

Użyteczność betonu zrównoważonego – emisja CO₂

SUSTAINABLE CONCRETE PERFORMANCE – CO₂ – EMISSION

Streszczenie

Bilans emisji dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych w cyklu życia betonu stanowi jeden z istotnych elementów kształtowania zrównoważonego rozwoju technologii betonu. Modyfikacje składników i składu w kierunku minimalizacji tzw. „śladu węglowego” betonu wpływają także na większość jego cech technicznych, w tym przede wszystkim na cechy mechaniczne i trwałość. W artykule zaproponowano funkcję użyteczności, która pozwoliłaby szacować łączny skutek modyfikacji w aspekcie zarówno emisji CO₂, jak i wybranych cech technicznych betonu. Jako cechy kryterialne wybrano ekwiwalentną emisję CO₂, wytrzymałość na ściskanie i podatność/odporność betonu na karbonatyzację. Wybrane cechy należy traktować jako przykładowe – służące przedstawieniu proponowanej metodyki, a reprezentujące trzy filary użyteczności betonu w ujęciu zrównoważonego rozwoju, tj.: przydatność konstrukcyjną, trwałość i ekologiczność.

Abstract

The balance of carbon dioxide emissions and other greenhouse gases in the life cycle of concrete is one of the important elements shaping the sustainable development of concrete technology. Modifications in the composition and compounds in the aim of minimization of so-called. “carbon footprint” of concrete also affect the majority of its technical features, including primarily the mechanical properties and durability. The article presents a desirability function that would allow to estimate the combined effect of the modification in terms of both CO₂ emissions and some of the technical features of the concrete. As criterial features equivalent CO₂ emission, compressive strength and susceptibility/resistance to concrete carbonation were selected. Selected features should be considered as

inż. Rafał Latawiec – Politechnika Warszawska

dr hab. inż. Piotr Woyciechowski, prof. PW – Politechnika Warszawska

dr inż. Karol Kowalski – Politechnika Warszawska

an example – for the presentation of the proposed methodology, and represent the three pillars of concrete desirability in terms of sustainable development, i.e.: the constructional usefulness, durability and environmental performance.

1. Wstęp

Jednym z najpowszechniej stosowanych materiałów budowlanych na świecie jest beton. W Polsce w roku 2014 wyprodukowano 19,2 mln m³ betonu towarowego [1]. Koncepcja betonu zrównoważonego zakłada jego optymalizację materiałowo-technologiczną obejmującą wskaźniki techniczne, ekonomiczne i ekologiczne [2]. Porównanie podobnych konstrukcji zaprojektowanych w sposób optymalny ze stali, drewna lub betonu, wskazuje, że emisja gazów cieplarnianych w przypadku konstrukcji z betonu jest największa [3].

Ekwiwalentna emisja CO₂ w przeliczeniu na jednostkę masy jest, w przypadku betonu większa o kilka procent niż w przypadku stali i kilkanaście – niż w przypadku drewna. W tym kontekście duże zużycie betonu na świecie spowodowało skupienie uwagi badaczy na obniżaniu tzw. „emisyjności” betonu. Pojęcie „emisyjności” betonu odnoszone do emisji gazów cieplarnianych jest swoistym skrótem myślowym, jako iż beton – jak wiadomo – nie powoduje emisji do otoczenia ani dwutlenku węgla ani innych gazów. „Emisyjność” dotyczy całego cyklu życia ale w przypadku betonu – głównie fazy pozyskiwania surowców, produkcji składników i wbudowywania, a oznacza sumaryczną emisję gazów cieplarnianych wyrażoną jako emisję ekwiwalentną CO₂. Główną przyczyną wysokiej emisji gazów cieplarnianych są procesy wymagające dużych nakładów energii – w przypadku betonu jest to produkcja cementu. Dotyczy to także domieszek, jednak ich niewielka zawartość w mieszance praktycznie eliminuje je z rozważań o źródłach emisji gazów cieplarnianych. Wydobycie pozostałych surowców, ich transport i produkcja mieszanki mają także wpływ na bilans emisji gazów cieplarnianych w życiu betonu. W tym kontekście warto zwrócić także uwagę na proces karbonatyzacji betonu. W warunkach ekspozycji na atmosferyczne CO₂ następuje w betonie jego reakcja z wodorotlenkiem wapnia Ca(OH)₂. Wpływ tego procesu na bilans emisji CO₂ w fazie życia pierwotnego betonu (tj. w konstrukcji) jest jednak znikomy ze względu na mały zasięg procesu w głąb betonu oraz niewielką powierzchnię odkrytą betonu. Badania [4] dowodzą, że proces ten jest odpowiedzialny za zaledwie 2,5% emisji CO₂ w przypadku fragmentu wiaduktu. Największy wpływ na ograniczenie emisji ma „drugie” życie betonu – rozbiórka i użycie jako kruszywo odpadowe – działania te są jednak rzadko stosowane.

„Betonem o obniżonej emisyjności” czy też „obniżonej emisji CO₂” nazywany jest beton, którego skład został zmodyfikowany w sposób zapewniający obniżenie ekwiwalentnej emisji CO₂. Terminy te nie są w pełni poprawne, stały się jednak niezwykle popularne. Autorzy zwracają uwagę na powszechność używania błędnych pojęć jako uproszczenia. Uproszczenia zapożyczone są z języka angielskiego, w którym – w wielu publikacjach, np. [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11] – funkcjonują takie nielogiczne i niezgodne z faktografią pojęcia, jak „low-CO₂-concrete”, „low-carbon concrete”, „low-CO₂-emission concrete”, „low-carbon-emitting-concrete”, „low-emission-concrete”.

Pojęciem wprowadzonym w celu jednoznacznej oceny wielkości emisji gazów cieplarnianych do atmosfery, w cyklu życia danej substancji jest tzw. ślad węglowy, którego miarą jest ekwiwalentna emisja dwutlenku węgla. Ślad węglowy definiowany jest przez ISO 14067:2013 jako „suma emitowanych i pochłanianych przez produkt gazów cieplarnianych, wyrażana ekwiwalentem CO₂, bazująca na ocenie cyklu życia” [12]. Do porównywania wartości śladu węglowego wprowadzono pojęcie **wskaźnika emisji CO_{2eq}** – czyli śladu węglowego danej substancji przypadającego na jednostkę jej masy. Podczas obliczania śladu węglowego ważne jest wyraźne zdefiniowanie granic analizy cyklu życia. Najczęściej stosowane podejścia to „od kołyski do bram” (z ang. „from cradle to gate”) i „od kołyski do grobu” (z ang. „from cradle to grave”) [13].

Rozwiązaniem powszechnie stosowanym w celu obniżenia śladu węglowego betonu jest zmniejszenie zawartości klinkieru stosowanego w cemencie i zastąpienie go materiałami mineralnymi o znacznie niższym wskaźniku emisji. Ważne jest, aby stosowany zamiennik wykazywał takie cechy, aby uzyskany cement miał odpowiednie właściwości. Wiele takich zamienników jest stosowanych zarówno jako zamienniki klinkieru jak i cementu, zgodnie z PN-EN197-1 i PN-EN 206. Jest to np. popiół lotny. Ze względu na odpadowe pochodzenie emisja CO₂ wynikająca z jego użytkowania jest niemal zerowa.

2. Sformułowanie funkcji użyteczności betonu

Podstawą sformułowania funkcji użyteczności w proponowanym ujęciu jest stwierdzenie, że składniki, które powodują zmniejszenie śladu węglowego betonu, wpływają zasadniczo także na inne jego cechy. Przykładem może być beton z dodatkiem popiołu lotnego, który ma niższą emisyjność, ale jednocześnie, w niektórych aspektach może mieć obniżoną trwałość. Autorzy wyodrębnili cztery podstawowe grupy cechy, które, ich zdaniem, należy uwzględnić w proponowanym podejściu do analizy użyteczności. Są to: cechy mechaniczne związane z konstrukcyjną funkcją betonu, cechy charakteryzujące trwałość, charakterystyki związane z emisją CO₂ oraz wskaźniki ekonomiczne. Wskaźniki ekonomiczne zwykle nie są elementem typowych funkcji użyteczności, a jedynie są uwzględniane poprzez określenie tzw. „cost-benefit ratio”. Podobnie można potraktować wskaźniki ekologiczne, tworząc „emission-benefit ratio”. Autorzy podjęli jednak próbę sformułowania funkcji użyteczności betonu uwzględniającej cztery wymienione aspekty, co wymagało zdefiniowania ilościowych cech z każdej z grup. Szczególnie trudne jest to w przypadku trwałości betonu, gdyż wymaga wzięcia pod uwagę przewidywanego, zwykle złożonego, zestawu klas ekspozycji, w których beton będzie ekspozycyjny. W celu weryfikacji zasadności proponowanego podejścia sformułowano funkcję użyteczności betonu (1), która kwantyfikuje użyteczność betonu, uwzględniając: wytrzymałość na ściskanie, odporność na karbonatyzację, wskaźnik emisji CO_{2eq}, koszt jednostki objętości betonu, których wartości wyrażono w zmiennych standaryzowanych:

$$U = w_{f_{28}} * f_{28} + w_R * R_{carb} + w_W * W + w_K * K \quad (1)$$

gdzie: U – użyteczność uogólniona

$w_{f_{28}}$, w_R , w_W , w_K – wagi poszczególnych cech

f_{28} – wytrzymałość na ściskanie badana po 28 dniach

R_{carb} – trwałość rozumiana jako odporność na karbonatyzację

W – wskaźnik emisji CO_{2eq}

K – koszt 1m³ betonu.

Zmienne rzeczywiste przeliczono na zmienne standaryzowane zgodnie ze wzorami (2) w przypadku stymulantów i (3) w przypadku destymulantów:

$$z_{stan} = (z_{rzecz} - z_{srednie}) / (\sigma_z) \quad (2)$$

$$z_{stan} = - (z_{rzecz} - z_{srednie}) / (\sigma_z) \quad (3)$$

gdzie: z_{stan} – zmienna standaryzowana,

z_{rzecz} – zmienna rzeczywista,

$z_{srednie}$ – średnia populacji,

σ_z – odchylenie standardowe populacji.

3. Składowe funkcji użyteczności

Wytrzymałość na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie jest podstawowym wymaganiem stawianym betonom – zwykle w postaci wymaganej klasy wytrzymałości lub – rzadziej wartości wytrzymałości średniej lub minimalnej. Podczas porównywania wyników różnych badań należy pamiętać o porównywaniu wytrzymałości badanych na próbkach tych samych kształtów i rozmiarów. Ze względu na różne pochodzenie analizowanych wyników badań wytrzymałościowych, wytrzymałości na ściskanie próbek o rozmiarach i kształtach innych niż sześciennie o wymiarze 15 cm można w przybliżeniu przeliczać wg wzorów 4, 5, 6 podanych poniżej [14].

$$f_{ck,cube,15x15} = f_{ck,cyl,15x30} * 1,23 \quad (4)$$

$$f_{ck,cube,15x15} = f_{ck,cube,10x10} * 0,90 \quad (5)$$

$$f_{ck,cube,15x15} = f_{ck,cyl,10x20} * 1,19 \quad (6)$$

Analizowano wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych.

Emisja gazów cieplarnianych

Wskaźnik emisji W został obliczona jako suma śladów węglowych składowych substancji lub czynności związanych z produkcją surowców do betonu [15], [16], [17], [18]. według wzoru (7)

$$W = S(w_e * m) \text{ [kg emisji CO}_2\text{/m}^3\text{]} \quad (7)$$

gdzie: w_e – wskaźnik emisji danej substancji lub czynności
 m – jednostka substancji/czynności przypadająca na 1m³ betonu/

Wskaźniki emisji poszczególnych składników oraz czynności zaczerpnięto z literatury uwzględniając analizę cyklu życia „from cradle to gate” – [7], [8], [9], [10]. Pominięto wpływ procesu produkcji mieszanki betonowej, uznając go dla uproszczenia jako wartość stałą niezależną od składu betonu.

Koszt

Koszt betonu został obliczony jako suma iloczynów cen jednostkowych materiałów i ich zawartości, według wzoru 8 przedstawionego poniżej.

$$K = S(k_j * m) \text{ [pln/m}^3\text{]} \quad (8)$$

gdzie: k_j – koszt jednostkowy materiału
 m – zawartość składnika przypadająca na 1m³ betonu.

Koszty jednostkowe materiałów zostały pobrane z internetowych cenników budowlanych [19] lub zaczerpnięte od producenta (popiół lotny).

Trwałość

Trwałość, rozumiana jako zdolność do spełniania wymagań użytkownika w określonych warunkach przez określony czas, jest cechą związaną z warunkami użytkowania wykonanego obiektu [20]. Trwałość betonu determinują zagrożenia związane ze środowiskiem eksploatacji, skwantyfikowanym jako klasy ekspozycji wg normy PN-EN 206:2014 [21] (zagrożenia: karbonatyzacją, chlorkami pochodzącymi z wody morskiej, chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej, mrozem, agresją chemiczną, ścieraniem).

Wprowadzenie czynnika trwałości do funkcji użyteczności wymaga podjęcia arbitralnej decyzji odnośnie wskaźnika opisującego główne zagrożenia trwałości w konkretnym analizowanym przypadku. W warunkach środkowoeuropejskich jako najczęściej występujące mechanizmy ograniczające trwałość betonu wymienia się destrukcję mrozową betonu oraz pasywację zbrojenia na skutek dealkalizacji otuliny betonowej spowodowanej jej karbonatyzacją [20].

Na potrzeby analizy przedstawionej w tym artykule jako czynnik decydujący o trwałości przyjęto *odporność betonu na karbonatyzację* (R_{carb}), zdefiniowaną jako stosunek „umownej trwałości” analizowanego betonu do „umownej trwałości” betonu zwykłego, spełniającego wymagania najwyższej klasy ekspozycji związanej z karbonatyzacją – XC4. Norma PN-EN 206:2014 określa maksymalny wskaźnik wodno-cementowy dla tej klasy równy 0,5, a minimalną klasę wytrzymałości jako C25/30. Norma określa równocześnie minimalną zawartość cementu w betonie (300kg/m^3). Badania, np. [4], wykazują większą korelację odporności na karbonatyzację i współczynnika wodno-cementowego, niż zawartości cementu.

„Umowną trwałość” z uwagi na karbonatyzację t_x , można obliczyć stosując ogólny model karbonatyzacji (9) [22], przekształcony do postaci (10):

$$d = k_x * t_x^{0,5} \quad (9)$$

$$t_x = d^2 / k_x^2 \quad (10)$$

gdzie: d – głębokość karbonatyzacji równa grubości otuliny [mm]
 k_x – szybkość karbonatyzacji danego betonu [mm/rok^{0,5}]
 t_x – czas osiągnięcia przez front karbonatyzacji głębokości równej grubości otuliny, tzn. umowny czas inicjacji korozji zbrojenia w środowisku danego betonu [rok]

Niech indeks dolny 0,5 odnosi się do betonu o $w/c=0,5$ i spełniającego pozostałe wymagania klasy ekspozycji XC4, a brak indeksu do analizowanego przykładowego betonu. Wtedy, stosując równanie (10) obliczamy „umowną trwałość” betonu o $w/c=0,5$, jako $t_{0,5}$ i „umowną trwałość” przykładowego betonu, jako t :

$$t_{0,5} = d^2 / (k_{0,5})^2 \quad (11)$$

$$t = d^2 / k^2 \quad (12)$$

Z przyjętej definicji, odporność betonu na karbonatyzację (R_{carb}) można wyrazić jako:

$$R_{carb} = t / t_{0,5} \quad (13)$$

Stosując wcześniej przywołane indeksy i wzory:

$$R_{\text{carb}} = (d^2/k^2)/(d^2/(k_{0,5})^2) \quad (14)$$

$$R_{\text{carb}} = (k_{0,5}/k)^2 \quad (15)$$

gdzie: $k/k_{0,5}$ – współczynnik postępu karbonatyzacji analizowanego przykładowego betonu w stosunku do karbonatyzacji betonu o $w/c=0,5$.

Równanie (15), opisujące odporność na karbonatyzację, pozwala na obliczenie jej za pomocą współczynnika postępu karbonatyzacji $k/k_{0,5}$. Współczynnik należy określać na podstawie badań wykonywanych w jednakowych warunkach. Tak zdefiniowana wartość R_{carb} wynosi 1 dla betonu o $w/c=0,5$ oraz spełniającego pozostałe wymagania klasy ekspozycji XC4 i przyjmuje wartości poniżej jedności dla betonów mniej odpornych na karbonatyzację. Dla betonów mniej podatnych na karbonatyzację przyjęto także wartość $R_{\text{carb}}=1$, pomimo iż wartość rzeczywista jest wyższa. Wartość jeden oznacza wystarczającą odporność betonu w świetle oczekiwanej trwałości.

4. Baza danych do analizy

Podstawą analiz były wyniki badań pozyskane z prac [23], [24] zawierających wyniki badań betonów z cementem portlandzkim i dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego. Autorzy mają świadomość, że porównywanie wyników badań betonów z różnych źródeł, a więc zapewne o znacznej zmienności materiałowej, zwiększa poziom niepewności prowadzonego wywodu i formułowanych wniosków, ale uważają również, że proponowane podejście powinno mieć charakter względnie uniwersalny, przydatny do oceny różnych betonów. Baza danych stworzona na potrzeby tego opracowania ma przede wszystkim służyć weryfikacji proponowanego narzędzia, a dopiero w drugim przybliżeniu konkretnym porównawczym analizom użyteczności.

Dane zawarte w tabeli 1 pozwalają wyznaczyć model odporności na karbonatyzację betonów analizowanej populacji

Tabela 1. Dane do analizy [według 23, 24]

Lp	Skład[kg/m ³]				Wytrzymałość na ściskanie f_{28} [MPa]	Odporność na karbonatyzację R_{carb} wg wzoru (15)
	Cement	Woda	Popiół lotny	Kruszywo piasek+grys 0/20 mm		
1	340	170	0	1869	46,2	1,00
2	465	158	0	1798	72,0	>1
3	238	170	102	1819	35,1	0,18
4	280	160	120	1766	43,8	0,57
5	315	153	135	1738	56,0	>1
6	204	170	136	1790	31,3	0,14
7	240	160	160	1749	46,6	0,44

Tablica 1. Cd. Dane do analizy [według 15, 16]

Lp	Skład[kg/m ³]				Wytrzymałość na ściskanie f_{28} [MPa]	Odporność na karbonatyzację R_{carb} wg wzoru (15)
	Cement	Woda	Popiół lotny	Kruszywo piasek+grys 0/20 mm		
8	270	153	180	1720	57,7	>1
9	170	170	170	1790	25,8	0,09
10	200	160	200	1729	43,2	0,18
11	225	153	225	1697	54,9	0,25
12	325	163	0	1915	37,5	1,00
13	287	159	32	1915	38,3	0,78
14	214	153	92	1915	28,9	0,26
15	147	147	147	1915	23,4	0,13
16	290	174	0	1915	23,4	0,29
17	256	171	28	1915	23,4	0,31
18	192	165	82	1915	22,4	0,13
19	132	159	132	1915	18,0	0,05
20	435	174	0	1793	44,2	>1
21	382	170	42	1793	44,5	>1
22	284	162	122	1793	42,1	0,94
23	194	155	194	1793	38,1	0,37
24	382	191	0	1793	33,7	0,96
25	336	187	37	1793	33,7	0,59
26	251	179	108	1793	34,3	0,27
27	172	172	172	1793	24,8	0,11
28	340	204	0	1793	27,5	0,39
29	300	200	33	1793	26,8	0,27
30	225	193	96	1793	22,8	0,13
31	155	186	155	1793	16,7	0,06

5. Model odporności na karbonatyzację

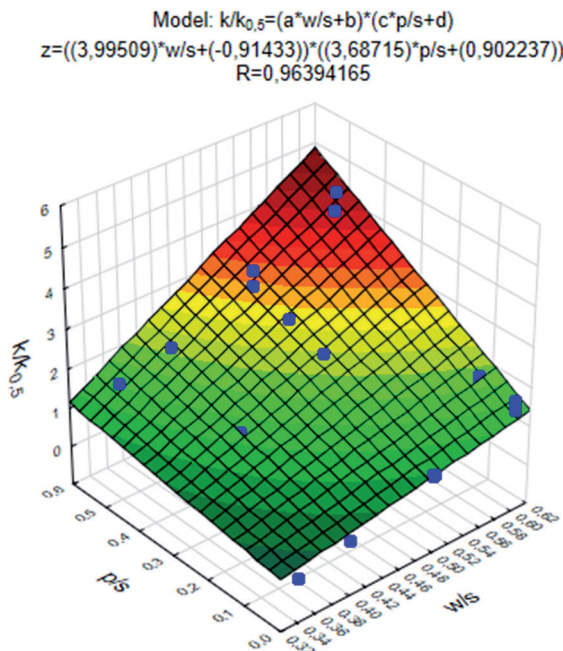
Badania [23], [24] wykazały, że wzrost udziału popiołu lotnego w spoiwie powoduje liniowy wzrost szybkości karbonatyzacji k , a zatem przewidywany spadek odporności betonu na karbonatyzację. Jednocześnie badania dowodzą, że także wzrost stosunku wodno-spoiwowego powoduje liniowy wzrost wartości k . Na podstawie danych pochodzących z wcześniej przywołanych badań, autorzy zaproponowali model określający współczynnik postępu karbonatyzacji $k/k_{0,5}$ oraz sposób obliczenia odporności na karbonatyzację R_{carb}

$$k/k_{0,5} = (4,0 * w/s - 0,91) * (3,69 * p/s + 0,9) \quad (16)$$

$$R_{carb} = 1 / (k/k_{0,5})^2, \text{ ale } R_{carb} > 0 \text{ i } R_{carb} \leq 1,0 \quad (17)$$

gdzie: w/s – stosunek masowy wody i spoiwa,
 p/s – % udział popiołu lotnego w spoiwie.

Model wg wzoru (16) określono przy pomocy programu Statistica 10 metodą najmniejszych kwadratów (rys. 1).



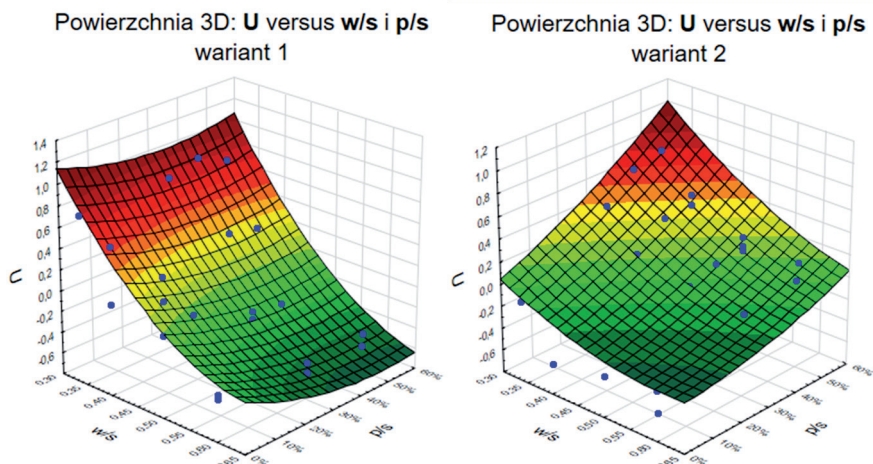
Rys. 1. Model zależności współczynnika postępu karbonatyzacji od w/s i p/s

6. Analiza użyteczności

W analizach betonów z dodatkami autorzy przyjęli dwa warianty ustalenia wag poszczególnych czynników (tabela 2).

Tabela 2. Wagi czynników do analizy użyteczności (oznaczenia wg rozdz. 3)

Warianty analizy	f_{28}	R_{carb}	K	W
	Wagi			
Wariant 1	0,4	0,3	0,2	0,1
Wariant 2	0,3	0,2	0,1	0,4



Rys. 2. Użyteczność w funkcji wskaźnika wodno-spoiwowego (w/s) oraz zawartości popiołu w spoiwie (p/s); warianty 1 i 2 według tabeli 2

W wariantcie 1 wytrzymałości na ściskanie, jako podstawowemu wymaganiu stawianemu betonom, autorzy przyznali wagę 0,4. Za drugi najważniejszy czynnik, autorzy uznali odporność na karbonatyzację, jako czynnik odpowiedzialny za trwałość i nadali mu wagę 0,3. Pozostałe cechy – koszt i emisyjność uznano za mniej ważne, nie rzutujące bezpośrednio na użyteczność betonu i nadano im wagi odpowiednio 0,2 i 0,1. W wariantcie 2 jako najważniejszy czynnik przyjęto emisyjność (waga 0,4), pozostawiając sekwencję pozostałych czynników bez zmian w stosunku do wariantu 1.

Przedstawiony graficznie wynik analiz wskazuje, że jeżeli wyższe wagi przyjmuje się dla czynników odnoszących się do cech technicznych (wytrzymałość i odporność na karbonatyzację), to użyteczność rośnie ze spadkiem w/s (co oczywiste), ale praktycznie nie zależy od udziału popiołu w spoiwie – wariant 1 na rys. 2. Oznacza to, że przyjęta w wariantcie 1 relacja wag R_{carb} i emisyjności W oraz kosztu K dobrze bilansuje korzystny wpływ popiołów (obniżenie emisyjności i kosztu) z jego wpływem niekorzystnym (odporność na karbonatyzację).

Jeśli natomiast jako dominujący czynnik potraktować emisyjność (wariant 2 na rys. 2), to wzrost udziału popiołu w spoiwie zwiększa użyteczność (pomimo obniżenia trwałości karbonatyzacyjnej) w podobnym stopniu jak obniżanie wskaźnika wodno – spoiwowego.

7. Wnioski końcowe

Przedstawiona analiza stanowi próbę oceny wielokryterialnej wpływu modyfikacji betonu popiołem na jego użyteczność, obejmującą główne aspekty techniczne (wytrzymałość i trwałość karbonatyzacyjną), ekologiczne (emisyjność) i ekonomiczne (koszt). Zaproponowane podejście pozwala uwzględnić te czynniki w sposób zależny od oczekiwań użytkownika, poprzez nadanie czynnikom odpowiednich wag. Charakter zaproponowanego narzędzia jest uniwersalny i może być ono przydatne do podobnej oceny innych modyfikacji betonu.

Przeanalizowana populacja betonów pozwoliła zweryfikować proponowane narzędzie. Wykazano, że jeżeli wyższe wagi przyjmuje się dla czynników odnoszących się do cech technicznych, to użyteczność rośnie ze spadkiem w/s i znacznie mniej zależy od udziału popiołu w spoiwie, jeśli natomiast jako dominujący czynnik potraktować emisyjność, to wzrost udziału popiołu w spoiwie zwiększa użyteczność.

Literatura

- [1] www.spbt.pl/files/docs/rynek_betonu_towarowego_w_polsce_12_2014.pdf, 19.04.2015,
- [2] L. Czarnecki, H. Justnes, Zrównoważony, trwały beton, Cement, Wapno Beton 6/2012, 341-362,
- [3] G. P. Maas, Comparison of quay wall designs in concrete, steel, wood and composites with regard to the CO-emission and the Life Cycle Analysis, Master Thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Section Hydraulic Structures, January 2011,
- [4] P. Woyciechowski, Model karbonatyzacji betonu, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013,
- [5] Keun-Hyeok Yang, Sung-Ho Tae, and Dong-Uk Choi, Mixture Proportioning Approach for Low-CO₂ Concrete Using Supplementary Cementitious Materials, Materials Journal vol. 113 (04), pp. 533-542,
- [6] Mukesh Limbachiya, Sevket Can Bostanci, Hsein Kew, Suitability of BS EN 197-1 CEM II and CEM V cement for production of low carbon concrete, Construction and Building Materials, Volume 71, 30 November 2014, Pages 397-405,
- [7] Taehyoung Kim, Sungho Tae, Seungjun Roh, Assessment of the CO₂ emission and cost reduction performance of a low-carbon-emission concrete mix design using an optimal mix design system, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 25, September 2013, Pages 729-741,
- [8] J. Thomas, H. Jennings, The Nanostructure of Low-CO₂ Concrete for a Sustainable Infrastructure, Report on a scientific collaboration, Lafarge Center for Research (LCR) – Northwestern University (NWU),
- [9] A. John, W. Harrison, Low carbon cements and concretes in modern construction, Internal Report TecEco www.tececo.com/files/conference%20papers/JHarrisonLowCarbonCements&Concrete8Mar13.pdf,
- [10] Genady Shakhmenko, Aleksandrs Korjakins, Patricija Kara, Girts Bumanis, Low-Carbon Concrete Using Local Industrial By-Products, 8th International Conference "Concrete in the Low Carbon Era, 2012,
- [11] Said Kenai, Belkacem Menadi, Jamal M Khatib, Sustainable construction and low-carbon dioxide concrete: Algeria case; Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability, Volume 167 Issue 2, April 2014, pp. 45-52,
- [12] ISO 14067:2013, Carbon footprints of products – Requirements and guidelines for quantification and communication,
- [13] A. Martínez-Rocamora, J. Solís-Guzmán, M. Marrero, LCA databases focused on construction materials: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58, May 2016, Pages 565–573,
- [14] Ł. Drobiec, R. Jasiński, A. Piekarczyk, Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych, metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010,
- [15] R. Rouwette, LCA of geopolymer concrete (e-crete), Final Report, Aurora Construction Materials, 2012,
- [16] D. Higgins, Sustainable Concrete: How can additions contribute?, The Institute of Concrete Technology Annual Technical Symposium, 28.03.2006,
- [17] Wykonanie analizy cyklu życia (LCA) w celu określenia śladu węglowego dla średnich cementów z grupy CEM I, CEM II i CEM III produkowanych w Polsce, zgodnie z PN-EN 15804: 2012 Raport wewnętrzny ITB, Nr pracy: 01929/12/Z00NF, Warszawa, wrzesień 2013,
- [18] L. K. Turner, F. G. Collins, Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete, Construction and Building Materials 43, 2013, p 125–130,
- [19] <http://www.cennik-budowlany.pl>, 24.05.2015,
- [20] Z. Ścisłowski, Ochrona konstrukcji żelbetonowych, Arkady, Warszawa 1999,
- [21] PN-EN 206:2014-04, Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność,
- [22] L. Czarnecki, P. H. Emmons, Naprawa i Ochrona Konstrukcji Betonowych, Polski Cement, Kraków, 2002,
- [23] D. Burden, The Durability of Concrete Containing High Levels of Fly Ash, Master Thesis, Portland Cement Association, Research & Development Serial No. 2989, January 2006,
- [24] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, T. Leelawat, A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete, Construction and Building Materials 20, 2006, p 744–753.