

Dominik KRYZIA*, Michał KOPACZ**, Monika ORZECZOWSKA*

Szacowanie emisji ditlenku węgla i zużycia oleju napędowego w samochodach osobowych

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące szacowania wielkości emisji ditlenku węgla pochodzącej z samochodów osobowych. Na podstawie wartości ich poszczególnych cech podjęto próbę budowy modelu, który posłużył do prognozowania wielkości emisji ditlenku węgla, a tym samym i zużycia paliwa w samochodach osobowych. Pod uwagę wzięto: pojemność i moc silnika, masę danego pojazdu, rok wprowadzenia pojazdu do produkcji oraz autosegment, do którego pojazd należy. Analizy przeprowadzono dla pojazdów zasilanych olejem napędowym.

W badaniach podjęto próbę zastosowania trzech odmiennych typów rozwiązań problemu badawczego. Obejmowały one dopasowanie modeli liniowych i nieliniowych, modelowanie przy pomocy metod sieciowych i grupowania wykorzystujących algorytmy logiki rozmytej, czy też symulację Monte Carlo.

Opracowany model może zostać wykorzystany przede wszystkim do oszacowania potencjalnego zużycia oleju napędowego, przez flotę samochodów osobowych wyposażonych w silnik wysokoprężny.

Artykuł zawiera analizę specyfiki zbioru danych, opis podejścia do modelowania problemu badawczego i budowy modelu teoretycznego, a także analizę otrzymanych efektów przeprowadzonych prac.

Dotychczasowe wyniki prac wskazują, że trudno jest uzyskać rozwiązanie, które będzie uniwersalne dla zbioru posiadanych cech samochodów osobowych. Próby estymacji modeli nieliniowych nie przynosiły spodziewanego efektu. Wyraźnej poprawy jakości modelowania nie osiągnięto również przy wykorzystaniu zaawansowanych metod matematycznych i statystycznych oraz symulacyjnych.

Obliczenia wykonywano przy pomocy specjalistycznych programów służących budowie modeli matematycznych i statystycznych takich jak: GRETL, KNIME i CRYSTAL BALL.

Słowa kluczowe: emisja CO₂, samochody osobowe, prognozowanie zużycia oleju napędowego, paliwa samochodowe, modelowanie matematyczne i statystyczne

* Mgr inż., ** Dr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków;
e-mail: kryzia@min-pan.krakow.pl, kopacz@min-pan.krakow.pl, monika.orzechowska@min-pan.krakow.pl

Estimation of carbon dioxide emissions and diesel consumption in passenger cars

Abstract: The article presents issues related to estimating the carbon dioxide emissions from passenger cars. Based on the assumptions, an attempt to build a model that was used to predict emissions of carbon dioxide and thus the fuel consumption of passenger cars on the basis of their individual characteristics was conducted. Taken into account were capacity and engine power, the weight of the vehicle and the autosegment to which the vehicle belongs. The analyses were performed only for vehicles powered by diesel fuel. The study attempted to use three different types of solutions for the problem of the research. They included fitting linear and nonlinear models, network methods and clustering with the use of fuzzy logic algorithms, or Monte Carlo simulation. The elaborated model can be used primarily to estimate the potential consumption of diesel by a fleet of cars equipped with a diesel engine. The article contains the analysis of the data set, description of the approach to modeling the research problem and estimating a theoretical model, as well as the analysis of the received results of the work carried out. Calculations were performed by using specialized programs aimed at the creation of mathematical models named GRETL, KNIME and CRYSTAL BALL.

Keywords: CO₂ emissions, passenger cars, fuel consumption, motor fuels, mathematical modeling

Wprowadzenie

Z roku na rok wzrasta liczba samochodów osobowych poruszających się po drogach, czego efektem jest ciągle rosnący poziom zapotrzebowania oraz zużycia paliw silnikowych. Wzrost zamożności obywateli przekłada się na posiadanie coraz częściej więcej niż jednego samochodu, przez co rynek motoryzacyjny staje się coraz większy. Jednak jego rozwój w najbliższych dziesięcioleciach będzie uwarunkowany możliwościami ograniczenia emisji szkodliwych substancji powstających w wyniku spalania paliw. Aby zapobiec nadmiernemu zanieczyszczeniu środowiska przyrodniczego, światowi ustawodawcy (w Europie Komisja Europejska) wprowadzają w życie coraz bardziej rygorystyczne normy emisji substancji szkodliwych z pojazdów. Ograniczenia te mają na celu poprawę jakości powietrza oraz zmniejszenie uzależnienia motoryzacji od paliw kopalnych (Andrzejewski 2013; Żywica 2012).

W Polsce zdecydowana większość samochodów osobowych wyposażona jest w silnik wewnętrznego spalania z zapłonem iskrowym lub zapłonem samoczynnym. Silniki te przeznaczone są do zasilania paliwami płynnymi, głównie benzynami i olejami napędowymi. Ponadto część pojazdów wyposażana jest fabrycznie w instalacje pozwalające na zasilanie silnika pojazdu paliwem alternatywnym takim jak LPG (*Liquefied Petroleum Gas*) lub CNG (*Compressed Natural Gas*) (Orzechowska i Kryzia 2014). Jednak to głównie pojazdy zasilane tradycyjnym paliwem (benzyna, olej napędowy) są doposażone w dodatkową instalację pozwalającą zasilać silnik pojazdu gazem płynnym w postaci LPG lub sprężonym gazem ziemnym (CNG). Użytkownik pojazdu, decydując się na montaż takiej instalacji, powinien liczyć się z kosztami, które należy ponieść podczas instalacji oraz cyklicznych prac serwisowych sprawdzających stan, a w szczególności szczelność instalacji gazowej. Decyzja o montażu instalacji powinna być podjęta na podstawie rachunku ekonomicznego, w którym kluczowym czynnikiem jest wielkość zużycia paliwa przez pojazd. Wartość ta zależy od cech pojazdu, sposobu jego eksploatacji oraz warunków drogowych panujących w okresie letnim i zimowym (Siłka 1994; Lorenc 2012; Ubysz 2008; Żywica 2012).

W niniejszej pracy podjęto próbę powiązania zależnościami matematycznymi (statystycznymi) relacji ilości spalanego paliwa z cechami danego pojazdu silnikowego. Zbudowanie satysfakcjonującego modelu matematycznego stanowi podstawę dla rozstrzygnięcia dylematu atrakcyjności paliw alternatywnych względem zużycia oleju napędowego czy benzyny i dalszej prognozy rozwoju rynków tych paliw.

W obszar podejmowanych przez autorów badań z zakresu modelowania ekonometrycznego (statystycznego) wpisują się zagadnienia regresji, korelacji, doboru modeli liniowych i nieliniowych, złożone modele sieciowe, metody z obszaru grupowania i algorytmów logiki rozmytej, czy też symulacji Monte Carlo.

Na całość prac prowadzonych przez autorów w ramach tematu badawczego dotyczącego oceny możliwości rozwoju rynku LPG i CNG w Polsce, składa się kilka kluczowych etapów. Niewątpliwie rozwój rynku tych paliw w Polsce jest uwarunkowany oceną atrakcyjności wykorzystania paliw alternatywnych w pojazdach silnikowych, co stanowi – pośrednio – istotę przedstawianych w artykule wyników badań modelowych.

1. Opis modelu

1.1. Przygotowanie danych

Jak już po części wspomniano, rozwiązanie postawionego problemu badawczego sprowadza się do skonstruowania modelu prognostycznego, w którym zużycie oleju napędowego przez dany pojazd (grupę pojazdów) będzie funkcją poziomu emisji CO₂, opisaną określonym zbiorem zmiennych niezależnych.

Dysponując dużą próbką danych w pracy przyjęto, że poziom emisji CO₂, zależny w rzeczywistości od wartości cech pojazdu, sposobu jego eksploatacji oraz warunków drogowych panujących w okresie letnim i zimowym, będzie mógł być opisany wektorem zmiennych niezależnych takich jak: pojemność i moc silnika, masa pojazdu, rok wprowadzenia samochodu do produkcji oraz autosegment, do którego pojazd został zakwalifikowany (Żywica 2012; Siłka 1994).

Pierwszym etapem prac nad modelem była obróbka danych wejściowych. W tym celu wykorzystano dane statystyczne, dostępne na portalu internetowym www.carfolio.com, który stanowi kompleksową bazę specyfikacji technicznych samochodów. Dane zawierały informacje na temat marki i modelu samochodu osobowego, pojemności i mocy silnika, masy pojazdu, roku wprowadzenia samochodu do produkcji oraz wartości emisji ditlenku węgla. Poziomy analizowanych zmiennych są wartościami deklarowanymi przez producentów.

Budowę modelu ekonometrycznego (statystycznego) winna poprzedzać analiza zgromadzonych danych pod kątem:

- jednoznaczności, rzetelności i jednorodności,
- zdolności prognostycznej, w pracach Zeliasia określonej mianem aktualności na przyszłość (Zeliś i in. 2003),
- reprezentatywności, tj. wnioski wyciągnięte z analizy próbki winny być miarodajne również dla całej populacji; w szczególności uwaga winna koncentrować się na ocenie stabilności parametrów estymowanego modelu oraz informacji pozostającej poza modelem (składnik resztowy) (Nowak 1998),

- określenia całkowitej bądź częściowej niezależności danych,
- liczby stwierdzonych błędów, tak systematycznych, jak i przypadkowych (Zając 1994).

Spełnienie wyżej wymienionych postulatów wymagało oczyszczenia danych i odrzucenia rekordów o niskiej przydatności prognostycznej (głównie zmienne niekompletne). Ostatecznie próbka badawcza obejmowała 2971 obserwacji, które poddano dalszej analizie.

Informacje na temat autosegmentu, do którego przypisany jest dany pojazd, pozyskano na podstawie marki i modelu pojazdu z bazy pojazdów dostępnej w niezależnym portalu motoryzacyjnym *www.autocentrum.pl*. Aby cecha ta miała charakter numeryczny, poszczególnym kategoriom przypisano wartości liczbowe (tab. 1).

TABELA 1. Wartości liczbowe przypisane do autosegmentów

TABLE 1. The numerical values assigned to the car segments

Autosegment	Wartość liczbową
Samochody najmniejsze	1
Samochody małe	2
Niższa klasa średnia	3
Klasa średnia	4
Minivany	5
Małe suwy	6
Wyższa klasa średnia	7
Samochody sportowe	8
Samochody luksusowe	9
Duże suwy	10

Źródło: opracowanie własne

Zebrane dane poddano analizie statystycznej, której wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Wyniki wstępnej analizy statystycznej danych pokazują, że najwyższym współczynnikiem zmienności (pomijając autosegment, dla którego wartości zostały przypisane w sposób arbitralny) charakteryzuje się zmienna moc, która waha się w zakresie od 32,80 (44,6 KM) do 283,17 kW (385 KM).

Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa dla zmiennych rok i autosegment są rozkładami platykurtycznymi (zmienne rozproszone). Wartości pozostałych cech charakteryzują się leptokurtycznymi rozkładami gęstości prawdopodobieństwa (z koncentracją wokół wartości średnich). Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa wartości wszystkich cech są asymetryczne, przy czym jedynie rozkład zmiennej rok cechuje asymetria lewostronna.

Na rysunku 1 (a-f) przedstawiono ilustrację graficzną cech i zakresów ich zmienności dla próbki analizowanych pojazdów osobowych.

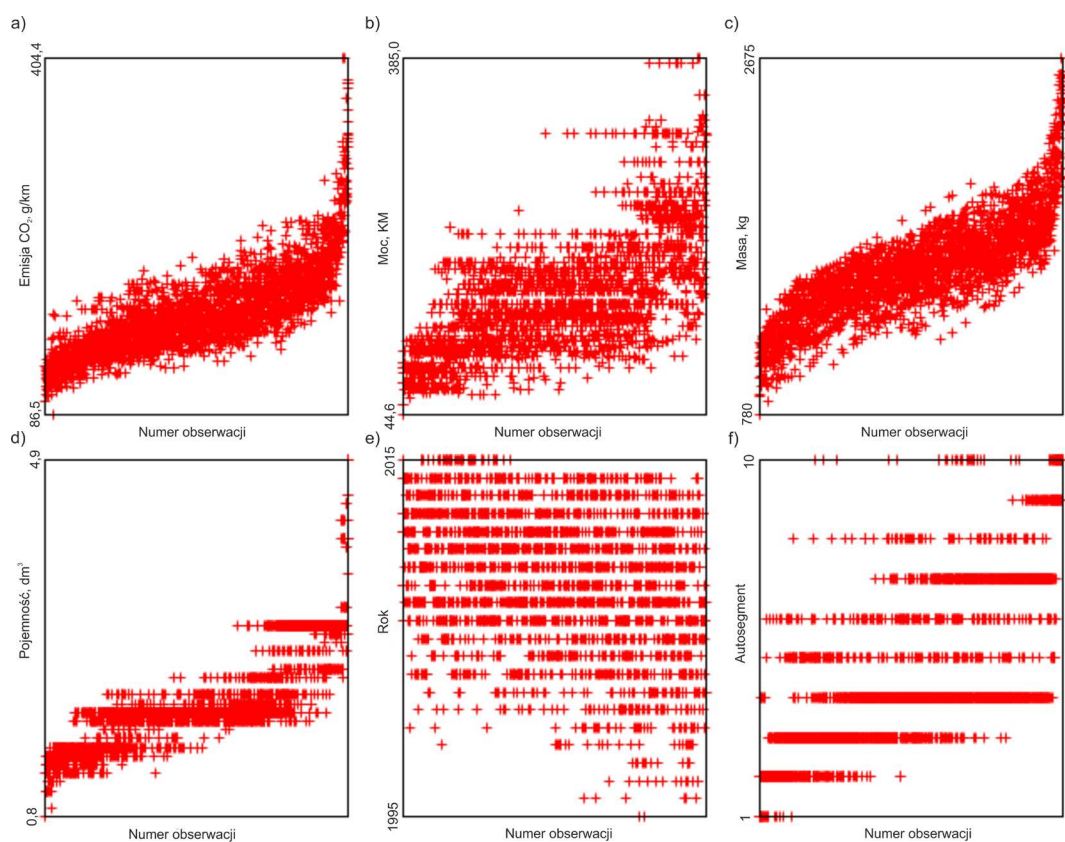
W tabeli 3 przedstawiono wartości współczynników korelacji liniowej dla analizowanych zmiennych.

TABELA 2. Statystyki opisowe dla obserwacji z badanej próby

TABLE 2. Descriptive statistics for the observations from the data sample 1 – 2971

Zmienna	J.m.	Średnia	Mediana	Wartość min.	Wartość maks.	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Skośność	Kurtzoza	Percentyl 5%	Percentyl 95%	Zakres Q3-Q1
Emisja CO ₂	g/km	176,79	171,04	86,49	404,40	38,08	0,22	1,30	3,38	128,89	246,45	48,73
Moc	kW	114,00	110,32	32,80	283,17	40,23	0,353	0,951	1,232	58,84	189,76	52,22
Masa	kg	1 546,0	1 540,0	780,0	2 675,0	257,4	0,167	0,597	1,405	1 155	1 955	310
Pojemność	dm ³	2,11	2	0,8	4,9	0,52	0,249	1,157	2,106	1,4	3	0,3
Rok	rok	2008	2009	1995	2015	3,92	0,002	-0,486	-0,302	2001	2014	5

Źródło: opracowanie własne



Rys. 1. Ilustracja graficzna cech analizowanych pojazdów osobowych; a) emisja CO₂, b) moc silnika, c) masa pojazdu, d) pojemność skokowa silnika, e) rok wprowadzenia pojazdu do produkcji, f) autosegment, do którego należy pojazd
 Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. The graphics illustration of the data set of the passenger cars

TABELA 3. Współczynniki korelacji zmiennych w badanej próbie

TABLE 3. The correlation coefficients for the observations from the analysed sample

Emisja CO ₂	Moc	Masa	Pojemność	Rok	Autosegment	Wyszczególnienie
1,00	0,62	0,77	0,77	-0,26	0,63	emisja CO ₂
	1,00	0,79	0,84	0,21	0,61	moc
		1,00	0,78	0,15	0,78	masa
			1,00	-0,09	0,61	pojemność
				1,00	0,06	rok
					1,00	autosegment

Źródło: opracowanie własne

Najwyższą wartość równą 0,84 przyjmuje współczynnik korelacji dla pary zmiennych pojemność i moc. Średnio i silnie skorelowane ze zmienną prognozowaną są również pozostałe cechy. Najniższą i ujemną (-0,26) wzajemną korelację wyznaczono dla pary rok i emisja CO₂.

1.2. Budowa modelu prognostycznego

Ogólną postać poszukiwanego modelu statystycznego można przedstawić w następujący sposób:

$$Emisja_CO_2 = f(p, M, m, R, As) \quad (1)$$

gdzie:

- P – pojemność samochodu [dm³],
- M – moc [KM],
- m – masa [kg],
- R – rok produkcji,
- As – autosegment.

Wielkość emisji CO₂ zależy bezpośrednio od rodzaju spalanej paliwa i jego ilości. Tym samym, jeżeli posiadamy te informacje, mamy możliwość określenia zużycia paliwa bazując na danych dotyczących wielkości emisji ditlenku węgla. Według raportu przygotowanego przez EC Project Sp. z o.o. (Raport... 2011) w procesie całkowitego i zupełnego utlenienia jednego litra oleju napędowego powstanie około 2,7 kg CO₂. Na podstawie wskazanego dokumentu opracowano wzór pozwalający przeliczyć emisję CO₂ na zużycie paliwa przez pojazd (wzór 2):

$$S_d = \frac{Emisja_CO_2}{27} \quad (2)$$

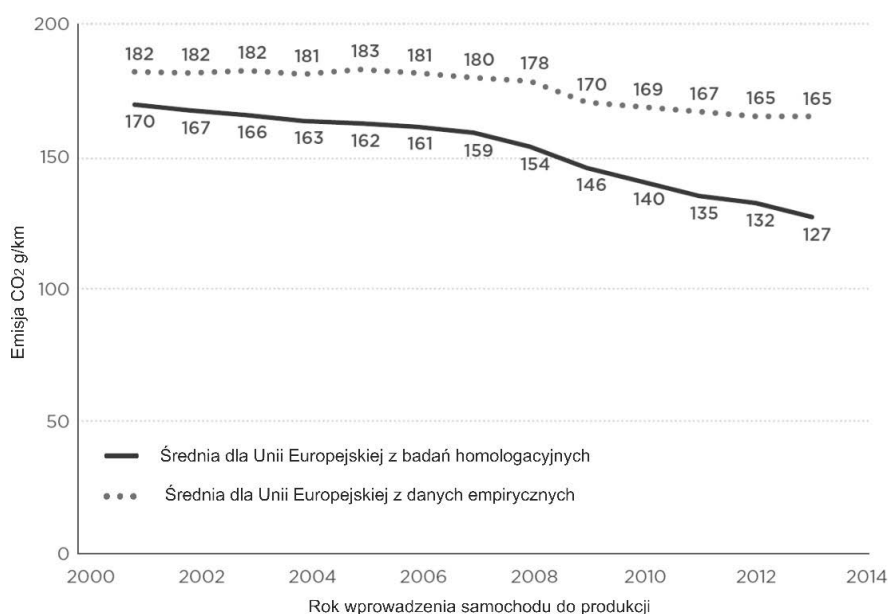
gdzie:

- S_d – zużycie oleju napędowego [dm³/100 km],
- $Emisja_CO_2$ – wielkość emisji ditlenku węgla [g/km].

Według (International... 2014) rzeczywista emisja CO₂ jest większa niż wynika to z danych przedstawianych przez producenta. Ta różnica z każdym rokiem jest coraz większa (rys. 2). Spowodowane jest to:

- wprowadzaniem rozwiązań technologicznych (na przykład technologii *start-stop*), które pokazują większe korzyści w zakresie obniżenia emisji CO₂ w badaniach homologacyjnych, niż ma to miejsce w świecie rzeczywistym,
- przez czynniki zewnętrzne, zmieniające się w czasie, które nie są ujęte w badaniu typu homologacji (na przykład zwiększone korzystanie z klimatyzacji),
- zwiększenie wykorzystania elastyczności w procedurze homologacji.

Biorąc powyższe pod uwagę zmienną emisja_CO₂ skorygowano do wartości realnych według wskazówek zawartych w (International... 2014).



Rys. 2. Emisja CO₂ dla UE na podstawie badań homologacyjnych i danych empirycznych w latach 2000–2014
Źródło: (International... 2014)

Fig. 2. CO₂ emissions for the EU on the basis of the approval and empirical data from 2000 to 2014

2. Rezultaty analiz statystycznych i modelowania

Bazując na zgromadzonych danych, w pierwszej kolejności przeprowadzono próbę doboru modelu liniowego przy wykorzystaniu programu komputerowego GRETL 1.10.1.

W wyniku estymacji wyprowadzono najlepiej dopasowany model – wielomian pierwszego stopnia, którego postać zaprezentowano poniższym wzorem (wzór 3).

$$Emisja_CO_2 = -0,2581 \cdot M + 0,0744 \cdot m + 47,6724 \cdot P - 0,00207 \cdot R + 1,1991 \cdot As \quad (3)$$

Skorygowany współczynnik determinacji R², będący miarą dopasowania modelu, ma wartość równą 0,99, co świadczy o tym, że model „statystycznie” dobrze wyjaśnia kształtowanie się zmiennej objaśnianej. Jednak wysoki błąd składnika resztowego (SSE; 1 271 282,0; MSE 20,7) istotnie obniża wartość progностyczną modelu.

W tabeli 4 zestawiono ocenę jakości (dobroci) dopasowania modelu liniowego do analizowanych zmiennych.

Natomiast w tabeli 5 przedstawiono pozostałe statystyki oceny jakości dopasowania modelu i ocenę związków liniowych analizowanych zmiennych ze zmienną prognozowaną.

Pozytywnej weryfikacji statystycznej mierzonej wartością *p-value* na założonym, domyślnym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ nie przeszła tylko zmienna rok (zmienna nieistotna statystycznie). Przy uzyskanym poziomie współczynnika determinacji, nie ma powodów do dalszego korygowania opracowanego modelu liniowego.

TABELA 4. Podstawowe statystyki dopasowania modelu liniowego do analizowanych danych

TABLE 4. The basic statistics of fitting the linear model to the analyzed data

Wyszczególnienie	Wartość	Wyszczególnienie	Wartość
Średnia arytmetyczna zmiennej zależnej	176,8	Odchylenie standardowe zmiennej zależnej	38,1
Suma kwadratów reszt	1 271 282,0	Błąd standardowy reszt	20,7
Współczynnik determinacji R ²	0,99	Skorygowany R ²	0,99
F(5, 2966)	47 889,3	Wartość p dla testu F	0,000
Kryterium informacyjne Akaike'a	26 442,3	Kryterium Hannana-Quinna	26 453,1

Źródło: opracowanie własne

TABELA 5. Parametry modelu liniowego i statystyki dobroci dopasowania zmiennych w modelu

TABLE 5. The parameters of the linear model and statistics of goodness of fit

Zmienna objaśniająca	Współczynnik	Błąd standardowy	Wskaźnik błędu [%]	Wartość statystyki t-Studenta	Wartość p-value
Moc	-0,25810	0,0154	5,97	-16,79	<0,0001
Masa	0,07440	0,0039	5,24	18,88	<0,0001
Pojemność	47,67240	1,7279	3,62	27,59	<0,0001
Rok	-0,00207	0,0018	85,71	-1,17	0,2435
Autosegment	1,19910	0,3266	27,24	3,67	0,0002

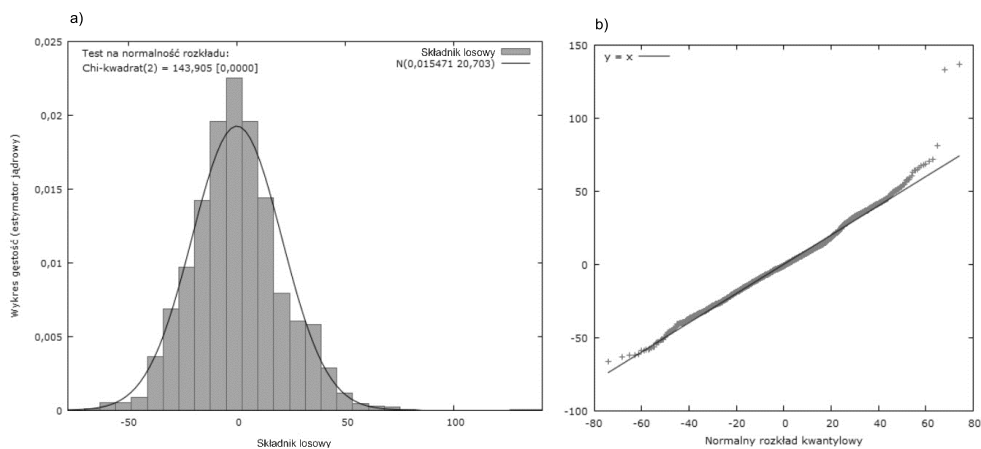
Źródło: opracowanie własne

Rozkład gęstości prawdopodobieństwa reszt (składnika losowego) ma charakter normalny o wartości oczekiwanej bliskiej zeru (0,02) i odchyleniu standardowym równym 20,7 g CO₂/km (symetryczność rozkładu reszt). Potwierdza to również test normalności rozkładu reszt, dla którego statystyka χ^2 wynosi 143,9, a ocena jej istotności statystycznej potwierdzona została bardzo niską wartością *p-value* równą $5,64308e^{-32}$ (rys. 3).

Na rysunku 4. przedstawiono z kolei rozkład rzeczywistych obserwacji emisji CO₂ względem oszacowań uzyskanych na podstawie zbudowanego modelu.

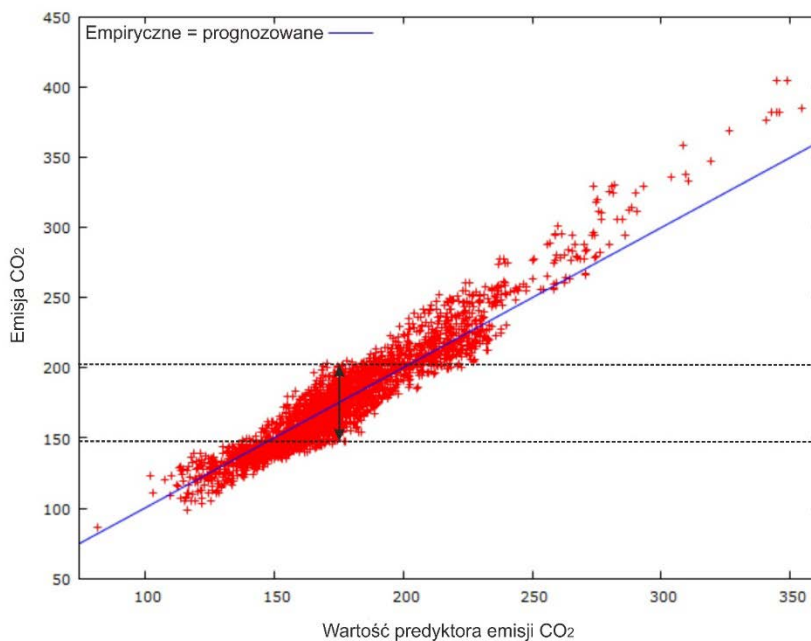
Przy interpretacji dołączony wykres uwidacznia się jednak niska przydatność modelu do oszacowania realnej emisji CO₂ (zużycia oleju napędowego) dla pojedynczego samochodu. Wyraża to duży zakres błędu interpretacji uzyskanych wyników. Na przykład dla wartości prognozowanych bliskich 175 g CO₂/km, rzeczywista emisja CO₂ może wynosić od około 150 g CO₂/km do nieco ponad 200 g CO₂/km. Widoczny staje się również fakt, że na podstawie tego modelu można błędnie prognozować poziomy emisji CO₂ w górnych zakresach, zaniżając ich faktyczną wartość (rys. 4).

Takie uwarunkowanie modelu nie przeszkadza jednak w wyciąganiu wiążących wniosków dla większych zbiorów samochodów, w skrajnym przypadku – całych flot (zbiorowiska). Potwierdzają to również wyniki oceny składnika losowego (reszt) w modelu.



Rys. 3. Składnik losowy; a) histogram reszt, b) rozkład kwantylowy reszt
 Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Random component: a) the probability density function b) normal Q-Q plot



Rys. 4. Wartości emisji CO₂ z próby i prognozowane na podstawie opracowanego modelu liniowego
 Źródło: opracowanie własne

Fig. 4. The CO₂ emissions from the sample and projected on the basis of the linear model

Aby możliwe było precyzyjne oszacowanie emisji CO₂ dla pojedynczego pojazdu podjęta została próba dopasowania bardziej skomplikowanego modelu teoretycznego z zakresu modelowania sieciowego, metod grupowania i logiki rozmytej. U podstaw tego działania

leżała próba wydzielenia z próbki mniejszych zbiorów bardziej jednolitych obserwacji. W tym celu wykorzystano algorytmy grupowania, które dla wybranych atrybutów określają odległości euklidesowe oraz uczące bez nadzoru algorytmu logiki rozmytej, które są udostępnione w programie KNIME 2.11.3.

Podział na klasy przeprowadzono dla różnych wariantów, które tworzą zmieniając liczbę podzbiorów w zakresie od 3 do 40. Zmieniało również atrybuty, tj. cechy modeli, według których było prowadzone grupowanie. Ostatecznie jednak, żaden wariant grupowania nie pozwolił osiągnąć rezultatu modelowania bardziej satysfakcjonującego statystycznie niż estymacja emisji CO₂ modelem liniowym dla całej próbki. Obserwacje zaklasyfikowane do niektórych podzbiorów pozwalały zbudować model wielomianowy o wysokim współczynniku determinacji i niskiej wartości odchylenia standardowego składnika losowego. Jednak w wielu innych podzbiórach problem właściwego doboru modelu teoretycznego nie został rozwiązany na satysfakcjonującym poziomie oceny statystycznej, co kończyło prace w tym zakresie.

Schemat opracowanego modelu sieciowego załączono na rysunku 5.

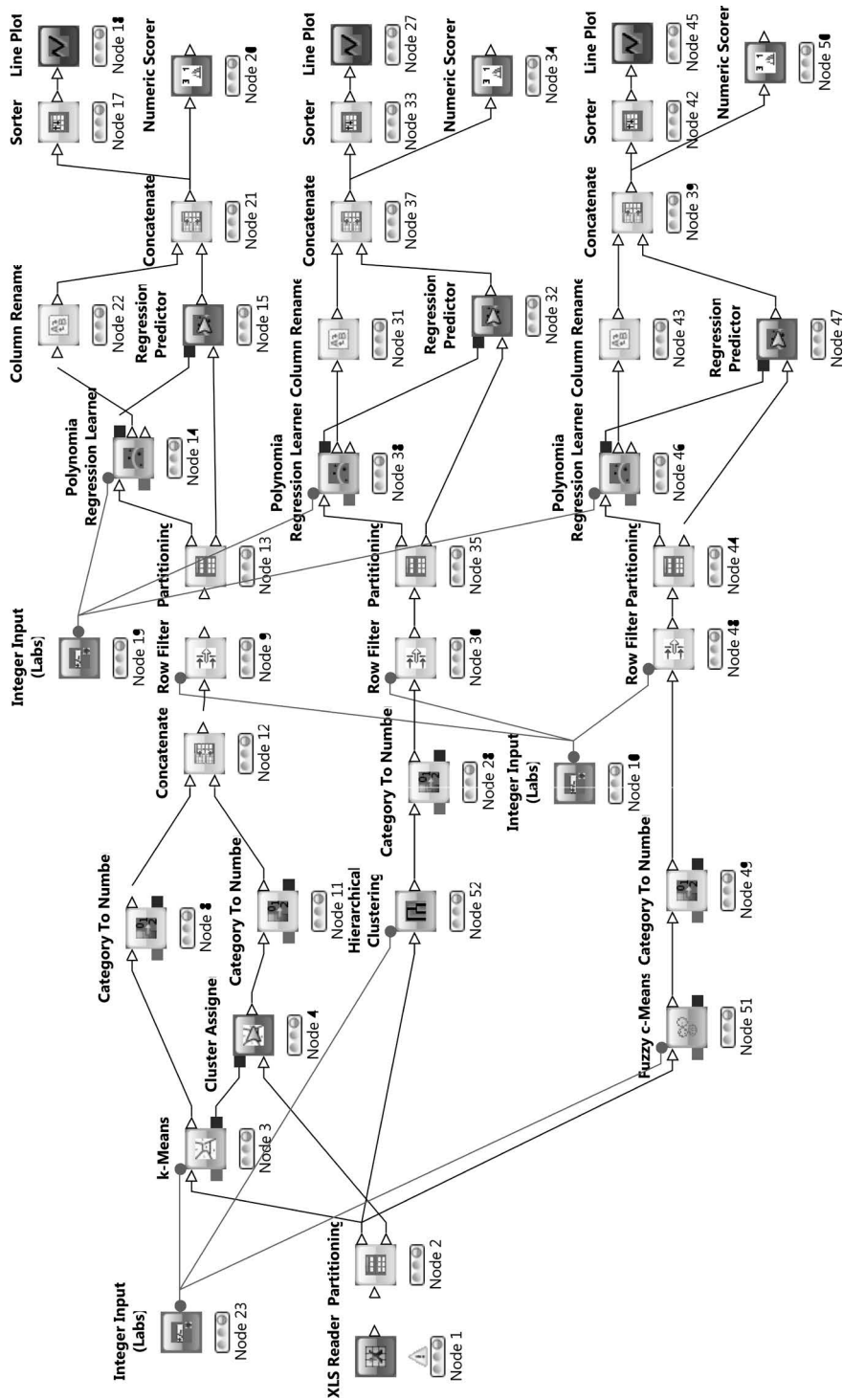
Ponieważ dotychczasowe wyniki prac były niesatysfakcjonujące, w dalszej kolejności zdecydowano się zastosować podejście bazujące na wykorzystaniu symulacji Monte Carlo. Narzucono typ rozwiązania bazującego na warunkowym próbkowaniu modeli rozkładów teoretycznych, dobranych do zmiennych empirycznych. Zmiennymi tymi były kombinacje cech analizowanych pojazdów osobowych.

W pierwszej fazie modelowania, przeprowadzono wstępną klasyfikację obserwacji według trzech cech, tj. rok (5 klas), pojemność (5 klas) i masa pojazdu (5 klas). Ustalono w ten sposób 125 kombinacji (podzbiorów), dla których podjęto próbę doboru rozkładów gęstości prawdopodobieństwa. Niestety podejście takie okazało się nieskuteczne głównie za sprawą małej liczby obserwacji dla niektórych kombinacji cech. Uzyskano ciągle niewielkie różnicowanie wartości oczekiwanej emisji CO₂ dla niektórych podzbiorów cech. Widoczne też było duże rozproszenie danych i platykurtyczny charakter ich rozkładów gęstości prawdopodobieństwa. Złożenie tak otrzymanych rezultatów modelowania symulacyjnego dalej nie rozwiązywało problemu jednoznacznego szacunku zużycia oleju napędowego dla pojedynczego samochodu na podstawie zestawu cech go określających, czyli posiadanego zbioru danych wejściowych.

Podsumowanie

Praca stanowi próbę doboru właściwego modelu teoretycznego, przy pomocy którego możliwe byłoby prognozowanie szacunkowego zużycia oleju napędowego (na podstawie emisji ditlenku węgla) dla wyspecyfikowanej grupy samochodów osobowych. Analizowane pojazdy opisane były wektorem kilku cech charakterystycznych, w szczególności: pojemność i moc silnika, masa pojazdu, rok wprowadzenia samochodu do produkcji oraz autosegment, do którego pojazd został zakwalifikowany.

W badaniach podjęto próbę zastosowania trzech odmiennych typów rozwiązań problemu badawczego. Obejmowały one dopasowanie modeli liniowych i nieliniowych, modelowanie przy pomocy metod sieciowych i grupowania wykorzystujących algorytmy logiki rozmytej, czy też symulację Monte Carlo.



Rys. 5. Model sieciowy bazujący na metodach grupowania i algorytmach logiki rozmytej

Źródło: opracowanie własne

Fig. 5. The network model based on clustering methods and fuzzy logic algorithms

Dotychczasowe wyniki prac wskazują, że trudno jest uzyskać rozwiązanie, które będzie uniwersalne dla zbioru posiadanych cech samochodów osobowych.

Próby estymacji modeli nieliniowych nie przynosiły spodziewanego efektu. Wyraźnej poprawy jakości modelowania nie osiągnięto również przy wykorzystaniu zaawansowanych metod matematycznych i statystycznych oraz symulacyjnych.

Przedstawiony model w postaci równania wielomianowego pierwszego stopnia może być zasadniczo zastosowany do prognozowania całkowitej lub średniej emisji CO₂, a tym samym zużycia oleju napędowego dla większych zbiorów pojazdów lub całych flot.

Możliwe przybliżenie poziomu zużycia oleju napędowego na podstawie emisji CO₂ w pojedynczych samochodach osobowych można osiągnąć metodą analogii, poprzez porównanie cech danego pojazdu z wartościami cech pojazdów dla zgromadzonej próbki obserwacji. Podejście to nie jest wolne od błędów, ale w przypadku konieczności prognozowania emisji CO₂ dla konkretnego pojazdu daje ono lepsze wyniki niż korzystanie z zaproponowanego modelu liniowego.

Niezależnie od zastosowanej metody analizy, w zbiorze danych wejściowych ujawnia się prawidłowość, że pojedynczy samochód, podobnie jak i większe grupy aut, cechuje duża elastyczność w zakresie emisji CO₂ i spalania oleju napędowego. Wynika to zarówno z właściwości produkowanych silników, sposobu użytkowania pojazdów, czy też innych czynników takich jak: pora roku, opory powietrza, rodzaj nawierzchni, rodzaj ogumienia i innych mniej znaczących.

W pracy nie podjęto próby wykorzystania sieci neuronowych. Przyszłe prace winny obejmować ponadto rozszerzenie zakresu zbioru analizowanych cech zmierzające do poprawy stopnia zróżnicowania zbioru zmiennych opisujących emisję CO₂ i zużycie paliwa w samochodach osobowych. Niewątpliwie, wśród najbardziej pożądanych cech można wymienić współczynnik oporów powietrza czy rodzaj osprzętu silnika.

Literatura

- Andrzejewski, M. 2013. Wpływ stylu jazdy kierowcy na zużycie paliwa i emisję substancji szkodliwych w spalinach. Praca doktorska. Politechnika Poznańska. [Online] Dostępne w: http://repozytorium.put.poznan.pl/Content/285883/Maciej_Andrzejewski_Wplyw_stylu_jazdy_kierowcy_na_zuzycie_paliwa_i_emisje_substancji_szkodliwych_w_spalinach.pdf [Dostęp: 31.08.2015].
- International... 2014 – From Laboratory to Road: A 2014 Update of Official and “Real-World” Fuel Consumption and CO₂ Values for Passenger Cars in Europe. International Council on Clean Transportation, 2014. [Online] Dostępne w: http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LaboratoryToRoad_2014_Report_English.pdf [Dostęp: 31.08.2015].
- Lorenc, A. 2012. Metodyka prognozowania rzeczywistego zużycia paliwa. *Czasopismo Techniczne. Mechanika*. 109, z. 7-M, s. 135–145.
- Nowak, E. 1998. *Prognozowanie gospodarcze: Metody, modele, zastosowania, przykłady*. Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa.
- Orzechowska, M. i Kryzia, D. 2014. Analiza SWOT wykorzystania gazu ziemnego w transporcie drogowym w Polsce. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 17, z. 3, s. 321–332.
- Raport... 2011 – Opracowanie strategii dobrego planowania prac budowlanych w odniesieniu do zużycia paliwa i emisji CO₂. EC Project sp. z o.o. Kraków 2011. [Online] Dostępne w: http://wspolny.niepolomice.eu/dokumenty_na_strone/raport_dobre_praktyki.pdf [Dostęp: 31.08.2015].
- Siłka, W. 1994. *Teoria ruchu samochodu, energochłonności ruchu I zużycia paliwa*. Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu, Opole.

Ubysz, A. 2008. Prognozowanie zużycia paliwa w samochodzie osobowym w ruchu rzeczywistym. Czasopismo *Techniczne. Mechanika* 105, z. 6-M, s. 209–217.

www.autocentrum.pl

www.carfolio.com

Zajac, K. 1994. *Zarys metod statystycznych*. Wyd. 5, PWE, Warszawa 1994.

Zeliaś A. i in. 2003 – Zeliaś, A., Pawelek, B. i Wanat, S. 2003. *Prognozowanie ekonomiczne: Teoria, przykłady, zadania*. PWN, Warszawa.