

# Statistička analiza trasiranja autoceste Bosiljevo-Split

Damir Pološki, Željko Stepan

## Ključne riječi

projektiranje autocesta, geometrija tlocrta, metode trasiranja, statistika trasiranja, projektne norme, konstelacija optimalnih elemenata

## Key words

motorway design, plan geometry, routing methods, routing statistics, design standards, constellation of optimum elements.

## Mots clés

étude des autoroutes, géométrie du plan, méthodes de traçage, statistique de traçage, normes d'études, constellation des éléments optimaux

## Ключевые слова

проектирование автострад, геометрия плана, методы трассирования, статистика трассирования, проектные нормы, констелляция

## Schlüsselworte

Autobahnentwerfen, Grundrissgeometrie, Linienführungsmethoden, Linienführungsstatistik, Entwurfsnormen, Konstellation der optimalen Elemente

D. Pološki, Ž. Stepan

Izvorni znanstveni rad

## Statistička analiza trasiranja autoceste Bosiljevo-Split

U radu se prikazuje generiranje statističkog uzorka od 50 varijabli koji porijeklo ima u digitalnom zapisu glavnih točaka osi autoceste A1 između Bosiljeva i Splita. Metodama deskriptivne i matematičke statistike opisuje se model suvremenog trasiranja autoceste metodom kružnica. Ukazuje se na mogućnost poboljšanja geometrije tlocrta i navode varijable koje vode prema optimumu. Ističe se nalaz kod maksimalnih dužina klotoida koji pokazuje nedostatak hrvatskih projektivnih normi.

D. Pološki, Ž. Stepan

Original scientific paper

## Statistical analysis of the Bosiljevo - Split motorway route

The process of statistical sample generation based on 50 variables, originating from the digital record of main axes for the Motorway A1 between Bosiljevo and Split, is presented in the paper. The methods of descriptive and mathematical statistics are used to describe the modern motorway route definition model based on the method of circles. Possibilities for improving the plan geometry are presented, and variables leading to an optimum solution are given. The finding relating to the maximum length of chlotoides, and pointing to the lack of Croatian standards in the field of design, is also presented.

D. Pološki, Ž. Stepan

Ouvrage scientifique original

## L'analyse statistique du tracé de l'autoroute Bosiljevo - Split

Le procédé d'établissement de l'échantillon statistique basé sur 50 variables, provenant du fichier digital des axes principales pour l'autoroute A1 entre Bosiljevo et Split, est présenté dans l'ouvrage. Les méthodes de statistique descriptive et de statistique mathématique sont utilisées pour décrire un modèle moderne pour l'établissement du tracé des autoroutes par la méthode des cercles. Les possibilités pour l'amélioration de la géométrie du plan sont présentées, et les variables menant à une solution optimale sont données. La conclusion relative à la longueur maximale des chlotoides, mettant en relief une manque des normes croates dans le domaine des études, est également présentée.

Д. Полошки, Ж. Степан

Оригинальная научная работа

## Статистический анализ трассирования автострады Босильево-Сплит

В работе описывается генерирование статистического образца из 50 переменных величин, чье происхождение существует в цифровой записи главных точек оси автострады А1 между Босильевым и Сплитом. Методом дескриптивной и математической статистики описывается модель современного трассирования автострады методом кругов. Указывается на возможность улучшения геометрии плана и приводятся переменных величин, ведущие к optimumу. Подчёркивается результат при максимальных длинах клотоида, показывающий недостаток хорватских проектных норм

D. Pološki, Ž. Stepan

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Statistische Analyse der Linienführung der Autobahn Bosiljevo-Split

Im Artikel beschreibt man die Gestaltung eines statistischen Musters von 50 Variablen dessen Herkunft vom digitalen Eintrag der Achshauptpunkte der Autobahn A1 zwischen Bosiljevo und Split stammt. Mit Methoden der deskriptiven und mathematischen Statistik beschreibt man das Modell der zeitgemässen Autobahnlinienführung nach dem Kreislinienverfahren. Auf die Möglichkeit die Grundrissgeometrie zu verbessern ist hingewiesen, und die zum Optimum führenden Variablen sind angegeben. Hervorgehoben wird das Untersuchungsergebnis über die maximalen Klothoidenlängen, das die Mangelhaftigkeit der kroatischen Entwurfsnormen anzeigt.

Autori: Doc. dr. sc. **Damir Pološki**, dipl. ing. građ.; **Željko Stepan** dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za prometnice, Kačićeva 26, Zagreb

## 1 Uvod

Autocesta Zagreb-Split (A1) na sektoru Bosiljevo-Split (Dugopolje) duljine 312,821 km projektirana je u razdoblju od 2000.god. do 2004. godine. Izgradnja cijelog sektora dovršena je i puštena u promet krajem lipnja 2005. godine. Projektna dokumentacija, od studije izbora koridora do glavnog projekta na temelju koje je građena ova autocesta, izrađena je u navedenom razdoblju. Stručna i znanstvena suvremenost tog projekta potiče nas da ga istražimo i da njegove karakteristike opišemo i obrazložimo.

Znano je da se trasa autoceste utvrđuje na temelju kriterija koje definira niz znanstvenih grana koje sudjeluju u planiranju tog infrastrukturnog sustava. Taj složeni proces matematički je uključen u geometriju trupa ceste. Suvremenost ovog projekta, koji je egzaktno definiran u digitalnom obliku, daje mogućnost analize trasiranja ovog autocestovnog projekta koja do sada nije bila provedena. Projekt trase ovdje se promatra kao izabrani statistički uzorak. Naime, "Ovdje je priroda promatrane pojave (trase autoceste) takva da se ne mogu kontrolirati svi mogući utjecaji na proces koji dovodi do konačnog rezultata", a što se prema Paušeu [1] (str. 15.), ako se pojavnost opisuje podacima, može identificirati statističkim podacima.

U radu je za tlocrtne komponente osi autoceste proveden niz statističkih proračuna koji su poslužili za «dijagnozu» provedenog trasiranja. Tlocrt trase primarna je sastavnica svake ceste s kojom počinje proces projektiranja, kao što ga proces optimiranja tijekom projektiranja u konačnici definira.

Geometrija trase autoceste oblikuje se prema projektnim pravilima za sve sastavnice trase ceste, pa analiza sastavnica suvremeno projektirane trase koja se u ovom radu opisuje među ostalim vodi i do zaključaka o suvremenosti projektnih pravila.

## 2 O podacima koji se analiziraju

Fond podataka koji je podvrgnut statističkoj analizi čini neprekinutu glavnu os autoceste A1 na dijelu od

Tablica 1. Prikaz sadržaja slogova glavnih točaka osi ceste

BROJ OSI	STACIONAŽA	DUŽINA	RADIJUS	KLOTOIDA	SMJERNI KUT	y	x
401	352,835	0,000	-500	0	200,9916638	5519882,829	5028845,885
401	852,835	500,000	-500	-225	137,3296866	5520106,097	5028421,620
401	954,085	101,250	0	300	130,8839114	5520193,980	5028371,433
401	1074,085	120,000	750	0	135,9768723	5520298,575	5028312,681
401	1742,168	668,084	750	-390	192,6855895	5520641,990	5027765,271
401	1944,968	202,800	0	550	201,2926934	5520647,006	5027562,698
401	2146,635	201,667	1500	0	197,0131974	5520647,429	5027361,072
401	3022,585				159,8367449	5520934,518	5026546,622
401						5521060,624	

Bosiljeva do Splita (Dugopolje) duljine 312,821 km.



Slika 1. Prikaz autoceste Bosiljevo-Split (Dugopolje)

Os autoceste definirana je glavnim točkama sa sljedećim značajkama:

- stacionaža glavne točke
- udaljenost do prethodne glavne točke
- polumjer u glavnoj točki
- parametar klotoide u glavnoj točki
- koordinate glavne točke (Y, X u Gauss-Kruegerovoj projekciji Zemlje)
- smjerni kut u glavnoj točki.

Značajke c. d., i e. za glavne točke osi iz glavnih projekata po kojima je izgrađena autocesta preneseni su u softver za izračun geometrije ceste (CADICS), kako bi se grafički provjerila ispravnost inputa. S istim softverskim rješenjem generirane su datoteke glavnih točaka osi za pojedine dionice A1, odnosno za cijeli analizirani sektor. Te sekvencijalne datoteke (prikazano u tablici 1.) pročitane su u bazu podataka (MS-Access) iz koje su složeni slogovi za statističke analize.

### 3 Projektna pravila u Hrvatskoj

Projektna pravila koja određuju geometriju tlocrta autocesta uporište nalaze u projektnoj brzini ( $V_p$ ) koja bi se trebala odrediti projektnim zadatkom na temelju kategorije ceste, konfiguracije terena, odnosno prostornih ograničenja i najveće zakonom dopuštene brzine, što je prikazano u tablici 2.

Tablica 2. Raspodjela projektnih brzina za autoceste [2]

Razina ograničenja	autoceste	
	projektna brzina ( $V_p$ )	uzdužni nagib ( $S_{MAX}$ )
	km/h	%
bez ograničenja	$\geq 120$	4
umjerena ograničenja	100	5
znatna ograničenja	90	5,5
velika ograničenja	80	6

Računska brzina ( $V_r$ ) posljedica je brzina vožnje na trasi kojoj je geometrija određena prema projektnoj brzini. Proračunata računaska brzina ne smije premašiti projektnu brzinu za više od 20 km ako se trasa projektirana po projektnoj brzini želi zadržati. Projektantska praksa kaže da se zadovoljavanje uvjeta  $V_r - V_p \leq 20$  km/h postiže već u drugoj iteraciji projekta osi ceste.

Prema projektnoj brzini "Pravilnika za projektiranje" [2] određuju se veličine tlocrtnih elementa trase. Tlocrtne elemente trase čine pravac, kružnica i njihova veza klotoida, a njihove granične vrijednosti prema [2] prikazuju se u tablici 3.

Tablica 3. Granične vrijednosti tlocrtnih elemenata [2]

projektna brzina ( $V_p$ ) km/h	pravac		radijusi		klotoida	
	$L_{min}$ m	$L_{max}$ m	$R_{min}$ m	$L_{min}$ m	$A_{min}$ m	$L_{min}$ m
80	160	1600	250	22	122	60
90	180	1800	350	25	150	65
100	200	2000	450	28	184	75
110	220	2200	600	30	226	85
120	240	2400	750	33	267	95
130	260	2600	850	36	313	115

Navedenim projektnim pravilima u ovome radu koristimo se kao okvirom za analizu pojedinih projektnih komponenata.

Projektna pravila sadrže poredbene vrijednosti za pojedine sastavnice ceste. Ona nisu zamjena za projektantsko iskustvo i inženjersku imaginaciju, pa odstupanja projekta od poredbenih vrijednosti imaju dublje značenje od čistoga statističkog odstupanja. Podrijetla i razloge tih odstupanja ovaj rad nema pretenziju tumačiti preko statističkih vrijednosti.

### 4 Deskriptivna statistika horizontalnih komponenata trase

Autocesta A1 na sektoru Bosiljevo-Split (Dugopolje) podijeljena je na 23 dionice koje predstavljaju prometno-gradevinske cjeline prema kojima se gradila ova autocesta.

Za svaku dionicu izrađena je deskriptivna statistika posebice za pravce, za kružnice i za klotoida.

Osim aritmetičke sredine i standardnog odstupanja od aritmetičke sredine za pojedine komponente trase, izračunana je i *vagana* aritmetička sredina te njezino standardno odstupanje. Poznato je da pri izračunu aritmetičke sredine na rezultat značajno utječu vrijednosti na periferiji tog skupa. Na primjer, polumjeri kružnica na periferiji skupa polumjera s malim duljinama kružnih lukova značajno utječu na aritmetičku sredinu polumjera, ali ne na vaganu sredinu. *Vagana* sredina u tablicama deskriptivne statistike indeksirane su sa sred/dulžina. Zbog razumljivosti navedenog navodimo formulu za račun vagane sredine kružnice [R].

$$R_{SRED/DUŽINA} = \frac{\sum (R_i \times L_i)}{\sum L_i}$$

Pri mjerenjima i u statističkim analizama govorimo o odstupanjima od poredbene vrijednosti pa je danas i temeljna mjera rasipanja (mjerenih) vrijednosti "standardno odstupanje  $\sigma$ ". Standardno odstupanje proračunano je za sve srednje vrijednosti varijabli. Prema Benčiću [3] "Standardno odstupanje srednje vrijednosti je mjera nesigurnosti srednje vrijednosti zbog slučajnog djelovanja".

Tablica 4. prikazuje deskriptivnu statistiku za pravce, tablica 5. za kružne krivine, tablica 6. za klotoida.

U tablici 7. prikazuju se izvedene karakteristike i to krivudavost ( $KRIVUDAVOST_i = \sum \alpha_i / \sum L_i$ ) i obilazak.

Obilazak predstavlja odnos duljine dionice i pravocrtne udaljenosti krajnjih točaka promatrane dionice u zemljišnom koordinatnom sustavu.

## 5 Diskusija o statistici trasiranja

### 5.1 O pravcima

Usporedimo li duljine pravaca s graničnim vrijednostima (prema [2]) konstatiramo da samo jedna dionica (dionica 10) sadrži pravac koji je manje duljine ( $L_{pravca} = 156,06$  m) od najmanjih 240 m.

Granična vrijednost najveće duljine od 2400 m prekoračena je u dionicama 2, 10 i 11 u naravi u tunelu Mala Kapela i Sveti Rok.

Na otvorenoj cesti na dionici 17 Benkovac-Pirovac za pravac od 2412,95 m može se reći da odgovara najvećoj vrijednosti.

Za duljine pravaca može se konstatirati da leže striktno unutar granica koje su određene pravilima za projektiranje prema tablici 3.

Srednja vrijednost pravaca od 1149,91 m sa standardnim odstupanjem od 963,33 m ne pruža mogućnost tumačenja trasiranja na temelju srednjih vrijednosti.

Tablica 4. Deskriptivna statistika pravaca

Red.br.	Dionica	Dužina	Pravac										
			L <sub>pr</sub>		L <sub>prk</sub>		L <sub>prg</sub>		C <sub>pr</sub>	n	n / Km (8/13)	L <sub>prumo</sub>	L <sub>prnomca</sub>
			km	m	km	m	km	m					
1	BOSILJEVO-JOSIPOL	27,739	430,16	430,16	430,16	0,00	1	0,04	430,16	1,55			
2	JOSIPOL-TUNEL MALA KAPELA	14,658	578,44	3703,01	2146,72	2209,40	2	0,14	4281,45	29,21			
3	TUNEL MALA KAPELA-ŽUTA LOKVA	15,077	484,69	869,94	677,32	272,41	2	0,13	1354,64	8,98			
4	INTERREGIONALNO ČVORIŠTE ŽUTA LOKVA	5,325	492,94	492,94	492,94	0,00	1	0,19	492,94	9,24			
5	ŽUTA LOKVA-OTOČAC 1	4,178	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00			
6	ŽUTA LOKVA-OTOČAC 2	19,631	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00			
7	OTOČAC-LIČKI OSIK	24,379	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00			
8	LIČKI OSIK-SVETI ROK	32,102	1315,20	1315,20	1315,20	0,00	1	0,03	1315,20	4,10			
9	SV. ROK-TUNEL SVETI ROK	9,230	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00			
10	TUNEL SV. ROK- DESNA CJEV	7,946	156,06	4154,53	2135,29	2799,06	2	0,25	4270,59	53,75			
11	TUNEL SV. ROK- LJEVA CJEV	8,163	3981,39	3981,39	3981,39	0,00	1	0,12	3981,39	48,78			
12	TUNEL SV. ROK-MASLENICA-LJEVI KOLNIK	14,512	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00			
13	TUNEL SV. ROK-MASLENICA-DESNI KOLNIK	14,682	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00			
14	MASLENICA-ZADAR1	13,182	2119,53	2119,53	2119,53	0,00	1	0,08	2119,53	16,08			
15	ZADAR1-ZADAR2	9,415	245,82	274,46	255,89	16,10	3	0,32	767,68	8,15			
16	ZADAR2-BENKOVAC	15,894	690,12	1718,52	1204,32	727,19	2	0,13	2408,64	15,15			
17	BENKOVAC-PIROVAC	22,359	1022,05	2412,99	1676,53	699,06	3	0,13	5029,66	22,49			
18	PIROVAC-SKRADIN	9,218	1055,80	1055,80	1055,80	0,00	1	0,11	1055,80	11,45			
19	SKRADIN-ŠIBENIK	8,759	541,81	541,81	541,81	0,00	1	0,11	541,81	6,19			
20	ŠIBENIK-VRPOLJE 1	6,989	608,06	608,06	608,06	0,00	1	0,14	608,06	8,71			
21	ŠIBENIK-VRPOLJE 2	7,220	384,15	1106,57	745,41	510,76	2	0,28	1490,82	20,65			
22	VRPOLJE-PRGOMET	15,656	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00			
23	PRGOMET-DUGOPOLJE	29,181	486,36	2239,60	1284,91	620,90	8	0,27	9479,28	32,48			
24	BOSILJEVO-DUGOPOLJE	312,821	156,06	4154,53	1149,91	963,33	31	0,10	35647,07	11,40			

Srednja vrijednost pravaca od 1149,91 m sa standardnim odstupanjem od 963,33 m ne pruža mogućnost tumačenja trasiranja na temelju srednjih vrijednosti.

Iz postotka trase ceste u pravcima (11,4 %), koji je manji od postotka trase u klotoidama (25,88%), a napose u kružnicama (62,73%), zaključuje se da je trasa autoceste projektirana fleksibilno, ne kruto. Malen postotak pravaca u odnosu na dužinu cijele trase dokaz je suvremenosti projekta. Trasa autoceste projektirana je "metodom kružnica" koje su povezane klotoidama odnosno pravcima pa su pravci, dakle, posljedica trasiranja kružnicama. Za nekadašnje trasiranje putem tangentskog poligona u projektu autoceste A1 kaže se da je izostalo.

Lorenz je za pravce rekao ([4] str. 15.): "Pravac gotovo uvijek vodi pogrešnim smjerom, što dokazuje već sljedeća krivina. Samo za više ili manje kratkih dionica opravdan je pravac kao ciljni pravac. No cilj ovako naglašenog ispravljanja mora biti vrijedan toga".

Zbog broja pravaca po dionicama koji se kreće u intervalu od 0-3 (izuzetak dionica 23 Prgomet-Dugopolje s 8 pravaca), pravac je kao element trasiranja primijenjen u dugim tunelima (M. Kapela dionica 2, Sv. Rok dionica 9 i 10) i velikim mostovima (most Maslenica dionica 14, most Krka dionica 18).

## 5.2 O kružnicama

Kružnice su dominantni element trasiranja autoceste A1 i čine 62,73 % cijele trase.

Tablica 7. Izvedene karakteristike

Red.br.	Dionica	Dužina	Izvedene karakteristike			
			Krivudavost	Keseno/ružavost	C <sub>TK</sub>	Obilježak
			g/km	g	g	%
1	BOSILJEVO-JOSIPOL	27,739	41,32	35,87	36,03	1,094
2	JOSIPOL-TUNEL MALA KAPELA	14,658	36,21	27,07	29,55	1,105
3	TUNEL MALA KAPELA-ŽUTA LOKVA	15,077	41,83	29,64	28,14	1,085
4	INTERREGIONALNO ČVORIŠTE ŽUTA LOKVA	5,325	30,10	54,94	53,26	1,144
5	ŽUTA LOKVA-OTOČAC 1	4,178	50,43	36,85	32,34	1,233
6	ŽUTA LOKVA-OTOČAC 2	19,631	35,31	21,40	17,01	1,054
7	OTOČAC-LIČKI OSIK	24,379	25,98	20,64	16,28	1,046
8	LIČKI OSIK-SVETI ROK	32,102	12,44	46,30	22,62	1,146
9	SV. ROK-TUNEL SVETI ROK	9,230	21,63	18,95	10,39	1,081
10	TUNEL SV. ROK- DESNA CJEV	7,946	7,07	9,44	12,33	1,036
11	TUNEL SV. ROK- LJEVA CJEV	8,163	8,65	10,49	12,65	1,037
12	TUNEL SV. ROK-MASLENICA-LJEVI KOLNIK	14,512	62,18	36,15	48,96	1,698
13	TUNEL SV. ROK-MASLENICA-DESNI KOLNIK	14,682	62,07	36,55	41,96	1,695
14	MASLENICA-ZADAR1	13,182	25,92	10,40	16,47	1,140
15	ZADAR1-ZADAR2	9,415	18,33	25,83	23,76	1,134
16	ZADAR2-BENKOVAC	15,894	9,22	11,76	10,13	1,014
17	BENKOVAC-PIROVAC	22,359	6,86	9,59	8,56	1,009
18	PIROVAC-SKRADIN	9,218	8,37	25,09	15,14	1,019
19	SKRADIN-ŠIBENIK	8,759	36,62	14,94	13,71	1,042
20	ŠIBENIK-VRPOLJE 1	6,989	25,20	7,10	6,02	1,018
21	ŠIBENIK-VRPOLJE 2	7,220	22,63	15,84	15,41	1,024
22	VRPOLJE-PRGOMET	15,656	26,13	30,08	19,59	1,074
23	PRGOMET-DUGOPOLJE	29,181	21,87	15,41	18,72	1,053
24	BOSILJEVO-DUGOPOLJE	312,821	26,12	25,71	27,32	1,382

Granični najmanji polumjer  $R_{min}=75$  m primijenjen je samo u dionici 6 Žuta Lokva-Otočac2. U autocestovnoj zaokretnici primijenjen je  $R=344$  m koji je nastao iz potrebe razvijanja trase od tunela Velebit (510 mn.m.) prema lokaciji Maslenica u Novskom Ždrilu (90 mn.m.).

Najmanji su polumjeri po dionicama kreću se u intervalu od 850 m do 5000 m, najveći od 1500 m do 8000 m. Srednja vrijednost polumjera za cijelu trasu je 2284,32 m sa standardnim odstupanjem od 1787,70 m, *vagana* je sredina polumjera 3196,93 m sa standardnim odstupanjem od 2158,62 m. Srednja vrijednost polumjera je mjera preko koje se ne može prepoznati dužina kružnog luka nad polumjerom s kojim je cesta trasirana.

*Vagana* sredina pokazuje srednji polumjer kružnog luka koji je ovisan o dužini  $L$  kružnog luka. Odstupanje srednjeg polumjera od vagane sredine govori o ujednačenosti trasiranja i može služiti za usporedbu trasa s istim *vaganim* sredinama.

*Vaganom* sredinom, koja dakle potpunije opisuje primjenu elemenata, treba se koristiti kao varijablom za valorizacije trasiranja uzduž trase, a ne samo u pojedinim

Tablica 5. Deskriptivna statistika kružnih krivina

Red.br.	Dionica	Dužina km	Kružna krivina																	
			R <sub>MIN</sub> m	R <sub>MAX</sub> m	R <sub>SRED</sub> m	σ <sub>R</sub> (14) m	R <sub>SRED/DUŽINI</sub> m	σ <sub>R</sub> (16) m	L <sub>MIN</sub> m	L <sub>MAX</sub> m	L <sub>SRED</sub> m	σ <sub>L</sub> (20) m	L <sub>KUPNO</sub> m	U <sub>MIN</sub> g	U <sub>MAX</sub> g	U <sub>SRED/DUŽINI</sub> g	σ <sub>U</sub> g	n	n / Km (27/3)	L <sub>R/DIONICA</sub> %
1	BOSILJEVO-JOSIPDOOL	27,739	500,00	3000,00	1529,17	413,97	1328,98	585,28	22,54	1551,80	796,20	413,97	19108,84	1,91	162,96	50,23	34,33	24	0,87	68,89
2	JOSIPDOOL-TUNEL MALA KAPELA	14,658	800,00	1500,00	1050,00	231,04	1049,00	210,34	179,71	1159,91	706,42	385,09	6307,81	11,44	80,01	56,44	21,21	9	0,61	43,37
3	TUNEL MALA KAPELA ŽUTA LOKVA	15,077	800,00	2000,00	1142,86	295,39	1202,97	354,80	95,53	1380,17	616,74	424,62	8634,40	6,08	87,86	48,92	22,28	14	0,93	57,27
4	INTERREGIONALNO ČVORIŠTE ŽUTA LOKVA	5,325	1400,00	2500,00	2100,00	522,81	1607,42	367,11	103,86	2465,01	838,37	1101,82	3353,49	2,65	112,09	85,86	43,82	4	0,75	62,98
5	ŽUTA LOKVA-OTOČAC 1	4,178	900,00	1500,00	1142,50	295,34	1057,06	253,35	165,32	1169,40	650,67	412,79	2802,69	8,28	82,72	56,05	26,44	4	0,96	62,30
6	ŽUTA LOKVA-OTOČAC 2	19,631	750,00	5000,00	1768,02	1287,77	2153,86	1342,18	143,78	1648,20	640,57	405,90	12811,31	7,04	55,13	30,60	14,08	20	1,02	65,26
7	OTOČAC-LIČKI OSIK	24,379	900,00	5600,00	2320,00	1292,33	2688,60	1317,97	159,06	1868,68	833,40	452,39	16667,91	5,47	54,07	28,72	13,45	20	0,92	68,37
8	LIČKI OSIK-SVETI ROK	32,102	3600,00	6800,00	4962,50	1174,66	4892,94	1018,57	1617,73	5306,81	3598,38	1321,19	28067,00	15,15	70,38	52,84	15,49	8	0,25	87,43
9	SV. ROK-TUNEL SVETI ROK	9,230	1000,00	6000,00	3242,71	1932,57	4015,08	1768,04	586,83	2320,45	1113,96	641,56	6682,77	11,89	39,16	24,11	6,95	6	0,65	72,41
10	TUNEL SV. ROK-DEŠNA CJEV	7,946	2500,00	5000,00	3750,00	1767,77	4415,28	1057,81	668,71	2195,30	1432,00	1079,46	2864,01	17,03	27,95	25,40	4,62	2	0,25	36,04
11	TUNEL SV. ROK- LJEVA CJEV	8,163	2000,00	5012,50	3042,50	1158,92	4116,64	1194,47	41,14	2209,70	695,75	919,07	3478,73	1,04	28,07	24,23	6,74	5	0,61	42,82
12	TUNEL SV. ROK-MASLENICA-LJEVI KOLNIK	14,512	344,00	6511,00	1356,82	1424,09	2051,45	2079,44	46,47	1616,53	424,62	412,47	9341,76	3,94	169,28	52,03	54,73	22	1,52	64,27
13	TUNEL SV. ROK-MASLENICA-DESNI KOLNIK	14,682	395,00	6500,00	1338,23	1501,35	1977,52	2029,90	76,49	1611,68	496,71	426,21	9934,27	3,48	137,48	50,79	44,29	20	1,36	67,66
14	MASLENICA-ZADAR1	13,182	1000,00	3500,00	1962,50	963,90	2015,76	811,17	52,09	2894,76	936,28	899,89	7480,26	1,66	105,31	60,35	37,50	8	0,61	56,82
15	ZADAR1-ZADAR2	9,415	2000,00	5500,00	3521,49	1259,58	3166,80	1120,69	320,74	2380,77	972,64	750,83	6808,50	3,71	60,63	35,00	21,83	7	0,74	72,32
16	ZADAR2-BENKOVAC	15,994	1500,00	8000,00	5035,71	2510,10	6011,64	1507,37	278,28	2850,12	1295,35	934,21	9095,47	6,06	25,92	19,50	6,18	7	0,44	57,23
17	BENKOVAC-PROVAČ	22,359	2750,00	8000,00	6321,43	2201,87	6823,09	1849,60	985,83	2288,70	1669,92	512,59	11689,41	12,88	25,83	17,29	3,37	7	0,31	52,28
18	PROVAČ-SKRADIN	9,218	5000,00	7500,00	6250,00	1767,77	6375,12	1243,82	2997,53	3664,37	3330,95	471,52	6661,89	31,10	28,17	34,28	3,51	2	0,22	72,27
19	SKRADIN-ŠIBENIK	8,759	1000,00	6000,00	1863,64	1674,68	1893,39	1553,87	137,36	874,53	436,54	205,35	4801,94	3,80	45,76	24,47	11,76	11	1,26	54,82
20	ŠIBENIK-VRPOLJE 1	6,989	1200,00	3000,00	1761,11	683,64	1969,16	790,52	77,50	551,60	285,87	182,10	2372,85	3,29	20,49	13,34	5,30	9	1,29	36,81
21	ŠIBENIK-VRPOLJE 2	7,220	1000,00	2600,00	1966,67	585,38	2097,71	585,87	151,02	1481,91	645,58	455,98	3879,50	4,37	40,27	28,00	10,94	6	0,83	53,73
22	VRPOLJE-PROGNET	15,656	1000,00	4800,00	2391,67	1306,95	2896,44	1336,18	422,51	2207,76	1044,02	799,60	12528,28	8,89	67,22	36,75	16,01	12	0,77	80,02
23	PROGNET-DUKOPOLJE	29,181	1000,00	8000,00	2152,50	1687,92	2342,99	1870,89	154,41	1625,42	680,28	379,39	13615,66	4,25	57,49	31,33	15,48	20	0,69	46,66
24	BOSILJEVO-DUGOPOLJE	312,821	355,00	8000,00	2284,32	1787,70	3196,93	2198,62	22,54	5306,81	891,95	831,96	196229,36	1,66	162,96	39,33	26,21	220	0,70	62,73

Tablica 6. Deskriptivna statistika klotoida

Red.br.	Dionica	Dužina km	Klotoida																	
			A <sub>MIN</sub>	A <sub>MAX</sub>	A <sub>SR</sub>	σ <sub>A</sub> (32)	A <sub>SR</sub> /DUŽINA	σ <sub>A</sub> (34)	L <sub>MIN</sub>	L <sub>MAX</sub>	L <sub>SR</sub>	σ <sub>L</sub> (38)	L <sub>KUPNO</sub>	U <sub>MIN</sub>	U <sub>MAX</sub>	U <sub>SR</sub> /DUŽINA	σ <sub>U</sub>	n	n / Km (45/3)	L <sub>L/DIONICA</sub>
1			30	11	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
2	BOSILJEVO-JOSIPOV.	27,739	225,00	1000,00	524,62	171,44	565,00	173,54	62,51	333,23	182,21	55,74	8199,54	1,55	8,61	4,26	1,17	45	1,52	29,56
3	JOSIPOV.-TUNEL MALA KAPELA	14,658	328,63	670,00	477,00	11,46	521,87	105,41	120,00	448,90	226,42	112,23	401,910	3,55	15,05	9,46	4,24	17	1,16	27,42
4	TUNEL MALA KAPELA-ŽUTA LOKVA	15,077	310,00	670,00	441,24	94,46	460,22	94,67	120,00	266,67	169,60	39,31	5088,02	3,54	6,45	4,83	0,90	30	1,99	33,75
5	INTERREGIONALNO ČVORIŠTE ŽUTA LOKVA	5,325	502,00	766,49	679,17	97,22	687,99	87,78	168,00	235,00	211,22	27,57	1478,55	2,14	4,09	3,14	0,50	7	1,31	27,77
6	ŽUTA LOKVA-OTOČAC 1	4,178	379,47	540,72	440,76	71,06	446,14	68,58	160,00	200,00	175,00	16,01	1575,02	4,24	6,30	5,11	0,78	9	2,15	37,70
7	ŽUTA LOKVA-OTOČAC 2	19,631	286,73	1084,44	523,02	216,83	569,75	221,43	109,62	220,00	174,86	43,88	681,941	1,33	8,77	4,12	1,76	39	1,99	34,74
8	OTOČAC-LIČKI OSIK	24,379	360,00	1480,00	693,04	271,37	764,16	293,07	88,57	375,45	207,38	62,61	7880,55	0,82	6,29	3,18	1,07	38	1,56	32,33
9	LIČKI OSIK-SVETI ROK	32,102	793,30	1075,17	901,24	105,03	901,23	101,70	163,27	176,34	169,98	2,37	2219,70	0,77	1,50	1,17	0,25	16	0,90	8,47
10	SV. ROK-TUNEL SVETI ROK	9,230	546,00	1580,00	952,42	368,92	934,25	326,79	160,00	375,00	282,97	60,48	2546,71	1,59	10,88	5,41	3,39	9	0,98	27,59
11	TUNEL SV. ROK- DESNA CIEVA	7,946	544,00	1000,00	739,51	189,93	736,79	165,04	199,96	211,30	202,82	5,66	811,27	1,27	4,80	2,82	1,29	4	0,50	10,21
12	TUNEL SV. ROK- LIJEVA CIEVA	8,163	405,12	635,44	542,87	98,62	571,69	85,36	65,00	200,00	100,38	53,15	702,63	0,48	3,18	1,85	1,07	7	0,86	8,61
13	TUNEL SV. ROK-MASLENICA-LJEVI KOLNIK	14,512	230,00	1141,00	444,75	233,58	468,00	227,05	67,48	385,79	147,72	98,80	5170,18	0,98	22,89	7,47	6,25	35	2,41	35,63
14	TUNEL SV. ROK-MASLENICA-DEJNI KOLNIK	14,682	232,38	1140,18	413,95	209,24	451,61	229,96	24,50	381,95	143,88	60,31	4747,92	0,98	22,32	6,76	5,47	33	2,25	32,34
15	MASLENICA-ZADAR1	13,182	400,00	1200,00	676,46	765,39	769,85	287,86	160,00	443,08	223,29	90,12	3572,69	1,82	11,70	4,23	2,24	16	1,21	27,10
16	ZADAR1-ZADAR2	9,415	547,72	1147,14	826,83	242,82	887,26	222,30	150,00	375,98	229,84	79,27	1838,69	1,39	3,90	2,67	0,82	8	0,85	19,53
17	ZADAR2-BENKOVAC	15,994	519,62	1833,03	1233,75	475,16	1354,30	405,39	180,00	420,00	313,57	85,81	4390,00	1,67	3,82	2,18	0,72	14	0,88	27,62
18	BENKOVAC-PROVAC	22,359	823,15	1833,18	1540,23	374,27	1595,05	330,63	250,00	420,07	276,01	60,69	5640,12	1,67	2,89	1,96	0,44	15	0,67	25,23
19	PROVAC-SKRADIN	9,218	1322,88	1732,05	1527,46	236,24	1541,10	204,20	350,00	400,00	375,00	28,87	1500,00	1,70	2,23	1,95	0,27	4	0,43	16,27
20	SKRADIN-ŠIBENIK	8,759	350,00	1100,00	526,19	238,02	545,35	248,29	122,50	201,67	162,62	17,46	3415,08	1,07	5,09	3,91	1,70	21	2,40	38,99
21	ŠIBENIK-VRPOJCE 1	6,989	385,00	875,00	560,84	148,82	582,40	151,80	148,23	255,21	190,39	35,08	3807,73	1,96	6,69	3,89	1,11	20	2,86	54,48
22	VRPOJCE-VRPOJCE 2	7,220	440,00	684,00	609,38	87,26	611,84	79,46	160,00	210,00	185,00	14,34	1850,00	2,20	5,09	3,10	0,88	10	1,88	25,62
23	VRPOJCE-PRGOMET	15,656	287,30	836,66	538,00	119,63	551,90	118,93	57,75	210,00	164,62	37,68	3127,75	0,46	4,78	3,34	0,95	19	1,21	19,98
24	PRGOMET-DALCOPOLJE	79,181	387,30	812,40	526,14	118,91	540,76	119,73	65,55	260,00	173,89	38,65	6086,00	0,26	5,52	3,78	0,90	35	1,20	20,66
	BOSILJEVO-DALCOPOLJE	312,831	225,00	1833,00	638,64	337,65	741,08	405,40	24,50	448,90	197,91	75,68	80944,22	0,00	22,22	3,97	2,71	409	1,31	25,88

presjecima. *Vagana* sredina može biti orijentacijska vrijednost polumjera s kojim bi se hipotetski moglo provesti trasiranje na određenoj dionici.

Minimalne duljine kružnih lukova  $L_{\min}$  kreću se u intervalu od 22,54 m do 1617,73 m, te osim u dionici 1 (Bosiljevo-Josipdol) ne idu ispod propisanih minimalnih vrijednosti (trajanje vožnje 1 sekundu brzinom  $V_p$ , vidi tablicu 3.).

Maksimalne duljine kružnih lukova ( $L_{\max}$ ) od 551,60 m do 5306,81 m ne mogu se detaljnije protumačiti bez poznavanja prostornih ograničenja. Trasa autoceste kod koje se "veliki" polumjeri protežu preko nekoliko kilometara dugih kružnih lukova trasirana je uglavnom u prostoru bez ograničenja. Ova konstatacija dozvoljava da se na razini statističke analize geometrije trasiranja formuliraju pretpostavke optimalnog trasiranja autoceste, što može biti korisno za trasiranja novih autocesta.

Srednja dužina kružnih lukova od 831,95 m (varijabla 20) u kombinaciji s brojem kružnica po kilometru dionice 0,70 (varijabla 28) dobro pokazuju "narav" trasiranja s kružnicama.

Kod ove autoceste po kojoj se 62,73 % ukupne duljine vozi s mirnim volanom u prolazu kroz kružne krivine nameće se pitanje monotone vožnje po kružnim lukovima velikog polumjera. Upozorenje na monotoniju pokazuje potrebu smanjenja dužina kružnica u smjeru srednjih dužina. Jednu dugu kružnu krivinu može se zamijeniti s tri kružnice sličnog radijusa različitih predznaka. Ovaj model zamjene jednog elementa s trima elementima odgovara načinu zamjene dugih pravaca kružnicama (zamjena pravaca kod kojih bi dužina bila veća od maksimalne). Ovaj nalaz pokazuje na nedostatak pravila za trasiranje [2] koja ne obrađuju problematiku dugih kružnih krivina.

### 5.3 O klotoidama

Klotoide se na autocesti A1 prepoznaju kao element trasiranja jer čine 25,88% ukupne duljine trase. Po pojedinim dionicama duljine klotoida kreću se od 8,61% do 54,48% duljine. Može se konstatirati da je ukupna duljina klotoida 227% veća od duljine pravaca. Ovo je dodatna potvrda načina trasiranja kružnicama, a što se poistovjećuje s modernim trasiranjem.

Najmanje vrijednosti duljina klotoida prema [2] (tablica 3.), kao što je poznato odnose se na klotoide koje počinju s polumjerom  $\infty$  i završavaju s  $R_i$ . Vrijednosti za  $L_{\min}$  u tablici 6. koje su manje od najmanjih duljina klotoida prema pravilima za projektiranje (tablica 3.) pripadaju najmanjim linijama.

Srednje vrijednosti klotoida otprilike 2 puta najmanje premašuju vrijednosti i pokazuju potrebu primjene većih klotoida pri trasiranju od najmanjih vrijednosti.

Estetika trasiranja sugerira trasiranje sa simetričnim krivinama kod kojih je odnos duljina klotoida (KL) prema duljini polumjera (RL) u relaciji KL: RL: KL = 1: 1: 1. Na razini srednjih vrijednosti taj je odnos na autocesti A1: KL: RL: KL = 1: 4,51: 1.

Pri izboru klotoida treba paziti na najmanji kut klotoide  $\tau$  ( $\tau = L/2R = L^2/2A^2$ ) kod kojeg je klotoida kao prijelazna krivina uočljiva. Prema [5]  $\tau$  treba biti veći ili jednak 3,5 gona. *Vagana* srednja klotoida od 3,97 gona (varijabla 43) tek je 13% veća od najmanjega kuta klotoide od 3,5 gona.

Ne bi trebalo zaboraviti da primjena dužih klotoida vodi do skraćivanja trase ceste, pa na taj način veća klotoida u sebi nosi i ekonomsku karakteristiku gospodarskog trasiranja. Estetika trasiranja kroz približavanje navedenom odnosu KL: RL: KL = 1: 1: 1 nije dakle samo estetska karakteristika inženjerskog razmišljanja. Smanjenja duljina kružnica na račun klotoida, procjenjuje se, vodi do smanjenja dužina trase približno 1%.

Najveće duljine klotoida nisu regulirane pravilnikom [2] što je činjenica koja ukazuje na njegov nedostatak; kreću se u intervalu od 176,34 m do 448,90 m i daleko su po vrijednostima od veličina polumjera do kojih bi mogle dosezati prema [5] ( $R/3 < A < R$ ).

## 6 O izvedenim karakteristikama

Od izvedenih karakteristika, koje su posljedica geometrije autoceste, razmotrimo krivudavost, i to *vaganu* krivudavost koja bolje reprezentira tu karakteristiku ceste od prosječne vrijednosti, te obilazak.

Krivudavost se kreće u intervalu 7,10 gon/km do 54,94 gon/km s *vaganim* prosjekom od 25,71 gon/km. Krivudavost se u ovom statističkom uzorku nalazi u slaboj korelaciji s brojem kružnih krivina po km dionice. Pearsonov je koeficijent determinacije  $r^2$  iznosi 0,033, Pearsonov koeficijent linearne korelacije je 0,182 [6].

Obilazak koji predstavlja odnos stvarne duljine dionice prema duljini pravocrtnog spoja početne i završne točke promatranog projekta kreće se u intervalu od 1,009% do 1,233%. Izaberemo li dionicu Zadar1-Zadar2 koja ima vrijednost varijable "Obilazak" 1,134% kažemo da je trasa autoceste na toj dionici 13,4% dulja od pravocrtnog spoja krajnjih točaka. Za cijelu autocestu izračunani obilazak jest 1,382%, ili, trasa je 38,2% dulja od pravocrtnog spoja Bosiljeva i Splita (Dugopolje). Obilazak je posljedica vođenja autoceste koridorom prema prostornom planu Republike Hrvatske od Bosiljeva prema Zadru preko zaleđa Šibenika do zaleđa Splita na lokaciji Dugopolje. Skretanje od moguće kraće trase pokazuje se opravdanim.

## 7 Zaključak

Analiza tlocrtne geometrije trase autoceste A1 na sektoru Bosiljevo-Split (Dugopolje) prvo je istraživanje jednog suvremeno izrađenog projekta kod nas uz primjenu metoda deskriptivne i matematičke statistike.

Iz projekta tlocrta koji je definiran glavnim točkama osi generirano je 50 statističkih varijabli za sektor autoceste neprekinute duljine od 312,821 km.

U radu je potvrđena teza suvremenosti projekta koji napušta kruto trasiranje pravcima i koristi se suvremenim metodama trasiranja kružnicama. To se dokumentira odnosom duljina pravaca (PL) kružnica (RL) i klotoida (KL) koji je  $PL:RL:KL = 11,40:62,7:25,88$  ili  $1:5,5:2,3$ .

Pojedinačne najmanje vrijednosti duljina pravaca, polumjera kružnica i klotoida te najveće duljine pravaca nalaze se u granicama propisa.

Kako hrvatski propis ne određuje najveće duljine kružnica i najveće duljine klotoida, analizirane vrijednosti za te varijable nisu dakle izvan propisanih vrijednosti, ali nisu optimalne.

Optimizacija cestovnog projekta kompleksan je problem. Slijedi li se metoda projektiranja cesta kao iterativnog procesa, onda je postupno približavanje optimumu put prema dobrom rješenju.

Trasiranje sa simetričnim krivinama ( $KL:RL:KL=1:1:1$ ) dobar je put do optimalnih rješenja. Imajući na umu statističke veličine za pojedine sastavnice osi u predmetnom uzorku, a u nastojanju iznalaženja boljih projektnih rješenja u novim projektima zaključuje se da bi trebalo:

- smanjiti duljine pravaca do nužnih konstruktivnih dužina za velike građevine
- smanjiti duljine na kojima "traju" polumjeri,
- optimirati broj polumjera po km u skladu s prostornim uvjetima
- povećati duljine klotoida prema vrijednostima za simetrične krivine.

Navedene konstatacije upozoravaju na nedostatke pravilnika [2] koji ne govori o najvećim duljinama klotoida. Nepoznavanje gornje granice za duljine klotoida između ostalog nedostatak je s utjecajem na inženjersku kreativnost.

## ITERATURA

- [1] Pauše, Ž.: *Uvod u matematičku statistiku*, Školska knjiga, Zagreb, 1993., str.15.
- [2] *Pravilnik o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa*, N.N., broj 110, 2001.
- [3] Benčić, D.: *Pojam, značenje i iskazivanje mjerne nesigurnosti*, Geodetski list. br.1., 1998., str. 23-30.
- [4] Lorenz, H.: *Projektovanje i trasiranje puteva i autoputeva*, IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1980.
- [5] *Richtlinien für die Anlage von Strassen*, Teil: Linienführung RAS-L, FGSV 296., 1995.
- [6] Šošić, I., Serdar, V.: *Uvod u statistiku*, Školska knjiga, Zagreb, 1992.