

VYUŽITÍ PREDIKČNÍHO NEHODOVOSTNÍHO MODELU PŘI IDENTIFIKACI KRITICKÝCH ÚSEKŮ NA SILNIČNÍ SÍTĚ

Ing. Petr Šenk, Ph.D.
Centrum dopravního výzkumu

Ing. Petr Pokorný
Centrum dopravního výzkumu

Ing. Jiří Ambros
Centrum dopravního výzkumu

Abstrakt

Příspěvek představí možnost využití predikčních nehodovostních modelů k identifikaci kritických úseků na silniční síti. Aplikace této metody je představena na příkladu extravilánových silnic II. třídy v Jihomoravském kraji, které jsou rozděleny do úseků homogenních ve vztahu k základním geometrickým a provozním charakteristikám. Predikční model je reprezentován zobecněným lineárním modelem, který na základě dostupných dat o dopravních nehodách a silniční síti stanovuje očekávaný počet nehod pro jednotlivé typy úseků. Kritický úsek je pak definován jako úsek, na kterém pozorovaný počet nehod významně překračuje hodnotu očekávaného počtu nehod na komunikacích s podobnými geometrickými a provozními charakteristikami. Tato metoda může být využita jako jeden z efektivních nástrojů managementu bezpečnosti silniční sítě.

Tento článek vznikl v rámci projektu č. VG20112015013 "Identifikace a řešení kritických míst a úseků v síti pozemních komunikací, které svým uspořádáním stimuluji nezákonné a nepřiměřené chování účastníků silničního provozu - IDEKO" podpořeného v rámci Programu bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra ČR.

1. Východiska a cíle studie

Prvním krokem managementu bezpečnosti silniční sítě je identifikace kritických míst. Z rešerše vyplývá, že většina zemí EU používá systém identifikace rizikových nehodových lokalit (tzv. black spots, hot spots apod.) a analýzy nehod, které se na nich vyskytují. Avšak zřejmě žádný z těchto systémů se nepřibližuje ideálnímu teoretickému přístupu, který je popsán například v práci Elvika [1], podle nějž by měla identifikace a řešení kritických míst probíhat následujícím způsobem:

- Vývoj predikčního modelu nehodovosti, který může být využit jako základ pro analýzu silniční sítě při identifikování kritických míst;
- Vytvoření vyčerpávajícího seznamu silničních prvků, na které je analýza použita a jejich klasifikace (úseky, křižovatky, směrové oblouky, mosty, tunely apod.). Toto rozdělení na je důležité z toho důvodu, aby při analýze nebylo např. identifikováno značné množství křižovatek jako nehodových jednoduše proto, že v křižovatkách

je obvykle více nehod než na úsecích podobné délky (např. 100 m);

- Odhad očekávaného počtu nehod pro každý prvek;
- Aplikace algoritmu za účelem identifikace silničních úseků, které mají vyšší jak normální očekávaný počet dopravních nehod;
- Návrh potenciálně efektivních opatření vedoucích ke zvýšení bezpečnosti prvků.

Tento postup byl použit ve studii představené v následujícím textu. Studie je součástí projektu s akronymem IDEKO („Identifikace a řešení kritických míst a úseků v síti pozemních komunikací, které svým uspořádáním stimuluji nezákonné a nepřiměřené chování účastníků silničního provozu“), řešeného Centrem dopravního výzkumu, v.v.i. a financovaného z Programu BV MVČR. Objektem studie byla síť extravilánových silnic II. tříd na území Jihomoravského kraje, a to z toho důvodu, že tato kategorie představuje společně se silnicemi I. tříd nejrizikovější kategorii pozemních komunikací v České republice.

Následující část představí zdroje dat využitých ve studii, metodický postup návrhu predikčního modelu nehodovosti a výslednou formu modelu. Poté bude popsáno využití modelu při identifikaci nehodových lokalit. Závěrečná část obsahuje souhrn výsledků studie a stručný popis navazujícího plánu řešení projektu IDEKO.

2. Predikční model

2.1. Data

□ Data o dopravních nehodách

Data o dopravních nehodách byla získána ze zdrojů Policie České republiky. Pro účely studie byly vybrány dopravní nehody, které se staly na extravilánových komunikacích II. třídy v Jihomoravském kraji v letech 2009 až 2011. Dále byly odstraněny nehody, které se staly na křižovatkách s komunikacemi III. a vyšších tříd tak, aby v datovém souboru zůstaly pouze nehody na sledovaných mimokřižovatkových úsecích. Nehody na křižovatkách s místními nebo účelovými komunikacemi (výjezdy z polních, lesních cest, výjezdy z parkovišť, stanic ČPH apod.) ve sledovaných úsecích byly ponechány. Byla provedena manuální kontrola těchto nehod, při níž bylo odhaleno, že některé z nehod, které jsou uvedeny na křižovatce s místní komunikací, se ve skutečnosti staly na křižovatce se silnicí III. nebo vyšší třídy. Tyto nehody byly dodatečně odstraněny. Dále byly odstraněny ty dopravní nehody, které byly zaměřeny dále než 50 m od nejbližší komunikace – u těchto nehod zřejmě došlo k chybnému zaměření polohy.

Celkový počet nehod, které v databázi zůstaly, byl 1408 (515 za rok 2009, 480 za rok 2010 a 413 za rok 2011).

Tabulka 1 nabízí přehled hodnot atributů ze záznamů o dopravních nehodách. Až na výjimky jsou všechny nehody registrovány na dvoupruhových komunikacích, a to nejčastěji v přímém úseku (45 % případů), přímém úseku do 100 m od směrového oblouku (22 % případů) a ve směrovém oblouku (30 % případů). Pouze 3 % záznamů odkazuje na nehody v křiženích s místními nebo účelovými komunikacemi. Většina nehod je důsledkem havárie, srážky vozidla s pevnou překážkou nebo srážky s jiným vozidlem (84 % případů). Srážky se zvěří tvoří 11 % případů a srážky s chodci a ostatní srážky tvoří 3 %, resp. 2 % případů. Z důvodu vysokého podílu nehod se zvěří byla data o pozemních komunikacích obohacena o atribut „okolí komunikace“, který slouží jako proxy proměnná pro expozici zvěře. Blížší pohled na zavinění srážek se zvěří ukazuje, že ve většině případů (83 %) je viníkem shledán řidič vozidla, v 11 % je na vině zvěř a v ostatních případech řidič nemotorového vozidla, chodci nebo závada na vozidle.

Proměnná	Četnosti
LOKALITA NEHODY	
v obci	13
mimo obec	1395
DRUH NEHODY	
srážka s nekolejovým vozidlem	562
srážka s pevnou překážkou	294
srážka s chodcem	39
srážka se zvěří	158
srážka s vlakem	2
havárie	326
jiný druh nehody	27
CHARAKTER NEHODY	
nehoda s následky na životě nebo zdraví	776
nehoda pouze s hmotnou škodou	632
ZAVINĚNÍ NEHODY	
řidičem motorového vozidla	1173
řidičem nemotorového vozidla	38
chodcem	15
lesní zvěří, domácím zvířectvem	158
závadou komunikace	3
technickou závadou vozidla	12
jiné zavinění	9
DĚLENÍ KOMUNIKACE	
dvoupruhová	1390
jiné	18
SMĚROVÉ POMĚRY	
přímý úsek	638
přímý úsek po projetí zatáčkou	307
zatáčka	418
křižovatka	45

Tab. 1: Popisné statistiky souboru dat o DN z let 2009-2011

□ Data o infrastruktuře

Data o silnicích II. třídy v Jihomoravském kraji byla získána ze zdrojů Silniční databanky ŘSD. S ohledem na cíle studie byly vybrány pouze extravilánové úseky, na

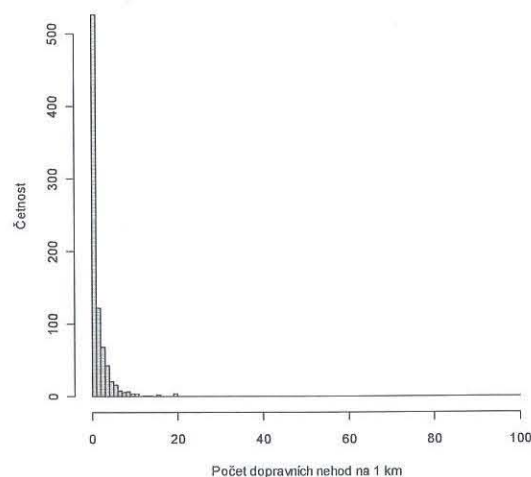
nichž nedochází ke křížení se silnicemi I., II. a III. třídy. Vybrané úseky byly dále rozděleny do segmentů tak, aby každý dílčí segment splňoval následující kritéria:

- délka segmentu alespoň 50 m
- stejný počet jízdních pruhů v celé délce segmentu
- stejná kategorie pozemní komunikace v celé délce segmentu
- existence/neexistence zpevněné krajnice v celé délce segmentu
- existence/neexistence permanentního snížení rychlosti v celé délce segmentu
- existence/neexistence souvislého lesního porostu v okolí segmentu
- stejná intenzita provozu v celé délce segmentu

Po segmentaci úseků do homogenních segmentů byla ke každému segmentu doplněna data o délce úseku, křivolakosti, podílu těžkých nákladních vozidel a počtu křižení s místními komunikacemi. Na závěr byla ke každému segmentu přiřazena informace o příslušném počtu dopravních nehod. Výsledná datová sada zahrnuje 848 segmentů. V Tabulce 2 jsou uvedeny základní popisné statistiky datového souboru.

2.2. Metodická část

Při návrhu modelu nehodovosti jsme zohlednili specifika dat, konkrétně Poissonovské rozdělení počtu nehod na 1 km délky segmentu (viz. Obr. 1). Data tohoto typu jsou modelována pomocí Poissonova regresního modelu anebo v případě v případě podezření na nadměrný rozptyl pomocí negativního binomického regresního modelu. V našem případě jsme zvolili obecnou variantu negativní binomické regrese, která se v případě statisticky nevýznamného nadměrného rozptylu redukuje na klasickou Poissonovu regresi.



Obr. 1: Histogram počtu dopravních nehod na 1 km segmentu

Označení	Popis	Typ proměnné	Zdroj	Popisné statistiky (střední hodnota/směrodatná odchylka/ minimum/maximum nebo četnost)
KRAJNICE	Komunikace s krajnicí	Binární [1=ano]	ŘSD	1:170; 0: 678
KATPK	Kategorie komunikace	Kategorická	ŘSD	S7,5: 642; S9,5: 142; S11,5: 64
KRIZENI	Počet křížení s MK	Spojité	ŘSD	0,20 / 0,50 / 0 / 4
VYBAV	Vybavení komunikace	Spojité	ŘSD	0,47 / 0,94 / 0 / 13
CUMUL	Křivolakost	Spojité [grad/km]	ŘSD	116 / 174 / 0 / 1595
JPRUH	Počet jízdních pruhů	Kategorická	ŘSD	1:1; 2:806; 3:39; 4:2
LES	Okolí komunikace (les)	Binární [1=ano]	Cenia	1:199; 0: 649
RPDI	Roční průměr denních intenzit	Spojité [voz./rok]	ŘSD	3063 / 2931 / 91 / 18500
PODILTV	Podíl těžkých vozidel	Spojité	ŘSD	0,18 / 0,05 / 0,06 / 0,49
LEN	Délka segmentu	Spojité [m]	ŘSD	1176 / 1120 / 51 / 6456
CRASH	Počet nehod	Spojité [neh./3 roky]	PČR	1,66 / 2,9 / 0 / 20

Tab. 2: Základní popisné statistiky souboru dat o dopravní infrastruktuře

Detailní matematický popis negativního regresního modelu a jeho vztah k Poissonově regresi byl publikován v článku k predikčnímu modelu nehodovosti pro okružní křižovatky [2]. Připomeneme pouze, že negativní binomická regrese je specifickým případem zobecněné lineární regrese, ve které je jádro modelu tvořeno spojovací funkcí ve tvaru

$$\lambda = e^{(\alpha\beta + s)}$$

kde e^s je náhodnou chybou s gamma rozdělením se střední hodnotou $E(e^s) = 1$ a rozptylem $Var(e^s) = \alpha$. Integrace s z výše uvedené rovnice vede k negativnímu binomickému rozdělení vysvětlované proměnné se střední hodnotou λ a rozptylem $\lambda + \alpha\lambda^2$. Kladné hodnoty parametru α korigují nadměrný rozptyl vysvětlované proměnné (počtu nehod na segmentu komunikace), zatímco hodnoty blízké nule redukuje model na Poissonův regresní model. Odhad parametrů α a β je proveden metodou maximální věrohodnosti.

Obecná funkce očekávaného počtu dopravních nehod má tvar

$$E(CRASH) = e^{\beta_0 + \beta_1 \ln(RPDI) + \beta_2 \ln(LEN) + \sum_{i=3}^n \beta_i x_i}$$

kde RPDI představuje roční průměr denních intenzit vozidel projíždějících segmentem komunikace, LEN délku segmentu v metrech, x_i geometricko-provozní charakteristiky segmentu a β_i příslušné regresní koeficienty. Schopnost modelu reprezentovat empirická data byla hodnocena kombinací Akaikeho informačního kritéria (AIC) a testu poměrem věrohodnosti.

2.3. Výsledný regresní model

K odhadu parametrů regresního modelu byl využit statistický software R, konkrétně funkce glm.nb() pro negativní binomickou regresi z rozšiřujícího balíčku MASS. Finální verze modelu je výsledkem níže uvedeného procesu:

- Sestavení výchozí/aktuální verze modelu se základními proměnnými RPDI a LEN (počet proměnných v modelu $j = 2$);

- Vytvoření množiny modelů N složené z n modelů, které vzniknou rozšířením aktuální verze modelu o jednu z n proměnných, která není v aktuální verzi modelu obsažena ($j = j + 1$);
- Výběr takové podmnožiny modelů M z N , aby pro každý model platilo, že koeficienty všech proměnných jsou statisticky různé od nuly a to na hladině významnosti 0,1 a zároveň, aby příslušná verze modelu v porovnání s aktuální verzí modelu lépe vysvětlovala variabilitu v závislé proměnné (posouzeno testem poměrem věrohodnosti). V případě nesplnění jedné z podmínek je proces modelování ukončen a aktuální verze modelu je prohlášena za finální verzi.
- Model m z množiny M s nejnižší hodnotou AIC je prohlášen za aktuální verzi modelu.
- Návrat do bodu 2

Finální verze modelu je uvedena v Tabulce 3.

	β_i	SEM	z-skóre	Pr(> z)
γ	-13,646	0,6325344	-	<0,001
			21,574855	
ln(RPDI)	0,9306	0,0548745	16,959690	<0,001
ln(LEN)	0,9499	0,0525791	18,066279	<0,001
LES	0,4199	0,0958151	4,3832096	<0,001
CUMUL	0,0004	0,0002335	1,7874443	0,074
AIC	2357.3			
Odhad α	2.08			
SEM α	0.28			
2 x log-věrohodnost	-2345.3			

Tab. 3: Parametry predikčního modelu nehodovosti

Vysoká kladná hodnota disperzního parametru α a nízká hodnota střední chyby průměru (SEM) potvrzují nadměrný rozptyl vysvětlované proměnné a správnost volby negativního binomického modelu.

Dosažením proměnných a příslušných hodnot parametrů do obecné funkce očekávaného počtu nehod získáme predikční model dopravní nehodovosti na

mimokřižovatkových úsecích silnic II. třídy v Jihomoravském kraji ve tvaru

$$P(\text{CRASH}) = e^{-13,646E+09307 \cdot I \cdot (RRD)^2 + 09499 \cdot I \cdot (LEN)^2 + 042,2E5 + 0,0004 \cdot CU \cdot NU \cdot L}$$

3. Aplikace modelu

V předchozí části byl popsán predikční model dopravní nehodovosti na síti extravilánových silnic II. třídy v Jihomoravském kraji. V následující části budou představeny možnosti aplikace výsledků tohoto modelu v procesu managementu bezpečnosti silniční sítě a to především z pohledu správce pozemní komunikace. Tento proces zahrnuje identifikaci kritických segmentů (nehodových lokalit) a stanovení priorit jejich sanace.

3.1. Teoretická část

Jak uvádí Pokorný a Striegler [3], v ČR existuje v současné době celá řada rozdílných definic nehodové lokality. Existuje totiž více identifikačních kritérií pro určení nehodové lokality. V rámci literární rešerše provedené v projektu IDEKO bylo pro účely identifikace nehodových lokalit vybráno tzv. kritérium absolutního rozdílu. Toto kritérium se zaměřuje na lokality, které mají největší potenciál ke snížení počtu nehod. Při použití tohoto kritéria je nutné stanovit, jak velký by měl být absolutní rozdílný, aby lokalita mohla být považována za nehodovou. To je závislé na dopravně bezpečnostní politice, strategii, rozpočtu a požadované úrovni přesnosti. Nelze tedy paušálně udát jedno číslo; lze však uvést dvě obecná pravidla:

- Kritérium pro identifikaci může být stanovené číslo, které musí potenciál překročit (vhodné pro menší územní celky) nebo určité procento silniční sítě s největším potenciálem (vhodné pro větší územní celky).
- Závažnost nehod by při identifikaci nehodových lokalit neměla být brána v potaz.

Například Elvik [2] definuje nehodovou lokalitu jako lokalitu, která má vyšší očekávaný počet nehod než ostatní shodné lokality a to důsledkem lokálních rizikových faktorů s tím, že lokální rizikové faktory souvisí zejména s uspořádáním pozemní komunikace.

3.2. Příklad využití predikčního modelu nehodovosti

V projektu se nehodové lokality (rizikové místa) identifikují v rámci sítě silnic II. třídy v Jihomoravském kraji (jedná se pouze o mezikřižovatkové úseky). Tyto úseky jsou definovány svými geometrickými a provozními charakteristikami, které představují nezávislé proměnné v predikčním modelu, který byl popsán v části 2. Očekávaný počet nehod, který je výsledkem predikce (a závislou proměnnou modelu), proto odpovídá výše uvedené definici. Vhodné kritérium pro stanovení závažnosti (rizikovosti) úseků a priorit jejich sanace představuje rozdíl mezi zaznamenaným a očekávaným počtem nehod.

Riziko, představované počtem nehod, lze chápat dvěma způsoby: individuálně nebo kolektivně. Individuální riziko vyjadřuje pravděpodobnost pro řidiče, že se případná nehoda stane zrovna jemu/jí; vyjadřuje se relativní nehodovostí. Naproti tomu kolektivní riziko, vyjadřované hustotou nehod, se týká všech vozidel. Je zřejmé, že zatímco individuální riziko je vnímáno jednotlivými řidiči, z pohledu správce komunikace je vhodnějším ukazatelem hustota nehod [4]. K vyjádření hustoty byl tedy zmíněný rozdíl mezi pozorovaným (P) a očekávaným počtem nehod (O) proto vydělen délkou segmentu: $X = (P - O) / L$. Hodnota X představuje výše zmíněný nehodový potenciál.

- „Dobrý“ příklad: Na kilometrovém segmentu došlo za tři roky ke dvěma nehodám, přitom byla očekávána jen jedna nehoda $\Rightarrow X = 2 - 1 = 1$.
- „Špatný“ příklad: Na kilometrovém segmentu za tři roky k jedné nehodě, přitom byly očekávány dvě nehody $\Rightarrow X = 1 - 2 = -1$.

Kladné hodnoty potenciálu tedy označují situace, na které se má zaměřit následná sanace.

Pro ilustraci byl vytvořen přehled očekávané a skutečné hustoty nehod všech segmentů na síti, která je předmětem této studie (viz. Tabulka 4).

očekávaná a skutečná hustota nehod	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4	4-4,5	4,5-5	5-5,5	5,5-6	6-6,5	6,5-7	7-7,5	7,5-8	8-8,5
0-0,5	100	120	83	56	33	14	12	7	5	7	0	3	3	2	3	1	1
0,5-1	8	21	28	13	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-1,5	2	25	16	12	3	3	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1,5-2	7	16	15	8	6	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-2,5	3	9	13	8	3	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2,5-3	0	6	6	7	4	2	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
3-3,5	0	2	8	8	3	2	2	0	2	1	0	0	0	1	0	0	1
3,5-4	0	1	1	3	3	3	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
4-4,5	0	1	2	1	5	2	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4,5-5	0	1	0	1	3	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
5-5,5	0	0	0	3	1	2	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0
5,5-6	0	0	0	2	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
6-6,5	0	1	1	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6,5-7	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7-7,5	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,5-8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
8-8,5	0	1	3	4	5	2	1	2	3	3	1	2	3	0	2	0	3

Tab. 4: Kontingenční tabulka očekávané a skutečné hustoty nehod

Řádky jsou rozděleny v intervalech skutečné hustoty nehod, sloupce pak v intervalech očekávané hustoty nehod. Číslo v každé buňce tabulky pak uvádí počet segmentů s hustotou nehod v příslušných intervalech.

Průměrná skutečná i očekávaná hustota nehod na 1 km analyzované sítě je přibližně 1,7. Proto byly zvýrazněny „podprůměrné“ hodnoty, tj. kde skutečná i očekávaná hustota nehod překročila hodnotu 2. Jedná se o 169 segmentů, tj. cca pětinu sledované sítě. Je zřejmé nereálné očekávat, že takové množství segmentů může být sanováno. V předchozím případě bylo aplikováno kritérium „podprůměrné“ lokality. Jiné kritérium může využívat předem stanoveného podílu, např. horních 10 % všech hodnot. Podle tohoto kritéria se na sledované síti nachází 83 rizikových segmentů.

4. Závěr

Příspěvek představil využití predikčních nehodovostních modelů k identifikaci kritických úseků na silniční síti – jak jeho teoretické pozadí, tak konkrétní příklad aplikace na síti silnic II. třídy v Jihomoravském kraji. Uvedený postup je ve světě doporučován; v rámci ČR se jedná první známý příklad jeho aplikace. Dalším krokem projektu bude nehodová analýza vybraných míst a bezpečnostní inspekce za účelem identifikování lokálních rizikových faktorů. Tak bude naplněna výše uvedená teoretická definice kritického úseku: je to takový, který má vyšší očekávaný počet nehod ostatní shodné úseky důsledkem lokálních rizikových faktorů. Následně budou navržena nízkonákladová opatření na odstranění těchto rizikových faktorů.

Literatura

- [1] ŠENK, P., AMBROS, J. Estimation of Accident Frequency at Newly-built Roundabouts in the Czech Republic. *Transactions on Transport Sciences*, 2011, roč. 4, č. 4, s. 199-206.
- [2] ELVIK, R. State-of-the-Art Approaches to Road Accident Black Spot Management and Safety Analysis of Road Networks. Institute of Transport Economics, 2007, report 883 (www.toi.no/getfile.php/Publikasjoner/T%D8I%20rappor%20ter/2007/883-2007/883-2007-nett.pdf).
- [3] POKORNÝ, P., STRIEGLER, R. Identifikace nehodových lokalit. *Dopravní inženýrství*, 2011, roč. 6, č. 2, s. 8-11.
- [4] AMBROS, J. Jak měřit bezpečnost? – 1. část. *Silniční obzor*, 2010, roč. 73, č. 3, s. 78-82.