

# VIŠEKRITERIJUMSKO RANGIRANJE KONSTRUKCIJSKO-KONCEPCIJSKIH REŠENJA AUTOBUSA U CILJU STVARANJA ODRŽIVOG JMTP-A U BEOGRADU

**Ivan Ivković, dipl. inž.,**  
**Saobraćajni fakultet, Beograd**

**Snežana Kaplanović, dipl. ekon.**  
**Saobraćajni fakultet, Beograd**

**Prof. dr Srećko Žeželj, dipl. inž.**  
**Saobraćajni fakultet, Beograd**

*U radu je izvršena višekriterijumska analiza moguće primene različitih konstrukcijsko-koncepcijskih rešenja autobusa u sistemu javnog masovnog transporta putnika koja se u većoj ili manjoj meri poslednjih dvadeset godina koriste u svetu. Izbor najpovoljnije alternative za uslove u Beogradu sproveden je metodom TOPSIS na osnovu 11 definisanih kriterijuma. Težina odgovarajućih kriterijuma utvrđena je Delfi postupkom.*

*Ključne reči: autobus, kriterijumi rangiranja, višekriterijumsko rangiranje*

## UVOD

Javni masovni transport putnika predstavlja jedan od najznačajnijih i najsloženijih tehničko-tehnoloških i organizacionih podсистема gradske sredine. U Beogradu mreža linija JMTP-a je veoma razgranata a sačinjavaju je autobuski, trolejbuski, tramvajski i podсистemi prigradske železnice. Od svih navedenih vidova autobuski resursi na 331 liniji (64 u gradskom i 267 u prigradskom sektoru) prevezu oko 80% svih prevezenih putnika dnevno i ostvare dnevni transportni rad od oko 9 miliona putkm. Veliki značaj autobusa u sistemu transporta putnika ogleda se i u transportnoj ponudi koja po danu iznosi oko 27 miliona mestakm. Navedeni podaci jasno ukazuju da se prilikom planiranja dugoročnog razvoja JMTP-a mora voditi računa o problemima funkcionisanja i daljeg razvoja postojećih kapaciteta koji su prvenstveno zasnovani na autobuskom prevozu putnika.

Strategije razvoja javnog transporta putnika (i okviru njega autobuskog podсистема) a u cilju stvaranja održivog JMTP-a su veoma brojne i najčešće se odnose na: poboljšanje efikasnosti

postojećih vozničkih jedinica, primenu novih tehnoloških rešenja, korišćenje alternativnih goriva, promene i poboljšanja u regulisanju konvencionalnih saobraćajnih tokova, primena inteligentnih transportnih sistema, edukaciju vozača itd /2/, /9/.

U okviru ovog rada sagledava se i analizira mogućnost razvoja JMTP-a u Beogradu sa aspekta osavremenjavanja i obnove autobuskog podсистема primenom novih konstrukcijsko-koncepcijskih rešenja autobusa (u odnosu na primenu novih alternativnih goriva). Analiza pogodnosti pojedinih alternativnih varijanti vrši se na osnovu jedanaest kriterijuma koji se mogu svrstati u četiri osnovne grupe: tehnološke, transportne, sociološke i ekonomske.

## KONSTRUKCIJSKO-KONCEPCIJSKA REŠENJA AUTOBUSA

Primena novih koncepcijskih rešenja autobusa u sistemu javnog prevoza putnika iziskuje između ostalog i korišćenje novih, alternativnih goriva. Upotreba bilo kog alternativnog energenta kao pogonskog, uslovljava pored primene pogonskog agregata prilagođenog korišćenju novog energenta i primenu odgovarajuće instalacije koja može u manjoj ili većoj meri da utiče na koncepciju gradnje kompletnog vozila. Broj elemenata nove

instalacije i njihova funkcionalna svojstva zavise u najvećoj meri od tipa motora i načina skladištenja energenta u sklopu autobusa, što takođe u većoj ili manjoj meri može da utiče na konstrukcione karakteristike vozila.

U ovom radu su predstavljena pojedina alternativna rešenja autobusa koja se u svetu već koriste za transport putnika i koja imaju potencijala da u narednom periodu postanu u našim uslovima osnovna rešenja a to su: autobus sa pogonom na biodizel, autobus sa pogonom na prirodni gas (CNG), autobus sa pogonom na tečni naftni gas (LPG), autobus sa pogonom na etanol, autobus sa pogonom na metanol, autobus sa elektro pogonom, autobus sa hibridnim pogonom i autobus sa pogonom na gorive ćelije.

U daljem tekstu ove tačke rada naznačene su osnovne karakteristike ovih varijanti autobusa sa odgovarajućim prednostima i nedostacima dok se u narednim tačkama vrši analiza moguće primene navedenih rešenja prema kriterijumima koji za naše uslove imaju odgovarajuće težinske faktore.

#### **Autobus sa pogonom na klasično dizel gorivo (mineralni dizel)**

Konvencionalni dizel autobusi predstavljaju rešenje koje se ne samo u Beogradu već i u čitavoj Srbiji koristi za prevoz putnika u preko 99% slučajeva. Predstavljaju velike izvore zagađivača životne sredine u gradskim uslovima, pre svega čestičnog zagađenja (PM) i azotnih oksida ( $\text{NO}_x$ ). Danas posle poznatih energetske krize u svetu i zbog veoma štetne emisije izduvnih gasova autobusa sa dizel pogonskim agregatom, sve više se radi na iznalaženju novih tehnoloških rešenja koja će zasnivaju na primeni novog vida pogona (alternativna goriva), usavršavanju procesa sagorevanja, odnosno smanjenju emisije polutanata kroz:

- zastupljenost novih sistema napajanja dizel gorivom (common rail);
- upotrebom uređaja za tretman izduvnih gasova: trosmerni, oksidacioni, de  $\text{NO}_x$  katalitički konvertori; dizel čestični filter (DPF), recirkulacija izduvnih gasova (EGR), tehnologije SCRT (Selektive Catalytic Reduction Tap);
- primenu dizel goriva sa malom količinom sumpora ULSD ( $\text{S} < 50 \text{PPM}$ ).

#### **Autobus sa pogonom na biodizel**

Biodizel kao alternativno gorivo poznato je još od 1900 godine, kada su ga na izložbi u Parisu Rudolf Diesel i Henry Ford najavili kao gorivo budućnosti. Uprkos ranom interesu on do sada nije našao širu primenu za pogon autobusa pre svega zbog loše termičke (oksidacione) stabilnosti i promene viskoziteta. Za sada osnovni interes korišćenja biodizela u vozilima proizilazi iz činjenice da se dobija iz obnovljivih izvora što je u skladu sa preporukama Evropske unije u vezi sa udelom dizela iz obnovljivih izvora (5% do 2010. godine) u ukupnoj potrošnji dizel goriva. Pored toga osnovne prednosti biodizela kao pogonskog goriva autobusa su:

- nema opasnosti za primenu u motorima sa katalitičkim konvertorima zbog odsustva sumpora;
- sadrži oko 11% kiseonika, zbog čega daje manje emisije ugljenmonoksida (CO), ugljovodonika (HC), čestica (PM) i ugljendioksida ( $\text{CO}_2$ );
- predstavlja dobro mazivo za sistem ubrizgavanja;
- cetanski broj je približno isti ili veći u odnosu na mineralni dizel;
- bio razgradiv je.

#### **Autobus sa pogonom na prirodni gas (cng)**

Već više godina prirodni gas je prihvaćen u svetu kao jedno od najperspektivnijih alternativnih goriva za autobuse JGPP-a. Prednosti prirodnog gasa u odnosu na tečno gorivo su što se bolje meša sa vazduhom, potpunije sagoreva, ima relativno visoku toplotnu moć, sagoreva gotovo bez ostatka i ima nižu nabavnu cenu od tečnih goriva. Razlikuju se nekoliko osnovnih varijanti primene prirodnog gasa za pogon autobusa a to su:

**Gasni pogon:** Ovo konceptijsko rešenje podrazumeva primenu klasičnog dizel motora na autobusima, koji se uz određene prepravke može prilagoditi da radi isključivo na prirodni gas ili fabrički proizvedenog namenskog gasnog motora /4/. Prilikom prepravke motora, potrebno je obezbediti dopunski izvor plamena u komorama za sagorevanje, pošto je metan otporan na samopaljenje pod pritiskom zahvaljujući visokom oktanskom broju. To se postiže demontažom brizgaljki i pumpe visokog pritiska i ugradnjom na njihovo mesto, svećica za paljenje smeše i kompletne električne opreme za paljenje. Pored toga potrebno je

obezbediti sniženje stepena kompresije na 8 do 12 (zbog rasta stepena korisnosti i ipak mogućnosti pojave detonativnog sagorevanja pri punom opterećenju), što se postiže zahvatima na čelu klipa, čime se povećava zapremina prostora za sagorevanje. U opticaju su dva načina pripreme smeše za sagorevanje:

- priprema stehiometrijske smeše gasa i vazduha ( $\lambda=1$ );
- priprema siromašne smeše gasa i vazduha ( $\lambda>1$ ,  $\lambda=1,4-1,6$ )

**Gasno dizelni pogon:** Ovo konceptijsko rešenje podrazumeva upotrebu prirodnog gasa na dizel motoru autobusa, bez ikakvih intervencija na konstrukciji motora, a izvodi se na dva načina odnosno postoje dve mogućnosti regulacije motora:

- dvogorivi motor sa takozvanim "pilot" ubrizgavanjem dizel goriva. Prirodni gas i vazduh mešaju se na ulazu u motor, u potrebnoj razmeri, a zatim se pod uticajem razlike pritiska uvode u cilindre. Smeša se nakon toga sabija, temperatura raste, a u određenom momentu kroz brizgaljku se ubrizgava uvek ista mala količina dizel goriva, koja se pali sama od sebe, istovremeno paleći smešu gasa i vazduha u komori za sagorevanje. Ova količina dizel goriva naziva se inicijalna i iznosi najviše 10-15% od nominalne potrošnje u čistom dizelnom režimu. Kod "pilot" ubrizgavanja, na punom opterećenju dolazi do usisavanja znatne količine homogene smeše gasa i vazduha, pa veoma lako može doći do pojave samopaljenja (detonacije) sa svim njenim negativnim posledicama. Zbog toga visoki stepen kompresije dizel motora mora da se u izvesnim slučajevima smanji ili se mora smanjiti količina homogene smeše na punom opterećenju što nije povoljno zbog smanjenja snage motora;
- dvogorivi motor sa promenljivom količinom ubrizganog goriva (progresivno ubrizgavanje). Da bi se izbegla pojava detonativnog sagorevanja pri punom opterećenju kod prethodne varijante, umesto ubrizgavanja konstantne male količine dizel goriva vrši se progresivno povećavanje ubrizgavanja inicijalne doze sa povećanjem količine usisavane homogene smeše gasa i vazduha. Tada se na punom opterećenju smanjuje količina homogene smeše na oko 50% tako da se ona bitno osiromašuje onemogućavajući pojavu

detonacije čak iako je stepen sabijanja ostao isti kao i kod klasičnog dizel motora. time se zadržava potpuno isti motor, ali je regulacija i ubrizganog dizel goriva i doziranog prirodnog gasa nešto složenija, a supstitucija dizel goriva znatno manja nego u prethodnom slučaju.

### **Autobus sa pogonom na tečni naftni gas (LPG)**

Tečni naftni gas (LPG-Liquefied Petroleum Gas) predstavlja smešu propana  $C_3H_8$  i butana  $C_4H_{10}$ , koja je uskladištena na povišenom pritisku, tako da se obe, pri normalnim uslovima gasovite komponente, nalaze u tečnom stanju. LPG se dobija na dva načina: iz prirodnog gasa, u postupcima frakcionisanja sirovog prirodnog gasa, tokom kojih se izdvajaju etan, propan, butan i ostali gasovi. Drugi način dobijanja LPG-a je tokom postupaka primarne i sekundarne prerade nafte. LPG je sa ekološkog aspekta vrlo pogodno gorivo. S obzirom da lako obrazuje smešu sa vazduhom, LPG skoro potpuno sagoreva. Zato produkti nepotpunog sagorevanja (ugljenmonoksid CO, ugljovodonici HC, i čestice PM) slično kao i kod prirodnog gasa nastaju u zanemarivim količinama.

Razvijene zemlje već dugo sistematski rade na omasovljenju upotrebe LPG za pogon motornih vozila. U velikim gradovima, sa velikim intenzitetom saobraćaja, autobusi gradskog saobraćaja, kao i taksi vozila, masovno koriste LPG. Najdužu tradiciju u tom pogledu ima Austrija, gde u Beču skoro svi autobusi gradskog prevoza već 30 godina koriste LPG. Slično je i u ostalim evropskim državama, Japanu i SAD. Osim u javnom prevozu, posebnim poreskim olakšicama podstiče se i upotreba LPG-a i u putničkim vozilima.

### **Autobus sa pogonom na etanol**

Etanol ili etil alkohol,  $C_2H_5OH$ , je tečno gorivo koje se dobija preradom određenih biljnih produkata i stoga se svrstava u goriva dobijena iz biomase, odnosno iz obnovljivih izvora energije.

Čist etanol nije mnogo pogodan za upotrebu u dizel motorima, zbog niskog cetanskog broja, odnosno visoke temperature samopaljenja /7/. Pored toga, etanol stvara izvesne teškoće u procesu podmazivanja motora i elemenata sistema za ubrizgavanje goriva. Međutim, poslednjih godina razvijeni su odgovarajući aditivi za povećanje cetanskog broja, što je omogućilo primenu etanola i za pogon dizel motora. Prilikom prilagođavanja motora za

pogon na etanol najvažnije modifikacije baznog dizel motora odnose se na: povećanje stepena kompresije sa 18 na 24, povećanje kapaciteta pumpe visokog pritiska radi postizanja veće ubrizgane količine goriva (s obzirom da etanol ima nižu toplotnu moć u odnosu na dizel gorivo), promena brizgača i nova regulacija procesa ubrizgavanja.

Najnovije generacije gradskih autobusa sa pogonom na etanol i sa ugrađenim katalitičkim konventorom imaju nivo emisije regulisanih toksičnih komponenata u izduvnim gasovima, bliske ili nešto više od nivoa emisija najnovije generacije dizel motora sa ugrađenim katalizatom, filterom čestica i recirkulacijom izduvnih gasova. Sa druge strane emisija ugljendioksida i ozona, koji doprinosi nastanku fotohemijskog smoga, znatno je niža.

#### ***Autobus sa pogonom na metanol***

Metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) je tečno gorivo koje se najčešće dobija od prirodnog gasa, gde se u hemijskoj reakciji jedan atom vodonika zamenjuje hidroksidnom grupom. U transportnom sektoru koristi se obično smeša 85% metanola i 15% benzina. U ovakvom obliku uz odgovarajuću konverziju motora može se koristiti za pogon autobusa [1]. Najveći nedostatak ovog konceptijskog rešenja koji ograničava u ovom trenutku u svetu širu primenu ogleda se u maloj energetske efikasnosti pogonskog goriva ( $0,6\text{km/l}$ ) što je posledica niske toplotne vrednosti metanola ( $\text{MJ/kg}$ ).

#### ***Autobus sa elektro pogonom***

Autobus sa elektromotorom jednosmerne struje ima veoma povoljne pogonske karakteristike zbog jednostavne regulacije pogonskog momenta. Ključno pitanje pri eksploataciji ove kategorije autobusa je obnova izvora električne energije (baterija). U principu se rešava na dva načina: ponovnim punjenjem ispražnjenih baterija ili zamenom ispražnjenih baterija napunjenim. Obnova izvora električne energije još uvek je glavni nedostatak ove tehnologije. Osnovne prednosti ogledaju se u sledećem:

- nulta emisiji polutanata;
- korišćenje obnovljivog izvora energije;
- niži nivo buke i vibracija u toku vožnje;
- veća energetska efikasnost u start-stop vožnji;
- motor se ponaša kao rekuperator i dodatno dopunjava baterije prilikom kočenja i kretanja nizbrdo.

Osnovni nedostaci:

- visoka cena autobusa;
- smanjen radijus kretanja vozila;
- vreme punjenja tipičnih baterija iznosi od 6-8h;
- povećana ukupna masa vozila od 300-900kg;
- smestaj baterija zahteva dosta prostora.

#### ***Autobus sa hibridnim pogonom***

Hibridni pogon autobusa podrazumeva dva pogonska agregata koji koriste različite izvore energije. Autobusi osim konvencionalnog motora sa unutrašnjim sagorevanjem imaju najčešće elektro motor koji direktno služi za pokretanje pogonske osovine. Pri tome, motor SUS (benzinski, dizel, CNG, LPG) pogoni alternator koji napaja elektro-motor snage od 100-150kW. Višak električne energije skladišti se u akumulatorima, omogućavajući samostalno kretanje vozila na relaciji od 5-10km, a prilikom vožnje nizbrdo, kočenja i zaustavljanja motor dodatno dopunjuje baterije.

Osnovne prednosti predstavljene su:

- smanjenom potrošnjom tečnih goriva na račun primene najčešće električne energije;
- znatno sniženom nivou buke, dimnosti i toksičnosti izduvnih gasova;
- postoji mogućnost korišćenja samo električnog pogona pri polasku sa stanica kada su zagađenja i buka posebno intenzivni;
- veći radijus kretanja u odnosu na autobuse sa "čistim" elektro-pogonom.

Osnovni nedostaci ove tehnologije se u velikoj meri podudaraju sa nedostacima autobusa sa elektro-pogonom. Posebno se izdvajaju: povećana ukupna masa vozila što se odražava na vučno dinamičke karakteristike, povećani investicioni troškovi u odnosu na konvencionalna rešenja i dopune u vezi zahtevima za održavanjem budući da se primenjuju dva različita pogonska sistema.

#### ***Autobus sa pogonom na gorive ćelije***

Gorive ćelije su elektrohemijski uređaji za neposredno pretvaranje hemijske energije, sadržane u nekom hemijskom elementu ili spoju, u jednosmernu električnu struju. Kao gorivo najčešće se koristi vodonik smešten u rezervoarima u tečnom (rashlađivanjem na veoma nisku temperaturu  $-253^\circ\text{C}$ ) ili gasovitom stanju (sabijanjem na pritisak od 250bar-a).

Opciono uz prisustvo reformera vodonik se može osloboditi konverzijom iz ugljovodoničnog goriva kao što su metanol, prirodni gas ili druga ugljovodonična goriva. Primena vodonika kao pogonskog goriva autobusa još uvek nije masovna i pored velikog potencijala koji se ogleda pre svega u nultoj emisiji polutanata. Najveće teškoće javljaju se prilikom skladištenja vodonika ali i visoke cene energenta, nekompatibilnosti sa već postojećim rešenjima po pitanju vozila kao sistema i prateće infrastrukture za snabdevanje gorivom i održavanjem.

U svetu se za sada razvijaju demonstracioni programi sa ciljem prikupljanja podataka o troškovima funkcionisanja ovih autobusa, njihovih performansi, pouzdanosti i troškovima održavanja. Pod pokroviteljstvom EU i komisije za energetiku, 2003. godine pokrenut je projekat CUTE (Clean Urban Transport for Europe) u okviru koga su u devet evropskih gradova vršena ispitivanja eksploatacionih karakteristika autobusa sa pogonom na gorive ćelije u realnim gradskim uslovima. Takođe sa istim ciljem u Americi i Kanadi i Australiji pokrenuti su projekti CFCP (California Fuel Cell Partnership), NRC (National Resources Canada) i STEP (Sustainable Transport Energy for Perth) /5/.

## **KRITERIJUMI RANGIRANJA**

### **Emisija polutanata**

Pod ovim kriterijumom podrazumeva se količina štetnih izduvnih gasova oslobođena pri kretanju autobusa u gradskim eksploatacionim uslovima po jednom kilometru pređenog puta. Osnovu kriterijuma predstavljaju polutanti regulisani pravilnikom 99/96/EC (ugljenmonoksid CO, ugljovodonici HC, nemetanski ugljovodonici NMHC, metan CH<sub>4</sub>, azotni oksidi NO<sub>x</sub>, čestično zagađenje PM). Pored toga u obzir se uzimaju i gasovi staklene bašte pre svih ugljendioksid (CO<sub>2</sub>).

### **Emisija buke**

Buka u vozilu koja potiče od operativnih radnji prilikom kretanja vozila predstavlja značajan faktor opterećenja vozača i putnika. Ovaj kriterijum se odnosi na nivo zvučnog pritiska (SPL), ekvivalentni nivo zvučnog pritiska (Leq), vršne vrednosti (Leq<sub>max</sub> i Leq<sub>min</sub>) i nivo izlaganja zvuku (SEL).

### **Vučno dinamička svojstva**

Ovaj kriterijum se odnosi na performanse autobusa: moment i snaga na točku, maksimalna brzina kretanja, maksimalni uspon koje vozilo može da savlada kao i maksimalno ubrzanje.

### **Troškovi**

Ovim kriterijumom obuhvaćeni su i sagledavaju se troškovi nabavke već primenjenog rešenja i potencijalnog alternativnog rešenja (ili troškovi konvertovanja primenjenog-konvencionalnog rešenja u alternativno ukoliko postoji takva mogućnost), troškovi eksploatacije, troškovi održavanja i troškovi implementacije novog rešenja.

### **Tehnička pouzdanost**

Kriterijum se odnosi na verovatnoću da će autobus izvršiti transportni zadatak bez otkaza u projektovanom vremenu trajanja zadatka unutar specificiranih granica performansi, prema određenim uslovima eksploatacije.

### **Raspoloživost pogonskog goriva**

Kriterijum obuhvata nekoliko različitih faktora: postojanje odgovarajuće infrastrukture u postupku dopremanja pogonskog goriva do autobaze javnog prevoza i mogućnost njene izgradnje u bliskoj budućnosti ukoliko ne postoji, postojanje infrastrukture za skladištenje goriva u autobazi, mogućnost domaće proizvodnje ili potreba uvoza energenta iz inostranstva.

### **Energetska efikasnost**

Pod ovim kriterijumom podrazumeva se prevashodno energetska efikasnost pogonskog goriva, izražena preko pređenog puta po 1dm<sup>3</sup> tečnog goriva, 1m<sup>3</sup> gasovitog goriva ili kWh-u elektropogona. Ostali činioci energetske efikasnosti autobusa kao sistema: potrošnja maziva, potrošnja elemenata kočionog sistema, elemenata sistema za oslanjanje, sistema za prenos snage itd., obuhvaćeni su troškovima eksploatacije i održavanja.

### **Autonomija vozila**

Pod autonomijom autobusa podrazumeva se pređeni put sa jednim punjenjem rezervoara za gorivo. Uzima se u obzir raspoloživ i potreban prostor koji zahtevaju specifična rešenja rezervoara pojedinačnih konstrukcijsko konceptijskih rešenja autobusa prema zahtevanoj autonomiji.

### **Lako i brzo tankovanje**

Kriterijum se odnosi na potrebno vreme za snabdevanja autobusa pogonskim gorivom ili vreme potrebno za zamenu praznog rezervoara punim (metod agregatne zamene).

### **Bezbednost**

Pomoću ovog kriterijuma uzeti su u obzir: uticaj specifičnosti konstrukcije konceptijskog rešenja

autobusa na dinamičko ponašanje vozila pri kretanju (aktivna bezbednost) i različite vrste rizika (pojava vatre ili eksplozije, rizik po zdravlje ljudi u mikroprostoru, toksičnost po okolinu, pojava visokog pritiska u instalaciji itd.) koji su posledica isticanja ili direktnog izlaganja pogonskog goriva čoveku ili okolini (pasivna bezbednost).

### Komfor

Kriterijum obuhvata uticaj niskofrekventnih oscilacija sa učestanošću do 80Hz kojima su izloženi putnici u vozilu. Najvažniji uticaj na čoveka imaju vršne vrednosti ubrzanja, pravac delovanja, frekvencije i vreme izlaganja oscilacijama.

### UTVRĐIVANJE TEŽINE POJEDINIH KRITERIJUMA

U procesu višekriterijumskog vrednovanja određivanje težina pojedinih kriterijuma predstavlja najveći problem i najosetljivije mesto koje može presudno da utiče na konačne rezultate. Kvalitet višekriterijumske analize u najvećoj meri zavisi pored izbora same metode vrednovanja i od načina utvrđivanja težine pojedinačnih kriterijuma prema kojima se analiza sprovodi.

Određivanje težine kriterijuma u okviru ovog istraživanja svodi se na planiranje i predviđanje potreba javnog masovnog transporta putnika u budućnosti sa aspekta osavremenjavanja voznog parka tj. njegovog autobusnog podsistema.

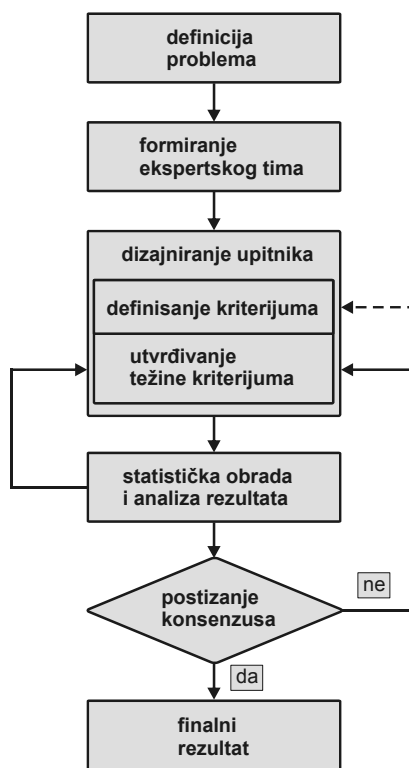
U oblasti saobraćaja i transporta jedna od najčešće primenjivanih vrsta tehnološkog predviđanja je Delfi metoda. Bazirana je na pretpostavci da je mnoštvo mišljenja (mišljenja eksperata) uvek bolje od mišljenja pojedinca i da je iterativni proces jedan od najpodesnijih načina procene činjenica koje mogu biti od značaja u budućnosti. Donekle heuristički karakter Delfi postupka (intuitivno-iskustvena razmatranja) doprinosi da tačnost ove metode nije idealna ali je veoma pragmatična zbog iznalaženja dovoljno kvalitetnog rešenja u kratkom vremenskom periodu.

Usled visokog stepena kompatibilnosti sa strateškim planiranjem u oblasti saobraćaja i transporta i zbog suštinskih prednosti koje se ogledaju kroz:

- kolektivan rad;
- zajednički napor usmeren ka rešavanju problema;

- sagledavanje događaja i tehnoloških promena u budućnosti;
- zbir informacija koje poseduje grupa prevazilazi broj i kvalitet informacije pojedinca;
- radom u grupi povećava se broj relevantnih faktora i raznih aspekata neke istraživane pojave ili događaja;
- pristup sagledavanja prošlosti i sadašnjosti u cilju razvoja rešenja u narednom periodu.

Za utvrđivanje težinskih faktora kriterijuma korišćena je upravo Delfi metoda. Procesni dijagram prikazan je na slici 1.



Slika 1: Postupak određivanja težinskih faktora pojedinačnih kriterijuma

Formiranje ekspertskega tima je prvi korak u sprovođenju metodologije određivanja težinskih faktora pojedinačnih kriterijuma. Pod ekspertom se podrazumeva osoba koja u svojoj oblasti (tj. oblasti istraživanja) raspolaže većinom osvojenih znanja i značajnim iskustvom u praksi. U okviru ovog istraživanja formiran je tim od 98 eksperata podeljenih u tri grupe. Prvu grupu sačinjavali su inženjeri i tehničari "IKARBUS"-a koji su direktno ili indirektno vezani za proces projektovanja i proizvodnje autobusa. U drugoj grupi nalazili su se inženjeri i tehničari koji su se bavili direktno ili indirektno eksploatacijom i održavanjem autobusa u transportnim preduzećima "GSP" i "LASTA".

Formiranjem ove grupe težilo se približavanju naučne i praktične misli što je jedan od osnovnih zadataka Delfi postupka. Treća grupa formirana je od stručnjaka sa fakulteta i instituta (Saobraćajni fakultet; Mašinski fakultet) koji se profesionalno bave projektovanjem, proizvodnjom eksploatacijom i održavanjem transportnih sredstava.

Za svaki kriterijum odnosno oblast koju reprezentuju formirana su pitanja koja mogu da je adekvatno okarakterišu. Ekspertima je data mogućnost da za svaku ocenjivanu oblast (kriterijum) daju dodatnu opisnu ocenu i zapažanje ali i da predlože nove kriterijume.

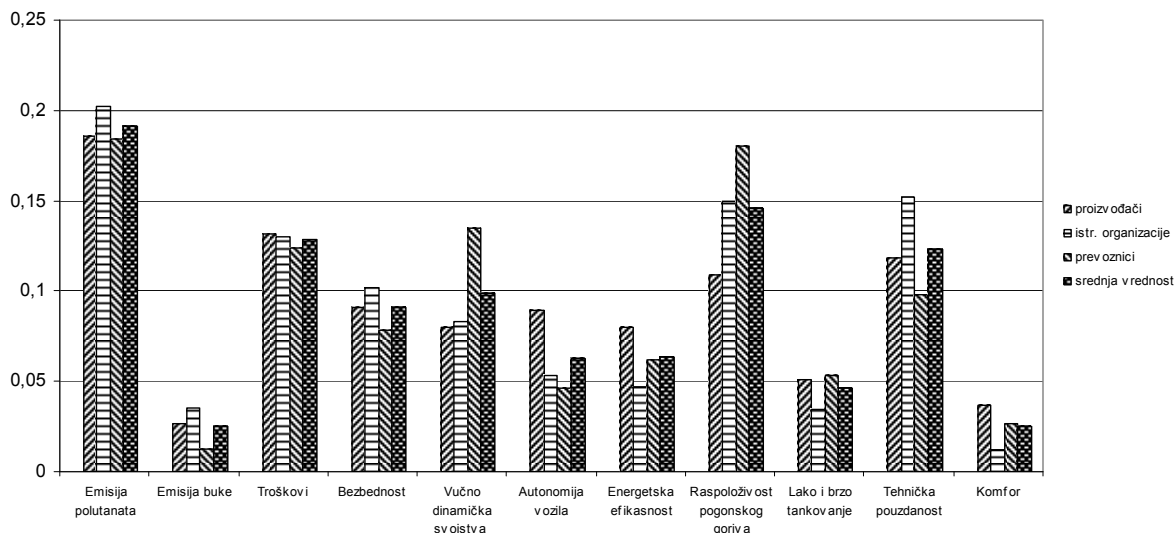
Utvrđivanje kriterijuma i njihovih težinskih faktora izvršeno je u četiri kruga. U prvom krugu postavljene su četiri inicijalne oblasti prema

kojima se vrši rangiranje alternativa: emisija polutanata, bezbednost, raspoloživost i ekonomski aspekt primene. Posle svake iteracije podaci su statistički obrađivani. Rezultati obrade dostavljeni su svim učesnicima u ispitivanju pred svaki novi krug. Konsenzus je postignut nakon tri iteracije odnosno posle četiri kruga konsultovanja eksperata. Finalni rezultat se ogleda kroz definisanje 11 kriterijuma sa svojim težinskim faktorima prikazanih u tabeli 1 i dijagramu 1. Zbog obimnosti rezultata ispitivanja u ovom radu su prikazani samo finalni rezultati.

Nakon utvrđivanja težinskih faktora pojedinačnih kriterijuma pristupa se postupku višekriterijumskog vrednovanja alternativnih varijanti autobusa.

| Kriterijum                     | Proizvođači | Istr. organizacije | Prevoznici | Srednja vrednost |
|--------------------------------|-------------|--------------------|------------|------------------|
| Emisija polutanata             | 0,18580     | 0,20250            | 0,18420    | 0,19090          |
| Emisija buke                   | 0,02690     | 0,03500            | 0,01230    | 0,02486          |
| Troškovi                       | 0,13180     | 0,13000            | 0,12360    | 0,12852          |
| Bezbednost                     | 0,09120     | 0,10200            | 0,07810    | 0,09056          |
| Vučno dinamička svojstva       | 0,07960     | 0,08290            | 0,13480    | 0,09874          |
| Autonomija vozila              | 0,08910     | 0,05320            | 0,04610    | 0,06297          |
| Energetska efikasnost          | 0,08030     | 0,04700            | 0,06230    | 0,06321          |
| Raspoloživost pogonskog goriva | 0,10890     | 0,14970            | 0,18010    | 0,14589          |
| Lako i brzo tankovanje         | 0,05070     | 0,03430            | 0,05360    | 0,04612          |
| Tehnička pouzdanost            | 0,11850     | 0,15200            | 0,09820    | 0,12315          |
| Komfor                         | 0,03720     | 0,01140            | 0,02670    | 0,02508          |

Tabela 1: Težinski faktori pojedinačnih kriterijuma rangiranja



Dijagram 1: Težinski faktori pojedinačnih kriterijuma rangiranja

## RANGIRANJE I IZBOR KONSTRUKCIJSKO-KONCEPCIJSKOG REŠENJA AUTOBUSA

Izbor optimalne alternative koncepcijskog rešenja autobusa na osnovu prethodno definisanih i težinski kategorizovanih kriterijuma vrši se pomoću metode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). Metoda se zasniva na istovremenom merenju varijante od tzv. pozitivnog idealnog i negativnog idealnog rešenja, tj. na merenju relativnog rastojanja razmatrane varijante od idealnog rešenja /8/.

Eliminacija dimenzija u kojima se izražavaju vrednosti varijanti (alternativa) po pojedinim kriterijuma vrši se pomoću formule:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{11} x_{ij}^2}}$$

Bezdimenzionalni elemnti  $r_{ij}$ , normalizovane matrice R dati su tabeli 2.

Težinska normalizacija se vrši množenjem svake kolone matrice R odgovarajućom težinom kriterijuma iz tabele 1. Na ovaj način dobijaju se težinski normalizovani elementi matrice V (tabela 3).

| Koncepc. rešenje   | Emisija polutanata | Buka   | Vučne karakter. | Troškovi | Pouzdanost | Raspoloživost | Energ. efikasnost | Auto-nomija | tankovanje | bezbednost | komfor |
|--------------------|--------------------|--------|-----------------|----------|------------|---------------|-------------------|-------------|------------|------------|--------|
| Dizel              | 0,4813             | 0,2324 | 0,3625          | 0,1072   | 0,3461     | 0,4363        | 0,2974            | 0,4017      | 0,1925     | 0,3226     | 0,2480 |
| Biodizel           | 0,4251             | 0,2324 | 0,3625          | 0,1233   | 0,3115     | 0,3927        | 0,2914            | 0,3749      | 0,1925     | 0,3226     | 0,2480 |
| CNG, stehio.       | 0,2185             | 0,3099 | 0,2900          | 0,1715   | 0,3115     | 0,3927        | 0,2528            | 0,3213      | 0,1925     | 0,3065     | 0,2967 |
| CNG, $\lambda > 1$ | 0,2740             | 0,3099 | 0,2900          | 0,1715   | 0,3115     | 0,3927        | 0,2528            | 0,3213      | 0,1925     | 0,3065     | 0,2967 |
| Gasno dizelni      | 0,4446             | 0,2905 | 0,2900          | 0,1286   | 0,3011     | 0,3927        | 0,2439            | 0,2945      | 0,1925     | 0,3065     | 0,2878 |
| LPG                | 0,2612             | 0,2905 | 0,2900          | 0,1822   | 0,3046     | 0,3927        | 0,2320            | 0,3838      | 0,1925     | 0,3065     | 0,2967 |
| Etanol             | 0,2883             | 0,3176 | 0,3262          | 0,2144   | 0,2423     | 0,1309        | 0,1844            | 0,2231      | 0,1925     | 0,2903     | 0,3099 |
| Metanol            | 0,2611             | 0,3215 | 0,3262          | 0,2144   | 0,2423     | 0,1309        | 0,1725            | 0,1964      | 0,1925     | 0,2903     | 0,3099 |
| Elektropogon       | 0,0719             | 0,3873 | 0,2356          | 0,5360   | 0,3288     | 0,0436        | 0,4461            | 0,1607      | 0,5774     | 0,3065     | 0,3542 |
| Hibridni           | 0,1955             | 0,2711 | 0,2537          | 0,2680   | 0,3219     | 0,0436        | 0,3866            | 0,2678      | 0,5774     | 0,3226     | 0,3454 |
| Gorive ćelije      | 0,0647             | 0,3215 | 0,2610          | 0,6432   | 0,2769     | 0,0218        | 0,4163            | 0,2678      | 0,1925     | 0,2226     | 0,3055 |

Tabela 2: Normalizovana matrica R, bezdimenzionalni elementi  $r_{ij}$

| Koncepc. rešenje   | Emisija polutanata | Buka   | Vučne karakter. | Troškovi | Pouzdanost | Raspoloživost | Energ. efikasnost | Auto-nomija | tankovanje | bezbednost | komfor |
|--------------------|--------------------|--------|-----------------|----------|------------|---------------|-------------------|-------------|------------|------------|--------|
| Dizel              | 0,0919             | 0,0058 | 0,0358          | 0,0138   | 0,0426     | 0,0637        | 0,0188            | 0,0253      | 0,0089     | 0,0292     | 0,0062 |
| Biodizel           | 0,0812             | 0,0058 | 0,0358          | 0,0158   | 0,0384     | 0,0573        | 0,0184            | 0,0236      | 0,0089     | 0,0292     | 0,0062 |
| CNG, stehio.       | 0,0417             | 0,0077 | 0,0286          | 0,0220   | 0,0384     | 0,0573        | 0,0160            | 0,0202      | 0,0089     | 0,0278     | 0,0074 |
| CNG, $\lambda > 1$ | 0,0523             | 0,0077 | 0,0286          | 0,0220   | 0,0384     | 0,0573        | 0,0160            | 0,0202      | 0,0089     | 0,0278     | 0,0074 |
| Gasno dizelni      | 0,0849             | 0,0072 | 0,0286          | 0,0165   | 0,0371     | 0,0573        | 0,0154            | 0,0185      | 0,0089     | 0,0278     | 0,0072 |
| LPG                | 0,0499             | 0,0072 | 0,0286          | 0,0234   | 0,0375     | 0,0573        | 0,0147            | 0,0242      | 0,0089     | 0,0278     | 0,0074 |
| Etanol             | 0,0550             | 0,0079 | 0,0322          | 0,0276   | 0,0298     | 0,0191        | 0,0117            | 0,0141      | 0,0089     | 0,0263     | 0,0078 |
| Metanol            | 0,0498             | 0,0080 | 0,0322          | 0,0276   | 0,0298     | 0,0191        | 0,0109            | 0,0124      | 0,0089     | 0,0263     | 0,0078 |
| Elektropogon       | 0,0137             | 0,0096 | 0,0233          | 0,0689   | 0,0405     | 0,0064        | 0,0282            | 0,0101      | 0,0266     | 0,0278     | 0,0089 |
| Hibridni           | 0,0373             | 0,0067 | 0,0251          | 0,0344   | 0,0396     | 0,0064        | 0,0244            | 0,0169      | 0,0266     | 0,0292     | 0,0087 |
| Gorive ćelije      | 0,0123             | 0,0080 | 0,0258          | 0,0827   | 0,0341     | 0,0032        | 0,0263            | 0,0169      | 0,0089     | 0,0202     | 0,0077 |

Tabela 3: Težinski normalizovana matrica V, bezdimenzionalni elementi  $r_{ij}$

Nakon izračunavanja elemenata matrice V određuje se idealno  $Y^*$  i negativno idealno rešenje  $Y^-$  prema formulama (rezultati dati u tabeli 4):

$$Y^* = \left[ (\max V_{ij} \mid j \in J), (\min V_{ij} \mid j \in J') \right] = (V_1^*, V_2^*, \dots, V_{11}^*)$$

$$Y^- = \left[ (\min V_{ij} \mid j \in J), (\max V_{ij} \mid j \in J') \right] = (V_1^-, V_2^-, \dots, V_{11}^-)$$

pri čemu je:

$i = (1, 2, \dots, 11)$ , broj koncepcijskih rešenja autobusa,

$j = (1, 2, \dots, 11)$ , broj kriterijuma,

$J = (1, 2, \dots, 11)$ , j koje odgovara kriterijumu "koristi",

$J' = (1, 2, \dots, 11)$ , j koje odgovara kriterijumu "troškova".

| Koncepc. rešenje | Emisija polutanata | Buka   | Vučne karakter. | Troškovi | Pouzdanost | Raspoloživost | Energ. efikasnost | Auto-nomija | tankovanje | bezbednost | komfor |
|------------------|--------------------|--------|-----------------|----------|------------|---------------|-------------------|-------------|------------|------------|--------|
| $Y^*$            | 0,0123             | 0,0096 | 0,0358          | 0,0138   | 0,0426     | 0,0637        | 0,0282            | 0,0253      | 0,0089     | 0,0292     | 0,0089 |
| $Y^-$            | 0,0919             | 0,0058 | 0,0233          | 0,0827   | 0,0298     | 0,0032        | 0,0109            | 0,0101      | 0,0266     | 0,0202     | 0,0062 |

Tabela 4: Idealna i negativna idealna rešenja



Rastojanje pojedine varijante od idealnog i negativnog idealnog rešenja definiše se kao:

$$Q_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{11} (v_{ij} - v_j^+)^2}$$

$$Q_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{11} (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

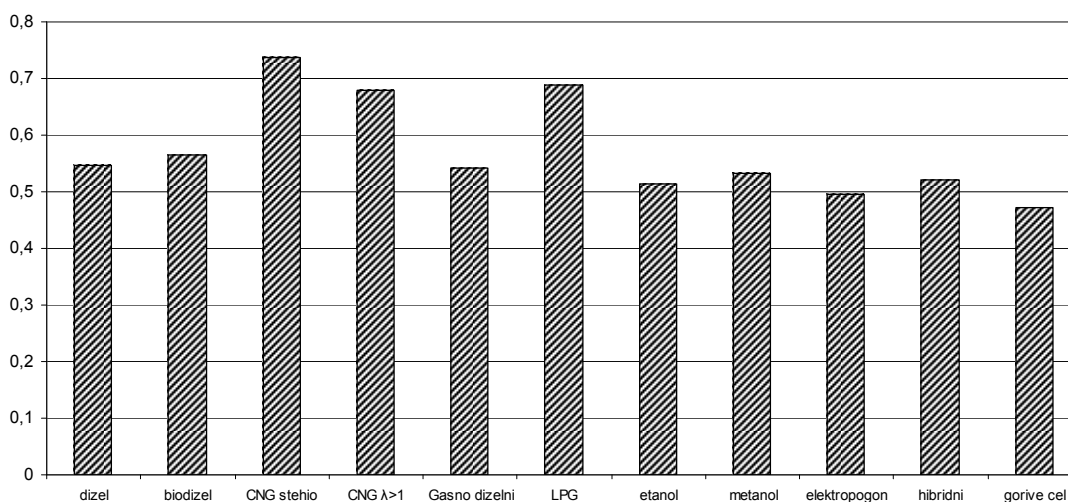
Rezultati proračuna dati su tabeli 5.

Relativna bliskost između varijante i idealnog rešenja date su u tabeli 5 i dijagramu 2, a dobijaju se prema formuli:

$$C_i^* = \frac{Q_i^-}{(Q_i^+ + Q_i^-)}$$

| Koncepc. rešenje   | $Q^+$  | $Q^-$  | $C^*$  |
|--------------------|--------|--------|--------|
| Dizel              | 0,0802 | 0,0970 | 0,5474 |
| Biodizel           | 0,0701 | 0,0915 | 0,5661 |
| CNG, stehio.       | 0,0350 | 0,0986 | 0,7382 |
| CNG, $\lambda > 1$ | 0,0443 | 0,0937 | 0,6792 |
| Gasno dizelni      | 0,0749 | 0,0889 | 0,5426 |
| LPG                | 0,0426 | 0,0942 | 0,6887 |
| Etanol             | 0,0677 | 0,0714 | 0,5133 |
| Metanol            | 0,0651 | 0,0742 | 0,5327 |
| Elektropogon       | 0,0838 | 0,0825 | 0,4959 |
| Hibridni           | 0,0698 | 0,0757 | 0,5204 |
| Gorive ćelije      | 0,0935 | 0,0834 | 0,4715 |

Tabela 5: Relativna bliskost između varijante i idealnog rešenja



Dijagram 2: Relativna bliskost varijanti i idealnog rešenja

## ANALIZA REZULTATA I ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Za utvrđivanje težinskih faktora kriterijuma prema kojima se vrši višekriterijumsko rangiranje korišćena je "DELFI" metoda kao poseban i u svetu priznat vid pronalaženja relevantnog rešenja datog problema, sumiranjem mišljenja eksperata na zadatu temu. Dobijeni prikazani rezultati ukazuju da u našim uslovima, a u cilju stvaranja održivog JMTP-a, najveći značaj na izbor moguće varijante jedinice autobusnog podsistema imaju: emisija štetnih izduvnih gasova, raspoloživost pogonskog goriva, ekonomski faktori i tehnička pouzdanost.

Višekriterijumska analiza sprovedena u radu ukazuje da se prema definisanim kriterijuma iz

grupe alternativnih rešenja kao najbolja izdvajaju autobusi sa pogonom na komprimovani prirodni gas i tečni naftni gas. Ovome doprinosi najviše veoma niska emisija izduvnih gasova pomenutih rešenja u odnosu na autobuse sa pogonom na dizel gorivo, i to ugljenmonoksida i čestičnog zagađenja kao glavnog nosioca kancerogenih materija.

Biodizel kao zamena za dizel gorivo je pogodan za pogon autobusa isključivo zbog svoje obnovljivosti i biorazgradivosti.. Po svim drugim kriterijumima autobus sa pogonom na biodizel ima slične karakteristike kao i autobus sa konvencionalnim pogonom što se u procesu rangiranja i dokazalo.

Prema rangu prikazanom u tabeli 5 i dijagramu 2, rešenja autobusa sa pogonom na metanol i etanol zauzimaju sedmu i osmu poziciju. Osnovni uzroci ovakvog stanja su nepovoljnosti

sa aspekta raspoloživosti energenata, njihova mala energgetska efikasnost i nedostaci u vezi sa emisijom pojedinih polutanata u odnosu na druga rešenja.

Autobusi sa hibridnim, elktropogonom i pogonom na gorive ćelije svakako da imaju perspektivu da budu osnovni vozne jedinice autobuskog podsistema JMTP-a u Beogradu ali ipak ne u vremenskom periodu prema kojem su vršena istraživanja u ovom radu. Prevelika cena proizvodnje goriva, problemi pri skladištenju energenta, nizak stepen raspoloživosti uopšte same tehnologije, ograničena vučna dinamička svojstva vozila, povećano vreme za snabdevanje gorivom, čine da izuzetno povoljne karakteristike po pitanju štetne emisije ne mogu da utiču presudno odnosno ne u tolikoj meri da bi ova rešenja autobusa bila primenljiva u sistemu JMTP-a.

Uzimajući u obzir prethodno navedeno nameće se kao zaključak da je uvođenje vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas u autobuski podsistema JMTP-a u Beogradu, rešenje koje u odnosu na sve druge konstrukcijsko-koncepcijske varijante autobusa razmatranih u ovom radu nudi najbolji mogući balans vrednosti pojedinačnih kriterijuma vrednovanja.

## LITERATURA

- /1/ J. Sigall: "Analysis of Alternative Fuel Technologies for New York City Transit Buses", New York City Transit Riders Council, February 2000.
- /2/ G. Krzywkowska: "Sustainable Transport-A Survey of Public Transport in Six Cities of Central and Eastern Europe", Szentendre, Hungary, September, 2004.
- /3/ T. Litman: "Developing Indicators for Comprehensive and Sustainable Transport Planning", Victoria Transport Policy Institute, Canada, June 2005.

- /4/ S. Glumac, S. Žeželj idr.: "Projektovanje, proizvodnja i eksploatacija autobusa" IKARBUS AD, 2002., Beograd
- /5/ L. Fulton: " Sustainable Transport: New Insights from the IEA's Worldwide Transit Study", Marrakesh, Nov., 2002.
- /6/ P. Gramm, P. Sarbanes: "Use of Alternative Fuels in Transit Buses", United States General Accounting Office, Dec., 1999.
- /7/ K. Treanton: " Special Issue Paper 8, Net Calorific Values" IEA, Paris, Nov., 2003.
- /8/ S. Opricovic, G. H. Tzeng: "Compromise solution by MCDM methods:A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS", European Journal of Operational Research 156 (2004) 445–455.
- /9/ E. Deakin: "Sustainable Development and Sustainable Transportation: Strategies for Economic Prosperity, Environmental Quality, and Equity", University of California at Berkeley Institute of Urban and Regional Development, 2001-2003.

## **MULTIPLE ATTRIBUTE DECISION MAKING OF CONSTRUCTIONAL CONCEPT BUS SOLUTIONS FOR ACHIEVING SUSTAINABLE MASS PUBLIC TRANSPORTATION IN BELGRADE**

*The purpose of this paper is to present multi-criteria analysis of possible applications of different constructional concept solutions for buses in mass public transportation systems, which has been in use for around twenty years worldwide. The most acceptable alternative for prevailing conditions in Belgrade was chosen by employing the TOPSIS method based on 11 defined criteria. The Delphi procedure is applied to determine the weight of appropriate criteria.*

**Key words:** bus, ranking criteria, multiple criteria ranking