

## ПРИЛОГ САВРЕМЕНОМ СРПСКОМ НЕИМАРСТВУ 7/1 - Топлотна проводљивост грађевинских материјала

Мирко Д. Петковић<sup>1</sup>

УДК: 691 : 536.2.022

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2016.044

**Резиме:** Полазну величину за термички прорачун грађевинских конструкција представља топлотна проводљивост која карактерише пре свега способност материјала тих конструкције да кондукционо пренесе односно, проводе топлоту. У оквиру једног истог материјала ова величина првенствено зависи од његове температуре, густине, порозности, влажности, а потом и од других утицаја.

У раду су поред стања ствари презентирани аналитички изрази за одређивање утицаја температуре и густине на проводљивост класичних материјала, а у другом делу рада (Део 7/2) и изрази за све остале утицаје.

Резултати добивени коришћењем изведених релација показују одличну сагласност са експерименталним вредностима независно добивених од више аутора и више институција за више врста агрегата и бетона различитог порекла и састава.

Истовремено рад даје практични допринос одговору на питање које је добро познато физичарима и другим специјалистима из области грађевинских конструкција, а то је шта се дешава са проводљивошћу материјала, а преко тога и процесом преноса топлоте у конструкцијама специјалних намена (војне структуре, реактори, расхладни торњеви, нуклеарне електране, ..) када се исти изложе прекомерном порасту температуре, али и порасту неког другог утицаја.

Као и претходни самостални прилози савременом српском неимарству и овај је посвећен сећању на инж. Милутина Миланковића, као и на његов рад "О примени математичке теорије преноса топлоте на проблеме космичке физике". Миланковић је рад објавио 1913. на српском или хрватском језику у "Раду" - Југословенске академије наука и уметности (ЈАЗУ), да би му се 1917. вратио<sup>2</sup> и инкорпорирао га у "Математичким основама науке о космичком зрачењу"<sup>3</sup>.

**Кључне речи:** Топлотна проводљивост, Миланковић, утицаји, нове једначине, бетон

<sup>1</sup> KECO Invest Engineering GmbH i KG Int. Exp. Group, [mirkopetkovic7@gmail.com](mailto:mirkopetkovic7@gmail.com), тел: 7 926 623 623 1

<sup>2</sup> Током свог рада у Мађарској академији наука и универзитетском астрономском институту у Будимпешти где се обрео као интернирац после кућног притвора у Даљу, концентрационог логора Нежидер и интервенције европских научника и политичара тј., његовог професора математике Czuber-a, иначе дворског саветника и таста члана царске породице, потом барона Eötvös-a, утицајног мађарског научника и магната и коначно грофа Tisza-e, министра-председника Угарске.

<sup>3</sup> Књига није објављена у изворном облику и на немачком језику 1917. већ 1920. код Gauthier-Villars-a у Паризу, на француском језику и под насловом *Математичка теорија топлотних појава изазваних Сунчевим зрачењем* - опет у издању Југословенске академије наука и уметности (ЈАЗУ).

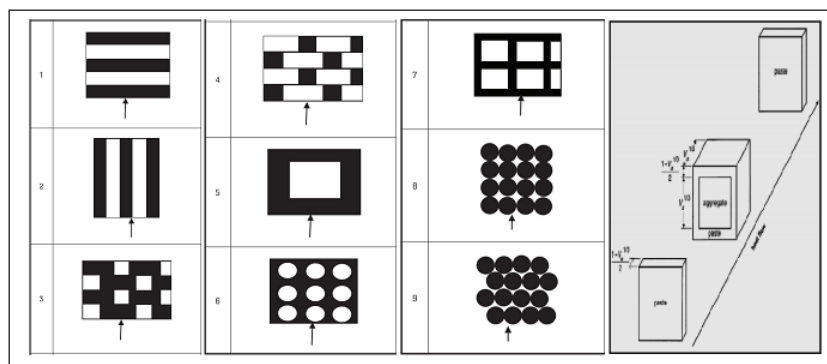
## 1. УВОД СА ПОСТАВКОМ ПРОБЛЕМА И СТАЊЕМ СТВАРИ

Свака наука која не идеализује природно стање супстанце у практичној примени се сусреће са проблемом многопараметралних зависности било ког природног или вештачког процеса, па у склопу тога и карактеристика саме материје која, као једно од могућих енергетских стања те супстанце, улази у састав тзв. реалних-неидеалних тела или система. Из различитих карактеристика и интеракционих дејстава материјалних компонената које улазе у састав тих неидеалних - најчешће природних тела или вештачких производа добивених од њих - резултира не само механичка већ и свеколика сложеност класичних грађевинских материјала.

Она се, нешто уже посматрано, махом манифестује у различитим вредностима једног истог особеног показатеља при различитим правцима његовог опажања – *анизотропност*, у физичкој или некој другој сложености – *хетерогеност* и коначно, у сложенијем, обично физичком, реаговању на дејство неког, уобичајено механичког оптерећења – *нелинеарност*, или прецизније, *квазиеластичност*.

Гледано са аспекта топлотне проводљивости међу свим тим својствима најважнија је хетерогеност. Стога се скоро сви грађевински материјали, без обзира на врсте и степен њихове компактности, могу посматрати као мешавине двеју или више чврстих фракција понаособ различитих топлотних проводљивости [1], [2].

Уколико су они капиларно-порозне структуре, или су испресецани слободно оријентисаним прелинама и пукотинама испуњених течним или гасовитим флуидом, онда они представљају топлотно сложеније више фазне порозне или дисперзионе саставе, што најчешће представља и полазну основу за израду бројних физичких, а потом и математичких модела [3], [4], [5] (Слика 1).



Слика 1. Неки од данас коришћених модела за прорачун топлотне проводљивости

Механички и топлотно знатно комплекснији случај, са појавом свих видова преноса топлоте, се јавља код специјалних врста опека или, можда боље, бетона<sup>4</sup> са губитком не само течне или гасне фазе у периоду сазревања, већ и променама

<sup>4</sup> Када се унутар бетона јавља кондукција, али, посебно при већим температурама, може и радијација, на контакту бетона и воде – конвекција, али као поставка проблема може и кондукција, на контакту бетона и ваздуха – конвекција, али и радијација, и коначно, између склопова бетона или на контакту са другим чврстим конструктивним делом или тлом – поново кондукција, али може и радијација.

услед хемијских процеса и утицаја околне средине или пак услед разних, махом цикличних утицаја [6]. Посебно у појединим екстремним условима без обзира да ли се стање разматра унутар или на површини тела.

У склопу такве поставке се налази и проблем температурног режима унутар или на површини небеских тела, који је пре више од једног века Миланковић разматрао<sup>5</sup>. Другим речима, свеједно је ради ли се о природном камену, опеки и бетону или хладном и ужареном небеском телу (Слика 2.): у оба случаја важе иста топлотна законмерност која се може описати Fourier-Kirchoff-љевом једначином:

$$c_p \rho \frac{dT}{dt} = \text{div} (\lambda \nabla T + Q^* D\rho \nabla \rho_{ko}) + \sum_k h_k I_{vk} + \frac{d\rho}{dt} + \eta \Phi_v + \sum_k c_{pk} j_k \nabla T + \sum_k j_k F_k$$

или, у најједноставнијем случају, добро познатим обликом<sup>6</sup>

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

Јасно је да без обзира о ком облику једначина се радило у свима њима топлотна проводљивост ( $\lambda$ ) представља есенцијалну карактеристику.



Слика 2. Два примера истог закона преноса топлоте: Брана Boulder (данас Hoover) са ЈО - Јупитеровим сателитом и новооткривеном планетом GJ1132b

Иако се за њу, као и у концепцијски сличном *Newton*-овом закону трења, закону дифузије *Fick*-а у молекуларном преносу материје, *Ohm*-а у преносу електрицитета у металима, *Darcy*-евом закону филтрације и др. везују константне вредности у сложенијим случајевима, рецимо при температурама које прекорачују границе

<sup>5</sup> Математички посматрано, и поред све своје сложености и тај проблем се на крају своди на налажење партикуларног решења једне исте парцијалне диференцијалне једначине са одговарајућим контурним тј., граничним условима (више о таквом приступу у *Fillunger*-овим поставкама из 1930.)

<sup>6</sup> Хипотетички формулисаним 1807. од француског физичара, математичара и археолога *Jean-Baptist-Joseph de Fourier*-а, и објављеним у оквиру, како ју је *Lord Kelvin* назвао, "Велике математичке поеме".

термостабилности класичних агрегата<sup>7</sup> или при увећаним притисцима који се јављају код специјалних војних структура (тунели, лансирне рампе и др.), у реакторима, расхладним торњевима, нуклеарним електранама, код небеских тела, у случајевима блиским криогеним процесима, па чак и код појединих густих масивних бетона претпоставка о њеној константној вредности је неодржива<sup>8</sup>.

Стога да би се било који термички прорачун коректније извршио неопходно је познавати не само вредности већ и зависност проводљивости од најугицајнијих фактора као што су то температура, густина, порозност, притисак, слојевитост, садржај воде или гаса, иако и сама дебљина тела и др. утичу на њену промену.

Почевши од радова *Rowley u Algren-a* из 1937. па све до данас учињено је пуно, мање или више успешних покушаја успоставе односа, између топлотне проводљивости и температуре, а посебно између топлотне проводљивости и густине одређених врста грађевинских материјала и лаких бетона (*Rowley u Algren, Krischer, Kluge u др., Price u Cordon, Kaufman, Arnold, Некрасова u др.*).

Тако на пример, не наводећи бројне моделе и начине на које се до њих дошло, довољно познати Амерички институт за бетон (*ACI*) у свом важећем упутству за бетон од 21. јуна 2002., као и најновијим публикацијама из 2015. (*ACI 122R-02*), промовише и користи *Valore-evu једначину* из 1980-е [7] који је однос између густине потпуно сувог бетона  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>] и његове проводљивости  $\lambda_c$  [W/mK] дао у облику [5]

$$\lambda_c(\rho) = 0.072 e^{0.00125\rho} \quad (2a)$$

односно,

$$\lambda_c(\rho) = 0.0865 e^{0.00125\rho} \quad (2б)$$

Међутим, уколико се полазним математичко-физичким моделом занемари (Слика 1/10), а резултати примене ове једначине мало боље проанализирају, па на бази њих и сама једначина, долази се до закључка да она заправо одговара изразу који би се добио на бази препоручених вредности *Arnold-a* из 1970. (*Петковић-1988*)

$$\lambda_c(\rho) = 0.0854 e^{0.00128\rho} \quad (2в)$$

што пак даље одговара коригованим вредностима *Jakob-a* још из 1949.

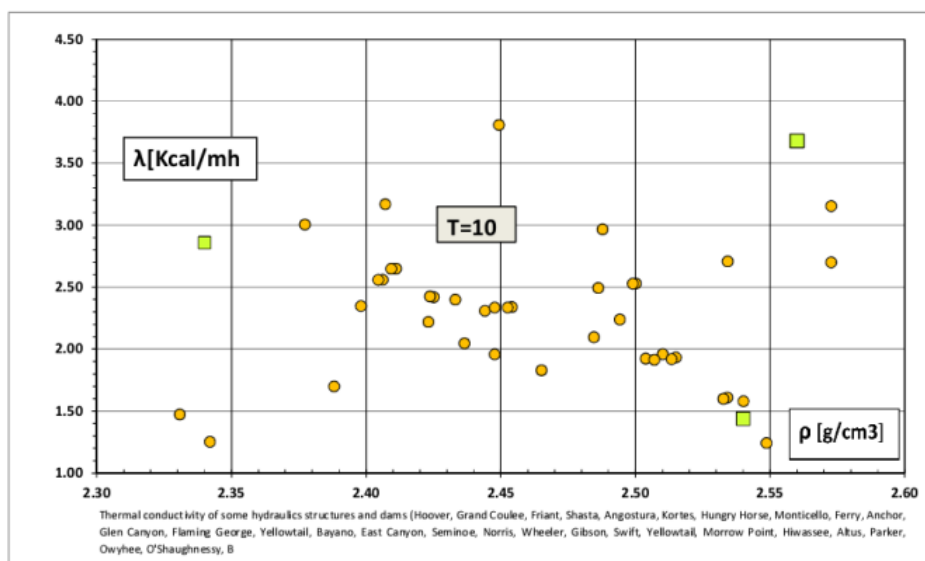
Поврх свега, та једначина у пракси даје резултате са знатним одступањима – како за поједине лаке, тако и за нормалне, а највише за масивне бетоне (в. [5] и одељак 4. овога рада).

То исто се односи и на формуле *Kaufmann-a* (суви бетон, T=25°C), *Некрасове* (3% влаге) и др., који се још увек налазе, не само у приручницима и уџбеницима, већ и у препорукама појединих произвођача и испоручилаца масивних бетона класичне намене - такође из 2015. године.

<sup>7</sup> По правили такав случај се дешава при температурама већим од 300-350°C

<sup>8</sup> На страну то што и при знатно мањим утицајима код класичних бетона долази до недозвољених напона и деформација, па тиме и сломова. Тако на пример, код бетона проблем настаје увек кад максимална температурна разлика у маси пређе 20°C односно, 31°C у случају бетона спремљеног од агрегата кречњачког порекла, иако се при већим температурама мења и значај и уопште третман температурне разлике и напона затезања. При томе се не сме сметнути са ума да поред потребе контроле процеса преноса топлоте унутар конструкција или њиховог окружења, са измењеним материјалом или пак са данас популарним заштитима, путем коришћења изолације или додавања разних чврстих, течних и или гасовитих адитива и инхибитора, јавља потреба да се процес унапред прорачуна, па тиме и континуално контролише при његовом – не спутаном, већ несметаном одвијању.

Истовремено, иако се могу наћи бројне експерименталне вредности топлотне проводљивости за поједине потпуно суве бетоне и агрегате, малтере и опеке<sup>9</sup>, као и одговарајуће махом линеаризоване зависности које су презентирали *Petersen, Valore u Green, Valore* самостално, *Granholm, Campbell-Allen u Thorn, Lentz u Monfore, Lewicki, Arnold, Zoldners, Institution of Heating and Ventilating Engineers, Valore Jr.* и други, и које се као класична решења наводе у стручним издањима врло ретко се могу наћи пажње вредне корелације за неке мешавине и масивне бетоне. За већину од њих, онакви какви су заправо у пракси (Слика 3.) такве релације још увек или не постоје или су за специјалне случајеве далеко мање познате грађевинцима него физичарима и уопште инжењерима других струка.<sup>10</sup>



Слика 3. Топлотна проводљивост неких масивних бетона: Хидротехнички бетон [7], (Вредности су махом дате у истим јединицама као у изворним материјалима)

Ситуација је слична и код сложенијих феноменолошких и статистичких поставки, које произилазе из разматрања порозних и дисперзионих система. Међутим, иако су проблем топлотне проводљивости у неким од њих, са хомогеним матрицама или аналогним системима, понекад са задовољавајућом ефикасношћу аналитички разматрали и такви ауторитети науке као што су то *Maxwell* и *Lord Rayleigh*, а

<sup>9</sup> Колико да су тачни резултати одређени за потпуно суве материјале толико су исти ван граничних услова и додатних показатеља код овде разматраних случајева практично и некорисни.

<sup>10</sup> Како је аутор лично обавештен од института Кучеренко и од Г. И. Марчука (врсни математичар, председник АНСССР и члан РАН-а) приликом његових контаката са Заводом у Челябинску, иако је употреба функција уместо константи више позната физичарима него грађевинским инжењерима постоје прорачунате и изведене неке фортификацијске и сличне војне структуре са баш таквим приступом проблему. На страну то што већ сада постоје трендови да се садашњи концепт топлотне проводљивости измени, а сами прорачуни више сконцентришу на гранична стања и ивичне елементе. Све то је је добрим делом јасно уколико се не сметну са ума примењена поједностављења тј., усвајања линеаризованих зависности преноса супстанци у чврстим телима ван њихових међусобних веза

после њих и *Lees, Burgers, Fricke, Lichtenecker, Eucken, Schumann, Russell, Ribaud, Богомилов и остали, Waddams, Wilhelm u Johnson, Каликова, Bruggeman, Loeb, Francl u Kingery, Orr u Dall Velle, Kaufman, de Vries, Krischer u Esdorn, Wang u Knudsen, Kingery u Klein, Woodside u Messner, Sugawara u Yoshizawa, Görning u Churchill, Kingery, Оделевский, Васильев, Дулнев и Сизалова, Godbee u Ziegler, Walsh u Decker, Sift, Kaganer, Misnar, Liley и остали*, па *Simpson u Stucks* и многи други [1], [3] генерално решење за чврсте материјале са хетерогеним матрицама тј., грађевинске материјале какви они реално јесу тешко да постоји. Посебно не решење у простом и практично корисном облику.<sup>11</sup>

У склопу овога дела рада, управо је то учињено: приказан је један успешнији покушај поставке и решења проблема утицаја температуре и густине на проводљивост класичних грађевинских материјала, а у другом делу рада и остали. Сви они се свде на примену веома простих и практично употребљивих једначина.

## 2. УТИЦАЈ TEMPERATURE И ГУСТИНЕ НА ПРОВОДЉИВОСТ

Добро позната и код највећег броја чврстих тела коришћена једначина за прорачун утицаја температуре на топлотну проводљивост се може представити као:

$$\lambda(T) = \lambda_0 + \frac{d\lambda}{dT} T$$

где је  $\lambda_0 = \lambda(T=0)$  и у том облику она даје задовољавајуће тачне резултате.<sup>12</sup>

Међутим, у случају чврстих тела хетерогеног састава тј., код напред споменутих материјала и конструкција сачињених од њих, неупоредиво боља и практично употребљива апроксимација се постиже путем примене следеће сложеније опште једначине за ефективну топлотну проводљивост [8] [9],

$$\lambda(T) = \lambda_{eff}(T) = f[\vartheta(\lambda_{min}, \lambda_{max}, T), k_4, k_5], T_{min} \leq T \leq T_{max}$$

За практични температурни интервал  $(T_1, T_2) \cup (T_{min}, T_{max})$ ,  $T_{min} \geq 0$ , кад непознате функције  $k_4$  и  $k_5$  могу бити апроксимирани константама [1],

$$k_4 \rightarrow K_4 = \text{const}, k_5 \rightarrow K_5 = \text{const}$$

горња једначина се може поједноставити обликом:

$$\lambda(T) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 \xi + \lambda_2 (1 - \xi)}, 0 \leq \xi \leq 1 \quad (3)$$

где је  $\xi = (T - T_1) / (T_2 - T_1)$ ,  $T_1 \leq T \leq T_2$

На другој страни, утицај густине на топлотну проводљивост многих хетерогених, па тиме и хомогених материјала може се изразити једначином

<sup>11</sup> Про томе се изузимају решења за утицај порозности која су тематика другог дела овога рада.

<sup>12</sup> Или у облику  $\lambda(T) = \lambda_0 (1 + \alpha T)$  тј.,  $\lambda(T) = \lambda_0 + \alpha T$

$$\lambda(\rho) = \lambda_{eff}(\rho) = f[\emptyset(\lambda_{min}, \lambda_{max}, \rho), k_1, k_2, k_3], \rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max} \quad (4)$$

У складу са сличним напред наведеним условима тј.,  $(\rho_1, \rho_2)$  У  $(\rho_{min}, \rho_{max})$ ,  $\rho_{min} \geq 0$  једначина (4) се може задовољавајуће тачно апроксимирати обликом

$$\lambda(\rho) = K_1\rho^2 + K_2\rho + K_3 \quad (5)$$

Иако се неопходност одређивања трију константи може избећи коришћењем израза сличног изразу (3):

$$\lambda(\rho) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 \xi + \lambda_2 (1 - \xi)}, 0 \leq \xi \leq 1 \quad (6)$$

где је  $\xi = (\rho - \rho_1) / (\rho_2 - \rho_1)$ ,  $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$

у практичном раду потребну тачност дају једначине [1] [8] [10]

$$\lambda(\rho) = f(\lambda_c, R_m) \rightarrow \lambda_c e^{B\rho} \rightarrow \lambda(\rho) = \lambda(\rho)^{eff} = \sim A e^{B\rho} \quad (7)$$

$$\lambda(\rho) = \lambda(\rho)^{eff} = \sim \frac{\lambda}{K_6 \lambda_2 - K_7 \lambda_1 \rho} \quad (8)$$

При томе се, када  $\rho_2 \rightarrow \rho_{max}^{п\text{ракт}}$ , за сваки сличан тип може искористити корелација

$$\lambda(\rho)^i = \lambda_1 + (\lambda_1^i - \lambda_1)(1 - \xi) \quad (9)$$

где је  $\xi = (\rho - \rho_1) / (\rho_2 - \rho_1)$ ,  $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$

У складу са дефиницијом  $V(\text{фау})$ -функције [1], [10] карактеристични коефицијенти  $A$ ,  $B$ ,  $K_6$  и  $K_7$  се могу апроксимирати константама (на пример за бетон  $A = 0.06$ ,  $B = 1.45$ ,  $K_6 = 2.0$ ,  $K_7 = 2.3 \div 2.4$ ,  $K_7^{sr} = 2.35$ ,  $\lambda$  [Kcal/mhK],  $\rho$  [t/m<sup>3</sup>]).

Како се у пракси често ради о материјалу конструкције са приближно једнаким садржајем минералних или других компонената, али са различитим густинама, па тиме и различитог састава (опека, камен, бетон и сл.), то се следећи дво-корачни поступак за прорачун топлотне проводљивости може генерално и врло успешно применити:

1. Одређивање односа између густине и порозности тих материјала ([1], [3])
2. Одређивање проводљивости порозних средина [3],[10],[11].

На сличан начин, путем коришћења принципа линеарне суперпозиције и решења за систем сачињен од чврстог материјала и течног или гасовитог флуида, могуће је разматрати и задовољавајуће тачно решити неке од најсложенијих проблема више-фазних система [1],[12].

3. ПРИМЕРИ ПРОРАЧУНА<sup>13</sup>

ПРИМЕР 1. Чврсти мермери ( $\rho=2.52-2.80 \text{ g/cm}^3$ ) и ниско порозни кварцити ( $\rho=2.61-2.95 \text{ g/cm}^3$ , кварц=70-98%,  $\rho \sim 0$ ), сви различитог порекла, састава и анализа. Температурна разлика  $\Delta T(\text{мермер}) = 300^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T(\text{кварцит}) = 200^\circ\text{C}$  [25] ( $\lambda_{\text{exp}}^{\text{average}}$  – средња експериментална вредност) Како се види из доње табеле и поред изузетно великог  $\Delta T$  опсега резултати прорачуна добивених путем коришћења једн. (3) су са таквим одступањима да се иста практично могу занемарити (Табела 1.).

Табела 1.

T [°C]	MARBLE* $\lambda=\lambda(T)$					QUARTZITE** $\lambda=\lambda(T)$				
	0	50	100	200	300	0	20	50	100	200
$\lambda_{\text{exp}}^{\text{average}}$ [W/mK]	3.0	2.65	2.3	1.8	1.4	6.0	5.7	5.2	4.6	3.9
Eq.(3)	3.0	2.5	2.2	1.7	1.4	6.0	5.7	5.3	4.7	3.9
$\delta\%$	0%	-5%	-5.5%	-5.4%	0%	0%	-0.1%	1.7%	2.8%	0%

\* Euchen, A. and G. Kuhn (1928), Euchen A., (1925), Euchen, A., (1911), Birch, F. and H. Clark (1940), Eberle, Chr. and Cl. Holzbauer (1928), Nukiyama, Sh. (1936), Nelson, R. A., (1921), Niven, C. D., (1940), Fritz, W. (1972)

\*\* Ensor, C. R., (1931), Carte, A. E., (1955), Bullard, E., (1939), Mossop, S. C., G. Gafner (1951), Marovelli, R. L., K. F. Veith (1965), Birch, F., H. Clark (1940), Fritz, W., (1972)

ПРИМЕР 2. Чврсти гранити различитог порекла и састава ( $\lambda_1 = 2.23-3.80 \text{ W/mK}$ ,  $\lambda_2 = 2.10-3.22 \text{ W/mK}$ ,  $\rho = 2610-2920 \text{ kg/m}^3$ ,  $T = 0-100^\circ\text{C}$  и  $T = 0-200^\circ\text{C}$ , ). [2],[13]. Гранични услови су приказани мимо срачунатих вредности, а коришћене ознаке исте као и у Примеру 1. Као што се види из табеле и поред поново великог  $\Delta T$ -опсега прорачунска одступања су поново таква да се иста практично могу занемарити.

Табела 2.

T [°C]	SOLID GRANITE $\lambda=\lambda(T)$										
	30	50	70	30	50	70	30	50	70	100	$\delta_{\text{aver.}}^*$
	$\lambda_{\text{exp},T=0}=3.8, \lambda_{\text{exp},T=100}=3.22^*$			$\lambda_{\text{exp},T=0}=3.53, \lambda_{\text{exp},T=100}=3.01^*$			$\lambda_{\text{exp},T=0}=2.79, \lambda_{\text{exp},T=100}=2.45^*$				
$\lambda_{\text{exp}}^{\text{approax}}$ [W/mK]	3.6	3.47	3.37	3.35	3.22	3.14	2.67	2.60	2.53		
Eq. (3)	3.6	3.49	3.38	3.36	3.25	3.15	2.69	2.61	2.54		
$\delta\%$	0	+0.6	+0.3	+0.3	+0.9	+0.3	+0.7	+0.4	+0.4		0.4%
	$\lambda_{\text{exp},T=0}=3.42, \lambda_{\text{exp},T=100}=2.25^*$			$\lambda_{\text{exp},T=0}=2.23, \lambda_{\text{exp},T=100}=2.10^{**}$			$\lambda_{\text{exp},T=0}=2.71, \lambda_{\text{exp},T=100}=2.30^{**}$				
$\lambda_{\text{exp}}$ [W/mK]	2.36	2.32	2.29	2.19	2.17	2.14	2.57	2.48	2.40		
Eq. (3)	2.37	2.33	2.30	2.19	2.16	2.14	2.57	2.49	2.41		
$\delta\%$	+0.4	+0.4	+0.4	0	-0.5	0	0	+0.4	+0.4		0.2%
	$\lambda_{\text{exp},T=0}=2.96, \lambda_{\text{exp},T=100}=2.83^{***}$						$\lambda_{\text{exp},T=0}=3.0, \lambda_{\text{exp},T=200}=2.4^{****}$				
$\lambda_{\text{exp}}$ [W/mK]	2.93	2.89	2.86							2.6	
Eq. (3)	2.92	2.89	2.87							2.7	
$\delta\%$	-0.3	0	+0.3							+3.8	3.7% <sup>**</sup>

\* Birch, F. and H. Clark (1940)

\*\* Marovelli, R. L. and Veith, K. F. (1965)

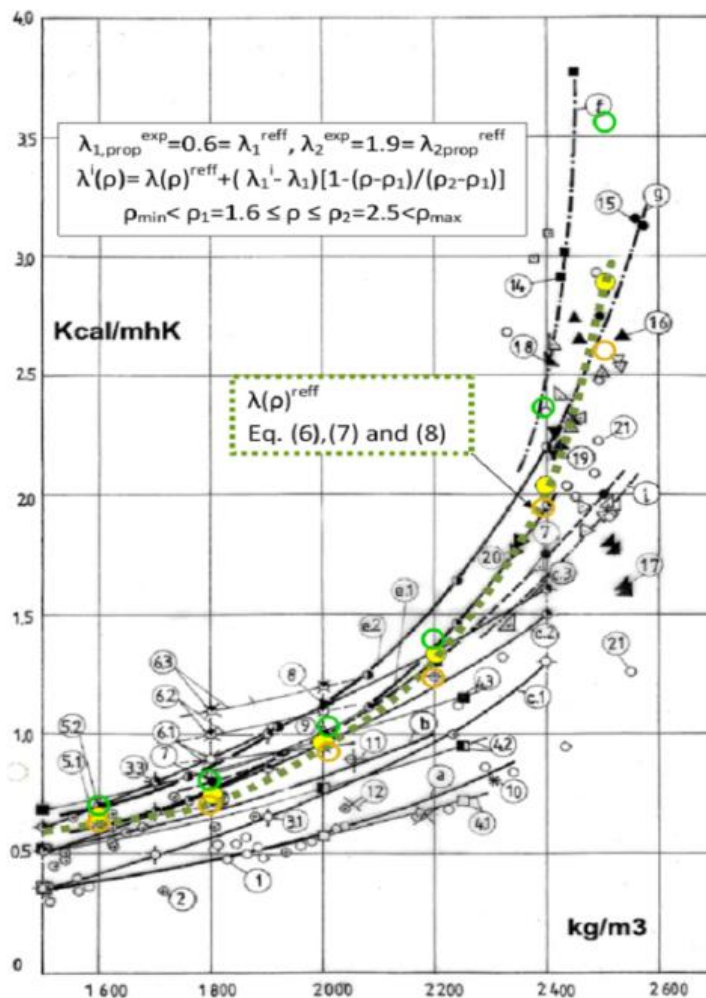
\*\*\* Nukiyama, Sh. (1936)

\*\*\*\* Fritz, W., (1972)

<sup>13</sup> Подаци су узети из расположиве литературе која је у оригиналној верзији рада детаљно наведена. Да би се избегле било какве евентуалности сви експериментални подаци и добивени резултати прорачуна су махом дати у оним јединицама као у изворним материјалима и са истом прецизношћу.







Слика 4. Проводљивост бетона разних врста, намена, порекла и састава [2], [8].

### 3. УМЕСТО ЗАКЉУЧКА

На крају овог дела рада није на одмет дати и једну критичку напомену која се односи на топлотну проводљивост, али делом и на саме термичке прорачуне конструкција. Наиме, без обзира на приказану ефикасност датих једначина, тешко је поверовати да се однос између топлотне проводљивости и најугицајнијих фактора (температура, густина и пре свих порозност), толико може упростити да решење зависи од врло једноставних граничних услова, неког карактеристичног коефицијента и променљиве вредности једног параметра.

На први поглед сумњу уноси и идеју одбија мноштво радова са врло сложеним моделима и резултати експеримената где је, на пример, могуће за исти материјал и

исту порозност као и идентичне граничне услове добити различите вредности топлотне проводљивости.<sup>14</sup> Међутим, чак и да се ради о резултатима добивених при потпуно истим условима и начинима истраживања, не треба сметнути са ума да у пракси није ни могућа, а инжењерима није ни потребна егзактна тачност већ само она коју диктира потреба проблема тј., практично ефикасна, а не ретко и само границе унутар којих се разматрани параметар или тражено решење налази. Тада о вредности резултата не одлучује теоретска поставка проблема и сложеност модела већ једноставно тачност добијених резултата у односу на практичне показатеље. Презентиран рад, заједно са још увек актуелним радовима аутора на ту тему на добар начин управо показује да ипак "у једноставности лежи све".

Даље, иако се овим радовима може ставити тачка на проблематику како је овде изложена, мишљење аутора је да је сам проблем помало наглавачке постављен. То се најбоље види кад се уђе у специјалне конструкције или проблем вине у небеса [8] и схвати да је суштина проблема у нечему сасвим другом: полазним основама и поставкама.

У том случају *Rayleigh* –ева дисипациона функција и уопште полазна *Fourier-Kirchoff*-љева једначина и одговарајући контурни услови се не могу тек тако лако упростити нити се одржати Миланковићева рачуница. Примењено на класичне проблеме у грађевинарству то практично значи: или ће се у рачуници користити сложенији облик полазне једначине са једноставним параметрима или ће се користити једноставнији облик једначине са сложенијим параметрима (како је то аутор и практично показао у склопу пројекту бетона ХЕ *Napoleao de Brito* у Бразилу). Дакле, он мора почети од тога шта се у пракси заправо хоће постићи и који је крајњи циљ прорачуна, па онда у складу са тим одабрати концепцију рада, теоретске основе и начин одређивања проводљивости. Међутим, уколико се ради о материјалима специјалних конструкција или уопште грађевинским материјалима изложених екстремним утицајима презентирани приступ одређивања топлотне проводљивости и коришћење резултујућих корелационих односа у много чему налази своје оправдање.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] ПЕТКОВИЋ, М., "Analytical Estimation of the Thermal Conductivity of Unideal Bodies and their Compounds", *Our Civil Engineering*, XLIV (1-2), 1990, pp. 23-32
- [2] ПЕТКОВИЋ, М., "Heat Characteristics and Functional Dependences of Some Types of Rocks and Massive Concretes" (1988 - unpublished).
- [3] VASILEV, A.L., TANAeva, S.A., *Thermophysical Properties of Porous Materials*, pp. 14-73, Academy of Science BSSR, Science and Technology Publ., Minsk, 1971 (in Russian), see also: DULNEV, G. N., NOVIKOV V. V., *Transfer processes in heterogeneous systems*, Energoatomizdat, Leningrad, 1991, pp. 248 (in Russian)
- [4] ЧЕЈЛЫТКО. А. А., "Исследование влияния пор на теплопроводность материалов", *Технологический аудит и резервы производства-№ 2/2(10)*, 2013

<sup>14</sup> У таквим случајевима дубље анализе указују да се не ретко ради и о разликама проистеклим због разлика у условима и начинима истраживања у којима нормативи и канони уносе додатне потешкоће.

- [5] Guide of Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems", *Report of ACIC No 122R-02, 2015*, see also, VANGEEM, M. G. at all: "Optimal thermal mass and R-value in concrete", *Proc. of First Int. Conf. on Concrete Sustainability, Paper No SI-9-2*, pp. 412
- [6] NAUS D. J., "Effect of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures" – *A Literature Review*, U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research Under Interagency Agreement No. 1886-N674-1Y NRC FIN No. Y6741. **2005**. See also: *Structural Materials of Nuclear Reactors*/Ed. by N.M. BESKOROVAINY. – M.: Atomizdat, **1977**
- [7] VALORE, R. C., Jr., "Calculation of U-Values of Hollow Concrete Masonry" , *Concrete International*, V. 2, No. 2, February **1980**, pp. 40-63
- [8] PETKOVIĆ, M., *Heat and Moisture Transfer Estimation in Massive Concrete and Dams, Part II: Design of Concrete Mixtures and Slabs, D. Ph. thesis, (1985 - unpublished)* See also: PETKOVIĆ, M., "One Modification of Binder-Schmidt Method for Design of Concrete Slabs" (**1979** – unpublished),
- [9] PETKOVIĆ, M., "Some Equations for Estimations of the Temperature and Density Influences on the Thermal Conductivity of Building Material" Papers from XXI Int. Symp.: "*Heat and Mass Transfer in Building Material and Structure*", Dubrovnik, **1989** (Author's presentation)
- [10] PETKOVIĆ, M., "A Generalized Exponential Form and One V-Function Method for Estimation of the Effective Thermal Conductivity of Some Building Material and Structure", In: *Heat and Mass Transfer in Building Material and Structure*, pp. 329-346, Hemisphere Publ. Corp., **1990**
- [11] GANJIAN, E., *The relationship between porosity and thermal conductivity of concrete*, Ph. D. dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Leeds, December **1990**
- [12] PETKOVIĆ, M., "Practical Estimation of the Thermal Conductivity of Building Materials – Part Two", (to be published)
- [13] FRITZ, W., KUSTER, W., in *Landolt-Bornstein Zahlenwerte und Funktionen ...*, 6. Aufl., Bd. IV/4b., pp. 409-507, Springer-Verlag, Berlin-Heideberg-New York, **1972**
- [14] NEVILLE, A. M., *Properties of Concrete, 4th ed.*, ELBS, Addison Wesley Longman Ltd., Harlow, England, ISBN 0582 279380, **1996**

## PRACTICAL ESTIMATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF BUILDING MATERIALS – Part 7/1

**Summary:** *This paper presents one usefully attempt to define the relationships for practical estimation of the temperature and density influences on the thermal conductivity of building materials such as earth, stone, gravel, sand, cement, lime, brick, mortal, concrete mixture or similar compounds. The results of the presented examples obtained by using the new analytical expressions show closer approximation with experimental data of very different origin and consist.*

**Keywords:** *Thermal conductivity, influences, Milankovic, new equations, concrete*