



*Получена: 31.05.2019 г.*

*Приета: 01.07.2019 г.*

## ИЗВЛИЧАНЕ НА ТОПЛИННА ЕНЕРГИЯ ОТ НАСИПИ, ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ

Н. Керенчев<sup>1</sup>

*Ключови думи: геотермална енергия, количество топлина, насипи*

### РЕЗЮМЕ

Изследването чрез числен модел е една първа стъпка към изчислението на това, колко енергия може да се извлече от насипите и дали това би било достатъчно за частично или пълно отопление на пътища или сгради. Топлотехническите почвени параметри, използвани в изследването, са взети от досегашни проучвания на почвите. Първоначалните вариации, наблюдавани в модела, са неговите характеристики като големина на мрежата, температура на колекторите, коефициент на топлопроводимост и др. На базата на тези величини се правят вариации за броя на слоевете и броя на колекторите. Тези проучвания показват някои важни качества и количествени връзки, описващи извличането на топлината от насипи.

### 1. Въведение

Това проучване обхваща насипите като алтернативен топлинен източник за отопление или охлаждане на пътища или сгради. Насипите биват изградени по специфичен начин и със специфични материали, които според обстоятелствата могат значително да се различават от тези, използвани при площните абсорбатори, положени в земята. Насипите се различават значително и от масивните абсорбатори, системи, при които абсорбиращите проводници се полагат в масивни бетонови части при плиткото и дълбокото фундиране. Колекторите, чрез които се осъществява топлоизвличането, са подобни на използваните в останалите системи както по материал, така и по диаметър, но видът и разположението им могат да се различават. В насипите могат да се използват термоземни колектори и нетъкани текстили с вложени енергийни колектори, чиито качества са

---

<sup>1</sup> Николай Керенчев, гл. ас. д-р инж., кат. „Геотехника“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: kerenchev@hotmail.com

вече добре познати. Изследването чрез числен модел е една първа стъпка към изчислението на това, колко енергия може да се извлече от насипите и дали това би било достатъчно за частично или пълно отопление на пътища или сгради.

## 2. Моделни изчисления

### 2.1. Общи сведения

В проведеното моделно проучване за първи път се изследва „земна топлина от насипи“. На разположение е голям обем от информация за почвени параметри, геометрични и топлотехнически параметри на колекторите, както и за цялостно поведение на системи за използване на земната топлина, които могат лесно да бъдат въведени в компютърен модел. На базата на тези данни компютърният модел може да предостави достатъчни качествени и количествени връзки, които представят ясна картина на „земна топлина от насипи“.

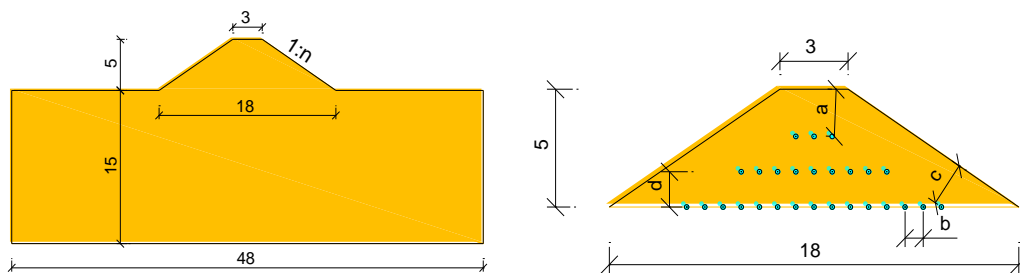
### 2.2. Използван софтуер

COMSOL Multiphysics е мощна интерактивна среда за моделиране и решение на всички видове научни и технически проблеми, базирани на частни диференциални уравнения (PDEs).

Благодарение на интегрирания физичен модул е възможно да се изграждат модели посредством дефиниране на физични величини, описващи свойства на материалите, натоварвания, гранични условия, извори и потоци. Операторът може по всяко време да преобразува тези променливи, изрази или числа в областите, границите или точките, независимо от мрежата. COMSOL Multiphysics образува вътрешен ред от частни диференциални уравнения, които описват целия модел. Операторът се възползва от възможностите на COMSOL Multiphysics в гъвкавата графична среда, както и от скриптовото програмиране, осъществимо в среда на MATLAB [1].

### 2.3. Модел

Фиг. 1 показва границите на модела, обособени от почвата. Тази геометрия се запазва при всички проучвания на параметри. Показани са също и разположението на тръбните колектори в базовия модел. Външният диаметър на колекторите е 25 mm за всички проучвания на параметри.



Фиг. 1. Границите на модела и разположение на тръбните колектори в базов модел

В най-общ вид топлотехническите свойства на материалите са дадени в табл. 1. Тъй като глинестите материали не са подходящи за строителство на насипи и се използват само в ядрата на определени насипи, се приемат за горна граница. Термичните параметри на чакъли и пясъци определят долната граница. Такива стойности притежават глинестите пясъци, но могат да се срещат и при глините и мокрите пясъци. Тези стойности биват в последствие варирани.

**Таблица 1. Термични почвени параметри – базов модел**

Обемна плътност на скелета	$\rho$	1700	kg/m <sup>3</sup>
Топлопроводимост	$\lambda$	1,5	W/m.K
Топлинен капацитет	$c$	1600	W.s/(kg.K)

В модела колекторите са представени чрез два физични параметъра. Това са плътността,  $\rho_R$  и топлопроводимостта,  $\lambda_R$ , табл. 2.

**Таблица 2. Термични параметри на колекторите – базов модел**

Обемна плътност на скелета	$\rho_R$	1200	kg/m <sup>3</sup>
Топлопроводимост	$\lambda_R$	0,35	W/(m.K)

Коефициентът на топлопроводимост, който се определя посредством топлопроводимостта и дебелината на стената на колектора, се използва по-нататък в изследването на параметрите. Базовата стойност от 100 W/(m<sup>2</sup>.K) се изчислява по следния начин:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{d} = \frac{0,35}{0,0035} = 100, \text{ W/(m}^2\text{.K)}, \quad (1)$$

където  $\Lambda$  е коефициент на топлопроводимост, W/(m<sup>2</sup>.K);

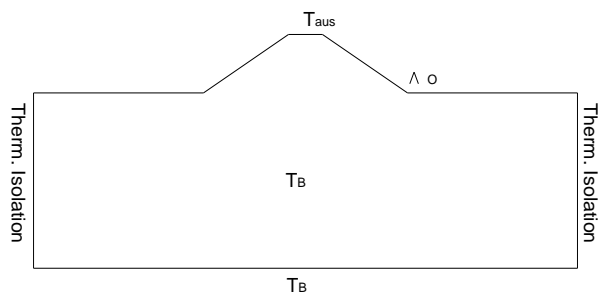
$\lambda$  – топлопроводимост, W/(m.K);

$d$  – дебелина на стената, m.

Флуидът е приет с константна температура [2]. В базовия модел тя е 4 °C. Нормално разликата между входящата и изходящата температура е 4 °C, това означава 4±2 °C за базовия модел. Понякога почвата не замръзва и при температури под 0 °C [3].

Предвид базовата геометрия се въвеждат следните гранични условия. На повърхността слънчевото лъчение, вятърът и др. са заместени чрез температурна синусоида и коефициент на топлопроводимост. Отдолу температурата на почвата остава през цялото време константа. С цел да се запази геометрията крайна, без да има изтичания на топлинен поток, страните са термично изолирани. Граничните условия са показани на фиг. 2 и в табл. 3.

Температурата на повърхността зависи основно от слънчевото лъчение и атмосферните условия. Това се постига в програмата с помощта на синусоида. Като източник на климатични данни са използвани среднодневните стойности на измервателната станция Мариябрун, Виена [4].

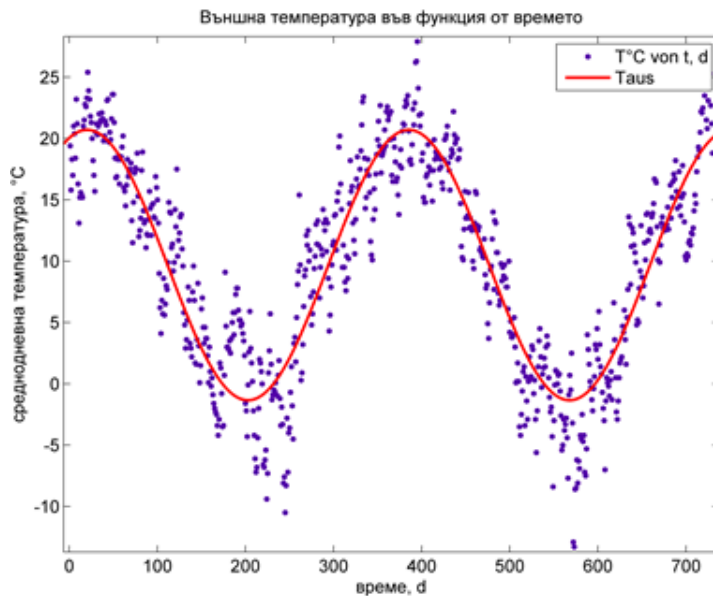


Фиг. 2. Начални и гранични условия

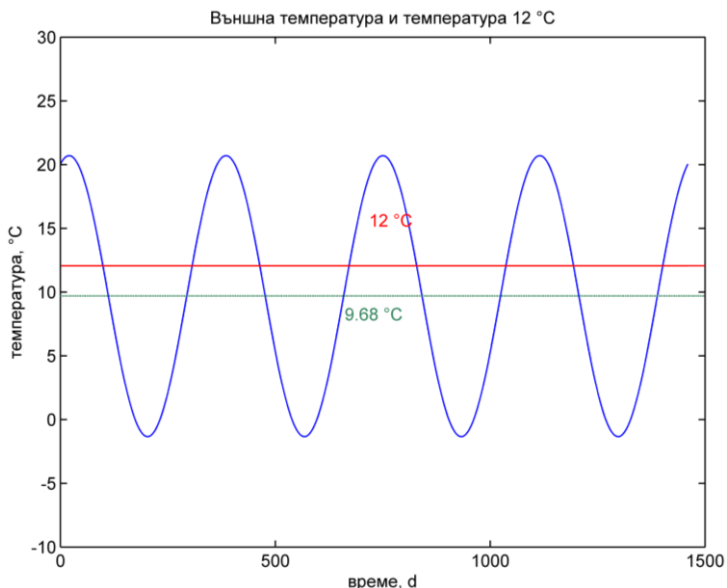
Таблица 3. Термични почвени параметри – базов модел

Величина	Означение	Стойност или формула	Единица
Външна температура	$T_{aus}$	$9.68+11.02*(\sin(2*\pi/365*(t+71)))$	$^{\circ}\text{C}$
Коефициент на топлопроводимост – повърхност	$\Lambda_o$	15	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Температура на почвата	$T_B$	10	$^{\circ}\text{C}$
Коефициент на топлопроводимост на колекторите	$\Lambda_{Kollektor}$	100	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$

За определяне на температурната синусоида са използвани данни от 1.07.2004 до 30.06.2006 (общо две години). С помощта на MATLAB Software се корелира крива от следния вид:  $a*(\sin(2*\pi/365*(t+b)))+c$ , където  $a$ ,  $b$  и  $c$  са коефициенти на уравнението,  $a$  и  $t$  е векторът на времето.

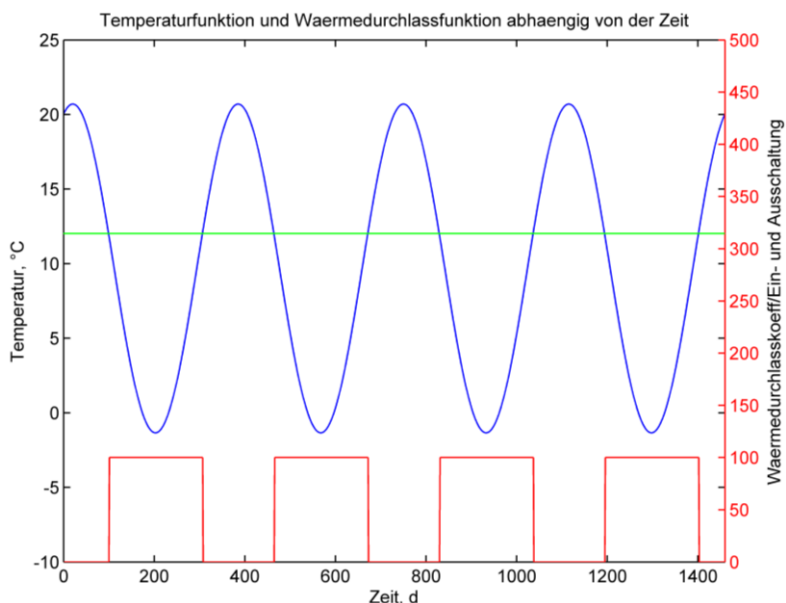


Фиг. 3. Установяване на температурната синусоида с помощта на MATLAB



**Фиг. 4.** Външна температура за цялото време на симулация. Температура на включване – 12 °C и 9,68 °C – средна годишна температура

Коефициентът на топлопроводимост на повърхността е  $h = 15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  и е взет от „Wirtschaftliche Optimierung von TunnelThermie®-Absorberanlagen“ (Hofinger & Kohlböck, 2006).



**Фиг. 5.** Коефициент на топлопроводимост  $\Lambda$ , в зависимост от времето  $t$  и температурата на повърхността, 12 °C – критерий за включване и изключване на системата

Мрежата (Constrained Delaunay Triangulation) е създадена чрез използване на автоматична функция в програмата. Само няколко ръба, като повърхностния и този на тръбите, биват допълнително дефинирани. При предварително проучване на модела е установено следното. Резултатите се влияят силно от недостатъчно детайлната мрежа при колекторните ръбове и повърхността. Детайлизирането на мрежата в тези части е задължително. Големината на елемента на колекторния ръб е  $0,005 \text{ m} = 5 \text{ mm}$ . Големината на елементите на повърхността е  $0,5 \text{ m}$ . С цел спестяване на компютърно време се използва ос на симетрия. По този начин броят на елементите се намалява наполовина, без това да влияе на резултатите.

С цел да се изследват качествените връзки в симулационният модел, се провеждат вариации на основните параметри на модела, съгласно табл. 4. Тези параметри определят така наречения „базов модел“.

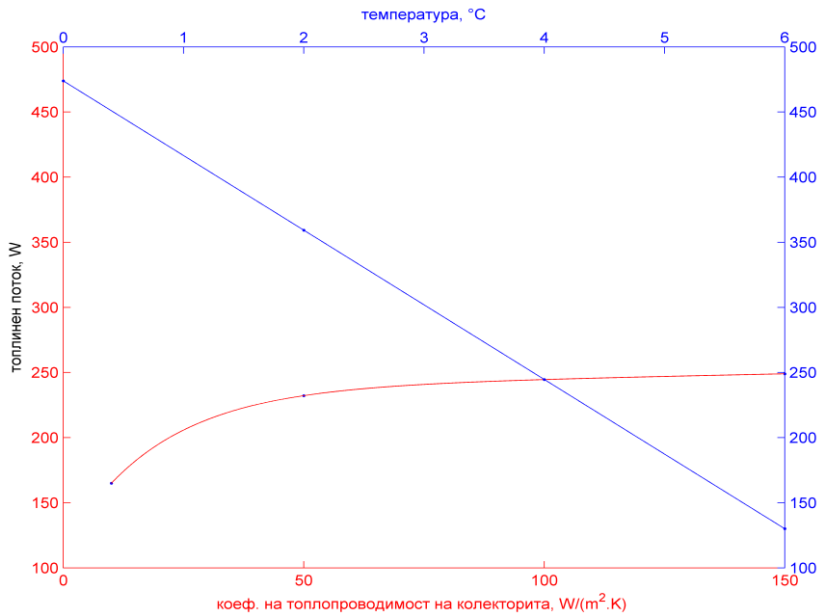
**Таблица 4. Термични почвени параметри – базов модел**

Брой колектори	27,00	1
Коеф. на топлопровод. на колект.	100,00	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Температура на колекторите	4,00	$^{\circ}\text{C}$
Времева стъпка	1,00	d
Начало на интегриране	1194,00	d
Край на интегриране	1402,00	d
Период	208,00	d
Интегр. количество топлина	296,66	kWh/Zeitspanne
Среден топлинен поток	118,85	$\text{W}/\text{fmDamm}$
Ср. топл. поток 2400 h насип	247,22	$\text{W}/\text{fmDamm}$
Ср. топл. поток 2400 h колектор	9,16	$\text{W}/\text{fmRohr}$

Вариацията на параметрите на модела, като специфични гранични условия и мрежа от крайни елементи, няма да бъдат представени тук, тъй като многократно надвишават обема на статията. Ще се представят само крайните резултати за количествата топлина, която може да бъде изведена от такава система.

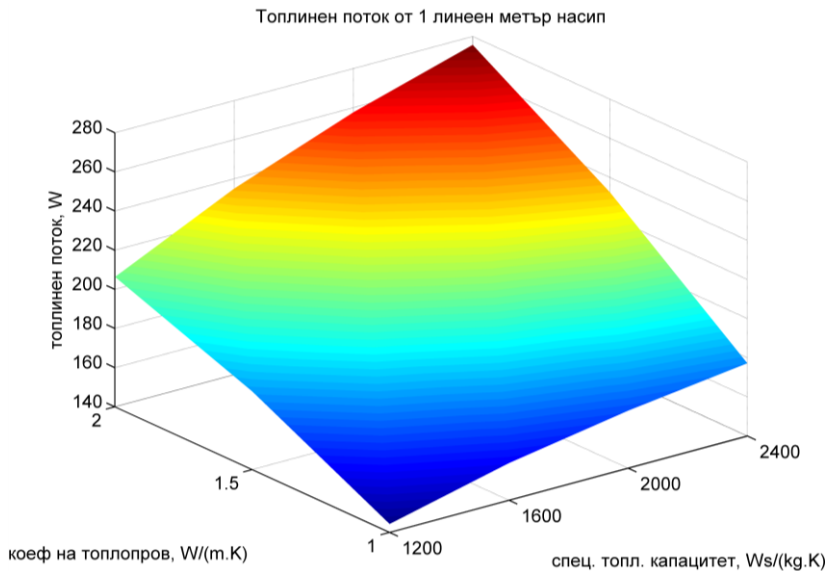
### 3. Резултати от моделните изчисления

На фиг. 6 са изобразени едновременно температурата на флуида и топлопроводимостта. Данните са взети от изследванията на параметрите за базовия модел (три нива). На графиката се наблюдава голямото влияние на температурата на флуида. Пресечната точка при  $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  и  $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  показва къде се намира базовият модел. От икономическа гледна точка температурата на флуида трябва да се запазва възможно най-ниска.



**Фиг. 6. Топлинен поток от 1 линеен метър насип – топлопропускливост на колекторните стени и температура на флуида**

Варирането на двата основни топлотехнически почвени параметъра, топлопроводимостта  $\lambda$  и специфичният топлинен капацитет  $c$  на почвата, могат да бъдат представени нагледно чрез повърхнина (фиг. 7).



**Фиг. 7. Топлинен поток – почвени параметри 3D**

Крайните резултати за няколко модела са представени в табл. 5, като таблицата дава информация за някои от важните вариации на параметрите.

**Таблица 5. Базов модел – таблица [7]**

Базов модел			
Параметри	Вариране	Топл. поток от 1 lfm насип*, W	Топл. поток от 1 lfm колектор*, W
Мрежа (стена на колектора)	e = 1 mm	247,22	9,16
	e = 2,5 mm	246,74	9,14
	e = 5 mm	244,57	9,06
	e = 10 mm	237,76	8,81
Години	1 Jahr	287,58	10,65
	2 Jahr	254,38	9,42
	3 Jahr	247,46	9,17
	4 Jahr	244,57	9,06
Температура на колекторите	T = 0 °C	473,92	17,55
	T = 2 °C	359,26	13,31
	T = 4 °C	244,57	9,06
	T = 6 °C	130,05	4,82
Коефициент на топлопровод. на колекторите	$\Lambda = 10 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	164,95	6,11
	$\Lambda = 50 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	232,21	8,60
	$\Lambda = 100 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	244,57	9,06
	$\Lambda = 150 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	249,01	9,22

\* 2400 експлоатационни часа на година

#### 4. Заключение

Насипите се намират най-често до пътища. От това веднага следва възможността за използване на извлечената от тях топлина при снеготопене на пътища и мостове. Въз основа на проведените пресмятания и сравнението с вече съществуващите данни от (Kaller, 2007) става ясно, че съществува десетократна разлика между извлечената и необходимата енергия. Дори и многоредов, насипът предоставя само 10 до 15% от необходимата за снеготопенето на пътя топлина. Насип (височина 5 m, ширина на основата 18 m) предоставя енергия между 150 и 300 W на линеен метър. Това топлоизвличане се осъществява при средни топлотехнически почвени параметри и съобразно VDI4640. Относно принципа и количеството извлечена енергия насипите са сравними с площните колектори. Единственото им предимство е пиковата мощност и възможността им да работят като помощна инсталация при снеготопене. По отношение на отоплението на сгради 1,6 m<sup>2</sup> положена с колектори насипна площ затопля 1 m<sup>2</sup> отопляема площ. Това е смислено само тогава, когато разстоянието между насипа и сградата се запази малко.



## ЛИТЕРАТУРА

1. COMSOL. (2008), COMSOL Multiphysics User's Guide. © COPYRIGHT 1998 – 2008 by COMSOL AB.
2. Adam, D., Markiewicz, R. (2002), Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke – Teil 1: Theoretische Grundlagen. ÖIAZ, 147. Jg., Heft4/2002, Wien.
3. Алексиев, А., Стефанов, Г. и др. (1989), Наръчник по земна механика и фундаменте.
4. Kaller, R. (2007), Wärmestromverhalten von freiflächenheizungen. Wien.
5. VDI4640. Verein deutsche ingenieure "VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrunds". Richtlinie, Blatt 1 (2008) Blatt 2 (2001) Blatt 3 (2001) Blatt 4 (2004).
6. Brandl, H. (2001), Energy foundations and other thermo-active ground structures. 41st Rankine Lecture, British Geotechnical Association (veröffentlicht 2006: Geotechnique, London Vol. 56, No. 2, pp. 81 – 122).
7. Kerenchev, N. (2010), Diplomarbeit „Erdwärmennutzung von dämmen“ ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs, Wien.

## GEOHERMAL ENERGY FROM EMBANKMENTS – NUMERICAL MODELLING

N. Kerenchev<sup>1</sup>

**Keywords:** *geothermal energy, heat flux, embankment, road anti-freezing*

### ABSTRACT

The numerical model study is a first step in determining how much thermal energy can be brought out from the embankments and whether it would be sufficient for partial or full road or home heating. The thermal soil parameters can be adopted from previous studies. The model parameters such as item size, tube temperature and the conductance of the pipe investigated are in the model. The variation of the collector number and their plane number investigated is based on this. These investigations provide important qualitative and quantitative relationships in the geothermal use of embankments.

---

<sup>1</sup> Nikolay Kerenchev, Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Geotechnics", UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: kerenchev@hotmail.com