



Modelování a simulace

Simulační studie

Proces výroby tehly

Varianta 7: Vliv stavebnictví na životní prostředí

5. februára 2021

Adrián Boros (xboros03)

Tomáš Žigo (xzigot00)

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Autori, zdroje	2
1.2	Overovanie validity modelu	2
2	Rozbor témy a použitých metód/technológií	2
2.1	Použité postupy	3
2.2	Popis pôvodu použitých metód/technológií	3
3	Koncepcia modelu	3
3.1	Návrh konceptuálneho modelu	4
3.2	Formy konceptuálneho modelu	4
4	Architektúra simulačného modelu	4
5	Podstata simulačných experimentov a ich priebeh	5
5.1	Postup experimentovania	5
5.1.1	Použitie simulátoru	5
5.2	Dokumentácia jednotlivých experimentov	5
5.2.1	Experiment 1	6
5.2.2	Experiment 2	6
5.3	Závery experimentov	8
6	Zhrnutie simulačných experimentov a záver	8

1 Úvod

Táto práca vznikla ako projekt do predmetu Modelování a simulace. Práca sa zaoberá procesom zostavovania modelu [1, snímok 7] pre proces výroby tehly a jeho následnou simuláciou [1, snímok 33]. Ďalej sú popísané simulačné experimenty [1, snímok 9] na vytvorenom modeli, ktoré sledujú množstvo vyprodukovaných emisií v rôznych podmienkach a za použitia rôznych technológií.

Cieľom projektu je navrhnúť alebo analyzovať [1, snímok 10] protiopatrenia vedúce k zníženiu uhlíkovej stopy v stavebníctve a taktiež preskúmať ekonomickú náročnosť týchto protiopatrení. V reálnom živote by bolo obtiažne a finančne nákladné testovať tieto opatrenia, preto je vhodné použiť simulačný model [1, snímok 10].

1.1 Autori, zdroje

Na projekte pracoval dvojčlenný tím v zložení Adrián Boros (xboros03) a Tomáš Žigo (xzigot00) z FIT VUT v Brně.

Pri tvorbe projektu sme využili znalosti nadobudnuté z predmetu Modelování a simulace. Zdrojom informácií týkajúcich sa zadaného problému boli verejne prístupné zdroje a to najmä webová stránka [researchgate.net](https://www.researchgate.net) [2] s vedeckým článkom, v ktorom sú popísané jednotlivé kroky výroby tehly a taktiež aj technické správy zaoberajúce sa problematikou produkcie emisií.

1.2 Overovanie validity modelu

Overovanie validity [1, snímok 37] prebiehalo postupným testovaním. Toto overovanie bolo prevádzané porovnávaním získaných výsledkov zo simulácie s údajmi dostupnými v dokumente [2]. Overovalo sa, či modelová situácia odpovedá reálnej situácii a či výsledky simulačného modelu [1, snímok 10] odpovedajú skutočným hodnotám, pričom informácie ktoré neboli dostupné v článku [2], boli čerpané z iných dôveryhodných zdrojov. Pre nedostupné informácie boli zvolené hypotetické hodnoty.

Pre porovnanie, v zdroji [2] sa uvádza, že z 1 tony materiálu sa vyprodukuje 201.8 kg CO₂. Z výstupu našich experimentov sme zistili, že z 1 tony materiálu sa vyprodukuje 198.584 kg CO₂. Tento rozdiel mohol byť spôsobený tým, že v našej simulácii sme vynechali niektoré kroky reálnej výroby, ktoré vyprodukovali minimálne množstvo emisií v porovnaní s ostatnými krokmi.

2 Rozbor témy a použitých metód/technológií

Pre modelovanie a simuláciu procesu výroby tehly je nutné poznať reálny chod výroby. Informácie potrebné pre implementáciu boli vyhľadané na verejne dostupných stránkach. Problémom pri niektorých hodnotách bolo to, že mnoho informácií bolo uvedených v sumarizovaných hodnotách za nejaké obdobie, alebo pre väčšie množstvo ako bolo pre našu simuláciu potrebné. Z tohto dôvodu museli byť niektoré hodnoty vypočítané pomocou dostupných informácií z rôznych štatistík.

Celý proces výroby prebieha nepretržite, bez prestávky, nakoľko celá výroba je realizovaná pomocou strojov. Stavebný materiál sa na miesto výroby priváža strojmi Caterpillar 740B EJ Tier 4 Interim s nosnosťou 25 ton a priemernou spotrebou 30 litrov dieselu na 100 kilometrov¹. Materiál je privážaný zo vzdialenosti 12 kilometrov a priemerná rýchlosť stroja je 30 km/h. Pre výrobu tehly sa používa 1 tona pripraveného materiálu zo skladu. Sklad má kapacitu 500 ton. Tento materiál sa najprv zmieša a následne pomelie na menšie časti. Dĺžka miešania aj mletia trvá 4 minúty. Ak je

¹<https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C780975>

materiál pomletý, v 2% prípadov je zloženie materiálu nevhodné, takže sa materiál musí vrátiť naspať do skladu. V opačnom prípade materiál prepravuje ďalej, kde sa k nemu pridáva voda a znovu sa mieša. Dĺžka miešania je daná exponenciálnym rozložením[1, snímok 91] so stredom 13 minút. Z takto pripraveného materiálu sa narezávajú tehly o veľkosti 29 x 14 x 6,5 cm a hmotnosti 4.7 kg. Pri narezaní sa produkuje odpad, ktorý tvorí 9% celkovej hmotnosti. Tento odpad sa následne vracia naspať do procesu miešania. V prípade, že sa nazbiera potrebné množstvo narezaných tehál, podľa typu použitej pece, tehly sa vypália a následne ich proces výroby končí. Boli použité 3 druhy pece, informácie o týchto peciach boli čerpané zo zdrojov [4], [5] a [6]. Celý postup výroby bol prevzatý zo zdroja [2].

2.1 Použité postupy

Pre vytvorenie modelu bol použitý programovací jazyk C++, nakoľko podporuje knižnicu na simulovanie. Simulačná knižnica SIMLIB[3] poskytuje prostriedky na implementáciu simulačného modelu pre konkrétne zadanie.

Ďalej boli použité postupy popísané v slidoch k predmetu Modelovanie a simulace[1] k vytvoreniu Petriho siete[1, snímok 123] a samotnému programovaniu pomocou knižnice SIMLIB[3].

2.2 Popis pôvodu použitých metód/technológií

Boli použité štandardné triedy a funkcie jazyka C++ a taktiež vyššie spomenutá knižnica SIMLIB[1, snímok 163] a jej dokumentácia. Knižnica SIMLIB bola stiahnutá z oficiálnych stránok tejto knižnice. Bola použitá verzia 3.07 zo dňa 19. októbra 2018. Autormi tejto knižnice sú Petr Peringer, David Leska a David Martinek.

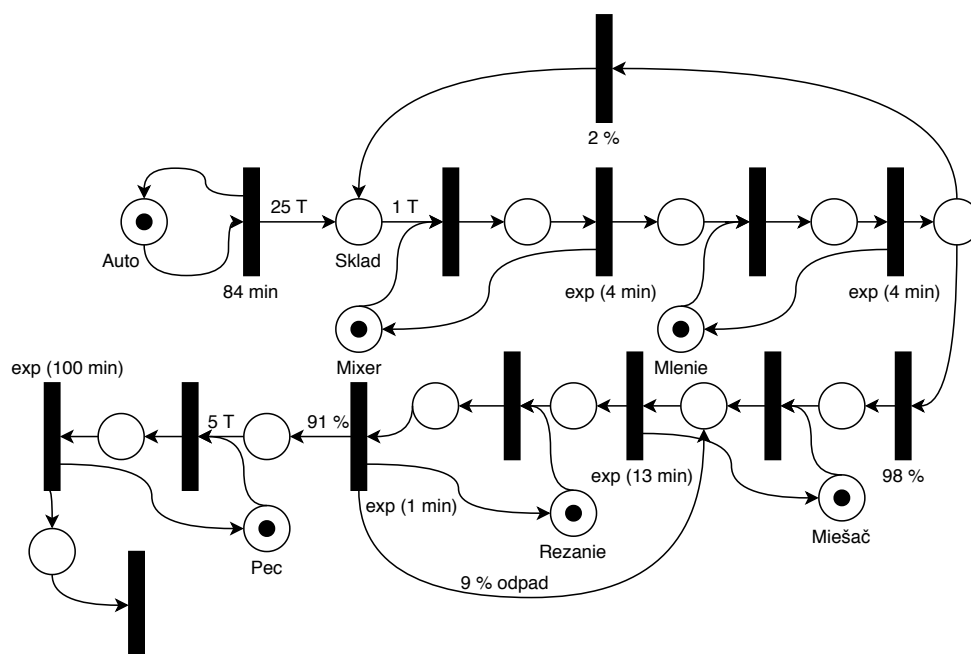
3 Koncepcia modelu

V tejto sekcii sa nachádza spracovanie návrhu konceptuálneho [1, snímok 48] (abstraktného) modelu nad systémom, ktorý je braný ako systém hromadnej obsluhy[1, snímok 136]. Pri vytváraní je nutné vybrať iba najpodstatnejšie informácie pre model. Simuluje sa príchod materiálu do systému, jeho následné spracovanie a výroba samotných tehál. Z reálneho procesu výroby sme vynechali niektoré, pre náš model, nepodstatné kroky. V týchto krokoch sa vyprodukovalo iba nepatrné množstvo emisií. Pri modelovaní sme nezohľadňovali ľudský element, pretože žiadne zdroje naň nepoukazujú ako na významný pri tvorbe uhlíkovej stopy, pri výrobe tehál. Taktiež sme zanedbali poruchovosť strojov, nakoľko tento údaj nie je podstatný v našom simulačnom modeli. Neuvažovali sme ani cenu ťažby materiálov na pohon pecí, nakoľko tento údaj nezohráva dôležitú úlohu pre výrobu tehál. Aby sa model zjednodušil, je počet vyrobených tehál zaokrúhlený na celé číslo. Na validitu modelu to má zanedbateľný vplyv. Simulovali sme priebeh výroby počas jedného mesiaca, pričom sme pracovali s možnosťou, že v každom dni sa vyprodukuje rovnaké množstvo tehál a to pri priaznivom počasí. Výslednú cenu zariadení ako aj profit výrobne sme zohľadňovali iba v časti pálení tehál, kde bola uhlíková stopa najväčšia a práve tejto časti sa týkal jeden z našich experimentov. Množstvo emisií v ostatných krokoch výroby sme vypočítali podľa zdroja [2] pre nami požadované množstvo.

3.1 Návrh konceptuálneho modelu

Vstupom simulácie je privezený materiál, ktorý prichádza do systému v dvoch rôznych časoch: V prvom prípade je materiál dovezený autom, kde trvanie cesty závisí na vzdialenosti umiestnenia výroby od bane. V druhom prípade je použitý dopravníkový pás, ktorý dokáže preniesť 2 tony materiálu každé 1.2 minúty. Dovezený materiál postupne prechádza systémom a nakoniec ho opustí vo forme vyrobených tehál. V simulácii uvažujeme tri druhy pece, z ktorých dve pracujú po 10 dávkach o veľkosti 910 kilogramov. Tento obsah pece dokážu vypáliť za 340 minút. Druhý typ pece vypaľuje jednotlivé dávky postupne a vypálenie jednej dávky trvá 7 minút. Ostatné časové údaje o jednotlivých obslužných linkách sa nachádzajú v sekcii 2. Výstupom simulácie sú štatistiky vyprodukovaných emisií v jednotlivých krokoch výroby, celkové množstvo vyprodukovanej uhlíkovej stopy a profit z vyrobených tehál.

3.2 Formy konceptuálneho modelu



Obr. 1: Návrh modelu

Abstraktný model [1, snímok 10] bol popísaný pomocou Petriho siete ktorá sa nachádza na obrázku 1 na základe získaných údajov zo sekcii 2.

4 Architektúra simulačného modelu

Pre implementáciu modelu bol zvolený jazyk C++ a knižnica SIMLIB. Základnou časovou jednotkou je hodina, od nej sú potom odvodené aj ďalšie časové hodnoty. Pre rýchlu zmenu nastavení je definovaných niekoľko konštánt ktoré sa využívajú pri experimentoch.

V implementácii sa využíva trieda *Generator*, ktorá je podtriedou triedy *Event* [1, snímok 169]. Týmto generátorom sa simuluje prívod materiálu do výroby. Je aktivovaný v čase spustenia simulácie, a potom vždy za časový úsek podľa použitého typu dovozu (auto alebo dopravníkový pás).

Sklad materiálu, ako aj počet čakajúcich tehál na vypálenie, sú modelované ako typ `Store`[1, snímok 184]. Kapacita týchto skladov je v oboch prípadoch 500 ton. Jednotlivé oblužné linky predstavujú v modeli prevádzané operácie nad materiálom. V našom prípade to sú *Smasher*, *Mixer*, *Kneader*, *Shaper* a *Oven*. V našej implementácii sú tieto linky typu `Facility` [1, snímok 180]. Hlavnú časť programu tvorí trieda `Production`, ktorá dedí z triedy `Process`[1, snímok 171]. Obsahuje metódu `Behaviour`, ktorá simuluje celý proces prechodu materiálu navrhnutým systémom. Táto časť je najzročnejšia v rámci implementácie. K simulácii času, po ktorý sú jednotlivé zariadenia obsadené, je použitá metóda `Exponential`[1, snímok 167]. Na percentuálne rozdelenie prechodov je využitá metóda `Random`[1, snímok 167]. Pre zdokumentovanie doby, kedy sú tehly prítomné v peci, bola využitá trieda `Histogram`[1, snímok 84], do ktorého sa zapisuje čas keď dávky tehál opustili pec.

5 Podstata simulačných experimentov a ich priebeh

Prvotným cieľom experimentov bolo nájsť najvhodnejšie hodnoty nedostupných údajov tak, aby bol model čo najpodobnejší skutočnosti. Následne dochádzalo k experimentovaniu s úpravami použitých hodnôt – typu pecí a paliva, ktoré používajú a spôsobu dovezenia materiálu. Cieľom týchto úprav bolo minimalizovať množstvo vyprodukovanej uhlíkovej stopy a analyzovať ekonomickú náročnosť týchto opatrení. Simulačný model umožňuje previesť množstvo experimentov a spracovanie výsledkov[1, snímok 35].

5.1 Postup experimentovania

Naším cieľom je vyskúšať rôzne varianty simulačného modelu a vyhodnotiť získané výsledky. Experimenty vychádzajú z hodnôt popísaných v kapitole 2 a následne z výsledkov predchádzajúcich experimentov. Tieto experimenty boli prevedené s dobou simulácie na jeden mesiac.

5.1.1 Použitie simulátoru

- `make` – preloženie programu a vytvorenie spustiteľného súboru
- `make clean` – odstránenie súborov vytvorených pomocou príkazu `make`
- `make run` – spustenie simulácie s rôznymi scenármi, výstup jednotlivých experimentov je uložený do súboru s koncovkou `.out`

Význam jednotlivých parametrov:

1. `parameter` – typ transportu, kde 0 znamená transport pomocou nákladného auta a 1 transport dopravníkovým pásom
2. `parameter` – typ použitej pece, 0 je typ Zig Zag, 1 je pec typu FCBTK a 2 je tunelová pec
3. `parameter` – použité palivo, 0 značí uhlie a 1 označuje drevené pelety
4. `parameter` – názov súboru do ktorého sa ukladajú výsledky jednotlivých experimentov

5.2 Dokumentácia jednotlivých experimentov

V tejto sekcii sú popísané jednotlivé vykonané experimenty.

5.2.1 Experiment 1

V prvom experimente sme sa zamerali na transport materiálu do výroby. V prvom prípade bol materiál dovezený autom zo vzdialenosti 12 kilometrov a v druhom prípade bol materiál prepravovaný z bane pomocou dopravníkového pásu. Dopravníkový pás bol modelovaný na dĺžke ~20m. Množstvo emisií ktoré vyprodukovalo auto je vypočítané podľa webovej stránky [greentruckassociation.com](http://www.greentruckassociation.com)². Množstvo emisií vyprodukovaných dopravníkovým pásom, pri použití pásu od firmy Zenith³, je získané na základe výkonu ktorý sa vynásobil koeficientom **0.4483**⁴.

Typ dovozu	Počet vyprodukovaných tehál	Uhlíková stopa dopravy	Dovezený materiál
Auto	213 928	5134.785 kg	5460 ton
Pás	213 928	995.269 kg	6088 ton

Tabuľka 1: Uhlíková stopa podľa typu dovozu materiálu

Z výsledkov v tabuľke 1 vidíme, že použitím pásu sa znížilo množstvo emisií v časti prepravy materiálu do výroby. A to aj za predpokladu, že dopravníkový pás pracuje nepretržite, kým auto je pri nakladaní materiálu nečinné. Toto má za následok to, že v sklade sa nachádza väčšie množstvo surového materiálu. Na počet vyrobených tehál, pri použití rovnakého počtu strojov (v našom prípade jeden každého druhu), však typ prepravy nemá žiaden vplyv, nakoľko v oboch prípadoch bol vyrobený rovnaký počet tehál. V tomto experimente sme neuvažovali cenu spotrebovaného paliva kamiónu, ani cenu spotrebovanej energie na chod dopravníkového pásu. Z výsledku nášho experimentu ale nemôžeme považovať dopravníkový pás za vhodnú voľbu pre každú výrobnú tehál. Pri dopravníkovom páse totiž vzniká nevýhoda kapacity bane. Pri vyčerpaní kapacity ťaženia na jednom mieste je nutné zmeniť lokáciu bane a pri použití dopravníkového pásu aj celú výrobu na miesto blízko bane. Táto procedúra môže byť ekonomicky veľmi náročná a z tohto dôvodu je pre niektoré výrobné ekonomicky výhodnejšie použiť, aj napriek zvýšenej produkcie oxidu uhličitého, dopravu pomocou nákladných áut.

5.2.2 Experiment 2

Náš druhý experiment sme zamerali na oblasť výroby kde sa vyprodukuje najviac uhlíkovej stopy, a to pálenie tehál. Vykonali sme experimenty s tromi rôznymi druhmi pecí a dvoma najpoužívanejšími palivami v týchto peciach. Dve z týchto pecí fungujú po dávkach tehál a dokážu za 340 minút vypáliť jednu dávku (10 ton) narezaných tehál. Posledná pec pracuje na princípe tunelového posuvníka, kde sa vypáli 1 tona tehál za 7 minút. Uhlíková stopa jednotlivých pecí je vypočítaná podľa vzorca: *výhrevnosť paliva * energia pece * 1000 kg CO₂*.

Z tabuľky 2 vyplýva, že najviac tehál sa vyprodukuje pri použití tunelovej pece, ale na druhej strane sa vyprodukuje aj najviac emisií. Z obrázku 3 je možné zistiť dôvod tohto tvrdenia. Dôvod je ten, že v porovnaní s pecami Zig Zag a FCBTK táto pec udržiava, po celú dobu prevádzky, výhrevnú teplotu a tehly sú pridávané postupne po malých častiach. Naopak, najmenej emisií sa vyprodukuje použitím pece typu **Zig Zag** s použitím drevených peliet. Táto pec je upravená FCBTK (*fixed chimney bull's trench kiln*), tak aby iným priechodom vzduchu teplo dlhšie udržala vo vnútri a tým znížila množstvo paliva potrebné na vyhrievanie. Ak by sa jednalo o veľkú výrobnú, teda

²http://www.greentruckassociation.com/GreenTruckAssociation/Resources/Calculate_a_carbon_footprint.aspx

³<https://www.zenithcrusher.com/ver2.0/>

⁴<https://carbonfund.org/calculation-methods/>

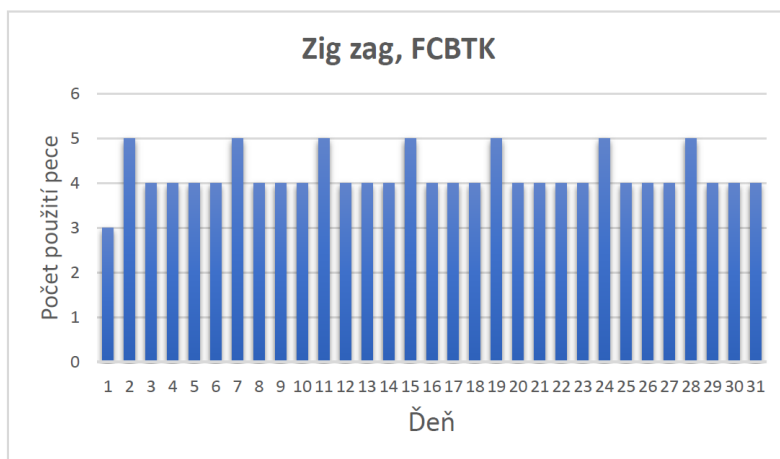
Typ pece	Typ paliva	Počet tehál	Množstvo emisií	Celková uhlíková stopa
Zig zag	uhlie	213 928 ks	15 847 kg	45.604 ton
Zig zag	drevené pelety	213 928 ks	3445 kg	33.202 ton
FCBTK	uhlie	151 008 ks	19 435 kg	49.192 ton
FCBTK	drevené pelety	151 008 ks	4225 kg	33.982 ton
Tunnel	uhlie	629 257 ks	552 552 kg	582.309 ton
Tunnel	drevené pelety	629 257 ks	120 120 kg	149.877 ton

Tabuľka 2: Množstvo emisií jednotlivých pecí s rôznymi palivami za mesiac činnosti

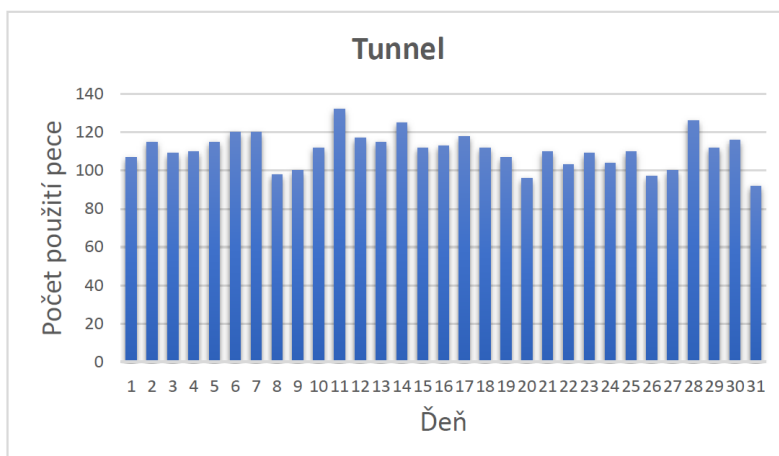
Typ pece	Cena pece	Typ paliva	Cena paliva / t	Cena paliva	Profit	Účinnosť
Zig zag	75 000 €	uhlie	30.43 €	1106.89 €	41 553.50 €	85%
Zig zag	75 000 €	drevené pelety	180 €	12 141.9 €	30 518.49 €	85%
FCBTK	50 000 €	uhlie	30.43 €	958.24 €	32 096.15 €	60%
FCBTK	50 000 €	drevené pelety	180 €	10 511.30 €	22 543.09 €	60%
Tunnel kiln	902 805 €	uhlie	30.43 €	4300.19 €	-561 013.84 €	95%
Tunnel kiln	902 805 €	drevené pelety	180 €	47 170.37 €	-603 884.02 €	95%

Tabuľka 3: Ceny pecí, palív a čistý zisk

aby za mesiac vyrobila čo najviac tehál, je pre ňu vhodná tunelová pec. Túto možnosť používa väčšina európskych výrobcov tehál. Avšak z tabuľky 3 zistíme, že táto pec je aj najdrahšia a výrobní by trvalo približne 2 až 3 mesiace, kým by sa jej investícia vrátila späť. Naopak ak chce byť firma čo najviac ekologická, oplatilo by sa jej investovať do Zig zag pece. Zároveň táto pec dokáže vrátiť investíciu viditeľne už po dobe jedného mesiaca. To znamená, že táto pec je výbornou investíciou pre menšie až stredne veľké firmy. Výsledkami modelovania sa zistilo, že pec FCBTK je najhoršou voľbou medzi vybranými pecami. Ako palivo sú najšetrnejšie drevené pelety, ale za spotrebované pelety zaplatí firma viac ako 10-násobok oproti uhliu a jej profit je tým približne o 11 tisíc € menší.



Obr. 2: Počet použitia Zig Zag a FCBTK pece v jednotlivých dňoch mesiaca



Obr. 3: Počet použítí tunelové pece v jednotlivých dnech měsíce

5.3 Závěry experimentov

Bolo vykonaných 12 experimentov v rôznych podmienkach. Niektoré z nich boli zamerané na zníženie emisií v oblasti transportu materiálu. Avšak väčšia časť experimentov analyzovala protiopatrenia vedúce k zníženiu uhlíkovej stopy pri vypaľovaní tehál. Z prevedených experimentov vyplynulo, že zvolením optimálnej pece a paliva je možné redukovať CO_2 bez veľkého zníženia rýchlosti produkcie. Najoptimálnejším riešením je použitie dopravníkového pásu na dovoz materiálu a použitie pece typu Zig zag s drevenými peletami. Výsledky jednotlivých experimentov sú dostupné v súboroch test[1-12].out.

6 Zhrnutie simulačných experimentov a záver

V rámci projektu vznikol nástroj, ktorý vychádza z modelu reálneho systému výroby tehál. Tento nástroj bol modelovaný v jazyku C++, za použitia knižnice SIMLIB. Z výsledkov experimentov vyplýva, že nami analyzovanými prostriedkami je možné znížiť množstvo vyprodukovaných emisií.

Literatúra

- [1] Peringer, P.; Hrubý, M.: *Modelování a simulace*. [Online], 24. říjen 2019.
Dostupné z: <https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IMS/public/prednasky/IMS.pdf>
- [2] Koroneos, C.; Dompros, A.: *Environmental assessment of brick production in Greece*. [Online].
Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/223560241_Environmental_assessment_of_brick_production_in_Greece
- [3] Peringer, P.; Leska, D.; Martinek, D.: *SIMLIB/C++ == SIMulation LIBrary for C++*. [Online].
Dostupné z: <https://www.fit.vutbr.cz/~peringer/SIMLIB/>
- [4] Maithel, S.; Kumar S.; Lalchandani D.: *Natural draught Zigzag firing technology*. [Online].
Dostupné z: <https://www.shareweb.ch/site/Climate-Change-and-Environment/about%20us/about%20gpcc/Documents/02%20Natural%20Draught%20Zigzag%20Kiln.pdf/>
- [5] Maithel, S.; Kumar S.; Lalchandani D.: *Tunnel kiln technology*. [Online].
Dostupné z: <https://www.shareweb.ch/site/Climate-Change-and-Environment/about%20us/about%20gpcc/Documents/07%20Tunnel%20Kiln.pdf>
- [6] Maithel, S.; Kumar S.; Lalchandani D.: *Fixed chimney bull's trench kiln*. [Online].
Dostupné z: [https://www.shareweb.ch/site/Climate-Change-and-Environment/about%20us/about%20gpcc/Documents/01%20Fixed%20Chimney%20Bulls%20Trench%20Kiln%20\(FCBTK\).pdf](https://www.shareweb.ch/site/Climate-Change-and-Environment/about%20us/about%20gpcc/Documents/01%20Fixed%20Chimney%20Bulls%20Trench%20Kiln%20(FCBTK).pdf)