

CRREM w ocenie środowiskowej na przykładzie analizy budynków magazynowych

CRREM in environmental assessment: a case study of warehouse buildings

Małgorzata Kwestarz^{1*} , Daniel Kołodziejczyk¹ 

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska

*Kontakt / Correspondence: malgorzata.kwestarz@pw.edu.pl

Streszczenie:

Artykuł prezentuje wykorzystanie narzędzia obliczeniowego CRREM do analizy efektywności energetycznej oraz emisyjności budynków i obiektów budowlanych. Narzędzie umożliwia generowanie raportów stanowiących uzupełnienie świadectw charakterystyki energetycznej oraz dokumentacji ESG. Wybór scenariuszy obliczeniowych, uwzględniających lokalizację, typ użytkowania oraz strukturę zużycia energii czyni CRREM narzędziem uniwersalnym i adekwatnym do oceny ryzyka tzw. ryzyka transformacyjnego, czyli jakim obciążony jest proces transformacji energetycznej w tym przypadku sektora nieruchomości komercyjnych, na przykładzie hal magazynowych.

Słowa kluczowe: efektywność energetyczna, emisja gazów cieplarnianych

Abstract:

The article presents the CRREM computational framework, used to analyse the energy performance and carbon emissions of buildings and other built assets. The tool enables the generation of reports that complement Energy Performance Certificates (EPCs) and ESG documentation. The selection of calculation scenarios, taking into account location, use type, and the structure of energy consumption, makes CRREM a versatile and appropriate tool for assessing transition risk - that is, the risk associated with the energy transition process, in this case within the commercial real estate sector, as illustrated by the example of warehouse facilities.

Keywords: energy efficiency, greenhouse gas emissions

1. Wprowadzenie

Carbon Risk Real Estate Monitor (CRREM) jest globalną inicjatywą o charakterze nonprofit, stanowiącą zaawansowane ramy analityczne służące do oceny ryzyka transformacji klimatycznej w sektorze nieruchomości komercyjnych. Projekt został zainicjowany w 2017 roku przez europejskie jednostki badawcze, początkowo finansowane ze środków unijnych. W 2024 roku CRREM przekształcono w formalną fundację z siedzibą w Holandii. Obecny standard opiera się na ponad siedmioletnich badaniach empirycznych oraz implementacjach rynkowych, integrując wiedzę z zakresu nauk o klimacie oraz lokalnych uwarunkowań rynków nieruchomości [6]. Celem CRREM jest dostarczenie inwestorom instytucjonalnym, właścicielom nieruchomości oraz innym interesariuszom narzędzia umożliwiającego ocenę ryzyka niefinansowego w obszarze ESG. Metodyka CRREM stanowi

odповідź na wymogi Porozumienia Paryskiego, zakładającego ograniczenie globalnego ocieplenia do poziomu 1,5°C lub maksymalnie 2°C względem epoki przedindustrialnej. Model wypełnia lukę w zakresie standaryzacji oceny ryzyka przejścia (ang. *transition risk*) poprzez precyzyjne wyznaczanie ścieżek dekarbonizacji (ang. *decarbonization pathways*). CRREM umożliwia generowanie zestandaryzowanych wskaźników emisyjnych i energetycznych dla budynków różnych typów, z uwzględnieniem warunków charakterystycznych dla poszczególnych krajów Unii Europejskiej. Dzięki procesowi operacjonalizacji globalnych celów klimatycznych na poziomie pojedynczych obiektów narzędzie zapewnia transparentność, powtarzalność oraz wysoką porównywalność wyników [8].

Zastosowanie środowiska CRREM do oceny efektywności energetycznej obiektów magazynowych umożliwia precyzyjne określenie wskaźników zapotrzebowania na energię pierwotną EP

określaną jako intensywność zużycia energii (EUI) oraz emisji gazów cieplarnianych (GHG). Narzędzie „CRREM Tool” wykorzystuje rygorystyczny proces *downscalingu*, pozwalający przełożyć cele Porozumienia Paryskiego na mierzalne ścieżki dekarbonizacji dopasowane do specyfiki technicznej i lokalizacji geograficznej danego budynku.

CRREM jest zgodne z zaawansowanymi projekcjami klimatycznymi RCP 4.5 oraz RCP 8.5. Jest zintegrowane z uznanymi standardami raportowania, takimi jak GRESB (Global Real Estate Sustainability Benchmark – globalny standard sprawozdawczości i oceny wyników ESG) oraz SBTi (Science Based Targets initiative – międzynarodowa inicjatywa wspierająca przedsiębiorstwa w wyznaczaniu celów redukcji emisji gazów cieplarnianych). Dzięki temu CRREM analizuje nie tylko dane historyczne, lecz przede wszystkim ocenia długoterminową odporność nieruchomości na ryzyka transformacyjne [1, 2, 3, 4]. W procesie analitycznym kluczową rolę odgrywa uwzględnienie wskaźników stopniodni ogrzewania (HDD) oraz chłodzenia (CDD). Parametry te służą normalizacji klimatycznej, umożliwiającej ograniczenie wpływu zmienności pogodowej na ocenę efektywności budynku. Wykorzystanie HDD i CDD pozwala rozróżnić, czy obserwowany spadek zużycia energii jest wynikiem poprawy efektywności, czy jedynie konsekwencją łagodniejszych warunków atmosferycznych. Ma to szczególne znaczenie dla trafności prognoz modelu w horyzoncie do 2050 roku.

2. Konstrukcja środowiska obliczeniowego

Analiza energetyczna i emisyjna obiektów przeprowadzona w niniejszej pracy wykorzystuje dedykowane oprogramowanie opracowane w ramach metodyki CRREM (CRREM Tool). Poprawne zdefiniowanie parametrów wejściowych stanowi kluczowy etap oceny ryzyka klimatycznego oraz potencjalnej utraty wartości aktywów.

Normalizacja zużycia energii względem obciążenia budynku. Funkcja ta umożliwia przeliczenie rzeczywistego zużycia energii na wartości odpowiadające 100% wykorzystania powierzchni użytkowej. Ma to szczególne znaczenie w przypadku obiektów cechujących się wysokim poziomem pustostanów, np. w okresach komercjalizacji lub zmian najemców [5].

Korekta pogodowa zużycia energii. Oparta na wskaźnikach stopniodni grzania (HDD) oraz chłodzenia (CDD) [5] eliminuje wpływ nietypowych warunków pogodowych na ocenę efektywności budynku, co umożliwia poprawną analizę zmian zużycia energii w dłuższych okresach czasu.

Wybór scenariusza zmian klimatu (RCP). CRREM umożliwia wybór scenariusza zmian klimatycznych opartego na ścieżkach koncentracji gazów cieplarnianych RCP 4.5 i 8.5 [6]. Wybór scenariusza wpływa na projekcję przyszłego zapotrzebowania budynku na energię do ogrzewania i chłodzenia. RCP 4.5 – scenariusz umiarkowany, zakładający stabilizację emisji około 2050 roku i późniejszy spadek dzięki wdrażaniu technologii niskoemisyjnych. RCP 8.5 – scenariusz wysokich emisji, zakładający brak skutecznych działań redukcyjnych i znaczące nasilenie globalnego ocieplenia.

Ścieżka dekarbonizacji. Model CRREM generuje ścieżkę dekarbonizacji na podstawie podanych parametrów analizy: kraju i dokładnej lokalizacji budynku, trajektorii globalnego ocieplenia

(np. 1,5°C) i typu użytkowania obiektu. Na tej podstawie narzędzie generuje roczne wartości docelowej intensywności emisji GHG dla wybranego typu nieruchomości i lokalizacji.

Porównanie scenariuszy 1,5°C oraz 1,5°C All GHG. Różnica pomiędzy trajektorią 1,5°C a 1,5°C All GHG wynika z odmiennych założeń dotyczących zakresu gazów cieplarnianych uwzględnianych w analizie [7]. Ścieżka 1,5°C koncentruje się na emisjach CO₂ i jest uznawana za standard rynkowy zgodny z SBTi. Ścieżka 1,5°C All GHG obejmuje pełne spektrum gazów objętych Protokołem z Kioto, w tym m.in. CH₄, N₂O oraz emisje czynników chłodniczych. CRREM uwzględnia również projekcje dotyczące dostępności energii odnawialnej do 2050 roku, oparte m.in. na analizach Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA). Prognozy wskazują, że w 2050 roku większy udział energii końcowej nadal będzie przypadał na ogrzewanie (ok. 17%) niż na chłodzenie (ok. 11%) [7].

Metodyka obliczeń. Kluczowym elementem metodyki obliczeń jest poprawne określenie wskaźników emisji dla energii elektrycznej oraz paliw. W CRREM stosuje się dwa podejścia: *location-based* lub *market-based* [10]. Metoda *location-based* wykorzystuje średnie krajowe lub regionalne wskaźniki emisji, wynikające z aktualnego miksu energetycznego danego państwa. Metoda *market-based* opiera się na rzeczywistym portfelu energetycznym odbiorcy. Uwzględnia ona m.in.: energię ze źródeł odnawialnych potwierdzoną gwarancjami pochodzenia (GO), indywidualne umowy zakupu energii, wskaźniki emisji publikowane w raportach dostawców energii, dane z baz AIB oraz krajowych baz emisji.

Zakresy emisji (Scopes). Metodyka CRREM w sposób kompleksowy obejmuje główne zakresy emisji zgodnie z GHG Protocol. Uwzględniane są Zakres 1: emisje bezpośrednie, Zakres 2: emisje pośrednie z energii i Zakres 3: emisje pośrednie z ograniczeniami [9, 10].

3. Kluczowe czynniki aktualizacji ścieżek dekarbonizacji

Model CRREM jest aktualizowany wraz z publikacją nowych danych naukowych i politycznych. Najnowsza wersja uwzględnia sześć kluczowych czynników [8]:

Redukcja globalnego budżetu węglowego. Zgodnie z aktualizacją IPCC, globalny budżet emisji możliwy do wyemitowania w latach 2020–2050 został obniżony z 519 Gt do 468 Gt CO₂. Oznacza to konieczność ostrzejszej redukcji emisji w krótszym czasie – krzywe dekarbonizacji ulegają „zaostreniu”.

Przekroczenie wcześniejszych limitów emisji. Dotychczasowe cele redukcji emisji nie zostały zrealizowane przez większość sektorów. W związku z tym budynki muszą przyspieszyć redukcję intensywności emisji – ścieżki stają się bardziej wymagające.

Stabilizacja prognoz wzrostu powierzchni budynków. Aktualne prognozy wykazują jedynie 1,6% wzrost globalnej powierzchni budynków do 2050 roku względem poprzednich założeń. Przy ograniczonym budżecie węglowym oznacza to konieczność dalszego obniżania emisyjności poprzez redukcję przyrostu nowych powierzchni użytkowych.

Przyspieszona dekarbonizacja systemów elektroenergetycznych. Sektor elektroenergetyczny rozwija się dynamicznie, zwiększając udział źródeł niskoemisyjnych. Skutkuje to spad-

kiem współczynnika emisji EF energii elektrycznej. Niższy EF oznacza: niższą intensywność emisji operacyjnych budynków, większy margines zużycia energii końcowej przy niezmiennym celu emisyjnym.

Transformacja miksu energetycznego i elektryfikacja. Elektryfikacja ogrzewania i procesów technicznych to jeden z kluczowych trendów. Jej efekt zależy od kraju: w państwach z niskoemisyjną siecią – elektryfikacja redukuje emisje, w krajach o wysokoemisyjnej sieci – może krótkoterminowo zwiększać emisje. W długim terminie synergia elektryfikacji i dekarbonizacji sieci stanowi podstawę osiągnięcia celów klimatycznych.

Aktualizacja metodologii obliczeń EF. W aktualnej wersji CRREM wskaźniki EF uwzględniają jedynie emisje w miejscu generacji energii, bez emisji ze strat przesyłu nośnika energii T&D. Powód: zgodność ze standardem SBTi, eliminacja ryzyka podwójnego liczenia emisji (między sektorem energetycznym a nieruchomościami). Niższe EF przekładają się na mniejszą intensywność emisji w wynikach użytkownika i w samych ścieżkach dekarbonizacji.

4. Dane wejściowe

W procesie analizy ryzyka klimatycznego z wykorzystaniem modelu CRREM kluczowe znaczenie ma zapewnienie wysokiej jakości danych wejściowych. Niedokładności lub braki w danych prowadzą do błędnej oceny ryzyka transformacyjnego portfela nieruchomości [5].

Standaryzacja danych. Narzędzie umożliwia ekstrapolację danych względem: okresu raportowania (*Reporting Period*), poziomu obłożenia budynku (*Occupancy Rate*) i zakresu dostępnych danych (*Data Coverage*). CRREM umożliwia analizę nawet przy niepełnym pokryciu danymi. W takim przypadku narzędzie określa: maksymalny potencjalny obszar pokrycia (*maximum potential coverage area*) bądź rzeczywisty obszar pokrycia danymi (*data coverage area*). Na tej podstawie model szacuje brakujące dane, wykorzystując wartości referencyjne przypisane do typu budynku.

Parametry bazowe. Jednym z fundamentalnych elementów analizy CRREM jest prawidłowe określenie typu nieruchomości (*Property Type*). Wybór typu pozwala na przypisanie budynku do właściwej ścieżki dekarbonizacji oraz wzorcowych wartości intensywności zużycia energii. Klasyfikacja typów nieruchomości w CRREM jest zgodna z systemem GRESB [5].

Adres i lokalizacja. Wprowadzenie pełnego adresu oraz kodu pocztowego budynku jest konieczne, ponieważ CRREM wykorzystuje dane lokalizacyjne do: przypisania budynku do właściwej strefy klimatycznej, uwzględnienia projekcji dostępności energii odnawialnej i wykorzystania lokalnych danych dotyczących miksu energetycznego.

Dane ilościowe. Kluczowym elementem analizy w CRREM jest prawidłowe określenie struktury zużycia energii. Dane wejściowe obejmują: zużycie energii elektrycznej, zużycie gazu ziemnego, zużycie ciepła sieciowego lub chłodu, zużycie paliw ciekłych, produkcję oraz autokonsumpcję energii z OZE.

Powierzchnia budynku. W metodyce CRREM zaleca się stosowanie standardu pomiaru IPMS 2 (International Property Measurement Standards), który definiuje sposób pomiaru powierzchni netto do wewnętrznej strony przegród zewnętrznych,

wraz z częścią powierzchni wspólnych. Zapewnia to: porównywalność wyników pomiędzy budynkami, spójność raportowania w portfelach inwestycyjnych oraz unikanie różnic wynikających ze stosowania lokalnych metod pomiaru.

Odnawialne źródła energii. W przypadku budynków wyposażonych w instalacje OZE model wymaga wprowadzenia osobno: energii wyprodukowanej, energii zużytej na potrzeby własne i energii oddanej do sieci. Podział ten jest konieczny, ponieważ tylko energia autokonsumowana redukuje emisje operacyjne, energia oddana do sieci nie wpływa na wynik *location-based* a zakup „zielonej energii” wymaga udokumentowania gwarancjami pochodzenia.

Emisje niezorganizowane – czynniki chłodnicze. CRREM umożliwia również uwzględnienie emisji z wycieków czynników chłodniczych stosowanych w: systemach HVAC, pompach ciepła i instalacjach chłodniczych. Ze względu na bardzo wysoki potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP), nawet niewielkie wycieki mogą znacząco wpływać na całkowitą emisję GHG obiektu.

5. Dane wyjściowe

Rok niezgodności (ang. *stranding year*). Jeden z najważniejszych parametrów generowanych przez CRREM. Jest to rok, w którym intensywność emisji analizowanego budynku przekracza dopuszczalną wartość określoną przez ścieżkę dekarbonizacji. Rok utraty zgodności jest kluczowym wskaźnikiem ryzyka transformacyjnego – budynki niezgodne mogą zostać uznane za tzw. aktywa zagrożone (*stranded assets*) w portfelu właścicielskim.

Carbon Intensity (C_i). Intensywność emisji ekwiwalentu CO_2 na jednostkę powierzchni użytkowej w $kgCO_2e/(m^2 \cdot rok)$. Parametr umożliwia porównanie obiektów niezależnie od ich skali.

Energy Intensity (E_i). Wskaźnik zapotrzebowania na energię pierwotną budynku w przeliczeniu na m^2 w $kWh/(m^2 \cdot rok)$. Wskaźnik pozwala ocenić efektywność energetyczną obiektu.

Excess Emissions per Floor Area (E_{em}). Nadwyżka emisji generowana w stosunku do ścieżki referencyjnej. Wartość dodatnia wskazuje na przekroczenie dopuszczalnego poziomu emisji przewidzianego dla danego typu budynku.

6. Studium przypadku

Przykład analizy w środowisku CRREM oparto na przykładzie oceny środowiskowej trzech hal magazynowych oznaczony celem zanonimizowania danych A, B i C o powierzchniach użytkowych odpowiedni: 50 300 m^2 , 102 900 m^2 i 45 400 m^2 . Na potrzeby analizy tego typu obiektów budowlanych tj. wielkopowierzchniowych o przeznaczeniu komercyjnego najmu opracowano dedykowany dla każdej z hal model energetyczny budynku, który zawiera kompleksową prognozę przewidywanego rocznego zużycia energii. Na podstawie wyników tego modelu opracowywano ocenę zgodnie z metodologią CRREM.

6.1. Hala magazynowa A

W scenariuszu bazowym roczne zapotrzebowanie budynku na energię elektryczną oszacowano na poziomie 2 510 910,0 kWh.

Projektowana instalacja fotowoltaiczna ma generować około 1 069 917 kWh energii rocznie. W scenariuszu bazowym przyjęto, że w miesiącach letnich chwilowe zapotrzebowanie na energię elektryczną będzie niższe niż maksymalna moc generowana przez instalację fotowoltaiczną. W związku z tym zakłada się integrację systemu magazynowania energii.

W scenariuszu alternatywnym zmodyfikowano strategię eksploatacyjną systemu wentylacji w części magazynowej. Centrale wentylacyjne wyposażono w czujniki CO₂, które umożliwiają regulację ilości powietrza świeżego w zależności od rzeczywistego poziomu użytkowania hali. Podejście to prowadzi do ograniczenia zużycia energii elektrycznej przez wentylatory oraz zmniejszenia zapotrzebowania na energię do ogrzewania pomieszczeń. W rezultacie roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną spadnie do poziomu 2 260 431 kWh. Podobnie jak w scenariuszu bazowym, założono, że w miesiącach letnich zapotrzebowanie budynku na energię elektryczną pozostanie niższe niż maksymalna zdolność generowania energii elektrycznej w instalacji fotowoltaicznej, co ponownie przekłada się na konieczność zastosowania systemu magazynowania energii. Nie przewiduje się zmian w ilości energii wytwarzanej przez instalację fotowoltaiczną w porównaniu ze scenariuszem bazowym.

6.2. Hala magazynowa B

W odniesieniu do hali magazynowej B przyjęto jeden scenariusz, tzw. bazowy. Analiza dotyczy prognozy emisji dwutlenku węgla oraz zużycia energii przy założeniu braku wdrażania dodatkowych działań optymalizacyjnych i modernizacyjnych – dla obiektu w stanie istniejącym, odpowiadającym warunkom po jego wybudowaniu. Informacje dotyczące energii elektrycznej pobieranej z sieci elektroenergetycznej jak i zużycie gazu ziemnego opracowano na podstawie wskazań liczników energii. Zużycie paliwa ciekłego odnosi się do oleju napędowego typu ON B0, wykorzystywanego na potrzeby pracy pomp przeciwpożarowych. Dane dotyczące instalacji fotowoltaicznej udostępniono w formie miesięcznych zestawień produkcji energii, z wyszczególnieniem ilości energii zużytej na potrzeby własne obiektu oraz energii wprowadzonej do sieci elektroenergetycznej. Dominującym nośnikiem energii jest gaz ziemny, którego roczne zużycie wynosi 1 977 778 kWh. Jest on wykorzystywany do celów grzewczych oraz przygotowania ciepła technologicznego i użytkowego. Zużycie energii elektrycznej z sieci elektroenergetycznej kształtuje się na poziomie 161 904 kWh rocznie i ma charakter uzupełniający względem gazu ziemnego, pokrywając zapotrzebowanie na potrzeby eksploatacyjne obiektu: oświetlenie, zasilanie urządzeń i instalacji technicznych. Instalacja fotowoltaiczna rocznie generuje energię elektryczną głównie na potrzeby własne obiektu (52 163 kWh) przy czym energia oddana do sieci może zostać pominięta z uwagi na jej nieznaczącą ilość.

6.3. Hala magazynowa C

W przypadku hali magazynowej C poddany analizie został również jeden scenariusz, czyli scenariusz bazowy. Dane dotyczące rocznego zużycia energii wprowadzono do oprogramowania na podstawie zweryfikowanych odczytów z układów pomiarowo-rozliczeniowych oraz faktur za energię. W tym przypadku

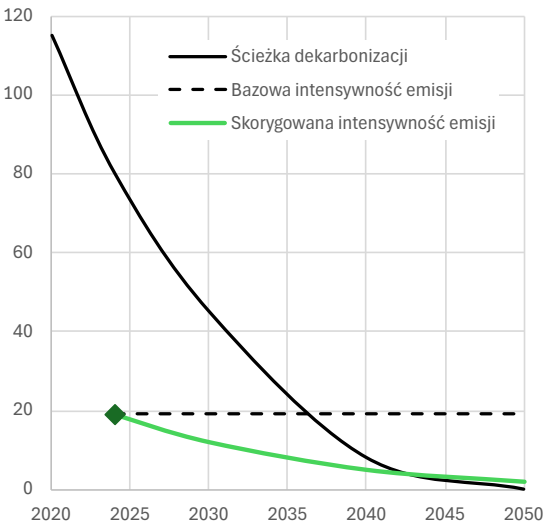
uwzględniono również wyniki symulacji numerycznej modelu energetycznego budynku. Parametry użytkowania i stopień obłożenia obiektu, odbiegające od wartości referencyjnych przyjętych dla tej klasy budynków na terenie Polski, przekształcono do scenariusza standardowego, zgodnie z wymaganiami i wytycznymi określonymi przez Klienta. Całkowite zużycie energii dla budynku hali magazynowej C wyniosło 1 814 166 kWh. Około 60% zużycia pokrywane jest przez gaz ziemny, natomiast pozostałe 40% energii pochodzi z sieci elektroenergetycznej.

7. Wyniki analizy w środowisku CRREM

Wyniki generowane przez model opisują wskaźniki zawarte w tabeli 1. W celu wizualizacji efektów pracy programu zdecydowano się na zamieszczenie wykresów dla jednego z trzech omawianych budynków. Rys. 1 przedstawia rozbieżności intensywności emisji (C_i) w stosunku do celu globalnego ocieplenia (wynoszącego 1,5°C) dla analizowanego obiektu tzw. punkt niezgodności.

Tabela 1. Wskaźniki dla objętych raportowaniem budynków [1]
Table 1. Indicators for buildings covered by reporting [1]

Budynek	C _i [kg CO _{2e} /(m ² rok)]	E _i [kWh/(m ² rok)]	E _{em} [MgCO _{2e}]
Hala A	18,1	50	519
Hala B	3,6	21	1 276
Hala C	17,2	43	n/d



Rys. 1. Punkt niezgodności. Linie reprezentują intensywność emisji (C_i), kg CO_{2e}/(m²rok) [1]

Fig. 1. Point of non-compliance. The lines represent the emission intensity (C_i), kg CO_{2e}/(m²a) [1]

Ścieżka dekarbonizacji specyficzna dla budynków o funkcji magazynowej w Polsce jest pokazana na wykresie jako linia zielona. Czarna linia przerywana to bazowa intensywność emisji gazów cieplarnianych dla danego obiektu, obliczona jako roczna ilość emisji gazów cieplarnianych na metr kwadratowy powierzchni budynku. Dane dotyczące emisji obejmują emisje generowane bezpośrednio przez spalanie paliw kopalnych na miejscu w celu ogrzewania oraz emisje pośrednie (spowodowane zużyciem

energii elektrycznej). Punkt przecięcia linii celu dekarbonizacji (linia zielona) oraz skorygowanej linii intensywności emisji (linia czarna ciągła) stanowi moment utraty zgodności z przyjętą ścieżką redukcji emisji. Dla analizowanego budynku rok niezgodności przypada na 2043 r. Oznacza to, że od tego momentu intensywność emisji gazów cieplarnianych generowanych przez obiekt przekracza dopuszczalny poziom wynikający z przyjętej trajektorii dekarbonizacji.

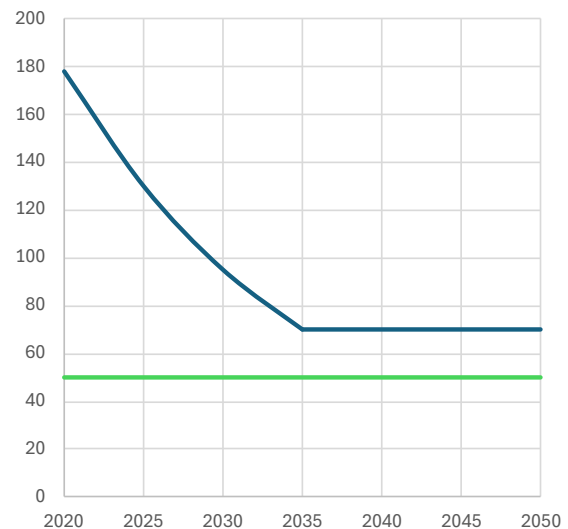
Emisje przekraczające wartości graniczne określone w wybranym scenariuszu (tzw. emisje nadwyżkowe) stanowią istotny wskaźnik ryzyka klimatycznego i regulacyjnego. Ich wielkość może być wykorzystywana do oceny ekspozycji aktywa na ryzyko transformacyjne, w szczególności w kontekście zaostrzających się wymagań prawnych oraz oczekiwań rynku dotyczących efektywności energetycznej i śladu węglowego. Nieruchomości, które w wyniku niespełnienia przyszłych standardów energetycznych i emisyjnych mogą być narażone na ryzyko przedwczesnej utraty wartości ekonomicznej (tzw. ryzyko „stranded assets”). W związku z tym zasadne jest zaplanowanie i wdrożenie działań modernizacyjnych przed osiągnięciem punktu niezgodności, tj. przed rokiem 2043, w celu ograniczenia przyszłych emisji oraz dostosowania obiektu do wymagań długoterminowej polityki klimatycznej. Należy podkreślić, że przyjęta trajektoria redukcji emisji uwzględni stopniową dekarbonizację krajowego mixu energetycznego, zgodnie z założeniami metodyki CRREM. W scenariuszu nieuwzględniającym dekarbonizacji sieci elektroenergetycznej punkt niezgodności wystąpiłby wcześniej – po 2035 r. (co odzwierciedla czarna linia przerywana na wykresie).

Na rys. 2 przedstawiono wykres zmian wartości współczynnika zapotrzebowania na energię pierwotną EP, kWh/(m² rok). Niebieska krzywa odzwierciedla niezbędną dynamikę poprawy efektywności, jakiej oczekuje się od nowoczesnych obiektów budowlanych wielkopowierzchniowych. W roku 2020 dopuszczalny limit wynosił 178 kWh/(m² rok). Przewidywany spadek wartości współczynnika EP dla budynków w perspektywie do 2050 r. zamieszczono w tabeli 2. Zgodnie z przyjętą metodologią, limit ten ulega systematycznej redukcji (np. do 115 w 2027 r. i 79 w 2033 r.), osiągając ostateczną stabilizację na poziomie 70 po roku 2035. Tak gwałtowny spadek wartości docelowych wynika z konieczności adaptacji budownictwa do standardów niemal zeroemisyjnych oraz przewidywanych zmian w legislacji dotyczącej charakterystyki energetycznej budynków (EPBD).

Tabela 2. Prognozowana zmiana wartości współczynnika EP, kWh/m²/rok [1]

Table 2. Projected change in the value of the ep indicator, kWh/m²/a [1]

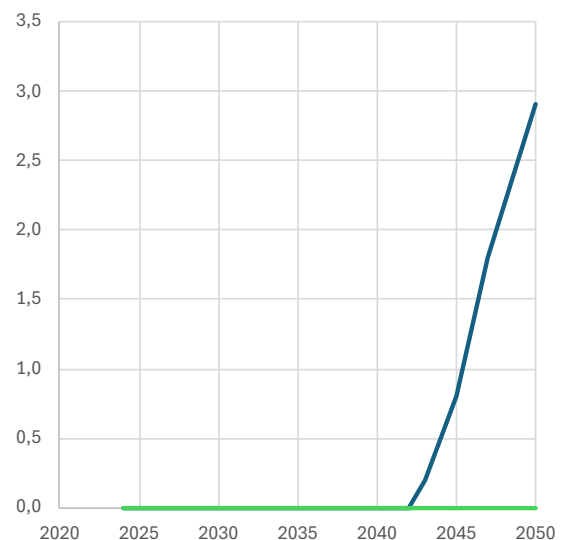
Rok	EP [kWh/(m ² ·rok)]
2020	178
2025	130
2030	95
2035	70
2036	70
2041	70
2046	70



Rys. 2. Wykres zmian wartości współczynnika zapotrzebowania na energię pierwotną EP, kWh/(m² rok) [1]

Fig. 2. Graph of changes in the value of the EP Indicator, kWh/(m² a) [1]

Wykres na rys. 3 prezentuje ewolucję śladu węglowego obiektu w czasie, uwzględniając nie tylko parametry techniczne instalacji, ale również czynniki makroekonomiczne i klimatyczne specyficzne dla lokalizacji. Niebieska ciągła linia przedstawia trajektorię docelową 1,5°C, wskazując maksymalną dopuszczalną intensywność emisji zgodną z celem Porozumienia Paryskiego, jakim jest ograniczenie globalnego ocieplenia do 1,5°C, natomiast zielona linia przedstawia trajektorię docelową dla wszystkich GHG, oznaczającą mniej rygorystyczną ścieżkę redukcji emisji.



Rys. 3. Ślad węglowy generowany przez budynek – nadmierna emisja, kgCO_{2e}/(m² rok) [1]

Fig. 3. Carbon footprint generated by the building – excess emission, kgCO_{2e}/(m² a) [1]

8. Wnioski z analizy studium przypadku

Najniższe wartości intensywności węglowej i emisyjnej ($C_i = 3,6$, $E_i = 21$) odnotowano dla hali magazynowej B. Wynik ten wynika bezpośrednio z dominującego udziału gazu ziemnego, charakteryzującego się niższą emisyjnością niż energia elektryczna pobierana z krajowej sieci elektroenergetycznej. Jednocześnie w analizowanym obiekcie stwierdzono najwyższy poziom emisji nadmiarowych ($E_{em} = 1276 \text{ MgCO}_{2e}$), co należy wiązać przede wszystkim z jego dużą skalą – wyrażoną największą powierzchnią użytkową – oraz wysokim całkowitym zużyciem energii. Otrzymane wyniki wskazują zatem, że niska intensywność emisji nie wyklucza ryzyka przekroczenia ścieżek dekarbonizacyjnych w ujęciu bezwzględny.

Hala magazynowa A, pomimo braku wykorzystania gazu ziemnego oraz częściowego wsparcia ze strony instalacji fotowoltaicznej, charakteryzuje się najwyższą intensywnością węglową ($C_i = 18,1$) oraz emisyjną ($E_i = 50$). Stan ten wynika z dominującego udziału energii elektrycznej pobieranej z sieci, która – w warunkach krajowego mixu energetycznego – cechuje się wysokim współczynnikiem emisji. Wartość emisji nadmiarowych ($E_{em} = 519 \text{ MgCO}_{2e}$), potwierdza, że obiekt ten pozostaje na niekorzystnej ścieżce dekarbonizacyjnej, mimo częściowego wykorzystania odnawialnych źródeł energii.

Hala magazynowa C, o skali zbliżonej do hali magazynowej A, lecz z częściowym udziałem gazu ziemnego (około 60%), osiąga pośrednie wartości analizowanych wskaźników ($C_i = 17,2$, $E_i = 43$). Taka struktura nośników energii przekłada się na niższą emisyjność w porównaniu z obiektem opartym wyłącznie na energii elektrycznej, jednak jej poziom nadal pozostaje relatywnie wysoki. Brak danych dotyczących emisji nadmiarowych uniemożliwia pełną ocenę ryzyka dekarbonizacyjnego w tym przypadku.

Końcowa interpretacja wyników wskazuje, że kluczowym czynnikiem determinującym efektywność emisyjną analizowanych obiektów jest nie tylko ich wielkość, lecz przede wszystkim struktura zużycia nośników energii. Obiekty charakteryzujące się wysokim udziałem energii elektrycznej pobieranej z sieci wykazują wyższą intensywność emisji, natomiast wykorzystanie gazu ziemnego prowadzi do obniżenia wskaźników intensywności, nie eliminuje jednak ryzyka wysokich emisji całkowitych w przypadku obiektów wielkopowierzchniowych.

9. Literatura

- [1] Kołodziejczyk, D. (2026). *Analiza wskaźników emisyjności budynków pełniących funkcje magazynów w środowisku CRREM* [Niepublikowana praca magisterska]. Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska.
- [2] Kłusek, T. (2024). Realizacja idei budownictwa zrównoważonego na polskim rynku nieruchomości magazynowych. Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. *Ekonomika i Organizacja Logistyki*, 9(4), 55-68. <https://doi.org/10.22630/EIOL.2024.9.4.28>
- [3] Wyrwa, A., Radomska, E., Pająk, T., Mika, Ł., Michalak, P., Lis, Ł., Kwasnowski, P., Klempka, R., Kalawa, W., Jaszczur, M., Gołdasz, A., Fornalik-Wajs, E., Brus, G., Buczyński, R., Bień, A., Banaś, M., & Sztekler, K. (2025). Efektywność wytwarzania i użytkowania energii. *Energetyka Rozproszona*, 13-14, 9-33. <https://doi.org/10.7494/er.2025.13-14.9>
- [4] Zygmunt, M., Witczak, K., & Gawin, D. (2025). *Dekarbonizacja i autonomiczność energetyczna budynków użyteczności publicznej – studium przypadku*. W Materiały III Konferencji Naukowej Energetyki Rozproszonej KNER'2025. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie.
- [5] CRREM. (2026). CRREM EUI Methodology Explainer: A Summary of CRREM's Energy Pathway Methodology. <https://crrem.org/wp-content/uploads/2026/01/CRREM-EUI-Methodology-Explainer.pdf> (Dostęp: 07.03.2026).
- [6] CRREM. (2026). What are the CRREM pathways and what does the CRREM misalignment year mean? CRREM explained: Part 1. https://crrem.org/wp-content/uploads/2026/03/CRREM-Explained_Part-1.pdf (Dostęp: 07.03.2026)
- [7] European Commission, Directorate-General for Climate Action, Directorate-General for Mobility and Transport, & Directorate-General for Energy. (2021). *EU Reference Scenario 2020: Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050* (Report). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2833/35750>
- [8] Institute for Real Estate Economics. (2023). From global emission budgets to decarbonization pathways at property level: CRREM downscaling documentation and assessment methodology (Version 2, Version 1.01). CRREM. https://crrem.org/wp-content/uploads/2026/04/CRREM-downscaling-documentation-and-assessment-methodology_Update-V2_V1.01-03.05.2023.pdf
- [9] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), & World Resources Institute (WRI). (2019). Scope 1 & 2 GHG inventory guidance. GHG Protocol. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/Guidance_Handbook_2019_FINAL.pdf
- [10] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), & World Resources Institute (WRI). (2013). Technical guidance for calculating Scope 3 emissions: Supplement to the Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting & Reporting Standard. GHG Protocol. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/Scope3_Calculation_Guidance_0%5B1%5D.pdf (Dostęp: 07.05.2026)