

Modułowy układ do zautomatyzowanego wznoszenia schronów przydomowych o dowolnej powierzchni

Machi Zawidzki^{1,2}, Wojciech Kiński^{1,3}, Jacek Katzer^{3,4}, Janusz Kobaka³, Czesław Suchocki⁵, Paweł Grzybowski⁶

¹Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Warszawa

²Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

³Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

⁴VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Czech Republic

⁵Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

⁶Akademia Nauk Stosowanych im. Stanisława Staszica w Pile

Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcję Układu Ekstremalnie Modularnego Shelter-Z, opartego na jednym rodzaju przestrzennego betonowego prefabrykatu ochronnego. Odpowiednie sposoby łączenia identycznych modułów umożliwiają tworzenie kopuł oraz wydłużonych sklepień kolebkowych zakończonych półkopułami, a tym samym schronów przydomowych o różnej powierzchni. Zewnętrzną warstwę prefabrykatu przewidziano jako lekki fibrobeton pochłaniający energię pocisków i odłamków oraz ograniczający ryzyko ich rykoszetowania. Zastosowanie jednego rodzaju powtarzalnego modułu upraszcza produkcję i logistykę, a przede wszystkim umożliwia automatyzację i robotyzację procesu montażu schronu.

Słowa kluczowe: prefabrykat ochronny, schron przydomowy, automatyzacja montażu, robotyzacja budownictwa, Układ Ekstremalnie Modularny

1. Wprowadzenie

Jednym z głównych powodów rozwoju automatyzacji i robotyzacji procesów budowlanych jest zwiększenie bezpieczeństwa ludzi, obok poprawy wydajności, precyzji, powtarzalności i jakości wykonania, skrócenia czasu realizacji oraz ograniczenia kosztów [1]. Szczególne znaczenie technologie te mają w przypadku prac ciężkich, niebezpiecznych oraz prowadzonych w środowiskach trudno dostępnych i dynamicznie zmieniających się. Robotykę stosuje się również w zarządzaniu kryzysowym, reagowaniu na katastrofy i działaniach prowadzonych w warunkach zagrożenia [2].

Szczególnie istotnym obszarem zastosowania automatyzacji w budownictwie jest wznoszenie infrastruktury służącej ochronie ludności. Automatyzację stosuje się w tym przypadku w celu ograniczenia udziału ludzi w ciężkich i niebezpiecznych pracach, skrócenia czasu realizacji oraz zmniejszenia zapotrzebowania na wykwalifikowaną siłę roboczą. Jest to szczególnie ważne w sytuacjach wymagających szybkiego zwiększenia dostępności obiektów ochronnych.

Warunkiem skutecznej automatyzacji jest odpowiednie zaprojektowanie zarówno konstrukcji, jak i procesu jej montażu. Z tego względu szczególnie przydatne są systemy prefabrykowane i modularne, bazujące na ograniczonej liczbie standaryzowanych elementów. Powtarzalność ich geometrii upraszcza identyfikację, chwytanie, transport, pozycjonowanie oraz kontrolę poprawności montażu. Możliwość automatycznego montażu prefabrykatów z wykorzystaniem robotów, systemów wizyjnych i modeli cyfrowych została wykazana dla różnych rodzajów elementów budowlanych [3]. Modularność nie jest zatem wyłącznie sposobem uproszczenia produkcji, lecz może również stanowić podstawę automatyzacji procesu wznoszenia obiektu.

Zmieniająca się sytuacja geopolityczna oraz rosnące znaczenie ochrony ludności zwiększają zapotrzebowanie na budowle ochronne, w tym niewielkie obiekty przeznaczone dla użytkowników domów jednorodzinnych. Ustawa z dnia 5 grudnia 2024 r. o ochronie ludności i obronie cywilnej określa zasady funkcjonowania obiektów zbiorowej ochrony oraz definiuje schron jako obiekt o konstrukcji zamkniętej i hermetycznej, wyposażony w urządzenia filtrowentylacyjne lub pochłaniacze regeneracyjne [A1]. Obowiązujące przepisy Prawa budowlanego umożliwiają realizację na podstawie zgłoszenia wolno stojących przydomowych budowli ochronnych o powierzchni użytkowej do 35 m², przeznaczonych do ochrony użytkowników budynku mieszkalnego jednorodzinnego [A2]. Szczegółowe wymagania dotyczące warunków technicznych, użytkowania i usytuowania budowli ochronnych określono w odrębnym rozporządzeniu [A3].

Znaczna część istniejących domów jednorodzinnych nie ma piwnic, które można zaadaptować na potrzeby schronu.

Autor korespondujący:

Machi Zawidzki, zawidzki@ippt.pan.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 25.07.2026 r., przyjęty do druku 08.09.2026 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

W innych przypadkach adaptację ograniczają konstrukcja budynku, brak możliwości zapewnienia wyjścia awaryjnego, trudności z uzyskaniem hermetyczności lub niewystarczająca odporność istniejących przegród. Uzasadnia to rozwój niezależnych przydomowych budowli ochronnych, wznoszonych w bezpośrednim sąsiedztwie istniejących budynków.

Budowa takiego obiektu na zagospodarowanej działce może napotkać ograniczenia wynikające z dostępnej przestrzeni, warunków gruntowych, ukształtowania terenu oraz istniejącej zabudowy. Schrony częściowo zagłębione w gruncie mogą być łatwiejsze i tańsze w realizacji niż obiekty całkowicie podziemne. Możliwość ich szerszego stosowania zależy jednak od ograniczenia kosztów produkcji, transportu i montażu oraz od dostosowania geometrii obiektu do lokalnych warunków. Wymagania te sprzyjają stosowaniu przestrzennych prefabrykatów ochronnych, wytwarzanych seryjnie i zestawianych na miejscu w obiekty o wymaganej wielkości i kształcie.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa istotna jest nie tylko nośność całej konstrukcji, lecz również zachowanie jej zewnętrznej powierzchni pod wpływem odłamków i pocisków małokalibrowych. Przydomowy schron nie będzie zazwyczaj celem bezpośredniego ataku, może być jednak narażony na oddziaływanie odłamków, zbłąkanych pocisków oraz fragmentów gruzu. Ich odbicie od twardej powierzchni konstrukcji może stanowić dodatkowe zagrożenie dla osób i mienia znajdujących się na zewnątrz. Zewnętrzna warstwa prefabrykatu może zatem pełnić dodatkową funkcję ochronną przez pochłanianie części energii uderzenia oraz ograniczanie możliwości rykoszetowania i odpryskiwania materiału [4].

W literaturze opisano zarówno monolityczne, jak i prefabrykowane oraz modułarne konstrukcje przeznaczone do ochrony ludności. Karkhut [5] analizował szybko montowane prefabrykowane schrony żelbetowe, obejmując badania pełnoekranowego fragmentu konstrukcji oraz ocenę jego nośności. Tolok i współautorzy [6] badali zachowanie naziemnych modułarnych schronów żelbetowych pod wpływem obciążenia wybuchowego. Badane są również płytko zagłębione konstrukcje ochronne składane z prefabrykowanych betonowych elementów łukowych i poddawane obciążeniom wybuchowym [7]. Rozwiązania te potwierdzają przydatność prefabrykacji i modularności do szybkiego wznoszenia konstrukcji ochronnych, jednak modularność odnosi się w nich przede wszystkim do zestawiania powtarzalnych segmentów lub określonego zestawu różnych prefabrykatów.

Prefabrykowane schrony są również stosowane w praktyce. Przykładem jest rozwijany w Finlandii system prefabrykowanych schronów żelbetowych EVAshelter, którego założeniem jest skrócenie procesu realizacji przez seryjną produkcję elementów i ich szybki montaż na miejscu budowy [A4]. Rozwiązania tego rodzaju wskazują na możliwość znacznego skrócenia czasu wznoszenia budowli ochronnych dzięki zastosowaniu prefabrykacji. Ich geometria i technologia montażu pozostają jednak odmienne od koncepcji przedstawionej w niniejszej pracy.

Równolegle rozwijane są materiały i wielowarstwowe układy osłonowe przeznaczone do ochrony przed oddziaływaniem wybuchów, pocisków i odłamków, w których poszczególne warstwy pełnią odmienne funkcje konstrukcyjne i ochronne [8]. Wcześniejsze badania autorów wykazały możliwość zastosowania lekkiego fibrobetonu jako warstwy ograniczającej rykoszetowanie i odpryskiwanie materiału w warunkach opisanych w [4]. Wyniki tych badań nie stanowią nowego rezultatu niniejszej pracy, lecz są podstawą przyjętej koncepcji dwuwarstwowego prefabrykatu ochronnego.

Na tle opisanych rozwiązań zasadniczą cechą układu Shelter-Z jest zastosowanie tylko jednego rodzaju przestrzennego prefabrykatu, który przez zmianę wzajemnej orientacji kolejnych elementów umożliwia tworzenie zarówno kopuł, jak i wydłużonych konstrukcji sklepionych. Rozwiązanie to stanowi zastosowanie koncepcji Układów Ekstremalnie Modularnych [9]. Wcześniejsze

układy tego rodzaju, w tym Truss-Z oraz Vault-Z [10], były rozwijane dla innych zastosowań konstrukcyjnych i architektonicznych. W dostępnej autorom literaturze nie zidentyfikowano wcześniejszego zastosowania Układu Ekstremalnie Modularnego opartego na jednym rodzaju przestrzennego modułu do wznoszenia budowli ochronnych.

Układ Shelter-Z został wcześniej objęty zgłoszeniem patentowym [11], dotyczącym geometrii modułu i sposobu tworzenia z niego przestrzennych konfiguracji. Wcześniejsza praca dotycząca Vault-Z [10] odnosi się do innego zastosowania Układów Ekstremalnie Modularnych, natomiast badania przedstawione w [4] dotyczą właściwości materiału przewidzianego do zastosowania w warstwie osłonowej. Zasadniczym wkładem niniejszej pracy jest połączenie geometrii jednego powtarzalnego prefabrykatu z koncepcją konstrukcji nośno-osłonowej przydomowej budowli ochronnej oraz z założeniami jej przyszłego zautomatyzowanego i zrobotyzowanego montażu.

Celem artykułu jest przedstawienie geometrii układu Shelter-Z, sposobów wzajemnego zestawiania prefabrykatów, możliwych konfiguracji konstrukcji ochronnej, założeń jej zautomatyzowanego montażu oraz koncepcji zastosowania zewnętrznej warstwy lekkiego fibrobetonu o funkcji osłonowej. Przedstawiony układ stanowi koncepcję modularnej konstrukcji nośno-osłonowej schronu, a nie kompletny projekt budowli ochronnej. Elementy takie jak drzwi ochronne, filtrowentylacja, wyjście awaryjne, fundament, hydroizolacja i instalacje, jak również potwierdzenie wymaganej szczelności całego obiektu, pozostają poza zakresem niniejszej pracy. Projekt techniczny połączeń prefabrykatów, weryfikacja nośności pełnowymiarowej konstrukcji oraz eksperymentalna walidacja procesu zrobotyzowanego montażu stanowią przedmiot dalszych badań.

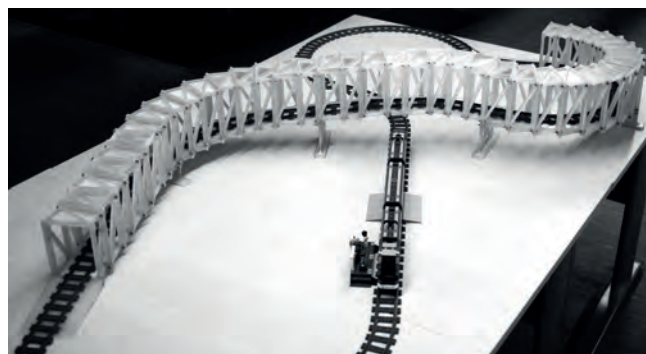
2. Układy Ekstremalnie Modularne

Układ Ekstremalnie Modularny (ang. Extremely Modular System) jest koncepcją tworzenia użytecznych konstrukcji inżynierskich z możliwie najmniejszej liczby rodzajów modułów, w przypadku idealnym z jednego rodzaju elementu [9]. Ograniczenie liczby różnych prefabrykatów upraszcza ich seryjną produkcję, transport i składowanie, a przede wszystkim sprzyja automatyzacji oraz robotyzacji procesu montażu.

Przykładem takiego rozwiązania jest Truss-Z, układ kratownicowo-ramowy oparty na jednym rodzaju modułu, umożliwiający tworzenie pochylni o stałym kącie nachylenia i zróżnicowanym przebiegu przestrzennym. Model fizyczny przykładowej konfiguracji przedstawiono na Rys. 1.

Układy Ekstremalnie Modularne mają cztery zasadnicze cechy:

- ekonomiczność – zastosowanie jednego lub niewielkiej liczby rodzajów modułów umożliwia produkcję seryjną, upraszcza



Rys. 1. Model fizyczny pochylni modularnej Truss-Z, zaprojektowany i wykonany dla kolejki systemu LEGO

Fig. 1. Physical model of the modular Truss-Z ramp, designed and built for a LEGO railway system

logistykę i ogranicza koszty. Konstrukcje mogą być również demontowane, przenoszone i ponownie wykorzystywane w innych konfiguracjach;

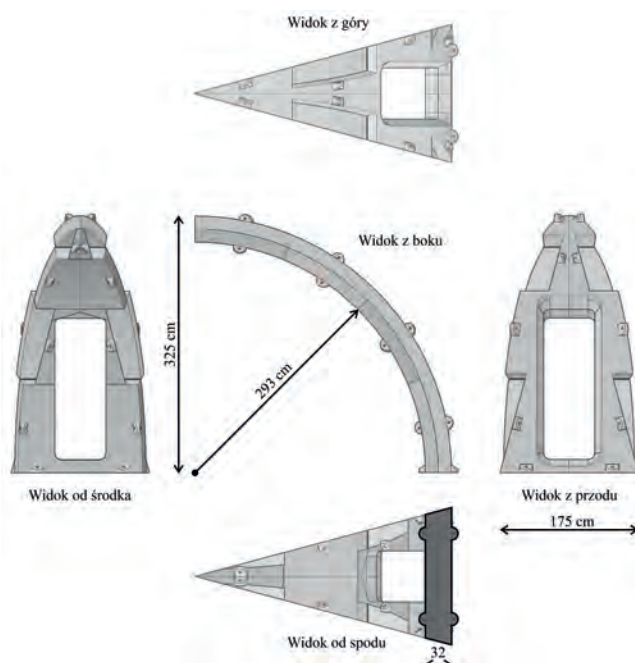
- niezawodność – uszkodzony moduł może zostać zastąpiony identycznym elementem bez konieczności projektowania części zamiennej specjalnie dla danej konfiguracji;
- podatność na optymalizację – konfiguracje złożone z powtarzalnych modułów mogą być opisywane matematycznie, generowane algorytmicznie i optymalizowane pod względem geometrii, konstrukcji oraz sposobu montażu;
- podatność na automatyzację – powtarzalność geometrii modułów ogranicza liczbę wymaganych operacji manipulacyjnych oraz upraszcza ich identyfikację, chwytanie, pozycjonowanie, zestawianie i kontrolę poprawności montażu.

Z punktu widzenia zautomatyzowanego wznoszenia prefabrykowanych obiektów ochronnych najważniejsza jest ostatnia z wymienionych cech. Zastosowanie jednego rodzaju modułu umożliwia opracowanie powtarzalnego procesu montażowego, realizowanego przy użyciu tego samego wyposażenia manipulacyjnego, procedur sterowania i metod kontroli dla kolejnych elementów konstrukcji.

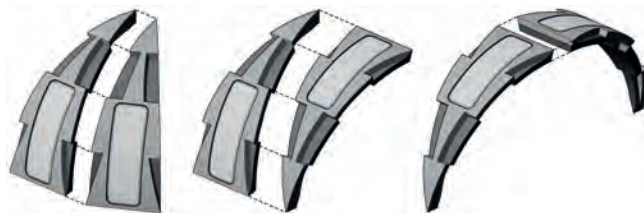
3. Układ Shelter-Z

Układ Shelter-Z [11] opiera się na jednym rodzaju przestrzennego prefabrykatu ochronnego. Moduł ma postać płaszczyznowo symetrycznego klina wygiętego łukowo, przedstawionego na Rys. 2. Jego geometria została opracowana w taki sposób, aby przez zmianę wzajemnej orientacji identycznych elementów możliwe było tworzenie zarówno konstrukcji kopułowych, jak i wydłużonych konstrukcji sklepiennych.

W przykładowym wariantie realizacyjnym opisanym w zgłoszeniu patentowym [11] zewnętrzny promień krzywizny modułu wynosi 3,25 m, a przy grubości elementu równej 0,32 m odpowiadający mu promień wewnętrzny wynosi 2,93 m. Szerokość podstawy pojedynczego prefabrykatu wynosi około 1,75 m, natomiast kąt rozwarcia klina wynosi 30°. Wymiary te należy traktować jako przykład realizacji geometrii modułu, a nie jako wartości docelowe dla wszystkich zastosowań układu Shelter-Z. Skala prefabrykatu może być dobierana z uwzględnieniem



Rys. 2. Widoki prostokątne prefabrykatu ochronnego Shelter-Z
Fig. 2. Orthographic views of the Shelter-Z protective precast element



Rys. 3. Trzy sposoby wzajemnego zestawiania prefabrykatów Shelter-Z.
Po lewej: "AA", w środku: "AV", po prawej: "<>"

Fig. 3. Three arrangements of adjacent Shelter-Z precast elements;
left: "AA", center: "AV", right: "<>"



Rys. 4. Przykłady konfiguracji układu Shelter-Z utworzonych z jednego rodzaju prefabrykatu ochronnego; po lewej: kopuła (32,15 m² powierzchni zabudowy), po prawej: wydłużona konstrukcja sklepienna zakończona półkopułami (53,6 m² p.z.)

Fig. 4. Examples of Shelter-Z system configurations formed from a single type of protective precast element; left: a dome (32.15 m² building footprint); right: an elongated vaulted structure terminated with half-domes (53.6 m² building footprint)

wymaganej powierzchni i wysokości użytkowej obiektu, wymagań konstrukcyjnych, warunków transportu i montażu oraz potrzeb przyszłych użytkowników, jak pokazano na Rys. 2.

Geometria modułu umożliwia trzy podstawowe sposoby wzajemnego zestawiania sąsiednich prefabrykatów, oznaczone na Rys. 3 jako "AA", "AV" oraz "<>". Zmiana wzajemnej orientacji kolejnych elementów pozwala sterować przebiegiem tworzonej powłoki bez konieczności stosowania dodatkowych rodzajów prefabrykatów.

Ścianki boczne prefabrykatu wyposażono w komplementarny układ wybrań i występów umożliwiających kształtowe łączenie sąsiednich modułów. W wariantie przedstawionym w zgłoszeniu patentowym na każdej z dwóch ścianek bocznych znajdują się cztery pary wybrań i występów. Moduł wyposażono ponadto w ucha montażowe, które mogą służyć do dodatkowego lub tymczasowego łączenia elementów podczas wznoszenia konstrukcji [11]. Rozwiązania te określają wzajemne położenie sąsiadujących prefabrykatów, natomiast docelowy sposób ich trwałego zespolenia oraz uszczelnienia połączeń, w tym zapewnienia szczelności wymaganej dla kompletnej konstrukcji schronu, wymaga dalszego opracowania i weryfikacji.

Odpowiednie sekwencje zestawień prefabrykatów umożliwiają tworzenie zamkniętych kopuł oraz wydłużonych konstrukcji o przekroju sklepienia kolebkowego, zakończonych z obu stron półkopułami. W drugim przypadku szerokość konstrukcji pozostaje stała, natomiast jej długość może być zwiększana przez dodawanie kolejnych powtarzalnych segmentów. Pozwala to dostosowywać powierzchnię użytkową obiektu bez wprowadzania dodatkowych rodzajów prefabrykatów, co ilustruje Rys. 4.

Przedstawiona geometria umożliwia zatem skalowanie zarówno pojedynczego prefabrykatu, jak i całego obiektu oraz zmianę jego długości przez zwiększanie liczby modułów. Docelowe parametry wymiarowe i konstrukcyjne wariantu przeznaczonego do zastosowania jako przydomowa budowla ochronna powinny zostać dobrane w dalszym etapie rozwoju systemu, po uwzględnieniu wymagań użytkowych, konstrukcyjnych, technologicznych i ekonomicznych.

4. Zrobotyzowany montaż Shelter-Z

Układ Shelter-Z, jako Układ Ekstremalnie Modułarny oparty na jednym rodzaju prefabrykatu ochronnego, został zaprojektowany z uwzględnieniem możliwości automatyzacji i robotyzacji montażu. Powtarzalność geometrii elementów ogranicza liczbę różnych operacji manipulacyjnych, natomiast zmiana konfiguracji konstrukcji wynika przede wszystkim z odpowiedniej orientacji kolejnych identycznych modułów.

Ze względu na przewidywane zastosowanie betonu oraz wymiary prefabrykatów nie zakłada się ręcznego przenoszenia elementów przez pracowników. W wariantcie konwencjonalnym montaż odbywałby się z wykorzystaniem urządzenia dźwigowego, natomiast pracownicy wykonywaliby operacje związane z naprowadzaniem, orientowaniem, ustalaniem i łączeniem kolejnych prefabrykatów. Przewidziane w konstrukcji modułu ucha montażowe mogą być wykorzystane podczas jego podnoszenia i przemieszczania [11]. Dobór urządzenia dźwigowego, liczby pracowników oraz czasu montażu zależy jednak bezpośrednio od ostatecznie przyjętych wymiarów i masy prefabrykatu, dlatego parametry te nie są na obecnym etapie określone ilościowo.

Niezależnie od stopnia automatyzacji podstawowa sekwencja montażowa obejmuje:

- pobranie prefabrykatu ze strefy składowania;
- jego podniesienie i przemieszczenie do strefy montażowej;
- nadanie orientacji wynikającej z projektowanej konfiguracji;
- naprowadzenie elementu względem wcześniej zamontowanych modułów;
- osadzenie prefabrykatu i jego geometryczne ustalenie;
- wykonanie połączenia tymczasowego lub docelowego;
- kontrolę poprawności położenia elementu.

W wariantcie zrobotyzowanym część lub wszystkie wymienione operacje manipulacyjne może wykonywać odpowiednio dobrany manipulator. Powtarzalność modułu umożliwia stosowanie tych samych punktów chwytu, modeli geometrycznych i podstawowych procedur manipulacyjnych dla kolejnych prefabrykatów. Zmiennymi parametrami pozostają przede wszystkim położenie docelowe elementu oraz jego orientacja wynikająca z sekwencji zestawień opisanych w poprzednim rozdziale.

Zrobotyzowany proces montażu wymagałby integracji modelu cyfrowego projektowanego obiektu z systemem pomiarowym określającym rzeczywiste położenie prefabrykatów. System sterowania powinien na tej podstawie identyfikować kolejny element, wyznaczać jego wymaganą orientację i trajektorię ruchu, a następnie korygować położenie podczas osadzania. Podobne podejście, wykorzystujące sprzężenie danych projektowych z pomiarami wykonywanymi na stanowisku montażowym, jest rozwijane w badaniach nad automatycznym montażem prefabrykatów budowlanych [3].

Szczególne znaczenie dla automatyzacji ma zastosowany w Shelter-Z kształtowy układ wybrań i występów na ściankach bocznych modułu. Oprócz funkcji łączenia elementów może on ułatwiać ich wzajemne naprowadzanie i ustalanie podczas montażu. Przydatność tego rozwiązania do zrobotyzowanego składania konstrukcji wymaga jednak weryfikacji eksperymentalnej, obejmującej między innymi wymagane tolerancje wykonawcze, dokładność pozycjonowania oraz siły występujące podczas osadzania prefabrykatu.

Robotyzacja jest w prezentowanej koncepcji przede wszystkim sposobem ograniczenia udziału ludzi w manipulowaniu ciężkimi prefabrykatami oraz wykonywaniu powtarzalnych operacji montażowych. Potencjalne korzyści obejmują również zwiększenie powtarzalności pozycjonowania i możliwość bieżącej kontroli zgodności wykonywanej konstrukcji z jej modelem cyfrowym. Ocena wpływu robotyzacji na czas i koszty realizacji

wymaga jednak przeprowadzenia badań na pełnowymiarowych elementach i nie jest przedmiotem niniejszej pracy.

Na obecnym etapie nie zweryfikowano również stateczności konstrukcji w kolejnych fazach montażu ani konieczności stosowania podpor tymczasowych. Zagadnienie to jest bezpośrednio związane z docelowym rozwiązaniem połączeń i parametrami konstrukcyjnymi prefabrykatów i powinno zostać uwzględnione przy opracowaniu kolejności montażu. Dalsze prace obejmą zatem dobór urządzeń manipulacyjnych, projekt chwytania i docelowych połączeń modułów, analizę stateczności faz montażowych, opracowanie algorytmów planowania i sterowania oraz eksperymentalną weryfikację procesu.

5. Lekki fibrobeton warstwy osłonowej

Koncepcja prefabrykatu Shelter-Z zakłada zastosowanie dwóch warstw pełniących odmienne funkcje. Warstwa wewnętrzna stanowi zasadniczą część konstrukcyjną elementu, natomiast zewnętrzna warstwa osłonowa ma ograniczać skutki uderzenia pocisków i odłamków, w szczególności możliwość ich rykoszetowania oraz powstawania wtórnych odłamków betonu. W tym celu przewiduje się zastosowanie lekkiego fibrobetonu o właściwościach innych niż typowy beton konstrukcyjny lub beton wysokowartościowy.

Założeniem materiałowym jest zastosowanie stosunkowo podatnej na penetrację matrycy cementowej zawierającej kruszywo lekkie. Podczas uderzenia pocisku część jego energii może być rozpraszana w wyniku lokalnego kruszenia i deformacji materiału warstwy osłonowej. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego ma natomiast ograniczać niekontrolowane pękanie i odpryskiwanie fragmentów betonu [12, 13]. Warstwa ta nie jest przewidziana jako zasadniczy element nośny prefabrykatu, a jej lokalne uszkodzenie w wyniku uderzenia jest dopuszczalnym elementem przyjętej koncepcji ochronnej.

Podstawę do przyjęcia takiego rozwiązania stanowią wcześniejsze badania rozpoznawcze opisane szczegółowo w [4]. Wyniki tych badań nie są nowym rezultatem niniejszej pracy, lecz służą jako przesłanka do zastosowania podobnego rozwiązania materiałowego w prefabrykacie Shelter-Z.

W badaniach przedstawionych w [4] wykonano trzy rodzaje lekkiego betonu: beton z kruszywem keramzytowym, beton z kruszywem keramzytowym zbrojony włóknami stalowymi oraz beton z granulatem styropianowym zbrojony włóknami polipropylenowymi. Keramzyt miał uziarnienie od 2 mm do 16 mm, natomiast granulatu styropianowy od 4 mm do 8 mm. Jako kruszywo drobne zastosowano naturalny piasek polodowcowy [14]. Do zbrojenia rozproszonego wykorzystano włókna stalowe [15] oraz polipropylenowe, a spoiwem był cement CEM II 42.5R B-V. Zastosowanie keramzytu i granulatu styropianowego jako składników betonów lekkich jest szeroko opisane w literaturze [A5, 16, 17].

Próby strzeleckie przeprowadzono z użyciem pistoletu Sig Sauer P226 LDC i amunicji 9 mm Parabellum (9×19 mm). Dla zastosowanej amunicji prędkość początkowa i energia pocisku wynosiły odpowiednio 396 m/s i 584 J. Strzały oddawano z odległości 7 m. Próbkę stanowiła dwuwarstwowa płyta złożona z warstwy zwykłego betonu, reprezentującej część konstrukcyjną, oraz warstwy badanego betonu lekkiego. Płytę ustawiono pod kątem 45° względem osi strzału, aby stworzyć warunki sprzyjające wystąpieniu rykoszetu.

Program miał charakter rozpoznawczy i służył sprawdzeniu możliwości zastosowania lekkiego betonu jako warstwy osłonowej ograniczającej rykoszetowanie i odpryskiwanie materiału. Spośród przebadanych wariantów najbardziej obiecujące wyniki uzyskano dla fibrobetonu z kruszywem keramzytowym i włóknami stalowymi [4]. Wyniki wskazują, że w przebadanych warunkach lekki fibrobeton może pełnić funkcję war-

stwy pochłaniającej część energii pocisku oraz ograniczającej powstawanie odłamków betonu.

Zakres przeprowadzonych prób nie pozwala jednak na uogólnienie otrzymanych wyników na inne rodzaje amunicji, odłamki o zróżnicowanej geometrii i energii ani obciążenia wybuchowe. W szczególności badania opisane w [4] nie stanowią walidacji odporności odłamkowej kompletnego prefabrykatu Shelter-Z. Określenie wymaganej grubości i składu warstwy osłonowej oraz ocena jej skuteczności wobec reprezentatywnych zagrożeń wymagają dalszych badań balistycznych.

6. Dyskusja

Przedstawiony układ Shelter-Z znajduje się obecnie na etapie koncepcyjnym. Opracowano geometrię pojedynczego modułu oraz zasady jego zestawiania umożliwiające tworzenie kopuł i wydłużonych konstrukcji sklepionych. Geometria rozwiązania została objęta zgłoszeniem patentowym [11]. Nie wykonano natomiast dotychczas pełnowymiarowego prefabrykatu Shelter-Z ani kompletnej konstrukcji demonstracyjnej.

Wymiary przedstawione w niniejszej pracy odpowiadają przykładowemu wariantowi realizacyjnemu opisanemu w zgłoszeniu patentowym i nie stanowią docelowych parametrów systemu. Dobór skali prefabrykatu powinien być wynikiem dalszych prac projektowych, uwzględniających wymagania użytkowe, konstrukcyjne, technologiczne i ekonomiczne. Dotyczy to również konfiguracji przeznaczonych dla przydomowych budowli ochronnych o powierzchni użytkowej do 35 m². Liczba modułów, wymiary obiektu i jego powierzchnia użytkowa będą zależały od przyjętej skali prefabrykatu i powinny zostać dobrane jako wzajemnie powiązane parametry projektowe.

Nie określono również docelowej masy prefabrykatu. Będzie ona zależała przede wszystkim od przyjętych wymiarów, grubości i konstrukcji części nośnej oraz grubości zewnętrznej warstwy osłonowej. Z tego względu na obecnym etapie nie jest uzasadnione ilościowe określanie wymaganej liczby pracowników, parametrów urządzenia dźwigowego ani czasu montażu. Parametry te powinny zostać wyznaczone dla konkretnego wariantu konstrukcyjnego i następnie stanowić podstawę porównania montażu konwencjonalnego i zrobotyzowanego.

W zakresie materiałowym istnieją wstępne wyniki eksperymentalne dotyczące zastosowania lekkiego fibrobetonu jako warstwy ograniczającej rykoszetowanie i odpryskiwanie betonu [4]. Badania te przeprowadzono jednak dla określonego rodzaju amunicji, geometrii próbki i warunków uderzenia, dlatego nie stanowią one potwierdzenia odporności balistycznej ani odłamkowej kompletnego prefabrykatu Shelter-Z. Dalsze prace powinny obejmować dobór składu i grubości warstwy osłonowej oraz badania z użyciem różnych rodzajów pocisków i reprezentatywnych odłamków, prowadzone dla różnych energii i kątów uderzenia.

Badania takie mogą być prowadzone na specjalistycznej strzelnicy badawczej, z wykorzystaniem stacjonarnych stanowisk strzeleckich, rejestracji kamerą szybką oraz metod nieniszczących służących do oceny uszkodzeń wewnętrznych. Łukasiewicz – PIAP dysponuje krytą strzelnicą badawczą oraz doświadczeniem w prowadzeniu badań z wykorzystaniem broni strzeleckiej i materiałów wybuchowych. Z kolei współpraca z Centrum Telč ÚTAM AV ČR umożliwia zastosowanie obrazowania rentgenowskiego do trójwymiarowej oceny struktury wewnętrznej badanych elementów.

Odrębnym zagadnieniem jest opracowanie części konstrukcyjnej prefabrykatu. Konieczne będzie określenie jego zbrojenia, nośności i sztywności oraz przeprowadzenie analiz całych konfiguracji pod działaniem obciążeń stałych, gruntu oraz odpowiednich oddziaływań wyjątkowych. Weryfikacji wymagają również połączenia między modułami, w tym ich zdolność do przenoszenia sił oraz rozwiązanie zapewniające wymaganą szczelność

konstrukcji. Istotnym elementem badań będzie także stateczność konstrukcji w kolejnych fazach montażu i określenie, czy oraz w jakich konfiguracjach konieczne będzie stosowanie podpór tymczasowych.

Koncepcja zrobotyzowanego montażu również nie została dotychczas zweryfikowana eksperymentalnie. Powtarzalność jednego rodzaju modułu ogranicza liczbę różnych operacji manipulacyjnych i stanowi korzystną podstawę automatyzacji, jednak praktyczna realizacja procesu wymaga określenia tolerancji wykonawczych, sposobu chwytania prefabrykatów, dokładności ich pozycjonowania oraz sił występujących podczas osadzania i łączenia elementów. Dopiero badania na fizycznych modułach pozwolą ocenić wpływ robotyzacji na czas montażu, liczbę wymaganych operatorów oraz koszty realizacji.

Należy również podkreślić, że przedstawiony układ stanowi koncepcję modularnej konstrukcji nośno-osłonowej schronu, a nie kompletny projekt budowli ochronnej. Elementy takie jak fundament, hydroizolacja, drzwi ochronne, wyjście awaryjne, filtrowentylacja oraz instalacje wymagają niezależnego opracowania i integracji z konstrukcją modularną. Potwierdzenie spełnienia wszystkich wymagań stawianych budowlom ochronnym będzie możliwe dopiero na etapie projektu i badań kompletnego obiektu.

7. Wnioski

W pracy przedstawiono koncepcję układu Shelter-Z, będącego Układem Ekstremalnie Modularnym przeznaczonym do tworzenia modularnej konstrukcji nośno-osłonowej przydomowych budowli ochronnych. Zasadniczym elementem rozwiązania jest jeden rodzaj przestrzennego prefabrykatu, którego odpowiednie zestawianie umożliwia tworzenie zarówno kopuł, jak i wydłużonych konstrukcji sklepionych.

Geometria modułu nie narzuca jednej bezwzględnej skali układu. W niniejszej pracy przedstawiono przykładowy wariant wymiarowy opisany w zgłoszeniu patentowym [11], natomiast docelowe wymiary prefabrykatu powinny zostać dobrane do wymagań użytkowych, konstrukcyjnych, transportowych i ekonomicznych konkretnego zastosowania.

Powtarzalność jednego rodzaju modułu stanowi korzystną podstawę do automatyzacji procesu montażu. Koncepcja zakłada możliwość zastąpienia części operacji wykonywanych podczas konwencjonalnego montażu dźwigowego przez system zrobotyzowany, obejmujący manipulację, orientowanie, pozycjonowanie i kontrolę poprawności osadzenia kolejnych prefabrykatów. Proces ten wymaga jednak dalszej weryfikacji eksperymentalnej.

Koncepcja materiałowa zakłada zastosowanie zewnętrznej warstwy lekkiego fibrobetonu pełniącej funkcję osłonową. Wcześniejsze badania [4] wskazują na możliwość ograniczenia rykoszetowania i odpryskiwania betonu w przebadanych warunkach, lecz nie stanowią walidacji odporności balistycznej ani odłamkowej kompletnego prefabrykatu Shelter-Z.

Na obecnym etapie opracowano geometrię modułu i możliwe konfiguracje układu oraz sformułowano założenia dotyczące jego montażu i budowy materiałowej. Dalsze prace powinny obejmować projekt i weryfikację części konstrukcyjnej prefabrykatu, opracowanie docelowych połączeń i sposobu ich uszczelnienia, analizę stateczności podczas montażu, badania materiałowe i balistyczne oraz eksperymentalną walidację procesu zrobotyzowanego montażu pełnowymiarowej konstrukcji.

Podziękowania

Niniejszy artykuł powstał w ramach projektu nr CZ.02.01.01/00/22008/0004631 "Materials and technologies for sustainable development", realizowanego w programie OP JAK i finansowanego przez Unię Europejską oraz z budżetu państwa Republiki Czeskiej.

Bibliografia

1. Xiao B., Chen C., Yin X., *Recent advancements of robotics in construction*, "Automation in Construction", Vol. 144, 2022, DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104591.
2. Wilk-Jakubowski G., Harabin R., Ivanov S., *Robotics in crisis management: A review*, "Technology in Society", Vol. 68, 2022, DOI: 10.1016/j.techsoc.2022.101935.
3. Liu C., Wu J., Jiang X., Gu Y., Xie L., Huang Z., *Automatic assembly of prefabricated components based on vision-guided robot*, "Automation in Construction", Vol. 162, 2024, DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105385.
4. Katzer J., Kobaka J., *Anti-terrorist concrete shields absorbing projectiles with no ricochets*, "Structural Concrete", Vol. 24, No. 1, 2023, 6–8, DOI: 10.1002/suco.202200174.
5. Karkhut I., *Research of precast concrete fragments of protective shelters*, "Architecture and Building", Vol. 25, 2024, 46–54, DOI: 10.31734/architecture2024.25.046.
6. Tolok I., Rybka E., Pozdieiev S., Kustov M., Novhorodchenko A., Plisko Y., *Behavior patterns of reinforced concrete structures of modular shelters in explosion conditions*, "Problems of Emergency Situations", Vol. 40, 2024, 258–268, DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-18.
7. Zhao C., Tang Z., Wang P., Feng J., Zhou J., Kong X., Geng H., Jin F., Fan H., *Blast responses of shallow-buried prefabricated modular concrete tunnels reinforced by BFRP-steel bars*, "Underground Space", Vol. 7, No. 2, 2022, 184–198, DOI: 10.1016/j.undsp.2021.07.004.
8. Pai A., Kini C.R., Satish Shenoy B., *Development of materials and structures for shielding applications against blast and ballistic impact: A detailed review*, "Thin-Walled Structures", Vol. 179, 2022, DOI: 10.1016/j.tws.2022.109664.
9. Zawidzki M., *Discrete optimization in architecture: Extremely modular systems*. Springer, 2017, DOI: 10.1007/978-981-10-1109-2.
10. Zawidzki M., Szklarski J., *Vault-Z: Automated system for freeform modular pavilion design*, "Automation in Construction", Vol. 180, 2025, DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106552.
11. Zawidzki M., *Moduł budowlany*, UPRP P.448577, 15 maja 2024.
12. Zhang B., Feng Y., Xie J., He J., Yu T., Cai C., Huang D., *Compressive behaviours, splitting properties, and workability of lightweight cement concrete: the role of fibres*, "Construction and Building Materials", Vol. 320, 2022, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126237.
13. Nili M., Ghorbankhani A.H., AlaviNia A., Zolfaghari M., *Assessing the impact strength of steel fibre-reinforced concrete under quasi-static and high velocity dynamic impacts*, "Construction and Building Materials", Vol. 107, 2016, 264–271, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.161.
14. Katzer J., Kobaka J., *The assessment of fine aggregate pit deposits for concrete production*, "Kuwait Journal of Science & Engineering", Vol. 33, No. 2, 2006, 165–174.
15. Katzer J., Domski J., *Quality and mechanical properties of engineered steel fibres used as reinforcement for concrete*, "Construction and Building Materials", Vol. 34, 2012, 243–248, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.058.
16. Adeala A.J., Soyemi O.B., *Structural use of expanded polystyrene concrete*, "International Journal of Innovative Science and Research Technology", Vol. 5, No. 6, 2020, 1131–1138, DOI: 10.38124/IJISRT20JUN849.
17. Chen B., Liu J., *Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber*, "Cement and Concrete Research", Vol. 34, No. 7, 2004, 1259–1263, DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.12.014.

Inne źródła

- A1. Ustawa z dnia 5 grudnia 2024 r. o ochronie ludności i obronie cywilnej, 2024. Dz.U. 2024 poz. 1907.
- A2. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – prawo budowlane, 2026, tekst jednolity. Dz.U. 2026 poz. 524.
- A3. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 4 listopada 2025 r. w sprawie warunków technicznych dla budowli ochronnych oraz warunków technicznych ich użytkowania i usytuowania, 2025. Dz.U. 2025 poz. 1548.
- A4. Elematic Oyj. Finnish shelter concept drives faster civil defense shelter production globally, [www.elematic.com/articles/finnish-shelter-concept-drives-faster-civil-defense-shelter-production-globally], 2026.
- A5. Holm T.A., Ries J.P., Reference manual for the properties and applications of expanded shale, clay and slate lightweight aggregate, Prepared by Expanded Shale Clay and Slate Institute, 2007, [www.escsi.org/reference-manual/].

Modular System for Automated Construction of Household Shelters of Arbitrary Floor Area

Abstract: The article presents the concept of the Shelter-Z Extremely Modular System, based on a single type of spatial precast concrete protective module. Appropriate connection patterns between identical modules enable the creation of domes and elongated barrel-vaulted structures terminated with half-domes, and thus household shelters of different floor areas. The outer layer of the precast element is conceived as lightweight fiber-reinforced concrete capable of absorbing part of the energy of projectiles and fragments while reducing the risk of ricochet. The use of a single type of repetitive module simplifies production and logistics and, most importantly, facilitates the automation and robotization of the shelter assembly process.

Keywords: Protective precast element, Household shelter, Assembly automation, Construction robotics, Extremely Modular System

dr hab. inż. Machi Zawidzki

zawidzki@ippt.pan.pl

ORCID: 0000-0001-8695-4400

Od października 2022 r. kieruje Działem Automatyki w Budownictwie w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Od lutego 2017 r. jest adiunktem w Zakładzie Technologii Inteligentnych Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk. W 2020 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie informatyka, na podstawie osiągnięcia pt. „Zastosowania metod inteligencji obliczeniowej do optymalizacji architektonicznych Systemów Ekstremalnie Modularnych”. W latach 2007–2010 odbył studia doktoranckie na Uniwersytecie Ritsumeikan w Japonii. Tematem jego rozprawy doktorskiej było „Application of Computational Intelligence to Engineering Design Problems in Architecture – firmitatis, utilitatis, venustatis”.

**mgr inż. Wojciech Kiński**

wojciech.kinski@piap.lukasiewicz.gov.pl

ORCID: 0000-0003-4973-7604

Absolwent Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, gdzie uzyskał tytuł magistra inżyniera w zakresie mechaniki i budowy maszyn. Obecnie jest doktorantem Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Od 2020 r. związany z Łukasiewicz – PIAP, gdzie obecnie kieruje Laboratorium Szybkiego Prototypowania i Obliczeń Numerycznych. Jego działalność naukowa koncentruje się głównie na technologiach przyrostowych.

**dr hab. inż. Jacek Katzer, prof. UWM**

jacek.katzer@uwm.edu.pl

ORCID: 0000-0002-4049-5330

Specjalizuje się w technologii betonu i fibrobetonu. Od 2017 r. prowadzi również badania nad gruntem księżycowym i jego symulantami. Ma doświadczenie jako badacz betonu, projektant mieszanek betonowych, kontroler jakości produkcji betonu towarowego i prefabrykatów oraz wykładowca technologii betonu. Obecnie pracuje na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie, gdzie kieruje Centrum Inżynierii Lądowej. W swojej karierze naukowej był również związany z Politechniką Koszalińską, University of Sheffield w Wielkiej Brytanii, Politechniką w Brnie oraz VŠB – Politechniką Ostrawską w Czechach.

**dr inż. Janusz Kobaka**

janusz.kobaka@uwm.edu.pl

ORCID: 0000-0002-3596-3187

Od lipca 2021 r. jest zatrudniony na stanowisku post-doc w projekcie NCN „Wydobycie regolitu na powierzchni Księżyca w warunkach obniżonej grawitacji”. W okresie od marca do maja 2021 r. pracował jako adiunkt na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie, a w latach 2018–2021 jako adiunkt na Politechnice Koszalińskiej. W latach 2007–2018 kierował Laboratorium Techniki Budowlanej Politechniki Koszalińskiej, z którym był związany od 2004 r. jako specjalista inżynierijno-techniczny.

**dr hab. inż. Czesław Suchocki, prof. PK**

czeslaw.suchocki@tu.koszalin.pl

ORCID: 0000-0002-0121-57110

Od 2004 r. pracuje na Wydziale Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji Politechniki Koszalińskiej. W 2010 r. uzyskał stopień doktora w dyscyplinie geodezja i kartografia, a w 2021 r. stopień doktora habilitowanego w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport. Jego działalność naukowa koncentruje się na zastosowaniu technologii naziemnego skaningu laserowego w inżynierii lądowej oraz dokumentacji dziedzictwa kulturowego.

**mgr inż. Paweł Grzybowski**

pgrzybowski@ans.pila.pl

ORCID: 0000-0002-9115-7622

Absolwent Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, gdzie uzyskał tytuł magistra inżyniera budownictwa lądowego. W 2006 r. uzyskał uprawnienia budowlane bez ograniczeń do kierowania robotami budowlanymi w specjalności konstrukcyjno-budowlanej, a w 2015 r. rozszerzył je o projektowanie bez ograniczeń w tej samej specjalności. Obecnie pracuje w Akademii Nauk Stosowanych im. Stanisława Staszica w Pile. Jego główne zainteresowania naukowe dotyczą zastosowania tworzyw sztucznych pochodzących z recyklingu, w szczególności politereftalanu etylenu (PET), w budownictwie.

