

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA: INŻYNIERIA LĄDOWA, GEODEZJA

I TRANSPORT

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO - TECHNICZNYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. Wioletta Dobaczewska

**Wielokryterialne wspomaganie decyzji EIPICI umożliwiające wybór
zrównoważonej receptury mieszanki betonowej**

Promotor:

dr hab. inż. Karol Prałat, prof. uczelni

Promotor pomocniczy:

dr inż. Wojciech Kubissa

PŁOCK, 2023

Serdecznie dziękuję

Panu dr hab. inż. Karolowi Prałatowi, profesorowi uczelni,
*za kilkuletnią opiekę promotorską, nieocenioną pomoc, wyrozumiałość i ogromne ilości
przekazanej motywacji w czasie powstawania rozprawy doktorskiej.*

Panu dr inż. Wojciechowi Kubissa,
*za ukierunkowanie naukowe, nieocenioną pomoc merytoryczną i życzliwość udzieloną
w czasie powstawania rozprawy doktorskiej.*

Mężowi Tomaszowi
za wsparcie i wiarę w moje możliwości.

Wioletta Dobaczewska

Streszczenie

Tytuł: *Wielokryterialne wspomaganie decyzji EIPICI umożliwiające wybór zrównoważonej receptury mieszanki betonowej.*

Pod pojęciem technologii betonu rozumie się wiedzę naukową o kształtowaniu właściwości betonu odpowiednio do wymagań konstrukcyjnych, ekologicznych i trwałości uzupełnioną o doświadczenia praktyczne z wykonania i eksploatacji konstrukcji i wyrobów z betonu. W obliczu bardzo szybko postępujących zmian klimatu i degradacji środowiska naturalnego aspekt ekologiczny zyskał na znaczeniu. Katalizatorem dynamizacji była popularyzacja idei zrównoważonego rozwoju. Działania proklimatyczne przedstawione w *Europejskim prawie o klimacie* z dnia 30 czerwca 2021 r. [1] przyczyniły się do inkluzyjnej i zrównoważonej gospodarki państw Unii Europejskiej, które za cel prawnie wiążący postawiły osiągnięcie zerowej emisji gazów cieplarnianych do 2050 r. W zakresie technologii betonu kluczem do sprostania temu wyzwaniu jest analiza wpływu składników betonu i procesów jego wytwarzania na środowisko.

W pierwszym rozdziale rozprawy przeglądowi poddano wybrane zagadnienia wpisane w koncepcję zrównoważonego budownictwa mające istotne znaczenie w projektowaniu i produkcji betonu. Przedstawiono i usystematyzowano podejmowane działania mające na celu ograniczenie nadmiernego negatywnego wpływu przemysłu betonowego na jakość środowiska i klimatu. W aspekcie produkcji betonu w szczególności rozważaniom poddano dostępne sposoby redukcji emisji dwutlenku węgla do atmosfery oraz racjonalne gospodarowanie surowcami naturalnymi. Wskazano, iż znakiem szczególnym technologii betonu XXI wieku jest dążenie do stosowania materiałów odpadowych z różnych gałęzi przemysłu i gospodarki oraz z recyklingu.

W rozdziale drugim, uwzględniając przesłanki do prowadzenia rozprawy doktorskiej, tezę rozprawy sformułowano następująco: ***metoda wielokryterialna wspomagania decyzji, która ze względu na zdefiniowane obszary formułowania celu: ekologiczny, techniczny i ekonomiczny, umożliwi wybór optymalnego wariantu receptury mieszanki betonowej.*** Mając na uwadze tezę rozprawy, określono jej cel oraz cele szczegółowe. Rozdział trzeci rozprawy poświęcono metodom badań własnych.

W kolejnym rozdziale pracy zaproponowano metodę wielokryterialnego wspomagania decyzji – EIPICI. Metodę oparto na działaniu aparatu matematycznego, który umożliwia 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 aparatem matematycznym przyjętym w metodzie EIPICI, umożliwiają uszeregowanie receptur mieszanek betonowych, od najlepiej do najgorzej spełniających wymagania decydenta.

Ostatnie dwa rozdziały poświęcono rozwiązaniu problemów decyzyjnych, polegających na wyborze receptury mieszanki betonowej do zastosowania w budownictwie infrastrukturalnym.

W ramach rozprawy przygotowano aplikację, umożliwiającą wykonywanie obliczeń przyjętych w metodzie EIPICI.

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

The summary

Title: *Multi-criteria decision support EIPICI enabling the selection of the sustainable concrete mix formulation.*

Concrete technology is understood as the scientific knowledge of shaping the properties of concrete in accordance with structural, durability and ecological requirements, supplemented by practical experience from the construction and operation of concrete structures and products. In the context of very rapid climate change and environmental degradation, the ecological aspect has become increasingly important. The catalyst for further dynamism was the popularisation of the idea of sustainability. The pro-climate measures outlined in the *European Climate Law* of 30 June 2021 [1] contributed to an inclusive and sustainable economy of the European Union countries, which established the goal of achieving zero greenhouse gas emissions by 2050 as a legally binding target. In the field of concrete technology, the key to meeting the aforementioned challenge is to analyse the environmental impact of concrete components and concrete production processes.

The first chapter of the dissertation reviews selected issues embedded in the concept of sustainable construction that are relevant to the design and production of concrete. The measures undertaken to reduce the negative, excessive impact of the concrete industry on environmental and climate quality are presented and systematised. In the aspect of concrete production, in particular, the available means of reducing carbon dioxide emissions into the atmosphere and the rational management of natural resources were considered. It was indicated that a distinctive feature of 21st century concrete technology is the trend towards the use of waste materials from various industrial and economic sectors and from recycling.

In chapter two, considering the rationale for the dissertation, the thesis of the dissertation was formulated as follows: ***a multi-criteria decision support method which, due to the defined areas of goal formulation: ecological, technical and economic, will enable the selection of the optimum concrete mix formulation variant.*** Considering the thesis of the dissertation, its aim and specific objectives were defined. The third chapter of the dissertation is devoted to the methods of the own research.

The next chapter of the dissertation proposes a multi-criteria decision support method – EIPICI. This method is supported by the operation of a mathematical apparatus that enables the selection of the optimum concrete mix formulation variant according to the established decision criteria. The optimum option was identified as the recipe that most closely matches the expectations of the decision-maker based on the defined criteria. The calculations,

performed in accordance with the mathematical apparatus adopted in the EIPICI method, enable concrete mix formulations to be ranked from best to worst to match the decision-maker's requirements.

The last two chapters are devoted to solving decision-making problems involving the selection of a concrete mix formulation for use in infrastructure construction.

As part of the dissertation, an application was prepared to perform the calculations adopted in the EIPICI method.

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

Spis treści

Wykaz najczęściej stosowanych skrótów i oznaczeń.....	12
Rozdział 1.....	15
Idea zrównoważonego rozwoju w budownictwie	15
1.1. Definicja zrównoważonego budownictwa w świetle obowiązujących przepisów prawa	15
1.2. Neutralność klimatyczna Unii Europejskiej.....	16
1.3. Realizacja zasady zrównoważonego rozwoju w przemyśle cementowym.....	17
1.4. Beton jako zrównoważony wyrób	19
1.4.1. Zwiększenie udziału dodatków mineralnych w składzie betonu.....	20
1.4.2. Stosowanie kruszywa pochodzącego z recyklingu w procesie produkcji betonu	23
1.5. Wybrane zagadnienia dotyczące trwałości obiektów budowlanych	25
1.6. Nowe kierunki rozwoju betonu	31
1.6.1. Beton wysokowartościowy (wysokiej wytrzymałości)	31
1.6.2. Beton z proszków reaktywnych.....	32
1.6.3. Beton polimerowy	33
1.6.4. Beton o wysokiej zawartości popiołów HVFAC	34
1.6.5. Beton ze zbrojeniem strukturalnym.....	34
1.7. Wybrane systemy certyfikacji, metodologie i narzędzia oceny budynków „zielonych”	35
1.8. Wielokryterialne metody wspomagania decyzji.....	39
Rozdział 2.....	41
Cel i zakres rozprawy	41
2.1. Przesłanki do prowadzenia tematu rozprawy	41
2.2. Cel i zakres rozprawy doktorskiej	42
Rozdział 3.....	45
Badania własne.....	45
3.1. Materiały i receptury mieszanek betonowych.....	45
3.2. Metody badań	48
3.2.1. Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 oraz po 90 dniach dojrzewania	48
3.2.2. Badanie wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu	49
3.2.3. Badanie sorpcyjności betonu.....	50
3.2.4. Badanie nasiąkliwości betonu	51
3.2.5. Badanie mrozoodporności betonu	52
3.2.6. Badanie głębokości wnikania chlorków	53
3.2.7. Badanie ścieralności na tarczy Boehmego	54
3.3. Wyniki badań laboratoryjnych	55

Rozdział 4.....	60
Rozwiązanie problemu decyzyjnego metodą EIPI.....	60
4.1. Wprowadzenie.....	60
4.2. Rozwiązanie problemu decyzyjnego metodą EIPI.....	61
4.2.1. Zdefiniowanie problemu decyzyjnego	61
4.2.2. Przygotowanie aparatu matematycznego	62
4.2.3. Przygotowanie bazy wiedzy o wariantach decyzyjnych	63
4.2.4. Wyznaczenie wartości kryteriów EI i PI oraz wartości wskaźnika GEPI	64
Rozdział 5.....	66
Metoda wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPICI.....	66
5.1. Wprowadzenie.....	66
5.2. Przygotowanie zbioru informacji o składniach mieszanek betonowych	69
5.3. Rozwiązanie problemu decyzyjnego metodą EIPICI.....	75
5.3.1. Opis problemu decyzyjnego	75
5.3.2. Przygotowanie aparatu matematycznego	76
5.3.3. Przygotowanie bazy wiedzy o wariantach decyzyjnych	78
5.3.4. Wyznaczenie wartości kryteriów EI, PI i CI oraz wartości wskaźnika EIPICI.....	79
Rozdział 6.....	81
Rozwiązanie problemu decyzyjnego metodą EIPICI polegającego na wyborze receptury mieszanki betonowej spośród zbioru wariantów decyzyjnych $C = \{CC1, \dots, CC9, M1C, M2C, M7C, CF1, \dots, CF9\}$ z uwzględnieniem pięciu kryteriów technicznych.....	81
6.1. Wprowadzenie.....	81
6.2. Opis problemu decyzyjnego	81
6.3. Przygotowanie aparatu matematycznego	82
6.4. Propozycja wartości wag kryteriów w zależności od oddziaływania środowiska na beton w konstrukcji.....	83
6.5. Przygotowanie bazy wiedzy o wariantach decyzyjnych	84
6.6. Wyznaczenie wartości kryteriów EI, PI i CI oraz wartości wskaźnika EIPICI.....	85
Rozdział 7.....	89
Rozwiązanie problemu decyzyjnego metodą EIPICI polegającego na wyborze receptury mieszanki betonowej do zastosowania w budownictwie mostowym.....	89
7.1. Opis problemu decyzyjnego	89
7.2. Przygotowanie aparatu matematycznego	90
7.3. Przygotowanie bazy wiedzy o wariantach decyzyjnych	91
7.4. Wyznaczenie wartości kryteriów EI, PI i CI oraz wartości wskaźnika EIPICI.....	92
Rozdział 8.....	94

Rozwiązanie problemu decyzyjnego metodą EIPICI polegającego na wyborze receptury mieszanki betonowej do zastosowania w budownictwie drogowym	94
8.1. Opis problemu decyzyjnego	94
8.2. Rozwiązanie problemu decyzyjnego dotyczącego wyboru receptury mieszanki betonowej dla dolnej warstwy betonu nawierzchniowego	95
8.2.1. Charakterystyka metody EIPICI dla zbioru wariantów decyzyjnych DB = {DB-01, DB-02, DB-03}	95
8.2.2. Przygotowanie bazy wiedzy o wariantach decyzyjnych	97
8.2.3. Wyznaczenie wartości kryteriów EI, PI, CI oraz wartości wskaźnika EIPICI.....	98
8.3. Rozwiązanie problemu decyzyjnego dotyczącego wyboru receptury mieszanki betonowej dla górnej warstwy betonu nawierzchniowego	99
8.3.1. Charakterystyka metody EIPICI dla zbioru wariantów decyzyjnych GB = {GB-01, GB-02, GB-03}	99
8.3.2. Przygotowanie bazy wiedzy o wariantach decyzyjnych	101
8.3.3. Wyznaczenie wartości kryteriów EI, PI i CI oraz wartości wskaźnika EIPICI.....	103
Rozdział 9.....	105
Wykonanie obliczeń za pomocą kalkulatora EIPICI.....	105
Rozdział 10.....	112
Podsumowanie i wnioski końcowe	112
Literatura	115
Spis tabel	125
Spis rysunków	127
Załącznik 1 – szczegółowe wyniki badań własnych	129
Załącznik 2 - wyznaczenie śladów węglowych oraz wartości zużycia surowców naturalnych dla wariantów decyzyjnych CC1 – CC9, M1C, M2C, M7C, CF1 – CF9	144
Załącznik 3 - wyznaczenie kosztu wyprodukowania 1 m ³ mieszanki betonowej dla wariantów decyzyjnych CC1 – CC9, M1C, M2C, M7C, CF1 – CF9.....	151
Załącznik 4 - wyznaczenie śladów węglowych oraz wartości zużycia surowców naturalnych dla wariantów decyzyjnych RC1 – RC6	158
Załącznik 5 - wyznaczenie kosztu wyprodukowania 1 m ³ mieszanki betonowej dla wariantów decyzyjnych RC1 – RC6	161
Załącznik 6 - wyznaczenie śladów węglowych oraz wartości zużycia surowców naturalnych dla wariantów decyzyjnych DB-01 – DB-03, GB-01 – GB-03.....	164
Załącznik 7 - wyznaczenie kosztu wyprodukowania 1 m ³ mieszanki betonowej dla wariantów decyzyjnych DB-01 – DB-03, GB-01 – GB-03	167

Wykaz najczęściej stosowanych skrótów i oznaczeń

f_{cm28}	średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania [MPa]
$f_{cm28,r}$	wartość referencyjna średniej wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania [MPa]
f_{cm90}	średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 90 dniach dojrzewania [MPa]
$f_{cm90,r}$	wartość referencyjna wytrzymałości betonu na ściskanie po 90 dniach dojrzewania [MPa]
f_{tm}	średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]
$f_{tm,r}$	wartość referencyjna średniej wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]
$f_{ct,fl}$	średnia wytrzymałość betonu na zginanie [MPa]
$f_{ct,fl,r}$	wartość referencyjna wytrzymałości betonu na zginanie [MPa]
S	sorpcyjność betonu [$\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$]
S_r	referencyjna wartość sorpcyjności betonu [$\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$]
$n_{w,m}$	średnia nasiąkliwość betonu [%]
$n_{w,r}$	referencyjna wartość nasiąkliwości betonu [%]
$\Delta m_{F,m}$	średni ubytek masy betonu po badaniu mrozoodporności [%]
$\Delta m_{F,r}$	referencyjna wartość ubytku masy betonu po badaniu mrozoodporności [%]
$\Delta f_{F,m}$	średni spadek wytrzymałości betonu po badaniu mrozoodporności [%]
$\Delta f_{F,r}$	referencyjna wartość spadku wytrzymałości betonu po badaniu mrozoodporności [%]
ΔV_m	średnie zmniejszenie objętości próbek betonu po 16 cyklach ścierania [mm^3]
ΔV_r	referencyjna wartość zmniejszenia objętości próbek betonu po 16 cyklach ścierania [mm^3]
d_m	średnia głębokość wnikania chlorków [mm]
d_r	referencyjna wartość głębokości wnikania chlorków [mm]
s_m	głębokość penetracji wody [mm]
s_r	referencyjna wartość głębokości penetracji wody [mm]
S_{n28}	ubytek masy po 28 cyklach zamrażania – rozmrażania z udziałem soli odladzających [kg/m^2]
$S_{n28,r}$	referencyjna wartość ubytku masy po 28 cyklach zamrażania – rozmrażania z udziałem soli odladzających [kg/m^2]

S_{n56}	ubytek masy po 56 cyklach zamrażania – rozmrażania [kg/m^2]
$S_{n56,r}$	referencyjna wartość ubytku masy po 56 cyklach zamrażania – rozmrażania z udziałem soli odladzających [kg/m^2]
n	ilość próbek [szt.]
EM	śląd węglowy mieszanki betonowej [kgCO_2/m^3]
EW	wartość referencyjna śladu węglowego mieszanki betonowej [kgCO_2/m^3]
RM	wartość zużycia surowców naturalnych niezbędnych do wyprodukowania 1 m^3 mieszanki betonowej [kg]
RW	referencyjna wartość zużycia surowców naturalnych potrzebnych do wyprodukowania 1 m^3 mieszanki betonowej [kg]
C_k	koszt bezpośredni wyprodukowania 1 m^3 mieszanki betonowej [zł]
$C_{k,r}$	referencyjny koszt bezpośredni wyprodukowania 1 m^3 mieszanki betonowej [zł]
EI	wartość kryterium ekologicznego
PI	wartość kryterium technicznego
CI	wartość kryterium ekonomicznego
$EIPI$	metoda wielokryterialnego wspomagania decyzji uwzględniająca ekologiczny i techniczny obszar formułowania celu (metoda)
$GEPI$	wartość wynikowa oceny EIPI (wskaźnik)
$EIPICI$	metoda wielokryterialnego wspomagania decyzji uwzględniająca ekologiczny, techniczny i ekonomiczny obszar formułowania celu (metoda)
$EIPICI$	wartość wynikowa oceny EIPICI (wskaźnik)

Rozdział 1

Idea zrównoważonego rozwoju w budownictwie

1.1. Definicja zrównoważonego budownictwa w świetle obowiązujących przepisów prawa

Początkowo idea zrównoważonego rozwoju ograniczała się do potrzeby zmniejszenia negatywnego oddziaływania gospodarek na środowisko naturalne. Wraz z upływem lat koncepcja zyskała pełniejszą definicję, uwzględniającą istotę trzech czynników rozwoju: poszanowania środowiska, postępu społecznego oraz wzrostu gospodarczego. Definicję zrównoważonego rozwoju reguluje Ustawa z dnia 27 kwietnia 2021 r. *Prawo ochrony środowiska* jako rozwój społeczno - gospodarczy, w którym następuje proces integrowania działań politycznych, gospodarczych i społecznych z zachowaniem równowagi przyrodniczej oraz trwałości podstawowych potrzeb poszczególnych społeczności lub obywateli, zarówno współczesnego pokolenia, jak i przyszłych pokoleń [2].

W 1997 r. zasadzie zrównoważonego rozwoju nadano rangę prawa podstawowego wynikającego z zapisów Konstytucji RP. Art. 5 ustawy zasadniczej, który mówi: „Rzeczpospolita Polska strzeże niepodległości i nienaruszalności swojego terytorium, zapewnia wolności i prawa człowieka i obywatela oraz bezpieczeństwo obywateli, strzeże dziedzictwa narodowego oraz zapewnia ochronę środowiska, kierując się zasadą zrównoważonego rozwoju” [3].

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. Powszechnie „zrównoważone budownictwo” oznacza szereg działań mających na celu ograniczenie negatywnego wpływu obiektów budowlanych na środowisko w ciągu ich całego „cyklu życia”. Działania te są regulowane przez krajowe oraz międzynarodowe akty prawa w tym Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) NR 305/2011 z dnia 9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzenia do obrotu wyrobów budowlanych [4] i uchylające dyrektywę Rady 89/106/EWG, Ustawę z dnia 7 lipca 1994 r. *Prawo budowlane* [5] oraz krajowe i międzynarodowe normy. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego nr 305/2011 [4] definiuje podstawowe wymagania stawiane obiektom budowlanym w gospodarczo uzasadnionym okresie użytkowania takie jak:

- nośność i stateczność;
- bezpieczeństwo pożarowe;
- higiena, zdrowie, środowisko;

- bezpieczeństwo użytkowania i dostępność obiektów;
- ochrona przed hałasem;
- oszczędność energii, izolacyjność cieplna;
- zrównoważone wykorzystanie zasobów naturalnych.

W publikacjach naukowych termin „budownictwo zrównoważone” określany jest mianem „budownictwa ekologicznego”. Budownictwo ekologiczne to działania człowieka polegające na projektowaniu, wznoszeniu, użytkowaniu, a w końcowym etapie rozbiórce obiektów budowlanych z ograniczeniem nadmiernego wpływu tych działań na jakość środowiska i klimatu, z uwzględnieniem racjonalnego gospodarowania surowcami naturalnymi, przy zachowaniu wszystkich parametrów technicznych zapewniających ich bezpieczne użytkowanie [6, 7].

1.2. Neutralność klimatyczna Unii Europejskiej

Działania proklimatyczne państw Unii Europejskiej przedstawione w *Europejskim prawie o klimacie* z dnia 30 czerwca 2021r. [1] to strategia rozwoju, która ma przekształcić państwa członkowskie w obszar neutralny klimatycznie. Europejskie prawo klimatyczne, celem pośrednim, zobowiązało państwa członkowskie do redukcji emisji dwutlenku węgla o 55% do 2030 r. w porównaniu do poziomu z 1990 r., zaś, celem prawnie wiążącym, do osiągnięcia zerowej emisji gazów cieplarnianych do 2050 r. Opracowano pakiet *Gotowi na 55* [8] mający na celu zmianę ustawodawstwa w dziedzinie klimatu, energii i transportu oraz wprowadzenie nowych inicjatyw ustawodawczych tak, by dostosować unijne przepisy do celów klimatycznych Unii Europejskiej. Istotnym instrumentem do osiągnięcia ww. celów ma być raportowanie wiarygodnych informacji na temat realizacji idei zrównoważonego rozwoju, a jednym z podstawowych narzędzi będzie wartość śladu węglowego.

Pojęcie śladu węglowego zostało opracowane przez Mathisa Wackernagela oraz Wiliama Reesa w 1992 r. [9]. W kolejnych latach definicja śladu węglowego przeszła dynamiczną transformację – z koncepcji o charakterze naukowym po powszechnie stosowane narzędzie oceniające wpływ na klimat działalności antropogenicznej – stając się stopniowo elementem współczesnych, prośrodowiskowych wymogów Unii Europejskiej. Ślad węglowy jest jedną z metod liczenia sumy emisji wszystkich gazów cieplarnianych, wyrażony ekwiwalentem CO₂. Może dotyczyć produktów i usług, aktywności pojedynczych osób i gospodarstw domowych, a także działalności przedsiębiorstw, rządów czy całych sektorów gospodarki.

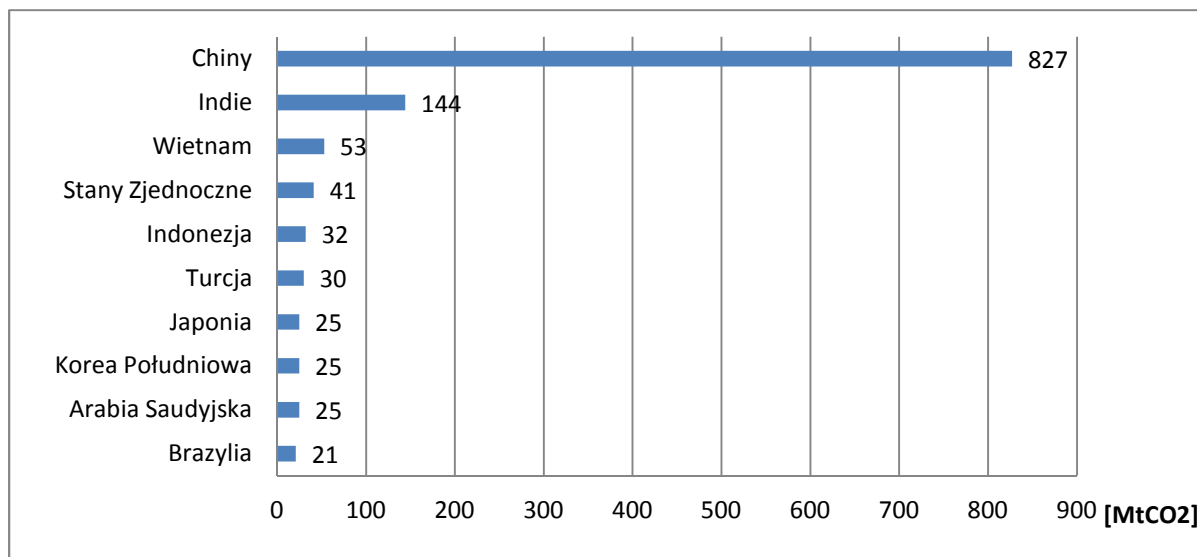
Ślad węglowy uwzględnia nie tylko emisje bezpośrednio generowane przez daną aktywność czy produkt, ale też emisje związane ze wszystkimi etapami ich cyklu życia.

1.3. Realizacja zasady zrównoważonego rozwoju w przemyśle cementowym

Współczesny przemysł budowlany jest nierozłącznie związany z szerokim stosowaniem budowlanych materiałów wiążących, a najpowszechniejszym z nich jest cement portlandzki wraz z liczną grupą jego pochodnych. Budowlane materiały wiążące, takie jak, spoiwa hydrauliczne są to substancje pochodzenia mineralnego, wytwarzane w postaci sproszkowanej stanowiące półprodukt, który należy poddać dalszej obróbce celem wytworzenia gotowego wyrobu. Spoiwa hydrauliczne po zmieszaniu z wodą wiążą, następnie w wyniku reakcji i procesów hydratacji twardnieją, osiągając cechy wytrzymałościowe, które zachowują również pod wodą. W budownictwie do wznoszenia obiektów budowlanych powszechnie stosuje się beton, czyli mieszaninę zestawioną z cementu, kruszywa drobnego i grubego, wody, dodatków i domieszek. Stale postępujący rozwój gospodarczy wpływa na wzrost przemysłu budowlanego w tym na zwiększone zapotrzebowanie na produkcję betonu, w konsekwencji na produkcję cementu.

Produkcja cementu polega na obróbce termicznej mieszanki składającej się z surowców naturalnych - glin i wapieni lub margli. Przemysłowa synteza minerałów wymaga temperatur rzędu 1250°C – 1450°C [10]. Otrzymany ze spiekania produkt – klinkier cementowy – w kolejnym etapie wraz z dodatkiem gipsu i innych składników poddaje się mieleniu.

Przemysł cementowy ze względu na technologię produkcji klinkieru cementowego jest jednym z dominujących emitentów dwutlenku węgla do atmosfery. Według danych zgromadzonych w ramach projektu Global Carbon Atlas globalna emisja dwutlenku węgla w roku 2020 wyniosła 34,8 Gt, z czego 1,6 Gt pochodziła z przemysłu cementowego [11]. W pierwszej piątce państw mających największą roczną emisją dwutlenku węgla, będącego produktem ubocznym w procesie produkcji cementu, znalazły się Chiny, Indie, Wietnam, Stany Zjednoczone oraz Indonezja (Rysunek 1).



Rysunek 1. Ranking 10 największych światowych emitentów CO₂ pochodzącego z przemysłu cementowego w 2020 r. [11]

Wraz ze stale postępującym rozwojem budownictwa do powszechnej produkcji wdrożono cementy o obniżonym udziale klinkieru cementowego, oznaczone zgodnie z polską normą [12]:

- CEM II – cement portlandzki żuźlowy, krzemionkowy, pucolanowy, popiołowy, łupkowy, wapienny zawierający nie mniej niż 65% klinkieru portlandzkiego oraz każdy inny jeden składnik spośród składników głównych; wyjątkiem w tej grupie jest cement portlandzki wieloskładnikowy, który poza klinkierem zawiera co najmniej dwa składniki główne spośród wymienionych w normie [12];
- CEM III – cement hutniczy, zawierający nie mniej niż 36% granulowanego żużla wielkopiecowego;
- CEM IV – cement pucolanowy, zawierający od 11% do 55% mieszanego materiału o charakterze pucolanowym;
- CEM V – cement wieloskładnikowy zawierający od 20% do 64% klinkieru, od 18% do 49% granulowanego żużla wielkopiecowego, resztę stanowi pucolana naturalna, sztuczna lub popiół lotny krzemionkowy.

Obniżenie zawartości klinkieru w składzie cementu poprzez zastosowanie dodatków takich jak np.: granulowany żużel wielkopiecowy, popiół lotny czy pył krzemianowy zmniejsza zużycie energii, ogranicza emisję CO₂ do atmosfery oraz umożliwia oszczędność naturalnych zasobów surowców mineralnych w procesie produkcji cementu. Takie działania pomimo iż, nie są nowością, wpisują się w koncepcję zrównoważonego rozwoju, a postęp w nauce czyni je coraz doskonalszymi [10, 13-16].

Zintegrowanym działaniem przemysłu cementowego w kierunku zmniejszenia zużycia tradycyjnych nośników energii jest stosowanie paliw zastępczych, zwanych alternatywnymi. Substytutem paliwa są np. szlasy z przemysłu farb i lakierów, odpady przemysłu chemicznego, odpady drzewne, papier, tkaniny, wysuszone osady ściekowe czy zużyte opony samochodowe. Stosowanie paliw alternatywnych w procesach współspalania przyczynia się do zmniejszenia emisji CO₂, powstającego w wyniku spalania paliw kopalnianych, jednocześnie oszczędzając ich zasoby [17-20].

1.4. Beton jako zrównoważony wyrób

Rozwój gospodarczy wpłynął nie tylko na rozwój przemysłu budowlanego, ale również na wzrost świadomości ekologicznej społeczeństw. Budownictwo objęło ideą zrównoważonego rozwoju, a rok 2011 okazał się przełomowy, gdyż Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) NR 305/2011 określono wymagania stawiane obiektom budowlanym, uwzględniając ich wpływ na środowisko, klimat, wykorzystanie zasobów naturalnych oraz oszczędność energii. Zgodnie z zapisami [4] 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 wpływu na jakość środowiska ani klimatu.

Jednym z powszechnie stosowanych, w budownictwie indywidualnym i przemysłowym, wyrobów budowlanych jest beton. Zapisy polskiej normy [21] 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 [22]. Beton w aspekcie zrównoważonego wyrobu, na etapie produkcji, wymaga rozważenia wielu działań, w tym:

- stosowanie do produkcji betonu cementów o obniżonym składzie klinkieru [23];
- zwiększenie udziału dodatków mineralnych w składzie mieszanki betonowej;
- stosowanie w produkcji betonu dodatków uzyskanych z materiałów odpadowych;
- stosowanie w produkcji betonu kruszywa pochodzącego z recyklingu [24];

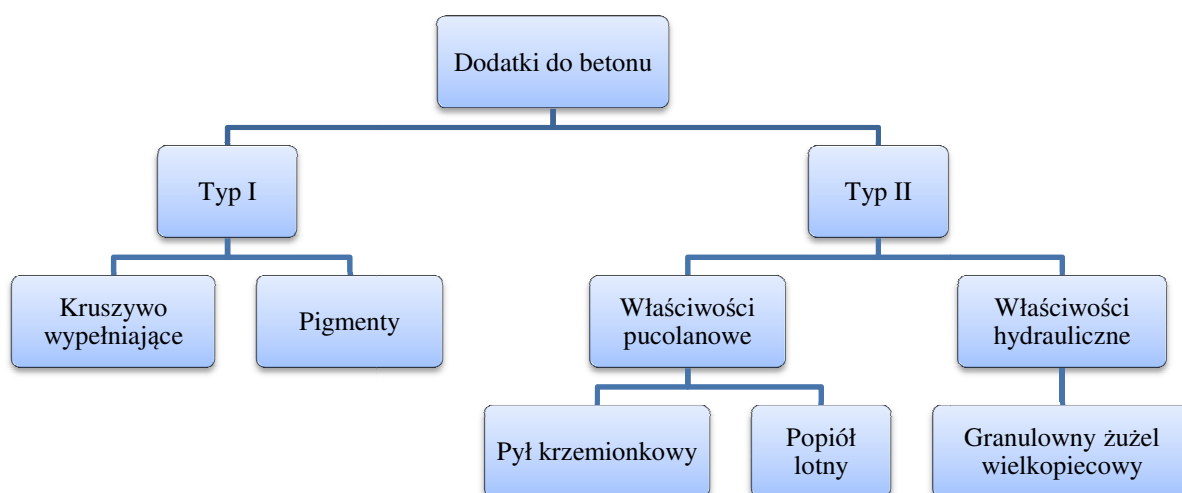
- stosowanie w produkcji betonu lokalnego kruszywa w konsekwencji ograniczenie transportu na duże odległości;
- stosowanie betonu o zwiększonej trwałości w efekcie zmniejszenie nakładów na przedwczesne naprawy betonowych/żelbetowych elementów budowlanych oraz wydłużenie czasu ich użytkowania.

Zrównoważonym działaniem jest również projektowanie elementów konstrukcji o mniejszym przekroju, lecz z betonu wyższej klasy. Takie postępowanie zwiększa ilość cementu w 1 m³ betonu równocześnie zmniejszając ilość m³ betonu [23].

1.4.1. Zwiększenie udziału dodatków mineralnych w składzie betonu

W procesie produkcji betonu duża część emisji dwutlenku węgla pochodzi z przemysłu cementowego. Szacuje się, że jest to ok. 95%. Pozostałe 5% przypada na transport surowców i wyrobu końcowego [25]. Najskuteczniejszym sposobem uzyskania zrównoważonego betonu jest stosowanie wieloskładnikowych cementów oraz zwiększenie w składzie betonu udziału dodatków mineralnych tj. granulowanych żużli wielkopieczowych, popiołów lotnych, pyłu krzemionkowego czy metakaolinu. Takie działania nie tylko ograniczają zużycie surowców naturalnych, zmniejszają emisję dwutlenku węgla do atmosfery, ale również mogą pozytywnie wpłynąć na właściwości techniczne betonu [26-31].

Zgodnie z zapisami normy [21], dodatek to drobnoziarnisty nieorganiczny składnik stosowany do produkcji betonu w celu poprawy pewnych właściwości lub uzyskania specjalnych, którego zawartość zazwyczaj przekracza 5% masy cementu. Dodatki mogą w znaczny sposób modyfikować właściwości zarówno mieszanki betonowej, jak i betonu. Norma [21] wyróżnia dwa typy nieorganicznych dodatków do betonu – typ I i typ II. Do dodatków typu I należą kruszywa wypełniające oraz pigmenty. Typ II stanowią dodatki charakteryzujące się właściwościami pucolanowymi tj. pył krzemionkowy, popiół lotny, metakaolin lub hydraulicznymi - granulowany żużel wielkopieczowy. Podział dodatków do betonu przedstawiono na Rysunku 2.



Rysunek 2. Dodatki do betonu według [21]

Popiół lotny to wartościowy produkt uboczny przemysłu energetycznego powstały podczas spalania węgla kamiennego lub brunatnego w konwencjonalnych kotłach pyłowych (popiół lotny konwencjonalny) lub w kotłach z paleniskiem fluidalnym (popiół lotny fluidalny) [30]. Popiół lotny modyfikuje zarówno właściwości mieszanki betonowej, jak i betonu. Wpływ dodatku popiołu na właściwości mieszanki zależy od jego składu chemicznego i fazowego, a także od rodzaju instalacji, z jakiej pochodzi (warunki otrzymywania). Wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje popiołu lotnego:

- krzemionkowy popiół lotny z kotłów konwencjonalnych – produkt uboczny ze spalania węgla kamiennego;
- wapniowy popiół lotny z kotłów konwencjonalnych – produkt uboczny ze spalania węgla brunatnego;
- popiół lotny z kotłów fluidalnych.

Konwencjonalne popioły lotne charakteryzują się właściwościami pucolanowymi, drobnym uziarnieniem oraz kulistym kształtem ziaren. Dzięki tym właściwościom zmniejszają wodożądność i porowatość kapilarną mieszanki betonowej, poprawiają jej urabialność oraz przeciwdziałają segregacji. Wprowadzenie popiołu lotnego do betonu, bez równoczesnego zmniejszania w nim ilości cementu, nie wpływa w sposób istotny na zmianę czasu wiązania. Zastąpienie części cementu popiołem lotnym opóźnia początek i koniec wiązania betonu. Wielkość opóźnienia zależy od ilości cementu, który został zastąpiony przez popiół lotny, od całkowitej ilości dodanego popiołu oraz od jego właściwości pucolanowych [30, 32-34]. Beton z dodatkiem popiołu lotnego charakteryzuje się zwiększoną odpornością chemiczną, w tym na agresję siarczanową. Zastosowanie zbyt dużej ilości popiołów lotnych

może spowodować opóźnienie przyrostu wytrzymałości we wczesnym okresie oraz zmniejszyć odporność betonu na mróz. Właściwa pielęgnacja, zastosowanie domieszek uplastyczniających oraz napowietrzających skutecznie wpływają na poprawę mrozoodporności [33, 35-37].

Popioły z kotłów fluidalnych, w wyniku spalania i współspalania biomasy, posiadają bardzo różne i zmienne właściwości chemiczne [38]. Ziarna charakteryzują się nieregularnym kształtem i wielkością. Popiół fluidalny wykazuje dużą aktywność pucolanową i właściwości hydrauliczne. Jako składnik mieszanki betonowej niekorzystnie wpływa na jej właściwości reologiczne. Uzyskanie właściwej konsystencji wiąże się z koniecznością dozowania większej ilości superplastyfikatora oraz zwiększenia ilości wody zarobowej (zwiększenie w/s). Zmienne składy chemiczne popiołów fluidalnych oraz ich negatywny wpływ na właściwości reologiczne mieszanki betonowej powodują, że dodatki te mogą być efektywnie wykorzystane tylko w ograniczonym segmencie budownictwa, takim jak podbudowy w inżynierii komunikacyjnej, mieszaniny osuszające grunty czy mieszaniny spoiwowo-gruntowe [37, 39, 40].

Pyły krzemionkowe, inaczej mikrokrzemionki, są to produkty uboczne, które powstają w procesie hutniczym podczas wytwarzania krzemu metalicznego lub jego stopów w elektrycznych piecach łukowych różnej konstrukcji. Bardzo drobne uziarnienie i silnie rozwinięta powierzchnia ziaren bezpostaciowej krzemionki decydują o jej wysokich właściwościach pucolanowych. Pyły krzemionkowe charakteryzują się wysoką wodożądnością. Zastosowanie ich jako dodatków mineralnych powoduje, że woda przeznaczona do wykonania mieszanki betonowej w dużym stopniu jest absorbowana na ziarnach mikrokrzemionki, co skutkuje zmniejszeniem jej płynności. W celu zachowania odpowiedniej konsystencji, konieczne jest stosowanie domieszek uplastyczniających lub upłynniających. Dodatek popiołów krzemionkowych zmniejsza porowatość kapilarną, zwiększa wytrzymałość i wodoszczelność betonu [34, 37, 41-45].

Granulowany żużel wielkopiecowy to również wartościowy produkt uboczny. Otrzymuje się go w wyniku szybkiego chłodzenia płynnego żużla powstającego przy wytopieniu żelaza. Dodatek ten jest materiałem o utajonych właściwościach hydraulicznych. Odpowiednio rozdrobniony wykazuje właściwości wiążące, tzn. w połączeniu z wodą wiąże i twardnieje. Wprowadzenie żużla do mieszanki betonowej poprawia jej urabialność, powoduje wolniejsze wydzielanie się ciepła i niższy gradient temperatury w elemencie betonowym lub żelbetowym. Beton charakteryzuje się niższą wczesną wytrzymałością na ściskanie niż ta, którą osiągnąłby, gdyby spoiwem był tylko cement portlandzki wprowadzony do mieszanki

w takiej samej ilości. Badania naukowe betonów zawierających żużel wielkopiecowy wykazały ich dobrą odporność na przenikanie jonów chlorkowych [34, 46, 47].

Metakaolin to mineralny dodatek powstały w procesie prażenia w temperaturze 700°C – 900°C naturalnego kaolinitu. Z uwagi na niższą temperaturę i krótszy czas wypalania, produkcja metakaolinu jest znacznie mniej energochłonna niż klinkieru cementowego. Badania betonu zawierającego w swoim składzie metakaolin potwierdzają, iż przy właściwym jego dozowaniu można uzyskać poprawę właściwości mechanicznych [48].

1.4.2. Stosowanie kruszywa pochodzącego z recyklingu w procesie produkcji betonu

Nieustające zapotrzebowanie na beton podczas realizacji nowych inwestycji oraz znaczne ilości materiałów pochodzących z rozbiórek obiektów budowlanych powodują konieczność poszukiwania alternatywnych metod produkcji betonu z wykorzystaniem dostępnych zasobów. Równolegle popularyzacja koncepcji zrównoważonego rozwoju, której jednym z postulatów jest ochrona nieodnawialnych źródeł surowców naturalnych, wpłynęła na rozwój recyklingu czyli systemu czynności polegający na ograniczeniu zużycia surowców naturalnych metodą odzysku. Recykling to proces przetwarzania odpadów na wartościowe produkty, materiały lub substancje, które można wykorzystać ponownie w pierwotnym lub innym celu. W przemyśle budowlanym najczęściej stosowanymi materiałami pochodzącymi z recyklingu są kruszywa. Właściwości kruszyw, kruszyw wypełniających uzyskiwanych podczas procesu naturalnego, przemysłowego lub recyklingowego oraz mieszanek tych materiałów określono w normie [49].

W rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) NR 305/2011 z dnia 9 marca 2011 r. określono wymagania stawiane nowo realizowanym obiektom budowlanym. Zgodnie z zapisami rozporządzenia [4] obiekty budowlane muszą być zaprojektowane, wykonane i rozebrane w taki sposób, aby wykorzystanie zasobów naturalnych było zrównoważone i zapewniało w szczególności:

- ponowne wykorzystanie lub recykling materiałów i części pochodzących z rozbiórki obiektów budowlanych;
- trwałość obiektów budowlanych;
- wykorzystanie w obiektach budowlanych surowców i materiałów wtórnych przyjaznych środowisku.

Już na etapie planowania inwestycji, dobór materiałów, z jakich będzie wykonany obiekt budowlany, zdecyduje o możliwości jego ponownego zastosowania. Dobierając materiały budowlane należy poddać analizie ich wpływ na środowisko w ciągu ich całego cyklu życia.

Norma [49] definiuje kruszywo recyklingowe, jako kruszywo, powstałe w wyniku przeróbki nieorganicznego materiału zastosowanego uprzednio w budownictwie. Norma [49] wyróżnia kategorie dla kruszywa grubego pochodzącego z recyklingu w oparciu o udział: gruzu betonowego (Rc), niezwiązanego kruszywa (Ru), gruzu z elementów murowych (Rb), materiałów bitumicznych (Ra), szkła (Rg), niestabilizowanego materiału (FL) oraz innych składników (X). Gruz betonowy obecnie stanowi udział ponad 50% spośród kruszyw recyklingowych, wykorzystywanych do nowych mieszanek betonowych [50]. Z uwagi na sposób pozyskania jego struktura składa się z kruszywa pierwotnego, zaprawy oraz zanieczyszczeń fizycznych i chemicznych. Rodzaj i udział zanieczyszczeń rodzimego materiału może wpłynąć negatywnie na właściwości techniczne nowego betonu tj. wytrzymałość na ściskanie, szczelność betonu, może obniżyć wartość modułu sprężystości, a także naruszyć ochronę antykorozyjną zbrojenia [51].

Zarówno w polskiej jak i zagranicznej literaturze naukowej odnajdziemy informacje, w których autorzy opisują właściwości mieszanek betonowych oraz badania właściwości technicznych betonu zawierającego w swoim składzie kruszywa recyklingowe. Według badań opisanych w [52-54] beton cementowy zawierający RCA (recycled concrete aggregate) charakteryzuje się porównywalnymi parametrami technicznymi w stosunku do betonu zawierających w swoim składzie kruszywa naturalne. Według innych badań [55-57] maleje wytrzymałość betonu na ściskanie, mrozoodporność, moduł sprężystości, gorsza jest też urabialność mieszanki betonowej. Istotnie na wyniki badań wpływają właściwości fizykochemiczne kruszyw pozyskanych z recyklingu, które zależą przede wszystkim od pierwotnej klasy betonu, stopnia hydratacji ziaren cementu, poziomu skorodowania, a także występujących w nich zanieczyszczeń. Kruszywa uzyskane metodą odzysku często uważa się za składniki niskiej jakości, które wpływają negatywnie na właściwości mechaniczne betonu. Pojawiają się sugestie, że RCA nie jest właściwym komponentem do produkcji betonu o projektowanej wytrzymałości na ściskanie wyższej niż 25 MPa [58]. Prowadzone są badania, których celem jest opracowanie odpowiedniego procesu obróbki kruszyw recyklingowych. Skuteczne usunięcie drobnych, luźnych cząstek zaprawy obecnych w RCA może znacznie poprawić właściwości techniczne betonu [59, 60]. Równolegle naukowcy badają możliwość zastosowania dodatków do betonu. W przypadku betonu zawierającego

w swoim składzie kruszywo recyklingowe pozytywne wyniki uzyskano stosując dodatek – nanokrzemionki [61], popiołu lotnego klasy F czy metakaolinu [48, 62].

Polityka zrównoważonego rozwoju zakłada poszukiwanie nowych rozwiązań w celu oszczędności zasobów naturalnych oraz jak największego wykorzystania materiałów odpadowych. W artykule [63] zaprezentowano badania na temat możliwości zastąpienia całości lub części drobnego kruszywa w betonie żuzłem pomiedziowym. Żuzel pomiedziowy jest to produkt uboczny powstały w wyniku czyszczenia konstrukcji stalowych z korozji metodą strumieniowo – ścierną. Badano beton o stosunku $w/c = 0,6$ i zawartością cementów CEM I 32,5 R i CEM II/B-V 32,5N 300 kg/m³. Stopień zastąpienia drobnego kruszywa (0-2 mm), żuzłem pomiedziowym wyniósł odpowiednio 33%, 66% i 100%. Beton o tym samym składzie ze 100% zawartością piasku rzecznoego jako kruszywa drobnego posłużył jako referencyjny. Wykonano badanie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie (po 28 dniach), sorpcyjności, nasiąkliwości i odporności na ścieranie. Uzyskane wyniki wykazały, że wytrzymałość i niektóre badane właściwości betonów z żuzłem pomiedziowym jako zamiennikiem piasku były podobne lub lepsze niż właściwości betonu referencyjnego.

Pomimo, iż stosowanie produktów ubocznych jak i odpadów niesie ze sobą prośrodowiskowe korzyści, wymaga spełnienia warunków postawionych w *Ustawie o odpadach* [64]. Krajowe przepisy prawa stanowią, że produkt uboczny, nie będący odpadem, jest to przedmiot lub substancja powstające w wyniku procesu produkcyjnego, którego podstawowym celem nie jest ich produkcja. Ich dalsze wykorzystanie wymaga uzyskania decyzji administracyjnej wydanej przez marszałka województwa właściwego ze względu na miejsce wytwarzania przedmiotu lub substancji. W decyzji marszałek województwa potwierdza spełnienie warunków uznania przedmiotu lub substancji za produkt uboczny lub stwierdza niespełnienie tych warunków.

Również ponowne wykorzystanie odpadów poddanych recyklingowi lub innemu procesowi odzysku wymaga uzyskania decyzji administracyjnej wydawanej przez organ właściwy ze względu na miejsce wytwarzania odpadów. Zgodnie z ustawą [64] decyzja stanowi zezwolenie na przetwarzanie odpadów. Jej uzyskanie oznacza, że wskazany we wniosku odpad traci taki status i staje się produktem.

1.5. Wybrane zagadnienia dotyczące trwałości obiektów budowlanych

Trwałość jest to zdolność materiału lub konstrukcji do utrzymania wymaganych właściwości użytkowych w określonym czasie. Trwała konstrukcja powinna przez cały projektowany okres użytkowania spełniać wymagania ze względu na użytkowanie, nośność

i stateczność, bez istotnego obniżenia przydatności lub nadmiernych kosztów utrzymania. Obniżona trwałość konstrukcji betonowej może doprowadzić do konieczności wykonania przedwczesnych napraw lub wymiany jej elementów. Dodatkowe naprawy wiążą się bezpośrednio ze zużyciem materiałów i energii, a w konsekwencji obciążeniem środowiska naturalnego oraz dodatkowymi nakładami finansowymi. Z uwagi na powyższe trwałość obiektów budowlanych jest ważnym elementem kształtowania zrównoważonego rozwoju.

Aspekt trwałości w projektowaniu konstrukcji betonowych został podjęty w normie [65]. Projektowany okres użytkowania określono jako przyjęty w projekcie przedział czasu, w którym konstrukcja lub jej część ma być użytkowana zgodnie z zamierzonym przeznaczeniem i przewidywanym utrzymaniem bez potrzeby dużych napraw. Projektowane okresy użytkowania zamieszczono w Tabeli 1.

Tabela 1. Orientacyjne projektowane okresy użytkowania według [65]

Kategoria projektowanego okresu użytkowania	Orientacyjny projektowany okres użytkowania (lata)	Przykłady
1	10	Konstrukcje tymczasowe
2	od 10 do 25	Wymienne części konstrukcji np. belki, podsuwnice, łożyska
3	od 15 do 30	Konstrukcje rolnicze i podobne
4	50	Konstrukcje budynków i inne konstrukcje zwykłe
5	100	Konstrukcje budynków monumentalnych, mosty i inne konstrukcje inżynierskie

Trwałość obok bezpieczeństwa i użyteczności, jest analizowana jako jeden z trzech filarów niezawodności konstrukcji [66]. Normowym kryterium niezawodności konstrukcji jest nieprzekroczenie stanów granicznych nośności i użytkowania [65]. Do uszkodzeń konstrukcji budowlanej może dojść w wyniku błędów projektowych, wykonawczych oraz niewłaściwego użytkowania. Uszkodzenia mogą być również wynikiem różnych oddziaływań pochodzących ze środowiska. W konstrukcjach żelbetowych dzielimy je na uszkodzenia betonu oraz korozję zbrojenia. Uszkodzenia betonu mogą wystąpić w wyniku oddziaływań:

- mechanicznych np. uderzenia, przeciążenia, przemieszczenia, wybuchu, wibracji, ścierania;
- chemicznych np. reakcji alkalicznych, działania czynników agresywnych tj. siarczany, wody, sole, czynniki biologiczne;
- fizycznych np. zamrażanie/rozmarzanie, skurcz, erozja, oddziaływania cieplne.

Uszkodzenia zbrojenia mogą być skutkiem między innymi: karbonatyzacji, zanieczyszczeń działających korozyjnie oraz w wyniku pojawienia się prądów błędzących [67, 68].

Warunki środowiskowe, w jakich realizowany będzie nowo projektowany obiekt budowlany, należy określić na etapie projektowania tak, aby można było ocenić ich wpływ na trwałość i podjąć odpowiednie środki ochrony materiałów stosowanych w konstrukcji. W Tabeli 2 przedstawiono 6 klas ekspozycji, które wyróżnia norma [2]. W tej samej Tabeli uwzględniono klasę ekspozycji XM wg krajowego uzupełnienia [69]. Tabela 3 zawiera wartości graniczne dotyczące klas ekspozycji w przypadku agresji chemicznej gruntu naturalnego i wody gruntowej.

Tabela 2. Klasy ekspozycji betonu według [21] i [69]

Oznaczenie klasy	Opis środowiska	Przykłady występowania klas ekspozycji
1. Brak zagrożenia korozją lub agresją środowiska		
X0	W przypadku betonów niezawierających zbrojenia i innych elementów metalowych: wszystkie oddziaływania środowiska z wyjątkiem przypadków występowania zamrażania/rozmarzania, ścierania lub agresji chemicznej. W przypadku betonów zbrojonych lub zawierających inne elementy zbrojone: bardzo suche.	Beton wewnątrz budynków o bardzo niskiej wilgotności powietrza.
2. Korozja spowodowana karbonatyzacją		
W przypadku gdy beton zawierający zbrojenie lub inne elementy metalowe jest narażony na kontakt z powietrzem i wilgocią, ekspozycja powinna być klasyfikowana w następujący sposób:		
XC1	Suche lub stale mokre	Beton wewnątrz budynku o niskiej wilgotności powietrza; Beton stale zanurzony w wodzie
XC2	Mokre, sporadycznie suche	Powierzchnie betonowe narażone na długotrwały kontakt z wodą; Wiele fundamentów
XC3	Umiarkowane wilgotne	Beton wewnątrz budynków o umiarkowanej lub wysokiej wilgotności powietrza; Beton na zewnątrz osłonięty przed deszczem
XC4	Cyklicznie mokre i suche	Powierzchnie betonowe narażone na kontakt z wodą, ale nie jak w klasie ekspozycji XC2
3. Korozja spowodowana chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej		
W przypadku, gdy beton zawierający zbrojenie lub inne elementy metalowe jest narażony na kontakt z wodą zawierającą chlorki, w tym sole odladzające, pochodzące z innych źródeł niż woda morska, ekspozycja powinna być klasyfikowana w następujący sposób:		
XD1	Umiarkowane wilgotne	Powierzchnie betonowe narażone na działanie chlorków z powietrza

Tabela 2. Klasy ekspozycji betonu według [21] i [69] – cd.

Oznaczenie klasy	Opis środowiska	Przykłady występowania klas ekspozycji
XD2	Mokre, sporadycznie suche	Baseny; Beton narażony na działanie wody przemysłowej zawierającej chlorki
XD3	Cyklicznie mokre i suche	Elementy mostów narażone na działanie rozpylanych cieczy zawierających chlorki; Nawierzchnie drogowe; Płyty parkingowe
4. Korozja spowodowana chlorkami pochodzącymi z wody morskiej		
W przypadku, gdy beton zawierający zbrojenie lub inne elementy metalowe jest narażony na kontakt z chlorkami pochodzącymi z wody morskiej, znajdującej się w wodzie lub w powietrzu, ekspozycja powinna być klasyfikowana w następujący sposób:		
XS1	Narażenie na działanie soli zawartych w powietrzu, ale nie na bezpośredni kontakt z wodą morską	Budowle zlokalizowane na wybrzeżu lub w jego pobliżu
XS2	Stałe zanurzenie	Elementy budowli morskich
XS3	Strefy pływów, rozbryzgów i aerozoli	Elementy budowli morskich
5. Agresja spowodowana zamrażaniem/rozmrężaniem przy udziale środków odladzających lub bez ich udziału		
W przypadku, gdy beton w stanie mokrym jest narażony na znaczącą agresję spowodowaną cyklicznym zamrażaniem/rozmrężaniem, ekspozycja powinna być klasyfikowana w następujący sposób:		
XF1	Umiarkowane nasycenie wodą bez środków odladzających	Pionowe powierzchnie betonowe narażone na deszcz i zamarzanie
XF2	Umiarkowane nasycenie wodą ze środkami odladzającymi	Pionowe powierzchnie betonowe konstrukcji drogowych narażone na zamarzanie i działanie środków odladzających z powietrza
XF3	Silne nasycenie wodą bez środków odladzających	Poziome powierzchnie betonowe narażone na deszcz i zamarzanie
XF4	Silne nasycenie wodą ze środkami odladzającymi lub wodą morską	Jezdnie dróg i mostów narażone na działanie środków odladzających; Powierzchnie betonowe bezpośrednio narażone na działanie aerozoli zawierających środki odladzające i zamarzanie; Strefy rozbryzgu w budowlach morskich i narażonych na zamarzanie
6. Agresja chemiczna		
W przypadku, gdy beton jest narażony na agresję chemiczną gruntów naturalnych lub wody gruntowej, ekspozycja powinna być klasyfikowana w następujący sposób:		
XA1	Środowisko chemicznie mało agresywne	Beton narażony na kontakt z gruntem naturalnym i wodą gruntową z uwzględnieniem zgodnie z Tabelą 3
XA2	Środowisko chemicznie średnio agresywne	Beton narażony na kontakt z gruntem naturalnym i wodą gruntową z uwzględnieniem zgodnie z Tabelą 3

Tabela 2. Klasy ekspozycji betonu według [21] i [69] – cd.

Oznaczenie klasy	Opis środowiska	Przykłady występowania klas ekspozycji
XA3	Środowisko chemicznie silnie agresywnie	Beton narażony na kontakt z gruntem naturalnym i wodą gruntową z uwzględnieniem zgodnie z Tabelą 3
7. Agresja wywołana ścieraniem		
W przypadku, gdy powierzchnia betonu narażona jest na obciążenie mechaniczne, oddziaływanie środowiska należy klasyfikować według następujących zasad:		
XM1	Umiarkowane zagrożenie ścieraniem	Posadzki i nawierzchnie eksploatowane przez pojazdy o ogumieniu pneumatycznym
XM2	Silne zagrożenie ścieraniem	Posadzki i nawierzchnie eksploatowane przez pojazdy o ogumieniu pełnym oraz wózki podnośnikowe z ogumieniem elastomerowym lub na rolkach stalowych
XM3	Ekstremalnie silne zagrożenie ścieraniem	Posadzki oraz nawierzchnie często najeżdżane przez pojazdy gaśnicowe, filary mostów, powierzchnie przelewów, ściany spustów i sztoli hydrotechnicznych, niecki wypadowe

Tabela 3. Wartości graniczne dotyczące klas ekspozycji w przypadku agresji chemicznej gruntu naturalnego i wody gruntowej [21]

Charakterystyka chemiczna	Referencyjna metoda badania	XA1	XA2	XA3
Woda gruntowa				
SO ₄ ²⁻ mg/l	EN 196-2	≥ 200 i ≤ 600	> 600 i ≤ 300	> 3000 i ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 i ≥ 5,5	< 5,5 i ≥ 4,5	< 4,5 i ≥ 4,0
CO ₂ mg/l agresywny	EN 13577	≥ 10 i ≤ 40	> 40 i ≤ 100	> 100 aż do nasycenia
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1	≥ 15 i ≤ 30	> 30 i ≤ 60	> 60 i ≤ 100
Mg ²⁺	EN ISO 7980	≥ 300 i ≤ 1000	> 1000 i ≤ 3000	> 3000 aż do nasycenia
Grunt				
SO ₄ ²⁻ mg/kg ^A całkowite	EN 196-2 ^B	≥ 2000 i ≤ 3000 ^C	> 3000 ^C i ≤ 12000	> 12000 i ≤ 24000
Kwasowość według Baumanna Gully'ego ml/kg	Pr EN 16502	> 200	Niespotykane w praktyce	Niespotykane w praktyce
<p>A – Grunty ilaste o przepuszczalności poniżej 10⁻⁵ m/s można zakwalifikować do niższej klasy;</p> <p>B – Metoda badania przewiduje ekstrakcję SO₄²⁻ z użyciem kwasu chlorowodorowego, alternatywnie można zastosować ekstrakcję wodną, jeżeli takie badania były już wcześniej prowadzone w miejscu stosowania betonu;</p> <p>C – W przypadku, gdy istnieje ryzyko akumulacji jonów siarczanowych w betonie na skutek cyklicznego wysychania i nawilżania lub podciągania kapilarnego, wartość graniczną 3000 mg/kg należy zmniejszyć do 2000 mg/kg.</p>				

Dla każdej klasy ekspozycji norma [21] określa zalecenia w formie informacji o wartościach granicznych dla składu i właściwości betonu. Zalecenia dotyczą: maksymalnego współczynnika woda/cement, minimalnej klasy wytrzymałości, minimalnej ilości cementu w mieszance, minimalnej zawartości powietrza oraz ograniczeń w stosowaniu typów cementów.

Projektowanie obiektów budowlanych ze względu na trwałość koncentruje się na zachowaniu odporności konstrukcji na wpływy środowiskowe przekazywane na konstrukcję. Jedną z najczęstszych przyczyn destrukcji betonu jest korozja mrozowa, zwłaszcza gdy beton jest narażony na zawilgocenie i stosowane są środki odladzające. Zwiększenie objętości zamarzającej wody powoduje lokalne zniszczenia w utwardzonym spoiwie betonu lub w ziarnach kruszywa. Powszechnie jako beton mrozoodporny stosuje się beton zawierający domieszki napowietrzające. Wprowadzenie do mieszanki betonowej składników powierzchniowo czynnych powoduje równomierne rozłożenie drobnych pęcherzyków powietrza. W porach może gromadzić się woda, która pod wpływem zmian temperatury zmienia stan skupienia, w konsekwencji objętość. Równomiernie rozłożenie pęcherzyków wpływa na zmniejszenie naprężeń betonu na skutek procesu zamrażania–rozmarzania znajdującej się w strukturze betonu wody [70]. Do równie częstych przyczyn uszkodzeń konstrukcji żelbetowych należy utrata zdolności ochronnych otuliny betonowej wobec zbrojenia, w wyniku procesów karbonatyzacji. Karbonatyzacja jest to chemiczna reakcja wodorotlenku wapnia powstałego w wyniku hydratacji cementu z atmosferycznym dwutlenkiem węgla, której głównym skutkiem jest zmniejszenie alkaliczności betonu i utrata właściwości otuliny betonowej wobec stali. Konsekwencją zjawiska karbonatyzacji jest korozja stali zbrojeniowej [71-73]. Właściwe określenie klasy ekspozycji betonu oraz grubości otuliny wobec zbrojenia na etapie projektowania umożliwia uzyskanie konstrukcji odpornej na działanie szkodliwych substancji znajdujących się w powietrzu atmosferycznym, w wodzie mającej kontakt z powierzchnią betonu, czy na działanie zmiennej temperatury powietrza podczas sezonu jesienno–zimowego.

Ocena potencjalnej trwałości zbrojonego betonu na podstawie klas związanych ze wskaźnikami trwałości, DIs ang. durability indicators, polega na jakościowej ocenie potencjalnej trwałości poprzez pomiar różnych właściwości betonu. Pięciostopniowa skala zawiera wartości graniczne, w przypadku takich właściwości betonu jak: porowatość, efektywna lub pozorna dyfuzja chlorków, przepuszczalność powietrza i wody, wstępną zawartość wodorotlenku wapnia. Wartości graniczne wyznaczono dla szerokiego zakresu betonów dojrzewających w wodzie przez 90 dni. Ocena polega na porównaniu otrzymanych

wyników z badań własnych betonu z zaproponowanymi wartościami granicznymi. Beton może charakteryzować się bardzo niską, niską, średnią, wysoką lub bardzo wysoką potencjalną trwałością [74].

1.6. Nowe kierunki rozwoju betonu

Sukcesywnie zwiększa się baza materiałowa betonu. Rozwój ten odbywa się poprzez modyfikowanie i doskonalenie dotychczas stosowanych materiałów (cementów i domieszek) oraz wdrażanie nowych, zwłaszcza odpadowych, z recyklingu, a także domieszek nowych generacji. Właściwy dobór ilościowy i jakościowy składników betonu, w tym zastosowanie odpadowych dodatków mineralnych, umożliwia uzyskanie betonów wysokowartościowych. Oprócz korzystnego wpływu na właściwości wytrzymałościowe betonu, zastosowanie produktów ubocznych jest istotne z uwagi na aspekt ekologiczny (wykorzystanie materiału odpadowego, oszczędność surowców naturalnych, ochrona środowiska naturalnego).

1.6.1. Beton wysokowartościowy (wysokiej wytrzymałości)

Beton wysokowartościowy (wysokiej wytrzymałości) jest pochodną tradycyjnego betonu zwykłego, uzyskiwany na drodze modyfikacji składu mieszanki betonowej pod względem jakościowym i ilościowym, ukierunkowany na redukcję słabych stron betonu zwykłego. Beton ten wykonany jest z wysokiej jakości spoiw cementowych, przy zachowaniu niskiego współczynnika wodno-spoiwowego oraz z zastosowaniem domieszek chemicznych, głównie kształtujących właściwości reologiczne, dodatków mineralnych, jak również wypełniaczy i włókien. Powszechnie stosuje się następujący podział betonów ze względu na wytrzymałość na ściskanie oznaczoną po 28 dniach dojrzewania:

- beton zwykły do 60 MPa;
- beton wysokowartościowy (BWW) od 60 MPa do 100 MPa;
- beton bardzo wysokowartościowy (BBWW) od 100 MPa do 150 MPa;
- beton ultrawysokowartościowy (BUWW) powyżej 150 MPa.

W przypadku wielu zastosowań kryteria trwałości są tak samo ważne jak kryteria wytrzymałości. W betonie wysokowartościowym dodatkowym wymaganiem, oprócz wysokiej wytrzymałości, jest wysoka trwałość. Betony BWW charakteryzują się:

- dobrą urabialnością świeżej mieszanki betonowej, utrzymywaną co najmniej przez jedną godzinę;
- wytrzymałością na ściskanie po 28 dniach dojrzewania co najmniej 60 MPa;

- dobrą szczelnością (niska przepuszczalnością mediów ciekłych i gazowych);
- wysoką odpornością na agresję chemiczną;
- wysoką odpornością na mróz;
- dobrą wodoszczelnością;
- niską nasiąkliwość;
- dobrą odpornością na ścieranie.

Wysoka trwałość betonów BWW jest kształtowana szczelną strukturą zaczynu poprzez redukcję stosunku wody do cementu oraz dzięki uszczelnieniu mikroporowatości na drodze wypełnienia mieszanki fazą mikroziarnistą. W tym celu stosuje się nieorganiczne dodatki do betonu tj. pył krzemionkowy, popiół lotny, mielony granulowany żużel oraz inne składniki mineralne. Powyższe działania powodują zmniejszenie grubości i porowatości strefy przejściowej zaczyn–kruszywo, co pozwala lepiej przenosić obciążenia pomiędzy zaczynem cementowym, a kruszywem. W efekcie w betonach BWW, to kruszywo staje się jego najsłabszym elementem [34, 75, 76].

1.6.2. Beton z proszków reaktywnych

Beton z proszków reaktywnych (skrót BPR lub ang. RPC) należy do grupy betonów ultrawysokowartościowych. Beton RPC charakteryzuje się dużą zawartością cementu i pyłu krzemionkowego, zastosowaniem zbrojenia rozproszonego w postaci włókien stalowych lub węglowych, mączki kwarcowej oraz superplastyfikatorów. W betonie z proszków reaktywnych funkcje grubego kruszywa pełni piasek kwarcowy, przy czym średnica ziaren mieści się w granicach 0,15-0,40 mm. Zastosowanie piasku kwarcowego wyeliminowało słabe ogniwo, jakim przy dużych wytrzymałościach na ściskanie jest grube kruszywo. Główną zaletą tak uzyskanego materiału jest wysoka wytrzymałość na ściskanie. Dla betonu bez dodatku zbrojenia rozproszonego osiągnięto wytrzymałość na ściskanie do 300 MPa, natomiast z dodatkiem włókien stalowych, po specjalnej obróbce cieplno-ciśnieniowej, aż 810 MPa [75]. Szczelna mikrostruktura betonu RPC przekłada się na odporność na działanie szkodliwych czynników chemicznych, dobrą mrozoodporność, a także wysoką odporność ogniową. Beton RPC stosuje się do budowy konstrukcji obiektów mostowych – typowych ustrojów nośnych oraz w postaci konstrukcji zespolonych, do obiektów narażonych na działanie czynników środowiskowych oraz w celu nadania budowli wyjątkowego wyrazu architektonicznego [34, 77-79].

1.6.3. Beton polimerowy

Beton polimerowy otrzymuje się poprzez dodanie do mieszanki betonowej monomeru, oligomeru, prepolimeru lub polimeru, które jeśli są aktywne chemicznie, ulegają polimeryzacji lub polikondensacji. Do grupy betonów polimerowych zalicza się różne rodzaje kompozytów ziarnistych zawierających polimery:

- beton żywiczny (PC), bezzementowy, otrzymywany przez zmieszanie syntetycznych żywic, prepolimerów lub monomerów z odpowiednio dobranym kruszywem;
- beton polimerowo–cementowy (PCC), otrzymywane poprzez dodanie do mieszanki betonowej polimeru, oligomeru lub monomeru;
- beton impregnowany polimerem (PIC), otrzymywany przez impregnację betonu monomerem lub prepolimerem i następnie jego wewnętrzną polimeryzację [80].

Beton polimerowy różni się sposobem wprowadzania polimeru. Polimer może być wprowadzany z wodą zarobową (PCC), dodawany do mieszanki betonowej (PCC i PC) lub w wyniku specjalnych zabiegów technicznych „wciskany” do utwardzonego betonu (PIC). Do betonu polimerowego można stosować różne rodzaje polimerów, w różnej ilości, przy czym ta sama odmiana polimeru może różnić się strukturą łańcuchów polimeru (długość, rozgałęzienia). Wprowadzenie polimeru do betonu powoduje istotną zmianę właściwości technicznych w porównaniu z niemodyfikowanym betonem. Beton polimerowy charakteryzuje się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi, szczelnością, dobrą odpornością chemiczną i mrozową. Ze względu na posiadane cechy stosuje się go powszechnie w naprawach konstrukcji żelbetowych i w ich ochronie powierzchniowej, jako beton posadzkowy oraz do betonowania konstrukcji prefabrykowanych. Beton polimerowy PC i PCC ze względu na swoje właściwości mechaniczne jest często stosowany do betonowania elementów cienkościennych [34, 75, 81].

W artykule [82] podjęto próbę otrzymania betonu polimerowego z żywic epoksydowych wykorzystując kruszywo ze stłuczki przednich szyb samochodowych oraz piasek kwarcowy w różnych proporcjach objętościowych. Przygotowano pięć serii betonu. Kompozyty charakteryzowały się 20%, 35%, 50% lub 70% zawartością szkła odpadowego. Wykonano badania wytrzymałości betonu na ściskanie, zginanie, udarność Charpy’ego, nasiąkliwość oraz oznaczono porowatość i gęstość pozorną. Przeprowadzone badania wykazały, że wykorzystanie mielonych szyb samochodowych jest dobrą metodą wykorzystania tych odpadów. Mieszanka betonowa charakteryzowała dobrą urabialnością, jednorodną i spójną

masą. Próbkę zawierającą 20% objętości mielonego szkła uzyskały wytrzymałość na ściskanie 101 MPa.

1.6.4. Beton o wysokiej zawartości popiołów HVFAC

We współcześnie wznoszonych konstrukcjach częstą praktyką jest stosowanie betonu o zawartości dodatku popiołu lotnego w ilości od 25% do 30% w stosunku do zawartości cementu. Taka praktyka jest zgodna z zapisami normy [21], która określa, iż zawartość popiołu lotnego w betonie nie powinna przekraczać 1/3 zawartości cementu. Beton, w których stosowane są większe ilości popiołów – powyżej 1/2 zawartości cementu – klasyfikuje się do betonu o dużej zawartości popiołu lotnego HVFAC [22]. Beton HVFAC osiąga klasę wytrzymałości od C20/25 do C45/55. Charakteryzuje się zwiększoną odpornością chemiczną, w tym na agresję siarczanową, działanie środków odładzających oraz zmniejszoną podatnością na alkaliczną reakcję kruszywa. Beton HVFAC stosuje się zwłaszcza w konstrukcjach masywnych, gdzie zastosowanie spoiwa o mniejszym cieple hydratacji pozwala zmniejszyć ryzyko wystąpienia rys termicznych. Stosowanie popiołów lotnych w betonie ma także inne korzyści. Pozwala zmniejszyć zawartość cementu, przy jednoczesnym zapewnieniu wymagań zwiększonej zawartości frakcji pyłowej, w efekcie uzyskując beton zrównoważony, przyjazny dla środowiska naturalnego [83, 84].

1.6.5. Beton ze zbrojeniem strukturalnym

Znaczącą modyfikację właściwości betonu uzyskuje się poprzez wprowadzenie do betonu dodatku włóknistego, rozproszonego w sposób równomierny w mieszance betonowej. W ten sposób uzyskuje się beton zawierający zbrojenie strukturalne, zwany fibrobetonem. Jako zbrojenie rozproszone stosuje się:

- włókna stalowe – w postaci krótko pociętego drutu stalowego;
- włókna szklane – krótkie lub długie, cięte ze szkła o podwyższonej odporności na działanie środowiska;
- włókna bazaltowe – cienkie włókna wykonane z bazaltu powleczonego polimerem;
- włókna polimerowe – w postaci krótkich, cienkich nitek, postrzępionych powierzchni z materiału polimerowego.

W porównaniu do betonu bez włókien, fibrobeton charakteryzuje się większą wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu, rozłupywaniu, czy na ścinanie. Obecność włókien pozytywnie

wpływa na hamowanie powstawania mikro i makro pęknięć w kompozytach betonowych [85, 86].

W artykule [87] zaprezentowano badania na temat możliwości zastosowania włókien stalowych z recyklingu opon samochodowych. Badano beton o stosunku $w/c=0,55$, zawartością cementu CEM I 42.5 R 350 kg/m^3 oraz kruszywem naturalnym niekruszonym o maksymalnym wymiarze 16 mm. Włókna stalowe z recyklingu dodano w ilości 10, 20, 30, 40 kg/m^3 . Jednocześnie przygotowano beton o tym samym składzie, lecz ze zbrojeniem przemysłowym, który posłużył jako referencyjny. Wykonano badania: wytrzymałości na ściskanie, zginanie i rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałość resztkową na rozciąganie przy zginaniu. Wyniki badań uzyskane dla betonu z dodatkiem włókien recyklingowym wykazały, że posiada on lepsze właściwości techniczne, niż beton referencyjny.

1.7. Wybrane systemy certyfikacji, metodologie i narzędzia oceny budynków „zielonych”

Zrównoważone budownictwo to szereg działań mających na celu ograniczenie negatywnego wpływu budynków na środowisko w całym ich „cyklu życia”, począwszy od przygotowania projektu przez proces budowy, aż po eksploatację. W aspekcie zrównoważonego rozwoju, budynek zielony (zrównoważony) to obiekt oszczędny, komfortowy i stworzony z poszanowaniem środowiska naturalnego. Projektując, budując i użytkując budynki zielone, jednocześnie spełniamy nasze bieżące potrzeby, a także dbamy o to, aby następne pokolenia mogły zaspokoić swoje przyszłe potrzeby [88]. Na wszystkich etapach „życia” uwzględnia się, w stopniu szczególnym, oszczędzanie zasobów naturalnych i dbanie o środowisko. Do tego służą systemy certyfikacji budynków.

Certyfikowanie budynków pod względem ekologii oraz energooszczędności budziło kontrowersje, wśród architektów i inwestorów, ze względu na zwiększony koszt inwestycji. Z czasem zauważono, że zyski w całym „cyklu życia” budynku przewyższają koszty, a oszczędności w stosunku do budynku referencyjnego mogą sięgać kilkunastu procent [25]. Obecnie istnieje kilkadziesiąt systemów certyfikacji budynków opracowanych w różnych państwach np. w Wielkiej Brytanii BREEAM, w Stanach Zjednoczonych LEED i WELL, we Francji HQE, w Niemczech DGNB, w Polsce GBS, w Austrii TQB, w Szwajcarii GOBAS i wiele innych. Międzynarodowe systemy oceny i certyfikacji opierają się na kompleksowej ocenie budynku, uwzględniającej kryteria ekologiczne, finansowe i społeczne zrównoważonego rozwoju. Wiele systemów wskazuje, zarówno, na świadomość znaczenia koncepcji zrównoważonego rozwoju, jak i na trudność w utworzeniu jednego, jednolitego dla wszystkich państw systemu certyfikacji. Trudność ta wynika ze zróżnicowania klimatycznego

krajów, uwarunkowań prawno–politycznych, ekonomicznych i gospodarczych, od poziomu rozwoju gospodarczego danego kraju oraz od popularyzacji koncepcji budownictwa zrównoważonego.

System certyfikacji BREEM powstał w latach dziewięćdziesiątych XX wieku w Wielkiej Brytanii. Od tamtego czasu ewaluował poprzez dostosowanie nie tylko do rozwoju w zakresie technologii budowlanych i eksploatacyjnych budynków, lecz także do zmieniających się potrzeb społecznych, ekonomicznych i środowiskowych. System pozwala na certyfikację budynków nowo powstających, istniejących oraz użytkowanych minimum dwa lata. Obecnie system, dzięki dużej ilości rodzajów certyfikatów, pozwala na ocenę między innymi: budynków mieszkalnych, handlowych, biurowych, magazynowych, hoteli, szkół, opieki zdrowotnej, obiektów przemysłowych, zakładów karnych. Wybranie odpowiedniej wersji certyfikatu wiąże się z określeniem funkcji budynku, sposobem zarządzania i szeregiem innych cech, które powodują, że pozornie podobne budynki nie powinny być oceniane w ten sam sposób. Certyfikowany budynek podlega ocenie w 10 kategoriach nazwanych „issues and aims” – „sprawy i cele” tj. zarządzanie, zdrowie i samopoczucie, energia, transport, woda, odpady, zanieczyszczenie, zagospodarowanie działki i ekologia, materiały oraz innowacyjność. W każdej kategorii przyznawane są punkty, które pomnożone przez wagę procentową, a następnie zsumowane dają wynik procentowy – finalny certyfikat w następującej pięciostopniowej skali: 30-44% zadowalający, 45-54% dobry, 55-69% bardzo dobry, 70-84% doskonały, 85-100% wyróżniający się [25, 88-90].

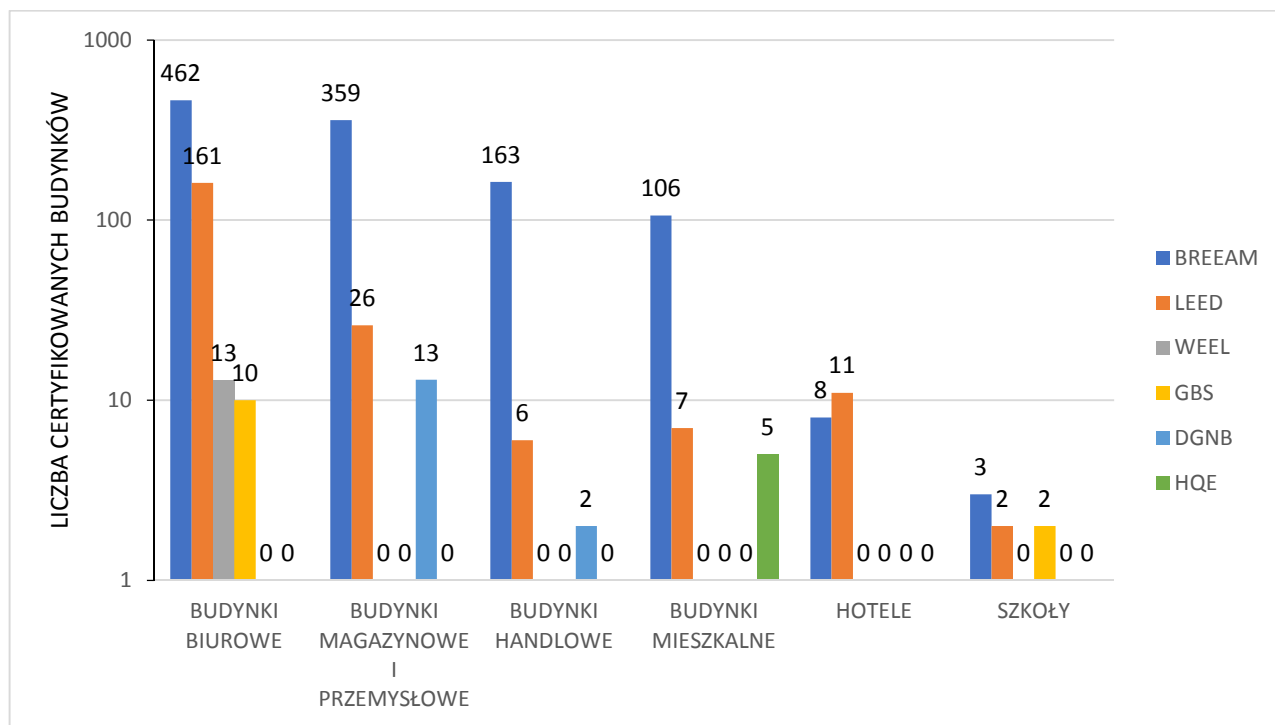
System certyfikacji LEED również powstał w latach dziewięćdziesiątych XX wieku. Opracowany został przez amerykańską organizację Green Building Council. System LEED analogicznie jak BREEM przewiduje nieco zmodyfikowane parametry dla oceny na przykład: domów mieszkalnych, szkół, obiektów handlowych i opieki zdrowotnej, zagospodarowania obszaru, nowych realizacji i generalnych remontów, wnętrz budynków komercyjnych, konstrukcji i wykończenia budynków. Certyfikowany budynek podlega ocenie w następujących kategoriach: zintegrowany proces projektowy, energia i środowisko, racjonalne/oszczędne zużywanie wody, zrównoważone wykorzystanie zasobów i materiałów, jakość powietrza wewnątrz budynku, zrównoważona lokalizacja i transport, innowacyjność projektu, priorytety regionalne. W zależności od ilości uzyskanych punktów, budynek uzyskuje finalnie świadectwo według następującej czterostopniowej skali: 40-49 punktów zwykłe, 50-59 punktów srebrne, 60-79 punktów złote oraz powyżej 80 punktów platynowe [25, 88, 91].

WELL Building Standard to system certyfikacji budynków wprowadzony na przestrzeni lat 2007 – 2014 w Stanach Zjednoczonych. System ten umożliwia certyfikację nowo powstających i istniejących budynków, nowych i istniejących wnętrz oraz budynków w stanie deweloperskim. Składa się z szeregu funkcji zawierających wskaźniki wydajności, strategię planowania i wykonawcze, które służą regulacji różnych aspektów wpływających na zdrowie, komfort i świadomość użytkowników. Budynek systemem WELL oceniany jest w następujących dziesięciu kategoriach: powietrze, woda, odżywianie, światło, ruch, komfort termiczny, akustyka, materiały, umysł oraz społeczność. W każdej kategorii wyznaczono warunki konieczne oraz warunki opcjonalne. Warunki konieczne są to kluczowe wymagania, które należy zrealizować, aby otrzymać certyfikat. Warunki opcjonalne to wymagania, których spełnianie podwyższa ocenę. W zależności od stopnia spełnienia wymagań w systemie WELL można otrzymać certyfikat srebrny, złoty lub platynowy [25, 92].

DGNB to niemiecki system certyfikacji opracowany przez Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen w 2008 r. System może służyć do oceny nowych realizacji, istniejących budynków oraz całych kwartałów miast, przy uwzględnieniu wszystkich istotnych aspektów koncepcji budownictwa zrównoważonego. Metoda DGNB polega na ocenie szeregu kryteriów definiujących sześć głównych dziedzin tj. jakość ekologiczna, ekonomiczna, społeczno–kulturalna, funkcjonalna, techniczna, procesów oraz lokalizacji. Poszczególnym dziedzinom jakości nadane są nieco zmodyfikowane parametry (wagi) dla oceny: budynków biurowych i administracyjnych, obiektów handlowych, placówek edukacyjnych, hoteli, budynków przemysłowych i mieszkalnych oraz dzielnic biznesowych, przemysłowych i miejskich. W zależności od stopnia spełnienia wymagań w systemie WELL można otrzymać certyfikat: brązowy, srebrny lub złoty [25, 93].

W Polsce uzyskanie certyfikatu ekologicznego jest dobrowolne. Z roku na rok inwestorzy oraz właściciele nieruchomości coraz częściej sięgają po narzędzia oceny wpływu budynków na środowisko naturalne. Sukcesywnie zwiększa się liczba certyfikowanych, zarówno nowo powstałych, jak i istniejących budynków. Aktualne dane są zbierane, analizowane oraz archiwizowane przez Polskie Stowarzyszenie Budownictwa Ekologicznego. Zgodnie z informacjami zawartymi w raporcie [94], podsumowującym okres od marca 2021 r. do marca 2022 r., certyfikaty ekologiczne przyznano w sześciu różnych systemach: brytyjskim BREEM, amerykańskim LEED i WEEL, niemieckim DGNB, francuskim HQE oraz polskim GBS. Najczęściej stosowanym systemem certyfikacji był BREEAM, stanowił 81,2% udziału w rynku. W LEED certyfikowano ponad 15,7% wszystkich budynków, natomiast udział DGNB, WELL, HQE, GBS wyniósł ok. 1%. Analizując podział branżowy certyfikowanych

obiektów (Rysunek 3) do marca 2022 liderem były obiekty biurowe z udziałem 47,6%. Budynki magazynowe i przemysłowe, z 29,4% udziałem, zajęły drugą pozycję. Branża nieruchomości handlowych, z 12,6% udziałem, znalazła się na trzeciej pozycji [94].



Rysunek 3. Podział branżowy certyfikowanych budynków w Polsce (marzec 2022) [94]

Parametrem, który najlepiej przedstawia obraz zrównoważonego, certyfikowanego budownictwa jest powierzchnia użytkowa certyfikowanych budynków. W Polsce w marcu 2022 r. przekroczyła ona 28,6 mln m², co daje 24% wzrost w stosunku do marca 2021 r. Jednocześnie liczba certyfikowanych budynków łącznie wyniosła 1359, czyli o 259 obiektów więcej w stosunku do roku ubiegłego [94, 95]. W Tabeli 4 zestawiono liczbę oraz odpowiadającą jej powierzchnię użytkową certyfikowanych budynków z podziałem na lata 2019, 2020, 2021, 2022 [94-97]. Dane liczbowe dowodzą, że certyfikowanie obiektów budowlanych w Polsce to trwały kierunek zmian w branży budowlanej.

Tabela 4. Liczba/powierzchnia użytkowa certyfikowanych budynków w Polsce [94-97]

Okres	Zastosowana metoda						ŁĄCZNIE (szt./m ²)
	BREEAM (szt./m ²)	LEED (szt./m ²)	DGNB (szt./m ²)	WELL (szt./m ²)	HQE (szt./m ²)	GBS (szt./m ²)	
Marzec 2022	1101 / 23 985 770	213 / 3 344 346	15 / 564 000	13 / 403 800	5 / 38 560	12 / 299 228	1359 / 28 635 704
Marzec 2021	865 / 18 852 370	190 / 2 890 646	15 / 564 000	16 / 479 400	5 / 38 560	9 / 220 528	1100 / 23 045 504

Tabela 4. Liczba/powierzchnia użytkowa certyfikowanych budynków w Polsce [94-97] – cd.

Okres	Zastosowana metoda						
	BREEAM (szt./m ²)	LEED (szt./m ²)	DGNB (szt./m ²)	WELL (szt./m ²)	HQE (szt./m ²)	GBS (szt./m ²)	ŁĄCZNIE (szt./m ²)
Marzec 2020	649 / 13 559 870	169 / 2 721 466	14 / 552 000	8 / 209 800	5 / 38 560	0	845 / 17 081 696
Marzec 2019	477 / 10911670	146 / 2278866	13 / 460000	7 / 182500	5 / 38560	0	648 / 13871596

1.8. Wielokryterialne metody wspomaganie decyzji

Mówiąc o podejmowaniu decyzji, myśli się zwykle o sytuacji problemowej, która wymaga znalezienia właściwego rozwiązania. Powszechność takich sytuacji oraz duża waga wielu z nich, przyczyniły się do rozwoju wielokryterialnych metod wspomaganie decyzji. Ich zebranie i usystematyzowanie, a także dalszy rozwój metodologii, realizowane były w latach 2009–2012 w ramach badań zespołowych pod kierunkiem T. Trzaskalika [98]. Metody posiadają szerokie spektrum stosowania, mogą być wykorzystane do analizy podejmowania decyzji w różnych dziedzinach aktywności ludzkiej. Celem metod jest wsparcie decydenta w podjęciu decyzji poprzez wskazanie wariantu zgodnego z jego preferencjami. W odniesieniu do sposobu działania metod wyróżnia się:

- metody analitycznej hierarchizacji: AHP [99], AHP w ujęciu rozmytym [100], REMBRANDT [101, 102, 103], ANP [104, 105, 106], ANP w ujęciu rozmytym [98];
- metody addytywne: sumy ważonej SAW [107], sumy ważonej w ujęciu rozmytym FSAW [108], SMART [98], SMARTER [109];
- metody wykorzystujące punkty referencyjne: TOPSIS [110], F-TOPSIS [111], VIKOR [112], BIPOLAR [113, 114], BIPOLAR z dominacjami stochastycznymi [115];
- metody budujące relacje przewyższenia - metody rodziny ELECTRE [116];
- metody konstrukcji rankingu preferencji w celu wzbogacenia preferencji – metody rodziny PROMETHEE [117, 118];
- metody werbalne VDA: ZAPROS I–III [119, 120];
- metoda pomiaru atrakcyjności wariantu przy użyciu techniki oceny opartej na kategoriach – metoda MACBETH [221, 122];
- i inne.

Ustalenie metody wielokryterialnego wspomagania decyzji jest samo w sobie problemem wielokryterialnego wyboru. Z uwagi na różnorodność dostępnych metod, przed wyborem tej właściwej, konieczne jest ustalenie struktury problemu decyzyjnego, stopnia jego złożoności, ilości i rodzaju dostępnych informacji oraz preferencji decydenta [123]. W rozprawie podjęto problem wyboru receptury mieszanki betonowej w aspekcie ekologicznego, technicznego i ekonomicznego obszaru formułowania celu. Kryteria decyzyjne podzielono zgodnie z obszarami celu na trzy podzbiory. Założono, iż wszystkie kryteria zostaną wyrażone w wartościach liczbowych w sposób niewymagający dokonywania obiektywnych ocen. Zauważono brak zebranych informacji niezbędnych do wyznaczenia przyjętych w rozprawie kryteriów ekologicznych tj. ślad węglowy mieszanki betonowej oraz wartość zużycia surowców naturalnych niezbędnych do jej produkcji. Wobec tego, nie zdecydowano się rozwiązać przedstawionego w rozprawie problemu za pomocą dostępnych metod. Uznano, iż istnieje potrzeba zaproponowania nowej, wiarygodnej i czytelnej metody, służącej do wskazania rozwiązania (receptury mieszanki betonowej) najbardziej pożądanego. Wobec powyższego, opracowano metodę dedykowaną podjętemu w rozprawie problemowi decyzyjnemu oraz zbiór informacji zawierający charakterystyki składników mieszanek betonowych (Tabela 22).

Rozdział 2

Cel i zakres rozprawy

2.1. Przesłanki do prowadzenia tematu rozprawy

W rozdziale pierwszym niniejszej rozprawy przeglądowi poddano wybrane zagadnienia wpisane w koncepcję zrównoważonego budownictwa, mające istotne znaczenie w projektowaniu i produkcji betonu. Przedstawiono i usystematyzowano podejmowane działania mające na celu ograniczenie nadmiernego wpływu przemysłu betonowego na jakość środowiska i klimatu. W aspekcie produkcji betonu, w szczególności rozważaniom poddano dostępne sposoby redukcji emisji dwutlenku węgla do atmosfery oraz racjonalne gospodarowanie surowcami naturalnymi. Wskazano, iż znakiem szczególnym technologii betonu XXI wieku jest dążenie do stosowania materiałów odpadowych z różnych gałęzi przemysłu i gospodarki oraz z recyklingu. Realizacja powyższych celów jest możliwa wyłącznie przy zachowaniu wszystkich parametrów technicznych zapewniających bezpieczne użytkowanie konstrukcji.

Zauważono, iż:

- przemysł budowlany jest wpisany w koncepcję zrównoważonego rozwoju;
- przemysł cementowy poprzez ograniczenie emisji pyłów, zmniejszenie energochłonności procesu klinkieryzacji, zastosowanie produktów odpadowych z przemysłu energetycznego i hutnictwa poczynił znaczące kroki na drodze zrównoważonego wyrobu;
- w artykułach naukowych szeroko opisano wpływ zastosowania produktów ubocznych przemysłu energetycznego i hutnictwa jako dodatków do betonu oraz dodatków, których produkcja wiąże się ze zmniejszeniem energii na ten cel;
- prowadzone są badania naukowe, których celem jest poprawa właściwości betonu wykonanego z udziałem kruszyw recyklingowych;
- prowadzone są badania naukowe, których celem jest wykorzystanie produktów odpadowych z różnych dziedzin gospodarki do produkcji betonu;
- wprowadzono systemy kompleksowej oceny projektów budowlanych, po które pomimo, iż nie są prawem obowiązkowe, coraz częściej sięgają inwestorzy;
- wpływ betonu na środowisko, jako wyrobu, jest wyrażony za pomocą „parametru” jakim jest ślad węglowy;

- jednocześnie brak jest zebranych i usystematyzowanych informacji umożliwiających wyznaczenie śladu węglowego mieszanki betonowej;
- brak jest metod analizy wielokryterialnych służących do wyboru receptury mieszanki betonowej;
- europejskie prawo klimatyczne zobowiązało kraje Unii Europejskiej do redukcji emisji dwutlenku węgla o 55% do 2030 r. w porównaniu do poziomu z 1990 r. oraz ustanowiło cel neutralności klimatycznej do 2050 r.
- coraz to większe skomplikowanie konstrukcji betonowych pracujących w złożonych warunkach środowiskowych stawia nowe wyzwania przed projektantami i wykonawcami betonu powodując rozwój nowych technologii betonu.

Powyższe aspekty stały się przesłanką do podjęcia badań i analiz z zaproponowaniem metody wielokryterialnej wspomagania decyzji, opartej na aparacie matematycznym, która pozwoli na wybór optymalnego wariantu receptury mieszanki betonowej.

2.2. Cel i zakres rozprawy doktorskiej

Uwzględniając przesłanki do prowadzenia rozprawy doktorskiej, tezę rozprawy sformułowano następująco:

- ***metoda wielokryterialnego wspomagania decyzji oparta na aparacie matematycznym, która ze względu na zdefiniowane obszary formułowania celów: ekologiczny, ekonomiczny i techniczny, umożliwi wybór optymalnego wariantu receptury mieszanki betonowej.***

W związku z tak postawioną tezą celem niniejszej pracy jest:

- ***opracowanie metody wielokryterialnego wspomagania decyzji opartej na aparacie matematycznym, która ze względu na zdefiniowane obszary formułowania celów: ekologiczny, ekonomiczny i techniczny, pozwoli na wybór optymalnego wariantu receptury mieszanki betonowej.***

Cele szczegółowe:

- realizacja badań własnych betonu;
- za pomocą metody EIPI rozwiązanie problemu decyzyjnego polegającego na wyborze, spośród zbioru receptur mieszanek betonowych, wariantu optymalnego;
- opracowanie autorskiej metody wspomagania decyzji EIPICI oraz przy jej użyciu rozwiązanie problemu decyzyjnego polegającego na wyborze, spośród zbioru receptur mieszanek betonowych, wariantu optymalnego;

- za pomocą metody EIPICI rozwiązanie problemu decyzyjnego polegającego na wyborze, spośród receptur mieszanek betonowych, wariantu optymalnego do zastosowania w budownictwie mostowym;
- za pomocą metody EIPICI rozwiązanie problemu decyzyjnego polegającego na wyborze, spośród receptur mieszanek betonowych, wariantu optymalnego do zastosowania w budownictwie drogowym jako dolna i górna warstwa betonu nawierzchniowego;
- implementacja komputerowa metody.

Utylitarne efekty pracy planuje się zweryfikować na podstawie opracowanych w ramach niniejszej rozprawy bazach wiedzy zawierających:

- wyniki badań właściwości technicznych betonu (badania własne wykonane w Centralnym Laboratorium Mechaniki i Budownictwa Filii PW w Płocku, ul. Jachowicza 2);
- wyniki badań właściwości technicznych betonu C30/37 stosowanego w budownictwie mostowym oraz betonu C35/45 stosowanego w budownictwie drogowym;
- dane o emisji dwutlenku węgla, powstałego bezpośrednio przy produkcji 1 m³ mieszanki betonowej oraz jej składników (śląd węglowy);
- wartości zużycia surowców naturalnych niezbędnych do wyprodukowania 1 m³ mieszanki betonowej;
- koszt bezpośredni wyprodukowania 1 m³ mieszanki betonowej: materiałów budowlanych wraz z kosztem ich dostawy (M), robocizny (R), pracy maszyn i pracy sprzętu budowlanego (S).

Założono, że autorska metoda wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPICI powinna charakteryzować się użytecznością i łatwością w definiowaniu bazy wiedzy, natomiast zaproponowany algorytm postępowania powinien poszerzać dotychczasowy stan wiedzy w zakresie oceny wielokryterialnej betonu. Dotyczyć to będzie w szczególności:

- aspektu współuczestnictwa w analizie trzech obszarów formułowania celu: ekologicznego, technicznego i ekonomicznego;
- w związku z tak zdefiniowanymi obszarami formułowania celu podział kryteriów na trzy podzbiory.

Na Rysunku 4 przedstawiono główne elementy dysertacji.



Rysunek 4. Główne elementy dysertacji

Rozdział 3

Badania własne

3.1. Materiały i receptury mieszanek betonowych

W celu osiągnięcia użytecznych zamierzeń podjętych w rozprawie zaprojektowano dwadzieścia siedem receptur mieszanek betonowych. Receptury podzielono na trzy serie: CC1-CC9, M1C-M9C i CF1-CF9. Pierwszą serię przygotowano bezpośrednio w ramach rozprawy doktorskiej. Dwie kolejne opisano odpowiednio w pracy dyplomowej magisterskiej [124] i inżynierskiej [125]. Receptury opracowano w taki sposób, aby różniły się: rodzajem zastosowanego cementu, rodzajem i frakcją zastosowanego kruszywa, użytymi dodatkami i domieszkami. Składniki receptur mieszanek betonowych oraz ich oznaczenia zamieszczono w Tabeli 5, natomiast receptury w Tabeli 6.

Tabela 5. Wykaz składników receptur mieszanek betonowych

Oznaczenie	Składnik mieszanki betonowej
C1	Cement CEM I 32,5R
C2	Cement CEM II/B-S32,5R – 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 42,5 N- LA
C9	Cement CEM III/A 32,5 N-LA
F1	Kruszywo granitowe 2-8 mm
F2	Kruszywo granitowe 8-16 mm
F3	Kruszywo granitowe 2-16 mm
F8	Kruszywo wapienne 2-8 mm
F9	Kruszywo wapienne 8-16 mm
F10	Kruszywo żwirowe 2-4 mm
F11	Kruszywo żwirowe 2-8 mm
F12	Kruszywo żwirowe 8-16 mm
F13	Kruszywo recyklingowe 4-16 mm
F14	Grys szarogłazowy 2-8 mm
F15	Grys szarogłazowy 8-16 mm
F16	Ścierniwo na bazie żużla pomiedziowego
F17	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

Tabela 6. Receptury mieszanek betonowych

Znak 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
		654/F1	654/F2	-	-				-	-	
CC1	300/C1	654/F1	654/F2	-	-	662/F17	150	2,40/D1	-	-	0,50
CC2	300/C2	648/F1	648/F2	-	-	655/F17	150	2,40/D1	-	-	0,50
CC3	300/C3	654/F1	654/F2	-	-	662/F17	150	2,40/D1	-	-	0,50
CC4	300/C4	647/F1	647/F2	-	-	654/F17	150	2,40/D1	-	-	0,50
CC5	300/C5	654/F1	654/F2	-	-	662/F17	150	2,40/D1	-	-	0,50
CC6	300/C6	648/F1	648/F2	-	-	655/F17	150	2,40/D1	-	-	0,50
CC7	300/C7	651/F1	651/F2	-	-	659/F17	150	2,40/D1	-	-	0,50
CC8	300/C8	652/F1	651/F2	-	-	659/F17	150	2,40/D1	-	-	0,50
CC9	300/C9	648/F1	648/F2	-	-	655/F17	150	2,40/D1	-	-	0,50
M1C	300/C5	1633/F3	-	-	-	356/F17	150	3,00/D2	-	-	0,50
M2C	300/C5	1614/F3	-	-	-	352/F17	137	3,00/D2	22,50/P	-	0,46
M3C	300/C5	1595/F3	-	-	-	348/F17	123	3,00/D2	45,00/P	-	0,41
M4C	300/C5	1544/F3	-	-	-	337/F17	150	3,00/D2	-	30,00/M	0,50
M5C	300/C5	1456/F3	-	-	-	318/F17	150	3,00/D2	-	60,00/M	0,50
M6C	300/C5	1526/F3	-	-	-	333/F17	137	3,00/D2	22,50/P	30,00/M	0,46
M7C	300/C5	1438/F3	-	-	-	314/F17	137	3,00/D2	22,50/P	60,00/M	0,46
M8C	300/C5	1507/F3	-	-	-	329/F17	123	3,00/D2	45,00/P	30,00/M	0,41
M9C	300/C5	1419/F3	-	-	-	310/F17	123	3,00/D2	45,00/P	60,00/M	0,41
CF1	300/C5	662/F1	662/F2	-	-	677/F17	135	2,40/D3	-	-	0,45
CF2	300/C5	669/F8	669/F9	-	-	677/F17	135	2,40/D3	-	-	0,45
CF3	300/C5	80/F10	328/F11	328/F12	523/F13	677/F17	135	2,40/D3	-	-	0,45
CF4	300/C5	657/F11	657/F12	-	-	677/F17	135	2,40/D3	-	-	0,45
CF5	300/C5	669/F14	669/F15	-	-	677/F17	135	2,40/D3	-	-	0,45
CF6	300/C5	655/F11	655/F12	507/F16	-	225/F17	135	4,80/D3	-	-	0,45
CF7	300/C5	1190/F13	159/F10	-	-	517/F17	135	2,40/D3	-	-	0,45
CF8	300/C5	80/F10	331/F1	523/F13	331/F2	677/F17	135	2,40/D3	-	-	0,45
CF9	300/C5	660/F2	597/F16	660/F1	-	225/F17	135	4,80/D3	-	-	0,45

Do wykonania próbek betonowych wykorzystano powszechnie stosowane w Polsce cementy oraz kruszywa. Wyjątek stanowi ścierniwo na bazie żużla pomiedziowego. Do przygotowania betonu CF6 i CF9 użyto ścierniwo o twardości 6-7 według skali Mohsa. Zawartość procentową związków chemicznych ścierniwa zamieszczono w Tabeli 7.

Tabela 7. Zawartość procentowa związków chemicznych ścierniwa

Związek chemiczny	Zawartość procentowa
SiO ₂	30,00 – 41,00
CaO	24,20 - 26,20
Al ₂ O ₃	11,50 - 12,60
MgO	6,07 - 10,40
FeO	4,60 - 9,02
K ₂ O	2,61 - 3,90
CuO	0,90 - 1,12
NaO	0,40 - 0,53
PbO	0,50-1,00

Kruszywo recyklingowe wykorzystane w badaniach otrzymano w wyniku kruszenia próbek betonowych po badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Beton, z którego zostały wykonane próbki, miał wytrzymałość od 30 MPa do 50 MPa. Do badań wykorzystano frakcję 4-16 mm, przy czym frakcja 4-8 mm stanowiła 40% całości.

Jako dodatek do betonu użyto ceramiczne (krzemowo – glinowe) mikrosfery o frakcji 150 µm. Tego rodzaju mikrosfery pozyskiwane są między innymi w trakcie spalania węgla kamiennego, gdzie stanowią jedną z frakcji popiołu lotnego. Do badań wykorzystano mikrosfery szare pochodzące z zakładu ECO EXPORT S.A o zawartości procentowej związków chemicznych zamieszczonych w Tabeli 8.

Tabela 8. Skład chemiczny mikrosfery szarej

Związek chemiczny	Zawartość procentowa
Al ₂ O ₃	34,00 – 38,00
Fe ₂ O ₃	1,00 – 3,00
SiO ₂	50,00 – 60,00
K ₂ O	0,10 – 2,00
CaO	1,00 – 4,00
MgO	0,20 – 2,00
TiO ₂	0,50 – 3,00

3.2. Metody badań

Zgodnie z zamieszczonymi w Tabeli 6 recepturami mieszanek betonowych przygotowano łącznie 864 próbek sześciennych o krawędzi 10 cm, po 35 sztuk z każdego betonu. Próbki do badań formowane były w plastikowych formach poddanych dwukrotnie wibrowaniu na stole wibracyjnym. Po rozformowaniu próbki dojrzewały w wodzie przez 28 lub 90 dni w zależności od planowanego badania. Pomiary rozpoczęto po okresie dojrzewania, natomiast próbki w okresie przed badaniem przechowywane były w Centralnym Laboratorium Mechaniki i Budownictwa Filii Politechniki Warszawskiej w Płocku. Wykaz badań oraz oznaczenie normy, zgodnie z którą zostały wykonane, zamieszczono w Tabeli 9.

Badania serii CC1-CC9 wykonano w ramach rozprawy doktorskiej. Badania próbek z serii M1C-M9C w ramach pracy dyplomowej magisterskiej [124], zaś z serii CF1-CF9 w ramach pracy dyplomowej inżynierskiej [125]. Autorka dysertacji brała czynny udział w badaniach i powstawaniu wymienionych prac.

Tabela 9. Wykaz badań własnych betonu

Rodzaj badania	Norma	Ilość próbek przeznaczonych do badania
Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania	[126]	135
Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie po 90 dniach dojrzewania	[126]	135
Badanie wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu	[127]	135
Badanie sorpcyjności betonu	Badanie nienormowe [128]	Wykonano na próbkach po badaniu rozciągania przy rozłupywaniu
Badanie nasiąkliwości betonu	[129]	162
Badanie mrozoodporności betonu	-	135
Badanie głębokości wnikania chlorków	Badanie nienormowe [124]	81
Badanie ścieralności betonu na tarczy Boehmego	[130]	81

3.2.1. Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 oraz po 90 dniach dojrzewania

Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 oraz 90 dniach dojrzewania wykonano na próbkach sześciennych o krawędzi 10 cm na maszynie wytrzymałościowej ToniTechnik ToniPACT II zgodnie z normą [126]. Próbki obciążano z prędkością 0,5 MPa/s. Na potrzeby badania przygotowano łącznie 270 próbek, po 10 sztuk z każdego betonu (5 szt. przeznaczono

na badanie wytrzymałości po 28 dniach i 5 szt. na badanie po 90 dniach). Wytrzymałość betonu na ściskanie wyznaczono ze wzoru (1), a średnią z badań ze wzorów (2) i (3):

$$f_{c28}, f_{c90} = \frac{F}{A_C} \quad (1)$$

gdzie:

f_{c28} – wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania [kN/mm²];

f_{c90} – wytrzymałość betonu na ściskanie po 90 dniach dojrzewania [kN/mm²];

F – maksymalne obciążenie przy zniszczeniu [kN];

A_C – pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki, na który działa siła ściskająca [mm²].

$$f_{cm28} = \frac{\sum f_{c28}}{n} \quad (2)$$

$$f_{cm90} = \frac{\sum f_{c90}}{n} \quad (3)$$

Otrzymane wyniki wyrażono w MPa z dokładnością do 0,1.

3.2.2. Badanie wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu

Badanie wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu wykonano na próbkach sześciennych o krawędzi 10 cm na maszynie wytrzymałościowej ToniTechnik ToniPACT II w oparciu o zapisy normy [127]. Na potrzeby badania przygotowano łącznie 135 próbek, po 5 sztuk z każdego betonu. Badanie wykonano po 28 dniach dojrzewania próbek. Próbki obciążano z prędkością 0,05 MPa/s. Wytrzymałość na rozciąganie obliczono zgodnie z formułą (4), a średnią wyników ze wzoru (5):

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (4)$$

gdzie:

f_{ct} – wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa];

F – maksymalne obciążenie próbki [kN];

L – długość linii styku próbki [mm];

d – deklarowany wymiar przekroju poprzecznego [mm].

$$f_{tm} = \frac{\sum f_{ct}}{n} \quad (5)$$

Otrzymane wyniki wyrażono w MPa z dokładnością do 0,05.

3.2.3. Badanie sorpcyjności betonu

Badanie sorpcyjności betonu wykonano metodą masową, opartą na założeniu, że woda penetruje beton przy jednokierunkowym przepływie. Taki przepływ można zapewnić w przypadku, kiedy jedna z powierzchni próbki w całości styka się z wodą, co umożliwiło wykonanie badania na próbkach o wymiarach 10x10x5cm uzyskanych po badaniu wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu. Próbki przed badaniem były suszone do stałej masy w temperaturze około 100°C. Następnie próbki zważono i umieszczono w wodzie destylowanej na głębokość około 3 mm. Test polegał na zważeniu próbek po 15 i 30 minutach, następnie po 1, 2, 3, 4, 5 i 6 godzinach od zanurzenia próbek w wodzie destylowanej. Sorpcyjność S jest współczynnikiem kierunkowym prostej na wykresie obrazującym przyrost masy próbki w czasie, określonym wzorem (6) [128]:

$$\frac{\Delta m}{A_s} = S \cdot \sqrt{t} \quad (6)$$

gdzie:

Δm – masa zaabsorbowanej wody [g]

A_s – powierzchnia badanej próbki [cm²];

t – czas [s].

Sorpcyjność jest to parametr, który określa szybkość wnikania wody w beton, co czyni go dobrym predykatorem trwałości konstrukcji betonowych/żelbetowych [128]. Im wartość sorpcyjności jest niższa, tym mniejsze jest zagrożenie korozyjne betonu. Sorpcyjność, jako cecha betonu, może być wykorzystana do oceny lub zapewnienia trwałości konstrukcjom z betonu. Powyższe wpłynęło na wybór sorpcyjności jako kryterium decyzyjnego w dalszej części pracy. Na rysunku 5 przedstawiono zdjęcie z badań laboratoryjnych sorpcyjności betonu.



Rysunek 5. Badanie sorpcyjności betonu [124]

3.2.4. Badanie nasiąkliwości betonu

Badanie nasiąkliwości betonu wykonano na próbkach sześciennych o krawędzi 10 cm postępując zgodnie z normą [129]. Na potrzeby badania przygotowano łącznie 162 próbki, po 6 sztuk z każdego betonu. Przyjęto temperaturę suszenia próbek 105°C. Nasiąkliwością określa się maksymalną ilość wody, jaką może zabsorbować beton i wyraża się wzorem (7). Średnią z wyników obliczono według wzoru (8).

$$n_w = \frac{(G_2 - G_1)}{G_1} \cdot 100 \% \quad (7)$$

gdzie:

n_w – nasiąkliwość próbki [%];

G_2 – masa próbki nasyczonej wodą [g];

G_1 – masa próbki wysuszonej w 105°C [g].

$$n_{w,m} = \frac{\sum n_w}{n} \quad (8)$$

Nasiąkliwość betonu nie powinna być większa niż:

- 5% – w przypadku betonu narażonego na bezpośrednie działanie czynników atmosferycznych;
- 9% – w przypadku betonów osłoniętych przed bezpośrednim działaniem czynników atmosferycznych.

3.2.5. Badanie mrozoodporności betonu

Badanie mrozoodporności betonu wykonano na próbkach sześciennych o krawędzi 10 cm. Na potrzeby badania przygotowano łącznie 135 próbek, po 5 sztuk z każdego betonu. Próbki poddano stu pięćdziesięciu cyklom zamrażania – rozmrażania. Jeden cykl składał się z 4 godzin zamrażania w temperaturze -18°C oraz 2 godzin rozmrażania w temperaturze 18°C . Badanie pozwala ocenić odporność betonu na działanie mrozu, z uwzględnieniem zarówno stopnia wewnętrznego zniszczenia betonu, charakteryzowanego przez spadek wytrzymałości próbki, jak również destrukcji zewnętrznych, określonych wizualnie oraz na podstawie ubytku masy próbki. Ubytek masy próbki po badaniu mrozoodporności, Δm_F , obliczono zgodnie ze wzorem (9), a średnią z wyników ze wzoru (10):

$$\Delta m_F = \frac{m_{F1} - m_{F2}}{m_{F1}} \cdot 100\% \quad (9)$$

gdzie:

Δm_F – ubytek masy próbki po badaniu mrozoodporności [%];

m_{F1} – masa próbek przed ich zamrażaniem, w stanie nasycenia wodą [kg];

m_{F2} – masa próbek po ich ostatnim rozmrażaniu, w stanie nasycenia wodą [kg].

$$\Delta m_{F,m} = \frac{\sum \Delta m_F}{n} \quad (10)$$

Średni spadek wytrzymałości próbek po badaniu mrozoodporności, Δf_{m_F} , należy obliczyć według wzoru (11), a średnią wyników ze wzoru (12):

$$\Delta f_F = \frac{f_{c90} - f_{F2}}{f_{c90}} \cdot 100\% \quad (11)$$

gdzie:

Δf_F – spadek wytrzymałości próbki po badaniu mrozoodporności [%];

f_{c90} – wytrzymałość betonu na ściskanie po 90 dniach dojrzewania [kN/mm²];

f_{F2} – wytrzymałość próbki badanej, po jej ostatnim rozmrażaniu, nasyconej wodą [MPa].

$$\Delta f_{F,m} = \frac{\sum \Delta f_F}{n} \quad (12)$$

Zgodnie z normą [131] stopień mrozoodporności betonu jest osiągnięty, jeżeli po wymaganej liczbie cykli zamrażania/rozmrażania próbek betonowych, spełnione zostaną następujące warunki:

- próbki nie wykazują pęknięć;
- łączna masa ubytków betonu w postaci zniszczonych narożników i krawędzi, odprysków itp. nie przekracza 5% masy próbek przed rozpoczęciem cykli zamrażania – rozmrażania;
- obniżenie wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości próbek niezamrożonych jest nie większe niż 20%.

3.2.6. Badanie głębokości wnikania chlorków

Badanie głębokości wnikania chlorków wykonano na próbkach sześciennych o krawędzi 10 cm w komorze solnej ASCOTT 10001P. Na potrzeby badania przygotowano łącznie 81 próbek, po 3 sztuki z każdego betonu. Próbki poddano trzydziestu cyklom natrysk-osuszanie. Jeden cykl obejmował czterogodzinny natrysk dziesięcioprocentowego wodnego roztworu chlorku sodu (mgły solnej) oraz dwugodzinne osuszanie próbek. Po zakończeniu ostatniego cyklu próbki przecięto na pół. W celu ukazania głębokości wnikania do próbek chlorku sodu wewnętrzne ich strony spryskano roztworem AgNO_3 , który reagując z NaCl spowodował zabarwienie się próbek na fioletowo (Rysunek 6) [125]. W wyniku reakcji azotanu srebra z chlorkiem sodu powstaje chlorek srebra i azotan sodu (13). Chlorek srebra rozkłada się pod wpływem działania światła lub temperatury. W wyniku rozkładu wydziela się gazowy chlor oraz metaliczne srebro, które nadaje barwę (14).





Rysunek 6. Zdjęcie próbek po badaniu głębokości wnikania chlorków [125]

3.2.7. Badanie ścieralności na tarczy Boehmego

Badanie ścieralności wykonano zgodnie z metodą B opisaną w normie [130]. Na potrzeby badania przygotowano łącznie 81 próbek, po 3 sztuki z każdego betonu. Prostopadłościenne próbki o podstawie 71 x 71 mm poddano szesnastu cyklom ścierania, każdy po 22 obroty. Wynikiem badania jest zużycie próbek w skutek ścierania po 352 obrotach wyrażone jako średnie zmniejszenie objętości próbki, ΔV , zgodnie ze wzorem (15). Średnią z wyników obliczono ze wzoru (16).

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_b} \quad (15)$$

gdzie:

Δm – ubytek masy po 16 cyklach ścierania [g];

ρ_b – gęstość objętościowa próbki lub w przypadku próbek wielowarstwowych, gęstość objętościowa warstwy ścieranej [g/mm³].

$$\Delta V_m = \frac{\sum \Delta V}{n} \quad (16)$$

Na Rysunku 7 przedstawiono zdjęcie z badania ścieralności betonu na tarczy Boehmego.



Rysunek 7. Badanie ścieralności na tarczy Boehmego [124]

3.3. Wyniki badań laboratoryjnych

W Tabelach od 10 do 19 zestawiono wyniki badań laboratoryjnych wykonanych na przygotowanych próbkach betonowych. Przedstawione wyniki są wartościami średnimi z każdej serii pomiarów. Zestawienie wszystkich wyników zamieszczono w Załączniku 1 do rozprawy. Otrzymane obszerne wyniki pomiarowe posłużyły jako dane wejściowe do utylitarnego zobrazowania działania aparatów matematycznych przyjętych w metodach wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPI oraz EIPICI opisanych w rozdziałach 4, 5 i 6.

Tabela 10. Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania

Receptura	Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania [MPa]	Receptura	Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania [MPa]	Receptura	Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania [MPa]
CC1	54,9	M1C	53,5	CF1	64,9
CC2	63,8	M2C	47,4	CF2	59,3
CC3	45,0	M3C	44,5	CF3	52,8
CC4	50,6	M4C	52,9	CF4	57,1
CC5	62,4	M5C	48,0	CF5	65,2
CC6	63,8	M6C	43,7	CF6	55,4
CC7	45,3	M7C	40,9	CF7	48,1
CC8	63,7	M8C	40,6	CF8	57,7
CC9	45,5	M9C	43,7	CF9	59,4

Tabela 11. Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie po 90 dniach dojrzewania

Receptura	Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 90 dniach dojrzewania [MPa]	Receptura	Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 90 dniach dojrzewania [MPa]	Receptura	Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 90 dniach dojrzewania [MPa]
CC1	58,5	M1C	60,5	CF1	71,9
CC2	69,3	M2C	51,5	CF2	66,1
CC3	56,5	M3C	49,3	CF3	58,1
CC4	56,3	M4C	57,8	CF4	63,5
CC5	70,7	M5C	53,5	CF5	71,4
CC6	75,7	M6C	50,2	CF6	63,5
CC7	53,0	M7C	44,6	CF7	50,1
CC8	71,2	M8C	44,3	CF8	63,1
CC9	58,1	M9C	49,2	CF9	68,0

Tabela 12. Wyniki badania wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu

Receptura	Średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]	Receptura	Średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]	Receptura	Średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]
CC1	4,30	M1C	3,80	CF1	4,15
CC2	4,70	M2C	3,55	CF2	4,25
CC3	3,60	M3C	3,30	CF3	3,45
CC4	4,40	M4C	3,75	CF4	3,45
CC5	4,30	M5C	3,50	CF5	4,75
CC6	3,70	M6C	3,40	CF6	3,85
CC7	3,35	M7C	3,40	CF7	3,20
CC8	4,44	M8C	3,30	CF8	3,60
CC9	4,00	M9C	3,50	CF9	4,00

Tabela 13. Wyniki badania sorpcyjności

Receptura	Sorpcyjność [g/(cm ² ·h ^{0,5})]	Receptura	Sorpcyjność [g/(cm ² ·h ^{0,5})]	Receptura	Sorpcyjność [g/(cm ² ·h ^{0,5})]
CC1	0,0950	M1C	0,0994	CF1	0,0687
CC2	0,0740	M2C	0,0801	CF2	0,0849
CC3	0,0692	M3C	0,0645	CF3	0,0929
CC4	0,0487	M4C	0,0898	CF4	0,0568
CC5	0,0951	M5C	0,0866	CF5	0,0658
CC6	0,0740	M6C	0,0702	CF6	0,0765
CC7	0,0837	M7C	0,0558	CF7	0,1209
CC8	0,0704	M8C	0,0490	CF8	0,1012
CC9	0,0584	M9C	0,0429	CF9	0,0530

Tabela 14. Wyniki badania mrozoodporności - średni spadek wytrzymałości

Receptura	Średni spadek wytrzymałości [%]	Receptura	Średni spadek wytrzymałości [%]	Receptura	Średni spadek wytrzymałości [%]
CC1	5,98	M1C	18,64	CF1	4,53
CC2	1,73	M2C	18,91	CF2	3,78
CC3	19,65	M3C	61,76	CF3	4,17
CC4	2,84	M4C	57,64	CF4	6,24
CC5	3,40	M5C	52,99	CF5	4,15
CC6	10,57	M6C	25,57	CF6	7,94
CC7	7,55	M7C	11,19	CF7	3,59
CC8	4,07	M8C	27,28	CF8	2,92
CC9	10,84	M9C	28,88	CF9	3,41

W przypadku próbek wykonanych zgodnie z recepturami M3C, M4C, M5C, M6C, M8C, M9C obniżenie wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości próbek niezamrożonych jest większe niż 20%, a więc otrzymane wartości przekraczają wartość normową [131]. Oznacza to, że beton nie uzyskał odporności w zakresie 150 cykliów zamrażania–rozmarzania, a otrzymane wyniki świadczą o jego wewnętrznym zniszczeniu. Wobec tego powyższe receptury nie zostały uwzględnione jako warianty decyzyjne w dalszej części pracy.

Tabela 15. Wyniki badania mrozoodporności - średni ubytek masy

Receptura	Średni ubytek masy [%]	Receptura	Średni ubytek masy [%]	Receptura	Średni ubytek masy [%]
CC1	0,046	M1C	-0,248	CF1	0,521
CC2	0,040	M2C	-0,144	CF2	0,469
CC3	-0,289	M3C	7,832	CF3	0,435
CC4	0,323	M4C	2,638	CF4	0,662
CC5	-2,467	M5C	0,796	CF5	0,738
CC6	-0,495	M6C	0,010	CF6	0,792
CC7	2,653	M7C	0,168	CF7	0,943
CC8	-0,023	M8C	0,780	CF8	-0,037
CC9	-0,076	M9C	2,176	CF9	-0,067

Tabela 16. Wyniki badania mrozoodporności - pęknięcia powierzchni próbek

Receptura	Pęknięcia powierzchni próbek	Receptura	Pęknięcia powierzchni próbek	Receptura	Pęknięcia powierzchni próbek
CC1	brak	M1C	brak	CF1	brak
CC2	brak	M2C	brak	CF2	brak
CC3	brak	M3C	brak	CF3	brak
CC4	brak	M4C	brak	CF4	brak
CC5	brak	M5C	brak	CF5	brak
CC6	brak	M6C	brak	CF6	brak
CC7	brak	M7C	brak	CF7	brak
CC8	brak	M8C	brak	CF8	brak
CC9	brak	M9C	brak	CF9	brak

Tabela 17. Wyniki badania nasiąkliwości

Receptura	Nasiąkliwość betonu [%]	Receptura	Nasiąkliwość betonu [%]	Receptura	Nasiąkliwość betonu [%]
CC1	4,81	M1C	4,51	CF1	4,85
CC2	4,75	M2C	4,82	CF2	3,54
CC3	5,21	M3C	5,00	CF3	4,55
CC4	5,03	M4C	4,67	CF4	4,20
CC5	4,61	M5C	5,00	CF5	4,06
CC6	4,85	M6C	4,79	CF6	3,85
CC7	5,21	M7C	4,96	CF7	3,96
CC8	4,76	M8C	4,77	CF8	4,98
CC9	5,00	M9C	4,85	CF9	3,44

Tabela 18. Wyniki badania głębokości wnikania chlorków

Receptura	Głębokość wnikania chlorków [mm]	Receptura	Głębokość wnikania chlorków [mm]	Receptura	Głębokość wnikania chlorków [mm]
CC1	7,14	M1C	6,69	CF1	6,83
CC2	8,64	M2C	8,69	CF2	4,92
CC3	6,83	M3C	6,97	CF3	6,81
CC4	8,44	M4C	8,83	CF4	7,92
CC5	8,08	M5C	7,69	CF5	6,44
CC6	6,69	M6C	6,33	CF6	5,83
CC7	6,64	M7C	5,64	CF7	7,03
CC8	8,03	M8C	7,28	CF8	7,36
CC9	5,97	M9C	5,92	CF9	5,78

Tabela 19. Wyniki badania ścieralności betonu na tarczy Boehmego

Receptura	Zmniejszenie objętości betonu [mm ³]	Receptura	Zmniejszenie objętości betonu [mm ³]	Receptura	Zmniejszenie objętości betonu [mm ³]
CC1	18330,45	M1C	13527,05	CF1	18906,15
CC2	18035,37	M2C	13582,92	CF2	18653,11
CC3	14101,89	M3C	14061,79	CF3	14710,27
CC4	14350,03	M4C	15116,11	CF4	15149,32
CC5	13667,35	M5C	15640,09	CF5	13247,05
CC6	18608,78	M6C	15011,71	CF6	12208,62
CC7	14866,53	M7C	15214,02	CF7	17723,89
CC8	13727,85	M8C	14531,39	CF8	14078,20
CC9	19338,71	M9C	13232,51	CF9	13086,36

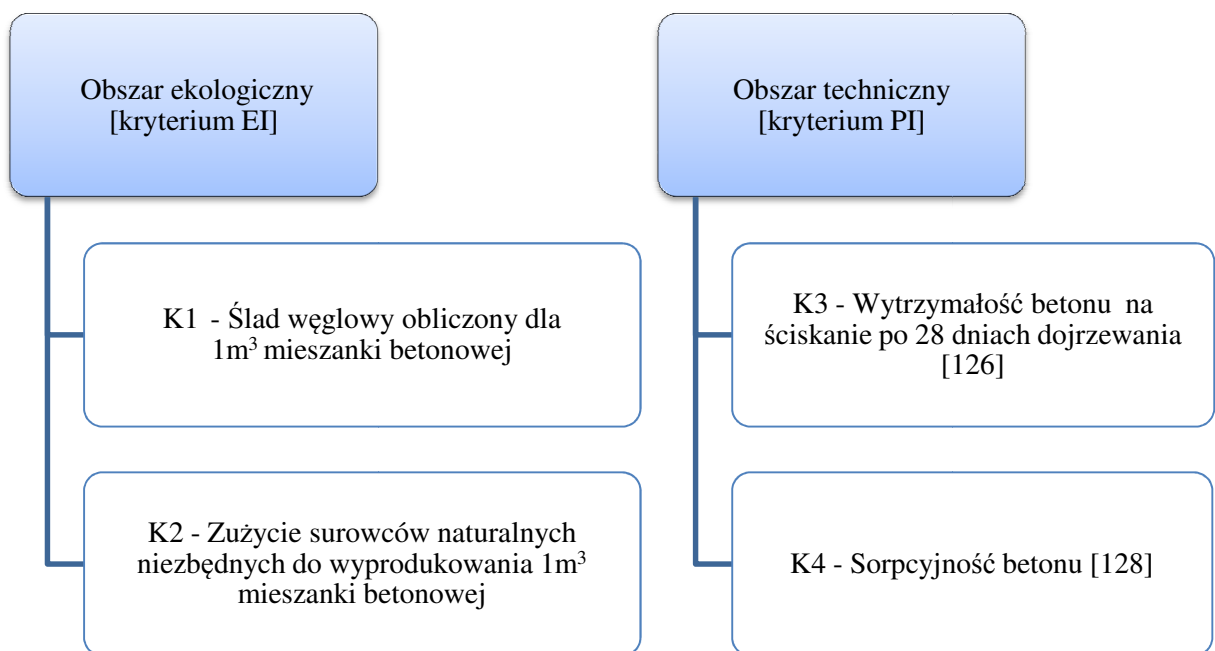
Z uwagi na główny cel pracy doktorskiej związany z zaproponowaniem metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPICI nie przeprowadzono głębszej analizy otrzymanych wyników badań betonu. Jak zaznaczono już wcześniej, obszerne wyniki badań posłużyły za dane wejściowe do prowadzonej metody.

Rozdział 4

Rozwiązanie problemu decyzyjnego metodą EIPI

4.1. Wprowadzenie

Metoda wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPI została opracowana przez W. Kubisę, R. Jaskulskiego, J. Chen, P.L. Ng oraz W. Dobaczewską w 2019 roku [132]. Metoda dedykowana jest do wspomaganie procesu decyzyjnego polegającego na wyborze wariantu receptury mieszanki betonowej w aspekcie ekologicznego oraz technicznego obszaru formułowania celu. W metodzie za pomocą przyjętego sposobu obliczeń, kryteria, a następnie warianty decyzyjne, zostają wyrażone w wartościach liczbowych. Takie działanie, w efekcie końcowym umożliwia hierarchizację wariantów decyzyjnych. Rysunek 8 przedstawia zdefiniowane w metodzie EIPI obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne.



Rysunek. 8. Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne w metodzie EIPI [132]

4.2. Rozwiązanie problemu decyzyjnego metodą EIPI

4.2.1. Zdefiniowanie problemu decyzyjnego

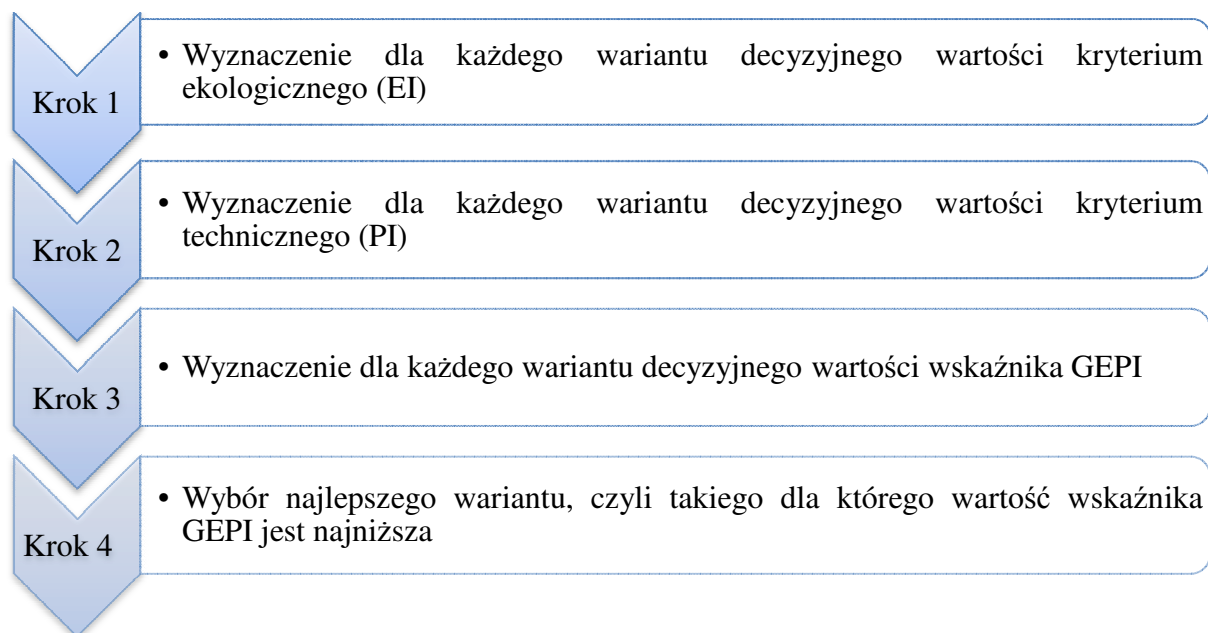
Rozpatrujemy zbiór 21 wariantów decyzyjnych $C = \{CC1, \dots, CC9, M1C, M2C, M7C, CF1, \dots, CF9\}$ oraz zbiór kryteriów decyzyjnych, który ze względu na zdefiniowane wcześniej obszary formułowania celu (ekologiczny i techniczny) podzielono na dwa podzbiory:

- podzbiór kryteriów ekologicznych $EI = \{K1, K2\}$
- podzbiór kryteriów technicznych $PI = \{K3, K4\}$.

Zbiór wariantów decyzyjnych stanowią zamieszczone w Tabeli 6 receptury mieszanek betonowych, z wyjątkiem M3C, M4C, M5C, M6C, M8C, M9C. Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne przedstawiono na Rysunku 8.

Znane są również wagi kryteriów $W = \{W_1, W_2, W_3, W_4\}$ oraz miejsce produkcji mieszanki betonowej – Płock, województwo mazowieckie.

Uwzględniając tak zdefiniowane warianty oraz kryteria decyzyjne schemat algorytmu metody EIPI przedstawiono na Rysunku 9.



Rysunek 9. Schemat algorytmu metody EIPI

4.2.2. Przygotowanie aparatu matematycznego

Zgodnie z przyjętymi dla rozpatrywanego problemu założeniami, do wykonania obliczeń przyjęto następujący aparat matematyczny [132]:

$$EI = \sqrt{K1 \cdot W_1 + K2 \cdot W_2} \quad (17)$$

$$EI = \sqrt{\frac{EM}{EW} \cdot W_1 + \frac{RM}{RW} \cdot W_2} \quad (18)$$

$$PI = K3 \cdot W_3 + K4 \cdot W_4 \quad (19)$$

$$PI = \frac{f_{cm28}}{f_{cm28,r}} \cdot W_3 + \frac{S_r}{S} \cdot W_4 \quad (20)$$

$$GEPI = \sqrt{EI^2 + \frac{1}{PI^2}} \quad (21)$$

Do obliczenia kryterium ekologicznego EI przyjęto [132]:

- EW – **490 kgCO₂/m³**;
- RW – **2000 kg/m³**;
- współczynnik wagowy W₁ = **0,5**;
- współczynnik wagowy W₂ = **0,5**.

Podstawiając powyższe wartości, równanie (18) przyjmie postać (22):

$$EI = \sqrt{\frac{EM}{490 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3} \cdot 0,5 + \frac{RM}{2000 \text{ kg/m}^3} \cdot 0,5} \quad (22)$$

Do obliczenia kryterium technicznego PI przyjęto [132]:

- f_{cm28,r} – **60 MPa**;
- s_r – **0,12 cm/h^{0,5}**;
- współczynnik wagowy W₃ = **0,6**;
- współczynnik wagowy W₄ = **0,4**.

Podstawiając powyższe wartości, równanie (20) przyjmie postać (23):

$$PI = \frac{f_{cm28}}{60 \text{ MPa}} \cdot 0,6 + \frac{0,12 \text{ cm/h}^{0,5}}{s} \cdot 0,4 \quad (23)$$

4.2.3. Przygotowanie bazy wiedzy o wariantach decyzyjnych

Wyznaczenie kryteriów EI i PI, a następnie wskaźnika GEPI, jest możliwe po przygotowaniu dla każdego obszaru formułowania celu kompletnych zbiorów informacji.

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryteriów ekologicznych K1 oraz K2 stanowią:

- wartości śladu węglowego wyznaczone dla każdej receptury, zestawione w Tabeli 20. Szczegółowe obliczenia zamieszczono w Załączniku 2 do rozprawy;
- wartości zużycia surowców naturalnych potrzebnych do wyprodukowania 1 m³ każdej mieszanki betonowej zestawione w Tabeli 20. Szczegółowe obliczenia zamieszczono w Załączniku 2 do rozprawy.

Tabela 20. Ślad węglowy oraz wartość zużycia surowców naturalnych wyznaczone dla receptur CC1-CC9, M1C, M2C, M7C i CF1-CF9

Receptura	EM [kgCO ₂ /m ³]	RM [kg/m ³]	Receptura	EM [kgCO ₂ /m ³]	RM [kg/m ³]	Receptura	EM [kgCO ₂ /m ³]	RM [kg/m ³]
CC1	336,79	1817,65	M1C	346,16	1970,69	CF1	338,04	1838,65
CC2	281,23	1751,90	M2C	351,52	2000,15	CF2	329,75	1851,78
CC3	280,56	1766,65	M3C	-	-	CF3	302,23	1517,40
CC4	278,63	1749,53	M4C	-	-	CF4	303,49	2239,90
CC5	337,30	1817,65	M5C	-	-	CF5	325,12	1851,78
CC6	280,71	1742,90	M6C	-	-	CF6	303,48	2014,30
CC7	240,72	1723,53	M7C	345,66	1816,20	CF7	300,62	716,15
CC8	214,94	1691,03	M8C	-	-	CF8	319,52	1318,03
CC9	214,63	1718,90	M9C	-	-	CF9	338,94	1614,30

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryteriów technicznych K3 oraz K4 stanowią:

- wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania zamieszczone w Tabeli 10;
- wyniki badania sorpcyjności betonu zamieszczone w Tabeli 13.

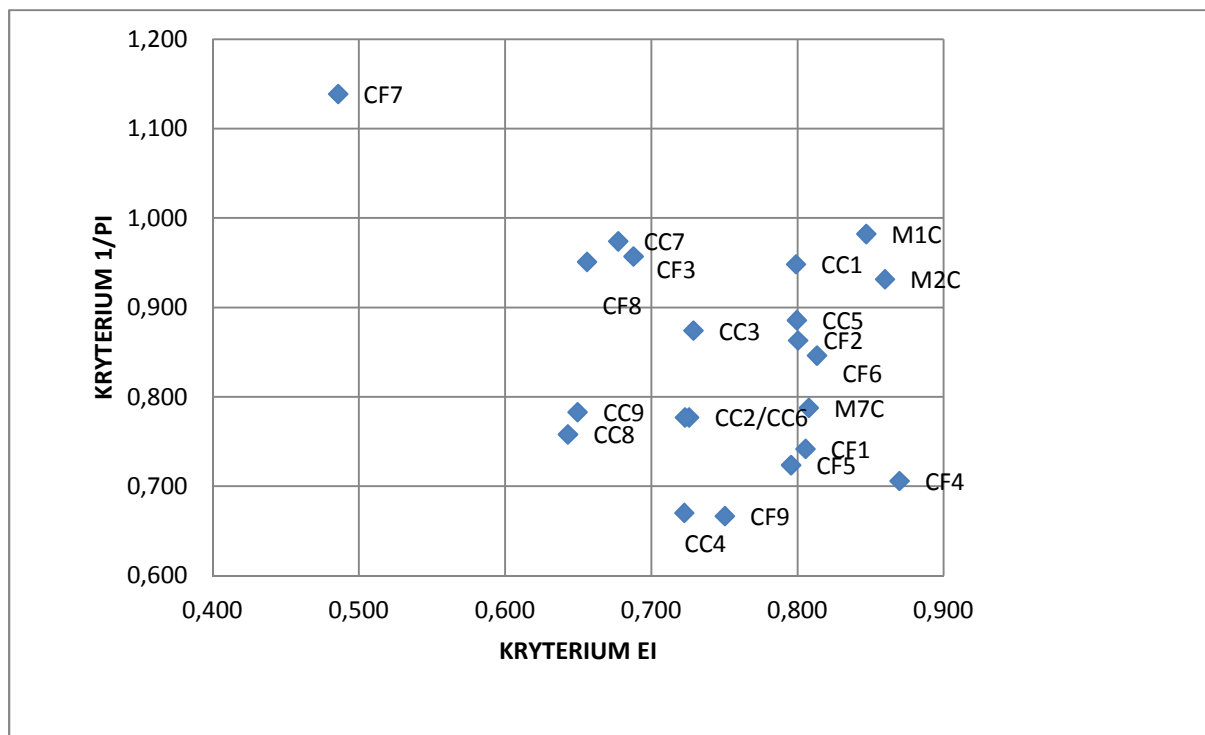
4.2.4. Wyznaczenie wartości kryteriów EI i PI oraz wartości wskaźnika GEPI

Posiadając odpowiednio uporządkowaną bazę wiedzy o wszystkich wariantach decyzyjnych przystąpiono do wykonania obliczeń zgodnie z przyjętym w metodzie EIPI aparatem matematycznym.

Dla każdego wariantu decyzyjnego $C = \{CC1, \dots, CC9, M1C, M2C, M7C, CF1, \dots, CF9\}$ wyznaczono wartość kryterium ekologicznego EI (22), wartość kryterium technicznego $1/PI$ (23) oraz wskaźnik GEPI (21). Wyniki obliczeń zestawiono w Tabeli 21.

Tabela 21. Wartości kryteriów EI, 1/PI oraz wskaźnika GEPI dla receptur CC1-CC9, M1C M2C, M7C, CF1-CF9

Receptura	Wartość kryterium EI	Wartość kryterium 1/PI	Wartość wskaźnika GEPI	Miejsce w rankingu
CC1	0,798	0,949	1,240	19
CC2	0,725	0,777	1,063	6
CC3	0,728	0,874	1,137	11
CC4	0,722	0,670	0,985	1
CC5	0,799	0,886	1,193	17
CC6	0,722	0,777	1,061	5
CC7	0,677	0,974	1,186	16
CC8	0,642	0,758	0,993	2
CC9	0,649	0,783	1,017	4
M1C	0,846	0,982	1,296	21
M2C	0,859	0,932	1,267	20
M7C	0,807	0,788	1,128	10
CF1	0,805	0,742	1,095	8
CF2	0,799	0,863	1,176	14
CF3	0,688	0,957	1,179	15
CF4	0,870	0,706	1,120	9
CF5	0,795	0,724	1,075	7
CF6	0,813	0,846	1,173	13
CF7	0,486	1,139	1,238	18
CF8	0,656	0,951	1,155	12
CF9	0,749	0,667	1,003	3



Rysunek 10. Wykres obrazujący zależność wartości kryteriów 1/PI i EI dla receptur CC1-CC9, M1C, M2C, M7C, CF1-CF9

Dla każdego wariantu decyzyjnego wyznaczono wynikową wartość oceny – wskaźnik GEPI, który umożliwił utworzenie rankingu receptur mieszanek betonowych (Tabela 21). Najlepszym rozwiązaniem jest ta receptura, w przypadku której uzyskano najniższą wartość wskaźnika. Na miejscu pierwszym znalazł się wariant CC4, zaś kolejne w rankingu są: CC8, CF9, CC9, CC6, CC2, CF5, CF1, CF4, M7C, CC3, CF8, CF6, CF2, CF3, CC7, CC5, CF7, CC1, M2C, M1C. Do przygotowania 1m³ mieszanki betonowej CC4 użyto: 300 kg cementu CEM II/B-V 42,5R, 647 kg kruszywa granitowego 2-8 mm, 647 kg kruszywa granitowego 8-16 mm, 654 kg piasku 0-2 mm, 150 kg wody, 2,40 kg plastyfikatora SP OPTIMA FLUID 1000. Współczynnik woda/cement wyniósł 0,50. Rysunek 10 przedstawia zależność wartości kryterium ekologicznego EI i technicznego wyrażonego 1/PI. Receptury zlokalizowane najbliżej początku układu współrzędnych charakteryzują się najkorzystniejszymi właściwościami ekologicznymi i technicznymi.

Rozdział 5

Metoda wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPICI

5.1. Wprowadzenie

Zastosowany w metodzie EIPI algorytm stał się podstawą do opracowania autorskiego rozwiązania EIPICI. Metoda EIPICI jest dedykowana do wspomaganie procesu decyzyjnego polegającego na wyborze optymalnego wariantu receptury mieszanki betonowej, zarówno w aspekcie ekologicznego, technicznego oraz dodatkowo **ekonomicznego** obszaru formułowania celu.

Podjęcie decyzji jest procesem, w którym osoba decydująca – decydent, opierając się na dostępnych mu informacjach, dokonuje wyboru 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. Istotny jest tutaj odpowiedni dobór kryteriów oceny oraz właściwe przypisanie kryteriom wag. Celem analizy wielokryterialnej EIPICI jest wybór optymalnego wariantu decyzyjnego. Wobec powyższego, korzystne jest modelowanie matematyczne, które pozwoli, za pomocą aparatu matematycznego, znaleźć najlepsze rozwiązanie z uwzględnieniem kryteriów decyzyjnych. Metoda EIPICI umożliwia uszeregowanie dostępnych wariantów decyzyjnych od najlepiej do najgorzej spełniającego preferencje decydenta.

W metodzie EIPICI w następujący sposób zdefiniowano podstawowe pojęcia:

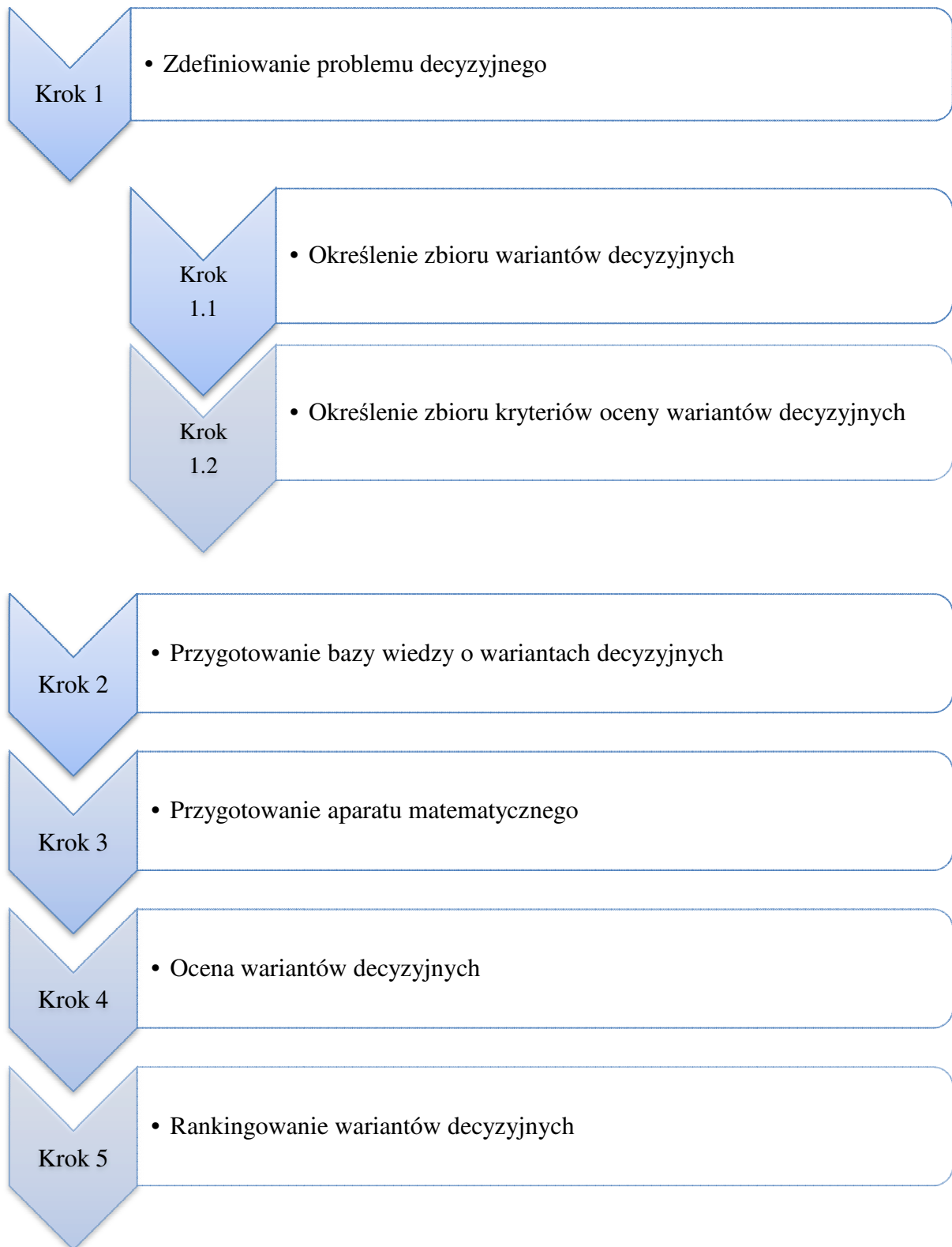
- proces decyzyjny – proces wyboru, na podstawie kryteriów decyzyjnych, optymalnego wariantu spośród zbioru wariantów decyzyjnych;
- zbiór wariantów decyzyjnych – zbiór zaprojektowanych receptur mieszanek betonowych;
- optymalny wariant decyzyjny – wariant (receptura mieszanki betonowej), który na podstawie zdefiniowanych kryteriów decyzyjnych, spośród wariantów dopuszczalnych, w największym stopniu odpowiada oczekiwaniom decydenta;
- zbiór kryteriów decyzyjnych – wartości, cechy, na podstawie których, oceniane będą warianty decyzyjne. Kryteria decyzyjne podzielono na zbiory zgodnie z zdefiniowanymi w metodzie EIPICI obszarami formułowania celu;
- obszary formułowania celu – obszar ekologiczny, techniczny i ekonomiczny;
- baza wiedzy – zbiory informacji niezbędne do wyznaczenia wartości kryteriów decyzyjnych;

- kryterium techniczne PI – odwzorowanie właściwości technicznych wariantów decyzyjnych wyrażone w wartościach liczbowych;
- kryterium ekologiczne EI – odwzorowanie wpływu wariantów decyzyjnych na środowisko wyrażone w wartościach liczbowych;
- kryterium ekonomiczne CI – koszty bezpośrednie wyprodukowania wariantów decyzyjnych – mieszanek betonowych;
- wskaźnik EIPICI – wartość wynikowa oceny.

W kontekście tematyki rozprawy, w metodzie EIPICI:

- ekologiczny obszar formułowania celu należy odnieść do minimalizacji wpływu produkcji betonu na środowisko naturalne;
- techniczny obszar formułowania celu należy odnieść do maksymalizacji właściwości technicznych betonu;
- ekonomiczny obszar formułowania celu należy odnieść do minimalizacji kosztu bezpośredniego produkcji mieszanki betonowej.

Schemat metody wspomagania decyzji EIPICI przedstawiono na Rysunku 11. Zdefiniowanie problemu decyzyjnego oznacza określenie zbioru wariantów oraz zbioru kryteriów decyzyjnych. W praktyce, zbiór wariantów decyzyjnych stanowić będą wcześniej zaprojektowane receptury mieszanek betonowych, natomiast zbiór kryteriów decyzyjnych zostanie zaproponowany przez autorkę metody. Jest to etap, który ma odzwierciedlać preferencje decydenta, wobec tego zbiór kryteriów decyzyjnych można modyfikować. Przygotowanie bazy wiedzy o wariantach decyzyjnych oznacza opracowanie zbiorów informacji o wariantach decyzyjnych, które mają zostać poddane ocenie. Istotne jest, aby dla każdego wariantu posiadać komplet informacji. W przeciwnym wypadku działanie przyjętego aparatu matematycznego będzie niemożliwe. Na tym etapie kryteria decyzyjne należy wyrazić w wartościach liczbowych, przyjąć wartości referencyjne oraz nadać wagi kryteriom. Ocena wariantów decyzyjnych obejmuje zasadniczą pracę opracowanego aparatu matematycznego. W efekcie warianty decyzyjne zostaną również wyrażone w wartościach liczbowych, co umożliwi utworzenie ich rankingu.



Rysunek 11. Schemat metody wspomagania decyzji EIPICI

Kluczowe założenia metody wielokrotnego wspomagania decyzji EIPICI dedykowanego do wyboru optymalnego wariantu receptury mieszanki betonowej są następujące:

- wybór odbywa się spośród ustalonego skończonego zbioru wariantów decyzyjnych;
- warianty są oceniane względem zdefiniowanych kryteriów decyzyjnych;
- kryteria są zgrupowane w trzech podzbiorach zwanych obszarami formułowania celu: ekologicznym, technicznym i ekonomicznym;
- w przypadku każdego wariantu decyzyjnego znane są parametry (informacje) względem, których jest on oceniany;
- kryteriom decyzyjnym przypisane są współczynniki wagowe;
- w każdym ocenianym obszarze suma współczynników wagowych jest równa jeden;
- indywidualnie opracowany aparat matematyczny metody jest oparty na wyznaczeniu w każdym obszarze średniej ważonej kryteriów decyzyjnych;
- ocena wariantów decyzyjnych służy określeniu stopnia zgodności wybranych właściwości technicznych, ekologicznych i ekonomicznych charakteryzujących receptury mieszanek betonowych z preferencjami decydenta;
- efektem obliczeń jest uszeregowanie wariantów decyzyjnych od najlepiej do najgorzej spełniających oczekiwania decydenta;
- optymalnym, czyli najlepszym rozwiązaniem jest ten wariant, dla którego wskaźnik EIPICI jest najniższy.

5.2. Przygotowanie zbioru informacji o składniach mieszanek betonowych

Warunkiem koniecznym działania aparatu matematycznego jest przygotowanie bazy wiedzy o wszystkich wariantach decyzyjnych (recepturach).

Zbiór informacji potrzebny do wyznaczenia wartości kryteriów ekologicznych w metodzie EIPICI stanowią, obliczone dla 1 m³ każdej mieszanki betonowej, ślad węglowy oraz wartość zużycia surowców naturalnych potrzebnych do jej wyprodukowania.

W przypadku betonu, podejście do określenia śladu węglowego staje się coraz bardziej kompleksowe, uwzględniające „główne życie” (pozyskanie surowców, ich transport, produkcję materiału, transport na plac budowy, układanie itp.), „drugie życie” (rozbiórka i ewentualny recykling), a także sekwencję CO₂ w procesie karbonatyzacji [133]. W rozprawie do obliczeń przyjęto, że ślad węglowy to suma emisji gazów cieplarnianych wywołana bezpośrednio podczas produkcji mieszanki 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. Parametr rzadkości określono na podstawie posiadanej wiedzy i doświadczenia autorki oraz informacji dostępnych w literaturze przedmiotu [132, 134-136]. Jest to wartość szacunkowa z uwzględnieniem ilości i rodzaju zasobów surowców w Polsce.

Zbiór informacji potrzebny do wyznaczenia wartości kryteriów technicznych stanowią wyniki wybranych badań technicznych betonu.

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia wskaźnika ekonomicznego tworzą koszty bezpośrednie wyprodukowania 1 m³ każdej z mieszanek betonowych. W metodzie EIPICI koszt (18) wyznaczono jako sumę kosztów bezpośrednich: materiałów i ich dostawy (M), robocizny (R), pracy maszyn i pracy sprzętu budowlanego (S). Nie uwzględniono kosztów pośrednich (Kp) takich jak np. płace, 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.

$$C_k = R + M + S \quad (24)$$

W Tabeli 22 zestawiono informacje o składnikach mieszanek betonowych użytych w dysertacji. Są to dane niezbędne do wyznaczenia zespołów informacji o wariantach decyzyjnych. Każdemu składnikowi przypisano oznaczenie oraz charakterystykę, wyrażoną w liczbach. Te same oznaczenia składników oraz wartości zadano w kalkulatorze EIPICI – aplikacji umożliwiającej wykonywanie obliczeń zgodnie z przyjętym aparatem matematycznym. Przedmiotowej tematyce poświęcono Rozdział 9 rozprawy.

Tabela 22. Zbiór informacji o składnikach mieszanek betonowych

Ozn. Skł.	Składnik mieszanek betonowej	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg·km]	Ilość surowca niezbędną do wyprodukowania 1 kg składnika [kg]	Parametr rzadkości	Współcz. zużycia surowca [kg/kg]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość ** [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]
C1	CEM I 32,5R	0,889 [137]	270	0,0000518	1,60 [132]	0,50 [132]	0,8000	0,510	20	0,0003
C2	CEM II/B S32,5 R - NA	0,704 [137]	303	0,0000518	1,26 [132]	0,50 [132]	0,6300	0,610	20	0,0003
C3	CEM II/B - M (V-LL) 32,5R	0,704 [137]	223	0,0000518	1,26 [132]	0,50 [132]	0,6300	0,590	20	0,0003
C4	CEM II/B-V 42,5R	0,704 [137]	142	0,0000518	1,26 [132]	0,50 [132]	0,6300	0,630	20	0,0003
C5	CEM I 42,5R	0,889 [137]	303	0,0000518	1,60 [132]	0,50 [132]	0,8000	0,690	20	0,0003
C6	CEM II/B-V 32,5R	0,704 [137]	270	0,0000518	1,20 [132]	0,50 [132]	0,6000	0,665	20	0,0003
C7	CEM IV/B(V) 32,5N-LH	0,568 [137]	303	0,0000518	1,02 [132]	0,50 [132]	0,5100	0,620	20	0,0003
C8	CEM III/A 42,5 N-LA	0,482 [137]	303	0,0000518	0,80 [132]	0,50 [132]	0,4000	0,650	20	0,0003
C9	CEM III/A 32,5 N-LH	0,482 [137]	303	0,0000518	1,04 [132]	0,50 [132]	0,5200	0,610	20	0,0003
C10	CEM I 42,5 N- SR 3/NA	0,889 [137]	370	0,0000518	1,60 [132]	0,50 [132]	0,8000	0,790	20	0,0003
C11	CEM I 42,5 N-NA	0,889 [137]	223	0,0000518	1,60 [132]	0,50 [132]	0,8000	0,740	20	0,0003
C12	CEM I 42,5 N- SR 5/NA	0,889 [137]	223	0,0000518	1,60 [132]	0,50 [132]	0,8000	0,790	20	0,0003
C13	CEM I 42,5R NA	0,889 [137]	223	0,0000518	1,60 [132]	0,50 [132]	0,8000	0,740	20	0,0003
C14	CEM I 42,5R INFRA	0,889 [137]	223	0,0000518	1,60 [132]	0,50 [132]	0,8000	0,790	20	0,0003
F1	Kruszywo granitowe 2-8 mm	0,008 [132]	380	0,0000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,045	380	0,0002
F2	Kruszywo granitowe 8-16 mm	0,008 [132]	380	0,0000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,050	380	0,0002

Tabela 22. Zbiór informacji o składnikach mieszanek betonowych – cd.

Ozn. Skł.	Składnik mieszanek betonowej	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg·km]	Ilość surowca niezbędna do wyprodukowania 1 kg składnika [kg]	Parametr rzadkości	Współcz. zużycia surowca [kg/kg]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość ** [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]
F3	Kruszywo granitowe 2-16 mm	0,008 [132]	380	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,045	380	0,0002
F4	Kruszywo granitowe 16-22 mm	0,008 [132]	380	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,040	380	0,0002
F5	Kruszywo dolomitowe 2-8 mm	0,008 [132]	264	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,055	264	0,0002
F6	Kruszywo dolomitowe 8-16 mm	0,008 [132]	264	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,050	264	0,0002
F7	Kruszywo dolomitowe 16-22 mm	0,008 [132]	264	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,050	264	0,0002
F8	Kruszywo wapienne 2-8 mm	0,008 [132]	275	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,040	275	0,0002
F9	Kruszywo wapienne 8-16 mm	0,008 [132]	275	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,050	275	0,0002
F10	Kruszywo żwirowe 2-4 mm	0,005 [132]	15	0,000063	1,25 [132]	1,00 [132]	1,2500	0,066	15	0,0002
F11	Kruszywo żwirowe 2-8 mm	0,005 [132]	15	0,000063	1,25 [132]	1,00 [132]	1,2500	0,067	15	0,0002
F12	Kruszywo żwirowe 8-16 mm	0,005 [132]	15	0,000063	1,25 [132]	1,00 [132]	1,2500	0,067	15	0,0002
F13	Kruszywo recyklingowe 4-16 mm	0,005	0	0,000000	0,00	0,00	0,0000	0,030	0	0,0002

Tabela 22. Zbiór informacji o składnikach mieszanek betonowych – cd.

Ozn. Skł.	Składnik mieszanek betonowej	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg·km]	Ilość surowca niezbędna do wyprodukowania 1 kg składnika [kg]	Parametr rzadkości	Współcz. zużycia surowca [kg/kg]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość ** [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]
F14	Grys szarogłazowy 2-8 mm	0,008 [132]	220	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,056	220	0,0002
F15	Grys szarogłazowy 8-16 mm	0,008 [132]	220	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,055	220	0,0002
F16	Ścierniwo na bazie żużla pomiedziowego 2-8 mm	0,000	50	0,000063	0,00	0,00	0,0000	0,030	50	0,0002
F17	Pasek 0-2 mm	0,005 [132]	15	0,000063	1,00 [132]	0,50 [132]	0,5000	0,035	15	0,0002
F18	Grys amfibolitowy 2-8 mm	0,008 [132]	400	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,040	400	0,0002
F19	Grys amfibolitowy 8-16 mm	0,008 [132]	400	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,040	400	0,0002
F20	Grys amfibolitowy 2-5 mm	0,008 [132]	400	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,047	400	0,0002
F21	Grys amfibolitowy 5-8 mm	0,008 [132]	400	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,048	400	0,0002
F22	Kruszywo gabro 2-8 mm	0,008 [132]	421	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,039	421	0,0002
F23	Kruszywo gabro 8-16 mm	0,008 [132]	421	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,048	421	0,0002
F24	Kruszywo gabro 2-5 mm	0,008 [132]	421	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,039	421	0,0002
F25	Kruszywo gabro 4-8 mm	0,008 [132]	421	0,000063	1,25 [132]	0,75 [132]	0,9375	0,050	421	0,0002
M	Mikrosfery od EKO EXPORT S.A.	0,000	390	0,0000518	0,00	0,00	0,0000	0,040	390	0,0004

Tabela 22. Zbiór informacji o składnikach mieszanek betonowych – cd.

Ozn. Skł.	Składnik mieszanek betonowej	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg·km]	Ilość surowca niezbędna do wyprodukowania 1 kg składnika [kg]	Parametr rzadkości	Współcz. zużycia surowca [kg/kg]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość ** [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]
P	Polimer SikaLatex	0,250 [132]	100	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	12,000	100	0,0004
D1	SP OPTIMA FLUID 1000	0,250 [132]	100	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	10,000	100	0,0004
D2	SAVEMIX - 4000	0,250 [132]	55	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	10,000	55	0,0004
D3	DUROFLOW PE-220	0,250 [132]	150	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	10,000	150	0,0004
D4	MC – Powerflow 2650	0,250 [132]	200	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	16,100	20	0,0004
D5	Centrament AIR 207/2	0,250 [132]	200	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	10,000	20	0,0004
D6	MasterGlenium SKY 716	0,250 [132]	410	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	10,000	20	0,0004
D7	MasterAir 3012	0,250 [132]	410	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	6,500	20	0,0004
D8	MasterPozzoilith 18 BVC	0,250 [132]	410	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	6,500	20	0,0004
D9	Plastiment BV 3 M	0,250 [132]	100	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	4,000	20	0,0004
D10	ViscoCrete 3088	0,250 [132]	100	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	7,680	20	0,0004
D11	LP SV	0,250 [132]	100	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	16,050	20	0,0004
D12	Air LB	0,250 [132]	100	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	10,000	20	0,0004
D13	Optima 295	0,250 [132]	100	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	10,000	20	0,0004
D14	Plastyfikator 120LS	0,250 [132]	100	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	10,000	20	0,0004
D15	Delta 23	0,250 [132]	100	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	10,000	20	0,0004
D16	Air P	0,250 [132]	100	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	10,000	20	0,0004
D17	Plast 331	0,250 [132]	100	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	10,000	20	0,0004
D18	MasterAir 117	0,250 [132]	410	0,000221	2,25 [132]	1,00 [132]	2,2500	6,500	20	0,0004
W	Woda	0,001 [132]	0	0,000000	0,10 [132]	1,00 [132]	0,1000	0,005	0	0,0000
PB	Produkcja betonu	0,008 [132]	0	0,000000	0,00	0,00	0,0000	0,003	0	0,0000

* Odległość liczona od zakładu produkcyjnego składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej ** Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

5.3. Rozwiązanie problemu decyzyjnego metodą EIPICI

5.3.1. Opis problemu decyzyjnego

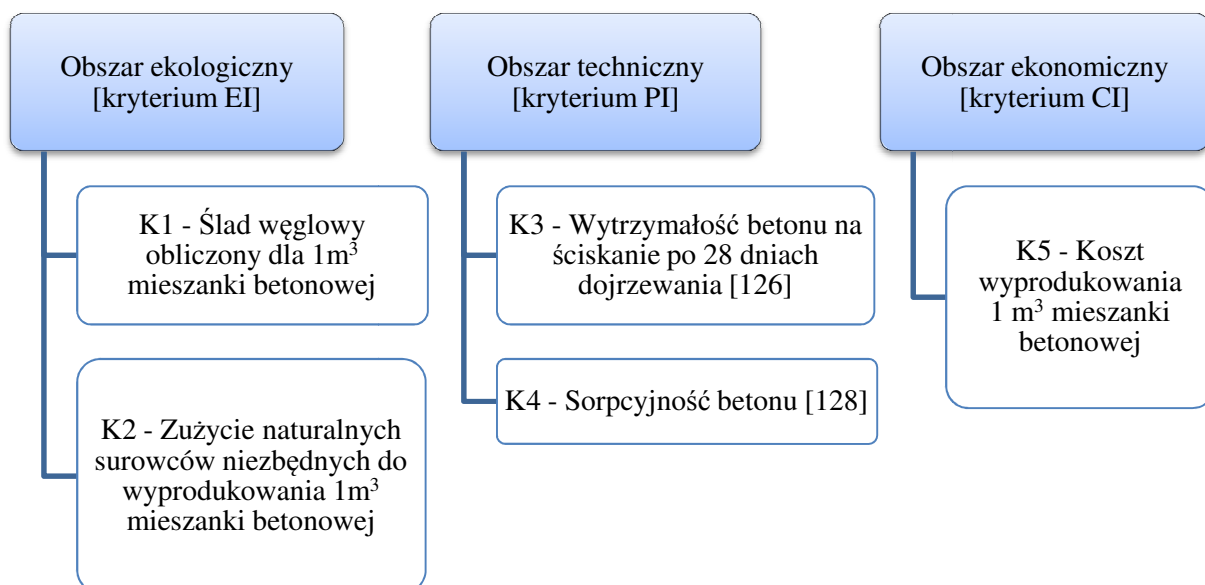
Analogicznie jak w metodzie EIPI rozpatrujemy zbiór 21 wariantów decyzyjnych $C = \{CC1, \dots, CC9, M1C, M2C, M7C, CF1, \dots, CF9\}$. Zbiór kryteriów decyzyjnych, który ze względu na zdefiniowane wcześniej obszary formułowania celu: ekologiczny, techniczny i ekonomiczny dzielimy na trzy podzbiory:

- podzbiór kryteriów ekologicznych w postaci $EI = \{K1, K2\}$;
- podzbiór kryteriów technicznych w postaci $PI = \{K3, K4\}$;
- kryterium ekonomiczne $CI - K5$.

Zbiór wariantów decyzyjnych stanowią zamieszczone w Tabeli 6 receptury mieszanek betonowych, z wyjątkiem M3C, M4C, M5C, M6C, M8C, M9C. Obszary formułowania celów oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne przedstawia Rysunek 12.

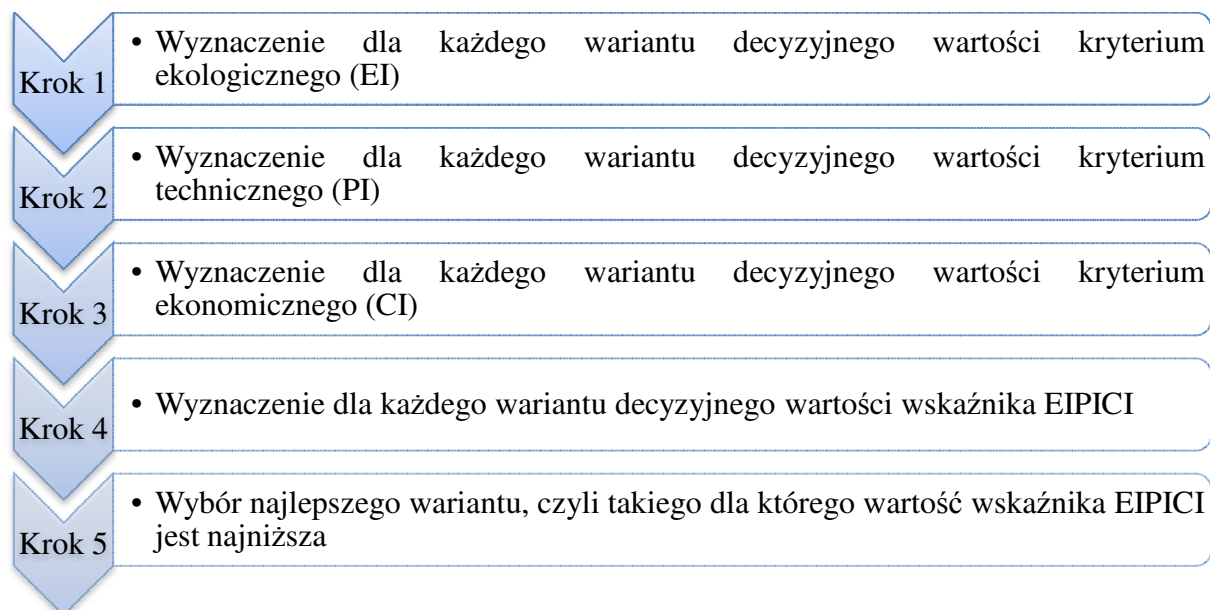
Znany jest również zbiór wag kryteriów decyzyjnych $W = \{W_1, W_2, W_3, W_4\}$ oraz miejsce produkcji mieszanki betonowej – Płock, województwo mazowieckie.

Zdefiniowany w identyczny sposób jak w metodzie EIPI podzbiór kryteriów ekologicznych i technicznych umożliwi zweryfikowanie wpływu kryterium ekonomicznego na ranking wariantów decyzyjnych (Tabela 21).



Rysunek 12. Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne dla wariantów CC1-CC9, M1C, M2C, M7C, CF1-CF9

Uwzględniając tak zdefiniowane warianty oraz kryteria decyzyjne, algorytm metody EIPICI, należy przedstawić w następujący sposób (Rysunek 13):



Rysunek 13. Schemat algorytmu metody EIPICI

5.3.2. Przygotowanie aparatu matematycznego

Zgodnie z przyjętymi dla rozpatrywanego problemu założeniami, wartości kryterium PI należy wyznaczyć ze wzoru (23). W celu wyznaczeniu wartości kryterium ekologicznego EI, ekonomicznego CI oraz wskaźnika EIPICI przyjęto następujący aparat matematyczny:

$$EI = K1 \cdot W_1 + K2 \cdot W_2 \quad (25)$$

$$EI = \frac{EM}{EW} \cdot W_1 + \frac{RM}{RW} \cdot W_2 \quad (26)$$

$$i \quad W_1 + W_2 = 1,0$$

$$CI = K5 \quad (27)$$

$$CI = \frac{c_k}{c_{kr}} \quad (28)$$

W metodzie EIPICI:

- ekologiczny obszar formułowania celu należy odnieść do minimalizacji wpływu produkcji betonu na środowisko naturalne;
- techniczny obszar formułowania celu należy odnieść do maksymalizacji właściwości technicznych betonu;
- ekonomiczny obszar formułowania celu należy odnieść do minimalizacji kosztu bezpośredniego produkcji mieszanki betonowej.

W związku z powyższym wartość kryterium EI i CI dąży do minimum, zaś wartość kryterium PI dąży do maksimum. Stąd we wzorze (29) stosujemy odwrotność wartości PI. Wówczas wskaźnik EIPICI również dąży do minimum, a więc rozwiązaniem najlepszym jest ten wariant, w przypadku którego wartość wskaźnika jest najniższa.

$$EIPICI = (EI \cdot W_8 + \frac{1}{PI} \cdot W_9 + CI \cdot W_{10}) \quad (29)$$

$$i \quad W_8 + W_9 + W_{10} = 1,0$$

Do obliczenia wskaźnika ekologicznego EI przyjęto [132]:

EW – **490 kgCO₂/m³**;

RW – **2000 kg/m³**;

współczynnik wagowy $W_1 = 0,5$;

współczynnik wagowy $W_2 = 0,5$;

Podstawiając powyższe dane, wzór (26) przyjmie postać (30):

$$EI = \frac{EM}{490 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3} \cdot 0,5 + \frac{RM}{2000 \text{ kg/m}^3} \cdot 0,5 \quad (30)$$

Do obliczenia kryterium ekonomicznego CI przyjęto:

$C_{k,r} = 400 \text{ zł}$

Podstawiając wartość $C_{k,r}$, wzór (28) przyjmie postać (31):

$$CI = \frac{C_k}{400 \text{ zł}} \quad (31)$$

5.3.3. Przygotowanie bazy wiedzy o wariantach decyzyjnych

Analizę wielokryterialną zarówno za pomocą metody EIPI jak i EIPICI zastosowano do rozwiązania problemu decyzyjnego, w którym warianty decyzyjne zdefiniowano jednakowo jako zbiór $C = \{CC1, \dots, CC9, M1C, M2C, M7C, CF1, \dots, CF9\}$. Również w ten sam sposób wyrażono podzbiór kryteriów ekonomicznych i technicznych. Wybór pomiędzy tak samo zdefiniowanymi wariantami decyzyjnymi w konsekwencji umożliwił wykorzystanie wcześniej zebranych i opracowanych zbiorów informacji.

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryteriów K1 i K2 stanowią:

- wartości śladu węglowego wyznaczone dla każdej receptury zamieszczone w Tabeli 20;
- wartości zużycia surowców naturalnych potrzebnych do wyprodukowania 1 m^3 każdej mieszanki betonowej zamieszczone w Tabeli 20.

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryteriów technicznych K3, K4 stanowią:

- wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania zamieszczone w Tabeli 10;
- wyniki badania sorpcyjności betonu zamieszczone w Tabeli 13.

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia wartości kryterium ekonomicznego, tworzy:

- koszt bezpośredni wyprodukowania 1 m^3 mieszanki betonowej obliczony dla każdej receptury zestawiony w Tabeli 23. Szczegółowe obliczenia zamieszczono w Załączniku 3 do rozprawy.

Tabela 23. Koszt bezpośredni 1 m^3 mieszanek betonowych CC1-CC9, M1C, M2C, M7C, CF1-CF9

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	M1C	458,06	CF1	430,17
CC2	401,80	M2C	726,40	CF2	400,50
CC3	397,61	M3C	-	CF3	333,60
CC4	407,51	M4C	-	CF4	358,61
CC5	427,61	M5C	-	CF5	386,45
CC6	418,30	M6C	-	CF6	385,74
CC7	405,73	M7C	714,96	CF7	306,85
CC8	414,73	M8C	-	CF8	369,45
CC9	401,80	M9C	-	CF9	460,96

5.3.4. Wyznaczenie wartości kryteriów EI, PI i CI oraz wartości wskaźnika EIPICI

Posiadając uporządkowaną bazę wiedzy o wariantach decyzyjnych, należy przystąpić do wykonania obliczeń wartości kryteriów decyzyjnych zgodnie z przyjętym w metodzie EIPICI aparatem matematycznym.

Dla każdego wariantu decyzyjnego $C = \{CC1, \dots, CC9, M1C, M2C, M7C, CF1, \dots, CF9\}$ wyznaczono wartość kryterium ekologicznego EI (30), wartość kryterium technicznego PI (23), wartość kryterium ekonomicznego CI (31) oraz wskaźnik EIPICI (29). Wyniki obliczeń zestawiono w Tabeli 24.

Wyznaczenie wskaźnika EIPICI jest ostatnim działaniem aparatu matematycznego. Działanie to umożliwia pozyskanie jednej wartości wynikowej oceny dla każdego z wariantów decyzyjnych. Uzyskane wartości pozwolą na uszeregowanie wariantów od najbardziej do najmniej preferowanych. Zgodnie z przyjętą metodyką, rozwiązaniem najlepszym jest ten wariant decyzyjny, dla którego wartość wskaźnika EIPICI jest najniższa. Założono, że wszystkie obszary formułowania celu są tak samo ważne, dlatego do obliczeń przyjęto $W_8 = W_9 = W_{10} = \frac{1}{3}$.

Tabela 24. Wartości kryteriów EI, 1/PI, CI oraz wskaźnika EIPICI dla receptur CC1-CC9, M1C, M2C, M7C, CF1-CF9

Receptura	Wartość kryterium EI	Wartość kryterium 1/PI	Wartość kryterium CI	Wartość wskaźnika EIPICI	Miejsce w rankingu
CC1	0,798	0,949	0,934	0,894	17
CC2	0,725	0,777	1,005	0,836	8
CC3	0,728	0,874	0,994	0,865	12
CC4	0,722	0,670	1,019	0,804	2
CC5	0,799	0,886	1,069	0,918	18
CC6	0,722	0,777	1,046	0,848	10
CC7	0,677	0,974	1,014	0,888	15/16
CC8	0,642	0,758	1,037	0,812	3/4
CC9	0,649	0,783	1,005	0,812	3/4
M1C	0,846	0,982	1,145	0,991	19
M2C	0,859	0,932	1,816	1,202	21
M7C	0,807	0,788	1,787	1,127	20
CF1	0,805	0,742	1,075	0,874	13/14
CF2	0,799	0,863	1,001	0,888	15/16
CF3	0,688	0,957	0,834	0,826	6
CF4	0,870	0,706	0,897	0,824	5
CF5	0,795	0,724	0,966	0,828	7
CF6	0,813	0,846	0,964	0,874	13/14
CF7	0,486	1,139	0,767	0,797	1
CF8	0,656	0,951	0,924	0,844	9
CF9	0,749	0,667	1,152	0,856	11

Metoda wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPICI umożliwia, spośród zbioru receptur mieszanek betonowych, wskazanie optymalnego wariantu. Jest to możliwe dzięki wykonaniu szeregu obliczeń, podczas których kryteria oraz warianty decyzyjne zostają wyrażone w wartościach liczbowych. Wynikiem końcowym jest wartość wskaźnika EIPICI obliczona dla każdego wariantu decyzyjnego. Rozwiązaniem najlepiej spełniającym oczekiwania decydenta jest wariant charakteryzujący się najniższą wartością wskaźnika EIPICI. Zgodnie z rankingiem zamieszczonym w Tabeli 24 jest to wariant CF7, zaś kolejne w rankingu są: CC4, CC9/CC8, CF4, CF3, CF5, CC2, CF8, CC6, CF9, CC3, CF1/CF6, CC7/CF2, CC1, CC5, M1C, M7C, M2C. Do przygotowania 1 m³ mieszanki betonowej CF7 zastosowano: 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. Kruszywo recyklingowe stanowiło 88,21% kruszywa grubego. Współczynnik woda/cement wyniósł 0,45.

W Rozdziale 4 i 5 za pomocą odpowiednio metody EIPI i EIPICI rozwiązano problem decyzyjny polegający na wyborze optymalnego wariantu receptury mieszanki betonowej spośród identycznie zdefiniowanego zbioru wariantów decyzyjnych. Uwzględnienie w analizie trzeciego obszaru formułowania celu, ekonomicznego, znacząco zmieniło hierarchizację wariantów decyzyjnych. Wariant CC4 z pierwszego miejsca rankingowego, znalazł się na miejscu drugim, zaś wariant CF7 z miejsca osiemnastego na miejscu pierwszym.

Zadaniem metod EIPI i EIPICI jest odzwierciedlenie preferencji decydenta w procesie decyzyjnym jakim jest wybór receptury mieszanki betonowej. Technika rozwiązania problemu decyzyjnego zależy przede wszystkim od zakresu i jakości posiadanej wiedzy. Niewątpliwie, dzięki trzem obszarom formułowania celu, zaletą metody EIPICI jest jej użyteczność. To decydent na etapie formułowania problemu decyzyjnego określa, modyfikuje lub pozostawia przyjęte przez autorkę kryteria w określonych obszarach. Zastosowany w metodzie aparat matematyczny umożliwia wyrażenie wariantów decyzyjnych za pomocą wartości liczbowej, a następnie wybór wariantu optymalnego.

Rozdział 6

Rozwiązanie problemu decyzyjnego metodą EIPICI polegającego na wyborze receptury mieszanki betonowej spośród zbioru wariantów decyzyjnych $C = \{CC1, \dots, CC9, M1C, M2C, M7C, CF1, \dots, CF9\}$ z uwzględnieniem pięciu kryteriów technicznych

6.1. Wprowadzenie

W metodzie EIPICI to decydent określa liczbę kryteriów w podzbiorach na etapie definiowania problemu decyzyjnego. Liczba i rodzaj kryteriów technicznych zależą od wymagań stawianych betonowi np. w projektach budowlanych, specyfikacjach technicznych, planach zapewnienia jakości robót budowlanych i mogą się różnić w zależności od zamierzenia budowlanego. W rozdziale 5 metodą EIPICI wykonano obliczenia z uwzględnieniem dwóch kryteriów technicznych: wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania i sorpcyjności betonu. W niniejszym rozdziale do obliczeń przyjęto 5 kryteriów technicznych: wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, nasiąkliwość, mrozoodporność betonu, głębokość wnikanie chlorków oraz ścieralność betonu na tarczy Boehmego.

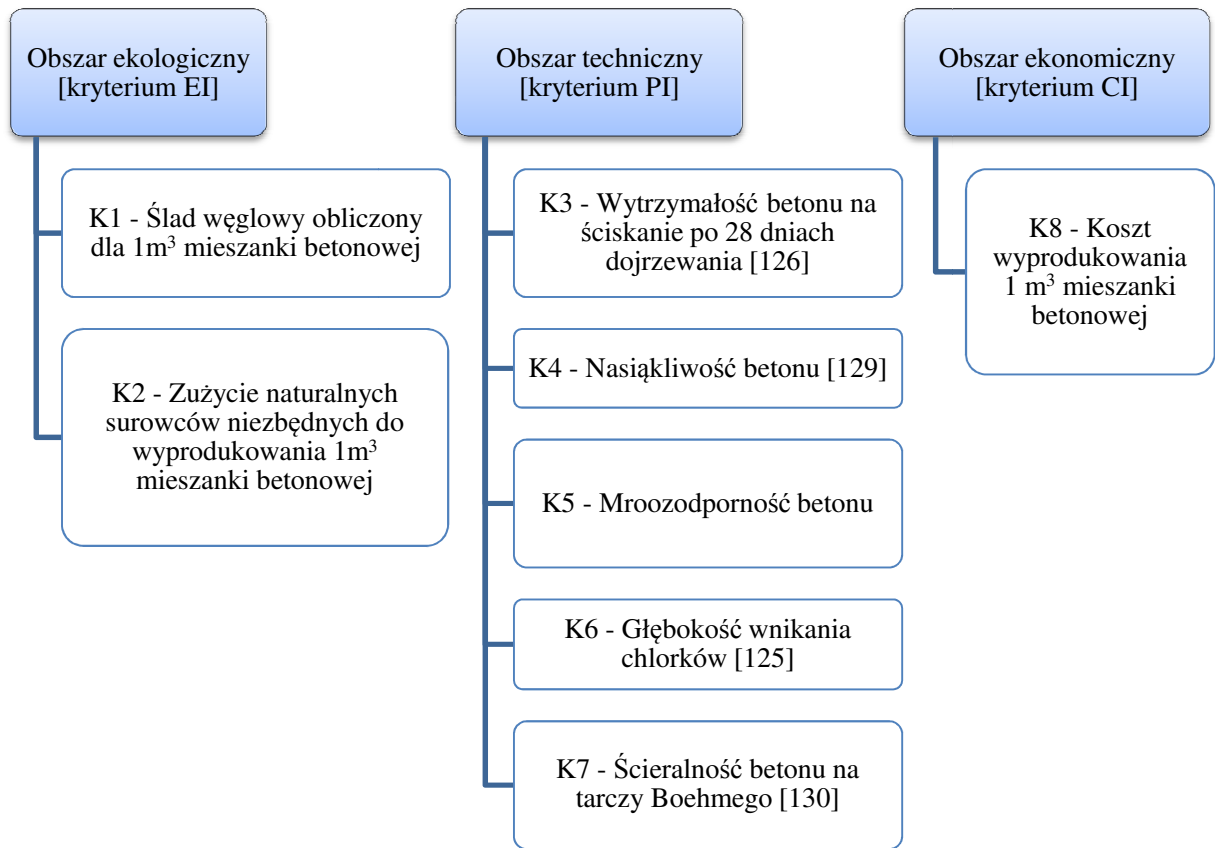
6.2. Opis problemu decyzyjnego

Rozpatrujemy zbiór 21 wariantów decyzyjnych $C = \{CC1, \dots, CC9, M1C, M2C, M7C, \dots, CF1, \dots, CF9\}$ oraz zbiór kryteriów decyzyjnych, który ze względu na zdefiniowane wcześniej obszary formułowania celu: ekologiczny, techniczny i ekonomiczny podzielono na trzy podzbiory:

- podzbiór kryteriów ekologicznych w postaci $EI = \{K1, K2\}$;
- podzbiór kryteriów technicznych w postaci $PI = \{K3, K4, K5, K6, K7\}$;
- kryterium ekonomiczne $CI - K8$.

Zbiór wariantów decyzyjnych stanowią zamieszczone w Tabeli 6 receptury mieszanek betonowych, z wyjątkiem M3C, M4C, M5C, M6C, M8C, M9C. Obszary formułowania celów oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne przedstawia Rysunek 14.

Znany jest również zbiór wag kryteriów decyzyjnych $W = \{W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, W_7\}$ oraz miejsce produkcji mieszanki betonowej – Płock, województwo mazowieckie.



Rysunek 14. Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne dla wariantów CC1-CC9, M1C, M2C, M7C, CF1-CF9

6.3. Przygotowanie aparatu matematycznego

Zgodnie z przyjętymi dla rozpatrywanego problemu założeniami, wartości kryterium ekologicznego EI należy wyznaczyć ze wzoru (30), wartości kryterium ekonomicznego CI ze wzoru (31), zaś wskaźnik EIPI z (29). W celu wyznaczenia wartości kryterium technicznego PI przyjęto następujący aparat matematyczny:

$$PI = K3 \cdot W_3 + K4 \cdot W_4 + K5 \cdot W_5 + K6 \cdot W_6 + K7 \cdot W_7 \quad (32)$$

$$PI = \frac{f_{cm28}}{f_{cm28,r}} \cdot W_3 + \frac{n_{w,r}}{n_{w,m}} \cdot W_4 + \left(\frac{100\% - \Delta f_{F,m}}{100\% - \Delta f_{F,r}} \cdot 0,5 + \frac{100\% - \Delta m_{f,m}}{100\% - \Delta m_{f,r}} \cdot 0,5 \right) \cdot W_5 + \frac{d_r}{d_m} \cdot W_6 + \frac{\Delta V_r}{\Delta V_m} \cdot W_7 \quad (33)$$

$$i \quad W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7 = 1,0$$

Do obliczenia kryterium technicznego PI przyjęto:

- $f_{cm28,r}$ – **60 MPa**. Wartość wytrzymałości 60 MPa jest powszechnie uznana za maksymalną wytrzymałością betonu zwykłego na ściskanie po 28 dniach dojrzewania.
- $\Delta f_{F,r}$ – **20%**. Zgodnie z normą [131] obniżenie wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości próbek niezamrożonych nie może być większe niż 20%.
- $\Delta m_{f,r}$ – **5%**. Zgodnie z normą [131] łączna masa ubytków betonu w postaci zniszczonych narożników i krawędzi, odprysków itp. nie może przekroczyć 5% masy próbek przed rozpoczęciem cykli zamrażania – rozmrażania;
- $n_{w,r}$ – **5%**. Zgodnie z normą [129] nasiąkliwość nie powinna być większa niż 5% w przypadku betonu narażonego na bezpośrednie działanie czynników zewnętrznych.
- d_r – **8 mm**. Wartość przyjęto na podstawie analizy otrzymanych wyników badania głębokości wnikania chlorków (Tabela 18).
- ΔV_r – **14980 mm³**. Wartość przyjęto na podstawie analizy otrzymanych wyników badania ścieralności betonu na tarczy Boehmego (Tabela 19).
- współczynniki wagowe dla kasy ekspozycji XF zgodnie z Tabelą 25.

Podstawiając powyższe dane, wzór (33) przyjmie postać (34):

$$PI = \frac{f_{cm28}}{60 \text{ MPa}} \cdot 0,4 + \frac{5 \%}{n_{w,m}} \cdot 0,1 + \left(\frac{100\% - \Delta f_{F,m}}{100\% - 20\%} \cdot 0,5 + \frac{100\% - \Delta m_{f,m}}{100\% - 5\%} \cdot 0,5 \right) \cdot 0,3 + \quad (34)$$

$$+ \frac{8 \text{ mm}}{d_m} \cdot 0,1 + \frac{14980 \text{ mm}^3}{\Delta V_m} \cdot 0,1$$

6.4. Propozycja wartości wag kryteriów w zależności od oddziaływania środowiska na beton w konstrukcji

Oddziaływanie środowiska na beton w konstrukcji definiuje norma [21] jako klasy ekspozycji. Klasy ekspozycji zaprezentowano w Tabeli 2. Oddziaływania środowiska na beton w konstrukcji mogą mieć charakter chemiczny lub fizyczny, mogą wpływać na beton lub zbrojenie. Beton w konstrukcji może:

- nie być zagrożony agresywnym oddziaływaniem środowiska;
- może być poddany jednemu oddziaływaniu środowiska;

- może być poddany więcej niż jednemu oddziaływaniu środowiska, a zatem warunki środowiska, w których znajduje się beton, mogą wymagać określenia za pomocą kombinacji klas ekspozycji.

Na podstawie wiedzy i doświadczenia autora, w zależności od klasy ekspozycji betonu zaproponowano wartości wag kryteriom decyzyjnym oznaczonym jako K3, K4, K5, K6, K7. Na potrzeby uylitarne niniejszej dysertacji przyjęto zgodnie z normą [21] podział na siedem głównych kas ekspozycji X, XC, XD, XD, XS, XF, XA, XM oraz zaproponowano cztery kombinacje XC XA, XC XF, XC XA XM, XC XF XD. Propozycję współczynników wagowych zamieszczono w Tabeli 25.

Tabela 25. Propozycja nadania wag kryteriom w zależności od klas ekspozycji

	X	XC	XD	XS	XF	XA	XM	XC, XA	XC, XF	XC, XA, XM	XC, XF, XD
K3 – wytrzymałość na ściskanie betonu po 28 dniach dojrzewania	0,6	0,8	0,6	0,4	0,4	0,6	0,6	0,3	0,4	0,4	0,4
K4 – nasiąkliwość	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3	0,3	0,1	0,2
K5 – mroozodporność	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,3
K6 – głębokość wnikania chlorków	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,3	0,1	0,2	0,1
K7 – ścieralność na tarczy Boehmego	0,4	0,0	0,1	0,3	0,1	0,0	0,4	0,0	0,0	0,2	0,0
SUMA	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

6.5. Przygotowanie bazy wiedzy o wariantach decyzyjnych

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryteriów K1 i K2 stanowią:

- wartości śladu węglowego wyznaczone dla każdej receptury zamieszczone w Tabeli 20;
- wartości zużycia surowców naturalnych potrzebnych do wyprodukowania 1 m³ każdej mieszanki betonowej zamieszczone w Tabeli 20.

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryteriów technicznych K3, K4, K5, K6 i K7 stanowią:

- wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania zamieszczone w Tabeli 10;
- wyniki badania mroozodporności – średni spadek wytrzymałości zamieszczone w Tabeli 14;

- wyniki badania mrozoodporności – średni ubytek masy zamieszczone w Tabeli 15;
- wyniki badania mrozoodporności – pęknięcia powierzchni próbek zamieszczone w Tabeli 16;
- wyniki badania nasiąkliwości zamieszczone w Tabeli 17;
- wyniki badania głębokości wnikania chlorków zamieszczone w Tabeli 18;
- wyniki badania ścieralności na tarczy Boehmego zamieszczone w Tabeli 19;
- współczynniki wagowe dla kasy ekspozycji XF zgodnie z Tabelą 25.

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia wartości kryterium ekonomicznego, tworzy:

- koszt bezpośredni wyprodukowania 1 m³ mieszanki betonowej obliczony dla każdego wariantu decyzyjnego zestawiony w Tabeli 23.

6.6. Wyznaczenie wartości kryteriów EI, PI i CI oraz wartości wskaźnika EIPICI

Posiadając bazę wiedzy o wszystkich wariantach decyzyjnych przystąpiono do wykonania obliczeń wartości kryteriów decyzyjnych zgodnie z przyjętym w metodzie EIPICI aparatem matematycznym.

Dla każdego wariantu decyzyjnego $C = \{CC1, \dots, CC9, M1C, M2C, M7C, CF1, \dots, CF9\}$ wyznaczono wartość kryterium ekologicznego EI (30), wartość kryterium technicznego PI (34), wartość kryterium ekonomicznego CI (31) oraz wskaźnik EIPICI (29). Wyniki obliczeń zestawiono w Tabeli 26. Założono, że wszystkie obszary formułowania celu są tak samo ważne, dlatego do obliczeń przyjęto $W_8 = W_9 = W_{10} = \frac{1}{3}$.

Tabela 26. Wartości kryterium EI, I/ PI, CI oraz wskaźnika EIPICI dla receptur CC1-CC2, M1C, M2C, M7C, CF1-CF9

Receptura	Wartość kryterium EI	Wartość kryterium I/PI	Wartość kryterium CI	Wartość wskaźnika EIPICI	Miejsce w rankingu
CC1	0,798	1,002	0,934	0,911	11
CC2	0,725	0,954	1,005	0,894	6
CC3	0,728	1,077	0,994	0,933	17
CC4	0,722	1,025	1,019	0,922	14
CC5	0,799	0,929	1,069	0,932	16
CC6	0,722	0,948	1,046	0,905	9
CC7	0,677	1,057	1,014	0,916	13
CC8	0,642	0,929	1,037	0,869	4
CC9	0,649	1,064	1,005	0,906	10
M1C	0,846	0,991	1,145	0,994	19
M2C	0,859	1,073	1,816	1,249	21
M7C	0,807	1,066	1,787	1,220	20
CF1	0,805	0,936	1,075	0,939	18
CF2	0,799	0,895	1,001	0,899	7/8
CF3	0,688	0,982	0,834	0,835	2
CF4	0,870	0,969	0,897	0,912	12
CF5	0,795	0,884	0,966	0,882	5
CF6	0,813	0,919	0,964	0,899	7/8
CF7	0,486	1,018	0,767	0,757	1
CF8	0,656	0,961	0,924	0,847	3
CF9	0,749	0,882	1,152	0,928	15

Na podstawie wykonanych obliczeń, należy stwierdzić, iż najlepszym rozwiązaniem jest receptura CF7.

Jak zmienia się wartości wskaźnika EIPICI, jeżeli zmienimy wartości współczynników wagowych W8, W9, W10?

Rozważmy trzy następujące przypadki, w każdym eksponując inny obszar formułowania celu.

I tak:

1. założmy, że $W8 = 0,8$, $W9 = 0,1$ i $W10 = 0,1$;
2. założmy, że $W8 = 0,1$, $W9 = 0,8$ i $W10 = 0,1$;
3. założmy, że $W8 = 0,1$, $W9 = 0,1$ i $W10 = 0,8$.

Stosując opisane założenia, wyznaczono wartości wskaźnika EIPICI. Wyniki obliczeń ujęto w Tabeli 27.

Tabela 27. Wartości wskaźnika EIPICI w zależności od przyjętych wag

Receptura	Wartość wskaźnika EIPICI dla założenia 1	Miejsce w rankingu	Wartość wskaźnika EIPICI dla założenia 2	Miejsce w rankingu	Wartość wskaźnika EIPICI dla założenia 3	Miejsce w rankingu
CC1	0,832	14	0,975	14	0,927	5
CC2	0,776	7	0,936	9	0,971	9
CC3	0,789	10	1,034	19	0,976	11
CC4	0,782	9	0,994	16	0,990	14
CC5	0,839	15	0,930	7	1,028	16
CC6	0,777	8	0,935	8	1,004	15
CC7	0,748	6	1,015	17	0,985	12
CC8	0,710	2	0,911	4	0,987	13
CC9	0,726	4	1,016	18	0,975	10
M1C	0,890	19	0,992	15	1,100	19
M2C	0,976	21	1,126	21	1,646	21
M7C	0,931	20	1,112	20	1,617	20
CF1	0,845	17	0,937	10	1,034	17
CF2	0,829	13	0,896	2/3	0,970	8
CF3	0,732	5	0,938	11	0,834	2
CF4	0,882	18	0,952	13	0,901	3/4
CF5	0,821	12	0,883	1	0,941	6
CF6	0,839	15	0,913	5	0,945	7
CF7	0,567	1	0,940	12	0,764	1
CF8	0,713	3	0,927	6	0,901	3/4
CF9	0,803	11	0,896	2/3	1,085	18

Obliczenia, wykonane zgodnie z aparatem matematycznym przyjętym w metodzie EIPICI, umożliwiają rankingowanie receptur mieszanek betonowych, od najlepiej do najgorzej spełniających wymagania decydenta. Zarówno w pierwszym jak i trzecim przypadku najlepszym rozwiązaniem jest receptura CF7. W drugim przypadku jest to wariant CF5. Do przygotowania 1 m³ mieszanki betonowej CF7 zastosowano: 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. Kruszywo recyklingowe stanowiło 88,21% kruszywa grubego. Do przygotowania 1 m³ mieszanki betonowej CF5 zastosowano: 300 kg cementu CEM I 42,5R, 669 kg grysłu szarogłazowego 2-8 mm, 669 kg grysłu szarogłazowego 8-16 mm, 677 kg piasku 0-2 mm, 135 kg wody, 2,40 kg ATLAS DUROFLOW PE-220. Obie receptury charakteryzowały się współczynnikiem woda/cement 0,45.

Na podstawie przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, iż wykorzystanie kruszyw recyklingowych do produkcji betonu pozytywnie wpływa na aspekt ekologiczny i ekonomiczny. Badania potwierdzają, że betony, w których zastosowano kruszywa z odzysku

mogą również charakteryzować się dobrymi właściwościami technicznymi. Należy pamiętać, iż znaczna, w porównaniu z kruszywem naturalnym, zmienność parametrów kruszyw odzyskanych, często jest czynnikiem ograniczającym możliwość jego stosowania w betonie. Właściwości kruszywa wtórnego zależną w dużym stopniu od właściwości elementu budowlanego, z którego zostało ono wyprodukowane. Poza tym, kruszywo wyprodukowane z tych samych elementów rozbiórkowych może charakteryzować się innymi właściwościami. Zaprojektowane receptury mieszanek betonowych posłużyły do osiągnięcia użytkowych celów rozprawy. Na ich podstawie wykonano badania własne betonu, a otrzymane wyniki umożliwiły utworzenie zbioru informacji niezbędnych do zastosowania w metodach EIPI i EIPICI. Korzystając z tego samego rankingu (Tabela 27), lecz nie uwzględniając receptur zawierających w swoim składzie kruszywo recyklingowe, otrzymamy:

- w pierwszym przypadku jako rozwiązanie najlepsze – CC8;
- w drugim przypadku jako rozwiązanie najlepsze – CF5;
- w trzecim przypadku jako rozwiązanie najlepsze – CF3.

W rozprawie analizy wielokryterialne przeprowadzono na betonie o ustalonym składzie jakościowym i ilościowym oraz znanych właściwościach technicznych. Metodę EIPICI można zastosować na etapie dobierania składników mieszanki betonowej oraz ich ilości. Wówczas należy przyjąć, że wartość wagi dla kryterium technicznego wynosi zero, a suma wartości wag kryterium ekologicznego i kryterium ekonomicznego wynosi jeden. Przy takich założeniach receptury oceniane będą w dwóch obszarach formułowania celu – ekologicznym i ekonomicznym. Jest to istotne z uwagi na przyjętą powszechnie praktykę zamawiania betonu projektowanego. Interesariuszami metody EIPICI mogą być zarówno przedsiębiorcy działający w przemyśle budowlanym (np. wytwórca betonu, wykonawca robót budowlanych), jednostki samorządu terytorialnego, zarządcy dróg (np. GDDKiA), czy uczelnie wyższe prowadzące badania naukowe betonu.

Rozdział 7

Rozwiązanie problemu decyzyjnego metodą EIPICI polegającego na wyborze receptury mieszanki betonowej do zastosowania w budownictwie mostowym

7.1. Opis problemu decyzyjnego

Rozważmy problem decyzyjny polegający na wyborze spośród sześciu receptur mieszanek betonowych, stosowanych w budownictwie mostowym, oznaczonych RC1, RC2, RC3, RC4, RC5 i RC6 wariantu optymalnego ze względu na trzy obszary formułowania celu: ekonomiczny, techniczny oraz ekologiczny. Do rozwiązania problemu decyzyjnego zastosujemy metodę wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPICI. Mieszanki betonowe zaprojektowano w kombinacji klas ekspozycji XC4, XD1, XF3, XA2, natomiast beton charakteryzował się klasą C30/37. Przeznaczenie mieszanek betonowych to wykonanie konstrukcyjnych elementów obiektów mostowych. Receptury mieszanek betonowych zamieszczono w Tabeli 28.

Tabela 28. Receptury mieszanek betonowych RC1-RC6

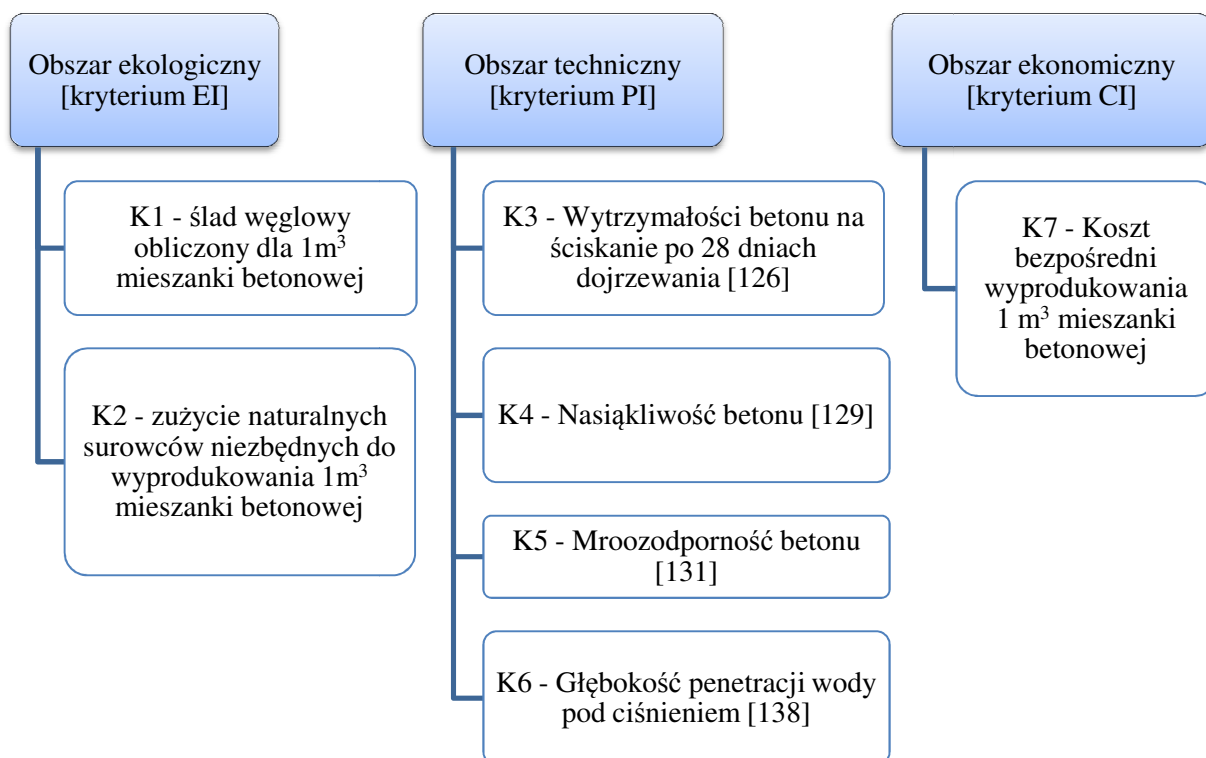
Rec.	Cement (kg/m ³)	Kruszywo grube (kg/m ³)		Kruszywo drobne (kg/m ³)	Woda (kg/m ³)	Domieszki (kg/m ³)			W/C
RC1	350/C10	531/F18	683/F19	683/F17	152	2,45/D4	0,70/D5	-	0,43
RC2	350/C10	531/F18	683/F19	714/F17	152	2,45/D6	0,39/D7	1,00/D8	0,43
RC3	370/C11	520/F1	620/F2	650/F17	161	1,11/D9	1,85/D10	0,37/D11	0,44
RC4	370/C12	520/F1	620/F2	650/F17	161	1,11/D9	1,85/D10	0,56/D11	0,44
RC5	360/C10	583/F22	583/F23	698/F17	155	0,43/D12	2,16/D13	2,16/D14	0,43
RC6	360/C10	546/F22	759/F23	645/F17	155	0,43/D12	2,16/D13	2,16/D14	0,43

Rozpatrujemy zatem zbiór wariantów decyzyjnych składający się z sześciu receptur mieszanek betonowych $RC = \{RC1, \dots, RC6\}$ oraz zbiór kryteriów decyzyjnych, który ze względu na zdefiniowane w metodzie EIPICI obszary formułowania celów podzielono na trzy podzbiory:

- podzbiór kryteriów ekologicznych $EI = \{K1, K2\}$;
- podzbiór kryteriów technicznych $PI = \{K3, K4, K5, K6\}$;
- kryterium ekonomiczne $CI - K7$.

Zbiór wariantów decyzyjnych stanowią zamieszczone w Tabeli 28 receptury mieszanek betonowych. Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne przedstawiono na Rysunku 15.

Znany jest również zbiór wag kryteriów decyzyjnych $W = \{W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6\}$ oraz miejsce produkcji mieszanki betonowej – Płock, województwo mazowieckie.



Rysunek 15. Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne dla receptur RC1-RC6

7.2. Przygotowanie aparatu matematycznego

Zgodnie z przyjętymi dla rozpatrywanego problemu założeniami, wartości kryterium ekologicznego EI należy wyznaczyć z (30), wartości kryterium ekonomicznego CI ze wzoru (31), zaś wskaźnik EIPICI z (29). W celu wyznaczenia kryterium technicznego wartości kryterium technicznego PI przyjęto następujący aparat matematyczny:

$$PI = K3 \cdot W_3 + K4 \cdot W_4 + K5 \cdot W_5 + K6 \cdot W_6 \quad (35)$$

$$PI = \frac{f_{cm28}}{f_{cm28,r}} \cdot W_3 + \frac{n_{w,r}}{n_{w,m}} \cdot W_4 + \left(\frac{100 - \Delta f_{F,m}}{100 - \Delta f_{F,r}} \cdot 0,5 + \frac{100 - \Delta m_{f,m}}{100 - \Delta m_{f,r}} \cdot 0,5 \right) \cdot W_5 + \frac{s_r}{s_m} \cdot W_6 \quad (36)$$

$$i \quad W_3 + W_4 + W_5 + W_6 = 1,0$$

Do obliczenia kryterium technicznego PI przyjęto:

- $f_{cm28,r} = 37 \text{ MPa}$. Zgodnie z projektem budowlanym, klasa wytrzymałości betonu to C30/37.
- $\Delta m_{f,r} = 5\%$. Wartość wymagana zgodnie z Warunkami Wykonania i Odbioru Robót właściwymi dla zamierzenia budowlanego;
- $\Delta f_{F,r} = 20\%$. Wartość wymagana zgodnie z Warunkami Wykonania i Odbioru Robót właściwymi dla zamierzenia budowlanego;
- $n_{w,r} = 5\%$. Wartość wymagana zgodnie z Warunkami Wykonania i Odbioru Robót właściwymi dla zamierzenia budowlanego;
- $s_r = 50 \text{ mm}$. Wartość wymagana zgodnie z Warunkami Wykonania i Odbioru Robót właściwymi dla zamierzenia budowlanego;
- współczynnik $W_3 = 0,3$;
- współczynnik $W_4 = 0,2$;
- współczynnik $W_5 = 0,3$;
- współczynnik $W_6 = 0,2$.

Podstawiając powyższe dane, wzór (36) przyjmie postać (37):

$$PI = \frac{f_{cm28}}{37 \text{ MPa}} \cdot 0,3 + \frac{5\%}{n_{w,m}} \cdot 0,2 + \left(\frac{100\% - \Delta f_{F,m}}{100\% - 20\%} \cdot 0,5 + \frac{100\% - \Delta m_{f,m}}{100\% - 5\%} \cdot 0,5 \right) \cdot 0,3 + \frac{50 \text{ mm}}{s_m} \cdot 0,2 \quad (37)$$

7.3. Przygotowanie bazy wiedzy o wariantach decyzyjnych

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryteriów ekologicznych K1, K2 stanowią:

- wartości śladu węglowego wyznaczone dla każdej receptury zamieszczone w Tabeli 29. Szczegółowe obliczenia zamieszczono w Załączniku 4 do rozprawy.
- wartości zużycia surowców naturalnych potrzebnych do wyprodukowania 1 m³ każdej mieszanki betonowej zamieszczone w Tabeli 29. Szczegółowe obliczenia zamieszczono w Załączniku 4 do rozprawy.

Tabela 29. Ślad węglowy oraz wartość zużycia surowców naturalnych wyznaczone dla receptur RC1-RC6

Receptura	EM [kgCO ₂ /m ³]	RM [kg/m ³]	Receptura	EM [kgCO ₂ /m ³]	RM [kg/m ³]
RC1	382,52	1781,91	RC4	393,19	1713,77
RC2	383,34	1798,97	RC5	391,86	1756,31
RC3	393,14	1713,34	RC6	397,03	1860,13

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryteriów technicznych K3, K4, K5 i K6 stanowią:

- wyniki badań technicznych zamieszczone w Tabeli 30.

Tabela 30. Wyniki badań technicznych betonu RC1-RC6

Recep.	Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania [MPa]	Średnia nasiąkliwość betonu [%]	Mrozoodporność betonu			Maksymalna głębokość penetracji wody [mm]
			Średni ubytek masy [%]	Średni ubytek wytrzymałości betonu na ściskanie [%]	Pęknięcia powierzchni próbek	
RC1	57,8	4,2	0,30	-3,60	brak	24,0
RC2	44,2	4,4	0,19	5,30	brak	30,0
RC3	56,4	4,7	0,00	4,74	brak	30,0
RC4	57,1	4,7	0,00	5,10	brak	30,0
RC5	52,6	4,8	0,10	6,70	brak	18,0
RC6	50,4	4,8	0,10	5,10	brak	19,0

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryterium ekonomicznego K7 stanowią:

- koszt bezpośredni wyprodukowania 1 m³ mieszanki betonowej obliczony dla każdej receptury zestawiony w Tabeli 31. Szczegółowe obliczenia zamieszczono w Załączniku 5 do rozprawy.

Tabela 31. Koszt bezpośredni 1m³ mieszanek betonowych RC1-RC6

Receptura	Koszt 1m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]	Receptura	Koszt 1m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
RC1	504,67	RC4	498,48
RC2	493,04	RC5	517,45
RC3	476,93	RC6	534,40

7.4. Wyznaczenie wartości kryteriów EI, PI i CI oraz wartości wskaźnika EIPICI

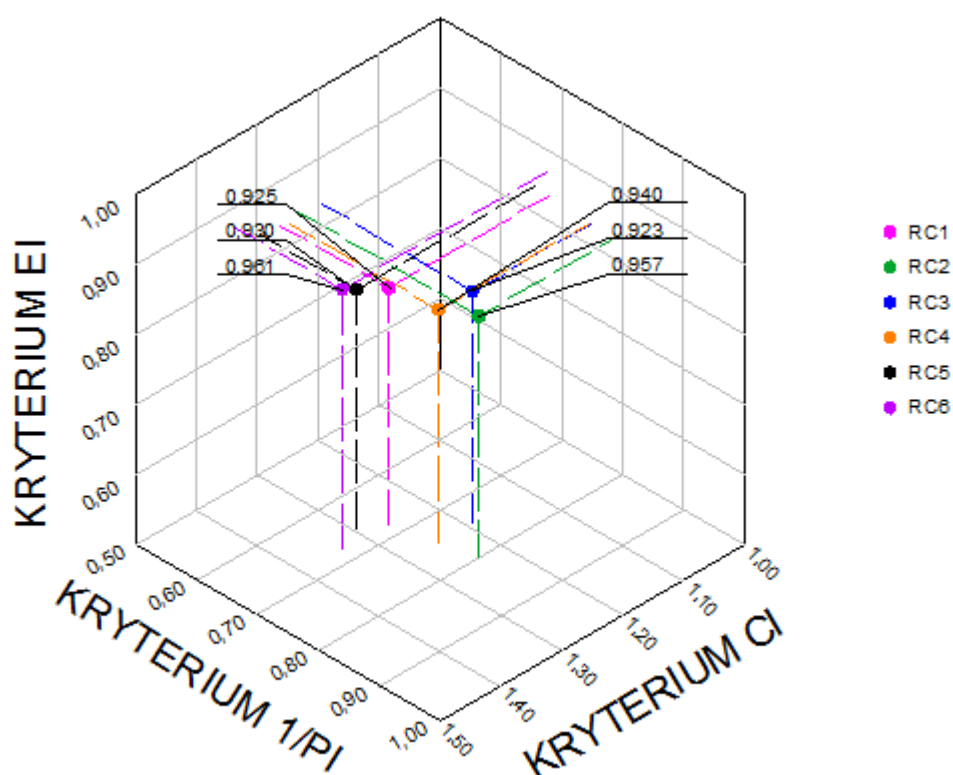
Posiadając odpowiednio uporządkowane zbiory informacji o wszystkich wariantach decyzyjnych przystąpiono do wykonania obliczeń wartości kryteriów decyzyjnych zgodnie z przyjętym w metodzie EIPICI aparatem matematycznym.

Dla każdego wariantu decyzyjnego $R = \{RC1, \dots, RC6\}$ wyznaczono wartość kryterium ekologicznego EI (30), wartość kryterium technicznego PI (37), wartość kryterium

ekonomicznego CI (31) oraz wskaźnik EIPICI (29). Wyniki obliczeń zestawiono w Tabeli 32. Rysunek 16 przedstawia zależność wartości kryteriów EI, 1/PI i CI.

Tabela 32. Wartości kryteriów EI, 1/PI, CI oraz wskaźnika EIPICI dla receptur RC1 – RC6

Receptura	Wartość kryterium EI	Wartość kryterium 1/PI	Wartość kryterium CI	Wartość wskaźnika EIPICI	Miejsce w rankingu
RC1	0,836	0,678	1,262	0,925	2
RC2	0,841	0,797	1,233	0,957	5
RC3	0,830	0,746	1,192	0,923	1
RC4	0,830	0,744	1,246	0,940	4
RC5	0,839	0,657	1,294	0,930	3
RC6	0,870	0,676	1,336	0,961	6



Rysunek 16. Wykres obrazujący zależność wartości kryteriów EI, 1/PI oraz CI dla receptur RC1-RC6

Na podstawie wykonanych obliczeń, stwierdza się, iż najlepszym rozwiązaniem, spośród zbioru wariantów decyzyjnych $R=\{RC1, \dots, RC6\}$, jest wariant RC3, zaś kolejne w rankingu są: RC1, RC5, RC4, RC2, RC6.

Rozdział 8

Rozwiązanie problemu decyzyjnego metodą EIPICI polegającego na wyborze receptury mieszanki betonowej do zastosowania w budownictwie drogowym

8.1. Opis problemu decyzyjnego

Rozważmy problem decyzyjny polegający na wyborze optymalnej receptury mieszanki betonowej przeznaczonej do wykonania dolnej warstwy betonu nawierzchniowego oraz optymalnej receptury mieszanki betonowej przeznaczonej do wykonania górnej warstwy betonu nawierzchniowego. Wybór receptury dla dolnej warstwy betonu nastąpi spośród trzech receptur mieszanek betonowych oznaczonych DB-01, DB-02 i DB-03. Zaś wybór receptury dla górnej warstwy betonu nastąpi spośród trzech receptur mieszanek betonowych oznaczonych GB-01, GB-02, GB-03. Wybór wariantów optymalnych zostanie wykonany z uwzględnieniem trzech obszarów celu: ekonomicznego, technicznego oraz ekologicznego za pomocą metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPICI. Mieszanki betonowe dla dolnej warstwy zaprojektowano w klasie ekspozycji XF4 oraz klasie betonu C35/45. Mieszanki betonowe dla górnej warstwy zaprojektowano w kombinacji klas ekspozycji XF4, XM2 oraz klasie betonu C35/45. Receptury mieszanek zamieszczono w Tabelach 33 i 34.

Tabela 33. Receptury mieszanek betonowych – dolna warstwa betonu nawierzchniowego

Recep.	Cement (kg/m ³)	Kruszywo grube (kg/m ³)			Kruszywo drobne (kg/m ³)	Woda (kg/m ³)	Domieszki (kg/m ³)	
DB-01	370/C10	273/F1	400/F2	600/F4	545/F17	133	2,04/D15	0,59/D16
DB-02	370/C14	401/F5	331/F6	664/F7	514/F17	131	2,22/D8	0,44/D18
DB-03	370/C5	401/F5	331/F6	664/F7	514/F17	131	2,22/D17	0,33/D16

Tabela 34. Receptury mieszanek betonowych – górna warstwa betonu nawierzchniowego

Recep.	Cement (kg/m ³)	Kruszywo grube (kg/m ³)			Kruszywo drobne (kg/m ³)	Woda (kg/m ³)	Domieszki (kg/m ³)	
GB-01	425/C12	81/F20	1217/F21	-	505/F17	149	2,34/D15	0,6/D16
GB-03	420/C5	284/F24	1078/F25	-	529/F17	153	2,94/D17	0,38/D16
GB-06	420/C5	284/F24	1077/F25	-	529/F17	154	2,52/D8	0,25/D18

W rozpatrywanym problemie decyzyjnym, obliczenia należy wykonać oddzielnie dla dwóch zbiorów wariantów decyzyjnych $DB = \{DB-01, DB-02, DB-03\}$ oraz $GB = \{GB-01, GB-02, GB-03\}$.

8.2. Rozwiązanie problemu decyzyjnego dotyczącego wyboru receptury mieszanki betonowej dla dolnej warstwy betonu nawierzchniowego

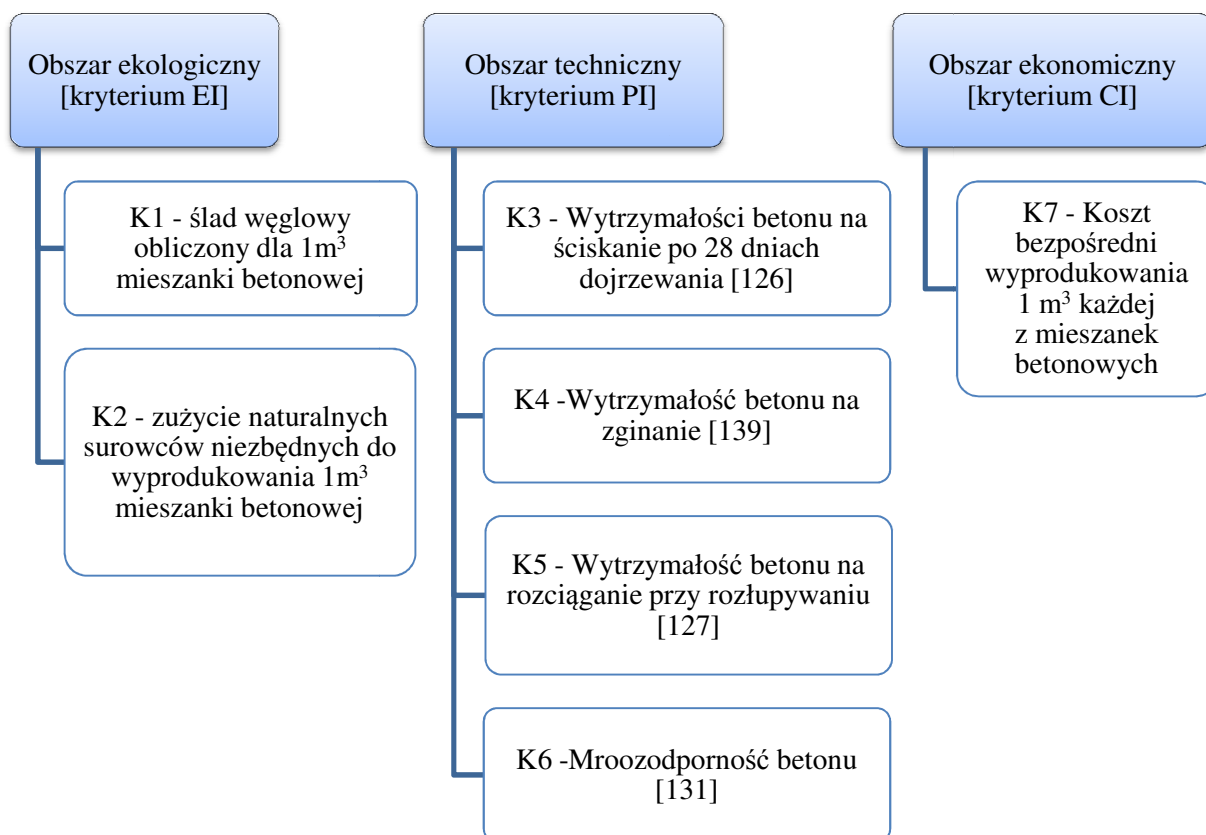
8.2.1. Charakterystyka metody EIPICI dla zbioru wariantów decyzyjnych $DB = \{DB-01, DB-02, DB-03\}$

Rozważmy zbiór wariantów decyzyjnych $DB = \{DB-01, DB-02, DB-03\}$ oraz zbiór kryteriów decyzyjnych, który ze względu na zdefiniowane w metodzie EIPICI obszary formułowania celu, podzielono na trzy podzbiory:

- podzbiór kryteriów ekologicznych $EI = \{K1, K2\}$;
- podzbiór kryteriów technicznych $PI = \{K3, K4, K5, K6\}$;
- kryterium ekonomiczne $CI - K7$.

Zbiór wariantów decyzyjnych stanowią zamieszczone w Tabeli 30 receptury mieszanek betonowych. Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne przedstawiono na Rysunku 16.

Znany jest również zbiór wag kryteriów decyzyjnych $W = \{W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6\}$ oraz miejsce produkcji mieszanki betonowej – Płock, województwo mazowieckie.



Rysunek 17. Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne dla wariantów $DB-01 - DB-03$

Zgodnie z przyjętymi dla rozpatrywanego problemu założeniami, wartości kryterium ekologicznego EI należy wyznaczyć ze wzoru (30), wartości kryterium ekonomicznego CI ze wzoru (31), zaś wskaźnik EIPIK z (29). W celu wyznaczenia wartości kryterium technicznego PI przyjęto następujący aparat matematyczny:

$$PI = K3 \cdot W_3 + K4 \cdot W_4 + K5 \cdot W_5 + K6 \cdot W_6 \quad (38)$$

$$PI = \frac{f_{cm28}}{f_{cm28,r}} \cdot W_3 + \frac{f_{ct,fl}}{f_{ct,fl,r}} \cdot W_4 + \frac{f_{tm}}{f_{tm,r}} \cdot W_5 + \left(\frac{100 - \Delta f_{F,m}}{100 - \Delta f_{F,r}} \cdot 0,5 + \frac{100 - \Delta m_{f,m}}{100 - \Delta m_{f,r}} \cdot 0,5 \right) \cdot W_6 \quad (39)$$

$$i \ W_3 + W_4 + W_5 + W_6 = 1,0;$$

Do obliczenia kryterium technicznego PI przyjęto:

- $f_{cm28,r}$ – **45 MPa**. Zgodnie z projektem budowlanym, klasa wytrzymałości betonu nawierzchniowego dolnej warstwy to C35/45;
- $f_{ct,fl,r}$ – **5,5 MPa**. Wartość wymagana zgodnie z Warunkami Wykonania i Odbioru Robót właściwymi dla zamierzenia budowlanego;
- $f_{tm,r}$ – **3,5 MPa**. Wartość wymagana zgodnie z Warunkami Wykonania i Odbioru Robót właściwymi dla zamierzenia budowlanego;
- $\Delta m_{f,r}$ – **5%**. Wartość wymagana zgodnie z Warunkami Wykonania i Odbioru Robót właściwymi dla zamierzenia budowlanego;
- $\Delta f_{F,r}$ – **20%**. Wartość wymagana zgodnie z Warunkami Wykonania i Odbioru Robót właściwymi dla zamierzenia budowlanego;
- współczynniki wagowe $W_3 = W_4 = 0,3$;
- współczynniki wagowe $W_5 = W_6 = 0,2$.

Podstawiając powyższe dane, wzór (39) przyjmie postać (40):

$$PI = \frac{f_{cm28}}{45 \text{ MPa}} \cdot 0,3 + \frac{f_{ct,fl}}{5,5 \text{ MPa}} \cdot 0,3 + \frac{f_{tm}}{3,5 \text{ MPa}} \cdot 0,2 + \left(\frac{100\% - \Delta f_{F,m}}{100\% - 20\%} \cdot 0,5 + \frac{100\% - \Delta m_{f,m}}{100\% - 5\%} \cdot 0,5 \right) \cdot 0,2 \quad (40)$$

8.2.2. Przygotowanie bazy wiedzy o wariantach decyzyjnych

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryteriów ekonomicznych K1 i K2 stanowią:

- wartości śladu węglowego wyznaczone dla każdej receptury zamieszczone w Tabeli 35. Szczegółowe obliczenia zamieszczono w Załączniku 6 do rozprawy.
- wartości zużycia surowców naturalnych potrzebnych do wyprodukowania 1 m³ każdej mieszanki betonowej zamieszczone w Tabeli 35. Szczegółowe obliczenia zamieszczono w Załączniku 6 do rozprawy.

Tabela 35. Ślad węglowy oraz wartość zużycia surowców naturalnych wyznaczone dla receptur DB-01, DB-02, DB-03

Receptura	EM [kgCO ₂ /m ³]	RM [kg/m ³]
DB-01	399,20	1781,16
DB-02	390,84	1879,85
DB-03	392,31	1880,59

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryteriów technicznych K3, K4, K5, K6, stanowią:

- wyniki badań technicznych betonu zamieszczone w Tabeli 36.

Tabela 36. Wyniki badań technicznych betonu przeznaczonego do wykonania dolnej warstwy betonu nawierzchniowego

Recep.	Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania [MPa]	Średnia wytrzymałość betonu na zginanie [MPa]	Średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]	Mrozoodporność betonu		
				Średni ubytek masy [%]	Średni ubytek wytrzymałość betonu na ściskanie [%]	Pęknięcia powierzchni próbek
DB-01	56,0	5,9	4,7	0,10	3,2	brak
DB-02	57,8	7,0	3,9	0,13	2,8	brak
DB-03	56,1	6,1	3,7	0,15	4,2	brak

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryterium ekonomicznego K7 stanowi:

- koszt bezpośredni wyprodukowania 1 m³ mieszanki betonowej obliczony dla każdego wariantu decyzyjnego zestawiono w Tabeli 37. Szczegółowe obliczenia zamieszczono w Załączniku 7 do rozprawy.

Tabela 37. Koszt bezpośredni 1m³ mieszanek oznaczonych DB-01, DB-02, DB-03

Receptura	Koszt 1m³ mieszanki betonowej [zł/m³]
DB-01	502,22
DB-02	484,77
DB-03	456,10

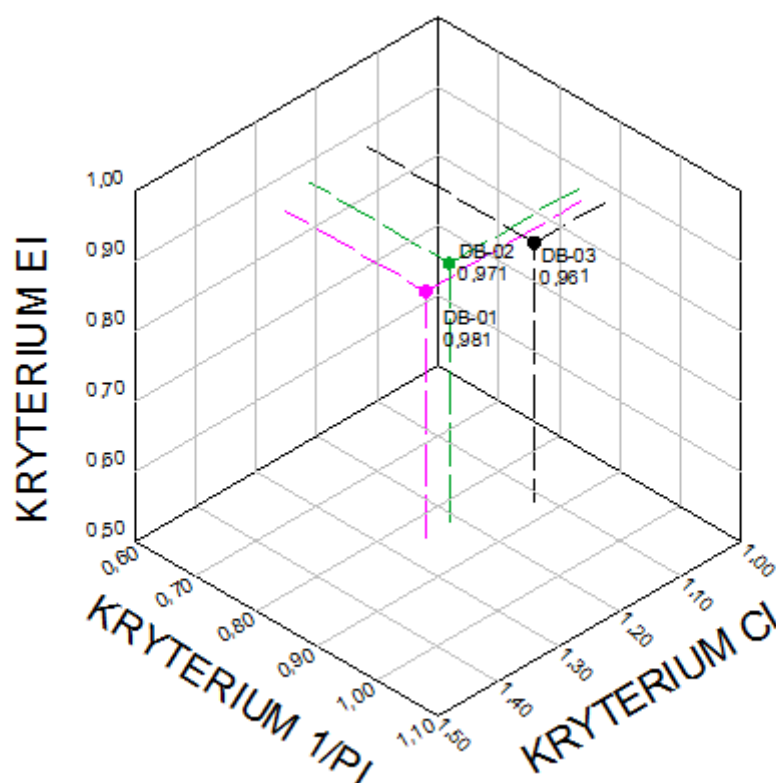
8.2.3. Wyznaczenie wartości kryteriów EI, PI, CI oraz wartości wskaźnika EIPICI

Posiadając odpowiednio uporządkowane zbiory informacji o wariantach decyzyjnych przystąpiono do wykonania obliczeń wartości kryteriów decyzyjnych zgodnie z przyjętym w metodzie EIPICI aparatem matematycznym.

Dla każdego wariantu decyzyjnego $DB = \{DB-01, DB-02, DB-03\}$ wyznaczono wartości kryterium ekologicznego EI (30), wartość kryterium technicznych PI (40), wartości kryterium ekonomicznego CI (31) oraz wartości wskaźnika EIPICI (29). Uzyskane wyniki obliczeń zestawiono w Tabeli 38. Na rysunku 18 przedstawiono zależności wartości kryteriów EI, 1/PI i CI.

Tabela 38. Wartości kryteriów EI, 1/PI, CI oraz wskaźnika EIPICI dla wariantów DB-01, DB-02, DB-03

Receptura	Wartość kryterium EI	Wartość kryterium 1/PI	Wartość kryterium CI	Wartość wskaźnika EIPICI	Miejsce w rankingu
DB-01	0,853	0,836	1,256	0,981	3
DB-02	0,869	0,831	1,212	0,971	2
DB-03	0,870	0,873	1,140	0,961	1



Rysunek 18. Wykres obrazujący zależność wartości kryteriów EI, 1/PI oraz CI dla receptur DB-01 – DB-03

Na podstawie wykonanych obliczeń, stwierdza się, iż najlepszym rozwiązaniem, spośród zbioru wariantów decyzyjnych $DB = \{DB-01, DB-02, DB-03\}$ jest wariant DB-03, natomiast kolejne w rankingu są: DB-02 i DB-01.

8.3. Rozwiązanie problemu decyzyjnego dotyczącego wyboru receptury mieszanki betonowej dla górnej warstwy betonu nawierzchniowego

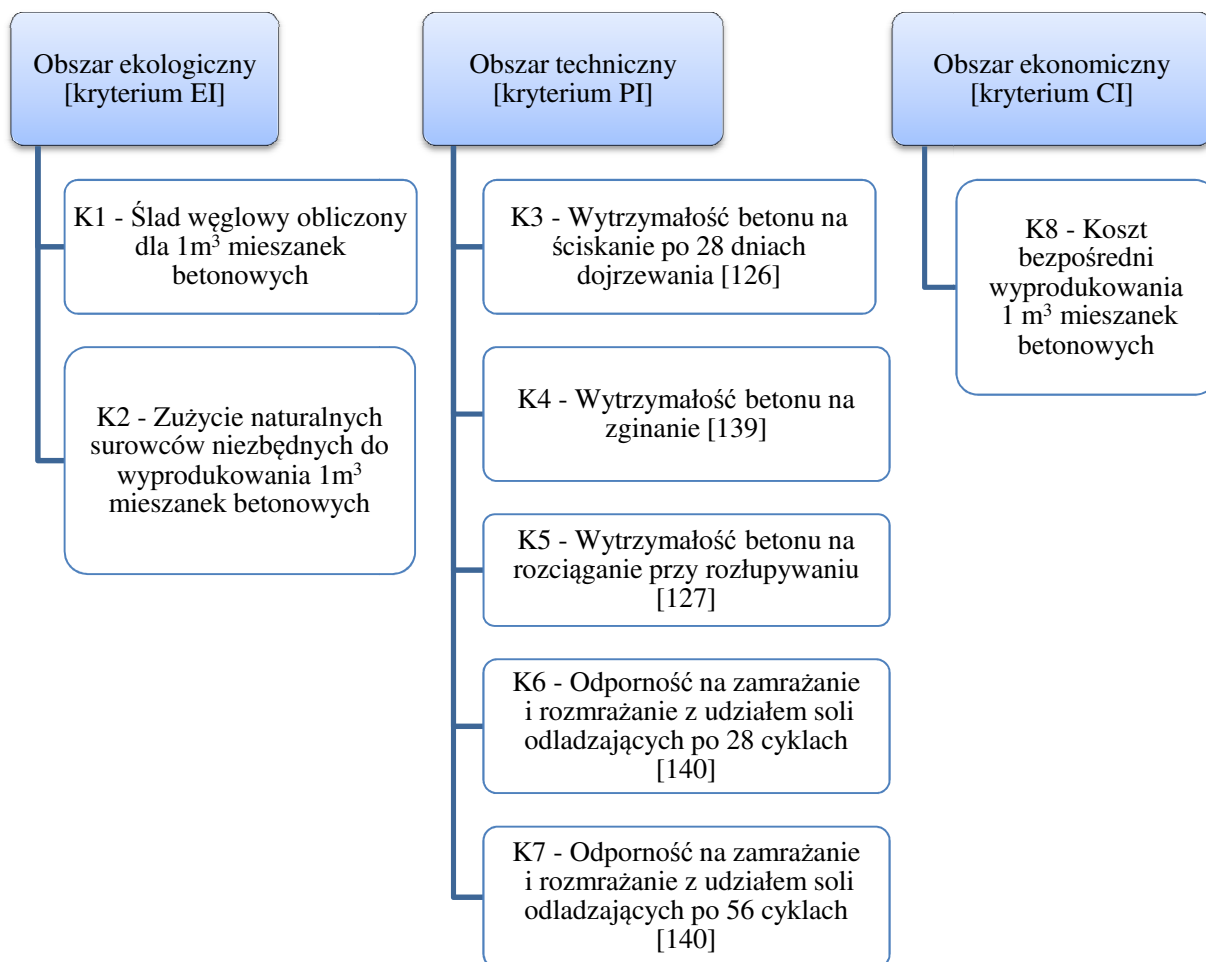
8.3.1. Charakterystyka metody EIPICI dla zbioru wariantów decyzyjnych $GB = \{GB-01, GB-02, GB-03\}$

Rozważmy, zbiór wariantów decyzyjnych $GB = \{GB-01, GB-02, GB-03\}$ oraz zbiór kryteriów decyzyjnych, który ze względu na zdefiniowane w metodzie EIPICI obszary formułowania celu, podzielono na trzy podzbiory:

- podzbiór kryteriów ekologicznych $EI = \{K1, K2\}$;
- podzbiór kryteriów technicznych $PI = \{K3, K4, K5, K6, K7\}$
- kryterium ekonomiczne $CI - K8$.

Zbiór wariantów decyzyjnych stanowią zamieszczone w Tabeli 34 receptury mieszanek betonowych dla górnej warstwy betonu nawierzchniowego. Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne przedstawiono na Rysunku 19.

Znany jest również zbiór wag kryteriów decyzyjnych $W = \{W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, W_7\}$ oraz miejsce produkcji mieszanki betonowej – Płock, województwo mazowieckie.



Rysunek 19. Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne dla wariantów GB-01 – GB-03

Zgodnie z przyjętymi dla rozpatrywanego problemu założeniami, wartości kryterium ekologicznego EI należy wyznaczyć ze wzoru (30), wartości kryterium ekonomicznego CI ze wzoru (31), zaś wskaźnik EIPIK z (29). W celu wyznaczenia wartości kryterium technicznego PI przyjęto następujący aparat matematyczny:

$$PI = K3 \cdot W_3 + K4 \cdot W_4 + K5 \cdot W_5 + K6 \cdot W_6 + K7 \cdot W_7 \quad (41)$$

$$PI = \frac{f_{cm28}}{f_{cm28,r}} \cdot W_3 + \frac{f_{ct,fl}}{f_{ct,fl,r}} \cdot W_3 + \frac{f_{tm}}{f_{tm,r}} \cdot W_5 + \frac{S_{n28,r}}{S_{n28}} \cdot W_6 + \frac{S_{n56,r}}{S_{n56}} \cdot W_7 \quad (42)$$

$$i \ W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7 = 1,0;$$

Do obliczenia kryterium technicznego PI przyjęto:

- $f_{cm28,r}$ – **45 MPa**. Zgodnie z projektem budowlanym, klasa wytrzymałości betonu nawierzchniowego górnej warstwy to C35/45;
- $f_{ct,r}$ – **5,5 MPa**. Wartość wymagana zgodnie z Warunkami Wykonania i Odbioru Robót właściwymi dla zamierzenia budowlanego;
- $f_{tm,r}$ – **3,5 MPa**. Wartość wymagana zgodnie z Warunkami Wykonania i Odbioru Robót właściwymi dla zamierzenia budowlanego;
- $S_{n28,r}$ – **0,5 kg/m²**. Wartość wymagana zgodnie z Warunkami Wykonania i Odbioru Robót właściwymi dla zamierzenia budowlanego;
- $S_{n56,r}$ – **1,0 kg/m²**. Wartość wymagana zgodnie z Warunkami Wykonania i Odbioru Robót właściwymi dla zamierzenia budowlanego;
- współczynnik wagowy: $W_3 = 0,3$;
- współczynniki wagowe: $W_4 = W_5 = 0,2$;
- współczynniki wagowe: $W_6 = W_7 = 0,15$.

Podstawiając powyższe dane, wzór (42) przyjmie postać (43):

$$PI = \frac{f_{cm28}}{45 \text{ MPa}} \cdot 0,3 + \frac{f_{ct,fl}}{5,5 \text{ MPa}} \cdot 0,2 + \frac{f_{tm}}{3,5 \text{ MPa}} \cdot 0,2 + \frac{0,5 \text{ kg/m}^2}{S_{n28}} \cdot 0,15 + \frac{1,0 \text{ kg/m}^2}{S_{n56}} \cdot 0,15 \quad (43)$$

8.3.2. Przygotowanie bazy wiedzy o wariantach decyzyjnych

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryteriów ekologicznych K1 i K2 stanowią:

- wartości śladu węglowego wyznaczone dla każdej receptury zamieszczone w Tabeli 39. Szczegółowe obliczenia zamieszczono w Załączniku 6 do rozprawy.
- wartości zużycia surowców naturalnych potrzebnych do wyprodukowania 1 m³ każdej mieszanki betonowej zamieszczone w Tabeli 39. Szczegółowe obliczenia zamieszczono w Załączniku 6 do rozprawy.

Tabela 39. Ślad węglowy oraz wartość zużycia surowców naturalnych wyznaczone dla receptur GB-01, GB-02, GB-03

Receptura	EM [kgCO ₂ /m ³]	RM [kg/m ³]
GB-01	448,82	1830,89
GB-02	450,93	1900,15
GB-03	450,93	1898,07

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryteriów technicznych K3, K4, K5, K6 i K7 stanowią:

- wyniki badań technicznych betonu przeznaczonego do wykonania górnej warstwy betonu nawierzchniowego zamieszczone w Tabeli 40.

Tabela 40. Wyniki badań technicznych betonu przeznaczonego do wykonania górnej warstwy betonu nawierzchniowego

Recep.	Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania [MPa]	Średnia wytrzymałość betonu na zginanie po 28 dniach dojrzewania [MPa]	Średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]	Ubytek masy po 28 cyklach zamrażania – rozmrażania z udziałem soli odladzających [kg/m ²]	Ubytek masy po 56 cyklach zamrażania – rozmrażania z udziałem soli odladzających [kg/m ²]
GB-01	55,7	6,6	4,8	0,12	0,35
GB-02	56,1	6,6	4,0	0,35	0,41
GB-03	57,0	7,6	4,0	0,11	0,16

Zbiór informacji niezbędny do wyznaczenia kryterium ekonomicznego K8 stanowią:

- koszt bezpośredni wyprodukowania 1 m³ mieszanki betonowej obliczony dla każdego wariantu decyzyjnego zestawiono w Tabeli 41. Szczegółowe obliczenia zamieszczono w Załączniku 7 do rozprawy.

Tabela 41. Koszt bezpośredni 1m³ mieszanek oznaczonych GB-01, GB-02, GB-03

Receptura	Koszt 1m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
GB-01	560,86
GB-02	533,47
GB-03	518,14

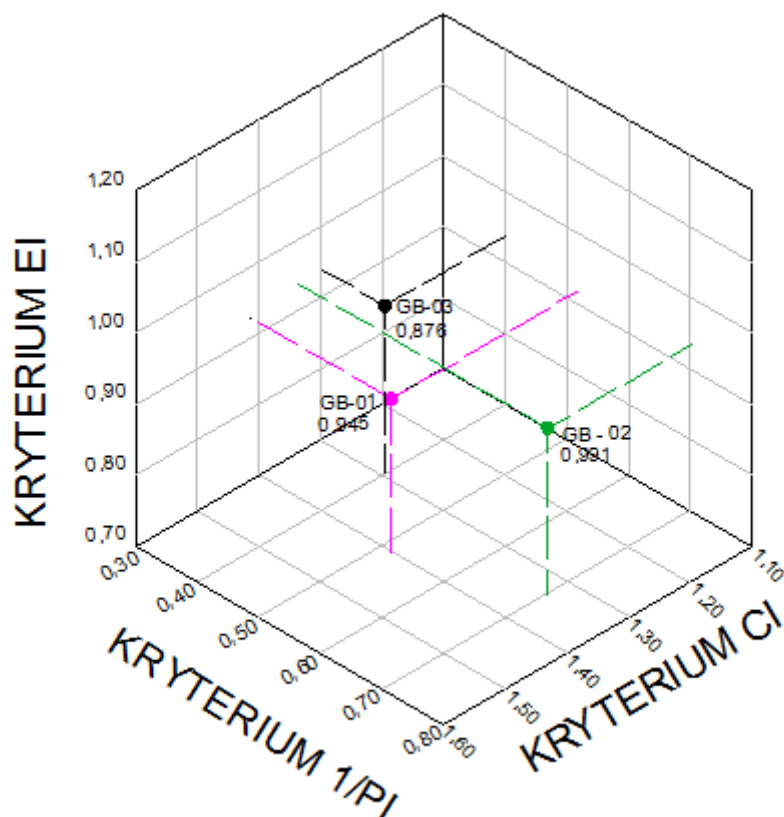
8.3.3. Wyznaczenie wartości kryteriów EI, PI i CI oraz wartości wskaźnika EIPICI

Posiadając odpowiednio uporządkowane zbiory informacji o wszystkich wariantach decyzyjnych można przystąpić do wykonania obliczeń wartości kryteriów decyzyjnych zgodnie z przyjętym w metodzie EIPICI aparatem matematycznym.

Dla każdego wariantu decyzyjnego $GB = \{GB-01, GB-02, GB-03\}$ wyznaczono wartości kryterium ekologicznego EI (30), wartości kryterium technicznego PI (43), wartości kryterium ekonomicznego CI (31) oraz wartości wskaźnika EIPICI (29). Uzyskane wyniki obliczeń zestawiono w Tabeli 42. Na Rysunku 20 przedstawiono zależność wartości kryteriów EI, 1/PI, CI.

Tabela 42. Wartości kryteriów EI, 1/PI, CI oraz wskaźnika EIPICI dla wariantów GB-01, GB-02, BG-03

Receptura	Wartość kryterium EI	Wartość kryterium 1/PI	Wartość kryterium CI	Wartość wskaźnika EIPICI	Miejsce w rankingu
GB-01	0,916	0,516	1,402	0,945	2
GB-02	0,935	0,703	1,334	0,991	3
GB-03	0,935	0,399	1,295	0,876	1



Rysunek 20. Wykres obrazujący zależność wartości kryteriów EI, 1/PI oraz CI dla receptur GB-01 – GB-03

Na podstawie wykonanych obliczeń, stwierdza się, iż najlepszym rozwiązaniem, spośród zbioru wariantów decyzyjnych $GB = \{GB-01, GB-02, GB-03\}$, jest wariant GB-03, zaś kolejne w rankingu są: GB-01 i GB-02.

Rozdział 9

Wykonanie obliczeń za pomocą kalkulatora EIPICI

Kalkulator EIPICI jest narzędziem, które umożliwia wykonanie obliczeń zgodnie z przyjętym w metodzie EIPICI aparatem matematycznym. Efektem końcowym obliczeń jest ranking wariantów decyzyjnych (receptur mieszanek betonowych).

Przeprowadzenie obliczeń za pomocą kalkulatora EIPICI należy rozpocząć od wprowadzenia receptur (wariantów decyzyjnych). Aplikacja posiada wczytane składniki mieszanek betonowych, ich oznaczenie oraz charakterystyki, zgromadzone w toku powstawania rozprawy doktorskiej (Tabela 22). Na tym etapie charakterystyki można edytować, usuwając wartość wczytaną, wpisując nową (Rysunek 21).

Wybierz składnik mieszanki betonowej	Wybierz składnik mieszanki betonowej
<input type="text" value="C1: CEM I 32,5R"/>	<input type="text" value="F1: Kruszywo granitowe 2-8 mm"/>
Oznaczenie i nazwa składnika	Oznaczenie i nazwa składnika
C1: CEM I 32,5R	F1: Kruszywo granitowe 2-8 mm
Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]
0.889	0.008
Odległość liczona od zakładu produkcyjnego składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej [km]	Odległość liczona od zakładu produkcyjnego składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej [km]
270	380
Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]
0.0000518	0.000063
Ilość surowca niezbędna do wyprodukowania 1 kg składnika [kg]	Ilość surowca niezbędna do wyprodukowania 1 kg składnika [kg]
1.60	1.25
Parametr rzadkości	Parametr rzadkości
0.50	0.75
Współczynnik zużycia składnika [kg/kg]	Współczynnik zużycia składnika [kg/kg]
0.8	0.9375
Cena jednostkowa [zł/kg]	Cena jednostkowa [zł/kg]
0.510	0.045
Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej [km]	Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej [km]
20	380
Koszt jednostkowy transportu [zł/kg km]	Koszt jednostkowy transportu [zł/kg km]
0.0003	0.0002
<input type="button" value="Dodaj składnik"/>	<input type="button" value="Dodaj składnik"/>

Rysunek 21. Widok okna dodawania składników mieszanki betonowej

Edycji nie podlega *Współczynnik zużycia surowca* (okno w kolorze białym), ponieważ jest on liczony jako iloczyn parametru rzadkości i ilości surowca niezbędnej do wyprodukowania 1 kg składnika. Składniki należy dodawać po kolei dla jednej receptury. Dodane składniki są widoczne w oknie *Podgląd wprowadzonych składników* (Rysunek 22). Przycisk *Usuń składnik* umożliwia usuwanie składników w kolejności odwrotnej do kolejności ich wprowadzania. Po dodaniu wszystkich składników należy wybrać oznaczenie receptury, a następnie podać ich ilości. Do tego celu służy opcja *Wprowadź ilości składników mieszanki betonowej* (Rysunek 23).

Podgląd wprowadzonych składników

Oznaczenie i n...	Ślad węglowy ...	Odległość* [km]	Emisja CO2 p...	Ilość surowca ...	Parametr rzad...	Współczynnik ...	Cena jednostk...	Odległość** [k...	Koszt jednostk...
C10: Cement ...	0.889	370	0.0000518	1.60	0.50	0.8	0.790	20	0.0003
F18: Grys amfi...	0.008	400	0.000063	1.25	0.75	0.9375	0.040	400	0.0002
F19: Grys amfi...	0.008	400	0.000063	1.25	0.75	0.9375	0.040	400	0.0002
F17: Piasek 0-...	0.005	15	0.000063	1.00	0.50	0.5	0.035	15	0.0002
W: Woda	0.001	0	0.00	0.10	1.00	0.1	0.005	0	0.00
D4: MC - Pow...	0.250	200	0.000221	2.25	1.00	2.25	16.10	20	0.0004
D5: Centrame...	0.250	200	0.000221	2.25	1.00	2.25	10.00	20	0.0004
PB: Produkcja ...	0.008	0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.003	0	0.00

* Odległość liczona od zakładu produkcyjnego składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej ** Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Usuń składnik Wprowadź ilości składników mieszanki betonow... Wprowadź wyniki badań betonu

Rysunek 22. Widok okna Podgląd wprowadzonych składników

Wybierz recepturę

i wprowadź ilości składników

Receptura

Ilość składnika: C10: Cement CEM I 42,5 N- SR 3/NA

Ilość składnika: F18: Grys amfibolowy 2-8 mm

Ilość składnika: F19: Grys amfibolowy 8-16 mm

Ilość składnika: F17: Piasek 0-2 mm

Ilość składnika: W: Woda

Ilość składnika: D4: MC - Powerflow 2650

Ilość składnika: D5: Centrament AIR 207/2

Ilość składnika: PB: Produkcja betonu

Ilość składnika:

Zatwierdź ilości

Wybierz recepturę

i wprowadź ilości składników

Receptura

RC1

Ilość składnika: C10: Cement CEM I 42,5 N- SR 3/NA

350

Ilość składnika: F18: Grys amfibolowy 2-8 mm

531

Ilość składnika: F19: Grys amfibolowy 8-16 mm

683

Ilość składnika: F17: Piasek 0-2 mm

683

Ilość składnika: W: Woda

152

Ilość składnika: D4: MC - Powerflow 2650

2.45

Ilość składnika: D5: Centrament AIR 207/2

0.7

Ilość składnika: PB: Produkcja betonu

2402.15

Ilość składnika:

Zatwierdź ilości

Rysunek 23. Widok okna wyboru receptury i wprowadzenia ilości składników

Po dodaniu wszystkich składników oraz ich ilości, w kolejnym kroku, należy wprowadzić wyniki badań technicznych otrzymanych dla wprowadzanej receptury. Do tego służy polecenie *Wprowadź wyniki badań betonu* (Rysunek 24). W następnym kroku, uruchamiając opcję *Wprowadź/modyfikuj parametry referencyjne* wprowadzamy wartości referencyjne kryteriów oraz wartości wag niezbędne do wyznaczenia kryterium ekologicznego (Rysunek 25), technicznego (Rysunek 26, 27) i ekonomicznego (Rysunek 28). Działanie kalkulatora, oparto na założeniu, że „domyślnie” zaczyta wartości referencyjne, wartości wag, które użyto w rozprawie. Zaczytane wartości można modyfikować zgodnie z potrzebą.

Wyniki badań technicznych betonu

Receptura	fcm28 [MPa]	Nw,m [%]	$\Delta m_f, m$ [%]	$\Delta f_f, m$ [%]	sm [mm]
RC1	57.8	4.2	0.30	-3.60	24.00

[Dalej](#)

Rysunek 24. Widok okna służącego do wprowadzania wyników badań technicznych betonu

Wartości referencyjne oraz wartości wag dla kryteriów ekologicznych EI

EW [kgCO ₂ /m ³]	RW [kg/m ³]	W1 [EW]	W2 [RW]
490	2000	0.5	0.5

[Dalej](#)

Rysunek 25. Widok okna służącego do modyfikacji wartości referencyjnych oraz wartości wag dla kryteriów ekologicznych EI

Wartości referencyjne oraz wartości wag dla kryteriów technicznych PI

fcm28r [MPa]	nw,r [%]	Δf_{fr} [%]	Δm_{fr} [%]	sr [mm]	W3 [fcm28r]	W4 [nw,r]	W5 [$\Delta f_{fr}/\Delta m_{fr}$]	W6 [sr]
37	5	20	5	50	0.3	0.2	0.3	0.2

[Dalej](#)

Rysunek 26. Widok okna służącego do modyfikacji wartości referencyjnych oraz wartości wag dla kryteriów technicznych PI

Wartości referencyjne oraz wartości wag dla kryteriów technicznych PI

fcm28r [MPa]	nw,r [%]	Δf_{fr} [%]	Δm_{fr} [%]	dr [mm]	ΔV_r [mm ³]
60.0	5.0	20.0	5.0	8	14980.0

Klasy ekspozycji	W3 [fcm28r]	W4 [nw,r]	W5 [$\Delta f_{fr}/\Delta m_{fr}$]	W6 [dr]	W7 [ΔV_r]
<input type="button" value="▼"/>	0.4	0.1	0.3	0.1	0.1

[Dalej](#)

Rysunek 27. Widok okna służącego do modyfikacji wartości referencyjnych oraz wartości wag dla kryteriów technicznych PI wraz z możliwością wyboru klasy ekspozycji

Wartości referencyjne oraz wartości wag dla kryteriów ekonomicznych CI

Ckr [zł/m ³]
400

Rysunek 28. Widok okna służącego do modyfikacji wartości referencyjnych oraz wartości wag dla kryteriów ekonomicznych CI

Okno *Podgląd wprowadzonych receptur* służy do bieżącej kontroli wprowadzonych receptur (Rysunek 29). W tym kroku zweryfikujemy dodane składniki ich ilość oraz przynależność do danej receptury. Funkcja *Usuń recepturę* umożliwia usuwanie receptur w kolejności odwrotnej do kolejności ich wprowadzania. Każdorazowo podczas dodawania składników należy pamiętać o dodaniu *PB* – *produkcji betonu*. Jest to istotne, z uwagi na jej wpływ na wartość kryterium ekologicznego i ekonomicznego.

Modyfikuj parametry referencyjne

Podgląd wprowadzonych receptur

Receptura	Składnik	Ilość [kg/m ³]
RC5	F22: Kruszywo gąbro 2-8 mm	583
RC5	F23: Kruszywo gąbro 8-16 mm	583
RC5	F17: Piasek 0-2 mm	698
RC5	W: Woda	155
RC5	D12: Air LB	0.43
RC5	D13: Optima 295	2.16
RC5	D14: Plastyfikator 120LS	2.16
RC5	PB: Produkcja betonu	2383.75
RC6	C10: Cement CEM I 42,5 N- SR 3/NA	360
RC6	F22: Kruszywo gąbro 2-8 mm	546
RC6	F23: Kruszywo gąbro 8-16 mm	759
RC6	F17: Piasek 0-2 mm	645
RC6	W: Woda	155
RC6	D12: Air LB	0.43
RC6	D13: Optima 295	2.16
RC6	D14: Plastyfikator 120LS	2.16

Rysunek 29. Widok okna *Podgląd wprowadzonych receptur*

Wykonanie obliczeń jest ostatnim elementem, które ma miejsce po uruchomieniu polecenia *Dalej*. Wówczas uzyskamy okno w postaci tabel (Rysunek 30 i 31) zawierających zestawienie:

- obliczonych wartości śladu węglowego dla każdej mieszanki betonowej;
- obliczonych wartości zużycia surowców naturalnych dla każdej mieszanki betonowej;
- obliczonego kosztu bezpośredniego wyprodukowania 1 m³ każdej mieszanki betonowej;
- wprowadzonych wartości referencyjnych oraz wag kryteriów;
- wprowadzonych wartości badań technicznych betonu;
- obliczonych wyników kryterium ekologicznego EI, technicznego PI i ekonomicznego CI.

Wyznaczenie wskaźnika EIPICI wymaga wprowadzenia współczynników wagowych dla zdefiniowanych w metodzie EIPICI obszarów formułowania celu. Po wybraniu funkcji *Wprowadź/modyfikuj wartości wag dla EI, PI, CI* uruchomi się okno, w którym można pozostawić domyślnie przyjęte wagi lub je zmodyfikować.

Zestawienie wyników EI															
Receptura	EM [kgCO2/m3]	EW [kgCO2/m3]	RM [kg/m3]	RW [kg/m3]	W1	W2	EI								
RC1	382.519	490	1781.913	2000	0.5	0.5	0.836								
RC2	383.338	490	1798.966	2000	0.5	0.5	0.841								
RC3	393.142	490	1713.343	2000	0.5	0.5	0.83								
RC4	393.195	490	1713.77	2000	0.5	0.5	0.83								
RC5	391.861	490	1756.313	2000	0.5	0.5	0.839								
RC6	397.032	490	1860.125	2000	0.5	0.5	0.871								
Zestawienie wyników PI															
Receptura	fcm28r [MPa]	nw,r [%]	Δf/r [%]	Δm/r [%]	sr [mm]	W3	W4	W5	W6	fcm28 [MPa]	nw,m [%]	Δmf,m [%]	Δf,m [%]	sm [mm]	PI
RC1	37	5	20	5	50	0.3	0.2	0.3	0.2	57.8	4.2	0.30	-3.60	24.00	1.476
RC2	37	5	20	5	50	0.3	0.2	0.3	0.2	44.2	4.4	0.19	5.30	30.00	1.255
RC3	37	5	20	5	50	0.3	0.2	0.3	0.2	56.4	4.7	0.00	4.76	30.00	1.34
RC4	37	5	20	5	50	0.3	0.2	0.3	0.2	57.1	4.7	0.00	5.10	30.00	1.345
RC5	37	5	20	5	50	0.3	0.2	0.3	0.2	52.6	4.8	0.10	6.70	18.00	1.524
RC6	37	5	20	5	50	0.3	0.2	0.3	0.2	50.4	4.8	0.10	5.10	19.00	1.479
Zestawienie wyników CI															
Receptura	Ckr [zł/m3]				Ck [zł/m3]				CI						
RC1	400				504.671				1.262						
RC2	400				493.04				1.233						
RC3	400				476.927				1.193						
RC4	400				498.478				1.247						
RC5	400				517.447				1.294						
RC6	400				534.4				1.336						

Rysunek 30. Widok zestawienia wartości kryteriów EI, PI oraz CI

Wprowadź/zmień wagi dla EI, PI, CI

Przelicz wskaźnik EIPICI

Zestawienie wyników EIPICI

Receptura	Wartość kryterium EI	Wartość kryterium PI	Wartość kryterium CI	W7 [EI]	W8 [PI]	W9 [CI]	Wartość wsk. EIPICI
RC1	0.836	1.476	1.262	0.333	0.333	0.333	0.925
RC2	0.841	1.255	1.233	0.333	0.333	0.333	0.956
RC3	0.83	1.34	1.193	0.333	0.333	0.333	0.923
RC4	0.83	1.345	1.247	0.333	0.333	0.333	0.94
RC5	0.839	1.524	1.294	0.333	0.333	0.333	0.929
RC6	0.871	1.479	1.336	0.333	0.333	0.333	0.961

Wróć

Uporządkuj wyniki

Nowy projekt

Rysunek 31. Widok zestawienia wartości wskaźnika EIPICI

Opcja *Uporządkuj wyniki* służy do uporządkowania wartości wskaźnika EIPICI od najmniejszej do największej, słowem uporządkowania receptur od najbardziej do najmniej pożądanych (Rysunek 32-34).

Wprowadź/zmień wagi dla EI, PI, CI

Przelicz wskaźnik EIPICI

Zestawienie wyników EIPICI

Receptura	Wartość kryterium EI	Wartość kryterium PI	Wartość kryterium CI	W7 [EI]	W8 [PI]	W9 [CI]	Wartość wsk. EIPICI
RC3	0.83	1.34	1.193	0.333	0.333	0.333	0.923
RC1	0.836	1.476	1.262	0.333	0.333	0.333	0.925
RC5	0.839	1.524	1.294	0.333	0.333	0.333	0.929
RC4	0.83	1.345	1.247	0.333	0.333	0.333	0.94
RC2	0.841	1.255	1.233	0.333	0.333	0.333	0.956
RC6	0.871	1.479	1.336	0.333	0.333	0.333	0.961

Wróć

Uporządkuj wyniki

Nowy projekt

Rysunek 32. Hierarchizacja receptur RC1–RC2

Zestawienie wyników EIPICI							
Receptura	Wartość kryterium EI	Wartość kryterium PI	Wartość kryterium CI	W7 [EI]	W8 [PI]	W9 [CI]	Wartość wsk. EIPICI
DB-03	0.871	1.146	1.14	0.333	0.333	0.333	0.961
DB-02	0.87	1.204	1.212	0.333	0.333	0.333	0.97
DB-01	0.853	1.197	1.256	0.333	0.333	0.333	0.981

Rysunek 33. Hierarchizacja receptur DB-01 – DB-03

Zestawienie wyników EIPICI							
Receptura	Wartość kryterium EI	Wartość kryterium PI	Wartość kryterium CI	W8 [EI]	W9 [PI]	W10 [CI]	Wartość wsk. EIPICI
GB-03	0.935	2.505	1.296	0.333	0.333	0.333	0.876
GB-01	0.916	1.94	1.403	0.333	0.333	0.333	0.944
GB-02	0.936	1.423	1.334	0.333	0.333	0.333	0.99

Rysunek 34. Hierarchizacja receptur GB-01 – GB-03

Kalkulator EIPICI - kalkulator śladu węglowego, zużycia surowca i kosztu

Składnik receptury	Ilość [kg/m3]
C5: CEM I 42,5R	300
F3: Kruszywo granitowe 2-16 mm	1633
F17: Piasek 0-2 mm	356
W: Woda	150
D2: SAVEMIX - 4000	3
PB: Produkcja betonu	2442

Przelicz

Wyniki	
Ślad węglowy, EM (kgCO2/m3)	346.155
Zużycie surowca, RM (kg/m3)	1970.688
Koszt, CK (zł/m3)	458.064

Rysunek 35. Kalkulator śladu węglowego, zużycia surowca i kosztu

Dodatkową użytecznością programu jest opcja „szybkiego” wyznaczania wartości zużycia surowców naturalnych, śladu węglowego i kosztu produkcji mieszanki betonowej.

Składniki mieszanki betonowej należy dobrać z listy (Tabela 23). Po wpisaniu ilości i aktywacji opcji *Przelicz* otrzymamy wartości powyższych parametrów.

Opracowana metoda i narzędzie w postaci kalkulatora EIPICI pozwalają na rozwiązanie problemu decyzyjnego jakim jest świadomy wybór receptury mieszanki betonowej. Kalkulator jest narzędziem, którego główne zadanie to usprawnienie obliczeń przyjętych w metodzie EIPICI. Należy pamiętać, że to decydent określa kryteria decyzyjne, wartości referencyjne, wartości współczynników wagowych. Od tych założeń zależą wyniki końcowe oraz finalnie ich hierarchizacja.

Kalkulator EIPICI będzie działał poprawnie na każdym systemie operacyjnym, lecz po wcześniejszym zainstalowaniu JVM (Java Virtual Machine) w wersji 8 lub wyższej.

Rozdział 10

Podsumowanie i wnioski końcowe

Zmiany klimatyczne i degradacja środowiska naturalnego to dwa najpoważniejsze wyzwania, przed którymi obecnie stoimy. Zgodnie z ideą zrównoważonego rozwoju, działania podejmowane przez współczesne pokolenia, powinny gwarantować zachowanie równowagi przyrodniczej tak, aby nie ograniczyć możliwości zaspokojenia potrzeb przyszłych pokoleń. Niewątpliwie przemysł budowlany jest jednym z głównych elementów zrównoważonego rozwoju. Powyższe stało się przesłanką do podjęcia badań i analiz wraz z zaproponowaniem metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji EIPICI.

W rozprawie przeglądowi poddano wybrane zagadnienia wpisane w koncepcję zrównoważonego budownictwa mające istotne znaczenie w projektowaniu i produkcji betonu. Przedstawiono i usystematyzowano podejmowane działania mające na celu ograniczenie nadmiernego wpływu przemysłu betonowego na jakość środowiska i klimatu. W aspekcie produkcji betonu w szczególności rozważaniom poddano dostępne sposoby redukcji emisji dwutlenku węgla do atmosfery oraz racjonalne gospodarowanie surowcami naturalnymi. Wskazano, iż znakiem szczególnym technologii betonu XXI wieku jest dążenie do stosowania materiałów odpadowych z różnych gałęzi przemysłu i gospodarki oraz z recyklingu.

W dysertacji przywołano przepisy prawa stanowiące proklamacyjne wymagania, którym musi sprostać przemysł budowlany. Kluczem do tego jest odpowiednie oraz świadome dobranie narzędzi pozwalających na określenie wpływu przemysłu budowlanego na środowisko i klimat. Właściwym „parametrem” jest ślad węglowy. W pracy do oceny „ekologiczności” betonu wyznaczono ślady węglowe mieszanek betonowych oraz wartość zużycia surowców naturalnych.

Przeprowadzona analiza literatury przedmiotu, a także własna wiedza i doświadczenie autorki umożliwiły opracowanie metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji – EIPICI – opartej na aparacie matematycznym, który ze względu na zdefiniowane obszary formułowania celu: ekologiczny, ekonomiczny i techniczny, umożliwi wybór optymalnej receptury mieszanki betonowej. Optymalny wariant, czyli taki, który w największym stopniu odpowiada wymaganiom decydenta. Metoda, oprócz aspektów ekologicznych, uwzględnia właściwości techniczne betonu oraz koszt bezpośredni jego produkcji. Autorka metody, dla każdego obszaru formułowania celu, zaproponował zbiór kryteriów decyzyjnych. Na potrzeby utylitarne metody opracowano zbiór 27 receptur mieszanek betonowych, określonych

w metodzie jako warianty decyzyjne. Dla każdego wariantu przygotowano zbiory informacji, które umożliwiły wykonanie obliczeń zgodnie z przyjętym w metodzie EIPICI aparatem matematycznym. Obliczenia wykonano również na rzeczywistych przykładach z budownictwa infrastrukturalnego.

Z praktycznego punktu widzenia najtrudniejszą kwestią metody jest ustalenie i przyporządkowanie wag kryteriom decyzyjnym. W rozprawie zaproponowano wartości wag kryteriów decyzyjnych w zależności od klasy ekspozycji betonu. Opracowana metoda czynnie włącza decydenta w proces szeregowania wariantów decyzyjnych. Jest to możliwe, nie tylko poprzez zmianę wag kryteriów decyzyjnych, ale również poprzez możliwość modyfikacji wszystkich wartości określonych jako referencyjne.

W ramach rozprawy opracowano aplikację dedykowaną do wykonywania obliczeń za pomocą metody EIPICI. Aplikacja, według autorki, jest prosta i przejrzysta w obsłudze.

W rozpatrywanym problemie dostrzega się kilka kwestii otwartych, które powinny być rozważone, celem udoskonalenia obliczeń. Są to między innymi następujące zagadnienia:

- przyjęte w rozprawie wartości śladów węglowych zostały zaczerpnięte z literatury przedmiotu. Pożądane dla udoskonalenia obliczeń byłoby zaczerpnięcie informacji bezpośrednio od producentów poszczególnych składników mieszanek betonowych. Autorka podjęła taką próbę, lecz na dzień sporządzania rozprawy, większość producentów deklarowała, iż jest w takcie ich wyznaczania;
- podobnie – ilość surowca niezbędną do wyprodukowania 1 m³ składnika mieszanki betonowej – zaczerpnięto z literatury przedmiotu. Pożądane, w celu zwiększenia wiarygodności obliczeń, byłoby pozyskanie informacji bezpośrednio od producentów składników mieszanek betonowych;
- parametr rzadkości surowca ustalono na podstawie informacji dostępnych w literaturze oraz posiadanej wiedzy, jako wartość średnią. Zasadnym, byłoby zróżnicowanie parametru w zależności od obszaru geograficznego;
- koszt bezpośredni składników mieszanek betonowych ustalono na podstawie przeprowadzonego ofertowania. Zasadnym, byłoby zróżnicowanie kosztu w zależności zamawianej ilości (hurt/detal) oraz od obszaru geograficznego.

Powyższe kwestie będą przedmiotem dalszych działań nad udoskonalaniem metody wielokrotnego wspomaganie decyzji EIPICI i świadczą o potencjale rozwojowym zagadnień rozwiązywanych w przedłożonej rozprawie.

Zaproponowana w rozprawie metoda wspomagania decyzji, stanowi, według autorki dobre narzędzie, które umożliwi świadomy wybór receptury mieszanki betonowej. Przedstawiona metodyka powinna wspomóc decydenta w podjęciu ekologicznie odpowiedzialnej i zasobowo oszczędnej decyzji, co było celem pracy. Pamiętać należy o tym, że ostateczny wybór należy do decydenta, a opisana w rozprawie metoda ma jedynie charakter doradczy. Zaproponowana aplikacja jest stosunkowo prosta w obsłudze, czytelna, a przede wszystkim wygodna, by móc wspierać decydenta w podjęciu decyzji.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/1119 z dnia 30 czerwca 2021 r. *w sprawie ustanowienia ram na potrzeby osiągnięcia neutralności klimatycznej i zmiany rozporządzeń* (WE) nr 401/2009 i (UE) 2018/1999 (Europejskie prawo o klimacie) (Dz. U. UE. L. 2021.243.1).
- [2] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. *Prawo ochrony środowiska* (Dz. U. 2022.2566. t.j.).
- [3] Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej z dn. 2 kwietnia 1997 r. (Dz. U. 1997.78.483).
- [4] 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).
- [5] Ustawa z dn. 7 lipca 1994 r. *Prawo budowlane* (Dz. U. 2021.2351. t.j.).
- [6] S. Belniak, M. Głuszak, M. Zięba, *Budownictwo ekologiczne aspekty ekonomiczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013.
- [7] M. Major, I. Major, *Konstrukcje zespolone w budownictwie zrównoważonym*, Budownictwo o Zoptimalizowanym Potencjale Energetycznym, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2015, 2(16), 51-56.
- [8] Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiego Komitetu Ekonomiczno – społecznego i Komitetu Regionów Empty „Gotowi na 55”: *osiągnięcie unijnego celu klimatycznego na 2030 r. w drodze do neutralności*, Bruksela, 2021.
- [9] W.E. Rees, *Ecological Footprints and appropriated carrying capacity: what urban economies leaves out*, Environment and Urbanization, 1992, 4(2), 121-130.
- [10] A. Hasanbeigi, L. Prince, E. Lin, *Emerging energy – efficiency and CO₂ emission – reduction technologies for cement and concrete production: A technical review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16, 8, 6220 – 6238.
- [11] <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>.
- [12] PN-EN 197-1:2012 *Cement część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*.
- [13] L. Barcelo, J. Kline, G. Walenta, E. Gartner, *Cement and carbon emission*, Material and Structures, 2014, 47, 1055 – 1065.
- [14] E. Gartner, *Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements*. *Cement and Concrete Research*, 2014, 34(9), 1489–1498.
- [15] C. Müller, *Environmental and technical aspects of the application of blended cements in concrete*. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 2006, 5(3), 43–72.

- [16] D. Dziuk, Z. Giergiczny, A. Garbacik, *Calcareous fly ash as a main constituent of common cements*. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, 2013, 12(1), 57–69.
- [17] E. Mokrzycki, A. Uliasz-Bocheńczyk, *Alternative fuels for the cement industry*, Applied Energy, 2003, 74(1–2), 95–100.
- [18] F. Li, W. Zhang, *Combustion of sewage sludge as alternative fuel for cement industry*. Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition, 2011, 26(3), 556–560.
- [19] A. Rahman, M. G. Rasul, M. M. K. Khan, S. Sharma, *Impact of Alternative Fuels on the Cement Manufacturing Plant Performance: An Overview*. Procedia Engineering, 2013, 56, 393–400.
- [20] T. Baran, *Wykorzystanie odpadów i ubocznych produktów przemysłowych a możliwość zmniejszenia emisji CO₂ w przemyśle cementowym – badania przemysłowe*, Cement Wapno Beton, 2021, 25(3), 169-184.
- [21] PN-EN 206+A2:2021 *Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność*.
- [22] L. Czarnecki, H. Justnes, *Zrównoważony, trwały beton*, Cement Wapno Beton, 2012, 6, 341-362.
- [23] Z. Giergiczny, *Flay Ash and slag*, Cement and Concreat Research, 2019.
- [24] B. Zając, J. Gołębiewska, *Możliwość redukcji CO₂ przez zastosowanie betonu zrównoważonego i kruszywa recyklingowego*, Inż. Ap. Chem., 2014, 51(5), 261-265.
- [25] L. Runkiewicz, T. Błaszczynski, *Ekologia w budownictwie*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2014.
- [26] J.J. Chen, W. W. S. Fung, P. L. Ng, A. K. H. Kwan, *Adding fillers to reduce embodied carbon and embodied energy of concrete*. In Twelfth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability, Prague., Michigan: American Concrete Institute, 2012, 91-107.
- [27] W. Kubissa, T. Simon, R. Jaskulski, R. Reiterman, M. Supera, *Ecological High Performance Concrete*, Procedia Engineering, 2017, 172, 595–603.
- [28] W. Kubissa, R. Jaskulski, P. Reiterman, *Ecological Concrete Based on Blast-Furnace Cement with Incorporated Coarse Recycled Concrete Aggregate and Fly Ash Addition*. Journal of Renewable Materials, 2017, 5(1), 53–61.
- [29] M. S. Muhd Norhasri, M.S. Hamidah, A. Mohd Fadzil, O. Megawati, *Inclusion of nano metakaolin as additive in ultra high performance concrete (UHPC)*. Construction and Building Materials, 2016, 127, 167–175.

- [30] Z. Jamróży, *Beton i jego technologie*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 2015.
- [31] W. Godlewska (Dobaczewska), W. Kubissa, K. Prałat, P. Tomczuk, *Influence of activation of microsphere and latex base addition on mechanical properties of concrete*, MODERN BUILDING MATERIALS, STRUCTURES AND TECHNIQUES MBMST 2019, 2019, 40-46.
- [32] Z. Giergiczny, *Właściwości popiołu lotnego, a trwałość betonu*, Budownictwo, Technologie, Architektura, 2007, 44-48.
- [33] Z. Giergiczny, M. Gawlicki, *Popiół lotny jako aktywny składnik cementów i dodatek mineralny do betonu*, Materiały Konferencji Dni Betonu, Wisła, 2004.
- [34] W. Krudowski, *Chemia cementu i betonu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010.
- [35] J. Wawrzeńczyk, *Wpływ dodatku popiołu lotnego na mrozoodporność betonu*, Materiały konferencyjne, Polski Cement, Dni Betonu 2002.
- [36] J. Halbiniak, B. Langier, *Frost resistance of concrete ash and characterization of air voids*, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej seria Budownictwo 2014, 20(1).
- [37] W. Kubissa, B. Pacewska, I. Wilińska, *Comparative investigations of some properties related to durability of cement concretes containing different fly ashes*, Advanced Materials Research, 2014, 1054 (1), 154-161.
- [38] R. Rajamma, R. Ball, L. Tarelho, G. Allen, J. Labrincha, V. Ferreira, *Charakterisation and use of biomass fly ash in cement – base materials*, Journal of Hazardous Materials, 172, 1049-1060.
- [39] M. Gawlicki, W. Wans, *Popioły lotne z kotłów fluidalnych jako składniki popiołowo – cementowych spoiw drogowych*, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, 2011, 8, 4, 69-78.
- [40] M. Gawlicki, W. Wans, *Właściwości fizykochemiczne popiołów lotnych z kotłów fluidalnych i ich wpływ na wybrane cechy użytkowe mieszanek drogowych*, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, 2013, 12, 6, 18-27.
- [41] I. Wilińska, B. Pacewska, *Influence of selected activating methods on hydration processes of mixtures containing high and very high amount of fly ash*, Jurnal of Thermal Analysis Calorimerty, 2018, 133, 823–843.
- [42] J. Feng, S. Liu, Z. Wang, *Effects of ultrafine fly ash on the properties of highstrength concrete*, Jurnal of Thermal Analysis Calorimerty, 2015, 121, 1213–1223.
- [43] D.M. Gil, G.L. Golewski, *Analiza odporności na pękanie betonów z dodatkiem popiołów lotnych i mikrokrzemionki*, Materiały Budowlane, 2016, 11, 116-117.

- [44] D.M. Gil, G.L. Golewski, *Ocena zastosowania popiołów lotnych i mikrokrzemionki w betonie*, Przegląd Budowlany, 2019, 10, 90, 142-145.
- [45] PN-EN 13263-1+A1:2010 *Pył krzemionkowy do betonu – Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności*.
- [46] E. Giergiczny, K. Góralna, *Mielony granulowany żużel wielkopiecowy – dodatek do betonu typu II*, Budownictwo, Technologie, Architektura, 2008, 1, 56-59.
- [47] PN-EN 15167-1:2007 *Mielony granulowany żużel wielkopiecowy do stosowania w betonie, zaprawie i zaczynie – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*.
- [48] R. Siddique, J. Klaus, *Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review*, Applied Clay Science, 2009, 43, 3-4, 392-400.
- [49] PN-EN 12620+A1:2010 *Kruszywa do betonu*.
- [50] M. Babiak, T. Błaszczński, A. Ratajczak, S. Węglewski, *Przydatność kruszyw z recyklingu do produkcji betonu*, Przegląd budowlany, 2017, 10, 60-63.
- [51] J. Czaja, J. Jaskowska-Lemańska, *Wpływ wybranych zanieczyszczeń kruszywa z recyklingu na zmianę parametrów betonu*, Inżynieria Środowiska – Młodym Okiem, 2015, 17, 45-67.
- [52] R. Jaskulski, W. Kubissa, M. Supera, P. Koteš, M. Brodňan, *The influence of RCA addition on selected parameters of concrete*, MATEC Web. Conf., 2018, 196.
- [53] P. Rutkowski, B. Sadowska-Buraczewska, *Betony z użyciem kruszywa recyklingowego wysokiej wytrzymałości – dziedzina zrównoważonego rozwoju*, Rocznik Ochrona Środowiska, 2013, 15, 2175-2184.
- [54] M. Surendar, G. Benlah Gnana Ananthi, M. Sharaniya, M.S. Deepak, T.V. Soundarya, *Mechanical properties of concrete with recycled aggregate and M-sand*, materials Today proceedings 44, 2021.
- [55] E. Pawluczuk, K. Kozak, *Wpływ stosowania drobnego kruszywa z recyklingu na wybrane właściwości kompozytów cementowych*, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2016, 7, 39-45.
- [56] K. Rahal, *Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate*. Building and Environment, 2007, 42(1), 407–415.
- [57] A. Katz, *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*, Cement and Cement Research, 2003, 33, 5, 707-711.
- [58] W. Kubissa, R. Jaskulski, P. Reiterman, *Ecological concrete based on blast-furnace cement with incorporated coarse recycled concrete aggregate and fly ash addition*, Jurnal of Renewable Materials, 2017, 5(1), 53-61.

- [59] M. Swirydziuk, *Wpływ temperatury i czasu prażenia na zawartość zaprawy w kruszywie recyklingowym*, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2014, 5, 119-123.
- [60] B. Zjác, J. Gołębiowska, *Ewolucja technologii recyklingu betonu*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2010, 49, 5, 134-135.
- [61] B.B. Mukharjee, S.V. Barai, *Influence of Nano-Silica on the properties of re-cycled aggregate concrete*, Construction and Building Materials, 2014, 55, 29-37.
- [62] W. Kubissa, R. Jaskulski, A. Koper, M. Supera, *High performance concrete with SCM and recycled aggregate*, Key Eng. Mater, 2015, 677, 233-240.
- [63] W. Kubissa, R. Jaskulski, T. Simon, *Surface blast-cleaning waste as a replacement of fine aggregate in concrete*, Architecture Civil Engineering Environmental, 2017, 10, 3, 89-94.
- [64] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. 2022.699 t.j. z dnia 29.03.2022).
- [65] PN-EN 1990:2004 Eurokod – Podstawy projektowania konstrukcji.
- [66] A. Ajdukiewicz, *Aspekty trwałości i wpływu na środowisko w projektowaniu konstrukcji betonowych*, Przegląd Budowlany, 2011, 2, 20-29.
- [67] L. Czarnecki, *Beton: uszkodzenia i naprawy*, Konferencja „Dni betonu 2021”.
- [68] L. Czarnecki, P. Łukowski, A. Garbacz, *Naprawa i ochrona konstrukcji z betonu. Komentarz do PN-EN 1540*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2016.
- [69] PN-B-06265:2022-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2 2021-08.
- [70] W. Kubissa, W. Dobaczewska, *Diagnostics of air permeability of concrete in abutments of the viaduct in Płock*, Roads and Bridges, Drogi i Mosty, 2021, 20, 157-171.
- [71] M. A. Glinicki, D. Józwiak-Niedźwiedzka, K. Gibas, M. Dąbrowski, *Influence of blended cements with calcareous fly ash on chloride ion migration and carbonation resistance of concrete for durable structures*. Materials, 2016, 9(1), 1-15.
- [72] L. Czarnecki, P. Woyciechowski, *Concrete carbonation as a limited process and its relevance to concrete cover thickness*. ACI Materials Journal, 2012, 109, 3, 275-282.
- [73] P. Woyciechowski, *Karbonatyzacja betonu, trwałość vs sekwestracja CO₂*, Budownictwo, Technologie, Architektura, 2021, 2, 56-63.
- [74] V. Baroghel-Bouny, *Durability indicators: relevant tools for performance-based evaluation and multi-level prediction or RC durability*, International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, 2007, 3-30.

- [75] J. Jasiczak, A. Wdowska, T. Rudnicki, *Betony ultrawysokowartościowe*, Stowarzyszenie Producentów Cementów, Kraków, 2008.
- [76] A. Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz, *Betonowe konstrukcje sprężone*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2001, 510.
- [77] A. Densiewicz, *Betony z proszków reaktywnych i ich zastosowanie w konstrukcjach zespolonych*, Przegląd budowlany, 2014, 11, 18-23.
- [78] S. Grzeszczyk, A. Matuszek - Chmurowska, *Badania betonów z proszków reaktywnych*, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 2018, 67, 1, 127-740.
- [79] T. Zdeb, J. Śliwiński, *The influence of selected material and technological factors on mechanical properties and microstructure of reactive powder concrete (RPC)*, Archives of Civil Engineering, 2011, 57, 2, 227-246.
- [80] L. Czarnecki, *Betony polimerowe*, Cement Wapno Beton, 2010, 2, 63-85.
- [81] A. Garbacz, P. Woyciechowski, P. Łukowski, B. Jaworska, J.J. Sokołowska, *Zrównoważone betony polimerowe i polimerowo – cementowe*, Inżynieria i Budownictwo, 2021, 77, 7, 324-327.
- [82] J. Smoleń, B. Degirmenci, B.D. Tekeli, B. Nowicki, *Wykorzystanie odpadu szkła samochodowego do produkcji epoksydowego polimerobetonu*, Cement Wapno Beton, 2021, 26(5), 402-412.
- [83] Z. Giergiczny, *Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2006.
- [84] K. Mehta, *High – Performance, High – Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development*, University of California, USA, 2005.
- [85] W. Pichór, *Betony z dodatkiem włókien, Beton, technologie i metody badań*. Praca zbiorowa, redakcja naukowa prof. Jan Deja, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2020.
- [86] A. Michalak, P. Kupisz, *Ocena mrozoodporności betonu z dodatkiem włókien polimerowych*, Przegląd Budowlany, 2020, 5.
- [87] A. Michalak, F. Chyliński, P. Kupisz, Ł. Zacharski, W. Pichór, *Wpływ włókien stalowych z recyklingu opon na cechy wytrzymałościowe betonu*, Inżynieria i budownictwo, 2022, 9-10, 397-400.
- [88] <https://plgbc.org.pl/zrownowazone-budownictwo/certyfikacje-wielokryterialne/>
- [89] <https://bregroup.com/products/breem/>

- [90] M. Wojciechowski, *Modelowanie parametrów technicznych proekologicznego budynku biurowego*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii, Płock, 2020.
- [91] <https://www.usgbc.org/leed/>
- [92] <https://www.wellcertified.com/>
- [93] <https://www.dgnb-system.de/en/>
- [94] Certyfikacja zielonych budynków w liczbach – *Raport 2022* - Polskie Stowarzyszenie Budownictwa Ekologicznego, Warszawa, 2022.
- [95] Certyfikacja zielonych budynków w liczbach – *Raport 2021* - Polskie Stowarzyszenie Budownictwa Ekologicznego, Warszawa, 2021.
- [96] Certyfikacja zielonych budynków w liczbach – *Raport 2020* - Polskie Stowarzyszenie Budownictwa Ekologicznego, Warszawa, 2020.
- [97] Certyfikacja zielonych budynków w liczbach – *Raport 2019* - Polskie Stowarzyszenie Budownictwa Ekologicznego, Warszawa, 2019.
- [98] T. Trzaskalik, *Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Metody i zastosowanie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 2014.
- [99] T.L. Saaty, L.G. Vargas L.G., *Decision Making with the Analytic Network Process*, 1980, Springer, Boston.
- [100] D.Y. Chang, *Applications of the Extent Analysis Method on Fuzzy AHP*, European Journal of Operational Research, 1996, 95 (3).
- [101] F.A. Lootsma, *The REMBRANDT System for Multi-criteria Decision Analysis via Pairwise Comparisons or Direct Rating*, Report 92-05, Faculty of Technical Mathematics and Informatics, Delft University of Technology, Delft, 1992.
- [102] F.A. Lootsma, *Scale Sensitivity in the Multiplicative AHP and SMART*, Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 1993, 2.
- [103] F.A. Lootsma, T.C.A. Mensch, F.A. Vos, *Multi-criteria Analysis and Budget Reallocation in Long-term Research Planning*, European Journal of Operational Research, 1990, 47.
- [104] T.L. Saaty, *Fundamentals of the Analytic Network Process*, ISAHP, Kobe, 1999.
- [105] T.L. Saaty, *Decision making with dependence and feedback*, The analytic network process, RWS Publications, 4922 Ellsworth Ave., Pittsburgh, 1996.
- [106] T.L. Saaty, L.G. Vargas, *Decision Making with the Analytic Network Process*, Springer, Boston, 2006.

- [107] C.W. Churchman, R. L. Ackoff, *An Approximate Measure of Value*, Journal of Operation Research Society of America, 1954, 2(1).
- [108] G.H. Tzeng, J. J. Huang, *Multiple Attribute Decision Making. Methods and Applications*, CRC Press, London, 2011.
- [109] W. Edwards, F. H. Barron, *SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Measurement*, Organizational Behavior and Human Decision Process, 1994, 60.
- [110] C.L. Hwang, K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications: A State of the Art Survey*, Springer-Verlag, New York, 1981.
- [111] G.R. Jahanshahloo, F. Lotfi Hosseinzadeh, M. Izadikhah, *Extension of the TOPSIS Method for Decision-making Problems with Fuzzy Data*, Applied Mathematics and Computation, 185, 2006.
- [112] S. Opricovic, *Multicriteria Optimization of Civil Engineering System*, Technical Report, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 1998.
- [113] E. Konarzewska-Gubała, *Bipolar: Multiple Criteria Decision Aid Using Bipolar Reference System*, LAMSADE, Cashier et Documents, 1989, 56.
- [114] E. Konarzewska-Gubała, *Wspomaganie decyzji wielokryterialnych: system Bipolar*, Prace naukowe Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu, 1991, 551.
- [115] D. Gródecka, *Wielokryterialne wspomaganie wyboru projektów europejskich*, TNOiK „Dom Organizatora” Toruń, 2009.
- [116] B. Roy, D. Bouyssou, *Aide Multicritere a la Decision: Methodes at Cas*, Economica, Paris, 1993.
- [117] J.P. Brans, *L'ingenierie de la decision; Elaboration d'instruments d'aide a la decision. La method PROMETHEE*, w: *L'aide a la decision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir*, R.Nadeau, M. Landry, Presses de l'Universite Laval, Quebec, Canada, 1982.
- [118] J.P. Brans, B. Mareschal, *The PROMCALC & GAIA Decision-support System for Multicriteria Decision Aid*, Decision Support Systems, 1994, 12.
- [119] I.O. Larichev, H.M. Moshkovich, *ZAPROS-LM – A Method and System for Ordering Multiattribute Alternatives*, European Journal of Operational Research, 82, 1995.
- [120] I.O. Larichev, H.M. Moshkovich, *Verbal Decision Analysis for Unstructured Problems*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.
- [121] C.A. Bana e Costa, J.C. Vansnick, *Sur la quantification des jugements de valeur: L'approche MACBETH*, Cahiers du LAMSADE, 117, University Paris-Dauphine, Paris, 1993.

- [122] C.A. Bana e Costa, J.C. Vansnick, *Applications of the MACBETH Approach in The Framework of The Additive-aggregation Model*, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6, 1997b.
- [123] A. Guitouni, J.M. Martel, *Tentative guidelines to help choosing on appropriate MCDA Method*, *European Journal of Operational Research*, 1998, 109, 501-521.
- [124] P. Tomczak, *Badanie wpływu dodatku mikrosfer i polimeru na wybrane właściwości betonu*, Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii, Płock, 2019.
- [125] M. Czarnecki, *Badanie wpływu rodzaju kruszywa na wybrane właściwości betonu*, Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii, Płock, 2019.
- [126] PN-EN 12390-3:2019-07 *Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań*.
- [127] PN-EN 12390-6:2011 *Badania betonu - Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań*.
- [128] W. Kubissa, R. Jaskulski, *Measuring and Time Variability of The Sorptivity of Concrete*, *Procedia Engineering*, 2013, 57, 634-641.
- [129] PN-B-06250:1988 *Beton zwykły*.
- [130] PN-EN 14157:2017-11 *Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczenie odporności na ścieranie*.
- [131] PN-EN-06265:2022-08 *Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08*.
- [132] W. Kubissa, R. Jaskulski, J. Chen, W. Dobaczewska (Godlewska), P.L. NG, P. Reiterman, *EVALUATION OF ECOLOGICAL CONCRETE USING MULTI-CRITERIA ECOLOGICAL INDEX AND PERFORMANCE INDEX APPROACH*, *Architecture Civil Engineering Environment*, 2019, 1, 97-107.
- [133] A. Garbacz, P. Urbańska, *Ślad węglowy betonu*, *Budownictwo, Technologie, Architektura*, 2021, 4, 56-61.
- [134] W. Kozioł, P. Czaja, *Rock Mining in Poland – Present Situation, Perspectives*, *Górnictwo i Geologia*, 2010, 5(3), 41-58.
- [135] W. Mizerski, *Geologia dynamiczna*, wydanie trzecie zmienione, PWN S.A., Warszawa, 2015.
- [136] W. Kozioł, I. Baic, *Kruszywa naturalne w Polsce*, *Przegląd Górniczy*, 2018, 74, 11, 1-8.

- [137] *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.
- [138] PN-EN 12390-8:2019-08 *Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem*.
- [139] PN-EN 12390-5:2019-08 *Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań*.
- [140] PKN-CEN/TS 12390-9:2017-07 *Badania betonu - Część 9: Oznaczanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odładzających - Złuszczenie*.

Spis tabel

Tabela 1	Orientacyjne projektowane okresy użytkowania według [65]
Tabela 2	Klasy ekspozycji betonu według [21] i [69]
Tabela 3	Wartości graniczne dotyczące klas ekspozycji w przypadku agresji gruntu naturalnego i wody gruntowej [21]
Tabela 4	Liczba/powierzchnia użytkowa certyfikowanych budynków w Polsce [94-97]
Tabela 5	Wykaz składników receptur mieszanek betonowych
Tabela 6	Receptury mieszanek betonowych
Tabela 7	Zawartość procentowa związków chemicznych ścierniwa
Tabela 8	Skład chemiczny mikrosfery szarej
Tabela 9	Wykaz badań własnych betonu
Tabela 10	Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania
Tabela 11	Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie po 90 dniach dojrzewania
Tabela 12	Wyniki badania wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu
Tabela 13	Wyniki badania sorpcyjności
Tabela 14	Wyniki badania mrozoodporności – średni spadek wytrzymałości
Tabela 15	Wyniki badania mrozoodporności – średni ubytek masy
Tabela 16	Wyniki badania mrozoodporności – pęknięcia powierzchni próbek
Tabela 17	Wyniki badania nasiąkliwości
Tabela 18	Wyniki badania głębokości wnikania chlorków
Tabela 19	Wyniki badania ścieralności betonu na tarczy Boehmego
Tabela 20	Ślad węglowy oraz wartość zużycia surowców naturalnych wyznaczone dla receptur CC1-CC9, M1C, M2C, M7C i CF1-CF9
Tabela 21	Wartości kryteriów EI, 1/PI oraz wskaźnika GEPI dla receptur CC1-CC9, M1C, M2C, M7C, CF1-CF9
Tabela 22	Zbiór informacji o składnikach mieszanek betonowych
Tabela 23	Koszt bezpośredni 1m ³ mieszanek betonowych CC1-CC9, M1C, M2C, M7C, CF1-CF9

Tabela 24	Wartości kryteriów EI, PI, CI oraz wskaźnika EIPICI dla receptur CC1-CC9, M1C, M2C, M7C, CF1-CF9
Tabela 25	Propozycja nadania wag kryteriom w zależności od klasy ekspozycji
Tabela 26	Wartości kryteriów EI, 1/PI, CI oraz wskaźnika EIPICI dla receptur CC1-CC9, M1C, M2C, M7C, CF1-CF9
Tabela 27	Wartości wskaźnika EIPICI w zależności od przyjętych wag
Tabela 28	Receptury mieszanek betonowych RC1-RC6
Tabela 29	Ślad węglowy oraz wartość zużycia surowców naturalnych wyznaczone dla receptur RC1-RC6
Tabela 30	Wyniki badań technicznych betonu RC1-RC6
Tabela 31	Koszt bezpośredni 1m ³ mieszanek betonowych RC1-RC6
Tabela 32	Wartości kryteriów EI, 1/PI, CI oraz wskaźnika EIPICI dla receptur RC1-RC6
Tabela 33	Receptury mieszanki betonowej – dolna warstwa betonu nawierzchniowego
Tabela 34	Receptury mieszanki betonowej – górna warstwa betonu nawierzchniowego
Tabela 35	Ślad węglowy oraz wartość zużycia surowców naturalnych wyznaczone dla receptur DB-01, DB-02, DB-03
Tabela 36	Wyniki badań technicznych betonu przeznaczonego do wykonania dolnej warstwy betonu nawierzchniowego
Tabela 37	Koszt bezpośredni 1m ³ mieszanek betonowych DB-01, DB-02, DB-03
Tabela 38	Wartości kryteriów EI, 1/PI, CI oraz wskaźnika EIPICI dla wariantów DB-01, DB-02, DB-03
Tabela 39	Ślad węglowy oraz wartość zużycia surowców naturalnych wyznaczone dla receptur GB-01, GB-02, GB-03
Tabela 40	Wyniki badań technicznych betonu przeznaczonego do wykonania górnej warstwy betonu nawierzchniowego
Tabela 41	Koszt bezpośredni 1m ³ mieszanek betonowych GB-01, GB-02, GB-03
Tabela 42	Wartości kryteriów EI, 1/PI, CI oraz wskaźnika EIPICI dla wariantów GB-01, GB-02, GB-03

Spis rysunków

- Rysunek 1 Ranking 10 największych emitentów CO₂ pochodzącego z przemysłu cementowego w 2020 r. [11]
- Rysunek 2 Dodatki do betonu według [21]
- Rysunek 3 Podział branżowy certyfikowanych budynków w Polsce (marzec 2022) [94]
- Rysunek 4 Główne elementy dysertacji
- Rysunek 5 Badanie sorpcyjności betonu [124]
- Rysunek 6 Zdjęcie próbek po badaniu głębokości wnikania chlorków [125]
- Rysunek 7 Badanie ścieralności na tarczy Boehmego [124]
- Rysunek 8 Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne w metodzie EIPI [132]
- Rysunek 9 Schemat algorytmu metody EIPI
- Rysunek 10 Wykres obrazujący zależność wartości kryteriów EI i 1/PI dla receptur CC1-CC9, M1C, M2C, M7C, CF1-CF9
- Rysunek 11 Schemat metody wspomagania decyzji EIPICI
- Rysunek 12 Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne dla wariantów CC1-CC9, M1C, M2C, M7C, CF1-CF9
- Rysunek 13 Schemat algorytmu metody EIPICI
- Rysunek 14 Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne wariantów CC1-CC9, M1C, M2C, M7C, CF1-CF9
- Rysunek 15 Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne receptur RC1-RC6
- Rysunek 16 Wykres obrazujący zależność wartości kryteriów EI, 1/PI i CI dla receptur RC1-RC6
- Rysunek 17 Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne wariantów DB-01 – DB-03
- Rysunek 18 Wykres obrazujący zależność wartości kryteriów EI, 1/PI oraz CI dla receptur DB-01 – DB-03
- Rysunek 19 Obszary formułowania celu oraz odpowiadające im kryteria decyzyjne dla wariantów GB-01 – GB-03

- Rysunek 20 Wykres obrazujący zależność wartości kryteriów EI, 1/PI oraz CI dla receptur GB-01 – GB-03
- Rysunek 21 Widok okna dodawania składników mieszanki betonowej
- Rysunek 22 Widok okna *Podgląd wprowadzonych składników*
- Rysunek 23 Widok okna wyboru receptury mieszanki betonowej wprowadzania ilości składników
- Rysunek 24 Widok okna służącego do wprowadzania wyników badań technicznych betonu
- Rysunek 25 Widok okna służącego do modyfikacji wartości referencyjnych oraz wartości wag dla kryteriów ekologicznych EI
- Rysunek 26 Widok okna służącego do modyfikacji wartości referencyjnych oraz wartości wag dla kryteriów technicznych PI
- Rysunek 27 Widok okna służącego do modyfikacji wartości referencyjnych oraz wartości wag dla kryteriów technicznych PI wraz z możliwością wyboru klasy ekspozycji
- Rysunek 28 Widok okna służącego do modyfikacji wartości referencyjnych oraz wartości wag dla kryteriów ekonomicznych CI
- Rysunek 29 Widok okna *Podgląd wprowadzonych receptur*
- Rysunek 30 Widok zestawienia wartości kryteriów EI, PI i CI
- Rysunek 31 Widok zestawienia wartości wskaźnika EIPICI
- Rysunek 32 Hierarchizacja receptur RC1-RC2
- Rysunek 33 Hierarchizacja receptur DB-01 – DB-03
- Rysunek 34 Hierarchizacja receptur GB-01 – GB-03
- Rysunek 35 Kalkulator śladu węglowego, zużycia surowca i kosztu

Załącznik 1 – szczegółowe wyniki badań własnych

Tabela 1. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania – seria CC1-CC9

	RECEPTURA								
Nr próbki	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8	CC9
1	53,2	63,6	45,1	48,5	63,2	65,2	47,2	61,9	44,1
2	55,5	62,8	44,8	50,2	60,3	65,1	44,0	63,1	44,2
3	55,6	65,3	44,5	53,1	63,6	63,1	47,4	62,8	46,5
4	54,9	64,5	43,3	47,9	63,1	62,7	45,7	65,4	44,1
5	55,5	63,0	47,2	53,1	61,6	63,0	42,2	65,5	47,8
f_{cm28} [MPa]	54,9	63,8	45,0	50,6	62,4	63,8	45,3	63,7	45,5
Odch. Stan.	1,02	1,08	1,43	2,51	1,40	1,26	2,19	1,64	1,72
Wsp. Zmienn.	1,86	1,69	3,18	4,96	2,24	1,97	4,83	2,57	3,78

Tabela 2. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania – seria M1C-M9C

	RECEPTURA								
Nr próbki	M1C	M2C	M3C	M4C	M5C	M6C	M7C	M8C	M9C
1	52,8	48,7	44,3	52,6	49,5	45,3	40,0	40,02	42,7
2	50,3	46,8	45,3	52,7	47,8	43,0	40,0	39,98	45,9
3	53,5	47,7	44,0	52,5	48,7	43,9	40,3	40,26	43,6
4	52,2	46,4	44,6	54,5	46,8	43,0	41,8	41,84	44,2
5	58,6	47,5	44,4	52,4	47,1	43,3	40,7	40,68	41,9
f_{cm28} [MPa]	53,5	47,4	44,5	52,9	48,0	43,7	40,9	40,6	43,7
Odch. Stan.	3,10	0,89	0,49	0,89	1,12	0,97	0,75	0,77	1,53
Wsp. Zmienn.	5,79	1,88	1,10	1,68	2,33	2,22	1,83	1,90	3,50

Tabela 3. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania – seria CF1-CF9

	RECEPTURA								
Nr próbki	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5	CF6	CF7	CF8	CF9
1	65,1	58,8	54,5	56,8	66,4	55,1	47,9	59,3	59,3
2	65,1	58,2	52,7	57,8	63,9	56,8	49,2	56,3	58,2
3	64,8	60,4	52,4	55,7	63,7	54,6	48,5	55,5	60,5
4	66,1	60,2	51,8	57,2	66,3	53,6	46,1	58,4	61,2
5	63,2	59,1	52,8	58,2	65,5	56,9	49,0	58,8	58,0
f_{cm28} [MPa]	64,9	59,3	52,8	57,1	65,2	55,4	48,1	57,7	59,4
Odch. Stan.	1,05	0,94	1,01	0,97	1,29	1,43	1,25	1,66	1,40
Wsp. Zmienn.	1,62	1,59	1,91	1,70	1,98	2,58	2,60	2,88	2,36

Tabela 4. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie po 90 dniach dojrzewania – seria CC1-CC9

	RECEPTURA								
Nr próbki	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8	CC9
1	59,7	66,9	57,4	55,0	70,9	74,3	54,7	71,2	56,7
2	55,9	67,9	55,4	56,5	68,4	75,3	51,5	70,0	60,5
3	59,1	71,7	55,4	56,0	69,1	77,8	51,4	70,8	58,9
4	58,0	69,5	57,2	55,4	71,5	76,4	55,0	72,2	57,2
5	59,7	70,5	57,3	58,7	73,4	74,6	52,6	71,6	57,1
f_{cm90} [MPa]	58,5	69,3	56,5	56,3	70,7	75,7	53,0	71,2	58,1
Odch. Stan.	1,62	1,91	1,05	1,47	2,00	1,41	1,72	0,84	1,58
Wsp. Zmienn.	2,77	2,76	1,86	2,61	2,83	1,86	3,25	1,18	2,72

Tabela 5. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie po 90 dniach dojrzewania – seria M1C-M9C

	RECEPTURA								
Nr próbki	M1C	M2C	M3C	M4C	M5C	M6C	M7C	M8C	M9C
1	60,7	52,1	49,5	58,3	54,4	50,0	45,0	43,6	46,9
2	62,1	50,1	51,7	59,7	54,3	51,8	44,4	43,7	50,1
3	60,7	50,9	49,2	55,6	54,6	49,7	46,2	45,8	51,0
4	57,3	53,2	47,8	56,6	52,4	51,4	44,1	43,3	49,6
5	61,5	51,3	48,5	58,8	51,7	48,3	43,5	44,9	48,2
f_{cm90} [MPa]	60,5	51,5	49,3	57,8	53,5	50,2	44,6	44,3	49,2
Odch. Stan.	1,86	1,18	1,47	1,67	1,33	1,40	1,03	1,05	1,62
Wsp. Zmienn.	3,07	2,29	2,98	2,89	2,49	2,79	2,31	2,37	3,29

Tabela 6. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie po 90 dniach dojrzewania – seria CF1-CF9

	RECEPTURA								
Nr próbki	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5	CF6	CF7	CF8	CF9
1	75,0	65,2	58,2	65,1	72,4	61,5	50,0	61,5	67,3
2	72,8	64,8	58,9	64,3	71,5	62,8	48,8	64,6	68,3
3	69,8	67,1	57,2	63,5	72,3	65,5	51,1	61,8	70,1
4	73,4	66,5	58,4	61,6	69,8	64,0	52,0	64,4	66,2
5	68,5	67,1	57,6	63,1	70,8	63,5	48,6	63,3	68,2
f_{cm90} [MPa]	71,9	66,1	58,1	63,5	71,4	63,5	50,1	63,1	68,0
Odch. Stan.	2,68	1,08	0,67	1,32	1,09	1,48	1,46	1,43	1,43
Wsp. Zmienn.	3,73	1,63	1,15	2,08	1,53	2,33	2,91	2,27	2,10

Tabela 7. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu – seria CC1-CC9

	RECEPTURA								
Nr próbki	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8	CC9
1	4,27	4,59	3,88	4,12	4,28	3,79	3,23	4,97	3,56
2	4,44	4,65	3,48	4,23	4,16	3,69	3,39	4,23	3,64
3	4,11	4,84	3,44	4,73	4,10	3,32	3,49	4,58	3,88
4	4,29	4,76	3,35	4,40	5,10	3,89	3,12	4,13	4,28
5	4,28	4,78	3,74	4,59	3,77	3,90	3,45	4,26	4,58
f_{tm} [MPa]	4,30	4,70	3,60	4,40	4,30	3,70	3,35	4,44	4,00
Odch. Stan.	0,12	0,10	0,22	0,25	0,49	0,24	0,16	0,34	0,43
Wsp. Zmienn.	2,79	2,13	6,11	5,68	11,40	6,49	4,78	7,66	10,75

Tabela 8. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu – seria M1C-M9C

	RECEPTURA								
Nr próbki	M1C	M2C	M3C	M4C	M5C	M6C	M7C	M8C	M9C
1	3,26	3,68	3,33	3,62	3,57	3,39	3,33	3,39	3,40
2	4,40	3,46	3,11	3,80	3,59	3,26	3,50	3,27	3,54
3	3,97	3,58	3,35	3,96	3,31	3,70	3,26	3,22	3,53
4	3,51	3,43	3,40	3,62	3,56	3,35	3,60	3,39	3,52
f_{tm} [MPa]	3,80	3,55	3,30	3,75	3,50	3,40	3,40	3,30	3,50
Odch. Stan.	0,50	0,12	0,13	0,16	0,13	0,13	0,16	0,09	0,07
Wsp. Zmienn.	13,16	3,38	3,94	4,27	3,71	3,82	4,71	2,73	2,00

Tabela 9. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu – seria CF1-CF9

	RECEPTURA								
Nr próbki	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5	CF6	CF7	CF8	CF9
1	4,19	4,42	3,55	3,56	4,88	3,78	3,22	3,58	3,92
2	4,21	4,21	3,49	3,38	4,68	3,94	3,14	3,49	4,20
3	4,13	4,10	3,44	3,46	4,58	3,77	3,34	3,62	3,85
4	4,08	4,20	3,41	3,39	4,85	3,96	3,00	3,65	4,10
f_{tm} [MPa]	4,15	4,25	4,45	3,45	4,75	3,85	3,20	3,60	4,00
Odch. Stan.	0,06	0,13	0,06	0,08	0,14	0,10	0,14	0,07	0,16
Wsp. Zmienn.	1,45	3,06	1,35	2,32	2,95	2,60	4,38	1,94	4,00

Tabela 10. Wyniki badania sorpcyjności betonu – seria CC1-CC9

	RECEPTURA								
Nr próbki	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8	CC9
1	0,0930	0,0632	0,0929	0,0549	0,1134	0,0759	0,0813	0,0726	0,0591
2	0,0923	0,0636	0,0840	0,0560	0,1047	0,0790	0,0795	0,0717	0,0598
3	0,0885	0,0754	0,0450	0,0430	0,0986	0,0683	0,0852	0,0737	0,0555
4	0,0992	0,1040	0,0656	0,0419	0,0954	0,0771	0,0823	0,0687	0,0554
5	0,0976	0,0587	0,0669	0,0415	0,0787	0,0716	0,0863	0,0655	0,0603
6	0,0992	0,0793	0,0607	0,0550	0,0799	0,0719	0,0873	0,0701	0,0604
S [g/cm ² ·h ^{0,5}]	0,0950	0,0740	0,0692	0,0487	0,0951	0,0740	0,0837	0,0704	0,0584
Odch. Stan.	0,0044	0,0167	0,0171	0,0072	0,0137	0,0040	0,0031	0,0030	0,0023
Wsp. Zmienn.	4,63	22,57	24,71	14,78	14,41	5,41	3,70	4,26	3,94

Tabela 11. Wyniki badania sorpcyjności betonu – seria M1C-M2C

	RECEPTURA								
Nr próbki	M1C	M2C	M3C	M4C	M5C	M6C	M7C	M8C	M9C
1	0,1108	0,0730	0,0614	0,0710	0,1020	0,0775	0,0512	0,0476	0,0456
2	0,0916	0,0721	0,0626	0,0928	0,0943	0,0749	0,0586	0,0467	0,0428
3	0,0939	0,0783	0,0656	0,0757	0,0795	0,0717	0,0502	0,0453	0,0419
4	0,1126	0,0891	0,0599	0,1001	0,0821	0,0722	0,0615	0,0508	0,0426
5	0,0896	0,0906	0,0671	0,0986	0,0806	0,0622	0,0532	0,0512	0,0431
6	0,0976	0,0776	0,0703	0,1007	0,0810	0,0626	0,0599	0,0524	0,0411
S [g/cm ² ·h ^{0,5}]	0,0994	0,0801	0,0645	0,0898	0,0866	0,0702	0,0558	0,0490	0,0429
Odch. Stan.	0,0099	0,0079	0,0039	0,0131	0,0093	0,0064	0,0048	0,0028	0,0015
Wsp. Zmienn.	9,96	9,86	6,05	14,59	10,74	9,12	8,60	5,71	3,50

Tabela 12. Wyniki badania sorpcyjności betonu – seria CF1-CF9

	RECEPTURA								
Nr próbki	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5	CF6	CF7	CF8	CF9
1	0,0632	0,0830	0,0998	0,0487	0,0632	0,0510	0,1201	0,0991	0,0501
2	0,0654	0,0812	0,0887	0,0595	0,0595	0,0792	0,1124	0,1124	0,0671
3	0,0643	0,0910	0,0867	0,0662	0,0662	0,0865	0,1110	0,0910	0,0321
4	0,0697	0,0788	0,0984	0,0595	0,0685	0,0795	0,1285	0,0895	0,0390
5	0,0736	0,0825	0,0956	0,0450	0,0550	0,0650	0,1235	0,1161	0,0568
6	0,0757	0,0930	0,0879	0,0621	0,0821	0,0980	0,1300	0,0993	0,0730
S [g/cm ² ·h ^{0,5}]	0,0687	0,0849	0,0929	0,0568	0,0658	0,0765	0,1209	0,1012	0,0530
Odch. Stan.	0,0043	0,0046	0,0059	0,0087	0,0054	0,0142	0,0074	0,0122	0,0139
Wsp. Zmienn.	6,26	5,42	6,35	15,32	8,21	18,56	6,12	12,06	26,23

Tabela 13. Wyniki badania mrozoodporności – średni spadek wytrzymałości CC1-CC9

	RECEPTURA								
Nr próbki	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8	CC9
1	54,8	68,9	42,3	54,2	66,8	69,1	43,0	66,6	51,8
2	56,5	68,3	40,1	51,4	67,7	70,5	50,4	69,0	52,6
3	51,7	68,2	52,8	56,4	69,4	68,3	51,3	67,7	50,6
4	57,7	66,0	45,9	54,8	68,9	59,3	48,8	69,6	51,1
5	54,3	69,1	45,7	56,8	68,8	71,1	51,2	68,3	53,1
f_{cm} [MPa]	55,0	68,1	45,4	54,7	68,3	67,7	49,0	68,3	51,8
Odch. Stan.	2,29	1,22	4,83	2,17	1,06	4,80	3,47	1,18	1,04
f_{cm90} [MPa]	58,5	69,3	56,5	56,3	70,7	75,7	53,0	71,2	58,1
Δm_F [%]	5,98	1,73	19,65	2,84	3,40	10,57	7,55	4,07	10,84

Tabela 14. Wyniki badania mrozoodporności – średni spadek wytrzymałości – M1C-M9C

	RECEPTURA								
Nr próbki	M1C	M2C	M3C	M4C	M5C	M6C	M7C	M8C	M9C
1	47,10	40,90	22,18	12,97	18,81	34,19	37,21	34,03	37,02
2	47,40	38,30	13,33	21,82	30,89	36,21	40,10	30,21	26,77
3	47,30	39,10	26,35	23,96	27,28	34,25	43,03	35,68	36,62
4	53,20	45,10	11,10	31,50	28,25	38,60	39,43	34,14	36,77
5	51,10	45,40	21,29	32,18	20,52	43,56	38,28	27,01	37,78
f_{cm} [MPa]	49,20	41,80	18,90	24,50	25,20	37,40	39,60	32,20	35,00
Odch. Stan.	2,78	3,32	6,40	7,88	5,21	3,91	2,21	3,54	4,62
f_{cm90} [MPa]	60,5	51,5	49,3	57,8	53,5	50,2	44,6	44,3	49,2
Δm_F [%]	18,64	18,91	61,76	57,64	52,99	25,57	11,19	27,28	28,88

Tabela 15. Wyniki badania mrozoodporności – średni spadek wytrzymałości – CF1-CF9

	RECEPTURA								
Nr próbki	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5	CF6	CF7	CF8	CF9
1	68,9	63,5	55,7	59,4	68,2	58	48,5	62,4	66,9
2	68,5	64,3	56,2	59,5	68,9	57,8	47,3	61,8	64,9
3	71,1	63,7	54,3	60,3	67,5	58,7	48,7	59,2	65,1
4	65,3	63,9	55,6	58,5	69,1	58,2	48	63,4	65,3
5	69,4	62,6	56,6	60	68,5	59,6	49	59,5	66,2
f_{cm} [MPa]	68,6	63,6	55,7	59,5	68,4	58,5	48,3	61,3	65,7
Odch. Stan.	2,11	0,63	0,87	0,69	0,63	0,72	0,67	1,84	0,84
f_{cm90} [MPa]	71,9	66,1	58,1	63,5	71,4	63,5	50,1	63,1	68
Δm_F (%)	4,53	3,78	4,17	6,24	4,15	7,94	3,59	2,92	3,41

Tabela 16. Wyniki badania mrozoodporności – średni ubytek masy

RECEPTURA	Nr próbki	Masa próbki przed badaniem [g]	Masa próbki po badaniu [g]	Ubytek masy [g]	Ubytek masy [%]	Średni ubytek masy [%]
CC1	1	2404,7	2403,3	1,4	0,058	0,046
	2	2408,1	2406,6	1,5	0,062	
	3	2414,6	2414,6	0,0	0,000	
	4	2380,6	2378,2	2,4	0,101	
	5	2396,2	2396,0	0,2	0,008	
CC2	1	2379,3	2378,8	0,5	0,021	0,040
	2	2394,5	2393,3	1,2	0,050	
	3	2422,7	2422,2	0,5	0,021	
	4	2388,2	2387,8	0,4	0,017	
	5	2441,1	2438,9	2,2	0,090	
CC3	1	2389,5	2398,4	-8,9	-0,372	-0,289
	2	2402,1	2412,9	-10,8	-0,450	
	3	2397,1	2397,5	-0,4	-0,017	
	4	2390,5	2397,1	-6,6	-0,276	
	5	2394,6	2402,5	-7,9	-0,330	
CC4	1	2414,6	2388,8	25,8	1,068	0,323
	2	2396,4	2392,6	3,8	0,159	
	3	2358,3	2375,4	-17,1	-0,725	
	4	2387,6	2367,9	19,7	0,825	
	5	2376,5	2369,7	6,8	0,286	
CC5	1	2340,7	2391,2	-50,5	-2,157	-2,467
	2	2343,2	2405,2	-62,0	-2,646	
	3	2337,8	2416,1	-78,3	-3,349	
	4	2358,1	2402,6	-44,5	-1,887	
	5	2361,7	2415,9	-54,2	-2,295	
CC6	1	2384,6	2417,3	-32,7	-1,371	-0,495
	2	2387,9	2398,0	-10,1	-0,423	
	3	2377,4	2362,0	15,4	0,648	
	4	2370,4	2394,4	-24,0	-1,012	
	5	2369,5	2377,0	-7,5	-0,317	
CC7	1	2392,7	2335,6	57,1	2,386	2,653
	2	2407,3	2339,3	68,0	2,825	
	3	2419,4	2335,2	84,2	3,480	
	4	2405,3	2355,8	49,5	2,058	
	5	2418,1	2357,3	60,8	2,514	
CC8	1	2383,9	2384,0	-0,1	-0,004	-0,023
	2	2380,3	2381,2	-0,9	-0,038	
	3	2392,8	2393,1	-0,3	-0,013	
	4	2384,2	2384,2	0,0	0,000	
	5	2379,4	2380,8	-1,4	-0,059	
CC9	1	2412,1	2412,8	-0,7	-0,029	-0,076
	2	2404,1	2405,4	-1,3	-0,054	
	3	2416,7	2419,1	-2,4	-0,099	
	4	2400,5	2402,4	-1,9	-0,079	
	5	2401,8	2404,6	-2,8	-0,117	
M1C	1	2432,0	2444,4	-12,4	-0,510	-0,248
	2	24350	2439,4	-4,4	-0,180	
	3	2437,8	2444,5	-6,7	-0,270	
	4	2378,9	2380,8	-1,9	-0,080	
	5	2434,4	2439,4	-5,0	-0,200	

Tabela 16. Wyniki badania mrozoodporności – średni ubytek masy – cd

RECEPTURA	Nr próbki	Masa próbki przed badaniem [g]	Masa próbki po badaniu [g]	Ubytek masy [g]	Ubytek masy [%]	Średni ubytek masy [%]
M2C	1	2366,1	2371,5	-5,4	-0,230	-0,144
	2	2387,5	2396,9	-9,4	-0,390	
	3	2358,9	2352,9	6,0	0,260	
	4	2370,8	2374,2	-3,4	-0,140	
	5	2397,1	2402,5	-5,4	-0,220	
M3C	1	2419,5	2428,0	-8,5	-0,350	7,832
	2	2417,8	2199,3	218,5	9,930	
	3	2415,8	2408,2	7,6	0,320	
	4	2441,9	1883,1	558,8	29,670	
	5	2446,2	2456,3	-10,1	-0,410	
M4C	1	2403,3	2075,0	328,3	15,820	2,638
	2	2406,0	2419,3	-13,3	-0,550	
	3	2424,9	2454,4	-29,5	-1,200	
	4	2397,2	2411,4	-14,2	-0,590	
	5	2413,5	2420,4	-6,9	-0,290	
M5C	1	2316,6	2304,7	11,9	0,520	0,796
	2	2309,3	2323,0	-13,7	-0,590	
	3	2319,2	2284,5	34,7	1,520	
	4	2321,2	2327,2	-6,0	-0,260	
	5	2323,0	2260,0	63,0	2,790	
M6C	1	2331,0	2329,4	1,6	0,070	0,010
	2	2310,1	2312,5	-2,4	-0,100	
	3	2340,5	2340,1	0,4	0,020	
	4	2316,5	2315,9	0,6	0,030	
	5	2335,1	2334,4	0,7	0,030	
M7C	1	2287,5	2266,6	20,9	0,920	0,168
	2	2250,5	2249,6	0,9	0,040	
	3	2230,1	2232,6	-2,5	-0,110	
	4	2234,3	2235,8	-1,5	-0,070	
	5	2223,9	2222,6	1,3	0,060	
M8C	1	2280,5	2279,7	0,8	0,040	0,780
	2	2259,4	2240,4	19,0	0,850	
	3	2285,8	2269,6	16,2	0,710	
	4	2265,3	2260,2	5,1	0,230	
	5	2270,7	2226,8	43,9	1,970	
M9C	1	2240,7	2234,7	6,0	0,270	2,176
	2	2239,3	2060,9	178,4	8,660	
	3	2245,4	2235,6	9,8	0,440	
	4	2234,3	2253,6	-19,3	-0,860	
	5	2250,2	2198,2	52,0	2,370	
CF1	1	2374,5	2385,2	10,7	0,451	0,521
	2	2345,3	2355,3	10,0	0,426	
	3	2402,4	2423,5	21,1	0,878	
	4	2381,1	2392,1	11,0	0,462	
	5	2412,0	2421,3	9,3	0,386	
CF2	1	2410,5	2416,2	5,7	0,236	0,469
	2	2365,3	2367,7	2,4	0,101	
	3	2389,2	2395,3	6,1	0,255	
	4	2400,0	2431,0	31,0	1,292	
	5	2368,3	2379,2	10,9	0,460	

Tabela 16. Wyniki badania mrozoodporności – średni ubytek masy – cd

RECEPTURA	Nr próbki	Masa próbki przed badaniem [g]	Masa próbki po badaniu [g]	Ubytek masy [g]	Ubytek masy [%]	Średni ubytek masy [%]
CF3	1	2387,9	2391,1	3,2	0,134	0,435
	2	2404,0	2421,9	17,9	0,745	
	3	2408,0	2411,2	3,2	0,133	
	4	2398,2	2412,0	13,79	0,575	
	5	2384,9	2398,9	14	0,587	
CF4	1	2368,5	2378,4	9,9	0,418	0,662
	2	2375,7	2389,2	13,5	0,568	
	3	2374,9	2393,2	18,3	0,771	
	4	2381,2	2398,3	17,1	0,718	
	5	2406,7	2426,8	20,1	0,835	
CF5	1	2376,8	2381,2	4,4	0,185	0,738
	2	2412,0	2428,3	16,3	0,676	
	3	2409,0	2421,2	12,2	0,506	
	4	2387,5	2403,3	15,8	0,662	
	5	2395,3	2435,1	39,8	1,662	
CF6	1	2387,5	2395,4	7,9	0,331	0,792
	2	2368,9	2397,6	28,7	1,212	
	3	2406,2	2421,5	15,3	0,636	
	4	2412,3	2443,2	30,9	1,281	
	5	2385,4	2397,4	12,0	0,503	
CF7	1	2401,3	2421,4	20,1	0,837	0,943
	2	2367,5	2389,3	21,8	0,921	
	3	2373,2	2391,5	18,3	0,771	
	4	2390,2	2421,7	31,5	1,318	
	5	2408,2	2429,1	20,9	0,868	
CF8	1	2410,2	2408,4	-1,8	-0,075	-0,037
	2	2406,3	2405,4	-0,9	-0,037	
	3	2386,7	2384,7	-2,0	-0,084	
	4	2391,2	2390,9	-0,3	-0,013	
	5	2387,6	2388,1	0,5	0,021	
CF9	1	2403,2	2401,1	-2,1	-0,087	-0,067
	2	2386,7	2385,7	-1	-0,042	
	3	2404,2	2403,1	-1,1	-0,046	
	4	2393,2	2392,1	-1,1	-0,046	
	5	2397,9	2395,2	-2,7	-0,113	

Tabela 17. Wyniki badania nasiąkliwości

RECEPTURA	Nr próbki	Masa próbki nasyconej wodą [g]	Masa próbki wysuszonej [g]	Nasiąkliwość próbki [%]	Średnia nasiąkliwość próbek [%]	Odchylenie standardowe	Wsp. zmienności
CC1	1	1186,8	1133,8	4,67	4,81	0,15	2,98
	2	1186,3	1132,2	4,78			
	3	1157,0	1105,1	4,70			
	4	1220,6	1164,1	4,85			
	5	1139,7	1085,1	5,03			
	6	1257,0	1199,3	4,81			
CC2	1	1094,2	1045,1	4,70	4,77	0,11	2,40
	2	1229,2	1174,1	4,69			
	3	1182,6	1127,5	4,89			
	4	1208,0	1152,0	4,86			
	5	1178,9	1127,2	4,59			
	6	1255,5	1198,2	4,78			
CC3	1	1167,7	1108,5	5,34	5,21	0,15	2,96
	2	1210,8	1149,3	5,35			
	3	1183,5	1123,9	5,30			
	4	1185,0	1127,1	5,14			
	5	1103,2	1049,2	5,15			
	6	1185,8	1129,8	4,96			
CC4	1	1223,3	1164,7	5,03	5,03	0,12	2,44
	2	1095,1	1044,4	4,85			
	3	1223,9	1165,6	5,00			
	4	1155,1	1099,8	5,03			
	5	1225,1	1166,5	5,02			
	6	1165,0	1107,0	5,24			
CC5	1	1199,3	1145,9	4,66	4,61	0,24	5,18
	2	1179,2	1123,0	5,00			
	3	1180,5	1127,6	4,69			
	4	1206,9	1154,3	4,56			
	5	1226,2	1175,5	4,31			
	6	1143,3	1094,7	4,44			
CC6	1	1189,5	1134,0	4,89	4,85	0,19	3,98
	2	1069,5	1017,3	5,13			
	3	1117,9	1068,3	4,64			
	4	1251,7	1196,5	4,61			
	5	1286,8	1227,1	4,87			
	6	1111,2	1059,0	4,93			
CC7	1	1213,1	1152,3	5,28	5,21	0,16	3,10
	2	1124,3	1069,3	5,14			
	3	1223,0	1163,9	5,08			
	4	1071,1	1020,2	4,99			
	5	1142,6	1084,1	5,40			
	6	1161,2	1102,2	5,35			
CC8	1	1189,9	1136,0	4,74	4,76	0,09	1,94
	2	1190,0	1134,1	4,93			
	3	1184,4	1130,4	4,78			
	4	1193,2	1139,3	4,73			
	5	1140,2	1088,7	4,73			
	6	1250,8	1195,2	4,65			

Tabela 17. Wyniki badania nasiąkliwości – cd

RECEPTURA	Nr próbki	Masa próbki nasyconej wodą [g]	Masa próbki wysuszonej [g]	Nasiąkliwość próbki [%]	Średnia nasiąkliwość próbek [%]	Odchylenie standardowe	Wsp. zmienności
CC9	1	1202,5	1144,4	5,08	5,00	0,19	3,90
	2	1199,1	1138,7	5,30			
	3	1214,7	1156,7	5,01			
	4	1168,4	1112,6	5,02			
	5	1238,5	1181,7	4,81			
	6	1142,3	1090,3	4,77			
M1C	1	1238,6	1185,3	4,50	4,51	0,16	3,61
	2	1094,7	1048,0	4,46			
	3	1013,7	967,8	4,74			
	4	1139,6	1089,0	4,65			
	5	1166,3	1116,9	4,42			
	6	1091,8	1046,9	4,29			
M2C	1	1067,8	1020,0	4,69	4,82	0,14	2,95
	2	1159,8	1107,4	4,73			
	3	1105,0	1054,9	4,75			
	4	1219,1	1163,8	4,75			
	5	1152,9	1097,7	5,03			
	6	1155,5	1100,8	4,97			
M3C	1	1152,0	1096,5	5,06	5,00	0,44	8,73
	2	1157,4	1098,8	5,33			
	3	1045,5	989,9	5,62			
	4	1228,4	1170,3	4,96			
	5	1144,2	1095,2	4,47			
	6	1106,5	1058,1	4,57			
M4C	1	1094,0	1047,0	4,49	4,67	0,18	3,90
	2	1235,1	1180,8	4,60			
	3	1149,1	1098,8	4,58			
	4	1183,2	1131,7	4,55			
	5	1107,4	1056,7	4,80			
	6	1248,8	1189,7	4,97			
M5C	1	1203,3	1145,4	5,06	5,00	0,08	1,55
	2	1058,0	1006,7	5,10			
	3	1127,5	1074,8	4,90			
	4	1186,1	1130,2	4,95			
	5	1100,1	1047,2	5,05			
	6	1181,7	1126,0	4,95			
M6C	1	1139,5	1086,1	4,92	4,79	0,14	2,85
	2	1189,8	1134,9	4,84			
	3	1091,8	1041,6	4,82			
	4	1079,9	1030,3	4,81			
	5	1195,5	1143,8	4,52			
	6	1115,0	1063,9	4,80			
M7C	1	1138,5	1083,5	5,08	4,96	0,13	2,59
	2	1021,1	971,1	5,15			
	3	1103,5	1051,7	4,93			
	4	1148,4	1095,5	4,83			
	5	1175,0	1120,8	4,84			
	6	1006,0	958,4	4,97			

Tabela 17. Wyniki badania nasiąkliwości – cd

RECEPTURA	Nr próbki	Masa próbki nasyconej wodą [g]	Masa próbki wysuszonej [g]	Nasiąkliwość próbki [%]	Średnia nasiąkliwość próbek [%]	Odchylenie standardowe	Wsp. zmienności
M8C	1	1161,3	1108,3	4,78	4,77	0,13	2,80
	2	1097,2	1047,7	4,72			
	3	961,5	916,9	4,86			
	4	1146,4	1092,4	4,94			
	5	1173,0	1119,9	4,74			
	6	1122,9	1074,0	4,55			
M9C	1	1100,1	1047,8	4,99	4,85	0,13	2,73
	2	1131,6	1078,5	4,92			
	3	1138,2	1085,9	4,82			
	4	1117,2	1064,4	4,96			
	5	1130,0	1079,9	4,64			
	6	1130,3	1078,7	4,78			
CF1	1	1098,4	1047,2	4,89	4,85	0,17	3,43
	2	1110,4	1059,2	4,83			
	3	1087,2	1036,0	4,94			
	4	1152,0	1100,8	4,65			
	5	1142,3	1091,1	4,69			
	6	1054,5	1003,3	5,10			
CF2	1	1108,2	1072,0	3,38	3,54	0,14	4,08
	2	1054,2	1018,0	3,56			
	3	1102,5	1066,3	3,39			
	4	1034,2	998,0	3,63			
	5	998,5	962,3	3,76			
	6	1056,3	1020,1	3,55			
CF3	1	1091,2	1045,0	4,42	4,55	0,24	5,20
	2	1141,2	1095,0	4,22			
	3	989,9	943,7	4,90			
	4	1072,1	1025,9	4,50			
	5	1065,0	1018,8	4,53			
	6	1023,3	977,1	4,73			
CF4	1	996,5	953,3	4,53	4,20	0,29	6,94
	2	1023,5	980,3	4,41			
	3	1102,0	1058,8	4,08			
	4	1145,2	1103,1	3,82			
	5	995,2	953,1	4,42			
	6	1108,2	1066,1	3,95			
CF5	1	1067,7	1026,4	4,02	4,06	0,23	5,74
	2	1087,8	1046,5	3,95			
	3	1109,7	1068,4	3,87			
	4	996,5	955,2	4,32			
	5	1122,3	1081,0	3,82			
	6	987,6	946,3	4,36			
CF6	1	1023,4	984,1	3,99	3,85	0,25	6,44
	2	1114,2	1074,9	3,66			
	3	1143,2	1103,9	3,56			
	4	1163,2	1121,9	3,68			
	5	1064,2	1022,9	4,04			
	6	1032,2	990,9	4,17			

Tabela 17. Wyniki badania nasiąkliwości – cd

RECEPTURA	Nr próbki	Masa próbki nasyconej wodą [g]	Masa próbki wysuszonej [g]	Nasiąkliwość próbki [%]	Średnia nasiąkliwość próbek [%]	Odchylenie standardowe	Wsp. zmienności
CF7	1	983,2	943,9	4,16	3,96	0,19	4,75
	2	1019,3	980	4,01			
	3	995,2	955,9	4,11			
	4	1045,2	1005,9	3,91			
	5	1121	1081,7	3,63			
	6	1038,2	998,9	3,93			
CF8	1	1102,1	1050,8	4,88	4,98	0,34	6,81
	2	1132,2	1080,9	4,75			
	3	987,2	937,9	5,26			
	4	1113,2	1061,9	4,83			
	5	1154,3	1103	4,65			
	6	978,7	927,4	5,53			
CF9	1	1043	1007,7	3,50	3,44	0,23	6,73
	2	983,2	947,9	3,72			
	3	1023,0	987,7	3,57			
	4	1160,2	1124,9	3,14			
	5	1032,2	996,9	3,54			
	6	1143,5	1108,2	3,19			

Tabela 18. Wyniki badania głębokości wnikania chlorków

Rec.	Pom. 1	Pom. 2	Pom. 3	Pom. 4	Pom. 5	Pom. 6	Pom. 7	Pom. 8	Pom. 9	Pom. 10	Pom. 11	Pom. 12	Średnia	Średnia z trzech wyników
CC1	7	6	5	10	8	9	5	6	7	11	9	8	7,58	7,14
	4	4	5	7	6	8	8	7	7	4	4	4	5,67	
	10	7	7	8	7	11	6	6	6	10	11	9	8,17	
CC2	10	11	10	8	8	7	7	8	7	8	7	6	8,08	8,64
	12	11	10	6	7	7	11	11	11	8	8	8	9,17	
	12	11	12	8	6	5	10	10	9	7	7	7	8,67	
CC3	9	10	10	4	3	3	5	7	7	8	7	6	6,58	6,83
	4	4	7	6	7	8	5	5	6	10	10	9	6,75	
	12	11	9	7	8	7	3	4	5	7	7	6	7,17	
CC4	11	9	9	8	6	8	4	3	4	10	12	11	7,92	8,44
	10	9	8	7	8	6	10	10	11	9	7	9	8,67	
	12	13	11	6	6	6	12	11	14	6	4	4	8,75	
CC5	6	7	6	6	7	7	8	9	9	5	4	3	6,42	8,08
	7	8	7	9	10	8	11	10	7	9	9	9	8,67	
	8	8	8	10	11	13	8	12	9	8	8	7	9,17	
CC6	4	3	4	8	9	11	4	3	4	12	10	11	6,92	6,69
	5	6	6	4	4	5	8	7	6	3	4	4	5,17	
	4	5	5	7	7	9	8	8	11	10	11	11	8,00	
CC7	3	3	2	7	6	7	3	3	3	8	9	10	5,33	6,64
	10	7	11	2	3	5	9	10	8	6	6	6	6,92	
	14	13	11	8	7	6	5	4	6	6	5	7	7,67	
CC8	7	7	7	8	7	8	6	5	6	8	7	8	7,00	8,03
	10	9	8	12	8	8	12	9	9	9	9	6	9,08	
	8	6	10	7	7	8	4	5	5	11	13	12	8,00	
CC9	5	4	5	5	5	5	8	6	4	5	6	5	5,25	5,97
	4	3	6	6	10	9	5	5	4	7	5	7	5,92	
	3	5	3	7	8	9	8	6	8	9	7	8	6,75	
M1C	7	6	7	7	5	6	11	12	7	6	5	5	7,00	6,69
	5	4	4	7	6	5	9	7	7	5	5	5	5,75	
	9	5	7	8	6	11	6	6	6	9	7	8	7,33	

Tabela 18. Wyniki badania głębokości wnikania chlorków - cd

Rec.	Pom. 1	Pom. 2	Pom. 3	Pom. 4	Pom. 5	Pom. 6	Pom. 7	Pom. 8	Pom. 9	Pom. 10	Pom. 11	Pom. 12	Średnia	Średnia z trzech wyników
M2C	10	9	10	7	8	7	8	7	9	7	6	6	7,83	8,69
	14	15	14	6	6	6	14	14	14	6	6	6	10,08	
	13	11	10	7	5	5	10	8	7	8	7	7	8,17	
M3C	8	10	10	4	5	5	6	8	6	7	6	6	6,75	6,97
	5	5	9	7	8	8	6	5	6	11	10	8	7,33	
	10	11	8	6	7	8	5	4	5	7	5	6	6,83	
M4C	12	10	7	8	6	6	10	11	13	5	7	6	8,42	8,83
	11	10	8	7	8	6	10	10	9	8	7	8	8,50	
	13	14	14	5	5	5	15	16	18	5	3	2	9,58	
M5C	8	7	9	8	5	7	9	10	9	5	4	6	7,25	7,69
	6	8	7	6	10	5	11	10	6	9	9	7	7,83	
	7	6	8	10	8	9	6	12	8	7	8	7	8,00	
M6C	5	3	7	8	7	11	5	3	4	12	10	7	6,83	6,33
	5	7	7	5	5	6	7	7	6	5	4	4	5,67	
	3	5	5	6	6	9	5	4	5	10	9	11	6,50	
M7C	3	3	2	5	6	7	2	2	3	7	9	10	4,92	5,64
	10	7	8	2	2	5	9	10	7	5	5	3	6,08	
	5	7	4	8	5	4	5	11	6	6	5	5	5,92	
M8C	6	7	7	6	5	8	7	5	7	8	5	8	6,58	7,28
	6	9	6	12	7	7	12	7	7	6	9	6	7,83	
	7	6	10	6	5	8	6	5	5	11	13	7	7,42	
M9C	5	4	5	7	5	5	12	6	8	5	6	5	6,08	5,92
	5	3	6	5	9	9	5	5	4	7	5	4	5,58	
	7	5	4	7	6	9	5	5	4	9	7	5	6,08	
CF1	4	4	3	10	11	9	5	6	7	11	9	9	7,33	6,83
	4	4	5	5	5	6	7	7	7	3	4	3	5,00	
	6	8	6	9	7	11	6	7	6	10	11	11	8,17	
CF2	3	4	3	8	8	7	5	6	7	4	4	3	5,17	4,92
	2	2	3	4	6	6	8	6	6	5	3	3	4,50	
	6	7	6	4	4	3	6	6	7	4	5	3	5,08	
CF3	11	10	10	4	3	5	5	7	6	7	7	6	6,75	6,81
	5	5	7	7	7	8	6	5	6	11	9	8	7,00	
	11	11	9	4	5	5	5	4	5	8	7	6	6,67	
CF4	10	9	13	9	7	9	5	5	5	7	12	11	8,50	7,92
	9	9	8	8	8	7	9	10	11	9	8	9	8,75	
	4	5	4	7	6	7	10	10	12	5	4	4	6,50	
CF5	8	7	8	2	2	3	4	5	5	6	3	6	4,92	6,44
	6	7	7	8	9	12	10	11	8	8	7	7	8,33	
	3	4	5	5	4	6	8	7	9	7	8	7	6,08	
CF6	5	4	5	7	7	8	4	4	4	5	6	7	5,50	5,83
	4	5	4	5	4	5	5	6	6	4	4	4	4,67	
	5	6	5	6	7	6	8	8	10	9	9	9	7,33	
CF7	6	6	5	7	7	7	4	4	3	7	8	10	6,17	7,03
	9	10	12	4	4	5	10	10	8	9	9	9	8,25	
	7	8	7	9	8	9	8	8	5	4	4	3	6,67	
CF8	8	6	6	7	7	7	7	4	6	4	6	4	6,00	7,36
	9	9	8	10	8	8	9	9	8	7	7	6	8,17	
	9	10	11	6	7	8	4	4	3	10	12	11	7,92	
CF9	6	6	5	6	5	6	6	7	6	5	7	5	5,83	5,78
	5	5	6	8	8	9	5	5	6	7	8	7	6,58	
	3	4	3	4	4	4	5	4	5	8	7	8	4,92	

Tabela 19. Wyniki badania ścieralności na tarczy Boehmego

RECEPTURA	Masa próbki przed badaniem [g]	Masa próbki po badaniu [g]	Ubytek masy po 16 cyklach ścierania [g]	Objętość próbki przed badaniem [mm ³]	Gęstość objętościowa próbki [g/mm ³]	Zmniejszenie objętości próbek po 16 cyklach ścierania [mm ³]	Średnie zmniejszenie objętości próbek po 16 cyklach ścierania [mm ³]
CC1	771,21	732,40	38,81	359930,24	0,00214	18112,96	18330,45
	802,65	764,80	37,85	359121,86	0,00224	16934,86	
	756,32	714,20	42,12	358112,67	0,00211	19943,55	
CC2	851,21	813,30	37,91	357004,20	0,00238	15899,75	18035,37
	833,54	789,66	43,88	357407,08	0,00233	18814,96	
	784,32	742,10	42,22	360233,62	0,00218	19391,40	
CC3	848,70	809,75	38,95	353889,56	0,00240	16241,31	14101,89
	883,13	854,19	28,94	358818,96	0,00246	11758,43	
	839,40	805,06	34,34	349691,50	0,00240	14305,94	
CC4	800,47	767,09	33,38	358112,67	0,00224	14933,48	14350,03
	813,33	782,81	30,52	357911,00	0,00227	13430,52	
	855,90	820,78	35,12	357911,00	0,00239	14686,10	
CC5	880,68	847,95	32,73	356601,54	0,00247	13252,91	13667,35
	834,77	804,49	30,28	357911,00	0,00233	12982,67	
	862,33	827,15	35,18	361955,16	0,00238	14766,48	
CC6	780,51	744,48	36,03	359829,14	0,00217	16610,48	18608,78
	802,20	761,87	40,33	371137,59	0,00216	18658,66	
	742,61	701,26	41,35	369189,50	0,00201	20557,20	
CC7	881,55	846,85	34,70	370214,17	0,00238	14572,55	14866,53
	835,64	803,39	32,25	378462,67	0,00221	14606,08	
	863,20	826,05	37,15	358314,39	0,00241	15420,97	
CC8	845,12	810,96	34,16	358718,01	0,00236	14499,49	13727,85
	816,99	790,12	26,87	368166,25	0,00222	12108,63	
	876,94	842,29	34,65	368882,37	0,00238	14575,43	
CC9	781,38	743,38	38,00	376495,42	0,00208	18309,69	19338,71
	803,07	760,77	42,30	357911,00	0,00224	18852,20	
	743,48	700,16	43,32	357911,00	0,00208	20854,23	
M1C	899,01	864,23	34,78	361347,09	0,00249	13979,43	13527,05
	935,47	902,83	32,64	389006,19	0,00240	13573,03	
	891,04	858,75	32,29	359525,94	0,00248	13028,70	
M2C	869,43	832,81	36,62	354391,00	0,00245	14926,79	13582,92
	841,09	809,84	31,25	360739,53	0,00233	13402,98	
	876,69	846,33	30,36	358617,09	0,00244	12419,00	
M3C	891,48	859,43	32,05	364087,44	0,00245	13089,47	14061,79
	859,78	823,00	36,78	368268,51	0,00233	15753,93	
	880,27	847,64	32,63	359930,24	0,00245	13341,96	
M4C	861,75	823,46	38,29	365920,09	0,00236	16258,87	15116,11
	922,4	889,08	33,32	386487,68	0,00239	13961,16	
	874,04	837,21	36,83	359020,88	0,00243	15128,30	
M5C	805,87	766,31	39,56	358112,67	0,00225	17579,68	15640,09
	842,18	807,82	34,36	361347,09	0,00233	14742,56	
	829,40	795,60	33,80	358213,52	0,00232	14598,04	
M6C	847,27	807,35	39,92	369906,62	0,00229	17428,53	15011,71
	881,70	851,79	29,91	360537,12	0,00245	12230,54	
	837,97	802,66	35,31	364901,38	0,00230	15376,05	
M7C	799,04	764,69	34,35	362462,28	0,00220	15581,92	15214,02
	811,90	780,41	31,49	357004,20	0,00227	13846,61	
	854,47	818,38	36,09	383872,92	0,00223	16213,53	

Tabela 19. Wyniki badania ścieralności na tarczy Boehmego - cd

RECEPTURA	Masa próbki przed badaniem [g]	Masa próbki po badaniu [g]	Ubytek masy po 16 cyklach ścierania [g]	Objętość próbki przed badaniem [mm ³]	Gęstość objętościowa próbki [g/mm ³]	Zmniejszenie objętości próbek po 16 cyklach ścierania [mm ³]	Średnie zmniejszenie objętości próbek po 16 cyklach ścierania [mm ³]
M8C	879,25	845,55	33,70	385964,02	0,00228	14793,28	14531,39
	833,34	802,09	31,25	365105,01	0,00228	13691,33	
	860,90	824,75	36,15	359829,14	0,00239	15109,56	
M9C	842,82	809,66	33,16	356299,70	0,00237	14018,29	13232,51
	814,69	788,82	25,87	362868,23	0,00225	11522,67	
	874,64	840,99	33,65	367961,77	0,00238	14156,58	
CF1	774,81	734,50	40,31	358213,52	0,00216	18636,29	18906,15
	806,25	766,90	39,35	357911,00	0,00225	17468,28	
	759,92	716,30	43,62	359121,86	0,00212	20613,87	
CF2	854,81	815,40	39,41	359626,99	0,00238	16580,18	18653,11
	837,14	791,76	45,38	357911,00	0,00234	19401,77	
	787,92	744,20	43,72	360031,35	0,00219	19977,37	
CF3	852,30	811,85	40,45	348894,71	0,00244	16558,48	14710,27
	886,73	856,29	30,44	359930,24	0,00246	12355,82	
	843,00	807,16	35,84	357911,00	0,00236	15216,52	
CF4	804,07	769,19	34,88	359424,90	0,00224	15591,60	15149,32
	816,93	784,91	32,02	371137,59	0,00220	14546,93	
	859,5	822,88	36,62	359323,87	0,00239	15309,41	
CF5	881,88	850,05	31,83	357911,00	0,00246	12918,21	13247,05
	835,97	806,59	29,38	357911,00	0,00234	12578,71	
	863,53	829,25	34,28	358818,96	0,00241	14244,22	
CF6	845,45	814,16	31,29	359829,14	0,00235	13317,23	12288,62
	817,32	793,32	24	357911,00	0,00228	10509,79	
	877,27	845,49	31,78	359930,24	0,00244	13038,84	
CF7	781,71	746,58	35,13	358415,28	0,00218	16107,16	17723,89
	803,4	763,97	39,43	358617,09	0,00224	17600,54	
	743,81	703,36	40,45	357911,00	0,00208	19463,98	
CF8	882,75	848,95	33,8	357911,00	0,00247	13704,21	14078,20
	836,84	805,49	31,35	359222,86	0,00233	13457,34	
	864,4	828,15	36,25	359424,90	0,00240	15073,06	
CF9	846,32	813,06	33,26	359222,86	0,00236	14117,30	13086,36
	818,19	792,22	25,97	358718,01	0,00228	11385,99	
	878,14	844,39	33,75	357911,00	0,00245	13755,77	

Załącznik 2 - wyznaczenie śladów węglowych oraz wartości zużycia surowców naturalnych dla wariantów decyzyjnych CC1 – CC9, M1C, M2C, M7C, CF1 – CF9

Tabela nr 1. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC1

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C1	300,0	0,889	270	0,0000518	270,90	0,8000	240,00
F1	654,0	0,008	380	0,000063	20,89	0,9375	613,13
F2	654,0	0,008	380	0,000063	20,89	0,9375	613,13
F17	662,0	0,005	15	0,000063	3,94	0,5000	331,00
D1	2,4	0,250	100	0,000221	0,65	2,2500	5,40
Woda	150,0	0,001	0	0,000000	0,15	0,1000	15,00
Produkcja betonu	2422,4	0,008	0	0,000000	19,38	0,0000	0,00
SUMA					336,79		1817,65

*Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 2. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC2

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C2	300,0	0,704	303	0,0000518	215,91	0,6300	189,00
F1	648,0	0,008	380	0,000063	20,70	0,9375	607,50
F2	648,0	0,008	380	0,000063	20,70	0,9375	607,50
F17	655,0	0,005	15	0,000063	3,89	0,5000	327,50
D1	2,4	0,250	100	0,000221	0,65	2,2500	5,40
Woda	150,0	0,001	0	0,000000	0,15	0,1000	15,00
Produkcja betonu	2403,4	0,008	0	0,000000	19,23	0,0000	0,00
SUMA					281,23		1751,90

*Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 3. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC3

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C3	300,0	0,704	223	0,0000518	214,67	0,6300	189,00
F1	654,0	0,008	380	0,000063	20,89	0,9375	613,13
F2	654,0	0,008	380	0,000063	20,89	0,9375	613,13
F17	662,0	0,005	15	0,000063	3,94	0,5000	331,00
D1	2,4	0,250	100	0,000221	0,65	2,2500	5,40
Woda	150,0	0,001	0	0,000000	0,15	0,1000	15,00
Produkcja betonu	2422,4	0,008	0	0,000000	19,38	0,0000	0,00
SUMA					280,56		1766,65

*Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 4. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC4

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C4	300,0	0,704	142	0,0000518	213,41	0,6300	189,00
F1	647,0	0,008	380	0,000063	20,67	0,9375	606,56
F2	647,0	0,008	380	0,000063	20,67	0,9375	606,56
F17	654,0	0,005	15	0,000063	3,89	0,5000	327,00
D1	2,4	0,250	100	0,000221	0,65	2,2500	5,40
Woda	150,0	0,001	0	0,000000	0,15	0,1000	15,00
Produkcja betonu	2400,4	0,008	0	0,000000	19,20	0,0000	0,00
SUMA					278,63		1749,53

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 5. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC5

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C5	300,0	0,889	303	0,0000518	271,41	0,8000	240,00
F1	654,0	0,008	380	0,000063	20,89	0,9375	613,13
F2	654,0	0,008	380	0,000063	20,89	0,9375	613,13
F17	662,0	0,005	15	0,000063	3,94	0,5000	331,00
D1	2,4	0,250	100	0,000221	0,65	2,2500	5,40
Woda	150,0	0,001	0	0,000000	0,15	0,1000	15,00
Produkcja betonu	2422,4	0,008	0	0,000000	19,38	0,0000	0,00
SUMA					337,30		1817,65

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 6. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC6

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C6	300,0	0,704	270	0,0000518	215,40	0,6000	180,00
F1	648,0	0,008	380	0,000063	20,70	0,9375	607,50
F2	648,0	0,008	380	0,000063	20,70	0,9375	607,50
F17	655,0	0,005	15	0,000063	3,89	0,5000	327,50
D1	2,4	0,250	100	0,000221	0,65	2,2500	5,40
Woda	150,0	0,001	0	0,000000	0,15	0,1000	15,00
Produkcja betonu	2403,4	0,008	0	0,000000	19,23	0,0000	0,00
SUMA					280,71		1742,90

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 7. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC7

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość *[km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C7	300,0	0,568	303	0,0000518	175,11	0,5100	153,00
F1	651,0	0,008	380	0,000063	20,79	0,9375	610,31
F2	651,0	0,008	380	0,000063	20,79	0,9375	610,31
F17	659,0	0,005	15	0,000063	3,92	0,5000	329,50
D1	2,4	0,250	100	0,000221	0,65	2,2500	5,40
Woda	150,0	0,001	0	0,000000	0,15	0,1000	15,00
Produkcja betonu	2413,4	0,008	0	0,000000	19,31	0,0000	0,00
SUMA					240,72		1723,53

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 8. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC8

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C8	300,0	0,482	303	0,0000518	149,31	0,4000	120,00
F1	651,0	0,008	380	0,000063	20,79	0,9375	610,31
F2	651,0	0,008	380	0,000063	20,79	0,9375	610,31
F17	660,0	0,005	15	0,000063	3,92	0,5000	330,00
D1	2,4	0,250	100	0,000221	0,65	2,2500	5,40
Woda	150,0	0,001	0	0,000000	0,15	0,1000	15,00
Produkcja betonu	2414,4	0,008	0	0,000000	19,32	0,0000	0,00
SUMA					214,94		1691,03

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 9. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC9

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C9	300,0	0,482	303	0,0000518	149,31	0,5200	156,00
F1	648,0	0,008	380	0,000063	20,70	0,9375	607,50
F2	648,0	0,008	380	0,000063	20,70	0,9375	607,50
F17	655,0	0,005	15	0,000063	3,89	0,5000	327,50
D1	2,4	0,250	100	0,000221	0,65	2,2500	5,40
Woda	150,0	0,001	0	0,000000	0,15	0,1000	15,00
Produkcja betonu	2403,4	0,008	0	0,000000	19,23	0,0000	0,00
SUMA					214,63		1718,90

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 10. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak M1C

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C5	300,0	0,889	303	0,0000518	271,41	0,8000	240,00
F3	1633,0	0,008	380	0,000063	52,16	0,9375	1530,94
F17	356,0	0,005	15	0,000063	2,12	0,5000	178,00
D2	3,0	0,250	55	0,000221	0,79	2,2500	6,75
Woda	150,0	0,001	0	0,000000	0,15	0,1000	15,00
Produkcja betonu	2442,0	0,008	0	0,000000	19,54	0,0000	0,00
SUMA					346,16		1970,69

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 11. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak M2C

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C5	300,0	0,889	303	0,0000518	271,41	0,8000	240,00
F3	1614,0	0,008	380	0,000063	51,55	0,9375	1513,13
F17	352,0	0,005	15	0,000063	2,09	0,5000	176,00
D2	3,0	0,250	55	0,000221	0,79	2,2500	6,75
P	22,5	0,250	100	0,000221	6,12	2,2500	50,63
Woda	136,5	0,001	0	0,000000	0,14	0,1000	13,65
Produkcja betonu	2428,0	0,008	0	0,000000	19,42	0,0000	0,00
SUMA					351,52		2000,15

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 12. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak M7C

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C5	300,0	0,889	303	0,0000518	271,41	0,8000	240,00
F3	1438,0	0,008	380	0,000063	45,93	0,9375	1348,13
F17	314,0	0,005	15	0,000063	1,87	0,5000	157,00
D2	3,0	0,250	55	0,000221	0,79	2,2500	6,75
M	60,0	0,000	390	0,0000518	1,21	0,0000	0,00
P	22,5	0,250	100	0,000221	6,12	2,2500	50,63
Woda	137,0	0,001	0	0,000000	0,14	0,1000	13,70
Produkcja betonu	2274,5	0,008	0	0,000000	18,20	0,0000	0,00
SUMA					345,66		1816,20

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 13. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF1

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C5	300,0	0,889	303	0,0000518	271,41	0,8000	240,00
F1	662,0	0,008	380	0,000063	21,14	0,9375	620,63
F2	662,0	0,008	380	0,000063	21,14	0,9375	620,63
FA17	677,0	0,005	15	0,000063	4,02	0,5000	338,50
D3	2,4	0,250	150	0,000221	0,68	2,2500	5,40
Woda	135,0	0,001	0	0,000000	0,14	0,1000	13,50
Produkcja betonu	2438,4	0,008	0	0,000000	19,51	0,0000	0,00
SUMA					338,04		1838,65

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 14. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF2

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C5	300,0	0,889	303	0,0000518	271,41	0,8000	240,00
F8	669,0	0,008	275	0,000063	16,94	0,9375	627,19
F9	669,0	0,008	275	0,000063	16,94	0,9375	627,19
F17	677,0	0,005	15	0,000063	4,02	0,5000	338,50
D3	2,4	0,250	150	0,000221	0,68	2,2500	5,40
Woda	135,0	0,001	0	0,000000	0,14	0,1000	13,50
Produkcja betonu	2452,4	0,008	0	0,000000	19,62	0,0000	0,00
SUMA					329,75		1851,78

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 15. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF3

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C5	300,0	0,889	303	0,0000518	271,41	0,80	240,00
F10	80,0	0,005	15	0,000063	0,48	1,25	100,00
F11	328,0	0,005	15	0,000063	1,95	1,25	410,00
F12	328,0	0,005	15	0,000063	1,95	1,25	410,00
F13	523,0	0,005	0	0,000000	2,62	0,00	0,00
F17	677,0	0,005	15	0,000063	4,02	0,50	338,50
D3	2,4	0,250	150	0,000221	0,68	2,25	5,40
Woda	135,0	0,001	0	0,000000	0,14	0,10	13,50
Produkcja betonu	2373,4	0,008	0	0,000000	18,99	0,00	0,00
SUMA					302,23		1517,40

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 16. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF4

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C5	300,00	0,889	303,00	0,0000518	271,41	0,80	240,00
F11	657,00	0,005	15,00	0,000063	3,91	1,25	821,25
F12	657,00	0,005	15,00	0,000063	3,91	1,25	821,25
F17	677,00	0,005	15,00	0,000063	4,02	0,50	338,50
D3	2,40	0,250	150,00	0,000221	0,68	2,25	5,40
Woda	135,00	0,001	0,00	0,000000	0,14	0,10	13,50
Produkcja betonu	2428,40	0,008	0,00	0,000000	19,43	0,00	0,00
SUMA					303,49		2239,90

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 17. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF5

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C5	300,0	0,889	303	0,0000518	271,41	0,8000	240,00
F14	669,0	0,008	220	0,000063	14,62	0,9375	627,19
F15	669,0	0,008	220	0,000063	14,62	0,9375	627,19
F17	677,0	0,005	15	0,000063	4,02	0,5000	338,50
D3	2,4	0,250	150	0,000221	0,68	2,2500	5,40
Woda	135,0	0,001	0	0,000000	0,14	0,1000	13,50
Produkcja betonu	2452,4	0,008	0	0,000000	19,62	0,0000	0,00
SUMA					325,12		1851,78

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 18. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF6

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C5	300,0	0,889	303	0,0000518	271,41	0,80	240,00
F11	655,0	0,005	15	0,000063	3,89	1,25	818,75
F12	655,0	0,005	15	0,000063	3,89	1,25	818,75
F16	507,0	0,000	50	0,000063	1,60	0,00	0,00
F17	225,0	0,005	15	0,000063	1,34	0,50	112,50
D3	4,8	0,250	150	0,000221	1,36	2,25	10,80
Woda	135,0	0,001	0	0,000000	0,14	0,10	13,50
Produkcja betonu	2481,8	0,008	0	0,000000	19,85	0,00	0,00
SUMA					303,48		2014,30

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 19. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF7

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C5	300,0	0,889	303	0,0000518	271,41	0,80	240,00
F10	159,0	0,005	15	0,000063	0,95	1,25	198,75
F13	1190,0	0,005	0	0,000000	5,95	0,00	0,00
F17	517,0	0,005	15	0,000063	3,07	0,50	258,50
D3	2,4	0,250	150	0,000221	0,68	2,25	5,40
Woda	135,0	0,001	0	0,000000	0,14	0,10	13,50
Produkcja betonu	2303,4	0,008	0	0,000000	18,43	0,00	0,00
SUMA					300,62		716,15

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 20. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF8

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C5	300,0	0,889	303	0,0000518	271,41	0,8000	240,00
F1	331,0	0,008	380	0,000063	10,57	0,9375	310,31
F10	80,0	0,005	15	0,000063	0,48	1,2500	100,00
F13	523,0	0,005	0	0,000000	2,62	0,0000	0,00
F2	331,0	0,008	380	0,000063	10,57	0,9375	310,31
F17	677,0	0,005	15	0,000063	4,02	0,5000	338,50
D3	2,4	0,250	150	0,000221	0,68	2,2500	5,40
Woda	135,0	0,001	0	0,000000	0,14	0,1000	13,50
Produkcja betonu	2379,4	0,008	0	0,000000	19,04	0,0000	0,00
SUMA					319,52		1318,03

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 21. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF9

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C5	300,0	0,889	303	0,0000518	271,41	0,8000	240,00
F1	660,0	0,008	380	0,000063	21,08	0,9375	618,75
F2	660,0	0,008	380	0,000063	21,08	0,9375	618,75
F16	597,0	0,000	50	0,000063	1,88	0,0000	0,00
F17	225,0	0,005	15	0,000063	1,34	0,5000	112,50
D3	4,8	0,250	150	0,000221	1,36	2,2500	10,80
Woda	135,0	0,001	0	0,000000	0,14	0,1000	13,50
Produkcja betonu	2581,8	0,008	0	0,000000	20,65	0,0000	0,00
SUMA					338,94		1614,30

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Załącznik 3 - wyznaczenie kosztu wyprodukowania 1 m³ mieszanki betonowej dla wariantów decyzyjnych CC1 – CC9, M1C, M2C, M7C, CF1 – CF9

Tabela nr 1. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC1

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C1	300,00	0,510	20,00	0,0003	154,80
F1	654,00	0,045	380,00	0,0002	79,13
F2	654,00	0,050	380,00	0,0002	82,40
F17	662,00	0,035	15,00	0,0002	25,16
D1	2,40	10,000	100,00	0,0004	24,10
Woda	150,00	0,005	0,00	0,0000	0,75
Produkcja betonu	2422,40	0,003	0,00	0,0000	7,27
SUMA					373,61

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 2. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC2

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C2	300,00	0,610	20,00	0,0003	184,80
F1	648,00	0,045	380,00	0,0002	78,41
F2	648,00	0,050	380,00	0,0002	81,65
F17	655,00	0,035	15,00	0,0002	24,89
D1	2,40	10,000	100,00	0,0004	24,10
Woda	150,00	0,005	0,00	0,0000	0,75
Produkcja betonu	2403,40	0,003	0,00	0,0000	7,21
SUMA					401,80

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 3. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC3

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C3	300,00	0,590	20,00	0,0003	178,80
F1	654,00	0,045	380,00	0,0002	79,13
F2	654,00	0,050	380,00	0,0002	82,40
F17	662,00	0,035	15,00	0,0002	25,16
D1	2,40	10,000	100,00	0,0004	24,10
Woda	150,00	0,005	0,00	0,0000	0,75
Produkcja betonu	2422,40	0,003	0,00	0,0000	7,27
SUMA					397,61

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 4. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC4

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C4	300,00	0,630	20,00	0,0003	190,80
F1	647,00	0,045	380,00	0,0002	78,29
F2	647,00	0,050	380,00	0,0002	81,52
F17	654,00	0,035	15,00	0,0002	24,85
D1	2,40	10,000	100,00	0,0004	24,10
Woda	150,00	0,005	0,00	0,0000	0,75
Produkcja betonu	2400,40	0,003	0,00	0,0000	7,20
SUMA					407,51

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 5. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC5

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/k·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C5	300,00	0,690	20,00	0,0003	208,80
F1	654,00	0,045	380,00	0,0002	79,13
F2	654,00	0,050	380,00	0,0002	82,40
F17	662,00	0,035	15,00	0,0002	25,16
D1	2,40	10,000	100,00	0,0004	24,10
Woda	150,00	0,005	0,00	0,0000	0,75
Produkcja betonu	2422,40	0,003	0,00	0,0000	7,27
SUMA					427,61

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 6. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC6

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C6	300,00	0,665	20,00	0,0003	201,30
F1	648,00	0,045	380,00	0,0002	78,41
F2	648,00	0,050	380,00	0,0002	81,65
F17	655,00	0,035	15,00	0,0002	24,89
D1	2,40	10,000	100,00	0,0004	24,10
Woda	150,00	0,005	0,00	0,0000	0,75
Produkcja betonu	2403,40	0,003	0,00	0,0000	7,21
SUMA					418,30

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 7. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC7

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C7	300,00	0,620	20,00	0,0003	187,80
F1	651,00	0,045	380,00	0,0002	78,77
F2	651,00	0,050	380,00	0,0002	82,03
F17	659,00	0,035	15,00	0,0002	25,04
D1	2,40	10,000	100,00	0,0004	24,10
Woda	150,00	0,005	0,00	0,0000	0,75
Produkcja betonu	2413,40	0,003	0,00	0,0000	7,24
SUMA					405,73

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 8. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC8

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C8	300,00	0,650	20,00	0,0003	196,80
F1	651,00	0,045	380,00	0,0002	78,77
F2	651,00	0,050	380,00	0,0002	82,03
F17	659,00	0,035	15,00	0,0002	25,04
D1	2,40	10,000	100,00	0,0004	24,10
Woda	150,00	0,005	0,00	0,0000	0,75
Produkcja betonu	2413,40	0,003	0,00	0,0000	7,24
SUMA					414,73

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 9. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CC9

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C9	300,00	0,610	20,00	0,0003	184,80
F1	648,00	0,045	380,00	0,0002	78,41
F2	648,00	0,050	380,00	0,0002	81,65
F17	655,00	0,035	15,00	0,0002	24,89
D1	2,40	10,000	100,00	0,0004	24,10
Woda	150,00	0,005	0,00	0,0000	0,75
Produkcja betonu	2403,40	0,003	0,00	0,0000	7,21
SUMA					401,80

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 10. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak M1C

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C5	300,00	0,690	20,00	0,0003	208,80
F3	1633,00	0,045	380,00	0,0002	197,59
F17	356,00	0,035	15,00	0,0002	13,53
D2	3,00	10,000	55,00	0,0004	30,07
Woda	150,00	0,005	0,00	0,0000	0,75
Produkcja betonu	2442,00	0,003	0,00	0,0000	7,33
SUMA					458,06

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 11. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak M2C

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C9	300,00	0,690	20,00	0,0003	208,80
F3	1614,00	0,045	380,00	0,0002	195,29
F17	352,00	0,035	15,00	0,0002	13,38
D1	3,00	10,000	55,00	0,0004	30,07
P	22,50	12,000	100,00	0,0004	270,90
Woda	136,50	0,005	0,00	0,0000	0,68
Produkcja betonu	2428,00	0,003	0,00	0,0000	7,28
SUMA					726,40

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 12. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak M7C

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C5	300,00	0,690	20,00	0,0003	208,80
F3	1438,00	0,045	380,00	0,0002	174,00
F17	314,00	0,035	15,00	0,0002	11,93
D2	3,00	10,000	55,00	0,0004	30,07
M	60,00	0,040	390,00	0,0004	11,76
P	22,50	12,000	100,00	0,0004	270,90
Woda	136,50	0,005	0,00	0,0000	0,68
Produkcja betonu	2274,00	0,003	0,00	0,0000	6,82
SUMA					714,96

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 13. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF1

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C5	300,00	0,690	20,00	0,0003	208,80
F1	662,00	0,045	380,00	0,0002	80,10
F2	662,00	0,050	380,00	0,0002	83,41
F17	677,00	0,035	15,00	0,0002	25,73
D3	2,40	10,000	150,00	0,0004	24,14
Woda	135,00	0,005	0,00	0,0000	0,68
Produkcja betonu	2438,40	0,003	0,00	0,0000	7,32
SUMA					430,17

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 14. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF2

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C5	300,00	0,690	20,00	0,0003	208,80
F8	669,00	0,040	275,00	0,0002	63,56
F9	669,00	0,050	275,00	0,0002	70,25
F17	677,00	0,035	15,00	0,0002	25,73
D3	2,40	10,000	150,00	0,0004	24,14
Woda	135,00	0,005	0,00	0,0000	0,68
Produkcja betonu	2452,40	0,003	0,00	0,0000	7,36
SUMA					400,50

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 15. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF3

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C5	300,00	0,690	20,00	0,0003	208,80
F10	80,00	0,066	15,00	0,0002	5,52
F11	328,00	0,067	15,00	0,0002	22,96
F12	328,00	0,067	15,00	0,0002	22,96
F13	523,00	0,030	0,00	0,0002	15,69
F17	677,00	0,035	15,00	0,0002	25,73
D3	2,40	10,000	150,00	0,0004	24,14
Woda	135,00	0,005	0,00	0,0000	0,68
Produkcja betonu	2373,40	0,003	0,00	0,0000	7,12
SUMA					333,60

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 16. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF4

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C5	300,00	0,690	20,00	0,0003	208,80
F11	657,00	0,067	15,00	0,0002	45,99
F12	657,00	0,067	15,00	0,0002	45,99
F17	677,00	0,035	15,00	0,0002	25,73
D3	2,40	10,000	150,00	0,0004	24,14
Woda	135,00	0,005	0,00	0,0000	0,68
Produkcja betonu	2428,40	0,003	0,00	0,0000	7,29
SUMA					358,61

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 17. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF5

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C5	300,00	0,690	20,00	0,0003	208,80
F14	669,00	0,046	220,00	0,0002	60,21
F15	669,00	0,045	220,00	0,0002	59,54
F17	677,00	0,035	15,00	0,0002	25,73
D3	2,40	10,000	150,00	0,0004	24,14
Woda	135,00	0,005	0,00	0,0000	0,68
Produkcja betonu	2452,40	0,003	0,00	0,0000	7,36
SUMA					386,45

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 18. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF6

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C5	300,00	0,690	20,00	0,0003	208,80
F11	655,00	0,067	15,00	0,0002	45,85
F12	655,00	0,067	15,00	0,0002	45,85
F16	507,00	0,030	50,00	0,0002	20,28
F17	225,00	0,035	15,00	0,0002	8,55
D3	4,80	10,000	150,00	0,0004	48,29
Woda	135,00	0,005	0,00	0,0000	0,68
Produkcja betonu	2481,80	0,003	0,00	0,0000	7,45
SUMA					385,61

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 19. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF7

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C5	300,00	0,690	20,00	0,0003	208,80
F10	159,00	0,066	15,00	0,0002	10,97
F13	1190,00	0,030	0,00	0,0002	35,70
F17	517,00	0,035	15,00	0,0002	19,65
D3	2,40	10,000	150,00	0,0004	24,14
Woda	135,00	0,005	0,00	0,0004	0,68
Produkcja betonu	2303,40	0,003	0,00	0,0000	6,91
SUMA					306,85

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 20. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF8

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C5	300,00	0,690	20,00	0,0003	208,80
F1	331,00	0,045	380,00	0,0002	40,05
F10	80,00	0,066	15,00	0,0002	5,52
F13	523,00	0,030	0,00	0,0002	15,69
F2	331,00	0,050	380,00	0,0002	41,71
F17	677,00	0,035	15,00	0,0002	25,73
D3	2,40	10,000	150,00	0,0004	24,14
Woda	135,00	0,005	0,00	0,0000	0,68
Produkcja betonu	2379,40	0,003	0,00	0,0000	7,14
SUMA					369,45

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 21. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak CF9

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C5	300,00	0,690	20,00	0,0003	208,80
F1	660,00	0,045	380,00	0,0002	79,86
F2	660,00	0,050	380,00	0,0002	83,16
F16	597,00	0,030	50,00	0,0002	23,88
F17	225,00	0,035	15,00	0,0002	8,55
D3	4,80	10,000	150,00	0,0004	48,29
Woda	135,00	0,005	0,00	0,0000	0,68
Produkcja betonu	2581,80	0,003	0,00	0,0000	7,75
SUMA					460,96

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Załącznik 4 - wyznaczenie śladów węglowych oraz wartości zużycia surowców naturalnych dla wariantów decyzyjnych RC1 – RC6

Tabela nr 1. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak RC1

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C10	350,00	0,889	370,00	0,0000518	317,86	0,80	280,00
F18	531,00	0,008	400,00	0,0000630	17,63	0,94	497,81
F19	683,00	0,008	400,00	0,0000630	22,68	0,94	640,31
F17	683,00	0,005	15,00	0,0000630	4,06	0,50	341,50
Woda	152,00	0,001	0,00	0,0000000	0,15	0,10	15,20
D4	2,45	0,250	200,00	0,0002210	0,72	2,25	5,51
D5	0,70	0,250	200,00	0,0002210	0,21	2,25	1,58
Produkcja betonu	2402,15	0,008	0,00	0,0000000	19,22	0,00	0,00
SUMA					382,52		1781,91

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 2. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak RC2

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C10	350,00	0,889	370,00	0,0000518	317,86	0,80	280,00
F18	531,00	0,008	400,00	0,0000630	17,63	0,94	497,81
F19	683,00	0,008	400,00	0,0000630	22,68	0,94	640,31
F17	714,00	0,005	15,00	0,0000630	4,24	0,50	357,00
Woda	152,00	0,001	0,00	0,0000000	0,15	0,10	15,20
D6	2,45	0,250	410,00	0,0002210	0,83	2,25	5,51
D7	0,39	0,250	410,00	0,0002210	0,13	2,25	0,88
D8	1,00	0,250	410,00	0,0002210	0,34	2,25	2,25
Produkcja betonu	2433,84	0,008	0,00	0,0000000	19,47	0,00	0,00
SUMA					383,34		1798,97

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 3. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak RC3

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C11	370,00	0,889	223,00	0,0000518	333,20	0,80	296,00
F1	520,00	0,008	380,00	0,0000630	16,61	0,94	487,50
F2	620,00	0,008	380,00	0,0000630	19,80	0,94	581,25
F17	650,00	0,005	15,00	0,0000630	3,86	0,50	325,00
Woda	161,00	0,001	0,00	0,0000000	0,16	0,10	16,10
D9	1,11	0,250	100,00	0,0002210	0,30	2,25	2,50
D10	1,85	0,250	100,00	0,0002210	0,50	2,25	4,16
D11	0,37	0,250	100,00	0,0002210	0,10	2,25	0,83
Produkcja betonu	2324,33	0,008	0,00	0,0000000	18,59	0,00	0,00
SUMA					393,14		1713,34

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 4. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak RC4

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C12	370,00	0,889	223,00	0,0000518	333,20	0,80	296,00
F1	520,00	0,008	380,00	0,0000630	16,61	0,94	487,50
F2	620,00	0,008	380,00	0,0000630	19,80	0,94	581,25
F17	650,00	0,005	15,00	0,0000630	3,86	0,50	325,00
Woda	161,00	0,001	0,00	0,0000000	0,16	0,10	16,10
D9	1,11	0,250	100,00	0,0002210	0,30	2,25	2,50
D10	1,85	0,250	100,00	0,0002210	0,50	2,25	4,16
D11	0,37	0,250	100,00	0,0002210	0,10	2,25	0,83
Produkcja betonu	2324,33	0,008	0,00	0,0000000	18,59	0,00	0,00
SUMA					393,19		1713,77

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 5. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak RC5

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C11	360,00	0,889	370,00	0,0000518	326,94	0,80	288,00
F1	583,00	0,008	421,00	0,0000630	20,13	0,94	546,56
F2	583,00	0,008	421,00	0,0000630	20,13	0,94	546,56
F17	698,00	0,005	15,00	0,0000630	4,15	0,50	349,00
Woda	155,00	0,001	0,00	0,0000000	0,16	0,10	15,50
D12	0,43	0,250	100,00	0,0002210	0,12	2,25	0,97
D13	2,16	0,250	100,00	0,0002210	0,59	2,25	4,86
D14	2,16	0,250	100,00	0,0002210	0,59	2,25	4,86
Produkcja betonu	2383,75	0,008	0,00	0,0000000	19,07	0,00	0,00
SUMA					391,86		1756,31

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 6. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak RC6

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C11	360,00	0,889	370,00	0,0000518	326,94	0,80	288,00
F1	546,00	0,008	421,00	0,0000630	18,85	0,94	511,88
F2	759,00	0,008	421,00	0,0000630	26,20	0,94	711,56
F17	645,00	0,005	15,00	0,0000630	3,83	0,50	322,50
Woda	155,00	0,001	0,00	0,0000000	0,16	0,10	15,50
D12	0,43	0,250	100,00	0,0002210	0,12	2,25	0,97
D13	2,16	0,250	100,00	0,0002210	0,59	2,25	4,86
D14	2,16	0,250	100,00	0,0002210	0,59	2,25	4,86
Produkcja betonu	2469,75	0,008	0,00	0,0000000	19,76	0,00	0,00
SUMA					397,03		1860,13

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Załącznik 5 - wyznaczenie kosztu wyprodukowania 1 m³ mieszanki betonowej dla wariantów decyzyjnych RC1 – RC6

Tabela nr 1. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak RC1

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C10	350,00	0,790	20,00	0,0003	278,60
F18	531,00	0,040	400,00	0,0002	63,72
F19	683,00	0,040	400,00	0,0002	81,96
F17	683,00	0,035	15,00	0,0002	25,95
Woda	152,00	0,005	0,00	0,0000	0,76
D4	2,45	16,100	20,00	0,0004	39,46
D5	0,70	10,000	20,00	0,0004	7,01
Produkcja betonu	2402,15	0,003	0,00	0,0000	7,21
SUMA					504,67

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 2. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak RC2

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C10	350,00	0,790	20,00	0,0003	278,60
F18	531,00	0,040	400,00	0,0002	63,72
F19	683,00	0,040	400,00	0,0002	81,96
F17	714,00	0,035	15,00	0,0002	27,13
Woda	152,00	0,005	0,00	0,0000	0,76
D6	2,45	10,000	20,00	0,0004	24,52
D7	0,39	6,500	20,00	0,0004	2,54
D8	1,00	6,500	20,00	0,0004	6,51
Produkcja betonu	2433,84	0,003	0,00	0,0000	7,30
SUMA					493,04

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 3. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak RC3

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C11	370,00	0,740	20,00	0,0003	276,02
F1	520,00	0,045	380,00	0,0002	62,92
F2	620,00	0,050	380,00	0,0002	78,12
F17	650,00	0,035	15,00	0,0002	24,70
Woda	161,00	0,005	0,00	0,0000	0,81
D9	1,11	6,500	20,00	0,0004	7,22
D10	1,85	7,680	20,00	0,0004	14,22
D11	0,37	16,050	20,00	0,0004	5,94
Produkcja betonu	2324,33	0,003	0,00	0,0000	6,97
SUMA					476,93

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 4. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak RC4

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C12	370,00	0,790	20,00	0,0003	294,52
F1	520,00	0,045	380,00	0,0002	62,92
F2	620,00	0,050	380,00	0,0002	78,12
F17	650,00	0,035	15,00	0,0002	24,70
Woda	161,00	0,005	0,00	0,0000	0,81
D9	1,11	6,500	20,00	0,0004	7,22
D10	1,85	7,680	20,00	0,0004	14,22
D11	0,56	16,050	20,00	0,0004	8,99
Produkcja betonu	2324,52	0,003	0,00	0,0000	6,97
SUMA					498,48

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 5. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak RC5

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C11	360,00	0,79	20,00	0,0003	286,56
F1	583,00	0,039	421,00	0,0002	71,83
F2	583,00	0,048	421,00	0,0002	77,07
F17	698,00	0,035	15,00	0,0002	26,52
Woda	155,00	0,005	0,00	0,0000	0,78
D12	0,43	10	20,00	0,0004	4,30
D13	2,16	10	20,00	0,0004	21,62
D14	2,16	10	20,00	0,0004	21,62
Produkcja betonu	2383,75	0,003	0,00	0,0000	7,15
SUMA					517,45

** Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 6. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak RC6

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C11	360,00	0,790	20,00	0,0003	286,56
F1	546,00	0,039	421,00	0,0002	67,27
F2	759,00	0,048	421,00	0,0002	100,34
F17	645,00	0,035	15,00	0,0002	24,51
Woda	155,00	0,005	0,00	0,0000	0,78
D12	0,43	10,000	20,00	0,0004	4,30
D13	2,16	10,000	20,00	0,0004	21,62
D14	2,16	10,000	20,00	0,0004	21,62
Produkcja betonu	2469,75	0,003	0,00	0,0000	7,41
SUMA					534,40

** Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Załącznik 6 - wyznaczenie śladów węglowych oraz wartości zużycia surowców naturalnych dla wariantów decyzyjnych DB-01 – DB-03, GB-01 – GB-03

Tabela nr 1. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak DB-01

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C10	370,00	0,889	370,00	0,0000518	336,02	0,80	296,00
F1	273,00	0,008	380,00	0,0000630	8,72	0,94	255,94
F2	400,00	0,008	380,00	0,0000630	12,78	0,94	375,00
F4	600,00	0,008	380,00	0,0000630	19,16	0,94	562,50
F17	545,00	0,005	15,00	0,0000630	3,24	0,50	272,50
W	133,00	0,001	0,00	0,0000000	0,13	0,10	13,30
D15	2,04	0,250	100,00	0,0002210	0,56	2,25	4,59
D16	0,59	0,250	100,00	0,0002210	0,00	2,25	1,33
Produkcja betonu	2323,63	0,008	0,00	0,0000000	18,59	0,00	0,00
SUMA					399,20		1781,16

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 2. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak DB-02

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość* [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C14	370,00	0,889	223,00	0,0000518	333,20	0,80	296,00
F5	401,00	0,008	264,00	0,0000630	9,88	0,94	375,94
F6	331,00	0,008	264,00	0,0000630	8,15	0,94	310,31
F7	664,00	0,008	264,00	0,0000630	16,36	0,94	622,50
F17	514,00	0,005	15,00	0,0000630	3,06	0,50	257,00
W	131,00	0,001	0,00	0,0000000	0,13	0,10	13,10
D8	2,22	0,250	410,00	0,0002210	0,76	2,25	5,00
D18	0,44	0,250	410,00	0,0002210	0,00	2,25	
Produkcja betonu	2413,66	0,008	0,00	0,0000000	19,31	0,00	0,00
SUMA					390,84		1879,85

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 3. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak DB-03

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C13	370,00	0,889	303,00	0,0000518	334,74	0,80	296,00
F5	401,00	0,008	264,00	0,0000630	9,88	0,94	375,94
F6	331,00	0,008	264,00	0,0000630	8,15	0,94	310,31
F7	664,00	0,008	264,00	0,0000630	16,36	0,94	622,50
F17	514,00	0,005	15,00	0,0000630	3,06	0,50	257,00
W	131,00	0,001	0,00	0,0000000	0,13	0,10	13,10
D17	2,22	0,250	100,00	0,0002210	0,60	2,25	5,00
D16	0,33	0,250	100,00	0,0002210	0,09	2,25	0,74
Produkcja betonu	2413,55	0,008	0,00	0,0000000	19,31	0,00	0,00
SUMA					392,31		1880,59

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 4. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak GB-01

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C12	425,00	0,889	223,00	0,0000518	382,73	0,80	340,00
F20	81,00	0,008	400,00	0,0000630	2,69	0,94	75,94
F21	1217,00	0,008	400,00	0,0000630	40,40	0,94	1140,94
F17	505,00	0,005	15,00	0,0000630	3,00	0,50	252,50
W	149,00	0,001	0,00	0,0000000	0,15	0,10	14,90
D15	2,34	0,250	100,00	0,0002210	0,64	2,25	5,27
D16	0,60	0,250	100,00	0,0002210	0,16	2,25	1,35
Produkcja betonu	2379,94	0,008	0,00	0,0000000	19,04	0,00	0,00
SUMA					448,82		1830,89

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 5. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak GB-02

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C13	420,00	0,889	303,00	0,0000518	379,97	0,80	336,00
F24	284,00	0,008	421,00	0,0000630	9,80	0,94	266,25
F25	1078,00	0,008	421,00	0,0000630	37,22	0,94	1010,63
F17	529,00	0,005	15,00	0,0000630	3,14	0,50	264,50
W	153,00	0,001	0,00	0,0000000	0,15	0,10	15,30
D17	2,94	0,250	100,00	0,0002210	0,80	2,25	6,62
D16	0,38	0,250	100,00	0,0002210	0,10	2,25	0,86
Produkcja betonu	2467,32	0,008	0,00	0,0000000	19,74	0,00	0,00
SUMA					450,93		1900,15

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Tabela nr 6. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak GB-03

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Odległość * [km]	Emisja CO ₂ podczas transportu [kgCO ₂ /kg km]	Całkowity ślad węglowy [kgCO ₂ /kg]	Współczynnik zużycia surowca [kg/kg]	Wartość zużycia surowców [kg/m ³]
C13	420,00	0,889	303,00	0,0000518	379,97	0,80	336,00
F24	284,00	0,008	421,00	0,0000630	9,80	0,94	266,25
F25	1077,00	0,008	421,00	0,0000630	37,18	0,94	1009,69
F17	529,00	0,005	15,00	0,0000630	3,14	0,50	264,50
W	154,00	0,001	0,00	0,0000000	0,15	0,10	15,40
D8	2,52	0,250	410,00	0,0002210	0,86	2,25	5,67
D18	0,25	0,250	410,00	0,0002210	0,09	2,25	0,56
Produkcja betonu	2466,77	0,008	0,00	0,0000000	19,73	0,00	0,00
SUMA					450,93		1898,07

**Odległość liczona od zakładu produkcyjnego do miejsca produkcji mieszanki betonowej*

Załącznik 7 - wyznaczenie kosztu wyprodukowania 1 m³ mieszanki betonowej dla wariantów decyzyjnych DB-01 – DB-03, GB-01 – GB-03

Tabela nr 1. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak DB-01

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C10	370,00	0,790	20,00	0,0003	294,52
F1	273,00	0,045	380,00	0,0002	33,03
F2	400,00	0,050	380,00	0,0002	50,40
F4	600,00	0,040	380,00	0,0002	69,60
F17	545,00	0,035	15,00	0,0002	20,71
W	133,00	0,005	0,00	0,0000	0,67
D15	2,04	10,000	20,00	0,0004	20,42
D16	0,59	10,000	20,00	0,0004	5,90
Produkcja betonu	2323,63	0,003	0,00	0,0000	6,97
SUMA					502,22

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 2. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak DB-02

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C14	370,00	0,790	20,00	0,0003	294,52
F5	401,00	0,055	264,00	0,0002	43,23
F6	331,00	0,050	264,00	0,0002	34,03
F7	664,00	0,050	264,00	0,0002	68,26
F17	514,00	0,035	15,00	0,0002	19,53
W	131,00	0,005	0,00	0,0000	0,66
D8	2,22	6,500	20,00	0,0004	14,45
D18	0,44	6,500	20,00	0,0004	2,86
Produkcja betonu	2413,66	0,003	0,00	0,0000	7,24
SUMA					484,77

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 3. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak DB-03

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C13	370,00	0,690	20,00	0,0003	257,52
F5	401,00	0,055	264,00	0,0002	43,23
F6	331,00	0,050	264,00	0,0002	34,03
F7	664,00	0,050	264,00	0,0002	68,26
F17	517,00	0,035	15,00	0,0002	19,65
W	131,00	0,005	0,00	0,0000	0,66
D17	2,22	10,000	20,00	0,0004	22,22
D16	0,33	10,000	20,00	0,0004	3,30
Produkcja betonu	2416,55	0,003	0,00	0,0000	7,25
SUMA					456,10

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 4. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak GB-01

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C12	425,00	0,790	20,00	0,0003	338,30
F20	81,00	0,047	400,00	0,0002	10,29
F21	1217,00	0,048	400,00	0,0002	155,78
F17	505,00	0,035	15,00	0,0002	19,19
W	149,00	0,005	0,00	0,0000	0,75
D15	2,34	10,000	20,00	0,0004	23,42
D16	0,60	10,000	20,00	0,0004	6,00
Produkcja betonu	2379,94	0,003	0,00	0,0000	7,14
SUMA					560,86

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 5. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak GB-02

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C13	420,00	0,690	20,00	0,0003	292,32
F24	284,00	0,039	421,00	0,0002	34,99
F25	1078,00	0,050	421,00	0,0002	144,67
F17	529,00	0,035	15,00	0,0002	20,10
W	153,00	0,005	0,00	0,0000	0,77
D17	2,94	10,000	20,00	0,0004	29,42
D16	0,38	10,000	20,00	0,0004	3,80
Produkcja betonu	2467,32	0,003	0,00	0,0000	7,40
SUMA					533,47

* Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej

Tabela nr 6. Obliczenia dla wariantu decyzyjnego – receptura znak GB-03

Składnik	Ilość [kg/m ³]	Cena jednostkowa [zł/kg]	Odległość* [km]	Jednostkowy koszt transportu [zł/kg·km]	Koszt 1 m ³ mieszanki betonowej [zł/m ³]
C13	420,00	0,690	20,00	0,0003	292,32
F24	284,00	0,039	421,00	0,0002	34,99
F25	1077,00	0,050	421,00	0,0002	144,53
F17	529,00	0,035	15,00	0,0002	20,10
W	154,00	0,005	0,00	0,0000	0,77
D8	2,52	6,500	20,00	0,0004	16,40
D18	0,25	6,500	20,00	0,0004	1,63
Produkcja betonu	2466,77	0,003	0,00	0,0000	7,40
SUMA					518,14

** Odległość liczona od miejsca zakupu składnika do miejsca produkcji mieszanki betonowej*