



Modelování a simulace
Uhlíková stopa v dopravě

Tomáš Hampl (xhampl10)

Ondrej Šajdík (xsajdi01)

1. Úvod

Táto práca sa zaoberá problematikou dopadu uhlíkovej stopy v doprave, konkrétne vlaky s vodíkovými palivovými články. Implementujeme a simulujeme chovanie vlaku na linke Rumburk - Kolín, kde jazdí staré dieselové lokomotívy. Nemá tu zmysel stavať elektrickú dráhu a preto sa tu vodík skvelo hodí.

Zmyslom práce je demonštrovať, koľko oxidu uhličitého dokáže výmena dieselových lokomotív za vodíkové vlaky ušetriť. V práci počítame s výrobou vodíku reformovaním pary, pretože výroba elektrolýzou je "zelená" až na možnou použitou elektrinu.

1.1 Autori

Autormi tejto práce sú Tomáš Hampl (xhampl10) a Ondrej Šajdík (xsajdi01).

1.2 Zdroje

Informácie k vypracovaniu boli získané zo štúdie o použití palivových článku a vodíku v prostredí železnice. Informácie o vlaku boli získané z Wikipédie o spoločnosti Alstom Coradia LINT. Rovnice a výpočty potrebné pro výpočet potrebnej energie pro vlaky, boli vypočítané pomocou štúdie o aerodynamickom odpore vlaku a Wikipédie.

1.3 Validita modelu

Model je abstraktom reálneho vlaku. Snažíme sa dodržiavať všetkých zákonov a počítať s všetkými faktormi, avšak úplný vplyv prostredia sa nedá zobrať v úvahu pre jeho náročnosť.

2. Rozbor

2.1 Téma a použité metódy/technológie

Informácie o vlaku ako napríklad váha (65 ton), počet sedadiel (160) a maximálna rýchlosť (140 km/h) boli získané z článku o spoločnosti [1]Alstom Coradia LINT, typ vlaku iLint. Tento vlak sa berie v úvahu v štúdiu "Study on the use of Fuel Cells and Hydrogen in the Railway Environment", na ktorej sme založili túto prácu. Získali sme tu informácie o produkcii vodíku a prípadnému vzniku oxidu uhličitého pri reformovaní páry (200g na 1kWh). Informácie o linke Rumburk - Kolín, ako napríklad počet zastávok (14), vzdialenosti (152 km) a počte vlakov, ktoré tu jazdia (6), boli získané pomocou spoločnosti České Dráhy. Informácia o počtu pasažierov bola získaná z štvrtročného prehľadu základných ukazovateľov, súhrnný prehľad o preprave cestujúcich a vecí po železnici z roku 2019 (5% populácie denne). Informácii o produkcii oxidu uhličitého (21g za pasažiera alebo 9.9 kg za km) sme získali zo stránky ecopassenger a článku zo stránky seat61.

2.2 Použité technológie

K implementácii sa využilo C++ a knižnica SIMLIB.

3. Konceptcia

3.1 Konceptuálny model

Máme dráhu o 14 zastávkach. S celkovou vzdialenosťou 152 km a s počtom 6 vlakov, ktoré po tejto linke prejdú za jeden deň. Vlak má váhu 65 ton, 160 miest a potom ako sa rozbehne, drží rýchlosť 22,2 m/s. Model je založený na nasledujúcich rovniciach:

$$accelDist[m] = \frac{velocity \left[\frac{m}{s} \right]}{DEFAULT_{VELOCITY} \left[\frac{m}{s} \right]} * DEFAULT_ACCEL_DISTANCE[m]$$

Tento vzorec slúži k výpočtu vzdelenosti potrebne pro zrychlenie z 0 m/s na požadovanou rýchlosť.

$$accelTime[s] = \frac{accelDist[m]}{velocity[m/s]}$$

Vzorec slúži pro výpočet času potrebného pro akcelerácii.

$$acceleration[m/s^2] = \frac{velocity[m/s]}{accelTime[s]}$$

Vzorec slúži pro výpočet akcelerácie.

$$brakeDist[m] = \frac{velocity^2[m/s]}{2 * STEEL_FRICTION * GRAVITY_ACCEL[m/s^2]}$$

Vzorec vypočíta brzdnou dráhu.

$$\begin{aligned} dragForce[N] \\ &= \frac{1}{2} * RESISTANCE_COEFFICIENT * AIR_DENSITY[kg/m^3] \\ &\quad * velocity^2[m/s] * TRAIN_FRONTAL_AREA[m^2] \end{aligned}$$

Vzorec slúži pro výpočet sily odporu.

$$accelForce[N] = weight[kg] * acceleration[m/s^2]$$

Vzorec slúži pro výpočet sily potrebnej pro zrýchlení.

$$accelEnergy[J] = (accelForce[N] + accelForce[N] * wheelFriction) * accelDist[m]$$

Rovnice vypočítavá potrebnou energii pro zrýchlení. Berie v úvahu odporu trení.

$$\begin{aligned} travelEnergy[J] \\ &= (dragForce[N] + dragForce[N] * wheelFriction) * (dist[m] \\ &\quad - accelDist[m] - brakeDist[m]) \end{aligned}$$

Rovnica počíta potrebnú energiu k prekonaniu odporu za jazdy.

Pro výpočet produkcie oxidu uhličitého musíme previesť energii v Joulech na Watthodiny.

$$Wh = \frac{Energy [J]}{3600}$$

Následne použijeme formulu na výpočet oxidu uhličitého.

$$1 kWh = 200 g CO_2$$

| Mesto | Vzdialenosť | Počet obyvateľov |
|----------------------|-------------|------------------|
| Rumburk | | 11000 |
| Krásna Lípa | 6 km | 3490 |
| Rybnište | 5 km | 662 |
| Jedlová | 9 km | 992 |
| Svor | 8 km | 628 |
| Nový Bor | 5 km | 11679 |
| Skalice u České Lípy | 10 km | 18733 |
| Česká Lípa | 2 km | 18734 |
| Doksy | 15 km | 5191 |
| Bělá pod Bezdězem | 20 km | 4890 |
| Bakov nad Jizerou | 10 km | 4978 |
| Mladá Boleslav | 9 km | 44327 |
| Nymburk | 30 km | 15054 |
| Podebrady | 7 km | 14192 |
| Kolín | 16 km | |

3.2 Implementační detaily

Vlak začína čkaním na zastávke a nástupom ľudí do vlaku. Po ukončení doby čakania na zastávke sa vypraví na prví úsek. Jednotlivé vzdialenosti sú uložené vo vektore. Úsek je simulovaný výpočtom trvania podľa vzdialenosti ku rýchlosti a je tu započítaný čas potrebný pre zrýchlenie. Pri dosiahnutí ďalšej stanice začína opäť čkanie, aby pasažieri mohli vystúpiť, a noví pasažieri mohli nastúpiť. Výstupy stredná hodnota od 0 až po počet obyvateľov daného mesta krát 2.5% delene aktuálnym počtom pasažierov. Nástupy stredná hodnota od 0 až po počet obyvateľov krát 2.5% delene celkovým počtom vlakov. Je nutné zobrať v úvahu počet vlakov, pretože jeden vlak bude viac naplnený ako viacej vlakov. Hodnota 2.5% je prevzatá z faktu, že denne sa prepraví 5% populácie vlakovou dopravou a naše práce simuluje linku v jednom smeru. Ďalej obsahuje metódu `calculateEnergy`, ktorá má vstupný parameter vzdialenosť. Táto funkcia vypočíta na základe hmotnosti, ktorá je určená základom vlaku a počtom cestujúcich, rýchlosti a akcelerácie energii, ktorá je nutná pre prekonanie síl pôsobiacich na vlak. Pomocou faktu, že známe potrebnú energiu, dokážeme určiť, koľko oxidu uhličitého bolo vyprodukované pri výrobe vodíku, aby sa tato cesta mohla uskutočniť.

4. Architektúra

Trieda `Train`

Dedí od triedy `Process` z knižnice `SIMLIB`. Obsahuje metódu `Behavior()`, kde je implementovaný celý proces chovania vlaku na linke.

Trieda `Generator`

Dedí od triedy `Event` z knižnice `SIMLIB`. Obsahuje metódu `Behavior()`, ktorá pred behom simulácie vytvorí zadaný počet vlakov v intervaloch odpovedajúcich reálnej premávke na trati, poprípade sa intervaly prispôbia počtu vlakov. Pokiaľ simulácia beží viacej dní, aktivuje sa v čase nasledujúceho dňa.

5. Experimenty

Cieľom nášho experimentovania je zistiť ako by sa zmenilo množstvo vyprodukovaného CO₂, ak by aktuálne dieselové vlaky na trase Rumburk – Kolín boli poháňané vodíkom. A ako by sa toto množstvo menilo, pri iných frekvenciách linky, množstve sedadiel a iných maximálnych rýchlostiach, ktoré vlak dosahuje pri ceste. S cieľom čo najviac využiť výhod vodíka v množstve vyprodukovaných emisií, pri čo najmenšom dopade na kvalitu linky.

5.1 Postup experimentovania

Najprv sa v experimentoch budeme snažiť zistiť, aký majú dopad jednotlivé parametre (max. rýchlosť, kapacita vlaku, frekvencia vlakov) a nasledovne tieto poznatky využiť k vytvoreniu experimentu, kombinujúci tieto parametre.

5.2 Experimenty

Experiment #1

Týmto prvým experimentom sa ukáže, aký by bol rozdiel v množstve vyprodukovaných emisií u aktuálnej linky, pri rozdielnom type pohonu, bez zmeny parametrov. Z výsledkov je jasné, že pri využití vodíkového pohonu je vypustené do ovzdušia menej CO₂ emisií.

| | |
|---------------------------------|-----------|
| Počet dní | 30 |
| Počet prejdenných vlakov za deň | 6 |
| Počet miest vo vlaku | 160 |
| Váha vlaku | 65 000 kg |
| Maximálna rýchlosť | 22.2 m/s |

| | |
|--|--------------|
| Priemerný čas cesty jedného vlaku | 114.11 min |
| Celkový čas vlakov na ceste | 20540.50 min |
| Celkový počet prevezených cestujúcich | 62638 |
| Celkové množstvo potrebnej energie | 156319 MJ |
| Množstvo CO ₂ emisií pri produkcii energie (vodík) | 8684.40 kg |
| Množstvo CO ₂ emisií pri produkcii energie (diesel) | 37534.50 kg |

Experiment #2

Znížila sa maximálna rýchlosť vlaku na 15 m/s, aby sa zistil dopad rýchlosti vlaku na čas cesty a množstvo vyprodukovaných emisií. Ihneď sa môže všimnúť, že množstvo vyprodukovaných emisií u vodíku je o viac než polovicu menší, zatiaľ čo u dieselu nie je tento rozdiel až taký značný.

| | |
|---------------------------------|-----------|
| Počet dní | 30 |
| Počet prejdenných vlakov za deň | 6 |
| Počet miest vo vlaku | 160 |
| Váha vlaku | 65 000 kg |
| Maximálna rýchlosť | 15 m/s |

| | |
|--|-------------|
| Priemerný čas cesty jedného vlaku | 168.889 min |
| Celkový čas vlakov na ceste | 30400 min |
| Celkový počet prevezených cestujúcich | 60168 |
| Celkové množstvo potrebnej energie | 72587.60 MJ |
| Množstvo CO ₂ emisií pri produkcii energie (vodík) | 4032.64 kg |
| Množstvo CO ₂ emisií pri produkcii energie (diesel) | 35851.80 kg |

Experiment #3

Zvýšila sa maximálna rýchlosť vlaku na 30 m/s, ako protiklad predchádzajúcemu experimentu. Môže sa pozorovať prudký nárast množstva emisií u vodíku, zatiaľ čo u dieselu je rozdiel len veľmi malý.

| | |
|---------------------------------|-----------|
| Počet dní | 30 |
| Počet prejdejších vlakov za deň | 6 |
| Počet miest vo vlaku | 160 |
| Váha vlaku | 65 000 kg |
| Maximálna rýchlosť | 30 m/s |

| | |
|--|-------------|
| Priemerný čas cesty jedného vlaku | 84.44 min |
| Celkový čas vlakov na ceste | 15200 min |
| Celkový počet prevezených cestujúcich | 61769 |
| Celkové množstvo potrebnej energie | 279252 MJ |
| Množstvo CO ₂ emisií pri produkcii energie (vodík) | 15514.00 kg |
| Množstvo CO ₂ emisií pri produkcii energie (diesel) | 26879.20 kg |

Experiment #4

Znížila sa frekvencia vlakov z 6 denne na 4 denne. S cieľom zistiť, či pri menšom počte vlakov nebol problém s kapacitou vlakov a dopad tejto zmeny na emisie. Zatiaľ čo množstvo emisií sa u oboch typov vlakov zmenšilo priamoúmerne k ich počtu, tak sa znížil i počet prevezených cestujúcich v dôsledku naplnenia kapacity vlakov.

| | |
|--------------------------------|-----------|
| Počet dní | 30 |
| Počet prejdených vlakov za deň | 4 |
| Počet miest vo vlaku | 160 |
| Váha vlaku | 65 000 kg |
| Maximálna rýchlosť | 22.2 m/s |

| | |
|--|--------------|
| Priemerný čas cesty jedného vlaku | 114.11 min |
| Celkový čas vlakov na ceste | 13693.70 min |
| Celkový počet prevezených cestujúcich | 48062 |
| Celkové množstvo potrebnej energie | 104883 MJ |
| Množstvo CO ₂ emisií pri produkcii energie (vodík) | 5826.81 kg |
| Množstvo CO ₂ emisií pri produkcii energie (diesel) | 30615.00 kg |

Experiment #5

V predchádzajúcom experimente, sa zistilo, že zníženie počtu vlakov, má nepriaznivý účinok na množstvo prevezených cestujúcich. Preto v tomto experimente, sa uberie len 1 vlak a zvýši kapacita vlakov o 40, čím sa vykompenzuje kapacita tohto vlaku. Pri tejto zmene sa v simulácii podarilo previesť takmer rovnaké množstvo pasažierov ako v 1. experimente. Množstvo emisií sa u vodíku znížilo. Ale len o malé množstvo. Zatiaľ čo u dieselu sa množstvo emisií dokonca zvýšilo.

| | |
|--------------------------------|-----------|
| Počet dní | 30 |
| Počet prejdených vlakov za deň | 5 |
| Počet miest vo vlaku | 200 |
| Váha vlaku | 65 000 kg |
| Maximálna rýchlosť | 22.2 m/s |

| | |
|--|--------------|
| Priemerný čas cesty jedného vlaku | 114.11 min |
| Celkový čas vlakov na ceste | 17117.10 min |
| Celkový počet prevezených cestujúcich | 58858 |
| Celkové množstvo potrebnej energie | 130940 MJ |
| Množstvo CO ₂ emisií pri produkcii energie (vodík) | 7274.45 kg |
| Množstvo CO ₂ emisií pri produkcii energie (diesel) | 38112.90 kg |

Experiment #6

V tomto experimente sa využijú zistenia z predchádzajúcich experimentov, aby sa zistilo, že tieto zistenia pri súbežnom použití nie sú v konflikte. Na základe experimentov 2 a 3, sa nastaví maximálna rýchlosť vlakov na 15 m/s. A podľa experimentov 4 a 5 sa nastaví frekvencia vlakov na 5 za deň o kapacity 200 miest. Pri týchto zmenách sa oproti výsledkom z 1. experimentu značne zmenšilo množstvo emisií pri vodíku, ale množstvo emisií u dieselu sa zväčšilo. V zhl'adom k zníženiu rýchlosti sa doba cesty jedného vlaku taktiež zvýšila.

| | |
|---------------------------------|-----------|
| Počet dní | 30 |
| Počet prejdejších vlakov za deň | 5 |
| Počet miest vo vlaku | 200 |
| Váha vlaku | 65 000 kg |
| Maximálna rýchlosť | 15 m/s |

| | |
|--|--------------|
| Priemerný čas cesty jedného vlaku | 168.89 min |
| Celkový čas vlakov na ceste | 25333.30 min |
| Celkový počet prevezených cestujúcich | 57561 |
| Celkové množstvo potrebnej energie | 60892.40 MJ |
| Množstvo CO ₂ emisií pri produkcii energie (vodík) | 3382.91 kg |
| Množstvo CO ₂ emisií pri produkcii energie (diesel) | 37659.00 kg |

5.3 Závery experimentov

Bolo vykonaných šesť experimentov. Prvý zisťoval rozdiel v množstvo emisií vypustených do ovzdušia v porovnaní vodíkového a dieslového pohonu pri súčasnom stave linky. V druhom a treťom sa zisťovalo aký má dopad zmena maximálnej rýchlosti vlaku. V štvrtom a piatom sa pokúšalo nájsť správny pomer počtu vlakov a sedadiel. A u posledného experimentu sa tieto zmeny spojili pre overenie, že výsledky týchto experimentov nie sú v konflikte. Preverovanie týchto situácií by nemalo priniesť žiadnu novú informáciu, pretože simulácie boli spúšťané na intervale 30 dní, čo by malo v dostatočnej miere zamedziť nepresnostiam vzniknutých pri generovaní vstupov náhodných veličín.

6. Zhrnutie simulačného experimentu a záver

V výsledkov experimentov vyplýva, že pre danú vlakovú linku by vlak poháňaný vodíkom bola značne úsporná alternatíva v množstve vyprodukovaných emisií, čo sme zistili už pri prvom experimente. A taktiež pri úprave linky by sa toto množstvo dalo ešte znížiť, na základe šiesteho experimentu. Zároveň experimenty dva a tri ukázali, že rýchlosť, ktorú vlak dosahuje má veľký vplyv na množstvo emisií, preto by vodíkový variant bol vhodnejší pre linky, kde vlaky jazdia pomalšie. Vytvorený simulačný model použitý v experimente je navrhnutý tak, že len pri malých zmenách je možné simulovať chovanie na inej linke a tak by mohol byť vhodným nástrojom pre overovanie, či sa oplatí zaviesť vodíkové vlaky aj inde.

1. RUF, Yvonne, Thomas ZORN, Pinar Akcayoz DE NEVE, Patrick ANDRAE, Svetlana EROFEEVA, Frank GARRISON a Andreas SCHWILLING. Study on the use of Fuel Cells and Hydrogen in the Railway Environment [online]. Publications Office of the European Union, April 2019, , 36 [cit. 2019-12-09]. DOI: 10.2881/495604. ISSN 978-92-95215-11-5.
Dostupné z: https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2019/05/Study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment_final.pdf
2. WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Alstom_Coradia_LINT. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-12-09].
Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Alstom_Coradia_LINT
3. BROCKIE, N.J.W. a C.J. BAKER. THE AERODYNAMIC DRAG OF HIGH SPEED TRAINS. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics [online]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1990, 15.12.1988, 1990(34), 273-290 [cit.2019-12-09].
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167610590901567>
4. České dráhy: Národní dopravnice [online]. Praha: České dráhy, 2016 [cit. 2019-12-09].
Dostupné z: <https://www.cd.cz/>
5. Ecopassenger [online]. Germany: HaCon Ingenieurgesellschaft mbH, 2019 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: http://ecopassenger.hafas.de/bin/query.exe/en?L=vs_uic&
6. SMITH, Mark. Cut your CO2 emissions by taking the train, by up to 90%... [online]. [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://www.seat61.com/CO2flights.htm>