

Thornthwaite-Mather vandens balanso modelio optimizavimas Monte Karlo metodu

Edvinas Stonevičius

*Vilniaus universitetas,
M. K. Čiurlionio 21,
LT-03101 Vilnius
El. paštas: edvinas.stonevicius@gf.vu.lt*

Stonevičius E. Thornthwaite-Mather vandens balanso modelio optimizavimas Monte Karlo metodu. *Geografija*. 2009. T. 45(1). ISSN 1392-1096.

Tiriant nuotėkį dažnai susiduriama su duomenų trūkumu. Vienas iš galimų šios problemos sprendimo būdų yra matematinių vandens balanso modelių taikymas. Konkretiam baseinui tinkamiausių modelių parametrų paieška dažnai yra sudėtingas ir daug laiko užimantis procesas. Šiame darbe taikant Monte Karlo optimizavimo metodą buvo analizuotas sniego modulių papildyto Thornthwaite-Mather vandens balanso modelio rezultatų jautrumas parametrų vertėms. Jautriausiai modelio rezultatai reaguoja į maksimalios dirvos drėgmės talpos ir rezervuaro koeficiento verčių pokyčius. Monte Karlo metodu galima pakankamai tiksliai nustatyti tinkamiausias šių dviejų parametrų vertes. Modeliu apskaičiuotas nuotėkis yra artimiausias realiam, kai maksimali dirvos drėgmės talpa lygi 30 mm, o rezervuaro koeficientas 0,21.

Modelio rezultatai mažiau jautrūs sniego modulio parametrų, todėl modelio optimizavimo metu nustatyti sniego modulio parametrų verčių intervalai, kada gaunami geriausi modelio rezultatai. Sniego modulio parametrų verčių neapibrėžtumas beveik nepaveikia modeliu apskaičiuoto metinio nuotėkio tūrio, tačiau išryškėja sezoninėje nuotėkio kaitoje.

Raktažodžiai: nuotėkis, Thornthwaite-Mather modelis, vandens balansas, optimizavimas Monte Karlo metodu, jautrumo tyrimas

ĮVADAS

Tiriant baseinų nuotėkį dažnai susiduriama su duomenų apie nuotėkį stygiumi. Įvairių baseinų nuotėkio stebėjimo trukmė gali būti labai trumpa arba iš viso nevykdyta. Retas hidrologinių stebėjimų tinklas labai apsunkina mažesnių upių baseinų vandens balanso vertinimą.

Nuo antrosios XX a. pusės matavimų duomenų trūkumą bandoma kompensuoti įvairaus sudėtingumo matematiniiais modeliais. Hidrologiškai mažai ištirtiems baseinams dažniausiai taikomi patys paprasčiausi vandens balanso modeliai. Daugelyje tokių modelių pagal garingumo ir kritulių duomenis vertinami likę vandens balanso elementai: garavimas, paviršinis ir požeminis nuotėkis bei vandens atsargos baseine. Šiuos vandens balanso elementus veikia vietinės baseino sąlygos: reljefas, hidrografinis tinklas, žemėnauda ir dirvožemiai. Dažnai baseino savybių poveikis vandens balanso modeliuose realizuojamas empiriniais koeficientais, kurių verčių negalima išmatuoti. Parinkę baseinui tinkamos struktūros modelį ir koeficientų vertes, turėtume gauti matematinę sistemą, kuri sugebėtų pakankamai tiksliai atspindėti

tiriamo baseino atsaką į išorinių (klimato) elementų pokyčius ir įvertintų juos atitinkantį nuotėkio pokytį.

Šio tyrimo tikslas yra remiantis Monte Karlo optimizavimo metodu (Metropolis ir kt., 1949) pritaikyti Thornthwaite-Mather vandens balanso modelį (Thornthwaite ir kt., 1955) Žuvinto ežero baseinui. Ieškant optimalaus modelio parametrų rinkinio atlikta modelio rezultatų jautrumo ir neapibrėžtumo analizė.

DUOMENYS IR DARBO METODIKA

Klimatinius Žuvinto ežero baseino rodiklius galima vertinti pagal arčiausiai esančios ir ilgą patikimų stebėjimų eilę turinčios Lazdijų meteorologijos stoties (MS) duomenis. Šiame darbe, vertinant Žuvinto ežero baseino nuotėkį, buvo naudoti 1961–2000 m. mėnesio kritulių kiekio ir vidutinės paros oro temperatūros duomenys.

Vertinant garingumą Žuvinto ežero baseine, oro temperatūros duomenys panaudoti remiantis Thornthwaite metodu (Thornthwaite, 1948). Pastaraisiais metais Lietuvoje šis garingumo vertinimo metodas yra dažnai taikomas įvairiuose hi-

drologiniuose tyrimuose (Stonevicius ir kt., 2008; Taminskas ir kt., 2008). Viena šio metodo populiarumo priežasčių – garingumas įvertinamas vien tik pagal vidutinę mėnesio oro temperatūrą, o rezultatų tikslumas artimas sudėtingesniems metodams (Lu ir kt., 2005; Alkaeed ir kt., 2006).

Žuvinto ežero baseine epizodiškai veikė tik dvi hidrologijos stotys: Sutrės (baseino plotas virš HS – 25 km², veikė 1970–1973 m.; Kilkus, 1998) ir Spernios upės (baseino plotas virš HS – 115 km², veikė 1969–1971 m.; Kilkus, 1998). Sutrė yra Dusios ežero intakas ir atspindi tik labai nedidelės Žuvinto ežero baseino dalies hidrologinį režimą. Metelytės hidrologijos stotis yra ant Spernios upės, kelis šimtus metrų žemiau Dusios ežero, ir atspindi šio ežero nuotėkio režimą.

Ežero baseine esančių hidrologijos stočių duomenų sekos yra trumpos, jų reprezentuojama teritorija maža, todėl, vertinant baseino hidrologinį režimą, tenka remtis kitų hidrologijos stočių duomenimis. Remdamasi daugiamečiais Šešupės ties Kalvarija duomenimis, M. Kovalenkovienė (2004) įvertino vidutinį metinį Žuvinto ežero baseino nuotėkį ir jo sezoninį pasiskirstymą. Šie nuotėkio duomenys buvo naudojami vertinant vandens balanso modelio parametrų rinkinio tinkamumą.

Pagal garingumą ir kritulių kiekį Thornthwaite-Mather (toliau TM) modeliu galima apskaičiuoti nuotėkio aukštį R_M kiekvieną tirtą laikotarpio mėnesį, tačiau modelis yra konceptualus ir juo įvertintas konkretaus mėnesio nuotėkis nėra tikslus. Daugiametis nuotėkis ir jo sezoninis pasiskirstymas gali būti įvertinti tiksliau (McCabe ir kt., 1989; Xu ir kt., 2005), nes skaičiuojant vidutines vertes teigiamo ir neigiamo ženklų paklaidos atsveria viena kitą. Modeliu įvertintas vidutinis metinis nuotėkis R_M ir vidutinis sezoninis jo pasiskirstymas buvo lyginami su M. Kovalenkovienės (2004) įvertintu vidutiniu metiniu Žuvinto ežero baseino nuotėkiu R_D ir jo sezoniniu pasiskirstymu (1 pav.).

Modelio parametrų rinkinio tinkamumas vertintas statistiniais rodikliais, nusakančiais gautų rezultatų ir matuotų duomenų atitikimą. Dvi duomenų sekos gali būti pasislinkusios per ΔR dydį (1). Tokiu atveju modeliu įvertintas vidutinis metinis nuotėkis $\overline{R_M}$ iš Žuvinto ežero baseino skirtųsi nuo realaus vidutinio metinio nuotėkio $\overline{R_D}$. Vertinant balansą, vidutinė skaičiavimo paklaida ΔR yra ypač svarbi, nes rodo, ar per laiko intervalą apskaičiuotas vandens nuotėkio tūris atitinka realųjį:

$$\Delta R = \overline{R_M} - \overline{R_D}. \quad (1)$$

Matuotų ir modeliu apskaičiuotų reikšmių sutapimas įvertintas pagal nuokrypių vidurkio kvadratinę šaknį – $RMSE$ (2). $RMSE$ leidžia įvertinti duomenų sklaidos apie regresijos kreivę glaudumą. Modelio rezultatai tikslesni, kai nuokrypių vidurkio kvadratinė šaknis $RMSE$ yra maža.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_{Di} - R_{Mi})^2}{N}}. \quad (2)$$

Hidrologijoje modelio tinkamumas dažnai vertinamas pagal Nash-Sutcliffe modelio efektyvumo koeficientą E (Nash ir Sutcliffe, 1970):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (R_{Di} - R_{Mi})^2}{\sum_{i=1}^N (R_{Di} - \overline{R_D})^2}. \quad (3)$$

Nash-Sutcliffe koeficientas kinta nuo $-\infty$ iki 1. Jei modelio efektyvumo koeficientas E yra tarp $-\infty$ ir 0, tai stebėjimų vidurkis yra informatyvesnis nei naudojamas modelis. Idealiai modelio rezultatai atitinka matavimo rezultatus tada, kai modelio efektyvumo koeficientas $E = 1$. Priimtina E reikšme laikoma 0,5 ir daugiau, tačiau mūsų darbe lyginamos tik 12-os narių duomenų eilės, todėl modelis buvo laikomas tinkamu, kai Nash-Sutcliffe koeficientas buvo didesnis arba lygus 0,9.

Thornthwaite-Mather vandens balanso modelis

Thornthwaite-Mather (1955) modelis Lietuvoje nėra plačiai taikytas, todėl tikslinga pateikti šio modelio struktūros aprašymą. Tai dviejų rezervuarų tipo teritorijos vandens balanso modelis (1 pav.). Vienas iš modelio rezervuarų yra dirvos drėgmės atsargos, o kitas – vandens atsargos, susikaupusios baseine. Modelį galima aprašyti vandens balanso lygtimi:

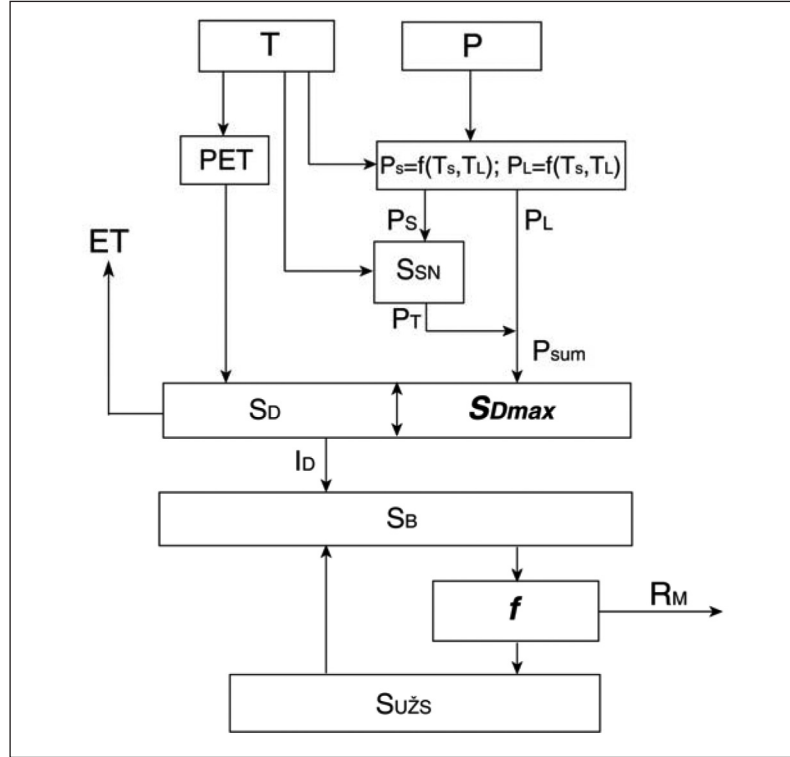
$$\frac{dS_B}{dt} = P_{sum}(T, t) - ET(P_{sum} - PET, S_D, S_{Dmax}, t) - R(S_B, f, t); \quad (4)$$

čia: $\frac{dS_B}{dt}$ – vandens atsargų pokytis baseine per laiko žingsnį t ; S_B – vandens atsargos baseine mm; P_{sum} – suminiai krituliai (skysti krituliai + sniego tirpsmo vanduo) mm; T – oro temperatūra °C; ET – suminis garavimas (evapotranspiracija) mm; PET – garingumas mm; S_D – dirvos drėgmės atsargos mm; S_{Dmax} – maksimali dirvos drėgmės talpa mm; R – nuotėkis mm; f – rezervuaro koeficientas.

Thornthwaite-Mather modelis gali būti taikomas tik tiems baseinams, kurie neturi sniego dangos. Siekiant pritaikyti šį modelį Lietuvos klimato sąlygoms, originalus TM modelis buvo papildytas sniego moduli (McCabe ir kt., 2007).

TM modelio įvesties duomenys yra vidutinis mėnesio kritulių kiekis (P , mm) ir vidutinė mėnesio oro temperatūra (T , °C) (1 pav.). Krituliai yra vienintelis modeliuojamos sistemos vandens pajamų šaltinis. Nuo oro temperatūros (T) priklauso kritulių fazinė sudėtis (P_s – kieti krituliai, P_L – lietus). Skysta kritulių dalis P_L patenka ant dirvos paviršiaus, o kieti krituliai kaupiami sniego dangoje S_{SN} . Sniegui tirpstant tirpsmo vanduo P_T papildoma skystus kritulius P_L (1 pav.).

Suminis garavimas ET modelyje priklauso nuo suminio kritulių P_{sum} kiekio ir garingumo PET skirtumo ($P_{sum} - PET$), drėgmės atsargų dirvoje S_D ir maksimalios dirvos drėgmės talpos S_{Dmax} . Vandens kiekis, viršijantis S_{Dmax} , pereina į baseino vandens atsargų rezervuarą (S_B). Baseino vandens atsargos (S_B) apima vandens atsargas baseino hidrografiniame tinkle ir gilesniuose požeminio vandens horizontuose.



1 pav. Thornthwaite-Mather modelio su sniego moduliui konceptualioji diagrama (simboliai paaiškinti tekste)
Fig. 1. Conceptual diagram of Thornthwaite-Mather model with incorporated snow module (explanation in the text)

Dalis baseine esančių vandens atsargų formuoja nuotėkį, o likusi dalis užsilaiko baseine iki kito laiko žingsnio. Rezervuaro koeficientas f nulemia, kuri vandens atsargų dalis nutekės (1 pav.).

Skaičiuojant vandens balansą pirmiausia nustatoma iškritusių kritulių fazė. Kritulių fazinė sudėtis priklauso nuo vidutinės mėnesio temperatūros T_i (°C) ir nuo TM modelio parametrų: mėnesio, per kurį susiformuoja nuolatinė sniego danga, oro temperatūros T_s (°C) ir vidutinės mėnesio, kurio metu išnyksta nuolatinė sniego danga, oro temperatūros T_L (°C) (5, 6, 7 lygtis):

$$P_{Si} = m_i \times P_i, \quad (5)$$

$$PL_i = P_i - P_{Si}; \quad (6)$$

čia: P_i – per i mėnesį iškritę krituliai mm; P_{Si} – per i mėnesį sniego pavidalu iškritę krituliai mm; PL_i – per i mėnesį lietaus pavidalu iškritę krituliai mm; m_i – sniego tirpimo / susidarymo koeficientas i mėnesį.

$$m_i = \begin{cases} 1 & \text{kai } T_i \leq T_s \\ 0 & \text{kai } T_i \geq T_L \\ \frac{(T_L - T_i)}{(T_L - T_s)} & \text{kai } T_s < T_i < T_L \end{cases}. \quad (7)$$

Sniego atsargos baseine i mėnesį (S_{Sni} mm) apibūdinamos lygtimi:

$$S_{Ni} = S_{Sni-1} + P_{Si} - P_{Ti}; \quad (8)$$

čia: S_{Sni-1} – sniego atsargos baseine prieš tai buvusį mėnesį mm; P_{Si} – iškritusio sniego kiekis i mėnesį mm; P_{Ti} – per mėnesį ištirpusio sniego kiekis mm.

$$P_{Ti} = (1 - m_i) \times m_{\max} \times S_{Sni}; \quad (9)$$

čia m_{\max} – maksimalus sniego tirpimo greitis, parodantis, kuri dalis susikaupusios sniego dangos gali ištirpti per mėnesį. Kai $T_i \geq T_L$, maksimalus sniego tirpimo greitis m_{\max} laikomas lygiu 1, nes kitu atveju sniego danga per visą šiltą laikotarpį mažėja, tačiau visiškai neišnyksta.

Ištirpęs sniegas su skystais krituliais sudaro i mėnesio suminius kritulius:

$$P_{sumi} = P_{Ti} + P_{Li}. \quad (10)$$

Suminis garavimas ET priklauso nuo garingumo PET . Jei i mėnesį suminis garavimas P_{sumi} yra mažesnis nei garingumas PET_i , tuomet suminis garavimas ET_i vertinamas lygtimi (Thornthwaite ir kt., 1955):

$$ET_i = P_{sumi} - PET_i + S_{Dai}; \quad (11)$$

čia: S_{Dai} – drėgmės, kuri gali būti išgarinta iš dirvos, kiekis mm. Jis įvertinamas pagal lygtį:

$$S_{Dai} = S_{Di-1} - \left(\text{abs}(P_{sumi} - PET_i) \times \frac{S_{Di-1}}{S_{Dmax}} \right). \quad (12)$$

Iš dirvos galinčio išgaruoti vandens kiekis S_{Dai} mažėja, jei drėgmės atsargų kiekis S_{Di-1} (12) dirvoje yra mažesnis. TM modelyje laikoma, jei i mėnesį suminio kritulių kiekio ir drėgmės, kuri gali būti išgarinta iš dirvos, kiekio suma yra mažesnė už garingumą ($P_{sumi} + S_{Dai} < PET_i$), tuomet vandens deficitas yra lygus garingumo ir suminio garavimo skirtumui ($PET_i - ET_i$). Jei suminio kritulių kiekis viršija garingumą ($P_{sumi} > PET_i$), tai TM modelyje garingumas ir suminis garavimas yra lygūs ($PET_i = ET_i$), o neišgaravęs vanduo ($P_{sumi} - ET_i$) papildo dirvos atsargas S_{Di} . Jei vandens atsargos dirvoje S_{Di} viršija maksimalią dirvos drėgmės talpą S_{Dmax} , perteklinis vanduo S_{PERTi} patenka į gilesnius sluoksnius ir papildo vandens atsargas baseine S_{Bi} . Dalis vandens atsargų nuteka per i mėnesį, o likusi užsilaiko baseine ir formuoja nuotėkį kitais mėnesiais (13, 14):

$$R_i = S_{Bi} \times f; \quad (13)$$

čia: f – rezervuaro koeficientas.

$$S_{UZSi} = S_{Bi} \times (1 - f). \quad (14)$$

Baseine užsilaikęs vanduo grįžta į aktyvias baseino vandens atsargas kitą mėnesį:

$$S_{Bi} = S_{UZSi-1} + S_{PERTi}. \quad (15)$$

Per i mėnesį iš baseino nutekantis vandens kiekis yra nulėmtas i mėnesio vidutinio kritulių kiekio, vidutinės mėnesio temperatūros ir garavimo bei vandens atsargų, sukauptų baseine per prieš tai buvusius mėnesius.

TM modelis gali būti kalibruojamas dviem parametrais – maksimalia dirvos drėgmės talpa S_{Dmax} ir rezervuaro koeficientu f . Sniego moduliui papildomai nurodomi dar trys parametrai: vidutinės mėnesių, kurių metu susiformuoja ir

išnyksta pastovi sniego danga, oro temperatūros T_s ir T_L ir maksimalaus sniego tirpimo koeficientas m_{max} . Konkrečiam baseinui modelis taikomas derinant visus penkis parametrus.

Thornthwaite-Mather modelio optimizavimas Žuvinto ežero baseinui

Thornthwaite-Mather modelio struktūra yra pakankamai sudėtinga (1 pav.), tačiau modeliui nereikia daug skaičiavimo ir laiko resursų. Siekiant nustatyti labiausiai Žuvinto ežero baseinui tinkančius modelio parametrus, buvo atliekamas modelio optimizavimas Monte Karlo metodu. Šis metodas paremtas atsitiktiniu modelio parametrų derinių sudarymu iš galimų reikšmių erdvės bei gautų modelio rezultatų lyginimu su matavimų duomenimis.

Pirmame Monte Karlo optimizavimo etape nustatomos galimų modelio parametrų verčių ribos ir pagal jas nusakoma galimų modelio parametrų erdvė PE_0 . Šio tyrimo metu PE_0 parametrų erdvės ribos buvo parinktos pagal G. J. McCabe, S. L. Markstrom (2007) rekomenduojamas parametrų S_{Dmax} , T_s , T_L ir m_{max} vertes pasirenkant visą galimą parametro f reikšmių intervalą $[0; 1]$ (1 lentelė).

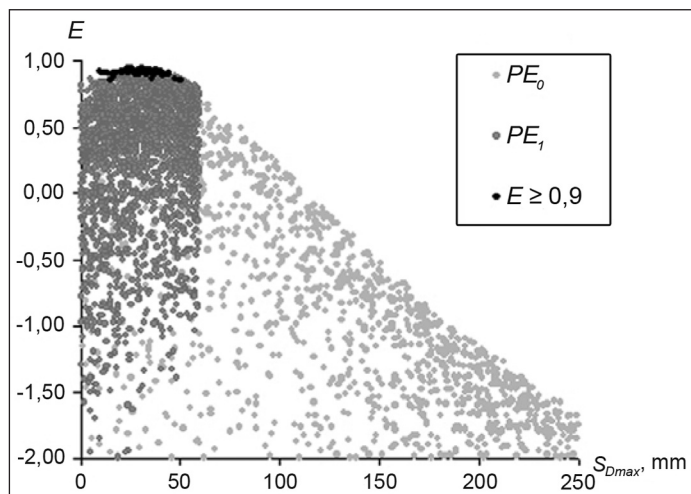
Kitame Monte Karlo optimizavimo etape atliekami skaičiavimai su atsitiktinai iš parametrų erdvės pasirinktais parametrų reikšmių deriniais. Iš gautų skaičiavimo rezultatų sprendžiama, koks parametrų derinys yra tinkamiausias ir kaip parametrai veikia modelio rezultatus.

Siekiant nustatyti optimalius modelio parametrus, TM modeliu skaičiuotas nuotėkis, atitinkantis 2000 atsitiktinių parametrų reikšmių iš parametrų erdvės PE_0 derinių (2, 3, 4 pav.). Pagal gautus modelio skaičiavimo rezultatus išskirta pirminės parametrų erdvės PE_0 sritis PE_1 , kurioje modelio rezultatai yra artimiausi stebėjimų duomenims. Parametrų erdvės PE_1 ribos išskirtos pagal tai, kokiame maksimalios dirvos drėgmės talpos S_{Dmax} ir rezervuaro koeficiento f verčių intervale modelio efektyvumo koeficientas E pasiekia didžiausias reikšmes (2, 3 pav.). Naujoje parametrų erdvėje PE_1 maksimali dirvos drėgmės talpa S_{Dmax} kinta nuo 0 iki

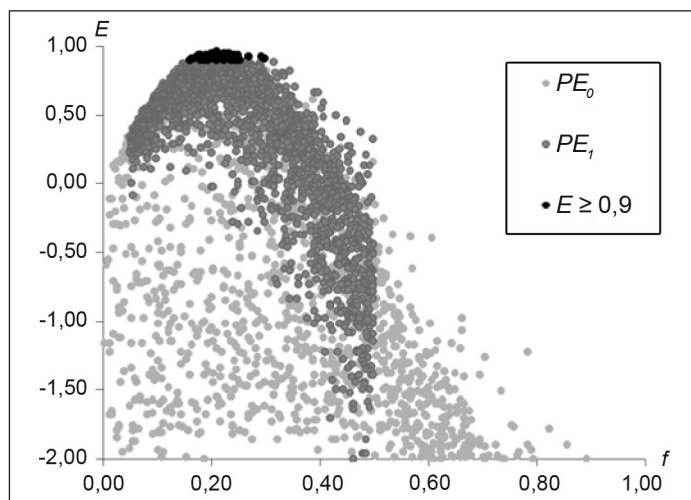
1 lentelė. Thornthwaite-Mather modelio parametrų erdvių PE_0 ir PE_1 ribos

Table 1. Boundaries of Thornthwaite-Mather model parameter spaces PE_0 and PE_1

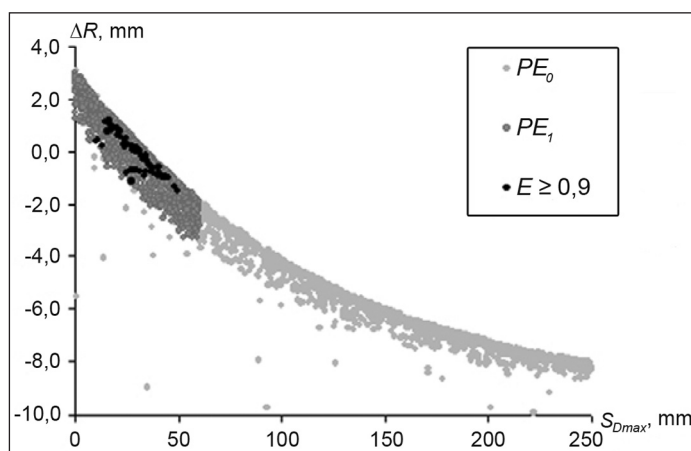
Parametras / Parameter	Parametrų erdvė PE_0 / Parameter space PE_0		Parametrų erdvė PE_1 / Parameter space PE_1	
	Minimali vertė / Minimum	Maksimali vertė / Maximum	Minimali vertė / Minimum	Maksimali vertė / Maximum
Maksimali dirvos drėgmės talpa S_{Dmax} (mm) Maximal soil water-holding capacity S_{Dmax} mm	0,0	250	0,0	60
Rezervuaro koeficientas f Reservoir coefficient f	0,0	1,0	0,05	0,5
Vidutinė mėnesio, per kurį ištirpsta sniego danga, oro temperatūra T_L (°C) Average air temperature of the first month without snow T_L	1,0	6,0	1,0	6,0
Vidutinė mėnesio, per kurį susidaro sniego danga, oro temperatūra T_s (°C) Average air temperature of the first month with snow T_s	-8,0	-2,0	-8,0	-2,0
Maksimalaus sniego tirpimo koeficientas m_{max} Maximal snow melting rate m_{max}	0,2	1,0	0,2	0,6



2 pav. Modelio efektyvumo koeficiento E ryšys su maksimalia dirvos drėgmės talpa S_{Dmax}
 Fig. 2. Relationship between the maximal soil water-holding capacity S_{Dmax} and the model efficiency coefficient E



3 pav. Modelio efektyvumo koeficiento E ryšys su rezervuaro koeficientu f
 Fig. 3. Relationship between the reservoir coefficient f and the model efficiency coefficient E



4 pav. Vidutinės skaičiavimo paklaidos ΔR ryšys su maksimalia dirvos drėgmės talpa S_{Dmax}
 Fig. 4. The relationship between maximal soil water-holding capacity S_{Dmax} and model bias ΔR

60 mm, o rezervuaro koeficientas f yra tarp 0,05 ir 0,50 (3 pav.). Nuotėkis modeliuotas dar su 2000 atsitiktinių parametų reikšmių derinių iš parametų erdvės PE_1 (2, 3, 4 pav.).

TM modelio vidutinė skaičiavimo paklaida ΔR yra apibrėžta maksimalia dirvos drėgmės talpa S_{Dmax} (4 pav.). ΔR rodo, kiek milimetrų per mėnesį modeliu įvertintas Žuvinto ežero baseino nuotėkis vidutiniškai skiriasi nuo realiojo. Jei vidutinė skaičiavimo paklaida $\Delta R > 0$, tai modeliu įvertinta nuotėčio reikšmė yra didesnė už realiąją. Priešingu atveju, kai vidutinė skaičiavimo paklaida $\Delta R < 0$, modeliu apskaičiuotas nuotėkis yra mažesnis už realųjį. Geriausi rezultatai gaunami tada, kai ΔR yra artimas arba lygus nuliui.

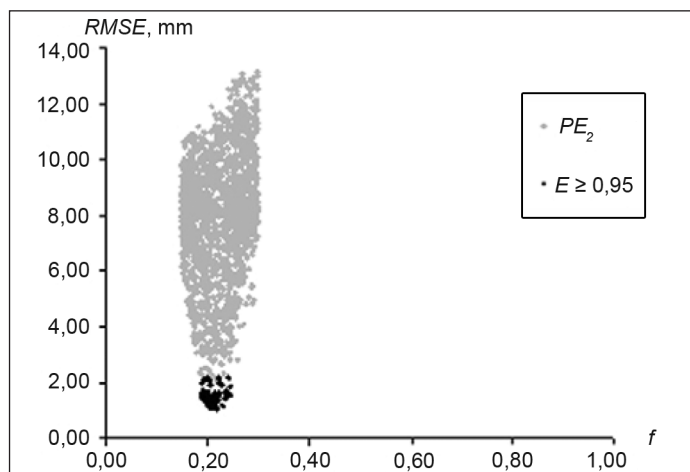
Maksimalios dirvos drėgmės talpos S_{Dmax} ryšį su nuotėčio tūriu galima paaiškinti tuo, kad kuo didesnė maksimali dirvos drėgmės talpa, tuo daugiau vandens sulaikoma tame dirvos sluoksnyje, iš kurio vyksta garavimas. Didėjant iš baseino išgaravusio vandens kiekiui, sumažėja nuotėkis.

Vidutinė skaičiavimo paklaida ΔR lygi nuliui, kai maksimali dirvos drėgmės talpa S_{Dmax} yra nuo 14 iki 35 mm (4 pav.). Su šiuo intervalu esančiomis S_{Dmax} vertėmis įvertintas vidutinis metinis nuotėkis atitinka realųjį, tačiau sezoninė jo kaita gali būti įvertinta neteisingai. Vidutinis metinis nuotėkis ir sezoninė jo kaita bus tinkami tik tuo atveju, kai vidutinė skaičiavimo paklaida $\Delta R = 0$, o modelio efektyvumas E bus maksimalus. Šias sąlygas atitinka maksimali 30 mm dirvos drėgmės talpa S_{Dmax} (4 pav.).

Rezervuaro koeficientas f lemia nuotėčio sezoninį pasiskirstymą. Nuo f priklauso, kuri per mėnesį į baseiną iškritusių ir neišgaravusių kritulių dalis formuos nuotėkį, o kuri užsilaikys baseine. Jei rezervuaro koeficientas f yra didelis, padidėja sezoninės nuotėčio kaitos amplitudė, o potvynio kilimo ir slūgimo greitis yra didelis. Mažesnės rezervuaro koeficiento f reikšmės lemia tolydesnį nuotėčio pasiskirstymą per metus. Apibrėžus naują parametų erdvę PE_2 , kurioje maksimali dirvos drėgmės talpa S_{Dmax} yra 30 mm, atlikta dar 2000 nuotėčio modeliavimų.

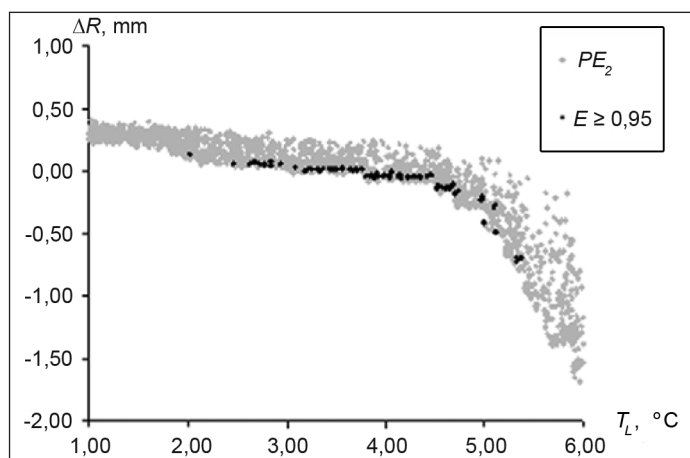
Nuokrypių vidurkio kvadratinės šaknies $RMSE$ reikšmė parametų erdvėje PE_2 mažiausia tuomet, kai $f = 0,21$ (5 pav.). Žuvinto ežero baseino rezervuaro koeficientas f yra mažesnis nei G. J. McCabe, S. L. Markstrom (2007) nustatyta dažnai pasitaikanti $f = 0,50$ reikšmė. Tai iš dalies galima paaiškinti dideliu Žuvinto ežero baseino ežeringumu, kuris išlygina metinę nuotėčio kaitą (Kilkus, 1998).

Parametų erdvėje PE_2 išryškėja mėnesio, kurio metu išnyksta sniego danga, vidutinės temperatūros T_L poveikis vidutinei skaičiavimo paklaidai ΔR (6 pav.). Kai T_L viršija 4,5 °C, sumažėja vidutinis



5 pav. Modelio rezultatų nuokrypių vidurkio kvadratinės šaknies $RMSE$ ryšys su rezervuaro koeficientu f , kai $S_{Dmax} = 30$ mm

Fig. 5. Relationship between the reservoir coefficient f and the root mean squared error $RMSE$ when $S_{Dmax} = 30$ mm



6 pav. Vidutinės skaičiavimo paklaidos ΔR ryšys su mėnesio, kurio metu išnyksta sniego danga, vidutine temperatūra T_L , kai $S_{Dmax} = 30$ mm, o $f = 0,21$

Fig. 6. Average air temperature of the first month without snow T_L and the model bias ΔR when $S_{Dmax} = 30$ mm and $f = 0.21$

2 lentelė. Geriausius Thornthwaite-Mather modelio rezultatus atitinkančios sniego modulio parametrų vertės

Table 2. The range of snow module parameters corresponding to good Thornthwaite-Mather model fit

Parametras / Parameter	Mažiausia reikšmė / Minimum	Didžiausia reikšmė / Maximum
Vidutinė mėnesio, per kurį ištirpsta sniego danga, oro temperatūra T_L (°C) / Average air temperature of the first month without snow T_L , °C	3,0	3,8
Vidutinė mėnesio, per kurį susidaro sniego danga, oro temperatūra T_s (°C) / Average air temperature of the first month with snow T_s , °C	-5,0	-2,5
Maksimalaus sniego tirpimo koeficientas m_{max} / Maximal snow melting rate m_{max}	0,2	0,6

daugiametis nuotėkis (ΔR yra neigiamas ir tolsta nuo nulio).

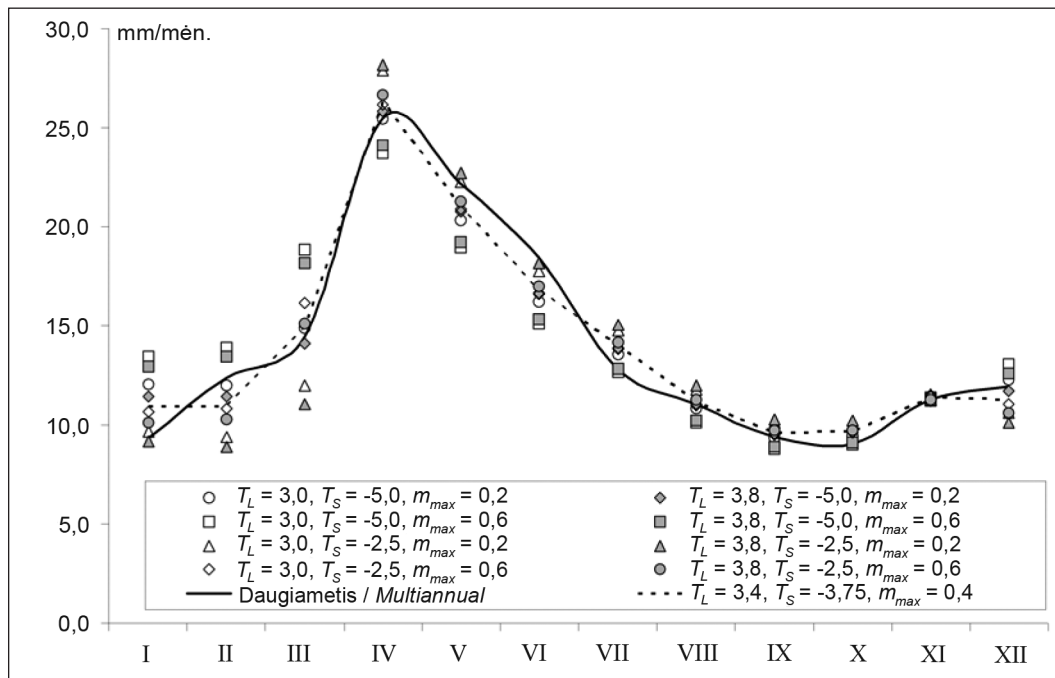
Nuotėkio sumažėjimą esant aukštesnei sniego tirpimo temperatūrai galima paaiškinti tuo, kad TM modelyje garavimas iš sniego dangos nevyksta, o esant aukštai T_L reikšmei, sniego danga visiškai ištirpsta, kai temperatūra yra aukštesnė. Tirpimo vandens patenka į aplinką, kai garingumas PET yra didelis (PET – oro temperatūros funkcija). Dėl šios priežasties pavasarį padidėja iš baseino išgaravusio vandens kiekis, o metinis nuotėkis yra mažesnis. Vidutinei mėnesio, per kurį ištirpsta sniego danga, temperatūrai T_L kintant nuo 1 iki 4,5 °C, nėra ryškaus poveikio modelio rezultatams (6 pav.).

Kitiems su sniego tirpimu susijusiems parametrams (T_s ir m_{max}) modelio rezultatai nėra jautrūs. Atlikus 2000 nuotėkio modeliavimų, kai maksimali dirvos drėgmės talpa S_{Dmax} lygi 30 mm, rezervuaro koeficientas $f = 0,21$, o mėnesio, per kurį ištirpsta sniego danga, temperatūra T_L kinta nuo 2,0 iki 4,5 °C, geriausi rezultatai (modelio efektyvumo koeficientas $E \geq 0,96$) gauti su plačiais sniego modulio parametrų reikšmių intervalais (2 lentelė). Neapibrėžtos sniego modulio parametrų vertės sukelia modelio rezultatų neapibrėžtumus. Šiame tyrime modelio rezultatų neapibrėžtumas buvo įvertintas apskaičiuojant nuotėkį pagal ribines sniego modulio parametrų vertes, kurios užtikrina 0,96 ar didesnę modelio efektyvumo koeficientą.

Su įvairiais sniego modulio parametrais (2 lentelė) apskaičiuotas nuotėkis daugiausia skiriasi žiemos ir pavasario sezonais (7 pav.). Šiltuoju sezonu sniego danga nesiformuoja, tačiau šiltojo sezono nuotėkis priklauso nuo nuotėkio pavasario potvynio metu.

Iš visų sniego modulio parametrų metinis nuotėkio pasiskirstymas labiausiai priklauso nuo mėnesio, kurio metu susidaro sniego danga, temperatūros T_s . Kai T_s mažiausia (-5,0 °C), žiemos mėnesių nuotėkis yra didesnis už vidutinį daugiametį. Nuotėkis padidėja, nes žemesnė sniego susidarymo temperatūra T_s lemia didesnę skystų kritulių frakcijos dalį šaltojo laikotarpio krituliuose. Jei žiemą vyrauja skysti krituliai, jie greičiau formuoja nuotėkį, o per žiemą baseine susikaupia mažos sniego atsargos.

Didžiausios mėnesio, kurio metu susidaro sniego danga, temperatūros T_s reikšmės (-2,5 °C) lemia didesnę sniego dalį krituliuose ir mažesnę nuotėkį šaltuoju metų laiku. Didėsnė kritulių dalis susikaupia sniego dangoje. Per šaltąjį laikotarpį susikaupusi sniego danga ištirpsta pavasarį ir sukelia potvynį baseine, todėl didesnės vandens atsargos baseine lemia aukštesnį pavasario potvynį.



7 pav. Modelių įvertinto nuotėkio neapibrėžtumas, sukeltas sniego modulio parametų (mėnesio, per kurį ištirpsta sniego danga, vidutinės oro temperatūros T_L , mėnesio, per kurį susidaro sniego danga, vidutinės oro temperatūros T_S ir maksimalaus sniego tirpimo koeficiento m_{max})

Fig. 7. The contribution of snow module parameters – average air temperature of the first month with (T_L) and without (T_S) snow and maximal snow melt rate m_{max} – to modeled runoff uncertainty

Pagal skirtingus sniego parametų derinius įvertintas vidutinis metinis nuotėkis kinta nuo 167 iki 169 mm. TM modelių apskaičiuota vertė beveik nesiskiria nuo kitų autorių gauto rezultato – 167,0 mm (Gailiūšis ir kt., 2003), todėl galima teigti, kad Monte Karlo metodu optimizuotas Thornthwaite-Mather modelis gali būti taikomas Žuvinto ežero baseino metiniam nuotėkiui modeliuoti. Naudojantis sumodeliuota sezonine nuotėkio kaita reikia atsižvelgti į sniego modulio parametų sukeltus neapibrėžtumus.

IŠVADOS

1. Thornthwaite-Mather modelių apskaičiuotą vidutinį daugiamečių nuotėkį labiausiai veikia maksimali dirvos drėgmės talpos $S_{D_{max}}$ vertė.

2. Sezoninį įvertinto nuotėkio pasiskirstymą nulemia rezervuaro koeficiento f vertė.

3. Taikant Monte Karlo optimizavimo metodą galima pakankamai tiksliai surasti parametų, į kuriuos jautriai reaguoja modelio rezultatai, optimalias vertes. Žuvinto ežero baseino nuotėkis labiausiai atitinka daugiamečius duomenis, kai maksimali dirvos drėgmės talpa $S_{D_{max}}$ lygi 30 mm, rezervuaro koeficientas $f = 0,21$.

4. Thornthwaite-Mather modelių apskaičiuotas nuotėkis yra mažiau jautrus sniego modulio parametų vertėms nei rezervuaro koeficientui ir maksimaliai dirvos drėgmės talpai. Taikant Monte Karlo optimizavimo metodą galima išskirti tik tinkamiausių parametų verčių ribas.

5. Tiksliai nenustatytos sniego modulio parametų vertės lemia modelio rezultatų neapibrėžtumą. Dėl modelio neapibrėžtumo apskaičiuotas vidutinis metinis nuotėkis kinta nuo 167 iki 169 mm. Neapibrėžtumo poveikis sezoniniam nuotėkio pasiskirstymui yra didesnis.

Gauta 2009 05 25

Parengta 2009 06 03

Literatūra

1. Alkaeed O., Flores C., Jinno K., Tsutsumi A. 2006. Comparison of several reference evapotranspiration methods for Itoshima Peninsula area, Fukuoka, Japan. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*. 66(1). 14 p.
2. Gailiūšis B., Kovalenkoviėnė M., Gaigalis K. 2003. Antropogeninis poveikis Žuvinto ežero hidrologiniam režimui ir vandens kokybei. *Energetika*. 53(2): 38–44.
3. Kilkus K. 1998. *Lietuvos vandenų geografija*. Vilnius.
4. Kovalenkoviėnė M. 2004. Dovinės upės baseino hidrologinio režimo studija. *Natura 2000 teritorijų tvarkymas ir atstatymas parengiant integruotą Dovinės baseino valdymo planą*. PIN-Matra projektas Nr. 2003 / 040.
5. Lu J., Sun G., McNulty S. G., Amatya D. 2005. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the Southeastern United States. *Journal of American Water Resources Association*. 41(3): 621–632.
6. McCabe G. J., Ayers M. 1989. Hydrologic effects of climate change in the Delaware River basin. *Water Resources Bulletin*. 25: 1231–1242.

7. McCabe G. J., Markstrom S. L. 2007. *A monthly water-balance model driven by a graphical user interface*. U. S. Geological Survey Open-File report 2007-1088: 6.
8. Metropolis N., Ulam S. 1949. The Monte Carlo method. *Journal of the American Statistical Association*. 44(247): 335-341.
9. Nash J. E., Sutcliffe J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(3): 282-290.
10. Stonevičius E., Štaras A., Valiuškevičius G. 2008. Dirvožemio drėgmės režimo pokyčių XXI a. prognozės pagal skirtingus klimato kaitos scenarijus. *Geografija*. 44(1): 17-25.
11. Taminskas J., Mažeikis A., Valiuškevičienė L. 2008. Pagal oro temperatūrą apskaičiuoto potencialiojo suminio garavimo lyginamoji analizė. *Geografijos metraštis*. 41(1/2): 81-89.
12. Thornthwaite C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographic Review*. 38: 55-94.
13. Thornthwaite C. W., Mather J. R. 1955. The water balance. *Publications in Climatology*. 8(1).
14. Xu Chong-Yu, Chen D. 2005. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. *Hydrological Processes*. 19: 3717-3734.

Edvinas Stonevičius

MONTE CARLO OPTIMIZATION OF THE THORNTHWAITE-MATHER WATER BALANCE MODEL

Summary

Watershed runoff studies are often limited by the shortage of available data. Recently, simple and conceptual water balance models are used to estimate runoff from climate data. The implementation of mathematical models usually begins with identification of the parameter values. Various optimization techniques could be employed to get the best set of model parameters. In the present study, the Monte Carlo optimization was used to fit the Thornthwaite-Mather water balance model for the Lake Žuvintas watershed.

The Thornthwaite-Mather model has two calibration parameters: the maximal soil water-holding capacity $S_{D_{max}}$ and the reservoir coefficient f . In this study, the original version of the TM model was complemented with the snow module. Three additional parameters are used for the snow module: the average air temperature of the first month with (T_s) and without snow (T_l) and the maximal snow melt rate m_{max} . The model can be adjusted to a basin by varying all the five parameters.

The sensitivity analysis of the Thornthwaite-Mather model has revealed that the bias of the model calculation is determined by the maximal soil water-holding capacity $S_{D_{max}}$. The reservoir coefficient f predetermines the seasonal distribution of the runoff. The Monte Carlo optimization indicates that the best model fit is matched by the maximal soil water holding capacity $S_{D_{max}} = 30$ mm and the reservoir coefficient $f = 0.21$.

The Thornthwaite-Mather model is less sensitive to snow module parameters. The wide range of snow module parameter values gives a good model fit. The annual runoff is not influenced by the uncertainty of the snow module parameters. The modeled annual runoff (from 167 mm to 169 mm) agrees well with the results of other similar studies (167 mm). The uncertainty of the parameter values is more significant in the seasonal runoff variation.

Key words: runoff, Thornthwaite-Mather model, water balance, Monte Carlo optimization, sensitivity analysis