



ОЦЕНКА НА ИНФИЛТРАЦИЯТА НА ПОВЪРХНОСТНИ КЪМ ПОДЗЕМНИТЕ ВОДИ ЗА ЕСТЕСТВЕНИ ТЕРЕНИ И ОТКРИТИ РУДНИЦИ ЧРЕЗ ИЗВЪРШВАНЕ НА ПОСЛЕДОВАТЕЛЕН ДНЕВЕН ВОДЕН БАЛАНС НА ВАЛЕЖНИ ВОДИ

Никола Тошков, Желязко Яламов, Георги Роялски, Любомир Свиленов
n.toshkov@ellatzite-med.com, zh.yalamov@ellatzite-med.com, g.royalski@ellatzite-med.com,
l.svilenov@ellatzite-med.com

РЕЗЮМЕ

Поведението на подземните води в райони, където тяхното подхранване е основно от валежи и снеготопене, зависи съществено от големината на инфилтрацията. Факторите, влияещи на количественото и пространствено изменение на инфилтрацията във времето са метеорологични условия, вид на земната повърхност и нейните топографски особености, състав и мощност на почвата, наличното количество влага, филтрационните свойства и водонаситеност на инфилтриращия масив. В районите, засегнати от открити рудници, изкопно-насипните дейности променят естествената инфилтрация и поведение на подземните води.

За симулирането на месечния тримерен поток на подземните води в рудник „Елаците“ е намерена инфилтрацията на повърхностни към подземните води за естествени и антропогенни терени. Анализът е извършен в софтуера SWB2 на USGS чрез прилагане на последователен дневен воден баланс на валежни води. Методиката разделя валежите на елементите повърхностен отток, истинско изпарение, разлика в почвената влага, количество сняг и инфилтрация.

ESTIMATION OF GROUNDWATER RECHARGE FROM SURFACE-WATER INFILTRATION FOR NATURAL TERRAINS AND OPEN PIT MINES BY USING SEQUENTIAL PRECIPITATION DAILY WATER BALANCE

Nikola Toshkov - n.toshkov@ellatzite-med.com; Zhelyazko Yalamov - zh.yalamov@ellatzite-med.com;
Georgi Royalski - g.royalski@ellatzite-med.com; Lyubomir Svilenov - l.svilenov@ellatzite-med.com

ABSTRACT

In regions that groundwater is mainly recharged by precipitation and snowmelt its flow behavior is governed by the infiltration rate. Natural factors that influence the spatial and temporal distribution of the infiltration are meteorological conditions, land cover and its topographical features, hydrological soil groups and their thickness, soil moisture content, hydraulic parameters and saturation of the infiltrating substrata. In areas of open pit mining excavation and waste piling is changing natural infiltration and groundwater behavior.

To simulate the three dimensional monthly groundwater flow at Ellatzite open pit the infiltration rate is estimated for natural and anthropogenic terrains in the SWB2 software of USGS. The methodology applies sequential daily water balance of precipitation that calculates the components runoff, actual evapotranspiration, soil moisture, canopy interception, snowfall and snowmelt.

Въведение

Определянето на баланса на водите в естествени условия и такива, засегнати от минни и други човешки дейности, е особено необходимо за тяхното използване, опазване и управление. В този баланс влизат различни приходно-разходни елементи на оттока, като валежи, истинска евапотранспирация, повърхностен отток и инфилтрация. Честотата, интензитетът и сезонното разпределение на валежите и метеорологичните условия, най-често са добре изучени чрез измервателни станции, а повърхностният отток чрез наблюдения на стоежа на реките. Евапотранспирацията и влагата в почвата са елементи от оттока, важен в селското и горското стопанство.



Инфилтрацията се използва в хидрогеологията за определяне на хидродинамиката и оттокът на подземните води. Тя е основният източник на подхранване към подземната водна система в между речни масиви (Гълабов and Стоянов 2005), а нейното количествено и пространствено изменение във времето зависи от многобройни фактори като метеорологични условия, вид на земната повърхност и нейните топографски особености, състав и мощност на почвата, наличното количество влага, филтрационните свойства и водонаситеност на инфилтриращия масив.

При извършване на открити минни дейности се нарушава естествения повърхностен и подземен отток. За определяне на: подземното водно ниво в откосите, водопритокът от подземни води към минната изработка, дебитът на водоотвеждащи и водопонизителни системи е от изключителна важност познаването на инфилтрацията, която може да варира значително във времето и пространството. За намиране на инфилтрацията на повърхностни към подземни води в рудник „Елаците“ е извършено моделиране на последователния дневен воден баланс на 32 km² естествени и антропогенни водосборни площи чрез софтуера SWB2. Симулираната пространствена месечна инфилтрация е използвана за тримерно хидрогеоложко моделиране и определяне режима на оттока на дренажни системи и водосборни площи.

Елементи на оттока и последователен дневен воден баланс

Изследваната водосборна площ в софтуера SWB2 се моделира като мрежа от клетки (грид) с определена резолюция, които съдържат информация за дневните метеороложки и хидроложки условия, посоката на потока и дебелината на почвената покривка в клетката. Програмата извършва последователен дневен воден баланс за всяка клетка използвайки модифициран метод на Thornthwaite-Mather, който проследява дневното водно количество в почвения слой. За получаването на това количество се решава следното приходно-разходно уравнение:

$$\theta_t = \theta_{t-1} + \text{валеж} + \text{снеготопене} - \text{повърхностен отток} - \text{евапотранспирация} \quad (1)$$

където:

θ_t – влага в почвата за симулирания ден;

θ_{t-1} – влага в почвата на предишния ден;

Възможността на почвеният слой да задържа вода и нейното дневно водно количество зависи от нейния капацитет (θ_{FC}) и минимална влага в почвата, нужна на растенията преди да увехнат необратимо (θ_{WP}). Като разликата между двете представлява наличния капацитет на почвата за единица мощност (Westenbroek et al. 2010), а капацитетът умножен по ефективната дълбочина на кореновата система (*rooting depth*) представлява пълния наличен капацитет (*TAW*) на почвата (Формула 2). Дълбочината на кореновата система е прието да е равна на резервоара на почвата.

$$TAW = (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \cdot \text{rooting depth} \quad (2)$$

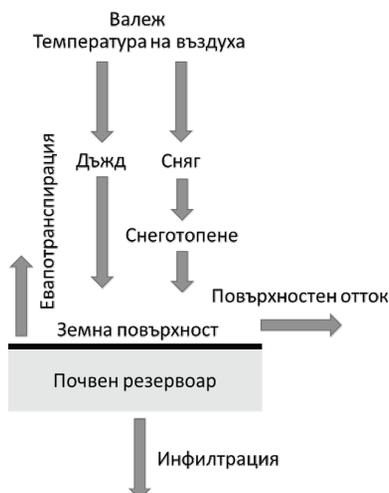
Инфилтрация настъпва, когато водното количество в почвата за деня (θ_t) е по-висока от нейния пълен наличен капацитет (θ_{FC}). В такъв случай инфилтрацията е равна на разликата между количеството вода за симулирания ден и нейния капацитет (Формула 3).

$$\text{инфилтрация} = \theta_t - \theta_{FC} \quad (3)$$

Дневните стойности на валежите и температурата трябва да бъдат предварително подготвени спрямо метода, който се използва. Един от тези методи е подготовка на данните в грид с формата и резолюцията на модела във формата Network Common Data Form 4 (NetCDF4). Всяка грид клетка има стойности за дневния валеж, минималната и максималната температура. Валежът се превръща в сняг, ако средната температура минус 1/3 от дневната амплитуда е под 0 °C (Формула 4). Скоростта на снеготопене е 1.5 mm/d за всеки градус над 0 °C.

$$T_{ave} - (T_{max} - T_{min})/3 < 0 \quad (4)$$

Повърхностният отток може да бъде оценен по два начина – по метода на шаблонните криви от NRCS и коефициента на леглото. При първия се оценява количеството дъжд, което е нужно да падне преди да започне повърхностен отток, а вторият разчита на измервания на връзката валеж-отток, за да се определи колко процента от общия (подземен и повърхностен) отток е повърхностен (Woodward et al. 2003).



Фигура 1. Концептуална схема на процеса на изчисление на елементите на оттока в софтуера SWB2 (адаптирано от Westenbroek et al. 2018).

Според метода на кривите повърхностният отток зависи от вида на земната повърхност и хидроложката почвена група, както и от унаследеното състояние за последните пет дена. Видът на земната повърхност може да бъде от най-разнообразен тип, като гори, обработваеми селскостопански площи, пасища, урбанизирана или минна. Хидроложките почвени групи биват четири според скоростта на инфилтрация (Таблица 1). Тези с най-висока скорост имат най-нисък потенциал за повърхностен отток и най-често представляват мощни почвени слоеве от пясъци и чакъли. С най-ниска скорост на инфилтрация и най-висок потенциал за повърхностен отток са глинести почви, такива с постоянно високо ниво на подземните води или плитки почви върху непроницаеми скали (Hawkins et al. 2008). Методът дава възможност за промяна на номера на кривата в изчислителния ден спрямо унаследеното състояние от последните пет дена. Ако сумарният дъжд за последните пет дена е над 53.3 mm и 27.9 mm, съответно за сезон на растеж и останалата част от времето, ще бъде избран по-висок номер на кривата. Ако сумарният дъжд за последните пет дена е под 35.5 mm и 1.3 mm, съответно за сезон на растеж и останалата част от времето, ще бъде избран по-нисък номер на кривата. Друго специално условие, което може да настъпи, е увеличен повърхностен отток поради замръзнала почва. В такъв случай номерът на кривата се увеличава.

Таблица 1. Хидроложки почвени групи по скорост на инфилтрация (Hawkins et al. 2008).

Хидроложка почвена група	Скорост на инфилтрация, in/h (m/s)		Обхват на типични номера на кривите за хидроложките почвени групи		
	от	до	Минимален	Среден	Максимален
A Силно инфилтриращи	>0.3 (0.00013)		25	51-68	77
B Средно инфилтриращи	0.15 (0.00006)	0.3 (0.00013)	48	62-77	86
C Слабо инфилтриращи	0.05 (0.00002)	0.15 (0.00006)	65	70-84	91
D Много слабо инфилтриращи	<0.05 (0.00002)		73	77-88	94

Потенциалната евапотранспирация показва максималното водно количество, което е възможно да бъде изпарено от почвата и растенията. Когато обаче, количеството вода в почвата е по-малко от потенциалната евапотранспирация, не е възможно тя да бъде достигната. За по-точното определяне на евапотранспирацията се изчислява истинската евапотранспирация, която е функция на потенциалната евапотранспирация и наличната влага (вода) в почвата за деня (Уравнение 5). Един от начините за изчисление на потенциалната евапотранспирация в SWB2 е този на Hargreaves-Samani, който е базиран на уравнение, получено от лизиметри и в него участват минималната, средната и



максималната дневна температура, както и слънчевата енергия за деня (George H. Hargreaves and Zohrab A. Samani 1985).

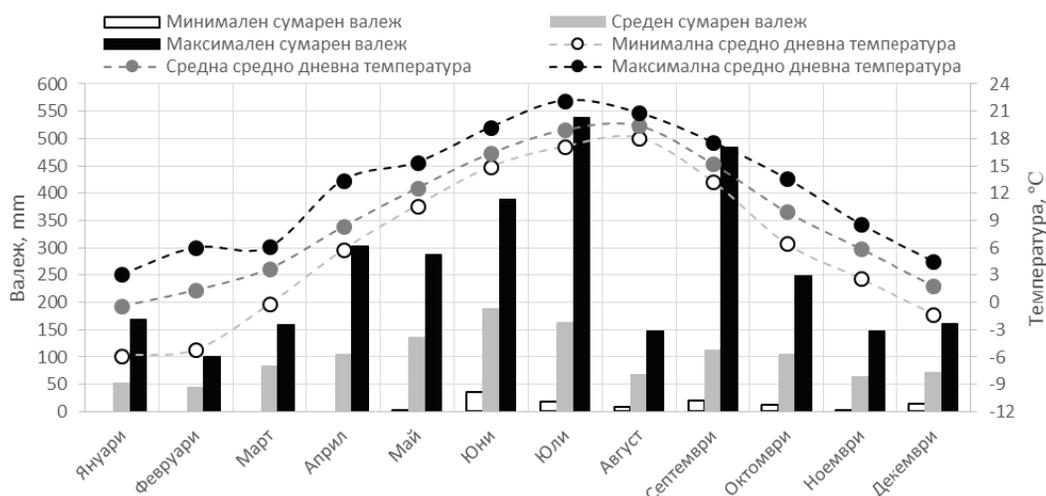
$$AET = PET \cdot \int \frac{\theta_t}{\theta_{FC}} \quad (5)$$

За всяка хидроложка почвена група и вид на земната повърхност се задава максимална скорост на инфилтрацията. По този начин се избягват моменти, в които изчислената инфилтрация е по-висока от капацитета на инфилтриращата среда. По този начин се генерира отказана инфилтрация от клетката, която допълнително се добавя към повърхностния отток.

Характеристики на естествени и минни терени около и в рудник „Елаците“, и входни данни за водно-балансов модел

Рудник „Елаците“ се намира северно от главното Старопланинско било на средна надморска височина 1200 m. Планинските терени около рудника са силно разчленени от дълбоко врязани речни долини. Главните от тях са р. Негърцица, р. Елашка и р. Равна, които са леви притоци на р. Малък Искър (Бендеров, Христов и Василев 2007). Терените, разположени непосредствено на билото на Стара планина, са на надморска височина над 1650 m и достигат до 1790 m (Фигура 3). Те представляват тревни площи и пасища с ниска растителност, които лежат върху пясъчници с висока филтрация. Съставът на почвения слой е едрозърнест със средни инфилтриращи свойства (Фигура 4). Непосредствено под билото на планината започва пояс от възрастни широколисти гори с добре развита дървесна система. Тези гори и почвеният им слой са разположени основно върху два вида скали филити и гранодиорити. Първите генерират фини почви поради техния състав и текстура, а вторите едрозърнести почви, поради това че при изветрянето им те се разпадат до кварцови мономинерални частици. Изкопните дейности в рудника оформят терен, който поради плътният скален масив се характеризира с ниски инфилтрационни свойства и висок потенциал за повърхностен отток. От друга страна скалните насипи са силно инфилтриращ терен, който се характеризира с нисък потенциал за повърхностен отток.

Климатът е планински, като режимът на инфилтрация е сезонен. През зимата и пролетта тя е най-висока, а през лятото, когато евапотранспирацията е висока, а валежите по-малко, тя е най-ниска. По данни от метеорологичната ни станция най-високата средномесечна температура е през август, около 19.5 °C, а най-ниската през януари -0.4 °C. Месецът с най-висок средномесечен сумарен валеж от 188.1 mm е юни, а с най-нисък февруари 44.8 mm (Фигура 2).



Фигура 2. Метеорологични данни от станция разположена в РК „Елаците“, на надморска височина 1102 m, обобщени на месечна база от Април 2011 г. до Май 2023 г.

Сумарният дневен валеж, минималната и максималната дневни температури, използвани при моделирането на водния баланс, са от периода 01 април 2011 г. – 31 декември 2021 г. Те са получени посредством станция, разположена в Рудодобивния комплекс, на надморска височина 1102 m.



Сумарният дневен валеж е равно разпределен върху моделираната площ и всяка клетка има еднаква стойност. Поради повече от 1000 m разлика в надморската височина между най-ниската и най-високата точка в модела за разпределението на температурата е използван температурен градиент от 0.65 °C за всеки 100 m височина (Формула 6). Чрез създаден в програмния език Python код е конфигуриран NetCDF4 файл с дневните метеорологични данни за всяка клетка.

$$T_{pix} = T_{RK} + 0.0065 * (1102.0 - Z_{pix}) \quad (6)$$

Където:

T_{pix} – дневна температура в дадена клетка от модела;

T_{RK} – дневна температура, измерена от метеорологичната станция в Рудодобивния комплекс;

Z_{pix} – средна надморска височина на пиксела.

Хидроложките почвени групи, използвани в модела (Фигура 4), са избрани по литературни данни и направените полеви изследвания. В площта на модела попадат и четирите хидроложки почвени групи (Таблица 1), като рудникът се характеризира с най-ниска инфилтрация и най-голям потенциал за повърхностен отток, а насипите с едро-блоков материал с най-висока инфилтрация и най-нисък потенциал за повърхностен отток.

Полеви изследвания, чрез мини инфилтrometer и комплексен хидролого-геофизичен метод, проведени от екип на ГИ БАН през 2018 г. (Бендерев 2020), характеризират едроблоков насип и такъв от фин материал като силно и средно инфилтриращи (Таблица 2).

Таблица 2. Средни скорости на инфилтрация за насипи, установени от екип на ГИ БАН, чрез различни методи на изследване

Метод	Местоположение	Средна скорост на инфилтрация, m/s
Мини инфилтrometer	Източни насипи	0.000005
Комплексен хидрогеолого-геофизичен	Източни насипи	0.000300
	Западни насипи - силно проводяща	0.000042
	Западни насипи - слабо проводяща	0.000014



Фигура 3. Естествени терени, речна система и обхват на рудник „Елаците“ през април 2017 г. С различни обозначения са изобразени видовете земната повърхност в обхвата на изследваната територия.



Номерът на кривите, по които се определя повърхностния отток, за всеки вид на земната повърхност, според хидроложката почвена група, е организиран в таблица, в която се задават още мощността на почвената покривка и максималната скорост на инфилтрация (Таблица 3). Стойностите в таблицата и пространственото разпределение на вида на земната повърхност са свързани чрез код.

Таблица 3. Номер на кривата и дълбочина на почвения слой според вида на земната повърхност и хидроложката почвена група

Вид на земната повърхност	Код	Хидроложка почвена група							
		Номер на кривата				Дълбочина на почвения слой			
		HSG_1	HSG_2	HSG_3	HSG_4	HSG_1	HSG_2	HSG_3	HSG_4
Рудник	76	86	89	90	91	0.02	0.02	0.02	0.02
Наспища	75	50	55	60	65	0.10	0.10	0.10	0.10
Пасища	31	45	65	75	80	0.40	0.30	0.20	0.10
Сечища	32	48	67	77	83	0.40	0.30	0.20	0.10
Широколистни гори	41	40	65	75	80	0.80	0.60	0.40	0.20
Смесени гори	43	40	65	75	80	0.80	0.60	0.40	0.20



Фигура 4. Естествени терени, речна система и обхват на рудник „Елаците“ през април 2017 г. С различни обозначения са изобразени видовете хидроложки почвени групи в обхвата на изследваната територия.

Пространствено и времево разпределение на елементите на оттока

След направения дневен воден баланс стойностите на елементите на оттока за всяка изчислителна клетка са сумирани за изследваните месеци. Според режима на инфилтрация за сумарните месечни стойности се различават 8 района – широколистни гори с едър състав на почвения слой, широколистни гори с фин състав на почвения слой, широколистни гори с едър състав на почвения слой, разположени на по-високо надморско равнище (непосредствено под билото на Стара планина), смесени гори, пасища/тревни пространства, рудник, насипи от едро-блоков материал и

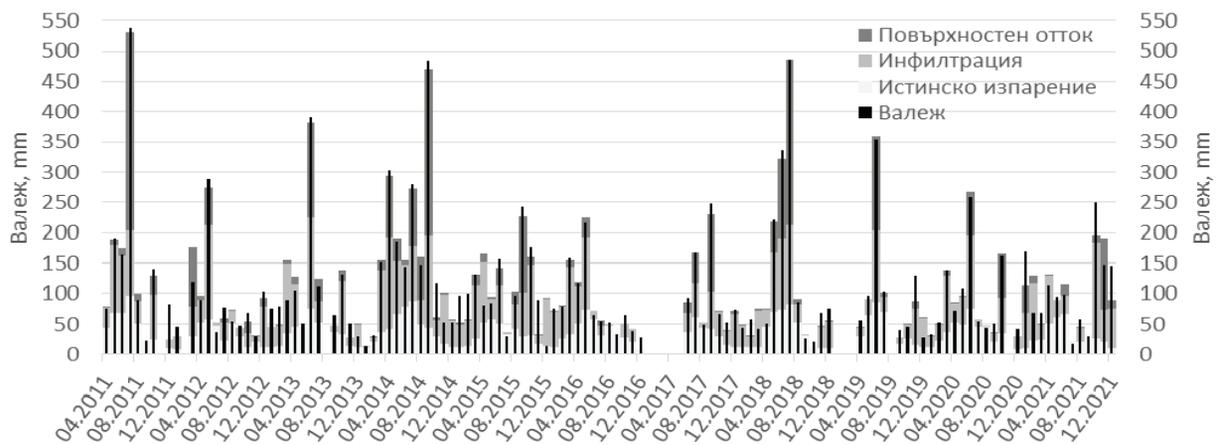


насипи с фин материал от филити и шисти (Фигура 5). За всеки от тези райони елементите на оттока са осреднени по получените в клетките на модела месечни стойности.

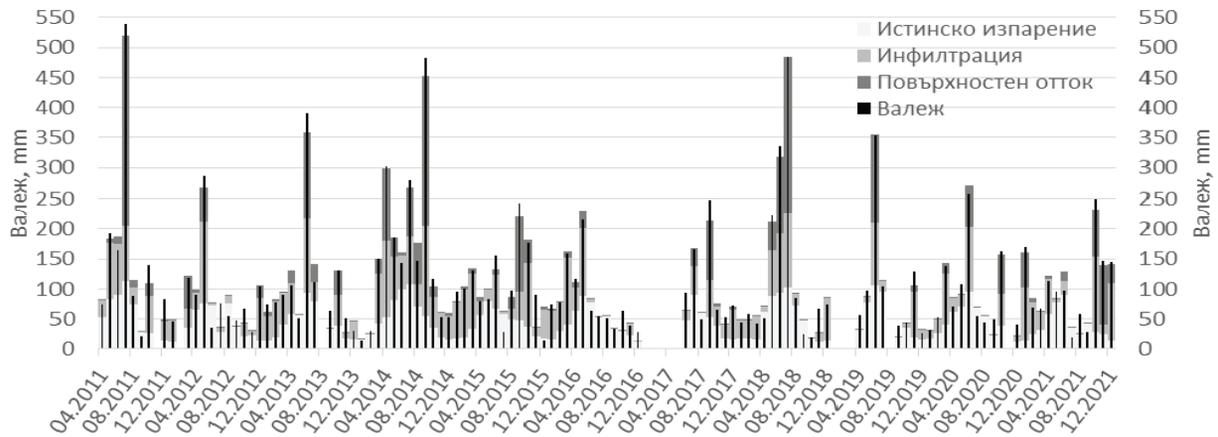
Сравнявайки сумарния месечен валеж със сумарните стойности на елементите на оттока, се установява, че естествените площи имат сходен месечен режим на елементите на оттока, като с най-голяма инфилтрация се отличават пасищата/тревисти площи, поради високото надморско равнище и ниското изпарение на валежите (Фигура 6 и Фигура 7). От друга страна антропогенните терени се отличават значително от естествените, като площта на рудника има изключително голям повърхностен отток, ниско изпарение и инфилтрация, докато насипите с едро-блоков материал са с нисък повърхностен отток и изпарение, но със значителна инфилтрация (Фигура 8 и Фигура 9).



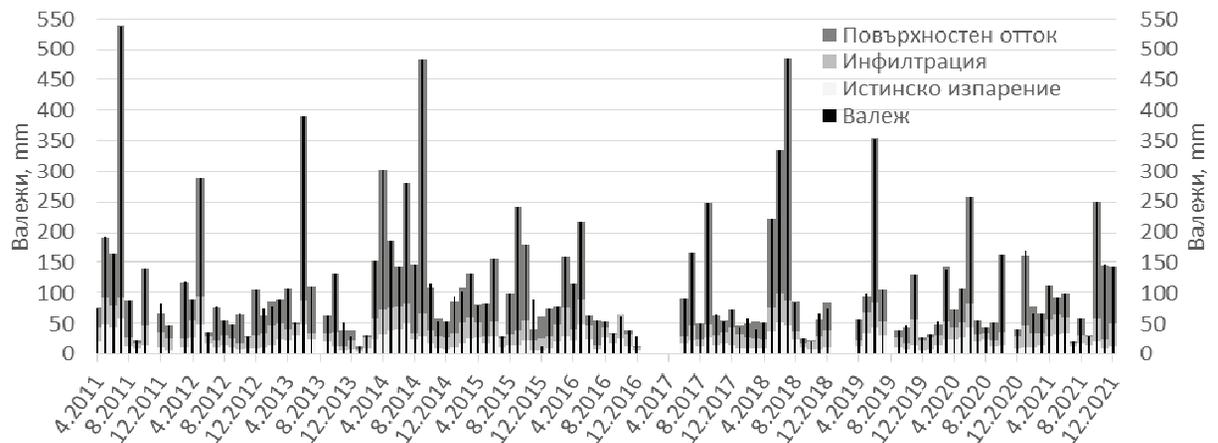
Фигура 5. Площи с различен характер на подхранване към подземните води (инфилтрация) към 2017 г.



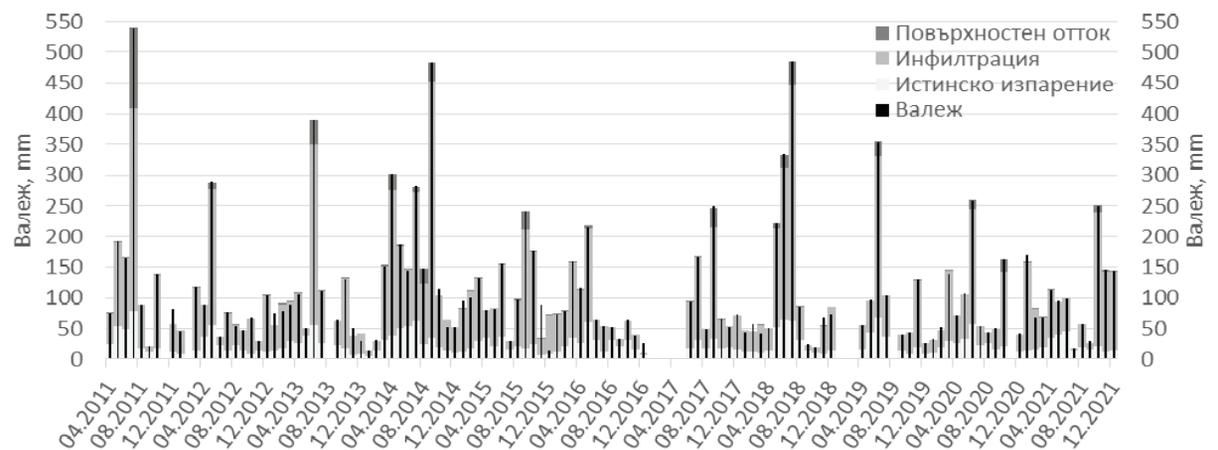
Фигура 6. Месечно разпределение на елементите на оттока спрямо валежа за пасища/тревисти площи.



Фигура 7. Месечно разпределение на елементите на оттока спрямо валежа за широколистни гори с едър състав на почвения слой.



Фигура 8. Месечно разпределение на елементите на оттока спрямо валежа за областта на рудника.



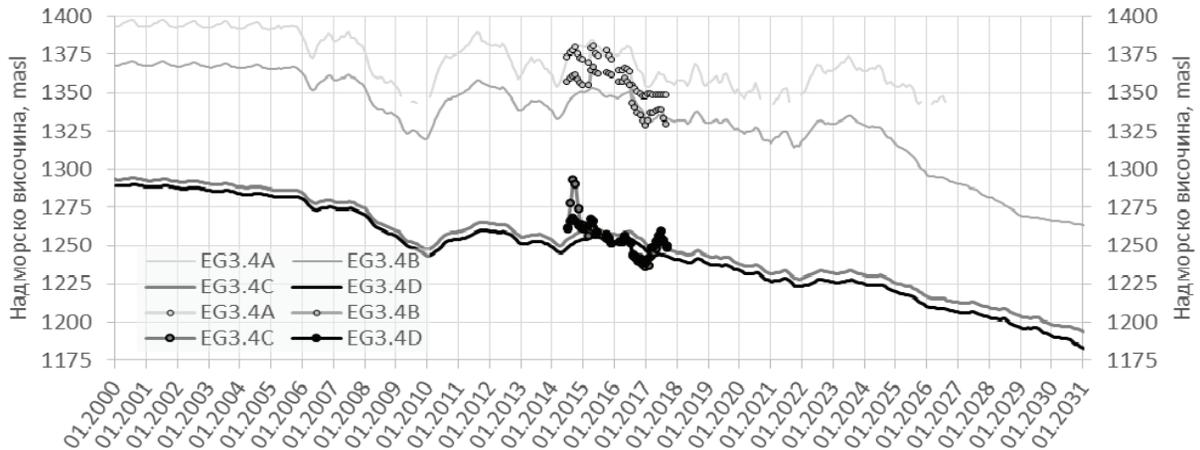
Фигура 9. Месечно разпределение на елементите на оттока спрямо валежа за насипи с едро-блоков материал.

Изводи и обобщение

Софтуерът SWB2 е успешно използван за симулиране на последователния дневен воден баланс на естествени и антропогенни площи в рудник „Елаците“. Получени са главните елементи на



оттока: истинско изпарение, повърхностен отток и инфилтрация на месечна база за площи с различен режим на тези елементи. Получените сумарни месечни стойности за инфилтрацията са използвани за тримерно хидрогеолошко моделиране (Фигура 10). По този начин по-точно се характеризират сезонните фактори при подхранването на подземните води и формирането на повърхностният отток.



Фигура 10. Измерени и получени средно месечни водни нива в един от наблюдаваните пиезометри в рудника, чрез използване на оценената месечна инфилтрация.

Използвана литература

1. George H. Hargreaves and Zohrab A. Samani. 1985. "Reference Crop Evapotranspiration from Temperature." *Applied Engineering in Agriculture* 1 (2): 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>.
2. Hawkins, Richard H., Timothy J. Ward, Donald E. Woodward, and Joseph A. Van Mullem. 2008. *Curve Number Hydrology*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784410042>.
3. Westenbroek, S. M., J. A. Engott, V. A. Kelson, and R. J. Hunt. 2018. "SWB Version 2.0—A Soil-Water-Balance Code for Estimating Net Infiltration and Other Water-Budget Components." *Techniques and Methods*. U.S. Geological Survey.
4. Westenbroek, S. M., V. A. Kelson, W. R. Dripps, R. J. Hunt, and K. R. Bradbury. 2010. "SWB: A Modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance Code for Estimating Groundwater Recharge." *Techniques and Methods*. U.S. Geological Survey.
5. Woodward, Donald E., Richard H. Hawkins, Ruiyun Jiang, Allen T. Hjelmfelt, Jr., Joseph A. Van Mullem, and Quan D. Quan. 2003. "Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio." In *World Water & Environmental Resources Congress 2003*, 1–10. Philadelphia, Pennsylvania, United States: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40685\(2003\)308](https://doi.org/10.1061/40685(2003)308).
6. Бендерев, Алексей. 2020. "Изготвяне На Баланс На Чистите и Замърсени Води На Територията На Рудничен Комплекс „Елаците“." София.
7. Бендерев, Алексей, Владимир Христов, and Иван Василев. 2007. "Хидрогеоложки Проучвания На Рудник 'Елаците.'" София: ГИ БАН "Страшимир Димитров."
8. Гълабов, М, and Н Стоянов. 2005. *Динамика На Подземните Води*. София: Минно-геоложки университет "Свети Иван Рилски."