

Leszek Orzechowski\*

## *Czerwone Pogranicze: energia ucieleśniona marsjańskiej architektury*

### *The Red Frontier: the embodied energy of Martian architecture*

#### *Cywilizacja a zużycie energii*

Ludzka cywilizacja jest oparta na energii. Wraz z postępem rośnie na tę energię zapotrzebowanie. Na przestrzeni wieków można wyszczególnić procesy, które powszechnie nazywa się rewolucjami, np. rewolucja agrokulturowa, rewolucja przemysłowa czy rewolucja cyfrowa. Każde z wymienionych wydarzeń skutkowało podniesieniem możliwości produkcyjnych oraz standardu życia, przy jednoczesnym znacznym zwiększeniu popytu na energię. Wysłano więc wnioski, że stopień rozwoju cywilizacji można mierzyć ilością zużywanej energii. Do tego stwierdzenia doszedł Nikolai Kardashev [1], tworząc skalę zaawansowania technologicznego cywilizacji w zależności od użytkowanej ilości energii. Skala dzieliła potencjalne cywilizacje na trzy typy. Cywilizacja typu I byłaby w stanie wykorzystać ogół energii docierającej na jej planetę z macierzystej gwiazdy. Cywilizacja typu II byłaby w stanie ujarzmić całość energii emitowanej przez macierzystą gwiazdę, natomiast cywilizacja typu III wykorzystywałaby energię i zarządzałaby energią na skalę macierzystej galaktyki [2]. Nieżyjący już Carl Sagan ocenił postęp cywilizacji ludzkiej na 0,7 typu I [3]. Oznacza to, że według Sagana jesteśmy w stanie zagospodarować 70% energii, jaką Ziemia otrzymuje ze Słońca (brzmia to dość optymistycznie, jednak należy pamiętać, że paliwa kopalne to też przetworzona energia słoneczna) (il. 1).

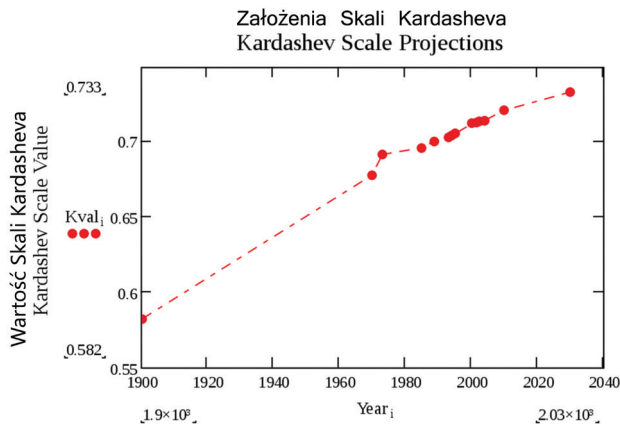
Obecnie nie ma powodu, aby się zastanawiać, czy i kiedy zostaniemy cywilizacją galaktyczną, jednakże

#### *Civilisation and energy consumption*

Human civilisation is based on energy. Along with progress, the demand for this energy is increasing. Over the centuries, processes have occurred that are commonly referred to as revolutions, such as the agriculture, industrial and digital revolutions. Each of these events resulted in increased production capacity and a higher standard of living, while significantly increasing the demand for energy. As a result, a conclusion was proposed that the degree of civilisation development can be measured by the amount of energy consumed. This statement was made by Nikolai Kardashev [1] while creating the scale of a civilisation's technological advancement based on the amount of energy used. The scale breaks the potential civilisations down into three types. A Type I civilisation would be able to use all of the energy reaching the planet from its parent star. A Type II civilisation would be able to harness all the energy emitted by its parent star, while a Type III civilisation would use and manage energy on the scale of its entire host galaxy [2]. The late Carl Sagan assessed the progress of human civilisation at 0.7 of Type I [3]. This means that, according to Sagan, we can utilise 70% of the energy that the Earth receives from the sun (this sounds quite optimistic, but it should be borne in mind that fossil fuels are also processed solar energy) (Fig. 1).

Currently, there is no reason to wonder whether and when we will become a galactic civilisation; however, the concept of analysing the development of human civilisation by measuring the level of energy consumed seems very sensible. Today, humanity is trying to reduce the use of fossil fuels, because of evidence that human civilisation is suffering from climate change [4]. The scientific

\* Wydział Architektury Politechniki Wrocławskiej/Faculty of Architecture, Wrocław University of Science and Technology.



Il. 1. Wykres przedstawiający rozwój ludzkiej cywilizacji oraz dalszą prognozę zgodnie z założeniami skali Kardasheva, (źródło: [geopoliticatus.com/beyond-the-kardashev-scale/](http://geopoliticatus.com/beyond-the-kardashev-scale/) [data dostępu: sierpień 2017])

Fig. 1. Graph showing the development of the human civilisation and further forecasts according to the Kardashev Scale (source: [geopoliticatus.com/beyond-the-kardashev-scale/](http://geopoliticatus.com/beyond-the-kardashev-scale/) [accessed: August 2017])

propozycja, by analizować rozwój ludzkiej cywilizacji, mierząc poziom zużywaną energię, wydaje się bardzo sensowna. Współcześnie ludzkość stara się ograniczyć wykorzystanie paliw kopalnych ze względu na dowody obciążające naszą cywilizację za zmiany klimatu [4]. Społeczność naukowa jest zgodna, że ludzkość stoi przed ogromnym wyzwaniem, jakim jest zahamowanie tych zmian i powstrzymanie globalnej katastrofy. W tym celu potrzeba precyzyjniejszych zestawów danych oraz lepszych strategii zarządzania energią i zasobami. Proponuje się, by pozyskiwać odpowiednie ilości danych kalkulacjami energii ucieleśnionej każdego produktu oraz usługi. W książkowym zestawieniu *Inventory of Carbon & Energy (ICE)* przez energię ucieleśnioną Groff Hammond rozumie [5, s. 1]: *Sumę energii wymaganej do wytworzenia dowolnego dobra lub usługi, przy założeniu, że ta energia jest „ucieleśniona” w samym produkcie. Pojęcie to może być przydatne w określaniu efektywności urządzeń produkujących bądź oszczędzających energię. Zaleca się też używać energii ucieleśnionej jako „prawdziwej” wartości kosztów budowy budynków. Z racji że obliczenia tego wskaźnika uwzględniają także emisję gazów cieplarnianych, mogą pomóc określić, czy produkt lub rozpatrywany proces przyczynia się w znaczący sposób do globalnego ocieplenia. Fundamentalnym powodem mierzenia tej wielkości jest porównanie ilości energii wyprodukowanej lub zaoszczędzonej przez produkt i ilości energii zużytej podczas jego produkcji.* Powyżej opisana metoda jest już stosowana przez wielu producentów materiałów budowlanych. Cechuje się ona wysokim potencjałem dla optymalizacji procesów produkcji oraz konsumpcji energii. To z kolei w dużej skali byłoby pomocne w przeciwdziałaniu zmianom klimatu spowodowanym aktywnością człowieka. Pełne wdrożenie takich praktyk może jednak okazać się problematyczne, jeśli uwzględni się złożoność kluczowych gałęzi przemysłu. Istnieje zatem potrzeba przeprowadzenia kontrolowanego testu

community agrees that humanity is facing the enormous challenge of stopping these changes and preventing a global disaster. For this purpose, more-accurate data sets and better energy and resource management strategies are needed. It is proposed that adequate amounts of data should be obtained by calculating the embodied energy of all products and services. Groff Hammond understands embodied energy to mean [5, p. 1]: *The total amount of energy required to produce any goods or service, assuming that this energy was included or “embodied” in the product itself. This concept can be useful in determining the efficiency of energy-producing or energy-efficient equipment. It is also recommended that embodied energy be used as a “true” value of the costs of building construction. Because the calculation of this indicator also includes the emission of greenhouse gases, it can help determine if the product or process in question contributes significantly to global warming. The fundamental reason for measuring this size is to compare the amount of energy produced or saved by the product with the amount of energy consumed during its production.* The above method is already used by some manufacturers of building materials. It is characterised by a high potential for optimisation of the production process and energy consumption, which, in turn, would be of great help in the counteracting climate change caused by human activity. The full implementation of such practices may, however, prove problematic, if the complexity of key industries is taken into account. Therefore, there is a need for a controlled test to be carried out at an isolated construction site, where new resource management and energy consumption strategies would be applied. In the author’s opinion, NASA’s planned series of “Journey to Mars” missions and the preparation for a manned mission to Mars in the 2030s are a good model for similar tests [6].

### Man on Mars

Dr. Robert Zubrin – an American aviation engineer and author known for his advocacy of the manned Mars research expedition – adapted the Kardashev scale to represent the cosmic range of civilisation, rather than determining the amount of energy consumed. The process of a civilisation’s development towards Type II begins with the colonisation of our closest planet – Mars [7].

In the 1990s, Dr. Zubrin paved the way for a new approach to manned Mars missions. The Mars Direct mission concept was focused on reducing costs by using the resources the planet offers, as opposed to bringing all the needed supplies from Earth [8]. Some of Zubrin’s ideas were later adapted by NASA, and are still present in *Human Exploration of Mars Design Reference Architecture 5.0* from 2009 [9], and are constantly discussed under the „Journey to Mars” programme [6].

Despite this work, the question of “Why send people to Mars?” still exists. In response, it is often argued that we need to colonise the Red Planet while a global disaster has not yet occurred. Opponents say that the problems facing society on Earth must be resolved before even thinking of spending billions on manned Mars missions.

na odizolowanym terenie budowy, na którym byłyby stosowane nowe strategie zarządzania zasobami i zużycia energii. Cykl planowanych misji NASA „Journey to Mars” oraz przygotowania do załogowej misji na Marsa w latach 30. XXI w. zdaniem autora są dobrym modelem do podobnych testów [6].

### **Człowiek na Marsie**

Doktor Robert Zubrin – amerykański inżynier lotniczy oraz pisarz znany z działalności promującej załogową ekspedycję badawczą na Marsa – zaadaptował skalę Kardasheva, by przedstawić kosmiczny zasięg cywilizacji, zamiast określać ilość zużywanej energii. Proces rozwoju cywilizacji ku typowi II zaczyna się od kolonizacji naszej najbliższej planety – Marsa [7].

W latach 90. XX w. działalność Zubrina utorowała drogę nowemu podejściu do załogowych misji marsjańskich. Koncepcja misji Mars Direct skupiała się na obniżaniu kosztów poprzez wykorzystywanie zasobów, jakie oferuje planeta, w przeciwieństwie do przywożenia całości potrzebnych zapasów z Ziemi [8]. Niektóre koncepcje Zubrina zostały później zaadaptowane przez NASA i są nadal obecne w *Human Exploration of Mars Design Reference Architecture 5.0* z roku 2009 [9], jak również są na bieżąco dyskutowane w ramach programu „Journey to Mars” [6].

Mimo tych prac wciąż zadawane jest pytanie: „Po co zajmować się wysyłaniem ludzi na Marsa?”. W odpowiedzi często stawiany jest argument, że potrzebujemy skolonizować Czerwoną Planetę, póki jeszcze nie wydarzył się jakiś globalny kataklizm. Oponenty odpowiadają, że najpierw należy rozwiązać problemy, jakie nękają społeczeństwo na Ziemi, nim można będzie myśleć o wydatkowaniu miliardów na załogowe misje marsjańskie. Takie opinie mogą się wydawać racjonalne, jednak doświadczenia pokazują, że dotychczasowa eksploracja kosmosu zaowocowała ogromnymi zyskami dla naszej cywilizacji w postaci globalnej komunikacji, danych o pogodzie (wiedza o globalnym ociepleniu) czy nawigacji satelitarnej. Tworzenie placówki na skrajnie niegościnnym globie, o bardzo ograniczonych zasobach jest w stanie rozwinać wiele systemów związanych z budownictwem, robotyką, sposobami uzdatniania wody czy produkcją energii. Przeprowadzenie załogowych misji na Marsa będzie wymagało technologii mogących znacząco wpłynąć na walkę ze zmianą klimatu, brakiem dostępu do wody pitnej czy odbudowy infrastruktury po katastrofach naturalnych. Załogowe misje będą mieć bardzo szczególną strategię zarządzania zasobami oraz energią i niewykluczone, że będą się opierały na szacunkach energii ucieleśnionej.

### **Środowisko marsjańskie oraz marsjańska architektura**

Mars jest mniejszą planetą niż Ziemia, a astronauty będą na niej doświadczać jedynie 38% ziemskiego ciężenia. Planeta nie ma pola elektromagnetycznego chroniącego żywe organizmy przed promieniowaniem kosmicz-

Such opinions may seem rational; however, experiments show that previous space exploration has resulted in huge benefits for human civilisation in the form of global communication, weather data (knowledge of global warming) and satellite navigation. Creating a facility on an extremely inhospitable globe with very limited resources could potentially develop a variety of systems related to construction, robotics, water treatment and energy production. Conducting manned missions to Mars will require technologies that can significantly impact the fight against climate change, the lack of access to drinking water, and the rebuilding of infrastructure after natural disasters. Manned missions will have a very detailed strategy for managing resources and energy, and it is possible that they will be based on embodied energy estimates.

### **The Martian environment and Martian architecture**

Mars is a smaller planet than Earth, and astronauts will experience only 38% of Earth’s gravity on it. The planet has no electromagnetic field that protects living organisms from cosmic rays. Low atmospheric pressure at 6 hPa results in low average temperatures of  $-64^{\circ}\text{C}$ . Both the low temperature and low pressure make it impossible for unprotected astronauts to survive. This significantly affects the plans of manned missions. The parameters referred to above allow inferences about the requirements for the Martian habitat intended for human habitation. It should ensure not only survival, but also a sense of security. It is also worth highlighting the features of Mars that make it similar to Earth (Fig. 2).

A day on Mars lasts 24 hours and 40 minutes, which is important for the human day-night cycle and the plant gas exchange cycle. Because of the lack of reservoirs, the planet has as many land masses as Earth. There is also a large amount of solidified water, and it was recently confirmed that under certain conditions, Mars also has liquid water. Water and atmosphere composed of carbon dioxide can be an oxygen source. Martian soil – regolith – has been investigated in terms of potential plant growth, and is also being considered as a building material for Martian architecture that could provide its inhabitants with protection against cosmic rays.

In the light of the above, the basic features of Martian architecture can be determined:

- a sealed space, isolated from the external environment,
- controlled pressure, atmosphere, temperature and humidity values,
- protection provided against cosmic rays,
- access provided to water and oxygen, together with recovery,
- made of materials available on Mars – regolith or ice.

The above assumptions can be found in the NASA document *The Mars Surface Reference Mission* [8] of 2001. Newer papers, such as *Mars Destination Operations* [10], strongly recommend using the planet’s resources and additive manufacturing techniques to build the architecture. 3D printing is a synonym of additive manufacturing techniques – this is the process of three-dimensional

nym. Niskie ciśnienie atmosferyczne, na poziomie 6 hPa, skutkuje niskimi temperaturami o średniej wartości  $-64^{\circ}\text{C}$ . Zarówno niska temperatura, jak i niskie ciśnienie wykluczają życie niezabezpieczonych astronautów. Wpływa to w sposób decydujący na plany misji załogowych. Przytoczone tutaj parametry pozwalają wnioskować o wymogach dla marsjańskiego habitatu przeznaczonego na pobyt ludzi. Powinien on zapewnić nie tylko możliwość przeżycia, ale i poczucie bezpieczeństwa. Warto też wspomnieć cechy Marsa, które upodobniają go do Ziemi (il. 2).

Dzień na Marsie trwa 24 godziny i 40 minut, co ma duże znaczenie dla cyklu dobowego ludzi oraz cyklu wymiany gazowej roślin. Planeta ze względu na brak akwenułów ma tyle samo mas lądowych co Ziemia. Znajduje się tam również znaczna ilość zestalonej wody, a niedawno potwierdzono, że w określonych warunkach na Marsie występuje też woda w stanie płynnym. Woda oraz atmosfera złożona z dwutlenku węgla mogą być źródłem tlenu. Gleba marsjańska – regolit – została zbadana pod kątem potencjalnej uprawy roślin i jest także rozważana jako budulec dla marsjańskiej architektury, która mogłaby stanowić ochronę przed promieniowaniem kosmicznym dla jej mieszkańców.

Biorąc powyższe pod uwagę, można określić podstawowe cechy architektury marsjańskiej:

- przestrzeń szczelna, odizolowana od środowiska zewnętrznego,
- kontrolowane wartości ciśnienia, atmosfery, temperatury i wilgotności,
- zapewniona ochrona przed promieniowaniem kosmicznym,
- zapewnienie dostępu do wody i tlenu wraz z odzyskiem,
- tworzona z materiałów dostępnych na Marsie – regolitu lub lodu.

Powyższe założenia można znaleźć w dokumencie NASA *The Mars Surface Reference Mission* [8] z roku 2001. Nowsze opracowania, jak *Mars Destination Operations* [10], mocno rekomendują z kolei używanie zasobów planety oraz addytywnych technik produkcyjnych do budowy architektury. Synonimem addytywnych technik produkcyjnych jest druk 3D. Określa on proces trójwymiarowego produkowania przedmiotu poprzez pozycjonowanie materiału. Europejska Agencja Kosmiczna wraz z firmą Foster+Partners opracowywała studium wykonalności druku 3D z gleby księżycowej [11]. Stała baza na Księżycu autorstwa ESA ma szansę być wybudowana zdalnie przez roboty w latach 2025–2030 (il. 3).

W roku 2015 NASA oraz America Makes ogłosiły konkurs 3D Printed Habitat Challenge. Szukano koncepcji technologicznych pozwalających budować architekturę poza Ziemią z lokalnych materiałów. Wedle założenia habitaty miałyby być konstruowane autonomicznie przez maszyny. Taka technologia mogłaby być wykorzystywana nie tylko na Księżycu czy Marsie, ale też na Ziemi [12].

Nadesłane prace konkursowe, w tym praca autora niniejszego tekstu, prezentowały autonomiczne rozwiązania wytwarzania architektury poza Ziemią. Automatyzacja jest kluczowa, by wyręczyć ludzi w skomplikowanych

produkcji obiektu przez pozycjonowanie materiału. The European Space Agency together with Foster+Partners performed a feasibility study on 3D printing using the moon's soil [11]. A permanent base on the moon by the ESA could be built remotely by robots in 2025–2030 (Fig. 3).

In 2015, NASA and America Makes announced the competition “3D Printed Habitat Challenge”. Technology concepts were sought in order to build architecture outside the Earth from local materials. According to the assumption, habitats were to be constructed autonomously by machines. Such technology could be used not only on the Moon or Mars, but also on Earth [12].

The submitted competition entries, including the entry of the author of this paper, presented autonomous solutions for creating architecture away from Earth. Automation is key in order to substitute people in performing complex and dangerous tasks in a hostile environment. A human crew will largely control the work of semi-autonomous machines from the safety of the habitat. Mars has extremely unfriendly conditions, but the planet also has enough resources to use robots to create a self-sufficient human base, as Terry Huntsberger et al. proved in the paper *Robotic outposts as precursors to a manned Mars habitat* [13].

### *Augmented humans and their agent-avatars on Mars*

Mars is currently the only known planet inhabited exclusively by robots. It has three active rovers that serve as an extension of human senses [14]. One could say that, in a sense, people physically on Earth are already driving and exploring the Red Planet, testing the rocks and soil of the planet. The only problem is the huge distance separating the two worlds. At an average distance of 80 million kilometres, the speed of light seems insufficient for effective data transfer. Data transfer takes an average of four minutes (when Mars and Earth are the farthest away from each other, this is significantly longer); therefore, sending a command to a rover and watching the results provides the operator with feedback after an average of eight minutes. Only once astronauts are on the surface, or in the immediate vicinity of Mars, will this problem disappear. Different types of rovers and humanoid robots would be the perfect avatars for astronauts inside a safe base or spaceship [15].

While overseeing the work of Space is More research team registered at the Centre of Knowledge and Science and Technology Information of Wrocław University of Science and Technology, the author conducted design studies of rovers and robots needed to create a habitat using local materials [16] for the contest 3D Printed Habitat Challenge. Two types of rovers for working in the demanding Martian environment were proposed. The first type of machine was a rover collecting regolith for building materials. The other type of machine was two rovers connected by a crane equipped with a robotic arm with a high-energy laser and a regolith feeding line. This arrangement forms a semi-autonomous 3D printer for facilities in the size of buildings, as shown in Figure 4.

i niebezpiecznych zadaniach we wrogim środowisku. Załoga ludzka będzie w dużym stopniu kontrolowała prace półautonomicznych maszyn z bezpiecznego wnętrza habitatu. Na Marsie panują skrajnie nieprzyjemne warunki, lecz planeta posiada również dostatecznie dużo zasobów, by za pomocą robotów stworzyć samowystarczającą ludzką bazę, jak udowodniali Terry Huntsberger et al. w swojej pracy *Robotic outposts as precursors to a manned Mars habitat* [13].

### **Rozszerzony człowiek i jego agenci-awatary na Marsie**

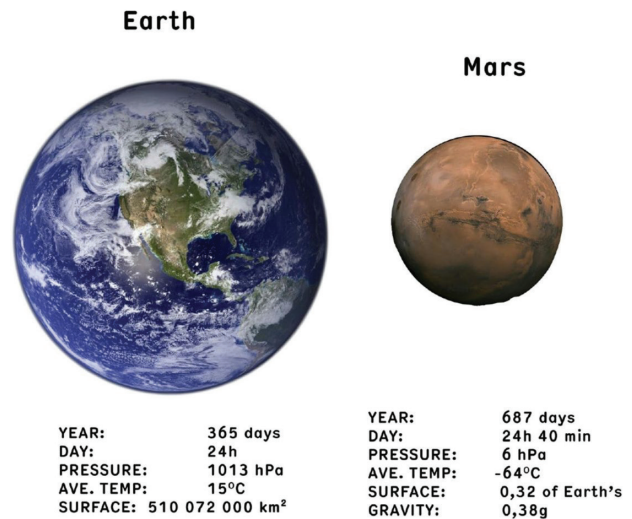
Mars jest obecnie jedyną znaną planetą zamieszkałą wyłącznie przez roboty. Na jej powierzchni znajdują się trzy działające łaziki służące jako przedłużenie ludzkich zmysłów [14]. W pewnym sensie można powiedzieć, że ludzie, fizycznie znajdując się na Ziemi, już teraz jeżdżą, eksplorują Czerwoną Planetę, badając jej skały i glebę. Jedynym problemem są ogromne odległości dzielące dwa światy. Przy średniej odległości 80 milionów kilometrów prędkość światła wydaje się niewystarczająca dla efektywnego transferu danych. Transfer danych zajmuje średnio 4 minuty (kiedy Mars i Ziemia są od siebie najdalej, jest zdecydowanie dłużej), więc przesłanie polecenia do łazika i obserwacja wyników dostarcza operatorowi zwrotnej informacji po średnio 8 minutach. Dopiero kiedy astronauta będą na powierzchni bądź w najbliższej okolicy Marsa, ten problem zniknie. Różne rodzaje łazików i humanoidalnych robotów stanowiłyby idealne awatary dla astronautów znajdujących się w bezpiecznym wnętrzu bazy lub statku kosmicznego [15].

Autor przy okazji kierowania pracami zespołu badawczego Space is More zarejestrowanego w Centrum Wiedzy i Informacji Naukowo-Technologicznej Politechniki Wrocławskiej przeprowadził studia projektowe łazików i robotów potrzebnych do wytworzenia habitatu przy użyciu lokalnych materiałów [16] na potrzeby konkursu 3D Printed Habitat Challenge. Zostały zaproponowane dwa typy łazików do pracy w wymagającym środowisku marsjańskim. Pierwszym typem maszyny był łazik zbierający regolit służący za budulec. Drugim typem maszyny były dwa łaziki połączone suwnicą wyposażoną w robotyczne ramię z wysokoenergetycznym laserem oraz przewodem podającym regolit. Taki układ tworzy półautonomiczną drukarkę 3D do obiektów w skali budynków, jak zostało to przedstawione na ilustracji 4.

Używając podobnych rozwiązań, będzie można stworzyć placówkę spełniającą rygorystyczne wymagania marsjańskiego habitatu, zapewniającą przyszłej załodze przestrzeń do życia oraz pracy. Roboty oraz łaziki w czasie produkcji architektury potrzebowałyby w ograniczonym zakresie dozoru ludzkiego, jednakże proces jest w dużej mierze autonomiczny (il. 5).

### **Energia ucieleśniona na Marsie**

Na Marsie kalkulacje energii ucieleśnionej mogłyby się przysłużyć do optymalizacji zużycia energii oraz zmniejszenia kosztów. Większość sprzętów o znaczeniu strate-



Il. 2. Porównanie ogólnych cech Ziemi i Marsa (oprac. L. Orzechowski)

Fig. 2. A comparison of the general features of Earth and Mars (by L. Orzechowski)



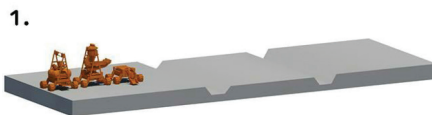
Il. 3. ESA Moon Habitat Foster+Partners (źródło: [www.esa.eu](http://www.esa.eu) [data dostępu: sierpień 2017])

Fig. 3. ESA Moon Habitat Foster+Partners (source: [www.esa.eu](http://www.esa.eu) [accessed: August 2017])

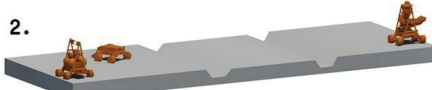
By using similar solutions, a facility can be created that meets the stringent requirements of the Martian habitat, providing the future crew with space for living and working. During the production of architecture, the robots and rovers would require a limited amount of human supervision; however, the process is largely autonomous (Fig. 5).

### **Embodied energy on Mars**

On Mars, the calculation of embodied energy could be used to optimise energy consumption and reduce costs. Most of the equipment critical to the manned Mars mission will consume electricity, which will need to be produced on-site. Accurate management of energy consumption will be a very important aspect of mission planning. Life-support systems, communication systems, testing equipment, and rovers are all components that are essential for the safety of astronauts and carrying out basic research. The value embodied energy can be calculated

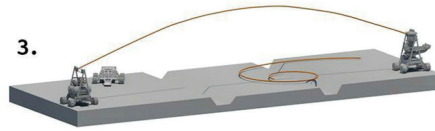


1. Na teren budowy zostają sprowadzone roboty, będące elementami składowymi drukarki 3d  
Powder collecting rover and Y-end rovers arrives at prepared site

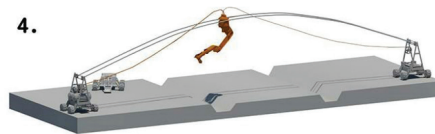


2. Łaziki składające się na drukarkę 3d zostają ustawione w odpowiedniej konfiguracji, podczas gdy łaźik zbierający rozpoczyna drogę do depozytu materiału budowlanego

Y-end rovers are set in positions. Powder collecting rover leave for material deposit



3. Profile stalowe zostają użyte do połączenia ze sobą łaźika zasilającego oraz łaźika podającego materiał budowlany  
Inflatable steel profiles are used as rails to connect Y-end rovers



4. Ramię robotyczne zostaje umieszczone na szynach i podłączone. Drukarka jest gotowa do pracy.  
Robotic arm is set on the rails. The printer is ready for use.

Il. 4. Przygotowanie autonomicznych łaźików drukujących do pracy (oprac. L. Orzechowski)

Fig. 4. Preparing autonomous printing rovers for work (by L. Orzechowski)

gicznym dla załogowej misji na Marsa będzie zużywała prąd, który trzeba będzie wytworzyć na miejscu. Precyzyjne zarządzanie poziomem zużycia energii będzie bardzo ważnym aspektem planowania misji. Systemy podtrzymywania życia, systemy komunikacji, aparatura badawcza, łaźiki, wszystkie te elementy są niezbędne do zapewnienia astronautom bezpieczeństwa oraz wykonania podstawowych badań. Dla każdego z tych systemów można obliczyć wartość energii ucieleśnionej. Jest to jeden z powodów skłaniających do przypuszczenia, że energia ucieleśniona może być w przyszłości używana jako wskaźnik kosztów życia i kolonizacji Czerwonej Planety. Pomiar energii ucieleśnionej pozwala na dokładne analizy danych zużycia energii, ułatwiając optymalizację. Takie dane umożliwiłyby ustalenie wielu innych współczynników takich jak koszty pieniężne, określenie ilości pracy wykonanej przez roboty czy wydzielone przez nie ciepło. Warto też dodać, że zastosowanie takich obliczeń od samego początku działalności ludzkiej na Marsie pozwoli na zebranie bardzo szczegółowych danych o wpływie cywilizacji na klimat Czerwonej Planety. Koszt wszystkich czynności, w tym tworzenia architektury, byłby wtedy przedstawiony w jednostkach energii ucieleśnionej, jaką jest MJ/kg [1].

### Strategia 4X

Szacowanie energii ucieleśnionej wytwarzanej architektury marsjańskiej musi odbywać się wedle ustalonej strategii pozwalającej sprawnie zarządzać poszczególnymi etapami produkcji. Autor proponuje podzielić poszczególne zadania na cztery odrębne działy wyróżniające się skomplikowaniem oraz wykorzystaniem robotów o różnym przeznaczeniu:

- eksplorację w celu zlokalizowania depozytu materiału,
- ekstrakcję i transport tego materiału,
- eksploatację tego materiału bądź zasobu w celu zaspokojenia potrzeb placówki,
- ekspansję placówki poprzez tworzenie nowych struktur przy wykorzystaniu nadprogramowych, zgromadzonych surowców.

Taki podział nazwano strategią 4X (*eXplore, eXtract, eXploit, eXpand*), a wywodzi się ze sposobu projekto-

for each of these systems. This is one of the reasons for supposing that, in the future, embodied energy can be used as an indicator of the cost of living and colonisation of the Red Planet. The measurement of embodied energy allows for an accurate analysis of energy consumption data, facilitating optimisation. Such data would make it possible to establish many co-factors, such as cash costs, as well as the amount of work done by the robots and the heat they emit. It is also worth adding that the application of such calculations from the very beginning of human activity on Mars will make it possible to collect very detailed data on the impact of human activity on the climate of the Red Planet. The cost of all activities, including the creation of architecture, would then be denoted in units of embodied energy, i.e. MJ/kg [1].

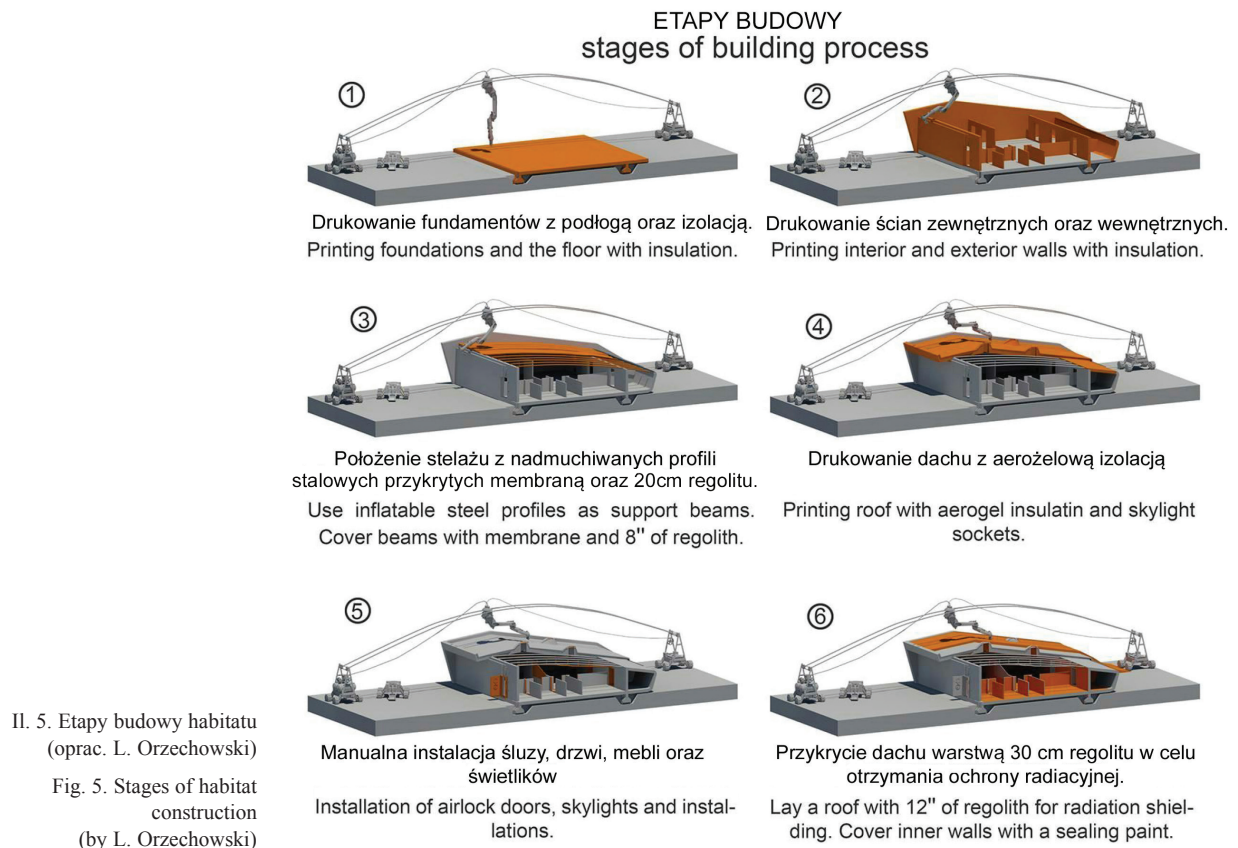
### 4X Strategy

The estimation of the embodied energy of Martian architecture being created must be based on a set strategy that allows for efficient management of the various stages of production. The author proposes to divide the individual tasks into four separate departments, distinguished by complexity and the use of robots with different purposes:

- exploration to locate material deposits,
- extraction and transport of this material,
- exploitation of this material or resource to meet the needs of the facility,
- expansion of the facility by creating new structures using a surplus of raw materials gathered.

This break down has been named the “4X strategy” (*eXplore, eXtract, eXploit, eXpand*), and derives from the method of designing the gameplay mechanics of a popular computer game genre. The main goal of games in the 4X genre is to provide convenient conditions for the growth of a specific social structure model, such as a city or civilisation, by securing strategic resources and efficient management of resources and space [17].

The most well-known representatives of this game genre are, for example, the series Sid Meier’s *Civilization* and *Colonization* [18], [19], *Pharaoh* [20] and *Master of Orion* [21]. In each game, the strategically important resources are matched to the type of gameplay, and this could be the



wania mechaniki rozgrywki popularnego gatunku gier komputerowych. Głównym celem gier z gatunku 4X jest zapewnienie dogodnych warunków wzrostu pewnego modelu struktury społecznej, np. miasta czy cywilizacji, poprzez zabezpieczenie strategicznych surowców oraz sprawne zarządzanie zasobami i przestrzenią [17].

Najbardziej znanymi przedstawicielami tego gatunku gier jest np. seria *Cywilizacja* oraz *Kolonizacja Sida Meiersa* [18], [19], *Faraon* [20] czy *Master of Orion* [21]. W każdej z gier ważne strategicznie zasoby są dopasowane do typu rozgrywki i nie inaczej musi być w przypadku realnego rozwoju placówki na innej planecie. Podane powyżej aspekty strategii 4X będą wykonywane przez roboty, które do realizacji zadań będą zużywały energię. Budując autonomicznie nowy habitat, można zsumować ilość energii zużytej przez roboty podczas wykonywania poszczególnych zadań, a następnie podzielić tę wartość przez końcową masę gotowej budowli, otrzymując wartość energii „ucieleśnionej” w daną konstrukcję, jak pokazano we wzorze (1):

$$E_{\text{hab}} = \frac{E_A + E_B + E_C + E_D}{M_{\text{hab}}} \quad (1)$$

gdzie:

$E_{\text{hab}}$  – energia ucieleśniona wybudowanego habitatu [MJ/kg],

$E_A$  – energia zużyta na procesy typu eksploracja [MJ],

$E_B$  – energia zużyta na procesy typu ekstrakcja [MJ],

$E_C$  – energia zużyta na procesy typu eksploatacja [MJ],

$E_D$  – energia zużyta na procesy typu ekspansja [MJ],

$M_{\text{hab}}$  – masa skonstruowanego habitatu [kg].

case in the development of a facility on another planet. The abovementioned aspects of the 4X strategy will be performed by robots that will use energy to carry out tasks. By autonomously building a new habitat, one can add up the amount of energy consumed by the robots while performing individual tasks, then divide this value by the final mass of the completed structure and obtain the value of “embodied” energy in a given structure, as shown in formula (1):

$$E_{\text{hab}} = \frac{E_A + E_B + E_C + E_D}{M_{\text{hab}}} \quad (1)$$

where:

$E_{\text{hab}}$  – embodied energy of the built habitat [MJ/kg],

$E_A$  – energy consumed for exploration-type processes [MJ],

$E_B$  – energy consumed for extraction-type processes [MJ],

$E_C$  – energy consumed for exploitation-type processes [MJ],

$E_D$  – energy consumed for expansion-type processes [MJ],

$M_{\text{hab}}$  – mass of the constructed habitat [kg].

### Exploration

Exploration will be one of the fundamental tasks of future manned Mars missions. This is a way of collecting data and studying the points of interest. The points of interest may have scientific or strategic importance. Areas with potential resource reserves should be tested and, if the verification is positive, exploited. Exploration using robotic agents is the fastest and safest way of conducting investigations. If one of the goals of the mission is to achieve partial independence of finding water, building

### Eksploracja

Eksploracja będzie jednym z fundamentalnych zadań przyszłych załogowych misji marsjańskich. Jest to sposób na zbieranie danych i badanie tzw. regionów zainteresowań (*points of interests*). Regiony zainteresowań mogą mieć znaczenie naukowe bądź strategiczne. Obszary z potencjalnymi złożami zasobów powinny zostać przebadane, a w przypadku pozytywnej weryfikacji – eksploatowane. Eksploracja za pomocą robotycznych agentów to najszybszy i najbezpieczniejszy sposób dokonania rozpoznania. Jeśli jednym z celów misji będzie osiągnięcie częściowej niezależności odnajdywania depozytów wody, materiałów budowlanych czy metali, stanie się on koniecznością dla powodzenia misji oraz rozwoju samowystarczalnej placówki. Biorąc powyższe pod uwagę, eksploracja za pomocą łazików jest relatywnie prosta do przedstawienia w formie zużytej przez roboty energii, jak pokazano to we wzorze (2):

$$E_A = \sum_{i=1}^{N_A} P_{A,i} t_{A,i} \quad (2)$$

gdzie:

- $P_{A,i}$  – moc  $i$ -tego łazika użytego w procesie eksploracji,
- $t_{A,i}$  – czas pracy  $i$ -tego łazika w procesie eksploracji,
- $N_A$  – liczba łazików.

### Ekstrakcja

Proces ekstrakcji skupia się na pozyskaniu zasobów zidentyfikowanych podczas eksploracji oraz transporcie ich w okolice bazy w celu rafinacji do użytecznych wariantów. Energia wykorzystana w tym etapie to suma pracy wykonanej przez łaziki oraz inne urządzenia uczestniczące w procesie, jak pokazano we wzorze (3):

$$E_B = \sum_{i=1}^{N_B^{(1)}} P_{B,i}^{(1)} t_{B,i}^{(1)} + \sum_{i=1}^{N_B^{(2)}} P_{B,i}^{(2)} t_{B,i}^{(2)} + \sum_{i=1}^{N_B^{(j)}} P_{B,i}^{(j)} t_{B,i}^{(j)} + \dots \quad (3)$$

gdzie:

- $P_{B,i}^{(j)}$  – moc  $i$ -tego łazika w  $j$ -tej grupie procesu ekstrakcji,
- $t_{B,i}^{(j)}$  – czas pracy  $i$ -tego łazika w  $j$ -tej grupie procesu ekstrakcji.

### Eksploatacja

Eksploatacja reprezentowana jest sumą energii zużywanej, by utrzymać astronautów przy życiu, a placówkę w pełni możliwości operacyjnych. U podstaw tego procesu znaleźć można wszystkie zrównoważone technologie oparte na zamkniętych pętlach odnawiania zasobów oraz zarządzania tymi zasobami. Załoga zużywa wodę, jedyne i tlen, wydalając dwutlenek węgla i organiczne odpady. System kontroli klimatu i podtrzymywania życia (Environmental Control and Life Support System – ECLSS) jest odpowiedzialny za utrzymywanie tlenu i dwutlenku węgla na dopuszczalnych poziomach. System odpowiada też za kontrolę temperatury, ciśnienia wewnątrz habitatu oraz odzyskiwanie zużytej wcześniej wody i tlenu.

material or metal deposits, it will become a necessity for the success of the mission and the development of a self-sufficient facility. Taking this into account, rover exploration is relatively easy to represent in the form of energy consumed by the robots, as shown in formula (2):

$$E_A = \sum_{i=1}^{N_A} P_{A,i} t_{A,i} \quad (2)$$

where:

- $P_{A,i}$  – the power of the  $i$ -th rover used in the exploration process,
- $t_{A,i}$  – the working time of  $i$ -th rover in the exploration process,
- $N_A$  – number of rovers.

### Extraction

The extraction process focuses on obtaining the resources identified during exploration, and transporting them to the base for refining for useful forms. The energy used at this stage is the total of the work carried out by the rovers and other devices involved in the process, as shown in formula (3):

$$E_B = \sum_{i=1}^{N_B^{(1)}} P_{B,i}^{(1)} t_{B,i}^{(1)} + \sum_{i=1}^{N_B^{(2)}} P_{B,i}^{(2)} t_{B,i}^{(2)} + \sum_{i=1}^{N_B^{(j)}} P_{B,i}^{(j)} t_{B,i}^{(j)} + \dots \quad (3)$$

where:

- $P_{B,i}^{(j)}$  – the power of  $i$ -th rover in the  $j$ -th group of the Extraction process,
- $t_{B,i}^{(j)}$  – the operating time of  $i$ -th rover in the  $j$ -th group of the Extraction process.

Exploitation is represented by the total energy consumed to keep the astronauts alive and the facility fully operational. At the heart of this process are all sustainable technologies based on closed resource renewal loops and managing these resources. The crew uses water, food and oxygen, expelling carbon dioxide and organic waste. The Environmental Control and Life Support System (ECLSS) is responsible for keeping oxygen and carbon dioxide at acceptable levels. The System is also responsible for controlling the temperature, pressure inside the habitat, and recovering previously used water and oxygen. The recovery efficiency of current ECLSS is 80% of water and 98% of oxygen used [22].

In the simplest type of a manned mission, all consumable resources needed are delivered from Earth, and the crew will be able to complete the mission only because of ECLSS. In such a scenario, the sum of the energy during the exploitation process will be equal to the work done by ECLSS, as shown in formula (4):

$$E_C = P_C t_C N_C \quad (4)$$

where:

- $P_C$  – power of ECLSS machines,
- $t_C$  – ECLSS working time needed to service one astronaut,
- $N_C$  – number of astronauts.

A more-complex scenario can also be envisaged, in which consumable resources, such as water, are obtained



Sprawność odzysku obecnych systemów ECLSS sięga 80% zużytej wody oraz 98% zużytego tlenu [22].

W najprostszym typie misji załogowej wszystkie potrzebne zasoby zużywalne zostają dostarczone z Ziemi, a załoga będzie mogła wykonać misję jedynie dzięki pracy systemu ECLSS. W takim scenariuszu suma energii podczas procesu eksploatacji będzie równa pracy wykonanej przez ECLSS, jak przedstawione zostało we wzorze (4):

$$E_C = P_C t_C N_C \quad (4)$$

gdzie:

$P_C$  – moc maszyn ECLSS,

$t_C$  – czas pracy ECLSS potrzebny do obsłużenia jednego astronauty,

$N_C$  – liczba astronautów.

Można założyć też bardziej złożony scenariusz, w którym zasoby zużywalne, np. woda, są pozyskane z lokalnych złóż. Taki scenariusz przedstawia dążenie do samowystarczalności placówki i w takim wypadku ten aspekt misji mógłby uzyskać najwyższy priorytet. W tym scenariuszu załoga musiałaby za pomocą robotycznych łazików odnaleźć i pozyskać wodny lód, który następnie mógłby zostać poddany procesowi uzdatniania lub zużyty do pozyskania tlenu i wodoru. Obliczenia energii ucieleśnionej będą pomocne w procesie optymalizacji tych zadań w celu stworzenia najbardziej efektywnej strategii utrzymania placówki z zasobów dostępnych na Czerwonej Planecie. Dopiero kiedy placówka osiągnie zadowalający poziom samowystarczalności, a załoga dysponować będzie nadwyżką pozyskanych lokalnie surowców, będzie można rozważać ekspansję i rozbudowę bazy.

### Ekspansja

Ekspansja jest procesem łączącym się ze znacznymi nakładami zasobów. Konstrukcja nowych struktur wymaga nie tylko dużej ilości energii (którą również zużywa istniejąca infrastruktura), ale też materiałów budowlanych pozyskanych podczas procesów eksploracji oraz ekstrakcji. Ten proces jest również czasochłonny, dlatego też uznawany jest za najbardziej skomplikowany. Habitat i jego załoga muszą być przygotowani i zabezpieczeni na czas budowy, wymagającej zaangażowania w pewnym stopniu wszystkich poprzednich procesów. Zakończona rozbudowa placówki pociąga za sobą konieczność ponownego dążenia do samowystarczalności poprzez zwiększenie skali pozyskiwania surowców z dostępnych źródeł w celu pokrycia nowego popytu na tlen, energię czy wodę. Cykl rozwoju placówki ograniczony jest przez ilość dostępnych zasobów oraz poziom ich wydobywania.

Przykładowy, teoretyczny proces konstrukcji architektury z zasobów lokalnych za pomocą technologii wytwarzania przyrostowego został przedstawiony na ilustracji 5 oraz 6. Proces ten zakłada użycie dwóch łazików połączonych suwnicą z ramieniem robotycznym zakończonym laserem składających się na drukarkę 3D, oraz jednego łazika transportującego materiał budowlany. Dla powyższego procesu łatwo można dokonać kalkulacji

from local deposits. This scenario demonstrates the objective of the facility being self-sufficient and, in that case, this aspect of the mission could be given top priority. In this scenario, the crew would have to use robotic rovers to find and obtain water ice, which could then be treated or used to obtain oxygen and hydrogen. Embodied energy calculations will help optimise these tasks to create the most-effective strategy for the maintenance of the facility from the resources available on the Red Planet. It is only when the facility reaches a satisfactory level of self-sufficiency and the crew has a surplus of locally sourced raw materials that development and expansion of the base can be considered.

### Expansion

Expansion is a process that requires substantial resources. The construction of new structures requires not only large amounts of energy (which is also consumed by existing infrastructure), but also building materials acquired during the exploration and extraction processes. This process is also time consuming and, therefore, considered to be the most complicated. The habitat and its crew must be prepared and secured for the duration of the construction, requiring a certain degree of involvement of all previous processes. A completed extension of the facility entails the need to, once again, aspire to self-sufficiency by increasing the scale of obtaining raw materials from available sources to be sufficient for the new demand for oxygen, energy and water. The development cycle of the facility is limited by the amount of resources available and the level of their extraction.

An example of a theoretical process of constructing architecture from local resources using additive manufacturing technology is presented in Figures 4 and 5. This process involves the use of two rovers connected by a crane with a robotic arm with a laser for the 3D printer at the end, and one rover transporting building material. For the above process, calculations of the work performed by the robots are simple, as shown in formula (5):

$$E_D = \sum_{i=1}^{N_D^{(1)}} P_{D,i}^{(1)} t_{D,i}^{(1)} + \sum_{i=1}^{N_D^{(2)}} P_{D,i}^{(2)} t_{D,i}^{(2)} + \sum_{i=1}^{N_D^{(j)}} P_{D,i}^{(j)} t_{D,i}^{(j)} + \dots \quad (5)$$

where:

$P_{D,i}^{(j)}$  – power of  $i$ -th rover in  $j$ -th group of the Expansion process,

$t_{D,i}^{(j)}$  – the operating time of  $i$ -th rover in the  $j$ -th group of the Expansion process.

### Prototype scenario

To illustrate the 4X strategy, a prototype simulation was used. The simulation is based on real-time strategy computer games and turn-based games. Creating similar simulations will make it possible to not only illustrate how this type of solution works, but also carry out the first simplified optimisations of resource management strategies. As a result, it will be possible to prepare a number of strategies and procedures depending on the scenario set. The technological concepts contained in the presented

pracy wykonanej przez roboty, jak przedstawiono we wzorze (5):

$$E_D = \sum_{i=1}^{N_D^{(1)}} P_{D,i}^{(1)} t_{D,i}^{(1)} + \sum_{i=1}^{N_D^{(2)}} P_{D,i}^{(2)} t_{D,i}^{(2)} + \sum_{i=1}^{N_D^{(j)}} P_{D,i}^{(j)} t_{D,i}^{(j)} + \dots \quad (5)$$

gdzie:

$P_{D,i}^{(j)}$  – moc  $i$ -tego łożnika w  $j$ -tej grupie procesu ekspansji,  
 $t_{D,i}^{(j)}$  – praca  $i$ -tego łożnika w  $j$ -tej grupie procesu ekspansji.

### Prototypowy scenariusz

W celu przedstawienia funkcjonowania strategii 4X posłużono się prototypową symulacją. Symulacja operuje na zasadach zaczerpniętych z komputerowych gier strategicznych czasu rzeczywistego oraz gier turowych. Tworzenie podobnych symulacji pozwoli nie tylko zilustrować zasadę działania tego typu rozwiązań, lecz także przeprowadzić pierwsze uproszczone optymalizacje strategii zarządzania zasobami. W rezultacie możliwe będzie przygotowanie wielu strategii i procedur w zależności od zadanego scenariusza. Technologiczne koncepcje zawarte w przedstawianym prototypie opierają się na rozwiązaniach wypracowanych przez grupę projektową Space is More z Politechniki Wrocławskiej pod kierownictwem autora w ramach konkursu NASA 3D Printed Habitat Challenge [12].

### Miejsce lądowania

Placówka została umiejscowiona na Marsie w kraterze Gale o współrzędnych 5.4S, 137.8E w północno-zachodnim kwadrancie regionu Aeolis (il. 6). Została ona wybrana ze względu na istniejące obszerne zbiory danych orbitalnych i analiz wykonanych na potrzeby misji łożnika Curiosity podczas procesu selekcji obszaru misji MER (Mars Exploration Rover) [24], [25].

Wyselekcjonowany region ma przynajmniej trzy możliwe źródła materiału budowlanego w postaci wydm. Wydmy Aeolis można podzielić na trzy podgrupy:

1. Ciemne wydmy podstawy góry Sharp – złożone z metamorficznych składowych sugerujących sproszkowany oliwin, czyli skalę bazaltową. Rozmiary ziarna wymagają szczegółowych badań terenowych [26].

prototype are based on the solutions developed by the Space is More project team of the Wrocław University of Science and Technology under the direction of the author as part of the NASA 3D Printed Habitat Challenge [12].

### Landing site

The facility was located on Mars in the Gale Crater with coordinates 5.4S, 137.8E in the north-western quadrant of the Aeolis region (Fig. 6). It was chosen because of the existing extensive orbital data sets and analyses conducted for the purpose of the rover Curiosity during the process of selecting the MER (Mars Exploration Rover) mission area [23], [24].

The selected region has at least three possible sources of construction material in the form of dunes. Aeolis dunes can be divided into three subgroups:

1. Dark dunes at the base of the Sharp Mountain – composed of metamorphic components suggesting a powdered olivine, which is basalt rock. Grain sizes require detailed field studies [25].

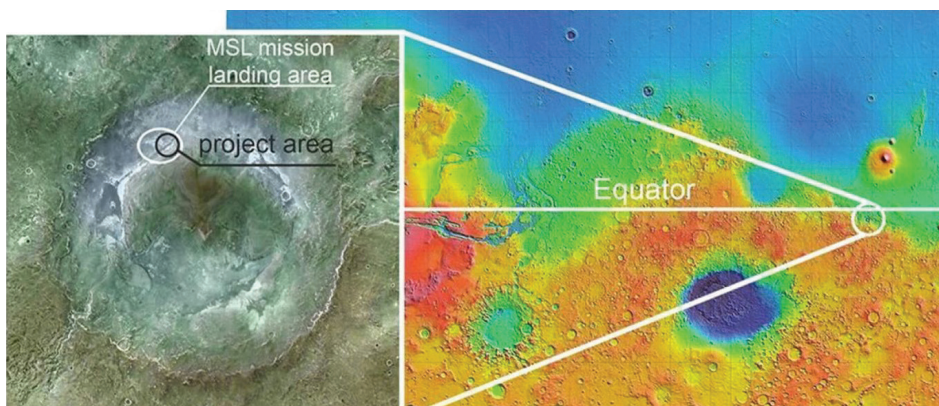
2. Dunes inside the craters scattered over Aeolis Palus – on the map (Fig. 7), large formations with a size larger than 60 m have been marked in white. Each highlighted deposit has a sufficient amount of building material for habitat construction [26].

3. Small aeolian dunes scattered at the base of the crater that may contain useful material on fine fraction [27].

### Simulation

The simulation scenario presented is defined as the mission of four astronauts in a functional habitat. Nearby are solar-panel batteries providing energy, and a set of autonomous machines: four exploring rovers, two rovers collecting regolith, and one printer consisting of two robots. In the simulated scenario, the base is self-sufficient. A decision is made to build a habitat extension that will provide shelter for the next four astronauts. To this end, a robotic process of finding and gathering construction materials can be carried out, as well as construction of the shell stage of the construction. An example of such a simulation is shown in Figures 8 and 9.

In order to execute the scenario, the described processes operate in a 4X cycle: exploration, extraction, exploita-



Il. 6. Krater Gale oraz wybrane miejsce lądowania (oprac. L. Orzechowski)

Fig. 6. Gale Crater and selected landing site (by L. Orzechowski)

2. Wydmy znajdujące się wewnątrz kraterów rozrzuconych po Aeolis Palus – na mapie (il. 7) oznaczono kolorem białym znaczne formacje o rozmiarach większych niż 60 m. Każdy zaznaczony depozyt posiada dostateczną ilość budulca dla konstrukcji habitatu [27].

3. Małe wydmy aeolinu rozsiane przy podstawie krateru mogące zawierać przydatny materiał o drobnej frakcji [27].

### Symulacja

Scenariusz symulacji jest przedstawiony jako misja czterech astronautów znajdujących się w funkcjonalnym habitacie. W pobliżu znajdują się baterie paneli słonecznych dostarczające energię oraz zestaw autonomicznych maszyn: 4 łazików eksplorujących, 2 łazików zbierających regolit oraz jednej drukarki złożonej z dwóch robotów połączonych suwnicą z ramieniem robotycznym. W symulowanym scenariuszu baza jest samowystarczalna. Podjęta zostaje decyzja o budowie rozszerzenia habitatu, który zapewni schronienie kolejnej czwórce astronautów. W tym celu można przeprowadzić robotyczny proces zlokalizowania materiałów konstrukcyjnych, pozyskania ich oraz budowy stanu surowego konstrukcji. Przykładowy przebieg takiej symulacji przedstawiony został na ilustracji 8 i 9.

W celu realizacji scenariusza opisane procesy operują w cyklu 4X: eksploracji, ekstrakcji, eksploatacji oraz ekspansji. Zaczynając, operator habitatu oraz robotów – po zapoznaniu się z sytuacją bazy (il. 8A, nr 2) – stwierdza:

- Łazik zbierający pozyskuje wodę w postaci lodu z pobliskiego depozytu (il. 8A, nr 1). Zgromadzone zapasy są wystarczające na zaspokojenie potrzeb habitatu na okres rozbudowy.

- W pobliżu habitatu znajduje się niewielka ilość zgromadzonego wcześniej materiału budowlanego w postaci odpowiednio małej frakcji regolitu.

- Łaziki eksplorujące nie pracują, znajdują się w najbliższej okolicy bazy (il. 8A, nr 3).

Operator podejmuje decyzje o rozbudowie habitatu, wybierając miejsce konstrukcji (il. 8B, nr 4). Po zatwierdzeniu lokalizacji roboty drukujące rozpoczynają proces budowy, używając wcześniej zgromadzonego materiału budowlanego. Rozpoczyna się procedura ekspansji. Roboty drukujące kontynuują proces budowy, podczas gdy łaziki zbierające dostarczają materiał (il. 8B, nr 5, 6). W pewnym momencie operator dostaje informacje o wyczerpaniu zgromadzonego depozytu materiału budowlanego i wstrzymaniu procesu budowy. Procedura ekspansji zostaje przerwana, a zostają uruchomione procedury eksploracji w celu zidentyfikowania nowego depozytu materiału budowlanego oraz procedura ekstrakcji pobliskiego depozytu lodu – kontynuacja wcześniej przerwane go procesu (il. 8C, nr 8, 9).

Operator na podstawie danych satelitarnych określa obszar eksploracji dla łazików eksplorujących. Wybiera oddalony o pół kilometra na wschód teren pokryty licznymi wydmami oraz rumoszem skalnym. Po dotarciu na miejsce łazik, analizując jedną z wydmy, identyfikuje

tion, and expansion. While starting the scenario the player needs to consider the state of the base, robots and resources (Fig. 8A, no. 1–3). He assesses:

- A gathering rover collects water in the form of ice from a nearby deposit,

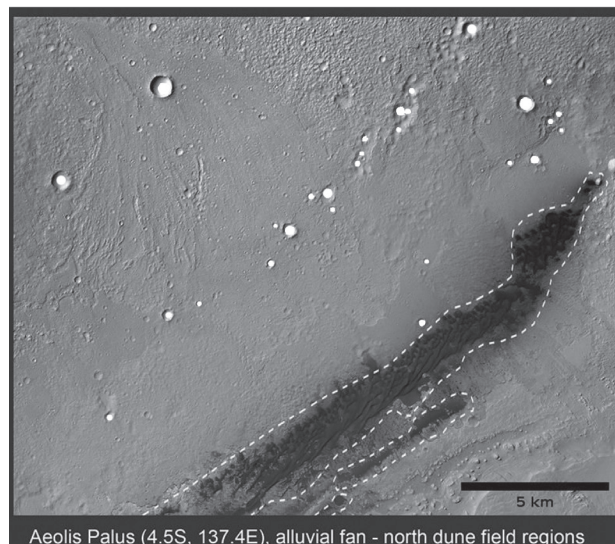
- Station has enough consumables (water, food, oxygen) to sustain its crew for a prolonged period of time,

- There is a small deposit of building material located in the close proximity of the base.

- The exploration and building rovers are idle and are near the base.

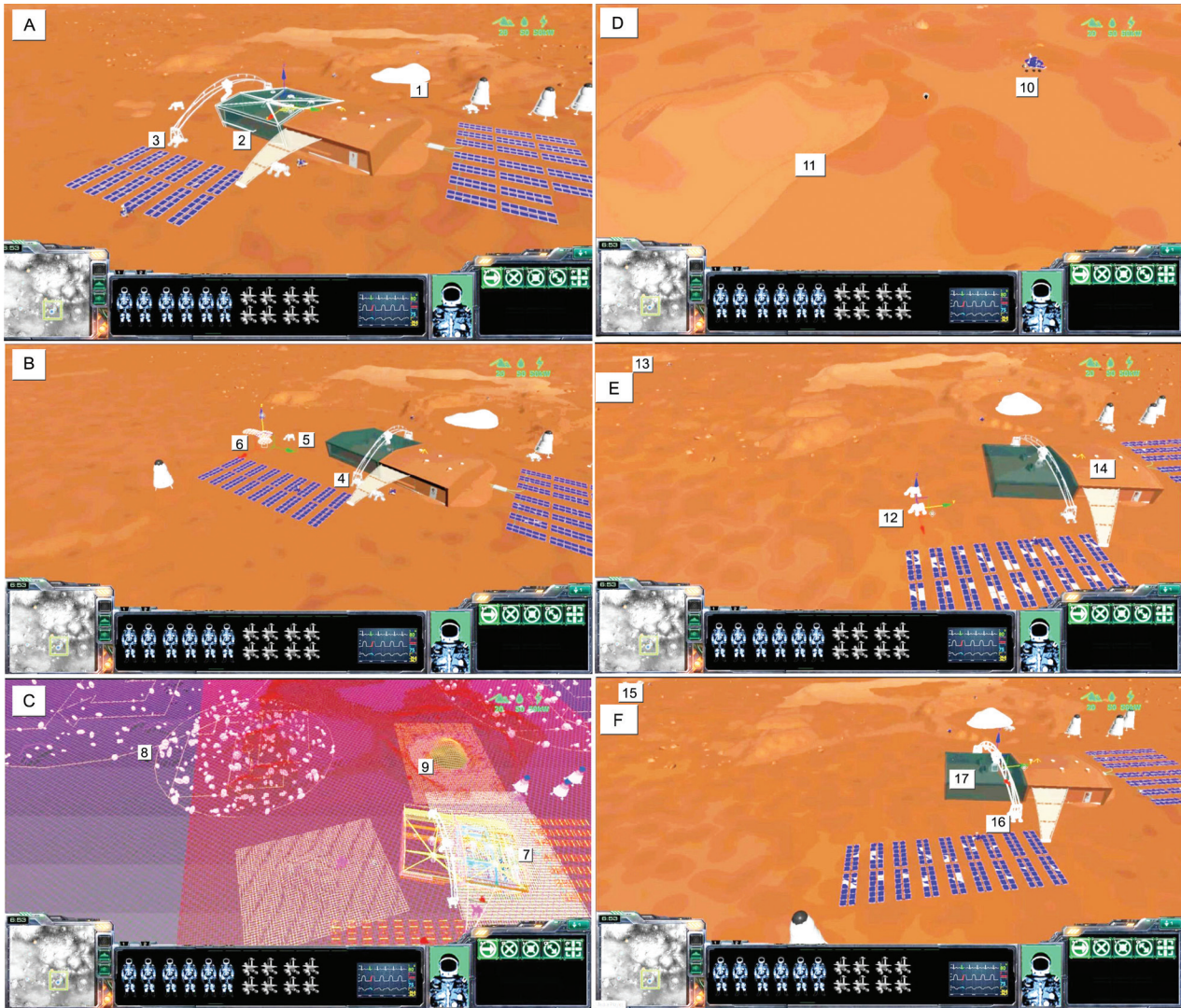
The operator decides that it is a favourable situation to start the building process. A place for future expansion of the habitat is chosen. Printing robots begin the construction process using previously collected building materials. The Expansion procedure begins. Gathering rovers transport construction material to printing robots until the deposit of construction material has been exhausted before completion of the construction process (Fig. 8B, no. 4–6). The player is in need of new construction material deposit. He analyses satellite data to set exploration directions. Key sites are identified: Habitat (Fig. 8C, no. 7), Rock rubble (Fig. 8C, no. 8), Water ice deposit (Fig. 8C, no. 9).

An exploring rover is sent to a location near rocky rubble fields. It finds a regolith deposit with the right fraction for construction (Fig. 8D, no. 10, 11). The collecting rovers are sent to the building material deposit (Fig. 8E, no. 12–14). The expansion process can continue. With enough material, power and supplies construction can be finalized without further drawbacks (Fig. 8F, no. 16, 17). The player is presented with an amount of power used and embodied energy of the habitat. He/she is informed that according to the simulation scenario the process could be optimized and could take less time and energy resulting in lower embodied energy of the habitat.



Il. 7. Rejony zainteresowań w kraterze Gale (oprac. L. Orzechowski)

Fig. 7. Areas of interest in the Gale Crater (by L. Orzechowski)



Il. 8. Wizualizacja scenariusza symulacji (oprac. L. Orzechowski)

Fig. 8. Visualisation of the simulated scenario (by L. Orzechowski)

odpowiednią frakcją regolitu pozwalającą na użycie w procesie budowlanym (il. 8D, nr 10, 11). W tym momencie proces eksploracji może zostać zakończony po bezpiecznym powrocie łazika i oznaczeniu trasy. Cel procesu ekstrakcji zostaje zmieniony z depozytu lodu na oddalony depozyt materiału budowlanego (il. 8E, nr 12–14). Po zapewnieniu regularnych dostaw materiału operator może podjąć decyzję o kontynuacji procesu ekspansji (il. 8F, nr 16, 17). Przy dostatecznie dużych ilościach energii, zapasów wody oraz materiału budowlanego rozbudowa bazy kończy się sukcesem.

### Wnioski

Powyżej omówiony scenariusz przedstawia szereg akcji zbieżnych z założeniami strategii 4X pozwalającymi opisać proces prowadzenia budowy za pomocą robotów. Dla scenariusza można przeprowadzić kalkulację energii ucieleśnionej skonstruowanego habitatu. Wyniki takich obliczeń mogą pomóc w optymalizacji przyszłych zadań i ograniczeniu czasu budowy lub zużycia energii.

### Conclusions

The above scenario describes a series of actions that coincide with the 4X strategy and that are needed to create the architecture using robots. Calculations of the embodied energy of the constructed habitat can be carried out for the scenario. The results of such calculations can help optimise future tasks and reduce construction time and energy consumption. Following is equation (6), which describes the calculations for the considered simulation:

$$E_{\text{hab}} = \frac{1}{M_{\text{hab}}} \left( P_{A,1} t_{A,1} + P_{B,1}^{(1)} t_{B,1}^{(1)} + P_{B,1}^{(2)} t_{B,1}^{(2)} + P_C t_C \cdot 4 \right) + P_{D,1}^{(1)} t_{D,1}^{(1)} + P_{D,1}^{(2)} t_{D,1}^{(2)} + P_{D,2}^{(2)} t_{D,2}^{(2)} \quad (6)$$

The meaning of symbols, in order:

$P_{A,1}$ ;  $t_{A,1}$  – power and running time of rover No. 1 in the Exploration group,

$P_{B,1}^{(1)}$ ;  $t_{B,1}^{(1)}$  – power and running time of rover No. 1 assigned to task (1) in the Extraction group,

$P_{B,1}^{(2)}$ ;  $t_{B,1}^{(2)}$  – power and running time of rover No. 2 assigned to task (2) in the Exploitation group,

Równanie (6) dla rozważanej symulacji wygląda następująco:

$$E_{\text{hab}} = \frac{1}{M_{\text{hab}}} \left( P_{A,1} t_{A,1} + P_{B,1}^{(1)} t_{B,1}^{(1)} + P_{B,1}^{(2)} t_{B,1}^{(2)} + P_C t_C \cdot 4 \right) + P_{D,1}^{(1)} t_{D,1}^{(1)} + P_{D,1}^{(2)} t_{D,1}^{(2)} + P_{D,2}^{(2)} t_{D,2}^{(2)} \quad (6)$$

gdzie:

$P_{A,1}$ ;  $t_{A,1}$  – moc i czas pracy łożyska 1 w grupie eksploatacji,

$P_{B,1}^{(1)}$ ;  $t_{B,1}^{(1)}$  – moc i czas pracy łożyska 1 przydzielonego do zadania (1) w grupie ekstrakcji,

$P_{B,1}^{(2)}$ ;  $t_{B,1}^{(2)}$  – moc i czas pracy łożyska 2 przydzielonego do zadania (2) w grupie eksploatacji,

$P_{D,1}^{(1)}$ ;  $t_{D,1}^{(1)}$  – moc i czas pracy łożyska 1 przydzielonego do zadania (1) w grupie ekspansji,

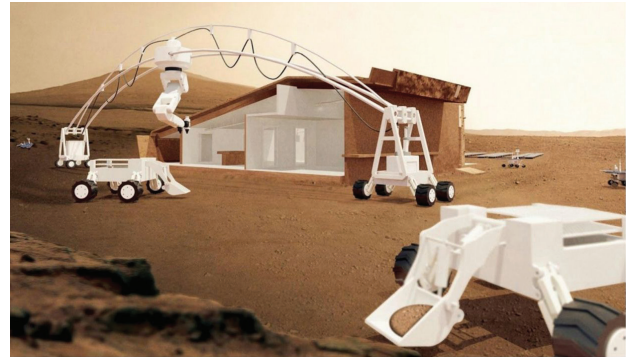
$P_{D,1}^{(2)}$ ;  $t_{D,1}^{(2)}$  – moc i czas pracy łożyska 1 przydzielonego do zadania (2) w grupie ekspansji,

$P_{D,2}^{(2)}$ ;  $t_{D,2}^{(2)}$  – moc i czas pracy łożyska 2 przydzielonego do zadania (2) w grupie ekspansji,

4 – liczba astronautów;

oznaczenia  $P_C$ ,  $t_C$  oraz  $M_{\text{hab}}$  zostały zdefiniowane we wcześniejszych wzorach.

Wyniki powyższego obliczenia wyznaczyłyby koszt architektury tworzonej na Marsie mierzony w jednostkach energii ucieleśnionej. Zastosowanie strategii 4X w trakcie tworzenia powyższego równania pozwala na przejrzystą klasyfikację podobnych co do złożoności grup zadań. Autor jest zdania, że dzięki połączeniu estymacji energii ucieleśnionej ze strategią 4X możliwe są daleko idące optymalizacje kosztów i zużycia energii pracy robotów. Możliwe jest również użycie powyższej metody w warunkach ziemskich, przy założeniu odpowiednio dużej automatyzacji procesów produkcji i dokładnym określeniu odcisku węglowego tych procesów. Aby potwierdzić takie szacowania, potrzebne jest przeprowadzenie testów i symulacji pozwalające pozyskać konkretne dane liczbowe. Zaprezentowany powyżej scenariusz takiej symulacji jest obiecującym wstępem do badań nad zarysowanym powyżej zagadnieniem.



Il. 9. Wizualizacja procesu druku 3D (oprac. L. Orzechowski)

Fig. 9. Visualisation of the 3D printing process (by L. Orzechowski)

$P_{D,1}^{(1)}$ ;  $t_{D,1}^{(1)}$  – power and running time of rover No. 1 assigned to task (1) in the Expansion group,

$P_{D,1}^{(2)}$ ;  $t_{D,1}^{(2)}$  – power and running time of rover No. 1 assigned to task (2) in the Expansion group,

$P_{D,2}^{(2)}$ ;  $t_{D,2}^{(2)}$  – power and running time of rover No. 2 assigned to task (2) in the Expansion group,

4 – number of astronauts;

meanings of  $P_C$ ,  $t_C$  and  $M_{\text{hab}}$  are defined in earlier formulas.

The results of the above calculation would determine the cost of the Mars-based architecture measured in units of embodied energy. The use of the 4X strategy while creating the above equation allows for a clear classification of similarly complex task groups. The author is of the opinion that, thanks to the combination of the estimation of embodied energy with the 4X strategy, far-reaching optimisation of costs and energy consumption of robots is possible. It is also possible to use the above method in Earth conditions, assuming a sufficiently high automation of production processes and precise determination of the carbon footprint of these processes. In order to confirm such estimates, it is necessary to carry out tests and simulations to obtain specific figures. The above scenario of such a simulation is a promising introduction to research on the abovementioned problem.

Translated by  
Robert Ciechowicz

## Bibliografia/References

- [1] Kardashev N., *Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations*, „Soviet Astronomy” 1964, Vol. 8, No. 2, 217–221.
- [2] Kardashev N., *On the Inevitability and the Possible Structures of Supercivilizations*, [w:] M.D. Papagiannis (ed.), *The search for extraterrestrial life: Recent developments. Proceedings of the 112<sup>th</sup> Symposium of the International Astronomical Union Held at Boston University, Boston, Mass., U.S.A., June 18–21, 1984*, D. Reidel Publishing, Dordrecht 1985, 497–504.
- [3] Sagan C., *Cosmic Connection: An Extraterrestrial Perspective*, Dell Publishing Company, New York 1975.
- [4] Parmesan C., Yohe G., *A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems*, „Nature” 2003, No. 421, 37–42.
- [5] Hammond G., Jones C., *Inventory of Carbon & Energy (ICE)*, University of Bath, 2008, <http://www.organicexplorer.co.nz/site/organicexplorer/files/ICE%20Version%201.6a.pdf> [accessed: September 2017].
- [6] NASA, *Journey To Mars*, <https://www.nasa.gov/content/nasas-journey-to-mars> [accessed: September 2017].
- [7] Zubrin R., Richard W., *The Case for Mars: the plan to settle the red planet and why we must*, Touchstone by Simon & Schuster, New York 1997.
- [8] *The Mars Surface Reference Mission: A Description of Human and Robotic Surface Activities*, S.J. Hoffman (ed.), NASA 2001, <http://www.nss.org/settlement/mars/2001-NASA-MarsSurfaceReferenceMission.pdf> [accessed: September 2017].
- [9] Mars Architecture Steering Group, *Human Exploration of Mars Design Reference Architecture 5.0*, B.G. Drake (ed.), NASA 2009, [https://www.nasa.gov/pdf/373665main\\_NASA-SP-2009-566.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/373665main_NASA-SP-2009-566.pdf) [accessed: September 2017].
- [10] *Mars Destination Operations*, L. Toups (ed.), NASA 2014, [https://www.lpi.usra.edu/lunar/strategies/HAT\\_Mars-DOT-2013-Final-Report.pdf](https://www.lpi.usra.edu/lunar/strategies/HAT_Mars-DOT-2013-Final-Report.pdf) [accessed: September 2017].

- [11] ESA, [http://www.esa.int/Highlights/Lunar\\_3D\\_printing](http://www.esa.int/Highlights/Lunar_3D_printing), 2015 [accessed: September 2017].
- [12] NASA 3D-Printed Habitat Challenge, [https://americamakes.us/wpcontent/themes/3dchallenge2015/assets/Design\\_Competition\\_Rules.pdf](https://americamakes.us/wpcontent/themes/3dchallenge2015/assets/Design_Competition_Rules.pdf), 2015 [accessed: September 2017].
- [13] Huntsberger T., Pirjanian P., Schenker P.S., „Robotic outposts as precursors to a manned Mars habitat”, „AIP Conference Proceedings” 2001, Vol. 552, Iss. 1, [https://www.researchgate.net/publication/2801344\\_Robotic\\_Outposts\\_as\\_Precursors\\_to\\_a\\_Manned\\_Mars\\_Habitat](https://www.researchgate.net/publication/2801344_Robotic_Outposts_as_Precursors_to_a_Manned_Mars_Habitat) [accessed: September 2017].
- [14] Huntsberger T., Rodriguez G., Schenker P.S., „Robotics challenges for robotic and Human Mars Exploration”, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena 2012, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.83.3242&rep=rep1&type=pdf> [accessed: September 2017].
- [15] Fong T., Thorpe C., Baur C., „Collaboration, Dialogue, and Human-Robot Interaction”, [w:] *10<sup>th</sup> International Symposium of Robotics Research, Lorne, Victoria, Australia*, Springer-Verlag, Pittsburgh, PA 2001, <https://pdfs.semanticscholar.org/f617/005acc94c64f6f8fed991f9949774257ae8f.pdf> [accessed: September 2017].
- [16] Space is More design team, [www.spaceismore.com](http://www.spaceismore.com) [accessed: September 2017].
- [17] 4x Strategies, <https://en.wikipedia.org/wiki/4X> [accessed: September 2017].
- [18] Civilization, [https://en.wikipedia.org/wiki/Civilization\\_\(video\\_game\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Civilization_(video_game)) [accessed: September 2017].
- [19] Colonization, [https://en.wikipedia.org/wiki/Sid\\_Meier%27s\\_Colonization](https://en.wikipedia.org/wiki/Sid_Meier%27s_Colonization) [accessed: September 2017].
- [20] Pharaoh, [https://en.wikipedia.org/wiki/Pharaoh\\_\(video\\_game\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Pharaoh_(video_game)) [accessed: September 2017].
- [21] Master of Orion II, [https://en.wikipedia.org/wiki/Master\\_of\\_Orion\\_II](https://en.wikipedia.org/wiki/Master_of_Orion_II) [accessed: September 2017].
- [22] Meyer Th.R., McKay C., „The resources of Mars for human settlement”, „Journal of the British Interplanetary Society” 1989, Vol. 42, 147–160, [https://www.researchgate.net/publication/252478654\\_Using\\_the\\_Resources\\_of\\_Mars\\_for\\_Human\\_Settlement](https://www.researchgate.net/publication/252478654_Using_the_Resources_of_Mars_for_Human_Settlement) [accessed: September 2017].
- [23] Schwenzer S.P., Abramov O., Allen C.C. et al., „Gale Crater: Formation and postimpact hydrous environments”, „Planetary and Space Science” 2012, No. 70, Iss. 1, 84–95, <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00320633/70> [accessed: September 2017].
- [24] Golombek M., Grant J., Vasavada A.R. et al., „Final Four Landing Sites For The Mars Science Laboratory”, LPI Contribution No. 1608, 1520, Texas 2011, <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2011/pdf/1520.pdf> [accessed: September 2017].
- [25] Arvidson R.E., Bellutta P., Calef F. et al., „Terrain physical properties derived from orbital data and the first 360 sols of Mars Science Laboratory Curiosity rover observations in Gale Crater”, „Journal of Geophysical Research: Planets” 2014, Vol. 119, 1322–1344, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013JE004605/epdf> [accessed: September 2017].
- [26] Milliken R.E., Ewing R., Fischer W., Hurowitz J., „Clay and Sulfate-Cemented Sandstones in Gale Crater: Evidence from Orbital Data”, [w:] *44<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, March 18–22, 2013*, 1243, <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2013/pdf/1243.pdf> [accessed: September 2017].
- [27] Milliken R., MSL Science Team, „Mineral Mapping of Gale Crater Using Orbital Data: Results From Visible Near Infrared Reflectance Spectroscopy”, „Search and Discovery” 2014, Article #51013, [http://www.searchanddiscovery.com/documents/2014/51013milliken/ndx\\_milliken.pdf](http://www.searchanddiscovery.com/documents/2014/51013milliken/ndx_milliken.pdf) [accessed: September 2017].

## Streszczenie

Celem publikacji było przedstawienie zagadnienia określania kosztów tworzenia ekstremalnej architektury kosmicznej za pomocą autonomicznych robotów na przykładzie teoretycznego scenariusza załogowej misji na Marsa zawartego w dokumencie *NASA Mars Reference Mission*. Autor opisuje strategię pozwalającą określić energię ucieleśnioną zawartą w architekturze stworzonej z lokalnych materiałów za pomocą addytywnych procesów produkcyjnych, czyli druku 3D. Energia ucieleśniona jest sumą energii włożonej w proces wytworzenia dowolnej usługi bądź dobra, w tym energii zużytej do pozyskania surowców do jego wytworzenia, transportu. W ramach omawianej przez autora strategii zakresy prac oraz zadania zostały pogrupowane w cztery działy pokrywające się ze strukturą rozgrywki strategicznych gier komputerowych z gatunku 4X. Gry komputerowe 4X biorą swoją nazwę od skrótowego opisu elementów prowadzenia rozgrywki: *explore, exploit, expand, exterminate*, co w wolnym tłumaczeniu znaczy: eksploracja, eksploatacja, ekspansja, eksterminacja. W trakcie trwania gry użytkownik skupia się na zarządzaniu i rozwijaniu cywilizacji lub miasta, gdzie głównym jego zadaniem jest pozyskiwanie i zarządzanie zasobami. Taka struktura została uznana przez autora za obiecujący punkt wyjścia strategii optymalizacji procesu budowy architektury marsjańskiej przez agentów robotycznych. Wspomniana symulacja mogłaby zostać użyta do stworzenia narzędzia do optymalizacji procedur na potrzeby realnej misji na Marsa przy wykorzystaniu jako wyznacznika energii ucieleśnionej. Takie narzędzie miałoby szansę obniżyć koszty podczas pierwszych załogowych misji na inne planety. W dalszej perspektywie stosowanie takiego rozwiązania do gromadzenia danych o energii ucieleśnionej pozwoli na zachowanie całości danych o odcisku ekologicznym kolonizacji Marsa.

**Słowa kluczowe:** architektura kosmiczna, druk 3D, energia ucieleśniona, automatyzacja budowy

## Abstract

The purpose of this publication is to present the problem of determining the costs of creating extreme space architecture using autonomous robots based on the example of the theoretical manned mission to Mars scenario contained in the *NASA Mars Reference Mission* document. The author focuses on strategies that can determine the embodied energy contained in architecture made from local materials, using additive manufacturing processes – 3D printing. Embodied energy is the sum of the energy invested in the process of producing any service or good, including the energy consumed to obtain raw materials for its production and transport. Procedures to optimise the work of robotic agents will be crucial during manned Mars missions with limited access to resources, including electricity. Using robots to work on the surface will precisely determine the amount of energy used to complete the given job, which will enable optimisation and the determination of the embodied energy of these works. As part of the strategy discussed by the author, the scope of work and tasks are grouped into four divisions that coincide with the gameplay structure of 4X-type strategic computer games. 4X computer games get their name from the brief description of the gameplay elements: “explore, exploit, expand, exterminate”. During the game, the user focuses on managing and developing a civilisation or city, where resource acquisition and management play a central role. The author considers such a structure to be a promising starting point for the strategy of optimising the process of building a Martian architecture using robotic agents. Procedures that can determine the embodied energy of the described processes have been grouped into the sections Exploration, Extraction, Exploitation, and Expansion, and have been included in the simulation model for the manned mission to Mars in the form of a 4X-type computer game prototype. This simulation could be used to create a tool for optimising procedures for the needs of an actual mission to Mars, using embodied energy as an indicator. Such a tool would have the potential to reduce costs during the first manned missions to other planets. In the longer term, the use of such a solution for the collection of data on embodied energy will preserve all environmental footprint data of the colonisation of Mars.

**Key words:** space architecture, 3D printing, embodied energy, building automation