

УТИЦАЈ САДРЖАЈА ВЛАГЕ НА КОЕФИЦИЈЕНТ ТОПЛОТНЕ ПРОВОДНОСТИ БЕТОНА

Марина Ашкрабић¹
Јована Јосиповић²
Зорана Петојевић³
Милица Мирковић⁴
Љиљана Брајовић⁵
Радован Госпавић⁶
Слободан Радовановић⁷
Горан Тодоровић⁸

УДК: 691.32 : 536.21

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2016.042

Резиме: У раду су описани физички процеси адсорпције и транспорта влаге који доминантно утичу на физичке и топлотне карактеристике бетона, посебно утицај величине и распореда пора. Анализиран је драстичан пораст коефицијента топлотне проводности λ бетона при порасту релативне влажности. Дате су аналитичке формуле и графици за λ у функцији запреминске масе и масене влажности лаких и нормалних бетона за вредности садржаја влаге који се јављају у пракси. Формула се базира на експерименталним вредностима за λ које су доступне у литератури.

Кључне речи: бетон, садржај влаге, коефицијент топлотне проводности материјала

¹Марина Ашкрабић, маг. инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 0631949313, e-mail: amarina@grf.bg.ac.rs

²Јована Јосиповић, маг. инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 0600333955, e-mail: josipovicjovanabb@gmail.com

³Зорана Петојевић, дипл.инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 0641306101, e-mail: zjovanovic@grf.bg.ac.rs

⁴Милица Мирковић, маг. инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 0644732829, e-mail: milicamirkovic91@gmail.com

⁵Љиљана Брајовић, дипл.инж.ел., Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 0113218585, e-mail: brajovic@grf.bg.ac.rs

⁶Радован Госпавић, дипл.инж.ел., Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 0113218584, e-mail: gospavic@grf.bg.ac.rs

⁷Слободан Радовановић, маг. инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, Институт за водопривреду "Јарослав Черни", тел: 0603404235, e-mail: radovanovicdslobodan@gmail.com

⁸Горан Тодоровић, дипл.инж.ел., Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 0113218584, e-mail: todor@grf.bg.ac.rs

1. УВОД

Приликом пројектовања грађевинских конструкција кључно питање представља избор врсте материјала који ће у току експлоатације задовољити све захтеве употребљивости и трајности. Бетони различитих карактеристика и намена се годинама користе у скоро свим типовима објеката, највише због лаке производње и прилагодљивости при обликовању. Последњих деценија постоји пораст цена енергената, што намеће потребу доброг познавања топлотних карактеристика материјала. Зграде и други стамбени објекти су највећи појединачни потрошачи енергије са највећим потенцијалом енергетских уштеда. Због тога, побољшање топлотно-изолационих карактеристика термичког омотача представља императив за смањење укупних топлотних губитака, имајући у виду да су трансмисиони губици највећи. Правила зелене градње и енергетске ефикасности, који су данас саставни део пројектовања, захтевају детаљно познавање топлотних карактеристика материјала. Међутим, током периода експлоатације објекта, вода у свим агрегатним стањима се лако везује, транспортује и складишти унутар порозних материјала преко система пора и њено присуство доводи до драстичног повећања коефицијента топлотне проводности λ што чини губитке зависне од времена. Вода има 24 пута већи коефицијент топлотне проводности од сувог ваздуха а 4 пута од сувог бетона са каменим агрегатима. У литератури, посебно домаћој, утицај садржаја воде и порозности бетона на коефицијент λ је мање презентован у односу на друге физичко механичке карактеристике.

Од свих фактора који утичу на топлотне карактеристике бетона доминирају: састав, порозност, садржај воде, микроструктура и температура. Са аспекта транспорта воде, највећи утицај има облик, величина и распоред пора. Порозност се описно одређује експериментално, на пример испуњавање пора живом, визуелном анализом микроскопске слике површине или томографијом X-зрацима али ни једна од метода не даје тачан геометријски распоред пора. Код лаких бетона, запреминске масе 300-900 kg/m³, и експериментално је потврђено да у расподели величина пора доминирају поре већих димензија, реда величине 100 μm , као и поре димензија карактеристичних за цементни камен реда величине 0,03 μm [1]. Генерално са порастом запреминске масе бетона долази до смањења димензија пора.

Од интереса за праксу је да постоји аналитичка формула која даје зависност коефицијента λ од масеног садржаја воде H и густине бетона ρ . У различитој литератури постоје експериментални резултати за бетоне у ужем опсегу ρ и садржаја воде које обично укључује и стања засићења. На бази ових мерења, ми у раду дајемо 3D график вредности коефицијента λ у функцији ρ и H , тј. једначину површи $\lambda(\rho, H)$ која је добијена фитовањем експерименталних вредности из литературе као и график $\lambda(H)$ у којима запреминска маса бетона фигурише као параметар. У раду су описани и механизми везивања (адсорпције) и транспорта (капиларно упијање и дифузија) воде као и утицај структуре и састава бетона на коефицијент λ лаких аутоклавираних и бетона нормалне запреминске масе. За бетоне, у општем случају, важи да је топлотна проводност директно сразмерне запреминској маси а обрнуто сразмерне степену порозности.

2. ПОДЕЛА БЕТОНА

У раду су разматрани бетони различитих запреминских маса са различитим садржајем влаге. Запреминска маса бетона је одабрана као величина која је осетљива на промене врсте и количине крупног агрегата, као и на проценат порозности. Термотехничка својства компонентних материјала, посебно агрегата, њихова међусобна интеракција и коначно формирана структура бетона, тачније његова порозност значајно утичу на топлотна својства бетона. Након што се овако формиран бетон нађе у употреби у конструкцији, далеко највећи утицај на промену топлотне проводности, као и код већине материјала који се употребљавају у грађевинарству, имаће садржај влаге. Коришћена је класификације бетона на лаке, нормалне и тешке, направљена према вредности запреминске масе. Лаки бетони обухватају оне чија је запреминска маса мања од 1900 kg/m^3 , док се под тешким подразумевају они чије запреминске масе премашују 2500 kg/m^3 [6]. Начин производње и коришћени материјали имају велики утицај на својства лаких бетона, па је према томе извршена класификација на:

- Лакоагрегатне бетоне, који у свом саставу имају порозне, лаке агрегате
- Бетоне у које се на неки од вештачких начина уводе веће шупљине (аерирани, ћелијасте, пена и гас бетони),
- Бетони из којих је избачен ситан агрегат, што доводи до појаве великог броја шупљина између крупнијих зрна агрегата.

У суштини, смањење запреминске масе је у сва три случаја настало услед повећаног садржаја шупљина и пора, или у агрегату или у цементном малтеру који га обавија, или између зрна агрегата. [7] Са друге стране тешки бетони садрже тешке агрегате као што су: барит, магнетит, хематит, специјалне гвоздене или челичне куглице. Направљени су са нижим водоцементним факторима између 0,35-0,50. [6] Овај тип бетона има велику примену у изградњи нуклеарних електрана, због високог нивоа заштите од зрачења. Услед повећаног ризика од експлозија, када долази до великог ослобађања енергије, неки аутори предлажу и додатно повећање топлотне проводности оваквих бетона [8].

У састав нормалних бетона најчешће улазе компактни агрегати, па њихова порозност зависи највише од процеса хидратације употребљеног цемента. Чврсти производи хидратације заузимају запремину мању од збира апсолутних запремина употребљеног цемента и воде. Као последица ове појаве настају капиларне поре распоређене свуда по запремини пасте. Поре могу бити суве или испуњене водом у зависности од количине воде која је употребљена у справљању мешавине, и у случају да је додатна вода продрла у бетон током процеса хидратације. За потпуно хидратисани цемент, у случају да је употребљена количина воде једнака оној потребној за хидратацију цемента, садржај пора чини око 18,5 % почетне запремине сувог цемента. У случају да је степен хидратације нижи од 1, овај проценат расте. (Пример: при водоцементном фактору од 0,6, укупна запремина пора чини између 47% и 60 % укупне запремине цементне пасте, у зависности од степена хидратације). Иако се сматра да су капиларне поре у просеку пречника величине $1 \mu\text{m}$, у стварности се може наћи цео спектар пора различитих пречника у цементној пасти [7].

3. КОЕФИЦИЈЕНТ ТОПЛОТНЕ ПРОВОДНОСТИ БЕТОНА

Топлотна проводност је физичка карактеристика материјала којом се описује способност материјала да проводи топлоту. На бројну вредност коефицијента λ утичу веома сложени физички процеси на атомском и међу молекуларном нивоу у којима важну улогу играју структура молекула, њихов распоред у простору и међумолекуларне силе. Овај проблем за реална тела теоријски ни данас није задовољавајуће решен а занимљиво је да га је решавао и Анштајн неуспешно. При провођењу топлоте размена енергије између атома (молекула) се одвија у порцијама (квантима) које се називају фонони. Топлота се проводи преносом аластичних осцилација кристалне решетке, односно емисијом и апсорпцијом фонона. Топлотну проводност ограничава расејавање фонона на дефектима и нерегуларностима решетке. Утврђено је да дуготаласни акустички (лонгитудинални) фонони дају главни допринос проводности за неметале у које спадају сви грађевински материјали.

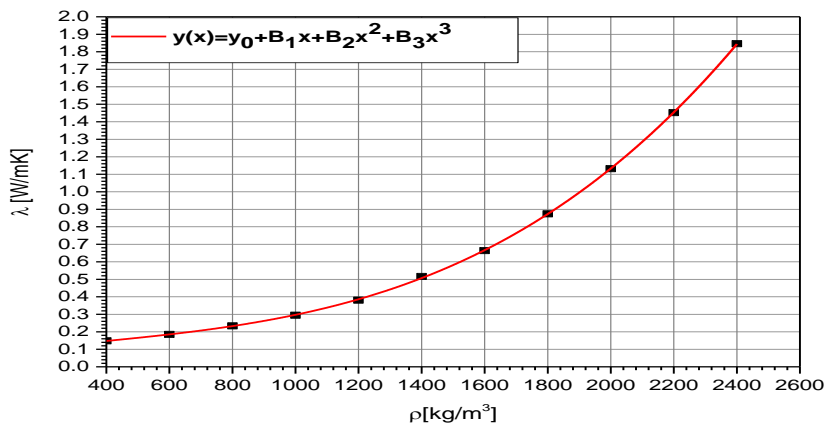
Речено је да је бетон изразито анизотропан и нехомоген у ком супстанце егзистирају у сва три агрегатна стања што га чини веома комплексним за теоријско моделовање па се лакше и тачније описује експериментално. Овим путем могуће је поуздано мерити λ и развијено је неколико стандардних метода мерења. Вредност λ за бетон константне густине, у опсегу температура T и релативне влажности H од интереса за грађевинарство, је дата линеарним законом $\lambda(T, H) = \lambda_0 + aT + bH$.

Треба напоменути да је зависност од температуре врло слаба и постаје значајна тек на врло високим температурама (преко 100°C) што је значајно у применама тешких бетона ($\rho > 2500 \text{ kg/m}^3$) у термоенергетским објектима (нуклеарне и термо електране, бетонска склоништа). Вредности коефицијента λ бетона према Правилнику [4] се крећу од $0,14 \text{ W/mK}$ за гас бетоне (400 kg/m^3) до $2,33 \text{ W/mK}$ (2500 kg/m^3) за бетоне са каменим агрегатима. Пораст коефицијента са повећањем запреминске масе је последица смањења порозности односно мањег садржаја ваздуха заробљеног у порам материјала и у исто време веће брзине простирања лонгитудиналних фонона. Презентоване вредности се вишеструко увећавају када степен zasiћења влагом досегне 100% , тј. када су све поре узорка испуњене водом. Расподела влаге у материјалу је обично неуниформна што чини да је λ функција координата. Ово за последицу има да опис провођења топлоте решавањем Фуријеовој једначине није довољно већ се морају решавати и једначине транспорта влаге (паре и течности) што значајно усложњава проблем. Систем ових једначине се може решити нумерички али се морају познавати граничне и почетне услове као и материјалне и транспортне константе [5]. Поређењем теоријских и експерименталних резултата за лаке бетоне [1] утврђено је да се одређен проценат топлоте, која се проводи кроз узорак у експерименту, троши на фазне прелазе воде у пару, узрокујући грешку при одређивању λ (6% за $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$, $1,2\%$ за $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$) [9].

Слика 1 приказује зависност коефицијента λ од запреминске масе бетона са $H = 3\%$ масеног садржаја влаге. Експерименталне вредности из референце [2] су фитоване на полином трећег степена и добијена је зависност:

$$\lambda(\rho) = 0,07218 + 2,25594 \cdot 10^{-4} \rho - 1,53657 \cdot 10^{-7} \rho^2 + 1,53045 \cdot 10^{-10} \rho^3 \text{ [W/mK]} \quad (1)$$

Са слике видимо да практично линеарни пораст за лаке бетоне прелази у нелинеарни за теже. У пракси, услед недостатка испитивања је дозвољено да се користе вредности коефицијента λ из Стандарда [4] који не узима у обзир све саставе бетона, распоред пора, порозност и врсту гаса који испуњава поре.



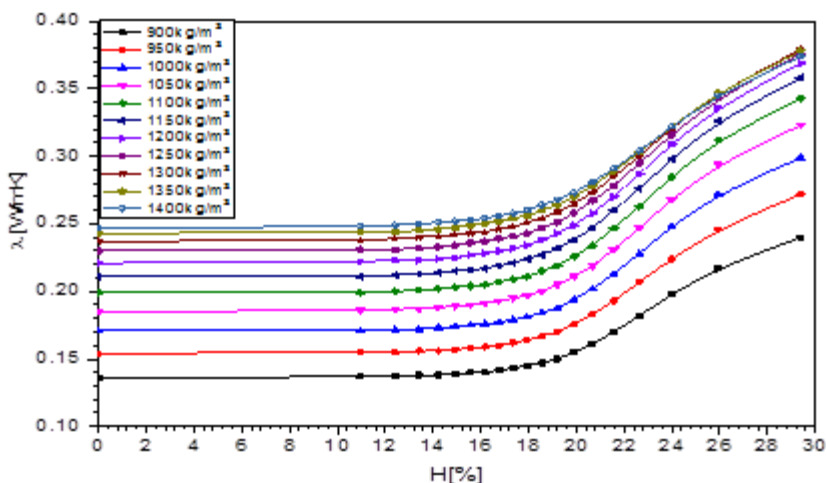
Слика 1. Вредности коефицијента λ за различите густине материјала

4. САДРЖАЈ ВЛАГЕ

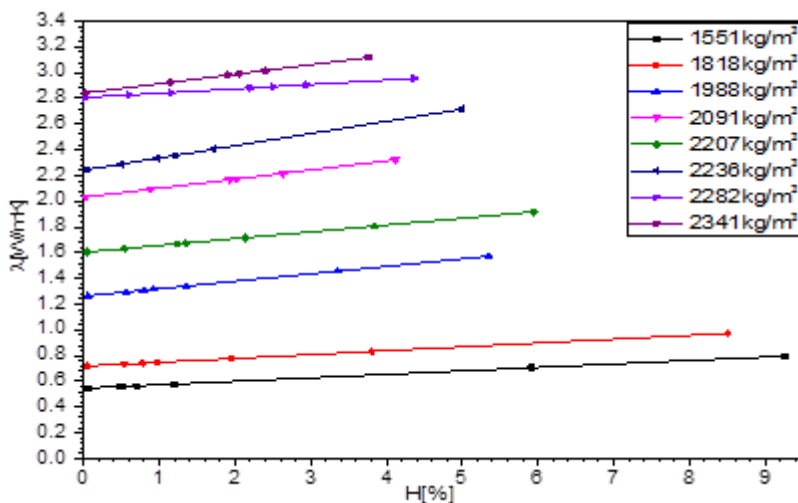
Конструкције и материјали су увек у контакту с влагом из тла и ваздуха. До промене количине влаге најчешће долази услед промене релативне влажности ваздуха (смена годишњих доба, падавине) и услед промене начина употребе зграде (почетак грејне сезоне, умањено проветравање). Влага у конструкцијама има вишеструко негативно дејство и представља један од најважнијих фактора деградације материјала. Садржај влаге у материјалима се може изразити на различите начине, апсолутним садржајем по јединици масе или запремине или релативно. Често се садржај влаге материјала изражава у функцији релативне влажности ваздуха помоћу кога се кондиционира. Криве које дају везу садржаја влаге материјала и релативне влажности ваздуха се називају сорбционе криве и одређују се искључиво експериментално. Бетони потпуно засићени влагом, запреминских маса од 1500 kg/m^3 до 2500 kg/m^3 , имају масени удео влаге од 10% до 4% (лакши бетони због веће порозности упијају већу количину влаге). За запреминске масе између 900 kg/m^3 и 1400 kg/m^3 исти садржај влаге иде до 30%, а код лаких може да пређе 100% када је маса абсорбоване воде већа од масе сувог бетона. На Сликама 2 и 3 су приказане зависности коефицијента топлотне проводности у функцији масене влажности бетона запреминских маса од 900 kg/m^3 до 1400 kg/m^3 [3] и од 1551 kg/m^3 до 2341 kg/m^3 редом [2]. Види се карактеристичан пораст коефицијента λ у функцији запреминске масе и масене влажности. На слици 2 се види да λ значајно расте за мале масене влажности (између 15% и 20%) а да при њеном повећању тренд пораста се смањује.

Аналитички израз функције $\lambda(\rho, H)$ је добијен фитовањем тренда пораста на полином трећег степена.

На Слици 3 видимо да за масене влажности између 4% и 10% аналитички израз функције $\lambda(\rho, H)$ је добијен фитовањем тренда пораста на линеарну функцију. У Табели 1 су дати аналитички изрази добијени фитовањем мерених вредности за цео опсег запреминских маса бетона.



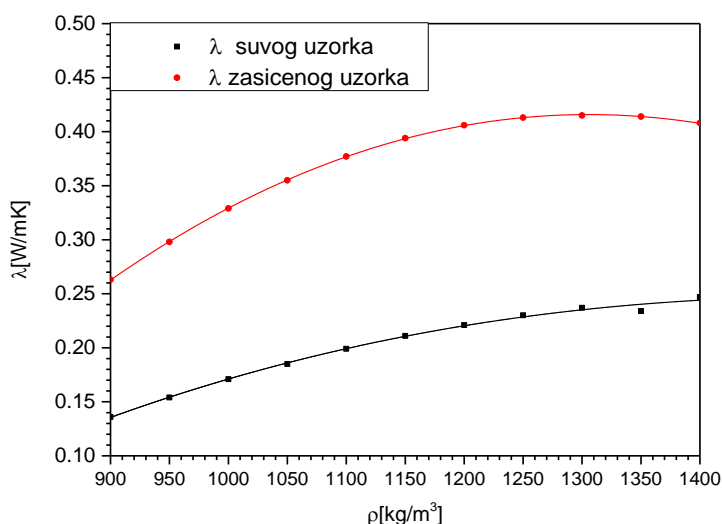
Слика 2. Вредности коефицијента λ у функцији густине материјала и масене влажности



Слика 3. Вредности коефицијента λ у функцији густине материјала и масене влажности

Табела 1. Коefицијенти топлотне проводности бетона у функцији густине и масене влажности H[%]

ρ [kg/m ³]	$\lambda(\rho, H)$ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	$\lambda(\rho, H)$ [W/mK]
900	$\lambda = 1,273 - 0,166 H + 0,00775 H^2 - 1,127 \cdot 10^{-4} H^3$	1551	$\lambda = 0,547 + 0,027 H$
950	$\lambda = 1,363 - 0,177 H + 0,00833 H^2 - 1,212 \cdot 10^{-4} H^3$	1818	$\lambda = 0,719 + 0,030 H$
1000	$\lambda = 1,458 - 0,184 H + 0,00846 H^2 - 1,203 \cdot 10^{-4} H^3$	1988	$\lambda = 1,263 + 0,058 H$
1050	$\lambda = 1,547 - 0,195 H + 0,00894 H^2 - 1,269 \cdot 10^{-4} H^3$	2091	$\lambda = 2,031 + 0,071 H$
1100	$\lambda = 1,578 - 0,197 H + 0,00907 H^2 - 1,285 \cdot 10^{-4} H^3$	2207	$\lambda = 1,604 + 0,053 H$
1150	$\lambda = 1,620 - 0,201 H + 0,00922 H^2 - 1,304 \cdot 10^{-4} H^3$	2236	$\lambda = 2,242 + 0,095 H$
1200	$\lambda = 1,541 - 0,189 H + 0,00870 H^2 - 1,231 \cdot 10^{-4} H^3$	2282	$\lambda = 2,806 + 0,034 H$
1250	$\lambda = 1,595 - 0,221 H + 0,01147 H^2 - 1,835 \cdot 10^{-4} H^3$	2341	$\lambda = 2,840 + 0,074 H$
1300	$\lambda = 1,576 - 0,216 H + 0,01119 H^2 - 1,787 \cdot 10^{-4} H^3$		
1350	$\lambda = 1,384 - 0,185 H + 0,00964 H^2 - 1,539 \cdot 10^{-4} H^3$		
1400	$\lambda = 1,292 - 0,170 H + 0,0089 H^2 - 1,415 \cdot 10^{-4} H^3$		



Слика 4. Коefицијент λ сувог и засићеног бетона влагом

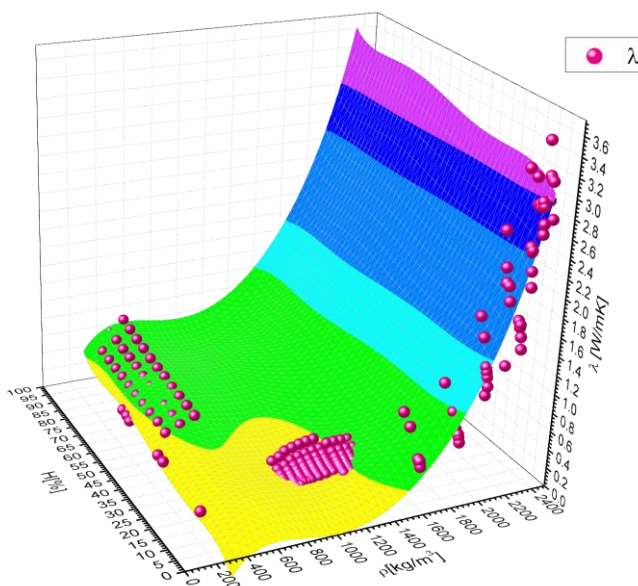
Табела 2. Коefицијенти топлотне проводности бетона у функцији густине и масене влажности H[%]

	$\lambda(\rho, H)$ [W/mK]
Суво узорак (H=0%)	$\lambda = -0,60362 + 0,00132 \rho - 6,28205 \cdot 10^{-7} \rho^2 + 8,54701 \cdot 10^{-11} \rho^3$
Засићен узорак (H=100%)	$\lambda = -1,22394 + 0,00257 \rho - 1,05128 \cdot 10^{-6} \rho^2 + 3,4188 \cdot 10^{-11} \rho^3$

У пракси је корисно знати опсеге за вредности коефицијента $\lambda(\rho, H)$ који се односе на суве и zasiћене бетоне. На Слици 4, и Табели 2, су дати експериментални резултати из референце [3], наше фитоване криве као и аналитички изрази кривих преко полинома трећег степена.

На Слици 5 је дат 3D график вредности коефицијента λ у функцији ρ и H , тј. једначину површи $\lambda(\rho, H)$ која је добијена фитовањем свих до сада презентованих експерименталних вредности у раду за опсег запреминских маса бетона од 300 kg/m^3 до 2341 kg/m^3 . Аналитички израз који описује површ $\lambda(\rho, H)$ гласи:

$$\lambda(\rho, H) = -1,62232 + 0,00812\rho - 1,40736 \cdot 10^{-5} \rho^2 + 0,189052 \cdot 10^{-8} \rho^3 - 3,86861 \cdot 10^{-12} \rho^4 + 5,58123 \cdot 10^{-16} \rho^5 + 0,03232H - 0,00194H^2 + 5,14329 \cdot 10^{-5} H^3 - 5,74331 \cdot 10^{-7} H^4 + 2,27422 \cdot 10^{-9} H^5 \quad (2)$$



Слика 5. Вредности коефицијента λ у функцији ρ и H за лаке и нормалне бетоне

5. ЗАКЉУЧАК

Избор врсте материјала који ће у току експлоатације задовољити све захтеве употребљивости и трајности представља кључно питање приликом пројектовања грађевинских конструкција. Влага у бетону представља један од најважнијих фактора деградације материјала и најважнији фактор пораста коефицијента топлотне проводности. У раду су, на бази експерименталних података доступних у

литератури, дати аналитички изрази добијени фитовањем података и графички приказане криве коефицијента топлотне проводности у функцији запреминске масе и масеног садржаја воде бетона. У раду су дате вредности коефицијента $\lambda(\rho, H)$ за опсег запреминских маса бетона од 300kg/m^3 до 2341kg/m^3 који се редовно користе у скоро свим типовима објеката, највише због лаке производње и прилагодљивости при обликовању. Циљ рада је да се на једном месту опише топлотна проводност бетона и прикажу зависности коефицијента проводности у функцији састава и садржаја воде бетона.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hong-Quing J., Xiao-Li Y., Li-Wu F., Xu X., Zi-Tao Y.: Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content. *International Journal of Heat and Mass transfer*, **2016.**, vol. 92, Pages 589-602
- [2] Ganjian E.: The relationship between porosity and thermal conductivity of concrete. PhD dissertation, The University of Leeds, **1990.**
- [3] Juan José del Coz Díaz, F.P.A.R., P.J.G.N., J.D.H., B.R.S., J.M.P.B.: Hygrothermal properties of lightweight concrete: Experiments and numerical fitting study. *Construction and Building Materials*, **2013.**, vol. 40, Pages 543-555
- [4] Службени гласник RS: 61/2011, Правилник о енергетској ефикасности зграда
- [5] Kunzel M.H.: Simultaneous heat and moisture transport in building components. Fraunhofer IRB Verlag Suttgart, **1995.**, ISBN 3-8167-4103-7
- [6] Мурављов М.: Грађевински материјали, *Грађевинска књига*, Београд, **2007.**
- [7] Neville A.M.: Concrete technology, *Pearson Education Limited*, Harlow, England, **1987.**, ISBN 978-0-273-73219-8
- [8] Lee H., Kwon S.: Effects of Magnetite Aggregate and Steel Powder on Thermal Conductivity and Porosity in Concrete for Nuclear Power Plant, *Advances in Materials Science and Engineering*, **2016.**, vol.2016, Article ID 9526251, 8 страна
- [9] Gawin D., J. K., D.A.: Effect of moisture on thermal performance and energy efficiency of buildings with lightweight concrete walls. *Commercial Buildings: Technologies, Design, and Performance Analysis*, **2004.**

MOISTURE CONTENT INFLUENCE ON THERMAL CONDUCTIVITY OF CONCRETE

Summary: In this paper, physical processes of adsorption and transport of humidity, which has dominant influence on the physical and thermal characteristics of concrete, has been described. The impact of structure of concrete especially pores dimensions and distribution has been explained. The drastic increase in the coefficient of thermal conductivity λ of concrete at increasing relative humidity has been analyzed. An analytic formula for λ , as a function of the concrete density and moisture content in exploitation conditions, starting from light autoclaved aerated to heavy concrete, has been given. The

formula is based on experimental values for λ available in the literature. It has been confirmed that the thermal conductivity of all concretes are directly related to density and inversely to porosity and pores diameters.

Keywords: *concrete, moisture content, coefficient of heat conductivity*