

Usporedba različitih tipova konstrukcija stambenih zgrada

Manja Kitek Kuzman, Jasna Hrovatin, Petra Grošelj

Ključne riječi

stambena zgrada, konstrukcija, drvo, beton, opeka, čelik, usporedba

Key words

residential building, structure, wood, concrete, brick, steel, comparison

Mots clés

immeuble résidentiel, structure, bois, béton, brique, acier, comparaison

Ключевые слова

жилой дом, конструкция, древесина, бетон, кирпич, сталь, сравнение

Schlüsselworte

Wohngebäude, Konstruktion, Holz, Beton, Ziegel, Stahl, Vergleich

M. Kitek Kuzman, J. Hrovatin, P. Grošelj

Prethodno priopćenje

Usporedba različitih tipova konstrukcija stambenih zgrada

U radu su s namjerom vrednovanja svrsishodnosti uporabe drva u stambenoj gradnji uspoređene sljedeće konstrukcije: drvena monolitna, drvena okvirna, betonska, opečna i čelična. Za usporedbu je upotrijebljena metoda analitičkoga hijerarhijskog procesa. Analiza je pokazala da je za stambenu gradnju najprihvatljivija drvena okvirna konstrukcija, pri čemu su najvažniji kriteriji odlučivanja bili: nosivost, požarna sigurnost, energijska učinkovitost, kvaliteta stanovanja i estetika.

M. Kitek Kuzman, J. Hrovatin, P. Grošelj

Preliminary note

Comparison of various types of residential building structures

The use of wood in the construction of residential structures is analyzed, and the following structures are compared: wooden monolithic structure, wooden frame structure, concrete structure, brick structure and steel structure. The analytic hierarchy process method is used in the comparison. The analysis has shown that the wooden frame structure is the most convenient for residential construction purposes. The most significant decision making criteria used in this analysis are: safety, fire safety, energy efficiency, housing quality and aesthetics.

M. Kitek Kuzman, J. Hrovatin, P. Grošelj

Note préliminaire

Comparaison des types divers structurels pour immeubles résidentiels

L'emploi de bois dans la construction des structures résidentielles est analysé, et les structures suivantes sont comparées: structure monolithique en bois, structure-cadre en bois, structure en béton, structure de briques et structure en acier. La méthode connue comme le processus de la hiérarchie analytique est utilisée dans la comparaison. L'analyse a montré que la structure-cadre en bois est la plus appropriée pour les structures résidentielles. Les plus importants critères de sélection utilisés dans la présente analyse sont: sécurité, sécurité incendie, rendement énergétique, qualité d'habitation et esthétique.

M. Китек Кузман, Ї. Хроватин, П. Грошелъ

Предварительное сообщение

Сравнение различных типов конструкций жилых домов

С целью оценки целесообразности применения древесины в жилищном строительстве в работе произведено сравнение следующих конструкций: деревянной монолитной, деревянной рамной, бетонной, кирпичной и стальной. Для проведения сравнения использовался метод аналитического иерархического процесса. Анализ показал, что для жилищного строительства наиболее приемлемой является деревянная рамная конструкция. При этом важнейшими критериями при принятии решения были: несущая способность, пожарная безопасность, энергетическая эффективность, качество проживания и эстетика.

M. Kitek Kuzman, J. Hrovatin, P. Grošelj

Vorherige Mitteilung

Vergleich verschiedener Typen der Konstruktionen von Wohngebäuden

Im Artikel sind mit dem Vorhaben der Bewertung der Zweckmäßigkeit der Anwendung von Holz im Wohnungsbau verglichen folgende Konstruktionen: Monolith - Holz, Holzrahmen, Beton, Ziegel, Stahl. Zum Vergleich benutzte man die Methode des analytischen hierarchischen Prozesses. Die Analyse zeigte dass für den Wohnungsbau die Holzrahmenkonstruktion die annehmbarste ist, wobei die wichtigsten Entscheidungskriterien: Tragfähigkeit, Brandsicherheit, energetische Leistungsfähigkeit, Qualität des Wohnens und Ästhetik waren.

Autori: Doc. dr. sc. **Manja Kitek Kuzman**, dipl. ing. arh.; doc. dr. sc. **Jasna Hrovatin**, dipl. ing. arh.; mr. sc. **Petra Grošelj**, dipl. ing. mat., Univerzitet u Ljubljani, Biotehnički fakultet, Odjel za drvo, Ljubljana, Slovenija

1 Uvod

Više od polovice gradnji u Sloveniji odnosi se na zgrade pri čemu gradnja novih građevina obuhvaća oko 75 posto građevinskih aktivnosti. Najveći dio postojećih zgrada su stambene, uglavnom zidane opekom (56 %). U posljednje se vrijeme zapaža porast betonskih konstrukcija zgrada, a također i drvenih konstrukcija [1]. U Sloveniji je 2007. proizvedeno 745 montažnih kuća od kojih je pola prodano u Sloveniji, a najveći dio preostalih izvezen je u države Europske Unije, najviše u Austriju, Italiju i Njemačku [2]. U Austriji je primjerice 1980. proizvedeno 1300 montažnih kuća, a 2002. 5684. Tamo drvene konstrukcije obuhvaćaju više od 35 posto ukupne obiteljske stambene gradnje [3]. U Finskoj se udio montažne gradnje u obiteljskim kućama kreće između 70 i 80 posto [4].

Za gradnju montažnih drvenih stambenih zgrada važni su argumenti novosti i poboljšanja koja su se počela uvoditi krajem prošlog stoljeća. To se odnosi na veći dio izvedbe u tvornici, prijelaz na modularnu gradnju, veću upotrebu lijepjenog drva, razvoj krupnopanelnog montažnog sustava [5].

Istraživanje javnog mnijenja u Sloveniji [6] provedeno 2007. pokazalo je da su osnovne karakteristike potencijalnim korisnicima vrlo malo poznate. Većina je smatrala da su drvene montažne građevine skuplje od tradicijskih, međutim to opovrgava provedena usporedna analiza [7].

Za istraživanje su se rabili višekriterijski modeli odlučivanja, među kojima su: teorija MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*) [8], model SMART (*Simplified Multi-Attribute Rating Technique*) [9] i analitički hijerarhijski proces (AHP) [10].

U radovima [11] do [15] prikazani su rezultati primjene višekriterijskih modela donošenja odluka o gradnjama i upotrebi materijala.

U ovom će se radu modelom AHP birati tip konstrukcije najprikladniji za stambenu gradnju. Uspoređivat će se sljedeće konstrukcije: drvena punostijenska, drvena okvirna, betonska, zidana od opeke i čelična. Usporedba će se provoditi na temelju devet kriterija koji imaju najveći utjecaj na izbor konstrukcije. Primijenit će se metoda Delphi [16].

2 Metode

2.1 Analitički hijerarhijski proces (AHP)

AHP metoda koju je razvio Saaty [10] temelji se na usporedbama parova građevina i jedna je od najčešće primijenjenih metoda za rješavanje diskretnih višekrite-

rijskih problema. AHP metoda omogućava da se u matematički model uključe različiti kriteriji koji mogu biti i opisni, subjektivni, nemjerljivi..., čime se može obuhvatiti sva kompleksnost i neodređenost problema realnoga svijeta. Metoda se sastoji od triju koraka:

1. Prvi je korak sastavljanje stabla odluka koje sadrži cilj problema, kriterije koji utječu na cilj i mogućnosti koje se mogu izabrati pri rješavanju problema. Kriteriji se mogu razviti u više razina potkriterija.
2. Drugi korak su usporedbe parova dviju građevina na istoj razini s obzirom na element s kojim su povezana na sljedećoj višoj razini.
3. Treći je korak proračun vektora težine na svakoj od hijerarhijskih razina i sinteza težine u konačni rezultat. Slijedi još analiza rezultata [17].

Drugi je korak najvažniji dio AHP metode. Za usporedbe parova rabi se ljestvica od 1. do 9., koju je sastavio Saaty [17] (tablica 1.).

Tablica 1. Ljestvica usporedbi parova

Vrijednost a_{ij}	Definicija
1	kriteriji i i j su jednakovrijedni
3	kriterij i je nešto važniji od j
5	kriterij i je prilično važniji od j
7	kriterij i je puno važniji od j
9	kriterij i je ekstremno važniji od j
2, 4, 6, 8	međuvrijednosti

Inverznoj usporedbi daje se recipročna vrijednost, a to je $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Usporedbe parova zapisuju se u matricu A usporedbe parova:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

S obzirom na usporedbe parova traži se vektor težine koji određuje koliko su važne pojedine građevine koje se uspoređuju. Saaty [10] je razvio metodu vlastitoga vektora pri kojoj se vektor težine $w = (w_1, \dots, w_n)$ dobiva iz matrice usporedbi A rješavanjem jednadžbe $Aw = \lambda_{max} w$, gdje je λ_{max} najveća vlastita vrijednost matrice A . Ovdje su vlastiti vektori proračunani u *Excelu*, grafikoni su napravljeni programskim alatom R.

Za svaku matricu A proračuna se i konzistentan kvocijent koji pokazuje stupanj nekonzistentnosti između usporedbi:

$$CR_A = \frac{CI_A}{RI_n}, \quad (2)$$

gdje je $CI_A = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ konzistentan indeks, n red matrice

A te RI_n prosječan konzistentan indeks [8].

Ako je $CR_A < 0.1$, stupanj nekonzistentnosti matrice A je promjenjiv. U suprotnom je primjeru matrica A nekonzistentna i donositelj odluke mora još jednom provjeriti svoje ocjene.

Forman i Peniwati [9] pokazali su da postoje dva osnovna načina kako se dobiva skupna ocjena kada je u odlučivanje uključeno više donositelja odluke: udruživanje ocjena usporedbi donositelja odluke i udruživanje vektora težine pojedinih donositelja odluke. Individualne ocjene usporedbi a_{ij}^k , $k=1, \dots, m$, za m donositelja odluke mogu se udružiti u skupnu ocjenu (a_{ij}^{skupna}). Aczel i Saaty [4] pokazali su da je za udruživanje individualnih ocjena u skupnu ocjenu jedina ispravna metoda geometrijske sredine:

$$a_{ij}^{skupna} = \sqrt[m]{\prod_{k=1}^m a_{ij}^k}, \quad (3)$$

jer ispunjava neke važne aksiomske uvjete, kao što je recipročnost. Za udruživanje vektora težine pojedinih donositelja odluke u skupni vektor težine uobičajeno se rabi aritmetička sredina [18].

2.2 Stablo odlučivanja za izbor građevne konstrukcije

Komponente stabla odlučivanja za promatrani problem su cilj, kriteriji i mogućnosti (slika 1.). Cilj je izabrati najprikladniji tip konstrukcije za stambenu gradnju. Moguće su sljedeće konstrukcije: drvena punostijenska, drvena okvirna, betonska, zidana od opeke i čelična okvirna. Konstrukcije će se uspoređivati s obzirom na kriterije koji su jezgra stabla odlučivanja. Kriteriji su određeni u dva kruga pomoću metode Delphi. U prvome su

krugu stručnjaci izabrali osamnaest važnih građevnih kriterija i razdijelili ih u pet kategorija. U drugome su krugu između tih osamnaest kriterija izabrali devet najvažnijih i razdijelili ih u tri skupine:

1. mehanički i tehnički kriteriji (energijska učinkovitost, nosivost, ograničenja oblika i dimenzija, požarna otpornost),
2. ekonomski kriteriji (troškovi amortizacije, troškovi gradnje i vrijeme gradnje),
3. stambeni kriteriji (estetika i kvaliteta stanovanja).

Tih je devet kriterija uključeno u daljnju analizu (slika 1.).

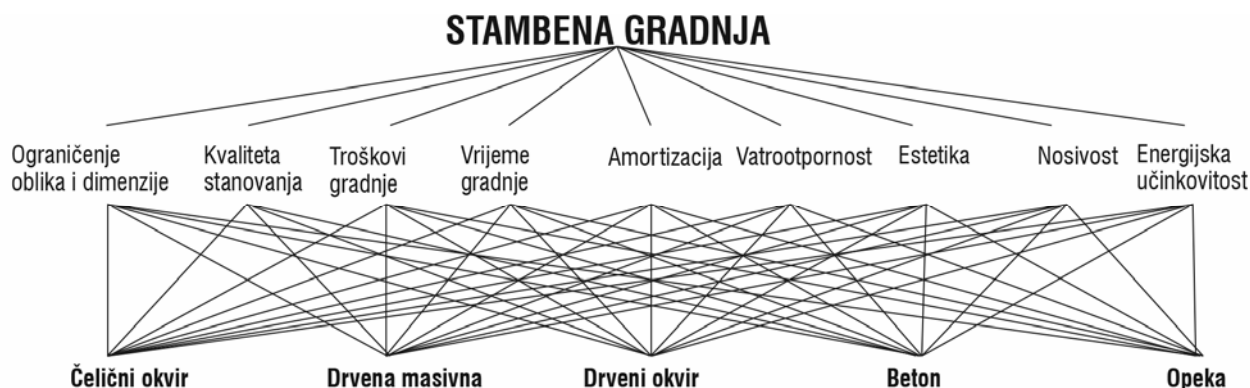
2.3 Usporedba parova kriterija

Na osnovi stabla odlučivanja sastavljen je upitnik s usporedbom parova kriterija s obzirom na cilj istraživanja. Zanimalo nas je koji je kriterij bolji za stambeni tip gradnje i koliko je puta bolji. Provedeno je 27 anketa. U istraživanje su uključeni stručnjaci triju različitih struka: inženjeri arhitekture, inženjeri građevinarstva i inženjeri šumarstva iz više zemalja, čime je osigurana realnost ocjena.

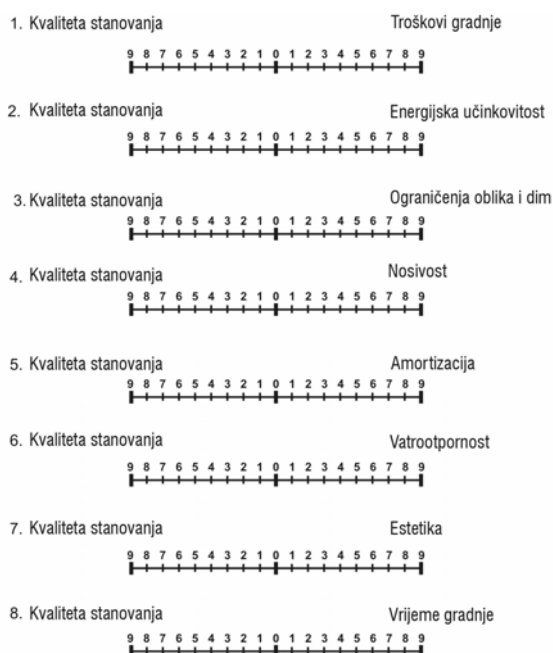
Na slici 2. prikazan je primjer upitnika za prvu razinu stabla odlučivanja. Trebalo je odgovoriti na sljedeće: "Poznato je da je gradnja stambenih građevina kompleksan proces na koji utječe više čimbenika, kao što su ekonomski, ekološki, mehanički itd. U nastavku su u parovima usporedni kriteriji gradnje. Zanima nas koji je od usporednih kriterija važniji i koliko je puta važniji. Ocjena se bira na ljestvici od 1. do 9. prema tablici 1."

Rezultati su prikazani u tablici 2. Ako stupanj nekonzistentnosti odgovora stručnjaka nije bio prihvatljiv zamolilo ih se da još jednom provjere svoje ocjene.

Kada su se skupili odgovori svih stručnjaka proračunana je geometrijska sredina njihovih ocjena i dobivene su vrijednosti zapisane u skupnu matricu A^{skupna} .



Slika 1. Stablo odlučivanja za izbor najprikladnije konstrukcije za stambenu gradnju



Slika 2. Anketni upitnik - usporedba parova kriterija za stambenu gradnju

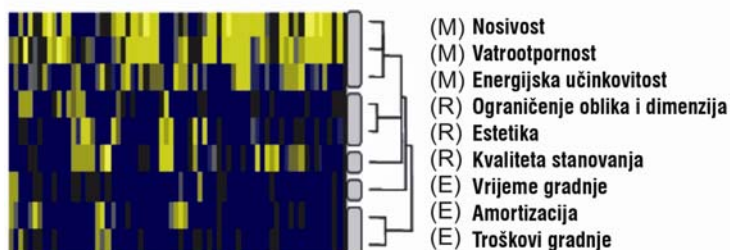
Tablica 2. Primjer rezultata usporedbi

Usporedni kriteriji			Rezultat
1	Energijska učinkovitost	troškovi gradnje	3:1
2	Energijska učinkovitost	kvaliteta stanovanja	5:1
3	Energijska učinkovitost	dimenzijska i oblikovna ograničenja	7:1
4	Energijska učinkovitost	nosivost	2:1
5	Energijska učinkovitost	troškovi održavanja	5:1

3 Rezultati i rasprava

3.1 Težine i rangiranje odabranih kriterija

Metodom vlastitoga vektora proračunan je vektor težine za odabranih devet kriterija za svakoga stručnjaka po-



a)

Slika 3. Analiza sličnosti profila odgovora za pojedini kriterij, A) analiza metodom grupiranja, B) analiza metodom PCA

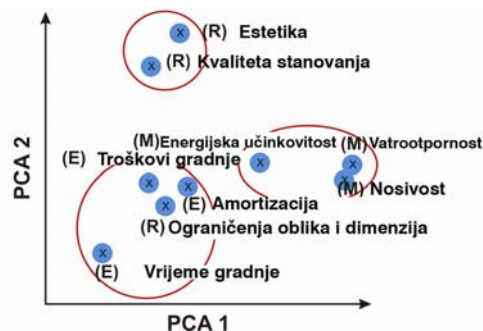
seбно i za skupnu matricu parnih usporedbi A^{skupna} . Ko-
načni skupni vektor težine, zajedno s rangom kriterija
predstavljen je u tablici 3.

Tablica 3. Težine i rangovi kriterija

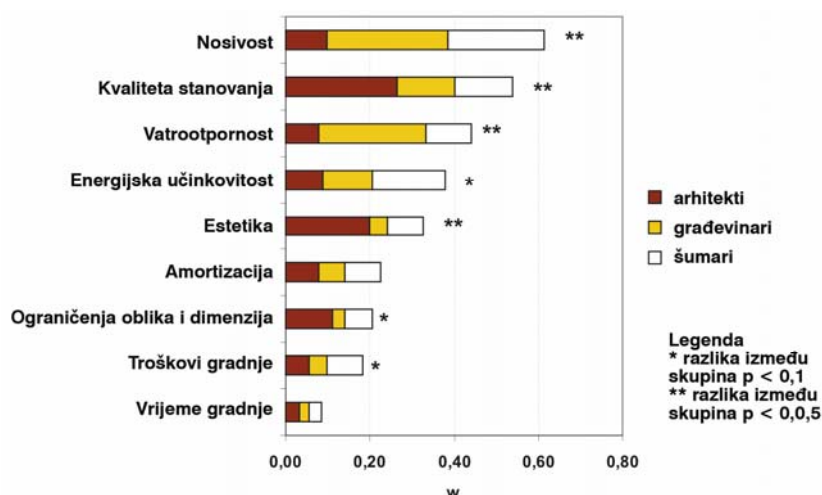
Kriteriji gradnje		w	Rang
1	Nosivost	0,19	1-2
2	Požarna otpornost	0,14	3
3	Ograničenja oblika i dimenzija	0,06	7-8
4	Troškovi gradnje	0,06	7-8
5	Troškovi amortizacije	0,08	6
6	Kvaliteta stanovanja	0,19	1-2
7	Energijska učinkovitost	0,13	4
8	Estetika	0,10	5
9	Vrijeme gradnje	0,04	9

Na slici 3.a prikazana je analiza sličnosti profila kriterija grupiranja (*clustering*), gdje pojedinačni profil određuju težinski koeficijenti iz pojedine ankete. Sličnost profila mjeri se korelacijskim koeficijentom. Analiza pokazuje da su međusobno najbliži profili kriterija iz istoga sklopa. Profili odgovora grupiraju se u tri skupine i to: u skupinu mehaničko-tehničkih kriterija (M), skupinu ekonomskih kriterija (E) i u skupinu stambenih kriterija (R). Slično razvrstavanje u navedene tri skupine dobiva se i analizom PCA (*Principal Component Analysis*) prikazanoj na slici 3.b.

Metodom analize varijanti (ANOVA) uspoređeni su odgovori između skupina stručnjaka koji su sudjelovali u istraživanju (inženjeri arhitekture, inženjeri građevinarstva i inženjeri šumarstva). Vektori težine za svaku skupinu stručnjaka posebno su proračunani aritmetičkom sredinom vektora težine svih stručnjaka u skupini (slika 4.). Skupina inženjera arhitekture razlikovala se od drugih dviju skupina jer je više vrednovala kriterije estetike, kvalitete stanovanja i ograničenja oblika i dimenzije. Skupine su se najviše podudarale u kriterijima troškova gradnje i vremena gradnje.



b)



Slika 4. Usporedba dobivenih vrijednosti težinskih koeficijenata kriterija s obzirom na skupinu stručnjaka koji su sudjelovali u anketi

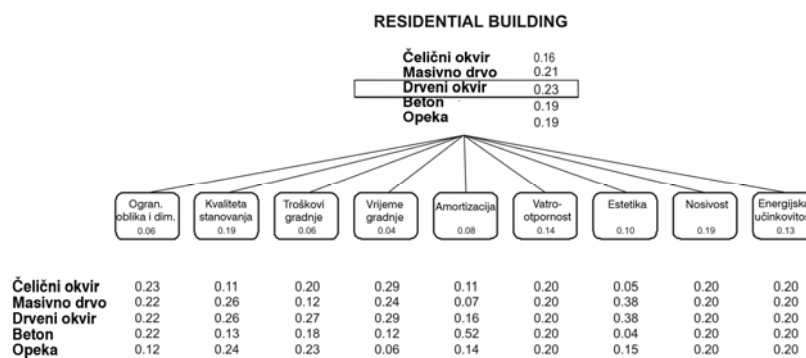
3.2 Vrednovanje konstrukcija unutar pojedinoga kriterija

Na osnovi proračuna modela i analize literature obrađeno je pet različitih tipova konstrukcija prema stablu odlučivanja. Svaka je konstrukcija bila posebno vrednovana prema svakom od devet ključnih kriterija. Težinski koeficijenti kriterija *Troškovi gradnje* izabrani su na osnovi prosječnih cijena kvadratnoga metra zida odabranih tipova konstrukcije vodećih slovenskih proizvođača, a ne ocjeni na osnovi prosječne cijene zgrade jer ona ovisi o veličini zgrade, opremi itd. *Troškovi amortizacije* bili su ocijenjeni na osnovi odnosa između vijeka trajanja materijala i troškova gradnje. Kriterij *Ograničenja oblika i dimenzija* ocijenjen je na osnovi pokazatelja kao što su funkcionalnost, mogućnosti raspona, višekratna gradnja, sustavna rješenja i iskoristivost površine. Na ocjenu kriterija *Vrijeme gradnje* utjecali su čimbenici kao što su stupanj predgotovljenosti, sušenje, transport, poznavanje i iskustvo uporabe elemenata itd. *Kvaliteta stanovanja* ocijenjena je na osnovi zdravstvenih i psiholoških čimbenika. Težinski koeficijenti za kriterij *Estetika* izabrani su na osnovi ankete. Između devet kriterija tri kriterija – *Nosivost*, *Požarna otpornost* i *Energijska učinkovitost* – imaju propisane parametre u normama o gradnji građevina. S obzirom na činjenicu da se adekvatnim planiranjem za svaki navedeni materijal zadovoljavaju spomenute norme za te kriterije svim su obrađivanim konstrukcijama pripisani jednaki težinski koeficijenti.

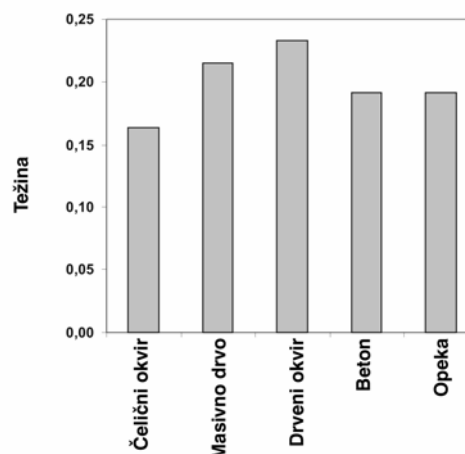
3.3 Rezultati istraživanja

Na stablu odlučivanja (slika 5.) prikazane su težine promatranih vrsta konstrukcija s obzirom na svaki od devet kriterija. Pri svakom je kriteriju zapisana i njegova težina s obzirom na cilj. Težine različitih tipova konstrukcija proračunane su matričnim množenjem vrijednosti konstrukcija i vektora težine kriterija. Na konačni rang konstrukcija najviše je utjecao raspored konstrukcija s obzirom na najvažnije kriterije. S obzirom na to da su za *Nosivost*, *Požarna otpornost* i *Energijsku učinkovitost* svi tipovi konstrukcija jednakovrijedni, na rang konstrukcija velik je utjecaj imao kriterij *Kvaliteta stanovanja*.

Na slici 6. usporedno su prikazani konačni rezultati istraživanja koji se nalaze i u stablu odlučivanja na slici 5.



Slika 5. Prikaz rezultata istraživanja na stablu odlučivanja



Slika 6. Konačni rezultati istraživanja

Najveću je težinu dobila drvena okvirna konstrukcija ($w = 0,23$), slijedi drvena punostijenska konstrukcija

($w = 0,21$). Betonska i opečna konstrukcija dijele treće mjesto ($w = 0,19$), čelična konstrukcija, kao manje prikladna za stambenu gradnju, našla se na posljednjem mjestu ($w = 0,16$).

4 Zaključak

Odabir tipa konstrukcije za stambene zgrade složena je zadaća. Na odluku utječu ekonomski čimbenici, vrsta zgrade, oblik i ekološki čimbenici. Racionalizacija procesa odlučivanja i utvrđivanje kritičnih svojstava kvalitete zahtijevaju uporabu matematičkih modela odlučivanja. Kao uspješan matematički model za povezivanje različitih stručnih područja pokazala se višekriterijska analiza koja omogućava istodobnu obradu važnih kriterija. Osim toga, omogućava numeričko vrednovanje obrađivanih kriterija s obzirom na specifičnost građevine.

U ovom se radu pokazuje primjena metode analitički hijerarhijski proces (AHP) za analizu kriterija odlučivanja o stambenoj gradnji. Utvrđeno je da na odluke, uz nosivost i požarnu sigurnost, najviše utječe kvaliteta življenja i štednja energije. Između razmatranih konstrukcijskih tipova za stambenu se gradnju kao najprikladnija pokazala drvena okvirna konstrukcija.

U budućnosti bi slične studije mogle služiti kao pomoć stručnjacima za dobivanje jasnije vizije optimizacije i razvoja pojedinih aspekata gradnje građevina jer omogućavaju usporedbu različitih varijanti. Osim toga, uz pomoć tih analiza lakše se prepoznaju prednosti i nedostaci gradnje drvom. Uzimanje u obzir utjecaja pojedinih parametara na kriterije odluke može dovesti do novih dimenzija u promociji i marketingu drvenih građevina.

Zahvala

Studija prikazana u ovom članku bila je dio istraživačkoga programa "Drvo i lignocelulozni materijali" koje podupire Ministarstvo za visoko školstvo, znanost i tehnologiju Republike Slovenije. Autorice se zahvaljuju na potpori.

LITERATURA

- [1] Mandič, S.: *Development Research Project Housing Survey*, The Housing Fund of the Republic of Slovenia Faculty of Social Science, Office of International Cooperation, University of Ljubljana, 2006.
- [2] Furniture and Wood Processing Association: *Wooden buildings in Slovenia*, CCIS Chamber of Commerce and Industry Slovenia, 2008.
- [3] Kitek Kuzman, M. et al.: *Gradnja z lesom - izziv in priložnost za Slovenijo*, Oddelek za lesarstvo Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, 2008.
- [4] Invest in Finland: *Wood construction opportunities to invest in the Finnish Forestry Cluster*, Invest in Finland, Invest in Finland, Helsinki, 2006.
- [5] Premrov, M.; Dobrila, P.: *Lesene konstrukcije*, Fakulteta za gradbeništvo, Univerza v Mariboru, 2008.
- [6] CATI: *Lesena gradnja- medijska raziskava*, Cati trženjske, medijske, družbene raziskave in svetovanja, Ljubljana, 2007.
- [7] Johnson, K. *Timber bridge design, engineering and construction manual*. 4th ed. Wheeler Consolidated. St. Louse Park, MN, 1990.
- [8] Brugha, C.M.: *Phased multicriteria preference finding*, European Journal of Operational Research, 158 (2004) 2, 308–316
- [9] Lootsma, F.A.: *A model for the relative importance of the criteria in the Multiplicative AHP and SMART*, European Journal of Operational Research, 94 (1996) 3, 467-476
- [10] Saaty, T.L.: *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, 1980.
- [11] Oblak, L.; Jelačić, D.; Motik, D.; Grladinović, T.: *A model for stock management in a woodindustry company*, Wood Research, 53 (2008)1, 105-118
- [12] Nassar, K.; Thabet, W.; Beliveau, Y.: *A procedure for multi-criteria selection of building assemblies*, Automation in Construction. 12 (2003) 5, 543-560 10
- [13] Frenette, C.D.; Derome, D.; Beaugard, R.; Salenikovich, A.: *Identification of multiple criteria for the evaluation of light-frame wood wall assemblies*, Journal of Building Performance Simulation, 1 (2008) 4, 221-236.
- [14] Chauhan, K.A.; Shah, C.N.; Rao, V.R.: *The Analytic Hierarchy Process as a Decision-Support System in the Housing Sector: A Case Study*, World Applied Sciences Journal, 3 (2008) 4, 609-613
- [15] Lipušček, I.; Oblak, L.; Zadnik Stirn, L.: *Model for classifying wood products according to environment burdening during the process of manufacturing*, Wood Research 48 (2003) 4, 43-53
- [16] Gupta, G.U.; Clarke, R.E.: *Theory and Applications of the Delphi Technique: A Bibliography (1975-1994)*, Technological Forecasting and Social Change, 53 (1996) 2, 185-211
- [17] Saaty, T.L.: *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory*, Pittsburgh, RWS Publication, 1994.
- [18] Ramanathan, R.; Ganesh, L.S.: *Group preference aggregation methods employed in AHP: an evaluation and intrinsic process for deriving members' weightages*, European Journal of Operational Research 79 (1994) 2, 249-265