

Wybór spoiwa przyjaznego dla środowiska w celu zastosowania odpowiedniego cementu w budownictwie

Developing a Material Sustainable Performance Score (MSPS) to select an alternative Cementitious Material

Słowa kluczowe: konstrukcje zrównoważone, cykl życia materiału, wielokryterialna metoda hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych, wskaźnik oceny przydatności materiału

Keywords: Sustainable Construction, Material life cycle, Analytic Hierarchy Process [AHP], Material Sustainable Performance Score [MSPS]

1. Wprowadzenie

Rozwój zrównoważony jest jednym z tych obszarów działalności, w którym zachodzą największe zmiany. Przemysł budowlany jest w dużej mierze zależny od zużycia zasobów nieodnawialnych, oraz emisji spalin w produkcji cementu (1). Wiele materiałów w inwestycjach budowlanych łączy się nieodwrotnie z dużą emisją CO₂ (2). Dlatego trudnym wyzwaniem dla firm budowlanych jest wznoszenie konstrukcji, które będą pomagać w poprawie jakości życia użytkowników, a jednocześnie zmniejszą swój negatywny wpływ na środowisko. Jednym z ważnych zagadnień zrównoważonego rozwoju jest wybór materiałów o dużej trwałości, gdyż to właśnie materiały budowlane decydują o trwałości konstrukcji. Jasne jest więc, że dobór trwałych materiałów to podstawowy warunek dobrego projektu, dlatego też konieczne jest opracowanie metody oceny materiałów z punktu widzenia rozwoju zrównoważonego (3, 4). Podczas oceny materiałów, które mają być stosowane jako trwałe materiały budowlane, należy wziąć pod uwagę szereg czynników, między innymi ich wpływ na zanieczyszczenie środowiska, zużywanie i powstawanie odpadów, trwałość, możliwość powtórnego zastosowania, zużycia energii, małe nakłady na konserwację i ogólne aspekty ekonomiczne (5-7). Większość opracowanych strategii doboru materiału w branży budowlanej opiera się wyłącznie na jego właściwościach fizycznych, jednak problem zrównoważonego budownictwa wymaga uwzględnienia zagadnień środowiskowych, ekonomicznych i społecznych. Duża część badań poświęcona jest określeniu przydatności materiałów biorąc pod uwagę tylko problemy środowiska (7). Niektórzy autorzy rozważali już wcześniej zagadnienia środowiskowe i ekonomiczne w celu oceny przydatności materiałów (8). Jednak w przypadku budownictwa zrównoważonego, należy wziąć pod uwagę jednocześnie zagadnienia środowiskowe, społeczne i ekonomiczne (9). Oprócz tego, szczególnie w budownictwie, należy uwzględnić

1. Introduction

Sustainability is one among those fields which have greatest potential to bring change. The construction industry is largely dependent on consumption of non-renewable resources and production of waste and emissions (1). Many operations in construction projects are responsible for the generation of a large amount of CO₂ emissions (2). Therefore, the challenging job for construction firm is to construct a structure which should help in enhancing user's quality of life and at the same time it should reduce the impact on social, environmental and economic parameters. One of the important parameters to sustainable development is the selection of sustainable material because materials are major consumers of resources. Structural materials are fundamental in construction, and thus selection of good material is an integral part of good design, therefore there arises a necessity of sustainability evaluation methodologies for selection of sustainable materials (3, 4). Some consideration needs to be considered while evaluating materials which are to be used as sustainable construction material, those include studying pollution impact of materials, material depletion potential, recycling capability, reusing capability, energy consumption, waste production, low maintenance and economical material (5-7). Most of the developed strategies for material selection in the construction industry are based on only physical and mechanical properties, therefore, it is necessitated to consider environmental, economic and social bases also for achieving sustainable construction. A considerable amount of work has been done to measure the material performance considering environment parameter only (7). Some of the researchers considered environmental and economic aspects to evaluate the material performance (8). But, to achieve sustainable construction it is crucial to consider environmental, social, economic aspects (9). In addition to this particularly in construction sector the technological concept of Reduce, Reuse

technologiczną koncepcję 3R "Reduce, Reuse and Replace" – zmniejsz, wykorzystaj ponownie i zamień (7, 10). W związku z tym w pracy do oceny materiałów uwzględniono kryteria środowiskowe, społeczne, ekonomiczne i technologiczne. Głównym celem badań jest ułatwienie wyboru trwałego materiału spośród różnych wariantów, biorąc pod uwagę kluczowe czynniki i kryteria. W opisywanych badaniach wykorzystano podejście analityczne polegające na wielokryterialnej metodzie hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych i metody statystyczne do oceny wydajności materiału.

2. Metody

Biorąc pod uwagę ekologiczne, ekonomiczne, społeczne i technologiczne aspekty zrównoważonego rozwoju, poprzez analizę dostępnych danych, wyszczególniono listę 10 wskaźników ważnych dla rozwoju zrównoważonego, wymienionych w tablicy 1. Wskaźników tych użyto do określenia wskaźników trwałości dostępnych obecnie spoiw wariantowych.

Trwałość materiałów można ocenić, biorąc pod uwagę kryteria wieloaspektowe (11). Dowody naukowe sugerują, że ocena znaczącego wskaźnika trwałości jest konsensusem analizy kompleksowej (7). Proponowana metoda, przedstawiona na rysunku 1, wykazuje jak można osiągnąć rozwój zrównoważony w budownictwie, mając na uwadze cztery zrównoważone kryteria.

2.1. Skala Likerta i Saaty'ego

Skala Likerta jest powszechnie stosowana do uzyskania odpowiedzi na pytania zawarte w kwestionariuszu. Jest to skala ta została opracowana przez Thomasa Saaty'ego (13) w 1980 roku i określa ona opinię, percepcję i zachowanie respondenta. Jest to

Tablica 1 / Table 1

LISTA UWZGLĘDNIONYCH WSKAŹNIKÓW PRZYDATNOŚCI

LIST OF SUSTAINABLE INDICATORS CONSIDERED IN THE STUDY

Code Oznaczenie	Sustainable Indicators Wskaźniki wydajności	Key References Literatura
F1	Global Warming Potential Globalne ocieplenie	(12, 13)
F2	Pollution and Emissions Emisje i zanieczyszczenie	(4, 14)
F3	Construction and Demolition Waste Odpady budowlane i rozbiórkowe	(5, 15)
F4	Resource Consumption Zużycie zasobów	(7, 16, 17)
F5	Life Cycle Cost Koszt cyklu życia	(4, 18)
F6	Recyclability and Reusability Możliwość recyklingu i ponownego użycia	(9, 19–21)
F7	Local Development Rozwój lokalny	(22, 23)
F8	Human Health & Safety Zrowie i bezpieczeństwo społeczne	(24, 25)
F9	Human Satisfaction Zadowolenie społeczne	(4, 26)
F10	Practicability & Flexibility Użyteczność i uniwersalność	(17, 27)

and Replace [3R's] has to be considered for achieving sustainable construction (7, 10). Therefore, the present study considered environmental, social, economic and technological criteria for material evaluation. The main objective of the study is to facilitate the selection of sustainable material among various alternatives considering key factors and criteria. The study utilizes the decision-making approach Analytical Hierarchy Process [AHP] and statistical methods to assess the material performance.

2. Methodology

Considering the environmental, economic, social and technological aspects of sustainability through content analysis a list of 10 sustainable indicators are identified and listed in Table 1, which are used for analysing the material sustainability among available material alternatives.

The sustainable material performance can be assessed by considering multi-dimensional criteria (11). The scientific evidence proposes that the assessment of significant sustainable performance indicator can be performed by a consensus-based process which best suits the comprehensive analysis (7). The proposed methodology as shown in Fig. 1 has been developed based on how sustainability in construction has to be achieved, keeping in view the four dimensions of sustainable criteria and indicators.

2.1. Likert's and Saaty's Scale

A Likert's scale is a scale commonly employed to get questionnaire responses, which measures the respondent's opinion, perception and behavior. While the AHP Saaty's scale is accordant to the scale mentioned by Thomas Saaty in 1980 (13). It is a default scale developed to implement the pairwise comparison among the elements. By using Saaty's scale the decision makers feel difficulty in giving quick responses (14).

In the present study, questionnaire survey was drawn out with 7-point Likert's scale and experts from the public and private organizations participated (where '1' represents very low and '7' represents very high). The survey collected 54 responses from academicians, designers, architects, consultants, clients, contractors, and others to analyze their significance towards material sustainability. The data extracted was observed to be consistent using Cronbach's alpha coefficient. They are then processed, analyzed and interpreted using statistical techniques to extract the required information. This information is then analyzed using Analytical Hierarchy Process a pairwise comparison Multi-Criteria Decision-Making [MCDM] method to establish interrelationship among material alternatives with respect to each sustainable indicator. The study as proposed a conversion scale from Likert's scale to AHP Saaty's scale to get quick responses as shown in Table 2.

The following steps are carried out to analyze the hierarchy problem and to calculate Material Sustainable Performance

powszechnie używana skala do porównania elementów parami. Podczas badań skalą Saaty'ego decydenci odczuwają trudność w udzieleniu szybkich odpowiedzi (14). W tych badaniach przeprowadzono również ankietę z siedmiopunktową skalą Likerta, w której „1” reprezentuje poziom bardzo niski, a „7” bardzo wysoki i wzięli w niej udział eksperci z organizacji prywatnych oraz publicznych. W badaniu uzyskano 54 odpowiedzi od naukowców, projektantów, architektów, konsultantów, klientów i wykonawców, aby przeanalizować ich znaczenie pod kątem spoiw dla zrównoważonego rozwoju. Zebrane dane mieściły się w zakresie ogólnie stosowanego współczynnika rzetelności testów psychologicznych [współczynnik α Lee Cronbacha]. Następnie wyniki przetwarzano, analizowano, a także interpretowano za pomocą technik statystycznych aby uzyskać końcowe informacje. Informacje te następnie analizowano metodą Saaty'a, która jest wielokryterialną metodą hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych w procesie porównywania parami w celu ustalenia wzajemnych powiązań między spoiwami wariantowymi, w odniesieniu do każdego wskaźnika przydatności. W badaniach zaproponowano konwersję skali Likerta do skali Saaty'a, celem uzyskania szybkich odpowiedzi, jak to pokazano w tablicy 2. W celu określenia hierarchii zagadnień i obliczenia wskaźnika przydatności materiału dla każdego spoiwa wariantowego przeprowadzono opisane poniżej kroki od

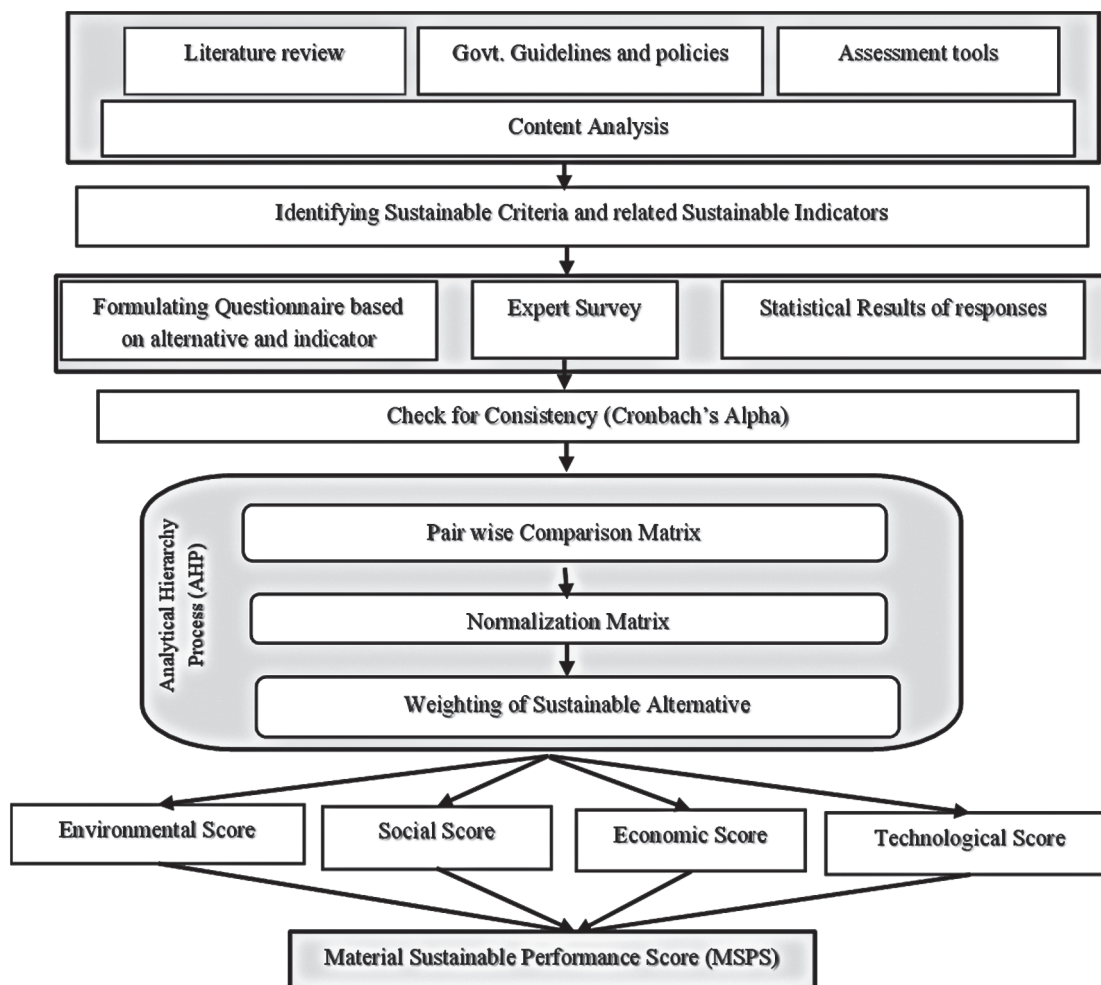
Score [MSPS] for a given sustainable material alternative. A case study is demonstrated for ease of understanding of the proposed methodology. The case deals with a selection of a sustainable cementitious binder material and to rank them in their order of preference. The responses are collected using the questionnaire survey, the pattern of question is based on the significance/importance of material alternative on each of the sustainable indicator mentioned in Table 1. The detailed steps in the process are as follows.

Step 1- Summarize all responses for alternative with respect to each sustainable indicator.

Step 2- Convert Likert's scale responses to AHP scale using Table 2 conversion scale.

Step 3- Compose the pairwise comparison matrix **A** for each indicator, where a_{ij} represents the relative importance of i^{th} alternative with regard to j^{th} alternative for each criteria

$$A = [a_{ij}] = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_n \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$



Rys. 1. Wytyczne do oceny wydajności w aspekcie wyboru wariantowych materiałów wiążących

Fig. 1. Framework to Develop Material Sustainable Performance Score (MSPS)

1 do 7. Aby ułatwić zrozumienie proponowanej metody poniżej przedstawiono przykład tego postępowania. Sprawa dotyczy wyboru trwałego materiału wiążącego, a następnie uszeregowanie według preferencji. Odpowiedzi zebrano za pomocą ankiet, które polegały na określeniu znaczenia/wagi spoiwa wariantowego dla każdego wskaźnika zrównoważonego wymienionego w tablicy 1. Poszczególne kroki w tym procesie są następujące:

Krok 1 - Podsumowanie wszystkich odpowiedzi dla spoiw wariantowych w odniesieniu do każdego wskaźnika zrównoważonego.

Krok 2 - Konwersja odpowiedzi w skali Likerta na skalę Saaty'a według tablicy 2.

Krok 3 - Tworzenie macierzy porównań A dla każdego wskaźnika, w której a_{ij} odpowiada relatywnej wadze i-tego spoiwa dla j-tego kryterium.

$$A = [a_{ij}] = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{matrix} \end{matrix}$$

C_n oznacza liczbę kryteriów

Jeśli $a_{ij} > 1$, wówczas kryteria i są ważniejsze niż kryterium j

Jeśli $a_{ij} < 1$, wtedy kryteria i są mniej ważne niż kryterium j .

Jeśli $a_{ij} = 1$, kryteria są równoważne, $a_{ij} \times a_{ji} = 1$

Tablica 3 / Table 3

ODPOWIEDZI RESPONDENTA

EXPERT RESPONSE

Binder material alternative/ Wariantowy materiał wiążący	Ordinary Portland Cement/ Cement portlandzki	PPC Fly ash based Popiołowy cement pucolanowy	PPC Slag based Żyłowy cement pucolanowy	Geopolymer Geopolimery	Composite Cement Cement wieloskładnikowy
	OPC	PPC-F	PPC-S	GP	CC
Response	1	3	4	5	4

Krok 4 - Wykonanie normalizacji powyższej macierzy poprzez sumowanie wartości w każdej kolumnie, a następnie dzielenie każdego elementu kolumny przez jej sumę. Wszystkie kolumny znormalizowanej macierzy porównywanych par mają więc sumę 1.

Przykład ilustruje podejście zastosowane w metodzie Saaty'a z przeliczoną skalą w odniesieniu do jednego ze wskaźników i przedstawione w tablicach 3-5. Znaczenie spoiwa wariantowego, w odniesieniu do potencjału globalnej emisji gazów cieplarnianych [EGC], dla jednego z respondentów pokazano w tablicy 3. Dla każdego z respondentów w podobny sposób sformułowano 10 macierzy porównań par, o rozmiarze 5x5 [to znaczy 54x10], w celu określenia względnego znaczenia/przydatności spoiw wariantowych.

Względne znaczenie wariantowych materiałów wiążących (OPC i PPC-F) w odniesieniu do GEC respondent podał odpowiednio

C_n represents the number of criteria

If $a_{ij} > 1$ then i^{th} criteria is more important than j^{th} criteria

If $a_{ij} < 1$ then i^{th} criteria is less important than j^{th} criteria.

If $a_{ij} = 1$ then two criteria are equal $a_{ij} \times a_{ji} = 1$

Step 4 – Find the normalized matrix from the above obtained matrix by summing up values in each column and then divide each element of the column by its column total. All the columns in the normalized pairwise comparison matrix now have a sum of 1.

An example is illustrated for the approach followed in AHP method using the converted scale with respect to one of the indicators and is shown in Tables 3-5. The significance of an alternative with respect to Global Warming Potential [GWP] emission by one of the respondents is shown in Table 3. Likewise, 10 pairwise comparison matrices with 5x5 size are formulated for each respondent [i.e., 54 x 10] to determine the relative weight of material alternatives.

The relative importance of alternatives (OPC and PPC-F) with respect to GWP emissions is given as '1' and '3' respectively (Table 3). Therefore, the difference of relative importance of OPC and PPC-F is 2. From Table 2, the corresponding relative importance for the difference value of '2' is observed to be '5'. Since the alternatives OPC and PPC-F are compared based on GHG indicator and the alternative PPC-F rating is higher than the OPC rating, then the pairwise comparison is considered as reciprocal (i.e., $1/5 = 0.20$). Similarly, the pairwise comparison matrix is developed.

Tablica 4 / Table 4

PAIRWISE COMPARISON MATRIX

MACIERZ PORÓWNAŃ PAR

Alternatives Dodatek mineralny	OPC	PPC-F	PPC-S	GP	CC
OPC	1.00	0.20*	0.20*	0.14*	0.20*
PPC-F	5.00	1.00	0.33*	0.20*	0.33*
PPC-S	5.00	3.00	1.00	0.33*	1.00
GP	7.00	5.00	3.00	1.00	1.00
CC	5.00	3.00	1.00	1.00	1.00
Sum / Suma	23.00	12.20	5.53	2.68	3.53

* Wartości odwócone jeśli $j > i$

*Reciprocal values if $j > i$

Tablica 5 / Table 5

NORMALIZATION MATRIX

MACIERZ ZNORMALIZOWANA

Alternatives Dodatek mineralny	OPC	PPC-F	PPC-S	GP	CC	Average Średnia	W%
OPC	0.04	0.02	0.04	0.05	0.06	0.04	4.12%
PPC-F	0.22	0.08	0.06	0.07	0.09	0.11	10.58%
PPC-S	0.22	0.25	0.18	0.12	0.29	0.21	21.08%
GP	0.30	0.41	0.54	0.37	0.28	0.38	38.28%
CC	0.22	0.25	0.18	0.37	0.28	0.26	26.03%
Sum / Suma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		

jako „1” i „3” [tablica 3]. Zatem różnica względnego znaczenia OPC i PPC-F wynosi 2. Z tablicy 2 wynika, że odpowiadające względne znaczenie wagi dla wartości „2” wynosi „5”. Ponieważ materiały OPC i PPC-F są porównywalne pod względem wskaźnika EGC, a ocena PPC-F jest wyższa niż ocena OPC, wówczas porównanie parami jest odwrócone, to jest $1/5 = 0,20$. W podobny sposób układane były pozostałe macierze.

Krok 5 - Sprawdzenie indeksu spójności (CI) < 0,10. Współczynnik spójności zaprojektowano w taki sposób, aby wartości indeksu CI przekraczającego 0,10 świadczyły o niespójnych ocenach.

$$\text{Indeks spójności (CI)} = (\lambda_{\max} - n)/(n-1) \quad [1]$$

$$\text{Współczynnik spójności (CR)} = \text{CI/RI} \quad [2]$$

„RI” określa indeks losowości, który jest średnią CI dla dużej liczby losowo wygenerowanych macierzy tego samego rzędu, λ_{\max} to maksymalna wartość własna macierzy, a „N” to rozmiar macierzy (n = 5).

Maksymalna wartość własna jest obliczana z tablic 4 i 5

$$\lambda_{\max} = \{[(23 \cdot 4,12) + (12,2 \cdot 10,58) + (5,53 \cdot 21,08) + (2,67 \cdot 38,28) + (3,533 \cdot 26,02)] / 100\} = 5,34.$$

Z równania 1 wynika, że wskaźnik spójności (CI) wynosi 0,085. Ponieważ wielkość macierzy wynosi 5x5, więc ustalone z góry wartości na podstawie (28) i indeksu losowości (RI) wynoszą 1,12. Z równania 2, współczynnik spójności (CR) = 0,075 < 0,10. Dlatego uzyskane dane są wiarygodne i spójne. Ostatecznie, względne wagi kryteriów dla spoiw wariantowych uzyskuje się przez sumowanie poszczególnych rzędów macierzy.

Krok 6 - Określanie średniej wagi Saaty’ego spoiwa wariantowego dla wszystkich respondentów w odniesieniu do każdego wskaźnika.

Krok 7 - Obliczenie ostatecznego wyniku przydatności materiału poprzez zsumowanie wagi względnej każdego spoiwa alternatywnego, w odniesieniu do wskaźnika przydatności, a także kryteriów, na podstawie tablicy 6.

Step 5 – Check for Consistency Index [CI] < 0.10. The ratio is designed in such a way that values of the ratio exceeding 0.10 are indicative of inconsistent judgments.

$$\text{Consistency Index(CI)} = (\lambda_{\max} - n)/(n-1) \quad [1]$$

$$\text{Consistency Ratio (CR)} = \text{CI/RI} \quad [2]$$

‘RI’ represents the Random Index value, which is average CI for a large number of randomly generated matrices for the same order; λ_{\max} represents the maximum Eigen’s value; ‘n’ is the size of the matrix (n = 5).

Maximum Eigen’s value is calculated from Tables 4 and 5

$$\lambda_{\max} = \{[(23 \cdot 4.12) + (12.2 \cdot 10.58) + (5.53 \cdot 21.08) + (2.67 \cdot 38.28) + (3.533 \cdot 26.02)]/100\} = 5.34.$$

From Equation 1, the Consistency Index [CI] is found to be 0.085. Since the size of the matrix is 5x5 the predetermined values obtained from (28) and the Random Index [RI] is found to be 1.12. From Equation 2, Consistency Ratio CR = 0.075 < 0.10. Hence the data said to be reliable and consistent. Finally, the relative weights of criteria to alternative are obtained by pooling along the rows.

Step 6 – Find the average AHP relative weight of an alternative for all the respondents with respect to each indicator.

Step 7 – Obtain the final Material Sustainable Performance Score [MSPS] by aggregating each alternative relative weight with respect to sustainable indicator and criteria using Table 6.

3. Results and Discussion

To select an optimum sustainable alternative material, the AHP relative weighted score is calculated for Environmental, Economic, Social and Technological criteria as shown in Figs 1, 2, 3 and 4 respectively. The higher the sustainable material score, higher is the material sustainability. Considering environmental parameter, the alternative geopolymer based concrete has secured the highest score of 1.53 [Fig 2]. Similarly, considering economic parameter PPC fly ash based concrete has rated high as 1.12 [Fig 3]. In social parameter, PPC fly ash based concrete has rated high as

Tablica 6 / Table 6

ZALEŻNOŚĆ MIĘDZY WSKAŹNIKIEM TRWAŁOŚCI A KRYTERIUM TRWAŁOŚCI

RELATION BETWEEN SUSTAINABLE INDICATOR AND SUSTAINABLE CRITERIA

Code Oznaczenie	Indicators or Criteria Wskaźnik lub kryterium	Environmental Środowiskowe	Economic Ekonomiczne	Social Społeczne	Technological Technologiczne
F1	Climate change / Zmiany klimatyczne	•			
F2	Pollution potential / Zanieczyszczenie	•			
F3	Solid waste / Odpady stałe	•			
F4	Resource consumption / Zużycie zasobów naturalnych	•	•		
F5	Cost / Koszty		•		
F6	Recyclability / Możliwość recyklingu	•	•		•
F7	Local development / Rozwój lokalny		•	•	
F8	Human health safety / Bezpieczeństwo i zdrowie			•	
F9	Human satisfaction / Zadowolenie społeczne	•		•	
F10	Practicability / Użyteczność		•		•
Total no of indicators related to criteria Suma wskaźników powiązanych z kryterium		6	5	3	2

Źródła: (4,6)

Source: (4, 6)

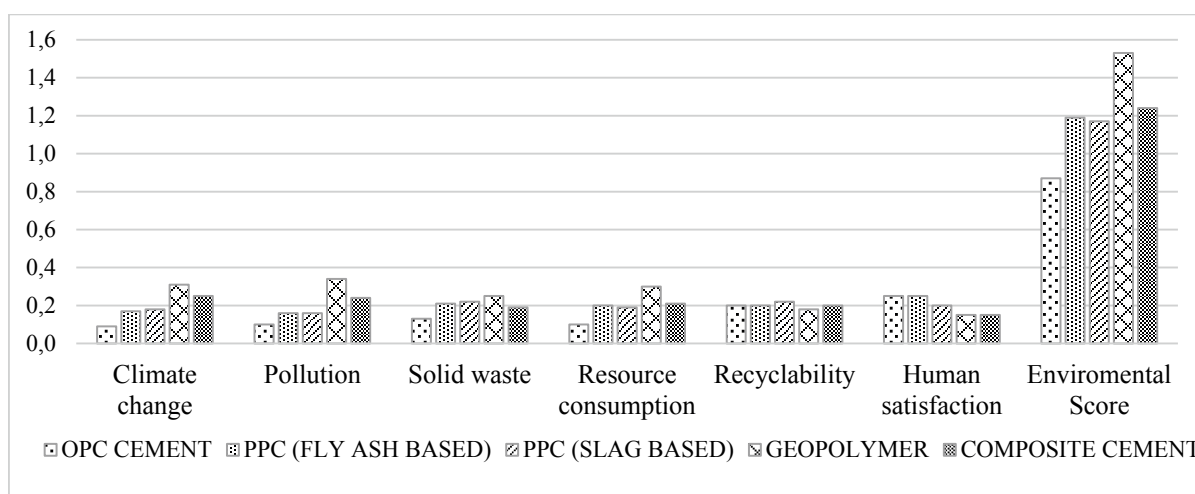
3. Wyniki i dyskusja

Aby wybrać optymalny pod kątem rozwoju zrównoważonego do-
datek mineralny, względna waga Saaty’ego jest obliczana zgodnie
z kryteriami środowiskowymi, ekonomicznymi, społecznymi i tech-
nologicznymi, jak to pokazano odpowiednio na rysunkach 1-4.
Im wyższy wskaźnik dla spoiwa zrównoważonego, tym wyższa
przydatność materiału. Biorąc pod uwagę parametr środowisko-
wy, beton geopolimerowy jako alternatywa dla zwykłego betonu
uzyskał najwyższy wynik 1,53 [rysunek 2]. Podobnie, biorąc pod
uwagę parametr ekonomiczny beton z cementu pucolanowego
popiołowego, oceniono na 1,12 [rysunek 3]. W kryterium spo-
łecznym beton z cementu PPC-F oceniono na 0,69 [rysunek 4].
Podobnie, biorąc pod uwagę kryterium technologiczne, ten sam
beton uzyskał najwyższy wynik 0,44 [rysunek 5].

0.69 [Fig 4]. Similarly, considering technological parameter PPC fly
ash based concrete has secured the highest score of 0.44 [Fig 5].

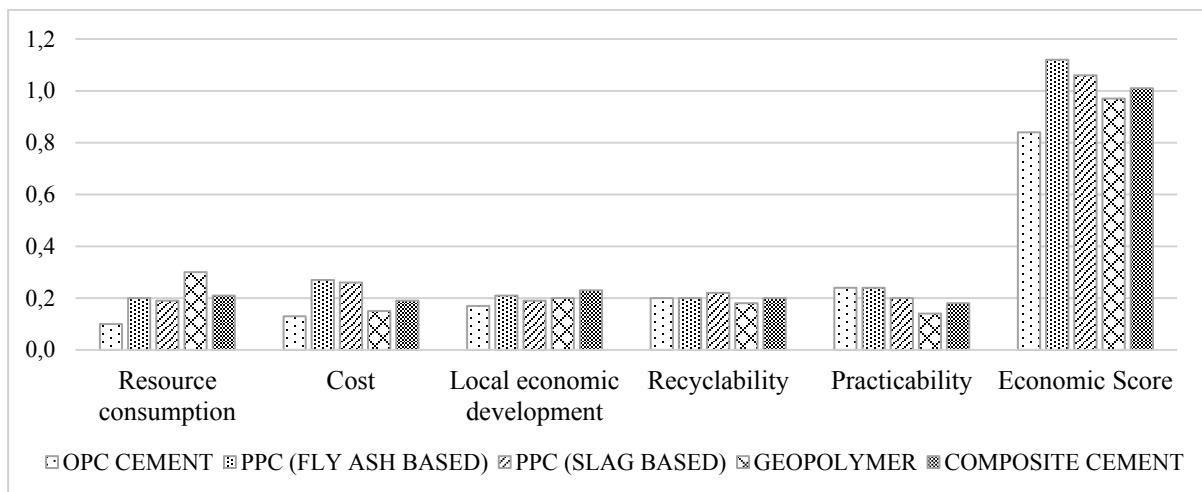
The sustainable criteria weight may vary with various constraints
like location and regional context, climate conditions, culture,
geographical conditions and awareness. The relative weights for
the criteria: environmental, economic, social and technological
are obtained from the literature (29), and is based on the experts
opinion [Academicians, Designers, Consultants, Architects, Engi-
neers and other stakeholder from the construction industry] and
analysed using AHP approach. The values are respectively 0.4, 0.3,
0.12 and 0.18. To obtain the overall MSPS the weighted average
for material alternatives is calculated as follows:

$$\text{Ordinary Portland cement} = (0.4 \times 0.87) + (0.3 \times 0.84) + (0.12 \times 0.57) + (0.18 \times 0.41) = 0.71$$



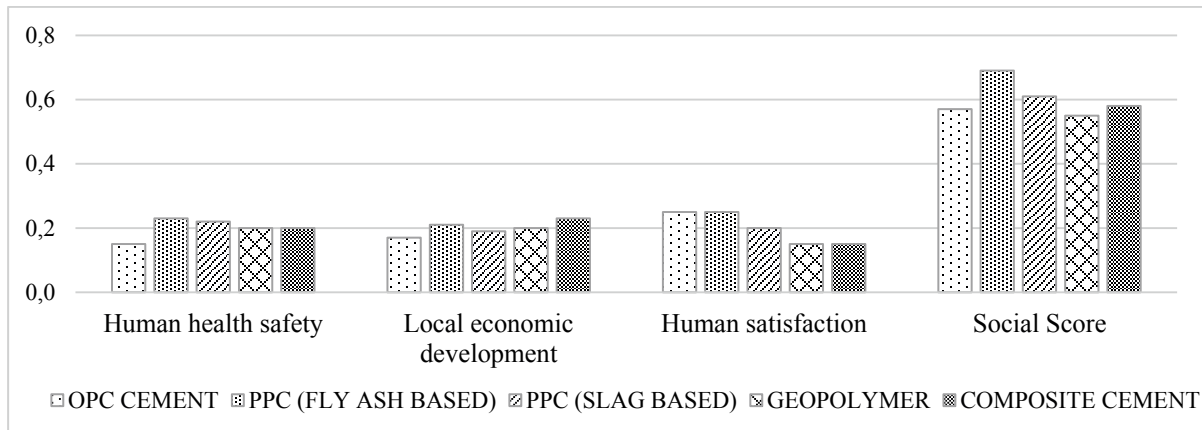
Rys. 2. Względna ocena spoiw alternatywnych w odniesieniu do wskaźników zrównoważonych (środowiskowych)

Fig. 2. Relative score of alternatives with respect to 'Environmental' sustainable indicator



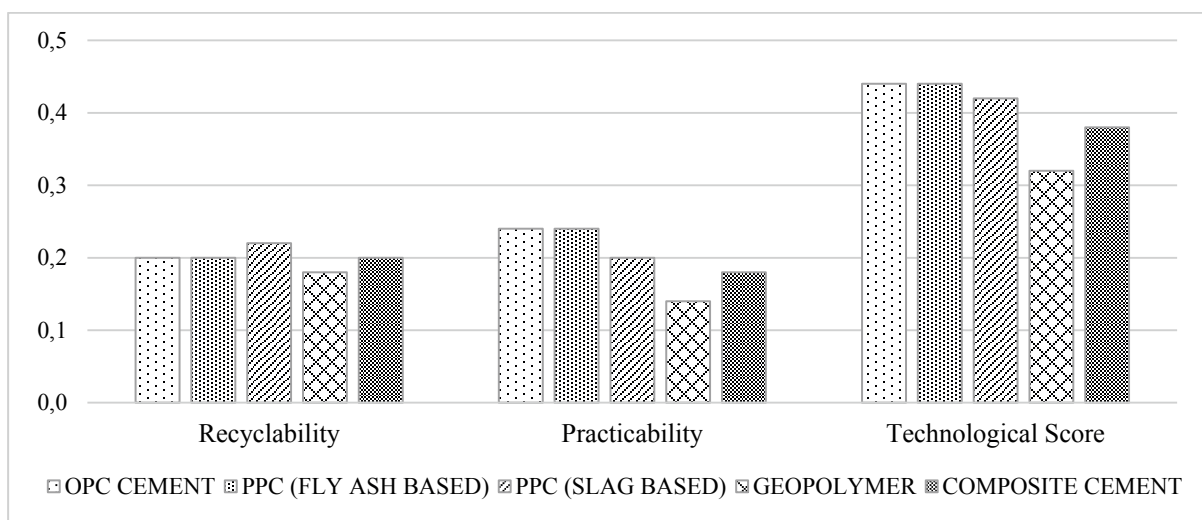
Rys. 3. Względna ocena spoiw alternatywnych w odniesieniu do wskaźników zrównoważonych (ekonomicznych)

Fig. 3. Relative score of alternatives with respect to 'Economic' sustainable indicator



Rys. 4. Względna ocena spoiw alternatywnych w odniesieniu do wskaźników zrównoważonych (społecznych)

Fig. 4. Relative score of alternatives with respect to 'Social' sustainable indicator



Rys. 5. Względna ocena spoiw alternatywnych w odniesieniu do wskaźników zrównoważonych (technologicznych)

Fig. 5. Relative score of alternatives with respect to 'Technological' sustainable indicator

Tablica 7 / Table 7

WYNIKI ZNORMALIZOWANE DLA SPOIW WARIANTOWYCH

NORMALISED SCORES FOR MATERIAL ALTERNATIVES

Material Alternatives/ Spoiwo alternatywne	OPC Cement/ Cement port- landzki	PPC (Fly ash Based)/ PPC popiołowy	PPC (Slag Based)/ PPC żuźłowy	Geopolymer/ Geopolimery	Composite Cement/ Cement wieloskładnikowy
Material Sustainable Performance Score Zrównoważony wskaźnik wydajności materiału [MSPS]	0,34	0,47	0,45	0,50	0,42

Waga kryteriów rozwoju zrównoważonego może być różna, w zależności od różnych ograniczeń, takich jak lokalizacja i charakter regionalny, warunki klimatyczne, kultura, warunki geograficzne i świadomość społeczna. Względne wagi kryteriów środowiskowych, ekonomicznych, społecznych i technologicznych pochodzą z literatury (29) i opierają się na opinii ekspertów – naukowców, projektantów, konsultantów, architektów, inżynierów, interesariuszy z branży budowlanej i analiz przy użyciu metody Saaty’ego. Wartości wynoszą odpowiednio 0,4; 0,3; 0,12 i 0,18. Aby uzyskać ogólną ocenę obliczono średnią ważoną dla spoiw wariantowych w następujący sposób:

$$\text{Zwykły cement portlandzki} = (0,4 \times 0,87) + (0,3 \times 0,84) + (0,12 \times 0,57) + (0,18 \times 0,41) = 0,71$$

$$\text{PPC popiołowy} = (0,4 \times 1,19) + (0,3 \times 1,12) + (0,12 \times 0,69) + (0,18 \times 0,44) = 0,97$$

$$\text{PPC żuźłowy} = (0,4 \times 1,17) + (0,3 \times 1,06) + (0,12 \times 0,61) + (0,18 \times 0,42) = 0,94$$

$$\text{Geopolimery} = (0,4 \times 1,53) + (0,3 \times 0,97) + (0,12 \times 0,55) + (0,18 \times 0,32) = 1,03$$

$$\text{Cement wieloskładnikowy} = (0,4 \times 1,24) + (0,3 \times 1,01) + (0,12 \times 0,58) + (0,18 \times 0,38) = 0,92$$

4. Wnioski

Uwzględnianie jedynie aspektów środowiskowych i pomijanie społeczno-ekonomicznych oraz technologicznych skutków wywoływanych przez budownictwo nie jest wystarczające do oceny materiałów z punktu widzenia rozwoju zrównoważonego. W tej pracy zaproponowano metodę oceny przydatności materiałów poprzez przeanalizowanie jego całego cyklu życia, przy użyciu wielokryterialnej metody hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych. Rzetelność badań oparta jest na zebraniu odpowiedzi od wszystkich zainteresowanych stron z branży budowlanej, w tym akademików, projektantów, architektów, konsultantów, klientów, a także wykonawców. Opracowane ogólne wytyczne ułatwiają zrozumienie przydatności spoiwa, mając na uwadze aspekty środowiskowe, ekonomiczne, społeczne i technologiczne oraz ich odpowiednie wskaźniki, kluczowe dla zrównoważonego rozwoju. Im większy wskaźnik przydatności materiału tym lepiej materiał nadaje się do budownictwa zrównoważonego. Wytyczne ułatwiają użytkownikowi kierowanie się własnymi preferencjami, w każdym ze zrównoważonych kryteriów, a następnie podjęcie najlepszej de-

$$\text{Pozzolana Fly Ash Based} = (0,4 \times 1,19) + (0,3 \times 1,12) + (0,12 \times 0,69) + (0,18 \times 0,44) = 0,97$$

$$\text{Pozzolana Slag Based} = (0,4 \times 1,17) + (0,3 \times 1,06) + (0,12 \times 0,61) + (0,18 \times 0,42) = 0,94$$

$$\text{Geopolymer} = (0,4 \times 1,53) + (0,3 \times 0,97) + (0,12 \times 0,55) + (0,18 \times 0,32) = 1,03$$

$$\text{Composite Cement} = (0,4 \times 1,24) + (0,3 \times 1,01) + (0,12 \times 0,58) + (0,18 \times 0,38) = 0,92$$

4. Conclusions

Considering only the environmental aspects and ignoring socio-economic and technological impacts of construction is not adequate to assess the material performance towards sustainability. In the present study, the proposed methodology assesses the material sustainability through material life cycle thinking using Analytic Hierarchy Process [AHP]. The significance of the study lies in gathering the responses from all the stakeholders of the construction industry i.e., academicians, designers, architects, consultants, clients, contractors, and others. The developed holistic framework facilitates to understand the material sustainability keeping in view the Environmental, Economic, Social and Technological aspects and their respective key sustainable indicators. Higher the sustainable material score, high is the material performance towards sustainability. The framework facilitates the user to prefer material performance in each of the sustainable criteria and accordingly take decisions suitable for the project. In the demonstrated case study, based on Material Sustainable Performance Score [MSPS], the order of priority for selection of cementitious material is Geopolymer, PPC fly ash, PPC slag, Composite cement and OPC cement based concrete. In the case of unavailability or scarcity of first ranked alternatives designer can prefer subsequently ranked alternatives for achieving better sustainability. Thus, the developed framework is a simple and lucid approach to assist the designer/building professionals to obtain a preference based sustainable concrete while choosing the alternative material.

czyli przy realizacji projektu. W przedstawionym studium kolejność wyboru spoiw wariantowych, oparta na wskaźnikach przydatności materiałów jest następująca: geopolimery, PPC popiołowy, PPC żuźlowy, cement wieloskładnikowy i cement portlandzki. W przypadku braku lub niedoboru najlepszego wariantu projektant może wybierać następne w kolejności, w przygotowanym rankingu. W ten sposób opracowane wytyczne są prostymi, przejrzystymi narzędziami wspomagającymi projektantów, a także pracowników firm budowlanych w stosowaniu betonu, opartego na preferencjach użytkownika i budownictwa zrównoważonego.

Literatura / References

1. S. Franco, V. R. Mandla, and K. Ram Mohan Rao, Urbanization, energy consumption and emissions in the Indian context A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* **71**, 898–907 (2017)
2. A. Garg, P. R. Shukla, B. Kankal, and D. Mahapatra, CO₂ emission in India: trends and management at sectoral, sub-regional and plant levels, *Carbon Manag.* **8**, 111–123 (2017).
3. S. H. Smith and S. A. Durham, A cradle to gate LCA framework for emissions and energy reduction in concrete pavement mixture design, *Int. J. Sustain. Built Environ.* **5**, 23–33 (2016)
4. E. S. Bakhoun and D. C. Brown, Developed Sustainable Scoring System for Structural Materials Evaluation, *J. Constr. Eng. Manag.* **138**, 110–119 (2012).
5. J. M. Khatib, *Sustainability of Construction Materials*. Woodhead Publishers, UK 2009
6. P. O. Akadiri and P. O. Olomolaiye, Development of sustainable assessment criteria for building materials selection, *Eng. Constr. Archit. Manag.* **19**, 666–687 (2012)
7. A. S. Reddy, P. A. Raj, and P. R. Kumar, Developing a Sustainable Building Assessment Tool (SBAT) for Developing Countries—Case of India, in *ASCE Urbanization Challenges in Emerging Economies*, pp. 137–148, 2018.
8. B. Jha, S. Verma, and P. R. Chaudhari, Green Buildings Concept towards Sustainable Urban Development and Panacea for Global Warming, **2**, 35–41 (2016)
9. L. Czarniecki, H. Justnes, Sustainable & durable concrete, *Cement Wapno Beton*, **17**, 341–360 (2012).
10. J. J. Wang, Y. Y. Jing, C. F. Zhang, and J. H. Zhao, Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making, *Renew. Sustain. Energy Rev.* **13**, 2263–2278 (2009).
11. K. K. Jain and B. Bhattacharjee, Application of Fuzzy Concepts to the Visual Assessment of Deteriorating Reinforced Concrete Structures, *J. Constr. Eng. Manag.* **138**, 399–408 (2012).
12. S. G. Al-Ghamdi and M. M. Bilec, Green Building Rating Systems and Whole-Building Life Cycle Assessment: Comparative Study of the Existing Assessment Tools, *J. Archit. Eng.* **23**, 04016015 (2017).
13. P. O. Akadiri, P. O. Olomolaiye, and E. A. Chinyio, Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects, *Autom. Constr.* **30**, 113–125 (2013).
14. J. M. Hussin, I. Abdul Rahman, and A. H. Memon, The Way Forward in Sustainable Construction: Issues and Challenges, *Int. J. Adv. Appl. Sci.* **2**, 31–42 (2013).
15. M. A. Nekooie, H. Goodall, and M. I. Mohamad, Selection of sustainable materials for lightweight concrete, *Proc. Inst. Civ. Eng. Sustain.* **168**, 159–172 (2015).
16. M. F. A. Al-Jebouri, M. S. Saleh, S. N. Raman, R. A. A. B. O. K. Rahmat, and A. K. Shaaban, Toward a national sustainable building assessment system in Oman: Assessment categories and their performance indicators, *Sustain. Cities Soc.* **31**, 122–135 (2017).
17. M. Sabaghi, C. Mascle, P. Baptiste, and R. Rostamzadeh, Sustainability assessment using fuzzy-inference technique (SAFT): A methodology toward green products, *Expert Syst. Appl.* **56**, 69–79 (2016).
18. E. S. Bakhoun and D. C. Brown, A hybrid approach using AHP-TOPSIS-entropy methods for sustainable ranking of structural materials, *Int. J. Sustain. Eng.* **6**, 212–224 (2013).
19. R. Dangwal et al., A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management, *J. Clean. Prod.* **2**, 1–11 (2016).
20. V. Sangiorgio, G. Uva, and F. Fatiguso, Optimized AHP to Overcome Limits in Weight Calculation: Building Performance Application, *J. Constr. Eng. Manag.* **144**, 04017101 (2018).
21. P. Oluwole Akadiri, Investigating Factors Influencing Building Materials Selection in Nigerian Construction Industry, *Am. J. Civ. Eng. Archit.* **6**, 154–157 (2018).
22. S. Vinodh, Improvement of agility and sustainability: A case study in an Indian rotary switches manufacturing organisation, *J. Clean. Prod.* **18**, 1015–1020 (2010).
23. Meg. Calkins, *Materials for Sustainable Sites: A Complete Guide for Evaluation, Selection and Use of Sustainable Construction Materials Defined*. Wiley Publications 2008.
24. S. Vinodh, K. Jayakrishna, V. Kumar, and R. Dutta, Development of decision support system for sustainability evaluation: A case study, *Clean Technol. Environ. Policy*, **16**, 163–174 (2014).
25. M. Zimmermann, H. J. Althaus, and A. Haas, Benchmarks for sustainable construction: A contribution to develop a standard, *Energy Build.* **37**, 1147–1157 (2005).
26. E. S. Bakhoun, G. L. Garas, and M. E. Allam, Sustainability analysis of conventional and eco-friendly materials: A step towards green building, *ARN J. Eng. Appl. Sci.* **10**, 788–796 (2015).
27. A. Weisbrod et al., Framework for Evaluating Sustainably Sourced Renewable Materials, *Supply Chain Forum An Int. J.* **17**, 259–272 (2015).
28. T. L. Saaty, Decision making with the analytic hierarchy process, *Int. J. Serv. Sci.*, **1**, 83 (2008).
29. A. Suchith Reddy P. Rathish Kumar P. Anand Raj, Sustainable performance indicators in built environment for developing countries, *Advances in Concrete, Structural & Geotechnical Engineering (ACSGE 2018)*, Bloomsbury India, 2018.