Стручни критички осврт

Александар М. Чупић, *Пројектовање транспортних мрежа применом еволуционог рачунарства: мрежа за пренос експрес поштанских пошиљака*. Докторска дисертација. Београд: Саобраћајни факултет Универзитета у Београду, 2014, 151 стр. основног текста; литература стр. 152–176; биографија 177–178; прилози 179–181 (укупно 181 штампана страна). Ментор: проф. др Душан Теодоровић; комисија: Д. Теодоровић, Б. Димитријевић, В. Ковачевић-Вујчић. Отворени приступ: Национални репозиторијум дисертација у Србији (НаРДуС).

I Предмет, грађа и мерило

Дисертација узима за предмет један од централних задатака операционих истраживања у поштанском саобраћају: хаб локацијски проблем при пројектовању мреже за пренос експрес пошиљака. Задатак је постављен потпуно и прегледно већ у уводу — „за познате токове, растојања и времена путовања између свих парова чворова као и трошкове превоза, прераде/разврставања пошиљака и изградње хабова, пронаћи укупан број хабова, њихове локације и сваком хабу доделити подручје“ (стр. 3), при чему се, поред профита преносиоца, тражи и максимизација нивоа услуге корисницима. Тежиште рада је развојно-инжењерско: изградња математичког модела, генетског алгоритма и компромисног програмирања, рачунарског програма и интерактивног поступка, те њихова примена на реалним подацима компаније CityExpress (Србија) и на контролној мрежи Турске.

Пре свега осталог ваља изрећи мерило, изричито и без изузетка. Рукопис је пред комисијом био у првој половини и почетком јесени 2014. године: 25. априла 2014. аутор је поднео шест примерака неукоричене дисертације с молбом да отпочне поступак оцене и одбране, а комисија за оцену и одбрану именована је 11. септембра 2014. Као крајња граница узима се, дакле, септембар 2014. Рад се овде мери искључиво према литератури, стандардима, прописима и стању знања који су постојали и били доступни до тог тренутка; ништа што је настало касније није мерило. То правило важи и за списак литературе овог осврта: свака његова јединица објављена је пре септембра 2014, изузев саме дисертације, реферата комисије и извора за чињенице које се временом не мењају (нпр. званично значење скраћенице класе сложености), што је на одговарајућем месту назначено.

Наводи из дисертације преузети су дословно, у наводницима, с бројем стране према штампаној пагинацији рада (штампана страна једнака је страни PDF-а умањеној за четрнаест).

II Шта рад доноси

Осврт је дужан да почне оним што дисертација јесте, јер је то и највећи део онога што она вреди.

Прво и најважније, рад доноси самосталну вишекритеријумску формулацију хаб локацијског проблема у којој ниво услуге није споредни услов него равноправан критеријум. То је и најчвршћи, проверљив допринос: „Методом компромисног програмирања укључени су у разматрање и параметри квалитета услуге коју транспортна мрежа пружа корисницима, за разлику од већине сличних истраживања која су се углавном концентрисала на минимизирање трошкова односно максимизирање профита“ (стр. 148). Позиционирање је тачно — прегледна литература области (Alumur & Kara, 2008) потврђује да се тежиште хаб локацијских модела дуго држало трошка и профита — а сам рад препознаје ту празнину изричито: „Правилна локација хаб центара подразумева не само минимизацију трошкова преноса, како је најчешће присутно у литератури, већ и максимизацију нивоа квалитета услуге, процента опслужених корисника“ (стр. 6).

Друго, рад свесно одступа од стандардних hub covering модела с унапред задатим бројем хабова: „Ови модели углавном се срећу са унапред задатим бројем хабова када имамо проблеме хаб покривања (hub covering problem) док ће ова дисертација понудити модел у коме број хабова које треба успоставити није унапред дефинисан“ (стр. 45). Број и локације хабова су, дакле, излаз оптимизације, а не улаз — што задатак чини тежим и реалистичнијим.

Треће, рад уводи самосталан трећи критеријум квалитета услуге — проценат клијената којима је доступна предаја пошиљке током продуженог радног времена — изведен из стварног ограничења домаћег тржишта, где је корисницима у временски удаљеним чворовима време за предају пошиљке „екстремно на само 1 сат“ (стр. 39). Тиме модел мери нешто што пословну вредност мреже стварно погађа, а не апстрактан показатељ.

Четврто, генетски алгоритам није генеричка примена методе него озбиљно пројектован поступак: „имплементирани су генетски оператори који чувају допустивост решења. На тај начин је искључена појава некоректних јединки у свакој генерацији“ (стр. 148), уз мере против преурањене и споре конвергенције, елитистичку стратегију и вероватносно засејавање хабова по обиму токова. Уз то стоји интерактивни приступ преко аспирационих нивоа доносиоца одлуке (satisficing метод, преузет и прилагођен целобројном проблему), који целу поставку окреће ка практичном пројектантском алату и генерише низ изведених параметара мреже — радна времена чворова, општи ред вожње, возни парк и капацитете прераде.

Пето — рад доследно наводи сопствена ограничења, и то на местима где би их било лакше прећутати. Признаје хеуристичку природу приступа — „нема никаквих гаранција да је добијено нецелобројно решење близу правог оптимума“ (стр. 102); признаје да се метахеуристиком „најчешће је немогуће доказати оптималност добијених решења као ни пронаћи сва недоминирана решења тако да се поставља оправдано питање да ли тако генерисан Парето фронт задовољава (3.8) и (3.9)“ (стр. 80); признаје да „не постоји оптимална комбинација параметара (величина почетне популације, политика замене популације, вероватноћа мутације, тип и вероватноћа укрштања, итд.) која би давала најбоље резултате у решавању свих проблема“ (стр. 73); отворено означава да за вишекритеријумски проблем адекватан тест-пример не постоји — „није могуће директно упоређивање добијених резултата“ (стр. 127); и унапред релативизује касније тврђења признањем да „остаје до краја нерешено питање ‘коректног’ одређивања идеалне тачке и решавања min-max проблема (5.4)“ (стр. 140). То самоограничавање је интелектуално поштење које ваља именовати, јер је управо оно омогућило да се о раду расправља овако детаљно.

Најзад, поштено је рећи и оно што надилази појединачне вредности: наводи рада у највећем делу одговарају изворима на које упућују. Унутрашњи бројчани резултати — илустративни пример селекције, табеле једнокритеријумских максимума, Парето фронтови и табеле интерактивних итерација — међусобно су доследни и аритметички тачни; приписивања метода и модела њиховим ауторима (O’Kelly, Campbell, Holland/Goldberg, Ernst & Krishnamoorthy, Cohon & Marks, Nakayama & Sawaragi) у највећем делу држе; макро-подаци о тржишту преузети су из студије Оксфорда и, у носивим износима, верно пренети; а улазни подаци студије случаја стварни су подаци оператора, уз образложену нормализацију. Ова поузданост фактографске основе није споредна: она је оно што уопште омогућава да се о раду говори строго.

III Циљ и метод

Рад не поставља формалне, оповргљиве хипотезе него три развојно-пројектна циља (одељак 1.2, стр. 5–7): развој општег модела hub-and-spoke преноса и дефинисање критеријума, развој алгоритма и програма за вишекритеријумску анализу, и развој интерактивног приступа за доносиоце одлука. Изостанак формалних хипотеза овде се не узима заману: за развојно-инжењерску дисертацију методолошка литература о експерименталном раду с хеуристикама не тражи хипотезе него уредно извештавање, поновљивост и поређење (D.S. Johnson, „A Theoretician’s Guide to the Experimental Analysis of Algorithms“, 2002; R.S. Barr и др., „Designing and reporting on computational experiments with heuristic methods“, *Journal of Heuristics*, 1995).

Циљеви су, у оквиру своје природе, остварени изградњом модела (изрази 4.21–4.29), генетског алгоритма с компромисним програмирањем и интерактивног поступка, те њиховом применом на реалне податке.

Једна методолошка примедба, међутим, стоји и на нивоу постављања циљева, и она се провлачи кроз цео завршни слој рада. Пошто су циљеви постављени описно („развој … модела“, „развој … програма“, „развој … интерактивног приступа“), они се сматрају оствареним самим постојањем модела и програма; али остварење развојног циља не доказује и квалитет добијених решења, а управо се квалитет тврди у закључку. Скок од постојања модела и програма ка оцени да је метода „изузетно успешна“ (стр. 149) није премошћен посебном провером. Реч је о примедби на логичку структуру потврде; њено се тежиште развија у одељку VII, јер тамо стоје и подаци на које се та оцена позива.

Треба, ради потпуности, рећи и оно што у формалном погледу иде у прилог раду. Услов из Правилника о докторским студијама Универзитета у Београду („Гласник УБ“ бр. 155/10, чл. 20) — да докторанд има „најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у међународном часопису“ — испуњен је радом Čupić & Teodorović у часопису *Journal of Advanced Transportation* (онлајн од јануара 2013), па је уградња тог рада у четврто поглавље очекивана, а не спорна. Форма рада (резиме и Abstract, кључне речи, страна с ментором и комисијом, прилози с потписаним изјавама о ауторству, о истоветности штампане и електронске верзије и о коришћењу) одговара Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација (Сенат УБ, 14.12.2011).

IV Организација експрес преноса и хаб локацијски проблеми

Друго поглавље даје контекст — врсте и нивое услуга, искуства домаћих и страних оператора, hub-and-spoke концепт и опрему прерадног центра — а завршава прегледом хаб локацијских модела и метода. Тај преглед је, у теоријском делу, тачан и добро референциран: таксономија модела (p-хаб медијана, p-хаб центар, хаб локацијски проблем с фиксним трошковима, хаб покривање) и хронологија првих радова (O’Kelly 1986/1987, Campbell и O’Kelly 1994) исправно су пренете, а закључак да поштанске мреже за пренос експрес пошиљака користе шему једноструке алокације одговара приказу у прегледу Alumur & Kara (2008).

Неколико примедаба у овом делу стварно стоји, али све погађају контекст, не модел ни резултате.

Прва је прегледна непрецизност у приписивању порекла модела. На стр. 43 стоји да је „Прва формулација проблема p-хаб центра дата је у [OKe91]“, док рад O’Kelly & Miller (1991), на који та ознака упућује, формулише једнохабни минимакс (center) критеријум, а општи проблем p-хаб центра у прегледној литератури уопштава

Campbell (1994) — што и Alumur & Kara (2008) изричито бележе. Слично, у пасусу о фиксним трошковима (стр. 44) порекло је прецизније приписати O'Kelly (1992) него минимакс раду из 1991. Реч је о нијанси хронологије коју треба ускладити; рани O'Kelly-еви радови јесу шире извориште области, а Campbell као првог прегледача рад наводи на суседном месту (стр. 41). У истом реду је и сврставање рада Skorin-Kapov и сарадника (1996) међу примене Лагранжове релаксације (стр. 51), иако наслов те јединице у попису рада — „Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems" — показује да је реч о тесним линеарним релаксацијама; преостале три референце уз ту методу приписане су тачно, а две технике су сродне, па је носивост споредна.

Друга примедба тиче се тачности тржишног приказа, ослоњеног претежно на једну студију Оксфорда из 2008/2009. Носиви износи — директан допринос светском БДП-у од 80 милијарди и промет од 175 милијарди долара — верно су пренети, али тврдња да је „готово половина генерисана на територији Европе" (стр. 24) није тачна: по истом извору највеће је тржиште Северна Америка (43%), а Европа учествује с око 28% (Oxford Economics, *The Impact of the Express Delivery Industry on the Global Economy*, 2009). Формулација је вероватно настала сажимањем навода о унутаревропском авио-карго тржишту. Из истог круга су и две мање непрецизности: раст од четири одсто годишње извор везује за реални приход, а рад за физички обим (стр. 24); а број од 2,75 милиона послова извор наводи као укупно подржане послове (директне, индиректне и индуковане), док их рад приказом „директно запошљавале више од 1,3 милона (индиректно 2,75 милиона) људи" (стр. 24) означава као индиректне. Тржишни контекст био би, уз то, чвршћи да је поткрепљен новијим или додатним извором; најактуелнији догађај — неуспели покушај да UPS 2013. преузме TNT — рад ипак уврштава (стр. 30).

Трећа је чиста, али поновљена грешка у акроними: као четврти глобални интегратор наведен је „USPS" уместо UPS — „Највеће светске компаније у овој области су: DHL, FedEx, TNT и USPS." (стр. 23), што понавља и стр. 16. USPS је национални поштански оператор САД, а не глобални интегратор; да је реч о омашки, а не о забуни око идентитета, види се из тога што рад на истој страни међу глобалним преносиоцима тачно наводи UPS, као и из детаљног описа UPS-а на стр. 30. Ниједна од ових примедаба не дира модел; све су ствар редакције контекстуалног поглавља.

V Генетски алгоритми и компромисно програмирање

Треће поглавље је методолошки преглед и, у целини, коректан је, тачан и добро цитиран: оператори генетског алгоритма (селекција, замена генерација, укрштање, мутација) изложени су уз одговарајуће изворе, а вишекритеријумски оквир преузет је по Coello Coello и сарадницима с исправним дефиницијама Парето-оптималности

и фронта. Уз то, поглавље задржава критичку свест о методи коју рад примењује — истиче оба темељна недостатка простог генетског алгоритма и, важније, унапред признаје границе метахеуристике (стр. 73, стр. 80, наведено у одељку II).

Примедбе у овом делу су лаке и претежно се тичу атрибуције и историјских нијанси; ниједна не дира резултат.

Опис простог генетског алгоритма — „прости генетски алгоритам (Simple Genetic Algorithm (SGA)) [Hol75]“ (стр. 61), уз рулет селекцију, једнопозиционо укрштање и просту мутацију — у тачно том облику, као и сам назив SGA, потиче из Goldberg-ове систематизације (Goldberg, 1989), док Holland (1975) уводи опште адаптивне планове; прецизније би било уз опис навести и Goldberg-а, тим пре што рад на стр. 58 исправно одређује Holland-а као родоначелника методе.

Класификацију вишекритеријумских метода по Cohon & Marks (1975) рад на стр. 81 дели само на априори и апостериори, док изворна таксономија има и трећу, прогресивну (интерактивну) класу; изостанак је делимично оправдан контекстом, јер интерактивни приступ рад обрађује засебно у петом поглављу. У низу референци уз оптимизацију колонијом мрава омашком је уврштен рад Mladenović–Hansen о променљивим околинама, који припада другој метахеуристици; у низу примена генетског алгоритма на проблем трговачког путника наведена је и студија локалне оптимизације Johnson & McGeoch, која није рад о генетским алгоритмима — обоје ситне библиографске непрецизности које не дирају опште тврдње. У методолошком поглављу износи се и сажет каузални исказ — „Нумерички експерименти вршени у оквиру ове докторске дисертације (више стотина експеримената) су показали да се приликом лоцирања хабова за пренос експрес пошиљака нису јављали залеђени битови што је последица правилно подешених оператора GA.“ (стр. 71) — који би заслужио или поткрепу подацима или упут на место где се показује.

Две примедбе имају нешто веће методолошко језгро. Општи оквир Парето оптималности и одговарајућа слика дати су, по преузетом извору, у минимизационој конвенцији, док је проблем дисертације претежно максимизациони, а рад изричито не наводи усаглашавање знака (максимизација као минимизација негације); свођење је тривијално и универзално подразумевано, у четвртом поглављу се и минимизира (трошкови), па је реч о формалној недоследности излагања. Друга је атрибуција компромисног програмирања: меру блискости идеалном решењу рад приписује Duckstein-у — „Duckstein [Duc84] је предложио следећу меру ‘блискости са идеалним решењем’“ (стр. 100) — што је прихватљиво за ту конкретну нормализовану форму, али би приписивање било потпуније уз навођење изворника компромисног програмирања, чији су темељ (идеална тачка и L_p-метрика) Zeleny (1982) и Yu (1973). Реч је о непотпуности атрибуције, не о грешци у методи.

VI Модел: једнокритеријумски и вишекритеријумски приступ

Језгро сопственог доприноса — самостална математичка формулација профита, нивоа услуге и покривености, и њихово спајање у вишекритеријумски целобројни задатак решаван компромисним програмирањем и генетским алгоритмом — методолошки је уредно и, у највећем делу, тачно изведено. Носеће формуле (приход, број возила преко подеоне функције, профит, просечан временски прозор, проценат опслужених клијената, ограничења некапацитивног проблема с једноструком алокацијом, мера блискости идеалу, вероватносна иницијализација хабова и алокација најближем хабу) написане су исправно и са дефинисаним симболима, а хеуристика избора хаба добро је практично утемељена — „не постоје оправдани разлози за повећање транспортних трошкова повезивањем чвора на удаљеније хабове“ (стр. 104).

Једна суштинска примедба тиче се потпуности формулације у односу на опис и на трећу меру. Ограничење (4.25) захтева да сваки чвор буде додељен тачно једном хабу — „Услов (4.25) одређује да је сваки чвор придружен једном и само једном хабу.“ (стр. 96) — док опис поступка и мера покривености f_3 почивају на томе да се поједини чворови, с прекратким временским прозором, избацују из мреже: „чвор і неће бити укључен у мрежу преноса пошиљака“ (стр. 91–92). Модел, међутим, нема експлицитну променљиву укључења чвора (укључен или искључен), нити је сумирање у критеријумима ограничено на опслужене чворове. Реч је о нотационом пропусту, не о несагласности с имплементацијом (недопустиви чворови уклањају се из скупа пре евалуације, односно недопустива решења се пенализују), али формулација би добила увођењем изричите променљиве укључења, чиме би (4.25) важило над скупом реализованих чворова. Стандардни запис хаб модела то допушта: једнострука наспрам вишеструке алокације разликује се управо по томе „how non-hub nodes are allocated to hubs“ (Alumur & Kara, 2008, стр. 1), па би доследно означавање покривености ускладило модел с описом.

Мања примедба тиче се оператора селекције. Текст најављује линеарну селекцију рангирањем — „селекција рангирањем (линеарно) где се фитнес функција добија на основу позиције (ранга) јединке у популацији“ (стр. 105) — док одговарајући израз (4.32) по облику делује као обична пропорционална (рулет) селекција. Опис је, заправо, интерно доследан: фитнес се изводи из ранга, па израз представља корак пропорционалног избора над тако добијеним фитнесом; препоручује се да се то линеарно пресликавање ранг→фитнес наведе изричито, ради потпуне поновљивости.

VII Експериментални резултати и интерактивни приступ

Овде почива најозбиљнији део критике, али и знатан део вредности рада, па оба ваља изрећи одмерено.

Прво о вредности. Поузданост унутрашњег рачуна — доследност и аритметичка тачност једнокритеријумских максимума, скупова недоминираних решења, Парето фронтова и табела интерактивних итерација — већ је истакнута у одељку II и овде се на њу само подсећа. Спроведена је и анализа осетљивости на неизвесност трошкова изградње и експлоатације хабова (множитељ у интервалу од нуле до два), која доносиоцу одлуке даје увид у робусност конфигурације. Улазни подаци су стварни подаци оператора, уз транспарентно обелодањену нормализацију — „Сви улазни подаци су на захтев компаније CityExpress нормализовани“ (стр. 112) — а контролни пример на знатно већој мрежи Турске (81 чвор) преузет је из документованог извора и служи као поштена провера изводљивости на већим димензијама, будући да за вишекритеријумски проблем адекватан тест-пример не постоји.

Најтежа примедба целог рада јесте изостанак мере квалитета решења. Носеће тврдње закључка — „Предложени еволутивни приступ је веома значајан јер омогућава успешно решавање датих проблема, без обзира на димензије проблема.“ (стр. 147) и „Добијени резултати показују да је предложена еволутивна метода изузетно успешна при решавању хаб локацијских проблема.“ (стр. 149) — нигде нису поткрепљене поређењем с референтном тачком: нема поређења с егзактним оптимумом, ни с познатим тест-примерима хаб локације, ни с другом метахеуристиком. Управо за мрежу Србије (16 чворова) простор избора хабова је мали и егзактно набрајање подскупова уз алокацију најближем хабу било је изводљиво, па се бар за једнокритеријумске случајеве најбоље пронађено решење могло потврдити као оптимално — што није учињено. Мерило те врсте именовано је у струци: контролна табела за извештавање о експериментима с хеуристикама тражи да се хеуристика упореди с другим методама и да се примени статистички дизајн — „5. Use statistical experimental design techniques. 6. Compare the heuristic with other methods.“ (Barr и др., 1995, Табела 2, стр. 23) — а водич за експерименталну анализу алгоритама поставља, међу десет принципа, „7. Ensure comparability.“ и „3. Use instance testbeds that can support general conclusions.“ (Johnson, 2002, стр. 3). Тежину примедбе ваља, ипак, поштено сузити: рад изричито и коректно образлаже да општеприхваћени хаб тест-примери не садрже параметре које вишекритеријумски модел захтева, па „није могуће директно упоређивање добијених резултата“ (стр. 127), а за реалне димензије егзактне методе нису применљиве. Зато оцену треба формулисати као демонстрирану изводљивост и реалистичност, не као доказану оптималност — што је, уосталом, у складу с ауторовим сопственим оградама на стр. 80 и 102.

Из истог круга је уопштавање домета. Из једне студије случаја и једног контролног примера изводи се закључак о применљивости на класу: „Сви резултати добијени експериментисањем указују да су развијени програми способни за решавање широког спектра хаб локацијских проблема.“ и „У том смислу величина посматраног проблема не представља посебан изазов у решавању, што је потврђено на контролном примеру транспортне мреже у Турској.“ (стр. 148). Мрежа Турске јесте намерна контрола скалабилности и знатно је већа од српске, што је стварна вредност; али два појединачна примера не оправдавају закључак о широком спектру и о неосетљивости на димензије у пуном смислу — за то би, по принципу 3 из Johnson (2002), био потребан низ инстанци растуће величине с мереним временом рачунања. Демонстрирана је изводљивост на мрежама до 81 чвора истим програмом, не доказана скалабилност на класу проблема.

Трећа примедба тиче се извештавања о стохастичком алгоритму. Систематска статистика поновљених извршавања — просек, најгори случај, расипање — дата је само за једну комбинацију тежина (десет понављања), уз коју рад поштено извештава да алгоритам „не налази увек Парето оптимално решење, али је проценат успешности у распону од 70 до 100%“ (стр. 122); за остале случајеве приказана је по једна „најбоља“ вредност. Уз то је термин „стандардна девијација“ на стр. 125 употребљен описно — „не постоји значајна стандардна девијација критеријумских функција“ (стр. 125) — за варијацију по комбинацијама тежина, а не по поновљеним извршавањима, при чему трећи критеријум ипак варира око тринаест процентних поена. За стохастичку метахеуристику контрола те врсте није украс: иста струковна мера тражи, кад се користе генератори псеудослучајних бројева, да се „the code should be tested on each instance with different seed initializations“ (Barr и др., 1995, стр. 26). Стабилност конвергенције, коју дијаграми фитнеса показују, овде даје назнаку поузданости, али не замењује систематски приказ расипања.

Четврта примедба је унутрашња противречност око времена рачунања. На стр. 112 стоји да времена „ни у најсложенијим експериментима (мрежа са 81 чвором, три критеријума, варирање вредности свих тежина) нису прелазила 2 сата“ и да „времена рада рачунара нису дата ни за један изведени експеримент“, док стр. 134 за исти, најкомпликованији случај наводи да је „Време рада рачунара у овом, најкомпликованијем, случају износило … приближно 150“ минута, а Табела 4.8 садржи целу колону с временима рада за мрежу Турске. Реч је о неусаглашеним исказима истог реда величине које треба ускладити; квалитативни закључак о прихватљивом времену рада тиме није доведен у питање, али оба исказа не могу истовремено стајати.

Пета се тиче параметара и подешавања. Вредности вероватноће мутације („Најбоље резултате у екперименитима дало је коришћење вероватноће мутације од 0,0075“, стр. 106) и укрштања наведене су као најбоље, а величина популације и број

генерација мењају се међу случајевима (за трокритеријумску Турску знатно веће подешавање), без приказаног поступка подешавања и без систематске анализе осетљивости на саме параметре генетског алгоритма. Веће подешавање за већу мрежу разумљив је избор, а осетљивост на коефицијенте компромисног програмирања табелирана је; недостаје, међутим, изричит приказ подешавања баш тих параметара метахеуристике. По мерилу овог осврта то се не узима за пунуману — реч је о развојно-инжењерском раду који параметре преузима из литературе и потврђује пробним извршавањима — али би допуна ојачала поновљивост.

Интерактивно поглавље заслужује засебну реч. Поступак је формално коректан и добро прилагођен целобројном проблему, а аутор транспарентно наводи да га је симулирао сам, уз консултације с менаџментом оператора: „Уз консултације са менаџментом компаније, чији подаци су коришћени за експериментисање, приступило се симулирању процеса проналажења решења у више итерација.“ (стр. 140). То је студија изводљивости која приказује ток и понашање методе, али не и одзив независног корисника, чиме је домет закључка о практичној употребљивости ограничен — премда не и коректност поступка. Уз то, правило ажурирања аспирационих нивоа аутор само најављује као потребно — „Приликом дефинисања аспирационих нивоа треба успоставити стратегију по којој се они мењају“ (стр. 144) — али га не формализује, па број итерација и тачка заустављања остају ствар субјективне процене доносиоца одлуке (што јесте природа сатисфикацијских метода). Идеална тачка, најзад, није коректно израчуната него транспарентно апроксимирана горњом границом нађених максимума — што компромисно програмирање допушта као апроксимацију и што аутор сам означава као нерешено (стр. 140). Ситна, али стварна недоследност коју ваља исправити јесте почетни аспирациони ниво временског прозора откуцан као 690 уместо 680 (стр. 144); коришћена вредност (680) поштује услов да аспирациони ниво буде мањи од идеалног (685) и даје исправан резултат, па је реч о штампарској омашци.

Најзад, оцена о високом квалитету и реалистичности решења — „Резултат оваквог приступа је висок квалитет добијених решења и њихова реалистичност.“ (стр. 149) — почива на стварним улазним подацима и трошковима процењеним по реалним ценама локација, што реалистичност улаза чини основаном; али реалистичност решења на нивоу закључка није проверена поређењем са стварном конфигурацијом оператора нити анализом осетљивости на процену трошкова, па и ту оцену треба одвојити од остварења развојних циљева и поткрепити.

VIII Слике, табеле, формуле, бројеви и језик

Рад је технички прегледно обрађен, али је ниво брижљивости у нотацији и лектури испод нивоа садржаја, и то на начин који стручном читаоцу отежава праћење.

Најуочљивија је неуједначеност математичких ознака. Иста бинарна променљива алокације писана је малим x у дефиницијама и функцији циља, а великим X у ограничењима (4.25)–(4.27); симбол тока пошиљака јавља се као W_ij у једним изразима, а као w_ij у другима ((4.20) и (4.23)); аргумент функције профита писан је као f_1(x̄) у формулацији и као f_1(ȳ) на стр. 107; а симбол R употребљен је двоструко — за скуп полазних чворова (стр. 85) и за укупне приходе (стр. 86). У прорачунима нема стварне двосмислености (скуп R се даље не користи, а аргумент представља исто решење), али је реч о одступању од доследног означавања које струковна норма математичких ознака тражи (ISO 80000-2:2009). Уз то, шести ред псеудокода упућује на „израз (3.1)“ за вероватноћу избора хаба, док је та вероватноћа у истом поглављу дата изразом (4.31); испод једне слике тежине компромисног решења исписане су трипут с индексом 1 (уместо w_1, w_2, w_3), иако натписи слика недвосмислено дају 0,6, 0,3 и 0,1; а позив „У табели 2“ на стр. 113 треба да гласи „У табели 4.2“. Све су то формалне омашке које не мењају вредности ни резултате, али их у монографском издању треба отклонити.

Скраћеница класе сложености развијена је двојако и једном нетачно: на стр. 3 стоји „спада у групу NP (Non-Polynomial)“, што није званично значење (NP означава недетерминистичко полиномијално време — Garey & Johnson, 1979, чињеница која се временом не мења), док сам рад на стр. 54 наводи тачнији облик — „NP (Non-deterministic Polynomial-time hard)“, где је, обрнуто, реч „hard“ (која чини засебан појам NP-тежак) неспретно уграђена у саму скраћеницу и поновљена домаћим „тешки“. Довољно је ускладити ознаку с исправним обликом који рад већ делом користи. Слично, уз „evolutionary computing“ на стр. 55 стоји скраћеница „(EA)“, док би одговарало EC, јер EA означава уже — саме алгоритме.

Слике 2.1 и 2.2 наведене су без ознаке извора, за разлику од суседних слика; порекло прве већ је означено у наслову (образац Поште Србије), а друга приказује технологију идентификације (бар-код) без ознаке извора, али би ради доследности апарата уз обе требало формално навести извор (уредничка мера праксе — *Publication Manual of the APA*, 6. изд., 2010, погл. 5).

Најзад, језик. Кроз цео рад провлачи се низ ситних словних и граматичких омашки — од „ниво услуге“ записаног као „ново услуге“ и „Докторска дисертацији се бави“ у првој реченици кључног одељка 1.2, преко „метахуристици“, „пробем“, „праметар“, „Класификција“, „имлементацијом“, до „конкуретских“ у закључку — које не мењају смисао, али их лектура треба отклонити. Терминологија је, уз то, местимично неуједначена (наизменично „бинарни низ“ и „бинарни стринг“ за исти појам), а англицизми се користе напоредо с домаћим еквивалентима без пуне доследности. Употреба усвојеног термина „хаб“ уз домаћи еквивалент (прерадни односно сортирни центар) при првом помену није порок и правописно је прихватљива; али изворно писани изрази (нпр. „trade-offs“) без домаћег парњака одступају од норме,

која за ћирилички текст поставља прилагођено писање као опште правило: „У писању туђих властитих имена у нашем стандардном језику примењују се два поступка: прилагођено писање (применљиво и у ћирилици и у латиници) и изворно писање (применљиво у латиници).“ (Правопис српскога језика, Матица српска, 2010, т. 195).

IX Научни апарат

Научни апарат је место на коме је рад био најмање брижљив, мада ни ту не у мери која дира садржину, а у неколико тачака апарат је, напротив, узоран.

Најпре о ономе што вреди. Покривеност пописа је потпуна: сваки цитат у тексту има одговарајућу јединицу у попису — пет привидно недостајућих ознака само су скраћене или погрешно записане ознаке постојећих јединица. Нема ниједног места посредног цитирања из друге руке; темељни радови наводе се из изворних јединица. Улазни подаци студије случаја приложени су (нормализована матрица токова), контролни пример преузет је из документованог извора, а самоцитирање је умерено и на одговарајућим местима. То говори у прилог уредности апарата.

Примедбе које стоје претежно су формалне. Иста јединица наведена је двапут; број библиографских јединица у реферату (238) не слаже се са стварним стањем пописа (244 јединствене ознаке); пет ознака позивања записано је недоследно у односу на кључеве у попису (нпр. изостављено слово у ознакама за O’Kelly и Kara), а исте се јединице цитирају час ћирилицом час латиницом, што квари азбучно уланчавање. Поједини кључеви не слажу се с годином издања (ознака с „09“ за рад из 1995). Неколико библиографских записа треба исправити према изворним издањима: рад Bryan & O’Kelly објављен је 1999, а не 2002 (Journal of Regional Science 39(2), 1999, 275–295); часопис уз једну јединицу је *IIE Transactions*, том 33, а не како стоји у попису — „IEE Transactions 23“ (стр. 169) — реч је о раду Pamuk & Sepil (IIE Transactions 33(5), 2001, 399–411); том часописа *RAIRO* уз рад Кратице и сарадника је 35, не 73 (Kratica и др., RAIRO — Operations Research 35(1), 2001, 127–142); свеска часописа *Networks* уз извор за турску мрежу је 49, не 4 (Tan & Kara, Networks 49(1), 2007, 28–39); а презиме уредника зборника уз интерактивни метод треба да гласи „Grauer“, не „Graver“ (Nakayama & Sawaragi, у: Grauer & Wierzbicki, ур., *Interactive Decision Analysis*, Springer, 1984, 113–122). Све су то омашке које не омета проналажење јединица, али их треба уредити.

Три примедбе прелазе раван словне исправке. Знатан удео пописа (64 од 244 јединице) не цитира се нигде у тексту; укључивање шире контекстуалне грађе о метахеуристикама разумљив је избор, али би попис добио прочишћавањем на јединице које рад непосредно користи. Свих дванаест интернет извора наведено је без датума приступа, а четири су голе адресе оператора без аутора, наслова и године;

за трајно архивирани рад датум приступа је обавезан елемент електронског извора (ISO 690:2010). И, најзад, регулаторни оквир поштанског саобраћаја (поштанске директиве Европске уније, Закон о поштанским услугама, акти Светског поштанског савеза, конкретни ISO стандарди габарита и идентификације) помиње се наративно, али се нигде не наводи као цитирана јединица; тежиште рада јесте оптимизациони модел, а не регулатива, па се то не узима за тешкуману, али би неколико кључних навода ојачало апарат дисертације из поштанског саобраћаја.

X Однос рада и реферата комисије

Реферат комисије оцењује да су „изабране и коришћене методе адекватне“ и да рад доноси вишекритеријумски модел с параметрима квалитета услуге. Тај део оцене одговара стању у тексту: вишекритеријумска формулација с параметрима квалитета услуге јесте самосталан и проверљив допринос, а модел, генетски алгоритам, компромисно програмирање и интерактивни поступак стварно су изграђени и примењени на реалне податке. Оцена о вредности методолошког приступа и о промишљеном концепту, дакле, стоји.

Три исказа реферата, међутим, ваља одмерити према тексту. Прво, реферат наводи да је „потврђено … да се методологија може успешно примењивати за одређивање броја и локације прерадних центара било ког поштанског оператора али и других објеката на транспортним мрежама“ (стр. 7 реферата) — уопштавање које, као и у самом закључку, надилази оно што две студије случаја носе (в. одељак VII); реч је о применљивости демонстрираној на мрежама од 16 и 81 чвора, не о доказаној применљивости на класу. Друго, реферат међу примењеним методама наводи „технике математичке статистике“ (стр. 7 реферата), док у раду систематске статистичке обраде стохастичких извршавања заправо нема осим учесталости за једну комбинацију тежина. Треће, оцена да је „нумерација слика, дијаграма, табела и израза поштована … током целог текста“ (стр. 4 реферата) у напетости је с неуједначеношћу математичких ознака описаном у одељку VIII, као и с погрешним унутрашњим позивима. Најзад, обим који реферат наводи (170 страна) и број библиографских јединица (238) не слажу се тачно са стањем рукописа (главни текст до стр. 151, укупно 181 страна; 244 јединствене ознаке у попису) — што је последица другачијег бројања и накнадног допуњавања, и што при коначној редакцији реферата и пописа треба ускладити. Ниједна од ових напомена не оспорава оцену о вредности рада; оне бележе места на којима формулације реферата иду испред онога што текст показује.

XI Шта остаје

Кад се све сабере, добија се оцена коју вреди изрећи у једном комаду, без ублажавања и без претеривања.

Дисертација Александра Чупића самосталан је и добро изведен развојно-инжењерски рад који домаћим операционим истраживањима у поштанском саобраћају доноси нешто употребљиво: вишекритеријумску формулацију хаб локацијског проблема у којој је ниво услуге равноправан критеријум, модел у коме број хабова није унапред задат, самосталан трећи критеријум квалитета услуге изведен из стварног ограничења тржишта, озбиљно пројектован генетски алгоритам с компромисним програмирањем, и интерактивни поступак који целу поставку окреће ка практичном пројектантском алату. Приступ је примењен на стварне податке оператора и на знатно већу контролну мрежу, а фактографска основа рада — унутрашњи бројеви, приписивања метода, тржишни макро-подаци — у највећем делу држи. Изнад свега, рад доследно и поштено означава сопствена ограничења, што треба именовати.

Слабости су, по оцени овог осврта, четвороструке, и ниједна не руши носеће доприносе рада. Прва и најозбиљнија је изостанак мере квалитета решења: тврдња о успешности и високом квалитету износи се без иједног поређења — с егзактним оптимумом (изводљивим за малу српску инстанцу), с познатим тест-примерима или с другом метахеуристиком — па почива на понашању конвергенције, а не на измереном јазу до оптимума. Друга је уопштавање домета: из две студије случаја изводи се закључак о применљивости на „широк спектар“ проблема и о неосетљивости на димензије, што строг доказ скалабилности не подупире. Трећа је извештавање о стохастичком алгоритму: систематска статистика поновљених извршавања дата је само за једну комбинацију тежина. Четврта је брижљивост нотације и апарата: неуједначене математичке ознаке, погрешни унутрашњи позиви, низ библиографских омашки, интернет извори без датума приступа и нецитиран регулаторни оквир.

Изнад тога стоји једна правилност коју ваља изрећи у корист рада: провере чињеница и приказ туђих решења изведени су брижљивије него сопствене завршне оцене. Управо зато највећи део онога што треба поправити већ је негде у раду тачно урађено или поштено ограђено — на стр. 80, 102, 127 и 140 сам рад зна оно што закључак на стр. 147–149 прећуткује.

Пет измена биле би, по оцени овог осврта, најплодније у евентуалном монографском издању или наставку истраживања. Прво, за једнокритеријумске случајеве на малој мрежи спровести поређење с егзактним оптимумом (изводљиво набрајањем), а тврдњу о квалитету изнети као измерени јаз, не као оцену. Друго, статистику поновљених извршавања (просек, најгори случај, расипање, различита засејавања)

приказати за више комбинација тежина, а закључак о скалабилности поткрепити низом инстанци растуће величине с мереним временом. Треће, формулацију модела допунити изричитом променљивом укључења чвора, ускладити математичке ознаке (x/X, w/W, аргумент функције профита, симбол R) и исправити погрешне унутрашње позиве и противречност око времена рачунања. Четврто, интерактивни поступак ојачати формализованим правилом ажурирања аспирационих нивоа и, где је могуће, одзивом независног доносиоца одлуке. Пето, апарат довести у ред: уклонити двоструку и нецитирану грађу, ускладити ознаке и писмо, исправити библиографске омашке, додати датуме приступа и увести кључне јединице регулаторног оквира.

Уз ту врсту редакције — која у највећем делу не тражи ново истраживање него доследно спровођење и мерење онога што је рад већ започео — ова дисертација остаје вредан и употребљив допринос, чији би модел и интерактивни приступ имали шта да кажу и пројектанту мреже за пренос експрес пошиљака и стручном читаоцу изван уже теме.

Литература

Предмет осврта

Чупић, Александар М., *Пројектовање транспортних мрежа применом еволуционог рачунарства: мрежа за пренос експрес поштанских пошиљака* [докторска дисертација]. Саобраћајни факултет Универзитета у Београду, 2014. (НаРДуС.)

Реферат Комисије о оцени докторске дисертације мр Александра Чупића, Саобраћајни факултет Универзитета у Београду, 2014.

Методологија експерименталног рада с хеуристикама

Barr, Richard S.; Golden, Bruce L.; Kelly, James P.; Resende, Mauricio G. C.; Stewart, William R., „Designing and reporting on computational experiments with heuristic methods“, *Journal of Heuristics*, 1/1, 1995, 9–32. DOI 10.1007/BF02430363.

Johnson, David S., „A Theoretician’s Guide to the Experimental Analysis of Algorithms“, у: *Data Structures, Near Neighbor Searches, and Methodology* (DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, 59), AMS, Providence, 2002, 215–250.

Хаб локација, метахеуристике и вишекритеријумска оптимизација

Alumur, Sibel; Kara, Bahar Y., „Network hub location problems: The state of the art“, *European Journal of Operational Research*, 190/1, 2008, 1–21. DOI 10.1016/j.ejor.2007.06.008.

Bryan, D. L.; O'Kelly, Morton E., „Hub-and-spoke networks in air transportation: An analytical review“, *Journal of Regional Science*, 39/2, 1999, 275–295.

Cohon, J. L.; Marks, D. H., „A review and evaluation of multiobjective programming techniques“, *Water Resources Research*, 11/2, 1975, 208–220.

Goldberg, David E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading (MA), 1989.

Kratica, J.; Tošić, D.; Filipović, V.; Ljubić, I., „Solving the Simple Plant Location Problem by Genetic Algorithm“, *RAIRO — Operations Research*, 35/1, 2001, 127–142.

Nakayama, H.; Sawaragi, Y., „Satisficing Trade-off Method for Multiobjective Programming“, y: Grauer, M.; Wierzbicki, A. P. (yp.), *Interactive Decision Analysis* (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 229), Springer, Berlin, 1984, 113–122.

O'Kelly, Morton E., „A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities“, *European Journal of Operational Research*, 32/3, 1987, 393–404.

O'Kelly, Morton E.; Miller, Harvey J., „Solution Strategies for the Single Facility Minimax Hub Location Problem“, *Papers in Regional Science*, 70/4, 1991, 367–380.

Pamuk, F. S.; Sepil, C., „A solution to the hub center problem via a single-relocation algorithm with tabu search“, *IIE Transactions*, 33/5, 2001, 399–411.

Tan, P. Z.; Kara, Bahar Y., „A hub covering model for cargo delivery systems“, *Networks*, 49/1, 2007, 28–39.

Zeleny, Milan, *Multiple Criteria Decision Making*, McGraw-Hill, New York, 1982.

Yu, Po-Lung, „A Class of Solutions for Group Decision Problems“, *Management Science*, 19/8, 1973, 936–946. DOI 10.1287/mnsc.19.8.936.

Стандарди ознака, цитирања и језика

ISO 80000-2:2009, *Quantities and units — Part 2: Mathematical signs and symbols to be used in the natural sciences and technology*, ISO, Geneva, 2009.

ISO 690:2010, *Information and documentation — Guidelines for bibliographic references and citations to information resources*, ISO, Geneva, 2010.

Publication Manual of the American Psychological Association, 6. изд., APA, Washington, 2010.

Пешикан, Митар; Јерковић, Јован; Пижурица, Мато, *Правопис српскога језика* (измењено и допуњено издање), Матица српска, Нови Сад, 2010.

Формални оквир докторских студија (важећи 2014)

Правилник о докторским студијама које организује и изводи Универзитет у Београду, „Гласник Универзитета у Београду“, бр. 155/10, 2010.

Упутство за формирање репозиторијума докторских дисертација, Сенат Универзитета у Београду, 14.12.2011, 06 бр. 3222/XXVI-11.

Извори за чињенице које се временом не мењају (уз назнаку)

Garey, Michael R.; Johnson, David S., *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, W. H. Freeman, San Francisco, 1979. (Наведено за званично значење скраћенице NP; чињеница се временом не мења.)

Oxford Economics, *The Impact of the Express Delivery Industry on the Global Economy*, Oxford Economics, 2009. (Извор тржишних података [Oxf09] коришћених у раду.)