

ГЛАСНИК ШУМАРСКОГ ФАКУЛТЕТА, БЕОГРАД, 2013, бр. 108, стр. 07-24

BIBLID: 0353-4537, (2013), 108, p 07-24

Višnjevac N., Cvijetinić Ž., Bajat B., Radić B., Ristić R., Milčanović V. 2013. *Estimation of flow accumulation uncertainty by Monte Carlo stochastic simulations*. Bulletin of the Faculty of Forestry 108: 07-24.

Ненад Вишњевац
Жељко Цвијетиновић
Бранислав Бајат
Борис Радић
Ратко Ристић
Вукашин Милчановић

UDK: 556:004.942:519.245
Оригинални научни рад
DOI: 10.2298/GSF1308007V

ОЦЕНА НЕСИГУРНОСТИ ПРОСТОРНЕ КОНЦЕНТРАЦИЈЕ ОТИЦАЈА ПРИМЕНОМ МОНТЕ КАРЛО СТОХАСТИЧКИХ СИМУЛАЦИЈА

Извод: Излазни резултати добијени применом ГИС функција и алатки за анализу, обично се подразумевају као тачни, међутим и они су подложни несигурностима које могу утицати на одлуке базиране на тим истим резултатима. Оцена утицаја несигурности резултата је веома комплексна и често немогућа применом стандардних математичких метода с обзиром на веома комплексне алгоритме који се користе у ГИС анализама. У овом раду разматрано је алтернативно решење код оцене несигурности просторне концентрације отицаја, применом Монте Карло стохастичких симулација. За подручје ширег обухвата општине Чачак генерисано је сто могућих излазних верзија резултата просторне концентрације отицаја применом Монте Карло стохастичких симулација. На основу њих, уз одговарајуће статистичке анализе добијена је "највероватнија" верзија просторне концентрације отицаја уз припадајући интервал поверења односно стандардне девијације добијених решења. У раду су описане најзначајније фазе у процесу оцене несигурности, попут моделирања вариограма и одабира броја симулација. Такође је дата и препорука како најефикасније применити и дискутовати добијене резултате и њихову значајност.

Кључне речи: несигурност, просторна концентрација отицаја, стохастичке симулације

Ненад Вишњевац, асистент, Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Београд, Институт за геодезију и геоинформатику (nvisnjevac@grf.bg.ac.rs)

др Жељко Цвијетиновић, доцент, Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Београд, Институт за геодезију и геоинформатику

др Бранислав Бајат, ванредни професор, Универзитет у Београду Грађевински факултет, Београд, Институт за геодезију и геоинформатику

Борис Радић, истраживач сарадник, Универзитет у Београду - Шумарски факултет, Београд

др Ратко Ристић, редовни професор, Универзитет у Београду - Шумарски факултет, Београд
Вукашин Милчановић, асистент, Универзитет у Београду - Шумарски факултет, Београд

ESTIMATION OF FLOW ACCUMULATION UNCERTAINTY BY MONTE CARLO STOCHASTIC SIMULATIONS

Abstract: Very often, outputs provided by GIS functions and analysis are assumed as exact results. However, they are influenced by certain uncertainty which may affect the decisions based on those results. It is very complex and almost impossible to calculate that uncertainty using classical mathematical models because of very complex algorithms that are used in GIS analyses. In this paper we discuss an alternative method, i.e. the use of stochastic Monte Carlo simulations to estimate the uncertainty of flow accumulation. The case study area included the broader area of the Municipality of Čačak, where Monte Carlo stochastic simulations were applied in order to create one hundred possible outputs of flow accumulation. A statistical analysis was performed on the basis of these versions, and the "most likely" version of flow accumulation in association with its confidence bounds (standard deviation) was created. Further, this paper describes the most important phases in the process of estimating uncertainty, such as variogram modelling and chooses the right number of simulations. Finally, it makes suggestions on how to effectively use and discuss the results and their practical significance.

Key words: uncertainty, flow accumulation, stochastic simulations

1. УВОД

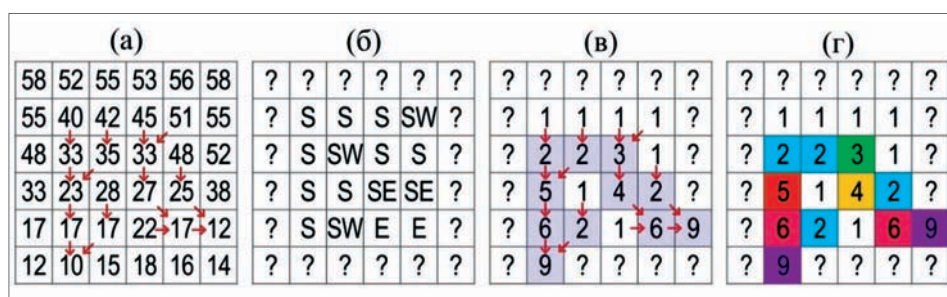
Највећи број природних феномена и појава из реалног света данас се веома успешно моделира и анализира применом ГИС-а (*Географски Информациони Систем*). Основни циљ извођења ГИС анализа је разумевање појава и процеса који се јављају у реалном свету. Пре извођења анализа поменуте појаве и процеси се моделирају преко одговарајућих рачунарских модела. Имајући у виду сложеност појава и процеса који се моделирају, јасно је да су рачунарски модели који се користе само апроксимација тих појава и процеса. Имајућу то у виду, јасно је да и резултати добијени након извршених анализа садрже одређен степен несигурности. Ова несигурност је дакле последица несигурности и грешака које се јављају код моделирања просторних података и појава, прикупљања и обраде просторних података за описивање тих појава и процеса, али и рачунарских алгоритама који се користе за ГИС анализе. Стандардни ГИС софтверски пакети садрже велики број алата за имплементацију најсложенијих ГИС анализа, али врло ретко обезбеђују, поред резултата тих анализа, и одговарајуће показатеље на основу којих корисник софтвера може да стекне увид у степен несигурности тих резултата.

У раду ће на примеру прорачуна *просторне концентрације отицаја* (енг. flow accumulation) бити анализиран утицај несигурности улазних података прикупљених за моделирање површи терена, тј. за израду дигиталног модела терена (ДМТ) на коначне резултате анализе. За те потребе биће коришћене Монте Карло симулације, односно условна Гаусова симулација. Треба нагласити да ће сва разматрања везана за несигурност улазних података у овом раду бити ограничена на анализе просторне концентрације отицаја.

1.1. Просторна концентрација отицаја (flow accumulation)

Прорачун *просторне концентрације отицаја* (ПКО) на основу дигиталног модела терена је честа метода у просторним анализама које су на било који начин условљене геоморфолошким и хидролошким аспектима (Arnold, 2010). Према литературним наводима, вредности и расподела грида ПКО утичу на просторни образац атмосферских и површинских вода на земљишном простору (Gessler *et al.*, 2000), генерисање површинског отицаја (Maidment, 1996), индекс топографске расподеле влаге (енг. topographic wetness index) (Sorensen *et al.*, 2006), биодиверзитет и обиље акватичних биотопа (Goetz, Fiske, 2008).

Просторна концентрација отицаја у комбинацији са смером отицаја (енг. flow direction) представља један од основних корака којим се применом ГИС анализа аутоматски генерише систем вододелница терена, односно сливова и подсливова. Ова функција користи као улаз грид са вредностима смера отицаја на основу кога „сабира” вредности ћелија грида низводно по линијама природних бразда и јаруга (O’Callaghan, Mark, 1984) (Слика 1). Високе вредности грида просторне концентрације отицаја грида указују на ушћа водотокова док су гридне ћелије са почетним вредностима у алгоритму елевационо највише тачке терена које геоморфолошки највише одговарају гребенима. Заправо, повезане у линијски систем, гридне ћелије ПКО грида са најнижим вредностима представљају вододелнице, односно границе сливних подручја. Графичка представа вредности просторне концентрације отицаја најбоље илуструје дренажну мрежу терена. Повећањем вредности гридних ћелија се смањује густина дренажне мреже (Jenson, Domingue, 1988; Martz, Garbrecht, 1992). Треба нагласити да на овај начин добијена дренажна мрежа не узима у обзир постојање сталних и привремених водотокова већ искључиво природну геоморфолошку предиспонираност терена према формирању тока.



Слика 1. (а) Елевациони град са смеровима нагиба; (б) грид смера отицаја; (в) логика израчунавања просторне концентрације отицаја; (г) растер просторне концентрације отицаја

Figure 1. (a) Elevation grid with flow direction marks; (b) flow direction grid; (v) flow accumulation calculation method; (g) flow accumulation grid

Анализа просторне концентрације отицаја се изводи на основу једног улазног континуалног поља које представља дигитални модел површи терена (ДМТ). Некада је улаз готов ДМТ у одговарајућем формату (најчешће је то грид формат), а некада улаз представља оригинални узорак прикупљених података у форми скупа неправилно распоређених тачака са измереним висинама и на основу којих тек треба формирати модел површи терена, тј. интерполовати висине за све ћелије грида.

1.2. Монте Карло симулације

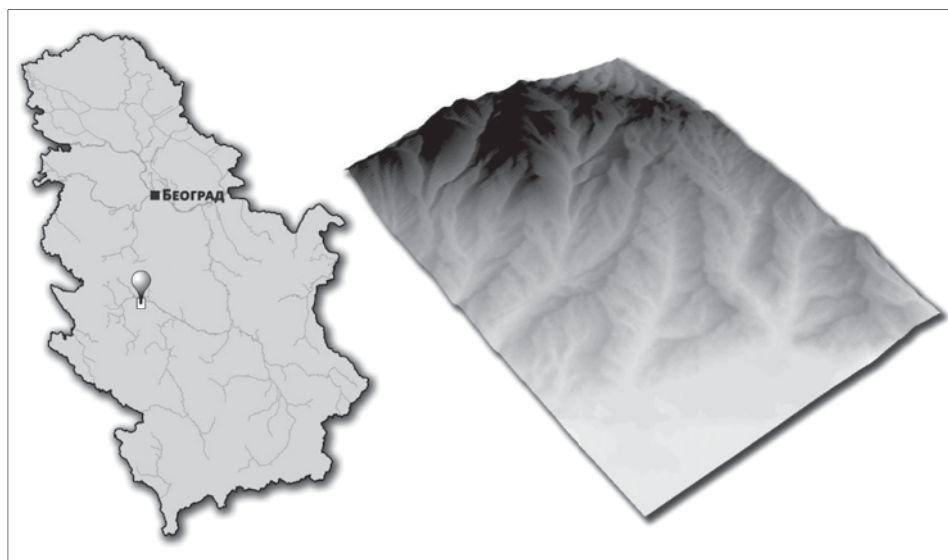
Монте Карло симулација или Монте Карло метода представља стохастичку, симулациону методу, односно алгоритме који уз помоћ случајних или квази-случајних бројева, великог броја прорачуна и понављања предвиђају понашање сложених физичких и математичких система. (Burrough, McDonnell, 2006). Монте Карло симулације су корисне за моделовање феномена са великом несигурношћу улазних података. Код примена ГИС операција утицај несигурност улазних података на финални производ, а сами тим и квалитет истог тог производа може се оценити применом Тејлоровог модела првог или другог реда, Розенблутовим методом и методом Монте Карло симулација (Heuvelink, 1998).

Основни циљ примене Монте Карло симулација код оцене несигурности ГИС анализа јесте оцена преноса грешака (несигурности) у улазним подацима на резултате ГИС анализа. Метода ради на принципу употребе такозване „грубе силе“. Користи се снага рачунара да би се на основу оригиналног скупа улазних података извршило симулирање, тј. формирање више скупова улазних података, с тим што симулирани скупови података представљају варијације оригиналних података. Ове варијације треба да одговарају несигурностима (грешкама) које су присутне у оригиналном скупу података (Burrough, McDonnell, 2006).

Примена Монте Карло симулација код просторних предикција такође омогућава да се превазиђу основни недостаци које геостатистичке интерполационе методе носе са собом, а то се првенствено односи на резултујућу изгладану површ која заобљава локалне екстремуме. Применом Монте Карло симулација могуће је добити као резултат површи комплексније текстуре (Pejović *et al.*, 2012).

2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Истраживано подручје (Слика 2) представља околину града Чачка где су измерене висине терена на 15862 локације. Подручје поседује варијабилне карактеристике рељефа; од широке алувијалне равни Западне Мораве на североистоку ($H_{min}=229mnm$) до брдско планинског система Јелица у јужним деловима истраживаног подручја ($H_{max}=777mnm$). Наведене карактеристике квалификују истраживано подручје за анализу утицаја несигурности површи терена за прорачун ПКО.



Слика 2. Локација и тродимензионални приказ истраживаног подручја
Figure 2. Locations and a three-dimensional view of the study area

За реализацију постављеног задатка потребно је коректно обавити следеће операције:

- оцена несигурности моделиране површи терена (оцена несигурности улазних података);
- формирање ДМТ-а (биће коришћена интерполација, тј. предикција висина у хелијама грида по кригинг методи);
- симулације улазних скупова података (биће коришћена условна Гаусова симулација);
- обрада симулираних скупова података (прорачун ПКО) и стохастичка анализа резултата.

Свака од ових операција ће бити укратко објашњена у даљем тексту рада. Оцена несигурности моделиране површи терена има за циљ да утврди колики је ниво несигурности саме моделиране површи терена. У наредном поглављу биће показано да је она проузрокована: грешкама мерења висина у датим тачкама, локалним варијацијама рељефа које нису на одговарајући начин обухваћене прикупљеним подацима (па се манифестују као просторно некорелисане варијације површи) и самим процесом формирања модела површи терена изабраном методом интерполације (у овом раду кориштена је кригинг метода предикције). Грешке мерења висина и локалне варијације биће збирно оцењене преко груменског ефекта (енг. nugget effect) вариограма. Вариограмом ће се описати и просторна зависност вредности површи (просторна структура површи), па ће вариограм такође бити кориштен и за оцену вредности предикције путем кригинга, али и оцену грешке

предикције која је кључна за оцену несигурности ДМТ-а који се користи за прорачун ПКО. Оцењена несигурност ДМТ-а биће основ за симулирање улазних скупова података. Циљ је да се добије више варијација полазног ДМТ-а (више симулираних растера) којима се на тај начин добро моделира несигурност ДМТ-а. Ови растери се затим користе за прорачун ГИС анализа а у овом раду за прорачун просторне концентрације отицаја.

На крају растери који представљају резултате ПКО анализе се статистички обрађују, односно рачуна се средња (највероватнија) вредност ћелије и стандардно одступање за сваку ћелију.

2.1. Оцена несигурности моделиране површи терена

Несигурност је неизбежно својство нашег окружења, информација о окружењу, и наше спознаје окружења и самим тим и просторних анализа. Главни проблем коју несигурност доноси у просторним анализама јесу недоумице и немогућност да се донесу одлуке на основу расположивих информација, као и могућност да донесене одлуке нису исправне, јер су због несигурности улазних података темељене на нетачним информацијама. Главни узрок несигурности просторних анализа јесте што је стварни свет исувише комплексан и са много детаља тако да га је практично немогуће у целости представити у дигиталном облику. Због тога се кроз поступак прикупљања података један део информација заувек изгуби. Други део су, наравно, грешке самих мерења приликом прикупљања информација, а трећи део грешке модела просторних анализа.

У овом раду ће разматрања бити ограничена на површ терена и њено коришћење за хидролошке и геоморфолошке анализе, али се исти принципи и технике могу применити и на друге типове површи и врсте просторних анализа.

Моделирање површи применом геостатистичких метода интерполације (предикције) започиње квантификацијом просторне структуре површи која се моделира (Cvijetinović, 2005).

Квантификација просторне структуре површи, тј. оцена просторне аутокорејације вредности атрибута у тачкама површи (висина у референтним тачкама површи терена) и висине некорелисаног шума у подацима изводи се преко моделирања вариограма (полувариограма) или ковариограма на основу стохастичке анализе вредности атрибута (висина) у тачкама из узорка. Вариограмом се постиже робуснија оцена просторне зависности него ковариограмом у случајевима када услови стационарности нису у потпуности задовољени (Diggle, Ribeiro, 2007). Зато је у овом раду коришћен вариограм.

Може се закључити да је избор одговарајуће функције полувариограма кључан за квантификацију просторне структуре површи (моделирање просторних својстава површи као резултата случајног процеса), па самим тим и за оцену њене несигурности. За функцију вариограма могу се изабрати: сферна, експоненцијална,

гаусова, квадратна, степен, линеарна, логаритамска, кубна и друге функције, као и њихове комбинације, али се у пракси најчешће користе прве три. Функција вариограма и њени параметри се бирају тако да се њоме добро апроксимирају емпиријске вредности полуваријанси добијене из узорка. На основу добијеног вариограма може се оценити и да ли у подацима уопште постоји просторна зависност, тј. да ли просторна предикација уопште има смисла.

Поред важности избора одговарајуће функције вариограма од кључне важности јесу и сами мерени подаци. Уколико распоред и број мерења није довољно репрезентативан оцена вариограма неће бити задовољавајућа. Због тога је потребно имати квалитетне податке у смислу броја и распореда мерења.

На основу функције вариограма (или ковариограма) и средње вредности процеса могу се уз помоћ Монте Карло симулација и условне Гаусове симулације симулирати процеси са истим просторним стохастичким карактеристикама. На основу већег броја симулација могу се у површ терена вратити варијације (шум) које се стандардно отклањају у поступку кригинга. Са друге стране, шум који представља несигурност моделиране површи терена може имати значајног утицаја на несигурност резултата просторних анализа, а посебно на хидролошке анализе као што је смер отицаја и просторна концентрација отицаја.

2.2. Формирање ДМТ-а применом интерполације по кригинг методи

Хидролошке анализе, као и уосталом највећи број анализа континуалних поља, полази од претпоставке да је континуално поље (дигитални модел терена - ДМТ) дефинисано математички, у виду правилне или неправилне теселације. Правилна теселација, тј. представљање поља у виду грида (растера) је знатно чешћи случај, јер су алгоритми за просторне анализе над овим моделом знатно једноставнији од одговарајућих алгоритама за моделе са неправилном теселацијом (најчешће су то модели са мрежом неправилних троуглова - ТИН). Пошто се подаци о површи којом се дефинише континуално поље најчешће прикупљају узорковањем (енг. *sampling*) који обезбеђује вредности поља у тачкама које су мање или више неправилно распоређене по подручју од интереса, први корак код анализе континуалних поља (па и код дигиталног модела површи терена) је формирање математичке површи терена на основу узорка. Стандардан поступак код поља представљених у виду грида је интерполација вредности поља у ћелијама грида. За ове потребе врло често се користе геостатистичке методе, тј. нека од кригинг метода.

Кригинг метода припада геостатистичким методама интерполације и њеном применом, статистички посматрано, треба очекивати најтачније резултате приликом моделирања неке површи на основу измерених вредности у референтним тачкама (Isaaks, Srivastava, 1989).

Кригинг методом се у тачкама у којима се врши предикација површи добија линеарна, најбоља (варијанса вредности предикације и тачне вредности је статистички најмања) и (сем за случај простог кригинга) непомерена оцена

вредности површи. Сама ефикасност кригинг методе у великој мери зависи од квалитета моделирања вариограма (коваријационе функције) и моделирања тренда, тј. избора одговарајућих параметара интерполације. Са друге стране, чак и са недовољно добро изабраним параметрима интерполације, кригинг метода обезбеђује резултате који нису лошији од конвенционалних метода интерполације.

Такође, кригинг метода за разлику од конвенционалних метода интерполације даје оцену грешке предикције (стандардно одступање, варијанса грешке или кригинг варијанса) за сваку интерполовану тачку. Ово је врло важно и представља основ за оцену несигурности површи.

Битно је нагласити да се коришћењем кригинг методе добија глатка површ при чему је степен глачања пропорционалан варијанси срачунатој из укупног узорка, тј. шума. Што је шум више присутан у подацима, то ће и глачање бити веће. У свом основном облику кригинг метода је егзактна (тачна) метода интерполације, па се у референтним тачкама интерполацијом добијају полазне, тј. познате вредности (интерполована површ пролази кроз референтне тачке). Ово је такозвана чиста предикација. Уколико се вредност шума респектује током интерполације, реч је о предикцији са филтрирањем.

Не улазећи у детаље математичког апарата који се користи за кригинг предикцију и који се може наћи на много места у литератури (Isaaks, Srivastava, 1989; Bailey, 1995; DeSmith, 2007), овде треба рећи да основ, како за предикцију вредности површи у некој тачки, тако и за оцену грешке предикције те вредности, представљају вредности у референтним тачкама, вредности полувариограма (ковариограма) између референтних тачака и вредности полувариограма (ковариограма) између тачке у којој се врши предикција и референтних тачака. Из овог је сасвим јасно колики значај код кригинг методе има моделирање вариограма (ковариограма).

Формирање ДМТ-а применом интерполације по кригинг методи се ради тако што се најчешће формира гريدна структура тј. ДЕМ. Прво се изабере одговарајућа вредност димензије грида, а затим се по горе описаном поступку врши предикција вредности за све ћелије грида (централна тачка ћелије). Редослед избора ћелија грида код прорачуна је небитан.

2.3. Условна Гаусова симулација

Условне симулације су корисне за добијање реалне слике о просторној варијабилности. Уствари, оне су једна од алатки за оцену утицаја просторне несигурности на резултате сложених анализа, као што је просторна концентрација отицаја. Условне симулације улазе у оквир Монте Карло симулација, тј. оне представљају начин да се за потребе Монте Карло симулација симулирају улазни скупови података који су просторног карактера. Битно је нагласити да се не ради о директно креираној условној симулацији него је у питању метод који се користи за трансформацију безусловних симулација у условне симулације (Cressie, 1991).

Саставни елементи условне симулације су средња вредност $\mu(\cdot)$, коваријациона функција $C(\cdot, \cdot)$ и сами подаци Z . Захтева се да условна симулација $z_{cs}(\cdot)$ прође кроз податке Z , тј. да се задовољи услов $z_{cs}(\cdot) = z(x_i)$, $i=1, \dots, n$, где су $z(x_i)$ вредности површи у референтним тачкама (x_i) (Cressie, 1991). Кригинг интерполација задовољава овај услов али површ не поседује довољно информација о просторној несигурности јер је глаткија од реалне површи.

Средња вредност већег броја независних условних симулација у одређеној тачки тежи кригинг оцени, а варијанса кригинг варијанси. Другим речима, условна симулација „шета“ између узоркованих тачака у распону који је једнак кригинг стандардној грешци (Chiles, Delfiner, 1999).

Практична реализација условне Гаусове симулације за терен површи представљен у форми грида састоји се у томе да се за посматрано подручје прво креира GRID са истом величином и бројем ћелија као код улазног грида али и са истим стохастичким својствима (варијацијама и просторном зависношћу). На овај начин се креира безуслован процес. Затим се на основу вредности тог грида у референтним тачкама кригинг методом интерполују остале вредности ћелија у гриду. Разлика између ова два грида представља грешку кригинга описану као $z_{NS}(X) - z_{NS}^*(x)$. Када се ова грешка кригинга сабере са полазним GRIDом који описује површ терена добије се једна реализација условне Гаусове симулације површи терена.

3. РЕЗУЛТАТИ

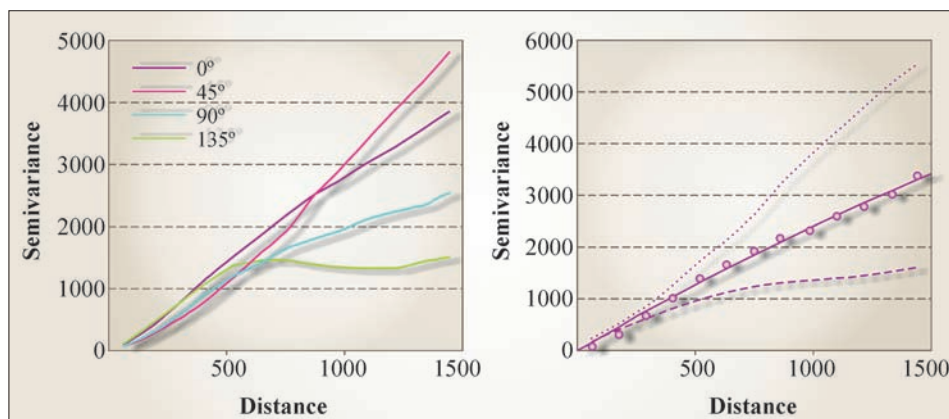
За реализацију практичног дела коришћен је програмски језик R* и пакет RSAGA**. Програмски језик R је софтверско окружење за статистичке прорачуне и графику, док је RSAGA пакет који омогућује приступ ГИС функцијама софтверског окружења SAGA.

3.1. Моделирање вариограма

Прво што је потребно урадити јесте оценити и моделовати функцију вариограма. Ово је уједно и најважнији део практичног рада јер ће од квалитета избора функције вариограма зависити и квалитет оцене несигурности просторних анализа услед несигурности површи. Коришћењем методе најмањих квадрата моделирана је функција вариограма. Графикон 1а представља оцењене вариограме у четири правца док 1б представља оцењени вариограм под претпоставком да је просторна аутокорејација независна од правца (површ је резултат процеса који је изотропан).

* Web page: <http://cran.r-project.org/doc/manuals/R-lang.html>

** Web page: <http://www.saga-gis.org/en/index.html>



Графикон 1. (а) Емпиријски вариограми у четири правца; (б) функција вариограма са интервалом поверења

Diagram 1. (a) Empirical variograms in four directions; (b) variogram function and its confidence interval

Пре самог моделирања функције вариограма корисно је установити да ли је процес за који се врши моделирање вариограма изотропан. То се може установити на основу вариограма по правцима.

За дати случај испробане су три функције за моделирање вариограма (сферна, експоненцијална и гаусова) и на основу резултата и квалитета слагања (најмања вредност одступања од вредности добијених из узорка) изабрана је експоненцијална функција. На основу графикана 1б може се видети да изабрана функција доста добро описује емпиријски одређене вредности.

Поред методе најмањих квадрата софтверски пакети често омогућавају „ручно“ подешавање моделиране функције вариограма, тј. подешавање параметара функције уз визуелну контролу слагања са емпиријски одређеним вредностима. Наравно, овај метод је далеко субјективнији али може бити користан уколико је потребно поправити моделовану функцију вариограма.

Процес моделирања вариограма може бити субјективан у поступку избора функције и усвајања параметара функције, због тога је то веома осетљиво место приликом оцене несигурности моделиране површи терена и може имати велики утицај на оцењену несигурност просторне анализе. Различите функције могу дати различите резултате што може створити лажну слику о већој или мањој несигурности просторне анализе услед несигурности просторне површи.

3.2. Симулације ДЕМ-ова

Након што је креирана функција вариограма може се симулирати жељени број ДЕМ-ова. За те потребе користе се Монте Карло симулације односно условна

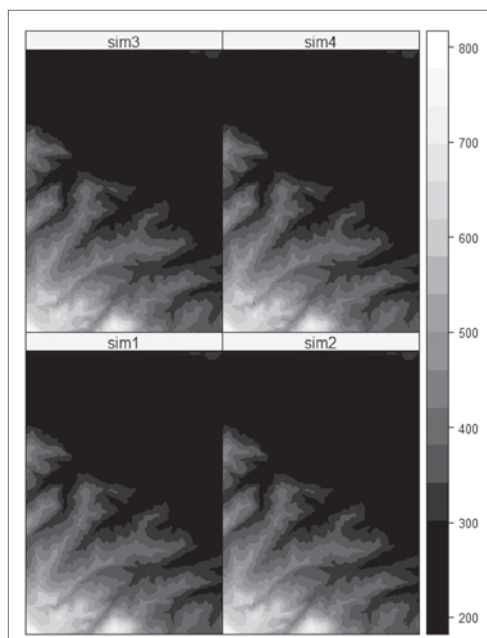
Гаусова симулација. Да би се добили стабилни резултати број симулација мора бити велики, али који је то заиста број зависи од тачности која се жели постићи. Тачност Монте Карло симулација је пропорционална квадратном корену из броја симулација, тако ће бити потребан релативно велики број симулација да би се постигла одређена тачност (Hengl, 2011). Са друге стране, Монте Карло симулације су веома захтевне у погледу процесорског времена и меморије тако да ће у овом случају бити коришћено 100 симулација. С обзиром на тренутни ниво развоја софтверских и хардверских ресурса велики број овако генерисаних гридова данас не представља проблем. У већини апликација он је обично 100, мада је Норе (1986) доказао да је само 19 реализација симулација довољно да се добију статистички употребљиви резултати са 95% нивоом поверења.

Пре самих симулација потребно је одредити величину ћелије грида на основу којих ће бити извршена интерполација висина. Потребно је обратити пажњу на избор оптималне величине ћелије грида. Превише велика ћелија грида може додатно допринети губитку информација и повећати несигурност просторних анализа, мала ћелија грида може непотребно повећати и успорити прорачуне. За истраживано подручје изабрана је величина грида $25 \times 25 \text{ m}$, тако да је димензија симулираних ДЕМ-ова 234×337 а укупан број интерполованих тачака износи 78858.

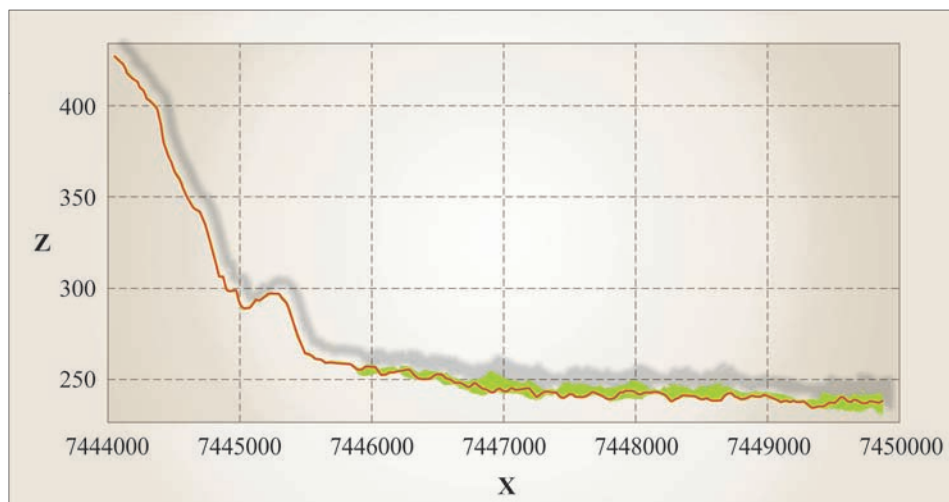
На слици 3 приказане су четири симулације ДЕМ-а коришћењем условне Гаусове симулације.

На исти начин су креиране и остале симулације. Најбољи начин за приказ разлике између симулација јесте упоређивање пресека профила површи терена за сваку симулацију. На графикону 2 су приказани пресеци профила у правцу исток – запад по координати $X = 4860000 \text{ m}$.

Јасно се види да се највећа разлика (до неколико метара) између симулација појављује у равничарском делу где су и мерене тачке најређе. Потврђује се претпоставка да несигурност површи, у овом случају разлика између симулација зависи од густине узоркованих тачака (Hengl, 2011).



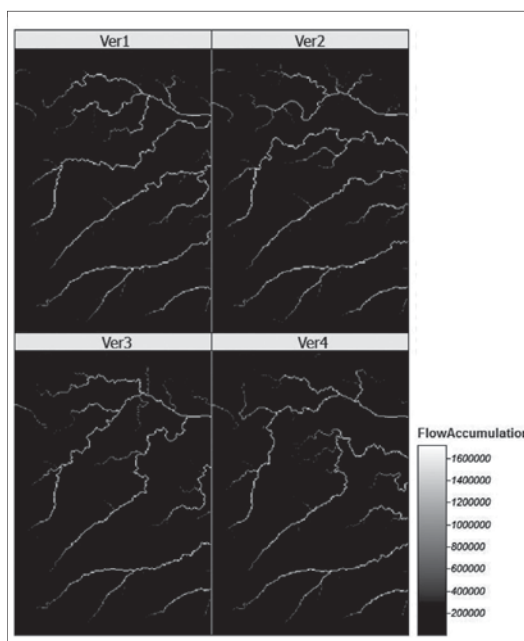
Слика 3. Четири симулације ДЕМ-а креиране условном Гаусовом симулацијом
Figure 3. Four DEM simulations created using the conditional Gaussian simulation



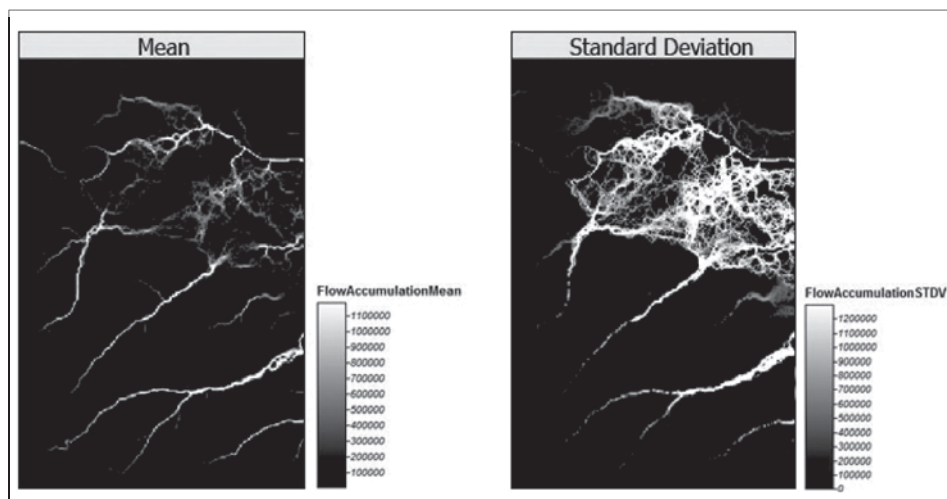
Графикон 2. Приказ профила терена, црвена линија представља профил почетног тј. интерполованог ДЕМ-а, а зелене линије, профиле за сваку од симулација ДЕМ-а.
Diagram 2. Terrain cross-section. The red line represents the cross-section of the initial, i.e. interpolated DEM, and the green lines the cross-section of each simulated DEM.

На основу генерисаних ДЕМ-ова могуће је уз помоћ пакета RSAGA креирати исто толико верзија акумулације тока. За то је коришћен алгоритам који се може пронаћи на много места у литератури (O’Callaghan, Mark, 1984). На слици 4 приказане су четири реализације акумулације тока.

Креирани растери акумулације тока се могу статистички обрадити и донети одређени закључци о несигурности просторних анализа. Статистика се врши на нивоу гريدне ћелије јер свака има различите вредности у различитим симулацијама. Коришћена статистика је веома једноставна, рачуна се средња вредност и стандардно одступање, односно варијанса.



Слика 4. Четири реализације акумулације тока
Figure 4. Four realizations of flow accumulation



Слика 5. (а) Средња вредност, (б) стандардно одступање
 Figure 5. (a) Mean value, (b) standard deviation

На слици 5 приказана је средња вредност (лево) и стандардна девијација (десно) за сваку ћелију грида.

4. ДИСКУСИЈА

Средња вредност представља највероватнију вредност акумулације тока на основу 100 симулираних верзија, док вредности ћелија у гриду стандардне девијације показују колико се може „веровати“ тим вредностима. Заједно ова два грида представљају резултат оцене несигурности просторних анализа, у овом случају ПКО, узроковане несигурношћу просторне површи.

Обзиром да је ПКО вектор материје, енергије и организама у пределу, оцена његове просторне несигурности потенцијално има широку примену. Посматрано у ширем временском оквиру, GRID стандардне девијације ПКО анализе указује на повећану хидролошку активност. Просторна концентрација грида стандардне девијације ПКО указује на комплексне плавне зоне у којима су хидролошки и геоморфолошки процеси динамични. Ови фактори утичу на фреквентност и трајање засићености земљишта водом и површинског плављења што су важне егзогене предиспозиције за развој педолошких профила. Наведени фактори синергично делују на структуру и функцију флувијалних екосистема. На локалним размерама, у зонама потенцијалне промене ПКО се очекују појаве варијабилних типова биотопа који утичу на биодиверзитет подручја. На већим размерама, ова појава утиче на израженост просторне параметре диверзитета структуре предела, односно квантитет и хетерогеност предеоних елемената.

Приликом примене овог модела важно је одредити број потребних симулација приликом чега је од велике помоће праћење промена вредности излазних резултата (вредност ћелије излазног поља и његова стандардна девијација) након сваке симулације. Другим речима, након одређеног броја симулација вредности ћелија излазног поља добијеног осредњавањем резултата из свих симулација и стандардно одступање вредности сваке ћелије појединачно ће почети да се смирују и промене ће бити све мање и мање. Односно, нове симулације ће имати мали утицај на просечне вредности ћелија. Уколико може да се одреди праг значајности промене, симулације могу да се прекину ако је промена између симулација мања од задатог прага. У табели 1 приказане су средње и максималне апсолутне вредности разлика између осредњених растера резултујућег поља (ПКО) и стандардних одступања сваких 10 симулација.

Табела 1. Средње и максималне вредности разлика за средњу вредност и стандардно одступање ПКО анализе за сваку ћелију растера

Table 1. Medium and maximum differences for the mean and standard deviation of flow accumulation for each raster cell

Промене између симулација/ Changes between simulations	Осредњени растери ПКО/ Mean values of flow accumulation rasters		Стандардно одступање ПКО/ Standard deviation of flow accumulation raster	
	Средња вредност/ Mean value	Максимална вредност/ Maximum value	Средња вредност/ Mean value	Максимална вредност/ Maximum value
10 - 20	34938	3884562	73827	7972357
20 - 30	21277	1882021	50403	3376228
30 - 40	15511	1516552	38484	3065580
40 - 50	12016	1113643	29357	2667387
50 - 60	9683	1134985	23396	2694237
60 - 70	8322	661437	21606	2228643
70 - 80	7191	907728	17133	2340581
80 - 90	6251	406161	15940	1743234
90 - 100	5521	836522	14014	2629175

У овом конкретном случају велике промене дешавају се до приближно педесте итерације а затим долази до мањих промена у резултатима. Даље смањење вредности би захтевало већи број итерација. Узимајући у обзир распон вредности GRIDних ћелија (до 1 600 000) процењено је да је за потребе овог рада 100 симулација довољно.

5. ЗАКЉУЧЦИ

На основу рада у целини, како теоријског тако и експерименталног дела, дошло се до следећих закључака:

- Квалитет оцене несигурности просторне концентрације отицаја, а и других просторних анализа у највећој мери зависи од квалитета оцене несигурности моделиране површи терена, тј. избора функције и моделирања вариограма (ковариограма).
- Поред избора и моделирања функције вариограма потребно је имати квалитетне податке у смислу броја и распореда мерења. Уколико распоред и број мерења није довољно репрезентативан оцена вариограма неће бити задовољавајућа, а самим тим ни оцењена несигурност ПКО анализе.
- Број симулација зависи од жељене тачности. Симулације су захтевне у погледу процесорског времена и меморије, па се даље симулирање може прекинати оног тренутка када нове симулације буду имале безначајан утицај на укупне резултате.
- Грид ПКО представља важан геоморфолошки параметар који је тежински фактор за развој и функционисање одређене векторске појаве у пределу.
- Резултат оцене несигурности ПКО анализе је растер средњих (највероватнијих) вредности за сваку ћелију и растер стандардног одступања.
- Зоне изражене стандардне девијација ПКО се одликују сложеном еволуцијом екосистема која као крајњи резултат има изражен биодиверзитет на различитим размерама.

ЛИТЕРАТУРА

- Arnold A. (2010): *A new approach for dealing with depressions in digital elevation models when calculating flow accumulation values*, Progress in Physical Geography 6(34) (781-809)
- Bailey T.C., Gatrell A.C. (1995): *Interactive Spatial Data Analysis*, Longman
- Burrough P.A., McDonnell R.A. (2006): *Principi geografskih informacionih sistema*, превод: проф др. Branislav Bajat, проф. др. Dragan Blagojević, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд
- Chiles J.P., Delfiner P. (1999): *Geostatistics - Modeling Spatial Uncertainty*, A Wiley-Interscience publication
- Cressie N. (1991): *Statistics for Spatial Data*, Iowa State University
- Cvijetinović Ž. (2005): *Razvoj metodologije i tehnoloških postupaka za formiranje digitalnog modela terena za teritoriju države*, докторска дисертација, Грађевински факултет Универзитета у Београду
- DeSmith M.J., Goodchild M.F., Longley, P.A. (2007): *Geospatial Analysis - A Comprehensive Guide to principles, Techniques and Software Tools*, second edition, Winchester Press

- Diggle P., Ribeiro, P. (2007): *Model-based Geostatistics*, Springer
- Gessler P.E., Chadwick O.A., Charman F., Althouse L., Holmes K. (2000): *Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes*, Soil Science Society of America Journal 64 (2046-2056)
- Goetz S., Fiske G. (2008): *Linking the diversity and abundance of stream biota to landscapes in the mid-Atlantic USA*, Remote Sensing of Environment 112 (4075-4085)
- Hengl T. (2011): *A Practical Guide to Geostatistical Mapping* 2nd edition, University of Amsterdam, Amsterdam,
- Heuvelink G.B.M. (1998): *Error Propagation in Environmental Modelling with GIS*, Research Monographs in Geographical Information Science, Taylor&Francis, London
- Hope A.C.A. (1968): *A simplified Monte Carlo significance test procedure*, Journal of the Royal Statistical Society 30(582-598)
- Isaaks E.H., Srivastava, R.M. (1989): *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York City
- Jenson S.K., Domingue J.O. (1988): *Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis*, Photogrammetric engineering and remote sensing 54(11) (1593-1600)
- Maidment D.R.(1996):*GIS and Hydrologic Modeling - an Assessment of Progress*, Presented at The Third International Conference on GIS and Environmental Modeling , January 22-26, 1996, Santa Fe, New Mexico
- Martz L., Garbrecht J. (1992): *Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models*, Computers & Geosciences 18(6) (747-761)
- O'Callaghan J., Mark D. (1984): *The extraction of drainage networks from digital elevation data*, Computer vision, graphics, and image processing 28 (323-344)
- Pejović M., Bajat B., Luković J. (2012): *Spatial distribution of interpolation uncertainty: case study of isotherm map of Serbia (1991-2009)*, Bulletin of the Serbian Geographical society 92(4) (31-50)
- Sorensen R., Zinko U., Seibert J. (2006): *On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations*, Hydrology and Earth System Sciences 10 (101-112)
- http://spatial-analyst.net/book/system/files/Hengl_2009_GEOSTATe2clw.pdf

Nenad Višnjevac
Željko Cvijetinović
Branislav Bajat
Boris Radić
Ratko Ristić
Vukašin Milčanović

ESTIMATION OF FLOW ACCUMULATION UNCERTAINTY BY MONTE CARLO STOCHASTIC SIMULATIONS

Summary

Digital Elevation Models (DEMs) as square grid terrain models have emerged as the most widely used structure in geomorphometric spatial analysis. Flow accumulation represents one of

the recently derived land surface parameters obtained from DEMs that is very frequently used in hydrological and ecological analysis. It determines the size of the region over which the water from rainfall, snowfall etc. can be aggregated. Like other spatial data bases, DEMs can be affected by errors and uncertainty. It is very important to examine the effect that they may have on data analysis and spatial data modelling. Simulated DEMs based on Monte Carlo stochastic simulation techniques are very suitable for the evaluation of the impact of DEMs uncertainty on the calculation of flow accumulation.

The input data that are necessary for the calculation of flow accumulation can be an already created DEM or sample terrain height points that can be used for DEM production (interpolation). In this paper we used the second approach.

The test area (wider area of the Municipality of Čačak) accounts for 15 862 sample points of the measured terrain heights. In the first phase, the uncertainty of input data was estimated through variogram modelling and the nugget effect estimation. This is the most important part in the process of uncertainty estimation, because its quality depends on the modelling variogram function parameters. Besides that, it is necessary to have a good data quality in terms of number and spatial distribution. If the distribution and number of measurements is not good enough, the modelled variogram will not be satisfying.

Secondly, the DEM was created by using the kriging method, i.e. by interpolating grid values. The next step was to create other versions of DEMs using stochastic Monte Carlo simulations, specifically conditional Gaussian simulations. On the basis of these DEMs, 100 possible versions of flow accumulation were created. The number of simulations depends on the required accuracy. However, we can stop iterations if a new simulation has an insignificant effect on the overall results.

Statistical analysis gives us an average (most likely) solution of flow accumulation and its standard deviation. These results are presented in the form of raster maps and they depict uncertainty estimation of flow accumulation caused by terrain surface uncertainty. Prepared in this way, they present suitable inputs for subsequent hydrological and ecological design and modelling.

