



POMGRAD



Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKO ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774
Ljubljana, maj 2016, letnik 65, str. 101-116

Izdajatelj:

Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Javne agencije za raziskovalno dejavnost RS, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**, predsednik
Dušan Jukić
prof. dr. Matjaž Mikoš
IZS MSG: **Gorazd Humar**
Mojca Ravnikar Turk
dr. Branko Zadnik
UL FGG: **izr. prof. dr. Sebastjan Bratina**
UM FGPA: **doc. dr. Milan Kuhta**
ZAG: **doc. dr. Matija Gams**

Glavni in odgovorni urednik:

prof. dr. Janez Duhovnik

Lektor:

Jan Grabnar

Lektorica angleških povzetkov:

Romana Hudin

Tajnica:

Eva Okorn

Oblikovalska zasnova:

Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

Kočeovski tisk

Naklada:

500 tiskanih izvodov
3000 naročnikov elektronske verzije

Podatki o objavah v reviji so navedeni v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA (The Int. Construction Database) ter na

<http://www.zveza-dgits.si>

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in upokoјence 9,27 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 171,36 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je vštēt DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
SI560201 7001 5398955

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnimi presledki med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev z nazivi in naslovi ter besedilo.
6. Članki morajo obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); znanstveni naziv, imena in priimke avtorjev, strokovni naziv, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov PO-VZETEK in povzetek v slovenščini; ključne besede v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; ključne besede (key words) v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ... naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavlja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavlja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike (risbe in fotografije s primerno ločljivostjo) in preglednice morajo biti razporejene in omenjene po vrstnem redu v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: (priimek prvega avtorja ali kratica ustanove, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja ali ustanove morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela razvrščena po abecednem redu priimkov prvih avtorjev ali kraticah ustanov in opisana z naslednjimi podatki: priimek ali kratica ustanove, začetnica imena prvega avtorja ali naziv ustanove, priimki in začetnice imen drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
14. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD glavnemu in odgovornemu uredniku na e-naslov: janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

Vsebina • Contents

Članki • Papers

stran **102**

Tjaša Dolenc, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.
prof. dr. Franci Steinman, univ. dipl. inž. grad.

AMFIBIJSKA STAVBA ZA GRADNJO NA POPLAVNIH OBMOČJIH

AMPHIBIOUS BUILDING, AN EXAMPLE OF FLOOD-PROOF
TECHNIQUE

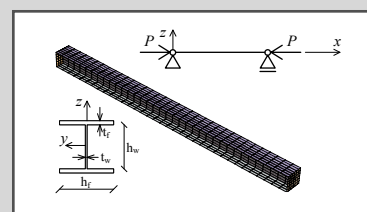


stran **109**

asist. dr. Teja Melink, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Jože Korelc, univ. dipl. inž. grad.

METODA STOHAŠTIČNIH KONČNIH ELEMENTOV V MODELIRANJU KONSTRUKCIJ

STOCHASTIC FINITE ELEMENT METHOD IN STRUCTURE MODELLING



Obvestilo ZDGITS

ZADNJI PRIPRAVLJALNI SEMINAR IN IZPITNI ROK ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2016

Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: AC Draženci – Gruškovje, sklop 1, Nadvoz 4-1; foto Silvo Tivadar

AMFIBIJSKA STAVBA ZA GRADNJO NA POPLAVNIH OBMOČJIH

AMPHIBIOUS BUILDING, AN EXAMPLE OF FLOOD-PROOF TECHNIQUE

Tjaša Dolenc, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.

tjasa7dolenc@gmail.com

prof. dr. Franci Steinman, univ. dipl. inž. grad.

franci.steinman@fgg.uni-lj.si

UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,

Hajdrihova 28, 1000 Ljubljana

Strokovni članek

UDK 005.936.2:627.51(285.3)

Povzetek | V Sloveniji in po svetu je obseg območij poplavne nevarnosti velik, zaradi podnebnih sprememb pa naj bi se te površine še povečale. Pri nas se želi z bodočo gradnjo zgostiti pozidavo v območjih pozidave, kar pomeni, da bo treba stopnji poplavne nevarnosti prilagoditi tudi gradnjo objektov. Amfibijska gradnja stavb prinaša kakovostne dopolnitve k vodotesni oz. vodoodporni gradnji, ki se uporabljata na območjih poplavne nevarnosti. Zagotavlja varnost pred poplavitvijo, zato niso potrebne sanacije po poplavi, nima čezmernih vplivov na okolje oz. vodne tokove ter omogoča vključitev v podobo soseske in ohranja obstoječi arhitekturni značaj. Predstavljeni so glavne značilnosti in konstrukcija amfibijske stavbe, pravni vidiki umeščanja take gradnje pri nas ter nekaj primerov iz sveta.

Ključne besede: poplave, amfibijska stavba, plovni temelj

Summary | In Slovenia and around the world the extent of flood hazard areas is large, and due to climate changes these areas will increase. Our future construction aims at compacting buildings in the populated areas, which means that the building construction has to adapt to the level of flood hazard. Amphibious construction brings good additions to water-proof and water-resistant construction, which are used in flood-prone areas. It provides protection against inundating. Therefore, rebuilding after the flood is not necessary, has no excessive impact on the environment or on streams, allows integration to the neighborhood and maintains the existing architectural character. In the paper the main characteristics and structure of amphibious building, legal aspects of placing this construction in Slovenia and a few examples from the world are presented.

Key words: floods, amphibious building, floating foundation

1 • UVOD

Gradnja na poplavnih območjih v Sloveniji in drugod po svetu je vzrok za veliko pričakovano poplavno škodo. Pri obstoječih ogroženih objektih lahko na eni strani vplivamo na zmanjšanje poplavne nevarnosti (npr. z zadrževalniki), pogosto pa preostanejo le ukrepi za povečanje poplavne odpornosti. Po klimatskih scenarijih se bodo povečevali

ekstremi (tj. več padavin in s tem večji pretoki in vodostaji), hkrati pa tudi dvig morske gladine. Na območju srednje in vzhodne Evrope naj bi se znatno povečale padavine v zimskem času (EEA, 2014), gladina morja pa se lahko do konca 21. stoletja dvigne tudi za 1 m (IPCC, 2013). V svetu se zaradi naraščajoče populacije vse bolj poselju-

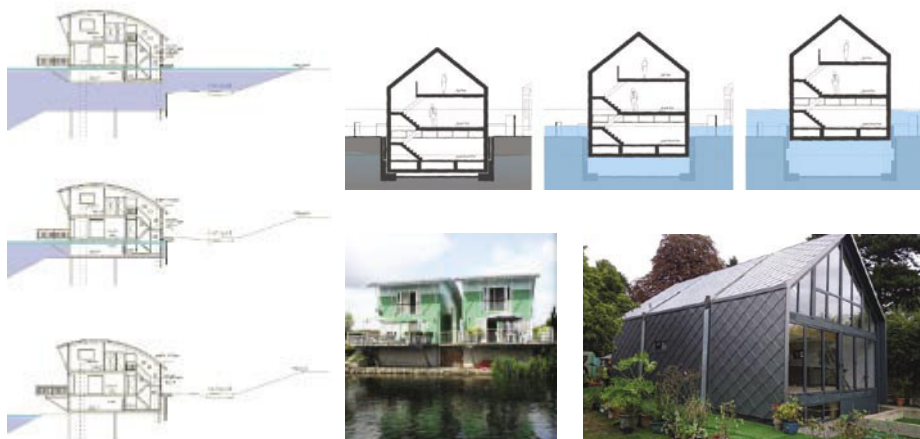
jejo poplavne in vodne površine. V prihodnosti torej lahko pričakujemo pogostejše visoke vode in povečanje števila ogroženih zgradb, kar skupaj povečuje tudi pričakovano poplavno škodo. V članku bo prikazano, kako bi lahko zmanjšali pričakovano škodo, saj je o protipoplavnih ukrepih (ti. PPU) že veliko napisanega.

2 • POVEČANJE ODPORNOSTI GRADENJ NA POPLAVNIH OBMOČJIH

Seveda bi bilo preventivno ravnanje, podprto z negradbenimi ukrepi, najboljše. Življenje pa prinaša vrsto izzivov pri novogradnjah in obstoječih gradnjah, kjer je iz različnih razlogov treba izboljšati varnost ljudi in objektov. V Sloveniji se že gradi protipoplavna infrastruktura in pripravljajo nekateri skupinski ukrepi. Pri individualnih ukrepih pa se uporabljajo:

- dvig uporabnih površin nad gladino visoke vode (do projektnega pretoka npr. Q100),
- suho tesnjenje objektov, tj. gradnja vodotesnih objektov (od Noetove barke naprej), ter
- mokro tesnjenje objektov, tj. izdelava vodo-odpornih objektov, kjer poplavitve objekta ne povzročijo čezmerne škode.

Z dvigom nad gladino projektnega vodostaja do izbrane meje preprečimo poplavljanje zgradbe, vendar pa ostanejo hidrodinamične obremenitve in sile plavja na spodnje elemente objekta in nevarnost spodjedanja temeljev. Dvignjen objekt je bolj izpostavljen tudi silam vetra, težje ga je vključiti v podobo soseke idr., predvsem pa zagotavlja poplavno varnost le do izbrane meje – pri višjih vodostajih bo tudi dvignjen objekt poplavljen. Pri suhem tesnjenju za objekt izberemo vodotesne materiale ali pa vodotesnost dosežemo z različnimi premazi in zaščitami, odprtine na objektu (vrata, vstop instalacij idr.) je treba opremiti z različnimi tesnilnimi elementi ali ureditvami, npr. kanalizacijskih cevi za zaščito pred povratnim tokom, preučiti je treba tudi težave z vzgonom (npr. na talne plošče). Ta tehnika zahteva dobro vzdrževanje in stalno pripravljenost, da vdor vode v objekt ne povzroči škode. Pri mokrem tesnjenju zgradb pa se uporabijo materiali, ki so vodo-odporni, insta-



Slika 1 • Sledenje amfibijske hiše dinamiki vodne gladine: levo sheme za amfibijsko hišo v Massbommelu na Nizozemskem; zgoraj desno sheme za amfibijsko hišo v Veliki Britaniji; spodaj desno oba realizirana projekta ((Manley, 2014), (Robarts, 2014), (Links To ..., 2015))

lacije so prilagojene (ali dvignjene) na poplavni vodostaj itd., predvidene pa so dejavnosti v objektu, ki se lahko začasno preselijo oz. so za vodo malo občutljive. V tem primeru se vodi dopusti vstop v objekt, ker je poskrbljeno, da je pričakovana poplavna škoda majhna (tj. sprejemljiva). Ta pristop je pogosto cenejši od dvigovanja objekta ali suhega tesnjenja, vendar pa ne zagotavlja varnosti pri vodostajih, višjih od projektnih, in zahteva odpravo posledic po poplavah.

Zanimivo rešitev predstavlja gradnja amfibijskih objektov, ki ob vodilih sledijo dinamiki vodostajev pri rednih ali občasnih poplavah oz. sledijo nihanju stoječih voda. Pri tem se postavlja vprašanje, ali gre za objekt, fiksno povezan s tlemi (po ZGO), ali morda za plovilo.

Bistvena lastnost amfibijske zgradbe je pravilno razmerje med vzgonskimi silami in

nosilnostjo plovnega temelja, kar določa dovoljeno maso objekta, ki naj bo porazdeljena centrično zaradi ohranjanja horizontalnosti. Cilj je, da zgradba ostane nepoplavljena in se po umiku poplavne vode vrne v prvotno lego, zato ne zahteva odprave posledic po poplavah. Da bi lahko bila v času poplave v uporabi, je treba primerno poskrbeti za komunalno opremljenost in seveda za dostopnost (npr. s čolnom). Primerna je za razlivna območja ob vodotokih, za kraška polja (kjer se voda zadržuje dalj časa) in za območja, kjer se teren poseda. Že izvedeni primeri v svetu omogočajo dvigovanje za nekaj metrov.

Amfibijski objekt sestoji iz lahke zgradbe na plovnem temelju, vertikalnih stabilizacijskih vodil in naprav za priključitev hišnih inštalacij na javno komunalno infrastrukturo.

3 • ZASNOVA AMFIBIJSKIH STAVB IN RAZLIČNI PROJEKTI PO SVETU

Gradnja amfibijskih stavb je že dlje prisotna na Nizozemskem in v Združenih državah Amerike. Izkazali so odlično delovanje, tj. sledenje dinamiki vodostajev, in pokazali, da lahko brez posledic funkcionirajo med poplavo in po njej. V zadnjih šestih letih se je gradnja počasi začela širiti tudi v Veliko Britanijo ter v države jugovzhodne in južne Azije. Avgusta 2015 so

na Tajske organizirali prvo mednarodno konferenco o amfibijski arhitekturi, načrtovanju in inženirstvu. S prikazom take gradnje ne podpiramo pozidave poplavnih območij, prikazujemo le možen pristop na območjih srednje in majhne poplavne nevarnosti, kjer sicer gradnja v Sloveniji ni prepovedana, je pa tako mogoče zmanjšati pričakovano poplavno škodo.

3.1 Vrste plovnih temeljev

Za izgradnjo amfibijske stavbe je ključen ustrezni tip plovnega temelja, najpomembnejša naloga pa izračun plovnosti. Temelj mora imeti zadosten vzgon, hkrati pa ustrezno prevzeti hidrodinamične sile poplavne vode in plavja. Uporabljeni materiali so lahko zelo različni, pogosto pa se pojavlja EPS, to je ekspanzirani polistiren (znan tudi kot stiropor), ki ne razpada in zagotavlja trajnost, zaradi zaprte celične strukture pa je vodotesen. EPS-

jedro torej zagotovi nepotopljivo platformo, kar jamči, da se objekt ne bo potopil ((EPS, 2015), (FlexBase, 2013)). Oglejmo si nekaj rešitev:

- leseno ogrodje, polnjeno s praznimi sodi (kovinskimi in plastičnimi), plastenkami ali EPS-bloki (ekspandirani polistiren). Gre za dokaj trpežne in poceni materiale, vendar zmorejo le manjše obtežbe, npr. manjše hiše oz. lahke objekte, največ v jugovzhodni in južni Aziji.
- jekleni temelj – jeklo omogoča lažje oblikovanje, ima visoko natezno trdnost, je odporno proti vremenskim vplivom in lahko popravljivo. Tak ponton je skoraj nepotopljiv. Čeprav so začetni stroški od 7 % do 8 % manjši kot pri betonskih konstrukcijah, so stroški vzdrževanja veliko večji, temelji imajo krajšo dobo trajnosti. Problem sta korozija na zunanji strani in kondenzacija v notranjosti temelja. Potrebni so katodna zaščita ter na vsakih nekaj let pregled in vzdrževanje, kar poveča končne stroške (Concrete vs Steel, 2015).
- kompozitni temelj – material je lahko celo bolj nosilen od betona ali jekla, ni nevarnosti korozije, je zelo lahek in obstojen, kemično odporen in skoraj ne zahteva vzdrževanja. Omogoča svobodo pri oblikovanju, žal pa visoka cena pogosto odvrne investitorje (Balance d'eau, 2015).
- jekleno ogrodje, polnjeno z EPS-bloki – je najbolj značilno v Louisiani. Omogoča enostavno in hitro gradnjo, ki je cenovno zelo ugodna. Za slabosti navajajo vizualno motečo konstrukcijo, nosi lahko manjše obtežbe, problem pa predstavlja še izpostavljenost EPS, ki potrebuje zaščito pred toplimi in gorivi, npr. v poplavni vodi (Fenuta, 2010).
- EPS-jedro, obrizgano z betonom, ojačanim s steklenimi vlakni – vlaknasti armiranobetonski ovoj poveča trajnost temelja, izboljša udarno odpornost (plavje ipd.) ter zmanjša skupno težo v primerjavi z drugimi skeleti, kar je pomembno dejstvo pri projektiranju.

- armiranobetonski temelj z EPS-polnilom – jedro iz EPS se obda z armiranobetonskimi stenami. Gre za patentirano rešitev IMFS (International Marine Floatation Systems), ki razvija betonske plavajoče konstrukcije, pri katerih je potrebna manjša debelina betonskih sten kot pri votlih temeljih. Glavne prednosti so dobra toplotna izolativnost, majhno vzdrževanje in večja nosilnost – gradimo lahko večje platforme, slabost pa so višji stroški materiala kot pri votlih temeljih (IMFS, 2013).
- votel, škatlasti armiranobetonski temelj – je najbolj razširjena oblika plovnega temelja, ki lahko služi tudi za klet, prostor za tehnične infrastrukturne naprave ali celo bivalni prostor. Pri izdelavi betonske školjke je bistveno, da postane vodotesna. Z zadostno debelino sten zagotovimo vodotesnost temelja in preprečimo korozijo armature – v večini primerov se izdeluje od 23 do 25 cm debela stena. Glavne prednosti votlega armiranobetonskega temelja so: je relativno poceni, trden, trajen (dolga doba trajnosti, tudi do 100 let), odporen proti udarcem (plavje ipd.) in vremenskim vplivom, ne potrebuje vzdrževanja in znižuje težišče stavbe, kar poveča stabilnost plavanja in zniža končne stroške. Omejitve pa prinašata kontinuirana vgradnja betona (tj. velikost škatle) in slabša natezna trdnost ostenja ((Concrete vs Steel, 2015), (Build It Bigger, 2014), (Project review, 2011)).

Kadar plovni temelj lega na teren, vizualno izstopa, vhod v zgradbo pa je dvignjen od tal za višino temelja. Zlasti estetski vidik projektante vodi k rešitvam, kjer je temelj skrit v tla.

3.2 Vodila in stabilizacijski stebri

Običajno dva ali štirje vertikalni stebri služijo za vodila pri dvigovanju zgradbe ob poplavi in za ohranjanje lokacije. Izbira materialov in zasnova konstrukcije (vpetost, nosilnost) naj

zagotovita stabilnost zgradbe pri vertikalnem dvigu objekta na projektno višino (običajno nad vodostaj 100-letne vode) ter omejita horizontalne pomike in nagibanje objekta. Pogosto jih zaradi estetike vgradimo oz. zakrijemo s fasado zgradbe.

3.3 Priključki na javno komunalno infrastrukturo

Zaradi vertikalnih pomikov potrebujejo amfibijski objekti dovolj dolge fleksibilne instalacijske vode, ki so običajno položeni ob vodilih na vertikalnih stabilizacijskih stebrih tako, da omogočajo neovirano uporabo objekta med poplavo. Njihova izvedba je draga, problem pa včasih predstavlja pridobitev soglasja za priključitev na lokalno gospodarsko infrastrukturo. Tedaj se uporabijo samotestni, samodejno odklopni komunalni priključki, zgradba pa se oprepi z lastno strojnico in rezervoarji (pitna/odpadna voda), z električnim generatorjem ipd, kar je pač za uporabo zgradbe potrebno oz. zaželeno.

3.4 Zasnova lahke zgradbe s centrično obtežbo

Nosilnost plovnega temelja že določa možno obremenitev, tj. maso temelja in zgradbe ter koristno obtežbo zgradbe. Zato se uporabljajo lahki gradbeni elementi (les, aluminij, jeklo, kompoziti), lahka konstrukcija zgradbe na težjem plovnem temelju pa poveča stabilnost plavanja. Skrbna izbira materialov glede na različne vplive okolja zmanjša obseg oz. strošek vzdrževanja.

Pri arhitekturni zasnovi je treba paziti na razmerja mas kot tudi na porazdelitev masivnejših elementov v zgradbi (npr. stopnišče, sanitarije, skladišča ipd.), da celotna obremenitev deluje centrično na plovni temelj. Pri nesimetrični vertikalni obtežbi se pojavi nagibanje zgradbe, s tem pa pojav dodatnih horizontalnih sil na vertikalna vodila. Dosedanji primeri kažejo, da



Slika 2 • **Blooming Bamboo Home (Vietnam); plovno telo iz plastenk in bambusa ter prototip LIFT House (Bangladeš) ((Davis, 2013), (English, 2009), (Prosun, 2011))**

pri plovnih temeljih, ki so več kot dvakrat težji od zgradbe, centrična porazdelitev obtežbe v zgradbi ni tako pomembna, če pa je to razmerje manjše, je treba centričnost doseči.

3.5 Primeri amfibijskih objektov po svetu

Eno od organiziranih oblik pomoči revnejšim prebivalcem na poplavnih območjih predstavlja vietnamski prototip Blooming Bamboo Home, kjer kot plovni temelj uporabljajo prazne sode, učvrščene s konstrukcijo iz bambusa, štiri jeklena vodila pa omogočajo vertikalni dvig do 1,5 m (Davis, 2013). Naprednejši pristop prinaša prototip LIFT House v Bangladešu, pripravljen za cenena barakarska naselja v Daki, z nizkimi stroški vzdrževanja, kjer zgradba iz bambusa stoji na plovnem telesu iz bambusovega paličja in recikliranih plastenk. S povezavo dveh prebivališč je zasnovano, da se med njima uredi prostor za sanitarije, kuhinjo oz. druge instalacije ((English, 2009), (Prosun, 2011)).

Za tajsko državno stanovanjsko upravo (National Housing Authority, NHA) je bil zgrajen prvi pilotni projekt amfibijske hiše leta 2012. Plovni temelj iz jeklenih pontonov in EPS-polnila je bil zgrajen v tovarni ter na lokaciji vgrajen v zgrajeno jamo. Vodila omogočajo, da se hiša lahko dvigne do 3 m. Priključena je na javno omrežje, mogoče pa je tudi vgraditi rezervoarje za pitno vodo in deževnico ter generator, sončne celice ali vetrne turbine ((A Site-Specific Experiment, 2011), (Tang, 2015)). Tudi v ZDA so zasnovali amfibijsko hišo (Noetovo barko, Noah's Ark) v Lakeviewu, New Orleans, ki jo sestavljajo votla jeklena školjka (kot plovni temelj višine 90 cm), na kateri stoji lesena zgradba, ter na vogalih hiše štirje nosilni leseni vertikalni stebri, ki so hkrati vodila (English, 2009).

Drugačne materiale imajo amfibijske hiše na jezeru Raccourci Old River v Louisiani, s plovnim temeljem iz jeklenega ogrodja, ki obdaja EPS-bloke, in štirimi vertikalnimi jeklenimi vodili na vogalih hiše, ki so nadaljevanje zabitih pilo-



Slika 3 • Amfibijska hiša Noah's Ark v južni Louisiani (levo), tajski pilotni projekt amfibijske hiše v vasi Ban Sang (desno) ((English, 2009), (Tang, 2015))

tov. Te hiše se uspešno uporabljajo že več kot 30 let (English, 2009). Po orkanu Katrina je bila leta 2006 v Louisiani ustanovljena fundacija za razvoj plovnih temeljev (Buoyant Foundation Project, BFP), da bi pomagali sanirati stanje v New Orleansu. Cilj je na naslednje poplave pripraviti že obstoječe louisianske tradicionalne hiše (t. i. hiše shotgun). Zato pod obstoječe hiše vgradijo jekleno ogrodje in plovne (EPS) bloke kot plovni temelj in štiri vertikalna teleskopska jeklena vodila. Stroški preureditve znašajo od 10.000 do 25.000 USD in so nižji od stroškov dviga objekta nad gladino poplavne vode ((Anderson, 2014), (English, 2009)). Oktobra 2009 so v New Orleansu zgradili prvo amfibijsko hišo (FLOAT House), ki je pridobila

uporabno dovoljenje. Doslej so jih zgradili že več kot 100, načrtujejo jih še več. Fundacija Gradimo pravilno (Make it Right) se posveča gradnji cenovno dostopnih in naravnim danostim prilagojenih hiš za prebivalce na z orkanom Katrina najbolj prizadetem območju New Orleansa, Lower Ninth Ward. Imajo plovni temelj iz EPS-jedra, obrizgan z betonom, ojačenim s steklenimi vlakni, ter vgrajene že vse instalacije in potrebne rezervoarje, hiša pa je priključena na javno infrastrukturo. Dve jekleni vodili na obeh krajših straneh hiše sta sidrani v betonsko temeljno ploskev, ki je dvignjena od tal, a je



Slika 4 • Obstoječi hiši v južni Louisiani so dodani plovni temelj in vodila (levo); desno je razvidno, da je amfibijska hiša prestala poplavo nepoškodovana v primerjavi s poplavljeno hišo, grajeno na terenu ((English, 2009), (English, 2015))



Slika 5 • Dva pogleda na FLOAT House ((Float House, 2012), (Float House, 2009))



Slika 6 • Povezani amfibijski hiši v Maasbommel, levo in desno, amfibijska hiša Formosa ((Floating Homes, 2015), (Formosa, 2015))

pritrjena na pilote, ki segajo 14 m globoko v tla. Zasnova omogoča, da se hiša v primeru poplav lahko dvigne za 3,6 m in ob tem prenese močne orkanske vetrove. Slabost objekta pa je, da morajo prebivalci ob nastopu ujme hišo zapustiti ((Anderson, 2014), (English, 2009), (Float House, 2012)).

Amfibijsko gradnjo poznamo tudi v Evropi. V Maasbommel na Nizozemskem so leta 1998 na reki Maas začeli gradnjo prvega projekta amfibijske gradnje in dokončali gradnjo 32 hiš leta 2005. Plovni temelji so votle armiranobetonske škatle, približno 2 m visoke in težke okoli 70 t, ki stojijo na šestih betonskih pilotih v izkopenem doku v brežini reke oziroma na nasipu, njihova

notranjost pa služi za klet. Vodotesnost temelja zagotavljajo 23 cm debele stene. Hiše so povezane v pare, ki jim za vodili služita dva vertikalna jeklena okvira, ob katerih hiše splavajo na mestu, ko voda naraste za več kot 70 cm, in se v primeru večjih poplav lahko dvignejo tudi do 5,5 m. Priključki na javno infrastrukturo so zaščiteni v fleksibilnih cevih in se dvigajo s tal doka ob vertikalnih stebrih do hiše. Hiše so uspešno prestale večjo poplavo januarja 2011 ((Manley, 2014), (Project review, 2011)).

Formosa, leta 2014 zgrajena prva amfibijska hiša v Veliki Britaniji, stoji 10 m od reke Temze v mestu Marlow. Najprej so zgradili pravokotni dok, v katerem se ob poplavi ob štirih jeklenih

vodilih vertikalno giblje votla armiranobetonska školjka, kot 150 ton težek plovni temelj, ki služi za bivalni prostor in prostor za infrastrukturno opremo. Možen je dvig objekta do 2,5 m, čeprav je projektni vodostaj pri stoletni vodi 1,8 m nad terenom. Enonadstropna lesena konstrukcija ima maso 70 ton, fleksibilne cevi s priključki, ki se raztegnejo do 3,0 m, pa omogočajo normalno uporabo v času poplave ((Grand Designs, 2014), (Robarts, 2014)). Čeprav se amfibijska gradnja vse bolj širi po svetu, ostaja še veliko odprtih vprašanj v zakonodaji kot tudi pri dvomih različnih udeležencev o takšni gradnji in primernosti tega načina za zmanjšanje pričakovane poplavne škode.

4 • STANJE V SLOVENIJI IN MOŽNA GRADNJA AMFIBIJSKIH STAVB

Prvo vprašanje, ki je z amfibijskimi zgradbami povezano, izvira iz določil Zakona o graditvi objektov, po katerih se sklepa, da je amfibijska stavba gradbeni objekt, saj je povezana s tlemi, in torej ni plovilo, čeprav bi lahko izpolnila tudi predpisane kriterije za plavajočo napravo pri pooblaščenem klasifikacijskem zavodu. V nadaljevanju bomo privzeli, da gre za gradbeni objekt, zato velja, da je gradnja mogoča le na zazidljivi parceli, z upoštevanjem prostorskih aktov in drugih predpisov.

Cilj amfibijske gradnje je s pravilno gradnjo čim bolj zmanjšati pričakovano škodo na območjih poplavne nevarnosti, kjer je gradnja sicer dovoljena. Torej so izhodišče predpisi s področja voda, ki pa jih običajno dopolnjujejo še drugi pogoji, kadar bi bil objekt grajen na

območju varovanja narave, kulturne dediščine, okolja idr. Zakon o vodah določa, da gradnja objektov ni mogoča na območju vodnih in priobalnih zemljišč ali na območju presihajočih jezer. Vendar pa se amfibijska gradnja lahko izvede na (zelo obširnih) preostalih poplavnih območjih, kadar se pridobi vodno soglasje, ki ga izda Direkcija RS za vode, če poseg ne bo povečal poplavne ogroženosti in nima vpliva na vode in vodni režim.

Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja (Uredba, 2008), namreč določa, da je na območju majhnega razreda poplavne nevarnosti dovoljena gradnja enostanovanjskih stavb ob

upoštevanju pogojev iz vodnega soglasja. Na območju srednjega razreda poplavne nevarnosti pa je mogoča gradnja le na območju strnjeno grajenih stavb enakovrstne namembnosti v obstoječih naseljih, kadar je mogoče s predhodno izvedenimi omilitvenimi ukrepi in v skladu s smernicami ali pogoji vodnega soglasja zagotoviti, da vpliv načrtovanega posega v prostor ni bistven. Zato bi bilo smotno graditi tako, da bi bila pričakovana poplavna škoda čim manjša – na enega od načinov, opisanih v drugem poglavju.

V Sloveniji še ni grajene amfibijske stavbe. Za prvi poskus bi lahko štel postavitev kioska na plovno podkonstrukcijo na poplavni ravnici Krke pri Velikih Malencah, ker je kiosk, fiksiran na teren, Krka poplavljal. Lastnik je preurejeni kiosk uradno registriral kot plavajočo napravo, vendar se gradbeni inšpektor s tem ni strinjal in je izdal odločbo o rušenju (Zore, 2012). Primer pokaže, da bo potrebna dopolnilna



Slika 7 • Območje razreda srednje poplavne nevarnosti (svetlo modra barva) ter velike poplavne nevarnosti (temno modra) na Ljubljanskem barju (Atlas okolja, 2015)

razlaga Zakona o graditvi objektov ali dodatna ureditev amfibijske gradnje v predpisih.

Glede na prikazane razrede poplavne nevarnosti na Ljubljanskem barju, ponavljajoče se poplave in z monitoringom ugotovljeno posedanje barja na eni strani in dejstva, da je še vedno dovoljena gradnja v zgoraj opisanih primerih, smo preverili, ali bi bila gradnja amfibijske stavbe (enodružinske hiše) skladna s predpisi in prostorskimi akti. Za primerno zazidljivo parcelo v območju

poselitve, kjer je možna zgostitev pozidave oz. nadomestna gradnja, je bilo ugotovljeno, da je mogoče amfibijsko stavbo umestiti v prostor v skladu s predpisi in prostorskim aktom (OPN MOL, Uradni list RS, št. 78/10) ter jo ustrezno dimenzionirati. Testna stavba je bila zasnovana s plovnim temeljem iz armirano-betonske školjke in EPS-polnila, ki nosi lahko leseno hišo, katere fasada zakriva štiri jeklena vodila. Mogoča bi bila izvedba s fleksibilnimi priključki na komunalno infrastrukturo ali

rešitev s samodejnim odklopom inštalacij in z lastno oskrbo v času trajanja poplave. Seveda tudi dodatna plovna ploščad za avtomobil ne bi predstavljala težave. Ker se Barje poseda in je zemljina slabo nosilna, je predvideno, da plovni temelj v obdobjih brez poplav naleže na zabite pilote, od katerih so na štiri pritrjena vertikalna vodila. Tehnično izvedljiva gradnja, ki upošteva prostorske in druge pogoje, pa potrebuje še družbeno sprejemljivost, da bi takšno gradnjo lahko izpeljali.

5 • SKLEP

Kot vidimo, je v Sloveniji še vedno mogoča gradnja stanovanjskih stavb na območjih poplavne nevarnosti, saj absolutna prepoved niti ne bi bila smotrna. Zato pa je treba »pametno graditi« tako, da bo čim manj pričakovane poplavne škode. Glavna prednost amfibijske gradnje je prilagajanje na poplavne vodostaje, zato ni vdora vode v objekt in v njem ne nastaja poplavna škoda. Na območju pogostejših poplav bi bilo zato primerno razmisliti o razmerju med dražjo investicijo v amfibijsko zgradbo in pridobljeno koristjo, tj. preprečeno škodo ob

vsaki poplavi. Z upoštevanjem lokalnih razmer, npr. smeri glavnih vodnih tokov, je mogoče stavbo pravilno umestiti in jo uporabljati tudi med poplavami, če je urejen dostop idr. Amfibijska zgradba, ki ne vpliva bistveno na odtocene razmere in nima škodljivih vplivov na okolje, lahko ohranja podobo in obstoječi arhitekturni značaj naselja, po poplavah pa tudi ni vir odpadnega materiala, kot ga običajno vidimo v naseljih po poplavah.

Uporaba amfibijskih zgradb v Sloveniji je v veliki meri odvisna od tolmačenja predpi-

sov in sprejemljivosti take gradnje pri strokovnjakih, upravah in posameznikih. Tudi tu velja Shakespearova misel: »Sama po sebi ni nobena stvar ne dobra ne zla, tako jo naredi šele naša sodba.« Raznolikost (nižinskih) slovenskih pokrajin pokaže, da so v skladu s predpisi zazidljiva še obsežna poplavna območja, zato so tudi možnosti amfibijske gradnje razmeroma velike. Izvedba infrastrukturnih protipoplavnih državnih ukrepov namreč številnim občanom na območjih poplavne nevarnosti sploh ne bo pomagala, zato je treba razmišljati tudi o individualnih protipoplavnih ukrepih. Eden takih samozaščitnih ukrepov je predstavljen, ne ve pa se, ali bo v slovenskem prostoru tudi sprejemljiv.

6 • LITERATURA

- A Site-Specific Experiment, Site-Specific, WordPress, <https://asitespecificexperiment.wordpress.com/2011/10/23/%E0%B8%9A%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%AA%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B8%AA%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B8%9A%E0%B8%81-%E0%B9%82/>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2011.
- Anderson, H. C., Amphibious Architecture - Living with a Rising Bay, Master Thesis, California Polytechnic State University, Faculty of Architecture, San Luis Obispo, 20-27, <http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2318&context=theses>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2014.
- Atlas Okolja, Agencija RS za okolje, http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso, pridobljeno 2. 10. 2015, 2015.
- Balance d'eau: Construction system, Balance d'eau, <http://www.balancedeau.nl/en/construction-system>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2015.
- Build It Bigger: Amsterdam Futuristic Floating City, Extreme Engineering, You Tube, <https://www.youtube.com/watch?v=Es74LezQUCs>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2014.
- Concrete vs Steel, Aquabase Construction, <http://www.aqua-base.co.uk/concrete.html>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2015.
- Davis, A., Blooming Bamboo Home by H&P Architects, Dezeen magazine, <http://www.dezeen.com/2013/09/25/blooming-bamboo-house-by-h-and-p-architects/>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2013.
- EEA, European Environment Agency, Precipitation extremes, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/precipitation-extremes-in-europe-2/assessment>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2014.
- English, E., Amphibious foundations and the Buoyant Foundation Project: Innovative strategies for flood-resilient housing, University of Waterloo, School of Architecture, Waterloo, 1-8, http://www.buoyantfoundation.org/pdfs/ECEnglish_ParisUFMpaper_nov2009.pdf, pridobljeno 2. 10. 2015, 2009.
- English, E., Flood Performance of Amphibious Housing, Buoyant Foundation Project, 9, <http://www.buoyantfoundation.org/pdfs/BFP%20Amphib%20vs%20PermStatElev.pdf>, pridobljeno 9. 9. 2015, 2015.
- EPS, Expanded Polystyrene, Technodinamica, <http://www.tecnodinamica.it/about-eps/>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2015.
- Fenuta, E. V., Amphibious Architectures: The Buoyant Foundation Project in Post-Katrina New Orleans, Master Thesis, University of Waterloo, Faculty of Architecture, Waterloo, 245. http://issuu.com/lizfenuta/docs/amphibious_architectures_thesis, pridobljeno 28. 10. 2015, 2010.
- FlexBase: Technology, FlexBase, <http://www.flexbase.eu/?lnd=uk&cd=3>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2013.
- Float House, Morphosis Architects Inc, <http://morphopedia.com/projects/float-house>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2012.
- Float House Is Big Easy Green, Forced Green, <http://www.forcedgreen.com/2009/10/float-house-is-big-easy-green/>, pridobljeno 28. 12. 2015, 2009.
- Floating Homes - 2 types, Inspiration Green, <http://www.inspirationgreen.com/floating-homes.html>, pridobljeno 28. 12. 2015, 2015.
- Formosa - The UK's First Amphibious House, Riba, <https://www.architecture.com/FindAnArchitect/ArchitectPractices/BACA/Projects/Formosa-TheUK39sFirstAmphibiousHouse-132908.aspx>, pridobljeno 28. 12. 2015, 2015.
- Grand Designs - River Thames: Floating House, Grand Designs, You Tube, <https://www.youtube.com/watch?v=gpH1-b2DV6E&feature=youtu.be>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2014.
- IMFS: Technology, Home, International Marine Flotation Systems Inc, <http://www.floatingstructures.com/>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2013.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Working Group I, Fifth Assessment Report, Cambridge University Press, 25-26, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf, pridobljeno 2. 10. 2015, 2013.
- Links To Other Amphibious Projects, Amphibious House on the River Thames, Buoyant foundation project, <http://www.buoyantfoundation.org/amphibious.html>, pridobljeno 28. 12. 2015, 2015.
- Manley, C. R., Floating Tybee: Planning and designing for rising seas, Master Thesis, Georgia Institute of Technology, College of Architecture, Georgia, 73-74 in 87-94, <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/52256?show=full>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2014.
- Project review: Floating Homes 'De Gouden Kust'. Boiten Raadgevende Ingenieurs BV, Factor Architecten BV, 1-14, <ftp://ftp.cs.kun.nl/pub/toinesmits/course%20material%20IWM%202011/project%20review%20Maasbommel%202011.pdf>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2011.
- Prosun, P., The LIFT House: An amphibious strategy for sustainable and affordable housing for the urban poor in flood-prone Bangladesh, Master Thesis, University of Waterloo, School of Architecture, Waterloo, 37-162, http://www.buoyantfoundation.org/pdfs/prosun_prithula.pdf, pridobljeno 2. 10. 2015, 2011.
- Robarts, S., Floods don't wash with this amphibious floating house, Gizmag, <http://www.gizmag.com/baca-architects-formosa-amphibious-floating-house/34346/>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2014.
- Tang, A., Thailand tests floating homes in region grappling with floods, Thomson Reuters, <http://www.reuters.com/article/2015/03/05/us-disaster-risk-architecture-idUSKBNOM100N20150305>, pridobljeno 2. 10. 2015, 2015.
- Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, Uradni list RS št. 89/08, 2008.
- Zore, J., Inšpektor zahteva rušenje čolna na Krki, Delo, <http://www.delo.si/novice/slovenija/inspektor-zahteva-rusenje-colna-na-krki.html>, pridobljeno 28. 12. 2015, 2012.

METODA STOHAŠTIČNIH KONČNIH ELEMENTOV V MODELIRANJU KONSTRUKCIJ

STOCHASTIC FINITE ELEMENT METHOD IN STRUCTURE MODELLING

asist. dr. Teja Melink, univ. dipl. inž. grad.

teja.melink@guest.arnes.si

Na Pristavi 51, 5290 Šempeter pri Gorici

prof. dr. Jože Korelc, univ. dipl. inž. grad.

joze.korelc@fgg.uni-lj.si

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK UDK 519.21:624.07

Povzetek | V članku je predstavljen stohastični pristop k reševanju mehanskih problemov. Stohastični pristop privzame, da spremenljivke nimajo določene vrednosti, temveč z neko verjetnostjo zavzamejo naključno vrednost, vrednosti pa se lahko naključno spreminjajo tudi preko prostorske domene problema. V okviru raziskovalnega dela smo razvili pristop za modeliranje in analizo stohastičnih procesov v okolju za metodo končnih elementov, ki se na ta način razširi v metodo stohastičnih končnih elementov. Posledično ima razvita metoda prednosti, ki odlikujejo metodo končnih elementov, kot sta na primer možnost uporabe za poljubne geometrijsko in materialno nelinearne probleme ter enostaven opis robnih pogojev problema. Glavna cilja pri razvoju metode sta bila zanesljivost in numerična učinkovitost. Računski časi razvitega pristopa za reševanje stohastičnih problemov so primerljivi z običajnim determinističnim pristopom k analizi konstrukcij, zaradi česar je prikazan stohastični pristop uporaben tudi za praktično projektiranje.

Ključne besede: stohastični pristop, verjetnost, metoda stohastičnih končnih elementov, perturbacijska metoda, občutljivostna analiza

Summary | The paper presents the stochastic approach in mechanical problems. In stochastic approach, the uncertainties of parameters involved in mechanical problems are taken into account. The developed stochastic approach is compatible with finite element method, thus allowing application to arbitrary geometrical and material nonlinear mechanical problems, simple manipulation with arbitrary input data and mesh topology. Further on, it is numerically efficient. Two main objectives of our work were the numerical stability and numerical efficiency of the methods. The calculation time of the presented stochastic approach is comparable to that of the deterministic approach to mechanical problems with the use of standard finite element method.

Key words: stochastic approach, uncertainty, stochastic finite element method, perturbation method, sensitivity analysis.

1 • UVOD

V inženirskih problemih imamo opravka z naključnostjo pri skoraj vseh parametrih problema. Naključno se spreminjajo lastnosti materiala, obtežba, geometrijske nepopolnosti,

korozija, poroznost in druge spremenljivke. To pomeni, da konkretna vrednost posameznih parametrov ni določljiva vnaprej, temveč je bolj ali manj naključna in se običajno naključno

spreminja tudi preko območja problema. Zaradi tega je stohastični pristop k modeliranju konstrukcij, ki upošteva, da vhodni parametri problema nimajo točno določenih vrednosti, temveč z neko verjetnostjo zavzamejo naključno vrednost na omejenem ali neomejenem območju, bolj realen v primerjavi s splošno uveljavljenim determinističnim pristopom, pri

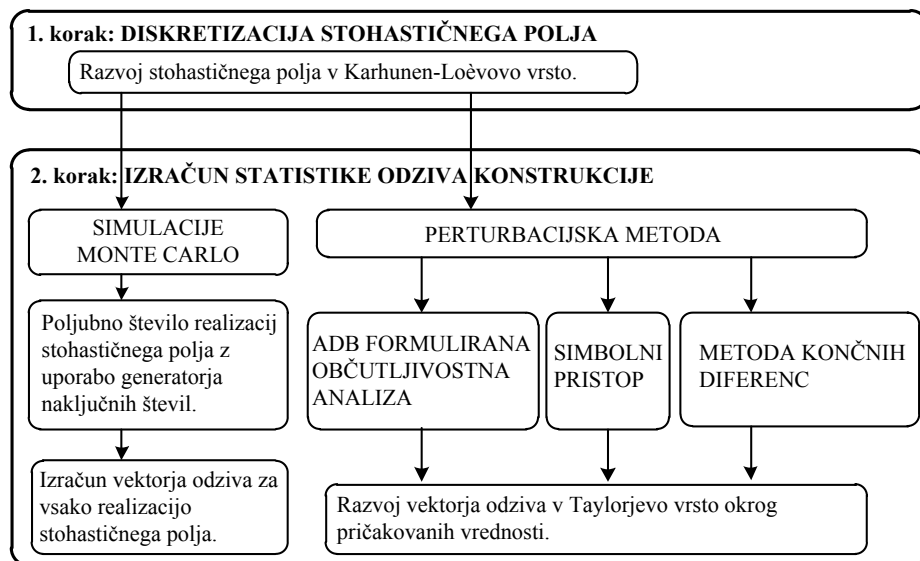
katerem ima vsak vhodni parameter točno določeno (determinirano) vrednost. Kljub temu je stohastični pristop le redko uporabljen v praksi, saj upoštevanje naključnosti pojavov bistveno poveča numerično zahtevnost in kompleksnost problema. Zaradi tega se v inženirski praksi večinoma uporablja enostavnejši, deterministični pristop, vse možne scenarije zaradi stohastične narave pojavov pa se poskuša zajeti z upoštevanjem ekstremov ali srednjih vrednosti stohastičnih parametrov. Vendar so študije z bolj realističnim upoštevanjem stohastičnosti pokazale, da deterministični pristop kljub uporabi ekstremnih vrednosti parametrov, ki so na videz na varni strani, ne zajame nujno najslabšega možnega scenarija, ki se lahko zgodi zaradi naključne kombinacije posameznih parametrov. Poleg tega deterministični pristop ne vodi do optimalnih dimenzij inženirskih konstrukcij. Zaradi tega je dolgoročno korak v smeri stohastičnega modeliranja neizogiben. V raziskovalnem delu smo se zato posvetili razvoju avtomatizacije stohastičnega pristopa k modeliranju konstrukcij. Glavni cilji pri tem so bili:

- računski čas naj bo primerljiv determinističnemu pristopu,
- metoda naj bo robustna in
- sledi naj standardni tehnologiji končnih elementov.

2 • REPREZENTACIJA STOHAŠTIČNEGA POLJA

Vrednost spremenljivk, ki se stohastično spreminjajo po prostoru, se lahko opiše s stohastičnim poljem. V raziskavi smo se omejili na stohastična polja mehanskih spremenljivk z Gaussovo robno porazdelitvijo, vendar se predstavljen način obravnave stohastičnega polja lahko uporabi tudi za druge porazdelitve ali spremenljivke, le z nekaj dodatnimi računskimi operacijami.

Stohastično polje je določeno s pričakovano vrednostjo in kovariančno funkcijo (Ghanem, 2003). Kovariančna funkcija določa korelacijo vrednosti, tj., koliko so vrednosti naključne spremenljivke v posameznih točkah v prostoru med seboj povezane. Velika korelacija polja pomeni, da se vrednosti naključne spremenljivke preko prostora zelo malo spreminjajo, medtem ko pri majhni korelaciji vrednosti naključne spremenljivke preko domene močnejše variirajo. Za boljšo predstavbo, kaj korelacija pomeni, so na sliki 2 prikazane



Slika 1 • Procedura predlagane metode stohastičnih končnih elementov

Omenjene lastnosti so namreč ključne, da je stohastičen pristop uporaben tudi za praktično projektiranje konstrukcij. Pri razvoju formulacije stohastičnega pristopa smo iskali metode in numerične postopke, ki so kompatibilni z metodo končnih elementov, saj je le-ta najširše uporabljena metoda v inženirski praksi in ima zato takšen pristop možnost širše uporabe. Na ta način se metoda končnih elementov razširi v metodo stohastičnih končnih elementov.

Procedura metode stohastičnih končnih elementov je prikazana na sliki 1 in je v grobem sestavljena iz dveh korakov:

1. reprezentacije stohastičnega polja in
2. izračuna statistike odziva konstrukcije.

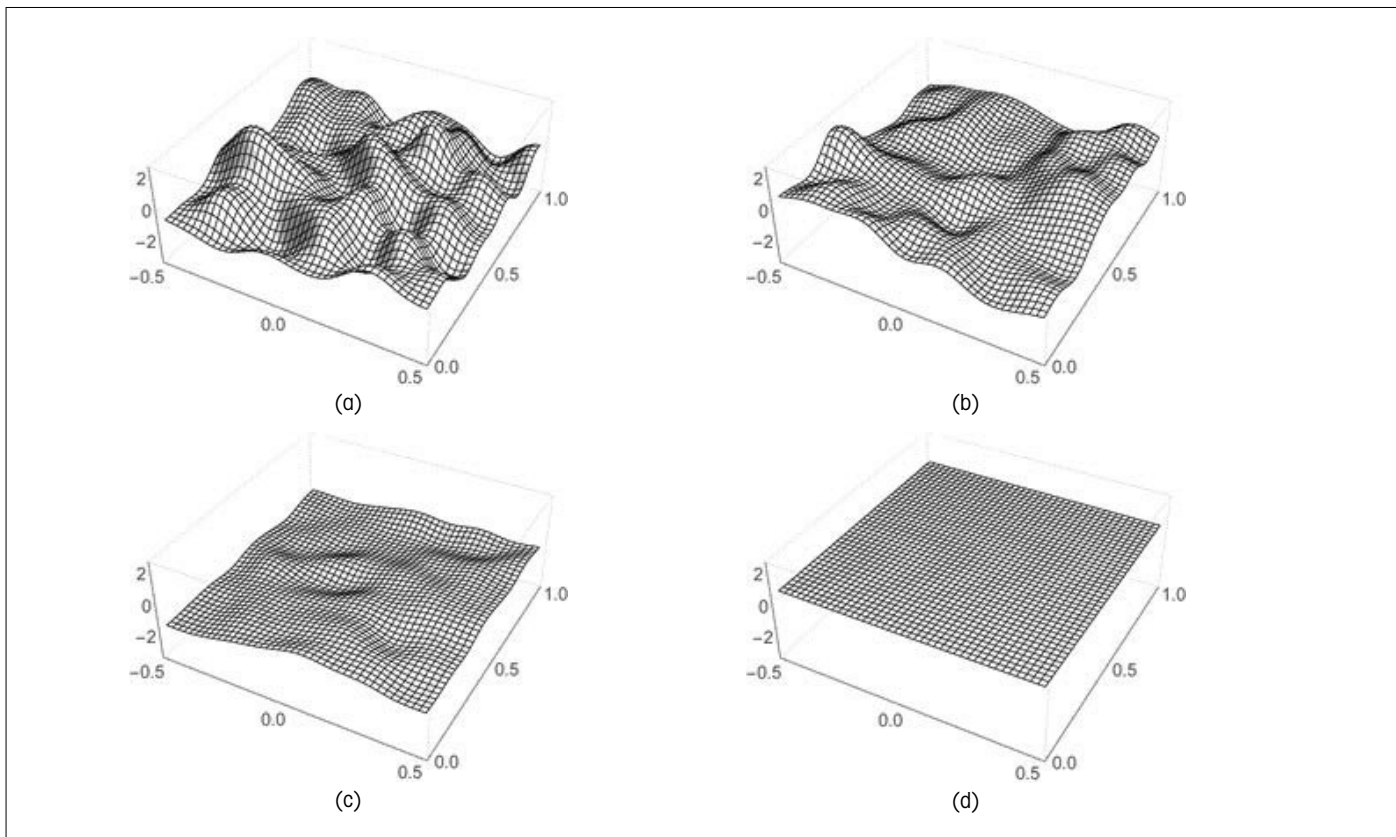
V nadaljevanju je predstavljena razvita avtomatizacija stohastičnega pristopa za vsak korak posebej. Pristop in postopki so predstavljeni na kratko, za podrobnejši opis glej (Melink, 2014b).

membam, ki so vezane na kristalno strukturo materialov.

Za opis koreliranosti spremenljivk mehanskih problemov se običajno uporablja eksponentna kovariančna funkcija v obliki

$$C(x_1, x_2) = \sigma^2 e^{-\frac{\|x_2 - x_1\|}{l_c}}, \quad (1)$$

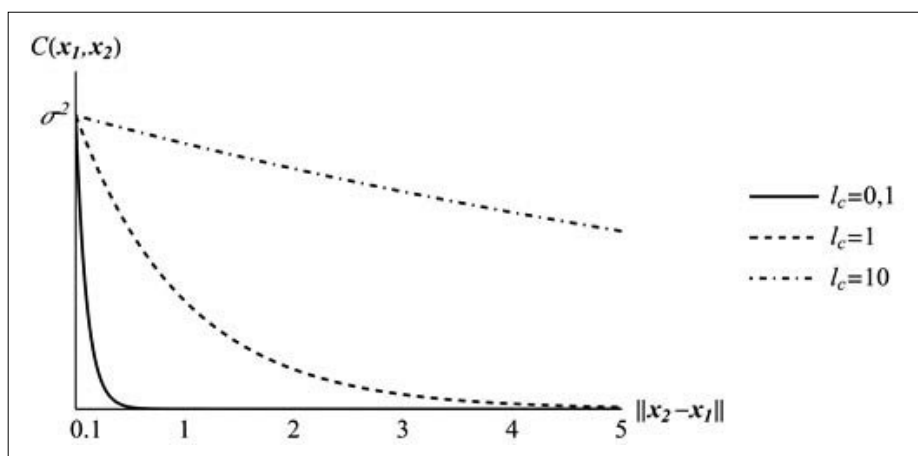
kjer sta x_1 in x_2 vektorja prostorskih koordinat poljubnih dveh točk na stohastičnem polju, σ^2 je varianca stohastičnega polja in l_c korelacijska dolžina, ki določa koreliranost stohastičnega polja. Eksponentna kovariančna funkcija in vpliv različnih korelacijskih dolžin na obliko kovariančne funkcije prikazuje slika 3. Ker je stohastično polje zvezna veličina, ga je treba za numerično obravnavo diskretizirati. Za opis in diskretizacijo stohastičnega polja smo izbrali Karhunen-Loèvevo (K-L) dekompozicijo, ki stohastično polje razvije v vrsto in predstavlja optimalno redukcijo v smislu potrebnega števila členov vrste (Ghanem, 2003). Poleg tega je K-L dekompozicija primerna tako



Slika 2 • Stohastična polja z različno korelacijo: (a) nizko, (b) srednje, (c) visoko in (d) neskončno korelirano stohastično polje

za stohastične procese, ki se spreminjajo preko prostorske domene problema, kot za stohastične procese, ki se spreminjajo skozi čas, ter za poljubno korelirane stohastične procese.

Stohastično polje označimo z $w(x, \theta)$, x je krajevni vektor, definiran preko območja prostorske domene, in q je dogodek iz prostora slučajnih dogodkov. Z razvojem stohastičnega polja v K-L dekompozicijo se stohastično polje zapiše kot vsoto pričakovane vrednosti tega polja $\bar{w}(x)$ in neskončne vrste, ki se jo v numeričnih simulacijah aproksimira z M prvimi členi



Slika 3 • Eksponentna kovariančna funkcija za tri različne korelacijske dolžine

$$w(x, \theta) = \bar{w}(x) + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_k} f_k(x) \xi_k(\theta) \approx \bar{w}(x) + \sum_{k=1}^M \sqrt{\lambda_k} f_k(x) \xi_k(\theta), \quad (2)$$

kjer so $\xi_k(\theta)$ normirane nekorelirane slučajne spremenljivke (ki so v primeru Gaussovega slučajnega polja Gaussove spremenljivke z ničelno pričakovano vrednostjo in enotsko varianco), λ_k in $f_k(x)$ so lastne vrednosti in lastne funkcije, ki jih dobimo kot rešitev homogene Fredholmove integralne

enačbe 2. vrste. Ker za splošen primer analitična rešitev te enačbe ne obstaja, smo za numerično reševanje Fredholmove enačbe uporabili Galerkinovo metodo, ki reševanje te enačbe prevede na reševanje posplošenega problema lastnih vrednosti. Za ta korak smo razvili stohastične končne elemente in

predlagali nekaj izboljšav (npr. modifikacijo kovariančne funkcije), ki občutno skrajšajo računski čas in hkrati izboljšajo robustnost metode. Nekonsistentno modificirana

kovariančna funkcija namreč lahko privede do numerične nestabilnosti Galerkinove metode (Melink, 2014a).

Ko izračunamo deterministične člene λ_k in

$f_k(x)$ v izrazu (2) (slučajne spremenljivke ξ_k ostanejo neznanke problema), je prvi korak metode stohastičnih končnih elementov zaključen.

3 • IZRAČUN STATISTIKE ODZIVA KONSTRUKCIJE

Odziv konstrukcije označimo z $z(\xi_k)$ in predstavlja poljubno količino, na primer pomik v določeni točki, maksimalno napetost, plastični del deformacij v določeni točki, mejno nosilnost itd. Odziv z je odvisen od slučajnih spremenljivk ξ_k . V okviru izračuna statistike odziva konstrukcije so nas zanimala predvsem statistike nižjega reda, in sicer pričakovana vrednost in standardna deviacija odziva. Za izračun odziva stohastičnih problemov smo uporabili perturbacijsko metodo in simulacije Monte Carlo.

Metoda Monte Carlo je bila v raziskavah izbrana predvsem z namenom preveriti rezultate razvite formulacije perturbacijske metode. Metoda Monte Carlo je zaradi svoje splošnosti primerna za poljubne stohastične procese, njena implementacija pa je dokaj trivialna. Pri tej metodi se vrednost stohastičnih spremenljivk ξ_k v izrazu (2) v vsaki simulaciji določi naključno (z generatorji naključnih števil, ki so vgrajeni v večino programskih jezikov). S temi vrednostmi se nato rešuje deterministični problem. Izvede se želeno število simulacij in v vsaki simulaciji beleži odziv konstrukcije. Statistiko odziva se nato določi s standardnimi statističnimi metodami. Posledica tega je, da je natančnost rešitve odvisna od števila simulacij, kar omejuje praktično uporabnost metode Monte Carlo predvsem pri nelinearnih problemih večjih dimenzij ali ko nas zanimajo repne vrednosti odziva (npr. pri analizi zanesljivosti).

Posvetili smo se predvsem razvoju numerično učinkovite formulacije perturbacijske metode poljubnega reda, ki za določitev statistike odziva zahteva samo eno direktno simulacijo odziva konstrukcije. Posledično je računski čas, potreben za izvedbo stohastične analize, neprimerno krajši v primerjavi z drugimi metodami za izračun statistik. Perturbacijska metoda odziv konstrukcije aproksimira z razvojem odziva v Taylorjevo vrsto

kjer je s_i red razvoja v vrsto za i -ti parameter in ${}^0\xi_i$ pričakovana vrednost i -tega slučajnega parametra. V primeru Gaussovega polja je ${}^0\xi_i = 0$. Red perturbacijske metode pomeni red Taylorjeve vrste, v katero se razvije odziv. Koeficienti Taylorjeve vrste v enačbi (3) so odvodi funkcije odziva. Ko je razvoj odziva v Taylorjevo vrsto izračunan, sledi izračun statistik odziva

$$\left. \frac{\partial^{s_1+s_2+\dots+s_M} z}{\partial \xi_1^{s_1} \partial \xi_2^{s_2} \dots \partial \xi_M^{s_M}} \right|_{\xi_i = {}^0\xi_i, i=1, \dots, M}$$

Te se izračuna z enostavnimi matematičnimi enačbami (glej npr. (Sudret, 2002)).

Natančnost perturbacijske metode je odvisna od nelinearnosti odziva in reda perturbacijske metode. V splošnem velja: višji ko je red perturbacijske metode, bolj natančen je opis odziva v njegovi širši okolici. Kljub temu je perturbacijska metoda višjega reda v literaturi zelo redko uporabljena. Vzrok je pomanjkanje numerično učinkovitih in natančnih algoritmov za izračun odvodov višjega reda funkcije odziva, ki so potrebni za izvedbo perturbacijske metode višjega reda. Aproksimacija odvodov s končnimi diferencami se izkaže v primeru večjega števila stohastičnih spremenljivk za drago metodo, v primeru višjih odvodov pa tudi za nezanesljivo metodo. Alternativa je analitična občutljivostna analiza, pri kateri poljubne odvode dobimo na podlagi ene same direktne simulacije odziva pri pričakovani vrednosti stohastičnih parametrov (Keulen, 2005). Dobljeni odvodi so natančni v okviru računske natančnosti računalnika. Vendar pa taka analiza zahteva izpeljavo višjih odvodov ravnotežnih enačb problema v zaključeni obliki, kar se izkaže v primeru splošnih materialno in geometrijsko nelinearnih problemov za zelo zahteven problem.

Za rešitev tega problema smo kombinirali numerični in simbolni pristop. V uporabljenem simbolno-numeričnem pristopu smo kombinirali: program za simbolno računanje Mathematica, avtomatski generator programske kode AceGen (Korelc, 2009b) in okolje za numerično modeliranje po metodi končnih elementov AceFEM (Korelc, 2009b). V AceGenu so vgrajene različne tehnike za optimiranje programske kode in tehnika avtomatskega odvajanja, ki omogoča izpeljavo poljubnih odvodov v zaključeni obliki. Dodatno smo formulacijo občutljivostne analize prvega reda z uporabo avtomatskega odvajanja (Korelc, 2009a) razširili za občutljivostno analizo (poljubnega) višjega reda. Z razvito formulacijo perturbacijske metode je za izračun odziva v izrazu (3) in statistik odziva potrebna ena sama izvedba mehanske analize. Rezultat vseh naštetih uporabljenih tehnik in formulacij je numerično zelo učinkovit postopek, posledično je možna izvedba perturbacijske metode višjega reda za neprimerno višje število uporabljenih členov K-L dekompozicije, kot je možno z drugimi metodami za izračun odvodov (npr. metodo končnih diferenc).

V zvezi z uporabo perturbacijske metode je treba opozoriti še na njeno omejitve, in sicer je metoda primerna za opis odzivov konstrukcij, ki se v okolici pričakovane vrednosti odziva obnašajo zvezno. V mehaniki konstrukcij to pomeni, da je uporaba perturbacijske metode omejena na primere, pri katerih se porušni mehanizem v odvisnosti od slučajnih parametrov ne spreminja.

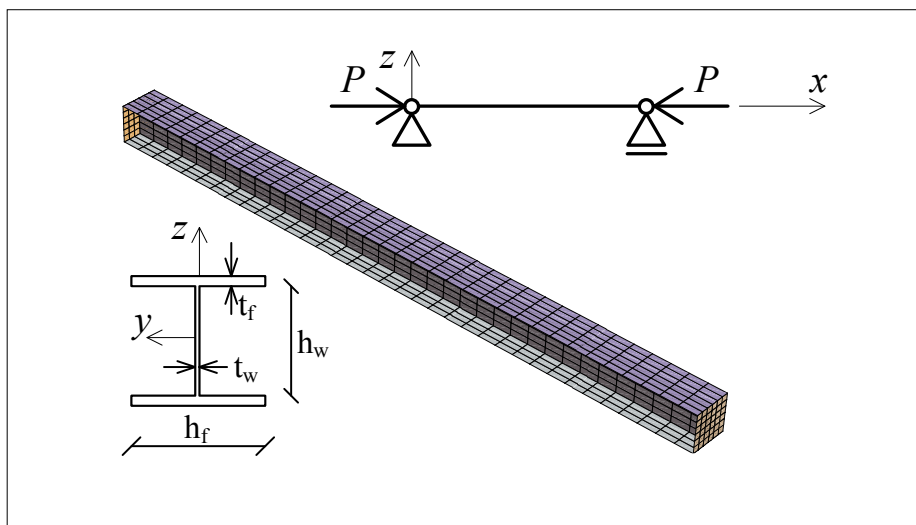
$$z(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_M) = \sum_{l_1=0}^{s_1} \sum_{l_2=0}^{s_2} \dots \sum_{l_M=0}^{s_M} \frac{1}{l_1! l_2! \dots l_M!} \left. \frac{\partial^{l_1+l_2+\dots+l_M} z}{\partial \xi_1^{l_1} \partial \xi_2^{l_2} \dots \partial \xi_M^{l_M}} \right|_{\xi_i = {}^0\xi_i, i=1, \dots, M} (\xi_1 - {}^0\xi_1)^{l_1} (\xi_2 - {}^0\xi_2)^{l_2} \dots (\xi_M - {}^0\xi_M)^{l_M}, \quad (3)$$

4 • PRIKAZ UPORABE RAZVITEGA PRISTOPA K STOHAŠTIČNI ANALIZI KONSTRUKCIJ

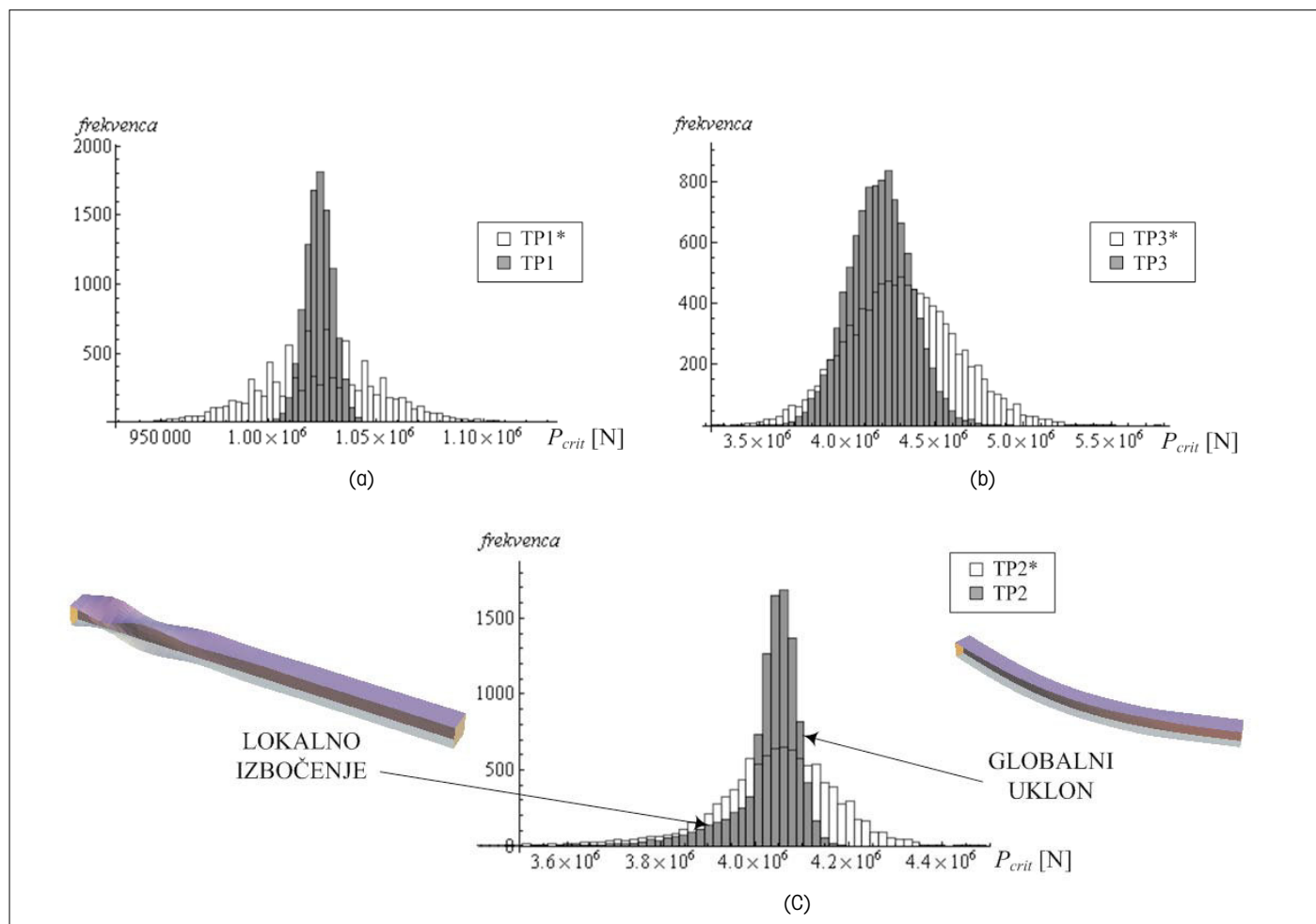
Natančnost in numerično učinkovitost razvite avtomatizacije metode stohastičnih končnih elementov smo preverili na različnih računskih primerih, ki smo jih izbrali tako, da pokrivajo vse osnovne primere, pomembne za inženirsko prakso. V računskih primerih so bili zajeti različna mejna stanja in porušni mehanizmi, in sicer statična analiza pri dani obtežbi, mejno stanje materiala in mejno stanje stabilnosti. V nadaljevanju bomo zaradi omejenosti prostora predstavili le nekaj primerov uporabe predstavljene metode stohastičnih končnih elementov.

4.1 Prikaz vpliva upoštevanja korelacije stohastičnega polja korozije

Korozija je kompleksen pojav razpadanja kovine, ki so mu bile v preteklosti namenjene že



Slika 4 • Primer tlačnega prostoležečega nosilca



Slika 5 • Histogram kritične uklonske sile za nosilec dolžine (a) 10 m, (b) 3 m in (c) 5 m

številne študije (npr. (Valor, 2007), (Tarantseva, 2010)). Zaključki vseh obravnavanih študij in raziskav so, da je korozija primerna za opis s stohastičnim poljem. Kljub temu v literaturi skorajda ni zaslediti študije, ki bi jo obravnavala na ta način. V izbranem računskem primeru smo pokazali, da sta razvita avtomatizacija za opis stohastičnih polj in izračun statistike odziva z uporabo metode končnih elementov primerna tudi za opis procesa korozije ter da upoštevanje korelacije stohastičnega polja (tj., da se sprememba debeline pasnic in stojine zaradi procesa korozije preko nosilca naključno spreminja) pomembno vpliva na odziv konstrukcije.

Obravnavan je jekleni prostoležeči nosilec s prečnim prerezom I-profila z dimenzijami stojine $h_w/t_w = 276/7$ mm in pasnice $h_f/t_f = 300/12$ mm, kot prikazuje slika 4. Za preprečitev lokalnih deformacij na mestu vnosa koncentrirane tlačne sile je nosilec na obeh straneh ojačan s čelno pločevino. Dolžine nosilcev so 10 m (v rezultatih oznaka TP1), 5 m (TP2) in 3 m (TP3). Nosilec je obremenjen s tlačno osno silo P .

Pasnici in stojino nosilca smo modelirali z 9-vozliščnimi lupinastimi hiperelastičnimi končnimi elementi. Za opis procesa korozije smo privzeli model jamičaste korozije. Proces korozije smo opisali s srednje koreliranim stohastičnim poljem spremembe debeline pločevine (korelacijska dolžina l_c je 300 mm). Stohastično polje spremembe debeline ima pričakovano vrednost $\mu = -1$ mm in standardno deviacijo $\sigma = 0,3$ mm. Upoštevanih je 40 členov K-L vrste. Poleg primerov z upoštevanjem korelacije stohastičnega polja je bil za vsak testni primer narejen še primer z enakomerno stanjšano debelino, kjer se je sprememba debeline v vsaki simulaciji izračunala po Gaussovi porazdelitvi, kar pomeni, da je stohastično polje neskončno korelirano. Ti testni primeri imajo poleg oznake TP še zvezdico (TP1*, TP2*, TP3*). Za vsak testni primer je bilo izvedenih 10.000 simulacij Monte Carlo, v katerih se je z linearizirano sta-

bilnostno analizo izračunala kritična uklonska sila P_{crit} .

V preglednici 1 je primerjava dobljenih rezultatov. Izkaže se, da v primeru 10 m nosilca kritična sila povzroči globalni uklon, pri 3 m nosilcu pa pride v vseh primerih do lokalnega izbočenja pločevin, zato sta histograma P_{crit} za ti dve dolžini nosilca simetrični (slika 5 (a) in (b)). V obeh primerih se razpršenost rezultatov za primer z upoštevanjem korelacije zelo razlikuje od primera, ko se privzame, da se debelina pasnic in stojine nosilca stanjša konstantno po celotnem nosilcu. Vpliv korelacije stohastičnega polja v primeru globalnega uklona nima bistvenega vpliva na pričakovano vrednost kritične sile, ta v obeh primerih znaša 1024 kN, izkaže pa se, da ima v primeru, ko je kritično lokalno izbočenje pločevin, korelacija pomemben vpliv na pričakovano kritično silo, ki v tem primeru znaša 4185 kN, medtem ko znaša pri simulacijah z enakomerno stanjšano debelino 4315 kN.

V primeru 5 m nosilca se izkaže, da v posameznih realizacijah stohastičnega polja nastopi globalna ali lokalna izguba stabilnosti. V simulacijah Monte Carlo, v katerih pride na neki dovolj veliki površini stojine ali pasnice nosilca do večjega stanjšanja debeline, je kritična sila, ki je potrebna za lokalno izbočenje pločevine, manjša od kritične sile, ki bi povzročila globalni uklon nosilca. Histogram P_{crit} je zaradi tega nesimetričen (slika 5 (c)). Asimetričnost je v primeru upoštevanja korelacije stohastičnega polja $-2,01$ kN in je v absolutnem smislu znatno večja kot v primeru modela nosilca z enakomerno stanjšanimi pločevinami, kjer znaša $-0,90$ kN. Temu primeru je pričakovana vrednost P_{crit} manjša v prvem primeru, in sicer 4032 kN, medtem ko je za TP2* 4041 kN. Za primerjavo: kritična sila 5 m nosilca, ki se mu debelina stojine in pasnic enakomerno stanjša za pričakovano vrednost, je 4051 kN in povzroči globalni uklon nosilca. Prikazani računski primer nam pokaže, da neupoštevanje korelacije stohastičnega polja lahko vodi do precej zgrešene ocene dejanske-

ga odziva konstrukcije. Pri oceni spodnjih mejnih vrednosti kritične sile je ta ocena v vseh primerih konservativna, medtem ko je ocena pričakovane vrednosti ob neupoštevanju korelacije lahko podcenjena ali precenjena, saj s tako poenostavljenim računskim modelom ni mogoče zajeti vseh možnih odzivov konstrukcije.

4.2 Nelinearna stohastična analiza korodiranega tlačno obremenjenega nosilca

Tudi v tem primeru smo obravnavali korodirani tlačno obremenjeni jekleni nosilec, vendar smo tokrat upoštevali tudi začetno geometrijsko nepopolnost nosilca ter odziv izračunali z nelinearno elastoplastično analizo. Nosilec ima prečni prežez I-profila IPE300. Dolžina nosilca je 5,25 m. Primerjalna vitkost nosilca, ki je enakomerno korodiran, je 2,0, zato je ne glede na stopnjo korodiranosti pričakovani porušni mehanizem globalni uklon. Pasnici in stojino nosilca smo modelirali z lupinastimi 9-vozliščnimi elastoplastičnimi končnimi elementi, ki upoštevajo velike deformacije.

Proces korozije smo modelirali s stohastičnim poljem spremembe debeline lupinastih končnih elementov, v K-L dekompoziciji smo ohranili 66 členov. V okviru perturbacijske metode drugega reda to pomeni, da je treba izračunati 2277 odvodov prvega in drugega reda mejnega obtežnega faktorja po slučajnih parametrih. Nosilec je bil na obeh koncih obremenjen s tlačno osno silo P . Zanimala nas je nosilnost konstrukcije v odvisnosti od slučajnih spremenljivk, s katerimi smo opisali proces korozije. Kritično silo, pri kateri se konstrukcija ukloni, smo označili s P_{crit} .

ADB formulirano perturbacijsko metodo drugega reda smo primerjali z metodo Monte Carlo, pri kateri je bilo izvedenih 5000 simulacij. Na sliki 6 sta prikazana naključna simulacija procesa korozije in deformiran (za boljše predstavo so deformacije na sliki 10-kratno povečane) nosilec v trenutku, ko je bila dosežena mejna obtežba za dane vhodne podatke in prikazano porazdelitev korozije.

	TP1	TP1*	TP2	TP2*	TP3	TP3*
Minimalna vrednost	996	929	3480	3258	3497	3232
Maksimalna vrednost	1119	1134	4183	4494	5783	5497
Pričakovana vrednost	1024	1024	4032	4041	4185	4315
Stand. deviacija	7	28	71	132	176	309
0,05 kvantil	1013	977	3885	3802	3893	3817

Preglednica 1 • Karakteristične vrednosti simulacij kritične sile za testne primere (v kN)

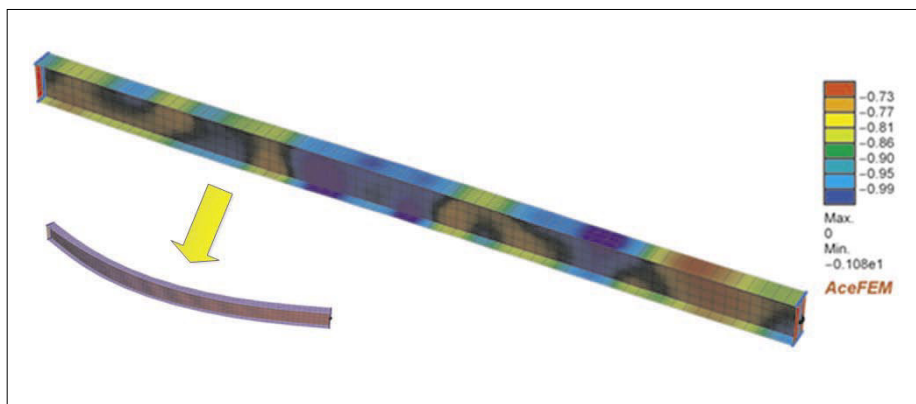
V preglednici 2 je prikazna primerjava rezultatov in računskih časov ADB formulirane perturbacijske metode in simulacij Monte Carlo. Rezultati obeh analiz se ujemajo. Primerjava računskih časov analiz pokaže, da je ADB formulirana perturbacijska metoda za izračun rezultatov potrebovala približno 25-krat manj časa v primerjavi s simulacijami Monte Carlo.

4.3 Geometrijska nepopolnost sinusoidnega panela

Tretji računski primer obravnava uporabo obojestransko vpetega sinusoidnega strešnega panela s stohastično spremenljivo amplitudo valov. Panel je na zgornji in spodnji strani obdan z jekleno pločevino, na sredini pa zapolnjen z izolacijsko peno. Geometrijsko idealen panel ima vzdolž abscisne osi obliko sinusoidne funkcije. Oblika in dimenzije panela in vsi parametri, ki so potrebni za analizo, so prikazani na sliki 7. Zanima nas vertikalni pomik v sredini panela v odvisnosti od stohastičnega polja geometrijske nepopolnosti.

Za modeliranje panela smo izbrali dvodimenzionalne 4-vozliščne hiperelastične končne elemente. Izolacijska pena v sredini panela je diskretizirana z mrežo 120×4 končnih elementov, za vsako izmed pločevin na obodu panela pa je uporabljena diskretizacijska mreža 120×2 končnih elementov.

Geometrijska nepopolnost panela je modelirana z enodimenzionalnim stohastičnim poljem amplitude valov h_{val} (definiranim vzdolž osi x). Privzeta je relativno visoka koreliranost stohastičnega polja ($l_c = 400$ cm), zato za ustrezno natančnost izračuna zadostujejo 4 člani K-L vrste. Odziv panela je izračunan s perturbacijsko metodo četrtega reda. Rezultat perturbacijske metode četrtega reda je razvoj odziva panela (v_m) v vrsto po enačbi (3), v kateri se upošteva le člani, katerih vsota potenc slučajnih spremenljivk ($l_1 + l_2 + l_3 + l_4$) je manjša ali enaka 4. Skupno je treba izračunati 69 odvodov ($\partial^{l_1+l_2+l_3+l_4} v_m / \partial \xi_1^{l_1} \partial \xi_2^{l_2} \partial \xi_3^{l_3} \partial \xi_4^{l_4}$). Odvode smo izračunali z ADB formulirano občutljivostno analizo in standardno metodo končnih diferenc. Rezultati obeh metod so se popolnoma ujemali. Primerjava računskih časov, potrebnih za izvedbo celotne stohastične analize z različnimi metodami, je prikazana v preglednici 3 in je močno v korist razviti ADB formulirani perturbacijski metodi. Za primerjavo: računski čas za izvedbo ene direktne analize problema je 0,11 s. Vsi izračuni so bili opravljeni v računalniku z Intelovim procesorjem i7-950 (3.07 GHz) z 12 GB RAM-a, 4 jedri in 8 nitmi.



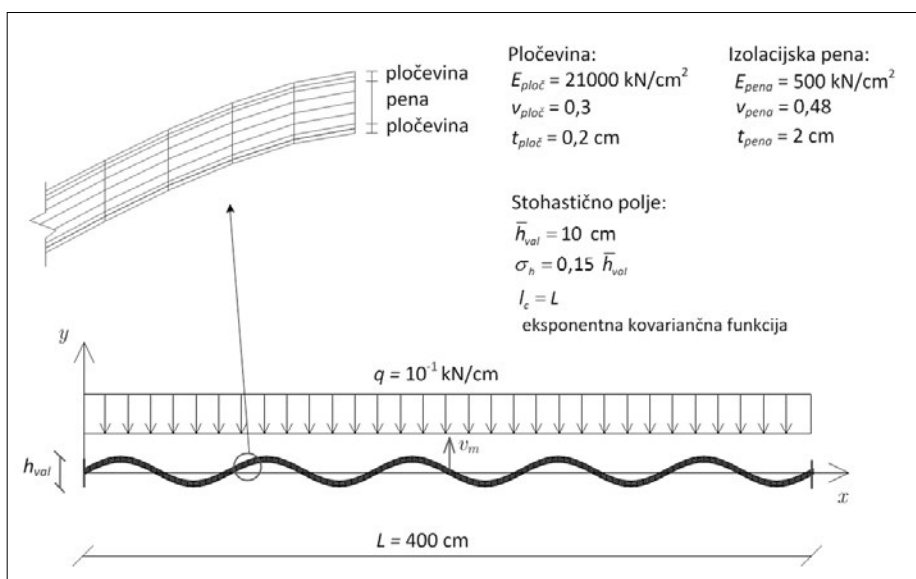
Slika 6 • Naključno izbrana realizacija stohastičnega polja korozije in deformiran nosilec v trenutku, ko je dosežen mejni obtežni faktor (10-kratna povečava deformacij)

	Perturbacijska metoda (ADB-formulacija)	Monte Carlo (5000 simulacij)
$\bar{\gamma}_{max}$	359.16	359.14
$\sigma_{\gamma_{max}}$	1.38	1.39
t	1 h, 40 min.	41 h, 53 min.

Preglednica 2 • Pričakovana vrednost ($\bar{\gamma}_{max}$), standardna deviacija ($\sigma_{\gamma_{max}}$) in računski čas (t), potreben za izvedbo celotne analize

Naredili smo tudi primerjavo ocene odziva v_m z uporabo perturbacijske metode in simulacijami Monte Carlo, in sicer dvema serijama z različnim številom simulacij, 1000 in 50.000. Čeprav deluje 1000 simulacij na prvi pogled

dokaj veliko število ponovitev, se je izkazalo, da je bilo za konvergenco metode potrebno večje število simulacij, drugače je bil nabor naključno izbranih slučajnih spremenljivk premajhen, da bi predstavljal statistično tipično množico. Rezultati so prikazani v preglednici 3.

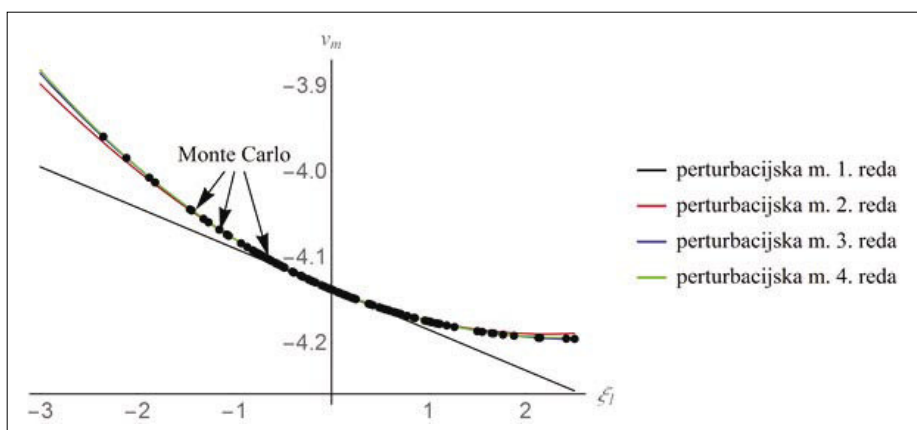


Slika 7 • Sinusoidna panelna plošča

Odziv v_m je nelinearen, zato se na prikazanem primeru lepo vidi tudi vpliv reda perturbacijske metode na natančnost rezultatov. Perturbacijska metoda drugega in višjih redov se z dejanskimi simulacijami veliko bolje ujemajo v primerjavi s perturbacijsko metodo prvega reda, kar je prikazano na sliki 8.

	Perturbacijska metoda		Metoda Monte Carlo	
	ADB formulirana občutljivostna analiza	Metoda končnih diferenc	10 ³ sim.	(5 · 10 ⁴ sim.)
v_m	-4,126		-4,128	-4,126
σ_{v_m}	0,0586		0,0571	0,0588
Skupni čas	5,27 s	173,28 s	112 s	5604 s

Preglednica 3 • Primerjava statistik odziva (pričakovane vrednosti v_m ter standardne deviacije σ_{v_m} oboje v cm) in primerjava računskih časov različnih metod



Slika 8 • Vertikalni pomik na sredini panela (v_m), izračunan s perturbacijsko metodo različnih redov in simulacijami Monte Carlo

5 • SKLEPI

Cilj razvoja avtomatizacije metode stohastičnih končnih elementov je bil, da bi v analizi mehanskih problemov z upoštevanjem naključnosti vhodnih parametrov dosegli računске čase, primerljive determinističnemu pristopu, ter da bi bila metoda numerično stabilna in zanesljiva. Z uporabo kombiniranega

simbolnega in numeričnega pristopa smo ta cilj dosegli. Metode, ki so uporabljene v postopku, smo izbirali tako, da so kompatibilne z metodo končnih elementov, ki je v inženirski praksi najpogosteje uporabljena metoda za mehansko analizo konstrukcij. Poleg tega smo metode izbrali tako, da so

robustne in omogočajo tudi njihovo razširitev na druge tipe stohastičnih problemov (npr. na stohastična polja z Negaussovimi robnimi porazdelitvami, na stohastične procese, kjer se naključnost spreminja s časom, itd.) Zato predstavlja prikazani stohastični pristop k reševanju mehanskih problemov orodje za poglobljene študije mehanskih problemov z upoštevanjem njihove stohastične narave ter potencial za uporabo v splošni inženirski praksi in za nadaljnji razvoj Evrokodov.

6 • LITERATURA

- Ghanem, R., Spanos, P. D., Stochastic Finite Element: A Spectral Approach, Dover, New York, 2003.
- Keulen, F., Haftka, R. T., Kim, N. H., Review of options for structural design sensitivity analysis, Part 1: Linear systems, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 194, 3213–3243, 2005.
- Korelc, J., Automation of primal and sensitivity analysis of transient coupled problems, Comput. Mech, 44, 631–649, 2009a.
- Korelc, J., AceGen and AceFEM User Manual, www.fgg.uni-lj.si/symech/, 2009b.
- Melink, T., Korelc, J., Stability of Karhunen-Loève expansion for the simulation of Gaussian stochastic fields using Galerkin scheme, Probabilistic Engineering Mechanics, 37, str. 7–15, 2014a.
- Melink, T., Metoda stohastičnih končnih elementov v modeliranju konstrukcij, doktorska disertacija, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, 191 str., 2014b.
- Mathematica 9.0, Wolfram Research Inc., povzeto po: <http://www.wolfram.com>, 2012.
- Sudret, B., Comparison of the Spectral Stochastic Finite Element method with the Perturbation method for second moment analysis, Proc. 1st ASRANET Int. Coll., 2002.
- Tarantseva, K.R., Models and Methods of Forecasting Pitting Corrosion, Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, Vol. 46, 139–147, 2010.
- Valor, A., Caleyó, F., Alfonso, L., Rivas, D., Hallen, J. M., Stochastic modeling of pitting corrosion: a new model for initiation and growth of multiple corrosion pits, Corrosion Science, 49, p. 559–579, 2007.

ZADNJI PRIPRAVLJALNI SEMINAR IN IZPITNI ROK ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2016

SEM INAR	IZPIT	
	Osnovni in dopolnilni	Revidiranje
10.–12. 10. 2016	30. 11. 2016 (po potrebi še 29. 11. 2016)	26. 10. 2016

A. PRIPRAVLJALNI SEMINARJI:

Seminarje organizira **Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana;**

Telefon: (01) 52-40-200; Fax: (01) 52-40-199;

e-naslov: gradb.zveza@siol.net; gradbeni.vestnik@siol.net.

Uradne ure:

ponedeljek, torek, sreda, četrtek od 09.00 do 14.00 ure;

v petek ni uradnih ur za stranke!

Seminar vključuje **izpitne programe** za:

1. odgovorno projektiranje (osnovni in dopolnilni strokovni izpit)
2. odgovorno vodenje del (osnovni in dopolnilni strokovni izpit)
3. odgovorno vodenje posameznih del
4. Investicijski procesi in vodenje projektov (za kandidate, ki opravljajo dopolnilni strokovni izpit; predavanje se odvija v okviru rednih seminarjev).
5. Kandidati lahko poslušajo posamezna predavanja v okviru rednih seminarjev.

(Vsi posamezni programi so dostopni na spletni strani IZS - MSG:
<http://www.izs.si>, v rubriki »Strokovni izpiti«)

Cena za udeležbo na seminarju (za predavanje in literaturo) po izpitnih programih pod 1., 2. in 3. točko znaša 623,22 EUR, pod 4. točko pa 89,10 EUR. Cena za obisk posameznega predavanja (točka 5) je 89,10 EUR. Vse cene vključujejo DDV.

Kotizacijo za seminar je potrebno nakazati ob prijavi

na poslovni račun ZDGITS: **SI56 0201 7001 5398 955**.

Prijavo je treba posredovati organizatorju (ZDGITS) najkasneje **14 dni pred pričetkom** seminarja! Prijavni obrazec je objavljen na spletni strani ZDGITS (<http://www.zveza-dgits.si>).

Izvedba seminarja je odvisna od števila prijav (najmanj 25).

B. STROKOVNI IZPITI

potekajo pri **Inženirski zbornici Slovenije (IZS), Jarška 10-B, 1000 Ljubljana**. Informacije o strokovnih izpiti in izpitnih programih je mogoče dobiti na spletni strani IZS <http://www.izs.si>, po telefonu (01) 547-33-19 (uradne ure: ponedeljek, sreda, četrtek, petek od 10.00 do 12.00 ure; v torek od 14.00 do 16.00 ure) ali osebno na sedežu IZS (uradne ure: ponedeljek, sreda, četrtek, petek od 8.00 do 12.00 ure; v torek od 12.00 do 16.00 ure).

KOLEDAR PRIREDITEV

9.-10.6.2016

Drugi srpski kongres o putevima

Beograd, Srbija
www.kongresoputevima.rs

16.-18.6.2016

7. Posvetovanje slovenskih geotehnikov in 17. Šukljejev dan

Podčetrtek, Slovenija
www.sloged.si

22.-24.6.2016

2. CESB16 – Central Europe towards Sustainable Building 2016

Praga, Češka
www.cesb.cz

26.-30.6.2016

IABMAS2016 – 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management

Foz do Iguaçu, Brazilija
www.iabmas2016.org/

28.6.-7.7.2016

SGEM 2016 – 16th International Scientific Geoconference

Albena, Bolgarija
www.sgem.org/

17.-22.7.2016

35th International Conference on Coastal Engineering

Istanbul, Turčija
<http://icce2016.com/en/>

27.-29.7.2016

3rd International Conference on Structures and Architecture

Guimaraes, Portugalska
www.icsa2016.arquitectura.uminho.pt/

22.-25.8.2016

WCTE – World Conference on Timber Engineering

Dunaj, Avstrija
<http://wcte2016.conf.tuwien.ac.at/home/>

7.-9.9.2016

ECPPM 2016 – 11th European Conference on Product and Process Modelling

Limassol, Ciper
<http://cyprusconferences.org/ecppm2016/>

19.-21.9.2016

International Conference on Accelerated Pavement Testing

San Jose, Kostarika
www.apf-conference.com/

21.-23.9.2016

19th IABSE Conference "Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment"

Stockholm, Švedska
www.iabse.org/stockholm2016

30.9.-1.10.2016

9th International Conference »Bridges in Danube Basin«

Žilina, Slovaška
<http://svf.uniza.sk/kskm/Danubebridges2016/>

5.-6.10.2016

ICABE 2016 – International Conference on Architecture and Built Environment

Kuala Lumpur, Malezija
<https://icabe2016.wordpress.com>

10.-11.10.2016

11th Conference on Advanced Building Skins

Bern, Švica
<http://abs.green/home/>

16.-19.10.2016

IALCCE2016 – 5th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering

Delft, Nizozemska
www.ialcce2016.org

17.-19.10.2016

SBE16 – Thessaloniki International Conference "Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale"

Solun, Grčija
<http://sbe16-thessaloniki.gr/>

19.-20.10.2016

13. Slovenski kongres o cestah in prometu

Portorož, Slovenija
www.drc.si

29.5.-2.6.2017

4. svetovni forum o zemeljskih plazovih

Ljubljana, Slovenija
www.sloged.si/?page_id=716

15.-19.7.2017

GeoMEast 2017 International Conference "Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"

Sharm El-Sheik, Egipt
www.geomeast2017.org/

Rubriko ureja • **Eva Okorn**, ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: gradb.zveza@siol.net