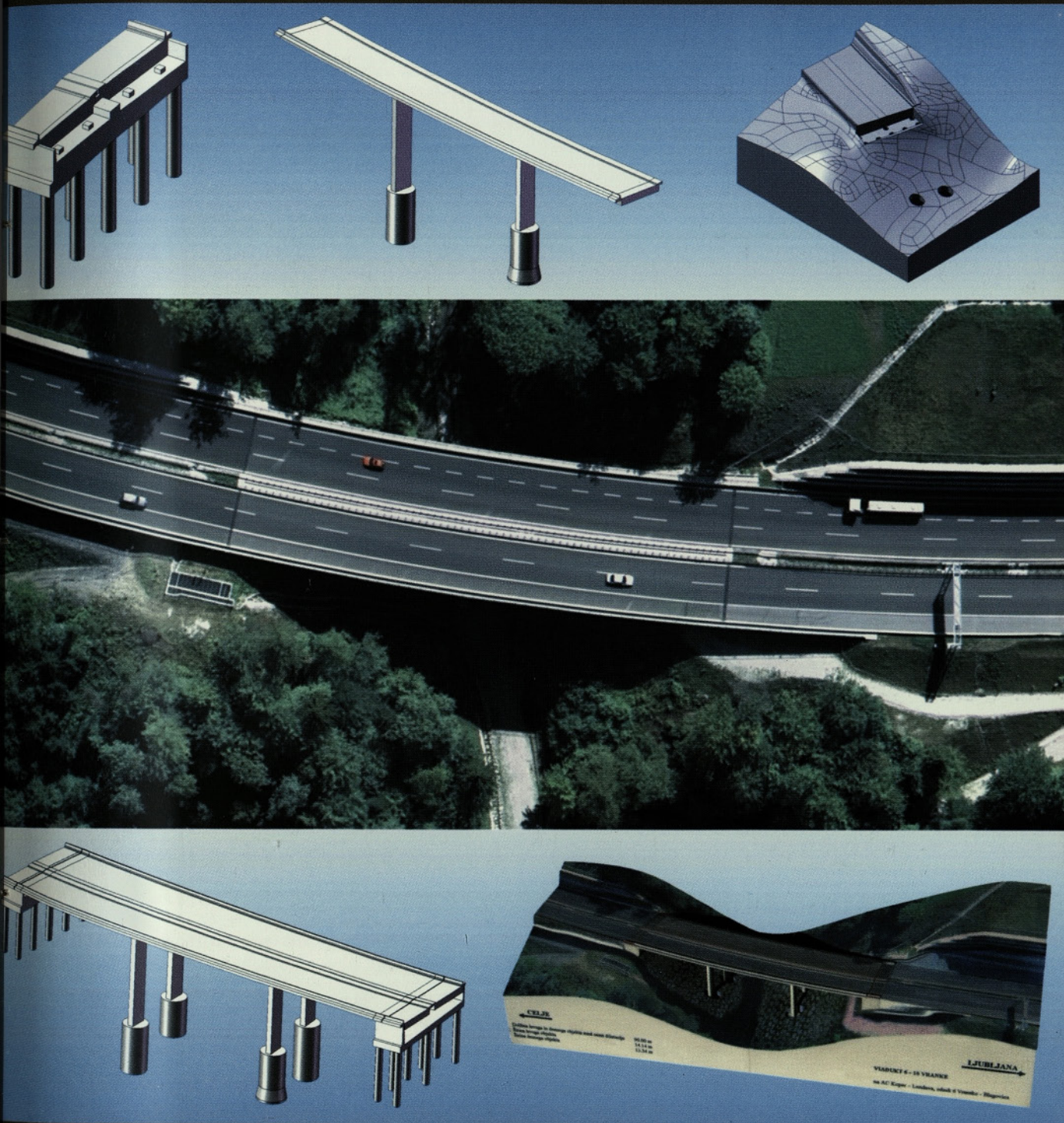
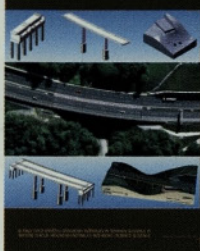






Izdajatelj:

Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Leskoškova 9a, 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 Republike Slovenije, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani** in **Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**
izr. **prof. dr. Matjaž Mikoš**

Jakob Presečnik

MSG IZS: **Gorazd Humar**

mag. Črtomir Remec

doc. dr. Branko Zadnik

FGG Ljubljana: **doc. dr. Marijan Žura**

FG Maribor: **Milan Kuhta**

ZAG: **prof. dr. Miha Tomaževič**

Glavni in odgovorni urednik:

prof. dr. Janez Duhovnik

Sodelavec pri MSG IZS:

Jan Kristijan Juteršek

Lektorica:

Alenka Raič Blažič

Lektorica angleških povzetkov:

Darja Okorn

Tajnica:

Anka Holobar

Oblikovalska zasnova:

Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

Kočevski tisk

Naklada:

3000 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 števk. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 22,95 EUR; za študente in upokojence 9,18 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 169,79 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je všteti DDV.

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

Gradbeni vestnik •

GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN
TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH
INŽENIRJEV INŽENIRSKÉ ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774

Ljubljana, april 2007, letnik 56, str. 81-112

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

- Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
- Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
- Besedilo prispevkov mora biti napisano v slovenščini.
- Besedilo mora biti izpisano z znaki velikosti 12 pik z dvojnimi presledki med vrsticami.
- Prispevki morajo imeti naslov, imena in priimke avtorjev ter besedilo prispevka.
- Besedilo člankov mora obvezno imeti: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); oznako ali je članek strokoven ali znanstven; nazive, imena in priimke avtorjev ter njihove naslove; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; naslov SUMMARY, in povzetek 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 dodatki označeni še z A, B, C, itn.
- Poglavja in razdelki so lahko oštevilčeni.
- Slike, preglednice in fotografije morajo biti omenjene v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino. Vse slike in fotografije v elektronski obliki (slike v običajnih vektorskih grafičnih formatih, fotografije v formatih .tif ali .jpg visoke ločljivosti) morajo biti v posebnih datotekah, običajne fotografije pa priložene.
- Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
- Kot decimalno ločilo je treba uporabiti vejico.
- Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki: (priimek prvega avtorja, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja morajo biti označena še z oznakami a, b, c, itn.
- V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela opisana z naslednjimi podatki: priimek, ime prvega avtorja (lahko okrajšano), priimki in imena drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
- 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.
- Prispevke je treba poslati glavnemu in odgovornemu uredniku prof. dr. Janezu Duhovniku na naslov: FGG, Jamova 2, 1000 LJUBLJANA oz. janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si. V spremnem dopisu mora avtor članka napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren. Prispevke je treba poslati v enem izvodu na papirju in v elektronski obliki v formatu MS WORD in v 8. točki določenih grafičnih formatih.

Uredništvo

Vsebina • Contents

Jubilej

stran **82**

LEANDER LITERA prof., univ. dipl. inž. grad., 80 let

Nagrajeni gradbeniki

Prešernove nagrade študentom FGG UL

Članki • Papers

stran **86**

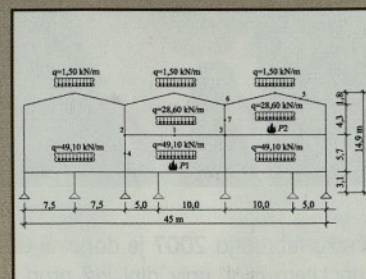
Tomaž Hozjan, univ. dipl. inž. grad.,

doc. dr. Sebastjan Bratina, univ. dipl. inž. grad.,

izr. prof. dr. Stanislav Srpčič, univ. dipl. inž. grad.

NELINEARNA POŽARNA ANALIZA JEKLENIH OKVIRNIH KONSTRUKCIJ

NONLINEAR FIRE ANALYSIS OF STEEL FRAME STRUCTURES

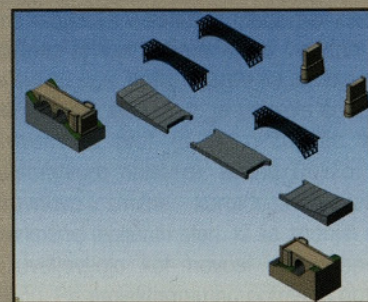


stran **95**

doc. dr. Boris Lutar, univ. dipl. inž. grad.

UPORABA HITRE IZDELAVE PROTOTIPOV IN 3D TISKANJA V GRADBENIŠTVU

USE OF RAPID PROTOTYPING AND 3D PRINTING IN CONSTRUCTION



Vabilo

REDNA SKUPŠČINA ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE

Novi diplomanti gradbeništva

J. K. Juteršek, univ. dipl. inž. grad.

Koledar prireditev

J. K. Juteršek, univ. dipl. inž. grad.

Slika na naslovnici: Viadukt Vranke in deli njegovega modela, avtor Boris Lutar

LEANDER LITERA prof., univ. dipl. inž. grad., 80 let



V začetku februarja 2007 je dopolnil 80 let Leander Litera, prof., univ. dipl. inž. grad.

Svojo življenjsko pot je začel v Celju. Po končani Gradbeni fakulteti v Ljubljani se je vrnil nazaj v svoje mesto, kjer je preživel

mlada leta. Njegovi stanovski kolegi se ga spominjajo kot mladega gradbenika na takratni Plinarni Celje.

Že kmalu po letu 1960 se je zaposlil na gradbenem oddelku Tehniške šole Celje, kjer je bil predavatelj strokovnih predmetov in kmalu postal njegov predstojnik. Mnogi dijaki se ga spominjajo kot dobrega in duhovitega predavatelja in predstojnika, ki je vedno našel lepo besedo za dijake in ostale sodelavce. V času bitke za novo šolo je slavljenec skupaj s svojimi pedagoškimi kolegi dosegel, da se je prepričalo vso javnost o nujnosti nove tehniške šole, ki bo izobraževala kakovitosten kader na področju gradbeništva. Za dijake je v gradbenih podjetjih v celjskem bazenu uredil izredno dobre pogoje, v katerih so lahko opravljali prakso v gradbeništvu in se spoznali z delom, ki jim bo omogočila zaključek srednje šole ali nadaljevanje študija na fakultetah. Po njegovem požrtvovalnem delu na gradbenem oddelku na Tehniški šoli v Celju se ga spominjajo številni dijaki, ki so danes še aktivni gradbeniki.

V celotnem času službovanja in tudi še sedaj, ko je v pokoju, je bil aktiven član Društva gradbenih inženirjev in tehnikov Celje. Opravljal je tudi funkcije v Zvezi društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije. Še posebej se bi mu v celjskem društvu radi zahvalili za to, da je v letih od 1996–1997, ko se je društvo najbolj iskalo, potegnil voz in v skladu z novo zakonodajo pripeljal društvo do ponovnega aktivnega dela. Njegovi predlogi so vsem v veliko pomoč pri oblikovanju programov in ciljev. Še vedno je član Izvršnega odbora celjskega društva.

Naj omenimo, da je bil ob številnih aktivnostih v svoji stroki tudi aktivni član Komornega mešanega zbora v Celju. Uspešno je združeval strokovno delo s kulturo in velikokrat je svoje skrbi prenesel v pesem, se s tem razbremenil in si polepšal dneve.

Ob njegovem življenjskem jubileju mu želimo še veliko zdravja in da bi s svojo duhovitostjo in izkušnjami še mnogokrat prišel med svoje gradbenike.

**Društvo gradbenih inženirjev
in tehnikov Celje**

Prešernove nagrade študentom Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani

V decembru 2006 je Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo ob Tednu Univerze v Ljubljani podelila študentske Prešernove nagrade petim študentom, ki so se posebej izkazali pri raziskovalnem delu.



Blaž Horvat je Prešernovo nagrado FGG prejel za delo **Aktivna zaščita vodarne Hrastje**, ki ga je izdelal pod mentorstvom izr. prof. dr. Borisa Kompareta. Raziskovalna naloga je nastala na pobudo JP Vodovod in kanalizacija Ljubljana, kjer imajo že nekaj časa probleme z obratovanjem vodarne Hrastje zaradi občasno prevelikega onesnaženja. Raziskava ima tako ob upoštevanju sodobnih teoretičnih pristopov in modernih programskih orodij, ki so predstavljena v nalogi, tudi veliko uporabno vrednost za zanesljivo preskrbo mesta Ljubljana z zdravo pitno vodo. V uvodu je najprej predstavljena problematika vodonošnika Ljubljanskega polja, ki je eden največjih v Sloveniji. Posebej je opisan problem vodarne Hrastje, kjer so zaradi bližine morebitnega onesnaženja vodnjaki še posebej ogroženi. Rešitev problema se išče v več smereh in ena od možnosti je tudi aktivna zaščita z nalivalnimi vodnjaki, ki je obravnavana v predloženi nalogi. V opisu modela Ljubljanskega polja so podane teoretične osnove modeliranja toka podtalnice in opisano uporabljeno programsko orodje, model MIKE SHE, ki ga je razvil Danski hidravlični institut (DHI) iz Hørsholma. Gre za

distribuiran in integriran model, katerega osnova je tridimenzionalni model podtalnice, ki pa ima zelo izpopolnjen opis napajanja in interakcijskih procesov med površinsko vodo in podtalnico. Konkretno za model Ljubljanskega polja je bila uporabljena mreža celic 200 x 200 m in tri računske plasti po globini. Znotraj tega so bile uporabljene še lokalne zgostitve s celicami 25 x 25 m ali 50 x 50 m s šestimi vertikalnimi sloji. Opisani so vsi uporabljeni meteorološki, hidrološki ter geološki in hidrogeološki podatki, s katerimi je bil model umerjen in vrednoten. V opisu vodarne Hrastje je pojasnjena problematika vodnjakov v Hrastju, kjer količina načrpane vode zaradi slabe kakovosti in občasnih večjih onesnaženj vztrajno pada (v letu 2004 je bilo načrpane le 20 % vode v primerjavi z letom 1995). Z lokalno zgoščenim modelom MIKE SHE so bile narejene simulacije širjenja morebitnega onesnaženja, ki potrjujejo ogroženost vodnjakov kljub zaščitnim pasovom, ki veljajo danes. Avtor je iskal rešitev problematike v aktivni zaščiti vodarne s pomočjo umetnega bogatenja oz. nalivalnih vodnjakov. Za vodo za bogatenje je narejena primerjalna analiza z dimenzioniranjem potrebnih objektov med tremi možnostmi: direktnim zajemom savske vode ter zajemom obrežnega filtrata z vodnjaki ali drenažo. Zadnja možnost se je na podlagi primerjave stroškov pokazala kot najugodnejša. Za nalivanje so predlagani 4 obstoječi in 6 novih nalivalnih vodnjakov, ki v kar največji meri zaščitijo črpalne vodnjake. Učinkovitost izbranih lokacij je bila dokazana tudi z uporabo lokalnega modela MIKE SHE. Simulacije z metodo sledenja delcev potrjujejo, da bi bila vodarna s predlaganim umetnim bogatenjem zaščitena pred onesnaženjem. Predlagana rešitev z umetnim bogatenjem ima veliko prednosti pred alternativnim iskanjem novega vira pitne vode: uporabljena bi bila vsa obstoječa infrastruktura, na območju vodarne so dobro znane hidrogeološke razmere, zmanjšali bi lahko obstoječa vodovarstvena območja in ne nazadnje bi lahko po potrebi na enostaven način povečali zmogljivosti črpanja vodarne. Raziskovalna naloga Blaža Horvata kaže na avtorjevo poglobljeno poznavanje problematike in uspešno povezovanje teoretičnih principov in sodobnih programskih orodij s praktičnimi problemi stroke. Po vložnem obsegu, kakovosti, sistematič-

nosti in temeljitosti opravljenega dela močno presega zahteve dodiplomskega študija. Ustrezna je tudi skrb za slovenski jezik, saj je delo napisano tekoče in z uporabo ustreznih strokovnih izrazov obravnavanega tehničnega področja.



Simona Klobčar je Prešernovo nagrado FGG prejela za delo **Vpliv odprtín na strižno nosilnost lesenih sten**, ki jo je izdelala pod mentorstvom izr. prof. dr. Roka Žarníča in s mentorstvom asist. dr. Bruna Dujíča. Delo obravnava strižne karakteristike lesenih navzkrižno lepljenih sten, ki se zadnjih nekaj let uveljavljajo kot novost na evropskem tržišču. Pri projektiranju na potresno obtežbo se navadno pri stenah z odprtinami upoštevajo le deli, ki so polni po celotni višini stene. Nekatere novejšé eksperimentalne preiskave in parametrične študije pa kažejo na to, da tudi deli sten nad oziroma pod odprtino lahko pomembno prispevajo k potresni odpornosti lesenih objektov. Simona Klobčar je delo razdelila na pet glavnih poglavij. Eksperimentalne raziskave in študijo vpliva odprtín na strižno nosilnost navzkrižno lepljenih lesenih sten je zasnovala na sklopu preiskav posameznih sestavnih elementov in celotne stene brez odprtín in z odprtinami. Sledila je smernicam, ki so jih zastavili japonski in ameriški raziskovalci pri raziskavah lesenih okvirnih konstrukcij z odprtinami. Ker se leseni masivni in okvirni sistem medsebojno zelo razlikujeta, je kandidatka podrobno opisala razlike med posameznimi konstrukcijskimi

sistemi. Opisala je les kot gradbeni material in podala prednosti in slabosti, ki bi jih projektanti morali dobro poznati, kadar imajo namen projektirati potresno odporne lesene konstrukcije. Podrobno je opisala inovativni konstrukcijski sistem v obliki lesenih masivnih plošč iz navzkrižno lepjenih lamel. Pri izhodiščih za analizo je kandidatka opisala obnašanje lesenih konstrukcij na potresnih območjih in prikazala vpliv robnih pogojev na obnašanje strižne stene kot osnovnega nosilnega elementa lesene konstrukcije. Naredila je natančen pregled tuje literature na obravnavanem področju in povzela ugotovitve japonskih in ameriških raziskovalcev. V poglavju Eksperimentalne preiskave lesenih lepjenih masivnih sten je opisala vse preiskave, ki jih je v okviru raziskovalnega dela izvedla v laboratoriju FGG. Opisala je predhodne preiskave na posameznih sestavnih elementih konstrukcijskega sklopa stene in ciklične preiskave sider, ki so bila uporabljena za pritrjevanje stene v temeljno konstrukcijo. Nato je opisala strižne preiskave lesenih masivnih stenskih elementov z natančnim opisom preizkušancev, merilnih instrumentov in merskih mest, poteka vodoravnega obteževanja in rezultatov preiskav. V poglavju Računska analiza strižne odpornosti je na podlagi rezultatov preiskav posameznih segmentov in celotne stene izdelala natančen računski model. Izdelan je bil v programu za računanje konstrukcij po metodi končnih elementov SAP 2000 – V8 Nonlinear. Nelinearno obnašanje sider je modelirala z uporabo nelinearnih vzmeti, izračun pa je izvedla z nelinearno statično »pushover« analizo. S primerjavo eksperimentalnih in računskih rezultatov je potrdila ustreznost računskega modela. Na podlagi eksperimentalno preverjenega modela je s parametrično študijo spreminjanja dolžine stene ter velikosti in oblike odprtin izvedla veliko število računskih analiz, katerih rezultati so pripomogli k ovrednotenju vpliva odprtin na strižno nosilnost in togost stenskih elementov iz navzkrižno lepjenega lesa. Rezultati parametrične študije so diagrami odvisnosti strižne togosti in strižne nosilnosti od površine odprtine, dolžine polnih segmentov stene ter koeficienta odprtin. Določila je enostavne empirične izraze, s katerimi bodo lahko projektanti pri projektiranju sodobnih lesenih masivnih konstrukcij na zelo enostaven način določili strižno nosilnost in togost sten z različnimi odprtinami. Pri svojem delu je pokazala veliko mero zagnanosti in inovativnosti ter dokazala, da je sposobna reševati tudi zahtevne probleme.

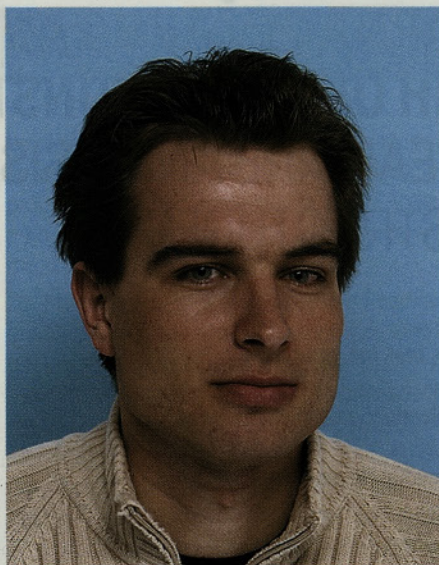


Matej Maček je Prešernovo nagrado FGG prejel za delo **Sukcija zemljin**, ki ga je izdelal pod mentorstvom prof. dr. Bojana Majesa in somentorstvom viš. pred. dr. Ane Petkovšek. Sukcija je negativni tlak porne vode v nezasičeni zemljini. Vpliva na trdnost, deformabilnost in prepustnost zemljine. Spremembe sukcije lahko povzročijo v tleh volumenske deformacije, ki škodljivo vplivajo na stabilnost, trajnost in funkcionalnost objektov. Klasična geomehanika temelji na raziskovanju obnašanja zasičenih zemljin in še pred petnajstimi leti je veljalo prepričanje, da so za geotehnično obravnavo sukcije zanimive le zemljine iz aridnih klimatskih pasov. Vse pogostejše poškodbe na velikih infrastrukturnih objektih ob hkrati vse bolj očitnih klimatskih spremembah pa so opozorile, da je treba pričeti s sistemskimi raziskavami in obravnavo sukcije tudi na območjih z zmerno klimo. Matej Maček je na predlog mentorjev sprejel izziv: sodelovati pri uvajanju meritev sukcije v Laboratoriju za mehaniko tal Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Pod vodstvom mentorjev je prvič v Sloveniji izvajal meritve sukcije zemljin z metodo filtrskega papirja, s potenciometrom in tenziometrom. Zaradi celovitosti naloge in za primerjavo z že vpeljanimi metodami je svoje meritve dopolnil z meritvami v tlačnem loncu. Slednje je opravil v sodelovanju z Biotehniško fakulteto v Ljubljani. Uvajanje novih raziskovalnih metod v geotehniko ne pomeni le nabavo nove raziskovalne opreme in izvedbo meritev, temveč zahteva študij literature, kalibracijo opreme, izbor in testiranje referenčnih materialov ter pripravo in prilagoditev postopkov dela značilnostim lokalnih geomaterialov. Rezultati eksperimentov so, predvsem v času uvajanja

novih metod, močno odvisni od pristopa k delu in kaj hitro lahko zapeljejo raziskovalca na napačno pot. Matej Maček je v okviru svojega dela kalibriral novo raziskovalno opremo in izvedel meritve sukcije na referenčnih čistih in realnih, mešanih zemljinah. Rezultate meritev je opisal z uporabo štirih analitičnih funkcij, ki so jih različni avtorji predlagali za opis referencijske krivulje. Uporabil je modele van Genuchtena, Fredlunda in Xinga, Brooks in Coreya ter Visserja. Pripravil si je orodje za določanje oblikovnih parametrov modelov. Tako smo prvič pri nas dobili materialne parametre za štiri zelo značilne zemljine, s katerimi je mogoče numerično analizirati obnašanje teh zemljin v nezasičeni coni. V zaključku naloge je pokazal možnosti uporabe teh parametrov pri numerični simulaciji dogajanja v vzorcu nezasičene zemljine, potem ko ga v edometru zalijemo in tako omogočimo postopno zasičenost. Ni se zadovoljil zgolj s prikazom možnosti numeričnega orodja, ampak je rezultate numerične analize primerjal z rezultati dejansko izvedenih meritev v laboratoriju. Referencijska krivulja omogoča boljše razumevanje in napovedovanje obnašanja zemljin, ki se vgrajujejo v zemeljske objekte, še zlasti glin, zato so raziskave sukcije pomembne tudi v praksi. Matej Maček je že med izdelavo naloge sodeloval pri uvajanju meritev sukcije v izvajalske laboratorije in pri izobraževanju njihovih kadrov. Rezultate raziskovalnega dela je predstavil na Evropski konferenci mladih geotehnikov 2006 v Zagrebu.



Franc Sinur je Prešernovo nagrado FGG prejel za delo **Torzijska odpornost vzdolžnih in prečnih ojačitev polnostenskih nosilcev**, ki jo je izdelal pod mentorstvom prof. dr. Darka



Anže Urevc je Prešernovo nagrado FGG prejel za delo **Upravljanje z jezerom – primerjava Bleda s podobnimi kraji v Avstriji**, ki ga je izdelal pod mentorstvom izr. prof. dr. Borisa Kompareta. V delu je obravnaval naravno staranje jezer, ki ga pospešujejo tudi človeške dejavnosti. Tipičen primer je Blejsko jezero, v katerem se je evτροφikacija močno povečala v začetku prejšnjega stoletja. Po številnih neuspešnih poskusih sanacije je bila v letih 1980–1982 zgrajena natega, ki je uspešno zaustavila procese staranja Blejskega jezera. Poleg natege so možni tudi drugi ukrepi, ki so jih uspešno uporabili tudi v sosednji Avstriji. Na avstrijskem Koroškem so v uporabi še drugačni modeli upravljanja z jezeri, kar omogoča ali pa onemogoča določene sanacijske ukrepe. Za nadaljnje upravljanje z Blejskim jezerom je ključnega pomena, da bodoči upravljavec pozna vse praktično možne načine sanacije in pa v okviru slovenske zakonodaje možne načine upravljanja. Anže Urevc je kot domačin in pozorni opazovalec vsa ta dejstva pravilno razumel in jih v svoji nalogi tudi temeljito opisal in analiziral. V

svoji raziskovalni nalogi je obravnaval tako tehnične oz. inženirske načine za sanacijo evτροφnih jezer kakor tudi zakonodajne in upravljalne vidike v Avstriji in na Bledu. V času raziskave je bil avtor preko Socrates-Erasmus štipendije en semester na TU Graz v Avstriji kjer je intenzivno preučeval dostopno literaturo in ekspertize s področja sanacije jezer. Obiskal je tudi sanirana jezera in si ustvaril mnenje o uspešnosti sanacije. Sanacijske ukrepe so mu tolmačili avtorji ukrepov oz. sedanji skrbniki in izvajalci državnega monitoringa (Koroški inštitut za jezera v Celovcu). Naloga obravnava za Slovenijo aktualno strokovno področje zagotavljanja kakovosti stojećih površinskih voda. Za Blejsko jezero je to zlasti pomembno s turističnega vidika, glede akumulacij za pitno vodo (npr. Padež v projektiranju) pa je to še toliko bolj pomembno za zagotovitev varne preskrbe s pitno vodo. Obravnavana naloga daje obsežen in temeljit pregled nad možnimi načini sanacije evτροφnih jezer in nad možnimi načini upravljanja z njimi. Pri tem ima ključni pomen je tudi zakonodajni in upravljalni vidik, kar na tehničnih fakultetah radi zapostavljamo. Avtor je opravil izjemno veliko samostojnega kabinetnega in terenskega dela ter navezal stike s strokovnjaki v Avstriji in v Sloveniji. Svojo raziskovalno nalogo je v prvotni obliki napisal v angleščini na TU Graz, kjer jo je tudi predstavil v okviru podiplomskih seminarjev, kar je za dodiplomskega študenta velika redkost. Vsebina, širina in globina naloge kažejo na izredno poglobljeno samostojno študentsko raziskovalno delo, ki ima spričo pomanjkanja tovrstne strokovne literature v Sloveniji tudi koristno uporabno vrednost tako za načrtovalce kot za upravljavce jezer. Vsebina naloge in izkazana strokovna poglobljenost in razgledanost avtorja znatno presegajo zahteve dodiplomskega učnega programa. Napisana je v zelo lepem, bogatem in tekočem slovenskem jeziku.

Uredništvo čestita prejemnikom nagrad, jim želi še naprej uspešno raziskovalno in strokovno delo, hkrati pa jih vabi, da s svojimi deli boljše seznanijo bralce Gradbenega vestnika.

NELINEARNA POŽARNA ANALIZA JEKLENIH OKVIRNIH KONSTRUKCIJ NONLINEAR FIRE ANALYSIS OF STEEL FRAME STRUCTURES

Tomaž Hozjan, univ. dipl. inž. grad.^{1,2}

thozjan@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Sebastijan Bratina, univ. dipl. inž. grad.¹

sbratina@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Stanislav Srpčič, univ. dipl. inž. grad.¹

ssrpcic@fgg.uni-lj.si

Znanstveni članek

UDK 624.014.2:620.17/.18:536.46:51-7

Povzetek | V članku je prikazan računski postopek analize mehanskega odziva jeklenih linijskih konstrukcij, izpostavljenih sočasnemu delovanju mehanske in požarne obtežbe. Požarna analiza je razdeljena na tri med seboj matematično nepovezane faze. Materialni in temperaturni parametri konstrukcijskega jekla so upoštevani skladno z evropskimi standardi za jeklene konstrukcije Evrokod 3. Geometrijska nelinearnost je zajeta z uporabo učinkovitega deformacijskega končnega elementa, vpeljanega na podlagi geometrijsko točne teorije linijskega nosilca. Pri razčlenitvi geometrijskih deformacij na mehanske, temperaturne in viskozne je uporabljeno adicijsko pravilo. Poudarek je na primerjavi dveh materialnih modelov, in sicer časovno odvisnega bilinearnega modela in časovno neodvisnega bilinearnega modela z eliptičnim vmesnim delom, ki je predpisan v evropskem standardu Evrokod 3. Pri prvem od obeh modelov so viskozne deformacije ovrednotene z Williams-Leirovo enačbo viskoznega lezenja. Z računskim primerom ravninskega okvirja, izpostavljenega lokalnemu požaru v določenem sektorju, je predstavljena globalna računska analiza jeklenih konstrukcij v razmerah, ki vladajo v požaru.

Summary | The paper presents the computational procedure for the nonlinear fire analysis of steel frame structures, being simultaneously exposed to mechanical and fire loads. The fire analysis is divided into three mathematically uncoupled phases. The material and temperature parameters of structural steel are taken into consideration with regard to the European standard Eurocode 3. Geometrical nonlinearity is accounted for by the use of an efficient finite element formulated on the basis of geometrically exact beam theory. The calculation is based on the additive principle where the geometrical strain increment is composed as a sum of mechanical, temperature and viscous part. The emphasis is laid on the comparison between two material models: the time dependent bilinear model within which the viscous strains are evaluated by William-Leir's equation and the time independent bilinear-elliptical material model proposed by the European standard Eurocode 3. A numerical example of multi-bay steel plane frame exposed to local fire in a certain frame sector is presented in order to show the global computational analysis of steel structures in real fire.

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

² Trimo d.d., Prijateljjeva cesta 12, 8210 Trebnje

1 • UVOD

Razvite zahodnoevropske države in ZDA imajo sorazmerno natančne in stroge predpise glede upoštevanja požarne varnosti pri arhitektonski zasnovi stavb in izbiri materialov na izpostavljenih mestih. V teh predpisih, ki jih v glavnem uporabljajo tudi naši projektanti, gre v večini primerov za zahteve glede tako imenovane požarne odpornosti funkcionalnih in konstrukcijskih elementov zgradb. Pojem požarne odpornosti se praviloma nanaša na eksperimentalno preverjeno vzdržljivost elementov in konstrukcijskih sklopov pri standardiziranem načinu segrevanja v poskusni peči. Zahtevana stopnja požarne odpornosti je odvisna od urbanističnih, socioloških, konstrukcijskih, funkcionalnih in drugih pogojev.

V strokovni literaturi in nekaterih nacionalnih tehničnih predpisih so podane s standardiziranimi eksperimentalnimi postopki podprte tabele in poenostavljene empirične formule za hitro preverjanje požarne varnosti posameznih elementov konstrukcij, na primer nosilcev, stebrov ali enostavnih okvirjev pri idealnih robnih pogojih. S takimi eksperimentalnimi in računskimi postopki je sicer mogoče razmeroma zanesljivo opisati lokalno obnašanje elementov pri visokih temperaturah. Žal pa še tako zanesljivi rezultati preiskav v poskusni peči ne morejo dati odgovora na vprašanje o mehanizmu globalnega obnašanja določene sestavljene konstrukcije v realnem požaru. Na nastanek, razvoj in potek požara ter na obnašanje posameznih elementov in konstrukcije kot celote med požarom vpliva namreč zelo veliko parametrov, katerih spreminjanja in medsebojnih odvisnosti eksperimentalno ni mogoče upoštevati. Poleg tega so tovrstne preiskave praviloma zelo zahtevne glede potrebne eksperimentalne opreme in temu primerno drage. Zato je razumljivo, da je razvoj raziskav na področju požarnega inženirstva usmerjen k metodam za računsko modeliranje termodinamičnih in termomehanskih procesov pri požarih in obnašanja konstrukcij v teh procesih. Le z učinkovitim matematičnim orodjem je namreč mogoče opraviti veliko število parametričnih študij in zajeti vplive različnih parametrov na značaj požara in obnašanje konstrukcije v njem. Seveda se pomen eksperimentalnega dela pri tem ne zmanjšuje; noprotno, eksperimentalni podatki o termodinamičnih in termomehanskih lastnostih ma-

terialov, elementov in konstrukcijskih sklopov so osnova za vsakršno računsko obdelavo problema, njihova zanesljivost pa je toliko pomembnejša, kolikor boljša so razpoložljiva matematična in računalniška orodja.

Za namene računske analize so zanimivi predvsem eksperimentalni podatki, ki omogočajo formulacijo konstitucijskih modelov konstrukcijskih materialov. Pri teh preiskavah gre v večini primerov za enoosne poskuse na standardnih vzorcih materiala, s katerimi določamo sovisnosti med deformacijami, napetostmi in temperaturo. Vendar pri tem nalečimo na dodatno težavo; znano je namreč, da se v temperaturnem območju nad 400 °C pri običajnih napetostih v jeklenih vzorcih pojavijo izrazite viskozne, torej časovno odvisne deformacije, ki z višanjem temperature občutno naraščajo in pogosto celo prevladajo nad mehanskimi in temperaturnimi deformacijami. Pri eksperimentalnem delu torej nastopi čas kot dodatna spremenljivka, kar eksponentno poveča število potrebnih poskusov. Poleg tega se pojavi tudi vprašanje, kako pri visokih temperaturah dovolj natančno ločiti viskozne od plastičnih deformacij. Da bi se izognili opisanim nejasnostim, se v literaturi pojavljajo poenostavljeni, časovno neodvisni modeli, zasnovani na predpostavki, da je v neelastičnem delu zajeto tudi viskozno lezenje jekla. Ustrezni napetostno-deformacijski diagrami so konstruirani pri različnih temperaturah, doseženih z enakomernim segrevanjem, neelastični del pa je praviloma modeliran s kombinacijo eliptičnega in linearnega poteka. Tak časovno neodvisen materialni model je predlagan tudi v Evrokodu 3 (EC3, 2003), pri čemer je naveden tudi interval hitrosti segrevanja (2 do 50 K/min). Vendar poglobljeni poskusi kažejo, da hitrost segrevanja pomembno vpliva na razvoj deformacij (Huang, 2004). Za realne požare so značilni veliki razponi temperaturnih gradientov, zato je uporabnost časovno neodvisnih materialnih modelov v računski analizi jeklenih konstrukcij v realnih požarih omejena. Verodostojne rezultate lahko pričakujemo le tedaj, ko temperatura v bistvenih delih konstrukcije ne preseže 450 °C. To pa je možno zgolj v primerih popolno zaščitenih konstrukcij ali pa pri tako majhnih zalogah gorljivih snovi v požarnem prostoru, da se požar ne more razviti do polne intenzitete.

Z namenom izpopolnitve računskih metod, s katerimi bi bilo mogoče bolj natančno opisati globalno obnašanje jeklenih konstrukcij v požaru, je bilo v zadnjem desetletju izvedenih nekaj večjih testov in naravnem merilu. Med najbolj odmevnimi je bila preiskava osem-etažne jeklene poslovne zgradbe (Newman, 2001) v Cardingtonu (VB). V sklopu te preiskave je bilo opravljenih šest večjih eksperimentov, in sicer od preizkušanja posameznih nosilcev in okvirja do večjega poslovnega prostora. Rezultati so pokazali, da lahko jeklene konstrukcije z višjo stopnjo statične nedoločenosti pri sektorskem požaru ohranijo nosilno integriteto vse tja do temperature 1000 °C, in to brez dodatne požarne zaščite. Na podlagi tega eksperimenta je bilo izdelanih več računalniških programov za termomehansko analizo okvirnih konstrukcij, ki v večji ali manjši meri zajemajo posebnosti obravnavanega problema.

V slovenskem prostoru smo se z numeričnimi raziskavami problemov požarnega inženirstva začeli ukvarjati v osemdesetih letih prejšnjega stoletja. Prvo uporabno programsko orodje za numerične preiskave jeklenih linijskih konstrukcij pri požarni obtežbi predstavlja program NONFIRE (Srpčič, 1991). Program je nastal kot modificirana verzija programa NONFRAN (Banovec, 1988). S smiselno povezavo Van Foekenovega bilinearnega mehanskega modela in Williams-Leirove enačbe viskoznega tečenja je bil razvit razmeroma obvladljiv konstitucijski model konstrukcijskega jekla pri visokih temperaturah, ki je v kombinaciji z naprednim nelinearnim linijskim končnim elementom (Banovec, 1986) omogočal geometrijsko, materialno in časovno nelinearno numerično analizo jeklenih ravninskih okvirjev pri spremenljivi mehanski in temperaturni obtežbi. Pomembno izboljšavo in razširitev v numeričnem in vsebinskem pogledu pomeni program NFIRA (Bratina, 2003) in je namenjen predvsem računski obravnavi armiranobetonskih konstrukcij v požaru. V programu je uporabljen učinkovit linijski končni element (Planinc, 1998), ki je zasnovan na geometrijsko točni Reissnerjevi teoriji ter Bernoullijevi predpostavki o ravnih prečnih prerezi.

Za namene tega članka je uporabljena modificirana verzija programa NFIRA, prirejena za računanje jeklenih ravninskih okvirjev pri požarni obtežbi. V programu sta vgrajena časovno neodvisni bilinearno-eliptični materialni model, podan v standardu Evrokod 3 (EC3, 2003), ter bilinearni mehanski model z viskoznim lezenjem jekla (Srpčič, 1991).

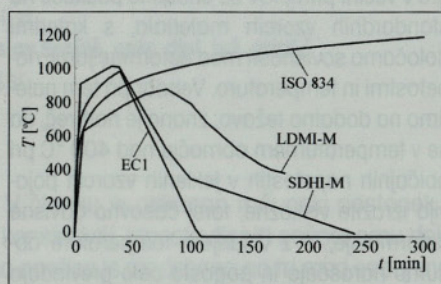
2 • RAČUNSKI POSTOPEK POŽARNE ANALIZE KOSTRUKCIJ

Matematično modeliranje fizikalne interakcije med požarnim prostorom in konstrukcijo je zaradi velikega števila parametrov zelo zapleteno. Skladno s prvim zakonom termodinamike je sprememba notranje energije enaka vsoti dovedene toplote in vloženega dela. Ker je pri požarih vpliv opravljenega mehanskega dela na spremembo temperature polja konstrukcije v primerjavi z vplivom dovedene toplote sorazmerno majhen, ga lahko pri računu temperaturnega polja jeklenih konstrukcij zanemarimo. S tem lahko požarno analizo konstrukcij razdelimo na tri med seboj matematično nepovezane faze. V prvi fazi določimo razvoj temperature v požarnem prostoru. V drugi fazi izračunamo časovno in prostorsko razporeditev temperature po konstrukciji, ki pove, kako temperatura konstrukcije sledi ogrevanju in ohlajevanju požarne okolice. V tretji, zadnji fazi, pa analiziramo mehanski odziv konstrukcije na sočasen vpliv časovno spremenljive mehanske in temperaturne obtežbe.

2.1 Določitev časovnega poteka temperature okolice med požarom

Analitično obravnavanje razvoja temperatur med požarom je zaradi velikega števila dejavnikov, ki so bolj ali manj slučajni, zelo zapletena naloga. V inženirski praksi so zato v rabi različne poenostavitve v obliki parametričnih požarnih krivulj, ki so zasnovane na rezultatih eksperimentov in s katerimi skušamo opisati časovni potek temperature med požarom. Požarne krivulje lahko razdelimo v dve skupini. V prvi skupini so krivulje, ki predstavljajo skrajno poenostavitve realnega požara; to so standardne požarne krivulje (ISO834, BS476, ASTM E119). Uporabljajo jih večinoma v požarnih laboratorijih za eksperimentalno določanje požarne nosilnosti posameznih elementov konstrukcije. Na teh krivuljah temelji tudi večina poenostavljenih analitičnih metod v požarnem inženirstvu. Temperatura okolja pri teh krivuljah ves čas narašča, zato so te krivulje za globalno mehansko analizo konstrukcij, ki so izpostavljene naravnim požarom, praktično neuporabne. Drugo skupino tvorijo parametrične požarne krivulje, s katerimi skušamo kolikor je mogoče realno opisati potek naravnega požara. Na obliko teh krivulj vpliva veliko parametrov, predvsem zaloga gorljivega materiala ter velikost, oblika in možnost prezračevanja pro-

stora. Na sliki 1 so prikazane različne požarne krivulje. Poleg standardne požarne krivulje ISO834 so prikazane še nekatere parametrične krivulje za simulacijo realnega požara. S krivuljama EC1 in SDHI-M je opisan kratkotrajen požar visoke jakosti, kar ustreza pisarniškim prostorom. Požar v skladiščnih prostorih, kjer je veliko gorljive snovi in so manj zračeni, opisuje krivulja LDMI-M.



Slika 1 • Parametrične požarne krivulje

2.2 Časovna razporeditev temperature v jeklenih elementih konstrukcije

Glede na znan časovni režim požara določimo prostorsko in časovno razporeditev temperature po elementih konstrukcije kot rešitev problema nestacionarnega prostorskega prevajanja toplote. S sevanjem, konvekcijo in kondukcijo prihaja do prenosa toplote iz okolja na konstrukcijo in obratno. Matematično gledano moramo pri tem rešiti parcialno diferencialno enačbo za nestacionarno prevajanje toplote po konstrukciji s pripadajočimi robnimi in začetnimi pogoji.

Pri določitvi temperaturnega polja linijske konstrukcije običajno predpostavimo, da je temperatura v požarnem sektorju ali pa vsaj na območju dolžine elementa homogena, zato lahko spreminjanje temperature v vzdolžni smeri linijskega elementa zanemarimo. Tako je za določitev temperaturnega polja določenega elementa konstrukcije potrebno določiti spreminjanje temperature po karakterističnem prečnem prerezu elementa.

Pri jeklenih konstrukcijah so za nosilne elemente največkrat uporabljeni tenkostenski nosilci. Zaradi njihove posebne oblike in velike temperaturne prevodnosti kovin lahko predpostavimo, da je temperatura v vsakem prerezu enakomerna po celotnem prečnem prerezu nosilca in s tem tudi po celotnem elementu. Z upoštevanjem te predpostavke lahko temperaturna polja posameznih elementov

konstrukcije določimo s pomočjo rekurzivnih formul (EC3, 2003), (Srpčič, 1991)) v odvisnosti od tako imenovanega faktorja masivnosti prereza $m = o/A$, kjer je o obseg, A pa površina prečnega prereza.

2.3 Mehanski odziv konstrukcije na časovno spremenljivo mehansko in temperaturno obtežbo

V predstavljenem računskem postopku za geometrijsko in materialno nelinearno analizo jeklenih konstrukcij pri požarni obtežbi rešujemo sistem posplošenih ravnotežnih enačb konstrukcije z Newtonovo inkrementno-iteracijsko metodo (Bratina, 2003). Pri tem celotni čas trajanja požara razdelimo na časovne korake ($t^i, t^{i+1} = t^i + \Delta t$). Znotraj i -tega časovnega koraka pri znanem prirastku obtežnega faktorja izračunamo popravke posplošenih vozliščnih pomikov do želene natančnosti. Analiza temelji na predpostavki, da so posamezna vzdolžna materialna vlakna izpostavljena enoosnemu napetostnemu stanju. S tem se pri formulaciji konstitucijskih enačb neposredno navežemo na rezultate enoosnih preizkusov. V smislu Lagrangevega opisa se napetosti in deformacije nanašajo na začetno, nedeformirano stanje nosilca. Ob upoštevanju rezultatov predhodne faze lahko privzamemo, da je temperatura v vsaki točki elementa znana funkcija časa $T = T(t)$. Da bi lahko upoštevali geometrijsko in materialno nelinearnost problema, definiramo zveze med geometrijsko deformacijo ε , temperaturo T , časom t in vzdolžno normalno napetostjo σ v inkrementi obliki. Pri tem prirastek geometrijske deformacije $\Delta\varepsilon$ izračunamo po adicijskem pravilu

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_M + \Delta\varepsilon_T + \Delta\varepsilon_C, \quad (1)$$

kjer je $\Delta\varepsilon_M$ prirastek mehanske deformacije, $\Delta\varepsilon_T$ prirastek temperaturne deformacije in $\Delta\varepsilon_C$ prirastek časovno odvisne viskozne deformacije. Pri računu napetosti prečni prerez razdelimo na posamezna območja, znotraj vsakega pa uporabimo 3×3 ploskovno Gaussovo numerično integracijo. Mehansko stanje, pri katerem postane tangentna togost na matrika globalne konstrukcije singularna, razumemo kot mejno nosilnost konstrukcije. Čas, pri katerem se to zgodi, imenujemo kritični čas, pripadajočo temperaturo okolja pa kritična temperatura (t_{cr}, T_{cr}).

2.3.1 Prirastek temperaturnih deformacij

Prirastek temperaturne deformacije $\Delta\varepsilon_T$ pri spremembi temperature $\Delta T = T^{i+1} - T^i$ izračunamo

namo v skladu s standardom Evrokod 3 (EC3, 2003), kjer je temperaturna deformacija podana s formalnim izrazom $\varepsilon_T = f(T)$. Tako znotraj časovnega koraka (t^i, t^{i+1}) določimo prirastek temperaturne deformacije z izrazom

$$\Delta \varepsilon_T = \varepsilon_T^{i+1} - \varepsilon_T^i. \quad (2)$$

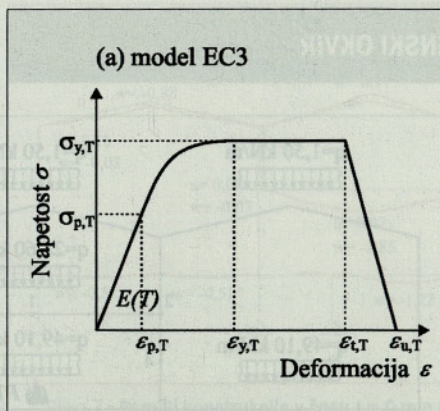
2.3.2 Prirastek mehanske deformacije

Prirastek mehanske deformacije, ki je z vzdolžno normalno napetostjo povezan s parametri enosnega preizkusa in ni eksplicitno odvisen od časa oziroma temperature, je sestavljen iz prirastka elastičnega $\Delta \varepsilon_E$ in plastičnega $\Delta \varepsilon_P$ dela deformacij. Zaradi adicijskega pristopa lahko prirastek mehanske deformacije izračunamo iz enačbe (1). Tako dobimo:

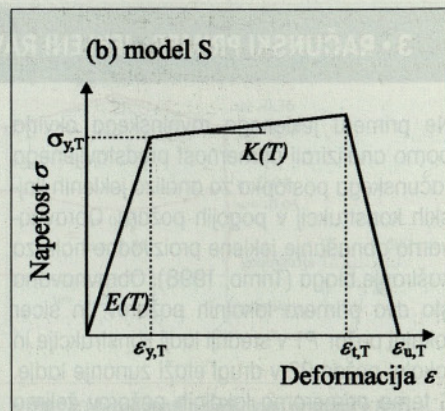
$$\Delta \varepsilon_M = \Delta \varepsilon_E + \Delta \varepsilon_P = \Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_T - \Delta \varepsilon_C. \quad (3)$$

V tem prispevku uporabimo za račun napetosti dva materialna modela. Na sliki 2 je prikazan časovno neodvisni bilinearni materialni model z eliptičnim prehodom, kakršnega podaja Evrokod 3 (EC3, 2003) in ga zato označimo z EC3. Enosni materialni diagram ima štiri dele. Prvi del opisuje linearno elastično obnašanje jekla. Neelastični del je opisan z eliptičnim prehodom v območje brez utrditve, četrti del pa predstavlja mehčanje oziroma porušitev. Model je vpeljan ob predpostavki, da je v neelastičnem delu zajeto tako plastično kakor tudi viskozno tečenje jekla. Drugi uporabljeni model z oznako S (Srpič, 1991) je zasnovan kot kombinacija časovno neodvisnega bilinearnega elastično – plastičnega modela, ki povezuje napetost z mehanskim delom deformacije (slika 3), ter viskozne deformacije (slika 3), ter viskozne deformacije v odvisnosti od časa. V mehanskem delu modela je uporabljen kinematični model utrjevanja, s katerim vsaj približno simuliramo znani Bauschingerjev efekt. To je pomembno zlasti pri statično nedoločenih konstrukcijah v razmerah realnega požara, kjer je umestno pričakovati ciklično spreminjanje napetosti ter prehode iz plastičnega napetostnega stanja v nategu v plastifikacijo v tlaku in obratno. Viskozni del časovno odvisnega materialnega modela je opisan v razdelku 2.3.3.

Dobro je znano, da se z višanjem temperature pomembno znižuje togost jeklenih elementov, saj tako modul elastičnosti kakor tudi napetost na meji tečenja pri tem nelinearno upadajo. Pri modelu EC3 zajamemo spreminjanje materialnih parametrov enosnega preizkusa skladno s standardom Evrokod 3, pri modelu



Slika 2 • Eliptični materialni model



Slika 3 • Bilinearni materialni model

S pa uporabimo francoske predpise (Construction metallique, 1976).

2.3.3 Prirastek viskozne deformacije

Pri normalni temperaturi in pri napetostih, ki ne dosega ekstremnih vrednosti, je viskozno tečenje konstrukcijskega jekla praktično zanemarljivo. Pri temperaturah nad 400 pa poskusi kažejo, da se pri konstantnih napetostih deformacije s časom razmeroma hitro povečujejo. V območju časovnih intervalov, ki so značilni za trajanje realnih požarov, gre za razvoj viskoznih deformacij v primarni in sekundarni fazi. V literaturi je predlaganih več modelov za opis viskoznega deformiranja jekla pri visokih temperaturah. Med njimi je najbolj znan in eksperimentalno dokumentiran Harmathyjev model, ki temelji na Dornovi teoriji viskoznega lezenja jekla.

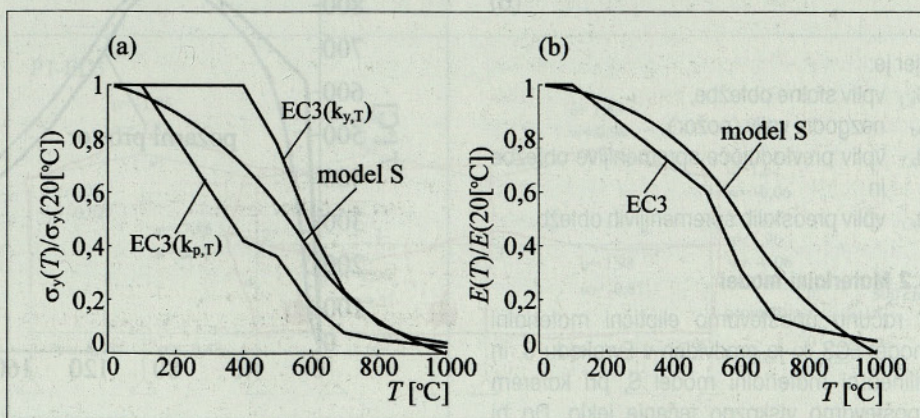
V okviru materialnega modela S je uporabljen Harmathyjev model v modificirani obliki (Williams-Leir, 1983), pri čemer sta v enačbi lezenja povezana viskozna deformacija in realni čas t

$$\frac{d\varepsilon_C}{dt} = \text{sign}(\sigma) b_1 \coth^2(b_2 \varepsilon_C). \quad (4)$$

Na podlagi velikega števila eksperimentov je Williams-Leir podal analitične izraze za parametre viskoznega lezenja b_1 in b_2 za različne vrste jekel. Koeficienta b_1 in b_2 sta funkciji konstantne napetosti σ (lb/in²) in absolutne temperature T (K). Z inkrementnim pristopom je dovolj natančno zadoščeno predpostavki o konstantni napetosti in temperaturi znotraj časovnega koraka, saj z manjšanjem časovnega intervala Δt manjšamo tudi spremembo temperature, poleg tega pa v majhnem časovnem intervalu ni mogoča velika sprememba napetosti σ . Tako znotraj časovnega koraka (t^i, t^{i+1}) prirastek viskozne deformacije $\Delta \varepsilon_C$ izračunamo z enačbo

$$\Delta \varepsilon_C = \text{sign}(\sigma) b_1 \coth^2(b_2 \varepsilon_C) \Delta t. \quad (5)$$

Podrobnosti v zvezi z določitvijo viskoznega dela deformacije so prikazane v delih (Srpič, 1991), (Bratina, 2003).



Slika 4 • Spreminjanje (a) napetosti na meji plastičnega tečenja in (b) elastičnega modula jekla v odvisnosti od temperature

3 • RAČUNSKI PRIMER: JEKLENI RAVNINSKI OKVIR

Ne primeru jeklenega ravninskega okvirja bomo analizirali primernost predstavljenega računskega postopka za analizo jeklenih linijskih konstrukcij v pogojih požara. Obravnavamo obnašanje jeklene proizvodne hale za kaširanje blaga (Trimo, 1998). Obravnavana sta dva primera lokalnih požarov, in sicer lokalni požar P1 v srednji ladji konstrukcije in lokalni požar P2 v drugi etaži zunanje ladje. S tega primeroma lokalnih požarov želimo simulirati obnašanje jeklene hale v pogojih realnega požara. Oceniti hočemo vpliv izbranega materialnega modela jekla na mehanški odziv in požarno odpornost konstrukcije ter analizirati vpliv neogrevanih elementov na obnašanje statično nedoločene konstrukcije med požarom. Predpostavimo, da je globalni in lokalni uklon iz ravnine okvirja preprečen.

3.1 Računska shema in robni pogoji

Računski model obravnavanega okvirja je prikazan na sliki 5. Konstrukcija je triladijski okvir z razponi med stebri 15 m in z višino 14,9 m. Prva etaža je na višini 3,1 m, druga pa na 8,8 m. Konstrukcija je izdelana iz vroče valjanih jeklenih elementov: glavni stebri HEB 400, stebri v pritličju HEA 450, nosilci v prvi etaži HEA 450, v drugi etaži HEA 500 ter prečke strehe IPE 300. Vsi stiki so tog. Obtežbo določimo skladno z evropskim standardom Evrokod 1 (EC1, 2004) za požarno projektno stanje

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot E_d =$$

$$= \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_d + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}, \quad (6)$$

kjer je:

$G_{k,j}$ vpliv stalne obtežbe,

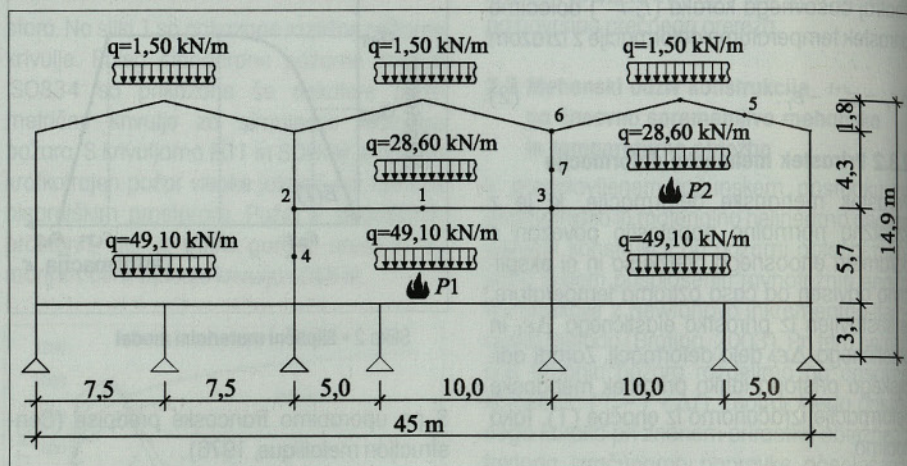
A_d nezgodni vpliv (požar),

$Q_{k,1}$ vpliv prevladujoče spremenljive obtežbe in

$Q_{k,i}$ vpliv preostalih spremenljivih obtežb.

3.2 Materialni model

V računu upoštevamo eliptični materialni model EC3, ki je predviden v Evrokodu 3, in bilinearni materialni model S, pri katerem upoštevamo viskozno tečenje jekla. Da bi pokazali vpliv intenzivnosti viskoznega tečenja na požarno odpornost konstrukcije,



Slika 5 • Računski model okvirja

obravnavamo dve vrsti jekla: Austen 50 (oznaka modela S1) kot primer jekla z nižjo intenzivnostjo viskoznega tečenja in A149 (S2) kot jeklo z razmeroma izrazitim viskoznim tečenjem (Williams-Leir, 1982; Srpčič, 1991). Začetni elastični modul $E(20(^{\circ}\text{C})) = 21000 \text{ kN/cm}^2$ in začetna napetost na meji tečenja $\sigma_y(20(^{\circ}\text{C})) = 23,5 \text{ kN/cm}^2$ sta enaka za vse elemente.

3.3 Temperaturna obtežba

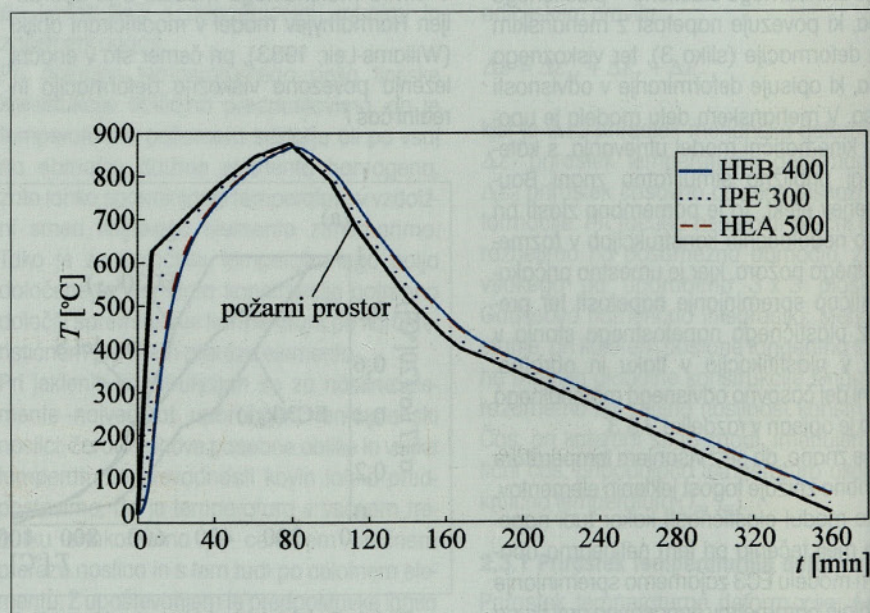
Za časovni potek temperature v požarnem prostoru izberemo parametrično požarno krivuljo LDMI-M, ki je predvidena za simulacijo

požarov v skladiščnih prostorih. Časovni razvoj temperature v ogrevanih elementih konstrukcije določimo ob predpostavki, da je temperatura elementa enakomerna. Uporabimo rekurzivno formulo, podano v Evrokodu 3 (EC3, 2003), kjer upoštevamo ustrezne masivnosti ogrevanih prereзов:

$$\Delta T_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} h_{net,d} \Delta t. \quad (7)$$

Pri tem je:

k_{sh} korekcijski faktor zaradi zasenčenosti A_m/V masivnost prereza (m) (m^{-1})



Slika 6 • Časovni razvoj temperature

A_m površina elementa na enoto dolžine (m^2)
 V volumen elementa na enoto dolžine (m^3)
 c_a specifična toplota jekla (J/kgK)
 $h_{net,d}$ neto toplotni tok na enoto ploščine (W/m^2)
 ρ_a gostota jekla (kg/m^3)
 Δt prirastek časa (s)

Korekcijski faktor k_{sh} je za I-profile določen z enačbo:

$$k_{sh} = 0,9 [A_m / V]_b / [A_m / V], \quad (8)$$

kjer je:

$(A_m/V)_b$ konturna masivnost prereza (angl. box value of section factor).

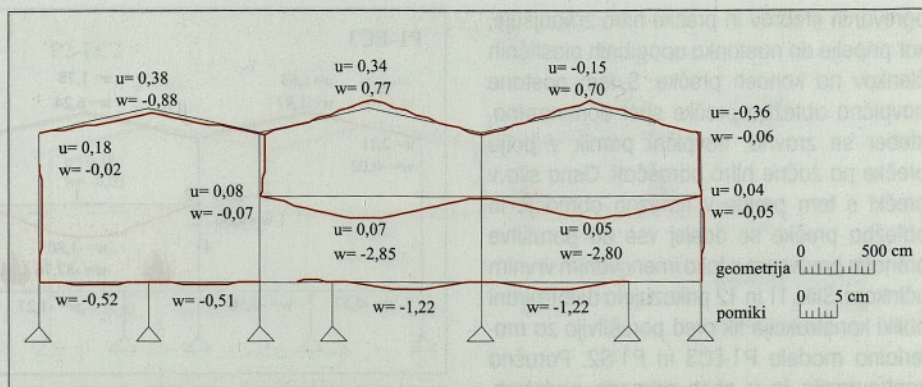
Korekcija prirastka temperature zaradi zasenčenosti dela razvejanega prereza je v rahlem nasprotju z osnovno predpostavko o enakomernem segrevanju celotnega prereza, zato za korekcijski faktor k_{sh} vzamemo vrednost 1 in smo s tem na varni strani. Prirastek časa Δt ne sme biti večji od 5 sekund. V primeru lokalnega požara P1 sta ogrevana stebra prereza HEB 400 ($m = 100 m^{-1}$) in prečka etaže HEA 500 ($m = 109 m^{-1}$). V primeru P2 pa je poleg stebrov ogrevana tudi prečka strehe prereza IPE 300 ($m = 220 m^{-1}$). Pri računu razvoja temperature po elementih upoštevamo spreminjanje termičnih parametrov konstrukcijskega jekla skladno s standardom Evrokod 3. Slika 6 prikazuje časovni razvoj temperature požarnega prostora in ogrevanih elementov.

3.4 Analiza rezultatov

Na sliki 7 je prikazana začetna deformirana lega obravnavanega okvirja, ki ustreza mehanski obtežbi pred nastopom požarne obtežbe. V nadaljevanju analiziramo mehanški odziv jeklene hale ločeno za lokalni požar P1 in P2.

3.4.1 Lokalni požar P1

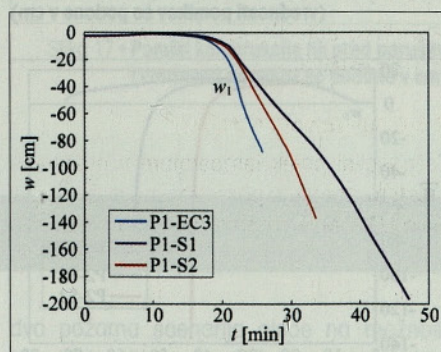
Na sliki 8 je prikazan časovni razvoj navpičnega pomika w v sredini ogrevane prečke (točka 1), na sliki 9 pa časovni razvoj osnih sil N v ogrevani prečki (točka 1) in v levem ogrevanem stebri (točka 4). Rezultati kažejo, da konstrukcija lokalnega požara P1 ne preživi. V primeru P1-EC3, kjer smo za račun napetosti uporabili eliptični materialni model z oznako EC3, konstrukcija odpove pri času $t = 26$ min ($T_{amb} = 708^\circ C$), v primeru P1-S1, uporabili



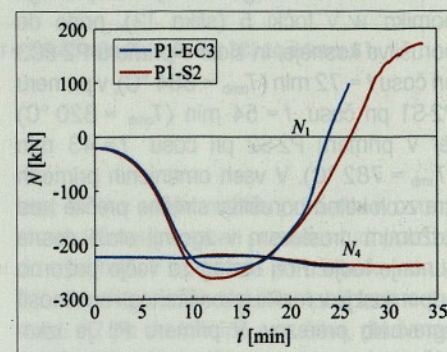
Slika 7 • Pomiki konstrukcije v času $t = 0$ min ($T_{amb} = 20^\circ C$) (vrednosti pomikov so podane v cm)

smo bilinerani model S in jeklo z nižjo intenzivnostjo viskoznega tečenja, pri času $t = 47$ min ($T_{amb} = 797^\circ C$), ter v primeru P1-S2, bilinerani model S in jeklo z izrazitim viskoznim tečenjem, pri času $t = 34$ min ($T_{amb} = 742^\circ C$). Da bi lažje sledili mehanizmu delovanja konstrukcije med požarom, je na sliki 10 prikazana deformirana oblika konstrukcije v 17 minuti (25-kratna povečava pomikov), ko temperatura v požarnem pro-

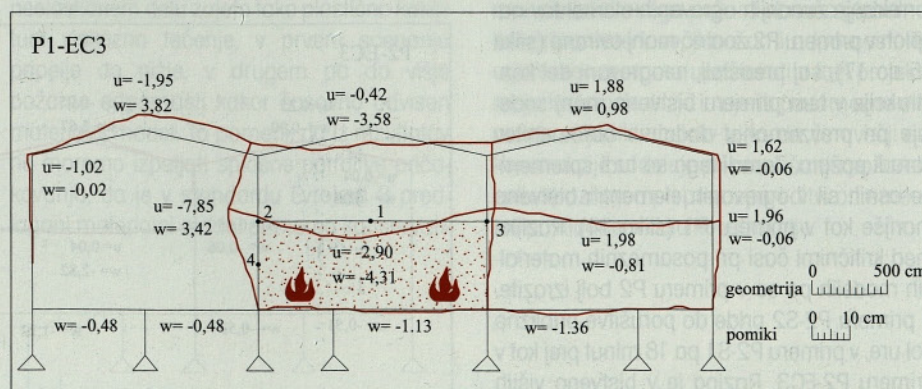
storu doseže $669^\circ C$. Zaradi ogrevanja se prečka, ki je izpostavljena požaru (element od točke 2 do 3), razteza. Hladni del konstrukcije to raztezanje ovira, zato se v ogrevanih stebrih in prečki povečajo tlačne osne sile (slika 9). Ker je ladja na levi strani požarnega prostora brez prečke in zato bolj podajna od desnega dela konstrukcije, pride do izrazitega upogiba vmesnega stebra v levo (slika 10). Z naraščanjem temperature se upogibna togost



Slika 8 • Časovni razvoj navpičnega pomika w v točki 1



Slika 9 • Časovni razvoj osne sile N v točkah 1 in 4

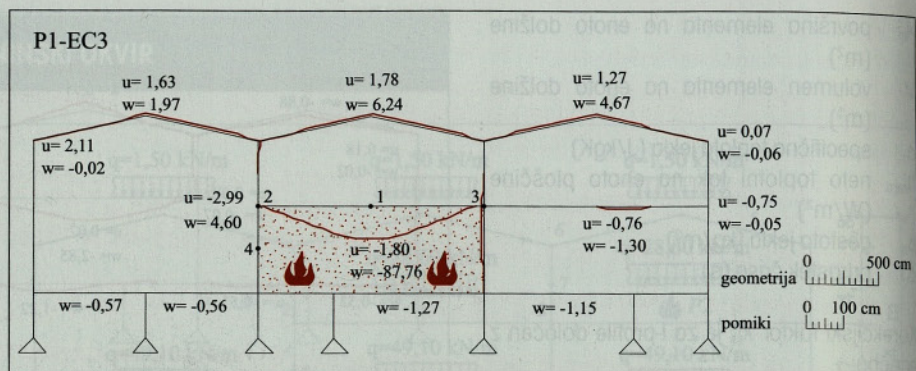


Slika 10 • Pomiki konstrukcije v času $t = 17$ min ($T_{amb} = 669^\circ C$) za primer P1-EC3 (vrednosti pomikov so podane v cm)

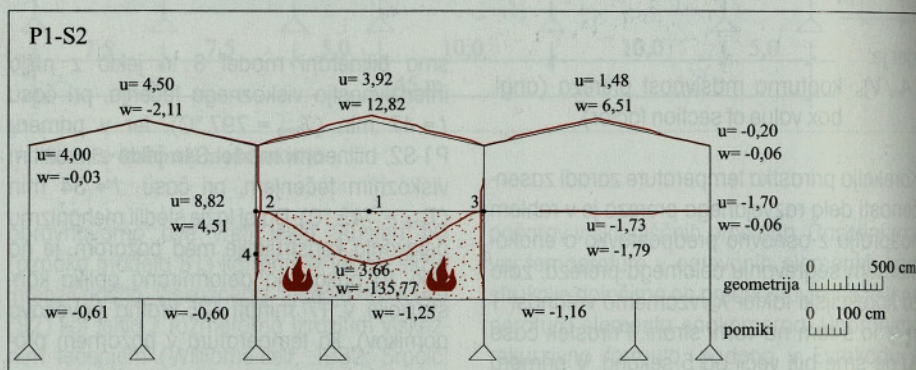
ogrevanih stebrov in prečke hitro zmanjšuje, kar pripelje do nastanka upogibnih plastičnih členkov na koncih prečke. S tem postane navpična obtežba prečke spet dominantna, stebri se zravna, navpični pomik v polju prečke pa začne hitro naraščati. Osnova sile v prečki s tem preide v natezno območje in obtežba prečke se odslej vse do porušitve prenaša predvsem s tako imenovanim vrhnim učinkom. Sliki 11 in 12 prikazujeta deformirani obliki konstrukcije tik pred porušitvijo za materialna modela P1-EC3 in P1-S2. Porušna konfiguracija je v obeh primerih podobna, manjša požarna odpornost v primeru P1-EC3 pa je posledica hitrejšega zmanjševanja togostnih karakteristik jekla (E , f_y , f_u) v območju visokih temperatur in odsotnosti utrjevanja pri modelu EC3 v primerjavi z modelom S. Pomembna pa je tudi vloga viskoznih deformacij pri modelu S, zaradi katerih pride v statično nedoločeni konstrukciji do prerazporeditve notranjih sil in s tem do podaljšanja stabilnega stanja konstrukcije.

3.4.2 Lokalni požar P2

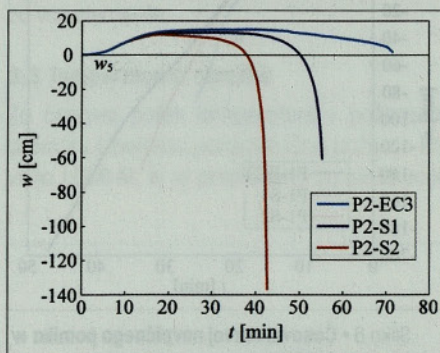
Podobno kot v prvem primeru tudi tukaj konstrukcija ne preživi lokalnega požara. Kakor kaže slika časovnega razvoja navpičnega pomika w v točki 5 (slika 13), pride do porušitve kasneje, in sicer v primeru P2-EC3 pri času $t = 72$ min ($T_{amb} = 864$ °C), v primeru P2-S1 pri času $t = 54$ min ($T_{amb} = 820$ °C) ter v primeru P2-S2 pri času $t = 43$ min ($T_{amb} = 782$ °C). V vseh omenjenih primerih gre za lokalno porušitev strešne prečke nad požarnim prostorom v zgornji etaži desne zunanje ladje. Prvi razlog za večjo požarno odpornost je v razliki izkoriščenosti nosilnosti ogrevanih prereзов. V primeru P1 je izkoriščenost ogrevane prečke v drugi etaži na začetku 50 %, izkoriščenost ogrevane prečke strehe v primeru P2 pa le 20 %. Drugi vzrok pa je v tem, da je temperaturno raztezanje in deformiranje zunanjih ogrevanih elementov nasploh v primeru P2 znatno manj ovirano (slike 15 do 17), saj preostali, neogrevani del konstrukcije v tem primeru bistveno manj sodeluje pri prevzemanju dodatnih obremenitev zaradi požara. Zaradi tega so tudi spremembe osnih sil v ogrevanih elementih bistveno manjše kot v primeru P1 (slika 14). Razlike med kritičnimi časi pri posameznih materialnih modelih pa so v primeru P2 bolj izrazite. V primeru P2-S2 pride do porušitve približno pol ure, v primeru P2-S1 pa 18 minut prej kot v primeru P2-EC3. Razlog je v bistveno višjih temperaturah ogrevanih elementov, zaradi česar se pri modelih S razvijejo izrazite



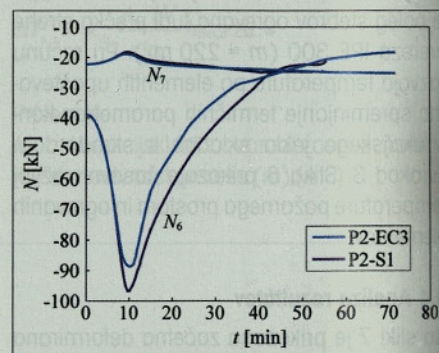
Slika 11 • Pomiki konstrukcije tik pred porušitvijo $t = 26$ min ($T_{amb} = 708$ °C) za primer P1-EC3 (vrednosti pomikov so podane v cm)



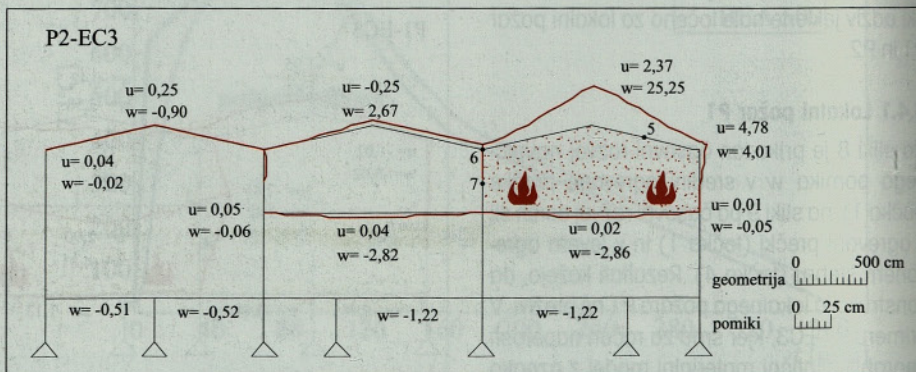
Slika 12 • Pomiki konstrukcije tik pred porušitvijo $t = 34$ min ($T_{amb} = 742$ °C) za primer P1-S2 (vrednosti pomikov so podane v cm)



Slika 13 • Časovni razvoj vertikalnega pomika w v točki 5

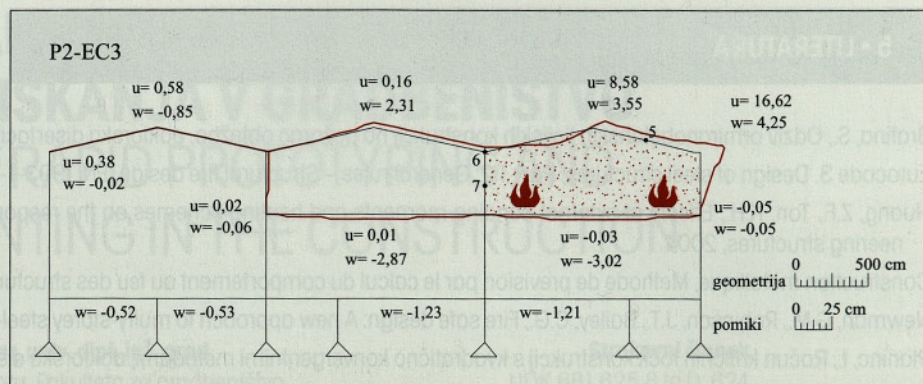


Slika 14 • Časovni razvoj osne sile N v točkah 6 in 7

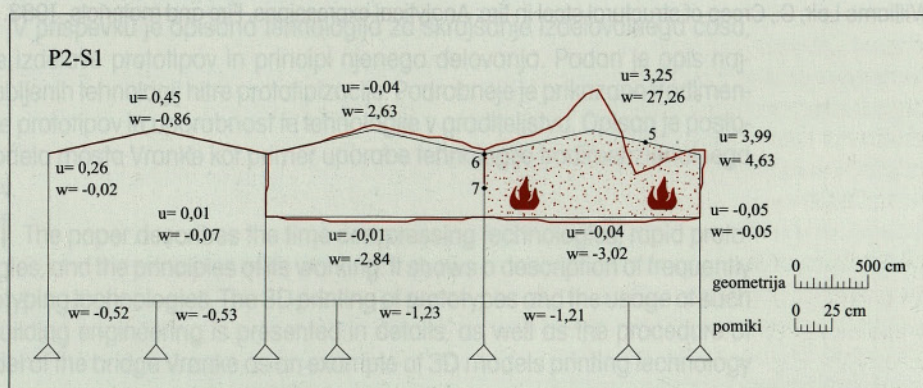


Slika 15 • Pomiki konstrukcije v času $t = 30,5$ min ($T_A = 724,04$ °C) za primer P2-EC3 (vrednosti pomikov so podane v cm)

viskozne deformacije, kar povzroči hitro mehčanje ogretyh elementov in s tem znatno povečanje skupne geometrijske deformacije. Tako pride do lokalne porušitve občutno prej kot pri modelu P2-EC3, v katerem viskozne deformacije niso eksplicitno upoštevane. To je razvidno tudi iz časovnega poteka navpičnega pomika v točki 5 (slika 13). Pri nizkih temperaturah se pomik pri vseh treh modelih razvija praktično brez razlik, pri višjih temperaturah pa se pri modelih S pomiki zaradi izrazitih viskoznih deformacij znatno hitreje povečujejo. Občutne so tudi razlike v končnih vrednostih pomikov in s tem tudi razlike v porušnih konfiguracijah, kar je za modela P2-EC3 in P2-S1 prikazano na slikah 16 in 17.



Slika 16 • Pomiki konstrukcije tik pred porušitvijo $t = 71,5$ min ($T_A = 863,5$ °C) za primer P2-EC3 (vrednosti pomikov so podane v cm)



Slika 17 • Pomiki konstrukcije tik pred porušitvijo $t = 53,53$ min ($T_A = 819,8$ °C) za primer S1 (vrednosti pomikov so podane v cm)

4 • SKLEP

V članku je predstavljen računski postopek za nelinearno analizo mehanskega odziva jeklenih konstrukcij na sočasen vpliv mehanske in požarne obtežbe. Upoštevana je materialna in geometrijska nelinearnost. Na računskem primeru ravninskega jeklenega okvirja so prikazane razlike med rezultati računske analize ob uporabi časovno neodvisnega materialnega modela v skladu z evropskim standardom Evrokod 3 in bolj realističnega modela, ki upošteva tudi eksperimentalno potrjeno časovno odvisno viskozno lezenje jekla pri visokih temperaturah. Obravnavana sta

dva požarna scenarija glede na možnost izbruha lokaliziranega požara v rastru okvirja. Rezultati kažejo občutne razlike. Pomembna je ugotovitev, da časovno neodvisni materialni model EC3, zasnovan na predpostavki, da je v neelastičnem delu zajeto tako plastično kakor tudi viskozno tečenje, v prvem scenariju pripelje do nižje, v drugem pa do višje požarne odpornosti kakor časovno odvisen materialni model. To pomeni, da iz rezultatov ne moremo izpeljati splošne potrditve pričakovanja, da je v standardu Evrokod 3 predlagani materialni model primerno konservativ-

ven, torej v vseh možnih primerih na varni strani. Primerjava obeh primerov tudi pokaže, da v primeru P1 pride do porušitve konstrukcije zaradi globalne izgube stabilnosti, v primeru P2 pa do lokalne porušitve, pri čemer ostali elementi konstrukcije bistveno manj sodelujejo pri prevzemanju obremenitev zaradi temperaturnih sprememb. V splošnem velja, da je ugodno, če se konstrukcija v primeru lokaliziranega požara obnaša globalno, kar pripomore k večji požarni odpornosti. To ugotovitev moramo upoštevati v fazi projektiranja ter konstrukcijo in njene posamezne elemente vključiti v celoto tako, da čim večji del konstrukcije sodeluje pri prenašanju požarnih vplivov oziroma pri prerazporeditvi obremenitev po hladnem delu konstrukcije.

5 • LITERATURA

- Bratina, S., Odziv armiranobetonskih linijskih konstrukcij na požarno obtežbo, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, 2003.
- Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2: General rules – Structural fire design, EN 1993-1-2, 2003.
- Huang, Z.F., Tan, K.H., Effects of external bending moments and heating schemes on the responses of thermally-restrained steel columns, Engineering structures, 2004.
- Construction metallique, Methode de prevision par le calcul du comportement au feu des structures en acier, Document technique unifie, 1976.
- Newman, G.M., Robinson, J.T., Bailey, C.G., Fire safe design: A new approach to multi-storey steel-framed buildings, Berkshire, SCI, 2001.
- Planinc, I., Račun kritičnih točk konstrukcij s kvadratično konvergentnimi metodami, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, 1998.
- SIST EN 1991-1-2:2004 – Evrokod 1 – Vplivi na konstrukcije – 1-2.del: Splošni vplivi – Vplivi na konstrukcije, izpostavljene požaru, 2004.
- Srpcič, S., Račun vpliva požara na jeklene konstrukcije, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, 1991.
- Statični račun, Proizvodna hala za kaširanje blaga, Trimo d.d., 1998.
- Williams-Leir, G., Creep of structural steel in fire: Analytical expressions, Fire and materials, 1983.

UPORABA HITRE IZDELAVE PROTOTIPOV IN 3D TISKANJA V GRADBENIŠTVU

USE OF RAPID PROTOTYPING AND 3D PRINTING IN THE CONSTRUCTION

doc. dr. Boris Lutar, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo
Smetanova 17, 2000 Maribor

Strokovni članek

UDK 681.625.8 tri D: 624

Povzetek | V prispevku je opisana tehnologija za skrajšanje izdelovalnega časa, tehnologija hitre izdelave prototipov in principi njenega delovanja. Podan je opis najpogostejše uporabljenih tehnologij hitre prototipizacije. Podrobneje je prikazano trodimenzionalno tiskanje prototipov in uporabnost te tehnologije v graditeljstvu. Opisan je postopek izdelave modela mosta Vranke kot primer uporabe tehnologije trodimenzionalnega tiskanja modelov.

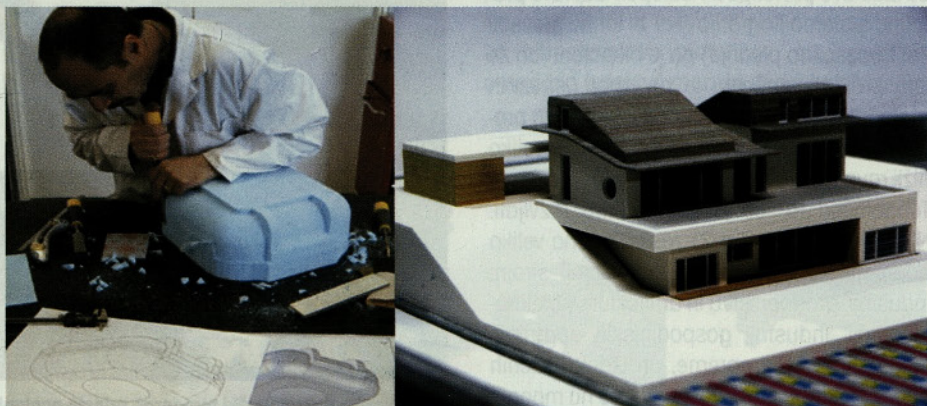
Summary | The paper describes the time compressing technologies, rapid prototyping technologies, and the principles of its working. It shows a description of frequently used rapid prototyping technologies. The 3D printing of prototypes and the usage of such technology in building engineering is presented in details, as well as the procedure of making the model of the bridge Vranke as an example of 3D models printing technology usage.

1 • UVOD

Razvoj in globalizacija trga zahtevata hitre odzive in prilagoditve proizvajalcev najrazličnejših produktov potrebam kupcev. V bližnji preteklosti je zadostovala ena oblika izdelka. Danes je trg zapolnjen s podobnimi izdelki in je potrebno izdelek prilagoditi populaciji. Zmanjšanje potrebnega časa za razvoj, za testiranje, za izdelavo in za nastop na trgu na najmanjšo možno mero, je vodilo uspeha. Nove tehnologije z imeni, kot so: tehnologija skrajšanja izdelovalnega časa (Time Compressing Technologies TCT), hitra izdelava prototipov (Rapid Prototyping RP), hitra proizvodnja (Rapid Manufacturing RM) in hitra izdelava orodij (Rapid Tooling RT) omogočajo, da proizvajalci sledijo in se prilagajajo vedno novim in novim zahtevam trga (Lutar, 2002), (Dolenc, 1992, 1994), (Gebhardt, 2000). V nadaljevanju bomo opisali bistvo navedenih tehnologij. Na samem začetku velja poudariti, da je osnovna sestavina vseh navedenih tehnologij navidezni ali, kot mu pravimo, virtualni

model. Torej model, ki ga vidimo na zaslonu računalnika in v resnici ne obstaja. In če rečemo, da je prototip prva podoba bodočega izdelka, potem lahko rečemo, da gre pri predstavitvi izdelka na zaslonu računalnika za 'navidezno ali virtualno prototipizacijo'.

Prototip bodočega izdelka lahko izdelajo ročno (slika 1). Za to so potrebne izkušnje in to počnejo ustrezno izobraženi modelarji še danes, vendar v veliko manjšem obsegu kot pred slabima desetletjema, ker je čas za izdelavo prototipa prevelik. Modelar je pri svojem delu omejen in se zateče k poenostavitvam. To pomeni, da modela ročno ne more narediti tako natančno in v taki funkcionalni obliki, ki omogoča potrebna testiranja bodo-



Slika 1 • Modelar pri izdelavi modela izdelka iz načrta in model stavbe, izdelan pred izgradnjo s 3D tiskalnikom

čega izdelka. Znano je, da pride pri testiranju do novih spoznanj, ki jim je potrebno prilagoditi model oziroma prototip izdelka. Izdelati je potrebno nov prototip brez odkritih slabosti in napak, za kar je potreben čas. Opraviti je potrebno dodatna testiranja in ... Časovni prirež je vse hujši in hujši (mišljena je ročna izdelava prototipa), nastop na trgu z novim izdelkom se oddaljuje in izgubljam konkurenčno sposobnost ter denar.

Tehnologija skrajšanja izdelovalnega časa

TCT je skupek tehnologij CAD, CAE, CAT, CAM, RP, RT, RE in drugih (Computer-Aided Design, Computer-Aided Engineering, Computer Adaptive Test, Computer-Aided Manufacturing, Reverse Engineering), ki omogočajo: tvorbo 3D modela, preračune, simulacijo brizganja plastike, struženja in rezkanja na numerično krmiljenih obdelovalnih strojih, računalniško podprto testiranje, izdelavo prototipa in nulte serije izdelka. Skratka vse, kar je potrebno za pričetek proizvodnje izdelka (Hong, 2003).

Največji pomen tehnologij skrajšanja izdelovalnega časa in hitre izdelave prototipov je, da omogočata zmanjšanje potrebnega časa za razvoj izdelka na najmanjšo možno mero. Izdelek ima življenjsko dobo in v nekem času zastari. Čas zastaranja izdelka je vedno krajši. Sorazmerno hitro ga je potrebno umakniti iz proizvodnje in prodaje ter ga nadomestiti z novim. Zato je potrebno paziti, da se pri razvoju izdelka ne porabi preveč časa. S preveliko porabo časa za razvoj izdelka se zmanjša njegov čas prodaje na trgu.

Hitra izdelava prototipov RP je tehnologija, ki omogoča izdelavo fizičnega modela iz CAD podatkov (Kai, 1997). Njen začetek uvrščajo mnogi v svojih prispevkih v mesec november 1987 leta, ko je firma 3D Systems, Inc. v Detroitu (ZDA) na firmi AUTOFACT predstavila prvi komercialni stereolitografski stroj SLA-1 za izdelavo prototipov. Postopek izdelave prototipa s stereolitografijo (kar bi lahko prevedli kot trirazsežno pisanje) pa je bil patentiran že leto prej. Na začetku je bil izbor ustreznih materialov omejen, natančnost izdelanih prototipov v primerjavi z današnjo pa na veliko nižji ravni.

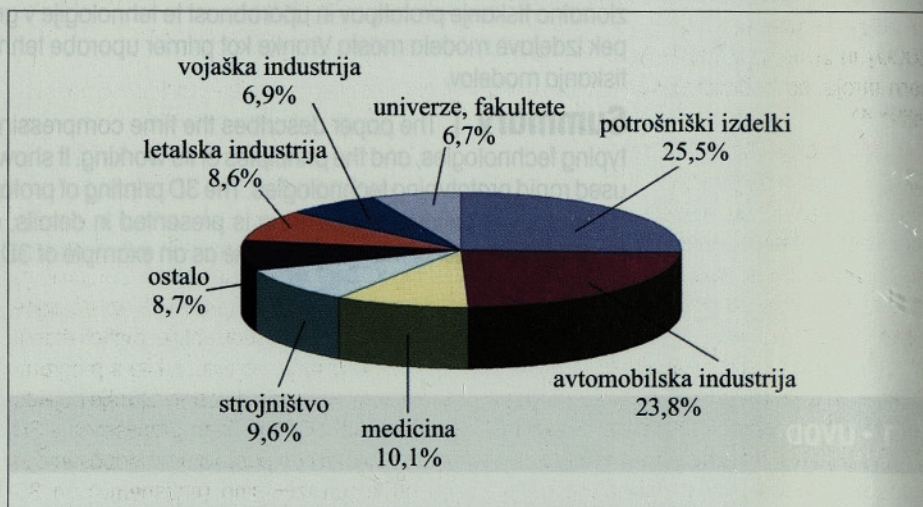
Tehnologija RP se je začela hitro razvijati. Njeno uporabo (slika 2) zasledimo na veliko področjih: v umetnosti, biomedicini, strojni industriji, gradbeništvu in arhitekturi, v elektroindustriji, industriji gospodinjskih aparatov, industriji športne opreme, pri izdelavi učnih pripomočkov in otroških igračk in še na mnogih drugih področjih. Danes si skoraj ni mogoče predstavljati napredka brez njene uporabe.



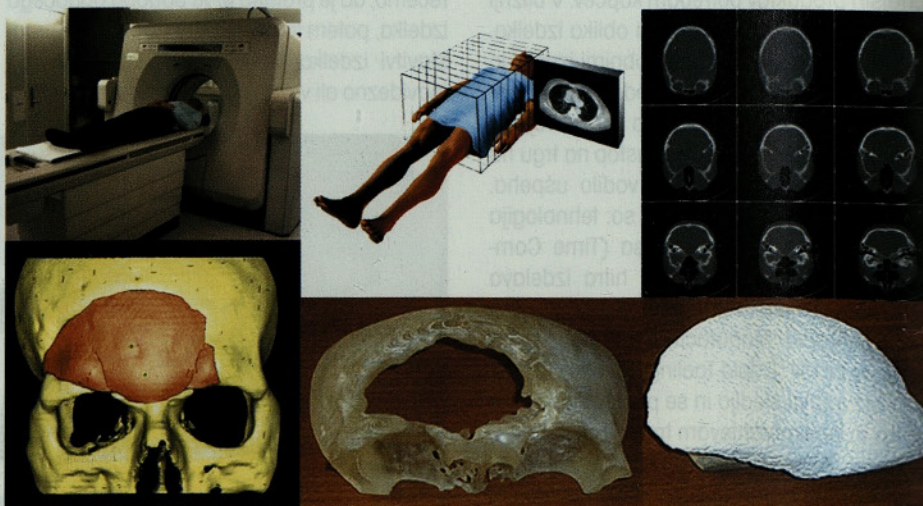
Slika 2 • Različne vrste prototipov, izdelanih na 3D tiskalniku: prototip dela motorja z gibljivimi deli, umetniška instalacija, vaza s poslikavo in otroška igračka

Poznanih je več kot 30 različnih tehnologij izdelav prototipov. Mnoge med njimi so si zelo podobne in nekaj je že takih, ki se v praksi ne uporabljajo. Za izdelavo prototipa zahtevajo preveč časa in ne omogočajo njegove izdelave v potrebni natančnosti in s potrebnimi lastnostmi.

Največja deleža uporabe RP tehnologije (slika 3) pripadajo proizvodnji, ki ustvarja izdelke za potrošnika (športna oprema, industrija gospodinjskih aparatov in aparatov za osebno nego, ohišja in deli za video naprave in podobno) in avtomobilski industriji (skoraj polovica uporabe RP v svetu). Sledita medicina in strojništvo.



Slika 3 • Deleži RP po vrsti industrije in dejavnosti (povzeto po (Wohlert, 2003))

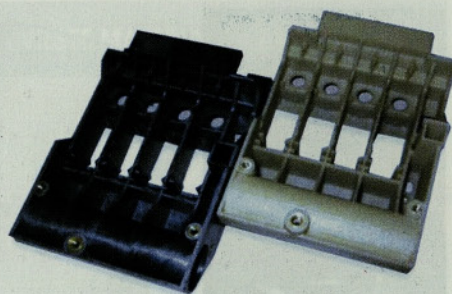


Slika 4 • Računalniški tomograf, princip nastanka CT posnetkov, CT posnetki glave, virtualen model načrtovane rekonstrukcije poškodbe lobanje in modela poškodovanega dela lobanje ter vsadka

Čeprav medicina z gradbeništvo nima skoraj nič skupnega (razen na področju mehanike konstrukcij in preračunov mehanskih sistemov), velja omeniti pridobitve tehnologije RP za človeka. Eden njenih segmentov je protetika, kjer ta tehnologija ne omogoča samo izdelavo protetičnih pripomočkov ustrezne kakovosti, ampak tudi ustrezno in natančno načrtovanje vgraditve pripomočka pred operativnim posegom. Drugi, za človeka neprijeten, a pomemben segment, so rekonstrukcije poškodovanih delov glave (slika 4) in okončin pri prometnih nesrečah ali odstranitve prirojenih napak, ki zmanjšajo kakovost življenja prizadetega in so vzrok mnogih travm. Ustrezno sestavljena skupina kirurgov na osnovi CT (Computed Tomography – računalniška tomografija) ali MR (Magnetic Resonance – magnetna resonanca) posnetkov izdelata virtualni model načrtovanega operativnega postopka na računalniku (Kalender, 2000) in za tem prototip modela na ustreznem stroju: na trodimenzionalnem tiskalniku (slika 4).

V nadaljevanju bomo spoznali, da ime 'tiskalnik' dejansko ustreza samo enemu postopku: Ink-Jet tehnologiji ali tehnologiji trodimenzionalnega tiskanja. Tako pred posegom izdelajo del za rekonstrukcijo iz ustreznega materiala, ki ga naše tkivo prenaša (na primer iz titana) in ga ob operativnem posegu vstavijo. S tem se skrajša čas posega, število posegov in potreben čas za vključitev človeka v normalno življenje. Morda bomo podobne (CT ali RM) posnetke uporabljali v prihodnosti v gradbeništvo (za nedestruktivno ugotovitev, ali je armatura v armiranem betonu ustrezno razporejena, ali jo je dovolj, ali so prednapeti kabli v prerezu na mestu, kjer bi naj bili in podobno).

Hitro proizvodnjo RM lahko upoštevamo kot naravno nadaljevanje hitre izdelave prototipov RP. Gre za majhno serijo izdelkov, namenjenih prodaji, ki izvirajo neposredno iz CAD podatkov oziroma iz ustvarjenega virtualnega modela izdelka v računalniku (Pham, 2001). Čeprav je danes s to tehnologijo mogoče izdelati nekaj deset uporabnih izdelkov (iz kovine oziroma njenih praškastih delcev, iz ustreznih praškastih polimerov ali tekočih polimerov in keramičnih prahov), ni mišljena kot nadomestilo običajnih velikoserijskih proizvodnih postopkov. V primerjavi z njimi je RM tehnologija draga. Zato se uporablja, kadar bi bila drugačna izdelava dražja ali predolga ali kadar ni mogoče nabaviti kakega rezervnega dela stroja. V takih primerih se uporabi v kombinaciji s povratnim inženirstvom RE (Reverse



Slika 5 • Originalen nosilec tiskalnih glav 3D tiskalnika firme Z Corporation (črne barve) in prototip (svetle barve) po utrditvi, vrtanju odprtin za puše in njihovi vstavitvi ter vgrajen prototip



Engineering)). Za prikaz uporabnosti svojih tiskalnikov in materialov za te namene je firma Z Corporation (ZDA) izdelala na svojem 3D tiskalniku nosilec tiskalnih glav lastnega tiskalnika (slika 5). Po vgradnji v lastni tiskalnik so štiri tedne tiskalnik uporabljali enako, kot bi imel vgrajen originalni del. Tako so v bistvu za prikazan izdelek izvedli vsa potrebna testiranja (tudi funkcionalno testiranje – uporaba izdelanega prototipa na tiskalniku).

Pri povratnem inženirstvu RE, ki sega na mnoga področja in se v zadnjih letih zelo hitro razvija (slika 6), imamo v mislih nekontaktne tehnologije za trirazsežno optično zajemanje oblik z digitalizatorji (skenerji). Iz množice točk, pravimo jim tudi oblaki digitaliziranih točk delov površja objekta, lahko s programsko opremo ustvarimo zaprto površje objekta (torej 'solid' ali telo). Tega prenesemo v 3D modelirnik, kjer ga popravimo in dopolnimo in ga na koncu izdelamo (natisnemo) na 3D tiskalniku. S to tehnologijo merijo deformacije (statične in dinamične), uporabna je v medicini, za rekonstrukcije pomembnih zgodovinskih objektov, v različnih vejah industrije, za tvorbo virtualnih muzejev in še na mnogih drugih področjih.

Trirazsežno optično zajemanje najrazličnejših oblik in pojavov (sem spadata tudi tehnologiji CT in MR) je tehnologija, ki se razvija z veliko hitrostjo in uporablja na mnogih področjih

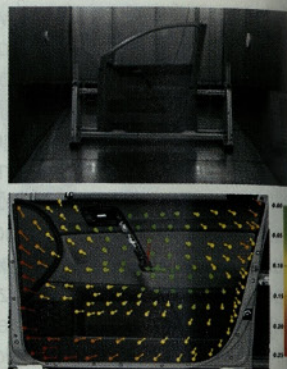
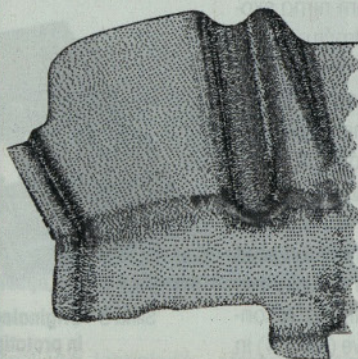
(Pogačar, 2007). V Laboratoriju za inženirsko oblikovanje Fakultete za strojništvo v Mariboru si lahko zainteresirani strokovnjaki po dogovoru med drugimi postopki ogledajo tudi črtno interferometrično (digitalno) zajemanje podatkov z digitalizatorjem Atos II nemškega proizvajalca Gom iz Braunschweiga (slika 7). Digitalizator, ki ima v primerjavi s prikazanim ročnim modelom ZScanner 700 (ta uporablja laser tipa II, ki ni škodljiv za oči) večjo natančnost in možnost uporabe, omogoča dinamične in statične meritve različnih konstrukcijskih delov in konstrukcij.

Hitra izdelava orodij RT je tehnologija, ki v proizvodnem procesu omogoča znaten napredek in prihranek pri najpočasnejšem, najdražjem in najzahtevnejšem opravilu, kjer je zahtevana velika natančnost, trdnost, odpornost proti obrabi in kakovost: pri izdelavi potrebnih orodij za stiskalnice kovinskih in plastičnih sestavnih delov proizvoda. Tehnologija RT nadomešča že v znatni meri običajno ročno izdelavo orodij in izdelavo orodij na numerično krmiljenih obdelovalnih strojih (stružnicah, rezkarjih). Ločimo indirektno in direktno izdelavo orodij. Pri indirektni izdelavi orodja je potreben izdelan prototip, ki je uporabljen kot vložek ali jedro pri peščenem litju. Orodje ni v celoti izdelano na sistemu za hitro izdelavo prototipov, postopek pa omogoča izdelavo manjše serije izdelkov. Pri



Slika 6 • 3D digitalizator ZScanner 700 firme Z Corporation Systems (ZDA), skeniranje kipca z nalepljenimi reflektivnimi točkami in skenirana roka

direktni izdelavi orodja pa je orodje v celoti izdelano na sistemu za hitro izdelavo prototipov. Pogosto se s toplotno obdelavo odstrani iz njega vezivo (snov, ki spaja prašne delce kovine in je bila uporabljena pri 3D tiskanju) in infiltrira snov, ki zmanjša poroznost in poveča trdnost. Običajno izdelana orodja zaradi toplotne obdelave izgubijo natančnost in jih je potrebno mehansko obdelati.



Slika 7 • Digitalizator Atos II pri snemanju modela avtomobila z nalepljenimi reflektivnimi točkami, zajete točke objekta (oblak točk) in vektorji pomikov izmerjenih točk statično obremenjenih vrat avtomobila

2 • PRINCIP DELOVANJA VSEH TEHNOLOGIJ HITRE IZDELAVE PROTOTIPOV

Princip delovanja vseh tehnologij RP je enak in prikazan na sliki 8. Ideja se naprej 'spravi' v neko obliko, kar je pogosto skica, ki jo spremljajo: osnovne zahteve funkcionalnosti izdelka, oblika in ergonomski pogoji, ki jih mora izpolniti izdelek, izbira ustreznega materiala, grob oris tehnologije izdelave in druge pomembne odločitve za izdelavo. To se običajno imenuje zasnova.

Na računalniku se ob uporabi programa za 3D modeliranje izdela navidezni ali virtualni model izdelka in shrani v datoteko ustreznega grafičnega formata, ki jo računalniški program za pripravo tiskanja na 3D tiskalniku prebere.

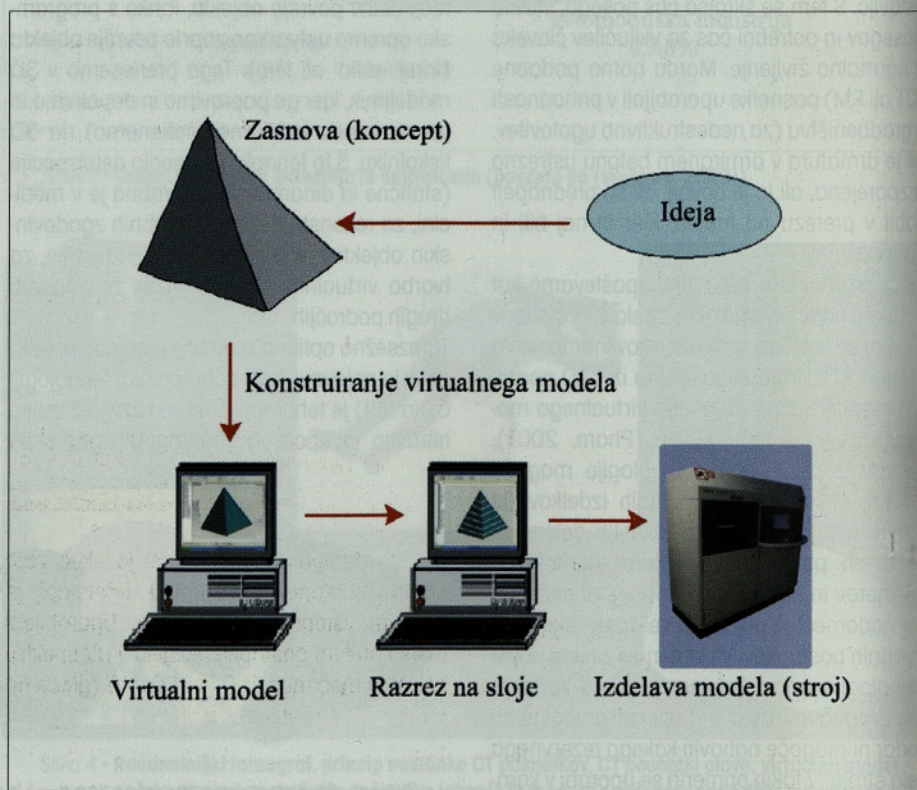
V programu za izdelavo (tiskanje) modela se določi lega modela v tiskalniku pri izdelavi glede na lastnosti tiskalnika, ki zagotavlja najkvalitetnejši način tiskanja (najboljšo izdelavo). Izbere se debelina sloja (če uporabljena tehnologija tiskanja in tiskalnik to omogočata) in parametri optimizacije tiskanja.

Računalniški program virtualni model programsko razreže na potrebno število slojev in izračuna: število slojev tiskanja, količino materiala za izdelavo modela (osnovnega materiala, podpornega materiala in veziva, če je potrebno) ter čas izdelave modela. Pred tiskanjem imamo na razpolago vse informacije za določitev cene izdelave prototipnega modela.

Po zagonu prične stroj izdelovati (tiskati) najnižji (prvi, spodnji) sloja modela. Ko ga naredi, pomakne delovno mizo navzdol za

debelino sloja in izdela nov sloj, ki se spoji s prejšnjim. Stroj postopek ponavlja do izgotovitve prototipnega modela. Tiskanje poteka z izdelavo sloja za slojem. Pri nekaterih tehnologijah je potrebno pri izdelavi previs-

nih delov modela te podpreti. Običajno se podpore izdelajo iz drugačnega materiala, kot se uporablja za izdelavo modela. Potrebne podpore in njihovo razporeditev samodejno določi računalniški program za tiskanje modela. Izdelane podpore je potrebno pred ugotovitvijo modela (pred postopkom, s katerim se doseže končna trdnost modela) odstraniti.



Slika 8 • Princip delovanja vseh tehnologij hitre izdelave prototipov

3 • DELITEV TEHNOLOGIJ RP GLEDE NA VRSTE MATERIALOV ZA IZDELAVO

Tehnologije hitre izdelave prototipov ločimo po vrsti materiala za izdelavo (ali kot pravimo: glede na vrsto vstopnega materiala) na:

- tehnologije s tekočim vstopnim materialom

- na tehnologije s praškastim vstopnim materialom
- na tehnologije s trdim vstopnim materialom.

Znotraj navedenih skupin so proizvajalci 3D tiskalnikov razvili svoje podvrsti in tiskalnike. Toda ne glede na to jih je mogoče razvrstiti v navedene osnovne skupine glede na vrsto vstopnega materiala. Kot smo omenili v uvodu, se posameznih podvrsti zaradi navedenih vzrokov nič več ne uporablja, čeprav so k razvoju RP tehnologij dale pomemben prispevek.

4 • DELITEV 3D TISKALNIKOV GLEDE NA VELIKOST IN ZMOGLJIVOST

Večina proizvajalcev ponuja naslednje vrste 3D tiskalnikov:

- delavniške – Workshop Application
- pisarniške ali namizne – Desktop Application
- za direktno izdelavo orodij – Toolshop Application

Delavniški tiskalniki so namenjeni prototipnim delavnicam. So veliki, primerno hrupni in omogočajo izdelavo kosov do velikosti dveh metrov (največje imenujejo 'mamutske tiskalnike'). Zahtevajo izurjene in izobražene operaterje in so ustrezno izolirani od okolja.

Pisarniški ali namizni tiskalniki so manjši in si tega imena vse do pred kratkim 'niso povsem zaslužili'. Res je, da je delo z njimi enostavno in ne vplivajo škodljivo na okolje. Vendar je bolje, da jih imamo v ustrezni delavnici. Največja velikost modela, ki ga lahko izdelajo, ne presega dimenzij 500 x 600 x 400 mm. Najbolj razširjeni so tiskalniki, ki omogočajo izdelavo modelov velikosti približno 250 x 350 x 200 mm. Pred kratkim je firma 3D Systems (ZDA) dala na tržišče pravi pisarniški tiskalnik (slika 9), ki uporablja SLA tehnologijo. Njegove mere so

630 x 660 x 680 mm, izdela lahko model do velikosti 180 x 230 x 200 mm, ima maso 45 kg in predvideno prodajno ceno približno 10000 ameriških dolarjev (vse navedene

dimenzije smo zaokrožili, ker so podane v anglosaškem merskem sistemu).

Tiskalniki za direktno izdelavo orodij so nameščeni v delavnicah, so večjih dimenzij in izolirani od okolja. Omogočajo izdelavo prototipov s potrebnimi lastnostmi za vsa testiranja in delovno uporabnih prototipov (izdelkov, s katerimi lahko kaj proizvedemo).



Slika 9 • 3D tiskalnik V-Flash firme 3D Systems in izdelana modela

5 • PREGLED IN OPIS NAJPOGOSTEJE UPORABLJANIH PRINCIPOV RP

5.1 Stereolitografija (Stereolithography SLA)

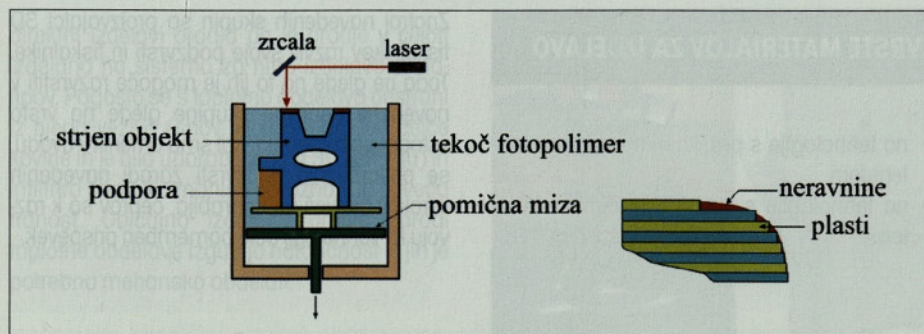
Stereolitografija, ki jo označujejo s kratico SLA, je: najstarejši, najpočasnejši, najdražji, najnatančnejši in še vedno pogosto uporabljan postopek prototipizacije modelov (Durham, 2003).

Izdelek nastaja v kopeli fotoobčutljivega akrilnega ali epoksidnega polimera (slika 10), ki je občutljiv za ultravijolično svetlobo UV. Mate-

rial, iz katerega nastane model, je tekoč, zato spada postopek v skupino tehnologij s tekočim vstopnim materialom. Uporabljeni laserji pri tem postopku delujejo v UV spektru in imajo moč med 100 in 800 mW (glede na vrsto in zmogljivost tiskalnika).

Model nastaja v kadi, napolnjeni s fotopolimerom tako, da laserski žarek pri prehodu čez tekočino polimerizira vrhno plast, ki otrdi

in se sprime s spodnjo plastjo. Krmilni mehanizem poskrbi, da laserski žarek osvetli samo dele, ki predstavljajo steno nastajajočega modela. Ko je plast narejena, se miza potopi za toliko, da se ustvari tekočinski film (za debelino rezine, sloja). Različni proizvajalci takih strojev dosežejo s poravnavo in odsesavanjem presežka tekočine polimera (zaradi vpliva površinske napetosti polimera) ravnost njegove površine. Laser se spet vklopi in žarek osvetli dele, kjer bo stena modela. Žarek le malo prodre v globino, vendar dovolj, da se prejšnja in nastajajoča plast sprimetata. Po-



Slika 10 • Nastanek modela v kadi tiskalnika po tehnologiji SLA in nazobčanost površine modela zaradi izdelave

stopke se ponavlja do izgotovitve modela. Izdelek s previsom je potrebno podpreti s podporami, ki jih samodejno izračuna računalniški program tiskalnika.

Površina modela je zaradi izdelovalnega procesa nazobčana (desni del slike 10), ki je občutnejša na mestih, kjer površje modela prehaja iz navpične v vodoravno lego. Čas izdelave modela je odvisen od njegove zahtevnosti in velikosti in traja lahko tudi več kot 24 ur (z upoštevanjem potrebnega dela za odstranitev podpor in brušenja nazobčanosti). Debelina rezin (slojev) in s tem natančnost je od 0,025 mm do 0,127 mm, velikost modelov pa je lahko od 25 x 25 x 25 cm do 50 x 50 x 50 cm. Najmanjša debelina samostojne stene je približno 0,3 mm. Na zelo velikih, 'mamutskih tiskalnikih', ki uporabljajo SLA tehnologijo (v svetu jih ima samo nekaj firm in so izdelani posebej za njih), lahko izdelajo modele do velikosti 2 m. Po končani izdelavi se dvigne pomična miza, odvečen polimer odteče v kad, model pa se odstrani in spere. Na koncu, še preden se je polimer popolnoma strdil, je potrebno podpore odstraniti z zobotehnično opremo (skalpeli, pincete, pilice, ...). Če jih ni mogoče povsem odstraniti, se to stori po strjevanju v posebni omari (desni del slike 11), kjer UV žarki osvetlujejo model tako dolgo, da polimer popolnoma otrdi (polimerizira). V takih omarah je potrebno strjevati debelostenske modele. Omara in postopek sta podobna omari in postopku razkuževanja pribora pri frizerjih, le da so moči UV luči in velikost omare večje.

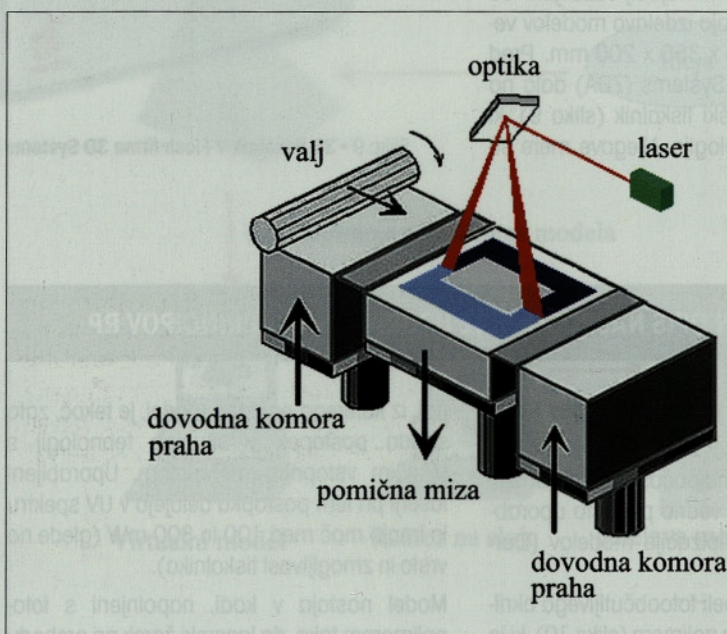
5.2 Selektivno lasersko sintranje (Selective Laser Sintering SLS)

Selektivno lasersko sintranje (slika 12) se od stereolitografije razlikuje v glavnem po uporabljenem materialu za izdelavo modela (Goode, 2003). Uporabljajo se praški raz-

ličnih materialov (termoplast, različne kovine, keramika). Proces izdelave poteka po plasteh, laser pa je močnejši (50 do 200 W), ker mora prašne delce natopiti oziroma segreti preko temperature kristalizacije, da se sprimejo in izgradijo stene modela. Ko je plast končana, pripelje dovodni valj novo plast praška, ki je dovodni komori segret skoraj do temperature kristalizacije in ga enakomerno razporedi po delovni površini. Prašek se uporablja kot podpora previsnim delom, zato podpor ni potrebno izdelati. Na koncu je potrebno odesati odvečne prašne delce.



Slika 11 • Tiskalnik SLA-5000 firme 3D Systems in utrjevalna komora



Slika 12 • Princip delovanja SLS tiskalnika

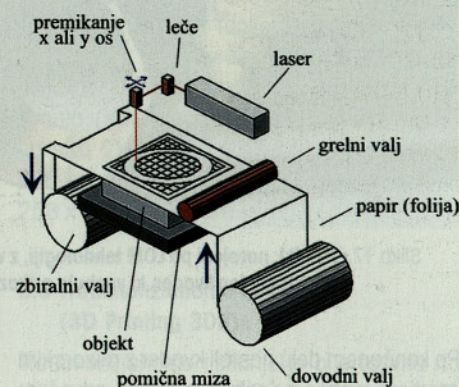


Slika 13 • Tiskalnik EOSINT P 385 firme EOS GmbH (Nemčija), ki uporablja SLS tehnologijo

Sintrani izdelki se uporabljajo kot osnova za mikrolivarstvo, za neposredno izdelavo orodij DT (Direct Tooling), kot konceptni modeli ali kot končni izdelki. Površina izdelka je bolj groba kot pri stereolitografiji SLA (slika 14), ker se poleg želenega prašnega delca natali še nekaj sosednjih in daje videz, kakor da bi bila peskana. Kovinske izdelke lahko zaradi poroznosti utrdijo z infiltracijo v kovinski talini ali v kopeli epoksidne smole. Čas izdelave je odvisen od velikosti modela in uporabljenega materiala. Traja lahko nekaj ur ali dni. Delovna prostornina SLS strojev je približno enakovredna delovni prostornini SLA strojev in enako velja tudi za mase strojev. Najmanjša debelina samostoječe stene je približno 1 mm.

5.3 Laminatna izdelava modelov (Laminated Object Manufacturing LOM)

Laminatna izdelava modelov LOM je najenostavnejša metoda hitre prototipizacije modelov (slika 15) in se deli na: laserski način rezanja folije, z močjo laserja od 20 do 50 W (odvisno od velikosti in zmogljivosti stroja) in na način rezanja folije s karbidnim nožem (manj uporabljen način). Papir s točkastim nanosom lepila potuje iz dovodnega na zbiralni valj. Vmes se ustavi na delovni mizi, kjer ga grelni valj spoji s prejšnjo plastjo, laserski žarek (ali karbidni nožek) pa ga obdela.



Slika 15 • Prikaz laminatne izdelave modela

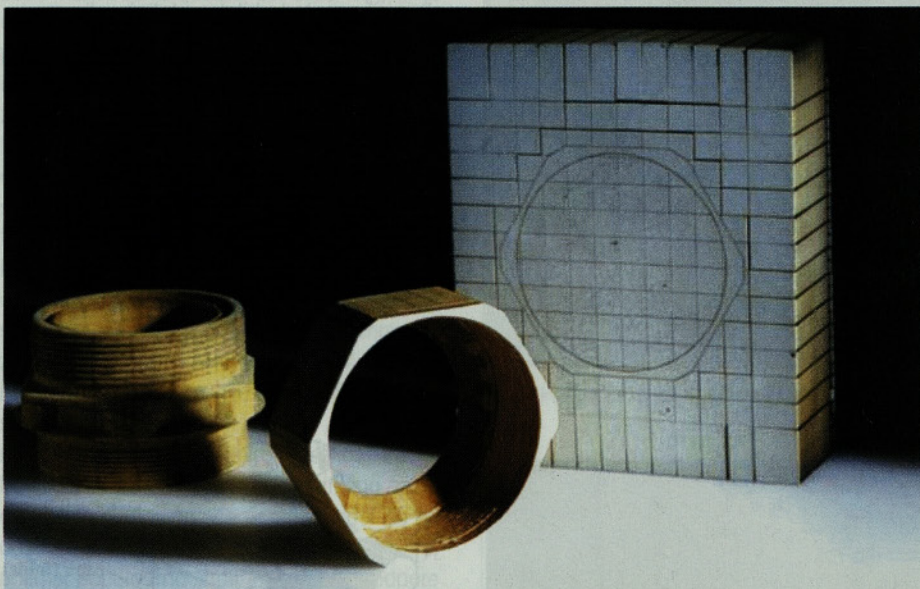
Najprej nariše (izreže) zunanjo in notranjo konturo sloja modela, nato pa vse naokoli nariše (izreže) še mrežo odvečnega dela sloja. Stroj (slika 16) premakne papir (folijo) za širino delovne mize naprej, z vročim valjem stisne novo na prejšnjo plast in ponovi rezanje. Pri tem je pomembno, da izreže mrežo na enakem mestu kot na prejšnjem sloju.



Slika 14 • Izdelek z vidno površinsko hrapavostjo in povečava njegove površine z vidnimi sprijetimi delci materiala



Slika 16 • Stroj LOM-2030H firme Helisys, Inc. (ZDA), z laserjem moči 50 W. Naredi lahko model do velikosti 813 x 559 x 508 mm



Slika 17 • Izdelki, narejeni po LOM tehnologiji, z vidnimi ostanki mreže izžganih odvečnih delov in nerazstavljen kvader, ki vsebuje prikazani izdelek na sliki

Po končanem delu nastali kvader z mizarskim orodjem razbijejo (ostranijo mrežo odvečnega materiala), da izločijo izdelek (slika 17). Masa kvadra je lahko pri velikem izdelku tudi 200 kg. Izdelek je videti kot les in ima tudi take lastnosti, na njem pa so vidne sledi mreže. Namesto papirnate folije uporabljajo folije, ki so izdelane iz drugih materialov (na primer keramično folijo).

Tehnologijo uporabljajo za najrazličnejše namene: za izdelavo umetnih kosti, v umetnosti, za jedra pri izdelavi kalupov, v arhitekturi, v strojni industriji in drugod. Izdelek se po potrebi še dodatno obdeli (obrusi, obarva,

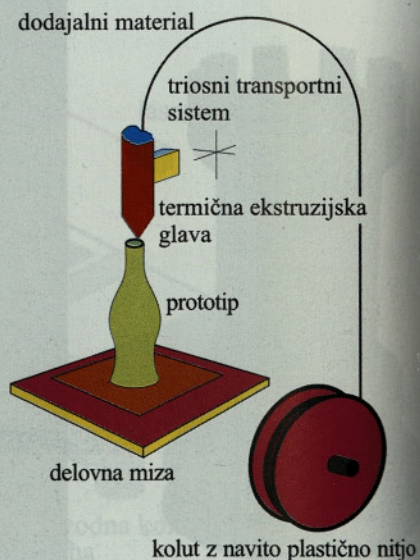
izdelava izvrtine z vrtnim strojem in podobno). Ker je na folijo lepilo naneseno točkasto, je potrebno z infiltriranjem epoksidne smole v vakuumski komori in s sušenjem v sušilni komori izdelek po potrebi še utrditi. Izdelati je mogoče velike modele s sorazmerno majhnimi stroški v primerjavi z drugimi tehnologijami. Seveda pa ima ta tehnologija (kot vsaka tehnologija) omejitve in ni primerna za vsa področja.

Florisne dimenzije prikazanega stroja na sliki 16 so približno 5 x 4 m, njegova masa pa je približno 1500 kg. Manjši model istega proizvajalca LOM-1015Plus, ki ga imenujejo ne-

kateri 'kabinetni model', lahko izdela model velikosti 380 x 250 x 360 mm. Njegove florisne dimenzije so 360 x 360 cm, moč laserja je 20 W, masa pa okoli 450 kg. Najmanjša debelina samostoječe stene pri tej tehnologiji znaša 1 do 2 mm.

5.4 Modeliranje z odlaganjem nataljene snovi (Fused Deposition Modeling FDM)

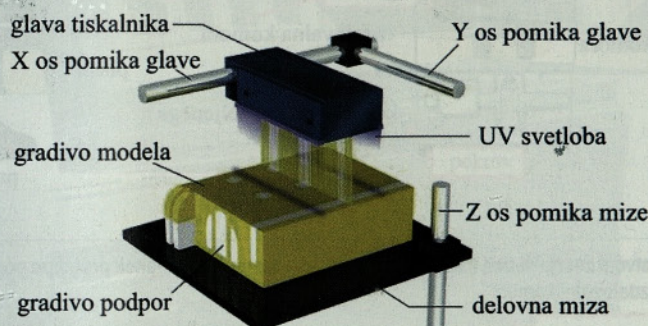
Model se gradi v tiskalniku enako, kot so risali peresni risalniki. Rapidograf in črnilo sta zamenjana s termično ekstruzijsko glavo in materialom v obliki niti debeline 0,17 mm. Ko pride material iz šobe, se razleže in ohladi ter veže na sebe prejšnjo plast (slika 18). Delovna miza se pomakne navzdol za debelino plasti in postopek nanosa materiala (nove plasti) se ponovi. Celoten sistem je postavljen v komoro, ogreto na nekaj stopinj pod toplotno plastiko. Uporabljajo se različni plastični materiali, pa tudi kovina in keramika, povezani s plastičnim vezivom. Previsne dele je potrebno podpreti, za kar poskrbi program stroja. Ta samodejno izbere lego modela za izdelavo, ki zahteva najmanjše število izdelanih podpor. Dele, izdelane po tej tehnologiji, uporabljajo že kot končne izdelke. Najmanjša debelina samostoječe stene je približno (1 mm), najmanjša debelina sloja pa 0,127 mm. Slika 19 prikazuje stroj Stroj Prodigy Plus firme Stratasys (ZDA), ki uporablja FDM tehnologijo in izdela modele do velikosti 220 x 200 x 300 mm. Meri 6876 x 864 x 1041 mm in ima maso 128 kg. Izdelujejo tudi večje stroje.



Slika 18 • Izdelava prototipa po tehnologiji FDM



Slika 19 • Stroj Prodigy Plus firme Stratasys (ZDA)



Slika 20 • Prikaz glave tiskalnika fotopolimerne faze z delovno mizo, načinom premikanja glave in utrjevanjem osnovnega in podpornega gradiva modela z UV svetlobo



Slika 21 • Slika stroja Eden 260 firme Objet Geometries Ltd

5.5 Brizgalniki fotopolimerne faze (Polyjet postopek)

Skupino tvorijo tiskalniki, ki brizgajo tekoč fotopolimer podobno kot Ink-jet tiskalniki. Vstopni material je tekoč in občutljiv za UV svetlobo, pod katero se strdi (polimerizira). Model nastaja po plasteh na pomični mizi (Durham, 2003), ki se po izdelavi sloja pomakne vzdolž za debelino naslednjega sloja (slika 20). Posebna piezoelektrična glava, ki ima več kot 1500 šob, brizga skozi eno skupino šob osnovni material za izdelavo modela, skozi drugo skupino šob pa podporni material za gradnjo podpor previsnih delov modela. Podpore samodejno določi in razporedi računalniški program tiskalnika.

Ob premikanju glave tiskalnika vzdolž X osi se material pod vplivom UV svetlobe utrdi (polimerizira). Postopek je podoben kot pri Ink-jet tiskalnikih, le da glava namesto črnila brizga fotopolimera (za gradnjo modela in podpor). Tekoči gradivi (fotopolimera) sta v plastenkah in zaščitena pred vplivom UV žarkov. Črpalka ju potiska v vsebnika tiskalne glave, kjer se pred brizganjem segrejeta na delovno temperaturo približno 70 °C. Po izdelavi modela se podporni material odstrani z vodnim curkom. Najmanjša debelina sloja je 0,02 mm, največja velikost modela pa je odvisna od modela tiskalnika in je od 250 x 250 x 200 mm do 490 x 390 x 200 mm. Izdelke uporabljajo za predstavitve in vizualne analize zasnov, posredno pa za jedra kalupov, ker zaradi trdnosti funkcionalnih analiz ne omogočajo. Znan proizvajalec tovrstnih tiskalnikov je firma Objet Geometries Ltd. iz Izraela (slika 21). Mere prikazanega stroja na sliki 21 so 87 x 73 x 120 cm, masa pa 280 kg. Izdela lahko modele do velikosti 258 x 250 x 205 mm.

5.5 Trodimenzionalno tiskanje (3D Printing 3DP)

Trodimenzionalno tiskanje je bilo razvito na Massachusetts Institute of Technology (MIT) 1993 leta. Firma Z Corporation (ZDA) je bila ustanovljena leta 1994 in je prvi trodimenzionalni enobarvni (monokromatski) tiskalnik dala na tržišče leta 1998, prvi barvni tiskalnik pa leta 2000. Ti tiskalniki, ki so na tržišču pod različnimi imeni njenih 'sestrskih firm', so najhitrejši in glede na pojem 'tiskanje' tudi edini, ki upravičeno nosijo ime '3D tiskalniki' oziroma 'trodimenzionalni tiskalniki'. Pri vseh ostalih, ki jim tudi pravijo '3D tiskalniki', je proces nastanka prototipa precej oddaljen od procesa, ki ga razumemo kot tiskanje. Ti

tiskalniki tiskajo sloj za slojem tako, kot to počnejo Ink-Jet tiskalniki. Imajo podobno tiskalno glavo (če je monokromatski tiskalnik) oziroma tiskalne glave (če gre za barvni tiskalnik), le namesto na papir tiskajo na raven sloj stisnjenega, pudru podobnega praška. Namesto črnila brizgajo tekočino, ki je vezivo (pri barvnih tiskalnikih je ta štirih barv). Torej snov, ki prašne delce sloja poveže med seboj v sloj in tega s prejšnjim slojem. Ker model nastaja v zapolnjeni komori praha, podpore za previse modelov niso potrebne.

Za področje strojne industrije ponuja firma Prometal (je sestavni del firme ExOne Company iz ZDA) tiskalnike, ki delujejo po enakem principu, le da sta osnovni material (kovinski, keramični in kompozitni prah) in vezivo namenjena prvenstveno potrebam v avtomobilski industriji in strojništvu. Njihov največji stroj lahko izdelata model velikosti 1500 x 759 x 700 mm.

Tiskalniki firme Z Corporation so hitri (trenutno najhitrejši) in primerni za uporabo v gradbeništvu, arhitekturi, umetnosti in še kje, ker modelom lahko pripišemo barvne texture in jim damo s tem naravnejši videz. Na enem med modeli tiskalnikov te firme smo izdelali maketo mosta Vranke na AC med Celjem in Blagovico in je opisana v nadaljevanju. Glede na navedeno bi bilo prav, da imeni 'trodimenzionalni tiskalnik' in 'trodimenzionalno tiskanje' uporabljamo za tovrstne tiskalnike, za ostale pa 'stroji za izdelavo prototipov', čeprav se tudi s trodimenzionalnimi tiskalniki izdelata prototip.

Tiskalnik in čistilna komora firme Z Corporation na sliki 22 tvorita celoto ali sistem. Na tiskalniku se model natisne, v čistilni komori pa se iz površin modela očisti neuporabljen prah. Na koncu se model osuši in ga površinsko utrdi z epoksidno smolo, z voskom ali z originalnimi utrjevalci in penetranti firme. Ob uporabi ustreznih prahov in z infiltracijo ustreznih penetrantov se lahko izdelajo prototipi, ki imajo lastnosti plastike ali gume (na primer podplat športnega copata) ali pa kalupe za vliivanje barvnih kovin, ki prenesajo temperature nad 1000 °C. Za prototipe, ki morajo prenesti zahtevne funkcionalne analize (na primer: preizkus s tiskalnikom izdelane deske rolke – skateboarda) so razvili poseben penetrant – trdilec z imenom Z-Max. Tiskanje novega sloja se prične tako, da se nosilec tiskalnih glav (vsebuje elektroniko za tiskanje in valj za nanos prahu na delovno površino) pomika v desni smeri (prvi korak na sliki 24). Pri tem valj nanaša sloj praha na delovno površino iz dovodne komore in ga

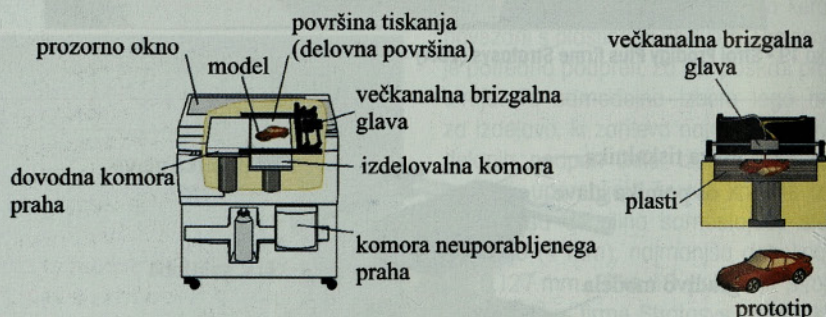


3D tiskalnik Z510/Cx

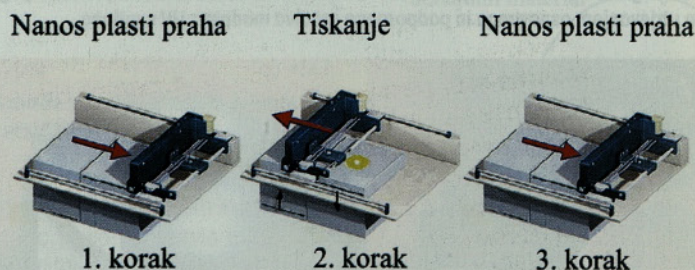


Čistilna komora ZD5

Slika 22 • Trodimenzionalni tiskalnik firme Z Corporation in čistilna komora



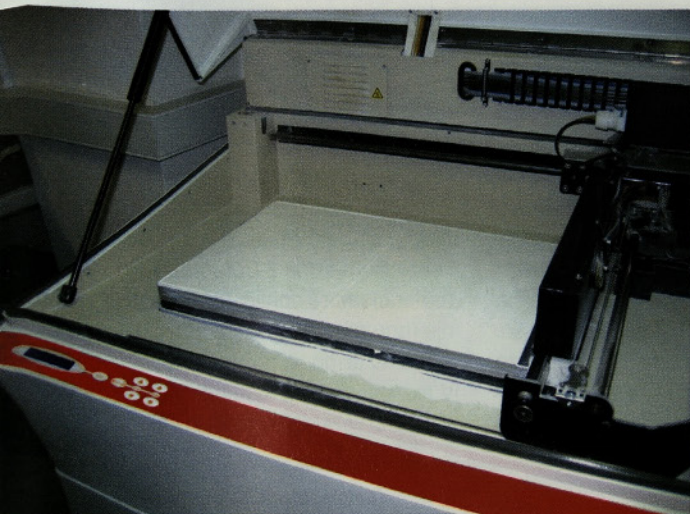
Slika 23 • Bistveni sestavni deli tiskalnika firme Z Corporation in nastanek prototipa po plasteh v izdelovalni komori



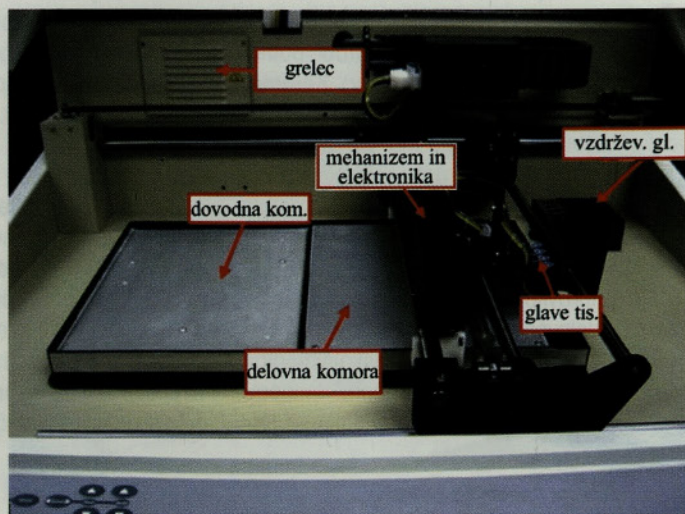
Slika 24 • Koraki tiskanja v 3D tiskalniku firme Z Corporation

primerno stisne. To je podobno vstavitvi papirja v tiskalnik. Sloj prahu nadomešča papir pri običajnem Ink-Jet tiskalniku. Nosilec se ustavi v skrajni desni legi tako, da so tiskalne glave zunaj desnega roba delovne površine (slika 25). Debelina sloja je 0,08 mm ali

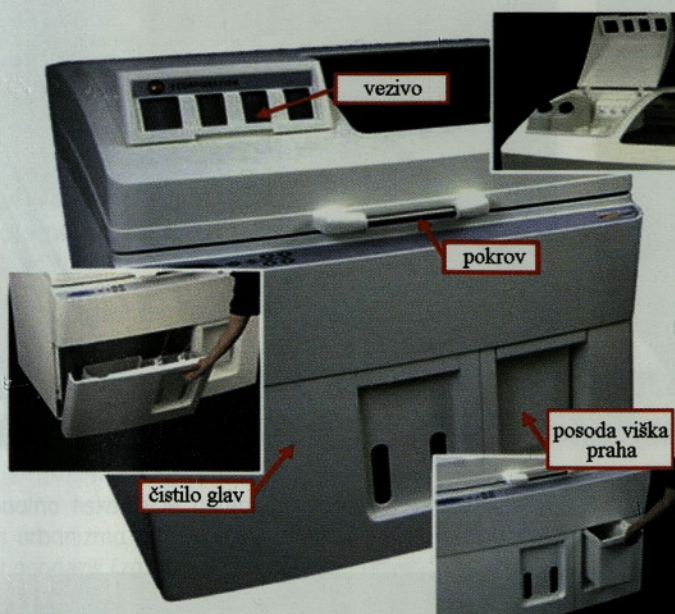
0,1 mm, kar se izbere glede na želeno natančnost izdelave. Uporaba tanjših slojev da boljši izdelek, poveča pa izdelovalni čas zaradi večjega števila slojev. V drugem koraku se nosilec s tiskalnimi glavami pomika levo, glave pa tiskajo sloj



Slika 25 • Pogled v notranjost delovnega območja tiskalnika, ki je pripravljen za delo



Slika 26 • Pogled v notranjost delovnega območja tiskalnika z opisom delov pred vnosom praha v dovodno in delovno komoro (pred pripravo tiskalnika za tiskanje)



Slika 27 • Prikaz zunanjih sestavnih delov tiskalnika z opisi



Slika 28 • Izdelana deska rolke s privitimi kolesi in preizkušanje njene trdnosti ter uporabnosti



modela na delovni površini, in sicer vrstico za vrstico. Pri tem se nastajajoči novi sloj sprime s prejšnjim. Stroj tiska samo na področju delovne površine, nosilec z glavami in valjem pa se po tiskanju pomakne in ustavi v skrajni levi legi zunaj levega roba površine dovodne komore (sliki 25 in 26).

V tretjem koraku bat v dovodni komori (slika 23 in 26) dvigne prah za malenkost več, kot je potrebno za izdelavo stisnjenega sloja na delovni površini tiskalnika. Nosilec se prične pomikati desno, valj v nosilcu pa nanaša prah na delovno površino in ga stisne, da naredi nov sloj. Odvečna količina praha, ki je potrebna za izdelavo novega sloja, pade v stranske reže in od tod v komoro neuporabljenega praha. Ko je nosilec glav skrajno desno, je novi sloj izdelan in pripravljen za tiskanje. Ponovi se opisani drugi korak tiskanja in tako tiskalnik tiska sloj za slojem do izgotovitve modela. Neuporabljen prah v tiskalniku in čistilni komori vsebuje drobne delce sprjete prahu. Zato se lahko ponovno uporabi (reciklira) s presejanjem približno 92 % praha. Prah je higroskopičen in ga je potrebno varovati pred vlago.

Pri modelih, kjer so površinam pripisane barvne texture, tiskalnik obarva rob sloja, ki pripada obarvani površini, približno 1 mm v notranjost. Ker so barve tudi vezivo, jih tako porabi malo, saj večino sloja potiska z brezbarvnim vezivom. Tiskalnik ima na razpolago tri prosojne nepokrivne barve (podobne uporabljajo tiskarji): cyan, magenta in yellow. Ostale barve in njihove odtenke ustvari z uporabo barvnih modelov

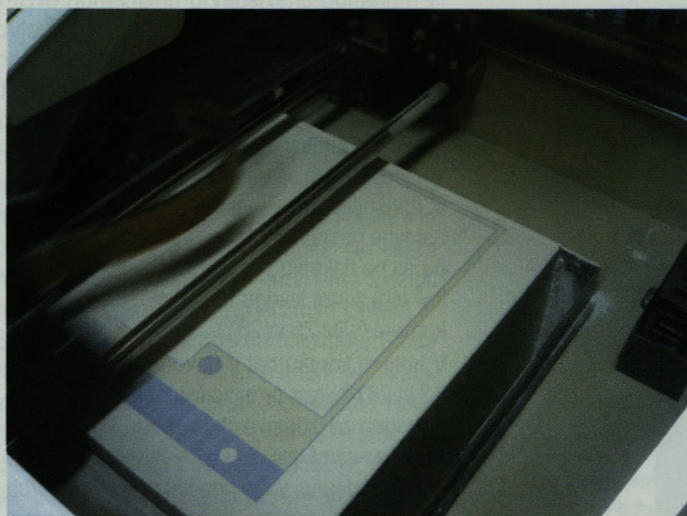
(na primer: črno barvo naredi po subtraktivnem barvnem modelu – uporabi polne (100 %) vrednosti vseh treh barv). Ker ima tiskalnik štiri tiskalne glave, uporablja za vsako barvno in brezbarvno vezivo svojo glavo. Vsa veziva so v ustreznih plastičnih posodah, od koder jih posebna črpalka dovede do glav tiskalnika.

Slika 25 prikazuje notranjost delovnega območja pripravljenega tiskalnika za tiskanje. Površini delovne in izdelovalne komore sta poravnani, nosilec tiskalnika s tiskalnimi glavami in valjem pa je v skrajnem desnem položaju in pripravljen na začetek tiskanja. Na

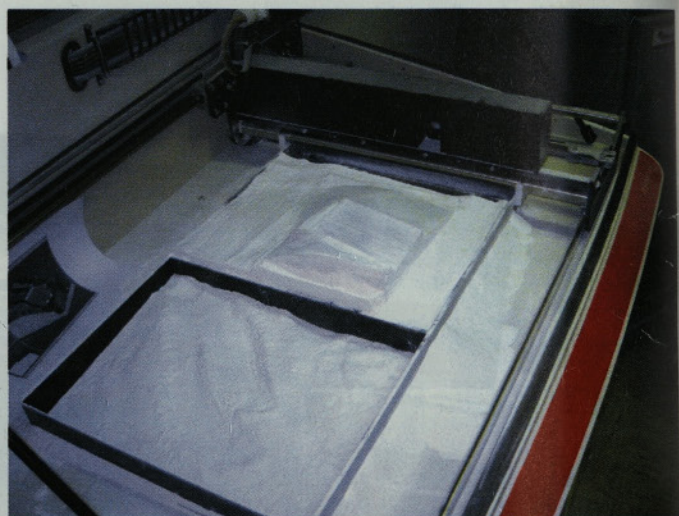
slikah 26 in 27 smo prikazali v obliki fotomontaž, ki smo jih povzeli iz priročnika za vzdrževanje tiskalnika in zamenjali angleška imena s slovenskimi, vse bistvene sestavine tiskalnika.

Slike v nadaljevanju (slike 29 do 35) prikazujejo nekaj zaporednih korakov tiskanja modela mosta, ki smo ga izdelali na prikazanem tiskalniku. Model vsebuje po izgotovitvi odvečno vlago zaradi veziva, zato je krhek in ga je potrebno previdno odstraniti iz tiskalnika. Po osušitvi in utrditvi je model pripravljen za vizualne analize in predstavitve. Trdnost modela je mogoče povečati z ustreznimi infiltrati.

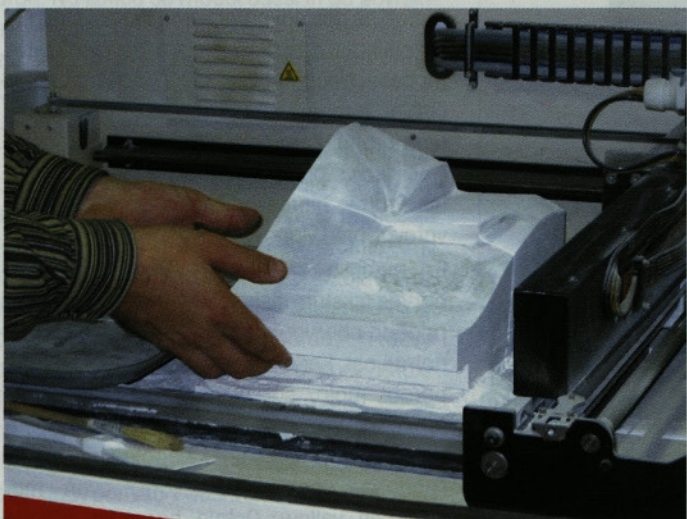
Na razpolago so različni materiali (vrste prahov, veziva in infiltrati). Tudi taki, ki omogočajo izdelati desko rolke, ji priviti kolesa in s tako izdelanim športnim rekvizitom (slika 28) opraviti zelo zahtevno analizo uporabnosti in vzdržljivosti (mimogrede: rolka je vzdržala kar 24 minut vožnje z obrati – načrtujejo izboljšavo preparata Z-Max in še strožje teste). S 3D tiskalnikom firme Z Corporation in ustreznim materialom se lahko izdela kalup za vlivanje barvnih kovin, ki prenese temperatura 1000 °C in ga je mogoče večkrat uporabiti. V razvoju so novi materiali v praškasti obliki, ustreznna veziva, utrjevalci in infiltrati.



Slika 29 • Tiskanje sloja modela terena



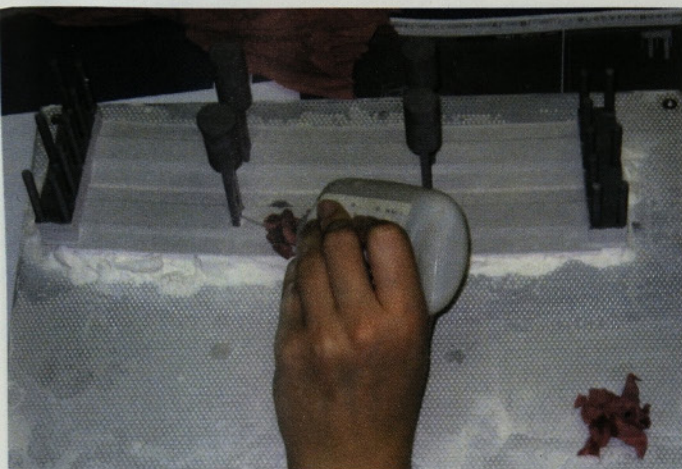
Slika 30 • Model v izdelovalni komori pred odvzemom



Slika 31 • Odvzet model na pladnju v notranjosti tiskalnika



Slika 32 • Odstranitev prahu iz modela v čistilni komori



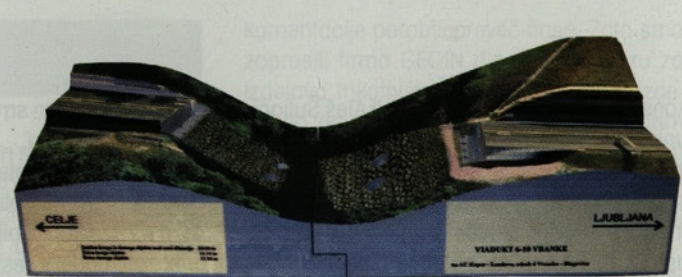
Slika 33 • Utrditev dela mostu (stebra)



Slika 34 • Utrjen levi in neutrjen (svetel) desni del modela terena



Slika 35 • Sestavljen model mostu



Slika 36 • Modela terena z odstranjenim mostom

6 • UPORABA TRODIMENZIONALNEGA TISKANJA V GRADITELJSTVU

Trodimenzionalno tiskanje je uporabno: v arhitekturi in urbanizmu, v elektrotehniki in strojništvu, v geodeziji (za izdelavo reliefnih kart, reliefov in za taktilno kartografijo, ki slepim omogoča spoznavanje prostora in

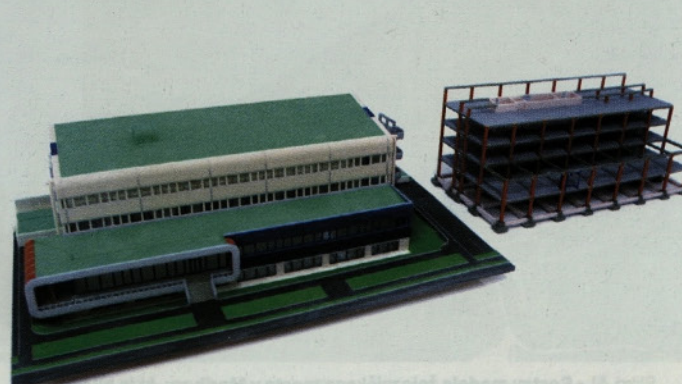
razmerij v njem z dogovorjenimi tipnimi znaki), v konstrukcijskem inženirstvu ... Torej povsod, kjer potrebujemo model, ki ga lahko otipamo, obračamo in si ga dobro ogledamo. Na njem lahko vidimo veliko prikritih

napak, ki jih iz risb in slikovnih ali vizualnih predstavitev težje (ali pa sploh ne). Vsak dobro in natančno izdelan model nam da več odgovorov kot tisoč slik. Slike izdelanih maket prikazujejo nekaj možnosti uporabe trodimenzionalnega tiskanja v graditeljstvu.

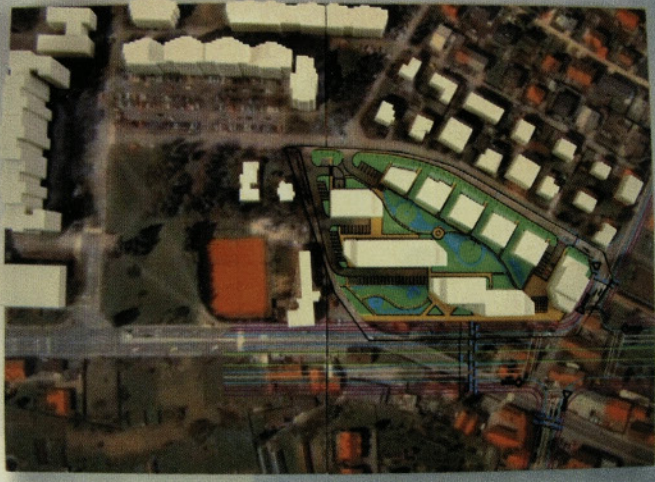
Sliki 37 in 38 prikazujeta: fotografijo stavbe ICIT Vrtojba, modela stavbe firme ICIT in njene nosilne konstrukcije



Slika 37 • Slika stavbe forma ICIT Vrtojba



Slika 38 • Modela stavbe firme ICIT in njene nosilne konstrukcije



Slika 39 • Maketa območja Ruski car z vstavljenjo maketo stanovanjsko poslovnega kompleksa



Slika 40 • Makete variant stanovanjsko poslovnega kompleksa območja Ruski car

konstrukcije. Avtor projekta je bil Aleš Šuligoj, univ. dipl. inž. arh., virtualna modela stavbe in njene konstrukcije pa je izdelal David Lozej s programom ARCHICAD. Čeprav bi bilo mogoče model stavbe izdelati s pripisom ustreznih tekstur še bolje, je izdelek dober primer uporabe 3D tiskanja v arhitekturi.

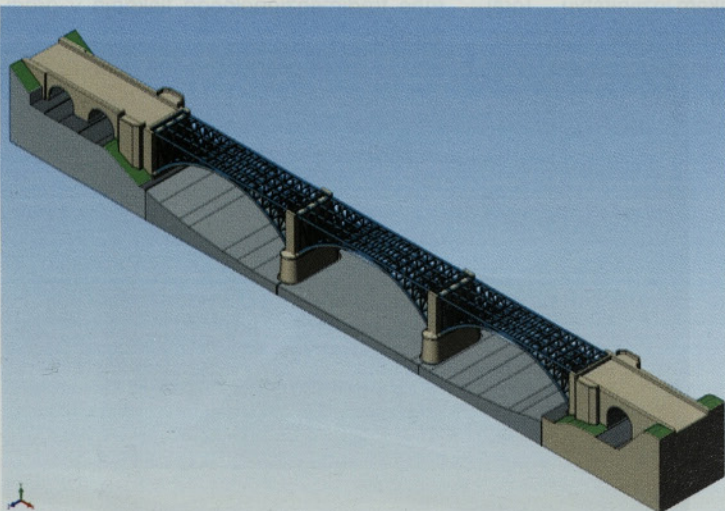
Na slikah 39 in 40 so prikazane izdelane makete zazidalnega načrta območja Ruski car v Ljubljani (avtor: Ciril Mlinar, univ. dipl. inž. arh., TrueCAD d.o.o) za namen ugotovitve primer- nosti in primerjave postavitve stanovanjsko- poslovnega kompleksa. Makete nazorno ka-

žejo primernost in smiselnost uporabe 3D tis- kanja v urbanizmu.

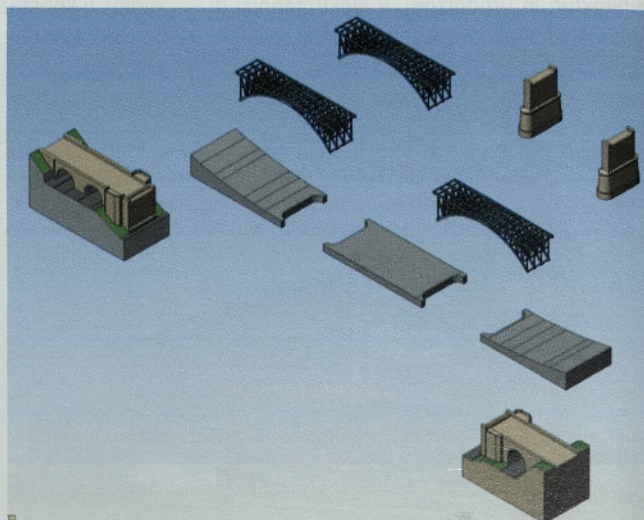
Izdelavo modela železniškega mostu v Mari- boru v programu SolidWorks prikazujeta sliki 41 in 42. Izdelan je bil kot sestav. Na sliki 41 je prikazan model v sestavljeni obliki, na sliki 42 pa v razstavljeni obliki. Model smo izdelali v merilu (1:150). Desni obrežni opornik mostu z napisi in teksturo, ki je pripravljen za 3D tiskanje, je prikazan na sliki 43. Rezultat pos- kusnega tiskanja ločne konstrukcije polja mosta, s katerim smo preverili natančnost izdelave oziroma tiskanja, pa je prikazan na

sliki 44. Dimenzije makete železniškega mostu, ki je bil ob pisanju prispevka v izdelavi, so 1597 x 160 x 160 mm.

Uporabnost 3D tiskanja je mnogo širša, kot smo prikazali z nekaj zgledi. Pri montažnih konstrukcijah lahko na ta način preverimo pravilnost konstruiranih spojev in v pomanj- šanem merilu opravimo tudi vsaj delno funk- cionalno testiranje. In kar ni nepomembno: model lahko izdelamo v enem ali največ dveh dneh. Ob tem velja ponovno poudariti, da tako narejen model v največji možni meri ustreza računalniško konstruiranemu modelu.



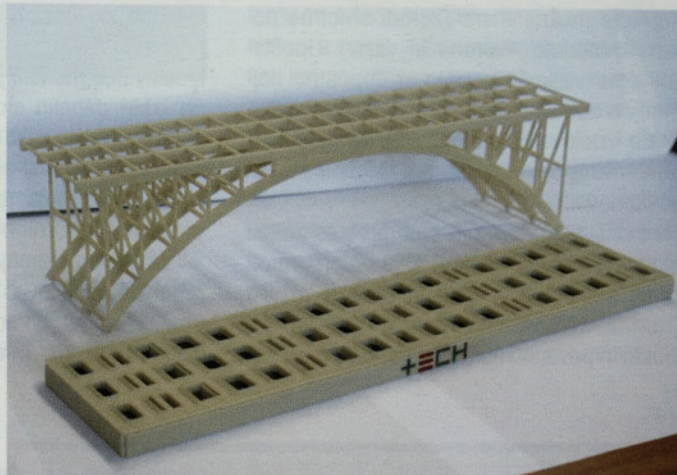
Slika 41 • Sestav modela železniškega mostu v Mariboru, ki je bil narejen v programu SolidWorks



Slika 42 • Model železniškega mostu v Mariboru v razstavljeni obliki



Slika 43 • Model desnega obrežnega opornika z napisi in teksturami



Slika 44 • Slika poskusnega tiskanja ločne konstrukcije železniškega mostu

7 • OPIS DELA PRED TISKANJEM MAKETE MOSTA VRANKE

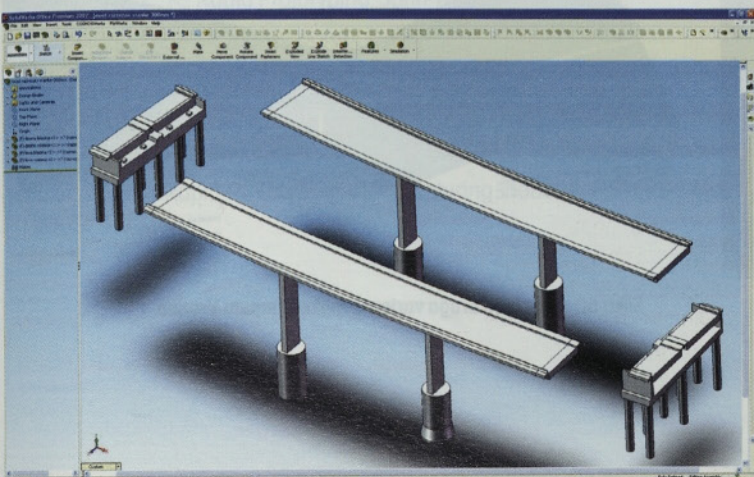
Uporaba 3D tiskanja za izdelavo prototipov v našem okolju ni novost, ker to tehnologijo uporablja že nekaj naših firm in ker obstajajo firme, ki nudijo tovrstne usluge. Res pa je, da se je v vejah graditeljstva komaj pričela uporabljati in da mnogi ne vedo za možnosti in prednosti, ki jih ta tehnologija nudi. Najbrž je razlog v tem, da se uporaba 3D modelirnikov prepočasno uvaja in izrablja. Osnovni pogoj, da lahko prototip ali maketo izdelamo na 3D tiskalniku, je izdelan virtualni model načrtovanega izdelka, njegovega dela, makete ali njenih sestavnih delov. Tudi za most Vranke nismo imeli virtualnega modela. Izdelali smo ga s programom SolidWorks iz risb narejenih

s programom AutoCAD, in sicer v dveh variantah: kot celoto (kos) in kot sestav (slika 45). Prvo varianto modela je izdelala firma IB-PRO-CADD d.o.o. iz Ljubljane, drugo, zahtevnejšo pa StudioTech d.o.o. iz Izole.

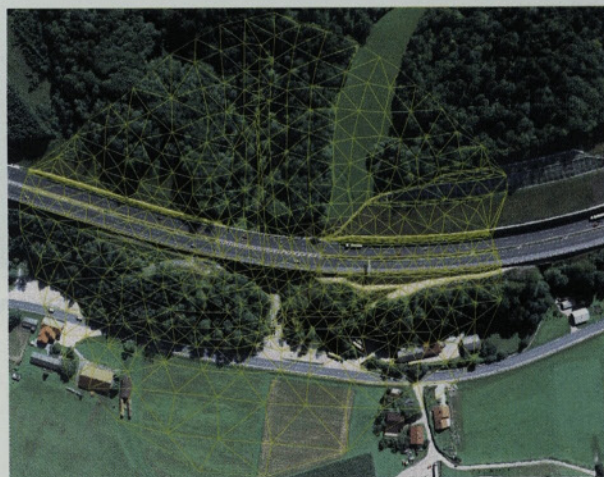
Po izdelanem virtualnem modelu mostu smo za maketo izdelali še model terena ob upoštevanju zmogljivosti uporabljenega 3D tiskalnika. Največji model, ki ga lahko izdela, ne sme preseči dimenzij kvadra z robovi 254 x 356 x 203 mm. Odločili smo se, da bomo most izdelali v največji možni velikosti, ki bo v skladu z merami izdelanega modela terena. Ocenili smo, da bi za iskanje podatkov o terenu pri izvajalcih projektne do-

kumentacije porabili preveč časa. Zato smo zaprosili firmo GEOIN d.o.o. v Mariboru za izdelavo trikotniškega modela terena. Izdelali so ga za ožje področje mostu in nam dali tudi ortofoto. Tega smo uporabili kot teksturo izdelane makete mostu. Brez njihove pomoči makete v načrtovani obliki ne bi mogli izdelati.

Trikotniški model terena smo v programu SolidWorks zgladili, da njegov videz ustreza razmeram v naravi. V model terena smo vstavili model mostu in izrezali odprtine za stebre, ležišča pilotnih blazin in benoto pilote. Pri tem so nam bile v veliko pomoč točke robov mostu na trikotniškem modelu terena, ker drugih podatkov nismo imeli. Narejen model terena je bil prevelik, da bi ga izdelali v enem kosu. Razrezali smo ga na dva dela (slika 47) in vsakega izvozlili do



Slika 45 • Prikaz sestava mosta Vranke v razstavljeni obliki



Slika 46 • Slika trikotniškega modela terena ožjega področja mostu z ozadjem ortofota

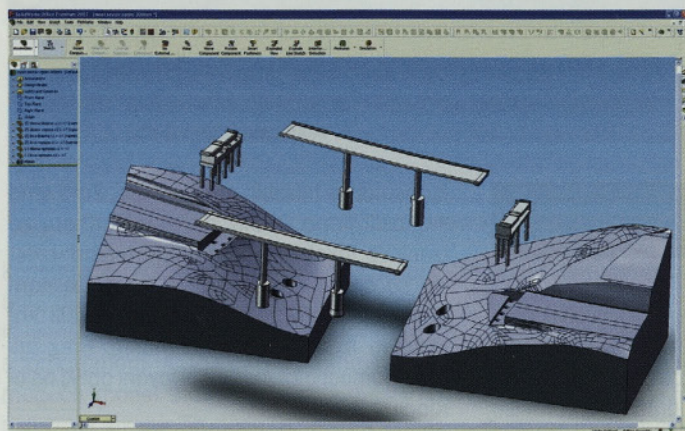
največje možne mere (zaradi smotrne porabe materiala – prahu in veziv). Upoštevali smo velikost modela in dopustno najmanjšo debelino sten (po navodilih in izkušnjah izdelovalca modela), da se model pri odvzemu iz delovne komore tiskalnika ne bi poškodoval.

Pred pričetkom tiskanja smo pri izdelovalcu modela v programu ZEdit, ki je ob programu ZPrint priložen 3D tiskalniku (oba je razvila firma Z Corporation) namestili na vozišči mosta in površini modelov terena ortofoto kot

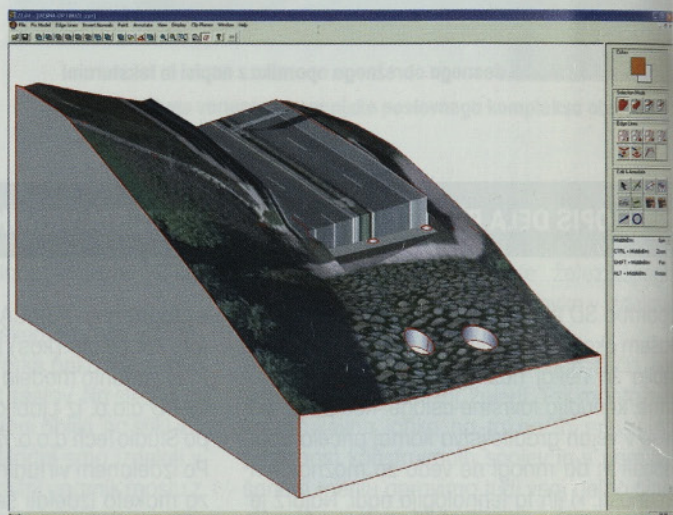
teksturo, na čelni strani modelov terena pa napise.

Izdelovalec makete je v programu ZPrint, ki ob izbiri debelin slojev izračuna potrebno količino prahu (slika 49), veziva in čas tiskanja, določil ustrezne parametre za najboljše tiskanje in z razporeditvijo manjših delov v prosto prostornino izdelovalne komore tiskalnika pri tiskanju modelov terena optimaliziral čas izdelave. Za prikazani desni del modela terena, ki ima mere opisnega kvadra 220 x 310 x 157 mm, je tiskalnik potreboval

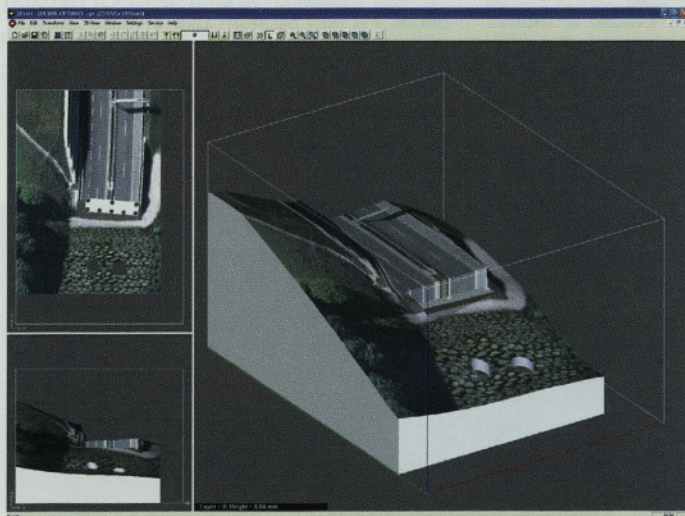
10,50 ur. Natisniti je moral 1750 slojev debeline 0,0889 mm. V minuti je v povprečju natisnil približno 2,7 sloja. Za izdelavo je porabil 1177 cm³ prahu in 460 ml veziva. Levi del modela terena je manjši (220 x 290 x 129 mm), za njegovo izdelavo je tiskalnik potreboval 8,50 ur. Iz navedenega sledi, da imata na čas izdelave največji vpliv višina modela in debelina sloja ter posledično (zaradi višine) število slojev. Izdelana, sestavljena in utrjena maketa mostu je prikazana na sliki 50.



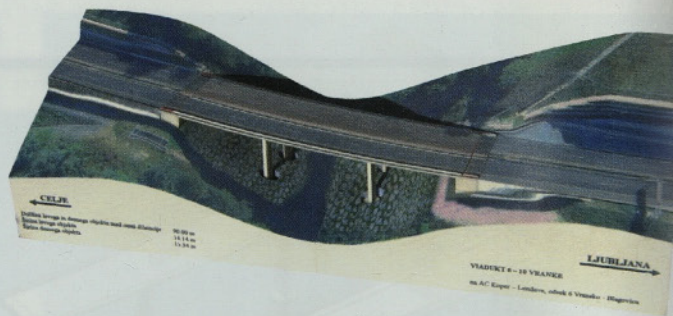
Slika 47 • Izdelana maketa mostu Vranke, prikazana v programu SolidWorks v razstavljeni obliki



Slika 48 • Namestitev dela ortofota v programu ZEdit kot teksture na desni model terena



Slika 49 • Postavitev desnega modela terena v programu za tiskanje ZPrint



Slika 50 • Izdelana druga varianta makete mostu Vranke

8 • SKLEP

Uporaba tehnologij hitre izdelave prototipov in njenega segmenta, trodimenzionalnega tiskanja, bo v prihodnosti zaradi racionalne izrabe delovnega časa doživela tudi v graditeljstvu intenzivnejšo uporabo in izrabo svojih možnosti. Ta čas bo krajši, če bo uvajanje uporabe 3D modelirnikov hitrejše, kot je v trenutnih razmerah. Najbrž ni smiselno, da je še pogosto potrebno

iz risb ustvariti virtualni model objekta, ki je osnova za uporabo trodimenzionalnega tiskanja. Ročna izdelava maket, ki zahteva veliko časa in sredstev, pri čemer maket ni vedno mogoče izdelati v zadovoljivi kakovosti in natančnosti, bo najbrž v posebnih primerih še potrebna. Večinoma pa bo zaradi smotrne izrabe časa nadomeščena s prikazano tehnologijo. Kljub

temu da avtorju ni uspelo dobiti zanesljivih podatkov o cenah ročne izdelave podobnih maket, kot so prikazane v članku, je na podlagi posredovanih ocen stroškov izdelave takih maket prepričan, da je prikazana možnost izdelave maket hitrejša, da je natančnost izdelanih maket večja in da je njihova cena ob upoštevanju realnih stroškov manjša. Čeprav so možnosti uporabe prikazane tehnologije veliko večje, kot je izdelava maket, bo morda prav ta možnost v graditeljstvu predstavljala uvod v njeno intenzivnejšo uporabo in izrabo.

9 • ZAHVALA

Avtor se zahvaljuje Aleksandru Breclu, univ. dipl. inž. str., za pomoč pri pripravi makete mostu Vranke in makete železniškega mostu

v Mariboru. Zahvaljuje se tudi podjetju GEOIN d.o.o. iz Maribora za izdelavo trikotniškega modela ožjega področja terena mosta, Studi-

uTech d.o.o. iz Izole pa za sodelovanje in skrbno izdelavo modela železniškega mostu v Mariboru in za podaritev izdelane druge variante modela mostu Vranke.

10 • LITERATURA

- Dolenc, A., Software Tools for Rapid Prototyping Technologies in Manufacturing. Acta Polytechnica Scandinavia, Mathematics and Computer-science No. 62, Helsinki, 1993.
- Dolenc, A., An Overview Of Rapid Prototyping Technologies In Manufacturing, Institute of Industrial Automation, Helsinki University of Technology, 1994.
- Durham, M., The Rapid Prototyping: Stereolithography, Selective Laser Sintering and PolyJet, Advanced Materials & Processes, Vol. 161, No. 1, January 2003, ASM International, 2003.
- Gebhardt, A., Rapid Prototyping. Werkzeuge fuer die schnelle Produktentwicklung., Muenchen, Hanser, 2000.
- Goode, E., Selective Lasering Systems & Materials, Advanced Materials & Processes, Vol. 161, No. 1, January 2003, ASM International, 2003.
- Hong, Y., S., Supplementary Chapter, Rapid Prototyping and Manufacturing, The University of Toledo, 2003.
- Kai, C., C., Fai, L., K., Rapid Prototyping, John Wiley & Sons, 1997.
- Kalender, W., A., Computertomographie, MVD Verlag, 2000.
- Lutar, B., Uporaba geometrijskega modeliranja v gradbeništvu, CD-ROM, Fakulteta za gradbeništvo, Maribor, 2002.
- Pham, D., T., Dimos, S., S., Rapid Manufacturing, Springer, 2001.
- Pogačar, V., 3D sken – nova paradigma ustvarjalnosti, Večer, priloga Znanost, 4. januar, 2007.
- Wohlers, T., The Rapid Prototyping/Manufacturing Industry, Advanced Materials & Processes, Vol. 161, No. 1, January 2003, ASM International, 2003.

Izvršni odbor ZDGITS

sklicuje

v četrtek, 31. maja 2007
ob 11.00 uri

REDNO SKUPŠČINO
ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV
SLOVENIJE

Skupščina bo potekala
v dvorani Zavoda za gradbeništvo Slovenije (V. nadstropje),
Dimičeva 12, Ljubljana

Vabljeni v čim večjem številu!

Predsednik ZDGITS
Marjan Vengust, dipl. inž. grad.

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Rok Čokl, Premične varnostne ograje, mentor doc. dr. Alojzij Juvanc, somentor asist. mag. Robert Rijavec.

Blaž Grašič, Vzdrževanje večstanovanjskih stavb v sklopu upravljanja, mentor doc. dr. Jana Šelih.

Samir Čorić, Analiza finančne realizacije projekta VDC Cerknica, mentor doc. dr. Jana Šelih, somentor asist. dr. Aleksander Srdić.

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Gregor Bostič, Sanacija in zapiranje odlagališč komunalnih odpadkov, mentor izr. prof. dr. Jože Panjan.

Tibor Krašovec, Preverjanje kakovosti voziščne konstrukcije, mentor prof. dr. Janez Žmavc.

Tjaša Teran, Izdelava armaturnih načrtov prostorskega okvira s programom Allplan, mentor doc. dr. Matjaž Dolšek.

Aljoša Kokot, Komunalna infrastruktura v Občini Ig v prostorskih aktih in v razvojnih programih, mentor izr. prof. dr. Albin Rakar, somentor asist. Tadej Žaucer.

Mojca Urbanec, Vzpostavitev službe za prodajo nepremičnin v gradbenem podjetju, mentor izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač.

Gregor Balažič, Pridobivanje gradbenega dovoljenja za manj zahteven objekt, mentor izr. prof. dr. Albin Rakar.

Goran Boštjančič, Analiza življenjskega cikla gradbenih proizvodov, mentor doc. dr. Jana Šelih.

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ VODARSTVO IN KOMUNALNO INŽENIRSTVO

Rok Velišek, Predlog ureditve jezua na Savinji pri Polzeli, mentor prof. dr. Matjaž Mikoš, somentor Rok Fazarinc.

Erik Kramberger, Hidravlični model Savinje pri Latkovi vasi, mentor prof. dr. Matjaž Mikoš, somentor Rok Fazarinc.

Lara Flis, Vzpostavitev strukture sistema za analizo podatkov o kvaliteti vode in zdravju prebivalstva, mentor izr. prof. dr. Boris Kompare, somentor doc. dr. Primož Banovec.

Špela Lakota-Jeriček, Analiza agresivnosti in erozivnosti padavin v Sloveniji, mentor prof. dr. Matjaž Mikoš, somentor Rok Fazarinc.

Krištof Zupančič, Mehansko biološka obdelava odpadkov in možnosti njene uporabe v Republiki Sloveniji, mentor izr. prof. dr. Viktor Grilec.

Tea Hrovat, Modeli organiziranosti komunalnih dejavnosti v Republiki Sloveniji, mentor izr. prof. dr. Albin Rakar.

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Boštjan Bohorč, Kontinuirana meritev zgoščevanja nevezanih slojev cestne konstrukcije, mentor izr. prof. dr. Bojan Žlender, somentor red. prof. dr. Ludvik Trauner.

Senad Hodžić, Študija spremembe konstrukcijskega sistema mostu, mentor red. prof. dr. Branko Bedenik, somentor pred. Milan Kuhta, univ. dipl. inž. grad.

Erazem Počivavšek, Analiza nosilnosti montažnih sten z lesenimi obložnimi ploščami, mentor izr. prof. dr. Miroslav Premrov, somentor doc. dr. Peter Dobrila.

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA

Smiljan Kramberger, Smotrnost in ekonomska upravičenost investicije v pasivno zgradbo, mentorja izr. prof. dr. Dean Korošak in red. prof. dr. Anton Hauc, somentor doc. dr. Metka Sitar.

Tjaša Paradižnik, Termenska opredelitev kontrolnih meritev v gradbeništvu, mentorja doc. dr. Boštjan Kovačič in red. prof. dr. Duško Uršič, somentor Rok Kamnik, univ. dipl. inž. geod.

Marko Soršak, Izdelava digitalnih etažnih načrtov ter uporaba kartografskih načrtov pri gradnji večstanovanjskih objektov, mentorja doc. dr. Boštjan Kovačič in red. prof. dr. Boris Snoj.

Rubriko ureja • **Jan Kristjan Juteršek**, univ. dipl. inž. grad.

KOLEDAR PRIREDITEV

maj 2007

SIST EN 206

IZS, Ljubljana, Slovenija
www.izs.si

9.-10.5.2007

Četrta konferenca CGS 2007

Hotel Mons, Ljubljana

11.5.2007

Geodetski načrti in gospodarska javna infrastruktura

IZS, Ljubljana, Slovenija
www.izs.si

29.5.2007

14. Slovenski kolokvij o betonih:

Posebne lastnosti betonov z dodatki

Trg Republike 3, Ljubljana, Slovenija
www.irma.si

junij 2007

Sodobni kanalizacijski sistemi

IZS, Ljubljana, Slovenija
www.izs.si

junij 2007

Cvetka digitalnih katastrskih načrtov

IZS, Ljubljana, Slovenija
www.izs.si

11.-13.6.2007

International Conference: Sustainable Construction Materials and Technologies

Coventry, Anglija
www.uwm.edu/dept/cbu/coventry.html

18.-20.6.2007

6th ITS in Europe Congress and Exhibition

Aalborg, Danska
www.ertico.com

26.-29.6.2007

24th W78 Conference &

5th ITCEDU Workshop &

14th EG-ICE Workshop

Maribor, Slovenija
www.w78.uni-mb.si

18.-21.9.2007

The Eleventh International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing

St Julians, Malta
www.civil-comp.com/conf or contact

19.-21.9.2007

IABSE Symposium

International Association for Bridge and Structural Engineering

Weimar, Nemčija
www.iabse2007.de

24.-27.9.2007

14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnical Engineering in Urban Environment

Madrid, Španija
www.ecsmge2007.org

26.-28.9.2007

12th International Congress: Polymer in Concrete (ICOIC'07)

Chuncheon, Južna Koreja
http://icpic.kongwon.ac.kr

6.-10.10.2007

75th IBTTA Annual Meeting and Exposition

Dunaj, Avstrija
www.ibtta.org

10.-13.12.2007

7th International Symposium on Cable Dynamics

Dunaj, Avstrija
www.aimontefiore.org/cable/

21.-25.4.2008

TRA 2008

2nd Transport Research Arena (TRA)

Ljubljana, Slovenija
www.traconference.com

4.-6.6.2008

IABSE Conference

ICT for Bridges, Buildings and Construction Practice

Helsinki, Finska
www.iabse.org

30.6.-4.7.2008

10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes

Xi'an, Kitajska
www.landslide.iwhr.com

8.-10.7.2008

7th International Congress Concrete:

Construction's Sustainable Option

Dundee, Škotska
www.ctucongress.co.uk

24.-26.11.2008

2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICRRR 2008)

Cape Town, Južna Afrika
www.civil.uct.ac.za/icrrr

5.-9.10.2009

17th International Conference for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering

Alexandria, Egipt
www.2009icsmge-egypt.org

Rubriko ureja • **Jan Kristijan Juteršek**, ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: **msg@izs.si**