics&Planetary Science*, vol 35-4, pp. 807-816, Jul. 2000, <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2000.tb01464.x>.
- [14] Aksoy, Ü., "Dünya, Mars ve Ay'da Yerel Kaynaklar ile Üretilen Betonlardan Yapılmış Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemi Tasarlanması ve Karşılaştırılmaları", *Doktora Tezi*, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2022.
- [15] J. Oberst and Y. Nakamura, "A Seismic Risk for the Lunar Base", *Second Conference Lunar Bases Sp Act 21st Century*, v.231-3, 1992.
- [16] D. Stöffler and G. Ryder, "Stratigraphy and Isotope Ages of Lunar Geologic Units: Chronological Standard for the Inner Solar System", *Springer Space Sciences Series of ISSI*, v.12, pp. 9-54, 2001.
- [17] G. Neukum, B.A. Ivanov and W.K. Hartmann, "Cratering Records in the Solar System in Relation to the Lunar Reference System", *Springer Space Sciences Series of ISSI*, v.12, pp. 55-86, 2001.
- [18] M.D. Norman, "The Lunar Cataclysm: Reality or "Mythconception"?", *Elements*, v.5-1, pp. 23-28, 2009, <https://doi.org/10.2113/gselements.5.1.23>.
- [19] "Ay Stratigrafisi", https://en.wikipedia.org/wiki/Lunar_geologic_timescale. [Erişim Tarihi: 01.10.2024].
- [20] D.A. Peacock, "Mining on the Moon; Yes, It's Going to Happen", *Mining Engineering Magazine*, pp. 23-31, Jan, 2017.
- [21] A. Sammariva, L. Gori, B. Chizzolini and M. Pianorsi, "The Economics of Moon Mining", *Acta Astronautica*, v.170, pp. 712-718, May 2020, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.042>.
- [22] "Ay Araştırmacı", <https://science.nasa.gov/mission/lunar-prospecter>. [Erişim Tarihi: 01.10.2024].
- [23] E.N. Cameron, "Helium Mining on the Moon: Site Selection and Evaluation", *2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities*, pp. 189-197, 1992.
- [24] G. Heiken, D. Vaniman and B.M. French, "Lunar Sourcebook", *Cambridge University Press*, 1991.

- [25] I.A. Crawford, M. Anand, S. Barber, A. Cowley, S. Crites, W. Fa, J. Flahaut, L.R. Gaddis, B. Greenhagen, J. Haruyama, D. Hurley, C.L. McLeod, A. Morse, C.R. Neal, H. Sargeant, E.S. Nash, R. Tartese, "Lunar Resources", *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v.89-1, pp. 829-868, Dec. 2023, <https://doi.org/10.2138/rmg.2023.89.19>.
- [26] A.J. Waajen, R. Prescott and C.S. Cockell, "Meteorites: Beneficial or Toxic for Life on Early Earth? Growth of an Anaerobic Microbial Community on a Carbonaceous Chondrite", *Microbiology Society*, v.4-5, May 2022, <https://doi.org/10.1099/acmi.ac2021.po0128>.
- [27] M.H. Carr, "Formation of Martian Flood Features by Release of Water from Confined Aquifers", *JGR Solid Earth*, v.84-B6, pp.2995-3007, June, 1979, <https://doi.org/10.1029/JB084iB06p02995>.
- [28] R.B. Leighton, N.H. Horowitz, B.C. Murray, R.P. Sharp, A.H. Herriman, A.T. Young, B.A. Smith, M.E. Davies and C.B. Leovy, "Mariner 6 and 7 Television Pictures: Preliminary Analysis", *Science*, v.166-3901, pp. 49-67, Oct. 1969, DOI: 10.1126/science.166.3901.49.
- [29] A. Lagain, G.K. Benedix, K. Servis, D. Baratoux, L.S. Doucet, A. Rajsic, H.A.R. Devillepoix, P.A. Bland, M.C. Towner, E.K. Sansom, K. Miljkovic, "The Tharsis Mantle Source of Depleted Shergottites Revealed by 90 Million Impact Craters", *Nature Communications*, v.12-6352, 2021, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26648-3>.
- [30] N. G. Barlow, J.M. Boyce, F.M. Costard, R.A. Craddock, J.B. Garvin, S.E.H. Sakimoto, R.O. Kuzmin, D.J. Roddy, L.A. Soderblom, "Standardizing the Nomenclature of Martian Impact Crater Ejecta Morphologies", v.105-E11, pp. 26733-26738, Nov. 2000, <https://doi.org/10.1029/2000JE001258>.
- [31] F.M. Costard, "The Spatial Distribution of Volatiles in the Martian Hydrolithosphere", *Earth, Moon and Planets*, v.45, pp.265-290, 1989.
- [32] P. Broz, O. Kyyza, L. Wilson, S.J. Conway, E. Hauber, A. Mazzini, J. Raack, M.R. Balme, M.E. Sylvest and M.R. Patel, "Experimental Evidence for Lava-Like Mud Flows Under Martian Surface Conditions", v.13 pp. 403-407, June, 2020.
- [33] A.S. McEwen, M.C. Malin, M.H. Carr and W.K. Hartmann, "Voluminous Volcanism on Early Mars Revealed in Valles Marineris", *Nature*, v. 397, pp. 584-586, Feb. 1999.
- [34] G.J. Leonard and K.L. Tanaka, "Geologic Map of the Hellas Region of Mars", *Mars Geologic Map of the Hellas Region-2*, USGS, PP. 1-10, 2001.
- [35] S.C. Mest and D.A. Crown, "Geology of the Reull Vallis Region, Mars", *Icarus*, vol.153, pp. 89-110, Sep.2001, <https://doi.org/10.1006/icar.2001.6655>.
- [36] S.C. Werner, B.A. Ivanov and G. Neukum, "Theoretical Analysis of Secondary Cratering on Mars and an Image-Based Study on the Cerberus Plains", *Icarus*, vol.200, pp.406-417, Apr. 2009, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2008.10.011>.
- [37] D.A. Crown and R. Greeley, "Geologic Map of the MTM-30262 and -30267 Quadrangles, Hadriaca Patera Region of Mars", USGS, Jan. 2007, Doi: 10.3133/sim2936.
- [38] S.J. Robbins and B.M. Hynek, "Secondary Crater Fields from 24 Large Primary Craters on Mars: Insights into Nearby Secondary Crater Production", *Journal of Geophysical Research Planets*, v.116-E10, Oct. 2011, <https://doi.org/10.1029/2011JE003820>.
- [39] J. Vaucher, D. Baratoux, M.J. Toplis, P. Pinet, N. Mangold and K. Kurita, "The Morphologies of Volcanic Landforms at Central Elysium Planitia: Evidence for Recent and Fluid Lavas on Mars", *Icarus*, vol.200-1, pp.39-51, Marh 2009, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2008.11.005>.
- [40] P.J. Mougini-Mark and M.S. Robinson, "Evolution of the Olympus Mons Caldera, Mars", *Bulletin of Volcanology*, v.54, pp. 347-360, July 1992.
- [41] S.S.C. Wu, P.A. Garcia, R. Jordan, F.J. Schafer and B.A. Skiff, "Topography of the Shield Volcano, Olympus Mons on Mars", *Nature*, v.309, pp. 432-435, May 1984.
- [42] C.A. Hodges and H.J. Moore, "The Subglacial Birth of Olympus Mons and Its Aureoles", *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, v. 84-B14, PP. 8061-8074, Dec. 1979, <https://doi.org/10.1029/JB084iB14p08061>.
- [43] K.J. Mohr, D.A. Williams, W.B. Garry and J.E. Bleacher, "Preliminary Volcanic Feature Analysis of Olympus Mons and Ascraeus Mons, Mars", *ADS*, June 2018.
- [44] C.O. Lee, B.M. Jakosky, J.G. Luhmann, D.A. Brain, M.L. Mays, D.M. Hassler, M. Holmström, D.E. Larson, D.L. Mitchell, C. Mazelle, J.S. Halekas, "Observations and Impacts of the 10 September 2017 Solar Events at Mars: An Overview and Synthesis of the Initial Results", *Geophysical Research Letters*, v.45-17, pp. 8871-8885, Sep. 2018, <https://doi.org/10.1029/2018GL079162>.
- [45] E.S. Kite, "Geologic Constraints on Early Mars Climate", *Space Science Reviews*, v.215-10, pp. 24-47, Jan. 2019.
- [46] R.D. Wordsworth, "The Climate of Early Mars", *Annual Reviews*, v.44, pp. 381-408, June 2016, <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060115-012355>.
- [47] M.P. Golombek, "Mars Tectonics", *Planetary Tectonics*, Cambridge University Press, pp. 183-232, 2010.

- [48] D.U. Wise, M.P. Golombek, G.E. McGill, "Tharsis Province of Mars: Geologic Sequence, Geometry and a Deformation Mechanism", *Icarus*, vol.38-3, pp.456-472, June 1979, [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(79\)90200-8](https://doi.org/10.1016/0019-1035(79)90200-8).
- [49] S.M. Wisemann, R.E. Arvidson, J.C. Andrews-Hanna, R.N. Clark, N.L. Lanza, D.D. Marais, G.A. Marzo, R.V. Morris, S.L. Murchie, H.E. Newsom, E.Z. Noe Dobrea, A.M. Ollila, F. Poulet, T.L. Roush, F.P. Seelos, G.A. Swayze, "Phyllosilicate and Sulfate-Hematite Deposits within Miyamoto Crater in Southern Sinus Meridiani, Mars", *Geophysical Research Letters*, v.35-19, Oct. 2008, <https://doi.org/10.1029/2008GL035363>.
- [50] J.E.P. Connerney, M.H. Acuna, N.F. Ness, G. Kletetschka, D.L. Mitchell, R.P. Lin and H. Reme, "Tectonic Implications of Mars Crustal Magnetism", *Earth, Atmospheric and Planetary Sciences*, v.102-42, pp. 14970-14975, Oct. 2005, <https://doi.org/10.1073/pnas.0507469102>.
- [51] "Mars Stratigtafisi", https://en.wikipedia.org/wiki/Amazonian_Mars. [Erişim Tarihi: 01.10.2024].
- [52] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Mars>. [Erişim Tarihi: 01.10.2024].
- [53] T. Fornaro, A. Boosman, J.R. Brucato, I.L. Kate, S. Siljeström, G. Poggiali, A. Steele, R.M. Hazen, "UV Irradiation of Biomarkers Adsorbed on Minerals Under Martian-Like Conditions: Hints for Life Detection on Mars", *Icarus*, vol.313 pp.38-60, Oct. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.05.001>.