

Recenzja:

*Prospects of green hydrogen in Poland: A  
techno-economic analysis using a Monte Carlo  
approach*

**Jakub Ostrzołek**

Autorzy pracy źródłowej: Pablo Benalcazar, Aleksandra Komorowska

Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej  
Politechnika Warszawska

12 czerwca 2024

# Plan prezentacji

- 1 Wprowadzenie do tematu
- 2 Model
- 3 Wyniki
- 4 Podsumowanie

# Motywacja

Nadchodzące zmiany energetyczne:

- ❶ EU: plan osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050
  - 17.5 GW łącznej mocy elektrolizerów  $H_2$  do 2025
  - produkcja + import 10 mln ton  $H_2$  do 2030
  - brak emisji gazów cieplarnianych do 2050
- ❷ *Polityka Energetyczna Polski do 2040*
- ❸ *Polska Strategia Wodorowa do roku 2030*

Niewiele analiz rozwojowych gospodarki  $H_2$  na terenie Polski w stosunku do państw zachodnich. Brak analiz MC.



# Produkcja H<sub>2</sub>

## Rodzaje produkcji H<sub>2</sub>

- 1 *szary* – z gazu naturalnego lub metanu ( $\sim 97\%$ )
- 2 *niebieski* – szary + przechwytywanie CO<sub>2</sub>
- 3 *fioletowy* – z energii atomowej
- 4 ***zielony*** – z energii odnawialnej

# Efektywność

Czynniki wpływające na efektywność farmy  $H_2$

- farma = elektrownia odnawialna + elektrolizer  $H_2$
- sprzęt: elektrolizery (PEM), elektrownie (wiatrowe, PV, ...)
- warunki pogodowe, geologiczne
- koszt: CAPEX + OPEX (obsługa, prąd, woda, utrzymanie)
- metryka?

# LCOH

## Levelized Cost of Hydrogen (LCOH)

$$LCOH = \frac{(C_{CC} \times CRF) + C_{O\&M} + C_{REP}}{M_{H_2}}$$

$$CRF = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1}$$

$$C_{CC} = P_{el} \times I_{el}$$

$$C_{O\&M} = (\tau \times P_{el} \times u_{el} \times c_e) + (\gamma \times M_{H_2} \times c_w) + (C_{CC} \times \phi)$$

$$M_{H_2} = \frac{\tau \times P_{el} \times u_{el}}{E_{el}}$$

$$C_{REP} = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1} \times \frac{C_{TotalRep}}{(1 + i)^t}$$

# LCOH

## Levelized Cost of Hydrogen (LCOH)

$$LCOH = \frac{(C_{CC} \times CRF) + C_{O\&M} + C_{REP}}{M_{H_2}}$$

$$CRF = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1}$$

$$C_{CC} = P_{el} \times I_{el}$$

$$C_{O\&M} = (\tau \times P_{el} \times u_{el} \times c_e) + (\gamma \times M_{H_2} \times c_w) + (C_{CC} \times \phi)$$

$$M_{H_2} = \frac{\tau \times P_{el} \times u_{el}}{E_{el}}$$

$$C_{REP} = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1} \times \frac{C_{TotalRep}}{(1 + i)^t}$$



# LCOH

## Levelized Cost of Hydrogen (LCOH)

$$LCOH = \frac{(C_{CC} \times CRF) + C_{O\&M} + C_{REP}}{M_{H_2}}$$

$$CRF = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1}$$

$$C_{CC} = P_{el} \times I_{el}$$

$$C_{O\&M} = (\tau \times P_{el} \times u_{el} \times c_e) + (\gamma \times M_{H_2} \times c_w) + (C_{CC} \times \phi)$$

$$M_{H_2} = \frac{\tau \times P_{el} \times u_{el}}{E_{el}}$$

$$C_{REP} = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1} \times \frac{C_{TotalRep}}{(1 + i)^t}$$

# LCOH

## Levelized Cost of Hydrogen (LCOH)

$$LCOH = \frac{(C_{CC} \times CRF) + C_{O\&M} + C_{REP}}{M_{H_2}}$$

$$CRF = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1}$$

$$C_{CC} = P_{el} \times I_{el}$$

$$C_{O\&M} = (\tau \times P_{el} \times u_{el} \times c_e) + (\gamma \times M_{H_2} \times c_w) + (C_{CC} \times \phi)$$

$$M_{H_2} = \frac{\tau \times P_{el} \times u_{el}}{E_{el}}$$

$$C_{REP} = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1} \times \frac{C_{TotalRep}}{(1 + i)^t}$$

# LCOH

## Levelized Cost of Hydrogen (LCOH)

$$LCOH = \frac{(C_{CC} \times CRF) + C_{O\&M} + C_{REP}}{M_{H_2}}$$

$$CRF = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1}$$

$$C_{CC} = P_{el} \times I_{el}$$

$$C_{O\&M} = (\tau \times P_{el} \times u_{el} \times c_e) + (\gamma \times M_{H_2} \times c_w) + (C_{CC} \times \phi)$$

$$M_{H_2} = \frac{\tau \times P_{el} \times u_{el}}{E_{el}}$$

$$C_{REP} = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1} \times \frac{C_{TotalRep}}{(1 + i)^t}$$

# LCOH

## Levelized Cost of Hydrogen (LCOH)

$$LCOH = \frac{(C_{CC} \times CRF) + C_{O\&M} + C_{REP}}{M_{H_2}}$$

$$CRF = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1}$$

$$C_{CC} = P_{el} \times I_{el}$$

$$C_{O\&M} = (\tau \times P_{el} \times u_{el} \times c_e) + (\gamma \times M_{H_2} \times c_w) + (C_{CC} \times \phi)$$

$$M_{H_2} = \frac{\tau \times P_{el} \times u_{el}}{E_{el}}$$

$$C_{REP} = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1} \times \frac{C_{TotalRep}}{(1 + i)^t}$$

# Capital Recovery Factor?

$$LCOH = \frac{(C_{CC} \times \mathbf{CRF}) + C_{O\&M} + C_{REP}}{M_{H_2}}$$

$$CRF = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1}$$

$$C_{CC} = P_{el} \times I_{el}$$

$$C_{O\&M} = (\tau \times P_{el} \times u_{el} \times c_e) + (\gamma \times M_{H_2} \times c_w) + (C_{CC} \times \phi)$$

$$M_{H_2} = \frac{\tau \times P_{el} \times u_{el}}{E_{el}}$$

$$C_{REP} = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1} \times \frac{C_{TotalRep}}{(1 + i)^t}$$

# Capital Recovery Factor?

		$N$			
		10	20	30	40
$i$	0.1	0.163	0.117	0.106	0.102
	0.2	0.239	0.205	0.201	0.200
	0.3	0.323	0.302	0.300	0.300
	0.4	0.414	0.400	0.400	0.400
	0.5	0.509	0.500	0.500	0.500
	0.6	0.606	0.600	0.600	0.600
	0.7	0.703	0.700	0.700	0.700
	0.8	0.802	0.800	0.800	0.800
	0.9	0.901	0.900	0.900	0.900

$CRM$  w zależności od  $i$  oraz  $N$

# Utilization rate?

$$LCOH = \frac{(C_{CC} \times CRF) + C_{O\&M} + C_{REP}}{M_{H_2}}$$

$$CRF = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1}$$

$$C_{CC} = P_{el} \times I_{el}$$

$$C_{O\&M} = (\tau \times P_{el} \times \mathbf{u}_{el} \times c_e) + (\gamma \times M_{H_2} \times c_w) + (C_{CC} \times \phi)$$

$$M_{H_2} = \frac{\tau \times P_{el} \times u_{el}}{E_{el}}$$

$$C_{REP} = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1} \times \frac{C_{TotalRep}}{(1 + i)^t}$$

# Replacement costs?

$$LCOH = \frac{(C_{CC} \times CRF) + C_{O\&M} + C_{REP}}{M_{H_2}}$$

$$CRF = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1}$$

$$C_{CC} = P_{el} \times I_{el}$$

$$C_{O\&M} = (\tau \times P_{el} \times u_{el} \times c_e) + (\gamma \times M_{H_2} \times c_w) + (C_{CC} \times \phi)$$

$$M_{H_2} = \frac{\tau \times P_{el} \times u_{el}}{E_{el}}$$

$$C_{REP} = \sum_t \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1} \times \frac{C_{TotalRep}}{(1 + i)^t}$$



# Model

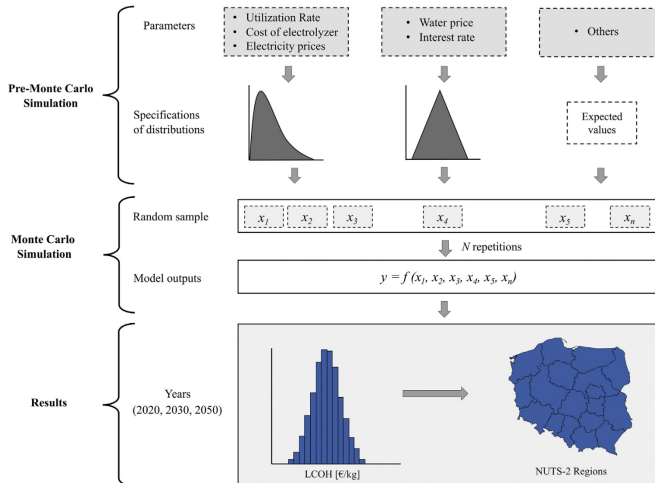


Diagram modelu

# Stałe

Parameter	Unit	Scenario I	Scenario II	Scenario III	Reference
Rated power of electrolyzer	kW	1000	6000	20000	[18,51]
Stack efficiency <sup>a</sup>	%	59.0	63.0	71.0	[59]
Power consumption	kWh/kg	51.0	46.0	44.0	[59]
Lifetime	yrs	20	20	30	[38,86–89]
Maintenance cost	% of electrolyzer cost	5.0	2.2	1.85	[89]
Replacement cost	% of electrolyzer cost	42.0	42.0	42.0	[14,31,90]
Replacement year	yrs	7.0	10.0	15.0	[91]
Water requirement	L/kg H <sub>2</sub>	9.0	9.0	9.0	[31]
Lower heating value of hydrogen	kWh/kg	33.3	33.3	33.3	[89]

<sup>a</sup> Based on lower heating value (LHV).

## Wartości stałych

## Stałe

$$LCOH = \frac{(C_{CC} \times CRF) + C_{O\&M} + C_{REP}}{M_{H_2}}$$

$$CRF = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1}$$

$$C_{CC} = P_{el} \times I_{el}$$

$$C_{O\&M} = (\tau \times P_{el} \times u_{el} \times c_e) + (\gamma \times M_{H_2} \times c_w) + (C_{CC} \times \phi)$$

$$M_{H_2} = \frac{\tau \times P_{el} \times u_{el}}{E_{el}}$$

$$C_{REP} = \frac{i \times (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1} \times \frac{C_{TotalRep}}{(1 + i)^t}$$

# Zmienne

Parameter	Unit	Scenario I	Scenario II	Scenario III
Cost of electrolyzer	€/kW	PERT (500.0; 1164.8; 2097.6)	PERT (315.6; 362.0; 403.4)	PERT (138.6; 174.5; 210.5)
Electricity price (onshore wind)	€/MWh	PERT (24.7; 53.1; 131.3)	PERT (25.4; 33.9; 42.3)	PERT (16.9; 21.1; 25.4)
Electricity price (ground solar PV)	€/MWh	PERT (28.7; 53.0; 145.7)	PERT (16.9; 42.3; 67.7)	PERT (8.5; 22.5; 42.3)
Price of water	€/kg	Tr (0.00094; 0.00098; 0.00103)	Tr (0.00106; 0.00113; 0.00118)	Tr (0.00143; 0.00150; 0.00158)
Interest rate	%	Tr (6.0; 8.0; 10.0)	Tr (6.0; 8.0; 10.0)	Tr (6.0; 8.0; 10.0)
Note: PERT(A; B; C) – Beta-PERT distribution with a $\lambda$ (lambda) parameter of 4; Tr(A; B; C) – Triangular distribution; A – the lowest possible value, B – the highest probability value, C – the highest possible values.				

## Wartości zmiennych

# Zmienne

Parameter	Unit	Scenario I	Scenario II	Scenario III
Cost of electrolyzer	€/kW	PERT (500.0; 1164.8; 2097.6)	PERT (315.6; 362.0; 403.4)	PERT (138.6; 174.5; 210.5)
Electricity price (onshore wind)	€/MWh	PERT (24.7; 53.1; 131.3)	PERT (25.4; 33.9; 42.3)	PERT (16.9; 21.1; 25.4)
Electricity price (ground solar PV)	€/MWh	PERT (28.7; 53.0; 145.7)	PERT (16.9; 42.3; 67.7)	PERT (8.5; 22.5; 42.3)
Price of water	€/kg	Tr (0.00094; 0.00098; 0.00103)	Tr (0.00106; 0.00113; 0.00118)	Tr (0.00143; 0.00150; 0.00158)
Interest rate	%	Tr (6.0; 8.0; 10.0)	Tr (6.0; 8.0; 10.0)	Tr (6.0; 8.0; 10.0)
Note: PERT(A; B; C) – Beta-PERT distribution with a $\lambda$ (lambda) parameter of 4; Tr(A; B; C) – Triangular distribution; A – the lowest possible value, B – the highest probability value, C – the highest possible values.				

## Wartości zmiennych

Utilization rate  $u_{el}???$

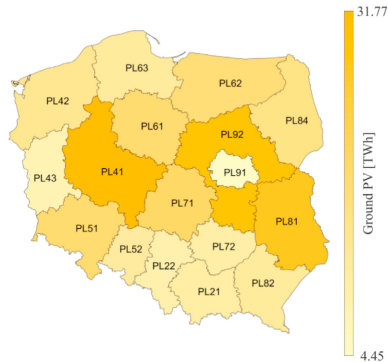
# Gdzie jest $u_{el}$ ?

NUTS-2 2021	Region	Ground PV CF	Onshore Wind CF
PL21	Małopolskie	12.64	17.12
PL22	Śląskie	12.65	17.12
PL41	Wielkopolskie	12.76	25.57
PL42	Zachodniopomorskie	11.92	33.10
PL43	Lubuskie	12.69	23.47
PL51	Dolnośląskie	12.82	26.58
PL52	Opolskie	12.95	26.38
PL61	Kujawsko-pomorskie	12.35	28.88
PL62	Warmińsko-mazurskie	11.82	29.58
PL63	Pomorskie	11.84	35.04
PL71	Łódzkie	12.70	23.62
PL72	Świętokrzyskie	12.94	20.77
PL81	Lubelskie	12.97	23.61
PL82	Podkarpackie	12.66	16.72
PL84	Podlaskie	12.23	28.15
PL91	Warszawski stołeczny	12.45	24.67
PL92	Mazowiecki regionalny	12.45	24.67

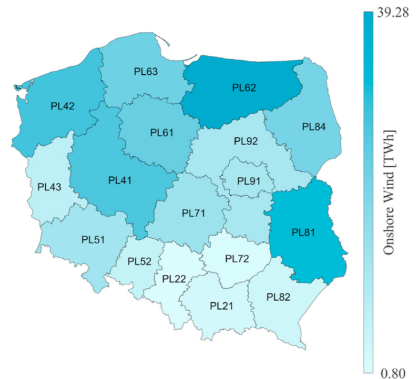
Source: Own work based on [80,81].

Średnie współczynniki wydajności „capacity factor” (CF)

# Gdzie jest $u_{el}$ ?



Mapy średnich CF dla PV



Mapy średnich CF dla elektrowni wiatrowych

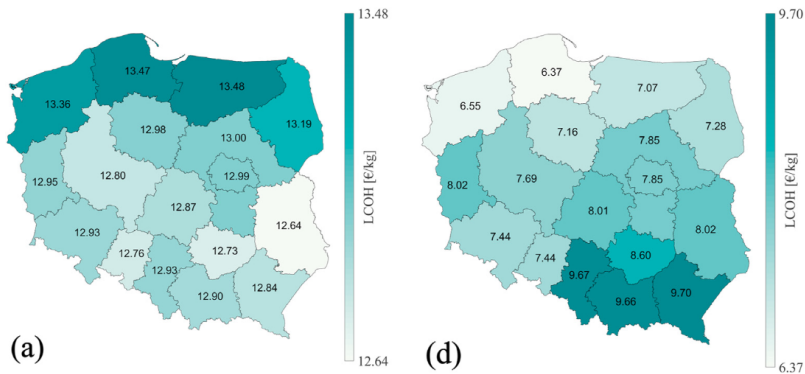
# Gdzie jest $u_{el}$ ?



# Gdzie jest $u_{el}$ ?

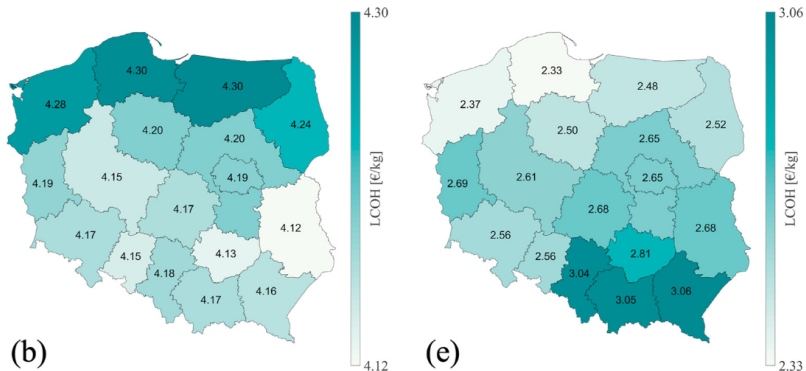
**Nigdzie.**

# Mapy LCOH



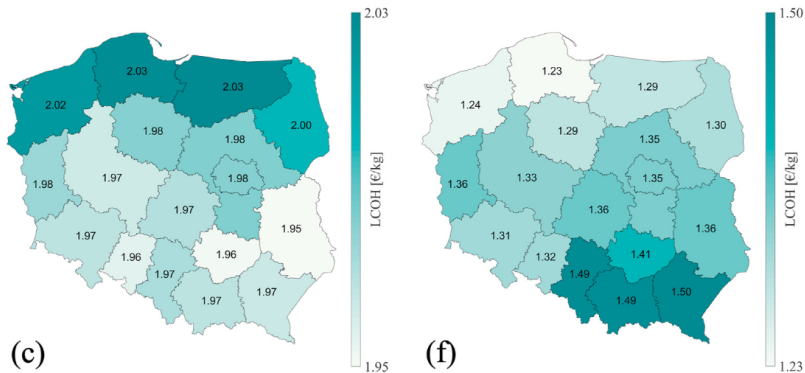
Mapa mediany LCOH – scenariusz 1 (lewo - PV, prawo - wiatr)

# Mapy LCOH



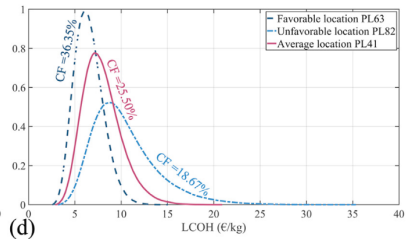
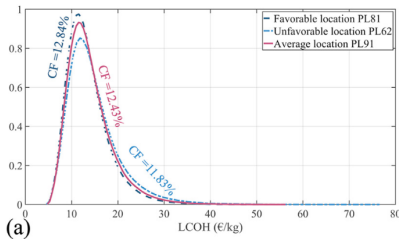
Mapa mediany LCOH – scenariusz 2 (lewo - PV, prawo - wiatr)

# Mapy LCOH



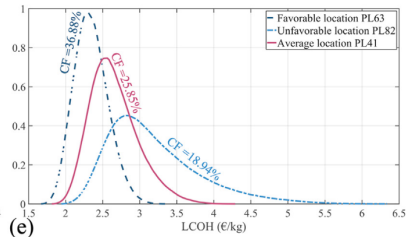
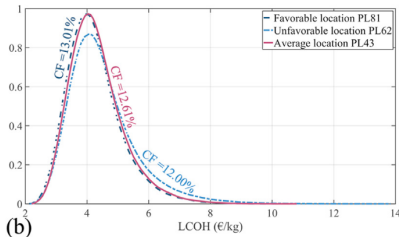
Mapa mediany LCOH – scenariusz 3 (lewo - PV, prawo - wiatr)

# Rozkłady LCOH



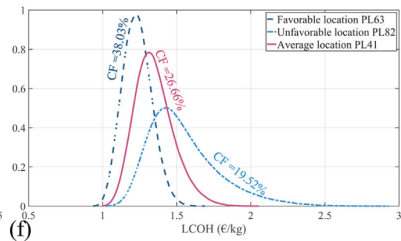
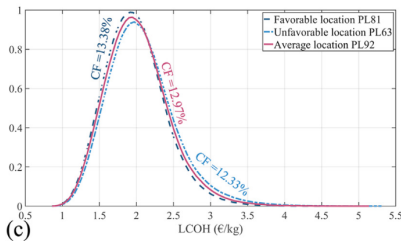
Rozkład LCOH – scenariusz 1 (lewo - PV, prawo - wiatr)

# Rozkłady LCOH



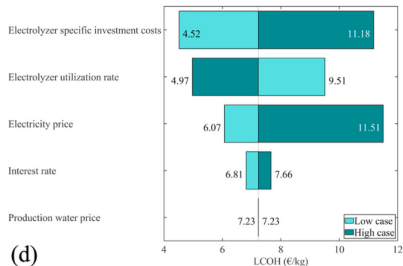
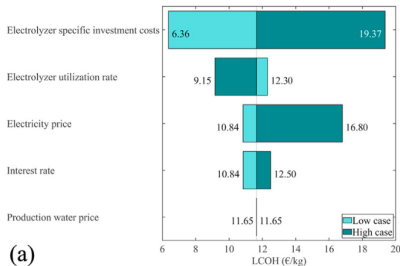
Rozkład LCOH – scenariusz 2 (lewo - PV, prawo - wiatr)

# Rozkłady LCOH



Rozkład LCOH – scenariusz 3 (lewo - PV, prawo - wiatr)

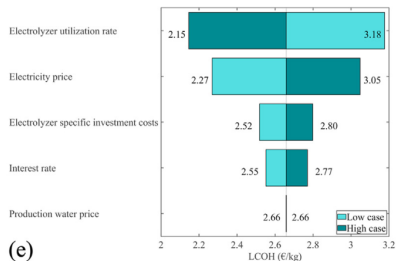
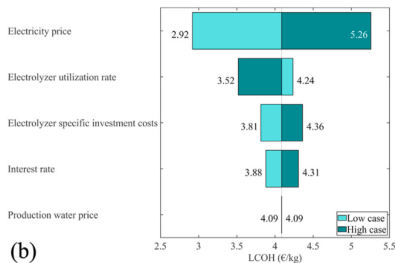
# Analiza wrażliwości



Analiza wrażliwości – scenariusz 1 (lewo - PV, prawo - wiatr)

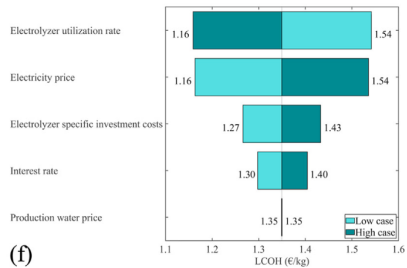
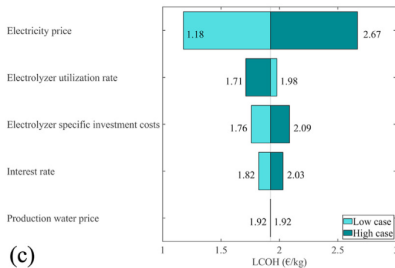


# Analiza wrażliwości



Analiza wrażliwości – scenariusz 2 (lewo - PV, prawo - wiatr)

# Analiza wrażliwości



Analiza wrażliwości – scenariusz 3 (lewo - PV, prawo - wiatr)

# Dodatkowe uwagi

- brak specyfikacji generatora liczb pseudolosowych
- miejscami nieprzyjemna kompozycja (w kilku rozdziałach to samo, przeplatane wykresy)
- + duża większość założeń ma źródła
- + wartości parametrów/zmiennych mają źródła
- + brak błędów ortograficznych, językowych, itp.
- + słowniczek skrótów na początku
- + dobrze sformatowane

# Subiektywna ocena

- uzasadniona motywacja
- ładny język, dobrze się czytało (nie licząc kompozycji)
- mógłby być krótszy
- **brak reprodukowalności**

# Bibliografia I



Benalcazar, Pablo and Aleksandra Komorowska. "Prospects of green hydrogen in Poland: A techno-economic analysis using a Monte Carlo approach". In: *International Journal of Hydrogen Energy* 47.9 (2022), pp. 5779–5796. ISSN: 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921047017>.

# Testy

- Silnik testowany jednostkowo
- Moduł dekodujący i pliki zasad testowane integracyjnie, wraz z silnikiem
- Serwis API testowany integracyjnie wraz z pozostałymi komponentami
- Testy manualne