



Katarzyna Piotrowska

Metoda środowiskowej oceny cyklu istnienia wybranych środków transportu samochodowego



Metoda środowiskowej oceny cyklu istnienia
wybranych środków transportu samochodowego

Monografie – Politechnika Lubelska

Rada Naukowa Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej

Przewodnicząca:
Agnieszka RZEPKA

Dyrektor CIN-T:
Katarzyna WEINPER

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej:

Magdalena CHOŁOJCZYK
Karolina FAMULSKA-CIESIELSKA
Jarosław GAJDA
Anna KOŁTUNOWSKA
Katarzyna PEŁKA-SMĘTEK
Anna STROJEK

Przedstawiciele Dyscyplin Naukowych Politechniki Lubelskiej:

Marzenna DUDZIŃSKA
Małgorzata FRANUS
Arkadiusz GOLA
Paweł KARCZMAREK
Beata KOWALSKA
Anna KUCZMASZEWSKA
Jarosław LATAJSKI
Tomasz LIPECKI
Zbigniew ŁAGODOWSKI
Joanna PAWŁAT
Lucjan PAWŁOWSKI
Natalia PRZESMYCKA
Magdalena RZEMIENIAK
Mariusz ŚNIADKOWSKI

Przedstawiciele honorowi:

Zhihong CAO, Chiny
Miroslav GEJDOŠ, Słowacja
Karol HENSEL, Słowacja
Hrvoje KOZMAR, Chorwacja
Frantisek KRCMA, Czechy
Sergio Lujan MORA, Hiszpania
Dilbar MUKHAMEDOVA, Uzbekistan
Sirgii PAWŁOW, Ukraina
Natalia SAVINA, Ukraina
Natia SHENGELIA, Gruzja
Daniele ZULLI, Włochy

Katarzyna Piotrowska

Metoda środowiskowej oceny cyklu istnienia
wybranych środków transportu samochodowego



POLITECHNIKA
LUBELSKA
WYDAWNICTWO

Lublin 2023

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz, Politechnika Poznańska

prof. dr hab. inż. Andrzej Świdorski, Instytut Transportu Samochodowego

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

ISBN: 978-83-7947-559-9

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

www.wpl.pollub.pl

ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59

Druk: Agencja Reklamowa TOP Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 50 egz.

Spis treści

Streszczenie	7
Abstract	8
Wykaz skrótów i symboli	9
Od autorki	13
1. Wprowadzenie	15
1.1. Geneza	15
1.2. Cel i problem	17
1.3. Zakres.....	18
2. Współczesne wyzwania rozwoju transportu samochodowego	21
2.1. Istota bezpieczeństwa ekologicznego i energetycznego transportu.....	21
2.2. Mobilność 4.0, pojazd użytkowy 4.0 oraz transport 4.0 – kwestie teoretyczne i praktyczne	23
2.3. Sektor transportu samochodowego w świetle koncepcji zrównoważonego rozwoju.....	28
2.4. Podstawowe determinanty efektywnego rozwoju sektora transportu.....	33
2.5. Podsumowanie	36
3. Metodologia środowiskowej oceny cyklu istnienia środków transportu samochodowego	37
3.1. Ocena cyklu istnienia (LCA)	37
3.2. Główne założenia metodologii badań.....	43
3.3. Cel i zakres analiz.....	46
3.4. Przegląd danych.....	49
3.4.1. Podstawowe informacje	49
3.4.2. Ogólna charakterystyka cyklu istnienia rozpatrywanych pojazdów....	54
3.4.3. Wytwarzanie, eksploatacja i zagospodarowanie poużytkowe.....	59
3.4.4. Energia elektryczna w cyklu istnienia.....	71
3.4.5. Produkcja i spalanie paliw.....	73
3.5. Modele oceny wpływu na otoczenie.....	79
3.5.1. ReCiPe.....	81
3.5.2. IPCC.....	82
3.5.3. CED	83
3.5.4. CML.....	84
3.5.5. Ecological Scarcity.....	84

3.6. Interpretacja wyników	86
3.7. Autorska metoda oceny: wskaźnik następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu	87
3.8. Podsumowanie	89
4. Zastosowanie metody na wybranych przykładach	91
4.1. Samochody osobowe segmentu A i B.....	91
4.2. Samochody osobowe segmentu C	101
4.3. Samochody osobowe segmentu SUV	112
4.4. Samochody osobowe z silnikiem spalinowym (ICEV) zasilane benzyną.....	123
4.5. Samochody osobowe z silnikiem spalinowym (ICEV) zasilane olejem napędowym.....	136
4.6. Samochody osobowe z silnikiem spalinowym (ICEV) zasilane CNG.....	146
4.7. Hybrydowe elektryczne samochody osobowe typu plug-in (PHEV) zasilane benzyną.....	157
4.8. Akumulatorowe elektryczne samochody osobowe (BEV)	169
4.9. Elektryczne samochody osobowe na ogniwa paliwowe (FCEV).....	181
4.10. Zasilanie samochodów osobowych energią elektryczną i wybranymi rodzajami paliw	192
4.11. Porównawcza ocena wybranych samochodów z zastosowaniem autorskiego wskaźnika następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu	201
4.12. Podsumowanie	217
5. Podsumowanie i wnioski.....	219
Literatura.....	229

Metoda środowiskowej oceny cyklu istnienia wybranych środków transportu samochodowego

Streszczenie

Współczesny sektor transportu powinien dążyć do transformacji zgodnej z koncepcją rozwoju zrównoważonego, uwzględniającej zarówno aspekty gospodarczo-ekonomiczne, jak też środowiskowe i społeczne. Postępujące wyczerpywanie zasobów surowców kopalnych, zmniejszenie bioróżnorodności, pogłębienie efektu cieplarnianego czy coraz większa liczba chorób wywołanych obniżającą się jakością środowiska spowodowały, że społeczeństwo zaczęło zwracać większą uwagę na wpływ różnych gałęzi gospodarki na otoczenie. Produkcja oraz spalanie paliw na cele transportu stanowią około 25% emisji wszystkich gazów cieplarnianych. W związku z powyższym jako zasadne uznano opracowanie metody środowiskowej oceny cyklu istnienia wybranych środków transportu samochodowego.

Monografia składa się z dwóch zasadniczych części. W pierwszej z nich – literaturowej – dokonano analizy najważniejszych, współczesnych wyzwań rozwoju transportu samochodowego, w tym m.in. poruszono tematykę bezpieczeństwa ekologicznego i energetycznego transportu, omówiono kwestie teoretyczne oraz praktyczne związane z transportem 4.0, mobilnością 4.0 i pojazdami użytkowymi 4.0, dokonano także oceny sektora transportu samochodowego w świetle koncepcji rozwoju zrównoważonego oraz określono podstawowe determinanty warunkujące jego efektywną transformację.

W drugiej części przybliżono najważniejsze założenia autorskiej metodologii środowiskowej oceny cyklu istnienia środków transportu samochodowego (w tym opracowanego wskaźnika następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu W_{ns}), którą następnie zastosowano na wybranych przykładach. Analizy przeprowadzono dla cykli istnienia pojazdów z segmentu A i B, C oraz SUV wyposażonych w odmienne układy napędowe (ICEV zasilane benzyną, olejem napędowym i CNG, PHEV zasilane benzyną, BEV oraz FCEV). Rozważono dwa scenariusze zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów i elementów – w formie składowania na wysypisku odpadów oraz z wykorzystaniem procesów recyklingu. Przyjęto także dwa odmienne horyzonty czasowe – pierwszy dla samochodów zarejestrowanych w roku 2020, natomiast drugi dla tych, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Dodatkowo przeprowadzono analizę cykli paliwowych i energetycznych rozważanych pojazdów.

Na podstawie otrzymanych wyników sformułowano kluczowe zalecenia w obszarze zrównoważonego, efektywnego rozwoju sektora transportu samochodowego.

Słowa kluczowe: transport, zrównoważony rozwój, ocena cyklu istnienia (LCA), recykling

Method of environmental life cycle assessment of selected means of motor transportation

Abstract

The modern transportation sector should strive for transformation in accordance with the concept of sustainable development, taking into account economic aspects as well as environmental and social aspects. The progressive depletion of fossil resources, the reduction of biodiversity, the deepening of the greenhouse effect and the increasing number of diseases caused by the deteriorating quality of the environment have made society pay more attention to the impact of various sectors of the economy on the environment. The production and combustion of fuels for transport purposes account for approximately 25% of all greenhouse gas emissions. Mention that, it was considered reasonable to develop a method for environmental assessment of the life cycle of selected means of road transport.

The monograph consists of two main parts. Literature is the first of it, and consists of an analysis of the most important contemporary challenges for the development of road transport, including, among others, discussion on the subject of ecological and energetical safety of transport with theoretical and practical issues related to transport 4.0, mobility 4.0 and commercial vehicles 4.0. The car transport sector was also assessed in the light of the concept of sustainable development and the basic determinants describing its effective transformation.

In the second part, the most important assumptions of the author's environmental methodology for assessing the life cycle of motor transport (including the developed indicator of environmental consequences in the life cycle of the vehicle) were presented, what was then applied to selected examples. The analyzes were carried out for the life cycles of vehicles from segments A and B, C and SUVs equipped with different drive systems (ICEV fueled by petrol, diesel and CNG, PHEV fueled by petrol, BEV and FCEV). Two scenarios of post-consumer management of plastics, materials and elements were considered – in the form of landfill and with the use of recycling processes. Two different time horizons were also adopted – the first for cars registered in 2020, and the second for those to be registered in 2050. In addition, an analysis of the fuel and energy cycles of the considered vehicles was carried out.

On the basis of the obtained results, key recommendations were formulated in the area of sustainable, effective development of the car transport sector.

Keywords: transport, sustainability, life cycle assessment (LCA), recycling

Wykaz skrótów i symboli

- AP – potencjał zakwaszenia środowiska (ang. *acidification potential*)
- APOS – model systemu alokacji w punkcie substytucji (ang. *allocation at the point of substitution*)
- BEV – akumulatorowe pojazdy elektryczne (ang. *battery electric vehicles*)
- CCS – sekwestracja ditlenku węgla (ang. *carbon capture and storage*)
- CD – tryb jazdy głównie z rozładowywaniem baterii (ang. *electric chargedepleting*)
- CNG – sprężony gaz ziemny (ang. *compressed natural gas*)
- CS – tryb jazdy z podtrzymywaniem ładowania baterii (ang. *engine chargesustaining*)
- EF – ślad środowiskowy (ang. *environmental footprint*)
- EoL – koniec cyklu istnienia (ang. *end-of-life*)
- EP – potencjał eutrofizacji środowiska (ang. *eutrophication potential*)
- FAME – estry metylowe kwasów tłuszczowych (ang. *fatty acid methyl esters*)
- FCEV – pojazdy elektryczne na ogniwa paliwowe (ang. *fuel cell electric vehicles*)
- GHG – gaz cieplarniany (ang. *greenhouse gas*)
- GWP – potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (ang. *global warming potential*)
- H2G – koncepcja bilansowania systemu elektroenergetycznego wykorzystująca źródła energii w budynkach, np. instalacje odnawialnych źródeł energii (ang. *home-to-grid*)
- HDV – pojazd ciężki (ang. *heavy-duty vehicle*)
- HEV – hybrydowe pojazdy elektryczne (ang. *hybrid electric vehicles*)
- HVO – uwodorniony olej roślinny (ang. *hydrotreated vegetable oil*)
- ICCT – Międzynarodowa Rada Czystego Transportu (ang. *the International Council on Clean Transportation*)
- ICEV – pojazdy z silnikiem spalinowym (ang. *internal combustion engine vehicles*)
- IEA – Międzynarodowa Agencja Energetyczna (ang. *International Energy Agency*)
- IFEU – Instytut Badań Energii i Środowiska (de. *Institut für Energie und Umweltforschung*)
- ILUC – pośrednia zmiana użytkowania gruntów (ang. *indirect land use change*)
- IoT – internet rzeczy (ang. *Internet of Things*)
- IARC – Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (ang. *International Agency for Research on Cancer*)
- ITI – inteligentne narzędzia transportowe (ang. *intelligent transport items*)
- ITS – inteligentne systemy transportowe (ang. *intelligent transport systems*)
- LCA – środowiskowa ocena cyklu istnienia (ang. *life cycle assessment*)
- LCI – analiza zbioru wejść i wyjść (ang. *life cycle inventory*)
- LCIA – ocena wpływu cyklu istnienia (ang. *life cycle impact assessment*)
- LCM – zarządzanie cyklem istnienia (ang. *life cycle management*)
- LCT – myślenie kategoriami cyklu istnienia (ang. *life cycle thinking*)
- LDV – pojazd lekki (ang. *light-duty vehicle*)
- LNG – ciekły gaz ziemny (ang. *liquefied natural gas*)

- MSW – odpady komunalne (ang. *municipal solid waste*)
- NEDC – nowy europejski cykl jazdy (ang. *New European Driving Cycle*)
- NMVO – niemetanowe lotne związki organiczne (ang. *non-methane volatile organic compounds*)
- PHEV – hybrydowe pojazdy elektryczne typu plug-in (ang. *plug-in hybrid electric vehicles*)
- PM – pył zawieszony, drobne cząsteczki stałe lub kropelki cieczy swobodnie unoszące się w powietrzu, stanowiące część aerozolu atmosferycznego (ang. *particulate matter*)
- POCP – potencjał fotochemicznego tworzenia ozonu (ang. *photochemical ozone creation potential*)
- RED II – dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady UE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych (ang. *Renewable Energy Directive*)
- REEV – pojazd elektryczny o rozszerzonym zasięgu (ang. *range-extended electric vehicle*)
- SDS – scenariusz zrównoważonego rozwoju (ang. *sustainable development scenario*)
- SMR – parowy reforming metanu (ang. *steam methane reforming*)
- SOC – straty węgla organicznego w glebie (ang. *soil organic carbon*)
- SUV – pojazd łączący cechy samochodu osobowego i terenowego, przeznaczony do celów użytkowych i rekreacyjnych (ang. *sport utility vehicle*)
- TTW – podzakres w łańcuchu energetycznym pojazdu: od momentu, w którym energia jest pobierana (punkt ładowania, dystrybutor paliwa) do jej wykorzystania (pojazd w ruchu), jest to zużycie paliwa w pojeździe i powodowane przez niego emisje podczas jazdy (ang. *tank-to-wheel*)
- V2B – interfejs realizujący stały kontakt, komunikację między pojazdem a centrami IT (ang. *vehicle-to-IT-backend*)
- V2G – koncepcja bilansowania systemu elektroenergetycznego, w której samochody elektryczne mogą pełnić rolę mobilnych magazynów energii (ang. *vehicle-to-grid*)
- V2H – interfejs realizujący komunikację między pojazdem a kierowcą (ang. *vehicle-to-human*)
- V2I – interfejs realizujący stały kontakt, komunikację pojazdu z otaczającą go infrastrukturą, np. sygnalizacją świetlną, znakami drogowymi (ang. *vehicle-to-infrastructure*)
- V2V – interfejs realizujący komunikację danego pojazdu z innymi pojazdami (ang. *vehicle-to-vehicle*)
- V2X – interfejs realizujący stały kontakt pojazdu z innymi elementami otoczenia, które wpływają na niego i w jakikolwiek sposób są z nim powiązane (ang. *vehicle-to-x, vehicle-to-everything*)
- WHO – Światowa Organizacja Zdrowia (ang. *World Health Organization*)

- WLTP – światowa zharmonizowana procedura testowa pojazdów lekkich (ang. *world harmonized light vehicle test procedure*)
- WTT – podzakres dostaw paliwa: od produkcji źródła energii (benzyna, energia elektryczna itd.) do zaopatrzenia w paliwo (transport do punktu ładowania lub dystrybutora paliwa) (ang. *well-to-tank*)
- WTW – podejście holistyczne, obejmujące całe zużycie energii i wszystkie emisje związane z produkcją, dostawą i użytkowaniem paliw (ang. *well-to-wheel*)
- WWA – wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (ang. *polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH*)
- xEV – pojazd elektryczny (ang. *electric vehicles*, tj. PHEV, REEV, BEV lub FCEV)
- ZEV – pojazd bezemisyjny (ang. *zero-emission vehicle*)
- ZLEV – pojazd zero- i niskoemisyjny (ang. *zero- and low-emission vehicle*)

Od autorki

Do najważniejszych gałęzi transportu zalicza się transport drogowy, kolejowy, lotniczy oraz morski. Wśród wymienionych, transport samochodowy jest najbardziej upowszechniony. Cechuje go równocześnie największy wybór środków przemieszczania się, od niewielkich aut osobowych do ogromnych, bardzo pojemnych samochodów ciężarowych. Rozbudowana sieć dróg oplata niemal cały glob, umożliwiając dotarcie prawie w każde miejsce na Ziemi. Elementy infrastruktury drogowej przeważają nad elementami infrastrukturalnymi innych gałęzi transportu. Jednak podstawową wadę transportu samochodowego stanowi szkodliwy wpływ na środowisko, istotnie wyższy niż w przypadku kolei czy transportu morskiego, dodatkowo potęgowany przez efekt skali. Wszystkie środki transportu samochodowego posiadają skończony czas istnienia, złożony z pięciu etapów: sformułowania potrzeby i konstruowania (fazy niematerialne) oraz wytwarzania, eksploatacji i zagospodarowania użytkowego (fazy materialne). Każdy z materialnych etapów niesie ze sobą nie tylko pozytywne, ale i negatywne oddziaływania na otoczenie. Celem ograniczenia destrukcyjnych i zwiększenia konstruktywnych wpływów na środowisko, projektowane zmiany w cyklach istnienia pojazdów powinny wpisywać się w podstawowe założenia zrównoważonego rozwoju transportu.

Głównym zamysłem monografii stało się zatem opracowanie oryginalnej metody środowiskowej oceny cyklu istnienia wybranych środków transportu samochodowego, umożliwiającej dokonanie analizy kryterialnej zarówno z punktu widzenia sektora transportu, jak i szeroko rozumianego otoczenia obiektów badań (oraz następujących w nim zmian). Postawione zadanie starano się rozwiązać kompleksowo, z uwzględnieniem aktualnego stanu wiedzy i techniki z badanego obszaru oraz głównych założeń rozwoju zrównoważonego i ekoprojektowania obiektów technicznych.

Współcześnie szczególnie uwaga poświęcana jest konieczności zastępowania pojazdów konwencjonalnych – alternatywnymi, celem ograniczenia (a nawet wyeliminowania) szkodliwych następstw ich eksploatacji. Nadal nie istnieje jednak taki środek transportu, który nie stanowiłby źródła niekorzystnych oddziaływań dla otoczenia. W ramach każdego etapu cyklu istnienia, również pojazdów alternatywnych, odnotowuje się mniejszy lub większy destrukcyjny wpływ na zdrowie człowieka, jakość środowiska oraz wyczerpywanie zasobów surowców. Autorka zdaje sobie sprawę, że pomimo stosunkowo dużej objętości niniejszej monografii wiele zjawisk dotyczących środowiskowej oceny cyklu istnienia środków transportu samochodowego nie zostało jeszcze do końca wyjaśnionych. Szczególnie dotyczy to mechanizmów rozproszenia energii, nadużywania materii i selekcji informacji. Istnieje na ten temat wiele teorii oraz hipotez, co do których starano się sprecyzować własne stanowisko.

Monografia stanowi podstawę do zrównoważonego projektowania cyklu istnienia środków transportu samochodowego. Praca przeznaczona jest dla twórców i badaczy zajmujących się problematyką oceny cyklu istnienia obiektów technicznych o wysokim stopniu skomplikowania konstrukcji, może również służyć studentom kierunków transport, mechanika i pokrewnych.

1. Wprowadzenie

1.1. Geneza

Współczesny sektor transportu powinien dostosować się do wysiłków wspierających możliwie jak najpełniejsze osiągnięcie celów zawartych w Porozumieniu paryskim (2015 r.), jakimi są ograniczenie poziomu globalnego ocieplenia poniżej 2°C (docelowo 1,5°C) w porównaniu z epoką przemysłową (celem minimalizacji ryzyka i szkód wywoływanych przez zmiany klimatu), adaptacja oraz ograniczanie skutków zmian klimatu i wzmocnienie niskoemisyjnego rozwoju (w sposób nieograniczający produkcji żywności), jak również uwzględnienie zgodności działań sektora finansowego z celami klimatycznymi. Aby do tego doszło, emisje gazów cieplarnianych (GHG) pochodzące z globalnego transportu w 2050 r. muszą być istotnie niższe od współczesnych poziomów. Prognozy ICCT (Międzynarodowej Rady Czystego Transportu, ang. the International Council on Clean Transportation) zakładają, że wysiłki zmierzające do ograniczenia wielkości globalnego ocieplenia do 1,5°C są tożsame ze zmniejszeniem emisji pochodzących ze spalania i produkcji paliw oraz energii elektrycznej dla transportu o co najmniej 80% do roku 2050 (w stosunku do dzisiejszego poziomu). Największa część tej redukcji musi obejmować samochody osobowe. Jeżeli weźmie się pod uwagę prognozowany przyszły rozwój sektora transportu, niezbędna zmiana w przeliczeniu na pojedynczy pojazd będzie jeszcze wyższa. Współcześnie w globalnej skali produkcja oraz spalanie paliw na cele transportu powodują emisje do atmosfery ok. 12 Gt CO₂ eq (ekwiwalentu CO₂) rocznie. Stanowi to w przybliżeniu 25% emisji wszystkich gazów cieplarnianych pochodzenia antropogenicznego. Przy prognozowanym zwiększeniu liczby ludności oraz wzroście gospodarczym, zakłada się, że popyt na transport istotnie wzrośnie. Bez znaczących działań w tym obszarze emisje gazów szklarniowych pochodzące ze spalania oraz produkcji paliw i energii elektrycznej wzrosną prawie dwukrotnie – do 21 Gt CO₂ eq [200, 222, 304].

Pojazdy lekkie, z których większość stanowią samochody osobowe, odpowiadają za największą część emisji gazów cieplarnianych związanych z sektorem transportu – obecnie jest to blisko 5 Gt CO₂ eq. Celem ograniczenia emisji GHG z pojazdów lekkich stosowane są dwa uzupełniające się podejścia. Pierwsze z nich obejmuje zmniejszenie zużycia paliwa przez nowe pojazdy przez ustanowienie norm średniej emisji CO₂ lub efektywności paliwowej oraz przez zapewnienie zachęt dla kupujących pojazdy z elektrycznym układem napędowym. Drugie z kolei polega na wspieraniu dekarbonizacji sieci elektroenergetycznej i zachęcaniu do produkcji paliw odnawialnych oraz niskoemisyjnych [200].

Równie istotnym jak zmniejszanie emisji z wytwarzania oraz zużycia paliwa i energii elektrycznej jest zwrócenie uwagi na to, aby przez wprowadzenie nowych technologii nie zwiększył się także poziom szkodliwych emisji pochodzących z cykli istnienia pojazdów. Celowym wydaje się zatem dokonanie analizy, które

rodzaje pojazdów oraz technologie paliwowe najbardziej sprzyjają zmniejszeniu śladu węglowego samochodów oraz innych niebezpiecznych emisji występujących na każdym etapie ich cykli istnienia. Kluczowa jest zatem nie tylko emisja pochodząca bezpośrednio z rur wydechowych, ale również ta pochodząca z produkcji paliwa i energii elektrycznej, wytwarzania pojazdów, ich eksploatacji oraz zagospodarowania użytkowego.

W sektorze transportu wdrożono szereg aktów prawnych na szczeblu Unii Europejskiej, aby przeciwdziałać negatywnym skutkom jego oddziaływania na środowisko i wspierać przejście na niskoemisyjną gospodarkę o obiegu zamkniętym. Transport drogowy w szczególności jest odpowiedzialny za szereg szkodliwych wpływów na otoczenie. Aby ułatwić podejmowanie decyzji w tym obszarze, kluczowe znaczenie ma lepsze zrozumienie wpływu pojazdów na środowisko w całym ich cyklu istnienia. Faza użytkowania samochodu stanowi istotną część oddziaływania na środowisko cyklu istnienia pojazdów, ale stosowanie paliw cechujących się niższą emisyjnością niebezpiecznych substancji, lepsza kontrola emisji oraz alternatywne układy napędowe – zwiększają znaczenie oceny wpływu na środowisko również w ramach pozostałych etapów cyklu [103, 194].

Opierając się na spójnych wyborach metodologicznych i porównywalnych poziomach wiarygodności danych, ocena cyklu istnienia (LCA) umożliwia analizę różnych technologii pojazdów i cykli paliwowych na podobnych zasadach. Może pomóc w identyfikacji kluczowych wpływów na różnych etapach cykli, aby lepiej zrozumieć możliwości ich ograniczenia. Modelowanie pojazdów zgodnie z założeniami LCA jest złożone i wymaga szeregu wyborów metodologicznych. W przypadku wielu innych badań przedstawionych w literaturze przedmiotu można zauważyć, że ich zakres był w większości przypadków znacznie węższy w porównaniu z niniejszą monografią (obejmując przede wszystkim emisje gazów cieplarnianych), przez co nie był kompletny i wystarczająco szczegółowy, by móc jednoznacznie sformułować zalecenia w obszarze cykli istnienia najczęściej eksploatowanych w Europie samochodów osobowych. W związku z tym zdecydowano się na przeprowadzenie szczegółowych analiz w celu zbadania wpływu wybranych segmentów środków transportu samochodowego na środowisko w sposób całościowy, przy użyciu podejścia LCA obejmującego etapy wytwarzania, eksploatacji i zagospodarowania użytkowego oraz z uwzględnieniem zmian technologicznych oraz miksów energetycznych w horyzoncie czasowym do roku 2050. Kluczowym celem było połączenie wiedzy pochodzącej z literatury oraz danych pozyskanych od producentów, w celu zaproponowania kompleksowej metodologii, a także dalszego udoskonalenia przyszłych badań. W związku z tym za zasadne uznano przeprowadzenie badań określających wpływ na otoczenie samochodów osobowych, zarówno konwencjonalnych, jak i napędzanych alternatywnie, przez ocenę ich cyklu istnienia.

Podstawowym celem prowadzonych analiz było lepsze zrozumienie wpływu środków transportu samochodowego (na przykładzie wybranych segmentów pojazdów osobowych) na środowisko oraz metodologii ich oceny w perspektywie długoterminowej (do 2050 roku). Obejmują one wybór pojazdów lekkich (LDV) z różnymi typami układów napędowych (silnik spalinowy i/lub silnik elektryczny zasilany ogniwami paliwowymi lub akumulatorami). Kluczowym zadaniem w ramach badań było opracowanie podejścia do LCA środków transportu samochodowego, z uwzględnieniem różnych rodzajów paliw lub energii elektrycznej, które je napędzają. Przeprowadzone badania obejmowały szeroki zakres wpływów na otoczenie spowodowanych etapami wytwarzania, eksploatacji i zagospodarowania pożytkowego wybranych segmentów pojazdów osobowych.

Wybory metodologiczne dokonane podczas analiz, w tym szczegółowe modelowanie wpływu na środowisko i wybór zbiorów danych, opierały się na dostępnej literaturze i zbiorach danych (zarówno literaturowych, jak i udostępnionych bezpośrednio przez producentów). Dokonane wybory miały za zadanie spełnienie przyjętych celów badania i były konsekwentnie stosowane dla wszystkich rozważanych typów pojazdów. Uzyskane wyniki LCA wybranych samochodów miały za zadanie dostarczyć zaleceń na temat zwiększenia efektywności ekologicznej w całym ich cyklu istnienia. Analizy miały również uwidocznić, jak czynniki czasowe i technologiczne wpływają na poziom oddziaływania na otoczenie cykli istnienia oraz jak potencjalne przyszłe zmiany (w technologii czy dostawach energii) mogą wpłynąć na poziom oddziaływania na otoczenie środków transportu samochodowego.

1.2. Cel i problem

U podstaw prac badawczo-rozwojowych, w zakresie zwiększania pozytywnych oraz ograniczania negatywnych następstw środowiskowych występujących w cyklach istnienia obiektów technicznych, leży koncepcja myślenia kategoriami cyklu istnienia (LCT, ang. *life cycle thinking*). Dla osiągnięcia celów zrównoważonego rozwoju, w tym założeń zawartych w Porozumieniu paryskim, konieczną jest z jednej strony proekologiczna modernizacja procesów wytwórczych przez minimalizację destrukcyjnego oddziaływania na otoczenie samych procesów oraz wytwarzanych obiektów, a z drugiej strony – ograniczenie emisji szkodliwych substancji pochodzących z etapu ich eksploatacji. Współcześnie zarówno w Europie, jak i w wielu innych obszarach świata stymulowane są mechanizmy sprzyjające wytwarzaniu obiektów bardziej przyjaznych dla środowiska. Nieustannie poszukiwane są sposoby na ograniczenie niebezpiecznych wpływów na otoczenie obiektów, procesów i usług w całym ich cyklu istnienia. W perspektywie umożliwia to ekoprojektowanie środków transportu samochodowego, których cykle istnienia będą wywierały mniej negatywnych oddziaływań na otoczenie [93, 149].

Bardziej kompleksowe podejście do zagadnień kształtowania cyklu istnienia obiektów technicznych cechuje koncepcję zarządzania cyklem istnienia (LCM, ang. *life cycle management*). Wyróżnia ją istotny wymiar praktyczny oraz możliwość wprowadzenia myślenia kategoriami cyklu istnienia (LCT) do praktyki gospodarczej. Polega ona na takim zarządzaniu działalnością firmy, aby zapewnić bardziej zrównoważoną, mniej szkodliwą dla otoczenia produkcję oraz konsumpcję. LCM znajduje zastosowanie w obszarach planowania strategicznego, projektowania i rozwoju wytwarzanych obiektów, decyzji marketingowych czy programów komunikacyjnych [52, 192].

Środowiskowa ocena cyklu istnienia (LCA, ang. *life cycle assessment*) stanowi podstawowe narzędzie do realizacji prac o charakterze analitycznym w ramach LCM. Jest metodą identyfikacji i oceny wpływu na otoczenie, uznaną przez środowiska naukowe oraz coraz częściej stosowaną przez podmioty gospodarcze. Pogłębiający się spadek jakości środowiska, wzrastające zagrożenie dla organizmów żywych (w tym człowieka) oraz zwiększające się wyczerpywanie zasobów surowców stanowią efekt konwencjonalnego projektowania obiektów technicznych, nieuwzględniającego powodowanych przez nie negatywnych następstw dla otoczenia w perspektywie całego cyklu istnienia. Niezwykle istotne staje się zatem łączenie projektowania i konstruowania z procesami eksploatacji oraz uwzględnieniem późniejszego recyklingu, przy równoczesnym zminimalizowaniu destrukcyjnych relacji pomiędzy otoczeniem a środkami transportu samochodowego [52, 149].

Zgodnie z powyższym, za główny cel monografii przyjęto ***opracowanie metody środowiskowej oceny cyklu istnienia wybranych środków transportu samochodowego.***

Dla zrealizowania głównego celu sformułowano problem badawczy w postaci pytania: ***Jakie następstwa w obszarze wpływu na zdrowie człowieka, jakość środowiska oraz wyczerpywanie zasobów surowców wywierają cykle istnienia wybranych środków transportu samochodowego?***

1.3. Zakres

Monografia swoim zakresem obejmuje:

- analizę aktualnego stanu wiedzy oraz techniki z obszaru współczesnych wyzwań dla rozwoju transportu samochodowego (w tym problematyki bezpieczeństwa energetycznego i ekologicznego, kwestii teoretycznych oraz praktycznych związanych z transportem 4.0, mobilnością 4.0 i pojazdami użytkowymi 4.0, zagadnień zrównoważonego rozwoju sektora transportu oraz analizy determinant warunkujących jego efektywną transformację);
- omówienie metod analiz (w tym autorskiej metodologii środowiskowej oceny cyklu istnienia środków transportu samochodowego, ze szczególnym uwzględnieniem opracowanego wskaźnika następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu – Wnś);

- zaprezentowanie wyników badań z wykorzystaniem autorskiej metody (analizie poddano wybrane pojazdy z segmentu A i B, C oraz SUV wyposażone w sześć rodzajów układów napędowych – ICEV zasilane benzyną, olejem napędowym i CNG, PHEV zasilane benzyną, BEV oraz FCEV. Przyjęto dwa scenariusze zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów i elementów, obejmujące składowanie na wysypisku odpadów lub recykling. Uwzględniono dwa horyzonty czasowe – pierwszy dla samochodów zarejestrowanych w roku 2020, natomiast drugi dla tych, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Przeanalizowano także wybrane cykle paliwowe i energetyczne wszystkich ocenianych pojazdów);
- sformułowanie kluczowych wniosków i zaleceń w obszarze próśrodowiskowego, zrównoważonego, efektywnego rozwoju sektora transportu samochodowego.

2. Współczesne wyzwania rozwoju transportu samochodowego

2.1. Istota bezpieczeństwa ekologicznego i energetycznego transportu

Współcześnie odnotowuje się nie tylko korzyści wynikające z rozwoju sektora transportu, ale również szereg zagrożeń w aspekcie ekologicznym i energetycznym. Coraz częściej podnoszony jest problem destrukcyjnych oddziaływań środowiskowych oraz możliwości występowania niestabilnych dostaw paliw. Tego rodzaju zagrożenia uważane są za problemy o charakterze strategicznym. W ostatnich latach odnotowuje się bardzo dynamiczny rozwój sektora transportu, co może stanowić istotne źródło negatywnych następstw dla otoczenia. Niekorzystne skutki widoczne są nie tylko w obszarze obniżania jakości środowiska, ale również w zakresie zdrowia człowieka. Są one związane głównie z wykorzystaniem paliw kopalnych, pogłębianiem globalnego ocieplenia, emisjami zanieczyszczeń do środowiska atmosferycznego, wodnego i glebowego czy emisją hałasu komunikacyjnego [7, 206, 306].

Jedno z kluczowych ograniczeń rozwojowych państw europejskich w pierwszej połowie XXI w. stanowi nieustanny, dynamiczny wzrost zapotrzebowania na surowce energetyczne. Zagadnienie to jest szczególnie ważne w odniesieniu do sektora transportu. W krajach członkowskich Unii Europejskiej potrzeby energetyczne w tym zakresie w ponad 90% są zaspokajane przez produkty ropopochodne. Oparcie popytu na energię w transporcie prawie całkowicie na produktach naftowych skutkuje ważnymi problemami w kontekście bezpieczeństwa ekologicznego i energetycznego. Pierwsze z nich wiążą się ze wzrostem obaw o pogłębienie zmian klimatycznych w połączeniu z istniejącymi już trudnościami związanymi z zanieczyszczeniem środowiska czy hałasem. Drugie z nich dotyczą bezpieczeństwa dostaw produktów ropopochodnych i samej ropy celem realizacji zwiększających się potrzeb przewozowych. Kraje europejskie w coraz większym stopniu uzależniają się od importu ropy naftowej oraz produktów ropopochodnych spoza Unii. Poziom zależności energetycznej krajów UE w zakresie importu ropy naftowej jest najwyższy w porównaniu z poziomem zależności w przypadku innych nośników energii. Pogłębiające się uzależnienie od importu ropy jest zatem istotnym zagrożeniem dla rozwoju zasobooszczędnego oraz efektywnego (ekologicznie, energetycznie i ekonomicznie) europejskiego sektora transportu. Bez niższych, stabilnych cen paliw niemożliwa stanie się również poprawa konkurencyjności transportu [1, 206, 247].

Bezpieczeństwo energetyczne transportu jest rozumiane jako możliwość powszechnego korzystania z usług przewozowych, która jest pojmowana w wymiarze poziomu cen paliw, gwarancji niezawodności ich dostaw oraz zachowania wymagań z zakresu ochrony środowiska [245]. Potrzeby energetyczne, które warunkują realizację popy-

tu na transport, niosą ze sobą nie tylko wymierne korzyści ekonomiczne, ale również skutkują szeregiem destrukcyjnych efektów zewnętrznych. Skutki transportu są zazwyczaj ponoszone nie tylko przez użytkownika środka komunikacji czy wytwórcę tych efektów, ale również przez całe społeczeństwo. Z tego powodu zarówno bezpośrednie, jak i pośrednie efekty zewnętrzne realizowanych usług przewozowych są coraz częściej rozważane w kontekście bezpieczeństwa ekologicznego. Bezpieczeństwo ekologiczne jest to pożądaný stan otoczenia, wolny od zagrożeń, które naruszają równowagę biosfery i poszczególnych ekosystemów. Tak rozumiane bezpieczeństwo rozpatrywane jest w dwóch aspektach – pozytywnym i negatywnym. W aspekcie pozytywnym postuluje się taką zmianę dotychczasowych stosunków społeczno-gospodarczych, która nie będzie prowadziła do powstania kryzysu ekologicznego. Wpisuje się to w ideę zrównoważonego rozwoju. Z kolei w ujęciu negatywnym bezpieczeństwo ekologiczne ograniczone jest do eliminacji zagrożeń dla środowiska [48, 227, 296].

Do kluczowych celów transformacji energetycznej Europy i Polski w perspektywie do roku 2050 zalicza się zmniejszenie uzależnienia gospodarki do importu ropy oraz zbilansowanie miksu energetycznego w kierunku dywersyfikacji i rozproszenia źródeł energii ze szczególnym naciskiem na zwiększenie udziału źródeł odnawialnych. Jednym z rozwiązań mających na celu zrealizowanie tych założeń może być elektryfikacja transportu drogowego oraz popularyzacja wodoru jako źródła energii w tym sektorze. Rozwój elektromobilności jest wskazywany jako jedna z najważniejszych determinant w kontekście poprawy bezpieczeństwa energetycznego. Potencjał w obszarze elektryfikacji transportu dotyczy także możliwości zapewniania krótkookresowego bezpieczeństwa dostaw energii. Jest on uznawany za jeden z bezpośrednich elementów elastyczności systemów elektroenergetycznych, (w pewnym stopniu) pozwalający na bilansowanie podaży energii i popytu na nią. Zdolność do tego rodzaju bilansowania jest ważna w okresach, w których popyt lub podaż ulegają niespodziewanym, nagłym, znaczącym wahaniom [69, 178].

Powodzenie w zakresie bilansowania popytu i podaży na energię zależne jest od jakości i ilości elementów systemu elektroenergetycznego, którymi można sterować. Rozwój elektromobilności jest uznawany za jeden z nich. Zasadniczym źródłem zasilania pojazdów z napędem elektrycznym powinna być jednak energia odnawialna, a ich ładowanie winno mieć miejsce w okresach o wysokiej generacji tego typu energii. Takie rozwiązanie pozwoliłoby systemom elektroenergetycznym magazynować nadmiar energii. Ograniczyłoby również zapotrzebowanie na energię w okresach szczytowego obciążenia systemów. W tym względzie akumulatory samochodów z napędem elektrycznym byłyby ważnymi magazynami energii, stabilizującymi pracę systemów elektroenergetycznych. Jednak wdrożenie tego typu rozwiązań wymaga rozwoju sieci inteligentnych, np. H2G (dom–sieć, ang. *home-to-grid*) czy V2G (pojazd–sieć, ang. *vehicle-to-grid*). Rozwój elektromobilności jest również związany z koniecznością dodatkowego pokrycia wciąż rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną. Koniecznym staje się zatem prowadzenie łącznych działań w zakresie budowy nowych

jednostek wytwórczych (przede wszystkim odnawialnych źródeł energii) oraz zwiększenia zdolności do magazynowania energii [1, 206, 290].

Rozwój sektora elektromobilności oraz zwiększenie stopnia wykorzystania pojazdów elektrycznych wpisują się w kierunki działań Komisji Europejskiej w zakresie europejskiej strategii na rzecz niskoemisyjnej mobilności. Transport stanowi źródło emisji wielu niebezpiecznych substancji, np. ditlenku i tlenku węgla, tlenków azotu, niemetanowych lotnych związków organicznych czy cząsteczek pyłu zawieszonego. Emisje pochodzące z transportu drogowego nie są systematycznie redukowane, tak jak ma to miejsce np. dla sektora energetycznego. Jeżeli chodzi o zanieczyszczenie powietrza w Polsce, kluczowy problem stanowi bardzo wysoki poziom emisji pyłu zawieszonego PM_{2,5} i PM₁₀ oraz zawartego w nim benzo(a)pirenu (o właściwościach rakotwórczych), które równocześnie w istotnym stopniu przyczyniają się do powstawania smogu. Jednym z trzech największych krajowych źródeł emisji pyłu zawieszonego jest transport samochodowy. Wpływ pojazdów na jakość powietrza jest najsilniej odczuwalny w miastach. Ich udział w zanieczyszczeniu powietrza w centrach dużych polskich aglomeracji często przekracza 60%. Biorąc pod uwagę dynamiczny wzrost liczby samochodów w Polsce, udział ten najprawdopodobniej będzie rósł. Istotnym zjawiskiem towarzyszącym zwiększającej się liczbie aut osobowych jest import używanych pojazdów, a ich wiek i stan techniczny stanowią kluczowe czynniki w kontekście poziomu emisji zanieczyszczeń podczas eksploatacji [193, 206, 247, 278].

Integracja systemu transportowego i elektrycznego będzie wymagała stworzenia adekwatnej infrastruktury, która pozwoli na stabilne i komfortowe korzystanie z pojazdów z napędem elektrycznym. Wiąże się to ze znaczącymi nakładami finansowymi oraz dobrym dopasowaniem czasu realizacji inwestycji. Jednym z istotnych czynników hamujących rozwój polskiego rynku pojazdów elektrycznych jest ich cena. Jednak transport drogowy zajmuje bardzo wysoką pozycję wśród dominujących źródeł destrukcyjnej presji wywieranej na otoczenie. Głównym źródłem oddziaływań w tym zakresie będzie uniezależnienie od paliw kopalnych. Z tego względu bardzo ważnym zagadnieniem w aspekcie poprawy bezpieczeństwa energetycznego i ekologicznego będzie rozwój elektromobilności. Stopniowa elektryfikacja transportu samochodowego wpłynie na poprawę bezpieczeństwa ekologicznego. Z kolei wzrost bezpieczeństwa energetycznego wymagał będzie efektywnej integracji systemu elektroenergetycznego i transportowego z zastosowaniem nowych, dopasowanych modeli biznesowych [7, 206].

2.2. Mobilność 4.0, pojazd użytkowy 4.0 oraz transport 4.0 – kwestie teoretyczne i praktyczne

Coraz częściej teraźniejszość jest opisywana jako „rzeczywistość chaosu”, ponieważ cechują ją zwiększające się turbulencje, pojawianie się nowych zjawisk, a proce-

sy i czynniki, które dotychczas dominowały, stopniowo tracą na znaczeniu. W porównaniu z przeszłością i chwilą obecną, przyszłość wyróżnia się zatem stale rosnącym, nieliniowym charakterem. W konsekwencji wiele przyszłych zjawisk nie będzie miało albo będzie miało niewiele wspólnego z tym, co do tej pory się wydarzyło. Istnieje wiele różnych przyczyn takiego stanu rzeczy, tworzących swoisty konglomerat elementów ekonomicznych, politycznych, społecznych, kulturowych i militarnych. Za jeden z najważniejszych można uznać obecny oraz przyszły postęp techniczny i technologiczny. Rozwój w obszarze informatyki, elektroniki, możliwości gromadzenia, generowania, przesyłania i obrabiania ogromnych ilości danych wykreował zupełnie nową rzeczywistość, w której człowiek zaczyna żyć w bardzo zelektronizowanym i usieciowionym środowisku, z silną robotyzacją i automatyzacją. W konsekwencji skomercjalizowane następstwa rozwoju technologicznego stanowią jedną z podstawowych sił napędowych obecnych zmian. Zachodzące zmiany są na tyle poważne, że stworzono dla nich odrębny termin „czwartej rewolucji przemysłowej”, obejmującej wiele dziedzin życia. Procesy te nie omijają również sektora transportu. Coraz częściej zaczyna się w nim używać pojęć „mobilność 4.0”, „pojazd użytkowy 4.0” czy „transport 4.0” [139, 269].

Mobilność 4.0 jest rozumiana jako ruchliwość zwiększona i bardziej efektywna w układzie kosztowym, organizacyjnym oraz czasowym. Wyraża się przez zdolność do elastycznego i sprawnego przemieszczania, opierając się na trzech podstawowych elementach: autonomizacji, sieciowości i zelektryfikowaniu. Ten sposób definiowania mobilności 4.0 wpływa bezpośrednio na cechy pojazdu użytkowego 4.0. Taki środek transportu musi być mobilny również „w sposób 4.0”, a więc zgodnie z regułami charakterystycznymi dla mobilności 4.0. Jego cechy w większości wynikają z właściwości mobilności 4.0, zatem pojazd użytkowy 4.0 wyróżniają te same elementy, czyli stale rosnąca autonomizacja, sieciowość oraz elektryfikacja [19, 26].

Zwiększająca się autonomizacja pojazdów użytkowych 4.0 określa ich stale rosnącą zdolność do samodzielnego działania w coraz większej liczbie obszarów, np. prowadzeniu czy kontroli stanu technicznego (samokontrola, zapobiegawcze serwisowanie itp.). Z kolei coraz większa sieciowość polega na wykorzystywaniu kompatybilnych systemów, przejawiając się pogłębioną i poszerzoną integracją w obszarze elastycznie oraz dynamicznie funkcjonujących, powiązanych ze sobą, przenikających się sieci. Poszerzanie jest rozumiane jako zwiększenie liczby składowych włączonych w dane sieci, jak również wzrost liczby powiązanych sieci w ujęciu ogólnym, natomiast pogłębianie oznacza wzrost liczby interakcji i zależności między elementami, które funkcjonują w określonej sieci. Sieci tworzone w taki sposób powodują, że sieciowość stanowiąca ich wypadkową z jednej strony wynika z włączenia określonego pojazdu do ściśle wyznaczonych, obsługiwanych przez niego w danym momencie łańcuchów transportowych, a z drugiej – ze stałego kontaktu samochodu z otoczeniem, realizowanego przez szereg interfejsów, np. V2H (pojazd–człowiek, ang. *vehicle-to-human*), V2V (pojazd – inne pojazdy, ang. *vehicle-to-vehicle*), V2I (pojazd–infrastruktura,

ang. *vehicle-to-infrastructure*) czy V2B (pojazd – centra IT kontroli, ang. *vehicle-to-IT-backend*). Wszystkie połączenia danego pojazdu z otoczeniem sieciowym (innymi użytkownikami i odbiorcami) określane są mianem V2X (pojazd – inne elementy, które wpływają na niego i w jakikolwiek sposób są z nim powiązane, ang. *vehicle-to-x*). Stale zwiększająca się elektryfikacja powoduje z kolei, że docelowa konfiguracja układu napędowego powinna bazować na systemach elektrycznych (silnik lub silniki elektryczne, akumulatory itd.), bez korzystania ze źródeł spalinyowych. Warianty w pełni elektryczne spełniają zatem wymagania mobilności ekologicznej (przy założeniu, że energia generowana jest ze źródeł odnawialnych). W konsekwencji powyższego, istotny element stanowi również nieustannie rosnąca elektronizacja, która jest wyrażona przez bazowanie w układzie konstrukcyjnym pojazdu na coraz większej liczbie połączonych ze sobą, nadzorowanych i sterowanych elektronicznie systemów (zarówno z poziomu pokładu samochodu, jak i zdalnie, na duże odległości) [15, 26, 44, 49, 303].

Pojazd użytkowy 4.0 będzie przygotowany do działania autonomicznego oraz działania w sieciach. Będzie mógł w czasie rzeczywistym wymieniać stale rosnącą liczbę informacji. Zapewni również możliwie jak największą efektywność realizowanych operacji, np. dzięki skróceniu postojów czy eliminacji zbędnych jazd (m.in. w formie długich dojazdów czy poszukiwania wolnego miejsca na parkingu). Cechował się będzie także zminimalizowaną lub nawet zerową emisją substancji niebezpiecznych, co przełoży się na ograniczony lub zerowy destrukcyjny wpływ na otoczenie. Tym samym wpisze się w założenia zrównoważonego transportu, spełniającego wymogi środowiskowe, społeczne i ekonomiczne. Eksploatacja tego typu pojazdów związana jest z wieloma korzyściami. Przede wszystkim skutkuje dalszą ekonomizacją działań. Wszelkiego rodzaju niezbędne zasoby rzeczowe i ludzkie zostaną bardziej efektywnie wykorzystane. Same pojazdy będą również używane w bardziej efektywny sposób, m.in. przez ograniczenie zbędnych przejazdów i postojów oraz uzyskanie wysokiego współczynnika technicznej gotowości. Dojdzie także do lepszego wykorzystania miejsca na drogach, a więc do optymalizacji jej pokonywania. Pojazdy połączone w sieci będą zapewniały większe bezpieczeństwo i płynność ruchu. Zmniejszy się zatłoczenie dróg, a korki zostaną ograniczone, przez co w konsekwencji liczba wypadków zostanie zredukowana [19, 49].

Dzięki wdrażaniu mobilności 4.0, pojazdów użytkowych 4.0 i transportu 4.0 spadną ich koszty społeczne, pomimo prognozowanego dalszego wzrostu zapotrzebowania na przemieszczanie. Istniejąca infrastruktura zostanie lepiej wykorzystana, ruch będzie cechował się większą płynnością i przewidywalnością, a ilość emitowanych niebezpiecznych substancji oraz hałasu będzie niewielka lub zerowa. Dojdzie zatem do tworzenia swoistych, nowoczesnych ekosystemów mobilności [26].

Jednym z podstawowych wyróżników transportu 4.0 jest otwartość, rozumiana jako eklektyczny charakter w odniesieniu do wyzwań, które niesie ze sobą przyszłość, w tym umiejętność tworzenia nowej roli oraz relacji w obrębie przyszłych ekosystemów sieciowych. Cechuje go także duża elastyczność, polegająca na intuicyjnym działaniu oraz sprawnej i szerokiej zdolności adaptacyjnej do zmieniających się

warunków oraz wymagań otoczenia. Transport 4.0 charakteryzuje się również wysokim poziomem samokonfiguracji, dużą zdolnością do samokontroli, pełnym ucyfrowieniem, lepszą dostępnością dzięki sieciowości oraz szeroką współpracą w obszarze nieustannie rozwijanych i ewoluujących sieci. Posiada on unikatowy potencjał wzrostu efektywności celem zapewnienia niepowtarzalnych usług oraz produktów, dzięki czemu umożliwia tworzenie nowoczesnych modeli biznesowych. Transport 4.0 pozwala na zmaksymalizowanie wykorzystania dostępnej infrastruktury przy jednoczesnym ograniczeniu szkodliwego wpływu na otoczenie i kosztów społecznych poprzez realizację wizji tzw. „zielonego transportu” dla bardziej przyjaznej dla środowiska przyszłości [10, 26, 181, 316].

Jedną z istotnych cech transportu 4.0 jest jego sieciowość polegająca na zwiększonej komunikacji, kooperacji i koordynacji, pozwalająca na działanie w środowisku wysoko ucyfrowionym. Stopniowe przejście od dużej ilości informacji do celowanej informacji inteligentnej (ang. *smart data*) umożliwi wyeliminowanie natłoku informacyjnego oraz informacji zbędnych. Przyspieszy również wielokierunkowy obieg informacyjny i zapewni dużą zawartość pojedynczych informacji. Zwiększy się także liczba posiadanych danych oraz informacji, które będą pochodziły z wielu różnych źródeł i zostaną dostarczone w odmiennych formatach. Transport 4.0 będzie pozwalał na szybsze zbieranie, analizowanie i obróbkę coraz bardziej złożonych danych pochodzących z wielu źródeł, dlatego ogromnego znaczenia nabierze zdolność do eliminacji lub odrzucania danych niepotrzebnych, zakłócających lub nawet szkodliwych. Dodatkowo dane, które zostaną uznane za niezbędne, będą włączane w indywidualne platformy, celem otrzymywania dodatkowej wartości dodanej. Na skutek zwiększającego się usieciowienia, w tym silnej integracji systemowej, będzie się pogłębiać integracja oraz wzajemne powiązania – zarówno w ramach już istniejących, jak i nowo tworzonych usieciowionych, zintegrowanych systemów przemieszczania [26, 97, 186, 320, 330].

Transport 4.0 łączy w sobie perspektywę lokalną i globalną. Lokalna optymalizacja będzie coraz bardziej dopasowana do globalnych wymagań. Powiązanie mikrocelów określonego przewozu z globalnymi celami systemu spowoduje rozwój ogólnosiatkowych sieci dążących do globalnie realizowanej, zarządzanej i integrowanej optymalizacji, która będzie zmierzała do lokalnej optymalizacji, realizowanej na skutek synchronizacji wszystkich uczestniczących lub włączonych w transport podmiotów. W efekcie będzie miało miejsce przejście z poziomu współpracy sieciowej do poziomu sieciowej integracji, czyli do synchronodalności (ang. *sychromodality*). Synchronodalność oznacza włączenie wszystkich gałęzi transportu do jednej zintegrowanej sieci, co spowoduje postępującą, coraz silniejszą synchronizację i integrację między poszczególnymi gałęziami w ramach transportu synchronodalnego o synchronicznie funkcjonalnie powiązanych sieciach [26, 49, 120, 273].

Optymalizacja wszelkiego rodzaju działań oraz ich poszerzona, pogłębiona ekonomiczna pozwolą na maksymalną eliminację strat rzeczowych i czasowych. Transport 4.0 pozwoli na dużo bardziej efektywne wykorzystywanie wszystkich dostępnych

zasobów. Możliwym stanie się funkcjonowanie w ramach inteligentnych systemów transportowych (ITS, ang. *intelligent transport systems*) oraz inteligentnych narzędzi transportowych (ITI, ang. *intelligent transport items*), na których podstawie stworzone zostaną sieci przemieszczania, a ich podstawę będzie stanowiła kompleksowa informacja pochodząca z heterogenicznych źródeł, mocno integrowana celem stworzenia różnych możliwości optymalizacji wszelkiego rodzaju realizowanych procesów, m.in. z obszaru energii, jakości, bezpieczeństwa, czasu, kosztów itd. Istotne będzie również różnicowanie sposobów zaopatrzenia w energię i maksymalne spożytkowanie tej aktualnie dostępnej (ang. *energy harvesting*). Wszelkie wykonywane operacje będą kontrolowane w czasie rzeczywistym. Powiązanie z otoczeniem stanie się jeszcze ściślejsze, a reakcje na zdarzenia zewnętrzne – bardziej adekwatne [26, 61, 264, 272, 319].

Tak zdefiniowany i zdeterminowany transport 4.0, opierający się oraz ściśle powiązany z pojazdami użytkowymi 4.0 i mobilnością 4.0, stanowi subsystem, składową systemu logistyki 4.0, która będzie funkcjonować w ramach przemysłu 4.0. Logistyka 4.0 może być rozpatrywana w dwóch płaszczyznach czasowych. W krótkim okresie jest ona rozumiana jako zarządzanie informacją, dalszy wzrost efektywności, optymalizacji oraz przejrzystości procesów. Z kolei w średnim okresie wskazywana jest możliwość funkcjonowania systemów autonomicznych, samoorganizujących się systemów systemów (ang. *self-organization of systems of systems*). Wciąż jednak jednoznacznie nie wskazano jej cech dla długiego okresu. Jest to związane m.in. z brakiem pełnej wiedzy na temat charakteru, kształtu i kierunku procesów zachodzących na rynku logistycznym, jak również na rynkach silnie z nim powiązanych (np. dystrybucyjnym, produkcyjnym, zaopatrzeniowym) [61, 213, 252, 294].

Transport 4.0 stanowi fundament mobilności 4.0, w coraz większym stopniu jest on autonomicznym procesem przemieszczania w połączeniu z różnego rodzaju czynnościami, które mu towarzyszą, funkcjonującym w środowisku usieciowionym, pełnym informacji. Działa on jako podsystem usieciowionej logistyki 4.0, opierając się na stałym doskonaleniu. Jest skierowany na elastyczne, ale permanentnie optymalizowane operacje realizowane w określonym układzie organizacyjnym, czasowym i kosztowym. Działania prowadzone w jego ramach powinny być nastawione na stałe doskonalenie. Transport 4.0 odegra w przyszłości kluczową rolę w obszarze zarządzania informacją w ramach logistyki 4.0. Wprowadzanie autonomicznych, inteligentnych pojazdów w ramach infrastruktury bazującej na internecie rzeczy (ang. *Internet of Things*) stanowi wstęp do nowych obszarów postępu i rozwoju oraz zapewniania dużo bardziej elastycznych, zautomatyzowanych rozwiązań logistycznych. W tym zakresie dane, transport i logistyka są ze sobą ściśle połączone [97, 186, 271, 320].

Terminy mobilność 4.0, pojazd użytkowy 4.0 oraz transport 4.0 stanowią pojęcia stosunkowo nowe, ale kluczowe w perspektywie przechodzenia gospodarek wysoko rozwiniętych krajów do poziomu określanego mianem 4.0. Z tego względu w realiach kształtowania się transportu 4.0, przy wsparciu powiązanych z nim pojazdów użytkowych 4.0 i mobilności 4.0, w obrębie logistyki 4.0 i szerzej – przemysłu 4.0, pojawi się szereg szans oraz zagrożeń związanych z postępującą automatyzacją, integracją i digi-

talizacją. Rzeczywistość transportu 4.0 wymusza silnie pogłębioną i poszerzoną współpracę. Wymaga zatem kompatybilnej kombinacji zmian technologicznych w powiązaniu ze zmianami mentalnościowo-behawioralnymi poszczególnych jego uczestników [26, 252, 320].

2.3. Sektor transportu samochodowego w świetle koncepcji zrównoważonego rozwoju

Na obecnym etapie rozwoju cywilizacji nie jest możliwe powstrzymanie dążenia do dalszego rozwoju społeczno-ekonomicznego. Kluczowe jest jednak, w jaki sposób ma przebiegać ten proces oraz czy da się nim sterować w taki sposób, by wprowadzić go na pożądaną ścieżkę rozwoju. Współcześnie mobilność ma ogromne znaczenie dla jakości życia człowieka oraz konkurencyjności poszczególnych krajów i regionów. Stały wzrost znaczenia sektora transportu w życiu społecznym oraz gospodarce powoduje, że z jednej strony powinien on być sprawny z makroekonomicznego punktu widzenia, natomiast z drugiej winien zaspokajać potrzeby transportowe zgłaszane przez społeczeństwo i gospodarkę, a więc zapewniać efektywną, sprawną obsługę transportową. Na funkcjonowanie i kształt systemu transportowego wpływają bardzo różne czynniki. Najogólniej można je podzielić na uwarunkowania zewnętrzne oraz wewnętrzne, które wynikają ze zmian zachodzących w ramach sektora transportowego. Ważną rolę odgrywa także czynnik instytucjonalny [227, 291, 327].

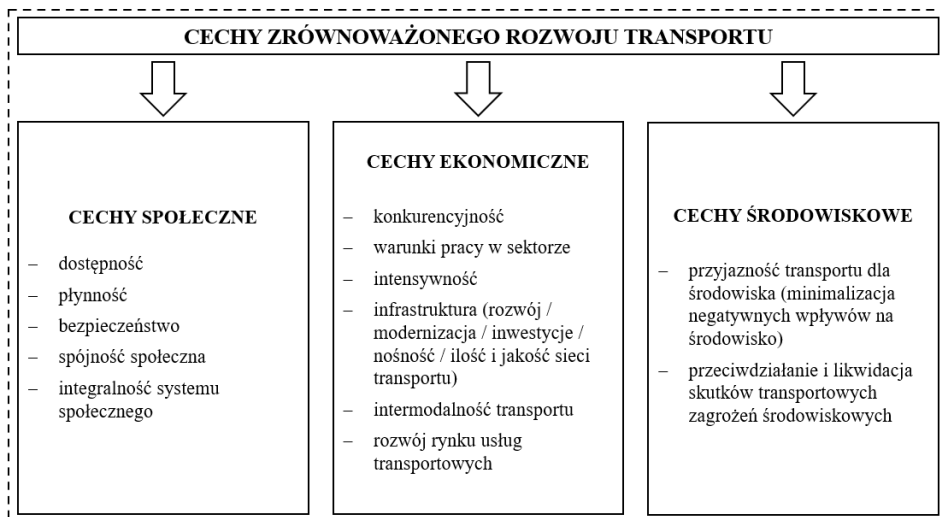
Funkcjonowanie efektywnego, sprawnego, zintegrowanego systemu transportu winno uwzględniać relacje z otoczeniem oraz zmiany, które się w nim dokonują. Koncepcja zrównoważonego rozwoju stanowi czynnik o znaczącym wpływie na kierunki rozwoju tego sektora. Zasady zrównoważonego rozwoju muszą być uwzględniane w politykach społeczno-gospodarczych i sektorowych oraz w strategiach i działaniach Unii Europejskiej. Z tego względu czynnik ten odgrywa szczególnie istotną rolę podczas wytyczania kierunków rozwoju społeczno-gospodarczego, a co za tym idzie – również sektora transportu [85, 101].

Efektywny transport pozwala na zaspokojenie popytu na usługi przemieszczania, ale także minimalizuje zasoby wykorzystywane do tego celu. Wykorzystywanie czynnika transportowego celem pobudzenia rozwoju ekonomicznego jest efektywne oraz skuteczne wtedy, gdy zarówno transport, jak i cała gospodarka podporządkowane są zasadom zrównoważonego rozwoju. Bardzo ważne jest to, z wykorzystaniem jakiego potencjału transportowego wzbudzany jest rozwój ekonomiczny. Procesy inwestycyjne w sektorze transportu nie mogą zostać podporządkowane zaspokajaniu chaotycznie i żywiołowo tworzących się potrzeb transportowych. Równowaga oraz racjonalność są osiągane przez zastosowanie optymalnych instrumentów mających na celu obniżenie transportochłonności gospodarki, jak również dzięki stymulowaniu zmian organizacyjnych i technologicznych w transporcie, które będą zmniejszały jego energochłonność, zasobochłonność oraz negatywny wpływ na środowisko [51, 226, 304].

System transportowy rozwijający się zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju po raz pierwszy został zdefiniowany w 1991 roku w Berlinie na konferencji OECD. W świetle tendencji charakteryzujących transport w ramach początkowych rozważań, do realizacji tego celu niezbędnymi były rewolucyjne przemiany w zachowaniach komunikacyjnych. W głównej mierze odnoszono się do środowiskowych aspektów funkcjonowania sektora transportu [71].

Transport niesie ze sobą istotne skutki środowiskowe, przestrzenne, społeczne i gospodarcze, co sprawia, że stanowi jeden z kluczowych czynników w kontekście zjawiska zrównoważenia społeczeństwa oraz gospodarki. W tym względzie zrównoważenie może być rozumiane jako fundamentalne dążenie człowieka do ochrony oraz poprawy jakości życia. Pojęcie zrównoważenia obejmuje szereg zintegrowanych działań ludzkich, które jednocześnie wiążą się z koniecznością podejmowania skoordynowanych decyzji między odmiennymi grupami interesów, sektorami czy systemami legislacyjnymi [21, 86, 121, 227].

W ramach definicji zrównoważonego transportu najczęściej wyróżniane są dwa podejścia – szerokie i wąskie. Stanowi to konsekwencję analogicznego definiowania samego rozwoju zrównoważonego. W wąskim ujęciu eksponowane są przede wszystkim środowiskowe aspekty równoważenia transportu, przez co ta interpretacja jest określana jako transport zrównoważony środowiskowo. W szerokim ujęciu zrównoważony transport stanowi konsekwencję ładu zintegrowanego. Oznacza to, że przemieszczenie powinno być realizowane w taki sposób, który będzie równocześnie uwzględniał oraz godził kwestie środowiskowe, ekonomiczne i społeczne. Na rysunku 2.1 schematycznie zobrazowano najważniejsze cechy zrównoważonego rozwoju transportu [25, 227, 329].



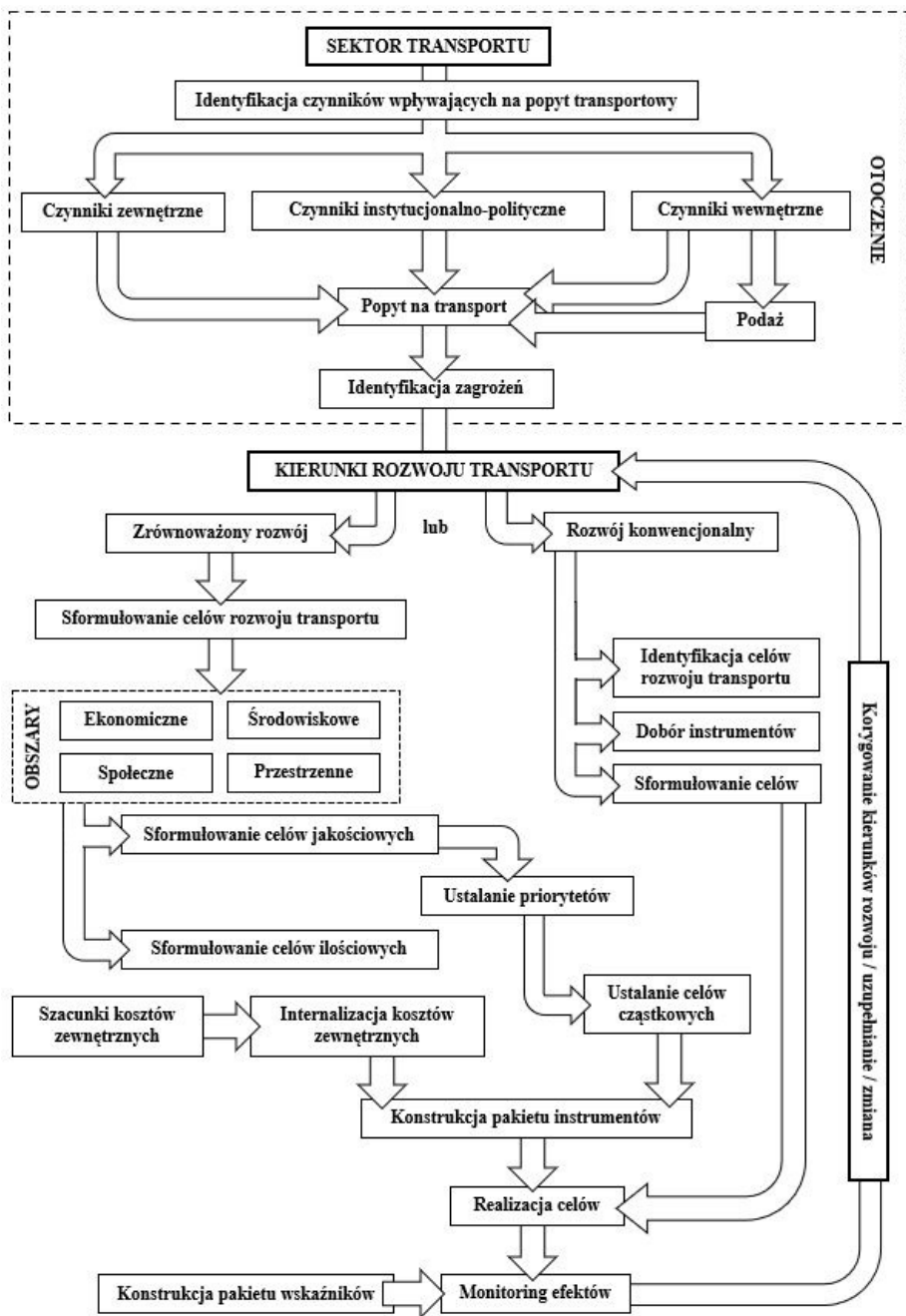
Rys. 2.1. Schematyczne przedstawienie najważniejszych cech zrównoważonego transportu. Opracowanie własne na podstawie [226]

Spśród wskazanych cech równoważenia rozwoju transportu, kluczowa rola przypisywana jest jego dostępności i mobilności. Mobilność stanowi cechę tradycyjnie związaną z rozwojem transportu. W odniesieniu do koncepcji zrównoważonego rozwoju maksymalizuje poczucie zadowolenia użytkownika danej usługi przeniesione na jednostkę mobilności. Zatem można uznać, że zrównoważony transport powoduje koniecznym maksymalizowanie zadowolenia przypadającego na jednostkę mobilności, a więc na poprawę efektywności transportu. Transport zrównoważony nie zagraża ekosystemom ani zdrowiu człowieka, jednocześnie zaspokajając potrzebę mobilności. W odniesieniu do definicji rozwoju zrównoważonego powinien on zużywać zasoby odnawialne na poziomie ich odnowienia, z kolei nieodnawialne – na poziomie pozwalającym na ich zastąpienie odnawialnymi substytutami. Wszelkiego rodzaju przedsięwzięcia, które dotyczą organizacji, kształtowania i planowania transportu oraz innych, związanych z nim sfer działalności (np. planowania przestrzennego), powinny mieć cechy zrównoważonego rozwoju [22, 99, 173, 226].

Działania w zakresie zrównoważonego rozwoju transportu powinny uwzględniać aspekty społeczne, gospodarcze, przestrzenne i ekologiczne. W odniesieniu do społeczeństwa należy tworzyć warunki do zrównoważonej mobilności społeczeństwa oraz zapewnić możliwość rozwoju przyszłym pokoleniom. W sensie gospodarczym powinno się zwracać szczególną uwagę na efektywność ekonomiczną i tworzenie warunków sprzyjających uczciwej konkurencji. W aspekcie przestrzennym należy uwzględniać wymogi ogólnej kompozycji przestrzennej danego obszaru, dla którego sieć transportowa stanowić będzie osnowę, oraz dążyć do zachowania powiązań o charakterze funkcjonalnym, które będą minimalizowały transportochłonność. Z kolei w sensie ekologicznym powinno się zwracać szczególną uwagę na ograniczoną zdolność środowiska do wchłaniania szkodliwych substancji i zanieczyszczeń, wyczerpywalność zasobów naturalnych (w szczególności nieodnawialnych, takich jak paliwa kopalne czy przestrzeń) oraz konieczność ochrony bioróżnorodności [134, 195, 226, 256, 261].

Sektor transportu stanowi kluczowy czynnik nowoczesnej gospodarki. Można jednak zauważyć sprzeczność pomiędzy społeczeństwem wymagającym coraz większej mobilności a opinią publiczną, która jest mniej tolerancyjna wobec szkodliwych następstw bardzo szybko rozwijającego się transportu i konsekwencji wynikających z tego stanu rzeczy. Pomimo ogromnego postępu technologicznego, który dokonał się na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci, transport nadal pozostaje sferą charakteryzującą się efektywnością na niezadowalającym poziomie. Rosnące koszty zewnętrzne oraz zwiększające się przejawy niewydolności systemów transportowych skłaniają środowiska naukowe i gospodarcze do intensyfikacji poszukiwań rozwiązań, które pozwoliłyby dokonać istotnych zmian jakościowych w obszarze różnych sposobów pokonywania przestrzeni [163, 263].

Ekstensywny rozwój, bez implikacji rozwiązań innowacyjnych, polega wyłącznie na zwiększaniu do określonych granic parametrów elementów systemów transportowych (np. pojemności środków transportu, przepustowości węzłów, terminali i dróg itp.).



Rys. 2.2. Schemat teoretycznego modelu zrównoważonego rozwoju transportu. Opracowanie własne na podstawie [226]

W przypadku dużej koncentracji ruchu ekstensywne sposoby zwiększania potencjału technicznego transportu skutkują zazwyczaj przyspieszonym (wykładniczym) wzrostem nakładów, co w konsekwencji budzi wątpliwości względem zasadności wyłącznie ilościowego rozwoju. Ilościowe usprawnianie elementów może prowadzić do konfliktów społecznych, środowiskowych czy przestrzennych. Niezbędne jest poszukiwanie inteligentnych, innowacyjnych koncepcji organizacyjnych i technologicznych systemów transportowych, które będą oparte na rozwiązaniach eliminujących lub minimalizujących słabości dotychczas istniejących systemów. Wprowadzenie idei rozwoju zrównoważonego w obszar rozwoju sektora transportu stanowi jedną z prób jego optymalizacji. Bez zrównoważonego transportu nie można oczekiwać zrównoważonego rozwoju gospodarki, a co za tym idzie – również samego społeczeństwa [13, 33, 41, 219].

Głównym celem modelowania systemu transportowego jest poznanie zależności występujących w rzeczywistym obiekcie transportowym, a następnie wskazanie kierunków działań, które pozwolą na optymalizację jego rozwoju. Na rysunku 2.2 przedstawiono uproszczony teoretyczny model zrównoważonego rozwoju transportu. Ma on charakter optymalizacyjny, a analizy prowadzone na jego podstawie mogą umożliwić poznanie wcześniej wspomnianych zależności, a zatem – osiągnięcie celu modelowania, dzięki wskazaniu kierunków dalszego rozwoju. Działania w kierunku zrównoważenia rozwoju transportu mają za zadanie zwiększyć jego efektywność i sprawność oraz skierować na zupełnie nową, alternatywną ścieżkę transformacji. W pierwszym kroku należy określić czynniki, które ze względu na całokształt procesów mających miejsce we współczesnym świecie oraz w sektorze transportu będą cechowały się decydującym wpływem na jakościową i ilościową stronę popytu transportowego. Wielkość i zauważalne tendencje w zakresie popytu są obecnie uważane za niepokojące, szczególnie przy uwzględnieniu struktury gałęziowej przewozów. Prawidłowa identyfikacja czynników węzłowych o kluczowym wpływie na przyszły popyt stanowi konieczny warunek do rozpoczęcia prac nad oszacowaniem charakterystyk i rozmiarów popytu w przyszłości. Stworzone scenariusze staną się przydatne podczas identyfikacji zagrożeń, które wynikają z obecnie istniejących trendów, jednak jednocześnie – będą również wpływać na przyszłe kierunki rozwoju [35, 130, 221, 226, 257].

Następny etap stanowi określenie kierunków rozwoju transportu. Model konwencjonalny opiera się na współcześnie obowiązującym standardzie biznesu zakładającym maksymalizację zysków. W konsekwencji rozmiary efektów zewnętrznych transportu powodują bardzo wysokie koszty zewnętrzne, a brak upodmiotowienia skutkuje przetrzuceniem ich na otoczenie, czyli ekosystem, gospodarkę i społeczeństwo. Alternatywny model transformacji stanowi zrównoważony rozwój transportu. Jego zadaniem jest zwiększenie efektywności transportu i skierowanie go na zupełnie nową ścieżkę rozwoju. W ramach tego etapu istotny jest sposób formułowania celów transformacji sektora. Kluczowe jest dokładne określenie celów ilościowych. Ujęcie ilościowe umożliwia operacjonalizację procesu rozwojowego, zawiera jednak bardzo wiele elementów o charakterze jakościowym. Transformacja transportu stanowi proces

wielopłaszczyznowy. Dotychczas rozwój tego sektora nakładał na gospodarkę i społeczeństwo ogromne koszty społeczne, jednocześnie negatywnie wpływając na jakość środowiska. Z tego powodu zaistniała potrzeba minimalizacji kosztów zewnętrznych transportu przez ich internalizację. Zasadniczy cel upodmiotowienia kosztów zewnętrznych stanowi racjonalizacja podziału zadań przewozowych między konkretne gałęzie transportu, z uwzględnieniem zwiększenia wykorzystania potencjału obszarów generujących mniej negatywnych następstw dla środowiska i zdrowia człowieka. Niezbędne jest również stałe monitorowanie postępów w zakresie realizacji zakładanych priorytetów oraz celów. Umożliwi to bieżące oraz okresowe uzupełnianie i korygowanie działań w celu otrzymania jak największego, najlepszego efektu [103, 142, 183, 227].

Niezwykle ważne jest traktowanie samego systemu transportowego oraz jego otoczenia w dynamiczny sposób. Podczas analizy procesów zachodzących w środowisku, gospodarce, społeczeństwie i sektorze transportu należy pamiętać o tym, że popyt oraz podaż są zmienne w czasie. Rynek również ulega transformacji. Konsekwentne realizowanie postawionych zadań w kierunku zrównoważonego rozwoju transportu będzie prowadziło do nadania przyszłej transformacji cech trwałości i równowagi oraz podniesie efektywność całego sektora [226].

2.4. Podstawowe determinanty efektywnego rozwoju sektora transportu

Optymalizacja systemów transportowych stanowi zagadnienie coraz częściej omawiane w literaturze z powodu znaczenia jako narzędzia pozwalającego na ocenę efektywności i sprawności funkcjonowania pojedynczych elementów systemu, umożliwiającego zwiększenie konkurencyjności przedsiębiorstw oraz w konsekwencji – generowanie wymiernych zysków pochodzących ze sprzedaży usług transportowych. Pojęcie sprawności systemu transportowego rozumiane jest jako zdolność całego systemu oraz jego poszczególnych elementów do realizacji oraz elastycznego dopasowywania się do zmiennych w czasie i przestrzeni potrzeb przewozowych. Sprawność samych środków transportu obejmuje przede wszystkim ich zdolność przewozową, niezawodność techniczną, prędkość, ładowność, terminowość, ciągłość, regularność oraz bezpieczeństwo komunikacyjne. System transportowy jest uznawany za sprawny, jeżeli w prawidłowy sposób, w pełni zaspokaja uzasadnione pod względem ekonomicznym potrzeby transportowe gospodarki i społeczeństwa przy równoczesnym, optymalnym wykorzystaniu właściwości oraz cech poszczególnych gałęzi transportu, jak również jak najniższym nakładzie pracy [121, 167, 236, 304].

Efektywność jest atrybutem działania, warunkującym samorealizację człowieka oraz rozwój i funkcjonowanie jego organizacji. Istnieje bardzo duże zróżnicowanie zakresu pojęciowego odnoszącego się do kategorii efektywności. Wynika to z szerokiego stosowania tego pojęcia w różnych dyscyplinach naukowych. Zazwyczaj wy-

różnia się węższe i szersze znaczenie efektywności w kontekście sfery gospodarowania. W węższym znaczeniu efektywność ekonomiczna rozumiana jest jako sprawność ekonomicznego działania określana relacją między otrzymanymi efektami a nakładami czynników wykorzystanych do ich osiągnięcia. Występuje tu zatem związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy nakładami a efektami. W szerszym ujęciu można wyróżnić efektywność zintegrowaną rynkowo, która uwzględnia sprawność i skuteczność logistyczno-marketingową. Najszerszy zakres pojęcia efektywności odnotowywany jest jednak w przypadku ujęcia integracji efektywności ekologicznej i społecznej. Efektywność społeczna stanowi relację priorytetu do nakładu. Niezwykle istotne jest przy tym odpowiednie zdeponowanie priorytetu, a każdy nakład przeznaczony na jego realizację uznaje się za konieczny i opłacalny. Efektywność ekologiczna również stanowi relację efektu do nakładu, który jest warunkiem koniecznym. W przypadku tego rodzaju efektywności kluczowe znaczenie ma stopień realizacji przyjętych priorytetów działania. Nakład ponoszony na ich zrealizowanie posiada drugorzędne znaczenie, jednak nie oznacza to, że wydatkowane środki mogą być marnowane. Podczas wydatkowania środków przeznaczonych na zwiększenie efektywności społecznej i ekologicznej obowiązują dwie podstawowe zasady. Pierwsza z nich zakłada, że realizacja priorytetu jest nadrzędną w stosunku do wydatkowanych środków. Z kolei druga mówi o tym, że obowiązującą jest jednak zasada niemarnowania, a więc oszczędzania środków wydatkowanych celem realizacji konkretnych priorytetów. W warunkach gospodarki rynkowej, efektywność rynkowa samoczynnie integruje efektywności cząstkowe, czyli finansową, produkcyjną i ekonomiczną. Jednakże integrowanie efektywności ekologicznej i społecznej wymaga kreowania instytucjonalnego lub też korygowania mechanizmu rynkowego poprzez działania w obszarze danego sektora oraz ochrony środowiska [81, 103, 144, 173, 177, 226, 263].

Efektywność w transporcie stanowi wzajemną relację pomiędzy zużyciem zasobów i generowanymi kosztami a wydajnością. Wskaźniki efektywności obrazują, w jakim zakresie zmiany jakościowo-ilościowe świadczonych usług, podaży infrastruktury oraz w wyborze środków transportu i tras skutkują obniżeniem wydatków ponoszonych z tytułu jednej podróży. Najczęściej jako koszty transportu rozumie się te ponoszone przez przewoźników oraz użytkowników transportu. Zazwyczaj pomija się koszty zewnętrzne ponoszone przez społeczeństwo, takie jak np. koszty oddziaływania na środowisko, nie uwzględniając ich w systemach oceny efektywności transportu. Niezbędne staje się zatem podejmowanie starań o włączanie tego rodzaju nakładów do analiz kosztów i korzyści. Efektywny transport powinien zaspokajać popyt na usługi przemieszczania, równocześnie ograniczając do minimum ilość zasobów wykorzystywanych w tym celu. Dostawcy usług transportowych starają się w jak największym stopniu zminimalizować koszty i zwiększyć wydajność, z kolei użytkownicy oczekują jak najwyższej jakości usług w zakresie bezpieczeństwa, niezawodności, komfortu, dostępności, wygody oraz przystępnej ceny [102, 131, 145, 226, 304].

„Biała Księga Transportowa” zawiera plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu, którego celem będzie osiągnięcie konkurencyjnego, zasoboszczędnego systemu. Podkreślana jest w niej konieczność podejmowania działań w kierunku bardziej zrównoważonego rozwoju transportu. Wśród kluczowych działań w tym zakresie wyróżnia się zapewnienie wzrostu sektora, wspieranie mobilności oraz równoczesne obniżenie emisji szkodliwych substancji do otoczenia. Jest to istotne wyzwanie w kontekście obniżenia poziomu zależności systemu transportowego od paliw kopalnych, bez obniżania jego wydajności oraz bez zagrożenia dla mobilności. Uznaje się, że poprawa w zakresie zrównoważonej mobilności jest możliwa przez obniżenie energochłonności, internalizację zewnętrznych kosztów oraz ograniczenie emisji niebezpiecznych substancji pochodzących z sektora transportu. Równie ważnymi zadaniami w tym zakresie będą także: poprawa bezpieczeństwa i klimatu akustycznego, złagodzenie zjawiska kongestii, niwelowanie braków w infrastrukturze, poprawa mobilności, pokonywanie różnic w dostępności infrastruktury transportowej oraz zwiększenie jakości samej infrastruktury [121, 227, 249, 289].

Wśród głównych wyzwań w zakresie podwyższenia efektywności transportu można wyróżnić zwiększającą się mobilność społeczeństwa. Istotnym zadaniem stojącym przed sektorem jest zarządzanie ograniczonymi zasobami w taki sposób, aby całemu społeczeństwu zapewnić dostępność usług. Drugim, równie ważnym, wyzwaniem jest obniżenie kosztów społecznych transportu. Ze względu na wzrost potrzeb w zakresie mobilności obserwowany jest również wzrost negatywnych następstw zewnętrznych w odniesieniu do środowiska przyrodniczego oraz jakości życia człowieka. Konieczne staje się podejmowanie działań mających na celu zmniejszenie negatywnych skutków transportu [103, 227].

Dotychczas opracowano wiele narzędzi mających pomóc we wdrożeniu koncepcji zrównoważonego rozwoju transportu. W obszarze obniżenia wielkości emisji są to np. stosowanie nowych rozwiązań technicznych i technologicznych pojazdów, zastrzeżenie norm emisji z pojazdów, promowanie oraz wspieranie rozwoju rynku biopaliw, tworzenie mechanizmów wsparcia dla wykorzystywania paliw alternatywnych, optymalizacja zużycia paliwa w silnikach, promowanie gałęzi transportu przyjaznych dla środowiska i transportu multimodalnego, prace nad inteligentnymi systemami transportowymi, działania na rzecz obniżenia popytu na transport czy wspieranie prac w zakresie poprawy efektywności wykorzystywania energii w każdej z gałęzi transportu. W zakresie poprawy bezpieczeństwa można wyróżnić natomiast m.in. zwiększanie poziomu bezpieczeństwa czynnego i biernego pojazdów, wzrost ich kompatybilności pod względem wymogów bezpieczeństwa, poprawę jakości infrastruktury czy wprowadzanie nowych rozwiązań w zarządzaniu ruchem. W odniesieniu do poprawy klimatu akustycznego zastosowanie znajdują np. wdrażanie nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych pojazdów, upowszechnianie nowych technologii w obszarze budowy obiektów, stosowanie ekranów akustycznych czy regularna inspekcja stanu infrastruktury. W obszarze złagodzenia zjawiska kongestii są to m.in.

planowanie przestrzenne, modernizacja i rozbudowa infrastruktury czy optymalizacja popytu na usługi transportowe. Jednak w świetle celów zrównoważonego rozwoju problem ograniczenia zużycia energii oraz poprawa efektywności paliwowej uznawane są za kluczowe w kontekście możliwości realizacji założonych priorytetów [132, 184, 226, 261, 304].

Coraz pilniejszy problem do rozwiązania stanowi złagodzenie negatywnego wpływu, jaki transport wywiera na otoczenie. W nadchodzących latach oczekiwany jest dalszy wzrost cen paliw kopalnych, powodowany m.in. zwiększającym się popytem oraz wyczerpywaniem się źródeł wydobywania o niższych kosztach eksploatacji. Destrukcyjny wpływ na jakość środowiska oraz zdrowie ludzi może się pogłębić, ponieważ tradycyjne źródła wydobywania są częściej zastępowane nie źródłami odnawialnymi, ale źródłami powodującymi dużo więcej szkodliwych następstw dla otoczenia. Z drugiej strony konieczność przejścia na gospodarkę jak najmniej emisyjną, jak również rosnące obawy w zakresie bezpieczeństwa dostaw energii mogą spowodować stopniowy wzrost udziału energii ze źródeł odnawialnych, której koszty wytwarzania będą się obniżały na skutek masowej produkcji oraz postępu technicznego. Uniezależnienie sektora transportu od ropy naftowej, upowszechnienie pojazdów o napędzie elektrycznym, wodorowym lub innym, alternatywnym, stanowi proces długotrwały, wymagający przeprowadzenia ogromnych zmian w obecnej infrastrukturze i funkcjonowaniu całego sektora. Przejście na gospodarkę niskoemisyjną najprawdopodobniej może trwać całe dziesięciolecie i istotnie wpłynie na działania prawie wszystkich gałęzi gospodarki. Cena tego typu działań może być bardzo wysoka, ale beczynność będzie kosztowała znacznie więcej [196, 215, 226, 263].

2.5. Podsumowanie

Wraz z rozwojem cywilizacyjnym zwiększa się świadomość antropogenicznych zagrożeń środowiska oraz upowszechnia się potrzeba przeciwdziałania im. Szczególnie widoczne jest to w gałęzi transportu, w której w ciągu ostatnich lat zaczęto przywiązywać coraz większą wagę do aspektów związanych z ochroną środowiska. Współcześnie właściwości ekologiczne środków transportu samochodowego, obok wykorzystywanych systemów bezpieczeństwa, często są uznawane za wyznaczniki postępu technicznego w tym obszarze. Celem ograniczenia negatywnego oddziaływania pojazdów na otoczenie opracowywane są m.in. nowe rozwiązania konstrukcyjne silników spalinowych oraz podejmowane są próby zastąpienia konwencjonalnych paliw – benzyny i oleju napędowego – paliwami alternatywnymi. Duże nadzieje pokładane są także w napędach hybrydowych, elektrycznych oraz w ogniwach paliwowych.

3. Metodologia środowiskowej oceny cyklu istnienia środków transportu samochodowego

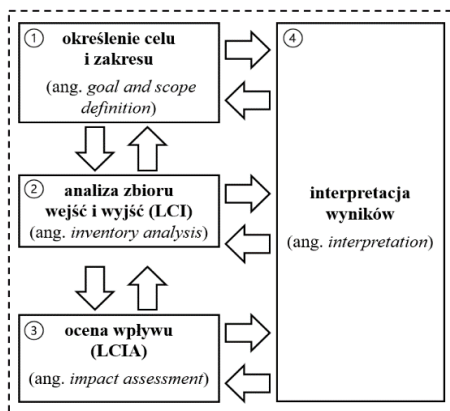
3.1. Ocena cyklu istnienia (LCA)

Oceny cyklu istnienia jako instrumenty analizy środowiskowej są tworzone od lat 80. XX wieku. Podejście LCA stanowi istotną metodę charakteryzowania i identyfikacji obciążeń środowiskowych systemów. Dotychczas jest to jedyny instrument przeznaczony do oceny środowiskowej znormalizowany normą ISO [105, 234].

Normy ISO 14040:2006 (*Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura*) i ISO 14044:2006 (*Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne*) stanowią wspólną podstawę dla wszystkich współczesnych badań LCA w ustandaryzowanej formie. Zawierają ogólne wymagania dotyczące większości sfer cyklu istnienia obiektów. Jednak ze względu na szeroki zakres badań LCA, normy ISO wciąż pozostawiają wiele aspektów metodologicznych wymagających dalszego zdefiniowania podczas prowadzenia praktycznych analiz [105, 128, 129].

Ocena cyklu istnienia jest procedurą służącą do rejestrowania i oceny procesów istotnie wpływających na otoczenie. Pierwotnie została opracowana głównie do oceny produktów, obecnie jest używana również do analiz procesów, usług itd. Wyniki LCA można wykorzystać zarówno do optymalizacji procesów na rzecz zrównoważonej produkcji, jak i do opracowywania wytycznych, w tym dobrych praktyk, polityk czy aktów prawnych. W zależności od horyzontu czasowego (teraźniejszość lub przyszłość) można zastosować różne podejścia do modelowania. Kluczowym atutem LCA jest uwzględnienie wszystkich etapów cyklu istnienia obiektu lub procesu. Istnieje również możliwość przeprowadzenia badań tylko dla wybranego etapu lub etapów cyklu istnienia (np. etapu wytwarzania pojazdu). Ważne jest także określenie docelowego odbiorcy lub odbiorców prowadzonych analiz [111, 150, 152, 237].

W ramach prowadzonej oceny LCA konieczne jest wzięcie pod uwagę wszystkich istotnych, potencjalnie szkodliwych skutków dla otoczenia (w tym dla środowiska atmosferycznego, wodnego i glebowego, jak również zdrowia ludzi) oraz wszystkich przepływów materiałów związanych z rozważanym systemem (wkład surowców i emisje, procesy zaopatrzenia i zagospodarowania poużytkowego, wytwarzanie energii, transport itd.). Ramy LCA określone w standardach ISO podsumowano na rysunku 3.1 i w tabeli 3.1 [104, 128, 129].



Rys. 3.1. Główne etapy LCA. Opracowanie własne na podstawie [128, 129]

Tab. 3.1. Charakterystyka głównych etapów LCA. Opracowanie własne na podstawie [128, 129]

Etap LCA	Charakterystyka
Określenie celu i zakresu	W ramach pierwszego etapu cel, zakres i granice analizy zostają formalnie określone i udokumentowane. Jest on kluczowy dla opracowania studium dostosowanego do założonego celu i wymaga sprecyzowania istotnych elementów zestawionych w tabeli 3.2
Analiza zbioru wejść i wyjść (LCI)	<p>Drugi etap polega na opracowaniu zestawienia wejść i wyjść w cyklu istnienia badanego obiektu (LCI), obejmujących:</p> <ul style="list-style-type: none"> wszystkie surowce, które składają się na jednostkę funkcjonalną (przeprowadzenie szczegółowej identyfikacji ich rodzaju i określenie masy); wszelkie nakłady energii (dokonanie precyzyjnej identyfikacji ich rodzaju i określenie ilości); wszystkie produkty uboczne i odpady wraz z ich późniejszym przeznaczeniem (recykling, składowanie itp.); wszelkie emisje do gleby, wody i powietrza
Ocena wpływu (LCIA)	Na tym etapie wpływ każdej pozycji w wykazie wejść i wyjść jest oceniany przy użyciu wskaźników środowiskowych (np. charakteryzujących globalne ocieplenie, zakwaszenie itp.) zidentyfikowanych podczas określania zakresu. Analiza zbioru wejść i wyjść oraz wybrane zestawy czynników emisyjności są grupowane w celu określenia ogólnych wpływów na otoczenie
Interpretacja wyników	W badaniach zgodnych z ISO, interpretacja ma miejsce w trakcie całego procesu LCA. Nawet w najmniej skomplikowanych ocenach należy przeanalizować LCIA i zbadać kluczowe czynniki wpływające na otrzymane rezultaty. Uzyskane końcowe wyniki LCA mogą posłużyć do sformułowania zaleceń np. w kierunku zwiększenia efektywności ekologicznej badanego obiektu

Wybory metodologiczne muszą być adekwatne do celu i zakresu analizy oraz powinny być określone na samym początku badań – podczas definicji celu i zakresu. Najważniejsze z nich podsumowano w tabeli 3.2. Podejście zastosowane dla każdego z nich przedstawiono w dalszej części rozdziału.

Tab. 3.2. Kluczowe wybory metodologiczne w ramach prowadzonych analiz. Opracowanie własne na podstawie [104, 128, 129]

Aspekt	Charakterystyka
Funkcja i jednostka funkcjonalna	Zgodnie z ISO14040:2006, LCA jest analizą, która opiera się na jednostce funkcjonalnej. Reprezentuje ona obiekt lub usługę odniesienia, z którymi powiązane są dane wejściowe i wyjściowe cyklu istnienia. Ze względu na porównawczy charakter wielu analiz LCA, jednostka funkcjonalna odgrywa kluczową rolę i musi jasno określać funkcje badanego systemu.
Zakres (granice systemu)	Zakres (granice systemu) określa, które procesy zostaną uwzględnione w ocenie. Muszą być one zgodne z celem badania. Ponieważ na końcowe wyniki analiz LCA można wpływać przez wybór granic systemu, należy je jasno zdefiniować na początku oceny i uwzględnić w ich ramach wszystkie istotne procesy. Podczas definiowania granic można np. stosować kryteria odcięcia (ang. <i>cut-off criteria</i>) celem ograniczenia złożoności procesu modelowania. Kryteria odcięcia zwykle określają minimalny wkład w oddziaływanie na otoczenie lub wielkość przepływu materiałów czy energii, celem uzasadnienia wyłączenia z systemu. W ten sposób zapewnia się, że wszystkie istotne wkłady do systemu są oceniane, przy jednoczesnym ograniczeniu jego nadmiernej złożoności.
Modelowanie	Istnieją dwa różne ogólne podejścia do modelowania LCA. Atrybucyjne LCA (ang. <i>attribitional LCA</i>) polega na tym, że wejścia i wyjścia z systemu są przypisywane do jednostki funkcjonalnej przez podział procesu jednostkowego zgodnie z regułą normatywną. Najczęściej znajduje ono zastosowanie w przypadku obiektów już oferowanych na rynku, dla których zmiany w produkcji nie spowodują żadnych konsekwencji na dużą skalę. Gdy analizowane są decyzje, które mogą skutkować zmianami na dużą skalę w całym systemie, należy zastosować skutkowe podejście LCA (ang. <i>consequential LCA</i>). W jego wyniku działania są tak powiązane, aby uwzględnić wszystkie aspekty, które mogą ulec zmianie na skutek zapotrzebowania na konkretny obiekt w systemie.
Koniec okresu eksploatacji pojazdu (EoL, ang. <i>end of life</i>) – zagospodarowanie użytkowe	<p>Kwestia podejścia do modelowania i wielofunkcyjności jest również ściśle powiązana z zagospodarowaniem użytkowym. Jedną z form recyklingu jest jego dokonanie w obiegu zamkniętym (ang. <i>closed-loop</i>). Współcześnie nie ma on niestety jeszcze zbyt szerokiego zastosowania, ponieważ np. odnotowuje się obniżenie jakości wielu materiałów pochodzących z recyklingu czy też zbyt długi okres między pierwotnym a wtórnym wykorzystaniem. Dlatego często zastosowanie znajdują inne podejścia, z których najczęstszymi są:</p> <ul style="list-style-type: none"> • koncepcja polegająca na uniknięciu obciążenia (0 : 100) (ang. <i>avoided-burden approach</i>), nazywana również podejściem „końca cyklu istnienia” (EoL), w której materiał wtórny może (częściowo) zastąpić materiał pierwotny; • koncepcja odcięcia (100 : 0) (ang. <i>cut-off approach</i>), określana również jako podejście „zawartości recyklingu” (ang. <i>recycled content</i>), w ramach której przeprowadzane jest odcięcie między systemem pierwotnym i wtórnym. Pierwotnemu użytkownikowi zostają przyporządkowane pełne obciążenia za przetwarzanie odpadów, ale żadnych – za recykling. Nie uwzględniany jest zatem potencjalny pozytywny wpływ recyklingu lub przetwarzania odpadów produktów ubocznych. <p>Jeżeli znany jest główny i wtórny użytkownik, można również zastosować podejście 50 : 50. Wszystkie wpływy na otoczenie są dzielone po połowie między dwa systemy produktów. Jeszcze inną możliwością stanowi dokonanie alokacji między pierwotnym i wtórnym zastosowaniem. Metoda ta jest ściśle powiązana z bazą danych Ecoinvent i jest stosowana w jej modelu systemu tzw. „alokacji w punkcie substytucji” (APOS – ang. <i>allocation at the point of substitution</i>). Koncepcje te mają jednak mniejsze znaczenie we współczesnej praktyce LCA.</p>

cd. Tab. 3.2. Kluczowe wybory metodologiczne w ramach prowadzonych analiz. Opracowanie własne na podstawie [104, 128, 129]

Aspekt	Charakterystyka
Wielofunkcyjność	<p>Podejście modelowe wiąże się również z wielofunkcyjnością. Jeżeli w wyniku procesu powstaje więcej niż jeden typ obiektu (np. w koprodukcji lub gdy ma miejsce recykling albo przetwarzanie odpadów), jest to proces wielofunkcyjny. Trzyetapowa procedura (hierarchia) postępowania z wielofunkcyjnością została szczegółowo scharakteryzowana w ISO14040:2006 i obejmuje:</p> <ul style="list-style-type: none"> • podział systemu obiektów (ang. <i>subdivision</i>), który stanowi opcję preferowaną. Wielofunkcyjny proces jednostkowy jest dzielony na jednofunkcyjne procesy jednostkowe, tym samym ma miejsce odizolowanie danego procesu i uniknięcie potrzeby alokacji lub zastępowania; • gdy nie jest to możliwe, dokonywana jest rozbudowa systemu (ang. <i>system expansion</i>), czyli rozszerzenie go o funkcję produktu równoległego lub ma miejsce jego substytucja (ang. <i>substitution</i>) produktem równoległym; • w ostateczności możliwa jest także alokacja (ang. <i>allocation</i>). W jej ramach można wykorzystać różne właściwości fizyczne produktu (np. alokacja egzergetyczna dla zasobów energetycznych). Jeżeli jednak nie można zaobserwować fizycznych związków, zastosować można również alokację ekonomiczną.
Oddziaływania na środowisko	<p>Analiza zbioru wejść i wyjść (LCI) często obejmuje tysiące substancji. Niektóre z nich są powszechnie stosowane w ocenach oddziaływania transportu, np. emisje CO₂, NO_x czy pyłu zawieszanego. Jednak, ze względu na dużą liczbę innych substancji uwzględnianych w LCI, powszechnie stosowane są ściśle określone kategorie wpływu (ang. <i>impact categories</i>) (grupujące kilka lub więcej związków chemicznych lub procesów), w celu lepszego zrozumienia, oceny wielkości i znaczenia potencjalnego wpływu obiektu na otoczenie. W ten sposób dane inwentaryzacyjne są pogrupowane i ważne według potencjalnych szkód, które mogą spowodować. Wybór, które wpływy na środowisko należy ocenić, ma kluczowe znaczenie dla wyników LCA i powinien być dokonany na etapie określania zakresu analizy.</p> <p>Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje wskaźników. Wskaźniki punktu końcowego (ang. <i>endpoint indicators</i>) bezpośrednio odnoszą się do wpływu w obszarze zdrowia ludzkiego, środowiska naturalnego lub zużycia zasobów i najściślej odzwierciedlają chronione dobro. Typowym przykładem jest ocena utraconych lat życia w odniesieniu do zdrowia ludzkiego (jednostka DALY – ang. <i>disability adjusted life years lost</i>). Z kolei wskaźniki punktu środkowego (ang. <i>midpoint indicators</i>) obejmują ważenie substancji o podobnych skutkach – we wskaźnik wpływu za pomocą czynników charakteryzujących. Oddziaływania w ramach wskaźników punktu środkowego mogą jednak wpływać na różne punkty końcowe (np. zarówno na zdrowie ludzkie, jak i środowisko naturalne). Wskaźniki te agregują potencjalne skutki, a zatem nie określają ilościowo rzeczywistych szkód w punkcie końcowym, które zależą również od innych czynników, takich jak aspekty związane z lokalizacją czy specyficzną sytuacją, np. poziomy ekspozycji na skutki toksyczności.</p>
Dane pierwotne i wtórne	<p>Jedną z kluczowych decyzji w ramach analiz LCA jest również ta obejmująca wybór wykorzystywanych źródeł danych (pierwotne czy wtórne). Dane pierwotne (ang. <i>primary data</i>) pochodzą z rzeczywistych operacji objętych badaniem, natomiast dane wtórne lub zastępcze (ang. <i>secondary or proxy data</i>) pozyskiwane są z literatury i baz danych. W analizach preferowane są dane pierwotne, ale ich wykorzystanie zależy zarówno od dostępności, jak i od posiadania odpowiednich funduszy celem ich pozyskania. Często cel badania można osiągnąć bez konieczności zbierania danych pierwotnych. Czasami też początkowo wykorzystywane są dane wtórne, aby opracować ogólny obraz wpływu na system, a następnie są one iterowane z danymi pierwotnymi w obszarach, w których zostaną zidentyfikowane kluczowe czynniki i/lub wpływy.</p>

Wśród powszechnie stosowanych wytycznych dotyczących LCA jako punkt odniesienia przy opracowywaniu indywidualnej metodologii analiz w ramach niniejszej monografii posłużyły:

- normy ISO 14040:2006 i ISO14044:2006 [128, 129] stanowiące wspólną podstawę dla wszystkich współczesnych badań LCA. Obejmują one ogólne wymagania dotyczące kluczowych obszarów cyklu istnienia obiektów, jednak nadal pozostawiają wiele aspektów metodologicznych do dalszego zdefiniowania przez praktyków LCA;
- podręcznik ILCD (*The International Reference Life Cycle Data System Handbook*) [155] stworzony w 2010 roku przez Instytut Środowiska i Zrównoważonego Rozwoju we Wspólnotowym Centrum Badawczym Komisji Europejskiej (Environment and Sustainability in the European Commission Joint Research Centre) we współpracy z Dyrekcją Generalną ds. Środowiska (Environment DG). Jest on zgodny z normami ISO i składa się z kilku dokumentów: ogólnego przewodnika dotyczącego oceny cyklu istnienia, szczegółowego przewodnika z zakresu inwentaryzacji cyklu istnienia, wytycznych dotyczących metod oceny wpływu cyklu istnienia (w tym zestaw zalecanych metod LCIA) oraz przewodnika z zakresu kryteriów przeglądu krytycznego. Wraz z tymi dokumentami podręcznik ILCD zawiera wiele praktycznych rozważań dotyczących zastosowania LCA, wykraczających poza ogólne wymagania ISO 14040/14044;
- przewodnik PEFG dotyczący śladu środowiskowego produktu (*Product Environmental Footprint Guide*) [180] zawierający europejską metodologię badań śladu środowiskowego (EF – ang. *Environmental Footprint*) z zastosowaniem podejścia opartego na cyklu istnienia. Znajdujące się w nim wytyczne mają zostać w przyszłości uzupełnione bardziej szczegółowymi zasadami dotyczącymi konkretnych kategorii produktów (PCR – ang. *Product Category Rules*), zgodnie z założeniami z obszaru zasad dotyczących śladu środowiskowego produktu – PEFCR (ang. *Product Environmental Footprint Category Rules*) [154]. Jednym z wykorzystanych do analiz założeń dotyczących kategorii produktów był PEFCR dla akumulatorów [283], który zawiera szczegółowe wytyczne techniczne z obszaru przeprowadzania badania śladu środowiskowego – PEF (ang. *Product Environmental Footprint*) dla tego obiektu.

Ze względu na pochodzenie, znaczenie i akceptację przez organy UE informacje zawarte w podręczniku ILCD i przewodniku PEFG uznano za punkt wyjścia dla opracowania kluczowych aspektów metodologicznych. Inne stosowane w literaturze wytyczne zawierają przepisy dotyczące określonych aspektów lub etapów cyklu istnienia. Spośród nich przeanalizowano wytyczne eLCAr dla elektromobilności (*Guidelines for the LCA of electric vehicles*) [57] oraz przewodnik FC-Hy w zakresie analiz wytwarzania wodoru i oceny ogniwi paliwowych (*Guidance Document for performing LCAs on Fuel Cells and H₂ Technologies*). Dokument eLCAr zawiera wytyczne dotyczące LCA pojazdów elektrycznych i opiera się na podręczniku ILCD. Jego idea było stworzenie

wspólnych ram w obszarze wyborów metodologicznych i założeń dla pojazdów elektrycznych oraz zwiększenie porównywalności badań prowadzonych w tej dziedzinie. Podobny zakres ma przewodnik FC-Hy. Zawiera on szczegółowe wskazówki techniczne z zakresu przeprowadzania LCA dla ogniw paliwowych (FC – ang. *fuel cells*) i systemów produkcji wodoru (także opiera się na podręczniku ILCD).

Podczas badań LCA istotne jest uwzględnienie zamierzonego zastosowania i powodów przeprowadzenia analiz. Podczas dokonywania przeglądu literatury zauważono, że zasadniczo dzieliła się ona na następujące kategorie:

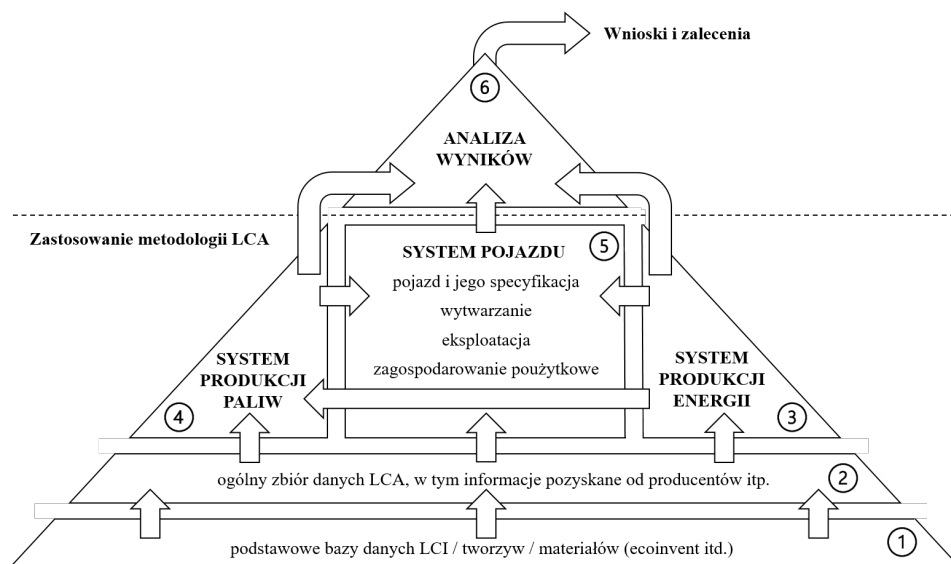
- LCA produktów danej firmy: zazwyczaj wykonywane lub zlecane przez duże firmy jako dowód efektywności środowiskowej niektórych produktów w porównaniu z poprzednimi modelami lub innymi technologiami. Krytyczny przegląd jest często podejmowany nie tylko w celu zapewnienia zgodności z normą ISO 14044, ale także aby zwiększyć wiarygodność publiczną zrealizowanych analiz. Jako docelową grupę odbiorców przyjmuje się ogół społeczeństwa (klientów, dziennikarzy oraz decydentów politycznych);
- LCA zorientowane na politykę w danym obszarze: zlecane przez organy polityczne i wykonywane przez wyspecjalizowane agencje konsultingowe, instytuty, a czasem także uczelnie wyższe. Badania te są warunkowane koniecznością podjęcia konkretnych decyzji politycznych (np. opracowania dyrektyw) albo mają na celu dostarczenie informacji do ogólnej dyskusji na temat kierunków polityki w określonym obszarze;
- akademickie LCA: często wykonywane przez uczelnie wyższe lub inne instytucje akademickie. Ich poziom szczegółowości metodologicznej jest na ogół wyższy w porównaniu z LCA zorientowanym na aspekty polityczne. Skupiają się również na konkretnych etapach cyklu istnienia pojazdów, m.in. produkcji baterii, łańcuchach paliwowych czy wytwarzaniu energii elektrycznej. Często rozwój metodologii jest jednym z celów tego typu analiz.

Analizy przeprowadzone w ramach niniejszego opracowania można zaliczyć do akademickiego LCA. W przeanalizowanej literaturze ilość przejechanych kilometrów oraz długość okresu eksploatacji pojazdu są najczęstszymi jednostkami funkcjonalnymi.

Na potrzeby oceny skutków oddziaływań cyklu istnienia wykorzystywane są wskaźniki punktu końcowego (ang. *endpoint*) i punktu środkowego (ang. *midpoint*). Większość pozycji literaturowych wykorzystuje wskaźniki punktu środkowego. Niektóre badania podają tylko wartości dla emisji pojedynczych zanieczyszczeń. Mimo że wiele badań skupia się wyłącznie na emisji gazów cieplarnianych, nie ma jednak naukowych podstaw do redukcji wyników LCA do jednego ogólnego wyniku lub liczby. Z tego względu w ramach niniejszej monografii dokonana zostanie szczegółowa analiza potencjalnego oddziaływania na środowisko nie tylko w kontekście emisji GHG w cyklu istnienia wybranych środków transportu samochodowego, ale również szeregu innych substancji i procesów, cechujących się największą ilością pozytywnych lub negatywnych następstw dla otoczenia.

3.2. Główne założenia metodologii badań

Wybory metodologiczne dokonane w ramach prowadzonych badań opierały się na dokonanym przeglądzie literatury i są zgodne z normami ISO14040:2006 i ISO14044:2006. Innymi aspektami branymi pod uwagę podczas decyzji metodologicznych były kompleksowość całościowego oddziaływania cyklu istnienia, adekwatność do przedmiotu badania oraz przydatność do analiz uwzględniających różnicowanie czasowe.



Obliczenia i przepływy danych zostały przeprowadzone we wskazanej kolejności od 1 (tło LCI) do 6 (wyniki)

Rys. 3.2. Przegląd struktury zastosowania metodologii LCA i kluczowych przepływów danych w ramach prowadzonych badań

Rysunek 3.2 przedstawia ogólny przegląd ram zastosowania metodologii LCA w prowadzonych badaniach i pokazuje kluczowe przepływy danych. Wybrano modułowe podejście do obliczeń, ponieważ umożliwia ono uzyskiwanie poszczególnych grup wyników w sposób systematyczny i elastyczny.

Wdrożenie indywidualnie opracowanej metodyki pozwoliło na otrzymanie wyników badań obejmujących:

- trzy typy samochodów osobowych: małe (segment A i B), niższe średnie (segment C) i SUV-y;
- sześć odmiennych rodzajów układów napędowych: ICEV benzyna, ICEV olej napędowy, ICEV CNG, PHEV benzyna, BEV i FCEV;

- dwa szczegółowe scenariusze cykli istnienia oparte na długoterminowej strategii Komisji Europejskiej (komunikat Komisji COM(2018)773): scenariusz odniesienia (rok 2020) i scenariusz uwzględniający obniżenie poziomu emisyjności w przyszłości (rok 2050);
- dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów i elementów: składowanie na wysypisku odpadów (w jak największym stopniu) lub recykling (na maksymalnym poziomie);
- trzy różne łańcuchy produkcji paliw (benzyna, olej napędowy, CNG) i dwa odmienne łańcuchy produkcji energii elektrycznej (europejski miks energetyczny oraz wodór).

Uzyskane wyniki badań umożliwiają porównanie efektywności środowiskowej wybranych pojazdów na wszystkich etapach ich cyklu istnienia. Szeroki zestaw danych pozwala na dalsze analizy poszczególnych oddziaływań, a także na porównanie różnych kategorii wpływu.

Opracowanie metodologii i jej zastosowanie umożliwiło pozyskanie informacji na temat potencjalnego przyszłego rozwoju zmian klimatu, struktury dostarczanej energii, jakości powietrza i wpływów związanych z transportem, wynikających z polityk w perspektywie długoterminowej (do roku 2050). Kluczowymi kryteriami użytymi do określenia metodologii w przeprowadzonych badaniach były:

- zgodność z celem i zakresem;
- stosowność do przedmiotu badań: przedmiotem badań są środki transportu samochodowego, a metodologia powinna obejmować kluczowe oddziaływania obecnie związane z transportem drogowym i procesami go poprzedzającymi;
- przejrzystość: ważna zwłaszcza w kontekście przejrzystości metodologicznej i otrzymanych wyników analiz;
- przydatność do zastosowania na poziomie poszczególnych pojazdów: LCA mające zastosowanie do przygotowania profili oddziaływania na otoczenie poszczególnych środków transportu samochodowego jest zamierzonym wynikiem przeprowadzonych badań;
- równowagę dostępnych zasobów do zastosowania: zakres oceny jest bardzo szeroki – tj. obejmuje szereg różnych typów pojazdów, łańcuchów paliw i energii elektrycznej, sposobów zagospodarowania użytkowego oraz horyzontów czasowych.

Ogólne wybory metodologiczne zostały spowodowane z jednej strony celem i zakresem analiz, z drugiej – praktyczną możliwością zastosowania. Ponadto uwzględniono istotność całościowego oddziaływania oraz adekwatność do przedmiotu badań. Tabela 3.3 zawiera podsumowanie kluczowych aspektów ram metodologicznych.

Tab. 3.3. Podstawowe ramy metodologiczne przeprowadzonych badań

Zagadnienie	Zastosowane podejście
Cel	Zwiększenie zrozumienia wpływu cyklu istnienia środków transportu samochodowego na otoczenie i stworzenie podstawy do monitorowania/porównywania/benchmarkingu różnych kombinacji segmentów pojazdów, wykorzystywanych układów napędowych, rodzajów paliw, możliwości zagospodarowania użytkowego, horyzontów czasowych itd.
Systemy obiektów	Analizie poddano trzy różne grupy segmentów pojazdów lekkich z sześcioma różnymi opcjami układu napędowego. Ponadto w analizie uwzględniono odmienne rodzaje łańcuchów paliwowych i elektrycznych mogących mieć zastosowanie w przypadku ocenianych samochodów
Jednostka funkcjonalna	Porównano środki transportu samochodowego o podobnych rozmiarach i użyteczności, które są definiowane przez typ pojazdu, klasę wielkości i segment. Przebieg samochodu i czas jego eksploatacji stanowią główny przepływ odniesienia dla wyników cyklu istnienia, a dodatkowe jednostki są wykorzystywane wyłącznie do wyników pośrednich
Granice systemu	Cały cykl istnienia środków transportu samochodowego, od fazy wytwarzania, przez fazę eksploatacji, aż do zagospodarowania użytkowego
Podejścia LCA	W odniesieniu do ogólnego podejścia LCA zastosowano podręcznik ILCD ze względu na jego pochodzenie, znaczenie i akceptację na obszarze Unii Europejskiej. W związku z tym zastosowano przede wszystkim spójne podejście atrybucyjne. Ponieważ zakres badania obejmuje również analizę scenariuszy przyszłych oddziaływań do 2050 r., podjęto dodatkowe analizy konsekwencji. Jest to zatem swego rodzaju nowe, hybrydowe podejście do LCA
Koniec cyklu istnienia pojazdu	Zastosowano dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego pojazdów po zakończeniu eksploatacji, uwzględniające: składowanie na wysypisku odpadów (możliwie jak największy, dopuszczalny prawem odsetek składowanych tworzyw, materiałów i elementów) oraz recykling (również na możliwie jak najwyższym poziomie)
Horyzont czasowy	Horyzont czasowy badania to współczesność (2020), a także rok 2050. Główne zmiany czasowe obejmowały zmiany w europejskim koszyku energii elektrycznej, zmiany w zapotrzebowaniu pojazdów na energię, zmiany w podaży paliw kopalnych i odnawialnych, zmiany w produkcji pojazdów (np. różnice w zastosowanych tworzywach i materiałach, masa pojazdu, procesy produkcyjne) oraz zmiany we wpływie produkcji materiałów (dekarbonizacja zużytej energii)
Kategorie wpływu	Do badań zastosowano pięć modeli obliczeniowych (ReCiPe 2016, IPCC 2021, CED VI.11, CML-IA baseline, Ecological Scarcity 2021), w ramach których przeanalizowano łącznie sześćdziesiąt jeden kategorii wpływu i trzy obszary oddziaływania
Bazy danych LCI	Wykorzystano Ecoinvent (wersja 3.8) będący przejrzystą i ugruntowaną bazą danych do analiz LCA.
Energia elektryczna – bazy danych	Dane do modeli łańcuchów energii elektrycznej oparto na bazach danych Instytutu Badań Energii i Środowiska (ifeu, Institut für Energie und Umweltforschung) obejmujących łańcuchów paliwowe, procesy zachodzące w elektrowniach, dystrybucję energii elektrycznej i produkcję dóbr inwestycyjnych dla głównych rodzajów wytwarzania (węgiel kamienny, węgiel brunatny, olej opałowy, gazy naturalne i pochodne, biomasa stała i biogaz, energia jądrowa, słoneczna, wodna i wiatrowa)
Paliwa – bazy danych	Ze względu na różnorodność uwzględnionych surowców i paliw wymagane było połączenie zbiorów danych z różnych źródeł. Żaden pojedynczy publicznie dostępny zbiór nie zawiera danych wejściowych i wyjściowych pełnego cyklu istnienia dla wszystkich łańcuchów paliwowych analizowanych w ramach badań
Specyfikacja pojazdu – bazy danych	Do charakteryzowania pojazdów i układów napędowych przede wszystkim starano się pozyskać dane od producentów. Zbiory danych oparte na średnich rynkowych danych wejściowych wykorzystanych do modelowania układów napędowych pojazdu referencyjnego i średniego okresu eksploatacji pozyskano z najnowszych badań prowadzonych na zlecenie Komisji Europejskiej
Cykl istnienia pojazdu – bazy danych	Dane na temat wytwarzania i recyklingu pojazdów (wykorzystanie materiałów w pojazdach/komponentach, ogólne czynniki strat produkcyjnych i założenia dotyczących zawartości materiałów pochodzących z recyklingu) starano się pozyskać przede wszystkim od producentów. Brakujące informacje uzupełniono na bazie dostępnej literatury. Szczegółowa, specyficzna charakterystyka produkcji baterii i wycofania ich z eksploatacji oparta została głównie na danych/metodologiach stosowanych w modelu cyklu istnienia GREET (the Greenhouse Gases, Regulated Emissions and Energy Use in Transportation Model)

3.3. Cel i zakres analiz

Pierwszym krokiem w LCA jest określenie celu i zakresu analizy. W ramach prowadzonych analiz kluczową była próba określenia wpływu rozpatrywanych środków transportu samochodowego na otoczenie w ujęciu całego ich cyklu istnienia oraz w odniesieniu do możliwie wielu kategorii potencjalnego oddziaływania. Ocena cyklu istnienia umożliwia porównanie różnych technologii pojazdów, w tym odmiennych rodzajów wykorzystywanego przez nie paliwa. LCA może pomóc w identyfikacji najistotniejszych wpływów wywieranych na otoczenie podczas różnych etapów cyklu. W konsekwencji pozwala to na określenie możliwości ich ograniczenia.

Głównym założeniem prowadzonych badań było zatem lepsze zrozumienie wpływu środków transportu samochodowego na otoczenie współcześnie (rok 2020) oraz w perspektywie długoterminowej (do roku 2050). Ocena obejmowała wybrane segmenty pojazdów lekkich (LDV) z różnymi rodzajami układów napędowych (silnik spalinowy i/lub silnik elektryczny zasilany ogniwami paliwowymi lub akumulatorami). W ramach prowadzonych analiz założono dwa zasadnicze cele:

- opracowanie podejścia metodologicznego do oceny cyklu istnienia środków transportu samochodowego (w tym zasilających je paliw i energii);
- zastosowanie tego podejścia do porównania wyników dla wybranych kategorii pojazdów.

Podczas określania celu i zakresu analiz pojawiło się kilka pytań, na które chciano znaleźć odpowiedź:

- Jakie podejścia LCA (lub analizy częściowe) były dotychczas stosowane, w jakim celu i dla jakich odbiorców (przepisy, informacje dla konsumentów itp.)? Jak odnoszą się one do zasad, wymagań i wytycznych określonych w normach ISO 14040 i 14044?
- Jaki jest stan wiedzy na temat LCA wybranych segmentów pojazdów lekkich, biorąc pod uwagę rodzaje paliwa, z których korzystają? Jakie są główne istniejące luki w danych?
- Jakie modele LCA będą odpowiednie i spójne celem dokonania obiektywnej oceny emisji gazów cieplarnianych oraz innych wpływów na środowisko występujących w cyklach istnienia wybranych segmentów samochodów osobowych, biorąc pod uwagę kompromis między dokładnością analiz a ich wykonalnością?
- Jakie są kluczowe czynniki determinujące emisje gazów cieplarnianych i inne wpływy na otoczenie w cyklach istnienia pojazdów różnego typu?
- W jaki sposób można wpływać na te czynniki w celu zmniejszenia ich negatywnego oddziaływania?
- Jakie są zalety i wady indywidualnego podejścia metodologicznego zastosowanego w ramach analiz zaprezentowanych w niniejszej monografii?

Podsumowanie ogólnej struktury prowadzonych badań przedstawiono na rysunku 3.3, a cel i zakres prac omówiono szczegółowo w dalszej części rozdziału. Analizy rozpoczęto od dokonania przeglądu literatury. Ustalenia dokonane na jego podstawie stanowiły bazę do opracowania indywidualnej metodologii badań. W kolejnym kroku zastosowano ją w praktyce, a wyniki przedstawiono i omówiono w rozdziale 4. W rozdziale 5 podsumowano kluczowe wnioski i rekomendacje wynikające ze zrealizowanych analiz.



Rys. 3.3. Ogólna struktura planu analiz

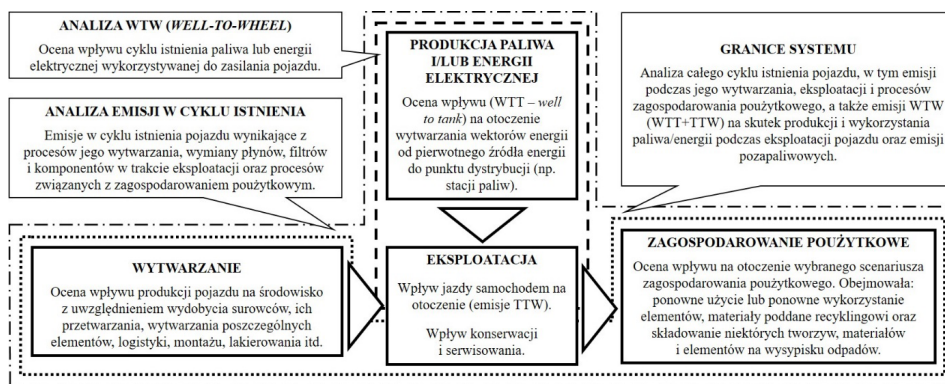
Zakres analiz obejmuje wszystkie istotne procesy bezpośrednio związane z całym materialnym cyklem istnienia rozpatrywanych środków transportu samochodowego. Granica metodologiczna obejmuje ich wytwarzanie, eksploatację i zagospodarowanie pożytkowe.

Ponieważ wszystkie analizowane pojazdy mają stosunkowo porównywalny wpływ na infrastrukturę drogową (np. ulice czy miejsca parkingowe), elementy te zostały pominięte w analizach. Infrastruktura ładowania i uzupełniania paliwa mogłaby potencjalnie mieć znaczenie w ocenie porównawczej alternatywnych mechanizmów napędowych (np. mieszkalnych/publicznych, wolnych/szybkich/bardzo szybkich ładowarek, pomp wodorowych, elektryfikacji dróg). Z tego powodu, że dostępność danych w tym zakresie jest znikoma – zostały one pominięte. Infrastruktura ładowania i tankowania powinna jednak zostać rozważona pod kątem konkretnych technologii (zwłaszcza elektrycznych systemów drogowych) i w przyszłości planowane jest przeprowadzenie dalszych badań w tym obszarze. Infrastruktura wytwórcza dla zakładów produkujących pojazdy również została pominięta ze względu na jej duże podobieństwo dla rozpatrywanych typów pojazdów.

Horyzont czasowy badania to współczesność rozumiana jako rok 2020 oraz przyszłość w perspektywie roku 2050. Badanie koncentruje się na ustaleniu obecnego wpływu na środowisko jako solidnej podstawy dla scenariusza, w którym uwzględ-

niono rozwój technologiczny, a także wpływ polityk środowiskowych (np. cele dotyczące pojazdów w zakresie emisji CO₂, dyrektywa w sprawie jakości paliw i dyrektywa w sprawie odnawialnych źródeł energii). Przegląd podstawowych granic systemu przedstawiono na rysunku 3.4.

Analizowane systemy to wybrane segmenty pojazdów lekkich (małe – segment A i B, niższe średnie – segment C i SUV-y). Zostały one ocenione dla szeregu kombinacji układów napędowych, które są istotne dla typu nadwozia pojazdu (jak wskazano w tab. 3.4) i obejmują zarówno konwencjonalne układy napędowe (ICEV), jak i xEV (tj. PHEV – hybrydowe pojazdy elektryczne typu plug-in, BEV – akumulatorowe pojazdy elektryczne i FCEV – pojazdy elektryczne na ogniwa paliwowe). W segmencie małych samochodów osobowych w 2020 roku w Europie nie były powszechnie dostępne żadne modele PHEV ani FCEV, stąd też odstąpiono od przeprowadzenia analizy w tym obszarze.



Rys. 3.4. Schematyczny zakres prowadzonych analiz (granice systemu)

Tab. 3.4. Zestawienie typów pojazdów i segmentów objętych analizą

Rodzaj zasilania	Rodzaj pojazdu		
	Mały (segment A i B)	Niższy średni (segment C)	SUV
ICEV benzyna	✓	✓	✓
ICEV olej napędowy	✓	✓	✓
ICEV CNG	✓	✓	✓
PHEV benzyna	×	✓	✓
BEV	✓	✓	✓
FCEV	×	✓	✓

Jednostka funkcjonalna została zdefiniowana na podstawie wielkości środka transportu samochodowego i jego użyteczności. W związku z tym w ramach prowadzo-

nych badań porównano warianty pojazdów/zespołów napędowych, które są podobne pod tym względem. Rozmiar i użyteczność samochodu są w dużej mierze określone przez rodzaj pojazdu (np. niższy średni – segment C). W dokonanym porównaniu dla wszystkich opcji układu napędowego (rodzajów zasilania) brane były pod uwagę te same średnie właściwości użytkowe różnych segmentów samochodów pod względem przebiegu i profilu jazdy.

Pojazdokilometr (vkm) był używany jako główny przepływ odniesienia dla pełnego cyklu istnienia pojazdu. Wyniki dotyczące długości okresu eksploatacji pojazdu wyznaczono na podstawie analiz wykonywanych na zlecenie Komisji Europejskiej [66, 118].

3.4. Przegląd danych

3.4.1. Podstawowe informacje

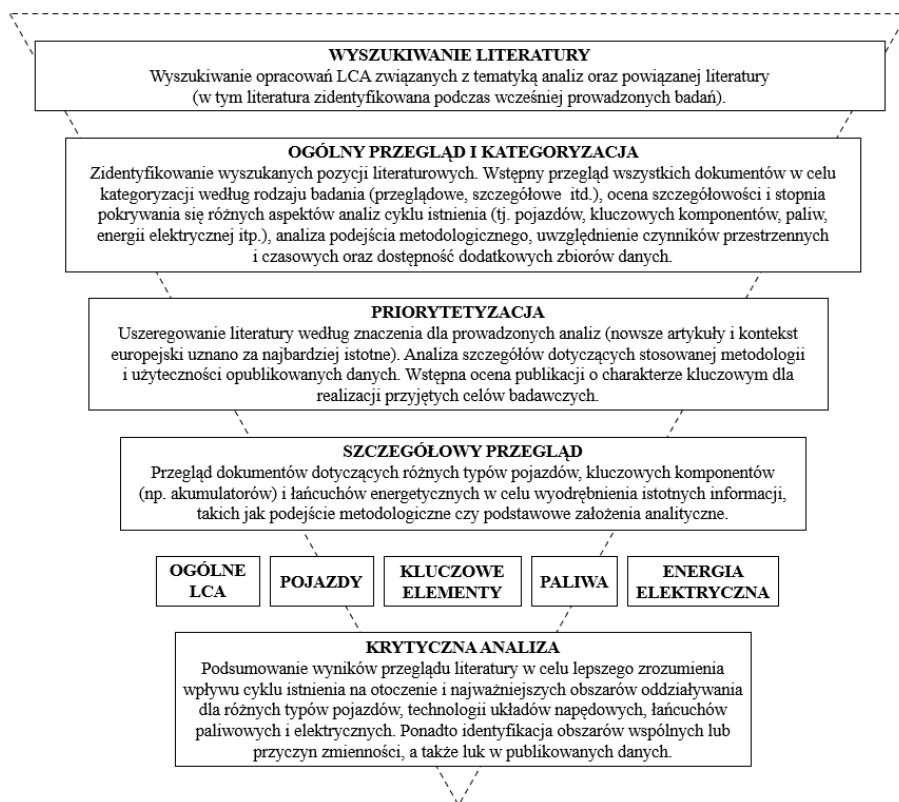
Opracowanie indywidualnej metodologii, a następnie jej zastosowanie opierało się na analizie danych zebranych na podstawie dwóch głównych obszarów: przeglądu literatury i danych od producentów. Cele i działania dla tych dwóch głównych obszarów przedstawiono w tabeli 3.5.

Tab. 3.5. Przegląd głównych źródeł danych wykorzystanych w analizach

Obszar pozyskiwanych danych	Cele	Czynności
Literatura	Dokonanie obszernego przeglądu literatury na temat cyklu istnienia pojazdów, kluczowych komponentów i nośników energii celem opracowywania indywidualnej propozycji metodologii oceny cyklu istnienia środków transportu samochodowego i zebrania kluczowych danych do wykorzystania w analizach	<ul style="list-style-type: none"> • Analiza danych dostępnych w literaturze: książki, artykuły, opracowania Międzynarodowej Rady Czystego Transportu (ICCT), Komisji Europejskiej, Öko-Institut, Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA) itd. • Ewidencjonowanie zebranych materiałów. • Ocena zgromadzonych danych
Dane od producentów	Nawiązanie kontaktu z producentami, celem stworzenia indywidualnej metodologii oceny, wypełnienia luk w danych dostępnych w literaturze oraz zweryfikowanie kluczowych założeń dotyczących zastosowania przyjętej metodologii	<ul style="list-style-type: none"> • Analiza ogólnodostępnych danych o produktach. • Wysyłanie próśb do producentów o szczegółowe informacje. • Ewidencjonowanie zebranych danych. • Ocena zgromadzonych danych

Dokonany przegląd literatury miał na celu analizę i syntezę informacji z obszaru badawczego. Kluczowymi założeniami było zidentyfikowanie istotnych wpływów na otoczenie w cyklu istnienia różnych typów środków transportu samochodowego oraz zidentyfikowanie znaczących różnic i mocnych stron dotychczasowych prac naukowych celem opracowania indywidualnego podejścia metodologicznego. Rozpatrywa-

ne dokumenty obejmowały różne rodzaje badań (zarówno szczegółowe, jak i przeglądowe), analizy obejmujące cały pojazd lub jego kluczowe komponenty, a także cykl istnienia i łańcuchy energetyczne dla różnych układów napędowych, typów pojazdów i źródeł energii. Uwzględniono również literaturę, która omawia przyszłe implikacje i zmienność regionalną. Po wstępnej analizie zebranych materiałów ustalono pozycje literatury przeznaczone do dokładniejszego przeglądu na następnym etapie oraz te, które mogą pomóc w identyfikacji kluczowych braków. Literatura została uszeregowana na podstawie przydatności jej treści dla prowadzonych badań, a następnie pozycje priorytetowe zostały szczegółowo przeanalizowane, umożliwiając dokonanie indywidualnych wyborów metodologicznych. Proces przeglądu literatury podsumowano na rysunku 3.5.



Rys. 3.5. Ogólna struktura procesu przeglądu literatury w ramach prowadzonych analiz

Najwięcej publikacji można znaleźć w odniesieniu do ICEV (pojazdów z silnikiem spalinowym, zasilanych zarówno olejem napędowym, jak i benzyną). Coraz więcej, szczególnie najnowszych, publikacji dotyczy BEV (akumulatorowych pojazdów elektrycznych), mniejszym zainteresowaniem badaczy cieszą się samochody typu PHEV

(hybrydowe pojazdy elektryczne typu plug-in). Najmniej analiz przeprowadzono w stosunku do FCEV (pojazdów elektrycznych na ogniwa paliwowe).

W przeanalizowanej literaturze zwrócono również uwagę na problematykę rodzajów ocenianych paliw. Paliwa konwencjonalne i znane paliwa alternatywne stosunkowo często są uwzględniane w analizach. Dość rzadko rozpatrywany jest biometan, paliwa z recyklingu węgla i alternatywne paliwa kopalne. Wiele badań (np. WTT – ang. *well to tank*) koncentruje się wyłącznie na rodzaju paliwa (np. skupiają się tylko na cyklu produkcji wodoru). Równie często przeprowadzane są analizy cyklu istnienia pojazdów (np. TTW – ang. *tank to wheel*) nieobejmujące cykli paliwowych.

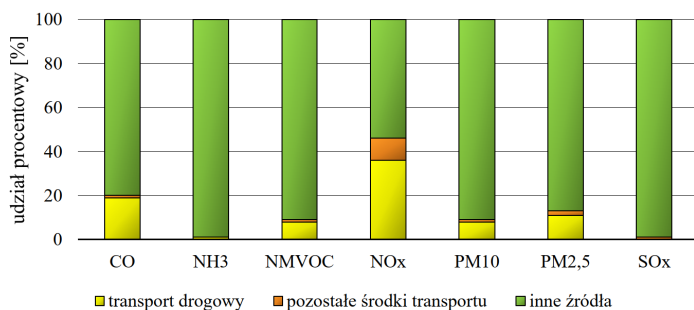
W odniesieniu do kategorii wpływu rozpatrywanych w badaniach większość omawia wpływ gazów cieplarnianych na środowisko, jednak oddziaływanie to zazwyczaj jest ujmowane globalnie i brakuje analiz specyficznych dla danej lokalizacji. Ponadto wiele z nich analizuje wpływ na pogłębianie się efektu szklarniowego bez uwzględniania innych kategorii wpływu, np. zmiany sposobu użytkowania gruntów czy wpływ na jakość wody są omawiane w marginalnej liczbie publikacji.

Dominacja analiz dotyczących emisji GHG (w badaniach LCA) może wynikać m.in. z większej świadomości ich wpływu na otoczenie. Ta kategoria wpływu jest również uważana przez opinię publiczną za kluczową dla sektora transportu drogowego. Stanowiła ona przedmiot wielu badań oceniających zdolność różnych układów napędowych lub rodzajów paliwa do przyczyniania się do celów redukcji emisji gazów cieplarnianych. Emisje gazów szklarniowych stanowią bardzo istotną kategorię wpływu w przypadku środków transportu samochodowego, ponieważ jest on jednym z największych emitentów gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej [75].

Transport jest jednak również istotnym źródłem innych zanieczyszczeń powietrza, co ilustruje rysunek 3.6. Widoczne jest znaczenie emisji NO_x w transporcie drogowym, które wpływa na szereg różnych kategorii oddziaływania (dotyczących zarówno jakości środowiska, jak i zdrowia człowieka). Przede wszystkim jednak transport drogowy jest nadal odpowiedzialny za prawie 36% europejskiej emisji NO_x , która przyczynia się do zwiększania potencjału zakwaszania i eutrofizacji, fotochemicznego tworzenia ozonu (POCP – ang. *photochemical ozone creation potential*) i powstawania cząstek stałych (PMF – ang. *particulate matter formation*). Udział tego rodzaju transportu w całkowitej emisji CO, która również przyczynia się do POCP, wynosi około 19% [116].

Środki transportu samochodowego odpowiadają także za ok. 11% emisji $\text{PM}_{2,5}$. Można je zatem uznać za istotne dla oceny wpływu sektora transportu na otoczenie. Również emisje niemetanowych lotnych związków organicznych (NMVOC) z transportu drogowego są znaczące (ok. 8% udziału w całkowitej emisji), przyczyniając się do powstawania POCP i cząstek stałych [116].

Emisja amoniaku (NH_3), który powoduje m.in. zakwaszenie, eutrofizację i tworzenia cząstek stałych, nie jest powodowana bezpośrednio przez transport, lecz głównie przez rolnictwo (ok. 92% emisji NH_3), jednak wiąże się to z produkcją np. biopaliw [116].



Rys. 3.6. Udział transportu drogowego w głównych zanieczyszczeniach powietrza w UE.
Opracowanie własne na podstawie [116]

Wyniki przeprowadzonego przeglądu literatury wskazują, że zwiększanie efektu cieplarnianego oraz inne skutki związane z zanieczyszczeniami powietrza są zwykle większe w przypadku eksploatacji pojazdów ICEV w porównaniu z pojazdami xEV (tj. PHEV, REEV, BEV lub FCEV). Z drugiej strony, pojazdy xEV mają zwykle większy negatywny wpływ na otoczenie (niż pojazdy ICEV) pod względem wykorzystania zasobów surowców na etapie wytwarzania oraz energii podczas eksploatacji (jeżeli pochodzi ze źródeł nieodnawialnych). Rodzaj stosowanego paliwa lub źródło energii elektrycznej w dużej mierze warunkują wielkość destrukcyjnego wpływu cyklu istnienia pojazdu. Oddziaływania na środowisko związane z produkcją paliw mogą się znacznie różnić w zależności od tego, czy paliwo jest produkowane z surowców biogenych, kopalnych itd. Wpływ na otoczenie jest zwykle podobny w przypadku spalania wszystkich paliw ciekłych, istnieją jednak kluczowe różnice w oddziaływaniu na pogłębianie się efektu szklarniowego w zależności od tego, czy paliwo jest wykonane z węgla kopalnego czy też substancji biogennej. Inne kategorie wpływu stają się bardziej istotne w przypadku rodzajów paliw produkowanych z pierwotnych surowców kopalnych oraz surowców pochodzących z upraw rolnych czy produkcji leśnej, które są związane ze specyficznymi skutkami zmiany użytkowania gruntów i wyczerpywania zasobów.

W szczególności w odniesieniu do łańcucha dostaw energii elektrycznej paliwa kopalne wykazują większy ogólny wpływ w porównaniu ze źródłami odnawialnymi (zwłaszcza w przypadku węgla brunatnego). Gaz ziemny wykazuje najmniejsze negatywne oddziaływanie na otoczenie wśród wszystkich paliw kopalnych. Wynika z tego, że źródło energii elektrycznej ma kluczowe znaczenie dla potencjału pojazdów xEV w zakresie wywierania mniejszego wpływu na środowisko, a zatem jest niezwykle

istotnym aspektem oceny (zarówno w ramach etapu użytkowania, jak i wytwarzania, ponieważ np. produkcja akumulatorów jest procesem bardzo energochłonnym).

Udział badań różnych etapów cyklu istnienia w analizowanej literaturze różni się w zależności od rozpatrywanych kategorii wpływu, typów układu napędowego i źródeł paliwa/energii elektrycznej. Zdecydowana większość analiz koncentruje się jednak na emisjach gazów cieplarnianych. Biorąc pod uwagę znaczenie etapów cyklu istnienia dla różnych kategorii wpływu, eksploatacja powoduje największy wpływ na poziom całkowitej emisji gazów szklarniowych w przypadku pojazdów typu ICEV, podczas gdy zarówno etap wytwarzania, jak i łańcuch dostaw energii (WWT) najbardziej przyczyniają się do wpływu na pogłębianie efektu cieplarnianego w odniesieniu do pojazdów xEV (który etap dominuje w cyklu istnienia pojazdu xEV, zależy od przyjętych założeń, np. emisyjności energii elektrycznej lub wodoru, a także od wielkości i typu pojazdu).

Pod kątem względnego znaczenia etapów cyklu istnienia dla różnych typów układów napędowych etap wytwarzania pojazdu xEV jest zwykle odpowiedzialny za więcej ogólnych negatywnych następstw środowiskowych w porównaniu z analogicznym pojazdem ICEV. Jest to spowodowane pozyskiwaniem materiałów do produkcji pojazdów – w szczególności tych, które są potrzebne do produkcji baterii trakcyjnych. Akumulatory są kluczowym elementem pojazdów xEV, a tym samym wymagają bardziej szczegółowej oceny, zarówno współcześnie, jak i w świetle przewidywanych zmian technologicznych.

Etap zagospodarowania użytkowego po wycofaniu pojazdu z eksploatacji nie zawsze jest uwzględniany w badaniach LCA. Recykling może jednak częściowo zrekomensować negatywny wpływ wytwarzania pojazdów, w szczególności akumulatorów. Dlatego ten etap powinien być częściej i szerzej rozpatrywany w badaniach.

Rozważając spalanie paliw (tj. cykl WTW – ang. *well to wheel*), istnieją kluczowe różnice między paliwami kopalnymi a paliwami odnawialnymi (np. biopaliwami, biogazem czy „zielonym” wodorem). W literaturze często zakłada się, że emisje gazów cieplarnianych na etapie eksploatacji są zerowe w przypadku biogenego składnika spalanych paliw, ale są bardzo istotne w przypadku paliw kopalnych. Spalanie paliw jest największym źródłem emisji w całym cyklu istnienia pojazdów napędzanych ze źródeł kopalnych. Stosowanie wodoru samo w sobie nie generuje emisji GHG podczas użytkowania, ale energia wykorzystywana w procesie jego produkcji może mieć pochodzenie kopalne, powodując tym samym emisje gazów cieplarnianych i inne negatywne skutki dla otoczenia na wcześniejszych etapach cyklu istnienia. Różnice można zaobserwować również pomiędzy poszczególnymi źródłami energii elektrycznej. Elektryczność oparta na węglu generuje większość emisji gazów cieplarnianych podczas eksploatacji.

Ogólny wpływ cyklu istnienia pojazdu xEV może być niższy niż równoważnego ICEV wtedy, gdy cechują go mniejsze skutki z cyklu WTT, które kompensują dodatkowe negatywne oddziaływania na etapie wytwarzania. Dokładna ocena następstw śro-

dowiskowych na każdym etapie cyklu istnienia pojazdu ma zatem kluczowe znaczenie dla prowadzonych analiz.

Na bazie informacji pozyskanych z analizy literatury i związanych z nimi wniosków dotyczących kluczowych następstw środowiskowych i etapów cyklu istnienia określono podstawowe założenia analityczne. Wiele z nich wiąże się z aspektami czasowymi i/lub przestrzennymi. Jednak na ogólne oddziaływanie pojazdu na otoczenie będą miały wpływ również przyszłe zmiany technologiczne, lokalizacja produkcji i/lub jego eksploatacji:

- oddziaływanie cyklu istnienia energii elektrycznej zależy od miksu energetycznego wykorzystywanego w danym kraju (często nawet na poziomie subkrajowym) – przewidywane są jego zmiany zarówno w długim, jak i krótkim w czasie (dobowe, sezonowe, wieloletnie);
- wzorce jazdy zależą od rodzaju dróg, na których głównie używane są pojazdy (np. pojazdy xEV mogą generować mniej negatywnych następstw środowiskowych w porównaniu z analogicznymi pojazdami typu ICEV w warunkach jazdy w mieście dzięki hamowaniu rekuperacyjnemu oraz możliwościom wykorzystania systemu start-stop);
- z czasem spodziewane są ulepszenia w technologii xEV i zwiększenie skali produkcji;
- przewiduje się ogólną poprawę efektywności paliwowej i elektroenergetycznej;
- spodziewane jest zwiększenie potencjału do zastosowań wtórnych baterii i aplikacji V2G (ang. *vehicle-to-grid*) oraz stworzenie nowych technologii recyklingu.

Przeгляд podejść metodologicznych zidentyfikowanych w literaturze oraz doświadczenia własne zostały wykorzystane do opracowania indywidualnej metodologii, która została zastosowana w niniejszej monografii.

3.4.2. Ogólna charakterystyka cyklu istnienia rozpatrywanych pojazdów

W analizowanej literaturze stosowano trzy główne rodzaje podejść do charakteryzowania środków transportu samochodowego oraz szacowania eksploatacyjnego zużycia energii i emisji:

- charakterystyka prosta – polegała na wykorzystaniu danych lub założeń opartych na typowych przykładach reprezentatywnych pojazdów, wartości zaczerpniętych z literatury lub informacji ogólnie dostępnych;
- podejścia pośrednie – były oparte na bardziej szczegółowych, ale uproszczonych metodologiach i obliczeniach w celu lepszego uwzględnienia różnic w kluczowych parametrach między samochodami lub układami napędowymi;
- charakterystyka złożona – wykorzystywała zastosowanie bardziej złożonych metod i kompleksowe podejście do symulacji cyklu istnienia pojazdów, zazwyczaj opierając się na danych pozyskanych bezpośrednio od producentów.

W celu scharakteryzowania danego segmentu samochodów podejście metodologiczne oparte na kluczowych cechach pojazdów uznano za dobre praktyczne rozwiąza-

nie. Jest to również podejście stosowane w większości bardziej szczegółowych badań, które miały na celu dostarczenie analizy porównawczej szeregu różnych typów samochodów lub zespołów napędowych [m.in. 16, 72, 109]. Podejście to można zastosować do skalowania obliczeń, np. dla serii przeciętnych typów nadwozi pojazdów.

W przypadku oceny zapotrzebowania na energię podczas eksploatacji pojazdu dostępnych jest wiele możliwości analiz, począwszy od prostych reprezentatywnych wartości pochodzących z literatury lub ogólnodostępnych źródeł [np. 109], aż po złożoną, pełną symulację dla konkretnego samochodu w celu określenia wartości dla danych cykli i typów układu napędowego [m.in. 16, 17]. Badania, które mają węższy zakres, często są w stanie uwzględnić bardziej dokładne, złożone metodologie. Ze względu na stosunkowo szeroki charakter prowadzonych analiz pełne podejście symulacyjne nie było możliwe, jednak wzięcie pod uwagę niektórych innych ważnych elementów (takich jak uwzględnienie zmian masowych w konstrukcji pojazdów w przyszłości itp.) uznano za wykonalne. Zdecydowano się na zastosowanie podejścia opartego na połączeniu istniejących zestawów danych bazujących na symulacjach (np. w odniesieniu do zależności masy i zużycia energii oraz względnej efektywności różnych układów napędowych) oraz innych metodologii (np. krzywych i wzorów opisujących prędkość oraz zużycie paliwa, stosowanych w inwentaryzacjach emisji).

Do modelowania zanieczyszczeń powietrza w niektórych badaniach wykorzystuje się metody oparte na inwentaryzacji, a także złożone symulacje pojazdów w celu oszacowania rzeczywistych skutków środowiskowych występującej emisji [m.in. 166, 277]. Większość analiz LCA pojazdów zleczanych przez producentów celem uzyskania przez nie deklaracji środowiskowych produktów wykorzystuje współczynniki emisji z wyników badań laboratoryjnych [np. 54]. Odbiegają one jednak od rzeczywistych warunków i dlatego nie zostały uznane za odpowiednie dla niniejszej analizy. Oceniono, że metody oparte na inwentaryzacji (takie jak COPERT [74]) są bardziej realistyczne i ułatwiają uwzględnienie zmienności emisji w zależności od rodzaju drogi, umożliwiając także zbadanie różnic regionalnych.

W większości badań przyjęto informacje dotyczące masy pojazdu i składu materiałowego na podstawie dostępnych informacji dla konkretnych modeli pojazdów pochodzących z literatury lub innych ogólnodostępnych źródeł [np. 109]. Analizy LCA opracowane na potrzeby deklaracji środowiskowych produktów dla producentów samochodów były oparte na szczegółowych informacjach dostarczonych przez nich samych dla poszczególnych ocenianych modeli [m.in. 55, 259]. W bardziej szczegółowych ocenach LCA niezleczanych przez firmy produkujące samochody [np. 16, 72] zwykle przyjmowano bardziej złożone metodologie, w których opracowywano przejrzysty, systematyczny podział na różne komponenty – zazwyczaj dzieląc pojazd na szereg elementów specyficznych dla układu napędowego oraz pozostałą część samochodu (każde uwzględniające skład materiałowy i masę). Podejście to uznano za najlepiej dopasowane do prowadzonych w ramach niniejszej monografii analiz, ponieważ

umożliwia ono przedstawienie spójnej oceny porównawczej równoważnych typów środków transportu samochodowego i zespołów napędowych.

W większości analizowanych pozycji literaturowych wykorzystano stosunkowo proste metodologie i założenia dotyczące doboru wielkości i specyfikacji akumulatorów dla pojazdów elektrycznych – najczęściej na podstawie przykładów opierających się na stałych rozmiarach oraz specyfikacjach z już istniejących samochodów oraz niezmiennych założeniach dotyczących wymiany (o ile zostało to uwzględnione), zazwyczaj bez przyjęcia bardziej dynamicznych interakcji z innymi parametrami pojazdu. W niektórych badaniach zastosowano dokładniejsze podejścia [m.in. 16, 72, 117, 225]. W pojedynczych opracowaniach zbudowano metodologie i dane z modelu GREET (the Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Technologies Model by Argonne National Laboratory) [214]. Uznano to za optymalne podejście również dla analiz prowadzonych w ramach niniejszej monografii. Charakterystyka akumulatorów litowo-jonowych, ich produkcja i recykling w modelach GREET i EverBatt zostały opracowane i udoskonalone przez Narodowe Laboratorium Argonne (ANL – Argonne National Laboratory), cechując się szczegółowym i przejrzystym podejściem.

W scenariuszach dotyczących produkcji akumulatorów i ogniw paliwowych w przyszłości pod uwagę zostały wzięte kluczowe elementy powodujące potencjalne konsekwencje w przyszłości (np. nowa chemia ogniw akumulatorowych, wyższa wydajność procesu dzięki wpływowi efektu skali, dekarbonizacja materiałów).

W większości badań stosuje się uproszczone podejście oparte na stałych rocznych profilach przebiegu pojazdów. Jednak szereg analiz zrealizowanych dla Komisji Europejskiej [np. 66, 118, 313] dostarczył dokładniejszych wyników na temat rzeczywistego przebiegu różnych typów samochodów, m.in. na temat ich zmienności w zależności od wieku pojazdu. Przewiduje się, że w okresie eksploatacji pojazdu emisje spalin nie zmieniają się znacząco, jednak zmiany technologii produkcji paliw i energii elektrycznej mogą być istotne.

Przedstawiona w pracy analiza w głównej mierze opiera się na podejściu atrybucyjnym, przez uwzględnienie wartości oddziaływania na otoczenie, które można przypisać do analizowanych środków transportu samochodowego oraz paliw w całym okresie ich eksploatacji. Ocenie podlegał obszar Europy. W badaniach określono poziom potencjalnych następstw środowiskowych w całym cyklu istnienia pojazdów ICEV (pojazdy z silnikiem spalinowym, paliwo: benzyna, olej napędowy), PHEV (hybrydowe pojazdy elektryczne typu plug-in, paliwo: benzyna), BEV (pojazdy elektryczne na baterie) i FCEV (pojazdy elektryczne na ogniwa paliwowe). Typy zespołów napędowych były porównywane przy użyciu średniej ważonej sprzedaży w ramach najbardziej reprezentatywnych segmentów rynku. Wartości zużycia paliwa oraz energii elektrycznej odpowiadały rzeczywistym warunkom jazdy, a poza wodorem – w analizach uwzględnione zostały uśrednione miksy energii elektrycznej i paliw z rozpatrywanego obszaru. Pod względem przedziału czasowego analiza obejmowała ocenę emisji występujących w cyklu istnienia samochodów zarejestrowanych w roku 2020

oraz ich porównanie z prognozami dla aut mających zostać zarejestrowanymi w roku 2050. W badaniu uwzględniono również przewidywane zmiany w miksie paliwowo-energetycznym.

Przeprowadzona ocena obejmowała wszystkie bezpośrednie i pośrednie emisje, które miały istotny wpływ na poziom emisji całkowitej w całym cyklu istnienia rozpatrywanych układów napędowych (przyjęty poziom odciążenia: 0,01%). Emisje związane z budową i utrzymaniem infrastruktury do wytwarzania i recyklingu aut, transportu i dystrybucji paliw oraz ładowania energią elektryczną pojazdów, jak również emisje związane z infrastrukturą drogową – nie były brane pod uwagę, ze względu na ich stosunkowo duże podobieństwo dla różnych typów mechanizmów napędowych i niewielki wpływ na emisje w całym cyklu istnienia analizowanych środków transportu samochodowego.

W krajach Unii Europejskiej i Wielkiej Brytanii w roku 2020 zarejestrowano około 15,5 mln nowych samochodów [62]. Spośród nich 63% stanowiły pojazdy benzynowe (w tym hybrydowe pojazdy elektryczne), 32% diesle, a 1,6% – auta ICEV na gaz (CNG i LPG). W ostatnim czasie w Europie odnotowano wzrost udziału pojazdów PHEV, który zwiększył się z 1% nowej sprzedaży w roku 2019 do 5% w 2020, a także samochodów typu BEV – z 2% w 2019 do 6% w roku 2020 [203]. Dodatkowo auta FCEV są dyskutowane jako potencjalny typ układu napędowego do samochodów osobowych w krajach europejskich. Opierając się na reprezentatywnych charakterystykach pojazdów wymienionych sześć typów układów napędowych porównano w ramach najpopularniejszych segmentów samochodów osobowych w Europie, a mianowicie małych aut z segmentu A i B (18% nowych rejestracji w 2020 r.), niższych średnich z segmentu C (23%) i segmentu SUV-ów (37%) [62].

W przypadku pojazdów typu ICEV i BEV charakterystyki pojazdów, zużycie paliwa i energii elektrycznej oraz pojemność akumulatora odpowiadają średnim wartościom segmentów samochodów zarejestrowanych w Unii Europejskiej i Wielkiej Brytanii w roku 2020 (dane pochodzące z EV-Volumes – światowej bazy danych sprzedaży pojazdów elektrycznych). PHEV cechują się dużo większą różnorodnością, z tego względu w ramach niniejszych badań były one reprezentowane przez dwa najpopularniejsze modele – BMW 225xe i Mitsubishi Outlander PHEV. Oba wymienione auta odpowiadały kolejno za 60% sprzedaży aut PHEV z segmentu niższego średniego i 37% sprzedaży SUV-ów PHEV w Europie w roku 2020. Analizy dotyczące FCEV opierały się z kolei na dwóch modelach, które zostały zarejestrowane w znaczących ilościach w Europie w 2020 roku – Toyocie Mirai (segment niższy średni) i Hyundai Nexu (SUV). W segmencie małych samochodów osobowych w 2020 roku w Europie nie były powszechnie dostępne żadne modele PHEV ani FCEV [62].

Wzięte pod uwagę w niniejszej analizie zużycie paliwa i energii elektrycznej odpowiadało średniemu rzeczywistemu zużyciu. W przypadku zużycia paliwa przez pojazdy ICEV średnie laboratoryjne wartości zużycia paliwa zgodne z tzw. nowym europejskim cyklem jazdy (NEDC – ang. *New European Driving Cycle*) zostały sko-

rygowane o średnie odchylenie wartości zgłoszonych przez konsumentów [64]. Rzeczywiste zużycie paliwa przez pojazdy PHEV przyjęto na podstawie średnich wartości zgłaszanych przez kierowców na stronie internetowej *spritmonitor.de* [84]. Dla pojazdów typu BEV średnie wartości zużycia energii elektrycznej wyznaczono na podstawie tzw. światowej zharmonizowanej procedury testowej pojazdów lekkich (WLTP – ang. *World Harmonized Light Vehicle Test Procedure*), a następnie dostosowano do rzeczywistych warunków na podstawie ich średniego odchylenia od wartości zużycia energii elektrycznej określonego przez uznawany za bardziej wiarygodny ADAC Ecotest, opracowany przez Allgemeiner Deutscher Automobil-Club [243]. Przyjęte zużycie wodoru przez FCEVs bezpośrednio odpowiada wartościom z ADAC Ecotest.

W przypadku emisyjności przeciętnej mieszanki benzyny, oleju napędowego i gazu ziemnego uwzględniono udział biopaliw wynoszący 5% obj. etanolu (E5), 7% obj. biodiesla i uwodornionego oleju roślinnego (HVO) (B7) oraz 3,4 obj. biometanu [125]. Analiza uwzględnia obecny średni udział odpowiednich surowców w postaci etanolu, biodiesla, HVO i biometanu, a także prognozy zmian tych udziałów w kierunku spełnienia wymagań dyrektywy UE w sprawie odnawialnych źródeł energii (RED II).

E-paliwa nie są zawarte w przeciętnych mieszankach paliwowych. Według Niemieckiej Narodowej Platformy ds. Przyszłości Mobilności (NPM – ang. *German National Platform on the future of Mobility*) pierwsze zakłady produkujące e-paliwa na dużą skalę (100 000 Mg lub 4 PJ e-paliw rocznie) pojawią się około roku 2028 [318]. Przewiduje się zatem, że produkcja e-paliw zacznie rosnąć dopiero w latach 2030–2040, a ze względu na wysokie koszty produkcji wymagać będzie wsparcia finansowego w wysokości od 2 do 3 euro za litr ekwiwalentu oleju napędowego, w okresie od 2030 do 2050 roku [276]. Biorąc pod uwagę powyższe, w ramach prowadzonych analiz przyjęto, że e-paliwa nie będą dostępne w żadnej istotnej ilości przez cały okres eksploatacji samochodów zarejestrowanych w roku 2020.

Na potrzeby prowadzonych analiz przyjęto, że samochody zarejestrowane w Europie są używane przez średni okres 18 lat [77, 190, 297]. Jako podstawę tego założenia oparto się na średnim wieku pojazdów wycofanych z eksploatacji w kilku krajach: w Niemczech w latach 2014–2016 wynosił on 17–18 lat [77], we Francji w roku 2018 był równy 19 lat [297], natomiast w Portugalii i Polsce w 2015 r. wynosił 20 lat [190]. Pod uwagę wzięto również średni wiek pojazdów w Grecji, Rumunii, Estonii i na Litwie w 2018 r., który zawierał się w zakresie od 16 do 17 lat [76]. Ponieważ wyżej wymienione liczby odnoszą się do aut, które zostały zarejestrowane około dwie dekady temu, a długość eksploatacji pojazdów z każdym rokiem rośnie [76], założenie 18-letniego cyklu istnienia samochodów zarejestrowanych w 2020 i 2050 r. można uznać za ostrożny szacunek.

Krótsze cykle istnienia pojazdów stosowane we wcześniejszych badaniach LCA dostępnych w literaturze mogą odnosić się do średniego wieku samochodów wyrejestrowanych w danym kraju, np. 13 lat w Niemczech w latach 2005–2009 [78] lub 14 lat w Wielkiej Brytanii w latach 2012–2013 [66]. W przypadku krajów, które eksportują dużą liczbę

używanych samochodów, takich jak Niemcy [77] czy też odmiennych państw europejskich [189, 246], pojazdy te są dalej eksploatowane w innych krajach, dlatego liczba 13–14 lat nie oddaje pełnego okresu eksploatacji auta. Przy średnim przebiegu rocznym dla samochodów segmentu małych (A i B), niższych średnich (C) i SUV-ów wynoszącym odpowiednio ok. 11 000, 13 500 i 15 000 km/rok [18], zakres ich eksploatacji oszacowano kolejno na 198 000, 243 000 i 270 000 km. Z danych niemieckiego badania mobilności wywnioskowano ponadto, że roczny przebieg samochodów osobowych zmniejsza się o około 5% rocznie. W związku tym miksy paliwowo-elektryczne w pierwszych latach pojazdów mają większy destrukcyjny wpływ na otoczenie niż miksy, które będą charakterystyczne dla lat pod koniec ich cyklu istnienia [18].

3.4.3. Wytwarzanie, eksploatacja i zagospodarowanie użytkowe

Analizowana literatura różni się znacznie pod względem celu i zakresu oraz poziomu szczegółowości, z jakim uwzględniono wpływ wytwarzania, eksploatacji i zagospodarowania użytkowego rozpatrywanych pojazdów. W przypadku wytwarzania środków transportu samochodowego zidentyfikowano trzy rodzaje badań:

- badania przeglądowe – koncentrujące się na etapie eksploatacji, zazwyczaj wykorzystujące zagregowane dane z obszaru produkcji pojazdów, które są pobierane z różnych źródeł i tylko w przybliżeniu odzwierciedlają specyficzne różnice między analizowanymi autami [np. 244]. Badania te zazwyczaj ograniczają się do analizy emisji gazów cieplarnianych;
- akademickie oceny LCA dotyczące ogólnych typów pojazdów – zazwyczaj skupiają się na porównywaniu poszczególnych technologii [np. 109, 113]. Komponenty i materiały są zwykle rozpatrywane na wyższym poziomie szczegółowości, a dalsze dane często są dokumentowane. Badania te zwykle są stosunkowo ogólne i nie zakładają analizy konkretnego modelu pojazdu. Dane wejściowe są kompilowane z różnych źródeł, takich jak inne badania, ogólnodostępne bazy danych, dane producentów itd. Analizy te często wykorzystują podejście modułowe oparte na komponentach, uwzględniają szczegółowe składy materiałowe i szacują zużycie energii oraz materiałów pomocniczych wykorzystywanych w procesie produkcyjnym;
- badania zlecane przez producentów dotyczące konkretnych modeli pojazdów [np. 9, 23, 54, 55, 314, 315]. Wykorzystują głównie dane pierwotne od producentów i ich dostawców, ale publikowane są tylko wyniki zagregowane, a nie dane szczegółowe.

Z jednej strony wykorzystanie zagregowanych wartości z innych badań jest podejściem bardzo praktycznym. Z drugiej strony zróżnicowane i specyficzne dla konkretnego pojazdu podejście jest bardziej przejrzyste oraz nadaje się do przeprowadzenia analiz uwzględniających zróżnicowanie czasowe i przestrzenne. W związku z tym w odniesieniu do analiz przeprowadzonych w niniejszej monografii uznano za zasadne podejście metodologiczne tożsame z podejściem akademickich LCA, przy jednoczesnym zapewnieniu wystarczającego poziomu

szczególności, aby uwzględnić wszystkie istotne różnice w specyfikacji rozpatrywanych segmentów pojazdów. Podejście to obejmuje stosowanie zróżnicowanych składów materiałów, ale w sposób modułowy i komponentowy, a następnie łączenie ich z wartościami dla materiałów z powszechnie akceptowanych baz danych (Ecoinvent).

Rozważane w niniejszym opracowaniu cykle istnienia środków transportu samochodowego uwzględniają emisje pochodzące z wytwarzania, eksploatacji i recyklingu pojazdów (tzw. podejście „od kołyski go grobu” – ang. *cradle to grave*). W tabeli 3.6 zestawiono przyjęte granice emisji rozważanych w cyklach istnienia obiektów badań, z uwzględnieniem tych na etapie eksploatacji.

Tab. 3.6. Zakres emisji uwzględniony w cyklach istnienia analizowanych środków transportu samochodowego

Element/etap	Uwzględniony zakres
Układ napędowy i pozostała część pojazdu	<ul style="list-style-type: none"> wytwarzanie pojazdu, w tym wydobycie surowców i ich przetwarzanie, produkcja elementów oraz ich montaż recykling elementów pojazdu
Akumulator	<ul style="list-style-type: none"> wytwarzanie akumulatorów, w tym wydobycie surowców i ich przetwarzanie, produkcja elementów oraz ich montaż nie uwzględniono: wtórnej eksploatacji
Instalacja wodorowa	<ul style="list-style-type: none"> wytwarzanie zbiornika na wodór i ogniwa paliwowego, w tym wydobycie surowców i ich przetwarzanie, produkcja elementów oraz ich montaż nie uwzględniono: wtórnej eksploatacji
Eksploatacja (z wyłączeniem cyklu paliwowego)	<ul style="list-style-type: none"> wymiana materiałów eksploatacyjnych (opon, płynu chłodniczego itd.)

Z przeprowadzonego przeglądu literatury wynika, że liczba badań, które uwzględniają pełną eksploatację pojazdów (nie tylko zużycie paliwa i/lub energii elektrycznej), jest niewielka. Ze względu na niski stopień istotności znaczenia wymiany zużytych części, napraw czy zabiegów konserwacyjnych w perspektywie całego cyklu istnienia samochodu często wykorzystywane są podstawowe informacje pobierane bezpośrednio z różnych baz z zakresu eksploatacji konkretnych pojazdów. W niniejszym badaniu również zastosowano uproszczone podejście, opierające się na uśrednionych danych z baz biorących pod uwagę doświadczenia użytkowników pojazdów, które uznano za wystarczające, uwzględniając fakt, że nie ma ono dużego udziału w całkowitym wpływie na otoczenie cyklu istnienia auta.

Emisje z etapu wytwarzania i recyklingu układu napędowego oraz pozostałej części samochodu zostały oparte na wskaźnikach specyficznych dla danego typu zespołu napędowego (w Mg emisji na Mg samochodu) oraz średniej masie segmentowej aut zarejestrowanych w analizowanym regionie w roku 2020. Założono, że przy ciągłej

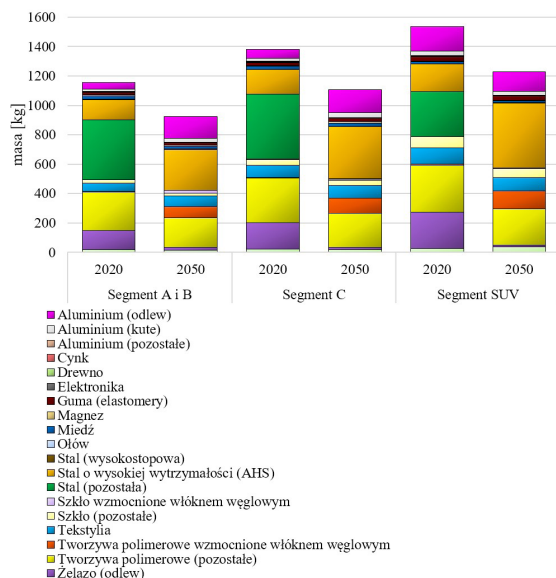
dekarbonizacji gospodarki współczynniki te będą niższe w roku 2050, a masa pojazdu – zmaleje [116].

W Unii Europejskiej i Wielkiej Brytanii średnia masa samochodów w segmencie małych (A i B), niższych średnich (C) i SUV-ów zarejestrowanych w 2020 r. wyniosła odpowiednio 1155 kg, 1382 kg i 1537 kg [62]. Zakłada się, że w przypadku cykli istnienia samochodów do roku 2050 emisje szkodliwych substancji zmniejszą się o ok. 15% [116].

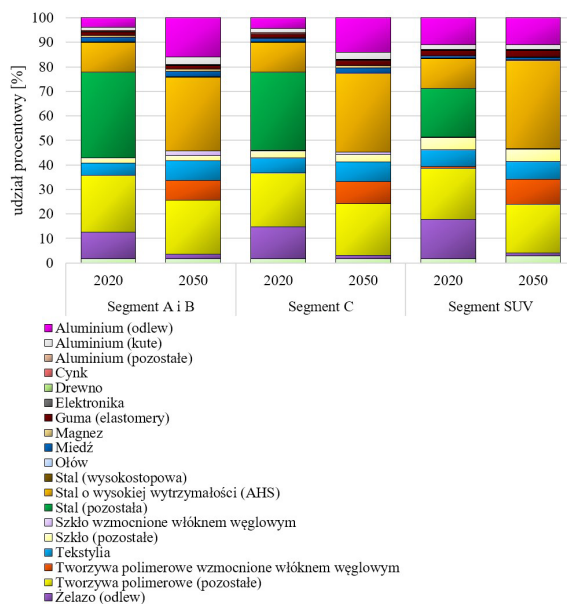
Zarówno w przypadku samochodów zaliczanych do segmentu A, B, C, jak i SUV w perspektywie kolejnych 30 lat masa pojazdów ma ulec zmniejszeniu łącznie o ok. 20%. Współcześnie szczególnie dużym udziałem masowym we wszystkich wymienionych typach pojazdów wyróżnia się stal, tworzywa polimerowe oraz żelazo. Prognozuje się, że dla aut zarejestrowanych w roku 2050 zwiększy się udział stali o wysokiej wytrzymałości, aluminium oraz tworzyw polimerowych wzmacnianych włóknem węglowym, z kolei zmniejszy się – udział żelaza, pozostałych rodzajów tworzyw polimerowych oraz innych typów stali (rys. 3.7).

Dla pojazdów zarejestrowanych w roku 2020 widoczne jest, że wyższy procentowy udział stali w masie samochodu charakterystyczny jest dla aut z segmentu A i B oraz C, dla żelaza odnotowano sytuację odwrotną – najwyższy jego udział procentowy cechuje pojazdy z segmentu SUV, natomiast w przypadku tworzyw polimerowych jest on porównywalny dla wszystkich rozpatrywanych segmentów. Prognozuje się, że dla samochodów zarejestrowanych w roku 2050 najwyższy udział procentowy stali i żelaza będzie cechował auta z segmentu SUV, aluminium – pojazdów z segmentu A i B, a tworzyw polimerowych – będzie podobny dla wszystkich segmentów (rys. 3.8).

Założenia związane z produkcją akumulatorów dla samochodów typu BEV i PHEV zostały wyznaczone na podstawie współczynników emisyjności uśrednionych dla całego regionu, rozpatrywanego przedziału czasowego oraz pojemności baterii. W przypadku pojazdów zarejestrowanych w roku 2020 współczynniki emisji podczas wytwarzania akumulatorów zostały oparte na najbardziej powszechnym składzie chemicznym baterii, czyli bateriach NMC622-grafitowych (NMC – ogniwa niklo-manganowo-kobaltowe) oraz europejskim miksie rynku baterii dla roku 2020. W przypadku aut, których zarejestrowanie jest prognozowane w 2050 roku, czynniki te odpowiadały akumulatorom grafitowym NMC811, produkowanym w Europie. Pojemności akumulatorów brano pod uwagę dla pojazdów BEV w roku 2020 stanowiły średnie rynkowe dla danego segmentu w tym roku, z kolei dla samochodów PHEV odpowiadały reprezentatywnym modelom. Założono spadek kosztu zakupu baterii oraz zwiększenie ich pojemności zarówno dla aut BEV, jak i PHEV. Ze względu na niepewność dotyczącą żywotności akumulatorów podczas badań nie wzięto pod uwagę opcji ponownej eksploatacji baterii (ang. *second-life applications*) [106].



Rys. 3.7. Uproszczony skład materiałowy samochodów osobowych segmentu A i B, C oraz SUV zarejestrowanych w roku 2020 i 2050 (prognoza). Opracowanie własne na podstawie analizy literatury oraz danych pozyskanych od producentów



Rys. 3.8. Udział kluczowych materiałów w konstrukcji samochodów osobowych segmentu A i B, C oraz SUV zarejestrowanych w roku 2020 i 2050 (prognoza). Opracowanie własne na podstawie analizy literatury oraz danych pozyskanych od producentów

Zarówno w przypadku samochodów z 2022, jak i 2050 r. prowadzona analiza uwzględniała niższy poziom emisji szkodliwych substancji podczas produkcji akumulatorów w porównaniu z większością wcześniejszych badań dostępnych w literaturze. Ta różnica jest spowodowana uwzględnieniem wyłącznie najnowszych danych dotyczących ich produkcji, stanu wiedzy na temat chemii najnowocześniejszych baterii oraz danych nt. regionalnych udziałów w produkcji i imporcie. Składają się one na szacunkowe emisje związków chemicznych z wytwarzania baterii dla pojazdów typu BEV, które są bardzo podobne do emisji z produkcji systemu wodorowego w pojazdach typu FCEV (stanowiącego zaledwie około jednej trzeciej całkowitych emisji pochodzących z etapu wytwarzania pojazdów typu BEV) [20].

Wielkość szkodliwych emisji występujących podczas produkcji baterii różni się w zależności od ich składu chemicznego. Współczesne modele BEV i PHEV są w większości wyposażone w baterie grafitowe NMC622 i NCA (ogniwa niklowo-kobaltowo-glinowe). Wcześniej używane baterie grafitowe NMC111 zostały wycofane z rynku [284]. W odróżnieniu od wcześniejszej literatury [m.in. 53, 73, 140], w niniejszym badaniu dla samochodów z roku 2020 rozważano akumulatory NMC622-grafitowe zamiast NMC111-grafitowych. Tabela 3.7 pokazuje przykład różnic w emisji gazów cieplarnianych powstających podczas wytwarzania baterii z różnymi materiałami katodowymi w 2020 roku dla obszaru geograficznego Europy.

Tab. 3.7. Emisje gazów cieplarnianych na etapie wytwarzania akumulatorów litowo-jonowych o różnej chemii katod dla obszaru geograficznego Europy w 2020 r. Opracowanie własne na podstawie [20]

Rodzaj akumulatora	Emisja gazów cieplarnianych [kg CO ₂ eq /kWh] dla obszaru geograficznego Europy
NMC111-grafitowy	56
NMC622-grafitowy	54
NMC811-grafitowy	53
NCA-grafitowy	57
LFP-grafitowy	34–39

Wartości w tabeli 3.7. były ważone odpowiednimi udziałami akumulatorów wyprodukowanych w 2020 r. lub importowanych (dane pochodzące z bazy EV-Volumes). Poziom emisji gazów cieplarnianych przeciętnego akumulatora używanego w nowych samochodach w Europie odpowiada 60 kg ekwiwalentu CO₂/kWh [20].

W tabeli 3.7 średnie poziomy emisji GHG zostały połączone z pojemnościami akumulatorów dla pojazdów typu BEV i PHEV w rozważanych segmentach aut. W przypadku pojazdów typu BEV w Europie pojemności akumulatorów odpowiadają średnim ważonym nowo zarejestrowanych pojazdów w roku 2020 (dane z bazy EV-Volumes). Dla pojazdów PHEV pojemności akumulatorów zostały pobrane z baz danych dla reprezentatywnych modeli.

W przypadku pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, w badaniu uwzględniono akumulatory grafitowe NMC811 jako dominujące [284]. Dodatkowo wraz ze wzrostem zdolności produkcyjnych baterii założono, że akumulatory używane w samochodach w 2050 r. zostaną w całości wyprodukowane w Europie. Ponadto ze względu na zmniejszenie emisyjności dostaw energii ulepszenia technologii produkcji baterii oraz efekt skali przyjęto, że szkodliwe emisje powstałe podczas produkcji baterii NMC811-grafitowych będą o ok. 20% niższe w roku 2050 w porównaniu z wartością z 2020 r. Jednocześnie ze względu na niższe koszty produkcji i zwiększoną energię właściwą założono, że pojemność baterii zarówno w pojazdach typu BEV, jak i PHEV wzrośnie o ok. 20% w 2050 roku (w porównaniu z obecnymi modelami) [161, 232].

Tab. 3.8. Pojemność baterii i emisje gazów cieplarnianych na etapie wytwarzania akumulatorów dla pojazdów typu BEV i PHEV zarejestrowanych w Europie w 2020 r. Opracowanie własne na podstawie [20]

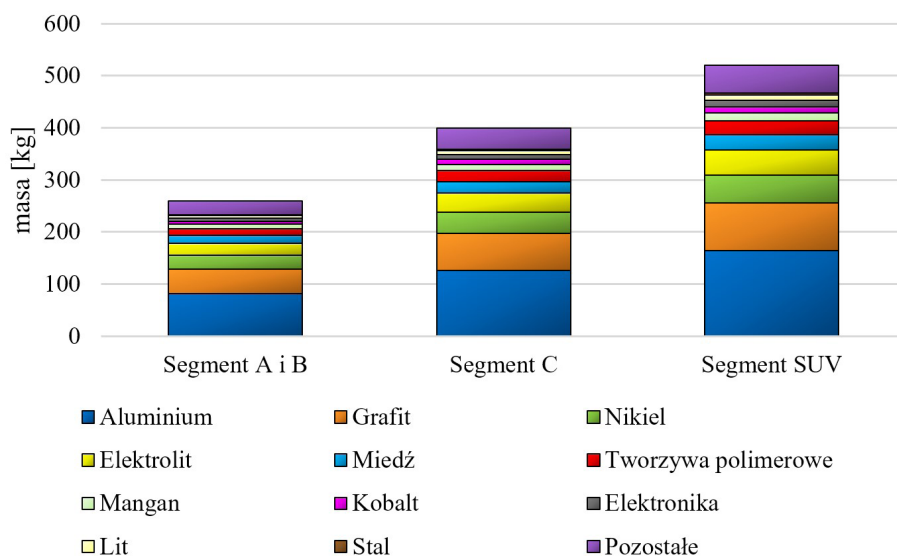
Obszar geograficzny	Typ pojazdu	BEV		PHEV	
		Pojemność baterii [kWh]	Emisja GHG [Mg CO ₂ eq]	Pojemność baterii [kWh]	Emisja GHG [Mg CO ₂ eq]
Europa [60 kg CO ₂ eq/kWh]	mały (segment A i B)	45,0	2,7	–	–
	niższy średni (segment C)	45,0	2,7	9,7	0,6
	SUV	70,0	4,2	13,8	0,8

Prognozuje się, że obecnie używane akumulatory litowo-jonowe zapewnią od 1500 do 15 000 cykli ładowania i rozładowania (do poziomu 80% początkowej pojemności) [79]. Ten szeroki zakres odzwierciedla fakt, że cykl istnienia baterii cechuje się dużym zróżnicowaniem, w zależności od materiału elektrody, a także warunków użytkowania, takich jak szybkość ładowania i rozładowania, czas przechowywania oraz temperatura. W przypadku ogniw grafitowych NMC532 długoterminowe eksperymenty ładowania i rozładowania wykazują 90–95% pojemności początkowej, nawet po 3000 pełnych cyklach ładowania i rozładowania. Dla pojazdów typu BEV o zasięgu 200–400 km 3000 cykli odpowiada od 600 000 do 1 200 000 km, czyli kilkakrotnie więcej niż przeciętny przebieg w cyklu życia samochodu osobowego. Baterie potencjalnie mogłyby być zatem wykorzystywane ponownie [106].

Największa masa akumulatora wyróżnia pojazdy zaliczane do segmentu SUV, a najmniejsza – auta segmentu A i B. Najwyższym udziałem masowym w bateriach samochodów wszystkich rozważanych segmentów cechuje się aluminium (ok. 30%), grafit (ok. 20%) oraz nikiel (ok. 10%). Masa elektrolitu stanowi ok. 10% masy całej baterii (rys. 3.9).

Przewiduje się również, że pod koniec cyklu istnienia pojazdów elektrycznych wyprodukowanych w latach 2020 i 2050, czyli w perspektywie roku 2040 i 2070, akumulatory będą w dużym stopniu poddawane recyklingowi [284]. Wpływ na

poziom emisji szkodliwych związków chemicznych będzie miało również stosowanie materiałów pochodzących z recyklingu zamiast materiałów pierwotnych, a jego poziom będzie istotnie zależał od tworzyw, z których wykonane zostaną elektrody, i stosowanych procesów recyklingu [46]. Szacuje się, że w przypadku akumulatorów grafitowych NMC622 wykorzystujących kobalt, nikiel i (w pewnych przypadkach) lit, dzięki recyklingowi, niebezpieczne emisje występujące na etapie produkcji mogłyby zostać obniżone nawet o 14–25% (odpowiada to proponowanemu przez Komisję Europejską celowi poziomu recyklingu wynoszącemu 95% dla Co i Ni oraz 70% dla Li) [214].



Rys. 3.9. Uproszczony skład materiałowy baterii samochodów osobowych segmentu A i B, C oraz SUV zarejestrowanych w roku 2020 i 2050 (prognoza). Opracowanie własne na podstawie analizy literatury oraz danych pozyskanych od producentów

W przypadku pojazdów FCEV emisje odpowiadające zbiornikom wodorowym i ogniwom paliwowym różnią się od siebie w zależności od pojemności zbiornika i pochodzą głównie z bardzo energochłonnej produkcji wzmacnianego włóknami węglowymi tworzywa polimerowego niezbędnego do jego wytworzenia. Analogicznie jak w przypadku akumulatorów pojazdów typu BEV i PHEV założono, że instalacje wodorowe będą produkowane z około 20% niższą emisją szkodliwych substancji w roku 2050. Współcześnie materiały z tworzyw polimerowych wzmacnianych włóknem węglowym najczęściej zostają spalane lub umieszczone na wysypiskach odpadów. W przyszłości emisje w cyklach istnienia instalacji wodorowych mogą jednak zostać zmniejszone, ze względu na obecnie opracowywane, bardziej efektywne procesy recyklingu [137].

Podczas etapu eksploatacji wszystkich środków transportu samochodowego wymiana elementów pojazdu, takich jak opony, części układu wydechowego, układu oczyszczania spalin oraz materiałów eksploatacyjnych, np. płynu chłodniczego czy oleju, skutkuje emisjami szkodliwych związków chemicznych do otoczenia. Pojazdy typu BEV i FCEV, w porównaniu z ICEV i PHEV, wymagają wymiany tylko niektórych ze wspomnianych materiałów i elementów, zatem cechują się nieco niższym poziomem emisji związanych z eksploatacją (z wyłączeniem analiz w zakresie cyklu paliwowego).

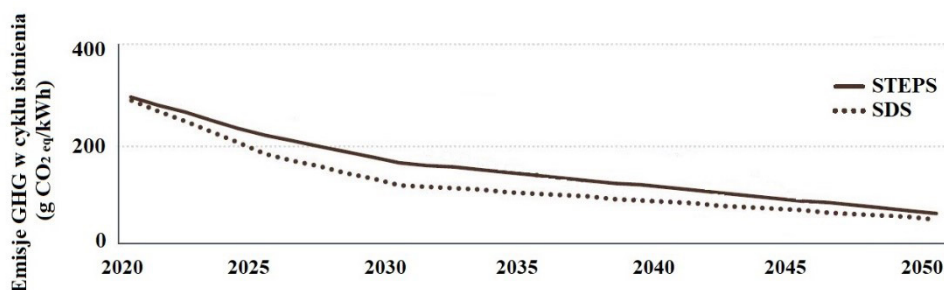
Wykorzystane w prowadzonych badaniach przebiegi eksploatacyjne oparto na średnim okresie eksploatacji pojazdów zarejestrowanych w Europie w roku 2020, tych, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 (w połączeniu z krzywymi przebiegu rocznego, zależnego od wieku auta oraz danymi dotyczącymi średnich rocznych przebiegów). Wartości zostały dostosowane do segmentu rozpatrywanych samochodów, przy czym założono, że są one porównywalne dla wszystkich typów układów napędowych. Przyjęto także, że pojazdy były eksploatowane na analizowanym obszarze geograficznym (Europa) w ciągu całego cyklu istnienia – nie założono ich potencjalnego eksportu do innych regionów.

Biorąc pod uwagę ciągle wysiłki na rzecz dekarbonizacji sieci elektroenergetycznych, założono, że samochody typu BEV będą cechowały się zużyciem mniej destrukcyjnej dla otoczenia energii elektrycznej z każdym kolejnym rokiem eksploatacji. Każda prognoza przyszłego miks elektroenergetycznego wiąże się jednak z dużą niepewnością, w wyniku czego badania w ramach niniejszej monografii porównują założenia stosunkowo realistycznego scenariusza odpowiadającego polityce Międzynarodowej Agencji Energetycznej (STEPS) z bardziej optymistycznymi prognozami opracowanego przez nią scenariusza zrównoważonego rozwoju (SDS) [199]. Scenariusz SDS przewiduje postępy w sektorze energetycznym, które są zgodne z celami porozumienia paryskiego.

Miksy energetyczne są połączone z danymi globalnej średniej emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu istnienia, wyznaczonymi przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC) [20], z uwzględnieniem różnych technologii wytwarzania energii elektrycznej [204] oraz skorygowanymi o straty przesyłowe i dystrybucyjne w sieciach elektrycznych [197]. Wyniki tych analiz dla zużycia energii elektrycznej w Europie przedstawiono na rysunku 3.10.

Tak jak już wspomniano, ze względu na fakt, iż pojazdy typu BEV i FCEV zużywają mniej materiałów eksploatacyjnych, założono, że cechują je niższe emisje szkodliwych substancji związanych z eksploatacją (w przypadku braku uwzględnienia oddziaływania cyklu paliwowego). Z kolei samochody z silnikiem diesla zużywają mocznik w procesie oczyszczania spalin, dlatego też przyjęto, że wykazują one wyższe emisje związane z eksploatacją (również w przypadku braku uwzględnienia wpływu cyklu paliwowego).

Wartości zużycia paliwa i energii elektrycznej stosowane dla poszczególnych typów układów napędowych w niniejszym opracowaniu zostały oparte w większości na średnich ważonych rejestracji nowych samochodów w roku 2020, z uwzględnieniem podziału na segmenty. Średnie zaczerpnięto z oficjalnych wartości testowych, a następnie skorygowano o wartości z baz danych opierających się na rzeczywistych doświadczeniach użytkowników, tak aby odzwierciedlić zużycie w realnych warunkach jazdy, w tym wielkość strat podczas ładowania [302].



Rys. 3.10. Emisje gazów cieplarnianych w cyklu istnienia zużycia energii elektrycznej wyznaczone na podstawie miksów energii elektrycznej krajów europejskich, zgodnie z założoną polityką Międzynarodowej Agencji Energetycznej (STEPS) i scenariuszem zrównoważonego rozwoju (SDS), współczynnikami emisji gazów cieplarnianych IPCC oraz z uwzględnieniem strat energii w sieciach. Opracowanie własne na podstawie [20, 197, 204]

W przypadku pojazdów PHEV zużycie paliwa i energii elektrycznej zależy od tego, jaka część jazdy odbywa się w trybie głównie z rozładowywaniem baterii (ang. *electric charge-depleting* – CD), a jaka – w trybie podtrzymywania ładowania (ang. *engine charge-sustaining* – CS). W trybie CD silnik elektryczny jest zasilany przez silnik spalinywy, jest to zatem mieszany tryb silnika elektrycznego i spalinowego, a nie tryb z napędem wyłącznie elektrycznym. W oficjalnych wartościach testowych zużycie paliwa i energii elektrycznej w trybach jazdy CD i CS jest ważne albo przez założony udział zależny od zakresu trybu CD (tak jak w tzw. ogólnoświatowej procedurze testowej pojazdów lekkich, ang. *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure* – WLTP), albo przez założony udział całkowicie elektryczny zależny od zasięgu elektrycznego (tak jak w tzw. nowym europejskim cyklu jazdy, ang. *New European Driving Cycle* – NEDC). Zasięg całkowicie elektryczny jest określany jako część zakresu trybu CD, w którym silnik spalinowy nie pracuje [262].

Wartości z testów WLTP i NEDC zakładają, że każdego dnia jazdy pojazdy PHEV są uruchamiane z w pełni naładowanym akumulatorem i jeżdżą w trybie CD tak długo, jak pozwala na to bateria. Przeciętni użytkownicy PHEV ładują swoje samochody rzadziej niż raz dziennie. W połączeniu z niższym zasięgiem w trybie elektrycznym i wyższym zużyciem paliwa w trybie CS – średnie rzeczywiste zużycie paliwa poszczególnych modeli PHEV jest od dwóch do czterech razy wyższe niż wskazywane

przez wartości z testów NEDC lub WLTP. Różnice w korzystaniu z PHEV występują między użytkownikami samochodów prywatnych i służbowych, a także między badanymi krajami europejskimi. Zużycie paliwa różni się również pomiędzy poszczególnymi modelami PHEV, a podawane przez użytkowników wartości jego zużycia są dostępne tylko dla ograniczonej liczby modeli aut. Z tego względu rzeczywiste zużycie energii elektrycznej wazone udziałem napędu można oszacować tylko dla poszczególnych modeli PHEV. W związku z tym w ramach przeprowadzonej analizy oceniono rzeczywiste wartości zużycia paliwa i energii elektrycznej przez pojazdy PHEV w odpowiednich segmentach w Europie, przy użyciu średnich danych zgłaszanych przez użytkowników z reprezentatywnych modeli [242].

Średnie rzeczywiste zużycie paliwa przez nowe samochody benzynowe, z silnikiem diesla i CNG w Europie zestawiono w tabeli 3.9. Zaprezentowane dane oparto na średnim zużyciu paliwa w ramach założeń NEDC (nowego europejskiego cyklu jazdy) dla danego segmentu przez nowe samochody zarejestrowane w Europie w roku 2020 [62] oraz zgłaszane przez kierowców rzeczywiste odchylenia od NEDC wynoszące +37% dla konwencjonalnych samochodów benzynowych i CNG, +50% dla hybrydowych pojazdów elektrycznych (HEV) oraz +44% dla samochodów z silnikiem diesla [64].

Tabela 3.9. Średnie rzeczywiste wartości zużycia paliwa i energii elektrycznej dla samochodów segmentu A i B, C oraz SUV zarejestrowanych w Europie w roku 2020. Opracowanie własne na podstawie [62, 64, 242, 262, 302]

Zużycie paliwa [l lub kg] i energii elektrycznej [kWh] na 100 km	Rodzaj pojazdu		
	Maly (segment A i B)	Niższy średni (segment C)	SUV
ICEV benzyna [l]	6,5	7,1	7,9
ICEV olej napędowy [l]	5,4	5,9	7,2
ICEV CNG [kg]	4,5	5,0	5,1
PHEV benzyna [l + kWh]	–	4,1 + 12,1	4,0 + 14,8
BEV [kWh]	19,9	20,6	21,9
FCEV [kg]	–	1,0	1,2

Przyjęte zużycie paliwa i energii elektrycznej przez pojazdy PHEV w segmencie niższym średnim oraz dla SUV-ów opierało się na danych BMW 225xe (wariant: 2019, pojemność akumulatora: 8,8 kWh, moc silnika: 165 kW) oraz Mitsubishi Outlander PHEV (wariant: 2019, pojemność akumulatora: 13,8 kWh, moc silnika: 165 kW). Z udziałami w rynku wynoszącymi odpowiednio 60% i 37% te dwa najpopularniejsze modele odpowiadają większej części PHEV zarejestrowanych w segmencie niższym średnim i SUV-ów w Europie w roku 2020 [62]. Według danych dotyczących średniego zużycia paliwa zgłaszanych przez użytkowników niemieckiej strony internetowej spritmonitor.de [84] 4,1 l/100 km dla rozpatrywanego modelu BMW 225xe i 4,0 l/100 km dla analizowanego modelu Mitsubishi Outlander PHEV są uważane przez kierowców za wartości rzeczy-

wiste. W przypadku obu modeli dane te są dwukrotnie wyższe niż wartości zużycia paliwa zgodne z założeniami NEDC (nowego europejskiego cyklu jazdy), które wynoszą kolejno 1,9 l/100 km (BMW) i 1,8 l/100 km (Mitsubishi). W przypadku zużycia energii elektrycznej przez te pojazdy do analiz wykorzystano dane z ADAC Ecotest [243]. Dzięki temu testowi uzyskiwane są oddzielne wartości zużycia paliwa i energii elektrycznej dla trybu głównie z rozładowywaniem baterii (CD) oraz trybu podtrzymywania ładowania (CS) (tab. 3.10) oraz zostają uwzględnione straty podczas ładowania. Na podstawie tych danych oraz podanego przez użytkowników zużycia paliwa (4,1 l/100 km dla BMW 225xe i 4,0 l/100 km dla Mitsubishi Outlander) obliczono średnie udziały napędu w trybie CD na poziomie 69% i 63%. Ważone tymi udziałami średnie zużycie energii elektrycznej obu modeli odpowiada kolejno 12,1 kWh/100 km (BMW) i 14,8 kWh/100 km (Mitsubishi).

Tab. 3.10. Zużycie paliwa i energii elektrycznej reprezentatywnych modeli PHEV w segmencie C i SUV w Europie w roku 2020. Opracowanie własne na podstawie [62, 84, 243]

Model	Tryb CS (dane z ADAC Ecotest)	Tryb CD (dane z ADAC Ecotest)		Średnie zużycie		
	Zużycie paliwa [l/100 km]	Zużycie paliwa [l/100 km]	Zużycie energii elektrycznej [kWh/100 km]	Zużycie paliwa (dane z bazy spritmonitor.de) [l/100 km]	Udział napędu w trybie CD [%]	Zużycie energii elektrycznej [kWh/100 km]
BMW 225xe	7,6	2,5	17,6	4,1	69	12,1
Mitsubishi Outlander PHEV	8,5	1,3	23,7	4,0	63	14,8

Przyjęte w niniejszych analizach zużycie energii elektrycznej przez pojazdy typu BEV początkowo opierało się na średnim zużyciu energii elektrycznej wyznaczonym zgodnie ze światową zharmonizowaną procedurą testową pojazdów lekkich (WLTP) przez pojazdy typu BEV zarejestrowane w Europie w roku 2020 (dane z bazy EV-Volumes). Bardziej realistyczne warunki jazdy niż w przypadku WLTP (w tym straty podczas ładowania) są uwzględniane w ramach ADAC Ecotest, który podaje wartości zużycia energii elektrycznej średnio o 19% wyższe niż analogiczne dla WLTP. W związku z tym w ramach badań skorygowano średnie rynkowe wartości zużycia energii elektrycznej WLTP o wymieniony czynnik. W przypadku wartości zużycia energii elektrycznej zgodnej z NEDC (nowym europejskim cyklem jazdy) wartości uzyskane w ramach ADAC Ecotest są wyższe o 30–40%, co jest poziomem analogicznym do rzeczywistego współczynnika uwzględnianego dla zużycia paliwa w samochodach z silnikami benzynowymi i wysokoprężnymi.

W 2020 roku w Europie zarejestrowano tylko około 500 samochodów osobowych typu FCEV, a prawie wszystkie z nich stanowiła Toyota Mirai lub Hyundai Nexa. W związku z tym te dwa modele były używane w ramach niniejszych analiz jako przedstawiciele odpowiednio segmentu niższego średniego i SUV. Wartości zużycia wodoru ADAC Ecotest są uważane za rzeczywiste i są o 25–33% wyższe niż wartości NEDC (co również uwzględniono w analizach) [62].

Emisje pochodzące z paliwa i energii elektrycznej zużywanych podczas jazdy zostały uwzględnione oddzielnie – w cyklu paliwowym. Obejmują one emisje z produkcji paliwa i energii elektrycznej (tzw. „od studni do zbiornika”, ang. *well to tank* – WTT) oraz zużycie paliwa w pojeździe (tzw. „od zbiornika do koła”, ang. *tank to wheel* – TTW). W tabeli 3.11 przedstawiono przegląd zakresu emisji rozważanych dla różnych paliw i energii elektrycznej w ramach prowadzonych badań.

Tab. 3.11. Zakres emisji uwzględniony w cyklach paliwowych w ramach prowadzonych analiz

Rodzaj paliwa	Uwzględniony zakres
Paliwa kopalne	<ul style="list-style-type: none"> wydobycie ropy naftowej/gazu ziemnego, ich przetwarzanie i transport oraz rafinacja i dystrybucja paliw (z uwzględnieniem wycieków metanu) emisje związane ze zużyciem paliwa przez pojazd
Biopaliwa	<ul style="list-style-type: none"> uprawa roślin i ich zbiór, przetwarzanie oraz transport, aż do wytworzenia biopaliwa i jego dystrybucji pośrednia zmiana użytkowania gruntów pod uprawy roślin emisje związane ze zużyciem paliwa przez pojazd
Energia elektryczna	<ul style="list-style-type: none"> emisje z wytwarzania energii elektrycznej oraz jej przesyłu i dystrybucji (z uwzględnieniem strat)
Wodór	<ul style="list-style-type: none"> wodór z procesu elektrolizy: emisje pochodzące z wykorzystywanej energii elektrycznej, skorygowane o straty podczas procesu elektrolizy i sprężania wodoru wodór z gazu ziemnego i węgla: wydobycie gazu ziemnego/węgla, ich przetwarzanie, transport, reforming parowy/zgazowanie węgla oraz sprężanie wodoru (z uwzględnieniem wycieków metanu) nie uwzględniono: transport wodoru na znaczne odległości

Jednym z obszarów, który zwykle nie jest przedmiotem badań LCA środków transportu samochodowego, jest etap wycofania pojazdu z eksploatacji i jego zagospodarowania użytkowego, jednak wpływ w ramach tej fazy może być znaczący. Główne różnice we wpływie na otoczenie na tym etapie w analizowanej literaturze wynikają z wyboru metody modelowania zagospodarowania użytkowego (choć niektóre wynikają również z różnych źródeł danych).

W niniejszej analizie zastosowano dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów i elementów badanych samochodów osobowych – składowanie na wysypisku odpadów lub recykling.

Podejście do modelowania końca cyklu istnienia (EoL, ang. *end of life*) było w ostatnich latach szeroko dyskutowane w społeczności LCA i chociaż nadal nie ma

ogólnego konsensusu co do jednego najlepszego podejścia, istnieje rosnąca tendencja do korzystania z CFF (ang. *the Circular Footprint Formula*) [154], czyli podejścia metodologicznego upowszechnionego w Unii Europejskiej. Istnieją dwie opcje – pierwsza uwzględniająca przede wszystkim promowanie recyklingu albo druga obejmująca głównie wykorzystanie materiałów wtórnych. CFF opracowano po części w celu uwzględnienia zróżnicowania tego ukierunkowania w przypadku różnych materiałów, ale także dla uwzględnienia innych czynników, takich jak różnice w jakości materiałów wejściowych i wyjściowych. Dlatego wykorzystano właśnie podejście CFF dla scenariusza zagospodarowania użytkowego pojazdów i akumulatorów (scenariusz obejmujący cykl istnienia z uwzględnieniem procesów recyklingu).

W przypadku akumulatorów samochodów elektrycznych istotne jest rozważenie ich ponownego użycia oraz zmiany przeznaczenia. Obszar ten jest nadal na stosunkowo wczesnym etapie badań i dostępnych jest niewiele analiz dotyczących potencjalnych oddziaływań na środowisko w tym zakresie. Pomimo dostępności w literaturze pojedynczych analiz LCA dotyczących powtórnego użycia akumulatorów pojazdów xEV [np. 5, 38] nie opracowano jeszcze wytycznych lub zharmonizowanych podejść umożliwiających wykonanie standaryzowanego porównania. W literaturze widocznymi są różne granice systemowe, m.in. ocena całego okresu eksploatacji baterii xEV lub tylko tych etapów, które bezpośrednio wpływają na ich powtórne użycie.

3.4.4. Energia elektryczna w cyklu istnienia

W zależności od celu, ale także badanych technologii lub systemów obiektów, zakres analizy cyklu istnienia dla wytwarzania energii elektrycznej w rozpatrywanych źródłach literaturowych różnił się znacząco – od ograniczenia analizy do działania zakładu i powiązanych z nim emisji bezpośrednich, aż do całościowego i złożonego podejścia uwzględniającego wszystkie dodatkowe procesy, a także inne istotne czynniki, takie jak:

- wytwarzanie i dostarczanie niezbędnej infrastruktury – obejmujące infrastrukturę samej elektrowni lub wzięcie pod uwagę infrastruktury pozyskiwania surowców, produkcji paliwa, odległości transportu oraz infrastruktury związanej z sieciami przesyłowymi i dystrybucyjnymi;
- produkcja paliw – uwzględnia produkcję paliw, takich jak węgiel kamienny czy gaz ziemny, ale także biomasy, lub paliw jądrowych przez wydobycie (paliwa kopalne i jądrowe) oraz uprawę (biomasa pierwotna). Produkcja paliw do wytwarzania energii z odpadów zwykle obejmuje wyłącznie ich odbiór i transport;
- eksploatacja elektrowni – w tym rzeczywiście produkcja energii przez np. spalanie węgla. Ponadto może być również wzięta pod uwagę konserwacja i inne procesy pomocnicze, takie jak np. usuwanie odpadów;
- przesył i dystrybucja – wraz ze stratami towarzyszącymi mają istotny wpływ na uzyskiwane wyniki analiz, w zależności od charakterystyki badanego systemu (odległości dystrybucji, zastosowanych technologii itd.);

- energia elektryczna jako przedmiot handlu zewnętrznego – rozumiana jako towar sprzedawany z jednego kraju do drugiego lub kilku innych. Ma wpływ na oddziaływanie na otoczenie podczas analizy energii elektrycznej zużywanej w danym kraju, ale nie w nim wytwarzanej. W przypadku analizowanego w niniejszych badaniach obszaru Europy efekty te wzajemnie się znoszą. Mają jednak znaczenie podczas porównywania struktury konsumpcji w danym kraju lub na mniejszą skalę.

Wytwarzanie energii jest możliwe w szerokim spektrum różnych technologii. Wybór jednej z nich prowadzi do odpowiadających jej specyficznych skutków, zarówno pod względem ilości, jak i rodzaju emisji. Większość badań koncentruje się na analizie poziomu emisji gazów cieplarnianych w cyklach produkcji energii (a w mniejszym stopniu na zapotrzebowaniu na energię pierwotną na jednostkę dostarczonej energii, [np. 148]). Jednak niektóre obejmują także dodatkowe kategorie wpływu lub zawierają i agregują je w ramach jednego wskaźnika, np. w ramach metody tzw. „ekologicznego deficytu” (ang. *ecological scarcity*). Niewiele badań podchodzi do oceny następstw środowiskowych w sposób bardziej holistyczny [np. 17, 89, 114, 254, 310]. Jeżeli jednak taka sytuacja ma miejsce, to wszystkie różnią się pod względem zastosowanej oceny wpływu. W większości najnowszych analiz LCA najczęściej omawiane oddziaływania na otoczenie to: potencjał globalnego ocieplenia (ang. *global warming potential*), potencjał zakwaszenia (ang. *acidification potential*), potencjał eutrofizacji (ang. *eutrophication potential*), potencjał fotochemicznego tworzenia ozonu (ang. *photochemical ozone creation potential*), zużycie energii (ang. *energy consumption*) i potencjał toksyczności dla ludzi (ang. *human toxicity potential*).

Różne technologie wytwarzania energii różnią się pod względem etapów cyklu istnienia powodujących najwięcej szkodliwych oddziaływań na otoczenie. Elektrownie węglowe podczas eksploatacji będą wytwarzać większość emisji gazów cieplarnianych (i innych szkodliwych substancji) w perspektywie całego cyklu istnienia. W przeciwieństwie do tego energia elektryczna, np. wytwarzana dzięki zastosowaniu systemów fotowoltaicznych, jest praktycznie bezemisyjna podczas eksploatacji, a większość destrukcyjnych emisji jest związana z procesami poprzedzającymi dostarczanie infrastruktury, takimi jak wydobywanie i przetwarzanie surowców oraz wytwarzanie poszczególnych elementów.

W ramach badań realizowanych na potrzeby niniejszej monografii postanowiono zwrócić szczególną uwagę na poziomy negatywnych następstw środowiskowych występujących na etapie eksploatacji samochodów osobowych xEV zasilanych energią z europejskiego miksu energetycznego.

Emisje szkodliwych substancji w całym cyklu istnienia różnych źródeł energii elektrycznej, przewidywany miks energetyczny w okresie eksploatacji pojazdów oraz straty przesyłowe i dystrybucyjne w sieci elektrycznej stanowiły podstawę do określenia emisyjności energii elektrycznej zużywanej podczas ładowania pojazdów typu BEV i PHEV rozpatrywanych w ramach badań realizowanych w niniejszej monografii. W przypadku odnawialnych źródeł energii, takich jak np. energia wiatru i słonecz-

na, emisje w perspektywie ich całego cyklu istnienia są istotnie mniejsze w porównaniu z pozyskiwaniem energii ze źródeł konwencjonalnych.

W tabeli 3.12 przedstawiono emisje GHG dla cyklu istnienia różnych technologii wytwarzania energii elektrycznej [43, 292]. W przypadku energii odnawialnej emisje gazów cieplarnianych i innych niebezpiecznych substancji chemicznych w całym cyklu istnienia odpowiadają głównie budowie elektrowni (zbliżone do zera oddziaływanie na etapie eksploatacji OZE). Przy ciągłej dekarbonizacji przemysłu w ogóle, a sieci elektroenergetycznej w szczególności, przewiduje się, że w przyszłych elektrowniach emisje te będą się zmniejszać [228].

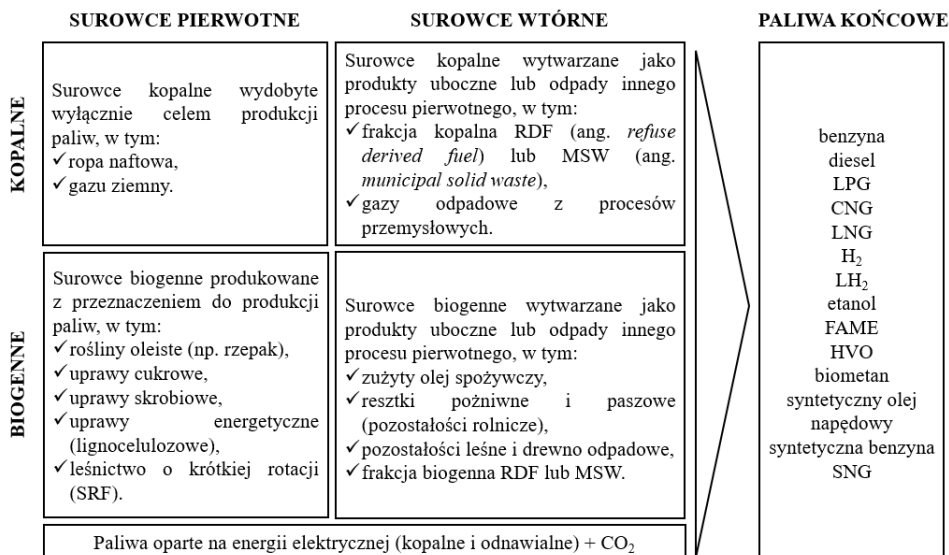
Tab. 3.12. Średnie emisje gazów cieplarnianych dla całego cyklu istnienia wybranych technologii wytwarzania energii elektrycznej. Opracowanie własne na podstawie [43, 228, 292]

Źródło energii	g CO _{2eq} /kWh	g CO _{2eq} /MJ
Spalanie węgla	1001	278
Spalanie ropy	840	233
Spalanie gazu ziemnego	469	130
Elektrownie atomowe	16	4
Elektrownie wykorzystujące biomasę	230	64
Elektrownie geotermalne	45	13
Elektrownie fotowoltaiczne (PV)	46	13
Elektrownie CSP (skoncentrowana energia słoneczna)	22	6
Elektrownie wiatrowe	12	3
Elektrownie pływowe	8	2
Elektrownie wodne	4	1

3.4.5. Produkcja i spalanie paliw

Istnieje wiele publikacji, które próbują ocenić wpływ łańcuchów paliwowych na środowisko, ale znaczna ich część dotyczy wyłącznie emisji gazów cieplarnianych. Większość analizowanych publikacji miała na celu porównanie paliw kopalnych z biopaliwami konwencjonalnymi. Liczba źródeł literaturowych dotyczących nowszych paliw alternatywnych (np. e-paliw i paliw syntetycznych) jest niewielka.

Kategorie paliw oceniane w dostępnej literaturze ilustruje rysunek 3.11. Zarówno w przypadku kategorii kopalnych, jak i biogenicznych paliwa pierwotne (tj. wymagające dedykowanej ekstrakcji lub uprawy surowców, takie jak ropa naftowa, gaz ziemny, rośliny uprawne lub drewno) istotnie różnią się poziomem oddziaływania na otoczenie od paliw wtórnych (tj. wytwarzanych z pozostałości i odpadów generowanych przez inne źródła). Piąta kategoria obejmuje wszystkie paliwa wytwarzane z energii elektrycznej (e-paliwa), w tym wodór oraz inne pochodne paliwa syntetyczne [116].



Rys. 3.11. Klasyfikacja paliw według pierwotnych i wtórnych surowców kopalnych oraz biogenicnych.
Opracowanie własne na podstawie [116]

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury, w odniesieniu do pierwotnych paliw kopalnych (olej napędowy, benzyna, CNG, LNG), zauważono następujące zależności:

- układy napędowe często są porównywane w zakresie WTW (ang. *well-to-wheel*) (w tym źródła energii). Emisje ze spalania stanowią istotny wyróżnik między paliwami kopalnymi, paliwami biogenicznymi i e-paliwami, są one jednak uwzględniane zazwyczaj w ramach etapu TTW (ang. *tank-to-wheel*) cyklu istnienia pojazdu, a zatem nie są brane pod uwagę w ramach WTT (ang. *well-to-tank*);
- do produktów ubocznych można odnosić się na różne sposoby, np. stosować alokację ekonomiczną lub alokację energii (tzw. model ifeu, ang. *the ifeu refinery model*);
- podczas analiz należy uwzględniać wycieki metanu, odpowietrzanie i spalanie, ponieważ stanowią one potencjalnie znaczący wkład w powstające emisje.

W przypadku wtórnych paliw kopalnych (np. etanol z odpadowych gazów przemysłowych) charakterystyczne były następujące założenia:

- podobnie jak dla paliw kopalnych, emisje gazów cieplarnianych ze spalania zostają dodawane do reszty emisji WTT;
- surowce uważane za odpady (np. obornik) zazwyczaj trafiają do systemów LCA bez obciążeń, a zgodnie z obecną polityką Unii Europejskiej pozostałościom, w tym wierzchołkom i gałęziom drzew (pozostałościom leśnym), słomie, plewom, kolbom i łupinom orzechów (tj. pozostałościom rolniczym) oraz pozostałościom z przetwarzania (np. trocinom), nie są przypisywane żadne emisje gazów cieplarnianych przed pierwszym etapem zbiórki (RED II). W literaturze stwierdzono,

że przekierowanie surowców wtórnych z istniejących zastosowań do produkcji paliwa może mieć niezamierzone skutki [68], które można wziąć pod uwagę przy użyciu tzw. „podejścia skutkowego” (ang. *consequential LCA approach*). W jego ramach konsekwencje unikniętych zastosowań alternatywnych (np. wytwarzanie energii poprzez spalanie odpadów) byłyby oceniane zarówno jako oddziaływania uniknięte, jak i oddziaływania dodatkowe (np. poprzez wytworzenie równoważnej ilości energii z sieci);

- odpadowe surowce kopalne pochodzą z procesów przemysłowych albo z wyspecjalizowanej zbiórki odpadów, a związane z nimi obciążenia środowiskowe należy uwzględniać w ocenie cyklu istnienia, aby mieć pewność, że wszelkie potencjalne oszczędności emisji nie są liczone podwójnie w żadnym punkcie pomiędzy granicami systemu. Dotyczy to w szczególności przemysłowych gazów odlotowych lub wydzielonego i wychwyconego CO₂;
- ditlenek węgla jako surowiec nie zawiera żadnej energii, jednak do wytworzenia paliwa transportowego wszystkie procesy syntezy katalitycznej wymagają reakcji wodoru z CO₂, z kolei w syntezie mikrobiologicznej drobnoustroje potrzebują H₂ do przetworzenia CO₂ na metan. Oznacza to, że produkcja wodoru może skutkować negatywnymi następstwami środowiskowymi.

W zakresie pierwotnych paliw biogenicznych również odnotowano pewne zależności:

- środki rolnicze, takie jak pestycydy i nawozy, mogą powodować znaczące, choć trudne do uogólnienia oddziaływania na otoczenie. Wpływy te są silnie uzależnione od lokalnych warunków (np. typu gleby, opadów, geologii, praktyk rolniczych) oraz uprawianych roślin. Istnieją jednak uznane, dostępne zbiory danych, które zawierają kompleksowe inwentaryzacje nakładów rolniczych stosowanych do upraw zidentyfikowanych w zakresie prowadzonych analiz (np. Ecoinvent zastosowany podczas oceny realizowanej w ramach niniejszej monografii);
- emisje wynikające z bezpośredniej zmiany użytkowania gruntów (LUC, ang. *land use change*) są dobrze zidentyfikowane i mierzalne, np. przez współczynniki emisji LUC IPCC (ang. *IPCC LUC emission factors*). Jednak pośrednia zmiana użytkowania gruntów (ILUC, ang. *indirect land use change*) spowodowana różnicami w wykorzystaniu surowców jest bardziej skomplikowana w modelowaniu (i nie jest objęta zakresem polityk dotyczących biopaliw). Obejmuje straty GHG wywołane konwersją gruntów, a także straty węgla organicznego w glebie (SOC, ang. *soil organic carbon*) podczas uprawy. Istnieje kilka źródeł danych ILUC, w tym modele GLOBIOM i GTAP, które wyróżniają się dużą liczbą publikacji i raportów stworzonych w ciągu ostatnich kilku lat;
- paliwa biogenne wyróżniają specyficzne oddziaływania (punkty środkowe LCA, ang. *LCA midpoints*, np. zakwaszenie lub eutrofizacja), które mogą mieć mniejsze znaczenie dla innych łańcuchów paliwowych, a wpływ ten jest spowodowany przede wszystkim praktykami rolniczymi;

- modelowanie obiegu węgla w uprawach i lasach jest złożone, zwłaszcza przy uwzględnieniu czasowości emisji, co doprowadziło w ciągu ostatnich kilku lat do intensyfikacji rozważań na ten temat, zwłaszcza w przypadku konwersji biomasy leśnej na energię elektryczną. Większość badań i polityk dotyczących biopaliw zakłada jednak, że emisje CO₂ ze spalania są równoważne z jego pochłanianiem.

W przypadku wtórnych paliw biogenicznych charakterystycznymi były poniższe założenia:

- podobnie jak dla wtórnych paliw kopalnych, literatura sugeruje, że alternatywne zastosowania wtórnej biomasy powinny być oceniane i uwzględniane w LCA;
- podobnie jak w przypadku pierwotnych paliw biogenicznych, założenie, że pochłanianie i uwalnianie CO₂ jest równe zero, potencjalnie może być w niektórych przypadkach nieprecyzyjnym uproszczeniem. Jest to jednak podejście przyjęte w wielu publikacjach i politykach.

W obszarze e-paliw (w tym wodoru) zauważono z kolei następujące zależności:

- w literaturze udokumentowano kilka podejść dotyczących wielofunkcyjności, które różnią się w zależności od procesu produkcji wodoru. Istnieje możliwość uwzględnienia koproduktów SMR (parowego reformingu metanu) przez rozbudowę analizowanego systemu, jednak literatura sugeruje zastosowanie ekonomicznego przydziału dla koproduktów w paliwach wodorowych opartych na elektrolizie i paliwach syntetycznych;
- analogicznie jak w przypadku wcześniej wymienianych paliw, pewne wpływy środkowe (*midpoints*) są bardziej istotne w przypadku analizy cyklu istnienia e-paliw (np. zakwaszenie, eutrofizacja lub fotochemiczne tworzenie ozonu).

W ramach badań prowadzonych na cele niniejszej monografii, w przypadku benzyny, oleju napędowego i gazu ziemnego, emisje na jednostkę paliwa zostały oparte na bieżących średnich udziałach surowców, paliw kopalnych i odnawialnych w mikrosach energetycznych krajów europejskich. Udziały te będą zmienne w czasie, biorąc pod uwagę zasady dyrektywy w sprawie energii odnawialnej (RED II).

W związku z przewidywanymi zmianami w mieszankach paliwowych w okresie eksploatacji pojazdów zmieni się również wielkość emisji szkodliwych substancji powstających na skutek ich zużycia. Ze względu na fakt, iż roczny przebieg samochodów osobowych zazwyczaj zmniejsza się wraz z wiekiem pojazdu, średnia emisyjność zużywanej energii elektrycznej i wodoru w ciągu całego cyklu istnienia została skorygowana przez zmniejszenie rocznego przebiegu. Założono zatem, że paliwa stosowane w pierwszych latach eksploatacji mają wyższy udział w całkowitej emisji niebezpiecznych związków chemicznych niż te stosowane w latach późniejszych.

Przyjęty udział biopaliw (% obj.) dla benzyny wynosił 5%, dla diesla – 7%, a dla gazu ziemnego – 3% [248]. Mieszanka benzyny w Unii Europejskiej zawiera obecnie 5% obj. etanolu, który jest wytwarzany z mieszanki surowców opartych głównie na kukurydzy, pszenicy i buraku cukrowym (tab. 3.13) [125]. Zgodnie z wymogami dyrektywy w sprawie odnawialnych źródeł energii (RED II) prognozuje się, że do 2050

r. wzrośnie udział etanolu celulozowego, np. ze słomy pszennej [125]. Biorąc pod uwagę bezpośrednie emisje szkodliwych związków chemicznych podczas produkcji [248] oraz oddziaływania związane z pośrednią zmianą użytkowania gruntów (ILUC) [311], emisje gazów cieplarnianych oraz innych niebezpiecznych substancji w cyklu istnienia etanolu mogą nie być istotnie niższe niż w przypadku produkcji i spalania benzyny w 100% kopalnej (bez dodatku etanolu) [67].

Tab. 3.13. Średni udział wybranych surowców w europejskiej mieszance etanolu. Opracowanie własne na podstawie [67, 125, 248, 311]

Surowiec	Udział w mieszance etanolu (% obj.)	
	2020	2050 (prognoza)
Kukurydza	38	34
Pszenica	30	26
Burak cukrowy	19	19
Jęczmień/żyto	7	6
Trzcina cukrowa	2	2
Słoma pszenna	4	13

Średnia mieszanka oleju napędowego w krajach UE zawiera 7% obj. biogenego oleju napędowego, z czego 83% obj. odpowiada biodieslowi (lub estrowi metylowemu kwasów tłuszczowych, FAME), a 17% obj. to uwodornione oleje roślinne (HVO). Jak zaprezentowano w tabeli 3.14, oba składają się głównie z oleju rzepakowego, oleju palmowego i zużytego oleju spożywczego [125]. W przypadku biodiesla i HVO, dla których bazą są rośliny spożywcze (takie jak olej rzepakowy, palmowy, sojowy lub słonecznikowy), bezpośrednie emisje niebezpiecznych substancji podczas ich wytwarzania [248]) oraz oddziaływania związane z pośrednią zmianą użytkowania gruntów (ILUC) [311] wynoszą znacznie więcej niż emisje pochodzące z produkcji i spalania oleju napędowego w 100% kopalnego (bez biododatków) [67]. Zwłaszcza w przypadku oleju palmowego i sojowego emisje gazów cieplarnianych i innych szkodliwych związków chemicznych w cyklu istnienia są od dwóch do trzech razy wyższe niż dla paliwa kopalnego. Zaawansowane, nowoczesne biopaliwa oparte na pozostałościach i odpadach (takich jak np. zużyty olej spożywczy) wyróżniają się znacznym poziomem korzyści środowiskowych w zakresie ograniczenia niebezpiecznych emisji w porównaniu z paliwami kopalnymi. Ich udział we współczesnej mieszance surowców biodiesla i HVO w Europie obniża poziom średnich emisji w cyklu istnienia biogenicznego oleju napędowego [125].

Tab. 3.14. Średni udział wybranych surowców w europejskiej mieszance biodiesla i uwodornionych olejów roślinnych (HVO). Opracowanie własne na podstawie [67, 125, 248, 311]

Surowiec	Udział w mieszance biodiesla (% obj.)		Udział w mieszance HVO (% obj.)	
	2020	2050 (prognoza)	2020	2050 (prognoza)
Olej rzepakowy	52	63	18	54
Olej palmowy	20	–	45	–
Olej sojowy	5	7	2	5
Olej słonecznikowy	1	8	0,4	0,4
Zużyty olej spożywczy	17	15	25	25
Tłuszcze zwierzęce	5	5	11	11
Inne pozostałości	–	2	–	5

Ponieważ surowce do produkcji biopaliw o wysokim poziomie oddziaływania związanego z pośrednią zmianą użytkowania gruntów (ILUC) nie będą wliczane do celów dyrektywy w sprawie energii odnawialnej (RED II), prognozuje się, że olej napędowy na bazie oleju palmowego zostanie wycofany do 2030 r. W związku z tym najprawdopodobniej szkodliwe emisje w cyklu istnienia całej mieszanki biodiesla i HVO zbliżą się do emisyjności paliw kopalnych [116].

Średni udział gazu ziemnego i biometanu różnego pochodzenia w europejskiej mieszance gazu ziemnego przedstawiono w tabeli 3.15. Oprócz gazu ziemnego, który jest transportowany rurociągiem, zawiera ona gaz ziemny transportowany do Europy statkami jako LNG oraz biometan produkowany z kukurydzy, pozostałości roślinnych i obornika. Przyjęto, że mieszanka paliwowa pozostaje stała [125]. W przypadku kukurydzy, pozostałości roślinnych i biometanu obornika brane są pod uwagę bezpośrednie emisje produkcyjne [248] oraz oddziaływania związane z pośrednią zmianą użytkowania gruntów (ILUC) w cyklu istnienia kiszonki kukurydzianej [311].

Tab. 3.15. Średni udział gazu ziemnego i biometanu różnego pochodzenia w europejskiej mieszance gazu ziemnego. Opracowanie własne na podstawie [67, 125, 248, 311]

Surowiec	Udział (% obj.)
gaz ziemny (rurociąg)	77,7
gaz ziemny (transport statkiem)	18,9
biometan kukurydziany	1,4
biometan z odpadów	1,4
biometan na bazie obornika	0,7

Wytwarzany współcześnie wodór prawie w całości pochodzi z parowego reformingu gazu ziemnego (tzw. „szary” wodór – ang. *grey hydrogen*) lub zgazowania węgla (tzw. „czarny” wodór – ang. *black hydrogen*) [198]. W coraz większej liczbie aktów prawnych, w tym w unijnej dyrektywie w sprawie energii odnawialnej (RED II), pro-

muje się produkcję wodoru za pomocą elektrolizy opartej na energii odnawialnej (tzw. „zielony” wodór – ang. *green hydrogen*) oraz gazu ziemnego w połączeniu z CCS diotlenku węgla (sekwestracją CO₂ – ang. *carbon capture and storage*) (tzw. „niebieski” wodór – ang. *blue hydrogen*). Uważa się, że dwie ostatnie metody wytwarzania wodoru („zielonego” i „niebieskiego”) będą zyskiwać na znaczeniu w nadchodzących dekadach.

W przypadku „szarego” wodoru emisje szkodliwych substancji w cyklu istnienia obejmują wytwarzanie i transport gazu ziemnego, w tym wycieki metanu oraz produkcję i sprężanie wodoru. Emisje występujące w cyklu istnienia „czarnego” wodoru uwzględniają produkcję węgla i jego zgazowanie, w tym również występujące emisje związane ze sprężaniem wodoru. W przypadku „zielonego” wodoru bierze się pod uwagę emisje niebezpiecznych związków chemicznych w całym cyklu istnienia produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych, a także straty energii podczas elektrolizy i sprężania wodoru. Dla „niebieskiego” wodoru część emisji z reformingu parowego gazu ziemnego jest niwelowana przez CCS. W ramach prowadzonych badań rozważano transport wodoru na krótkie odległości, ale nie uwzględniono strat energetycznych transportu na duże odległości (np. wodoru produkowanego na innym kontynencie) [116].

Podczas przekształcania gazu ziemnego w wodór wycieki metanu wynoszą 0,34 g CH₄ na MJ wodoru [214]. Emisje metanu są takie same dla „niebieskiego” wodoru, jednak zasadnicza różnica polega na tym, że przyjmuje się, iż emisje CO₂ z procesu reformingu parowego są równoważone przez CCS.

Za najniższą wartość opałową wodoru uznaje się 120 MJ/kg. W przypadku produkcji na drodze elektrolizy („zielony” wodór) emisje w cyklu istnienia wodoru są określane z uwzględnieniem rodzaju zużytej energii elektrycznej i wydajności energetycznej elektrolizy. Prognozuje się, że wydajność energetyczna elektrolizy wzrośnie z 65% [248] do 70% w 2030, a następnie do 80% w 2050 [112]. W ramach prowadzonych analiz zdecydowano się przyjąć jej średnią wartość na poziomie 70%. Odpowiada to 1,43 MJ energii elektrycznej na MJ wodoru. Ponadto sama elektroliza, sprężanie wodoru i jego dystrybucja po stronie detalicznej są rozpatrywane ze stratą energii na poziomie 0,25 MJ na MJ wodoru [248]. Przyjęto, że wodór pozyskiwany dzięki procesom elektrolizy cechuje się zapotrzebowaniem na energię równym 1,68 MJ energii elektrycznej na MJ wodoru, co odpowiada 56 kWh energii elektrycznej na kg wodoru.

3.5. Modele oceny wpływu na otoczenie

Podczas określania wpływu cyklu istnienia obiektu na środowisko kluczowe znaczenie ma trzeci etap analizy – *Life Cycle Impact Assessment*. Zasadnicze różnice metodyczne w podejściach do LCA przede wszystkim odnoszą się właśnie do etapu LCIA, który jest złożony z elementów obowiązkowych oraz opcjonalnych.

Do elementów obowiązkowych zaliczany jest wybór kategorii wpływu, wskaźników kategorii i modeli charakteryzowania oraz klasyfikacja i charakteryzowanie. Z kolei wśród elementów opcjonalnych wyróżnia się normalizowanie oraz grupowanie i ważenie. Sekwencja elementów obowiązkowych jest ściśle określona i musi zostać zachowana podczas prowadzonych analiz. Wykorzystanie poszczególnych elementów opcjonalnych pozostaje kwestią wyboru. W ramach przeprowadzonych badań skorzystano ze wszystkich wymienionych elementów opcjonalnych (jeżeli było to możliwe dla danego modelu). Analizy na potrzeby niniejszej monografii przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania SimaPro 9.4 (PRé Sustainability, LE Amersfoort, Netherlands) oraz bazy danych Ecoinvent 3.8. Ocena cyklu istnienia wybranych środków transportu samochodowego została wykonana z użyciem modeli ReCiPe 2016, IPCC 2021, CED V1.11, CML-IA baseline oraz Ecological Scarcity 2021 [11, 14, 104, 255, 307].

Przypisywanie wyników LCI do poszczególnych kategorii wpływu określa się jako klasyfikowanie. Wykorzystanie specjalistycznego oprogramowania umożliwia zautomatyzowanie tego etapu. Z tego względu do klasyfikowania wykorzystano narzędzie SimaPro, które pozwoliło na automatyczne przypisywanie wyników LCI do poszczególnych kategorii wpływu, na bazie wykazu substancji przyporządkowanych do danych modeli obliczeniowych [70, 104, 150, 171].

Charakteryzowanie oraz przeliczanie wyników LCI na wyniki wskaźników kategorii wpływu stanowią niezwykle złożone procesy. Z technicznego punktu widzenia polegają na przeliczeniu wyników LCI przez odpowiednie parametry charakteryzowania i wykazaniu ich w formie względnych udziałów w każdej z rozpatrywanych kategorii. Otrzymane wyniki mogą być prezentowane np. jako wielkość emisji substancji odniesienia (kg CO₂ eq, kg SO₂ eq itp.), zapotrzebowanie na energię (MJ) itd. [104, 108, 238, 288].

Normalizowanie polega na obliczaniu wielkości wyników wskaźnika kategorii względem informacji odniesienia. Pozwala to na określenie względnego znaczenia wyników wskaźnika odniesionych do danego regionu (np. Polski, Europy, świata) lub osoby (np. przeciętny Europejczyk) w określonym przedziale czasu. Może ono także posłużyć do przygotowania wyników LCIA dla kolejnych procedur, np. grupowania i ważenia. W ramach prowadzonych analiz normalizowanie zostało zrealizowane również z wykorzystaniem narzędzia SimaPro [47, 96, 104, 233].

Istnieją odmienne sposoby i preferencje w zakresie wartościowania w odniesieniu do kategorii wpływu. W zależności od przyjętego celu i zakresu prowadzonej oceny LCA jedne mogą być bardziej istotne aniżeli inne. Dodatkowo można je pogrupować np. według skali (lokalne, globalne) czy wielkości emisji, np. w metodzie ReCiPe 2016 grupowanie odbywa się przez zsumowanie wyników wskaźników kategorii wpływu w trzy obszary oddziaływania (zdrowie człowieka, ekosystemy, zasoby surowców) oraz podczas końcowej agregacji do całkowitego wskaźnika oddziaływania [151, 160, 325].

Proces ważenia obejmuje określenie i przyporządkowanie stopnia ważności (współczynnika wagowego) konkretnym kategoriom wpływu oraz ich pomnożeniu przez znormalizowane wyniki wskaźnika. Powinien on być dokonywany na pełnych międzynarodowo uznanych zbiorach współczynników wagowych, np. przeprowadzenie procesu ważenia w ramach modelu ReCiPe 2016 pozwala na uzyskanie wyników w możliwej do porównania jednostce – punktach środowiskowych (Pt, ang. *environmental points*). Podczas prowadzonych analiz (gdy było to możliwe dla danego modelu) grupowanie i ważenie wykonano z wykorzystaniem programu SimaPro [104, 211, 239, 299].

3.5.1. ReCiPe

ReCiPe jest jednym z modeli stosowanych w ramach oceny wpływu na otoczenie (LCIA). Po raz pierwszy została opracowana w 2008 roku dzięki współpracy między Holenderskim Narodowym Instytutem Zdrowia Publicznego i Środowiska (RIVM, Dutch National Institute for Public Health and the Environment), Uniwersytetem Radboud w Nijmegen, Uniwersytetem w Leiden i firmą PRé Sustainability. Głównym celem stosowania ReCiPe jest zamiana wyników inwentaryzacji cyklu istnienia we wskaźniki wpływu na środowisko. Wskaźniki te wyrażają potencjalną wielkość oddziaływania na otoczenie poszczególnych kategorii wpływu. W ramach modelu ReCiPe wskaźniki są wyznaczane na dwóch poziomach – 22 wskaźniki punktu środkowego (ang. *midpoint impact category*) oraz 3 wskaźniki punktu końcowego (ang. *endpoint area of influence*). Wskaźniki punktu środkowego opisują pojedyncze problemy środowiskowe, z kolei wskaźniki punktu końcowego obrazują wpływ na środowisko na trzech wyższych poziomach agregacji [56, 122].

W ramach badań zrealizowanych na potrzeby niniejszej monografii dokonano analizy dwudziestu dwóch kategorii wpływu (wpływ substancji powodujących globalne ocieplenie oddziałujących na zdrowie człowieka, ekosystemy lądowe i ekosystemy słodkowodne, substancji powodujących uszczuplenie warstwy ozonowej w stratosferze, substancji o charakterze promieniotwórczym, substancji wpływających na tworzenie się ozonu oddziałujących na zdrowie człowieka, substancji powodujących tworzenie się drobnych cząstek stałych (PM), substancji powodujących powstawanie ozonu oddziałujących na ekosystemy lądowe, substancji powodujących zakwaszenie gleby, substancji powodujących eutrofizację wód słodkich i wód morskich, substancji ekotoksycznych oddziałujących na gleby, wody słodkie i wody morskie, substancji toksycznych o działaniu kancerogennym dla człowieka, substancji toksycznych niewykazujących działania kancerogennego dla człowieka, procesów związanych z użytkowaniem gruntów, procesów powodujących uszczuplenie zasobów mineralnych i kopalnych, procesów powodujących uszczuplenie zasobów wody oddziałujące na zdrowie człowieka, ekosystemy lądowe i ekosystemy wodne) i trzech obszarów oddziaływania

(zdrowie człowieka, jakość ekosystemu, zasoby surowców) [wykorzystany model: ReCiPe 2016, Endpoint (H), World (2010), H/A].

ReCiPe 2016 zawiera najszerszy zestaw kategorii punktu środkowego w porównaniu z innymi modelami. Stanowi ulepszenie ReCiPe 2008 oraz wcześniej stosowanych modeli, takich jak CML 2000 czy Ekowskażnik 99. W przeciwieństwie do poprzedniej wersji ReCiPe2016 uwzględnia również globalne współczynniki charakteryzowania, a nie tylko europejskie [122, 253].

Wyniki grupowania i ważenia w modelu ReCiPe 2016 prezentowane są w punktach środowiskowych (Pt). Tysiąc punktów odpowiada uśrednionemu oddziaływaniu jednego człowieka na otoczenie w ciągu jednego roku.

3.5.2. IPCC

Do najważniejszych gazów wpływających na pogłębianie się efektu cieplarnianego zaliczane są CO_2 , N_2O , CH_4 i CFCs. W trakcie prowadzenia analiz ważne jest uwzględnienie czasu przebywania konkretnego gazu w atmosferze, ponieważ dla oszacowania efektu szklarniowego istotne jest, że efekty oddziaływania są długotrwałe oraz posiadają zasięg globalny. W ramach modelu IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Global Warming Potential) efekt cieplarniany jest mierzony z wykorzystaniem GWP, który opisuje potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (ang. *Global Warming Potential*). Substancją odniesienia w tym modelu jest ditlenek węgla. Z tego powodu otrzymane wyniki prezentowane są w $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$. Łączny wskaźnik oceny wpływu na efekt szklarniowy odniesiony do CO_2 wynosi 1. Horyzont czasowy może zostać przyjęty na 20, 100 albo 500 lat [98, 141, 208].

Podczas analiz prowadzonych na potrzeby niniejszego opracowania przyjęto stu-letni okres rozpatrywania wpływu poszczególnych gazów na efekt cieplarniany. Dzięki zastosowaniu modelu IPCC 2021 oceniono poziom oddziaływań na środowisko w ramach trzech kategorii wpływu: GWP100 spowodowany eksploatacją źródeł kopalnych, biogenych i na skutek przekształcenia terenu (wykorzystany model: IPCC 2021, GWP100).

Współcześnie poznany jest wpływ wielu związków chemicznych na powiększanie efektu szklarniowego. Oszacowano dla nich również ilościowy udział w tym procesie, który określono indywidualnymi równoważnikami obciążeń, wyrażonymi w ilości CO_2 przypadającej na jednostkę masy danej substancji. Dzięki temu potencjał cieplarniany poszczególnych związków może zostać wyrażony w jednostkach masy CO_2 (zazwyczaj w kg). Pozwala to na określenie równoważnej emisji wszystkich substancji uwzględnianych w konkretnym badaniu. Równoważne obciążenie dla otoczenia, wyrażające globalny potencjał cieplarniany w odniesieniu do określonych ilościowo gazów szklarniowych, można wyznaczyć z wykorzystaniem zależności:

$$\Omega_{GWP} = \sum_{i=1}^m GWP_i O_i \quad (3.1)$$

gdzie: GWP_i – równoważnik i -tej substancji w odniesieniu do ditlenku węgla [kg CO₂ eq], O_i – masa i -tej substancji emitowana do otoczenia [kg] [104, 231].

Równoważniki indywidualnych obciążeń względem potencjalnego globalnego efektu szklarniowego opisywane są z kolei wzorem:

$$GWP_j = \frac{\int_0^t \alpha_i c_i(t) dt}{\int_0^t \alpha_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt} \quad (3.2)$$

gdzie: α_i – gęstość energii promieniowania i -tej substancji [$W \cdot (m^2 \cdot kg)^{-1}$], c_i – zmiana stężenia i -tej substancji w czasie [$kg \cdot m^{-3}$], α_{CO_2} – gęstość energii promieniowania CO₂ [$W \cdot (m^2 \cdot kg)^{-1}$], c_{CO_2} – zmiany stężenia CO₂ w czasie [$kg \cdot m^{-3}$], t – rozpatrywany horyzont czasowy oddziaływania [lata] [104].

Wyniki charakteryzowania w modelu IPCC 2021 prezentowane są w kg CO₂ eq.

3.5.3. CED

Celem określenia wielkości wpływu na środowisko procesów związanych z pozyskiwaniem energii w cyklu istnienia rozważanych samochodów osobowych wykorzystano model CED (*Cumulative Energy Demand*), który umożliwił ocenę skumulowanego zapotrzebowania na energię. W ramach tego modelu potencjalny wpływ emisji i wydobyć określany jest ilościowo z wykorzystaniem wskaźników punktu środkowego. Zapotrzebowanie na energię wyrażane jest w MJ lub MWh. Skumulowane zapotrzebowanie na energię danego obiektu obejmuje bezpośrednie i pośrednie zużycie energii w jego całym cyklu istnienia, w tym energię niezbędną w trakcie wydobywania, wytwarzania, eksploatacji i zagospodarowania użytkowego surowców oraz materiałów pomocniczych. W ramach modelu dostępne są trzy odmienne możliwości określania zapotrzebowania na energię pierwotną. Do analiz można wybrać maksymalną, średnią lub minimalną wartość opałową pierwotnych źródeł energii. W przypadku wyboru wartości minimalnej uwzględniona zostaje również wartość energii parowania wody obecnej w spalinach [91, 250, 275].

W ramach prowadzonych badań dokonano analizy wszystkich kategorii wpływu charakterystycznych dla modelu CED – trzech odnoszących się do źródeł nieodnawialnych (energia jądrowa, paliwa kopalniane, nieodnawialna biomasa) oraz trzech z obszaru źródeł odnawialnych (odnawialna biomasa, energia wody oraz łącznie: energia słoneczna, wiatru i geotermalna) (wykorzystany model: Cumulative Energy Demand, V1.11). Wyniki charakteryzowania w modelu CED są prezentowane w MJ zapotrzebowania na energię.

3.5.4. CML

Model CML (Centre for Milieukunde, Leiden), podobnie jak CED, cechuje podejście zorientowane na efekty pośrednie (ang. *midpoint approach*). Kategorie wpływu są w nim wyrażone w poziomie emisji szkodliwych substancji do otoczenia lub zapotrzebowania na energię. Pozwala on na uzyskanie wyników dla szeregu kategorii oddziaływania na otoczenie, wyrażonych jako emisje do środowiska lub wykorzystanie zasobów. Analizy przeprowadzone z wykorzystaniem modelu CML w ramach niniejszej monografii obejmowały jedenaście kategorii wpływu: wpływ substancji powodujących zubożenie zasobów abiotycznych (ogółem), procesów związanych z wydobyciem paliw kopalnych powodujących zubożenie zasobów abiotycznych, substancji powodujących globalne ocieplenie (GWP 100), substancji powodujących zubożenie warstwy ozonowej (ODP), substancji toksycznych dla człowieka, substancji o działaniu ekotoksycznym dla środowiska słodkowodnego, morskiego i lądowego, substancji powodujących utlenianie fotochemiczne, zakwaszenie i eutrofizację (wykorzystany model: CML-IA baseline, V3.08, EU25) [104, 111, 241].

Wyniki charakteryzowania w modelu CML-IA baseline są prezentowane w formie wielkości emisji substancji odniesienia (podobnie jak w modelu IPCC), w zależności od kategorii wpływu może to być np. kg SO₂ eq (substancje o działaniu zakwaszającym), kg PO₄ eq (związki o charakterze eutrofizującym) itd.

3.5.5. Ecological Scarcity

Zastosowanie modelu Ecological Scarcity (tzw. „niedoboru ekologicznego”) pozwoliło na określenie wpływu na otoczenie cyklu istnienia rozważanych pojazdów w formie emisji zanieczyszczeń oraz zużycia zasobów, przez wykorzystanie tzw. „współczynników ekologicznych” (ang. *eco-factors*). Różnią się one w zależności od analizowanej substancji, a ich wartości opierają się na wytycznych prawa z zakresu ochrony środowiska. Im bardziej wielkość emisji lub zużycia zasobów przekracza przyjęty, dopuszczalny poziom, tym większe wartości przyjmuje współczynnik ekologiczny (wyrażony w punktach środowiskowych) [3].

Model Ecological Scarcity obejmuje szereg współczynników charakteryzujących wiele różnych emisji do środowiska atmosferycznego, glebowego oraz wód gruntowych i powierzchniowych, a także opisujących wykorzystanie zasobów energii i niektórych rodzajów odpadów. Wszystkie czynniki są wyznaczane na podstawie aktualnego poziomu zanieczyszczenia (ang. *current flows*) oraz stopnia zanieczyszczenia uznawanego za maksymalne, krytyczne (ang. *critical flows*), opracowywanego na bazie szwajcarskich założeń z zakresu ochrony środowiska [104].

W ramach tego modelu ekocynniki wykorzystywane są do ważenia destrukcyjnych oddziaływań środowiskowych, a także zużycia zasobów. Pozwala to na ich wyrażenie w ekopunktach (UBP), np. emisja jednego kilograma CO₂ jest równa 1000 UBP, emisja jednego kilograma fosforanów do zbiornika wodnego to ok. 970 000 UBP,

a wydobycie jednego kilograma żwiru to 2,8 UBP. Każdą wielkość oddziaływania na otoczenie ujętą w analizie inwentaryzacyjnej mnoży się przez wartość odpowiadającą go jej ekoczynnikowi, a otrzymane punkty się sumuje [90].

Wartości użyte do wyrażenia negatywnego wpływu na środowisko są oparte na udokumentowanej wiedzy naukowej, np. zgodnie z danymi the Intergovernmental Panel on Climate Change (Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu) wpływ na klimat 1 kg metanu (CH_4) jest ok. 30 razy większy niż wpływ 1 kg ditlenku węgla (CO_2), a dla 1 kg sześciofluorku siarki (SF_6) jest on aż 23 500 razy wyższy. Otrzymane wyniki charakteryzowania w modelu Ecological Scarcity (podobnie jak w modelu IPCC czy CML) są wyrażane w kilogramach substancji odniesienia. W przypadku gazów cieplarnianych tą miarą są kilogramy ekwiwalentu CO_2 . Emisja jednego kilograma metanu ma taki sam wpływ na otoczenie jak emisja około 30 kilogramów CO_2 , dlatego wartość współczynnika charakterystyki, a więc i ekoczynnik, dla metanu jest 30 razy większa [90].

Ważenie w modelu Ecological Scarcity pozwala na wyrażenie zależności między aktualną wartością wpływu na środowisko danego cyklu istnienia a tolerowaną wielkością docelową określoną w przepisach dotyczących ochrony środowiska. Współczynnik wagowy jest podniesiony do kwadratu. Oznacza to, że jeśli aktualna wielkość destrukcyjnego oddziaływania na otoczenie jest większa niż tolerowana wielkość docelowa, jest to wyraźnie widoczne w wyniku prezentowanym w UBP [90].

Ekoczynnik jest opisywany równaniem:

$$\text{Ekoczynnik} = K \cdot \frac{1 \text{ UBP}}{F_n} \cdot \left(\frac{F}{F_k}\right)^2 \cdot c \quad (3.3)$$

charakteryzowanie normalizacja ważenie stała

gdzie: K – współczynnik charakteryzujący emisję lub zasób, F_n – ilość normalizacyjna (przepływ normalizacyjny): bieżąca roczna ilość (emisja lub zużycie) charakterystyczna dla przyjętej granicy systemu, F – bieżąca ilość (bieżący przepływ): bieżąca roczna ilość (emisja lub zużycie) odnotowana na obszarze referencyjnym, F_k – tolerowana ilość docelowa (przepływ krytyczny): ustawowa wartość graniczna w regionie odniesienia, c – stała (10^{12} /rok): służy do uzyskania łatwo reprezentowalnych wielkości liczbowych, UBP – ekopunkt: jednostka ocenianego wpływu na środowisko [90].

W ramach analiz prowadzonych z wykorzystaniem modelu Ecological Scarcity 2021 na potrzeby monografii dokonano analizy dziewiętnastu kategorii wpływu: wpływu procesów na zmianę bilansu netto zasobów wodnych, procesów związanych z pozyskaniem energii i zasobów mineralnych, procesów związanych z zagospodarowaniem terenu, substancji powodujących globalne ocieplenie i uszczuplenie warstwy ozonowej, substancji powodujących tworzenie się pyłów i kluczowych zanieczyszczeń atmosferycznych, emisji substancji o charakterze rakotwórczym i metali ciężkich do atmosfery, substancji powodujących zanieczyszczenie środowiska wodnego, emisji trwałych zanieczyszczeń organicznych i metali ciężkich do środowiska wodnego,

emisji pestycydów i metali ciężkich do środowiska glebowego, emisji substancji promieniotwórczych do atmosfery, emisji substancji radioaktywnych do środowiska wodnego, procesów związanych ze składowaniem odpadów nieradioaktywnych i promieniotwórczych, procesów i substancji oddziałujących na wielkość zasobów biotycznych (wykorzystany model: Ecological Scarcity 2021, V1.00, eiv3).

Wyniki uzyskane dzięki wykorzystaniu modelu Ecological Scarcity zaprezentowano w ekopunktach (UBP).

3.6. Interpretacja wyników

Interpretacja cyklu istnienia obejmuje systematyczną procedurę identyfikacji, kwalifikacji, sprawdzania i oceny informacji uzyskanych na wcześniejszych etapach badań (LCI i LCIA). Jej podstawowe zadanie to zaprezentowanie otrzymanych wyników w spójnej, kompletnej i łatwej do zrozumienia formie. Powinna ona prowadzić do sformułowania wniosków końcowych ze zrealizowanych analiz, wyjaśnienia ograniczeń (jeżeli występowały) oraz określenia zaleceń np. służących zmniejszeniu negatywnego wpływu na otoczenie obiektu badań [105, 128, 129].

Etap interpretacji nie jest wyłącznie ostatnim elementem analiz LCA, ponieważ powinien on być uwzględniany na każdym kroku badań i być prowadzony zgodnie z uprzednio przyjętym celem. LCA jest techniką iteracyjną, zatem od interpretacji rezultatów otrzymanych na każdym jej etapie będzie zależało, czy wstępna koncepcja analiz pozostanie niezmienna, czy ulegnie pewnym modyfikacjom [158, 168].

Ze względu na fakt, iż identyfikacja opiera się na wynikach uzyskanych podczas inwentaryzacji (LCI) i oceny wpływu (LCIA), kluczowe jest sprawdzenie poprawności założeń przyjętych na samym początku badań (określenie celu i zakresu, granicy systemu obiektu itd.) oraz dokonanie ich oceny. W pierwszej kolejności interpretacji poddawane są rezultaty otrzymane w odniesieniu do przyjętych założeń (m.in. granicy systemu, jednostki funkcjonalnej itd.) i wyborów podjętych w trakcie analiz (np. wskaźników kategorii, zasad alokacji itp.). Interpretacja obejmuje również formułowanie oraz uzupełnianie wniosków końcowych oraz ostateczne upewnienie się, czy osiągnięto założone cele [128, 129, 158, 235].

Etap interpretacji cyklu istnienia rozważanych samochodów osobowych składał się zatem z trzech zasadniczych elementów: identyfikacji istotnych kwestii, przeprowadzenia oceny (m.in. przez sprawdzenie spójności i kompletności) oraz sformułowania ostatecznych wniosków i zaleceń [128, 129, 149].

Interpretacja cyklu istnienia wybranych środków transportu samochodowego umożliwiła identyfikację tych ich typów, w przypadku których zagrożenie destrukcyjnym oddziaływaniem na otoczenie jest największe. Im wyższa jest wartość liczbową rozpatrywanego procesu, obiektu lub elementu, tym większy jest jego szkodliwy wpływ na środowisko. Możliwym staje się zatem wskazanie obszaru, w którym powinny zostać wprowadzone modyfikacje, udoskonalenia. Interpretacja stanowi także

podstawę podczas określania sposobów na zmniejszenie energochłonności, materiałochłonności oraz ilości wytwarzanych odpadów i emisji niebezpiecznych substancji w cyklu istnienia. Może to nastąpić poprzez zmianę technik wytwarzania, transportu, sposobu zagospodarowania użytkowego odpadów itd. [12, 83, 104, 169].

Dodatkowo w przypadku analiz porównawczych dwóch lub więcej obiektów możliwym jest wskazanie, który z nich wywiera mniej negatywnych oddziaływań w perspektywie całego cyklu istnienia lub jego poszczególnych faz. LCA umożliwia wykazanie efektywności ekologicznej i energetycznej całego obiektu technicznego lub jego pojedynczego elementu, pozwalając na ubieganie się o deklarację lub etykietę środowiskową. Etykietowanie środowiskowe (ang. *ecolabelling*) jest jednym z instrumentów polityki środowiskowej. Poprzez nadanie odpowiedniego symbolu graficznego wyróżniane są obiekty o najwyższej jakości ekologicznej [100, 104, 240, 305].

3.7. Autorska metoda oceny: wskaźnik następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu

Dotychczas w cyklu istnienia środków transportu samochodowego szczególna uwaga była zwracana na aspekty związane z osiągnięciem jak największej efektywności procesów, które pozwalałyby na uzyskanie jak najwyższej jakości produktów, przy równocześnie jak najniższych nakładach finansowych. Współcześnie poszukuje się nie tylko efektywnych (energetycznie i ekonomicznie) procesów wytwarzania oraz eksploatacji pojazdów, ale również technik i technologii o możliwie jak najmniejszym szkodliwym wpływie na otoczenie (w tym również procesów zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów oraz elementów). Założenia te wpisują się w aktualne trendy w obszarze zrównoważonego rozwoju transportu. Z analizy aktualnego stanu wiedzy i techniki wynika, że istnieje pilna potrzeba zweryfikowania konkretnych rozwiązań występujących w cyklach istnienia różnego typu samochodów osobowych. Wychodząc z zależności na wskaźnik opłacalności środowiskowej opracowany przez Huppesa i Ishikawa [124]:

$$W_{oś} = \frac{\text{poprawa wskaźnika środowiskowego}}{\text{koszt poprawy}} \quad (3.4)$$

wyprowadzono zależność na wskaźnik następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu (W_{ns}) w postaci:

$$W_{ns}(t) = \frac{P_{ns}(t)}{K_{ns}(t)} \quad (3.5)$$

gdzie: $P_{ns}(t)$ – poprawa wskaźnika następstw środowiskowych w postaci emisji w cyklu istnienia, $K_{ns}(t)$ – koszty poprawy wskaźnika następstw środowiskowych w postaci emisji w cyklu istnienia.

Zaproponowany nowy pojazd (N), wytwarzany z wykorzystaniem nowych, środowiskowych technologii cechuje się mniejszym negatywnym oddziaływaniem na otoczenie w całym cyklu istnienia (lub jego pojedynczych etapach) w odniesieniu do pojazdu konwencjonalnego (K), stosowanego, wytwarzanego w konwencjonalnej technologii, jeżeli wartość wskaźnika następstw środowiskowych będzie wynosiła $W_{ns} > 0$.

Z kolei zaproponowany nowy pojazd (N) cechuje się większym negatywnym oddziaływaniem na otoczenie w całym cyklu istnienia (lub jego pojedynczych etapach) w odniesieniu do pojazdu konwencjonalnego (K), jeżeli wartość wskaźnika następstw środowiskowych będzie wynosiła $W_{ns} < 0$.

Poprawa wskaźnika następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu (W_{ns}) jest zmienna w czasie z uwagi na zmienne emisje w poszczególnych latach eksploatacji, w zależności od długości cyklu istnienia. Poprawę wskaźnika można wyrazić jako:

$$P_{ns}(t) = P_{K(W)} - P_{N(W)} + (P_{K(E)} - P_{N(E)}) \cdot t + P_{K(ZP)} - P_{N(ZP)} \quad (3.6)$$

gdzie: $P_{K(W)}$, $P_{N(W)}$ – poprawa dla pojazdu konwencjonalnego (K) i nowego rozwiązania (N) na etapie wytwarzania, $P_{K(E)}$, $P_{N(E)}$ – poprawa dla pojazdu konwencjonalnego (K) i nowego rozwiązania (N) na etapie eksploatacji, $P_{K(ZP)}$, $P_{N(ZP)}$ – poprawa dla pojazdu konwencjonalnego (K) i nowego rozwiązania (N) na etapie zagospodarowania użytkowego.

Kosztem poprawy wskaźnika następstw środowiskowych są emisje poniesione w całym cyklu istnienia pojazdu:

$$K_{ns}(t) = P_{N(W)} + P_{N(E)} \cdot t + P_{N(ZP)} \quad (3.7)$$

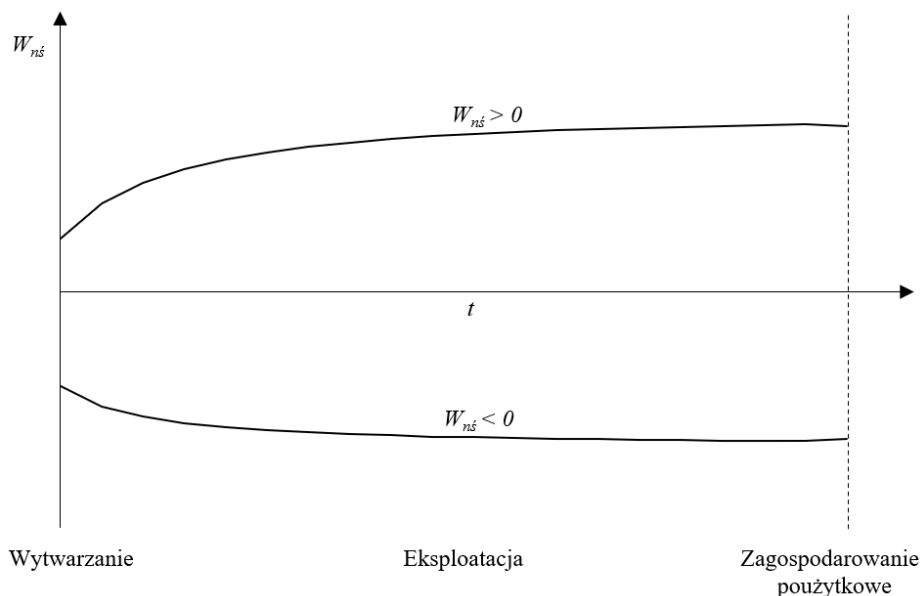
Wskaźnik następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu przyjmuje zatem postać:

$$W_{ns}(t) = \frac{P_{K(W)} - P_{N(W)} + (P_{K(E)} - P_{N(E)}) \cdot t + P_{K(ZP)} - P_{N(ZP)}}{P_{N(W)} + P_{N(E)} \cdot t + P_{N(ZP)}} \quad (3.8)$$

$$W_{ns}(t) = \frac{P_{K(W)} + P_{K(E)} \cdot t + P_{K(ZP)} - P_{N(W)} - P_{N(E)} \cdot t - P_{N(ZP)}}{P_{N(W)} + P_{N(E)} \cdot t + P_{N(ZP)}} \quad (3.9)$$

$$W_{ns}(t) = \frac{P_{K(W)} + P_{K(E)} \cdot t + P_{K(ZP)}}{P_{N(W)} + P_{N(E)} \cdot t + P_{N(ZP)}} - 1 \quad (3.10)$$

Na rysunku 3.12 przedstawiono interpretację graficzną wskaźnika następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu z uwzględnieniem wielkości oddziaływań na otoczenie na etapie wytwarzania, eksploatacji oraz zagospodarowania użytkowego.



Rys. 3.12. Interpretacja graficzna wskaźnika następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu

3.8. Podsumowanie

Ocena cyklu istnienia (LCA) stanowi instrument analityczny umożliwiający charakteryzowanie i identyfikację obciążeń środowiskowych m.in. środków transportu samochodowego. W jej ramach oceniane są wszystkie istotne, potencjalnie szkodliwe następstwa dla otoczenia (w tym także dla człowieka) oraz wszelkiego rodzaju przepływy materiałowe związane z rozpatrywanym obiektem technicznym (np. surowce, emisje, wytwarzanie energii itd.). Może ona również stanowić punkt wyjścia do opracowania nowych metod oceny, stworzonych z myślą o rozwiązaniu konkretnych, współczesnych problemów sektora transportu. Przybliżony w niniejszej monografii, autorski wskaźnik następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu pozwala na porównanie poziomów negatywnego oddziaływania na otoczenie w całym cyklu istnienia (lub w jego poszczególnych etapach) rozważanego, nowego pojazdu w odniesieniu do wybranego pojazdu konwencjonalnego. Może zatem stanowić jedno z narzędzi badawczych w obszarze zrównoważonego rozwoju transportu.

Opracowana metodologia badań pozwoliła na zrealizowanie analiz cykli istnienia samochodów osobowych z segmentu A i B, C oraz SUV wyposażonych w odmien-

ne układy napędowe (ICEV zasilane benzyną, olejem napędowym i CNG, PHEV zasilane benzyną, BEV oraz FCEV). Dodatkowo umożliwiła przyjęcie odmiennych horyzontów czasowych dla każdego z rozpatrywanych obiektów (pierwszy dla samochodów zarejestrowanych w roku 2020, drugi dla tych, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 oraz trzeci również dla zarejestrowanych w 2050 roku, ale spełniających główne założenia Porozumienia paryskiego). Pozwoliła także na zastosowanie alternatywnych scenariuszy zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów i elementów obiektów analiz (w formie składowania na wysypisku odpadów oraz z wykorzystaniem procesów recyklingu). Możliwą stała się również analiza cykli paliwowych i energetycznych rozpatrywanych pojazdów. Omówienie wyników przeprowadzonych badań zawarte zostało w rozdziale czwartym.

Wykonane analizy będą stanowiły podstawę do sformułowania zaleceń dotyczących działań w kierunku prośrodowiskowego, zrównoważonego i efektywnego rozwoju sektora transportu samochodowego.

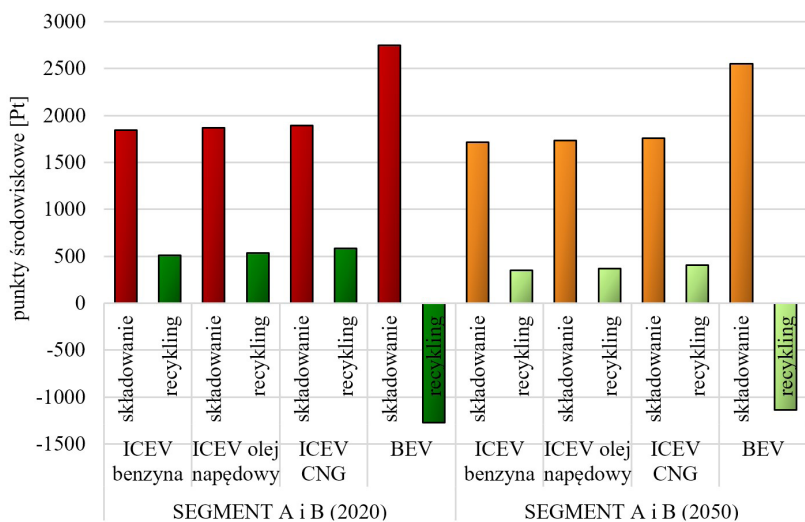
4. Zastosowanie metody na wybranych przykładach

4.1. Samochody osobowe segmentu A i B

Analizy oddziaływania cykli istnienia wybranych środków transportu samochodowego rozpoczęto od oceny potencjalnego wpływu na otoczenie pojazdów segmentu A i B (mały), z uwzględnieniem czterech odmiennych układów napędowych (ICEV zasilany benzyną, olejem napędowym i CNG oraz BEV). Rozpatrywano dwa scenariusze zagospodarowania poużytkowego – składowanie na wysypisku odpadów (w możliwie jak największym stopniu) oraz recykling (również możliwie na maksymalnym poziomie). Przyjęto również dwa scenariusze horyzontu czasowego, pierwszy dla aut zarejestrowanych w roku 2020, natomiast drugi – obejmujący prognozę dla samochodów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Ocenę przeprowadzono wyłącznie dla cyklu istnienia tworzyw, materiałów i elementów rozważanych środków transportu – wyniki w odniesieniu do cykli paliwowych i energetycznych zostały poddane szczegółowej analizie w podrozdziale 4.10.

W pierwszym etapie badań wykorzystano model ReCiPe 2016. Ocenie poddano dwadzieścia dwie kategorie wpływu oraz trzy obszary oddziaływania. W ramach monografii przybliżono wyłącznie najważniejsze z otrzymanych wyników. Rezultaty analiz zaprezentowano w jednostce punktów środowiskowych (Pt). Tysiąc Pt jest równych oddziaływaniu jednej osoby na otoczenie w ciągu jednego roku.

Na rysunku 4.1 zobrazowano wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w całym cyklu istnienia rozważanych samochodów osobowych segmentu A i B. Widoczne jest, że auta zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały istotnie większe szkodliwe oddziaływanie na otoczenie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Biorąc pod uwagę efekt skali (liczbę nowo zarejestrowanych i eksploatowanych pojazdów każdego roku), różnice te będą jeszcze bardziej widoczne. Cykl istnienia wszystkich rozpatrywanych samochodów zakładający ich formę zagospodarowania poużytkowego w postaci składowania zamiast recyklingu spowoduje więcej negatywnych następstw środowiskowych (o od ok. 80% do ok. 250%). Najwyższy poziom niebezpiecznych wpływów cechuje samochody BEV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania po zakończeniu eksploatacji ($2,75 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,55 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050). Zastosowanie procesów recyklingu spowodowałoby wyraźne zmniejszenie wielkości destrukcyjnych oddziaływań w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($-1,27 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $-1,14 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Cykle istnienia pojazdów ICEV cechował zbliżony poziom szkodliwego oddziaływania na środowisko, przy czym najniższym wyróżniały się te z silnikami wykorzystującymi benzynę, a najwyższym – układy napędowe zasilane CNG, co było spowodowane głównie przez dodatkowe elementy tego typu instalacji (w tym m.in. butlę/zbiornik gazu).



Rys. 4.1. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model ReCiPe 2016)

W tabeli 4.1 zestawiono wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych, ze szczególnym uwzględnieniem trzech obszarów wpływu (zdrowie człowieka, ekosystemy, zasoby surowców). Rezultaty również zaprezentowano w punktach środowiskowe (Pt). Najwięcej szkodliwych oddziaływań odnotowano w kontekście wpływu na zdrowie człowieka, z kolei najmniej – w odniesieniu do problemu wyczerpywania zasobów surowców. Maksymalny poziom łącznych negatywnych wpływów charakteryzował cykl istnienia akumulatorowych pojazdów elektrycznych zakładający ich składowanie po zakończeniu eksploatacji ($2,75 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,55 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia ludzkiego $2,60 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $2,40 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Recykling tego typu pojazdów umożliwiłby istotne ograniczenie destrukcyjnych oddziaływań w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($-1,27 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $-1,14 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia ludzkiego $-1,07 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $-9,61 \cdot 10^2$ Pt dla tych z roku 2050). Cykle istnienia pojazdów z silnikami spalinowymi zasilanymi różnego rodzaju typami paliwa powodowały stosunkowo podobny poziom niebezpiecznych wpływów na środowisko. Najwięcej szkodliwych oddziaływań ponownie zauważono w przypadku aut z układem napędowym wykorzystującym CNG, a najmniej – benzynę.

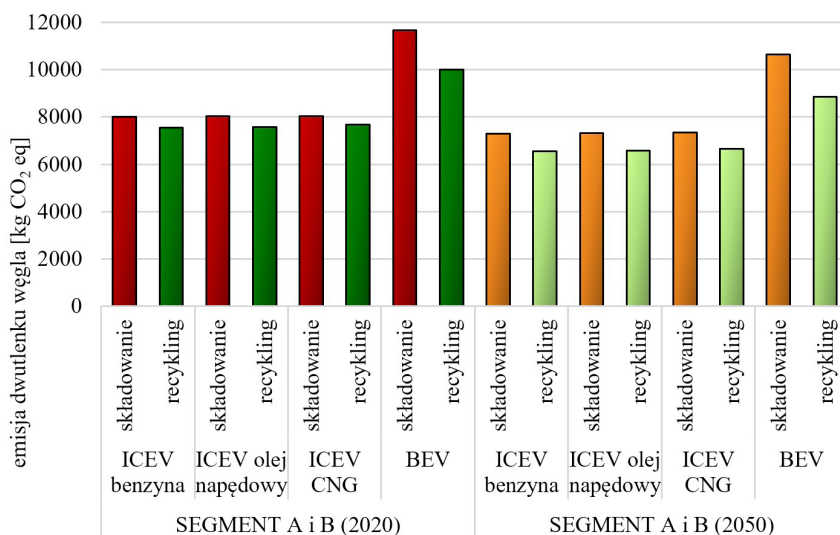
Tab. 4.1. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego oraz trzech obszarów wpływu (model ReCiPe 2016) [jednostka: Pt]

SEGMENT A i B		Zdrowie człowieka	Ekosystemy	Zasoby surowców	RAZEM	
2020	ICEV benzyna	składowanie	$1,72 \cdot 10^3$	$1,20 \cdot 10^2$	$5,66 \cdot 10^0$	$1,85 \cdot 10^3$
		recykling	$5,04 \cdot 10^2$	$-1,41 \cdot 10^0$	$4,96 \cdot 10^0$	$5,08 \cdot 10^2$
	ICEV olej napędowy	składowanie	$1,74 \cdot 10^3$	$1,20 \cdot 10^2$	$5,68 \cdot 10^0$	$1,87 \cdot 10^3$
		recykling	$5,28 \cdot 10^2$	$-9,82 \cdot 10^{-1}$	$4,98 \cdot 10^0$	$5,32 \cdot 10^2$
	ICEV CNG	składowanie	$1,77 \cdot 10^3$	$1,22 \cdot 10^2$	$5,74 \cdot 10^0$	$1,90 \cdot 10^3$
		recykling	$5,78 \cdot 10^2$	$3,28 \cdot 10^0$	$5,05 \cdot 10^0$	$5,86 \cdot 10^2$
	BEV	składowanie	$2,60 \cdot 10^3$	$1,39 \cdot 10^2$	$1,19 \cdot 10^1$	$2,75 \cdot 10^3$
		recykling	$-1,07 \cdot 10^3$	$-2,19 \cdot 10^2$	$9,97 \cdot 10^0$	$-1,27 \cdot 10^3$
2050	ICEV benzyna	składowanie	$1,59 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^2$	$5,42 \cdot 10^0$	$1,71 \cdot 10^3$
		recykling	$3,48 \cdot 10^2$	$-6,06 \cdot 10^0$	$4,72 \cdot 10^0$	$3,48 \cdot 10^2$
	ICEV olej napędowy	składowanie	$1,61 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^2$	$5,46 \cdot 10^0$	$1,74 \cdot 10^3$
		recykling	$3,72 \cdot 10^2$	$-5,62 \cdot 10^0$	$4,74 \cdot 10^0$	$3,70 \cdot 10^2$
	ICEV CNG	składowanie	$1,64 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^2$	$5,51 \cdot 10^0$	$1,76 \cdot 10^3$
		recykling	$4,06 \cdot 10^2$	$-3,04 \cdot 10^0$	$4,81 \cdot 10^0$	$4,08 \cdot 10^2$
	BEV	składowanie	$2,40 \cdot 10^3$	$1,39 \cdot 10^2$	$1,12 \cdot 10^1$	$2,55 \cdot 10^3$
		recykling	$-9,61 \cdot 10^2$	$-1,88 \cdot 10^2$	$9,33 \cdot 10^0$	$-1,14 \cdot 10^3$

W ramach drugiego etapu badań skorzystano z modelu IPCC 2021, który umożliwił ocenę poziomu emisji gazów cieplarnianych. Analizie poddano trzy kategorie wpływu. Zaprezentowano tylko kluczowe z otrzymanych wyników. Rezultaty przedstawiono w kilogramach ekwiwalentu ditlenku węgla ($\text{kg CO}_2 \text{ eq}$).

Gazami cieplarnianymi (szklarniowymi) nazywane są te składniki atmosfery ziemskiej, które przez swoje własności fizykochemiczne posiadają zdolność do zatrzymywania energii słonecznej w jej obrębie. Zalicza się do nich przede wszystkim parę wodną, ditlenek węgla, tlenek diazotu, metan i freony. Niektóre spośród wymienionych związków stanowią naturalne składniki atmosfery, obecne w niej od milionów lat. Dzięki nim na Ziemi powstały warunki klimatyczne, które umożliwiły powstanie i rozwój życia. Jednak przez działalność człowieka ich stężenie wzrasta. Dodatkowo w atmosferze pojawiły się gazy nieobecne w warunkach naturalnych, wykazujące analogiczne właściwości polegające na absorpcji promieniowania. Współcześnie obserwowany jest wzrost średniej temperatury powietrza w przy powierzchniowych warstwach atmosfery. Zwiększenie stężenia gazów cieplarnianych wywołane działalnością człowieka jest zasadniczym powodem ocieplenia klimatu na Ziemi. Dominują-

cy udział w efekcie cieplarnianym cechuje parę wodną, której zawartość w atmosferze jest zmienna w czasie i różna nad poszczególnymi obszarami planety (od ok. 40% do ok. 95%). Przyczynę tego zjawiska stanowi cykl krążenia wody w środowisku mający miejsce na skutek procesów skraplania, parowania, sublimacji i resublimacji. Działalność ludzka ma znikomy bezpośredni wpływ na zawartość tego gazu w atmosferze. Drugim istotnym dla efektu cieplarnianego związkiem chemicznym jest ditlenek węgla. Oddziaływania antropogeniczne, w tym procesy transportu, mają istotny wpływ na jego udział w atmosferze. Od początku ery przemysłowej jego zawartość systematycznie wzrasta. Metan, tlenek diazotu i freony, które również wpływają na pogłębianie efektu cieplarnianego, uwalniane są najczęściej w procesach przemysłowych, transportowych oraz na skutek działalności rolniczej [32, 164, 321].

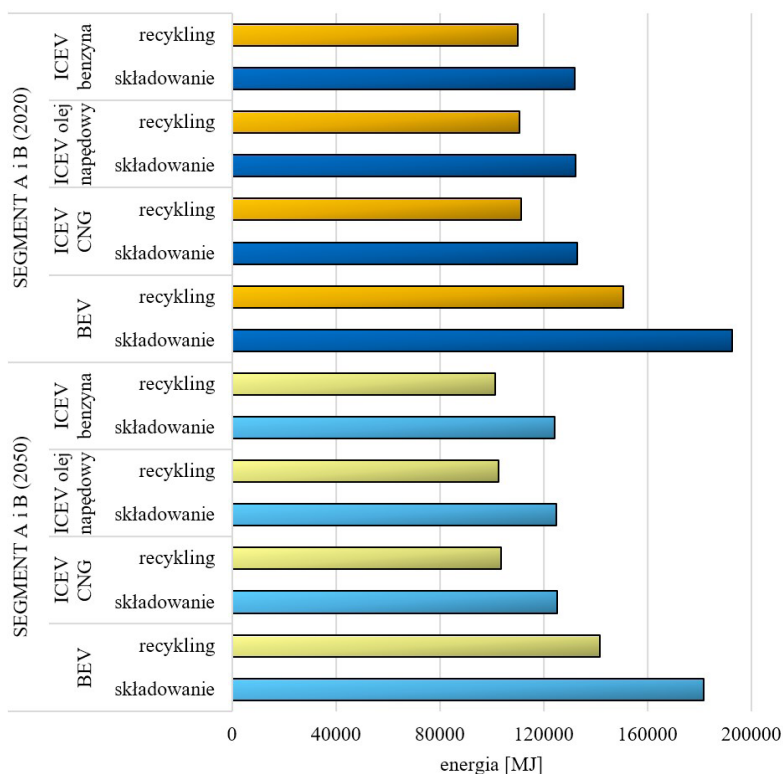


Rys. 4.2. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021)

Na rysunku 4.2 zestawiono wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego oraz różnych horyzontów czasowych. Najwięcej szkodliwych oddziaływań odnotowano dla cykli istnienia zakładających zagospodarowanie użytkowe w formie składowania na wysypisku odpadów, z kolei najmniej – w formie recyklingu. Cykle istnienia samochodów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej negatywnych wpływów w obszarze emisji gazów cieplarnianych w porównaniu z tymi z roku 2020. Ponownie najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań wyróżniał cykl istnienia aut BEV zakładający

ich składowanie ($1,17 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,06 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq – w roku 2050). Cykl istnienia wszystkich rozpatrywanych pojazdów uwzględniający składowanie zamiast recyklingu powoduje wyższy poziom emisji GHG (o od ok. 5% do ok. 17%). Cykle istnienia aut ICEV cechowały się zbliżonym poziomem szkodliwego wpływu na otoczenie, jednak najniższym poziomem emisji gazów szklarniowych wyróżniały się te z silnikami wykorzystującymi benzynę, a najwyższym – zasilane CNG.

Trzeci etap badań obejmował wykorzystanie modelu CED. Dokonano analizy sześciu kategorii wpływu, jednak przedstawiono wyłącznie najważniejsze z uzyskanych wyników. Rezultaty zaprezentowano w MJ zapotrzebowania na energię.

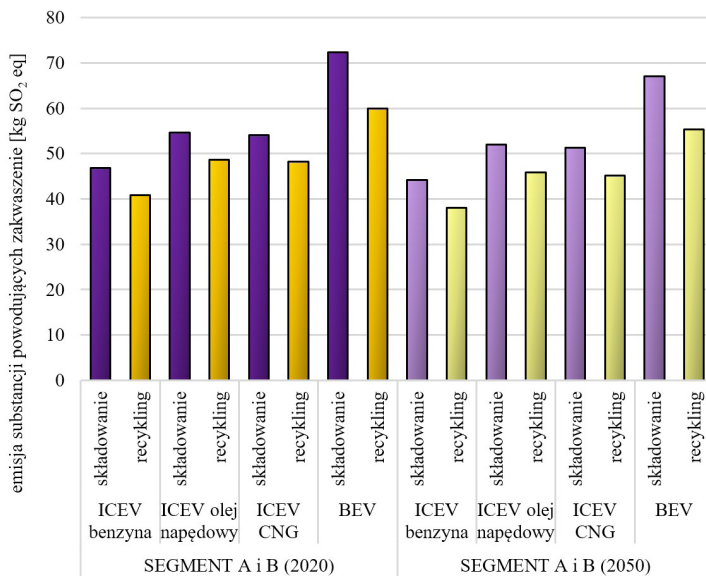


Rys. 4.3. Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CED V1.11)

Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia rozważanych samochodów osobowych segmentu A i B zestawiono na rysunku 4.3. Cykle istnienia samochodów zarejestrowanych w roku 2020 cechują się wyższą energochłonnością w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Rów-

niez sposób zagospodarowania poużytkowego ma wpływ na poziom zapotrzebowania na energię. W przypadku cykli istnienia aut mających zostać poddanych składowaniu po zakończeniu eksploatacji odnotowano wyraźnie wyższy poziom energochłonności (o od ok. 20% do ok. 28%). Najwyższe zapotrzebowanie na energię wyróżnia cykle istnienia akumulatorowych pojazdów elektrycznych ($1,93 \cdot 10^5$ MJ dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,82 \cdot 10^5$ MJ – w roku 2050). Cykle istnienia pojazdów z silnikami spalinowymi zasilanymi odmiennymi rodzajami paliw cechowały się zasadniczo podobnym poziomem energochłonności. Największe zapotrzebowanie na energię odnotowano w przypadku aut z układem napędowym wykorzystującym CNG, a najmniejsze – benzynę.

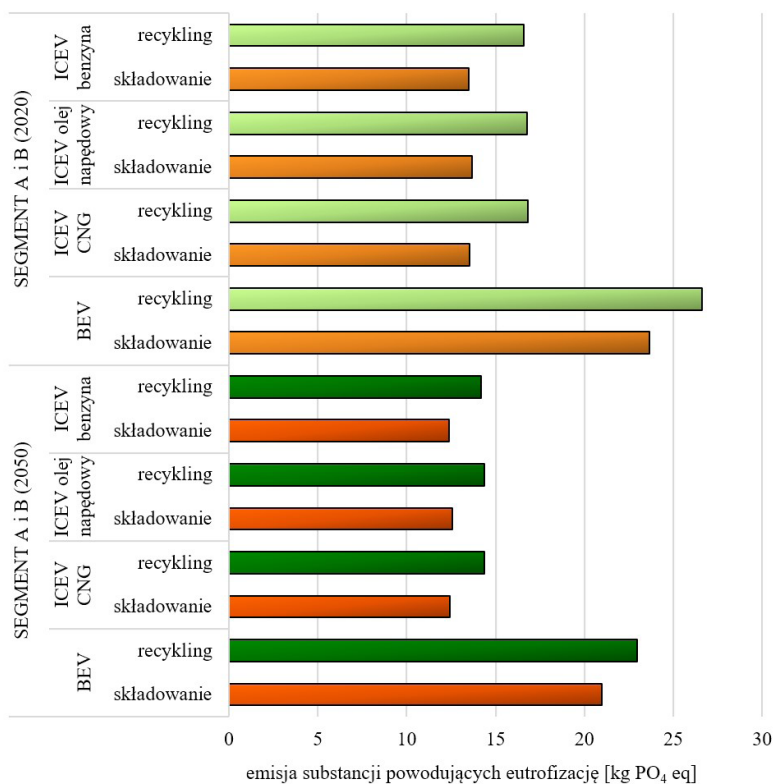
W czwartym etapie badań wykorzystano model CML-IA baseline. Ocenie poddano jedenaście kategorii wpływu. W ramach monografii przybliżono wyłącznie wybrane wyniki. Rezultaty analiz zaprezentowano w formie wielkości emisji substancji odniesienia – dla substancji o działaniu zakwaszającym w kg SO₂ eq, a dla związków o charakterze eutrofizującym – w kg PO₄ eq.



Rys. 4.4. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CML-IA baseline)

Na rysunku 4.4 zobrazowano wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w całym cyklu istnienia rozważanych samochodów osobowych segmentu A i B. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały istotnie większe szkodliwe oddziaływanie na otoczenie w porównaniu z tymi, które mają zostać zareje-

strowane w roku 2050. Cykl istnienia wszystkich rozpatrywanych aut zakładający ich formę zagospodarowania poużytkowego w postaci składowania powoduje więcej emisji substancji o charakterze zakwaszającym środowisko (o od ok. 12% do ok. 21%). Najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań w analizowanym obszarze cechuje samochody BEV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania na wysypisku odpadów po zakończeniu eksploatacji ($7,23 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $6,71 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq – w roku 2050). Zastosowanie procesów recyklingu spowodowałoby zmniejszenie wielkości destrukcyjnych oddziaływań w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($5,99 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla aut z roku 2020 i $5,54 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla tych z roku 2050). Cykle istnienia pojazdów ICEV cechował zbliżony poziom niebezpiecznego wpływu na otoczenie w kontekście emisji substancji zwiększających kwasowość środowiska.

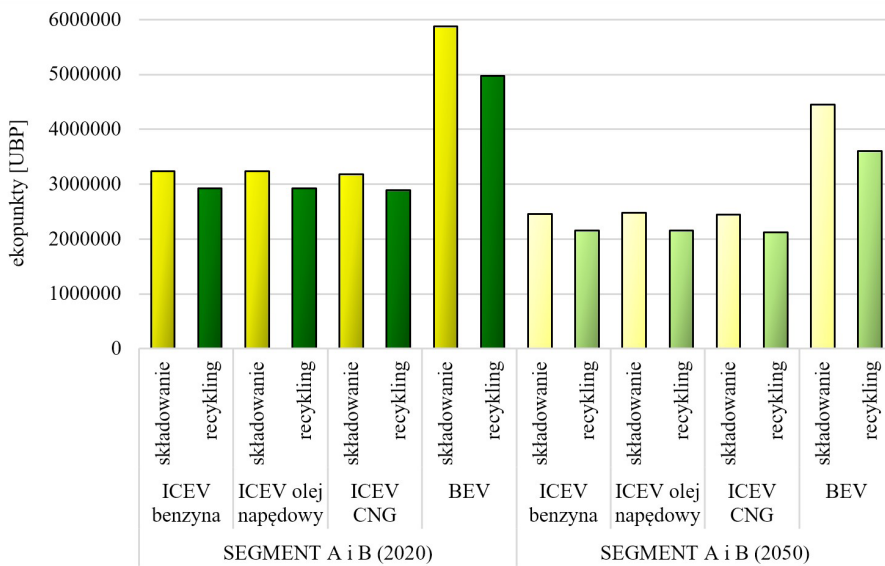


Rys. 4.5. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CML-IA baseline)

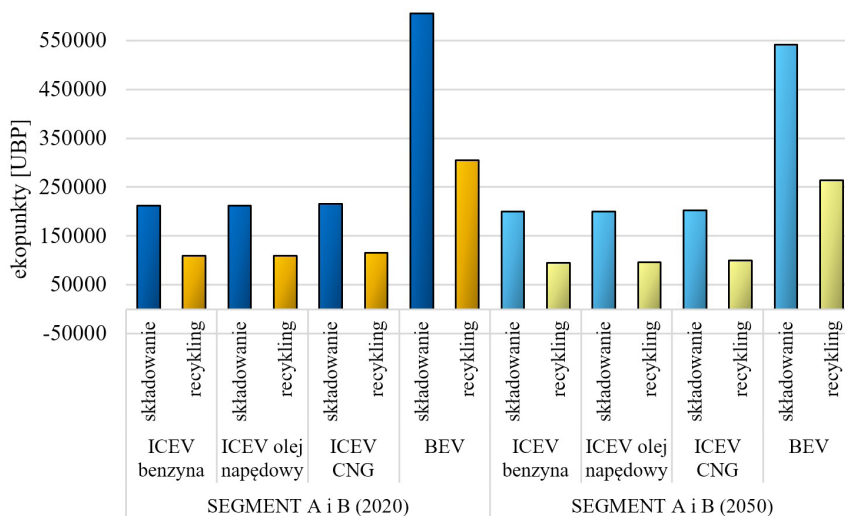
Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego oraz horyzontów czasowych, zestawiono z kolei na rysunku 4.5. Najwięcej negatywnych wpływów w tym względzie odnotowano dla cykli istnienia zakładających zagospodarowanie użytkowe w formie składowania na wysypisku odpadów, a najmniej – w formie recyklingu. Cykle istnienia aut mających zostać zarejestrowanymi w roku 2050 powodowałyby mniej negatywnych wpływów w obszarze emisji substancji powodujących eutrofizację w porównaniu z tymi z roku 2020. Najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań wyróżniał cykl istnienia aut BEV zakładający ich recykling ($2,66 \cdot 10^1$ kg PO_4 eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,30 \cdot 10^1$ kg PO_4 eq – w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich rozpatrywanych pojazdów uwzględniające składowanie powodują niższy poziom emisji związków chemicznych o charakterze eutrofizującym (o od ok. 9% do ok. 24%). Jest to spowodowane substancjami stosowanymi w procesach recyklingu, cechującymi się silnym negatywnym oddziaływaniem na środowisko w tym względzie. Cykle istnienia aut ICEV charakteryzowały się podobnym poziomem emisji związków zwiększających stopień eutrofizacji środowiska.

Ostatni, piąty etap badań obejmował wykorzystanie modelu Ecological Scarcity 2021. Dokonano analizy dziewiętnastu kategorii wpływu, jednak przedstawiono wyłącznie kluczowe wyniki odnoszące się do emisji wybranych grup związków chemicznych do środowiska atmosferycznego (o działaniu kancerogennym) oraz substancji (metale ciężkie) i procesów (zmiana sposobu użytkowania gruntów) wpływających na środowisko glebowe. Rezultaty analiz zaprezentowano w ekopunktach (UBP).

Zgodnie z definicją Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (ang. International Agency for Research on Cancer, IARC), działającej przy WHO, substancja kancerogenna to związek lub mieszanina związków chemicznych, które inicjują powstanie nowotworu złośliwego lub zwiększają częstotliwość jego nawrotu. Na skutek aktywacji metabolicznej w organizmie substancje mutagenne mogą wejść w interakcje z kwasami nukleinowymi DNA, co może prowadzić do zmian w kodzie genetycznym. Jeżeli tego typu błąd nie zostanie naprawiony, zachodzi mutacja, nadmierna ekspresja genów i niekontrolowane podziały komórki rakowej, a w konsekwencji – rozwój nowotworu. Zaburzenia funkcji genów mogą być spowodowane czynnikami fizycznymi (np. promieniowaniem ultrafioletowym), związkami chemicznymi (np. na skutek zanieczyszczenia środowiska) lub wektorami biologicznymi (np. przez oddziaływanie wirusów, bakterii, pasożytów). Szacuje się, że czynniki środowiskowe mogą odpowiadać za ok. 70–90% przypadków nowotworów [63, 107].



Rys. 4.6. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu rakotwórczym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)



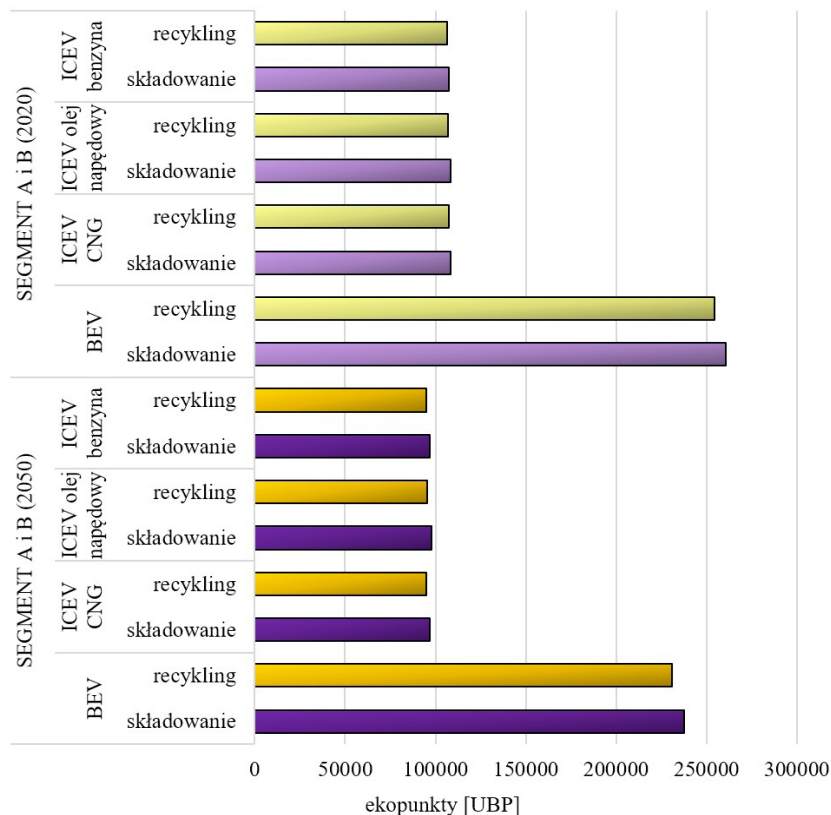
Rys. 4.7. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Na rysunku 4.6 zestawiono wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu rakotwórczym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B. Cykle istnienia samochodów zarejestrowanych w roku 2020 cechują się wyższym poziomem szkodliwych następstw środowiskowych w analizowanym zakresie, w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Także wybór sposobu zagospodarowania użytkowego wpływa na poziom emisji związków chemicznych o charakterze rakotwórczym. W przypadku cykli istnienia aut, które mają zostać poddane składowaniu po zakończeniu eksploatacji, odnotowano wyższy poziom destrukcyjnych emisji (o od ok. 9% do ok. 19%). Najwyższymi wartościami rozpatrywanych emisji wyróżniają się cykle istnienia akumulatorowych pojazdów elektrycznych zakładające ich składowanie ($5,88 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $4,46 \cdot 10^6$ UBP – w roku 2050). Cykle istnienia pojazdów z silnikami spalinowymi zasilanymi odmiennymi rodzajami paliw cechowały się zasadniczo zbliżonym poziomem emisji substancji rakotwórczych.

Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia rozważanych samochodów osobowych segmentu A i B zestawiono natomiast na rysunku 4.7. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe negatywne oddziaływanie na otoczenie w analizowanym obszarze w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykle istnienia wszystkich rozpatrywanych aut zakładające ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci recyklingu niosą ze sobą o około połowę mniejszą ilość emisji metali ciężkich. Najwyższy poziom niebezpiecznych oddziaływań w rozważanym zakresie cechuje samochody BEV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania na wysypisku odpadów po zakończeniu eksploatacji ($6,06 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $5,41 \cdot 10^5$ UBP – w roku 2050). Zastosowanie procesów recyklingu spowodowałoby zmniejszenie wielkości szkodliwych wpływów w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($3,04 \cdot 10^5$ UBP dla aut z roku 2020 i $2,64 \cdot 10^5$ UBP dla tych z roku 2050). Cykle istnienia aut ICEV cechowały się podobnym poziomem negatywnych następstw środowiskowych w stosunku do otoczenia, jednak najniższym poziomem emisji metali ciężkich wyróżniały się te z silnikami wykorzystującymi benzynę, a najwyższym – zasilane CNG.

Na rysunku 4.8 zaprezentowano natomiast wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B. Najwięcej negatywnych oddziaływań w tym względzie odnotowano dla cykli istnienia zakładających zagospodarowanie użytkowe w formie składowania na wysypisku odpadów, a najmniej – w formie recyklingu. Cykle istnienia samochodów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej destrukcyjnych wpływów w obszarze zmiany sposobu użytkowania gruntów w porównaniu z tymi z roku 2020. Ponownie najwyższy poziom szkodliwych oddziaływań wyróżniał cykl istnienia akumulatorowych pojazdów elektrycznych zakładający ich składowanie

($2,60 \cdot 10^5$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,38 \cdot 10^5$ UBP – w roku 2050). Cykl istnienia wszystkich rozpatrywanych aut uwzględniający składowanie zamiast recyklingu powoduje więcej negatywnych procesów związanych ze zmianą użytkowania gruntów (o od ok. 1% do ok. 4%). Cykle istnienia pojazdów z silnikami spalinowymi zasilanymi odmiennymi rodzajami paliw cechowały się zbliżonym poziomem szkodliwych następstw środowiskowych w analizowanym obszarze.

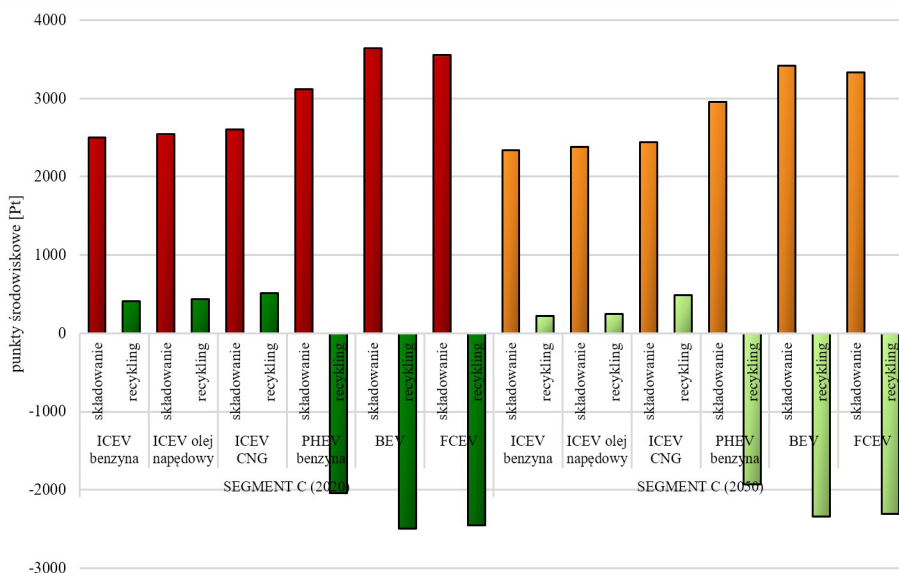


Rys. 4.8. Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

4.2. Samochody osobowe segmentu C

W ramach dalszych analiz wpływu cykli istnienia wybranych środków transportu samochodowego na otoczenie dokonano oceny potencjalnego oddziaływania na środowisko pojazdów segmentu C (niższy średni), z uwzględnieniem sześciu odmiennych układów napędowych (ICEV zasilany benzyną, olejem napędowym i CNG,

BEV, PHEV zasilany benzyną oraz FCEV). Analogicznie jak dla segmentu A i B rozpatrywano dwa scenariusze zagospodarowania poużytkowego – składowanie na wysypisku odpadów oraz recykling. Przyjęto także takie same scenariusze horyzontu czasowego, pierwszy obejmujący auta zarejestrowane w roku 2020, natomiast drugi – zawierający prognozę dla samochodów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Ponownie ocenę zrealizowano dla cyklu istnienia tworzyw, materiałów i elementów rozpatrywanych środków transportu, a wyniki w odniesieniu do cykli paliwowych oraz energetycznych zaprezentowano w podrozdziale 4.10.



Rys. 4.9. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model ReCiPe 2016)

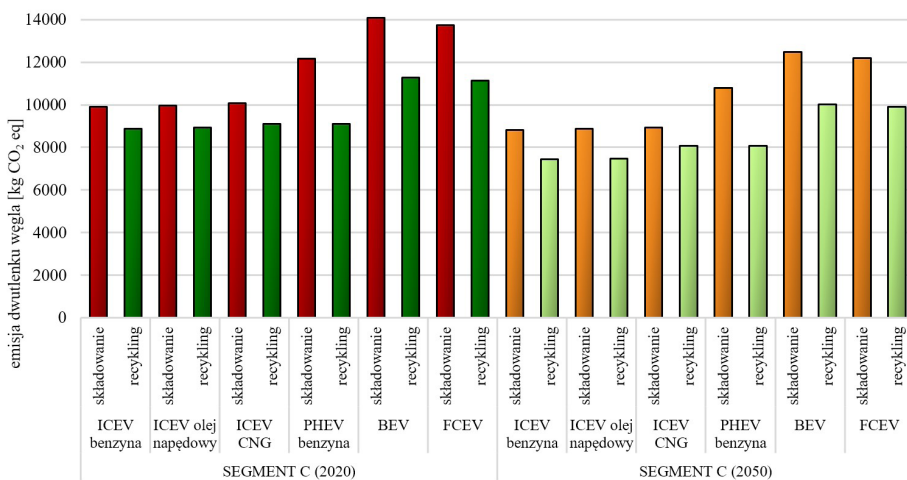
Pierwszy etap badań był analogiczny jak w przypadku pojazdów z segmentu A i B. Obejmował on analizy realizowane z wykorzystaniem modelu ReCiPe 2016. Przybliżono wyłącznie najważniejsze z uzyskanych wyników. Rezultaty zaprezentowano w punktach środowiskowych (Pt). Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w całym cyklu istnienia rozpatrywanych samochodów osobowych segmentu C zobrazowano na rysunku 4.9.auta zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały istotnie większe negatywne oddziaływanie na otoczenie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Cykl istnienia wszystkich analizowanych pojazdów zakładający ich formę zagospodarowania poużytkowego w postaci składowania powoduje więcej negatywnych następstw środowiskowych (o od ok. 80% do ok. 270%) w porównaniu z zagospodarowaniem w formie recyklingu. Najwyższy poziom destrukcyjnych wpływów cechuje akumu-

latorowe samochody elektryczne, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania na wysypisku odpadów po zakończeniu eksploatacji ($3,64 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,42 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050). Zastosowanie recyklingu spowodowałoby istotne ograniczenie wielkości niebezpiecznych oddziaływań w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($-2,04 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $-1,93 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Cykle istnienia pojazdów ICEV cechował zbliżony poziom szkodliwego wpływu na środowisko. Najniższym wśród nich wyróżniały się samochody z silnikami wykorzystującymi benzynę, z kolei najwyższym – układy napędowe zasilane CNG, co było spowodowane głównie przez dodatkowe elementy instalacji tego rodzaju.

Tab. 4.2. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego oraz trzech obszarów wpływu (model ReCiPe 2016)

SEGMENT C			Zdrowie człowieka	Ekosystemy	Zasoby surowców	RAZEM
2020	ICEV benzyna	składowanie	$2,32 \cdot 10^3$	$1,70 \cdot 10^2$	$7,04 \cdot 10^0$	$2,50 \cdot 10^3$
		recykling	$4,18 \cdot 10^2$	$-1,74 \cdot 10^1$	$5,98 \cdot 10^0$	$4,06 \cdot 10^2$
	ICEV olej napędowy	składowanie	$2,36 \cdot 10^3$	$1,71 \cdot 10^2$	$7,06 \cdot 10^0$	$2,54 \cdot 10^3$
		recykling	$4,48 \cdot 10^2$	$-1,68 \cdot 10^1$	$6,02 \cdot 10^0$	$4,36 \cdot 10^2$
	ICEV CNG	składowanie	$2,42 \cdot 10^3$	$1,76 \cdot 10^2$	$7,24 \cdot 10^0$	$2,60 \cdot 10^3$
		recykling	$5,20 \cdot 10^2$	$-1,16 \cdot 10^1$	$6,20 \cdot 10^0$	$5,14 \cdot 10^2$
	PHEV benzyna	składowanie	$2,92 \cdot 10^3$	$1,85 \cdot 10^2$	$1,14 \cdot 10^1$	$3,12 \cdot 10^3$
		recykling	$-1,79 \cdot 10^3$	$-2,69 \cdot 10^2$	$9,01 \cdot 10^0$	$-2,04 \cdot 10^3$
	BEV	składowanie	$3,44 \cdot 10^3$	$1,94 \cdot 10^2$	$1,53 \cdot 10^1$	$3,64 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,15 \cdot 10^3$	$-3,49 \cdot 10^2$	$1,24 \cdot 10^1$	$-2,49 \cdot 10^3$
	FCEV	składowanie	$3,34 \cdot 10^3$	$1,89 \cdot 10^2$	$1,56 \cdot 10^1$	$3,55 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,12 \cdot 10^3$	$-3,41 \cdot 10^2$	$1,28 \cdot 10^1$	$-2,45 \cdot 10^3$
2050	ICEV benzyna	składowanie	$2,18 \cdot 10^3$	$1,66 \cdot 10^2$	$6,54 \cdot 10^0$	$2,34 \cdot 10^3$
		recykling	$2,34 \cdot 10^2$	$-2,24 \cdot 10^1$	$5,46 \cdot 10^0$	$2,18 \cdot 10^2$
	ICEV olej napędowy	składowanie	$2,20 \cdot 10^3$	$1,67 \cdot 10^2$	$6,56 \cdot 10^0$	$2,38 \cdot 10^3$
		recykling	$2,64 \cdot 10^2$	$-2,20 \cdot 10^1$	$5,50 \cdot 10^0$	$2,48 \cdot 10^2$
	ICEV CNG	składowanie	$2,25 \cdot 10^3$	$1,78 \cdot 10^2$	$3,99 \cdot 10^0$	$2,44 \cdot 10^3$
		recykling	$4,83 \cdot 10^2$	$-1,18 \cdot 10^1$	$3,42 \cdot 10^0$	$4,82 \cdot 10^2$
	PHEV benzyna	składowanie	$2,74 \cdot 10^3$	$1,92 \cdot 10^2$	$7,62 \cdot 10^0$	$2,95 \cdot 10^3$
		recykling	$-1,68 \cdot 10^3$	$-2,78 \cdot 10^2$	$6,02 \cdot 10^0$	$-1,93 \cdot 10^3$
	BEV	składowanie	$3,21 \cdot 10^3$	$2,03 \cdot 10^2$	$1,06 \cdot 10^1$	$3,42 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,01 \cdot 10^3$	$-3,66 \cdot 10^2$	$8,53 \cdot 10^0$	$-2,34 \cdot 10^3$
	FCEV	składowanie	$3,11 \cdot 10^3$	$1,97 \cdot 10^2$	$1,11 \cdot 10^1$	$3,33 \cdot 10^3$
		recykling	$-1,98 \cdot 10^3$	$-3,56 \cdot 10^2$	$9,03 \cdot 10^0$	$-2,30 \cdot 10^3$

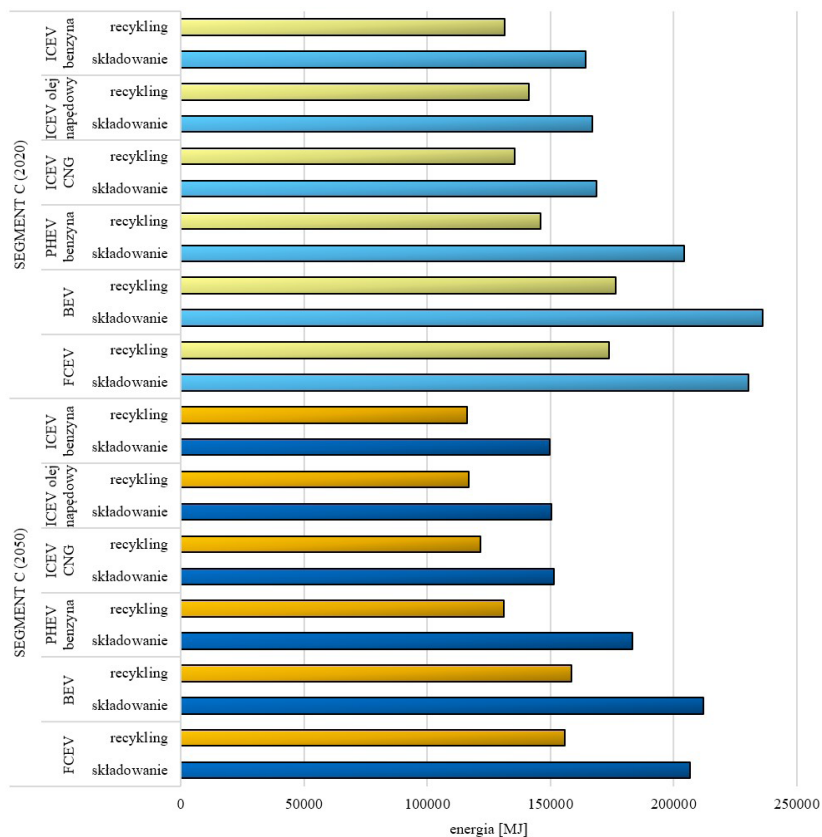
Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych, ze szczególnym uwzględnieniem trzech obszarów wpływu (zdrowie człowieka, ekosystemy, zasoby surowców) zestawiono natomiast w tabeli 4.2. Zaprezentowano je także w jednostce punktów środowiskowych (Pt). Najwyższy poziom negatywnych oddziaływań odnotowano w zakresie wpływu na zdrowie człowieka, a najniższy – w kontekście problematyki wyczerpywania zasobów surowców. Najwięcej destrukcyjnych wpływów zauważono dla cyklu istnienia BEV, uwzględniającego ich składowanie po zakończeniu eksploatacji ($3,64 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,42 \cdot 10^3$ – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia ludzi $3,44 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $3,21 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Recykling pojazdów z segmentu niższego średniego pozwoliłby na istotne ograniczenie niebezpiecznych następstw środowiskowych w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($-2,04 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $-1,93 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050, w tym w zakresie zdrowia człowieka $-2,15 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $-2,01 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Cykle istnienia ICEV zasilanych odmiennymi typami paliwa skutkowały stosunkowo podobnym poziomem szkodliwych wpływów na otoczenie. Najwięcej negatywnych oddziaływań zauważono jednak w przypadku aut z układem napędowym wykorzystującym CNG, a najmniej – benzynę.



Rys. 4.10. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021)

Drugi etap badań zakładał skorzystanie modelu IPCC 2021. Ponownie przedstawiono tylko kluczowe z otrzymanych wyników. Rezultaty zaprezentowano w kg CO₂ eq. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C zestawiono na rysunku 4.10. Najwięcej

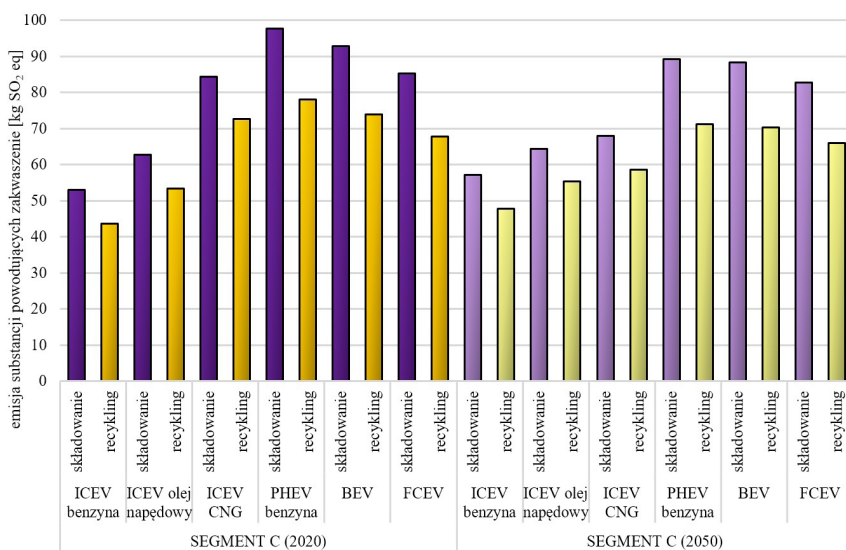
destrukcyjnych oddziaływań odnotowano dla cykli istnienia zakładających zagospodarowanie użytkowe w formie składowania na wysypisku odpadów, z kolei najmniej – w formie recyklingu. Cykle istnienia samochodów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniejszą ilość emisji gazów cieplarnianych w porównaniu z tymi z roku 2020. Najwyższy poziom szkodliwych oddziaływań ponownie charakteryzował cykl istnienia akumulatorowych pojazdów elektrycznych obejmujący ich składowanie ($1,41 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,25 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq w roku 2050). Cykl istnienia wszystkich ocenianych aut zakładający składowanie na wysypisku odpadów powoduje wyższy poziom emisji gazów szklarniowych (o od ok. 9% do ok. 25%). Cykle istnienia pojazdów ICEV posiadały zbliżony poziom negatywnego oddziaływania na otoczenie, jednak najniższym poziomem emisji gazów szklarniowych wyróżniły się auta z silnikami wykorzystującymi benzynę, natomiast najwyższym – zasilane CNG.



Rys. 4.11. Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CED V1.11)

W ramach trzeciego etapu badań wykorzystano model CED. W ramach monografii przedstawiono wyłącznie najważniejsze z uzyskanych wyników. Rezultaty zaprezentowano w jednostce MJ zapotrzebowania na energię. Na rysunku 4.11 zestawiono wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia rozważanych samochodów osobowych segmentu C. Cykle istnienia samochodów zarejestrowanych w roku 2020 wyróżniają się wyższą energochłonnością w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Sposób zagospodarowania użytkowego również wpływa na poziom zapotrzebowania na energię. Dla cykli istnienia aut mających zostać poddanych składowaniu po zakończeniu eksploatacji odnotowano istotnie wyższy poziom energochłonności (o od ok. 15% do ok. 28%). Maksymalne zapotrzebowanie na energię cechuje cykle istnienia BEV ($2,36 \cdot 10^5$ MJ dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,12 \cdot 10^5$ MJ – w roku 2050). Cykle istnienia ICEV zasilanych różnymi rodzajami paliw cechowały się stosunkowo podobnym poziomem energochłonności. Największe zapotrzebowanie na energię odnotowano w przypadku pojazdów z układem napędowym wykorzystującym CNG, z kolei najmniejsze – benzynę.

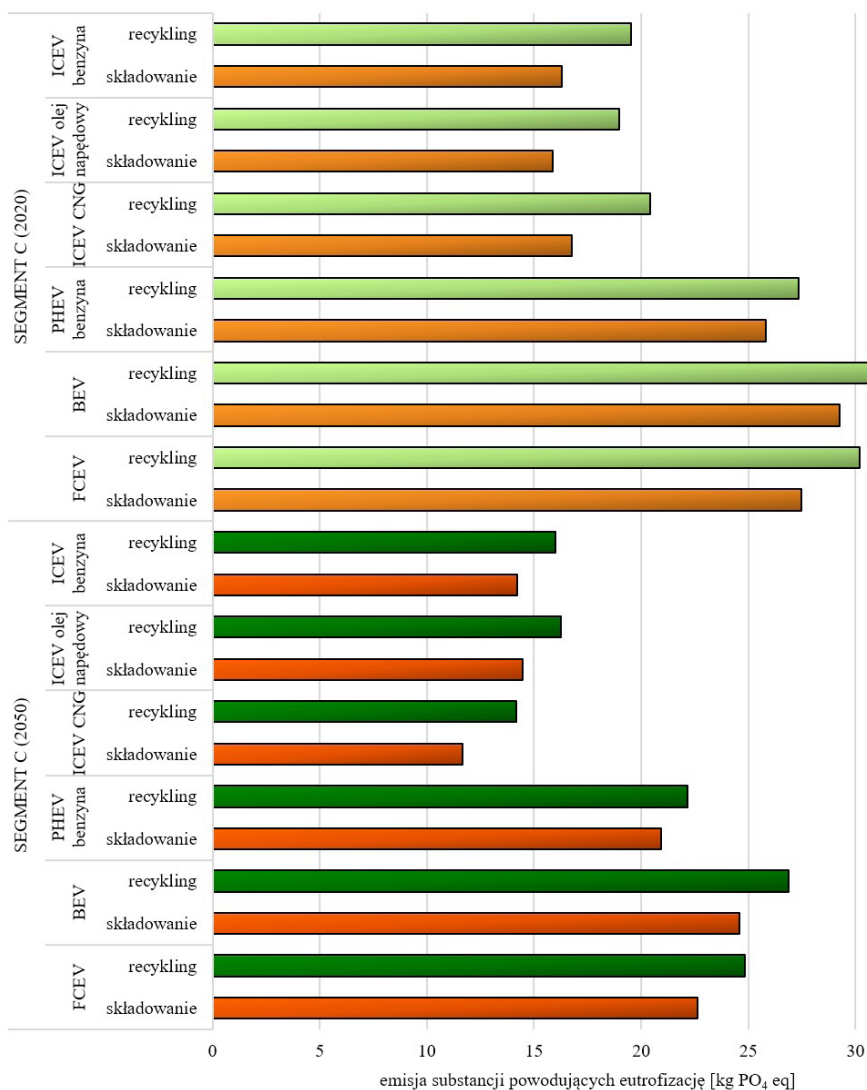
Czwarty etap badań przeprowadzono z zastosowaniem modelu CML-IA baseline. Ponownie zdecydowano się na przybliżenie wyłącznie wybranych wyników. Rezultaty analiz zaprezentowano w jednostkach wielkości emisji wybranych substancji odniesienia (w $\text{kg SO}_2 \text{ eq}$ dla związków chemicznych o charakterze zakwaszającym i $\text{kg PO}_4 \text{ eq}$ – eutrofizującym).



Rys. 4.12. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CML-IA baseline)

Zakwaszenie środowiska to zjawisko polegające na postępującym zmniejszaniu się wartości pH poszczególnych jego elementów. Zachodzi ono wskutek zakłócenia stanu ekologicznej równowagi procesów wymiany materii i energii pomiędzy poszczególnymi częściami ekosystemów, wewnątrz danych geosfer (atmosfery, hydrosfery, pedosfery) lub też między nimi, w ramach biosfery Ziemi. Zakwaszenie jest powodowane przez procesy naturalne, np. erupcje wulkanów, oddychanie, humifikację lub występuje na skutek antropopresji, np. w formie emisji zanieczyszczeń (m.in. SO_2 , NO_x , NH_3). Jednym ze skutków zakwaszenia są zmiany składu gatunkowego biocenoz i liczebności populacji w naturalnych ekosystemach. Zakwaszenie stanowi zatem jeden z czynników wpływających na lokalne oraz globalne zmiany klimatu. Szczególnie ważnym problemem jest także wzrastająca kwasowość gleb, wód oceanicznych czy powstawanie „kwaśnych opadów”. Związki chemiczne o charakterze zakwaszającym (głównie tlenki siarki) przyczyniają się także do powstawania smogu typu londyńskiego (kwaśnego), który w destrukcyjny sposób oddziałuje na układ krążenia oraz oddechowy człowieka [191, 216].

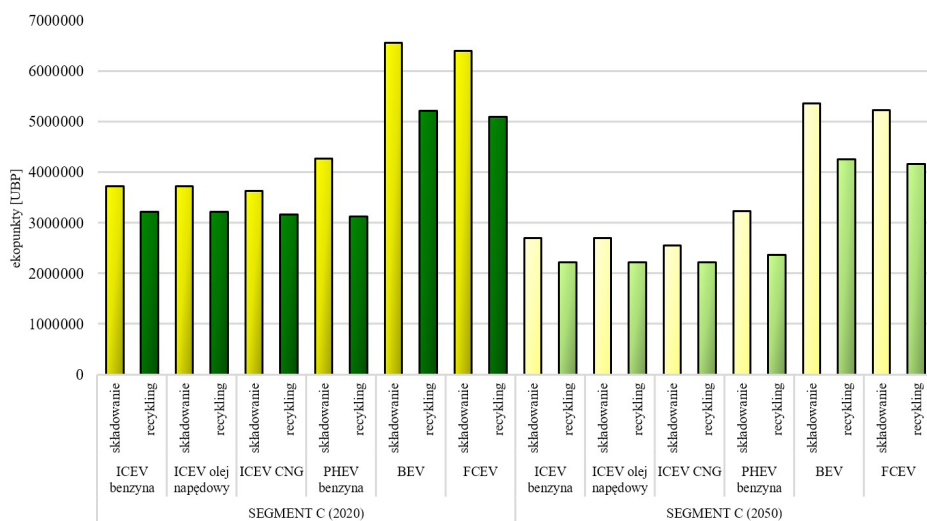
Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w całym cyklu istnienia rozważanych samochodów osobowych segmentu C zobrazowano na rysunku 4.12.auta zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe negatywne oddziaływanie na środowisko w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykl istnienia rozważanych pojazdów zakładający ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania powoduje wyższy poziom emisji substancji zakwaszających środowisko (o od ok. 14% do ok. 20%). Najwyższy poziom niebezpiecznych wpływów w analizowanym obszarze cechuje akumulatorowe samochody elektryczne, których tworzywa, materiały i elementy po zakończeniu eksploatacji zostałyby przeznaczone do składowania na wysypisku odpadów ($9,28 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $6,71 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq – w roku 2050). Zastosowanie recyklingu skutkowałoby zmniejszeniem wielkości szkodliwych oddziaływań w kontekście całego ich cyklu istnienia ($5,99 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq dla aut z roku 2020 i $8,83 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq dla tych z roku 2050). Wśród cykli istnienia pojazdów z silnikiem spalinowym najniższym poziomem negatywnego wpływu na otoczenie w kontekście emisji substancji o charakterze zakwaszającym wyróżniły się samochody z silnikami zasilanymi benzyną ($5,30 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq dla aut z roku 2020 i $5,72 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq z roku 2050 w przypadku cyklu uwzględniającego składowanie oraz $4,36 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq dla aut z roku 2020 i $4,78 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq z roku 2050 w przypadku cyklu uwzględniającego recykling).



Rys. 4.13. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CML-IA baseline)

Z kolei na rysunku 4.13 zobrazowano wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C. Najwięcej szkodliwych wpływów w tym względzie odnotowano dla cykli istnienia obejmujących zagospodarowanie poużytkowe w formie składowania na wysypisku odpadów, a najmniej – w formie recyklingu. Cykle istnienia aut, które

mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej destrukcyjnych wpływów w obszarze emisji substancji o charakterze eutrofizującym w porównaniu z tymi z roku 2020. Najwyższy poziom negatywnych oddziaływań wyróżniał cykl istnienia aut BEV zakładający ich recykling ($3,20 \cdot 10^1$ kg PO₄ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,69 \cdot 10^1$ kg PO₄ eq – w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich analizowanych pojazdów uwzględniające składowanie powodowały niższy poziom emisji związków chemicznych o charakterze eutrofizującym (o od ok. 6% do ok. 18%) w porównaniu z zagospodarowaniem z zastosowaniem procesów recyklingu. Wynika to ze stosowania podczas recyklingu substancji cechujących się silnym szkodliwym oddziaływaniem na otoczenie w tym względzie. Cykle istnienia aut ICEV wyróżniały się zbliżonym poziomem emisji związków zwiększających stopień eutrofizacji środowiska.



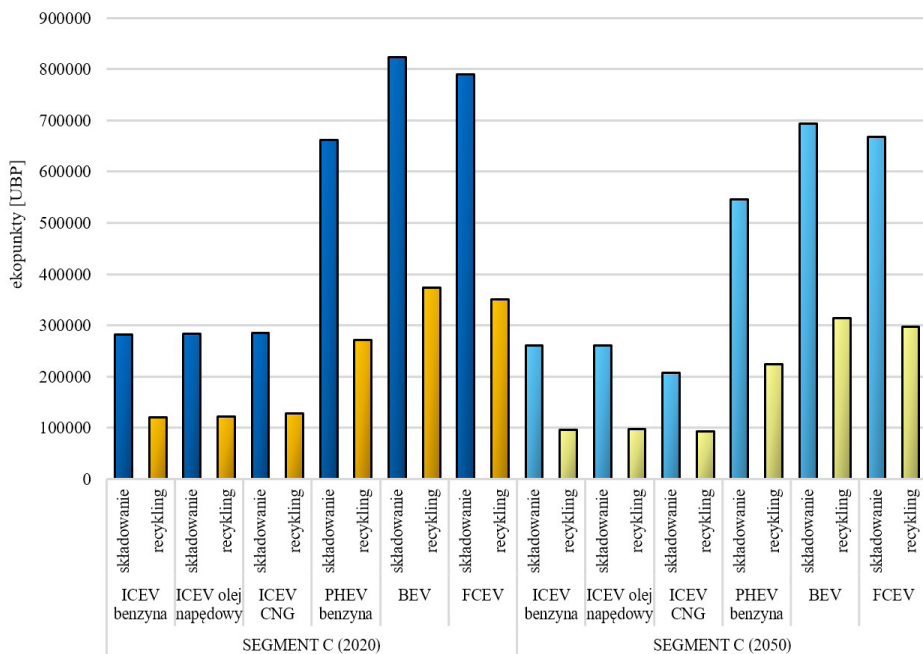
Rys. 4.14. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

W ramach ostatniego etapu badań wykorzystano model Ecological Scarcity 2021. Ponownie przedstawiono wyłącznie kluczowe wyniki, a rezultaty analiz zaprezentowano w ekopunktach (UBP). Ocenę rozpoczęto od analizy emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C, której efekty przedstawiono na rysunku 4.14. Cykle istnienia pojazdów zarejestrowanych w roku 2020 cechują się wyższym poziomem negatywnych następstw środowiskowych w rozpatrywanym zakresie, w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Wybór sposobu zagospodarowania użytkowego również wpływa na poziom emisji związków o działaniu

kancerogennym. Dla cykli istnienia aut, które mają zostać poddane składowaniu po zakończeniu eksploatacji, odnotowano wyższy poziom szkodliwych emisji (o od ok. 13% do ok. 25%). Najwyższymi wartościami analizowanych emisji wyróżniają się cykle istnienia akumulatorowych pojazdów elektrycznych zakładające ich składowanie ($6,55 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $5,35 \cdot 10^6$ UBP – w roku 2050). Cykle istnienia pojazdów z silnikami spalinowymi zasilanymi różnymi typami paliw charakteryzowały się zbliżonym poziomem emisji substancji o działaniu kancerogennym.

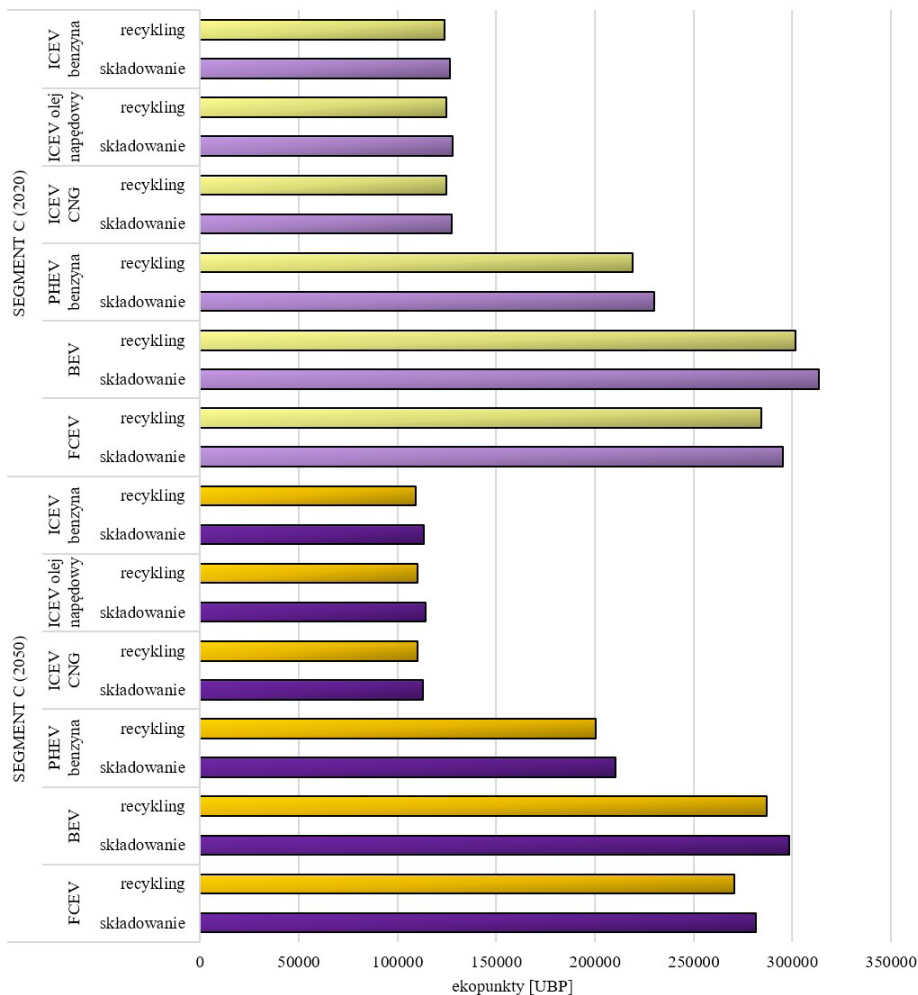
W dalszych krokach dokonano analizy emisji metali ciężkich na środowisko glebowe. Zanieczyszczenie środowiska tego rodzaju substancjami jest jednym z istotniejszych zagrożeń dla ludzkiego zdrowia. W związku z dynamicznym rozwojem przemysłowym świata wzrosło również niebezpieczeństwo zatrucia otoczenia metalami ciężkimi. Zaliczane są do nich pierwiastki o masie właściwej większej niż $4,5 \text{ g/cm}^3$, które podczas reakcji chemicznych posiadają tendencję do oddawania elektronów, dzięki czemu tworzą proste kationy. Metale ciężkie są wdychane, spożywane z produktami zwierzęcymi i roślinnymi oraz wchłaniane przez skórę. Przechodzenie tego typu pierwiastków do kolejnych ogniw łańcucha pokarmowego jest ograniczone działaniem barier biologicznych, jednak przy nadmiernym ich stężeniu – działanie tych barier jest ograniczone. Skutkuje to ryzykiem ich negatywnego oddziaływania na środowisko, w tym również na zdrowie człowieka. Metale ciężkie ze względu na stopień zagrożenia podzielono na te o bardzo wysokim (np. kadm, rtęć, ołów, miedź, cynk), wysokim (np. molibden, mangan, żelazo), średnim (np. nikiel, kobalt) oraz o niskim stopniu potencjalnego zagrożenia (np. stront, cyrkon). Mogą one wywołać natychmiastowe ostre zatrucia (np. arsen, cynk, kadm, miedź, rtęć) lub stany przewlekłe (np. arsen, cynk, kadm, chrom, miedź, rtęć, ołów, cyna, kobalt, nikiel, mangan, selen, żelazo, srebro). Choroby przewlekłe przez długi czas występują w formie utajonej, a następnie mogą powodować m.in. niebezpieczne zmiany mutagenne lub uszkodzenia centralnego systemu nerwowego [220, 298].

Na rysunku 4.15 zestawiono wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia rozważanych samochodów osobowych segmentu C.auta zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe szkodliwe oddziaływanie na otoczenie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykle istnienia analizowanych pojazdów zakładające ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci recyklingu niosą ze sobą mniej emisji metali ciężkich (o od ok. 55% do ok. 63%). Maksymalny poziom negatywnych oddziaływań w rozważanym obszarze cechuje pojazdy BEV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania na wysypisku odpadów ($8,23 \cdot 10^5$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $6,93 \cdot 10^5$ UBP – w roku 2050). Zastosowanie procesów recyklingu spowodowałoby zmniejszenie wielkości destrukcyjnych wpływów w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($3,73 \cdot 10^5$ UBP dla aut z roku 2020 i $3,14 \cdot 10^5$ UBP dla tych z roku 2050). Cykle istnienia aut ICEV cechowały się podobnym poziomem szkodliwych następstw środowiskowych w stosunku do otoczenia.



Rys. 4.15. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C zaprezentowano natomiast na rysunku 4.16. Najwięcej destrukcyjnych oddziaływań odnotowano dla cykli istnienia zakładających zagospodarowanie użytkowe w formie składowania na wysypisku odpadów, z kolei najmniej – w formie recyklingu. Cykle istnienia samochodów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej niebezpiecznych wpływów w obszarze zmiany sposobu użytkowania gruntów w porównaniu z tymi z roku 2020. Maksymalny poziom negatywnych oddziaływań ponownie wyróżniał cykl istnienia akumulatorowych pojazdów elektrycznych zakładający ich składowanie ($3,13 \cdot 10^5$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,98 \cdot 10^5$ UBP – w roku 2050). Cykl istnienia wszystkich rozpatrywanych samochodów uwzględniający składowanie powoduje więcej szkodliwych procesów związanych ze zmianą użytkowania gruntów (o od ok. 2% do ok. 5%). Cykle istnienia pojazdów z silnikami spalinowymi zasilanymi różnymi typami paliw cechowały się zbliżonym poziomem destrukcyjnych następstw środowiskowych.

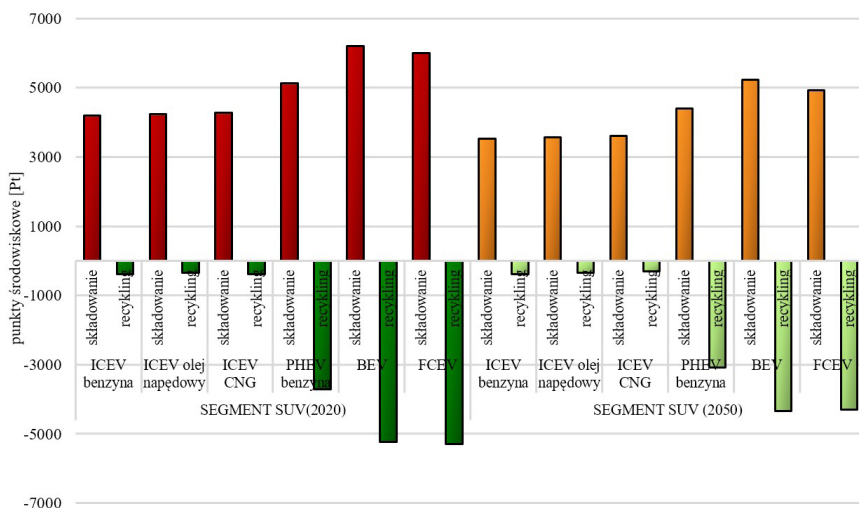


Rys. 4.16. Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

4.3. Samochody osobowe segmentu SUV

W ramach dalszych analiz dokonano oceny potencjalnego oddziaływania na środowisko pojazdów segmentu SUV, z uwzględnieniem sześciu odmiennych układów napędowych (ICEV zasilany benzyną, olejem napędowym i CNG, BEV, PHEV zasilany benzyną oraz FCEV). Analogicznie jak w przypadku segmentów A i B oraz C rozpa-

trywano dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego – składowanie oraz recykling. Przyjęto również takie same scenariusze horyzontu czasowego, obejmujące auta zarejestrowane w roku 2020 oraz prognozę odnoszącą się do samochodów, które mają być zarejestrowane w roku 2050. Ocenę ponownie wykonano wyłącznie dla cyklu istnienia tworzyw, materiałów i elementów rozważanych środków transportu. Wyniki uzyskane dla cykli paliwowych i energetycznych przybliżono w podrozdziale 4.10.



Rys. 4.17. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu C różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model ReCiPe 2016)

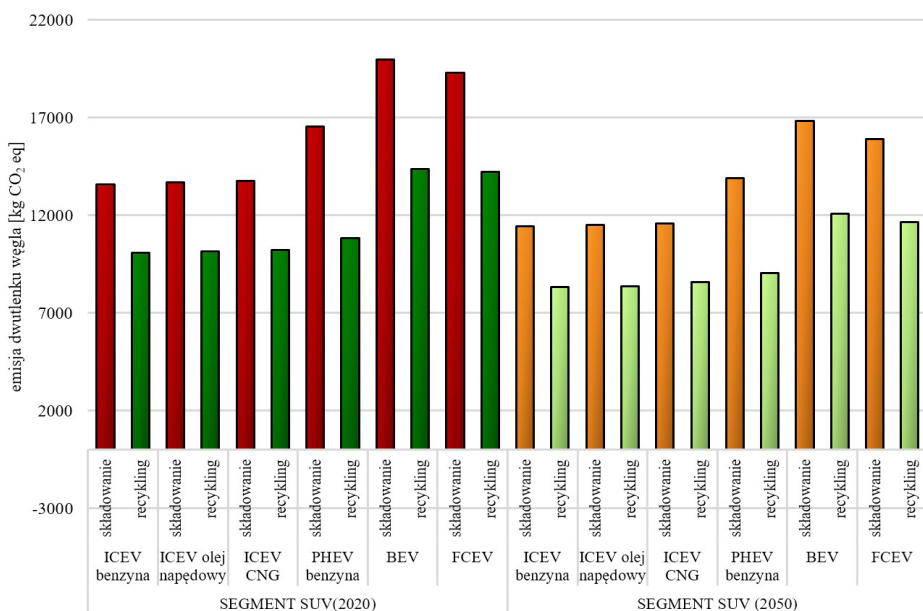
Model ReCiPe 2016 znów był pierwszym z pięciu modeli wykorzystanych do analiz. W opracowaniu przedstawiono wyłącznie najważniejsze z uzyskanych wyników. Rezultaty zaprezentowano w punktach środowiskowych (Pt). Na rysunku 4.17 zobrazowano wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w całym cyklu istnienia rozpatrywanych samochodów osobowych segmentu SUV. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe destrukcyjne oddziaływanie na otoczenie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Cykle istnienia wszystkich rozważanych aut zakładające ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania powodują więcej niebezpiecznych następstw środowiskowych (o od ok. 210% do ok. 290%) w porównaniu z zagospodarowaniem w formie recyklingu. Najwyższym poziomem szkodliwych wpływów wyróżniają się pojazdy BEV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania na wysypisku odpadów ($6,21 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $5,22 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050). Zastosowanie recyklingu skutkowałoby istotnym ograniczeniem wielkości

negatywnych oddziaływań w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($-5,23 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $-4,34 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Cykle istnienia samochodów ICEV charakteryzował zbliżony poziom destrukcyjnego wpływu na środowisko. Najniższym niebezpiecznym oddziaływaniem wyróżniały się samochody z silnikami wykorzystującymi benzynę, z kolei najwyższym – układy napędowe zasilane CNG, czego przyczynę stanowiło przede wszystkim zastosowanie dodatkowych elementów instalacji.

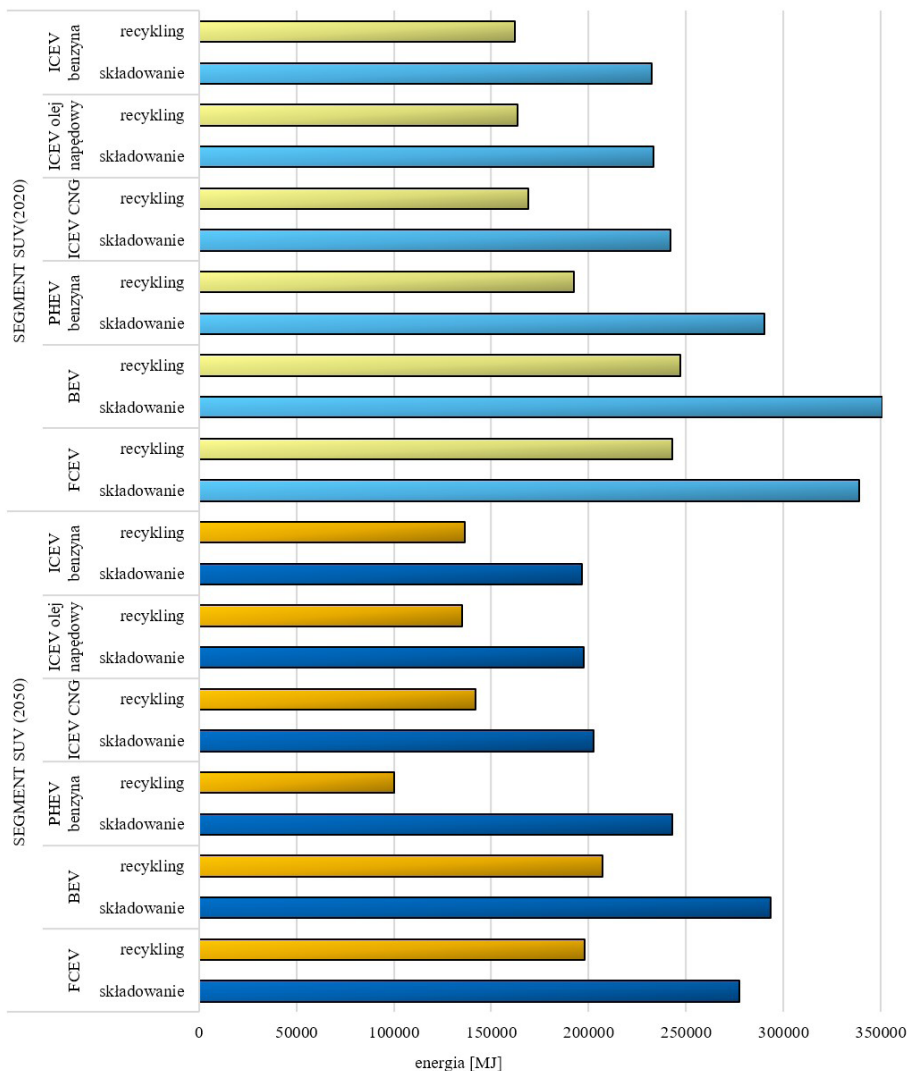
Tab. 4.3. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu SUV różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego oraz trzech obszarów wpływu (model ReCiPe 2016)

SEGMENT SUV		Zdrowie człowieka	Ekosystemy	Zasoby surowców	RAZEM	
2020	ICEV benzyna	składowanie	$3,88 \cdot 10^3$	$3,12 \cdot 10^2$	$9,86 \cdot 10^0$	$4,20 \cdot 10^3$
		recykling	$-3,02 \cdot 10^2$	$-9,04 \cdot 10^1$	$7,66 \cdot 10^0$	$-3,86 \cdot 10^2$
	ICEV olej napędowy	składowanie	$3,92 \cdot 10^3$	$3,14 \cdot 10^2$	$9,90 \cdot 10^0$	$4,2 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,64 \cdot 10^2$	$-8,98 \cdot 10^1$	$7,72 \cdot 10^0$	$-3,46 \cdot 10^2$
	ICEV CNG	składowanie	$3,94 \cdot 10^3$	$3,26 \cdot 10^2$	$5,81 \cdot 10^0$	$4,28 \cdot 10^3$
		recykling	$-3,07 \cdot 10^2$	$-9,45 \cdot 10^1$	$4,51 \cdot 10^0$	$-3,93 \cdot 10^2$
	PHEV benzyna	składowanie	$4,77 \cdot 10^3$	$3,39 \cdot 10^2$	$1,61 \cdot 10^1$	$5,14 \cdot 10^3$
		recykling	$-3,28 \cdot 10^3$	$-4,34 \cdot 10^2$	$1,21 \cdot 10^1$	$-3,70 \cdot 10^3$
	BEV	składowanie	$5,81 \cdot 10^3$	$3,68 \cdot 10^2$	$2,46 \cdot 10^1$	$6,21 \cdot 10^3$
		recykling	$-4,62 \cdot 10^3$	$-6,33 \cdot 10^2$	$1,91 \cdot 10^1$	$-5,23 \cdot 10^3$
	FCEV	składowanie	$5,63 \cdot 10^3$	$3,58 \cdot 10^2$	$2,50 \cdot 10^1$	$5,99 \cdot 10^3$
		recykling	$-4,66 \cdot 10^3$	$-6,35 \cdot 10^2$	$1,97 \cdot 10^1$	$-5,30 \cdot 10^3$
2050	ICEV benzyna	składowanie	$3,24 \cdot 10^3$	$2,64 \cdot 10^2$	$8,48 \cdot 10^0$	$3,52 \cdot 10^3$
		recykling	$-3,16 \cdot 10^2$	$-7,90 \cdot 10^1$	$6,58 \cdot 10^0$	$-3,88 \cdot 10^2$
	ICEV olej napędowy	składowanie	$3,28 \cdot 10^3$	$2,64 \cdot 10^2$	$8,52 \cdot 10^0$	$3,56 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,78 \cdot 10^2$	$-7,82 \cdot 10^1$	$6,64 \cdot 10^0$	$-3,50 \cdot 10^2$
	ICEV CNG	składowanie	$3,32 \cdot 10^3$	$2,68 \cdot 10^2$	$8,74 \cdot 10^0$	$3,60 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,30 \cdot 10^2$	$-7,50 \cdot 10^1$	$6,86 \cdot 10^0$	$-2,98 \cdot 10^2$
	PHEV benzyna	składowanie	$4,08 \cdot 10^3$	$2,94 \cdot 10^2$	$1,38 \cdot 10^1$	$4,40 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,74 \cdot 10^3$	$-3,60 \cdot 10^2$	$1,04 \cdot 10^1$	$-3,08 \cdot 10^3$
	BEV	składowanie	$4,88 \cdot 10^3$	$3,19 \cdot 10^2$	$2,12 \cdot 10^1$	$5,22 \cdot 10^3$
		recykling	$-3,84 \cdot 10^3$	$-5,22 \cdot 10^2$	$1,66 \cdot 10^1$	$-4,34 \cdot 10^3$
	FCEV	składowanie	$4,60 \cdot 10^3$	$2,99 \cdot 10^2$	$2,11 \cdot 10^1$	$4,93 \cdot 10^3$
		recykling	$-3,80 \cdot 10^3$	$-5,10 \cdot 10^2$	$1,66 \cdot 10^1$	$-4,29 \cdot 10^3$

W tabeli 4.3 zestawiono z kolei wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych, ze szczególnym uwzględnieniem trzech obszarów wpływu (zdrowie człowieka, ekosystemy, zasoby surowców). Zaprezentowano je w punktach środowiskowych (Pt). Maksymalny poziom szkodliwych oddziaływań odnotowano w obszarze wpływu na zdrowie człowieka, a minimalny – w odniesieniu do problematyki wyczerpywania zasobów surowców. Najwięcej negatywnych wpływów zauważono dla cyklu istnienia akumulatorowych pojazdów elektrycznych, uwzględniającego ich składowanie ($6,21 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $5,22 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia ludzkiego $5,81 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $4,88 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Recykling samochodów z segmentu SUV pozwoliłby na ograniczenie destrukcyjnych następstw środowiskowych w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($-5,23 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $-4,34 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050, w tym w zakresie zdrowia człowieka $-4,62 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $-3,84 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Cykle istnienia aut z silnikami spalinowymi zasilanymi różnymi rodzajami paliwa cechowały się podobnym poziomem niebezpiecznych wpływów na otoczenie. Najwięcej negatywnych oddziaływań odnotowano w przypadku samochodów z układem napędowym wykorzystującym CNG, z kolei najmniej – benzynę.



Rys. 4.18. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu SUV różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021)



Rys. 4.19. Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu SUV różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CED V1.11)

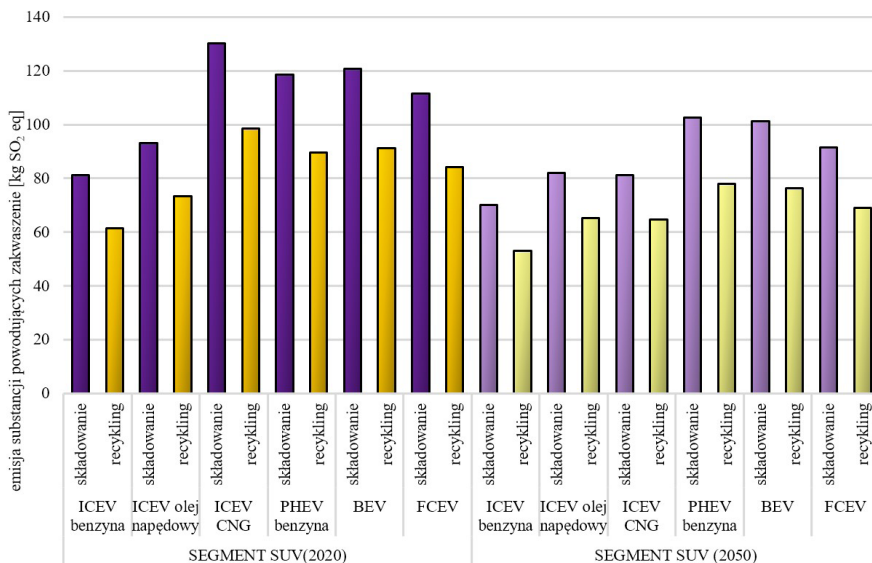
W drugim etapie badań skorzystano z modelu IPCC 2021. W tym przypadku również przedstawiono tylko kluczowe wyniki. Rezultaty zaprezentowano w kg CO₂ eq. Na rysunku 4.18 zestawiono wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu SUV. Najwięcej szkodliwych oddziaływań odnotowano dla cykli istnienia zakładających zagospodarowanie użytkowe w formie składowania na wysypisku odpadów, a najmniej – w formie recyklingu. Cykle istnienia samochodów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050,

powodowałyby mniejszą ilość emisji gazów szklarniowych w porównaniu z tymi z roku 2020. Maksymalny poziom destrukcyjnych oddziaływań ponownie charakteryzował cykl istnienia aut BEV obejmujący ich składowanie ($2,00 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,68 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq – w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich ocenianych pojazdów uwzględniające składowanie zamiast recyklingu powodują wyższy poziom emisji gazów cieplarnianych (o od ok. 26% do ok. 35%). Cykle istnienia samochodów ICEV cechowały się zbliżonym poziomem niebezpiecznego oddziaływania na otoczenie, jednak najniższym poziomem emisji GHG wyróżniały się pojazdy z silnikami wykorzystującymi benzynę, a najwyższym – zasilane CNG.

Trzeci etap badań zakładał wykorzystanie modelu CED. Ponownie przedstawiono wyłącznie najważniejsze z uzyskanych wyników. Rezultaty zaprezentowano w MJ zapotrzebowania na energię. Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia rozważanych samochodów osobowych segmentu SUV zestawiono na rysunku 4.19. Cykle istnienia pojazdów zarejestrowanych w roku 2020 wyróżniają się wyższym poziomem energochłonności w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Sposób zagospodarowania użytkowego także wpływa na wielkość zapotrzebowania na energię. Dla cykli istnienia aut mających zostać poddany składowaniu odnotowano wyższy poziom energochłonności (o od ok. 28% do ok. 59%). Najwyższe zapotrzebowanie na energię cechuje cykle istnienia samochodów elektrycznych ($3,51 \cdot 10^5$ MJ dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,93 \cdot 10^5$ MJ – w roku 2050). Cykle istnienia pojazdów z silnikiem spalinowym zasilanych odmiennymi typami paliw wyróżniały się podobnym poziomem zapotrzebowania na energię. Największą energochłonność odnotowano dla pojazdów z układem napędowym wykorzystującym CNG, z kolei najmniejszą – benzynę.

Model CML-IA baseline został zastosowany w ramach czwartego etapu badań. Ponownie zdecydowano się na przybliżenie wyłącznie wybranych wyników. Rezultaty analiz zaprezentowano w kg SO₂ eq i kg PO₄ eq. Na rysunku 4.20 zobrazowano wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w całym cyklu istnienia rozważanych samochodów osobowych segmentu SUV. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe szkodliwe oddziaływanie na środowisko w tym względzie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykl istnienia rozpatrywanych aut zakładający ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania powoduje wyższy poziom emisji związków o charakterze zakwaszającym (o od ok. 20% do ok. 25%). Maksymalny poziom negatywnych wpływów w rozważanym obszarze wyróżnia samochody BEV, których tworzywa, materiały i elementy po zakończeniu eksploatacji zostałyby przeznaczone do składowania ($1,21 \cdot 10^2$ kg SO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,01 \cdot 10^2$ kg SO₂ eq – w roku 2050). Zastosowanie recyklingu skutkowałoby zmniejszeniem wielkości destrukcyjnych oddziaływań w kontekście ich całego cyklu istnienia ($9,12 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla aut z roku 2020 i $7,63 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla tych z roku 2050). Wśród cykli istnienia pojazdów ICEV najniższym poziomem niebezpiecznego wpływu na otoczenie w kontekście

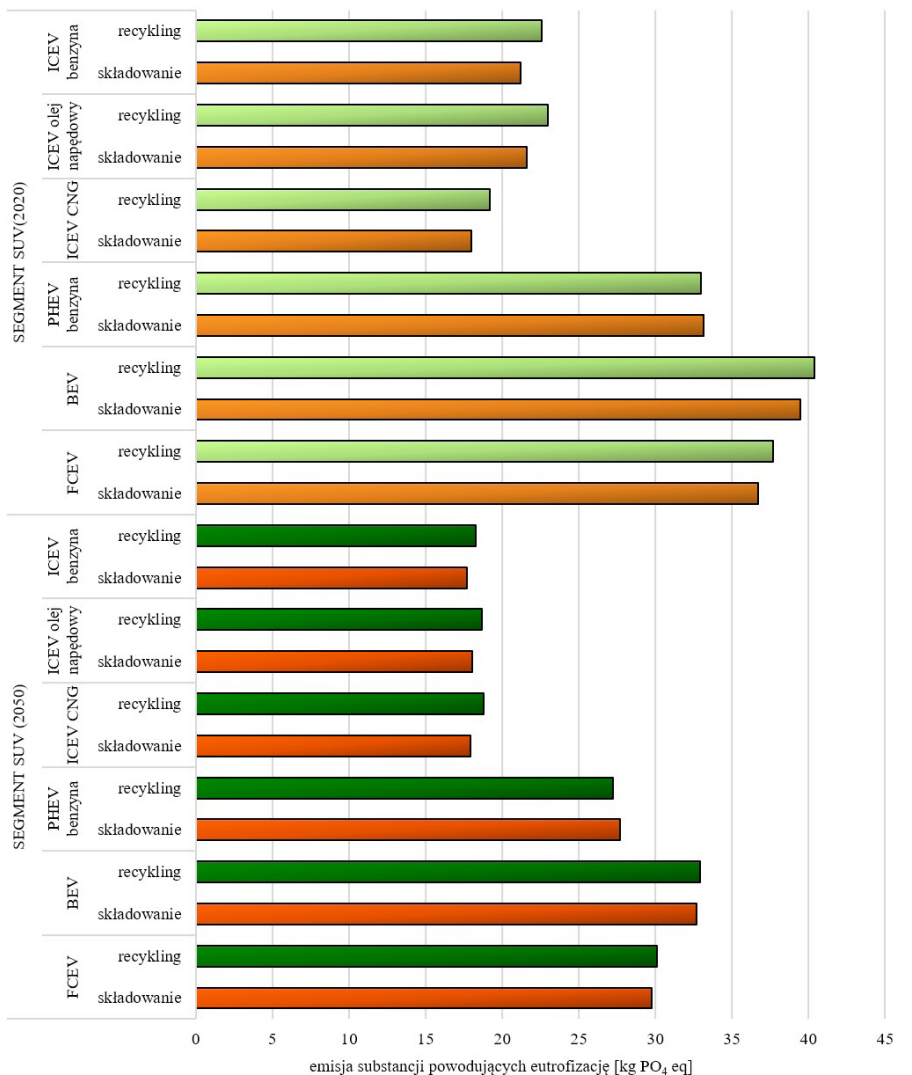
emisji substancji zakwaszających środowisko wyróżniały się auta z silnikami zasilanymi benzyną ($8,12 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq dla aut z roku 2020 i $7,00 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq – z roku 2050 w przypadku cyklu uwzględniającego składowanie oraz $6,14 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq dla aut z roku 2020 i $5,30 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq z roku 2050 w przypadku cyklu uwzględniającego recykling).



Rys. 4.20. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu SUV różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CML-IA baseline)

Eutrofizacja to proces polegający na nadmiernym wzbogacaniu się zbiorników wodnych oraz cieków w substancje odżywcze w formie pierwiastków biogennych (głównie azotu i fosforu, ale także potasu oraz sodu). Skutkuje ona nadmierną produkcją biomasy glonów (jest to widoczne w formie tzw. „zakwitów glonów”) i sinic (w morzach) prowadzącą do eutrofizmu. Wzrost dopływu fosforu spowodowany jest nie tylko zrzutem ścieków (w tym ze źródeł przemysłowych), ale także zwiększającą się w nich zawartością detergentów oraz innych substancji bogatych w ten pierwiastek. Nadmierny dopływ azotu jest z kolei związany przede wszystkim ze wzrastającą emisją jego tlenków do atmosfery, a tym samym zwiększoną ich zawartością w opadach atmosferycznych. Eutrofizacja powoduje zmiany właściwości wody w formie intensywnego zabarwienia i zapachu, mętności, dużych wahań stężenia tlenu oraz odczynu w górnej warstwie. Z kolei w warstwach głębszych powstają warunki beztlenowe przyczyniające się do wymierania organizmów zwierzęcych (w szczególności ryb). Zjawisko to prowadzi do dominacji organizmów beztlenowych (saprobiontów) i nagromadzenia istotnej ilości materii organicznej (w formie mułu). W konsekwencji

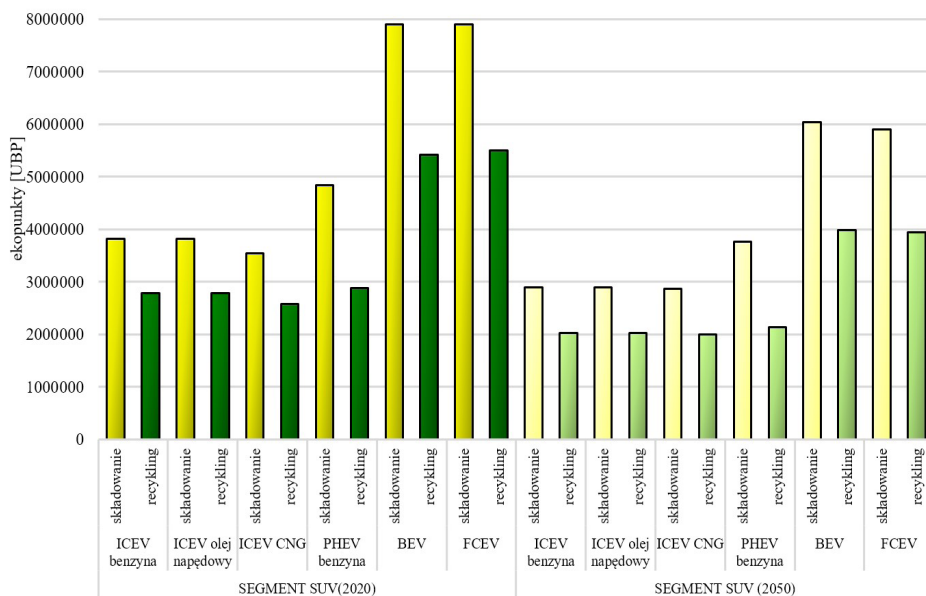
zbiornik wodny ulega spłyceniu, mogą przekształcić się w staw, bagno czy torfowisko niskie [126, 324].



Rys. 4.21. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu SUV różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CML-IA baseline)

Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu SUV zobrazowano na rysunku 4.21. Najwięcej negatywnych wpływów w tym obszarze odnotowano dla cy-

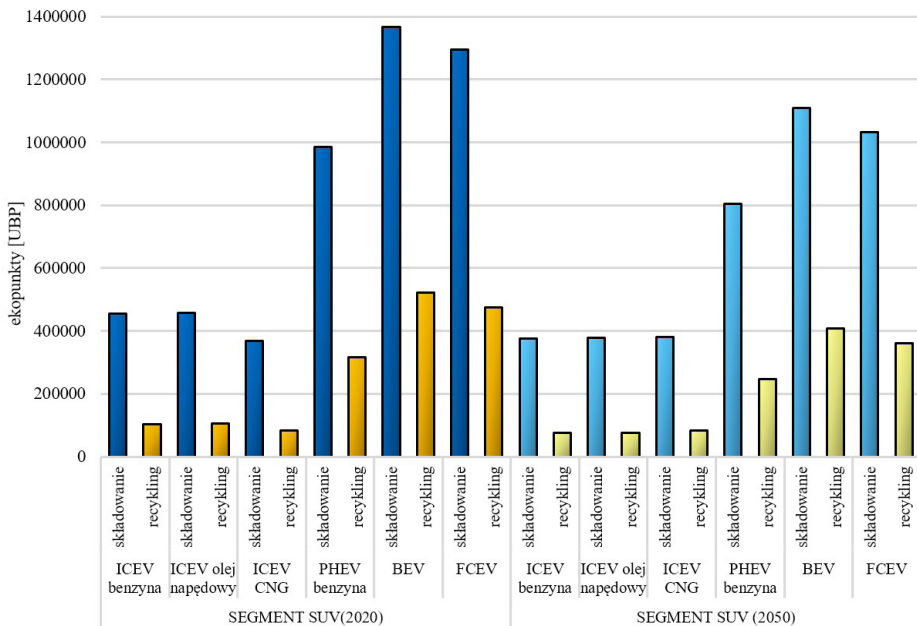
kli istnienia uwzględniających zagospodarowanie poużytkowe w formie składowania, a najmniej – w formie recyklingu. Cykle istnienia pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej niebezpiecznych wpływów w obszarze emisji związków chemicznych powodujących eutrofizację w porównaniu z tymi z roku 2020. Najwyższy poziom szkodliwych oddziaływań wyróżniał cykl istnienia akumulatorowych samochodów elektrycznych zakładający ich recykling ($4,04 \cdot 10^1$ kg PO_4 eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,29 \cdot 10^1$ kg PO_4 eq w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich ocenianych aut obejmujące składowanie powodowały niższy poziom emisji substancji o charakterze eutrofizującym (o od ok. 1% do ok. 6%) w porównaniu z zagospodarowaniem z zastosowaniem recyklingu. Zasadniczą przyczynę stanowi stosowanie podczas procesów recyklingu substancji wyróżniających się silnym destrukcyjnym oddziaływaniem na otoczenie w tym obszarze. Cykle istnienia pojazdów z silnikiem spalinowym charakteryzowały się zbliżonym poziomem emisji związków pogłębiających eutrofizację środowiska.



Rys. 4.22. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu SUV różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Ostatni etap badań obejmował wykorzystanie modelu Ecological Scarcity 2021. Przedstawiono wyłącznie kluczowe z otrzymanych wyników. Rezultaty analiz zaprezentowano w ekopunktach (UBP). Na rysunku 4.22 przedstawiono wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogen-

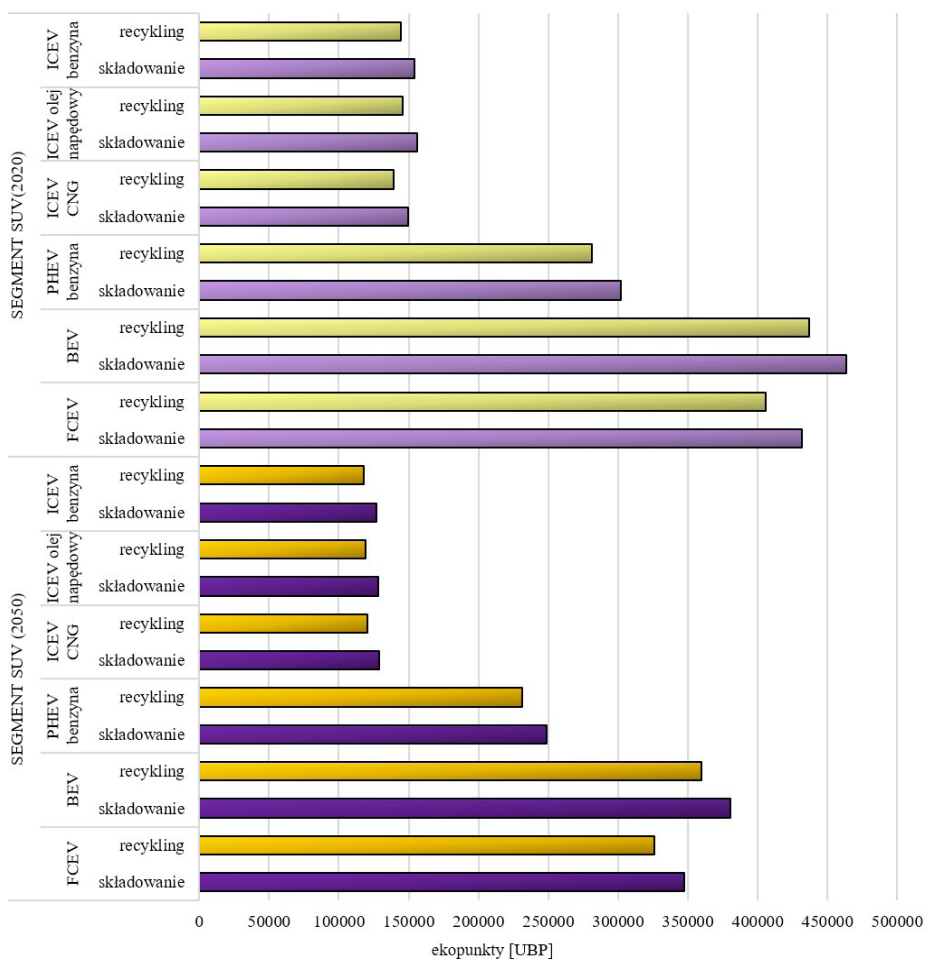
nym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu SUV. Cykle istnienia aut zarejestrowanych w roku 2020 wyróżniają się wyższym poziomem destrukcyjnych następstw środowiskowych w analizowanym zakresie, w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Wybór sposobu zagospodarowania użytkowego istotnie wpływa na poziom emisji związków o działaniu rakotwórczym. W przypadku cykli istnienia pojazdów, które mają zostać poddane składowaniu, odnotowano wyższy poziom niebezpiecznych emisji (o od ok. 27% do ok. 43%), w porównaniu z tymi, które mają być poddane procesom recyklingu. Maksymalnymi wartościami rozważanych emisji cechują się cykle istnienia aut BEV zakładające ich składowanie ($7,90 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $6,04 \cdot 10^6$ UBP – w roku 2050). Cykle istnienia samochodów ICEV zasilanych odmiennymi typami paliw wyróżniały się zbliżonym poziomem emisji substancji rakotwórczych.



Rys. 4.23. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu SUV różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia rozważanych samochodów osobowych segmentu SUV zestawiono natomiast na rysunku 4.23. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe negatywne oddziaływanie na środowisko w analizowanym zakresie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykle istnienia rozpatrywanych aut zakładające ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci recyklin-

gu niosą ze sobą mniejsze ilości emisji metali ciężkich (o od ok. 62% do ok. 80%). Najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań w ocenianym obszarze cechuje akumulatorowe samochody elektryczne, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania ($1,37 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,11 \cdot 10^6$ UBP – w roku 2050). Wykorzystanie procesów recyklingu spowodowałoby zmniejszenie wielkości niebezpiecznych wpływów w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($5,22 \cdot 10^5$ UBP dla aut z roku 2020 i $4,07 \cdot 10^5$ UBP dla tych z roku 2050). Cykle istnienia pojazdów z silnikiem spalinowym cechowały się stosunkowo podobnym poziomem negatywnym następstw środowiskowych.



Rys. 4.24. Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu SUV różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Kategoria wpływu obejmująca procesy związane ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w metodologii oceny cyklu istnienia (LCA) opisuje wpływ na środowisko zajmowania gruntów, przekształcania ich i gospodarowania nimi przez ludzi. Użytkowanie gruntów może polegać na długoterminowym ich wykorzystywaniu (np. pod uprawę) lub na zmianie rodzaju użytkowania (np. przekształcenie z obszarów naturalnych na obszary zabudowane, miejskie). Kategoria ta obejmuje wszystkie skutki dla otoczenia, które mają na nie wpływ ze względu na same procesy związane z użytkowaniem gruntów, np. przez redukcję elementów krajobrazu, sadzenie monokultur czy szczelne pokrywanie powierzchni ziemi (np. asfaltem, betonem itp.). Pod tym względem ważną konsekwencją ekologiczną zmiany sposobu użytkowania gruntów jest ograniczenie dostępności siedlisk i zmniejszenie bioróżnorodności. Prowadzi to do degradacji naturalności terenu [28].

Na rysunku 4.24 zaprezentowano wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych właśnie ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych segmentu SUV. Najwięcej szkodliwych oddziaływań zauważono w przypadku cyklu istnienia zakładających zagospodarowanie użytkowe w formie składowania, a najmniej – w formie recyklingu. Cykle istnienia aut, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej negatywnych wpływów w zakresie zmiany sposobu użytkowania gruntów w porównaniu z tymi z roku 2020. Najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań ponownie wyróżniał cykl istnienia pojazdów BEV zakładający ich składowanie ($4,64 \cdot 10^5$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,81 \cdot 10^5$ UBP w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich rozważanych samochodów uwzględniające składowanie zamiast recyklingu powodują występowanie większej ilości niebezpiecznych procesów związanych ze zmianą użytkowania gruntów (o od ok. 5% do ok. 7%). Cykle istnienia samochodów ICEV zasilanych odmiennymi rodzajami paliw wyróżniały się zbliżonym poziomem szkodliwych następstw środowiskowych w rozważanym zakresie.

4.4. Samochody osobowe z silnikiem spalinowym (ICEV) zasilane benzyną

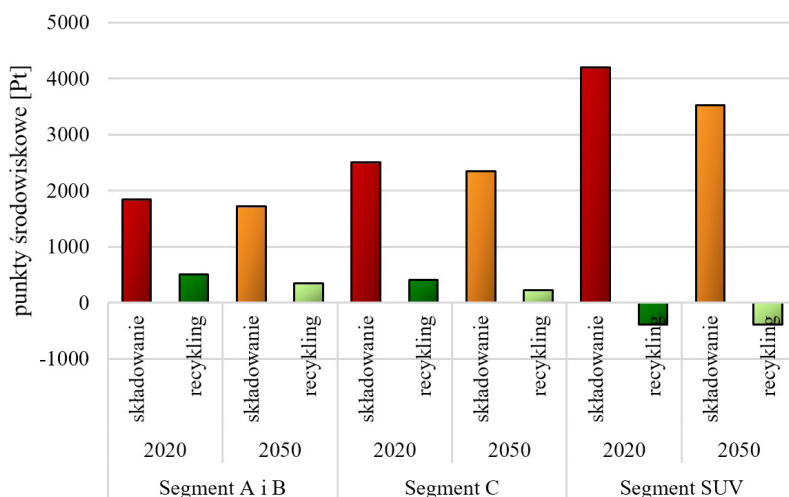
Po przeprowadzeniu analiz potencjalnego wpływu na otoczenie pojazdów segmentu A i B (mały), C (niższy średni) i SUV przystąpiono do oceny oddziaływania cyklu istnienia wybranych środków transportu samochodowego, skupiając się na ich podziale ze względu na rodzaje układów napędowych. Rozważaniom poddano pojazdy ICEV zasilane benzyną, olejem napędowym i CNG, PHEV zasilane benzyną, BEV oraz FCEV. Dla każdego z sześciu wymienionych typów aut również rozpatrywano dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego – składowanie na wysypisku odpadów (możliwie na maksymalnym poziomie) oraz recykling (także w możliwie jak największym stopniu). Analogicznie przyjęto dwa scenariusze horyzontu czasowego, pierwszy dla aut zarejestrowanych w roku 2020, a drugi – obejmujący prognozę dla sa-

mochodów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Tak jak dla segmentu A i B, C oraz SUV analizę wykonano wyłącznie dla cyklu istnienia tworzyw, materiałów i elementów rozpatrywanych środków transportu. Wyniki w odniesieniu do cykli paliwowych i energetycznych poddano szczegółowej ocenie w podrozdziale 4.10.

W pierwszym etapie badań ponownie wykorzystano model ReCiPe 2016. Przeanalizowano dwadzieścia dwie kategorie wpływu oraz trzy obszary oddziaływania. W ramach monografii przybliżono jednak wyłącznie najważniejsze z otrzymanych wyników. Rezultaty zaprezentowano w punktach środowiskowych (Pt). Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zobrazowano na rysunku 4.25.auta zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały istotnie większe szkodliwe oddziaływanie na otoczenie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Biorąc pod uwagę efekt skali (liczbę nowo zarejestrowanych i eksploatowanych pojazdów każdego roku), różnice te będą jeszcze bardziej wyraźne. Cykl istnienia wszystkich rozpatrywanych samochodów zakładający ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania zamiast recyklingu powoduje więcej negatywnych następstw środowiskowych. Najwyższy poziom destrukcyjnych wpływów cechuje samochody segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania na wysypisku odpadów po zakończeniu eksploatacji ($4,20 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,52 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050). Zastosowanie procesów recyklingu spowodowałoby wyraźne zmniejszenie wielkości niebezpiecznych oddziaływań w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($-3,86 \cdot 10^2$ Pt dla aut z roku 2020 i $-3,88 \cdot 10^2$ Pt dla tych z roku 2050). Do kategorii wpływu o najwyższym poziomie negatywnych następstw środowiskowych dla otoczenia, zidentyfikowanych w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych benzyną, zaliczyć można: procesy powodujące uszczuplenie zasobów wody oddziałujące na zdrowie człowieka i ekosystemy lądowe, emisje substancji powodujących tworzenie się drobnych cząstek stałych (PM), substancji toksycznych o działaniu nowotworogennym dla człowieka oraz substancji powodujących globalne ocieplenie (oddziałujących na zdrowie człowieka).

Ocena potencjalnego wpływu procesów powodujących uszczuplenie zasobów wody oddziałujących na zdrowie człowieka i ekosystemy lądowe była oparta na poziomie zużycia wody w cyklu istnienia analizowanych pojazdów. Zużycie wody było rozumiane jako wykorzystanie jej w taki sposób, że uległa ona odparowaniu, została włączana do produktów, przeniesiona do innych działów wodnych lub odprowadzana do morza. Woda, która została zużyta, nie jest już zatem dostępna (ani dla człowieka, ani dla ekosystemów) w zlewni, z której pochodziła. W przypadku ludzi zmniejszenie dostępności słodkiej wody prowadzi do konkurencji między jej użytkownikami, a w konsekwencji – może powodować konflikty społeczne. Zbyt słabe nawadnianie pól skutkuje zmniejszeniem produkcji roślinnej, co może prowadzić do wzrostu niedożywienia wśród miejscowej ludności. Podatność ludzi na niedożywienie rośnie przy

niższych wskaźnikach rozwoju społecznego, podczas gdy kraje uprzemysłowione mają wystarczające środki pieniężne na zakup żywności, aby zapobiec niedożywieniu, a tym samym – ograniczają szkody dla zdrowia człowieka pod tym względem. Zanieczyszczenia wody przez różnego rodzaju szkodliwe substancje również powodują uszczerbienie jej zasobów. Wpływ na ekosystemy lądowe jest rozpatrywany pod kątem potencjalnego obniżenia różnorodności biologicznej. Zmniejszenie ilości wody w jeziorach, rzekach, warstwach wodonośnych i opadach atmosferycznych potencjalnie zmniejszy również wilgotność gleby, a tym samym doprowadzi do zmniejszenia liczby gatunków roślin. Pod uwagę brane są również frakcje ryb, które wymierają z powodu zużycia i zanieczyszczenia wody [122].



Rys. 4.25. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model ReCiPe 2016)

Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, ze szczególnym uwzględnieniem trzech obszarów wpływu (zdrowie człowieka, ekosystemy, zasoby surowców), zestawiono natomiast w tabeli 4.4. Rezultaty zaprezentowano w jednostce punktów środowiskowych (Pt). Najwięcej szkodliwych oddziaływań odnotowano w obszarze wpływu na zdrowie człowieka, z kolei najmniej – w odniesieniu do problemu wyczerpywania zasobów surowców. Maksymalny poziom łącznych negatywnych wpływów odnotowano dla cyklu istnienia pojazdów segmentu SUV, zakładającego ich składowanie po zakończeniu eksploatacji ($4,20 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,52 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia ludzkiego $3,88 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $3,24 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Zastosowanie proce-

sów recyklingu umożliwiłoby istotne ograniczenie destrukcyjnych oddziaływań w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($-3,86 \cdot 10^2$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $-3,88 \cdot 10^2$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia ludzkiego $-3,02 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $-3,16 \cdot 10^2$ Pt dla tych z roku 2050). Spośród substancji o niebezpiecznym wpływie na zdrowie człowieka w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych benzyną najwyższy poziom emisji odnotowano dla: chromu (VI), ditlenku węgla, ditlenku siarki, drobnych cząstek stałych (PM), cynku i tlenku azotu.

Tab. 4.4. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego oraz trzech obszarów wpływu (model ReCiPe 2016)

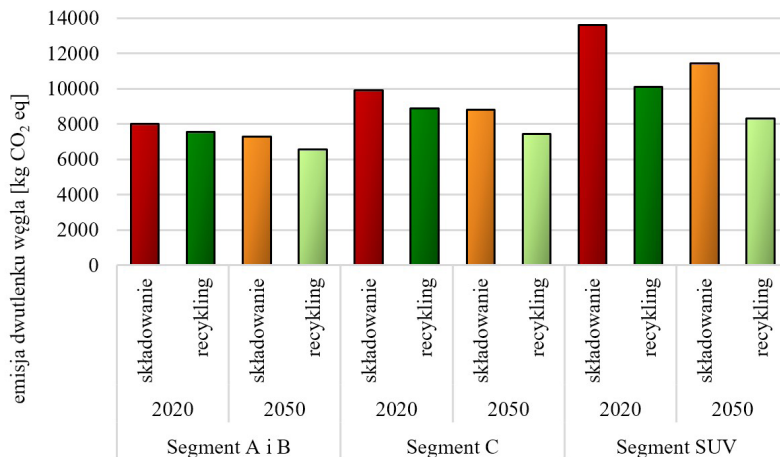
ICEV BENZYNA			Zdrowie człowieka	Ekosystemy	Zasoby surowców	RAZEM
2020	Segment A i B	składowanie	$1,72 \cdot 10^3$	$1,20 \cdot 10^2$	$5,66 \cdot 10^0$	$1,85 \cdot 10^3$
		recykling	$5,04 \cdot 10^2$	$-1,41 \cdot 10^0$	$4,96 \cdot 10^0$	$5,08 \cdot 10^2$
	Segment C	składowanie	$2,32 \cdot 10^3$	$1,70 \cdot 10^2$	$7,04 \cdot 10^0$	$2,50 \cdot 10^3$
		recykling	$4,18 \cdot 10^2$	$-1,74 \cdot 10^1$	$5,98 \cdot 10^0$	$4,06 \cdot 10^2$
	Segment SUV	składowanie	$3,88 \cdot 10^3$	$3,12 \cdot 10^2$	$9,86 \cdot 10^0$	$4,20 \cdot 10^3$
		recykling	$-3,02 \cdot 10^2$	$-9,04 \cdot 10^1$	$7,66 \cdot 10^0$	$-3,86 \cdot 10^2$
2050	Segment A i B	składowanie	$1,59 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^2$	$5,42 \cdot 10^0$	$1,71 \cdot 10^3$
		recykling	$3,48 \cdot 10^2$	$-6,06 \cdot 10^0$	$4,72 \cdot 10^0$	$3,48 \cdot 10^2$
	Segment C	składowanie	$2,18 \cdot 10^3$	$1,66 \cdot 10^2$	$6,54 \cdot 10^0$	$2,34 \cdot 10^3$
		recykling	$2,34 \cdot 10^2$	$-2,24 \cdot 10^1$	$5,46 \cdot 10^0$	$2,18 \cdot 10^2$
	Segment SUV	składowanie	$3,24 \cdot 10^3$	$2,64 \cdot 10^2$	$8,48 \cdot 10^0$	$3,52 \cdot 10^3$
		recykling	$-3,16 \cdot 10^2$	$-7,90 \cdot 10^1$	$6,58 \cdot 10^0$	$-3,88 \cdot 10^2$

Chrom to pierwiastek konieczny do prawidłowego funkcjonowania ludzkiego organizmu. Spełnia istotną rolę w procesach działania insuliny i wywiera duży wpływ na metabolizm glukozy oraz jej poziom we krwi. Bierze on udział w procesach antyoksydacyjnych, jak również odgrywa ważną rolę w działaniu układu immunologicznego. Wchodzi on w skład wielu enzymów oraz jest katalizatorem szeregu reakcji chemicznych. Zarówno nadmiar, jak i niedobór chromu mogą być szkodliwe. Jego nadmiar jest toksyczny dla organizmu człowieka. Chrom (VI) uznawany jest za związek mutagenny, kancerogenny, embriotoksyczny oraz teratogenny. Działa destrukcyjnie na układ oddechowy czy pokarmowy. Uszkadza on zarówno skórę, jak i błony śluzowe (wdychanie związków chromu może prowadzić do uszkodzeń gardła, nosa, płuc, żołądka, a nawet jelit). Długotrwała ekspozycja na chrom (VI) powoduje szkodliwy wpływ na działanie układu hematologicznego, immunologicznego, rozrodczego oraz zwiększa ryzyko rozwoju nowotworów. Chrom jest wprowadzany do organizmu dro-

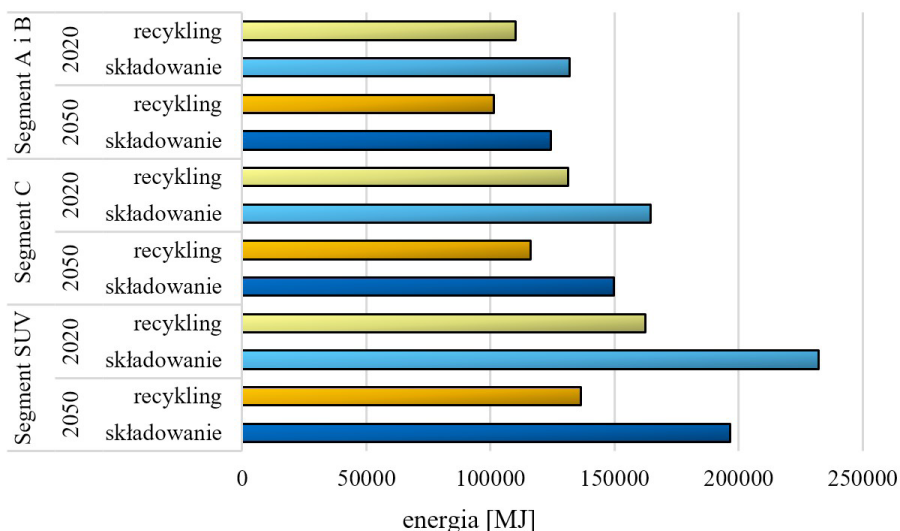
gą inhalacyjną, pokarmową i przez skórę. Sole kwasu chromowego (VI) mają zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu (chemicznym, metalurgicznym i budowlanym, przy produkcji pigmentów, wyrobów szklanych czy tworzyw polimerowych). Z tego powodu istotny poziom emisji tego pierwiastka jest odnotowywany w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV (szczególnie podczas wytwarzania ich tworzyw, materiałów i elementów) [60, 176].

Podczas drugiego etapu badań wykorzystano model IPCC 2021. Ocenie poddano trzy kategorie wpływu. Zaprezentowano wyłącznie kluczowe wyniki. Rezultaty przedstawiono w kilogramach ekwiwalentu ditlenku węgla ($\text{kg CO}_2 \text{ eq}$). Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zestawiono na rysunku 4.26. Najwięcej szkodliwych oddziaływań odnotowano dla cykli istnienia zakładających zagospodarowanie poużytkowe w formie składowania na wysypisku odpadów, z kolei najmniej – w formie recyklingu. Cykle istnienia samochodów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej negatywnych wpływów w obszarze emisji gazów cieplarnianych w porównaniu z tymi z roku 2020. Ponownie najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań wyróżniał cykl istnienia aut z segmentu SUV zakładający ich składowanie ($1,36 \cdot 10^4 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,15 \cdot 10^4 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ – w roku 2050). Cykl istnienia wszystkich rozpatrywanych pojazdów uwzględniający składowanie powoduje wyższy poziom emisji GHG (o od ok. 6% do ok. 27%). Wśród związków chemicznych powodujących pogłębienie efektu cieplarnianego najwyższy poziom emisji w cyklu istnienia aut ICEV zasilanych benzyną zidentyfikowano dla: ditlenku węgla, metanu, tetrafluorometanu (CFC-14), tlenku diazotu, heksafluoroetanu (HFC-116) oraz heksafluorku siarki.

Metan zaliczany jest do gazów cieplarnianych, choć wspomina się o nim dużo rzadziej aniżeli o ditlenku węgla. Jest on jednak niebezpiecznym dla otoczenia związkiem chemicznym. Podczas pierwszych 20 lat przebywania w atmosferze wpływ na klimat jednej tony metanu jest ok. 85 razy większy w porównaniu z jedną toną CO_2 . Do największych źródeł metanu można zaliczyć przemysł energetyczny i rolnictwo. CH_4 pochodzący z przemysłu energetycznego jest emitowany przede wszystkim podczas wydobycia, transportu oraz składowania paliw kopalnych (np. węgla, ropy czy gazu ziemnego). Polska jest największym emitentem metanu ze źródeł kopalnych w Europie. Ten związek chemiczny przede wszystkim silnie zanieczyszcza powietrze, którym oddychają ludzie. W konsekwencji może to prowadzić do szeregu chorób, takich jak rozedma płuc czy astma. Aktualne raporty Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (IPCC) wskazują, że w ciągu najbliższych 20 lat konieczne jest zmniejszenie o połowę światowej emisji metanu. Nie wskazano jeszcze konkretnych kroków redukcji, ale podkreślana jest znacząca rola sektora energetycznego i transportowego w tym zakresie. Kluczowym rozwiązaniem wydaje się możliwie jak najszybsze odejście od paliw kopalnych oraz dopilnowanie, aby CH_4 nie wyciekał z zamkniętych kopalni i z opuszczonych szybów gazowych lub naftowych [182, 202].



Rys. 4.26. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021)



Rys. 4.27. Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CED V1.11)

Trzeci etap badań obejmował wykorzystanie modelu CED. Dokonano analizy sześciu kategorii wpływu, jednak przedstawiono tylko najważniejsze z uzyskanych wyników. Rezultaty zaprezentowano w MJ zapotrzebowania na energię. Na rysunku

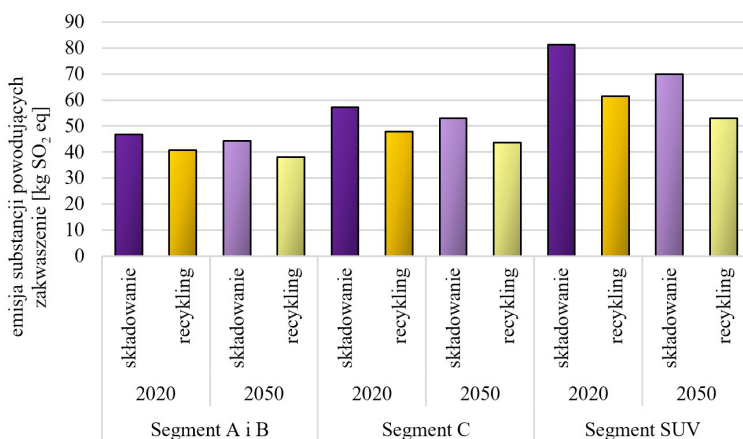
4.27 zestawiono wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Cykle istnienia pojazdów zarejestrowanych w roku 2020 cechują się wyższą energochłonnością w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Sposób zagospodarowania użytkowego ma wpływ na poziom zapotrzebowania na energię. W przypadku cykli istnienia aut mających zostać poddanych składowaniu po zakończeniu eksploatacji odnotowano wyraźnie wyższy poziom energochłonności (o od ok. 16% do ok. 31%) aniżeli w przypadku tych, które mają zostać poddane recyklingowi. Najwyższe zapotrzebowanie na energię wyróżnia cykl istnienia pojazdów segmentu SUV zakładający ich składowanie ($2,32 \cdot 10^5$ MJ dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,97 \cdot 10^5$ MJ w roku 2050). Kategorią wpływu o najwyższym poziomie negatywnych następstw środowiskowych dla otoczenia, zidentyfikowanych w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych benzyną, jest kategoria obejmująca procesy związane z wykorzystaniem nieodnawialnych paliw kopalnych (w szczególności procesy wykorzystania gazu ziemnego, ropy naftowej oraz węgla kamiennego).

Gaz ziemny jest uważany za źródło energii powodujące najmniej negatywnych następstw środowiskowych spośród paliw kopalnych. W jego skład wchodzi przede wszystkim metan, etan, propan, tlenek i ditlenek węgla, azot oraz hel. W warunkach naturalnych może on występować w złożach razem z ropą naftową (jako oddzielna frakcja lub w niej rozpuszczony). Jest pozyskiwany przez odwierty, a sposób jego wydobycia i dalszej obróbki zależy od formy występowania w złożu. Gaz ziemny użytkowany przez odbiorców końcowych stanowi produkt szeregu procesów technologicznych, na skutek których jego pierwotny skład ulega zmianie, ponieważ eliminowane są związki siarki, para wodna, cząstki stałe i inne niepożądane substancje. W procesie spalania (w porównaniu z węglem i ropą naftową) emituje on istotnie mniej tlenków azotu, tlenku i ditlenku węgla czy pyłów. Zarówno eksploatacja złóż gazu ziemnego, jak i dystrybucja tego surowca oznacza jednak ingerencję w środowisko naturalne. Z drugiej strony jego wykorzystywanie umożliwia ograniczenie wielkości emisji zanieczyszczeń do otoczenia w porównaniu z pozostałymi paliwami kopalnymi [170, 300].

W ramach czwartego etapu badań wykorzystano model CML-IA baseline. Ocenie poddano jedenaście kategorii wpływu. Przybliżono wyłącznie wybrane wyniki. Rezultaty analiz zaprezentowano w formie wielkości emisji substancji odniesienia – dla substancji o działaniu zakwaszającym w $\text{kg SO}_2 \text{ eq}$, natomiast dla związków o charakterze eutrofizującym w $\text{kg PO}_4 \text{ eq}$. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zobrazowano na rysunku 4.28. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe szkodliwe oddziaływanie na otoczenie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykl istnienia wszystkich rozpatrywanych aut zakładający ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania powoduje więcej emisji

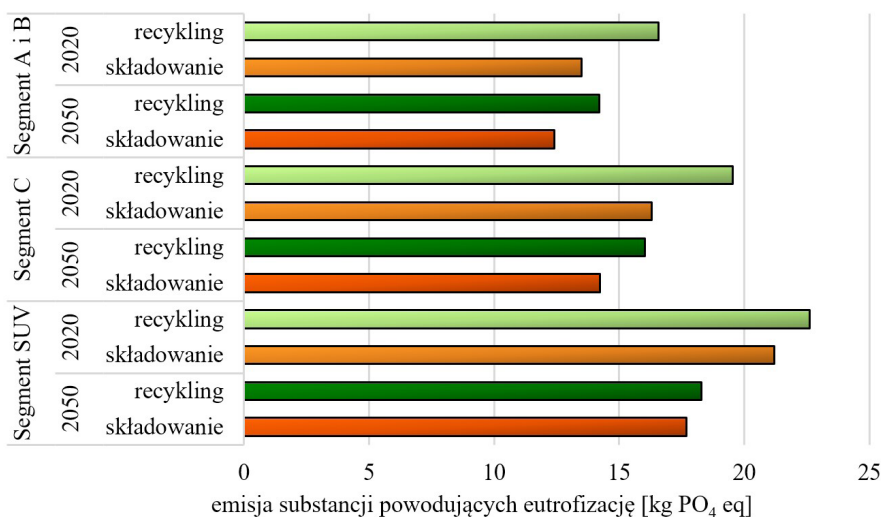
substancji o charakterze zakwaszającym środowisko (o od ok. 13% do ok. 24%). Najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań w analizowanym obszarze cechuje samochody z segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania na wysypisku odpadów po zakończeniu eksploatacji ($8,12 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $7,00 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq – w roku 2050). Zastosowanie procesów recyklingu spowodowałoby zmniejszenie wielkości niebezpiecznych oddziaływań w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($6,14 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla aut z roku 2020 i $5,30 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla tych z roku 2050). Spośród substancji przyczyniających się do zwiększenia zakwaszenia środowiska najwyższy poziom emisji w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych benzyną odnotowano dla: ditlenku siarki, tlenu azotu oraz amoniaku.

Tlenek azotu to bezbarwny gaz, bez zapachu i smaku, o działaniu drażniącym, jednak o mniejszym znaczeniu w kontekście szkodliwego oddziaływania na zdrowie człowieka i jakość środowiska w porównaniu z NO₂. W powietrzu ulega on szybkiemu utlenianiu do ditlenku azotu (w ciągu ok. 30 sekund 92% NO przechodzi w formę NO₂). Zarówno tlenek, jak i ditlenek azotu występują w istotnych stężeniach głównie w środowiskach miejskich i przemysłowych, ponieważ są to związki w największej ilości powstające na skutek działalności człowieka. Źródło ich emisji stanowią przede wszystkim procesy spalania wymagające wysokich temperatur i dostępu powietrza. Co prawda oba związki występują w gazach spalinowych, jednak przeważa w nich NO. Tlenki azotu są jednymi z bardziej niebezpiecznych substancji skażających atmosferę. Szereg reakcji fotochemicznych, w których biorą udział, przyczynia się m.in. do powstania smogu, pogłębienia efektu cieplarnianego czy tworzenia „kwaśnych opadów” [30, 119, 218].



Rys. 4.28. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CML-IA baseline)

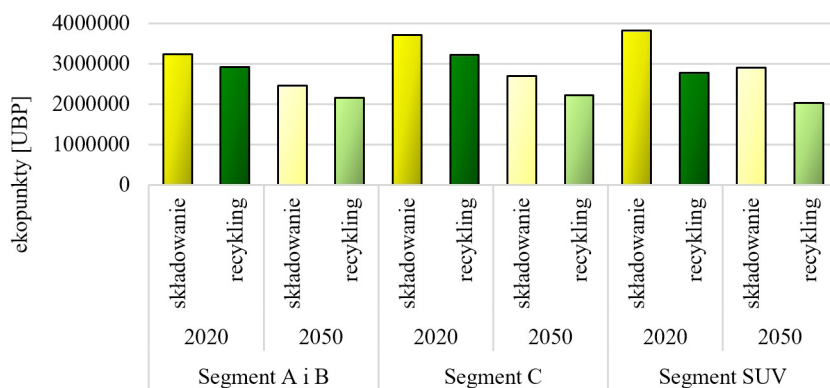
Na rysunku 4.28 zestawiono natomiast wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Najwięcej szkodliwych wpływów w tym względzie odnotowano dla cykli istnienia zakładających zagospodarowanie poużytkowe w formie składowania na wysypisku odpadów, z kolei najmniej – w formie recyklingu. Cykle istnienia aut, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej negatywnych wpływów w obszarze emisji substancji powodujących eutrofizację w porównaniu z tymi z roku 2020. Najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań wyróżniał cykl istnienia pojazdów z segmentu SUV zakładający ich recykling ($2,26 \cdot 10^1$ kg PO_4 eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,83 \cdot 10^1$ kg PO_4 eq w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich rozpatrywanych samochodów uwzględniające składowanie powodują niższy poziom emisji związków chemicznych o charakterze eutrofizującym (o od ok. 3% do ok. 19%). Jest to spowodowane substancjami stosowanymi w procesach recyklingu, cechującymi się silnym negatywnym oddziaływaniem na środowisko w tym względzie. Wśród związków chemicznych wpływających na pogłębianie się eutrofizacji środowiska najwyższy poziom emisji w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych benzyną zauważono dla: fosforanów, azotanów oraz fosforu.



Rys. 4.29. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CML-IA baseline)

Fosforany to związki chemiczne będące pochodnymi kwasu fosforowego. Zalicza się do nich sole i estry kwasu fosforowego. Estry kwasu fosforowego cechuje ogromna rola w procesach życiowych. Występują np. w kwasach nukleinowych i nukleotydach,

a trifosforan adenozy (ATP) stanowi podstawowe źródło energii w reakcjach chemicznych zachodzących w organizmach żywych. Jednak nadmiar fosforanów w środowisku może skutkować szeregiem negatywnych następstw, np. w formie eutrofizacji zbiorników i cieków wodnych (zmniejszającej bioróżnorodność organizmów oraz obniżającej jakość wody). Fosfor występuje w dużych ilościach na całym świecie i jest stosowany w wielu procesach przemysłowych. Na skutek reakcji z innymi związkami chemicznymi tworzy wiele różnych rodzajów fosforanów, np. fosfopiryt, apatyt czy uranit. Substancje te są stosowane w rolnictwie, przemyśle oraz (coraz rzadziej) środkach czystości [24, 159, 287].

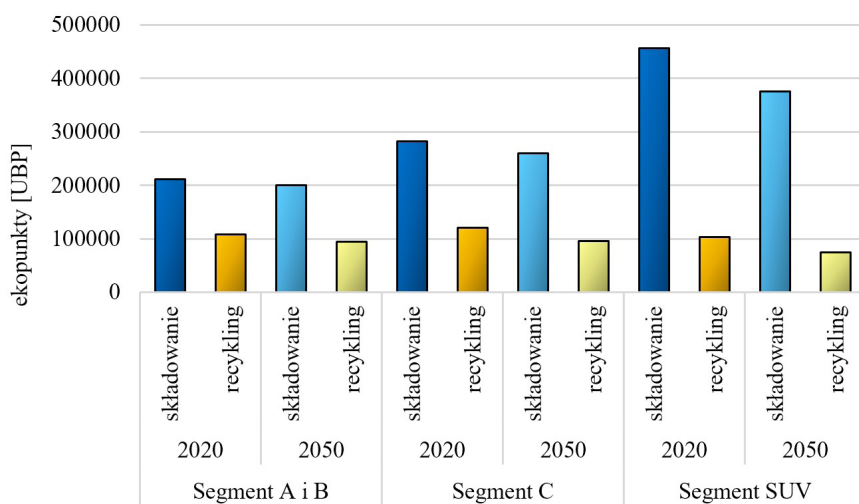


Rys. 4.30. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Piąty, ostatni etap badań obejmował wykorzystanie modelu Ecological Scarcity 2021. Dokonano analizy dziewiętnastu kategorii wpływu. W ramach monografii przedstawiono wyłącznie kluczowe wyniki odnoszące się do emisji wybranych grup związków chemicznych do środowiska atmosferycznego (o działaniu kancerogennym) oraz substancji (metale ciężkie) i procesów (zmiana sposobu użytkowania gruntów) wpływających na środowisko glebowe. Rezultaty zaprezentowano w ekopunktach (UBP). Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu zestawiono na rysunku 4.30. Cykle istnienia pojazdów zarejestrowanych w roku 2020 cechują się wyższym poziomem szkodliwych następstw środowiskowych w analizowanym zakresie, w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Wybór sposobu zagospodarowania użytkowego wpływa na poziom emisji związków chemicznych o charakterze kancerogennym. W przypadku cykli istnienia aut, które mają zostać poddane składowaniu po zakończeniu eksploatacji, odnotowano wyższy poziom negatywnych emisji (o ok. 10% do ok. 30%). Najwyższymi wartościami rozpatrywanych emisji

wyróżniają się cykle istnienia samochodów z segmentu SUV zakładające ich składowanie ($3,82 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,90 \cdot 10^6$ UBP – w roku 2050). Spośród substancji o działaniu rakotwórczym dla człowieka najwyższy poziom emisji do atmosfery w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych benzyną odnotowano dla: benzo(α)pirenu, benzeno oraz 2,3,7,8-tetrachlorodibenzodioxyny (TCDD).

Benzo(α)piren to związek zaliczany do grupy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA). Jest jednym z najbardziej toksycznych składników smogu – substancją mutagenną, rakotwórczą, teratogenną oraz stanowi istotne niebezpieczeństwo dla środowiska. Cechuje się małą toksycznością ostrą, ale dużą toksycznością przewlekłą, ponieważ posiada zdolność kumulacji w organizmie. Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC) już w 1987 roku uznała benzo(α)piren za główny ludzki kancerogen. Uszkadza on wątrobę, nadnercza, układ krwionośny i odpornościowy. Podstawowe źródło benzopirenów stanowią procesy niecałkowitego spalania węglowodorów. Jest również emitowany przez sektor transportu. W Polsce zanieczyszczenie powietrza benzo(α)pirenem stanowi istotny problem. Jego koncentracja wzrasta w okresie zimowym, podczas występowania niekorzystnych warunków atmosferycznych pod kątem jakości powietrza, np. niskiej prędkości wiatru czy zjawiska inwersji termicznej [174, 260, 295].



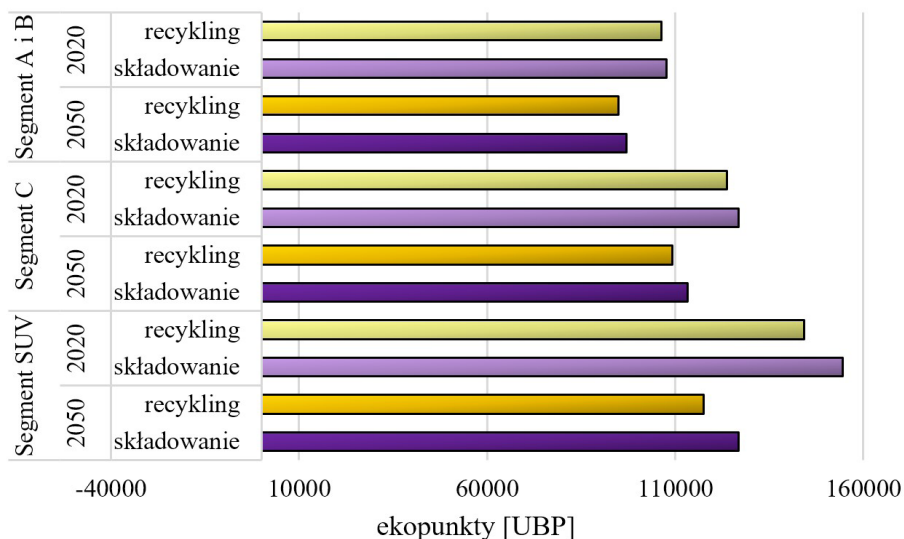
Rys. 4.31. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Na rysunku 4.31 zestawiono z kolei wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe szkodliwe oddziaływa-

nie na otoczenie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykle istnienia wszystkich rozpatrywanych aut zakładające ich formę zagospodarowania poużytkowego w postaci recyklingu, niosą ze sobą istotnie mniejszą ilość emisji metali ciężkich, w porównaniu z zagospodarowaniem w formie składowania. Najwyższy poziom negatywnych oddziaływań w analizowanym obszarze cechuje samochody z segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania na wysypisku odpadów po zakończeniu eksploatacji ($6,06 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $5,41 \cdot 10^5$ UBP – w roku 2050). Zastosowanie procesów recyklingu spowodowałoby zmniejszenie wielkości szkodliwych wpływów w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($4,56 \cdot 10^5$ UBP dla aut z roku 2020 i $3,76 \cdot 10^5$ UBP dla tych z roku 2050). Najwyższy poziom emisji w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych benzyną zauważono dla: chromu (VI), cynku, miedzi, niklu oraz kadmu.

Miedź jest pierwiastkiem niezbędnym do prawidłowego funkcjonowania organizmu człowieka. Uczestniczy w wielu reakcjach biochemicznych i jest konieczna do syntezy enzymów. Wpływa także na tworzenie tkanki kostnej oraz łącznej, ponieważ przez oksydazę lizylową warunkuje krzyżowanie się włókien elastyny i kolagenu. Miedź jest również istotna dla układu nerwowego. Zarówno jej niedobór, jak i nadmiar mogą wpływać na funkcjonowanie mózgu. W przypadku roślin miedź odgrywa ważną rolę w procesie tworzenia białek i fotosyntezie. Białka są niezbędne do powstawania chlorofilu, który z kolei jest konieczny do przeprowadzenia procesu fotosyntezy. Uczestniczy ona także w metabolizmie błon komórkowych, oddziałując na ich przepuszczalność, przez co wpływa na gospodarkę wodną roślin. Eksploatacja i przeróbka złóż rud metali, w tym również miedzi, jest związana z uruchamianiem do otoczenia znacznych ilości związków chemicznych. Część pierwiastków zostaje wprowadzona do środowiska wodnego razem ze zrzucanymi wodami kopalnianymi oraz ściekami z hut i zakładów wzbogacania, część z nich trafia również do atmosfery wraz z emitowanymi przez huty pyłami, a jeszcze inna część zawarta w odpadach hutniczych i poflotacyjnych, po zdeponowaniu na składowisku, może przenikać do najbliższego otoczenia. Największa ilość ładunków metali ciężkich, które są uruchamiane do środowiska w trakcie eksploatacji oraz przetwarzania rud metali, w ramach końcowego etapu trafia do wód powierzchniowych (zrzut ścieków, erozja i spływy z zanieczyszczonych gleb, infiltracja odcieków ze składowisk), gdzie zostaje zatrzymana w tworzących się osadach. Z tego względu niezwykle istotne jest upowszechnienie procesów recyklingu produktów wytworzonych z miedzi. Recykling miedzi jest bardzo efektywnym i energooszczędnym sposobem zwracania tego materiału do obiegu gospodarczego. Wymaga o ok. 85% mniej energii niż pierwotna produkcja. Miedź można odzyskiwać w nieskończoność, bez pogorszenia jej właściwości i obniżenia jakości. Oznacza to, że miedź pochodząca z recyklingu może być wykorzystywana do tych samych zastosowań jak ta pozyskiwana na drodze wydobywania. Od połowy lat 60. XX wieku światowe zapotrzebowanie na rafinowaną miedź wzrosło o ponad 250% (z ok. 5 mln do ok. 20 mln ton). Produkcja górnicza jest zatem niezbędna, aby zaspokoić stale rosnące zapotrzebowanie.

Miedź jest wszechobecna w maszynach, urządzeniach i systemach, na których w coraz większym stopniu opiera się współczesny styl życia – są to produkty zaawansowane technologicznie, silniki, instalacje elektryczne, fotowoltaiczne czy systemy budynków inteligentnych. Zapewnienie dostępności wystarczających ilości tego pierwiastka będzie zatem wymagać m.in. zwiększenia poziomów jego odzysku i recyklingu [95, 127, 280, 326].



Rys. 4.32. Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

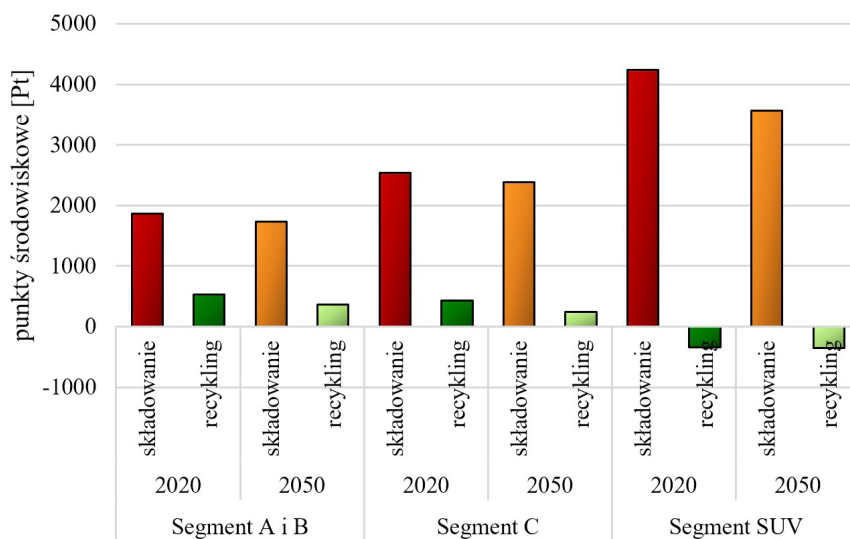
Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zaprezentowano natomiast na rysunku 4.32. Najwięcej szkodliwych oddziaływań odnotowano dla cykli istnienia zakładających zagospodarowanie użytkowe w formie składowania na wysypisku odpadów, a najmniej – w formie recyklingu. Cykle istnienia pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej negatywnych wpływów w obszarze zmiany sposobu użytkowania gruntów w porównaniu z tymi z roku 2020. Ponownie najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań wyróżniał cykle istnienia aut z segmentu SUV zakładające ich składowanie ($1,54 \cdot 10^5$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,27 \cdot 10^5$ UBP – w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich rozpatrywanych samochodów uwzględniające składowanie zamiast recyklingu powodują więcej szkodliwych procesów związanych ze zmianą użytkowania gruntów (o od ok. 1% do ok. 7%). Wśród procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów najwyższy poziom negatywnych oddziaływań

w cyklach istnienia pojazdów ICEV zasilanych benzyną zauważono dla procesów związanych z: zajęciem gruntu przez obszar wydobywania surowców mineralnych, zajęciem przez obszar przemysłowy oraz zajęciem przez place budowy, a w konsekwencji – obszar zabudowany.

4.5. Samochody osobowe z silnikiem spalinowym (ICEV) zasilane olejem napędowym

Kolejne analizy obejmowały ocenę potencjalnego oddziaływania na środowisko pojazdów z silnikiem spalinowym zasilanych olejem napędowym, z uwzględnieniem odmiennych segmentów (A i B, C oraz SUV). Dla każdego z wspomnianych typów aut ponownie przeanalizowano dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego – składowanie na wysypisku odpadów oraz recykling. Podobnie przyjęto także dwa scenariusze horyzontu czasowego, pierwszy dla aut zarejestrowanych w roku 2020, a drugi – obejmujący prognozę dla samochodów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Ocenę analogicznie wykonano wyłącznie dla cyklu istnienia tworzyw, materiałów i elementów rozważanych pojazdów. Wyniki w odniesieniu do cykli paliwowych oraz energetycznych przybliżono w podrozdziale 4.10.

Pierwszy etap badań zakładał wykorzystanie modelu ReCiPe 2016. Przybliżono wyłącznie najważniejsze z otrzymanych wyników. Rezultaty analiz zaprezentowano w jednostce punktów środowiskowych (Pt). Na rysunku 4.33 przedstawiono wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały dużo większe szkodliwe oddziaływanie na otoczenie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Cykl istnienia wszystkich analizowanych aut zakładający ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania powoduje więcej destrukcyjnych następstw środowiskowych w porównaniu z zagospodarowaniem w formie recyklingu. Najwyższy poziom niebezpiecznych wpływów wyróżnia pojazdy segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania na wysypisku odpadów ($4,24 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,56 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050). Zastosowanie recyklingu spowodowałoby istotne zmniejszenie wielkości szkodliwych oddziaływań w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($-3,46 \cdot 10^2$ Pt dla aut z roku 2020 i $-3,50 \cdot 10^2$ Pt dla tych z roku 2050). Wśród kategorii wpływu o najwyższym poziomie destrukcyjnych następstw środowiskowych dla otoczenia w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych olejem napędowym można wyróżnić: procesy powodujące uszczuplenie zasobów wody oddziałujące na zdrowie człowieka i ekosystemy lądowe, emisje substancji powodujących tworzenie się drobnych cząstek stałych (PM), substancji toksycznych o działaniu nowotworogennym dla człowieka oraz substancji powodujących globalne ocieplenie (oddziałujących na zdrowie człowieka).



Rys. 4.33. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model ReCiPe 2016)

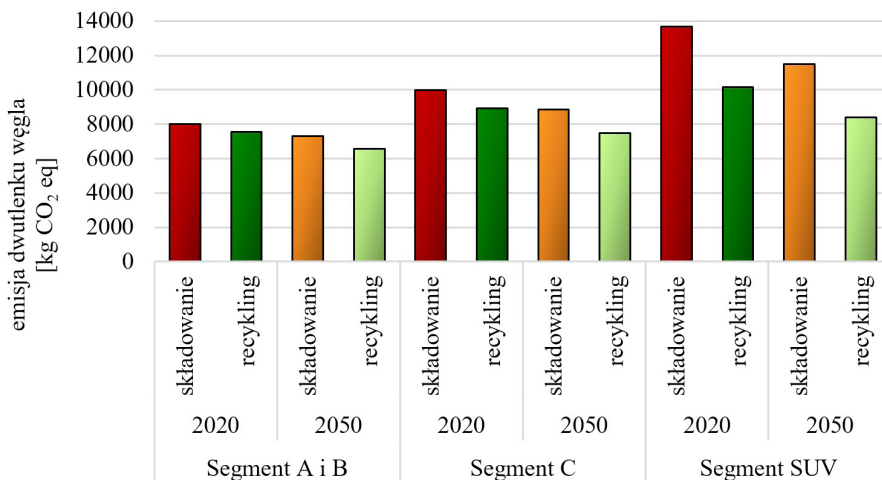
Tab. 4.5. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego oraz trzech obszarów wpływu (model ReCiPe 2016)

ICEV OLEJ NAPĘDOWY			Zdrowie człowieka	Ekosystemy	Zasoby surowców	RAZEM
2020	Segment A i B	składowanie	$1,74 \cdot 10^3$	$1,20 \cdot 10^2$	$5,68 \cdot 10^0$	$1,87 \cdot 10^3$
		recykling	$5,28 \cdot 10^2$	$-9,82 \cdot 10^{-1}$	$4,98 \cdot 10^0$	$5,32 \cdot 10^2$
	Segment C	składowanie	$2,36 \cdot 10^3$	$1,71 \cdot 10^2$	$7,06 \cdot 10^0$	$2,54 \cdot 10^3$
		recykling	$4,48 \cdot 10^2$	$-1,68 \cdot 10^1$	$6,02 \cdot 10^0$	$4,36 \cdot 10^2$
	Segment SUV	składowanie	$3,92 \cdot 10^3$	$3,14 \cdot 10^2$	$9,90 \cdot 10^0$	$4,24 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,64 \cdot 10^2$	$-8,98 \cdot 10^1$	$7,72 \cdot 10^0$	$-3,46 \cdot 10^2$
2050	Segment A i B	składowanie	$1,61 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^2$	$5,46 \cdot 10^0$	$1,74 \cdot 10^3$
		recykling	$3,72 \cdot 10^2$	$-5,62 \cdot 10^0$	$4,74 \cdot 10^0$	$3,70 \cdot 10^2$
	Segment C	składowanie	$2,20 \cdot 10^3$	$1,67 \cdot 10^2$	$6,56 \cdot 10^0$	$2,38 \cdot 10^3$
		recykling	$2,64 \cdot 10^2$	$-2,20 \cdot 10^1$	$5,50 \cdot 10^0$	$2,48 \cdot 10^2$
	Segment SUV	składowanie	$3,28 \cdot 10^3$	$2,64 \cdot 10^2$	$8,52 \cdot 10^0$	$3,56 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,78 \cdot 10^2$	$-7,82 \cdot 10^1$	$6,64 \cdot 10^0$	$-3,50 \cdot 10^2$

W tabeli 4.5 zaprezentowano z kolei wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu, ze szczególnym uwzględnieniem trzech obszarów wpływu (zdrowie człowieka, ekosystemy, zasoby surowców). Rezultaty przedstawiono w punktach środowiskowych (Pt). Najwięcej negatywnych oddziaływań odnotowano w zakresie wpływu na zdrowie człowieka, a najmniej – w obszarze wyczerpywania zasobów surowców. Najwyższy poziom łącznych destrukcyjnych oddziaływań zauważono dla cyklu istnienia aut z segmentu SUV, zakładającego ich składowanie ($4,24 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,56 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia ludzkiego $3,92 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $3,28 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Wykorzystanie procesów recyklingu pozwoliłoby na istotne ograniczenie niebezpiecznych wpływów w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($-3,46 \cdot 10^2$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $-3,50 \cdot 10^2$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia ludzkiego $-2,64 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $-2,78 \cdot 10^2$ Pt dla tych z roku 2050). Wśród związków chemicznych o szkodliwym oddziaływaniu na zdrowie ludzkie w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych olejem napędowym najwyższy poziom emisji cechował: chrom (VI), ditlenek siarki, ditlenek węgla, drobne cząstki stałe (PM), cynk i tlenek azotu.

Ditlenek węgla występuje w ludzkim organizmie i jest w nim wytwarzany. Wy różnia go istotna rola m.in. w transporcie tlenu, utrzymaniu równowagi kwasowo-zasadowej oraz rozkurczu mięśni gładkich w ścianach naczyń krwionośnych. Stanowi on ważną część obiegu węgla w przyrodzie, będąc produktem spalania i oddychania. Z tego powodu jego istotna ilość jest emitowana głównie w procesach wytwarzania tworzyw, materiałów i elementów ocenianych pojazdów, cechujących się istotną energo- i materiałochłonnością. Nadmiar CO_2 w środowisku atmosferycznym stanowi przyczynę np. zakwaszania pochłaniającej go wody, co ma istotne znaczenie dla szeregu ekosystemów morskich. Wzrost koncentracji tego związku chemicznego powoduje także pogłębienie efektu cieplarnianego, który prowadzi nie tylko do wzrostu temperatury powierzchni Ziemi, ale również wielu innych negatywnych konsekwencji. Podwyższona koncentracja ditlenku węgla we wdychanym powietrzu stanowi jeden z podstawowych czynników mogących podwyższyć stężenie CO_2 we krwi i płynie mózgowo-rdzeniowym. Wywołuje on duszności, powoduje powstawanie hiperkapnii, a w następstwie – obrzęku mózgu. Wspomniane przypadki mogą wydawać się skrajnie ekstremalne, ale ten związek chemiczny działa na organizm człowieka każdego dnia (choć w dużo mniejszym stopniu) i większość osób odczuło nieprzyjemne skutki zbyt wysokiego stężenia ditlenku węgla w powietrzu. Podwyższona ilość tego gazu skutkuje zaburzeniem ludzkich procesów poznawczych (począwszy od podejmowania prostych decyzji, a skończywszy na skomplikowanym myśleniu strategicznym), jego stężenie po kilkugodzinnym przebywaniu w zamkniętym pomieszczeniu ma negatywny wpływ na efektywność uczenia się, koncentrację i pamięć. CO_2 jest substancją, bez której życie na Ziemi oraz funkcjonowanie organizmów nie byłoby możliwe. Proble-

mem nie jest samo jego istnienie, ale istotny wzrost jego stężenia, następujący w coraz szybszym tempie [8, 32, 40, 82, 165].

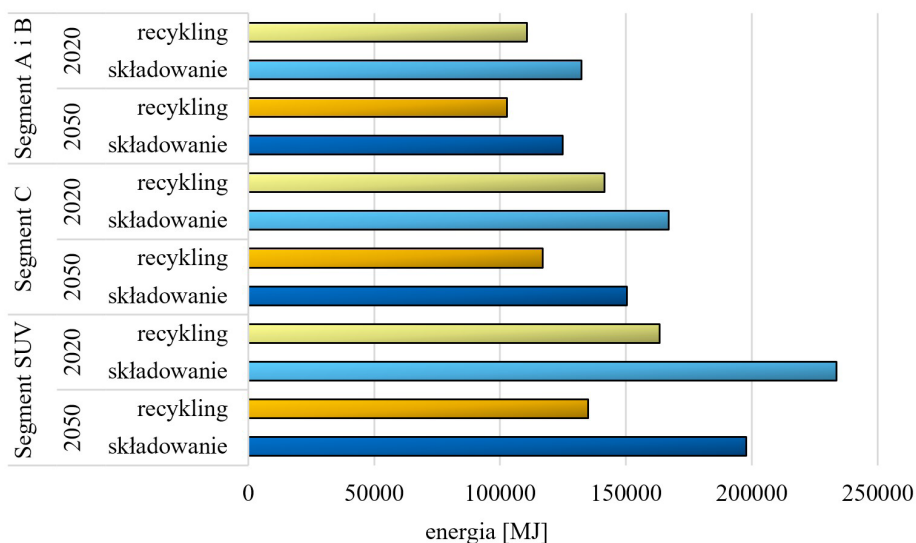


Rys. 4.34. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021)

W ramach drugiego etapu badań użyto modelu IPCC 2021. Zaprezentowano tylko kluczowe wyniki, a rezultaty przedstawiono w kg CO₂ eq. Na rysunku 4.34 zobrazowano wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Maksymalną ilość niebezpiecznych oddziaływań w rozpatrywanym zakresie zauważono dla cykli istnienia zakładających zagospodarowanie użytkowe w formie składowania na wysypisku odpadów, z kolei minimalną – w formie recyklingu. Cykle istnienia aut, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej szkodliwych wpływów w obszarze emisji gazów szklarniowych w porównaniu z tymi z roku 2020. Najwyższym poziomem negatywnych oddziaływań cechował się cykl istnienia pojazdów z segmentu SUV zakładający ich składowanie ($1,37 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,15 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich rozważanych samochodów uwzględniające składowanie generują wyższy poziom emisji gazów cieplarnianych (o od ok. 6 do ok. 27%). Spośród substancji powodujących pogłębienie efektu cieplarnianego najwyższy poziom emisji w cyklu istnienia aut ICEV zasilanych olejem napędowym odnotowano w przypadku: ditlenku węgla, metanu, tetrafluorometanu (CFC-14), tlenku diazotu, heksafluoroetanu (HFC-116) oraz heksafluorku siarki.

Tetrafluorometan to organiczny związek chemiczny stanowiący połączenie węgla i fluoru. Stanowi perfluorowaną pochodną metanu, co oznacza, że wszystkie atomy

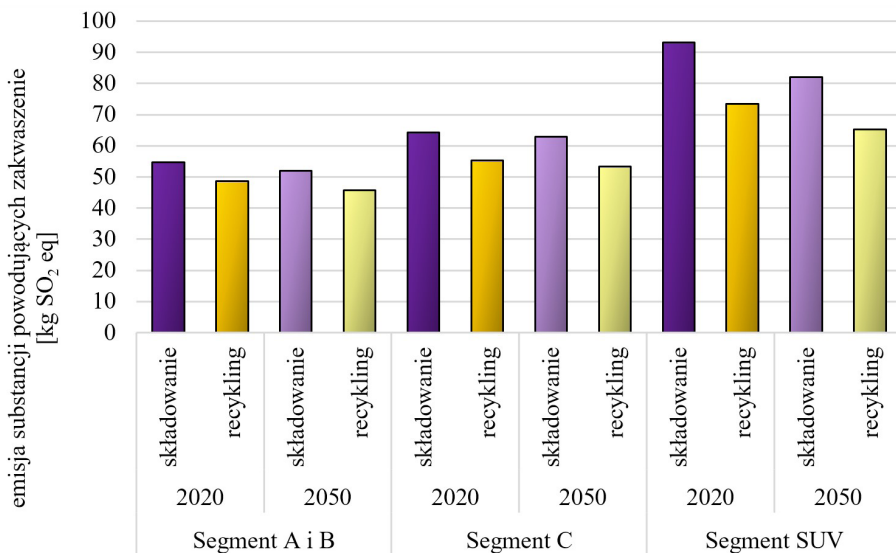
wodoru w metanie zostały zastąpione atomami fluoru. Jest on zaliczany do gazów cieplarnianych. Dla horyzontu czasowego 100 lat cząsteczka tetrafluorometanu posiada aż 6630 razy wyższy potencjał globalnego ocieplenia (GWP) w porównaniu z cząsteczką ditlenku węgla. Perfluorowęglowodory należą do najsilniejszych gazów cieplarnianych wymienionych w Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (UNFCCC – ang. *United Nations Framework Convention on Climate Change*). Przy czasie istnienia w atmosferze rzędu od tysięcy do dziesiątek tysięcy lat emisje tego typu związków chemicznych powodują trwałą zmianę globalnego klimatu. Do branż odpowiedzialnych za zdecydowaną większość emisji tej substancji można zaliczyć hutnictwo aluminium oraz produkcję półprzewodników, stąd też destrukcyjne oddziaływanie tetrafluorometanu odnotowano w szczególności na etapie wytwarzania tworzyw, materiałów i elementów analizowanych pojazdów [157, 274].



Rys. 4.35. Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CED V1.11)

W trzecim etapie badań wykorzystano model CED. W monografii przedstawiono najważniejsze z uzyskanych wyników. Rezultaty analiz zaprezentowano w jednostce MJ zapotrzebowania na energię. Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zestawiono na rysunku 4.35. Cykle istnienia aut zarejestrowanych w roku 2020 cechują się wyższym poziomem energochłonności w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Sposób zagospodarowania użytkowego również ma istotny wpływ na poziom zapotrzebowania na energię. W przypadku cykli istnienia pojazdów mających zo-

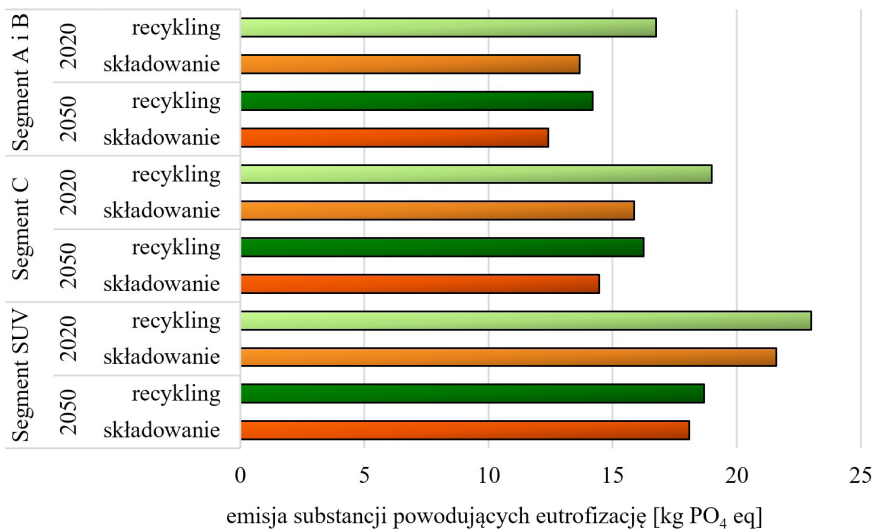
stać składowane odnotowano wyższy poziom energochłonności (o od ok. 15% do ok. 32%), w porównaniu z tymi, które mają zostać poddane recyklingowi. Maksymalnym zapotrzebowaniem na energię charakteryzuje się cykl istnienia samochodów segmentu SUV obejmujący ich składowanie ($2,34 \cdot 10^5$ MJ dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,98 \cdot 10^5$ MJ – w roku 2050). Kategorią wpływu o najwyższym poziomie szkodliwych następstw środowiskowych dla otoczenia, zidentyfikowanych w cyklu istnienia aut ICEV zasilanych olejem napędowym, jest kategoria obejmująca procesy związane z wykorzystaniem nieodnawialnych paliw kopalnych (w szczególności procesy wykorzystania gazu ziemnego, ropy naftowej oraz węgla kamiennego).



Rys. 4.36. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CML-IA baseline)

Czwarty etap badań obejmował użycie modelu CML-IA baseline. Przybliżono wyłącznie wybrane wyniki, a rezultaty analiz zaprezentowano w formie wielkości emisji substancji odniesienia (w kg SO₂ eq i kg PO₄ eq). Na rysunku 4.36 przedstawiono wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu.auta zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe destrukcyjne oddziaływanie na otoczenie w ocenianym zakresie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykl istnienia analizowanych pojazdów uwzględniający formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania powoduje więcej emisji substancji zakwaszających środowisko (o od ok. 11% do ok. 21%). Najwyższy poziom niebezpiecznych oddziaływań w roz-

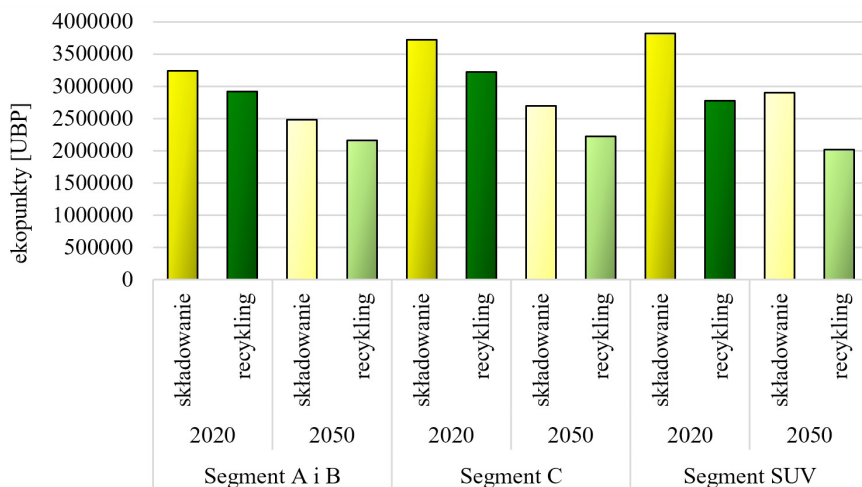
ważnym obszarze charakteryzuje auta z segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przekazane do składowania po zakończeniu eksploatacji ($9,32 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $8,20 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq – w roku 2050). Zastosowanie recyklingu skutkowałoby zmniejszeniem wielkości szkodliwych oddziaływań w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($7,34 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq dla aut z roku 2020 i $6,52 \cdot 10^1$ kg SO_2 eq dla tych z roku 2050). Wśród związków chemicznych zwiększających kwasowość środowiska najwyższym poziomem emisji w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych olejem napędowym wyróżniają się: ditlenek siarki, tlenek azotu oraz amoniak.



Rys. 4.37. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CML-IA baseline)

Z kolei wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zobrazowano na rysunku 4.37. Najwięcej destrukcyjnych wpływów w rozważanym obszarze odnotowano dla cykli istnienia zakładających zagospodarowanie użytkowe w formie składowania, a najmniej – w formie recyklingu. Cykle istnienia pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 powodowałyby mniej niebezpiecznych wpływów w obszarze emisji substancji o charakterze eutrofizującym w porównaniu z tymi z roku 2020. Najwyższym poziomem szkodliwych oddziaływań cechował się cykl istnienia pojazdów z segmentu SUV zakładający ich recykling ($2,30 \cdot 10^1$ kg PO_4 eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,87 \cdot 10^1$ kg PO_4 eq – w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich analizowanych aut uwzględniające składowanie skutkują niższym poziomem emisji

związków powodujących eutrofizację (o od ok. 3% do ok. 18%). Spośród substancji wpływających na pogłębianie się eutrofizacji środowiska najwyższym poziomem emisji w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych olejem napędowym wyróżniły się: fosforany, azotany oraz fosfor.

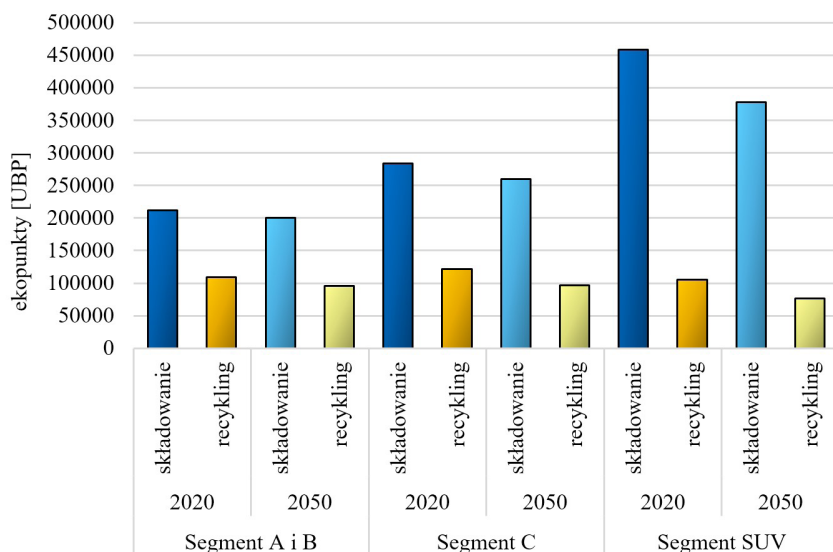


Rys. 4.38. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Ostatni etap badań opierał się na wykorzystaniu modelu Ecological Scarcity 2021. W monografii przedstawiono wyłącznie kluczowe wyniki, które odnosiły się do emisji wybranych grup związków chemicznych do środowiska atmosferycznego oraz substancji i procesów wpływających na środowisko glebowe. Rezultaty analiz zaprezentowano w ekopunktach (UBP). Na rysunku 4.38 zestawiono wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Cykle istnienia aut zarejestrowanych w roku 2020 wyróżniają się wyższym poziomem niebezpiecznych następstw środowiskowych w rozpatrywanym zakresie, w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Wybór sposobu zagospodarowania użytkowego również ma wpływ na wielkość emisji kancerogennych związków chemicznych. W przypadku cykli istnienia pojazdów, które mają zostać poddane składowaniu, zauważono wyższy poziom szkodliwych emisji (o od ok. 10% do ok. 30%), aniżeli tych, których zagospodarowanie przyjęłoby formę recyklingu. Maksymalnymi wartościami analizowanych emisji cechują się cykle istnienia aut z segmentu SUV zakładające ich składowanie ($3,82 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,90 \cdot 10^6$ UBP – w roku 2050). Wśród substancji o charakterze kancerogennym dla człowieka najwyż-

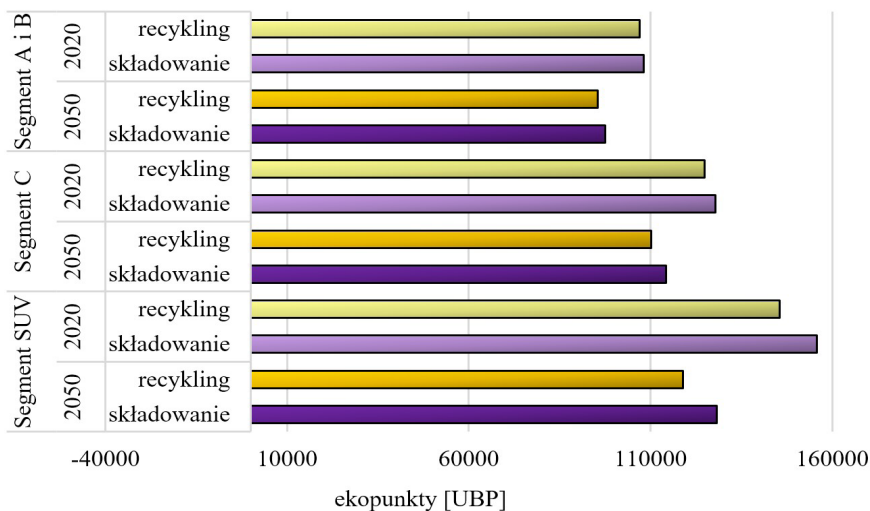
szym poziomem emisji do atmosfery w cyklu istnienia samochodów ICEV zasilanych benzyną wyróżniały się: benzo(α)piren, benzen oraz 2,3,7,8-tetrachlorodibenzodioxyna (TCDD).

Benzen składa się z sześciu atomów wodoru i sześciu atomów węgla, jest zatem najprostszym węglowodorem aromatycznym. W otoczeniu tras komunikacyjnych odnotowuje się duże stężenia zarówno samego benzenu, jak i jego alkilopochodnych, np. etylobenzenu, m,p,o-ksylenu, toluenu, izopropylobenzenu, 1,3,5-trimetylobenzenu czy 1,2,4-trimetylobenzenu. Wspomniane związki chemiczne są wysokooktanowymi komponentami benzyn, zatem ich emisja związana jest przede wszystkim z eksploatacją silników o zapłonie iskrowym. W spalinach tego rodzaju zanieczyszczenia występują w formie niespalonych składników paliwa. Z tego powodu zanieczyszczenie powietrza benzenem oraz jego pochodnymi stanowi znaczący problem, szczególnie w przypadku tras komunikacyjnych oraz dużych miast. Benzen oraz pozostałe wymienione węglowodory są poważnym zagrożeniem dla żywych organizmów, zarówno w formie pośredniego, jak i bezpośredniego oddziaływania. Zgodnie z wytycznymi Parlamentu Europejskiego od roku 2001 benzen jest uznawany jako substancja priorytetowa (o wyjątkowo ostrej i silnej toksyczności dla środowiska wodnego, pośrednio stanowiąca także zagrożenie dla życia człowieka) oraz rakotwórcza kategorii pierwszej. Działa toksycznie na ludzki organizm głównie przez drogi oddechowe. Benzen jest klasyfikowany jako substancja kancerogenna, mutagenna, teratogenna i embriotoksyczna [65, 286].



Rys. 4.39. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu zaprezentowano natomiast na rysunku 4.39.auta zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe destrukcyjne oddziaływanie na otoczenie w analizowanym obszarze w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykle istnienia wszystkich rozważanych pojazdów zakładające ich formę zagospodarowania poużytkowego w postaci recyklingu niosą ze sobą istotnie mniejszą ilość emisji metali ciężkich, w porównaniu z zagospodarowaniem w formie składowania na wysypisku odpadów. Najwyższym poziomem niebezpiecznych oddziaływań w rozpatrywanym zakresie cechują się samochody z segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania na wysypisku odpadów po zakończeniu eksploatacji ($4,58 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,78 \cdot 10^5$ UBP – w roku 2050). Wykorzystanie procesów recyklingu skutkowałoby zmniejszeniem poziomu negatywnych wpływów w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($1,05 \cdot 10^5$ UBP dla aut z roku 2020 i $7,68 \cdot 10^4$ UBP dla tych z roku 2050). Najwyższym poziomem emisji w cyklu istnienia aut ICEV zasilanych olejem napędowym wyróżniały się: chrom (VI), cynk, miedź, nikiel oraz kadm.



Rys. 4.40. Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Z kolei na rysunku 4.40 zobrazowano wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Najwięcej negatywnych

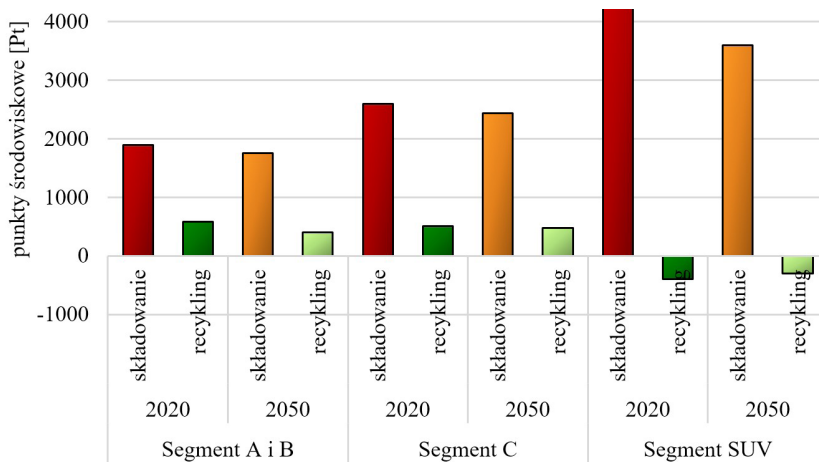
oddziaływań odnotowano dla cykli istnienia, w których zagospodarowanie użytkowe przyjmuje formę składowania na wysypisku odpadów, z kolei najmniej – formę recyklingu. Cykle istnienia aut, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej destrukcyjnych wpływów w zakresie zmiany sposobu użytkowania gruntów w porównaniu z tymi z roku 2020. Ponownie najwyższym poziomem niebezpiecznych oddziaływań cechował się cykl istnienia aut z segmentu SUV zakładający ich składowanie ($1,56 \cdot 10^5$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,28 \cdot 10^5$ UBP w roku 2050). Cykl istnienia wszystkich analizowanych samochodów uwzględniający składowanie powoduje więcej negatywnych procesów w zakresie zmiany użytkowania gruntów (o od ok. 1% do ok. 7%). Wśród procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów najwyższym poziomem szkodliwych oddziaływań w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych olejem napędowym wyróżniały się procesy związane z: zajęciem gruntu przez obszar wydobycia surowców mineralnych, zajęciem przez obszar przemysłowy oraz zajęciem przez place budowy, a w konsekwencji – obszar zabudowany.

4.6. Samochody osobowe z silnikiem spalinowym (ICEV) zasilane CNG

Dalsze analizy obejmowały ocenę potencjalnego oddziaływania na środowisko pojazdów z silnikiem spalinowym zasilanych CNG, również z uwzględnieniem różnych segmentów (A i B, C oraz SUV). Dla każdego z rozważanych typów samochodów przeanalizowano dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego – składowanie oraz recykling. Analogicznie przyjęto dwa scenariusze horyzontu czasowego (dla aut zarejestrowanych w roku 2020 oraz prognozę dla pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050). Ocenę ponownie zrealizowano dla cykli istnienia tworzyw, materiałów i elementów rozpatrywanych samochodów. Wyniki w zakresie cykli paliwowych oraz energetycznych przedstawiono w podrozdziale 4.10.

W ramach pierwszego etapu badań zastosowano model ReCiPe 2016. Przybliżono najważniejsze z otrzymanych wyników. Rezultaty zaprezentowano w punktach środowiskowych (Pt). Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zobrazowano na rysunku 4.41.auta zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały istotnie więcej negatywnych oddziaływań na otoczenie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Cykl istnienia wszystkich rozważanych pojazdów zakładający ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania na wysypisku odpadów powoduje więcej niebezpiecznych następstw środowiskowych w porównaniu z zagospodarowaniem w formie recyklingu. Maksymalnym poziomem destrukcyjnych wpływów cechują się auta segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania po zakończeniu eksploatacji

($4,28 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,60 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050). Zastosowanie procesów recyklingu umożliwiłoby znaczące zmniejszenie wielkości negatywnych oddziaływań w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($-3,93 \cdot 10^2$ Pt dla aut z roku 2020 i $-2,98 \cdot 10^2$ Pt dla tych z roku 2050). Do kategorii wpływu o najwyższym poziomie szkodliwych następstw środowiskowych dla otoczenia w cyklu istnienia samochodów ICEV zasilanych CNG można zaliczyć: procesy powodujące uszczuplenie zasobów wody oddziałujące na zdrowie człowieka i ekosystemy lądowe, emisje substancji powodujących tworzenie się drobnych cząstek stałych (PM), substancji toksycznych o działaniu nowotworowym dla człowieka oraz substancji powodujących globalne ocieplenie (oddziałujących na zdrowie człowieka).



Rys. 4.41. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model ReCiPe 2016)

Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, ze szczególnym uwzględnieniem trzech obszarów wpływu (zdrowie człowieka, ekosystemy, zasoby surowców) zestawiono natomiast w tabeli 4.6. Rezultaty przedstawiono w jednostce punktów środowiskowych (Pt). Najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań zauważono w obszarze wpływu na zdrowie człowieka, z kolei najniższy – w zakresie wyczerpywania zasobów surowców. Maksymalną ilość łącznych niebezpiecznych wpływów odnotowano w przypadku cyklu istnienia pojazdów z segmentu SUV, zakładającego ich składowanie na wysypisku odpadów ($4,28 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,60 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze ludzkiego zdrowia $3,94 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $3,32 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Zastosowanie recyklingu umożliwiłoby znaczące ograniczenie szkodliwych oddziaływań w perspektywie całego ich cyklu istnienia

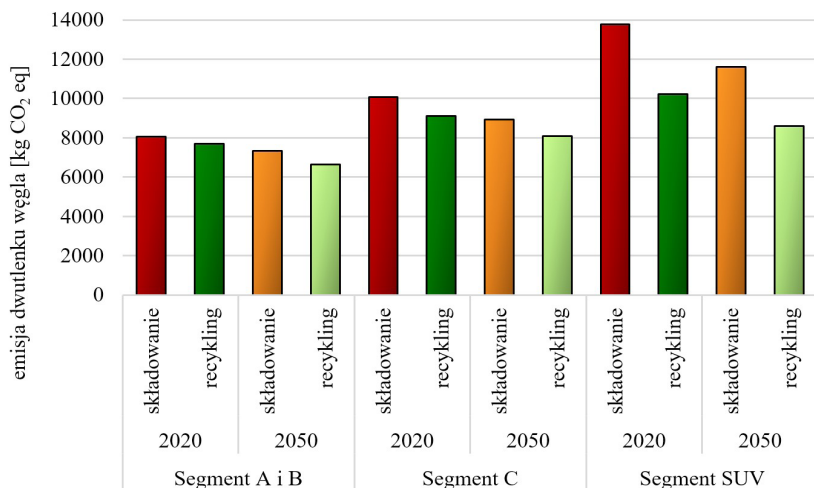
($-3,93 \cdot 10^2$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $-2,98 \cdot 10^2$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia człowieka $-3,07 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $-2,30 \cdot 10^2$ Pt dla tych z roku 2050). Spośród substancji o szkodliwym wpływie na ludzkie zdrowie w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych CNG najwyższym poziomem emisji charakteryzował się: chrom (VI), ditlenek siarki, ditlenek węgla, drobne cząstki stałe (PM), tlenek azotu i cynk.

Tab. 4.6. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania pożytkowego oraz trzech obszarów wpływu (model ReCiPe 2016)

ICEV CNG			Zdrowie człowieka	Ekosystemy	Zasoby surowców	RAZEM
2020	Segment A i B	składowanie	$1,77 \cdot 10^3$	$1,22 \cdot 10^2$	$5,74 \cdot 10^0$	$1,90 \cdot 10^3$
		recykling	$5,78 \cdot 10^2$	$3,28 \cdot 10^0$	$5,05 \cdot 10^0$	$5,86 \cdot 10^2$
	Segment C	składowanie	$2,42 \cdot 10^3$	$1,76 \cdot 10^2$	$7,24 \cdot 10^0$	$2,60 \cdot 10^3$
		recykling	$5,20 \cdot 10^2$	$-1,16 \cdot 10^1$	$6,20 \cdot 10^0$	$5,14 \cdot 10^2$
	Segment SUV	składowanie	$3,94 \cdot 10^3$	$3,26 \cdot 10^2$	$5,81 \cdot 10^0$	$4,28 \cdot 10^3$
		recykling	$-3,07 \cdot 10^2$	$-9,45 \cdot 10^1$	$4,51 \cdot 10^0$	$-3,93 \cdot 10^2$
2050	Segment A i B	składowanie	$1,64 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^2$	$5,51 \cdot 10^0$	$1,76 \cdot 10^3$
		recykling	$4,06 \cdot 10^2$	$-3,04 \cdot 10^0$	$4,81 \cdot 10^0$	$4,08 \cdot 10^2$
	Segment C	składowanie	$2,25 \cdot 10^3$	$1,78 \cdot 10^2$	$3,99 \cdot 10^0$	$2,44 \cdot 10^3$
		recykling	$4,83 \cdot 10^2$	$-1,18 \cdot 10^1$	$3,42 \cdot 10^0$	$4,82 \cdot 10^2$
	Segment SUV	składowanie	$3,32 \cdot 10^3$	$2,68 \cdot 10^2$	$8,74 \cdot 10^0$	$3,60 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,30 \cdot 10^2$	$-7,50 \cdot 10^1$	$6,86 \cdot 10^0$	$-2,98 \cdot 10^2$

Siarka jest pierwiastkiem chemicznym o szerokim zastosowaniu w przemyśle. Jej związki są wykorzystywane podczas produkcji m.in. środków ochrony roślin, nawozów sztucznych, leków (w tym antybiotyków), barwników czy substancji konserwujących. Jest ona szeroko rozpowszechniona w przyrodzie. Do atmosfery trafia także w wyniku procesów naturalnych, takich jak np. wybuchy wulkanów, erozja gleb lub rozkład materii organicznej. Związki siarki osiągają znacznie większe stężenia na skutek emisji antropogenicznej. W dużej ilości występuje w paliwach kopalnych (gazie ziemnym, węglu, ropie) oraz w biomasie. Podczas spalania wymienionych surowców zawarta w nich siarka łączy się z tlenem, tworząc tlenki siarki, wśród których dominuje ditlenek siarki. Stąd też istotnie wysoki poziom emisji tego związku chemicznego w cyklu istnienia ocenianych pojazdów. SO_2 jest silnie toksycznym gazem o duszącym, gryzącym zapachu. W atmosferze przechodzi szereg przemian chemicznych – początkowo utlenia się do tritlenku siarki, który w wyniku reakcji z wodą występującą w powietrzu tworzy kwas siarkowy. Powstały kwas ulega dysocjacji elektrolitycznej na

skutek kontaktu z kroplami wody, rozpadając się na jony SO_4^{2-} i H^+ . Związki te mają bardzo silne działanie zakwaszające, przez co destrukcyjnie wpływają na środowisko, np. w formie „kwaśnych opadów”. Powodują one zakwaszenie gleb, a w konsekwencji – spadek ich żyzności. Dodatkowo hamują również wzrost roślin oraz przyczyniają się do ich obumierania. Dytlenek siarki stanowi także obciążenie dla infrastruktury budowlanej, ponieważ inicjuje korozję materiałów konstrukcyjnych, np. stali, aluminium, miedzi czy cynku. Ludzki organizm również jest narażony na szkodliwy wpływ SO_2 . Jest on wchłaniany przez błonę śluzową nosa i gardła. Kontakt z ditlenkiem siarki skutkuje podrażnieniem górnych dróg oddechowych i może stanowić przyczynę rozwoju stanów zapalnych, zapalenia oskrzeli, płuc czy nawet rozedmy płuc. SO_2 za pośrednictwem krwioobiegu przenika do tkanek i kumuluje się w organach wewnętrznych. Deponowanie toksycznych substancji w narządach może prowadzić do powstawania ognisk zapalnych inicjujących zmiany nowotworowe [42, 251].

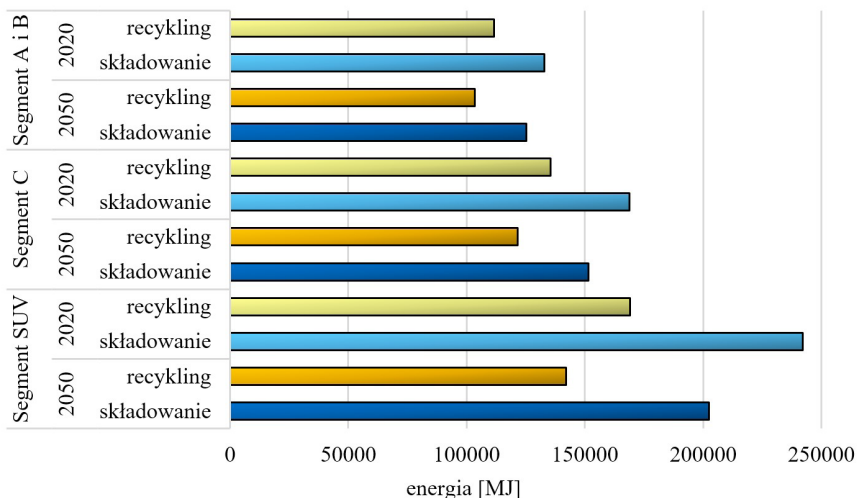


Rys. 4.42. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021)

Drugi etap badań obejmował wykorzystanie modelu IPCC 2021. W monografii zaprezentowano wyłącznie kluczowe wyniki. Rezultaty analiz przedstawiono w kg CO₂ eq. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, przybliżono na rysunku 4.42. Najwyższym poziomem szkodliwych oddziaływań w ocenianym obszarze charakteryzowały się cykle istnienia zakładające zagospodarowanie użytkowe rozważanych pojazdów w formie składowania, natomiast najniższym – w formie recyklingu. Cykle istnienia aut, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej negatywnych wpływów w zakresie emisji GHG w porównaniu z tymi z roku 2020. Maksymalny poziom destrukcyjnych

oddziaływań odnotowano dla cyklu istnienia pojazdów z segmentu SUV zakładającego ich składowanie ($1,38 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,16 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq – w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich analizowanych samochodów uwzględniające składowanie powodują wyższe poziomy emisji gazów szklarniowych (o od ok. 4% do ok. 26%). Wśród związków chemicznych powodujących pogłębienie efektu cieplarnianego najwyższym poziomem emisji w cyklu istnienia aut ICEV zasilanych CNG wyróżnia się: ditlenek węgla, metan, tetrafluorometan (CFC-14), tlenek diazotu, heksafluoroetan (HFC-116) oraz heksafluorek siarki. N₂O zaliczany jest do najważniejszych gazów cieplarnianych. Tlenki azotu stanowią jedne z najbardziej niebezpiecznych składników smogu. Ich toksyczność jest wielokrotnie większa w porównaniu z ditlenkiem węgla lub siarką. Ditlenek azotu został uznany za trzeci, najważniejszy długotrwały gaz szklarniowy, istotnie przyczyniający się do pogłębiania globalnego ocieplenia, ale jest również substancją, która istotnie zubaża strukturę warstwy ozonowej. W horyzoncie czasowym 100 lat, jego potencjał tworzenia efektu cieplarnianego jest określany jako ok. 300 razy silniejszy w porównaniu z CO₂. Średni czas istnienia tego gazu w atmosferze jest szacowany na 120 lat. Tlenki azotu mają negatywny wpływ na zdrowie człowieka. Podrażniają drogi oddechowe, w wyniku czego stanowią poważne zagrożenie, zwłaszcza dla osób chorujących na astmę oraz choroby płuc (zaostrzając dolegliwości). Ich negatywny wpływ na zdrowie ma miejsce także w sposób pośredni, gdyż przyczyniają się do zakwaszania gleby oraz tworzenia się w niej kancerogennych związków przenikających do roślin. Przemysłowo tlenki azotu najczęściej otrzymuje się na drodze utleniania amoniaku. Znajdują one zastosowanie w procesach wytwórczych wielu rodzajów polimerów [31, 34, 209, 301].

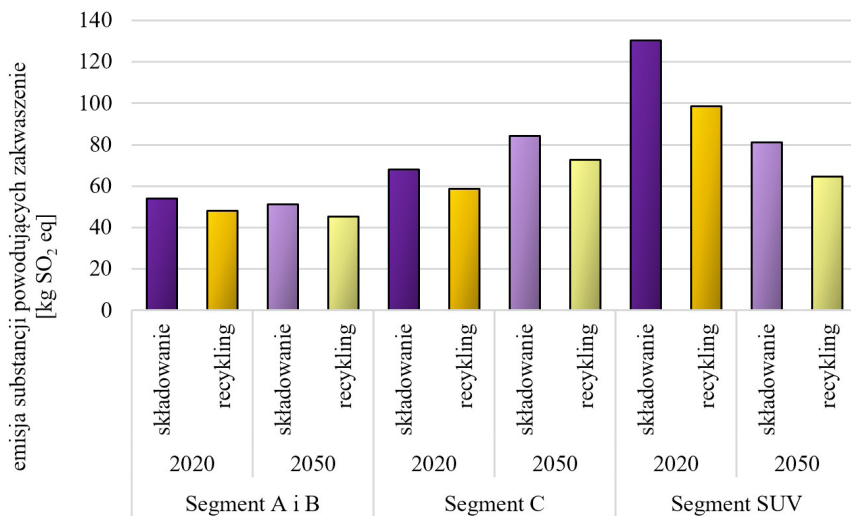
W ramach trzeciego etapu badań skorzystano z modelu CED. Przedstawiono tylko najważniejszych z uzyskanych wyników, a rezultaty zaprezentowano w MJ zapotrzebowania na energię. Na rysunku 4.43 zaprezentowano wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Cykle istnienia pojazdów zarejestrowanych w roku 2020 wyróżniają się wyższym poziomem energochłonności w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Scenariusz zagospodarowania użytkowego ma wpływ na poziom zapotrzebowania na energię. W przypadku cykli istnienia aut, które mają zostać poddane składowaniu, zauważono wyższy poziom energochłonności (o od ok. 16% do ok. 30%). Najwyższym zapotrzebowaniem na energię cechuje się cykl istnienia samochodów segmentu SUV zakładający ich składowanie ($2,42 \cdot 10^5$ MJ dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,02 \cdot 10^5$ MJ w roku 2050). Kategorią wpływu o najwyższym poziomie niebezpiecznych następstw środowiskowych dla otoczenia, zidentyfikowanych w cyklu istnienia ICEV zasilanych CNG, jest kategoria obejmująca procesy związane z wykorzystaniem nieodnawialnych paliw kopalnych (w szczególności procesy wykorzystania gazu ziemnego, ropy naftowej oraz węgla kamiennego).



Rys. 4.43. Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych GNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED V1.11)

Coraz szybsze zużywanie ropy naftowej, węgla i gazu ziemnego skutkuje nie tylko wyczerpywaniem się tych nieodnawialnych źródeł energii, ale ich eksploatacja powoduje również wiele problemów związanych z degradacją otoczenia i obniżaniem jakości środowiska. Ropa naftowa stanowi jeden z kluczowych surowców wykorzystywanych w światowej gospodarce. Jest stosowana nie tylko w energetyce, ale również jako baza dla produkcji benzyny, parafiny, nafty czy tworzyw polimerowych. Przemysł związany z zaopatrzeniem w ropę lub jej produkty obejmuje wydobywanie, przetwarzanie, uszlachetnianie, magazynowanie, transport oraz dystrybucję. Niezbędną staje się również obsługa służącej tym działaniom infrastruktury, czyli kopalni, rafinerii, rurociągów, magazynów, stacji paliw czy cystem. Jest to zatem niezwykle szeroko rozwinięta gałąź przemysłu, która przyczynia się do emisji zanieczyszczeń do otoczenia (szczególnie na obszarach wydobywania ropy), w tym nadmiernej emisji ditlenku węgla czy wycieków ropy i zatruc wód gruntowych. Największe niebezpieczeństwo niesie ze sobą górnictwo odkrywkowe, które powoduje więcej negatywnych następstw dla środowiska aniżeli wydobywanie ropy w sposób tradycyjny (za pomocą odwiertów). Postęp technologiczny, ale i kryzys paliwowy zapoczątkowały eksploatację piasków roponośnych w formie kopalni odkrywkowych. Techniki pozyskiwania tego rodzaju surowców powodują praktycznie nieodwracalne zniszczenia. W przypadku kopalni odkrywkowej przyjmuje się, że pozyskanie jednej baryłki ropy wymaga zazwyczaj najpierw wycięcia lasu, następnie usunięcia około dwóch ton gleby i torfu przykrywających roponośne piaski, a w końcu – wydobywania dwóch ton piasku bitumicznego. Wydobywanie piasku roponośnego oraz uzyskanie z niego baryłki ropy powodują około trzykrotnie większą emisję ditlenku węgla do atmosfery

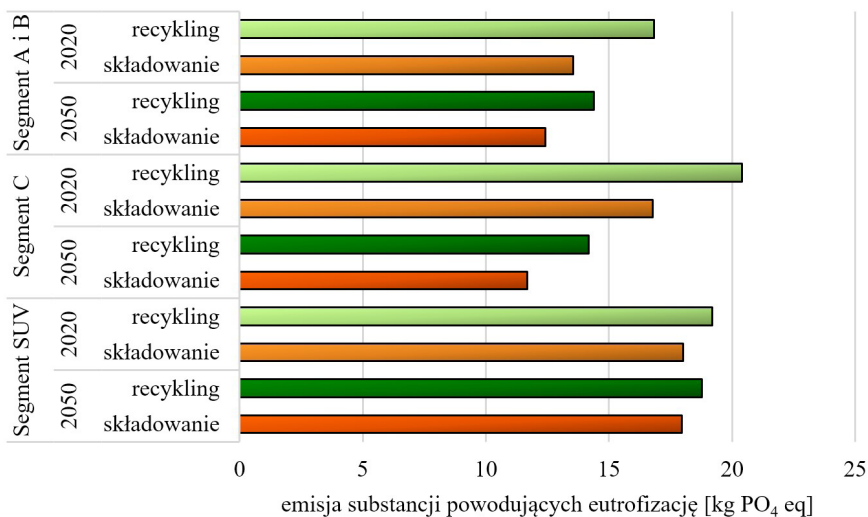
w porównaniu z pozyskaniem baryłki z tradycyjnych złóż, np. położonych w Arabii Saudyjskiej. Ponadto woda zużywana w procesach ekstrakcji ropy stanowi odpad poprodukcyjny, który najczęściej umiejscawiany jest w pobliżu kopalni (w formie zbiornika zagrażającego środowisku i zdrowiu ludzi). Ścieki poprodukcyjne z kopalni odkrywkowych piasków roponośnych zawierają szereg substancji kancerogennych mogących powodować zanieczyszczenie wód gruntowych oraz negatywnie wpływać na zdrowie (np. ołów, kadm, cynk, siarkę, policykliczne węglowodory aromatyczne czy kwas naftenowy) [143, 162, 223].



Rys. 4.44. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CML-IA baseline)

Czwarty etap badań obejmował zastosowanie modelu CML-IA baseline. Przybliżono tylko wybrane wyniki, a rezultaty zaprezentowano w formie wielkości emisji substancji odniesienia (w kg SO₂ eq i kg PO₄ eq). Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zobrazowano na rysunku 4.44. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe niebezpieczne oddziaływanie na otoczenie w ocenianym zakresie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykl istnienia rozważanych aut zakładający formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania na wysypisku odpadów niesie ze sobą więcej emisji związków chemicznych o charakterze zakwaszającym (o od ok. 11% do ok. 24%). Maksymalny poziom szkodliwych oddziaływań w omawianym obszarze cechuje samochody z segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przekazane do składowania po zakończeniu eksploatacji (1,30·10² kg SO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i 8,12·10¹ kg

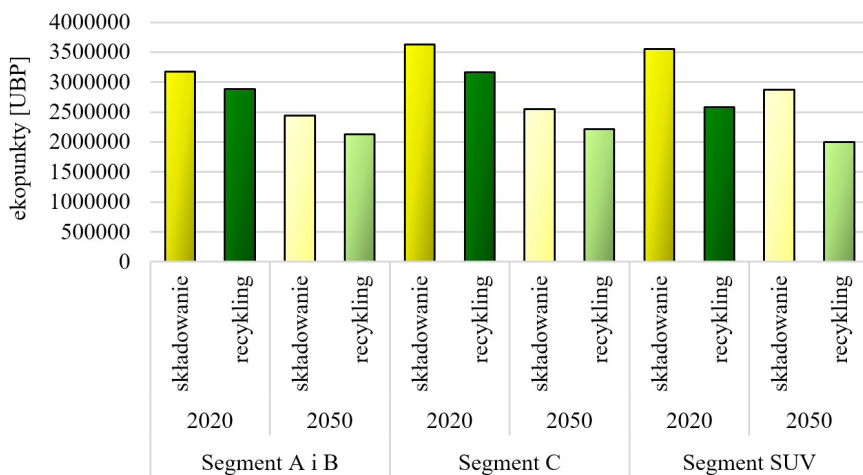
SO₂ eq – w roku 2050). Wykorzystanie procesów recyklingu pozwoliłoby na zmniejszenie wielkości negatywnych oddziaływań w perspektywie ich całego cyklu istnienia (9,84·10¹ kg SO₂ eq dla aut z roku 2020 i 6,46·10¹ kg SO₂ eq dla tych z roku 2050). Spośród substancji powodujących zakwaszenie środowiska najwyższy poziom emisji w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych CNG odnotowano dla: ditlenku siarki, tlenku azotu oraz amoniaku.



Rys. 4.45. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CML-IA baseline)

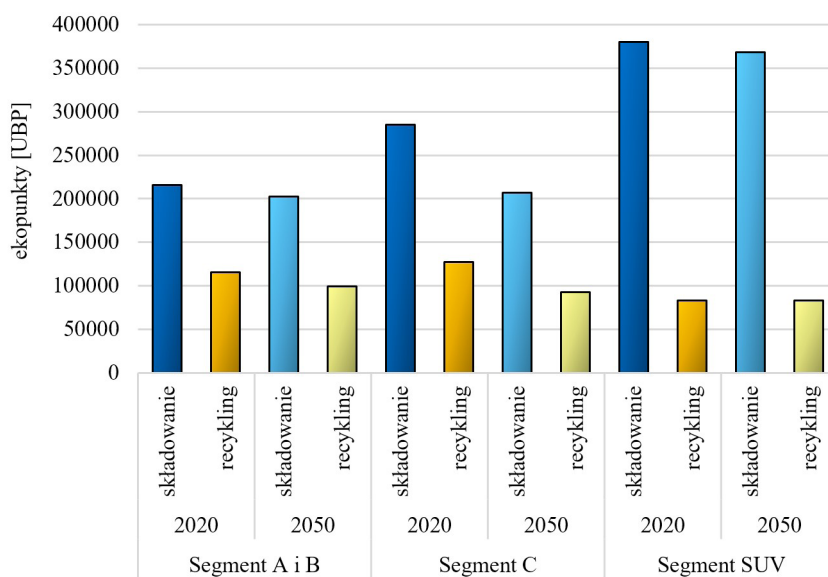
Na rysunku 4.45 zestawiono z kolei wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Maksymalny poziom niebezpiecznych wpływów w rozpatrywanym obszarze zauważono dla cykli istnienia obejmujących zagospodarowanie użytkowe w formie składowania na wysypisku, z kolei minimalny – w formie recyklingu. Cykle istnienia aut, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej szkodliwych wpływów w zakresie emisji substancji eutrofizujących w porównaniu z tymi z roku 2020. Najwyższym poziomem negatywnych oddziaływań wyróżniał się cykl istnienia pojazdów z segmentu SUV zakładający ich recykling (1,92·10¹ kg PO₄ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i 1,88·10¹ kg PO₄ eq – w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich rozważanych samochodów uwzględniające składowanie powodują zmniejszenie poziomu emisji związków o charakterze eutrofizującym (o od ok. 4% do ok. 20%). Wśród związków chemicznych powodujących pogłębianie się eutrofizacji środowiska najwyższym poziomem emisji w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych CNG cechują się: fosforany, azotany oraz fosfor.

Azot, mimo że jest bardzo ważnym pierwiastkiem, umożliwiającym wzrost roślin, przy zbyt wysokim stężeniu w wodzie jest szkodliwy dla zdrowia człowieka oraz ekosystemów, ponieważ powoduje eutrofizację. Azotany pochodzące z nawozów od dziesięcioleci stanowią główne źródło zanieczyszczenia wody w Europie. Około połowa azotu znajdującego się w nawozach stosowanych w krajach europejskich przenika do otoczenia innego niż docelowe. Azot w nawozach mineralnych występuje w formie azotanowej, amonowej i amidowej. Forma azotanowa z jednej strony jest najszybciej działającą, ale z drugiej – również najbardziej niebezpieczną dla człowieka i środowiska. Innym ważnym źródłem azotanów jest także przemysł. Azotany zostały uznane za związki chemiczne szkodliwe dla zdrowia człowieka, powodujące niedokrwistość oraz będące prekursorem rakotwórczych nitrozoamin. Nitrozoaminy to substancje powstające na skutek działania kwasu azotowego na aminy. Mogą kumulować się w glebie oraz w organizmach żywych, ponieważ są związkami, które cechuje duża trwałość. Należą do grupy kluczowych substancji podwyższających ryzyko zachorowania na raka. Najbardziej narażony na ich szkodliwe działanie jest żołądek. Substancje te mogą jednak przyczyniać się do zmian chorobowych również w innych narządach, gdyż są do nich transportowane razem z krwią. Reakcje nitrozowania zachodzą m.in. w jelicie grubym, powodując zmianę hemoglobiny w methemoglobinę, uniemożliwiającą prawidłowy transport tlenu do płuc. Główne źródło narażenia na azotany stanowi żywność oraz woda powierzchniowa przeznaczona do spożycia. Związki tego rodzaju występujące w żywności obniżają jej wartość odżywczą, m.in. zaburzając wchłanianie witaminy A oraz witamin z grupy B [37, 80, 179].



Rys. 4.46. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Piąty etap badań zakładał wykorzystanie modelu Ecological Scarcity 2021. W monografii przedstawiono kluczowe wyniki odnoszące się do emisji wybranych grup związków chemicznych do atmosfery oraz substancji i procesów oddziałujących na glebę. Rezultaty zaprezentowano w jednostce ekopunktów (UBP). Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu nowotworczym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, przybliżono na rysunku 4.46. Cykle istnienia pojazdów zarejestrowanych w roku 2020 cechują się wyższym poziomem szkodliwych następstw środowiskowych w analizowanym obszarze, w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Wybór sposobu zagospodarowania użytkowego wpływa na wielkość emisji związków o charakterze nowotworczym. Dla cykli istnienia aut, które mają zostać poddane składowaniu, zauważono wyższy poziom szkodliwych emisji (o od ok. 9% do ok. 30%), w porównaniu z tymi, dla których zagospodarowanie przyjęłoby formę recyklingu. Najwyższymi wartościami ocenianych emisji wyróżniają się cykle istnienia samochodów z segmentu SUV zakładające ich składowanie ($3,55 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,87 \cdot 10^6$ UBP w roku 2050). Spośród związków chemicznych o nowotworczym oddziaływaniu na człowieka najwyższym poziomem emisji do atmosfery w cyklu istnienia samochodów ICEV zasilanych CNG cechowały się: benzo(α)piren, benzen oraz 2,3,7,8-tetra-chlorodibenzodioxyna (TCDD).



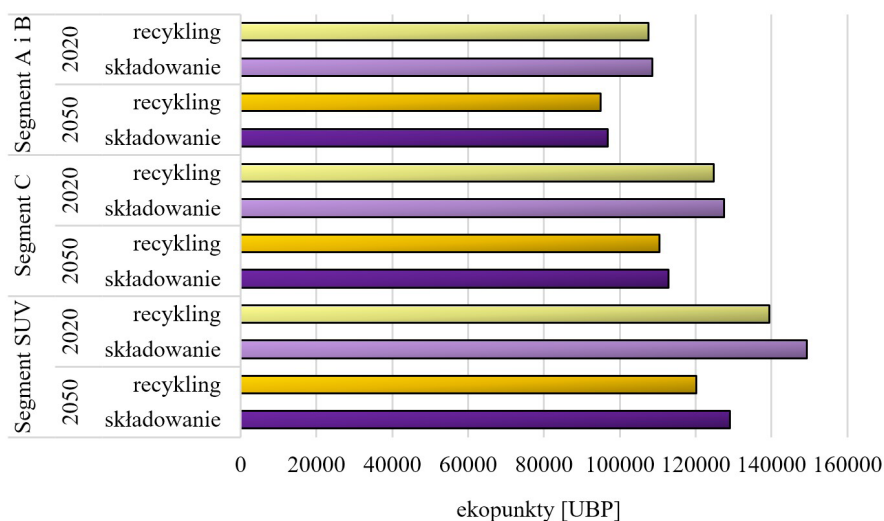
Rys. 4.47. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Na rysunku 4.47 przedstawiono natomiast wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe szkodliwe oddziaływanie na otoczenie w ocenianym zakresie aniżeli te, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykle istnienia wszystkich ocenianych aut uwzględniające ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci recyklingu niosą ze sobą dużo niższy poziom emisji metali ciężkich, w porównaniu z zagospodarowaniem w formie składowania. Najwięcej negatywnych oddziaływań w rozważanym obszarze odnotowano dla samochodów z segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania na wysypisku po zakończeniu eksploatacji ($3,80 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,68 \cdot 10^5$ UBP w roku 2050). Zastosowanie procesów recyklingu spowodowałoby zmniejszenie poziomu destrukcyjnych wpływów w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($8,33 \cdot 10^5$ UBP dla aut z roku 2020 i $8,32 \cdot 10^4$ UBP dla tych z roku 2050). Maksymalnym poziomem emisji w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych CNG charakteryzowały się: chrom (VI), cynk, miedź, nikiel oraz kadm.

Nikiel jest metalem powszechnie obecnym w przyrodzie. Do wód gruntowych oraz gleby dostaje się wraz z opadami deszczu i wiatrem. Do głównych źródeł emisji niklu do środowiska można zaliczyć spalanie paliw stałych (w szczególności węgla), ropy, odpadów, a także produkcję stali i procesy galwanizacyjne. Nikiel jest również wykorzystywany jako katalizator wielu reakcji, m.in. stosowanych podczas produkcji tworzyw polimerowych. Wysokie zapotrzebowanie na produkty zawierające nikiel nieuchronnie prowadzi do zanieczyszczenia środowiska tym pierwiastkiem oraz jego związkami uwalnianymi podczas produkcji, eksploatacji oraz zagospodarowania użytkowego. W powietrzu zanieczyszczonym związkami niklu najczęściej występuje on w postaci tlenków, siarczków i siarczanów. Nadmiar tego pierwiastka w organizmie człowieka ma działanie toksyczne oraz rakotwórcze. Wchłanianie niklu do organizmu ma miejsce przede wszystkim przez układ oddechowy. Cechuje go tendencja do kumulowania się w tkance chłonnej i płucnej. Nadmierne wdychanie związków niklu może powodować astmę oskrzelową oraz pylicę płuc, a przez ich akumulację w organizmie – uszkodzenie wątroby, śledziony, nerek lub mózgu [4, 39, 58, 138].

Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zobrazowano z kolei na rysunku 4.48. Maksymalny poziom szkodliwych oddziaływań w analizowanym zakresie zauważono dla cykli istnienia, w których zagospodarowanie użytkowe przyjmowało formę składowania, a minimalny – formę recyklingu. Cykle istnienia pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej negatywnych wpływów w obszarze zmiany sposobu użytkowania gruntów w porównaniu z tymi z roku 2020. Najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań charakteryzował cykl istnienia aut z segmentu SUV zakładający ich składowanie na

wysypisku odpadów ($1,49 \cdot 10^5$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,29 \cdot 10^5$ UBP w roku 2050). Cykl istnienia wszystkich rozważanych samochodów zakładający składowanie zamiast recyklingu, powoduje więcej niebezpiecznych procesów w zakresie zmiany użytkowania gruntów (o od ok. 1% do ok. 7%). Do procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów, o najwyższym poziomie negatywnych oddziaływań w cyklu istnienia pojazdów ICEV zasilanych CNG, zaliczyć można procesy związane z: zajęciem gruntu przez obszar wydobywania surowców mineralnych, zajęciem przez obszar przemysłowy oraz zajęciem przez place budowy, a w konsekwencji – obszar zabudowany.



Rys. 4.48. Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

4.7. Hybrydowe elektryczne samochody osobowe typu plug-in (PHEV) zasilane benzyną

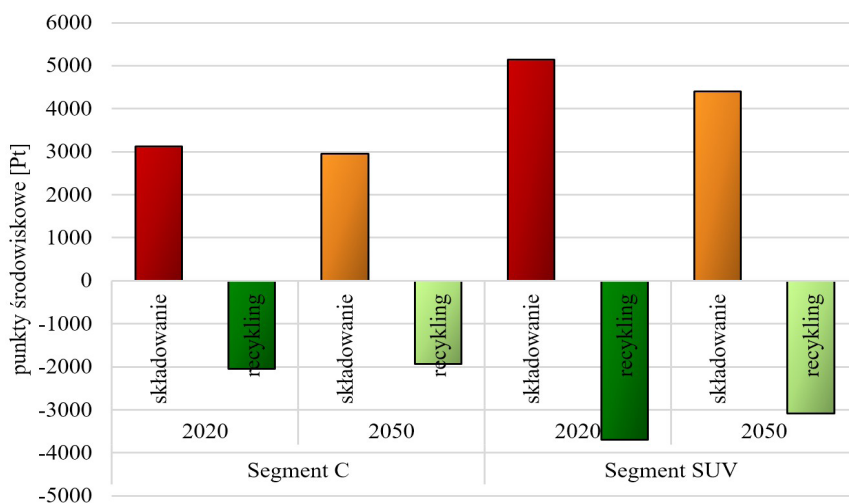
Kolejne przeprowadzone analizy polegały na dokonaniu oceny potencjalnego oddziaływania na środowisko hybrydowych pojazdów elektrycznych typu plug-in zasilanych benzyną, z uwzględnieniem dwóch różnych segmentów – C oraz SUV. Dla każdego z rozpatrywanych typów samochodów wykorzystano dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego – składowanie na wysypisku odpadów oraz recykling. Przyjęto także dwa scenariusze horyzontu czasowego. Pierwszy z nich obejmował auta zarejestrowane w roku 2020, z kolei drugi – prognozę dla pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Analogicznie jak we wcześniejszych przypadkach ocenę

zrealizowano wyłącznie dla cyklu istnienia tworzyw, materiałów i elementów rozważanych aut. Wyniki dla cykli paliwowych oraz energetycznych przybliżono w podrozdziale 4.10.

Pierwszy etap badań ponownie opierał się na wykorzystaniu modelu ReCiPe 2016. Przedstawiono najważniejsze z otrzymanych wyników, a rezultaty zaprezentowano w jednostce punktów środowiskowych (Pt). Na rysunku 4.49 zestawiono wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały znacznie więcej destrukcyjnych oddziaływań na otoczenie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Cykl istnienia wszystkich analizowanych aut zakładający ich formę zagospodarowania pożytkowego w postaci składowania powoduje więcej szkodliwych następstw środowiskowych w porównaniu z zagospodarowaniem w formie recyklingu. Najwyższym poziomem negatywnych wpływów wyróżniają się auta segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania po zakończeniu eksploatacji ($5,14 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $4,40 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050). Zastosowanie recyklingu pozwoliłoby na znaczące zmniejszenie wielkości destrukcyjnych oddziaływań w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($-3,70 \cdot 10^2$ Pt dla aut z roku 2020 i $-3,08 \cdot 10^2$ Pt dla tych z roku 2050). Wśród kategorii wpływu o najwyższym poziomie niebezpiecznych następstw środowiskowych w cyklu istnienia samochodów PHEV zasilanych benzyną wyróżnić można: procesy powodujące uszczuplenie zasobów wody oddziałujące na zdrowie człowieka i ekosystemy lądowe, emisje substancji powodujących tworzenie się drobnych cząstek stałych (PM), substancji toksycznych o działaniu kancerogennym dla człowieka oraz substancji powodujących globalne ocieplenie (oddziałujących na zdrowie człowieka).

Zanieczyszczenia emitowane do otoczenia, które powodują powstawanie aerozoli pierwotnych i wtórnych w atmosferze, mogą mieć istotny negatywny wpływ na zdrowie człowieka, począwszy od objawów ze strony układu oddechowego, przez hospitalizację, a skończywszy nawet na śmierci (w skrajnych przypadkach). Drobne cząstki stałe o średnicy mniejszej niż $2,5 \mu\text{m}$ (PM_{2,5}) stanowią złożoną mieszaninę substancji organicznych i nieorganicznych. PM_{2,5} powoduje problemy zdrowotne, ponieważ wdychany dociera do górnych partii dróg oddechowych i płuc. Wtórne aerozole PM_{2,5} powstają w powietrzu w wyniku emisji m.in. ditlenku siarki (SO₂), amoniaku (NH₃) i tlenków azotu (NO_x). Cząsteczki pyłu o średnicy $2,5\text{--}10 \mu\text{m}$ (PM_{2,5-10}) mogą powodować choroby układu oddechowego. Badania Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) wskazują, że najwięcej negatywnych następstw dla zdrowia w wyniku chronicznego narażenia na pyły zawieszane można przypisać przede wszystkim pyłowi PM_{2,5} (w porównaniu z większymi cząsteczkami pyłu). Modelowanie kategorii wpływu obejmującej emisje substancji powodujących tworzenie się drobnych cząstek stałych w ramach ReCiPe 2016 podzielono na

pięć etapów. Pierwszy z nich stanowi emisja NO_x , NH_3 , SO_2 , pierwotnego $\text{PM}_{2,5}$ itd. Drugi obejmuje przekształcenie wymienionych substancji w aerozole wtórne. W konsekwencji w etapie trzecim $\text{PM}_{2,5}$ może być wdychany przez ludność, co prowadzi do zwiększonej zachorowalności i śmiertelności (etap czwarty). Etap piąty obejmuje ostateczną wielkość uszczerbku na zdrowiu. W obliczeniach w zastosowanym modelu nie zostają uwzględnione dolne progi dla skutków oddziaływania na zdrowie $\text{PM}_{2,5}$. Po dokładnym zbadaniu wszystkich dostępnych dowodów naukowych przegląd literatury przeprowadzony przez grupę roboczą WHO wykazał, że większość badań epidemiologicznych na dużych populacjach nie była w stanie określić stężenia progowego, poniżej którego PM w otoczeniu nie ma wpływu na śmiertelność i zachorowalność [122].



Rys. 4.49. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model ReCiPe 2016)

W tabeli 4.7 przybliżono natomiast wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, ze szczególnym uwzględnieniem trzech obszarów wpływu (zdrowie człowieka, ekosystemy, zasoby surowców). Rezultaty przedstawiono w punktach środowiskowych (Pt). Maksymalny poziom szkodliwych oddziaływań odnotowano w zakresie oddziaływania na zdrowie człowieka, z kolei minimalny – w obszarze wyczerpywania zasobów surowców. Największą ilość łącznych negatywnych wpływów odnotowano dla cykli istnienia aut z segmentu SUV, zakładających ich składowanie ($5,14 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $4,40 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia ludzkiego $4,77 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020

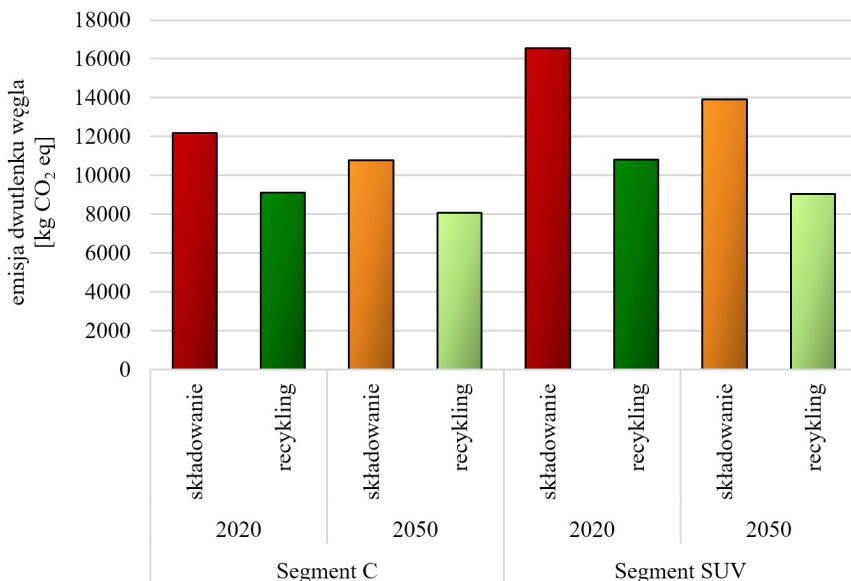
i $4,08 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Zastosowanie recyklingu pozwoliłoby na istotne ograniczenie destrukcyjnych oddziaływań w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($-3,70 \cdot 10^2$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $-3,08 \cdot 10^2$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia człowieka $-3,28 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $-2,74 \cdot 10^2$ Pt dla tych z roku 2050). Wśród związków chemicznych o szkodliwym wpływie na zdrowie ludzi w cyklu istnienia pojazdów PHEV zasilanych benzyną najwyższym poziomem emisji cechował się: chrom (VI), ditlenek siarki, ditlenek węgla, cynk, drobne cząstki stałe (PM), arsen i tlenek azotu.

Tab. 4.7. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego oraz trzech obszarów wpływu (model ReCiPe 2016)

PHEV BENZYNA		Zdrowie człowieka	Ekosystemy	Zasoby surowców	RAZEM	
2020	Segment C	składowanie	$2,92 \cdot 10^3$	$1,85 \cdot 10^2$	$1,14 \cdot 10^1$	$3,12 \cdot 10^3$
		recykling	$-1,79 \cdot 10^3$	$-2,69 \cdot 10^2$	$9,01 \cdot 10^0$	$-2,04 \cdot 10^3$
	Segment SUV	składowanie	$4,77 \cdot 10^3$	$3,39 \cdot 10^2$	$1,61 \cdot 10^1$	$5,14 \cdot 10^3$
		recykling	$-3,28 \cdot 10^3$	$-4,34 \cdot 10^2$	$1,21 \cdot 10^1$	$-3,70 \cdot 10^3$
2050	Segment C	składowanie	$2,74 \cdot 10^3$	$1,92 \cdot 10^2$	$7,62 \cdot 10^0$	$2,95 \cdot 10^3$
		recykling	$-1,68 \cdot 10^3$	$-2,78 \cdot 10^2$	$6,02 \cdot 10^0$	$-1,93 \cdot 10^3$
	Segment SUV	składowanie	$4,08 \cdot 10^3$	$2,94 \cdot 10^2$	$1,38 \cdot 10^1$	$4,40 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,74 \cdot 10^3$	$-3,60 \cdot 10^2$	$1,04 \cdot 10^1$	$-3,08 \cdot 10^3$

Arsen stanowi pierwiastek szkodliwy dla zdrowia człowieka. Zgodnie z wytycznymi WHO jest on jedną z dziesięciu substancji o największym znaczeniu dla zdrowia publicznego. Mimo że jest niezbędny do życia w niewielkich ilościach, to jednak wystarczająco wysokie narażenie na jego związki występujące w środowisku naturalnym stanowi duże niebezpieczeństwo dla prawidłowego rozwoju dla roślin, zwierząt oraz zdrowia ludzi. Arsen negatywnie wpływa na procesy enzymatyczne w komórkach organizmu. Dodatkowo zakłóca prawidłową pracę układu oddechowego, krążenia i nerwowego. Ma również niekorzystny wpływ na odporność organizmu i produkcję hormonów. Objawy zatrucia arsenem zazwyczaj występują po wielu latach ekspozycji na ten pierwiastek. Jest to spowodowane tym, że nie jest on wydalany z organizmu w procesach metabolicznych, lecz systematycznie odkłada się, stopniowo zatruwając wszystkie układy oraz narządy. Działalność człowieka w największym stopniu przyczynia się do uwalniania arsenu do środowiska atmosferycznego, wodnego i glebowego. Podstawowe źródła zanieczyszczeń tym pierwiastkiem stanowią m.in. przemysł wydobywczy i hutniczy rud metali oraz spalanie węgla. Arsen jest także używany np. do produkcji półprzewodników oraz celem polepszenia jakości stopów niektórych metali. Stanowi to przyczynę istotnych emisji tego pierwiastka w cyklu istnienia oce-

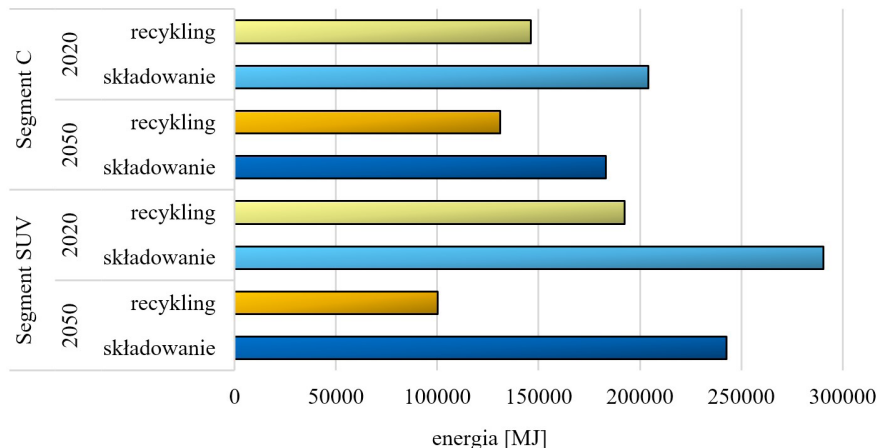
nianych pojazdów (głównie w ramach procesów wytwarzania tworzyw, materiałów i elementów tych obiektów technicznych) [115, 176, 258, 268].



Rys. 4.50. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021)

W ramach drugiego etapu badań zastosowano model IPCC 2021. Zaprezentowano wyłącznie kluczowe wyniki, a rezultaty przedstawiono w kg CO₂ eq. Na rysunku 4.50 przedstawiono wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Maksymalnym poziomem negatywnych oddziaływań w ocenianym obszarze wyróżniały się cykle istnienia obejmujące zagospodarowanie użytkowe w formie składowania, natomiast minimalnym – w formie recyklingu. Cykle istnienia pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 powodowałyby mniej destrukcyjnych wpływów w zakresie emisji gazów szklarniowych w porównaniu z tymi z roku 2020. Najwyższy poziom niebezpiecznych oddziaływań zauważono w przypadku cyklu istnienia aut z segmentu SUV obejmującego ich składowanie ($1,65 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,39 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq – w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich rozważanych samochodów uwzględniające składowanie zamiast recyklingu skutkują wyższymi poziomami emisji GHG (o od ok. 25% do ok. 35%). Spośród substancji powodujących pogłębienie efektu cieplarnianego najwyższym poziomem emisji w cyklu istnienia aut PHEV zasilanych benzyną, charakteryzuje się: ditlenek węgla, metan, tetrafluorometan (CFC-14), tlenek diazotu, heksafluoroetan (HFC-116) oraz heksafluorek siarki.

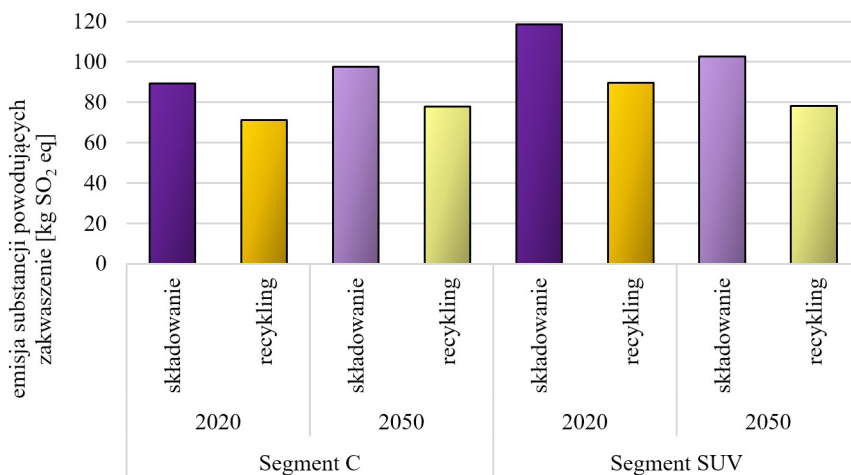
Zgodnie z Ramową konwencją Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (UNFCCC), perfluorowęglowodory (PFC), w tym heksafluoroetan, należą do najdłużej przebywających w atmosferze, najsilniejszych gazów cieplarnianych (GHG). W horyzoncie czasowym 100 lat cząsteczkę heksafluoroetanu cechuje ponad 12 tys. razy silniejszy potencjał cieplarniany (GWP) od cząsteczki ditlenku węgla. Jego czas przebywania w atmosferze szacowany jest na co najmniej 10 tys. lat. Z drugiej strony jego potencjał niszczenia warstwy ozonowej (ODP) jest równy zero. Heksafluoroetan emitowany jest do otoczenia m.in. w trakcie procesów przetwarzania aluminium, podczas produkcji półprzewodników i innych elementów elektronicznych do czyszczenia, trawienia plazmowego oraz chemicznego osadzania z fazy gazowej. Do pozostałych antropogenicznych źródeł heksafluoroetanu można zaliczyć procesy produkcyjne fluorowęglowodorów i fluoru, spalanie fluorowęglowodorów, paliw raketowych, oddzielanie izotopów uranu oraz stosowanie fluorytu podczas wytwarzania stali. W cyklach istnienia analizowanych pojazdów najwyższy poziom emisji heksafluoroetanu odnotowano na etapie wytwarzania ich tworzyw, materiałów i elementów [207, 274, 308].



Rys. 4.51. Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CED V1.11)

Trzeci etap badań polegał na wykorzystaniu modelu CED. W opracowaniu przedstawiono najważniejsze z uzyskanych wyników. Rezultaty analiz zaprezentowano w jednostce MJ zapotrzebowania na energię. Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zobrazowano na rysunku 4.51. Cykle istnienia aut zarejestrowanych w roku 2020 cechują się wyższym poziomem zapotrzebowania na energię w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. W przypadku cykli istnienia pojazdów, które mają zostać poddane składowaniu na wysypisku odpadów, odnotowano wyższy poziom energo-

chłonności (o od ok. 35% do ok. 145%). Maksymalne zapotrzebowanie na energię wyróżnia cykl istnienia samochodów segmentu SUV zakładający ich składowanie ($2,90 \cdot 10^5$ MJ dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,43 \cdot 10^5$ MJ w roku 2050). Kategorią wpływu o najwyższym poziomie niebezpiecznych następstw środowiskowych dla otoczenia, zidentyfikowanych w cyklu istnienia samochodów PHEV zasilanych benzyną, jest kategoria obejmująca procesy związane z wykorzystaniem nieodnawialnych paliw kopalnych (w szczególności procesy wykorzystania gazu ziemnego, ropy naftowej oraz węgla kamiennego).



Rys. 4.52. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CML-IA baseline)

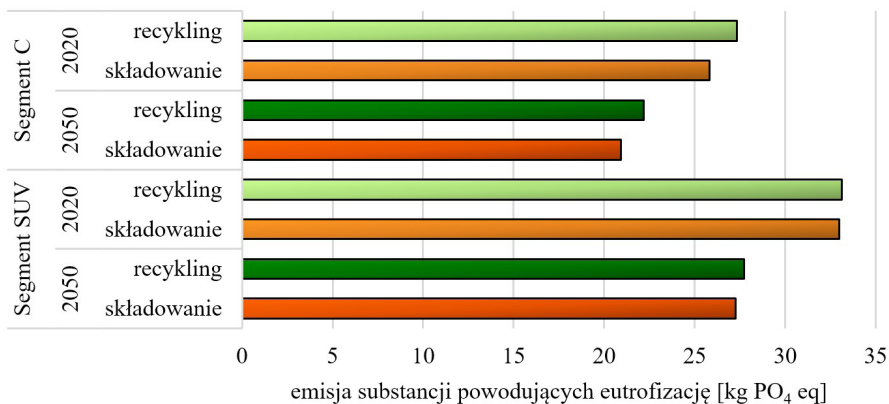
Podczas czwartego etapu badań zastosowano model CML-IA baseline. Przybliżono wyłącznie wybrane wyniki, a rezultaty analiz zaprezentowano w formie wielkości emisji substancji odniesienia (w kg SO₂ eq i kg PO₄ eq). Na rysunku 4.52 zestawiono wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu.auta zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe szkodliwe oddziaływanie na otoczenie w rozważanym obszarze w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykl istnienia analizowanych pojazdów zakładający formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania, skutkuje większą ilością emisji substancji pogłębiających zakwaszenie środowiska (o od ok. 20% do ok. 24%). Najwyższy poziom negatywnych oddziaływań w ocenianym zakresie charakteryzuje auta z segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przekazane do składowania ($1,18 \cdot 10^2$ kg SO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,03 \cdot 10^2$ kg SO₂ eq – w roku 2050).

Wykorzystanie recyklingu umożliwiłoby zmniejszenie wielkości destrukcyjnych oddziaływań w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($8,95 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla aut z roku 2020 i $7,81 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla tych z roku 2050). Wśród związków chemicznych o charakterze zakwaszającym najwyższy poziom emisji w cyklu istnienia pojazdów PHEV zasilanych benzyną zauważono dla: ditlenku siarki, tlenku azotu, amoniaku oraz tritlenku siarki.

Amoniak jest niezwykle reaktywny i stanowi jedno z najbardziej zasadowych zanieczyszczeń gazowych w atmosferze. Jest szkodliwy sam w sobie, jednak dodatkowo stosunkowo łatwo ulega wielu różnym reakcjom, w wyniku których przekształca się w inne, również niebezpieczne, związki. Pochodzi zarówno ze źródeł naturalnych, jak i antropogenicznych. Amoniak w stanie gazowym stanowi element naturalnego cyklu obiegu azotu w przyrodzie. Głównym źródłem tego związku chemicznego jest rolnictwo. Do jego pozarolniczych źródeł można zaliczyć emisje podczas eksploatacji pojazdów (katalizatory), różnego rodzaju procesy przemysłowe, oczyszczalnie ścieków, składowiska odpadów czy kompostowanie materiałów organicznych. Jego nadmiar jest jednak szkodliwy, ponieważ cechują go właściwości toksyczne. Szczególnie wiele negatywnych następstw środowiskowych niesie ze sobą jego połączenie z kwasami azotowymi i kwasem siarkowym. Emisja amoniaku do wód skutkuje ich eutrofizacją. Dodatkowo gwałtownie reaguje on z kwasami siarkowym i azotowym, w wyniku czego tworzy się zawiesina pyłów PM_{2,5}. Amoniak sprzyja tworzeniu się aerozoli atmosferycznych, które mogą powodować ograniczenie widzialności, jak również wpływają na bilans radiacyjny. Główną przyczynę tworzenia depozytów amoniaku stanowi konwersja jego gazowych cząstek na skutek ich reakcji z kwasami. Powstają one w wyniku reakcji tego związku chemicznego z zanieczyszczeniami generowanymi w trakcie spalania paliw kopalnych, takimi jak tlenki azotu i ditlenek siarki. Amoniak wyemitowany w powietrze stanowi jedną z przyczyn powstawania „kwaśnych opadów”, które mają negatywny wpływ na środowisko. Nadmierna jego ilość powoduje także zakwaszanie gleb. Zjawisko to prowadzi do zmniejszenia przyswajalności składników pokarmowych, co skutkuje obniżeniem plonów. Dodatkowo zwiększa mobilność metali ciężkich oraz ogranicza aktywność drobnoustrojów. Dla człowieka ten związek chemiczny w dużych ilościach jest toksyczny, jednak nawet w mniejszych powoduje podrażnienie gardła, oczu i nosa [135, 205, 317].

Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, przybliżono z kolei na rysunku 4.53. Najwyższy poziom destrukcyjnych wpływów w analizowanym zakresie odnotowano dla cykli istnienia uwzględniających zagospodarowanie użytkowe w formie składowania na wysypisku, a najniższy w formie recyklingu. Cykle istnienia pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej niebezpiecznych wpływów w zakresie emisji substancji o charakterze eutrofizującym w porównaniu z tymi

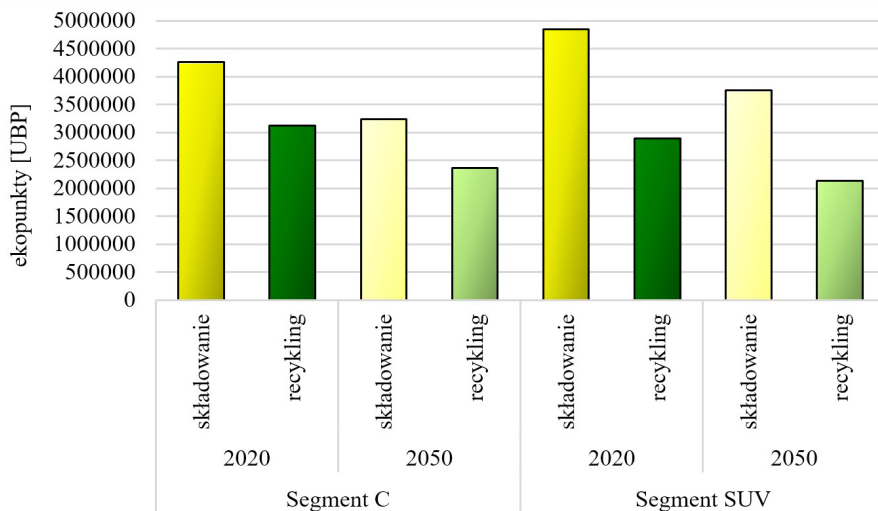
z roku 2020. Maksymalny poziom szkodliwych oddziaływań cechował cykl istnienia aut z segmentu SUV uwzględniający ich recykling ($3,31 \cdot 10^1$ kg PO₄ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,77 \cdot 10^1$ kg PO₄ eq – w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich ocenianych samochodów zakładające składowanie zamiast recyklingu powodują zmniejszenie poziomu emisji związków eutrofizujących (o od ok. 1% do ok. 7%). W ramach procesów recyklingu wykorzystywane są związki chemiczne o silnym negatywnym oddziaływaniu na otoczenie w tym względzie. Spośród substancji powodujących pogłębianie się eutrofizacji środowiska najwyższym poziomem emisji w cyklu istnienia pojazdów PHEV zasilanych benzyną wyróżniają się: fosforany, azotany oraz fosfor.



Rys. 4.53. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CML-IA baseline)

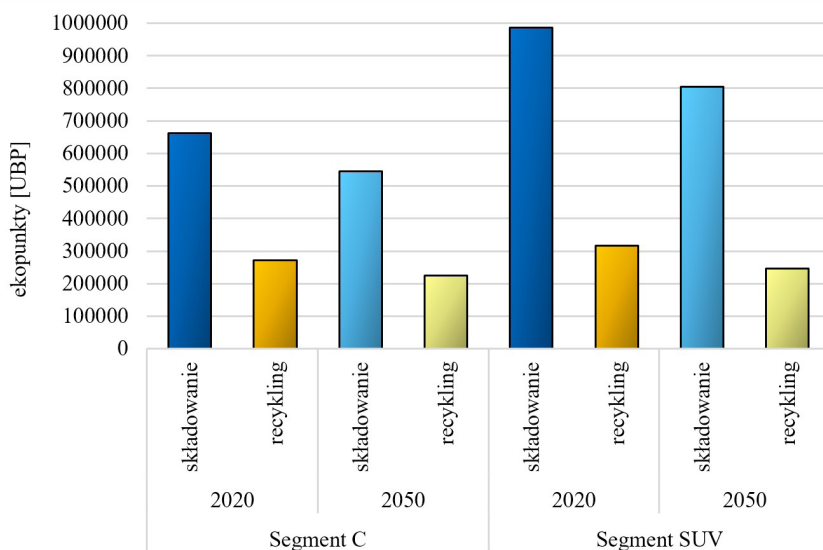
Ostatni etap badań oparto na wykorzystaniu modelu Ecological Scarcity 2021. W ramach monografii przedstawiono wyłącznie kluczowe wyniki, odnoszące się do emisji wybranych grup związków chemicznych do środowiska atmosferycznego oraz substancji i procesów oddziałujących na środowisko glebowe. Rezultaty analiz zaprezentowano w ekopunktach (UBP). Na rysunku 4.54 przedstawiono wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Cykle istnienia aut zarejestrowanych w roku 2020 charakteryzują się wyższym poziomem negatywnych następstw środowiskowych w rozważanym zakresie, w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Dla cykli istnienia pojazdów, które mają zostać poddane składowaniu, odnotowano wyższy poziom destrukcyjnych emisji (o od ok. 27% do ok. 43%), w porównaniu z tymi, dla których zagospodarowanie przyjęłoby formę recyklingu. Najwyższymi wartościami analizowanych emisji cechują się cykle istnienia samochodów z segmen-

tu SUV obejmujące ich składowanie ($4,85 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,76 \cdot 10^6$ UBP – w roku 2050). Wśród substancji o kancerogennym oddziaływaniu na człowieka najwyższym poziomem emisji do atmosfery w cyklu istnienia pojazdów PHEV zasilanych benzyną wyróżniały się: benzo(α)piren, 2,3,7,8-tetrachlorodibenzodiodksyna (TCDD), benzen, chloroeten oraz wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA).



Rys. 4.54. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Chlorowane dibenzodiodksyny i dibenzofurany powstają jako śladowe zanieczyszczenia podczas syntezy szeregu substancji chemicznych ważnych z handlowego punktu widzenia. Podstawowy związek z tej grupy, 2,3,7,8-tetrachlorodibenzodiodksyna (TCDD), jest jedną z najsilniejszych znanych toksyn oraz teratogenów o niskiej masie cząsteczkowej, której rozproszenie w środowisku wywołuje obawy o potencjalne zagrożenie dla zdrowia ludzi. Jej szkodliwe działanie polega przede wszystkim na zakłóceniu funkcji wydzielania wewnętrznego hormonów sterydowych. TCDD może powstawać w reakcjach enzymatycznych, termicznych, chemicznych i fotochemicznych. Wykryto ją w emisjach we wszystkich procesach spalania, niezależnie od zastosowanego paliwa. Z tego powodu procesy termiczne stanowią jej podstawowe źródło w środowisku (w szczególności procesy spalania odpadów). Diiodksyny są jednak nieodłącznie związane z różnymi sposobami zagospodarowania odpadów. Mogą one powstawać podczas kompostowania oraz w procesach enzymatycznych w osadach ściekowych. Obecność TCDD odnotowywana jest także w produktach papierniczych, chemicznych oraz w emisjach ze spalania benzyny i z przemysłu metalurgicznego [153, 201, 229].

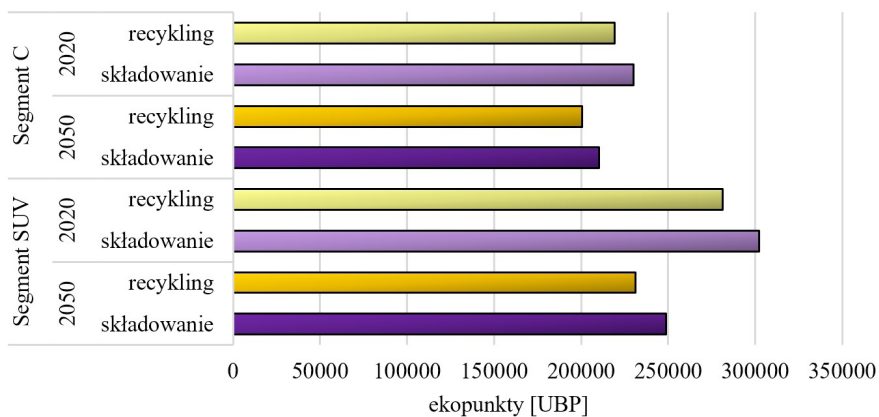


Rys. 4.55. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zobrazowano z kolei na rysunku 4.55.auta zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe destrukcyjne oddziaływanie na otoczenie w omawianym zakresie aniżeli te, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykle istnienia wszystkich analizowanych pojazdów uwzględniające ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci recyklingu niosą ze sobą istotnie niższy poziom emisji metali ciężkich, w porównaniu z zagospodarowaniem w formie składowania na wysypisku odpadów. Najwięcej niebezpiecznych oddziaływań w rozważanym obszarze zauważono dla samochodów z segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania ($9,86 \cdot 10^5$ UBp dla zarejestrowanych w roku 2020 i $8,04 \cdot 10^5$ UBp – w roku 2050). Zastosowanie recyklingu pozwoliłoby na zmniejszenie poziomu szkodliwych wpływów w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($3,17 \cdot 10^5$ UBp dla aut z roku 2020 i $2,47 \cdot 10^5$ UBp dla tych z roku 2050). Najwyższym poziomem emisji w cyklu istnienia pojazdów PHEV zasilanych benzyną cechowały się: chrom (VI), cynk, miedź, nikiel, kadm oraz ołów.

Kadm, obok arsenu, ołowiu, rtęci i chromu, jest metalem ciężkim, który nie pełni funkcji fizjologicznych i jest uważany za toksyczny. W ciągu ostatniego stulecia wykazano wiele różnych form narażenia na kadm, przy czym największe emisje do środowiska następują na skutek działań człowieka. Źródła zanieczyszczenia kadmem są związane z jego zastosowaniem w przemyśle jako odczynnika żrącego (trawiącego),

a także jako stabilizatora w wyrobach z PCV, barwnikach i bateriach Ni-Cd. Antropogeniczne źródła tego pierwiastka w środowisku pochodzą również z wytopu oraz rafinacji miedzi i niklu, spalania paliw kopalnych oraz stosowania nawozów fosforowych. Kadm jest także emitowany podczas procesów zachodzących w hutach metali nieżelaznych oraz w trakcie recyklingu odpadów elektronicznych. Działalność kopalni cynku, ołowiu i miedzi również przyczynia się do uwalniania tego metalu, w konsekwencji powodując zanieczyszczenie gleby. Aktywność wulkaniczna, stopniowy proces erozji i ścierania skał itp. stanowią z kolei naturalne czynniki wzrostu stężenia kadmu w środowisku atmosferycznym, wodnym i glebowym. Wchłanianie tego pierwiastka odbywa się głównie przez drogi oddechowe (w mniejszym stopniu przez przewód pokarmowy). Kiedy dostaje się on do organizmu, jest transportowany w krwioobiegu przez erythrocyty i albuminę, a następnie gromadzi się w nerkach, wątrobie i jelitach. Z tego względu ekspozycja na kadm może powodować szereg działań niepożądanych, takich jak np. dysfunkcja nerek i wątroby, obrzęk płuc, uszkodzenie nadnerczy oraz układu krwiotwórczego. Oprócz działania cytotoksycznego stanowi on czynnik rakotwórczy (zaliczany do pierwszej grupy wg klasyfikacji Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem). W cyklu istnienia rozpatrywanych pojazdów najwyższy poziom emisji kadmu odnotowano dla etapu wytwarzania tworzyw, materiałów i elementów oraz eksploatacji [50, 88, 94, 133, 217, 270].



Rys. 4.56. Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Na rysunku 4.56 zestawiono natomiast wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Najwyższy poziom niebezpiecznych oddziaływań w tym obszarze odnotowano dla cyklu istnienia, w których zagospoda-

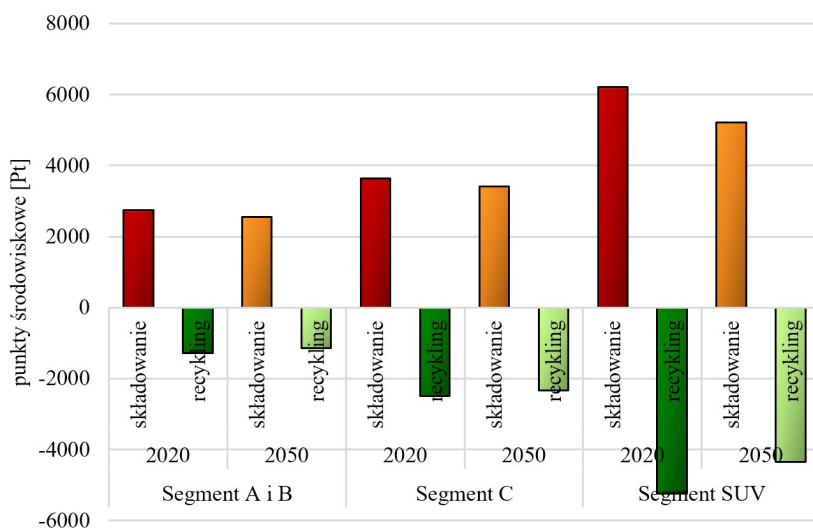
rowanie użytkowe przyjmowało formę składowania na składowisku odpadów, a najniższy – formę recyklingu. Cykle istnienia aut, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej szkodliwych wpływów w zakresie zmiany sposobu użytkowania gruntów w porównaniu z tymi z roku 2020. Maksymalny poziom negatywnych oddziaływań wyróżniał cykl istnienia pojazdów z segmentu SUV zakładający ich składowanie po zakończeniu eksploatacji ($3,02 \cdot 10^5$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,49 \cdot 10^5$ UBP w roku 2050). Cykl istnienia wszystkich ocenianych samochodów obejmujący składowanie powoduje więcej destrukcyjnych procesów w obszarze zmiany użytkowania gruntów (o od ok. 5% do ok. 7%). Do procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów o najwyższym poziomie niebezpiecznych oddziaływań w cyklu istnienia pojazdów PHEV zasilanych benzyną zaliczyć można procesy związane z: zajęciem gruntu przez wysypiska odpadów, zajęciem przez obszar wydobywania surowców mineralnych, zajęciem przez obszar przemysłowy, zajęciem przez place budowy, a w konsekwencji – obszar zabudowany oraz zajęciem gruntów rolnych i przeznaczeniem ich do innych celów niż uprawa roślin.

4.8. Akumulatorowe elektryczne samochody osobowe (BEV)

Dalsze analizy obejmowały ocenę potencjalnego oddziaływania na środowisko akumulatorowych pojazdów elektrycznych, także z uwzględnieniem odmiennych segmentów (A i B, C oraz SUV). W przypadku każdego z analizowanych typów samochodów rozważono dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego – składowania na wysypisku odpadów oraz recyklingu. Analogicznie przyjęto również dwa scenariusze horyzontu czasowego (dla aut zarejestrowanych w roku 2020 oraz prognozę dla pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050). Ocenę ponownie zrealizowano dla cyklu istnienia tworzyw, materiałów i elementów rozpatrywanych pojazdów. Wyniki w zakresie cykli paliwowych oraz energetycznych przedstawiono w podrozdziale 4.10.

W ramach pierwszego etapu badań wykorzystano model ReCiPe 2016. Przybliżono najważniejsze z otrzymanych wyników. Rezultaty zaprezentowano w punktach środowiskowych (Pt). Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, przedstawiono na rysunku 4.57.auta zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały istotnie więcej negatywnych oddziaływań na otoczenie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Cykl istnienia wszystkich rozpatrywanych samochodów obejmujący ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania powoduje więcej szkodliwych następstw środowiskowych w porównaniu z zagospodarowaniem w formie recyklingu. Najwyższym poziomem negatywnych wpływów wyróżniają się pojazdy segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania po zakończeniu eksploatacji ($6,21 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych

w roku 2020 i $5,22 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050). Zastosowanie procesów recyklingu pozwoliłoby na istotne zmniejszenie wielkości destrukcyjnych oddziaływań w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($-5,23 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $-4,34 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Wśród kategorii wpływu o najwyższym poziomie niebezpiecznych następstw środowiskowych dla otoczenia w cyklu istnienia samochodów BEV można wyróżnić: procesy powodujące uszczuplenie zasobów wody oddziałujące na zdrowie człowieka i ekosystemy lądowe, emisje substancji powodujących tworzenie się drobnych cząstek stałych (PM), substancji toksycznych o działaniu kancerogennym dla człowieka oraz substancji powodujących globalne ocieplenie (oddziałujących na zdrowie człowieka).



Rys. 4.57. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model ReCiPe 2016)

Współczynnik charakteryzujący ekotoksyczność i toksyczność dla człowieka określonej substancji uwzględnia jej trwałość w środowisku, akumulację w ludzkim łańcuchu pokarmowym (narażenie) i toksyczność (skutek) danego związku chemicznego. Łańcuch przyczynowo-skutkowy, od emisji substancji do uszkodzeń ekosystemu i/lub szkody dla zdrowia ludzkiego, obejmuje kilka etapów. Rozpoczyna się emisją określonego związku chemicznego, która w konsekwencji powoduje podwyższenie jego stężenia w środowisku. W wyniku tego stanu rzeczy zwiększa się ekspozycja organizmów żywych na dany czynnik, która może skutkować np. zmniejszeniem populacji rozpatrywanych organizmów lub nawet zmniejszeniem bioróżnorodności na określonym obszarze. Wszystko to powoduje powstawanie szkód środowiskowych i obniżanie jakości środowiska. W przypadku ekspozycji na dany

czynnik w kontekście ludzkiego zdrowia odnotowuje się zwiększenie przypadków zachorowalności na określone choroby, a w konsekwencji – szkody w obszarze zdrowia człowieka. Istotną grupę wspomnianych czynników stanowią substancje toksyczne o działaniu kancerogennym dla człowieka. W modelu ReCiPe 2016 wszystkie analizowane substancje tego typu obejmują wyłącznie związki chemiczne o potwierdzonym kancerogennym działaniu. Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC), będąca częścią WHO, oceniła ryzyko toksyczności 844 substancji dla ludzi przez przypisanie każdej z nich klasy rakotwórczości. Klasy te odzwierciedlają siłę dowodów na rakotwórczość określonego związku chemicznego, uzyskanych z badań na ludziach i zwierzętach doświadczalnych. Pozwalają zatem na wyznaczenie poziomu szkód dla zdrowia człowieka powodowanych przez konkretne substancje [122].

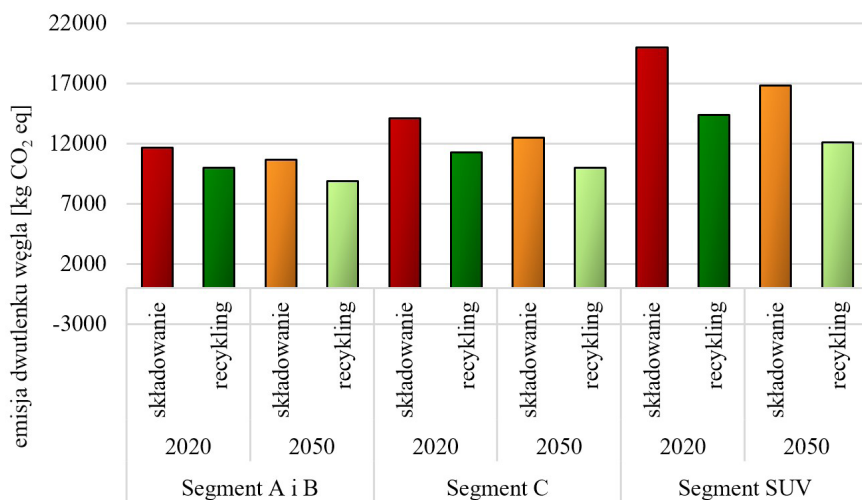
Tab. 4.8. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego oraz trzech obszarów wpływu (model ReCiPe 2016)

BEV			Zdrowie człowieka	Ekosystemy	Zasoby surowców	RAZEM
2020	Segment A i B	składowanie	$2,60 \cdot 10^3$	$1,39 \cdot 10^2$	$1,19 \cdot 10^1$	$2,75 \cdot 10^3$
		recykling	$-1,07 \cdot 10^3$	$-2,19 \cdot 10^2$	$9,97 \cdot 10^0$	$-1,27 \cdot 10^3$
	Segment C	składowanie	$3,44 \cdot 10^3$	$1,94 \cdot 10^2$	$1,53 \cdot 10^1$	$3,64 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,15 \cdot 10^3$	$-3,49 \cdot 10^2$	$1,24 \cdot 10^1$	$-2,49 \cdot 10^3$
	Segment SUV	składowanie	$5,81 \cdot 10^3$	$3,68 \cdot 10^2$	$2,46 \cdot 10^1$	$6,21 \cdot 10^3$
		recykling	$-4,62 \cdot 10^3$	$-6,33 \cdot 10^2$	$1,91 \cdot 10^1$	$-5,23 \cdot 10^3$
2050	Segment A i B	składowanie	$2,40 \cdot 10^3$	$1,39 \cdot 10^2$	$1,12 \cdot 10^1$	$2,55 \cdot 10^3$
		recykling	$-9,61 \cdot 10^2$	$-1,88 \cdot 10^2$	$9,33 \cdot 10^0$	$-1,14 \cdot 10^3$
	Segment C	składowanie	$3,21 \cdot 10^3$	$2,03 \cdot 10^2$	$1,06 \cdot 10^1$	$3,42 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,01 \cdot 10^3$	$-3,66 \cdot 10^2$	$8,53 \cdot 10^0$	$-2,34 \cdot 10^3$
	Segment SUV	składowanie	$4,88 \cdot 10^3$	$3,19 \cdot 10^2$	$2,12 \cdot 10^1$	$5,22 \cdot 10^3$
		recykling	$-3,84 \cdot 10^3$	$-5,22 \cdot 10^2$	$1,66 \cdot 10^1$	$-4,34 \cdot 10^3$

Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, ze szczególnym uwzględnieniem trzech obszarów wpływu (zdrowie człowieka, ekosystemy, zasoby surowców) zobrazowano natomiast w tabeli 4.8. Rezultaty przedstawiono w jednostce punktów środowiskowych (Pt). Maksymalny poziom szkodliwych oddziaływań odnotowano w zakresie wpływu na zdrowie człowieka, natomiast minimalny – w obszarze wyczerpywania zasobów surowców. Najwyższą ilość łącznych negatywnych wpływów zauważono dla cyklu istnienia aut z segmentu SUV, zakładającego ich składowanie ($6,21 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $5,22 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze ludzkie-

go zdrowia $5,81 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $4,88 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Zastosowanie recyklingu pozwoliłoby na znaczne ograniczenie destrukcyjnych oddziaływań w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($-5,23 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $-4,34 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia człowieka $-4,62 \cdot 10^3$ Pt dla pojazdów z roku 2020 i $-3,84 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Wśród związków chemicznych o negatywnym wpływie na ludzkie zdrowie w cyklu istnienia samochodów BEV najwyższym poziomem emisji wyróżnił się: chrom (VI), ditlenek węgla, ditlenek siarki, cynk, drobne cząstki stałe (PM), arsen i tlenek azotu.

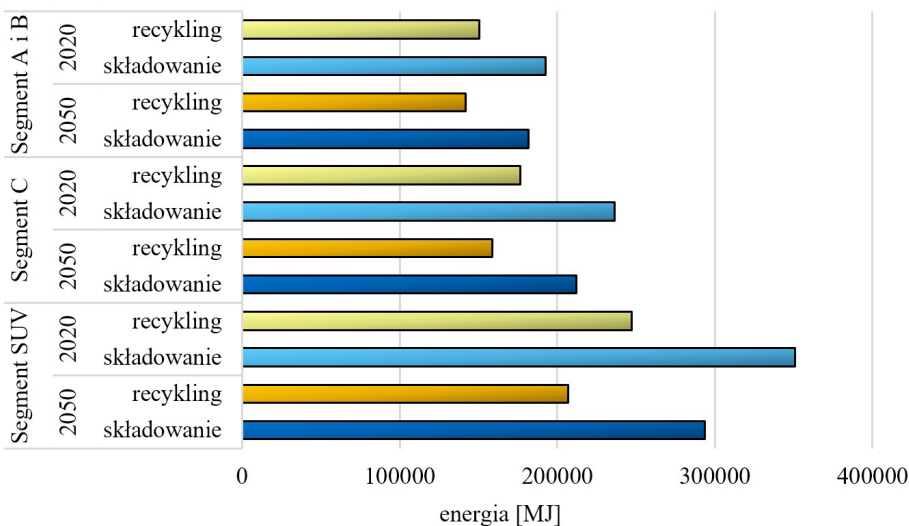
Drobne cząstki stałe PM_{2,5} to aerozole atmosferyczne, których średnica nie przekracza 2,5 μm. Cząsteczki o tym rozmiarze są uważane za szczególnie niebezpieczne dla zdrowia człowieka, ponieważ omijają szereg mechanizmów obronnych organizmu (np. włosy w nosie czy śluz), których podstawowe zadanie stanowi ich wychwycenie, nim wnikną w głąb ciała. Cząstki PM_{2,5} mogą dostać się do płuc, następnie do pęcherzyków płucnych i w konsekwencji – do krwioobiegu. Cząsteczki tego typu mogą zawierać różnego rodzaju toksyczne związki chemiczne. Pył PM_{2,5} jest odpowiedzialny m.in. za nasilenie objawów astmy, osłabienie czynności płuc, nowotwory (krtani, gardła i płuc), zaburzenia rytmu serca czy zapalenie naczyń krwionośnych. Główne źródło cząstek PM_{2,5} stanowi spalanie paliw kopalnych, transport oraz przemysł. Z tego względu istotny poziom ich emisji odnotowano na etapie wytwarzania tworzyw, materiałów i elementów oraz eksploatacji rozważanych pojazdów [92, 185, 210, 323].



Rys. 4.58. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021)

Drugi etap badań opierał się na ocenie bazującej na wykorzystaniu modelu IPCC 2021. W monografii zaprezentowano wyłącznie kluczowe wyniki. Rezultaty analiz

przedstawiono w kg CO₂ eq. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zestawiono na rysunku 4.58. Maksymalnym poziomem niebezpiecznych oddziaływań w rozważanym obszarze cechowały się cykle istnienia zakładające zagospodarowanie użytkowe ocenianych aut w formie składowania na wysypisku odpadów, natomiast najniższym – w formie recyklingu. Cykle istnienia pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 powodowałyby mniej szkodliwych wpływów w zakresie emisji gazów szklarniowych w porównaniu z tymi z roku 2020. Maksymalny poziom negatywnych oddziaływań odnotowano dla cyklu istnienia samochodów z segmentu SUV zakładającego ich składowanie po zakończeniu eksploatacji ($2,00 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,68 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq – w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich analizowanych aut uwzględniające składowanie zamiast recyklingu powodują wyższe poziomy emisji GHG (o od ok. 14% do ok. 28%). Spośród substancji powodujących pogłębienie efektu cieplarnianego najwyższym poziomem emisji w cyklu istnienia pojazdów BEV można wyróżnić: ditlenek węgla, metan, tetrafluorometan (CFC-14), tlenek diazotu, heksafluorek siarki oraz heksafluoroetan (HFC-116).

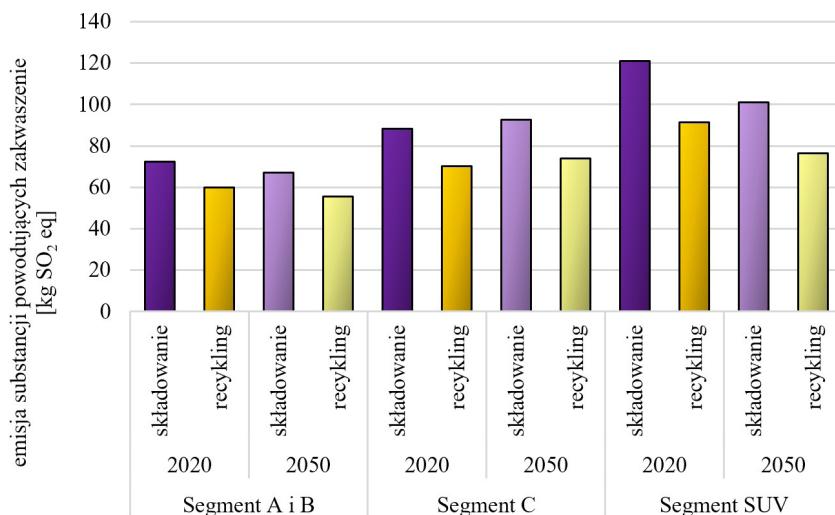


Rys. 4.59. Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CED V1.11)

W ramach trzeciego etapu badań zastosowano model CED. Przedstawiono tylko najważniejsze z uzyskanych wyników, a rezultaty zaprezentowano w MJ zapotrzebowania na energię. Na rysunku 4.59 przybliżono wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Cykle istnienia aut zarejestrowanych

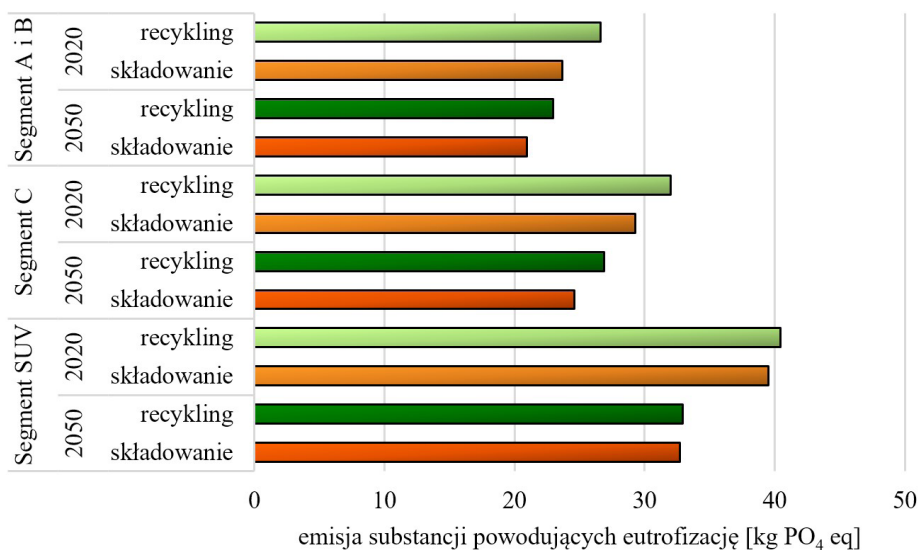
w roku 2020 charakteryzują się wyższym poziomem zapotrzebowania na energię w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Scenariusz zagospodarowania użytkowego wpływa na poziom energochłonności. Dla cykli istnienia pojazdów, które mają zostać poddane składowaniu, zauważono wyższy poziom zapotrzebowania na energię (o od ok. 22% do ok. 30%). Maksymalnym poziomem energochłonności cechuje się cykl istnienia samochodów segmentu SUV zakładający ich składowanie ($3,51 \cdot 10^5$ MJ dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,93 \cdot 10^5$ MJ – w roku 2050). Kategorią wpływu o najwyższym poziomie destrukcyjnych następstw środowiskowych dla otoczenia, zidentyfikowanych w cyklu istnienia aut BEV, jest kategoria obejmująca procesy związane z wykorzystaniem nieodnawialnych paliw kopalnych (w szczególności procesy wykorzystania gazu ziemnego, ropy naftowej oraz węgla kamiennego).

Każda eksploatacja kopalni (stałych, płynnych i gazowych) skutkuje nie tylko uszczupleniem zasobów, lecz również naruszeniem dotychczasowego stanu środowiska, wyrażającym się jego przekształceniem oraz pogorszeniem jakości. W obszarze pozyskiwania surowców zmiany zachodzące w otoczeniu w dużym stopniu zależą od zastosowanych metod wydobycia (np. otworowych, odkrywkowych, podziemnych). Na skutek podziemnej eksploatacji górniczej mają miejsce przemieszczenia elementów górotworu, powodujące deformację powierzchni terenów. Przemieszczania tego typu mogą także powodować zmiany stosunków wodnych zarówno na powierzchni, jak i w samym górotworze. Eksploatacja górnicza może również wiązać się z powstawaniem zjawisk sejsmicznych różnego typu. W przypadku górnictwa odkrywkowego surowce są z kolei zdejmowane, a następnie składowane w pobliżu wykopu, co powoduje, że są narażone na erozję i wietrzenie chemiczne, wymywanie lub ługowanie. Wpływ górniczych robót odkrywkowych na otoczenie polega głównie na przekształceniu lub wieloletnim wyłączeniu z użytkowania gleb, naruszeniu budowy oraz zmianie cech fizyczno-mechanicznych górotworu, przekształceniu morfologii terenu, ilościowych oraz jakościowych zmianach wód głębinowych i powierzchniowych, naruszeniu walorów krajobrazowych, jak również pogorszeniu walorów rekreacyjnych danego regionu. W wielu przypadkach ma miejsce przesuszenie gleb, pogorszenie plonów oraz inne formy szkód górniczych (uszkodzenie dróg, budynków, linii energetycznych, cieków wodnych itp.). Powstające zwałowiska zewnętrzne istotnie ingerują w rzeźbę terenu. W procesach wytwarzania analizowanych pojazdów wykorzystywane są zarówno materiały organiczne, jak i surowce naturalne, jednak konieczne jest także dostarczenie pewnej ilości surowców mineralnych, pozyskiwanych najczęściej w kopalniach odkrywkowych oraz określonej ilości energii (która w Polsce wytwarzana jest głównie w procesach spalania węgla kamiennego, wydobywanego z kopalni podziemnych głębinowych) [45, 136, 210, 293].



Rys. 4.60. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CML-IA baseline)

Czwarty etap badań obejmował wykorzystanie modelu CML-IA baseline. Przybliżono tylko wybrane wyniki, a rezultaty zaprezentowano w formie wielkości emisji substancji odniesienia (w kg SO₂ eq i kg PO₄ eq). Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, przedstawiono na rysunku 4.60.auta zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe niebezpieczne oddziaływanie na otoczenie w ocenianym zakresie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykl istnienia analizowanych pojazdów zakładający formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania niesie ze sobą więcej emisji związków chemicznych zakwaszających środowisko (o od ok. 17% do ok. 25%). Najwyższy poziom szkodliwych oddziaływań w rozważanym obszarze charakteryzuje samochody z segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przekazane do składowania po zakończeniu eksploatacji ($1,21 \cdot 10^2$ kg SO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,01 \cdot 10^2$ kg SO₂ eq – w roku 2050). Wykorzystanie procesów recyklingu umożliwiłoby zmniejszenie wielkości negatywnych oddziaływań w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($9,12 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla aut z roku 2020 i $7,63 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla tych z roku 2050). Wśród związków chemicznych o charakterze zakwaszającym najwyższy poziom emisji w cyklu istnienia pojazdów BEV zauważono dla: ditlenku siarki, tlenu azotu, amoniaku oraz tritlenku siarki.



Rys. 4.61. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CML-IA baseline)

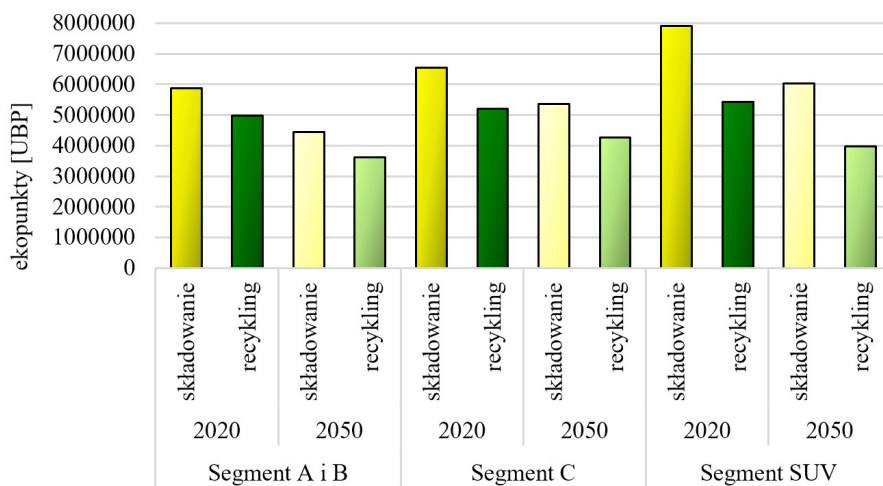
Na rysunku 4.61 zobrazowano z kolei wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Najwyższy poziom niebezpiecznych wpływów w ocenianym obszarze odnotowano dla cykli istnienia obejmujących zagospodarowanie użytkowe w formie składowania, a najniższy – w formie recyklingu. Cykle istnienia pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej szkodliwych wpływów w zakresie emisji związków chemicznych o charakterze eutrofizującym w porównaniu z tymi z roku 2020. Maksymalnym poziomem negatywnych oddziaływań cechował się cykl istnienia aut z segmentu SUV zakładający ich recykling ($4,04 \cdot 10^1$ kg PO₄ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,29 \cdot 10^1$ kg PO₄ eq – w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich analizowanych samochodów uwzględniające składowanie zamiast recyklingu powodują zmniejszenie poziomu emisji substancji eutrofizujących (o od ok. 1% do ok. 11%). Spośród związków chemicznych powodujących pogłębianie się eutrofizacji środowiska najwyższym poziomem emisji w cyklu istnienia pojazdów BEV charakteryzują się: fosforany, azotany oraz fosfor.

Fosfor jest nieodzownym elementem życia wszystkich organizmów, stanowiąc podstawowy składnik białek czy szkieletów kręgowców oraz uczestnicząc w przemianach cukrów i tłuszczu. Stymuluje on także rozwój korzeni roślin, dojrzewanie i rozwój nasion. W postaci fosforanów jest składnikiem wielu cząsteczek biologicznych, np. DNA i RNA oraz związków przekazujących energię na poziomie molekularnym (ATP). Reguluje również reakcje biochemiczne na poziomie komórkowym (fosfory-

lacji). Fosfolipidy stanowią podstawowy składnik strukturalny błon komórkowych, a fosforan wapnia u zwierząt i ludzi jest związkiem zwiększającym sztywność kości. Organizm człowieka zawiera ok. kilogram fosforu, z czego ok. 75% znajduje się w kościach i zębach. Niedobór tego pierwiastka powoduje zaburzenia działania obwodowego i centralnego układu nerwowego oraz nieprawidłowe funkcjonowanie komórek krwi. Fosfor wraz z jonami manganu, glinu i żelaza tworzy około 170 minerałów, ale największą liczbę wiązań tworzy z wapniem. Pierwiastek ten można odzyskiwać praktycznie bez końca, nie da się go jednak zastąpić. Eksploatacja złóż fosforytów związana jest z wysokim zapotrzebowaniem na energię i wodę, której zasoby na terenach występowania największych pokładów fosforytów są ograniczone. Przetwarzanie oraz transport surowca generują natomiast wiele negatywnych następstw środowiskowych. Straty związane z eksploatacją jego złóż (wydobyciem, wzbogacaniem i przetwarzaniem) to ok. 30% ilości skał fosforanowych, a ok. 10% jest tracone podczas transportu oraz przeładunku. Z tego względu niezwykle istotne jest racjonalne zintegrowanie poszukiwania nowych złóż z ograniczeniem negatywnego wpływu na otoczenie ich eksploatacji. Ważne jest również upowszechnianie metod ograniczających zużycie fosforu ze źródeł pierwotnych na rzecz odzysku materii organicznej z kompostowania i przetwarzania odpadów oraz recyklingu materiałów o wysokiej zawartości fosforu (np. z odchodów, ścieków, osadów ściekowych i wytwarzanych z nich popiołów czy z odpadów zielonych). Sposobami racjonalizacji wykorzystania fosforu są np. upowszechnienie rolnictwa precyzyjnego, ograniczenie zawartości fosforanów w detergentach, lepsza dystrybucja żywności oraz ograniczenie jej strat. Fosfor jest związkiem biogennym, którego obecność w środowisku wodnym pogłębia proces eutrofizacji. Warunkiem zatrzymania eutrofizacji jest zaprzestanie dostarczania fosforu do odbiornika, co współcześnie stanowi jedno z priorytetowych zagadnień w obszarze ochrony wód. Fosfor i jego związki znajdują zastosowanie w przemyśle elektronicznym (syntetyczne fosforki), w nawozach sztucznych (sole), pestycydach (estry) czy w przemyśle farmaceutycznym (fosfor biały). Z tego względu najwyższy poziom emisji fosforu do otoczenia odnotowano na etapie wytwarzania tworzyw, materiałów i elementów analizowanych pojazdów [175, 188, 279, 285, 312].

Piąty etap badań zakładał zastosowanie modelu Ecological Scarcity 2021. W monografii przedstawiono kluczowe wyniki odnoszące się do emisji wybranych grup związków chemicznych do atmosfery oraz substancji i procesów oddziałujących na glebę. Rezultaty zaprezentowano w jednostce ekopunktów (UBP). Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zestawiono na rysunku 4.62. Cykle istnienia aut zarejestrowanych w roku 2020 wyróżniają się wyższym poziomem szkodliwych następstw środowiskowych w rozważanym obszarze, w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Wybór sposobu zagospodarowania użytkowego ma wpływ na wielkość emisji związków kancerogennych. W przypadku cy-

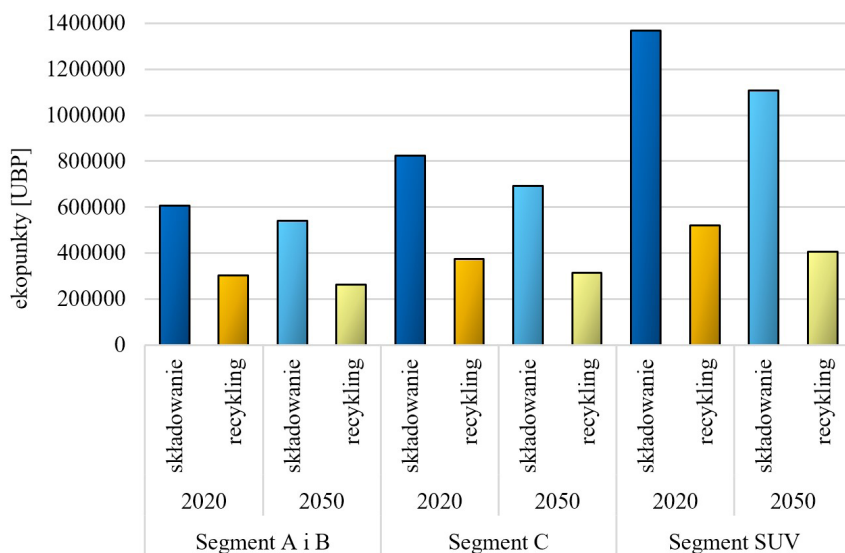
kli istnienia pojazdów, które mają zostać poddane składowaniu na wysypisku odpadów, odnotowano wyższy poziom szkodliwych emisji (o od ok. 15% do ok. 34%), w porównaniu z tymi, dla których zagospodarowanie przyjęłoby formę recyklingu. Maksymalnymi wartościami analizowanych emisji charakteryzują się cykle istnienia samochodów z segmentu SUV obejmujące ich składowanie ($7,90 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $6,04 \cdot 10^6$ UBP w roku 2050). Wśród substancji charakteryzujących się kancerogennym oddziaływaniem na człowieka najwyższym poziomem emisji do atmosfery w cyklu istnienia pojazdów BEV wyróżniały się: benzo(α)piren, 2,3,7,8-tetrachlorodibenzodioxyna (TCDD), benzen, chloroeten oraz wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA).



Rys. 4.62. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Chloroeten to organiczny związek chemiczny, stanowiący chlorową pochodną etenu. Jest stosowany przede wszystkim jako monomer w procesach otrzymywania polichloroku winylu oraz szeregu kopolimerów. Nie występuje naturalnie w przyrodzie. Otrzymywany jest wyłącznie na drodze syntezy chemicznej. Znajduje wykorzystanie w wielu gałęziach przemysłu, np. tworzyw polimerowych, gumowym, obuwniczym czy farmaceutycznym. Najczęściej jest stosowany podczas produkcji materiałów budowlanych i konstrukcyjnych, rur, profili okiennych oraz drzwiowych, tapet, wykładzin podłogowych, izolacji przewodów i kabli, folii, materiałów opakowaniowych, urządzeń elektrycznych, artykułów gospodarstwa domowego oraz części samochodowych. Główną drogą narażenia na ten związek chemiczny jest inhalacja. Wykazuje on niewielką toksyczność ostrą, ale długotrwałe narażenie na jego emisje może powodować bóle i zawroty głowy, duszności, zaburzenia neurologiczne czy niewyraźne

widzenie. Chloroeten został sklasyfikowany przez Międzynarodową Agencję Badań nad Rakiem (IARC) jako kancerogen pierwszej grupy. Jest on kumulowany głównie w wątrobie, przyczyniając się do powstawania jej nowotworów [27, 146].



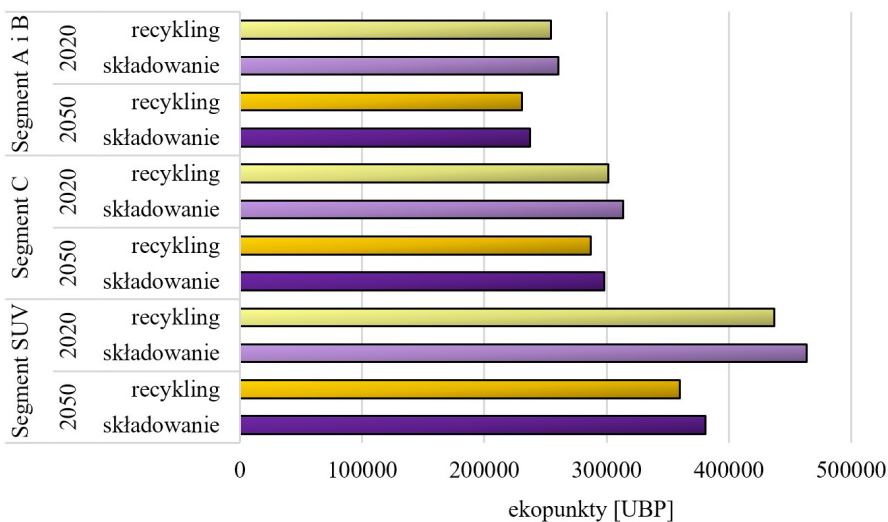
Rys. 4.63. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021).

Na rysunku 4.63 przybliżono z kolei wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu.auta zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe szkodliwe oddziaływanie na otoczenie w rozważanym zakresie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykle istnienia wszystkich rozpatrywanych pojazdów zakładające ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci recyklingu niosą ze sobą istotnie niższy poziom emisji metali ciężkich, w porównaniu z zagospodarowaniem w formie składowania na wysypisku odpadów. Maksymalną ilość negatywnych oddziaływań w ocenianym obszarze zauważono w przypadku samochodów z segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania po zakończeniu eksploatacji ($1,37 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,11 \cdot 10^6$ UBP – w roku 2050). Zastosowanie recyklingu skutkowałoby zmniejszeniem poziomu destrukcyjnych wpływów w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($5,22 \cdot 10^5$ UBP dla aut z roku 2020 i $4,07 \cdot 10^5$ UBP dla tych z roku 2050). Najwyższym poziomem emisji w cyklu istnienia aut BEV wyróżniały się: chrom (VI), cynk, miedź, nikiel, kadm oraz ołów.

Ołów to pierwiastek chemiczny zaliczany do metali ciężkich, charakteryzujący się wyższą gęstością od większości popularnych materiałów. Jest miękki i kowalny, cechuje go również względnie niska temperatura topnienia. Ołów można stosunkowo łatwo otrzymać z rudy. Jego główna ruda – galena – składa się z siarczku ołowiu i może zawierać srebro, cynk i miedź. Jego globalna roczna produkcja przekracza 10 mln ton, z czego ponad połowa pochodzi z recyklingu. Wysoka gęstość, przewodność, niska temperatura topnienia i względnie niewielka podatność na utlenianie stanowią o użyteczności ołowiu. W połączeniu z dość dużym rozpowszechnieniem złóż i stosunkowo niskimi kosztami wydobycia znalazł on powszechne zastosowanie w budownictwie, hydraulice, lutownictwie, glazurze, szkle, farbach, tworzywach polimerowych, przewodach elektrycznych, akumulatorach kwasowo-ołowiowych czy sprzęcie sportowym. Pod koniec XIX wieku odkryto, że istnieje jednak możliwość zatrucia ołowiem. Od tego czasu wycofano go z wielu zastosowań. Ołów stanowi neurotoksynę akumulującą się w kościach i tkankach miękkich, uszkadzającą układ nerwowy (przekracza barierę krew-mózg, a następnie niszczy osłonki mielinowe neuronów, zmniejsza ich liczbę, zaburza neurotransmisję oraz upośledza wzrost neuronów). Ekstrakcja, wytwarzanie, eksploatacja i składowanie ołowiu oraz jego produktów przyczyniły się do skażenia dużych obszarów gleb i wód. Ołów oraz jego związki w UE zostały uznane jako substancje priorytetowe w obszarze polityki wodnej. W czasie rewolucji przemysłowej odnotowano jego największe emisje do atmosfery. Istotne znaczenie miało również stosowanie benzyny ołowiowej. Podwyższone stężenia tego pierwiastka odnotowuje się w glebach i osadach terenów przemysłowych lub miejskich. Jego istotne źródło stanowią zarówno emisje przemysłowe, jak i spalanie węgla. Ołów może zostać zakumulowany w glebie. Jeżeli zawiera ona dużo związków organicznych, pozostaje w niej wtedy nawet do setek tysięcy lat. Ołów może także zajmować miejsca innych metali w roślinach oraz gromadzić się na ich powierzchni. Efektem tego jest spowolnienie procesów fotosyntezy, uniemożliwiające ich wzrost i rozwój. Skażenie gleb oraz roślin tym pierwiastkiem wpływa również na mikroorganizmy i zwierzęta, m.in. obniża zdolność do tworzenia czerwonych krwinek, co skutkuje niedokrwistością [29, 230, 298].

Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, przedstawiono natomiast na rysunku 4.64. Najwyższy poziom szkodliwych oddziaływań w rozważanym zakresie odnotowano w przypadku cykli istnienia, w których zagospodarowanie użytkowe przyjmowało formę składowania, z kolei najniższy – formę recyklingu. Cykle istnienia aut, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, niosłyby ze sobą mniej negatywnych następstw w zakresie zmiany sposobu użytkowania gruntów w porównaniu z tymi z roku 2020. Maksymalny poziom destrukcyjnych oddziaływań cechował cykl istnienia pojazdów z segmentu SUV zakładający ich składowanie ($4,64 \cdot 10^5$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,81 \cdot 10^5$ UBP – w roku 2050). Cy-

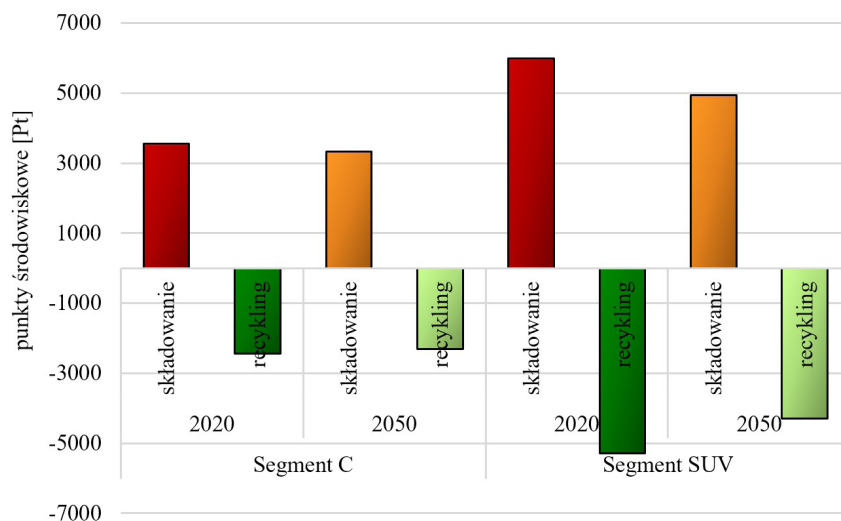
kle istnienia wszystkich ocenianych samochodów obejmujące składowanie powodują więcej niebezpiecznych procesów w obszarze zmiany użytkowania gruntów (o od ok. 2% do ok. 6%). Wśród procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów, o najwyższym poziomie negatywnych oddziaływań w cyklu istnienia aut BEV wyróżnić można procesy związane z: zajęciem gruntu przez wysypiska odpadów, zajęciem przez obszar wydobywania surowców mineralnych, zajęciem przez obszar przemysłowy, zajęciem przez place budowy, a w konsekwencji – obszar zabudowany – oraz zajęciem gruntów rolnych i przeznaczeniem ich do innych celów niż uprawa roślin.



Rys. 4.64. Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

4.9. Elektryczne samochody osobowe na ogniwa paliwowe (FCEV)

Kolejne analizy obejmowały dokonanie oceny potencjalnego oddziaływania na środowisko pojazdów elektrycznych na ogniwa paliwowe, z uwzględnieniem dwóch odmiennych segmentów – C oraz SUV. W przypadku każdego z rozpatrywanych typów samochodów zastosowano dwa scenariusze zagospodarowania poużytkowego – składowanie oraz recykling. Przyjęto również dwa scenariusze horyzontu czasowego. Pierwszy z nich obejmował auta zarejestrowane w roku 2020, z kolei drugi – prognozę dla pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Analogicznie jak we wcześniejszych przypadkach ocenę przeprowadzono wyłącznie dla cyklu istnienia tworzyw, materiałów i elementów rozważanych aut. Wyniki dla cykli paliwowych oraz energetycznych przybliżono w podrozdziale 4.10.



Rys. 4.65. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model ReCiPe 2016)

Analogicznie pierwszy etap badań opierał się na zastosowaniu modelu ReCiPe 2016. Przedstawiono najważniejsze z otrzymanych wyników, a rezultaty zaprezentowano w jednostce punktów środowiskowych (Pt). Na rysunku 4.65 zobrazowano wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Auta zarejestrowane w roku 2020 będą powodowały znacznie więcej niebezpiecznych oddziaływań na otoczenie aniżeli te, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Cykl istnienia wszystkich rozważanych pojazdów zakładający ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania na wysypisku odpadów powoduje więcej negatywnych następstw środowiskowych w porównaniu z zagospodarowaniem w formie recyklingu. Maksymalnym poziomem destrukcyjnych wpływów cechują się samochody segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania ($5,99 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $4,93 \cdot 10^3$ Pt w roku 2050). Zastosowanie recyklingu umożliwiłoby znaczące ograniczenie wielkości negatywnych oddziaływań w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($-5,30 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $-4,29 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Do kategorii wpływu o najwyższym poziomie szkodliwych następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdów FCEV zaliczyć można: procesy powodujące uszczuplenie zasobów wody oddziałujące na zdrowie człowieka i ekosystemy lądowe, emisje substancji powodujących tworzenie się drobnych cząstek stałych (PM), substancji toksycznych o działaniu nowotworowym dla człowieka oraz substancji powodujących globalne ocieplenie (oddziałujących na zdrowie człowieka).

W przypadku kategorii wpływu obejmującej substancje powodujące globalne ocieplenie modelowanie szkód dzieli się na kilka etapów. Emisja danego gazu cieplarnianego (kg) prowadzi do wzrostu całkowitego stężenia wszystkich gazów cieplarnianych w atmosferze (ppb), co z kolei zwiększa zdolność wymuszania radiacyjnego (W/m^2 , ang. *radiative forcing* – zmiana bilansu promieniowania w atmosferze spowodowana czynnikami naturalnymi lub antropogenicznymi), prowadząc do wzrostu średniej temperatury globalnej ($^{\circ}C$). Podwyższona temperatura w konsekwencji powoduje szkody dla zdrowia ludzkiego i ekosystemów. Kluczową decyzją podczas analiz stanowi wybór horyzontu czasowego, w którym oceniane wpływy są integrowane, ponieważ wpływa on zarówno na modelowanie punktu środkowego, jak i punktu końcowego dla ocenianej kategorii. Poszczególne gazy szklarniowe mają bardzo różne czasy istnienia w atmosferze, co zostaje odzwierciedlone w wynikach uzyskanych dla odmiennych horyzontów czasowych. Współczynnikiem charakterystyki punktu środkowego dla zmian klimatycznych jest powszechnie stosowany współczynnik globalnego ocieplenia (GWP). Wyraża on ilość dodatkowego wymuszenia radiacyjnego zintegrowanego w czasie (dla modelu ReCiPe może to być okres 20, 100 lub 1000 lat) spowodowanego emisją 1 kg gazów cieplarnianych w stosunku do dodatkowego wymuszenia radiacyjnego zintegrowanego w tym samym horyzoncie czasowym spowodowanego uwolnieniem 1 kg CO_2 . Wielkość wymuszenia radiacyjnego zintegrowanego w czasie, wywołana emisją 1 kg gazu cieplarnianego, nazywana jest bezwzględny potencjałem tworzenia efektu cieplarnianego (AGWP) [122].

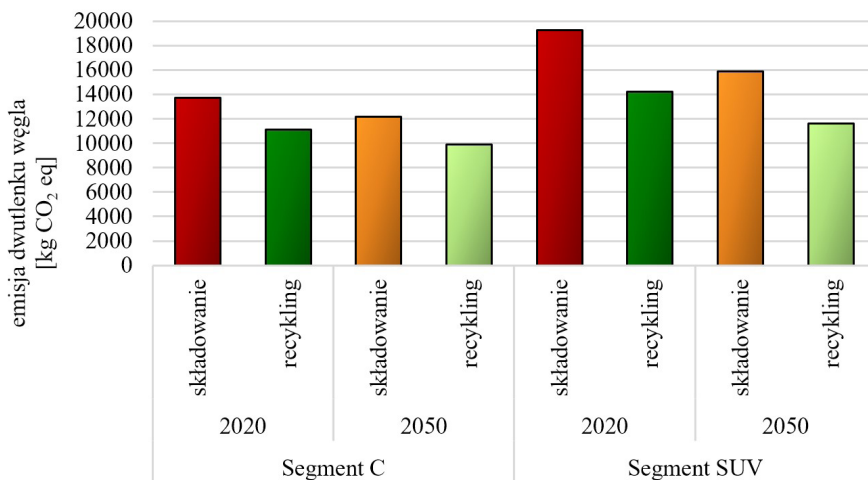
Tab. 4.9. Wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego oraz trzech obszarów wpływu (model ReCiPe 2016)

FCEV		Zdrowie człowieka	Ekosystemy	Zasoby surowców	RAZEM	
2020	Segment C	składowanie	$3,34 \cdot 10^3$	$1,89 \cdot 10^2$	$1,56 \cdot 10^1$	$3,55 \cdot 10^3$
		recykling	$-2,12 \cdot 10^3$	$-3,41 \cdot 10^2$	$1,28 \cdot 10^1$	$-2,45 \cdot 10^3$
	Segment SUV	składowanie	$5,63 \cdot 10^3$	$3,58 \cdot 10^2$	$2,50 \cdot 10^1$	$5,99 \cdot 10^3$
		recykling	$-4,66 \cdot 10^3$	$-6,35 \cdot 10^2$	$1,97 \cdot 10^1$	$-5,30 \cdot 10^3$
2050	Segment C	składowanie	$3,11 \cdot 10^3$	$1,97 \cdot 10^2$	$1,11 \cdot 10^1$	$3,33 \cdot 10^3$
		recykling	$-1,98 \cdot 10^3$	$-3,56 \cdot 10^2$	$9,03 \cdot 10^0$	$-2,30 \cdot 10^3$
	Segment SUV	składowanie	$4,60 \cdot 10^3$	$2,99 \cdot 10^2$	$2,11 \cdot 10^1$	$4,93 \cdot 10^3$
		recykling	$-3,80 \cdot 10^3$	$-5,10 \cdot 10^2$	$1,66 \cdot 10^1$	$-4,29 \cdot 10^3$

W tabeli 4.9 zestawiono z kolei wyniki grupowania i ważenia prognozowanych następstw środowiskowych występujących w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, ze szczególnym uwzględnieniem trzech obszarów wpływu (zdrowie człowieka, ekosystemy,

zasoby surowców). Rezultaty przedstawiono w punktach środowiskowych (Pt). Najwyższy poziom negatywnych oddziaływań zauważono w zakresie wpływu na zdrowie człowieka, natomiast najniższy – w obszarze wyczerpywania zasobów surowców. Maksymalną ilość łącznych destrukcyjnych wpływów zauważono dla cyklu istnienia pojazdów z segmentu SUV, zakładającego ich składowanie po zakończeniu eksploatacji ($5,99 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $4,93 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia ludzkiego $5,63 \cdot 10^3$ Pt dla aut z roku 2020 i $4,60 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Zastosowanie procesów recyklingu umożliwiłoby znaczące ograniczenie niebezpiecznych oddziaływań w perspektywie całego ich cyklu istnienia ($-5,30 \cdot 10^3$ Pt dla zarejestrowanych w roku 2020 i $-4,29 \cdot 10^3$ Pt – w roku 2050, w tym w obszarze zdrowia człowieka $-4,66 \cdot 10^3$ Pt dla samochodów z roku 2020 i $-3,80 \cdot 10^3$ Pt dla tych z roku 2050). Spośród substancji o negatywnym wpływie na zdrowie ludzi w cyklu istnienia aut FCEV najwyższym poziomem emisji wyróżnił się: chrom (VI), ditlenek węgla, ditlenek siarki, cynk, drobne cząstki stałe (PM), tlenek azotu, arsen i metan.

Cynk stanowi naturalny składnik środowiska. Odnotowuje się go w zróżnicowanych ilościach w powietrzu, wodzie, glebie i skałach. Najczęściej występuje w formie związanej (siarczan lub siarczki cynkowy czy tlenek cynkowy). Chlorek cynkowy bardzo dobrze rozpuszcza się w wodzie. Cynk, który występuje w związkach organicznych, jest łatwo przyswajany przez rośliny. Jest on pierwiastkiem koniecznym do prawidłowego działania ekosystemów. Organizmy żywe pobierają niezbędny do życia cynk z otoczenia, z tego względu równowaga w zawartości tego pierwiastka w przyrodzie jest ważna dla ich prawidłowego rozwoju. W ludzkim organizmie stanowi on jeden z kluczowych mikroelementów. Jest potrzebny dla właściwego funkcjonowania ponad trzystu enzymów, stabilizacji DNA czy przenoszenia neuroprzekaźników w układzie nerwowym. Ma również swój udział w regulacji rytmu serca i ciśnienia krwi. Cynk w środowisku pochodzi ze źródeł naturalnych oraz jest emitowany przez środki transportu, w wyniku działalności przemysłowej, rolniczej, w gospodarce komunalnej czy z produktów korozji cynku jako składnika powłok na eksploatowanych konstrukcjach oraz innych wyrobach. Przyjmuje się, że pyły z opon i zanieczyszczenia emitowane przez przemysł stanowią główne źródła cynku w środowisku. Poziom emisji tego pierwiastka do wody opadowej w warunkach miejskich zależy przede wszystkim od materiałów stosowanych na dachach i fasadach budynków oraz od natężenia ruchu pojazdów. Cynk jest surowcem, który bardzo dobrze poddaje się recyklingowi. Odzyskiwanie tego pierwiastka odpowiada ok. jednej trzeciej jego światowych dostaw i dotyczy np. ocynkowanej stali z przemysłu motoryzacyjnego, mosiężnego osprzętu, urządzeń domowych czy pozostałości z procesu cynkowania (pył i popiół piecowy, zwroty z odlewni) [6, 87, 110, 212].

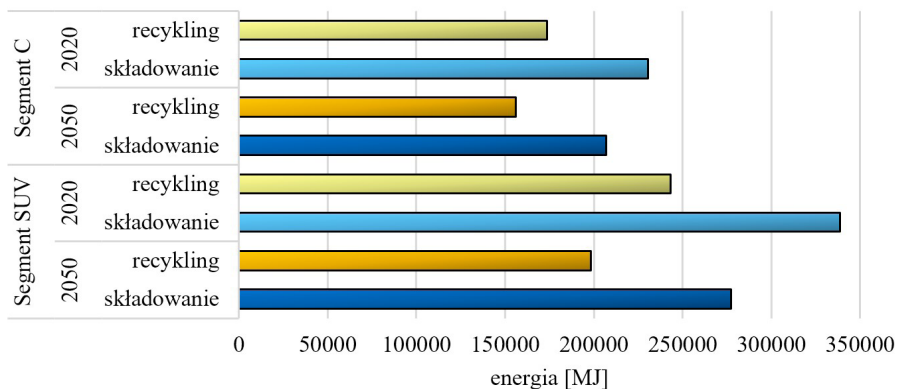


Rys. 4.66. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021)

W ramach drugiego etapu badań wykorzystano model IPCC 2021. Zaprezentowano wyłącznie kluczowe wyniki, a rezultaty przedstawiono w kg CO₂ eq. Na rysunku 4.66 przybliżono wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Najwyższym poziomem destrukcyjnych oddziaływań w ocenianym zakresie charakteryzowały się cykle istnienia uwzględniające zagospodarowanie użytkowe w formie składowania, a najniższym – w formie recyklingu. Cykle istnienia aut, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej niebezpiecznych wpływów w obszarze emisji GHG w porównaniu z tymi z roku 2020. Maksymalny poziom szkodliwych oddziaływań odnotowano dla cyklu istnienia pojazdów z segmentu SUV obejmującego ich składowanie na wysypisku odpadów ($1,93 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,16 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq – w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich rozważanych samochodów zakładające składowanie zamiast recyklingu skutkują wyższymi poziomami emisji gazów szklarniowych (o od ok. 19% do ok. 27%). Wśród związków chemicznych powodujących pogłębienie efektu cieplarnianego najwyższym poziomem emisji w cyklu istnienia aut FCEV wyróżnia się: ditlenek węgla, metan, tetrafluorometan (CFC-14), tlenek diazotu, heksafluorek siarki, trifluorometan (HFC-23) oraz heksafluoroetan (HFC-116).

Heksafluorek siarki (SF₆) jest gazem, który ma najsilniejszy wpływ na pogłębienie się efektu cieplarnianego (ok. 23 tys. razy większy niż CO₂). Jest również niezwykle trwały, ponieważ jego czas istnienia w atmosferze jest szacowany na ok. 3 tys. lat. Ze względu na swoje specyficzne właściwości heksafluorek siarki jest stosowany w wielu gałęziach przemysłu. Jednak z powodu jego wysoce szkodliwego wpływu na środowisko w 2007 roku zabroniono używania SF₆ w wielu obszarach zastosowań, np.

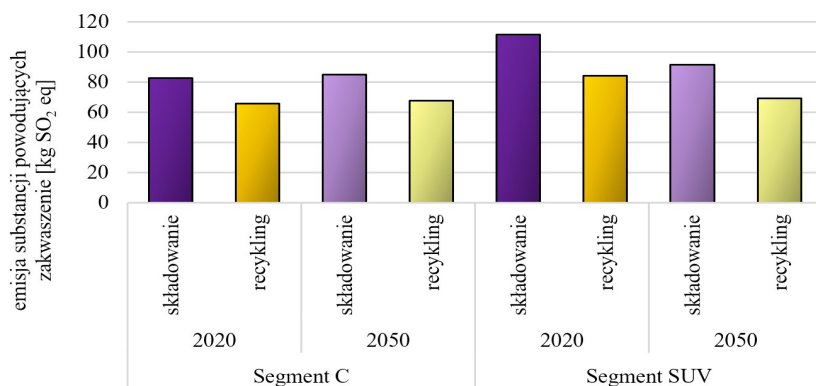
w oponach samochodowych, oknach dźwiękoszczelnych czy butach sportowych. Nie udało się jednak znaleźć dla niego odpowiednich alternatyw w szeregu innych aplikacji przemysłowych. Współcześnie głównym obszarem zastosowania heksafluorku siarki jest elektroenergetyka – w rozdzielnicach izolowanych gazem jest on stosowany jako medium izolacyjne oraz gasi łuki elektryczne, które powstają podczas przełączania (jego własności elektroizolacyjne są ok. trzykrotnie lepsze niż powietrza). Jest on także wykorzystywany podczas wytwarzania aluminium i magnezu (jako gaz inertny zapobiegający utlenianiu się stopionego metalu), półprzewodników (jako źródło fluoru do trawienia plazmowego o dużej gęstości), aparatury radiologicznej, włókien optycznych czy elementów instalacji solarnych. Emisja SF₆ jest praktycznie całkowicie pochodzenia antropogenicznego, a ze względu na bardzo długi okres rozkładu – skutkuje jego postępującą i nieodwracalną akumulacją w atmosferze. Silne wyładowania łukowe w rozdzielnicach, które stanowią 80% całego wykorzystania SF₆, powodują jego rozkład i indukują reakcje z różnymi cząsteczkami obecnymi w otoczeniu, tworząc wysoce niebezpieczne, toksyczne produkty uboczne. Zapotrzebowanie na rozdzielnice rośnie wraz ze wzrostem zużycia energii elektrycznej, stąd też szybko wzrasta poziom emisji heksafluorku siarki. Brakuje jednak efektywnych metod jego utylizacji [59, 224, 282, 309].



Rys. 4.67. Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED V1.11)

Trzeci etap badań polegał na skorzystaniu z modelu CED. W opracowaniu przedstawiono najważniejsze z uzyskanych wyników. Rezultaty analiz zaprezentowano w jednostce MJ zapotrzebowania na energię. Wyniki charakteryzowania zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, przedstawiono na rysunku 4.67. Cykle istnienia pojazdów zarejestrowanych w roku 2020 charakteryzują się wyższym poziomem energochłonności w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. W przypadku cykli istnienia aut, które mają zostać poddane składowaniu, zauważono wyższy poziom zapotrzebowania na energię (o od ok. 25% do ok. 29%).

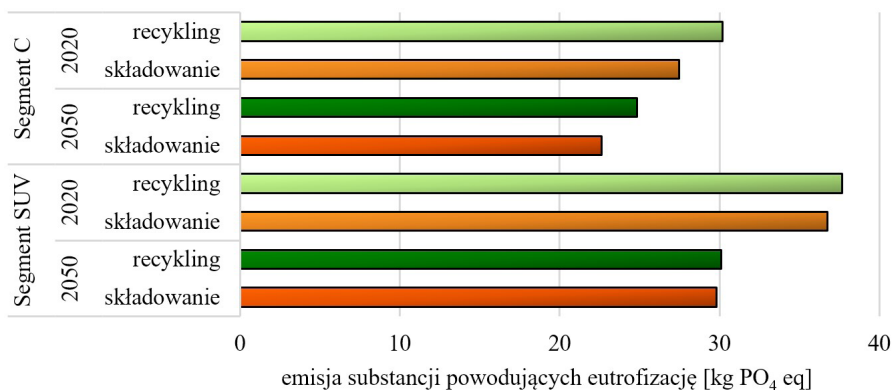
Najwyższą energochłonnością cechuje się cykl istnienia samochodów segmentu SUV uwzględniający ich składowanie ($2,30 \cdot 10^5$ MJ dla zarejestrowanych w roku 2020 i $2,07 \cdot 10^5$ MJ – w roku 2050). Kategorią wpływu o najwyższym poziomie szkodliwych następstw środowiskowych dla otoczenia, zidentyfikowanych w cyklu istnienia pojazdów FCEV, jest kategoria obejmująca procesy związane z wykorzystaniem nieodnawialnych paliw kopalnych (w szczególności procesy wykorzystania gazu ziemnego, ropy naftowej oraz węgla kamiennego).



Rys. 4.68. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CML-IA baseline)

W ramach czwartego etapu badań bazowano na modelu CML-IA baseline. Przybliżono wyłącznie wybrane wyniki, a rezultaty analiz zaprezentowano w formie wielkości emisji substancji odniesienia (w kg SO₂ eq i kg PO₄ eq). Na rysunku 4.68 zobrazowano wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących zakwaszenie w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe destrukcyjne oddziaływanie na otoczenie w rozważanym zakresie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykl istnienia analizowanych aut obejmujący formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania na wysypisku skutkuje większą ilością emisji substancji zakwaszających środowisko (o od ok. 20% do ok. 25%). Maksymalnym poziomem niebezpiecznych oddziaływań w analizowanym obszarze wyróżniają się samochody z segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przekazane do składowania po zakończeniu eksploatacji ($1,12 \cdot 10^2$ kg SO₂ eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $9,16 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq – w roku 2050). Wykorzystanie procesów recyklingu pozwoliłoby na ograniczenie wielkości szkodliwych oddziaływań w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($8,42 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla aut z roku 2020 i $6,91 \cdot 10^1$ kg SO₂ eq dla tych z roku 2050). Spośród substancji o charakterze zakwaszającym najwyższy poziom emisji w cyklu istnienia pojazdów FCEV odnotowano dla: ditlenku siarki, tlenku azotu, amoniaku oraz tritlenku siarki.

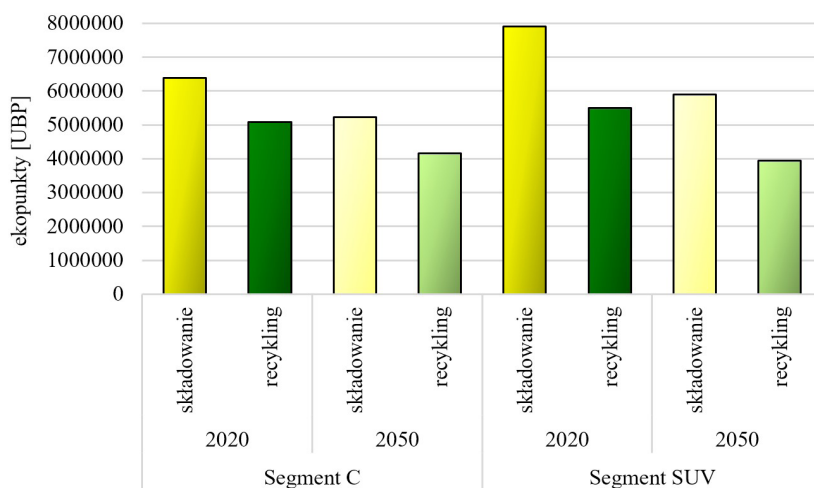
Siarka stanowi pierwiastek o ogromnym zastosowaniu w wielu różnych gałęziach przemysłu. Jeżeli tlenki siarki są stosowane w niewielkiej ilości, to nie generują one istotnych negatywnych następstw środowiskowych. Problem pojawia się, gdy związki te zostają wyemitowane do atmosfery. Człowiek jest nieustannie narażony na kontakt z tlenkami siarki. Jest to spowodowane wzmożoną emisją tych związków do powietrza. Ich zasadnicze źródło stanowią zakłady przemysłowe, procesy spalania paliw konwencjonalnych, transport oraz pozyskiwanie metali z rud. Trinitlenek siarki cechuje się dużą reaktywnością. Z wodą reaguje gwałtownie i egzotermicznie, tworząc kwas siarkowy. Ma również właściwości utleniające (utlenia m.in. fosfor do P_4O_{10}). W atmosferze ditlenek siarki utlenia się do trinitlenku siarki, który reaguje z zawieszonymi kropelkami wody, tworząc wcześniej wspomniany kwas siarkowy. Na skutek dysocjacji elektrolitycznej rozpada się on na jony SO_4^{2-} i H^+ , które cechują się właściwościami zakwaszającymi, powodując m.in. „kwaśne opady” prowadzące do obniżenia żyzności gleb oraz obumierania roślin. Tlenki siarki reagują również z innymi związkami znajdującymi się w powietrzu, przez co tworzy się niebezpieczny dla zdrowia pył zawieszony (PM). Produkty przemiany tlenków siarki mogą m.in. wnikać w głąb płuc i zaburzać prawidłowe funkcjonowanie układu oddechowego [147, 267, 328].



Rys. 4.69. Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CML-IA baseline)

Wyniki charakteryzowania emisji substancji powodujących eutrofizację w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, zestawiono z kolei na rysunku 4.69. Najwyższy poziom negatywnych wpływów w analizowanym zakresie odnotowano dla cykli istnienia uwzględniających zagospodarowanie użytkowe w formie składowania na wysypisku, a najniższy – w formie recyklingu. Cykle istnienia aut, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, powodowałyby mniej destrukcyjnych wpływów w obszarze emisji substancji eutrofizujących środowisko w porównaniu z tymi z roku 2020. Najwyższym poziomem niebezpiecznych oddziaływań wyróżnił się cykl istnienia pojazdów

z segmentu SUV zakładający ich recykling ($3,77 \cdot 10^1$ kg PO_4 eq dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,01 \cdot 10^1$ kg PO_4 eq – w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich ocenianych samochodów uwzględniające składowanie zamiast recyklingu, powodują zmniejszenie poziomu emisji substancji o charakterze eutrofizującym (o od ok. 1% do ok. 9%). Wśród substancji powodujących pogłębianie się eutrofizacji środowiska najwyższym poziomem emisji w cyklu istnienia aut FCEV charakteryzują się: fosforany, azotany oraz fosfor.

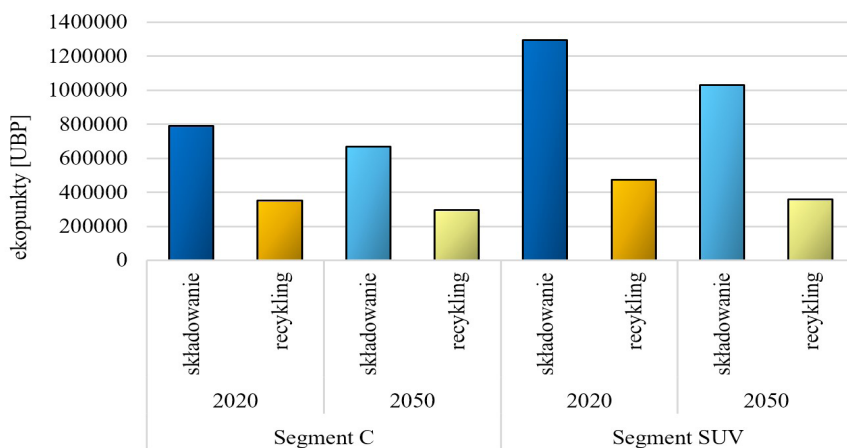


Rys. 4.70. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

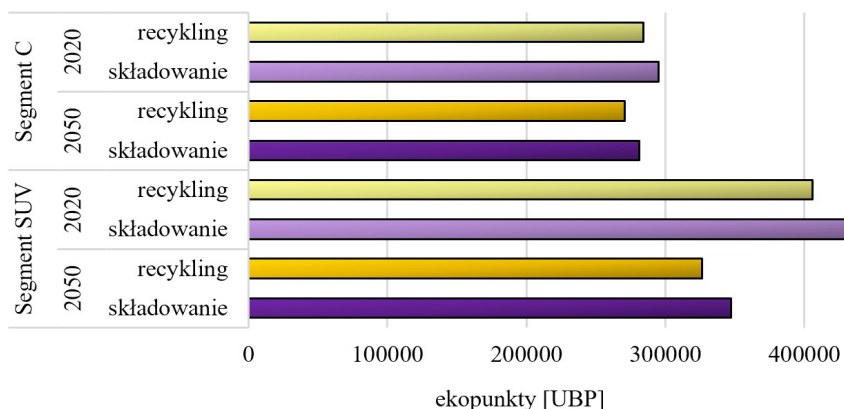
Ostatni etap badań opierał się na wykorzystaniu modelu Ecological Scarcity 2021. W ramach monografii przedstawiono wyłącznie kluczowe wyniki, odnoszące się do emisji wybranych grup związków chemicznych do środowiska atmosferycznego oraz substancji i procesów oddziałujących na środowisko glebowe. Rezultaty analiz zaprezentowano w ekopunktach (UBP). Na rysunku 4.70 przybliżono wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska atmosferycznego substancji o działaniu kancerogennym w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Cykle istnienia pojazdów zarejestrowanych w roku 2020 cechują się wyższym poziomem niebezpiecznych następstw środowiskowych w analizowanym zakresie, w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Dla cykli istnienia aut przeznaczonych do składowania po zakończeniu eksploatacji zauważono wyższy poziom szkodliwych emisji (o od ok. 20% do ok. 33%), w porównaniu z tymi, dla których zagospodarowanie przyjęłoby formę recyklingu. Najwyższymi wartościami rozważanych emisji cechują się cykle istnienia samochodów z segmentu SUV obejmujące ich składowanie na wysypisku odpadów

(7,91·10⁶ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i 5,90·10⁶ UBP – w roku 2050). Spośród związków chemicznych o kancerogennym oddziaływaniu na człowieka najwyższym poziomem emisji do atmosfery w cyklu istnienia pojazdów FCEV charakteryzowały się: benzo(α)piren, 2,3,7,8-tetrachlorodibenzodiodyna (TCDD), benzen, chloroeten oraz wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA).

Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) to związki organiczne, które w większości są bezbarwnymi białymi lub jasnożółtymi ciałami stałymi. Stanowią wszechobecną grupę kilkuset chemicznie spokrewnionych substancji, trwałych w środowisku, o różnej budowie i zróżnicowanej toksyczności. Termin WWA odnosi się do związków składających się wyłącznie z atomów węgla i wodoru. Pod względem chemicznym zbudowane są z dwóch lub więcej pierścieni benzenowych połączonych w układy liniowe, klasterowe lub łańcuchowe. Są one wszechobecnymi zanieczyszczeniami środowiska, powstającymi głównie podczas niecałkowitego spalania materiałów organicznych (np. węgla, ropy naftowej, benzyny czy drewna). Większość emisji pochodzi z działalności antropogenicznej. Główne ich źródła obejmują emisje z transportu oraz na skutek ogrzewania budynków mieszkalnych, eksploatacji instalacji zgazowania i skraplania węgla, wytwarzania sadzy, smoły węglowej oraz asfaltu, produkcji koksu i aluminium, eksploatacji wież do krakingu katalitycznego oraz powiązanych z nimi działań w rafineriach ropy naftowej. WWA nie są syntetyzowane chemicznie do celów przemysłowych. Istnieje jednak dla nich kilka zastosowań komercyjnych. Stosowane są głównie do produkcji pigmentów (np. acenaften, antracen, fluoren, piren), barwników (np. acenaften, antracen, fluoranten, fluoren), rozcieńczalników (np. antracen), tworzyw polimerowych (np. acenaften, fluoren), żywicy (np. fenantren), pestycydów (np. acenaften, fluoranten, fluoren, fenantren) oraz farmaceutyków (np. acenaften, fluoranten, fluoren). Specyficzne produkty rafinacji precyzyjnych WWA znajdują zastosowanie również w dziedzinie elektroniki, tworzyw funkcjonalnych i ciekłych kryształów. Omawiane związki chemiczne w powietrzu mogą występować w fazie gazowej oraz w postaci sorbetów i aerozoli. Atmosferyczny rozdział tych substancji pomiędzy fazę cząsteczkową i gazową silnie wpływa na ich losy i transport w atmosferze oraz sposób, w jaki dostają się do organizmu człowieka. Na usuwanie WWA z atmosfery w procesach suchej i mokrej depozycji duży wpływ ma ich podział na gaz i cząstki. Depozycja atmosferyczna stanowi ich główne źródło w glebie. Wiele wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych ma właściwości toksyczne, mutagenne oraz rakotwórcze. Są one dobrze rozpuszczalne w tłuszczach, a zatem łatwo wchłaniają się z przewodu pokarmowego ssaków. Mechanizm toksyczności WWA polega na ingerencji w funkcję błon komórkowych, jak również w układy enzymatyczne z nimi związane. Są one silnymi immunosupresantami, wpływają również na rozwój układu odpornościowego. Z kolei rośliny mogą je wchłaniać z gleby przez swoje korzenie i przenosić do innych części [2, 172, 265, 266].



Rys. 4.71. Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)



Rys. 4.72. Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model Ecological Scarcity 2021)

Wyniki grupowania i ważenia emisji do środowiska glebowego metali ciężkich w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, przedstawiono natomiast na rysunku 4.71. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą wywierały większe destrukcyjne oddziaływanie na otoczenie w rozpatrywanym zakresie aniżeli te, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Cykle istnienia wszystkich analizowanych aut uwzględniające ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci recyklingu niosą ze sobą niższy poziom emisji metali ciężkich w porównaniu z zagospodarowaniem w formie skła-

dowania. Najwięcej negatywnych oddziaływań w ocenianym obszarze odnotowano dla samochodów z segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania ($1,30 \cdot 10^6$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $1,03 \cdot 10^6$ UBP – w roku 2050). Wykorzystanie procesów recyklingu umożliwiłoby zmniejszenie poziomu destrukcyjnych wpływów w perspektywie ich całego cyklu istnienia ($4,74 \cdot 10^5$ UBP dla pojazdów z roku 2020 i $3,60 \cdot 10^5$ UBP dla tych z roku 2050). Maksymalnym poziomem emisji w cyklu istnienia aut FCEV wyróżniały się: chrom (VI), cynk, miedź, nikiel, kadm oraz ołów.

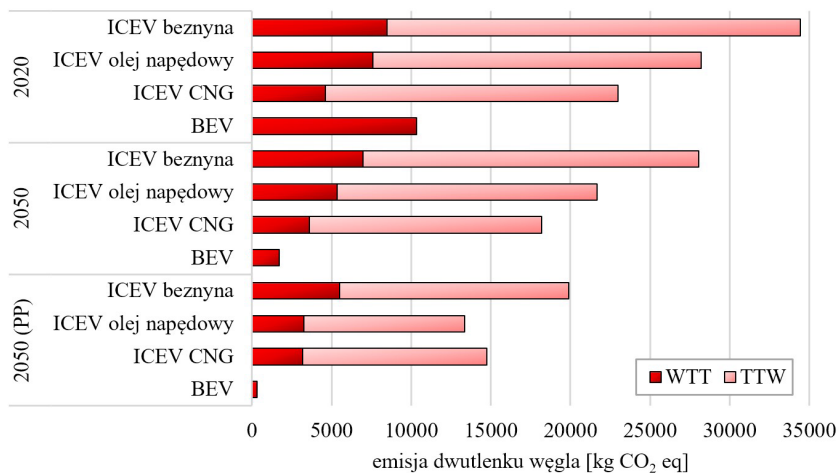
Na rysunku 4.72 zobrazowano z kolei wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów w cyklu istnienia analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu. Najwyższy poziom szkodliwych oddziaływań w tym zakresie odnotowano dla cykli istnienia, w których zagospodarowanie użytkowe przyjmowało formę składowania na składowisku odpadów, a najniższy – formę recyklingu. Cykle istnienia pojazdów, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, generowałyby mniej negatywnych wpływów w obszarze zmiany sposobu użytkowania gruntów w porównaniu z tymi z roku 2020. Najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań cechował cykl istnienia aut z segmentu SUV uwzględniający ich składowanie ($4,32 \cdot 10^5$ UBP dla zarejestrowanych w roku 2020 i $3,47 \cdot 10^5$ UBP w roku 2050). Cykle istnienia wszystkich rozważanych samochodów obejmujący składowanie, powodują więcej niebezpiecznych procesów w zakresie zmiany użytkowania gruntów (o od ok. 4% do ok. 6%). Wśród procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów o najwyższym poziomie szkodliwych oddziaływań w cyklu istnienia pojazdów FCEV wyróżnić można procesy związane z: zajęciem gruntu przez wysypiska odpadów, zajęciem przez obszar wydobywania surowców mineralnych, zajęciem przez obszar przemysłowy, zajęciem przez place budowy, a w konsekwencji – obszar zabudowany – oraz zajęciem gruntów rolnych i przeznaczeniem ich do innych celów niż uprawa roślin.

4.10. Zasilanie samochodów osobowych energią elektryczną i wybranymi rodzajami paliw

Aby sektor transportu efektywnie wspierał wysiłki w kierunku możliwie jak najpełniejszego osiągnięcia celów zawartych w Porozumieniu paryskim (m.in. ograniczenie poziomu globalnego ocieplenia poniżej 2°C w porównaniu z epoką przemysłową, a docelowo do $1,5^\circ\text{C}$), w roku 2050 emisje gazów szklarniowych z niego pochodzące muszą być istotnie niższe aniżeli współczesne ich poziomy. Zgodnie z prognozami ICCT jest to równoznaczne z koniecznością zmniejszenia emisji ze spalania i produkcji paliw oraz energii elektrycznej w tym sektorze o co najmniej 80% (w stosunku do dzisiejszego poziomu), a największy odsetek tej redukcji musi dotyczyć samochodów osobowych. Obecnie w skali świata produkcja oraz spalanie paliw na cele transportu obejmuje ok. 25% wszystkich emisji GHG pochodzenia antropogenicznego. W przyszłości popyt na transport wzrośnie i bez istotnych zmian przewiduje się, że emisje ga-

zów szklarniowych z tego tytułu się podwoją. Samochody osobowe odpowiadają za największą część emisji gazów szklarniowych w omawianym sektorze [200, 222].

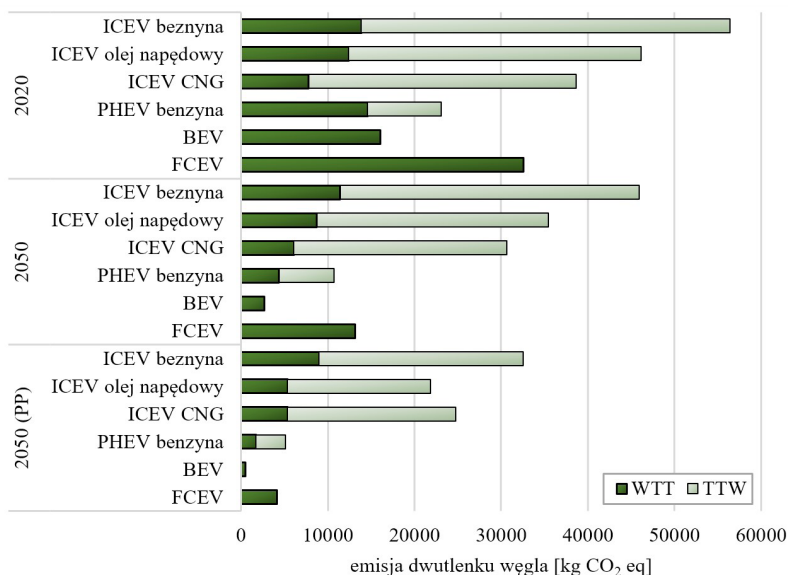
W związku z powyższym dokonano analizy cykli paliwowych i energetycznych dla wszystkich rozważanych pojazdów z segmentów A i B, C oraz SUV, z uwzględnieniem odmiennych rodzajów układów napędowych (ICEV zasilane benzyną, olejem napędowym i CNG, PHEV zasilane benzyną, BEV oraz FCEV). Pod uwagę wzięto również trzy różne scenariusze horyzontu czasowego. Pierwszy z nich odnosił się do samochodów zarejestrowanych w roku 2020, drugi – do aut, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, z kolei trzeci – również do pojazdów mających zostać zarejestrowanymi w 2050 roku, ale równocześnie spełniających główne założenia Porozumienia paryskiego. Emisje gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych i energetycznych zostały podzielone na dwa etapy. Pierwszy z nich to WTT (ang. *well to tank*), obejmujący cykl produkcji paliwa/energii elektrycznej, począwszy od produkcji źródła energii (benzyna, olej napędowy, energia elektryczna itd.), a skończywszy na zaopatrzeniu w paliwo (transport do punktu ładowania lub dystrybutora paliwa). Etap drugi to z kolei TTW (ang. *tank to wheel*), uwzględniający emisje na skutek spalania paliw, zaczynając od punktu, w którym energia jest pobierana (punkt ładowania, dystrybutor paliwa), a kończąc na jej wykorzystaniu (eksploatacja pojazdu), jest to zatem zużycie paliwa w pojeździe i powodowane przez nie emisje podczas jazdy. Do badań wykorzystano model IPCC 2021. Przybliżono wyłącznie najważniejsze z otrzymanych wyników, a rezultaty zaprezentowano w jednostce kg CO₂ eq.



Rys. 4.73. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych i energetycznych analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy horyzontu czasowego (2050 PP – prognoza zakładająca zrealizowanie głównych założeń Porozumienia paryskiego) (WTT – cykl produkcji paliwa/energii elektrycznej, TTW – emisje na skutek spalania paliw) (model IPCC 2021)

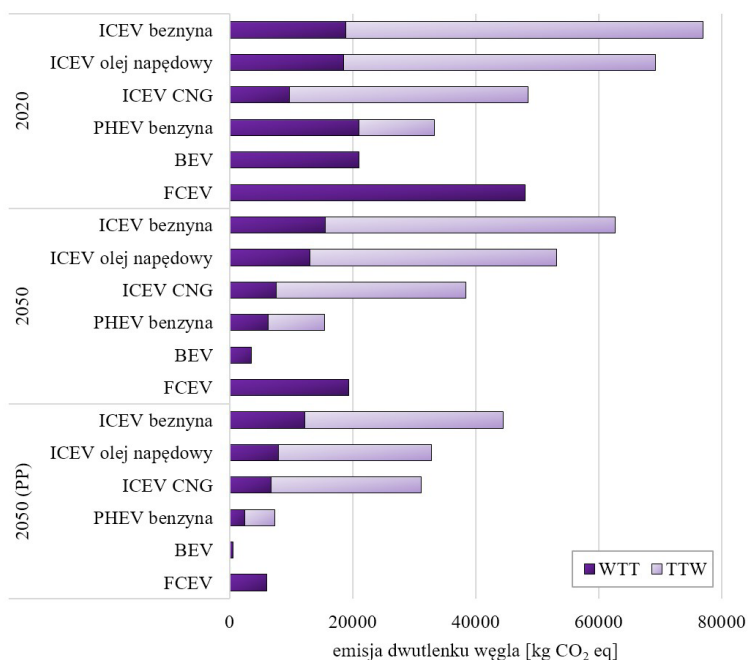
Na rysunku 4.73 przedstawiono wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych i energetycznych analizowanych samochodów osobowych segmentu A i B różniących się od siebie rodzajem układu napędowego. Widoczne jest, że samochody zarejestrowane w roku 2020 cechują się wyższą emisją gazów szklarniowych w swoich cyklach paliwowych w porównaniu z pozostałymi autami. Spełnienie głównych założeń Porozumienia paryskiego spowodowałoby istotne ograniczenie rozpatrywanych emisji do otoczenia. W każdym z analizowanych scenariuszy horyzontu czasowego auta ICEV zasilane benzyną przyczyniają się do najwyższych emisji GHG w porównaniu z pojazdami z innymi układami napędowymi. Najniższym łącznym poziomem emisji wyróżniają się natomiast samochody BEV. Porównując do siebie etap WTT i TTW, wszystkie rozważane auta generują więcej gazów cieplarnianych podczas drugiego z nich obejmującego proces spalania paliw. Jedynie pojazdy BEV nie powodują emisji w tym obszarze, ponieważ są zasilane energią elektryczną. Gdyby jednak przeanalizować poziom emisji gazów szklarniowych na etapie WTT, to cykl produkcji CNG niesie ze sobą najmniej negatywnych następstw środowiskowych w omawianym zakresie, w porównaniu z pozostałymi rodzajami paliw i energią elektryczną (miks energetyczny dla krajów europejskich).

Analogiczne analizy przeprowadzone dla pojazdów z segmentu C pokazują, że również samochody zarejestrowane w roku 2020 generują najwyższe emisje gazów cieplarnianych w rozważanych cyklach paliwowych oraz energetycznych, z kolei najniższe – auta, które mają zostać zarejestrowane w 2050 roku i będą spełniały założenia Porozumienia paryskiego. Ponownie najwyższą łączną emisją gazów szklarniowych wyróżniały się pojazdy z silnikiem spalinowym zasilane benzyną, a najniższą – akumulatorowe pojazdy elektryczne. W przypadku wszystkich trzech rodzajów samochodów ICEV etap TTW stanowił źródło większej emisji GHG aniżeli etap WTT. Dla współczesnych hybrydowych pojazdów elektrycznych typu plug-in zasilanych benzyną etap WTT wywiera więcej negatywnych następstw środowiskowych w omawianym obszarze w porównaniu z etapem TTW, jednak w perspektywie roku 2050 sytuacja ta ma ulec odwróceniu, przede wszystkim ze względu na zakładane istotne zmiany w mikсах energetycznych państw europejskich, uwzględniające m.in. zwiększenie udziału źródeł odnawialnych w produkcji energii. Ta tendencja widoczna jest także dla rozpatrywanych akumulatorowych samochodów elektrycznych. Jeżeli chodzi natomiast o pojazdy elektryczne na ogniwa paliwowe, również widoczne jest istotne ograniczenie ilości emitowanych gazów cieplarnianych w przypadku aut, które mają zostać zarejestrowane za 30 lat, ponieważ w tym okresie zakłada się istotne zwiększenie produkcji tzw. „zielonego” (wytwarzanego za pomocą elektrolizy opartej na energii odnawialnej) i „niebieskiego” wodoru (produkowanego z wykorzystaniem sekwestracji CO₂). Współcześnie prawie w całości pochodzi on z parowego reformingu gazu ziemnego („szary” wodór) lub zgazowania węgla („czarny” wodór) (rys. 4.74) [198].



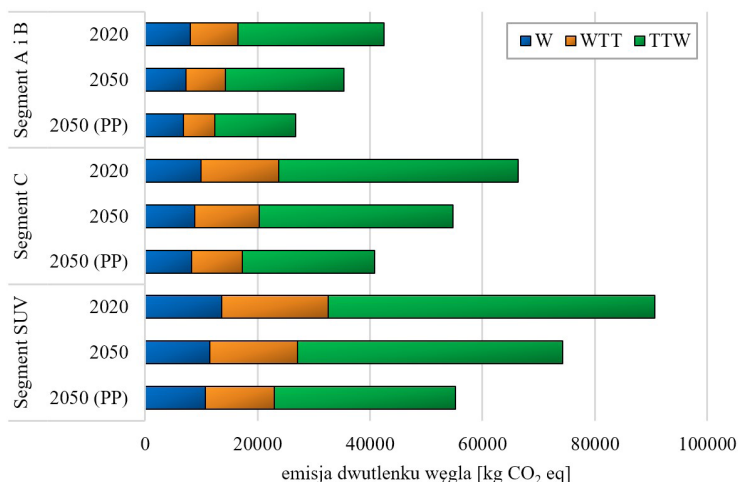
Rys. 4.74. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych i energetycznych analizowanych samochodów osobowych segmentu C różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy horyzontu czasowego (2050 PP – prognoza zakładająca zrealizowanie głównych założeń Porozumienia paryskiego) (WTT – cykl produkcji paliwa/energii elektrycznej, TTW – emisje na skutek spalania paliw) (model IPCC 2021)

Kolejna ocena została wykonana dla pojazdów SUV. Tak jak w przypadku aut z segmentu A i B oraz C zauważono, że samochody zarejestrowane w 2020 roku cechują się wyższą emisją gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych i energetycznych w porównaniu z tymi, które mają być zarejestrowane w roku 2050. Maksymalny łączny poziom emisji gazów szklarniowych odnotowano dla samochodów ICEV zasilanych benzyną, z kolei minimalny – dla pojazdów BEV. W przypadku aut z silnikiem spalinowym zasilanych zarówno benzyną, olejem napędowym, jak i CNG etap TTW obejmujący emisje na skutek spalania paliw powoduje więcej destrukcyjnych następstw środowiskowych w porównaniu z etapem WTT, uwzględniającym produkcję wymienionych rodzajów paliw. Podobnie jak dla pojazdów z segmentu C, hybrydowe pojazdy elektryczne typu plug-in zasilane benzyną, zarejestrowane w roku 2020, generują więcej GHG w ramach etapu WTT, a te, które mają zostać zarejestrowane w 2050 r. – podczas etapu TTW. Zmiany w europejskim miksie energetycznym oraz upowszechnienie mniej szkodliwych dla środowiska technik wytwarzania wodoru, analogicznie jak w przypadku aut z segmentu C, spowodują obniżenie poziomu emisji gazów cieplarnianych w perspektywie kolejnych 30 lat dla samochodów BEV i FCEV (rys. 4.75).



Rys. 4.75. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych i energetycznych analizowanych samochodów osobowych segmentu SUV różniących się od siebie rodzajem układu napędowego, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy horyzontu czasowego (2050 PP – prognoza zakładająca zrealizowanie głównych założeń Porozumienia paryskiego) (WTT – cykl produkcji paliwa/energii elektrycznej, TTW – emisje na skutek spalania paliw) (model IPCC 2021)

Z jednej strony istotne jest zmniejszanie poziomu szkodliwych emisji mających miejsce podczas produkcji oraz zużywania paliwa i energii elektrycznej, jednak z drugiej – bardzo ważne jest także ograniczenie destrukcyjnych emisji pochodzących z etapu wytwarzania samochodów osobowych. Z tego powodu dokonano dodatkowych analiz emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych i energetycznych na etapie eksploatacji oraz podczas wytwarzania rozważanych pojazdów z segmentu A i B, C oraz SUV. Oceny dokonano dla sześciu rodzajów układów napędowych (ICEV zasilanych benzyną, olejem napędowym i CNG, PHEV zasilanych benzyną, BEV oraz FCEV) oraz trzech scenariuszy horyzontów czasowych (auta zarejestrowane w roku 2020, samochody, które mają zostać zarejestrowane w 2050 roku oraz które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą równocześnie spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego). W ramach eksploatacji ocenianych pojazdów ponownie uwzględniono podział na etap WTT (cykl produkcji paliwa/energii elektrycznej) oraz TTW (emisje na skutek spalania paliw). Do badań wykorzystano model IPCC 2021. Zaprezentowano wyłącznie kluczowe z otrzymanych wyników. Przedstawiono je w jednostce kg CO₂ eq.

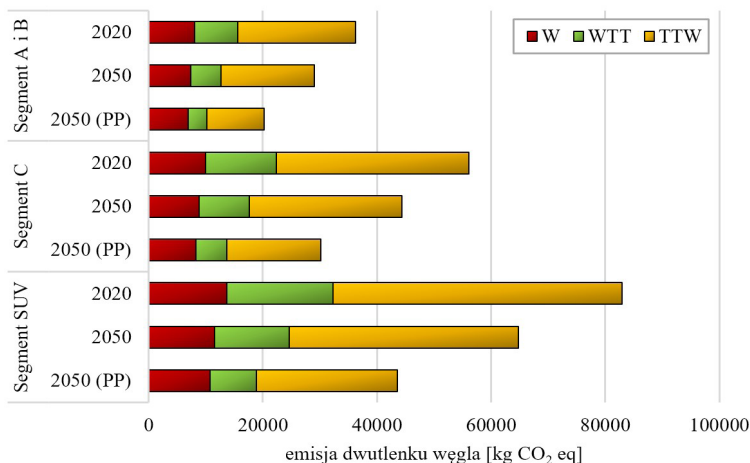


Rys. 4.76. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy horyzontu czasowego (2050 PP – prognoza zakładająca zrealizowanie głównych założeń Porozumienia paryskiego) (W – etap wytwarzania pojazdu, WTT – cykl produkcji paliwa/energii elektrycznej, TTW – emisje na skutek spalania paliw) (model IPCC 2021)

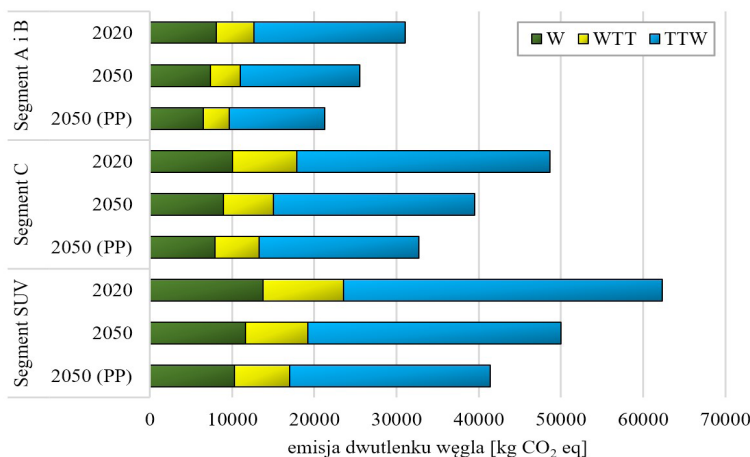
Na rysunku 4.76 zobrazowano wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu.auta z segmentu A i B generują najmniej gazów szklarniowych, z kolei te z segmentu SUV – najwięcej. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą bardziej przyczyniały się do pogłębiania efektu cieplarnianego, w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później. Wypełnienie głównych założeń Porozumienia paryskiego istotnie wpłynęłoby na ograniczenie emisji GHG. Etap eksploatacji aut skutkuje najwyższym poziomem emisji ocenianych związków chemicznych, a w szczególności etap TTW – obejmujący emisje powstające w wyniku spalania benzyny. Spośród wszystkich ocenianych pojazdów, ICEV zasilane benzyną z segmentu SUV, zarejestrowane w roku 2020, emitują łącznie największą ilość gazów szklarniowych (etap wytwarzania: $1,36 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq, WTT: $1,89 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq, TTW: $5,81 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq).

Analogiczną sytuację odnotowano podczas analizy wyników charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych ocenianych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym. Maksymalna ilość GHG generowana jest przez pojazdy z segmentu SUV, natomiast minimalna – z segmentu A i B. Auta, które zostaną zarejestrowane w roku 2050, a w szczególności te spełniające założenia Porozumienia paryskiego, w dużo mniejszym stopniu będą przyczyniały się do pogłębiania efektu szklarniowego aniżeli te zarejestrowane w roku 2020. Wytwarzanie tworzyw, materiałów i elementów wszystkich z rozważanych samochodów będzie skutkowało istotnie mniejszą ilością negatywnych następstw środowiskowych w ocenianym zakre-

sie w porównaniu z emisjami generowanymi na etapie eksploatacji. Ponownie spalanie paliwa, w tym przypadku oleju napędowego (etap TTW), stanowi główne źródło emisji gazów cieplarnianych (rys. 4.77).

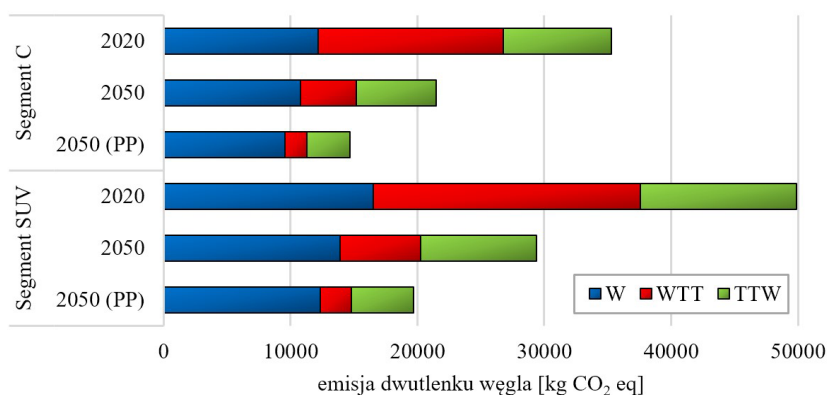


Rys. 4.77. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych olejem napędowym, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy horyzontu czasowego (2050 PP – prognoza zakładająca zrealizowanie głównych założeń Porozumienia paryskiego) (W – etap wytwarzania pojazdu, WTT – cykl produkcji paliwa/energii elektrycznej, TTW – emisje na skutek spalania paliw) (model IPCC 2021)



Rys. 4.78. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych analizowanych samochodów osobowych ICEV zasilanych CNG, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy horyzontu czasowego (2050 PP – prognoza zakładająca zrealizowanie głównych założeń Porozumienia paryskiego) (W – etap wytwarzania pojazdu, WTT – cykl produkcji paliwa/energii elektrycznej, TTW – emisje na skutek spalania paliw) (model IPCC 2021)

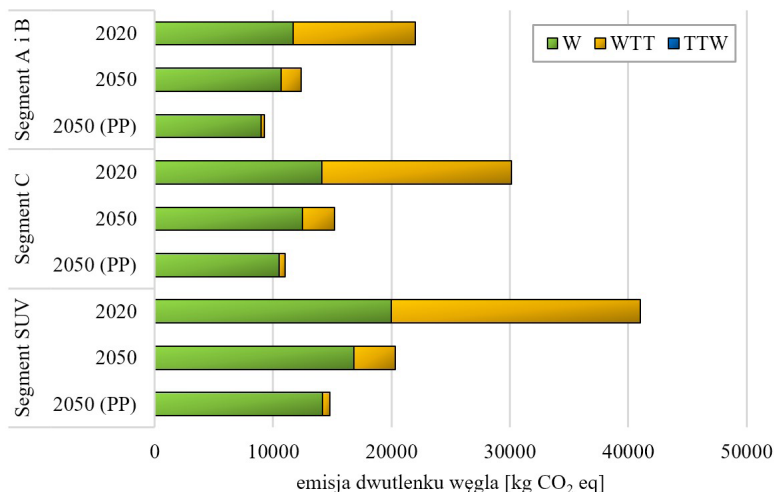
Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych ostatnich z analizowanych samochodów osobowych ICEV, czyli zasilanych CNG, zaprezentowano na rysunku 4.78. Ponownie najwyższy poziom emisji szkodliwych związków chemicznych odnotowano dla aut z segmentu SUV, a najniższy – dla tych z segmentu A i B. Pojazdy zarejestrowane w roku 2020 będą generowały więcej gazów szklarniowych aniżeli samochody, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 (szczególnie te spełniające kluczowe założenia Porozumienia paryskiego). Etap eksploatacji cechuje się wyższym poziomem emisji GHG w porównaniu z etapem wytwarzania rozpatrywanych aut. W ramach etapu eksploatacji cykl produkcji paliwa (WTT) niesie ze sobą mniej negatywnych następstw środowiskowych w omawianym obszarze aniżeli ich spalanie (TTW).



Rys. 4.79. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych i energetycznych analizowanych samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy horyzontu czasowego (2050 PP – prognoza zakładająca zrealizowanie głównych założeń Porozumienia paryskiego) (W – etap wytwarzania pojazdu, WTT – cykl produkcji paliwa/energii elektrycznej, TTW – emisje na skutek spalania paliw) (model IPCC 2021)

W przypadku samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną analiza emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych i energetycznych została wykonana wyłącznie dla aut z segmentu C oraz SUV. Większa ilość gazów szklarniowych jest emitowana do otoczenia w przypadku pojazdów z segmentu SUV. Samochody, które zostaną zarejestrowane w roku 2050, a przede wszystkim te spełniające główne założenia Porozumienia paryskiego, będą generowały mniej GHG aniżeli pojazdy zarejestrowane w 2020 roku. Eksploatacja pojazdów z roku 2020 będzie w większym stopniu przyczyniała się do pogłębiania efektu cieplarnianego w porównaniu z ich wytwarzaniem. Jeżeli chodzi o samochody, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później, to poziom szkodliwych oddziaływań etapu wytwarzania i eksploatacji będzie porównywalny. Dla aut zarejestrowanych w roku 2050, ale spełniających podstawowe założenia Porozu-

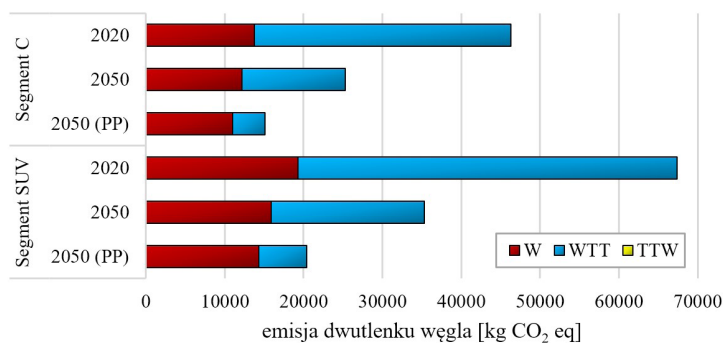
mienia paryskiego, etap wytwarzania będzie źródłem większej ilości emisji gazów cieplarnianych aniżeli etap eksploatacji. Samochody zarejestrowane w roku 2020 cechuje wyższy poziom emisji GHG na etapie WTT w porównaniu z etapem TTW. W przypadku aut, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później, sytuacja jest odwrotna.



Rys. 4.80. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach energetycznych analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy horyzontu czasowego (2050 PP – prognoza zakładająca zrealizowanie głównych założeń Porozumienia paryskiego) (W – etap wytwarzania pojazdu, WTT – cykl produkcji paliwa/energii elektrycznej, TTW – emisje na skutek spalania paliw) (model IPCC 2021)

Na rysunku 4.80 przedstawiono wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach energetycznych analizowanych samochodów osobowych BEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu. W związku z faktem, iż ocenie zostały poddane akumulatorowe pojazdy elektryczne oddziaływanie na etapie TTW (emisje na skutek spalania paliw) nie zostało odnotowane. Maksymalnym poziomem emisji GHG charakteryzowały się auta z segmentu SUV, natomiast minimalnym – z segmentu A i B. Samochody zarejestrowane w roku 2020 generowały więcej destrukcyjnych następstw dla otoczenia w rozważanym obszarze w porównaniu z pojazdami, które mają zostać zarejestrowane w 2050 roku. W przypadku aut zarejestrowanych w 2020 roku na etapie wytwarzania i eksploatacji emitowana jest porównywalna ilość gazów szklarniowych. Jeżeli natomiast chodzi o samochody, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później, etap eksploatacji będzie przyczyniał się do istotnie mniejszej emisji ocenianych związków chemicznych aniżeli etap wytwarzania. Spośród wszystkich analizowanych pojazdów akumulatorowe pojazdy elektryczne z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, spełniające kluczowe założenia Porozumienia paryskiego, będą generowały łącznie najmniejszą ilość gazów cieplarnianych (etap wytwarzania: $8,97 \cdot 10^3$ kg CO₂ eq, WTT: $3,13 \cdot 10^2$ kg CO₂ eq).

Ostatni rodzaj rozważanych pojazdów stanowiły samochody elektryczne na ogniwa paliwowe. W tym przypadku analizie poddano wyłącznie auta z segmentu C i SUV. W związku z tym, że oceniano pojazdy FCEV oddziaływanie na etapie TTW (emisje na skutek spalania paliw) nie zostało odnotowane. Wyższy łączny poziom emisji gazów cieplarnianych zauważono dla samochodów z segmentu SUV. Najmniej szkodliwych następstw środowiskowych w rozważanym obszarze odnotowano dla aut zarejestrowanych w 2050 roku (w szczególności dla tych spełniających główne założenia Porozumienia paryskiego). W przypadku pojazdów zarejestrowanych w roku 2020 etap eksploatacji cechował się większą ilością generowanych GHG w porównaniu z etapem wytwarzania. Dla samochodów, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później, poziom emisji gazów szklarniowych był porównywalny dla etapu wytwarzania i eksploatacji. Z kolei auta, które mają zostać zarejestrowane w 2050 roku, spełniające założenia Porozumienia paryskiego, będą wywierały więcej negatywnych oddziaływań w analizowanym zakresie na etapie wytwarzania aniżeli eksploatacji (rys. 4.81).



Rys. 4.81. Wyniki charakteryzowania emisji gazów cieplarnianych w cyklach paliwowych i energetycznych analizowanych samochodów osobowych FCEV, różniących się od siebie rodzajem segmentu, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy horyzontu czasowego (2050 PP – prognoza zakładająca zrealizowanie głównych założeń Porozumienia paryskiego) (W – etap wytwarzania pojazdu, WTT – cykl produkcji paliwa/energii elektrycznej, TTW – emisje na skutek spalania paliw) (model IPCC 2021)

4.11. Porównawcza ocena wybranych samochodów z zastosowaniem autorskiego wskaźnika następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu

Korzystając ze wzoru (3.10) na wskaźnik następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu (omówiony szerzej w podrozdziale 3.7), możliwe jest porównanie ze sobą wielkości oddziaływań na otoczenie w cyklu istnienia wszystkich rozważanych pojazdów. W związku z faktem, iż współcześnie sektor transportu powinien wprowadzić istotne zmiany w kierunku dostosowania się do wysiłków wspierających osiągnięcie celów zawartych w Porozumieniu paryskim, podjęto decyzję o przybliżeniu możli-

wości zastosowania wskaźnika następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu na przykładzie emisji gazów cieplarnianych.

Jak już wcześniej wskazano, pojazdy z silnikiem spalinowym z segmentu SUV zasilane benzyną generują największą ilość emisji gazów szklarniowych w perspektywie całego cyklu istnienia. Analizom poddano:

- samochody zarejestrowane w roku 2020 (SUV 2020);
- samochody, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 (SUV 2050) – prognoza;
- samochody, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego (SUV 2050 PP) – prognoza.

Czas eksploatacji (t) dla wszystkich rozpatrywanych aut wynosi 18 lat. Jako formę zagospodarowania użytkowego (ZP) przyjęto recykling. W pierwszym kroku porównano ze sobą pojazdy zarejestrowane w roku 2020 (SUV 2020) z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później (SUV 2050):

$$W_{n\dot{s}}(t) = \frac{P_{SUV2020(W)} + P_{SUV2020(E)} \cdot t + P_{SUV2020(ZP)}}{P_{SUV2050(W)} + P_{SUV2050(E)} \cdot t + P_{SUV2050(ZP)}} - 1 \quad (4.1)$$

$$W_{n\dot{s}} = \frac{13600 \text{ kg } CO_2eq + 77047 \text{ kg } CO_2eq + 3500 \text{ kg } CO_2eq}{11455 \text{ kg } CO_2eq + 62767 \text{ kg } CO_2eq + 3126 \text{ kg } CO_2eq} - 1 \quad (4.2)$$

$$W_{n\dot{s}} = 0,22 \quad (4.3)$$

W związku z powyższym należy stwierdzić, że pojazdy, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 (SUV 2050), będą generowały o 22% mniej gazów cieplarnianych w całym cyklu istnienia w porównaniu z samochodami zarejestrowanymi w 2020 roku (SUV 2020).

W drugim etapie porównano pojazdy zarejestrowane w roku 2020 (SUV 2020) z tymi, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego (SUV 2050 PP):

$$W_{n\dot{s}}(t) = \frac{P_{SUV2020(W)} + P_{SUV2020(E)} \cdot t + P_{SUV2020(ZP)}}{P_{SUV2050PP(W)} + P_{SUV2050PP(E)} \cdot t + P_{SUV2050PP(ZP)}} - 1 \quad (4.4)$$

$$W_{n\dot{s}} = \frac{13600 \text{ kg } CO_2eq + 77047 \text{ kg } CO_2eq + 3500 \text{ kg } CO_2eq}{10716 \text{ kg } CO_2eq + 44501 \text{ kg } CO_2eq + 2765 \text{ kg } CO_2eq} - 1 \quad (4.5)$$

$$W_{n\dot{s}} = 0,62 \quad (4.6)$$

Samochody, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, spełniające założenia Porozumienia paryskiego (SUV 2050 PP), będą generowały o 62% mniej gazów cieplarnianych w całym cyklu istnienia aniżeli pojazdy zarejestrowane w 2020 roku (SUV 2020).

W trzecim kroku porównano ze sobą z kolei pojazdy, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 (SUV 2050) z tymi, które mają zostać zarejestrowane w tym samym roku, ale będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego (SUV 2050 PP):

$$W_{nś}(t) = \frac{P_{SUV2050(W)} + P_{SUV2050(E)} \cdot t + P_{SUV2050(ZP)}}{P_{SUV2050PP(W)} + P_{SUV2050PP(E)} \cdot t + P_{SUV2050PP(ZP)}} - 1 \quad (4.7)$$

$$W_{nś} = \frac{11455 \text{ kg } CO_2eq + 62767 \text{ kg } CO_2eq + 3126 \text{ kg } CO_2eq}{10716 \text{ kg } CO_2eq + 44501 \text{ kg } CO_2eq + 2765 \text{ kg } CO_2eq} - 1 \quad (4.8)$$

$$W_{nś} = 0,33 \quad (4.9)$$

Samochody, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, spełniające założenia Porozumienia paryskiego (SUV 2050 PP), będą generowały o 33% mniej gazów cieplarnianych w całym cyklu istnienia w porównaniu z pojazdami zarejestrowanymi w tym samym roku, ale niespełniającymi tych założeń (SUV 2050).

Analogiczne analizy wykonano dla wszystkich rozważanych pojazdów, ze wszystkich rozpatrywanych segmentów (A i B, C oraz SUV), ze wszystkimi ocenianymi układami napędowymi (ICEV zasilane benzyną, olejem napędowym i CNG, PHEV zasilane benzyną, BEV oraz FCEV), dla trzech przyjętych scenariuszy horyzontu czasowego (samochody zarejestrowane w roku 2020 oraz pojazdy, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 spełniające i niespełniające głównych założeń Porozumienia paryskiego). Ich wyniki zestawiono w tabelach 4.10–4.15.



Rys. 4.82. Zmiana wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi ICEV zasilany benzyną, z segmentu A i B, który ma zostać zarejestrowany w roku 2050 i będzie spełniał główne założenia Porozumienia paryskiego, a pojazd nowy (P_N) – ICEV zasilany benzyną, z segmentu SUV, zarejestrowany w roku 2020

Najniższą wartość wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi ICEV zasilany benzyną, odnotowano dla samochodów z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego, porównywanych z autami z silnikami spalinowymi zasilanymi benzyną z segmentu SUV zarejestrowanymi w roku 2020 (P_N), i wynosiła ona $-0,71$ (tab. 4.10). Oznacza to, że pojazdy ICEV zasilane benzyną z segmentu SUV zarejestrowane w roku 2020 emitują o ok. 71% więcej gazów cieplarnianych aniżeli samochody ICEV zasilane benzyną z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały założenia Porozumienia paryskiego. Kształtowanie się wartości wskaźnika w czasie dla rozważanych aut zaprezentowano na rysunku 4.82.

Z kolei najwyższą wartość wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów szklarniowych w cyklu istnienia, w przypadku gdy pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi ICEV zasilany benzyną, zauważono dla aut z segmentu SUV zarejestrowanych w roku 2020, porównywanych z akumulatorowymi samochodami elektrycznymi z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego (P_N), i wynosiła ona $7,92$ (tab. 4.10). Oznacza to zatem, że pojazdy BEV z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały założenia Porozumienia paryskiego, będą emitowały o ok. 792% mniej gazów cieplarnianych aniżeli auta ICEV zasilane benzyną z segmentu SUV zarejestrowane w 2020 roku. Kształtowanie się wartości wskaźnika w czasie dla ocenianych samochodów zaprezentowano na rysunku 4.83.

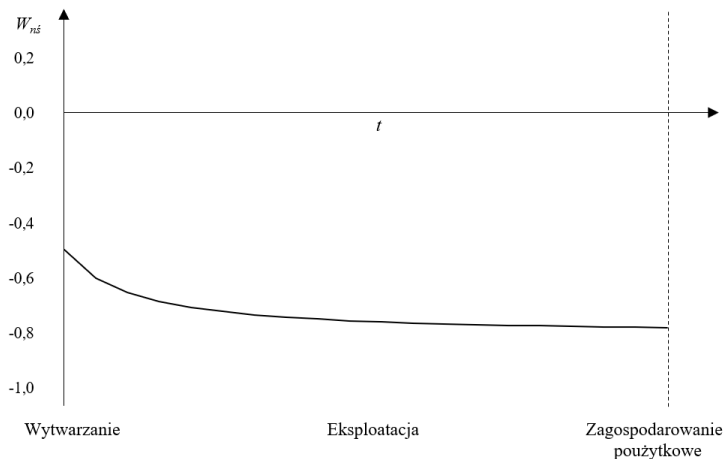


Rys. 4.83. Zmiana wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi ICEV zasilany benzyną, z segmentu SUV, zarejestrowany w roku 2020, a pojazd nowy (P_N) – BEV, z segmentów A i B, który ma zostać zarejestrowany w roku 2050 i będzie spełniał główne założenia Porozumienia paryskiego

Tab. 4.10. Wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklach istnienia rozważanych pojazdów, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi ICEV zasilany benzyną

P_N :		P_K : ICEV benzyna									
		A i B			C			SUV			
		2020	2050	2050 (PP)	2020	2050	2050 (PP)	2020	2050	2050 (PP)	
ICEV benzyna	A i B	2020	x	-0,17	-0,37	0,57	0,29	-0,03	1,18	0,79	0,34
		2050	0,20	x	-0,25	0,88	0,55	0,16	1,61	1,15	0,61
		2050 (PP)	0,59	0,32	x	1,49	1,06	0,54	2,46	1,85	1,13
	C	2020	-0,36	-0,47	-0,60	x	-0,17	-0,38	0,39	0,14	-0,14
		2050	-0,23	-0,36	-0,51	0,21	x	-0,25	0,68	0,38	0,04
		2050 (PP)	0,03	-0,14	-0,35	0,62	0,34	x	1,25	0,85	0,39
	SUV	2020	-0,54	-0,62	-0,71	-0,28	-0,41	-0,56	x	-0,18	-0,38
		2050	-0,44	-0,53	-0,65	-0,12	-0,28	-0,46	0,22	x	-0,25
		2050 (PP)	-0,25	-0,38	-0,53	0,17	-0,04	-0,28	0,62	0,33	x
ICEV olej napędowy	A i B	2020	0,17	-0,03	-0,27	0,83	0,51	0,13	1,54	1,09	0,57
		2050	0,46	0,21	-0,08	1,28	0,89	0,41	2,18	1,61	0,96
		2050 (PP)	1,09	0,74	0,31	2,27	1,70	1,02	3,55	2,74	1,80
	C	2020	-0,25	-0,37	-0,53	0,18	-0,03	-0,27	0,64	0,34	0,01
		2050	-0,05	-0,21	-0,40	0,49	0,23	-0,08	1,07	0,70	0,27
		2050 (PP)	0,38	0,15	-0,13	1,17	0,79	0,34	2,01	1,48	0,86
	SUV	2020	-0,50	-0,58	-0,69	-0,22	-0,35	-0,52	0,09	-0,11	-0,33
		2050	-0,36	-0,47	-0,60	0,00	-0,18	-0,38	0,39	0,14	-0,15
		2050 (PP)	-0,07	-0,22	-0,41	0,46	0,21	-0,10	1,03	0,67	0,25
ICEV CNG	A i B	2020	0,36	0,14	-0,14	1,13	0,76	0,32	1,97	1,44	0,83
		2050	0,65	0,38	0,04	1,59	1,14	0,60	2,61	1,96	1,22
		2050 (PP)	1,00	0,67	0,26	2,13	1,59	0,94	3,36	2,58	1,68
	C	2020	-0,13	-0,27	-0,45	0,36	0,13	-0,16	0,90	0,56	0,17
		2050	0,07	-0,11	-0,33	0,68	0,38	0,04	1,33	0,92	0,44
		2050 (PP)	0,29	0,08	-0,19	1,02	0,67	0,25	1,82	1,31	0,73
	SUV	2020	-0,34	-0,45	-0,59	0,03	-0,15	-0,36	0,43	0,17	-0,12
		2050	-0,19	-0,32	-0,49	0,28	0,05	-0,21	0,77	0,46	0,09
		2050 (PP)	-0,02	-0,18	-0,38	0,54	0,27	-0,05	1,14	0,76	0,32
PHEV benzyna	C	2020	0,13	-0,06	-0,29	0,77	0,46	0,09	1,46	1,02	0,51
		2050	0,78	0,49	0,12	1,80	1,31	0,73	2,89	2,19	1,39
		2050 (PP)	1,53	1,11	0,59	2,96	2,27	1,45	4,51	3,53	2,39
	SUV	2020	-0,22	-0,35	-0,51	0,22	0,01	-0,25	0,69	0,39	0,04
		2050	0,26	0,05	-0,21	0,98	0,63	0,22	1,75	1,26	0,69
		2050 (PP)	0,80	0,50	0,13	1,82	1,33	0,75	2,93	2,23	1,42
BEV	A i B	2020	0,83	0,52	0,15	1,86	1,36	0,77	2,98	2,27	1,45
		2050	2,05	1,54	0,92	3,78	2,95	1,96	5,65	4,46	3,10
		2050 (PP)	3,09	2,41	1,57	5,41	4,29	2,96	7,92	6,32	4,49
	C	2020	0,31	0,09	-0,17	1,06	0,70	0,27	1,86	1,35	0,76
		2050	1,45	1,04	0,54	2,83	2,17	1,37	4,33	3,38	2,28
		2050 (PP)	2,30	1,75	1,08	4,17	3,27	2,20	6,19	4,91	3,43
	SUV	2020	-0,07	-0,23	-0,42	0,45	0,20	-0,10	1,02	0,66	0,24
		2050	0,72	0,44	0,08	1,70	1,23	0,67	2,76	2,09	1,31
		2050 (PP)	1,30	0,92	0,45	2,60	1,98	1,23	4,01	3,12	2,09
FCEV	C	2020	-0,12	-0,26	-0,44	0,38	0,14	-0,14	0,93	0,58	0,19
		2050	0,57	0,30	-0,02	1,45	1,03	0,52	2,41	1,80	1,10
		2050 (PP)	1,52	1,10	0,58	2,94	2,26	1,44	4,48	3,51	2,38
	SUV	2020	-0,40	-0,50	-0,62	-0,07	-0,23	-0,42	0,30	0,07	-0,20
		2050	0,09	-0,09	-0,31	0,71	0,41	0,06	1,38	0,96	0,47
		2050 (PP)	0,79	0,49	0,13	1,80	1,31	0,73	2,90	2,20	1,40

Maksymalną wartość wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji GHG w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi natomiast ICEV zasilany olejem napędowym, analogicznie odnotowano dla samochodów z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego, porównywanych z autami z silnikami spalinowymi zasilanymi benzyną z segmentu SUV zarejestrowanymi w roku 2020 (P_N), i wynosiła ona $-0,78$ (tab. 4.11). Kształtowanie się wartości wskaźnika w czasie dla analizowanych pojazdów zaprezentowano na rysunku 4.84.

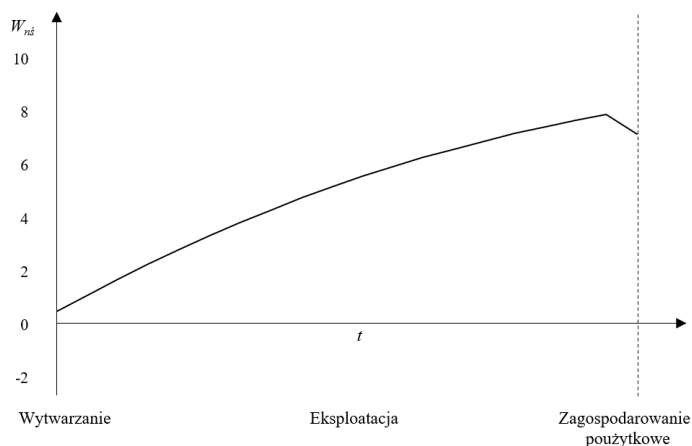


Rys. 4.84. Zmiana wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi ICEV zasilany olejem napędowym, z segmentu A i B, który ma zostać zarejestrowany w roku 2050 i będzie spełniał główne założenia Porozumienia paryskiego, a pojazd nowy (P_N) – ICEV zasilany benzyną, z segmentu SUV, zarejestrowany w roku 2020

Minimalną wartość wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, w przypadku gdy pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi ICEV zasilany olejem napędowym, zauważono również analogicznie dla aut z segmentu SUV zarejestrowanych w roku 2020, porównywanych z akumulatorowymi samochodami elektrycznymi z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego (P_N) i wynosiła ona $7,19$ (tab. 4.11). Kształtowanie się wartości wskaźnika w czasie dla rozpatrywanych pojazdów zaprezentowano na rysunku 4.85.

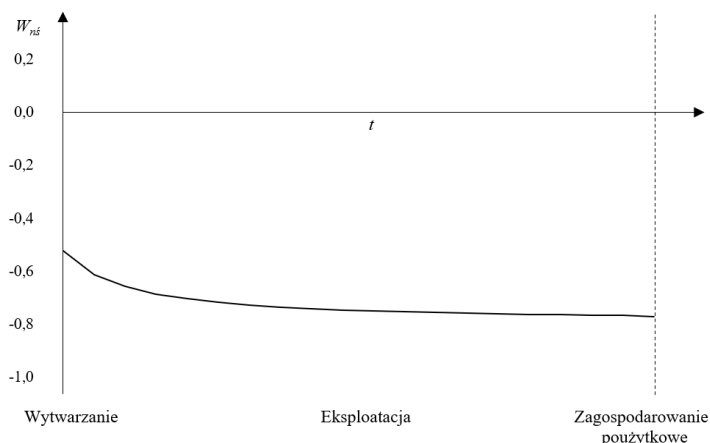
Tab. 4.11. Wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklach istnienia rozważanych pojazdów, gdzie pojazd konwencjonalny (P_k) stanowi ICEV zasilany olejem napędowym

		P_k : ICEV olej napędowy									
		A i B			C			SUV			
P_n :		2020	2050	2050 (PP)	2020	2050	2050 (PP)	2020	2050	2050 (PP)	
ICEV benzyna	A i B	2020	-0,14	-0,31	-0,52	0,33	0,05	-0,28	1,00	0,57	0,07
		2050	0,03	-0,18	-0,43	0,60	0,26	-0,13	1,40	0,88	0,29
		2050 (PP)	0,36	0,09	-0,24	1,12	0,67	0,15	2,18	1,50	0,71
	C	2020	-0,45	-0,56	-0,69	-0,15	-0,33	-0,54	0,28	0,00	-0,31
		2050	-0,34	-0,47	-0,63	0,03	-0,19	-0,44	0,55	0,21	-0,17
		2050 (PP)	-0,12	-0,29	-0,51	0,37	0,09	-0,25	1,07	0,62	0,11
	SUV	2020	-0,61	-0,69	-0,78	-0,39	-0,52	-0,67	-0,08	-0,28	-0,51
		2050	-0,52	-0,62	-0,73	-0,26	-0,41	-0,60	0,12	-0,12	-0,40
		2050 (PP)	-0,36	-0,49	-0,64	-0,01	-0,22	-0,46	0,49	0,17	-0,20
ICEV olej napędowy	A i B	2020	x	-0,20	-0,44	0,56	0,23	-0,16	1,34	0,83	0,25
		2050	0,25	x	-0,30	0,94	0,53	0,05	1,92	1,29	0,56
		2050 (PP)	0,79	0,43	x	1,78	1,20	0,51	3,18	2,28	1,24
	C	2020	-0,36	-0,48	-0,64	x	-0,21	-0,46	0,50	0,18	-0,19
		2050	-0,19	-0,35	-0,55	0,26	x	-0,31	0,90	0,49	0,02
		2050 (PP)	0,18	-0,05	-0,34	0,84	0,46	x	1,77	1,17	0,48
	SUV	2020	-0,57	-0,66	-0,76	-0,33	-0,47	-0,64	x	-0,22	-0,46
		2050	-0,45	-0,56	-0,70	-0,15	-0,33	-0,54	0,27	x	-0,32
		2050 (PP)	-0,20	-0,36	-0,55	0,24	-0,02	-0,33	0,86	0,46	x
ICEV CNG	A i B	2020	0,17	-0,07	-0,35	0,81	0,43	-0,02	1,73	1,14	0,46
		2050	0,42	0,14	-0,21	1,20	0,74	0,20	2,31	1,60	0,78
		2050 (PP)	0,71	0,37	-0,04	1,66	1,11	0,45	3,00	2,14	1,15
	C	2020	-0,25	-0,40	-0,58	0,16	-0,08	-0,37	0,74	0,37	-0,07
		2050	-0,08	-0,27	-0,49	0,42	0,13	-0,23	1,14	0,68	0,15
		2050 (PP)	0,11	-0,11	-0,38	0,72	0,36	-0,07	1,59	1,03	0,39
	SUV	2020	-0,44	-0,55	-0,69	-0,13	-0,31	-0,53	0,31	0,03	-0,30
		2050	-0,30	-0,44	-0,61	0,08	-0,14	-0,41	0,63	0,28	-0,13
		2050 (PP)	-0,16	-0,33	-0,53	0,31	0,03	-0,29	0,96	0,54	0,05
PHEV benzyna	C	2020	-0,03	-0,23	-0,46	0,50	0,19	-0,19	1,26	0,77	0,21
		2050	0,53	0,22	-0,15	1,38	0,88	0,29	2,57	1,80	0,92
		2050 (PP)	1,17	0,74	0,21	2,37	1,66	0,83	4,06	2,97	1,72
	SUV	2020	-0,33	-0,47	-0,63	0,03	-0,18	-0,44	0,56	0,22	-0,17
		2050	0,08	-0,13	-0,40	0,68	0,33	-0,09	1,52	0,98	0,35
		2050 (PP)	0,54	0,24	-0,14	1,40	0,90	0,30	2,61	1,83	0,94
BEV	A i B	2020	0,56	0,25	-0,13	1,43	0,92	0,32	2,65	1,87	0,96
		2050	1,61	1,09	0,46	3,07	2,21	1,21	5,11	3,79	2,28
		2050 (PP)	2,50	1,81	0,96	4,45	3,31	1,96	7,19	5,43	3,39
	C	2020	0,12	-0,10	-0,37	0,75	0,38	-0,05	1,63	1,06	0,41
		2050	1,10	0,68	0,17	2,26	1,58	0,77	3,90	2,84	1,63
		2050 (PP)	1,82	1,26	0,58	3,39	2,47	1,38	5,60	4,18	2,54
	SUV	2020	-0,21	-0,36	-0,56	0,23	-0,02	-0,33	0,85	0,46	-0,01
		2050	0,48	0,18	-0,17	1,30	0,82	0,25	2,45	1,71	0,85
		2050 (PP)	0,97	0,58	0,10	2,06	1,42	0,66	3,60	2,61	1,47
FCEV	C	2020	-0,24	-0,39	-0,58	0,18	-0,07	-0,36	0,77	0,39	-0,05
		2050	0,34	0,07	-0,25	1,08	0,65	0,13	2,13	1,46	0,68
		2050 (PP)	1,15	0,73	0,20	2,35	1,65	0,82	4,04	2,95	1,70
	SUV	2020	-0,49	-0,59	-0,71	-0,21	-0,37	-0,57	0,19	-0,06	-0,36
		2050	-0,06	-0,25	-0,48	0,46	0,15	-0,21	1,19	0,72	0,17
		2050 (PP)	0,53	0,23	-0,14	1,38	0,88	0,29	2,58	1,81	0,92



Rys. 4.85. Zmiana wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi ICEV zasilany olejem napędowym, z segmentu SUV, zarejestrowany w roku 2020, a pojazd nowy (P_N) – BEV, z segmentu A i B, który ma zostać zarejestrowany w roku 2050 i będzie spełniał główne założenia Porozumienia paryskiego

Najniższą wartość wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów szklarniowych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi ICEV zasilany CNG, ponownie odnotowano dla samochodów z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego, porównywanych z autami z silnikami spalinowymi zasilanymi benzyną z segmentu SUV zarejestrowanymi w roku 2020 (P_N), i wynosiła ona $-0,77$ (tab. 4.12). Kształtowanie się wartości wskaźnika w czasie dla rozważanych pojazdów zaprezentowano na rysunku 4.86.



Rys. 4.86. Zmiana wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi ICEV zasilany CNG, z segmentu A i B, który ma zostać zarejestrowany w roku 2050 i będzie spełniał główne założenia Porozumienia paryskiego, a pojazd nowy (P_N) – ICEV zasilany benzyną, z segmentu SUV, zarejestrowany w roku 2020

Tab. 4.12. Wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklach istnienia rozważanych pojazdów, gdzie pojazd konwencjonalny (P_k) stanowi ICEV zasilany CNG

		P_k : ICEV CNG									
		A i B			C			SUV			
P_n :		2020	2050	2050 (PP)	2020	2050	2050 (PP)	2020	2050	2050 (PP)	
ICEV benzyna	A i B	2020	-0,27	-0,40	-0,50	0,15	-0,07	-0,23	0,52	0,23	0,02
		2050	-0,12	-0,27	-0,40	0,38	0,12	-0,07	0,83	0,47	0,22
		2050 (PP)	0,17	-0,04	-0,21	0,83	0,49	0,23	1,42	0,95	0,62
	C	2020	-0,53	-0,61	-0,68	-0,27	-0,40	-0,51	-0,03	-0,22	-0,35
		2050	-0,43	-0,53	-0,61	-0,11	-0,28	-0,40	0,18	-0,05	-0,21
		2050 (PP)	-0,24	-0,38	-0,48	0,19	-0,03	-0,20	0,57	0,27	0,05
	SUV	2020	-0,66	-0,72	-0,77	-0,47	-0,57	-0,64	-0,30	-0,44	-0,53
		2050	-0,59	-0,66	-0,72	-0,36	-0,48	-0,57	-0,15	-0,31	-0,43
		2050 (PP)	-0,45	-0,55	-0,63	-0,14	-0,30	-0,42	0,14	-0,08	-0,24
ICEV olej napędowy	A i B	2020	-0,14	-0,29	-0,42	0,34	0,09	-0,10	0,78	0,43	0,19
		2050	0,07	-0,12	-0,27	0,67	0,36	0,13	1,22	0,79	0,49
		2050 (PP)	0,53	0,26	0,04	1,40	0,95	0,62	2,18	1,56	1,13
	C	2020	-0,45	-0,55	-0,62	-0,14	-0,30	-0,42	0,14	-0,08	-0,23
		2050	-0,30	-0,43	-0,53	0,09	-0,11	-0,27	0,45	0,17	-0,03
		2050 (PP)	0,02	-0,16	-0,31	0,59	0,29	0,07	1,11	0,70	0,41
	SUV	2020	-0,63	-0,70	-0,75	-0,43	-0,53	-0,61	-0,24	-0,39	-0,49
		2050	-0,53	-0,62	-0,68	-0,27	-0,40	-0,51	-0,03	-0,22	-0,35
		2050 (PP)	-0,32	-0,44	-0,53	0,07	-0,13	-0,28	0,42	0,14	-0,05
ICEV CNG	A i B	2020	x	-0,18	-0,32	0,57	0,27	0,05	1,08	0,67	0,39
		2050	0,21	x	-0,17	0,90	0,55	0,28	1,52	1,03	0,69
		2050 (PP)	0,47	0,21	x	1,30	0,87	0,55	2,05	1,46	1,04
	C	2020	-0,36	-0,47	-0,56	x	-0,19	-0,33	0,33	0,07	-0,11
		2050	-0,21	-0,35	-0,47	0,23	x	-0,17	0,63	0,31	0,09
		2050 (PP)	-0,05	-0,22	-0,35	0,48	0,21	x	0,97	0,59	0,32
	SUV	2020	-0,52	-0,60	-0,67	-0,25	-0,39	-0,49	x	-0,19	-0,33
		2050	-0,40	-0,51	-0,59	-0,06	-0,24	-0,37	0,24	x	-0,17
		2050 (PP)	-0,28	-0,41	-0,51	0,13	-0,08	-0,24	0,49	0,20	x
PHEV benzyna	C	2020	-0,17	-0,32	-0,44	0,30	0,05	-0,13	0,72	0,38	0,15
		2050	0,31	0,08	-0,11	1,05	0,67	0,38	1,72	1,19	0,82
		2050 (PP)	0,86	0,53	0,27	1,91	1,36	0,96	2,86	2,11	1,58
	SUV	2020	-0,43	-0,53	-0,61	-0,11	-0,27	-0,40	0,18	-0,05	-0,21
		2050	-0,07	-0,24	-0,37	0,45	0,18	-0,02	0,92	0,55	0,29
		2050 (PP)	0,32	0,09	-0,10	1,07	0,69	0,40	1,75	1,21	0,84
BEV	A i B	2020	0,34	0,10	-0,09	1,10	0,71	0,41	1,78	1,24	0,86
		2050	1,24	0,85	0,53	2,51	1,85	1,36	3,65	2,75	2,11
		2050 (PP)	2,00	1,47	1,05	3,70	2,82	2,17	5,23	4,02	3,17
	C	2020	-0,04	-0,21	-0,34	0,51	0,23	0,02	1,00	0,61	0,34
		2050	0,80	0,48	0,22	1,81	1,29	0,89	2,73	2,01	1,50
		2050 (PP)	1,42	0,99	0,65	2,79	2,08	1,55	4,03	3,05	2,36
	SUV	2020	-0,32	-0,44	-0,54	0,07	-0,13	-0,28	0,41	0,14	-0,06
		2050	0,27	0,04	-0,14	0,98	0,61	0,33	1,63	1,12	0,76
		2050 (PP)	0,69	0,39	0,15	1,64	1,15	0,78	2,51	1,83	1,35
FCEV	C	2020	-0,35	-0,47	-0,56	0,02	-0,17	-0,32	0,35	0,09	-0,10
		2050	0,15	-0,05	-0,22	0,80	0,46	0,21	1,38	0,92	0,60
		2050 (PP)	0,85	0,52	0,26	1,89	1,35	0,95	2,83	2,09	1,56
	SUV	2020	-0,56	-0,64	-0,70	-0,31	-0,44	-0,54	-0,09	-0,27	-0,39
		2050	-0,20	-0,34	-0,45	0,26	0,02	-0,15	0,67	0,34	0,11
		2050 (PP)	0,31	0,08	-0,11	1,06	0,67	0,38	1,72	1,20	0,82

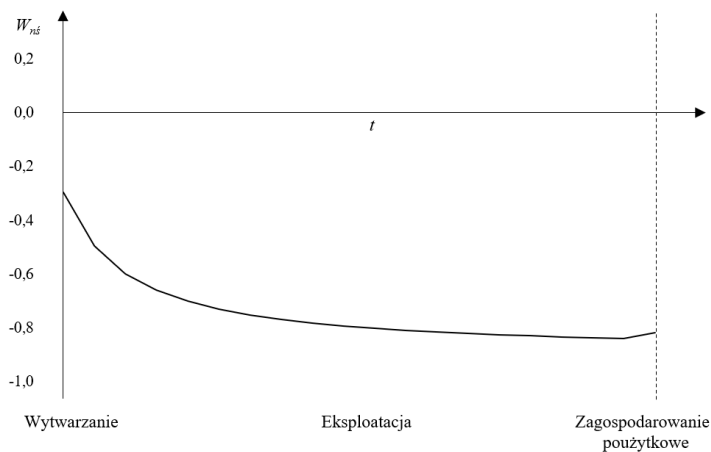
Najwyższą wartość wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji GHG w cyklu istnienia, w przypadku gdy pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi ICEV zasilany CNG, zauważono także analogicznie dla aut z segmentu SUV zarejestrowanych w roku 2020, porównywanych z akumulatorowymi samochodami elektrycznymi z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego (P_N), i wynosiła ona 5,23 (tab. 4.12). Kształtowanie się wartości wskaźnika w czasie dla ocenianych pojazdów zaprezentowano na rysunku 4.87.



Rys. 4.87. Zmiana wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi ICEV zasilany CNG, z segmentu SUV, zarejestrowany w roku 2020, a pojazd nowy (P_N) – BEV, z segmentu A i B, który ma zostać zarejestrowany w roku 2050 i będzie spełniał główne założenia Porozumienia paryskiego

Maksymalną wartość wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi PHEV zasilany benzyną, odnotowano dla samochodów z segmentu C, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego, porównywanych z autami z silnikami spalinowymi zasilanymi benzyną z segmentu SUV zarejestrowanymi w roku 2020 (P_N), i wynosiła ona -0,82 (tab. 4.13). Kształtowanie się wartości wskaźnika w czasie dla analizowanych pojazdów zaprezentowano na rysunku 4.88.

Minimalną wartość wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów szklarniowych w cyklu istnienia, w przypadku gdy pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi PHEV zasilany benzyną, zauważono natomiast dla aut z segmentu SUV zarejestrowanych w roku 2020, porównywanych z akumulatorowymi samochodami elektrycznymi z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego (P_N) i wynosiła ona 4,26 (tab. 4.13). Kształtowanie się wartości wskaźnika w czasie dla rozpatrywanych pojazdów zaprezentowano na rysunku 4.89.



Rys. 4.88. Zmiana wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi PHEV zasilany benzyną, z segmentu C, który ma zostać zarejestrowany w roku 2050 i będzie spełniał główne założenia Porozumienia paryskiego, a pojazd nowy (P_N) – ICEV zasilany benzyną, z segmentu SUV, zarejestrowany w roku 2020

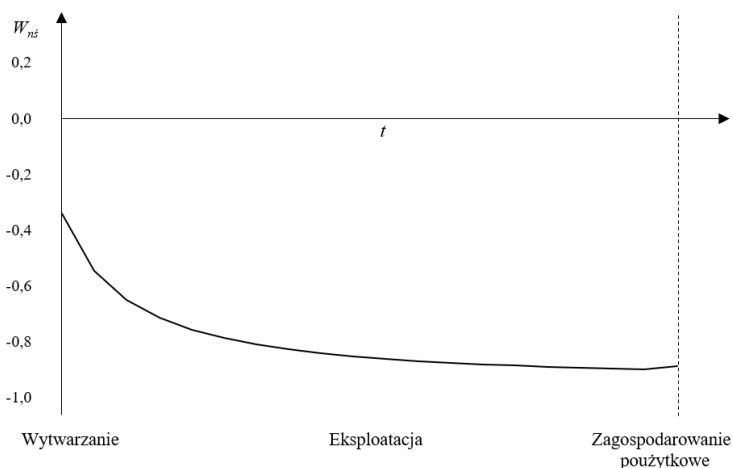


Rys. 4.89. Zmiana wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi PHEV zasilany benzyną, z segmentu SUV, zarejestrowany w roku 2020, a pojazd nowy (P_N) – BEV, z segmentów A i B, który ma zostać zarejestrowany w roku 2050 i będzie spełniał główne założenia Porozumienia paryskiego

Tab. 4.13. Wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklach istnienia rozważanych pojazdów, gdzie pojazd konwencjonalny (P_k) stanowi PHEV zasilany benzyną

			P_k : PHEV benzyna					
			C			SUV		
			2020	2050	2050 (PP)	2020	2050	2050 (PP)
P_N :								
ICEV benzyna	A i B	2020	-0,11	-0,44	-0,60	0,29	-0,21	-0,45
		2050	0,06	-0,33	-0,53	0,54	-0,05	-0,33
		2050 (PP)	0,41	-0,11	-0,37	1,04	0,26	-0,12
	C	2020	-0,43	-0,64	-0,75	-0,18	-0,49	-0,65
		2050	-0,31	-0,57	-0,69	-0,01	-0,39	-0,57
		2050 (PP)	-0,08	-0,42	-0,59	0,33	-0,18	-0,43
	SUV	2020	-0,59	-0,74	-0,82	-0,41	-0,64	-0,75
		2050	-0,50	-0,69	-0,78	-0,28	-0,56	-0,69
		2050 (PP)	-0,34	-0,58	-0,71	-0,04	-0,41	-0,59
ICEV olej napędowy	A i B	2020	0,04	-0,35	-0,54	0,50	-0,07	-0,35
		2050	0,29	-0,18	-0,42	0,88	0,15	-0,19
		2050 (PP)	0,85	0,17	-0,17	1,69	0,66	0,16
	C	2020	-0,33	-0,58	-0,70	-0,03	-0,40	-0,58
		2050	-0,16	-0,47	-0,62	0,22	-0,25	-0,47
		2050 (PP)	0,23	-0,22	-0,45	0,78	0,10	-0,23
	SUV	2020	-0,56	-0,72	-0,80	-0,36	-0,60	-0,72
		2050	-0,44	-0,64	-0,75	-0,18	-0,50	-0,65
		2050 (PP)	-0,17	-0,48	-0,63	0,20	-0,26	-0,48
ICEV CNG	A i B	2020	0,21	-0,24	-0,46	0,75	0,08	-0,24
		2050	0,47	-0,07	-0,35	1,13	0,31	-0,08
		2050 (PP)	0,77	0,12	-0,21	1,57	0,58	0,11
	C	2020	-0,23	-0,51	-0,66	0,12	-0,31	-0,52
		2050	-0,05	-0,40	-0,58	0,38	-0,15	-0,41
		2050 (PP)	0,15	-0,28	-0,49	0,66	0,02	-0,28
	SUV	2020	-0,42	-0,63	-0,74	-0,16	-0,48	-0,64
		2050	-0,28	-0,54	-0,68	0,05	-0,35	-0,55
		2050 (PP)	-0,13	-0,45	-0,61	0,26	-0,22	-0,46
PHEV benzyna	C	2020	x	-0,37	-0,55	0,45	-0,11	-0,37
		2050	0,58	x	-0,29	1,30	0,41	-0,01
		2050 (PP)	1,24	0,42	x	2,26	1,00	0,40
	SUV	2020	-0,31	-0,56	-0,69	x	-0,38	-0,57
		2050	0,12	-0,29	-0,50	0,62	x	-0,30
		2050 (PP)	0,60	0,01	-0,29	1,32	0,43	x
BEV	A i B	2020	0,62	0,02	-0,28	1,35	0,45	0,01
		2050	1,71	0,71	0,21	2,93	1,42	0,69
		2050 (PP)	2,63	1,29	0,62	4,26	2,24	1,27
	C	2020	0,16	-0,26	-0,48	0,69	0,04	-0,27
		2050	1,17	0,37	-0,03	2,15	0,94	0,36
		2050 (PP)	1,93	0,85	0,30	3,24	1,61	0,83
	SUV	2020	-0,18	-0,48	-0,63	0,19	-0,27	-0,49
		2050	0,53	-0,03	-0,32	1,22	0,37	-0,04
		2050 (PP)	1,04	0,29	-0,09	1,96	0,82	0,28
FCEV	C	2020	-0,22	-0,50	-0,65	0,14	-0,30	-0,51
		2050	0,39	-0,12	-0,38	1,01	0,24	-0,13
		2050 (PP)	1,23	0,41	-0,01	2,24	0,99	0,40
	SUV	2020	-0,47	-0,67	-0,76	-0,23	-0,53	-0,67
		2050	-0,03	-0,39	-0,57	0,41	-0,13	-0,39
		2050 (PP)	0,59	0,00	-0,29	1,30	0,42	-0,01

Najniższą wartość wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji GHG w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi BEV, odnotowano dla samochodów z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego, porównywanych z autami z silnikami spalinowymi zasilanymi benzyną z segmentu SUV zarejestrowanymi w roku 2020 (P_N), i wynosiła ona $-0,89$ (tab. 4.14). Kształtowanie się wartości wskaźnika w czasie dla rozważanych pojazdów zaprezentowano na rysunku 4.90.



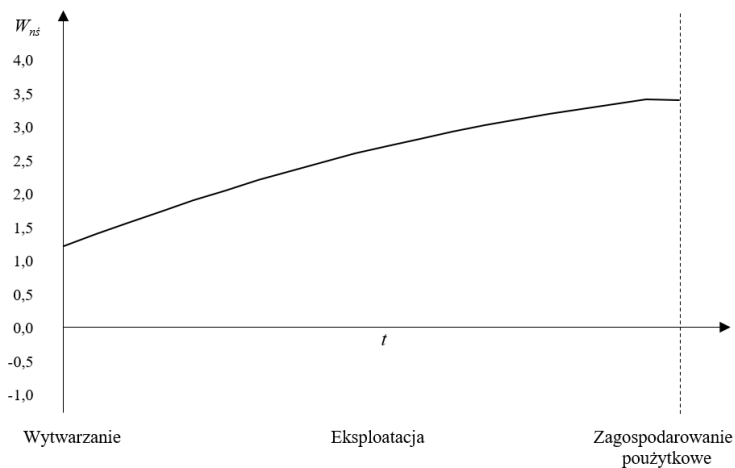
Rys. 4.90. Zmiana wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi BEV, z segmentów A i B, który ma zostać zarejestrowany w roku 2050 i będzie spełniał główne założenia Porozumienia paryskiego, a pojazd nowy (P_N) – ICEV zasilany benzyną, z segmentu SUV, zarejestrowany w roku 2020

Najwyższą wartość wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, w przypadku gdy pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi BEV, zauważono dla aut z segmentu SUV zarejestrowanych w roku 2020, porównywanych z BEV z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego (P_N), i wynosiła ona $3,41$ (tab. 4.14). Kształtowanie się wartości wskaźnika w czasie dla ocenianych pojazdów zaprezentowano na rysunku 4.91.

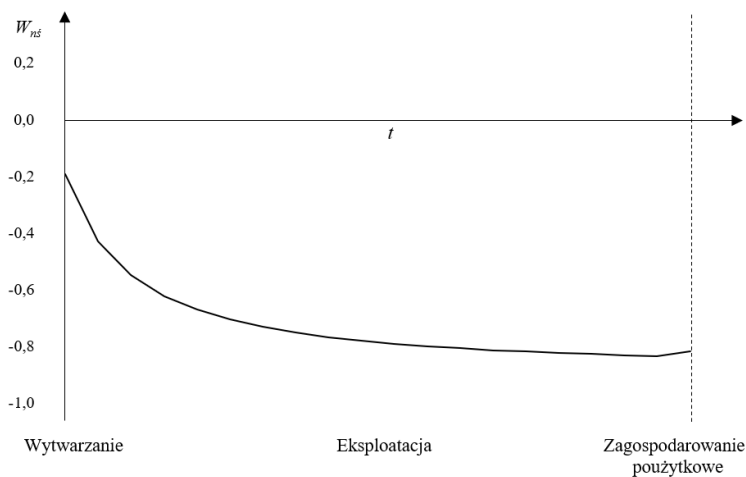
Maksymalną wartość wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów szklarniowych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi z kolei FCEV, odnotowano dla samochodów z segmentu C, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego, porównywanych z autami z silnikami spalinowymi zasilanymi benzyną z segmentu SUV zarejestrowanymi w roku 2020 (P_N), i wynosiła ona $-0,82$ (tab. 4.15). Kształtowanie się wartości wskaźnika w czasie dla analizowanych pojazdów zaprezentowano na rysunku 4.92.

Tab. 4.14. Wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklach istnienia rozważanych pojazdów, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi BEV

			P_K : BEV								
			A i B			C			SUV		
			2020	2050	2050 (PP)	2020	2050	2050 (PP)	2020	2050	2050 (PP)
P_K :			2020	2050	2050 (PP)	2020	2050	2050 (PP)	2020	2050	2050 (PP)
ICEV benzyna	A i B	2020	-0,45	-0,67	-0,76	-0,24	-0,59	-0,70	0,08	-0,42	-0,57
		2050	-0,34	-0,61	-0,71	-0,09	-0,51	-0,64	0,29	-0,30	-0,48
		2050 (PP)	-0,13	-0,48	-0,61	0,21	-0,35	-0,52	0,71	-0,08	-0,31
	C	2020	-0,65	-0,79	-0,84	-0,51	-0,74	-0,81	-0,31	-0,63	-0,72
		2050	-0,58	-0,75	-0,81	-0,41	-0,68	-0,77	-0,17	-0,55	-0,66
		2050 (PP)	-0,43	-0,66	-0,75	-0,21	-0,58	-0,69	0,11	-0,40	-0,55
	SUV	2020	-0,75	-0,85	-0,89	-0,65	-0,81	-0,86	-0,50	-0,73	-0,80
		2050	-0,69	-0,82	-0,86	-0,57	-0,77	-0,83	-0,40	-0,68	-0,76
		2050 (PP)	-0,59	-0,76	-0,82	-0,43	-0,70	-0,77	-0,20	-0,57	-0,68
ICEV olej napędowy	A i B	2020	-0,36	-0,62	-0,71	-0,11	-0,52	-0,65	0,26	-0,32	-0,49
		2050	-0,20	-0,52	-0,64	0,11	-0,40	-0,56	0,57	-0,15	-0,37
		2050 (PP)	0,14	-0,32	-0,49	0,59	-0,15	-0,37	1,25	0,21	-0,09
	C	2020	-0,59	-0,75	-0,82	-0,43	-0,69	-0,77	-0,19	-0,56	-0,67
		2050	-0,48	-0,69	-0,77	-0,28	-0,61	-0,71	0,02	-0,45	-0,59
		2050 (PP)	-0,24	-0,55	-0,66	0,05	-0,43	-0,58	0,49	-0,20	-0,40
	SUV	2020	-0,73	-0,84	-0,88	-0,62	-0,80	-0,85	-0,46	-0,71	-0,78
		2050	-0,65	-0,79	-0,84	-0,51	-0,74	-0,81	-0,31	-0,63	-0,72
		2050 (PP)	-0,49	-0,69	-0,77	-0,29	-0,62	-0,72	0,01	-0,46	-0,60
ICEV CNG	A i B	2020	-0,25	-0,55	-0,67	0,04	-0,44	-0,59	0,47	-0,21	-0,41
		2050	-0,09	-0,46	-0,60	0,26	-0,32	-0,50	0,79	-0,04	-0,28
		2050 (PP)	0,09	-0,34	-0,51	0,52	-0,18	-0,39	1,16	0,16	-0,13
	C	2020	-0,52	-0,71	-0,79	-0,34	-0,64	-0,74	-0,06	-0,50	-0,62
		2050	-0,41	-0,65	-0,74	-0,18	-0,56	-0,68	0,15	-0,38	-0,54
		2050 (PP)	-0,29	-0,58	-0,68	-0,02	-0,47	-0,61	0,39	-0,25	-0,44
	SUV	2020	-0,64	-0,79	-0,84	-0,50	-0,73	-0,80	-0,29	-0,62	-0,71
		2050	-0,55	-0,73	-0,80	-0,38	-0,67	-0,75	-0,12	-0,53	-0,65
		2050 (PP)	-0,46	-0,68	-0,76	-0,25	-0,60	-0,70	0,06	-0,43	-0,57
PHEV benzyna	C	2020	-0,38	-0,63	-0,72	-0,14	-0,54	-0,66	0,22	-0,35	-0,51
		2050	-0,02	-0,42	-0,56	0,36	-0,27	-0,46	0,93	0,04	-0,22
		2050 (PP)	0,39	-0,17	-0,38	0,93	0,03	-0,23	1,73	0,47	0,10
	SUV	2020	-0,57	-0,75	-0,81	-0,41	-0,68	-0,76	-0,16	-0,55	-0,66
		2050	-0,31	-0,59	-0,69	-0,04	-0,48	-0,62	0,36	-0,27	-0,45
		2050 (PP)	-0,01	-0,41	-0,56	0,37	-0,26	-0,45	0,95	0,05	-0,22
BEV	A i B	2020	x	-0,40	-0,55	0,39	-0,25	-0,45	0,97	0,06	-0,21
		2050	0,67	x	-0,25	1,33	0,25	-0,07	2,29	0,77	0,33
		2050 (PP)	1,24	0,34	x	2,12	0,67	0,24	3,41	1,37	0,78
	C	2020	-0,28	-0,57	-0,68	x	-0,46	-0,60	0,42	-0,24	-0,43
		2050	0,34	-0,20	-0,40	0,87	x	-0,26	1,64	0,42	0,06
		2050 (PP)	0,81	0,08	-0,19	1,51	0,35	x	2,56	0,91	0,43
	SUV	2020	-0,49	-0,70	-0,77	-0,29	-0,62	-0,72	x	-0,46	-0,60
		2050	-0,06	-0,44	-0,58	0,31	-0,30	-0,48	0,86	x	-0,25
		2050 (PP)	0,26	-0,25	-0,44	0,75	-0,06	-0,30	1,48	0,33	x
FCEV	C	2020	-0,52	-0,71	-0,78	-0,33	-0,64	-0,73	-0,05	-0,49	-0,62
		2050	-0,14	-0,49	-0,62	0,19	-0,36	-0,53	0,69	-0,09	-0,32
		2050 (PP)	0,38	-0,18	-0,38	0,92	0,03	-0,24	1,72	0,46	0,09
	SUV	2020	-0,67	-0,80	-0,85	-0,55	-0,76	-0,82	-0,36	-0,65	-0,74
		2050	-0,40	-0,64	-0,73	-0,17	-0,55	-0,67	0,18	-0,37	-0,52
		2050 (PP)	-0,02	-0,41	-0,56	0,36	-0,27	-0,46	0,93	0,04	-0,22



Rys. 4.91. Zmiana wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi BEV, z segmentu SUV, zarejestrowany w roku 2020, a pojazd nowy (P_N) – BEV, z segmentów A i B, który ma zostać zarejestrowany w roku 2050 i będzie spełniał główne założenia Porozumienia paryskiego



Rys. 4.92. Zmiana wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi FCEV, z segmentu C, który ma zostać zarejestrowany w roku 2050 i będzie spełniał główne założenia Porozumienia paryskiego, a pojazd nowy (P_N) – ICEV zasilany benzyną, z segmentu SUV, zarejestrowany w roku 2020

Tab. 4.15. Wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklach istnienia rozważanych pojazdów, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi FCEV

		P_K : FCEV						
		C			SUV			
P_N :		2020	2050	2050 (PP)	2020	2050	2050 (PP)	
ICEV benzyna	A i B	2020	0,13	-0,36	-0,60	0,68	-0,09	-0,44
		2050	0,36	-0,23	-0,52	1,01	0,10	-0,33
		2050 (PP)	0,80	0,02	-0,37	1,67	0,45	-0,11
	C	2020	-0,28	-0,59	-0,75	0,07	-0,42	-0,64
		2050	-0,13	-0,51	-0,69	0,30	-0,29	-0,57
		2050 (PP)	0,17	-0,34	-0,59	0,73	-0,06	-0,42
	SUV	2020	-0,48	-0,71	-0,82	-0,23	-0,58	-0,74
		2050	-0,37	-0,64	-0,78	-0,06	-0,49	-0,69
		2050 (PP)	-0,16	-0,52	-0,70	0,25	-0,32	-0,58
ICEV olej napędowy	A i B	2020	0,32	-0,25	-0,54	0,96	0,07	-0,35
		2050	0,65	-0,07	-0,42	1,44	0,33	-0,19
		2050 (PP)	1,36	0,33	-0,17	2,50	0,91	0,17
	C	2020	-0,15	-0,52	-0,70	0,26	-0,31	-0,58
		2050	0,07	-0,39	-0,62	0,59	-0,13	-0,47
		2050 (PP)	0,57	-0,12	-0,45	1,32	0,27	-0,23
	SUV	2020	-0,43	-0,68	-0,80	-0,16	-0,54	-0,72
		2050	-0,28	-0,59	-0,75	0,07	-0,42	-0,64
		2050 (PP)	0,05	-0,40	-0,63	0,56	-0,15	-0,48
ICEV CNG	A i B	2020	0,54	-0,13	-0,46	1,28	0,25	-0,24
		2050	0,87	0,06	-0,34	1,78	0,51	-0,07
		2050 (PP)	1,26	0,28	-0,21	2,35	0,83	0,12
	C	2020	-0,02	-0,44	-0,65	0,46	-0,20	-0,51
		2050	0,21	-0,32	-0,57	0,79	-0,02	-0,40
		2050 (PP)	0,46	-0,17	-0,49	1,17	0,18	-0,28
	SUV	2020	-0,26	-0,58	-0,74	0,10	-0,40	-0,63
		2050	-0,08	-0,48	-0,68	0,37	-0,25	-0,54
		2050 (PP)	0,11	-0,37	-0,61	0,65	-0,10	-0,45
PHEV benzyna	C	2020	0,28	-0,28	-0,55	0,89	0,03	-0,37
		2050	1,02	0,14	-0,29	1,99	0,63	0,00
		2050 (PP)	1,86	0,62	0,01	3,24	1,31	0,41
	SUV	2020	-0,12	-0,50	-0,69	0,30	-0,29	-0,57
		2050	0,43	-0,19	-0,50	1,12	0,15	-0,29
		2050 (PP)	1,04	0,15	-0,28	2,03	0,65	0,01
BEV	A i B	2020	1,07	0,17	-0,27	2,06	0,67	0,02
		2050	2,45	0,95	0,21	4,12	1,79	0,71
		2050 (PP)	3,63	1,61	0,63	5,86	2,74	1,29
	C	2020	0,48	-0,16	-0,48	1,20	0,20	-0,27
		2050	1,77	0,56	-0,03	3,11	1,24	0,37
		2050 (PP)	2,73	1,11	0,31	4,53	2,02	0,84
	SUV	2020	0,05	-0,41	-0,63	0,55	-0,15	-0,48
		2050	0,95	0,10	-0,31	1,89	0,58	-0,04
		2050 (PP)	1,60	0,47	-0,09	2,86	1,11	0,29
FCEV	C	2020	x	-0,44	-0,65	0,48	-0,19	-0,51
		2050	0,77	x	-0,38	1,63	0,43	-0,12
		2050 (PP)	1,85	0,61	x	3,22	1,30	0,41
	SUV	2020	-0,33	-0,62	-0,76	x	-0,45	-0,67
		2050	0,24	-0,30	-0,57	0,83	x	-0,39
		2050 (PP)	1,02	0,14	-0,29	2,00	0,64	x

Minimalną wartość wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji GHG w cyklu istnienia, w przypadku gdy pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi FCEV, zauważono natomiast dla aut z segmentu SUV zarejestrowanych w roku 2020, porównywanych z BEV z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego (P_N), i wynosiła ona 5,86 (tab. 4.15). Kształtowanie się wartości wskaźnika w czasie dla rozpatrywanych pojazdów zaprezentowano na rysunku 4.93.



Rys. 4.93. Zmiana wartości wskaźnika następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia, gdzie pojazd konwencjonalny (P_K) stanowi FCEV, z segmentu SUV, zarejestrowany w roku 2020, a pojazd nowy (P_N) – BEV, z segmentu A i B, który ma zostać zarejestrowany w roku 2050 i będzie spełniał główne założenia Porozumienia paryskiego

4.12. Podsumowanie

Sposób, w jaki środki transportu samochodowego oddziałują na otoczenie, jest bardzo złożony, a ocena środowiskowych skutków tego wpływu – skomplikowana. W związku z tym niezbędnym staje się podejmowanie działań w kierunku poszukiwania metod oceny charakteryzujących się kompleksowym podejściem, nietraktujących pojazdów jak wyizolowanych obiektów, lecz rozpatrujących je w ramach systemu, którego elementy stanowią również ich zakłady wytwórcze, materiały eksploatacyjne, cykle paliwowe i energetyczne, zakłady zagospodarowania użytkowego oraz wszystkie inne związane z nimi podmioty oddziaływania na otoczenie. Jedną z tego typu metod jest zaproponowana w niniejszej monografii autorska metodyka analiz, w tym opracowany wskaźnik następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu (W_{ns}). Za jeden z jej atutów można uznać wykorzystanie kwantyfikacji wyników dociekań. Wypełnia ona lukę pomiędzy ogólnymi, bardzo trudnymi do wykorzystania przez praktyków raportami LCA

a wyjątkowo szczegółowymi, drogimi opracowaniami przygotowywanymi na zlecenia koncernów samochodowych. Może również stanowić podstawę do przygotowania praktycznego przewodnika z obszaru analiz cyklu istnienia środków transportu samochodowego oraz zrównoważonego zarządzania rozwojem tego sektora.

5. Podsumowanie i wnioski

W ostatnich latach coraz częściej podnoszona jest problematyka niebezpieczeństw związanych z obniżającą się jakością środowiska. W efekcie podpisania Porozumienia paryskiego prawie dwieście krajów przyjęło pierwsze powszechne i prawnie wiążące zobowiązanie w sprawie globalnego klimatu, określając ogólnosiwiatowy plan działań na rzecz łagodzenia zmian klimatycznych. W przypadku Europy cel osiągnięcia neutralności pod względem emisji dwutlenku węgla został wyznaczony na rok 2050. Główną przyczyną tego rodzaju problemów środowiskowych jest powszechne stosowanie paliw kopalnych do celów energetycznych. Światowe zapotrzebowanie na energię pierwotną wynosi około 15 mld ton ekwiwalentu ropy naftowej (toe), z czego ok. 80% jest pokrywane przez paliwa kopalne. Sektor transportu zużywa ok. 3 mld ton toe, co odpowiada ok. 20% światowego zapotrzebowania na energię. Współcześnie popyt ten jest prawie całkowicie zaspokajany przez paliwa kopalne (ok. 95%) oraz zdominowany przez produkty ropopochodne (ok. 90%). Ponadto obserwuje się stały wzrost zużycia paliw w transporcie oraz ciągle zwiększanie się liczby eksploatowanych pojazdów. Transport z jednej strony stanowi trzon transformacji energetycznej, ale z drugiej – jest jednak jedynym sektorem, w którym odnotowano wzrost, a nie redukcję emisji gazów cieplarnianych. W szczególności pojazdy lekkie, w tym samochody osobowe, reprezentują dużą część (ok. 50%) zapotrzebowania na energię w obszarze transportu. Zastosowanie alternatywnych źródeł energii może odegrać strategiczną rolę w dekarbonizacji sektora oraz zmniejszenia jego innych destrukcyjnych oddziaływań na otoczenie. Celem sprawdzenia poziomu negatywnych następstw środowiskowych generowanych przez różnego rodzaju pojazdy koniecznym staje się opracowanie nowych metod umożliwiających ocenę cyklu istnienia środków transportu samochodowego [36, 187, 281].

Wnioski merytoryczne

Postępowanie analityczne zrealizowane w ramach niniejszej monografii umożliwiło sformułowanie wniosków o charakterze merytorycznym, które ściśle korespondują z celem badań.

Zasadniczy cel opracowania zrealizowano przez opracowanie metody środowiskowej oceny cyklu istnienia wybranych środków transportu samochodowego. Dla jego osiągnięcia:

- przeprowadzono analizę aktualnego stanu wiedzy oraz techniki z obszaru współczesnych wyzwań dla rozwoju transportu samochodowego. W jej ramach omówiono problematykę bezpieczeństwa energetycznego i ekologicznego, rozważono kwestie teoretyczne oraz praktyczne związane z transportem 4.0, mobilnością 4.0 i pojazdami użytkowymi 4.0, przybliżono zagadnienie zrównoważonego rozwoju sektora transportu oraz określono determinanty warunkujące jego efektywną transformację (rozdział 2);

- przybliżono autorską metodologię środowiskowej oceny cyklu istnienia środków transportu samochodowego, w której ramach opracowano wskaźnik następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu (W_{ns}) (rozdział 3);
- zastosowano autorską metodę badań na wybranych przykładach i omówiono otrzymane wyniki. Ocenie poddano pojazdy z segmentu A i B, C oraz SUV wyposażone w odmienne rodzaje układów napędowych (ICEV zasilane benzyną, olejem napędowym i CNG, PHEV zasilane benzyną, BEV oraz FCEV). Uwzględniono dwa scenariusze zagospodarowania poużytkowego tworzywa, materiałów i elementów – składowanie na wysypisku odpadów lub procesy recyklingu. Przyjęto dwa horyzonty czasowe – jeden dla samochodów zarejestrowanych w roku 2020, a drugi dla tych, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Dokonano także analizy cykli paliwowych i energetycznych wszystkich rozważanych pojazdów (rozdział 4);
- na podstawie uzyskanych rezultatów określono obszary, które będą wymagały zastosowania działań doskonalących, minimalizujących poziom szkodliwych oddziaływań w konkretnych aspektach cyklu istnienia pojazdów oraz sformułowano kluczowe wnioski i zalecenia w obszarze próśrodkowiskowego, zrównoważonego, efektywnego rozwoju sektora transportu samochodowego (rozdział 5).

Na podstawie wyników otrzymanych dzięki zastosowaniu autorskiej metody środowiskowej oceny cyklu istnienia wybranych środków transportu samochodowego odnotowano następujące zależności:

1. Wszystkie pojazdy, zarówno z segmentu A, B, C, jak i SUV, zarejestrowane w roku 2020 wywierają istotnie większy szkodliwy wpływ na otoczenie w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 (analizy z wykorzystaniem modelu ReCiPe 2016, nieuwzględniające cykli paliwowych i energetycznych). Widoczne jest to m.in. w obszarze emisji gazów cieplarnianych (model IPCC 2021, wskaźnik następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu W_{ns}), energochłonności (model CED V1.11), zakwaszenia i eutrofizacji środowiska (model CML-IA baseline), emisji do atmosfery substancji o działaniu kancerogennym, emisji do gleby metali ciężkich oraz zmiany sposobu użytkowania gruntów (model Ecological Scarcity 2021).
2. Najwięcej negatywnych oddziaływań odnotowano w kontekście wpływu rozważanych samochodów na zdrowie człowieka, natomiast najmniej – w odniesieniu do problemu wyczerpywania zasobów surowców (z pominięciem cykli paliwowych i energetycznych). Maksymalny poziom łącznych destrukcyjnych wpływów odnotowano dla cyklu istnienia akumulatorowych pojazdów elektrycznych (BEV) z segmentu SUV, zakładającego ich składowanie po zakończeniu eksploatacji. Recykling umożliwiłby istotne ograniczenie niebezpiecznych oddziaływań w perspektywie całego cyklu istnienia tych pojazdów (analizy z wykorzystaniem modelu ReCiPe 2016).

3. Wśród substancji cechujących się szkodliwym wpływem na zdrowie człowieka w cyklach istnienia wszystkich ocenianych samochodów maksymalnym poziomem emisji wyróżniały się: chrom (VI), ditlenek węgla, ditlenek siarki, cynk, drobne cząstki stałe (PM), tlenek azotu, arsen i metan (badania z zastosowaniem modelu ReCiPe 2016).
4. Do kategorii wpływu o najwyższym poziomie negatywnych następstw środowiskowych dla otoczenia, zidentyfikowanych w cyklach istnienia wszystkich analizowanych pojazdów, zaliczyć można: procesy powodujące uszczuplenie zasobów wody oddziałujące na zdrowie człowieka i ekosystemy lądowe, emisje substancji powodujących tworzenie się drobnych cząstek stałych (PM), substancji toksycznych o działaniu nowotworowym dla człowieka oraz substancji powodujących globalne ocieplenie (ocena z wykorzystaniem modelu ReCiPe 2016, nieuwzględniająca cykli paliwowych i energetycznych).
5. Cykle istnienia samochodów ze wszystkich rozpatrywanych segmentów (niezależnie od cykli paliwowych i energetycznych) zakładające ich formę zagospodarowania użytkowego w postaci składowania na wysypisku odpadów zamiast recyklingu powodują więcej destrukcyjnych następstw środowiskowych, w tym wyższy poziom emisji gazów szklarniowych, większą energochłonność, wyższy stopień zakwaszenia otoczenia, większe emisje do atmosfery substancji o działaniu nowotworowym, metali ciężkich do gleby oraz szersze zmiany sposobu użytkowania gruntów (analizy z zastosowaniem modeli ReCiPe 2016, IPCC 2021, CED V1.11, CML-IA baseline oraz Ecological Scarcity 2021).
6. Najwyższy poziom niebezpiecznych oddziaływań na otoczenie we wszystkich ocenianych obszarach oraz dla każdego z analizowanych układów napędowych (ICEV zasilane benzyną, olejem napędowym i CNG, PHEV zasilane benzyną, BEV oraz FCEV) cechuje pojazdy z segmentu SUV, których tworzywa, materiały i elementy zostałyby przeznaczone do składowania na wysypisku odpadów po zakończeniu eksploatacji. Zastosowanie procesów recyklingu spowodowałoby wyraźne zmniejszenie wielkości szkodliwych wpływów w perspektywie ich całego cyklu istnienia (badania z wykorzystaniem modeli ReCiPe 2016, IPCC 2021, CED V1.11, CML-IA baseline oraz Ecological Scarcity 2021, nieuwzględniające cykli paliwowych i energetycznych).
7. Maksymalnym poziomem negatywnych oddziaływań na środowisko dla każdego z rozpatrywanych obszarów oraz we wszystkich rozważanych segmentach (A i B, C oraz SUV) wyróżniają się samochody BEV, których tworzywa, materiały i elementy byłyby składowane na wysypisku. Wykorzystanie recyklingu skutkowało by jednak istotnym ograniczeniem poziomu destrukcyjnych wpływów w perspektywie całego ich cyklu istnienia (ocena z zastosowaniem modeli ReCiPe 2016, IPCC 2021, CED V1.11, CML-IA baseline oraz Ecological Scarcity 2021, nieuwzględniająca cykli paliwowych i energetycznych).

8. Cykle istnienia pojazdów ICEV cechował zbliżony poziom niebezpiecznego oddziaływania na środowisko, zarówno w zakresie emisji gazów cieplarnianych, energochłonności, eutrofizacji otoczenia, emisji do atmosfery substancji o działaniu nowotworczym, emisji do gleby metali ciężkich oraz zmiany sposobu użytkowania gruntów (analizy z wykorzystaniem modeli ReCiPe 2016, IPCC 2021, CED V1.11, CML-IA baseline oraz Ecological Scarcity 2021, nieuwzględniające cykli paliwowych i energetycznych).
9. Spośród procesów powiązanych z pozyskiwaniem energii, zidentyfikowanych w cyklach istnienia analizowanych samochodów, cechujących się najwyższym poziomem szkodliwych następstw środowiskowych dla otoczenia można wyróżnić procesy związane z wykorzystaniem nieodnawialnych paliw kopalnych, a w szczególności procesy wykorzystania gazu ziemnego, ropy naftowej oraz węgla kamiennego (badania z zastosowaniem modelu CED V1.11).
10. Maksymalnym poziomem emisji wśród substancji o charakterze zakwaszającym, w cyklach istnienia wszystkich rozważanych pojazdów, cechowały się: ditlenek siarki, tlenek azotu, amoniak oraz tritlenek siarki. Z kolei wśród związków powodujących pogłębianie się eutrofizacji środowiska, najwyższym poziomem emisji charakteryzowały się: fosforany, azotany oraz fosfor (ocena z wykorzystaniem modelu CML-IA baseline).
11. W przypadku związków chemicznych o nowotworczym wpływie na człowieka najwyższym poziomem emisji do atmosfery w cyklach istnienia analizowanych samochodów wyróżniały się: benzo(a)piren, 2,3,7,8-tetrachlorodibenzodioxyna (TCDD), benzen, chloroeten oraz wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA). Natomiast maksymalny poziom emisji spośród metali ciężkich odnotowano dla: chromu (VI), cynku, miedzi, niklu, kadmu oraz ołowiu (analizy z zastosowaniem modelu Ecological Scarcity 2021).
12. Wśród procesów związanych ze zmianą sposobu użytkowania gruntów o najwyższym poziomie negatywnych oddziaływań w cyklach istnienia wszystkich rozważanych pojazdów wyróżnić można procesy związane z: zajęciem gruntu przez wysypiska odpadów, zajęciem przez obszar wydobycia surowców mineralnych, zajęciem przez obszar przemysłowy, zajęciem przez place budowy, a w konsekwencji – obszar zabudowany oraz zajęciem gruntów rolnych i przeznaczeniem ich do innych celów niż uprawa roślin (badania z zastosowaniem modelu Ecological Scarcity 2021).
13. W przypadku wszystkich analizowanych segmentów samochodów (A i B, C oraz SUV) pojazdy zarejestrowane w roku 2020 cechują się wyższą emisją gazów szklarniowych zarówno podczas wytwarzania, jak i w swoich cyklach paliwowych/energetycznych, w porównaniu z tymi, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050. Spełnienie głównych założeń Porozumienia paryskiego spowodowałoby istotne ograniczenie rozpatrywanych emisji do otoczenia (ocena z wykorzystaniem modelu IPCC 2021 oraz wskaźnika następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu W_{ns}).

14. W każdym z analizowanych scenariuszy horyzontu czasowego we wszystkich ocenianych segmentach pojazdy ICEV zasilane benzyną przyczyniają się do wyższych emisji GHG w porównaniu z samochodami z innymi układami napędowymi (w zakresie cykli paliwowych). Najniższym łącznym poziomem emisji wyróżniają się natomiast pojazdy BEV (analizy z zastosowaniem modelu IPCC 2021).
15. W przypadku samochodów z silnikiem spalinowym zasilanych zarówno benzyną, olejem napędowym, jak i CNG etap TTW obejmujący emisje na skutek spalania paliw powoduje więcej emisji związków chemicznych skutkujących pogłębieniem efektu cieplarnianego w porównaniu z etapem WTT uwzględniającym produkcję tych rodzajów paliw (badania z wykorzystaniem modelu IPCC 2021).
16. Dla współczesnych hybrydowych pojazdów elektrycznych typu plug-in zasilanych benzyną etap WTT skutkuje większymi emisjami gazów szklarniowych w porównaniu z etapem TTW, jednak w perspektywie roku 2050 sytuacja ta ulegnie odwróceniu, jeżeli będą miały miejsce obecnie zakładane istotne zmiany w miksach energetycznych państw europejskich, uwzględniające m.in. zwiększenie udziału źródeł odnawialnych w produkcji energii (ocena z zastosowaniem modelu IPCC 2021).
17. Samochody BEV nie powodują emisji GHG w obszarze TTW, ponieważ są zasilane energią elektryczną. W perspektywie kolejnych 30 lat poziom emisji gazów cieplarnianych w zakresie ich WTT ulegnie obniżeniu, jeżeli zostaną wprowadzone w życie zakładane zmiany w europejskim miksie energetycznym (analizy z wykorzystaniem modelu IPCC 2021).
18. W przypadku pojazdów elektrycznych na ogniwa paliwowe, które mają zostać zarejestrowane w perspektywie najbliższych 30 lat, ograniczona zostanie ilość emitowanych gazów szklarniowych, ponieważ w tym okresie zakłada się istotne zwiększenie produkcji „zielonego” (wytwarzanego za pomocą elektrolizy opartej na energii odnawialnej) i „niebieskiego” wodoru (produkowanego z wykorzystaniem sekwestracji CO₂). Współcześnie prawie w całości pochodzi on z parowego reformingu gazu ziemnego („szary” wodór) lub zgazowania węgla („czarny” wodór) (badania z zastosowaniem modelu IPCC 2021).
20. Dla wszystkich ocenianych rodzajów układów napędowych (ICEV zasilane benzyną, olejem napędowym i CNG, PHEV zasilane benzyną, BEV oraz FCEV) samochody z segmentu A i B generują najmniej gazów cieplarnianych na etapie wytwarzania i eksploatacji (łącznie), z kolei te z segmentu SUV – najwięcej (ocena z wykorzystaniem modelu IPCC 2021 oraz wskaźnika następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu W_{ns}).
21. Eksploatacja wszystkich rozpatrywanych pojazdów z silnikiem spalinowym (zasilanych zarówno benzyną, olejem napędowym, jak i CNG) skutkuje wyższym poziomem emisji GHG w porównaniu z etapem ich wytwarzania (analizy z zastosowaniem modelu IPCC 2021).

22. Dla samochodów osobowych PHEV zasilanych benzyną zarejestrowanych w roku 2020 ich eksploatacja będzie w większym stopniu przyczyniała się do pogłębiania efektu cieplarnianego w porównaniu z etapem wytwarzania. W przypadku pojazdów, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później, poziom szkodliwych oddziaływań etapu wytwarzania i eksploatacji będzie porównywalny. Dla samochodów zarejestrowanych w roku 2050, ale spełniających podstawowe założenia Porozumienia paryskiego, etap wytwarzania będzie źródłem większej ilości emisji gazów cieplarnianych aniżeli etap eksploatacji (badania z wykorzystaniem modelu IPCC 2021).
23. W przypadku pojazdów BEV zarejestrowanych w 2020 roku na etapie wytwarzania i eksploatacji emitowana jest porównywalna ilość gazów szklarniowych. Dla samochodów, które mają zostać zarejestrowane 30 lat później, etap eksploatacji będzie przyczyniał się do istotnie mniejszej emisji ocenianych związków chemicznych w porównaniu z etapem wytwarzania (ocena z zastosowaniem modelu IPCC 2021).
24. Eksploatacja pojazdów FCEV zarejestrowanych w roku 2020 cechuje się większą ilością generowanych GHG niż tych emitowanych na etapie wytwarzania. Dla samochodów, które mają zostać zarejestrowane w 2050 roku, poziom emisji gazów szklarniowych będzie porównywalny dla etapu wytwarzania i eksploatacji. Z kolei pojazdy, które mają zostać zarejestrowane w tym samym roku, ale będą spełniały założenia Porozumienia paryskiego, będą wywierały więcej negatywnych oddziaływań w analizowanym zakresie podczas wytwarzania aniżeli w trakcie eksploatacji (analizy z wykorzystaniem modelu IPCC 2021).
25. Spośród wszystkich ocenianych samochodów ICEV zasilane benzyną z segmentu SUV, zarejestrowane w roku 2020, emitują łącznie największą ilość gazów szklarniowych (etap wytwarzania plus eksploatacja). Z kolei akumulatorowe pojazdy elektryczne z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050, spełniające kluczowe założenia Porozumienia paryskiego, będą generowały łącznie najmniejszą ilość GHG (badania z zastosowaniem modelu IPCC 2021 oraz wskaźnika następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu W_{ns}).
26. Wśród związków chemicznych powodujących pogłębienie efektu cieplarnianego najwyższym poziomem emisji w cyklach istnienia wszystkich ocenianych samochodów wyróżniały się: ditlenek węgla, metan, tetrafluorometan (CFC-14), tlenek diazotu, heksafluorek siarki, trifluorometan (HFC-23) oraz heksafluoroetan (HFC-116) (ocena z wykorzystaniem modelu IPCC 2021).
27. Najwyższą wartość wskaźnika następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu (W_{ns}) dla emisji gazów cieplarnianych odnotowano dla samochodów z silnikami spalinowymi zasilanymi benzyną z segmentu SUV zarejestrowanymi w roku 2020 (P_K), porównywanymi z akumulatorowymi pojazdami elektrycznymi z segmentu A i B, które mają zostać zarejestrowane w roku 2050 i będą spełniały główne założenia Porozumienia paryskiego (P_N) ($W_{ns} = 7,92$, co oznacza, że samochody BEV

będą emitowały o ok. 792% mniej gazów cieplarnianych aniżeli pojazdy ICEV, w perspektywie całego cyklu istnienia) (analizy z wykorzystaniem wskaźnika następstw środowiskowych w cyklu istnienia pojazdu W_{ns}).

Wnioski metodyczne

Zaprezentowane w niniejszej monografii postępowanie analityczne pozwoliło także na sformułowanie wniosków o charakterze metodycznym. Zrealizowanie przyjętego celu badawczego daje możliwość na uznanie słusznym zastosowania przyjętej autorskiej metody analiz i oceny jej jako poprawnej. Zaproponowana metodyka badawcza pozwoliła na identyfikację pozytywnych i negatywnych oddziaływań w stosunku do otoczenia, występujących w cyklach istnienia wybranych środków transportu samochodowego. Umożliwiło to zrealizowanie kompleksowej środowiskowej oceny cyklu istnienia, która może stanowić jedno z narzędzi mających na celu transformację sektora transportu zgodnie z koncepcją rozwoju zrównoważonego. Wykonalność przeprowadzenia oceny jest gwarantowana przez zgromadzenie danych ilościowych i jakościowych na temat rozpatrywanych środków transportu samochodowego. Analiza ma zastosowanie dla każdego etapu oraz całego cyklu istnienia, dzięki czemu pozwala m.in. na ekoprojektowanie pojazdów. Opracowana metoda umożliwi również wskazanie możliwości zmniejszenia negatywnych oraz zwiększenia pozytywnych wpływów na otoczenie środków transportu samochodowego.

Wnioski aplikacyjne

Uzyskane efekty badań mogą zostać wykorzystane w praktyczny sposób. Z tego względu sformułowano również wnioski o charakterze aplikacyjnym. Otrzymane wyniki mogą być zarówno wykorzystane przez podmioty projektujące, wytwarzające, eksploatujące oraz zagospodarowujące tworzywa, materiały, elementy i zespoły robocze środków transportu samochodowego, jak i infrastrukturę związaną z zasilającymi je paliwami i/lub energią. Mogą one także zostać skomercjalizowane, np. w formie usług doradczych przeznaczonych dla firm chcących zwiększyć swoją konkurencyjność na rynku, m.in. przez wprowadzenie innowacyjnych, bardziej efektywnych, przyjaznych dla środowiska wyrobów, wpisujących się w główne założenia zrównoważonego rozwoju. Stosunkowo prosta procedura pozwala na upowszechnienie tego typu rodzaju usług również w obszarze małych i średnich przedsiębiorstw.

Dzięki identyfikacji pozytywnych i negatywnych oddziaływań w cyklu istnienia środków transportu samochodowego możliwym stało się zaproponowanie sposobów zmniejszenia destrukcyjnych oraz zwiększenia konstruktywnych wpływów na otoczenie badanych pojazdów. W związku z tym w obszarze działań mających na celu prośrodowiskowy, zrównoważony, efektywny rozwój sektora transportu samochodowego sugeruje się przede wszystkim:

- podjęcie działań w obszarze zmniejszania materiało- i energochłonności oraz szkodliwej dla otoczenia emisyjności procesów związanych z wytwarzaniem, eksploatacją oraz zagospodarowaniem użytkowym środków transportu samochodowego;

- zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii w cyklach istnienia środków transportu samochodowego (w tym również podczas etapu eksploatacji pojazdów BEV i PHEV);
- prowadzenie prac w kierunku stworzenia bardziej prośrodowiskowych oraz opłacalnych pod względem ekonomicznym tworzyw, materiałów i elementów pojazdów, zachowujących odpowiednie parametry jakościowe, mechaniczne oraz techniczne do pełnienia danych ról w ich zespołach roboczych;
- modyfikowanie konstrukcji zarówno poszczególnych elementów, jak i całych zespołów roboczych w kierunku łatwiejszego oddzielania oraz prostej identyfikacji konkretnych materiałów, pod kątem ich późniejszego zagospodarowania poużytkowego (najlepiej z wykorzystaniem procesów recyklingu);
- kontynuację działań w zakresie opracowywania nowych, efektywnych ekologicznie, ekonomicznie i energetycznie metod pozyskiwania jak największej ilości surowców wtórnych, które mogą zostać poddane recyklingowi;
- prowadzenie dalszych prac nad zastosowaniem alternatywnych paliw oraz innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych układów napędowych środków transportu samochodowego, biorących pod uwagę fakt, że w cyklu istnienia pojazdów to etap eksploatacji stanowi dominujące źródło obciążenia otoczenia;
- zmniejszenie udziału w rynku pojazdów z silnikami spalinowymi na rzecz samochodów elektrycznych, w tym FCEV;
- kontynuacja prac mających na celu rozwój bardziej efektywnych akumulatorów, cechujących się dłuższym okresem eksploatacji, zbudowanych z łatwych do recyklingu materiałów;
- zwiększenie produkcji „zielonego” i „niebieskiego” oraz ograniczenie wykorzystywania „szarego” i „czarnego” wodoru do zasilania samochodów elektrycznych na ogniwa paliwowe;
- popularyzowanie idei badania i oceny pozytywnego oraz negatywnego oddziaływania na otoczenie środków transportu samochodowego w całym ich cyklu istnienia.

Cieszące się coraz większą popularnością w Europie auta hybrydowe nie są w stanie efektywnie pomagać w osiągnięciu celów Porozumienia paryskiego. Pojazdy PHEV emitują maksymalnie o 35–40% mniej gazów cieplarnianych w porównaniu z konwencjonalnymi samochodami spalinowymi. Wyłącznie pojazdy BEV i FCEV mogą doprowadzić do istotnej redukcji emisji gazów szklarniowych w nadchodzących latach. Najbardziej efektywne pod kątem obniżenia emisji GHG są akumulatorowe samochody elektryczne, jeżeli zostają zasilane energią pozyskiwaną ze źródeł odnawialnych. W takim przypadku cechują się o ok. 80% niższą emisją gazów cieplarnianych w całym cyklu istnienia w porównaniu ze swoimi odpowiednikami z napędem spalinowym. Emisje w cyklu istnienia pojazdów wodorowych różnią się przede wszystkim pod względem tego, w jaki sposób pozyskano wodór niezbędny do ich napędzania. W przypadku „szarego” i „czarnego” wodoru emisje gazów szklarniowych są mniejsze od tych generowanych przez pojazdy ICEV mak-

symalnie o 25%. Dzięki wykorzystywaniu „niebieskiego” wodoru jest to już blisko 70%, a dla wodoru „zielonego” – około 80%. Podstawowy problem stanowi jednak energochłonność produkcji, ponieważ w tego typu procesach zapotrzebowanie na energię jest około trzykrotnie wyższe w porównaniu z użytkowaniem energii elektrycznej w samochodach BEV.

Poszukiwanie rozwiązania optymalnego środka transportu samochodowego będzie zatem polegało przede wszystkim na znalezieniu właściwej konstrukcji pojazdu umożliwiającej uzyskanie pożądanego jakościowo produktu i wyznaczeniu parametrów procesów gwarantujących najniższe nakłady energetyczne oraz materiałowe na każdym etapie jego cyklu istnienia.

Literatura

- [1] Abdallah K.B., Belloumi M., de Wolf D., 2015, *International comparisons of energy and environmental efficiency in the road transport sector*, “Energy”, 93(12), 2087–2101.
- [2] Abdel-Shafy H.I., Mansour M.S.M., 2016, *A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation*, “Egyptian Journal of Petroleum”, 25(1), 107–123.
- [3] Acero A.P., Rodríguez C., Ciroth A., 2016, *Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories*, GreenDelta GmbH, Berlin.
- [4] Adriano D.C., 2001, *Trace Elements in Terrestrial Environments*, Springer, New York.
- [5] Ahmadi L., Young S.B., Fowler M., Fraser R.A., Achachlouei M.A., 2015, *A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems*, “The International Journal of Life Cycle Assessment”, 22(1), 1–14.
- [6] Ali H., Khan E., Ilahi I., 2019, *Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation*, “Journal of Chemistry”, 14, 1–14.
- [7] Alipour S., Karbassi A.R., Abbaspour M., Saffarzadeh M., Moharamnejad N., 2011, *Energy and Environmental Issues in Transport Sector*, “International Journal of Environmental Research”, 5(1), 213–224.
- [8] Andrew R.M., 2020, *A comparison of estimates of global carbon dioxide emissions from fossil carbon sources*, “Earth System Science Data”, 12(2), 1437–1465.
- [9] Audi AG, raport: *Life Cycle Assessment. Audi looks one step ahead*, <https://silو.tips/download/life-cycle-assessment-audi-looks-one-step-ahead> (dostęp: 08.08.2022).
- [10] Bai C., Dallasega P., Orzes G., Sarkis J., 2020, *Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective*, “International Journal of Production Economics”, 229(11), 1067–1077.
- [11] Bałdowska-Witos P., Kruszelnicka W., Kasner R., Tomporowski A., Flizikowski J., Klos Z., Piotrowska K., Markowska K., 2020, *Application of LCA Method for Assessment of Environmental Impacts of a Polylactide (PLA) Bottle Shaping*, “Polymers”, 12(2), 388–408.
- [12] Bałdowska-Witos P., Piotrowska K., Kruszelnicka W., Błaszczak M., Tomporowski A., Opielak M., Kasner R., Flizikowski J., 2020, *Managing the Uncertainty and Accuracy of Life Cycle Assessment Results for the Process of Beverage Bottle Moulding*, “Polymers”, 12(6), 1320–1346.
- [13] Bamwesigye D., Hlavackova P., 2019, *Analysis of Sustainable Transport for Smart Cities*, “Sustainability”, 11(7), 2140–2160.
- [14] Bare J.C., Hofstetter P., Pennington D.W., de Haes H.A.U., 2000, *Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits*, “The International Journal of Life Cycle Assessment”, 5, 319–326.
- [15] Barreto L., Amaral A., Pereira T., 2017, *Industry 4.0 implications in logistics: an overview*, “Procedia Manufacturing”, 13, 1245–1252.

- [16] Bauer C., Cox B., Heck T., Hirschberg S., Hofer J., Schenler W., Simons A., del Duce A., Althaus H.J., Georges G., Krause T., González Vayá M., Ciari F., Waraich R., Jäggi B., Stahel A., Froemelt A., Saner D., 2016, *Opportunities and challenges for electric mobility: an interdisciplinary assessment of passenger vehicles. Final report of the THELMA project in co-operation with the Swiss Competence Center for Energy Research "Efficient technologies and systems for mobility"* [dokument PSI (Paul Scherrer Institute), EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Tehnology) i ETHZ (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich)], Villigen – Dübendorf – Zürich.
- [17] Bauer C., Hofer J., Althaus H.J., Simons A., del Duce A., 2015, *The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life Cycle Assessment based on a novel scenario analysis framework*, "Applied Energy", 157, 871–883.
- [18] Bäumer M., Hautzinger H., Pfeiffer M., Stock W., Lenz B., Kuhnimhof T., Köhler K., 2017, *Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung* [dokument Federalnego Instytutu Badawczego Dróg (Bundesanstalt für Straßenwesen)], Brema.
- [19] Bernsmann A., Clausen U., Heinrichmeyer H., Stütz S., 2016, *ZF Future Study 2016, Last Mile Logistics*, [dokument Instytutu Fraunhofera (Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IM)], Dortmund.
- [20] Bieker G., 2021, *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars* [dokument Międzynarodowej Rady Czystego Transportu (ICCT)], Beijing – Berlin – Brussels – San Francisco – Washington.
- [21] Bieńczak M., Fierek S., Kiciński M., Kwaśnikowski J., Sawicki P., 2015, *Planowanie zrównoważonego rozwoju transportu publicznego w oparciu o regionalny model podróży*, „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport”, 105, 5–20.
- [22] Bieńczak M., Fierek S., Kiciński M., Kwaśnikowski J., Sawicki P., 2014, *Regionalny model podróży na potrzeby planu zrównoważonego rozwoju transportu publicznego*, „Logistyka”, 4, 1673–1682.
- [23] BMW AG, raport: *Environmental Certification BMW i3*, <https://silو.tips/download/environmental-certification-bmw-i3> (dostęp: 08.08.2022).
- [24] Boeykens S.P., Piol M.N., Legal L.S., Saralegui A.B., Vázquez C., 2017, *Eutrophication decrease: Phosphate adsorption processes in presence of nitrates*, "Journal of Environmental Management", 203(12), 888–895.
- [25] Borys T., 2005, *Wąskie i szerokie interpretacje zrównoważonego rozwoju oraz konsekwencje wyboru*, Wyd. Branta, Bydgoszcz.
- [26] Brach J., 2017, *Mobilność 4.0, pojazd użytkowy 4.0 oraz transport 4.0 – kwestie definicyjne i praktyczne*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Gdańskiego”, nr 74, Gdańsk.
- [27] Bradley P.M., 2010, *History and Ecology of Chloroethene Biodegradation: A Review*, "Bioremediation Journal", 7(2), 81–109.
- [28] Brentrup F., Küsters J., Lammel J., Kuhlmann H., 2020, *Life Cycle Impact assessment of land use based on the hemeroby concept*, "The International Journal of Life Cycle Assessment", 7, 339–348.
- [29] Briffa J., Sinagra E., Blundell R., 2020, *Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans*, "Heliyon", 9(6), 4691–4715.

- [30] Brown S.S., Ryerson T.B., Wollny A.G., Brock C.A., Peltier R., Sullivan A.P., Weber R.J., Dubé W.P., Trainer M., Meagher J.F., Fehsenfeld F.C., Ravishankara A.R., 2006, *Variability in Nocturnal Nitrogen Oxide Processing and Its Role in Regional Air Quality*, “Science”, 311, 67–70.
- [31] Burgess J.E., Stuetz R.M., Morton S., Stephenson T., 2002, *Dinitrogen oxide detection for process failure early warning systems*, “Water Science & Technology”, 45(5), 247–254.
- [32] Burke P.J., Shahiduzzaman M., Stern D.I., 2015, *Carbon dioxide emissions in the short run: The rate and sources of economic growth matter*, “Global Environmental Change”, 33(6), 109–121.
- [33] Burnewicz J., 2009, *A study of innovative trends in transport*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
- [34] Butterbach-Bahl K., Dannenmann M., 2011, *Denitrification and associated soil N₂O emissions due to agricultural activities in a changing climate*, “Current Opinion in Environmental Sustainability”, 3(5), 389–395.
- [35] Byrne M.R., Polonsky M.J., 2011, *Impediments to consumer adoption of sustainable transportation: Alternative fuel vehicles*, “International Journal of Operations & Production Management”, 21(12), 1521–1538.
- [36] Candelaresi D., Valente A., Iribarren D., Dufour J., Spazzafumo G., 2021, *Comparative life cycle assessment of hydrogen-fuelled passenger cars*, “International Journal of Hydrogen Energy”, 46, 35961–35973.
- [37] Canter L., 2020, *Nitrates in groundwater*, Routledge Press, New York.
- [38] Casals L.C., Amante García B., Aguesse F., Iturrondobeitia A., 2015, *Second life of electric vehicle batteries: relation between materials degradation and environmental impact*, “The International Journal of Life Cycle Assessment”, 22(1), 1–12.
- [39] Cempel M., Nikiel G., 2006, *Nickel: A Review of Its Sources and Environmental Toxicology*, “Polish Journal of Environmental Studies”, 15(3), 375–382.
- [40] Chang C.P., Dong M., Sui B., Chu Y., 2019, *Driving forces of global carbon emissions: From time – and spatial-dynamic perspectives*, “Economic Modelling”, 77, 70–80.
- [41] Chapman L., 2007, *Transport and climate change: a review*, “Journal of Transport Geography”, 15(5), 354–367.
- [42] Chelani A.B., Rao C.V.C., Phadke K.M., Hasan M.Z., 2002, *Prediction of sulphur dioxide concentration using artificial neural networks*, “Environmental Modelling & Software”, 17(2), 159–166.
- [43] Christensen A., Petrenko C., 2017, *CO₂-based synthetic fuel: Assessment of potential European capacity and environmental performance* [dokument Międzynarodowej Rady Czystego Transportu (ICCT)], Beijing – Berlin – Brussels – San Francisco – Washington.
- [44] Christopher S.T., Lucas P.V., 2019, *The strategic role of logistics in the industry 4.0 era*, “Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review”, 129(9), 1–11.
- [45] Chun-Zhu L., 2004, *Advances in the Science of Brown Coal*, Elsevier, Oxford.
- [46] Ciez R.E., Whitacre J.F., 2019, *Examining different recycling processes for lithium-ion batteries*, “Nature Sustainability”, 2(2), 148–156.

- [47] Ciroth A., Arvidsson R., 2021, *Life Cycle Inventory Analysis*, Springer, Cham.
- [48] Ciszek M., 2012, *Bezpieczeństwo ekologiczne i zrównoważony rozwój*, „*Studia Ecologiae et Bioethicae*”, 10(1), 30–36.
- [49] Clausen U., Holloh K-D., Kadow M., 2014, *Visions of the Future. Transportation and Logistics 2030. Examining the potential for the development of road and rail transportation to 2030* [dokument Instytutu Fraunhofera (Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik), IML Daimler AG DB Mobility Logistics AG], Dortmund.
- [50] Cullen J.T., Maldonado M.T., 2013, *Biogeochemistry of Cadmium and Its Release to the Environment*, Springer, Dordrecht.
- [51] Curtis C., Low N., 2012, *Institutional Barriers to Sustainable Transport*, Taylor & Francis Press, London.
- [52] Dahlquist E., Hellstrand S., 2017, *Natural Resources Available Today and in the Future. How to Perform Change Management for Achieving a Sustainable World*, Springer, Cham.
- [53] Dai Q., Kelly J.C., Gaines L., Wang M., 2019, *Life cycle analysis of lithium-ion batteries for automotive applications*, “*Batteries*”, 5(2), 48–63.
- [54] Daimler AG, Mercedes-Benz Cars, raport: *Life Cycle – 360° Environmental Check Mercedes-Benz B-Class*, <https://group.mercedes-benz.com/documents/sustainability/product/daimler-environmental-check-mb-b-class.pdf> (dostęp: 08.08.2022).
- [55] Daimler AG, Mercedes-Benz Cars, raport: *Life Cycle – Environmental Certificate Mercedes-Benz B-Class Electric Drive*, <https://docplayer.net/6882971-Life-cycle-environmental-certificate-mercedes-benz-b-class-electric-drive.html> (dostęp: 08.08.2022).
- [56] Dekker E., Zijp M.C., van de Kamp M.E., Temme E.H.M., van Zelm R., 2020, *A taste of the new ReCiPe for life cycle assessment: consequences of the updated impact assessment method on food product LCAs*, “*The International Journal of Life Cycle Assessment*”, 25, 2315–2324.
- [57] del Duce A., Egede P., Öhlschläger G., Dettmer T., Althaus H.J., Büttler T., Szczechowicz E., 2013, *Guidelines for the LCA of electric vehicles* [dokument eLCAR], Aachen.
- [58] Denkhaus E., Salnikow K., 2002, *Nickel essentiality, toxicity, and carcinogenicity*, “*Critical Reviews in Oncology/Hematology*”, 42(1), 35–56.
- [59] Dervos C.T., Vassiliou P., 2011, *Sulfur Hexafluoride (SF₆): Global Environmental Effects and Toxic Byproduct Formation*, “*Journal of the Air & Waste Management Association*”, 50(1), 137–141.
- [60] des Marias T.L., Costa M., 2019, *Mechanisms of chromium-induced toxicity*, “*Current Opinion in Toxicology*”, 14(4), 1–7.
- [61] Dev N.K., Shankar R., Swami S., 2020, *Diffusion of green products in industry 4.0: Reverse logistics issues during design of inventory and production planning system*, “*International Journal of Production Economics*”, 223(5), 1075–1091.
- [62] Díaz S., Mock P., Bernard Y., Bieker G., Pniewska I., Ragon P.L., Rodríguez F., Tietge U., Wappelhorst S., 2020, *European vehicle market statistics 2020/21* [dokument Międzynarodowej Rady Czystego Transportu (ICCT)], Beijing – Berlin – Brussels – San Francisco – Washington.

- [63] Dobrzański Z., Buszewski B., Opaliński S., Kołacz R., Koziel J.A., 2017, *Ksenobiotyki, substancje toksyczne, mutagenne i kancerogenne: klasyfikacja i aspekty prawne*, „Przemysł Chemiczny”, 96(1), 76–84.
- [64] Dornoff J., Tietge U., Mock P., 2020, *On the way to ‘real-world’ CO₂ values: The European passenger car market in its first year after introducing the WLTP* [dokument Międzynarodowej Rady Czystego Transportu (ICCT)], Beijing – Berlin – San Francisco – São Paulo – Washington.
- [65] Duarte-Davidson R., Courage C., Rushton L., Levy L., 2001, *Benzene in the environment: an assessment of the potential risks to the health of the population*, “Occupational and Environmental Medicine”, 58(1), 2–13.
- [66] Dun C., Horton G., Kollamthodi S., 2015, *Improvements to the definition of lifetime mileage of light duty vehicles* [dokument Komisji Europejskiej], Brussels.
- [67] Dyrektywa Rady (UE) 2015/652 z dnia 20 kwietnia 2015 r. ustanawiająca metody obliczania i wymogi w zakresie sprawozdawczości zgodnie z dyrektywą 98/70/WE Parlamentu Europejskiego i Rady odnoszącą się do jakości benzyny i olejów napędowych.
- [68] E4tech, raport: *Low Carbon Fossil Fuels Sustainability Risks and Accounting Methodology*, https://www.e4tech.com/uploads/files/LCFF_Sustainability-FinalReport_12_.pdf (dostęp: 08.08.2022).
- [69] Eberle U., von Helmolta R., 2010, *Sustainable transportation based on electric vehicle concepts: a brief overview*, “Energy & Environmental Science”, 3, 689–699.
- [70] Edelen A., Ingwersen W.W., Rodríguez C., Alvarenga R.A.F., de Almeida A.R., Wernet G., 2018, *Critical review of elementary flows in LCA data*, “The International Journal of Life Cycle Assessment”, 23, 1261–1273.
- [71] Ejdys J., 2009, *Zrównoważony rozwój jako perspektywa funkcjonowania transportu miejskiego*, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Białymstoku, Białystok.
- [72] Elgowainy A., Han J., Ward J., Joseck F., Gohlke D., Lindauer A., Ramsden T., Biddy M., Alexander M., Barnhart S., Sutherland I., Verduzco L., Wallington T.J., 2016, *Cradle-to-Grave Lifecycle Analysis of U.S. Light-Duty Vehicle-Fuel Pathways: A Greenhouse Gas Emissions and Economic Assessment of Current (2015) and Future (2025–2030) Technologies* [dokument Narodowego Laboratorium Argonne (Argonne National Laboratory)], Lemont.
- [73] Emilsson E., Dahllöf L., 2019, *Lithium-ion vehicle battery production. Status 2019 on energy use, CO₂ emissions, use of metals, products environmental footprint, and recycling* [dokument Szwedzkiego Instytutu Badań Środowiskowych (IVL) oraz Szwedzkiej Agencji Energii (SEA)], Stockholm.
- [74] Emisia, przewodnik: *COPERT – The industry standard emissions calculator*, <https://www.emisia.com/utilities/copert/> (dostęp: 08.08.2022).
- [75] Europejska Agencja Środowiska (European Environment Agency), raport: *Primary and final energy consumption in Europe*, <https://www.eea.europa.eu/ims/primary-and-final-energy-consumption> (dostęp: 08.08.2022).
- [76] Europejskie Stowarzyszenie Producentów Samochodów (European Automobile Manufacturers Association), raport: *Vehicles in use – Europe 2019*, https://www.acea.be/uploads/publications/ACEA_Report_Vehicles_in_use-Europe_2019.pdf.

- [77] Federalne Ministerstwo Środowiska, Ochrony Przyrody i Bezpieczeństwa Jądrowego (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), raport: *Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2018*, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/jahresbericht_alfahrzeug_2018_bf.pdf (dostęp: 23.07.2022).
- [78] Federalny Urząd Transportu Samochodowego (Kraftfahrt-Bundesamt), raport: *Fahrzeugzulassungen (FZ)*, https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/Fachartikel/alter_20110415.pdf (dostęp: 23.07.2022).
- [79] Few S., Schmidt O., Offer G.J., Brandon N., Nelson J., Gambhir A., 2018, *Prospective improvements in cost and cycle life of off-grid lithium-ion battery packs: An analysis informed by expert elicitations*, "Energy Policy", 114, 578–590.
- [80] Fewtrell L., 2004, *Drinking-Water Nitrate, Methemoglobinemia, and Global Burden of Disease: A Discussion*, "Environmental Health Perspectives", 112(14), 1371–1374.
- [81] Fierek S., 2015, *Budowa modelu podaży transportu publicznego dla wieloagentowego modelu symulacyjnego*, „Logistyka”, 5, 235–242.
- [82] Figueroa M., Lah O., Fulton L.M., McKinnon A., Tiwari G., 2014, *Energy for Transport*, "Annual Review of Environment and Resources", 39(1), 295–325.
- [83] Finkbeiner M., 2016, *Special Types of Life Cycle Assessment*, Springer, Dordrecht.
- [84] Fisch und Fischl GmbH – Spritmonitor.de (baza danych o zużyciu paliwa przez pojazdy w rzeczywistych warunkach), <https://www.spritmonitor.de/> (dostęp: 23.07.2022).
- [85] Flizikowski J., Bieliński K., 2000, *Projektowanie środowiskowych procesorów energii*, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz.
- [86] Flizikowski J., 2002, *Rozprawa o konstrukcji*, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Bydgoszcz – Radom.
- [87] Förstner U., Wittmann G.T.W., 2012, *Metal pollution in the aquatic environment*, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York – Tokyo.
- [88] Friberg L., 2017, *Cadmium in the Environment*, CRC Press, Boca Raton.
- [89] Frischknecht R., Itten R., Wyss F., Blanc I., Heath G., Raugei M., Sinha P., Wade A., 2014, *Life cycle assessment of future photovoltaic electricity production from residential-scale systems operated in Europe, Subtask 2.0 "LCA", IEA-PVPS Task 12* [dokument Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA)], Paris.
- [90] Frischknecht R., Krebs L., Dinkel F., Kägi T., Stettler C., Zschokke M., Braunschweig A., Ahmadi M., Itten R., Stucki M., 2021, *Swiss Eco-Factors 2021 according to the Ecological Scarcity Method. Methodological fundamentals and their application in Switzerland* [dokument Federalnego Urzędu ds. Środowiska (Federal Office for the Environment)], Bern.
- [91] Frischknecht R., Wyss F., Büsser-Knöpfel S., Lützkendorf T., Balouktsi M., 2015, *Cumulative energy demand in LCA: The energy harvested approach*, "The International Journal of Life Cycle Assessment", 20, 957–969.

- [92] Fuzzi S., Baltensperger U., Carslaw K., Decesari S., van der Gon H.D., Facchini M.C., Fowler D., Koren I., Langford B., Lohmann U., Nemitz E., Pandis S., Riipinen I., Rudich Y., Schaap M., Slowik J.G., Spracklen D.V., Vignati E., Wild M., Williams M., Gilardoni S., 2015, *Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs*, "Atmospheric Chemistry and Physics", 15(4), 8217–8299.
- [93] Galiana I., Green C., 2009, *Let the global technology race begin*, "Nature", 3(462), 570–571.
- [94] Genchi G., Sinicropi M.S., Lauria G., Carocci A., Catalano A., 2020, *The Effects of Cadmium Toxicity*, "International Journal of Environmental Research and Public Health", 17(11), 3782–3806.
- [95] Georgopoulos P.G., Roy A., Yonone-Lioy M.J., Opiekun R.E., Lioy P.J., 2011, *Environmental copper: its dynamics and human exposure issues*, "Journal of Toxicology and Environmental Health", 4, 341–394.
- [96] Ghadimi P., Gilchrist M.D., Xu M., 2021, *Role of Circular Economy in Resource Sustainability*, Springer, Cham.
- [97] Gilchrist A., 2016, *Industry 4.0. The Industrial Internet of Things*, Apress Berkeley, New York.
- [98] Goel M., Sudhakar M., 2017, *Carbon Utilization. Applications for the Energy Industry*, Springer, Singapore.
- [99] Goldman T., Gorham R., 2006, *Sustainable urban transport: Four innovative directions*, "Technology in Society", 28(2), 261–273.
- [100] Golubevaitė L., 2008, *Eco-labelling as a marketing tool for green consumerism*, "Global Academic Society Journal: Social Science Insight", 3, 25–36.
- [101] Gössling S., Schröder M., Späth P., Freytag T., 2016, *Urban Space Distribution and Sustainable Transport*, "Transport Reviews", 36(5), 659–679.
- [102] Graczyk M., Rybaczewska-Błażejowska M., 2010, *Continual improvement as a pillar of environmental management*, "Management", 14(1), 297–305.
- [103] Gudmundsson H., Hall R.P., Marsden G., Zietsman J., 2015, *Sustainable Transportation*, Springer, Berlin.
- [104] Guinée J., 2002, *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*, Springer, Berlin.
- [105] Guinée J., Heijungs R., Huppes G., Zamagni A., Masoni P., Buonamici R., Rydberg T., 2011, *Life Cycle Assessment: past, present, and future*, "Environmental Science and Technology", 45(1), 90–96.
- [106] Harlow J.E., Ma X., Li J., Logan E., Liu Y., Zhang N., Ma L., Glazier S.L., Cormier M.M.E., Genovese M., Buteau S., Cameron A., Stark J.E., Dahn J.R., 2019, *A wide range of testing results on an excellent lithium-ion cell chemistry to be used as benchmarks for new battery technologies*, "Journal of The Electrochemical Society", 166(13), 3031–3044.

- [107] Hartwig A., Arand M., Epe B., Guth S., Jahnke G., Lampen A., Martus H.J., Monien B., Rietjens I.M., Schmitz-Spanke S., Schriever-Schwemmer G., Steinberg P., Eisenbrand G., 2020, *Mode of action-based risk assessment of genotoxic carcinogens*, “Archives of Toxicology”, 94, 1787–1877.
- [108] Hauschild M.Z., Huijbregts M.A.J., 2015, *Life Cycle Impact Assessment*, Springer, Dordrecht.
- [109] Hawkins T.R., Singh B., Majeau-Bettez G., Strømman A.H., 2012, *Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles*, “Journal of Industrial Ecology”, 17(1), 12–85.
- [110] He Z.L., Yang X.E., Stoffella P.J., 2005, *Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment*, “Journal of Trace Elements in Medicine and Biology”, 19(2), 125–140.
- [111] Heijungs R., Guinée J.B., Huppes G., Lankreijer R.M., Udo de Haes H.A., Wegener Sleeswijk A., 1992, *Environmental Life Cycle Assessment of Products. Part I: Guide. Part II: Backgrounds*, Multicopy Press, Leiden.
- [112] Heinemann C., Kasten P., Bauknecht D., Bracker J., Bürger V., Emele L., Hesse T., Kühnel S., Seebach D., Timpe C., 2019, *Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland* [dokument Öko-Institut], Freiburg.
- [113] Helms H., Jöhrens J., Claudia K., Giegrich J., Liebich A., Vogt R., Lambrecht U., 2016, *Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen* [dokument Federalnego Ministerstwa Środowiska, Ochrony Przyrody i Bezpieczeństwa Jądrowego (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)], Heidelberg.
- [114] Helms H., Lambrecht U., Jöhrens J., Pehnt M., Liebich A., Weiß U., Claudia K., 2014, *Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität* [dokument Federalnego Ministerstwa Środowiska, Ochrony Przyrody i Bezpieczeństwa Jądrowego (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)], Heidelberg.
- [115] Henke K.R., 2009, *Arsenic. Environmental Chemistry, Health Threats and Waste Treatment*, Wiley & Sons Ltd., New Jersey.
- [116] Hill N., Amaral S., Morgan-Price S., Nokes T., Bates J., Helms H., Fehrenbach H., Biemann K., Abdalla N., Jöhrens J., Cotton E., German L., Harris A., Ziem-Milojevic S., Haye S., Sim C., Bauen A., 2020, *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA* [dokument Ricardo-AEA, ifeu i E4tech dla Komisji Europejskiej], Brussels.
- [117] Hill N., Clarke D., Blair L., Menadue H., 2019, *Circular Economy Perspectives for the Management of Batteries used in Electric Vehicles* [dokument Ricardo Energy & Environment dla Komisji Europejskiej], Brussels.
- [118] Hill N., Norris J., Kirsch F., Dun C., McGregor N., Pastori E., Skinner I., 2015, *Light weighting as a means of improving Heavy Duty Vehicles' energy efficiency and overall CO₂ emissions* [dokument Ricardo Energy & Environment dla Komisji Europejskiej], Brussels.
- [119] Hill S.C., Smoot L.D., 2000, *Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems*, “Progress in Energy and Combustion Science”, 26(8), 417–458.

- [120] Hofmann E., Rüscher M., 2017, *Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics*, “Computers in Industry”, 89(8), 23–34.
- [121] Hoogma R., Kemp R., Schot J., Truffer B., 2002, *Experimenting for Sustainable Transport*, Taylor & Francis Press, London.
- [122] Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F., Stam G., Verones F., Vieira M., Zijp M., Hollander A., van Zelm R., 2017, *ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level*, “The International Journal of Life Cycle Assessment”, 22, 138–147.
- [123] Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F., Stam G., Verones F., Vieira M., Hollander A., Zijp M., van Zelm R., 2017, *ReCiPe 2016 v1.1. A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization* [dokument Narodowego Instytutu Zdrowia Publicznego i Środowiska (National Institute for Public Health and the Environment), RVIM], Bilthoven.
- [124] Huppes G., Ishikawa M., 2005, *Why eco-efficiency?*, “Journal of Industrial Ecology”, 9, 2–5.
- [125] Huss A., Weingerl P., 2020, *JEC Tank-to-wheel report v5: Passenger cars* [dokument Biura Publikacji Unii Europejskiej (Publications Office of the European Union)], Luxembourg.
- [126] Hwang S.J., 2020, *Eutrophication and the Ecological Health Risk*, “International Journal of Environmental Research and Public Health”, 17(17), 6332–6338.
- [127] Ibrahim M., El-Haes H., 2005, *Computational spectroscopic study of copper, cadmium, lead and zinc interactions in the environment*, “International Journal of Environment and Pollution”, 23(4), 417–424.
- [128] ISO 14040:2006: *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*, International Organization for Standardization, Geneva 2022.
- [129] ISO 14044:2006: *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*, International Organization for Standardization, Geneva 2022.
- [130] Jacyna M., 2009, *Modelowanie i ocena systemów transportowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [131] Jarboui S., Forget P., Boujelbene Y., 2013, *Public Road Transport Efficiency: A Stochastic Frontier Analysis*, “Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology”, 13(5), 64–71.
- [132] Jarboui S., Forget P., Boujelbene Y., 2012, *Public road transport efficiency: a literature review via the classification scheme*, “Public Transport”, 4, 101–128.
- [133] Järup L., Åkesson A., 2009, *Current status of cadmium as an environmental health problem*, “Toxicology and Applied Pharmacology”, 238(3), 201–208.
- [134] Jeon C.M., Amekudzi A., 2005, *Addressing Sustainability in Transportation Systems: Definitions, Indicators, and Metrics*, “Journal of Infrastructure Systems”, 11(1), 1–12.
- [135] Jeppesen E., Moss B., Bennion H., Carvalho L., de Meester L., Feuchtmayr H., Friberg N., Gessner M.O., Hefting M., Lauridsen T.L., Liboriussen L., Malmquist H.J., May L., Meerhoff M., Olafsson J.S., Soons M.B., Verhoeven J.T.A., 2010, *Interaction of Climate Change and Eutrophication*, Wiley-Blackwell Press, Oxford.

- [136] Jonek-Kowalska I., 2014, *Risk management in the hard coal mining industry: Social and environmental aspects of collieries' liquidation*, "Resources Policy", 41(9), 124–134.
- [137] Karuppanan Gopalraj S., Kärki T., 2020, *A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: Fibre recovery, properties and life-cycle analysis*, "SN Applied Sciences", 2(3), 433–454.
- [138] Kasprzak K.S., Sunderman Jr. F.W., Salnikow K., 2003, *Nickel carcinogenesis*, "Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis", 533(12), 67–97.
- [139] Kayikci Y., 2018, *Sustainability impact of digitization in logistics*, "Procedia Manufacturing", 21, 782–789.
- [140] Kelly J.C., Dai Q., Wang M., 2020, *Globally regional life cycle analysis of automotive lithiumion nickel manganese cobalt batteries*, "Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change", 25, 371–396.
- [141] Kendall A., 2012, *Time-adjusted global warming potentials for LCA and carbon footprints*, "The International Journal of Life Cycle Assessment", 8, 1042–1049.
- [142] Kenworthy J.R., 2006, *The eco-city: ten key transport and planning dimensions for sustainable city development*, "Environment & Urbanization", 18(1), 67–85.
- [143] Kesler S.E., Simon A.C., 2015, *Mineral resources, economics and the environment*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [144] Kiciński M., Bieńczyk M., Fierek S., Zmuda-Trzebiatowski P., 2012, *Dostosowanie metody wyznaczania oceny efektywności ekonomicznej obiektów infrastruktury transportowej na przykładzie Ronda Rataje w Poznaniu*, „Technika Transportu Szynowego”, 9, 3909–3918.
- [145] Kiciński M., 2007, *Zarządzanie naprawami i obsługiwaniem taboru autobusowego jako element wpływający na efektywność funkcjonowania przedsiębiorstw komunikacji publicznej*, „Logistyka”, 3, CD.
- [146] Kielhorn J., Melber C., Wahnschaffe U., Aitio A., Mangelsdorf I., 2010, *Vinyl chloride: still a cause for concern*, "Environmental Health Perspectives", 108(7), 579–588.
- [147] Kikuchi R., 2001, *Environmental Management of Sulfur Trioxide Emission: Impact of SO₃ on Human Health*, "Environmental Management", 27, 837–844.
- [148] Kleinertz B., Pellingier C., von Roon S., Hübner T., 2018, *EU Displacement Mix – A simplified Marginal Method to Determine Environmental Factors for Technologies Coupling Heat and Power in the European Union* [dokument Komisji Europejskiej], Brussels.
- [149] Klinglmair M., Sala S., Brandão M., 2014, *Assessing resource depletion in LCA: A review of methods and methodological issues*, "The International Journal of Life Cycle Assessment", 19, 580–592.
- [150] Klöpffer W., Book B.G., 2016, *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice*, "The International Journal of Life Cycle Assessment", 21, 1063–1066.
- [151] Kłós Z., Kalkowska J., Kasprzak J., 2022, *Towards a Sustainable Future – Life Cycle Management. Challenges and Prospects*, Springer, Cham.

- [152] Kłos Z., Kurczewski P., Kasprzak J., 2005, *Środowiskowe charakteryzowanie maszyn i urządzeń*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- [153] Kner S., Schrenk D., 2006, *Carcinogenicity of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin in experimental models*, "Molecular Nutrition & Food Research", 50(10), 897–907.
- [154] Komisja Europejska, Wspólnotowe Centrum Badawcze, Instytut Środowiska i Zrównoważonego Rozwoju (European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability), przewodnik: *Product Environmental Footprint Category Rules Guidance*, https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6.3.pdf (dostęp: 10.08.2022).
- [155] Komisja Europejska, Wspólnotowe Centrum Badawcze, Instytut Środowiska i Zrównoważonego Rozwoju (European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability), przewodnik: *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General, guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance*, <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf> (dostęp: 08.08.2022).
- [156] Komisja Europejska, Wspólnotowe Centrum Badawcze, Instytut Środowiska i Zrównoważonego Rozwoju (European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability), raport: *Environmental Footprint Category –* <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/EFC.pdf> (dostęp: 08.08.2022).
- [157] Kowalczyk P., Holyst R., 2008, *Efficient Adsorption of Super Greenhouse Gas (Tetrafluoromethane) in Carbon Nanotubes*, "Environmental Science & Technology", 42(8), 2931–2936.
- [158] Kulczycka J., Góralczyk M., 2001, *Ekologiczna ocena cyklu życia (LCA) nową techniką zarządzania środowiskowego*, Wyd. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
- [159] Kundu S., Coumar M.V., Rajendiran S., Rao A., Rao A.S., 2015, *Phosphates from detergents and eutrophication of surface water ecosystem*, "Current Science", 108(7), 1320–1325.
- [160] Kurczewski P., Kłos Z., 2005, *Technical objects classification for environmental analyses*, "Zagadnienia Eksploatacji Maszyn", 40(2), 127–138.
- [161] Kurland S.D., 2019, *Energy use for GWh-scale lithium-ion battery production*, "Environmental Research Communications", 2(1), 1–5.
- [162] Kvenvolden K.A., Cooper C.K., 2003, *Natural seepage of crude oil into the marine environment*, "Geo-Marine Letters", 23, 140–146.
- [163] Łacny J., Zalewski W., 2009, *Telematics as an instrument for improving effectiveness and safety of transport*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
- [164] Lamb W.F., Wiedmann T., Pongratz J., Andrew R., Crippa M., Olivier J.G., Wiedenhofer D., Mattioli G., Khouradajie A.A., House J., Pachauri S., Figueroa M., Saheb Y., Slade R., Hubacek K., Sun L., Ribeiro S.K., Khennas S., de la Rue du Can S., Chapungu L., Davis S.J., Bashmakov I., Dai H., Dhakal S., Tan X., Geng Y., Gu B., Minx J., 2021, *A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2020*, "Environmental Research Letters", 16(7), 1–32.

- [165] Laws E.A., 2013, *Environmental Toxicology*, Springer-Verlag, New York.
- [166] Lee D.Y., Thomas V.M., 2016, *Parametric modeling approach for economic and environmental life cycle assessment of medium-duty truck electrification*, "Journal of Cleaner Production", 142 (4), 3300–3321.
- [167] Legutko S., 2007, *Eksploracja maszyn*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- [168] Lelek Ł., Kulczycka J., Lewandowska A., Zarębska J., 2016, *Life cycle assessment of energy generation in Poland*, "The International Journal of Life Cycle Assessment", 21(1), 1–14.
- [169] Lewandowska A., 2006, *Środowiskowa ocena cyklu życia produktu na przykładzie wybranych typów pomp przemysłowych*, Wydawnictwa Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań.
- [170] Li L., Wu F., Cao Y., Cheng F., Wang D., Li H., Yu Z., You J., 2022, *Sustainable development index of shale gas exploitation in China, the UK, and the US*, "Environmental Science and Ecotechnology", 12, 100202–100211.
- [171] Ligthart T.N., Ansems T.M.M., 2019, *EnvPack an LCA-based tool for environmental assessment of packaging chains: Part 2: influence of assessment method on ranking of alternatives*, "The International Journal of Life Cycle Assessment", 24, 915–925.
- [172] Lima A.L.C., Farrington J.W., Reddy C.M., 2004, *Combustion-Derived Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Environment – A Review*, "Environmental Forensics", 6(2), 109–131.
- [173] Litman T., Burwell D., 2006, *Issues in sustainable transportation*, "International Journal of Global Environmental", 6(4), 331–347.
- [174] Liu S., Lu Y., Wang T., Xie S., Jones K.C., Sweetman A.J., 2014, *Using gridded multimedia model to simulate spatial fate of benzo(a)pyrene on regional scale*, "Environment International", 63(2), 53–63.
- [175] Liu Y., Villalba G., Ayres R.U., Schroder H., 2008, *Global Phosphorus Flows and Environmental Impacts from a Consumption Perspective*, "Journal of Industrial Ecology", 12(2), 229–247.
- [176] Luch A., 2012, *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology. Volume 3: Environmental Toxicology*, Springer, Bazylea.
- [177] Malik K., 2004, *Efektywność zrównoważonego i trwałego rozwoju w wymiarze lokalnym i regionalnym*, Wydawnictwo Instytutu Śląskiego, Opole.
- [178] Malko J., 2013, *Narastający dylemat. OZE vs elastyczność i wystarczalność generacji*, „Rynek Energii”, 5, 17–21.
- [179] Manassaram D.M., Backer L.C., Moll D.M., 2006, *A Review of Nitrates in Drinking Water: Maternal Exposure and Adverse Reproductive and Developmental Outcomes*, "Environmental Health Perspectives", 114(3), 320–327.
- [180] Manfredi S., Allacker K., Chomkamsri K., Pelletier N., de Souza D.M., 2012, *Product Environmental Footprint (PEF) Guide* [dokument Komisji Europejskiej, Wspólnotowego Centrum Badawczego, Instytutu Środowiska i Zrównoważonego Rozwoju (European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability)], Ispra.

- [181] Manuguerra L., Cappelletti F., Manes F., Germani M., 2023, *A predictive eco-design method and tool for electric vehicles of Industry 4.0*, “Procedia Computer Science”, 217, 248–257.
- [182] Mar K.A., Unger C., Walderdorff L., Butler T., 2022, *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, “Environmental Science & Policy”, 134(8), 127–136.
- [183] Marczuk A., Misztal W., Słowik T., Piekarski W., Bojanowska M., Jackowska I., 2015, *Chemiczne uwarunkowania zagospodarowania elementów pojazdów poddanych recyklingowi*, „Przemysł Chemiczny”, 10, 1867–1871.
- [184] Markovits-Somogyi R., Bokor Z., 2014, *Assessing the logistics efficiency of European countries by using the DEA-PC methodology*, “Transport”, 29, 137–145.
- [185] Martins N.R., da Graça G.C., 2018, *Impact of PM_{2.5} in indoor urban environments: A review*, “Sustainable Cities and Society”, 42(12), 259–275.
- [186] Maslarić M., Nikoličić S., Mirčetić D., 2016, *Logistics Response to the Industry 4.0: the Physical Internet*, “Open Engineering”, 6, 511–517.
- [187] Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J.B.R., Chen Y., Zhou X., Gomis M.I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M., Waterfield T., 2018, *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, Cambridge University Press, Cambridge – New York.
- [188] Mayer B.K., Baker L.A., Boyer T.H., Drechsel P., Gifford M., Hanjra M.A., Parameswaran P., Stoltzfus J., Westerhoff P., Rittmann B.E., 2016, *Total Value of Phosphorus Recovery*, “Environmental Science & Technology”, 50(13), 6606–6620.
- [189] Mehlhart G., Kosinska I., Baron Y., Hermann A., 2018, *Assessment of the implementation of Directive 2000/53/EU on end-of-life vehicles (the ELV Directive) with emphasis on the end-of-life vehicles of unknown whereabouts* [dokument Öko-Institut dla Komisji Europejskiej], Freiburg.
- [190] Mehlhart G., Möck A., Goldman D., 2018, *Effects on ELV waste management as a consequence of the decisions from the Stockholm Convention on decaBDE* [dokument Öko-Institut], Freiburg.
- [191] Meng C., Tian D., Zeng H., Li Z., Yi C., Niu S., 2019, *Global soil acidification impacts on belowground processes*, “Environmental Research Letters”, 14(7), 1–11.
- [192] Mercader-Moyano P., 2017, *Sustainable Development and Renovation in Architecture, Urbanism and Engineering* Editors, Springer, Cham.
- [193] Merksiz J., Pielecha J., 2014, *Emisja cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- [194] Merksiz J., Pielecha J., Radzimirski S., 2014, *New trends in emission control in the European Union*, Springer Verlag, Berlin.

- [195] Merkisz-Guranowska A., Pielecha J., 2014, *Emisja zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych a parametry ruchu drogowego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa – Poznań.
- [196] Merkisz-Guranowska A., 2007, *Recykling samochodów w Polsce*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Poznań – Radom.
- [197] Międzynarodowa Agencja Energetyczna (IEA), raport: *Electric power transmission and distribution losses*, <https://data.worldbank.org/indicator/eg.elc.loss.zs> (dostęp: 22.07.2022).
- [198] Międzynarodowa Agencja Energetyczna (IEA), raport: *The future of hydrogen. Report for the G20, Japan*, https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf (dostęp: 21.07.2022).
- [199] Międzynarodowa Agencja Energetyczna (IEA), raport: *World energy outlook 2020*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf> (dostęp: 22.07.2022).
- [200] Międzynarodowa Rada Czystego Transportu (ICCT), raport: *Vision 2050. A strategy to decarbonize the global transport sector by mid-century*, https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCT_Vision2050_sept2020.pdf (dostęp: 20.07.2022).
- [201] Miller G.C., Zepp R.G., 2007, *2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin: Environmental Chemistry*, American Chemical Society Press, New York.
- [202] Miller S.M., Wofsy S.C., Michalak A.M., Kort E.A., Andrews A.E., Biraud S.C., Dlugokencky E.J., Eluszkiewicz J., Fischer M.L., Janssens-Maenhout G., Miller B.R., Miller J.B., Montzka S.A., Nehrkorn T., Sweeney C., 2013, *Anthropogenic emissions of methane*, “Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences”, 110(50), 20018–20022.
- [203] Mock P., Tietge U., Wappelhorst S., Bieker G., Dornoff J., 2021, *Market monitor: European passenger car registrations, January–December 2020* [dokument Międzynarodowej Rady Czystego Transportu (ICCT)], Beijing – Berlin – San Francisco – São Paulo – Washington.
- [204] Moomaw W., Burgherr P., Heath G., Lenzen M., Nyboer J., Verbruggen A., 2021, *Annex II: Methodology. In IPCC Special report on renewable energy sources and climate change mitigation*, Cambridge University Press, Cambridge – New York.
- [205] Moss B., Kosten S., Meerhoff M., Battarbee R.W., Jeppesen E., Mazzeo N., Havens K., Lacerot G., Liu Z., de Meester L., Paerl H., Scheffer M., 2010, *Climate change and eutrophication*, “Inland Waters”, 2, 101–105.
- [206] Motowidlak U., 2017, *Efekty implementacji rozwoju elekromobilności w Polsce w wymiarze energetycznym i środowiskowym*, „Zeszyty Naukowe Wydziału Ekonomicznego Uniwersytetu Gdańskiego”, nr 74, Gdańsk.
- [207] Mühle J., Ganesan A.L., Miller B.R., Salameh P.K., Harth C.M., Greally B.R., Rigby M., Porter L.W., Steele L.P., Trudinger C.M., Krummel P.B., O’Doherty S., Fraser P.J., Simmonds P.G., Prinn R.G., Weiss R.F., 2010, *Perfluorocarbons in the global atmosphere: tetrafluoromethane, hexafluoroethane, and octafluoropropane*, “Atmospheric Chemistry and Physics”, 10(1), 5145–5164.

- [208] Muñoz I., Schmidt J.H., 2016, *Methane oxidation, biogenic carbon, and the IPCC's emission metrics. Proposal for a consistent greenhouse-gas accounting*, "The International Journal of Life Cycle Assessment", 21, 1069–1075.
- [209] Murray R.H., Erler D.V., Eyre B.D., 2015, *Nitrous oxide fluxes in estuarine environments: response to global change*, "Global Change Biology", 21(9), 3219–3245.
- [210] Mushtaq B., Bandh S.A., Shafi S., 2020, *Environmental Management. Environmental Issues, Awareness and Abatement*, Springer Nature, Singapore.
- [211] Muthu S.S., 2021, *Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)*, Springer, Singapore.
- [212] Nagajyoti P.C., Lee K.D., Sreekanth T.V.M., 2010, *Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review*, "Environmental Chemistry Letters", 8, 199–216.
- [213] Nantee N., Sureeyatanapas P., 2021, *The impact of Logistics 4.0 on corporate sustainability: a performance assessment of automated warehouse operations*, "Benchmarking: An International Journal", 28(10), 2865–2895.
- [214] Narodowe Laboratorium Argonne (Argonne National Laboratory), przewodnik: *The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model (GREET)*, <https://greet.es.anl.gov/index.php> (dostęp: 23.07.2022).
- [215] Nechaev A., Schupletsov A., 2021, *Methods for Improving Efficiency of the Innovative Logistics System*, "Transportation Research Procedia", 54, 628–636.
- [216] Nematchoua M.K., 2022, *Strategies for Studying Acidification and Eutrophication Potentials, a Case Study of 150 Countries*, "Multidisciplinary Scientific Journal", 5(1), 150–165.
- [217] Nordberg G.F., 2009, *Historical perspectives on cadmium toxicology*, "Toxicology and Applied Pharmacology", 238(3), 192–200.
- [218] Normann F., Andersson K., Leckner B., Johnsson F., 2008, *High-temperature reduction of nitrogen oxides in oxy-fuel combustion*, "Fuel", 87(12), 3579–3585.
- [219] Nosal S., 2002, *Metody stabilizacji niezawodności maszyn w fazie eksploatacji*, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Poznań.
- [220] Ociepa-Kubicka A., Ociepa E., 2012, *Toksyczne oddziaływanie metali ciężkich na rośliny, zwierzęta i ludzi*, „Inżynieria i Ochrona Środowiska”, 15(2), 169–180.
- [221] Ogryzek M., Adamska-Kmieć D., Klimach A., 2020, *Sustainable Transport: An Efficient Transportation Network*, "Sustainability", 12(19), 8274–8288.
- [222] Organizacja Narodów Zjednoczonych, Ramowa Konwencja w sprawie Zmian Klimatu: *Adoption of the Paris Agreement*, 12 grudnia 2015, <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> (dostęp: 20.07.2022).
- [223] O'Rourke D., Connolly S., 2003, *Just Oil? The Distribution of Environmental and Social Impacts of Oil Production and Consumption*, "Annual Review of Environment and Resources", 28(8), 587–617.
- [224] Parthiban A., Gopal A.A.R., Siwayanan P., Chew K.W., 2021, *Disposal methods, health effects and emission regulations for sulfur hexafluoride and its by-products*, "Journal of Hazardous Materials", 417(9), 12610–12617.

- [225] Patterson J., 2018, *Understanding the life cycle GHG emissions for different vehicle types and powertrain technologies* [dokument Low Carbon Vehicle Partnership, Ricardo], London.
- [226] Pawłowska B., 2015, *Zrównoważony rozwój transportu jako przykład poprawy efektywności sektora*, „Acta Universitatis Lodziensis”, 313, 63–78.
- [227] Pawłowska B., 2013, *Zrównoważony rozwój transportu na tle współczesnych procesów społeczno-gospodarczych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
- [228] Pehl M., Arvesen A., Humpenöder F., Popp A., Hertwich E.G., Luderer G., 2017, *Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling*, “Nature Energy”, 2(12), 939–945.
- [229] Pelclová D., Urban P., Preiss J., Lukáš E., Fenclová Z., Navrátil T., Dubská Z., Senholdová Z., 2006, *Adverse Health Effects in Humans Exposed to 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-Dioxin (TCDD)*, „Reviews on Environmental Health”, 21(2), 119–128.
- [230] Peralta-Videa J.R., Lopez M.L., Narayan M., Saupe G., Gardea-Torresdey J., 2009, *The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain*, “The International Journal of Biochemistry & Cell Biology”, 41(8), 1665–1677.
- [231] Peter C., Fiore A., Hagemann U., Nendel C., Xiloyannis C., 2016, *Improving the accounting of field emissions in the carbon footprint of agricultural products: a comparison of default IPCC methods with readily available medium-effort modeling approaches*, “The International Journal of Life Cycle Assessment”, 21, 791–805.
- [232] Philippot M., Alvarez G., Ayerbe E., van Mierlo J., Messagie M., 2019, *Eco-efficiency of a lithium-ion battery for electric vehicles: Influence of manufacturing country and commodity prices on GHG emissions and costs*, “Batteries”, 5(1), 23–40.
- [233] Piasecka I., Bałdowska-Witos P., Flizikowski J., Piotrowska K., Tomporowski A., 2020, *Control the System and Environment of Post-Production Wind Turbine Blade Waste Using Life Cycle Models. Part I. Environmental Transformation Models*, „Polymers”, 12(8), 1828–1858.
- [234] Piasecka I., Bałdowska-Witos P., Piotrowska K., Tomporowski A., 2020, *Eco-Energetical Life Cycle Assessment of Materials and Components of Photovoltaic Power Plant*, “Energies”, 13(6), 1385–1409.
- [235] Piasecka I., Tomporowski A., Piotrowska K., 2018, *Environmental analysis of post-use management of car tires*, “Przemysł Chemiczny”, 97(10), 1649–1653.
- [236] Pieregund J., 2005, *Kryteria i narzędzia oceny sprawności systemu transportowego*, Wydawnictwo Szkoły Głównej Handlowej, Warszawa.
- [237] Piotrowska K., Kruszelnicka W., Bałdowska-Witos P., Kasner R., Rudnicki J., Tomporowski A., Flizikowski J., Opielak M., 2019, *Assessment of the Environmental Impact of a Car Tire throughout Its Lifecycle Using the LCA Method*, “Materials”, 12(24), 4177–4202.
- [238] Piotrowska K., Piasecka I., Bałdowska-Witos P., Kruszelnicka W., Tomporowski A., 2020, *LCA as a Tool for the Environmental Management of Car Tire Manufacturing*, “Applied Sciences”, 10(20), 7015–7040.

- [239] Piotrowska K., Piasecka I., Kłos Z., Marczuk A., Kasner R., 2022, *Assessment of the Life Cycle of a Wind and Photovoltaic Power Plant in the Context of Sustainable Development of Energy Systems*, "Materials", 15(21), 7778–7803.
- [240] Piotrowska K., Piasecka I., 2021, *Specification of Environmental Consequences of the Life Cycle of Selected Post-Production Waste of Wind Power Plants Blades*, "Materials", 14(17), 4975–5008.
- [241] Piotrowska K., Tomporowski A., Piasecka I., 2020, *Ekoinnowacje opon samochodowych*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin.
- [242] Plötz P., Moll C., Li Y., Bieker G., Mock P., 2020, *Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles: Fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions* [dokument Międzynarodowej Rady Czystego Transportu (ICCT)], Beijing – Berlin – Brussels – San Francisco – Washington.
- [243] Powszechny Niemiecki Automobilklub (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club) – ADAC Ecotest, <https://www.adac.de/rundums-fahrzeug/tests/ecotest/> (dostęp: 23.07.2022).
- [244] Powszechny Niemiecki Automobilklub (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club), raport: *Life Cycle Assessment of common drive technologies – Conventional drives are far from over*, <https://www.adac.de/infotestrat/umwelt-und-innovation/abgas/oekobilanz/default.aspx?ComponentId=317354&SourcePageId=47733> (dostęp: 08.08.2022).
- [245] Prawo energetyczne, Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. (Dz.U. 1997 nr 54 poz. 348).
- [246] Program Środowiskowy Organizacji Narodów Zjednoczonych (United Nations Environment Programme): *Used vehicles and the environment: a global overview of used light duty vehicles – flow, scale and regulation*, <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/34175> (dostęp: 23.07.2022).
- [247] Proost S., van Dender K., 2012, *Energy and environment challenges in the transport sector*, "Economics of Transportation", 11(1), 77–87.
- [248] Prussi M., Yugo M., de Prada L., Padella M., Edwards R., Lonza L., 2020, *JEC Well-to-tank report v5* [dokument Komisji Europejskiej], Brussels.
- [249] Przystupa F.W., Rajkowski R., Szczyrek P., 2007, *Diagnostyczna ocena systemu eksploatacji maszyn roboczych*, „Przegląd Mechaniczny”, 5, 35–40.
- [250] Puig R., Fullana-Palmer P., Baquero G., Riba J.R., Bala A.A., 2013, *Cumulative Energy Demand indicator (CED), life cycle based, for industrial waste management decision making*, "Waste Management", 33(12), 2789–2797.
- [251] Pyshyev S., Prysiaznyi Y., Shved M., Namiesnik J., Bratychak M., 2017, *State of the art in the field of emission reduction of sulphur dioxide produced during coal combustion*, "Critical Reviews in Environmental Science and Technology", 47(24), 2387–2414.
- [252] Rahimi Y., Matyshenko I., Kapitan R., Pronchakov Y., 2020, *Organization the Information Support of Full Logistic Supply Chains Within the Industry 4.0*, "International Journal for Quality Research", 14(4), 1279–1290.
- [253] Rashedi A., Khanam T., 2020, *Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by mid-point and end-point indicators of ReCiPe method*, "Environmental Science and Pollution Research", 27, 29075–29090.

- [254] Razdan P., Garrett P., 2018, *Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V110–2.0 MW Wind Plant* [dokument Vestas Wind Systems A/S], Arhus.
- [255] Rebitzer G., Loerincik Y., Jolliet O., 2002, *Input-output life cycle assessment: From theory to applications*, “The International Journal of Life Cycle Assessment”, 7, 174–176.
- [256] Redmer A., 2022, *Facility location problem mathematical models – supply chain perspective*, “LogForum”, 18(4), 379–395.
- [257] Redmer A., 2015, *Strategic vehicle fleet management – the composition problem*, “LogForum”, 11(1), 119–126.
- [258] Reimann C., Matschullat J., Birke M., Salminen R., 2009, *Arsenic distribution in the environment: The effects of scale*, “Applied Geochemistry”, 24(7), 1147–1167.
- [259] Renault Group, raport: *Fluence and Fluence Z.E. – Life Cycle Assessment*, <https://www.renaultgroup.com/wp-content/uploads/2014/09/fluence-acv-2011.pdf> (dostęp: 08.08.2022).
- [260] Rhead M.M., Hardy S.A., 2003, *The sources of polycyclic aromatic compounds in diesel engine emissions*, “Fuel”, 82(4), 385–393.
- [261] Richardson B.C., 2005, *Sustainable transport: analysis frameworks*, “Journal of Transport Geography”, 13(1), 29–39.
- [262] Riemersma I., Mock P., 2017, *Too low to be true? How to measure fuel consumption and CO₂ emissions of plug-in hybrid vehicles, today and in the future* [dokument Międzynarodowej Rady Czystego Transportu (ICCT)], Beijing – Berlin – Brussels – San Francisco – Washington.
- [263] Rietveld P., Stough R.R., 2005, *Barriers to Sustainable Transport: Institutions, Regulation and Sustainability*, Spon Press, London – New York.
- [264] Roblek V., Meško M., Krapež A., 2016, *A Complex View of Industry 4.0*, “SAGE Open”, 4, 1–11.
- [265] Rubio-Clemente A., Torres-Palma R.A., Peñuela G.A., 2014, *Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous environment by chemical treatments: A review*, “Science of The Total Environment”, 478(4), 201–225.
- [266] Samanta S.K., Singh O.V., Jain R.K., 2002, *Polycyclic aromatic hydrocarbons: environmental pollution and bioremediation*, “Trends in Biotechnology”, 20(6), 243–248.
- [267] Sarbassov Y., Duan L., Manovic V., Anthony E.J., 2018, *Sulfur trioxide formation/emissions in coal-fired air- and oxy-fuel combustion processes: a review*, “Greenhouse Gases: Science and Technology”, 8(3), 402–428.
- [268] Sarkar B., 2002, *Heavy Metals in the Environment*, Marcel Dekker, Inc., New York – Basel.
- [269] Sarnecki K., 2016, *Ekonomia chaosu, jak funkcjonować w takim środowisku. Wyjść z paradygmatu linearności*, „Transport Manager”, 2, 10–18.
- [270] Satarug S., Garrett S.H., Sens M.A., Sens D.A., 2010, *Cadmium, Environmental Exposure, and Health Outcomes*, “Environmental Health Perspectives”, 118(2), 182–190.
- [271] Sawicka H., Węgliński P., Witort P., 2010, *Application of multiple criteria decision aid methods in logistic systems*, “LogForum”, 6(3), 99–109.

- [272] Sawicki P., Jaworek P., 2017, *Business process maturity of the Transport-Forwarding-Logistics sector in Poland*, "Research in Logistics & Production", 7(4), 337–350.
- [273] Sawicki P., 2013, *Wielokryterialna optymalizacja procesów w transporcie*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji Państwowego Instytutu Badawczego, Radom.
- [274] Say D., Manning A.J., Western L.M., Young D., Wisher A., Rigby M., Reimann S., Vollmer M.K., Maione M., Arduini J., Krummel P.B., Mühle J., Harth C.M., Evans B., Weiss R.F., Prinn R.G., O'Doherty S., 2021, *Global trends and European emissions of tetrafluoromethane (CF₄), hexafluoroethane (C₂F₆) and octafluoropropane (C₃F₈)*, "Atmospheric Chemistry and Physics", 21(3), 2149–2164.
- [275] Scipioni A., Niero M., Mazzi A., Manzardo A., Piubello S., 2013, *Significance of the use of non-renewable fossil CED as proxy indicator for screening LCA in the beverage packaging sector*, "The International Journal of Life Cycle Assessment", 18, 673–682.
- [276] Searle S., Christensen A., 2018, *Decarbonization potential of electrofuels in the European Union* [dokument Międzynarodowej Rady Czystego Transportu (ICCT)], Beijing – Berlin – Brussels – San Francisco – Washington.
- [277] Sen B., Ercan T., Tatari O., 2017, *Does a battery-electric truck make a difference? Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8 heavy-duty trucks in the United States*, "Journal of Cleaner Production", 141, 110–121.
- [278] Shakya S.R., Shrestha R.M., 2011, *Transport sector electrification in a hydropower resource rich developing country: Energy security, environmental and climate change co-benefits*, "Energy for Sustainable Development", 15(2), 147–159.
- [279] Sharpley A.N., McDowell R.W., Kleinman P.J.A., 2001, *Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management*, "Plant and Soil", 237(12), 287–307.
- [280] Shrivastava A.K., 2009, *A Review on Copper Pollution and its Removal From Water Bodies by Pollution Control Technologies*, "Indian Journal of Environmental Protection", 29(6), 552–560.
- [281] Sikora A., 2021, *European Green Deal – legal and financial challenges of the climate change*, "ERA Forum", 21, 681–697.
- [282] Simmonds P.G., Rigby M., Manning A.J., Park S., Stanley K.M., McCulloch A., Henne S., Graziosi F., Maione M., Arduini J., Reimann S., Vollmer M.K., Mühle J., O'Doherty S., Young D., Krummel P.B., Fraser P.J., Weiss R.F., Salameh P.K., Harth C.M., Park M.K., Park H., Arnold T., Rennick C., Steele L.P., Mitrevski B., Wang R.H.J., Prinn R.G., 2020, *The increasing atmospheric burden of the greenhouse gas sulfur hexafluoride (SF₆)*, "Atmospheric Chemistry and Physics", 20(12), 7271–7290.
- [283] Siret C., Tytgat J., Ebert T., Mistry M., Thirlaway C., Schutz B., Xhantopoulos D., Wiaux J.P., Chanson C., Tomboy W., Pettit C., Gediga J., Bonell M., Carrillo V., 2018, *PEFCR – Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications* [dokument RECHARGE (the Advanced Rechargeable & Lithium Batteries Association)], Brussels.

- [284] Słowik P., Lutsey N., Hsu C.W., 2020, *How technology, recycling, and policy can mitigate supply risks to the long-term transition to zero-emission vehicles* [dokument Międzynarodowej Rady Czystego Transportu (ICCT)], Beijing – Berlin – Brussels – San Francisco – Washington.
- [285] Smil V., 2000, *Phosphorus in the Environment: Natural Flows and Human Interferences*, “Annual Review of Energy and the Environment”, 25(11), 53–88.
- [286] Smith M.T., 2010, *Advances in Understanding Benzene Health Effects and Susceptibility*, “Annual Review of Public Health”, 31, 133–148.
- [287] Smolders A.J.P., Lamers L.P.M., Lucassen E.C.H., van der Velde G., Roelofs J.G.M., 2006, *Internal eutrophication: How it works and what to do about it – a review*, “Chemistry and Ecology”, 22(2), 93–111.
- [288] Sonnemann G., Margni M., 2015, *Life Cycle Management*, Springer, Dordrecht.
- [289] Srisawat P., Kronprasert N., Arunotayanun K., 2017, *Development of Decision Support System for Evaluating Spatial Efficiency of Regional Transport Logistics*, “Transportation Research Procedia”, 25, 4832–4851.
- [290] Staffell I., Scamman D., Abad A.V., Balcombe P., Dodds P.E., Ekins P., Shah N., Ward K.R., 2019, *The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system*, “Energy & Environmental Science”, 12, 463–491.
- [291] Steg L., Gifford R., 2005, *Sustainable transportation and quality of life*, “Journal of Transport Geography”, 13(1), 59–69.
- [292] Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., 2013, *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge – New York.
- [293] Stottmeister U., Mudroch A., Kennedy C., Matiova Z., Sanecki J., Svoboda I., 2002, *Reclamation and Regeneration of Landscapes after Brown Coal Opencast Mining in Six Different Countries*, Springer, Berlin.
- [294] Strandhagen J.O., Vallandingham L.R., Fragapane G., Strandhagen J.W., Stangeland A.B.H., Sharma N., 2017, *Logistics 4.0 and emerging sustainable business models*, “Advances in Manufacturing”, 5, 359–369.
- [295] Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Deryabkina I.G., Vasil’eva G.K., Kızılkaya R., 2017, *Dynamics of benzo(a)pyrene accumulation in soils*, “Eurasian Soil Science”, 50, 95–105.
- [296] Szyja P., 2015, *Wymiar ekologiczny i społeczny bezpieczeństwa ekologicznego w Polsce*, Wydawnictwo PTE, Warszawa.
- [297] Taszka S., Domergue S., 2019, *Prime à la conversion des véhicules particuliers en 2018. Une évaluation socio-économique ex post* [dokument Ministerstwa Zmian Ekologicznych (Ministère de la Transition écologique et solidaire)], Paris.
- [298] Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Patlolla A.K., Sutton D.J., 2012, *Heavy Metals Toxicity and the Environment*, “Molecular, Clinical and Environmental Toxicology”, 101, 133–164.
- [299] Teodosiu C., Fiore S., Hospido A., 2022, *Assessing Progress Towards Sustainability. Frameworks, Tools and Case Studies*, Elsevier, Amsterdam.

- [300] Thalassinos E., Kadhubek M., Thong L.M., Van Hiep T., Ugurlu E., 2022, *Managerial Issues Regarding the Role of Natural Gas in the Transition of Energy and the Impact of Natural Gas Consumption on the GDP of Selected Countries*, “Resources”, 11(5), 42–64.
- [301] Tian H., Chen G., Lu C., Xu X., Ren W., Zhang B., Banger K., Tao B., Pan S., Liu M., Zhang C., Bruhwiler L., Wofsy S., 2014, *Global methane and nitrous oxide emissions from terrestrial ecosystems due to multiple environmental changes*, “Ecosystem Health and Sustainability”, 1, 1–20.
- [302] Tietge U., Díaz S., Yang Z., Mock P., 2017, *From laboratory to road international: A comparison of official and real-world fuel consumption and CO₂ values for passenger cars in Europe, the United States, China, and Japan* [dokument Międzynarodowej Rady Czystego Transportu (ICCT)], Beijing – Berlin – Brussels – San Francisco – Washington.
- [303] Tjahjono B., Esplugues C., Ares E., Pelaez G., 2017, *What does Industry 4.0 mean to Supply Chain?* “Procedia Manufacturing”, 13, 1175–1182.
- [304] Tolley R., 2010, *Sustainable transport*, CRC Press, Oxford – Cambridge – New Delhi.
- [305] Tomporowski A., Flizikowski J., Opielak M., Kasner R., Kruszelnicka W., 2017, *Assessment of energy use and elimination of CO₂ emissions in the life cycle of an offshore wind power plant farm*, “Polish Maritime Research”, 24(4), 93–101.
- [306] Tomporowski A., Piasecka I., Piotrowska K., 2014, *Transport nienormatywnych elementów elektrowni wiatrowych w Polsce*, „Logistyka”, 6, 10672–10677.
- [307] Treloar G.J., Love P.E.D., Faniran O.O., Iyer-Raniga U., 2000, *A hybrid life cycle assessment method for construction*, “Construction Management and Economics”, 18, 5–9.
- [308] Tsai W.T., Chen H.P., Hsien W.Y., 2002, *A review of uses, environmental hazards and recovery/recycle technologies of perfluorocarbons (PFCs) emissions from the semiconductor manufacturing processes*, “Journal of Loss Prevention in the Process Industries”, 15(2), 65–75.
- [309] Tsai W.T., 2007, *The decomposition products of sulfur hexafluoride (SF₆): Reviews of environmental and health risk analysis*, “Journal of Fluorine Chemistry”, 128(11), 1345–1352.
- [310] Turconi R., Boldrin A., Astrup T.F., 2013, *Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 28, 555–565.
- [311] Valin H., Peters D., van den Berg M., Frank S., Havlik P., Forsell N., Hamelinck C., 2015, *The land use change impact of biofuels consumed in the EU*, raport Ecofys, IIASA i E4tech dla Komisji Europejskiej, Utrecht.
- [312] van der Veen I., de Boer J., 2012, *Phosphorus flame retardants: Properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis*, “Chemosphere”, 88(10), 1119–1153.
- [313] Vanherle K., Vergeer R., 2016, *Data gathering and analysis to improve the understanding of 2nd hand car and LDV markets and implications for the cost effectiveness and social equity of LDV CO₂ regulations* [dokument DG Climate Action i Transport and Mobility Leuven], Brussels.
- [314] Volkswagen AG, raport: *The Caddy – Environmental Commendation Background Report*, <https://www.asktheeu.org/en/request/3146/response/11309/attach/6/thecaddy%20environmental%20commendation%20background%20report.pdf> (dostęp: 08.08.2022).

- [315] Volkswagen AG, raport: *The e-Golf – Environmental Commendation*, <https://www.ask-theeu.org/en/request/3146/response/11309/attach/6/egolf%20environmental%20commendation%20report.pdf> (dostęp: 08.08.2022).
- [316] Walerjańczyk W., 2011, *Zagadnienie jakości geokodowania obiektów w systemach transportowych*, „Logistyka”, 6, CD.
- [317] Warner J.X., Dickerson R.R., Wei Z., Strow L.L., Wang Y., Liang Q., 2017, *Increased atmospheric ammonia over the world's major agricultural areas detected from space*, “Geophysical Research Letters”, 44(2), 1–10.
- [318] Wieser S., Hörmandinger G., Gerwens S., Stolper E.C., Hasler J., Riedel F., Loogen F., Küchen C., Block T., Braun S., Knüttgen I., Dabbert L., 2020, *Werkstattbericht alternative kraftstoffe. Klimawirkungen und wege zum einsatz alternativer kraftstoffe. Arbeitsgruppe 1: klimaschutz im verkehr* [dokument Krajowej Platformy Przyszłości Mobilności (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität – NPM)], Berlin.
- [319] Winkelhaus S., Grosse E.H., 2020, *Logistics 4.0: a systematic review towards a new logistics system*, “International Journal of Production Research”, 58(1), 18–43.
- [320] Witkowski K., 2017, *Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 – Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management*, “Procedia Engineering”, 182, 763–769.
- [321] Worsfold P., Townshend A., Poole C., Miró M., 2019, *Encyclopedia of Analytical Science, Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, Elsevier, Amsterdam.
- [322] Xiao Y., Whitaker F., Xu T., 2018, *Reactive Transport Modeling: Applications in Subsurface Energy and Environmental Problems*, Wiley & Sons Press, Glasgow.
- [323] Xing Y.F., Xu Y.H., Shi M.H., Lian Y.X., 2016, *The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system*, “Journal of Thoracic Disease”, 8(1), 69–74.
- [324] Yang X., Wu X., Hao H., He Z., 2018, *Mechanisms and assessment of water eutrophication*, “Journal of Zhejiang University Science B”, 9, 197–209.
- [325] Yaser A.Z., Tajarudin H.A., Embrandiri A., 2022, *Waste Management, Processing and Valorisation*, Springer, Singapore.
- [326] Yruela I., 2008, *Copper in plants: acquisition, transport and interactions*, “Functional Plant Biology”, 36(5), 409–430.
- [327] Zhao X., Ke Y., Zuo J., Xiong W., Wu P., 2020, *Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019*, “Journal of Cleaner Production”, 256(5), 12040–12054.
- [328] Zheng C., Wang Y., Liu Y., Yang Z., Qu R., Ye D., Liang C., Liu S., Gao X., 2019, *Formation, transformation, measurement, and control of SO₃ in coal-fired power plants*, “Fuel”, 241(4), 327–346.
- [329] Zmuda-Trzebiatowski P., 2016, *Dostępność transportowa a partycypacja w aktywnościach, ubóstwo oraz zagrożenie wykluczeniem społecznym*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe”, 12, 754–759.
- [330] Zmuda-Trzebiatowski P., 2016, *Partycypacyjna ocena miejskich projektów transportowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.



POLITECHNIKA
LUBELSKA

70 lat

POLITECHNIKI
LUBELSKIEJ

ISBN: 978-83-7947-559-9



9 788379 475599