

Primljen / Received: 16.7.2023.

Ispravljen / Corrected: 7.10.2023.

Prihvaćen / Accepted: 26.11.2023.

Dostupno online / Available online: 10.3.2024.

# Optimizacija i projektiranje novog energetski učinkovitog betonskog samoizolirajućeg bloka

## Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Bashir H. Osman**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Sinnar, Sinnar, Sudan  
Tehnički fakultet, Odjel za građevinarstvo  
[bashir00@yahoo.com](mailto:bashir00@yahoo.com)  
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Zhongfan Chen**, dipl.ing.građ.  
Jugoistočno Sveučilište, Kina  
Ključni laboratorij armiranih i prednapregnutih  
konstrukcija Ministarstva obrazovanja  
[101003944@seu.edu.cn](mailto:101003944@seu.edu.cn)  
Autor za korespondenciju



Mr.sc. **Adrianna Carroll**, dipl.ing.građ.  
Integrirane građevinske usluge d.o.o.  
Nassau, Bahami  
[adriannac@gointegrated.com](mailto:adriannac@gointegrated.com)



Mr.sc. **Abdelrahman Abuserriya**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Sinnar, Sinnar, Sudan  
Tehnički fakultet, Odjel za građevinarstvo  
[engabedsoliman@hotmail.com](mailto:engabedsoliman@hotmail.com)

Prethodno priopćenje

**Bashir H. Osman, Zhongfan Chen, Adrianna Carroll, Abdelrahman Abuserriya**

## Optimizacija i projektiranje novog energetski učinkovitog betonskog samoizolirajućeg bloka

Ovaj rad prikazuje zahtjeve koje moraju zadovoljiti izolacijski blokovi koji se koriste za uštedu energije u izuzetno hladnim regijama. Kroz istraživanje su toplinska i mehanička svojstva te gustoća materijala sveobuhvatno optimizirani kako bi se dobio optimalni tip bloka. Prikazani su zahtijevani parametri i predložene daljnje sugestije za poboljšanja. Rad najprije proučava proces pripreme i svojstva materijala novog energetski učinkovitog betonskog samoizolirajućeg bloka. Također, projektira se i zatim provode ispitivanja vezana uz toplinsko ponašanje te tlačna ispitivanja zida. Konačno, ponašanje opeke pod tlačnim opterećenjem i posmična otpornost zida eksperimentalno su proučeni i optimizirani uporabom računalnog programa ANSYS.

### Ključne riječi:

ušteda energije, samoizolirajući betonski blok, toplinska i mehanička svojstva, optimizacija

Research Paper

**Bashir H. Osman, Zhongfan Chen, Adrianna Carroll, Abdelrahman Abuserriya**

## Optimisation and design of new energy-saving concrete self-insulation block

This study was designed to satisfy the requirements of energy-saving insulation blocks in severely cold regions, with the thermal and mechanical properties and bulk density comprehensively optimised. An optimal block type was obtained, with the necessary parameters provided and further suggestions for improvement proposed. This study investigated the preparation process and material properties of a new energy-saving self-insulation block. Additionally, both thermal performance and compression tests were designed and conducted on the wall, with the compression performance of the brick and the shear resistance of the wall experimentally studied and optimised using ANSYS.

### Key words:

energy saving, concrete self-insulation block, thermal and mechanical properties, optimisation

## 1. Uvod

Samoizolirajući betonski blokovi imaju nekoliko prednosti, ističemo energetska učinkovitost i zaštitu tla te gospodarenje otpadom i zaštitu okoliša [1, 2]. Postoje mnoge prednosti betonskih šupljih blokova poput boljih toplinskih svojstava, pojednostavljene izgradnje i uštede vremena prilikom gradnje. Nadalje, mogu znatno poboljšati toplinska i mehanička svojstva te postići uštedu energije u zgradama [3]. Svijet ide prema zelenim građevinama i zelenim materijalima te unaprjeđuje i uspostavlja koncept energetske učinkovitosti i standarde za zgrade s nultom potrošnjom energije [4-6]. To je jedan od rijetkih novih građevnih materijala s potencijalom značajnog iskoraka građevinske industrije, posebno u zemljama u razvoju. Mnoge vrste visoko učinkovitih i energetski učinkovitih blokova s izolacijskim materijalima usvojili su istraživači tijekom godina; svi oni zadovoljavaju potrebne standarde za toplinsku izolaciju [7-14]. S provođenjem nacionalne politike Kine o energetskoj uštedi i smanjenju emisija, energetsku učinkovitost građevina visoko su vrednovala lokalne vlasti. Provede se i brojni propisi te se proširuju ciljevi kako bi se minimizirala potrošnja energije i kontrolirala energetska učinkovitost radi uspostavljanja održivog okoliša [15]. Mnogi načini proizvodnje novih energetski učinkovitih samoizolirajućih betonskih blokova započeli su uporabom recikliranog agregata [1, 16] i drugih materijala [17].

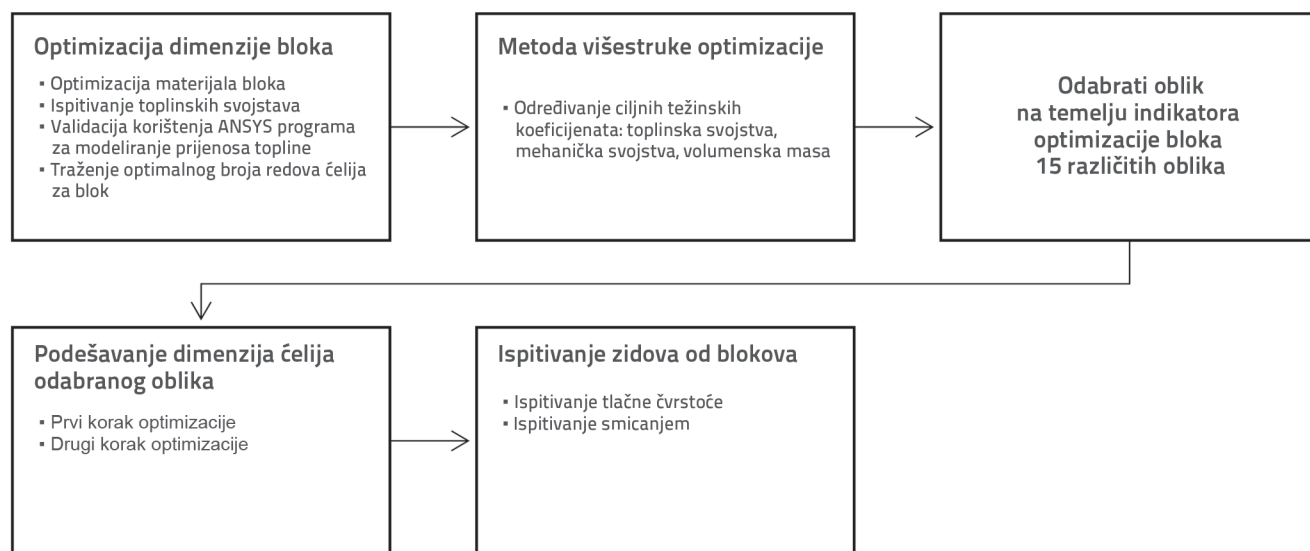
Huizhi Zhang i sur. [18] proučavali su nosivost i pomake zidova od recikliranog betona i samoizolirajućih blokova koristeći računalni program ABAQUS i laboratorijska ispitivanja. Zaključili su da je tlačno oštećenje zida od opeke kontrolirano mortom ili blokom koji ima nižu tlačnu čvrstoću. Dou dou Liu i sur. [19] koristili su blokove od recikliranog betona iz građevnog otpada kako bi proučili toplinska svojstva. Proveli su sveobuhvatne eksperimente, a rezultati su pokazali da izolacijski betonski

blok zadovoljava relevantne standarde s omjerima od 45 %, 0,15 % i 30 % za agregate pijesak, aktivni aktivator  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i leteći pepeo koji pokazuju najbolja svojstva.

Weihua Zheng i sur. [20] primijenili su numeričku analizu kako bi raščlanili zakonitosti prijenosa topline u hladnim i suhim zimskim područjima te optimizirali pripremu, proces povezivanja topline i vlage bloka. Njihova metoda temeljila se na uobičajenoj lokalnoj shemi kompozitnih samoizolirajućih blokova, pri čemu su reciklirani keramziti beton uzeli kao osnovni materijal, a ploče grafitnog polistirena kao izolacijski materijal. Njihovi rezultati pokazali su da struktura uzastopnih rupa može poboljšati izolacijsku sposobnost bloka do neke mjere, ali nije prikladna za izolacijski materijal s velikom apsorpcijom vode.

Cilj je ovog istraživanja proizvodnja novog, energetski učinkovitog betonskog samoizolirajućeg bloka, uz optimizaciju mješavine kako bi se poboljšala tlačna čvrstoća, koeficijent prijenosa topline i volumenska masa.

Na slici 1. prikazan je način istraživanja u ovom radu. Najprije je provedena serija eksperimentalnih i teorijskih ispitivanja o toplinskim svojstvima kako bi se oblikovao novi tip samoizolirajućeg i nosivog bloka za seoske kuće u različitim regijama Kine. Također su proučene osnovne mehaničke i seizmičke karakteristike zida od novog tipa bloka te metoda projektiranja sastava mješavine betona korištenog za izradu recikliranog betonskog bloka (engl. *recycled concrete block* - RCB) kao i najbolji omjer zamjene recikliranog agregata. Nadalje, razvijeni su numerički modeli primjenom računalnog programa ANSYS kako bi se predvidjelo ponašanje uzoraka koristeći pojednostavljenu mikromodeliranu tehniku. Naposljetku, optimizirane su savršene dimenzije energetski učinkovitog betonskog samoizolirajućeg bloka (engl. *energy-saving concrete self-insulation block* - ECSB) koji ima prednosti u pogledu nosivosti i toplinskih svojstava.



Slika 1. Dijagram toka metodologije istraživanja

## 2. Metoda pripremanja novih energetski učinkovitih betonskih samoizolirajućih blokova

### 2.1. Princip oblikovanja

A obzirom na svoje buduće ekonomske koristi, novi tip bloka namijenjen je niskim građevinama od opeke u iznimno hladnim ruralnim područjima. Blok se može koristiti kod okvirnih konstrukcija, posmičnih zidova i kao materijal za gradnju nosivih zidova. Na temelju zahtjeva pripreme i uvjeta u Kini, proizvodnja blokova ne bi trebala predstavljati poteškoće u ispunjavanju ekonomskih zahtjeva. Drugim riječima, uz pretpostavku smanjenja vlastite težine radi olakšanja izgradnje učinkovitijeg zida, blokovi bi trebali imati višenamjensku svrhu i biti integrirani s izolacijom.

Zasada zidovi u Kini imaju stopu uštede energije otprilike 65 % [21]. Neke nacionalne norme postavljaju jasne zahtjeve za koeficijent prijenosa topline vanjskih zidova zgrade. Na primjer, kriteriji oblikovanja za energetsku učinkovitost stambenih zgrada u hladnim područjima [22] preporučuju da se koeficijent prijenosa topline vanjskih zidova zgrada sa 4 do 8 katova u hladnim regijama (A zona) prema kineskom klasifikacijskom sustavu klima [23] ograniči na  $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , a "Norme projektiranja za uštedu energije za ruralne stambene zgrade" [24] preporučuju da se granica koeficijenta prijenosa topline za vanjske zidove stambenih kuća u hladnim regijama postavi na  $0,50 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

Tehničke specifikacije za betonske konstrukcije visokih zgrada u Kini [25] također preporučuju da debljina ojačanih zidova na prva dva kata i posmičnih zidova ne bude manja od 200 mm; bez uzimanja u obzir sloj izolacije vanjskog zida. To znači da je konačna debljina vanjskog zida barem 280 mm, pa je stoga debljina zida od blokova projektirana da bude 280 mm. Smanjenje veličine i geometrije šupljina u opeci značajno može poboljšati njezina toplinska svojstva.

### 2.2. Optimizacija materijala bloka

U optimizacijskom procesu sadašnjeg istraživanja korišteni su mali lagani šuplji betonski blokovi, nazvani blokovi od keramzitnog betona. Blokovi su izrađeni od laganog agregata s volumenskom masom od  $1100 \text{ kg}/\text{m}^3$  i laganog te običnog pijeska, s volumenskom masom ne većom od  $1950 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Na temelju korištenih sirovina, keramzit se može podijeliti na: glinene, škrljaste i pepelne keramzite. Dalje se može kategorizirati prema gustoći i čvrstoći kao: ultralagani keramzit (volumenska masa  $\leq 500 \text{ kg}/\text{m}^3$ , pogodan za pripremu keramzitnog betona (beton od ekspandirane gline) od 5 do 15 MPa), obični keramzit (volumenska masa  $\leq 500$  do  $700 \text{ kg}/\text{m}^3$ , pogodan za pripremu keramzitnog betona od 15 do 35 MPa) i

visokočvrsti keramzit (volumenska masa  $\leq 700$  do  $900 \text{ kg}/\text{m}^3$ , pogodan za pripremu keramzitnog betona od 30 do 60 MPa) [26-28].

U ovom istraživanju keramzit je bio glinenog podrijetla, s dodatkom određenih aditiva. Granule od ekspandirane gline su prirodno porozne i stoga imaju veliku sposobnost apsorpcije vode (većinom se događa unutar jednog sata) [29-31]. Za poboljšanje posmične čvrstoće zida, potreban je mort velike čvrstoće.

### 2.3. Mješavina materijala

#### 2.3.1. Sirovine

Keramzit (ekspandirana glina) korišten u ovom istraživanju prikazan je na slici 2., a proizvela ga je tvrtka *Nanjing Xingkai New Building Material Co. Ltd.* Keramzit je vrlo čvrst i stabilan materijal; zadovoljava osnovne zahtjeve za testiranje prema metodi ispitivanja laganih agregata [32]. Relevantna svojstva keramzita prikazana su u tablici 1. dobivena u laboratoriju. Blokovi napravljeni od keramzitnog betona imaju toplinsku provodljivost  $0,53 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  i odgovarajuću gustoću  $1200 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Keramzit se sastoji od primarne sirovine, koja može biti ili bazalt ili dijabaz, i pomoćnog materijala. Sirovine se kombiniraju i pretvaraju u umjetna anorganska vlakna.

U usporedbi s tradicionalnim materijalima za izolaciju građevina, staklena vuna (slika 3.) ima prednost zbog niske gustoće, niske toplinske provodljivosti, razreda ponašanja u požaru A, stabilnih svojstava materijala, dobre sigurnosti (netoksičnosti, bez nusproizvoda, bez onečišćenja, itd.) i drugih istaknutih prednosti [33-36].

Uz pomoć i stručnost tvornice blokova Shihwa, šljaka i staklena vuna se miješaju u beton od keramzita prema propisanim omjerima; rezultat su blokovi koji su energetski i troškovno učinkoviti te općenito s poboljšanim toplinskim svojstvima.



Slika 2. Keramzit (ekspandirana glina)

Tablica 1. Osnovna svojstva keramzita

Gustoća materijala [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Volumenska masa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Apsorpcija vode [%]	Faktor omekšavanja [%]
533	720	2,1	8	1

Važno je napomenuti da cement tipa P.O 42.5 koji proizvede tvrtka *Nanjing Zhonglian Cement Company*, zadovoljava zahtjeve "Univerzalnog portlandskog cementa" [36]. Specifični parametri prikazani su u tablici 2. Tijekom proteklih godina državne su politike uvedene kao sredstvo za poticanje širenja kineske industrije letećeg pepela. Kao rezultat toga, istraživanje i razvoj praktične primjene letećeg pepela pokazali su njegovu izvedivost u proizvodnji blokova. Zamjenom 10 do 15 % ukupne smjese cementa letećim pepelom, blokovi su postali gušći zbog smanjene potrebe za vodom, jači zbog pucolanske reakcije letećeg pepela s vapnom kako bi se proizvela dodatna veziva kalcijevog silikatnog hidrata koja omogućavaju rast čvrstoće betona s vremenom. Ti su blokovi i ekonomičniji [37, 38]. Leteći pepeo korišten u ovom istraživanju je razreda III i proizveden je u energani u Nanjingu. To je fini sivi prah s gubitkom na izgaranju od 3 %.



Slika 5. Proizvodnja blokova: a) Postrojenje za oblikovanje blokova pod tlakom; b) Oblikovani proizvodi - blokovi

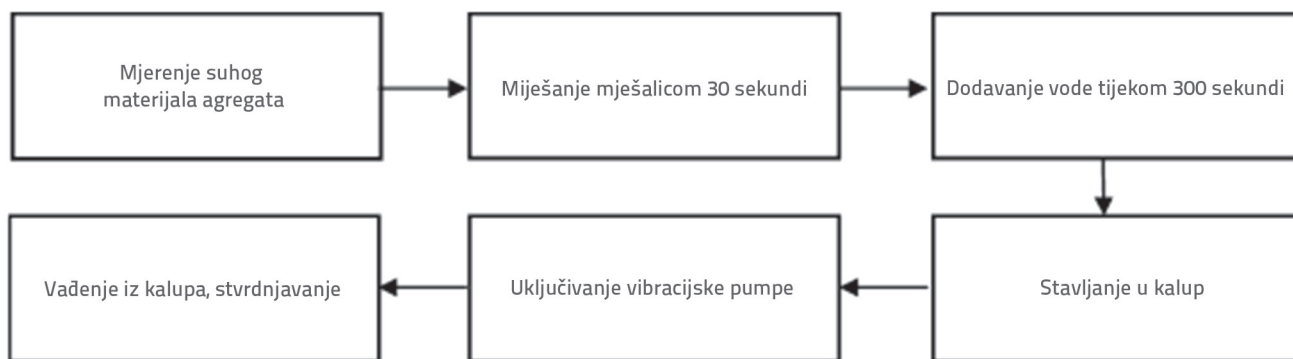
Prema propisu "Priprema seizmičkog oblikovanja zgrada" (engl. *Design of Seismic Design of Buildings - DSDB*), minimalna razina čvrstoće za nosive blokove postavljena je na MU7.5. Za ruralna područja sjeverne Kine, većina kuća ima jedan ili dva kata. Stoga ovaj rad koristi razinu čvrstoće bloka od MU5.0. Tijekom pripreme uzeti su u obzir "Tehnički propisi za beton s laganim agregatom" (engl. *Lightweight aggregate concrete technical regulations*) [39], koji utvrđuju načela i metode pripreme smjese betona s laganim agregatom.

### 2.4. Proces proizvodnje

Vibracijska preša za oblikovanje betonskih blokova izrađena je u tvornici blokova *Nanjing Shihwa* i korištena je u ovom istraživanju. Sila pobude na vibracijskom stolu ravnomjerno raspoređuje smjesu kako bi osigurala masu proizvoda, konzistentnost čvrstoće, točnost veličine, kvalitetu i stabilnost. Proces pripreme prikazan je na slici 4. Mehanička oprema i gotovi blokovi prikazani su na slici 5. Nakon 28 dana uzorci su podvrgnuti toplinskim, mehaničkim i seizmičkim ispitivanjima.



Slika 3. Staklena vuna



Slika 4. Proces pripreme bloka

Tablica 2. Parametri performansi cementa

Tlačna čvrstoća cementa [MPa]		Čvrstoća na savijanje cementa [MPa]		Potrošnja vode za standardnu konzistenciju [%]	Stabilnost
3 dana	28 dana	3 dana	28 dana		
22,3	44,3	4,9	7,3	27	zadovoljava



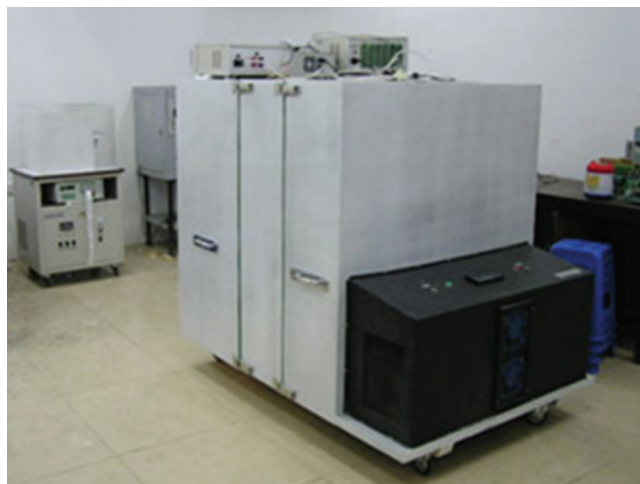
## 2.5. Ispitivanje toplinskih svojstava

### 2.5.1. Oprema za ispitivanje

Za procjenu općih toplinskih svojstava zida s blokovima za samoizolaciju i njegovih toplinskih i mehaničkih svojstava primijenjena je metoda vruće komore (Hot-box). Ispitivanje je provedeno u tvrtki *Nanjing Jinbi Building Energy Conservation Co. Ltd* (zaštićena vruća komora tip SK-QB1000B) i u *Zavodu za kvalitetu građevnih inženjerskih radova* u pokrajini Jiangsu (kalibrator BC-25), kako je prikazano na slikama 6. i 7.



Slika 6. Zaštićena vruća komora (tip SK-QB1000B)



Slika 7. Kalibracijski toplinski okvir (model BC-25)

### 2.5.2. Postupak i rezultati termičkog ispitivanja

Vanjske ćelije bloka u drugom redu nemaju potpune vanjske okvire, tj. ćelije nisu potpuno zatvorene. Stoga, tijekom procesa proizvodnje, susjedni blokovi su spojeni kako bi formirali zatvorene ćelije, čiji je specifičan raspored prikazan na slici 8. Uzorci za ispitivanje toplinskih svojstava izrađeni su od samoizolirajućih blokova dimenzija  $390 \times 280 \times 190$  mm, a

izrađeni su u okviru za uzorke dimenzija  $1500 \times 1500$  i  $1200 \times 1200$  mm s debljinom zida od 280 mm.

Korišten je obični mort, a šupljine ispunjene izolacijom od polistirenske ploče bile su zatvorene kako bi se spriječio ulazak zraka i vlage. Osušeni zid od blokova, pripremljen za ispitivanje toplinskih svojstava nakon 30 dana, prikazan je na slici 9. Površina ta dva zida iznosi  $1,44 \text{ m}^2$ .



Slika 8. Raspored ćelija unutar bloka



Slika 9. Pripremljeni uzorak zida za ispitivanje toplinskih svojstava

Nakon što se uzorak osuši, vruće i hladne površine na obje strane zida jednako su raspoređene pomoću temperature senzora. Hladna komora, vruća komora i okvir za uzorke zatvoreni su, a okolina je postavljena za testiranje. Temperature vruće komore i hladne komore postavljene su na  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  odnosno  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Iz testa, rezultirajući koeficijent prijenosa topline zida sa samoizolirajućim blokovima iznosi  $0,39 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ; ispunjavajući zahtjeve koeficijenata prijenosa topline za hladne regije sjeveroistočne Kine. Hladne zone A, B i C imaju sljedeće granice koeficijenata prijenosa topline;  $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,  $0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  i  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , redom.

Na temelju rezultata primijećena je razlika od  $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  između vrijednosti dobivenih eksperimentalno i vrijednosti

dobivenih izračunima. Treba napomenuti da su računске vrijednosti idealne vrijednosti, tj. očekuju se različite vrijednosti dobivene eksperimentom. Ostali faktori koje treba uzeti u obzir i vezi s koeficijentom prijenosa topline su okolišna vlažnost i ispunjenost sljubnica mortom.

### 2.5.3. Metoda izračuna

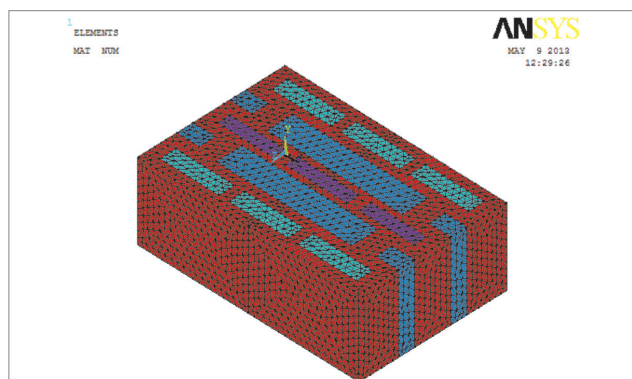
U istraživanju je korišten računalni program ANSYS kako bi se generirao modul prijenosa topline koji uključuje teoriju prijenosa topline, definiciju toplinskih rubnih uvjeta, te odabir i postavljanje modela za zračenje i prirodno strujanje da bi se izračunala toplinska svojstva predloženih samoizolirajućih blokova. Zbog njihove višedelektivne nepravilne konfiguracije, odgovarajući trodimenzionalni modeli blokova izrađeni su u programu CAD i kasnije uvezeni u ANSYS za analizu materijala. Postavljeni su atributi (podjela mreže i rubnih uvjeta). Na kraju je primijenjeno iterativno izračunavanje toplinske opterećenosti kako bi se dobio toplinski koeficijent blokova. Budući da se temperature mijenjaju tijekom vremena, toplinska analiza može biti analiza u stacionarnom stanju (temperaturno polje se ne mijenja s vremenom) ili analiza u prijelaznom stanju (temperaturno polje se mijenja s vremenom) [40]. Budući da ovaj rad razmatra stacionarno stanje, bilo je potrebno koristiti samo toplinsku provodljivost materijala pri postavljanju materijalnih svojstava.

Kompozitni betonski blok dimenzija  $360 \times 240 \times 115$  mm s umetnutim EPS izolacijskim pločama proizveo je istraživački tim, a namijenjen je ispitivanju toplinske provodljivosti četiri različita materijala, kako je prikazano u tablici 3. Toplinska provodljivost mjerena je na obrađenim uzorcima dimenzija  $5 \times 5 \times 3$  mm prema GB/T22588-2008 [41], primjenjujući opciju prijenosa topline (TTO) sustava za mjerenje fizičkih svojstava (PPMS, Model 6000, Quantum Design, SAD). Za model bloka koristila se SOLID87 jedinica, veličina mreže 10 mm, i inteligentna slobodna mreža, sa sljedećim početnim uvjetima: koeficijent prijenosa topline od  $9,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  za unutarnje površine zida od opeke, temperatura prostorije od  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , koeficijent prijenosa topline od  $25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  za vanjske površine zida od opeke, i vanjska temperatura od  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  [42]. Modeliranje bloka i rezultati termičke analize prikazani su na slikama 10. i 11. Prema rezultatima distribucije temperaturnog polja izračunanih iz simulacije bloka, koeficijent prijenosa topline iznosi  $0,943 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Blokovi proizvedeni u istoj seriji testirani su primjenom kalibracijske i zaštitne metode toplinskog okvira prema GB/T13475-2008 [43].

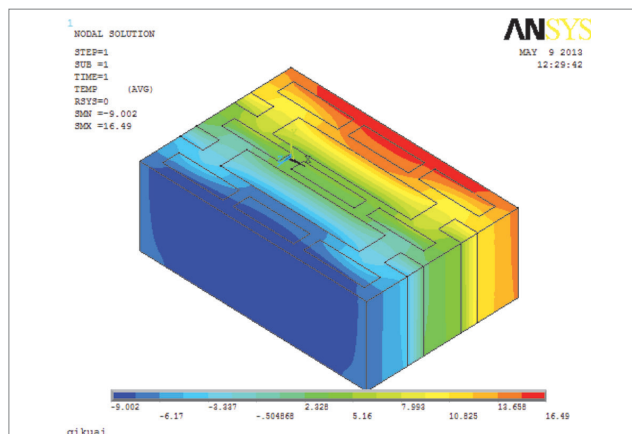
Konačni koeficijent prijenosa topline iz testa bio je  $1,038 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Osim toga, generirane su ANSYS simulacije za nedavne, relevantne blokove istražene na nacionalnoj razini, te su njihova odgovarajuća toplinska svojstva ocijenjena. Kada su izračunana toplinska svojstva uspoređena s vrijednostima dobivenim iz literature, rezultirajući stupanj pogreške nije premašio 8 %, što potvrđuje izvedivost uporabe ANSYS-a za simuliranje toplinskih svojstava zidanih struktura. Simulirane vrijednosti i vrijednosti dobivene ispitivanjima prikazane su u tablici 4.

Tablica 3. Toplinska provodljivost bloka

Materijal	Beton	EPS	Žbuka	Zračni sloj	
				20 mm	28 mm
Toplinska provodljivost [W/ (m·K)]	1,80	0,06	0,87	0,152	0,165



Slika 10. Prostorni model bloka



Slika 11. Rezultati analize temperature bloka

Tablica 4. Usporedba simuliranog koeficijenta prijenosa topline zidanih blokova s rezultatima ispitivanja  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

Izvor bloka	Dimenzije bloka [mm]	Rezultati simulacije	Rezultati ispitivanja	Pogreška [%]
Sanming [44]	$240 \times 240 \times 90$	0,512	0,536	4,48
Huifang [45]	$390 \times 390 \times 190$	0,691	0,660	4,70
Hong [46]	$390 \times 240 \times 190$	1,312	1,247	5,23
Guangqing [47]	$190 \times 90 \times 90$	0,379	0,350	8,29

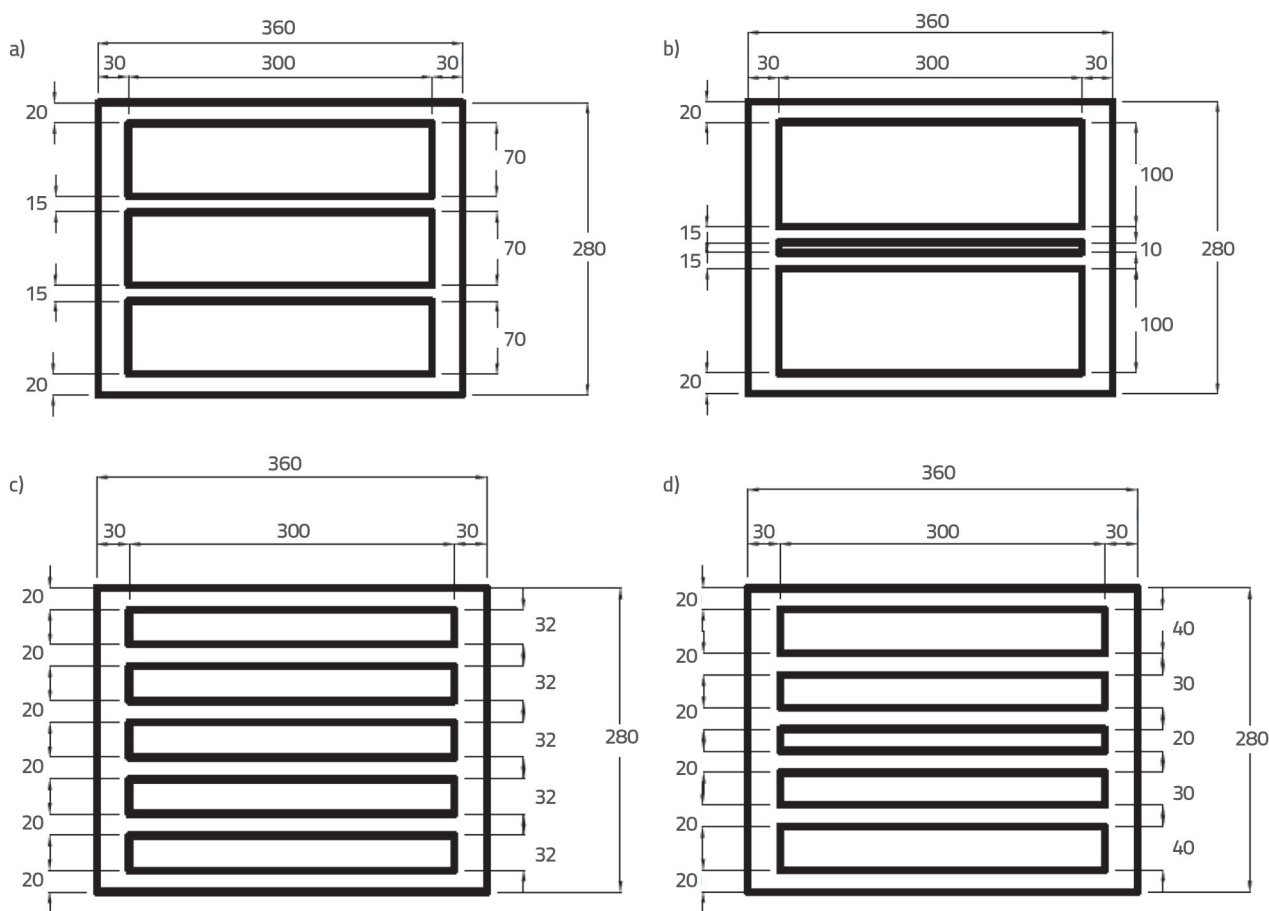
### 2.5.4. Princip izračuna

U šupljim se blokovima prijenos topline obično odvija kroz zrak u ćelijama i u rebrima oko ćelija. Poboljšana geometrija ćelija i odabir materijala rezultirali bi poboljšanim toplinskim svojstvima samoizolirajućih blokova. Blokovi bi trebali biti oblikovani s više redova nepravilno raspoređenih ćelija, tankostijenih rebara i dugih konvekcija. Materijal odabran za blokove i ispunu ćelija trebao bi imati nisku toplinsku provodljivost, a ispunu bi trebala biti toplinski izolacijski materijal i imati nisku toplinsku provodljivost. Kombiniranjem dobro oblikovane ćelije s visoko učinkovitom izolacijom, poboljšavaju se ukupna toplinskoizolacijska svojstva bloka.

Provedeno je komparativno istraživanje o utjecaju ravnomjerno raspoređenih ćelija i neujednačeno raspoređenih ćelija u šupljim blokovima u odnosu na toplinsko svojstvo prijenosa topline. Odabrani su betonski šuplji blokovi dimenzija 390 × 280 × 190 mm, a tip ćelije podijeljen je u dvije grupe za analizu; one koje sadrže tri reda ćelija i one koje sadrže pet redova. Prema tome, veličina ćelije varira, a udio šupljine bloka i širina rebara ćelije su konstantni. Raspodjela ćelija u šupljim blokovima prikazana je na slici 12. Polifenilenske ploče odabrane su kao materijal za ispunu na temelju prethodnih istraživanja i umetnute su u ćelije. Tablica 5. prikazuje koeficijente prijenosa topline zida blokova s različitim ćelijama.

Tablica 5. Koeficijenti prijenosa topline zida blokova s različitim ćelijama

Specifikacije bloka	Veličina ćelije (u smjeru debljine) [mm]	Koeficijent prijenosa topline [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
Tri reda ćelija	70+70+70	0,355
	100+10+100	0,347
Pet redova ćelija	32+32+32+32+32	0,34
	40+30+20+30+40	0,327



Slika 12. Distribucija pora dviju grupa blokova (dimenzije u mm)

Tablica 6. Termalni parametri materijala

Naziv materijala	Suha gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Toplinska provodljivost [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
Keramzitni beton	1200	0,53
Polistirenska ploča	500	0,042
Mort	800	0,29

### 2.5.5. Odabir materijala za zidove

U početku su kompozitni agregati od cementne pjene korišteni kao materijal matrice za predloženi blok; materijal je mort plastične konzistencije okružen jednoličnim slojem cementnog morta. Međutim, komparativnom je analizom dokazano da bi se keramzitni beton bolje prilagodio trenutačnom istraživanju te je stoga odabran kao matični materijal za blokove. Keramičke granule izrađene su od različitih vrsta gline, škrljevca, ugljene rude i industrijskog čvrstog otpada. Ima mnoge prednosti kao što su mala gustoća, toplinska izolacija, izvrsna nepropusnost, izvrsna reaktivnost agregata na alkalije, niska apsorpcija vode, dobra otpornost na smrzavanje i trajnost. Upotreba keramičkih agregata umjesto grubih agregata imaće sljedeće prednosti:

- Suha volumenska masa keramzita je 800 do 1900 kg/m<sup>3</sup>, (polovica gustoće običnog betona), tako da je masa cijele zgrade smanjena i seizmička je izvedba bolja.
- Toplinska provodljivost obično je niža od prosječnog betona za više od pola, tako da se debljina zida može smanjiti, a unutarnje proširenje povećati. Pri jednakoj debljini zida, toplinskoizolacijska svojstva prostorije mogu se znatno poboljšati.
- Površina keramzita grublja je od šljunka i ima određenu sposobnost apsorpcije vode. Stoga je veza između keramzita i cementnog morta jača; tj. keramzitni beton ima veću nepropusnost i trajnost.
- Rezultati testa požarne otpornosti pokazuju da granica otpornosti na vatru može doseći više od 3 sata u odnosu na običnu (1,5 do 2 sata).
- Građevinski radovi imaju snažnu prilagodljivost, koja nije dostižna nijednim drugim laganim građevnim materijalima (kao što su plinovi). Može formulirati različite volumenske mase i čvrstoće betonskih materijala prema različitoj uporabi i funkcijama zgrade, kao što su toplinska izolacijska struktura ili različiti zahtjevi nosive konstrukcije. Prema "Specifikacijama za projektiranje toplinskog inženjeringa građevnih objekata" [23], termofizikalna svojstva ispitivanih komponenata dobivena su u laboratoriju, kako je prikazano u tablici 6.

### 2.5.6. Model oblikovanja

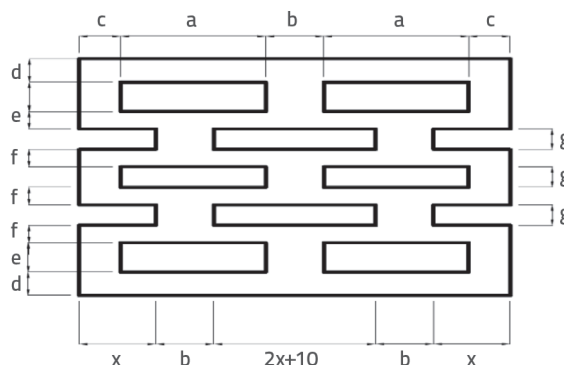
Tijekom godina izrađeno je više studija koje priznaju da najbolje toplinsko ponašanje među blokovima s različitim geometrijama ćelija jest ono kod šupljih blokova s pravokutnim ćelijama,

zatim blokovi s ovalnim ćelijama te na kraju oni s dijamantnim ili kružnim ćelijama. Geometrija ćelija odabrana u obliku bloka stoga je pravokutna. Zid rebara bloka oblikovan je kao rebrasti tip klina s nagibom od 2 mm. Dodatno, polistirenska ploča korištena je u kombinaciji sa zračnim slojevima kako bi se uštedjela količina polistirenske ploče.

Prema čimbenicima koji utječu na toplinska i mehanička svojstva samostojećih blokova, oblikovano je 15 različitih blokova. Osnovni model bloka prikazan je na slici 13.

Ćelije s obje strane bloka su simetrične. Blok se sastoji od 5 redova ćelija; sa simetričnim ćelijama s obje strane. Debljina između svakog reda ćelija, nazvana poprečno rebro, ista je i označena (f). Pretpostavlja se da je unutarnja debljina zida između svakog stupca ćelija, nazvana okomito rebro, ista i označena (a). Duljina ćelija u prvom redu je (a) i ima odgovarajuću širinu (e); ćelije u drugom redu gurnute su i produžene okomitim rebrima, rezultirajući manjim neslaganim ćelijama na svakom kraju bloka s duljinom (x), funkcionalni odnos je  $4x+10+2b = 390$ , i širinom (g).

Određivanje debljine vanjskog zida (d) samostojećeg izolacijskog bloka može biti problematično: ako je vanjski zid previše tanak, dovest će do popuštanja uslijed čupanja vijaka na zidu od opeke; ako je vanjski zid predebeo, toplinska izolacija zida bit će loša. Debljina vanjskog zida postavljena je na 20 mm, zadovoljavajući minimalne zahtjeve za debljinu vanjskog zida samostojećih, samostojećih betonskih kompozitnih blokova za izolaciju od 15 mm. Većina stručnjaka slaže se da će se četiri kuta ćelija samostojećeg izolacijskog bloka pretvoriti u kružne lukove s manjom silom. Najbolja veličina luka je 2 mm, što malo utječe na toplinsko ponašanje blokova. Stoga su u ovom modelu četiri kuta ćelija oblikovana kao lukovi od 2 mm.



Slika 13. Osnovni model samoizolirajućeg bloka



### 3. Optimizacija tipa novog energetski učinkovitog betonskog samoizolirajućeg bloka

#### 3.1. Princip višekriterijske optimizacije

Višekriterijski optimizacijski problem može se pretvoriti u skup funkcija cilja i funkcija ograničenja s matematičkim izrazom (1) [52]:

$$\min_{X \in \Omega} F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)) \quad (1)$$

$X \in \Omega \subset \mathbb{R}^n$  takav da je  $g_i(x) \leq 0$ ;  $i = 1, 2, \dots, p$

gdje je  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$   $n$ -dimenzijski vektorski prostor,  $x$  je vektor prostora odluke cilja optimizacije,  $i = 1, 2, \dots, p$  je funkcija svakog cilja, jer je svaki cilj  $x$  kontradiktoran, tj. ne može istovremeno dosegnuti minimalnu vrijednost,  $m$ -dimenzijski vektorski prostor  $i = 1, 2, \dots, p$  je prostor ciljeva,  $i = 1, 2, \dots, p$  je jednadžba ograničenja.

#### 3.2. Metoda višekriterijske optimizacije

Nekoliko istraživača provelo je dubinska istraživanja toplinskih i mehaničkih svojstava betonskih samoizolacijskih blokova [2], ali optimizacija njihovih toplinskih i mehaničkih svojstava zahtijevala je daljnje proučavanje. Toplinska i mehanička svojstva su dva različita svojstva bloka, i teško je postići jednako optimalno rješenje za oba istovremeno. U ovom radu primjenjuje se metoda višekriterijske optimizacije kako bi se analizirala toplinska svojstva, mehanička svojstva i volumenska masa blokova, te se odabire optimalno rješenje kako bi se odredio najbolji tip bloka.

Metoda težinske sume (engl. *weighted sum method*) je jednostavna, učinkovita i široko korištena metoda višekriterijske optimizacije. Ta metoda gradi funkciju cilja prema svakom cilju i dobiva ukupnu optimizacijsku funkciju ponderiranom zbrojnicom. Ponderirani zbroj svake funkcije cilja je 1, višekriterijska optimizacija pretvara se u jednokriterijsku optimizaciju, a zatim se matematičko rješenje koristi za rješavanje optimalnog rješenja. Matematička metoda težinske sume prikazana je u izrazu (2) [53]:

$$\text{Mini}F(X) = \sum_{i=1}^m w_i f_i(x) \quad (2)$$

pri čemu je  $x \in \Omega$

Ako se koeficijent ponderiranja ne odabere pravilno, čak i ako je proces analize strog, dobiveni rezultati su nelogični. Koeficijent ponderiranja u ovom radu određen je metodom analitičkog hijerarhijskog procesa (engl. *Analytic Hierarchy Process - AHP*) [54]. Ta metoda je jednostavna, fleksibilna i praktična metoda višekriterijskog donošenja odluka za kvantificiranje kvalitativnih pitanja, putem uspostavljanja i sortiranja matrica procjena. Bit AHP-a je kvantificirati prosudbe donositelja odluka, poboljšati

točnost temelja za donošenje odluka i učiniti ga praktičnijim u slučaju složenijih struktura ciljeva i nedostatka statističkih podataka. Metoda AHP primjenjuje se za određivanje težina evaluacijskih pokazatelja. Koeficijenti težine pokazatelja sveobuhvatno se izračunavaju usporedbom relativne važnosti pokazatelja na istoj razini.

Koriste se tri skale (-1, 0, 1) kako bi se predstavila relativna važnost svakog cilja, tj. 0 je važnije od -1, a 1 je važnije od 0. Najprije se koristi samoregulacija za uspostavljanje matrice usporedbe, a zatim se pretvara u matricu prosudbe konzistentnosti i ponovno rješava kako bi se dobile vrijednosti ponderiranja svakog cilja. Konkretni koraci su kako slijedi:

**Korak 1:** Oblikovani blokovi namijenjeni su primjeni u hladnim regijama sjeveroistoka Kine kao punila zidova ili kao nosivi zidovi za niske kuće na ruralnim područjima. Koeficijent ponderiranja svakog cilja određen je, što pokazuje da je toplinska izvedba važnija od mehaničkih svojstava. U tablici 7. se uspostavlja prostor usporedbe postavljanjem toplinske izvedbe kao P1, tlačne čvrstoće kao P2, volumenske mase kao P3, kako bi se dobila matrica usporedbe A:

Tablica 7. Usporedba triju faktora

Faktori	P1	P2	P3
P1	0	1	1
P2	-1	0	1
P3	-1	-1	0

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

**Korak 2:** Rješenje matrice usporedbe A, optimalna matrica prijenosa R među njima:  $r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (a_{ik} + a_{kj})$ . Zamjenjujući u matricu usporedbe A, izračunava se:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 2/3 & 4/3 \\ -2/3 & 0 & 2/3 \\ -4/3 & -2/3 & 0 \end{bmatrix}$$

**Korak 3:** Matrica R transformira se u konzistentnu matricu D, gdje:  $d_j = \exp(r_{jj})$ . Zamjenjujući navedeno dobiva se:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & e^{0.667} & e^{1.333} \\ e^{-0.667} & 1 & e^{0.667} \\ e^{1.333} & e^{-0.667} & 1 \end{bmatrix}$$

**Korak 4:** Nakon što se matrica usporedbe A podvrgne opisanom procesu normalizacije, vlastiti vektor matrice A dobiva se rješavanjem. Težinski koeficijent ili koeficijent ponderiranja svakog cilja (toplinska svojstva, mehanička svojstva, volumenska masa)  $W_A = [0.563, 0.289, 0.148]^T = (0.563, 0.289, 0.148)$ . Ovaj koeficijent ponderiranja može se primijeniti na različite vrste konstrukcija gdje su zahtjevi za čvrstoćom blokova niži od njihovih toplinskih indeksa.

### 3.3. Standardizacija pokazatelja optimizacije blokova

Prije nego što se metoda težinske sume može koristiti za optimizacijske izračune i analize, podaci se prvo moraju učiniti bezdimenzijskima i obraditi. U ovom procesu optimizacije, udio ćelija se zamjenjuje volumenskom masom, koeficijent prijenosa topline toplinskim svojstvima, a tlačna čvrstoća mehaničkim svojstvima. Bezdimenzijska jednadžba je dana izrazom (3):

$$x_i = 1000 \times p_i / \Sigma p_i \tag{3}$$

gdje su:

- $x_i$  - bezdimenzijski pokazatelji nakon bezdimenzijske konverzije pokazatelja
- $p_i$  - pokazatelji bez konverzije.

Na temelju osnovnog modela prikazanog na slici 14., ukupno je dobiveno 15 različitih blokova koji su navedeni u tablici 8. Rezultati izračuna indeksa izvedbe svakog bloka prikazani su u tablici 9. Širina ćelija u tablici označava debljinu duž zida.

### 3.4. Određivanje optimalnog tipa bloka

Funkcija procjene optimizirana u ovom radu je:

$$\text{Max}G(X) = \sum_{i=1}^3 w_i g_i(x) \sum_{i=1}^3 w_i = 1$$

pri čemu je  $x \in X$

gdje su  $g_i(x)$  koeficijent prijenosa topline bloka,  $g_2(x)$  tlačna čvrstoća blokova,  $g_3(x)$  udio ćelija u bloku. Koeficijenti ponderiranja za svaki cilj izračunani su kao:  $w_1 = 0,563$ ,  $w_2 = 0,289$ ,  $w_3 = 0,1483$ . Bezdimenzijske vrijednosti koeficijenta prijenosa topline, tlačne čvrstoće i volumenske mase blokova s izolacijom i odgovarajući koeficijenti ponderiranja uneseni su u gornju jednadžbu, a rezultati su prikazani u tablici 10.

Prema tablici 10., blok Q3 ima najbolje termičke karakteristike, mehanička svojstva i gustoću. Koeficijent prijenosa topline i tlačna čvrstoća poprečnog presjeka kroz izolaciju iznose 0,364 W/(m<sup>2</sup>·K) odnosno 6,50 MPa.

Tablica 8. Prikaz 15 modela blokova s obzirom na debljinu okomitih rebara i širinu ćelija

Širina ćelije [mm]	Debljina okomitih rebara [mm]		
	20	25	30
36+32+32	Q1	Q2	Q3
39+30+30	Q4	Q5	Q6
48+24+24	Q7	Q8	Q9
54+20+20	Q10	Q11	Q12
60+16+16	Q13	Q14	Q15

Tablica 9. Bezdimenzijski rezultati izračuna pokazatelja optimizacije blokova

Oznaka bloka	Koeficijent prijenosa topline [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	Koeficijent prijenosa topline (NDV)	Tlačna čvrstoća [MPa]	Tlačna čvrstoća (NDV)	Udio ćelija [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumenska masa (NDV)
Q1	0,346	67,763	6,533	66,697	0,523	68,143
Q2	0,355	69,526	6,540	66,768	0,513	66,840
Q3	0,364	71,289	6,500	66,360	0,502	65,407
Q4	0,342	66,980	6,442	65,768	0,523	68,143
Q5	0,351	68,743	6,543	66,799	0,512	66,710
Q6	0,359	70,309	6,558	66,952	0,502	65,407
Q7	0,330	64,630	6,456	65,911	0,521	67,883
Q8	0,338	66,197	6,543	66,799	0,511	66,580
Q9	0,345	67,568	6,530	66,666	0,501	65,277
Q10	0,324	63,455	6,556	66,931	0,520	67,752
Q11	0,331	64,826	6,584	67,217	0,510	66,450
Q12	0,338	66,197	6,567	67,044	0,501	65,277
Q13	0,321	62,867	6,502	66,380	0,519	67,622
Q14	0,328	64,238	6,578	67,156	0,509	66,319
Q15	0,334	65,413	6,519	66,554	0,508	66,189

Napomena: NDV označava bezdimenzijsku vrijednost (engl. *Non-dimensionalized value* - NDV)

Tablica 10. Rezultati težinskih analiza blokova

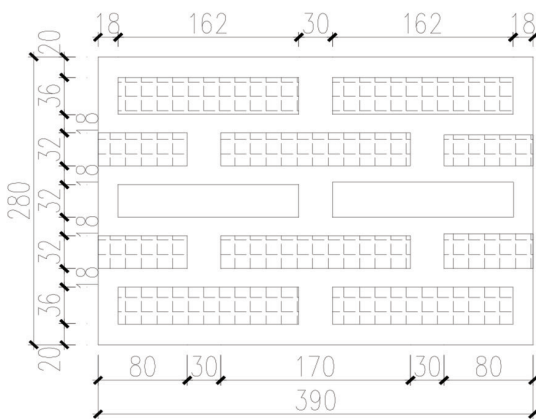
Oznaka bloka	Težinski kombinirana vrijednost	Rang
Q1	67,511	5
Q2	68,331	3
Q3	68,994	1
Q4	66,802	7
Q5	67,880	4
Q6	68,613	2
Q7	65,482	12
Q8	66,428	8
Q9	66,968	6
Q10	65,096	14
Q11	65,757	11
Q12	66,306	9
Q13	64,586	15
Q14	65,389	13
Q15	65,858	10

Osim toga, blok ima udio šupljina od 50 %, debljinu vertikalnih rebara od 30 mm, debljinu poprečnih rebara od 18 mm, vanjsku debljinu stijenske od 20 mm, ukupno 5 redova ćelija i debljinu relevantnog rebra u skladu sa zahtjevima "kompozitnog samoizolirajućeg betonskog bloka" [51]. Ravninske dimenzije bloka Q3 prikazane su na slici 14., prostorni prikaz stanja naprezanja prikazan je na slici 15., a maksimalna naprezanja rebara prikazana su u tablici 10.

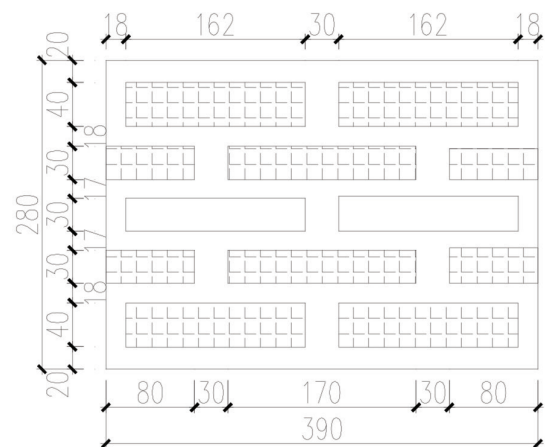
### 3.5. Optimizacija svojstava novog energetski učinkovitog betonskog samoizolacijskog bloka

#### 3.5.1. Prvi korak optimizacije

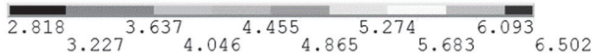
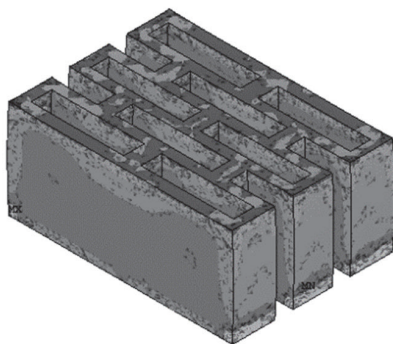
Dobiveni rezultati potvrđuju da se optimalna toplinska svojstva postižu kada je ispunjeni izolacijski materijal bliži objema stranama hladnih i toplih izvora. Prilagođavanjem dimenzija ćelija od 36+32+32 mm na 40+30+30 mm i smanjenjem širine dva srednja poprečna rebra na 17 mm, postignut je početno optimizirani betonski samoizolacijski blok; dimenzije kojeg su prikazane na slici 16., prostorni prikaz stanja naprezanja na slici 17., te maksimalna naprezanja horizontalnih i vertikalnih rebara u tablici 11.



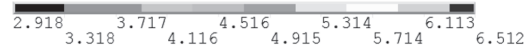
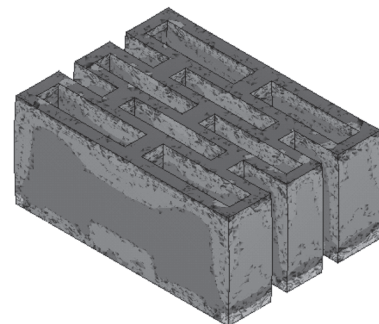
Slika 14. Izvorne tlocrtne dimenzije bloka Q3



Slika 16. Tlocrtne dimenzije bloka Q3 nakon prvog koraka optimizacije



Slika 15. Prostorni prikaz naprezanja bloka Q3 na početku optimizacije



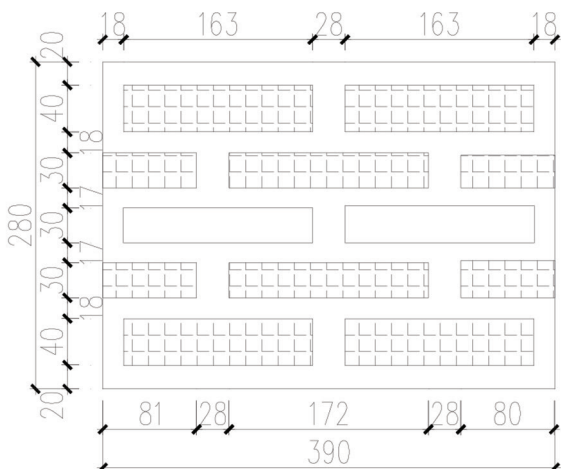
Slika 17. Prostorni prikaz naprezanja bloka Q3 nakon prvog koraka optimizacije

Tablica 11. Maksimalna naprezanja rebara prije i nakon optimizacije blokova Q3

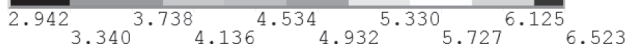
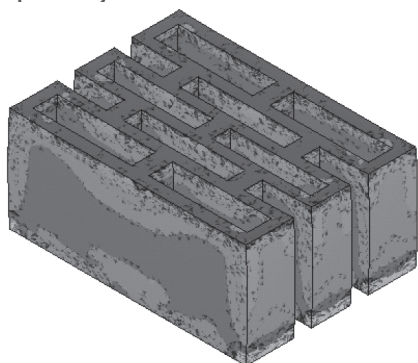
Rebra	Blok Q3 (prototip)		Nakon prvog koraka optimizacije		Nakon drugog koraka optimizacije	
	Debljina [mm]	Maksimalno naprezanje [MPa]	Debljina [mm]	Maksimalno naprezanje [MPa]	Debljina [mm]	Maksimalno naprezanje [MPa]
Poprečno rebro 1	18	4,257	18	3,85	18	4,848
Poprečno rebro 2	18	4,837	17	3,667	17	4,860
Vertikalno rebro 1	30	4,911	30	4,798	28	4,797
Vertikalno rebro 2	30	4,557	30	4,605	28	4,653
Vertikalno rebro 3	30	4,882	30	4,873	28	4,655

### 3.5.2. Drugi korak optimizacije

Nakon prvog koraka optimizacije, debljina vertikalnih rebara smanjena je na 28 mm. Promjene u dimenzijama bloka Q3 prikazane su na slici 18., prostorni prikaz stanja naprezanja na slici 18., te maksimalna naprezanja horizontalnih i vertikalnih rebara u tablici 11. Važno je napomenuti da su granice i uvjeti opterećenja ostali nepromijenjeni.



Slika 18. Tlocrtna dimenzije bloka Q3 nakon drugog koraka optimizacije



Slika 19. Prostorni prikaz naprezanja bloka Q3 nakon drugog koraka optimizacije

Usporedbom rezultata prve optimizacije s onima dobivenima iz druge, utvrđeno je da su iako su horizontalne i vertikalne vrijednosti naprezanja bile slične, raspodjele naprezanja nisu bile iste. Kod raspodjele naprezanja pri drugom koraku optimizacije primijećeno je da se koncentracija naprezanja na tlačnoj ravlini usporila, što je rezultiralo znatno nižim, povoljnijim naprezanjima u odnosu na prvi korak optimizacije. Dodatno, smanjenje debljine vertikalnih rebara u drugoj optimizaciji omogućilo je redistribuciju matrice krutosti u vertikalnim rebrima.

Drugi korak optimizacije ne samo da poboljšava mehanička svojstva, već značajno poboljšava i toplinska svojstva. Koeficijent prijenosa topline prototipa bloka Q3 generiran je pomoću računalnog programa ANSYS i iznosi 0,364 W/(m<sup>2</sup>·K). Nakon prvog koraka optimizacije, koeficijent prijenosa topline smanjen je na 0,355 W/(m<sup>2</sup>·K), a dalje je smanjen na 0,35 W/(m<sup>2</sup>·K) u drugom koraku optimizacije. To predstavlja smanjenje od 3,8 % u odnosu na prototip.

Granični koeficijenti prijenosa topline za hladne sjeveroistočne kineske regije A, B i C iznose 0,4 W/(m<sup>2</sup>·K), 0,45 W/(m<sup>2</sup>·K) i 0,5 W/(m<sup>2</sup>·K), redom. Blok Q3 pokazao je izvrsnu termalnu izvedbu nakon drugog koraka optimizacije i zadovoljava i energetske zahtjeve Kine za hladne sjeveroistočne regije i razvojne zahtjeve za domaćim zidnim materijalima. Granični koeficijenti prijenosa topline blaži su u kineskim regijama B i C za općine, sela i gradove. U praktičnoj primjeni, količina polistirenske pjene može se smanjiti prema lokalnim uvjetima i može se fleksibilno koristiti u različitim kineskim regijama. Tlačna čvrstoća nakon drugog koraka optimizacije iznosi 6,5 MPa, što je prikladno za niske zidane zgrade u selima i gradovima u Kini. Poboljšanjem kvalitete materijala i proizvodnih metoda, tlačna čvrstoća također će se poboljšati, čime će se ovi blokovi konačno učiniti prikladnima za uporabu u nosivim konstrukcijama s većim zahtjevima za čvrstoću.

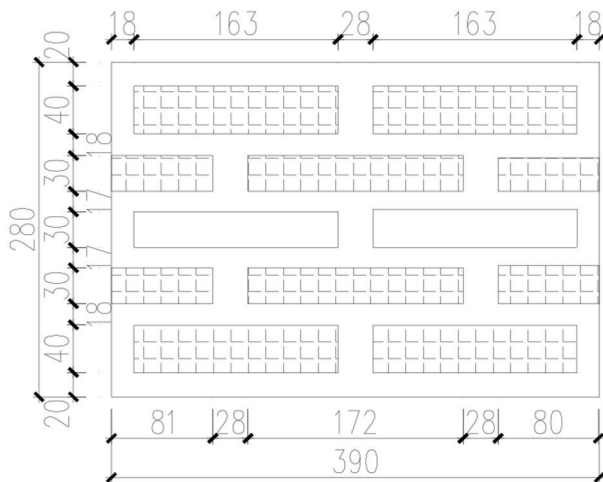
## 4. Projektiranje omjera mješavine i osnovnih svojstava novog energetski učinkovitog betonskog samoizolirajućeg bloka

### 4.1. Specifični ciljevi

Da bi se postavili specifični ciljevi treba: proučiti osnovna mehanička svojstva (npr. tlačnu čvrstoću, posmičnu otpornost i



razvoj pukotina) zidnog bloka te istražiti kompatibilnost između novog energetski učinkovitog samoizolacijskog betonskog bloka i morta.



Slika 20. Tip energetski učinkovitog betonskog samoizolacijskog bloka

## 4.2. Kompatibilnost bloka i morta za zidanje

### 4.2.1. Načelo kompatibilnosti bloka i morta

Općenito pravilo je da "čvrstoća morta neće premašiti čvrstoću opeke (bloka)" u zidanim konstrukcijama. To se temelji na višegodišnjim eksperimentalnim istraživanjima. Kada se koriste različiti mortovi različitih čvrstoća, poprečna vlačna naprezanja koja nastaju u bloku ostaju gotovo nepromijenjena. Na primjer, kada je čvrstoća morta veća od 70 % čvrstoće opeke, odgovarajuća čvrstoća zida povećava se ne više od 10 %. Stoga se može zaključiti da čvrstoća morta ima vrlo malen utjecaj na tlačnu čvrstoću zida.

### 4.2.2. Mehanizam rada zida

Međunarodna i nacionalna istraživanja slažu se da su vertikalna tlačna naprezanja koja djeluju na presjek zidnog bloka važan faktor u vezi s posmičnom čvrstoćom; budući da je način posmičnog sloma izravno određen vertikalnim tlačnim naprezanjima. Postoje tri vrste posmičnog sloma za zidne blokove: posmični, posmična naprezanja i baroklički slom. Međutim, vertikalna tlačna naprezanja imaju izravan utjecaj na posmičnu čvrstoću zidnih blokova bez obzira na način sloma. Zidani zidovi su nehomogeni i sastoje se od blokova koje povezuje mort. Budući da je posmična čvrstoća duž sljubnica niska u zidu, mort treba koristiti samo u sklopu zidova visoke čvrstoće. Nasuprot tome, zbog prisutnosti otvora u ćelijama u šupljim blokovima, budući da je čvrstoća materijala samog betona korištenog za izradu blokova veća od čvrstoće samih blokova, čvrstoća morta trebala bi stoga biti kompatibilna s čvrstoćom betona, kako je navedeno u poglavlju 3.5.1 ovog rada.

## 4.3. Tlačno ispitivanje zida

### 4.3.1. Tlačna čvrstoća bloka i morta

Pripremljene su dvije grupe blokova s čvrstoćama MU2,5 i MU5 s tlačnim čvrstoćama od 3,06 MPa, odnosno 4,45 MPa. Projektirane čvrstoće morta bile su Mb7,5 i Mb10, s izmjerenim čvrstoćama od 8,7 MPa, odnosno 11,5 MPa. U tablici 12. razgraničene su pojedinačne grupe s njihovim odgovarajućim vrijednostima čvrstoće. Svaka grupa sadrži tri uzorka, rezultirajući s ukupno 12 uzoraka ispitivanih na tlak.

Tablica 12. Oznake uzoraka za ispitivanje na tlak

Razred tlačne čvrstoće bloka	Razred tlačne čvrstoće morta	
	Mb7,5	Mb10
MU2,5	A	B
MU5	C	D

### 4.3.2. Postavljanje ispitnih uzoraka i uređaj za opterećenje

Ispitni uzorci od opeke i blokova različitih veličina zahtijevaju drugačija mehanička svojstva zida od osnovne standardne metode ispitivanja [51]. Prema omjeru visine  $\beta = H/t$ ,  $\beta$  iznosi 3 do 5, a visina zida od šupljih blokova je pet jedinica blokova plus debljina morta. S tlačnim uzorkom od pet jedinica blokova, dimenzija  $592 \times 280 \times 1010$  mm, i debljinom horizontalne i vertikalne sljubnice od 10 mm, rezultirajući omjer visine je  $\beta = 3,61$ . Opisani ispitni uzorci zida prikazani su na slici 21.



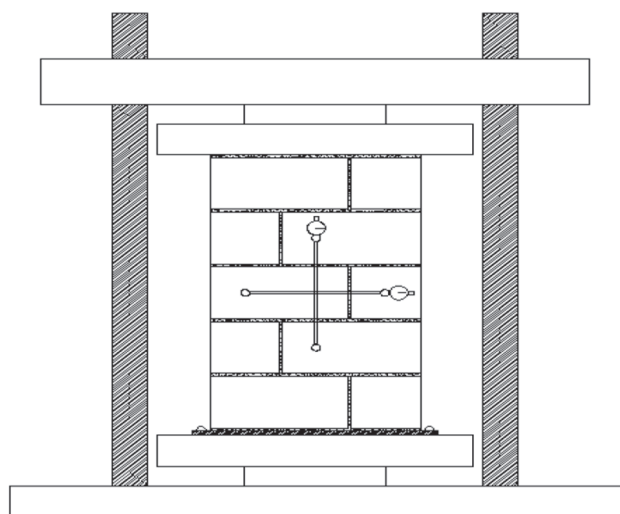
Slika 21. Ispitni uzorci zida

Ispitivanje je provedeno pomoću hidraulične preše od 1000 kN u Laboratoriju za konstrukcije Građevinskog fakulteta Jugoistočnog Sveučilišta Kine. Tlačna preša koristila se za mjerenje uzdužnih i poprečnih deformacija uzoraka. Ukupno su četiri komparatora pomaka postavljena simetrično s obje strane duž vertikalnih i horizontalnih osi uzorka. Ispitni uzorci

Tablica 13. Vrijednosti tlačnog ispitivanja zida novog kompozitnog samoizolirajućeg betonskog bloka

Oznaka ispitnog uzorka	Opterećenje pri pucanju [kN]	Opterećenje pri otkazivanju [kN]	Odnos opterećenja pri pucanju/otkazivanju	Tlačna čvrstoća [MPa]	Razlike [%]
A1	240	420,00	0,57	2,36	0,06
A2	290	360,00	0,81		
A3	340	400,00	0,85		
B1	270	400,00	0,68	2,54	0,06
B2	270	410,00	0,66		
B3	400	460,00	0,87		
C1	330	442,00	0,75	2,95	0,14
C2	350	442,00	0,79		
C3	550	592,00	0,93		
D1	550	715,00	0,77	4,1	0,03
D2	540	672,00	0,80		
D3	530	660,00	0,80		

podvrgnuti su tlačnom opterećenju, sa središnjom osi koja se podudara s osi gornje i donje ploče preše. Tlačna preša i raspored mjernih točaka prikazani su na slici 22.



Slika 22. Shematski prikaz ispitivanja zida

#### 4.3.3. Fenomeni i rezultati ispitivanja

Ispitni uzorak prolazi kroz tri različite faze pri podvrgavanju opterećenju: fazu elastičnog naprezanja (oko 50 % do 80 % sile loma, što je naznačeno pojavom pukotina), fazu elastoplastičnog naprezanja (80 % do 90 % uzorka uništeno je što se vidi po širenju i razvoju pukotina) i fazu uništenja (uzorak je trenutno zdrobljen i uništen).

Općenito primijećena opažanja u vezi s procesom ispitivanja su sljedeća: globalna krhkost u ispitnim uzorcima, manje koncentrirane pukotine razvijene tijekom ispitivanja, te pojava koncentriranih pukotina koje su dovele do ranog otkazivanja. Također, vrijedi napomenuti da je relativno lako proizvesti koncentrirana naprezanja gdje su vertikalni spojevi morta na vrhu ili na dnu zidnog elementa u kontaktu s pritiskom uređaja; dopušta se da se glavne pukotine neprestano razvijaju prema sredini uzorka zida sve dok uzdužna pukotina ne prođe kroz cijelu horizontalnu sljubnicu morta, kako je prikazano na slici 23. Tlačna čvrstoća novog energetski učinkovitog betonskog samoizolirajućeg bloka izračunana je prema "standardnoj metodi ispitivanja osnovnih mehaničkih svojstava zidova" [51]. Podaci su sažeti u tablici 13. Statističke analize i izračuni za prosječnu tlačnu

čvrstoću uzorka i prosječnu tlačnu čvrstoću betonskih blokova od laganog agregata, temeljeni na kineskom Pravilniku za projektiranje zidanih konstrukcija, prikazani su u tablici 14.

Vrijednosti prikazane u tablici 14. pokazuju da je tlačna čvrstoća novog energetski učinkovitog samoizolirajućeg betonskog bloka veća od tlačne čvrstoće standardnog lako agregatnog betonskog bloka. Sadašnje kineske norme pružaju prihvatljive formule koje se mogu koristiti u izračunu prosječne tlačne čvrstoće ovog novog betonskog bloka.



Slika 23. Oštećenja pri tlačnom ispitivanju: a) Uzorak s jednom pukotinom; b) Uzorak s dvije pukotine

Tablica 14. Osnova tlačna čvrstoća izmjerenih vrijednosti i standardnih vrijednosti

Oznaka uzorka	Izmjerena vrijednost čvrstoća [MPa]	Definirana vrijednost čvrstoća [MPa]	Izmjerena specifikacija
A	2,36	2,02	1,16
B	2,54	2,24	1,14
C	2,95	2,83	1,04
D	4,10	3,13	1,31

#### 4.3.4. Jednadžba prosječne tlačne čvrstoće zida

Da bi se nova vrsta samoizolirajućeg bloka koristila sigurno i ekonomično kao održivi materijal za zidanje, potrebna je jednadžba za određivanje prikladne tlačne čvrstoće. Na temelju rezultata ispitivanja, odgovarajući parametri su ispravljani analizom regresijskog prilagođavanja, te je dobivena prosječna tlačna čvrstoća za zide od novih samoizolirajućih blokova.

$$\ln f_m - \ln(1+0.07)f_2 = \ln k_1 + a \ln f_1 \quad (4)$$

gdje su:

- $f_1$  - tlačna čvrstoća zidnih blokova
- $f_2$  - tlačna čvrstoća morta za zidanje
- $f_m$  - tlačna čvrstoća zida.

Ako se definira  $\ln f_m - \ln(1+0.07)f_2 = y$ ,  $x = \ln f_1$ ,  $a = \alpha$ ,  $b = \ln k_1$ , izraz (4) može se pretvoriti u linearnu funkciju:

$$y = ax + b \quad (5)$$

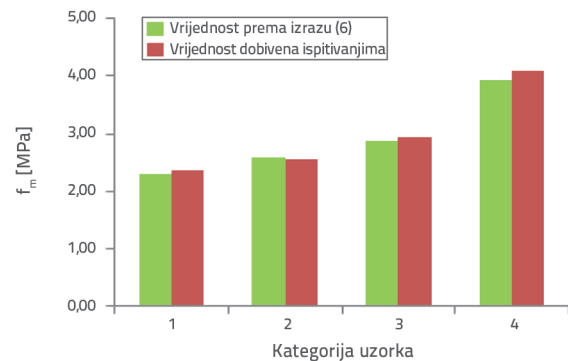
Utjecajni faktori koji se odnose na vrstu bloka i metodu zidanja dobiveni su analizom regresijskog prilagođavanja relevantnih parametara.

$$k_1 = 0,72, \quad a = 0,61$$

Prosječna tlačna čvrstoća zida od recikliranog betonskog bloka:

$$f_m = 0,72f_1^{0,61}(1 + 0,07)f_2 \quad (6)$$

Usporedbom izmjerenih vrijednosti uzoraka ispitivanih na tlak u svakoj grupi s onima izračunanim prema izrazu (6), očito je da su vrijednosti dobivene prema predloženoj formuli nešto niže od vrijednosti izmjerenih tijekom ispitivanja. Izračunane vrijednosti tlačne čvrstoće iz izraza (6) i izmjerene vrijednosti tlačne čvrstoće prikazane su na slici 24.



Slika 24. Usporedba vrijednosti tlačne čvrstoće novog energetski učinkovitog bloka dobivenih proračunom i ispitivanjima

Tablica 15. Usporedba koeficijenta iskorištenosti čvrstoće morta s onima u dostupnoj literaturi

Izvor	Grupa	$f_1$ [MPa]	$f_2$ [MPa]	$f_m$ [MPa]	$f_1/f_2$	$\bar{f}_1/\bar{f}$	$f_2/f_m$	$\bar{f}_2/\bar{f}_m$
Li [31]	1	14,08	6,31	2,23	4,65	2,26	2,83	1,84
	2	25,73	6,31	7,55	4,08		0,84	
	3	25,73	15,55	7,92	1,65		1,96	
	4	31,18	15,55	9,68	2,01		1,61	
	5	31,18	23,26	11,99	1,34		1,94	
Qu [35]	1	27,04	18,90	8,09	1,43	1,60	2,34	2,18
	2	33,90	18,90	9,52	1,79		1,99	
	3	40,30	18,90	11,45	2,13		1,65	
	4	33,90	27,90	9,57	1,22		2,92	
	5	40,30	27,90	13,77	1,44		2,03	
Ispitivanje prikazano u ovom radu	1	3,06	8,67	2,36	0,35	0,38	3,67	3,58
	2	3,06	11,48	2,54	0,27		4,52	
	3	4,45	8,67	2,95	0,51		2,94	
	4	4,45	11,48	4,10	0,39		2,80	



Može se zaključiti da je predložen izraz (6) za izračun tlačne čvrstoće novog energetski učinkovitog betonskog bloka, siguran i opravdan te daje određenu rezervu sigurnosti za inženjersko projektiranje i primjenu.

Uzimajući primjer bloka pod osnim tlakom, generira se složeno stanje naprezanja; jednoosna tlačna čvrstoća bloka ne može se učinkovito koristiti zbog kombiniranog djelovanja vlačnog naprezanja, posmika i savijanja. Čvrstoća bloka uvijek je veća od tlačne čvrstoće ziđa.

Kako bismo stekli bolji uvid u važnost čvrstoće morta, uspoređen je omjer tlačne čvrstoće morta i tlačne čvrstoće ziđa, nazvan koeficijent iskorištenosti čvrstoće morta, prema principu kompatibilnosti specifikacija (tablica 15.).

Vidi se iz tablice 15. da je stopa iskorištenosti morta kod novog samoizolirajućeg bloka mnogo veća od one kod običnog betonskog bloka. Čvrstoća novog samoizolirajućeg betonskog bloka povećala se za otprilike 60 do 90 %, a prosječna čvrstoća morta postala je 2,68 puta veća od prosječne čvrstoće betonskog bloka.

Kako bi se zajamčilo istodobno uništenje betonskih blokova i morta, čvrstoća morta trebala bi se temeljiti na čvrstoći betonskog bloka; kako je navedeno u relevantnim propisima. Stoga se može preporučiti da za blokove velike poroznosti, velike čvrstoće i dobre toplinske izolacije, čvrstoća morta treba biti veća od tlačne čvrstoće novog samoizolirajućeg bloka, ali nešto manja od čvrstoće betonskog bloka.

#### 4.4. Ispitivanje ziđa na posmik

Mjerene vrijednosti čvrstoće na tlak za blokove i mort iz iste serije, ovdje su izostavljene. Stoga su svojstva prijanjanja razmatrana u ovom poglavlju čisto prijanjanje. Blok dimenzija 595 × 280 × 600 mm s debljinom morta od 10 mm, kako je prikazano na slici 25., projektiran je u skladu sa Standardnom metodom ispitivanja osnovnih mehaničkih svojstava zidanja.



Slika 25. Uzorci za ispitivanje ziđa na posmik

Slika 26. prikazuje opći eksperimentalni postav, a tablica 16. svaku grupu s pripadajućim čvrstoćama prema normi GB 50574 [55]. Ukupno je ispitano 12 uzoraka na tlak; svaka grupa sadrži tri uzorka.



Slika 26. Uređaj za ispitivanje ziđa na posmik

Tablica 16. Grupirani i numerirani uzorci ispitivanja osnog tlaka

Razred čvrstoće bloka	Razred čvrstoće morta	
	Mb7,5	Mb10
MU2,5	AV	BV
MU5	CV	DV

##### 4.4.1. Postupak ispitivanja i rezultati načina otkazivanja

Nakon što su dostigli svoju granicu opterećenja, uzorci su doživjeli nagli gubitak nosivosti. Glavno otkazivanje dogodilo se na spoju između morta i bloka, ali nije došlo do otkazivanja bloka, kako je prikazano na slici 27. To je prvenstveno bilo zbog toga što je sloj morta bio ograničen na područje rebra, što je značajno oslabilo efektivnu posmičnu površinu bloka.

Iako ispitivanja obično rezultiraju pojedinačnim smicanjem, podaci ispitivanja sažeti su u nastavku u tablici 17. uzimajući u obzir sigurnosne mjere.

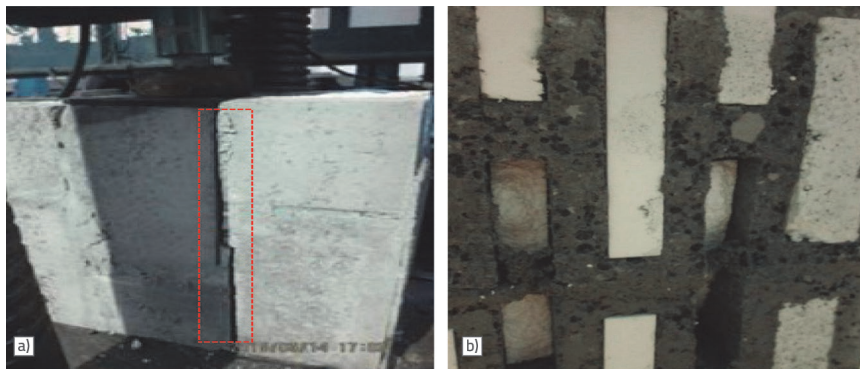
Rezultati prikazani u tablici 17. upućuju na dosljednu posmičnu čvrstoću, mali koeficijent varijacije i višu vrijednost izmjerene posmične čvrstoće u usporedbi s onima iz standardnih zahtjeva. Stoga, posmična čvrstoća morta duž sljubnice temelji se isključivo na čvrstoći morta; čvrstoća bloka nije bitna. Može se zaključiti da pravilo "čvrstoća morta ne smije biti veća od čvrstoće opeke" koje upravlja standardnim zidom ne vrijedi za predloženi energetski učinkovit samoizolirajući betonski blok. U svrhu usporedbe, jednadžba za čistu posmičnu čvrstoću za postojeće standardno zide koristi se u regresiji ispitnih podataka:

$$f_{v,m} = k\sqrt{f_2} \quad (7)$$



Tablica 17. Posmična čvrstoća ziđa od betonskih samoizolacijskih blokova [MPa]

Oznaka ispitnog uzorka	V [kN]	$f_{v,m}$ [MPa]	$\overline{f_{v,m}}$ [MPa]	Koeficijent varijacije	Standardna vrijednost	Specifikacijska vrijednost
AV-1	103,80	0,31	0,27	0,13	0,27	0,2
AV-2	77,13	0,23				
Aas-3	86,00	0,26				
BV-1	113,33	0,34	0,30	0,11	0,30	0,2
BV-2	93,33	0,28				
BV-3	88,60	0,27				
CV-1	106,60	0,31	0,36	0,09	0,36	0,23
CV-2	116,53	0,35				
CV-3	133,80	0,40				
DV-1	126,07	0,38	0,36	0,09	0,36	0,23
DV-2	115,93	0,35				
DV-3	113,8	0,34				



Slika 27. Način otkazivanja ziđa od betonskih samoizolacijskih blokova pri posmiku: a) Jednostrano otkazivanje; b) Oštećenje morta na kontaktnoj površini

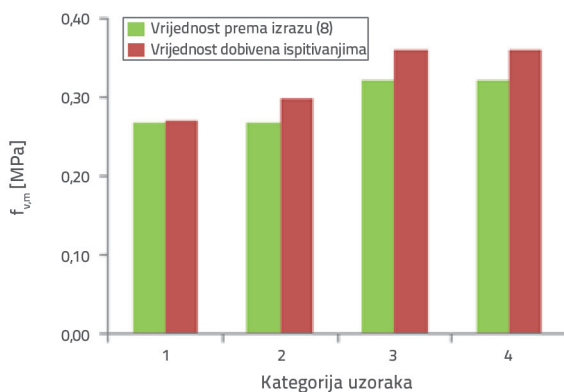
Iz slike 28. vidi se da je izračunana vrijednost prema izrazu (8) približna, ali niža od izmjerene vrijednosti. Korištenje navedenog izraza za izračun posmične čvrstoće za predloženi blok stoga je sigurno i logično.

### 5. Zaključak

Ovaj rad proučava svojstva materijala, projektantske parametre i procese pripreme potrebne za proizvodnju novog energetski učinkovitog betonskog samoizolacijskog bloka za upotrebu u izrazito hladnim područjima. Zatim su

Metoda najmanjih kvadrata za regresijsku analizu izmjerenih podataka:

$$f_{v,m} = 0.165 \sqrt{f_2} \tag{8}$$



Slika 28. Usporedba standardne vrijednosti posmične čvrstoće za novo energetski učinkovito zide dobivenih proračunom i ispitivanjima

provedena ispitivanja kako bi se utvrdila toplinska svojstva predloženog bloka, tlačna čvrstoća, otpornost na posmik i kompatibilnost morta s blokom. Glavni zaključci su sljedeći:

- Utvrđena je izvedivost ANSYS-ove računalne metode za simulaciju toplinskih svojstava zidnih jedinica. Također je predloženo da, uz pretpostavku korištenja sličnih udjela šupljina, ćelije trebaju biti raspoređene u nejednoličnom, ali simetričnom uzorku duž perimetra zida, a punjenje bi trebalo biti toplinskoizolacijski materijal. Izolacija bloka pokazala se učinkovitijom što je punjenje bliže krajevima izvora topline i hladnoće, a time i blok energetski učinkovitijim.
- Uzimajući u obzir utjecaj toplinskih svojstava, mehaničkih projektantskih faktora i volumenske mase materijala, provedena je sveobuhvatna višekriterijska optimizacijska analiza kako bi se generirao osnovni model za energetski učinkoviti samoizolirajući betonski blok. Ukupno je proizvedeno 15 vrsta neinferiornih rješenja blokova. Od tih 15, blok Q3 je odabran, optimiziran i analiziran metoda težinske sume. Izračunani su koeficijenti ponderiranja za svaki parametar: toplinska svojstva, mehanička

- svojstva i koeficijent volumenske mase iznose 0,563, 0,289, odnosno 0,148. Ukupni blok Q3 rezultirao je boljim toplinskim svojstvima, mehaničkim svojstvima i volumenskom masom.
- Optimizacija bloka Q3 provedena je kroz dva koraka. Prvi korak optimizacije temeljio se na izračunanim rezultatima "debljine stjenke i rebara betonskog bloka"; rezultati pokazuju da su potrebne daljnje prilagodbe debljine rebara. Drugi korak optimizacije proveden je s promijenjenom debljinom rebara, dajući zadovoljavajuće rezultate; oblik za energetske učinkoviti blok s izolacijom debljine 280 mm. Teorijski, koeficijent prijenosa topline predloženog samoizolirajućeg bloka bit će niži od standardnog koeficijenta prijenosa topline od 0,35 W/(m<sup>2</sup>·K) koji je određen za izrazito hladna područja. Predloženi blok ima dimenzije od 390 × 280 × 190 mm, udio šupljina od 50 %, 5 redova ćelija, tlačnu čvrstoću od 6,50 MPa i debljinu rebra u skladu s propisima utvrđenima u JG/T407 [56].

- Koeficijent prijenosa topline predloženog bloka iznosi 0,39 W/(m<sup>2</sup>·K) i zadovoljava energetske zahtjeve navedene za hladna područja u Kini.
- Za novi energetske učinkoviti betonski samoizolacijski blok, prosječne eksperimentalne vrijednosti za tlačnu i posmičnu čvrstoću trebale bi biti veće od vrijednosti dobivenih proračunom.
- Posebna konfiguracija ECSB-a ima prednosti i u mehaničkim i u toplinskim svojstvima. Mehanička prednost je pružanje jačih veza od običnih betonskih zidnih jedinica omogućavanjem morta između blokova. S druge strane, toplinska prednost je smanjenje toplinskih mostova korištenjem kontinuiranih izolacijskih materijala.

## Zahvala

Ovo istraživanje provedeno je uz financijsku potporu Nacionalnog istraživačkog programa "12. petogodišnji plan" u okviru Nacionalnog programa za znanost i tehnologiju (potpora br. 2015BAL03B02).

## LITERATURA

- [1] Ding, X., et al.: Experimental Study on the Shear Performance of Recycled Concrete Self-Insulating Block Walls. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33 (2021) 2, pp. 04020456.
- [2] Kejkar, R.B., Wanjari, S.P.: Development and optimisation of curing temperature of energy-efficient geopolymers bricks, *Građevinar*, 72 (2020) 05., pp. 411-420.
- [3] Wu, D., et al.: Experimental test for mechanical properties of new tenon composite wall using thermal self-insulation block, *Advances in Structural Engineering*, 24 (2021) 1, pp. 79-89.
- [4] Trkulja, T., Radujković, M., Nikolić-Topalović, M.: Vertical greenery system: a model for improving energy efficiency of buildings, *Građevinar*, 74 (2022) 07., pp. 561-571, <https://doi.org/10.14256/JCE.3370.2021>
- [5] Hatipoglu, H.K., Cetin, R., Hatipoglu, A.: Sustainable housing: Analysis of energy performance potential in Turkey with translation of building standards of Austria, *Građevinar*, 74 (2022) 08., pp. 647-659, <https://doi.org/10.14256/JCE.3332.2021>.
- [6] Milovanović, B., Bagarić, M.: How to achieve Nearly zero-energy buildings standard, *Građevinar*, 72 (2020) 8., pp. 703-720, <https://doi.org/10.14256/JCE.2923.2020>.
- [7] Osman, B.H., Chen, Z.: Experimental Studies on the Behaviors of New Energy-Saving Concrete Self-Insulating Load-Bearing Block Wall under Low-Cycle Cyclic Loading, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018 (2018), pp. 1-16.
- [8] Ding, X., Luo, Y., Chen, Z.: Design and optimization of concrete self-insulation blocks based on thermal and mechanical properties in cold regions, *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 45 (2015) 1, pp. 145-150.
- [9] Chuan-Meng, Z., De-Hua, D., Guo-Jing, L.: Development and Application of Small Concrete Hollow Blocks, *Innovation in Wall Materials and Energy Conservation*, 3 (1997), pp. 32-35.
- [10] Xiangzhou, L.: Some Trends in the Development of Foreign Wall Materials, *Brick and Tile*, 7 (2003), pp. 35-36.
- [11] Hu, W., et al.: Optimization of the thermal performance of self-insulation hollow blocks under conditions of cold climate and intermittent running of air-conditioning, *Case Studies in Thermal Engineering*, 35 (2022), pp. 102-148.
- [12] Pan, D., et al.: Development of solid waste-based self-insulating material with high strength and low thermal conductivity, *Ceramics International*, 49 (2023) 3, pp. 5239-5248.
- [13] Ali, Y.A., et al.: Use of expanded polystyrene wastes in developing hollow block masonry units, *Construction and Building Materials*, 241 (2020), pp. 118-149.
- [14] Yang, L., et al.: Recent development on heat transfer and various applications of phase-change materials, *Journal of Cleaner Production*, 287 (2021), pp. 124-432.
- [15] National Building Codes Committee, Saudi Building Code Energy Conservation Requirements, 2016, Saudi Building Code, Saudi Arabia.
- [16] Guo, Y., et al.: A study on heat transfer performance of recycled aggregate thermal insulation concrete, *Journal of Building Engineering*, 32 (2020), pp. 101797.
- [17] Bai, G.L., et al.: Study on the thermal properties of hollow shale blocks as self-insulating wall materials, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017 (2017).
- [18] Zhang, H., et al.: Load capacity and displacement of recycled concrete and self-insulation block masonry wall. *Materials*, 13 (2020) 4, pp. 863.
- [19] Liu, D., Qiao, L., Li, G.: Experimental Performance Measures of Recycled Insulation Concrete Blocks from Construction and Demolition Waste, *J. Renew. Mater.*, 10 (2022), pp. 1675-1691.
- [20] Zheng, W., Song, C., Su, Y.: Analysis and design of coupled heat and moisture performance of new self-insulation blocks of recycled ceramsite concrete, *Advances in Frontier Research on Engineering Structures*, 1 (2023), CRC Press, pp. 189-198.

- [21] Hou, J., et al.: A study on influencing factors of optimum insulation thickness of exterior walls for rural traditional dwellings in northeast of Sichuan hills, China, *Case Studies in Construction Materials*, 16 (2022), pp. e01033.
- [22] 26-2010, J.: Design Standard for Energy Efficiency of Residential Buildings in Cold and Cold Regions, 2010, Architecture & Building Press Beijing, China.
- [23] GB50176-93: Thermal Design Specification for Civil Buildings, 1993, China Plan Press Beijing, China.
- [24] Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China: Design standard for energy efficiency of rural residential buildings (GB/T 50824-2013), China Building Industry Press Beijing, China.
- [25] GJ3-2010, T.S.o.: High-rise Building Concrete Structures. 2010, Architecture & Building Press Beijing, China.
- [26] Yong-jian, S., Yu-hua, L., Zhi-wen, Y.: Cement-type design of ceramsite concrete block for bearing and heat preservation, *Concrete*, (2007) 9, pp. 86-87.
- [27] Li, Z. Linzhu, S.: The thermal performance analysis of a composite ceramic concrete block with self-thermal insulation, *Journal of Hunan University of Technology*, 25( 2011) 6, pp. 61-65.
- [28] Jingwen, W., Tao, J., Shu Rong, L.: Optimized research on the hole type of ceramsite concrete block, *New Materials Innovation and Building Energy Conservation*, (2009) 4, pp. 32-35.
- [29] P., L.L.: Performance test of ceramsite lightweight aggregate concrete and its energy-saving effect analysis, 2015, Zhejiang University.
- [30] Xinghui, X., Shuanghui, X.: Experimental and analysis of the compressive strength of clay, *Ceramsite and Concrete Small Block Masonry Hui Building*, 10 (2003) 3.
- [31] Li, W.: Application of ceramsite concrete block masonry, *Applied Energy Technology*, (1998) 1, pp. 9-10.
- [32] T17431.2, G.: Light aggregate and test methods 1998, Standard Press Beijing, China.
- [33] Guochang, L., Ping, W.: Preparation and Basic Properties of High-quality Shale Ceramsite Filter, *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 1 (2007) 6, pp. 123-129.
- [34] Pingjiang, L., Bo, L.: Basic mechanical properties of high-strength shale ceramsite concrete, *Chinese Journal of Building Materials*, 7 (2004) 1, pp. 113-116.
- [35] Qu, A.: Insulation bearing shale ceramsite small concrete sandwich panels sandwich wall structure. *Insulation Materials and Energy Saving Technology*, 51 (2004) 4.
- [36] GB175-2007: Portland cement. 2007, China Standard Press Beijing, China.
- [37] Xiangzhou, L.: Domestic and foreign solid waste management trends and countermeasures, *Fly Ash*, 16 (2004) 5, pp. 44-47.
- [38] Zi-fang, X., Ming-xu, Z., Fan-fei, M.: Analysis of strength mechanism and thermal performance of energy-saving thermal insulation bricks for low temperature firing of solid waste, *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2 (2008) 4, pp. 548-552.
- [39] JGJ51-2002: light aggregate concrete technical specifications, 2002, Building Industry Press Beijing, China.
- [40] Jindong, Y.: Analysis of Temperature Field of Reinforced Concrete Structure, *Guangdong Building Materials*, (2004) 7, pp. 29-31.
- [41] GB/T 22588-2008: Determination of thermal diffusivity or thermal conductivity by the flash method, 2008, Standardization Administration of the People's Republic of China.
- [42] GB50176-93: Specification for thermal design of civil buildings, 2008, Architecture & Building Press Beijing, China.
- [43] GB/T13475-2008: Thermal insulation. Determination of steady-state thermal transmission Properties, Calibrated and guard hot box. 2008, Standardization Administration of the People's Republic of China.
- [44] Sanming, Z., Yanping, T.: Thermal performance analysis of different types of concrete perforated brick wall, *New Building Materials*, (2005).
- [45] Huifang, S.: Experimental study on composite self-insulating concrete block masonry, 2010, Zhejiang University of Technology.
- [46] Hong, W.: Research on economical energy-saving composite blocks for rural construction, 2010, Yangzhou University.
- [47] Guangqing, J.: Die-casting porous bricks, hollow bricks and masonry blocks, *World of Tiles*, 4 (2009), pp. 9-27.
- [48] Wei, Z.: Preparation and Application of Lightweight Aggregate Concrete, 2013, Hunan University.
- [49] Bi-chao, Y., Zhou. H.: Thermal Performance Analysis of Concrete Small Hollow Block, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. IOP Publishing.
- [50] Al-Tamimi, A.S., et al.: Effect of geometry of holes on heat transfer of concrete masonry bricks using numerical analysis, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42 (2017), pp. 3733-3749.
- [51] GBJ50129-2011: Standard for test methods of basic mechanical properties of masonry, 2011, Architecture & Building Press Beijing, China.
- [52] Shihong, F., Kewei, D., Yayi, C.: Research on Multi-objective Optimization Method, *Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition*, 38 (2012) 4, pp. 658-661.
- [53] Ma, X., Li, Y., Yan, L.: Comparison review of traditional multi-objective optimization methods and multi-objective genetic algorithm, *Electr. Drive Autom*, 3 (2010), pp. 48-50.
- [54] Yu, P., Wangming, W.: Optimum transfer matrix for antisymmetric, *Mathematics in Practice and Recognition*, (1988), pp. 61-102.
- [55] 50574-2010, G.: Uniform technical code for wall materials used in buildings, 2010, Standardization Administration of the People's Republic of China.
- [56] JG/T407-2013: Self-insulated concrete composite block, 2013, Architecture & Building Press Beijing, China.