

ODHAD POČTU NEHOD NA NOVĚ BUDOVANÝCH OKRUŽNÍCH KŘIŽOVATKÁCH

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

Ing. Jiří Ambros
Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

Abstrakt

Okružní křižovatky se staly jedním z nejoblíbenějších opatření ke zklidňování dopravy a zvyšování bezpečnosti na pozemních komunikacích v České republice. Všechna rozhodnutí o realizaci každé nové okružní křižovatky by měla být založena na posouzení očekávaných nákladů a přínosů vyplývajících z budoucího provozu, obzvláště v oblasti plynulosti a bezpečnosti dopravy. Tato studie představuje negativní binomický regresní model, který umožnuje kvantifikovat bezpečnost na okružních křižovatkách jako funkci četnosti dopravních nehod závislé na provozních a geometrických charakteristikách. Návrh struktury modelu a odhad hodnot parametrů byl proveden na základě detailního popisu vzorku devadesáti okružních křižovatek situovaných na všech typech silničních komunikací v České republice. Výsledky naznačují, že mezi hlavní determinanty očekávaného počtu nehod patří počet pruhů na vjezdu do okružní křižovatky, rychlosť vozidel v okolí křižovatky, šířka pojízděného prstence a samozřejmě také intenzita vozidel na vjezdu do okružní křižovatky. Výsledná struktura modelu je v souladu se strukturami predikčních modelů nehodovosti, které jsou využívány v zemích EU a v USA. Určité rozdíly jsou však patrné v mře vlivu jednotlivých proměnných na očekávaný počet nehod.

Tento článek vznikl v rámci projektu "Vývoj metodiky hodnocení účinnosti opatření ke zvýšení bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích" podpořeného Ministerstvem dopravy ČR.

1. Východiska a cíle studie

Křižovatky jsou rizikovou částí silniční sítě. Podle statistik publikovaných iRAP (iRAP, 2010) jsou nehody na křižovatkách celosvětově jedním z nečastějších typů nehod. To ostatně potvrzují i statistiky Policie České republiky - přibližně 25 % všech nehod v České republice se odehrává v křižovatkách. Riziko nehody v křižovatce souvisí do značné míry s množstvím konfliktních bodů. Z tohoto důvodu se v praxi dostávají do obliby okružní křižovatky, u nichž je počet konfliktních bodů minimalizován.

Řada studií prokázala, že přestavba průsečních křižovatek na křižovatky okružní vede k podstatnému snížení počtu dopravních nehod. Například Schoon a van Minnen (1994) ukázali na vzorku 181 křižovatek v Holandsku snížení o 47 %; Persaud a kol. (2001) ve studii porovnávající nehodovost před a po přestavbě na okružní křižovatky identifikovali 40% snížení; a nako-

nec i Elvik (2003) ve své metaanalýze 28 studií z různých zemí potvrzuje na příkladu nehod se smrtelnými zraněními snížení v rozmezí 50 až 70 %. V případě České republiky lze odkázat na výsledky projektu BESIDIDO (Pokorný, 2011), který na vzorku osmi přestaveb potvrzuje snížení počtu nehod o 36 %.

Míra bezpečnostního benefitu okružních křižovatek se zdá být závislá na jejich geometrických a provozních parametrech. Z výše zmíněné metaanalýzy (Elvik, 2003) je zřejmé, že křižovatky s malým středovým ostrovem jsou bezpečnější než velké okružní křižovatky. Významný vliv geometrických parametrů pak potvrzuje i zpráva TRB (1998), která v syntéze zkušeností expertů z celého světa vyzdvihuje bezpečnostní benefit okružních křižovatek především v případě přestavby na okružní křižovatku s jedním jízdním pruhem.

V posledních dvaceti letech je v České republice patrný nárůst počtu nových okružních křižovatek. Jejich návrh se řídí nejčastěji některou z existujících metodik (V-projekt, s.r.o., 2000, Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., 2005, CityPlan spol. s r.o., 2009), které, přes všechny odlišnosti, mají jedno společné – chybí v nich návod, jak posoudit bezpečnostní přínos výstavby nové okružní křižovatky. Cílem této studie je představení nástroje, který umožní kvantifikovat bezpečnost na okružních křižovatkách v České republice. Pomocí zobecněného lineárního modelu identifikujeme klíčové geometrické a provozní charakteristiky okružních křižovatek mající vliv na očekávaný počet nehod a pomocí odhadu parametrů modelu stanovíme jejich účinek. U každé nově budované okružní křižovatky tak bude možné odhadnout budoucí očekávaný počet nehod a související socio-ekonomické ztráty.

Následující sekce přestaví data využitá k návrhu stochastického modelu nehodovosti, dále bude následovat krátký metodický oddíl zaměřený na predikční modely nehodovosti a oddíl s výsledky analytické části. Závěr studie je věnován rozboru výsledků a možnostem jejich využití v praxi.

2. Data

Tato studie integruje data z několika zdrojů, konkrétně databázi silničních nehod, databázi geometrických parametrů pozemních komunikací a data o provozu na pozemních komunikacích.

Data o dopravních nehodách jsou převzata z databáze Policie České republiky. Každý záznam obsahuje celou řadu informací včetně informací o lokalitě nehody (GPS souřadnice), typu nehody, zranění a škodě na majetku. Z důvodu nedávných změn v metodice sběru dat (od 1. 1. 2009 se posunula hranice hmotné škody, při které musí být na místo nehody přivolána hlídka Policie ČR z 50 000 na 100 000 Kč), byla v analýze uvažována pouze data z let 2009 a 2010. Dále jsou vybrány pouze

SILNIČNÍ KONFERENCE 2011

nehody v okružní křižovatce, které jsou vzdáleny do 100 m od středu křižovatky. Tato hodnota eliminující duplicitní přiřazení nehod ke křižovatkám vychází z maximálního poloměru sledovaných okružních křižovatek (74 m) a minimální vzdálenosti mezi dvěma okružními křižovatkami. Nakonec byly z důvodu nedostatku dat o intenzitě pěší dopravy vyřazeny nehody s chodci. Výsledný seznam nehod obsahuje 188 záznamů odpovídajících 136 nehodám bez zranění, 44 nehodám s jedním lehkým zraněním, pěti nehodám se dvěma nebo třemi lehkými zraněními a třem nehodám s jedním těžkým zraněním. Je nutno vzít v potaz, že uvedená data nezahrnují velkou část nehod bez zranění a škodou do 100 000 Kč.

Vzorek 90 okružních křižovatek byl vybrán ve dvou krocích pseudonáhodným způsobem. Nejdříve byly vybrány všechny okružní křižovatky z databáze Silniční databanky ŘSD, u kterých byla známa intenzita na všech vstupních větvích a zároveň na nich nebyly v le-

tech 2009 a 2010 registrovány žádné stavební úpravy. Jednalo se konkrétně o 48 z celkového počtu 286 registrovaných okružních křižovatek. Abychom získali informaci o okružních křižovatkách, které nejsou součástí sítě ŘSD, byl vzorek doplněn o dalších 42 okružních křižovatek na místních komunikacích zmapovaných v rámci projektu BESIDIDO. Z důvodu neexistence seznamu okružních křižovatek v ČR, který by mohl posloužit jako výběrový rámec, jsou dané případy výsledkem pseudonáhodného výběru pomocí webového mapového serveru.

Data o parametrech silnic a okružních křižovatek byly získány ze dvou zdrojů dat. Základní data o silnicích I., II. a III. třídy a relevantních okružních křižovatkách byla čerpána ze zdrojů Silniční databanky ŘSD. Doplňkové informace byly získány prostřednictvím aplikace Google Earth. Základní popis dat a jejich klíčových popisných charakteristik je uveden v Tabulce 1.

| Označení | Popis | Typ proměnné [Jednotky] | Zdroj * | Popisné statistiky (střední hodnota/směrodatná odchylka/minimum/maximum nebo četnost) |
|----------|---------------------------|----------------------------|---------|---|
| AADT | RPDI na vstupu do o.k. | Spojitá [voz./rok] | ŘSD/B | 17993 / 9873 / 3181 / 52952 |
| URBAN | Intravilán / Extravilán | Binární [1=intravilán] | ŘSD | 1: 80; 0: 10 |
| LANES_R | Dva pruhy v o.k. | Binární [1=ano] | GE | 1: 6; 0: 84 |
| LANES_A | Dva pruhy na větvi o.k. | Binární [1=ano] | GE | 1: 5; 0: 85 |
| OUTER_D | Vnější průměr | Spojitá [m] | GE | 42 / 24 / 18 / 146 |
| BYPASS | Bypass v o.k. | Binární [1=ano] | GE | 1: 15; 0: 75 |
| ANGLE | Max. úhel mezi větvemi | Spojitá [°] | GE | 118 / 25 / 65 / 180 |
| APRON | Pojižděný prstenec | Spojitá [m] | GE | 2.1 / 1.2 / 0 / 6 |
| ISLAND | Průměr středového ostrova | Spojitá [m] | GE | 24 / 23 / 7 / 120 |
| ARMS | Počet větví | Spojitá | GE | 4 / 0.6 / 3 / 6 |
| CRASH | Počet nehod | Spojitá [neh./2 roky] | PČR | 2.1 / 3.6 / 0 / 22 |

Tabulka 1: Popisné statistiky geometrických, provozních a nehodovostních dat (* ŘSD – Silniční databanka ŘSD; B – projekt BESIDIDO; GE – Google Earth; PČR – Policie České republiky)

Hodnoty ročních průměrů denních intenzit dopravy (RPDI) na větvích vstupujících do křižovatky pocházejí ze dvou zdrojů. Hlavním zdrojem je Celostátní sčítání dopravy (CSD) z roku 2005, ze kterého jsou čerpána data o intenzitách na silnicích I., II. a III. třídy. Data o RPDI na komunikacích, na kterých nebylo sčítání reálnizováno, byla získána z dílčích manuálních sčítání provedených v rámci projektu BESIDIDO v letech 2001 až 2004 (Simonová a Hrubý, 2004). V dalším kroku byly hodnoty RPDI upraveny pomocí růstových koeficientů (MDČR, 2005; ŘSD, 2005) tak, aby odpovídaly hodnotám v roce 2010.

3. Metodická část

Cílem studie je identifikace geometrických a provozních charakteristik, které ovlivňují bezpečnost dopravy na okružních křižovatkách a následná kvantifikace velikosti účinku jednotlivých proměnných. K řešení této úlohy jsme využili aparátu zobecněné lineární regrese.

Základní tvar regresního modelu respektuje specifika vysvětlované proměnné a běžnou praxi při návrhu prediktivních modelů nehodovosti. Nehodovostní data jsou charakterizována jako četnostní s výrazným kladným zešikmením a relativně vysokým počtem nulových hodnot. Literatura k modelování četnostních dat (Kennedy, 2008) doporučuje v případě rovnosti očekávané střední hodnoty a rozptylu vysvětlované proměnné využití log-lineárního Poissonova modelu. Tento model je popsán jako zobecněný lineární model, ve kterém má závislá proměnná Poissonovo rozdělení s parametrem a nabývá nezáporných celých hodnot. Dá se odvodit, že vysvětlovaná proměnná z Poissonova rozdělení nesplňuje podmínu homoskedasticity, která je vyžadována v klasických regresních modelech. Lineární kombinace vysvětlujících proměnných a neznámých parametrů je proto vztažena k vysvětlované proměnné prostřednictvím log-lineární spojovací funkce, která zaručuje nezáporné hodnoty parametru a potažmo také nezáporné očekávané hodnoty četnosti dopravních nehod. Umocnění výše uvedené rovnice vede k funkci popisující vztah

mezi lineárním prediktorem a očekávanou hodnotou vysvětlované proměnné (počtem dopravních nehod). K odhadu vektoru parametrů se využívá metoda maximální věrohodnosti. Detaily k postupu odhadu parametrů lze nalézt například v práci Kmenty (1986).

Z popisných statistik v Tabulce 1 je patrné, že hodnota rozptylu počtu nehod na okružních křižovatkách je přibližně 1,7krát větší než střední hodnota dané veličiny, což odporuje základnímu předpokladu Poissonovy regrese o rovnosti těchto dvou statistik. Ostatně, jak potvrzují i další studie, nadměrný rozptyl se objevuje ve většině nehodovostních dat (Zhang a kol., 2007). Tento problém je možné vyřešit malou úpravou specifikace modelu, konkrétně doplněním nepozorovatelné heterogenity do spojovací funkce. Integrace z výše uvedené rovnice vede k negativnímu binomickému rozdělení vysvětlované proměnné se střední hodnotou a rozptylem. Kladné hodnoty parametru korigují nadměrný rozptyl vysvětlované proměnné (počtu nehod na okružních křižovatkách), zatímco hodnoty blízké nule vedou k výše uvedenému Poissonovu modelu. Odhad parametrů se provádí pomocí metody maximální věrohodnosti.

V analytické části studie jsme využili negativního binomického modelu a empirických dat k testování závislosti mezi všemi teoreticky přijatelnými kombinacemi geometrických a provozních parametrů (vysvětlujícími proměnnými) a počtem nehod na okružních křižovatkách (vysvětlovanou proměnnou). Všechny modely obsahovaly expoziční proměnnou ve formě přirozeného logaritmu RPDI a vektor geometrických a lokačních atributů okružních křižovatek. Logaritmus RPDI zaručuje nulový očekávaný počet nehod v případě nulové intenzity provozu. Schopnost modelu reprezentovat empirická data byla hodnocena kombinací Akaikeho informačního kritéria (AIC) a testu poměrem věrohodnosti.

4. Výsledky

Na výstupu analytické části jsme získali model, který nejlépe reprezentuje empirická data použitá v této studii. Nutno poznamenat, že z důvodu snadnější interpretovatelnosti modelu jsme uvažovali pouze modely s proměnnými, které mají na 10 % hladině významnosti nenulový vliv na vysvětlovanou proměnnou. Výsledky analytické části jsou uvedeny v Tabulce 2.

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

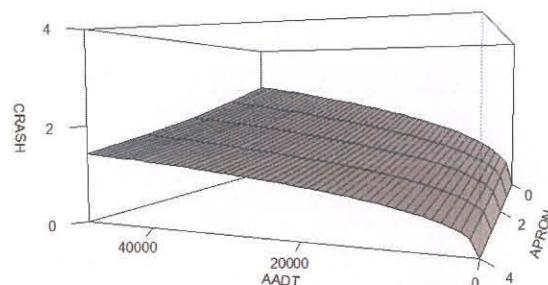
V souladu s dalšími empirickými studiemi (TRB, 2007; Daniels a kol., 2010; Daniels a kol., 2011) a příručkami bezpečnosti na okružních křižovatkách (Eenink et al., 2008, Maycock & Summersgill, 1994), AADT (RPDI) vystupuje v modelu jako jeden z klíčových faktorů, které ovlivňují bezpečnost na okružních křižovatkách. Vyšší RPDI vede přirozeně k vyššímu počtu dopravních nehod.

| Vysvětlující proměnná x_i | Odhad β_i | SEM | z-skóre | Pr ($> z $) |
|-----------------------------|-----------------|------|---------|---------------|
| (Y) | -1.91 | 2.04 | -0.94 | 0.349 |
| AADT | 0.39 | 0.21 | 1.82 | 0.068 |
| URBAN1 | -1.27 | 0.30 | -4.18 | < 0.001 |
| APRON | -0.17 | 0.10 | -1.74 | 0.082 |
| LANES_A1 | 1.66 | 0.39 | 4.21 | < 0.001 |
| AIC | 322.04 | | | |
| Odhad α | 2.12 | | | |
| SEM α | 0.83 | | | |
| 2×log-věrohodnost | -310.04 | | | |

Tabulka 2: Vysvětlující proměnné a odhadnuté parametry výsledného modelu

Mezi geometrickými a provozními atributy okružních křižovatek byly identifikovány tři faktory, které významně ovlivňují počet nehod – URBAN (lokalita), APRON (šířka pojízděného prstence) a LANES_A (počet jízdních pruhů na vstupních větvích). Okružní křižovatky v intravilánu se zdají být bezpečnější než okružní křižovatky v extravilánu. Nutno však podotknout, že samotné umístění do intravilánu nečiní okružní křižovatku bezpečnější. Proměnná URBAN pouze zastupuje jinou nesledovanou proměnnou – s největší pravděpodobností průměrnou rychlosť vozidel přijíždějících do křižovatky. Okružní křižovatky v intravilánu, kde je nejvyšší povolená rychlosť 50 km/h, se zdají být bezpečnější než okružní křižovatky v extravilánu, kde může rychlosť vozidel v okolí okružních křižovatek dosáhnout až 90 km/h. Z výsledků dále vyplývá, že okružní křižovatky, u kterých má alespoň jedna z větví dva pruhy na vjezdu, jsou, co se týče počtu dopravních nehod, výrazně nebezpečnější než okružní křižovatky s jedním jízdním pruhem na všech větvích. A nakonec, větší šířka pojízděného prstence má dle výsledků studie pozitivní efekt na bezpečnost okružních křižovatek.

Obrázek 1 ukazuje vztah mezi očekávaným počtem nehod (CRASH), RPDI (AADT) a šírkou pojízděného prstence (APRON) v případě nejčastějšího typu okružní křižovatky v České republice, tj. křižovatce v intravilánu s jedním jízdním pruhem na všech větvích. Je vidět, že očekávaný počet nehod roste s RPDI, zatímco vysoké hodnoty šířky prstence souvisí s nižším počtem dopravních nehod.



Obrázek 1: Vztah mezi očekávaným počtem nehod, RPDI a šírkou pojízděného prstence v případě křižovatek v intravilánu s jedním jízdním pruhem na všech vstupních větvích

SILNIČNÍ KONFERENCE 2011

Přehled výsledných predikčních modelů nehodovosti v rozdělení dle signifikantních binárních proměnných je uveden v Tabulce 3. Extravilánové okružní křížovatky se dvěma pruhy na vjezdu jsou z důvodu nedostatečného zastoupení ve zdrojových datech vynechány i v tomto přehledu.

| Lokalita | Dva pruhy na vjezdu | Predikční model |
|------------|---------------------|-----------------|
| Intravilán | Ano | CRASH = 0.22 |
| Intravilán | Ne | CRASH = 0.04 |
| Extravilán | Ne | CRASH = 0.15 |

Tabulka 3: Přehled predikčních modelů nehodovosti dle lokality a počtu pruhů na vstupních větvích

5. Souhrn a diskuze

Cílem této studie bylo vytvořit predikční model nehodovosti pro okružní křížovatky využitelný v podmírkách České republiky. Výsledný negativní binomický model popisuje závislost mezi počtem nehod jako vysvětluovanou proměnnou a RPDI, lokalitou, počtem jízdních pruhů a šírkou pojízděného prstence jako vysvětlujícími proměnnými. Výsledky naznačují, že okružní křížovatky v intravilánu jsou, co se týče počtu nehod motorových vozidel, bezpečnější než okružní křížovatky v extravilánu, a to pravděpodobně díky nižší rychlosti vozidel vjíždějících do křížovatky. Jako výrazně nebezpečnější se jeví také okružní křížovatky s dvěma jízdními pruhy na vstupních větvích. To je ostatně v souladu s analogickými studiemi, které tento fakt zdůvodňují vyšším počtem konfliktních bodů, větším prostorem pro nebezpečné předjízdění před křížovatkou a vyšší rychlosťí (TRB, 2010). Z výsledků dále vyplývá, že četnost nehod klesá s rostoucí šírkou pojízděného prstence okružní křížovatky.

Na závěr je nutno zmínit, že s ohledem na různorodost geometrických a provozních charakteristik okružních křížovatek je velikost vzorku využitého v této studii nedostačující pro automatické zobecnění na celou populaci. Predikční modely představené v této studii odpovídají poměrně dobře nejběžnějším typům okružních křížovatek v ČR. Co je chápáno pod pojmem „nejběžnější“, lze usoudit podle popisných statistik. V případě atypických okružních křížovatek doporučujeme pečlivě zvážit adekvátnost využití zde uvedených modelů.

Literatura

- [1] Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., 2005. Metodický pokyn „Velké okružní křížovatky“. Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., Brno.
- [2] CityPlan spol. s r. o., 2009. Příručka pro navrhování okružních křížovatek [online]. c2009 [cit. 2011-06-22].
- [3] Daniels, S., Brijs, T., Nuyts, E., Wets, G., 2010. Explaining variation in safety performance of roundabouts. Accident Analysis and Prevention, vol. 42, iss. 2, pp. 393 – 402.
- [4] Daniels, S., Brijs, T., Nuyts, E., Wets, G., 2011. Extended prediction models for crashes at roundabouts, Safety Science, vol. 49, iss. 2, pp. 198 – 207.
- [5] Eenink, R., Reurings, M., Elvik, R., Cardoso, J., Wichert, S., Stefan, C., 2008. Accident Prediction Models and Road Safety Impact Assessment: recommendations for using these tools [online]. c2008 [cit. 2011-06-22].
- [6] Elvik, R., 2003. Effects on road safety of converting intersections to roundabouts: review of evidence from non-U.S. studies. Transportation Research Record.
- [7] iRAP, 2010. Road Safety Toolkit: Intersections [online]. c2010 [cit. 2011-06-22].
- [8] Kennedy, P., 2008. A Guide To Econometrics, 6th Edition. Blackwell Publishing, p. 246.
- [9] Kmenta, J., 1986. Elements of Econometrics, 2nd Edition. Prentice Hall, pp. 175 – 183.
- [10] Maycock, G., Summersgill, I., 1994. Methods for investigating the relationship between accidents and road design standards. Transport Research Laboratory, Crowthorne.
- [11] Ministerstvo dopravy, 2005. Základní data pro výpočty ekonomické efektivnosti silničních a dálničních staveb v investičních záměrech s použitím programu HDM-4 s kalibrovanými daty (CSHS) [online]. c2005.
- [12] Persaud, B. N., Retting, R. A., Garder, P. E., Lord, D., 2001. Safety effect of roundabout conversions in the United States: Empirical Bayes observational before-after study. Transportation Research Record, vol. 1751.
- [13] Pokorný, P., 2011. Cost-benefit analysis of implementation of four-arm roundabouts in urban areas. Transactions on Transport Sciences, vol. 4, iss. 1.
- [14] Retting, R. A., Ulmer, R. G., Williams, A. F., 1999. Prevalence and characteristics of red light running crashes in the United States. Accident Analysis and Prevention, vol. 31, iss. 6, pp. 687 – 694.
- [15] Ředitelství silnic a dálnic, 2005. Výhledové koeficienty růstu dopravy pro období 2005 – 2040 pro dálnice a rychlostní silnice [online]. c2005 [cit. 2011-06-22].
- [16] Schoon, C., van Minnen, J., 1994. The Safety of Roundabouts in the Netherlands. Traffic Engineering and Control, vol. 35, iss. 3, pp. 142 – 148.
- [17] Simonová, E., Hrubý, Z., 2004. BESIDDO – Moderní úpravy komunikací ve městech a obcích pro zklidňování, vyšší bezpečnost a estetickou úroveň. Silniční obzor, roč. 65, č. 5, s. 132 – 133.
- [18] TRB, 1998. Modern Roundabout Practice in the United States: A Synthesis of Highway Practice (NCHRP Synthesis 264). Transportation Research Board and National Research Council, Washington, D. C.
- [19] TRB, 2007. Roundabouts in the United States, Transportation Research Board, Washington, D. C.
- [20] TRB, 2010. Roundabouts: An Informational Guide, Second Edition (NCHRP Report 672), Transportation Research Board, Washington, D. C.
- [21] V-projekt, s.r.o., 2000. Projektování okružních křížovatek na silničích a místních komunikacích (Technické podmínky 135). V-projekt, s.r.o., Ostrava.
- [22] Zhang, Y., Ye, Z., Lord, D., 2007. Estimating the Dispersion Parameter of the Negative Binomial Distribution for Analyzing Crash Data Using a Bootstrapped Maximum Likelihood Method. Transportation Research Record, vol. 2019, pp. 15 – 19.