

Poszerzone streszczenie

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Architecture in Extreme Conditions:

The Problem of Self-Sufficiency in Space Architecture and Its Impact

on Sustainable Development

Architektura w ekstremalnych warunkach:

Problem samowystarczalności w architekturze kosmicznej

i jego wpływ na zrównoważony rozwój

Autor: mgr inż. arch. Wiktoria Dziaduła

Wspólna Szkoła Doktorów, Politechnika Śląska

Dyscyplina Naukowa: Architektura i Urbanistyka

Promotor: Dr hab. inż. arch. Klaudiusz Fross, Prof. PŚ

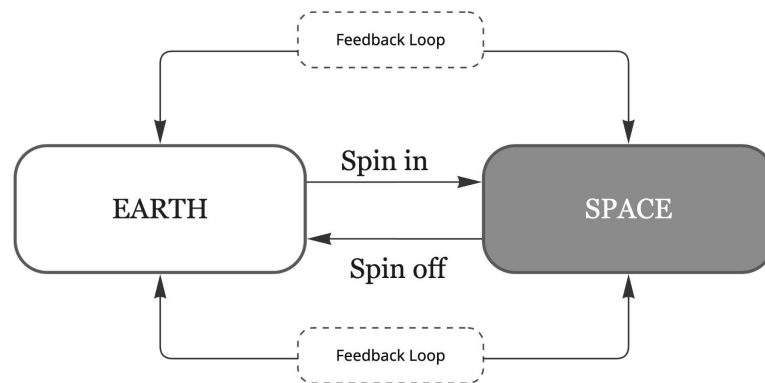
Spis treści

1. Zakres i Cele Pracy	1
1.1. Wprowadzenie	1
1.2. Luka Badawcza	2
1.3. Problem Badawczy i Cele Pracy	4
2. Metodologia Badawcza	5
3. Synteza Badań	7
3.1. Analiza literatury - Teoria Architektury w Środowiskach Ekstremalnych	7
3.2. Doświadczenia Empiryczne	8
3.3. Studium Przypadków	9
4. Wyniki Badań	11
4.1. Czynniki ARF	11
4.2. Skala Samowystarczalności	13
4.3. Interpretacja Skali SSRL w Kontekście Zrównoważonego Rozwoju	14
5. Dyskusja	15
6. Wnioski i Podsumowanie	16
Bibliografia	21

1. Zakres i Cele Pracy

1.1. Wprowadzenie

Punktem wyjścia rozprawy jest obserwacja, że technologie rozwijane na potrzeby misji kosmicznych od dziesięcioleci stanowią istotny impuls dla rozwoju technologicznego i naukowego na Ziemi. Zjawisko to funkcjonuje w literaturze i praktyce pod pojęciem spin-off, rozumianym jako adaptacja rozwiązań kosmicznych do zastosowań ziemskich, oraz spin-in¹, proces odwrotny czyli implementację technologii ziemskich w misjach kosmicznych [rys. 1].



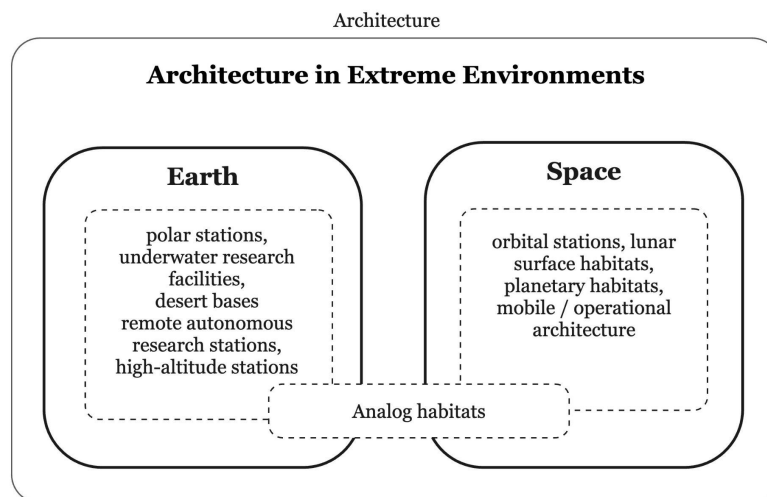
Rys. 1. Zmodyfikowany model transferu wiedzy pomiędzy przestrzenią kosmiczną a Ziemią (opracowanie własne na podstawie: Schlacht, 2016).

Skoro rozwiązania opracowane na potrzeby misji kosmicznych znajdują skuteczne zastosowanie w zróżnicowanych obszarach (materiały, technologie, medycyna, ekonomia), uzasadnione jest założenie, że podobny potencjał transferowy istnieje również w obszarze architektury. W szczególności dotyczy to zagadnień związanych z samowystarczalnością, które w architekturze kosmicznej stanowią warunek funkcjonowania środowiska zamieszkania².

¹ Schlacht, I., Foing, B., Bannova, O., Blok, F., Mangeot, A., Nebergall, K., Ono, A., & Schubert, D. (2016a). *Existing and new proposals of Space analog, off-grid and sustainable habitats with Space applications*. 46th International Conference on Environmental Systems.

² Dziaduła, W., & Fross, K. (2022). *About architecture in extreme conditions. How can space and extreme environment help architects design better?* 73rd International Astronautical Congress (IAC) Proceedings, International Astronautical Federation (IAF), Paris, France

Kontekst kosmiczny oraz pozostałe środowiska ekstremalne (jak środowiska polarne, podwodne, pustynne) mogą być analizowane w ramach jednej, spójnej perspektywy badawczej z uwagi na wspólną charakterystykę tych środowisk cechującą się warunkami ekstremalnymi - odbiegającymi od optymalnych. Te środowiska klasyfikowe są jako ICE (*Isolated, Confined, Extreme*)³ [rys. 2].



Rys. 2. Klasyfikacja środowisk i typów architektury ekstremalnej, obejmującą obiekty funkcjonujące na Ziemi, w przestrzeni kosmicznej oraz habitaty analogowe jako element łączący oba obszary badań (adapted from: Dziadula & Fross, 2022).

Stąd środowiska ekstremalne, o wysokim stopniu ograniczeń, mogą stanowić kontekst rozwoju rozwiązań odpowiadających kluczowym wyzwaniom współczesnej architektury ziemskiej, takim jak racjonalne gospodarowanie ograniczonymi zasobami, optymalizacja zużycia energii oraz zwiększanie odporności środowiska zbudowanego na zmienne i skrajne czynniki zewnętrzne.

1.2. Luka Badawcza

Rzeczywistość architektury kosmicznej jako obszaru badań naukowych nastąpił dopiero na początku XXI wieku, kiedy podczas Międzynarodowego Kongresu Astronautycznego

³ Suedfeld, P., & Palinkas, L. A. (2021). Psychosocial issues in isolated and confined extreme environments. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 126, 413-429. 10.1016/j.neubiorev.2021.03.032

oficjalnie sformułowano definicję i cele tej dziedziny⁴. Od tego momentu architektura kosmiczna zaczęła rozwijać się jako pole wysoce interdyscyplinarne, wywodzące się z inżynierii kosmicznej, a jednocześnie silnie powiązane z psychologią⁵, inżynierią środowiska, materiałoznawstwem i robotyką⁶. Problematyka ta funkcjonuje przede wszystkim w literaturze anglojęzycznej, w obrębie inżynierii kosmicznej, nauk o systemach, psychologii środowiskowej oraz badań nad środowiskami zamkniętymi. W literaturze polskojęzycznej zakres badań pozostaje ograniczony.

Istotnym tłem teoretycznym dla rozważań nad architekturą jako systemem są koncepcje myślenia systemowego oraz postrzegania środowiska zbudowanego jako zamkniętego układu podtrzymywania życia, obecne m.in. w pracach R. Buckminstera Fullera oraz w rozwoju projektowania ekologicznego, ukazującym przejście od architektury obiektu do architektury systemu środowiskowego⁷. Mimo ugruntowania tych idei w literaturze, nie doprowadziły one dotąd do wykształcenia spójnych narzędzi umożliwiających ocenę wpływu doświadczeń architektury kosmicznej i środowisk ekstremalnych na architekturę ziemską. Doświadczenia architektury kosmicznej oraz środowisk ekstremalnych dostarczają unikalnych danych dotyczących funkcjonowania zamkniętych systemów środowiskowych, zarządzania ograniczonymi zasobami oraz długotrwałego oddziaływania przestrzeni na użytkownika - funkcjonowania w sposób samowystarczalny. Zidentyfikowana luka badawcza dotyczy braku narzędzi pozwalających na uporządkowanie i analizę wiedzy wypracowanej w obszarze architektury kosmicznej i ekstremalnej w kontekście jej potencjalnego znaczenia dla architektury ziemskiej, szczególnie w kontekście samowystarczalności.

⁴ Team 11. (2002). *THE MILLENNIUM CHARTER*. spacearchitect.org. <https://spacearchitect.org/wp-content/uploads/2020/06/The-Millennium-Charter.pdf> (dostęp: 04 February 2026).

⁵ Häuplik-Meusburger, S., & Bannova, O. (2016). *Space Architecture Education for Engineers and Architects: Designing and Planning Beyond Earth*. Springer International Publishing.

⁶ Häuplik-Meusburger, S., & Bishop, S. (2021). *Space Habitats and Habitability: Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space*. Springer International Publishing.

⁷ Fuller, R. B. (2008). *Operating Manual for Spaceship Earth* (J. Snyder, Ed.; Original published 1969 ed.). Lars Müller Publishers.

1.3. Problem Badawczy i Cele Pracy

Rozprawa podejmuje problem niedostatecznej identyfikacji kluczowych czynników samowystarczalności architektury oraz ich relacji z architekturą ziemską, a także braku narzędzi umożliwiających ich porównywanie i ocenę w kontekście zróżnicowanych warunków funkcjonowania. W konsekwencji utrudnione jest metodyczne wskazywanie kierunków i potrzeb transferu rozwiązań z architektury kosmicznej do kontekstu ziemskiego, w szczególności w odniesieniu do architektury funkcjonującej w warunkach deficytu zasobów, izolacji systemowej i autonomii operacyjnej.

Celem nadrzędnym pracy jest znalezienie i kategoryzacja rozwiązań zapewniających samowystarczalność w środowiskach ekstremalnych i na ich podstawie opracowanie zintegrowanego modelu oceny i rozwoju architektury autonomicznej, odpornej i niezależnej.

Cele szczegółowe

1. Zbadanie zależności między charakterystyką środowiska ekstremalnego a stopniem integracji systemów samowystarczalnych w architekturze kosmicznej i obiektach funkcjonujących w ekstremalnych warunkach ziemskich.
2. Identyfikacja i analiza rozwiązań technologicznych i projektowych opracowanych w kontekście architektury ekstremalnej.
3. Wskazanie kierunków transferu wiedzy i technologii pomiędzy architekturą kosmiczną/ekstremalną a ziemską w ujęciu zjawisk *spin-off* i *spin-in*.
4. Wyodrębnienie czynników architektonicznej odporności i samowystarczalności (ARF - Architectural Resilience Factors), stanowiących podstawę do analizy rozwiązań stosowanych w środowiskach ekstremalnych.
5. Opracowanie autorskiej skali oceny - Self-Sufficiency Readiness Level (SSRL) opartej na ARF i dostosowanej do wielowymiarowej oceny samowystarczalności architektonicznej.

6. Sformułowanie wytycznych i rekomendacji dla rozwoju architektury samowystarczalnej przyszłości, bazujących na doświadczeniach architektury kosmicznej i wynikach analizy ARF i SSRL.

Tezy pracy:

Teza 1. Architektura kosmiczna, analogowe misje kosmiczne oraz obiekty w środowiskach ekstremalnych stanowią kluczowe źródło wiedzy projektowej, technologicznej i operacyjnej, które może być bezpośrednio wykorzystane w rozwoju architektury samowystarczalnej na Ziemi.

Teza 2. Czynniki odporności i samowystarczalności architektonicznej (ARF) stanowią narzędzie systematycznej oceny stopnia integracji systemów autonomicznych zarówno w architekturze funkcjonującej w warunkach środowisk ekstremalnych, jak i w obiektach projektowanych dla codziennego użytkowania w standardowych warunkach środowiska ziemskiego.

Teza 3. Autorska skala Self-Sufficiency Readiness Level (SSRL) jest skutecznym narzędziem do wielowymiarowej oceny stopnia samowystarczalności obiektów, umożliwiając porównywanie, klasyfikację i identyfikację potencjalnych kierunków rozwoju technologii i strategii projektowych.

Teza 4. Technologie i strategie projektowe rozwijane na potrzeby architektury kosmicznej pełnią istotną funkcję w formułowaniu przyszłych modeli zrównoważonego rozwoju oraz zwiększaniu odporności architektury ziemskiej na przyszłe wyzwania np. zmiany klimatu.

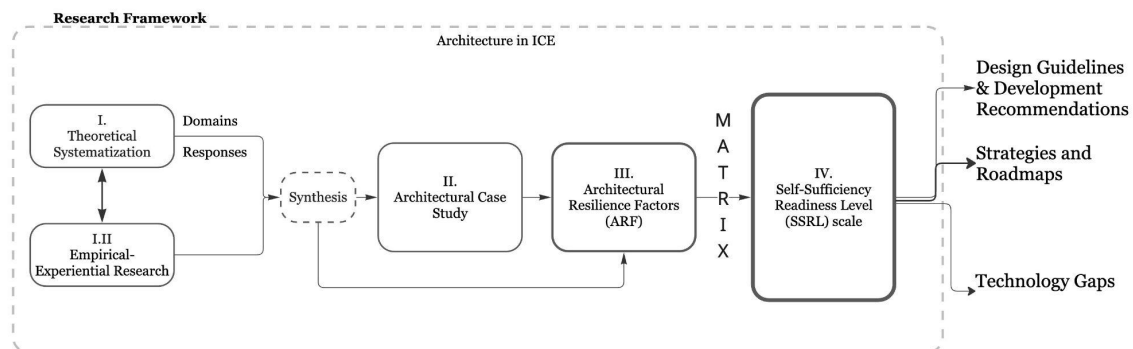
2. Metodologia Badawcza

W rozprawie zastosowano jakościowe podejście badawcze wykorzystujące analizę literatury, studia przypadku oraz syntezę uzyskanych wyników. Obejmuje ono analizę literatury, doświadczenia empiryczne autorki oraz analizę porównawczą architektury funkcjonującej w środowiskach ICE (*Isolated, Confined, Extreme*), zarówno w kontekście środowiska kosmicznego, jak i ekstremalnych środowisk ziemskich [rys. 3].

W pierwszym etapie zdefiniowano ramy pojęciowe i metodologiczne pracy, obejmujące zagadnienia architektury kosmicznej, środowisk ICE (*Isolated, Confined and Extreme*), samowystarczalności. Analiza literatury pozwoliła na sformułowanie podstaw teoretycznych dotyczących projektowania architektury w ekstremach. Doświadczenia empiryczne autorki stanowiły uzupełnienie analiz teoretycznych, umożliwiając odniesienie rozważań projektowych do rzeczywistych ograniczeń środowiskowych i operacyjnych.

W kolejnym etapie przeprowadzono analizę porównawczą (*case study*) obiektów funkcjonujących w różnych środowiskach ekstremalnych, obejmujących architekturę kosmiczną, analogowe habitaty kosmiczne oraz wybrane obiekty ziemskie. Analiza ta miała na celu identyfikację wspólnych strategii projektowych, technologicznych i przestrzennych wpływających na poziom samowystarczalności architektury.

Na podstawie wyników analiz wyodrębniono czynniki architektonicznej odporności i samowystarczalności (Architectural Resilience Factors - ARF), które następnie poddano analizie porównawczej z wykorzystaniem map cieplnych (heatmap). Uzyskane rezultaty stanowiły podstawę do opracowania autorskiej, wielowymiarowej skali oceny samowystarczalności architektury - Self-Sufficiency Readiness Level (SSRL).



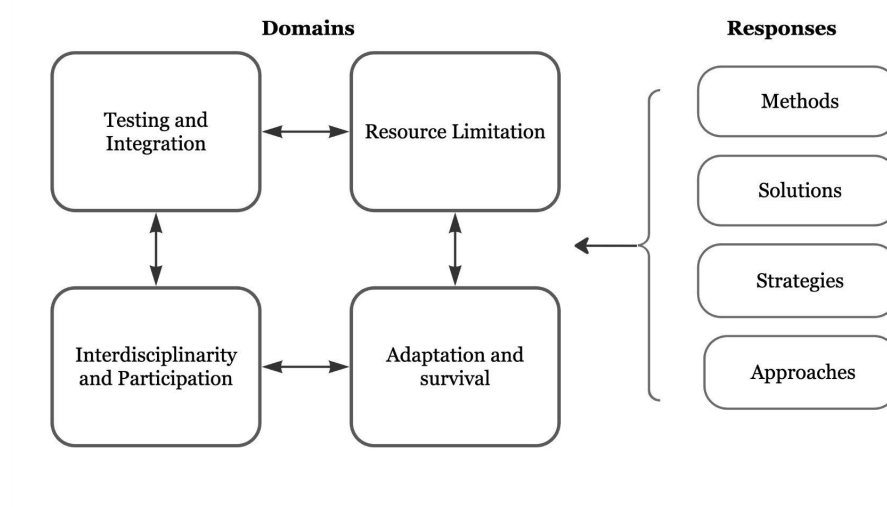
Rys. 3. Logika zastosowanej metody badawczej (opracowanie własne. 2025).

Zastosowanie skali SSRL w analizie wybranych studiów przypadku miało charakter pilotażowy i pozwoliło ocenić jej użyteczność jako narzędzia porównawczego oraz interpretacyjnego w kontekście transferu rozwiązań z architektury kosmicznej i środowisk ekstremalnych do architektury ziemskiej.

3. Synteza Badań

3.1. Analiza literatury - Teoria Architektury w Środowiskach Ekstremalnych

Na podstawie analizy literatury wyodrębniono autorski zestaw kluczowych domen projektowych, które stanowią ramę teorii projektowania w ekstremach i porządkują główne obszary wyzwań architektonicznych. W rozprawie zidentyfikowano cztery podstawowe domeny projektowe, które wzajemnie się przenikają i tworzą dynamiczny układ zależności [rys 4]:



Rys. 4. Zidentyfikowane domeny projektowania w ekstremach (opracowanie własne, 2026).

Interdyscyplinarność i Partycypacja. Projektowanie w kosmosie i środowiskach ekstremalnych wymaga ścisłej współpracy architektury z inżynierią, biologią, medycyną kosmiczną oraz psychologią środowiskową. Architekt pełni rolę integratora systemów technicznych i humanistycznych. W domenie tej podkreślono znaczenie modeli projektowych umożliwiających równoległą pracę wielu dyscyplin oraz włączanie przyszłych użytkowników w proces projektowy, co redukuje ryzyko błędów i sprzyja powstawaniu sprzężeń zwrotnych.

Testowanie i Iteracja. Proces projektowania w ekstremach ma charakter cykliczny i iteracyjny. Rozwiązania architektoniczne są wielokrotnie weryfikowane poprzez symulacje, testy, makiety oraz badania prowadzone w środowiskach analogowych. Archi-

tektura pełni tu rolę narzędzia testowego, umożliwiającego integrację systemów oraz ocenę ich funkcjonowania w warunkach zbliżonych do docelowych.

Deficyt Zasobów. Środowiska kosmiczne i ekstremalne charakteryzują się brakiem dostępu do zasobów oraz ograniczonymi możliwościami ich uzupełniania. Projektowanie architektury w tej domenie koncentruje się na tworzeniu systemów samowystarczalnych, zamkniętych obiegów materii i energii, minimalizacji zużycia materiałów oraz maksymalnym wykorzystaniu lokalnych warunków środowiskowych.

Adaptacja i Przetrwanie. Architektura musi wspierać długoterminowe funkcjonowanie człowieka w warunkach izolacji, zagrożenia i ograniczonego kontaktu ze środowiskiem naturalnym. Domenę tę tworzą zagadnienia związane z habitability, ergonomią, użytkowaniem przestrzeni, percepcją sensoryczną oraz dobrostanem psychicznym. Podkreślono, że elementy wcześniej uznawane za drugorzędne (estetyka, światło, kolor, kontakt z roślinnością) mają kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa i efektywności użytkowników.

Domeny te tworzą układ wzajemnych zależności, ponieważ każda z nich wpływa na pozostałe, generując dynamiczny proces projektowy⁸. Ich obecność i charakterystyka wpływa na podejmowane decyzje projektowe, dobieranie odpowiednich metod, strategii i podejść.

3.2. Doświadczenia Empiryczne

Istotnym uzupełnieniem analiz teoretycznych i studiów literaturowych są doświadczenia własne autorki, zdobyte w ramach działań badawczych, projektowych oraz eksperymentalnych realizowanych w kontekście architektury kosmicznej i środowisk ekstremalnych. Autorka uczestniczyła w symulowanych misjach kosmicznych, projektach badawczych i warsztatach projektowych realizowanych na Wydziale Architektury Politechniki Śląskiej oraz we współpracy z analogowym habitatem kosmicznym Lunares Research Station, obejmujących zagadnienia habitability, organizacji przestrzeni, prywatności, ergonomii oraz dobrostanu psychospołecznego w środowiskach zamkniętych.

⁸ Häuplik-Meusburger, S., & Bannova, O. (2016). *Space Architecture Education for Engineers and Architects: Designing and Planning Beyond Earth*. Springer International Publishing.

Doświadczenia te zostały uzupełnione pracami koncepcyjnymi nad habitatami kosmicznymi i ekstremalnymi (m.in. Lunae Abyssis, APA Misja MARS), udziałem w badaniach nad systemami bioregeneratywnymi (Space Volcanic Algae) oraz uczestnictwem w analogowej misji kosmicznej PANDA⁹. Dodatkowym źródłem obserwacji były studenckie projekty badawcze realizowane w ramach misji SIRIUS (2022), HESTIA I (2023) oraz PEGASUS (2024), prowadzone w odniesieniu do koncepcji projektowania środowiska wspierającego.

Doświadczenia własne autorki stanowiły kontekst empiryczny pracy i wspierały interpretację analiz literaturowych, studiów przypadku oraz syntez prowadzonych w ramach opracowania czynników ARF i skali SSRL.

3.3. Studium Przypadków

Studium przypadków obejmuje wybrane obiekty architektoniczne funkcjonujące w środowiskach kosmicznych, analogowych oraz ziemskich, dobrane ze względu na występowanie ograniczeń środowiskowych, izolacji oraz zwiększonego stopnia autonomii funkcjonowania (*środowiska ICE*). Celem analizy jest wyodrębnienie powtarzalnych zagadnień projektowych oraz strategii ich rozwiązywania, stanowiących podstawę do dalszej syntezy i wniosków przedstawionych w kolejnych częściach pracy.

- Środowiska polarne, reprezentowane przez obiekty Halley VI oraz FMARS, funkcjonujące w warunkach ekstremalnych klimatycznie i logistycznie.
- Środowiska pustynne, w tym analogowe habitaty marsjańskie MDRS - Mars Desert Research Station oraz D-MARS, wykorzystywane do badań nad izolacją i autonomią funkcjonowania.
- Środowiska podwodne, analizowane na przykładzie projektów Tektite oraz Aquarius Reef Base, umożliwiających badanie długotrwałego przebywania człowieka w zamkniętym systemie środowiskowym.

⁹ Fross, K., Orzechowski, L., Dziaduła, W., & Mintus, A. (2022). *The Panda Space Program in the Lunares habitat - research on needs and behavior during isolation*. w B. Komar, K. Fross, & B. Urbanowicz (Redaktorzy), *Multifaceted research in architecture*. Vol. 2, Architecture against the challenges of the future – smart architecture (s. 22-33). Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 22-33.

- Środowisko mikrogravitacji (LEO-Low Earth Orbit), obejmujące analizę stacji Skylab oraz International Space Station (ISS) jako rzeczywistych habitatów orbitalnych.
- Środowisko księżycowe, analizowanemu na przykładzie projektów koncepcyjnych Moon Village,
- Środowisko marsjańskie, reprezentowanemu przez Martian Habitat (NASA 3D Printed Habitat Challenge) - projekt koncepcyjny bazy marsjańskiej.

Każdy z analizowanych obiektów stanowi odpowiedź na odmienny zestaw uwarunkowań środowiskowych, technologicznych i operacyjnych, wynikających zarówno z charakteru otoczenia, jak i z przyjętych celów oraz czasu trwania misji.

Zestawienie przypadków potwierdza, że nie istnieje jedno uniwersalne rozwiązanie architektoniczne ani technologiczne zapewniające pełną samowystarczalność, jest to raczej zbiór zdolności architektury do przeciwdziałania oddziaływaniu środowiska ekstremalnego. Żaden z badanych obiektów nie osiąga stuprocentowej autonomii środowiskowej, technologicznej i logistycznej jednocześnie. Funkcjonowanie habitatów - nawet w najbardziej ekstremalnych warunkach kosmicznych - opiera się na częściowych pętlach zamkniętych (closed-loop), które ograniczają zależność od dostaw zewnętrznych, lecz nie eliminują jej całkowicie, szczególnie w odniesieniu do obiegu wody, powietrza i energii. Samowystarczalność nie jawi się więc jako cel absolutny, lecz jako zmienna stopniowalna, zależna od konfiguracji czynników projektowych, operacyjnych i środowiskowych. Jednocześnie badane realizacje potwierdzają istnienie powtarzalnych mechanizmów projektowych niezależnych od skali i stopnia realizacji obiektu. Architektura środowisk ekstremalnych funkcjonuje jako zintegrowany system bezpieczeństwa, łączący rozwiązania przestrzenne, technologiczne i użytkowe w celu ochrony życia oraz zapewnienia stabilnych warunków funkcjonowania człowieka. Kluczowe znaczenie mają tu integracja systemów technicznych z organizacją przestrzeni, strategie obiegu zamkniętego zasobów i wykorzystania zasobów lokalnych, a także modularność i elastyczność umożliwiające adaptację do zmiennych warunków operacyjnych.

Analiza ujawniła również istotną rolę zagadnień *habitability*. Organizacja przestrzeni, podział funkcjonalny, poziom prywatności oraz strategie wspierające dobrostan psychiczny użytkowników mają bezpośredni wpływ na długotrwałe i bezpieczne funkcjonowanie habitatów w warunkach izolacji.

W oparciu o przeprowadzone analizy przyjęto założenie, że dla potrzeb porównań i budowy uniwersalnej skali samowystarczalności kluczowe jest odejście od opisu pojedynczych technologii na rzecz identyfikacji nadrzędnych strategii i zdolności architektury wynikających z głównych wyzwań projektowania w ekstremach. Zidentyfikowane w analizie *Design Challenges* oraz *Design Factors* zostały poddane procesowi syntezy i uogólnienia, prowadzącemu do wyodrębnienia cech opisujących zdolność architektury do reagowania na zmienne warunki środowiskowe, ograniczenia zasobowe oraz potrzeby użytkowników.

4. Wyniki Badań

4.1. Czynniki ARF

Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowano zestaw Architectural Resilience Factors (ARF), stanowiących narzędzie do oceny zdolności architektury do funkcjonowania w sposób samowystarczalny. Czynniki ARF opisują kluczowe właściwości środowiska zbudowanego, które warunkują jego odporność, bezpieczeństwo, adaptacyjność. Warto podkreślić, że zaproponowane Architectural Resilience Factors (ARF) nie odnoszą się do konkretnych rozwiązań technicznych ani technologii, lecz koncentrują się na celach i zdolnościach architektury. Każdy z wyróżnionych czynników ARF obejmuje zestaw sub-czynników (sub-ARF), które uszczegóławiają jego zakres i umożliwiają operacyjną analizę architektury w różnych kontekstach środowiskowych. Sposób realizacji poszczególnych czynników ARF może być różny i zależy od indywidualnych uwarunkowań projektowych, takich jak charakter środowiska, skala obiektu, funkcja, czas użytkowania czy dostępność zasobów. ARF stanowią zatem ramę analityczną umożliwiającą ocenę architektury niezależnie od zastosowanych środków technicznych.

W rezultacie wyodrębniono 7 czynników ARF obejmujących kategorie główne zdolności architektury:

ARF 1. *Autonomia zasobowa i metabolizm.* Czynniki dotyczą zdolności architektury do samodzielnego pozyskiwania, przetwarzania, magazynowania i recykulacji podstawowych zasobów niezbędnych do podtrzymania życia i funkcjonowania obiektu w warunkach izolacji.

ARF 2. *Stabilność atmosfery i środowiska wewnętrznego.* Czynniki dotyczą zdolności architektury do utrzymania warunków fizycznych umożliwiających bezpieczne i długotrwałe przebywanie człowieka w zamkniętym środowisku

ARF 3. *Odporność systemowa i bezpieczeństwo.* Odnosi się do zdolności architektury do utrzymania ciągłości funkcjonowania w warunkach awarii, zakłóceń i sytuacji nieprzewidzianych, bez natychmiastowej utraty bezpieczeństwa użytkowników

ARF 4. *Adaptacyjność strukturalna, konstrukcyjna i materiałowa.* Zdolności struktury architektonicznej do dostosowywania swojej formy, konstrukcji i użytych materiałów do zmiennych warunków środowiskowych, logistycznych oraz operacyjnych

ARF 5. *Organizacja przestrzeni i funkcji.* Zdolność zapewnienia czytelnego, logicznego i elastycznego układu przestrzennego, który wspiera efektywne funkcjonowanie operacyjne

ARF 6. *Dobrostan psychospołeczny.* Zdolność do wspierania długoterminowej stabilności psychicznej i społecznej użytkowników.

ARF 7. *Autonomia operacyjna.* Zdolności architektury do samodzielnego funkcjonowania operacyjnego w warunkach ograniczonego lub opóźnionego wsparcia zewnętrznego.

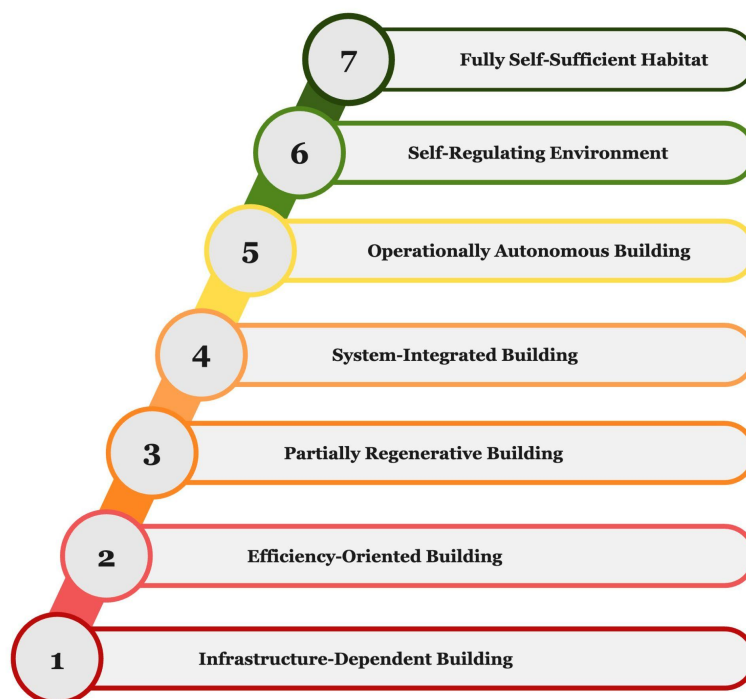
Przeprowadzono analizę porównawczą sub-ARF z wykorzystaniem map cieplnych (heatmap), umożliwiającą przejście od opisu jakościowego do hierarchizacji ich wpływu na

samowystarczalność architektury. Analiza oparta została na trzech kryteriach odpowiadających kolejnym poziomom stabilności środowiska zbudowanego: przetrwaniu, operacyjności oraz dobrostanie. Wyniki analizy ujawniły punkty przejścia w znaczeniu poszczególnych czynników, pokazując, że wraz z rozwojem środowiska zmienia się dominujący zestaw wymagań - od czynników krytycznych dla przetrwania, przez stabilność operacyjną, aż po aspekty związane z dobrostanem użytkowników. Analiza ta pozwoliła opisać samowystarczalność jako proces stopniowy, a nie stan docelowy, i stanowiła podstawę do opracowania skali Self-Sufficiency Readiness Level (SSRL).

4.2. Skala Samowystarczalności

Na potrzeby pracy przyjęto autorską definicję samowystarczalności architektury, rozumianej jako zdolność środowiska zbudowanego do długotrwałego funkcjonowania z udziałem człowieka, opartą na integracji rozwiązań technologicznych, przestrzennych i psychospołecznych, umożliwiających stabilne relacje pomiędzy człowiekiem, wnętrzem obiektu i środowiskiem zewnętrznym przy ograniczonym wsparciu zewnętrznym. Na podstawie wyników analizy czynników ARF opracowano autorską Skalę Self-Sufficiency Readiness Level (SSRL) [rys. 5]. Skala ma charakter opisowy i jakościowy i definiuje samowystarczalność jako proces stopniowy, a nie stan docelowy. Jej konstrukcja odzwierciedla nieciągły charakter przechodzenia pomiędzy kolejnymi stanami funkcjonowania obiektu oraz zmieniające się relacje architektury z zasobami, środowiskiem i użytkownikiem.

Kolejne poziomy skali SSRL opisują rosnący stopień integracji procesów środowiskowych, technicznych i użytkowych. Na niższych poziomach architektura funkcjonuje głównie jako odbiorca zasobów i stabilizator podstawowych warunków użytkowania. Poziomy pośrednie obejmują częściową regenerację, lokalną regulację środowiska oraz integrację systemów. Na najwyższych poziomach architektura działa jako zintegrowany, adaptacyjny i samoregulujący system, zdolny do długotrwałego funkcjonowania w warunkach izolacji, przy jednoczesnym wspieraniu dobrostanu psychospołecznego użytkowników.



Rys. 5. Skala SSRL przedstawia jakościowe progi samowystarczalności architektonicznej - od budynków zależnych od infrastruktury zewnętrznej po w pełni samowystarczalne habitaty (opracowanie własne, 2025).

Istotnym założeniem skali SSRL jest to nie wskazuje uniwersalnego, „docelowego” poziomu samowystarczalności. Stanowi narzędzie analityczne, projektowe i scenariuszowe, umożliwiające porównywanie obiektów o różnej skali, funkcji i lokalizacji, a także ocenę stopnia transferu rozwiązań wypracowanych w architekturze kosmicznej do zastosowań ziemskich. Podstawową wartością skali jest identyfikacja progów jakościowych pomiędzy kolejnymi etapami dojrzałości architektury, a nie maksymalizacja pojedynczych parametrów technicznych. Skala SSRL została zweryfikowana poprzez pilotażową, jakościową analizę porównawczą wybranych obiektów architektonicznych o odmiennych kontekstach funkcjonowania.

4.3. Interpretacja Skali SSRL w Kontekście Zrównoważonego Rozwoju

Skala Self-Sufficiency Readiness Level (SSRL) wpisuje się w nurt podejść do zrównoważonego rozwoju, umożliwiając ocenę architektury poprzez sposób funkcjonowania środowiska zbudowanego. W tym ujęciu zrównoważony rozwój rozumiany jest nie tylko jako redukcja negatywnego wpływu na środowisko, lecz przede wszystkim jako

zdolność architektury do długotrwałego i stabilnego funkcjonowania w warunkach zmiennych ograniczeń zasobowych, środowiskowych i społecznych. Skala SSRL pozwala powiązać pojęcie zrównoważenia z poziomem autonomii, odporności i integracji systemowej, wykraczając poza binarny podział na rozwiązania „zrównoważone” i „niezrównoważone”.

Zastosowanie skali umożliwia analizę wpływu architektury na trzy filary zrównoważonego rozwoju - środowiskowy, ekonomiczny i społeczny - w sposób stopniowy i kontekstowy. Wraz ze wzrostem poziomu SSRL architektura przechodzi od ograniczania negatywnych oddziaływań, przez częściową regenerację i stabilizację środowiska, aż do funkcjonowania jako element lokalnego ekosystemu; równolegle rośnie jej zdolność do amortyzowania kosztów, ograniczania ryzyka operacyjnego oraz wspierania dobrostanu psychospołecznego użytkowników. Skala SSRL stanowi tym samym narzędzie analityczne uzupełniające klasyczne ujęcia zrównoważonego rozwoju, pozwalające na uporządkowany transfer rozwiązań wypracowanych w architekturze kosmicznej do architektury ziemskiej, ze szczególnym uwzględnieniem odporności systemowej, adaptacyjności i długoterminowej jakości środowiska życia.

5. Dyskusja

Opracowana skala Self-Sufficiency Readiness Level (SSRL) została zdefiniowana jako narzędzie odnoszące się do poziomu pojedynczego obiektu architektonicznego, co umożliwiło precyzyjną analizę relacji pomiędzy architekturą, zasobami i użytkownikiem. Jednocześnie stanowi to jedno z głównych ograniczeń skali, ponieważ architektura funkcjonuje jako element szerszych systemów przestrzennych, infrastrukturalnych i społecznych. Zastosowanie skali SSRL do poziomów wyższych niż budynek wymagałoby jej istotnej modyfikacji oraz uwzględnienia czynników charakterystycznych dla skali urbanistycznej, takich jak sieci infrastrukturalne, logistyka zasobów czy mechanizmy zarządzania zbiorowego.

Zastosowanie skali w niniejszej pracy miało charakter pilotażowy i opierało się na jakościowej analizie ograniczonego zbioru studiów przypadku, co wyklucza jej walidację statystyczną. Skala została wykorzystana jako rama interpretacyjna, adekwatna do eks-

ploracyjnego charakteru badań nad architekturą środowisk ekstremalnych. Jej dalszy rozwój mógłby obejmować testowanie w szerszym spektrum typologii oraz na różnych etapach cyklu życia obiektu, co jednak wykracza poza zakres niniejszej rozprawy.

Jednym z kluczowych wniosków wynikających z zastosowania skali SSRL jest stwierdzenie, że nie każdy budynek musi ani powinien dążyć do wysokich poziomów samowystarczalności. W wielu kontekstach, zwłaszcza miejskich, optymalne mogą być poziomy pośrednie, zwiększające odporność i efektywność obiektu przy jednoczesnym wykorzystaniu istniejących systemów infrastrukturalnych. Skala SSRL umożliwia świadome dopasowanie poziomu samowystarczalności do funkcji, kontekstu i przewidywanego czasu użytkowania obiektu.

Analiza wykazała również, że wraz ze wzrostem poziomu autonomii rośnie złożoność systemów technicznych i organizacyjnych, a także koszty inwestycyjne i wymagania eksploatacyjne. Z tego względu najwyższe poziomy skali SSRL są realistyczne przede wszystkim w środowiskach ekstremalnych, obiektach badawczych lub infrastrukturze krytycznej, gdzie autonomia stanowi warunek bezpieczeństwa i ciągłości funkcjonowania.

Choć skala SSRL została zdefiniowana na poziomie budynku, jej wewnętrzna logika ujawnia stopniowe przechodzenie od postrzegania architektury jako obiektu do rozumienia jej jako elementu systemu, a następnie jako środowiska życia. W tym sensie skala może stanowić punkt wyjścia do dalszych badań nad samowystarczalnością w większych strukturach przestrzennych, zarówno w kontekście architektury ziemskiej, jak i przyszłych środowisk kosmicznych.

6. Wnioski i Podsumowanie

Wnioski sformułowane w pracy odnoszą się bezpośrednio do postawionego problemu badawczego i celów rozprawy, a także do zależności ujawnionych w toku analizy architektury kosmicznej, środowisk ekstremalnych typu ICE oraz studiów przypadku. Oprócz wniosków dotyczących samowystarczalności architektury i możliwości jej oceny za pomocą czynników ARF oraz skali SSRL, praca pozwoliła na sformułowanie szerszych

refleksji dotyczących roli architektury, relacji obiektu z infrastrukturą oraz zmieniającej się pozycji architekta w obliczu przyszłych wyzwań.

Samowystarczalność architektury jako strategia odporności i bezpieczeństwa

Współczesna architektura funkcjonuje głównie w modelu zależnym od zewnętrznych systemów infrastrukturalnych, jednak aktualne prognozy wskazują, że bezpieczeństwo zasobowe nie jest stanem trwałym. Zgodnie z raportami Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu, nasilające się zjawiska ekstremalne, zaburzenia dostępu do wody i energii oraz presja migracyjna będą coraz silniej wpływać na funkcjonowanie środowiska zbudowanego. Samowystarczalność architektury stanowi więc strategię przygotowania na warunki kryzysowe, takie jak katastrofy naturalne, przerwy infrastrukturalne. Jednakowoż szczególne znaczenie ma ona w obiektach wymagających ciągłości działania, m.in. w schronach cywilnych, obiektach ochrony ludności i infrastrukturze krytycznej w których zdolność obiektów do czasowego, autonomicznego funkcjonowania decyduje o życiu użytkowników. Analiza prowadzona w pracy pozwala wyodrębnić pojęcie *architektury bezpieczeństwa*, w której samowystarczalność jest warunkiem zapewnienia ochrony i ciągłości funkcjonowania.

Skalowanie potrzeb jako warunek racjonalnej samowystarczalności

Praca prowadzi do wniosku, że samowystarczalność architektury powinna być rozumiana jako odpowiedź stopniowalna i scenariuszowa. Różne konteksty funkcjonowania - od stabilnych środowisk miejskich po obszary kryzysowe i ekstremalne - wymagają odmiennych poziomów autonomii systemowej. Skala SSRL umożliwi świadome dopasowanie poziomu samowystarczalności do skali zagrożeń i potrzeb, przeciwdziałając zarówno nadmiernej technologizacji architektury, jak i jej niedostosowaniu do przyszłych wyzwań.

Architektura jako system adaptacyjny

Wnioski płynące z analizy ARF i SSRL pokazują, że samowystarczalność architektury nie może być zredukowana do zbioru rozwiązań technicznych. W środowiskach ekstremalnych architektura funkcjonuje jako system adaptacyjny, regulujący relacje między człowiekiem a środowiskiem poprzez organizację przestrzeni, zarządzanie zasobami oraz stabilizację warunków psychospołecznych. Czynniki takie jak czytelność prze-

strzeni, kontrola prywatności, światło i bodźce sensoryczne okazują się kluczowe dla długotrwałego funkcjonowania systemu i dobrostanu użytkowników.

Znaczenie dla teorii architektury

Istotnym wkładem pracy jest opracowanie skali SSRL jako narzędzia konceptualnego porządkującego zagadnienie samowystarczalności poprzez identyfikację progów jakościowych, a nie próbę jego ilościowego uproszczenia. Skala umożliwia analizy porównawcze obiektów o różnej funkcji i skali oraz stanowi punkt wyjścia do dalszych badań nad samowystarczalnością w ujęciu ponadbudynkowym, wpisując się w rozwój jakościowych metod badawczych w architekturze i urbanistyce.

Znaczenie dla praktyki projektowej

Badania potwierdzają, że rozwiązania wypracowane w architekturze kosmicznej mogą być selektywnie implementowane w architekturze ziemskiej jako elementy zwiększające odporność i efektywność środowiska zbudowanego, bez konieczności osiągnięcia pełnej autonomii. Dotyczy to m.in. technologii addytywnych, systemów obiegu zamkniętego wody i energii, lokalnej produkcji żywności, monitoringu zasobów oraz rozwiązań przestrzennych wspierających dobrostan użytkowników. Skala SSRL okazuje się szczególnie użyteczna w projektowaniu obiektów infrastruktury krytycznej i architektury przygotowanej na scenariusze kryzysowe.

Nowa rola architekta

Analiza środowisk ekstremalnych wskazuje na konieczność redefinicji roli architekta jako projektanta zintegrowanych środowisk życia, a nie wyłącznie form przestrzennych. Projektowanie w warunkach ograniczonych zasobów wymaga myślenia systemowego, integracji procesów środowiskowych, technologicznych i psychospołecznych oraz świadomego zarządzania ryzykiem. Doświadczenia architektury kosmicznej pokazują, że architektura staje się środowiskiem podtrzymującym życie, a projektowanie samowystarczalnych struktur oznacza projektowanie relacji między formą, funkcją i metabolizmem systemu.

Podsumowanie i wkład własny

W pracy wykazano, że poziom samowystarczalności architektury w środowiskach ekstremalnych determinowany jest przez złożoną konfigurację czynników środowiskowych, technologicznych i społecznych, a nie przez pojedyncze rozwiązania projektowe. Kluczowe znaczenie mają stopień ekstremalności środowiska zewnętrznego i wewnętrznego, dostępność oraz możliwość lokalnego pozyskiwania i odzysku zasobów, poziom autonomii i serwisowalności systemów technicznych, a także czynniki ludzkie, w tym liczba użytkowników, czas i cele użytkowania oraz habitability rozumiana jako zdolność środowiska do długoterminowego podtrzymania funkcjonowania człowieka w izolacji.

Analiza architektury kosmicznej, środowisk ICE oraz studiów przypadku potwierdziła, że doświadczenia z misji kosmicznych i analogowych stanowią istotne źródło wiedzy możliwej do transferu do architektury ziemskiej. Transfer ten obejmuje strategie projektowe, technologie oraz sposoby organizacji przestrzeni zwiększające odporność i zdolność funkcjonowania środowiska zbudowanego w warunkach ograniczonych zasobów i podwyższonego ryzyka.

Głównym wkładem własnym pracy jest identyfikacja czynników Architectural Resilience Factors (ARF) oraz opracowanie autorskiej skali Self-Sufficiency Readiness Level (SSRL), umożliwiającej wielowymiarową, jakościową ocenę samowystarczalności architektury w ujęciu środowiskowym, technologicznym i psychospołecznym. W odniesieniu do skali opracowano autorską kompleksową definicję samowystarczalności łączącą rozwiązania technologiczne, przestrzenne i społeczne.

Wykazano, że samowystarczalność architektury powinna być traktowana jako cecha stopniowalna i scenariuszowa, dostosowana do skali ryzyka, czasu użytkowania i kontekstu, a nie jako cel absolutny. Praca wnosi wkład do dyscypliny Architektura i Urbanistyka, w postaci narzędzia analitycznego do badań nad architekturą odporną oraz wskazując kierunki transferu wiedzy z architektury kosmicznej do zrównoważonego rozwoju architektury ziemskiej.

Bibliografia

- Dziadła, W., & Fross, K. (2022). *About architecture in extreme conditions. How can space and extreme environment help architects design better? 73rd International Astronautical Congress (IAC) Proceedings*, International Astronautical Federation (IAF), Paris, France.
- Fuller, R. B. (2008). *Operating Manual for Spaceship Earth* (J. Snyder, Ed.; Original published 1969 ed.). Lars Müller Publishers.
- Fross, K., Orzechowski, L., Dziadła, W., & Mintus, A. (2022). *The Panda Space Program in the LunAres habitat - research on needs and behavior during isolation*. w B. Komar, K. Fross, & B. Urbanowicz (Redaktorzy), *Multifaceted research in architecture*. Vol. 2, Architecture against the challenges of the future – smart architecture (s. 22-33). Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 22-33.
- Häuplik-Meusburger, S., & Bannova, O. (2016). *Space Architecture Education for Engineers and Architects: Designing and Planning Beyond Earth*. Springer International Publishing.
- Häuplik-Meusburger, S., & Bishop, S. (2021). *Space Habitats and Habitability: Designing for Isolated and Confined Environments on Earth and in Space*. Springer International Publishing.
- NASA - Spin-Off. (n.d.). *NASA Spinoff*. <https://spinoff.nasa.gov/> (dostęp: 04 February 2026).
- Schlacht, I., Foing, B., Bannova, O., Blok, F., Mangeot, A., Nebergall, K., Ono, A., & Schubert, D. (2016a). *Existing and new proposals of Space analog, off-grid and sustainable habitats with Space applications. 46th International Conference on Environmental Systems*.
- Suedfeld, P., & Palinkas, L. A. (2021). *Psychosocial issues in isolated and confined extreme environments. Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 126, 413-429. 10.1016/j.neubiorev.2021.03.032.
- Team 11. (2002). *THE MILLENNIUM CHARTER*. spacearchitect.org. <https://spacearchitect.org/wp-content/uploads/2020/06/The-Millennium-Charter.pdf> (dostęp: 04 February 2026).