

Hybrid Model 02: Validace modelu (Model Validation)

```
In [1]: # Instalace potřebných knihoven
        %%pip install pandas
        %%pip install numpy
```

```
In [2]: # Import potřebných knihoven
import pandas as pd
import numpy as np

from scipy import stats
from scipy.stats import ks_2samp, ttest_ind, mannwhitneyu

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
```

Načtení reálných a simulačních dat

```
In [3]: # Soubor je načten a přiřazen do proměnné ,df_sim"
other_path = '../data/04_HybridModel/hybrid_model.csv'
df_sim = pd.read_csv(other_path, header=0)
```

```
In [4]: # Zobrazení prvních 5 řádků datasetu
print('Prvních 5 řádků datového rámce')
df_sim.head(5)
```

Prvních 5 řádků datového rámce

```
Out[4]:
```

	x	y	z	time	stochastic_delay	total_time	cum_delay
0	74	459	1284	39	0	39	0
1	-90	4908	2217	42	0	42	0
2	522	3074	26	37	0	37	0
3	425	2247	2739	37	0	37	0
4	516	3425	1590	35	0	35	0

```
In [5]: # Základní deskriptivní statistika simulovaného datasetu
df_sim.describe()
```

Out[5]:

	x	y	z	time	stochastic_delay	total_time	cum_r
count	20000.000000	20000.000000	20000.000000	20000.000000	20000.000000	20000.000000	20000.00
mean	1422.944700	1336.856500	1374.817600	41.15180	4.59600	45.747800	43795.36
std	1440.916105	1512.725045	805.317921	4.76613	68.18379	68.422704	27884.67
min	-99.000000	-99.000000	0.000000	31.00000	0.00000	31.000000	0.00
25%	248.000000	202.000000	676.000000	37.00000	0.00000	37.000000	16810.00
50%	599.500000	521.000000	1374.500000	41.00000	0.00000	41.000000	43720.00
75%	2591.250000	2435.000000	2076.000000	44.00000	0.00000	44.000000	68400.00
max	4599.000000	4949.000000	2749.000000	52.00000	3000.00000	3051.000000	91920.00

In [6]:

```
# Soubor je načten a přiřazen do proměnné ,df_real"
other_path = '.././data/02_DetermModel/model_data_real.csv'
df_real = pd.read_csv(other_path, header=0)
```

In [7]:

```
# Zobrazení prvních 5 řádků datasetu
print('Prvních 5 řádků datového rámce')
df_real.head(5)
```

Prvních 5 řádků datového rámce

Out[7]:

	id	type_brick	type	rotation	x	y	z	layer	pallet	dist	start_to_verif	verif_to_dest	dest_t
0	1	CORNER	2	90	220	95	0	1	1	2731	6	17	
1	2	HALF	3	90	220	252	0	1	1	2596	3	17	
2	4	BASIC	1	90	220	690	0	1	2	2350	6	14	
3	6	BASIC	1	90	220	1190	0	1	4	1804	7	14	
4	9	BASIC	1	90	220	1940	0	1	7	1454	8	13	

In [8]:

```
# Základní deskriptivní statistika simulovaného datasetu
df_real.describe()
```

Out[8]:

	id	type	rotation	x	y	z	layer	pall
count	106.000000	106.000000	106.000000	106.000000	106.000000	106.000000	106.000000	106.000000
mean	69.622642	1.292453	94.245283	1245.122642	1037.443396	379.716981	2.518868	53.386700
std	37.319586	0.780317	67.329299	1255.988586	1258.426721	272.185013	1.088740	36.333500
min	1.000000	1.000000	0.000000	95.000000	95.000000	0.000000	1.000000	1.000000
25%	39.250000	1.000000	22.500000	220.000000	220.000000	250.000000	2.000000	22.250000
50%	67.500000	1.000000	90.000000	502.500000	220.000000	250.000000	2.000000	51.500000
75%	102.750000	1.000000	180.000000	2190.000000	1565.000000	500.000000	3.000000	86.750000
max	136.000000	4.000000	180.000000	4002.000000	4440.000000	750.000000	4.000000	120.000000

Monte Carlo Validation: Opakované podvzorkování na velikost reality

```
In [9]: # Bootstrap vzorkování ze simulace na velikost reálného datasetu
n_real = len(df_real)

sim_samples = []

for _ in range(1000):
    sample = df_sim.sample(n=n_real, replace=True, random_state=122 + _)
    sim_samples.append(sample['total_time'])
```

KS test pro každé podvzorkování

```
In [10]: # Výpočet KS p-hodnot pro porovnání reálných a simulovaných dat
p_vals = []

for s in sim_samples:
    _, p = ks_2samp(df_real['total_time'], s)
    p_vals.append(p)
```

Pravděpodobnost shody modelu

```
In [11]: valid_ratio = np.mean(np.array(p_vals) > 0.05)

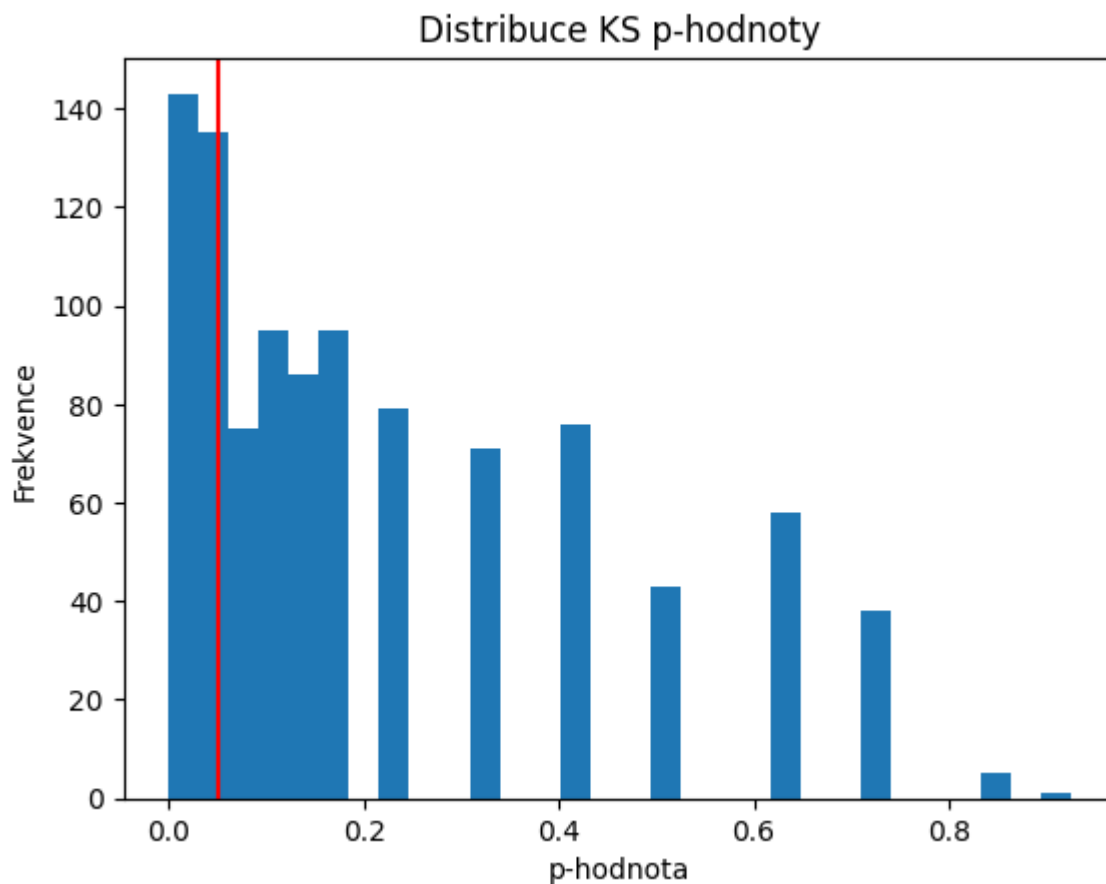
print("Podíl validních simulací:", valid_ratio)
```

Podíl validních simulací: 0.722

Distribuce KS p-hodnoty

```
In [12]: plt.figure()
plt.hist(p_vals, bins=30)
plt.axvline(0.05, color='red')

plt.title("Distribuce KS p-hodnoty")
plt.xlabel("p-hodnota")
plt.ylabel("Frekvence")
plt.show()
```



Interpretace (DES validace)

| Podíl | Interpretace | | ---- | ----- | 0.8 | model VALIDNÍ | | 0.5 – 0.8 | model přijatelný | | < 0.5 | model nevalidní |

Ve 72.2 % bootstrap vzorků ze simulace nelze statisticky rozlišit simulaci od reality (na hladině významnosti $\alpha = 0.05$ pomocí KS testu).

Simulace zachycuje trend, ale ne přesně variabilitu reality. **Parametry nejsou ideálně kalibrované.**

Porovnání průměru a směrodatné odchylky

Reálná data – referenční hodnoty:

```
In [13]: # Výpočet průměru a směrodatné odchylky z reálných dat
mean_real = df_real['total_time'].mean()
std_real = df_real['total_time'].std()

print("Real Mean:", mean_real)
print("Real STD:", std_real)
```

Real Mean: 40.9622641509434

Real STD: 6.358982440763672

Bootstrap ze simulace (na velikost reality):

```
In [14]: # velikost reálného datasetu
n_real = len(df_real)

sim_means = []
sim_stds = []
```

```
# opakované podvzorkování simulace
for i in range(1000):

    sample = df_sim.sample(
        n=n_real,
        replace=True,
        random_state=122 + i
    )

    sim_means.append(sample['total_time'].mean())
    sim_stds.append(sample['total_time'].std())
```

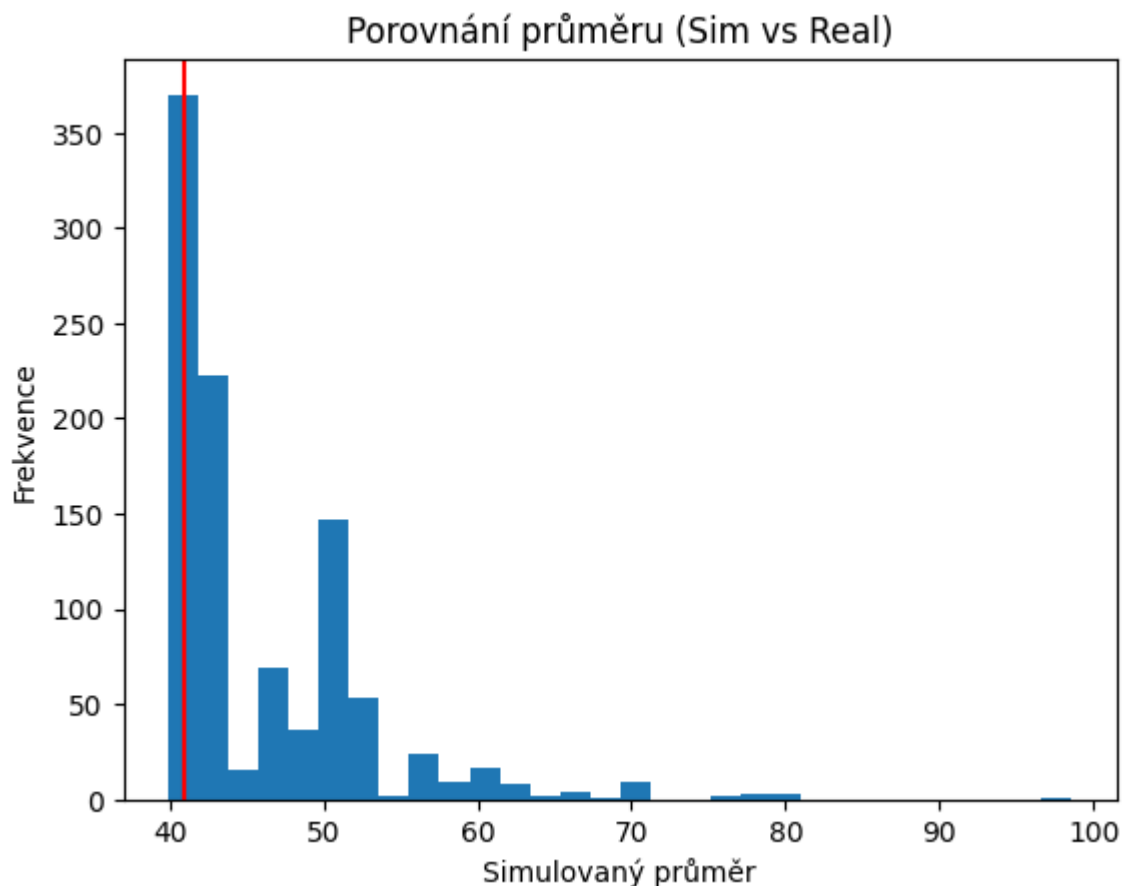
Porovnání průměru

```
In [15]: # Histogram průměrů ze simulace s vyznačením průměru reálných dat
plt.figure()

plt.hist(sim_means, bins=30)
plt.axvline(mean_real, color='red')

plt.title("Porovnání průměru (Sim vs Real)")
plt.xlabel("Simulovaný průměr")
plt.ylabel("Frekvence")

plt.show()
```



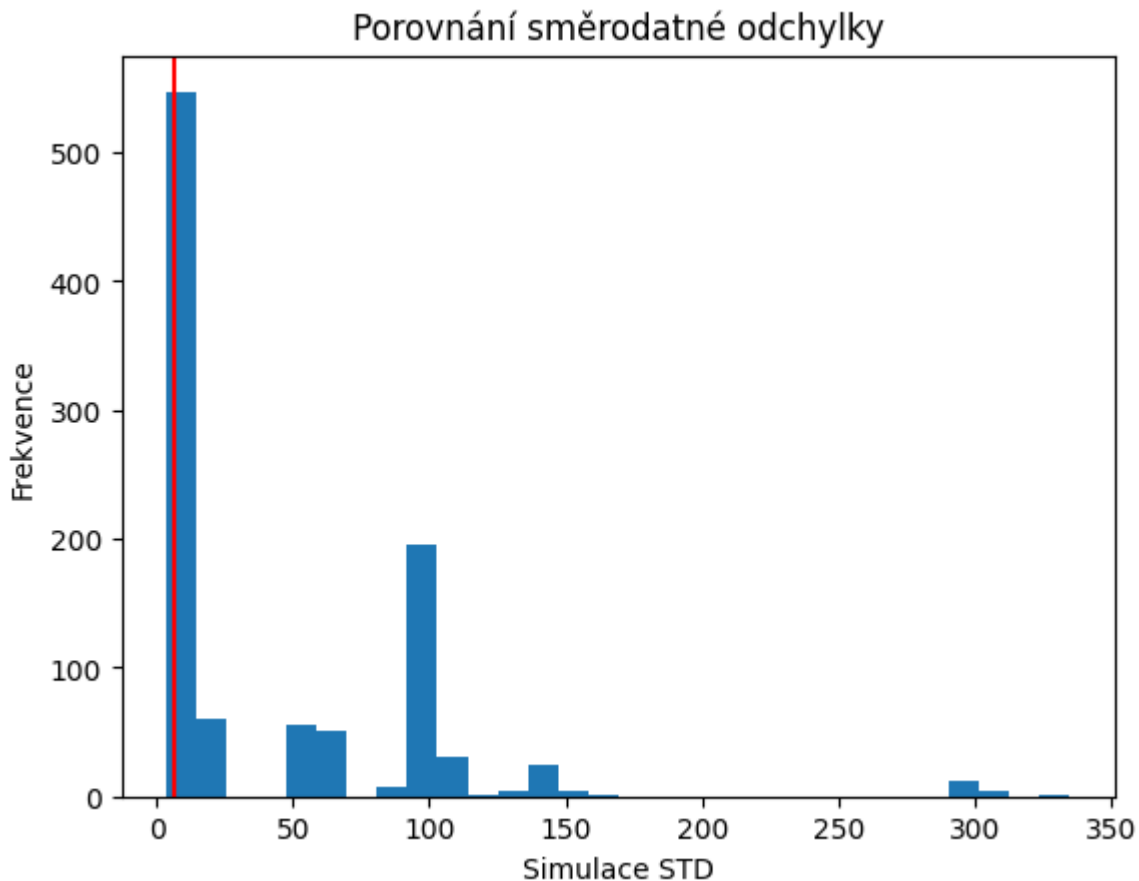
Porovnání STD

```
In [16]: # Histogram STD ze simulace s vyznačením průměru reálných dat
plt.figure()

plt.hist(sim_stds, bins=30)
plt.axvline(std_real, color='red')

plt.title("Porovnání směrodatné odchylky")
plt.xlabel("Simulace STD")
plt.ylabel("Frekvence")

plt.show()
```



Kvantilová validace

```
In [17]: mean_CI = np.percentile(sim_means, [2.5, 97.5])
std_CI   = np.percentile(sim_stds, [2.5, 97.5])

print("Mean 95% CI:", mean_CI)
print("STD 95% CI:", std_CI)

print("Real mean:", mean_real)
print("Real STD:", std_real)
```

```
Mean 95% CI: [40.58466981 62.98301887]
STD 95% CI: [ 4.38853464 137.62442429]
Real mean: 40.9622641509434
Real STD: 6.358982440763672
```

Model je validní, ale rozsah hodnot je moc široký -> **simulace není kalibrovaná.**

Parametrické porovnání dat

Welchův t-test

```
In [18]: stat, p = ttest_ind(  
    df_real['total_time'],  
    df_sim['total_time'],  
    equal_var=False  
)  
  
print("Welch t-test p-value:", p)
```

Welch t-test p-value: 3.62800304900374e-09

$p < 0.05 \rightarrow$ simulace má jiný průměr.

Cohen's d (velikost efektu)

```
In [19]: mean_diff = abs(df_real['total_time'].mean() - df_sim['total_time'].mean())  
  
pooled_std = np.sqrt(  
    (df_real['total_time'].std()**2 + df_sim['total_time'].std()**2) / 2  
)  
  
d = mean_diff / pooled_std  
  
print("Cohen's d:", d)
```

Cohen's d: 0.09848675815268022

Cohen's d $< 0.2 \rightarrow$ zanedbatelný význam

Neparametrické porovnání (Distribuce)

Mann–Whitney U test

```
In [20]: stat, p = mannwhitneyu(  
    df_real['total_time'],  
    df_sim['total_time']  
)  
  
print("Mann-Whitney p-value:", p)
```

Mann-Whitney p-value: 0.15363578224656693

Nelze zamítnout nulovou hypotézu. Neexistuje statisticky významný rozdíl mezi mediánem reálných a simulovaných dat.

Simulace realisticky zachycuje centrální tendenci systému.

Vyhodnocení shody simulovaných a reálných dat

Bootstrap KS test

0,722

Interpretace:

Ve 72.2 % případů nelze statisticky rozlišit simulaci od reality

STD

Real STD = 6.36 STD 95% CI (Sim) [4.39 ; 137.62]

Interpretace:

Reálná směrodatná odchylka je v intervalu, avšak simulace vykazuje nadměrnou variabilitu

Průměr

Real Mean = 40.96 Mean 95% CI (Sim) [40.58 ; 62.98]

Interpretace:

Reálný průměr se nachází v intervalu simulace

Welch t-test

$p = 3.63 \times 10^{-9}$

Interpretace:

Statisticky významný rozdíl průměrů (ovlivněn rozdílnou velikostí vzorků).

Cohen's d

0.098

Interpretace:

Zanedbatelný praktický rozdíl mezi průměry reálných a simulovaných dat

Mann-Whitney U test (neparametrický)

$p = 0.154$

Interpretace:

$p \gg 0,05 \rightarrow$ nelze zamítnout nulovou hypotézu.

Nebyl prokázán statisticky významný rozdíl mezi mediány reálných a simulovaných dat ($\alpha = 0.05$)

Autor / Organizace / Datum

Vjačeslav Usmanov, ČVUT v Praze, Fakulta stavební

Přehled změn

Datum (YYYY-MM-DD)	Verze	Autor změny	Popis změny
2026-01-27	1.1	Vjačeslav Usmanov	added HM_02_Model_Validation.ipynb
2026-02-16	1.2	Vjačeslav Usmanov	changed HM_02_Model_Validation.ipynb

