

UPORABA 3D MODELIRNIKOV

USE OF 3D MODELERS

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

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

Znanstveni članek

UDK 624.048 : 519.68

Povzetek | 3D modelirniki, geometrijski modeli in geometrijsko modeliranje izdelkov se uporabljajo na različnih strokovnih področjih. V članku so podani opisi navedenih pojmov in prikazan je razvoj 3D modelirnikov. V obliki diskusije, zgledov in opisa postavljene hipoteze je prikazan smisel uporabe 3D modelirnikov in oris trenutnega stanja v našem gradbeništvu na področju geometrijskega modeliranja objektov. Opisani so 3D tiskalniki in možnost njihove uporabe v gradbeništvu. Prikazano je upravljanje podatkovnih baz projektov in uporabnost ustreznih modulov za ta namen v 3D modelirnikih.

Summary | 3D Modelers, geometric models and geometric modelling of products are used in various technical fields. The paper presents a description of the mentioned concepts and the evolution of 3D modelers. In a form of discussion, examples and the description of the defined hypothesis we become aware of the reason for the use of 3D modelers and get a view of the momentary situation in sphere of geometric modelling of objects in our civil engineering. The paper describes 3D printers and the possibilities of their usage in civil engineering. It also shows the management of data bases of projects and the use of suitable modules for this purpose in 3D modelers.

1 • UVOD

1.1 Splošno

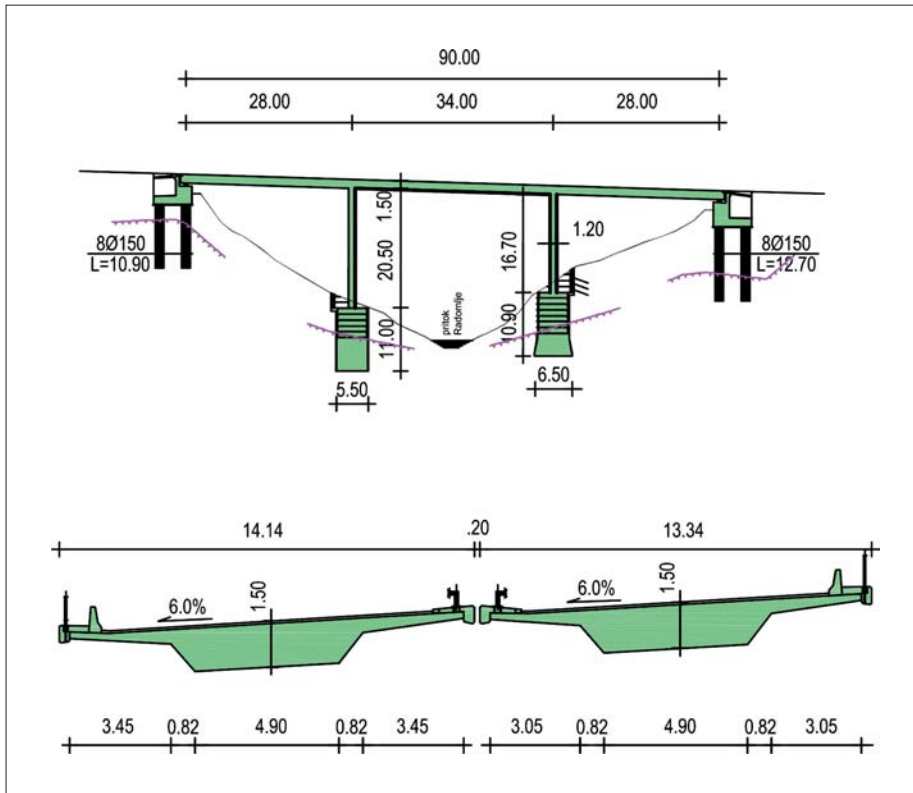
Slika, skica in risba so grafične predstavitve ali slikovne informacije geometrije, ki podaja oblike in prostorske odnose med objekti (med stavbami, različnimi konstrukcijami in drugimi izdelki). Pri posredovanju informacij med ljudmi s slikami in skicami ni omejitev kot pri jezikih in pisavah. Cilj človeka je, da idejo o objektu opredmeti. S tem postane načrtovalca, ki svojo idejo opiše, kar ni enostavno opravilo. Pogosto naleti na težavo, kako ustrezno opisati potrebne aktivnosti za izdelavo objekta. Znano je, da se informacija o obliki naprave ali njenega dela razlikuje od opisov materialov za izdelavo naprave (ali njenih delov), od kalkulacije ali cene izdelka, od terminskih planov izdelave in podobnega. Opis oblike načrtovane izdelave objekta je množica povezanih informacij, ki morajo biti nedvoumne. Določa ga topologija in geometrija objekta. Prva (topologija) podaja uporabljene komponente in njihovo povezanost pri objektu (oglišča, robovi, lica), druga (ge-

ometrija) pa prostorske relacije med deli objekta in med objekti. Njeni gradniki so točke, premice, daljice, krivulje, prebodišča, presečnice in podobno.

Proces določanja lastnosti objekta imenujemo **načrtovanje**. V njem je opis oblike novega objekta zahtevno delo. Iz navedenih razlogov je razumljiva težnja človeka, da kar v največji možni meri množico potrebnih informacij upravlja na znosen način. To so mu omogočili prvi računalniški programi, ki so se pojavili skupaj s cenejšo, dostopnejšo in zmogljivejšo računalniško opremo kmalu po letu 1970. Na začetku so programi za računalniško grafiko omogočali le skromne dvodimenzionalne predstavitve (risanje) objektov. Hiter razvoj je prinašal in še prinaša vse zmogljivejšo programsko (programe) in strojno opremo.

Risbe ali načrti (slika 1) so dvodimenzionalne predstavitve bodočih objektov. V njih je množica opisov in simbolov, ki tvorijo dodatno razlago oblik (dimenzije, dovoljena odstopa-

nja ali tolerance, navodila za izdelavo in podobno) in običajno ustrezajo veljavnim standardom. Objekt je na risbah predstavljen v pogledih (v tlorisu, v narisu, v stranskem risu). Podrobnosti so prikazane v detajlih in včasih je objekt na risbah prikazan v izometričnem ali dimetričnem pogledu. Manj pogosto v perspektivi, ker je to zahtevna risba, če je izdelana pravilno ob uporabi bežišč. Risbe (pravimo jim tudi načrti) so sestavni del tehniške dokumentacije, ki je potrebna za izdelavo objekta. Njihova slabost je, da ne omogočajo preveriti pravilnosti konstruiranih objektov na mnogih področjih (gradbeništvo, strojništvo, medicinska oprema, protetični izdelki in podobno). V njih ni mogoče vgraditi mehanizmov za kontrolo gibljivosti sestavnih delov objekta (stroja, proteze ...) ali za simulacijo obratovanja naprave. Nastale so iz predstav načrtovalca objekta v standardnih pogledih (tloris, naris, stranski ris, prerez), zato so pogosto nepopolne ali celo napačne. Pri predstavitev objektov izključno z risbami, ki razen medsebojne povezave niso povezane z drugačnimi načini ali oblikami predstavitev bodočega izdelka, nadomešča računalniška in programska oprema uporabo risalne



Slika 1 • Risba vzdolžnega in prečnega prereza viadukta Vranke na AC Koper-Lendava na odseku Vransko-Blagovica in pododseku Trojane-Blagovica

deske, papirja, ravnil, peres in ostalega risarskega pribora. Pri tem delu je že na začetku velika ovira: neustreznost predstavitev bodočega resničnega objekta v računalniku in posledično tudi na risbah (Guid, 1988).

1.2 Vrste modelov in opis

Resnični objekt je tridimenzionalen, zvezan, ima fizikalne lastnosti, namembnost, prenaša obremenitve, podvržen je uporabi, izrabi in podobno. Nasprotja med resničnim svetom in njegovo predstavitvijo v računalnikih so bila vzrok nastanka in uporabe različnih modelov za digitalne predstavitve resničnega sveta v računalnikih. Danes jih uporabljamo veliko in med njimi so tudi podatkovni, procesni, računski, produktni in geometrijski model.

Večini, ki se ukvarjajo z računanjem konstrukcij, je med naštetimi modeli znan računski model objekta (na primer okvirja, stene, plošče), zato ga ne bomo opisali.

Podatkovni model je v računalniški znanosti rezultat podatkovnega modeliranja, v katerem se uporablja matematična teorija neformalnega ali formalnega matematičnega modela. Podatki se strukturirajo ob upoštevanju postavljenih pogojev in omejitev. Strukturirani podatki se uporabijo pri upravljanju baz

podatkov z ustreznimi računalniškimi programskimi paketi (Abelson, 1996). Upravljanje velike množice strukturiranih in nestrukturiranih podatkov (besedila, elektronska sporočila oziroma pošta, slike, video in podobno) je osnovna naloga informacijskega sistema.

Procesni model je pojem, ki je poznan v procesnem inženirstvu in se uporablja v različnih povezavah. Morda ga najenostavneje opisuje C. Rolland v članku (Rolland, 1998), kjer pravi: 'Možna uporaba procesnega modela je, da predpišemo, kako stvari morajo/naj bi/ali bodo izdelane v primerjavi z resničnim procesom. Njegov dejanski potek bo določen z njegovo realizacijo.'

Produktni model je sestavina gradnikov in delov, skupaj z relacijami med njimi. Opiše vse logične poti in podatkovne strukture, ki so potrebne za izdelavo, za uporabo, za vzdrževanje in uničenje izdelka. Obsega torej ves življenjski cikel objekta in vsebuje: geometrijski model objekta, podatke o uporabljenih materialih in njihovi razporeditvi po sestavinah geometrijskega modela, časovne načrte izgradnje objekta, načrte in opise izrabe, vzdrževanja ter odstranitve objekta. Tako popoln produktni model je preobsežen in težko

obvladljiv, zato je bolje, da je razdeljen na obvladljive dele (Turk, 1991), (Tibaut, 2003).

Geometrijski model podaja obliko fizičnega ali matematičnega objekta ob uporabi geometrijskih konceptov (geometrije in topologije). Uporablja se na mnogih področjih, ker ga lahko zgradimo za objekte poljubnih dimenzij in geometričnih prostorov, zlasti pa v računalniški grafiki, v računalniško podprtem načrtovanju in proizvodnji. Lahko je dvodimenzionalen ali tridimenzionalen. Z zadnjo obliko se bomo ukvarjali v nadaljevanju prispevka s poudarkom na predstavitvi konstrukcij (na primer stavb, mostov) in drugih izdelkov (strojev, naprav in podobno).

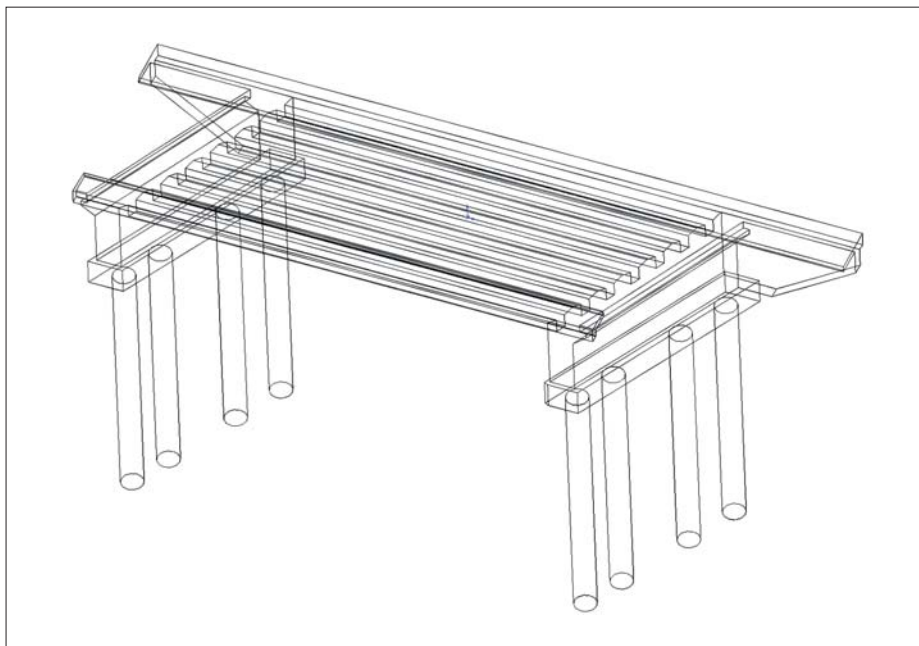
Geometrijsko modeliranje je oblika računalniških znanosti, ki je nastala zaradi potreb predstavitev realnih (v mislih imamo predvsem geometrijsko modeliranje teles) in matematičnih objektov na računalniku. Tvorijo ga tehnike in postopki, ki so v računalnikih uresničeni s podatkovnimi strukturami in algoritmi. Rezultat geometrijskega modeliranja je geometrijski model (Žalik, 1999), (Lutar, 2002), (Lutar, 2003).

Geometrijski modelirnik je računalniški program, ki omogoča predstavitve rešitev iz različnih področij ali sestavin resničnega sveta (teles) z računalnikom. Včasih ga imenujemo kar modelirnik in pri tem mislimo na računalniški program, ki omogoča geometrijsko modeliranje teles. V besedilu uporabljamo zaradi jasnosti in razumljivosti ime **geometrijski modelirnik objektov (teles)** oziroma krajše: **3D modelirnik**.

1.3 Geometrijski modelirniki teles, razvoj in opis osnovnih pojmov

Na začetku so bili v uporabi **žični modelirniki teles**, ki so omogočali predstavitve teles z robovi in oglišči. Z njimi je bilo mogoče narediti dvoumna ali celo neobstoječa telesa. Bili so nadgradnja risarskih računalniških programov, saj so uporabljali njihova osnovna elementa (rob in oglišče). Razen pomankljivosti, ki niso omogočale odstranitve zakritih lic, robov in senčenja, tvorbe prebodišč in presečnih krivulj teles, torej dobrih in ustreznih predstavitev, je bila njihova največja slabost, da ni bilo mogoče določiti težišča, mase, površine in prostornine telesa.

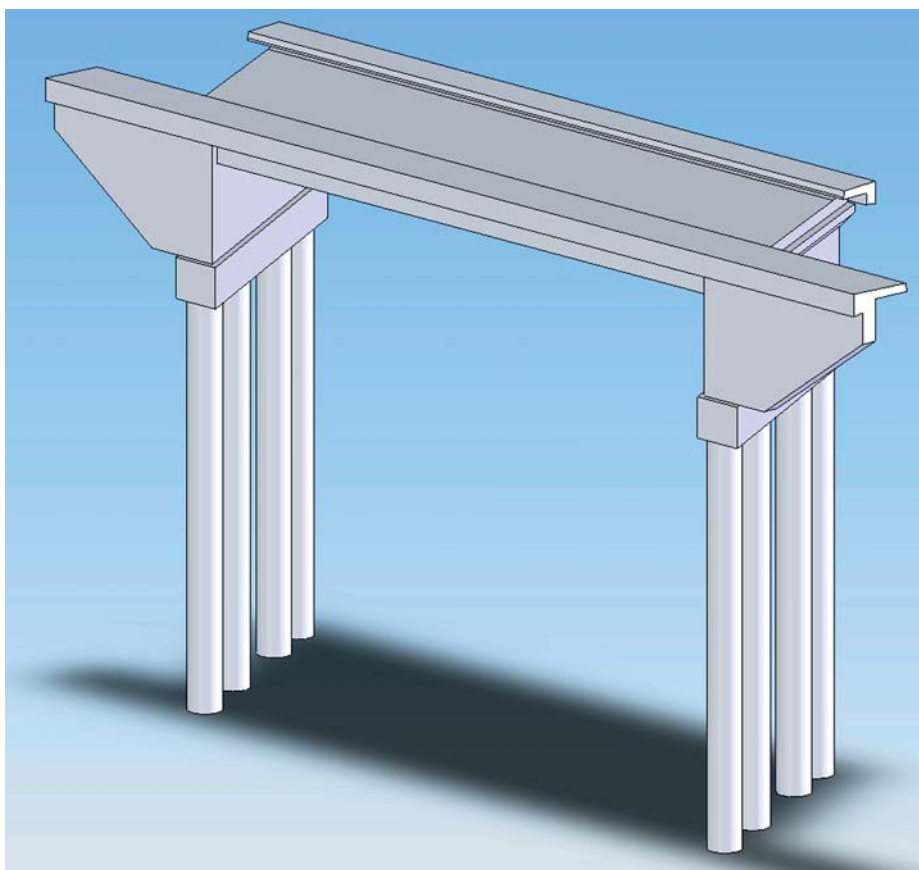
Predstavitve telesa z žičnim modelom kot rezultata uporabe žičnega modelirnika je kmalu zamenjala **predstavitve telesa s temeljnimi gradniki ali primitivi** (s kockami, kvadri, stožci, piramidami, z valji, s svitki in kroglami). Zahtevnejše oblike teles je bilo mogoče predstaviti z uporabo Boolovih operacij nad njimi



Slika 2 • Žični model mosta. Prikazan je v obliki, kot so jo omogočali prvi žični modelirniki teles

(z unijo, z razliko med unijami in podobnim). Različne oblike teles je bilo mogoče ustvariti z uporabo različnega vrstnega reda Boolovih

operacij (Lutar, 2000), (Lutar, 2003). Kar nekaj navedenih bistvenih pomanjkljivosti predstavitev teles z žičnimi modeli je bilo tako



Slika 3 • Virtualen model mosta čez Kokro (Cundrov most)

odpravljenih, vendar so bile možnosti tvorbe teles s kompleksnejšimi površji omejene. Tovrstni modelirniki teles so imeli še druge, mnogo usodnejše pomanjkljivosti, katerih podrobnejša obravnava bi nas oddaljila od osnovnega namena prispevka.

Površje telesa tvorijo **lica telesa**, ki so ravna ali kriva. **Ravno lice** je na primer omejeno področje ravne ploskve kvadra, **krivo lice** pa je omejeno področje ploskve. Njegove tvorilke so lahko Bezierove krivulje ali druge krivulje. Ker je površje telesa meja, ki loči točke v notranjosti telesa od točk v zunanosti in je v bistvu ovojnica telesa, so se kmalu pojavili **hibridni modelirniki**, ki so omogočali **predstavitev telesa z ovojnico in primitivi**. Čeprav so na začetku bili bolj ali manj posrečena kombinacija obeh metod predstavitev telesa, so pomenili velik napredek. Hkrati so se pojavili zaradi potreb oblikovalcev in medijev (filma, televizije in drugih) **geometrijski modelirniki ploskev** kot posebna zvrst geometrijskih modelirnikov. Na začetku so bili zaradi težav pri tvorbi zaprtega površja telesa deležni hudih kritik uporabnikov.

Prvi **parametrični geometrijski modelirniki teles** so bili v matematičnem smislu izpopolnjena oblika hibridnih modelirnikov. Pokazalo se je, da navedeni modelirniki ne morejo omogočiti dobre povezave med načrtovanjem in izdelavo telesa. Nepromostljive ovire hitrejšega, dobrega in skladnejšega razvoja so bile:

- potreba, da uporabnik pred pričetkom razgradi načrtovano predstavitev izdelka na računalniku na sestavine, kar se imenuje **načrtovanje od zgoraj navzdol** ali tudi **dekompozicijski proces načrtovanja**,
- omejena množica temeljnih gradnikov ali primitivov,
- otežena ali celo preprečena možnost operacij na izbranem območju konstruiranega telesa,
- omejenost možnosti Boolovih operatorjev,
- nizek nivo abstrakcij in opisov.

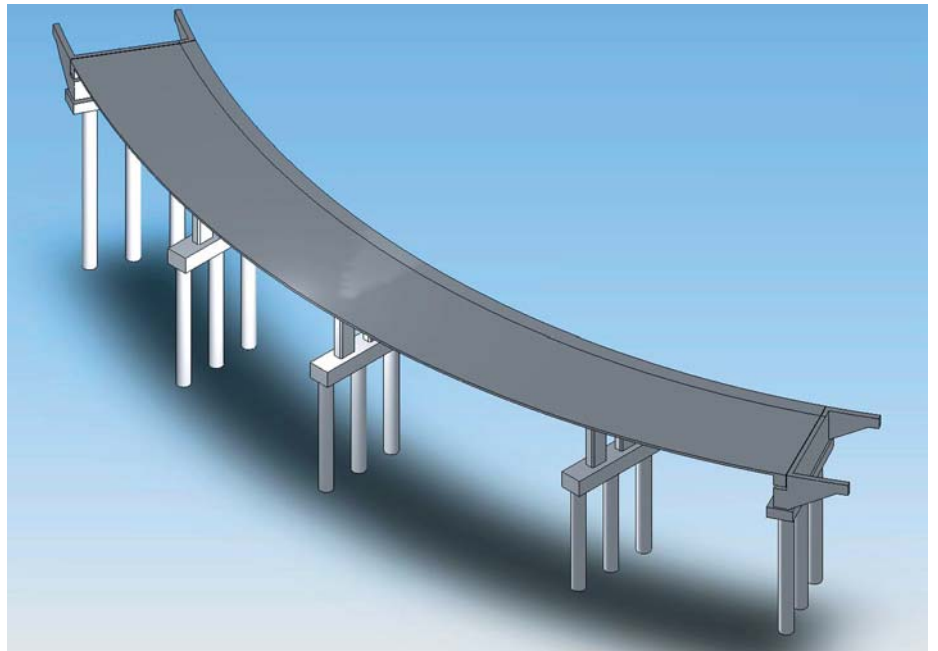
Današnji geometrijski modelirniki teles, za katere večina uporabnikov meni, da so dobri in so se uveljavili v praksi, so modelirniki, ki omogočajo **modeliranje teles z geometrijskimi značilnostmi** (Lutar, 2006). Takemu načinu dela pravimo tudi **modeliranje z značilnostmi**. V nekaterih modelirnikih je mogoče videti, da še omogočajo uporabo primitivov, ki je povsem parametrizirana. Vsi omogočajo uporabo Boolovih operatorjev, ker so ti potrebni. Brez njih bi bilo delo oteženo v mnogih primerih. Večinoma so opremljeni s knjižnicami že izdelanih **parametričnih grad-**

nikov (parameter je v njih na primer: dolžina, širina ali premer gradnika, lahko pa matematični izraz vsega navedenega in predstavlja vrednost novega; **gradnik** je na primer vijak, matica, podložka, celo del stroja in podobno). Uporabniku je omogočeno, da kupi dodatne že izdelane knjižnice gradnikov ali pa sam izdela svoje knjižnice.

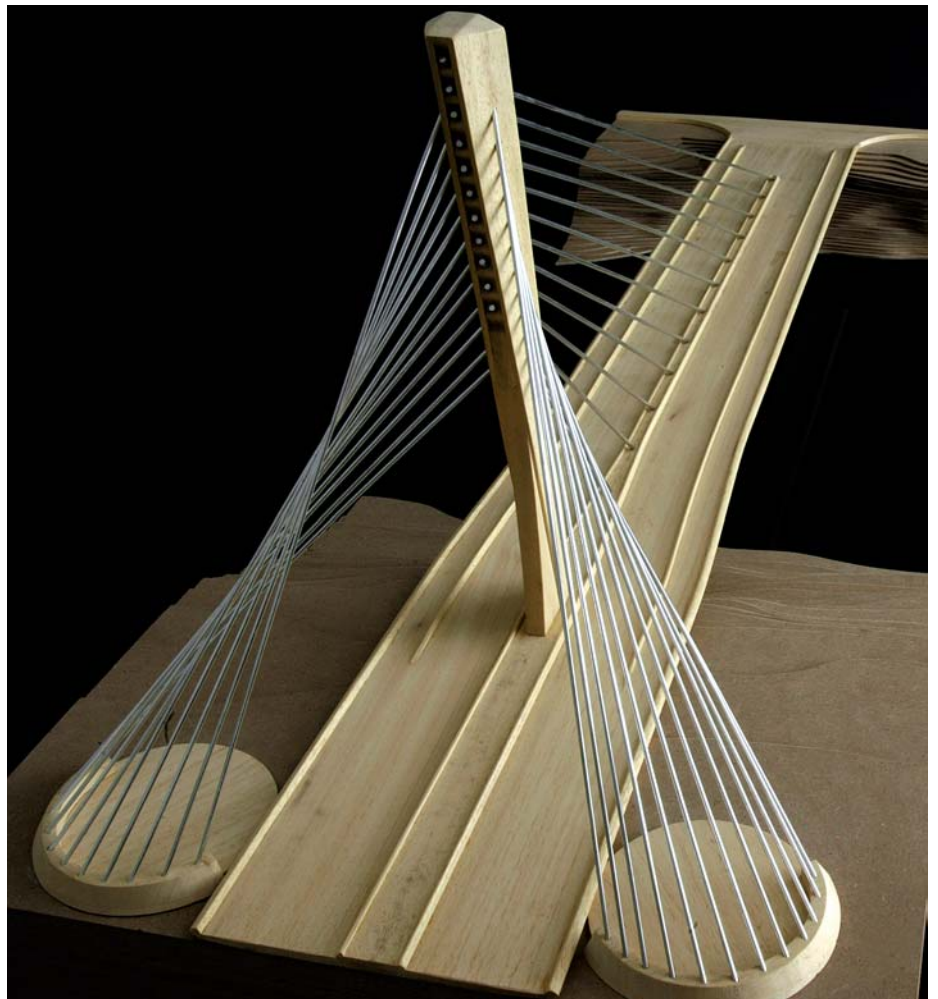
Pri modeliranju z značilnostmi razlikujemo dve skupine značilnosti: **osnovne** in **aplicirane**. **Osnovna značilnost** je na primer profil, ki ga povlečemo vzdolž krivulje in dobimo telo. Osnovno značilnost lahko tvori tudi več profilov, ki jih obvečemo in dobimo telo. **Aplicirana značilnost** pa je na primer luknja, ki jo izdelamo tako, da na površje telesa izrišemo (če je ravna ploskev) ali projiciramo (če je ukrivljena ploskev) obris ali profil luknje in nato v izbrani globini in smeri virtualnemu modelu odvezamo 'material'. Z nekaj pretiravanja lahko rečemo, da so današnji modelirniki že skoraj tako dobri, da omejitev predstavlja uporabnik (njegova izkušnost pri uporabi programa in njegova kreativnost).

Predstavitvi telesa v računalniku, ki ga uporabnik vidi na zaslonu, pravimo **navidezni ali virtualni model telesa** (sliki 3 in 4). Ne moremo ga otipati ali prijeti (zato uporabljamo izraz 'navidezni' ali 'virtualni' model telesa), lahko pa mu izračunamo površino, prostornino, lego težišča, maso in masne vztrajnostne momente (če mu pripišemo specifično težo materiala). Lahko ga prerežemo in si ogledamo njegovo notranjost, če gre za votlo telo. Večina današnjih geometrijskih modelirnikov teles omogoča izdelavo dobrih upodobitev, kjer s pripisom izbranih **tekstur** (zadovoljivih videzov resničnih površin materialov) površju telesa in s senčenjem dobimo fotorealistične slike na zaslonu, ki jih lahko shranimo ali natisnemo. Zato uspešno nadomeščajo običajne makete (sliki 5 in 6). Omogočajo tvorbo **gibljivih slik ali animacij**, kar je pomembna oblika predstavitve za nekatera področja (na primer strojništvo).

Pomembno pomagalo načrtovalca je grafična predstavitev zgodovine nastanka virtualnega modela, kjer so v obliki drevesa prikazane uporabljene operacije in ukazi ob upoštevanju postavljene hierarhije v programu. Preprosto povedano: dovoljeno zaporedje je v zaporedju prednik – naslednik ali tudi starši – otroci. V nekaterih primerih in v nekaterih modelirnikih je mogoče to zaporedje, ki večinoma ni ovira, če uporabnik premišljeno izdela virtualni model telesa, zamenjati in tako nastane nova oblika virtualnega modela. To je mogoče, če pri tem ne



Slika 4 • Virtualen model nadvoza 4–5, za deviacijo Koseze 3, AC odsek 0013 Šentvid–Koseze



Slika 5 • Slika makete (ročno izdelanega modela) mosta Millennium v Podgorici, Črna Gora, pred pričetkom izgradnje objekta

pride do logične porušitve dela ali celotne zgradbe virtualnega modela telesa. Torej do stanja, ki ga uporabljene geometrijski modelirnik teles ne more predstaviti, ker matematično ni definirano.

Ob koncu uvodnega poglavja navedimo razloge, ki opravičujejo različnost geometrijskih modelirnikov teles, čeprav z večino lahko izdelamo enak virtualni model telesa. Uporabnik s premišljeno uporabo razpoložljivih orodij geometrijskega modelirnika teles naredi virtualni model telesa in se pri tem večinoma ne zaveda, da mu to omogoča 'srce modelirnika' ali natančneje **modelirno jedro** programa. Modelirno jedro bi preprosto opisali tako: 'To je matematika, ki je v ozadju virtualnega modela telesa in je odgovorna za njegovo pravilno izdelavo.'

Različni geometrijski modelirniki teles uporabljajo različna modelirna jedra in so zato tudi tako različni, čeprav postajajo razlike vse manjše. Noben geometrijski modelirnik teles v celoti ne izkorišča možnosti, ki jih nudi uporabljeno modelirno jedro in noben geometrijski modelirnik ni brez napak. Za napake ni krivo uporabljeno modelirno jedro (na primer ACIS ali PARASOLID) ampak programer (oziroma programerji) in razvijalci programskega orodja. Dobri razvijalci geometrijskih modelirnikov teles tekoče pošiljajo registrira-



Slika 6 • Fotografija izgrajenega mosta Millennium preko reke Morače v Podgorici, Črna Gora; projektant Marjan Pipenbaher, univ. dipl. inž. grad., PONTING Inženirski biro d.o.o.

nim uporabnikov izdelane nadgradnje in popravke. Pri tem so jim v veliko pomoč prav uporabniki, ki jim sporočajo odkrite napake in težave pri uporabi programa.

V nekatere geometrijske modelirnike teles so vključeni moduli (računalniški programi), ki omogočajo preračune virtualnih modelov

konstrukcij pri različnih obtežbah po metodi končnih elementov. Tovrstne računalniške programe imenujemo **integrirani programski paketi**. Združujejo možnosti, ki jih nudijo geometrijski modelirniki teles in računalniški programi za preračune ali analizo konstrukcij (Lutar, 1996), (Lutar, 1977).

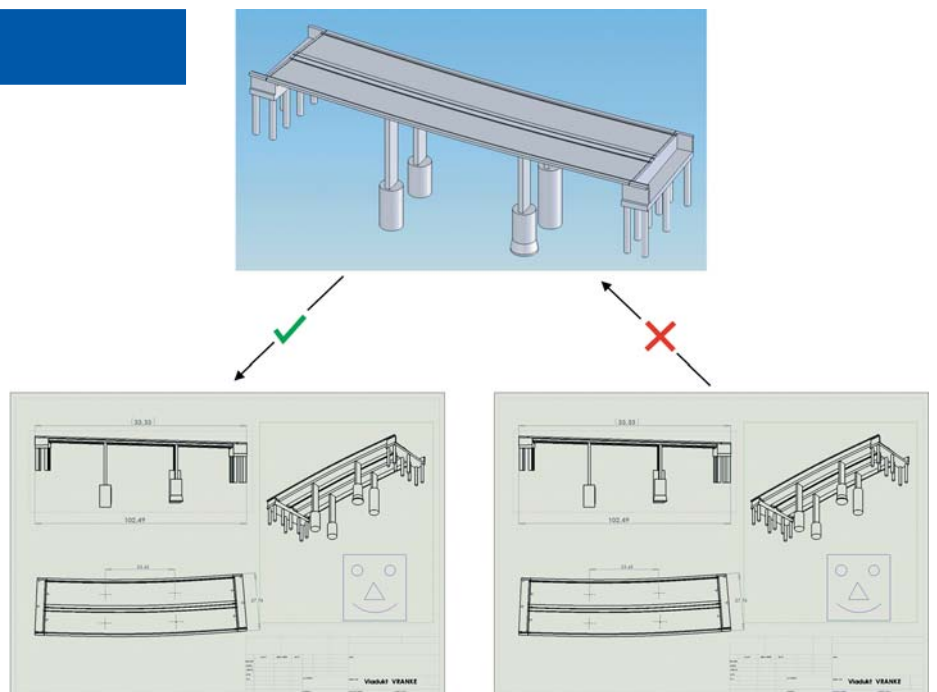
2 • POSTAVITEV HIPOTEZE

Nihče med nami ne vidi ničesar dvodimenzionalno. Vse, kar vidimo, vidimo v prostoru. Res je, da je slika prostora na mrežnici očesa dvodimenzionalna. Ne smemo pa spregledati, da ima zdrav človek dve očesi in da na mrežnici vsakega nastane dvodimenzionalna slika prostora. Ti sliki nista enaki, ker sta očesi razmaknjeni in tako človek vidi tretjo dimenzijo (oddaljenost, globino). To spoznanje je človek uporabil v kartografiji – pri fotogrametriji.

Vsi izdelki (orodja, stavbe, konstrukcije in podobno) so telesa. Izdelane risbe z risarskim priborom ali z risarskimi računalniškimi programi so rezultat prenosa dvodimenzionalne predstavitve bodočega objekta (telesa) v možganih človeka na papir oziroma na zaslon računalnika.

Naša hipoteza, prikazana na sliki 7, je:

Pravilna in naravna pot je, da izvirajo načrti iz virtualnega geometrijskega modela objekta in ne obratno.



Slika 7 • Slikovna ponazoritev postavljene hipoteze. Spodnja leva risba na sliki izvira iz prikazanega virtualnega geometrijskega modela viadukta na zgornji sliki in ustreza postavljeni hipotezi. Spodnja desna risba pa kaže obratno pot, ki ustreza trenutnim razmeram v praksi in je v nasprotju s postavljeno hipotezo

3 • OPIS RAZMER PRI NAS IN RAZLAGA POSTAVLJENE HIPOTEZE

Večina načrtov (risb) v našem okolju je danes narisana na računalnikih ob uporabi risarskih računalniških programov. Torej na podoben način, kot so bili izdelani pred uporabo računalnikov. Razlika je v tem, da je risarski pribor nadomeščen z računalnikom in zunanjo strojno opremo – risalniki. Risar v bistvu svojo predstavo bodočega realnega objekta v standardnem pogledu (florisu, narisu, pre-rezu) namesto z risanjem na papir prenese na zaslon računalnika.

Ustvarjene risbe niso direktno povezane z navideznim ali virtualnim geometrijskim modelom objekta, ki ga risar lahko naredi z ustreznim računalniškim programom za geometrijsko modeliranje teles. Pri tem pogosto pride do napačne predstavitve, kaj je spredaj in mora biti na risbi prikazano kot nevidno.

Nepovezanost virtualnega modela bodočega objekta in risb ima še usodnejše hibe. Risar opremi risbo z napisi, raznimi simboli in kotami. Kote (dimenzije) so izključno povezane z risbo. Za vrednosti kot lahko vpiše poljubna števila namerno ali pomotoma. Pri svojem delu praktično nima kontrole. Skrben pregledi prikazanih kot na risbah pogosto pokažejo, da so kote napačne. Avtor prispevka je svoje študente o teh težavah nazorno prepričal tako, da so morali pri vajah s programom SolidWorks izdelati iz treh različnih

načrtov mostov virtualne geometrijske modele mostov. Vse skupine so imele na začetku težave zaradi napačnih kot in risarskih napak. Vsi objekti so bili zgrajeni, sklepamo pa lahko, da so izvajalci imeli nepotrebne težave zaradi napak v načrtih.

V risbah, ki izvirajo iz virtualnega modela objekta (v geometrijskih modelirnikih objektov jih drugače ne moremo narediti), mora risar namerno prekiniti povezanost kote in virtualnega geometrijskega modela objekta, da lahko vpiše za vrednost kote svoje število.

Zgornja trditev, ki pojasnjuje postavljeno hipotezo, pomeni, da **nenamerno ni mogoče** iz pravičnega virtualnega geometrijskega modela objekta narediti napačnih načrtov. Trditev prikazujemo na praktičnem primeru (namerno skromne in pomanjkljive) oblike načrta za viadukt Vranke (slika 8).

Na načrtu sta prikazani dve koti dolžine viadukta v narisu, od katerih je vrednost dolžine na zgornji koti med oklepajema in se razlikuje od vrednosti dolžine na spodnji koti. Spodnja kota je pravilna in izvira iz izdelanega virtualnega geometrijskega modela viadukta. Ker je z njim povezana, jo imenujemo **vodilno koto**. Zgornja kota je narisana in ni povezana ne z risbo in ne z modelom. Če bi bila povezana samo z risbo, ne pa z modelom, bi jo imenovali **vodena koto**. Razlika med njima je zelo

pomembna in jo podajamo v nadaljevanju. Na sliki načrta vidimo, da smo na njem izrisali skico, ki nima povezave z virtualnim geometrijskim modelom viadukta. Z njo smo želeli ovreči razširjeno napačno trditev, da v načrte, ki izvirajo iz virtualnega geometrijskega modela objekta, ni mogoče ničesar vrisati ali dodati. Zaradi preglednosti slike načrta nismo opremili z napisi, komentarji in drugimi simboli, ki so pomembne informacije za izvajalca.

Če so načrti napačni, je napačen tudi virtualni geometrijski model objekta in obratno.

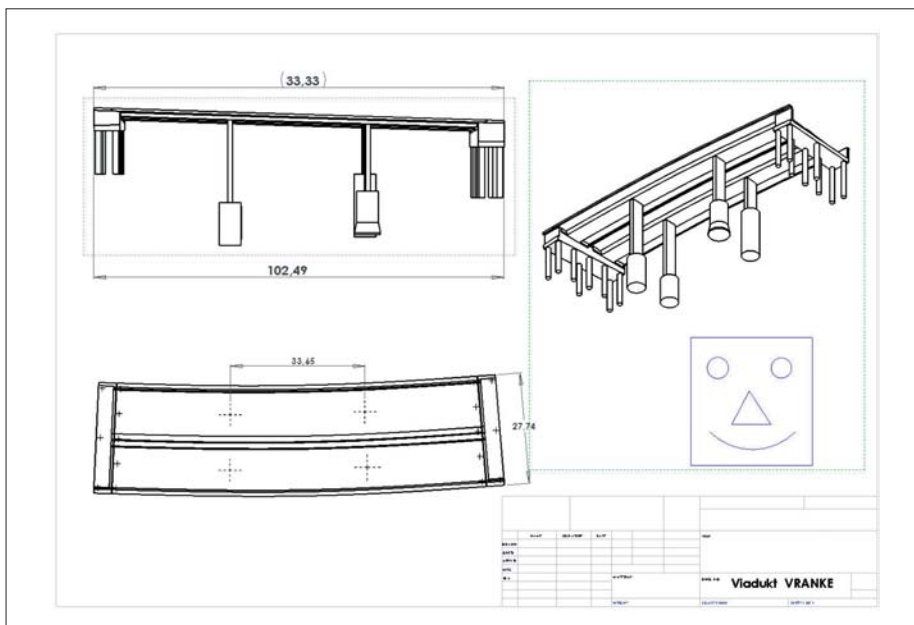
Z uporabo geometrijskega modelirnika ni mogoče nenamerno narediti dobrih načrtov in napačnega virtualnega geometrijskega modela. Lahko pa izdelamo dober virtualni geometrijski model objekta in namerno izdelamo napačne načrte, ki so samo delno povezani z njim (glede kot oziroma dimenzij). Velja trditev kot sledi.

Virtualni geometrijski modela objekta in načrti (risbe) so med seboj dvosmerno povezani.

V prikazani sliki načrta viadukta (slika 8) je kota, ki ima vrednost dolžine med oklepajema, izrisana. Vnesli smo poljubno vrednost. To smo naredili tako, da smo najprej izrisali koto, ki je bila povezana z virtualnim geometrijskim modelom – torej vodilno koto. Vrednost kote je bila ista, kot je prikazana vrednost spodnje kote dolžine narisa viadukta na sliki. Za tem smo v programu prekinili povezavo med izrisano koto in modelom in ji spremenili vrednost. Če vrednosti ne bi spremenili, bi dobili vodeno koto.

Vodena koto se spremeni, če se spremeni risba na delu, ki mu kota pripada. Njena sprememba nima nobenega vpliva na model. Vodilna koto ali dimenzija pa izvira iz virtualnega modela in je z njim dvosmerno povezana (zato smo postavili trditev, da so načrti in virtualni geometrijski model dvosmerno povezani). Če ob izrisanih načrtih spremenimo konstruirani model, se spremenijo vse kote v vseh načrtih, ki so povezane s spremembo modela. Če ob tem nimamo odprte datoteke, ki vsebuje izrisani načrt, se ta sprememba izvrši ob prvem odprtju datoteke načrta. Kadar pa v načrtu, ki je povezan z modelom, spremenimo vrednosti kot, se ustrezno spremeni konstruirani virtualni model objekta. Pri tem se spremenijo tudi kote in oblike v ostalih načrtih, ki so z virtualnim geometrijskim modelom povezani.

Fizikalnih lastnosti bodočih objektov ne moremo nedvoumno določiti, če za njihovo določitev uporabljamo načrte (risbe).



Slika 8 • Slika načrta viadukta Vranke, ki je bil narejena iz virtualnega geometrijskega modela viadukta v programu SolidWorks

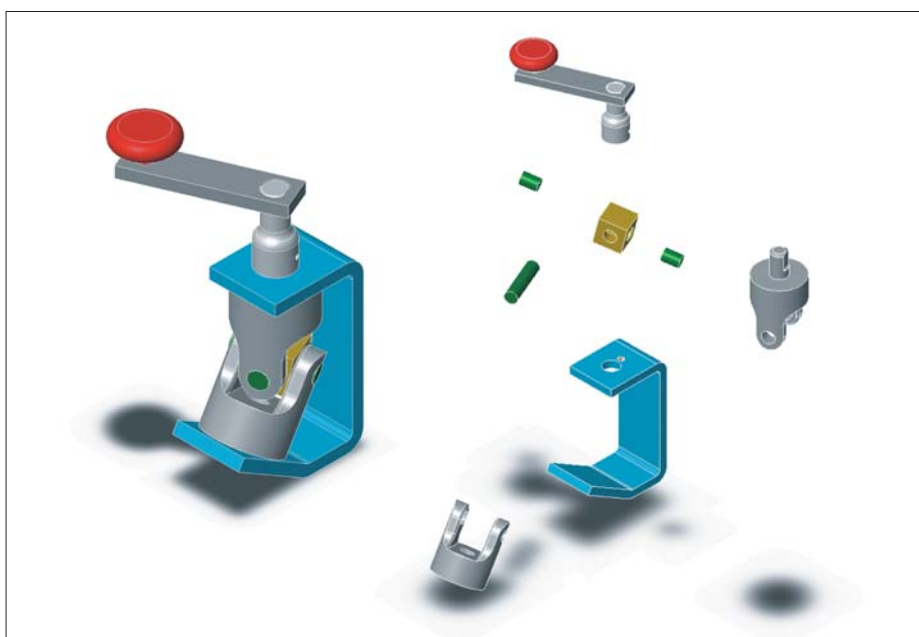
Pogosto je potrebno za bodoče objekte izračunati prostornino, površino, maso, masne vztrajnostne momente in podobno. Kadar imajo objekti komplicirane oblike, je to iz risb, ki večinoma ne vsebujejo zadostne količine potrebnih informacij, skoraj nemogoče narediti ali pa so težave tako velike, da se moramo iz praktičnih razlogov zadovoljiti s približki.

Risanje načrtov na računalnikih ob uporabi risarskih računalniških programov iz navedenih razlogov in opisanih težav ne moremo imenovati 'tehnološki napredek'. Tak način dela, ki je na področju gradbeništva še v pretežni rabi, je posledica dejstva, da je bilo potrebno veliko časa za prehod iz 'ročnega risanja', na risanje načrtov z upo-

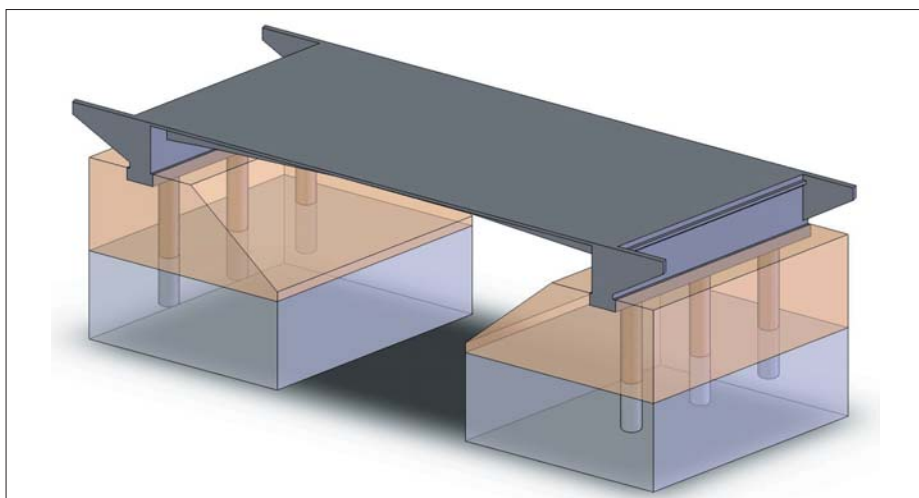
rabo računalnikov in risarskih računalniških programov.

Razmere, ki so ob tehnološkem napredku za skrbljujoče, je mogoče izboljšati s permanentnim izobraževanjem strokovnjakov iz prakse in z ustreznimi, premišljenimi, a dovolj hitrimi spremembami izobraževalnega procesa.

4 • SESTAVI IN UPORABNOST V GRADBENIŠTVU



Slika 9 • Na levem delu slike je prikazana preprosta naprava v sestavljeni obliki (sestav). Na desnem delu slike pa deli in podsestav razstavljene naprave. Podsestav na vrhu desnega dela slike sestavljajo okrogel ročaj (gumb), prečka in nasadilo



Slika 10 • Preprost primer sestava mosta. Kosi sestava so: kosi zemljine z različnimi elastičnimi lastnostmi in most s podporno konstrukcijo

Stroji in naprave v strojništvu so sestavljeni iz veliko delov (kosov). Veliko delov v nekem stroju je enakih (na primer: istovrstnih vijakov, matic in podložk). Zato lahko v naboru enakih delov enega vzamemo kot izvorni del ali izvorni objekt (izvorni kos), ostali pa so kopije ali inačice izvornega dela (inačice izvornega kosa). V geometrijskem modelirniku objektov bomo za skupino enakih delov izdelali samo izvorni del, ker so preostali njegove inačice.

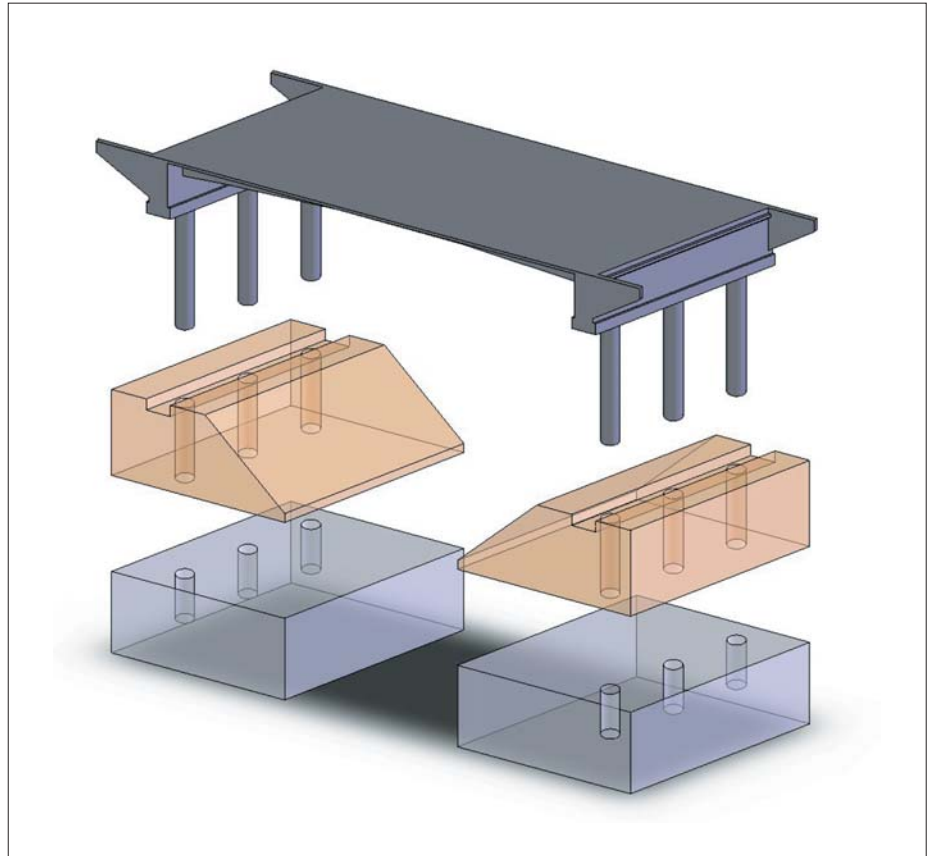
V stroju imamo podskupine delov, ki so sestavljeni iz delov in predstavljajo funkcionalno enoto (na primer: vplinjač ali zaganjač bencinskega motorja). Tako lahko na primeru stroja (na primer: bencinskega motorja) razložimo pomen uporabe **sestavov** v strojništvu. Beseda 'sestav' pove, da je nekaj sestavljeno. Vplinjač in zaganjač bencinskega motorja sta v bistvu sestava. Toda ker to velja tudi za cel bencinski motor, ki mu omenjeni funkcionalni enoti pripadata (oziroma ga tvorita – sestavljata), imamo takoj besedno in pomensko zmedo. Zato imenujemo funkcionalne enote, ki tvorijo večjo funkcionalno enoto, **podsestav**. Tudi podsestav sestavljajo deli (kosi). Na sliki 9 smo prikazali napravo v sestavljeni obliki (levi del slike) in napravo v razstavljeni obliki (desni del slike). Pozoren bralec bo na sliki opazil, da naprava ni v celoti razstavljena, ampak da je nekaj kosov na zgornjem desnem delu slike še sestavljenih (ročaj z gumbom in nasadilo). Ta skupina nerazstavljanih kosov je ravno podsestav naprave. Vse ostalo pa so deli (v geometrijskih modelirnikih teles jih imenujemo **kosi**). Enaki deli med njimi so **inačice** enega v skupini enakih delov – **izvornega dela** (na sliki ustrežata zadnjemu opisu kovinska moznika – majhna valja).

Uporabnost opisanega načina pristopa je najbrž razumljiva za prikazani primer. Žal pa je ta možnost v gradbeništvu redko uporabljena. Morda velja zaradi nazornosti omeniti, da imamo pri montažnih objektih namesto vijakov in matic stebre in grede. Stebri imajo ležišča za grede, stebri se priključijo na točkovne temelje in podobno. V gradbeništvu imamo pogosto opravka s kompliciranimi

oblikami konstrukcij. V uporabljenem geometrijskem modelirniku lahko komplicirane oblike naredimo tako, da jih razrežemo na podsestave (na primer: gredna konstrukcija mosta, komplicirane oblike glav stebrov, ležišča kablov in podobno). Tako lahko hkrati dela na projektu več ljudi, s čimer skrajšamo čas izdelave virtualnega geometrijskega modela objekta.

Za potrditev navedb smo prikazali primer iz gradbeništva. Na sliki 10 je prikazan sestav, ki ga tvorijo kosi zemljine (njihova oblika je določena za potrebe izračuna, v katerem bo upoštevano sodelovanje zemljine in podporne konstrukcije mosta (blazin pilotov in pilotov)). Pri tvorbi računskega modela je potrebno mrežiti vsak kos zemljine z elementi, ki imajo pripadajoče elastične lastnosti. Enako velja tudi za most in njegovo podporno konstrukcijo. Slika 11 pa prikazuje kose sestava oziroma virtualni geometrijski model prikazane konstrukcije v razstavljeni obliki.

Geometrijski modelirniki objektov omogočajo, da tudi v gradbeništvu za zahtevne objekte izrabimo njihove možnosti za tvorbo sestavov, ki omogočajo boljšo izrabo delovnega časa, večjo natančnost konstruiranja virtualnih geometrijskih modelov in lažje upoštevanje posebnosti v preračunih.



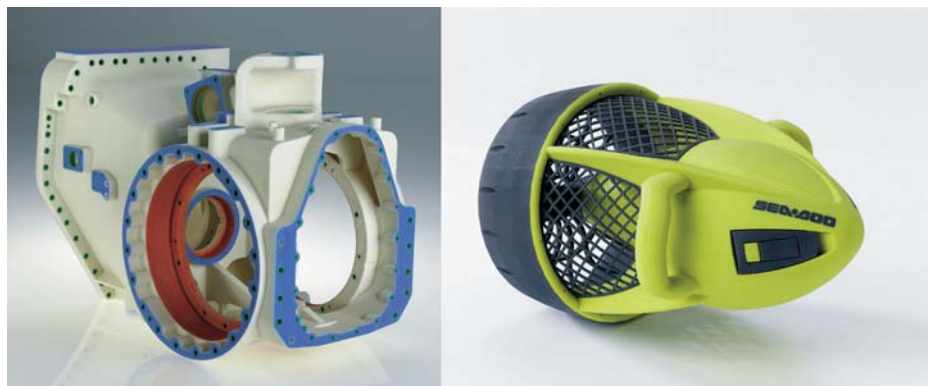
Slika 11 • Slika razmaknjenih kosov sestava

5 • 3D TISKALNIKI IN IZDELAVA MAKET

Izdelani virtualni geometrijski modeli objektov (strojev, naprav, ohišij aparatov, protetičnih naprav in še mnogih drugih serijskih izdelkov), možnosti vgradnje mehanizmov za preverjanje njihovega delovanja v kinematičnem smislu, njihove upodobitve in izdelave fotorealističnih slik, ne zadoščajo vsem zahtevam. Kljub znanemu izreku, da 'Slika pove več kot tisoč besed!', je izdelek, ki ga držimo v roki in na njem preverimo, kako natančno smo ga izdelali v geometrijskem modelirniku, na mnogih področjih nujnost in ne 'modna muha'. Za serijsko izdelavo izdelka (na primer: ohišja prenosnega telefona, rotorja črpalke, ohišja vrtnega stroja in podobno) je potrebno za vsak sestavni del izdelati orodje. Izdelava orodja za ohišje prenosnega telefona ni poceni. Mnogo večji pa so stroški, če zaradi napačno izdelanega orodja, ki je posledica napačno izdelanega virtualnega geometrijskega modela izdelka, mirujejo montažni trakovi in so delavci brez dela.

Usodna je tudi zakasnitev uvrščanja proizvoda na tržišče, saj je konkurenca huda in neizprosna. Zato so na mnogih področjih izkušeni modelarji iz načrtov najprej ročno izdelali **pramodel**, to je prvo obliko bodočega

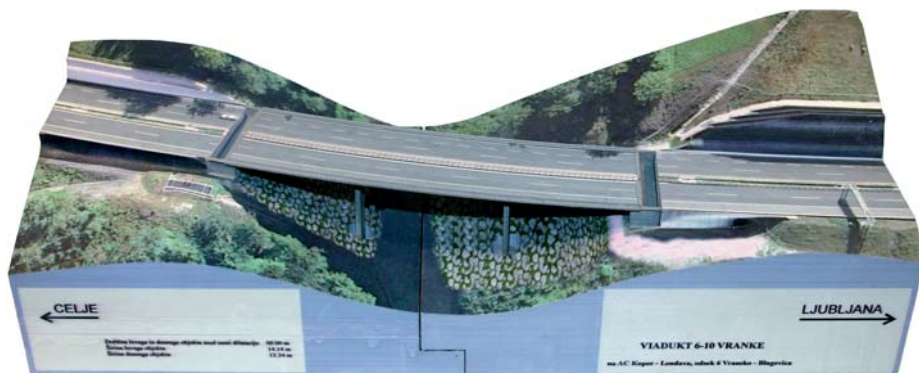
izdelka. Na njem so konstruktorji lahko ugotovili morebitne napake in jih pred izdelavo orodij (matric in patric bodočih izdelkov) odstranili. Natančno izdelan pramodel zahteva veliko časa in ker ga izdelata modelar (človek), ki je zmotljiv, ni zagotovila, da je izdelan tako, kot je v načrtih. Da bi skrajšali potrebni čas izdelave pramodela in ga izdelali v obliki in kvaliteti, ki ustreza virtualnemu



Slika 12 • Pramodela izdelkov, ki sta bila izdelana na 3D tiskalniku. Desni pramodel je tudi prototip. Narejen je iz delov, ki so izdelani v enaki barvi, enake oblike in debeline ter enako sestavljeni kot proizvodni izdelek

izdelku v geometrijskem modelirniku, so najprej uporabljali numerično krmiljene stružnice in ustrezen material (razne polimere), ki so ga lahko na teh strojih obdelovali. Kmalu po letu 1990 so se pojavile prve naprave, ki so jih imenovali **tridimenzionalne tiskalnike**. Z njimi so po podobnem postopku, kot se uporablja pri tiskanju (ni enak, je pa analogen tiskarskemu postopku), izdelali prve prototipe.

Za 3D tiskalnike potrebujemo virtualne geometrijske modele izdelkov. Z današnjo tehnologijo teh tiskalnikov se izdelajo pramodeli največje velikosti približno 500 . 600 . 400 milimetrov. Večje je potrebno izdelati v kosih in jih zlepi. Omogočajo že izdelavo manjših serij izdelkov, izdelavo kalupov za litje barvnih kovin, saj tako izdelani kalupi prenesejo temperature skoraj do 1000 stopinj. Z njimi je mogoče izdelati modele avtomobilskih menjalnikov (v pomanjšani obliki) skupaj z ohišjem in zobniki, ki se vrtijo. Omogočajo izdelavo prototipov podplatoval športne obuvice, ki imajo na otip in zvijanje podoben videz in lastnosti kot bodoči izdelki. Izdelajo lahko na



Slika 13 • Maketa modela viadukta in model terena, izdelana na 3D tiskalniku. Na model terena, ki je narejen kot virtualen geometrijski model v programu SolidWorks na osnovi kartografskih podatkov terena, je 'prilepljen' kot tekstura letalski posnetek terena

primer celo sklenjeno verigo kolesa, v kateri so členi gibljivi in podobno. Uporabljene tehnologije in principi delovanja teh tiskalnikov so različni in zahtevajo podrobnejši opis, ki presega namen pričujočega prispevka. Zato jih bomo predstavili in opisali v posebnem prispevku.

V gradbeništvu in arhitekturi lahko tak tiskalnik uporabimo za izdelavo makete. Avtorju je ob sodelovanju kolegov uspelo na enem med tiskalniki, ki jih imajo firme v Sloveniji, izdelati maketo viadukta Vranke skupaj z modelom terena, ki je prikazana na sliki 13.

6 • RAČUNANJE, DIMENZIONIRANJE IN ARMATURNI NAČRTI

Virtualni geometrijski model objekta lahko uporabimo v programskih paketih za preračune po metodi končnih elementov. Večina modelirnikov omogoča zapis narejenega virtualnega modela objekta v različnih grafičnih formatih, ki jih lahko v takih programih prebe-

remo, če to omogočajo. Enako velja za programe, ki omogočajo konstrukcijo in risanje armaturnih načrtov. Omenili smo, da je mogoče nekaterim geometrijskim modelirnikom objektov priključiti module za preračune modelov na različne obremenitve.

Težave, s katerimi se uporabniki večkrat srečajo, so težave zaradi različnih verzij takih zapisov. Običajno ni mogoče z njimi direktno preračunati prednapetih konstrukcij in izrisati armaturnih načrtov.

Uporabniki pričakujejo, da bodo ob nakupu 3D geometrijskih modelirnikov dobili univerzalno programsko orodje, s katerim bodo rešili vse probleme. Dejstvo je, da na primer pri izdelavi projekta za most uporabijo več



Slika 14 • Most čez Hudinjo v Celju



Slika 15 • Slika modela mosta čez Hudinjo v Celju po mreženju v programu CosmosWorks

različnih računalniških programov. In žal bo tako še kar nekaj časa, saj resnično dobrih univerzalnih računalniških programov za posamezno vrsto gradbenih konstrukcij še ni. Na slikah 14 do 17 smo prikazali: zgrajen most čez Hudinjo v Celju, sliko mreže elementov modela tega mostu, sliko obtežbe in podpor modela za kontrolni preračun obremenilne preizkušnje in grafično predstavitev rezultatov preračunanih pomikov s prikazom zelo povečane deformirane oblike mosta.

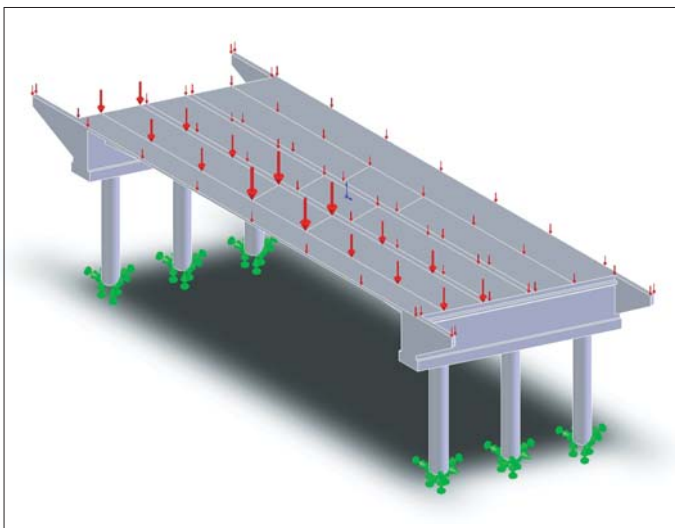
Velja omeniti, da zaradi uporabe risarskih programov v praksi konstruktorji s ponovnim vnašanjem podatkov oziroma s konstrukcijo

virtualnega geometrijskega modela objekta v računalniških programih, kjer je to potrebno, izgubljajo po nepotrebnem veliko časa. Današnji modelirniki 'so pisani na kožo uporabnikom'. V večini dobrih 3D geometrijskih modelirnikov je na razpolago delo v obliki, ki jim znatno olajša prehod iz trenutno najbolj razširjene oblike uporabe programa AutoCAD, kot risarskega računalniškega orodja, na uporabo 3D geometrijskega modelirnika. **Brez primerne vložka za izobraževanje to ne bo mogoče narediti.**

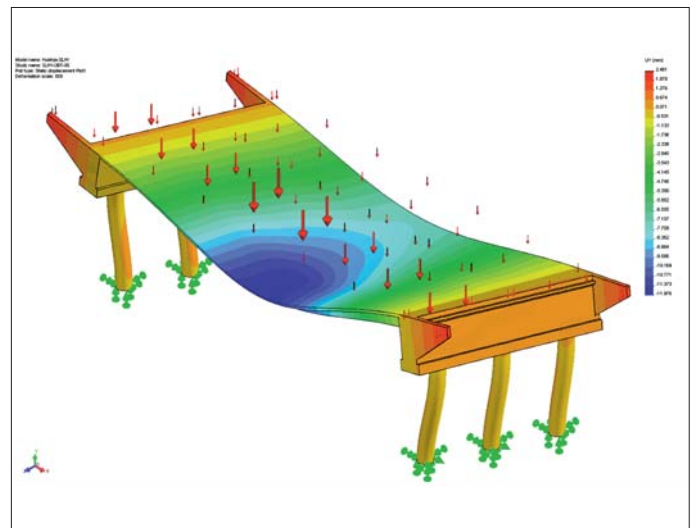
Če želimo slediti zahtevam trga, ki je vse bolj neizprosna in grob, potem moramo skrbeti za tekoče izobraževanje svojih ljudi.

Zavestno moramo sprejeti dejstvo, da morada predstavlja nakup programa samo 10 do 15 % vseh stroškov ob neupoštevanju stroškov primerne strojne opreme – računalnikov in potrebnih zunanjih ali perifernih enot.

Bistven strošek je človek oziroma njegovo izobraževanje. Ko je na tečajih, ko se uči uporabe novega programa, ne ustvarja nove vrednosti. To bo storil neprimerno hitreje in bolje po končanem izobraževanju. S tem pridobimo konkurenčno sposobnost in če vse skupaj povežemo v dobro organizirano celoto, smo cilj dosegli. Bližnjic ni in razviti vedo to že dolgo.



Slika 16 • Podpore in obtežba modela mosta čez Hudinjo v Celju pri obremenilnem preizkusu



Slika 17 • Slika izračunanih pomikov, deformirane oblike mosta, obtežbe in podpor mosta čez Hudinjo v Celju s programom CosmosWorks

7 • OBLIKE DELA IN UPORABA PROGRAMSKIH ORODIJ V PRAKSI

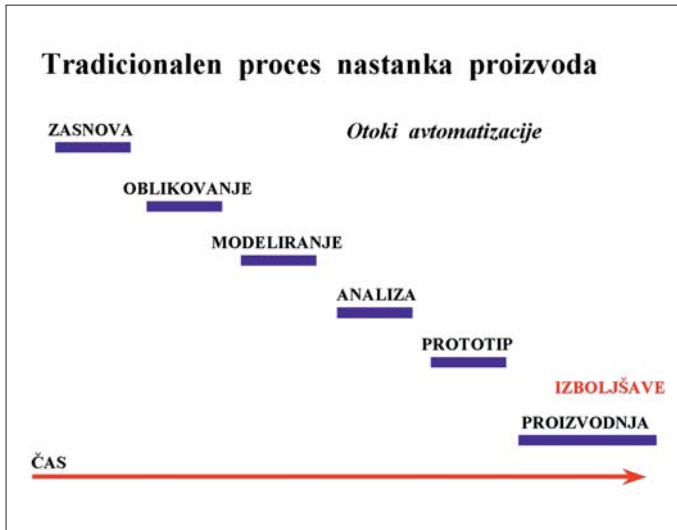
Da bi lahko razumeli slabosti in pasti trenutnega stanja uporabe programskih orodij in oblik nastajanja novih proizvodov, si oglejmo zgodovinski razvoj oblik procesa izdelave novih proizvodov v zadnjem času, oziroma natančneje povedano, v obdobju zadnjih dvajset let. Torej v času, ko so postali računalniki in programska oprema običajna orodja in s tem izgubili pridih mističnosti (SRAC, 1996). V začetku je prevladoval tradicionalen proces nastanka novih proizvodov (slika 18). Bistvene faze tega, kot so: zasnova, oblikovanje, modeliranje, analiza in tako naprej, so bili praktično ločeni procesi. Programska orodja ali programi za te namene niso nudili in omogočali omembne vrednih povezav. Avtomatizacija je bila

omejena znotraj faz dela, zato pravimo takemu stanju tudi **otoki avtomatizacije**.

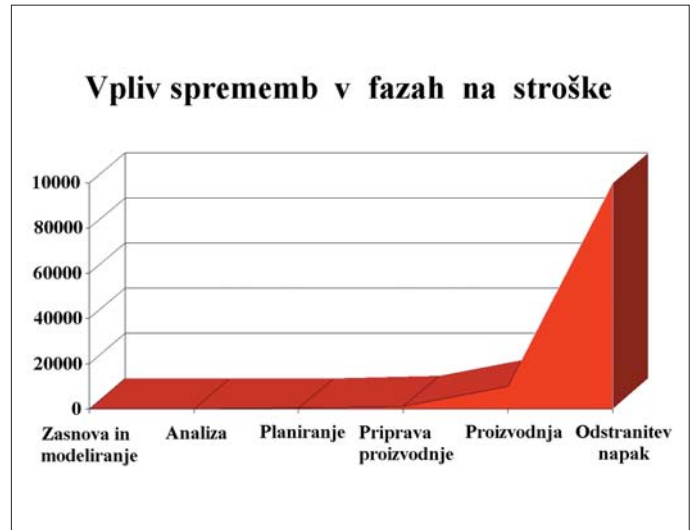
Slabost tradicionalnega nastanka novega proizvoda je velika poraba časa. Zaradi nepovezanosti faz dela je vpliv sprememb na stroške zelo velik. Iz grafikona, ki ga je za svoje potrebe izdelala znana ameriška firma Patterson Pump (SRAC, 1996) za izdelavo črpalk (slika 19) vidimo, da je vpliv tem večji, čim kasneje se sprememba pojavi. Najusodnejše je, če se napaka odkrije v fazi proizvodnje. Žal je tak način dela pri nas še prisoten in posledice, kot so: zakasneli nastop na trgu, počasnost prilagajanja spremembam in zahtevam trga ter majhna konkurenčna sposobnost, so njegova značilnost.

Zaporedni ali serijski pristop v inženiringu (slika 20) je bil nujna posodobitev tradicionalnega nastanka proizvodov. Njegova značilnost je zaporedna povezanost faz dela. To je veliko boljše od prvotnega, tradicionalnega načina nastanka proizvoda.

Toda proces je še zmeraj tog in vsaka sprememba ima zaradi zaporedne povezanosti faz dela velik vpliv na soodvisne faze dela. To pomeni znatne zakasnitve, počasen nastop na trgu in manjšo konkurenčno sposobnost. Najdemo ga tudi v naših uspešnejših gradbenih firmah. Med dobre plati tega načina spada večja avtomatizacija v fazah dela in boljše povezanost med zaporednimi fazami dela. Omeniti velja, da srečamo v dobro organiziranih okoljih že zamatke skladnega pristopa v inženiringu, ki zaradi velike togosti uporabljanega zaporednega pristopa ne morejo dati vidnejših učinkov.



Slika 18 • Shema tradicionalnega nastanka novega proizvoda

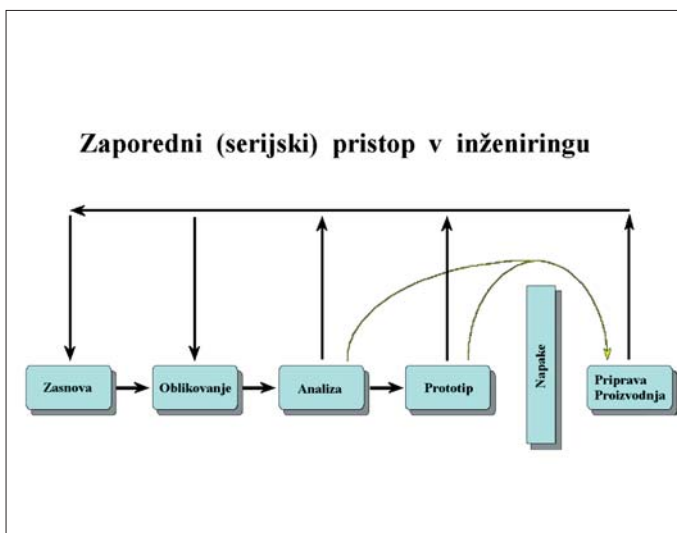


Slika 19 • Vpliv sprememb v fazah dela na stroške v dolarjih

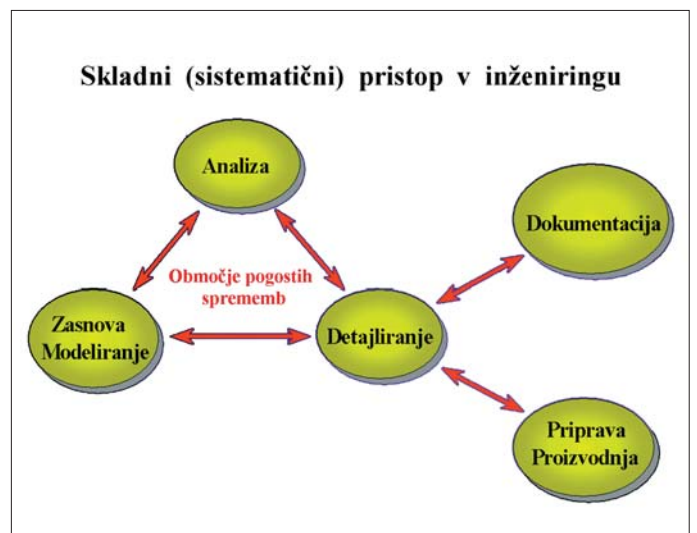
Skladen ali sistematični pristop v inženiringu (slika 21) je v današnjem času oblika, ki da hiter odziv na zahteve trga in omogoča hiter odziv na spremembe v vseh fazah nastanka proizvoda ob najmanjših stroških. Zahteva veliko strokovno usposobljenost vseh, ki sodelujejo v procesu in njihovo tekoče usposabljanje, dobro strojno in programsko opremo in dobro organizacijo. Pretok informacij v obliki datotek najrazličnejših vrst je urejen. Ni zakasnitev in v nobenem primeru tudi prekinitvev. Deluje lahko samo, če so izpolnjeni vsi naštetih bistveni pogoji. Na sliki 21 smo prikazali shemo tega sistema. Napis na njej 'Območje pogostih sprememb' je ključnega pomena za njegovo delovanje.

Ob nastajanju novega proizvoda sodelujejo različne skupine strokovnjakov, zato mora biti pretok informacij med njimi tekoč in organiziran. Upravljalnik datotek Windows Explorer, ki je sicer dobro orodje, ne zadošča. Gre za veliko število datotek najrazličnejših tipov, z različnimi načini oziroma pravicami do njihovih pristopov in sprememb. Poskrbljeno mora biti za soodvisnost vplivov sprememb med skupinami, za dokumentiranost vseh sprememb, za možnost sledenja vseh sprememb v času nastanka proizvoda, za zaščito pred možnimi izbrisi in nepooblaščenimi spremembami datotek. Skratka, za kopico stvari, ki omogočajo nemoteno delo in hiter, organiziran ter

nemoten pretok informacij znotraj delovnih skupin ter za pretok informacij med delovnimi skupinami projektov in naročniki. Ob dobri organizaciji, ob dobrih arhivih izdelanih projektov, ob dobri izdelavi vseh njihovih sestavnih delov, razpolagamo z urejeno bazo izdelanih projektov. To omogoča hitro prilagoditev že izdelanih podobnih projektov novemu projektu. Če so bili pri nastanku izdelanih projektov upoštevani in uporabljeni vsi dogovorjeni načini dela znotraj organiziranega okolja, če to okolje tvorijo dobro usposobljeni posamezniki, potem je njihov odziv hiter in zagotavlja, da se na trgu pojavimo prvi ali med prvimi.



Slika 20 • Shema zaporednega ali serijskega pristopa v inženiringu



Slika 21 • Shema skladnega ali sistematičnega pristopa v inženiringu

8 • POMEN IN KORIST UPRAVLJANJA BAZ PROJEKTOV

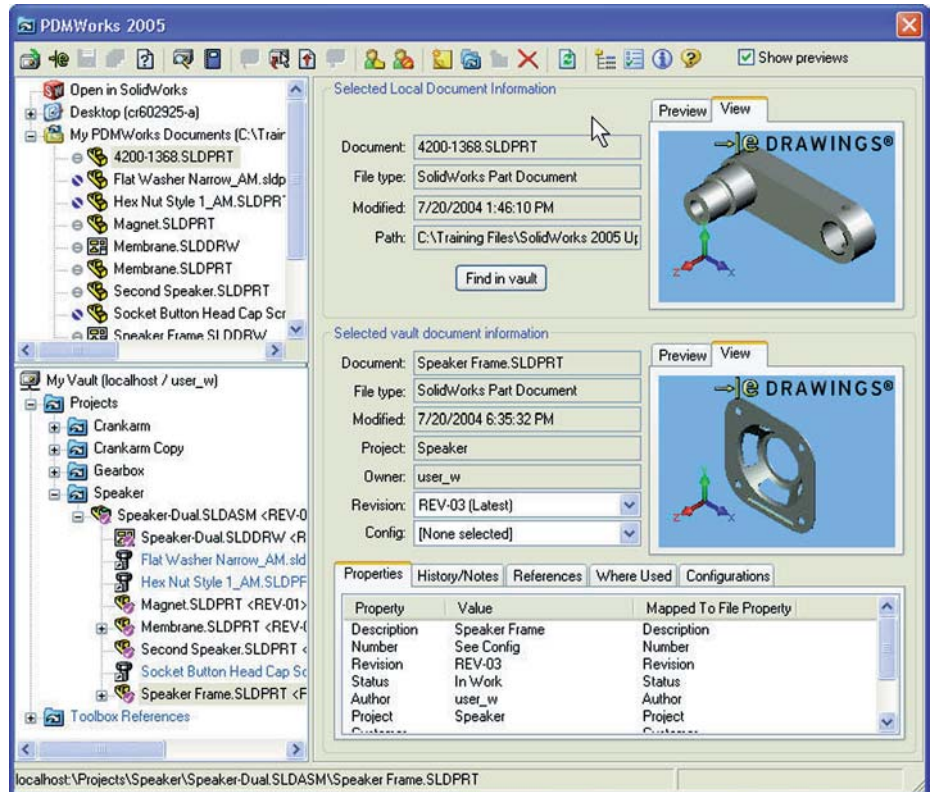
Dobra programska orodja ali programi, kot so na primer Catia ali SolidWorks (oba omogočata tridimenzionalno geometrijsko modeliranje objektov in njihove preračune – sodita v skupino integriranih računalniških programov), imajo orodja za upravljanje baze datotek projektov, ki jih imenujejo Product Data Management ali s kratico PDM. Na slikah 22 in 23 smo prikazali dva primera iz področja strojništva. Oba se nanašata na program SolidWorks oziroma na njegov modul PDMWorks.

Pogosto se veliko konstruktorjev ukvarja z vprašanji: 'Kam sem spravil datoteko? Ali je to zadnja verzija? Prepričan sem, da sem spremenil datoteko, a jo je Francelj najbrž povozil. To je bilo narejeno kot sestav. Kje so kosci? Kdo je delal z mojo datoteko? ...'.

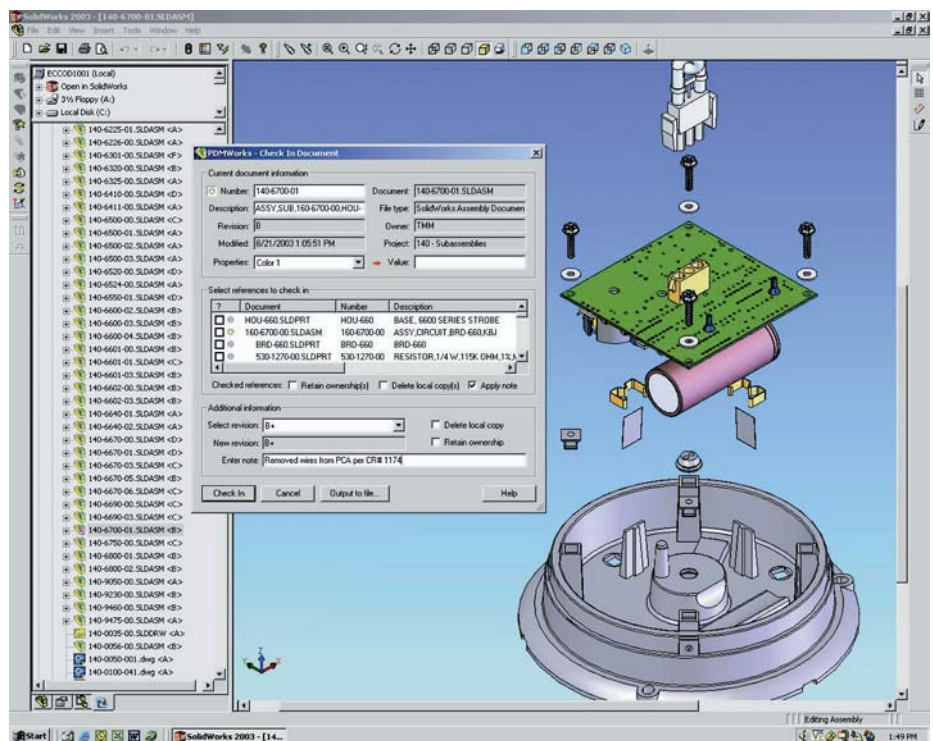
Modul PDMWorks poleg standardne zaščite, ki jo imamo na sistemu, omogoča še dodatno zaščito vseh datotek projekta pred nepooblaščenimi posegi oziroma spreminjanjem, brisanjem datotek in podobnimi neljubimi dogodki. Član delovne skupine projekta lahko uporabi samo datoteke, ki ustrezajo njegovim pooblastilom ('privilegijem'). Ta mu dodeli administrator oziroma vodja projekta.

Praktično ni možno, da bi prišlo do izgube datoteke ali da bi uporabili člani skupine datoteke, ki ne ustrezajo sprejetim spremembam, torej zastarelih. Med tipi datotek, za katere nam modul PDM posreduje vse potrebne informacije, so vse datoteke programa SolidWorks, vse standarne in izdelane knjižnice gradnikov programa SolidWorks, vsi dokumenti specifikacij in lastnosti, potrebnih za izdelavo projekta, vse datoteke računskih analiz s programom COSMOS, vse datoteke skupine programov Microsoft Office, datoteke DWG, DXF in IGES, poslane naročniku ali prejete od njega, vse datoteke grafičnih predstavitev, animacij in PDF dokumentov.

Moduli PDM (različni 3D modelirniki imajo različne PDM module) se sicer nanašajo na segmente firme in ne na celoto. Vendar so poleg urejenosti vseh preostalih segmentov nujna, če želimo ali nameravamo uvesti v svojem delovnem okolju skladen ali sistematični pristop pri izdelavi novih produktov. Ta omogoča, da se na zahteve trga hitro odzovemo in da se na njem pojavimo vsaj med prvimi, če že ne prvi.



Slika 22 • Slika okna modula PDMWorks programa SolidWorks pri delu z datotekami projekta



Slika 23 • Slika okna modula PDMWorks programa SolidWorks pri delu z datotekami projekta. Razen datotek programa SolidWorks sta v drevesu modula PDMWorks vidni datoteki programa AutoCAD

9 • SKLEP

Geometrijsko modeliranje objektov in uporaba 3D modelirnikov, ki omogočajo izdelavo virtualnih geometrijskih modelov vseh vrst konstrukcij na področju gradbeništva, zahtevajo drugačen pristop in razmišljanje kot pri uporabi računalniških risarskih programov. V ospredje je postavljen virtualen geometrijski model objekta kot začetek naravne poti

njegove realizacije (gradnje). Načrtovalec se ukvarja z opisom oblike, s funkcionalnimi rešitvami, s konstrukcijskimi rešitvami in drugimi potrebnimi aktivnostmi in ni obremenjen s prenosom dvodimenzionalnih predstavitev objekta v svojih možganih na zaslon računalnika. Načrti, risbe in skice kot potrebna sestavina tehniške dokumentacije so končni re-

zultat sprejetih odločitev. Z diskusijo in zgledi smo opisali in prikazali pomen ter smisel postavljene hipoteze. Prikazali in opozorili smo na velik razkorak med možnostmi, ki jih ponujajo tehnološke rešitve na področju načrtovanja konstrukcij, in stanjem na področju gradbeništva v našem okolju. Iz članka je moči razbrati priporočilo, da je potrebno v kar največji meri uporabljati in izrabljati možnosti 3D modelirnikov in njihovih nadgradenj – inegriranih programskih paketov za modeliranje in računanje konstrukcij.

10 • ZAHVALA

Avtor se zahvaljuje predstavnikom podjetij ib-CADdy in ib-PROCADD iz Ljubljane, podjetju PONTING Inženirski biro iz Maribora, podjetju

GRADIS Biro za projektiranje Maribor, d.o.o. ter kolegu doc. dr. Andreju Štruklju, univ. dipl. inž. grad. s Fakultete za gradbeništvo Univerze v

Mariboru za posredovano gradivo in informacije, ki jih je uporabil z njihovim dovoljenjem v članku.

11 • LITERATURA

- Abelson, H., Sussman, J., Structure and Interpretation of Computer Programs, The MIT Press, 1996.
- Guid, N., Računalniška grafika, Tehniška fakulteta, VTO elektrotehnika, računalništvo in informatika, Maribor, 1988.
- Lutar, B., Uporaba sodobnih programskih paketov za računanje konstrukcij v pedagoškem procesu, Gradbeni vestnik, št. 13, 1996.
- Lutar, B., Programska orodja za načrtovanje in računanje konstrukcij firm SRAC, Intergraph in BSI ter trendi razvoja, Gradbeni vsetnik, št. 9/10, 1997.
- Lutar, B., Načrtovanje in računanje konstrukcij s programom COSMOS/M Designer 1, Fakulteta za gradbeništvo, Maribor, 2000.
- Lutar, B., Uporaba geometrijskega modeliranja v gradbeništvu, CD-ROM, Fakulteta za gradbeništvo, Maribor, 2002.
- Lutar, B., Uvod v MicroStation Modeler, Fakulteta za gradbeništvo, Maribor, 2003.
- Lutar, B., MicroStation Modeler in modeliranje, Fakulteta za gradbeništvo, Maribor, 3 CD-ROM, 2004.
- Lutar, B., Uvod v SolidWorks, Fakulteta za gradbeništvo, Maribor, CD-ROM, 2006.
- Lutar, B., SolidWorks 2006, Zahtevnejše konstrukcije osnovnih oblik in aplicirane značilnosti, CD-ROM, Fakulteta za gradbeništvo, Maribor, 2006.
- Rolland, C., A Comprehensive View of Process Engineering. Proceedings of the 10th International Conference CAiSE'98, B. Lecture Notes in Computer Science 1413, Pernici, C. Thanos (Eds), Springer, Pisa, Italy, June 1998.
- SolidWorks 2004, Reference Guide, SolidWorks Corporation, 2004.
- SRAC, MAPS (Structural Research & Analysis Corporation), 1996.
- Tibaut, A., Rebolj, D., Towards a virtual product model. International journal of internet and enterprise management, (Print ed.), vol. 1, št. 2, str. 210–222, 2003.
- Turk, Ž., Constraints of product modelling approach in building. Proceedings of the 8th International conference on Durability of Building Materials and Components. Vancouver: NRC Research Press, 1999.
- Žalik, B., Geometrijsko modeliranje, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 1999.