

ZUŻYCIE ZASOBÓW W CYKLU ŻYCIA KONSTRUKCJI: SAMOLOT, SAMOCHÓD

Michał Pokorski
Instytut Lotnictwa

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę zużycia zasobów w cyklu życia konstrukcji, dla samolotu i samochodu, takich jak: energia, materiały, woda. Analiza uwzględnia głównie fazy produkcji i eksploatacji. A także emisję powstających zanieczyszczeń: odpady wyrzucane, ścieki, dwutlenek węgla (CO₂) i lotne pochodne węglowodorów (VOC). Wyniki prezentowane są w formie porównania samolotu do samochodu w przeliczeniu na pasażero-kilometr.

1. WSTĘP

W ostatnich latach aspekty ekologiczne działalności człowieka nabierają coraz większego znaczenia. Kupujemy energooszczędne żarówki, segregujemy śmieci. Producenci samochodów oprócz zużycia paliwa, jako jeden z ważnych parametrów, podają emisję CO₂. Czy to jednak wystarczy, aby ocenić piętno, jakie pojazdy odciskają na środowisku? I w jaki sposób porównać je na przykład z samolotami?

Kwestia uciążliwości dla środowiska była jednym z problemów analizowanych w ramach programu „System Transportu Małymi Samolotami” (STMS) realizowanego w Instytucie Lotnictwa. Niniejsza praca jest próbą odpowiedzi na postawione pytania.

Porównując różne środki transportu często mówi się jednak tylko o wybranych fazach cyklu życia samolotu czy samochodu. Najczęściej jest to eksploatacja i to niepełna. To znaczy patrzymy na zużycie paliwa i związaną z tym emisję CO₂. To zdecydowanie zbyt wąskie spojrzenie. Aby rzeczywiście móc porównać różne środki transportu należy wziąć pod uwagę pełny cykl życia konstrukcji i związane z nim obciążenie środowiska. Poniżej przedstawiono takie podejście, zwane: „Environmental Management System” (System Zarządzania Środowiskowego) producentów branży lotniczej i motoryzacyjnej, odpowiednio Airbusa i Toyoty.

Jak widać na rysunkach 1 i 2 Airbus i Toyota przywiązują dużą wagę do ograniczenia uciążliwości dla środowiska na każdym z etapów cyklu życia konstrukcji. Choć oba schematy nieco się różnią, można jednak wyodrębnić następujące główne etapy:

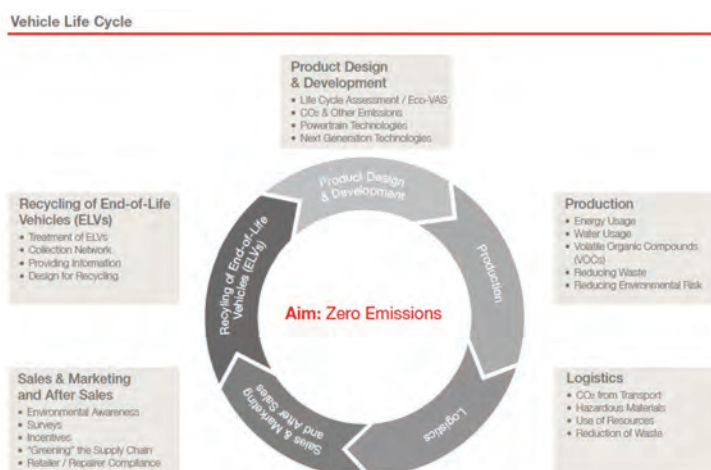
1. projektowanie i rozwój,
2. produkcja,
3. logistyka; na etapie produkcji i eksploatacji,
4. eksploatacja,
5. wycofanie z eksploatacji i recycling.

W każdym z etapów konsumuje się zasoby takie jak: energia, woda, materiały. Występuje

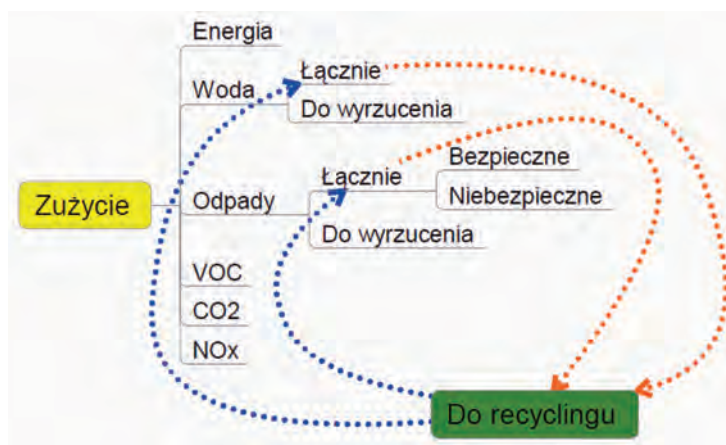
także emisja gazów takich jak: lotne związki węglodorów¹⁾ (VOC), dwutlenek węgla (CO₂), tlenki azotu(NO_x) oraz wyrzucanie odpady. Aby osiągnąć ambitne cele redukcji uciążliwości dla środowiska, w każdym z etapów próbuje się odzyskać jak najwięcej zasobów do powtórnego przetworzenia, rys. 3.



Rys. 1. System Zarządzania Środowiskowego Airbusa (Airbus Environmental Management System), w/g [2]



Rys. 2. System Zarządzania Środowiskowego Toyoty (Toyota Environmental Management System), w/g [1]



Rys. 3. Zużycie zasobów w każdym z etapów cyklu życia konstrukcji

¹⁾ Volatile Organic Compounds

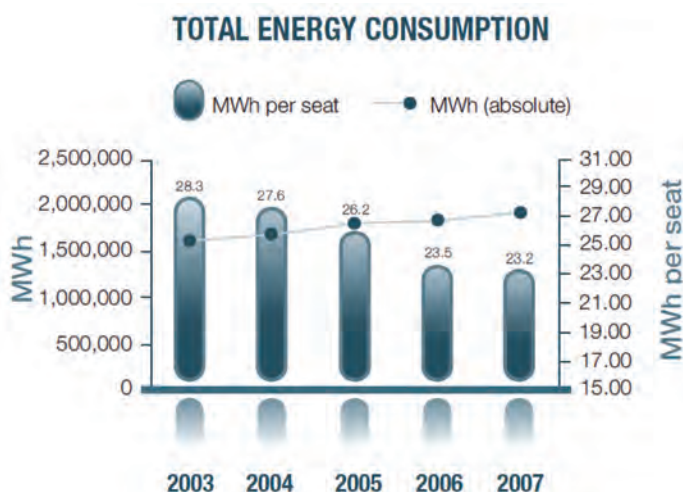
2. ZUŻYCIE ZASOBÓW

Analiza problemu jest bardzo złożona i wymaga dużej ilości szczegółowych danych. Są one trudno dostępne. Niewielu producentów publikuje wyczerpujące raporty środowiskowe. W niniejszej pracy oprzemy się na raportach producentów samolotów i samochodów, to jest, Airbusa i Toyoty [1, 2]. Pomimo obszerności, opracowania nie zawsze zawierają komplet danych do opisu wszystkich wymienionych faz oraz ich wzajemnego porównania. Dlatego skupimy się głównie na fazie produkcji i eksploatacji. Porównanie dotyczy roku 2006. Należy także zauważyć, że w praca dotyczy samolotów klasy General Aviation. Brak danych dla małych producentów zmusza nas do korzystania z informacji dostarczanych przez raporty Airbusa, odpowiednio skalowanych.

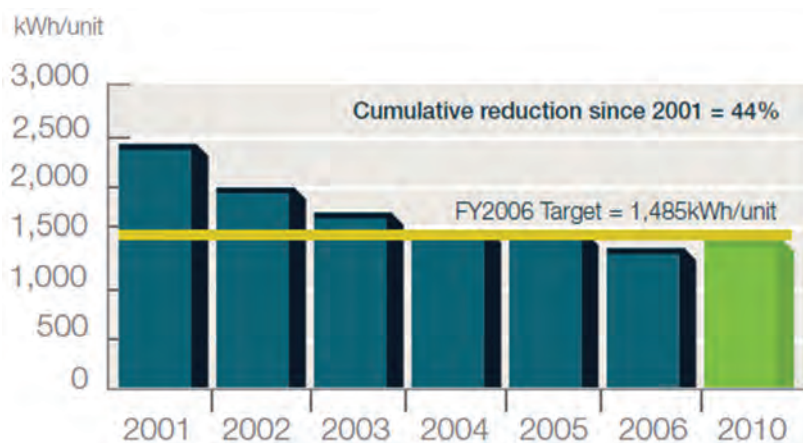
W przypadku Airbusa dane odnoszą się do miejsca pasażerskiego, a dla Toyoty do samochodu. Jak widać, w celu dalszej analizy i porównania konieczne będzie przeliczenie tych wielkości.

2.1. Energia

Zużycie energii to nie tylko procesy produkcyjne. To także wydatki na ogrzewanie i oświetlenie hal produkcyjnych, budynków administracyjnych i biur. Obydwaj producenci sukcesywnie zmniejszają konsumpcję energii na jednostkę produkcji (miejsce pasażerskie i samochód). Na przykład Airbus zmniejszył zużycie z 28.3MWh, na miejsce, w 2003 roku do 23.5MWh w 2006 roku. W przypadku Toyoty widać wyhamowanie redukcji, a nawet lekki trend odwrotny w 2010 roku. Pokazano to na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Łączne zużycie energii na miejsce pasażerskie [2]



Rys. 5. Łączne zużycie energii na samochód - Toyota [1]

2.2. Materiały

Zużycie materiałów można rozumieć jako ilość masy struktury konstrukcji, ale także jako ilość wyrzucanych odpadów przypadających na jednostkę masy tejże konstrukcji. Miarą uciążliwości dla środowiska jest oczywiście ilość odpadów trafiających na wysypiska. Należałoby uwzględnić cały cykl życia. Problemem jest jednak skąpa ilość danych dla faz innych niż produkcja. W raportach obydwóch producentów [1, 2] brak jakichkolwiek danych o zużyciu zasobów na etapie eksploatacji. Problemem stanowi również wycofanie z eksploatacji. Airbus podaje, na przykład, że na tym etapie 15% materiału trafia na wysypiska. Toyota publikuje jedynie prognozę, że w 2015 roku będzie to 5%. Dodatkowo obydwaj producenci inaczej dzielą łączną masę odpadów powstających podczas produkcji. Toyota wydziela tu kategorię „Waste to landfill” – to co zostaje wyrzucone, podczas gdy Airbus dzieli je na niebezpieczne i bezpieczne. Nie pozostaje nam nic innego jak założyć, że:

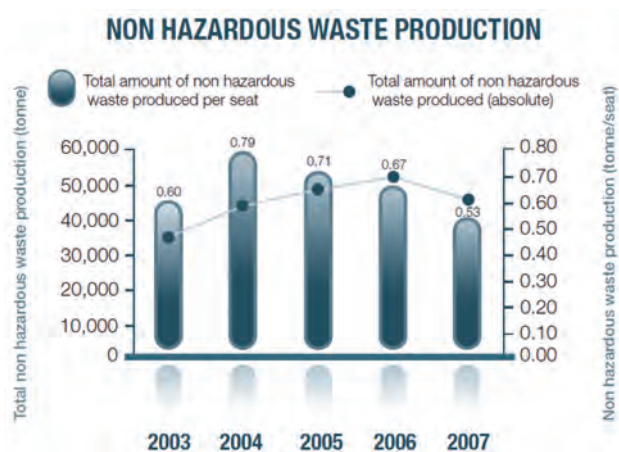
- na etapie wycofania z eksploatacji 15% materiału jest wyrzucana, w obydwu przypadkach;
- Airbus na etapie produkcji wyrzuca 15% materiału.

Dokładne zużycie materiałów dla Airbusa przedstawiają rysunki 6 i 7. Warto zauważyć, że „wyprodukowanie” 1 miejsca pasażerskiego obciąża środowisko 0.36 ton szkodliwych odpadów w 2006 roku (spadek z 0.47 ton w 2003 roku) oraz 0.67 ton odpadów nieszkodliwych (wzrost w stosunku do 2003 roku; 0.60 ton).

Rysunek 8 przedstawia łączną ilość wyrzucanych odpadów w wybranych fabrykach Toyoty [1]. Natomiast na rysunku 9 przedstawiono masę wyrzucanych śmieci w przeliczeniu na samochód. W 2006 roku Toyocie udało się skokowo zredukować tą wielkość do 18g/samochód! Stawia to wysokie wymagania innym producentom.



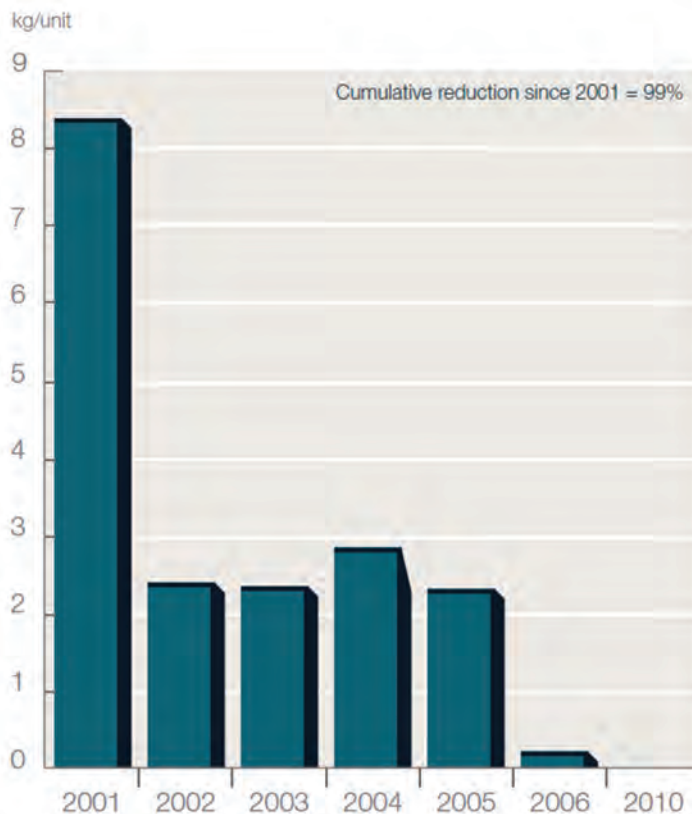
Rys. 6. Ilość odpadów niebezpiecznych – Airbus [2]



Rys. 7. Ilość odpadów bezpiecznych – Airbus [2]

Total KPI Waste (tonnes) ⁽¹⁾	11,272	13,464 ⁽²⁾	14,789	17,256	26,329
Total Waste to Landfill (tonnes)	1,179	1,252	1,680	2,319	71

Rys. 8. Ilość odpadów: łączna i wyrzucana – Toyota [1]



Rys. 9. Redukcja ilości wyrzucanych odpadów/samochód – Toyota [1]

2.3. Woda

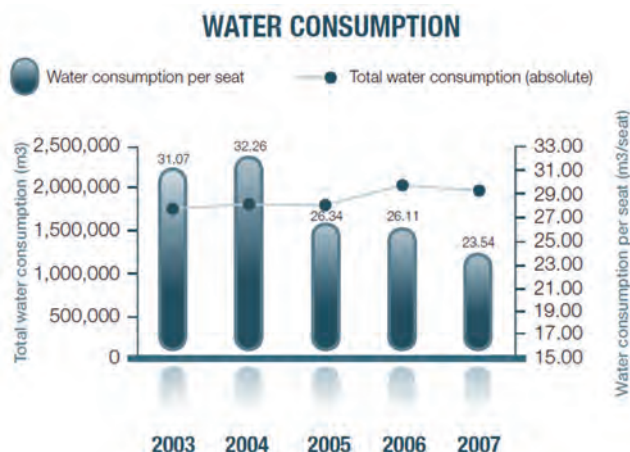
Zużycie wody na jednostkę produkcji można rozumieć dwojako. Po pierwsze jako ilość wody pobieranej niezbędnej do produkcji. Nie wszystko jednak z tej puli zostaje wylana jako ścieki, które to właśnie są miarą obciążenia dla środowiska.

Przykład ten dobrze ilustruje rysunek 9. Przed wprowadzeniem usprawnień w Toyocie zużycie wody wynosiło 7.4m^3 na godzinę, po 7.0m^3 jest odzyskiwana. Oznacza to aż 18.5-krotną redukcję ilości ścieków. Rysunek 10 przedstawia, z kolei zużycie wody na samochód. Widać tu redukcję z 3.5m^3 w 2001 roku do około 2.2m^3 w roku 2006.

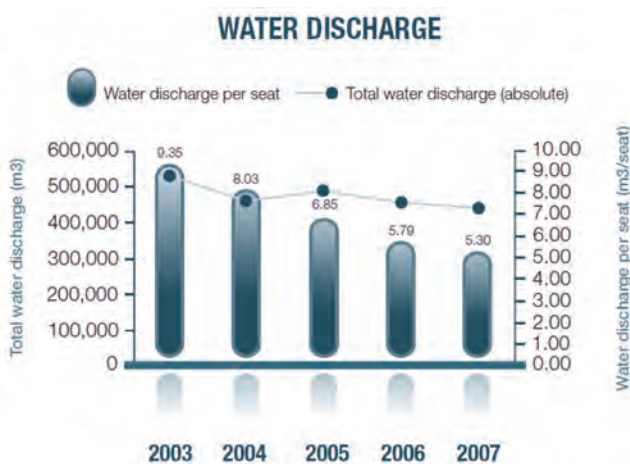


Rys. 10. Zużycie wody przed i po wprowadzeniu oszczędności – Toyota [1]

Rysunki 11 i 12 pokazują, odpowiednio zużycie wody i produkcję ścieków dla Airbusa. W 2006 roku było to odpowiednio 26.11m³ i 5.79 m³.



Rys. 11. Zużycie wody na samochód – Toyota [1]



Rys. 12. Zużycie łączne wody – Airbus [2]

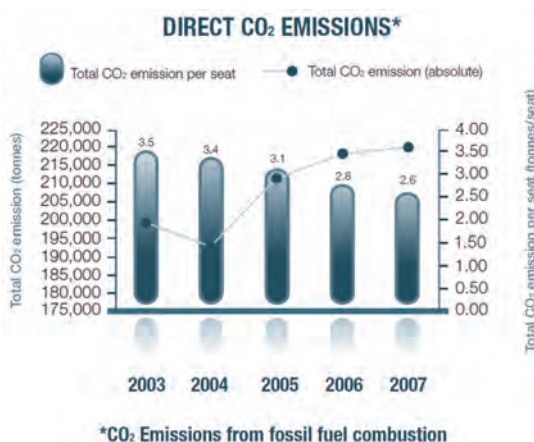


Rys. 13. Produkcja ścieków – Airbus [2]

2.4. Emisja CO₂

Emisja dwutlenku węgla jest ważnym miernikiem ekologiczności wyrobu. Przy czym zazwyczaj rozumiemy ją jako emisję podczas eksploatacji. Poniżej przedstawione wielkości odnoszą się do etapu produkcji.

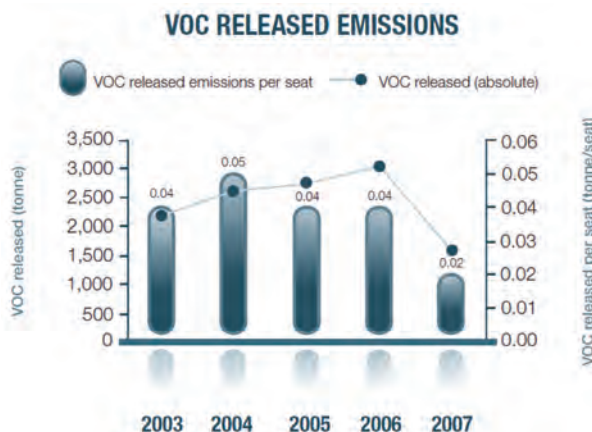
Airbus systematycznie redukuje emisję CO₂, z 3.5 tony w 2003 do 2.8 tony na miejsce w 2006 roku. Toyota nie podaje wprost emisji CO₂ na samochód. Jednak znając łączną emisję i produkcję można to łatwo obliczyć (0.385 ton/samochód w 2006 roku).



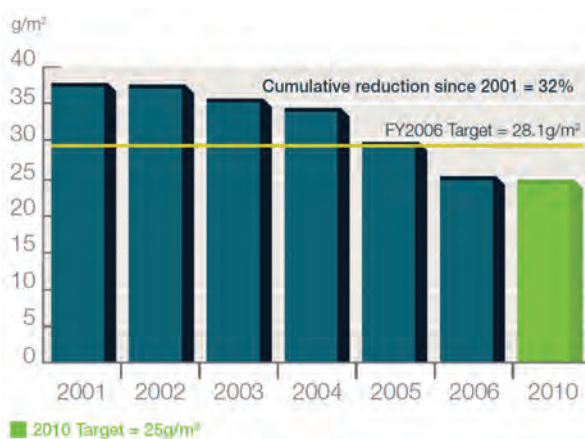
Rys. 14. Emisja CO₂ - Airbus [2]

2.5. Emisja VOC (Volatile Organic Compounds)

Emisja VOC związana jest z pracami lakierniczymi i obróbką powierzchni. Toyota nie podaje wprost emisji na samochód, jednak znając łączną emisję i produkcję można to łatwo obliczyć (2.34kg/samochód w 2006 roku). Tymczasem Airbus emituje 0.04 tony VOC na miejsce pasażerskie (2006 rok).



Rys. 15. Emisja VOC - Airbus [2]



Rys. 16. Emisja VOC (na m²) - Toyota [1]

3. CYKL ŻYCIA KONSTUKCJI

Naszym celem jest porównanie uciążliwości dla środowiska z uwzględnieniem pracy przewozowej wykonanej podczas cyklu życia konstrukcji. Miarą pracy przewozowej jest to ilość pasażerokilometrów „wykonana” w czasie eksploatacji.

W rozdziale 2 przedstawiono zużycie zasobów w wybranych fazach cyklu życia. Jednak te dane nie są wystarczające do przeliczenia zużycia zasobów na pasażero-kilometr i porównani samolotu z samochodem. Potrzebujemy jeszcze dodatkowych informacji, które pozwolą na policzenie pracy przewozowej.

Po pierwsze, danych dotyczących średnich odległości, na których wykorzystywane są samoloty (od tego zależy prędkość blokowa). Pomocny okazuje się tu raport Eurocontrol [3], z którego pochodzi tabela 1. Pokazano w niej średnie odległości, na których latają poszczególne typy samolotów w ruchu biznesowym. Mediana dystansu dla samolotów z napędem tłokowym to zaledwie 196.6 km. Niewiele dalej latają samoloty turbo-śmigłowe, to jest 332.5 km, odrzutowce na dystansie 601.5 km.

Drugim istotnym czynnikiem jest prędkość blokowa²⁾ (V_{block}) na poszczególnych dystansach. Ponadto trzeba znać długość życia konstrukcji. Dla samolotów jest to resurs wyrażony w godzinach, a dla samochodu przebieg wyrażony w kilometrach. Dla samolotów (V_{block} , resurs) posłużymy się wynikami uzyskanymi w programie EPATS [4].

Tabela 1. Ruch lotniczy w Europie: dystanse z podziałem na typy samolotów [3]

		Airport Pairs	Median Distance (km)	Mean Distance (km)
Business	Jet	73045	601.5	1100.8
	Piston	14499	196.6	284.0
	Turboprop	36401	332.5	420.9
Other		108535	1024.3	1553.9
Scheduled		29614	672.5	1423.3

Ważna jest także ilość miejsc pasażerskich i współczynnik ich wypełnienia. Jeśli założymy, że wszystkie miejsca są zajęte otrzymamy pracę przewozową na poziomie technicznym danego środka transportu. Jeśli natomiast uwzględnimy, że w rzeczywistości tylko część miejsc jest zajętych, wynikiem będzie praca przewozowa na poziomie systemu transportu.

Praca przewozowa dla samolotu wyraża się wzorem:

$$N_{pax.km.plane} = Life_{time} \cdot V_{block} \cdot N_{seats} \cdot \eta_{pax}, \quad (1.0)$$

gdzie:

$Life_{time}$ – resurs w godzinach,

V_{block} – prędkość blokowa na danym dystansie w km/h,

N_{seats} – liczba miejsc pasażerskich,

η_{pax} – współczynnik wypełnienia.

Praca przewozowa dla samochodu wyraża się wzorem:

$$N_{pax.km.car} = Distance \cdot N_{seats} \cdot \eta_{pax}, \quad (1.1)$$

²⁾ Prędkość podróży uwzględniająca wszystkie fazy lotu: kołowanie, start, wznoszenie, przelot, krążenie, itd. Jest mniejsza od przelotowej.

gdzie:

Distance – przebieg w czasie całego okresu eksploatacji,

N_{seats} – liczba miejsc pasażerskich,

η_{pax} – współczynnik wypełnienia.

Praca przewozowa ma istotny wpływ na wyniki – zużycie zasobów na pasażero-kilometr. Do policzenia pracy przewozowej należy poczynić szereg założeń.

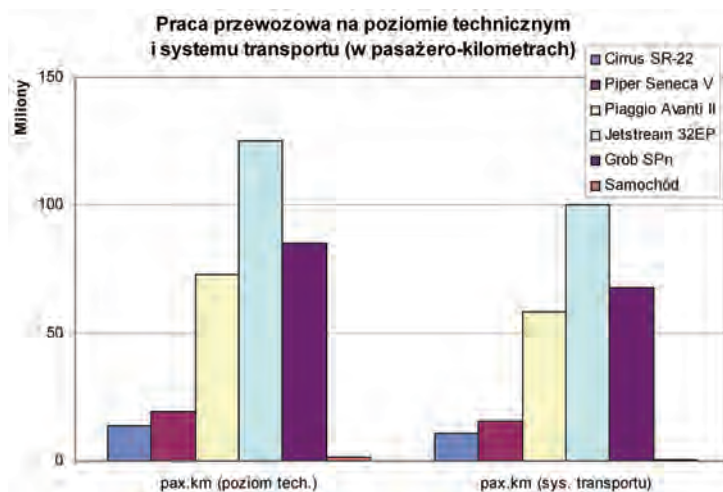
Dla wszystkich samolotów założono rewers płatowca na poziomie 20 000 godzin (tyle ile w programie EPATS na podstawie analizy dokumentów certyfikacyjnych samolotów).

Dla samochodu założono żywotność na poziomie 270 000 km, co oznacza na przykład, 9 lat intensywnej eksploatacji po 30 000 rocznie (biznes). Należy wspomnieć, że trudno o dane rzeczywistego przebiegu w cyklu życia. Problem można rozwiązać posiłkując się analogią z lotnictwa (gdzie wartość resztkowa płatowca wynosi 15%) oraz cenami samochodów używanych. Jak widać przyjęta wielkość wydaje się być rozsądna. Kolejnym ważnym czynnikiem wpływającym na pracę przewozową na poziomie systemu transportu jest współczynnik wypełnienia miejsc. Dla samolotów przyjęto 80%, a dla samochodów 40% (łącznie 5 miejsc). Są to wielkości dość optymistyczne i w toku dalszych prac należy rozważyć ich korektę na podstawie analiz rynku.

W tabeli 2 przedstawiono zestawienie powyższych wielkości. Na rysunku 17, widać porównanie pracy przewozowej, w cyklu życia konstrukcji dla samolotów i samochodu osobowego.

Tabela 2. Porównanie pracy przewozowej samolotów i samochodu – SkodaOctavia 1.9 TDI

	Cirrus SR-22	Piper Seneca V	Piaggio Avanti II	BAE Jetstream 32EP	Grob SPn	Samochód
Cykl życia						
Godziny (km dla samoch.)	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000	270 000
Lata (max)						
Miejsca pasażerskie	3	4	8	19	8	5
Wypełnienie	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.40
Liczba pasażerów	2.40	3.20	6.40	15.20	6.40	2.00
Misja						
Dystans – Mediana [km]	197	197	333	333	602	0
Prędkość blokowa [km/h]	226	240	457	329	531	0
Pax*km						
pax.km (poziom tech.)	13 558 476	19 223 600	73 068 208	125 081 421	84 888 383	1 350 000
pax.km (sys. transportu)	10 846 781	15 378 880	58 454 567	100 065 137	67 910 706	540 000



Rys. 17. Praca przewozowa w cyklu życia, na poziomie technicznym i systemu transportu

Widać wyraźnie, że praca przewozowa samochodu jest znacznie niższa od wszystkich samolotów. Wśród samolotów zaś, prym wiedzie 19-to miejscowy 2-silnikowy turbośmigłowy Jetstream. Tuż za nim plasują się konstrukcje 8-mio miejscowe: odrzutowiec Grob i turbośmigłowy Piaggio Avanti II. Na końcu, tłokowe Cirrus i Piper Seneca V. Warto zwrócić uwagę na różnicę pomiędzy samolotami tłokowymi o 3 lub 4 miejscach, a dwukrotnie pojemniejszymi samolotami z napędem turbinowym. Różnica pracy przewozowej jest co najmniej kilkukrotna, na korzyść tych drugich, a przyczyną jest ich większa prędkość.

4. WYNIKI

Porównania dokonano na dwóch poziomach: technicznym i systemu transportu. Warto zauważyć, że w przypadku samochodu, w praktyce, współczynnik wypełnienia miejsc jest dość niski w porównaniu do lotnictwa. Pogarsza to wyniki samochodu na poziomie systemu transportu.

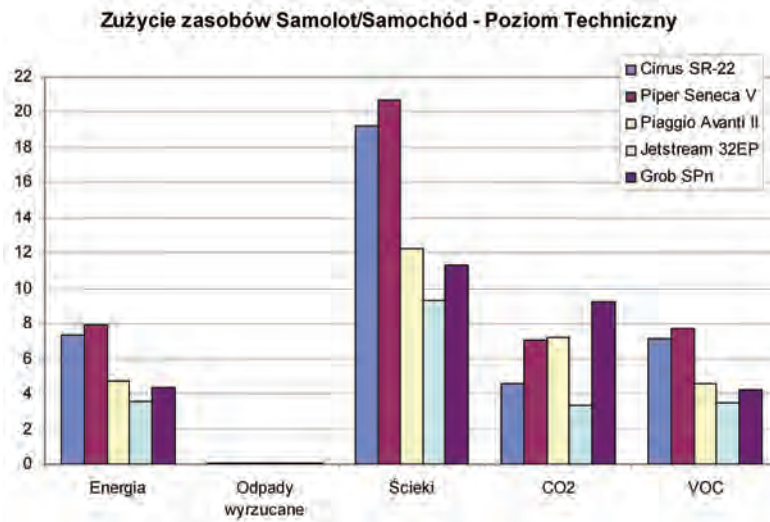
We wszystkich kategoriach, z wyjątkiem materiałów samoloty zużywają kilka do kilkunastu razy więcej zasobów niż samochód. Na przykład zużycie energii jest dla samolotu od ponad 3,5 do prawie 8 razy wyższe, a ilość ścieków od 9.3 do ponad 20 razy wyższa. Emisja szkodliwych gazów, to jest CO₂ i VOC dla samolotów to odpowiednio od około 3.4 (3.5) do 9.3 (7.7) razy więcej niż dla samochodów. Interesujące jest, że zużycie materiałów jest niższe dla samolotów kilkanaście (12.5) do kilkudziesięciu (25) razy. Łatwo to wytłumaczyć, biorąc pod uwagę fakt, że masy konstrukcji przypadające na 1 miejsce pasażerskie są porównywalne, natomiast praca przewozowa samolotów jest zdecydowanie większa. Dokładne wyniki przedstawia tabela 3. W celu łatwiejszego porównania wygodnie jest skorzystać z rysunków od 18 do 21.

Można spierać się, czy samoloty małe-tłokowe nie powinny mieć mniejszej trwałości ze względu na niższą intensywność eksploatacji. Natomiast mały samolot regionalny większej. Implikacją takich zmian było by pogorszenie wyników małych samolotów na tle samolotów i w porównaniu do samochodów. Natomiast 19 miejscowy samolot umocniłby jeszcze swoją przewagę.

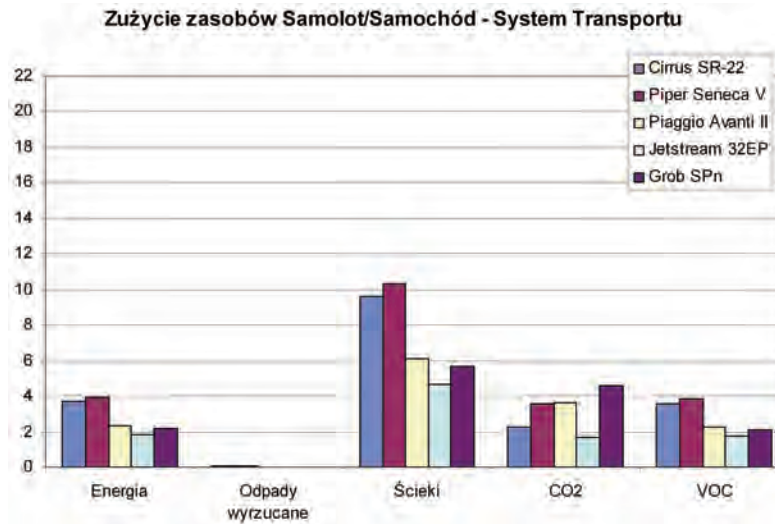
Na wstępie zaznaczono problemy dotyczące dostępności danych dla małych samolotów, co zmusiło nas do korzystania z informacji dostarczanych przez raporty Airbusa, odpowiednio skalowanych. Potrzeba również dokładniejszych danych dotyczących wykorzystania samolotów i samochodów na poziomie systemów transportu. Należy mieć to na względzie analizując wyniki. Warto, kontynuować analizy w miarę dostępności bardziej szczegółowych danych.

Tabela 3. Porównanie zużycie zasobów na pasażero-kilometr w cyklu życia konstrukcji – samolotu do samochodu

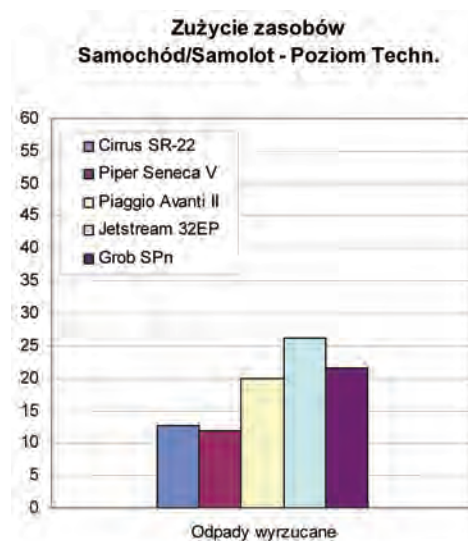
Samolot/Samochód		Cirrus SR-22	Piper Seneca V	Piaggio Avanti II	BAE Jetstream 32EP	Grob SPn
pax.km (poziom tech.)		10.04	14.24	54.12	92.65	62.88
pax.km (sys. transportu)		20.09	28.48	108.25	185.31	125.76
Poziom tech.	Energia	7.38	7.93	4.70	3.57	4.35
	Odpady wyrzucane	0.08	0.08	0.05	0.04	0.05
	Ścieki	19.23	20.66	12.25	9.30	11.32
	CO ₂	4.59	7.09	7.23	3.35	9.25
	VOC	7.15	7.69	4.56	3.46	4.21
Sys. transportu	Energia	3.69	3.97	2.35	1.79	2.17
	Odpady wyrzucane	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02
	Ścieki	9.61	10.33	6.12	4.65	5.66
	CO ₂	2.29	3.55	3.62	1.68	4.62
	VOC	3.58	3.84	2.28	1.73	2.11



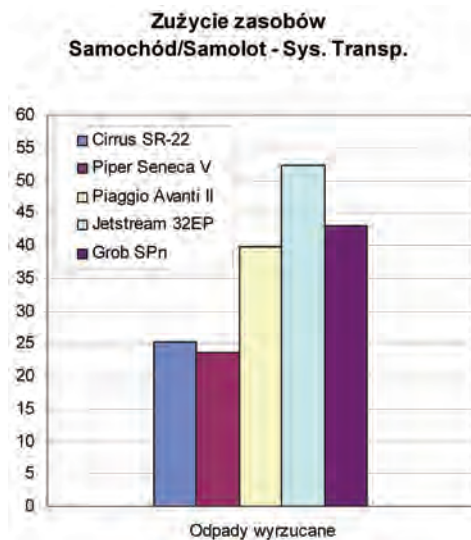
Rys. 18. Porównanie zużycia zasobów na pasażero-kilometr na poziomie technicznym; samolotu do samochodu



Rys. 19. Porównanie zużycia zasobów na pasażero-kilometr na poziomie systemu transportu; samolotu do samochodu



Rys. 20. Porównanie zużycia materiałów na pasażero-kilometr na poziomie technicznym; samochodu do samolotu



Rys. 21. Porównanie zużycia materiałów na pasażero-kilometr na poziomie systemu transportu; samochodu do samolotu

BIBLIOGRAFIA

- [1] Toyota: *European Sustainability Report*, 2007.
- [2] Airbus: *Environmental Social and Economic Report*, 2008.
- [3] EUROCONTROL Trends in Air Traffic volume 1: *Getting to the Point Business Aviation in Europe*, 2006.
- [4] EPATS D4.1: *Aircraft Missions Specification*, Instytut Lotnictwa, BP1, 2008.
- [5] Otomoto.pl: *Ceny samochodów używanych*.

Michał Pokorski

RESOURCES CONSUMPTION WITHIN LIFE CYCLE FOR AN AIRPLANE AND A CAR

Abstract

The elaboration presents analysis of resources consumption within life cycle for an airplane and a car, such as: energy, materials and water. The analysis takes under account production and operating phases, mainly. Also pollution emission of wastes to landfill, water discharge, Carbon Dioxide (CO₂) and Volatile Organic Compounds (VOC). Results are presented as comparison airplane to car recalculated per passenger-kilometer.