





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, november 2014, letnik 63, str. 249-268

Izdajatelj:

Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovska 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 in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**
prof. dr. Matjaž Mikoš
Jakob Presečnik
Dušan Jukič
MSG IZS: **Gorazd Humar**
mag. Črtomir Remec
doc. dr. Branko Zadnik
FGG Ljubljana: **izr. prof. dr. Marijan Žura**
FG Maribor: **doc. dr. Milan Kuhta**
ZAG: **akad. prof. dr. Miha Tomažević**

Glavni in odgovorni urednik:

prof. dr. Janez Duhovnik

Lektor:

Jan Grabnar

Lektorica angleških povzetkov:

Darja Okorn

Tajnica:

Eva Okorn

Oblikovalska zasnova:

Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

Kočevski tisk

Naklada:

3550 izvodov

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 upokojenca 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 všteta DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
SI56 0201 7001 5398 955

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 POVZETEK 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

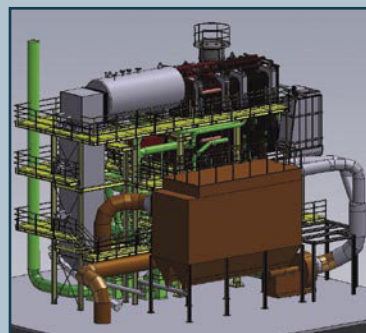
Članki • Papers

stran **250**

Miha Oražem, univ. dipl. inž. grad.
Vladimir Briški, inž. grad.

KOTLOVNICA NA LESNO BIOMASO V PODJETJU MELAMIN, d. d., KOČEVJE

BIOMASS BOILERHOUSE IN THE COMPANY
MELAMIN d. d., KOČEVJE

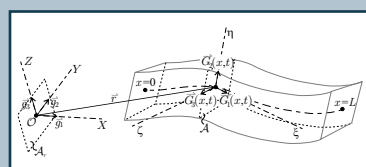


stran **257**

doc. dr. Eva Zupan, prof. mat.
prof. dr. Igor Planinc, univ. dipl. inž. grad.

NELINEARNA DINAMIČNA ANALIZA LINIJSKIH KONSTRUKCIJ POD VPLIVOM PREMKAJOČE SE MASE

NON-LINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF BEAM-LIKE STRUCTURES
UNDER THE INFLUENCE OF A MOVING MASS



Vabilo

stran **265**

25. MIŠIČEV VODARSKI DAN 2014

Novice iz IZS MSG

stran **266**

dr. Branko Zadnik, univ. dipl. inž. grad.

JUBILEJNA, 60. GENERALNA SKUPŠČINA ECCE

Novice iz DGIT

stran **267**

Jože Preskar, univ. dipl. inž. grad.

OGLED GRADBIŠČ NA ŽELEZNIŠKI PROGI PRAGERSKO-HODOŠ

Novi diplomanti

Eva Okorn

Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Montažna betonska konstrukcija objekta LTH Ulički na Trati pri Škofji Loki,
foto: Janez Duhovnik

KOTLOVNICA NA LESNO BIOMASO V PODJETJU MELAMIN, d. d., KOČEVJE

BIOMASS BOILERHOUSE IN THE COMPANY MELAMIN d. d., KOČEVJE

Miha Oražem, univ. dipl. inž. grad.

Vladimir Briški, inž. grad.

Projektivni biro AG – inženiring, d. o. o., Kočevje

Strokovni članek

UDK 630*81:697.32(497.4Kočevje)

Povzetek | V prispevku sta predstavljena projekt in gradnja nove kotlovnice na lesno biomaso v Kočevju. Investitor Melamin, d. d., Kočevje je zaradi novih tehnoloških zahtev in dotrajanosti starega parnega kotla na fosilno gorivo (Đuro Đakovič, št. 5356) izvedel prenovo in dograditev obstoječe kotlovnice v skupni moči 9,8 MW. Sistem za proizvodnjo tehnološke pare na lesne sekance vsebuje skladišče za lesne sekance, transportni in dozirni sistem, parni kotel in zbiranje pepela. Projekt nove parne kotlovnice je bil tehnološko, gradbeno in izvedbeno zelo zahteven, saj je gradnja potekala v času obratovanja obstoječega kotla (Loos, št. 61428), ki se trenutno uporablja za začasno proizvodnjo pare, v prihodnosti pa se bo uporabljal le še za rezervo. Glavni objekt kotlovnice dolžine 22,58 m, širine 12,75 m in svetle višine 15,07 m je izveden kot jeklena konstrukcija, zaprta s kovinskimi fasadnimi paneli. H glavnemu objektu kotlovnice sta konstrukcijsko in organizacijsko povezana tudi dva prizidka dolžine 15,06 m in širine 4,60 m ter dolžine 22,58 m in širine 4,70 m. K sistemu celotne kotlovnice spada tudi objekt, v katerem je transportni trak lesne biomase v florisnih dimenzijah 20,51 x 2,60 m, ki je prav tako obložen s kovinskimi fasadnimi paneli in služi za povezavo jeklenega objekta kotlovnice in skladišča lesne biomase. Objekt skladišča je izveden v armiranem betonu in je florisnih dimenzij 33,26 x 10,70 m. Poleg skladišča biomase so v tem objektu tudi prostor za skladiščenje tekočega goriva za obstoječi kotel (Loos, št. 61428), komandni prostor in nad njim elektroprostor za celotno postrojenje nove kotlovnice na lesno biomaso. Za potrebe postavitve kotlovske tehnološke opreme je v notranjosti objekta kotlovnice izvedena nosilna jeklena konstrukcija.

Ključne besede: kotlovnica, parni kotel, lesni sekanci, jeklena konstrukcija, armirano-betonska konstrukcija

Summary | The paper presents design and construction of the new biomass boilerhouse in Kočevje. Due to the new technological demands, the investor Melamin d.d. Kočevje decided to replace the old steam boiler using fossil fuel (Đuro Đakovič, No. 5356) with the new one with the total power of 9,8 MW. The new system for the production of steam consists of a biomass storage, transport and delivery system for woodchips, a steam boiler and the ash collector. The project was demanding from the technological and design point of view. The construction was also demanding because the construction took place during the operation of the existing boiler (Loos, No. 61428), which has been currently used for temporary steam production, while in the future it will only be used as a backup. The construction of the main building of the boilerhouse is made of steel and enclosed with metal facade panels. The main building is 22,58 m long, 12,75 m wide and 15,07 m high. There are two extensions connected to the main building of the boiler. The length of the first one is 15,06 m and its width is 4,60 m. The length of the second one is 22,58 and its width is 4,70 m. The main building has another extension, dimensions are 20,51 m times 2,60 m, used for conveyor belt for biomass. This building is also covered with metal facade panels and serves as a connection between the main building of the

boiler and the woodchips storage. The biomass storage facility is made of reinforced concrete. It is 33,26 m long and 10,70 m wide. Next to the biomass storage facility there is also liquid fuel storage for the existing boilers (Loos št. 61428), the control room and an electrical plant room for the new boiler plant biomass. The interior of the boilerhouse contains load-bearing steel construction used for the installation of technological equipment for the new boiler.

Keywords: boilerhouse, steam boiler, woodchips, steel structure, reinforced concrete structure

1 • UVOD

Predmet investicije je rekonstrukcija parne kotlovnice na lesno biomaso, v okviru katere se je dotrajani parni kotel na fosilno gorivo zamenjal s sistemom proizvodnje pare na lesno biomaso. Na lokaciji stare kotlovnice (sliki 1 in 2) se je najprej, ob stalnem delovanju zasilnega kotla (Loos, št. 61428), podrl objekt in odstranil stari parni kotel na fosilna goriva. Jedro kurišča je ogret fluidizirani sloj peska, ki omogoča veliko prilagodljivost kurišča različnim vrstam goriva. V njem z zelo visokim izkoristkom in nizkimi emisijami dimnih plinov izgoreva tako sveže posekana lesna biomasa kot tudi suhi kosi lesa. Projekt parne kotlovnice investitorja Melamin, d. d., Kočevje obsega izvedbo povezovalne instalacijske kinete, izvedbo armiranobetonskega objekta skladišča lesne biomase, izvedbo jeklenega objekta kotlovnice in povezovalnega objekta transportnega traku ter rekonstrukcijska dela na delu obstoječe kotlovnice in nekaterih novih tehnoloških konstrukcij.



Slika 1 • Stara kotlovnica podjetja Melamin, d. d., Kočevje



Slika 1 • Stari jekleni rezervoar za fosilno gorivo

2 • KONSTRUKCIJSKA ZASNOVA OBJEKTOV

2.1 AB-kineta

Pred izvedbo temeljenja armiranobetonskega objekta skladišča lesne biomase se je najprej izvedla nova AB-kineta v skupni dolžini okoli 40 m s prerezom svetlih mer 2,20 x 1,70 m, ki se je spojila z obstoječo in povezuje novozgrajene objekte s proizvodnim delom podjetja. Ker je nova kineta pod objektom kotlovnice, objektom skladišča in pod ploščadjo pretakališča, je ta izvedena v treh med seboj dilatiranih delih. Pri izvedbi prvega segmenta AB-kinete, ki je ob glavni cesti Ljubljana–Kočevje, je bilo zaradi bližine ceste in zavarovanja gradbene jame treba zgraditi tudi začasen AB-oporni zid višine 4,50 m.

2.2 AB-objekt skladišča

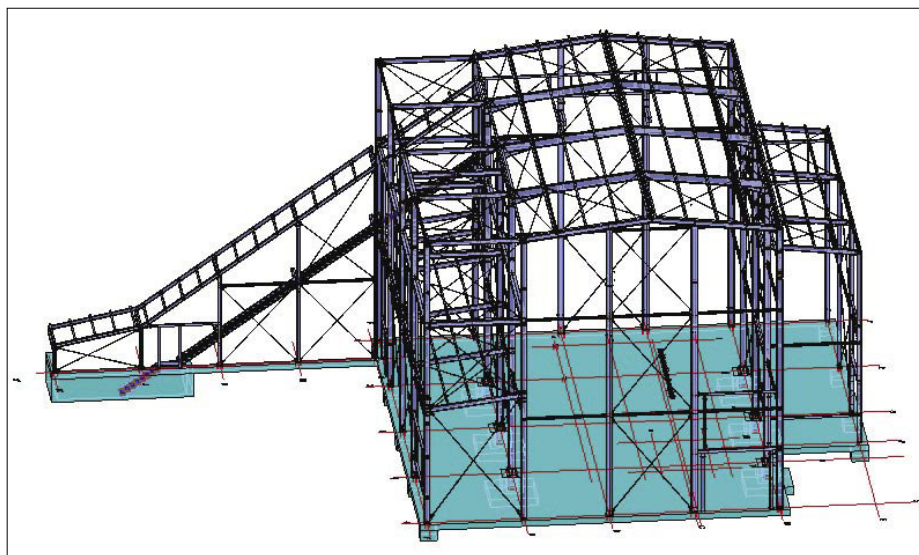
Armiranobetonski objekt skladišča je temeljen na AB-talni plošči debeline 50 cm, ta pa je zaradi tehnoloških in organizacijskih zahtev izvedena na več nivojih. V njem so poleg skladišča energenta tudi prostor za skladiščenje fosilnega goriva za rezervni kotel (Loos, št. 61428), komandni prostor za upravljanje celotnega postrojenja parne kotlovnice in elektroprostor nad njim. Na zadnjem delu objekta skladišča je bila lovilna posoda z rezervoarjem za mazut, ki je napajal kotel za začasno proizvodnjo tehnološke pare, zato je bila izdelava tega zasnovana in izvedena po fazah. Po izgradnji prve faze, ki zajema tudi zasnovano, izvedbo in postavitve novega jeklenega rezervoarja za fosilno gorivo v objektu skladišča, se je lahko izvedla odstranitev obstoječega jeklenega rezervoarja in porušitev armiranobetonske lovilne posode. Armiranobetonski objekt skladišča lesne biomase je florisnih dimenzij 33,26 x 10,70 m, njegova višina je 8,70 m. Vertikalno nosilno konstrukcijo objekta predstavljajo stene debeline 30 cm, strešna nosilna konstrukcija je izvedena iz AB-plošče debeline 20 cm in iz v njo integriranih AB-reber dimenzij 0,30 x 0,60 m, na razmiku 3,73 m. Na delu objekta, kjer je prostor za mazutno posodo, je streha narejena s prednapetimi votlimi ploščami PVP 16 cm, kar omogoča odprtje strešne konstrukcije in morebitno zamenjavo jeklenega rezervoarja. Na zadnjem delu skladišča je kot ločitev med skladiščem in transportnim delom izvedena AB-stena debeline 30 cm, ta pa je zaradi velikih obremenitev prečno na njeno ravnino, ki nastajajo ob vsakokratnem transportu lesne biomase v transportni trak, ojačena z

AB-rebri dimenzij 0,30 x 0,80 m. Zaradi boljše razporeditve obremenitev je ta preko AB-gred dimenzij 0,30 x 0,30 m povezana z zunanjo prečno steno, v kateri je zaradi boljšega prenosa točkovnih sil prav tako izvedeno ojačilno rebro dimenzij 0,30 x 0,80 m. Dostop v skladišče iz pretakališča je zagotovljen preko odprtine širine 10 m in višine 6 m. Zadostna osvetljenost v zadnjem delu skladišča je zagotovljena preko štirih strešnih kupol. Streha objekta je izvedena kot ravna streha z atiko in pokrita s črno kritino.

2.3 Jekleni objekt kotlovnice

Za objektom skladišča je zgrajen objekt nove parne kotlovnice (slika 3). Glavni jekleni objekt kotlovnice je florisnih dimenzij 22,58 m x 12,75 m in svetle višine 15,07 m. Čelna okvirja sta izvedena iz stebrov HEA 280, ki so med seboj dvakrat povezani s povezavami HEA 100 in v srednjem polju centrično zavetrovani s palicami RD 30 mm v najnižjem polju, RD 25 mm v srednjem polju in RD 20 mm v najvišjem polju. Strešna prečka dvokapne strehe je narejena iz standardnih vročevaljanih profilov HEA 280. Vmesni okvirji so izvedeni iz stebrov HEA 300 in strešnih prečk IPE 400 z vutami. Stebri so v šibki osi bočno podprti s povezavami HEA 100 in med seboj tudi dvakrat centrično zavetrovani z diagonalami RD 30 mm v najnižjem polju, RD 25 mm v srednjem polju in RD 20 mm v najvišjem polju. Strešne letve na glavnem delu objekta so narejene iz zaprtih

vročevaljanih profilov RQO 160 x 80 x 4. Strešne prečke glavnega objekta so med seboj povezane s povezavami HEA 100 in centrično zavetrovane s palicami RD 20 mm tako, da je omogočena demontaža srednje strešne prečke ob morebitni menjavi večjih delov tehnološke opreme v prihodnosti, ob tem pa je še vedno zagotovljena stabilnost objekta pri polni vrednosti obtežbe vetra. Vmesni stebri objekta so vpeti v čašastih točkovnih temeljih dimenzij 2,30 x 2,30 m, stebri čelnih okvirjev pa so temeljeni členkasto na pasovnih temeljih širine 0,80 m. Globina vpenjanja stebrov v čaše znaša 0,85 m. Temelji so med seboj povezani z AB-ploščo debeline 30 cm, ki služi tudi za podlago za postavitve vse tehnološke opreme v glavnem delu objekta kotlovnice. H glavnemu objektu sta dodana tudi dva manjša prizidka in sta z njim tudi konstrukcijsko povezana. Prizidek prostora filtra je florisnih dimenzij 15,06 x 4,60 m, njegova svetla višina znaša 10,37 m. Stebri prizidka so izvedeni iz standardnih vročevaljanih profilov HEA 200, strešne prečke, ki so povezane v stebre glavnega objekta, pa iz IPE 240. Strešne letve na tem delu objekta so izvedene iz zaprtih vročevaljanih pravokotnih profilov RQO 160 x 80 x 4. Vzdržna horizontalna stabilnost prizidka je zagotovljena s centričnimi diagonalami iz palic RD 30 in RD 25 mm, prečno stabilnost pa zagotavljajo povezave na glavni del objekta parne kotlovnice. Prizidek na drugi strani je zgrajen po celotni dolžini in višini glavnega objekta in širini 4,70 m. Streha prizidka je spuščena nižje od strehe glavnega objekta tako, da znaša svetla višina prizidka v notranjosti 6,29 m. Nad streho je odprt prostor, ki pa je po fasadi zaprt s fasadnimi paneli



Slika 3 • Prosteel model jeklene konstrukcije kotlovnice in objekta transporterja

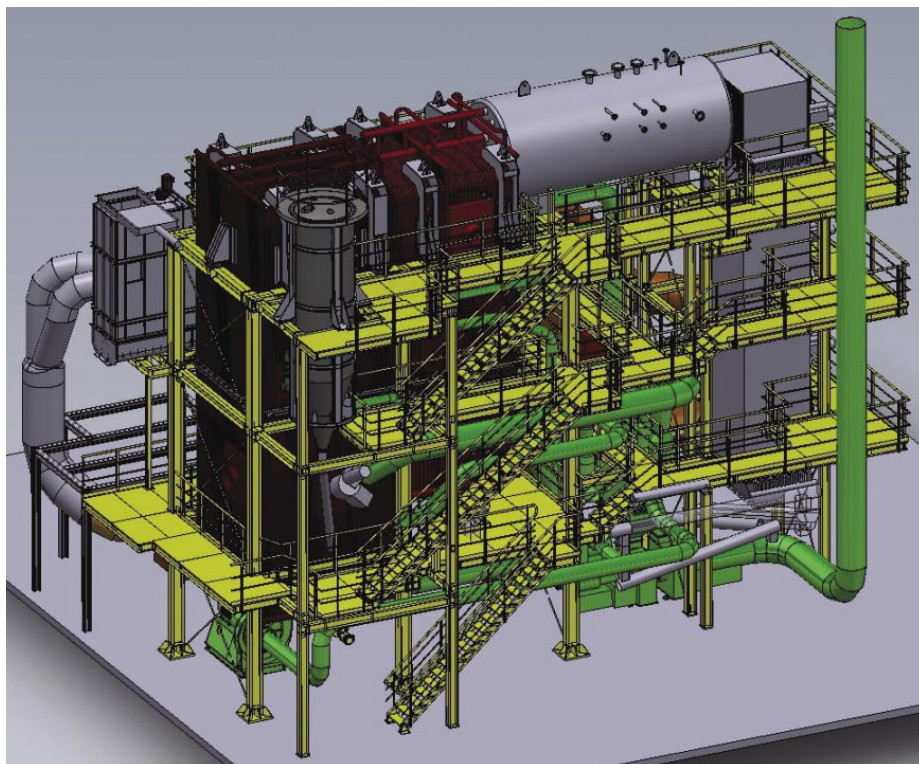
in je namenjen morebitni postavitvi parnega kondenzatorja skupne mase ca 80 t v bližnji prihodnosti. Prav iz tega razloga je konstrukcija prizidka izvedena in močnejših nosilnih elementov, iz stebrov HEA 280, prečnih povezovalnih prečk HEA 280 na mestih, kjer je konstrukcija predvidenega parnega kondenzatorja in HEA 100 povesod drugod. Nižja streha je narejena iz strešnih prečk IPE 240 in strešnih letev iz zaprtih vročevaljanih pravokotnih profilov RQO 140 x 70 x 4. Temeljenje obeh prizidkov je zasnovano in izvedeno na točkovnih temeljih 0,80 x 0,80 m, ki so med seboj povezani z AB-ploščo debeline 30 cm, ki služi tudi za tehnološko temeljno podlago.

2.4 Jekleni objekt transportnega traku

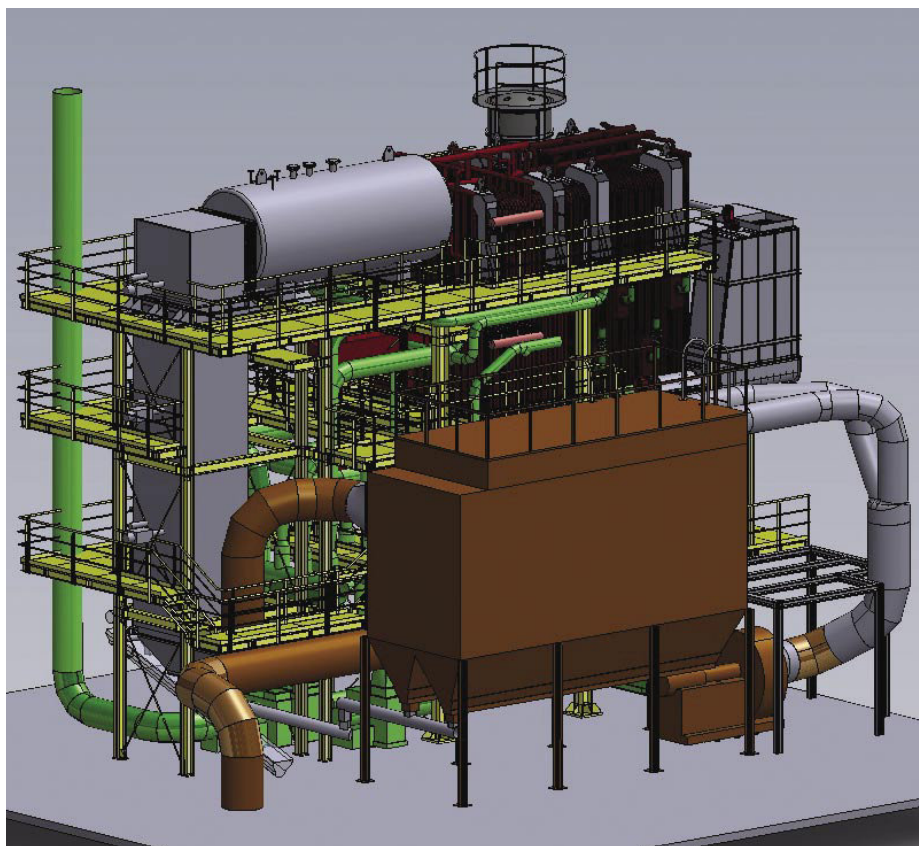
Oba glavna objekta povezuje objekt transportnega traku, po katerem se transportira lesni energent iz objekta skladišča v objekt kotlovnice. Objekt je zgrajen ob armirano-betonskem objektu skladišča v širini 2,60 m in dolžini 20,51 m. Nosilna konstrukcija je izvedena v jeklu, stebri in glavne prečke so iz standardnih vročevaljanih profilov HEA 160, povezave iz HEA 100, strešne letve pa iz zaprtih vročevaljanih kvadratnih cevi QRO 80 x 4. Vzdolžno stabilnost objekta zagotavljamo s centričnimi povezji RD 20 mm, prečno pa z navezavo na AB-objekt skladišča. Temeljenje je izvedeno na AB-talni plošči debeline 30 cm. V notranjosti objekta je izvedena nosilna konstrukcija transportnega traku in jeklenega servisnega stopnišča ob njem, ki je povezano z dostopnimi in servisnimi površinami na jekleni konstrukciji parnega kotla v objektu kotlovnice.

2.5 Jeklena nosilna konstrukcija parnega kotla

V glavnem objektu parne kotlovnice je bila načrtovana in je tudi izvedena tehnološka nosilna konstrukcija parnega kotla (slika 4) in vseh njegovih sestavnih delov (slika 5). Glavni deli, ki so postavljeni nanjo, so membransko kurišče skupne mase 85 t, komora pregrevalnika skupne mase 30 t, blok kotla skupne mase 65 t, ekonomajzer skupne mase 20 t, silos goriva z dozirnimi polži skupne mase 10 t, silos peska skupne mase 18 t, preostala manjša oprema in vsi drugi cevovodi oziroma povezave ter preostala inštalacija. Končna skupna masa vse opreme na konstrukciji kotla znaša ca 280 t. Konstrukcija je izvedena kot jeklena okvirna konstrukcija s centričnimi diagonalnimi povezji. Raster stebrov v vzdolžni smeri znaša 3,95 m, 4,435 m, 3,58 m in 3,55 m, raster stebrov v prečni



Slika 4 • Model jeklene konstrukcije parnega kotla



Slika 5 • Model jeklene konstrukcije parnega kotla in tehnološke opreme

smeri pa 4,20 m in 2,60 m. Ti so izvedeni iz standardnih vročevaljanih profilov HEA 300 in HEA 220 na zadnjem delu, kjer je ekonomaizer, in stranskem delu, kjer je postavljen silos kremenčevega peska. Prečke, ki povezujejo stebre, so izvedene v treh višinskih nivojih, v dveh vmesnih so izvedene iz profilov HEA 220, zgornje, na koti +10,88 m, ki nosijo večino vseh vertikalnih obremenitev, pa iz profilov HEA 300. Del konstrukcije, ki je dodan zaradi postavitve silosa peska, je izveden s prečkami HEA 220. Centrična diagonalna povezja so izvedena iz jeklenih palic RD 25 mm. Okrog in okrog so na več nivojih in treh glavnih, +3,70 m, +7,50 m in

+10,88 m, izvedeni povezovalni podesti in vertikalna komunikacija, kot so stopnice in lestve med njimi. Ti so izvedeni na konzolnih nosilcih iz HEA 220 in U 180 oziroma IPE 180. Pohodno površino podestov predstavljajo pohodne rešetke. Podesti omogočajo dostope do vse tehnološke opreme, ki so del kotlovskega postrojenja, kot tudi do transportnega traku, merilnih mest na novemu dimniku in dostopa na streho nižjega prizidka objekta kotlovnice.

2.6 Druge konstrukcije in sanacije konstrukcij

Zaradi povezave novega parnega kotla in nemotene izvedbe priklopa na obstoječi

zidani dimnik, višine 48 m, se je obstoječi zasilni kotel (Loos, št. 61428) priključil na novi jekleni dimnik iz nerjavečega jekla, višine 18 m in premera 1,00 m, ki je situiran v notranjosti objekta kotlovnice. Obstoječi zidani dimnik v kompleksu tovarne, ki predstavlja že simbol mesta Kočevje, se je ohranil, vanj pa je priključen odvod dimnih plinov novega visokotlačnega parnega kotla. Rekonstruiral se je samo priklop nanj iz armiranega betona brez posega v nosilno konstrukcijo dimnika.

3 • STATIČNA IN DINAMIČNA ANALIZA KONSTRUKCIJ OBJEKTOV

3.1 AB-kineta

Pri dimenzioniranju prvega segmenta AB-kinete je bila poleg lastne in stalne obtežbe upoštevana še koristna prometna obtežba kategorije G po SIST EN 1991-1. Drugi in tretji segment AB-kinete sta modelirana v sklopu objekta AB skladišča oziroma v sklopu objekta AB-talne plošče oziroma temeljev jeklene objekta kotlovnice. Poleg lastne in stalne obtežbe so bile na konstrukciji 2 in 3 segmenta kinete upoštevane še vse obtežbe objekta skladišča in kotlovnice.

3.2 AB-objekt skladišča lesne biomase

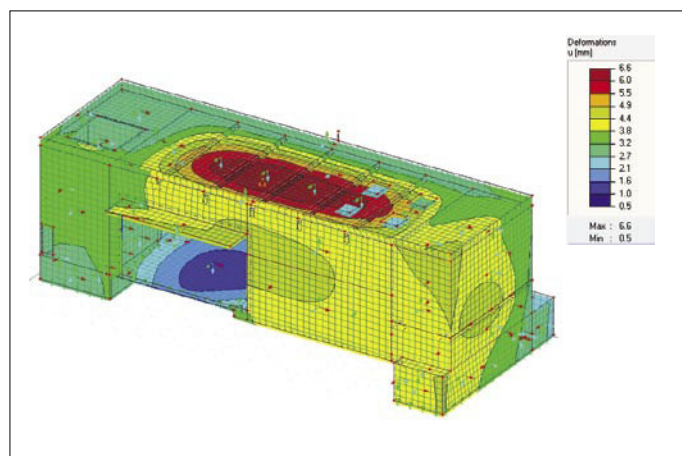
Pri analizi konstrukcije objekta (slika 6) so bile poleg lastnih in stalnih obtežb upoštevane še naslednje koristne vertikalne obtežbe:

- obtežba snega po SIST EN 1991-3, kjer se obtežba snega na ravni strehi zaradi možnega začasnega preprečenega odtekanja vode s strehe poveča s faktorjem 1,5,
 - tehnološka obtežba kategorije E1 in E2,
 - prometna obtežba kategorije G,
 - servisna obtežba na strehi.
- Poleg vertikalnih obtežb so bile pri analizi upoštevane še nekatere horizontalne koristne obtežbe:
- aktivni pritiski lesne biomase s specifično maso $4,00 \text{ kN/m}^3$ in strižnim kotom 45° ,
 - horizontalni zemeljski pritiski na poglobljeni del objekta s karakteristikami zasutja; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, $\varphi = 36^\circ$,
 - požarna obtežba, določena po SIST EN 1998-1, z naslednjimi kriteriji; $ag = 0,150 \text{ g}$, $S = 1,0$, $\gamma^l = 1,20$, $q = 2,10$,

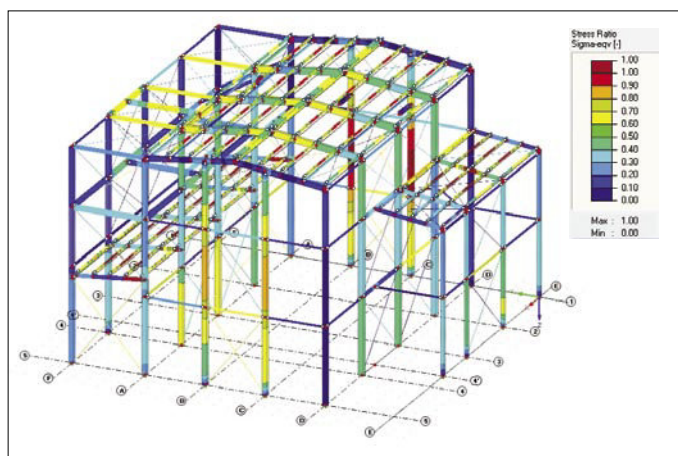
– tehnološka obtežba transportnih grabelj na prečno AB-steno in AB-talno ploščo.

3.3 Jekleni objekt kotlovnice in transportnega traku

Analiza objektov jeklenih konstrukcij je bila opravljena ob upoštevanju lastne in stalne obtežbe, obtežbe snega po SIST EN 1991-3, obtežbe vetra po SIST EN 1991-4, koristne obtežbe na stopnicah in podestih kategorije C ter koristne tehnološke obtežbe transportnega traku. Zaradi narave, oblike in višine konstrukcij je bila pri izračunu upoštevana tudi imperfekcija (sliki 7 in 8). Analiza konstrukcije AB-temeljev in talne plošče obeh objektov je bila opravljena ob upoštevanju lastnih in stalnih vplivov, koristne tehnološke obtežbe kategorije E1, koristne prometne obtežbe kategorije G in vseh drugih vplivov na jeklenih objektih. Prav tako je bila AB-talna plošča objekta kotlovnice dimenzionirana na vplive jeklene konstrukcije parnega kotla, ki je v objektu. Zaradi raznosa vplivov konstrukcije



Slika 6 • Statični model AB konstrukcije skladišča pri pomikih za MSU



Slika 7 • Statični model jeklene konstrukcije kotlovnice pri izkoriščenosti prezov po EC3

kočla na AB-talno ploščo v kotlovnici, ki služi tudi za tehnološko podlago za opremo, se je jeklena konstrukcija postavila na talno ploščo preko jeklenega čevlja, ki je bil posebej modeliran in dimenzioniran (slika 9).

3.4 Jeklena konstrukcija novega parnega kočla

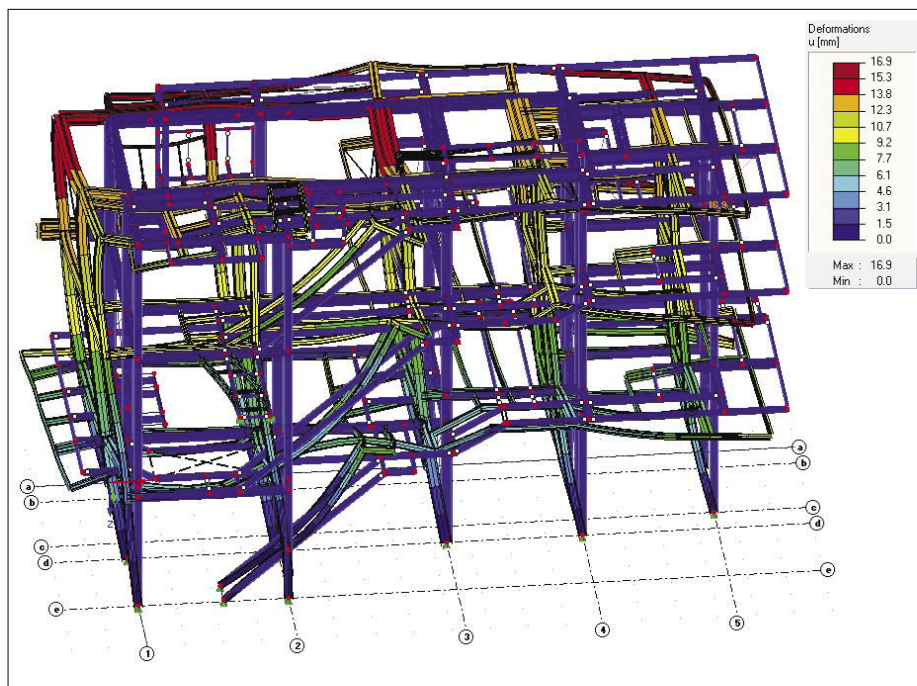
Poleg lastne in stalne obtežbe so bile upoštevane še naslednje koristne vertikalne obtežbe:

- obtežba na podestih in stopnicah kategorije C,
- tehnološka obtežba vse opreme na konstrukciji kategorije E v skupni vrednosti 280 t.

Izvedena je bila tudi analiza zaradi potresa po SIST EN 1998-1 z naslednjimi kriteriji; $ag = 0,150 g$, $S = 1,0$, $\gamma^1 = 1,20$, $q = 4,00$. Faktor obnašanja je bil določen pri srednji stopnji duktilnosti (DCM) za konstrukcije s sistemom pomičnih okvirjev, centričnih povezij in pomičnih okvirjev v kombinaciji s centričnimi povezji. Konstrukcija je zasnovana tako, da je v plastičnih členkih, ki so že vnaprej predvideni, sposobna sipati energijo. V prečni smeri konstrukcije so mesta sipanja energije predvidena v natezih diagonalah, v vzdolžni pa v šibkejših prečkah.

3.5 Druge konstrukcije

Za potrebe skladiščenja fosilnega goriva za rezervni kotel (Loos št. 61428) v armirano-betonskem objektu skladišča je bilo treba opraviti statično in dinamično analizo mazutnega rezervoarja kapacitete $60 m^3$, premera 3,40 m in skupne višine 8,50 m (slika 10). Rezervoar je izveden iz navadnega jekla kvallfete S235.



Slika 8 • Elastični pomiki jeklene konstrukcije parnega kočla za potresno kombinacijo v smeri X

3.6 Analiza konstrukcij

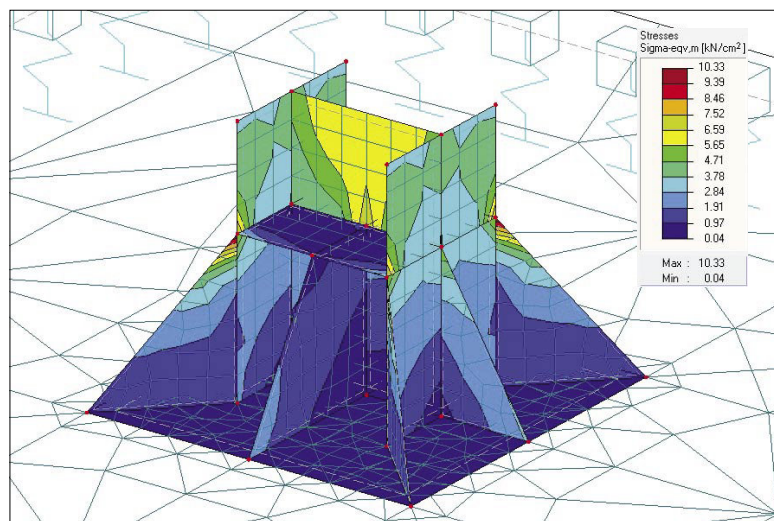
AB-konstrukcije so dimenzionirane po SIST EN 1992-1 in SIST EN 1998-1.

Jeklene konstrukcije so dimenzionirane po SIST EN 1993-1 in SIST EN 1998-1. Pri modalni analizi so bile upoštevane standardne linearne potresne kombinacije v posameznih smereh in kvadratna kombinacija potresnih vplivov SRSS.

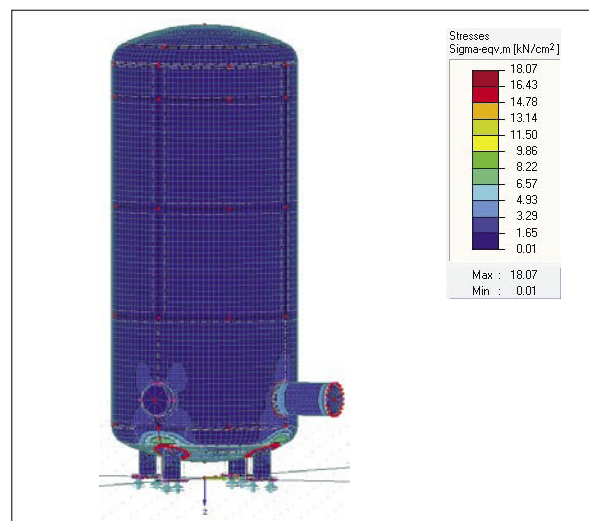
Analiza normalnega projektnega stanja jeklenega rezervoarja je bila narejena z upoštevanjem predpisov SIST EN 1993-1-6 ter DIN 6618. Kontrola po standardu SIST EN

1993-1-6, ki obravnava trdnost in stabilnost lupinastih jeklenih konstrukcij, zajema štiri kontrole normalnega projektnega stanja, kot sta meja plastičnosti, ciklične plastičnosti, uklona in utrujanja ter kontrola pomikov. Za obravnavani rezervoar so bile opravljene tudi kontrola potresnega projektnega stanja ob upoštevanju SIST EN 1998-4 in kontroli elastičnega in elastoplastičnega uklona.

Izračun in dimenzioniranje konstrukcij sta izvedena z računalniškim programom za statično in dinamično analizo prostorskih konstrukcij RFEM 4 (www.dlubal.de).



Slika 9 • Primerjalne napetosti v jeklenem čevlju za MSN



Slika 10 • Primerjalne napetosti v jeklenem rezervoarju za normalno projektno stanje v MSN

4 • GRADNJA



Slika 11 • Montaža jeklene konstrukcije kotla in večjih delov kotlovske tehnološke opreme

Rekonstrukcija parne kotlovnice v podjetju Melamin, d. d., Kočevje je trajala od maja 2013 do maja 2014, ko je bil opravljen tudi tehnični pregled za konstrukcije. Gradnja vseh objektov in njihovih delov je bila zelo zahtevna, saj je potekala v času obratovanja obstoječega kotla (slika 11). Vse konstrukcije so bile izvedene v več fazah, kar sta narekovali tehnološka zasnova in nemoteno obratovanje kotla za proizvodnjo tehnološke pare in s tem nemotena proizvodnja surovin v podjetju Melamin, d. d., Kočevje. Skupno je bilo za jeklene konstrukcije porabljenega 117 t jekla, za armiranobetonske konstrukcije vlitega 1100 m³ betona, za armiranje teh pa porabljenega 95 t armaturnega jekla. Gradbena dela sta opravili podjetji Obnova Kočevje, d. o. o., in podjetje METALINDT, Janez Smola, s. p., tehnološko opremo pa je dobavilo podjetje GORENJE PROJEKT, d. o. o.

5 • LITERATURA

Projektna dokumentacija – projekt gradbenih konstrukcij za objekt PARNA KOTLOVNICA vseh projektiranih faz PGD/PZI/PID, AG-inženiring, d. o. o., Kočevje, od 2012 do 2014.

Projektna dokumentacija – projekt strojnih inštalacij za objekt PARNA KOTLOVNICA projektirane faze PZI, Gorenje Projekt, d. o. o., Velenje 2014.

NELINEARNA DINAMIČNA ANALIZA LINIJSKIH KONSTRUKCIJ POD VPLIVOM PREMIKAJOČE SE MASE

NON-LINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF BEAM-LIKE STRUCTURES UNDER THE INFLUENCE OF A MOVING MASS

doc. dr. Eva Zupan, prof. mat.

eva.zupan@zag.si

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

prof. dr. Igor Planinc, univ. dipl. inž. grad.

igor.planinc@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 531:624.04

Povzetek | Obravnavamo problem vpliva gibajočega se telesa na linijsko konstrukcijo. Telo modeliramo kot masni delec, konstrukcijo pa kot geometrijsko nelinearen prostorski nosilec. Numerična primerjava kaže na podcenjen odziv konstrukcije v primeru nepovezanega reševanja in/ali uporabe preprostih modelov konstrukcije. Posebej je obravnavan vpliv začetne deformirane lege nosilca. S prostorskimi primeri pokažemo zmogljivost predstavljenega algoritma. Metoda je primerna za dinamično analizo prostorskih linijskih konstrukcij, ki so obtežene s premikajočimi se telesi manjših razsežnosti in pri katerih z ravninskimi modeli ne moremo zajeti bistvenih odzivov. Priporočamo jo za vse dinamične analize linijskih konstrukcij s premičnimi (potujočimi) telesi in obtežbami, kjer preprostejša dinamična analiza, nepovezано reševanje in/ali (kvazi)statične analize ne zagotavljajo ustreznih kvalitativnih in kvantitativnih rezultatov.

Ključne besede: linijske konstrukcije, dinamična analiza, premična masa

Summary | We analyse the response of beam-like structures subjected to a moving body. The body is modelled as a mass particle and the structure as a geometrically non-linear spatial beam. Numerical simulations and comparisons with other authors show considerable underestimation of the beam response when simplified models for the structure are used or the non-coupled analysis of the problem is performed. The influence of the initially deformed structure is studied. The spatial examples demonstrate the ability of the presented approach. The method is suitable for the spatial beam-like structures under a small-size moving body, which cannot be satisfactorily analysed by the in-plane analysis. Such methods should be used for the cases where the dynamic response strongly exceeds the response of the structure obtained by static or quasi-static analyses or with simplified dynamic models.

Keywords: beam-like structures, dynamic analysis, moving mass

1 • UVOD

Pri matematičnem modeliranju različnih inženjerskih problemov želimo z zadostno natančnostjo opisati bistvene lastnosti pojavov. Zaradi praktičnih razlogov pa tudi zaradi računske učinkovitosti lahko dejavnike, ki imajo manjši vpliv, zanemarimo. Pri modeliranju vpliva gibajočega se telesa po različnih premostitvenih objektih in tudi drugih gradbenih konstrukcijah pogosto ne smemo zanemariti fizikalno povezanega medsebojnega dinamičnega vpliva. Pri obravnavi takega povezanega problema je treba ločeno izbrati primeren model konstrukcije in primeren model gibajočega se telesa, z izbiro teh modelov in z izbiro predpostavke o načinu gibanja telesa pa vnaprej določimo, ali bo problem dejansko obravnavan povezano (prepletenost enačb) ali pa bo razpadel na več nepovezanih delov (separirani sistem enačb). Znanstvene objave v zadnjih dveh desetletjih kažejo na precejšnje zanimanje raziskovalcev za to problematiko. Večina obstoječih modelov temelji na Euler-Bernoullijevem ali Timošenkovem ravninskem mo-

delu nosilca in na nepovezanem reševanju problema gibanja telesa in odziva konstrukcije, saj delcu vnaprej predpišejo hitrost ali pospešek za celotno časovno območje analize. Potujoče telo v literaturi najpogosteje modelirajo z gibajočo silo (kot modeliramo na primer prometno obtežbo) in z enakomerno ali pospešeno gibajočo se točkovno maso (delcem), najdemo pa tudi primer delno porazdeljene mase. Nosilec je v večini primerov zgolj prostoležeče podprt, razen kadar model nosilca dodatno poenostavimo (sistem togih palic in vzmeti). V novejših virih raziskovalci obstoječe preproste modele večinoma uporabijo za analizo konkretnih problemov, na primer (Nikkhoo, 2007) predstavljajo algoritem kontrole vibracij, (De Salve, 2010) analizirajo vplive potovanja več zaporednih mas po linijski konstrukciji z več podporami itd. Ameriški raziskovalci Wu, Whittaker in Cartmell so že leta 2000 opozarjali na pomanjkanje prostorskih analiz konstrukcij, ki so obremenjene z gibajočo se maso, saj mnogih problemov, kot na primer gibanje tovora po žerjavu, gibanje

vozil po dvojno ukrivljenem mostu in podobnih primerov, ne moremo ustrezno opisati z ravninskimi modeli. Vseeno do danes nismo zasledili vidnejšega razvoja na tem področju. Prav zato so ((Wu, 2000), (Wu, 2002)) predstavili možnost vgraditve poenostavljenega vpliva gibajoče sile/mase na nosilec v komercialne programe za dinamično analizo prostorskih nosilcev.

Poleg problema ustreznosti ravninskega modela nosilca se spoprijemamo tudi s problematiko ustreznosti nepovezanega reševanja. Ugotoviti moramo, ali nepovezano reševanje sicer povezanih enačb problema dovolj natančno opiše odziv konstrukcije. V tem delu uporabimo natančnejši model linijske konstrukcije, saj uporabimo Reissner-Simovo geometrijsko točno teorijo prostorskih nosilcev. Potujoče telo modeliramo z delcem, ki mu predpišemo maso in začetno hitrost, enačbe delca in konstrukcije pa povežemo v enoten, medsebojno prepleten sistem enačb, ki ga rešujemo sočasno in z upoštevanjem medsebojnih vplivov. Rezultate ravninskega numeričnega primera primerjamo z analitičnimi rezultati in z rezultati drugega avtorja, prostorska primera pa prikažeta zmogljivost razvitega algoritma in računalniškega programa.

2 • MODEL NOSILCA

Z modelom nosilca opisujemo take gradbene elemente, ki imajo eno dimenzijo bistveno večjo od preostalih dveh. Tako telo lahko opišemo (i) s težiščno osjo nosilca, ki je v splošnem prostorska krivulja, in (ii) z družino prečnih prereзов vzdolž osi nosilca. V tem delu za matematičen opis deformiranja nosilca uporabimo znano Bernoullijevo hipotezo, ki predpostavlja, da so prerezi togi ravninski objekti, ki tudi po deformaciji nosilca ne spremenijo velikosti in oblike, dopuščamo pa, da so prečni prerezi poljubno nagnjeni glede na težiščno os nosilca. Težiščna os nosilca je pri vsakem času t podana z množico krajevnih vektorjev

$$\vec{r}(x, t), \quad (1)$$

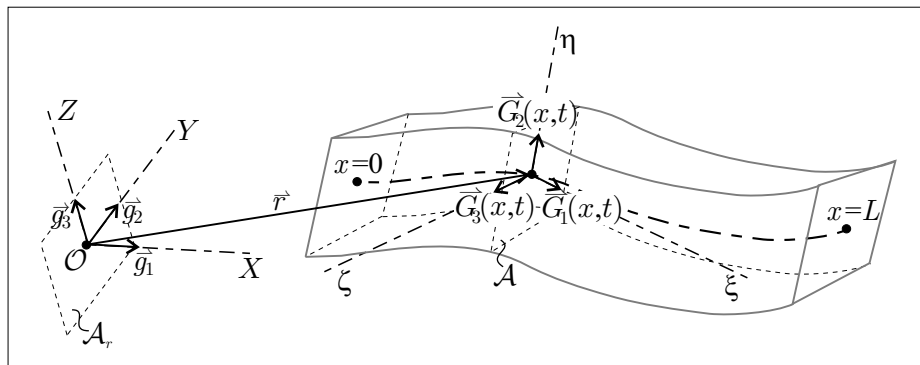
kjer je $x \in (0, L)$ parameter težiščne osi in L dolžina nosilca v začetni legi. V začetni legi pri času $t = 0$ je x naravni parameter, medtem ko v poljubni deformirani legi pri času $t > 0$ x ni več naravni parameter, ampak predstavlja koordinato točke težiščne osi glede na začetno

lego. Predpostavimo še, da ima nosilec konstanten prečni prerez, zato lahko družino prečnih prereзов predpišemo z referenčnim prerezom A_r in družino rotacij $R(x, t)$, ki preslikajo referenčni prerez v deformirano lego v izbrani točki nosilca, $R(x, t): A_r \rightarrow A(x, t)$.

Za zapis enačb nosilca običajno vpeljemo dva koordinatna sistema. *Fiksni (prostorski) koordinatni sistem* določa ortonormirana baza $\{\vec{g}_1, \vec{g}_2, \vec{g}_3\}$, ki jo postavimo v težišče

referenčnega prereza A_r , tako, da drugi in tretji bazni vektor ležita v smereh glavnih vztrajnostnih osi A_r . *Pomični (materialni) koordinatni sistem* določa ortonormirana baza $\{\vec{G}_1(x, t), \vec{G}_2(x, t), \vec{G}_3(x, t)\}$ z izhodiščem v težišču prereza $A(x, t)$; drugi in tretji bazni vektor ležita v smereh glavnih vztrajnostnih osi $A(x, t)$. Tako izbrani bazi povezuje rotacija $R(x, t): \vec{g}_i \rightarrow \vec{G}_i(x, t)$. Izbire koordinatnih sistemov in oznak so predstavljene na sliki 1.

V tem delu izhajamo iz geometrijsko točne teorije prostorskih nosilcev, katere začetnika sta Reissner (Reissner, 1981) in Simo (Simo, 1985). V numeričnem pristopu izhajamo



Slika 1 • Model prostorskega nosilca in izbira koordinatnih sistemov

iz modela s kvaterniono parametrizacijo rotacij, kot je predstavljena v delih ((Zupan, 2010), (Zupan, 2013)). Za osnovne interpolirane spremenljivke izberemo pomike in rotacijske kvaternione. Končni element za

prostorski nosilec temelji na šibkih konsistentnih enačbah, ki jih diskretiziramo po kraju v skladu s kolokacijsko metodo. Časovno integracijo in diskretizacijo izvedemo po Newmarkovem pravilu; za rotacijske količine

v skladu z njihovo neaditivno naravo uporabimo metodo, ki je predstavljena v delu (Simo, 1988) in je še dodatno prirejena za kvaterniono parametrizacijo rotacij (Zupan, 2013).

3 • ENAČBE PROBLEMA

Predstavili bomo gibalne enačbe delca in dopolnili enačbe nosilca. Predpostavimo, da delec z nespremenljivo maso m drsi po težiščni osi nosilca in je pri tem v stalnem stiku s težiščno osjo. Lego delca določa koordinata poti, $s(t)$, ki opredeljuje lego na težiščni osi nosilca glede na začetno stanje nosilca. Delec na poti opiše krivuljo $\vec{r}_m(s(t)) = \vec{r}(x, t)$, za $x = s(t)$, kjer je \vec{r} krajevni vektor težiščne osi iz enačbe (1). S spodnjim indeksom m označujemo količine, ki pripadajo potujočemu masnemu delcu. Točki, v kateri je ob času t masni delec, dodelimo oznako T_m .

3.1 Krivočrtni koordinatni sistem

Ker se masni delec v vsakem trenutku giblje v smeri tangente glede na trenutno težiščno os v točki T_m koordinatna sistema, ki sta bila izbrana za opis enačb nosilca (slika 1), nista primerna za opis gibanja delca. Zato v vsaki točki krivulje $\vec{r}_m(s)$, ki jo opiše masni delec, začasno uvedemo standardni krivočrtni Frenetov koordinatni sistem, ki ga sestavljajo *tangentni*, *normalni* in *binormalni bazni vektor* (Vidav, 1989):

$$\vec{e}_t = \frac{\vec{r}'_m}{\|\vec{r}'_m\|}, \quad (2)$$

$$\vec{e}_n = \frac{\vec{r}''_m - (\vec{r}''_m \cdot \vec{e}_t)\vec{e}_t}{\|\vec{r}''_m - (\vec{r}''_m \cdot \vec{e}_t)\vec{e}_t\|} = \frac{\vec{r}'_m \times (\vec{r}''_m \times \vec{r}'_m)}{\|\vec{r}'_m \times (\vec{r}''_m \times \vec{r}'_m)\|}, \quad (3)$$

$$\vec{e}_b = \vec{e}_t \times \vec{e}_n = \frac{\|\vec{r}'_m\|}{\|\vec{r}'_m \times (\vec{r}''_m \times \vec{r}'_m)\|} \vec{r}'_m \times \vec{r}''_m. \quad (4)$$

Črtice v zgornjih izrazih pomenijo odvod po parametru s . Vse tri vektorje Frenetovega koordinatnega sistema smo zapisali z odvodi krajevnega vektorja težiščne osi nosilca, zato poznamo tudi njihov zapis v fiksni bazi. Pripravimo prvi odvod tangentnega baznega vektorja, ki ga potrebujemo v nadaljevanju:

$$\vec{e}'_t = \frac{\|\vec{r}'_m \times (\vec{r}''_m \times \vec{r}'_m)\|}{\|\vec{r}'_m\|^3} \vec{e}_n.$$

Odvod \vec{e}'_t in normalni bazni vektor \vec{e}_n sta torej kolinearna, njun skalarni produkt pa določa *ukrivljenost* κ_m , krivulje $\vec{r}_m(s)$ v točki T_m :

$$\kappa_m = \frac{\vec{e}'_t \cdot \vec{e}_n}{\|\vec{r}'_m\|} = \frac{\|\vec{r}'_m \times (\vec{r}''_m \times \vec{r}'_m)\|}{\|\vec{r}'_m\|^4}. \quad (5)$$

Recipročna količina ukrivljenosti je polmer ukrivljenosti, $\rho_m = 1/\kappa_m$.

3.2 Hitrost in pospešek delca

Začetna hitrost delca $\vec{v}_m^{(0)}$ je podatek problema. Pri poljubnem času $t > 0$ pa hitrost delca določa naslednja enačba:

$$\vec{v}_m = \frac{d\vec{r}_m}{dt} = \frac{d\vec{r}}{ds} \frac{ds}{dt} = \vec{r}'_m \dot{s} = \dot{s} \|\vec{r}'_m\| \vec{e}_t. \quad (6)$$

Hitrost ima smer tangente, njen predznak pa določa odvod parametra s po času. Kadar želimo poudariti, da ima lahko hitrost tudi nasprotno smer kot tangentni bazni vektor, pišemo $\vec{v}_m = \text{sign}(\dot{s}) \dot{s} \|\vec{r}'_m\| \vec{e}_t$. Drugi odvod krajevnega vektorja krivulje poti delca določa pospešek delca:

$$\vec{a}_m = \frac{d\vec{v}_m}{dt} = \left(\ddot{s} \|\vec{r}'_m\| + \dot{s}^2 \left(\vec{r}''_m \cdot \vec{e}_t \right) \right) \vec{e}_t + \dot{s}^2 \|\vec{r}'_m\|^2 \frac{1}{\rho_m} \vec{e}_n \quad (7)$$

Pospešek pri času $t = 0$ ni podatek, temveč mora zadoščati gibalni enačbi delca. Iz enačbe (7) je razvidno, da imamo poleg pospeška v tangentni smeri tudi komponento pospeška v normalni smeri. V primeru, ko normalna komponenta pospeška ni zanemarljiva, nastane bistveno razhajanje rezultatov med poenostavljenimi metodami in predlaganim modelom, saj normalna komponenta pospeška pri pristopih drugih avtorjev, na primer (Lee, 1996), (Mofid, 1996), (Yavari, 2002), zaradi izbire poenostavljenega modela nosilca in predpostavke o enakomernem gibanju delca ni zajeta.

3.3 Gibalne enačbe delca

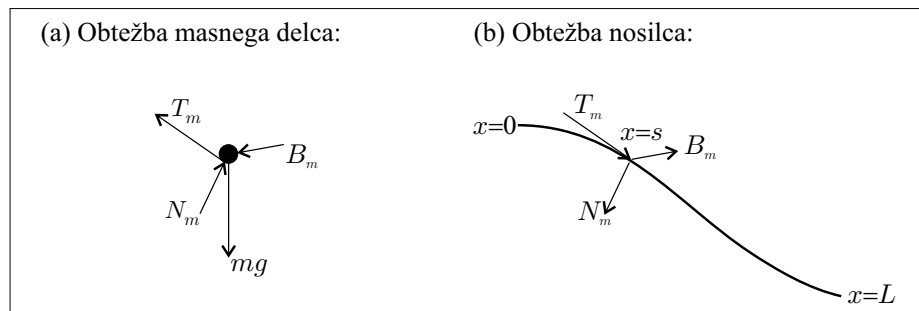
Poleg kontaktnih sil med delcem in nosilcem upoštevamo še lastno težo delca. Rezultanto kontaktnih sil \vec{R}_m izrazimo v krivočrtnem koordinatnem sistemu:

$$\begin{aligned} \vec{R}_m &= T_m \vec{e}_t + N_m \vec{e}_n + B_m \vec{e}_b \\ &= \vec{T}_m + \vec{N}_m + \vec{B}_m. \end{aligned} \quad (8)$$

T_m označuje silo trenja, N_m in B_m sta normalna in binormalna komponenta kontaktne sile; grafičen prikaz sil, ki delujejo na masni delec, kaže slika 2(a). Trenje predpišemo v skladu s Coulombovim zakonom:

$$\vec{T}_m = -\text{sign}(\dot{s}) \mu \|\vec{N}_m + \vec{B}_m\| \vec{e}_t. \quad (9)$$

μ je *koefficient trenja* med delcem in nosilcem. Koefficient trenja je odvisen od podlage, hitrosti podrsavanja in velikosti stične površine teles



Slika 2 • Obtežbe masnega delca in nosilca

ter se določa eksperimentalno. Gravitacijska sila $\vec{F}_m = mg\vec{e}$ deluje v smeri \vec{e} . Razstavimo jo glede na krivočrtne bazne vektorje

$$\vec{F}_m = mg \left((\vec{e}_g \cdot \vec{e}_t) \vec{e}_t + (\vec{e}_g \cdot \vec{e}_n) \vec{e}_n + (\vec{e}_g \cdot \vec{e}_b) \vec{e}_b \right).$$

Gibalna enačba delca določa, da je vsota vseh zunanjih sil, ki delujejo na masni delec, enaka produktu mase in pospeška. Komponentni zapis vektorske gibalne enačbe delca ima naslednjo obliko:

$$f_{d1}: T_m + mg (\vec{e}_g \cdot \vec{e}_t) = m\dot{s} \|\vec{r}_m'\| + m\dot{s}^2 (\vec{r}_m'' \cdot \vec{e}_t), \quad (10)$$

$$f_{d2}: N_m + mg (\vec{e}_g \cdot \vec{e}_n) = m\dot{s}^2 \|\vec{r}_m'\|^2 \frac{1}{\rho_m}, \quad (11)$$

$$f_{d3}: B_m + mg (\vec{e}_g \cdot \vec{e}_b) = 0. \quad (12)$$

Skupaj s Coulombovim zakonom (9) zgornje tri skalarni enačbe (10)–(12) sestavljajo sistem štirih enačb za štiri neznanne funkcije: tri komponente rezultantne kontaktne sile, T_m , N_m , B_m , in parameter poti, s . Ta sistem enačb v nekaj korakih združimo v eno samo enačbo. Neznanko B_m izrazimo iz enačbe (12) in jo uporabimo v Coulombovem zakonu, da izrazimo T_m z N_m . Izraz za T_m uporabimo v enačbi (10), s katero iz (11) izločimo še N_m , in dobimo eno samo skalarno enačbo

$$\begin{aligned} & -\text{sign}(\dot{s})\mu \left\| \dot{s}^2 \frac{\|\vec{r}_m' \times (\vec{r}_m'' \times \vec{r}_m')\|}{\|\vec{r}_m'\|^2} \vec{e}_n \right. \\ & \left. - g (\vec{e}_g \cdot \vec{e}_n) \vec{e}_n - g (\vec{e}_g \cdot \vec{e}_b) \vec{e}_b \right\| \\ & + g (\vec{e}_g \cdot \vec{e}_t) - \ddot{s} \|\vec{r}_m'\| - \dot{s}^2 (\vec{r}_m'' \cdot \vec{e}_t) \\ & = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Enačbo (13) dodamo sistemu enačb prostorskega nosilca (Zupan, 2013, enačbe (43)–(48)), neznanko $s(t)$ pa priključimo množici osnovnih neznank gibanja nosilca, torej pomikom težiščne osi in zasukom (rotacijskim kvaternionom) prečnih prerezov.

3.4 Vpliv delca na nosilec

Kot je razvidno s slike 2(b), masni delec prek kontaktnih sil vpliva na konstrukcijo. Zaradi specifičnosti končnega elementa, predstavljenega v delu (Zupan, 2013), razvitega posebej za reševanje povezanega problema gibajočega se delca po nosilcu, se vpliv delca na nosilec odraža le v robnih enačbah nosilca. Da zajamemo ta vpliv, moramo torej pri izpeljavi robnih enačb upoštevati skok notranje sile $\vec{T}_m + \vec{N}_m + \vec{B}_m$ pri $x = s(t)$. Robni enačbi ponovno izpeljemo iz enačbe lokalnega ravnotežja sil (Zupan, 2013, enačba (28))

$$\vec{N}' + \vec{n} - \rho A_r \vec{r} = \vec{0} \quad (14)$$

z integracijo po parametru x . Pomen oznak, uporabljenih v enačbi (14): $\vec{N}(x,t)$, je ravnotežna rezultantna sila v prečnem prerezu nosilca, \vec{n} je zunanja zvezna linijska obtežba na enoto dolžine osi nosilca glede na začetno lego, ρ je začetna gostota materiala. Za izpeljavo enačbe na levem robu izvedemo integracijo enačbe (14) po območju $(0, \frac{L}{2})$ in podobno pri izpeljavi enačbe za desni rob elementa integriramo po območju $(\frac{L}{2}, L)$. V primeru, ko je masni delec na prvi polovici nekega elementa, moramo levo robno enačbo tistega elementa v sistemu enačb nadomestiti z naslednjo enačbo:

$$\vec{S}^0 + \vec{T}_m + \vec{N}_m + \vec{B}_m + \vec{N}^{L/2} + \int_0^{L/2} (\vec{n} - \rho A_r \vec{r}) dx = \vec{0}, \quad (15)$$

kjer je $\vec{S}^0(t)$ zunanja točkovna obtežba konstrukcije na levem robu elementa. Originalno robno enačbo desnega roba elementa pa nadomestimo z enačbo

$$\vec{S}^L + \vec{T}_m + \vec{N}_m + \vec{B}_m - \vec{N}^{L/2} + \int_{L/2}^L (\vec{n} - \rho A_r \vec{r}) dx = \vec{0}, \quad (16)$$

kadar je masni delec na drugi polovici tistega elementa konstrukcije. Oznaka $\vec{S}^L(t)$ pomeni točkovno obtežbo konstrukcije v točki desnega roba elementa. Kontaktne sile v izrazih (15)–(16) izračunamo iz enačb (10)–(12).

ske funkcije, glej (Zupan, 2010 (opomba 18 na strani 124)). Da v celoti zajamemo vplive med nosilcem in delcem, moramo izbrati take interpolacijske funkcije, ki imajo tretji odvod netrivialen; torej je treba za interpolacijske funkcije izbrati polinome vsaj stopnje tri. Pri vsakem obravnavanem primeru izberemo tako število končnih elementov, da dobimo smiselne rezultate ob zagotovljeni konvergenci Newton-Raphsonove iteracijske sheme.

4.1 Delec na prostoležečem nosilcu

Z odzivom prostoležečega ravninskega nosilca pri enakomernem prehodu delca preko nosilca so se ukvarjali številni avtorji, glej na primer ((Mofid, 1996), (Lee, 1996), (Xu, 1997), (Yavari, 2002)). Za poenostavljeni problem enakomernega prehoda sile preko geometrijsko

4 • NUMERIČNA IMPLEMENTACIJA

Enačbe povezanega problema vpliva masnega delca na gibanje prostorskega nosilca modeliramo v programskem okolju Matlab (The Math Works, 1999), kjer smo razvili lastno programsko kodo.

Predstavljeno numerično metodo verificiramo z analitično rešljivim ravninskim problemom. S primerjavo rezultatov numeričnih analiz drugega avtorja dodatno analiziramo natančnost predstavljenega numeričnega modela. Zmogljivost predlaganega algoritma prikažemo na geometrijsko zahtevnejših primerih – poenostavljenem modelu dela žerjava in cevnem vodnem toboganu.

Obravnavamo le primere jeklenih konstrukcij in pa konstrukcijo iz polimernega materiala. Pri vseh primerih predpostavimo, da je konstrukcija zgrajena iz linearnoelastičnega materiala. Utemeljitev izbire takega materialnega modela za polimerni material pojasnimo v nadaljevanju. Ker so deformacije v predstavljenih primerih relativno majhne in se ne približajo deformacijam na meji elastičnosti, je taka izbira materialnega modela smiselna. Pri izbiri stopnje končnega elementa (stopnja je za ena večja od števila notranjih točk elementa) moramo upoštevati, da pri linearizaciji enačbe (13) nastopa tretji odvod interpolacij-

linearnega prostoležečega nosilca poznamo analitično rešitev (Muršič, 1972). Prečni pomik nosilca lahko izrazimo v zaključeni obliki z neskončno vsoto:

$$u_Y(x, t) = \frac{2F_m}{A_r \rho L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_n^2 - \Omega_n^2} \left(\sin \Omega_n t - \frac{\Omega_n}{\omega_n} \sin \omega_n t \right) \sin \frac{n\pi x}{L}, \quad (17)$$

za $\Omega_n = \frac{n\pi v}{L}$, $\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{A_r \rho}}$; A_r je ploščina prečnega prereza nosilca, E je elastični modul materiala, J je upogibni vztrajnostni moment prečnega prereza, ρ je gostota materiala, L je dolžina nosilca, v je konstantna hitrost masnega delca in F_m njegova teža. Podatki o nosilcu so izbrani iz (Lee, 1996):

$$E = 207 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2},$$

$$G = 77,6 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2},$$

$$L = 1 \text{ m}, \quad \rho = 7700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$

kjer je G strižni modul materiala. Lee analizira obsežnejši nabor prostoležeče podprtih nosilcev, obteženih z enakomerno gibajočima se masnim delcem in silo; izmed njih izberemo primer nosilca okroglega prečnega prereza s ploščino $A_r = 0,00179 \text{ m}^2$, z upogibnima vztrajnostnima momentoma $J_2 = J_3 = 2,55115 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$ in torzijskim vztrajnostnim momentom $J_t = J_2 + J_3$. Začetna geometrija in obtežba sta predstavljeni na sliki 3, levo. Delec ima maso $m = 0,2 \cdot \rho \cdot A_r \cdot L$. Predpostavimo tri različne začetne hitrosti (primeri (A), (B) in (C)):

$$v_A = 21,3876 \text{ m/s}^2,$$

$$v_B = 97,217 \text{ m/s}^2,$$

$$v_C = 213,877 \text{ m/s}^2.$$

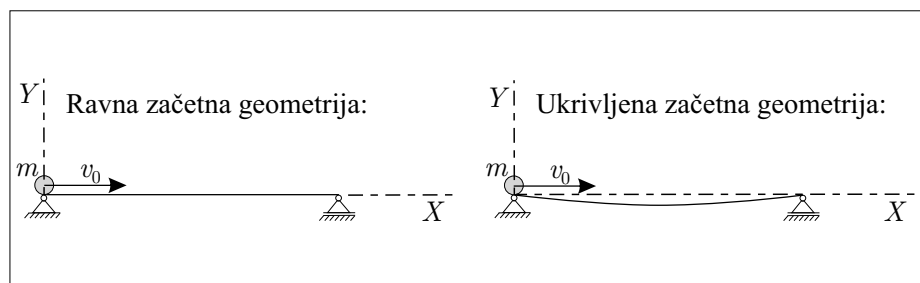
V primeru poenostavljenega modeliranja mase s točkovno silo se podane začetne hitrosti med računom ne spreminjajo, torej obravnavamo problem enakomernega prehoda sile preko nosilca. Kadar pa rešujemo problem prehoda delca preko nosilca povezano, se začetna hitrost delca s časom spreminja v skladu z gibalno enačbo delca. Vendar je pri vseh treh obravnavanih primerih prehoda delca preko prostoležeče podprtega nosilca spreminjanje hitrosti tako minimalno (reda velikosti 10^{-4}), da sprememba ne vpliva na grafično natančnost rezultatov in je primerjava numeričnih rezultatov z analitično rešitvijo poenostavljenega problema smiselna. Majhne spremembe hitrosti so posledica relativno majhnih prečnih pomikov, ki jih dosegamo v vseh primerih, povzetih po (Lee, 1996).

Nosilec modeliramo v primeru (A) z 32 končnimi elementi in v primerih (B) in (C) s 16 končnimi elementi; v vseh treh primerih za interpolacijske funkcije izberemo polinome stopnje šest, numerično integracijo izvedemo s sedmimi integracijskimi točkami. Izberemo časovni korak velikosti $\Delta t = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ in pogoj za ustavitev Newtonove iteracije $\varepsilon_{\text{New}} = 10^{-8}$. Izbira mreže končnih elementov ni bistveno odvisna od deformiranja nosilca (za to bi zadoščalo manj elementov), ampak predvsem od števila leg, ki jih glede na časovni korak zavzame delec na nosilcu, kar je neposredno odvisno od hitrosti delca. Zato v primeru (A), kjer je hitrost bistveno nižja od preostalih dveh, izberemo gostejšo mrežo. Rezultate analiz primerov (A), (B) in (C) prikazujemo za različno velike časovne intervale, saj nas zanima odziv le v časovnem območju, ko je masni delec na nosilcu.

Za vse tri primere izračunamo in na sliki 4 primerjamo normirane prečne pomike $\bar{u} = \frac{u_Y(L/2, t)}{u_{Ys}(L/2)}$, kjer je normalizacijski pomik

$$u_{Ys}(L/2) = \frac{mgL^3}{48EJ}$$

enak statičnemu pomiku po linearni teoriji. Pomiki u_Y so izračunani na več različnih načinov: (i) po predstavljeni teoriji z začetno ravno lego nosilca, kot je prikazana na sliki 3, levo (vijoličasta kombinirana črta ---); (ii) po predstavljeni teoriji z začetno ukrivljeno lego nosilca zaradi vpliva lastne teže (glej sliko 3, desno), ki jo izračunamo s predhodno statično analizo konstrukcije z metodo končnih elementov, predstavljeno v (Zupan, 2009) (zelena črtkana črta - - -); (iii) za prehod sile ustrezne velikosti, kjer rezultate izračunamo s poenostavljeno teorijo, v kateri zanemarimo vpliv vztrajnosti mase delca in predpostavimo konstantno hitrost (rešujemo nepovezan problem) (modra pikčasta črta ...); (iv) po analitični rešitvi (17) za prehod sile (polna rdeča črta -). Pomiki težiščne osi $u_Y(L/2, t)$ so v primeru začetno ukrivljene lege nosilca zaradi vpliva lastne teže izračunani kot rezultatni pomiki dveh analiz: (i) statične analize, ki določi deformiranje nosilca zaradi vpliva lastne teže, in (ii) dinamične analize, kjer je upoštevana obtežba s premikajočim se masnim delcem. Poleg primerjave s poenostavljeno analitično rešitvijo na sliki prikazemo še vrednosti iz vira (Lee, 1996) (krogec ● označuje posamično vrednost pri prehodu sile in križec + posamično vrednost pri prehodu delca). S slike 4 lahko razberemo, da se naši numerični rezultati pri prehodu sile povsem ujemajo z analitično rešitvijo, medtem ko rezultati, povzeti po literaturi, za vse tri primere precej opazno odstopajo od analitičnih rezultatov. Pri nižji hitrosti prehoda delca (A) pomiki nosilca, računani po načinih (i) do (iv), skoraj sovpadajo. Po pričakovanju se z večanjem hitrosti delca večja tudi dinamični vpliv na konstrukcijo. Predlagani postopek te vplive zajame, kar razberemo kot intenzivnejši odziv nosilca v primerih (B) in (C), kadar v račun zajamemo vplive vztrajnosti mase. Zanimiva je tudi ugotovitev, da se z večanjem hitrosti delca poveča vpliv začetne deformirane lege. Začetno deformirano lego smo izračunali s statično analizo nosilca ob upoštevanju enakomerno porazdeljene lastne teže nosilca. V vseh treh primerih je začetna deformirana lega enaka, pa kljub temu v primeru A, kjer je začetna hitrost delca manjša, skoraj nima vpliva na odziv konstrukcije. Pri večjih hitrostih (B)-(C) pa začetna deformirana lega bistveno vpliva na končen odziv konstrukcije.



Slika 3 • Geometrija in obtežba prostoležečega nosilca, levo z ravno začetno geometrijo in desno z ukrivljeno začetno geometrijo zaradi vpliva lastne teže nosilca

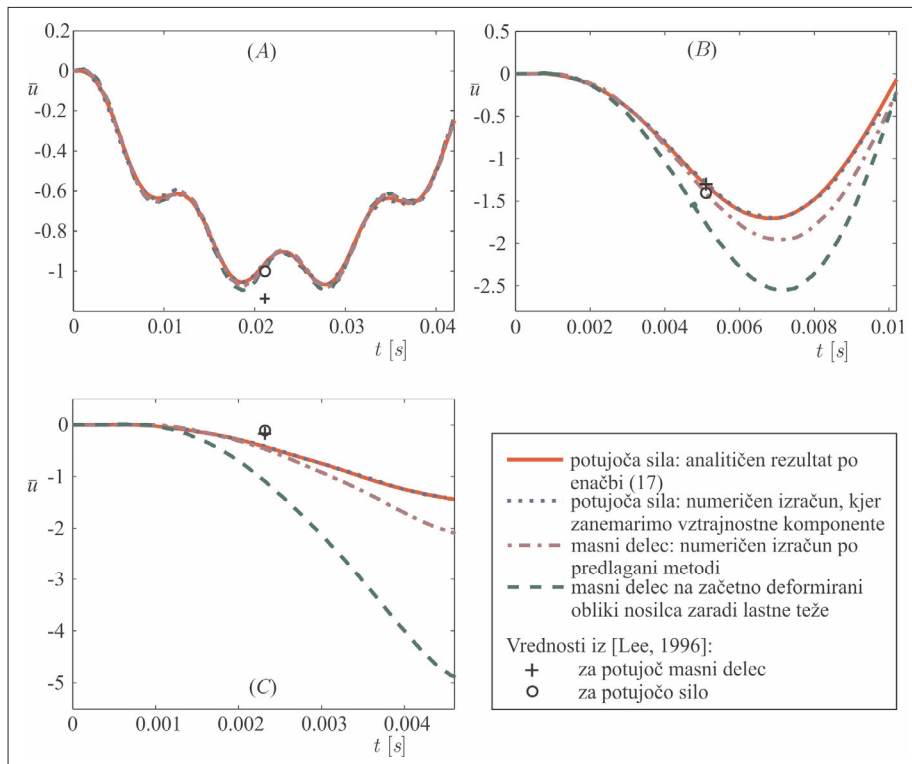
Na osnovi primerjav lahko zaključimo, da lahko pri nekaterih hitrostih delca dosežemo zadovoljive kvalitativne rezultate tudi z nepovezanim reševanjem problema in smemo celo potujoči masni delec nadomestiti s preprostejšim modelom – s potujočo silo. Pokazali smo, da pri obravnavanem primeru z večanjem hitrosti delca zelo poenostavljeni modeli nosilca in modeliranje potujočega delca s potujočo silo ne dajo več ustreznih rezultatov, saj so izračunani pomiki podcenjeni. Še več, pri večjih hitrostih delca je treba upoštevati tudi začetno deformirano lego konstrukcije. Za natančnejšo opredelitev meje območja veljavnosti preprostejših modelov je potrebna obširnejša študija vpliva spreminjanja drugih relevantnih količin na odziv konstrukcije, na primer razmerje med maso delca in maso konstrukcije.

4.2 Analiza preprostega žerjava

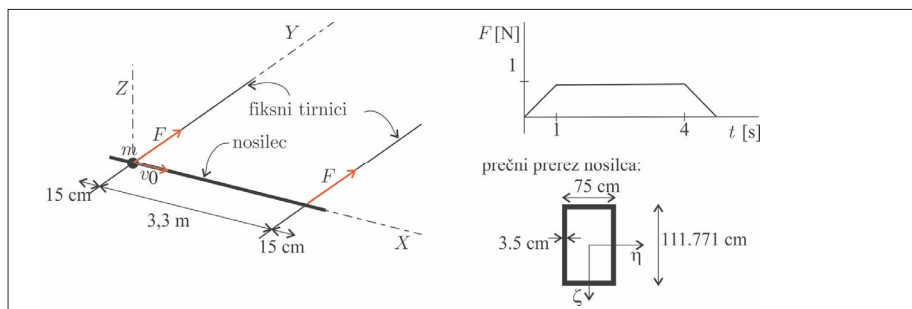
Že pri preprostih žerjavih lahko ustrezne analize potekajo zgolj z orodji, ki omogočajo prostorsko analizo konstrukcij. Na to so opozorili Wu in sodelavci že leta 2000, ko so predstavili prvi poenostavljen način upoštevanja premikajoče sile v komercialnem programu. Ker v člankih ((Wu, 2000),(Wu, 2002)) ne navajajo konkretnih podatkov o žerjavu, ki ga analizirajo, smo primorani poiskati realne podatke drugje. Francosko podjetje *Verlinde*, ki izdeluje dvigalne sisteme in žerjave, na svoji spletni strani (Verlinde, 2014) objavlja celotno tehnično dokumentacijo svojih izdelkov. Z razvitim algoritmom analiziramo žerjavni sistem ESMA, kjer se tovor premika vzdolž enojnega nosilca, nosilec pa dodatno drsi pravokotno glede na smer gibanja tovara, kot kaže slika 5.

Kjer podatki niso enolični, izberemo kar maksimalne vrednosti, na primer največji dopusten razpon in previsa nosilca, največjo dopustno maso premikajočega se tovara in njegovo najvišjo dopustno hitrost. Za prerez nosilca vzamemo škatlast pravokotni prerez, ki ima enako glavno vztrajnost $J_1 = 221 \text{ cm}^4$ kot dejansko uporabljeni UKA20-profil. Žerjav je v celoti izdelan iz jekla z elastičnim modulom $E = 21\,000 \text{ kN/cm}^2$. Lastno težo nosilca zanemarimo, delcu pa predpišemo maso 320 kg.

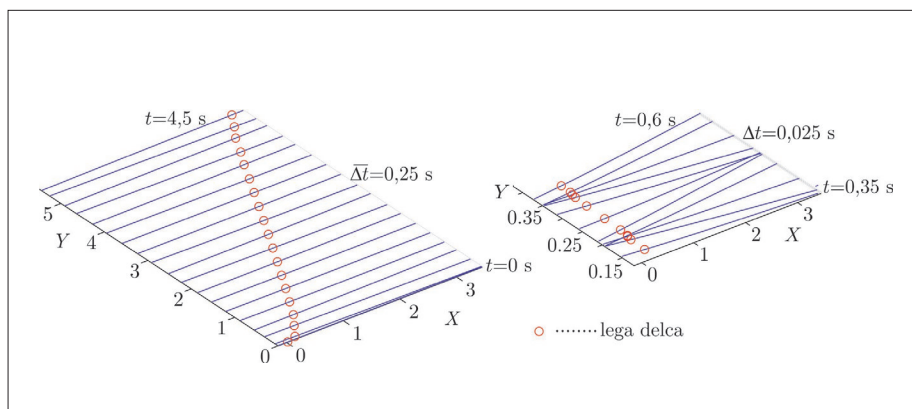
Nosilec dolžine 3,6 m v začetni legi leži vzdolž globalne osi X ; podpremo ga na razdalji 15 cm od robov nosilca tako, da sta preprečena pomika v smereh X in Z , preprečen je še zasuk okoli osi X (torzijski zasuk). V teh dveh točkah delujeta tudi motorja, ki premikata nosilec po drsnikih. To modeliramo z dvema točkovnima



Slika 4 • Normirani prečni pomiki sredine prostoležečega nosilca pri prehodu delca za primere (A), (B) in (C)



Slika 5 • Geometrija in obtežba žerjava



Slika 6 • Časovno zaporedje leg nosilca in delca; levo za vsak deseti rezultat na celotnem časovnem intervalu in desno na manjšem časovnem intervalu z desetkratno povečavo pomikov

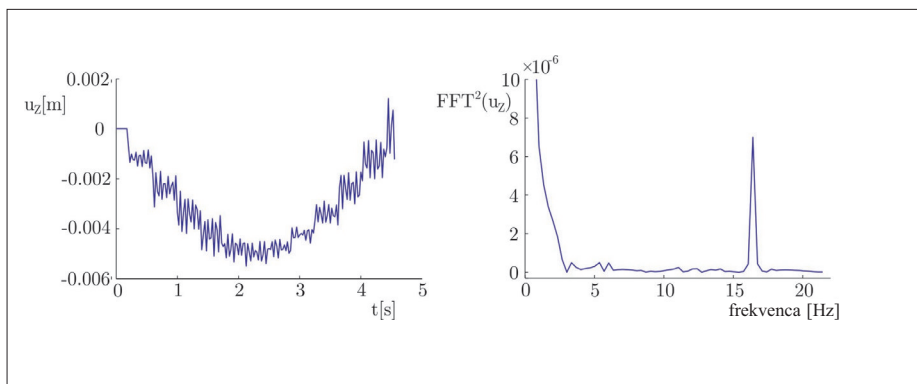
silama F s prijemališčema na mestu podpor, ki delujeta v smeri osi Y ; točkovni sili sprva linearno naraščata do časa $t = 1$ s od vrednosti 0 do 1 N, nato sta konstantni do časa $t = 4$ s, na koncu pa ponovno linearno padata do vrednosti 0 N pri $t = 5$ s. Predpostavimo, da sta drsni gredi popolnoma togi.

V trenutku, ko se začne masni delec gibati po težiščni osi nosilca od leve podpore proti desni, začne potovati tudi nosilec v smeri osi Y . Po 4,5 s, ko masni delec (tovor) doseže desno podporo, račun ustavimo. Delcu predpišemo začetno hitrost $v_0 = 0,6667$ m/s², kar je enako največji hitrosti, ki je dopustna za tovrstne žerjave. Za numerični izračun izberemo mrežo 14 končnih elementov šeste stopnje, pri čemer razpon med podporama modeliramo z dvanajstimi enako dolgimi elementi, preostala dva elementa pa določata previsa. Numerično integracijo opravimo s sedmimi integracijskimi točkami. Izberemo časovni korak velikosti $\Delta t = 0,025$ s; celoten izračun tako zahteva 180 časovnih korakov.

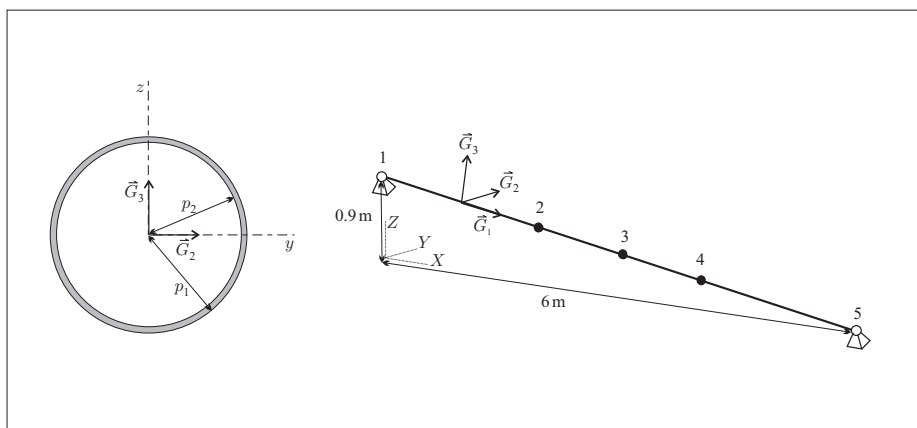
Zaporedje deformiranih leg, ki je na sliki 6 (levo) narisano za korak 0,25 s, prikazuje potek gibanja nosilca in delca skozi čas. Zanimiv je podrobnejši pogled zaporednih deformiranih leg na manjšem časovnem odseku z desetkratno povečavo pomikov, ki razkrije nihanje celotnega nosilca v smeri njegovega gibanja. Tudi pri prečnem pomiku lahko opazimo izrazite oscilacije (slika 7). Podobne frekvence delovanja pogonskega mehanizma in lastnega nihanja konstrukcije bi lahko povzročile nezaželen pojav resonance. Temu se lahko izognemo, če poznamo pomembne frekvence konstrukcije; najvplivnejšo frekvenco določimo s hitro Fourierovo analizo (Fast Fourier Transform, s kratico FFT, je vgrajena funkcija v programskem okolju Matlab (The Math Works, 1999)). Ker metoda deluje le pri številu časovnih korakov, ki so potence števila 2, to analizo izvedemo le pri rezultatih prečnega pomika srednje točke težiščne osi na časovnem območju od 0,5 s do 3,245 s (kar predstavlja $128 = 2^7$ časovnih korakov). Druga dominantna frekvenca znaša približno 16,6 Hz. Največji prečni pomik je dosežen na sredini razpona nosilca pri času $t = 2,125$ s in meri 0,0055 m, kar po pričakovanjih ne dosega 0,3 % razpona nosilca.

4.3 Vodni tobogan

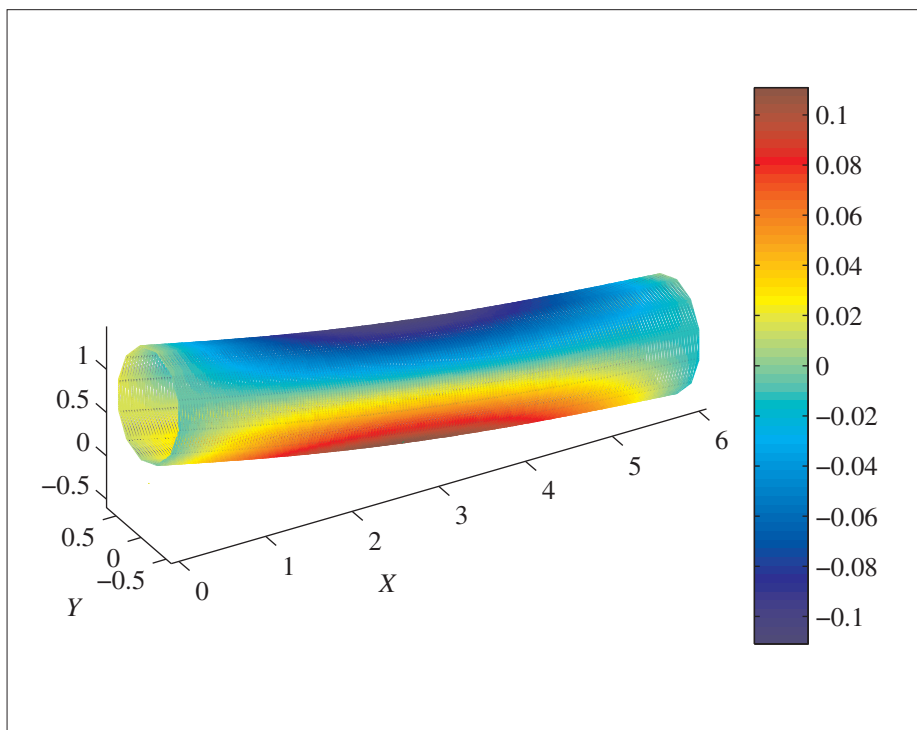
Podatke za vodni tobogan v celoti povzamemo iz internega poročila o statični analizi vodnih toboganov (Zupan, 2005). Tobogan je zgrajen iz polimernega materiala, ki ga v svoji proizvodnji uporablja podjetje Veplas,



Slika 7 • Prečni pomiki sredine razpona nosilca (levo) in njihov frekvenčni spekter (desno)



Slika 8 • Geometrija vodnega tobogana; levo prečni prerez, desno težiščna os



Slika 9 • Ovojnica poteka deformacij na obodu prereza za primer dinamične analize vodnega tobogana. Barvna skala prikazuje deformacije v odstotkih

velenjska plastika, d. d. ((Vedenik, 2005), (Zupan, 2005)), za katerega so ugotovili, da je deformacija na meji elastičnosti skoraj enaka mejni deformaciji (krhek lom). Osnova deformacija na meji elastičnosti je $\varepsilon_{\text{mejni}} = 0,023$. Za majhne deformacije je odvisnost med deformacijami in napetostmi linearna; za račun izberemo enega manj ugodnih vrednosti za elastični modul

Upoštevan je strižno tog material, zato za numeričen račun predpostavimo $G = 10E$. Prerez tobogana je kolobar, ki ga določata kroga s polmeroma $p_1 = 0,605$ m in $p_2 = 0,6$ m (slika 8, levo). Raven tobogana z naklonom 15° glede na vodoravno ravnino je obojestransko nepomično členkasto podprt, preprečena sta tudi torzijska zasuka. Sestavljajo ga trije enako dolgi ravni segmenti, ki so med seboj togo povezani. Poleg lastne teže ($\rho = 2692,74$ kg/m³), ki deluje v smeri $-g_3$, in točkovnih obtežb velikosti $F = -800$ N, ki delujejo na mestu spojev prav tako v smeri globalne vertikalne smeri, upoštevamo še druge obtežbe, povzete po poročilu (Zupan, 2005):

1. *voda v toboganu*: porazdeljena obtežba v smeri gravitacije z velikostjo 200 N/m po vsej dolžini;
2. *obtežba z vetrom*: porazdeljeni obtežbi v smeri lokalnih osi, določeni z vektorjema \vec{G}_2 in \vec{G}_3 , obe velikosti 6000 N/m vzdolž celotne težiščne osi tobogana;
3. *obtežba (teža) uporabnikov tobogana*: originalno je predpostavljena porazdeljena obtežba v smeri gravitacije velikosti 1500 N/m po vsej dolžini; vpliv uporabnikov namesto s porazdeljeno obtežbo modeliramo s pomičnim delcem z maso

1500/g kg ($g = 9.81$ m/s²) in začetno hitrostjo $v^{(0)} = 10$ m/s.

4. *obtežba s snegom*: porazdeljena obtežba v smeri gravitacije z velikostjo 2200 N/m po vsej dolžini.

Za določitev deformacijskega stanja v prečnem prerezu predpostavimo v skladu s predpostavkami teorije nosilcev linearen potek deformacij.

Najprej opravimo statično analizo po metodi končnih elementov, kot je predstavljena v delu (Zupan, 2009), pri čemer upoštevamo enake obtežbe kot v (Zupan, 2005) in enako mrežo končnih elementov: krajna dva segmenta modeliramo s po enim elementom stopnje šest, srednji segment pa z dvema elementoma stopnje šest, kot kaže slika 8. Za dinamično analizo, kjer porazdeljeno obtežbo zaradi kopalcev nadomestimo z masnim delcem, pa uporabimo mrežo petnajstih enako dolgih končnih elementov stopnje šest. Za zaključek Newtonove iteracije v obeh primerih postavimo zahtevo $\varepsilon_{\text{New}} = 10^{-8}$. Začetno obliko tobogana za dinamično analizo določimo s statično analizo kot posledico obremenitve s statičnimi obtežbami (lastna teža, teža vode v toboganu, obtežba z vetrom in obtežba s snegom). Bočna obtežba z vetrom in obtežbe

v smeri gravitacije povzročijo rahlo prostorsko ukrivljeno začetno lego nosilca. Nato tobogan dinamično obremenimo še s pomičnim delcem. Dinamično analizo opravimo s konstantnim časovnim korakom $\Delta t = 0,04$ s. Na sliki 9 prikazujemo ovojnico poteka deformacij na deformirani obliki tobogana po dinamični analizi v skladu s teorijo, predstavljeno v tem članku. V preglednici 1 so zbrani doseženi maksimalne deformacije in pomiki, izračunani po statični analizi iz vira (Zupan, 2005), po statični analizi z uporabo končnih elementov iz (Zupan, 2009) in po dinamični analizi. Pri računu relativnih razlik med dinamično in statično analizo za referenčne rezultate izberemo rezultate po statični analizi (Zupan, 2009), zaradi dobrega ujemanja s starejšimi rezultati drugega avtorja (Zupan, 2005). Ker je pri statični analizi obtežba uporabnikov upoštevana zelo konservativno – po predpisih bi zadoščalo upoštevanje porazdeljene obtežbe na dolžini 1 m na najmanj ugodni legi –, so, v skladu z pričakovanji, maksimalni deformacije in pomiki po statični analizi večji kot po dinamični analizi. Pri nižji začetni hitrosti nastajajo večja razhajanja. Pomembna ugotovitev je, da so rezultati po statični analizi konservativni.

	deformacije (%)	pomik (cm)
statika	0,115	0,664
dinamika	0,106	0,568
(Zupan, 2005)	0,11	0,66
relativna razlika (%)	7,83	14,4

Preglednica 1 • Maksimalne vrednosti deformacij in pomikov ter relativna razlika rezultatov dinamične analize glede na rezultate statične analize za primer vodnega tobogana

5 • SKLEP

V članku smo predstavili algoritem za prostorsko analizo konstrukcij pod vplivom premikajočega se telesa po metodi končnih elementov. Konstrukcijo smo modelirali z geometrijsko nelinearnimi linijskimi končnimi

elementi, telo pa z masnim delcem. Problem medsebojnega vpliva delca in nosilca smo rešili povezano. Pokazali smo, da upoštevanje nelinearnosti in povezanosti vodi v izrazitejši odziv konstrukcije v primerjavi s poenostav-

ljenimi modeli, še posebno za večje hitrosti ob nespremenjeni masi delca in konstrukcije. S primeroma preprostega žerjava in vodnega tobogana smo pokazali, da je predstavljeni numerični model za dinamično analizo prostorskih konstrukcij pod vplivom premikajoče se mase zelo učinkovit in primeren za analizo tovrstnih konstrukcij.

6 • ZAHVALA

Zahvaljujemo se Agenciji Republike Slovenije za raziskovalno dejavnost za delno financiranje teh raziskav prek raziskovalnega projekta Z2-4158.

7 • LITERATURA

- De Salvo, V., Muscolino, G., Palmeri, A., A substructure approach to the dynamic analysis of multi-span continuous beams under moving loads, *J. Sound Vib.* 329, 3101–3120, 2010.
- Lee, H. P., Dynamic response of a beam with moving mass, *J. Sound Vib.* 191, 289–294, 1996.
- The MathWorks, Inc. MATLAB, Using MATLAB, Natick, <http://www.mathworks.com>, 1999.
- Mofid, M., Akin, J. E., Discrete element response of beams with traveling mass, *Adv. Eng. Softw.* 25, 321–331, 1996.
- Muršič, M., Uvod v kinetiko konstrukcij, Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, 1972.
- Nikkhoo, A., Rofooei, F. R., Shadnam, M. R., Dynamic behaviour and modal control of beams under moving mass, *J. Sound Vib.* 306, 712–724, 2007.
- Reissner, E., On finite deformation of space-curved beams, *J. Appl. Math. Phys.* 32, 734–744, 1981.
- Siddiqui, S. A. Q., Golnaraghi, M. F., Heppler, G. R., Large free vibrations of a beam carrying a moving mass, *Int. J. Nonlinear Mech.* 38, 1481–1493, 2003.
- Simo, J. C., A finite strain beam formulation, The three-dimensional dynamic problem, Part I. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 49, 55–70, 1985.
- Vedenik, U., Optimizacija proizvodnje elementov vodnih toboganov v družbi Veplas d.d., Diplomsko delo, Fakulteta za gradbeništvo, Univerza v Mariboru, Maribor, 2005.
- Verlinda: Technical guide, <http://data.khkspa.com/Verlinda/GT/GT%20EUROSYST%2009-2011.pdf>, 09. 05. 2014.
- Vidav, I., Diferencialna geometrija, Ljubljana, DMFA Slovenije, 1989.
- Wu, J. J., Whittaker, A. R., Cartmell, M. P., Dynamic responses of structures to moving bodies using combined finite element and analytical methods, *Int. J. Mech. Sci.* 43, 2555–2579, 2001.
- Wu, J. J., Whittaker, A. R., Cartmell, M. P., The use of finite element techniques for calculating the dynamic response of structures to moving loads. *Comput. Struct.* 78, 789–799, 2000.
- Xu, X., Xu, W., Genin, J., A non-linear moving mass problem. *J. Sound Vib.* 204, 495–504, 1997.
- Yavari, A., Nouri, M., Mofid, M., Discrete element analysis of dynamic response of Timoshenko beams under moving mass, *Adv. Eng. Softw.* 33, 143–153, 2002.
- Zupan, D., Čas, B., Planinc, I., Saje, M., Statična (geometrijsko in materialno) nelinearna analiza vodnih toboganov, interno poročilo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2005.
- Zupan, D., Saje, M., Rotational invariants in finite element formulation of three-dimensional beam theories, *Comput. Struct.* 82, 2027–2040, 2004.
- Zupan, E., Dinamika prostorskih nosilcev s kvaternionско parametrizacijo rotacij, doktorska disertacija, UL FGG, Ljubljana 2010.
- Zupan, E., Saje, M., Zupan, D., The quaternion-based three-dimensional beam theory, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 198, 3944–3956, 2009.
- Zupan, E., Zupan, D., Saje, M., Dynamics of spatial beams in quaternion description based on the Newmark integration scheme, *Comput. Mech.* 51, 47–64, 2013.



25. MIŠIČEV VODARSKI DAN 2014

Narodni dom Maribor, 4. december 2014 ob 9. uri

Vodnogospodarski biro Maribor d.o.o. in Drava, vodnogospodarsko podjetje Ptuj d.d., vabita k sodelovanju na letošnjem strokovnem posvetu, kjer bodo obravnavane naslednje teme:

1. STRATEGIJA UPRAVLJANJA Z VODAMI,
2. POPLAVE V LETU 2014,
3. FINANCIRANJE VODARSKIH PROJEKTOV,
4. AKTUALNI PROJEKTI S PODROČJA UPRAVLJANJA Z VODAMI IN UREJANJA VODA.

Vsi prijavljeni referati bodo objavljeni v zborniku in na zgoščenki, izbrani pa predstavljeni na posvetu.

JUBILEJNA, 60. GENERALNA SKUPŠČINA ECCE

Poljska zbornica gradbenih inženirjev (PCCE) je bila od 16. do 18. oktobra 2014 organizator 60. jubilejnega srečanja ECCE. V Varšavi smo se zbrali predstavniki 20 nacionalnih združenj od sicer celotnega števila 26 držav. Za vse prisotne je bilo prijetno presenečenje, da je poljska strokovna in tudi politična javnost posvetila dogodku posebno pozornost. Zbor so pozdravili in počastili s svojo prisotnostjo na otvoritveni slovesnosti podpredsednik poljske vlade in gospodarski minister Janusz Piechocinski, državni sekretar iz kabineta predsednika Poljske Olgierd Dzielkowski, predsednik komiteja za gradbeništvo Poljske akademije znanosti Wojciech Radomski ter številni drugi visoki politiki in predstavniki organizacij iz akademske, znanstvene in strokovne sfere.

Organizatorji iz PCCE so se zelo potrudili in pripravili odlično srečanje, ki so ga popestrili z organizacijo konference z naslovom *Moderne rešitve pri gradnji mostov*. Na konferenci so predstavili izgradnjo avtocestnega omrežja Poljske s posebnim poudarkom na mostovih. Rezultati dela v zadnjih petih letih so vredni občudovanja in spoštovanja do kolegov strokovnjakov, ki so (bili) vključeni v te projekte, kot tudi do poljske družbe, ki je tako učinkovito pristopila k obnovi in izgradnji cestne infrastrukture. Za ilustracijo naj navedem, da so v tem času zgradili več kot 3000 kilometrov cest, od tega 1800 kilometrov avtocest skupaj s približno 500 mostovi na leto. Vsebinsko zelo dobra dopolnitev konference o mostovih je bila tudi promocija knjige *Footbridges – Small is Beautiful*, ki jo je do varšavskega srečanja izdala delovna skupina ECCE, TF CE Heritage, pod vodstvom ter uredniško in tudi konkretno ustvarjalno roko našega kolega Gorazda Humarja. Vsebino knjige je soustvarilo 70 avtorjev iz Evrope, in kot gostje v njej tudi avtorji iz Japonske.

Osrednji dogodek notranjega življenja ECCE so bile na 60. generalni skupščini volitve novih organov. Glede na to, da je staremu vodstvu potekel mandat, je bil za novega predsednika izvoljen dosednji President-elect Poljak, mag. Włodzimierz Szymczak, v izvršni odbor Executive Board pa Fernando Branco (P), dosedanj



Udeleženci 60. generalne skupščine ECCE

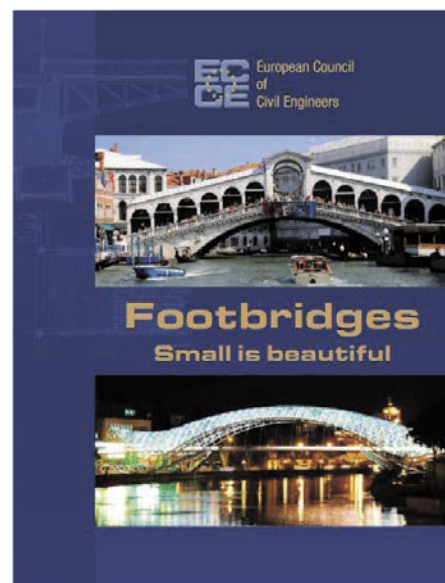
predsednik, Massimo Mariani (I), ki smo ga v kandidacijskem postopku podprli tudi mi, Vija Geme (LAT), Gorazd Humar (SI), Dimitar Natchev (BUL) in Jose Francisko Saez Rubio (SP).

Sicer je delo skupščine potekalo po ustaljenem dnevnem redu v sklopu stalnih komitejev (SC) za področja: SC Associate Membership (pridruženo članstvo), SC Development & Business Environment (razvoj in poslovno okolje), SC Environment & Sustainability (okolje in trajnostni razvoj), Education & Training (izobraževanje in usposabljanje), SC Knowledge & Technology (znanje in tehnologija) in TF CE Heritage (gradbena dediščina, tradicija). Rezultati dela posameznih komitejev so dosegljivi na spletni strani www.ecceengineers.eu. Od preostalih dogodkov je pomembna novica, da je bila v redno polnopravno članstvo ECCE v Varšavi sprejeta tudi Armenija, tako da ima zdaj družina ECCE 27 članic.

V sklopu preostalega delovanja je eden od zanimivejših predlog o organizaciji novega stalnega komiteja, ki naj bi se ukvarjal s protikorupcijskim delovanjem v gradbeništvu. Ideja je bila povzeta po WFEO, ki ima podoben

protikorupcijski organ, vendar se o tem še ni odločalo.

dr. Branko Zadnik
predsednik UO MSG



Naslovnica nove knjige ECCE

OGLED GRADBIŠČ NA ŽELEZNIŠKI PROGI PRAGERSKO–HODOŠ

Društvo gradbenih inženirjev in tehnikov Novo mesto je 24. oktobra 2014 organiziralo ogled dveh zahtevnih gradbišč zunajmivojskih križanj železnice in ceste na železniški progi Pragersko–Hodoš, in sicer podvoz Jablane in nadvoz Zgornja Hajdina.

Na obeh gradbiščih je izvajalec del CGP, družba za gradbeništvo, inženiring, proizvodnjo in vzdrževanje cest, d. d., Novo mesto. Predstavnik izvajalca del in hkrati člana našega društva Danilo Malnar, univ. dipl. inž. grad., in Matej Jarm, univ. dipl. inž. grad., sta pridobila dovoljenje za ogled gradbišč in poskrbela za strokovno predstavitev projektov.

Najprej smo si ogledali gradnjo armiranobetonskega podvoza lokalne ceste Jablane. Matej Jarm nam je podrobneje predstavil tehnologijo gradnje podvoza za predvideno dvotirno železnico, ki je zaradi stalne visoke podtalnice in aktivnega železniškega prometa zelo zahtevna (slika 1).

Projekt in tehnologijo gradnje nadvoza nad železniško progo v Zgornji Hajdini nam je predstavil odgovorni projektant tega objekta, zaposlen pri Pontingu, inženirski biro, d. o. o., Maribor Rok Mlakar, univ. dipl. inž. grad. Potek in zahtevnost gradnje nam je predstavil predstavnik izvajalca del Matej Jarm (sliki 2 in 3). Železniški nadvoz Zgornja Hajdina je prednapeta armiranobetonska konstrukcija dolžine 160 metrov. Tehnologija gradnje je postopno narivanje. Največji razpon med podporniki je 40 metrov. Podporniki so temeljeni na armiranobetonskih pilotih. Med gradnjo nemoteno poteka železniški promet. Odgovorni projektant Rok Mlakar nam je v restavraciji Pan Kidričevo dodatno predstavil nekaj podrobnosti o projektiranju in izvedbi tega mostu. Predstavil je tudi projekt Puhovega mostu, zgrajenega nad Ptujskim jezerom, ki smo si ga kasneje ogledali.

Predstavnik DRI, upravljanje investicij, d. o. o., Marko Movrin, univ. dipl. inž. grad., nam je v nadaljevanju predstavil celoten projekt rekonstrukcije, elektrifikacije in nadgradnje železniške proge Pragersko–Hodoš za hitrosti do 160 km/h, modernizacije nivojskih prehodov in izvedbe podhodov na železniških postajah; sestavni del sta tudi podvoz Jablane in nadvoz Zgornja Hajdina.

Železniški odsek Pragersko–Ormož–Hodoš–državna meja je pomemben odsek V. evrop-



Slika 1 • Gradnja AB-podvoza Jablane (Fotografija: Jože Preskar)



Slika 2 • Predstavitve gradbišča železniškega nadvoza v Zgornji Hajdini (Fotografija: Dušan Jukić)

skega železniškega koridorja, ki povezuje proge Lyon–Trst–Divača/Koper–Divača–Ljubljana–Budimpešta–ukrajinska meja. Osnovni namen projekta je povečati zmogljivost proge, omogočiti električno vleko, izboljšati kakovost storitev, zmanjšati vplive na okolje in povečati varnost železniškega in cestnega prometa. Investitor celotnega projekta je Republika Slovenija, ministrstvo za infrastrukturo in prostor.

Trenutno je to največji infrastrukturni projekt v Republiki Sloveniji, ki se sofinancira z evropskimi sredstvi. Njegova skupna vrednost je ocenjena na 465,5 milijona evrov, od tega bo 231,1 milijona evrov prispeval Kohezijski sklad.

Cilji tega projekta so povečati hitrost, prepustnost, osno obremenitev in prometno varnost, narediti bolj dostopen, kakovosten in prijazen potniški promet ter zmanjšati onesnaževanje okolja.

Projekt obsega:

- elektrifikacijo 109 km obstoječe železniške proge Pragersko–Hodoš–državna meja, povečanje hitrosti in zmogljivosti proge; zagotovitev osne obremenitve na kategorijo D4,
- rekonstrukcijo proge pred Ormožem (dolžina odseka približno 3 km),
- modernizacijo nivojskih prehodov (32 ukinitve, 27 prehodov, zavarovanih z avtomatskimi zapornicami),
- gradnjo 19 novih zunajnivojskih prehodov,
- gradnjo 41 km povezovalnih poti ter
- gradnjo postajališč Cirkovce in Grlava.

Projekt je okoljsko usmerjen in bo prispeval k preusmeritvi tovornega prometa s cest na železnice.

Ekскурzijo smo zaključili z ogledom Puhovega mostu in vodenim ogledom Ptujkega gradu (slika 4). Nekaj zanimivih dogodkov tega prijetnega jesenskega petka smo tudi fotodokumentirali in objavili na spletni strani <http://dgitnm.si/>.

**Jože Preskar, univ. dipl. inž. grad.
predsednik DGIT NM**



Slika 3 • Gradbišče železniškega nadvoza v Zgornji Hajdini (Fotografija: Jože Preskar)



Slika 4 • Udeleženci strokovne ekskurzije med ogledom znamenitosti Ptujkega gradu (Fotografija: Jože Preskar)

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Aljaž Žolnir, Primerjava dvodimenzijskih programov na primeru računa toka Bolske pri Gomilskem, mentor prof. dr. Matjaž Četina, somentorja asist. dr. Mario Krzyk in viš. pred. mag. Rok Fazarinc

Jernej Marot, Avtomatsko zaznavanje izrednih dogodkov, mentor doc. dr. Tomaž Maher, somentor viš. pred. mag. Robert Rijavec

Mojca Čebul, Ocena energetskega potenciala mHE Mešič na Paki, mentor doc. dr. Andrej Kryžanowski

Matjaž Beltram, Analiza metod za dimenzioniranje obročastih ojačitev jeklenih rezervoarjev, mentor doc. dr. Franc Sinur

Janez Mikec, Zdrs toplotne izolacije pod temeljno ploščo v primeru potresne obtežbe, mentor prof. dr. Tatjana Isaković, somentor izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Nejc Prašnikar, Projektiranje 13 nadstropne armiranobetonske poslovno - stanovanjske stavbe za srednjo stopnjo duktilnosti, mentor prof. dr. Tatjana Isaković, somentor prof. dr. Matej Fischinger

Aleš Košmrlj, Analiza in dimenzioniranje rebričastih plošč, mentor prof. dr. Boštjan Brank

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ VODARSTVA IN KOMUNALNEGA INŽENIRSTVA

Marko Preložnik, Hidravlična analiza reke Savinje skozi Laško s predlogom protipoplavnih ukrepov, mentor prof. dr. Matjaž Mikoš

David Pavlin, Primerjava naprednih oksidacijskih procesov pri čiščenju odpadne komunalne vode, mentor prof. dr. Boris Kompare, somentorja doc. dr. Darko Drev in dr. Aleksandra Krivograd Klemenčič

Anja Vihar, Koincidenčna verjetnostna analiza visokovodnih valov na sotočju Soče in Vipave, mentor doc. dr. Mojca Šraj, somentor prof. dr. Mitja Brilly

Klaudija Sapač, Stroški varstva pred poplavami v Sloveniji, mentor prof. dr. Mitja Brilly

Aleš Jecl, Načrtovanje učinkovitega izpiranja vodovodnega sistema, mentor prof. dr. Franc Steinman, somentor asist. dr. Daniel Kozelj

Denis Pečečnik, Primerjava med kompaktnimi, grajenimi in rastlinskimi čistilnimi napravami, mentor izr. prof. dr. Jože Panjan, somentor asist. dr. Mario Krzyk

Anamarina Ljubič, Idejne rešitve odvajanja in čiščenja odpadnih voda v naseljih Cundrovec, Bukošek, Sela, mentor izr. prof. dr. Jože Panjan, somentor asist. dr. Mario Krzyk

VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM I. STOPNJE OPERATIVNO GRADBENIŠTVO (VS)

Klemen Ambrožič, Projekt industrijske hale z mostnim dvigalom, mentor viš. pred. dr. Primož Može

Erik Reščič, Vpliv toplotnih mostov na porabo energije za ogrevanje v poslovno trgovskem objektu Plan invest v Kopru, mentor doc. dr. Mitja Košir

Damir Hamzić, Analiza sistemov upravljanja cestnih predorov v RS, mentor viš. pred. mag. Robert Rijavec, somentor doc. dr. Tomaž Maher

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM II. STOPNJE STAVBARSTVO

Špela Kunšič, Možnosti uporabe vakuumске toplotne izolacije v stavbah, mentor doc. dr. Roman Kunič, somentor dr. Živa Kristl

DOKTORSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Daniel Kozelj, Večkriterijska optimizacija umerjanja hidravličnih modelov vodooskrbnih sistemov, mentor prof. dr. Franc Steinman, somentorja doc. dr. Nataša Atanasova in prof. dr. Zoran Kapelan

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Karl Lamprecht, Razvoj spletnega portala za upravljanje znanja za gradbeni projekt v občini Selnica ob Dravi, mentor doc. dr. Andrej Tibaut

Edvard Pozvek, Kanalizacijski sistem in čistilna naprava v občini Turnišče, mentor viš. pred. Matjaž Nekrep Perc, somentor izr. prof. dr. Bojan Žlender

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Urh Klevže, Zasnova in analiza pomične strehe teniškega stadiona, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja

MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Sašo Turnšek, Vpliv geometrijskih elementov na prevozno hitrost v enopasovnih krožnih križiščih, mentor red. prof. dr. Tomaž Tollazzi, somentor doc. dr. Marko Renčelj

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO – EKONOMSKO POSLOVNA FAKULTETA

INTERDISCIPLINARNI UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA – SMER GRADBENIŠTVO – Bolonjski študijski program 2. stopnje

Marko Žižek, Primerjava različnih metod izmer vertikalnih pomikov pri obremenilnem preizkusu, mentor dr. Boštjan Kovačič, somentor pred. dr. Rok Kamnik

Rubriko ureja • Eva Okorn, gradb.zveza@siol.net

KOLEDAR PRIREDITEV

10.-21.1.2015

ICGCE 2015 – 2nd International Conference on Geological and Civil Engineering

Dubaj, Združeni arabski emirati
www.icgce.org

19.-24.1.2015

BAU 2015

München, Nemčija
www.bau-muenchen.com

3.-5.3.2015

ECOBUILD – Sustainable design – Construction – Energy

London, Anglija
www.ecobuild.co.uk

25.-27.3.2015

MEFORM 2015

Freiberg, Nemčija
www.imf.tu-freiberg.de/imfwp/?page_id=3654

12.-17.4.2015

7th World Water Forum

Daegu-Gyeongbuk, Republika Koreja
<http://worldwaterforum7.org/en>

14.-17.4.2015

24. International Mining Congress and Exhibition of Turkey IMCET2015

Antalya, Turčija
<http://imcet.org.tr/defaulten.asp>

22.-23.4.2015

12. Slovenski kongres o cestah in prometu

Portorož, Slovenija
www.drc.si

10.-13.5.2015

ICSDEC 2015 - International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction

Chicago, ZDA
www.icsdec.com/index.html

13.-15.5.2015

IABSE Conference Nara 2015

Nara, Japonska
www.iabse.org/Nara2015

17.-21.5.2015

ICONE23 – 23rd International Conference on Nuclear Engineering

Makuhari, Chiba, Japonska
www.icone23.org/about.html

20.-23.5.2015

ICOCEE – Cappadocia – International Conference on Civil and Environmental Engineering

Nevsehir, Turčija
www.icocee.org

22.-28.5.2015

WTC 2015 – Svetovni kongres o tunelih in podzemni gradnji

Dubrovnik, Hrvaška
http://wtc15.com/marketing_tools

25.-29.5.2015

XVth IWRA World Water Congress

Edinburgh, Škotska
www.worldwatercongress.com

3.-7.6.2015

5th International Congress on Construction History

Chicago, ZDA
www.5icch.org

22.6.-2.7.2015

XXVIth IUGG General Assembly

Praga, Češka
www.iugg.org/programmes/grants2015.php

9.-11.7.2015

International Scientific Conference Road Research and Administration, "CAR 2015"

Bukarešta, Romunija
http://car.utcb.ro/page_id=17&lang=en

15.-17.9.2015

NDT-CE- International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 2015

Berlin, Nemčija
www.ndt-ce2015.net/home

2.-4.11.2015

6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering

Christchurch, Nova Zelandija
www.6icege.com

7.-9.12.2015

Building Simulation Conference 2015

Hyderabad, Indija
www.bs2015.in/

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