



DOI: 10.21005/pif.2020.41.A-01

ARCHITECTURAL FORM OF A MARTIAN HABITAT: DIGITAL ANALYSES OF SPACE RADIATION AND INSOLATION OF A WATER-ICE CONSTRUCTION

KSZTAŁTOWANIE FORMY ARCHITEKTONICZNEJ HABITATU MARSJAŃSKIEGO: KOMPUTEROWE ANALIZY PROMIENIOWANIA KOSMICZNEGO I NASŁONECZNIENIA LODOWEJ KONSTRUKCJI

Tomasz Dzieduszyński

MSc in Architecture / Mgr inż. arch.

Author's Orcid number: 0000-0003-2571-5128

Ph.D. Candidate

Warsaw University of Technology

ABSTRACT

Researchers and architects responsible for the design of Martian habitats currently direct their attention towards unconventional construction materials, such as water-ice. In this article, a method of architectural forming based on safe radiation levels, insolation and radiation simulations (OLTARIS) is proposed. The suggested methodology allows for a delineation of the design guidelines in a graphical form legible for the architect designing an ice habitat.

Key words: Mars, radiation, insolation, OLTARIS, ice, galactic cosmic rays, solar particle event.

STRESZCZENIE

Badacze i architekci pracujący nad projektami habitatów marsjańskich coraz częściej zwracają się ku niekonwencjonalnym materiałom budowlanym, w tym ku wodnemu lodowi. W niniejszym artykule zaproponowano metodę kształtowania formy architektonicznej lodowej bazy marsjańskiej w oparciu o bezpieczne dla mieszkańców poziomy szkodliwego promieniowania kosmicznego, symulacje nasłonecznienia i promieniowania jonizującego (OLTARIS). Zaprezentowana metoda pozwala opracować graficzne wytyczne dla architekta projektującego lodowy habitat.

Słowa kluczowe: Mars, promieniowanie, nasłonecznienie, OLTARIS, lód, galaktyczne promieniowanie kosmiczne, rozbłysk słoneczny.

1. INTRODUCTION

Mars is one of the main exploration fields of the national, international and private space agencies (ESA 2005; NASA 2015 a; SpaceX 2017; ESA 2018 a; POLSA 2018). The moment in which the first habitats are erected on the Red Planet seems imminent. Even currently, extensive research is being conducted on the design of Martian architecture. During the last few years, the researchers and space architects started to investigate the unconventional building materials available in-situ and state-of-the-art manufacturing techniques such as automated 3D-printing (NASA 2015 b).

In the literature concerning Martian architecture, water-ice is more and more frequently mentioned as the optimal construction material. It stands out from the alternatives thanks to its unique properties such as its transparency (Bolsenga 1978; Bolsenga et al. 1996), relative abundance (Boynton et al. 2002), durability and strength (Petrovic 2003) and ability to shield from the harmful space radiation (Kozicka 2008, p. 169). Many of the architectural problems connected to the design of a Martian habitat can be solved through the utilization of ice structure (Dzieduszyński 2019 a). A new methodology of architectural forming of an ice shelter is presented in this article. The methodology is based on the results of digital simulations of ice's space radiation shielding properties (NASA OLTARIS tool) and parametric tools testing the radiation and insolation levels inside of the designed habitat (algorithms custom-written in Grasshopper and C# programming environments).

The conducted works had an experimental nature (the OLTARIS simulations and custom algorithms) and were complemented by synthetic elements (compilation of necessary data and applicable digital tools). The research has been conducted as a part of the "Mars: 10-50-150" project within the limits of the MSc thesis prepared under the supervision of Prof. Elżbieta Ryńska and Dr. Joanna Klimowicz.

The goals have been delineated as follows:

- Preparation of the architectural guidelines for the thickness of the ice radiation shields depending on the established ionising radiation levels inside of the Martian habitat. Recording the guidelines in a legible and easy to use quantitative form.
- Preparation of the parametric algorithms for the testing of ionising radiation and insolation levels inside of the designed habitat.
- Verification of the hypothesis on the ice-effectiveness in the context of space radiation and visible light transmittance.

2. STATE OF THE ART

The research conducted during the last three decades changed our perception of Mars. From a planet believed to be a sterile desert it turned into a dynamic world once covered with rivers, great lakes and a huge ocean covering most of the northern hemisphere. Some of this water is still present on the surface of the Red Planet in the form of ice mixed with the regolith and glaciers hidden under the layers of solid carbon dioxide. As it turns out, in the Martian conditions water can be used as a construction material (Kozicka 2008).

Many methods have been proposed for the in-situ water extraction (Zubrin 1996) and purification from the toxic perchlorates (Davila et al. 2013) and other contaminants (Ciardullo et al. 2016). Also, 3D-printing of space habitats is being actively investigated (ESA 2013; ESA 2018 b). Joanna Kozicka (2008) writes about water-ice constructions in the Martian context. She mentions, however, only ice-based bricks and subtractive methods (tunnels carved in the glaciers). In 2015, during the NASA 3D-printed habitat challenge, the victorious Ice House team (SEArch, CloudsAO et al.) proposed an idea of ice 3D-printing. The team even presented the physical, 3D-printed ice prototypes (Ciardullo et al. 2016). The radiation shielding aspects of Ice House are based on general NASA data from 1991 (Simonsen, Nealy). According to the author of this article, the proposed solutions do not correspond to the local contexts and provide an inadequate radiation protection. As shown in the OLTARIS simulations results, the summary shielding thickness of 20cm is insufficient for the long-term missions, the chosen site has limited insolation (high latitude) and very high radia-

tion levels (200-230mSv/y according to the Mars Radiation Experiment, Mars Odyssey 2001). In 2016, NASA Langley together with the Ice House authors organised the design workshops resulting in the Ice Home concept project (NASA 2017). Ice Home is currently being developed and subsequent research is being conducted on safety and technical difficulties connected with the realisation of ice Martian habitats (Kempton et al. 2018).

3. METHODOLOGY

3.1. Radiation Limits – Methodology

Following radiation equivalent dose limits have been established for the purpose of the design of the permanent Martian base:

- For pregnant women and children: **20mSv/y** (max. value for the general population, Wrixon 2008; max. value for pregnant women, Strout 2015)
- For the general inhabitants of the base: **35mSv/y** (background radiation in some areas of Norway and Sweden, Kardaszewska 2008)
- For people working outside: **50mSv/y** (max. value for the radiation workers in Poland, Dz.U. z 2005 r. nr 20, poz. 168)

The proposed limits are lower than the values usually utilized by the space agencies. This discrepancy arises from the fact that the current space missions are relatively brief, and astronauts are exposed to limited doses of radiation during their careers. During the Mars exploration however, the habitats must be designed for the permanent or long-term stay. Additionally, during the 3-6-month long Earth-Mars transit the crew will be very poorly protected against the space radiation. During the long-term missions the possibility of pregnancy should also be considered, as well as the related necessity to raise children.

3.2. OLTARIS Simulations, Design Guidelines – Methodology

In order to develop the architectural form guidelines for the design phase of the Martian habitat, a set of digital simulations was conducted utilizing the NASA OLTARIS tool (On-Line Tool for the Assessment of Radiation in Space). OLTARIS is used to test geometries and materials against space radiation during the planned space missions. The input data for a simulation consist of a geometry described in a form of an XML database and an environment defined in the starting parameters. The XML database contains a set of rays propagating concentrically from a tested point and the thicknesses of the radiation-shielding-materials encountered by the rays. I.e.: "The ray no. 1 from the direction $x=0, y=0, z=1$ encounters 100cm of ice and 200cm of Martian regolith".

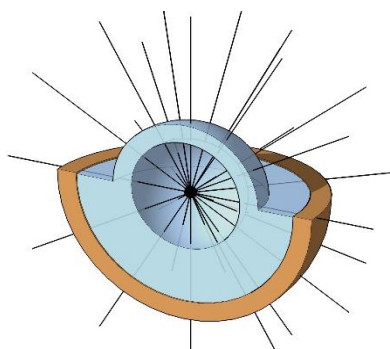


Fig. 1. Tested geometry. GCR with uniform ice shielding. Source: author's study

Ryc. 1. Testowana geometria. GCR z jednolitą osłoną lodową. Źródło: opracowanie własne

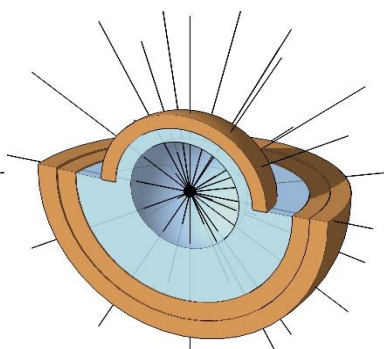


Fig. 2. Tested geometry. GCR with ice-regolith composite shielding. Source: author's study

Ryc. 2. Testowana geometria. GCR z kompozytem lod-regolit. Źródło: opracowanie własne

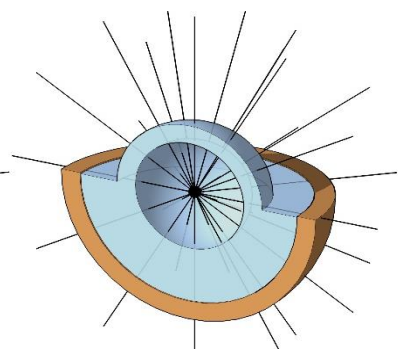


Fig. 3. Tested geometry. SPE with uniform ice shielding. Source: author's study

Ryc. 3. Testowana geometria. SPE z jednolitą osłoną lodową. Źródło: opracowanie własne

A total of 86 simulations was conducted for the varying ice and ice-regolith composite thicknesses. The results were gathered for the two types of cosmic radiation: Galactic Cosmic Rays GCR (high energy, high intensity, relatively stable, uniformly distributed in all directions) and Solar Particle Events SPE (low energy, very high intensity, incidental character, propagating concentrically from the Sun). The following starting parameters have been established:

GCR with uniform ice shielding:

- No. of simulations: 34 (ice thicknesses [cm]: 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 300, 400, 500, 750, 1000)
- Tested values: Dose [mGy/y] (17 simulations) and Equivalent Dose [mSv/y] (17 simulations)
- Environment: GCR, Martian Surface
- GCR Model: Badhwar-O'Neil 2014
- Range: Average for the years 1965-2017
- Altitude: -2000m
- No. of rays: 42 concentric rays propagating uniformly in all directions
- Geometry: Sphere divided into two hemispheres. The top hemisphere made from ice of variable (tested) thickness. The lower hemisphere made from Martian regolith with 176cm thickness (a layer generated by OLTARIS in the "Martian Surface" environment) and a 1000cm-thick ice layer (inner layer simulating the hemispherical geometry of the habitat) (fig. 1.)

GCR with ice-regolith composite shielding:

- No. of simulations: 26 (ice thickness [cm]: 100 + regolith thicknesses [cm]: 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000)
- Tested values: Dose [mGy/y] (13 simulations) and Equivalent Dose [mSv/y] (13 simulations)
- Environment: GCR, Martian Surface
- GCR Model: Badhwar-O'Neil 2014
- Range: Average for the years 1965-2017
- Altitude: -2000m
- No. of rays: 42 concentric rays propagating uniformly in all directions
- Geometry: Sphere divided into two hemispheres. The top hemisphere made from ice of 100cm thickness and the regolith layer of variable (tested) thickness. The lower hemisphere made from Martian regolith with 176cm thickness (a layer generated by OLTARIS in the "Martian Surface" environment), a second layer of regolith of a variable thickness and a 1000cm-thick ice layer (inner layer simulating the hemispherical geometry of the habitat) (fig. 2.)

SPE with uniform ice shielding:

- No. of simulations: 30 (ice thicknesses [cm]: 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 300, 400, 500)
- Tested values: Dose [mGy/y] (15 simulations) and Equivalent Dose [mSv/y] (15 simulations)
- Environment: SPE, Martian Surface
- SPE Model: the strongest in history "Carrington" event from September 1859 with a spectral soft-fit from March 1991
- Altitude: -2000m
- No. of rays: 42 concentric rays propagating uniformly in all directions
- Geometry: Sphere divided into two hemispheres. The top hemisphere made from ice of variable (tested) thickness. The lower hemisphere made from Martian regolith with 176cm thickness (a layer generated by OLTARIS in the "Martian Surface" environment) and a 1000cm-thick ice layer (inner layer simulating the hemispherical geometry of the habitat) (fig. 3.)

The results were recorded in a graphical, linear-diagram form legible for an architect and complemented with additional characteristic values (fig. 6-8). The data presented in the diagrams can be used in the design of the architectural form of an ice Martian habitat. With the help of the delineated radiation-thickness relations a functional program of the base can be prepared. Based on the guidelines an exemplary "Mars: 10-50-150" habitat has been designed (fig. 4-5). In this project the established radiation limits of the interiors are dependent on the time spent by the crew inside of the respective modules. The form and the arrangement of the modules directly emerge from the established radiation limits and necessary summary shielding thicknesses. Additionally, the toroidal

shape of the modules optimally responds to the pressure difference between the interior and the exterior (form of a toroidal pressure tank) and provides a high footprint of the interiors (compromised solely by the pillar in the middle of a module). Due to the invisibility of the cosmic radiation and the necessity of making its gradient legible for the inhabitants, the radiation levels are tied to the insolation and spatial plan of the base. The outer, brighter modules are exposed to higher doses than the inner, darker modules. Thanks to this dependence the radiation levels can be assessed intuitively at first glance.

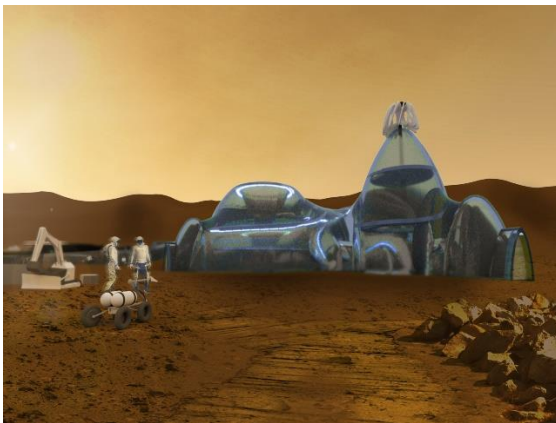


Fig. 4. "Mars: 10-50-150" project; Exploration of the planet. Source: author's study

Ryc. 4. Projekt „Mars: 10-50-150”; Eksploracja planety. Źródło: opracowanie własne

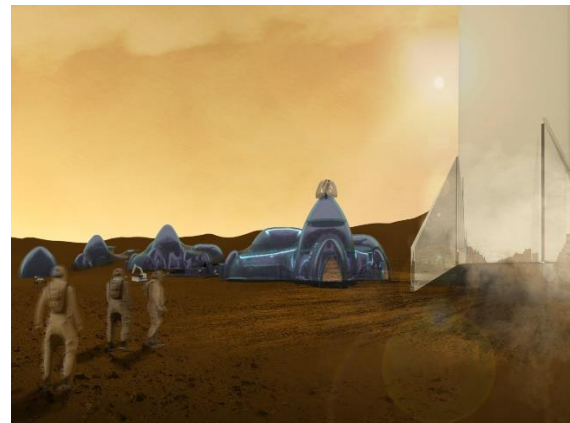


Fig. 5. "Mars: 10-50-150" project; Expanded, phase II habitat and a transfer rocket. Source: author's study

Ryc. 5. Projekt „Mars: 10-50-150”; Rozbudowany habitat fazy II i rakieta transferowa. Źródło: opracowanie własne

The insolation data was based on the extinction coefficient equation for the photosynthetically active light¹ in clear ice (Bolsenga 1996). The following GCR radiation limits [mSv/y] and insolation levels [% of transmitted light] were established for the modules:

- Housing modules: **1mSv/y, 0%** of insolation
- Recreation modules: **35mSv/y, 16.5%** of insolation
- Laboratory modules: **65mSv/y, 40%** of insolation
- Workshop modules: **75mSv/y, 55%** of insolation
- Greenhouse modules: **85mSv/y, 75%** of insolation
- Linear garden modules: **85mSv/y, 75%** of insolation
- Airlocks: **85mSv/y, 40%** of insolation

3.3. Parametric Algorithm Testing the GCR Radiation Levels – Methodology

In order to check whether the designed habitat fulfils the established radiation limits, the creation of a custom parametric tool was necessary. Utilization of OLTARIS was impossible due to the complexity of the geometry (its transcription into the form of an XML database would be cumbersome), the number of points needed to achieve a smooth gradient (4000 points and 256000 rays) and time expended by one simulation (from tens of minutes to few hours). The algorithm testing the geometry of the habitat has been written in the Grasshopper environment (with additional C# scripts).

Out of 4000 points generated within the footprint of the habitat 256000 rays (64 rays per point) are propagating concentrically within the top hemisphere (the radiation coming from the bottom is blocked by the Planet). The collisions between the rays and the geometries of the habitat and the terrain are checked. The lengths of the respectable collision distances are measured and an average summary shielding thickness is calculated for each point. The thicknesses are converted into

¹ The photosynthetically active radiation (400-700nm) is almost identical to visible light (380-750nm)

the yearly equivalent doses in mSv/y based on the OLTARIS results. The obtained values are visualised in the form of a colour diagram.

3.4. Parametric Algorithm Testing the Insolation - Methodology

The existing and easily available tools for insolation analysis are dedicated for the Earthly conditions and traditional construction materials. They can not be used during the design of Martian architecture. Therefore, a custom parametric tool for the insolation analysis was created. The algorithm written in the Grasshopper environment is similar to the radiation-testing program.

Based on the NASA "Mars Trek" data (angle and azimuth of solar rays during the equinox in the chosen site) a 3-hour insolation model was written for the 3 hours around noon on the Martian equinox. The model consists of seven rays corresponding to the Martian solar hours²: 10:30, 11:00, 11:30, 12:00, 12:30, 13:00 and 13:30. The rays propagate from the tested point toward the Sun's position in the sky.

The insolation model is applied to the 4000 points generated within the footprint of the habitat (28000 rays). The collisions between the rays and the habitat's geometry are checked. The collision length is averaged for each of the points (the summary length divided by 7). The resulting average thickness of the Sun-obstructing ice is converted into a percentage insolation value based on the transmittance equation for the photosynthetically active light in clear ice (Bolsenga 1996). The results are visualised in the form of a colour gradient.

4. RESULTS OF THE SIMULATIONS AND TESTS

4.1. OLTARIS Simulations – Results

GCR with uniform ice shielding

The results indicate, that the ice shielding with a summary thickness within the range of 10-300cm (light transmittance of 94.2%-16.5%, Bolsenga 1996) alone is not enough to provide a long-term radiation protection considered safe for the general population, children and pregnant women (20mSv/y). It is possible to provide levels safe for the radiation workers (50mSv/y). Interestingly, even 10cm of ice provides radiation levels lower than in some parts of the Ramsar city in Iran (Kardaszewska 2008). The results of a control simulation conducted for the thickness of 0cm (129mSv/y) are comparable to the real measurements of the Mars Odyssey orbiter for the altitude of -2000m (around 13rem/y \approx 130mSv/y, Mars Radiation Experiment, Mars Odyssey 2001).

GCR with ice-regolith composite shielding

Covering the ice shell with a layer of Martian regolith can reduce the radiation levels to negligible values. A layer of 230cm lowers the doses to the levels safe for the general population, children and pregnant women (20mSv/y). 400cm of regolith reduces the radiation to levels measured at the Grand Central station in New York (5mSv/y). 470cm provides the levels comparable to the background ionising radiation in Poland (2.5mSv/y). The biggest disadvantage of this solution is a total opacity of the ice-regolith composite.

SPE with uniform ice shielding

Even very thin ice layers can shield from the relatively low-energy-particles of the SPE radiation. With 60cm of ice, 90% of radiation is absorbed, and a singular exposition to the solar flare equals to a diagnostic x-ray of the whole body (10mSv). With a 140cm layer, over 97% of the radiation is blocked, the exposition equals to a head x-ray (2mSv). Thicknesses above 300cm lower the radiation to negligible levels. The ice thickness needed to shield from the GCR radiation is simultaneously sufficient to protect from the Solar Particle Events (with a reduced work-time in the most exposed modules during the solar flare).

² One Martian solar hour is longer than the Earthly hour by 2,7%

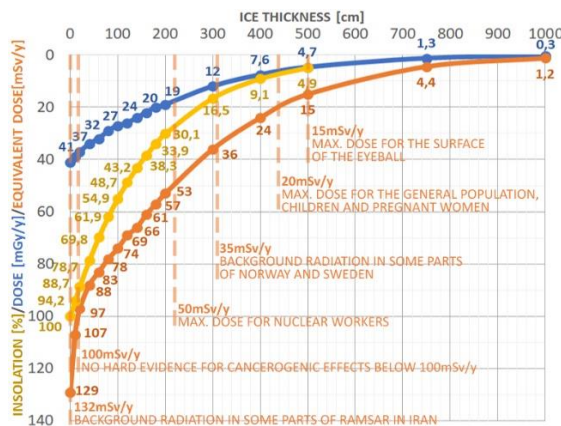


Fig. 6. OLTARIS GCR simulations' results and insolation levels for the uniform ice shielding. Source: author's study
Ryc. 6. Wyniki symulacji OLTARIS dla promieniowania GCR i poziomy nasłonecznienia dla jednolitej osłony lodowej. Źródło: opracowanie własne

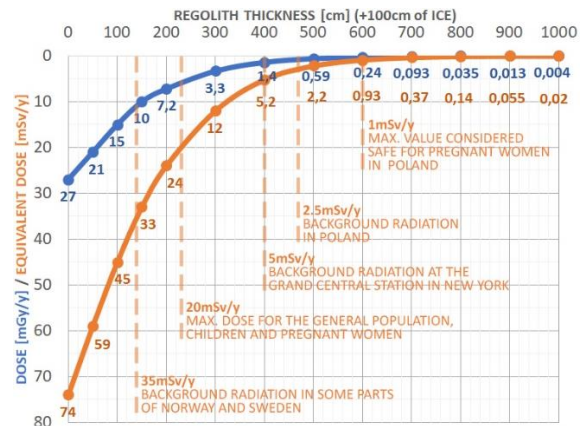


Fig. 7. OLTARIS GCR simulations' results for the ice-regolith composite shielding. Source: author's study
Ryc. 7. Wyniki symulacji OLTARIS dla promieniowania GCR dla kompozytywnej osłony łoż-regolitu. Źródło: opracowanie własne

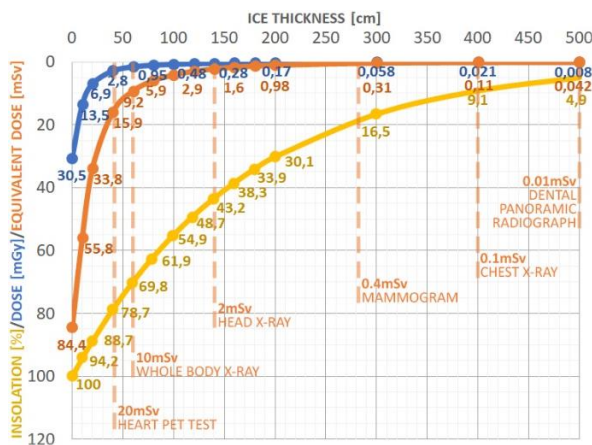


Fig. 8. OLTARIS SPE simulations' results and insolation levels for the uniform ice shielding. Source: author's study
Ryc. 8. Wyniki symulacji OLTARIS dla promieniowania SPE i poziomy nasłonecznienia dla jednolitej osłony lodowej. Źródło: opracowanie własne






	DESIRED RADIATION LIMITS	AVERAGE SOL (MARTIAN DAY):	AVERAGE YEARLY EQUIVALENT DOSE:
	PREGNANT WOMEN: 5-20 mSv PER YEAR	8h39 - SLEEP 1mSv/y 8h - WORK 20mSv/y 4h - GARDENING 50mSv/y 4h - RELAX 3mSv/y	15.8 mSv PER YEAR
	CHILDREN: 5-20 mSv PER YEAR	8h39 - SLEEP 1mSv/y 4h - SCHOOL 3mSv/y 4h - HOMEWORK 20mSv/y 4h - GARDENING 50mSv/y 4h - PLAYTIME 3mSv/y	13.0 mSv PER YEAR
	FARMING: 10-35 mSv PER YEAR	8h39 - SLEEP 1mSv/y 8h - FARMING 50mSv/y 8h - RELAX 3mSv/y	18.0 mSv PER YEAR
	LABORATORY WORK: 10-35 mSv PER YEAR	8h39 - SLEEP 1mSv/y 8h - WORK 20mSv/y 4h - GARDENING 50mSv/y 4h - JOGGING 50mSv/y	23.7 mSv PER YEAR
	FIELD WORK: 15-50 mSv PER YEAR	8h39 - SLEEP 1mSv/y 8h - WORK 140mSv/y 8h - RELAX 3mSv/y	48.0 mSv PER YEAR

Fig. 9. Average yearly equivalent radiation doses for the various inhabitants in the "Mars: 10-50-150" habitat. Source: author's study
Ryc. 9. Średnie roczne dawki równoważne promieniowania dla różnych mieszkańców habitatu „Mars: 10-50-150”. Źródło: opracowanie własne

4.2. Parametric Algorithm Testing the GCR Radiation Levels – Results

The exemplary "Mars: 10-50-150" habitat designed in accordance with the guidelines diagrams was tested with the custom-written parametric tool (fig. 10). Due to the complexity of the base (mutual shielding of the modules), toroidal form of the modules and the proximity of a crater's wall the GCR levels on the interior are lower than the established maximal values. The results do not accommodate the natural radioactivity of the construction materials therefore, the established average values have been increased. The equivalent doses fit within the ranges:

- Housing modules: 0.0-0.3mSv/y (assumed average 1mSv/y)
- Recreation modules: 1.0-2.0mSv/y (assumed average 3mSv/y)
- Laboratory modules: 6-30mSv/y (assumed average 20mSv/y)
- Workshop modules: 40-65mSv/y (assumed average 60mSv/y)
- Greenhouse modules: 15-55mSv/y (assumed average 50mSv/y)

- Linear garden modules: 10-55mSv/y (assumed average 50mSv/y)
- Airlocks: 1.2-70mSv/y (no assumed average due to the short stay-time inside of the modules)

The average values have been used during the preparation of the yearly radiation dose exposure diagram for the various groups of base's inhabitants (fig. 9).

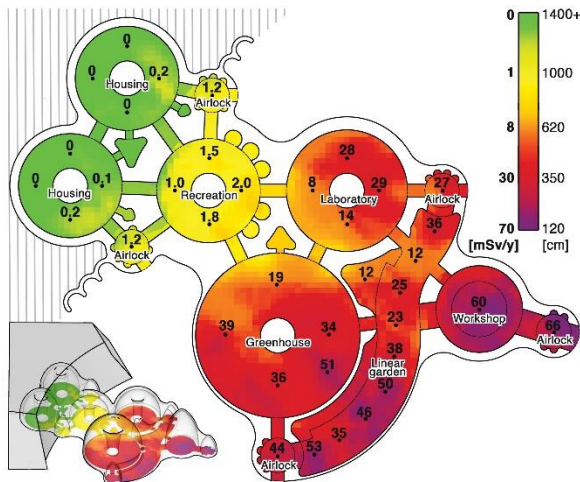


Fig. 10. Results of the GCR-interior-levels tests for the "Mars: 10-50-150" habitat. The tests were conducted with a custom-written parametric algorithm. Source: author's study

Ryc. 10. Wyniki testów promieniowania GCR wewnątrz zaprojektowanego habitatu „Mars: 10-50-150”. Testy przeprowadzono przy pomocy autorskiego algorytmu parametrycznego. Źródło: opracowanie własne

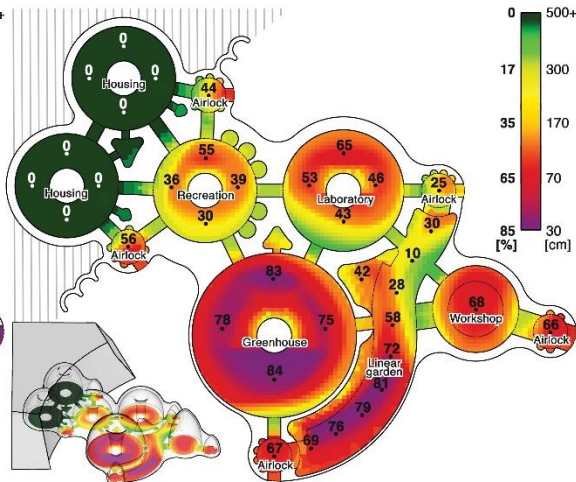


Fig. 11. Results of the interiors-insolation tests for the habitat during the three around noon hours on the Martian equinox. The tests were conducted with a custom-written parametric algorithm. Source: author's study

Ryc. 11. Wyniki testów nasłonecznienia wewnątrz habitatu dla trzech godzin okołopołudniowych w czasie marsjańskiej równonocy. Testy przeprowadzono przy pomocy autorskiego algorytmu. Źródło: opracowanie własne

4.3. Parametric Algorithm Testing the Insolation – Results

The designed habitat fulfils the established insolation minimal values measured in [%] of the transmitted light during the 3 around noon Martian hours during an equinox (fig. 11). Inside of the modules the insolation levels are equal to:

- Housing modules: 0%
- Recreation modules: 30-55%
- Laboratory modules: 40-65%
- Workshop modules: 50-70%
- Greenhouse modules: 70-85%
- Linear garden modules: 10-85%
- Airlocks: 25-70%

5. SUMMARY

5.1. Limits of the Proposed Method and the Research Directions

The presented data are based on digital simulations and are intended for utilization as the preliminary design guidelines for the architect of a Martian habitat made from ice. As the project advances the simulation data should be substituted with experimental data verifying the predictions. The OL-TARIS simulations were conducted for the specific altitude (-2000m), the radiation and insolation tests apply only to the specific habitat's geometry ("Mars: 10-50-150") and geographical coordinates (15°N 35°E). Depending on the site location and the form of the design habitat the results will

vary, but the methodology proposed in the article can be applied to any Martian project utilizing ice as an architectural material.

The insolation analyses were conducted for the transmittance properties of clear ice. Effects of contamination and physical damage were not considered in the tests. In the full "Mars: 10-50-150" project some solutions reducing the Martian dust contamination have been proposed (Dzieduszyński 2019 a).

The SPE simulations are based on a particularly strong "Carrington" flare from 1859 with the spectral characteristics of the March 1991 flare. The presented results are assumed as the maximal values. The radiation doses caused by the regular Solar Particle Events should be smaller.

5.2. Conclusions

A method of architectural form design of a Martian habitat made from ice has been proposed in this article. The method is based on the digital simulations of the harmful cosmic radiation and custom-written parametric tools testing the insolation and radiation levels inside of the base. The procedure can be directly applied to any site on the surface of Mars. After necessary adaptations similar methods can be used in the design process of lunar and deep space habitats. The proposed approach is based on simple, quantitative design guidelines suitable for an architect lacking a specialistic technological base. The form and the spatial arrangement of the habitat resulting from the guidelines corresponds to the local contexts and conditions. The effectiveness of the method has been presented on the example of the "Mars: 10-50-150" project.

Additionally, based on the simulations' results the hypothesis on the optimal properties of ice in the context of the radiation shielding and light transmittance has been confirmed. It is possible to design an ice Martian habitat suitable for various inhabitants including children and pregnant women.

KSZTAŁTOWANIE FORMY ARCHITEKTONICZNEJ HABITATU MARSJAŃSKIEGO: KOMPUTEROWE ANALIZY PROMIENIOWANIA KOSMICZNEGO I NASŁONECZNIENIA LODOWEJ KONSTRUKCJI

1. WSTĘP

Mars jest jednym z głównych kierunków eksploracyjnych państwowych, międzynarodowych i prywatnych agencji kosmicznych (ESA 2005; NASA 2015 a; SpaceX 2017; ESA 2018 a; POLSA 2018). Chwila, w której na Czerwonej Planecie pojawią się pierwsze habitaty wydaje się bardzo bliska. Już obecnie prowadzone są prace badawcze i projektowe mające doprowadzić do budowy baz marsjańskich. W ostatnich latach badacze zaczęli zwracać się ku niekonwencjonalnym surowcom dostępnym na powierzchni Marsa i ku technologiom budowlanym opartym o zautomatyzowany druk 3D (NASA 2015 b).

W literaturze dotyczącej architektury marsjańskiej wodny lód coraz częściej pojawia się jako optymalny materiał konstrukcyjny. Jako główne cechy wyróżniające lód na tle alternatywnych substancji podawane są jego transparentność w świetle widzialnym i czynnym fotosyntetycznie³ (Bolsenga 1978; Bolsenga. i in., 1996), stosunkowo duża dostępność (Boynton i in. 2002), wytrzymałość konstrukcyjna (Petrovic 2003) i zdolność do blokowania szkodliwego promieniowania kosmicznego (Kozicka 2008 s. 169). Wykorzystanie lodowej konstrukcji pozwala rozwiązać wiele problemów architektonicznych habitatu marsjańskiego (Dzieduszyński 2019a). W niniejszym artykule przed-

³ Promieniowanie fotosyntetycznie czynne znajdujące się w zakresie 400-700nm jest bardzo zbliżone do światła widzialnego w zakresie 380-750nm

stawiono metodę kształtowania formy architektonicznej lodowego habitatu opartą o wyniki badań efektywności lodu w blokowaniu promieniowania kosmicznego i przepuszczaniu światła widzialnego. W pracy wykorzystano symulacje komputerowe przeprowadzone przy pomocy narzędzia NASA OLTRIS oraz algorytmy parametryczne napisane w środowisku Grasshopper.

Przeprowadzone prace miały charakter badawczo-doświadczalny (symulacje OLTRIS i opracowane algorytmy parametryczne) z elementami syntetycznymi (zbiór koniecznych danych i możliwych do wykorzystania narzędzi cyfrowych). Badania zostały zrealizowane w ramach projektu „Mars: 10-50-150” będącego częścią pracy magisterskiej przygotowanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. arch. Elżbiety Ryńskiej oraz dr inż. arch. Joanny Klimowicz.

W badaniu wyróżniono następujące cele:

- Opracowanie wytycznych projektowych dla grubości lodowych osłon radiacyjnych w zależności od założonych poziomów szkodliwego promieniowania jonizującego tła we wnętrzach habitatu marsjańskiego. Zapis wytycznych w czytelnej i łatwej do wykorzystania formie ilościowej.
- Opracowanie narzędzia parametrycznego służącego do sprawdzenia gradientów promieniowania jonizującego i nasłonecznienia we wnętrzach zaprojektowanego habitatu.
- Sprawdzenie hipotezy o skuteczności lodu w kontekście promieniowania kosmicznego i przepuszczalności światła widzialnego.

2. STAN WIEDZY

Wyniki badań przeprowadzanych w ciągu ostatnich trzech dekad zmieniły nasze postrzeganie Marsa. Z planety uważanej za jałową pustynię Mars stał się w naszych oczach światem pokrytym niegdyś dolinami rzecznyymi, wielkimi jeziorami i oceanem zajmującym większą część półkuli północnej. Do tej pory na Czerwonej Planecie w przypowierzchniowej warstwie znajduje się dużo wody w postaci lodu zmieszanego z regolitem lub ukrytego pod pokładami suchego lodu. Okazuje się, że w warunkach marsjańskich woda może być użyta jako materiał budowlany (Kozicka 2008).

Zaproponowano wiele możliwości wydobywania wody (Zubrin 1996), oczyszczania jej ze szkodliwych nadchloranów (Davila i in. 2013) oraz innych zanieczyszczeń (Ciardullo i in. 2016). Aktywnie prowadzone są badania nad wykorzystaniem druku 3D w budowie habitatów kosmicznych (ESA 2013; ESA 2018). Joanna Kozicka (2008) pisze o lodowych habitatach w kontekście marsjańskim. Wspomina jednak tylko o murowaniu z lodowych cegieł i metodach subtraktywnych jak drążenie tuneli w lodowcu. W 2015 roku podczas konkursu NASA 3D-printed habitat challenge, zwycięski zespół Ice House (SEArch, CloudsAO i in.) wykorzystał pomysł druku 3D z lodu. Drużyna zaprezentowała nawet fizyczne prototypy lodowych wydruków 3D (Ciardullo i in. 2016). Rozwiązania dotyczące osłon radiacyjnych w projekcie Ice House oparte są o ogólne dane NASA z 1991 roku (Simonsen, Nealy). Według autora artykułu rozwiązania te w niewystarczającym stopniu uwzględniają kontekst lokalny i zapewniają zbyt słabą ochronę. Sumaryczne przesłony o grubości 20cm blokują niewiele promieniowania, wybrana lokalizacja jest narażona na wysokie dawki w przedziale 200-230mSv/r, (Mars Radiation Experiment, Mars Odyssey 2001) i zapewnia słabe nasłonecznienie przez niski kąt padania promieni słonecznych. W 2016 roku we współpracy z autorami projektu Ice House centrum badawcze NASA Langley zorganizowało warsztaty, których efektem był projekt koncepcyjny Mars Ice Home (NASA 2017). Ice Home jest obecnie rozwijany i na jego podstawie prowadzone są badania nad zmniejszeniem ryzyka i rozwiązaniem problemów technicznych połączonych z realizacją lodowych habitatów marsjańskich (Kempton i in. 2018).

3. METODYKA

3.1. Limity promieniowania – metodyka

Dla celów projektowych stałej bazy marsjańskiej przyjęto następujące dawki promieniowania:

- Dla kobiet w ciąży i dzieci: maksymalnie **20mSv/r** (maks. wartość dla ogółu populacji, Wrixon 2008; maks. wartość dla kobiet w ciąży, Strout 2015)

- Dla ogółu mieszkańców habitatu: maksymalnie **35mSv/r** (promieniowanie tła w niektórych rejonach Norwegii i Szwecji, Kardaszewska 2008)
- Dla osób pracujących na zewnątrz: maksymalnie **50mSv/r** (maks. wartość dla pracowników przemysłu nuklearnego, Dz.U. z 2005 r. nr 20, poz. 168)

Zaproponowane limity są niższe niż wartości zazwyczaj stosowane przez agencje kosmiczne. Wynika to z faktu, że dotychczasowe misje kosmiczne są względnie krótkotrwałe i astronauta w ciągu całej kariery pochłania ograniczone dawki promieniowania. Mając jednak w perspektywie eksplorację Marsa należy przygotowywać habitaty z myślą o pobycie wieloletnim lub stałym. Dodatkowo w trakcie transferu Ziemia-Mars trwającego od 3 do 6 miesięcy załoga będzie szczególnie narażona na promieniowanie kosmiczne. Przy projektowaniu habitatów dla misji długotrwałych trzeba także wziąć pod uwagę możliwość zajścia w ciążę przez uczestniczki misji i związaną z tym koniecznością wychowywania dzieci.

3.2. Symulacje OLTARIS, wytyczne projektowe – metodyka

W celu opracowania wytycznych architektonicznych dotyczących formy habitatu i grubości stosowanej lodowej osłony radiacyjnej przeprowadzono symulacje komputerowe wykorzystujące opracowane przez NASA narzędzie OLTARIS (On-Line Tool for the Assessment of Radiation in Space) służące do obliczania dawek promieniowania i koniecznej ochrony podczas planowanych misji kosmicznych. OLTARIS pozwala zbadać zdolność testowanej formy i użytych materiałów do blokowania promieniowania kosmicznego. Danymi wejściowymi symulacji są geometria zapisana w formie bazy danych XML oraz środowisko zdefiniowane w parametrach startowych. Baza danych XML składa się ze zbioru właściwości promieni rozchodzących się z badanego punktu i opisujących napotkane po drodze warstwy osłon radiacyjnych. Przykładowo: „promień nr 1 z kierunku $x=0$, $y=0$, $z=1$ napotyka po drodze 100cm lodu i 200cm marsjańskiego regolitu”.

Przeprowadzono 86 symulacji dla lodu o różnej grubości i kompozytu lód-regolit marsjański o różnej grubości warstwy regolitu. Symulacje przeprowadzono dla dwóch rodzajów promieniowania kosmicznego: galaktycznego promieniowania kosmicznego GCR (wysokoenergetyczne, o dużym zagęszczeniu cząsteczek, względnie stałe, równomierne ze wszystkich kierunków) oraz promieniowania rozbłysków słonecznych SPE (niskoenergetyczne, o bardzo dużym zagęszczeniu cząsteczek, incydentalne, rozchodzące się promieniście od Słońca). Zastosowano następujące parametry startowe:

Promieniowanie GCR przy jednolitej osłonie z lodu

- Liczba symulacji: 34 (grubości lodu [cm]: 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 300, 400, 500, 750, 1000)
- Badane wartości: Dawka [mGy/r] (17 symulacji) i dawka równoważna [mSv/r] (17 symulacji)
- Środowisko: GCR, Powierzchnia Marsa
- Model GCR: Badhwar-O'Neil 2014
- Zakres: Uśredniona wartość dla lat 1965-2017
- Wysokość bezwzględna: -2000m
- Liczba promieni: 42 koncentryczne promienie rozchodzące się równomiernie we wszystkich kierunkach
- Geometria: Sfera podzielona na dwie półsfery. Górna zbudowana z lodu o zmiennej (testowanej) grubości. Dolna zbudowana z regolitu marsjańskiego o grubości 176cm (warstwa zewnętrzna generowana przez OLTARIS w ramach symulowania powierzchni Marsa) oraz lodu o grubości 1000cm (warstwa wewnętrzna symulująca półsferyczną geometrię habitatu) (ryc. 1)

Promieniowanie GCR przy osłonie kompozytowej lód-regolit

- Liczba symulacji: 26 (grubość lodu [cm]: 100 + grubość regolitu [cm]: 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000)
- Badane wartości: Dawka [mGy/r] (13 symulacji) i dawka równoważna [mSv/r] (13 symulacji)
- Środowisko: GCR, Powierzchnia Marsa
- Model GCR: Badhwar-O'Neil 2014
- Zakres: Uśredniona wartość dla lat 1965-2017

- Wysokość bezwzględna: -2000m
- Liczba promieni: 42 koncentryczne promienie rozchodzące się równomiernie we wszystkich kierunkach
- Geometria: Sfera podzielona na dwie półsfery. Górna zbudowana z lodu o grubości 100cm (warstwa wewnętrzna) i marsjańskiego regolitu o zmiennej grubości (testowana warstwa zewnętrzna). Dolna zbudowana z regolitu marsjańskiego o grubości 176cm (warstwa zewnętrzna generowana przez OLTARIS w ramach symulowania powierzchni Marsa), drugiej warstwy regolitu marsjańskiego o zmiennej grubości oraz lodu o grubości 1000cm (warstwa wewnętrzna symulująca półsferyczną geometrię habitatu) (ryc. 2)

Promieniowanie SPE przy jednolitej osłonie z lodu

- Liczba symulacji: 30 (grubość lodu [cm]: 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 300, 400, 500)
- Badane wartości: Dawka jednorazowa [mGy] (15 symulacji) i jednorazowa dawka równoważna [mSv] (15 symulacji)
- Środowisko: SPE, Powierzchnia Marsa
- Model SPE: najsilniejszy historyczny rozbłysk SPE, burza „Carrington” z września 1859r, soffit spektralny z rozbłysku z marca 1991
- Wysokość bezwzględna: -2000m
- Liczba promieni: 42 koncentryczne promienie rozchodzące się równomiernie we wszystkich kierunkach
- Geometria: Sfera podzielona na dwie półsfery. Górna zbudowana z lodu o zmiennej (testowanej) grubości. Dolna zbudowana z regolitu marsjańskiego o grubości 176cm (warstwa zewnętrzna generowana przez OLTARIS w ramach symulowania powierzchni Marsa) oraz lodu o grubości 1000cm (warstwa wewnętrzna symulująca półsferyczną geometrię habitatu) (Ryc. 3)

Wyniki przedstawiono w czytelnej dla architekta postaci diagramów liniowych uzupełnionych o wartości charakterystyczne (ryc. 6-8). Diagramy umożliwiają wykorzystanie danych przy projektowaniu formy lodowego habitatu marsjańskiego. Na podstawie zależności poziomów promieniowania od sumarycznej grubości ścian można opracować jego układ funkcjonalny. Wykorzystując opracowane wytyczne zaprojektowano przykładowy habitat „Mars: 10-50-150” (ryc. 4-5), w którym założono wartości promieniowania tła uzależnione od funkcji i procentu czasu spędzanego przez załogę wewnątrz modułu. Forma i rozkład modułów wynikają bezpośrednio z założonych limitów promieniowania i wymaganych, sumarycznych grubości przesłaniania. Dodatkowo, toroidalny kształt modułów jest optymalny ze względu na różnicę ciśnień między wnętrzem a zewnątrz (forma zbiorników ciśnieniowych) i zapewnia duże rozpiętości powłok konstrukcyjnych (kosztem filaru we wnętrzu modułu). Ze względu na niewidzialność promieniowania kosmicznego i konieczność jego uczytelnienia (poczucie bezpieczeństwa załogi) wartości przyjmowanych dawek uzależniono od wartości nasłonecznienia modułu i układu przestrzennego. Jaśniejsze moduły zewnętrzne narażone są na większe dawki niż ciemniejsze moduły wewnętrzne. Dzięki temu załoga na pierwszy rzut oka może ocenić poziom zagrożenia promieniowaniem. Dane dotyczące nasłonecznienia oparto o wzór na współczynnik wygaszania promieniowania fotosyntetycznie czynnego przez lód (Bolsenga, 1996). Założono następujące maksymalne limity promieniowania GCR [mSv/r] i minimalne poziomy nasłonecznienia [% przepuszczanego światła]:

- Moduły mieszkalne: 1 mSv/r, 0% nasłonecznienia
- Moduły rekreacyjne: 35 mSv/r, 16,5% nasłonecznienia
- Moduły laboratoryjne: 65 mSv/r, 40% nasłonecznienia
- Moduły garażowe: 75 mSv/r, 55% nasłonecznienia
- Moduły szklarniowe: 85 mSv/r, 75% nasłonecznienia
- Liniowe moduły ogrodowe: 85 mSv/r, 75% nasłonecznienia
- Śluzy: 85 mSv/r, 40% nasłonecznienia

3.3. Algorytm parametryczny testujący wartości promieniowania GCR – metodyka

W celu sprawdzenia czy zaprojektowany habitat spełnia założone wymagania konieczne było opracowanie autorskiego narzędzia parametrycznego. Wykorzystanie narzędzia OLTARIS nie było

możliwe ze względu na złożoność geometrii (jej zapis w czytelny dla OLTARIS formacie bazy danych XML byłby bardzo uciążliwy), liczbę punktów wewnątrz habitatu umożliwiającą naszkicowanie płynnego gradientu promieniowania (4000 punktów i 256000 promieni) i czas potrzebny na przeprowadzenie jednej symulacji OLTARIS (od kilkudziesięciu minut do kilku godzin). Algorytm testujący geometrię habitatu napisano w środowisku Grasshopper z wykorzystaniem dodatkowych skryptów C#.

Z 4000 punktów wygenerowanych wewnątrz obrysu parteru habitatu prowadzonych jest 256000 promieni (64 promienie na punkt) rozchodzących się koncentrycznie w górnej półsfery (promieniowanie kosmiczne z kierunku dolnego blokowane jest przez Planetę). Sprawdzane są kolizje promieni z geometrią habitatu i geometrią terenu. Liczone są długości poszczególnych odcinków kolizji i obliczana jest średnia grubość chroniącego przed promieniowaniem lodu. Grubość przeliczana jest na wartości rocznych dawek promieniowania w mSv/r na podstawie wyników symulacji przeprowadzonych w programie OLTARIS. Otrzymane wartości wizualizowane są w postaci gradientu kolorystycznego.

3.4. Algorytm parametryczny testujący nasłonecznienie – metodyka

Istniejące i dostępne narzędzia do badania nasłonecznienia zaprojektowane są z myślą o warunkach ziemskich i tradycyjnych materiałach budowlanych. Ich zastosowanie do badania bazy marsjańskiej nie jest możliwe. Z tego powodu konieczne było opracowanie komputerowego narzędzia badającego poziomy nasłonecznienia wewnątrz habitatu. Algorytm testujący nasłonecznienie zbliżony jest do algorytmu badającego poziomy promieniowania.

Na podstawie danych z aplikacji NASA „Mars Trek” (kąąt i azymut padania promieni słonecznych w dniu równonocy dla wybranej lokalizacji habitatu) opracowano model 3-godzinne nasłonecznienia w dniu marsjańskiej równonocy wiosenno-jesiennej. Model składa się z siedmiu promieni odpowiadających marsjańskim godzinom solarnym:⁴ 10:30, 11:00, 11:30, 12:00, 12:30, 13:00, 13:30. W modelu nasłonecznienia promienie prowadzone są z punktu startowego w kierunku położenia Słońca na niebie.

Model nasłonecznienia aplikowany jest do 4000 punktów wygenerowanych wewnątrz obrysu parteru habitatu (28000 promieni). Sprawdzane są kolizje promieni z geometrią habitatu. Wyliczana jest długość sumaryczna promieni przebiegających przez lodową strukturę habitatu. Długość uśredniana jest dla każdego z 4000 punktów (długość sumaryczna podzielona przez 7 promieni). Uzyskana w ten sposób średnia grubość przesłaniającego lodu przeliczana jest na procentowy poziom nasłonecznienia wewnątrz habitatu na podstawie wzoru na współczynnik wygaszania promieniowania fotosyntetycznie czynnego dla czystego lodu (Bolsenga 1996). Otrzymane wyniki wizualizowane są w formie gradientu kolorystycznego.

4. WYNIKI SYMULACJI I TESTÓW

4.1. Symulacje OLTARIS – wyniki

Promieniowanie GCR przy jednolitej osłonie z lodu:

Otrzymane wyniki sugerują, że przegrody o sumarycznej grubości zawierające się w przedziale 10-300cm (przepuszczalność światła 94,2%-16,5%, Bolsenga 1996) samodzielnie nie są wystarczające dla zapewnienia długoterminowej ochrony przed promieniowaniem uznawanej za bezpieczną dla ogółu populacji, dzieci i kobiet w ciąży (20mSv/r). Możliwe jest zapewnienie wartości na poziomie bezpiecznym dla pracowników przemysłu nuklearnego (50mSv/r). Co ciekawe, już 10cm lodu zapewnia poziomy promieniowania niższe niż w niektórych rejonach miasta Ramsar w Iranie (Kardaszewska 2008). Wynik symulacji kontrolnej dla grubości lodu 0cm wynoszący 129mSv/r jest porównywalny z rzeczywistymi pomiarami dla wysokości bezwzględnej -2000m wynoszącymi około 13rem/r \approx 130 mSv/r (Mars Radiation Experiment, Mars Odyssey 2001).

Promieniowanie GCR przy osłonie kompozytowej lód-regolit:

⁴ Jedna marsjańska godzina solarna jest dłuższa od godziny ziemskiej o 2,7%

Zasypanie lodu warstwą regolitu marsjańskiego pozwala zmniejszyć poziomy promieniowania do wartości pomijalnych. Warstwa 230cm regolitu zmniejsza promieniowanie do poziomu bezpiecznego dla ogółu populacji, dzieci i kobiet w ciąży (20mSv/r). 400cm regolitu zmniejsza promieniowanie do poziomów zmierzonych na stacji Grand Central w Nowym Jorku (5mSv/r), a 470cm pozwala osiągnąć poziom promieniowania tła w Polsce (2,5mSv/r). Minusem rozwiązania jest nieprzepuszczalność zasypanego lodu dla światła słonecznego.

Promieniowanie SPE przy jednolitej osłonie z lodu:

Już bardzo cienkie warstwy lodu są w stanie zablokować niskoenergetyczne cząstki promieniowania SPE nawet przy bardzo silnej burzy słonecznej. Przy 60cm warstwie ochronnej 90% promieniowania jest blokowana, a jednorazowa ekspozycja na rozbłysk słoneczny równa się prześwietleniu diagnostycznemu całego ciała (10mSv jednorazowo). Przy warstwie 140cm blokowane jest ponad 97% promieniowania, ekspozycja równa się prześwietleniu diagnostycznemu głowy (2mSv jednorazowo). Grubości lodu powyżej 300cm zmniejszają promieniowanie SPE do znikomych poziomów. Osłona konieczna do zapewnienia ochrony przed promieniowaniem GCR jest jednocześnie wystarczająca do zapewnienia wystarczającej ochrony przed SPE przy ograniczeniu czasu pracy w zewnętrznych modułach w trakcie trwania rozbłysku.

4.2. Algorytm parametryczny testujący wartości promieniowania GCR – wyniki

Zaprojektowany na podstawie diagramów habitat „Mars: 10-50-150” przetestowano opracowanym narzędziem parametrycznym (ryc. 10). Dzięki złożoności habitatu (wzajemne przesłanianie modułów), toroidalnej formie poszczególnych modułów i bliskości zbocza krateru poziomy promieniowania GCR wewnątrz bazy są jeszcze niższe niż wartości zamierzone. Wyniki nie uwzględniają promieniowania pochodzącego z gruntu i użytych materiałów, dlatego przyjęte wartości średnie zostały podwyższone. Wartości zawierają się w przedziałach:

- Moduły mieszkalne: 0.0-0.3 mSv/r (przyjęta średnia 1 mSv/r)
- Moduły rekreacyjne: 1.0-2.0 mSv/r (przyjęta średnia 3 mSv/r)
- Moduły laboratoryjne: 6-30 mSv/r (przyjęta średnia 20 mSv/r)
- Moduły garażowe: 40-65 mSv/r (przyjęta średnia 60 mSv/r)
- Moduły szklarniowe: 15-55 mSv/r (przyjęta średnia 50 mSv/r)
- Liniowe moduły ogrodowe: 10-55 mSv/r (przyjęta średnia 50 mSv/r)
- Śluzy: 1.2-70 mSv/r (brak średniej ze względu na zróżnicowanie modułów i krótki czas pobytu)

Wartości średnie zostały wykorzystane przy opracowaniu diagramu rocznych dawek promieniowania dla różnych grup mieszkańców habitatu.

4.3. Algorytm parametryczny testujący nasłonecznienie – wyniki

Zaprojektowany habitat spełnił także założone minima nasłonecznienia wewnątrz mierzone w [%] przepuszczonego światła przez 3 okołopołudniowe godziny marsjańskie w dniu marsjańskiej równonocy (ryc. 11). W rejonie użytkowym modułów poziomy nasłonecznienia wynoszą:

- Moduły mieszkalne: 0 %
- Moduły rekreacyjne: 30-55 %
- Moduły laboratoryjne: 40-65 %
- Moduły garażowe: 50-70 %
- Moduły szklarniowe: 70-85 %
- Liniowe moduły ogrodowe: 10-85 %
- Śluzy: 25-70 %

5. PODSUMOWANIE

5.1. Ograniczenia zastosowanych metod i kierunek dalszych badań

Przedstawione dane są oparte o symulacje komputerowe i przeznaczone są do wykorzystania jako wstępne wytyczne projektowe dla architekta projektującego lodowy habitat marsjański. W miarę zaawansowania projektu dane symulacyjne powinny być zastępowane przez dane eksperymentalne.

ne weryfikujące przewidywania komputerowe. Symulacje OLTARIS zostały przeprowadzone dla konkretnej wysokości bezwzględnej (-2000m), wyniki testów promieniowania i nasłonecznienia dotyczą konkretnej geometrii habitatu („Mars: 10-50-150”) i współrzędnych geograficznych (15°N 35°E). W zależności od lokalizacji i formy projektowanego habitatu dane będą się różnić, jednak zaproponowana w artykule metodyka może być zastosowana dla dowolnego projektu wykorzystującego lód jako materiał architektoniczny.

Analiza nasłonecznienia uwzględnia dane dla czystego lodu. W testach nie były brane pod uwagę czynniki obniżające przejrzystość takie jak uszkodzenia mechaniczne czy zanieczyszczenia. W pełnym projekcie „Mars: 10-50-150” zaproponowano rozwiązania ograniczające skutki zanieczyszczenia lodu pyłem marsjańskim (Dzieduszyński 2019 a).

Symulacje rozbłysku słonecznego SPE oparte są o szczególnie silny rozbłysk „Carringtona” z 1859r. z charakterystyką szczegółową opartą o rozbłysk z marca 1991 roku. Otrzymane wyniki są założone jako wartości maksymalne. Należy się spodziewać, że wartości dawek promieniowania pochodzące ze standardowych, słabszych rozbłysków będą o wiele niższe.

5.2. Wnioski

W artykule przedstawiono metodę kształtowania formy architektonicznej lodowego habitatu w oparciu o symulacje promieniowania kosmicznego i autorskie narzędzia parametryczne testujące poziomy promieniowania i nasłonecznienia we wnętrzach. Procedura może być bezpośrednio zastosowana do dowolnej lokalizacji projektu marsjańskiego. Po koniecznych adaptacjach, zbliżone metody mogą być zastosowane przy projektowaniu baz księżycowych i habitatów w przestrzeni kosmicznej. Proponowana metoda operuje na prostych, liczbowych wytycznych projektowych możliwych do zastosowania przez architekta nieposiadającego specjalistycznego zaplecza technologicznego. Wytyczne pozwalają na uzależnienie formy i rozkładu funkcjonalnego habitatu marsjańskiego od rzeczywistych uwarunkowań lokalnych. Skuteczność metody zaprezentowano na przykładzie autorskiego projektu „Mars 10-50-150”.

Dodatkowo, metodą symulacyjną potwierdzona została hipoteza o adekwatności lodu w kontekście projektowania osłon radiacyjnych przepuszczających znaczące ilości światła słonecznego. Możliwe jest zaprojektowanie lodowego habitatu marsjańskiego nadającego się do zamieszkania przez różne grupy docelowe, w tym dzieci i kobiety w ciąży.

BIBLIOGRAPHY

- Bolsenga S. J., Evans, M., Vanderploeg, H. A., Norton, D. G. 1996, PAR transmittance through thick, clear fresh-water ice, *Hydrobiologia*, 330(3) 3/1996
- Bolsenga S. J. 1978, Photosynthetically active radiation transmission through ice, NOAA Technical Memorandum
- Boynton W. V., Feldman W. C., Squyres S. W., et al. 2002, Distribution of Hydrogen in the Near Surface of Mars: Evidence for Subsurface Ice Deposits, *Science* vol 297, Issue 5578
- Ciardullo C., Montes J., Yashar M. et al. 2016, Martian Ice Habitats: Approaches to Additive Manufacturing with H₂O Beyond Mars Ice House, AIAA SPACE 2016, At Long Beach, California
- Davila, A. F., Willson, D., Coates, J., D., McKay, C. P. 2013, Perchlorate on Mars: A chemical hazard and a resource for humans, *International Journal of Astrobiology*. Volume 12, Issue 4
- Dzieduszyński, T. 2019 a, Architecture of a Martian Habitat. Conditions, Problems and their Solutions. Consequences for the Architecture on Earth, Warsaw University of Technology
- Dzieduszyński, T. 2019 b, Case Study 2: MARS: 10-50-150. Circular Economy of the Martian Architecture - A 3D-Printed Ice Habitat, part of: Developing and Designing Circular Cities, Elżbieta Ryńska, IGI Global, part of: ISBN10: 1799818861
- ESA 2005, Cosmic Vision, Space Science for Europe 2015-2025, European Space Agency BR-247
- ESA 2013, Building a lunar base with 3D printing, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing, dostęp/access: 12.2019

- ESA 2018 a, ESA Technology Strategy Version 1.0, European Space Agency
- ESA 2018 b, 3D-printed ceramic parts made from lunar regolith, https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/11/3D-printed_ceramic_parts_made_from_lunar_regolith, dostęp/access: 12.2019
- Kardaszewska J. 2008, Ministerstwo Energii: Promieniowanie jonizujące i promieniowanie tła, <https://www.gov.pl/web/energia/promieniowanie-jonizujace>, dostęp/access 02.2019
- Kempton, K., Yashar, M., Ciardullo, C. et al. 2018, Technical Risk Reduction for the Mars Ice Home Habitat Concept, 69th International Astronautical Congress (IAC), At Bremen, Germany
- Kozicka, J. 2008: Problemy architektoniczne bazy na Marsie jako habitatu w ekstremalnych warunkach, Politechnika Gdańska
- NASA 2002, Mars Radiation Experiment, Cosmic Ray Environment, Estimated Radiation Dosage on Mars, Mars Odyssey 2001, <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA03480>, dostęp/access 12.2019
- NASA 2015 a, NASA's Journey to Mars. Pioneering Next Steps in Space Exploration, Washington
- NASA 2015 b, 3D-Printed Habitat Challenge Phase 1, https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab_p1.html, dostęp/access: 05.2019
- NASA 2017, Ice Home Mars Habitat Concept of Operations (ConOps), NASA Langley Research Center
- Petrovic, J. J. 2003, Review Mechanical properties of ice and snow, Journal of Materials Science, v. 38, 1/2003
- NASA Mars Trek, JPL, California Institute of Technology, <https://trek.nasa.gov/mars/>, dostęp/access: 02.2019
- NASA OLTARIS, On-Line Tool for the Assessment of Radiation in Space, <https://oltaris.nasa.gov/>, dostęp/access: 02.2019
- POLSA 2018, Krajowy Program Kosmiczny na lata 2019-2021, Polska Agencja Kosmiczna
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego, Dz.U. 2005 nr 20 poz. 168
- Simonsen, L.C., Nealy, J.E. 1991, Radiation protection for human missions to the Moon and Mars, NASA Technical Report: N-91-17999
- SpaceX 2017, Making Life Multiplanetary, 68th International Astronautical Congress, Adelaide
- Strout, J. 2015, Orbital Space Settlement Radiation Shielding, National Space Society, San Jose State University
- Wrixon, A. D. 2008, New ICRP recommendations, IOP Publishing Ltd
- Zubrin, R. 1996, The Case For Mars, Free Press, ISBN 10: 0684827573

AUTHOR'S NOTE

Tomasz Dzieduszyński is currently working on his doctoral thesis at the Warsaw University of Technology in the area of innovative, digital and multimedia tools for architecture and urban planning. He has participated in projects at the intersection of architecture, mechatronics, electronics, robotics, experimental literature, music and graphic design. His research interests include parametric architecture, CAD/CAM, BIM methodologies, space exploration, astronautics, sustainability and circular economy.

O AUTORZE

Tomasz Dzieduszyński pracuje obecnie nad dysertacją doktorską na Politechnice Warszawskiej w zakresie innowacyjnych, cyfrowych i multimedialnych narzędzi architektoniczno-urbanistycznych. W przeszłości brał udział w projektach znajdujących się na styku architektury i mechatroniki, elektroniki, robotyki, literatury eksperymentalnej, muzyki i grafiki. Jego zainteresowania badawcze obejmują architekturę parametryczną, CAD/CAM, metodologie BIMowskie, eksplorację kosmosu, astronautykę, zrównoważony rozwój i ekonomię cyrkularną.

Contact | Kontakt: t.dzieduszynski@gmail.com