

Dr Uroš Mirković^{*1}
Dr Nikola Mirković²

TERMIČKA ANALIZA VRŠNIH TEMPERATURA MASIVNIH TEMELJA VETROGENERATORA

0352-2733, 57 (2025), p. 17-36
doi: 10.5937/GK25057017M

UDK: 621.548.4:624.151
544.344.016.2
STRUČNI RAD

Rezime

Temeljne ploče vetrogeneratora predstavljaju masivne betonske konstrukcije kod kojih je kontrola porasta temperature tokom procesa ranog starenja betona od ključnog značaja u sprečavanju pojava prslina usled termičkih napona zatezanja odnosno obezbeđivanju trajnosti betonske konstrukcije.

U ovom radu je prikazan primer fazne termičke analize za tri masivna temelja vetrogeneratora jednog vetroparka u Republici Srbiji, a koja je zasnovana na primeni metode konačnih elemenata.

Termička analiza je obuhvatila sve relevantne aspekte termičkog ponašanja betona – parametre materijala, konturne uslove i dinamiku građenja. Razmatrane su varijacije početnih temperatura betonske mešavine u cilju predikcije vršnih temperatura tokom procesa hidratacije cementa. Proračuni su izvršeni u skladu sa relevantnim evropskim i svetskim standardima i smernica, uključujući Evrokod i ACI.

Rezultati ukazuju na prekoračenje vršnih temperatura koje su predviđene pravilnicima i neophodnost primene odgovarajućih mera za snižavanje temperature u betonu.

Dobijeni zaključci doprinose boljem razumevanju prikazanih termičkih procesa i ukazuju na neophodnost primene mera za snižavanje vršnih temperatura u betonu. Prekoračenje vršnih temperatura i potonje dugotrajno hlađenje i skupljanje masivnih konstrukcija (do prosečne temperature okoline) može izazvati nastanak i razvoj prslina koje negativno utiču na kvalitet i trajnost masivnih betonskih temelja vetrogeneratora.

Ključne reči: termička analiza; masivan beton; temelj vetrogeneratora; toplota hidratacije; vršne temperature

¹ Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, 11226 Beograd, Srbija; uros.mirkovic@jcerni.rs

² Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, 11226 Beograd, Srbija;
nikola.mirkovic@jcerni.rs

THERMAL ANALYSIS OF PEAK TEMPERATURES IN MASSIVE WIND TURBINE FOUNDATIONS

Summary

Wind turbine foundations are massive concrete structures in which controlling the temperature rise during the early-age curing process is of crucial importance for preventing cracking caused by thermal tensile stresses and for ensuring the durability of the concrete structure.

This paper presents an example of a thermal analysis of three massive wind turbine foundations within a wind farm in the Republic of Serbia, based on the application of the finite element method.

The thermal analysis included all relevant aspects of the thermal behavior of concrete—material parameters, boundary conditions, and construction dynamics. Variations in the initial temperature of the concrete mixture were considered in order to predict peak temperatures during the cement hydration process. The calculations were performed in accordance with relevant European and international standards and guidelines, including Eurocode and ACI.

The results indicate exceedance of the peak temperatures prescribed by the regulations and the necessity of applying appropriate measures to reduce the temperature in the concrete.

The obtained conclusions contribute to a better understanding of the presented thermal processes and emphasize the necessity of implementing measures to reduce peak temperatures in concrete. Exceeding peak temperatures, followed by long-term cooling and shrinkage of massive structures (toward the average ambient temperature), may cause the formation and development of cracks that negatively affect the quality and durability of massive concrete wind turbine foundations.

Keywords: thermal analysis; mass concrete; wind turbine foundation; heat of hydration; peak temperatures

1. UVOD

Temeljne ploče vetrogeneratora se svrstavaju u masivne betonske konstrukcije, kod kojih toplota oslobođena u procesu hidratacije cementa ima presudan uticaj na razvoj termičkih napona zatezanja u ranoj fazi očvršćavanja betona. Neadekvatna kontrola temperatura u betonu može dovesti do pojave visokih termičkih napona i, posledično, do pojave prslina, što može ugroziti trajnost i funkcionalnost konstrukcije. Iz navedenog razloga, pouzdana termička analiza predstavlja sastavni deo savremenog projektovanja masivnih betonskih konstrukcija.

Postupke negovanja betona potrebno je započeti odmah po ugrađivanju pojedinačnih betonskih slojeva. Površine betona moraju biti zaštićene od prebrzog isušivanja, brze izmene toplote između betona i vazduha, padavina i tekuće vode, ekstremnih temperatura (visokih i niskih) i vibracija.

U uslovima normalnih temperatura ($5,0\text{ °C} \leq T \leq 30,0\text{ °C}$) sa negom betona bi trebalo početi vrlo rano, već posle 3-6 sati nakon ugrađivanja. Dužina nege mora da traje najmanje 7 dana, odnosno ne manje od vremena potrebnog da beton postigne 60,0% od predviđene klase betona. Beton napravljen sa dodatkom usporivača ne sme se negovati kraće od 14 dana. Za negu betona mora se koristiti voda istog kvaliteta kao za njegovo spravljanje [1].

Betoniranje u posebnim uslovima je ugrađivanje betona pri spoljašnjim temperaturama ispod $5,0\text{ °C}$ (betoniranje u zimskim uslovima) ili iznad $30,0\text{ °C}$ (betoniranje u letnjim uslovima) [1].

Kod betoniranja u zimskim uslovima, pri projektovanju betonskih mešavina: koristiti cimente viših toplota hidratacije (cimente viših klasa i cimente bez dodataka), upotrebljavati veće količine cementa (5-10%), upotrebljavati niže vrednosti vodocementnih faktora, koristiti aditive antifrizne, kao i aditive akceleratora (ubrzivače vezivanja i očvršćavanja). Pri izvođenju betonskih radova potrebno je prekrivati otvorene površine betona prikladnim izolacionim materijalima [1].

Kod betoniranja u letnjim uslovima, pri projektovanju betonskih mešavina: koristiti cimente nižih toplota hidratacije (cimente nižih klasa i cimente sa dodacima), upotrebljavati manje količine cementa (5-10%), ići na više vrednosti vodocementnih faktora, koristiti aditive retardere (usporivače samo vezivanja) i aditive plastifikatore, odnosno superplastifikatore. Pri izvođenju betonskih radova agregat, rezervoare za vodu i cement štititi od direktnog dejstva zračenja. Prema potrebi hladiti komponente betona i to: vodu - ali ne ispod $4,0\text{ °C}$ - $5,0\text{ °C}$, uz promenu redosleda unošenja komponenti u mešalicu (agregat – hladna voda - cement), agregat - tako da temperatura odgovara temperaturi vazduha u

hladu. Prema potrebi izvršiti prinudno hlađenje betona sistemom cevi za hlađenje. Prema potrebi potrebno je prekinuti betoniranje kako bi se sprečilo prekomerno zagrevanje konstrukcije, uz adekvatnu negu izloženih površina (prekrivanje zaštitnim, kontinuirano vlažnim materijalima) [1].

Prema standardu SRPS EN 13670 [2], koji je važeći u Republici Srbiji, u cilju kontrole termičkog ponašanja, potrebno je uzeti u obzir sledeće zahteve:

- Stena, oplata ili drugi elementi koji su u kontaktu sa konstrukcijom koja se betonira, moraju imati temperaturu koja ne dovodi do zamrzavanja betona pre nego što on dobije dovoljnu čvrstoću;
- Tamo gde je ambijentalna temperatura niska, ili se predviđa da će biti niska u vreme betoniranja ili tokom perioda očvršćavanja, moraju se preduzeti mere zaštite;
- Tamo gde je ambijentalna temperatura visoka, ili se predviđa da će biti visoka u vreme betoniranja ili tokom perioda očvršćavanja, moraju se, takođe, preduzeti mere zaštite;
- Temperatura površine betona ne sme pasti ispod 0 °C sve dok čvrstoća površine betona na pritisak ne dostigne minimalnu vrednost od 5,0 MPa;
- Vršna temperatura betona ne sme preći 70,0 °C, osim ukoliko se dokaže da više temperature neće imati značajan negativan uticaj na karakteristike betona.

Tabele F.1 do F.3 Aneksa F ovog standarda definišu dužinu nege betona u danima u zavisnosti od površinske temperature i odnosa čvrstoće betona na pritisak za 2,0 i 28,0 dana.

Američki standardi ACI 301 [3] i ACI 207.1R-05 [4] daje sledeće preporuke za kontrolu i praćenje termičkog ponašanja kao i negu masivnih betonskih konstrukcija:

- Maksimalna temperatura u betonu nakon ugradnje ne sme biti veća od 70,0 °C;
- Maksimalna temperaturna razlika između centra masivne betonske konstrukcije i površine iste ne sme biti veća od 20,0 °C;
- Potrebno je izraditi plan (projekat) termičke kontrole masivne betonske konstrukcije koji će uključivati sledeće:
 - Prikaz materijala koji će se koristiti;
 - Adijabatski porast temperature u konstrukciji;
 - Maksimalnu temperaturu na osnovu očekivanih uslova u vreme betoniranja i nege betona;

- Opis mera koje će se preduzeti kako bi se obezbedilo da temperature prilikom ugrađivanja ne pređu definisanu granicu;
- Maksimalnu temperaturnu razliku na osnovu očekivanih uslova u vreme betoniranja i nege betona;
- Opis mera koje će se preduzeti da bi se obezbedilo da temperaturne razlike ne pređu definisanu granicu;
- Opis opreme i postupaka koji će se primeniti za praćenje i evidenciju temperatura i temperaturnih razlika;
- Crteži mesta za postavljanje merne opreme;
- Opis metoda i trajanja nege betona;
- Proceduru dostavljanja podataka merenja inženjeru;

Ovi standardi definišu i prekid betoniranja i preduzimanje hitnih mera koje su navedene u planu termičke kontrole ukoliko neka od dozvoljenih granica bude prekoračena, dok se ne utvrde uzroci i ne prihvate korekcije projektnog rešenja.

2. TEORIJSKE OSNOVE TERMIČKIH PROCESA U MASIVNIM BETONIMA

2.1 Osnovne jednačine prenosa toplote

Promena temperature homogenog izotropnog tela tokom vremena opisuje se dobro poznatom Furijeovom jednačinom provođenja toplote:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (1)$$

gde je ρ gustina materijala [kg/m^3], c specifična toplota betona [$\text{J}/(\text{kg K})$], T temperatura [$^{\circ}\text{C}$], k koeficijent provođenja toplote [$\text{W}/(\text{m K})$] i Q zapreminska gustina toplotnog fluksa izvora toplote [W/m^3].

U praktičnom rešavanju problema traži se ono rešenje $T(x,y,z,\tau)$ jednačine (1), koje zadovoljava odgovarajuće početne i granične uslove. Početni uslovi podrazumevaju da je raspodela temperatura u početnom trenutku ($\tau = 0$) poznata i data temperaturnim poljem $T(x,y,z,0)$, dok granični uslovi definišu razmenjen toplotni fluks između izlivenih delova i okoline:

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = q_c + q_r, \quad (2)$$

gde su $\frac{\partial T}{\partial n}$ gradijenti temperaturnog polja na površinama betona [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$], q_c konvektivni toplotni fluks [W/m^2] i q_r radijativni toplotni fluks [W/m^2].

Razmenjena toplota između betona i okoline putem konvekcije, tj. između betonskih površina i vazduha je data Newton-ovim zakonom hlađenja:

$$q_c = h_c(T - T_a) \quad (3)$$

gde su T temperatura površine betona [$^{\circ}\text{C}$], T_a temperatura okolnog vazduha [$^{\circ}\text{C}$] i h_c konvektivni koeficijent [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$].

Razmenjena toplota zračenjem između betonskih površina i okoline je opisana linearizovanim Štefan – Boltzman-ovim zakonom zračenja:

$$q_r = h_r(T - T_a), \quad (4)$$

gde su h_r linearizovani koeficijent zračenja [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$], koji se definiše preko izraza [5]:

$$h_r = \varepsilon\sigma(T^2 + T_a^2)(T + T_a), \quad (5)$$

gde su ε emisivnost betonske površine i σ Štefan - Boltzman-ova konstanta ($5.669 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2$).

Granični uslov (2), imajući u vidu izraze (3) i (4), može se napisati u obliku:

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h(T - T_a), \quad (6)$$

gde je h kombinovani ($h_c + h_r$) konvektivni koeficijent [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$].

2.2 Proces hidratacije betona

Prilikom očvršćavanja betona, u procesu hidratacije se izdvaja toplota koja zavisi od hemijskog i mineraloškog sastava cementa.

Eksperimenti su pokazali da se u toku prvih 7 do 10 dana očvršćavanja betona izdvaja i do 80,0% toplote nastale hidratacijom cementa i da se u daljem procesu očvršćavanja izdvajanje toplote usporava [6, 7].

Kriva izdvajanja hidratacione toplote se često aproksimira sledećim izrazom [6]:

$$Q_t(\tau) = Q_{max}(1 - e^{-m \cdot \tau}) \quad (7)$$

gde je $Q_t(\tau)$ izdvajanje hidratacione toplote iz betona u trenutku τ u [J], Q_{max} najveća količina hidratacione toplote koja se može izdvojiti iz betona datog sastava pri potpunoj hidrataciji cementa u [J], m empirijski parametar koji zavisi od vrste cementa [$1/\text{h}$] i τ vreme [h].

Temperatura usled toplote nastale hidratacijom cementa daje najveće napone zatezanja u betonu u periodu građenja, pri čemu porast temperature može iznositi i preko 50.0°C [6] i određuje se pomoću izraza:

$$T_h = \frac{q_t \cdot K}{c \cdot \rho} \quad (8)$$

gde su T_h temperatura usled toplote nastale hidratacijom cementa [°C], q_t količina izdvajanja toplote [J/kg], K masa cementa u jedinici zapremine [kg/m^3], c specifičan toplotni kapacitet betona [J/(kg K)] i ρ gustina betona [kg/m^3].

2.3 Razmena toplote sa slobodnih i zaštićenih betonskih površina

Razmena toplote između betonske konstrukcije i spoljašnje sredine predstavlja važan proces koji utiče na temperaturno stanje betona tokom njegovog očvršćavanja i kasnije tokom eksploatacije konstrukcije. Ovaj proces nastaje usled razlika temperatura na površini betona i temperatura spoljašnje sredine. Intenzitet i brzina ovog procesa zavise od vrednosti temperaturne razlike, svojstava materijala, kao i uslova u kojima se konstrukcija nalazi.

Temperatura na površini betona menja se pod uticajem više spoljašnjih i unutrašnjih faktora. Najvažniji spoljašnji faktor su promene temperatura vazduha tokom dana i noći, kao i sezonska kolebanja koja mogu biti veoma izražena u pojedinim klimatskim uslovima. Pored toga, značajan uticaj ima i Sunčevo zračenje, posebno kod horizontalnih ili direktno izloženih površina u fazi eksploatacije. Unutrašnji faktor predstavlja proces hidratacije cementa. Ovaj proces, kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, dovodi do oslobađanja toplote, usled čega temperatura unutar konstrukcije naglo raste, naročito kod masivnih betonskih elemenata.

Kod slobodnih betonskih površina, koje su direktno izložene spoljašnjoj sredini, razmena toplote odvija se intenzivnije. Ona se prenosi konvekcijom između površine betona i vazduha, zračenjem prema okolini (naročito tokom noći kada se površina betona hladi emitovanjem toplote prema hladnijem okruženju) kao i isparavanjem vode sa površine betona.

Nasuprot tome, kod zaštićenih betonskih površina razmena toplote je znatno sporija. Zaštita može biti u vidu oplata, termoizolacionih pokrivača, zaštitnih folija, slojeva izolacije ili drugih materijala koji smanjuju direktan kontakt betona sa spoljašnjom sredinom. Ovakvi zaštitni slojevi deluju kao barijera koja usporava prenos toplote između betona i okoline, čime se postiže ravnomernije hlađenje konstrukcije. Time se smanjuju velike

temperатурне разлике између унутрашњих и спољашњих делова бетона и спречава појава термићких напона затезања који утићу на појаву и развој прслина у бетону.

2.4 Temperatura свеће бетонске мешавине

Jedan od veoma važnih činilaca koji utiče na formiranje i razvoj temperaturnog polja u masivnim betonskim konstrukcijama jeste temperatura свеће бетонске мешавине u trenutku njenog spravljanja i ugradnje. Početna temperatura бетона ima direktan uticaj na maksimalnu temperaturu koja će se razviti u unutrašnjosti elementa tokom procesa hidratacije cementa.

Snižavanje početne temperature бетонске мешавине je jedan od efikasnijih načina ograničenja porasta temperature u masivnim betonskim elementima [8].

U tom cilju, koriste se sporovezujući cementi, spravljanje бетона sa manjom količinom cementa, primena retardera kojima se usporava proces vezivanja, lagerovanje vode u cisternama koje su ukopane u zemlju, upotreba leda prilikom spravljanja мешавине, термићка заштита silosa za cement, заштита agregata od direktnog delovanja Sunca. Sa stanovišta tehnologije ugradnje, primenjuju se sledeći koraci: fazno betoniranje, betoniranje ноћу, хлађење i negovanje бетонских површина nakon ugrađivanja, postavljanje sistema cevi za prinudno хлађење бетона, ugradnja prefabrikovanih бетонских elemenata kod kojih je proces hidratacije završen.

2.5 Temperatura pripadajuće stenske mase

Temperatura pripadajuće stenske mase praktično ne zavisi od sezonskih promena temperature vazduha i, izuzev površinskog sloja, može se usvojiti da ima konstantnu vrednost [8, 9].

3. NUMERIČKI MODEL ZA TERMIČKU ANALIZU

3.1 Osnovni podaci o konstrukciji i numeričkom modelu

Za potrebe fundiranja ветрогенератора predviđena su tri tipa temelja čije su zapremine 674,0 m³, 821,0 m³ i 1142,0 m³, dok su prečnici temelja ø20,0 m, ø21,4 m i ø26,2 m, respektivno (slike od 2 do 4).

U centralnom delu preseka, na istim slikama, uočava se čelični ankerni kavez za montažu konstrukcije stuba kao i korugovane PE cevi koje imaju funkciju sprovođenja instalacija iz vetrogeneratora. Nakon izgradnje konstrukcije predviđeno je nasipanje ispunom po obimu konstrukcije. Ispod konstrukcije predviđen je tampon sloj koji služi za nivelaciju podloge i poboljšanje njene nosivosti. Temelji prečnika 20,0 m se fundiraju na šipovima. Uticaj prethodno izrađenih šipova na temperaturno polje temelja je zanemarljiv pa nije ni razmatran u okviru modela. Za svaki od temelja različit je nivo podzemne vode koji će delovati na konstrukciju u fazi eksploatacije a koji, takođe, nije od uticaja na sprovedenu termičku analizu tokom građenja iste.

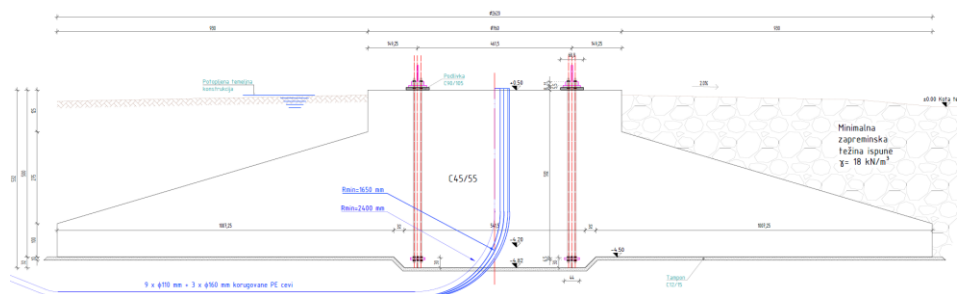
Prema projektu, predviđen je beton klase C45/55 i upotreba cementa CEM II/A-L 42,5 R u iznosu od 430,0 kg/m³.

Betoniranje na lokaciji, u planinskom delu istočne Srbije, vršeno je u periodu od oktobra do januara. Minimalne ambijentalne temperature na lokaciji su u mesecu februaru (-6,0°C), dok su maksimalne u avgustu (23,0°C). Prosečna temperatura u proleće i jesen je oko 15,0°C dok je prosečna zimska temperatura oko 2,5 °C..

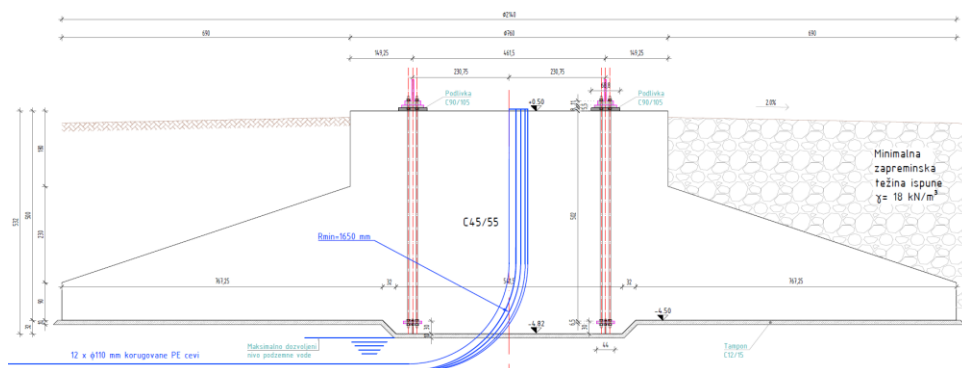


Slika 1. Izgled armaturnog koša jednog od temelja

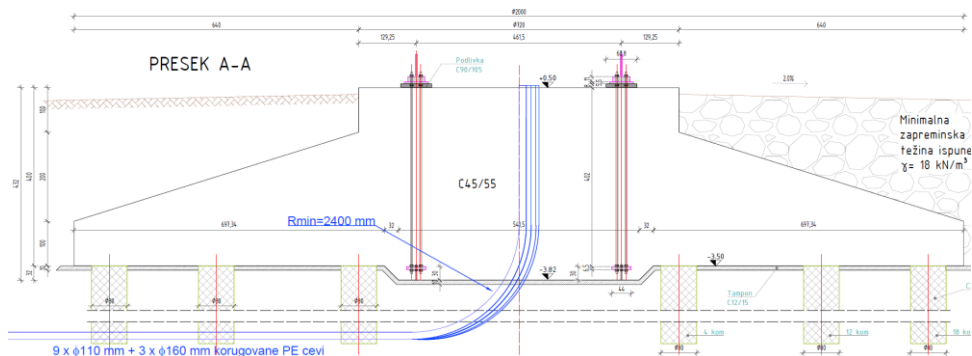
Trodimenzionalni strukturni model jednog temelja obuhvata betonsku ploču sa pripadajućim ravnajućim (tampon) slojem. Betonska podloga je debljine 0,1 m i njenim modeliranjem omogućeno je realnije simuliranje pojava u zoni temeljne spojnice kao i razmena toplote između tla i betonske konstrukcije.



Slika 2. Poprečni presek temeljne ploče vetrogeneratora $\varnothing 26,2$ m



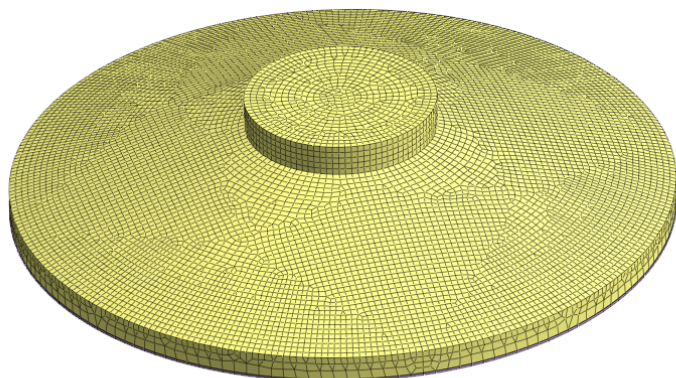
Slika 3. Poprečni presek temeljne ploče vetrogeneratora $\varnothing 21,4$ m



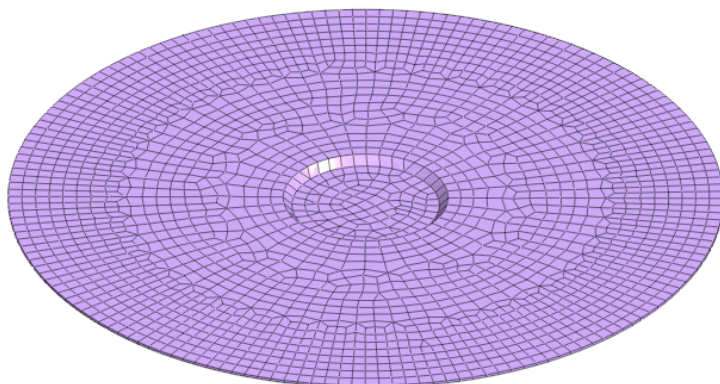
Slika 4. Poprečni presek temeljne ploče vetrogeneratora $\varnothing 20,0$ m

Za potrebe modeliranja termičkih procesa, formirani su trodimenzionalni MKE modeli navedenih ploča (slike 5 i 6). Ukupan broj konačnih elemenata modela temelja iznosi: $\varnothing 26,2$ m - 125531, $\varnothing 21,4$ m - 94527 i $\varnothing 21,4$ m - 73184.

Razvijeni numerički model obuhvata dve faze - fazu izgradnje tampon sloja konstantne temperature (koja je jednaka usvojenoj temperaturi tla) i fazu betoniranja betonske ploče u kojoj je razmatran proces hidratacije.



Slika 5. Prikaz mreže konačnih elemenata betonske ploče $\varnothing 26,2$ m



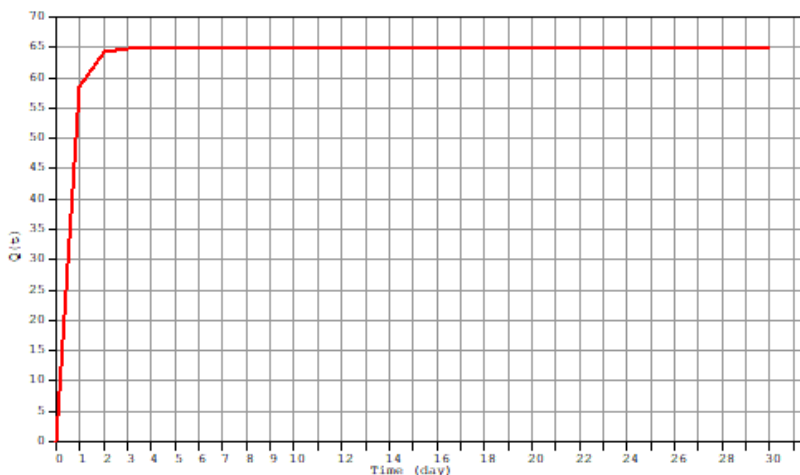
Slika 6. Prikaz mreže konačnih elemenata tamponskog sloja temelja $\varnothing 26,2$ m

Za termički proračun korišćeni su sledeći termički i parametri hidratacije betona:

- koeficijent provođenja toplote: $k = 2,50 \text{ W/(m K)}$
- specifičan toplotni kapacitet: $c = 900,0 \text{ J/(kg K)}$

- koeficijent termičkog širenja: $\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
- kombinovani konvektivni koeficijent: $h_1 = 25,0 \text{ J/(m}^2 \text{ K)}$
- udeo cementa u masi betona: $430,0 \text{ kg/m}^3$

Proračuni su izvršeni za krivu hidratacije cementa koja odgovara portland cementu sa visokom početnom čvrstoćom za svaki od tri temelja [10] (slika 7).



Slika 7. Kriva adijabatskog porasta temperature usled procesa hidratacije cementa sa visokom početnom čvrstoćom [10]

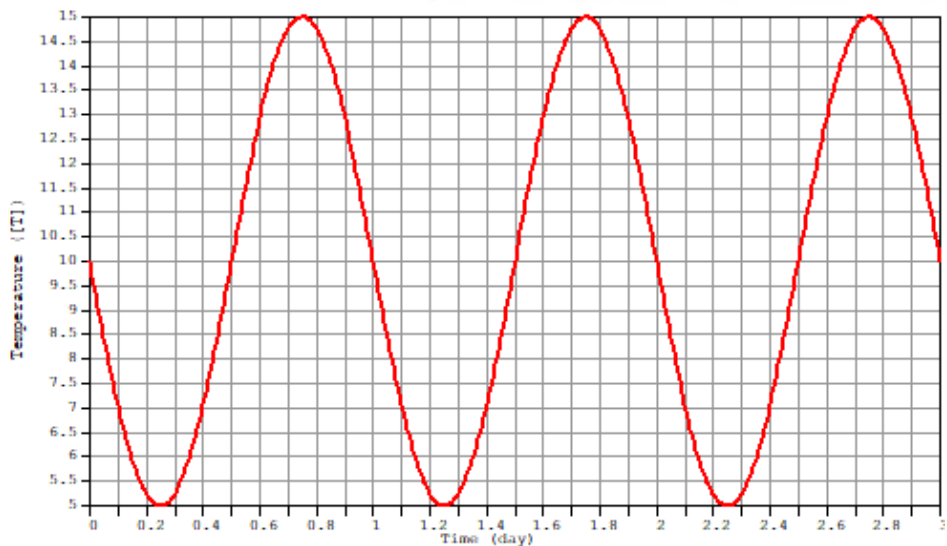
3.2 Konturni uslovi za termičku analizu

U termičkoj analizi, razmatrani su sledeći konturni uslovi:

- na kontaktu prethodno i sveže izbetoniranih slojeva,
- po površinama betona koje su u dodiru sa vazduhom,
- temperatura tla i
- temperatura sveže betonske mešavine temelja.

Betonskom temelju dodeljen je termički granični uslov koji dozvoljava slobodno provođenje toplote između slojeva betona na mestima kontaktnih površina.

Po betonskim površinama koje su u dodiru sa vazduhom zadaju se ambijentalne temperature prema funkciji na slici 8. Uticaj Sunčevog zračenja nije razmatran u okviru ovog modela imajući u vidu dužinu termičke analize kao i činjenicu da je tokom betoniranja, a zatim i očvršćavanja, površina betona prekrivana laganim neprovidnim PVC zaštitnim materijalom.



Slika 8. Vrednosti ambijentalne temperature vazduha

Temperatura tla usvojena je kao konstantna vrednost u iznosu od 13,0 °C.

Temperatura sveže betonske mešavine temelja je varijantisana u opsegu 10 - 15,0 °C, u skladu sa predviđenim temperaturama koje su se očekivale na mestu ugradnje u datim klimatskim uslovima kao i uslovima transporta.

U skladu sa predviđenom dinamikom betoniranja, termičkim proračunom je zadato da se svaki pojedinačni temelj izvede u okviru jednog dana, dok su proračuni sprovedeni u ukupnom periodu od 7,0 dana za svaki od temelja, kako bi se odredile vršne temperature betona usled procesa hidratacije cementa, a koji je najizraženiji u prva 3 dana nakon izlivanja.

Proces betoniranja jednog temelja prikazan je na slici 9.



Slika 9. Proces betoniranja temelja

4. REZULTATI PRORAČUNA

4.1 Prikaz rezultata temperaturnog polja po danima

Na narednim slikama prikazan je izgled temperaturnog polja u masivnom betonu temelja vetrogeneratora za sve dane proračunskog perioda.

Odmah nakon završetka izgradnje započinje proces postepenog hlađenja konstrukcije. Na slikama ispod ovaj proces se uočava kao redukcija obima narandžasto - žute zone poprečnog preseka temelja.

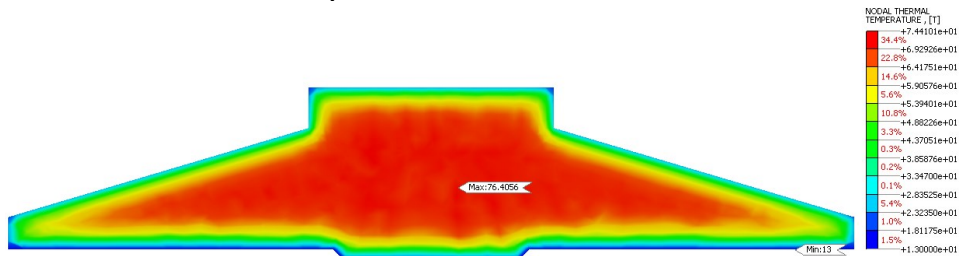
Uticaj niskih temperatura vazduha na pripovršinske zone evidentan je na prikazanim dijagramima. Isto se uočava i u zoni temeljne spojnice u kojoj temperature stenske mase značajno utiču na hlađenje betona.

Proces hlađenja betona dovodi do njegovog skupljanja i pojave termičkih napona zatezanja koji, kada su prekoračeni, dovode do nastanka i razvoja prslina u betonu.

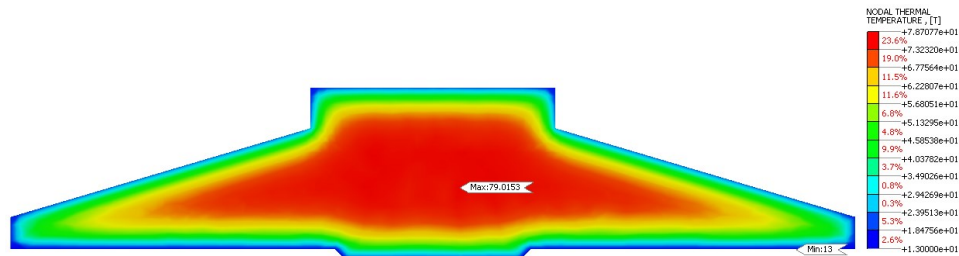
Proračun termičkih napona zatezanja nije vršen u okviru ovog rada, već je cilj bilo samo utvrđivanje vršnih temperatura u betonu tj. kontrola njihovog prekoračenja.

Proces nege betona tokom procesa očvršćavanja nije razmatran u okviru razvijenih modela ovog rada.

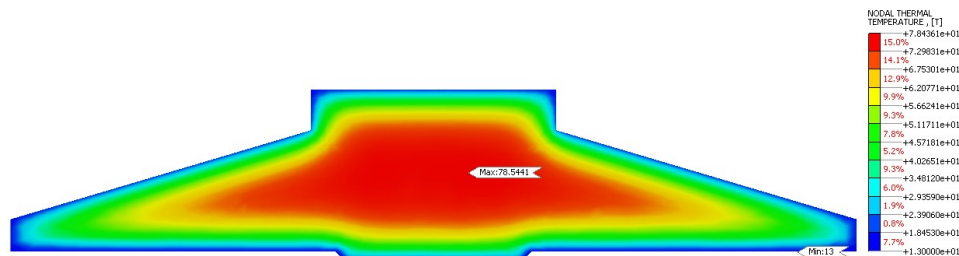
Na narednim slikama, od 10 do 16, dat je prikaz temperaturnog polja temelja prečnika $\varnothing 26,20$ m za početnu temperaturu mešavine $15,0$ °C za svaki od navedenih dana proračuna.



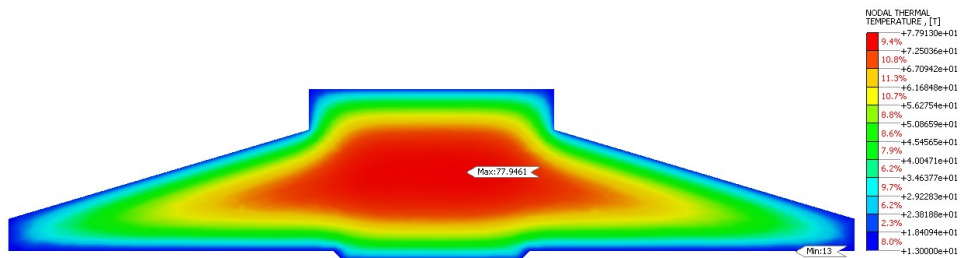
Slika 10. Temperaturno polje: Dan 1, temelj $\varnothing 26,20$ m



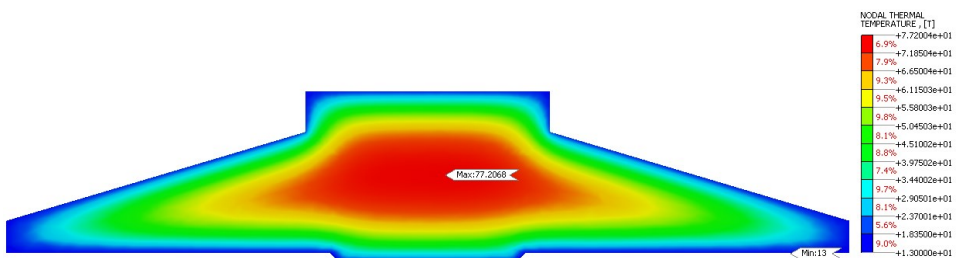
Slika 11. Temperaturno polje: Dan 2, temelj $\varnothing 26,20$ m



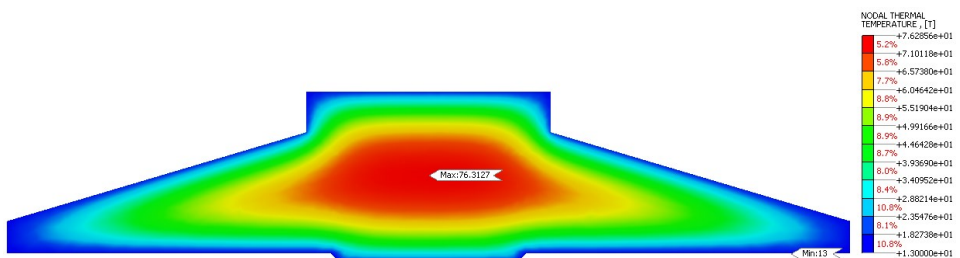
Slika 12. Temperaturno polje: Dan 3, temelj $\varnothing 26,20$ m



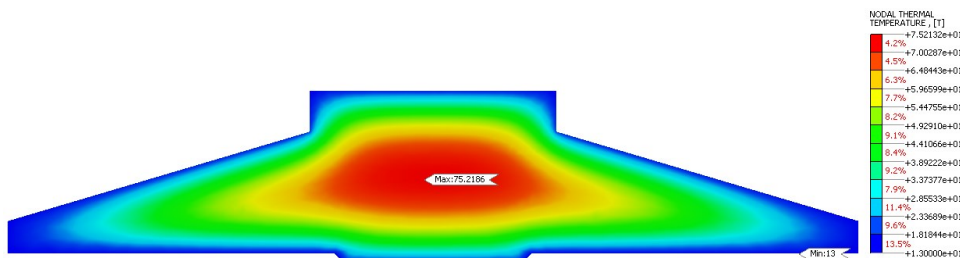
Slika 13. Temperaturno polje: Dan 4, temelj Ø26,20 m



Slika 14. Temperaturno polje: Dan 5, temelj Ø26,20 m



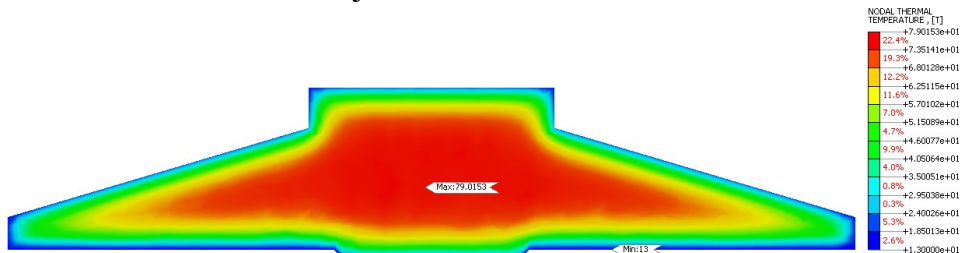
Slika 15. Temperaturno polje: Dan 6, temelj Ø26,20 m



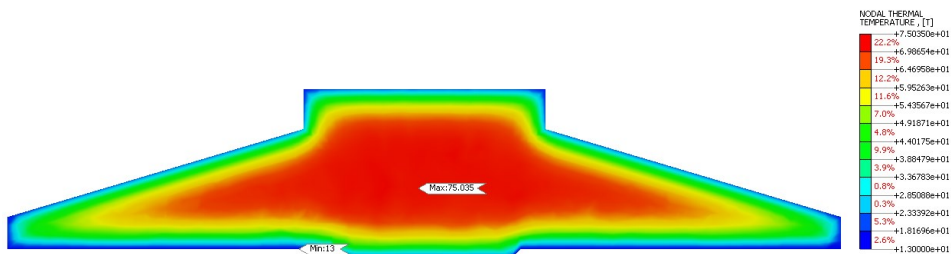
Slika 16. Temperaturno polje: Dan 7, temelj Ø26,20 m

4.2 Prikaz uticaja početne temperature betona na rezultate proračuna

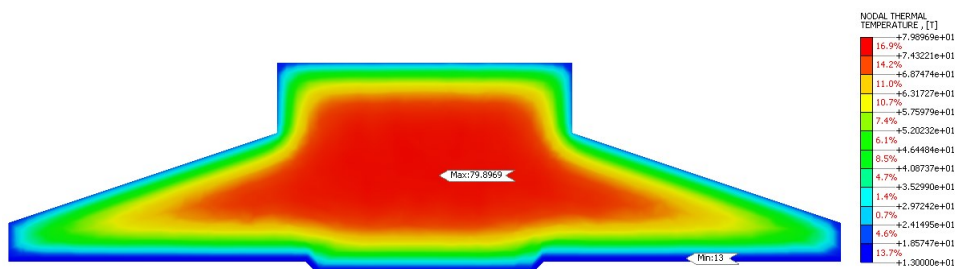
Na narednim slikama, od 17 do 22, prikazan je uticaj izbora početne temperature betonske mešavine na ekstremne vrednosti temperatura u betonu koje se javljaju drugog dana nakon betoniranja konstrukcije, za svaki od navedena tri temelja.



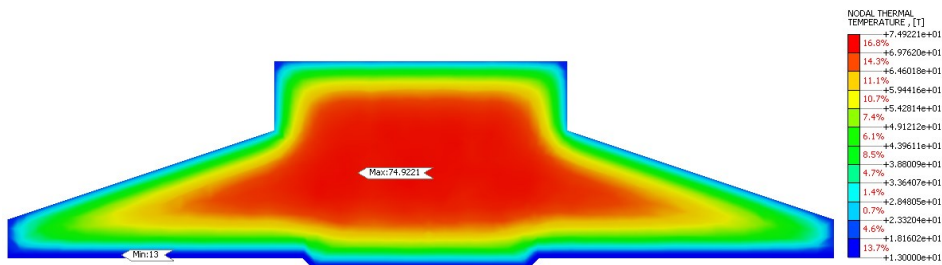
Slika 17. Temperaturno polje sa T_{max} , temelj $\varnothing 26,20$ m, $T_{poč} = 15,0$ °C



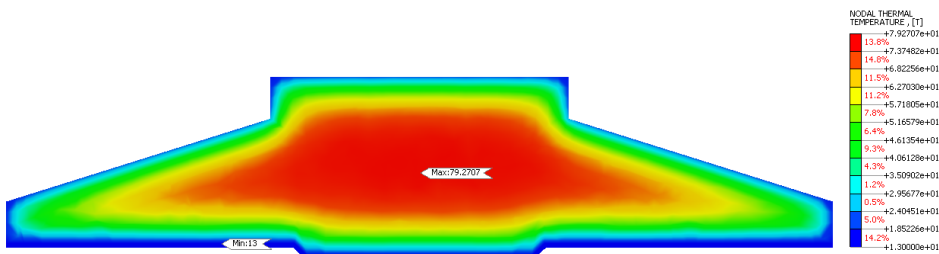
Slika 18. Temperaturno polje sa T_{max} , temelj $\varnothing 26,20$ m, $T_{poč} = 10,0$ °C



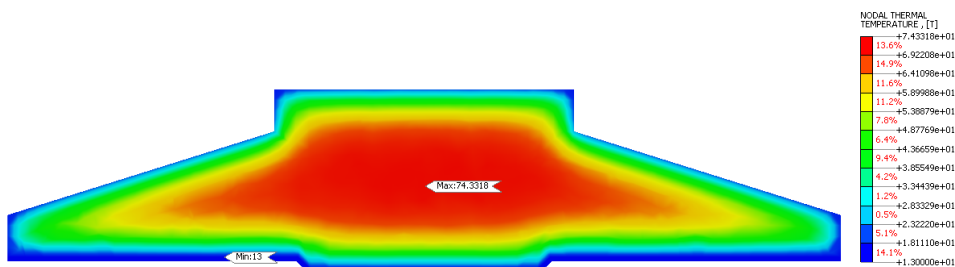
Slika 19. Temperaturno polje sa T_{max} , temelj $\varnothing 21,40$ m, $T_{poč} = 15,0$ °C



Slika 20. Temperaturno polje sa Tmax, temelj Ø21,40 m, Tpoč = 10,0 °C



Slika 21. Temperaturno polje sa Tmax, temelj Ø20,0 m, Tpoč = 15,0 °C



Slika 22. Temperaturno polje sa Tmax, temelj Ø20,0 m, Tpoč = 10,0 °C

4.3 Tabelarni prikaz dobijenih rezultata proračuna

U tabelama od 1 do 4 prikazani su dobijeni rezultati proračuna.

Tabela 1. Prikaz maksimalnih vrednosti temperatura u betonskim temeljima za vrednost početne temperature betona $T_{m,poč} = 15,0$ °C za ceo proračunski period

Prečnik temelja	Temperatura [°C]						
	Dan 1.	Dan 2.	Dan 3.	Dan 4.	Dan 5.	Dan 6.	Dan 7.
ø26,20	76,41	79,02	78,54	77,95	77,21	76,31	75,22
ø21,40	76,69	79,90	79,41	78,94	78,21	77,29	76,19
ø20,00	75,64	79,27	78,47	77,09	75,45	74,50	73,38

Tabela 2. Prikaz maksimalnih vrednosti temperatura u betonskim temeljima za vrednost početne temperature betona $T_{m,po\check{c}} = 10,0$ °C za ceo proračunski period

Prečnik temelja	Temperatura [°C]						
	Dan 1.	Dan 2.	Dan 3.	Dan 4.	Dan 5.	Dan 6.	Dan 7.
ø26,20	72,41	75,04	74,57	74,01	73,31	72,47	71,44
ø21,40	71,69	74,92	74,44	74,01	73,34	72,44	71,39
ø20,00	70,65	74,33	73,59	72,30	70,79	69,87	68,80

Tabela 3. Prikaz maksimalnih vrednosti temperatura u betonskim temeljima za vrednost početne temperature betona $T_{m,po\check{c}} = 15,0$ °C

Prečnik temelja	Početna temperatura mešavine [°C]	Tmax [°C]
ø26,20	15,0	79,02
ø21,40	15,0	79,90
ø20,00	15,0	79,27

Tabela 4. Prikaz maksimalnih vrednosti temperatura u betonskim temeljima za vrednost početne temperature betona $T_{m,po\check{c}} = 10,0$ °C

Prečnik temelja	Početna temperatura mešavine [°C]	Tmax [°C]
ø26,20	10,0	75,04
ø21,40	10,0	74,92
ø20,00	10,0	74,33

5. ZAKLJUČAK

Glavni doprinos sprovedenog istraživanja je prikaz postupka za primenu fazne termičke analize i metode konačnih elemenata u analizi masivnih betona temelja vetrogeneratora. Razmatrani su svi relevantni termički konturni uslovi (na kontaktnim površinama između betona i stenske mase, na površinama betona u kontaktu sa vazduhom, početna temperatura betonske mešavine), kao i proces hidratacije betona.

Prikazani rezultati temperaturnog polja pokazuju da na porast temperature u temelju najveći uticaj imaju proces hidratacije betona u prvim danima betoniranja, pri čemu se u konstrukciji javljaju temperature i do 80,0°C. Na proces hlađenja konstrukcije u velikoj meri utiču spoljašnja temperatura vazduha kao i temperatura stenske mase.

Rezultati sprovedene analize poboljšavaju razumevanje termičkih procesa kod masivnih betonskih temelja, što može uticati na donošenje projektnih odluka u cilju povećanja trajnosti i pouzdanosti ovih masivnih konstrukcija.

Prethodno navedeno ukazuje i na značaj kontrole temperature betona (sprovođenjem mera prilikom spravljanja kao i nakon ugradnje) u uslovima ekstremnih temperatura kao i na značaj monitoringa senzorima i uređajima za kontinualno merenje i snimanje podataka.

6. LITERATURA

- [1] Muravljev, M. Građevinski materijali, 1995., Beograd
- [2] SRPS EN 13670:2012 Izvođenje betonskih konstrukcija
- [3] ACI 301 Specifications for Concrete Construction
- [4] ACI 207.1R-05 Guide to Mass Concrete
- [5] Sheibany, F.; Ghaemian, M. Effects of environmental action on thermal stress analysis of Karaj concrete arch dam. *J. Eng. Mech.* 2006, 132, 532–544.
- [6] Petrović, P. Hidrotehničke Konstrukcije, drugi deo; Građevinski Fakultet: Beograd, Srbija, 2002.
- [7] Schindler, A.K.; Folliard, K.J. Influence of supplementary cementing materials on the heat of hydration of concrete. In *Proceedings of the Advances in Cement and Concrete IX Conference*, Copper Mountain Conference Resort in Colorado, Copper Mountain, CO, USA, 10-14 August 2003.
- [8] Kuzmanović, V. Thermal-Stress Analysis of Roller Compacted Concrete Dams. Ph.D. Thesis, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Beograd, Serbia, 2007.
- [9] Mirković, U., Kuzmanović, V. and Todorović, G. Influence of Monolith Length on Temperature Field of Concrete Gravity Dams. *Applied Sciences*, 2024, 14, 3248. <https://doi.org/10.3390/app14083248>
- [10] Léger, P.; Venturelli, J.; Bhattacharjee, S.S. Seasonal temperature and stress distributions in concrete gravity dams. Part 1: Modeling. *Can. J. Civ. Eng.* 1993, 20, 999–1017.
- [11] Léger, P.; Venturelli, J.; Bhattacharjee, S.S. Seasonal temperature and stress distributions in concrete gravity dams. Part 2: Behavior. *Can. J. Civ. Eng.* 1993, 20, 1018–1029.