

HRVATSKI I EUROPSKI PRISTUP POTRESNOJ OTPORNOSTI NEPOKRETNIH KULTURNIH DOBARA (2)

Prof. dr. sc. **Josip Dvornik**, mr. sc. **Damir Lazarević**, mr. sc. **Zorislav Despot**

Pročitali smo članak [1] prof. dr. sc. Dražena Aničića, dipl. ing. građ., redovitog člana Akademije tehničkih znanosti Hrvatske.

Članak je stručan i, uglavnom, zanimljiv.

Izgleda, ipak, da je u odjeljku 3.7, *Modeliranje i proračun*, glavni cilj autora bio kritika članka [2] u kojem je opisana naša idejna razrada sanacije konstrukcije palače Đorđić. Odlučili smo odgovoriti na neutemeljene kritike, kako šira javnost ne bi pogrešno protumačila naš pristup sanaciji kulturne baštine.

Mogli bi se naći prigovori našem projektu, ali su autorove primjedbe, blago rečeno, promašene. Profesor Aničić uz to daje vrlo autoritativnu, ali temeljno pogrešnu općenitu kritiku metode konačnih elemenata na koju ćemo se osvrnuti. U spomenutom odjeljku nema ni jedne ispravne tvrdnje koja se odnosi na tu numeričku metodu.

Ovdje reproduciramo cijeli odlomak iz citiranog odjeljka, u dijelovima, kurzivom, između kojih su umetnuti naši komentari. Ne može se reći da je neka tvrdnja izvađena iz konteksta.

- *Posebna opasnost pri modeliranju zgrade jest primjena metode konačnih elemenata, kod koje se prividno s velikim brojem konačnih elemenata i složenim proračunom dobiva veća točnost [7].*

Metoda konačnih elemenata postala je rutinska metoda proračuna, kojom se danas provode gotovo svi proračuni konstrukcija u svijetu. Ne treba isticati neku posebnu složenost. Upotrebom suvremenih programa s razvijenim postupcima za pripremu ulaznih podataka i pregled rezultata posao postaje jednostavan i brz, a za rutiniranog inženjera koji **razumije** temelje te metode nije ni posebno težak. Ono što vrijedi za metodu konačnih elemenata, ali i za sve metode proračuna, jest da su one doista opasne kada se nestručno upotrebljavaju.

Proračuni provedeni u projektu i prikazani u članku [2] danas su više nego uobičajeni. Ta radi se o, za današnja računala, brzom rješavanju razmjerno malog sustava linearnih jednadžbi, što odavno nije u središtu znanstvenih istraživanja iz numeričkih metoda.

Slažemo se da je pouzdanost rezultata proračuna povijesnih objekata **bilo kojom metodom**, pa i metodom konačnih elemenata vrlo mala, te da su numeričke vrijed-

nosti rezultata jedva nešto točnije od najgrublje procjene. Razlog, međutim, nije u lošoj metodi proračuna. Metoda je konačnih elemenata uz ispravno modeliranje, teorijski gledano, doista vrlo točna ako se raspolože pouzdanim ulaznim podacima. Na žalost, podaci o materijalima, konstrukciji, povijesti građenja, rekonstrukcija i pregradnji, neotkrivenim oštećenjima, povezivanju cijelih blokova zgrada u cjelinu, očekivanom potresnom djelovanju i drugim utjecajima — opterećeni su grubim procjenama. No, proračuni nekom grubljom metodom uzrokuju i dodatno smanjenje točnosti.

Usprkos spomenutih i nespomenutih nepouzdanosti, najveća je vrijednost proračuna metodom konačnih elemenata u tome što omogućuje kvalitativnu interpretaciju prostornog ponašanja i načina otkazivanja konstrukcije.

- *Pri tome se zaboravlja da temeljne postavke pri primjeni ove metode kod zidanih konstrukcija uz odvojenno modeliranje zidnih elemenata i veziva (morta) mogu biti načelno pogrešne, jer je ponašanje opterećenog zida u naravi potpuno drugačije od modelom pretpostavljenog.*

Autor je, čini se, iz slika 8. i 9. u članku [2] zaključio da su elementi kamena i morta odvojeni! Istim bi se razmišljanjem moglo zaključiti da se uobičajenim crtanjem armature odvojeno od betona zanemaruje njihova međusobna prionljivost.

Istina je da se u našem modelu razlikuju krutosti i oblik elemenata kamena od elemenata morta, ali su oni povezani u cjelinu, što predstavlja simulaciju realnoga stanja. **Povezanost konačnih elemenata jedna je od osnovnih pretpostavki ove numeričke metode!** Moglo bi se primijetiti da tako detaljan model nije potreban s obzirom na malu pouzdanost podataka, ali nikako da je pogrešan. Uobičajeni model u kojemu su kamen i mort pomiješani u homogenu i izotropnu „prosječnu“ mješavinu za rutinske je praktične potrebe dovoljno dobar, ali se ne može tvrditi da je načelno bolji. Model s dobro odabranim konačnim elementima kamena i morta bolje simulira **anizotropiju** ziđa, koje se i u stvarnosti različito ponaša u različitim smjerovima. Naši numerički eksperimenti u kojima je ziđe modelirano bez reški (potvrđeni u diplomskom radu [3]), pokazuju da je „uslojeni zid“ u smislu sigurnosti nepovoljniji za oko 15%, pa je pretpostavka homogenog

i izotropnog modela **na strani manje sigurnosti**. (Jasno, dobiveni postotak nije prevelik u odnosu na nepouzdanosti ulaznih podataka o kojima je već bilo govora.)

- *Nedopustivo je djelovanja rastavljati razmjerno krutostima „skeleta“ od morta i „skeleta“ od zidnih elemenata, jer se time ne zanemaruje samo volumenska deformabilnost zida koja je odlučujuća za njegovu nosivost, nego i veza prionljivosti koja postoji između dvaju gradiva. Rezultati proračuna dobiveni takvim postupkom nemaju nikakvog utemeljenja na fizikalnim svojstvima i ponašanju ziđa u potresu.*

Tvrđnja da se u našem modelu djelovanja rastavljaju razmjerno krutostima „skeleta“ od morta i „skeleta“ od zidnih elemenata potpuno je netočna. Ovdje je potrebno elementarno razjašnjenje: Na nizu paralelno povezanih jednostavnih elemenata (recimo stupova povezanih pločom krutom u svojoj ravnini) horizontalne se sile doista raspodjeljuju na stupove **razmjerno** njihovim krutostima. Naprotiv, elementi serijski povezani u lanac (recimo štap promjenjive krutosti) prenose istu silu, dok su produljenja elemenata proporcionalna gipkostima, odnosno **obrnuto proporcionalna** krutostima.

U modelu ziđa elementi nisu povezani ni serijski ni paralelno nego na mnogo složeniji prostorni način. Zato je i način prijenosa sila u modelu neusporedivo složeniji od serijskog ili paralelnog. Elementi od različitih materijala međusobno su povezani **monolitno** kao i elementi od istog materijala. Raspodjela pomaka i sila u prostoru određuje se rješavanjem sustava linearnih ili nelinearnih jednadžbi jer se radi o **višeosnom stanju napreznja**.

Ne stoji tvrđnja da se zanemaruje volumenska deformabilnost i veza prionljivosti između dva gradiva. Pri definiciji upotrijebljenog konačnog elementa (tzv. *plate-shell element*) volumenska je deformabilnost uvažena konstitutivnim jednadžbama materijala (kombinacija membranskog i fleksijskog djelovanja) i stupnjevim slobode čvorova u ravnini i izvan ravnine ziđa.

Prionljivost je osigurana samom idejom metode konačnih elemenata, tako da, baš autorovoj tvrđnji protivno, u obzir **nije uzeta popustljivost** spoja kamena i morta. Konačni elementi koji se upotrebljavaju u programima opće namjene prošli su tzv. *Patch test*, što je uvjet da međusobno prijanjaju i prenose sva opterećenja ako imaju zajedničku stranicu i zajedničke čvorove na toj stranici. **Čak i uz pretpostavku minimalnih uvjeta kompatibilnosti nije moguće odvajanje konačnih elemenata kamena od morta!** Naprotiv, kada bi se htjelo modelirati elemente koji prenose tlačne sile bez prionljivosti, bilo bi to nešto teže, ali nekim programima svakako moguće učiniti tzv. *gap* ili *joint* elementima, primjerice [4–6]. Dakle, u slučaju ispravnog modeliranja i dobrih ulaznih podataka,

kvalitativno se dobro simulira ponašanje ziđa u njegovoj ravnini i izvan nje.

Našem bi modelu poznavalac metode konačnih elemenata možda mogao postaviti prividno opravdani prigovor zbog upotrebe „dugoljastih“ elemenata morta, koji bi u slučaju standardnih elemenata zaista bili numerički nepovoljni jer je omjer dulje i kraće stranice prevelik. Radi se, međutim, o posebnim QUADB elementima [7] namijenjenima modeliranju izduženih oblika, bez ugrožavanja numeričke kvalitete aproksimacije.

- *Iduće je ograničenje što je metoda osnovana na teoriji elastičnosti, pa se napreznja dobivena iz reznih sila mogu uspoređivati samo s proizvoljno određenim „dopuštenim napreznjima“. Time se izbjegava primjena danas jedino propisane europske metode, metode graničnih stanja.*

Autor je na žalost i ovdje u velikoj zabludi. **Metoda konačnih elemenata nije osnovana na teoriji elastičnosti nego na općenitim formulacijama mehanike kontinuuma.** Već nekoliko godina poslije prvih programa opće namjene po linearnoj teoriji elastičnosti (prošlo je od tada dobrih 35 godina) na tržištu su se pojavili programi (npr. NONSAP, ADINA, MARC, NASTRAN, STARDYNE) koji uvažavaju različite vrste statičkih i dinamičkih nelinearnih konstitutivnih modela: viskoelastičnosti, plastičnosti, mehanike loma i sl. Svi poznati konstitutivni modeli nelinearnih materijala mogu se upotrijebiti za modeliranje konstrukcija pomoću metode konačnih elemenata. Također se mogu uzeti u obzir različiti modeli geometrijske nelinearnosti. Upućujemo autora na temeljnu literaturu [8–11] iz koje se može informirati o suštini, razvoju i mogućnostima metode konačnih elemenata.

Kad bi bila istinita tvrđnja da se konačnim elementima ne može provesti proračun po metodi graničnih stanja, metoda bi bila neprikladna i nedopustiva za sve proračune suvremenih armirano–betonskih i čeličnih konstrukcija. Svjedoci smo, naprotiv, da se gotovo svi proračuni provode tom „nedopustivom“ metodom.

Uostalom, po najsuvremenijim propisima EC1-1 [12] uobičajen je proračun unutarnjih sila pomoću linearno elastičnih modela, dok se samo dimenzioniranje provodi po metodi graničnih stanja. Spomenimo da su i postupci dimenzioniranja prema većini svjetskih propisa danas automatizirani i sadržani u velikom broju programa temeljenih na metodi konačnih elemenata.

Usput se može napomenuti: istina je da se pojam dopuštenih napreznja danas uglavnom napušta u propisanim praktičnim postupcima proračuna, ali nije točna tvrđnja da su ta napreznja „proizvoljno određena“. Trebalo

bi barem priznati da su dugogodišnjom upotrebom iskustveno potvrđena. Dokaz su tome golemi broj objekata dimenzioniranih takvim postupcima koji još uvijek služe svojoj svrsi. Uostalom, logično je da razvojem znanosti propisi zastarijevaju. Takvu će sudbinu sigurno doživjeti i sadašnja inačica Eurocodea. Ali nikako ne možemo zbog toga reći da je „proizvoljna“.

U našem su proračunu upotrebljena dopuštena naprezanja jer smo procijenili da je na razini idejnog projekta, kojim treba „vagnuti“ nosivost građevine, takav pristup dovoljan.

- *Ipak, velike grafičke mogućnosti suvremenih računalnih programa valja upotrijebiti za otkrivanje onih dijelova nosive konstrukcije koji su najosjetljiviji (najoštetljiviji), a što se grubljim modeliranjem bez takvih programa ne može ustanoviti.*

Nije nam jasno što je autor htio reći. Nadamo se da ne misli da se samo grafičkim prikazom, bez dobrih računa, mogu otkriti najosjetljiviji dijelovi konstrukcije.

- *Kod zidanih zgrada proračun se može provesti primjenom statičkih metoda temeljenih na nelinearnoj ovisnosti sila–deformacija svih konstrukcijskih elemenata koji prenose horizontalne sile. Provodi se to postupkom korak po korak, smanjujući krutosti elemenata s povećanjem horizontalnog opterećenja i postupnim isključivanjem elemenata kojih je nosivost iscrpljena. Pri tome se elastoplastično ponašanje pojedinih elemenata uzima na konzervativan način (na strani sigurnosti). Takav se način proračuna naziva „proračun postupnim guranjem“ (engl. *push-over analysis*).*

Izneseni je prijedlog u najmanju ruku nedorečen. Kako se modeliraju ti konstrukcijski elementi bez „opasne metode konačnih elemenata“? Po kojim propisima? Radi li se ručno ili na računalu?

Jasno je da se i takvi postupci u svijetu rade metodom konačnih elemenata, a postupno se slabljenje i isključivanje elemenata automatizira definiranjem odgovarajućih konstitutivnih jednadžbi materijala koji omogućuju takvo ponašanje. Opisana analiza zahtijeva detaljan model, jer treba otkriti mjesta **lokalne** koncentracije naprezanja koja uzrokuju početna oštećenja čijim se širenjem ugrožava

nosivost zida. Grubljim modeliranjem početna otkazivanja zahvaćaju veće dijelove modela, što nije ispravno.

Ali, takvi su postupci daleko od „jednostavnih“ za koje se zalaže autor, a točnost rezultata još više ovisi o točnosti ulaznih podataka.

Na kraju, vjerujemo da prof. dr. sc. Dražen Aničić bolje poznaje metodu konačnih elemenata od onoga što je pokazao kritizirajući pogrešno shvaćeni numerički model opisan u članku [2].

LITERATURA

- [1] Aničić, D.: *Hrvatski i europski pristup potresnoj otpornosti nepokretnih kulturnih dobara*, Građevinar, **52** (2000) 1, str. 1–7.
- [2] Despot, Z.; Lazarević, D.: *Projekt obnove palače Đorđić u Dubrovniku*, Građevinar **50** (1998) 12, str. 709–717.
- [3] Tkalčević, V.: *Diplomski rad*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 1998.
- [4] Page, A. W.: *Finite Element Model for Masonry*, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 104, No. ST8, 1978., pp. 1267–1285.
- [5] Oñate, E.; Hanganu, A.; Barbat, A.; Oller, S.; Vitaliani, R.; Saeeta, A.; Scotta, R.: *Structural Analysis and Durability Assessment of Historical Constructions Using a Finite Element Damage Model*, U: *Structural Analysis of Historical Constructions. Possibilities of Numerical and Experimental Techniques*, Eds.: P. Roca, J. L. González, A. R. Marí and E. Oñate, CIMNE, Barcelona, 1996., pp. 189–224.
- [6] Lourenço, P. B.: *Analysis of Masonry Structures with Interface Elements: Theory and Applications*, Delft University of Technology, Report, no. 03–21–22–0–01, Delft, the Netherlands, 1994.
- [7] *STAR DYNE, User Information Manual*, Research Engineers, Inc., Volume 2, 1996., pp. 194.
- [8] Bathe, K.–J.; Wilson, E. L.: *Numerical Methods in Finite Element Analysis*, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1975.
- [9] Cook, R. D.; Malkus, D. S.; Plesha, M. E.: *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [10] Bathe, K.–J.: *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1996.
- [11] Owen, D. R. J.; Hinton, E.: *Finite Elements in Plasticity — Theory and Practice*, Pineridge Press, Swansea, 1980.
- [12] *Eurokod 1, Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije, Dio 1, Osnove projektiranja*, (prijevod), Građevni godišnjak '96, HDGI, Zagreb, 1996.