

OPTIMALIZACE PROVOZU VENTILACE V SILNIČNÍCH TUNELECH

Příbyl Pavel, Jozef Štefaňák, Spalek Juraj

*České vysoké učení technické, Fakulta dopravní
Konviktská 20, 110 00 Praha, Česká republika
Tel.: +420 2 23 359 576, Fax: +420 2 23 359 514
Žilinská univerzita v Žiline, Elektrotechnická fakulta
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovenská republika
Tel.: +421 41 513 3301 Fax: +421 41 513 3301
e-mail: pribylp@eltodo.cz, jozef.stefanak@fel.uniza.sk, juraj.spalek@fel.uniza.sk*

Abstrakt: Tento příspěvek se zabývá optimalizací provozu ventilátorů v silničních tunelech. Problematika je řešena v rámci projektu vědy a výzkumu Ministerstva dopravy 1F43A/069/120 „OPTUN“.

Klíčové slová: řízení ventilace, hybridní model, predikční modul, koncentrace škodlivin

1 ÚVOD

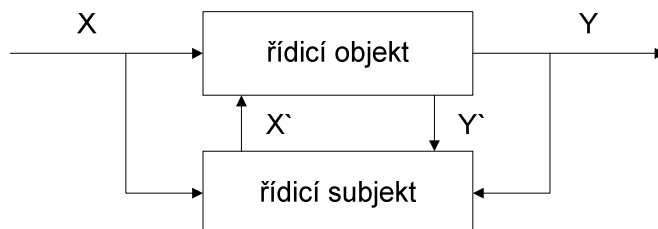
Řízení větrání v tunelu je složitý problém, který nelze řešit jedním samostatným klasickým regulátorem, např. PID, protože se jedná o nelineární systém s dopravním zpožděním, přičemž vstupní měřené hodnoty jsou zatíženy silnou stochastickou složkou. Do řídicího procesu vstupují i některé omezující podmínky, jako například omezení počtu sepnutí ventilátorů za časovou jednotku. Ventilace je projektována pro standardní dopravní podmínky, kdy zajišťuje přijatelné hygienické podmínky a viditelnost. Zároveň je však projektována pro případ požáru, kdy musí například bodově odsát až $120\text{--}140\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Z toho požadavku vyplývá, že se jedná o výkonné ventilátory, které je nutné efektivně řídit. Efektivní řízení je možné dosáhnout pomocí optimalizace.

Optimalizací se míní řízení ventilace dle měřených dopravních parametrů, což s sebou nese řadu výhod, jak potvrzují práce [1] až [4], ve srovnání s řízením ventilace podle měřených škodlivin. Typickou předností je velmi dobrá predikovatelnost dopravních parametrů ve srovnání s predikovatelností škodlivin. Tím se šetří zbytečná spínání ventilátorů a prodlužuje se jejich životnost. Také je možné tunel „předvětrávat“ nebo naopak nezapínat ventilaci při krátkodobém překročení hodnot škodlivin. To by mělo vést ke snížení provozních nákladů, neboť ventilace patří k největším spotřebičům energie.

Výzkumné práce zaoberající se řízením ventilace v silničních tunelech začali v roce 2005, kdy se pomocí progresivních metod hledali závislosti mezi hodnotami škodlivin a dopravních parametrů. V roce 2006 bylo hlavním cílem výzkumného projektu vytvoření modelu řídicího systému podélného větracího systému tunelu, kdy řídicí veličinou byla dopravní data, dle kterých byla ovládána vlastní ventilace. Dalším krokem bylo vytvoření aerodynamického modelu ventilace, který umožnil zkoumat předkládanou ideu a to i v dynamickém režimu a poskytuje přehled o možném využití netradičních řídicích systémů založených na fuzzy logice nebo využívajících metod prediktivního řízení a shrnuje možnosti využití v praxi.

2 ŘÍZENÍ VENTILACE STANDARDNÍMI METODAMI

Pro řízení ventilace se dosud používá v zásadě jednoduchý princip řízení v uzavřené smyčce vycházející ze základního schéma na Obr. 2.1, kde jsou vnější vlivy působící na objekt řízení (prostor tunelové trouby) označeny veličinou X (koncentrace škodlivin), zatímco odezva řízeného objektu je označena Y (ventilační systém). Řídící subjekt realizuje ovládání pomocí formulace cílů ovládání X' , které působí na řízený objekt. Vnitřní stavy řízeného objektu, umožňující řídicímu objektu realizovat zamýšlené ovládání jsou označeny jako Y' .



Obr. 2.1 Základní schéma ovládání objektu

Hodnoty X , resp. X' jsou argumenty funkcí objektu či subjektu, které je transformují ve výstupy Y , resp. Y' , což lze zapsat jako

$$Y = O(X, X')$$

$$X' = S(X, Y, Y')$$

kde O, S je řízený objekt resp. subjekt.

Z popisu tohoto principu je zřejmé, kde vznikají zásadní problémy. Prvním problémem je získat co nejvěrohodnější hodnoty škodlivin, které jsou časo-prostorově rozloženy v tunelu v závislosti na pozici senzorů a momentálních dopravních a jiných (fyzikálních podmínkách).

Druhým zásadním problémem je nelinearita celého procesu, která je tvořena řadou komponent. Například ventilátory mají nelineární charakteristiky závislosti množství vzduchu na otáčkách či nastavení lopatek. Pístový efekt, stejně jako tlakové ztráty závisí kvadraticky na rychlosti vozidel atd.

Třetí komponentou, která činí z řízení ventilace složitý problém je setrvačnost vzduchové hmoty v tunelu. Při zjištění překročení koncentrací škodlivin je nutné do pohybu uvést masu vzduchu, takže zvláště u delších tunelů se projeví značné dopravní zpoždění.

Výše uvedené nevýhody odstraňuje řízení ventilace vycházející z dopravních parametrů, neboť ty jsou velmi dobře predikovatelné na řadu minut dopředu a jejich stochastická složka je omezena danou fyzikální realitou dopravního proudu.

3 ŘÍZENÍ VĚTRÁNÍ NA ZÁKLADĚ DOPRAVNÍCH DAT

Základní ideou výzkumného projektu bylo vytvoření modelu řídicího systému podélného větracího systému tunelu, kdy řídicí veličinou jsou dopravní data, dle kterých je ovládána vlastní ventilace. Výzkumnou úlohu lze rozdělit do následujících částí:

1. Ověření předpokladu a nalezení modelu pro predikci škodlivin v reálném tunelu z měřených dopravních a případně dalších fyzikálních dat.
2. S využitím mikrosimulačního prostředí zpracovat dopravní model pro simulaci různých dopravních stavů při průjezdu vozidel virtuálním tunelem.
3. Vytvoření modelu větrání fiktivního tunelu s respektováním pístového efektu vozidel, aerodynamických ztrát a funkce ventilátorů.

4. Stanovení koncentrací škodlivin v tunelu pro výše uvedený dopravní model jako dynamické proměnné závislé na čase i místě.
5. Model větrání vycházející z koncentrací škodlivin získávaných z dopravních dat.
6. Zhodnocení efektu větrání založeném na dopravním modelu.

V roce 2005 byl částečně realizován bod 1, kdy bylo pro tunel Mrázovka ověřeno, že existuje závislost mezi koncentracemi škodlivin a dalšími měřenými parametry. Metodami technologií práce s databázemi nazývanými „Data Mining“¹, kdy se z nepřehledných databází měřených hodnot získávají skryté informace, byly hledány a nalezeny následujících informace a vazby:

- Vytvoření statického modelu historických dopravních dat, který popisuje pro různé měřené veličiny, například typický den (časovou řadu intenzity dopravy pro pondělky ...).
- Vytvoření statického modelu pro koncentrace škodlivin.
- Ohodnocení rozdílů v predikci dopravních a fyzikálních veličin.
- Nalezení modelu pro predikci koncentrací škodlivin z dopravních a fyzikálních dat.

Základní představu o predikci škodlivin, například CO v místě x v čase $t + \Delta T$ (predikční horizont) z měřených parametrů ve formě regrese vyjadřuje následující vzorec

$$CO_x(t + n\Delta T) = \alpha + \sum_{i=1}^k \beta_i [x_{i,x}(t) + \lambda \cdot x_{i,x}^{hist}(t + n\Delta T)] \quad (1)$$

kde α, β ... jsou regresní koeficienty

x_i ... vstupní proměnné (intenzita, rychlost ...)

x_i^{hist} ... historické hodnoty vstupních proměnných

λ ... koeficient vlivnosti/váhy historického modelu

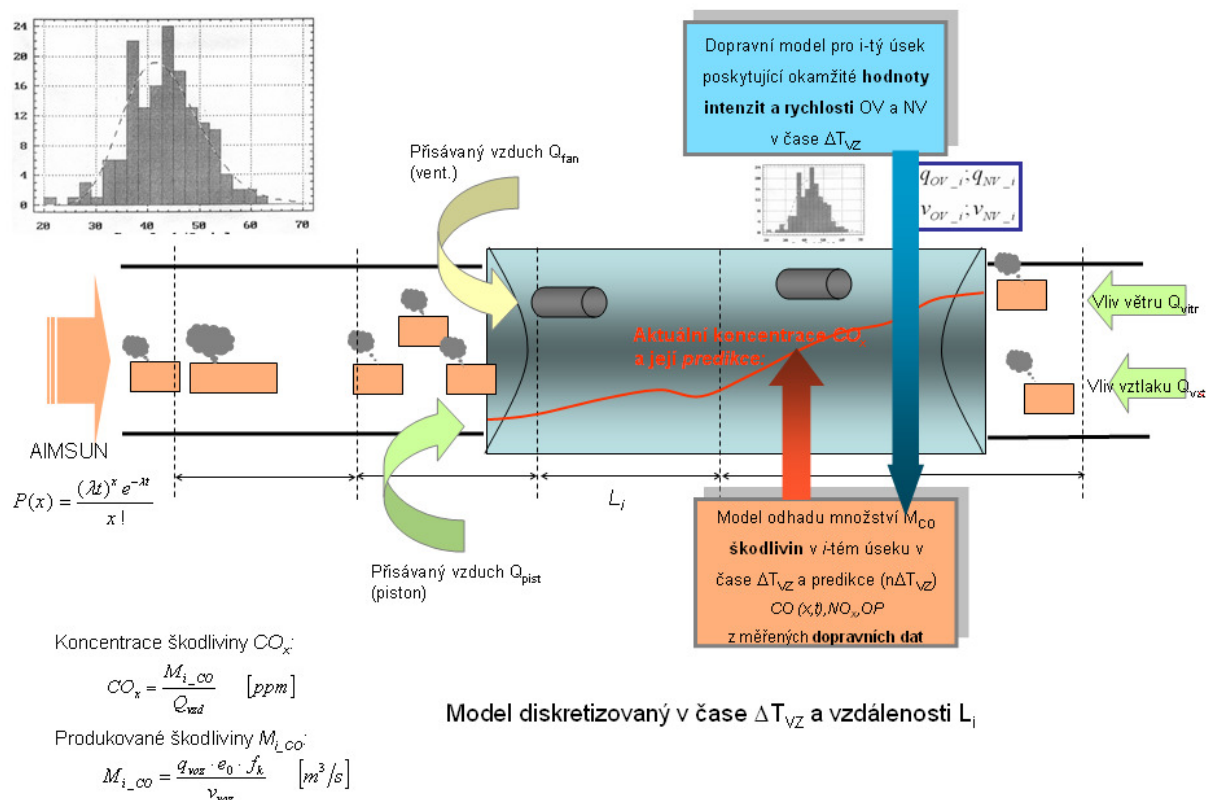
Predikční horizont může být reálně například 15 minut ($3 \cdot 5$ min). Za sumou se vyskytují dva sčítanci: první vyjadřuje aktuálně měřené proměnné x_i , ze kterých je odhadována hodnota škodlivin, zatímco druhý sčítanec „koriguje“ aktuálně měřené hodnoty historickým modelem stejných proměnných, ale s vlivností danou koeficientem λ . Interpretovat to lze tak, že pokud trend měřených hodnot souhlasí s trendy v historickém modelu, je možné predikci vylepšit historickým modelem, který řekne, jak se doprava vyvíjí.

Nalezené modely, které nejlépe odpovídaly zadání, obsahovaly množství vstupních veličin, tedy kromě dopravních dat i měřené teploty, tlaky, množství vzduchu apod. Kromě toho velmi podobně vycházel model založený na rozhodovacích stromech a regresní model, viz. lit. [5]. Proto bylo rozhodnuto, že práce v této oblasti budou pokračovat i v dalším roce a to na podstatném zjednodušení problematiky. Jinak řečeno, na základě statistické analýzy budou vybrány jen ty hodnoty, které nejlépe skládají předikovanou hodnotu koncentrací škodlivin a dále bude rozhodnuto, který z obou modelů se lépe hodí pro praktické využití.

Druhá oblast řešení spočívá na vytvoření dopravních modelů simulujících i dynamiku provozu ve fiktivním tunelu. V praxi se osvědčily mikrosimulační modely, které umožní v detailu sledovat dopravní poměry v tunelu. Programové prostředí AIMSUN umožňuje generovat na základě pravděpodobností fiktivní nákladní či osobní vozidla, které mohou mít nejenom různou

¹ Dolování dat

rychlost, hmotnost a různé časové odstupy, ale i odlišné dopravní vlastnosti. Vozidla, či skupiny vozidel projíždějí tunelem, takže v každém úseku L_i je v diskretním časovém okamžiku určitý počet osobních a nákladních vozidel vyjádřený hodnotami intenzit q_{OV_i} a q_{NV_i} s rychlostmi osobních v_{OV_i} a nákladních vozidel v_{NV_i} , viz. Obr. 3.1. Protože je znám vztah mezi odhadovanými hodnotami škodlivin a dopravními daty, lze pomocí vzorce (1) vypočítat aktuální i budoucí hodnoty škodlivin.



Obr. 3.1 Simulace průjezdu vozidel tunelem

Výstupem této části projektu jsou hodnoty koncentrací škodlivin odvozované z měření dopravních parametrů. Přínos spočívá v tom, že dopravní data jsou méně stochastická, respektive mají významnou stejnosměrnou složku, jak prokázala například práce [6] a tím jsou lépe predikovatelná. Dopravní data se navíc standardně měří ve větších vzdálenostech od tunelu, takže se i tím do značné míry zlepšuje predikovatelnost koncentrací škodlivin.

Další část projektu se zabývá modelováním větrání tunelu. Vychází se z toho, že je známo produkované množství škodlivin M_{i_CO} a toto množství je nutné rozředit čerstvým vzduchem. Ten se do tunelu dostává pístovým efektem vyvolaným vozidly a je ovlivňován gradientem tunelu a působením větru na portály. Pokud přirozené proudění nepostačuje, dodatečné množství vzduchu přivádí ventilátory.

Významná výzkumná oblast projektu souvisí s řízením větrání tunelu. Standardní řízení popsané například v bodě 2 „**Error! Reference source not found.**“ používá jako vstupy měřených fyzikálních veličin. S tím jsou spojené známé problémy dané hlavně silně stochastickými závislostmi měřených veličin (koncentrace CO, opacita) na vnějších vlivech (jedno čadící auto, porыв větru apod.) a jejich velkým časovým zpožděním, daným principy měření i filtrací měřených veličin.

V rámci této kapitoly řešení byl vytvořen model řídicího systému ventilace, který pracoval na základě vstupních hodnot tvořených dopravními daty. Jinak řečeno, množství vzduchu produkovaného ventilačním zařízením, které „řídí“ škodliviny je řízeno podle dopravního modelu. Vzhledem k nelinearitám celého procesu bylo navrženo Fuzzy řízení s alternativou prediktivního řízení. Součástí výzkumu bylo i zkoumání dynamiky procesu, odezev na skokové změny či zkoumání zpoždění.

4 HYBRIDNÍ MODEL PRO ODHADOVÁNÍ ŠKODLIVIN

Pro výzkum jsou použita data z tunelu Mrázovka, měřená v několika místech. V zásadě lze měření rozdělit na měření fyzikálně-chemických veličin, energetická měření a na měření dopravních parametrů. Pozice jednotlivých senzorů a bližší popis pro tunel Mrázovka lze najít v lit. [7]. Řídicí systémy obou tunelů uchovávají hodnoty měřených proměnných v databázi, což může být využito i pro následnou analýzu kvality řízení. Jako příklad lze uvést typická data uchovávaná řídicím systémem v automobilovém tunelu Mrázovka (ATM). Systém zaznamenává následující skupiny dat:

- Energetika (napětí, proud, příkon)
- Osvětlení (osvětlenost, stupně osvětlení)
- FyzChem² – fyzikálně chemická měření (koncentrace škodlivin, teploty, tlaky, apod.)
- Vzduch_dop – dopravní data (intenzita, rychlost, skladba dopravního proudu³)
- Vzduch_KSOL – vypočtené koncentrace CO, NO_x, opacity v jednotlivých úsecích
- Vzduch – data vzduchotechniky (množství vzduchu).

Řídicí systém uchová tato data pro oba tunely v databázi umístěné na serveru Strahovského dispečinku pražských tunelů. Z této databáze je prováděn každodenní export dat do CSV souborů. Soubory CSV (comma separated values – čárkami oddělené hodnoty) používají text ASCII (který je přenositelný mezi platformami pro reprezentaci dat a nezávisí na nějakém proprietárním formátu. Všechna datová pole jsou od ostatních oddělena jednou čárkou, odtud název formátu. Na jednom řádku je uložen řádek dat. Formát souborů CSV je vhodný pro výměnu dat mezi různými databázemi, které spolu nemohou komunikovat přímo.

Data jsou do CSV souborů exportována každých 24 hod., vždy v 00:00:00 hod. K dispozici jsou tedy data pro každý den zvlášť.

Základem modelu jsou předzpracovaná dopravní data ze senzorů dopravy, která jsou jako aktuální hodnoty, prostřednictvím bloku „Měření dopravních parametrů“ poskytována do bloku pro krátkodobou predikci škodlivin, viz. Obr. 4.1. Výstup tohoto bloku tedy poskytuje hodnoty škodlivin v závislosti na aktuálních datech.

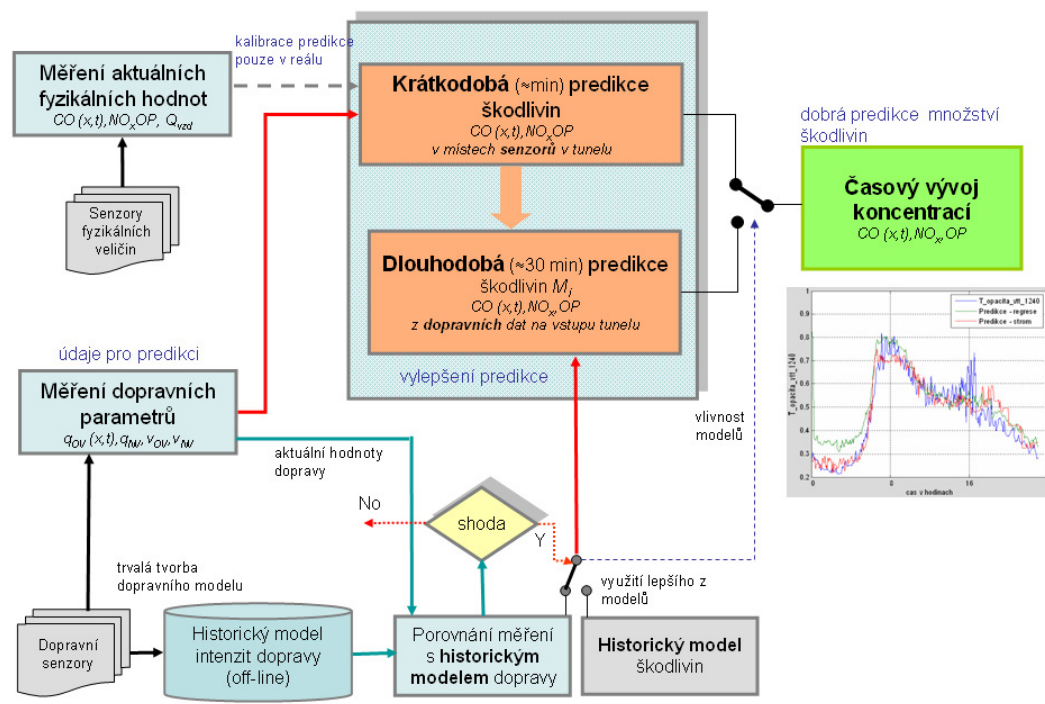
Kvalita predikce je vylepšována porovnáváním aktuálních dopravních dat s jejich historickým modelem. Pokud aktuální data mají podobný vývoj jako historický model, lze vylepšit dlouhodobější predikci tím, že se použije buď historický model dopravy, nebo jemu odpovídající historický model škodlivin.

Posouzení vlivnosti jednotlivých modelů je otázkou praktického testování a ladění. Podstatné je, že modul krátkodobé či dlouhodobé predikce prostřednictvím regresního vztahu, viz. rovnici (1), transformuje vstupní veličiny dopravy na hodnoty koncentrací škodlivin. Výstupem

² Použito označení z výzkumné zprávy, lit. [7]

³ Skladba dopravního proudu (osobní/nákladní vozidla) se měří pouze v ATM

je tedy krátkodobá (minuty) či dlouhodobá (desítky minut) predikce hodnot škodlivin, která vstupuje do modelu pro řízení vzduchotechniky.



Obr. 4.1 Hybridní model pro odhadování škodlivin

5 PREDIKČNÍ MODUL

V tomto kroku jsou otestovány různé typy modelů pro odhadování škodlivin z dopravních dat. V tomto případě byly testovány především modely založené na rozhodovacích stromech a lineární a logistické regresi.

Pro modelování škodlivin bylo vzato v úvahu 84 různých vstupních proměnných (intenzita dopravy, rychlost, tlak, teploty atd. různých senzorů). Tím získal model mimořádnou dimenzionalitu. Pro modelování byly zvoleny dva přístupy: lineární a logistická regrese a především modely založené na rozhodovacích stromech.

V případě regrese je cílem modelování určit vztah mezi regresory – proměnnými (intenzita, teploty atd.), a cílovou hodnotou (koncentrace CO, opacity). V našem případě je regresorů více, a proto mluvíme také o mnohočetné regresi.

Mnohočetnou regresi můžeme vyjádřit vzorcem:

$$y_j = \alpha + \beta_1 x_{1j} + \beta_2 x_{2j} + \dots + \beta_k x_{kj} + \varepsilon_j = \alpha + \sum_{i=1}^k \beta_i x_{ij} + \varepsilon_j, \quad (2)$$

kde x_{ij} jsou hodnoty proměnných a y_j je cílová hodnota. Koeficienty β jsou hledané koeficienty a koeficient α je tzv. intercept. Člen ε_j je odchylka mezi skutečnou a vypočtenou hodnotou. Omezením regresních modelů je lineární závislost mezi regresory a cílovou proměnnou. Vyplývá ze vztahu pro lineární regresi. Omezení lze překonat vhodnou transformací proměnných.

Rozhodovací stromy představují metodu modelování založenou na segmentaci dat pomocí sledu jednoduchých pravidel. Původní množina dat je rozdělena na podmnožiny, podle hodnoty určité proměnné tak, aby bylo dosaženo co nejlepší separace cílových hodnot v podmnožinách.

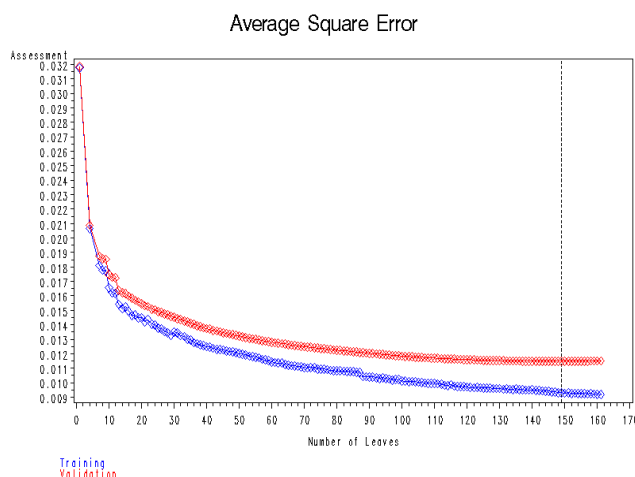
Každá podmnožina je následně dělena podle další proměnné, čímž vzniká stromová struktura. Podmnožina se také nazývá nodem. Pokud se jedná o nod, který již není dále dělen, mluvíme o listu stromu.

Větvení stromu je prováděno tak, aby bylo co nejlepší rozdělení cílových hodnot, to znamená, aby v ideálním případě byly stejné cílové hodnoty jednoho listu. Vytvořený strom je proto tvořen sérií pravidel, podle kterých jsou pak testovací a out-of-sample data zařazována do jednotlivých listů, u kterých je z trénovacích dat známá hodnota cílové proměnné.

Rozhodovací stromy tak představují srozumitelný typ modelů, který se, stejně jako například regresní modely, snadno implementuje.

Algoritmus prohledává proměnné trénovací množiny a hledá takovou proměnnou, která co nejlépe separuje od sebe hodnoty cílové proměnné. Pokud je tato proměnná nalezena, pak je trénovací množina rozdělena na podmnožiny podle dané proměnné tak, aby cílové hodnoty byly od sebe co nejlépe separovány. Tento postup je rekurzivně prováděn, pokud není dosaženo kritéria pro jeho zastavení. Kritérií pro zastavení dělení větve stromu může být více, jednak hodnota cílové proměnné, pokud cílová proměnná obsahuje jen jednu hodnotu, pak další dělení již není potřeba, dalším kritériem může být minimální počet pozorování v daném nodu, dosažení prahu variability v cílové proměnné, dosažená maximální hloubka větvení, a podobně.

Pokud jde o zobrazení rozhodovacích stromů, zobrazujeme je buď stromovou strukturou, případně přehledněji pomocí mezikruží. Proces učení rozhodovacích stromů obvykle probíhá po křivce podobné té, která je na Obr. 5.1. Trénovací data jsou modře, validační data jsou červeně. Vidíme, že po počátečním poklesu chyba klesá jen zvolna a rozdíl mezi chybou na trénovacích a na validačních datech se zvětšuje. Tato situace znamená, že model je naučený. O přeučení modelu bychom hovořili v situaci, pokud by chyba trénovacích dat klesala a chyba validačních dat stoupala.

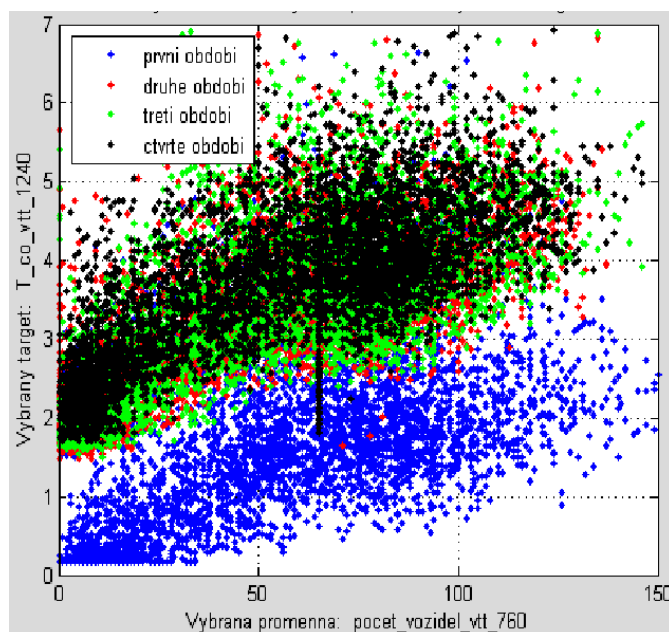


Obr. 5.1: Proces učení rozhodovacího stromu. Trénovací data jsou modře, validační jsou červeně.

Výkonnost nejlepších modelů je testována na datech, která nebyla do modelování použita. Jednalo se o testovací data, která tvořila 30% vzorků (vzorkem je míněn 5 minutový časový úsek). Následně byly modely hodnoceny na out-of-sample datech (měsíc září a první polovina října).

Prvním krokem pro tvorbu modelů bylo vytvoření náhledu na rozložení cílových hodnot, rozložení vstupních proměnných a jednoduché vztahy mezi vstupními hodnotami a cílovými proměnnými. Dobrou informaci lze vytěžit grafickým zpracováním závislosti mezi dvěma proměnnými. Graf na Obr. 5.2 vyjadřuje závislost mezi koncentrací CO (target) a mezi

intenzitou vozidel (vstupní proměnná). Z grafu lze rozeznat, že tato závislost bude patrně existovat.



Obr. 5.2: Vztah intenzity vozidel a koncentrace CO (T_co_vtt_1240)

Ve zprávě je v tabulce Tab. 5.1 přehled dosažených výsledků obou modelů s numerickou cílovou hodnotou. Sloupce Train ASE, Valid ASE a Test ASE představují střední kvadratickou chybu predikce /Average Square error/. Číslovka na konci označení cílové hodnoty (_1, _2 a _3 představuje posunutí cílové hodnoty do budoucnosti. Jedná se tedy o odhady – predikce na budoucích 5, 10 a 15 minut⁴. Tabulka si vyžaduje podrobnější rozbor, představu o výstupu ukazuje její část popisující výsledky modelování oxidu uhelnatého:

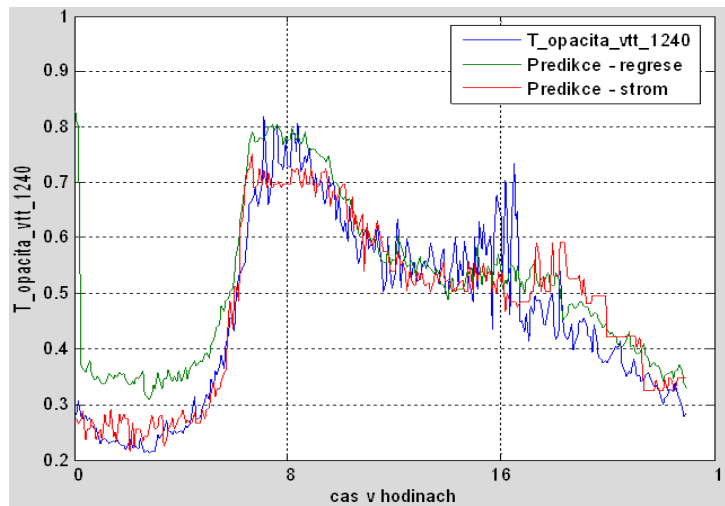
Koncentrace CO T_co 920				
Model	Cílová hodnota	Train ASE	Valid ASE	Test ASE
Strom	T_co_vtt_920	0.4255007091	0.451787818	0.4736552382
Regrese	T_co_vtt_920	0.4600168217	0.4666250228	0.4758430145
Strom	T_co_vtt_920_1	0.4380624771	0.4709196994	0.4800219451
Regrese	T_co_vtt_920_1	0.4673304894	0.4807264003	0.4834987315
Strom	T_co_vtt_920_3	0.4356791934	0.4835255145	0.4908239577
Regrese	T_co_vtt_920_3	0.4827424483	0.493065065	0.5049773396v

Tab. 5.1 Odhadování koncentrací škodlivin

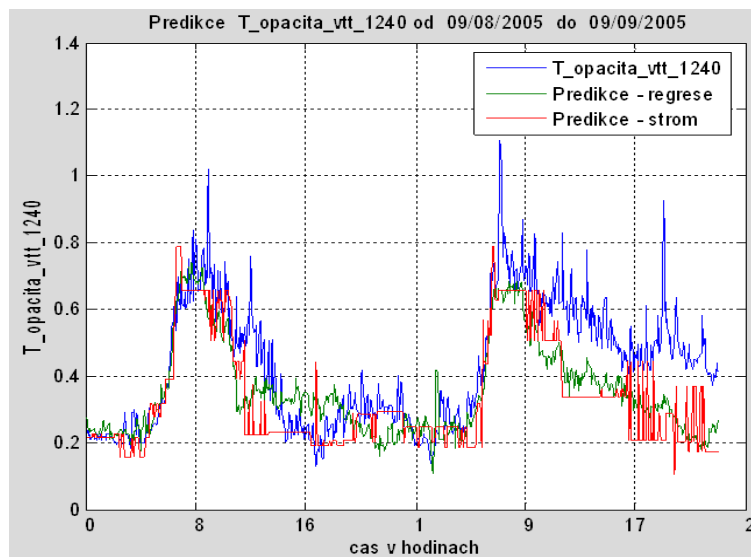
V hodnocení modelů jsou vidět rozdíly v jejich výkonnosti (Regrese, Strom). Bez výjimky jsou modely založené na rozhodovacích stromech výkonnější – dosahují lepší výsledky než regresní modely. Za zmínku stojí odhad NOx. Zde jsou výsledky regresního modelu podstatně horší – chyba ASE je dvojnásobná. Toto lze vysvětlit špatným měřením NOx a nekonzistencemi ve vstupních datech. Znamená to, mimi jiné, že závislost NOx na vstupních parametrech je silně nelineární.

Pro představu o výkonnosti modelů byly odhadovány hodnoty škodlivin čistě podle měřených ostatních dat v tunelu. V následujících grafech je vždy měřená (skutečná) hodnota a zároveň je zde odhad pro Regresní model i Stromkový model.

⁴ Predikce na 15 minut znamená že se predikuje hodnota která nastane v rozmezí 10-15 minut.

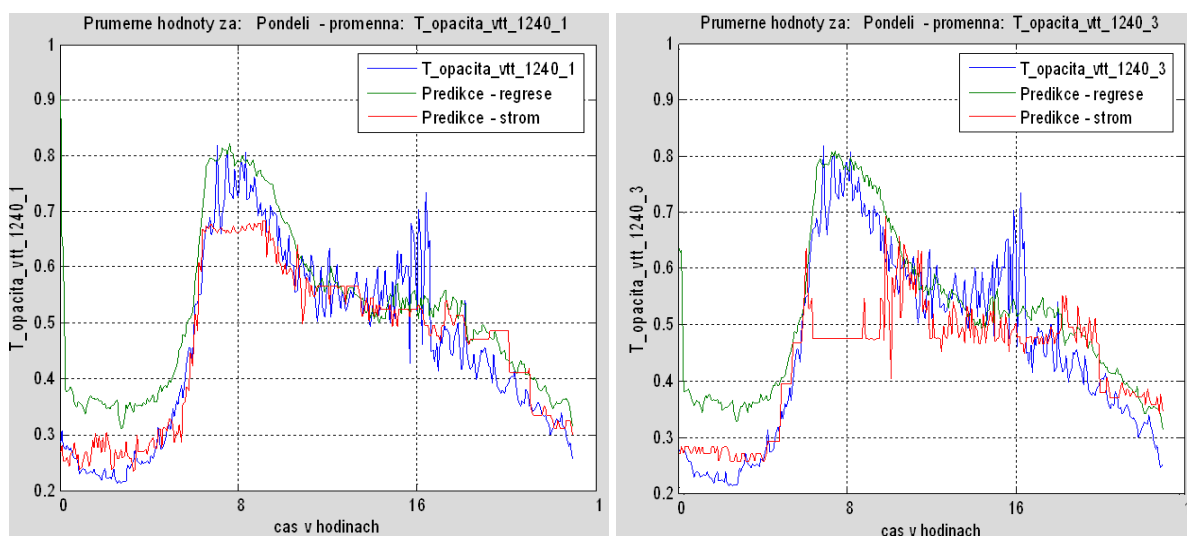


Obr. 5.3: Odhad opacity regresního (zeleně) a stromkového (červeně) modelu. Skutečná hodnota modře. Odhad pro typické pondělí za září až polovinu října



Obr. 5.4: Odhad opacity 8.-9. září 2005 (pátek, sobota)

Dále byla testována predikce o 5 a 15 min. Výsledky jsou na dalších grafech.



Obr. 5.5: Predikce opacity o +5 min. (vlevo) a +15 min. (vpravo)

V předpovědi pro 15 minut se projevila anomálie v čase okolo osmé hodiny. Graf je uveden úmyslně, protože ukazuje na nutnost dalšího zkoumání dat.

Vybrané typy modelů – to jest rozhodovací stromy a regresní modely se vyznačují jednoduchostí a snadnou srozumitelností a implementací. Pro zlepšení predikčních modelů je zásadním požadavkem zlepšení funkce příslušných čidel, zajištění konzistence měření a zabránění systematickým chybám čidel.

6 ZÁVĚR

Článek předkládá nový pohled na ventilaci tunelových systémů, která odstraňuje nevýhody řízení dle měření koncentrací CO a viditelnosti situovaných pouze v několika místech tunelu. Sensory pro měření těchto fyzikálních veličin jsou navíc velmi drahé a náročné na údržbu. Optimalizace ventilace má v tunelech zásadní význam, neboť ventilace je významně nejvyšším spotřebičem elektrické energie.

Výzkum byl zaměřen na korelaci dopravních a fyzikálních dat. Zvláště metoda rozhodovacích stromů poskytovala velmi dobré výsledky a umožňovala předpovídat škodliviny pouze z měřených dopravních parametrů ve velkém předstihu.

Připravovaný SW modul společnosti ELTODO EG pro řízení vzduchotechniky bude primárně využívat data z dopravních detektorů a hodnoty ze senzorů škodlivin budou odhadované výstupy pouze korigovat. Predikční horizont pro takto koncipovaný systém je cca 15 až 30 minut.

Idea řešení tohoto projektu, pokračuje dále v rámci společné laboratoře tunelových systémů (SLTS).

Tento příspěvek byl zpracován za podpory Slovenské grantové agentury VEGA, grant č. 1/0023/08 "Teoretický aparát na analýzu a hodnocení rizik telematických systémů v dopravě" a rovněž agentury APVV, grant SK-CZ-0100-07 Analýza a hodnotenie rizík cestných tunelov 2 – ARICET-2, slovensko-česká bilaterálna vedecko-technická spolupráca (2008–2009)

LITERATURA

- [1] Příbyl P.: „Fuzzy logic for control of ventilation in city tunnel“, 3rd International conference „Traffic Effects on Structures and Environment - TESE 94“, High Tatras, Slovakia, 1994, 13.-16.9.1994, str. 201-206
- [2] Příbyl P., Novák V.: „Multiparameter-optimised ventilation of city tunnel“, Tunnel Control and Communication, Amsterdam, The Netherlands, 10-12 March 1997, str. 123-132
- [3] Novák V.: “Řízení větrání ve Strahovském tunelu pomocí fuzzy logiky”, Závěrečná zpráva pro Eltodo, Praha, 3. březen 1995
- [4] Hrbček J., Janota A.: “Model Predictive Control and Hybrid Systems”, 6th European Conference „Transport and Telecommunications – TRANSCOM 2005“, Žilina, 2005, ISBN 80-8070-415-5
- [5] Pavelka M.: Modely koncentrací škodlivin, Výzkumná zpráva Eltodo 218/05, říjen 2005
- [6] Sojka J.: “Modelování exhalací v silničním tunelu pomocí dopravních dat”, Fakulta dopravní ČVUT, diplomová práce, 2002
- [7] Hašek M.: “Data ATM – Popis sbíraných dat vzduchotechniky ATM”, Výzkumná zpráva, studie 209/05, OPTUN, Praha, 2005