

Upravljački prometni sustavi

Upravljanje priljevnim tokovima urbanih autocesta

Doc. dr. sc. Edouard Ivanjko

Doc. dr. sc. Niko Jelušić

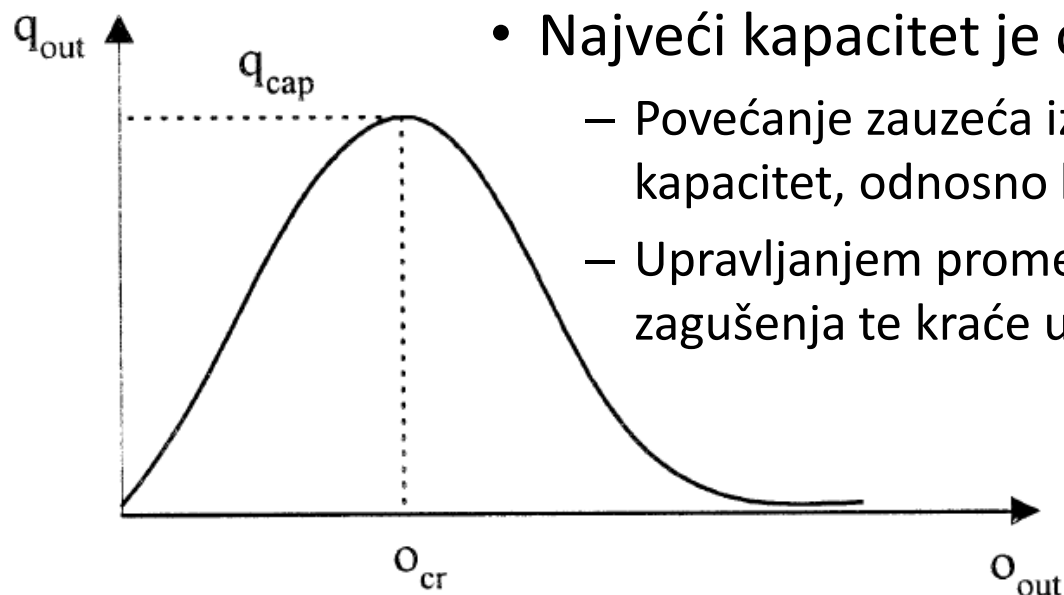
- **Sadržaj**

- Uvod
- Problemi urbanih autocesta
- Mjere kvalitete
- Lokalni algoritmi upravljanja
- Koordinirani algoritmi upravljanja
- Algoritmi zasnovani na učenju
- Kooperacija s drugim sustavima

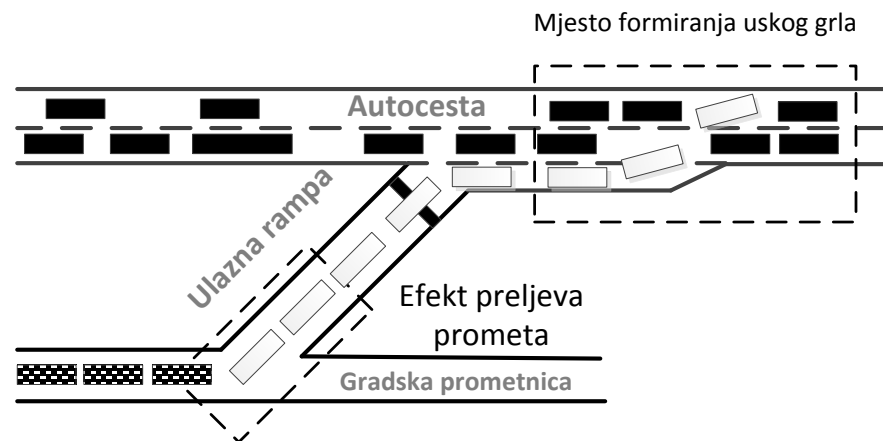
- Veliko povećanje urbanog prometa u zadnjih nekoliko desetljeća
- Problem svakodnevnih ponavljajućih zagušenja
- Urbani prostor najčešće ne dopušta daljnje povećanje urbane cestovne infrastrukture
- Rješenja
 - Korištenje javnog gradskog prijevoza
 - P&R (engl. „Park and Ride“) sustava za izvangradske korisnike
 - Smislenost P&R sustava kraj Glavnog željezničkog kolodvora Zagreb
 - Prebacivanje na drugi mod transporta (engl. „mode shift“)
 - Inteligentno upravljanje postojećom prometnom infrastrukturom

- **Intelligentno upravljanje zahtjeva**
 - Poznavanje povijesnog stanja prometa
 - Projektiranje upravljačkog sustava
 - Planiranje izgradnje infrastrukture
 - Mjerenje trenutnog stanja prometa
 - Arhiviranje i obradu prometnih parametara u stvarnom vremenu
 - Mogućnost djelovanja na prometnu mrežu i sudionike
 - Integraciju u postojeće i buduće sustave
- **Najvažniji algoritam upravljanja**
 - Prilagodba novim uvjetima
 - Sposobnost učenja
 - Samostalno zaključivanje

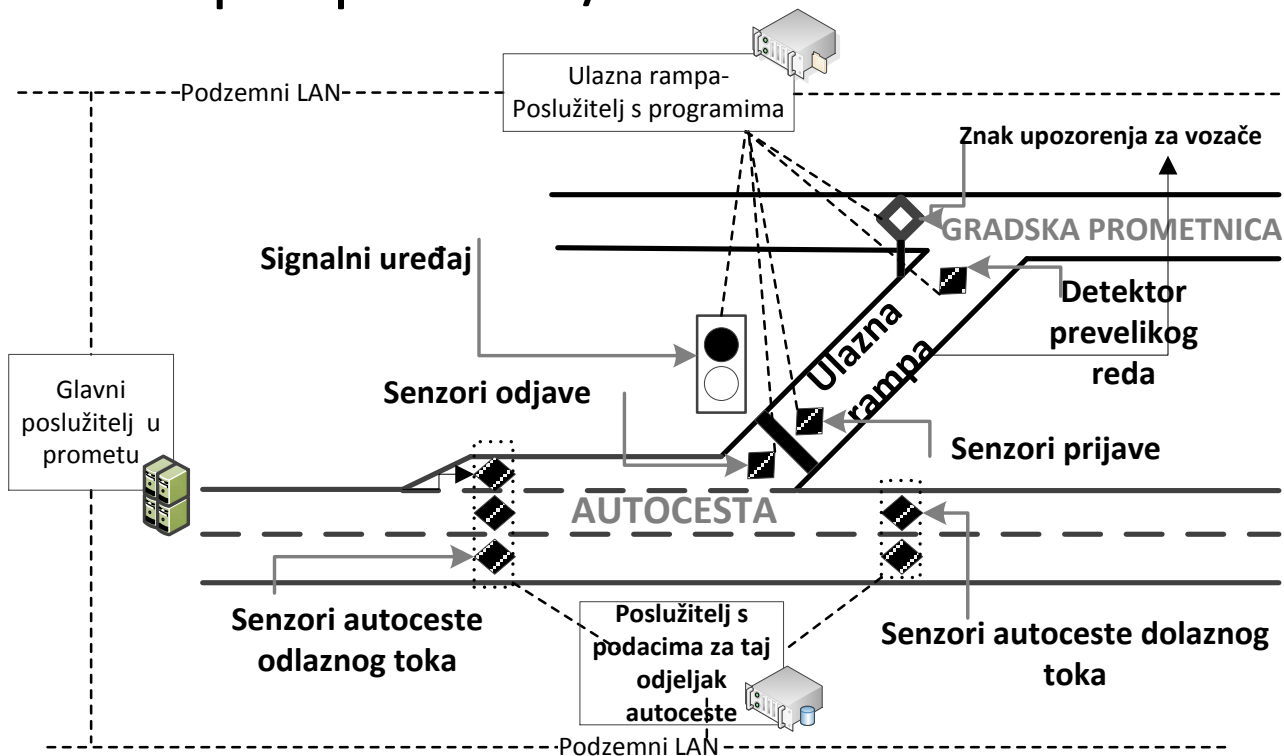
- Inteligentno upravljanje maksimizira propusnost prometne mreže
- Cilj držati prometnu mrežu na lijevoj strani fundamentalnog dijagrama
 - Područje slobodnog toka vozila
 - Povećanje zauzeća autoceste ne smanjuje kapacitet
 - Najveći kapacitet je oko kritične vrijednosti
 - Povećanje zauzeća iznad kritične vrijednosti smanjuje kapacitet, odnosno brzinu toka vozila
 - Upravljanjem prometna mreža ostaje duže u pretfazi zagušenja te kraće u fazi zagušenja i čišćenja zagušenja



- Funkcija urbanih autocesta
 - Brza poveznica unutar mega-gradova
 - Zaobilaznice
- Sadrže tranzitni promet i lokalni promet
 - Lokalni promet podložen svakodnevnim periodima velike gustoće (engl. „rush hour“)
- Veći broj ulaznih i izlaznih rampi
 - Mjesta stvaranja zagušenja
 - Mjesta međudjelovanja lokalnog i tranzitnog prometa



- Ulazna rampa mjesto djelovanja na prometnu mrežu (engl. „ramp metering”)
 - Upravljanje količinom vozila koja ulazi na autocestu
 - Trajanje zelenog intervala (engl. „ramp-metering rate”)
 - Ulazna rampa spremnik/skladište vozila



- Oznaka LoS (engl. „Level of Service”)
- Namjena
 - Ocjena trenutnog stanja prometa
 - Usporedba različitih upravljačkih sustava
- Vrijeme putovanja TT (engl. „Travel Time”) [s]
 - Vrijeme koje je pojedinom vozilu potrebno da prođe kroz prometnu mrežu upravljane autoceste
- Sati putovanja vozila VHT (engl. „Vehicle Hours Travelled”) [h/veh]
 - Vrijeme koje je svim vozilima potrebno da prođu kroz prometnu mrežu upravljane autoceste

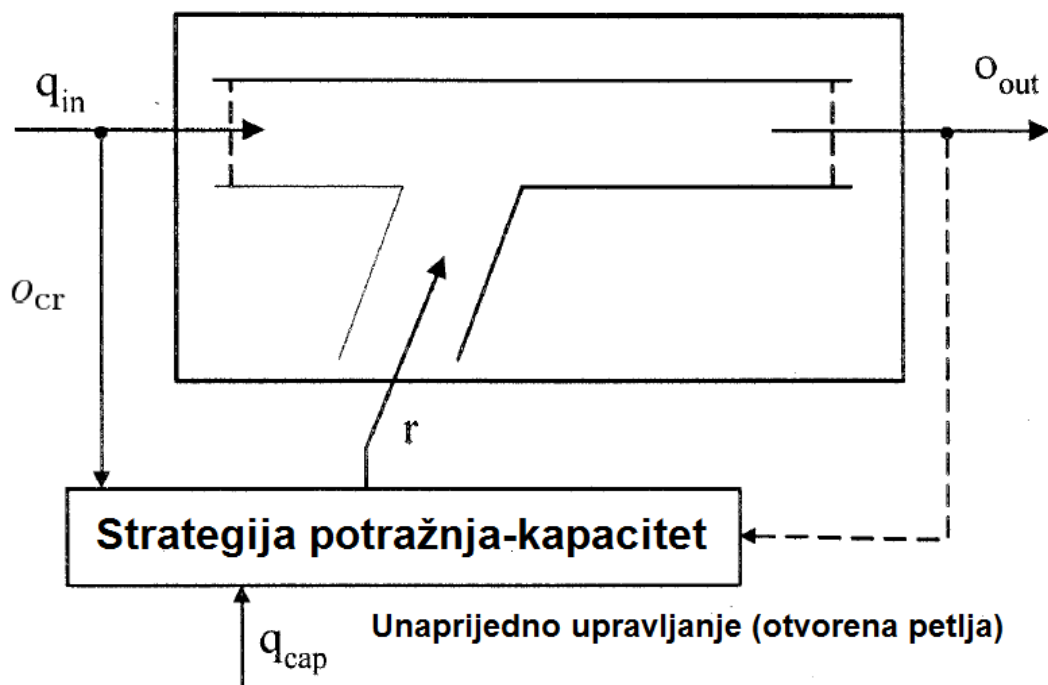
- Duljina putovanja vozila VKT (engl. „Vehicle Kilometers Travelled”) [km/veh]
 - Prijedeđeni kilometri vozila u prolasku kroz prometnu mrežu upravljane autoceste
- Kašnjenje putovanja TD (engl. „Travel Delay”) [s/veh]
 - Razlika između vremena putovanja u zagušenom i slobodnom toku
- Gubitak produktivnosti (engl. „Productivity loss”)
 - Količina izgubljenih traka-kilometar-sati (engl. „lane-kilometer-hours”) zbog pojave zagušenja



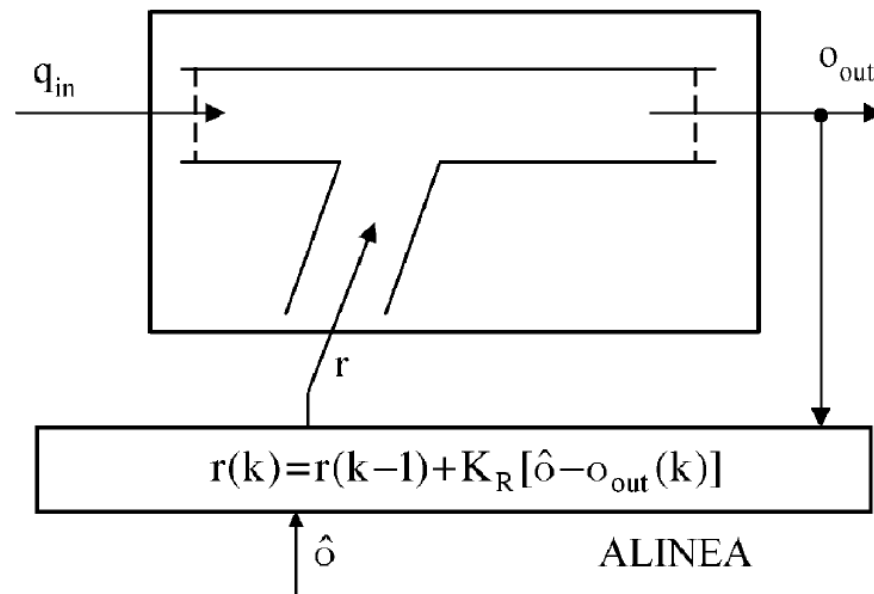
- Prva generacija upravljanja priljevnim tokovima
- Nazivaju se još i izolirani algoritmi upravljanja priljevnim tokovima
- Upravljanje samo jednom ulaznom rampom
 - Upravljački algoritam ima informaciju o stanju prometa segmenta uz ulaznu rampu
 - Mogućnost pojave međusobnog utjecaja između dvije ili više ulaznih rampi
 - Primjenjivo kod urbanih autocesta s većim razmacima između ulaznih rampi

- Najčešće korišteni algoritam inženjera građevine i prometa
- Radi na principu unaprijednog (engl. „feedforward”) upravljanja u otvorenoj petlji
 - Nedostatak je reakcija upravljanja tek nakon što se zagušenje pojavi

$$r(k) = \begin{cases} q_{cap} - q_{in}(k - 1), & \text{ako } o_{out}(k) \leq o_{cr} \\ r_{min}, & \text{inače} \end{cases}$$

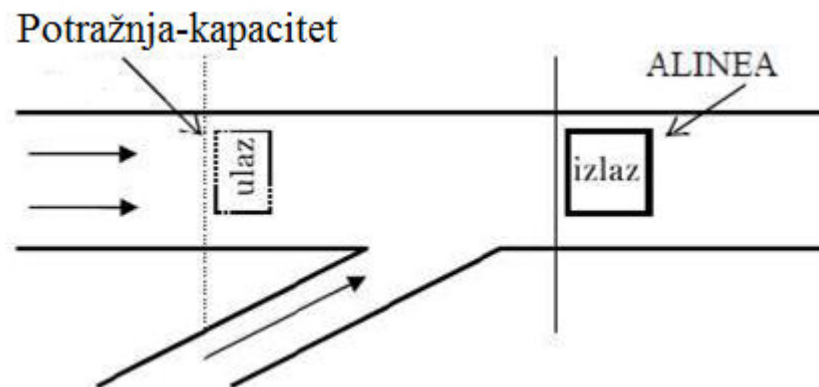


- Najčešće danas korišteni lokalni algoritam
- Preferiran od inženjera koji se bave automatikom/upravljanjem
- Radi na principu zatvorene petlje (engl. „closed loop”) s negativnom povratnom vezom
 - Reakcija odmah u trenutku početka stvaranja zagušenja
 - K_R parametar regulatora
 - ALINEA nije osjetljiva na iznos parametra K_R
 - Moguće ju koristiti unutar hijerarhijske strukture kao podređeni regulator



- Pristup potražnja-kapacitet reagira kada zauzeće autoceste prijeđe kritičnu vrijednost
 - Velike promjene u količini vozila (trajanju zelenog intervala) koja se propušta na autocestu
- ALINEA radi konstantnu prilagodbu količine vozila koja se propušta na autocestu
 - Nema velikih promjena trajanja zelenog intervala
 - Prometna mreža se stabilizira u području najveće propusnosti

Markos Papageorgiou, and Apostolos Kotsialos, Freeway Ramp Metering: An Overview, IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, Vol. 3, No. 4, December 2002





- Upravljeni segment urbane autoceste se podjeli u zone
 - Svaka zona može posjedovati jednu ili više rampi
 - Rampe mogu biti upravljane ili neupravljane
- Upravljanje koristi dvije granične vrijednosti
 - Gornji prometni tok -> rijedak promet te veća količina vozila koja se pušta u glavni tok
 - Donji prometni tok -> gust promet uz formiranje zagušenja
- Cilj upravljanja držati konstantnu gustoću toka u zoni upravljanja

- Iznos količine vozila koja se pušta u glavni tok ovisi o ulaznom i izlaznom toku zone

$$M + F = (X + B + S) - (A + U)$$

- A – gornji glavni prometni tok
- U – suma toka neupravljanih rampi
- M – suma toka upravljanih rampi (upravljačka varijabla)
- F – suma toka upravljanih rampi između urbanih autocesta (upravljačka varijabla)
- X – suma toka izlaznih rampi
- B – kapacitet donjeg toka kod kojeg dolazi do zagušenja
- S – prostor dostupan unutar upravljane zone

- Bottleneck algoritam koristi nadmetanje za odabir konačne količine vozila koja ulazi u glavni tok
- Na osnovi trenutne prometne situacije određuje se lokalna i globalna količina vozila
 - Odabire se manje vrijednost kao konačna
- Na lokalnoj razini koristi se podatak o prometnoj potražnji i dostupnom prometnom kapacitetu
- Na globalnoj razini se detektira postojeći zastoje i zona utjecaja
 - Odabir ulaznih rampi koje će poslužiti kao privremeno spremište vozila

- Skraćenica od „System Wide Adaptive Ramp Metering”
- Kriterij je postizanje najvećeg glavnog prometnog toka na urbanoj autocesti
- Određuje količinu vozila koja će se priključiti glavnom toku na osnovu trenutnih i predviđenih prometnih parametara
- Dvije inačice za lokalno upravljanje
 - SWARM 2a
 - Koristi vremenski razmak između vozila kao mjernu veličinu
 - SWARM 2b
 - Koristi količinu vozila na ulaznoj rampi (privremenom spremištu) kao mjernu veličinu



- U obzir uzimaju prometnu situaciju na cijelom upravljanom segmentu autoceste
- Sustav upravljanja sastoji se od lokalnog i globalnog dijela
 - Lokalno upravljanje jednom rampom
 - Globalna razina prikuplja podatke od svakog lokalnog upravljanja
 - Prepoznavanje problema
 - Preljev reda s ulazne rampe u lokalnu urbanu cestovnu mrežu
 - Zagušenje glavnog toka
 - Generiranje postavki za rad lokalno upravljanih rampi
 - Količina vozila koja se pušta s ulazne rampe u glavni tok



- SWARM 1 inačica za koordinirano upravljanje s više ulaznih rampi
- Koristi detektirano/predviđeno mjesto zastoja kao mjernu veličinu
 - Mjeri se zauzeće autoceste (gustoća prometnog toka)
- Ukoliko je predviđeno zauzeće za određenu dionicu veće od definiranog praga smanjuje se količina vozila koja ulazi u glavni tok uzvodno od potencijalnog mjesta zastoja
 - Svaka lokalna ulazna rampa ima zasebno definirane najmanje i najveće vrijednosti količine vozila

- Koordinacija ulaznih rampi zasnovana na heuristici
 - Heuristike na višoj razini upravljanja
 - Lokalno se najčešće koristi ALINEA
- Svaka rampa dobiva prag najveće duljine reda
 - Kod prekoračenja pripadna rampa postaje glavna rampa
 - Određen broj rampi „uzvodno” od glavne postaju podređene
 - Heuristika više razine upravljanja podešava parametre svake lokalne rampe

- Skraćenica od „Adaptive Fuzzy Algorithms for Traffic Responsive and Coordinated Ramp Metering”
- Zasnovan na neizrazitoj logici i genetskom algoritmu
- Lokalno upravljanje koristi neizrazitu logiku
- Viša razina upravljanja koristi genetski algoritam za postizanje globalnog optimuma
 - Aktivira se detekcijom problema na lokalnoj razini
 - Definicijom funkcijom cilja moguće definirati parametre optimiranja
 - Pretraživanjem svih mogućih rješenja se evolucijom dolazi do optimuma

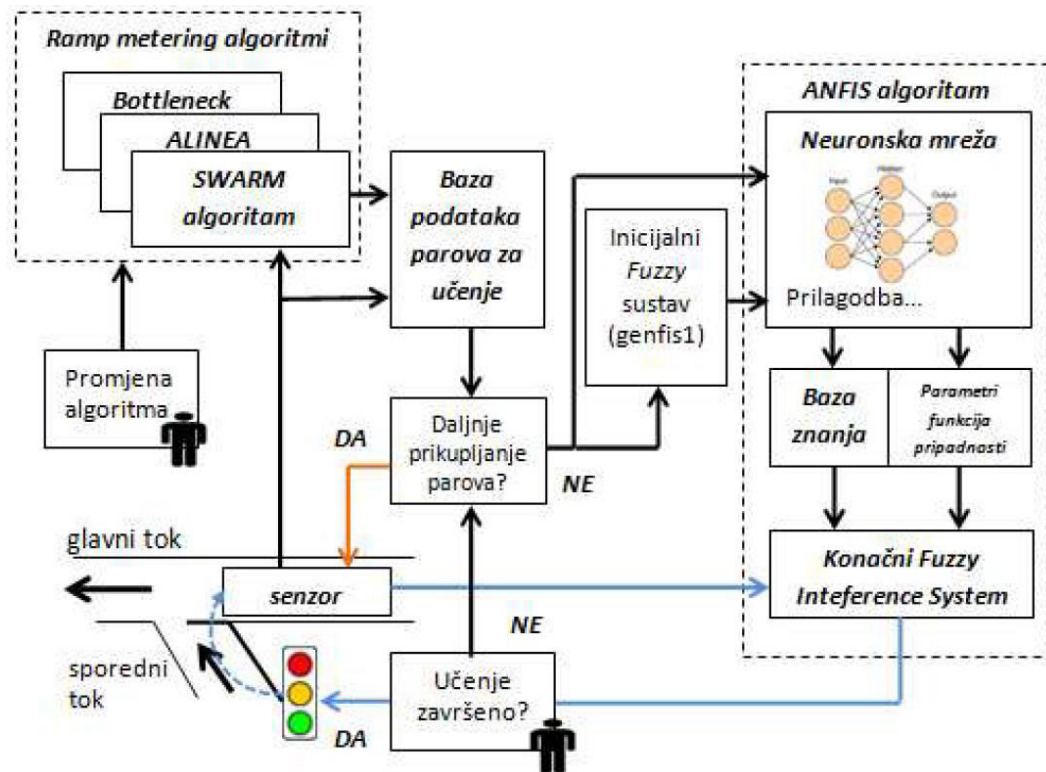
- Koristi princip generiranja glavne i podređenih rampi kod pojave zagušenja
- Na globalnoj i lokalnoj razini postoji nekoliko predefiniranih postavki upravljanja
- Lokalni algoritam upravljanja uključuje opciju čišćenja ulazne rampe
- Kod promjene količine vozila koja se pušta u glavni tok radi se glađenje kako bi se izbjegle nagle promjene u čekanju na ulazak u glavni tok



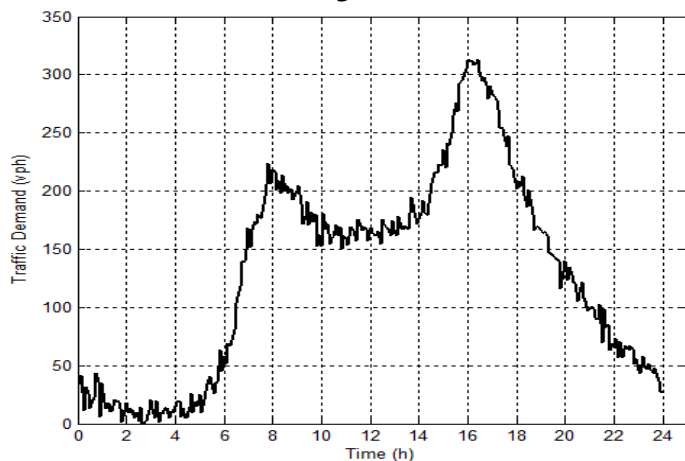
- Koriste se metode umjetne inteligencije
 - Neuronske mreže
 - Neizrazita logika
 - Ojačano učenje
 - Genetski algoritam
- Algoritam upravljanja se uči
 - Primjeri dobrih slučajeva postavki upravljanja
 - Simulacija korištenjem klasičnih algoritama
 - Minimizacija kriterijske funkcije
- Potrebno poznavati stvarne prometne parametre i model autoceste za simulaciju

- Neuronska mreža s elementima neizrazite logike se uči na primjerima klasičnih upravljanja priljevnim tokovima
 - ALINEA, SWARM, Bottleneck, HELPER
 - Primjer Zagrebačke obilaznice

Gregurić, M., Buntić, M., **Ivanjko, E.**, Mandžuka, S., Improvement of Highway Level of Service Using Ramp Metering, Proceedings of the 21st International Symposium on Electronics in Transport – ISEP 2013, ITS in real time, Ljubljana, Slovenia, 25-26.03.2013. R14



- Primjer simulacije Zagrebačke obilaznice
 - Korišten makroskopski simulator CTMSIM
 - Generirano zagušenje blizu čvora Lučko
 - Simulacija od 24h



	No Control	ALINEA	SWARM	HELPER	VSLC	HELPER + SLC	ANFIS
Average TT [min]	14.46	7.39	5.58	6.82	10.05	6.75	6.48
Average Delay [veh h]	6.06	8.8	8.03	7.29	8.05	7.59	10.18
Average TTS [veh h]	19.4	22.07	28.26	20.97	19.48	23.92	24.82
Average Queue [veh]	0	16	18	17	13	18	19
Max. Queue [veh]	0	40	49	40	15	42	42



- Cilj ojačanog učenja (engl. „Reinforcement learning”) je naučiti koje ponašanje primijeniti na temelju poznatih podataka
 - Dobro ponašanje se nagrađuje
 - Loše ponašanje se penalizira
- Za upravljanje priljevnim tokovima koristi se algoritam Q-učenja (engl. „Q-learning”)
 - Uči se agent koji upravlja ulaznom rampom
 - Agent u interakciji s okolinom
 - Na osnovu znanja i stanja okoline agent odlučuje kako djelovati na okolinu

- Upravlja se Markovljevim procesom odlučivanja (MDP, engl. „Markov decision process”)
 - Definira se petorkom (S, A, P, R, γ)
 - Stanje procesa
 - Akcija koja se primjenjuje
 - Vjerojatnost da primjena određene akcije dovodi proces u određeno stanje
 - Nagrada primijenjenoj akciji za tranziciju u novo stanje
 - Faktor slabljenja
 - Cilj je naučiti funkciju $r(s, \pi(s)) \in R$ koja će dovoditi upravljani proces u željeno stanje
 - Kod Q-učenja to je Q-matrica

- Kriterijska funkcija za učenje

$$\hat{Q}_n(s, a) \leftarrow (1 - \alpha_n) \hat{Q}_{n-1}(s, a) + \alpha_n [r + \gamma \max_{a'} \hat{Q}_{n-1}(s', a')]$$

– Brzina učenja

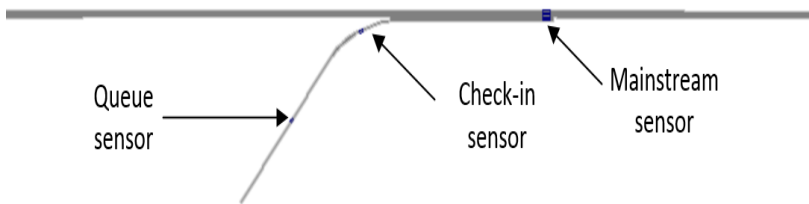
$$\alpha_n = \frac{1}{1 + \text{visits}_n(s, a)}$$

- Stanja za upravljanje priljevnim tokovima

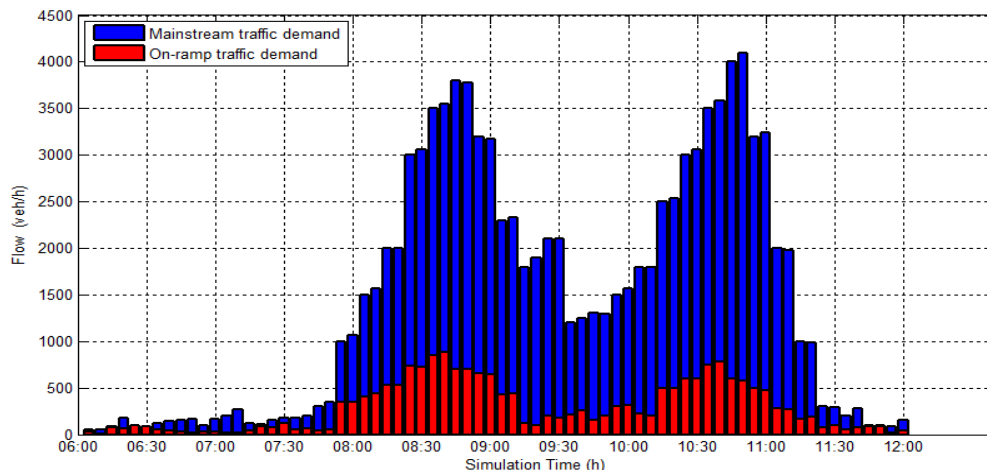
States <i>S</i>	Values	Description
Phases	1	“all green” (constan 3s)
	2	“all red” (variable)
	3*	“ramp metering off”
AverageDensity Class	0	between 0 [veh/km] and 100 [veh/km]
	1	101[veh/km] and 200 [veh/km]
	2	> 201 [veh/km]
AverageQueue Class	0	between 0 and 4 vehicles
	1	between 5 and 7 vehicles
	2	> 8 vehicles

*Mogućnost da se upravljanje priljevnim tokovima isključi za malu prometnu potražnju

- Primjer simulacije jedne ulazne rampe
 - Mikroskopski simulator VISSIM



Velika razlika prometne potražnje

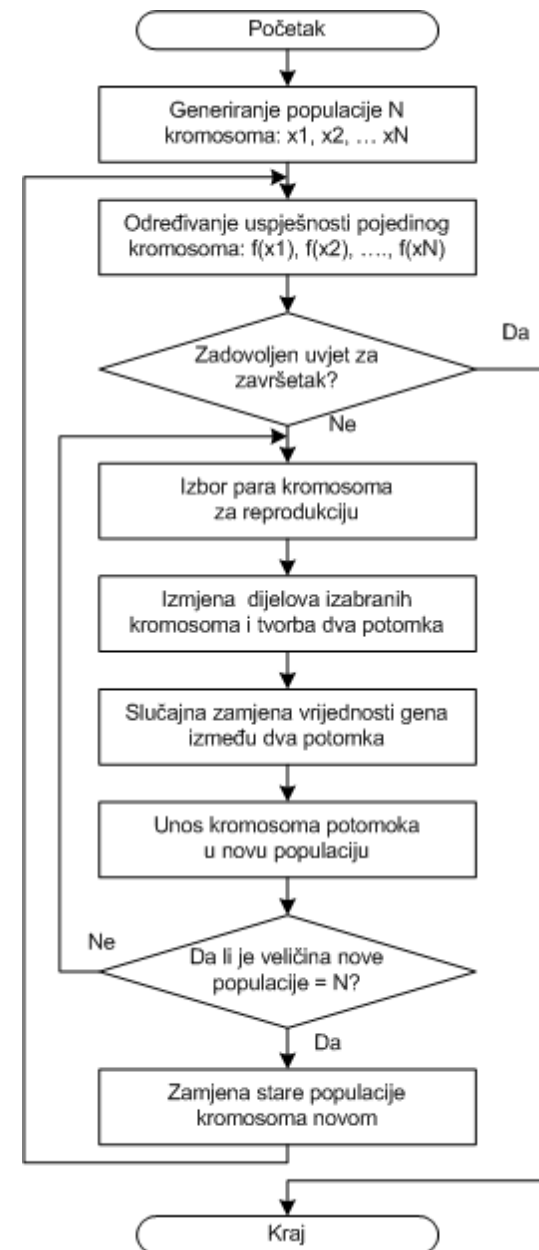


Gregurić, M., Koltovska Nečoska, D., **Ivanjko, E.**, Application of Q-Learning to Ramp Metering in Cases of Significant Changes in Traffic Demand, Autonomic Road Transport Support systems: Early Career Researcher Conference, University of Malta, La Valletta, Malta 27 - 28 May 2015

Performance Measures	Control Method		
	No ramp metering	Q learning	
		First type	Second type
Average Mainstream Travel Time (s)	61.9	58.2	57.4
Average On-ramp Travel Time (s)	97.4	182.9	100.4
Average downstream Speed (km/h)	82.1	87.3	88.5
Average on-ramp Speed (km/h)	30.0	16	29.1
Average Speed of the whole highway (km/h)	70.19	61.56	73.61
Total Delay (h)	60.01	88.07	50.76
Total Travel Time (h)	200.84	228.88	191.81

- Genetski algoritam je postupak stohastičkog/evolucijskog pretraživanja prostora zasnovan na izboru najboljih kandidata u skupu rješenja
 - Konvergencija prema optimalnom rješenju nije garantirana
- Motivacija iz prirode -> Darwin-ova teorija evolucije
 - Prilagodbu organizama uzrokuju procesi križanja i mijenjanja gena u kromosomima
 - Radi ograničenosti prirodnih bogatstava preživljavaju samo najprilagodljiviji (selekcija)

- Za kôdiranje kromosoma (rješenja) koristi se binarni brojevni sustav
 - Genetski operatori „rađaju” nova rješenja
 - Mutacija, križanje, inverzija
 - Prilagodba problemu koji se rješava
 - Novo rješenje se testira na ispravnost zbog stohastičkog procesa
- Kvaliteta rješenje se testira funkcijom uspješnosti/dobrote
 - Ovisi o problemu koji se rješava
- Skup rješenja se održava konstantne veličine -> ostaju samo najbolja rješenja (elitizam)

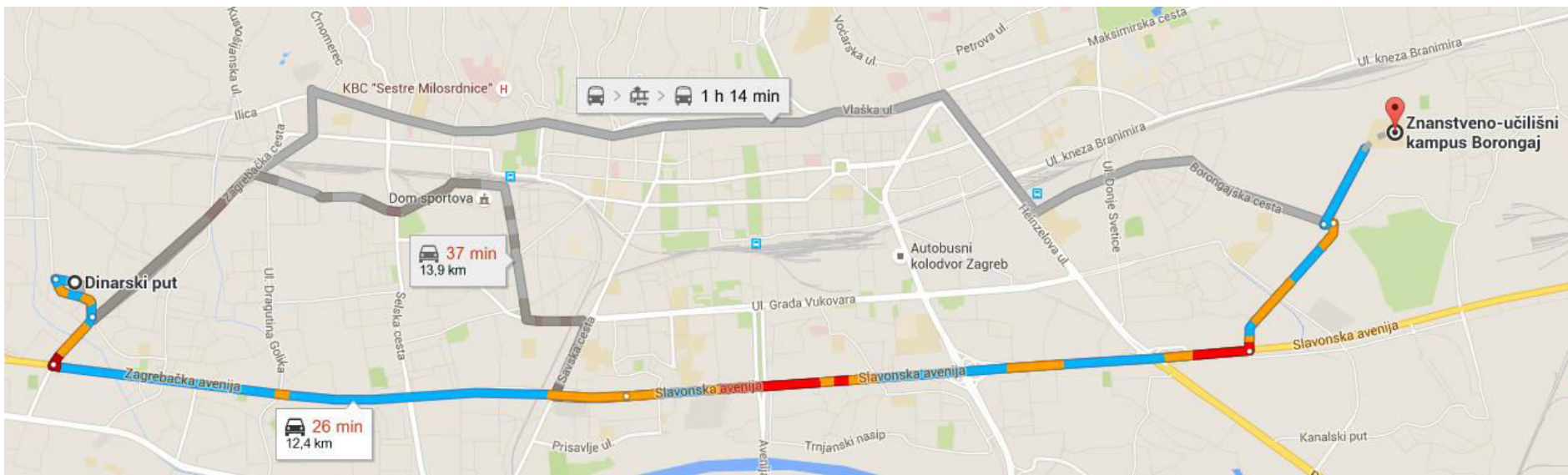


- Primjena za upravljanje više ulaznih rampama
 - Izvršava se u nadređenoj razini upravljanja
 - Pristup svim mjerenjima upravljanog dijela autoceste
 - Kromosomom se kôdiraju postavke lokalne rampe
 - Količina vozila koja se propušta na autocestu
 - Najveća duljina kolone vozila na ulaznoj rampi
 - Ulazna rampa glavna ili spremnik vozila zbog zagušenja
 - Funkcija uspješnosti
 - Vrijeme putovanja odnosno brzina glavnog toka
 - Ukupno vrijeme putovanja vozila (TTS)

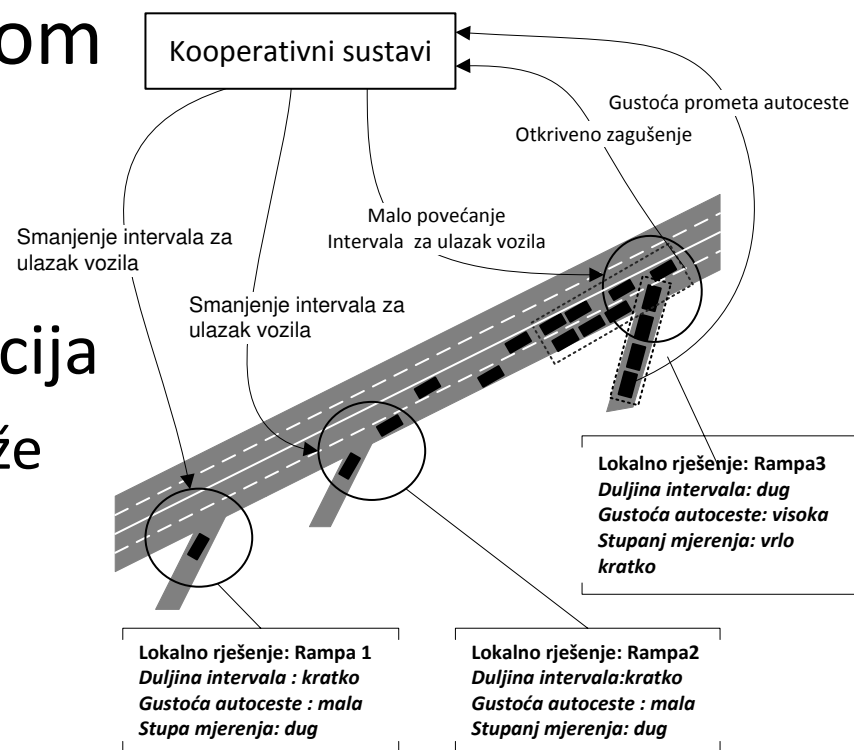
- Primjena za optimizaciju putovanja (ruta vozila)
 - Kromosom se kôdira redosljedom oznaka mjesta/prometnice kroz koje vozilo prolazi i mod transporta

Start	4	9	6	2	Cilj
-------	---	---	---	---	------

- Funkcija uspješnosti
 - Najkraća, najbrža, najsigurnija ili najjeftinija ruta
 - Energetski optimalna ruta (električna vozila)



- Pojedini dijelovi sustava izmjenjuju podatke
 - Komunikacija u stvarnom vremenu
- Cilj postignuti optimum za sve sudionike
- Nadređena razina upravljanja određuje način upravljanja lokalnom rampom
 - Kooperacija između rampi
 - Hijerarhijsko upravljanje
 - Korištenje dodatnih informacija
 - Stanje lokalne prometne mreže
 - Nadolazeći promet
 - Povijesni prometni podaci



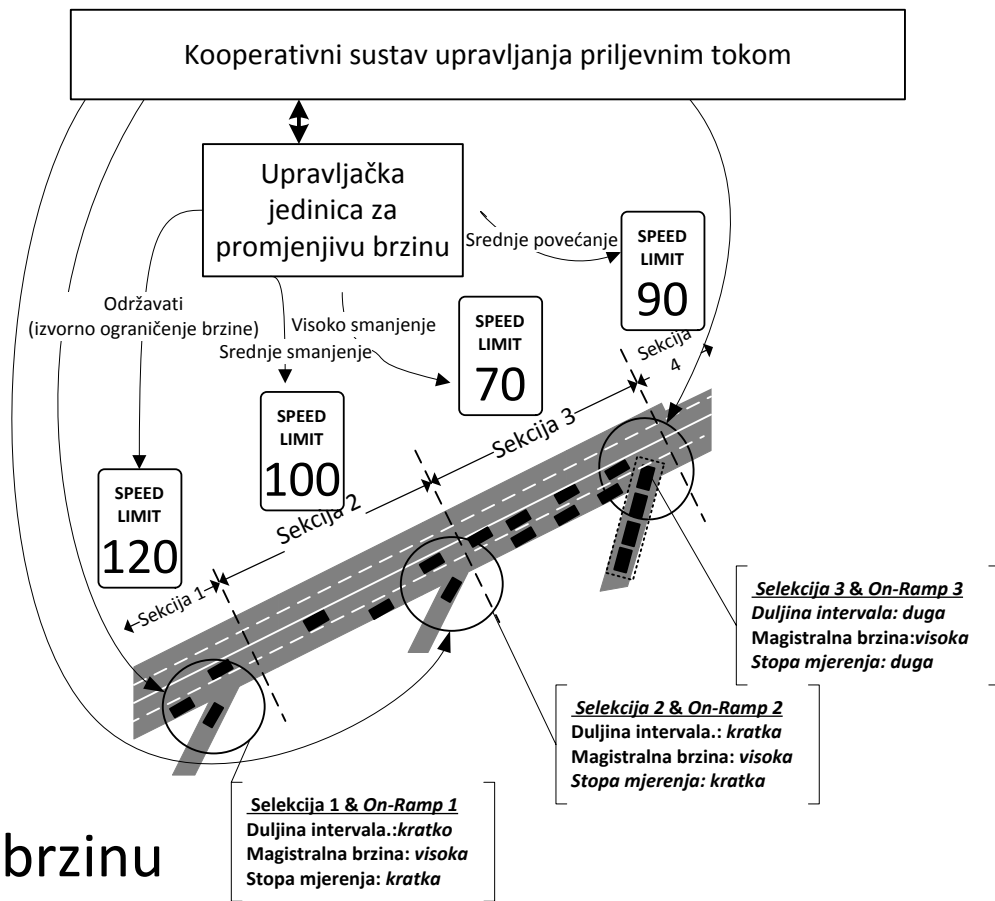
- Smanjenje brzine vozila smanjuje potreban sigurnosni razmak između vozila

- Povećanje gustoće
- Povećanje propusnosti

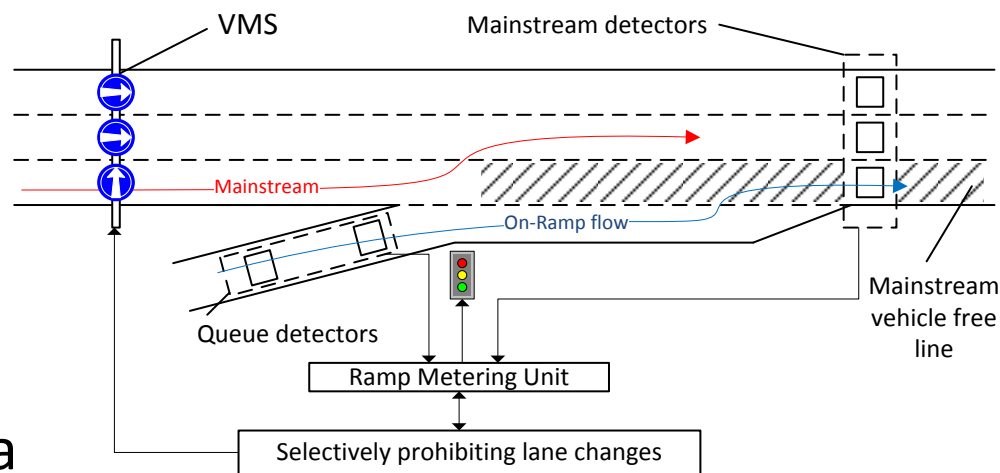
- Uz ulaznim rampama upravlja se i ograničenjem brzine

- Jednako za sve trake
- Svaka traka zasebno

- Desna traka ima manju brzinu
- Vozači prelaze u lijevu traku automatski



- Desna traka autoceste najsporija i s najviše vozila
 - Problem veće gustoće vozila desne trake za ulazak vozila s priljevne rampe
- Lijeve trake autoceste s manje vozila i većom brzinom
 - Neiskorišteni kapacitet
 - Prebacivanje vozila u lijevu traku
 - Olakšava se ulazak vozila
 - Nema pada razine uslužnosti zbog korištenja neiskorištenog kapaciteta lijevih traka
 - Sustav aktivan ovisno o količini vozila na priljevnoj rampi



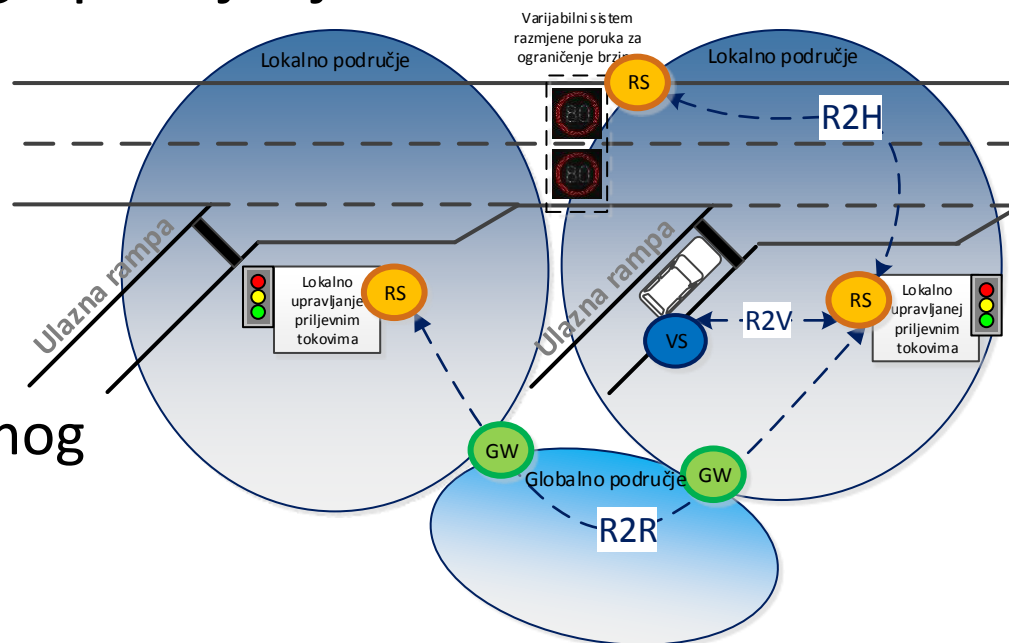
- Plan razvoja cestovnih vozila predviđa ugradnju upravljačkih jedinica više razine u vozilo

- Trenutno aktualan eCall sustav

- Automatski poziv žurnim službama
- Praćenje položaja vozila GNSS sustavom

- Mogućnost daljinskog upravljanja vozilom

- Smanjenje brzine
- Kretanje na rampi
- Koordinacija ulaska vozila u glavni tok
- Dodatna zadaća lokalnog upravljanja rampom



- Svi navedeni dodatni sustavi dio jednog većeg međusobno povezanog upravljačkog sustava
 - Nadređena kooperativna upravljačka jedinica čini poveznicu

