



Optymalizacja załadunku samolotu z priorytetami i dzieleniem ładunków

Krzysztof Kujawski,

Jiadong Wang,


Sureshan Karichery

MZBO 2020, 24-26 Październik 2021



Agenda



- 01** **Opis Planowania Załadunku**
 - 02** Ciężar i balans
 - 03** Zasady i ograniczenia
 - 04** Funkcja celu
 - 05** Zarys modelu
 - 06** Scenariusze z linii lotniczych
- 

OPIS PLANOWANIA ZAŁADUNKU

Optymalizacja załadunku samolotu ma na celu przypisanie ładunku do pozycji na pokładzie, biorąc pod uwagę ograniczenia fizyczne, bezpieczeństwa, poprzez modelowanie matematyczne.



Cargo Revenue
Special Load Cost
Split Load
Mixing load
Radioactive Load
Backward Arm
Bulk Load Item
Fair flight info
Distribution
CG Envelope
Max Volume
Center
Gravity Center
Load Balance
Max Weight
Door Position
Cplex
Penalty Cost
Fuel Efficiency
Metrics

Planowanie załadunku to rosnący biznes

6%

Szacowany wzrost
zysków światowego
rynku lotów
towarowych w ciągu
20 lat

4%

Szacowany wzrost
światowego rynku
lotów towarowych
w ciągu 20 lat

2430

Liczba nowych i wymienionych
samolotów transportowych w
ciągu 20 lat



Aspekt środowiskowy planowania załadunku

- Planowanie załadunku ma duży wpływ na zużycie paliwa.
 - Np. w pracy [1] eksperymentalnie wykazano różnice rzędu 10-30% na dwóch typach samolotów w zależności od wyważenia.
- Globalny trend związany obniżaniem emisji, np. w UE „fit for 55” oznacza dla lotnictwa:
 - CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) – światowy program, który ma na celu „offsetowanie” emisji gazów cieplarnianych, jest obowiązkowe dla linii operujących w UE. [2]
 - Emisje muszą być rozliczane w ramach EU ETS.
 - Nafta lotnicza nie będzie już zwolniona z podatku energetycznego, ma być opodatkowana co najmniej €10.75/GJ w UE podobnie jak paliwo drogowe. [3]

[1] https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/5096/1/3603_7304.pdf

[2] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0567>

[3] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0563>

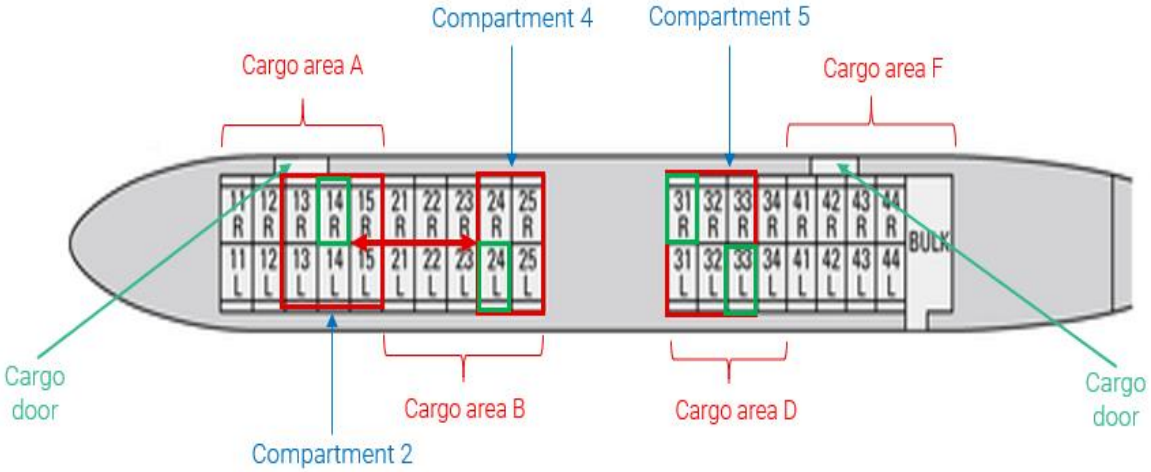
Proces załadunku



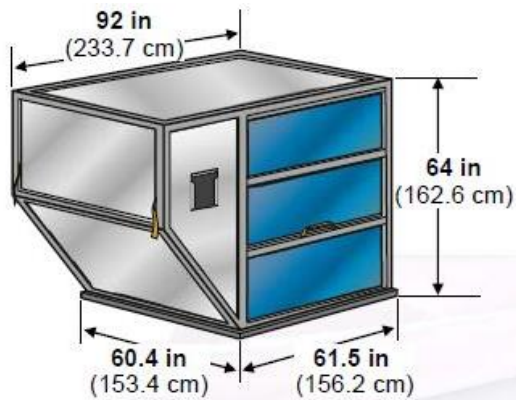
Proces nagromadzenia cargo



Proces załadunku samolotu

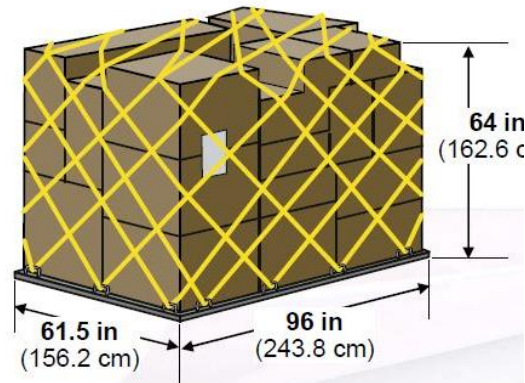


Typy standardowych ładunków (Unit Load Device-ULD)



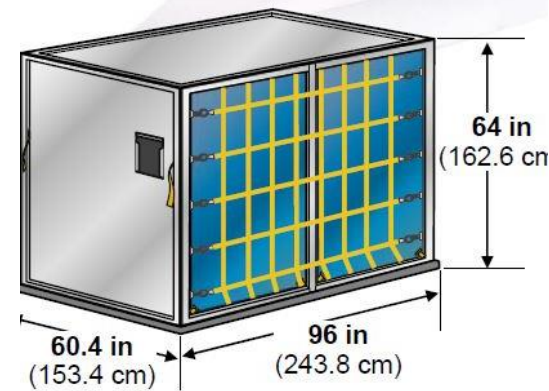
Kontener typu AKC

- Kontener zajmujący połowę dolnego pokładu.
- Maksymalna waga brutto: 1,588 kg
- Tara: 70 to 170 kg
- Objętość AS1825: $5.0 m^3$



PNA 767 półpaleta z siatką

- Kontener zajmujący całą szerokość dolnego pokładu. Podzielny na fragmenty.
- Maksymalna waga brutto: 2,449 kg
- Tara : 83 kg
- Objętość AS1825: $5.5 m^3$



ALP kontener prostokątny

- Kontener zajmujący całą szerokość dolnego pokładu. Drzwi z materiału oraz taśm.
- Maksymalna waga brutto: 2,449 kg
- Tara: 120 kg
- Objętość AS1825 : $5.7 m^3$

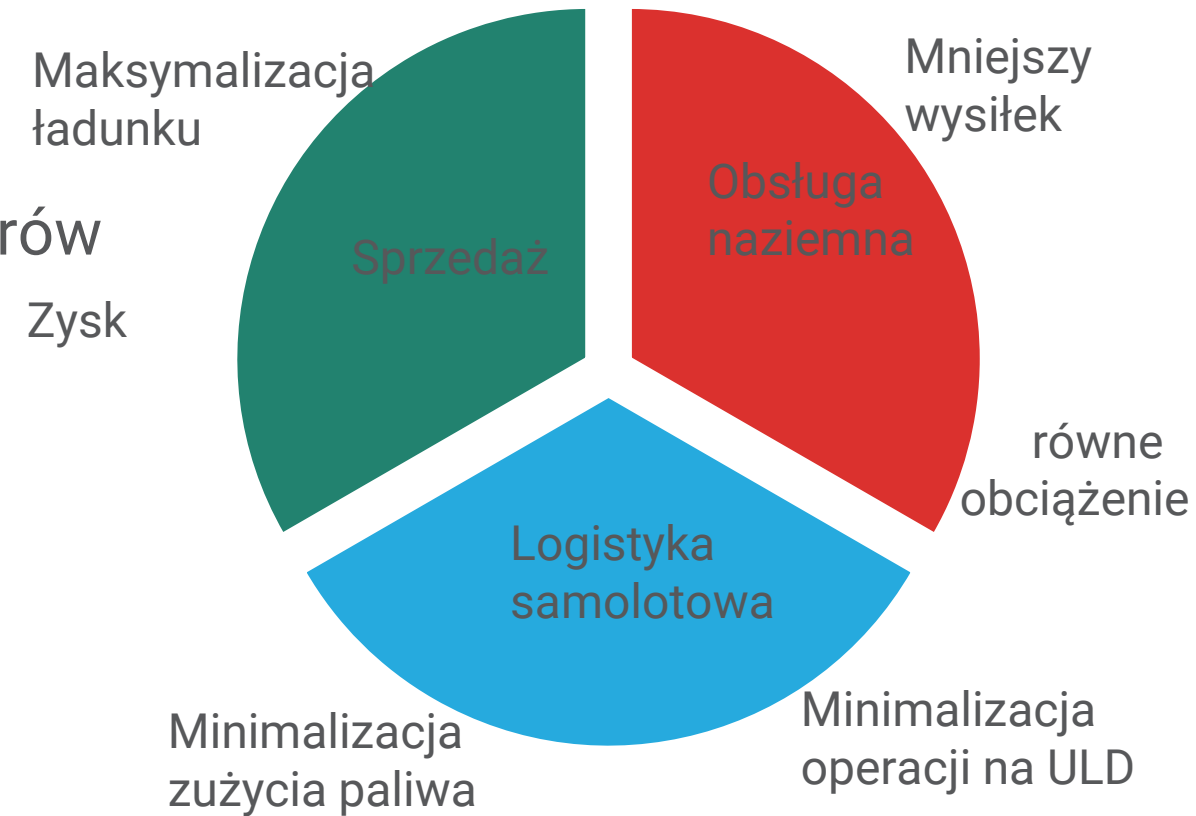


AYY kontener na półpalecie

- Kontener zajmujący połowę górnego pokładu.
- Maksymalna waga brutto: 3,016 kg
- Tara : 80 kg
- Objętość AS1825 : $5.8 m^3$

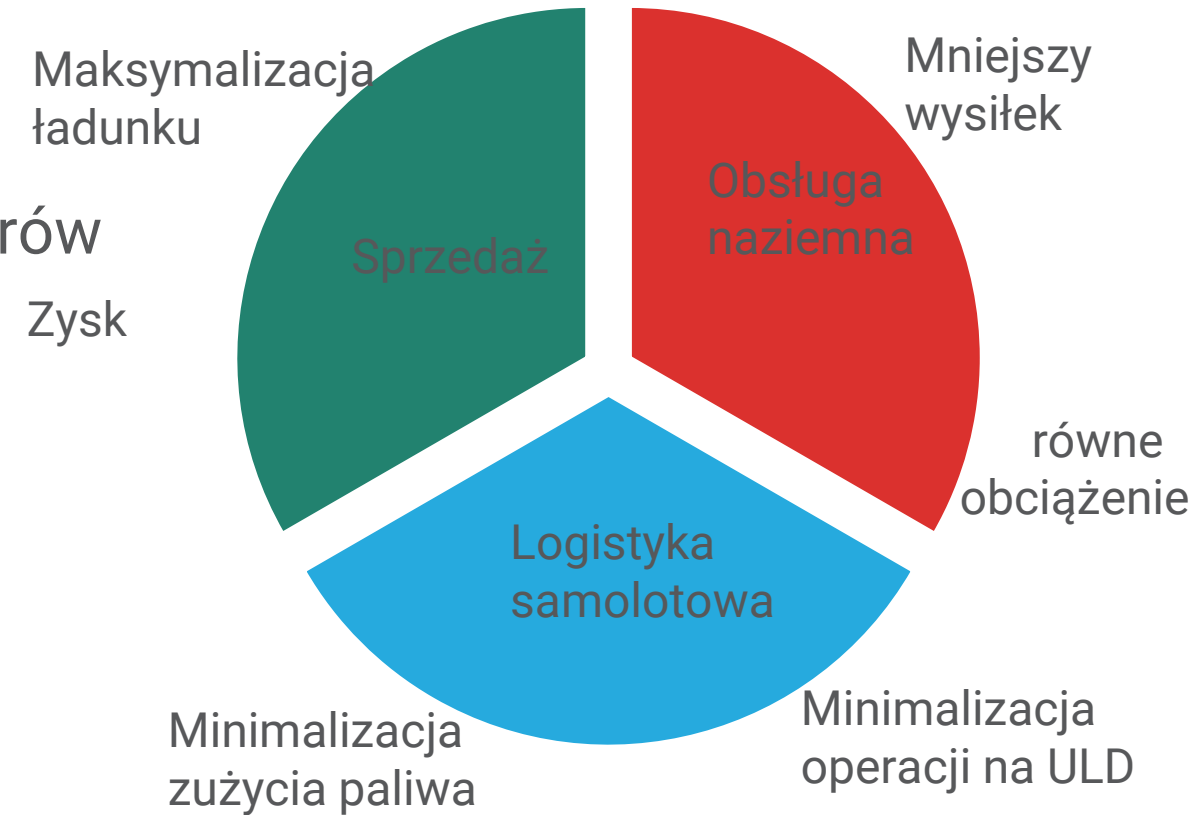
Zagadnienia planowania

- **Problem konfiguracji samolotu**
wybrać typy i liczbę kontenerów do danego lotu
- **Harmonogramowanie tworzenia kontenerów**
kiedy i które stanowisko ma spakować kontener
- **Problem paletyzacji kontenerów**
zdecydować o ułożeniu elementów w kontenerze
- **Problem ciężaru i wyważenia**
gdzie i jakie kontenery mają się znaleźć w samolocie



Zagadnienia planowania

- **Problem konfiguracji samolotu**
wybrać typy i liczbę kontenerów do danego lotu
- **Harmonogramowanie tworzenia kontenerów**
kiedy i które stanowisko ma spakować kontener
- **Problem paletyzacji kontenerów**
zdecydować o ułożeniu elementów w kontenerze
- **Problem ciężaru i wyważenia**
gdzie i jakie kontenery mają się znaleźć w samolocie

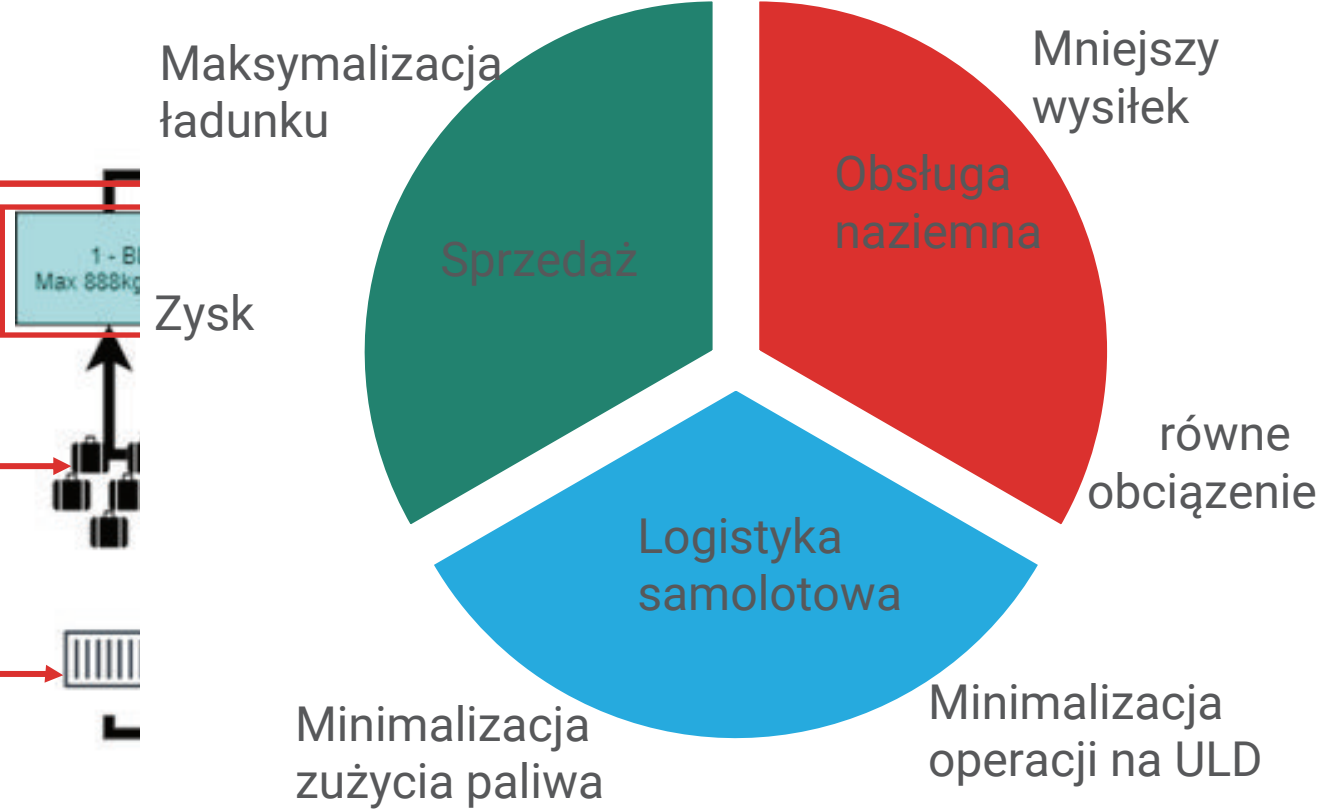


Plane carrying USC football team to Pullman tips onto back wheels on runway

by Fox 28 Spokane | @ | September 18, 2021 1:49 pm

W skrócie

- Zdecydować co załadować
- Gdzie
- Tak żeby spełniać ograniczenia
 - (np. nie wywrócić samolotu☺)
- Realizując cele sprzedaży, obsługi i logistyki w jak najlepszym stopniu

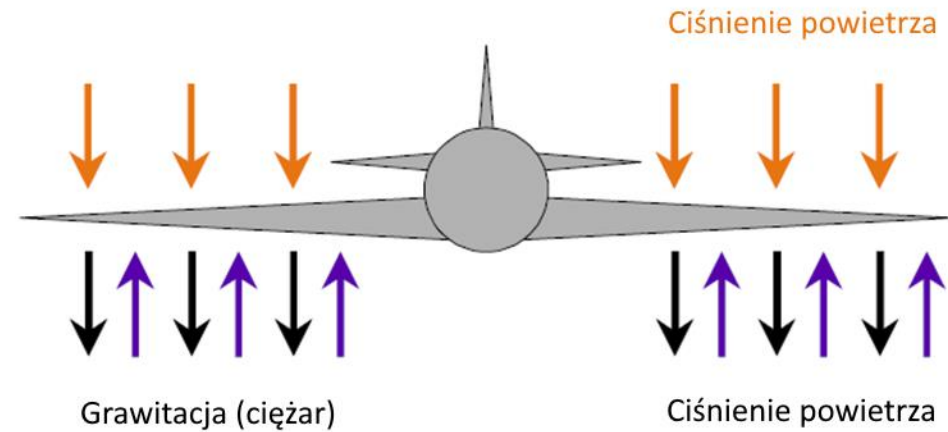


Agenda

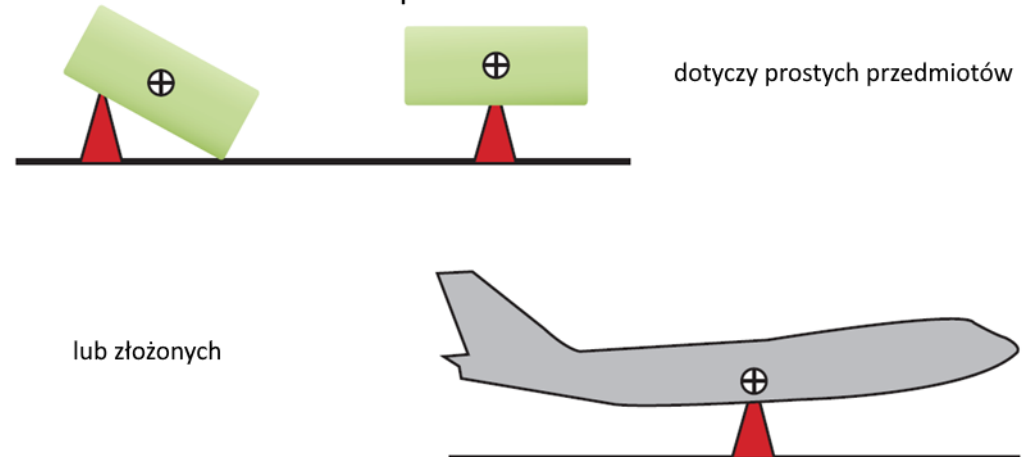


- 01 Opis Planowania Załadunku
- 02 Ciężar i balans**
- 03 Zasady i ograniczenia
- 04 Funkcja celu
- 05 Zarys modelu
- 06 Scenariusze z linii lotniczych

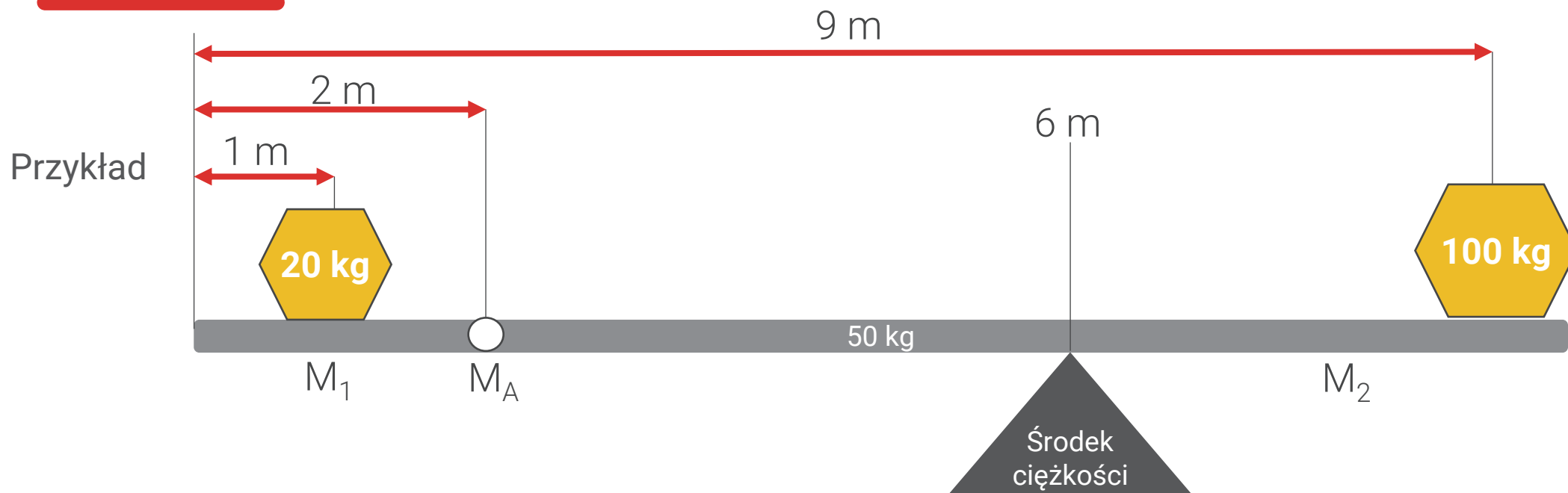
Siły podczas lotu



Środek ciężkości: Punkt w którym ze względów praktycznych można założyć, że jest skoncentrowana cała masa przedmiotu



Środek ciężkości i wyważenie



Moment siły = Siła * oś

$$M = F * r$$

CoG = Całkowity moment siły /
całkowita masa

$$M_A = 50\text{kg} * 2\text{m} = 100\text{kgm}$$

$$M_1 = 20\text{kg} * 1\text{m} = 20\text{kgm}$$

$$M_2 = 100\text{kg} * 9\text{m} = 900\text{kgm}$$

Całkowity moment siły =

$$100\text{kgm} + 20\text{kgm} + 900\text{kgm} = 1020\text{kgm}$$

$$\text{CoG} = 1020\text{kgm} / 170\text{kg} = 6\text{m}$$

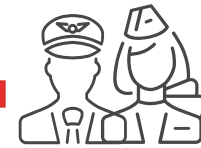
Terminologia związana z wagą samolotu

Basic Weight (BW) =



Dry Operating Weight (DOW) =

BW



Zero Fuel Weight (ZFW) =

DOW



Not usable fuel

Taxi Weight (TW) =

ZFW



Total fuel in tanks

Take Off Weight (TOW) =

TW



Taxi fuel

= ZFW



Take-off fuel

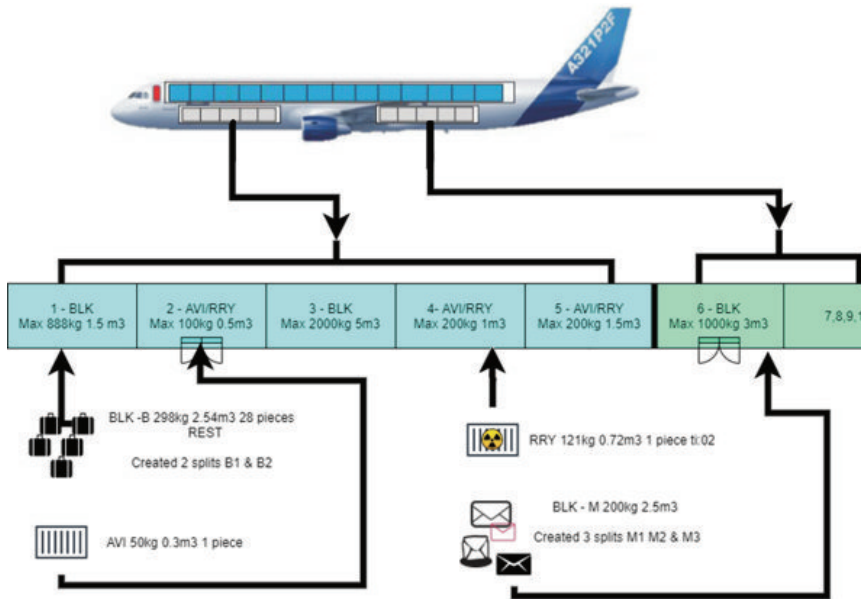
Landing Weight (LW) =

TOW

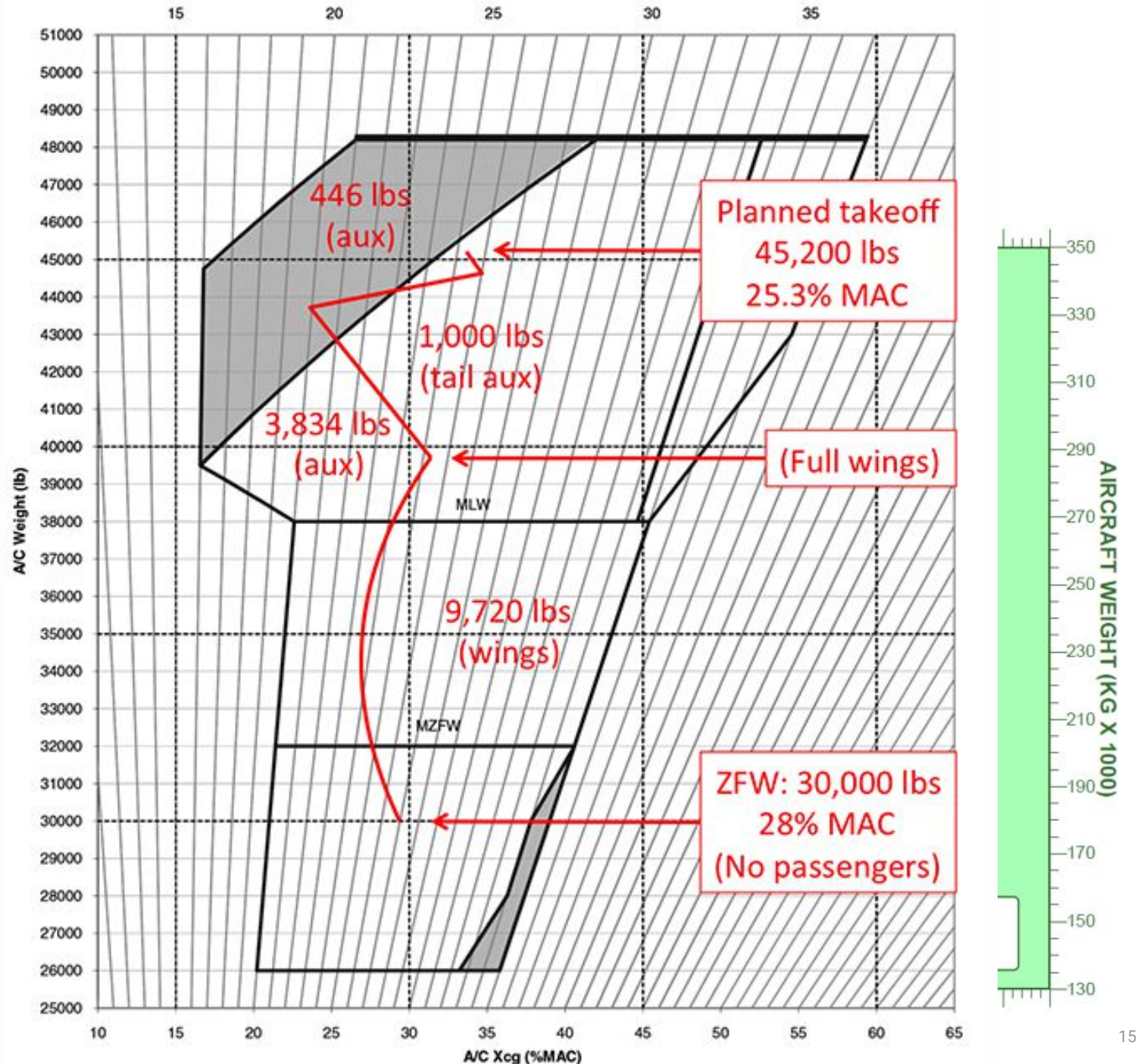


Trip fuel

Obwiednia środka ciężkości



Obliczony środek ciężkości na różnych etapach powinien mieścić się w obwiedni



Agenda

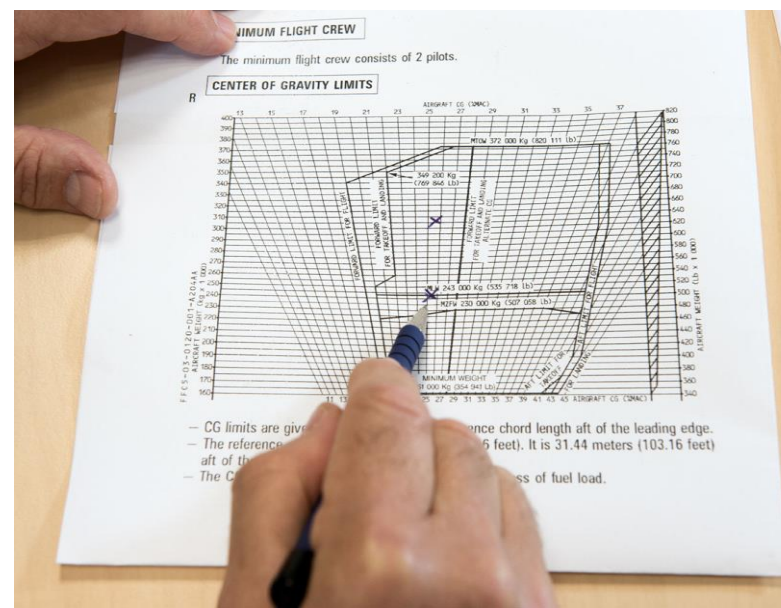


- 01 Opis Planowania Załadunku
- 02 Ciężar i balans
- 03 Zasady i ograniczenia**
- 04 Funkcja celu
- 05 Zarys modelu
- 06 Scenariusze z linii lotniczych



Ograniczenia

- Ograniczenie minimalna odległości dla przedmiotów z TI (Transport Index)
- Obwiednia środka ciężkości
- Kompatybilność ładunków specjalnych
- Separacja ładunków radioaktywnych
- Maksymalna waga
- Typ kontenera
- Maksymalne TI
- Maksymalna objętość





Zasady

- Przypisanie przedmiotów
- Przedmioty z ustaloną pozycją
- Wymagania dla lotów wieloetapowych
- Odchylenie środka ciężkości
- Dzielenie przedmiotów paletowych
- Przedmioty o wyższym priorytecie bliżej drzwi
- Odstępy między przedmiotami
- „Resztówki”



Agenda



- 01 Opis Planowania Załadunku
- 02 Ciężar i balans
- 03 Zasady i ograniczenia
- 04 **Funkcja celu**
- 05 Zarys modelu
- 06 Scenariusze z linii lotniczych



Funkcja celu

- Koszt nieprzypisania przedmiotu
- Koszt mieszania przedmiotów różnych typów na jednej pozycji
- Koszt dzielenia przedmiotów paletowych
- Koszt odchylenia od optymalnego środka ciężkości
- Koszt przypisania przedmiotu do pozycji ze złamaniem priorytetu
- Koszt przypisania resztówki bez dostępu do drzwi
- Koszty związane z lotami wieloetapowymi

Agenda



- 01 Opis Planowania Załadunku
- 02 Ciężar i balans
- 03 Zasady i ograniczenia
- 04 Funkcja celu
- 05 **Zarys modelu**
- 06 Scenariusze z linii lotniczych

Zarys modelu

Minimalizuj $\sum_{i \in I} p_{u_i} u_i + p_d d_l + \sum_{i \in I} p_s s_i + \sum_{p \in P} p_g g_p + \sum_{p \in P, t \in T} p_m m_{p,t} + \sum_{i \in I, p \in P} p_r r_{i,p} + \sum_{q \in Q} p_h h_q$

tak, że (jedynie dla przypisania u_i , i podziałów s_i , dla klarowności)

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} x_{i,p} + u_i = \chi_i, \forall i \in I,$$

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} - s_i \leq 1, \forall i \in I, s_i \geq 0, \forall i \in I, \forall p \in P \quad 1 \geq y_{i,p} \geq 0, y_{i,p} - \chi_i x_{i,p} \leq 0$$

Gdzie $0 \leq x_{i,p} \leq \chi_i$ - zmienna oznaczająca liczbę przypisanych fragmentów przedmiotu i do pozycji p

χ_i - maksymalna liczba fragmentów dla przedmiotu i .

$y_{i,p}$ - zmienna oznaczająca przypisanie choć jednego fragmentu przedmiotu i do pozycji p

$p_{u_i}, p_d, p_s, p_g, p_m, p_r, p_h$ to kary za nieprzypisanie przedmiotu, odchylenie od optymalnego środka ciężkości, dzielenie przedmiotu, przerwy w załadunku, mieszanie typów przedmiotów, zablokowanie resztówki, załadunek niezgodny z priorytetem.



Zastosowane kary

- Loty krajowe a zagraniczne
- Pasażerskie a łączone a towarowe
- Czartery a sieciowe

- Najczęściej menadżerowie załadunku stosują twarde priorytety
- Tj. Rozwiązanie ma minimalizować koszt najważniejszego celu, następnie utrzymując jakość, minimalizować kolejne, etc.

Zastosowane kary - przykład

Dane scenariusza

Przedmioty	1 o priorytecie 1 1 o priorytecie 2 (66 fragmenty) 1 o priorytecie 3 5 o priorytecie 4 3 o priorytecie 5
Pozycje	11 pozycji, 2 drzwi
Przerwy	6 możliwych przerw
Typy przedmiotów	2 typy, 3 pozycje paletowe
Kolejności	32 możliwe kombinacje
Podziały	2 możliwe
Resztówki	4
Obwiednia	50 poziomów odchylenia

Konfiguracja 1

7	Obwiednia	$p_d = 1$ $d_l \leq 50$
6	Resztówki	$p_r = 51$ $\sum_{i \in I, p \in P} r_{i,p} \leq 4$
5	Przerwy	$p_g = 255$ $\sum_{p \in P} g_p \leq 6$
4	Podziały	$p_s = 1231$ $\sum_{i \in I} s_i \leq 2$
3	Typy przedmiotów	$p_m = 3,693$ $\sum_{p \in P, t \in T} m_{p,t} \leq 6$
2	Kolejności	$p_h = (6 + 1) \cdot p_m = 25,851$ $\sum_{q \in Q} h_q \leq 32$
1	Przypisanie	Etc.

Konfiguracja 2

7	Typy przedmiotów	$p_m = 1$ $\sum_{p \in P, t \in T} m_{p,t} \leq 6$
6	Resztówki	$p_r = 7$ $\sum_{i \in I, p \in P} r_{i,p} \leq 4$
5	Przerwy	$p_g = 35$ $\sum_{p \in P} g_p \leq 6$
4	Kolejności	$p_h = (6 + 1) \cdot p_g = 245$ $\sum_{q \in Q} h_q \leq 32$
3	Podziały	$p_s = 8,085$ $\sum_{i \in I} s_i \leq 2$
2	Obwiednia	$p_d = 24,255$ $d_l \leq 50$
1	Przypisanie	Etc.

Agenda



- 01 Opis Planowania Załadunku
- 02 Ciężar i balans
- 03 Zasady i ograniczenia
- 04 Funkcja celu
- 05 Zarys modelu
- 06 **Scenariusze z linii lotniczych**

Fokker 70 KRK - WAW

- Non Cargo Weight 31221kg, Max ZFW 32658 kg

Pozycja	Maks. waga [kg]	Maks. objętość [m ³]	ULD	Masa [kg]	Objętość [m ³]	Elem.	Priorytet
11	650	2.24	1BLK	1199	9.22	109	3 + rest
12 [Door]	505	1.71	2BLK	0*	0*	0*	1 + rest
13	1245	4.21	3BLK	100	0.6	1	1
41	400	2.5	4BLK	451	3.47	41	2 + rest
42 [Door]	341	2.13					

Pozycja	Załadowane ULD	Elementy	Masa [kg]	Objętość [m ³]
11	1BLK	20	220	1.68
12 [Door]	3BLK, 2BLK(R), 1BLK(R)	1, 0, 10	100 + 0 + 110	0.6 + 0 + 0.84
13	1BLK	50	550	4.19
41	4BLK	21	231	1.82
42 [Door]	4BLK(R)	20	220	1.74



Więcej scenariuszy – wydajność dla typowej konfiguracji

Scenariusz	Złożoność / trudność	CPLEX czas obliczeń [sek]	Zmienne	Ograniczenia
Scenariusz 1	Wysoka	<1sek	871	1052
Scenariusz 2	Średnia	<1sek	216	299
Scenariusz 3	Wysoka	<1sek	300	494
Scenariusz 4	B. Wysoka	2	915	1187
Scenariusz 5	Średnia	<1sek	216	386
Scenariusz 6	Niska	<1sek	450	575
Scenariusz 7	B. Wysoka	2	881	1035
Scenariusz 8	Średnia	<1sek	540	670

Sabre®