

Wybór receptury mieszanki betonowej w aspekcie trzech obszarów formułowania celu

Selection of the concrete mix recipe in terms of three areas of goal formulation

mgr inż. Wioletta Dobaczewska (ORCID: 0000-0003-0987-2211), dr hab. inż. Karol Prałat (ORCID: 0000-0001-5116-0379, dr inż. Wojciech Kubissa (ORCID: 0000-0001-5626-7917), Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska, mgr inż. Tomasz Dobaczewski (ORCID: 0000-0001-8085-7749), PORR S.A.

DOI 10.5604/01.3001.0053.8506

Streszczenie: Budownictwo jako dział gospodarki narodowej o dużym znaczeniu społecznym i gospodarczym, a także o znaczącym wpływie na środowisko naturalne jest wpisane w zasady zrównoważonego rozwoju. Jednym z głównych i powszechnie stosowanym materiałem budowlanym jest beton. W artykule zaprezentowano metodę wielokryterialnego wspomagania decyzji EIPICI, umożliwiającą w aspekcie ekologicznego, ekonomicznego i technicznego obszaru formułowania celu wybór zrównoważonej receptury mieszanki betonowej.

Słowa kluczowe: koncepcja zrównoważonego rozwoju, wielokryterialne wspomaganie decyzji, technologia betonu, metoda EIPICI.

Abstract: Civil engineering as a division of national economy with a great social and economic meaning, as well as with significant influence on the natural environment embedded in the concept of sustainable development. Concrete is one of the main and widely used building material. In this paper the authors present a multi – criteria decision support EIPICI which, due to ecological, technical and economic areas of goal formulation, will enable the selection of the sustainable concrete mix.

Keywords: the concept of sustainable development, multi – criteria decision support, concrete technology, EIPICI method.

1. Wprowadzenie

Rozwój gospodarczy wpłynął nie tylko na rozwój przemysłu budowlanego, ale również na wzrost świadomości ekologicznej społeczeństw. Budownictwo objęto ideą zrównoważonego rozwoju, a rok 2011 okazał się przełomowy, gdyż Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) NR 305/2011 [1] określono wymagania stawiane obiektom budowlanym, uwzględniając ich wpływ na środowisko, klimat, wykorzystanie zasobów naturalnych oraz oszczędność energii. Zgodnie z zapisami [1] obiekty budowlane powinny być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby podczas ich budowy, użytkowania i rozbiórki nie stanowiły zagrożenia dla higieny, zdrowia oraz bezpieczeństwa ich użytkowników lub sąsiadów oraz nie wywierały nadmiernego, negatywnego wpływu na jakość środowiska ani klimatu. Projektując, budując i użytkując budynki, jednocześnie spełniamy nasze bieżące potrzeby, a także dbamy o to, aby następne pokolenia mogły zaspokoić swoje przyszłe potrzeby.

2. Beton – zrównoważony wyrób

Jednym z powszechnie stosowanych w budownictwie indywidualnym i przemysłowym wyrobów budowlanych jest beton. Zapisy polskiej normy [2] definiują beton jako wyrób

końcowy powstały w wyniku zmieszania wody, cementu, kruszywa drobnego i grubego oraz ewentualnych domieszek i dodatków, który właściwości techniczne uzyskuje w wyniku hydratacji cementu. W literaturze naukowej pojęcie „zrównoważonego wyrobu” zdefiniowano jako minimum materii (energii i masy) zużytej podczas produkcji oraz okresu użytkowania i minimum negatywnego oddziaływania na środowisko, przy zapewnieniu komfortu eksploatacji [3]. Beton w aspekcie zrównoważonego wyrobu, na etapie produkcji, wymaga rozważenia zagadnień związanych między innymi z:

- stosowaniem do produkcji betonu cementów o obniżonym składzie klinkieru [4];
- zwiększeniem udziału dodatków mineralnych w składzie mieszanki betonowej;
- stosowaniem w produkcji betonu dodatków uzyskanych z materiałów odpadowych;
- stosowaniem w produkcji betonu kruszywa pochodzącego z recyklingu [5];
- stosowaniem w produkcji betonu lokalnego kruszywa, w konsekwencji ograniczeniem transportu na duże odległości;
- stosowaniem betonu o zwiększonej trwałości, w efekcie zmniejszeniem nakładów na przedwczesne naprawy betonowych/żelbetowych elementów budowlanych oraz wydłużeniem czasu ich użytkowania.

Tabela 1. Receptury mieszanek betonowych

Oznaczenie receptury	Cement (kg/m ³)	Kruszywo grube (kg/m ³)			Kruszywo drobne (kg/m ³)	Woda (kg/m ³)	Domieszki (kg/m ³)	Dodatki (kg/m ³)	W/C
CC1	300/C1	654/F1	-	-	662/F13	150	2,40/D1	-	0,50
CC2	300/C2	648/F1	-	-	655/F13	150	2,40/D1	-	0,50
CC3	300/C3	654/F1	-	-	662/F13	150	2,40/D1	-	0,50
CC4	300/C4	647/F1	-	-	654/F13	150	2,40/D1	-	0,50
CC5	300/C5	654/F1	-	-	662/F13	150	2,40/D1	-	0,50
CC6	300/C6	648/F1	-	-	655/F13	150	2,40/D1	-	0,50
CC7	300/C7	651/F1	-	-	659/F13	150	2,40/D1	-	0,50
CC8	300/C8	652/F1	-	-	659/F13	150	2,40/D1	-	0,50
CC9	300/C9	648/F1	-	-	655/F13	150	2,40/D1	-	0,50
M1C	300/C5	1633/F3	-	-	356/F13	150	3,00/D2	-	0,50
M2C	300/C5	1614/F3	-	-	352/F13	137	3,00/D2	22,50/P	0,46
M7C	300/C5	1438/F3	-	-	314/F13	137	3,00/D2	22,50/P	0,46
CF1	300/C5	662/F1	-	-	677/F13	135	2,40/D3	-	0,45
CF2	300/C5	669/F4	-	-	677/F13	135	2,40/D3	-	0,45
CF3	300/C5	80/F6	328/F7	523/F9	677/F13	135	2,40/D3	-	0,45
CF4	300/C5	657/F7	-	-	677/F13	135	2,40/D3	-	0,45
CF5	300/C5	669/F10	-	-	677/F13	135	2,40/D3	-	0,45
CF6	300/C5	655/F7	507/F12	-	225/F13	135	4,80/D3	-	0,45
CF7	300/C5	1190/F9	159/F6	-	517/F13	135	2,40/D3	-	0,45
CF8	300/C5	80/F6	331/F1	523/F9	677/F13	135	2,40/D3	-	0,45
CF9	300/C5	660/F2	597/F12	660/F1	225/F13	135	4,80/D3	-	0,45
C1 – cement CEMI 32,5R C2 – cement CEM II/B-S 32,5R-NA C3 – cement CEM II/B M(V-LL) 32,5R C4 – cement CEM II/B-V 42,5R C5 – cement CEM I 42,5R C6 – cement CEM II/B-V 32,5R C7 – cement CEM IV/B(V) 32,5N-LH C8 – cement CEM III/A 42,5N-LA C9 – cement CEM III/A 32,5N-LA	F1 – kruszywo granitowe 2–8 mm F2 – kruszywo granitowe 8–16 mm F3 – kruszywo granitowe 2–16 mm F4 – kruszywo wapienne 2–8 mm F5 – kruszywo wapienne 8–16 mm F6 – kruszywo żwirowe 2–4 mm F7 – kruszywo żwirowe 2–8 mm F8 – kruszywo żwirowe 8–16 mm F9 – kruszywo recyklingowe 4–16 mm	F10 – grys szarogazowy 2–8 mm F11 – grys szarogazowy 8–16 mm F12 – ścierniwo na bazie żużla pomiedziowego F13 – piasek 0–2 mm M – mikrosfery 150 µm od EKO EXPORT S.A. P – polimer SikalateX D1 – plastyfikator SP OPTIMA FLUID 1000 D2 – plastyfikator SAVEMIX – 4000 D3 – plastyfikator ATLAS DUROFLOW PE-220							

W związku z powyższym kluczowe znaczenie ma wybór receptury mieszanki betonowej. Beton charakteryzujący się takimi samymi właściwościami technicznymi może mieć większy lub mniejszy wpływ na środowisko naturalne. Czynnikiem często równie ważnym, a nawet decydującym jest koszt produkcji mieszanki betonowej. W artykule zaproponowano metodę wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPICI, która umożliwi wybór optymalnego wariantu receptury mieszanki betonowej stosownie do założonych kryteriów decyzyjnych. Wariantem optymalnym określono recepturę, która na podstawie zdefiniowanych kryteriów w największym stopniu odpowiada oczekiwaniom decydenta. Obliczenia wykonane zgodnie z przyjętym w metodzie EIPICI aparatem matematycznym umożliwiają uszeregowanie receptur mieszanek betonowych, od najlepiej do najgorzej preferowanych.

3. Metoda EIPICI

Podejmowanie decyzji jest procesem, w którym osoba decydująca – decydent, opierając się na dostępnych mu informacjach dokonuje rozsądzenia co do sposobu dalszego działania. Uogólniając, proces decyzyjny opiera się na kryteriach oceny decyzji, na podstawie których dokonywany jest wybór. Analiza wielokryterialna stosowana jest przy wspomaganie procesu decyzyjnego w sytuacjach, gdy dokonywany wybór następuje pomiędzy wieloma wariantami decyzyjnymi. Metoda EIPICI jest dedykowana do rozwiązania problemu decyzyjnego polegającego na wyborze, spośród zbioru receptur mieszanek betonowych, wariantu optymalnego. Receptury oceniane są względem zdefiniowanych kryteriów decyzyjnych, które zaś zgrupowane są w trzech podzbiorach zwanych obszarami formułowania celu. W przypadku każdej receptury znane są parametry (informacje), względem których jest ona oceniana. Istotne jest, aby posiadać komplet informacji. W przeciwnym wypadku działanie aparatu matematycznego zastosowanego w metodzie EIPICI będzie niemożliwe. Kryteriom decyzyjnym przypisane są współczynniki wagowe, których suma w każdym obszarze jest równa jeden. Efektem obliczeń jest uszeregowanie receptur od najlepiej do najgorzej spełniających oczekiwania decydenta. Rozwiązaniem najlepszym jest ta receptura, dla której wskaźnik EIPICI jest najniższy. Algorytm metody składa się z pięciu następujących kroków:

- krok 1 – wyznaczenie dla każdej receptury wartości kryterium ekologicznego EI ;
- krok 2 – wyznaczenie dla każdej receptury wartości kryterium technicznego PI ;
- krok 3 – wyznaczenie dla każdej receptury wartości kryterium ekonomicznego CI ;
- krok 4 – wyznaczenie dla każdej receptury wartości wskaźnika EIPICI;
- krok 5 – wybór najlepszego wariantu, czyli takiego dla którego wartość wskaźnika EIPICI jest najniższa.

3.1. Opis problemu decyzyjnego

Metodę EIPICI, zgodnie z jej przeznaczeniem, zastosowano do wyboru wariantu receptury mieszanki betonowej spośród zbioru 21 wariantów decyzyjnych $C = \{CC1, \dots, CC9, M1C, M2C, M7C, \dots, CF1, \dots, CF9\}$. Zbiór kryteriów, ze względu na zdefiniowane obszary formułowania celu stanowią trzy podzbiory:

- podzbiór kryteriów ekologicznych EI : ślad węglowy mieszanki betonowej EM oraz wartość zużycia surowców naturalnych RM ;
- podzbiór kryteriów technicznych PI : wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania f_{cm28t} , sorpcyjność s oraz mrozoodporność betonu $\Delta m_F, \Delta F_{\rho}$;
- kryterium ekonomiczne – koszt bezpośredni wyprodukowania 1 m³ mieszanki betonowej C_k .

Zbiór wariantów decyzyjnych stanowią zamieszczone w tabeli 1 receptury mieszanek betonowych. Znany jest również zbiór wag kryteriów decyzyjnych $W = \{W_1, W_2, W_3, W_4, W_5\}$ oraz miejsce produkcji mieszanki betonowej.

3.2. Kryterium ekologiczne EI

Przeprowadzenie obliczeń metodą EIPICI rozpoczyna wyznaczenie dla każdej mieszanki betonowej wartości kryterium ekologicznego EI . Kryterium ekologiczne jest to odwzorowanie wpływu betonu na środowisko naturalne wyrażone w wartości liczbowej. Obliczenia należy rozpocząć od wyznaczenia śladu węglowego EM i wartości zużycia surowców naturalnych RM dla każdej receptury mieszanki betonowej.

Do obliczeń przyjęto, że ślad węglowy to suma emisji gazów cieplarnianych wywołana bezpośrednio podczas produkcji mieszanki betonowej oraz jej składników, obejmująca następujące etapy: wydobywanie surowców, ich przetwórstwo i towarzyszące temu zużycie energii, transport i właściwy proces produkcji, tzw. „od pobrania do bram zakładu”. Ślad węglowy obliczono dla 1 m³ każdej mieszanki betonowej. Wyznaczone wartości nie zawierają strumienia masy i energii, które wykluczono ze względu na trudność przypisania ich do określonego przepływu odniesienia np. oświetlenie i ogrzanie biur, transport pracowników, produkcja i utrzymanie narzędzi i infrastruktury produkcyjnej.

Współczynnik zużycia surowca to iloczyn dwóch wartości – parametru rzadkości surowca oraz jego ilości niezbędnej do wyprodukowania 1 kg mieszanki betonowej. Wartość współczynnika wyznaczono postępując zgodnie z metodą opisaną w [6]. W tabeli 2 zestawiono składowe w analizie śladu węglowego betonu, ich ślad węglowy oraz współczynnik zużycia. Ślad węglowy mieszanek betonowych oraz wartość zużycia surowców naturalnych zestawiono w tabeli 3.

Wartość kryterium ekonomicznego EI wyznacza się zgodnie ze wzorem (1).

$$EI = \frac{EM}{EW} \cdot W_1 + \frac{RM}{RW} \cdot W_2 \quad (1)$$

Tabela 2. Składowe w analizie śladu węglowego betonu, ich ślad węglowy oraz współczynnik zużycia

Element składowy analizy	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Źródło	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Źródło
CEM I 32,5R	0,889	[7]	0,800	[6]
CEM I 42,5R	0,889	[7]	0,800	[6]
CEM II/B-S 32,5R	0,704	[7]	0,630	[6]
CEM II/B M(V-LL) 32,5R	0,704	[7]	0,630	[6]
CEM II/B-V 42,5R	0,704	[7]	0,630	[6]
CEM II/B-V 32,5R	0,704	[7]	0,600	[6]
CEM III/A 32,5 N-LA	0,482	[7]	0,400	[6]
CEM III/A 42,5 N-LA	0,482	[7]	0,520	[6]
CEM IV/B(V) 32,5N-LH	0,568	[7]	0,510	[6]
Kruszywo grube, inne niż żwirowe	0,008	[6]	0,938	[6]
Kruszywo drobne	0,005	[6]	0,500	[6]
Kruszywo żwirowe	0,005	[6]	1,250	[6]
Kruszywo recyklingowe	0,005	-	0,000	-
Ścierniwo na bazie żużla pom.	0,000	-	0,000	-
Mikrosfery	0,000	[6]	0,000	[6]
Polimer	0,250	[6]	2,250	[6]
Plastyfikator	0,250	[6]	2,250	[6]
Woda	0,001	[6]	0,100	[6]
Produkcja betonu	0,008	[6]	0,000	[6]

Tabela 3. Wartości śladu węglowego oraz zużycia surowców naturalnych wyznaczone dla każdej receptury mieszanki betonowej

Receptura	Ślad węglowy EM [kgCO ₂ /kg]	Wartość zużycia surowców RW [kg/m ³]	Receptura	Ślad węglowy EM [kgCO ₂ /kg]	Wartość zużycia surowców RW [kg/m ³]	Receptura	Ślad węglowy EM [kgCO ₂ /kg]	Wartość zużycia surowców RW [kg/m ³]
CC1	336,79	1820,92	CC8	214,94	1694,28	CF3	302,23	1517,40
CC2	281,23	1755,14	CC9	214,63	1722,14	CF4	303,49	2239,90
CC3	280,56	1769,92	M1C	346,16	1974,77	CF5	325,12	1855,12
CC4	278,63	1752,76	M2C	351,52	2004,19	CF6	303,48	2014,30
CC5	337,30	1820,92	M7C	345,66	1819,80	CF7	300,62	716,15
CC6	280,71	1746,14	CF1	338,04	1841,96	CF8	319,52	1319,68
CC7	240,72	1727,78	CF2	329,75	1855,12	CF9	338,94	1617,60

gdzie:

EW – wartość referencyjna śladu węglowego mieszanki betonowej – 490 kgCO₂/m³ [6];

RW – wartość referencyjna zużycia surowców naturalnych potrzebnych do wyprodukowania 1 m³ mieszanki betonowej – 2000 kg/m³ [6].

Podstawiając powyższe dane, wzór (1) przyjmie postać (2):

$$EI = \frac{EM}{490 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3} \cdot 0,5 + \frac{RM}{2000 \text{ kg/m}^3} \cdot 0,5 \quad (2)$$

3.3. Kryterium techniczne *PI*

Trwałość obok bezpieczeństwa i użyteczności, jest analizowana jako jeden z trzech filarów niezawodności

konstrukcji. Uszkodzenia betonu mogą wystąpić w wyniku oddziaływań: mechanicznych, chemicznych i fizycznych. Jedną z najczęściej występujących przyczyn destrukcji betonu jest korozja mrozowa zwłaszcza gdy beton jest narażony na zawilgocenie i stosowanie środków odładzających. Do równie częstych przyczyn uszkodzeń konstrukcji żelbetowych należy utrata zdolności ochronnych otuliny betonowej wobec zbrojenia, w wyniku procesu karbonatyzacji. Z uwagi na powyższe jako kryteria techniczne, obok wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania betonu, wybrano badanie mrozoodporności oraz sorpcyjności.

Kryterium techniczne *PI* to odwzorowanie właściwości technicznych betonu wyrażone w wartości liczbowej,

które oblicza się ze wzoru (3). Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryterium technicznego stanowią wyniki badań technicznych betonu. Badania próbek z serii M1C, M2C, M7C w ramach pracy dyplomowej magisterskiej [9], zaś z serii CF1-CF9 w ramach pracy dyplomowej inżynierskiej [10].

$$PI = \frac{f_{cm28}}{f_{cm28r}} \cdot W_3 + \frac{s_r}{s} \cdot W_4 + \left(\frac{100\% - \Delta f_{fr}}{100\% - \Delta f_{fr}} \cdot 0,5 + \frac{100\% - \Delta m_f}{100\% - \Delta m_f} \cdot 0,5 \right) \cdot W_5 \quad (3)$$

gdzie:

f_{cm28r} – referencyjna wartość średniej wytrzymałości na ściskanie – 60 MPa [6];

Δm_f – referencyjna wartość ubytku masy betonu po badaniu mrozoodporności – 5% [11];

Δf_{fr} – referencyjna wartość spadku wytrzymałości po badaniu mrozoodporności – 20% [11];

s_r – referencyjna wartość sorpcyjności betonu – 0,120 cm/h^{0,5} [6]; współczynniki wagowe $W_3 = 0,4$, $W_4 = W_5 = 0,3$.

Podstawiając powyższe dane, wzór (3) przyjmie postać (4):

$$PI = \frac{f_{cm28}}{60 \text{ MPa}} \cdot 0,4 + \frac{0,120 \text{ cm/h}^{0,5}}{s} \cdot 0,3 + \left(\frac{100\% - \Delta f_{fr}}{100\% - 20\%} \cdot 0,5 + \frac{100\% - \Delta m_f}{100\% - 5\%} \cdot 0,5 \right) \cdot 0,3 \quad (4)$$

3.4. Kryterium ekonomiczne CI

Kryterium ekonomiczne w metodzie EIPICI zdefiniowano jako koszt bezpośredni C_k wyprodukowania 1 m³ każdej z mieszanek betonowych. Składowe w analizie stanowią koszt: materiałów i ich dostawy M , robocizny R , pracy maszyn i pracy sprzętu budowlanego S (5). Nie uwzględniono kosztów pośrednich K_p , takich jak np. koszty marketingu i reklamy, delegacji i przejazdów, eksploatacji samochodów służbowych, prowadzenia biura, ubezpieczenia, zużycia sprzętu budowlanego, koszty bezpieczeństwa i higieny pracy. W analizie pominięto również zysk i wartość podatku VAT. Koszt bezpośredni wyprodukowania 1 m³ każdej mieszanki betonowej zamieszczono w tabeli 4.

Koszt referencyjny 1 m³ mieszanki betonowej przyjęto 400 zł. Wartość kryterium ekonomicznego CI wyznacza się zgodnie ze wzorem (5):

$$CI = \frac{C_k}{400 \text{ zł}} \quad (5)$$

3.5. Wyznaczenie wskaźnika EIPICI

Wyznaczenie wskaźnika EIPICI jest ostatnim działaniem aparatu matematycznego przyjętego w metodzie wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPICI. Umożliwia pozyskanie jednej wartości wynikowej oceny dla każdego z wariantów decyzyjnych, co pozwala na utworzenie rankingu. Wartości wskaźnika wyznacza się ze wzoru (6). Zgodnie z przyjętą metodą, rozwiązaniem najlepszym jest ten wariant decyzyjny, dla którego wartość wskaźnika EIPICI jest najniższa. Do obliczeń przyjęto, wartość współczynników wagowych $W_6 = W_7 = W_8 = 1/3$. Wartości kryterium ekologicznego EI , technicznego PI , ekonomicznego CI oraz wskaźnika EIPICI zestawiono w tabeli 5.

$$EIPICI = EI \cdot W_6 + \frac{1}{PI} \cdot W_7 + CI \cdot W_8 \quad (6)$$

4. Podsumowanie

Zgodnie z przeprowadzonymi obliczeniami wariantem najbardziej preferowanym jest wariant CF7. Do przygotowania 1 m³ mieszanki betonowej CF7 użyto: 300 kg cementu CEM I 42,5R, 1190 kg kruszywa recyklingowego, 159 kg kruszywa żwirowego 2–4 mm, 517 kg piasku 0–2 mm, 135 kg wody, 2,40 kg plastyfikatora ATLAS DUROFLOW PE-220. Współczynnik w/c wyniósł 0,45. Na podstawie przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że wykorzystanie kruszyw recyklingowych do produkcji betonu pozytywnie wpłynęło na aspekt ekologiczny i ekonomiczny. Beton, w którym zastosowano kruszywa z odzysku może również charakteryzować się dobrymi właściwościami technicznymi, o czym świadczą wyniki badań zamieszczone w tabeli 6.

Należy pamiętać, że właściwości kruszywa wtórnego zależą w dużym stopniu od właściwości elementu budowlanego, z którego zostało ono wyprodukowane. Kruszywo

Tabela 4. Koszt bezpośredni wyprodukowania 1 m³ każdej mieszanki betonowej

Receptura	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]	Receptura	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]	Receptura	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
CC1	373,61	CC8	414,73	CF3	333,60
CC2	401,80	CC9	401,80	CF4	358,61
CC3	397,61	M1C	458,06	CF5	399,83
CC4	407,51	M2C	726,40	CF6	385,74
CC5	427,61	M7C	714,96	CF7	306,85
CC6	418,30	CF1	430,17	CF8	369,45
CC7	405,73	CF2	400,50	CF9	460,96

Tabela 5. Wartości kryterium EI, PI, CI oraz wskaźnika EIPICI

Receptura	Wartość kryterium EI	Wartość kryterium PI	Wartość kryterium CI	Wartość wskaźnika EIPICI	Miejsce w rankingu
CC1	0,798	1,079	0,934	0,886	16
CC2	0,725	1,254	1,005	0,842	9
CC3	0,728	1,129	0,994	0,869	11/12
CC4	0,722	1,416	1,019	0,816	2
CC5	0,799	1,137	1,069	0,916	18
CC6	0,722	1,238	1,046	0,859	10
CC7	0,677	1,059	1,014	0,878	14
CC8	0,642	1,274	1,037	0,821	5
CC9	0,649	1,245	1,005	0,819	4
M1C	0,846	1,030	1,145	0,987	19
M2C	0,859	1,076	1,816	1,201	21
M7C	0,807	1,242	1,787	1,133	20
CF1	0,805	1,293	1,075	0,884	15
CF2	0,799	1,157	1,001	0,888	17
CF3	0,688	1,076	0,834	0,817	3
CF4	0,870	1,347	0,897	0,836	7
CF5	0,795	1,318	0,966	0,840	8
CF6	0,813	1,169	0,964	0,877	13
CF7	0,486	0,956	0,767	0,766	1
CF8	0,656	1,080	0,924	0,835	6
CF9	0,749	1,414	1,152	0,869	11/12

Tabela 6. Wyniki badań technicznych betonu dla receptury CF3, CF7 i CF8

Receptura	Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania [MPa]	Sorpcyjność [g/(cm ² ·h ^{0,5})]	Mrozoodporność		
			Średni spadek wytrzymałość [%]	Średni ubytek masy [%]	Pęknięcia powierzchni próbek
CF3	52,8	0,0929	4,17	0,435	brak
CF7	48,1	0,1209	3,59	0,943	brak
CF8	57,7	0,1012	2,92	-0,037	brak

wyprodukowane z tych samych elementów rozbiórkowych może charakteryzować się innymi właściwościami. Jest to czynnik często ograniczający możliwość jego stosowania w betonie.

Metoda wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPICI stanowi dobre narzędzie, które umożliwi świadomy wybór receptury mieszanki betonowej. Przedstawiony tok postępowania powinien wspomóc decydenta w podjęciu ekologicznie odpowiedzialnej i zasobowo oszczędnej decyzji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) NR 305/2011 z dnia 9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzenia do obrotu wyrobów budowlanych (Dz.U. UE. L. 2011.88.5)
- [2] PN-EN 206+A2:2021: Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
- [3] Czarnecki L., Justnes H., Zrównoważony, trwały beton, Cement Wapno Beton 6/2012, str. 341–362
- [4] Giergiczny Z., Fly Ash and slag, Cement and Concreat Research, 2019
- [5] Zając B., Gołębiewska J., Możliwość redukcji CO₂ przez zastosowanie betonu zrównoważonego i kruszywa recyklingowego, Inżynieria i Aparatura Chemiczna 51(5)2014, str. 261–265
- [6] Kubissa W., Jaskulski R., Chen J., Dobaczewska (Godlewska) W., Pui-Lam Ng, Reiterman P., Evaluation of ecological concrete using multi – criteria ecologica index and performance index approach, Architecture Civil Engineering, Environment 1/2019, str. 97–107
- [7] Deklaracja Środowiskowa III Typu – EPD Cementy CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V produkowane w Polsce, Instytut Techniki Budowlanej ITB, Warszawa, 2020
- [8] Kubissa W., Jaskulski R., Measuring and Time Variability of The Sorptivity of Concrete, Procedia Engineering, 57, 2013, str. 634–641
- [9] Tomczak P., Badanie wpływu dodatku mikrosfer i polimeru na wybrane właściwości betonu, Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii, Płock, 2019
- [10] Czarnecki M., Badanie wpływu rodzaju kruszywa na wybrane właściwości betonu, praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii, Płock, 2019
- [11] PN-EN-06265:2022-08: Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08