

Koncepcja zintegrowanej analizy kosztów i generowanego śladu węglowego w cyklu życia budynku

Dr hab. inż. Krzysztof Zima, prof. uczelni, mgr inż. Apolonia Przesmycka, Katedra Zarządzania w Budownictwie, Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Rosnąca świadomość ekologiczna silnie wpływa na zainteresowanie i decyzje wielu rządów na całym świecie związane ze zrównoważonym rozwojem. Poprawa efektywności energetycznej i niższa emisja CO₂ stają się jednym z głównych celów poprawy stanu środowiska, ponieważ sektor budowlany w znacznym stopniu przyczynia się do globalnej emisji gazów cieplarnianych (GHG), a około jedna trzecia globalnego końcowego zużycia energii ma miejsce w budynkach. Głównym źródłem emisji GHG z budynków jest energia wykorzystywana do ogrzewania, chłodzenia, oświetlenia czyli ich użytkowanie. Należy również wspomnieć, że budynki także emitują spore ilości gazów cieplarnianych podczas ich budowy w oparciu o użyte materiały i odpady budowlane. Ponadto, według Międzynarodowej Agencji Energetycznej, budynki obecnie są odpowiedzialne za 40% zużycia energii w większości krajów, a przewiduje się, że popyt w tym sektorze wzrośnie o 60% do 2050 roku. [1]

2. Problematyka śladu węglowego w gospodarce

Emisja dwutlenku węgla, który jest głównym komponentem gazów cieplarnianych, na przestrzeni ostatnich dekad, wzrasta stopniowo wraz z rozwojem technologicznym. Gazy cieplarniane mają znaczący wpływ na środowisko (np. globalne ocieplenie klimatu) przyczyniając się do jego deterioracji. Emisje gazów cieplarnianych zależne są od wielu aspektów. Ma na nie wpływ sytuacja ekonomiczno-gospodarcza, zróżnicowanie społeczne oraz innowacyjność. Te wszystkie czynniki determinują rozkład przestrzenny działań podejmowanych na danym obszarze miejskim. W konsekwencji otrzymujemy określoną ilość gazów cieplarnianych, która może w sposób istotny wpłynąć na zmiany klimatu prowadzące do klęsk żywiołowych lub też ograniczeń zasobów (rys. 1).

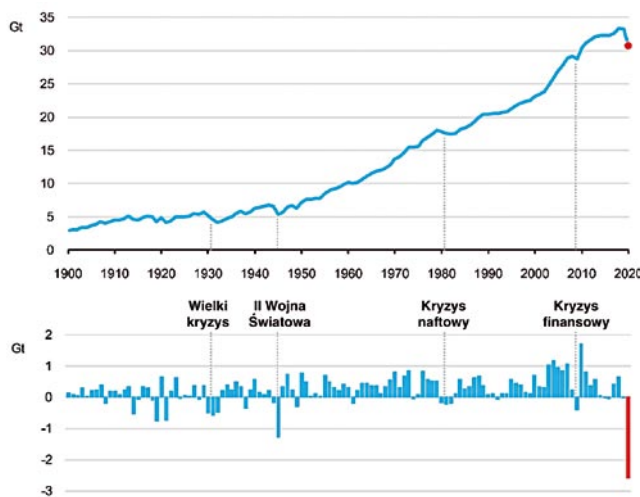
Rys. 1. Relacja między działaniami na obszarze miejskim i zmianą klimatu; źródło: [2]



Zgromadzone i udostępnione dane przez Międzynarodową Agencję Energetyczną (MAE) przedstawiające globalne emisje CO₂ związane z energią potwierdzają wspomniany znaczący wzrost produkcji dwutlenku węgla na przestrzeni ostatniego wieku (rys. 2). Wykres pokazuje również wpływ kryzysu COVID-19 na istotne obniżenie globalnego zapotrzebowania na energię, co przyczyniło się do obniżenia emisji CO₂. Według Raportu Stanu Globalnego dla Budynków i Budownictwa [3] MAE oszacowało, że wpływ COVID-19 na światowy przemysł budowlany był poważny, a działalność budowlana spadła o 10–25% w porównaniu z 2019 r.

Według statystyk Urzędu Statystycznego Unii Europejskiej Eurostat emisja CO₂ w 2019 r. w Unii Europejskiej (EU-27) w sektorze budownictwo i nieruchomości wyniosła aż 12% (na podstawie rysunku 3) całkowitej emisji CO₂ wytwarzanej przez kraje Unii Europejskiej.

Ponadto należy również przybliżyć statystyki globalne, które pokazują, że sektor budownictwa na całym świecie wykazuje także wzrost zarówno emisji, jak i zużycia energii. Budowa i eksploatacja budynków odpowiadają za największy udział zarówno w globalnym zużyciu energii końcowej (35%), jak i emisji CO₂ związanych z energią (38%) w 2019 r. (rys. 4). Przy czym aż 28% emisji pochodzi z eksploatacji budynków, natomiast do pozostałych 10% przyczynia się zużycie energii potrzebnej do produkcji materiałów oraz technologii używanych w budownictwie (jest to tzw. wbudowany ślad węglowy). Są to stosunkowo duże frakcje, lecz przy obecnych możliwościach wykorzystania rozwiązań zrównoważonego budownictwa i racjonalnego planowania w połączeniu z nowoczesnymi systemami zarządzania w budownictwie – możliwe do obniżenia.



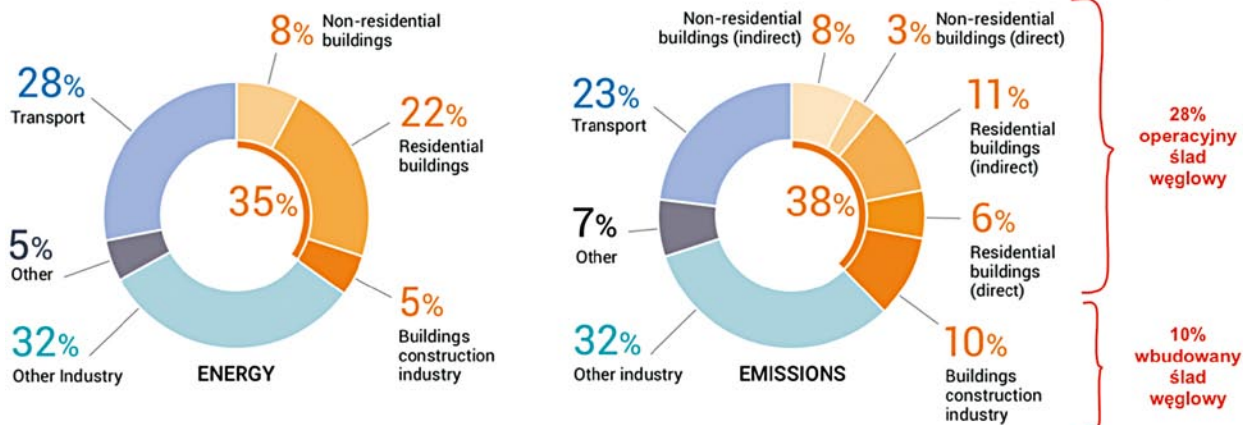
Rys. 2. Globalne emisje CO₂ związane z energią i roczna zmiana, 1900–2020 (źródło: Global Energy Review 2020, The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO₂ emissions, Międzynarodowa Agencja Energetyczna – MAE)

Jednak wymaga to większych działań wszystkich uczestników pojawiających się na różnych etapach procesów i działań łączących się w ogromne łańcuchy decyzji zależnych od siebie podejmowanych w sektorze budownictwa. Inwestorzy, decydenci, projektanci, budowniczy i inni uczestnicy tego łańcucha na całym świecie powinni podejmować działania mające na celu dekarbonizację globalnych zasobów budowlanych i poprawę ich charakterystyki energetycznej. Stąd proponowana analiza rozwiązań

konstrukcyjno-materiałowych w aspekcie kosztowo-środowiskowym mogłaby pomóc w optymalizacji wyborów we wszystkich fazach cyklu życia budynku oraz mieć wpływ na poszczególne decyzje uczestników tego sektora. Celem artykułu jest analiza istotności problematyki śladu węglowego oraz pokazanie wstępnej koncepcji systemu wspomagania podejmowania decyzji inwestycyjnych na podstawie zintegrowanej analizy kosztów i wielkości śladu węglowego w całym cyklu życia budynku. W ramach dalszych prac nad wspomnianą koncepcją podjęta zostanie analiza kosztów i wielkości emisji gazów cieplarnianych dla poszczególnych faz procesu budowlanego pozwalająca wdrażać rozwiązania i przeciwdziałać negatywnemu wpływowi na środowisko, bez zwiększania kosztów budowy. Udział w każdej z faz ilości wyprodukowanego węgla na potrzeby wybudowania i użytkowania budynku jest zależny przede wszystkim od wykorzystanych w nim materiałów oraz przyjętych rozwiązań projektowych. Analiza symulowanego cyklu życia będzie się opierać na rozwiązaniach uwzględniających zarówno wbudowany (ECF – Embodied Carbon Footprint) i operacyjny (OCF – Operational Carbon Footprint) ślad węglowy przy uwzględnieniu kosztów, aby opracować zoptymalizowany schemat systemu wspomagania podejmowania decyzji w poszczególnych fazach cyklu życia. Przy czym ECF, czyli wbudowany ślad węglowy, to ilość CO₂ wyemitowanego podczas realizacji obiektu budowlanego i obejmuje m.in. wydobycie surowców, produkcję materiałów, transport, budowę obiektu oraz rozbiórkę i utylizację materiałów po zakończeniu eksploatacji. Natomiast OCF to ilość CO₂

Rys. 3. Zestawienie ilości śladu węglowego dla szerokiej grupy produktów. Rozmiar każdego prostokąta reprezentuje względną wielkość śladu CO₂ dla tej grupy produktów; opracowane na podstawie: https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=File:CO2_footprints,_by_product_group,_EU-27,_2019.png

Zestawienie ilości śladu węglowego dla poszczególnych sektorów [kg/osobę]

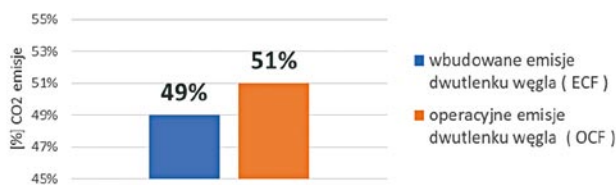


Rys. 4. Globalny udział energii końcowej i emisji dla sektora budownictwa, 2019; źródło: [3]

emitowana podczas fazy eksploatacji obiektu budowlanego, która obejmuje użytkowanie, zarządzanie i konserwację obiektu. OCF to operacyjny ślad węglowy dla studium przypadku budynku, tj. emisja CO₂ związana z pokryciem zapotrzebowania na ogrzewanie pomieszczeń, wentylację, ciepłą wodę użytkową, oświetlenie i urządzenia. [4]

Istotną różnicą pomiędzy operacyjnymi i wbudowanymi emisjami dwutlenku węgla jest ograniczona możliwość modyfikacji wielkości wbudowanego śladu węglowego. Wielkość ECF należy odpowiednio oszacować już na etapie projektowania budynku. W przeciwieństwie do operacyjnych emisji dwutlenku węgla, które można z czasem zmniejszyć dzięki renowacji budynków pod kątem efektywności energetycznej i wykorzystaniu energii odnawialnej, wbudowane emisje dwutlenku węgla są blokowane od razu po wybudowaniu budynku.

Według organizacji Architecture 2030, szacuje się, że do roku 2050, uwzględniając wszystkie nowo powstałe konstrukcje w okresie 2020–2050, wbudowane emisje dwutlenku węgla i operacyjne emisje dwutlenku węgla będą niemalże zrównoważone (rys. 5).



Rys. 5. Całkowite emisje dwutlenku węgla z nowych konstrukcji na świecie w latach 2020–2050; źródło: [5]

3. Analiza literatury ogólnowiatowej z zakresu śladu węglowego

3.1. Terminologia i zakres analizy w VOSviewer

Wyniki przeprowadzonej analizy literatury opierają się na zastosowaniu słów kluczowych i ograniczeniach wprowadzonych do wyszukiwania zaawansowanego w bazie danych scopus. Wyselekcjonowane z bazy wyniki wprowadzone zostały do programu VOSviewer w celu analizy powiązań otrzymanego wykazu literatury dla zadanego obszaru tematycznego. Zaobserwowanie zależności i relacji pomiędzy wybranymi słowami kluczowymi (*carbon footprint, embodied carbon, CO₂ emission, emissions, greenhouse gases, cost, building, construction, LCC*) wymagało utworzenia 10 zestawów danych.

Za pomocą programu VOSviewer wersja 1.6.16 stworzone zostały wizualizacje w formie map zawierających elementy – „items”. Elementami nazywani są np. badacze, publikacje, słowa terminy itp. Każdorazowo wygenerowana mapa zawiera jeden typ elementu. Pomiedzy dowolnymi parami elementów mogą znajdować się połączenia/linki – „links”. Link/połączenie to relacja między dwoma elementami. W ramach analizy wykorzystano relacje pomiędzy współautorstwem wśród wyselekcjonowanych na podstawie publikacji badaczy oraz

powiązania współwystępowania między terminami. Ponadto pomiędzy dowolną parą elementów nie może być więcej niż jedno połączenie. Każdy link ma siłę – „the strength of a link”, reprezentowaną przez dodatnią wartość liczbową. Im wyższa ta wartość, tym mocniejszy link. Siła linku może np. wskazywać na liczbę cytowanych odniesień wspólnych dla dwóch publikacji, liczbę publikacji, których współautorami są dwaj badacze (dla linków współautorskich) lub liczbę publikacji, w których dwa terminy występują razem (dla powiązań współwystępowania). Czasami wszystkie połączenia między elementami mają jedną siłę. VOSviewer nie pokazuje wówczas siły linku. Elementy i linki razem tworzą sieć – „network”. Sieć jest zatem zbiorem elementów wraz z połączeniami między elementami. Elementy grupowane są w klastry. Klastrer to zbiór – „set” elementów zawartych na mapie. Klastry w VOSviewer nie nakładają się. Oznacza to, że element może należeć tylko do jednego klastra. Klastry nie muszą obejmować wszystkich elementów na mapie. W związku z tym mogą istnieć pozycje, które nie należą do żadnego klastra. Klastry są oznaczone numerami klastrów. Jeśli istnieje tylko jeden klastrer, ten klastrer ma zwykle klastrer numer 1, jeśli istnieją dwa klastry, klastry te mają zwykle klastry o numerach 1 i 2 i tak kolejno. Elementy w VOSviewer mogą mieć różne atrybuty – „attributes”. Jeśli elementy zostały przypisane do klastrów, to numery klastrów mogą być przykładem atrybutu. Program uwzględnia również wagę elementu – „weight”. Element o wyższej wadze jest uważany za ważniejszy niż element o niższej wadze. W wizualizacji mapy elementy o wyższej wadze są bardziej widoczne niż elementy o niższej wadze.

Na wizualizacji przedstawiającej sieci elementy są reprezentowane przez ich etykietę – „label” i domyślnie również przez okrąg lub ramkę. W celu odróżnienia typu analizy, dla każdego zestawu danych została przydzielona etykieta w formie okręgu dla omówienia połączeń między elementami, jakimi są autorzy publikacji oraz w formie ramki dla określania połączeń między elementami słowa klucz. Rozmiar etykiety i okręgu/ramki przedmiotu określa waga elementu. Im wyższa waga elementu, tym większa etykieta i okrąg/ramka. W przypadku niektórych elementów etykieta może nie być wyświetlana. Odbywa się to w celu uniknięcia nakładania się etykiet. Kolor elementu jest określany przez klastrer, do którego należy element. Natomiast linie pomiędzy elementami reprezentują linki. Analiza literatury obejmuje również wizualizację typu „overlay”, dzięki której zdiagnozowano intensyfikację elementów w danym okresie czasowym. Pasek kolorów przedstawia oś czasową i pozwala określić, w jaki sposób wyniki są mapowane na kolory.

Interpretacja omawianych zestawów danych w programie VOSviewer obejmowała typ analizy „co-authorship” – współautorstwo dla analizy grupy autorów publikujących w zadanym zakresie tematycznym ograniczonym przez wymienione słowa kluczowe dla pełnej metody liczenia – „counting method: Full counting”. W programie dopuszczono dowolną liczbę współautorów w publikowanych dokumentach. Ograniczono liczbę

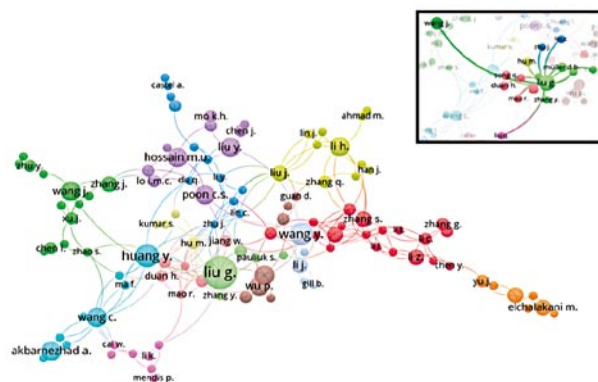
autorów jednego dokumentu do 10, aby odrzucić opracowania ze zbyt dużą liczbą badaczy. Ze względu na stosunkowo niewielką liczbę publikacji dla niektórych zestawów danych przyjęto do analizy każdego autora, który posiada choć jedną publikację z badanego zakresu. W ramach próby interpretacji słów kluczowych wybrano typ analizy „co-occurrence” – współwystępowanie dla pełnej metody liczenia – „counting method: Full counting” oraz jednostki analizy wszystkich słów kluczowych – „unit of analysis – All keywords”.

3.2. Baza danych Scopus – parametry wyszukiwania

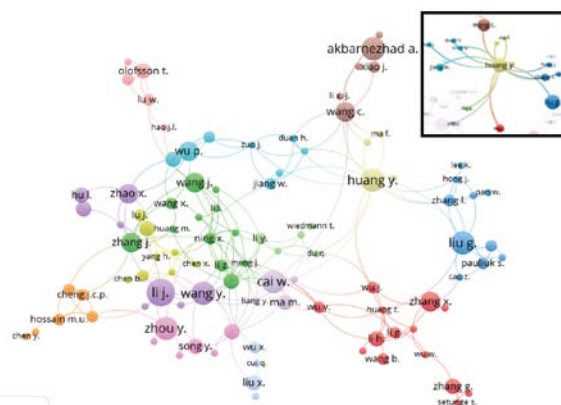
Zestawy danych przygotowane na podstawie bazy Scopus obejmują analizę literatury ogólnonaukowej w omawianym zakresie tematycznym skupiającym się na emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia obiektu wyrażanych jako ekwiwalent dwutlenku węgla, pokazując wartość emisji w ujęciu kosztowym oraz poszukując zależności pomiędzy tymi dwoma aspektami. Pierwsze zestawy stworzone zostały, aby zidentyfikować dostępność i wymiar publikacji dostępnych w tematyce śladu węglowego w budownictwie. W związku z brakiem możliwości wyboru parametru określającego budownictwo kubaturowe, w większości podjęto próbę uwzględnienia słowa kluczowego, jakim jest „budynek” – „building”. Kolejne zestawy zawierały słowa kluczowe uwzględniające aspekt kosztów. Różniły się natomiast próbą określenia formy śladu węglowego. Poza hasłem wiodącym wykorzystano: emisja CO₂, emisje, gazy cieplarniane, węgiel zawarty. Dokonano również sprawdzenia hasła „LCCF” – *Life Cycle Carbon Footprint*, lecz ze względu na to, że po ograniczeniu hasła do zakresu tematycznego inżynierii – „engineering” pokazały się jedynie 2 wyniki, z czego tylko jeden dotyczył budownictwa kubaturowego, nie zdecydowano się na dalszą analizę dla tego zagadnienia. Część wyników wyszukiwania została ograniczona do: „typ dokumentu: artykuł i referat konferencyjny; temat: Inżynieria” (document type: Article and Conference paper; subject area: Engineering).

Stworzono następujące zestawy danych:

- (1) KEY („carbon footprint” AND „construction”),
- (2) KEY („carbon footprint” AND „building”),
- (3) KEY („carbon footprint” AND „LCC” AND „building”),
- (4) KEY („embodied carbon” AND „cost” AND „building”),
- (5) KEY („CO₂ emission” AND „cost” AND „building”),
- (6) KEY („carbon footprint” AND „cost” AND „building”) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, „cp”)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)),
- (7) KEY („emissions” AND „cost” AND „building”) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, „cp”)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)),
- (8) KEY („greenhouse gases” AND „cost” AND „building”) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, „cp”)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)),
- (9) KEY („carbon footprint” AND „construction” AND „cost”) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, „cp”)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)),



Rys. 6. Sieć zestawu (1) – relacje pomiędzy współautorstwem



Rys. 7. Sieć zestawu (2) – relacje pomiędzy współautorstwem

- (10) KEY („CO₂ emission” AND „construction” AND „cost”) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, „cp”)).

3.3. Analiza wyników poszczególnych zestawów danych w VOSviewer

W pierwszym etapie analiz naświetlono powiązania pomiędzy śladem węglowym i budową oraz śladem węglowym i budynkiem. Wynikiem tych wyszukiwań są następujące ilości publikacji – dla zestawu „ślad węglowy” i „budowa” – 827 artykułów, natomiast dla „ślad węglowy” i „budynek” – 1063 artykułów. W tym etapie nie wprowadzono dodatkowych ograniczeń w celu ogólnej identyfikacji autorów publikujących w tej dziedzinie oraz określenia pomiędzy nimi powiązań dla badanych dokumentów. Ponadto brak innych ograniczeń pozwolił na identyfikację wiodących słów kluczowych dla szeroko zdefiniowanego zakresu tematycznego. Sieć powiązań między badaczami przy założeniu, że usunięto badaczy z sieci, którzy nie mają między sobą powiązań – „not connected to each other” przedstawiono na rysunku 6. Ze względu na dużą liczbę publikacji przyjęto do analizy każdego autora, który posiada choć dwie publikacje z badanego zakresu. Dla zestawu (1) otrzymano 13 klastrow dla największego zbioru składającego się z 117 elementów otrzymanego

spośród 279 elementów, tj. badaczy posiadających co najmniej 2 publikacje. Można tu wyróżnić jednego autora Liu G. (element o najwyższej wadze na rysunku 6 – największy okrąg w klastrze 11 jasnozielonym), który charakteryzuje się najwyższą liczbą całkowitej siły linków – „total link strength” równą 19. Ma on aż 15 połączeń między elementami – liczba ta wskazuje na liczbę powiązań współautorskich danego badacza z innymi badaczami.

Dla zestawu (2) otrzymano 14 klastrów dla największego zbioru autorów powiązanych ze sobą, składającego się ze 100 elementów, otrzymanego spośród 349 elementów również dla opcji badaczy posiadających minimum 2 publikacje. W otrzymanym zbiorze tak samo wyróżnić można jednego autora Huang Y. (element o najwyższej wadze na rysunku 7 – największy okrąg w klastrze 13 jasnożółtym), który charakteryzuje się najwyższą liczbą całkowitej siły linków – „total link strength” równą 17. Ma on aż 15 powiązań współautorskich wspomnianego badacza z innymi badaczami. W zestawie pierwszym wykazano powiązania tego samego autora (Huang Y.) z 10 autorami. W (2) zestawie danych również dominują autorzy z Azji, tworząc największą sieć powiązań.

Analizując wizualizacje typu „overlay” dla zestawu danych (1) i (2) zaobserwowano, że na przestrzeni ostatnich lat nie spada zainteresowanie tematyką śladu węglowego w budownictwie. Ponadto stwierdzenie to jest również właściwe dla badaczy z sieci, którzy nie posiadają między sobą powiązań. Wyraźnie można dostrzec dominację publikacji powstałych na przestrzeni ostatnich 4–5 lat.

- (1) KEY („carbon footprint” AND „construction”) – 827 artykułów,
- (2) KEY (“carbon footprint” AND “building”) – 1063 artykułów,
- (3) KEY (“carbon footprint” AND “LCC” AND “building”) – 3 artykuły.

W ramach tego zestawu wyszukiwania haseł otrzymano jedynie 3 artykuły reprezentowane przez dwa klastry – dwie publikacje są ze sobą powiązane na zasadzie współautorstwa (2015 r. i 2021 r.). Natomiast trzeci artykuł opracowany został przez badaczy z Chin (2020 r.).

- (4) KEY („embodied carbon” AND „cost” AND „building”) – 25 artykułów.

Dla podanych haseł zidentyfikowano 77 autorów, a zatem średnio przypada 3 autorów na jeden artykuł. Z tego jedynie 8 z nich jest autorem/współautorem co najmniej dwóch publikacji w tym zakresie tematycznym. W sumie tworzą oni trzy klastry, z czego jeden z nich składa się z 5 autorów powiązanych ze sobą wspólnymi publikacjami.

- (5) KEY („CO₂ emission” AND „cost” AND „building”) – 66 artykułów.

W tym wyszukiwaniu pojawia się 12 autorów, którzy są autorem/współautorem co najmniej dwóch publikacji. Pozostałych 187 osób opublikowało choć 1 artykuł zajmujący się badaną tematyką. Wymienionych 12 autorów tworzy 5

klastrów, z czego najsilniejszy z nich łączy ze sobą 7 autorów, wśród których tylko jeden autor posiada więcej niż 2 publikacje.

- (6) KEY („carbon footprint” AND „cost” AND „building”) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, „cp”)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)) – 78 artykułów.

Słowa kluczowe wskazane w tym zestawie pozwalają na wyodrębnienie 174 publikacji uwzględniających wybraną tematykę w wielu dziedzinach nauki. Ten zestaw oraz każde następane wyszukiwanie uwzględnia nałożenie dodatkowych ograniczeń w celu zawężenia baz danych i zidentyfikowania jak największych zbiorów autorów i publikacji zajmujących się śladem węglowym i kosztami w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie inżynierii lądowej oraz pokrewnych. Kolejnym ograniczeniem, jakie wprowadzono, jest redukcja rodzaju typu dokumentu. W tym celu wyszukiwanie zawężono do dwóch typów dokumentów, jakimi są artykuł i referat konferencyjny. Po nałożeniu omówionych ograniczeń uzyskano 78 publikacji opracowanych przez 460 autorów, przy czym 20 naukowców posiadających co najmniej 2 publikacje tworzy 11 odrębnych klastrów, niepowiązanych wspólnymi publikacjami.

- (7) KEY (“emissions” AND “cost” AND “building”) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, “cp”)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, “ENGI”)) – 698 artykułów.

Dla podanych haseł zidentyfikowano aż 2069 autorów, a 3 z nich posiada w swoim dorobku po 7 publikacji w tym zakresie tematycznym. Około 13% naukowców posiada co najmniej 2 publikacje dla powyższych ograniczeń i wybranych słów kluczowych. Wśród tych 13% jest 88 autorów, którzy są powiązani ze sobą wspólnymi publikacjami, tworząc sieć składającą się z 13 klastrów. W tym zestawie dominują publikacje z ostatnich 5 lat.

- (8) KEY (“greenhouse gases” AND “cost” AND “building”) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, “cp”)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, “ENGI”)) – 293 artykuły.

Kombinacja słów kluczowych z gazami cieplarnianymi tworzy 33 klastry uwzględniające autorów posiadających co najmniej 2 publikacje. Naukowcy nie tworzą rozbudowanych sieci powiązań współautorskich. Świadczy o tym zjawisko braku połączeń między klastrami.

- (9) KEY („carbon footprint” AND „construction” AND „cost”) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, „ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, „cp”)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, „ENGI”)) – 37 artykułów.
- (10) KEY (“CO₂ emission” AND “construction” AND “cost”) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, “ENGI”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, “cp”)) – 29 artykułów.

Dwa ostatnie zestawy charakteryzują się tym, że również nie tworzą rozbudowanych sieci powiązań współautorskich. Wielu autorów posiada tylko jedną publikację w zadanych obszarach tematycznych. W obu zestawach można zauważyć publikacje na przestrzeni ponad 10 lat. Nie widać szczególnego wzrostu zainteresowania tymi hasłami w ciągu kilku ostatnich lat.

4. Koncepcja metody analizy kosztów i śladu węglowego

4.1. Uzasadnienie konieczności zintegrowanej analizy kosztów i śladu węglowego

Analizując całokształt wyników otrzymanych na podstawie stworzonych zestawów danych, należy stwierdzić, że problematyka związana z emisją dwutlenku węgla jest aktualna i cały czas się rozwija. Ponadto liczne artykuły opublikowane w ostatnich latach (2015–2021) poruszają również aspekt kosztów, potwierdzając tym samym konieczność rozwinięcia koncepcji. Na podstawie analiz w programie VOSviewer można zaobserwować, że tematyka publikacji związana ze śladem węglowym jest podejmowana przez wielu naukowców. Na mapach bibliometrycznych utworzonych za pomocą programu widać dziesiątki klastrów o małej liczbie elementów, czyli o niewielu autorach, którzy posiadają powiązania współautorskie. Ponadto siła połączeń w większości analiz powyższych zestawów danych jest równa 1, co wskazuje na niską liczbę publikacji (równą 1), których współautorami jest ten sam zestaw badaczy. Taka konstrukcja map świadczy o dużym rozproszeniu publikacyjnym (wyróżniono na rysunku 8 w prawym górnym rogu).

W ramach analizy literatury określono również zakres słów kluczowych występujących w największych zestawach danych, tj. w zestawie (1), (2). Dla określenia wiodących słów kluczowych przyjęto, że minimalna liczba wystąpień danego słowa wynosi 5. Założenie to przyjęto w celu intensyfikacji wagi słów oraz w celu umożliwienia identyfikacji elementów na mapie – nadmiar elementów prowadzi do wielowarstwowego ich nakładania się i uniemożliwia identyfikację.

Analizując mapy (rys. 8), można zauważyć, że pomimo wyboru słów kluczowych, które nie uwzględniają w sobie

aspektów kosztów, hasła związane z tematyką finansową pojawiają się. Może to świadczyć o tym, że aspekty kosztów i emisji CO₂ w budownictwie są już analizowane, natomiast trudno jest stwierdzić, w jakim zakresie. Diagnostykę współwystępowania słów, należy zauważyć, iż stosunkowo dużą wagę ma słowo „China”, co jest uzasadnione, gdyż spora liczba publikacji pochodzi właśnie z Chin. Analizując wizualizację typu „overlay” dla występujących słów, należy wspomnieć, że zadana tematyka jest już badana od kilku lat i konsekwentnie poszerzana o nowe pojęcia.

Należy również zwrócić uwagę na hasło *Building Information Modelling* (BIM), które w aspekcie wyszukiwanych haseł śladu węglowego i budynku pojawiło się już około 2017 roku. Metodologia łączenia BIM z metodami szacowania ilości śladu węglowego i kosztami zdecydowanie mogłaby wpisywać się w koncepcję zintegrowanej analizy kosztów i generowanego śladu węglowego w cyklu życia budynku.

Podsumowując, mapy sieci autorów publikacji oraz słów kluczowych wyraźnie wskazują na wysoką rangę tematyki śladu węglowego i jej powiązania z wieloma gałęziami inżynierii, nakreślając również ścieżkę związaną z aspektem kosztów budowy. Zatem istnieje konieczność podjęcia próby zintegrowania śladu węglowego z kosztami w cyklu życia obiektu budowlanego.

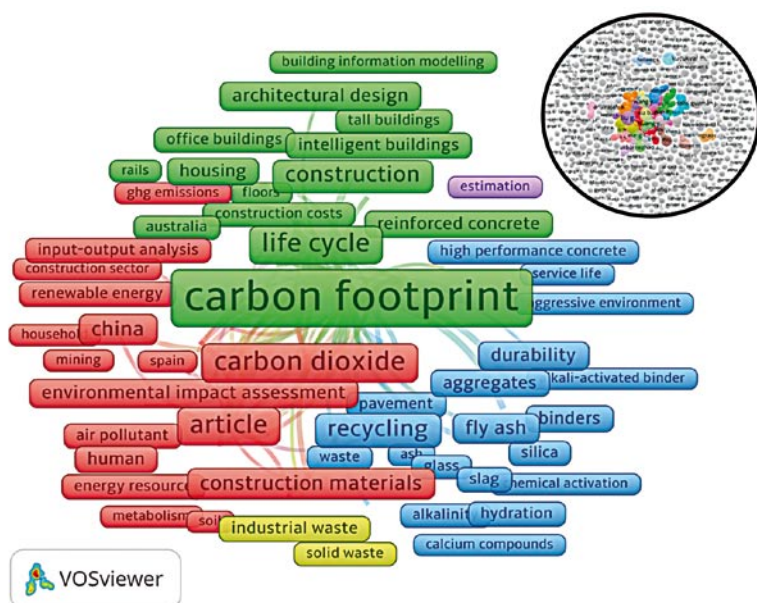
4.2. Koncepcja

Problem, który został przedstawiony powyżej, ma charakter naukowy, ale także praktyczny. Planowane badania mają za zadanie przedstawić podejście optymalizacyjne do cyklu życia oparte na symulacji, z uwzględnieniem operacyjnego śladu węglowego (OCF) i wbudowanego śladu węglowego (ECF) budynku. W szczególności znalezienie i przeanalizowanie różnicy między konstrukcją zoptymalizowaną pod

kątem cyklu życia (OCF & ECF) i zoptymalizowaną pod kątem wydajności operacyjnej (tylko OCF) jest głównym celem planowanego badania.

W budowaniu aplikacji występuje problem optymalizacji wspomagającej podejmowanie decyzji, zazwyczaj pojawia się wiele celów trudnych do pogodzenia ze względu na sprzeczny ich charakter. Zwykle funkcją celu są techniczne parametry eksploatacyjne budynku (np. zużycie energii w cyklu życia, trwałość budynku, ślad węglowy w cyklu życia itp.) lub parametry związane z kosztami (np. koszty eksploatacji, koszty budowy itp.).

Koncepcja proponowana przez autorów dotyczy zintegrowanej analizy kosztów (LCC) oraz śladu węglowego w cyklu życia budynku (LCCF), reprezentującego wpływ na środowisko. Funkcje celu zależą od decyzji inwestorskich oraz zmiennych projektowych. Zwykle w przypadku budynków zmienne decyzyjne są przedstawiane jako zmienne projektowe, takie jak grubość



Rys. 8. Sieć słów kluczowych zestawu (1)

izolacji przegród zewnętrznych budynku, typy okien, typ systemu ogrzewania, źródła odnawialne na miejscu itp. Niektóre elementy przedstawianej koncepcji są już analizowane przez naukowców i nakreślają istotność zmiennych projektowych na CO₂, często wraz z wpływem na koszty. Przykładowo badacze z Finlandii [4] rozważali takie zmienne projektowe, jak różne opcje grubości izolacji przegród zewnętrznych, typy okien, systemy grzewcze, jednostki odzysku ciepła i obszar PV. Jednym z ciekawszych wniosków jest to, że wpływ obszaru PV jest bardziej skuteczny w zmniejszaniu operacyjnego śladu węglowego niż jego niewielki wpływ na wzrost wbudowanego śladu węglowego. Natomiast autorzy artykułu [6] w ramach swoich badań dokonali próby określenia zależności między śladem węglowym a kształtem budynku. W optymalizacji rozważali trzy poziomy analizy: pierwszy uwzględniał konstrukcję budynku; drugi wewnętrzny rozkład stref zabudowy, a trzeci szczegółowe elementy budynku. Badaczom udało się określić zakres kompromisu pomiędzy kosztem konstrukcji a emisją węgla wbudowanego, który został oszacowany na poziomie 2–5%. Drugim, ciekawszym wnioskiem jest optymalizacja emisji dwutlenku węgla w cyklu życia i kosztów dla całego budynku, która pokazała, że istnieją duże kompromisy, rzędu 10–50%, w przypadku, gdy uwzględnione zostały również emisje operacyjnego śladu węglowego.

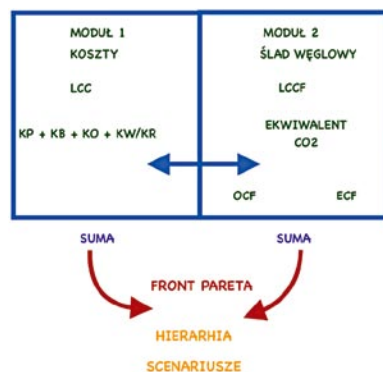
Przytoczone przykładowe publikacje uzasadniają potrzebę szczegółowej analizy zmiennych wpływających na koszty i ślad węglowy w budownictwie kubaturowym na etapie decyzji inwestorskich w celu znalezienia optymalnych rozwiązań.

Koncepcja metody zintegrowanego szacowania kosztów i wielkości emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia budynku wspomagającej podejmowania decyzji inwestycyjnych z uwzględnieniem korzyści środowiskowych została pokazana schematycznie na rysunku 9.

Moduł 1 ma służyć klasycznej analizie kosztowej przeprowadzanej w ujęciu kosztów cyklu życia obiektu. Uwzględnione mają być: koszty produkcji (KP), koszty budowy (KB), koszty operacyjne (KO), koszty wycofania (KW)/koszty recyklingu (KR).

Moduł 2 ma przedstawiać cykl życia śladu węglowego (LCCF), który składa się z operacyjnego śladu węglowego (OCF) i wbudowanego śladu węglowego (ECF).

Rys. 9. Koncepcja metody zintegrowanego szacowania kosztów i wielkości emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia budynku wspomagającej podejmowanie decyzji inwestycyjnych



Procedura optymalizacji ma służyć do oceny relacji między różnymi układami zmiennych, w celu znalezienia optymalnych kombinacji, które zminimalizują ślad węglowy w cyklu życia (LCCF) i koszt cyklu życia (LCC) obiektu. Koncepcja opierać się będzie na metodzie scenariuszy i ich hierarchizacji, a wynikiem będą optymalne modele Pareto.

5. Podsumowanie

Aby osiągnąć neutralność emisyjną, należy wziąć pod uwagę środowisko naturalne. Trzeba więc rozważyć wielkość emisji gazów cieplarnianych w procesie wydobywania surowców, produkcji materiałów budowlanych, ich wbudowania oraz transportu w całym cyklu życia. Aby osiągnąć ten cel, według [7] konieczna jest zmiana metodologii opracowywania budżetu budowy. Obecnie budżet budowy obejmuje jedynie kalkulację kosztów budowy materiału i nie uwzględnia śladu klimatycznego produkcji materiałów, co powinno znaleźć odzwierciedlenie w kosztach środowiskowych. Decyzje dotyczące kosztów i wielkości emisji są istotne, ponieważ ostateczne rozwiązania projektowe muszą być skutecznie skoordynowane z szerszym zespołem projektowym. Zintegrowane obliczenia kosztów i śladu węglowego powinny być teraz wykonywane dla wszystkich projektów budowlanych [8].

W artykule pokazano znaczenie tematyki śladu węglowego w budownictwie, dokonując analizy publikacji z wykorzystaniem programu VOSviewer. Wynikiem badań były następujące ilości publikacji – dla zestawu „ślad węglowy” i „budowa” – 827 artykułów, natomiast dla „ślad węglowy” i „budynek” – 1063 artykułów. Widać jeszcze pewne rozproszenie publikacji i brak współpracy, ale wyraźnie zaznacza się znaczenie tego typu problematyki w budownictwie. Autorzy zaproponowali także wstępną koncepcję zintegrowanej analizy kosztów i śladu węglowego, podkreślając jej znaczenie w przyszłości.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Planning for Climate Change: a strategic, values-based approach for urban Planners, united nations human settlements programme (UN-habitat), 2014
- [2] Fernández R., Zubelzu S., Martínez R., Carbon Footprint and the Industrial Life Cycle From Urban Planning to Recycling, Springer International Publishing AG 2017, ISBN 978-3-319-54983-5 Fig. 2. Interaction between urban activities and climate change Source Prepared by authors
- [3] United Nations Environment Programme 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector, Nairobi, 2020
- [4] Pal S. K., Takano A., Alanne K., Siren K., A life cycle approach to optimizing carbon footprint and costs of a residential building, Building and Environment, tom 123, 10/2017, str. 146–162
- [5] <https://architecture2030.org/about/>
- [6] Eleftheriadis S., Schwartz Y., Raslan R., Duffour P., Mumovic D., Integrated Building Life Cycle Carbon and Cost Analysis Embedding Multiple Optimisation Levels, 4th Building Simulation and Optimization Conference, Cambridge, UK: 11–12 wrzesień, 2018
- [7] Tažiková, A., Struková, Z., Reducing the carbon footprint by selecting building material, International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM; Sofia, tom 20, 4.2, 2020, str. 227–234
- [8] Zima K., Integrated analysis of costs and amount of greenhouse gases emissions during the building lifecycle, Archives of Civil Engineering, tom LXVII, 2/2021, str. 413–423