

Primljen / Received: 4.4.2012.

Ispravljen / Corrected: 10.5.2012.

Prihvaćen / Accepted: 15.5.2012.

Dostupno online / Available online: 25.6.2012.

Metode za osiguranje konzistencije toka trase

Autori:



Prof.dr.sc. **Dražen Cvitanić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
drazen.cvitanic@gradst.hr



Biljana Vukoje, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
biljana.vukoje@gradst.hr



Doc.dr.sc. **Deana Breški**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
deana.breski@gradst.hr

Pregledni rad

Dražen Cvitanić, Biljana Vukoje, Deana Breški

Metode za osiguranje konzistencije toka trase

Na izvangradskim dvotračnim cestama, koje u većini zemalja čine više od 80 % ukupne duljine cestovne mreže, najveći se broj nesreća događa u krivinama. Najčešći je uzrok nesreća nekonzistentnost elemenata trase s obzirom na mogućnost održavanja željene brzine. U radu su izložene postojeće metode i najnovija istraživanja vezana za procjenu operativnih brzina i osiguranje konzistencije elemenata horizontalnog toka trase na izvangradskim dvotračnim cestama te su opisane prednosti i nedostaci smjernica pojedinih zemalja.

Ključne riječi:

projektna brzina, operativna brzina, konzistencija toka trase, poprečni nagib, koeficijent radijalnog otpora trenja

Subject review

Dražen Cvitanić, Biljana Vukoje, Deana Breški

Methods for ensuring consistency of horizontal alignment elements

On rural two lane roads, which form over 80 percent of the total road network in most countries, most accidents are caused in curves. The most frequent cause of accidents is the inconsistency of horizontal alignment elements with respect to possibility of maintaining the desired speed of travel. An overview is given of existing methods and latest research, as related to the evaluation of vehicle operation speeds, and consistency of horizontal alignment elements on rural two lane roads. Advantages and deficiencies of guidelines applied in individual countries are also presented.

Key words:

design speed, vehicle operation speed, route flow consistency, cross slope, coefficient of radial resistance to friction

Übersichtsarbeit

Dražen Cvitanić, Biljana Vukoje, Deana Breški

Methode zur Sicherstellung der Konsistenz des Trassenverlaufs

Auf den außerstädtischen zweispurigen Straßen, die in dem Großteil aller Staaten über 80% der Gesamtlänge des Straßennetzes ausmachen, finden die meisten Unfälle in den Kurven statt. Die häufigste Unfallursache ist die Inkonsistenz der Trassenelemente bezüglich der Möglichkeit der Beibehaltung der gewünschten Geschwindigkeit. In der Arbeit wird eine Übersicht der bestehenden Methoden und neuesten Forschungen bezüglich der Schätzung operativer Geschwindigkeiten und der Konsistenzsicherstellung der Elemente des horizontalen Trassenverlaufs auf außerstädtischen zweispurigen Straßen gegeben. Ferner werden die Vor- und Nachteile der Richtlinien einzelner Staaten angeführt.

Schlüsselwörter:

Projektgeschwindigkeit, operative Geschwindigkeit, Konsistenz des Trassenverlaufs, Querneigung, Koeffizient des radialen Reibungswiderstands

1. Uvod

Dobar projekt ceste podrazumijeva odabir elemenata trase koji omogućuju konstantnu brzinu vožnje na duljim potezima ceste, čime je osigurana ekonomičnost, udobnost i sigurnost vožnje.

Sa stajališta sigurnosti, najveći problem pri projektiranju trase izvangradskih dvotračnih cesta jest izbor geometrijskih elemenata horizontalnih krivina u kojima se događa više od 50 % nesreća [1]. Baldwin [2] je na temelju istraživanja ustanovio da broj nesreća raste sa smanjenjem polumjera krivine, a opada kada se učestalost krivina malih polumjera po duljini trase povećava. Iz navedenog je jasno da postoji veza između sigurnosti prometa i konzistencije projektiranih elemenata ceste. Konzistencijom se osigurava da sukcesivni elementi ceste omogućavaju ujednačeno ponašanje vozača u skladu s njegovim očekivanjima [3]. Ponašanje vozača uključuje procesuiranje informacija i donošenje odluka koje se temelje na njegovu očekivanju, odnosno prema [4], težnji vozača da na temelju iskustva reagira na određen način u nekoj situaciji. To znači da vozač ima tendenciju da reagira na ono što očekuje, a ne na stvarnu situaciju na cesti [3]. Nataneen i Summala [5] uočili su da su očekivanja vozača težinski povezana s protokom vremena, tj. da su očekivanja jače povezana s nedavnim iskustvima. To npr. znači da vozači nakon nekoliko krivina velikog polumjera očekuju da je i polumjer sljedeće krivine velik. Stoga, konzistentan tok trase omogućuje uvjete sigurne vožnje željenom brzinom na cijeloj trasi, dok se inkonzistentija manifestira kada vozači moraju usporiti da bi se sigurno priključili na sljedeći element ceste što dovodi do povećanja vjerojatnosti događanja nesreća. Istraživanja brzina na cestama [6, 7] s projektnom brzinom manjom od 100 km/h pokazala su da su prosječna i 85 postotna brzina u krivinama uglavnom veće od projektne brzine. Problem je najizraženiji u oštrim krivinama koje slijede nakon blažih krivina jer zbog brzina vožnje većih od projektne brzine rezultirajući radijalni otpor trenja znatno premašuje dopuštene vrijednosti. Nadalje, za krivine većih polumjera potrebno je odrediti najpovoljniji odnos raspodjele veličine poprečnog nagiba i trenja u skladu s operativnim brzinama. Kod smjernica raznih zemalja postoje znatne razlike u odabiru mjerodavne brzine za projektiranje. Izbor nerealno malih vrijednosti mjerodavnih brzina rezultira primjenom premalih poprečnih nagiba u krivinama, a to dovodi do toga da je vozilu potreban veći otpor trenja kako bi zadržalo kružno gibanje nego što vozač očekuje. To može dovesti do nesigurnosti vozača te kočenja, čime se aktivira komponenta trenja u uzdužnom smjeru, što smanjuje raspoloživi radijalni otpor trenja i povećava mogućnost izljetanja iz krivine. Stoga dobar projekt ceste, osim konzistentnosti elemenata trase, mora uskladiti vrijednosti poprečnih nagiba i radijalnog otpora trenja sa stvarnim brzinama. U ovom je radu dan pregled metoda projektiranja dvotračnih izvangradskih cesta što se tiče konzistencije brzina i raspodjele nagiba u

krivinama, koji se primjenjuju u raznim dijelovima svijeta, te moguće posljedice njihove primjene.

2. Mjerodavne brzine za projektiranje, granične vrijednosti poprečnog nagiba i radijalnog otpora trenja

2.1. Projektna brzina

Sve metodologije projektiranja toka trase zasnivaju se na tzv. konceptu projektne brzine. Projektna se brzina određuje na temelju kategorije ceste i konfiguracije terena, a služi za određivanje minimalnih elemenata trase pri čemu je posebno važno određivanje minimalnog polumjera horizontalne krivine.

Minimalni polumjer horizontalne krivine R_{\min} (m) za projektnu brzinu V_p (km/h) određuje se iz uvjeta poprečne stabilnosti vozila u krivini za maksimalne dopuštene vrijednosti poprečnog nagiba q_{\max} (%) i radijalnog otpora trenja f_{rdop} prema poznatom izrazu:

$$R_{\min} = \frac{V_p^2}{127(q_{\max} + f_{rdop})} \quad (1)$$

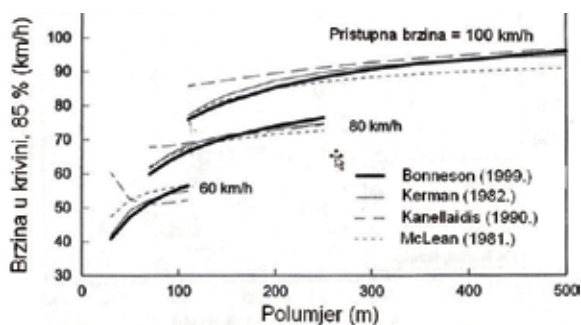
Na taj je način u krivinama minimalnog polumjera omogućena sigurna vožnja projektnom brzinom, dok dijelovi trase s blažim krivinama omogućuju vožnju većim brzinama. Većina smjernica preporučuje primjenu minimalnih polumjera samo u iznimnim situacijama te preferira projektiranje blažih krivina, a to može dovesti do značajne varijabilnosti brzina na trasi, osobito primjenom smjernica kod kojih nije definirana gornja granica veličine elemenata. Varijabilnost brzina uzrokom je velikom broju nesreća [8], te su istraživanja [9, 10] pokazala da je u krivinama manjih polumjera stopa nesreća do 5 puta veća nego li na pravcima.

Budući da je koncept projektiranja trase na temelju projektne brzine pokazao dosta manjkavosti što se tiče varijabilnosti brzina i određivanja poprečnog nagiba u krivinama, posljednjih su desetljeća u različitim dijelovima svijeta provedena brojna istraživanja odnosa projektne i stvarnih brzina u krivinama na temelju kojih je predloženo uključivanje procjene tzv. operativne brzine u postupak projektiranja.

2.2. Operativna brzina

Za operativnu se brzinu najčešće uzima 85 postotna vrijednost raspodjele brzina na određenom elementu ceste, odnosno brzina ispod koje vozi 85% vozača. Uključivanje operativne brzine u postupak projektiranja omogućuje procjenu promjene brzina između susjednih elemenata trase, kao i realniji izbor veličine poprečnog nagiba u blažim krivinama. Mnogo faktora utječe na brzinu vozila u slobodnom toku. Najčešće su istraživani faktori kategorija i fizičke karakteristike ceste, vremenski uvjeti i ograničenje brzine. Ustanovljeno je da najveći utjecaj na brzinu osobnih vozila u slobodnom toku

imaju polumjeri horizontalnih krivina, a znatno manji utjecaj imaju uzdužni nagib, polumjer i oblik vertikalnih krivina te elementi poprečnog presjeka. Najnoviji pregled modela brzina razvijenih u raznim dijelovima svijeta naveden je u [11]. Istraživanja više autora pokazala su da na izbor slobodne brzine u krivinama $R < 500$ m najveći utjecaj ima zakrivljenost ceste i brzina kojom vozilo pristupa krivini, što je prikazano na slici 1. Iz slike se vidi da se za iste vrijednosti polumjera 85 postotna brzina u krivini znatno razlikuje u zavisnosti od brzine kojom vozači pristupaju krivini. Tako se npr. za polumjer od 120 m 85 postotna brzina mijenja od 50 do više od 80 km/h ovisno o pristupnoj brzini (60 do 100 km/h), (slika 2.).



Slika 1. Ovisnost brzine o polumjeru krivine i pristupnoj brzini [12]

2.3. Poprečni nagib

Poprečni je nagib kolnika usmjeren prema središtu horizontalne krivine radi podržavanja kružnog gibanja. Najveće dozvoljene vrijednosti nagiba ovise o klimatskim uvjetima (učestalost te količina snijega i leda), terenskim uvjetima (gradske ili izvangradske ceste) te učestalosti sporih vozila. Granične su vrijednosti poprečnog nagiba u europskim zemljama izjednačene te većina zemalja primjenjuje maksimalni nagib od 7%. U Njemačkoj [13] se pri proračunu najmanjeg polumjera krivine također rabi vrijednost nagiba od 7%. Međutim, kako operativne brzine premašuju vrijednosti projektnih brzina, pri određivanju poprečnih nagiba u oštrim krivinama primjenjuju se nagibi do 8% s ciljem da bi se smanjile vrijednosti rezultirajućega radijalnog otpora trenja. S druge strane, s obzirom na prostranstvo Sjedinjenih Američkih Država te različite prevladavajuće uvjete u raznim državama, SAD smjernice [14] dozvoljavaju primjenu pet vrijednosti najvećih nagiba: 4, 6, 8, 10 i 12%. Vrijednosti od 10 i 12% rabe se za područja toplije klime, vrijednosti od 6 i 8% primjenjuju se za područja s čestom pojavom snijega i leda, dok se granične vrijednosti od 4 i 6% primjenjuju za gradska područja.

2.4. Koeficijent radijalnog otpora trenja

U SAD su granične vrijednosti radijalnog otpora trenja za izvangradske ceste dobivene na temelju istraživanja, provedenih prije više od 70 godina, koja se zasnivaju na

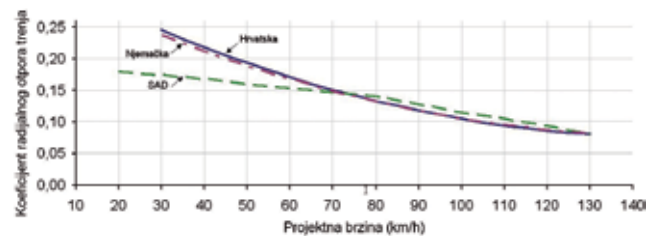
osjećaju udobnosti vozača [15]. Te se vrijednosti kreću od 0,17 za brzinu od 20 km/h do 0,09 za brzinu od 120 km/h.

Praksa u europskim zemljama razlikuje se od one u SAD-u. U Njemačkoj su na temelju brojnih mjerenja na različitim vrstama i stanjima kolnika izrađeni dijagrami razdiobe graničnih vrijednosti tangencijalnog koeficijenta trenja f_{Tmax} ovisno o brzini. Maksimalne veličine f_{Tmax} određuju se na temelju 95% percentila razdiobe svih zabilježenih vrijednosti trenja. Pri vožnji u krivini "aktivira" se radijalna komponenta vektora trenja što podrazumijeva smanjivanje raspoložive vrijednosti tangencijalnog otpora trenja pa je dopušteni tangencijalni koeficijent trenja:

$$f_{Tdop} = \sqrt{f_{Tmax}^2 - f_{Rdop}^2} \quad (2)$$

Gornja je vrijednost koeficijenta radijalnog otpora trenja ona vrijednost koja se uspostavlja u trenutku kada kotači počnu proklizavati. Iz sigurnosnih razloga dopuštene projektne vrijednosti puno su niže od graničnih vrijednosti, a računaju se prema izrazu: $f_{Rdop} = n \cdot 0,925 \cdot f_{Tmax}$ gdje je 0,925 odnos maksimalnih raspoloživih vrijednosti trenja u radijalnom i tangencijalnom smjeru nastalog zbog karakteristika guma pri mjerodavnoj brzini, a n stupanj iskorištenosti raspoložive vrijednosti trenja. Za izvangradske ceste n iznosi 0,5 čime se osigurava da u uzdužnom smjeru ostane raspoloživo 89% ukupne vrijednosti trenja. U Hrvatskoj se primjenjuje isti princip samo prema starijem njemačkom pravilniku, a koeficijent n iznosi 0,6.

Na ovaj način izabrana vrijednost radijalnog otpora trenja u krivini dovoljno je mala u odnosu na raspoloživu vrijednost da ne dođe do izlijetanja, a da vozači ipak osjete malu "dozu" neudobnosti pri vožnji kao "opomenu" da ne ubrzavaju. Iako se pristup SAD-a i europski pristup određivanju projektnih vrijednosti znatno razlikuju, mala je razlika između dopuštenih vrijednosti radijalnog trenja za izvangradske ceste s brzinama većim od 70 km/h (slika 2.).



Slika 2. Dopuštene vrijednosti koeficijenta radijalnog otpora trenja prema različitim smjernicama

3. Metode projektiranja horizontalnog toka trase

U nastavku je prikaz istraživanja odnosa karakteristika trase i brzina, pravilnika za projektiranje horizontalnog toka

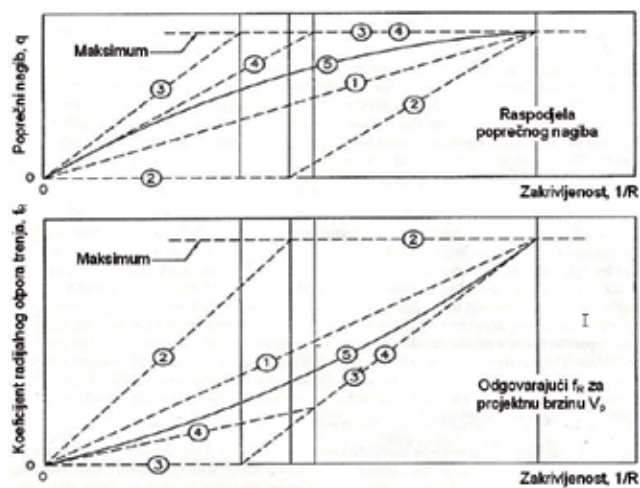
trase i određivanje vrijednosti poprečnih nagiba koji se rabe u pojedinim zemljama, kao i mogućih posljedica njihove primjene.

3.1. Smjernice SAD-a

Prema smjernicama SAD-a [14], projektna se brzina određuje na temelju kategorije ceste, topografije terena i namjene površina područja kroz koje cesta prolazi. Projektom se brzinom definiraju minimalni elementi trase s preporukom da se oni rabe samo u iznimnim situacijama. To rezultira trasom koja na svom velikom dijelu omogućava brzine vožnje veće od projektne brzine. Iako pravilnik počiva na pretpostavci da vozači poštuju ograničenje brzine, istraživanja [16] su pokazala da vozači prilagođavaju brzinu ovisno o geometrijskim karakteristikama ceste, ne vodeći previše računa o dozvoljenoj brzini. Krammes je u [3] dao kritički osvrt na način izbora i primjene projektne brzine s obzirom na rezultate istraživanja [6, 7] te zaključio da koncept projektne brzine može osigurati konzistentiju samo u slučaju da je projektna brzina veća od željene brzine većine vozača, što primjena smjernica ne osigurava. Uočena razlika između operativnih i projektnih brzina pokazuje sljedeće nedostatke metodologije:

1. Projektna se brzina odnosi samo na krivine, ne i na pravce jer nema kriterija za određivanje njihove duljine,
2. Preporučuje se projektiranje krivina s polumjerima većim od minimalnih, a to dovodi do znatno većih brzina od projektnih,
3. Nema mjera za osiguranje konzistentije osim što se raspodjelom poprečnog nagiba u krivinama ublažavaju posljedice inkonzistentije trase.

Smjernice SAD-a definiraju pet metoda raspodjele poprečnog nagiba i koeficijenta radijalnog otpora trenja u krivinama u ovisnosti o uvjetima prometa i prometnica (slika 3.).



Slika 3. Metode raspodjele poprečnog nagiba i faktora bočnog trenja [14]

Kod metode 1. poprečni nagib i trenje rastu linearno s povećanjem zakrivljenosti ($1/R$). Ova bi metoda bila idealna

kada bi vozači vozili projektom brzinom na svim elementima trase, što nije slučaj. Za vozila u slobodnom toku koja u blažim krivinama voze brže od projektne brzine bilo bi bolje da su nagibi veći radi udobnije vožnje, dok bi za vozila u vršnim satima, kada je operativna brzina manja od projektne, bilo bolje primjenjivati manje nagibe da se ne razvija negativna bočna sila.

Zbog navedene neuniformnosti brzina razvijene su: metoda 2., koja je pogodna za područja s promjenjivom brzinom vožnje kao što su gradske prometnice, i metoda 3. za izvangradske ceste. Kod metode 2. se u krivinama većih polumjera bočno ubrzanje podržava radijalnim otporom trenja bez utjecaja nagiba dok se ne dosegne maksimalna vrijednost trenja, a onda se poprečni nagib linearno povećava do maksimalne vrijednosti.

Metoda 3. u blažim krivinama primjenjuje poprečni nagib bez utjecaja otpora trenja sve dok se ne dosegne maksimalni nagib, a tada u oštrijim krivinama trenje raste linearno s povećanjem zakrivljenosti. Ova se metoda prije primjenjivala za izvangradske ceste jer omogućuje ugodniju vožnju u krivinama većih polumjera. Međutim kod primjene metode na cestama s malim brzinama u vršnim satima javlja se negativno trenje, pa je razvijena metoda 4. koja se razlikuje od metode 3. po tome što je raspodjela veličina f_r i q napravljena s obzirom na operativne brzine.

Danas se za projektiranje izvangradskih cesta rabi metoda 5 koja predstavlja kompromis primjene metoda 1. i 3. (4.) na način da se i u blažim krivinama primjenjuje povećani poprečni nagib, dok u krivinama manjih polumjera naglo raste faktor radijalnog otpora trenja što rezultira paraboličnom raspodjelom poprečnog nagiba i koeficijenta radijalnog otpora trenja.

Upotrebom metode 5. indirektno se uzima u obzir činjenica da vozači na izvangradskim cestama u blažim krivinama voze brzinom većom od projektne, pa se primjenom većih nagiba dijelom kompenzira nedostatak smjernica u smislu određivanja konzistentnosti brzina. Može se zaključiti da iako su na američkom kontinentu izvršena brojna istraživanja brzina na temelju kojih su stručnjaci potvrdili potrebu za dopunom smjernica, to još uvijek nije konkretizirano kvantitativnim ograničenjima.

3.2. Smjernice u Europi

Pristup projektiranju izravno usmjeren na osiguranje konzistentije trase temelji se na procjeni operativne brzine i usvojen je u mnogim zemljama. Najdulje se istraživanjem operativnih brzina bave njemački istraživači. Istraživanja su započeli sedamdesetih godina prošlog stoljeća za potrebe izrade pravilnika [13] iz 1973. godine u kojem je operativna brzina postala kriterij za projektiranje elemenata ceste. To je prvi put da su osim projektne i dozvoljene brzine kao teoretskih vrijednosti uvedeni i stvarni parametri u proces

projektiranja. Tijekom posljednjih su se desetljeća u Njemačkoj mnogi istraživači bavili utvrđivanjem ovisnosti operativne brzine o karakteristikama trase (npr. Dilling, Lamm, Trapp, Oellers, Koepfel, Bock, Kassar, Biederman, Lippold, Bakaba). Neki su se od navedenih autora bavili procjenom operativnih brzina na homogenim dionicama cesta, a neki procjenom brzina na pojedinim elementima trase (krivinama, pravcima). Najveći broj istraživanja tijekom posljednja 4 desetljeća proveo je Lamm. Rezultati njegovih istraživanja ušli su u mnoge pravilnike europskih zemalja pa tako i u hrvatski pravilnik, a temelj su njemačkih pravilnika [13] iz 1973., 1984., i 1995. godine. Ovdje smo kratko prikazali rezultate međunarodnog istraživanja [17] koje je on vodio, a u kojem su predloženi sigurnosni kriteriji radi postizanja konzistencije. Navedeni se kriteriji odnose na sljedeće:

- konzistenciju trase
- konzistenciju operativne brzine
- konzistenciju dinamike vožnje.

Granične vrijednosti za pojedine kriterije prikazane su u tablici 1. Kriterij 1. odnosi se na usklađenje pojedinih elemenata trase te se postavlja zahtjev da apsolutna razlika projektne V_p i operativne brzine V_{85} na pojedinom elementu trase bude unutar određenih granica (10 km/h dobro područje, 20 km/h primjenjivo područje). Kriterij 2. zahtijeva da operativne brzine susjednih elemenata trase budu u određenim granicama. Kriterij 3. zahtijeva da stvarna vrijednost radijalnog otpora trenja f_R (zbog vožnje operativnom brzinom) ne bude znatno veća od dopuštene vrijednosti f_{Rdop} (definirana za projektnu brzinu). Za procjenu operativne brzine uporabljani su različiti izrazi razvijeni na temelju istraživanja u brojnim zemljama (SAD, Libanon, Grčka, Australija, Francuska). Svi razvijeni izrazi uključuju ovisnost brzine o zakrivljenosti elementa trase, a ovdje je prikazan izraz razvijen na temelju istraživanja provedenih na dionicama cesta u Njemačkoj:

$$V_{85} = \frac{10^6}{(8270 + 8,01 \cdot KK)} \quad (3)$$

Krivinska karakteristika krivine (KK) definirana je sljedećim izrazom:

$$KK = \frac{\left(\frac{D_{KL}}{R} + \frac{L_1}{2R} + \frac{L_2}{2R}\right) \cdot 63700}{L} \quad (\text{grad/km}) \quad (4)$$

gdje je

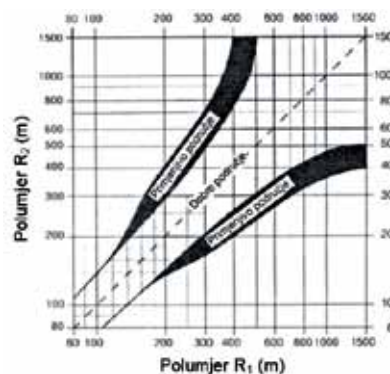
$$D = D_{KL} + L_1 + L_2 - \text{ukupna duljina krivine (km)}$$

Tablica 1. Granične vrijednosti sigurnosnih kriterija [17]

Sigurnosni kriterij	Dobro	Primjenjivo	Loše
Kriterij 1.	$ V_{85}^i - V_p \leq 10 \text{ km/h}$	$10 \text{ km/h} < V_{85}^i - V_p \leq 20 \text{ km/h}$	$20 \text{ km/h} < V_{85}^i - V_p $
Kriterij 2.	$ V_{85}^i - V_{85}^{i+1} \leq 10 \text{ km/h}$	$10 \text{ km/h} < V_{85}^i - V_{85}^{i+1} \leq 20 \text{ km/h}$	$20 \text{ km/h} < V_{85}^i - V_{85}^{i+1} $
Kriterij 3.	$0,01 \leq f_{Rdop} - f_R$	$-0,04 < f_{Rdop} - f_R \leq 0,01$	$f_{Rdop} - f_R < -0,04$

D_{KL} - duljina kružnog luka (m)
 L_1, L_2 - duljine prijelaznica (m).

Pomoću izraza (3) mogu se izračunati i usporediti operativne brzine između susjednih elemenata, kao i odnos prema projektnoj brzini (kriteriji 1. i 2.). S obzirom na kriterij 2. izrađen je dijagram odnosa polumjera susjednih krivina, prikazan na slici 4., tako da je prema izrazu (3) izračunana 85 postotna brzina te su za vrijednosti prihvatljivih razlika brzina izračunate vrijednosti polumjera prema (1). Na temelju istraživanja [18] sigurnosti prometa utvrđeno je da je očekivana stopa nesreća u krivinama manjih polumjera najmanje 2 puta veća kod krivina koje se nalaze u primjenjivom području nego kod onih koje se nalaze u dobrom području. Stoga je u [17] preporučeno da se kod novogradnji za krivine s $R < 200$ m izbjegava upotreba primjenjivog područja.



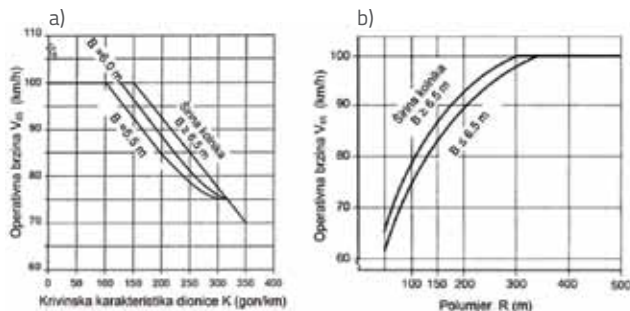
Slika 4. Odnos polumjera susjednih krivina prema [13]

Prema istim kriterijima utvrđeno je i odnos između duljine pravca i veličine polumjera krivine.

Pravilnik iz 1995. ne rabi direktno navedene izraze (3) i (4) za procjenu operativnih brzina, već prilaže dva dijagrama. Dijagram na slici 5.a služi za procjenu operativnih brzina na homogenim dionicama ceste i rabi se pri projektiranju novogradnji. Dijagram na slici 5.b prikazuje procjenu operativne brzine na pojedinoj krivini što se primjenjuje za ocjenu konzistencije postojećih cesta.

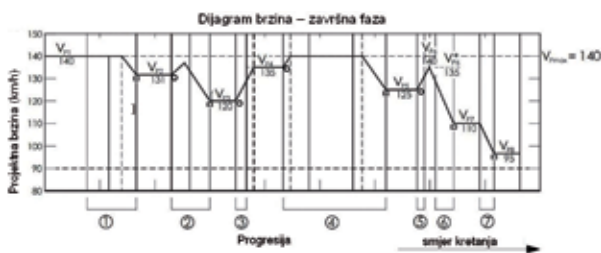
Planirane se novogradnje prema projektiranom toku trase dijele na dionice s konstantnim vrijednostima krivinske karakteristike dionice: $K = \sum \frac{\gamma_i}{L}$ (gon/km ili stupanj/km), gdje je γ_i smjerni kut krivine i (γ gon ili stupanj), L duljina dionice

(km). Operativna brzina se očita iz dijagrama prikazanog na slici 5.a ovisno o prosječnom K dionice te predstavlja 85 % brzinu na toj dionici. Nakon što se odrede operativne brzine za svaku dionicu, one se uspoređuju te se utvrđuje eventualna inkonzistencija brzina. Za već izgrađene ceste operativna se brzina procjenjuje s obzirom na polumjer krivine prema dijagramu prikazanom na slici 5.b



Slika 5. Procjena operativne brzine prema [13]; a) na homogenim dionicama, b) na pojedinim krivinama postojeće ceste

Službeni se pristup osiguranju konzistencije trase u Italiji i Švicarskoj [19] svodi na to da se crta profil tzv. operativnih brzina koje se dobiju na temelju proračuna stabilnosti vozila u krivini prema izrazu (1), a to su zapravo računske brzine. Profil se crta na temelju dobivenih brzina na kružnim lukovima uz pretpostavke da se promjene brzine događaju izvan krivina, a pretpostavljena vrijednost usporenja i ubrzanja je 0,8 m/s². Primjer profila brzina dan je na slici 6.



Slika 6. Primjer profila brzina [11]

Na temelju profila brzina provjerava se jesu li projektom zadovoljeni kriteriji konzistencije. Talijanski i švicarski propisi za ceste s projektnom brzinom $V_p < 80$ km/h primjenjuju sljedeće kriterije konzistencije:

- razlika operativnih brzina između homogenih dionica blagih krivina i dionica oštrijih krivina mora biti manja od 5 km/h
- razlika brzina između uzastopnih krivina treba biti manja od 20 km/h, a preporučljivo je da ne bude veća od 10 km/h.

Manjkavost je profila brzina koji se rabe u Italiji i Švicarskoj u tome što se primjenjuju teoretske vrijednosti brzina izračunanih prema (1), a ne 85 postotne vrijednosti koje su znatno veće. Svjesni nedostataka postojećih pravilnika posljednjih nekoliko godina, u Italiji su provedena istraživanja,

[21, 22] vezana za procjenu operativne brzine i konzistenciju elemenata trase.

U Austriji [20] operativna se brzina definira kao 85 postotna brzina vozila u slobodnom toku, a procjenjuje se u ovisnosti o primijenjenom polumjeru horizontalne krivine (tablica 2.) i uzdužnom nagibu te se bira manja vrijednost. Ako je ovako odabrana vrijednost manja od zakonom najveće dozvoljene brzine za određenu kategoriju ceste tada se maksimalno dozvoljena brzina uzima kao operativna brzina čime se podcjenjuju stvarne 85 postotne brzine.

Tablica 2. Procjena operativne brzine V_{85} ovisno o polumjeru krivine prema austrijskom pravilniku

R [m]	50	80	130	200	300	400	500	600	800
V_{85} [km/h]	50	60	70	80	90	100	110	120	130

Austrijske smjernice ne daju nikakav kriterij za utvrđivanje konzistencije osim što je u tekstualnom dijelu navedeno da se mora projektirati takav tok trase da nema naglih promjena u profilu brzina.

3.2.1. Hrvatske smjernice

Hrvatske smjernice za projektiranje cesta [23] izrađene su na temelju njemačkih smjernica iz 1973. i 1984. godine te definiraju sljedeće termine:

1. Projektna je brzina najveća brzina za koju je zajamčena potpuna sigurnost vožnje u slobodnom toku na cijelom potezu trase.
2. Računska je brzina najveća očekivana brzina koju vozilo u slobodnom toku može ostvariti uz dovoljnu sigurnost vožnje na određenom dijelu ceste ovisno o tlocrtnim i visinskim elementima analiziranog elementa trase.

Računska brzina određuje se prema izrazu (1) ovisno o primijenjenom polumjeru pojedine krivine (isto kao u Švicarskoj i Italiji) ili najvećem primijenjenom uzdužnom nagibu te se bira manja vrijednost, tablica 3.

Tablica 3. Određivanje računske brzine na temelju polumjera horizontalne krivine

V_r [km/h]	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
R [m]	25	45	75	120	175	250	350	450	600	750	850

Pravila konzistencije su slična kao i u ostalim europskim zemljama, odnosno:

- razlika između računske i projektne brzine unutar analizirane dionice ne smije biti veća od 20 km/h
- maksimalna razlika računskih brzina unutar jedne dionice ne smije iznositi više od 15 km/h.

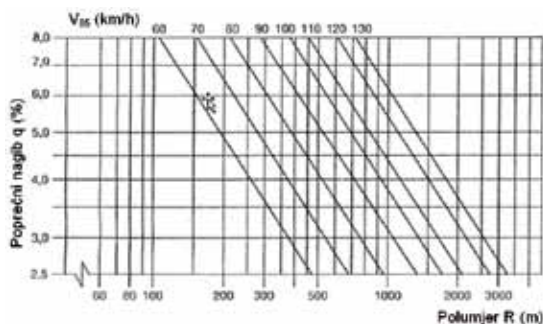
Za dozvoljene razlike brzina između pojedinih elemenata trase primjenjuje se dijagram odnosa vrijednosti polumjera susjednih krivina izrađen na temelju njemačkih smjernica iz 1973. godine. Također su dane vrijednosti minimalnih polumjera krivina iza dugih nezavisnih pravaca.

Iz sažetog se prikaza smjernica europskih zemalja i novijih istraživanja može uočiti da sve smjernice sadrže slične kriterije za osiguranje konzistencije brzina. Osnovna je razlika pravilnika pojedinih zemalja u definiranju i određivanju pojma operativne brzine. Njemačke smjernice daju izraz za procjenu brzine na pojedinom elementu trase koji se rabi pri provjerama konzistencije na postojećim cestama, a također i izraz za procjenu 85% brzine na homogenoj dionici ceste što se rabi pri projektiranju novogradnji.

Talijanski, hrvatski i švicarski pravilnik računsku brzinu računaju s obzirom na primijenjene polumjere horizontalnih krivina prema (1) čime se zanemaruje činjenica da su operativne brzine veće te da ovisi i o pristupnim brzinama na ulazu u krivinu.

3.3. Raspodjela poprečnog nagiba i koeficijenta bočnog trenja u blažim krivinama

Smjernice europskih zemalja, za razliku od SAD-a, primjenjuju samo jednu metodu kod koje se smanjivanjem zakrivljenosti krivine linearno smanjuju poprečni nagib i otpor trenja. To bi bilo idealno da vozači voze konstantnom (projektnom) brzinom što u praksi, naime, nije slučaj. Kako smjernice europskih zemalja definiraju ograničenja veličina elemenata trase što se tiče konzistencije brzine, ovakav način raspodjele na prvi se pogled čini logičnim rješenjem. Problem se pojavljuje kod pravilnika onih zemalja (Hrvatska, Italija, Švicarska) koje za razliku od njemačkog pravilnika nemaju izraze za procjenu 85 postotne brzine, već mjerodavnu brzinu određuju prema izrazu (1) ovisno o polumjeru krivine te vrijednostima f_{rdop} i q_{max} . Ova je brzina manja od operativne, a to može rezultirati odabirom neodgovarajućega poprečnog nagiba i znatnim prekoračenjem projektnih vrijednosti otpora trenja. Kod hrvatskog je pravilnika dodatni problem vezan za projektiranje cesta 3., 4. i 5. kategorije jer se za njih računsku brzinu uzima kao projektna brzina.



Slika 7. Odnos poprečnog nagiba kolnika i polumjera krivine [13]

Njemačke smjernice, za razliku od većine ostalih europskih zemalja gdje se rabi vrijednost nagiba od 7 %, pri proračunu

poprečnog nagiba za određeni polumjer koriste se operativnom brzinom te u oštrim krivinama primjenjuju nagib do 8% čime se uzima u obzir da je $V_{85} > V_p$. Time se osigurava da se znatno ne prekorače dopuštene vrijednosti otpora trenja. Logaritamski graf raspodjele nagiba s obzirom na R i V_{85} koji se rabi u Njemačkoj [13] prikazan je na slici 7.

4. Posljedice primjene različitih metodologija na sigurnost vožnje u krivinama

Pregledom postojećih smjernica uočeni su razni nedostaci što se tiče projektiranja horizontalnog toka trase. U SAD-u najveći je problem nedostatak ograničenja s obzirom na izbor veličine polumjera krivina i duljinu pravaca što često rezultira trasom s neujednačenim elementima. Drugi je problem što se najvažnije veličine (poprečni nagib, preglednost) elemenata trase određuju na temelju projektne brzine koja je znatno manja od operativnih brzina, a to može biti uzrok nesreća. Nedostatak procjene operativne brzine dijelom je kompenziran parabolikom raspodjelom poprečnog nagiba u blažim krivinama čime se indirektno uzima u obzir da operativne brzine odstupaju od projektnih.

Pravilnici gotovo svih europskih zemalja definiraju računsku brzinu kao kriterij za određivanje poprečnog nagiba i preglednosti te daju ograničenja u razlici računskih brzina susjednih elemenata. Značajna je razlika, međutim, u načinu određivanja računске brzine. U nekim zemljama, kao npr. u Njemačkoj, za računsku se brzinu uzima operativna brzina dobivena na temelju istraživanja ovisnosti o geometrijskim karakteristikama ceste, dok je u drugima (npr. Hrvatska, Švicarska, Italija) računska brzina teoretska vrijednost dobivena iz izraza (1) koja je manja od operativnih brzina.

Ovdje su, na primjeru krivine polumjera $R=300$ m na izvangradskoj cesti 3. kategorije (prema hrvatskom pravilniku) projektne brzine 70 km/h, prikazane posljedice primjene različitih postupaka za određivanje raspodjele poprečnog nagiba i otpora trenja. Iskorištene su hrvatske, njemačke i SAD smjernice.

Prema hrvatskom se pravilniku poprečni nagib računa u odnosu na V_r . Za ceste 3. kategorije projektne se brzina uzima kao računsku brzinu (70 km/h) što rezultira poprečnim nagibom od 4,8%. U slučaju da se radi o cesti 1. ili 2. kategorije, za krivinu $R=300$ m računsku brzinu V_r iznosila bi 85 km/h. Brzina od 85 km/h znatno je realnija od brzine 70 km/h koja se primjenjuje za ceste 3. kategorije, odnosno bliža je brzini kojom većina vozača zaista vozi u krivini tog polumjera (oko 100 km/h; slika 1.), a i zadovoljeni su uvjeti konzistencije. Veličina poprečnog nagiba prema Smjericama SAD-a računa se u odnosu na V_p i iznosi 6,7%. Prema njemačkom pravilniku (slika 5.b) operativna brzina za polumjer od 300 m iznosi 98 km/h (za ceste širine do 6 m), a poprečni nagib 8%. Ta brzina prelazi dozvoljenu vrijednost odstupanja V_{85} od

Tablica 4. Usporedba smjernica Hrvatske [23], SAD-a [14] i Njemačke [13] za krivinu $R=300$ m, $V_p=70$ km/h

Smjernice	V_p [km/h]	V_{mj} [km/h]	R [m]	q [%]	85 [km/h]			98 [km/h]			
					q	f_R	f_{Rdop}	$f_R - f_{Rdop}$	f_R	f_{Rdop}	$f_R - f_{Rdop}$
Hrvatska	70	70 ($V_r=V_p$)	300	4,8	6,2	0,142	0,125	0,017	0,204	0,108	0,100
SAD (metoda 5)	70	70 (V_p)	300	6,7	6,7	0,123	0,135	-0,012	0,185	0,115	0,070
Njemačka	70	98 (V_{85})	300	8,0	6,1	0,110	0,125	-0,015	0,72	0,108	0,064

V_p koja, prema tablici 1., iznosi maksimalno 20 km/h te se kod operativne brzine od 98 km/h ne bi smjele primjenjivati krivine polumjera manjeg od 380 m [13]. Stoga po njemačkom pravilniku ne bismo smjeli koristiti ovako velike polumjere za ceste s $V_p=70$ km/h. Međutim, kako je prema hrvatskim smjernicama i smjernicama SAD-a to dopušteno, ovdje su uspoređeni rezultati baš za slučaj polumjera krivine od 300 m da bi se istakli nedostaci ovih smjernica. U tablici 4. prikazane su mjerodavne brzine i odgovarajući poprečni nagibi te rezultirajući i dopušteni otpori trenja za gore navedene brzine prema hrvatskom, SAD-a i njemačkom pravilniku.

Iz rezultata prikazanih u tablici 4. jasno se vidi da vozači u krivini s različitim vrijednostima poprečnog nagiba (od 4.8, 6.7 i 8%) osjećaju različiti otpor trenja. Za slučaj ceste 3. kategorije, uz pretpostavku da je operativna brzina 85 km/h, primjenom hrvatskog pravilnika, prekoračuje se dopuštena projektna vrijednost f_{Rdop} za 0,017 (kolona 9.), odnosno za 14 %. Uz poprečne nagibe projektirane za mjerodavne brzine V_{mj} prema smjernicama SAD-a i njemačkim smjernicama, kod brzine od 85 km/h ne bi došlo do prekoračenja dozvoljenih vrijednosti radijalnog otpora trenja.

U posljednje tri kolone tablice 4. uspoređene su rezultirajuće vrijednosti radijalnog otpora trenja za brzinu vožnje od 98 km/h. Za ovaj bi slučaj prema svim pravilnicima bile prekoračene dopuštene vrijednosti, s tim da bi prekoračenje prema hrvatskom pravilniku iznosilo više od 90% (0,100). To znači da bi se iskorišteno trenje približilo granici proklizavanja, koja je otprilike 2 puta veća od dopuštenih vrijednosti, dok bi primjenom njemačkih smjernica i smjernica SAD-a prekoračenje iznosilo 60% te bi preostalo još rezerve do granice proklizavanja. Može se uočiti da razlika rezultirajuće f_R i dopuštene f_{Rdop} vrijednosti radijalnog otpora trenja ne zadovoljava 3. kriterij konzistencije, odnosno prekoračuje dozvoljenu vrijednost od 0,04 (tablica 1.) što se i očekuje budući da nije zadovoljen ni 1. kriterij.

Kada se na cestama 3. kategorije za računsku brzinu ne bi koristila projektna brzina već bi se određivala na isti način kao i za ceste viših kategorija, prema tablici 3., tada bi V_r iznosila 85 km/h umjesto 70 km/h, a poprečni bi nagib iznosio 7%.

Takav poprečni nagib znatno bi bolje odgovarao stvarnim brzinama na cesti jer bi se manje prekoračile dozvoljene vrijednosti radijalnog otpora trenja. Naime, prekoračenje za brzinu od 98 km/h uz poprečni nagib od 7% iznosilo bi 0,075, odnosno 70%.

Iz navedenog je prikaza jasno da postoji potreba za procjenom 85 postotne brzine i crtanjem profila brzina ne samo da bi se međusobno uskladili elementi trase u smislu konzistencije, već i da bi se odabrao najpovoljniji način raspodjele poprečnih nagiba s obzirom na stvarne brzine vožnje u krivinama.

Nedostatak uzimanja u obzir procjene operativne brzine u postupku projektiranja pravilnik SAD-a dijelom kompenzira način raspodjele poprečnog nagiba, dok se primjenom hrvatskog pravilnika za ceste nižih kategorija dolazi do znatnih prekoračenja dopuštenih vrijednosti f_{Rdop} , a to može biti uzrokom većeg broja nesreća. Što se tiče konzistentnosti brzina i otpora trenja najdorađeniji je njemački pravilnik.

5. Zaključak

Iz prikazanog se pregleda smjernica može uočiti da jedino smjernice SAD-a nemaju ugrađene kriterije za osiguranje konzistencije, a za određivanje veličine elemenata trase rabe isključivo projektnu brzinu. Primjena projektne umjesto operativne brzine dijelom se kompenzira paraboličnom raspodjelom poprečnog nagiba i otpora trenja u krivinama čime se u blažim krivinama za održavanje kružnog kretanja rabi više nagib, a manje trenje. Time se indirektno uzima u obzir da vozači u slobodnom toku prekoračuju projektne brzine. Dodatni je problem u SAD-u što postoji više maksimalnih veličina poprečnog nagiba, ovisno o prometnim i klimatskim uvjetima, što dovodi do toga da krivine istog polumjera na prometnicama iste kategorije u različitim područjima imaju različite poprečne nagibe. Stoga su i rezultirajući otpori trenja za vožnju istom brzinom različiti, a to može biti uzrokom neadekvatnih reakcija vozača te nesreća.

Pravilnici europskih zemalja definiraju slične kriterije za utvrđivanje konzistencije brzina između susjednih elemenata trase te usporedbu računске brzine s projektnom brzinom.

Osnovna je razlika smjernica u tome što se u nekim zemljama za računsku brzinu uzima 85 postotna brzina s obzirom na zakrivljenost dionice ili elementa ceste, dok se kod drugih za računsku brzinu uzima teoretska vrijednost u ovisnosti o veličini polumjera za maksimalne vrijednosti poprečnog nagiba i trenja. Računska je brzina manja od operativnih brzina što rezultira primjenom manjih poprečnih nagiba od najpovoljnijih za ugodnu vožnju. Najveća je nedorečenost hrvatskog pravilnika što se za proračun raspodjele poprečnog nagiba i preglednosti na cestama ceste 3., 4. i 5. kategorije ne rabi računski već projektna brzina, a to rezultira nedovoljnim vrijednostima nagiba za sigurnu i udobnu vožnju te može biti

uzrokom nesreća. Pregled novijih članaka pokazao je da se posljednjih godina rade brojna istraživanja ovisnosti ponašanja vozača (ubrzanja, usporavanja, brzine) o karakteristikama prometnice i okoliša s ciljem da se unaprijede pravilnici što se tiče konzistentnog projekta trase, a to će rezultirati u prvom redu sigurnijim te udobnijim i ekonomičnijim prijevozom.

S obzirom na hrvatski pravilnik prioritet istraživanja trebalo bi biti utvrđivanje ovisnosti operativne brzine o karakteristikama prometa, prometnice i okoliša te primjena operativne umjesto računski brzine u postupku određivanja poprečnog nagiba i preglednosti cesta i to za sve kategorije cesta.

LITERATURA

- [1] Lamm, R., Choueriri, E.M., and Mailaender, T.: *Traffic Safety on Two Continents—a ten-year Analysis of Human and Vehicular Involvements*, Proceedings SHRP, Goutenberg, Sweden, 18-20, 1992.
- [2] Baldwin, D.M.: *The Relation of Highway Design to Traffic Accident Experience*, AASHTO, Convention Group Meeting, Washington, DC, 1946.
- [3] Krammes R.A. et al.: *Horizontal Alignment Design Consistency for Rural Two-lane Highways*, Report no. FHWA-RD-94-034, FHWA, Washington D.C., 1995.
- [4] Rowan N.J.: *Safety Design and Operational Practices for Streets and Highways*, U.S. Gov. Print. 1980.
- [5] Nataneen, R.; Summala, H.: *Road user Behaviour and Traffic Accidents*, Elsevier, New York, 1976.
- [6] Chowdhury, M.A.; Warren, D.L.; Bissell, H.: *Analysis of Advisory Speed Setting Criteria*, Public roads, 55(3) 65-71, 1991.
- [7] McLean, J. R.: *Speeds, Friction Factors and Alignment Design Standards*, Australian Road Research, 1988.
- [8] Lamm, R.; Guenther, A.K.; Choueiri, E.M.: *Safety Module for Highway Geometric Design*, Transportation Research Record 1512, 7 – 15, 1995.
- [9] Lamm, R., Choueriri, E.M., and Mailaender, T.: *Accident Rates on Curves as Influenced by Highway Design Elements*, Proc. Roads safety in Europe, pp.33-54, Sweden 1989.
- [10] Fink, K. L.; Krammes, R. A.: *Tangent Length and Sight Distance Effects of Accident Rates at Horizontal Curves on Rural Two-lane Highways*, Transportation Research Board, Washington DC 1995.
- [11] *Modeling Operating Speed*, TRB, Washington DC, 2011.
- [12] Bonneson, J.A.: *Side Friction and Speed as Controls for Horizontal Curve Design*, Journal of Transportation engineering, Vol 125/6, pp 473-479, 1999.
- [13] *Die Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Linienführung (kurz RAS-L)*, Germany 1973., 1985, 1995.
- [14] *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2001
- [15] Barnett, J.: *Safe Side Friction Factors and Superelevation Design*. Highway Research Board. Proc., Vol. 16, pp. 69–80, 1936.
- [16] Fitzpatrick, K.: *Design Speed, Operating Speed and Posted Speed Relationship*, ITE Journal, Vol. 67/2, pp. 52-59, 1997.
- [17] Lamm et al.: *A Practical Safety Approach to Highway Geometric Design International Case Studies: Germany, Greece, Lebanon, and the United States*. International Symposium on Highway Geometric Design Practices, Boston, 1995.
- [18] Choueiri, E.M.; Lamm, R.; Kloeckner, J.H.: *Safety Aspects of Individual Design Elements and their Interactions on Two-lane Highways: International Perspective*, Transportation Research Record, Issue Number: 1445, pp. 34-46, 1994.
- [19] Union of Swiss Highway Engineers (VSS). *Swiss Guide SN 640080b. Project Planning, asics. Speed as a Design Element*, Zürich, January 1991.
- [20] *Austrian Guide. Geometric Design of Highways*, RVS 3.23. Research Society for Traffic and Road Engineering, Vienna, 1997.
- [21] Cafiso, S. et al.: *Safety Performance Indicators for Local Rural Roads: A Comprehensive Procedure from Low-Cost Data Survey to Accident Prediction Model*. 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington 2008.
- [22] Marchionna, A., and Perco, P.: *Operating Speed Profile Prediction Model for Two-Lane Rural Roads in the Italian Context*. Journal Advances in Transportation Studies, Vol. XIV, Rome, Italy, 2008.
- [23] *Pravilnik o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa (NN 110/01)*.