



WYDZIAŁ
ARCHITEKTURY

Imię i nazwisko studenta: Sara Gorczyńska

Nr albumu: 197101

Poziom kształcenia: studia drugiego stopnia

Forma studiów: stacjonarne

Kierunek studiów: Architektura

Specjalność/profil: -

PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA

Tytuł pracy w języku polskim: Zamknięte systemy życiowe na Marsie. Projektowanie zrównoważonych habitatów dla ludzkiej ekspansji.

Tytuł pracy w języku angielskim: Closed Life Support Systems on Mars: Designing Sustainable Habitats for Human Expansion.

Opiekun pracy: dr inż. arch. Michał Kwasek

STRESZCZENIE

Celem pracy jest opracowanie koncepcji samowystarczalnej bazy marsjańskiej przeznaczonej do długoterminowego zasiedlenia planety. Projekt skupia się na kluczowych wyzwaniach związanych z utrzymaniem życia w ekstremalnych warunkach Marsa, adaptacją architektury do środowiska marsjańskiego oraz wykorzystaniu lokalnych surowców do budowy habitatów. W pracy analizowane są technologie stabilizacji atmosfery wewnętrznej habitatu, a także wykorzystane w nim systemy podtrzymywania życia oraz struktury przestrzenne chroniące przed promieniowaniem, skrajnymi temperaturami, niskim ciśnieniem i burzami pyłowymi.

Lokalizacja bazy została wybrana w obrębie krateru Jezero i równiny Isidis Planitia ze względu na korzystne uwarunkowania geologiczne, dostęp do zasobów wodnych w postaci czap lodowych oraz ochronę przed ekstremalnymi warunkami zewnętrznymi. Projekt zakłada modułową budowę bazy z heksagonalnym przekryciem wewnątrz krateru, którą można rozbudowywać i adaptować do różnych celów wraz z rozwojem społeczności marsjańskiej. Głównym elementem jest parametrycznie modelowana kopuła sferyczna, integrująca funkcje mieszkalne, techniczne i społeczne oraz zapewniająca odpowiednie warunki środowiskowe.

Projekt uwzględnia kwestie psychologiczne mieszkańców, w tym obecność stref zieleni i rekreacji wewnątrz bazy, mających na celu podtrzymanie dobrostanu fizycznego oraz psychicznego. System zamkniętych obiegów wody, powietrza i energii oraz wykorzystanie materiałów pozyskanych z regolitu marsjańskiego podkreśla dążenie do autonomii bazy i minimalizacji dostaw z Ziemi. Zaproponowany kompleksowy model bazy może stanowić realny krok w rozwoju stałego osadnictwa pozaziemskiego.

Słowa kluczowe: architektura pozaziemska, kolonizacja Marsa, zamknięte systemy życiowe, ISRU, drukowanie 3D, samowystarczalność, modularyzacja, parametryzacja, architektura bezpieczeństwa

ABSTRACT

The aim of this thesis is to develop a concept for a self-sufficient Martian base intended for long-term planetary settlement. The project focuses on key challenges related to sustaining human life in the extreme conditions of Mars, adapting architectural solutions to the Martian environment, and utilizing local resources for habitat construction. The study analyzes technologies for stabilizing the internal atmosphere of the habitat, as well as life support systems and spatial structures designed to protect inhabitants from radiation, extreme temperatures, low atmospheric pressure, and dust storms.

The base is proposed to be located within Jezero Crater and the adjacent Isidis Planitia, due to favorable geological conditions, access to water resources in the form of ice deposits, and natural protection against environmental extremes. The project envisions a modular base structure covered by a hexagonal framework inside the crater, allowing for phased expansion and adaptation to various functions as the Martian community evolves. The central element of the base is a parametrically modeled spherical dome that integrates residential, technical, and social functions while ensuring stable environmental conditions.

The design also considers the psychological well-being of inhabitants, incorporating green and recreational zones within the base to support both physical and mental health. A closed-loop system for water, air, and energy, along with the use of materials extracted from Martian regolith, emphasizes the base's autonomy and the minimization of supply dependency on Earth. The proposed comprehensive model presents a realistic step toward the development of permanent extraterrestrial settlements.

Keywords:

extraterrestrial architecture, Mars colonization, closed life support systems, ISRU, 3D printing, self-sufficiency, modularity, parametrization, safety architecture

Spis treści

Część I - Studium problemu	5
1. Wstęp i cel pracy	5
1.1 Jaki jest cel i etyczne podejście do uczynienia Marsa zamieszkałym?	5
1.2 Aktualny stan wiedzy	7
1.3 Przedmiot analizy	10
1.4 Cele badawcze	11
2. Studium problemu i analiza uwarunkowań projektowych	12
2.1 Mars jako miejsce o szczególnie ekstremalnych warunkach do życia	12
2.1.1 Klimat i atmosfera	12
2.1.2 Woda	13
2.1.3 Fauna i flora	13
2.1.4 Uwarunkowania topograficzne	14
2.1.5 Minerały	14
2.1.6 Burze piaskowe	15
2.1.7 Aspekt ludzki	15
2.2 Techniki budowania	16
2.2.1 Drukowanie 3D i parametryzacja	16
2.2.2 Materiały dostępne in-situ	18
2.2.3 Planowane początki procesu budowy	18
2.3 Habitaty w warunkach ekstremalnych. Studium przypadków	19
2.3.1 Habitaty polarne	19
2.3.2 Habitaty podwodne	20
2.3.3 Habitaty podziemne	21
2.3.4 Habitaty w kosmosie (orbitalne, księżycowe, marsjańskie)	22
2.4. Podsumowanie	23
Część II - Opis koncepcji architektonicznej i zagospodarowania terenu	24
3. Studium obszaru projektowego	24
3.1 Opis lokalizacji	24
3.1.1 Ślady wody i dawnego życia	26
3.1.2 Zasoby mineralne i potencjał wykorzystania lokalnych surowców (ISRU)	27
3.1.3 Krater jako ochrona przed ekstremalnymi warunkami	28
3.1.4 Wnioski	28
3.2 Założenia do projektu	29

4. Projekt zagospodarowania terenu	30
4.1 Koncepcja układu przestrzennego bazy	31
4.2 Zaplecze techniczne (w skali cywilizacji)	33
4.4 Fazy kolonizacji i terraformacji Marsa / Przewidywana rozbudowa	33
5. Architektura bazy Marsjańskiej	35
5.1 Konstrukcja	35
5.2 Izolacja termiczna	38
5.3 Etapy budowy	38
5.4 Technologie	39
5.4.1 Systemy podtrzymywania życia	40
5.4.2 Robotyzacja	42
5.4.3 Zarządzanie zasobami	44
5.4.4 Zamknięty cykl materii organicznej	45
5.4.5 Recykling wody	46
5.4.6 Instalacje	47
5.4.7 Ochrona przeciwpożarowa i bezpieczeństwo	48
5.5 Forma	48
5.6 Funkcje	49
5.7 Wnętrza	58
5.8 Modułowość i parametryzacja	59
5.9 Aspekt psychologiczny	60
6. Bibliografia	62
6.1 Wykaz literatury:	62
6.2. Wykaz Ilustracji	64
6.3. Źródła internetowe	65

Część I - Studium problemu

1. Wstęp i cel pracy

Pomimo tego, że kolonizacja kosmiczna wydaje się futurystycznym tematem literatury oraz filmów science fiction, postępy w dziedzinie napędu raketowego, astronautyki, astrofizyki, robotyki i medycyny zbliżają te zagadnienie do rzeczywistości¹. Mars, nazywany często „Bliźniakiem Ziemi”, budzi szczególne zainteresowanie w kontekście przyszłej eksploracji kosmicznej. Mimo że do tej pory żadna załogowa misja nie dotarła na Czerwoną Planetę, a na jej powierzchni nie zbudowano jeszcze żadnych struktur, planowanie długoterminowej obecności człowieka na tej planecie jest coraz bardziej zaawansowane. Wśród koncepcji związanych z eksploracją kosmosu należy wyróżnić pomysł terraformacji Marsa². Plan ten składa się z dwóch faz: pierwsza zakłada ocieplenie Marsa przez stworzenie gęstej atmosfery z CO₂, co miałyby doprowadzić do podniesienia średniej temperatury do poziomu zbliżonego do ziemskiego. Ta faza, stosunkowo łatwiejsza, mogłaby potrwać około 100 lat. Druga faza, znacznie bardziej czasochłonna, obejmuje zwiększenie stężenia tlenu (O₂) w atmosferze. Umożliwiłoby to ludziom oddychanie na powierzchni Marsa, jednak ten proces mógłby trwać nawet 100 000 lat lub więcej. Celem pracy jest przedstawienie projektu habitatu dla astronautów, który umożliwiłby eksplorację Marsa przez człowieka oraz prowadzenie na nim badań naukowych. Obiekt wspierałby bezpieczną egzystencję załóg na Marsie, ale również mógłby przyczynić się do opracowania technologii, które w przyszłości pozwolą na kolonizację Czerwonej Planety.

1.1 Jaki jest cel i etyczne podejście do uczynienia Marsa zamieszkałym?

Udzielenie jednomyślnej i ostatecznej odpowiedzi na postawione pytanie może być trudne, a nawet niemożliwe. Życie na Marsie ma potencjalne możliwości ratowania życia na Ziemi, która już obecnie zmaga się z wyczerpującymi się zasobami wody, przytłaczającą zmianą klimatu i wieloma innymi katastrofami — od ataków terrorystycznych, a przyszłości najpewniej również uderzeniami meteorów³. Historia Ziemi pokazuje, że w przeszłości nasza planeta wielokrotnie doświadczyła katastrofalnych zderzeń w wyniku zderzenia z ciałami niebieskimi. Taką sytuację mieliśmy 250 milionów, a także 66 milionów lat temu, kiedy wyginęły dinozaury. Ziemia może ponownie stanąć w obliczu podobnych zagrożeń w przyszłości, ze względu na ryzyko nagłych wydarzeń. Mimo, że szacunkowo są to terminy odległe, jeśli mierzyć w skali życia człowieka, a temat może wydawać się abstrakcyjny, to kolonizacja innych planet staje się kluczowym krokiem w zapewnieniu długoterminowego przetrwania ludzkości⁴.

Znacznie bliższe i bardziej namacalne są zagrożenia wynikające z działalności człowieka, które już teraz mają katastrofalny wpływ na naszą planetę. Nadmierna eksploatacja zasobów naturalnych, wylesianie, zanieczyszczenie powietrza i wód, a także emisja gazów

¹ *Space Colonization*, <https://www.nasa.gov/headquarters/library/find/bibliographies/space-colonization/> [dostęp: 01.09.2024]

² *The future of space colonization – terraforming or space habitats?*, <https://phys.org/news/2017-03-future-space-colonization-terraforming-habitats.html> [dostęp: 10.09.2024]

³ S. Petranek, *How We'll Live on Mars*, Simon & Schuster, New York 2015, s. 4.

⁴ *Krótką historią lotów kosmicznych*, <https://zsobobowa.eu/index.php/tak-dzialamy/fizyka/145-krotka-historia-lotow-kosmicznych> [dostęp: 10.09.2024]

cieplarnianych, prowadzą do gwałtownych zmian klimatycznych. Wzrost temperatury globalnej powoduje topnienie lodowców, podnoszenie się poziomu mórz i oceanów oraz coraz częstsze ekstremalne zjawiska pogodowe, takie jak huragany, susze czy powodzie. Skutkiem jest destabilizacja ekosystemów, wymieranie gatunków, zmniejszanie bioróżnorodności i pogłębiające się problemy związane z dostępem do wody pitnej oraz żywności. Równocześnie gwałtownie rosnąca liczba ludności zwiększa presję na ograniczone zasoby naturalne. Już teraz obserwujemy konflikty o dostęp do wody, terenów rolnych czy surowców energetycznych, co w przyszłości może doprowadzić do globalnych kryzysów humanitarnych. W obliczu tych wyzwań, które są znacznie bardziej pilne niż potencjalne katastrofy kosmiczne, dalsza eksploracja kosmosu i poszukiwanie alternatywnych miejsc do zamieszkania, jak Mars, stają się realną koniecznością, aby zapewnić przetrwanie ludzkości.

Ludzkość jest obecnie na poziomie technologii, który pozwala sobie wyobrazić opuszczenie planety, wyruszając w kosmos, a kolonizacja jest bardziej realistyczna i ekscytująca dla architektów i decydentów. Pół wieku temu pierwszy raz człowiek dotarł na powierzchnię Księżyca, od tego czasu pogłębia się nasza chęć poznawania kosmosu oraz świata. Technologiczny postęp, jaki obserwujemy, nie tylko umożliwia prowadzenie eksploracji, ale także redefiniuje nasze podejście do podróży kosmicznych. Zaawansowanie w robotyce, sztuczna inteligencja, materiałoznawstwo, medycyna kosmiczna sprawiają, że kolonizacja innych planet staje się coraz bardziej wykonalna. **Systemy autonomiczne, które mogą działać niezależnie od człowieka, oraz technologie pozwalające na wykorzystanie lokalnych zasobów na Marsie (tzw. ISRU, ang. *In-Situ Resource Utilization*)** mają kluczowe znaczenie dla umożliwienia długotrwałego pobytu ludzi na Czerwonej Planecie. Dodatkowo rozwój zaawansowanych systemów napędowych, takich jak napęd fotonowy, może skrócić czas podróży między Ziemią a innymi planetami, co zwiększa szanse na udane misje załogowe. Rozwój nauki związany z kolonizacją Marsa ma znaczenie wykraczające poza samą eksplorację kosmosu. Badając inne planety, możemy lepiej zrozumieć procesy, które kształtują nasz Wszechświat.



Ilustracja 1. Cele i korzyści kolonizacji Marsa. (Opracowanie własne)

1.2 Aktualny stan wiedzy

Pierwsze obserwacje teleskopowe Marsa miały miejsce w XVII wieku. Od tamtej pory badania Czerwonej Planety rozwijały się wraz z postępem technologicznym i eksploracją kosmosu.

Jednym z najważniejszych przełomów w badaniach nad Marsem było skierowanie na tę planetę sondy Mariner 4 przez NASA w roku 1965. Była to pierwsza udana misja bezzałogowa, która dostarczyła zbliżone zdjęcia powierzchni Marsa. Pokazały one skaliste, spękanne tereny na planecie, wbrew wcześniejszym spekulacjom o obecności mórz i kanionów⁵.

Kolejne ważne wydarzenia w badaniach Marsa obejmują Misje Viking 1 i Viking 2 w 1976 roku, kiedy pierwsze sady pomyślnie wylądowały na Marsie. Przeprowadziły one szereg eksperymentów biologicznych w celu poszukiwania życia na Marsie, jednak nie znaleziono jednoznacznych dowodów na jego obecność⁶. W 1997 roku dzięki Misji Mars Pathfinder

⁵ Sheehan W., *The Planet Mars: A History of Observation and Discovery*, University of Arizona Press, Tucson 1996, s. 15-20.

⁶ *Viking Project*, <https://science.nasa.gov/mission/viking/> [dostęp: 01.05.2024]

dostarczono na powierzchnię planety mały lądownik oraz pierwszego małego łazika, Sojournera. Był to pierwszy raz, kiedy pojazd mechaniczny przemieszczał się po powierzchni innej planety⁷. W 2004 roku wysłano na Marsa dwa identyczne Roversy, które znalazły dowody na to, że w przeszłości na Marsie istniała woda w stanie ciekłym, co wzmocniło teorię o potencjalnej obecności życia na tej planecie. Osiem lat później wysłano kolejnego Rovera, który wylądował w kraterze Gale, przeprowadzał szczegółowe badania geologiczne i chemiczne, potwierdzając, że w przeszłości na Marsie istniały warunki sprzyjające życiu mikrobiologicznemu⁸.

Najnowsza misja NASA, Perseverance z 2021 roku, wylądowała na Marsie w celu poszukiwania śladów życia mikrobiologicznego, zbierania próbek skał i gleby oraz przetestowania technologii potrzebnych do przyszłych misji załogowych. Perseverance miał za zadanie przeprowadzić kompleksowe badania, które mogą dać wgląd w historię Marsa oraz potencjalne możliwości przyszłej kolonizacji. W ramach tej misji został również wysłany helikopter Ingenuity, który stał się pierwszym lotniczym pojazdem na innej planecie niż Ziemia⁹.

Oprócz wysyłania rakiet bezzałogowych, w ubiegłym wieku powstały plany misji załogowych. Robert Zubrin¹⁰ w swojej książce, przedstawia szczegółowy plan kolonizacji Marsa, argumentując za koniecznością ludzkiej ekspansji na tę planetę. Zubrin proponuje wykorzystanie zasobów dostępnych na Marsie (in-situ resource utilization, ISRU) do wspierania zamkniętych systemów życiowych. Jego koncepcje obejmują produkcję paliwa, tlenu i wody na Marsie, co znacząco zmniejszałoby zależność od dostaw z Ziemi. Zubrin kładzie nacisk na praktyczne i ekonomiczne aspekty kolonizacji w celu zminimalizowania kosztów i ryzyka. Pomimo że nie został jeszcze wdrożony w życie, plan ten nadal stanowi obiekt intensywnych badań i dyskusji w kontekście przyszłych misji na Marsa.

W ślad za misjami bezzałogowymi intensywnie rozwijane są także plany dotyczące przyszłych misji załogowych na Marsa. Firma SpaceX Elona Muska pracuje nad projektem Starship, wielofunkcyjnego pojazdu kosmicznego, który ma być zdolny do wielokrotnego użytku i umożliwić przewożenie dużej liczby pasażerów i ładunków na Czerwoną Planetę. Dodatkowo w książce "Elon Musk: Tesla, SpaceX, and the Quest for a Fantastic Future" Ashlee Vance przedstawia ambitne plany Muska dotyczące eksploracji i kolonizacji Marsa. Musk wierzy, że ludzie muszą stać się gatunkiem wieloplanetarnym, aby zapewnić przetrwanie ludzkości. Vance przedstawia wyzwania, z jakimi musiał się zmierzyć SpaceX, od technicznych trudności po finansowe problemy, oraz sukcesy, takie jak rozwój rakiet wielokrotnego użytku i pierwsze misje załogowe. Książka ukazuje także osobowość Muska, jego nieustępliwość i gotowość do podejmowania ogromnego ryzyka w dążeniu do realizacji swoich wizji, co czyni go jedną z najważniejszych postaci w dziedzinie współczesnej technologii i inżynierii kosmicznej¹¹.

⁷ *Mars Pathfinder*, <https://science.nasa.gov/mission/mars-pathfinder/> [dostęp: 01.09.2024]

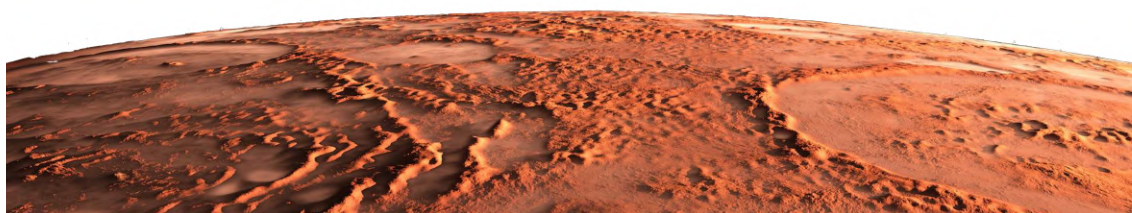
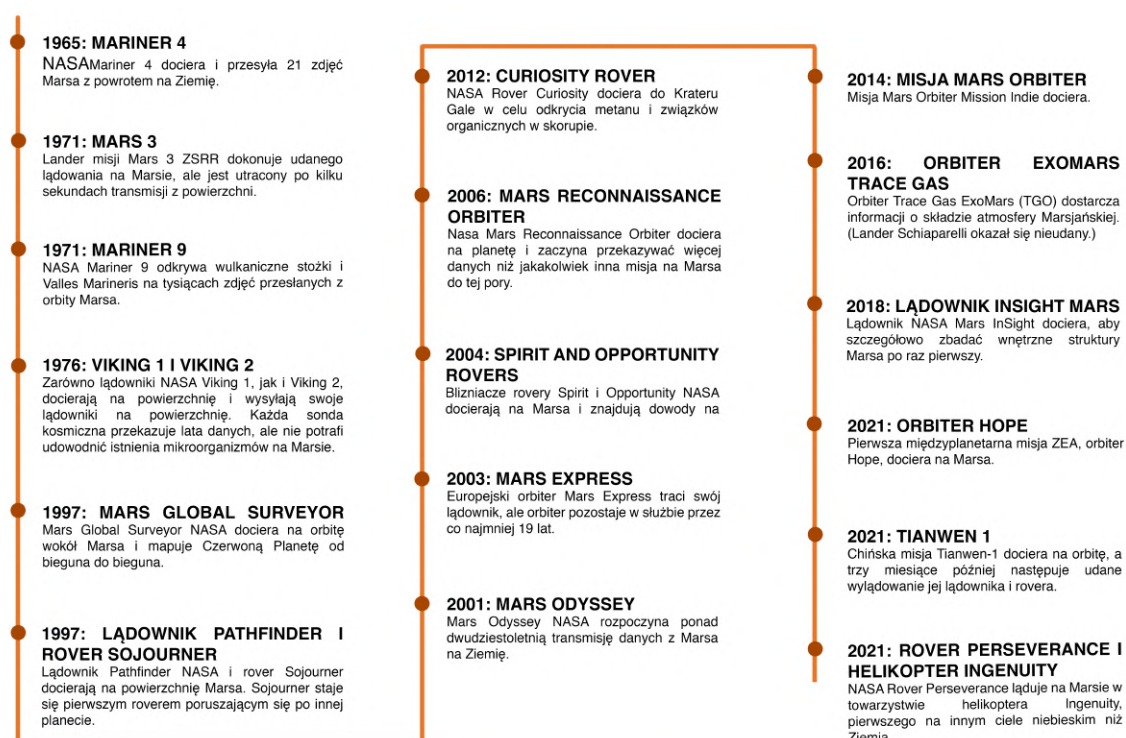
⁸ *Mars Exploration Rovers: Spirit and Opportunity*, <https://science.nasa.gov/mission/mars-exploration-rovers-spirit-and-opportunity/> [dostęp: 01.09.2024]

⁹ *Mars: Everything you need to know about the Red Planet*, <https://www.space.com/47-mars-the-red-planet-fourth-planet-from-the-sun.html> [dostęp: 01.05.2024]

¹⁰ Zubrin R., Wagner R., *Czas Marsa: Dlaczego i w jaki sposób musimy skolonizować Czerwoną Planetę*, Warszawa: Prószyński i S-ka, 1997, s. 101-120

¹¹ Vance A., *Elon Musk: Tesla, SpaceX, and the Quest for a Fantastic Future*, Ecco, New York 2015, s. 250-280.

W książce "How We'll Live on Mars" Stephen Petranek szczegółowo opisuje, jak w niedalekiej przyszłości ludzie mogą osiedlić się na Marsie. Autor analizuje kluczowe wyzwania, takie jak transport na Marsa, budowa habitatów, zapewnienie niezbędnych zasobów (woda, powietrze, żywność) oraz ochrona przed promieniowaniem kosmicznym. Petranek przedstawia również technologie, które umożliwią przetrwanie i rozwój marsjańskiej kolonii, takie jak druk 3D do budowy struktur i zaawansowane systemy podtrzymywania życia. Książka zawiera wizję przyszłego marsjańskiego społeczeństwa, które będzie funkcjonować w harmonii z surowymi warunkami Czerwonej Planety, oraz podkreśla, jak kolonizacja Marsa może być kolejnym krokiem w ewolucji ludzkości¹².

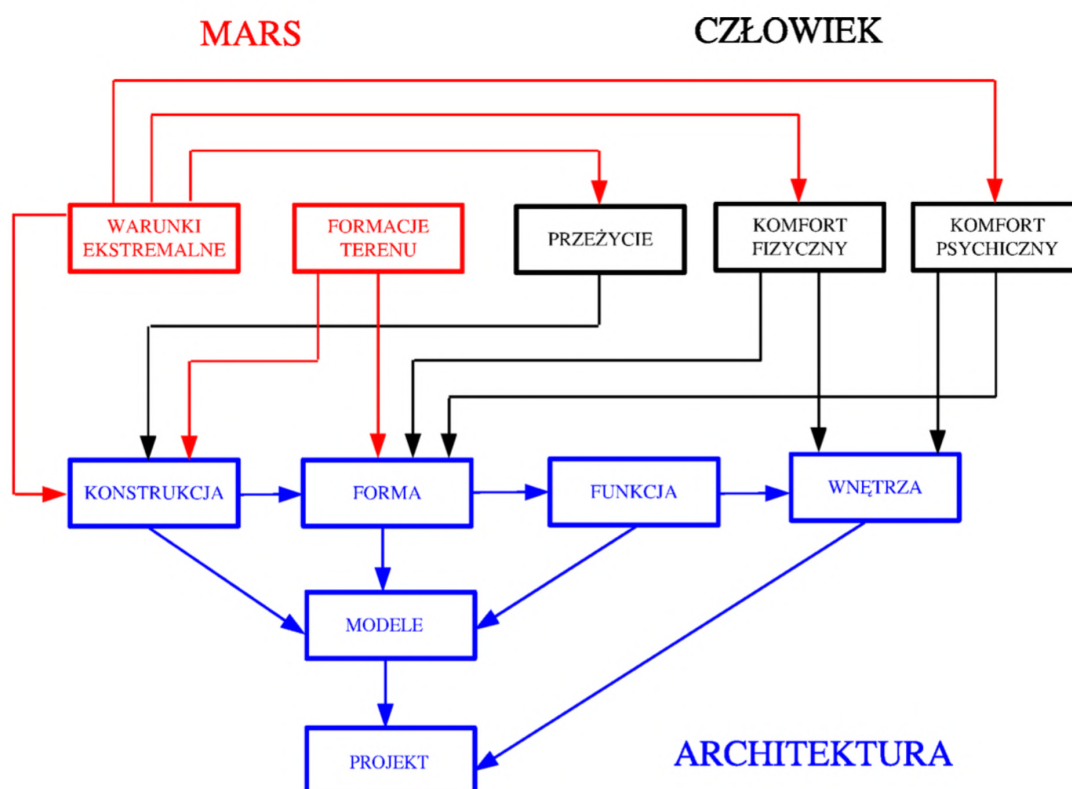


Ilustracja 2. Zarys chronologiczny ważnych misji na Marsa (Opracowanie własne na podstawie „Mars missions: A brief history”, <https://www.space.com/13558-historic-mars-missions.html> [dostęp: 20.07.2024])

¹² Petranek S., *How We'll Live on Mars*, NY: Simon & Schuster, 2015

1.3 Przedmiot analizy

Tworząc scenariusz osiedlenia Czerwonej Planety, kluczowymi zagadnieniami są: Mars, człowiek i architektura. Oprócz przeanalizowania i zrozumienia każdego z osobna, ważne jest to w jaki sposób stworzyć korelację między nimi. Przykładowo, zasoby dostępne na Marsie mogą wpływać na wybór materiałów budowlanych, a zrozumienie ludzkich potrzeb może kształtować projektowanie przestrzeni mieszkalnych i funkcjonalnych.



Ilustracja 3. Połączenia między zagadnieniami badawczymi z trzech bloków tematycznych: Mars, Człowiek, Architektura, (źródło: Kozicka J., *Problemy architektoniczne bazy na Marsie jako habitatu w ekstremalnych warunkach*, Politechnika Gdańska, Wydział Architektury, KTPPA, 2008, Dokohrat D/2230)

Aby podjąć się zaprojektowania habitatu na Marsie, należałoby zgłębić wiedzę nad podstawowymi problemami, z którymi będziemy się tam zmierzać. Podtrzymanie życia na Marsie wymaga zastosowania skutecznych strategii adaptacyjnych i technologii w kontekście projektowania zamkniętych systemów życiowych. Badanie możliwych rozwiązań motywowane jest potrzebą stworzenia odpowiednich warunków do przetrwania ludzi na tej planecie. Zakres badań obejmuje identyfikację strategii adaptacyjnych oraz technologii wspierających życie na Marsie, takich jak recykling i odzyskiwanie zasobów, utrzymanie odpowiedniego składu atmosfery, produkcję żywności, paliwa, wody, energii i prądu, uprawę roślinności.

Celem badań jest dobranie najlepszej techniki budowlanej, która umożliwi konstrukcję struktur na Marsie, odpowiadającej ekstremalnym warunkom panującym na tej planecie.

Motywacją do podjęcia się tego tematu jest potrzeba znalezienia optymalnych rozwiązań dla budowy habitatów na Marsie, uwzględniających ograniczone zasoby i wymagania środowiskowe. Zakres badań obejmuje analizę potencjalnych materiałów budowlanych oraz strategii ich pozyskiwania na Marsie. Istotne jest także zdefiniowanie, czy budowa habitatów powinna odbywać się przy użyciu materiałów dostępnych na miejscu (in-situ resource utilization, ISRU), czy też lepiej byłoby transportować materiały z Ziemi. Te pytania stanowią główne i szczegółowe aspekty badań, które zostaną omówione w kolejnych częściach pracy.

W ramach tego celu, konieczne jest zbadanie różnych materiałów pod kątem ich zdolności do spełnienia wymagań specyficznych dla warunków marsjańskich. Wymagania te obejmują konieczność szczelności dla dwutlenku węgla, wysoką wytrzymałość na rozciąganie w związku z niskim ciśnieniem atmosferycznym na Marsie, a także odporność na silne wiatry, promieniowanie UV oraz szeroki zakres temperatur. Wybór odpowiedniej techniki budowlanej ma kluczowe znaczenie dla sukcesu misji na Marsie oraz przyszłych kolonizacji, a badania te mają na celu zapewnienie niezbędnej wiedzy do skutecznego dostosowania się do warunków panujących na tej planecie.

Ostatnia kwestia, która zostanie omówiona, dotyczy ukształtowania oraz formy projektowanej bazy. Analiza form architektury i projektowania najlepiej odpowiadających specyficznym warunkom na Marsie, jednocześnie zapewniających bezpieczeństwo, komfort fizyczny i psychiczny, stanowi przedmiot badań.

Poprzez zgłębienie tych problemów, będziemy mogli lepiej zrozumieć wymagania, jakie stawia przed nami kolonizacja Marsa oraz wypracować strategie i rozwiązania, które pozwolą nam skutecznie przeciwdziałać tym wyzwaniom.

1.4 Cele badawcze

W toku badań zostały postawione następujące pytania badawcze:

1. Jakie cechy musi posiadać architektura, aby umożliwić długoterminowe podtrzymywanie życia na Marsie?
2. Jakie technologie wchodzi w skład systemów podtrzymywania życia w habitatów kosmicznych i jak wpływają na dobrostan załogi?
3. Jakie formy architektury mogą wspierać ochronę przed promieniowaniem, burzami pyłowymi i wahaniami temperatur?
4. Jaką rolę może odegrać integracja z naturalnym ukształtowaniem terenu w projektowaniu architektury marsjańskiej?
5. Jakie techniki budowlane i materiały konstrukcyjne mogą być zastosowane, aby zapewnić wytrzymałość, efektywność transportową i opłacalność budowy habitatów?
6. Czy lokalne materiały mogą być wykorzystywane jako surowce budowlane i w jakim zakresie?

2. Studium problemu i analiza uwarunkowań projektowych

2.1 Mars jako miejsce o szczególnie ekstremalnych warunkach do życia

2.1.1 Klimat i atmosfera

Technicznie kolonizacja Marsa jest możliwa, jednak warunki panujące na nim generują wiele przeszkód, które musimy wziąć pod uwagę. Mars ma wyjątkowo trudne środowisko, z cienką atmosferą z ekstremalnymi wahaniami temperatury, wysokim poziomem promieniowania słonecznego i kosmicznego, wynikającym z braku pola magnetycznego. Warunki te utrudniłyby ludziom przetrwanie bez znaczącego wsparcia technologicznego. Na planecie nie ma atmosfery nadającej się do oddychania, więc aby założyć tu kolonię, ludzie musieliby być w stanie wytwarzać powietrze do oddychania. Mars znajduje się średnio 240 milionów mil od Ziemi, co oznacza, że misje komunikacyjne i zaopatrzeniowe byłyby opóźnione i trudne¹³.

Czerwona planeta jest bardziej oddalona od Słońca niż Ziemia, co skutkuje znacznie niższymi temperaturami na jego powierzchni. Najniższe wartości sięgają około -125°C , najwyższe zbliżają się do 20°C , a średnia temperatura powierzchni wynosi około -63°C , w porównaniu do średniej około 14°C na Ziemi. Takie warunki wynikają m.in. z bardzo cienkiej atmosfery, złożonej w około 95–96% z dwutlenku węgla, której gęstość stanowi mniej niż 1% ziemskiej. Atmosfera ta nie zapewnia skutecznej izolacji termicznej ani ochrony przed szkodliwym promieniowaniem UV i promieniowaniem kosmicznym. Promieniowanie oraz agresywne warunki atmosferyczne mogą mieć degradujący wpływ na materiały konstrukcyjne używane do budowy siedlisk. Na Marsie występują także burze pyłowe, które mogą obejmować całą planetę. Prędkości wiatru sięgają około 30 m/s (czyli ok. 108 km/h), ale z powodu niskiego ciśnienia atmosferycznego (około 600 Pa) siła oddziaływania wiatru jest znacznie mniejsza niż na Ziemi. Niemniej jednak, drobny pył i jego właściwości ściernie mogą stanowić istotne zagrożenie dla sprzętu i infrastruktury¹⁴.

Różnice między zapewnianiem powietrza na Ziemi a na Marsie wynikają głównie z różnic w składzie atmosfery oraz warunkach panujących na obu planetach. Na Ziemi atmosfera jest bogata w tlen i azot, co umożliwia oddychanie ludziom i większości organizmom. Dodatkowo, Ziemia posiada naturalne źródła wody w postaci mórz, rzek i jezior, co ułatwia cykl wodny i dostarczanie tlenu poprzez fotosyntezę roślin. W przypadku Marsa, jego atmosfera jest rzadka i składa się głównie z dwutlenku węgla (CO_2) z niewielkimi ilościami azotu i argonu. Brak tlenu uniemożliwia oddychanie przez organizmy ziemskie. Dodatkowo, obecność promieniowania kosmicznego na powierzchni Marsa stanowi zagrożenie dla istot żywych.

Uczynienie Marsa podobnym do obecnej Ziemi – jak sugeruje słowo „terraformowanie” – wymaga osiągnięcia na nim pewnych poziomów O_2 i ustala górne limity dla toksycznych gazów, takich jak CO_2 . Alternatywnie, jeśli jesteśmy zainteresowani uczynieniem Marsa planetą bogatą w życie, ale niekoniecznie światem, w którym ludzie mogą się poruszać bez ochrony, wówczas obecność grubej warstwy CO_2 może być odpowiednim celem¹⁵. Masa Marsa jest 10

¹³ Spalvins K., Kusnere Z., Raita S., *Sustaining a Mars Colony through Integration of Single-Cell Oil in Biological Life Support Systems*, 2023

¹⁴ Freitas F., *Going Mars, the beginning of printed living machine development of 3D printed structures with in-situ resources*, Master's Thesis (Universidade do Porto, Portugal, 2018)

¹⁵ Berliner A. J., McKay C. P., *The Terraforming Timeline*, sporządzone podczas: Planetary Science Vision 2050 Workshop 2017 (LPI Contrib. No. 1989), University of California Berkeley, Berkeley, CA 94704, s.1

krotnie mniejsza niż Ziemi a przyciąganie o ponad połowę słabsze i wynosi około $3,71 \text{ m/s}^2$, czyli 38% przyciągania Ziemskiego. Nachylenie osi Czerwonej Planety zmienia się gwałtownie w czasie, ponieważ nie jest stabilizowane przez duży księżyc.

Chociaż warunki na Marsie są wyjątkowo trudne, nie przekreśla to możliwości stworzenia tam warunków do trwałej obecności człowieka. Każda przeszkoda staje się impulsem do innowacji – technologicznych, projektowych i społecznych. Jeśli ludzkość ma tam żyć, musimy nauczyć się współdziałać z tą planetą na nowych zasadach. To nie będzie łatwe, ale właśnie w tym tkwi potencjał – by zbudować coś od podstaw, świadomie i odpowiedzialnie.

2.1.2 Woda

Woda to podstawowy warunek istnienia życia, jakie znamy. W kontekście długoterminowego osadnictwa na Marsie, jej dostępność i możliwość wykorzystania nabierają kluczowego znaczenia. Odpowiednie zapasy wody, dwutlenku węgla i azotu (azotanu) obecnych na Marsie są kluczowe dla praktyczności stworzenia biosfery na tej planecie. Wiemy, że Mars ma wystarczająco dużo H_2O , aby zasilić chmury na niebie, deszcz, rzeki i jeziora¹⁶. Dotychczasowe badania wykazują, że na Marsie nie ma dostępu do wody w stanie ciekłym. Jest ona głównie uwięziona w czapach lodowych lub pod ziemią, jednak jeśli temperatura na powierzchni planety się podniesie, lód ten stopnieje. Jeziora przypominają ziemskie znajdujące się pod powierzchnią lodowca na Antarktydzie. W przeszłości natomiast istniejące kaniony oraz koryta rzeczne na powierzchni planety mogły być wypełnione wodą.

Z uwagi na fakt, że każda kropla wody będzie miała ogromne znaczenie, systemy recyklingu i zamkniętego obiegu wody staną się nieodzownym elementem przyszłych habitatów. Projektowanie osad marsjańskich będzie musiało uwzględniać nie tylko dostęp do surowców, ale również rozsądne gospodarowanie nimi — każda procedura, technologia i infrastruktura związana z wodą będzie odzwierciedlać wartość, jaką to podstawowe dobro odgrywa w codziennym przetrwaniu.

2.1.3 Fauna i flora

Obecnie brak jest dowodów na istnienie jakichkolwiek organizmów roślinnych ani zwierzęcych na powierzchni tej planety. Jednak nie wyklucza to jej w przyszłym zasiedleniu. Zastanawiając się nad tym, czy dana planeta ma szansę na kolonizację, należałoby przeanalizować, czy istniało, bądź istnieje na niej życie, jeżeli tak, prognozy na powodzenie bardzo wzrastają. Istnieją pewne podobieństwa Marsa z warunkami panującymi dawniej na Ziemi, dlatego możemy spekulować, że rozwinięcie na Marsie nie jest niemożliwe. Dawne ekosystemy mogły istnieć w zbiornikach wodnych lub w skałach, które mogły zapewniać odpowiednie warunki do przetrwania. Jednak w miarę ochładzania się i utraty atmosfery, warunki na Marsie stały się nieprzyjazne dla większych form życia¹⁷. Niektóre badania sugerują, że jeśli jakiegokolwiek życie istnieje dziś na Marsie, to może przetrwać w formie ekstremofili – mikroskopijnych organizmów żyjących w skrajnie nieprzyjaznych środowiskach, takich jak wieczna zmarzlina, podpowierzchniowe jaskinie solne lub pod lodem. Ziemskie odpowiedniki takich organizmów –

¹⁶ Tamże

¹⁷ Grotzinger, J. P., Milliken, R. E., *Sedimentary geology of Mars. SEPM*, Publikacja nr 102, 2012

np. *Deinococcus radiodurans* – potrafią przetrwać wysokie dawki promieniowania, suszę i niskie temperatury, co czyni je potencjalnym modelem dla hipotetycznego marsjańskiego życia¹⁸.

2.1.4 Uwarunkowania topograficzne

Mars posiada urozmaicone ukształtowanie terenu. Mimo, że planeta ma średnicę około dwukrotnie mniejszą niż Ziemia, możemy zaobserwować tu o wiele bardziej rozróżnione oraz kontrastujące formy terenu. Najwyższy szczyt górski jest trzy razy wyższy od Mount Everest, a kanion pięciokrotnie dłuższy od Kanionu Kolorado¹⁹. Większość powierzchni jest płasko ukształtowana. Obserwacje pokazują, że tereny są najgładsze w całym układzie słonecznym, co najpewniej jest zasługą tu uprzednio występującej wody na powierzchni. Dodatkowo Mars jest planetą z największą liczbą kraterów w całym Układzie Słonecznym. Szacuje się ją na około 43 tys., a największy ma średnicę ok. 2100 km.

Wulkaniczne pola hydrotermalne na Marsie mogą zapewnić środowisko sprzyjające powstawaniu życia poprzez cykle parowania i opadów, które umożliwiają kluczowe reakcje prebiotyczne. Te środowiska, podobne do tych na Ziemi, mogą być miejscem, gdzie protokomórki mogą ewoluować w prymitywne formy życia poprzez ciągłą ekspozycję na różnorodne warunki chemiczne oraz cykle mokre i suche, które "testują" ich trwałość i przetrwanie. W kontekście braku tektoniki płyt na Marsie, wulkany mogą być kluczowymi źródłami aktywności hydrotermalnej, co sprawia, że istnienie wulkanów jest istotne dla potencjalnego powstania życia na tym globie²⁰.

2.1.5 Minerale

W glebach marsjańskich występują wszystkie minerały niezbędne do wzrostu roślin. Azot jest podstawowym wymogiem życia i niezbędnym składnikiem oddychającej atmosfery. Może być on tworzony przez aktywność wulkaniczną lub wyładowania atmosferyczne. Niedawne odkrycie azotanów w glebie Marsa przez łazik Curiosity (~0,03% masy) stanowi obiecującą przesłankę na rzecz możliwości terraformowania planety²¹. Może być on tworzony przez aktywność wulkaniczną lub wyładowania atmosferyczne. Metale takie jak aluminium mogą zaburzać wzrost roślin. Choć brak eksperymentów z uprawą roślin na Marsie, badania z imitacją regolitu marsjańskiego wykazały możliwość wzrostu roślin, w tym tych wiążących azot. Czerwona planeta bogata jest w takie pierwiastki jak żelazo, wapń i magnez²², które odgrywają istotną rolę w procesach metabolicznych roślin oraz mogą być wykorzystane jako składniki odżywcze w systemach upraw hydroponicznych.

¹⁸ Dartnell, L. R.. *Ionizing radiation and life. Astrobiology*, 2011, s. 551–582.

¹⁹ Zubrin R., Wagner R., *Czas Marsa: Dlaczego i w jaki sposób musimy skolonizować Czerwoną Planetę*, Warszawa: Prószyński i S-ka, 1997, s. 21

²⁰ Cary F., Damer F., Fagents A., Ruttenberg C., Donachi P., *Could Life Have Started on Mars? Planetary Conditions That Assemble and Destroy Protocells*, 2024, DOI:[10.3390/life14030415], s.2

²¹ Brandenburg J. E., *Evidence for Large Planetary Climate Altering Thermonuclear Explosions on Mars in the Past*, Kepler Aerospace Ltd., Midland, USA, 2023, DOI: 10.4236/ijaa.2023.132007

²² Wiegner Wamelink G. W. i inni, *Can Plants Grow on Mars and the Moon: A Growth Experiment on Mars and Moon Soil Simulants*, 2014, DOI: 10.1371/journal.pone.0103138

2.1.6 Burze piaskowe

Burze piaskowe odgrywają istotną rolę w kształtowaniu klimatu Marsa. To właśnie one zmieniają bilans termiczny planety oraz przebieg zamarzania i parowania czap polarnych. Mają one również wpływ na rozkład pary wodnej. Kiedy prędkość wiatru wzrasta do 20-30 m/s, zaczynają się formować wiry atmosferyczne i powstają burze piaskowe. Czasami ponad miliard ton pyłu może unosić się w atmosferze i pozostawać w stanie zawieszenia przez dłuższy czas. Trwanie burz piaskowych może wynosić od 50 do 100 dni ziemskich. W tym czasie ogólny stan klimatyczny całej planety zmienia się dramatycznie. W trakcie burz piaskowych na Marsie występuje tzw. "efekt antycieplarniany". Jest on spowodowany tym, że chmury pyłowe nie przepuszczają promieni słonecznych do powierzchni, ale przepuszczają promieniowanie ciepłe pochodzące z niej. W rezultacie powierzchnia planety znacznie się ochładza, podczas gdy atmosfera znacząco się nagrzewa²³.

2.1.7 Aspekt ludzki

Życie i praca w warunkach ekstremalnych, takich jak przestrzeń kosmiczna lub powierzchnia innych planet, to nie tylko wyzwanie technologiczne, ale przede wszystkim wyzwanie dla ludzi. Długoterminowe misje kosmiczne niosą ze sobą skutki nie tylko fizyczne, lecz także emocjonalne i społeczne. Izolacja od Ziemi, brak bezpośredniego kontaktu z rodziną, ograniczenie prywatności oraz ciągła obecność tej samej grupy ludzi — to realia, które mogą negatywnie wpływać na kondycję psychiczną załogi. Codziennosc w zamkniętej przestrzeni, w której nie istnieje możliwość ucieczki od otoczenia i rutyny, potrafi stać się obciążającą. Poczucie zagrożenia, wynikające ze świadomości przebywania w środowisku nieprzyjawnym życiu, potęguje stres. Nawet drobne bodźce, takie jak kolorystyka wnętrza, dostęp do światła dziennego (lub jego imitacji), bądź możliwość chwilowej samotności, mogą zyskać olbrzymie znaczenie²⁴.

W tym kontekście **architektura staje się nie tylko funkcjonalną ramą życia, ale aktywnym uczestnikiem codziennego dobrostanu człowieka**. Przemyślana forma przestrzeni może wspierać utrzymanie zdrowia psychicznego, łagodzić skutki długotrwałej izolacji i sprzyjać relacjom międzyludzkim. Projektowanie przestrzeni powinno uwzględniać potrzebę różnorodności — zarówno pod względem funkcji, jak i estetyki. Miejsca do wspólnej integracji powinny być równoważone przez możliwość wycofania się i prywatności. Kluczowe stają się również rozwiązania sprzyjające aktywności fizycznej, rytuałom codzienności oraz kontaktowi z naturą — choćby w formie ogrodów hydroponicznych czy projekcji krajobrazów.

Przebywanie w zamkniętym, sztucznie wykreowanym środowisku, w którym każda cząstka powietrza, kropla wody i stopień temperatury są kontrolowane przez maszyny, sprawia, że systemy podtrzymywania życia stają się warunkiem biologicznego przetrwania, jak i również kluczowym elementem psychicznego komfortu. Technologie te — takie jak elektrolizery produkujące tlen, filtry usuwające dwutlenek węgla, obiegi zamknięte wody czy systemy termoregulacji — tworzą bezpośrednie tło codziennego życia. Ich niezawodność i stabilność

²³ Vidmachenko A., *Dust storms on Mars* w "Proceedings of V International Scientific and Practical Conference. Topical aspects of modern scientific research", Tokio: CPN Publishing Group, 2024, s.295-303

²⁴ Stuster, J., *Behavioral Issues Associated with Long-Duration Space Expeditions: Review and Analysis of Astronaut Journals*. NASA Technical Report TM-2010-216130, 2010

wpływają na poczucie bezpieczeństwa załogi, zmniejszając stres związany z przebywaniem w środowisku wrogim życiu. Stały dostęp do czystego powietrza i wody, kontrolowana wilgotność, komfort cieplny i przewidywalność funkcjonowania habitatów pozwalają uczestnikom misji skupić się na zadaniach, interakcjach społecznych i własnym dobrostanie. Gdy systemy te działają bez zarzutu, stają się swoistym "ekologicznym wsparciem emocjonalnym", które umożliwia człowiekowi utrzymanie rytmu życia, poczucia kontroli i psychicznej równowagi w rzeczywistości radykalnie odmiennej od ziemskiej.

Aspekt ludzki w eksploracji kosmosu to nie dodatek, lecz podstawa długofalowego funkcjonowania takich misji. Dlatego architektura przyszłych habitatów powinna być projektowana z myślą o człowieku jako istocie emocjonalnej, społecznej i zmysłowej — z jego potrzebą bezpieczeństwa, kontaktu, rytuału i estetyki.

2.2 Techniki budowania

Podczas eksplorowania potencjalnych metod konstrukcyjnych, głównym czynnikiem, który musi zostać uwzględniony są inne warunki od tych, które panują na Ziemi. Dodatkowo konstrukcje muszą nie tylko zapewniać bezpieczeństwo, ale i komfortowe warunki dla przyszłych mieszkańców lub eksploratorów. Kluczowym elementem jest analiza czynników środowiskowych, takich jak dostępność zasobów, ukształtowanie terenu oraz zmienne warunki pogodowe, które mają istotny wpływ na trwałość i zrównoważony rozwój każdej struktury na Marsie. Ponadto, podczas projektowania budynków na planecie, istotne jest uwzględnienie ekstremalnych warunków atmosferycznych, takich jak skrajne temperatury, bardzo niskie ciśnienie i burze piaskowe.

2.2.1 Drukowanie 3D i parametryzacja

Technologia **druku 3D** uznawana jest przez NASA i inne agencje kosmiczne za jedną z najbardziej obiecujących metod konstrukcyjnych w kontekście przyszłej eksploracji Marsa. Ze względu na ekstremalne koszty i ograniczenia logistyczne transportu materiałów z Ziemi, możliwość produkcji obiektów bezpośrednio na powierzchni planety z lokalnie dostępnych surowców (in-situ resource utilization, ISRU) staje się nie tylko opłacalna, ale wręcz niezbędna.

NASA zakłada, że do roku 2030 możliwe będzie wysłanie pierwszej misji załogowej na Marsa. W ramach przygotowań testowane są różne technologie konstrukcyjne, a jedną z najbardziej obiecujących jest addytywne wytwarzanie struktur z wykorzystaniem druku 3D. W środowisku marsjańskim drukowanie 3D może służyć zarówno do tworzenia habitatów, jak i infrastruktury wspomagającej, takiej jak osłony przed promieniowaniem, ściany ochronne czy zbiorniki na wodę.

Jednym z pionierskich projektów wpisujących się w tę strategię jest MARSHA – prototyp habitatów opracowany przez firmę AI SpaceFactory, który zdobył nagrodę NASA w konkursie 3D-Printed Habitat Challenge. Konstrukcja opiera się na materiałach pochodzenia lokalnego i odnawialnego, takich jak marsjański „polimer” – mieszanka bazaltu występującego w regolicie oraz włókien bazaltowych, a także bioplastik PLA (kwas polimlekowy), który może być wytwarzany z roślin hodowanych w zamkniętym obiegu biologicznym. Rozwiązanie to zakłada całkowitą eliminację komponentów wymagających dostaw z Ziemi w długofalowej perspektywie. Przeprowadzone testy wykazały wysoką wytrzymałość mechaniczną, odporność na zmienne

temperatury oraz ścieranie, co czyni tego typu konstrukcje szczególnie obiecującymi w kontekście surowego środowiska Marsa²⁵.

Wśród kluczowych zalet wykorzystania druku 3D w środowisku pozaziemskim należy wymienić zoptymalizowane zużycie materiału, eliminację odpadów, adaptację do lokalnych warunków poprzez wykorzystanie materiałów pozyskiwanych na miejscu oraz zautomatyzowany proces budowy, który umożliwia rozpoczęcie realizacji jeszcze przed przylotem załogi. Istotna jest również modularność konstrukcji, umożliwiająca ich rozbudowę w miarę zwiększających się potrzeb mieszkańców.

W kontekście realizacji konstrukcji na Marsie i innych środowiskach pozaziemskich warto rozważyć dwa główne podejścia do druku 3D: metodę in-situ oraz prefabrykację komponentów. Każde z nich oferuje określone korzyści, jak również wiąże się z istotnymi wyzwaniem technologicznymi i środowiskowymi.

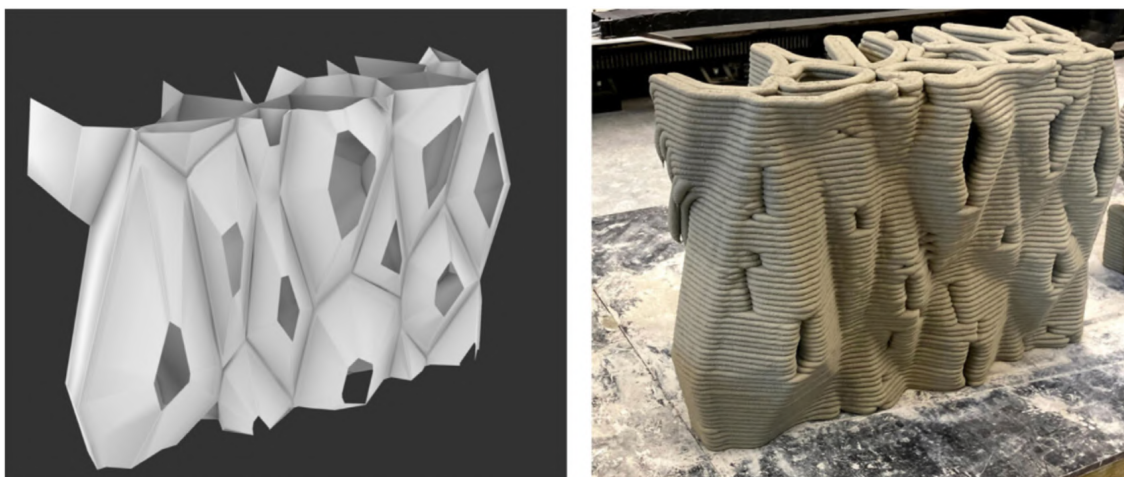
Drukowanie in-situ, czyli bezpośrednio na miejscu docelowym, jest szczególnie korzystne z punktu widzenia środowiska naturalnego. Pozwala na wykorzystanie surowców lokalnych, ogranicza potrzebę transportu ciężkich komponentów z Ziemi, a także umożliwia dostosowanie geometrii konstrukcji do konkretnych warunków lokalnych, zarówno środowiskowych, jak i przestrzennych. W połączeniu z cementless concrete lub geopolimerami, rozwiązania tego typu stanowią atrakcyjną alternatywę dla tradycyjnych form budownictwa, oferując jednocześnie znaczną redukcję emisji CO₂. Technologia ta jednak wciąż napotyka bariery, takie jak wysoka wrażliwość na zmienne warunki atmosferyczne, konieczność dostosowania robotów do pracy w środowiskach nieustrukturyzowanych oraz ograniczenia związane ze skalowalnością²⁶.

Z kolei **prefabrykacja** zakłada wytwarzanie komponentów w kontrolowanych warunkach, co umożliwia uzyskanie większej precyzji i powtarzalności oraz skrócenie czasu montażu w miejscu docelowym. Pozwala również na niezależność od warunków atmosferycznych i zmniejszenie ryzyka błędów wykonawczych. W kontekście długotrwałych konstrukcji na Marsie, prefabrykowane elementy mogą być łączone w stabilne i trwałe struktury, choć wymagają odpowiedniego zaplecza logistycznego, co wiąże się z dodatkowymi kosztami transportu i koordynacji działań.

Najbardziej obiecującym kierunkiem rozwoju w tej dziedzinie jest podejście **hybrydowe**, łączące zalety obu metod. Prefabrykacja zapewnia wysoką jakość i trwałość komponentów, natomiast ich montaż in-situ – z udziałem robotów i systemów wspieranych sztuczną inteligencją – umożliwia adaptację do zmieniających się warunków oraz optymalizację zużycia materiałów na miejscu. Dzięki wykorzystaniu algorytmów uczenia maszynowego oraz systemów komputerowego widzenia możliwe jest także zapewnienie bieżącej kontroli jakości w procesie produkcji oraz optymalizacja trajektorii pracy ramion robotycznych w czasie rzeczywistym.

²⁵ Lee Y., *3D Printed Martian Habitats and Challenges to Overcome*, Czerwiec 2022, DOI: 10.37591/rjosst.v11i1.3344

²⁶ Aslaminezhad A., Hidding A., Bier H., Calabrese G., *In-Situ vs. Prefab 3D Printing Considerations for CO2-free Pop-up Architecture*, Lipiec 2024, SPOOL 11(1):71-80, DOI: 10.47982/spool.2024.1.05



Ilustracja 4. Prototyp habitatu drukowanego za pomocą drukarki 3D (źródło: https://www.researchgate.net/publication/382438250_In-Situ_vs_Prefab_3D_Printing_Considerations_for_CO2-free_Pop-up_Architecture [dostęp: 01.10.2024])

2.2.2 Materiały dostępne in-situ

Beton siarkowy to materiał idealny do marsjańskich warunków. Jego spoiwem jest siarka, która po podgrzaniu tworzy trwałą, polimerową strukturę. W przeciwieństwie do tradycyjnej mieszanki betonowej, powstającej przy użyciu cementu, beton siarkowy dobrze znosi brak tlenu i niskie temperatury — warunki, jakie panują na Marsie. Siarka w formie polimeru jest odporna na promieniowanie UV i kosmiczne, które na Marsie jest bardzo intensywne przez cienką atmosferę i brak pola magnetycznego. Na skutek tego konstrukcje z betonu siarkowego będą mniej podatne na degradację niż te wykonane z konwencjonalnych materiałów. Dodatkowo, beton siarkowy jest mało nasiąkliwy i odporny na chemikalia obecne w marsjańskim regolicie. To ważne, bo tradycyjny beton mógłby szybciej ulegać tam degradacji. Technologia obróbki plazmowej pozwala na dodatkowe utwardzenie betonu siarkowego nawet w warunkach próżni, typowej dla powierzchni Marsa. Ta metoda może także pomagać w naprawianiu drobnych uszkodzeń materiału, co zwiększa jego trwałość. Co ważne, na Marsie jest siarka i odpowiedni kruszywo (regolit), co pozwala produkować beton na miejscu, bez konieczności transportu ciężkich materiałów z Ziemi. To ogromna zaleta dla misji załogowych, które muszą być jak najbardziej samowystarczalne²⁷.

2.2.3 Planowane początki procesu budowy

Misja Mars Direct zakłada zaopatrzenie Marsa w szereg elementów potrzebnych do przeżycia przed przybyciem załogi. Proces ten zaczyna się na orbicie okołoziemskiej, gdzie zakłada się produkcję paliwa raketowego w planowanych fabrykach ISRU. Następnie wysyła się załogowy statek transportowy, który łączy się z statkiem Earth Return Vehicle (ERV). ERV zawiera nie tylko materiały budowlane, ale także żywność, wodę, sprzęt naukowy i inne niezbędne wyposażenie. Po lądowaniu na Marsie, ERV jest gotowy do przyjęcia załogi i wykorzystania

²⁷ Anyszka R. i inni, Beton siarkowy i jego zastosowanie w budownictwie pozaziemskim, wygłoszone podczas Konferencji Samorządu Studentów Wydziału Chemicznego Politechniki Łódzkiej w Murzasichle, 2016, DOI: 10.13140/RG.2.1.2082.4722

zawartych w nim zasobów, zapewniając niezbędne warunki do życia na powierzchni planety, zanim dotrze tam załoga. W ten sposób można wysłać potrzebne maszyny, skompresowane bazy noclegowe lub elementy konstrukcji.

2.3 Habitaty w warunkach ekstremalnych. Studium przypadków

Przez całą historię swojego istnienia, człowiek kolonizował Ziemię, próbując ją zasiedlić niemal w każdym środowisku. Największa gęstość zaludnienia na Ziemi występuje na obszarach, gdzie warunki naturalne sprzyjają osiedleniu. Jednakże zamieszkane bywają także tereny, gdzie ludziom trudno przetrwać ze względu na panujące tam ekstremalne warunki. Pomimo tych wyzwań, rozwój dzisiejszej technologii pozwala na osiedlanie obszarów, które kiedyś były dla człowieka nieosiągalne. Człowiek nauczył się tam żyć i pracować, wykorzystując specjalnie zaprojektowane habitaty.

Ekstremalne środowiska, takie jak obszary polarne, głębiny oceaniczne, pustynie czy powierzchnia Księżyca i Marsa, stawiają przed architekturą zupełnie nowe wyzwania. Projektowane tam habitaty muszą nie tylko zapewniać komfort i funkcjonalność, ale przede wszystkim chronić użytkowników przed czynnikami zagrażającymi ich życiu. Należą do nich silne wahania temperatur, intensywne promieniowanie słoneczne i kosmiczne, a także zjawiska takie jak burze pyłowe – szczególnie niebezpieczne w środowiskach pozaziemskich. Analiza istniejących rozwiązań pokazuje, w jaki sposób architektura może adaptować się do skrajnych warunków poprzez odpowiedni dobór materiałów, zastosowanie osłon termicznych, systemów filtracji powietrza czy struktur zagłębionych w podłożu.

2.3.1 Habitaty polarne

Antarktyda charakteryzuje się ekstremalnymi warunkami klimatycznymi, w tym najniższymi temperaturami na Ziemi, sięgającymi -80°C zimą, i silnymi wiatrami katabatycznymi osiągającymi prędkość ponad 200 km/h. Jest to sucha pustynia lodowa z bardzo niskimi opadami, średnio poniżej 200 mm rocznie na wybrzeżu, oraz pokrywą lodową o średniej grubości około 1,9 km, zawierającą 60% słodkiej wody na Ziemi. Antarktyda doświadcza długich okresów dnia i nocy polarnej, co oznacza sześciomiesięczne okresy ciągłego światła latem i ciemności zimą. Ekstremalne warunki i izolacja sprawiają, że stała ludzka populacja jest ograniczona do naukowców w stacjach badawczych²⁸.

Stacje polarne charakteryzują się specjalną konstrukcją, która pozwala im przetrwać w ekstremalnych warunkach klimatycznych i geograficznych. Na przykład Stacja Amundsena-Scotta na biegunie południowym jest podniesiona na podporach, co zapobiega zasypywaniu śniegiem i umożliwia przepływ wiatru pod budynkiem, natomiast Stacja Halley na Brunt Ice Shelf, zaprojektowana przez Hugh Broughton Architects, składa się z modułów na hydraulicznie podnoszonych nartach, co umożliwia jej unikanie zasypywania przez śnieg oraz przemieszczanie w miarę przesuwania się lodowca. Stacje te są wyposażone w nowoczesne systemy podtrzymywania życia, takie jak zaawansowane systemy grzewcze, oczyszczania wody

²⁸ Birkenmajer K., *Stacje polarne w badaniach naukowych*, Wydawnictwo PAN, Warszawa 2017, s. 11–15.

i wentylacji. Przykładem może być Stacja Neumayer III, która wykorzystuje geotermalne ogrzewanie²⁹.

Stacje polarne są centralnymi punktami badań w dziedzinach takich jak meteorologia, glaciologia, biologia, fizyka atmosferyczna i ekologia, a ich laboratoria badawcze są wyposażone w nowoczesny sprzęt naukowy. Ze względu na trudności logistyczne związane z dostawami, stacje muszą być w dużej mierze samowystarczalne, posiadając zapasy żywności, paliwa i sprzętu naprawczego na długie okresy izolacji. Na przykład Stacja Halley VI ma własne generatory prądu i systemy oczyszczania wody³⁰.

Wysokie standardy bezpieczeństwa są niezbędne ze względu na surowe warunki i potencjalne zagrożenia, obejmując procedury ewakuacyjne, zaopatrzenie w awaryjne zestawy ratunkowe oraz regularne szkolenia personelu. Ponadto, stacje polarne są zaprojektowane tak, aby minimalizować swój wpływ na środowisko, czego przykładem jest Stacja Neumayer III z zaawansowanymi systemami zarządzania odpadami. Stacje te, dzięki swojej zaawansowanej technologii i przemysłowej konstrukcji, umożliwiają prowadzenie ważnych badań naukowych i przetrwanie w jednym z najbardziej ekstremalnych warunków na Ziemi³¹.

2.3.2 Habitaty podwodne

Warunki podwodne charakteryzują się szeregiem specyficznych wyzwań, takich jak wysokie ciśnienie, niskie temperatury, zwłaszcza na dużych głębokościach. Prowadzą one do potrzeby stosowania zaawansowanych systemów ogrzewania i izolacji oraz wytrzymałej konstrukcji odpornej na korozję. Brak naturalnego światła na większych głębokościach wymusza stosowanie sztucznego oświetlenia. Woda zawiera pewne ilości tlenu, ale nie nadaje się on do oddychania dla ludzi, gdyż jest rozpuszczony w wodzie. Rozwiązaniem mogą być sztuczne skrzela z wodoszczelnej membrany, która w jedną stronę przepuszcza tlen, a w drugą – dwutlenek węgla³².

„Podbój” oceanów fascynował badaczy XX wieku. Jacques-Yves Cousteau, pionier w tej dziedzinie, przeprowadził przełomowe eksperymenty Conshelf. Pierwszy eksperyment, Conshelf I, został przeprowadzony w 1962 roku u wybrzeży Marsylii, gdzie dwaj nurkowie spędzili tydzień na głębokości 10 metrów, dowodząc, że człowiek może mieszkać pod wodą przez dłuższy czas. Kolejny projekt, Conshelf II, zlokalizowany w Morzu Czerwonym, obejmował większy habitat - Starfish House - wyposażony w kuchnię, jadalnię, laboratorium i ciemnię fotograficzną. Na głębokości 12 metrów pięciu nurków spędziło miesiąc, wykonując zadania badawcze i testując długotrwałe przebywanie pod wodą.

Stacje badawcze, takie jak Sealab, również przyczyniły się do rozwoju podwodnych habitatów. W 1964 roku US Navy przeprowadziło eksperyment Sealab I, umieszczając habitat na głębokości 58 metrów na Bermudach. Chociaż eksperyment przerwano ze względu na

²⁹ Broughton H., *Designing for Extreme Environments: The Halley VI Antarctic Research Station, The Architectural Review*, nr 231(1383), 2012, s. 74–77.

³⁰ British Antarctic Survey, *Halley VI Research Station: Technical Summary*, BAS Publications, 2020, s. 9–12

³¹ Alfred-Wegener-Institut, *Neumayer Station III – Environmental Protection and Waste Management*, AWI Report, 2019, s. 4–6.

³² Kozicka J., *Problemy architektoniczne bazy na Marsie jako habitatu w ekstremalnych warunkach*, Politechnika Gdańska, Wydział Architektury, KTPPA, 2008 (Doktorat D/2230)

huragan, kolejne misje Sealab II i Sealab III skupiały się na badaniu aspektów psychologicznych długotrwałego pobytu pod wodą³³.

Projekt Tektite został zrealizowany przez General Electric i NASA w 1969 roku. Habitat ten, skonstruowany z elementów symulatora lotów kosmicznych, składał się z dwóch cylindrów połączonych przejściem. Wejścia zabezpieczone klatką chroniącą przed rekinami prowadziły do pomieszczenia mokrego, z którego drabina wiodła do kabiny kontroli. Kabina ta, wyposażona w wieżyczkę obserwacyjną, magazynowała również zapasy żywności na dwa miesiące. W drugim cylindrze znajdowało się laboratorium na górze, a przestrzeń mieszkalna z meblami i kącikiem rozrywkowym na dole. Tektite zapewniał kompleksowe środowisko do prowadzenia badań naukowych oraz obserwacji zachowania ludzi w izolacji³⁴.

Ostatnie lata przyniosły mobilne, częściowo zanurzone w wodzie obiekty mieszkalne, przeznaczone dla prywatnych użytkowników. Giancarlo Zema zaprojektował pływający dom Trilobis 65, zanurzony do połowy, z czterema kondygnacjami połączonymi spiralną klatką schodową. Na najwyższym poziomie znajduje się pulpit sterowniczy i duże okna z hartowanego szkła, a najniższa część, 3 metry poniżej poziomu wody, mieści szklane obserwatorium. Trilobis 65 może łączyć się w pływające kolonie, oferując ekologiczne i samowystarczalne mieszkania w unikatowym otoczeniu³⁵.

Prace nad podwodnymi habitatami przeszły od eksperymentów do fazy komercyjnej. W Dubaju powstają hotele podwodne, prywatni użytkownicy mogą zamawiać częściowo zanurzone domy, a turyści mogą spędzić noc w podwodnych ośrodkach, takich jak Marine Lab. Standardy stawiane tego typu obiektom są precyzyjnie określone przez ABS i Lloyds, a dyskusje na temat urbanistyki podwodnej wciąż trwają³⁶.

2.3.3 Habitaty podziemne

Na przestrzeni historii ludzie i ich przodkowie tworzyli wiele różnych rodzajów podziemnych struktur. Od starożytnych podziemnych tuneli na terenie dzisiejszej Szkocji po nowoczesne jaskinie mieszkalne w Australii, podziemne budowle przyjmowały dziesiątki różnych form. Architektura podziemna zwykle charakteryzuje się stabilną temperaturą, w podziemnych strukturach warunki atmosferyczne praktycznie nie mają znaczenia. Dzięki temu w okresie letnim w takich miejscach jest przyjemnie chłodno, a zimą znacznie cieplej niż na powierzchni. Habitaty podziemne wyróżniają się dobrą izolacją akustyczną oraz są schronieniem przed dzikimi zwierzętami i wrogami. Dodatkowo bardzo trudno jest je zniszczyć. Na naszej planecie istnieją już różnego rodzaju habitaty podziemne, takie jak schrony, jaskinie przystosowane do zamieszkania, a także podziemne miasta.

Przykładem takiego habitatu jest Coober Pedy w Australii, gdzie ludzie mieszkają w podziemnych domach zbudowanych w naturalnych jaskiniach, zwanych "dugouts", które chronią ich przed ekstremalnymi temperaturami panującymi na powierzchni. Jest to konieczne

³³ Widera B., *Podwodne środowisko mieszkalne dla człowieka*, Politechnika Wrocławska, 2009, Licencja: CC BY-SA 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.pl>. [dostęp: 10.06.2024]

³⁴ Kozicka J., *Problemy architektoniczne bazy na Marsie jako habitatu w ekstremalnych warunkach*, op.cit.

³⁵ Giancarlo Zema Design Group, *Trilobis 65 – An innovative semi-submerged houseboat*, 2001. www.giancarlozema.com [dostęp: 29.05.2025]

³⁶ Widera B., *Podwodne środowisko mieszkalne dla człowieka*, op. cit.

ze względu na surowy klimat regionu. Podziemne przestrzenie mogą mieć patia, atria i kopuły, które ograniczają uczucie życia pod ziemią. Budynki są pokryte roślinnością lub ziemią, co pozwala im wtopić się w krajobraz. Czasami budynki zasłonięte ziemią są wyrzeźbione w zboczu wzgórza, podczas gdy inne są sztucznie konstruowane z miejscowych materiałów. W Coober Pedy oprócz domów, istnieją podziemne kościoły, galerie sztuki, hotele oraz muzea, a w niektórych miejscach w okolicy można znaleźć pozostałości po misjach kosmicznych NASA, które były prowadzone tutaj ze względu na podobieństwo krajobrazu do powierzchni Marsa.

Podobnie, w Kappadocji w Turcji, istnieją osady wykute skałach. Podziemne miasta służyły jako schronienie przed najazdami i wojnami, a także jako miejsce zamieszkania w czasach zagrożenia. Kappadocja to region o niezwykłym krajobrazie, charakteryzujący się skalistymi stołbami, tzw. "bałwankami", które powstały w wyniku erozji wulkanicznej lawy i popiołów. Tuf jest również bardzo wytrzymały, dlatego domostwa od nawet 6000 lat do dziś w wielu miejscach stoją w nienaruszonej formie. Najbardziej znanym z miast jest Derinkuyu, które sięga głęboko pod ziemię, nawet na głębokość 85 metrów i posiada skomplikowaną, wielofunkcyjną tkankę miejską. To podziemne miasto zawiera mieszkania, kuchnie, warsztaty, sklepy, magazyny, zakłady pracy takie jak młyn i winiarnia oraz kaplice i kościoły, co świadczy o zaawansowanej organizacji życia w tych strukturach. Jedyne utrudnienie stanowi brak naturalnego światła słonecznego oraz kontaktu z zewnętrznym otoczeniem³⁷.

Doświadczenia z podziemnych osiedli na Ziemi sugerują, że wykorzystanie naturalnego ukształtowania terenu może znacząco zwiększyć bezpieczeństwo i efektywność habitatów w środowiskach ekstremalnych. W kontekście Marsa, zagłębianie konstrukcji w podłożu lub ich lokowanie w naturalnych formacjach, takich jak kratery, ściany kanionów czy tunele lawowe, może pełnić wieloraką funkcję: ochrony przed promieniowaniem kosmicznym, zabezpieczenia przed burzami pyłowymi oraz stabilizacji termicznej. Dzięki takiej integracji z terenem możliwe jest ograniczenie konieczności stosowania ciężkich osłon oraz lepsze zarządzanie energią.

2.3.4 Habitaty w kosmosie (orbitalne, księżycowe, marsjańskie)

Obecnie Ziemia jest już szeroko zbadana i zaludniona. Liczne kraje, organizacje i agencje kosmiczne aktywnie przygotowują się do ustanowienia stałych osiedli i baz w całym Układzie Słonecznym, zaczynając od Księżyca i Marsa. Księżyc, nasz jedyny naturalny satelita i najbliższe ciało niebieskie Ziemi, stanowi logiczny kolejny szczebel w drabinie ku osiągnięciu międzyplanetarnej cywilizacji.

Księżyc stawia przed nami znaczące wyzwania związane z zamieszkaniem przez ludzi. Doba księżycowa trwa 29 dni ziemskich, a towarzysząca jej ogromna dobową różnica temperatur wynosi 300°C (od maksymalnie 127°C do minimalnie -173°C). Pozbawiona atmosfery, która mogłaby zapewnić ochronę, powierzchnia księżyca jest narażona na uderzenia asteroid, meteoroidów oraz nieprzefiltrowane działanie promieniowania słonecznego i kosmicznego. Dodatkowo, powierzchnia pokryta jest ostrym pyłem.

Ludziom udało się wylądować na Księżycu i prowadzić tam badania. Pierwsze lądowanie misji załogowej miało miejsce w 1969 roku. Pobyt na powierzchni Księżyca zajmował

³⁷ Bahrami F., *Underground Architecture: History and Modern Applications*, Journal of Architectural Engineering, t. 20, nr 4, 2014, s. 55–67.

od 2 do 4 dni. Pomimo braku stałych habitatów i baz, astronauta korzystali z niewielkich habitatów zaprojektowanych specjalnie dla nich, umożliwiających odpoczynek i pracę. Moduł Księżycowy (LM) stworzono dla potrzeb amerykańskich misji Apollo. Składał się on z dwóch głównych elementów: części służącej do lądowania na Księżycu oraz części do powrotu z jego powierzchni. Dolną część stanowiło podium wyposażone w cztery nogi stabilizujące statek po lądowaniu. W górnej części znajdowało się małe pomieszczenie mieszkalno-robotyczne dla dwóch astronautów. Ze względu na krótki czas przebywania na Księżycu, nie zadbane szczególnie o wygodę wewnątrz habitatu. Starano się przede wszystkim zmniejszyć koszty, dlatego też habitat został zaprojektowany w możliwie najmniejszych rozmiarach. Wewnątrz lądownika znajdowało się jedno ciasne pomieszczenie wspólne z konsolą sterowniczą i przyrządami. Brakowało foteli; astronauta obsługiwali je na stojąco. Do spania używali małych niewygodnych siedzących. Część mieszkalna miała średnicę około 4 m i długość 3,5 m³⁸.

2.4. Podsumowanie

Mars, jako potencjalne miejsce przyszłej kolonizacji, stanowi przykład środowiska o wyjątkowo niekorzystnych warunkach dla życia człowieka. Niska temperatura, wysokie promieniowanie, brak atmosfery umożliwiającej oddychanie oraz silne burze pyłowe sprawiają, że projektowanie infrastruktury do zamieszkania na tej planecie wymaga rozwiązań wykraczających poza dotychczasowe standardy architektoniczne.

W kontekście tych wyzwań przeanalizowano przykłady habitatów funkcjonujących w ekstremalnych środowiskach na Ziemi i poza nią – w strefach polarnych, pod wodą, pod ziemią oraz w przestrzeni kosmicznej. Każdy z tych przypadków wnosi istotne obserwacje dotyczące organizacji przestrzeni, technologii podtrzymywania życia, bezpieczeństwa użytkowników i adaptacji do izolacji oraz ograniczonych zasobów.

Zgromadzony materiał dowodzi, że chociaż warunki na Marsie są unikalne, istniejące doświadczenia projektowe i inżynierskie w trudnych warunkach środowiskowych mogą stanowić ważny punkt odniesienia dla dalszych prac nad architekturą pozaziemską. Wnioski płynące z tych analiz pozwalają lepiej zrozumieć, jakie strategie sprawdzają się w kontekście trwałości, samowystarczalności i efektywności funkcjonalnej habitatów przeznaczonych do użytkowania w ekstremalnych warunkach.

³⁸ Kozicka J., *Problemy architektoniczne bazy na Marsie jako habitatu w ekstremalnych warunkach*, op.cit.

Część II - Opis koncepcji architektonicznej i zagospodarowania terenu

3. Studium obszaru projektowego

Przedmiotem opracowania jest koncepcja samowystarczalnej bazy marsjańskiej, projektowanej z myślą o długoterminowym, stałym zasiedleniu planety. Projekt uwzględnia zarówno aspekty technologiczne, funkcjonalne, jak i psychologiczne, przestrzenne oraz środowiskowe – tworząc spójny system życia w ekstremalnych warunkach pozaziemskich. Baza została zlokalizowana na obszarze krateru Jezero oraz przylegającej równiny Isidis Planitia, uwzględniając dane z aktualnych misji badawczych NASA i ESA.

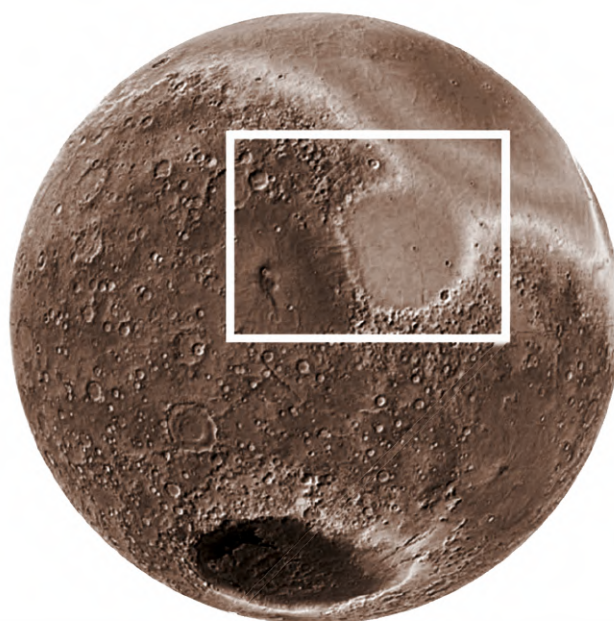
Projekt, oparty na modułowości oraz zasadach parametryzacji, zakłada możliwość rozbudowy i adaptacji w odpowiedzi na zmieniające się potrzeby użytkowników oraz wyzwania środowiska marsjańskiego. W kolejnych podrozdziałach szczegółowo omówione zostaną uwarunkowania przestrzenne, techniczne i środowiskowe wybranej lokalizacji.

3.1 Opis lokalizacji

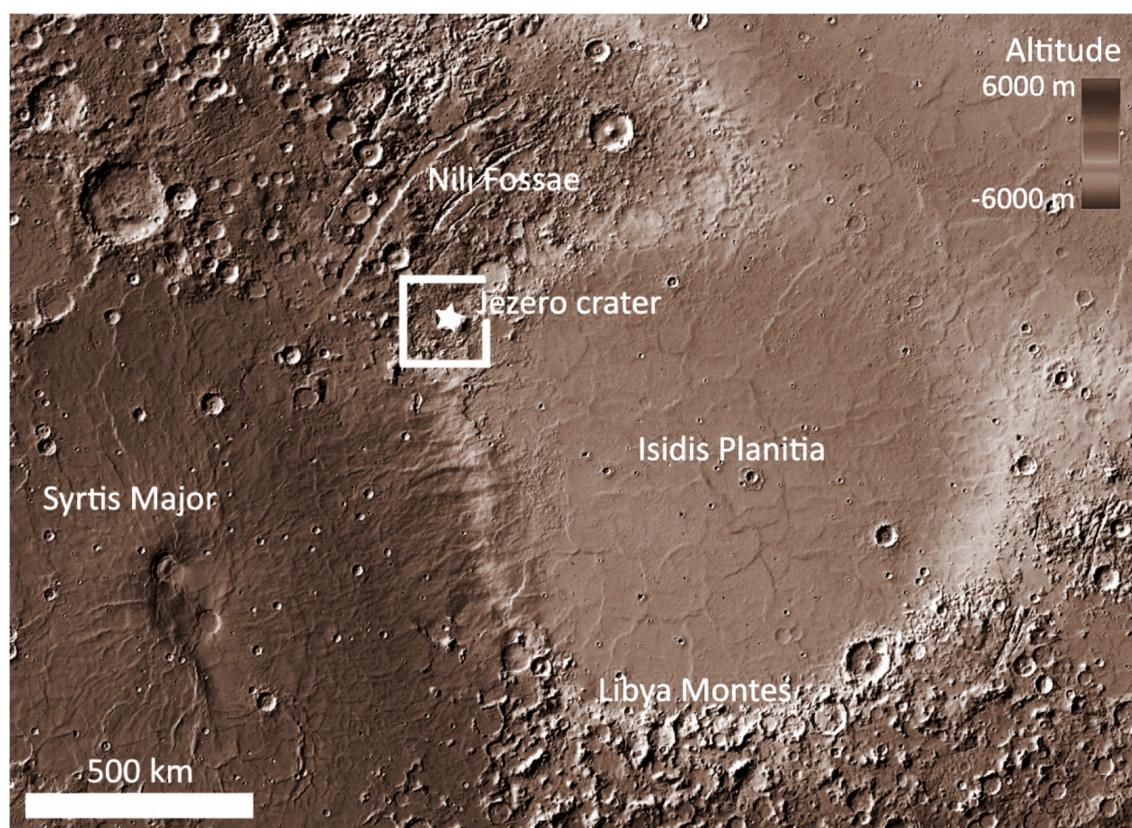
Wybór miejsca pod budowę bazy na Marsie nie był decyzją przypadkową — to wynik analizy wielu czynników środowiskowych, geologicznych i strategicznych. Choć Mars wciąż pozostaje dla nas planetą odległą i nieznaną, niektóre jego rejony zaczynają zyskiwać kontury bardziej zrozumiałe – nie tylko jako obiekty naukowych analiz, ale jako przyszłe przestrzenie ludzkiej obecności.

Lokalizacja projektu — krater Jezero (Ilustracja 6.) stanowi jedną z najciekawszych i najlepiej przebadanych stref na Czerwonej Planecie. Historia tego miejsca, od starożytnych jezior po współczesne misje badawcze, nadaje mu wartość naukową oraz symboliczny potencjał jako przyszłej kolebki życia poza Ziemią.

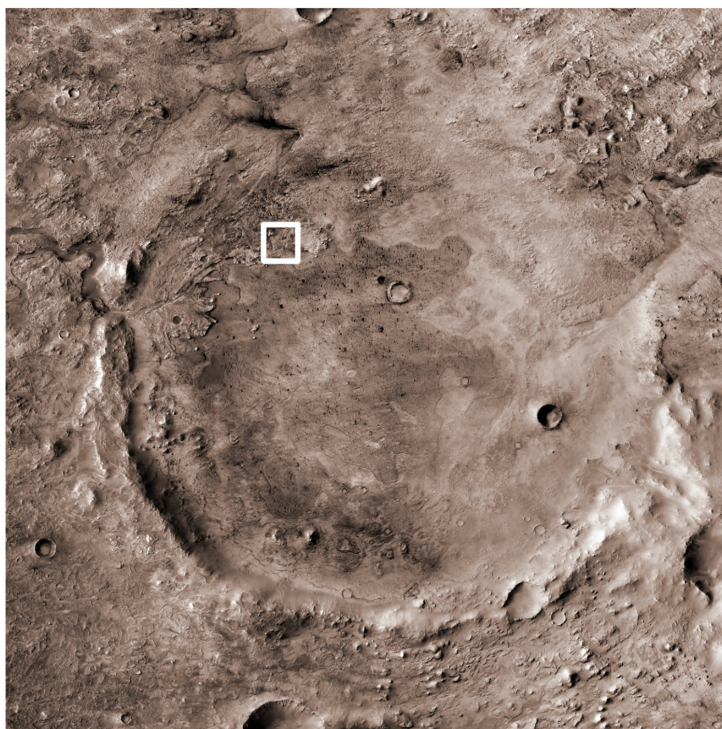
Szereg analiz topografii, dostępności światła, możliwości pozyskania wody oraz danych geologicznych pozwolił na zdefiniowanie tej lokalizacji jako wyjątkowo obiecującej. To przestrzeń, która mimo swojej surowości daje nadzieję na stworzenie stabilnych warunków do życia i funkcjonowania człowieka. W kolejnych podrozdziałach zostaną omówione konkretne cechy krateru Jezero oraz jego otoczenia, które miały kluczowe znaczenie dla sformułowania założeń projektowych.



Ilustracja 5. Lokalizacja równiny Isidis Planitia na globie Marsa. (Opracowanie własne na podstawie: <https://spectrum.ieee.org/2001-a-mars-odyssey> [dostęp: 01.04.2025])



Ilustracja 6. Lokalizacja krateru Jezero na obszarze równiny Isidis Planitia. (Opracowanie własne na podstawie: <https://sci.esa.int/web/mars-express/-/the-topography-of-nili-fossae> [dostęp: 01.04.2025])



Ilustracja 7. Krater Jezero i widoczne stare koryto doliny rzecznej po zachodniej stronie krateru oraz oznaczenie lokalizacji projektowanej bazy. (Opracowanie własne na podstawie <https://pol.obozrevatel.com/section-news/news-nasas-mars-rover-has-found-evidence-of-an-ancient-lake-on-the-planet-heres-why-its-a-sensation-30-01-2024.html> [dostęp: 01.04.2025])

3.1.1 Ślady wody i dawnego życia

Istnieją dowody na to, że miliardy lat temu w kraterze Jezero znajdowało się jezioro zasilane przez system rzeczny, który wnosił do niego wodę i osady. Zachowana do dziś delta (Ilustracja 7.) – przypominająca swoim układem te, które znamy z Ziemi – to bezcenny zapis historii, zapisany warstwa po warstwie w skałach.

Właśnie w tej delcie łazik Perseverance odkrył dowody na istnienie minerałów, które powstają w obecności wody – takich jak gliny. Co więcej, badania wykazały, że skały nie tylko były kiedyś zanurzone w wodzie, ale także wchodziły z nią w długotrwałe reakcje chemiczne. To oznacza, że środowisko było stabilne – a więc potencjalnie przyjazne dla życia mikroorganizmów. Jednym z odkryć, dokonanych przez łazik, była analiza skał w miejscu nazwanym Wildcat Ridge. To właśnie tam znaleziono materiał osadowy o dużym potencjale do przechowywania biosygnatur – czyli chemicznych „odcisków palców” dawnego życia. Chociaż łazik nie znalazł jeszcze bezpośrednich dowodów istnienia organizmów, to właśnie w takich miejscach szanse na to są największe, szczególnie gdy próbki zostaną sprowadzone na Ziemię do dalszych analiz.

Obecność dawnych zbiorników wodnych i osadów to nie tylko wątek naukowy – to również praktyczny atut. Woda to klucz do życia – i jeśli kiedykolwiek była na Marsie, to właśnie tu. Gdy myślimy o pozyskiwaniu wody z lodu lub hydratów w skałach, delta Jezero wydaje się idealnym miejscem do rozpoczęcia takich prób. To dla naukowców ogromna szansa. Jezero to nie tylko nauka – to też logistyka. Jeśli ludzkość poważnie myśli o budowie marsjańskiej

bazy, potrzebuje miejsca, które zapewni zasoby – wodę, minerały, osłonę geologiczną. Krater jest naturalną niecką, chronioną częściowo przez własne ukształtowanie terenu. Bliskość osadów, które mogą zawierać lód wodny, czyni go potencjalnym źródłem życiodajnego surowca niezbędnego zarówno do picia, jak i produkcji tlenu i paliwa. Te wszystkie czynniki sprawiają, że Jezero jest miejscem o dużym potencjale osadniczym.

3.1.2 Zasoby mineralne i potencjał wykorzystania lokalnych surowców (ISRU)

Jednym z głównych wyzwań kolonizacji Marsa jest ograniczony dostęp do zasobów oraz olbrzymi koszt transportu materiałów z Ziemi. Dlatego kluczowym założeniem każdej długoterminowej misji jest wykorzystanie dostępnych na miejscu surowców – koncepcja ta nosi nazwę In-Situ Resource Utilization (ISRU). W tym kontekście Krater Jezero okazuje się lokalizacją wyjątkowo obiecującą.

Badania prowadzone przez łazik Perseverance (rok 2021) wykazały obecność różnorodnych formacji skalnych: od osadowych, po magmowe i metamorfizowane przez działanie wody. Obecność skał ilastych (glin) i siarczanów sugeruje, że w przeszłości dochodziło tu do procesów chemicznych z udziałem wody, co sprzyjało powstawaniu złóż bogatych w pierwiastki, takie jak żelazo, krzem, magnez, a potencjalnie także pierwiastki ziem rzadkich. Szczególnie istotna jest obecność bazaltów na planecie – bogatych w tlenki żelaza i glinu – które mogą posłużyć do produkcji tlenu oraz materiałów budowlanych. Składniki regolitu marsjańskiego mogą zostać użyte do wytwarzania betonów siarkowych, ceramiki, a nawet elementów konstrukcyjnych w technologii druku 3D.

Chociaż marsjańska geologia wymaga jeszcze wielu badań, technologia wydobycia i przetwarzania zasobów in-situ rozwija się dynamicznie. W warunkach marsjańskich, roboty górnicze mogłyby:

- Wydobywać regolit i skały do przetwarzania w prostych reaktorach chemicznych.
- Używać procesów termochemicznych, np. pirolizy lub redukcji tlenków metali do otrzymywania metali i tlenu.
- Wytwarzać wodór z lodu wodnego i używać go do reakcji z regolitem, uzyskując metan jako paliwo.

Technologie takie, jak MOXIE, już dziś testują możliwość pozyskiwania tlenu z atmosfery Marsa, ale równie istotne będzie zbadanie wydajności produkcji zasobów z gruntu. Perseverance nie tylko odkrył odpowiednie minerały, ale także dostarczył informacji o ich strukturze, konsystencji i dostępności – to dane niezbędne do przyszłego planowania eksploatacji.

Lokalizacja bazy w obrębie Jezero mogłaby zapewnić dostęp do zróżnicowanych źródeł surowców w promieniu kilku kilometrów – od osadów deltowych po dawne pokłady lawy. Na skutek tego baza miałaby zaplecze do utrzymania życia, a także potencjał rozwoju technologicznego i samowystarczalności. Co więcej, możliwość pozyskiwania lokalnych materiałów pozwala zredukować zależność od dostaw z Ziemi, zwiększając bezpieczeństwo misji i otwierając drogę do długoterminowej obecności człowieka na Czerwonej Planecie.

3.1.3 Krater jako ochrona przed ekstremalnymi warunkami

Mars to planeta nieprzyjazna życiu, przynajmniej w jego ziemskim rozumieniu. Brak atmosfery chroniącej przed promieniowaniem, ekstremalne dobowe amplitudy temperatur i silne burze pyłowe to tylko niektóre z wyzwań, z jakimi musi zmierzyć się przyszła baza. Wybór odpowiedniego miejsca może jednak znacznie złagodzić skutki tych warunków. W tym kontekście krater Jezero zyskuje na znaczeniu jako naturalna tarcza ochronna.

Mars nie posiada globalnego pola magnetycznego ani gęstej atmosfery, dlatego powierzchnia planety jest narażona na działanie promieniowania kosmicznego i słonecznego (UV, gamma, protony). Krater, jako zagłębienie w terenie, ogranicza bezpośrednią ekspozycję na promieniowanie pochodzące z horyzontu, zwłaszcza w jego centralnych i niżej położonych partiach. Co więcej, lokalizacja konstrukcji przy wewnętrznych zboczach krateru mogłaby zapewnić dodatkowe zacienienie, co jeszcze bardziej zmniejszyłoby dawkę promieniowania docierającego do jej powierzchni.

Marsjańskie burze pyłowe, pomimo tego, że nie są bardzo gwałtowne w sensie siły wiatru (ze względu na niską gęstość atmosfery), mogą utrudniać pracę sprzętu, ograniczać widoczność oraz pokrywać panele słoneczne warstwą pyłu. Obwałowania krateru mogą działać jako naturalna osłona przeciwwiatrowa, ograniczając prędkość i siłę podmuchów przy powierzchni terenu. To z kolei zmniejsza ryzyko uszkodzeń infrastruktury oraz minimalizuje erozję mechaniczną.

Jezero znajduje się na stosunkowo niskiej wysokości względem średniego poziomu „mórz” marsjańskich. To oznacza nieco wyższe ciśnienie atmosferyczne, które – choć nadal znikome w ziemskich warunkach – może ułatwiać funkcjonowanie systemów podtrzymywania życia i chłodzenia. Dodatkowo, zagłębienie krateru może działać jak izolator termiczny, ograniczając wahania temperatur między dniem a nocą, co pozwala lepiej przewidzieć i kontrolować warunki pracy urządzeń oraz komfort termiczny mieszkańców bazy.

Konstrukcje habitatów umieszczone częściowo w ścianach lub dnie krateru mogą korzystać z naturalnego osłonięcia. Łatwiej także wkomponować je w teren, np. poprzez zasypywanie regolitem, co dodatkowo wzmacnia ich izolację termiczną i ochronę radiacyjną. Taka strategia wpisuje się w trend projektowania baz "zakorzenionych" w środowisku lokalnym, a nie sztucznie odizolowanych.

3.1.4 Wnioski

Wybór krateru Jezero jako lokalizacji przyszłej bazy marsjańskiej opiera się na unikalnym połączeniu korzystnych cech geologicznych, środowiskowych i naukowych. Jego przeszłość jako dawnego jeziora z dobrze zachowaną deltą rzeczną zapewnia dostęp do zasobów wodnych i minerałów, które mogą być wykorzystane w systemach ISRU (In-Situ Resource Utilization), kluczowych dla samowystarczalności misji załogowych.

Topografia krateru sprzyja ochronie przed ekstremalnymi warunkami marsjańskimi, takimi jak burze pyłowe czy promieniowanie kosmiczne, co zwiększa bezpieczeństwo przyszłych mieszkańców. Ponadto, lokalizacja w pobliżu równika umożliwia optymalne wykorzystanie energii słonecznej oraz zapewnia stosunkowo łagodne warunki termiczne.

Za sprawą szczegółowych badań prowadzonych przez łazik Perseverance, dysponujemy bogatą bazą danych i materiałów, które ułatwiają projektowanie infrastruktury oraz planowanie dalszych działań eksploracyjnych. Wszystkie te czynniki razem czynią krater Jezero idealnym miejscem do stworzenia trwałej i efektywnej bazy na Marsie.

3.2 Założenia do projektu

Inspiracją do opracowania założeń projektowych stały się wyzwania związane z długoterminowym funkcjonowaniem w warunkach pozaziemskich oraz konieczność stworzenia bazy, która zapewnia przetrwanie, a także sprzyja budowaniu trwałego i zrównoważonego środowiska życia przy spełnieniu potrzeby rozwijającej się społeczności marsjańskiej.



Ilustracja 8. Idea ZERO - od zera do samowystarczalności (opracowanie własne).

Głównymi założeniami do projektu są:

- Stworzenie zaawansowanego etapu kolonizacji
Projekt dotyczy bazy marsjańskiej dla około 50 osób, stanowiącej rozwinięty etap kolonizacji już po przetrwaniu pierwszych misji i funkcjonowaniu w tymczasowych habitatów. Zakłada się dalszy rozwój społeczności i infrastruktury.
- Idea samowystarczalności (Ilustracja 8)
Baza zaprojektowana jest jako autonomiczny system, opierający się na lokalnych zasobach (regolit, woda spod powierzchni, energia słoneczna) i zamkniętych obiegach powietrza, wody oraz odpadów, bez konieczności ciągłych dostaw z Ziemi.
- Możliwość rozbudowy i zmienności funkcji
Modułowy układ bazy pozwala na jej stopniową rozbudowę, rekonfigurację i elastyczne dostosowywanie funkcji do zmieniających się potrzeb mieszkańców – zarówno w czasie, jak i w odpowiedzi na nowe wyzwania.

- Parametryzacja i adaptacja konstrukcji

Główna kopuła bazy powstała na bazie parametrycznego modelowania – umożliwia to dostosowanie jej kształtu do warunków środowiskowych i technologicznych, optymalizując wytrzymałość, doświetlenie i ochronę.

- Struktura inspirowana neuronem

Układ przestrzenny bazy odwołuje się do struktury neuronu – centralny trzon (pełniący funkcje zarządzania i pracy) stanowi „jądro”, z którego wychodzą kładki prowadzące do otaczających go modułów funkcjonalnych – mieszkalnych, technicznych i wspólnotowych.

- Zieleń i aktywność fizyczna

Na najwyższej kondygnacji trzonu znajduje się strefa zieleni – ogród z roślinnością wspomagającą produkcję tlenu i regulację klimatu wewnętrznego. Przestrzeń ta służy także ruchowi i wypoczynkowi, wspierając zdrowie psychiczne załogi.

- Proekologiczne podejście

Projekt zakłada minimalizację zużycia zasobów, recykling w zamkniętym obiegu oraz stosowanie materiałów pozyskiwanych lokalnie (druk 3D z regolitu marsjańskiego), a także kontrolę emisji i zużycia energii w całym cyklu życia bazy.

- Bezpieczeństwo i ochrona

Moduły połączone są śluzami, a cała baza została zaprojektowana tak, by maksymalnie ograniczyć skutki awarii – dzięki wymiennym komponentom, izolacjom akustycznym i przeciwwstrząsowym oraz przemysłanej strukturze strefowej.

- Zdrowie psychiczne jako priorytet

Projekt uwzględnia wpływ długotrwałej izolacji i monotonnego środowiska na człowieka – w odpowiedzi na to zastosowano zróżnicowaną kolorystykę wnętrza, dostęp do zieleni, rekreację oraz technologie (np. hologramy z symulacją widoków z Ziemi), które łagodzą skutki separacji.

- Wyraźny podział funkcjonalny

Trzon bazy pełni funkcję serca – to tu odbywa się praca, zarządzanie i komunikacja. Funkcje życiowe, prywatne i społeczne rozmieszczone są w mniejszych modułach wokół niego. To czytelne rozdzielenie wspiera organizację i ergonomię codziennego życia.

- System komunikacji między modułami

Wszystkie części bazy połączone są systemem kładek biegnących na różnych poziomach, umożliwiających szybkie i bezpieczne przemieszczanie się wewnątrz kopuły oraz izolację funkcji tam, gdzie to konieczne.

4. Projekt zagospodarowania terenu

W kontekście Marsa pojęcie zagospodarowania terenu przybiera zupełnie nowy wymiar. Na Planecie, gdzie ekstremalne warunki atmosferyczne, promieniowanie kosmiczne i brak atmosfery uniemożliwiają swobodne poruszanie się na zewnątrz bez specjalistycznego sprzętu, klasyczne podejście do kształtowania przestrzeni zewnętrznych przestaje mieć zastosowanie. Dlatego projektowanie bazy marsjańskiej skupia się przede wszystkim na tym, co znajduje się wewnątrz – pod ochronną kopułą, która staje się odpowiednikiem „terenu zagospodarowanego”. Właśnie z tego powodu przyjęto decyzję o rozpiętości głównej kopuły sięgającej aż 120 metrów. Tak duża skala nie wynika jedynie z potrzeb funkcjonalnych – ma przede wszystkim umożliwić

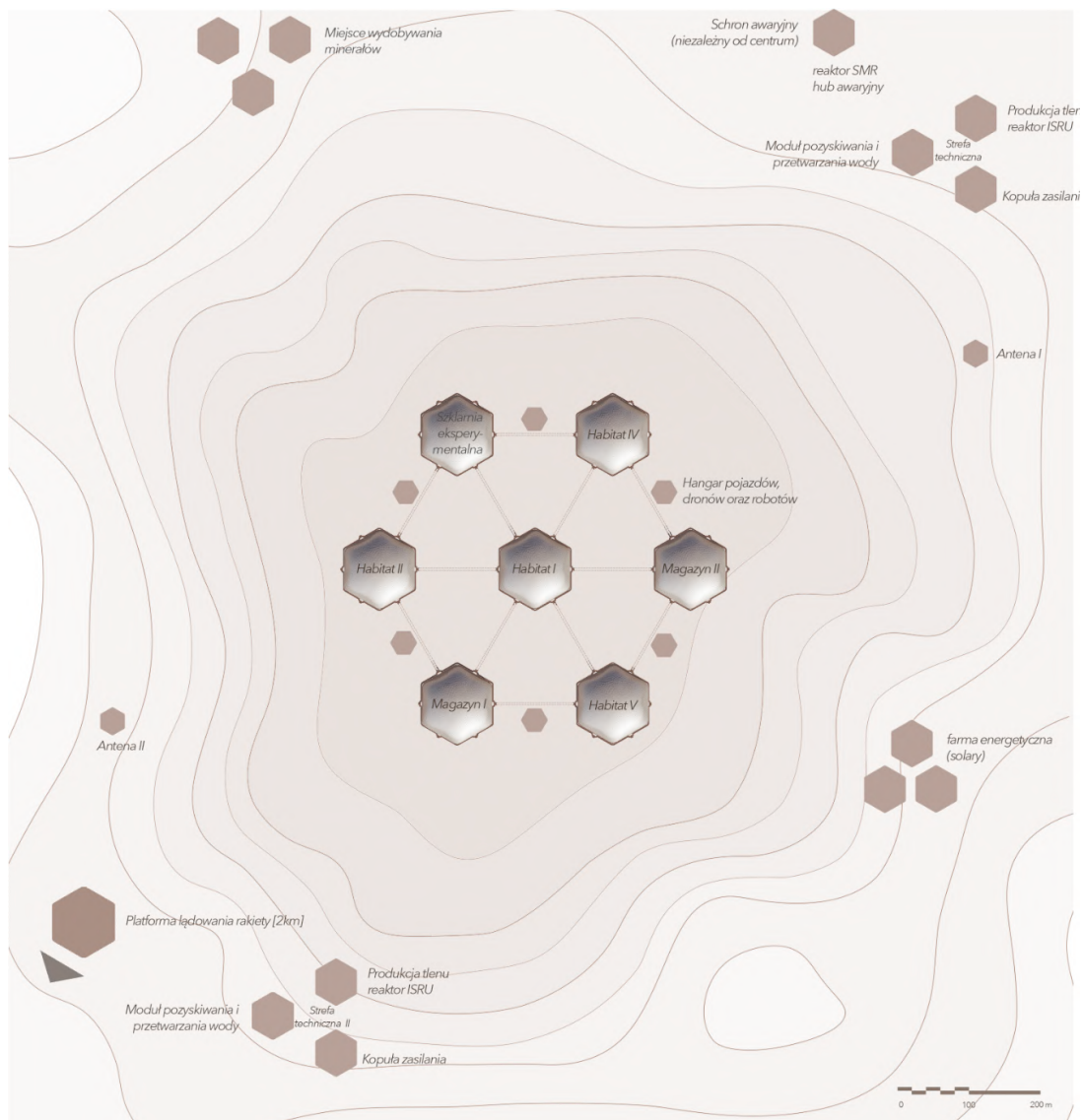
mieszkańcom doświadczenie przestrzeni, dać wrażenie „oddechu i otwartości”, które są tak naturalne na Ziemi, a których brak w zamkniętej bazie mógłby prowadzić do poczucia klaustrofobii i obciążenia psychicznego. Pod kopułą znalazło się miejsce na przestrzenie rekreacyjne i biologicznie aktywne. Na najwyższej kondygnacji modułów pobocznych zaprojektowano ogrody użytkowe i terapeutyczne, stanowiące zielone płuca bazy. Służą one zarówno do produkcji tlenu i do regeneracji psychicznej – pełnią rolę marsjańskiego parku. Wśród bujnej (jak na Marsa) zieleni poprowadzono tor do biegania oraz zorganizowano strefy relaksu, umożliwiające mieszkańcom aktywność fizyczną oraz kontakt z przyjaznym, stymulującym otoczeniem. W tym środowisku wszystko, co zwykle byłoby dostępne „na zewnątrz”, zostało przeniesione „do wnętrza”.

Projekt zakłada również pełną samowystarczalność – dlatego wszystkie kluczowe funkcje bazy znajdują się w jej obrębie, a organizacja przestrzeni wewnętrznej wspiera płynność życia codziennego. W przyszłości, wraz z rozwojem osadnictwa, możliwa będzie dalsza rozbudowa bazy. Przewidziano sześć modułów EVA (Extravehicular Activity), rozmieszczonych na każdym z boków zewnętrznego heksagonu. Pełnią one funkcję słuz wejściowych oraz potencjalnych punktów łączenia bazy z innymi strukturami. Co więcej, projekt dopuszcza tworzenie podziemnych tuneli łączących różne jednostki – dzięki temu kolonia może rozwijać się w sposób modułowy i bezpieczny.

4.1 Koncepcja układu przestrzennego bazy

Układ przestrzenny bazy oparto na modularnych kopułach o planie heksagonalnym, połączonych ze sobą za pomocą tuneli komunikacyjnych. Rozwiązanie to pozwala na tworzenie elastycznych, skalowalnych struktur, które można dostosować do zmieniających się potrzeb użytkowników, etapu rozwoju bazy czy specyfiki terenu. Układ heksagonalny zapewnia maksymalną efektywność przestrzenną przy minimalnej liczbie połączeń między modułami. Każda kopuła może pełnić inną funkcję – mieszkálną, techniczną, badawczą lub magazynową.

Ponieważ budowa bazy marsjańskiej to nadal koncepcyjna wizja przyszłości, oparcie się na modularnym, adaptacyjnym systemie wydaje się najbardziej racjonalnym podejściem, umożliwiającym etapowe wdrażanie i testowanie rozwiązań w ekstremalnych warunkach.



Ilustracja 9. Projekt zagospodarowania terenu bazy w fazie rozbudowanej do 7 głównych modułów połączonych ze sobą korytarzami podziemnymi (opracowanie własne).

Powtarzalność modułów i ich geometryczne dopasowanie, umożliwia:

- tworzenie zwartego, bezpiecznego układu zabudowy,
- łatwe rozbudowywanie bazy o kolejne funkcje,
- zachowanie logicznej i funkcjonalnej komunikacji pomiędzy strefami.

W skład jednostkowego układu przestrzennego bazy (Ilustracja 9.) wchodzi:

- 4 habitaty mieszkalne, stanowiące podstawę życia codziennego mieszkańców,
- szklarnia eksperymentalna, która pełni zarówno funkcję produkcyjną, jak i psychologiczną – kontakt z zielenią wspomaga dobrostan psychiczny. Połączona jest tunelami z habitatami oraz magazynami,
- 2 magazyny, zapewniające przestrzeń do przechowywania zasobów i sprzętu, również spięte siecią tuneli z pozostałymi modułami.

Wszystkie powyższe obiekty oparte są na jednakowym module heksagonalnym o średnicy 120 metrów i rozmieszczone są w odległości 150 metrów od siebie – dla bezpieczeństwa, ułatwienia budowy i konserwacji, ale bez nadmiernego rozpraszania funkcji. To kompromis między ergonomią a bezpieczeństwem.

Dodatkowo, w układzie uwzględniono:

- 6 hangarów pojazdów, dronów i robotów, zlokalizowanych przy tunelach komunikacyjnych – ich umiejscowienie tuż przy wyjściach na powierzchnię umożliwia szybki dostęp do transportu na wypadek ewakuacji lub bezpieczne przejście do innej części bazy.

4.2 Zaplecze techniczne (w skali cywilizacji)

Funkcjonowanie rozwiniętej bazy marsjańskiej wymaga złożonego zaplecza technicznego, które zapewni pełną autonomię i bezpieczeństwo, niezależnie od dostaw z Ziemi. Dlatego rozwiązania techniczne rozmieszczono w sposób strategiczny, zapewniający zarówno dostępność, jak i ochronę na wypadek awarii. System zasilania, pozyskiwania zasobów i komunikacji zlokalizowano w dedykowanej strefie technicznej, oddalonej o ok. 600 metrów od głównego kompleksu mieszkalnego. Dla redundancji i bezpieczeństwa, każdy kluczowy moduł występuje w podwójnej konfiguracji – po dwóch stronach bazy.

Elementy zaplecza technicznego obejmują:

- Moduł pozyskiwania i przetwarzania wody, niezbędny dla życia i procesów technologicznych,
- Reaktor ISRU do produkcji tlenu z lokalnych surowców (np. z atmosferycznego CO₂),
- Kopułę zasilania, odpowiedzialną za dystrybucję energii elektrycznej w bazie,
- Farmę solarną, dostarczającą energię odnawialną i ulokowaną w możliwie najbardziej nasłonecznionej części terenu,
- Dwie anteny komunikacyjne, utrzymujące łączność z Ziemią oraz innymi punktami na Marsie,
- Platformę lądowania rakiet, położoną w odległości 2 km od centrum bazy – minimalizującą ryzyko uszkodzeń w przypadku awarii podczas startu lub lądowania,
- Punkty wydobywania minerałów, zlokalizowane w miejscach bogatych w surowce – stanowiące fundament samowystarczalności kolonii,
- Niezależny schron awaryjny, który pozwala na przetrwanie w razie katastrofy systemowej – odizolowany i autonomiczny, z własnymi zasobami.

Całość zaplecza została zaprojektowana nie tylko jako system podtrzymujący życie, jak również jako infrastruktura umożliwiająca rozwój cywilizacyjny – zdolna obsłużyć kolejne etapy kolonizacji przy wzroście liczby mieszkańców.

4.4 Fazy kolonizacji i terraformacji Marsa / Przewidywana rozbudowa

W ramach niniejszego projektu przyjęto autorską sekwencję etapów kolonizacji Marsa, opartą na dostępnych danych naukowych, realistycznych prognozach technologicznych oraz koncepcji długoterminowego rozwoju cywilizacji pozaziemskiej. Poniższe fazy (Ilustracja 10.) mają charakter projektowych założeń i stanowią podstawę dla dalszych decyzji funkcjonalno-

przestrzennych, w tym dla skali, charakteru i programu projektowanego obiektu. Szczególny nacisk położono na konsekwentny rozwój infrastruktury i populacji, prowadzący w odległej przyszłości do pełnej terraformacji planety. Projektowany obiekt został osadzony w fazie zasiedlenia Marsa (ok. 2060 r.), zakładającej istnienie pierwszej stałej bazy z populacją około 50 osób.



Ilustracja 10. Schemat - fazy kolonizacji i terraformacji (opracowanie własne).

Etap 1 – Odkrywanie (ok. 1960–2030)

Początkowa faza, obejmująca misje bezzałogowe, koncentruje się na gromadzeniu podstawowych danych o Marsie – jego powierzchni, atmosferze i potencjalnych zasobach. Kluczowe znaczenie miały misje orbitalne i lądowniki, w tym: Viking (1976), Pathfinder (1997), Curiosity (2012) i Perseverance (2021). Umożliwiły one mapowanie topografii planety, identyfikację minerałów, badania śladów dawnej obecności wody oraz rozpoznanie warunków atmosferycznych – niezbędnych dla planowania przyszłych misji załogowych.

Etap 2 – Załogowa eksploracja (ok. 2030)

W drugiej fazie zakłada się dotarcie na Marsa pierwszej załogi, liczącej 4–6 osób. Celem tego etapu jest prowadzenie badań terenowych oraz testowanie technologii i systemów przetrwania w warunkach rzeczywistych. Przewiduje się budowę tymczasowych habitatów, funkcjonujących w trybie eksperymentalnym, oraz testy systemów ISRU (In-Situ Resource Utilization) umożliwiających lokalne pozyskiwanie zasobów – m.in. wody i tlenu z regolitu oraz atmosferycznego CO₂.

Etap 3 – Zasiedlenie (ok. 2060)

W tej fazie – stanowiącej podstawę koncepcji projektowanego obiektu – dochodzi do powstania pierwszej stałej bazy marsjańskiej, zamieszkałej przez około 50 osób. Głównym założeniem jest osiągnięcie częściowej samowystarczalności, na skutek zastosowania rozwiniętych technologii ISRU, recyklingowi i lokalnej produkcji. Projekt zakłada obecność infrastruktury energetycznej, szklarni, laboratoriów, przestrzeni mieszkalnych oraz systemów wspierających zdrowie i życie w długim okresie. To moment przejścia od obecności eksperymentalnej do zaplanowanego, funkcjonalnego osadnictwa. Architektura bazy musi odpowiadać na potrzeby fizyczne, psychiczne i społeczne mieszkańców oraz tworzyć warunki dla długotrwałego pobytu.

Etap 4 – Cywilizacja (ok. 2100)

Przy dalszym wzroście populacji (do ok. 350 osób) przewiduje się rozwój bazy w formie replikowalnych, autonomicznych modułów połączonych systemem korytarzy. Struktura przestrzenna zyskuje funkcjonalną złożoność – oprócz laboratoriów i przestrzeni mieszkalnych pojawiają się miejsca dedykowane edukacji, produkcji, rekreacji i kulturze. Marsjańska społeczność zaczyna funkcjonować jako stabilna jednostka cywilizacyjna.

Etap 5 – Multicywilizacja (ok. 2200)

Zakłada się powielanie udanych modeli baz i tworzenie sieci osiedli funkcjonujących równolegle. Zróżnicowanie funkcji i kompetencji pomiędzy ośrodkami prowadzi do powstania złożonego układu społeczno-technicznego o charakterze planetarnym.

Etap 6 – Ocieplenie atmosfery (+1000 lat)

W długofalowej perspektywie zakłada się rozpoczęcie procesu terraformacji. Głównym celem jest uwolnienie znacznych ilości CO₂, zwiększenie ciśnienia atmosferycznego i wzrost temperatury. Dzięki temu możliwe będzie uproszczenie systemów ochrony życia, uruchomienie marsjańskiego cyklu wodnego oraz stosowanie mniej zaawansowanych kombinizonów ochronnych.

Etap 7 – Pełna terraformacja (+100 000 lat)

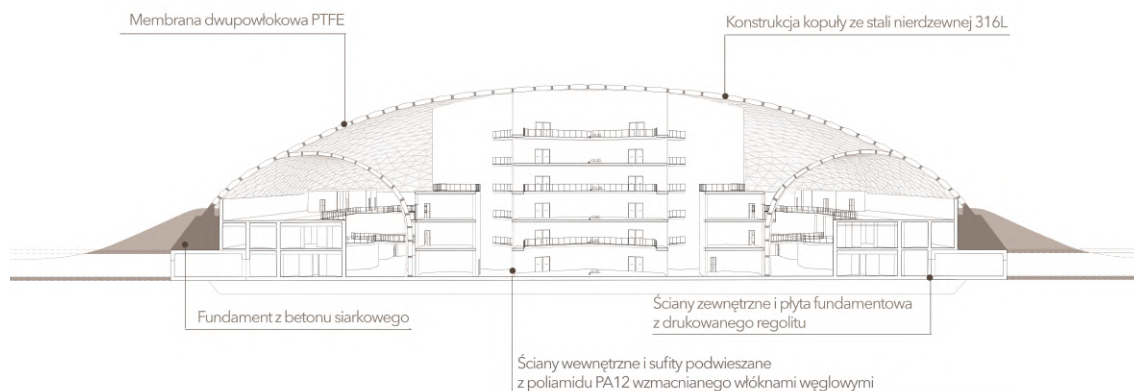
W najbardziej odległej wizji Mars staje się planetą zasiedloną w pełnym tego słowa znaczeniu – z trwałą atmosferą, hydrosferą, roślinnością, zwierzętami i dynamicznym środowiskiem miejskim. Zakłada się powstanie oceanów, lasów i miast o zróżnicowanej skali – Mars staje się drugim domem dla ludzkości.

5. Architektura bazy Marsjańskiej

5.1 Konstrukcja

Konstrukcje przeznaczone do funkcjonowania na Marsie muszą spełniać szereg rygorystycznych wymagań, wynikających z ekstremalnych warunków środowiskowych tej planety. Marsjańska atmosfera składa się głównie z dwutlenku węgla, a jej ciśnienie jest około tysiąc razy niższe niż ziemskie. Oznacza to, że każda struktura musi być całkowicie szczelna i zdolna do utrzymania ciśnienia wewnętrznego porównywalnego z ziemskim. Ponadto, silne wiatry wiejące z dużą prędkością oraz gwałtowne zmiany ciśnienia wymagają od zastosowanych materiałów bardzo dobrej uderzalności, czyli odporności na dynamiczne obciążenia i uderzenia. Konstrukcje muszą także wytrzymywać skrajne temperatury, które mogą spadać nawet do -140°C, oraz długotrwałą ekspozycję na promieniowanie ultrafioletowe i kosmiczne. W celu odpowiedniego doboru materiałów konstrukcyjnych dokonano analizy właściwości fizycznych i mechanicznych na podstawie dostępnych baz danych materiałowych³⁹, co pozwoliło na ich optymalne dopasowanie do warunków środowiskowych Marsa.

³⁹ Zestawienie właściwości technicznych materiałów konstrukcyjnych, <https://www.kipp.pl/pl/przegląd-surowcow> [dostęp: 01.06.2024]



Ilustracja 11. Przekrój bazy z oznaczeniem przyjętych materiałów konstrukcyjnych (opracowanie własne).

Pierwszym i najważniejszym materiałem lokalnym jest regolit marsjański, który został użyty jako zewnętrzna warstwa osłonowa całej konstrukcji. Regolit spełnia kilka kluczowych ról – przede wszystkim chroni wnętrze przed promieniowaniem kosmicznym, w tym promieniowaniem jonizującym i ultrafioletowym, które na powierzchni Marsa stanowi jedno z największych zagrożeń dla organizmów żywych. Gruba warstwa regolitu (minimum 2–3 metry) skutecznie absorbuje i rozprasza promieniowanie, stanowiąc naturalną tarczę ochronną. Dodatkowo, właściwości izolacyjne stabilizują temperaturę wewnątrz struktur, zabezpieczając je przed ekstremalnymi wahaniami – od nawet -125°C nocą do 20°C w ciągu dnia. Jego lekkość, dostępność oraz podatność na przetwarzanie metodami przyrostowymi, takimi jak druk 3D, czynią go idealnym materiałem konstrukcyjnym w warunkach marsjańskich. W projekcie regolit został wykorzystany do otaczania heksagonalnych modułów wykonanych z polimeru, wzmacniając ich strukturę oraz zwiększając ogólną trwałość i bezpieczeństwo założenia.

Rdzeń każdego z modułów mieszkalnych stanowi zaawansowany **kompozyt polimerowy**, wybrany ze względu na wysokie wymagania mechaniczne oraz odporność środowiskową. Zastosowano tu poliamid PA12 wzmacniany włóknami węglowymi⁴⁰, dodatkowo modyfikowany 2-hydroksybenzofenonem, który pełni rolę stabilizatora UV. Alternatywnie możliwe jest użycie PEEK (polieteroeteroketonu)⁴¹ o podobnych właściwościach. Dzięki wzmocnieniu włóknami kompozyt ten wykazuje bardzo wysoką wytrzymałość na rozciąganie⁴², co jest szczególnie istotne w warunkach marsjańskiej próżni, gdzie konstrukcje muszą zachować pełną szczelność przy niskim ciśnieniu atmosferycznym (ok. 600 Pa). Materiał ten cechuje się również dużą udarnością, co pozwala konstrukcjom skutecznie przetrwać dynamiczne obciążenia wywołane marsjańskimi burzami pyłowymi oraz możliwymi uderzeniami

⁴⁰ karta techniczna CARBON FIBER NYLON PA12, <https://print-me.pl/en/filamenty/carbon-fiber-nylon-pa12/> [dostęp: 01.06.2024]

⁴¹ karta techniczna TECAPEEK CF30, <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/peek-tecapeek-cf30-black> [dostęp: 01.06.2024]

⁴² Król-Morkisz K. *Tworzywa acetylowe modyfikowane hybrydowymi układami nieorganiczno-organicznymi w oparciu o hydroksypatyt*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Katedra Biomateriałów i Kompozytów, Rozprawa Doktorska, 2019

mikrometeoroidów. Polimer zachowuje stabilność strukturalną w skrajnych temperaturach i nie degraduje się pod wpływem długotrwałego promieniowania UV, co czyni go idealnym materiałem na podstawową strukturę habitatu. Choć jego właściwości są wystarczające do zapewnienia podstawowej ochrony i funkcjonalności, dodatkowe otoczenie go warstwą regolitu znacząco zwiększa bezpieczeństwo całej jednostki.

Całe założenie – składające się z sieci połączonych modułów – przykryte jest wspólną, sferyczną kopułą, której struktura nośna wykonana została ze **stali nierdzewnej 316L**⁴³ o podwyższonej odporności korozyjnej i mechanicznej. Stal zapewnia sztywność i trwałość całego układu, a jej zastosowanie w układzie prętowym na planie sześcioboku pozwala równomiernie rozłożyć obciążenia i zminimalizować ilość użytego materiału. Kopuła pełni funkcję drugiej powłoki ochronnej, obejmując założenie jako całość i tworząc warstwę osłonową także dla przestrzeni wspólnych oraz roślinnych. Aby odpowiednio zakotwiczyć kopułę w gruncie i zabezpieczyć ją przed naporem wiatru lub ruchami podłoża, zastosowano fundamenty z **betonu siarkowego** – materiału możliwego do wytworzenia z marsjańskich zasobów, który jest odporny na niskie temperatury i nie wymaga wody do produkcji (kluczowe ograniczenie w warunkach marsjańskich).

Na konstrukcji stalowej rozpięta została **dwupowłokowa membrana PTFE** (politetrafluoroetylenowej)⁴⁴, która stanowi lekką, ale bardzo wytrzymałą warstwę zewnętrzną kopuły. Membrana ta została wybrana ze względu na swoje znakomite właściwości fizyczne i optyczne – jest odporna na promieniowanie UV, wykazuje wysoką przezroczystość (przepuszcza do 95% światła widzialnego), co pozwala na dostęp naturalnego oświetlenia do wnętrza bazy. Dzięki temu możliwe jest prowadzenie upraw roślinnych w obrębie kopuły oraz ograniczenie zapotrzebowania na sztuczne oświetlenie. Warstwa PTFE jest również odporna na bardzo niskie temperatury, zachowując elastyczność i szczelność nawet przy -200°C . W celu zwiększenia jej trwałości i bezpieczeństwa zastosowano układ dwupowłokowy z przestrzenią powietrzną pomiędzy warstwami, co dodatkowo poprawia właściwości izolacyjne i pozwala lepiej kontrolować mikroklimat wewnętrzny. W przypadku awarii jeden trójkątny moduł, na którym osadzona jest membrana, może być w łatwy sposób wymieniony, co znacząco upraszcza konserwację i zwiększa niezawodność całej struktury.

Uzupełnieniem całości są tunele łączące poszczególne moduły oraz bazy pomocnicze. Tunele wykonano z tego samego kompozytu polimerowego co moduły główne, co zapewnia ich pełną szczelność, odporność mechaniczną oraz termiczną. Dodatkowo są one również obudowane warstwą regolitu, co nadaje im właściwości ochronne analogiczne do reszty zabudowy. Ich układ umożliwia bezpieczne poruszanie się między częściami kompleksu bez konieczności wychodzenia na zewnątrz, nawet w przypadku wystąpienia burzy pyłowej lub awarii lokalnych systemów podtrzymywania życia.

⁴³ karta techniczna Stainless Steel 316 <https://atlassteels.com.au/wp-content/uploads/2021/06/Stainless-Steel-316-316L-316H-Grade-Data-Sheet-27-04-21.pdf> [dostęp: 01.06.2024]

⁴⁴ karta techniczna PTFE <https://sol-plast.pl/assets/img/download/PTFE/PTFE-karta.pdf> [dostęp: 01.06.2024]

5.2 Izolacja termiczna

Z uwagi na ekstremalne warunki panujące na Marsie, skuteczna izolacja termiczna jest istotnym aspektem projektowanej bazy. Zakres temperatur od -125°C nocą do około 20°C , a także brak atmosferycznej ochrony przed promieniowaniem cieplnym, wymuszają zastosowanie zarówno aktywnych, jak i pasywnych metod ograniczania strat energii cieplnej.

Pierwszym poziomem ochrony termicznej jest regolit, który pełni funkcję warstwy osłonowej wokół heksagonalnych modułów mieszkalnych. Jego masa i gęstość pozwalają na znaczące tłumienie strat ciepła przez przewodnictwo. Aby jednak zapewnić wyższą efektywność i równomierność izolacji, wewnętrzna strona tej struktury została dodatkowo pokryta zamkniętokomórkową pianką polimerową, o niskim współczynniku przewodzenia ciepła. Pianka ta tworzy spójną warstwę termoizolacyjną bez mostków cieplnych, a jednocześnie nie wpływa negatywnie na strukturę i nośność modułów.

Taka sama pianka została również zastosowana pod płytą fundamentową wykonaną ze sprasowanego i stabilizowanego regolitu, który sam w sobie zapewnia dobrą akumulację ciepłą, jednak wymaga dodatkowego zabezpieczenia przed przenikaniem zimna od podłoża marsjańskiego. Dzięki zastosowaniu pianki pomiędzy warstwą regolitu a wnętrzem modułu, możliwe jest stworzenie buforu cieplnego chroniącego przed wychłodzeniem dolnej partii przestrzeni użytkowej.

Kolejny poziom ochrony termicznej stanowi dwupowłokowa membrana kopuły, wykonana z wysokowytrzymałego materiału ETFE (etyleno-tetrafluoroetylen), charakteryzującego się odpornością na promieniowanie UV, ekstremalne temperatury oraz wysoką przepuszczalnością światła. Przezroczystość tej membrany umożliwia dostęp światła dziennego do wnętrza bazy, co wspiera komfort życia oraz potencjalną uprawę roślin. Pomiedzy dwiema warstwami membrany znajduje się warstwa gazowa, która pełni funkcję dodatkowej bariery izolacyjnej – analogicznie do szyby zespolonej. Uwięziony gaz (np. argon lub inny gaz szlachetny o niskiej przewodności cieplnej) redukuje wymianę ciepła przez konwekcję i przewodzenie, poprawiając ogólną izolacyjność kopuły.

Całość systemu izolacyjnego została zaprojektowana z uwzględnieniem redundancji oraz zróżnicowanych materiałów w celu ochrony zarówno przed utratą ciepła, jak i jego nierównomiernym rozkładem. Takie podejście zapewnia utrzymanie stabilnych warunków wewnętrznych, minimalizując jednocześnie zużycie energii potrzebnej na aktywne ogrzewanie przestrzeni mieszkalnych.

5.3 Etapy budowy

Budowa stałych struktur mieszkalnych na Marsie to proces złożony, wieloetapowy i ściśle powiązany z warunkami środowiskowymi planety. W przypadku wybranej lokalizacji – krateru Jezero – decyzję o rozpoczęciu prac konstrukcyjnych poprzedziła dogłębna analiza geologiczna oraz ocena czynników środowiskowych.

Pierwszy etap budowy obejmuje przygotowanie podłoża – kluczowe zarówno z inżynierskiego, jak i środowiskowego punktu widzenia. Autonomiczne koparki, wyposażone w systemy LIDAR, prowadzą precyzyjne roboty ziemne mające na celu pogłębienie i wyrównanie wnętrza krateru. Uzyskana w ten sposób platforma stabilizuje konstrukcję

ciśnieniową oraz pełni funkcję warstwy buforowej, zwiększającej odporność obiektu na wahania temperatury oraz umożliwiającej zachowanie spójnego mikroklimatu wewnętrznego.

Kolejnym krokiem jest formowanie głównych elementów konstrukcyjnych z użyciem druku 3D. Wykorzystywany materiał to regolit marsjański – drobnoziarnisty, ilasty osad bogaty w tlenki żelaza i krzemu. Jego właściwości takie jak ogniotrwałość, naturalna izolacyjność i możliwość utwardzania za pomocą wiązań siarczanowych lub promieniowania mikrofalowego, sprawiają, że doskonale nadaje się do tworzenia fundamentów oraz zewnętrznych ścian obiektu. Drukowanie struktur metodą addytywną pozwala na efektywne wykorzystanie lokalnych surowców oraz na redukcję masy elementów transportowanych z Ziemi. Przegrody wewnętrzne, mniej narażone na obciążenia, powstają z lekkich i elastycznych materiałów polimerowych, dostarczanych w postaci granulatu i przetwarzanych bezpośrednio na miejscu.

Po zakończeniu budowy podstawowej bryły struktury, przystępuje się do montażu osłony zewnętrznej – półeliptycznej kopuły, której elementy wykonane są ze stali. Jest ona formowana przy udziale zrobotyzowanego ramienia, które precyzyjnie układa elementy zgodnie z wcześniej zaprogramowanym modelem geometrycznym. Kopuła pełni istotne funkcje – nadaje konstrukcji wytrzymałość mechaniczną, chroni ją przed mikrometeoritami oraz kompensuje naprężenia strukturalne, które mogą występować w wyniku zmiennych warunków temperaturowych i ciśnieniowych. Stal wykorzystywana do budowy powstaje na miejscu, poprzez redukcję hematytów z użyciem wodoru w procesach wysokotemperaturowych – co stanowi przykład efektywnego zastosowania koncepcji ISRU (In-Situ Resource Utilization).

Końcowym etapem jest pokrycie całej konstrukcji elastyczną membraną kompozytową, składającą się z dwóch współpracujących warstw. Jej głównym zadaniem jest zwiększenie szczelności konstrukcji i zabezpieczenie jej w przypadku ewentualnych uszkodzeń powłok ciśnieniowych. Dodatkowo, membrana pełni funkcje izolacyjne i optyczne – zatrzymuje nadmiar ciepła, przepuszcza określoną ilość promieniowania słonecznego i umożliwia dostęp do naturalnego światła dziennego, co jest niezbędne dla *procesów fotosyntezy i utrzymania rytmu dobowego mieszkańców habitatów*.

Cały proces budowy stanowi przykład synergii zaawansowanych technologii robotycznych, inżynierii materiałowej i adaptacji do ekstremalnych warunków środowiskowych. Co równie istotne, opiera się na zasadach zrównoważonego rozwoju – maksymalizując wykorzystanie lokalnych zasobów i minimalizując potrzebę dostarczania materiałów z Ziemi.

5.4 Technologie

Wyzwania związane z założeniem stałej bazy na Marsie wymagają zastosowania przełomowych rozwiązań technologicznych, które umożliwią nie tylko przetrwanie człowieka w ekstremalnych warunkach, ale także efektywną eksplorację oraz długofalowy rozwój działalności pozaziemskiej. Kluczowe obszary rozwoju zidentyfikowane w ramach warsztatów NASA „Vision 2050” (V2050), zorganizowanych przez Wydział Nauk Planetarnych NASA (PSD) w 2017 roku⁴⁵, zidentyfikowano kluczowe potrzeby technologiczne. Obejmują one

⁴⁵ Lakew B., Amato D., Freeman A. i inni, *Technology for NASA's Planetary Science Vision 2050*. Notes from the Workshop, Columbia, luty 2017

udoskonalenia w detekcji biosygnatur, zdalnym badaniu, systemach autonomicznych oraz adaptacji do ekstremalnych środowisk.

Technologie przeznaczone dla marsjańskiej bazy muszą być nie tylko wysoce niezawodne, ale też zoptymalizowane pod kątem samowystarczalności i wykorzystania lokalnych surowców (ISRU – In-Situ Resource Utilization). **Integracja platform zrobotyzowanych i załogowych, modularność infrastruktury oraz hybrydowe źródła zasilania** (fotowoltaika, reaktory jądrowe, systemy RTG) to fundamenty długoterminowego sukcesu takich przedsięwzięć. Rozwój technologii uwzględnia m.in. systemy analizy próbek i wykrywania życia w skali nano, wirtualną rzeczywistość wspomagającą zdalne badania, zaawansowaną architekturę statków kosmicznych (m.in. flotyle autonomicznych pojazdów badawczych), a także adaptacyjne systemy energetyczne i środowiskowe, odporne na promieniowanie i skrajne temperatury.

Przyszłość eksploracji Marsa zależy od zdolności do harmonijnego połączenia nauki, inżynierii oraz współpracy międzynarodowej – z uwzględnieniem różnorodności zespołów badawczych i zaangażowania społeczeństwa w procesy innowacyjne. Technologie testowane na Księżycu stanowią swoistą platformę demonstracyjną dla marsjańskich systemów – szczególnie w zakresie budowy habitatów, systemów ISRU oraz podtrzymywania życia.

5.4.1 Systemy podtrzymywania życia

Systemy podtrzymywania życia (ang. Life Support Systems) to krytyczny komponent każdej marsjańskiej bazy, stanowiący podstawę dla utrzymania funkcjonowania biologicznego człowieka w warunkach odmiennych od ziemskich. Ich celem jest zapewnienie stabilnych parametrów środowiskowych wewnątrz habitatów, w tym odpowiedniej atmosfery, temperatury, dostępności wody i energii, a także minimalizacji ryzyka awarii. Systemy te tworzą hermetycznie sprzężony ekosystem technologiczny, który – podobnie jak naturalne biosfery – opiera się na recyklingu, redundancji oraz autonomicznej kontroli parametrów środowiskowych.

Moduł zarządzania wodą

W zakresie zarządzania zasobami wodnymi zastosowano obieg zamknięty z zaawansowanymi technologiami odzysku i oczyszczania. Woda pozyskiwana jest poprzez recykling cieczy pochodzących z potu, moczu, kondensacji pary wodnej oraz innych procesów życiowych i technologicznych. System odzysku obejmuje zarówno mechaniczne, jak i biologiczne metody filtracji, a także dezynfekcję chemiczną i promieniowaniem UV-C. Oczyszczona woda trafia następnie do odpowiednich zbiorników magazynowych, gdzie przechowywana jest w podziale na wodę pitną i techniczną. Sieć dystrybucyjna zapewnia jej transport do punktów użytkowych w obrębie modułów mieszkalnych, laboratoryjnych i uprawnych. Integralną częścią systemu jest kontrola jakości, polegająca na ciągłym monitorowaniu parametrów fizykochemicznych i mikrobiologicznych. Woda odgrywa również istotną rolę w uprawie roślin – w systemach hydroponicznych umożliwia wzrost roślin jadalnych, a jednocześnie wspiera regenerację atmosfery przez udział w cyklu fotosyntezy.

Stacja kontroli powietrza

Zarządzanie atmosferą wewnętrzną oparte jest na szeregu wzajemnie powiązanych podsystemów, których zadaniem jest utrzymanie składu powietrza na poziomie fizjologicznie bezpiecznym i komfortowym. W skład systemu wchodzi czujniki monitorujące zawartość tlenu, dwutlenku węgla, wilgotność względną, ciśnienie atmosferyczne oraz temperaturę. Tlen wytwarzany jest głównie za pomocą elektrolizerów rozkładających wodę na wodór i tlen. Równocześnie, dwutlenek węgla absorbowany jest przy użyciu filtrów chemicznych, takich jak tlenek litu, lub w ramach reakcji Sabatiera, która umożliwia odzysk tlenu z CO₂ wydychanego przez załogę. Wentylacja i cyrkulacja powietrza zapewniają równomierne rozprowadzenie gazów, eliminując strefy zastoju, a także wspomagają termoregulację przestrzeni mieszkalnej. Wysokowydajne systemy filtracji, oparte na filtrach HEPA i technologii UV-C, odpowiadają za eliminację cząstek stałych, mikroorganizmów oraz alergenów. Regulacja wilgotności odbywa się za pomocą osuszaczy i nawilżaczy powietrza, dzięki czemu możliwe jest utrzymanie optymalnego mikroklimatu wewnątrz bazy. Uzupełnieniem systemu atmosferycznego jest bioreaktor z algami, takimi jak spirulina, które dzięki procesowi fotosyntezy pochłaniają CO₂ i produkują tlen, stanowiąc przy tym dodatkowe źródło pożywienia bogatego w białko.

Węzeł energetyczny

Zasilanie bazy w energię realizowane jest w oparciu o rozbudowany, wieloźródłowy system energetyczny. Głównym źródłem energii dziennej jest farma fotowoltaiczna, składająca się z rozkładanych paneli słonecznych wyposażonych w mechanizmy śledzące ruch Słońca. Ich rozmieszczenie i mobilność pozwalają na maksymalne wykorzystanie dostępnego promieniowania, nawet w warunkach niskiego kąta padania. Na potrzeby zasilania nocnego i w sytuacjach ograniczonej dostępności światła słonecznego zastosowano niskomocowe reaktory jądrowe, takie jak Kilopower, charakteryzujące się stabilnością i niezależnością od warunków atmosferycznych. Uzupełnieniem są radioizotopowe generatory termoelektryczne (RTG), które mimo niskiej mocy, oferują niezawodność i długoterminową trwałość⁴⁶, czyniąc je idealnym źródłem awaryjnym.

Zapasowe źródła zasilania obejmują również system elektrolizerów i ogniw paliwowych, umożliwiających przekształcanie nadmiarowej energii słonecznej w wodór, który magazynowany jest w postaci gazowej i przekształcany ponownie w energię elektryczną w razie potrzeby. Zewnętrzne magazyny energii, oparte na akumulatorach solid-state, LFP oraz superkondensatorach, pozwalają na buforowanie i rozdział energii w czasie rzeczywistym. Przetwarzanie napięcia AC/DC odbywa się przez system inwerterów i konwerterów, dostosowujących parametry zasilania do potrzeb poszczególnych urządzeń i modułów. Nad całością czuwa inteligentny system zarządzania energią, który monitoruje zużycie, optymalizuje dystrybucję i zapewnia autonomiczne reagowanie w sytuacjach kryzysowych. Utrzymanie odpowiedniego komfortu cieplnego jest realizowane przez zintegrowany system kontroli temperatury. W ciągu dnia, nadmiar ciepła z systemów energetycznych i zewnętrznego promieniowania słonecznego jest aktywnie rozpraszany za pomocą systemu chłodzenia,

⁴⁶ Kilopower <https://www.nasa.gov/directorates/stmd/tech-demo-missions-program/kilopower-hmqzw/> [dostęp: 01.04.2025]

natomiast nocą, kiedy temperatury spadają drastycznie, uruchamiane są systemy ogrzewania oparte na grzałkach rezystancyjnych oraz ciepłe odpadowym z modułów RTG. Całość wspierana jest przez rozbudowane systemy zarządzania termicznego, które chronią zarówno ludzi, jak i infrastrukturę technologiczną przed przegrzaniem lub zamarzaniem.

Perspektywy rozwoju i wyzwania

Energia jądrowa zapewnia stabilność i wydajność. Może okazać się jednak trudna do skalowania w dłuższej perspektywie – ograniczony dostęp do materiałów rozszczepialnych i potrzeba zaawansowanej infrastruktury przemysłowej stanowią istotne ograniczenie.

Energia słoneczna, mimo że dostępna lokalnie, również ma swoje wady: promieniowanie na Marsie stanowi zaledwie ok. 43% ziemskiego, a burze pyłowe mogą blokować światło słoneczne przez tygodnie (patrz pkt. 2.1.6). Wymusza to stosowanie efektywnych systemów magazynowania oraz dywersyfikację źródeł energii. W dłuższej perspektywie możliwe będzie nawet wytwarzanie paneli słonecznych z krzemu pozyskiwanego z marsjańskiego regolitu – jednak technologia ta wymaga ekstremalnie czystych materiałów i precyzyjnego przetwarzania.

W długoterminowym ujęciu rozważa się także energię geotermalną – szczególnie w rejonach wykazujących aktywność cieplną, jak Cerberus Fossae. Choć Mars nie posiada aktywnej tektoniki, lokalne źródła ciepła mogłyby zostać wykorzystane do generowania pary napędzającej turbiny, szczególnie przy zastosowaniu cieczy roboczych takich jak ciekły CO₂.

Energia wiatrowa, choć ograniczona przez niską gęstość atmosfery, może stanowić uzupełniające źródło zasilania – zwłaszcza podczas burz pyłowych i nocą. Wymagałaby jednak konstrukcji o bardzo dużych łopatach, by zapewnić minimalną efektywność przy niskiej sile aerodynamicznej⁴⁷.

Inne podsystemy

Komplementarną część systemu podtrzymywania życia stanowi infrastruktura wspomagająca. Należą do niej systemy zarządzania odpadami, umożliwiające przetwarzanie i częściowy recykling odpadów stałych, płynnych i gazowych, a także system medyczny, obejmujący diagnostykę, monitoring zdrowia załogi oraz podstawowe możliwości leczenia urazów i chorób. Kluczową rolę odgrywa również system ochrony przed promieniowaniem, wykorzystujący osłony pasywne z materiałów pochłaniających promieniowanie kosmiczne, alarmy promieniowania słonecznego, a w przyszłości także technologie aktywnych pól elektromagnetycznych. Uzupełnieniem tej infrastruktury jest system wsparcia psychologicznego, który poprzez światłoterapię, komunikację z Ziemią, symulacje naturalnych środowisk oraz dostęp do multimediów dba o stan emocjonalny członków załogi. W sytuacjach ekstremalnych możliwa jest szybka ewakuacja dzięki systemowi ratunkowemu, wyposażonemu w pojazdy ewakuacyjne oraz indywidualne zestawy awaryjne dla członków załogi.

5.4.2 Robotyzacja

Robotyzacja stanowi jeden z filarów funkcjonowania bazy marsjańskiej, zaprojektowanej z myślą o długoterminowym pobycie pięćdziesięcioosobowej załogi. W warunkach ekstremalnego

⁴⁷ *Generating Energy on Mars: ISRU Part 3*, <https://www.marssociety.ca/2020/09/16/isru-part3/>, [dostęp: 10.2024]

i nieprzewidywalnego środowiska Marsa, systemy robotyczne przejmują szereg zadań, które byłyby zbyt ryzykowne, czasochłonne lub wymagające nieustannej powtarzalności w wykonaniu przez człowieka. Celem wdrożenia zaawansowanej automatyzacji jest nie tylko odciążenie członków załogi, ale również podniesienie poziomu bezpieczeństwa, efektywności operacyjnej oraz zapewnienie ciągłości pracy w sytuacjach awaryjnych lub w sektorach tymczasowo niedostępnych dla ludzi.

W bazie zastosowano zróżnicowane typy robotów, wyspecjalizowane w konkretnych zadaniach i zintegrowane z architekturą oraz infrastrukturą technologiczną obiektu. Humanoidalne jednostki takie jak Valkyrie oraz MIRA zostały przystosowane do pracy w środowiskach zaprojektowanych z myślą o użytkownikach ludzkich. Robot Valkyrie pełni rolę asystenta konserwacyjnego i serwisowego, potrafiąc wykonywać precyzyjne naprawy oraz interakcje z klasycznymi interfejsami użytkownika. MIRA, jako chirurgiczny robot nowej generacji, wspomaga działania medyczne, wykonując minimalnie inwazyjne procedury operacyjne z wysoką precyzją. Jej mobilność i kompaktowe rozmiary umożliwiają przemieszczanie się między pomieszczeniami bez potrzeby relokacji sprzętu, co znacząco zwiększa dostępność opieki medycznej w warunkach izolacji.

Do zadań eksploracyjnych i badawczych wykorzystywane są specjalistyczne jednostki terenowe. Wśród nich znajdują się m.in. GLIMPSE, czteronożny robot inspirowany anatomią psa, który dzięki zwiększonej mobilności względem klasycznych platform kołowych sprawdza się w trudnym i nieregularnym terenie, oraz EELS – bioniczny robot przypominający węża, zdolny do eksploracji lodowych jaskiń, wąskich szczelin czy podziemnych formacji, co pozwala na poszukiwanie oznak życia i analizę geologicznej historii planety. Łaziki serii CADRE, działające w zintegrowanym zespole trzech miniaturowych jednostek, odpowiedzialne są za zbieranie danych powierzchniowych, tworzenie precyzyjnych map oraz pobieranie próbek gleby i skał z różnych lokalizacji wokół bazy.

Wewnętrzna logistykę oraz bieżącą kontrolę infrastruktury wspomagają roboty mobilne, takie jak ClearScape-1, które wykonują autonomiczne patrole, transport materiałów oraz diagnostykę techniczną instalacji. W trudnodostępnych przestrzeniach konstrukcyjnych zastosowano również roboty montażowe pokroju OSAM-1, umożliwiające precyzyjne łączenie i naprawę elementów strukturalnych bazy bez udziału człowieka. Tego typu systemy są szczególnie przydatne w trakcie rozbudowy modułów lub usuwania uszkodzeń spowodowanych wpływem warunków atmosferycznych i pyłu marsjańskiego.

Architektura bazy została zaprojektowana z myślą o obecności i autonomicznym funkcjonowaniu robotów. Zintegrowane kanały techniczne w posadzkach i ścianach umożliwiają dyskretną i efektywną mobilność jednostek bez ingerencji w codzienny rytm życia załogi. Moduły mieszkalne oraz techniczne cechują się ergonomiczną, minimalistyczną zabudową, umożliwiającą łatwe czyszczenie oraz serwisowanie przez systemy automatyczne. W wybranych strefach rozmieszczono dedykowane punkty ładowania, tankowania oraz dezynfekcji robotów, co umożliwia ich ciągłą gotowość operacyjną.

Całość zarządzana jest przez zaawansowany system koordynacyjny oparty na sztucznej inteligencji, który integruje dane z sieci czujników i umożliwia dynamiczne dostosowywanie działań robotów do zmieniających się warunków środowiskowych i potrzeb funkcjonalnych bazy. System pozwala również na zdalne sterowanie wybranymi jednostkami

zarówno z orbity marsjańskiej, jak i bezpośrednio z Ziemi, co zapewnia elastyczność operacyjną oraz możliwość interwencji zewnętrznej w sytuacjach krytycznych. Zastosowanie robotyzacji znacząco zwiększa wydajność wykorzystania czasu pracy załogi, pozwalając astronautom skoncentrować się na działaniach badawczych, decyzyjnych oraz kreatywnych. Co więcej, niektóre systemy robotyczne mogą wspierać aspekty psychologiczne misji, pełniąc funkcję towarzyszącą lub terapeutyczną, co nabiera szczególnego znaczenia w kontekście długotrwałej izolacji. Dzięki zastosowaniu tych technologii możliwe jest również ograniczenie kosztów operacyjnych misji poprzez zwiększenie autonomii, redukcję ryzyka oraz optymalizację zużycia zasobów.

5.4.3 Zarządzanie zasobami

W projektowanej koncepcji habitatu przyjęto założenie maksymalnego wykorzystania dostępnych zasobów naturalnych Marsa. Strategia opiera się na zasadach ISRU (In-Situ Resource Utilization), umożliwiających pozyskiwanie materiałów budowlanych, energii oraz składników niezbędnych do podtrzymania życia bez konieczności ich dostarczania z Ziemi. Poniższy schemat (Ilustracja 12.) przedstawia potencjał eksploatacyjny wybranych składników środowiska marsjańskiego oraz ich możliwe zastosowania w ramach samowystarczalnej bazy.

Regolit, obecny na całej powierzchni planety, zawiera ilaste minerały, siarkę oraz dwutlenek krzemu i skalenie. Może być poddawany procesom spiekania w celu uzyskania cegieł lub wykorzystywany jako surowiec do druku 3D w technologii betonowej. Topnienie składników krzemionkowych umożliwia również produkcję szkła wykorzystywanego np. do osłon i paneli.

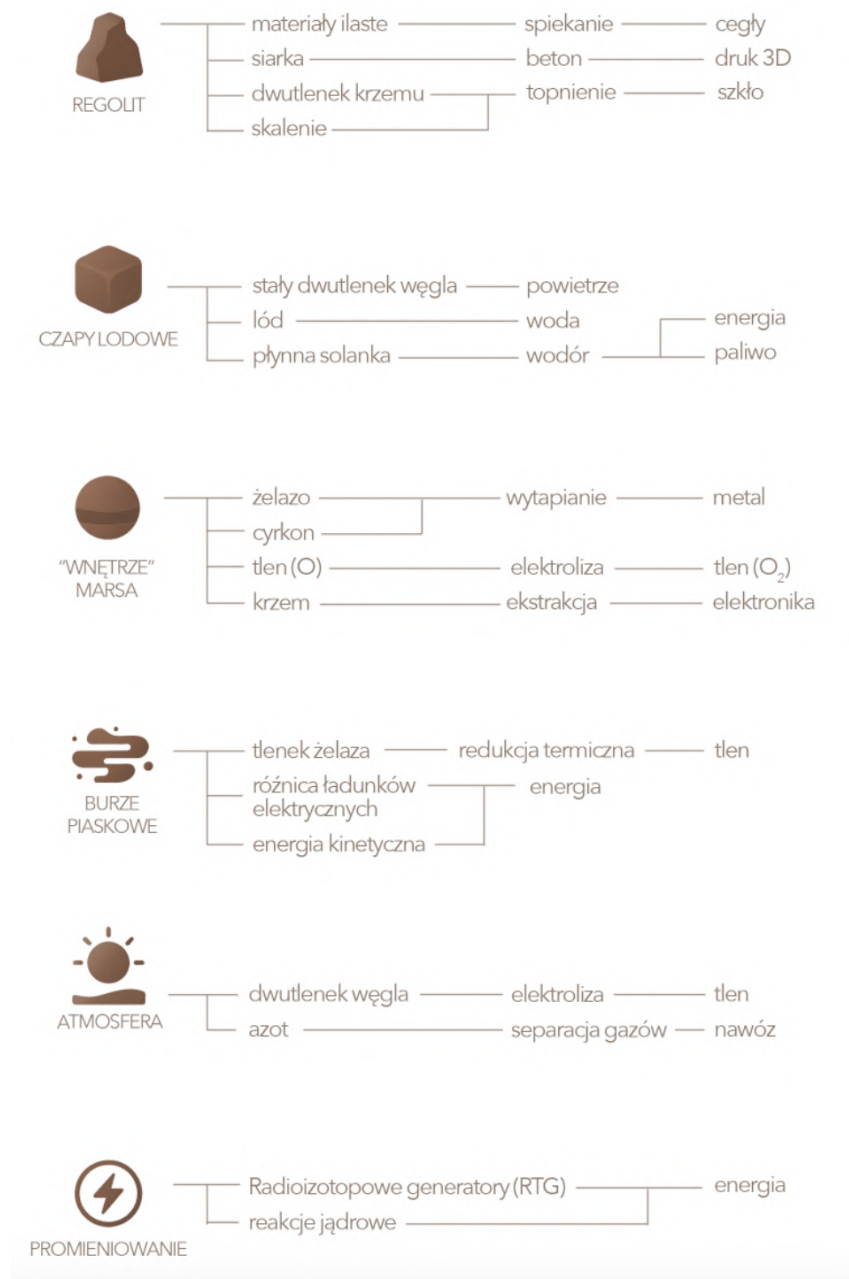
Czapy lodowe i podpowierzchniowe zasoby wodne (lód i solanki) są źródłem wody, wodoru i tlenu. Ich zastosowanie obejmuje zarówno cele bytowe, jak i produkcję energii czy paliwa. Stały dwutlenek węgla może być przekształcany w tlen atmosferyczny, wspierając procesy oddychania i ciśnienia w kontrolowanym środowisku habitatu.

Z wnętrza Marsa pozyskiwane mogą być surowce metaliczne, takie jak żelazo, cyrkon i krzem. Ich przetworzenie przez wytopienie lub ekstrakcję umożliwia produkcję metali i komponentów elektronicznych, niezbędnych w konstrukcjach technicznych. Ponadto elektroliza tlenowych związków mineralnych dostarcza tlen cząsteczkowy (O_2), stanowiący jeden z kluczowych zasobów życiowych.

Burze piaskowe, mimo swego zagrożenia, oferują potencjał energetyczny: energia kinetyczna wiatru oraz różnice ładunków mogą być wykorzystane do generacji prądu. Ponadto obecność tlenków żelaza w pyłe daje możliwość termicznej redukcji i pozyskiwania tlenu. Atmosfera Marsa, choć rzadka, zawiera znaczne ilości dwutlenku węgla i azotu. Dzięki odpowiednim technologiom możliwa jest elektroliza CO_2 w celu produkcji tlenu oraz separacja azotu, który może służyć jako komponent nawozów wspomagających uprawy w marsjańskich szklarniach.

Promieniowanie, powszechnie występujące na powierzchni Marsa, stanowi zarówno zagrożenie, jak i potencjalne źródło energii. Radioizotopowe generatory termoelektryczne (RTG) oraz reakcje jądrowe mogą stanowić stabilne źródła zasilania dla systemów bazowych, szczególnie w okresach ograniczonego dostępu do energii słonecznej.

Zaprojektowany habitat zakłada integrację powyższych zasobów w zrównoważony, wielowarstwowy system, którego celem jest ograniczenie zależności od dostaw z Ziemi, poprawa efektywności energetycznej oraz stworzenie trwałych podstaw dla dalszego rozwoju stałej obecności człowieka na Marsie.



Ilustracja 12. Schemat potencjalnego wykorzystania zasobów naturalnych Marsa w procesach budowy i funkcjonowania habitatów (opracowanie własne).

5.4.4 Zamknięty cykl materii organicznej

W warunkach ograniczonego dostępu do zasobów zewnętrznych, jak ma to miejsce na Marsie, kluczowe znaczenie dla długofalowego funkcjonowania bazy ma implementacja zamkniętego obiegu materii organicznej (Closed-loop Organic Matter Cycle). System ten stanowi fundament

biologicznego systemu podtrzymywania życia (BLSS – Bioregenerative Life Support System), którego zadaniem jest regeneracja i obieg podstawowych elementów niezbędnych do życia: wody, powietrza i pożywienia.

W ramach niniejszego projektu habitat został wyposażony w zintegrowany system zamkniętego cyklu materii organicznej (Ilustracja 13.), oparty na czterech kluczowych etapach:

1. Uprawa roślin jadalnych w systemach hydroponicznych lub aeroponicznych - produkcja żywności oraz oczyszczania wody i powietrza.
2. Konsumpcja i generacja odpadów organicznych.
3. Biokonwersja i kompostowanie w reaktorze kompostującym, gdzie odpady ulegają biodegradacji. W efekcie powstaje stabilny biokompost zawierający azot, fosfor i potas, a także mikroelementy niezbędne dla wzrostu roślin. Procesowi towarzyszy odzysk wody i produkcja biogazu.
4. Zamknięcie cyklu – powrót materii do systemu, gdzie uzyskany kompost stanowi bazę do produkcji pożywek dla kolejnych upraw, domykając cykl biogeniczny.



Ilustracja 13. Schemat zamkniętego cyklu materii organicznej (opracowanie własne).

5.4.5 Recykling wody

W projektowanym obiekcie uwzględniono implementację zamkniętego obiegu wody jako kluczowego elementu infrastruktury wspierającej życie. System ten umożliwia niemal pełną autonomię bazy w zakresie gospodarki wodnej. Szacuje się, że dzięki zaawansowanej technologii możliwy jest odzysk nawet 98% wody używanej przez mieszkańców habitatów. Zintegrowany system recyklingu pozwala na ponowne wykorzystanie cieczy pochodzącej z pryszniców, umywalek, potu, kondensatu pary wodnej, a nawet moczu.

W systemie stosuje się technologie jak:

- filtracja mechaniczna – usuwanie cząstek stałych,
- filtracja chemiczna i jonowymienna – neutralizacja zanieczyszczeń chemicznych,
- oczyszczanie biologiczne (z wykorzystaniem mikroorganizmów w bioreaktorach),
- destylacja próżniowa i odwrócona osmoza – odzyskiwanie wody z płynów fizjologicznych,
- dezynfekcja UV – eliminacja bakterii i wirusów.

5.4.6 Instalacje

W projektowanym habitacie zostały rozplanowane z uwzględnieniem maksymalnej dostępności serwisowej, redundancji systemów oraz bezpieczeństwa użytkowników. Wszystkie główne przewody i urządzenia przesyłowe zostały umieszczone w systemie szachtów technicznych, zlokalizowanych wzdłuż zewnętrznego obrysu modułów funkcjonalnych. Szachty te przylegają bezpośrednio do korytarza ewakuacyjnego, co pozwala na szybki dostęp w razie awarii, bez konieczności ingerencji w przestrzeń mieszkalną lub roboczą. Każde pomieszczenie w habitacie posiada dostęp do systemu szachtów poprzez indywidualne punkty serwisowe, umożliwiające zarówno bieżącą kontrolę, jak i wymianę komponentów instalacyjnych. Instalacje zostały poprowadzone w przestrzeniach sufitów podwieszanych. Szachty techniczne pełnią dodatkowo funkcję przestrzeni awaryjnych — w razie nagłej potrzeby mogą służyć jako kanały ewakuacyjne drugiego rzędu, trasy awaryjnego dostępu lub miejsca tymczasowego składowania zapasów sprzętu naprawczego, filtrów czy zasobników tlenowych. Ich obecność w takiej formie zwiększa elastyczność systemu oraz poziom redundancji.

W projekcie przewidziano następujące główne instalacje:

- instalacja elektryczna – zasilanie niskiego i średniego napięcia, zintegrowane z wewnętrzną siecią energetyczną opartą na magazynach energii oraz źródłach odnawialnych (np. ogniwach słonecznych i/lub reaktorze RTG).
- system wodny – instalacja doprowadzająca i oczyszczająca wodę szarą, zintegrowana z systemem odzysku wody i wilgoci z powietrza. Woda użytkowa podlega recyrkulacji i filtracji.
- instalacja powietrzna i klimatyzacja – rozprowadzanie tlenu oraz oczyszczanie powietrza z dwutlenku węgla i innych zanieczyszczeń, przy użyciu filtrów chemicznych i biologicznych. System oparty jest na kontrolowanej cyrkulacji i utrzymaniu stałego składu atmosfery wewnętrznej.
- instalacja cieplna – system ogrzewania oparty na pompach ciepła, rekuperatorach i wymiennikach, zapewniający utrzymanie stałej temperatury wewnątrz bazy.
- system zarządzania odpadami – zintegrowany z modułem biokonwersji materii organicznej, obejmuje transport i przetwarzanie odpadów biologicznych, technicznych oraz niebezpiecznych.
- instalacja informatyczno-komunikacyjna (ICT) – obejmuje wewnętrzne sieci danych, systemy monitoringu, czujniki stanu środowiska, komunikację z centrum dowodzenia oraz z Ziemią.

Dodatkowo, zaprojektowano moduł awaryjny do przesyłu substancji krytycznych, takich jak tlen czy woda, na wypadek rozszczelnienia lub awarii jednego z segmentów habitatów. Całość systemów instalacyjnych została opracowana z myślą o pełnej integracji z funkcjonowaniem inteligentnego systemu zarządzania bazą (BMS – Building Management System), który monitoruje i automatycznie reguluje parametry środowiskowe, zużycie zasobów oraz stan techniczny infrastruktury.

5.4.7 Ochrona przeciwpożarowa i bezpieczeństwo

Hermetyczna struktura, ograniczony dostęp do zasobów oraz opóźniona możliwość ewakuacji sprawiają, że każdy komponent projektowanej bazy musi zostać przemyślany jako potencjalnie krytyczny. W projekcie zakłada się wdrożenie kompleksowego systemu bezpieczeństwa, zorientowanego na prewencję, detekcję oraz szybką i niezależną reakcję. Kluczowym założeniem jest istnienie zdublowanych przestrzeni technicznych, instalacji i zewnętrznych jednostek odpowiedzialnych za utrzymanie warunków życia – pozyskiwanie energii, zarządzanie wodą oraz kontrolę atmosfery. Takie rozwiązanie pozwala na częściową autonomię poszczególnych segmentów bazy oraz kontynuację funkcjonowania systemów w przypadku lokalnej awarii.

System bezpieczeństwa obejmuje:

- podział ogniowy bazujący na niepalnych materiałach konstrukcyjnych,
- czujniki dymu, gazów i temperatury zintegrowane z automatycznymi zaworami izolacyjnymi,
- system gaszenia mgłą wodną lub gazami obojętnymi, bezpiecznymi dla sprzętu i ludzi,
- niezależne zasilanie awaryjne dla kluczowych urządzeń.

Z korytarza ewakuacyjnego prowadzi wyjście bezpośrednio na zewnątrz, gdzie znajduje się hangar pojazdów służących do mobilnych misji terenowych lub awaryjnego transportu załogi. Alternatywnie, w przypadku rozbudowy kolonii, z korytarza możliwe jest przejście do tunelu podziemnego, który prowadzi do sąsiednich modułów bądź również do hangaru na pojazdy, stąd można bezpośrednio przetransportować się do zewnętrznego schronu awaryjnego, całkowicie niezależnego od głównego habitat, stanowiącego punkt ratunkowy w przypadku poważnego zagrożenia, jak np. rozszczelnienie bazy, pożar, awaria energetyczna czy atak promieniowania słonecznego.

5.5 Forma

Projekt marsjańskiej bazy zakłada jej lokalizację wewnątrz naturalnego krateru. Wykorzystanie topografii Marsa to jeden z kluczowych elementów strategii ochrony przed surowym środowiskiem planety. Ściany krateru pełnią funkcję naturalnej bariery, która częściowo osłania bazę przed silnymi wiatrami, burzami pyłowymi oraz niebezpiecznym promieniowaniem kosmicznym i słonecznym. Na Marsie atmosfera jest bardzo rzadka – ciśnienie atmosferyczne wynosi zaledwie ok. 0,6% ziemskiego – co sprawia, że nie zapewnia ona skutecznej ochrony przed promieniowaniem UV i jonizującym. Co więcej, brak globalnego pola magnetycznego oznacza, że powierzchnia Marsa jest narażona na stały napływ promieniowania kosmicznego (GCR) i sporadyczne burze słoneczne (SPE), które mogą być groźne dla zdrowia ludzi. Krater pomaga zredukować tę ekspozycję, a dodatkowo stabilizuje temperaturę wewnątrz, chroniąc przed ekstremalnymi wahaniami dobowymi – sięgającymi od -125°C nocą do nawet $+20^{\circ}\text{C}$ w dzień.

Główna struktura bazy oparta jest na siatce heksagonalnej – rozwiązaniu znanym ze swojej efektywności i funkcjonalności. Heksagony, podobnie jak w strukturze plastra miodu, pozwalają na maksymalne wykorzystanie dostępnej przestrzeni bez powstawania „martwych

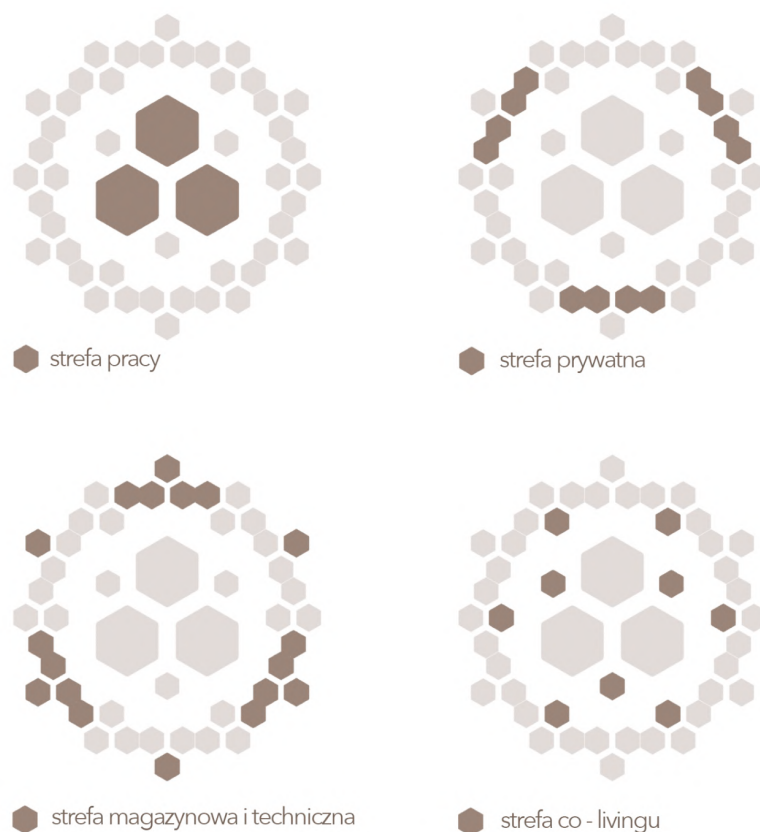
stref” między modułami. Taka konstrukcja ułatwia również rozbudowę – moduły mogą być dołączane w wielu kierunkach, co umożliwia dynamiczne dostosowywanie bazy do zmieniających się potrzeb, np. wzrostu liczby mieszkańców czy rozszerzenia zaplecza badawczego. Heksagonalna struktura zapewnia również zwiększoną wytrzymałość – geometrycznie rozprasza siły, co jest istotne w warunkach marsjańskich, gdzie zarówno wstrząsy gruntu, jak i różnice ciśnień mogą wpływać na stabilność budowli. Tego rodzaju układ zapewnia nie tylko bezpieczeństwo, ale także efektywność energetyczną. Baza składa się z powtarzalnych, zintegrowanych modułów o różnym przeznaczeniu: mieszkalnym, laboratoryjnym, technicznym czy magazynowym. Każdy z nich może funkcjonować jako autonomiczna jednostka, a jednocześnie stanowi część większego organizmu. Modularność pozwala na szybkie skalowanie infrastruktury oraz obniżenie kosztów – identyczne moduły można seryjnie produkować na Ziemi i łatwiej transportować na Marsa. Dodatkowo, taka organizacja zwiększa bezpieczeństwo – w przypadku awarii lub konieczności izolacji, pojedyncze moduły mogą być tymczasowo odseparowane od reszty bazy bez zakłócenia jej funkcjonowania.

Cała baza zostanie przykryta eliptyczną kopułą, która pełni funkcję osłony przed nieprzyjawnymi warunkami marsjańskimi. Ze względu na wspomniany brak silnego pola magnetycznego oraz cienką atmosferę, Mars nie chroni przed promieniowaniem – zarówno ultrafioletowym, jak i kosmicznym. Kopuła, wykonana z zaawansowanych materiałów kompozytowych, może zawierać warstwy zawierające polietylen lub inne związki bogate w wodór – skutecznie absorbujące promieniowanie jonizujące. Kopuła tworzy również kontrolowane środowisko wewnętrzne – chroni przed pyłem marsjańskim, ogranicza straty ciepła i pozwala na utrzymanie stabilnych warunków ciśnienia oraz temperatury, zbliżonych do ziemskich. Dodatkowo, może pełnić funkcję biologicznego bufora – zawierać roślinność lub przestrzeń rekreacyjną, co pozytywnie wpływa na dobrostan psychiczny mieszkańców.

5.6 Funkcje

Funkcjonalność bazy marsjańskiej została zaprojektowana z myślą o pełnej samowystarczalności, bezpieczeństwie oraz komforcie życia i pracy astronautów w ekstremalnych warunkach. Każdy moduł pełni ściśle określoną rolę w złożonym ekosystemie stacji – od zaawansowanych laboratoriów badawczych, przez systemy produkcji i recyklingu, aż po przestrzeń mieszkalną, rekreacyjną i techniczną. Dzięki podziałowi na strefy funkcjonalne (Ilustracja 14.), baza umożliwia jednocześnie prowadzenie eksperymentów naukowych, produkcję niezbędnych zasobów, utrzymanie zdrowia psychofizycznego załogi oraz zapewnienie ciągłej łączności i kontroli nad warunkami wewnętrznymi. Infrastruktura została zintegrowana w sposób modułowy, co pozwala na łatwą rozbudowę, niezależne zarządzanie systemami krytycznymi oraz szybkie reagowanie w sytuacjach awaryjnych.

Poniżej przedstawiono szczegółowy opis poszczególnych pomieszczeń i systemów, które razem tworzą spójną, zautomatyzowaną i odporną na zakłócenia strukturę funkcjonującą na powierzchni Marsa.



Ilustracja 14. Schemat funkcjonalny pomieszczeń na parterze i pierwszym piętrze (opracowanie własne).

EVA

6 modułów wejściowych umożliwiających astronautom bezpieczne opuszczanie i powrót do wnętrza bazy, minimalizując przy tym ryzyko dekompresji i zanieczyszczenia wnętrza pyłem marsjańskim. Mogą prowadzić na powierzchnię Marsa lub być połączone z innymi bazami za pomocą korytarzy. Każdy z modułów wyposażony jest w systemy oczyszczania i magazynowania skafandrów.

Laboratorium

Laboratorium to centrum badań naukowych, w którym analizowane są próbki gleby, atmosfery i mikroorganizmów z Marsa. Umożliwia również prowadzenie eksperymentów biologicznych i chemicznych, wspierających rozwój technologii przetrwania na Czerwonej Planecie. Dzięki nowoczesnym systemom analitycznym załoga może monitorować zmiany środowiskowe i dostosowywać strategię eksploracyjną.

Szklarnia

Zapewnia ciągłą produkcję świeżej żywności i tlenu, wykorzystując hydroponikę i automatyczne systemy nawadniania. Stanowi także przestrzeń terapeutyczną, wspierając zdrowie psychiczne załogi poprzez kontakt z roślinnością. Oświetlenie dostosowane do cyklu dobowego Ziemi pomaga utrzymać rytm biologiczny ludzi i wspomaga wzrost roślin.

Systemy produkcji i recyklingu

Ten moduł odpowiada za wytwarzanie niezbędnych narzędzi, komponentów i materiałów z wykorzystaniem druku 3D oraz zasobów lokalnych. Równocześnie zajmuje się przetwarzaniem odpadów i odzyskiwaniem surowców, minimalizując zużycie zasobów przywiezionych z Ziemi. Moduł ten stanowi fundament samowystarczalności bazy, umożliwiając szybkie reagowanie na awarie i potrzeby techniczne.

Moduł zarządzania wodą

Zapewnia bazie dostęp do czystej wody oraz jej ciągły obieg. Surowa woda pobierana jest z czap lodowych i trafia do systemów oczyszczania i filtracji. Równolegle działa recykling – odzyskujący wodę z atmosfery i odpadów organicznych. Magazynowanie wody odbywa się w modułach magazynowych lub zewnętrznych jednostkach magazynowych. Cały system pracuje w kontrolowanych warunkach ciśnienia i temperatury. Jakość wody jest stale monitorowana, a zasilanie zapewniają panele słoneczne i reaktory jądrowe. W razie awarii uruchamiane są systemy zapasowe.

Stacja kontroli powietrza

Stacja Kontroli Powietrza w bazie marsjańskiej zapewnia odpowiednią jakość powietrza dla załogi. Produkcja tlenu odbywa się przez elektrolizę wody i reakcje chemiczne, a CO₂ jest recyklingowany za pomocą filtrów i reaktorów. Powietrze jest filtrowane i oczyszczane z zanieczyszczeń, a tlen magazynowany w zbiornikach awaryjnych. Stacja reguluje wilgotność i temperaturę, a dystrybucja powietrza odbywa się przez przewody i wentylatory. Zasilanie pochodzi z paneli słonecznych oraz reaktorów jądrowych, a w razie awarii dostępne są układy awaryjne dostarczania tlenu. Cały system jest monitorowany w czasie rzeczywistym.

Węzeł energetyczny

Odpowiada za zasilanie całej bazy energią pozyskiwaną z paneli słonecznych i reaktorów jądrowych umieszczonych w zewnętrznych jednostkach. Energia jest magazynowana i rozprowadzana do wszystkich modułów, z uwzględnieniem zapasowych systemów awaryjnych. Instalacja obejmuje systemy regulacji napięcia, chłodzenia generatorów oraz zabezpieczeń przed przeciążeniami. Całość jest stale monitorowana i poddawana diagnostyce oraz konserwacji w celu zapewnienia niezawodności działania.

Magazyny

- Magazyn żywności i wody – przechowywanie zapasów żywności (suszonej, konserwowej, liofilizowanej)
- Magazyn narzędzi, części zapasowych i materiałów budowlanych do napraw i budowy, w tym metali, tworzyw sztucznych i części zamiennych
- Magazyn odzieży i sprzętu ochronnego
- Magazyn energii i paliw – składowanie akumulatorów, paliw oraz systemów zasilania, takich jak ogniwa fotowoltaiczne i generatory
- Magazyn technologii i eksperymentów – przechowywanie sprzętu do badań, czujników oraz próbek do eksperymentów

- Magazyn dla wszelkich elementów utworzonych przez człowieka w procesie produkcji oraz recyklingu.

Serwerownia

(6 identycznych modułów) Stanowią kręgosłup systemów zarządzania energią, atmosferą i gospodarką wodną. Każda z nich mieści szafy rack z redundantnymi serwerami i kontrolerami PLC, chłodzone cieczą w obiegu zamkniętym dla optymalnej wydajności. Zapewniają nieprzerwane przetwarzanie danych telemetrycznych i sterowanie automatyką (rozdzielanie mocy, monitoring parametrów powietrza, optymalizacja obiegu wody), przy zachowaniu wielowarstwowego bezpieczeństwa sieciowego oraz awaryjnego zasilania UPS. Dla utrzymania ciągłości działania moduły wyposażono w systemy monitoringu kondycji sprzętu, zdalnej diagnostyki i automatycznej przełączalności na zapasowe jednostki.

Moduł medyczno-sanitarny

Obejmuje strefę pierwszej pomocy z urządzeniami do automatycznego badania i monitorowania stanu zdrowia oraz zrobotyzowane stanowiska do zabiegów i rehabilitacji. W wydzielonych pomieszczeniach przechowywane są roboty medyczne, sprzęt diagnostyczny i zapasy leków, a pacjenci wymagający izolacji trafiają do odrębnej strefy kwarantanny. Dla higieny osobistej dostępne są bezwodne toalety i prysznice z zaawansowanym systemem odzysku i filtracji wody, a także pralnia wyposażona w energooszczędne pralki i moduł recyklingu wody, które minimalizują zużycie zasobów.

Habitat M2.A

Ten wariant zaprojektowany jest z myślą o parach – posiada jedną wspólną sypialnię z dużym łóżkiem. Podzielony jest na strefę dzienną z salonem do wspólnego spędzania czasu, kompaktową kuchnię z jadalnią oraz toaletą z nowoczesnym systemem spalania. Strefa prywatna obejmuje sypialnię z dwuosobowym łóżkiem, łazienkę oraz biuro do nauki.

Habitat M2.B

Ten wariant oferuje większą prywatność, poprzez zapewnienie oddzielnych sypialni dla każdej osoby. Moduł zawiera również wspólną kuchnię i salon, które sprzyjają integracji, oraz jedną łazienkę z nowoczesną toaletą spalającą. To idealne rozwiązanie dla współpracowników lub osób, które preferują oddzielne przestrzenie do odpoczynku, ale chcą korzystać z wspólnych udogodnień.

Habitat M4

Moduł 4-osobowy zapewnia pełną prywatność każdemu mieszkańcowi, oferując cztery oddzielne sypialnie. Wspólna przestrzeń obejmuje kuchnię, duży salon oraz dwie łazienki, co umożliwia komfortowe życie zespołowi. Jest to doskonałe rozwiązanie dla większych grup lub rodzin, które potrzebują przestronnych i funkcjonalnych warunków do pracy i odpoczynku.

Kuchnia

Zaprojektowana tak, aby maksymalnie wykorzystywać ograniczone zasoby. Wyposażona w nowoczesne urządzenia, w tym piekarnik, kuchenki indukcyjne oraz systemy do recyklingu wody, pozwala na przygotowywanie posiłków z wykorzystaniem produktów przechowywanych w długoterminowej formie. Zintegrowane z systemem przechowywania żywności w słoikach i specjalnych pojemnikach, umożliwia efektywne wykorzystanie zapasów, a także produkcję świeżych ziół i warzyw w hydroponicznych ogródkach.

Siłownia

Wyposażona jest w sprzęt dostosowany do warunków niskiej grawitacji, w tym bieżnie, rowery stacjonarne, a także maszyny do ćwiczeń siłowych z odpowiednim oporem. Nowoczesne urządzenia do monitorowania zdrowia, umożliwiają załodze regularne monitorowanie swoich parametrów fizycznych, co jest kluczowe dla utrzymania kondycji w długotrwałych misjach. Siłownia pełni również funkcję integracyjną, umożliwiając załodze wspólne aktywności fizyczne i relaks po intensywnych dniach pracy.

Sala kinowa VR

Przestrzeń służąca do relaksu i odprężenia, oferująca zaawansowane technologie wirtualnej rzeczywistości, które umożliwiają załodze przeniesienie się do wirtualnych środowisk. Użytkownicy mogą korzystać z gier, filmów lub symulacji, które pozwalają na oderwanie się od monotonii codziennego życia na Marsie. Dzięki immersyjnym doświadczeniom, sala VR nie tylko dostarcza rozrywki, ale również wspomaga zdrowie psychiczne załogi, oferując chwilę wytchnienia i możliwość regeneracji.

Ogrody

Rozciągają się pod przezroczystą kopułą, tworząc wrażenie spaceru na świeżym powietrzu, mimo że znajdują się w kontrolowanym środowisku marsjańskiej bazy. Przestrzeń ta została zaprojektowana z myślą o relaksie i regeneracji – bujna roślinność, miękkie podłoże, ciche alejki i widok na „niebo” pod kopułą tworzą namiastkę ziemskiego ogrodu.

Do ogrodów prowadzą lekkie kładki rozciągające się promieniście z centralnego trzonu bazy, które wznoszą się nad zielonymi przestrzeniami i zapewniają dostęp do różnych poziomów rekreacyjnych. To miejsce, w którym członkowie załogi mogą spacerować, medytować lub po prostu odpocząć, doświadczając kontaktu z naturą mimo oddalenia od Ziemi.

Tor do biegania

Tor ma formę ringu i znajduje się na drugim piętrze, nad modułami bazy, stanowiąc przestronną i inspirującą przestrzeń do aktywności fizycznej. Dostępny przez kładki łączące go z centralnym trzonem bazy, ring biegnie wokół ogrodów, co pozwala na aktywność na świeżym powietrzu, a jednocześnie chroni przed trudnymi warunkami marsjańskimi. Biegacze mogą cieszyć się pięknym widokiem na wnętrze bazy, otaczające ogrody, a także przez kopułę na Marsa - co sprawia, że każda sesja biegowa staje się wyjątkowym doświadczeniem. To miejsce sprzyja zdrowiu fizycznemu, jak i również umożliwia chwilę refleksji i kontemplacji w niezwykłym otoczeniu.

Pomieszczenia uzupełniające

Pomieszczenia pomocnicze dla laboratorium:

W laboratorium znajdują się specjalistyczne pomieszczenia, takie jak magazyn próbek, w którym przechowywane są próbki z Marsa w odpowiednich warunkach. Przestrzeń przygotowawcza służy do obróbki próbek przed ich analizą, zapewniając czystość i precyzyjność procesów. Dodatkowo, strefa dekontaminacji umożliwia oczyszczanie sprzętu i odzieży, zapobiegając kontaminacji prób i zachowując bezpieczeństwo.

Pomieszczenia pomocnicze dla szklarni:

Szklarnia zawiera przestrzeń do przechowywania nasion i materiałów rolniczych, co pozwala na efektywne zarządzanie zasobami do upraw. Pomieszczenie do monitorowania parametrów środowiskowych umożliwia precyzyjne kontrolowanie warunków wzrostu roślin, co ma kluczowe znaczenie w uprawach na Marsie. Ponadto, przechowalnia świeżych plonów zapewnia odpowiednie warunki do składowania zebranych roślin, dbając o ich jakość i świeżość.

Pomieszczenia pomocnicze dla centrum produkcji i recyklingu:

W centrum produkcji znajduje się warsztat, w którym wytwarzane są części zamienne oraz narzędzia potrzebne do bieżącej eksploatacji bazy. Pomieszczenie recyklingowe zajmuje się przetwarzaniem odpadów, odzyskiwaniem surowców, które następnie wykorzystuje się w produkcji nowych przedmiotów. Magazyn materiałów zapewnia przechowywanie surowców, co ułatwia organizację pracy i szybki dostęp do niezbędnych zasobów.

Śluzy

Prowadzą do korytarza ewakuacyjnego i stanowią kluczowy element systemu bezpieczeństwa bazy. Łączą one każdy mniejszy moduł z korytarzem, który biegnie wokół całej bazy i umożliwia szybki i bezpieczny dostęp do modułów EVA w sytuacjach awaryjnych, niezależnie od miejsca, w którym znajduje się załoga, co znacznie zwiększa szanse na szybką reakcję i ochronę życia w przypadku wypadku, rozszczelnienia lub pożaru. Cały system śluz wyposażony jest w automatyczne blokady, kontrolę ciśnienia i atmosfery, a także sygnalizację świetlną i dźwiękową, wspierającą procedury awaryjne.

Klatki schodowe i windy

Klatki schodowe rozmieszczone są w sześciu narożnikach bazy, zapewniając łatwy dostęp pomiędzy parterem a pierwszym i drugim piętrem. Dodatkowo, specjalnie zabezpieczone schody znajdują się także w korytarzu ewakuacyjnym, umożliwiając najkrótszą drogę do modułów EVA.

Windy umieszczone są wyłącznie w centralnej części bazy. Pełnią funkcję technicznych podnośników – służą głównie do transportu materiałów oraz sprzętu. W bazie promuje się aktywność fizyczną i codzienny ruch, dlatego komunikacja dla załogi opiera się głównie na schodach.

Pomieszczenia techniczne

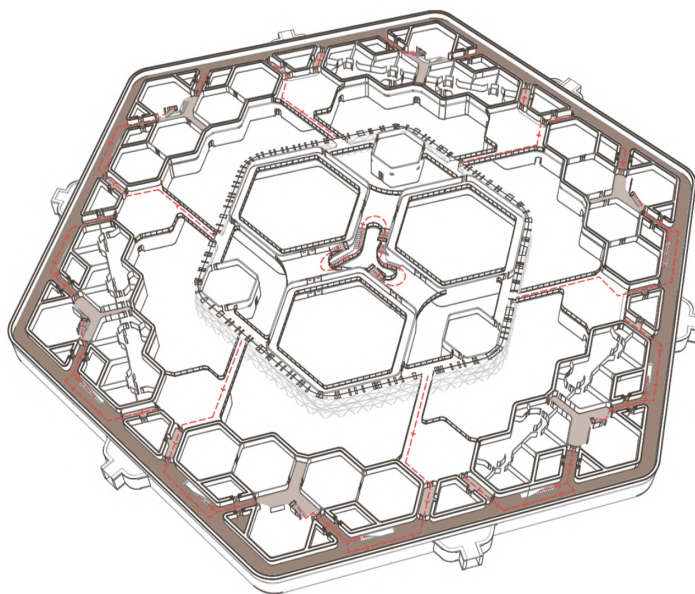
Przeznaczone na szachty techniczne i rezerwy magazynowej pełnią ważną rolę w utrzymaniu infrastruktury bazy. Szachty techniczne umożliwiają dostęp do systemów energetycznych, wodociągowych, wentylacyjnych i innych instalacji. Są one wyposażone w narzędzia do konserwacji i naprawy tych systemów. Z kolei pomieszczenia rezerwowe magazynowe służą do przechowywania zapasów materiałów, narzędzi oraz części zamiennych, które mogą być wykorzystane w przypadku awarii lub zwiększonego zapotrzebowania. Przechowywane tam przedmioty obejmują m.in. zapasowe akumulatory, części do systemów wentylacyjnych, a także sprzęt do szybkich napraw.

Schemat ewakuacji

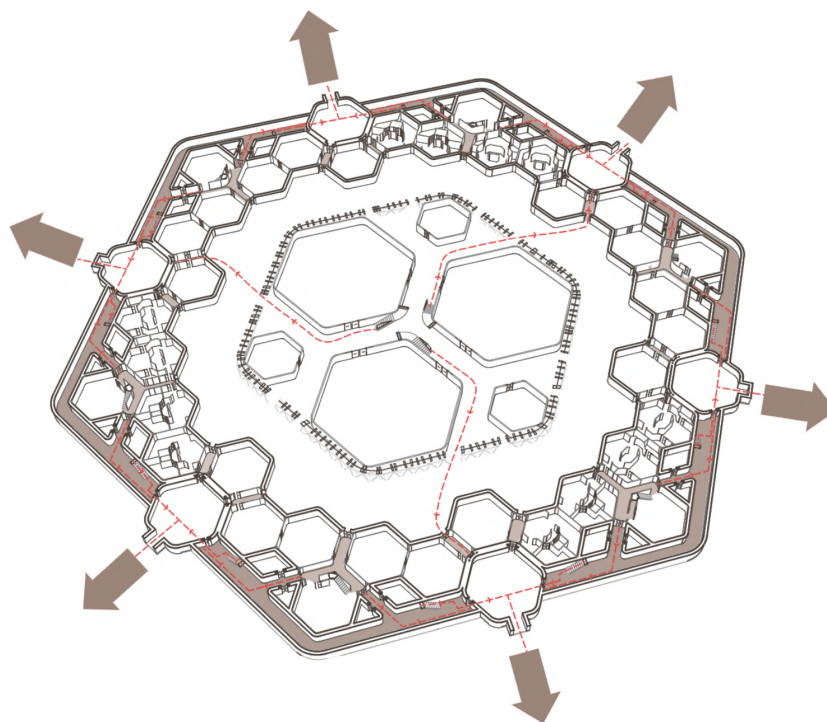
Wokół całej bazy, na parterze i piętrze, poprowadzony jest pierścieniowy korytarz ewakuacyjny o szerokości 2,3 m (Ilustracja 15 i 16). Przestrzeń ta wynika z konstrukcji fundamentu kopuły, który przebiega równoległe do jej powierzchni, tworząc wolną strefę między ścianą a podłożem.

Dostęp oraz komunikacja między piętrami korytarzy możliwy jest dzięki rozmieszczonym co 20 metrów kłatkom schodowym. Dodatkowo, z centralnej części kompleksu poprowadzone są kładki techniczne, które umożliwiają bezpośrednie przejście do zewnętrznych tras ewakuacyjnych, niezależnie od lokalizacji użytkownika wewnątrz habitatów. Korytarz zbudowany jest z drukowanego regolitu, co zapewnia ochronę przed promieniowaniem i uszkodzeniami. Od wnętrza bazy oddzielają go śluzy hermetyczne.

Na parterze korytarz łączy się z modułami EVA (Ilustracja 14.), które umożliwiają bezpieczną ewakuację do zewnętrznych jednostek ratunkowych (np. mobilnych pojazdów) lub bezpośrednio na powierzchnię Marsa, z użyciem wzmocnionych skafandrów ciśnieniowych. Całość zapewnia szybką, bezpieczną ewakuację z każdej części bazy, niezależnie od zagrożenia.



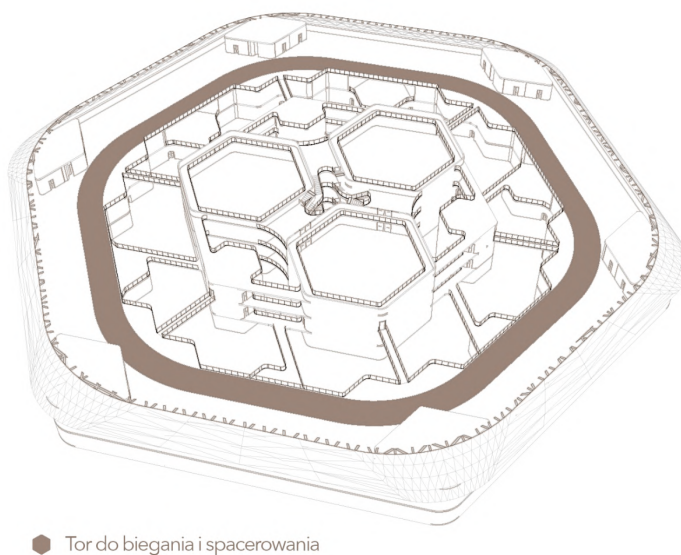
Ilustracja 15. Schemat ewakuacji - kondygnacja +1 (opracowanie własne).



Ilustracja 16. Schemat ewakuacji - kondygnacja 0 (opracowanie własne).

Ring do biegania

Ring do biegania o średnicy 90 m (Ilustracja 17.), usytuowany na drugim piętrze umożliwia kolonistom trening kardio przy naturalnym świetle słonecznym rozproszonym przez przezierną membranę kopuły. Tor wyposażono w panele kompozytowe z właściwościami tłumienia wstrząsów, co redukuje obciążenia stawów o ok. 20 % w porównaniu do biegania po twardej nawierzchni. Korzystając z toru astronauta mogą cieszyć się panoramicznym widokom na ażurową konstrukcję kopuły i wewnętrzny rdzeń bazy.

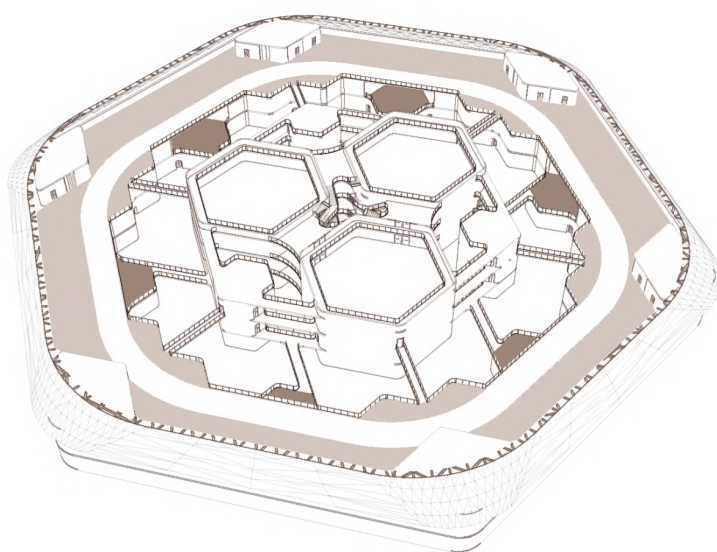


Ilustracja 17. Schemat lokalizacji ringu do biegania (opracowanie własne).

Ogrody i tarasy zielone

Na drugim piętrze oraz na tarasach pierwszego poziomu zaplanowano ogrody użytkowe (Ilustracja 18.) przylegające do toru biegowego, które pełnią funkcję relaksacyjną, regeneracyjną i wspomagającą codzienne warunki życia. Dzięki zastosowaniu roślinności, ogrody poprawiają jakość powietrza, usuwając lotne związki i podwyższając wilgotność, co sprzyja zdrowiu kolonistów. Strefa ta jest biofilna, co oznacza, że redukuje stres, poprawia koncentrację i sprzyja dobremu samopoczuciu. Dodatkowo, ogrody oferują dostęp do świeżych ziół i warzyw liściastych, wspierających dietę, a także stanowią przestrzeń do lekkich ćwiczeń fizycznych, takich jak joga czy medytacja.

W ogrodach zastosowano zaawansowane systemy wspierające ich funkcjonowanie. Automatyczne nawadnianie kropelkowe z recyrkulacją wody zapewnia oszczędność zasobów, a sterowane oświetlenie LED (spektrum PAR) oraz pryzmatyczne świetliki optymalizują dopływ światła. Czujniki klimatu monitorują wilgotność, temperaturę i poziom CO₂, a zintegrowany system zarządzania bazą umożliwia precyzyjne dostosowanie warunków. Dodatkowo, systemy filtracji powietrza oraz wentylacji zapewniają stały dopływ świeżego powietrza, a zbiorniki buforowe oraz odzysk wody z kondensatu dbają o efektywność wodną. Takie ogrody łączą walory estetyczne z funkcją ekosystemową, tworząc wielofunkcyjną przestrzeń, która wspiera zdrowie fizyczne i psychiczne kolonistów.



- tarasy na kondygnacji +1 - tereny rekreacyjne i zielone
- ogród na kondygnacji +2 - tereny rekreacyjne i zielone

Ilustracja 18. Schemat lokalizacji tarasów i ogrodów (opracowanie własne).

5.7 Wnętrza

Wnętrza marsjańskiej bazy zaprojektowano w oparciu o system modularnych jednostek heksagonalnych, wykonanych z lekkiego i wytrzymałego polimeru, który zapewnia doskonałe właściwości izolacyjne oraz pozwala na elastyczną adaptację przestrzeni. Każdy moduł to osobna jednostka funkcjonalna, łącząca się z innymi poprzez specjalne łączenia wyposażone w izolację akustyczną, co zapewnia prywatność i komfort dźwiękowy, nawet w ograniczonym środowisku zamkniętym.

Każdy moduł posiada sufit podwieszany, kryjący rozbudowaną sieć instalacyjną – w tym systemy wentylacyjne, kablowe i sensoryczne, które umożliwiają dynamiczną adaptację pomieszczeń do zmieniających się funkcji oraz łatwe zarządzanie środowiskiem wewnętrznym. Dostęp do nich odbywa się przez szczelne śluzy i automatyczne drzwi przesuwne, co umożliwia płynne poruszanie się pomiędzy strefami przy jednoczesnym utrzymaniu szczelności i bezpieczeństwa, a także zapewnia prywatność i redukcję hałasu.

Wnętrza są wyraźnie sparametryzowane – ich układ, wyposażenie i styl zależą od pełnionej funkcji danego modułu oraz od potrzeb użytkownika. Zabudowa meblowa zintegrowana jest z architekturą – posiada funkcje ukryte: automatyczne schowki, panele sterujące, składane powierzchnie robocze czy wbudowane systemy AI. Miejsce pracy, odpoczynku i relaksu może być elastycznie przekształcane za pomocą ruchomych paneli lub inteligentnych materiałów zmieniających właściwości.

Materiały wykończeniowe pochodzą z lokalnie dostępnych zasobów – takich jak przetworzony regolit – oraz specjalistycznych polimerów, które zostały stworzone w procesie druku 3D. Ich powierzchnie są łatwe do utrzymania w czystości, *odporne na ścieranie i przyjazne w dotyku*. Wykorzystano również bio-kompozyty oraz tekstylia z recyklingu biologicznego, co wpisuje się w ideę samowystarczalności bazy. Kolorystyka wnętrz jest jasna i zróżnicowana w zależności od przeznaczenia modułu – w strefach mieszkalnych i wypoczynkowych dominują ciepłe odcienie beżu, złamanej bieli, miękkich szarości oraz przyjazne pastele, które *sprzyjają regeneracji psychicznej*. W strefach roboczych wykorzystuje się chłodniejsze barwy – błękity i srebrzyste szarości – wspierające koncentrację i redukujące zmęczenie wzroku.

Oświetlenie pełni kluczową rolę w regulacji rytmu dobowego. Zastosowano inteligentne systemy LED z możliwością regulacji barwy i natężenia światła, które naśladują naturalny cykl dnia i nocy. W przestrzeniach wspólnych światło może symulować porę dnia na Ziemi, pomagając utrzymać rytm biologiczny załogi. Choć w modułach nie zastosowano tradycyjnych okien – ze względu na wymogi bezpieczeństwa i ciśnienia – użytkownicy mają dostęp do kopuły świetlnej w przestrzeni wspólnej, gdzie można poczuć namiastkę otwartości. Dodatkowo, w wielu pomieszczeniach znajdują się *interaktywne panele i hologramy, które mogą wyświetlać realistyczne wizualizacje* – widok Ziemi, lasu, oceanu czy dowolnego środowiska, które użytkownik wybierze. Taka immersyjna technologia *wpływa pozytywnie na samopoczucie i redukcję uczucia izolacji*.

Technologia jest obecna w każdej warstwie wnętrza – od robotów wspomagających codzienne czynności, po zaawansowane systemy monitorowania zdrowia i zarządzania środowiskiem. Wszystkie urządzenia są zintegrowane z centralnym systemem zarządzania,

który komunikuje się z użytkownikiem przez intuicyjne panele dotykowe, głos lub interfejs holograficzny.

Roślinność, mimo ograniczeń, jest ważną częścią wnętrza – zarówno jako element funkcjonalny (np. hydroponiczne uprawy w kuchni), jak i estetyczny. Zielone ściany, modułowe ogrody wertykalne i mikroszklarnie dodają życia przestrzeniom i pełnią funkcję terapeutyczną, poprawiając jakość powietrza i stan psychiczny załogi.

Wnętrza bazy marsjańskiej nie są jedynie miejscem przetrwania – to inteligentnie zaprojektowane środowisko życia, wspierające fizyczne i psychiczne potrzeby mieszkańców. Przemysłany układ przestrzeni, integracja technologii i dbałość o estetykę tworzą harmonijne miejsce, w którym człowiek może funkcjonować, rozwijać się i czuć jak u siebie – nawet podczas pobytu na innej planecie.

5.8 Modułowość i parametryzacja

Jednym z kluczowych założeń projektowych marsjańskiej bazy jest modułowość, oparta na systemie heksagonalnych jednostek konstrukcyjnych. Forma ta pozwala na optymalne wykorzystanie przestrzeni, elastyczność w planowaniu i łatwość rozbudowy. Każdy z podstawowych modułów posiada bok o długości 5 m i wysokość 3,8 m, co zapewnia komfortową przestrzeń użytkową i odpowiednią skalę zarówno dla funkcji indywidualnych, jak i wspólnych. Układ bazy powstał poprzez łączenie heksagonalnych modułów w strukturę opartą na siatce, z dodatkowymi słupami zapewniającymi szczelność i bezpieczeństwo pomiędzy sekcjami. W centralnej części bazy zlokalizowano trzy większe moduły, oparte również na formie sześcioboku, lecz o boku długości 13 m. Tworzą one trzon funkcjonalny całego założenia oraz podstawę pod kopułę świetlną. Wokół tej strefy znajdują się mniejsze moduły tworzące obrys bazy, odpowiadające za funkcje mieszkalne, co-livingowe, techniczne i magazynowe.

Zastosowanie parametryzacji w projektowaniu całej bazy niesie za sobą szereg korzyści. To narzędzie projektowe pozwala na precyzyjne formowanie geometryczne i na dynamiczne dopasowywanie rozwiązań do zmieniających się potrzeb funkcjonalnych, technologicznych i środowiskowych. Parametryzacja umożliwia szybkie modyfikacje – od skali pojedynczego elementu aż po całą strukturę bazy – co jest niezwykle istotne w warunkach tak nieprzewidywalnych jak środowisko Marsa.

Modułowość i parametryzacja razem tworzą elastyczny i zoptymalizowany system. Modułowe podejście sprawia, że baza może być łatwo powielana w innych lokalizacjach – wystarczy odtworzyć siatkę heksagonów i dostosować jej układ do danego terenu. Możliwa jest też rozbudowa już istniejącej bazy, przez dodawanie kolejnych modułów bez potrzeby przebudowy całości. Równie ważną zaletą modułowości jest łatwość wymiany elementów w przypadku awarii. Jeśli któryś moduł ulegnie uszkodzeniu, możliwe jest jego odłączenie, naprawa lub zastąpienie nowym – bez zakłócania funkcjonowania reszty bazy. Taka struktura zwiększa bezpieczeństwo i trwałość całego systemu, umożliwiając reagowanie na nieprzewidziane sytuacje bez konieczności ingerencji w całość obiektu.

W kontekście kolonizacji pozaziemskiej, modułowość i parametryzacja stają się kluczowymi narzędziami adaptacji, efektywności i przetrwania. Umożliwiają projektowanie architektury, która nie tylko odpowiada na aktualne potrzeby, ale może również rozwijać się

wraz z rosnącą załogą, nowymi funkcjami i kolejnymi etapami eksploracji. To architektura dynamiczna – reagująca, ucząca się i rozwijająca w rytmie życia swoich użytkowników.

5.9 Aspekt psychologiczny

Architektura nie tylko odnosi się do formy i konstrukcji. Niezwykle ważnym jej elementem jest to, jak ludzie czują się w danej przestrzeni. Każde miejsce, w którym przebywamy, oddziałuje na nas na dwóch poziomach: fizycznym i emocjonalnym. Po pierwsze, przestrzeń musi być dobrze zaplanowana – funkcjonalna, bezpieczna i dostosowana do potrzeb jej użytkowników. Po drugie jednak, powinna też wspierać nasze samopoczucie, relacje społeczne i ogólne poczucie komfortu. Inaczej to ujmując: architektura to nie tylko to, co widzimy i dotykamy, ale też to, co czujemy, będąc w danym miejscu⁴⁸.

W kontekście bazy na Marsie ta „podwójna natura” architektury staje się szczególnie ważna. Z jednej strony istotna jest konieczność stworzenia miejsca, które fizycznie ochroni ludzi przed surowym klimatem i promieniowaniem. Z drugiej strony jednak – równie ważne jest zadbanie o psychiczny komfort mieszkańców: ich zdrowie psychiczne, poczucie bezpieczeństwa, możliwość odpoczynku, prywatności i kontaktów z innymi.

Problem polega na tym, że nie mamy jeszcze realnego doświadczenia życia na innej planecie. Nie wiemy dokładnie, jak człowiek będzie się tam czuł – ale wiemy, że długotrwała izolacja, monotonia otoczenia i brak naturalnych bodźców mogą prowadzić do frustracji, przygnębienia czy nawet poważniejszych problemów psychicznych.

Dlatego tak ważne jest, by architekci, podobnie jak na Ziemi, nie skupiali się wyłącznie na technologii, efektywności funkcjonalnej i aspektach ekonomicznych. Potrzebna jest świadomość ludzkich potrzeb – tych codziennych, emocjonalnych, społecznych. Projektowanie przestrzeni na Marsie bez takiej refleksji może skończyć się tym, że nawet najbardziej zaawansowana technologicznie baza stanie się miejscem zimnym, obcym i trudnym do zniesienia. A przecież chodzi o to, by stworzyć dom – w zupełnie nowym świecie.

Wśród najważniejszych rozwiązań uwzględniających aspekt psychologiczny, w projekcie wykorzystano:

- zachowanie równowagi między prywatnością a wspólnotą – każdy mieszkaniec dysponuje habitatem o powierzchni ok. 30 m² na osobę, zapewniającym prywatność i możliwość wyciszenia się, przy jednoczesnym dostępie do przestrzeni wspólnych integrujących społeczność.
- wprowadzenie naturalnych bodźców – przezroczysta membrana kopuł umożliwia dostęp do naturalnego światła, co reguluje rytm dobowy i zmniejsza uczucie zamknięcia.
- Zieleń i przestrzeń aktywna – wewnętrzny ogród z bieżnią do biegania oraz strefami relaksu i jogi wspiera kontakt z naturą i aktywność fizyczną, kluczową dla kondycji psychicznej i fizycznej.

⁴⁸ Dyrda J., Architektura psychologicznej przestrzeni życia. Behawioralne podstawy projektowania, Warszawa: PWN, 2005, s. 9.

- stonowana kolorystyka i miękka forma – zastosowanie jasnych, neutralnych barw, zaokrąglonych kształtów i wplecenie materiałów z użyciem regolitu tworzy przyjazną, ciepłą atmosferę, łagodzącą surowość technologicznego wnętrza.
- funkcjonalne strefowanie przestrzeni (mix-use) – brak sztywnego podziału na strefy mieszkalne, techniczne i magazynowe zapobiega tworzeniu „martwych” części bazy oraz wspiera różnorodność aktywności w ciągu dnia.
- centralne strefy rozrywki VR – zapewniają odskocznnię od codzienności oraz możliwość eksploracji alternatywnych światów bez opuszczania bazy.
- wsparcie psychologiczne – w strefie medycznej funkcjonuje punkt opieki psychologicznej, w którym pomoc oferują m.in. specjalistyczne jednostki robotyczne.
- łącze z Ziemią – każde mieszkanie wyposażone jest w stanowisko komputerowe umożliwiające kontakt z bliskimi i dostęp do cyfrowych treści.
- promowanie ruchu pieszego – komunikacja piesza odbywa się szerokimi korytarzami i kładkami łączącymi moduły. Windy ograniczono do minimum, by zachęcać do codziennej aktywności.
- dbałość o zdrowie fizyczne – siłownie i strefy aktywności pomagają zapobiegać zanikowi mięśni, a jednocześnie pełnią funkcję regeneracyjną dla psychiki.
- optymalna liczba mieszkańców – 50 osób to liczba zapewniająca komfort funkcjonowania społecznego: wystarczająca do budowania więzi, ale nie przytłaczająca.
- zaawansowana wentylacja i systemy wspierające – rozmieszczone w całej bazie instalacje wspomagają prawidłowe funkcjonowanie organizmu i komfort oddechowcy.

Wszystkie te elementy łączy jedno: świadomość, że nawet najbardziej zaawansowana technologicznie baza nie spełni swojej roli, jeśli nie stanie się prawdziwym, emocjonalnie wspierającym domem.

6. Bibliografia

6.1 Wykaz literatury:

1. Abdeen Z. i inni, *Exploring potential building Materials for Planet Mars*, 2023, DOI: 10.1007/978-981-19-0968-9_31
2. Alfred-Wegener-Institut, *Neumayer Station III – Environmental Protection and Waste Management*, AWI Report, 2019, s. 4–6
3. Amirhossein J., Mercedes V., *Exploring the Geographical, Structural Materials, and Construction Techniques on Mars*, referat wygłoszony w ramach The 5th Building and Management International Conference (BIMIC), Madryt, Listopad 2023
4. Anyszka R. i inni, *Beton siarkowy i jego zastosowanie w budownictwie pozaziemskim*, wygłoszone podczas Konferencji Samorządu Studentów Wydziału Chemicznego Politechniki Łódzkiej w Murzasichle, 2016, DOI: 10.13140/RG.2.1.2082.4722
5. Aslaminezhad A., Hidding A., Bier H., Calabrese G., *In-Situ vs. Prefab 3D Printing Considerations for CO2-free Pop-up Architecture*, Lipiec 2024, SPOOL 11(1):71-80, DOI: 10.47982/spool.2024.1.05
6. Bahrami F., *Underground Architecture: History and Modern Applications*, *Journal of Architectural Engineering*, t. 20, nr 4, 2014, s. 55–67
7. Beech M., Seckbach J., Gordon J., *Terraforming Mars*, Salem: Wiley-Scrivener, 2021
8. Berliner A. J., McKay C. P., *The Terraforming Timeline, Planetary Science Vision 2050 Workshop 2017* (LPI Contrib. No. 1989), University of California Berkeley, s. 1
9. Birkenmajer K., *Stacje polarne w badaniach naukowych*, Warszawa: Wydawnictwo PAN, 2017, s. 11–15
10. Biswal M. K., Debadharshini A., Kumar R., *Conceptual Design of Mars Underground Habitation System for Human Settlement on Mars*, 2022, DOI: 10.2514/6.2022-0720
11. Brandenburg J. E., *Evidence for Large Planetary Climate Altering Thermonuclear Explosions on Mars in the Past*, Kepler Aerospace Ltd., Midland, USA, 2023, DOI: 10.4236/ijaa.2023.132007
12. British Antarctic Survey, *Halley VI Research Station: Technical Summary*, BAS Publications, 2020, s. 9–12
13. Broughton H., *Designing for Extreme Environments: The Halley VI Antarctic Research Station*, *The Architectural Review*, nr 231(1383), 2012, s. 74–77
14. Cary F., Damer F., Fagents A., Ruttenberg C., Donachi P., *Could Life Have Started on Mars? Planetary Conditions That Assemble and Destroy Protocells*, 2024, DOI: 10.3390/life14030415
15. Chirakkil K., Deighan J., Chaffin M., Jain S., *EMM EMUS Observations of Hot Oxygen Corona at Mars: Radial Distribution and Temporal Variability*, 2023, DOI: 10.22541/essoar.170224474.48958302/v1
16. Dartnell L. R., *Ionizing radiation and life*, *Astrobiology*, 2011, s. 551–582
17. Doheim R. M., *Humanizing Being on Mars: A Martian Colony*, 2022, DOI: 10.13189/cea.2022.101303
18. Dyrda J., *Architektura psychologicznej przestrzeni życia. Behawioralne podstawy projektowania*, Warszawa: PWN, 2005, s. 9

19. Fogg M. J., *Terraforming: Engineering Planetary Environments*, London: Society of Automotive Engineers, 1995
20. Freitas F. S., *Going Mars, the beginning of printed living machine development of 3D printed structures with in-situ resources*, Master's Thesis, Universidade do Porto, Portugal, 2018
21. Godwin R., *Mars: Historia podboju kosmosu*, Warszawa: Prószyński Media, 2005
22. Grotzinger J. P., Milliken R. E., *Sedimentary geology of Mars*, SEPM, Publikacja nr 102, 2012
23. Hoffman J., Rapp D., Hecht M. H., Hartvigsen J., *Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE) - Preparing for human Mars exploration*, 2022, DOI: 10.1126/sciadv.abp8636
24. Javaherikhah A., López M. V., *Construction on Mars*, referat wygłoszony w ramach 5th International Congress on Engineering, Technology & Innovation, Niemcy, 2023
25. Kozicka J., *Problemy architektoniczne bazy na Marsie jako habitatu w ekstremalnych warunkach*, Politechnika Gdańska, Wydział Architektury, KTPPA, 2008 (Doktorat D/2230)
26. Król-Morkisz K. *Tworzywa acetylowe modyfikowane hybrydowymi układami nieorganiczno-organicznymi w oparciu o hydroksyapatyt*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Katedra Biomateriałów i Kompozytów, Rozprawa Doktorska, 2019
27. Lee Y., *3D Printed Martian Habitats and Challenges to Overcome*, Czerwiec 2022, DOI: 10.37591/rrjosst.v11i1.3344
28. Manal A., Doheim M., George T., *Humanizing Being on Mars: A Martian Colony*, 2022, DOI: 10.13189/cea.2022.101303
29. Mane S., *Greening the Red Planet: Strategies for Cultivating Plants on Mars*, 2023
30. Pelc J. i inni, *Society on Mars based on example of ideacity project*, referat wygłoszony w ramach konferencji Mars Society Convention, Los Angeles, USA, 2019
31. Pelc J., Torchała P., Łabowska M. B., Suścicka B., Popiel M., *Urban planning in space on the example of ideacity project*, referat wygłoszony w ramach konferencji Mars Society Convention, Los Angeles, USA, 2019
32. Pelc J., Torchała P., Łabowska M. B., Suścicka B., Popiel M., *Space industry on the example of ideacity project*, referat wygłoszony w ramach konferencji Mars Society Convention, Los Angeles, USA, 2019
33. Petranek S., *How We'll Live on Mars*, NY: Simon & Schuster, 2015
- Peyrusson F., *Hydrogels Improve Plant Growth in Mars Analog Conditions*, 2021, DOI: 10.3389/fspas.2021.729278
34. Rapp D., *Mars life support systems*, Pasadena, 2006, DOI: 10.1555/mars.2006.0005
- Sheehan W., *The Planet Mars: A History of Observation and Discovery*, University of Arizona Press, Tucson 1996, s. 15-20
35. Spalvins K., Kusnere Z., Raita S., *Sustaining a Mars Colony through Integration of Single-Cell Oil in Biological Life Support Systems*, 2023, DOI: 10.2478/rtuct-2023-0026
36. Stuster J., *Behavioral Issues Associated with Long-Duration Space Expeditions: Review and Analysis of Astronaut Journals*, NASA Technical Report TM-2010-216130, 2010
37. Tocquet R., *Życie na planetach*, Seria Omega, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1965
38. Vance A., *Elon Musk: Tesla, SpaceX, and the Quest for a Fantastic Future*, Ecco, New York, 2015

39. Vidmachenko A., *Dust storms on Mars, Proceedings of V International Scientific and Practical Conference. Topical aspects of modern scientific research*, Tokio: CPN Publishing Group, 2024, s. 295-303
40. Vidmachenko A., *A modern view of former rivers on Mars, Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference. World science priorities*, Wiedeń: World of Conferences, 2024, s. 20–25
41. Vidmachenko A., *Frozen water reservoirs of Mars*, 2024, DOI: 10.5281/zenodo.10651834
42. Vidmachenko A., *The atmosphere of Mars*, referat wygłoszony w ramach konferencji Proceedings of 11 All-Ukrainian Scientific Conference “Astronomy and present day”, Vinnytsia, 12 kwietnia 2023
43. Vidmachenko A., *Dark spots on the surface of Mars may be holes in the ceiling of ice caves*, 2024, DOI: 10.5281/zenodo.10646934
44. Vidmachenko A., *About the possibility of existence of liquid water on the surface of Mars under modern conditions, Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. The modern vector of the development of science*, Philadelphia: World of Conferences, 2024, s. 25–30
45. Weinersmith K., Weinersmith Z., *A City on Mars*, USA: Penguin Press, 2023
46. Wieger Wamelink G. W. i inni, *Can Plants Grow on Mars and the Moon: A Growth Experiment on Mars and Moon Soil Simulants*, 2014, DOI: 10.1371/journal.pone.0103138
47. Widera B., *Podwodne środowisko mieszkalne dla człowieka*, Politechnika Wrocławska, 2009, Licencja: CC BY-SA 4.0, link [dostęp: 10.06.2024]
48. Zubrin R., Wagner R., *Czas Marsa: Dlaczego i w jaki sposób musimy skolonizować Czerwoną Planetę*, Warszawa: Prószyński i S-ka, 1997

6.2. Wykaz Ilustracji

Ilustracja 1. Cele i korzyści kolonizacji Marsa. (Opracowanie własne)

Ilustracja 2. Zarys chronologiczny ważnych misji na Marsa (Opracowanie własne na podstawie „Mars missions: A brief history”, <https://www.space.com/13558-historic-mars-missions.html> [dostęp: 20.07.2024])

Ilustracja 3. Połączenia między zagadnieniami badawczymi z trzech bloków tematycznych: Mars, Człowiek, Architektura, (źródło: Kozicka J., *Problemy architektoniczne bazy na Marsie jako habitatu w ekstremalnych warunkach*, Politechnika Gdańska, Wydział Architektury, KTPPA, 2008, Dokohorat D/2230)

Ilustracja 4. Prototyp habitatu drukowanego za pomocą drukarki 3D (źródło: https://www.researchgate.net/publication/382438250_In-Situ_vs_Prefab_3D_Printing_Considerations_for_CO2-free_Pop-up_Architecture [dostęp: 01.10.2024])

Ilustracja 5. Lokalizacja równiny Isidis Planitia na globie Marsa. (Opracowanie własne na podstawie: <https://spectrum.ieee.org/2001-a-mars-odyssey> [dostęp: 01.04.2025])

Ilustracja 6. Lokalizacja krateru Jezero na obszarze równiny Isidis Planitia. (Opracowanie własne na podstawie: <https://sci.esa.int/web/mars-express/-/the-topography-of-nili-fossae> [dostęp: 01.04.2025])

Ilustracja 7. Krater Jezero i widoczne stare koryto doliny rzecznej po zachodniej stronie krateru oraz oznaczenie lokalizacji projektowanej bazy. (Opracowanie własne na podstawie <https://pol.obozrevatel.com/section-news/news-nasas-mars-rover-has-found-evidence-of-an-ancient-lake-on-the-planet-heres-why-its-a-sensation-30-01-2024.html> [dostęp: 01.04.2025])

Ilustracja 8. Idea ZERO - od zera do samowystarczalności (opracowanie własne)

Ilustracja 9. Projekt zagospodarowania terenu bazy w fazie rozbudowanej do 7 głównych modułów połączonych ze sobą korytarzami podziemnymi (opracowanie własne)

Ilustracja 10. Schemat - fazy kolonizacji i terraformacji (opracowanie własne)

Ilustracja 11. Przekrój bazy z oznaczeniem przyjętych materiałów konstrukcyjnych (opracowanie własne)

Ilustracja 12. Schemat potencjalnego wykorzystania zasobów naturalnych Marsa w procesach budowy i funkcjonowania habitatów (opracowanie własne)

Ilustracja 13. Schemat zamkniętego cyklu materii organicznej (opracowanie własne)

Ilustracja 14. Schemat funkcjonalny pomieszczeń na parterze i pierwszym piętrze (opracowanie własne)

Ilustracja 15. Schemat ewakuacji - kondygnacja +1 (opracowanie własne)

Ilustracja 16. Schemat ewakuacji - kondygnacja 0 (opracowanie własne)

Ilustracja 17. Schemat lokalizacji ringu do biegania (opracowanie własne)

Ilustracja 18. Schemat lokalizacji tarasów i ogrodów (opracowanie własne)

6.3. Źródła internetowe

1. *Space Colonization*, <https://www.nasa.gov/headquarters/library/find/bibliographies/space-colonization/> [dostęp: 01.09.2024]
2. *The future of space colonization – terraforming or space habitats?*, <https://phys.org/news/2017-03-future-space-colonization-terraforming-habitats.html> [dostęp: 10.09.2024]
3. *Krótką historia lotów kosmicznych*, <https://zsobobowa.eu/index.php/tak-dzialamy/fizyka/145-krotka-historia-lotow-kosmicznych> [dostęp: 10.09.2024]
4. *Viking Project*, <https://science.nasa.gov/mission/viking/> [dostęp: 01.05.2024]
5. *Mars Pathfinder*, <https://science.nasa.gov/mission/mars-pathfinder/> [dostęp: 01.09.2024]
6. *Mars Exploration Rovers: Spirit and Opportunity*, <https://science.nasa.gov/mission/mars-exploration-rovers-spirit-and-opportunity/> [dostęp: 01.09.2024]
7. *Mars: Everything you need to know about the Red Planet*, <https://www.space.com/47-mars-the-red-planet-fourth-planet-from-the-sun.html> [dostęp: 01.05.2024]
8. *Generating Energy on Mars: ISRU Part 3*, <https://www.marssociety.ca/2020/09/16/isru-part3/> [dostęp: 10.2024]
9. *Kilopower*, <https://www.nasa.gov/directorates/stmd/tech-demo-missions-program/kilopower-hmqzw/> [dostęp: 01.04.2025]
10. *Zestawienie właściwości technicznych materiałów konstrukcyjnych*, <https://www.kipp.pl/pl/przeglad-surowcow> [dostęp: 01.06.2024]
11. *karta techniczna Stainless Steel 316* <https://atlassteels.com.au/wp-content/uploads/2021/06/Stainless-Steel-316-316L-316H-Grade-Data-Sheet-27-04-21.pdf> [dostęp: 01.06.2024]
12. *karta techniczna PTFE* <https://sol-plast.pl/assets/img/download/PTFE/PTFE-karta.pdf> [dostęp: 01.06.2024]