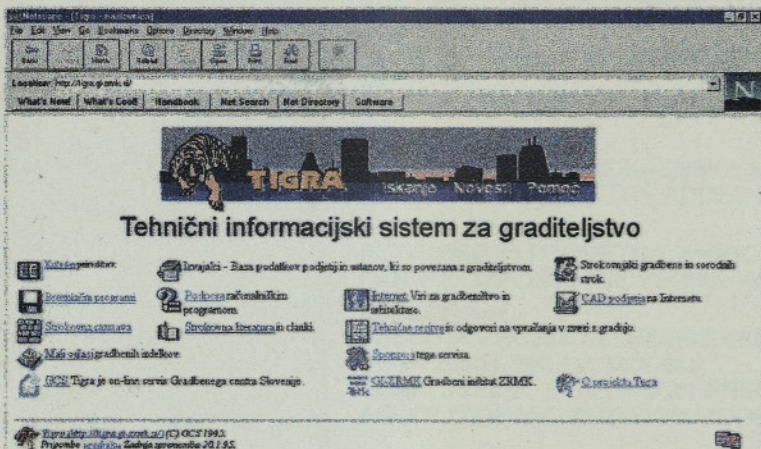


# GRADBENI VESTNIK

# 5-6-7

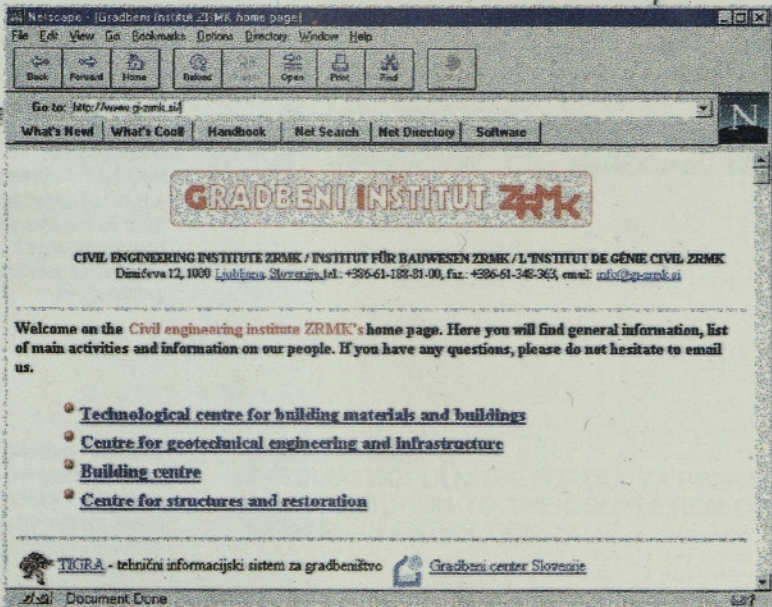
# 1996



http://tigra.gi-zrmk.si



HTTP://WWW.GI-ZRMK.SI  
info@gi-zrmk.si



INTERNET  
WWW - Svetovni splet

**Glavni in odgovorni urednik:**

---

Franc ČAČOVIČ

**Lektor:**

---

Alenka RAIČ-BLAŽIČ

**Tehnični urednik:**

---

Danijel TUDJINA

**Uredniški odbor:**

---

Sergej BUBNOV,  
mag. Gojmir ČERNE,  
mag. Damijana DIMIC,  
dr. Ivan JECELJ,  
Andrej KOMEL,  
Stane PAVLIN,  
dr. Franci STEINMAN,

**Tisk:**

---

TISKARNA TONE TOMŠIČ  
v LJUBLJANI

Revijo izdaja Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, Ljubljana, Karlovška 3, telefon: 061/221-587, ob finančni pomoči Ministrstva RS za znanost in tehnologijo, Gradbenega inštituta ZRMK, Zavoda za gradbeništvo ZRMK, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Univerze v Ljubljani ter Fakultete za gradbeništvo, Univerze v Mariboru. Tiska Tiskarna Tone Tomšič Ljubljana.

Letno izide 12 števil. Individualni naročniki plačajo letno naročnino v višini 2.300 SIT, študentje in upokojenci 1.150 SIT. Gospodarske organizacije in podjetja plačajo letno naročnino za 1 izvod revije 28.350 SIT. Naročnina za naročnike v tujini znaša 100 US \$.

Po mnenju Ministrstva RS za kulturo je v ceno vključen 5% prometni davek.

Žiro račun se nahaja pri Agenciji RS za plačilni promet, nadziranje in informiranje, Enota Ljubljana, številka: 50101-678-47602.

# GRADBENI VESTNIK

GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE  
ŠT. 5-6-7 • LETNIK 45 • 1996 • ISSN 0017-2774

## VSEBINA-CONTENTS

Poročila – Informacije  
Reports – Information

Viktor Markelj:  
PROBLEMATIKA DINAMIČNE OBREMENITVE CESTNIH MOSTOV ..... 110  
THE PROBLEMS OF DYNAMIC LOADING ON ROAD BRIDGES

Srečko Fridl:  
Alfa-CAD – GRAFIČNA NADGRADNJA RAČUNALNIŠKEGA PROGRAMA FRAME 2 ..... 121  
Alfa-CAD – GRAPHICAL UPGRADE OF THE COMPUTER PROGRAM FRAME 2

Matjaž Skrinar:  
DOPOLNITEV IDENTIFIKACIJSKE METODE Z DODATNO MASO ..... 129  
THE EXTENSION OF THE ADDED MASS IDENTIFICATION METHOD

Tomislav Šibenik:  
BIOVREME IN PROMETNA VARNOST ..... 136  
DAS WETTER UND DIE VERKEHRSSICHERHEIT

Danijel Rebolj:  
PRESOJA PROJEKTA CESTE Z EKOLOŠKEGA VIDIKA S POMOČJO DINAMIČNEGA EMISIJSKEGA MODELA ..... 140  
ROAD DESIGN EVALUATION FROM THE ECOLOGICAL ASPECT WITH THE AID OF DYNAMIC EMISSION MODEL

Poročila Fakultete za  
gradbeništvo  
in geodezijo  
Univerze v Ljubljani  
Proceedings of the  
Department of Civil  
Engineering and  
Geodesy, University  
in Ljubljana

Goran Turk, Janko Logar:  
UPORABA UMETNE INTELIGENCE V GRADBENI KONSTRUKCIJI ..... 147  
THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN STRUCTURAL ENGINEERING

Novosti Fakultete  
za gradbeništvo,  
Univerza v Mariboru  
Civil Engineering News  
of the University  
in Maribor

Eugen Petrešin:  
PREDLOG DOPOLNITVE FORMUL ZA PRERAČUN VODOVODNEGA OMREŽJA ..... 155  
A CONTRIBUTION TO THE COMPLETION OF THE EQUATIONS FOR WATER NETWORKS ESTIMATION

# PROBLEMATIKA DINAMIČNE OBREMENITVE CESTNIH MOSTOV

## The problems of dynamic loading or road bridges

UDK 624.21.046:625.745.1:340.130

VIKTOR MARKELJ

### POVZETEK

Članek opisuje problematiko dinamične, to je prometne obremenitve cestnih premostitvenih objektov. Primerjava izmerjenega koeficienta dinamičnosti pri obremenilnem preizkusu s koeficientom iz tehnične regulative ni primeren kriterij za ocenjevanje dinamične ustreznosti projektov. Podana je obrazložitev te trditve s pomočjo statističnega pregleda opravljenih preiskav. Prikazan je pregled projektne prometne obtežbe mostov za nekatere bolj znane tehnične predpise, vključno z Eurocode. Prikazan je primer dveh objektov dvojčkov, ki pa pri meritvah izkazujeta popolnoma različen dinamični koeficient. Na koncu je podanih nekaj sklepov in predlogov za nadaljnje delo.

### SUMMARY

The paper describes the problems of dynamic – traffic loads on road bridge. Comparison between measured dynamic increment at load test and dynamic increment according to technical regulations is not convenient criterion for estimation a highway bridges dynamical suitability. This statement is explained by statistical review of dynamical increments on bridges. The paper also describes the traffic loads for most known technical regulations, including Eurocode. The example of two identical bridges with totally different dynamic increment measured on the load test is shown. At the end some conclusions and suggestions for the future work are given.

### 1.0 UVOD

Po končani gradnji zahtevnejših gradbenih objektov je potrebno kot enega izmed dokazov za ustrezno kvaliteto predložiti tudi pozitivno opravljen obremenilni preizkus. Šele potem je možen tehnični prevzem objekta. Za premostitvene objekte se preizkusna obremenitev izvaja po standardu JUS U.M1.046 iz leta 1984, ki predpisuje statični in dinamični preizkus za cestne objekte z razponom, večjim kot 15 m.

Eden izmed treh kriterijev iz standarda za dinamično ustreznost objekta je tudi, da se izmerjeni dinamični koeficient nahaja v mejah, predvidenih s projektom. Naši državni investitorji za ceste (DRSC in DARS) v razpisih za gradnjo zahtevajo v projektu uporabo predpisov DIN

1072 za obtežbo mostov. Ta predpis pa uporablja k predpisani obtežni shemi računski dinamični koeficient, ki nima namena opisovati dejanske karakteristike objekta in ni primerljiv z izmerjenimi vrednostmi.

Postopek pri obremenilnih preizkusih, ki sloni na primerjavi računskega faktorja dinamičnosti za celotno shemo iz zahtevanih predpisov DIN 1072 ter pri preizkusu izmerjenega faktorja dinamičnosti pri določenem posameznem testnem vozilu, ne more biti kriterij za ustreznost objekta na mejno stanje vibracij. Direktna primerjava, brez poznavanja problematike in natančnega premisleka, pa lahko vodi celo k popolnoma napačnim sklepom.

Obrazložitev trditve in komentar s primerom k tej problematiki je podan v nadaljnjih točkah.

AVTOR:

Viktor MARKELJ, dipl. inž. gr., vodilni projektant, Inženirski biro PONTING d.o.o. Maribor

## 2.0 ODZIV PREMOSTITVENIH OBJEKTOV NA PROMETNO OBTEŽBO

Zaradi svojega gibanja, posledičnih pospeškov ter inercialnih sil povzročaja prometna obtežba nihanje konstrukcije okoli svoje ravnotežne lege. Posledica je spreminjanje – nihanje ustreznih obremenitev v konstrukciji. Razmerje med maksimalno (dinamično) in statično obremenitvijo pod istim bremenom imenujemo dinamični koeficient (razmerje  $> 1.00$ ) ali dinamični prirastek (procentualno povečanje  $> 0\%$ ). Zaradi enotnosti bo dalje uporabljan dinamični koeficient.

$$\phi = R_{din}/R_{st} > 1.00$$

Količine R, ki jih primerjamo, so ponavadi vertikalni pomiki konstrukcije ali pa napetosti, ki jih dobimo prek specifičnih deformacij v prerezu.

Dinamično obnašanje mostov je izredno široko in zahtevno področje, ki ga nikakor ni mogoče zajeti samo s koeficientom dinamičnosti. Zaradi zahtevnosti problema so za projektantsko prakso nacionalni predpisi namesto dejanske dinamične analize predvideli ekvivalentno statično analizo, z »dinamičnim« koeficientom povečano prometno obtežbo.

Tako zelo poenostavljen način, v kombinaciji z izkustvenimi vrednostmi za togosti oziroma vitkosti prekladne konstrukcije, deluje za običajno projektantsko prakso zadovoljivo in popolnoma ustreza.

Dejansko obnašanje konstrukcije je fizikalno gledano časovno odvisni problem dušenega nihanja z interakcijo med konstrukcijo in prometom (z enim ali več različnimi vozili). Najvažnejše karakteristike, ki vplivajo na dinamično delovanje tega sistema, so:

– karakteristike objekta, ki so odvisne od zasnove konstrukcije (geometrija, statični sistem, razporeditev mas in togosti, kvalitete materialov in drugo) ter se lahko predstavijo z naslednjimi glavnimi značilnostmi:

- karakteristična togost (kN/mm) v sredini tipičnega polja
- prva in ostale lastne frekvence konstrukcije
- logaritemski dekrement dušenja

– dinamične karakteristike vozil, ki so odvisne od razporeditve mas, togosti in razporeditve vzmeti, dušenja amortizerjev in drugega trenja, pritiska v gumah in drugih karakteristik. Za povprečno tovorno težko vozilo se te karakteristike kažejo v dveh tipičnih načinih nihanja:

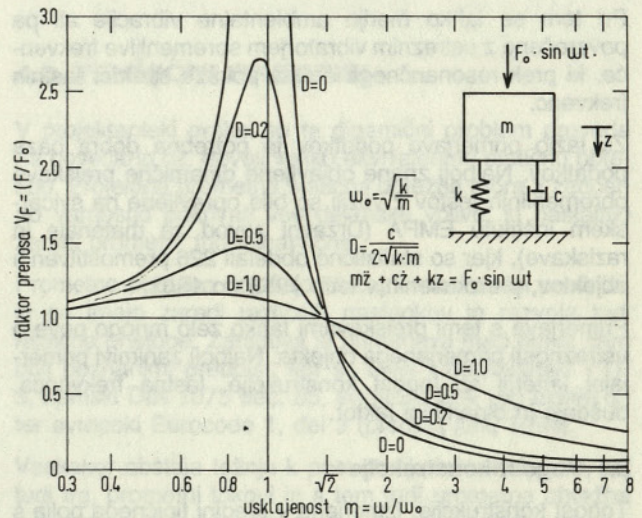
- nihanje vozila kot celote z 2–5 Hz
- nihanje oz. poskakovanje posameznih osi z 10–15 Hz

– začetno prometno zburjanje, ki je odvisno predvsem od:
 

- oblike neravnin na vozišču (asfaltu), ki so seveda prostorske oblike, tako da vsaka linija vožnje lahko povzroča različno zburjanje

- hitrosti vožnje, ki direktno vpliva na frekvenco zburjanja
- drugi vplivi med vožnjo, ki jih je praktično nemogoče zajeti v računu (nihanje ali zibanje vozila pred prihodom na objekt, udar pri dilataciji, zaviranje na objektu, blokiranje koles, interakcija več vozil in podobno.

Pri delovanju takega sistema je vsekakor potrebno omeniti pojav resonance. Če je lastna frekvenca nihanja objekta približno enaka vzbujevalni frekvenci, potem odgovor konstrukcije (dinamični koeficient) močno naraste. Iz elementarne fizike poznamo teoretičen primer sistema z eno prostostno stopnjo, kjer se pri teoretični vrednosti dušenja beta = 0, vzbujevalna sila v resonanci nalaga v sistem, tako da se končni odgovor povečuje prek vseh meja. Dejanski sistem brez dušenja, ki predstavlja zmanjševanje energije zaradi trenja in drugih uporov, v naravi seveda ne obstaja. Z dodajanjem dušenja v sistem se odgovor, tudi pri resonanci, hitro zmanjša (slika 1).



Slika 1: Vpliv dušenja pri vzbujanju sistema z eno prostostno stopnjo

Pri dejanski dušeni premostitveni konstrukciji in približno resonančnem zburjanju (primerno posamično vozilo na valovitem vozišču s primerno hitrostjo ali vozilo ob prehodu ovire na vozišču) se lahko realni koeficient dinamičnosti povzpne tudi prek 5 in več (EMPA). S povečanjem števila vozil, kar predstavlja večanje prometne obtežbe, se zaradi različnih vplivov posameznih vozil (interferenca, fazni zamik itd.) dinamični prirastek zmanjšuje.

Zaradi izredno velikega števila spremenljivk, ki so v fazi snovanja konstrukcije težko ali sploh nedoločljivi (npr. ravnost vozišča in karakteristike vozil), je realna dinamična analiza zelo težka in omejena na določene primere. Nekaj računalniških programov za ta namen sicer obstaja (npr. DANCEM-FAGG Ljubljana, (dr. Kržič), DYNBBF-TU München, DYBES-RWTH Aachen in drugi), vendar za uporabo potrebujemo podatke, ki jih projektant, kot je omenjeno, med samim projektiranjem še ne pozna. Zaradi tega so taki programi uporabni in namenjeni predvsem za raziskovalne namene, manj pa za projektante objektov v fazi zasnove in izdelave tehnične dokumentacije. Vsekakor pa bi jih kazalo v praksi, npr. ob obremenilnih preizkusih, čim večkrat uporabiti in potrditi njihovo uporabnost.

### 3.0 DINAMIČNE PREISKAVE

Dejanski odziv konstrukcij pa dobimo samo z meritvami na realnih objektih, kjer se dinamične preiskave v glavnem izvajajo v sklopu obremenilnih testov novih premostitvenih objektov, ki se izvajajo že po omenjenem JUS standardu.

Na tem mestu je vsekakor potrebno omeniti tudi dinamično preiskavo kot eno od metod neporušnih preiskav za nove ali stare objekte, potrebne popravila, pred in po sanaciji. Vsaka sprememba od prej izmerjenih ali odstopanje od teoretičnih vrednosti lastnih frekvenc, oblike nihanja ali dušenja nam pove mnogo o padcu togosti, razpokah, poškodbah, masnih in drugih spremembah.

Pri tem se lahko merijo ambientalne vibracije ali pa povzročene z ustreznim vibratorjem spremenljive frekvence, ki prek resonančnega efekta pokaže spekter lastnih frekvenc.

Za lažjo primerjavo podatkov je potrebna dobra baza podatkov. Najbolj znane objavljene dinamične preiskave obremenilnih testov z vozili so bile opravljene na švicarskem inštitutu EMPA (Državni zavod za materiale in raziskave), kjer so statistično obdelali 226 premostitvenih objektov, preizkušanih v letih 1958 do 1981.

Primerjava s temi preiskavami lahko zelo mnogo pove o ustreznosti primerjanega objekta. Najbolj zanimivi primerjalni kriteriji so togost konstrukcije, lastna frekvenca, dušenje in dinamični faktor.

#### 3.1 Togost konstrukcije

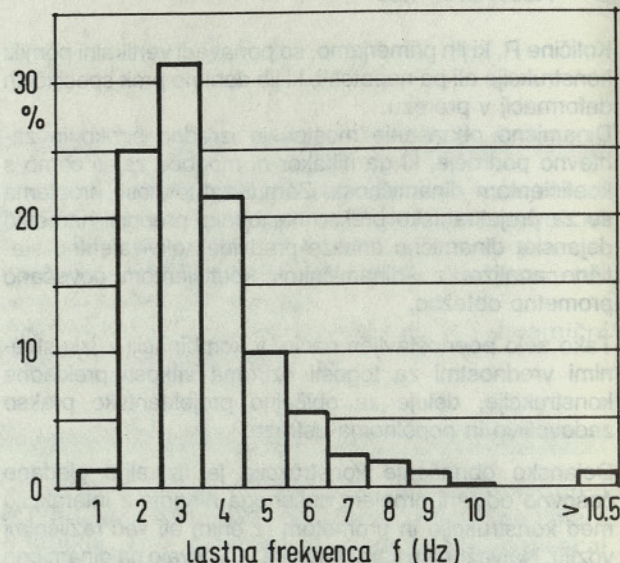
Togost konstrukcije, izmerjena v sredini tipičnega polja s statičnim preizkusom, neposredno vpliva na dinamične karakteristike objekta. Preiskane mostove so razdelili v štiri skupine togosti:

- A. majhna togost  $k < 100 \text{ kN/mm}$
- B. srednja togost  $100 < k < 250 \text{ kN/mm}$
- C. večja togost  $250 < k < 400 \text{ kN/mm}$
- D. velika togost  $400 < k$

Minimalna izmerjena togost je znašala komaj 7 kN/mm, maksimalna 800 kN/mm, povprečna pa 173 kN/mm. Razdelitev je prikazana na sliki 2.

#### 3.2 Lastna frekvenca

Omenjene meritve so pokazale, da se frekvence preiskanih mostov gibljejo med 1,2 do 14,0 Hz, oziroma povprečno 3,6 Hz. Številčna razdelitev je razvidna iz slike 3.

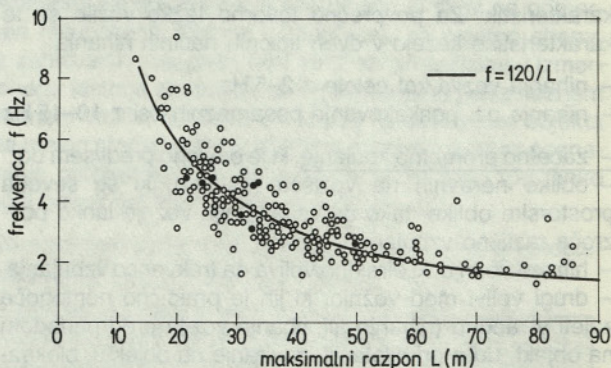


Slika 3: Izmerjene osnovne vertikalne frekvence

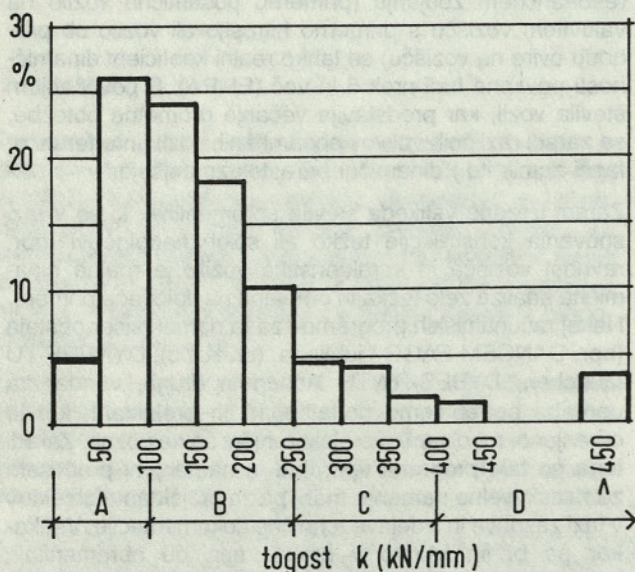
Lastne frekvence, narisane v odvisnosti od maksimalnega razpona, nam pokažejo dokaj grupirano sliko. Srednjo vrednost so pri EMPA izrazili z odvisnostjo

$$f = 95.4 \cdot L^{-0.933}$$

Za hitro »na pamet« določanje približne frekvence premostitvenih objektov v običajnih razponih 15–60 m pa zadostuje tudi preprosta enačba  $f = 120/L$  (po avtorju članka), ki je prikazana na sliki 4.



Slika 4: Meritve frekvenc v odvisnosti od razpona



Slika 2: Izmerjene togosti premostitvenih konstrukcij

Preiskave nihanja tipičnih tovornih vozil pa kažejo na dve področji resonančnih frekvenc:

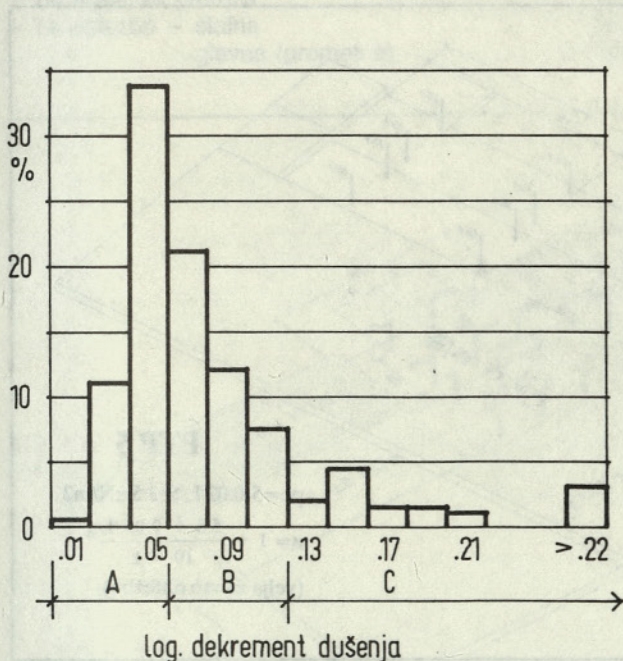
nihanje celotnega vozila:  $f = 2-5 \text{ Hz}$

poskakovanje osi:  $f = 10-15 \text{ Hz}$ .

Razvidno je, da je resonanca nihanja vozila in objekta mogoča na območju nihanja celotnega vozila, posebej če je spodbujeno z ustreznim valovanjem vozišča.

### 3.3 Dušenje

Minimalna izmerjena vrednost je znašala 1,9%, maksimalna 36%, povprečna pa 8,2% dušenja. EMPA navaja za dolge, ozke mostove z zaprtim prerezom povprečno vrednost logaritemskega dekrementa dušenja v vrednosti 4,8%, medtem ko so široki, kratki in močno zakrivljeni objekti izkazali večje dušenje, v povprečju 10% (slika 5).



Slika 5: Meritve dušenja konstrukcije

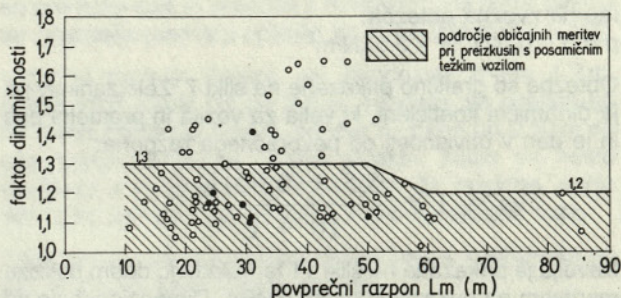
### 3.4 Faktor dinamičnosti (dinamični prirastek)

Iz meritev EMPA sledijo naslednji povprečni ter minimalni in maksimalni faktorji:

za prevoz brez ovire  $F_{povp} = 1,30$  (od 1.02 do 2.02)

za prevoz z oviro (plošč 5 cm)  $F_{povp} = 2,30$  (od 1,43 do 5,50)

Na sliki 6 so prikazane maksimalne vrednosti faktorja pri meritvah pod neposrednim vplivom vozila (73 primerov) brez ovire v odvisnosti od povprečnega razpona. Razvidna je mnogo večja razpršenost rezultatov kot pri meritvah lastnih frekvenc, kar je posledica mnogo večjega števila vplivnih faktorjev. Nekaj večjo zgoščenost dinamičnega odgovora dobimo, če ga naneseemo v odvisnosti od lastne frekvence objekta.



Slika 6: Izmerjeni faktor dinamičnosti v odvisnosti od razpona

## 4.0 TEHNIČNI PREDPISI

V projektantski praksi se ta dinamični problem prevede na povečano oz. dovolj veliko ekvivalentno statično obtežbo. Projektna prometna statična obtežba mora z zadostno varnostjo pokrivati vse dejanske vplive, ki nastajajo zaradi prometa, tudi dinamične.

Prometno obtežbo določajo običajno nacionalni predpisi, ki pa imajo zaradi različnih nastankov in razvoja tudi različne pristope. Zanimiva je primerjava med nekaj nam bolj poznanimi predpisi, kot so bivši jugoslovanski PTP 5, nemški DIN 1075 dec. 85, švicarski SIA 160 izdaja 89 ter evropski Eurocode 1, del 3 (predlog junij 1994).

Vsekakor obstaja težnja k poenotenju teh predpisov, saj tudi trg, prometni tokovi in s tem tudi prometna obtežba ne poznajo več državnih meja. To se kaže tudi v sprejemanju enotnih evropskih predpisov – Eurocode.

Pri pregledu obtežb se bom zaradi dolžine prispevka omejil samo na glavno shemo, ki je odločilna za dokaz po mejnem stanju nosilnosti na glavnih cestah, ne pa tudi na posebne prevoze, na cestah nižjega reda ali pa sheme za druge dokaze (utrujanje in podobno).

Direktna primerjava o velikosti vpliva na notranje količine zaradi prometa med različnimi predpisi ni mogoča, ker je potrebno upoštevati celotni komplet predpisov od začetka do konca. Predpisi določajo različne kriterije za posamezne dokaze, predvsem pa različne parcialne koeficiente varnosti, različne mejne in dopustne napetosti ter drugo.

### 4.1 Predpisi bivše Jugoslavije PTP 5

Mnogo slovenskih mostov, tudi na obstoječih avtocestah, je dimenzionirano po predpisih bivše države, imenovanih PTP 5 (Privremeni tehnički propisi) iz leta 1949. Zaradi zgodovinskega razvoja predpisov o obtežbah mostov, pa tudi zaradi morebitnih ojačitev takih objektov, je zanimivo poznati takrat predpisano cestno prometno obtežbo. Sestavljalo jo je več prometnih shem, in sicer redna obtežba, valjar, goseničar in posebno vozilo.

Redno obtežbo je sestavljalo eden ali več prometnih pasov širine 2,50 m v odvisnosti od celotne širine objekta. Na vsakem prometnem pasu sta bili dve tovorni vozili teže po 130 kN na skupni dolžini 18 m ter enako-

merna zvezna obtežba:

$$p = 5 - 0,02L \geq 3,5 \text{ kN/m}^2$$

Obtežbe so grafično prikazane na sliki 7. Zelo zanimiv pa je dinamični koeficient, ki velja za vozila in prometni pas in je dan v odvisnosti od povprečnega razpona:

$$\varphi = 1 + \frac{5,5 + 0,05 \cdot L}{10 + L}$$

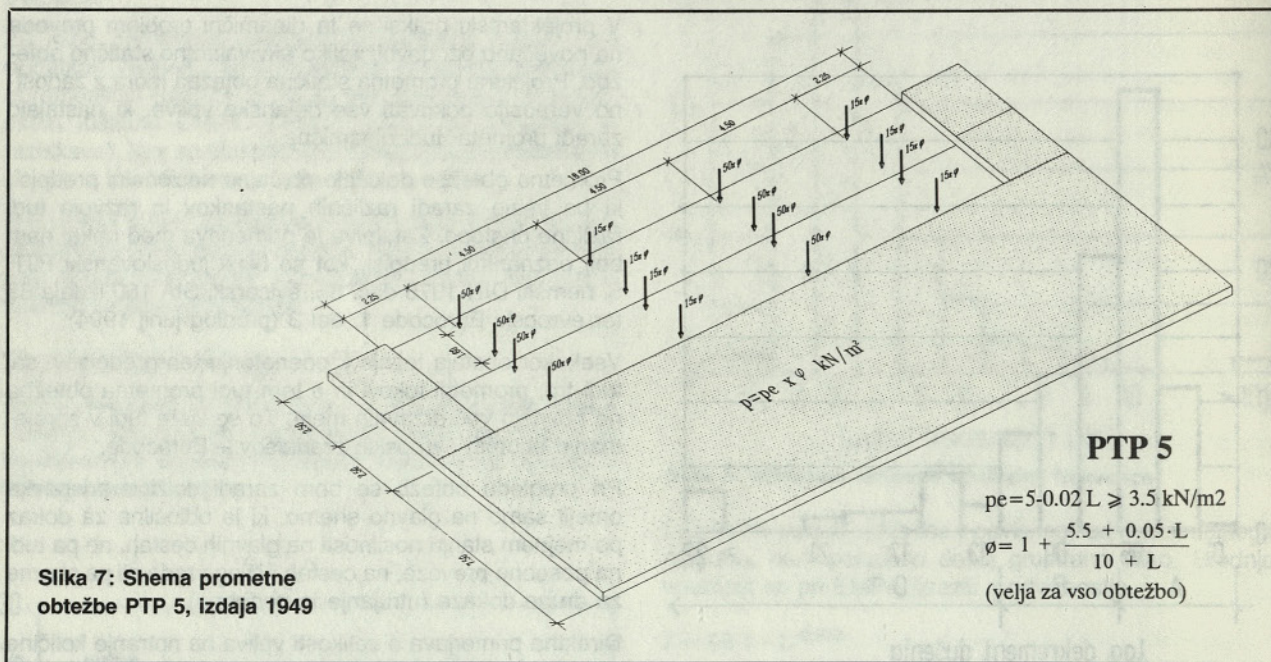
Krivulja je prikazana na sliki 11 ter relativno dobro ustreza meritvam na prikazanih testih EMPA. Dimenzioniranje se je izvajalo po metodi dopustnih napetosti iz takrat veljavnih pravilnikov. V praksi ga je relativno kmalu, zaradi večje in enotne sheme, zamenjal nemški predpis DIN 1072, čemur je skoraj v popolnosti ustrezal tudi predlog novih jugoslovanskih predpisov.

Iz izraza je razvidno, da je za razpone 50 in več metrov koeficient enak 1,00, čeprav je znano, da je dejanska vrednost dinamičnega koeficienta vedno večja od 1,00.

Pri določanju mejne nosilnosti se uporablja enotni koeficient varnosti 1,75, tako za prometno kot za stalno obtežbo. Promet pa se kot redna obtežba še kombinira z delom linearne temperaturne spremembe.

#### 4.3 Švicarski standardi SIA 160, izdaja 1989

V izdaji 1970, kjer se dimenzioniranje izvaja še po dopustnih napetostih, je glavna prometna shema (obt. primer I) sestavljena iz enakomerne obtežbe  $4,0 \text{ kN/m}^2$  ter dveh posamičnih osi po  $180 \text{ kN}$  (vsaka na en pas). Zanimiv je dinamični koeficient, ki je verjetno ostal iz prejšnjih predpisov ter je praktično skoraj enak kot v



Slika 7: Shema prometne obtežbe PTP 5, izdaja 1949

#### 4.2 Nemške norme DIN 1072, izdaja dec. 1985

Začetek sedanjih DIN 1072 predpisov sega v leto 1951, ko prvič vpeljejo shemo SLW 60, 45, 30 ter LKW 12, 6, 3, tem sledi izdaja leta 1967, ko zmanjšajo število obtežnih razredov za nove mostove. V sedaj veljavni izdaji iz decembra 1985 pa so povečali obtežbo z dodatno shemo SLW 30 poleg glavnega pasu.

Tako za glavne ceste velja shema SLW 60/30, ki je sestavljena iz dveh triosnih vozil teže  $600 + 300 \text{ kN}$ , prometnega pasu širine  $3,0 \text{ m}$  z obtežbo  $5,0 \text{ kN/m}^2$  ter preostale površine z obtežbo  $3,0 \text{ kN/m}^2$  (glej sliko 8). Shema SLW ne predstavlja realnega težkega vozila, ampak zagotavlja le odločilne obremenitve konstrukcije.

Shema SLW 60 ter prometni pas se povečujeta z dinamičnim koeficientom v odvisnosti od razpona:

$$\varphi = 1,4 - 0,008L; L = \text{povprečni razpon (slika 11)}$$

#### PTP 5.

V SIA 160 osnutek 1985, kjer se spremeni osnova računa po mejnih stanjih, vpeljejo za mejno stanje nosilnosti model troosnega vozila ( $6 \times 90 \text{ kN}$ ), prometnega pasu  $7,5 \text{ kN/m}^2$  na širini  $2,50 \text{ m}$  ter preostale širine v vrednosti  $3,5 - 5,0 \text{ kN/m}^2$ , medtem ko za mejno stanje uporabnosti velja druga shema z nižjimi vrednostmi. Na osnovi mnogih izvedenih raziskav na področju dinamike mostov v tistem času so predlagali nov način izračunavanja dinamičnega koeficienta v odvisnosti od lastne frekvence objekta, in sicer  $\varphi 1$  za vozilo ter  $\varphi 2$  za prometni pas po sliki 12. Koeficienta se lahko zunaj tipičnega resonančnega območja z vozili ustrezno zmanjšata. Če koeficient  $\varphi 1$  prevedemo v odvisnost od razpona po prej omenjeni formuli za frekvenco  $f = 120/L$ , dobimo odvisnost, ki je prikazana na sliki 11 s črtkano linijo.

Ta osnutek pa ni prišel v veljavnost, ampak je stare



predpise iz leta 1970 zamenjala izdaja 1989, v kateri so popolnoma zamenjali shemo, koeficiente varnosti pa tudi dinamični koeficient. Verjetno zaradi enostavnosti uporabe, pa tudi pod vplivom nastajajočih Eurocodov.

Tako je sedaj veljavna obtežna shema po SIA 160, izdaja 1989, za mejno stanje nosilnosti prikazana na sliki 9. Sestavljena je iz dveh osi ( $2 \times 2 \times 75 \text{ kN}$ ), prometnega pasu širine 3,0 m v vrednosti  $5,0 \text{ kN/m}^2$  ter gneče spremenljive vrednosti od 2,5 do  $3,5 \text{ kN/m}^2$  v odvisnosti od prometne širine. Zmanjšane sheme so podane za fazo uporabe ter kontrolo utrujanja.

Dinamični koeficient je konstanten v vrednosti 1,8 in velja samo za shemo osi vozila, kar glede na predlog iz leta 1985 zelo poenostavlja statični račun.

Pripadajoči faktorji varnosti so:

- na nosilnost prereza 1,2
- na obtežbo - stalna 1,3
- glavna (prometna) 1,5

en prometni pas je obtežen z  $9,0 \text{ kN/m}^2$ , vsi ostali pasovi ter preostala površina objekta pa z  $2,5 \text{ kN/m}^2$  (slika 10).

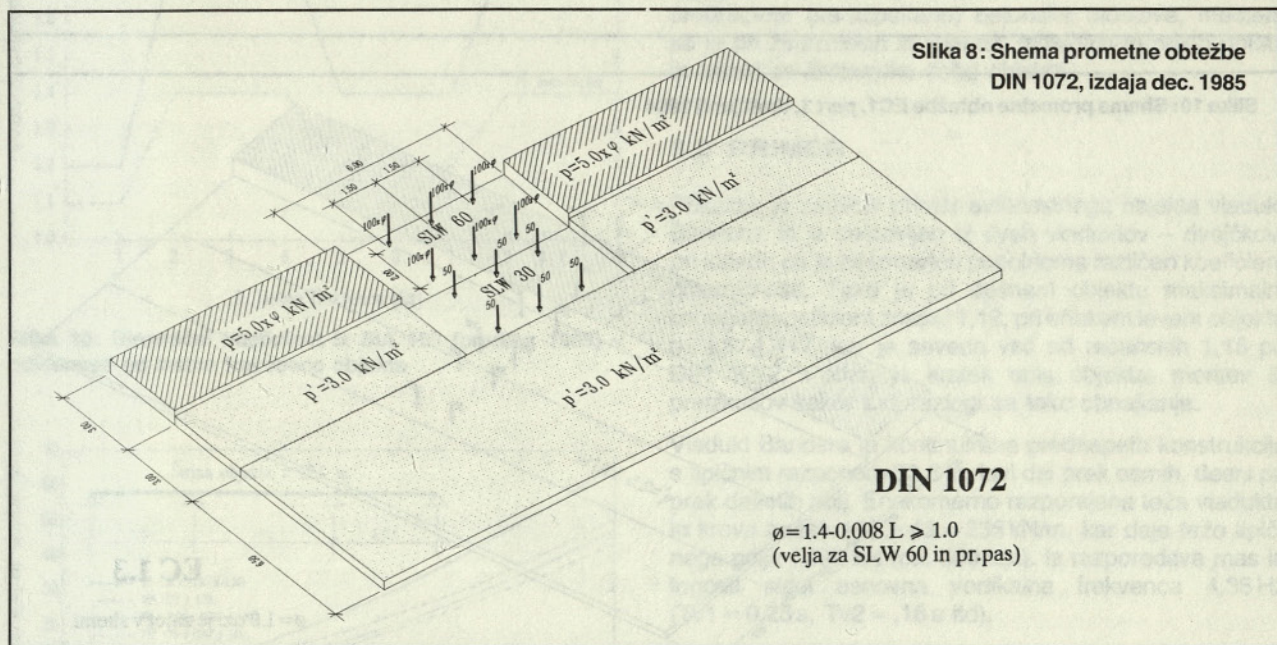
Vzdolžni razmak dvojice osi (tandema) znaša 1,2 m, prečni med kolesi osi pa 2,0 m. Tandemi se postavljajo na najneugodnejša mesta, vendar ne bližje od 0,50 m do sosednjega tandema. Stična ploskev koles se lahko upošteva s kvadratom  $0,40 \times 0,40 \text{ m}$ . Za razpone, večje kot 10 m, se lahko osi združita v eno os skupne teže.

Zanimivo je, da posebnega dinamičnega koeficienta ni, oziroma je že zajet v sami obtežbi.

Predpis še dopušča uporabo nacionalnih korekcijskih faktorjev na obtežbo, vendar v omejenih vrednostih.

Ostale obtežne sheme za mejno stanje nosilnosti so:

- obtežna shema 2: posamezna os teže 400 kN za kontrolo lokalnih vplivov, s stičnimi ploskvami  $2 \times 60 \times 35 \text{ cm}$
- obtežna shema 3 je neobvezna, predstavlja pa posebni prevoz teže od 600–3600 kN in jo predpiše investitor



Slika 8: Shema prometne obtežbe  
DIN 1072, izdaja dec. 1985

DIN 1072

$\phi = 1.4 - 0.008 L \geq 1.0$   
(velja za SLW 60 in pr.pas)

#### 4.4 Eurocode 1, Part 3, Draft junij 1994

Trenutno zadnja izdaja predlaganih evropskih predpisov je rezultat sodelovanja in konsenza evropskih strokovnjakov, v katerem je zaznati vplive modernejših nacionalnih predpisov, kot so SIA 160, ter britanskega BS 5400.

Predpis loči več obtežnih shem za mejno stanje nosilnosti, mejno stanje uporabnosti ter utrujanje. Z ostalimi primerljiva je shema 1 (Load model 1), ki sestoji iz treh dvojnih osi na prometnih pasovih od 1 do 3:

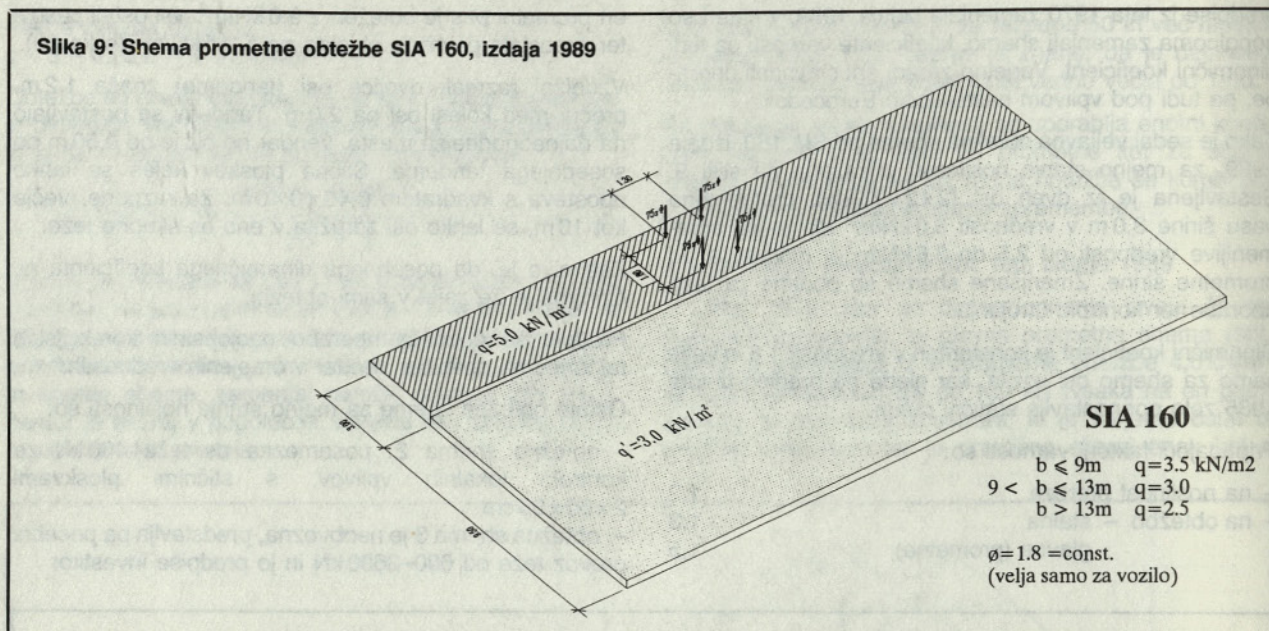
prometni pas 1	$2 \times 300 \text{ kN}$ osne obtežbe
prometni pas 2	$2 \times 200 \text{ kN}$ osne obtežbe
prometni pas 3	$2 \times 100 \text{ kN}$ osne obtežbe,

- obtežna shema 4 je prav tako neobvezna, predstavlja pa gnečo po celotni površini objekta, v vrednosti  $5,0 \text{ kN/m}^2$ , predpiše jo investitor.

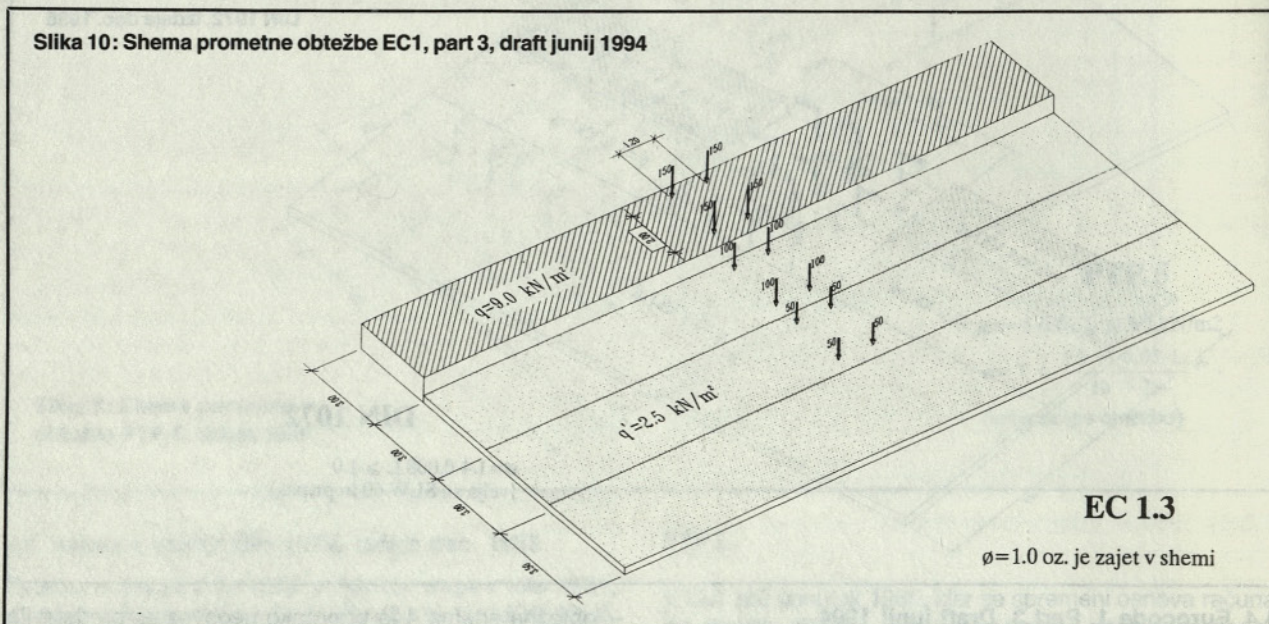
#### 4.5 Komentar k pregledu tehničnih predpisov

Na diagramu na sliki 13 je prikazano razmerje med upogibnimi momenti za tipični 12,5 m široki objekt. Vrednosti so pomnožene z ustreznimi enotnimi ali parcialnimi faktorji varnosti, tako da je mogoča primerjava končnih porušnih vrednosti za prometno obtežbo. Razvidno je, da predpis EC 1, kljub temu, da nima eksplicitno izraženega dinamičnega koeficienta, daje precej večje vrednosti (primerjalnih 100 %) od nemških DIN 1072 (74–78 %). Švicarski standardi SIA 160, ki imajo največji dinamični koeficient 1,8, dajejo še manjše vrednosti upogibnega mo-

Slika 9: Shema prometne obtežbe SIA 160, izdaja 1989



Slika 10: Shema prometne obtežbe EC1, part 3, draft junij 1994



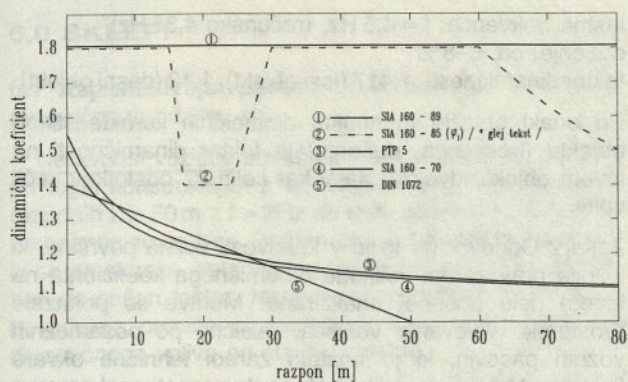
menta od 54 do 71 %. Najnižje vrednosti daje stari PTP 5, in sicer od 37 do 65% obremenitev po EC1.

Ta razmerja se sicer ne izražajo neposredno v porabi materialov, saj je potrebno upoštevati še ostale obtežbe, predvsem stalno obtežbo ter odločilne kombinacije, vse z ustreznimi koeficienti varnosti. Taka primerjava se lahko napravi samo na konkretnem primeru, kar presega okvirje članka.

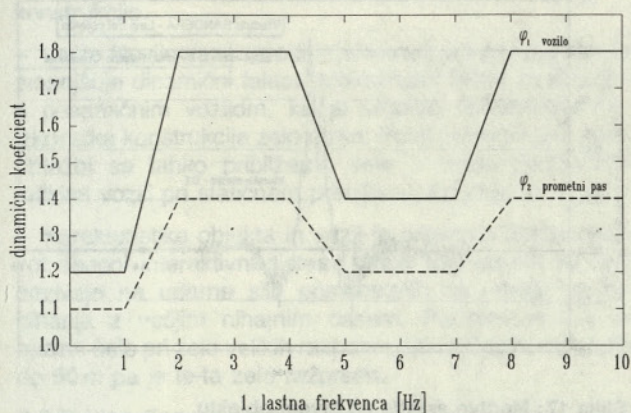
Iz prikazanega je razvidno, da dinamični koeficient po predpisih ni odločilen za določanje nosilnosti presekov in konstrukcije, kar je še en razlog, da ne more biti primerjalni kriterij, kot je omenjeno v uvodu.

Tu je potrebno osvetliti še tretji kriterij iz JUS standarda za zadovoljivo dinamično obnašanje objekta, to je fiziološki občutek nelagodja ob nihanju ali vibracijah objekta.

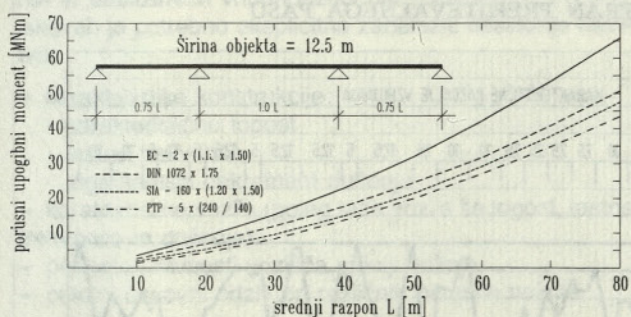
Mnogo predpisov ta kriterij samo omenja, brez določitve numeričnih vrednosti. Poznana izjema je zelo kakovostni British Standard BS 5400 ter CEB priporočila, ki omenjajo kot kriterij dopustnega neudobja maksimalno dopusten pospešek pri nihanju. Ta omejitev se lahko grafično prikaže kot dopustna kombinacija frekvence in ustrezne amplitude nihanja (ne ekvivalentne statične deformacije), kar je prikazano na sliki 14. Ti pogoji so posebej zahtevni pri zelo podajnih objektih, predvsem pa pri mostovih za pešce ali kolesarje, imenovane tudi brvi.



Slika 11: Dinamični koeficient iz predpisov v odvisnosti od razpona



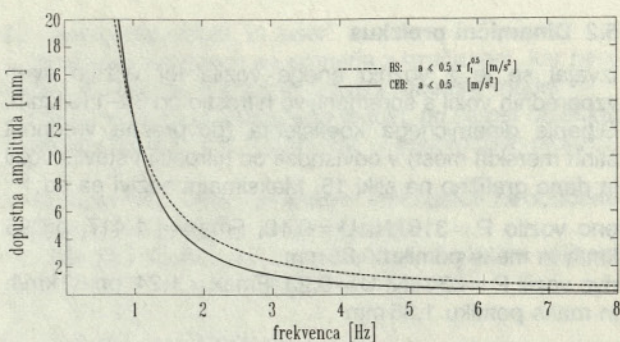
Slika 12: Dinamični koeficient iz SIA 160 (predlog 1985) v odvisnosti od lastne frekvence objekta



Slika 13: Primerjava porušnih upogibnih momentov zaradi prometne obtežbe pri različnih normah

Še en kriterij, na katerega ne smemo pozabiti pri prometni dinamični obremenitvi, je dokaz za utrujanje materiala. Na časovno izgubo mehaničnih kakovosti vpliva napetostna amplituda obremenjevanja ter število ciklov.

V praksi se ta dokaz izvaja po tako imenovanem »delta sigma konceptu« na znani dvojni logaritemski Wohlerjevi liniji. Za obremenitve je odločilna dejanska prometna obtežba (statistična obdelava težkih vozil), kar nekateri



Slika 14: Kriterij za fiziološki občutek nelagodja

predpisi zajamejo z zmanjševalnim faktorjem na predpisano shemo, s čimer dobimo ekvivalentno napetost utrujanja.

Utrujanje materiala praviloma ni odločilno za običajne prednapete (nerazpokane) betonske mostove, medtem ko je pri železniških in jeklenih mostovih to nujen dokaz in kriterij za življenjsko dobo objekta.

### 5.0 PRIMER

Prikazan je zanimiv primer avtocestnega objekta viadukt Bandera, ki je sestavljen iz dveh viaduktov – dvočkov, pri katerih pa je bil izmerjen popolnoma različen koeficient dinamičnosti. Tako je pri desnem objektu maksimalni izmerjeni koeficient znašal 1,12, pri enakem levem objektu pa kar 1,417, kar je seveda več od računskih 1,15 po DIN 1072. Podan je kratek opis objekta, meritev in preizkusov kakor tudi razlogi za tako obnašanje.

Viadukt Bandera je kontinuirana prednapeta konstrukcija s tipičnim razponom 33,6 m, levi del prek osmih, desni pa prek devetih polj. Enakomerno razporejena teža viadukta in krova znaša  $192 + 43 = 235$  kN/m, kar daje težo tipičnega polja 7896 kN (ca. 800 ton). Iz razporeditve mas in togosti sledi osnovna vertikalna frekvenca 4,35 Hz ( $Tv1 = 0,23$  s,  $Tv2 = .18$  s itd).

### 5.1 Statični preizkus

Pod obtežbo šestih naloženih tovornih vozil po ca. 32 ton skupne teže 1943 kN je povprečni upogib znašal samo 3,4 mm (ca.  $L/10000$ ), kar znaša ca. 90 % računskega pomika. Postopni nanosi obtežbe in postopno odstranjevanje kaže na popolnoma linearno elastično obnašanje. Koeficient učinkovitosti (razmerje med poskusno ter projektirano obremenitvijo) je znašal ca. 0.95.

Viadukt Bandera po togosti, zaradi tehnologije narivne gradnje, ni tipičen objekt, ampak spada v skupino z največjo togostjo. Posamično tovorno vozilo teže 316 kN povzroči pomik komaj 0,6 mm, kar daje togost 526 kN/mm > 400 kN/mm. Ta izredno velika togost že sama po sebi zagotavlja dobro uporabnost objekta, saj so deformacije in amplitude nihanja izredno majhne.

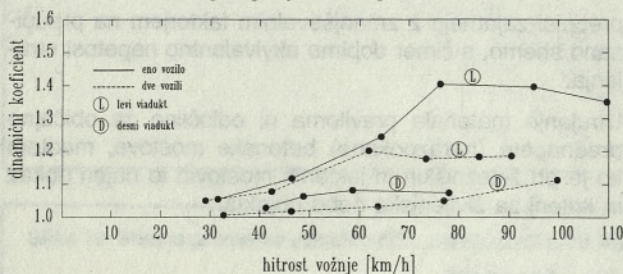
### 5.2 Dinamični preizkus

Izvajal se je z vožnjo enega vozila ter vožnjo dveh vzporednih vozil s spremenljivo hitrostjo od 30–110 km/h. Gibanje dinamičnega koeficienta (povprečna vrednost štirih merskih mest) v odvisnosti od hitrosti in števila vozil je dano grafično na sliki 15. Maksimalni odzivi pa so:

eno vozilo  $P = 316 \text{ kN}$ ,  $U = 0,12$ ,  $F_{\text{max}} = 1,417$ , pri 95 km/h in maks pomiku 0,85 mm  
 dve vozili  $P = 634 \text{ kN}$ ,  $U = 0,23$ ,  $F_{\text{max}} = 1,24$ , pri 62 km/h in maks pomiku 1,35 mm

Količnik  $U$  (učinkovitost) je razmerje preizkusne obtežbe, glede na celotno projektno obtežbo po DIN 1072, ki znaša 2702 kN na posamezno polje.

Diagram gibanja dinamičnega koeficienta



Slika 15: Izmerjeni dinamični koeficient na dveh enakih objektih v odvisnosti od hitrosti vožnje ter števila vozil

Iz časovnega poteka pomikov pri maksimalnem dinamičnem koeficientu (slika 16) na levem viaduktu so razvidne naslednje dinamične karakteristike objekta:

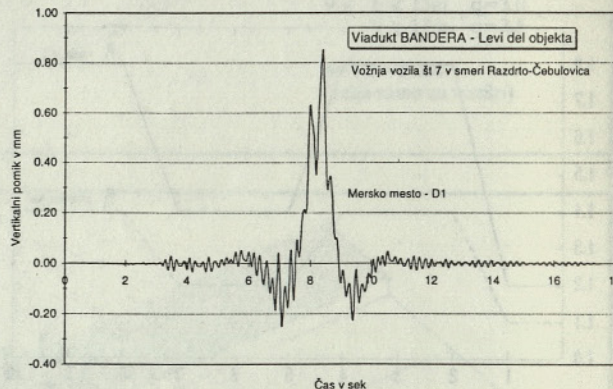
lastna frekvenca:  $f = 4,5 \text{ Hz}$ , (računsko 4,35 Hz)

dušenje: ca. 6–8 %

faktor dinamičnosti: 1,417 (levi objekt), 1,12 (desni objekt)

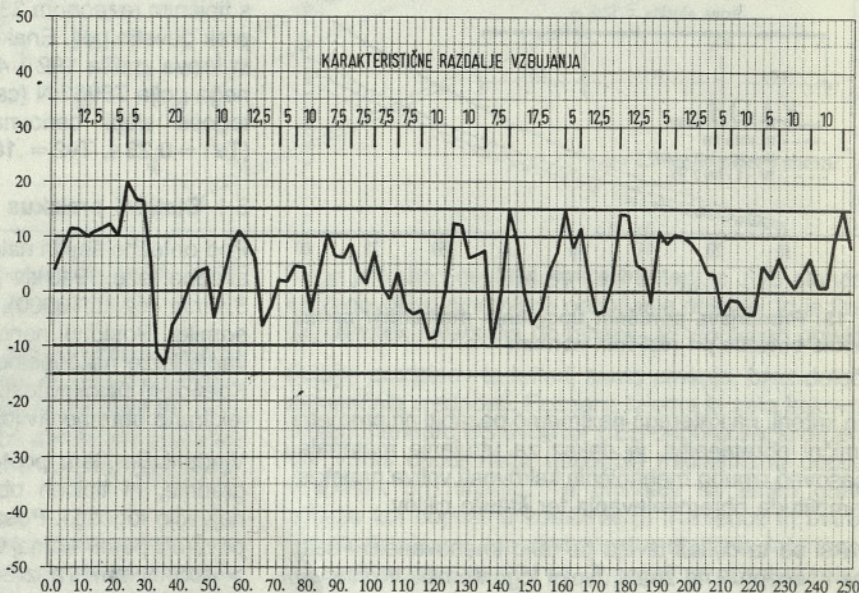
Pri enaki obtežbi in enakih dinamičnih karakteristikah objekta (frekvenca, dušenje) je faktor dinamičnosti na levem objektu dvojčku dajal kar celih 27 odstotkov večji vpliv.

Zakaj? Odgovor na to je v kakovosti vozne površine, ki je bila prav zaradi velikega dinamičnega koeficienta na levem delu posebej analizirana. Meritve so pokazale prostorsko valovanje vozišča, različno po posameznih voznih pasovih, ki je nastalo zaradi tehnične okvare finišeerja. Na posameznih delih se da zaznati enakomerne valove, ki ob primerni hitrosti povzročajo resonančno zburjanje in povečavo vplivov (slika 17).



Slika 17: Meritve asfalta na levem objektu

### LEVA STRAN PREHITEVALNEGA PASU



Slika 16: Odziv konstrukcije pri maksimalno izmerjenem dinamičnem koeficientu

## 6.0 SKLEPI

**6.1 Najzanimivejši parametri**, ki vplivajo na velikost dinamičnega odziva, so:

– **Neravnost vozišča** povečuje odziv objekta, še posebej pri togih konstrukcijah z višjo frekvenco. Pri zelo dolgih razponih  $L > 60$  m z  $f > 2$  Hz se vpliv udarcev in verjetnost resonance zmanjšuje. Pomembna je tudi oblika neravnin, ki so prostorske, zato vsak ponovni prevoz lahko pomeni tudi drugačen faktor. Neravnine na asfaltu se s časom povečujejo, posebej ob dilatacijah, kar pomeni povečanje dinamičnega vpliva pri starih objektih.

– **Hitrost vozila** običajno povečuje dinamični odgovor, vsekakor pa je hitrost v povezavi z obliko (frekvenco) neravnin in lastno frekvenco konstrukcije. Večje hitrosti vzbujajo toge, manjše hitrosti ( $< 40$  km/h) pa podajne konstrukcije.

– Večje število vozil zaradi intereferenčne vplivov praviloma zmanjšuje dinamični faktor. Maksimalni faktor se doseže s posamičnim vozilom, ko je stopnja učinkovitosti ter izkoristka konstrukcije zelo nizka. Polni projektni prometni obtežbi se lahko približamo šele s tesno parkiranimi težkimi vozili pri statičnem preizkusu, ko velja  $\phi = 1,00$ .

– **Karakteristike objekta in vozil** je potrebno obravnavati kot skupni interaktivni sistem. Krajši togi objekti se bolj odzivajo na udarne sile posameznih osi, daljši pa na nihanja z večjim nihajnim časom. Padanje odziva je opaziti šele pri zelo velikih razponih, pri običajnih razponih do 50 m pa je le-ta zelo razpršen.

**6.2 Faktor dinamičnosti** pri obremenilnem testu ne more biti edini kriterij dinamične ustreznosti cestnega objekta, posebej pa ne primerjava s koeficienti iz regulative (npr.: DIN 1072). Zaradi tega je potrebno razširiti število preiskanih in analiziranih vhodno-izhodnih parametrov. Pri preiskavah je potrebno eksplicitno zabeležiti naslednje meritve:

- karakteristike konstrukcije:
  - karakteristično togost
  - lastno frekvenco
  - logaritemski dekrement dušenja
- karakteristike vozila (poleg teže vozila še togost, lastno frekvenco in dušenje)
- posnetek ravnosti vozišča v liniji vožnje
- celotni časovni odziv pri različnih hitrostih vožnje.

**6.3 Kriterij za dinamično ustreznost objekta** je primerjava izmerjenih karakteristik z računskimi ali pričakovanimi

za preiskovani objekt, in sicer:

- izmerjena frekvenca se primerja z izračunom, kar nam kaže na ustrezne togosti in pravilni računski model
- enako velja za krakteristično togost, pri čemer objektov z majhno togostjo  $k < 100$  kN/mm ni priporočljivo projektirati
- dušenje mora ustrezati znanim vrednostim za podobne objekte, odstopanje se mora pojasniti
- dinamični koeficient, izmerjen pod direktnim vplivom posameznega vozila, ki presega vrednosti
  - $\phi = 1,3$  za  $L \leq 50$  m
  - $\phi = 1,2$  za  $L \geq 60$  m,
 je potrebno dodatno analizirati in obrazložiti ter po potrebi ukrepati (npr. povečati ravnost vozišča ali spremeniti togosti konstrukcije).
- maksimalni pospeški pri nihanju morajo biti manjši od kriterija nelagodja.

## 6.4 Potrebno bi bilo nadaljevati delo na naslednjih področjih:

- Statistično bi bilo potrebno obdelati domačo bazo podatkov o obremenilnih dinamičnih preizkusih (največja je vsekakor na ZAG Ljubljana).
- Dinamične meritve je potrebno izvajati tudi in obstoječih starih objektih, predvsem pred in po večjih ojačitvenih ali sanacijskih delih. Zanimiva je tudi meritev ravnosti vozišča pred in po sanaciji in vpliv spremembe na dinamiko. Povečanje lastne frekvence in sprememba oblik nihanja naravnost kažejo na dejanske učinkovite spremembe v nosilnosti ojačene konstrukcije.
- Dobro bi se bilo lotiti tudi izvajanja drugačnih dinamičnih preiskav, kot je na primer spektralna analiza resonančnih frekvenc. To je z ustreznim vibratorjem (brez vozil) lahko relativno poceni nedestruktivna preiskava, ki pove mnogo tudi o statični ustreznosti in nosilnosti objekta.
- Razmisliti je potrebno o možnosti vpeljave trajnega monitoringa s pomočjo optičnih kablov, kar pomeni neprestano spremljanje dejanskega obnašanja (deformacije, statične in dinamične obremenitve, korozija materiala itd.) poljubnega števila objektov na enem vzdrževalnem centru. Poskusno obratovanje takega sistema je smiselno vpeljati pri zahtevnih objektih, ki vpeljujejo nove tehnologije (npr. zunanji kabli) z namenom, da se pridobi čimveč povratnih informacij. Drugo pomembno področje trajnega monitoringa pa je pri poškodovanih in dotrajanih objektih, kjer to lahko deluje kot zgodnji opozorilni sistem za funkcionalnost ali celo varnost objekta.

## L I T E R A T U R A

1. JUS U.M1.046 Ispitivanje mostova probnim opterečenjem, 1984
2. Privremeni tehnički propisi PTP 5, Opterečenje mostova, 1949
3. DIN 1072 (izdaja dec. 1985), DIN 1075

4. SIA 160 (izdaja 1970, osnutek 1985 in izdaja 1988)
5. Eurocode 1; part 3, draft junij 1994
6. British Standard BS 5400, part 1–10
7. R. Cantieni: Dynamic Load Testing of Highway Bridges, IABSE proceedings Pž-75/84
8. K. G. Schutz: Schwingbeiwerte für Strassenbrücken, Stahlbau 1989
9. M. Slavik: Nochmals Schwing beiwerte bei Starsenbrücken, Bauingenieur 1993
10. D. Jurišič: Dinamika cestnih mostov (na primeru mostu čez Kokro), FAGG 1986, rokopis
11. F. Saje, J. Lopatič: Poročilo št. M1/95 o obremenilni preizkušnji desnega dela viadukta Bandera na AC Razdrto–Čebulovica, FAGG, 1995
12. F. Saje, J. Lopatič: Poročilo št. M3/95 o obremenilni prizkušnji levega dela viadukta Bandera na AC Razdrto–Čebulovica, FAGG, 1995
13. V. Markelj: Viadukta na AC Razdrto–Čebulovica, Zbornik 16. zbor. konstr. Slovenija, Bled 1994
14. C. Menn: Stahlbetonbrücken, Springer Verlag 1990
15. B. Zakič: Neke dinamičke karakteristike mostova od prednapregnutog betona, Izgradnja 6/1980
16. J. A. Calgaro, G. Sedlacek: Traffic Loads on Road Bridges, IABSE Conference, Structural Eurocodes, Davos 1992
17. A. Tesar, M. Držik: Resonanzzustände von Brücken-konstruktionen . . . , Bautechnik 7/1994
18. M. Herzog: Bemessung von Brücken auf Ermüdung, Bautechnik 7/1994
19. Darmstadter Massivbau-Seminar: Betonbrücken – Bemessung nach Eurocode 2, Teil 2, DBV, Darmstadt 1994
20. I. L. Curtis in drugi: Long term monitoring of concrete bridges, Bridge assessment, management and design, Cardiff, U. K., 1994
21. V. Markelj: Obremenilni preizkus cestnih mostov in koeficient dinamičnosti, Zbornik 17. zborovanja gradbenih konstruktorjev, Bled 1995, v pripravi

# Alfa-CAD – GRAFIČNA NADGRADNJA RAČUNALNIŠKEGA PROGRAMA FRAME2

## Alfa-CAD graphical upgrade of the computer program FRAME2

UDK 624.041:519.68:76

SREČKO FRIDL

### POVZETEK

V članku je predstavljena uporaba programskega paketa **AlfaCAD**, ki omogoča interaktivno grafično vnašanje vhodnih podatkov (vozlišča, elemente, podpore, obtežbo), potrebnih za opis ravninske konstrukcije (predprocesor) in grafičen prikaz in analiza rezultatov statične analize na zaslonu ter izris vseh podatkov na tiskalnik ali risalnik (po procesiranju). Za statično analizo je uporabljen programski paket **FRAME2**.

### SUMMARY

In the article we describe the use of computer program **AlfaCAD**, which enables interactive graphical input of input data (such as nodes, members, supports, releases, loadings), for description of plain frames, and graphical output results of static analysis on screen, printer or plotter. For static analysis we use computer program **FRAME2** (alpha numerical pre-processor and post-processor for static analysis of plain frames using the finite elements method).

### 1.0 UVOD

Programski paket **AlfaCAD** [1] je namenjen interaktivnemu načinu dela, v katerem je možno ravninsko konstrukcijo v celoti določiti, jo rešiti in rezultate narisati na zaslon in na papir. Konstrukcijo in vse pripadajoče skupine podatkov (vozlišča, elemente, podpore, obtežbo, notranje statične količine) imamo grafično predstavljene na zaslonu v prosojnicah (plasteh). Na osnovni prosojnici imamo vedno žični model konstrukcije, na ostalih pa po potrebi še koordinate vozlišč, številke vozlišč, številke elementov in tipov, podpore, sprostitve elementov, obtežbo ter notranje statične količine po obtežnih primerih. Risbo lahko izrišemo na tiskalnik ali na risalnik. Za statičen izračun uporabljamo programski paket **FRAME2** [2]. V **AlfaCADu** podajamo ukaze izključno z miško prek ustreznih vertikalnih menujev in preko posebnih menujev s katerimi lahko

podajamo večje skupine podatkov. Ukaz lahko tudi vtipkamo. Tipkovnica je namenjena predvsem vnosu numeričnih vrednosti. V splošnem je način dela podoben kot pri programu **AutoCAD** (ukazi REDRAW, ZOOM, SNAP, LAYER, SAVE, READ, PLOT, PRPLOT, GRID, LIMITS, END in QUIT).

### 1.1 Strojna oprema

Programski paket **AlfaCAD** lahko izvajamo na IBM PC 386/486 kompatibilnih računalnikih, z matematičnim koprocesorjem, grafično kartico VGA, EGA, Hercules in miško. Za izris risbe potrebujemo EPSON ali HP Laser Jet kompatibilen tiskalnik ali HPGL kompatibilen risalnik.

V nadaljevanju članka bomo predstavili uporabo programa **AlfaCAD** na konkretnem primeru modeliranja dvoetažne skeletne konstrukcije.

#### AVTOR:

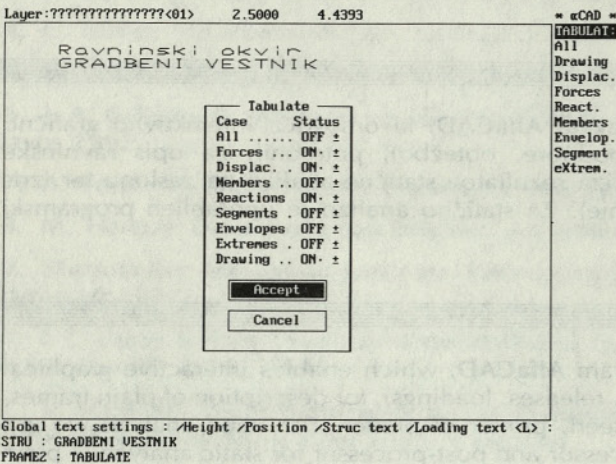
Srečko Fridl, dipl. inž. gradb., Univerza v Mariboru Fakulteta za gradbeništvo, 2000 Maribor, Smetanova 17

## 2.0 PREDPROCESOR

### 2.1 Podajanje osnovnih podatkov o konstrukciji

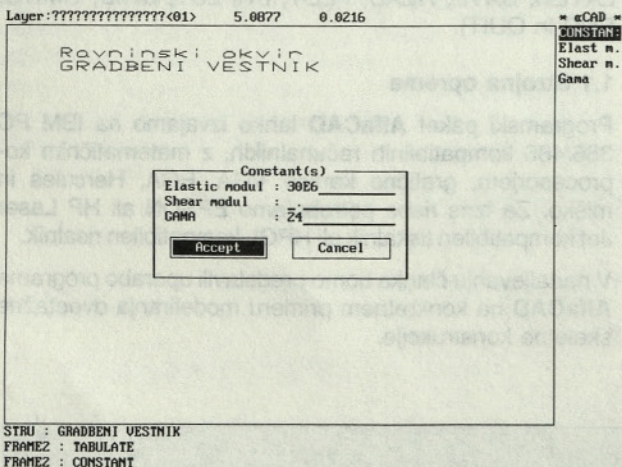
Z ukazom **STRUCTURE** podajamo podatke, ki so pomembni za konstrukcijo v celoti in za vse elemente konstrukcije. Podamo lahko naslov konstrukcije in naslov tekočega obtežnega primera. Naslov naše konstrukcije bo: »GRADBENI VESTNIK«.

Ukaz **TABULATE** definira, katere opcije bo izpisal numerični procesor v datoteko. Izpišemo lahko notranje sile, pomike vozlišč, reakcije, ovojnice in ekstreme notranjih sil ter notranje sile po odsekih. Mi bomo izpisali pomike, notranje sile, reakcije ter podatke za grafični poprocesor (slika 1).



Slika 1: Menu za izbiro opcij izpisa

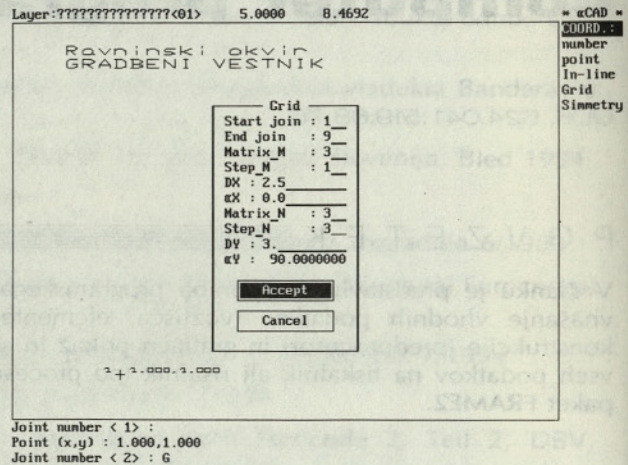
Z ukazom **CONSTANTS** podamo vrednost elastičnega modula, strižnega modula ter specifično težo, ki veljajo globalno. Za elastičen modul betona podamo, o  $30 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$  in za specifično težo betona pa  $24 \text{ kN/m}^3$  (slika 2).



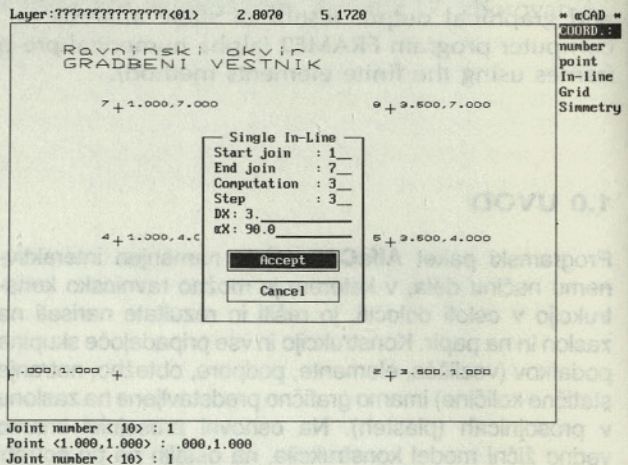
Slika 2: Menu za podajanje konstant

### 2.2 Generiranje vozlišč in podpor ter sprostitev vozlišč

Z ukazom **JOINCOOR** definiramo koordinate vozlišč. Vozlišča lahko podajamo posamično, v nizu ali v mreži. Upoštevamo lahko tudi simetrijo. Za prvo vozlišče podamo 1.0, 1.0, ostala vozlišča podamo s pomočjo menija za generiranje mreže vozlišč (slika 3). Vertikalo točk 1, 4 in 7 bomo pomaknili za 1,0 m v levo z menujem za generiranje niza vozlišč (slika 4).



Slika 3: Generiranje mreže vozlišč

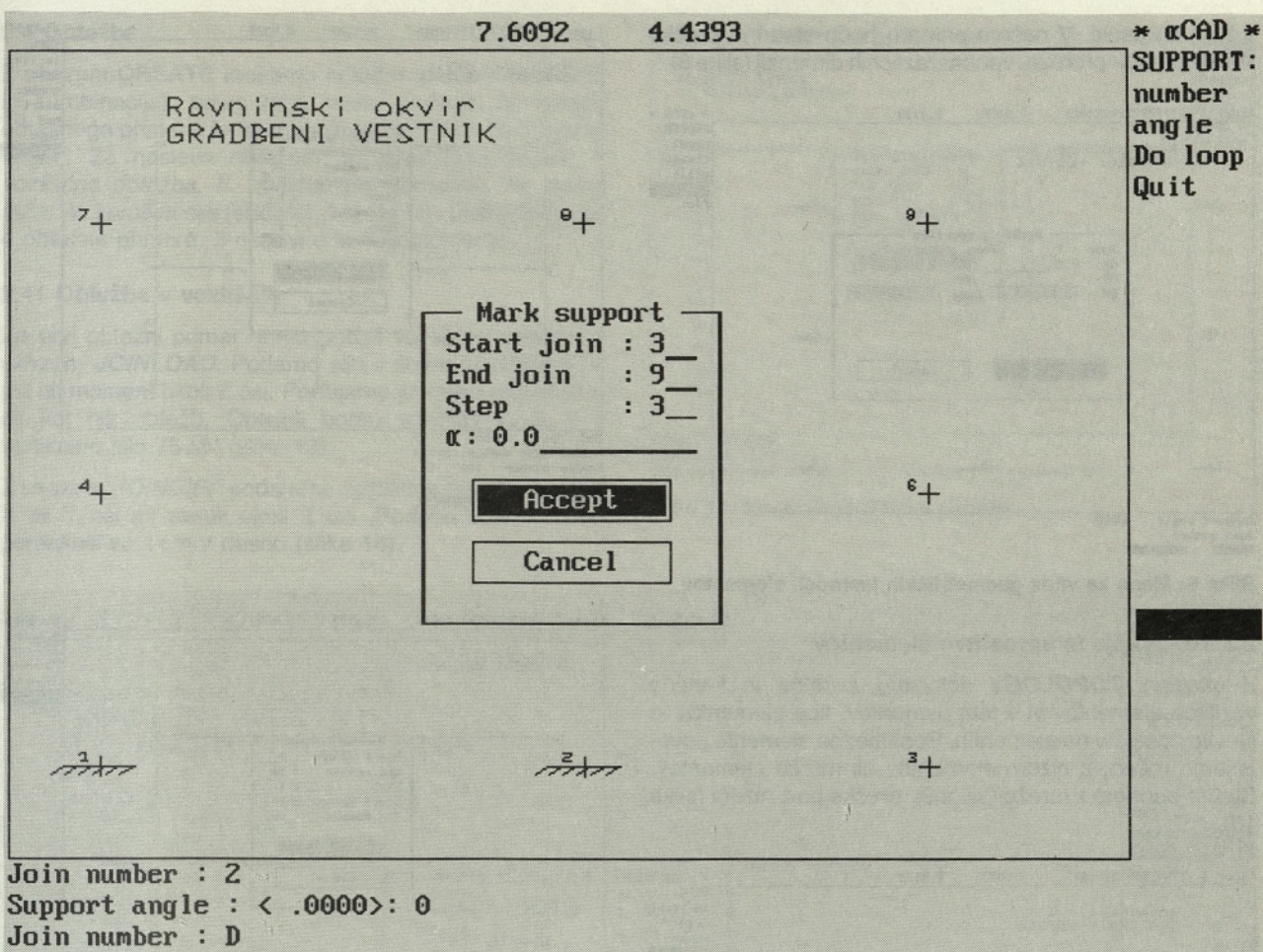


Slika 4: Menu za vnos niza vozlišč

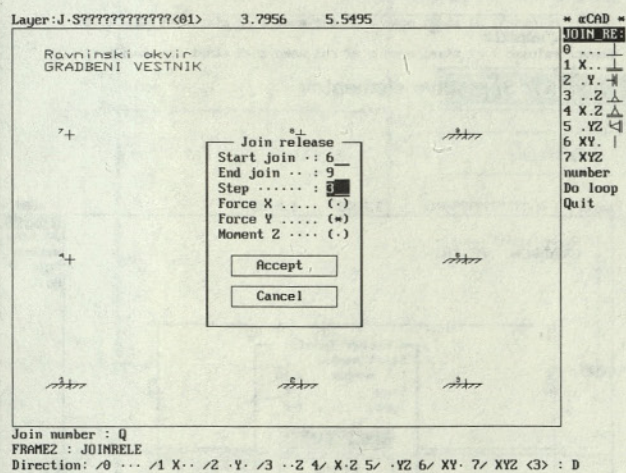
Z ukazom **SUPPORT** označimo tista vozlišča, ki bodo podprta. Vozlišča označujemo posamično ali v nizu (slika 5). Označili bomo vozlišča 1, 2, 3, 6 in 9.

Z ukazom **JOINRELE** sprostimo podpore v smereh globalnega koordinatnega sistema. Sprostimo lahko silo v smeri X, Y in zasuk v smeri Z. Sproščamo posamično ali niz podpor z menujem (slika 6). Podpori 6 in 9 bomo dovolili vertikalni pomik.





Slika 5: Menu za označevanje vozlišč

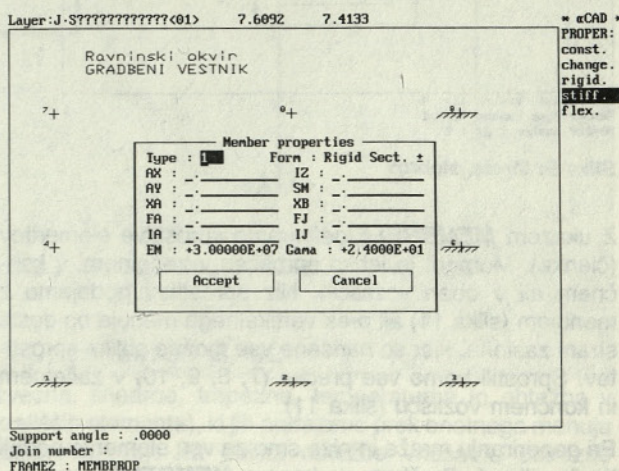


Slika 6: Menu za sproščanje podpor

## 2.2 Določevanje geometrijskih karakteristik elementov

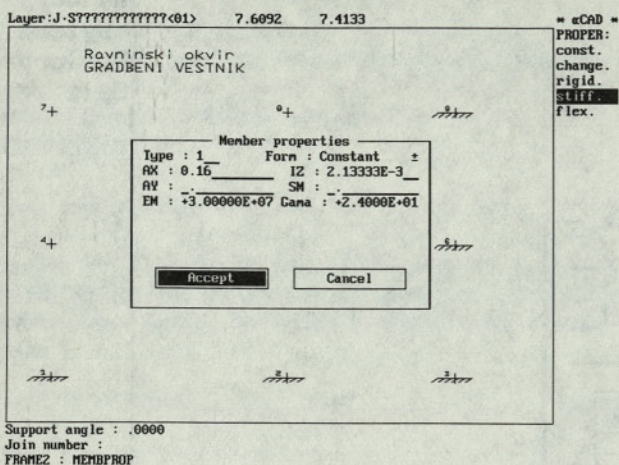
Z ukazom **MEMBPROP** definiramo lastnosti elementov.

**FRAME2** loči 4 oblike tipov elementov (elemente konstantnega prereza, elemente spremenljivega prereza, elemente s togimi odseki in elemente, za katere je podana togostna ali podajnostna matrika končnega vozlišča). Za določen tip se v meniju pojavijo ustrezne lastnosti, npr. na sliki 7 je prikazan menu, s katerim podajamo elemente



Slika 7: Menu za vnos podatkov za element s togimi odseki

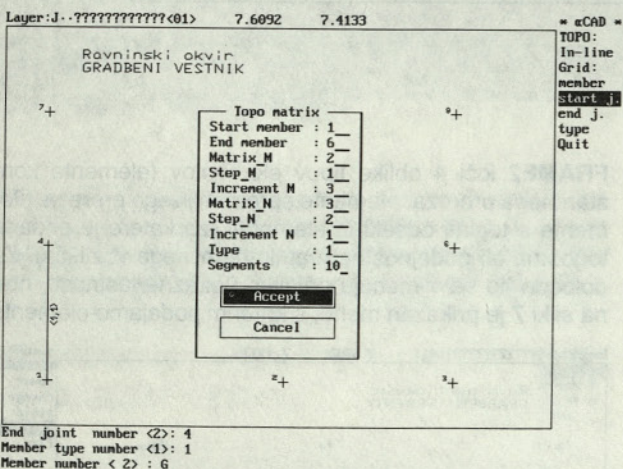
s togimi odseki. V našem primeru bodo stebri in prečke konstantnega prereza, vendar različnih dimenzij (slika 8).



Slika 8: Menu za vnos geometrijskih lastnosti elementov

### 2.3 Topologija in sprostitve elementov

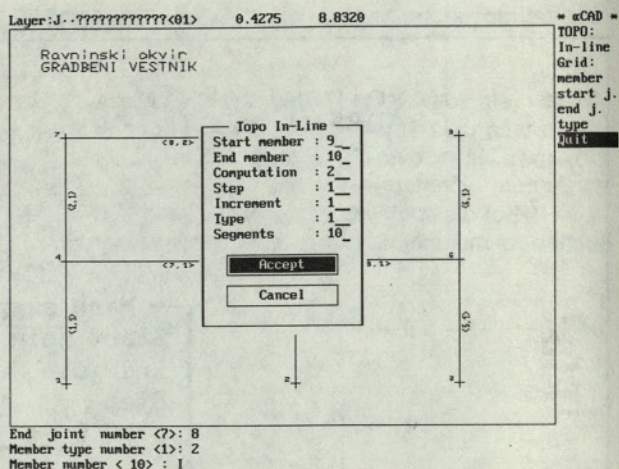
Z ukazom **TOPOLOGY** določimo začetna in končna vozlišča elementov in s tem usmeritev, tipe elementov in število odsekov na elementih. Posamezne elemente povezuje ročno, z nizom elementov ali mrežo elementov. Stebre podamo z mrežo (slika 9), prečke pa z nizom (slika 10).



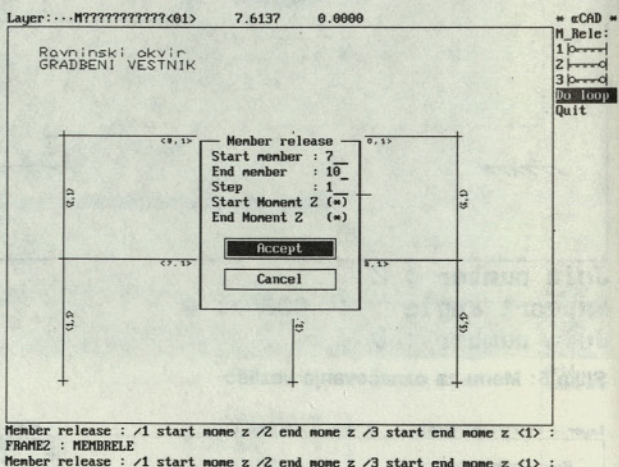
Slika 9: Mreža stebrov

Z ukazom **MEMBRELE** definiramo sprostitve elementov (členke). Moment je lahko sproščen v začetnem, v končnem ali v obeh vozliščih. Niz sprostitvev podajamo z menujem (slika 11) ali prek verticalnega menuja ob desni strani zaslona, kjer so narisane vse možne oblike sprostitvev. Sprostili bomo vse prečke (7, 8, 9, 10) v začetnem in končnem vozlišču (slika 11).

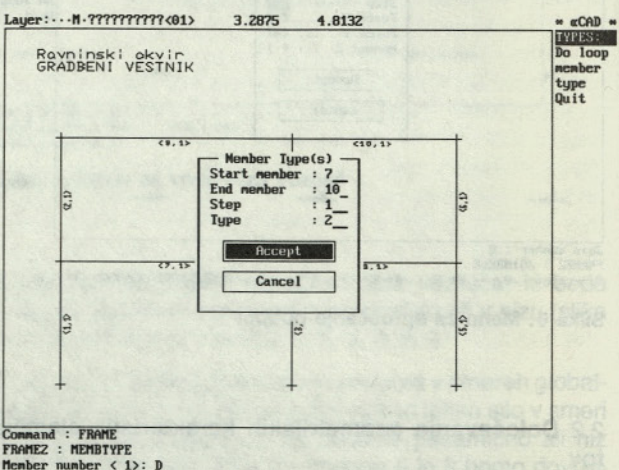
Pri generiranju mreže in niza smo za vse elemente podali tip številka 1. Prečkam z ukazom **MEMBTYPE** spremenimo številko tipa v 2 (slika 12).



Slika 10: Niz prečk



Slika 11: Sprostitve elementov



Slika 12: Menu za spremembo tipov elementa

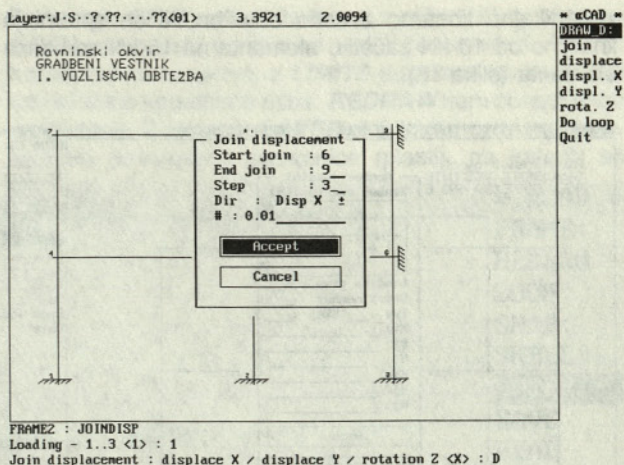
## 2.4 Obtežba

Z ukazom **CREATE** kreiramo obtežne primere (osnovne in kombinacije), poleg tega lahko podamo še naslov obtežnega primera, ki se izpisuje v glavi risbe (levi zgornji vogal). Za naslove obtežnih primerov smo podali: *I. vozliščna obtežba*, *II. obtežba po elementih*, *III. lastna teža*, *IV. kombinacije* (slika 13, 14, 15, 16). Definirali bomo 4 obtežne primere: 3 osnovne in 1 kombinacijo.

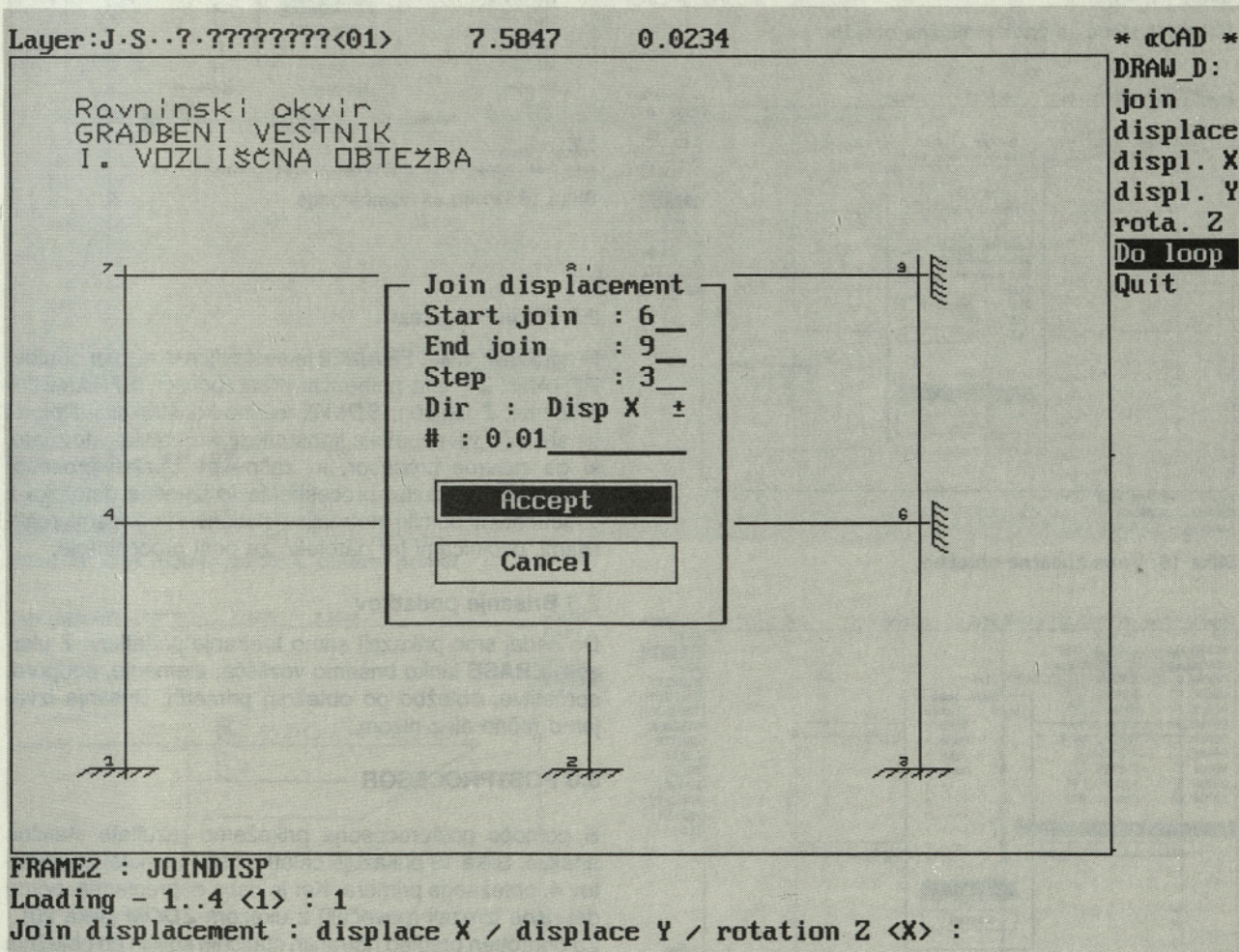
### 2.41 Obtežba v vozliščih

Za prvi obtežni primer bomo podali vozliščno obtežbo z ukazom **JOINLOAD**. Podamo silo v smeri globalne X, Y osi ali moment okoli Z osi. Podajamo jih lahko posamično ali kot niz obtežb. Obtežili bomo vozlišča 7, 8, 9 z vertikalno silo 75 kN (slika 13).

Z ukazom **JOINDISP** podajamo vozliščne pomike v smeri X ali Y osi ali zasuk okoli Z osi. Podpori 6 in 9 bomo pomaknili za 1 cm v desno (slika 14).



Slika 14: Menu za vozliščne pomike



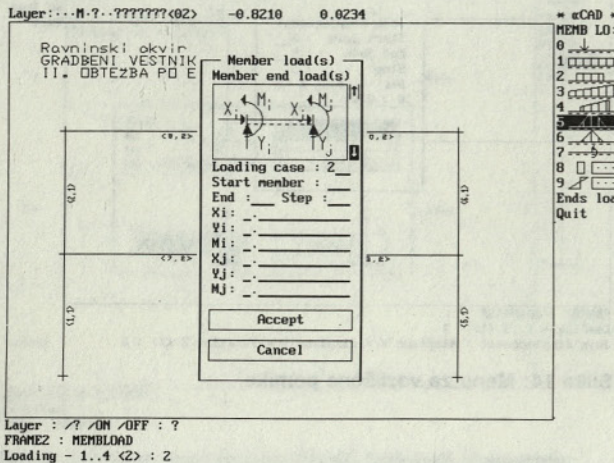
Slika 13: Podajanje vozliščne obtežbe

### 2.42 Obtežba po elementih

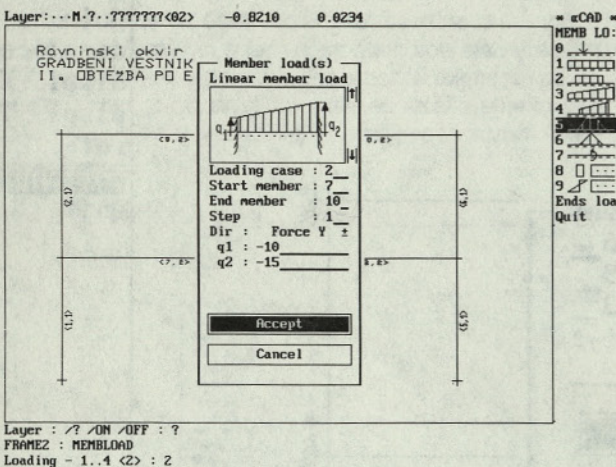
FRAME2 pozna 6 osnovnih oblik obtežbe (točkovna,

zvezna, linearna, trapezna, temperaturna in obtežba v krajiščih elementa), ki jih podajamo prek enotnega menija (slika 15, 16). Za obliko obtežbe vnašamo ustrezne vrednosti, npr. velikost in smer delovanja. V drugem obtežnem primeru bomo prečke 7, 8, 9 in 10 obremenili

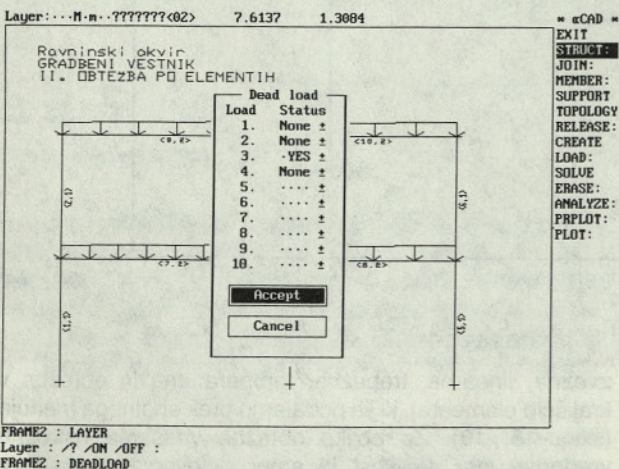
z vertikalno linearno zvezno obtežbo, ki se spreminja linearno od 10 kN začetku elementa na 15 kN za konca elementa (slika 16).



Slika 15: Menu za vnos krajiščne obtežbe



Slika 16: Vnos linearne obtežbe



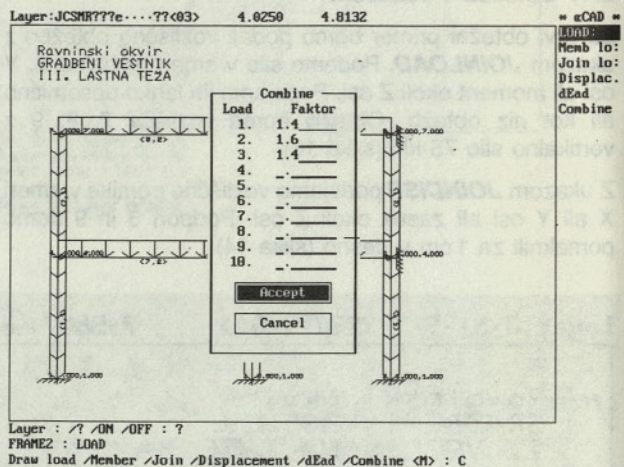
Slika 17: Menu za lastno težo

### 2.43 Lastna teža

V tretjem obtežnem primeru bomo definirali lastno težo (slika 17).

### 2.44 Kombinacije

V četrtem obtežnem primeru bomo kombinirali I., II. in III. osnovni obtežni primer s faktorji 1,4 za I., 1,6 za II. in 1,4 III. obtežni primer (slika 18).



Slika 18: Menu za kombinacije

### 2.5 Zaključni ukazi

Programski paket **FRAME2** je sestavljen iz dveh modulov: **PFRAME 2** – alfa numerični predprocesor, **SFRAME2** – procesor. Z ukazom **SOLVE** rešimo konstrukcijo. Najprej se shranijo vsi podatki o konstrukciji v datoteko v formatu, ki ga razume procesor, in začne se izvajati procesor **SFRAME2**. Rezultat procesiranja je izhodna datoteka z izračunanimi pomiki, notranjimi statičnimi količinami, reakcijami, ovojnicami ter datoteko za post procesiranje.

### 2.6 Brisanje podatkov

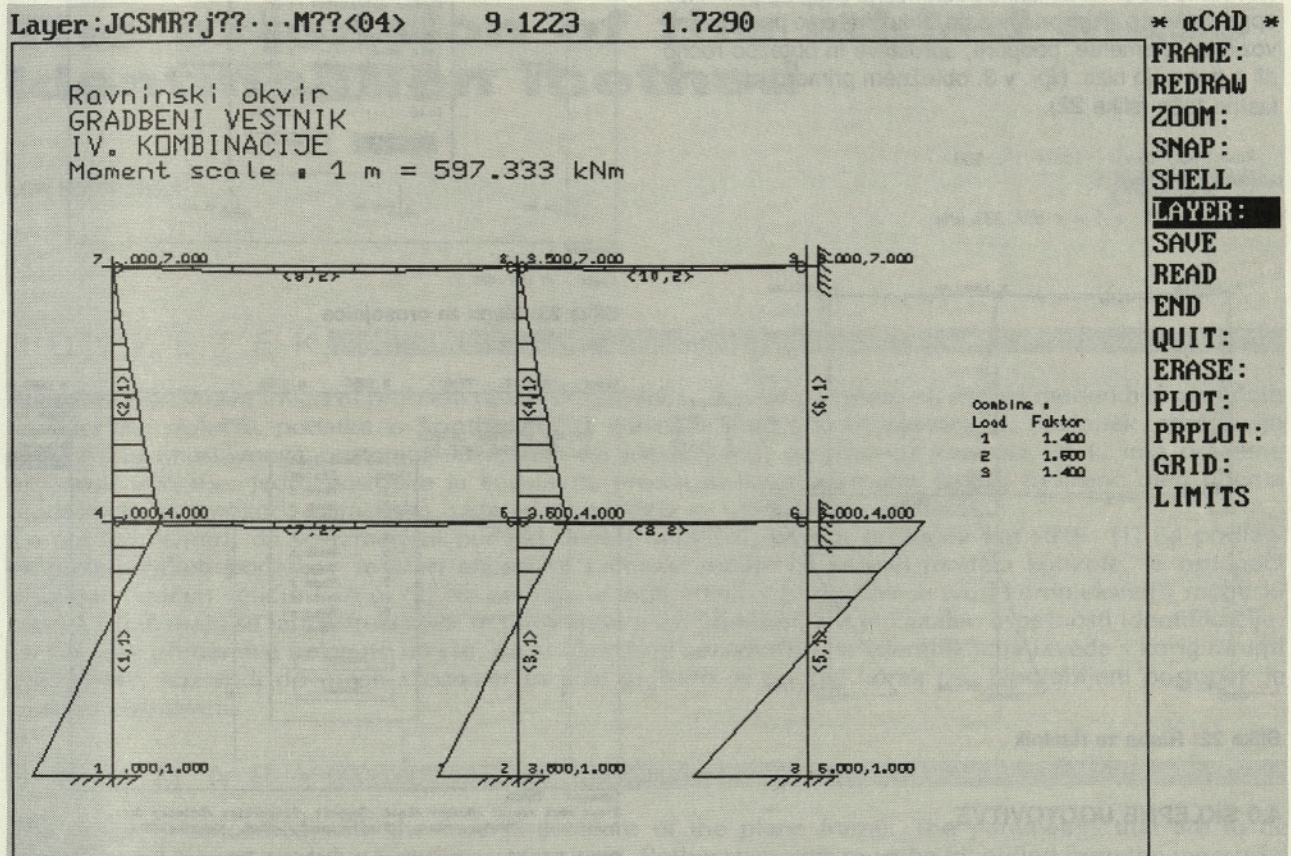
Do sedaj smo prikazali samo kreiranje podatkov. Z ukazom **ERASE** lahko brišemo vozlišča, elemente, podpore, sprostivte, obtežbo po obtežnih primerih. Brisanje izvaja ročno ali z nizom.

### 3.0 POSTPROCESOR

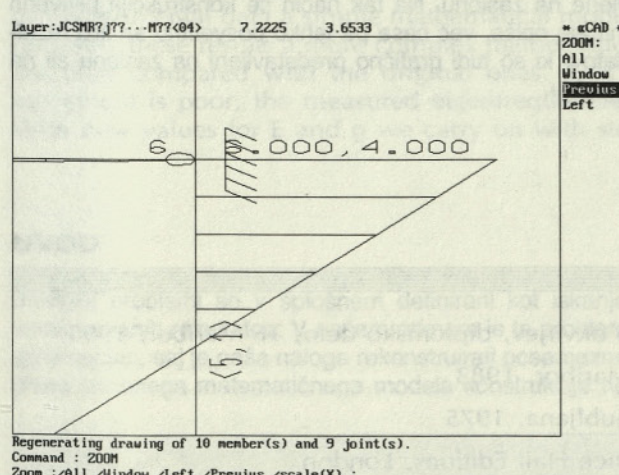
S pomočjo postprocesorja prikažemo rezultate statične analize. Slika 19 prikazuje celotno risbo za potek momentov 4. obtežnega primera. Ker je risba nepregledna, bomo del risbe izrezali (povečali) z ukazom **ZOOM** (slika 20). Za podroben pregled notranjih statičnih količin po obtežnih primerih in po elementih uporabimo ukaz **ANALYZE**. Slika 21 prikazuje potek in numerične vrednosti za moment 4. obtežnega primera na stebru 3. S funkcijskimi tipkami lahko preklaplamo med posameznimi notranjimi statičnimi količinami in med obtežnimi primeri.

Z ukazom **PRPLOT** in **PLOT** izrisujemo risbe neposredno na tiskalnik, risalnik ali v datoteko, ki jo lahko kasneje vključimo v besedilo (slika 22). Pri tem lahko podamo orientacijo risbe na papirju (pokončna ali ležeča) ter merilo risbe (konstrukcije) in merilo notranjih statičnih količin.

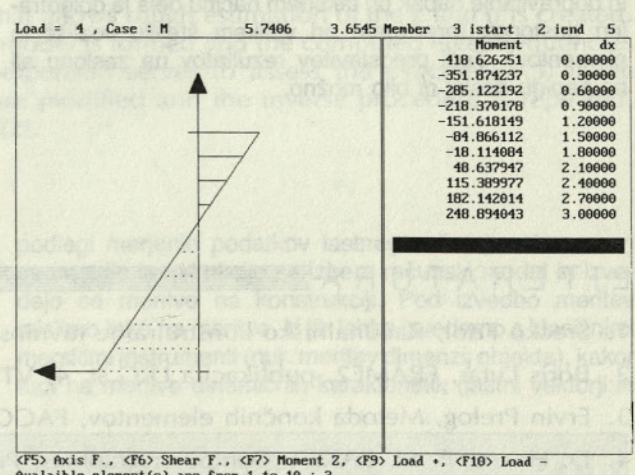
Z ukazom **GRID** na risbi izrišemo mrežo točk, z ukazom **SNAP** se po risbi pomikamo z določenim vertikalnim in horizontalnim korakom, z **LIMITS** določimo minimalne in maksimalne koordinate risbe, **REDRAW** nam obnovi risbo na zaslonu. Z ukazom **LAYER** aktiviramo oziroma deaktiviramo posamezne prosojnice (plasti), na katerih so



Slika 19: Izris momentov za 4. obtežni primer



Slika 20: Izrez (ZOOM) vozlišča

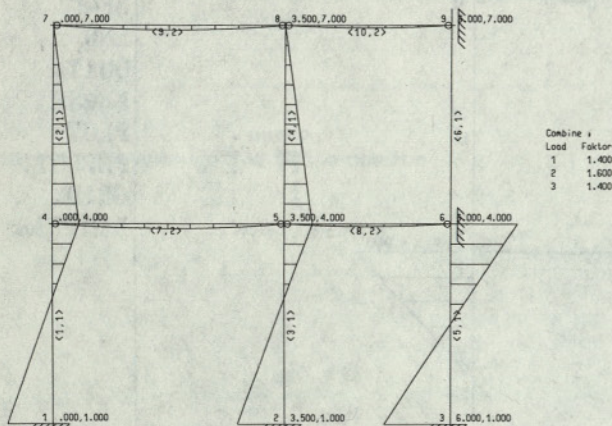


Slika 21: Podrobna analiza momentov

podatki grafično predstavljeni. Na sliki 21 bomo aktivirali prosojnicu z momenti za I. obtežni primer. Ukaz **READ** bere podatke o konstrukciji z diska, **SAVE** shrani podatke v datoteko na disk, **SHELL** nas začasno prestavi na nivo operacijskega sistema, z **END** in **QUIT** končamo delo.

Kot smo že omenili, lahko posamezne skupine podatkov sproti brišemo. Tudi pri brisanju lahko brišemo posamezna vozlišča, elemente, podpore, sprostitev in obtežbo ročno ali s pomočjo niza. Npr. v 3. obtežnem primeru izbrišemo lastno težo (slika 22).

Ravninski okvir, Scale 1 : 100  
 GRADBENI VESTNIK  
 IV. KOMBINACIJE  
 Moment scale : 1 m = 597.333 kNm



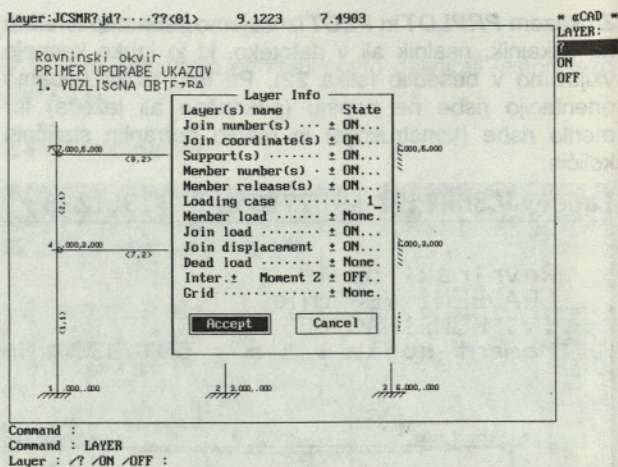
Slika 22: Risba za risalnik

#### 4.0 SKLEPNE UGOTOVITVE

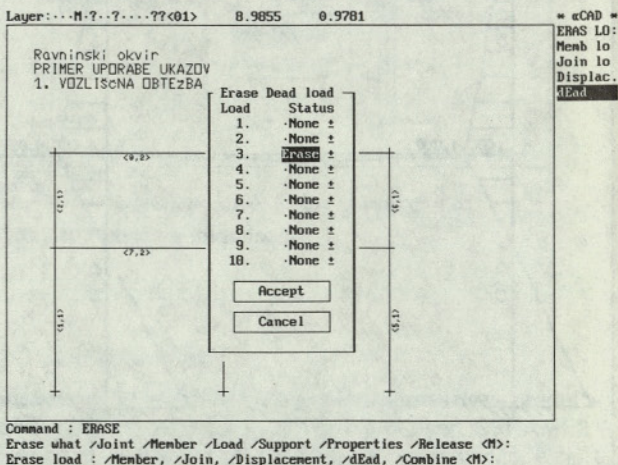
Za pripravo podatkov za program **FRAME2** je bilo dosedaj potrebno uporabljati urejevalnik besedil, v katerem smo z ukazi opisali konstrukcijo. Alfonumerični predprocesor je preveril, ali smo opisali konstrukcijo sintaktično pravilno, procesor pa je izračunal in izpisal rezultate. Ugotavljanje in odpravljanje napak pri takšnem načinu dela je dolgotrajen postopek (predvsem pri velikem številu vozlišč in elementov). Tudi predstavitev rezultatov na zaslonu ali na papirju doslej ni bilo možno.

#### LITERATURA

1. Srečko Fridl, Računalniško konstruiranje ravninskih okvirjev, diplomsko delo, TF Maribor, 1993
2. Boris Lutar, FRAME2, publikacija LRG št. 4, VTŠ Maribor, 1983
3. Ervin Prelog, Metoda končnih elementov, FAGG Ljubljana, 1975
4. D. Hearn, P. M. BAKER, Computer graphics, Prentice Hall Editions, London
5. Andrija Radovič, Kvantna grafika PC – računara, Privredni pregled, Beograd



Slika 23: Menu za prosojnice



Slika 24: Menu za brisanje lastne teže

V predstavljenem programu **AlfaCAD**, ki omogoča grafično modeliranje ravninskih konstrukcij, je možnost napak majhna, ker imamo vse podatke vedno grafično predstavljene na zaslonu. Na tak način se konstrukcija bistveno hitreje opiše, več časa pa lahko posvetimo analizi rezultatov, ki so tudi grafično predstavljeni na zaslonu ali na papirju.

# DOPOLNITEV IDENTIFIKACIJSKE METODE Z DODATNO MASO

## The extension of the added mass identification method

UDK 624.09:539.3

MATJAŽ SKRINAR

### POVZETEK

Prispevek obravnava inverzni problem ravninskega okvira, kjer je potrebno na osnovi merjenih dinamičnih karakteristik določiti podatke o konstrukciji – elastični modul  $E$  in gostoto  $\rho$ . Postopek predstavlja nadgradnjo enostavnega postopka, ki temelji na identifikaciji parametrov konzole, in ki ima omejene možnosti uporabe. Jedro postopka je enostavna predpostavka o razmerju lastnih frekvenc med obema modeloma, ki omogoča iteracijsko nadgradnjo modela in izboljšanje rezultatov.

Če predpostavimo, da so izmerjeni podatki dovolj natančni, poteka postopek kot sledi: (1) na podlagi eksperimentalnih podatkov se tvori enostavni računski model na osnovi modela konzole, ki omogoči približen izračun veličin  $E$  in  $\rho$ . (2) Na podlagi identificiranih parametrov se tvori kompleksnejši računski model, izračunajo se lastne frekvence in primerjajo z izmerjenimi, kar je kazalec uspešnosti identifikacije. (3) Če se iz primerjave frekvenc izkaže, da je ujemanje nezadostno, se identifikacija izvede s korigiranimi vrednostmi, kar vodi do novih vrednosti za  $E$  in  $\rho$ . Nato se ponovi korak (2). Uporabljeni postopek je izredno enostaven.

### SUMMARY

The paper is concerned with the inverse problem of the plane frame. The parameters that are to be identified are Young modulus  $E$  and mass density  $\rho$ . Both parameters must be identified from the measured dynamic characteristics of the structure. The procedure represents the upgrade of the known technique for cantilever beams which is of limited usage. The essence of the procedure is based on the simple relation between the natural frequencies of the two models. This relation allows the upgrade of the model withing the iteration procedure.

Based on the assumption that the measured data are correct, we proceed with following steps: (1) from the experimental data a simple mathematical model that allows rough estimation of the  $E$  and  $\rho$  is created. (2) Using these results a more complex mathematical model is formed and the computed eigenfrequencies are then compared with the original ones. This comparison serves to assess the exactness. (3) If the agreement is poor, the measured eigenfrequencies are modified and the inverse procedure is repeated. With new values for  $E$  and  $\rho$  we carry on with step (2).

### UVOD

Inverzni problemi so v splošnem definirani kot iskanje vzroka znanih rezultatov. V našem primeru je ta problem spremenjen, saj je naša naloga rekonstruirati posamezne člene izbranega matematičnega modela konstrukcije na

podlagi merjenih podatkov lastnega nihanja. Na osnovi geometrije konstrukcije se izbere računski model in izvedejo se meritve na konstrukciji. Pod izvedbo meritev mislimo tako na meritve, ki jih lahko izvedemo s klasičnimi merskimi instrumenti (npr. meritev dimenzij objekta), kakor tudi na meritve dinamičnih karakteristik (lastni vektorji in

AVTOR:

mag. Matjaž Skrinar, Fakulteta za gradbeništvo, Maribor

predvsem lastne frekvence). Pri izbiri računskega modela je največkrat potrebno izbirati med enostavnim (običajno zato manj natančnim) in kompleksnim (natančnejšim) modelom. Manj natančen model zahteva za opis manjše število podatkov in ga je tako pravilo lažje identificirati. Izbira matematičnega modela je pogojena v veliki meri z mersko opremo, ki je na razpolago. Trend, ki ga je moč opaziti na področju inverznih problemov, je trend nadgradnje modela, to je sprotno popravljanje in dopolnjevanje modela, ko je del karakteristik vsaj grobo identificiran. Inverzne metode so pomembne predvsem zaradi pridobitve podatkov o morebitnih nepravilnosti v materialu ali konstrukciji (npr. razpoke ali slabo izvedeni stiki – detajli).

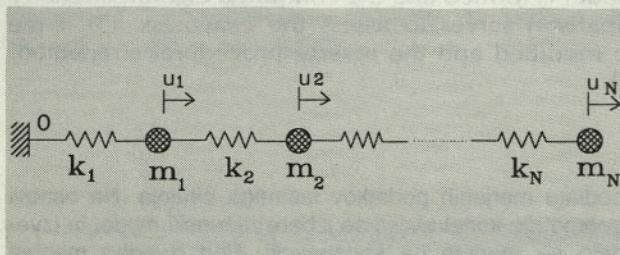
Zastavljeni cilj je torej identifikacija konstrukcije na podlagi identifikacije posameznih sklopov (oziroma elementov), ki tvorijo celotno konstrukcijo. Prvi del raziskav je zato posvečen identifikaciji posameznih enostavnih elementov.

Gladwell [2] predstavlja različne identifikacijske modele, kjer variira robne pogoje (pogoje podpiranja) na koncu sistema, in nato na osnovi lastnih frekvenc obeh sistemov (osnovnega in spremenjenega) rekonstruira člene masne in togostne matrike za izbrani računski model.

V prispevku je za razliko od prej omenjenega pristopa izvedena majhna in kontrolirana sprememba masnih lastnosti na prostem koncu konstrukcije, pri rekonstruiranju se uporablja samo omejeno število lastnih frekvenc. Tak pristop je v inženirski praksi mnogo lažje izvedljiv. Rezultati identifikacije za nosilce [6] so spodbudili nadaljnje študije za konzolne konstrukcije [7].

## IDENTIFIKACIJSKA METODA Z DODATNO MASO

Identifikacijska metoda z dodatno maso, predstavljena v [7], je v bistvu analogija identifikacije s spremembo robnega pogoja vpetja, predstavljene v [2]. Uporabna je za vzdolžno nihanje konzolnih nosilcev, ki jih diskretiziramo z zadostnim številom koncentriranih mas (slika 1). Za uspešno izvedbo identifikacije potrebujemo lastne frekvence osnovnega in modificiranega sistema z dodatno maso. Število potrebnih frekvenc za vsak sistem je enako številu koncentriranih mas.



Slika 1: Obravnavani sistem

Slika 1 predstavlja obravnavani sistem. Gre za najenostavnejši možni diskretni model palice, ki vibrira vzdolžno. Konzolni nosilec je diskretiziran z N diskretnimi oziroma koncentriranimi masami ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), medsebojno povezanimi z linearnimi vzmetmi s togostmi  $k_i$  ( $i = 1, 2,$

$\dots, N$ ). Sistem, ki leži na idealno gladki ravnini, je na enem koncu fiksiran, na drugem koncu pa prost. Gibanje je možno samo v osni smeri.

Gibalne enačbe so detajlno zapisane v [7], zato si oglejmo samo glavne rezultate. Gibalne enačbe se prevedejo v obliko

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{y} - \lambda \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{y} = 0 \quad (1)$$

kjer so:

$\mathbf{K}$  – togostna matrika,

$\mathbf{M}$  – masna matrika,

$\lambda$  – lastna vrednost, povezana z lastno frekvenco in

$\mathbf{y}$  – lastni frekvenci pripadajoč lastni vektor.

Poudariti velja, da ima masna matrika diagonalno obliko, togostna matrika pa tridiagonalno. S pomočjo linearne transformacije se enačba (1) prevede v standardno obliko, ki ima netrivialno rešitev, ko velja

$$|\mathbf{A} - \lambda \cdot \mathbf{I}| = 0 \quad (2)$$

Matrika  $\mathbf{A}$  ima prav tako tridiagonalno obliko:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & -b_2 & 0 & 0 & 0 \\ -b_2 & a_2 & -b_3 & 0 & 0 \\ 0 & -b_3 & a_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & a_{N-1} & -b_N \\ 0 & 0 & 0 & -b_N & a_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

in so členi

$$a_i = \frac{k_i + k_{i+1}}{m_i}, \quad b_i = \frac{k_i}{\sqrt{m_i \cdot m_{i-1}}} \quad \mathbf{Z} \quad (4)$$

$$b_1 \equiv 0 \quad k_{N+1} \equiv 0.$$

Iskanje lastnih vrednosti (oziroma frekvenc) se izvede kot iskanje ničel enačbe (2). Zaradi tridiagonalnosti matrike  $\mathbf{A}$  se enačba (2) lahko zapiše s pomočjo principalnih minorjev, ki zadostijo rekurzivno enačbo

$$p_i(\lambda) = (a_i - \lambda) \cdot p_{i-1}(\lambda) - b_i^2 \cdot p_{i-2}(\lambda), \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, N \text{ z } p_{-1}(\lambda) \equiv p_0(\lambda) \equiv 1 \quad p_1(\lambda) = a_1 - \lambda.$$

Lastne frekvence sistema je moč izračunati iz rešitev (ničel) enačbe

$$p_N(\lambda) \equiv 0 \quad (6)$$

ki predstavlja samo drugačen zapis enačbe (2).

Postopek identifikacije bazira na spremembi konstrukcije z dodatno maso v zadnji prostostni stopnji in njenim vplivom na enačbo (2). Iz enačb (4) je razvidno, da se spremenita samo člena  $a_N$  in  $b_N$ , tridiagonalnost matrike pa  $\mathbf{A}$  se ohrani. Izmed principalnih minorjev se spremeni samo zadnji.



Zadnji principalni minor posameznega sistema (osnovnega in sistema z dodatno maso) se da skonstruirati s pomočjo lastnih frekvenc pripadajočega sistema. Lastne frekvence sistema pridobimo z meritvami na konstrukciji.

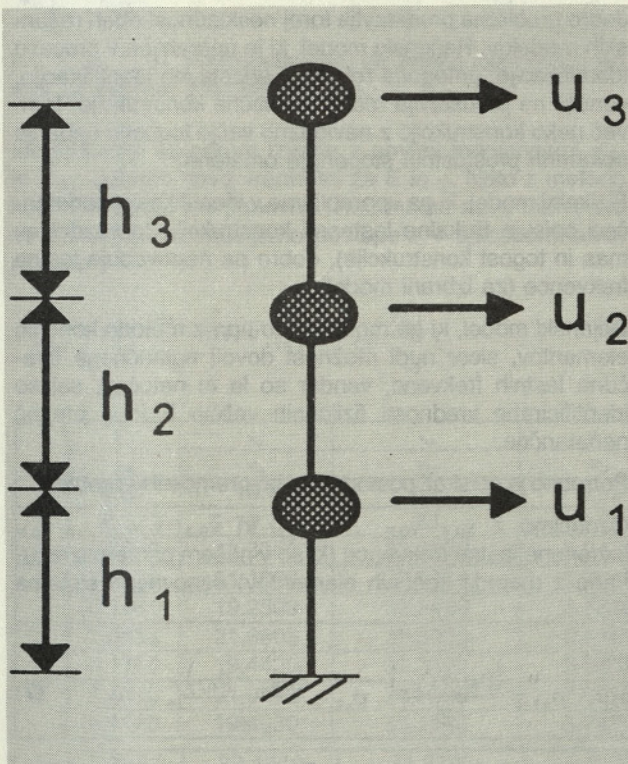
Ves postopek identifikacije koeficientov masne in togostne matrike temelji na dejstvu, da sta masna in togostna matrika diagonalni oziroma tridiagonalni. V primeru neizpolnitve enega izmed obeh pogojev postopka ni mogoče uporabiti.

## UPORABA POSTOPKA ZA IDENTIFIKACIJO RAVNINSKIH OKVIROV

Uporabnost postopka je bila prikazana na primeru ravninskega okvira [7], ki je izpolnjeval naslednje predpostavke:

- vertikalne deformacije stebrov so zanemarljivo majhne,
- mase so koncentrirane v višini prečk oziroma etaže,
- zasuki so zanemarljivi.

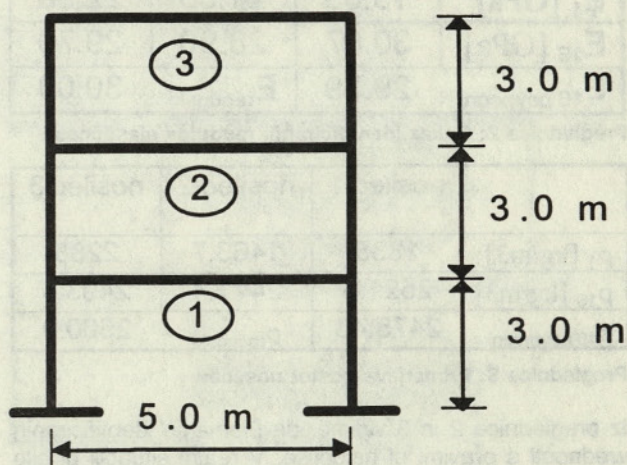
Na osnovi teh predpostavk je bila konstrukcija obravnavana kot sistem s tremi prostostnimi stopnjami z izbranim računskim modelom, predstavljenim na sliki 2.



Slika 2: Računski model s tremi prostostnimi stopnjami

Prostostne stopnje predstavljajo horizontalni pomik etaž. Tak računski (matematični) model je tako ekvivalentnem modelu, predstavljenem na sliki 1. Masna in togostna matrika imata diagonalno oziroma tridiagonalno obliko. Razmislek pokaže, da v splošnem primeru prej našteje predpostavke pogosto niso izpolnjene in da izbrani računski model ni najprimernejši.

Obravnavajmo sedaj primer, kjer ne upoštevamo vseh prej naštetih predpostavk. Vsi konstrukcijski elementi so iz istega materiala in imajo realne dimenzije. Elastični modul je privzet kot  $E = 30 \text{ GPa}$  (beton MB 25), gostota  $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ . Stebri so dimenzij  $0.30/0.45 \text{ m}$  ( $A_s = 0.135 \text{ m}^2$ ,  $I_s = 0.002278125 \text{ m}^4$ ), nosilci  $0.4/0.6 \text{ m}$  ( $A_n = 0.24 \text{ m}^2$ ,  $I_n = 0.0072 \text{ m}^4$ ).



Slika 3: Geometrija primera

Vsi konstrukcijski elementi so sedaj elastični, upoštevamo tudi vse pomike in rotacije, zato je jasno, da masna matrika ni diagonalna, togostna matrika pa ni tridiagonalna. Kot sistem z dodatno maso je bila obravnavana enaka konstrukcija z dodatno maso gornje etaže  $1000 \text{ kg}$ . Ker dejansko izmerjenih frekvenc ni bilo na razpolago, smo za potrebe predstavitve postopka uporabili numerično simulacijo z metodo končnih elementov. Tako izračunane frekvence bomo v nadaljevanju obravnavali kot izmerjene frekvence.

Izračunane so bile prve tri lastne frekvence obeh sistemov. Zaokrožene so bile na dve decimalni mesti (približno tako, kot če bi bile dejansko izmerjene). Vrednosti frekvenc podaja preglednica 1.

frekvenca	prvotni sistem	sistem z dodatno maso
1	6.32 Hz	5.93 Hz
2	19.7 Hz	18.9 Hz
3	33.0 Hz	32.5 Hz

Preglednica 1: Prve tri lastne frekvence

Te frekvence uporabimo v identifikacijski proceduri, ki je podana v [7]. Tako identificiramo koeficiente tridiagonalne togostne in diagonalne masne matrike modela s slike 2. Predpostavimo, da imamo znane geometrijske podatke o

konstrukciji (dolžine in prereze lahko enostavno izmerimo), zato lahko izračunamo vrednosti gostote in elastičnega modula posamezne etaže. Številčenje etaž poteka od spodaj navzgor. Rezultati so podani v preglednici 2. Preglednica 3 prikazuje identificirane vrednosti za gostote.

	etaža 1	etaža 2	etaža 3
$E_1$ [GPa]	15.65	21.35	22.88
$E_{16}$ [GPa]	30.07	28.90	29.79
$E_{16}$ povprečni	29.59	$E_{\text{računski}}$	30.00

Preglednica 2: Prikaz identificiranih modulov elastičnosti

	nosilec 1	nosilec 2	nosilec 3
$\rho_1$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1835	1463.7	2288
$\rho_{16}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2521.5	2411.4	2493.4
$\rho_{16}$ povprečni	2475.43	$\rho_{\text{računski}}$	2500.0

Preglednica 3: Primerjava gostot nosilcev

Iz preglednice 2 in 3 vidimo, da ujemanje identificiranih vrednosti s pravimi ni najboljše. V realni situaciji bi bilo nemogoče oceniti vrednost napake, saj prave vrednosti za  $E$  in  $\rho$  ne bi bile znane. Za ocenitev uspešnosti identifikacije je zato potrebno poiskati kriterij, ki bo omogočil drugačno oceno natančnosti. Izberimo nov, natančnejši računski model in izhajajoč iz predpostavke, da so merjene frekvence dovolj natančno izmerjene. Trdimo naslednje: lastne frekvence novega modela, ki ga opišemo z identificiranimi vrednostmi za  $E$  in  $\rho$ , morajo biti enake predhodno izmerjenim frekvencam, uporabljenim v procesu identifikacije. Lastne frekvence modela z identificiranimi vrednostmi so torej merilo uspešnosti identifikacije. Pogoji je, da je model, uporabljen za kontrolo, dovolj natančen.

Proces identifikacije poda približke elastičnega modula za stebre in gostote za sklop nosilca in polovice stebra pod in nad nosilcem. Pri diskretizaciji konstrukcije z modelom, uporabljenim za kontrolo, pa potrebujemo podatke, ločene po stebrih in nosilcih. Manjkajoči parametri so simulirani kot

$$E_{n1} = \frac{(E_{s1} + E_{s2})}{2} \quad E_{n2} = \frac{(E_{s2} + E_{s3})}{2} \quad E_{n3} = E_{s3} \quad \text{in} \quad \rho_{s1} = \rho_{n1} \quad \rho_{s2} = \frac{(\rho_{n1} + \rho_{n2})}{2} \quad \rho_{s3} = \frac{(\rho_{n2} + \rho_{n3})}{2} \quad (7)$$

Računski model konstrukcije za kontrolo je bil ponovno dobljen s pomočjo končnih elementov, kjer so bile v posameznih konstrukcijskih elementih uporabljene identificirane vrednosti  $E$  in  $\rho$ . Preglednica 4 prikazuje lastne frekvence obeh kontrolnih konstrukcij:

	$v_1$	$v_2$	$v_3$
osnovni sistem	5.667 Hz	18.335 Hz	33.167 Hz
sistem z dodatno maso	5.245 Hz	17.618 Hz	32.626 Hz

Preglednica 4: Prve tri lastne frekvence kontrolnega sistema brez in z dodatno maso

Iz preglednice 4 je razvidno, da ima identificirana konstrukcija nižje frekvence kot originalna konstrukcija. Vrednosti v splošnem indicirajo, da je togost konstrukcije podcenjena, bodisi masa konstrukcije precenjena ali pa oboje. Vzroke za takšno neujemanje je treba iskati predvsem v različnosti realne konstrukcije in konstrukcije, ki jo obravnava inverzni proces. Ključ leži predvsem v elastičnosti konstrukcije, saj mase niso koncentrirane v višini posamezne etaže, vertikalne deformacije stebrov in zasuki pa niso omejeni.

Rezultati, predstavljeni v preglednici 4 so pravzaprav pričakovani. Vrednosti, ki jih pridobimo iz inverznega procesa, ustrezajo računskemu modelu, ki je uporabljen v procesu identifikacije. Ta model je bolj tog od pravega modela. Elastičnejši model bo ob isti masi dal nižje lastne frekvence.

## IZBOLJŠAVA IDENTIFICIRANEGA ANALITIČNEGA MODELA Z UPORABO PREDPOSTAVKE ENOSTAVNE KORELACIJE

Jedro problema predstavlja torej neskladnost obeh računskih modelov. Računski model, ki je uporabljen v procesu identifikacije, omogoča relativno enostavno identifikacijo, vendar ne predstavlja realne elastične konstrukcije, temveč neko konstrukcijo z navidezno večjo togostjo (gibanje nekaterih prostostnih stopenj je omejeno).

Fizikalni model, ki ga uporabljamo v identifikaciji, nenatančno opisuje fizikalne lastnosti konstrukcije (porazdelitev mas in togost konstrukcije), dobro pa napoveduje lastne frekvence (za izbrani model).

Dejanski model, ki ga modeliramo npr. z metodo končnih elementov, sicer nudi možnost dovolj natančnega izračuna lastnih frekvenc, vendar so le te netočne, saj so identificirane vrednosti fizikalnih veličin  $E$  in  $\rho$  preveč nenatančne.

Potrebno je poiskati postopek, ki bo premostil ta problem.

Označimo z  $v_{0,1}, v_{0,2}, \dots, v_{0,N}$  in  $\bar{v}_{0,1}, \bar{v}_{0,2}, \dots, \bar{v}_{0,N}$  izmerjene lastne frekvence (ki so v našem primeru izračunane z metodo končnih elementov) osnovnega sistema

in sistema z dodatno maso. Z  $v'_{0,1}, v'_{0,2}, \dots, v'_{0,N}$  in  $\bar{v}'_{0,1}, \bar{v}'_{0,2}, \dots, \bar{v}'_{0,N}$  označimo lastne frekvence poenostavljenega modela, ki ga uporabljamo v procesu inverzne identifikacije, ki bi v inverznem procesu identificirale vrednosti za  $E$  in  $\rho$ , ki bi nato uporabljene v MKE modelu za kontrolo dale kot lastne frekvence  $v_{0,1}, v_{0,2}, \dots, v_{0,N}$  in  $\bar{v}_{0,1}, \bar{v}_{0,2}, \dots, \bar{v}_{0,N}$ . Premislek pokaže, da take frekvence  $v'_{0,1}, v'_{0,2}, \dots, v'_{0,N}$  in  $\bar{v}'_{0,1}, \bar{v}'_{0,2}, \dots, \bar{v}'_{0,N}$  zagotovo obstajajo, vendar jih ne poznamo in jih je treba šele poiskati.

Trdimo lahko [2]:

$$v_{0,j} < v'_{0,j} \text{ in } \bar{v}_{0,j} < \bar{v}'_{0,j}, j = 1, 2, \dots, N.$$

Vidimo, da v procesu identifikacije dejansko uporabljamo naslednjo predpostavko:

$$v'_{0,j} \approx v_{1,j} = v_{0,j} \text{ in } \bar{v}'_{0,j} \approx \bar{v}_{1,j} = \bar{v}_{0,j}, j = 1, 2, \dots, N.$$

Tako identificiramo prve približke vrednosti za E in  $\rho$ . Uspešnost metode preverimo tako, da identificirane vrednosti uporabimo v natančnejšem modelu konstrukcije s končnimi elementi in izračunamo lastne frekvence  $v_{1,j}$  in  $\bar{v}_{1,j}$ . Ker je v splošnem dejanska konstrukcija elastičnejša od modela, uporabljenega v procesu identifikacije, velja  $v_{1,j} < v_{0,j}$  in  $\bar{v}_{1,j} < \bar{v}_{0,j}$ .

Poiskati je potrebno način, kako izračunati lastne frekvence  $v'_{0,j}$  in  $\bar{v}'_{0,j}$ . Predpostavimo, da velja naslednje (enostavno) razmerje

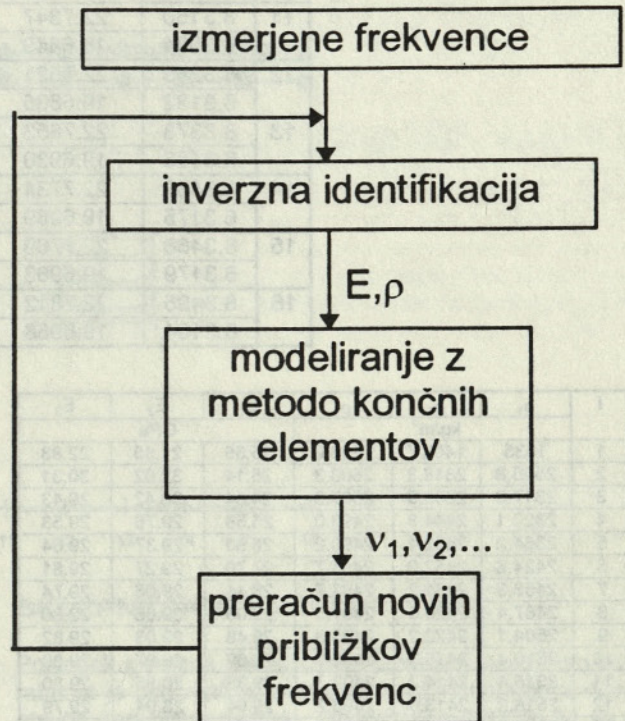
$$\frac{v'_{0,j}}{v_{0,j}} = \frac{v'_{1,j}}{v_{1,j}}, \text{ ki tako da } v'_{0,j} \approx v'_{2,j} = v'_{1,j} \cdot \frac{v_{0,j}}{v_{1,j}},$$

$j = 1, 2, \dots, N$ . Predpostavimo, da enako razmerje velja tudi za sistema z dodatno maso.

Identifikacija se potem izvede z novimi frekvencami  $v'_{2,j}$  in  $\bar{v}'_{2,j}$ ; dobimo nove vrednosti za E in  $\rho$ . Nato z metodo končnih elementov ponovno izračunamo nove frekvence in razmerja, in ponavljamo postopek. V splošnem lahko pišemo

$$v'_{i+1,j} = v'_{i,j} \cdot \frac{v_{0,j}}{v_{i,j}} \text{ in } \bar{v}'_{i+1,j} = \bar{v}'_{i,j} \cdot \frac{v_{0,j}}{v_{i,j}}. \tag{9}$$

Idejo iteracijskega procesa prikazuje naslednja shema:



Slika 4: Iteracijska shema

Proces iteracije ponavljamo tako dolgo, da se lastne frekvence modela za kontrolo ujemajo z izmerjenimi frekvencami. Preglednica 5 prikazuje potek sprememb lastnih frekvenc  $v_{i,j}$ ,  $\bar{v}_{i,j}$ ,  $v'_{i,j}$ ,  $\bar{v}'_{i,j}$  med iteracijo, preglednica 6 pa prikazuje iteracijo  $E_i$  in  $\rho_i$ .

i	$v_{0,j}$	$v_{1,j}$	$v_{2,j}$	$\bar{v}_{0,j}$	$\bar{v}_{1,j}$	$\bar{v}_{2,j}$
	$v_{0,j}$	$v_{1,j}$	$v_{2,j}$	$\bar{v}_{0,j}$	$\bar{v}_{1,j}$	$\bar{v}_{2,j}$
0	6.32	19.7	33	5.93	18.9	32.5
1	6.32	19.7	33	5.93	18.9	32.5
	5.6670	18.3350	33.1670	5.2450	17.6180	32.6260
2	7.0482	21.1666	32.8338	6.7045	20.2753	32.3745
	6.1481	19.2508	33.5430	5.7810	18.4910	33.0470
3	7.2453	21.6605	32.3023	6.8761	20.7238	31.8386
	6.1160	19.4420	33.3320	5.7450	18.6312	32.8424
4	7.4870	21.9479	31.9806	7.0975	21.0228	31.5067
	6.1160	19.4930	33.1140	5.7460	18.6750	32.6240
5	7.7367	22.1810	31.8705	7.3248	21.2761	31.3869
	6.1550	19.5405	33.0150	5.7807	18.7228	32.5200
6	7.9441	22.3621	31.8560	7.5140	21.4775	31.3676
	6.2030	19.5806	32.9794	5.8263	18.7704	32.4808
7	8.0939	22.4985	31.8759	7.6477	21.6258	31.3861
	6.2435	19.6149	32.9764	5.8611	18.8070	32.4753
8	8.1931	22.5961	31.8987	7.7376	21.7327	31.4100
	6.2730	19.6420	32.9812	5.8880	18.8377	32.4798
9	8.2544	22.6628	31.9169	7.7928	21.8046	31.4295
	6.2916	19.6624	32.9896	5.9050	18.8600	32.4884

Preglednica 5: Koraki iteracije lastnih frekvenc

10	8.2916	22.7061	31.9269	7.8257	21.8508	31.4407
	6.3022	19.6752	32.9941	5.9142	18.8737	32.4930
11	8.3150	22.7347	31.9326	7.8466	21.8812	31.4475
	6.3094	19.6849	32.9982	5.9206	18.8839	32.4974
12	8.3289	22.7521	31.9343	7.8590	21.8998	31.4500
	6.3132	19.6886	32.9987	5.9240	18.8880	32.4983
13	8.3378	22.7653	31.9355	7.8669	21.9136	31.4516
	6.3156	19.6930	32.9987	5.9261	18.8926	32.4984
14	8.3436	22.7734	31.9368	7.8721	21.9221	31.4531
	6.3175	19.6969	33.0022	5.9278	18.8966	32.5018
15	8.3468	22.7769	31.9347	7.8749	21.9260	31.4513
	6.3179	19.6963	32.9992	5.9281	18.8961	32.4991
16	8.3495	22.7812	31.9354	7.8773	21.9305	31.4521
	6.3184	19.6968	32.9978	5.9286	18.8968	32.4976

i	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$E_1$	$E_2$	$E_3$
	kg/m <sup>3</sup>					
1	1835	1463.7	2288.0	15.65	21.35	22.88
2	2505.8	2318.3	2608.3	25.14	32.02	30.31
3	2317.8	2388.5	2507.3	24.84	30.42	29.43
4	2320.1	2444.3	2496.0	25.58	29.76	29.53
5	2364.2	2452.4	2490.2	26.60	29.37	29.64
6	2424.6	2452.0	2494.7	27.70	29.27	29.81
7	2456.3	2431.2	2487.7	28.44	29.06	29.74
8	2487.4	2426.6	2491.5	29.08	29.05	29.80
9	2504.1	2422.2	2493.0	29.48	29.03	29.82
10	2510.4	2416.3	2492.2	29.69	28.97	29.80
11	2515.4	2414.2	2492.7	29.85	28.95	29.80
12	2518.2	2413.0	2493.2	29.94	28.94	29.79
13	2519.4	2412.3	2493.2	30.00	28.92	29.79
14	2520.6	2412.1	2493.3	30.04	28.92	29.80
15	2521.2	2411.7	2493.4	30.06	28.91	29.79
16	2521.5	2411.4	2493.4	30.07	28.90	29.79

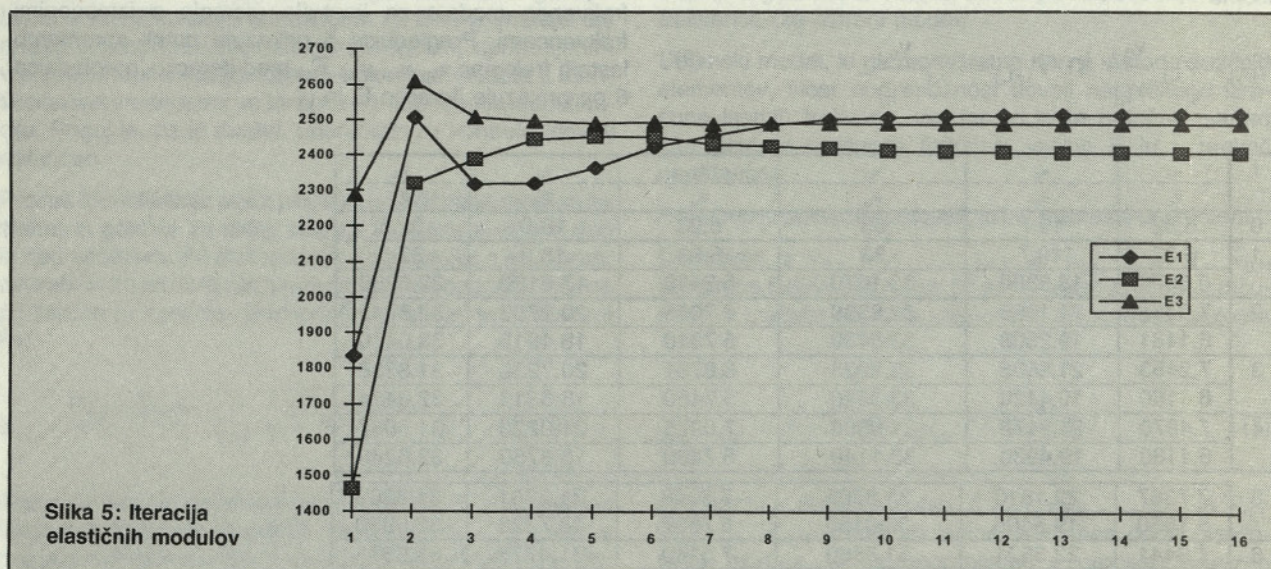
Preglednica 6: Koraki iteracije E in  $\rho$ 

iteracijski proces končan. Razlika med lastnimi frekvencami kontrolnega sistema in izmerjenimi frekvencami je manj kot 0,1 %.

	etaža 1	etaža 2	etaža 3
E [GPa]	15.65	21.35	22.88
natančnost	52.17 %	71.16 %	76.27 %

Preglednica 7: Primerjava elastičnih modulov

Podrobnejši pregled rezultatov pove, da je napaka pri izračunu lastnih frekvenc že po osmih iteracijah manjša od 1 %, pri izračunu E in  $\rho$  pa manjša od 4 %. S stališča inženirske natančnosti bi iteracijo torej lahko končali že po osmih korakih.

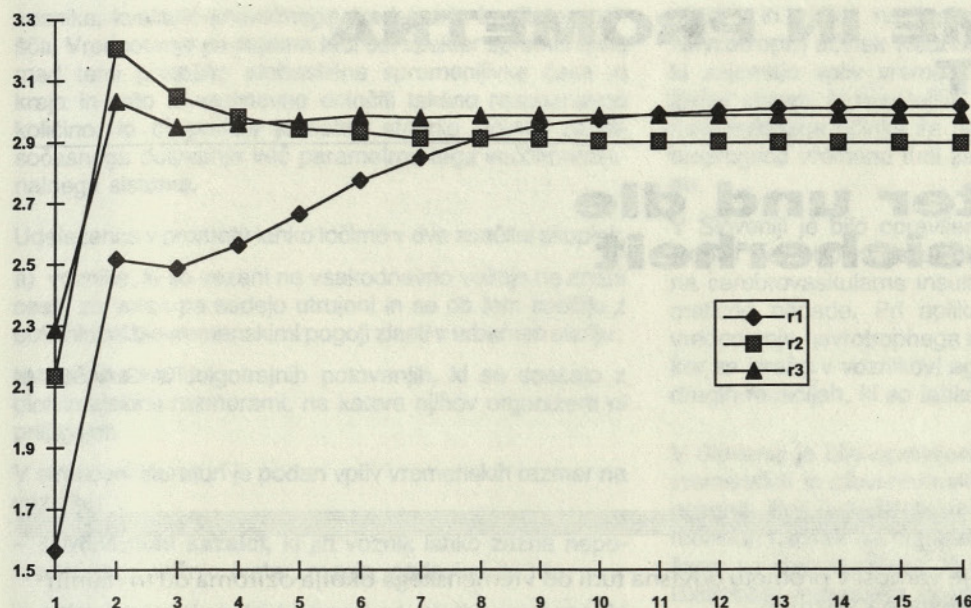


Iz slik 5 in 6 vidimo, da se natančnost identificiranih vrednosti E in  $\rho$  izrazito popravi že po enem krogu iteracije, celoten iteracijski proces pa se praktično uspešno zaključi po 18 iteracijah. Lastne frekvence elastičnega kontrolnega sistema in sistema z dodatno maso se praktično ujemajo z izmerjenimi, zato je to znak, da je

Čeprav sta vrednosti modula elastičnosti in gostote enaki za celotno konstrukcijo, je bilo v izračunu privzeto, da se v vsaki etaži razlikujeta. Upoštevanje enakosti po etažah in račun s povprečnima identificiranima vrednostima bi ves račun še poenostavila.

Opozoriti je treba še na dejstvo, da ima lahko enakost

Slika 6: Iteracija gostot



	nosilec 1	nosilec 2	nosilec 3
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1835	1463.7	2288
natančnost	73.40 %	58.55 %	91.52 %

Preglednica 8: Primerjava gostot

obeh parametrov  $E$  in  $\rho$  po vseh konstrukcijskih elementih velik vpliv na konvergenco postopka. Če se elastični modul nosilcev močno razlikuje od elastičnega modula stebrov (slično velja za gostote), je praktično nemogoče ugotoviti to razmerje in ga nato primerno opisati v modelu za kontrolo. To ima za posledico nekonvergenco rezultatov, saj take rešitve ne konvergirajo, kar je možno opaziti že po nekaj krogih iteracije.

## SKLEPNE UGOTOVITVE

Postopek inverzne identifikacije, katerega praktična uporabnost je bila močno omejena, je bil nadgrajen z enostavno iteracijsko metodo. Uporabljena metoda se je v prikazanem zgledu izkazala kot uspešna, saj vrednosti, ki jih dobimo direktno iz identifikacijskega procesa, izredno popravi. Bistvena izboljšava rezultatov je bila opazna že po eni sami iteraciji. Po opravljenih osmih iteracijah je napaka že manjša od 4%, po opravljenih 16. iteracijah pa je razlika manjša od 0,1%. Omejitev metode nastopi pri konstrukcijah, kjer imajo stebri in nosilci različne mehanske lastnosti. V takem primeru lahko nastopijo problemi pri modeliranju kontrolne konstrukcije, kar usodno vpliva na konvergenco rešitve. Nadaljevanje raziskav bo potekalo v iskanju rešitev tega problema.

## LITERATURA

1. Fajfar P., Dinamika gradbenih konstrukcij, Ljubljana 1984.
2. Gladwell G.M.L., Inverse Problems in Vibration, Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1986.
3. Lin R. M., Ewins D. J., Analytical Model Improvement using Frequency Response Functions, Mechanical Systems and Signal Processing (1994) 8(4), 437–458.
4. Meirovitch L., Computational Methods in Structural Dynamics, Sijthoff & Noordhoff, Alphen aan der Rijn, The Netherlands, Rockville, Maryland, U.S.A., 198.
5. Ram Y. A., Gladwell G.M.L., Constructing a Finite Element Model of a Vibratory Rod from Eigendata, Journal of Sound and Vibration (1993).
6. Skrinar M., Umek A., Identification of beams by the method of added mass, International Conference on computational methods and experimental measurements VI, Vol. 2, Computational mechanics Publication & Elsevier Applied Science, 1993.
7. Skrinar M., Umek A., Razširitev identifikacijske metode s spremembo robnih pogojev, zbornik 16. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, 1994, str. 191–198.

# BIOVREME IN PROMETNA VARNOST

## Das Wetter und die Verkehrssicherheit

UDK 656.08:551.5

TOMISLAV ŠIBENIK

### POVZETEK

Že dolgo časa je znano, da je varnost v prometu odvisna tudi od vremenskega okolja oziroma od trivialnih in netrivialnih vplivov vremena na voznike.

Tudi v Sloveniji je bilo opravljenih nekaj raziskav o problematiki vrednotenja vremenskega okolja na prometno varnost in reakcijsko zmožnost voznika. V delu so prikazani nekateri rezultati teh raziskav.

### SUMMARY

Schon geraume Zeit ist bekannt, daß die Verkehrssicherheit auch von den Wetterumständen bzw. von offensichtlichen und weniger offensichtlichen Einflüssen des Wetters auf die Fahrer abhängig ist. Auch in Slowenien wurden einige Untersuchungen über die Problematik der Bewertung des Einflusses der Wetterumstände auf Verkehrssicherheit und Reaktionsfähigkeit der Fahrer durchgeführt.

In diesem Artikel werden einige Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt.

### Uvod

Človek se trudi, da bi razumel vplive vremenskih dogajanj na svoj organizem že več kot dve tisočletji. Prva pričevanja o tem najdemo pri Babiloncih v tretjem stoletju pred našim štetjem in v Jobovi knjigi v Stari zavezi. Tudi Hipokrat je za vsako bolezen iskal vzroke v vremenskih spremembah in je bil v tesni povezavi z meteorologi tedanjega časa.

V sedemdesetih in v začetku osemdesetih let so po svetu spet zaživele raziskave s področja medicinske meteorologije, ki pa zahtevajo obsežno interdisciplinarno obravnavo. Vpliv vremenskih dogajanj na človeka je nedvomno dokazan.

Rezultati raziskave na Medicinski fakulteti ljubljanske univerze [1], ko so v raziskavo zajeli skoraj petinšestdeset tisoč pacientov, ki so v času enega leta iskali pomoč na Travmatološki kliniki UKC, so nedvomno pokazali, da negativni biotropni učinki vremenskih dogajanj vplivajo

tudi na pogostost poškodb vseh vrst. Potrjeni so bili izsledki raziskav v svetu s poudarkom na specifičnosti vremenskih dogajanj nad Slovenijo.

### Vpliv vremena na voznike

Med vzroki za nastanek prometnih nezgod so tudi takšni, ki jim do nedavnega ni bilo pripisano dosti pomembnosti, dostikrat pa je ob nezgodi pisalo »iz neznanega vzroka«. Med te spadajo tudi biometeorološki dejavniki, ki kot parametri okolja pogojujejo zmožnosti voznika oziroma varnost prometa. Tudi medicinsko-meteorološka literatura navaja ujemanje določenih vremenskih stanj ali vremenskih procesov z zmanjšano koncentracijo voznikov, povečano agresivnostjo voznikov ali pa celo s sprožitvijo bolezenskih pojavov pri udeležencih v prometu.

Vrednotenje biotropnih učinkov vremena na prometno varnost zahteva večdimenzionalno obravnavo med biometeorološkimi kazalci, psihično in fizično konstitucijo

AVTOR:

Mag. TOMISLAV ŠIBENIK, dipl. inž., Fakulteta za gradbeništvo SI 2000 Maribor, Smetanova 17

voznika, kvaliteto prevoznega sredstva in kvaliteto vozišča. Vrednotenje pa zajema tudi cel spekter spremenljivk, med temi pretežno stohastične spremenljivke časa in kraja in zato ni enostavno določiti takšno razpoznavno količino, ki bi podala jakostno stopnjo učinka zaradi sočasnega delovanja več parametrov tega večdimenzionalnega sistema.

Udeležence v prometu lahko ločimo v dve značilni skupini:

a) voznike, ki so vezani na vsakodnevno vožnjo na znani cesti, za volan pa sedejo utrujeni in se ob tem soočijo z obtežilnimi biovremenskimi pogoji zlasti v urbanem okolju;

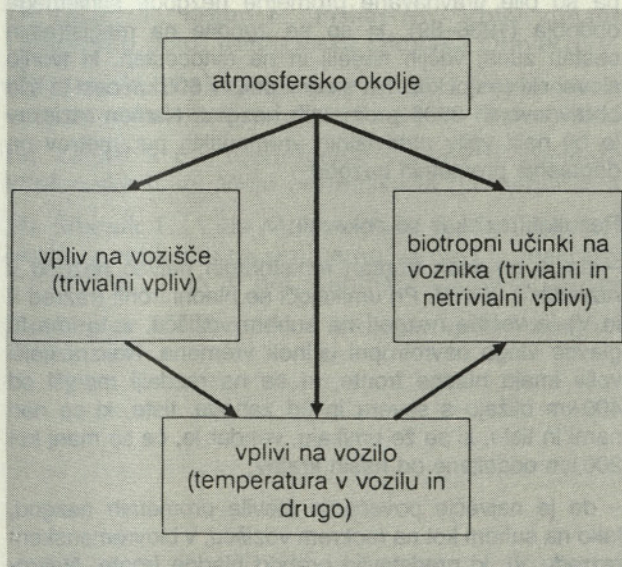
b) voznike na dolgotrajnih potovanjih, ki se soočajo z bioklimatskimi razmerami, na katere njihov organizem ni prilagojen.

V strokovni literaturi je podan vpliv vremenskih razmer na voznike:

– s **trivialnimi kazalci**, ki jih voznik lahko zazna neposredno med vožnjo (veter, megla, padavine itd.) in

– **netrivialnimi** kazalci biotropnega učinka vremena, ki vplivajo na počutje voznika in na njegovo reakcijsko zmožnost. Pomembni so zato, ker vozniki niso seznanjeni z njihovim učinkom. V statistiki prometnih nezgod so ponavadi zbrani pod skupino »neznanih« vzrokov nezgod.

Vsak živ organizem je sprejemljiv za **biotropni** učinek vremena, ki se izraža v psihičnih in fizioloških komponentah kot obremenilni dražljaj. Pri vremensko odvisnem organizmu lahko biotropni učinek vremena sproži napačno voznikovo reakcijo, lahko pa se takšen organizem odzove tudi z bolezenskim pojavom. V aplikaciji na prometno varnost sta pri netrivialnih vremenskih kazalcih pomembna predvsem nevrotropni in biotoplotni učinek vozila. Biotoplotni učinek se izraža s sočasnim učinkom temperature zraka, vlage v zraku, vetra in toplotnega sevanja



Slika 1 – Vpliv atmosferskega okolja na prometno varnost in voznikovo reakcijsko zmožnost

okolice in vpliva na toplotno uravnavanje organizma. **Nevrotropni** učinek vrednoti vpliv atmosferskih dogajanj, ki zajemajo vpliv vremenskih procesov na vegetativni živčni sistem. V razvitejših deželah se jakostne stopnje nevrotropnega učinka že nekaj časa uporabljajo v obliki bioprognoz vremena tudi za prometno preventivne ukrepe.

V Sloveniji je bilo opravljenih nekaj raziskav o jakostni stopnji nevrotropnega učinka, izdelanih npr. v aplikaciji na cerebrovaskularne insulte, migrenske glavobole, astmatične napade. Pri aplikacijah prometne varnosti je vrednotenje nevrotropnega učinka pomembno zlasti zato, ker se izraža v voznikovi agresivnosti, razburjenosti ali v drugih reakcijah, ki so lahko vzrok prometne nezgode.

V Sloveniji je bilo opravljenih nekaj raziskav o ujemanju vremenskih in biovremenskih stanj s številom prometnih nezgod. Prvi izsledki nekaterih proučevanj o vplivu vremenskih razmer na dogajanje nezgod na območju Ljubljane so dali rezultate, ki potrjujejo predhodne trditve. Biotropna vremenska dogajanja vključujejo tista, ki se pomikajo prek obravnavanega območja v sklopu splošne cirkulacije zraka, in tudi procese, ki so lokalno orografsko pogojeni. Prav zaradi teh ne moremo kar od drugod prenesti rezultatov raziskav o nevrotropnih učinkih, temveč moramo njih jakost določiti posebej za naše območje.

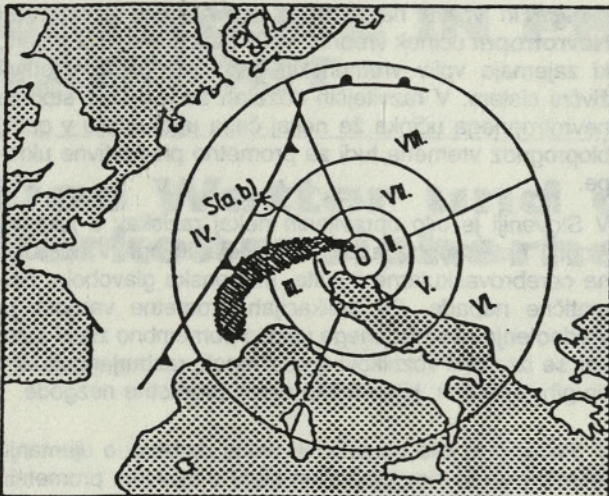
### Ujemanje prometnih nezgod z vremenskimi razmerami

• V eni zgodnejših raziskav je bila študirana zveza med frekvenco prometnih poškodb in meteorološkimi parametri:

- (1) vreme v Ljubljani,
- (2) vrsta in razred fronte ter
- (3) nekateri vodilni vremenski procesi, ki jih opredeljujejo nevrotropni učinek (N) ali trivialni vremenski parametri (T) ali pa oboje hkrati.

Fronte, vrisane v vremenske karte, predstavljajo skupek značilnih vremenskih dogajanj, vendar niso numerični vremenski parametri. Z določeno objektivno metodo so jih hoteli izraziti tako, da so za vsak začetni termin 12-urnega obdobja določili lego front s točko sečišča S (a, b). Na sliki 2 pomeni pri točki sečišča komponenta a pravokotno razdaljo med Ljubljano in njej najbližjo fronto, ki je razdeljena na odseke po 100 km, komponenta b pa njeno smer, ki je določena tako, da je krožnica okoli Ljubljane razdeljena na osem razredov po 45, začeni od 350 v smeri urinih kazalcev. Sečišča so nato združili v razrede frontalnih leg R od 0 do VIII.  $R = f(S(a, b))$ .

Pri določanju sečišča S na fronti so upoštevali vedno le najbližjo fronto, ki se je približevala Sloveniji in jo spremljali, ko se je oddaljevala. Kadar je prvi fronti sledila še druga, so prvo spremljali, dokler ni prešla Slovenije, nato pa drugo [2].



Slika 2: Določitev lege fronte s sečiščem S (a, b) in uvrstitev sečišč v razrede frontalnih leg ( $R = 0, I, \dots, VIII$ ). Vir (2)

Pri hladnih frontah opazimo največjo verjetnost prometnih nezgod v razredu I, tj. kadar je fronta oddaljena od Slovenije 100 do 200 km in se približuje Sloveniji od SZ ali JZ. V teh primerih je izražena vremenska preobčutljivost ljudi. Visoke pogostosti za prometne poškodbe zasledimo še pri hladnih frontah razredov 0 in II, tj., ko je fronta nad Ljubljano in se pomika proti S oziroma SV in je oddaljena od Ljubljane 100 do 300 km. Hladne fronte razreda II običajno povzročijo predfrontalne padavine.

Preglednica 1: Pogostnost prometnih poškodb v odvisnosti od vrste in razreda fronte – hladna fronta

Razred fronte	Število vremenskih procesov	Pogostost poškodb
0	30	9,27
I.	43	9,95
II.	15	9,80
III.	47	7,87
IV.	76	7,09
V.	27	9,07
VI.	44	7,43
VII.	21	8,10
VIII.	17	6,82

Vodilni vremenski procesi so razdeljeni na tiste, ki imajo težišče v nevrotropnih učinkih in na tiste, ki podajajo trivialne kazalce vremenskih pojavov. Prometne poškodbe pokažejo pri hladnih frontah nad Slovenijo visoke pogostosti le, če je hladno fronto spremljala nevihta (preglednica 2).

V pilotski raziskavi [3] je obravnavan vpliv biometeoroloških parametrov na dogajanje nezgod na magistralni cesti od Šentilja do Dekanov v skupni dolžini 262 km, kjer je bilo za triletno obdobje (1983–85) zajeto 1392 prometnih nezgod.

Preglednica 2: Pogostnost prometnih poškodb v odvisnosti od vodilnega vremenskega procesa

Vodilni proces	Število vodilnih vremenskih procesov	Pogostost poškodb
severni fen (N)	6	7,50
topla fronta (N,T)	22	5,91
fenizirana topla fronta (N)	18	8,11
hladna fronta (T)	50	8,34
fenizirana hladna fronta (N)	33	7,27
nevihtna fronta (N,T)	28	12,00
predfrontalne padavine (T)	63	2,54

Preglednica 3: Povprečno število prometnih nezgod za območje meteoroloških postaj za soparne dneve (1983–85)

Območje meteorološke postaje	Povprečno štev. nezgod na dan	Povprečno štev. nezgod na dan, ko je bilo $T_{eq} > 49^{\circ}C$
Maribor	0,31	0,48
Celje	0,27	0,28
Ljubljana	0,56	0,70
Postojna	0,07	0,11
Portorož	0,07	0,08

Kljub razmeroma majhnemu številu primerov, ko je bila ekvivalentna temperatura višja od  $49^{\circ}C$ , se na vseh območjih kaže povečano število prometnih nezgod.

V drugi obširnejši raziskavi [4] so bili v prvem delu uporabljeni podatki o 4866 prometnih nezgodah z večjo materialno škodo ter telesnimi poškodbami oseb za obdobje treh let (1986–88), ki so se zgodile na področju Ljubljane, Maribora in Obale. V drugem delu te raziskave pa so bile uravnane prometne nezgode štiriletne obdobja (1986–89), ki so se zgodile na magistralnih cestah zunaj večjih naselij in na avtocestah, ki tvorijo slovenski cestni križ. Na skupni dolžini 605 km cest je bilo obravnavanih 3396 prometnih nezgod. Namen raziskave je bil najti vpliv netrivialnih vremenskih parametrov na dogajanje prometnih nezgod.

Rezultati raziskav so pokazali:

- da je pri vseh frontah registriranih največ nezgod v razredih 0, II in V. Pri umikajoči se hladni fronti (razred II in V) je večina nezgod na suhem vozišču, zato ima tu glavno vlogo nevrotropni učinek vremena. Najizrazitejši vpliv imajo hladne fronte, ki se na razdalji manjši od 400 km bližajo s severa in od zahoda, tiste, ki so nad nami in tiste, ki se že umikajo, vendar le, če so manj kot 200 km oddaljene od naših krajev;

- da je največje povečanje števila prometnih nezgod, tako na suhem kot na mokrem vozišču, v biovremenskem razredu VI, ki predstavlja prehod hladne fronte. Nevrotropni učinek vremena je torej očitno;

- da na človekovo počutje neugodno vplivajo visoke



temperature ob sočasni visoki relativni vlagi. Meja neugodnega počutja nastopi, ko je ekvivalentna temperatura večja od 49°C (soparnost 1. stopnje). Tu nastopi obtežitev za manj odporne in bolnike, pri večji temperaturi od 56°C (soparnost 2. stopnje) pa je že obtežitev za vse;

– da kaže povezavo med smerjo vetra in številom prometnih nezgod opazno povečanje prometnih nezgod ob južnem vetru na 850 hPa in ob jugozahodnem vetru na 500 hPa. Jugozahodnik je značilen veter pred fronto, ko se pri nas pojavljajo že predfrontalne padavine, delež nezgod na suhem vozišču pa je tako velik, da lahko sklepamo tudi o nevrotropnem učinku vremena.

Nevrotropski učinek vremena deluje torej na večino subjektivnih akcidentogenih faktorjev, med najpomembnejšimi za prometno varnost pa je vpliv na psihomotorne sposobnosti voznikov ter na psihopatološka stanja.

### Sklepne ugotovitve

Stanje prometne varnosti pri nas je takšno, da kliče po preventivnih ukrepih, ki bi pripomogli k izboljšavi stanja. 'Akcija -10%' se je iztekla, število prometnih nezgod na cestah pa spet raste. Pokazala se je potreba po čimprejšnji implementaciji rezultatov raziskav v realno okolje. Pomen bioprognoze v preventivi, tudi v prometni, je bil vedno bolj poudarjen, saj lahko bioprognosa pripomore k boljšemu razumevanju reakcij voznikov. Še pred tem pa je bilo potrebno preveriti uporabnost izsledkov raziskav v

praksi. Zaradi tega je bila zasnovana izvedba ankete, pri kateri zasnovi preverjanja in njegovi izpeljavi je sodeloval Svet za preventivo in vzgojo v cestnem prometu RS. Šlo je za testiranje teoretičnih rezultatov raziskave na treh dobro opredeljenih in razmeroma zelo homogenih skupinah, ki so poklicno dobršen del delovnega časa na cesti. To bi naj bila zaključna faza raziskovalne naloge [4]. Podmena je bila, da se lahko tudi teoretično signifikantni rezultati v praksi izkažejo kot neuporabni oziroma težko uporabljivi. Test je bil namenjen prav preverjanju uporabnosti opozoril. V tej raziskavi so sodelovali prometni strokovnjaki, biometeorologi, zdravniki in psiholog. To testiranje je bilo izvedeno poleti 1993. leta. V anonimni anketi so sodelovale tri skupine:

- vozniki reševalne postaje Ljubljana,
- policisti postaje prometne policije Ljubljana II,
- policisti postaje prometne policije Ljubljana – mesto.

Poročilo o rezultatih ankete je bilo dokončano v aprilu 1994. leta, od 1. junija pa lahko vsako jutro pri poročilih 1. programa Radia Slovenije ob 7.30 slišimo biovremensko opozorilo za voznike. Opozorilo ima tri stopnje in se emitira le, kadar je pričakovati skupni učinek biotoplotnega in nevrotropnega vpliva vremena na voznike, sicer sporočijo, da 'opozorila ni'.

Namen teh opozoril je povečati pozornost udeležencev v prometu na morebitna nepravilna ravnanja drugih voznikov in se s tem izogniti možni nezgodi. Na ta način smo se tudi v Sloveniji pridružili tistim državam, ki se že dalj časa zavedajo pomembnosti tovrstnih preventivnih sporočil.

## LITERATURA

- [1] Bilač G., Koren F., Pišljar M.: Vpliv zunanjih dejavnikov na pogostost in naravo Travmatizma. Diplomsko delo, Medicinska fakulteta Univerze v Ljubljani, Ljubljana, 1983.
- [2] Vida M.: Izsledki posegov med objektivnimi prognostičnimi biometeorološkimi parametri in nastanki cerebrovaskularnih bolezni. Razprave-Papers DMS, 1981, Vol. 25/1.
- [3] Zavašnik F.: Vrednotenje vplivov biometeoroloških parametrov na dogajanje prometnih nezgod. Diplomsko delo, Višja pomorska in prometna šola Univerze v Ljubljani, Piran, 1988.
- [4] Šibenik T., Vida M., Mekinda T., Smrkolj V., Lenarčič J.: Vrednotenje parametrov biovremenskega okolja v aplikaciji na prometno varnost in reakcijsko zmožnost voznikov. Raziskovalna naloga 07-2689-797/89, 90, I. in II. del, Tehniška fakulteta Univerze v Mariboru, Maribor, 1989, 1990.
- [5] Cegnar T.: Poročilo o projektu vpliv vremena na voznike – anketa, Ljubljana, 1994.

# PRESOJA PROJEKTA CESTE Z EKOLOŠKEGA VIDIKA S POMOČJO DINAMIČNEGA EMISIJSKEGA MODELA

## Road design evaluation from the ecological aspect with the aid of dynamic emission model

UDK 625.72:504.05

DANIJEL REBOLJ

### P O V Z E T E K

V prispevku so prikazane osnove in implementacija dinamičnega emisijskega modela za analizo nekaterih škodljivih emisij cestnega prometa. DynEM, kakor smo ga kratko poimenovali, je vključen v integrirano računalniško okolje za načrtovanje in vrednotenje cest (RoDEE) in omogoča takojšnji izračun emisij na projektirani trasi ceste ob upoštevanju dinamičnih geometrijskih in geografskih parametrov.

### S U M M A R Y

Concept and implementation of the Dynamic emission model for the analysis of harmful emissions caused by road traffic are shown in the article. DynEM, as we have named it, is integrated in a computer aided Road Design and Evaluation Environment (RoDEE) and enables immediate calculation of emissions on a designed road layout with respect to dynamic geometrical and geographical parameters.

#### 1. UVOD

Ceste imajo velik in dolgotrajen vpliv na najrazličnejša področja človekove dejavnosti ter na okolje. Prav zato je velikega pomena skrbno načrtovanje različnih variant in presoja teh variant z vseh pomembnih vidikov.

V večini razvitih dežel so cestne mreže v glavnem že zgrajene, zato je metodam za načrtovanje in presojo projektov cest posvečene sorazmerno manj pozornosti. V Sloveniji pa je v teku »projekt stoletja« – izgradnja prek 300 km avtocest, ki bodo potekale čez razgibano in občutljivo pokrajino in bodo imele na ljudi in okolje izjemno velik vpliv. Prav zato je treba storiti vse, da bi negativne učinke čimbolj ublažili oziroma za nove ceste izbrali najugodnejše trase.

Eden od negativnih učinkov so tudi emisije škodljivih snovi ter hrupa, ki jih povzroča cestni promet. Novi modeli motorjev z notranjim zgorevanjem so sicer veliko prijaznejši do okolja, kljub temu pa bo preteklo še veliko časa, preden bodo emisije škodljivih snovi vsakega vozila na cesti enake 0! Predvidevanje emisij škodljivih snovi ter ugotavljanje njihovega vpliva na okolje v mikroprostoru je zato ključnega pomena pri izbiri optimalne trase nove ceste.

Znane obstoječe metode, ki se uporabljajo za izračun emisij pri presoji vplivov cest na okolje, prikazujejo brez izjeme statistično povprečje emisij posameznih snovi na določenem cestnem odseku (nekatero izmed metod, ki smo jih upoštevali, najdemo v [1], [2], [3], [4] in [5]). Seveda so ene bolj natančne in upoštevajo večje število

AVTOR:

Doc. dr. Danijel Rebolj, Fakulteta za gradbeništvo Laboratorij za gradbeno informatiko

relevantnih parametrov ceste in terena, druge manj, toda v vsakem primeru je rezultat izračuna masa snovi na celotnem odseku. Sledijo izračuni emisij, ki so še veliko bolj približni, saj vključujejo vremenske razmere. Najmanj pozornosti pa je posvečene sistematični analizi vplivov škodljivih snovi na posamezne občutljive objekte (ali področja) v okolju.

## 2. IZHODIŠČA ZA DRUGAČEN MODEL ZA IZRAČUN EMISIJ CESTNEGA PROMETA

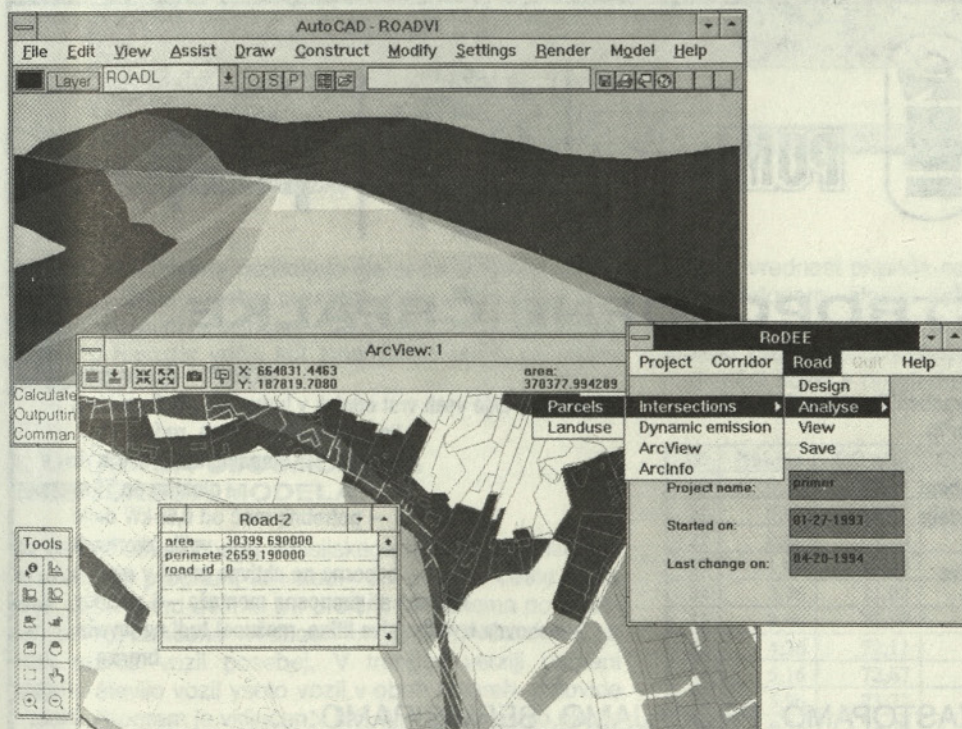
V preteklih letih smo načrtovanju cest posvetili precej pozornosti. Iz že omenjenega razloga – pospešene izgradnje avtocestne mreže v Sloveniji – verjetno sorazmerno več kot drugje v svetu. Tako je po nekajletnem razvoju nastalo Okolje za načrtovanje in vrednotenje cest ali kratko RoDEE (glej [6] ali [7]). Bistvena značilnost tega integriranega programskega okolja je fleksibilna, pa vendarle tesna povezava poljubnega obstoječega sistema za načrtovanje cest (RDS), izbranega geografskega informacijskega sistema (GIS) in drugih relevantnih modulov (kot npr. sistema za upravljanje projektov – PMS) na takšni abstraktni ravni, ki omogoča uporabniku zvezen potek pri postopkih načrtovanja in presoje cest. Uporabniški vmesnik RoDEE je prikazan na sliki 1.

Navzven je okolje odprto prek podatkovnega vmesnika, ki vsebuje vse bistvene podatke o predmetu »cesta« ali natančneje: geometrijo cestnega telesa. Za ta namen smo definirali tudi sintakso in semantiko prenosne datoteke, ki smo ji nadeli ime: *Metodatoteka cestnega telesa* ali *MCT* (podrobnosti glej v [9]).

Geometrija cestnega telesa pa je vključena tudi v podatkovne strukture podpornega geografskega informacijskega sistema, kar zagotavlja dobro osnovo za najrazličnejše prostorske analize (na prvi sliki npr. lahko v enem od oken vidimo presek cestnega telesa in katastra parcel). Prav ta tesna povezanost med natančnim potekom geometrije ceste in prostorom ter objekti v njem je porodila idejo o dinamičnem emisijskem modelu.

## 3. DINAMIČNI EMISIJSKI MODEL

Kot smo navedli že v uvodu, temeljijo metode za izračun emisij večinoma na statističnih podatkih in to tudi v primerih, ko gre za geometrijsko razgibane trase. Če že upoštevajo npr. vzdolžni naklon, ga torej upoštevajo kot nek statistični faktor, veljaven za celoten opazovani cestni odsek. V našem primeru pa postane zelo smiselno izračunavanje emisij v neprimerno manjših odsekih (velikostnega reda nekaj metrov), v katerih lahko rečemo, da sta

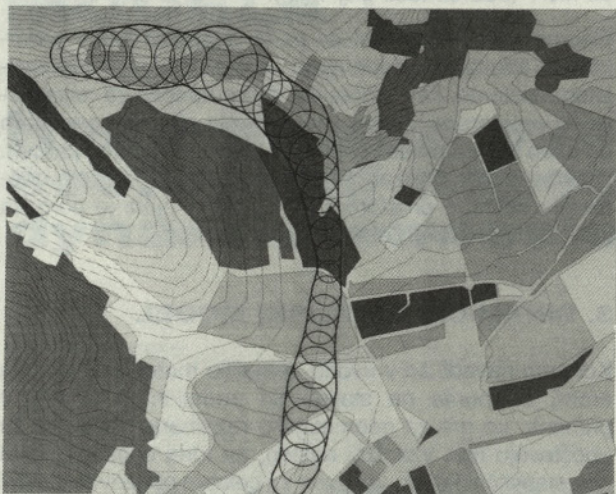


Slika 1. Okolje RoDEE skrbi za zvezen potek med procesi, ki jih izvajajo različni »podporni« programske sistemi – predvsem RDS in GIS.

Pri povezavi posameznih sistemov v celovito okolje smo uporabili *Metodo objektnih lupin* (razen v [6] je opisana tudi v [8]), ki omogoča povezave na ravni predmetov v smislu predmetno usmerjenega programskega pristopa.

vzdolžni naklon in nadmorska višina resnično konstantna. Izračun emisij ponavljamo v posameznih odsekih in pri tem upoštevamo različne *spremenljive (dinamične)* parametre geometrije ceste, ki nanj pomembno vplivajo. Prav

zaradi upoštevanja dinamičnih parametrov smo opisani model poimenovali *Dinamični emisijski model*. Shematičen rezultat metode je prikazan na sliki 2.



Slika 2. Osnovni koncept dinamičnega emisijskega modela. Spremenljive vrednosti emisij v posameznih odsekih so ponazorjene z radiji prikazanih krogov.

Vsota emisij, dobljenih z izračunom s pomočjo dinamičnega emisijskega modela, se ne razlikuje bistveno od natančnejših statističnih metod. Dobimo pa drug pomemben podatek – razpored emisij po osi ceste, kar je pomembno za nadaljnje korake: izračun emisij in/ali analizo vpliva emitiranih snovi na posamezne skupine občutljivih objektov oziroma površin v prostoru!

Dinamični emisijski model je primeren za izračun vseh vrst emisij, na katere ima geometrija ceste pomemben vpliv (CO, NO<sub>x</sub>, saje, hrup itd.). V prvi fazi naših raziskav smo se osredotočili na emisijo CO, NO<sub>x</sub> in saj, za katere smo našli ustrezne računske osnove, ki so podrobno opisane v [10]. Računski model upošteva strukturo prometa, ki ga deli na:

- osebne avtomobile z bencinskim motorjem,
- osebne avtomobile z dieselskim motorjem ter
- težka tovorna vozila.

Pri izračunih so upoštevani naslednji osnovni parametri:

- začetna emisijska vrednost, dobljena z meritvami na preizkusni mizi,
- povprečna hitrost,
- vzdolžni naklon,
- nadmorska višina,
- povprečna masa (za tovornjake) in
- leto izračuna, ki vpliva na zmanjšanje emisij zaradi »pomladitve«  
strukture vozil.

**WEDA**



**PUMP**



**robot  
pompen**

## ELEKTROPOTOPNE ČRPALKE

**WEDA – švedske**

za prečrpavanje vode v gradbeništvu, kmetijstvu...

- kapacitete od 35–1100 m<sup>3</sup>/h
- globina do 90 m
- možnost povečanja globine
- potrebna moč od 1 kW dalje
- izredna vzdržljivost
- majhna teža – prenosljive
- takojšnja dobava
- staro za novo

**ROBOT – nizozemske**

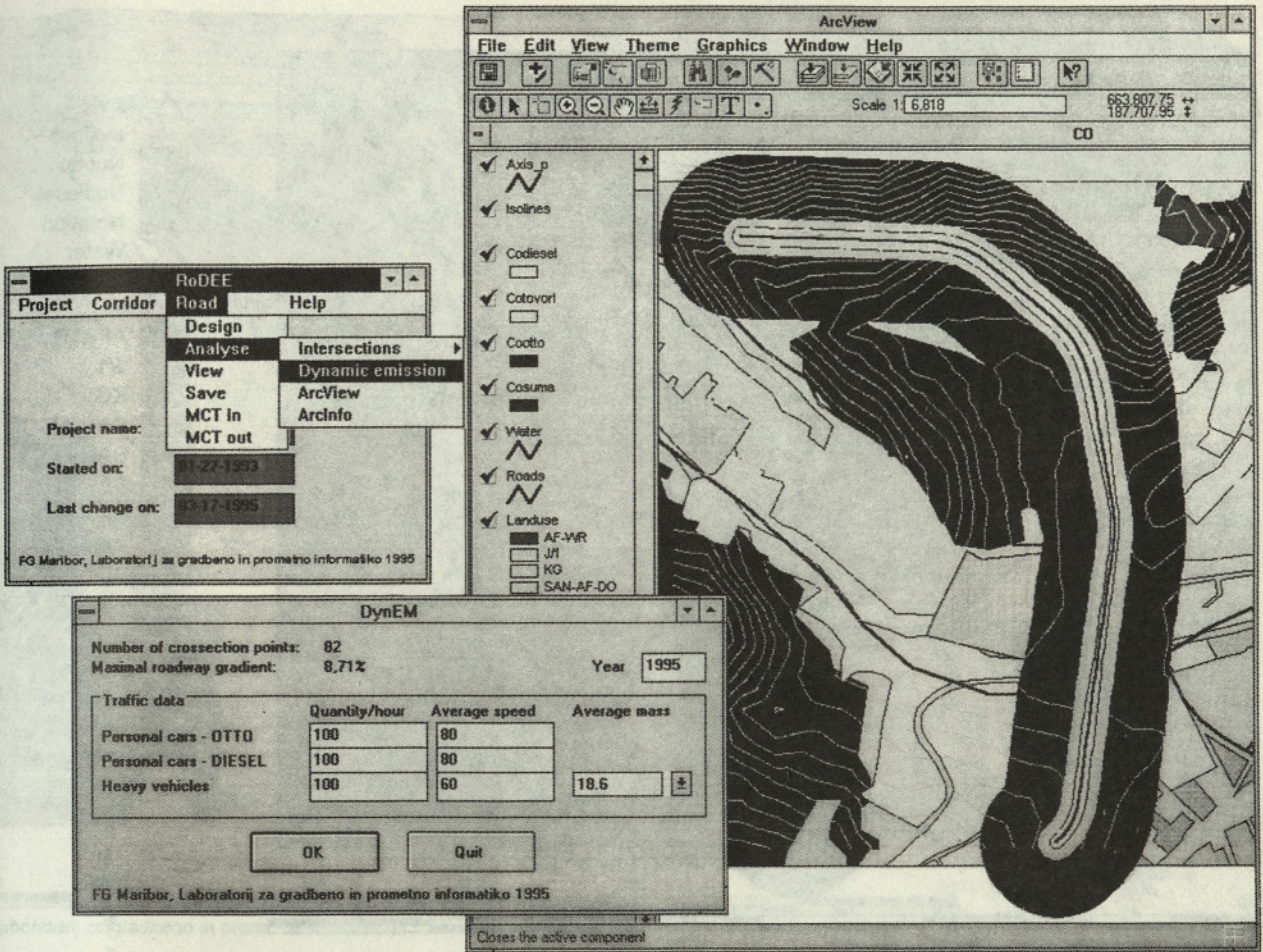
za prečrpavanje vseh vrst odplak v industriji, gradbeništvu, komunalni, elektrarnah, rudarstvu...

- kapacitete do 900 m<sup>3</sup>/h
- globina do 75 m
- potrebna moč od 0,65 kW dalje
- velik izkoristek
- odporne na aktivne snovi v mediju
- fiksna ali prenosna montaža – 6 načinov
- osnovna izvedba siva litina, možnost tudi nerjaveča, bronza...

ZASTOPAMO, PRODAJAMO, SERVISIRAMO:

*MiMeksTrade d.o.o. Žalec*

Podvin 223, 3310 ŽALEC, tel. 063/711-113, 714-651, fax 063/711-113



Slika 3. Dyn EM vključen v okolje RoDEE.

Parametri se seveda razlikujejo glede na emitirano snov. Pri tem je treba posebej poudariti, da v večini izračunov faktor naklona ni simetričen – da je torej povečanje emisij pri vožnji navzgor večje kot zmanjšanje emisij pri vožnji navzdol.

#### 4. UPORABA DINAMIČNEGA EMISIJSKEGA MODELA

Na osnovi dinamičnega emisijskega modela smo izdelali računalniški program, ki »sledi« osi podane ceste in za vsak odsek med dvema t. i. profilnima točkama po enačbah iz [10] izračuna vrednosti emisij CO, NOx in saj za vsak razred vozil posebej. V trenutni verziji pomeni podano število vozil vsoto vozil v obeh smereh, polovico v vsaki. Program je vključen v MS Windows verzijo okolja RoDEE in ga lahko aktiviramo takoj, ko smo definirali geometrijo ceste. Rezultati se zapišejo kot atributi cestne osi v podatkovno bazo podpornega geografskega informacijskega sistema, ta pa jih lahko v naslednjem hipu prikaže v izbranem merilu. Na sliki 3 so v oknu ArcView prikazane emisije CO v merilu 1 m = 1 m<sup>3</sup>/km/h. Naj-

manjša vrednost pripada osebnim avtomobilom z dieselskim motorjem, sledijo težka tovorna vozila in osebni avtomobili z bencinskim motorjem. Zadnji obod prikazuje emisijo vseh razredov skupaj. Isti rezultati so prikazani v numerični obliki v preglednici 1.

ID	Naklon	CO otto	CO diesel	CO tovor.	CO skupaj
20	0,36	69,38	6,24	27,43	103,05
21	0,43	69,42	6,24	27,43	103,10
22	0,86	69,70	6,24	27,43	103,38
33	1,96	70,49	6,24	27,43	104,16
34	2,76	71,02	6,67	27,43	105,12
35	3,56	71,57	7,62	27,43	106,62
36	4,36	72,11	8,56	27,43	108,10
37	5,16	72,67	9,51	27,43	109,61
38	5,96	73,22	10,45	27,43	111,11
39	6,76	73,79	11,40	27,43	112,62
40	7,56	74,36	12,35	27,43	114,15
41	8,36	74,94	13,29	27,43	115,66
42	8,71	75,23	13,71	27,43	116,37

Preglednica 1. Emisije CO [m<sup>3</sup>/km/h] za nekatere tipične točke primera, prikazanega na sliki 3.



Slika 4. Grafični prikaz emisij NOx.

Na slikah 4 in 5 je prikazana emisija NOx in saj za iste prometne podatke. Še posebej pri sajah je dobro viden vpliv vzdolžnega naklona, ki znaša v spodnjem delu ceste približno 5%, v sredini 0% in v zgornjem delu 8%.

Programski modul DynEM lahko uporabljamo tudi samostojno, saj zna prebrati metadateko cestnega telesa (MCT), rezultate pa lahko shrani v klasični ASCII datoteki, lahko pa tudi v katerem od razširjenih formatov podatkovnih baz (Access, DBase, Paradox, btrieve itd.).

## 5. NADALJNI RAZVOJ

V prihodnje nameravamo v okviru nekaterih raziskovalnih projektov primerjati dinamični emisijski model z najpogosteje uporabljenimi metodami za izračun emisij ter z meritvami in po potrebi prilagoditi računski postopek. Poleg tega bomo v izračun emisij vključili tudi hrup.

Na osnovi dinamičnega emisijskega modela bomo poizkusili izgraditi imisijski model, ki bo imel povezovalno vlogo za naslednji korak – model vrednotenja vpliva emitiranih snovi na posamezne, nanje občutljive objekte v prostoru

(kmetijska zemljišča, vode, gozdove, posamezne biotope, gradbene objekte itd.).

V načrtu imamo tudi povezavo programa DynEM z obstoječo podatkovno bazo cest v Sloveniji, ki skupaj z višinskim modelom Slovenije zagotavlja vse za izračun potrebne podatke. Na ta način bomo lahko prikazali razporeditev in vsaj približne vrednosti trenutnih prometnih emisij v celotni državi.

## 6. ZAKLJUČEK

Dobro se zavedamo dejstva, da predstavljeni dinamični emisijski model še zdaleč ni popoln. V strukturi cestnega prometa in v načinu vožnje je vse preveč neznank, ki se razlikujejo od države do države, od pokrajine do pokrajine, celo od ceste do ceste. Kljub temu smo mnenja, da je upoštevanje dinamičnih parametrov treba tudi obravnavati dinamično, če želimo čim bolj objektivno ugotoviti, katera varianta ceste je za okolje bolj sprejemljiva in katera manj. Pri tem je namreč vplive treba analizirati predvsem lokalno in ne le globalno. Le tako bomo lahko pretehtali vsa dejstva, ki govorijo za in proti cesti in ocenili, kakšno zapuščino smo pripravili znancem.



Slika 5. Grafični prikaz emisij saj.

## LITERATURA

- [1] »Assesing Transportation-Related Air Quality Impacts«, National Academy of Sciences, Washington, D. C., 1976.
- [2] »Fundamentals of Air Quality for Highway Planning and Project Development«, Technical Report U.S. DOT, FHWA, 1984.
- [3] Hazim K. Al-Omishy and Hafidh S. Al-Samarrai, »Road traffic Simulation Model for Predicting Pollutant Emissins«, Atmospheric Environment, 22 (1988), pp 769–774.
- [4] »Merkblatt über Luftverunreinigung van Straßen«, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, Bonn, 1992.
- [5] Köhalmi Zsuzsa, »Die Untersuchunge der Schadstoffemissionen von Kraftfahrzeugen in Ungarn«, 4. International workshop on computer aided road planning and traffic management proceedings, Faculty of technical sciences, Maribor, 1994, pp 110–114.
- [6] Danijel Rebolj, »Computerunterstützter integrierter Straßenentwurf in einer objektorientierten Umgebung«, Verlag für die Technische Universität Graz, Graz, 1993.
- [7] Danijel Rebolj, »Integrated road design and evaluation environment«, A. A. Balkema, Rotterdam, 1995, pp. II/1001–1006.

- [8] Danijel Rebolj, »The elevation of the abstraction level in the procedure oriented program environment with the Object Shell Method«, International conference on systems research, informatics and cybernetics. Baden-Baden, 1992.
- [9] Andrej Tibaut and Danijel Rebolj, »Visualisierung des Straßenkörpermodells«, Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und der Mathematik in Architektur und Bauwesen, Abstracts. Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar – Universität, Weimar, 1994, pp 151–156.
- [10] Schweiger H., et al., »Auswirkungen der Abgasgesetzgebung auf die Tunnellüftung«, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten. Heft 337 Straßenforschung, Wien, 1987.





## UPORABA UMETNE INTELIGENCE V GRADBENI KONSTRUKTIVI

### The application of artificial intelligence in structural engineering

UDK 624.007:681.324

GORAN TURK, JANKO LOGAR

#### POVZETEK

V članku prikazujemo pregled literature s področja umetne inteligence v gradbeni konstrukciji, še posebej s področja uporabe nevronske mreže. Osnova za tak pregled literature je bil mednarodni kolokvij »Na znanju oprti sistemi v gradbeništvu«, marca 1995 v Bergamu v organizaciji mednarodnega združenja za mostove in konstrukcije (IABSE). Na tem kolokviju je bil poudarek na uporabi ekspertnih sistemov in drugih na znanje oprtih sistemov, manj so avtorji poročali o nevronske mreže. Zato sva v tretjem razdelku dodala širši pregled literature s področja uporabe nevronske mreže.

#### SUMMARY

The paper includes literature review of the use of artificial intelligence in structural engineering. The basis for this report was the IABSE Colloquium »Knowledge Support Systems in Civil Engineering« held in Bergamo (Italy) from 16 to 17 March of 1995. Since the majority of authors reported about expert systems and knowledge based systems but less about the use of neural networks, a broader review of published reports on neural networks is given in separate section.

**AVTOR:**

dr. Goran Turk, dipl. gradb. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko; mag. Janko Logar, dipl. gradb. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem.

## 1. UVOD

Povod za pisanje tega članka je najina udeležba na mednarodnem kolokviju »Na znanje oprti sistemi v gradbeništvu,« ki je potekal od 16. do 17. 3. 1995 v Bergamu v Italiji (IABSE Colloquium, Knowledge Support Systems in Civil Engineering). Na zaključni razpravi kolokvija je prišlo do nekaterih nejasnosti v zvezi z izrazoslovjem. Videti je bilo, da so ljudje govorili o istih stvareh, vendar uporabljali različne pojme. Soglasni so si bili le v trditvi, da so *na znanje oprti sistemi* širši pojem kot *ekspertni sistemi*. Zato poskušava na to temo dodati še pogled, ki ustreza opisu v zanimivi knjigi o umetni inteligenci (*Caudill in Butler*, 1990), za katerega pa veva, da ni v skladu z nekaterimi avtorji (npr. *Lehner*, 1994):

– **Na znanje oprti sistemi** (ang. »knowledge based systems«) oziroma **sistemi za podporo pri odločanju** (ang. »decision support systems«) predstavljajo najširši pojem. Med take sisteme lahko uvrščamo prav vse metode, ki jih inženir uporablja pri svojem delu. Ti sistemi so lahko taki, da nam pomagajo pri odločitvi o najboljši rešitvi problema (baze podatkov, informacijski sistemi, algoritmični programi, ...) ali pa to odločitev predlagajo sami (ekspertni sistemi in umetne nevrnske mreže).

– **Umetna inteligenca** je malo ožji pojem. Med metode umetne inteligence lahko prištevamo tiste sisteme, ki se lahko na osnovi določenih podatkov odločijo, katera rešitev je najprimernejša. Taka definicija sledi iz razmisleka, kaj je to inteligenca. Webstrov slovar za inteligenco podaja naslednji opis: zmožnost sprejemanja logičnih povezav in uporabe znanja pri reševanju problemov ter za pravilno reagiranje v novih, neznanjih situacijah.

– **Ekspertni sistem** je računalniško orodje, ki na osnovi baze znanja predlaga rešitev problema.

– **Umetne nevrnske mreže** posnemajo delovanje živih možganov, zato lahko od njih pričakujemo podobno delovanje (zmožnost posploševanja, asociiranja in podobno).

Začetki uporabe umetne inteligence v gradbeništvu segajo že pred leto 1960 (*Spillers*, 1966). *Spillers* se med drugimi sklicuje na vir *Samuela* Some Studies in Machine Learning using the Game of Checkers iz leta 1959, leta 1962 pa je nastal že pregledni članek *Andrewsa* z naslovom A Survey of Artificial Learning and Intelligence.

Na kolokviju IABSE so bili prikazani zelo različni prispevki, ki jih lahko razdelimo v vsaj tri skupine: ekspertni sistemi, nevrnske mreže in kombinacije teh dveh z bazami podatkov, geografskimi informacijskimi sistemi, algoritmičnimi računskimi metodami in podobno. Zagovorniki posameznih sistemov (pristopov) so prikazovali prednosti svojih metod. Poglejmo najprej, katere so bistvene razlike med ekspertnimi sistemi in nevrnskimi mrežami (*Caudill in Butler*, 1990).

Ekspertni sistemi, ki so ena skupina na znanje oprtih sistemov, temeljijo na pravilih. Pri ekspertnih sistemih predpostavimo, da problem lahko rešimo z zaporedno uporabo določenih pravil. Pravila lahko temeljijo na približ-

nih napotkih, ki jih inženirji uporabljajo vsakodnevno, ali pa so rezultat analize konstrukcije. Umetne nevrnske mreže poskušajo rešiti problem na drugačen način. Pravil, po katerih naj se sistem umetne inteligence obnaša, pri nevrnski mreži ni potrebno podajati. Umetni nevrnski mreži podamo vhodno izhodne pare (podatke in njim ustrezajoče rezultate) in jo podvržemo procesu učenja. Ko je nevrnska mreža dobro naučena, so vsa pravila skrita v utežeh, s katerimi je obnašanje nevrnske mreže določeno.

Ekspertni sistemi delujejo tako, da zajamejo pametno obnašanje s pravili oziroma pogoji ne glede na osnovni mehanizem razmišljanja. Umetne nevrnske mreže pa pametno obnašanje posnemajo na podoben način, kot to delajo možgani živali in ljudi. Ekspertni sistemi torej opisujejo obnašanje možganov, nevrnska mreža pa ga posnema. Različen je tudi način, s katerim pripravljamo ekspertni sistem in umetno nevrnsko mrežo. Ekspertne sisteme sestavljamo tako, da na izbrano lupino postavljamo pravila oziroma pogoje. Praviloma naj bi ta pravila postavljali strokovnjaki s področja, za katerega pripravljajo ekspertni sistem. Pri kompleksnejših problemih je lahko takih pravil ogromno. V nekaterih aplikacijah se je pokazalo, da se dobro pripravljene ekspertni sistemi po uspešnosti **lahko** merijo s svojimi človeškimi tekmeci – strokovnjaki.

Vsem raziskavam navkljub pa ekspertni sistemi ne morejo rešiti nekaterih problemov, ki jih možgani ljudi neprestano rešujejo: prepoznavanje okolice, prepoznavanje govora, nadziranje gibanja in asociacija. Vsega tega ekspertni sistemi ne morejo narediti, saj zato preprosto ne poznamo pravil, ki jih ekspertni sistemi za svoje delovanje potrebujejo. Pri teh problemih so nevrnske mreže prava rešitev.

Druga težava pri sestavljanju ekspertnih sistemov je tudi ta, da se strokovnjak (človek) včasih ne odloča na osnovi urejenega znanja (določenih pravil), temveč se odloča intuitivno. Tega pa ne znamo in ne moremo vključiti v ekspertni sistem. Nevrnske mreže naj bi probleme lahko reševale celo »intuitivno«.

Seveda imajo tudi nevrnske mreže mnogo omejitev in slabosti. Prva je že v tem, da so današnji računalniki premalo sposobni (imajo premalo spomina in so prepočasni), da bi lahko posnemali možgane muhe, kaj šele človeka. Zato je vsaj zaenkrat njihova uporaba zelo omejena. Druga slabost je, da težko pripravimo mreže s tako komplicirano strukturo, kot so možgani živali in ljudi. V živih možganih so nevroni povezani v vseh smereh z nedoločeno strukturo (labirint, ang. »maze«). Mi pa znamo nevrnsko mrežo učiti in uporabljati le pri zelo preprosti strukturi – najobičajneje kar z enosmerno mrežo, v kateri so nevroni razporejeni v nivojih. Učenje nevrnske mreže je naslednja težava, saj predstavlja iskanje globalnega minimuma v mnogodimenzionalnem prostoru, kjer je lahko veliko število lokalnih minimumov. Za rešitev tega numeričnega problema ni zanesljive metode.

Na kolokviju v Bergamu so zagovorniki ekspertnih sistemov nakazali še eno prednost le-teh. Pravijo, da je

inženirju ljubše, da ve, kako neki program ali naprava deluje in da lahko tudi sami aktivno sodelujejo pri dodajanju novega znanja in izkušenj v ekspertni sistem (bazo znanja). Pri nevronske mreži pa nimamo nobenih podatkov, kako in zakaj deluje in jo uporabljamo le kot »črno škatlico«.

Začetki uporabe ekspertnih sistemov v načrtovanju konstrukcij segajo v prvo polovico osemdesetih let (*Maher in Fenves*, 1984). Pri nas se prvi članek o ekspertnih sistemih pojavi leta 1988 (*Duhovnik in Berkopec*, 1988), v Gradbenem vestniku pa je leto kasneje *Raič* poročal o ekspertnem sistemu za sestavljanje naložbenih predračunov (*Raič*, 1989). Do danes je vsaj na akademskem nivoju pri nas razvitih še nekaj ekspertnih sistemov (*Peruš*, 1994, *Krainer in sod.*, 1994). Za tiste bralce, ki jih bolj zanimajo ekspertni in na znanje oprti sistemi, med literaturo navajava posebni izdaji revije *Journal of Computing in Civil Engineering*, in sicer prvega z naslovom »Expert systems in Civil Engineering« (1987) ter drugega z naslovom »Knowledge-Based Systems in Design and Planning« (1991).

V nadaljevanju povzemava teme posameznih razprav s kolokvija in nekoliko natančneje opisujeva nevronske mreže ter njihovo uporabo v gradbeništvu, saj je bil tudi najin prispevek na kolokviju s tega področja.

## 2. KOLOKVIJ »NA ZNANJE OPRTI SISTEMI V GRADBENIŠTVU«

Kolokvij je organizirala delovna komisija 6IABSE, ki je zadolžena za informacijske tehnologije. Dosedanja tematska srečanja pod okriljem IABSE na obravnavano tematiko so bila: Informatika v visokogradnji (1982), Ekspertni sistemi v gradbeništvu (1993) in obravnavani kolokvij Na znanje oprti sistemi v gradbeništvu (1995).

Zbornik del predstavlja 37 prispevkov, razvrščenih v 4 sekcije:

1. Z znanjem podprto projektiranje in izgradnja konstrukcij (18 prispevkov),
2. Aplikacije za opazovanja in sanacije konstrukcij (8 prispevkov),
3. Na znanje oprti sistemi – standardi in tehnični predpisi (3 prispevki),
4. Tehnologija umetne inteligence v gradbeništvu (8 prispevkov).

V nadaljevanju povzemava pregled prispevkov. Članke, ki opisujejo uporabo nevronske mreže, navajava v tretjem razdelku.

### 2.1. Inženirstvo znanja (knowledge engineering)

Prispevke lahko uvrstimo v tri zvrsti: teoretične, razvojne in aplikativne. Med teoretične članke uvrščamo tiste, ki

pomenijo prispevek k razvoju inženirstva znanja (ang. »knowledge engineering«) in predstavljajo metode za zajem, procesiranje in predstavitev znanja, v zadnjem času predvsem z vidika objektno usmerjenega pristopa. Veliko dela je namenjenega spoznavanju in razumevanju procesa projektiranja, kot ga opravlja človek. Tovrstne prispevke so predstavili *Borkowski in Grabska*, ki sta za risanje mostov uporabila matematično teorijo grafov, *Bretschneider in Hartmann* sta se ukvarjala s predstavitvijo sočasnih procesov pri objektno orientiranih modelih projektiranja. *Boulanger in sod.* so na podlagi opazovanja ekspertov pri delu ugotavljali prednosti in slabosti posameznih modelov procesa projektiranja od linearnega, prek drevesnega in mrežnega do labirintnega (ang. »maze«) modela ter poudarili prednosti slednjega. Teoretične osnove za model, ki sta ga predstavila *Liu in Zhang*, so realizirane v ekspertnem sistemu *Reliability Assessment in Structural Engineering*, ki ga priporoča kitajsko ministrstvo za gradbeništvo. *Cauvin* in sodelavci so predstavili kriterije za organizacijo in izdelavo baze podatkov o konstrukcijah in njenih sestavnih delih (elementih), ki bo služila ekspertnemu sistemu. *Rio* pa je s sodelavci opisala svoj pristop k integraciji procesa projektiranja in podobno kot še nekateri drugi opozorila na problem subjektivnosti, individualnosti in osebnega pristopa vsakega posameznega eksperta, česar tudi na znanje oprti sistemi ne smejo onemogočiti. Prispevek *Tanake in Mikamija* je eden tistih, ki razvite teoretične novosti aplicirajo na konkretnem primeru. Na osnovi zajetne baze podatkov o poškodbah jeklenih mostov zaradi utrujanja materiala so razvili ekspertni sistem, ki se na osnovi primerov iz baze uči samostojno. Poleg »pozitivnega« učenja, pri katerem sistem učimo pravih odgovorov, sta vključila tudi t.i. »negativno« učenje, s katerim zmanjšamo možnost nezajetnih odgovorov.

### 2.2. Razvoj na znanje oprtih sistemov

Večina prispevkov opisuje sisteme v razvoju, ki so bodisi akademske ali praktične narave. Glavna orodja za razvoj sistemov umetne inteligence sta programska jezika Prolog in C++ v okolju Windows, veliko sistemov pa vključuje tudi orodja za delo z bazami podatkov, AutoCAD in AutoLISP ter geografske informacijske sisteme.

Na univerzi v Cardiffu skupina za razvoj sistemov za podporo pri odločanju že več let razvija tovrstne sisteme v tesnem sodelovanju s strokovnjaki. Spoznali so namreč, da sistemi za podporo pri odločanju zelo težko zaživijo v praksi, če ne prinašajo očitnih prednosti pred metodami, ki jih praksa trenutno uporablja. Poleg tega je pomembno, da so izdelki prijazni do uporabnika in kar se da sledijo načinu dela in razmišljanja uporabnika. Njihova najpomembnejša izkušnja pri dosedanjem razvoju na znanje oprtih sistemov pa je, da sistemi ne smejo biti preveč »samostojni« in morajo dopustiti inženirju, da jih vodi, da ustvarja. *Miles* je predstavil razvoj celovitega sistema za projektiranje mostov. Sistem deluje tako, da pravzaprav le opazuje inženirja pri delu in opozori, če je kaj narobe (konstrukcijska napaka, kršenje določil tehničnih predpisov, neekonomski rešitev, ...). *Moore* iz iste skupine je

predstavila del tega celovitega sistema, ki je namenjen hitri preliminarni oceni cene mostu in so ga že testirali potencialni uporabniki.

*Miyamoto* je še z dvema soavtorjema predstavil sistem za vrednotenje betonskih mostov na osnovi formularjev, ki nastanejo ob rednih inšpekcijskih pregledih. Uporabljena je kombinacija ekspertnega sistema in nevrnske mreže. *Nagaraja in Melhem* sta s procesom induktivnega učenja ustvarila ekspertni sistem za ugotavljanje stopnje korozije armature v armiranobetonskih konstrukcijah in posledično za določanje življenjske dobe konstrukcije. *Hammad* je s sodelavci na primeru domačega mesta Nagoye predstavil uporabnost novih tehnologij pri delu z bazami podatkov za upravljanje mostov. Uporabljena je kombinacija geografskih informacijskih sistemov in baze digitaliziranih fotografij ter video posnetkov. *Cauvin in Stagnitto* sta kot nadaljevanje že omenjenega, bolj teoretičnega prispevka, predstavila precej široko zasnovan prototip ekspertnega sistema za preliminarno projektiranje različnih objektov: mostov, razprostrtih enoetažnih objektov (npr. tovarniških hal) in objektov visokogradnje. *Lenerts in Gehbauer* sta predstavila sistem za optimizacijo organizacije gradbišča. *Vos in Buvelot* opisujeta zasnovano na znanje oprtega sistema za izkop gradbene jame, za katerega menita, da v fazi prototipa daje obetajoče rezultate. Zanimiva je njuna navedba v uvodu, da v strokovni literaturi nista zasledila nobenega poročila o uporabi ekspertnih sistemov v gradbeni industriji in da so ekspertni sistemi zaenkrat zaživel le v bančništvu in pri zavarovalniški dejavnosti. Za tiste, ki imajo bogato ekspertno znanje in bi ga želeli zajeti v na znanje oprti sistem, je *Bruno* s sodelavci izdelal lupino za razvoj takih sistemov. *Dal Zio Palutan* je s sodelavci opisala sistem za celovito obravnavo vzdrževanja objektov, ki je namenjen tako lastnikom, kot upravljalcem, državni administraciji, zgodovinarjem, projektantom, urbanistom. *Vann in Davis* sta zasnovala in deloma realizirala sistem za nadzorovanje in diagnostiko delovanja elektronskih merilnih naprav.

Arhitektom namenjeni ekspertni sistemi so še bolj v povojih, saj je za arhitekturo značilna velika mera individualnega pogleda na prostor in njegovo oblikovanje. Kljub temu so *Huebler* in sodelavci predstavili ambiciozno zastavljen na znanje oprt sistem, ki naj bi omogočal funkcionalno zasnovano bivanjskega ali poslovnega prostora pa vse do izdelave konstrukcijskega projekta. Znanje je razdeljeno v formalno (pravila) in neformalno (besedila, slike, primeri, ...). Trenutno je kot prototip izdelan le prvi del celotnega sistema, in sicer za funkcionalno analizo prostora. Bolj ozko je zastavljen projekt *Tanga in Zreika*, ki sta se omejila na ugotavljanje konsistence bivanjskega prostora. Sistem temelji na pogojih (omejitvah), ki morajo veljati za vsak arhitektonski objekt (vsak prostor mora imeti vrata, vrata morajo biti vgrajena v zidu, ...). *Karroum* je s sodelavci pripravil članek, ki utemeljuje potrebo po izdelavi na znanje oprtega sistema za analizo akustičnega odziva objektov. Delo je v začetni fazi in predstavlja le analizo projektiranja ekspertov s tega področja ter predlaga izbiro ustreznih orodij.

Standarde in tehnične predpise so obravnavali trije pri-

spevki. *Garret* je v sodelovanju z nemškimi kolegi predstavil tri različne koncepte pri razvoju sistemov za račun konstrukcij, pri katerih so tehnični predpisi različno vneseni v postopek računa in dimenzioniranja konstrukcij. Ker se predpisi spreminjajo, je idealen tak pristop, da je modul, ki vsebuje njihovo vsebino, povsem neodvisen od programa za račun in dimenzioniranje in »potuhnjeno« spremlja račun ter reagira šele takrat, ko so kršene določbe predpisa. *Vanier* je predstavil generator izvlečka predpisov. Ker so tehnični predpisi v večini držav zelo obsežni, pri posameznem objektu pa je potrebno upoštevati le nekatera določila, je ustrezen izvleček lahko zelo koristen. Obsežnost ni edina ovira pri uporabi predpisov. Pogosto se predpis sklicuje na druge predpise, pa tudi določila različnih poglavij istega predpisa se močno navezujejo. *Koumousis* in soavtorji so na primeru predpisa Eurocode 3 pokazali uporabnost elektronske verzije predpisa, kodirane v logičnem jeziku Prolog, ki omogoča hiter pregled vseh delov predpisa, nanašajočih se na isti problem.

Nekaj več prispevkov je obravnavalo različne kovinske konstrukcije. *Nishido in Ito* sta prikazala uspešnost sistema za izvedbo škatlastih jeklenih mostov po metodi narivanja (ang. »louching erection method«). V prikazanih primerih se je sistem obnašal nekoliko bolj varčno kot strokovnjak. Predvidel je nekaj manj bočnih ojačitev in most postavil na mesto v manj korakih. *Borkowski in Fleischman* ter *Tiziani s sod.* so sisteme za podporo pri odločanju uporabili za projektiranje prostorskega paličja, pri čemer je eden bistvenih kriterijev cena konstrukcije. Taki kompleksni sistemi omogočajo hitro in natančno ovrednotenje cene, ne le glede na težo vgrajenega jekla, temveč ob upoštevanju realnih stroškov od projektiranja do izvedbe. *De Gelder* je s sodelavci prikazal sistem za ekonomično projektiranje stikov med elementi kovinskih konstrukcij. *Roddis* je s sodelavci predstavila rezultate dveh raziskovalno razvojnih projektov. Prvi prispevek opisuje razvoj sistema, ki združuje na znanje oprti sistem in grafično konstruiranje (CAD) za projektiranje jeklenih konstrukcij. Poseben poudarek je na izmenjavi podatkov med vsemi členi, ki so vključeni v načrtovanje in izdelavo konstrukcij. Eno bistvenih vodil avtorjev je pomagati projektantu, da že v fazi zasnove pozna končne posledice svojih odločitev. Znano je namreč, da v fazi zasnove konstrukcije lahko vplivamo še na vse parametre, kasneje pa vse manj.

### 2.3. Aplikacije

Drugi prispevek *Roddis* prikazuje ekspertni sistem za odstranjevanje napak pri prefabriciranih elementih jeklenih mostov. Ta je že dobro leto v rabi pri končnih uporabnikih in nas tako privede v zadnjo skupino prispevkov s kolokvija: prikaz uspešnih aplikacij, prenesenih v prakso. Ti članki so bili maloštevilni. Predpogoj za uspešen prenos sistemov umetne inteligence v prakso je opazovanje ekspertov pri delu. Pri tem običajno naleti avtor na prvo oviro: nezaupanje ekspertov, ki neradi dovolijo podroben vpogled v svoje delo. Zato ni čudno, da je edina aplikacija, ki že nekaj let uspešno teče v

praksi, vezana na opazovanje in analiziranje meritev ločne pregrade Ridracoli in katedrale ter šestih drugih kulturnozgodovinskih spomenikov v Pavii v Italiji. Za človeka je namreč pregledovanje številnih meritev in njihova analiza mučno in nezanimivo opravilo. *Salvaneschi in Masera* sta s sodelavci opisala na znanje oprta sistema, ki zbirata meritve številnih merilnih naprav in jih analizirata ter opozarjata na predvideno obnašanje konstrukcij. *Salvaneschi* je sistema opisal z vidika avtorja, *Masera* pa na primeru ločne pregrade z vidika uporabnika.

### 3. NEVRONSKE MREŽE

Nevronske mreže so sestavljene iz večjega števila zelo preprostih elementov – nevronov. Model nevrone deluje podobno kot nevron v možganih. Nevron sprejme dražljaj od mnogih drugih nevronov, ga predela in pošlje mnogim drugim nevronom. Dražljaji se prenašajo prek povezav, na koncu povezav pa leži sinapsa, ki dražljaj ojači, zmanjša ali ga celo ustavi. V umetni nevronske mreži so nevroni predstavljeni kot spremenljivke, ki imajo vrednost trenutne vsote vseh dražljajev, povezave so določene z utežmi. Zaradi podobne strukture delujejo umetne nevronske mreže podobno kot možgani, čeprav so seveda mnogo bolj primitivne in manj sposobne od pravih možganov.

Umetne nevronske mreže lahko razdelimo v različne skupine na osnovi nekaj kriterijev:

– Vhodni podatki so lahko zvezni ali diskretni. Poseben primer diskretnih vhodnih podatkov so binarni vhodni podatki, katerih značilna predstavnika sta fotografija in digitaliziran zvok.

– Učenje mreže je lahko vodeno ali samostojno. Pri vodenem učenju so znani vhodni in izhodni podatki, mreža pa poskuša posnemati delovanje tako, da se izhodni podatki skladajo z rezultatom, ki ga poda nevronska mreža. Pri samostojnem učenju so podani le vhodni podatki. Mreža se nato uči podobno, kot se človek nauči hoditi, slišati in podobno.

– Mreže imajo različno strukturo (*Lippmann*, 1987). Strukture mrež se običajno imenujejo po avtorjih, ki so največ prispevali za razvoj določene mreže:

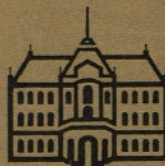
- mreža Hopfielada,
- mreža Hamminga,
- mreža Carpenterja in Grossberga,
- mreža Kohonena in
- večslojna enosmerne mreže (ang. »multilayer feed-forward network«), ki je sestavljena iz sloja vhodnih nevronov, enega ali več skritih slojev in sloja izhodnih nevronov.

Mreže z različno strukturo uporabljamo za različne probleme. Prve tri tipe mreže uporabimo pri binarnih vhodnih

podatkih in pri problemih razvrščanja v razrede. Zadnja dva tipa mreže pa sta bolj primerna za zvezne vhodne podatke in reševanje problemov aproksimacije.

V gradbeništvu najpogosteje uporabljamo večslojne enosmerne mreže, ki jih uporabljamo za aproksimacijo neznanih zvez med vhodnimi in izhodnimi podatki (vhodno-izhodni par). Dokazali so (*Hornik in sod.*, 1989; *Funahashi* 1989), da lahko z enosmernimi mrežami aproksimiramo poljubno zvezno funkcijo. Pri takih nevronske mrežah moramo določiti število skritih slojev ter število nevronov v posameznem skritem sloju. Naslednji korak je učenje mreže.

Osnovni način učenja enosmerne mreže je posplošeni delta postopek, ki ga imenujemo tudi učenje z vzratnim porazdeljevanjem napake (ang. »error back propagation algorithm«), ki ga je prvi predstavil *Rumelhart* v znani knjigi *Parallel distributed processing* (1986). Pri tem postopku spreminjamo uteži tako, da napaka aproksimacije najhitreje pada. To je pravzaprav Newtonov postopek iskanja ekstremov. Ta postopek je žal marsikdaj neprimeren, saj zelo slabo konvergira ali pa konvergira k lokalnemu minimumu, ki ni pravilna rešitev problema. Zato so raziskovalci iskali boljše rešitve. Prvi pristop je tako imenovana metoda simuliranega kaljenja (ang. »simulated annealing«), ki so jo s tremi različnimi prispevki predstavili na Svetovnem kongresu o nevronske mrežah (WNNC '93), ki je potekal od 11. 7. do 15. 7. 1993 v Portlandu (Or) v ZDA (*Yip in Pao; Li, Joerding in Genz; Burshstein*). Problem lahko rešimo tudi tako, da je velikost koraka, s katerim spreminjamo uteži, spremenljiva (*Jankiraman in Honavar, WNNC '93, Ramirez in Arghya*, 1991).



**FAKULTETA  
ZA GRADBENIŠTVO  
IN GEODEZIJO  
LJUBLJANA**

Pri učenju nevronske mreže lahko pride tudi do tega, da nevronska mrežo predobro naučimo na niz učnih podatkov in ji s tem zmanjšamo sposobnost posploševanja. Zato moramo učenje dovolj kmalu ustaviti. Druga rešitev tega problema je tako imenovano obrezovanje (ang. »pruning«). Pri obrezovanju lahko določen del mreže, za katerega ugotovimo, da ne vpliva močno na rezultate, izključimo iz računa. Dober pregled metod obrezovanja podaja *Reed* (1993).

Na kongresu v Portlandu so poročevalci prikazali čez 650 prispevkov z najrazličnejših področij. Najpogosteje so prikazovali rezultate raziskav na področju prepoznavanja vzorcev (pisave), prepoznavanja glasov in podobno. Le malo je bilo prispevkov iz gradbeništva. *Ramirez in Brar* sta prikazala uporabo mreže Hopfielda za optimalno razdeljevanje konstrukcije na podkonstrukcije pri statični analizi konstrukcij z metodo končnih elementov. *Cammarrat* s sodelavci je primerjal običajne regresijske metode aproksimacije z nevronskimi mrežami pri napovedovanju hrupa v urbanih sredinah. *Cook* s sodelavci pa je simuliral delovanje naftnega rezervoarja.

To seveda niso edini prispevki, ki prikazujejo uporabo nevronske mreže v gradbeništvu. Pred kratkim je bila te temi namenjena celotna številka revije *Journal of Computing in Civil Engineering* (ASCE, 1994). Našteti ali opisani so zelo različni primeri uporabe nevronske mreže v gradbeništvu. Prva skupina aplikacij rešuje probleme razvrščanja v razrede:

- odločitev o optimalnem tipu odrov pri visokogradnjah,
- napovedovanje intenzitete potresa glede na magnitudo potresa, geološke razmere in lokacijo,
- določitev stopnje napetosti v kabliah antene.

Drugi avtorji prikazujejo uporabo nevronske mreže v simulacijah delovanja konstrukcij. Na osnovi tega lahko rešujemo probleme optimizacije konstrukcij, računanja zanesljivosti konstrukcij in podobno. Zanimiv je problem, ki ga je reševal *Gagarine* s sodelavci, ki je na osnovi merjenja vpliva tovornjaka na mostno konstrukcijo z nevronske mreže ocenjeval teža vozila. Mnogi avtorji poročajo tudi o uporabi nevronske mreže pri ugotavljanju poškodovanosti konstrukcij.

Obsežen članek na temo diagnostike poškodb prednapetih betonskih kolov so objavili *Yeh s sod.* (1993). Podobna pa sta tudi članka *Wuja s sod.* (1992) ter *Ramireza in Arghya* (1991).

Zanimiv in zelo ambiciozen je prispevek *Žagarja in Delića* (1993), v katerem avtorja opisujeta uporabo nevronske mreže v aktivnih (pametnih) mostnih konstrukcijah.

Eden izmed pomembnejših člankov s področja uporabe nevronske mreže v mehaniki je članek *Ghaboussija s sod.* (1991), v katerem avtorji aproksimirajo delovanje betona z nevronske mreže. Nekakšno nadaljevanje njihovega dela je tudi najin prispevek na kolokviju v Bergamu, v

katerem prikazujeva, kako sva z nevronskimi mrežami napovedovala rezultate endometrijskih preiskav. Poleg najinega je bilo na kolokviju v Bergamu prikazanih še pet prispevkov o uporabi nevronske mreže. V prispevkih (*Kirkegard in Rytter; Barai in Pandey*) so analizirali delovanje nevronske mreže pri ugotavljanju poškodb na konstrukcijah. *Singh* s sodelavci je prikazal delovanje nevronske mreže pri odločanju o optimalni uporabi mehanizacije, *Borkowski in Fleischmann* sta uporabila nevronske mreže za oceno stroškov izvedbe prostorskega paličja, *Satorre* pa je z nevronske mreže iz zaporedja slik analizirala spremembe na njih.

Tudi pri nas že nekaj časa uporabljamo nevronske mreže v različnih aplikacijah. *Peruš* (1994) je nevronske mreže uporabil pri oceni potresne odpornosti armiranobetonskih konstrukcijskih elementov. V doktorskem delu *Peruš* tudi podaja kratek pregled objavljenih del s področja uporabe nevronske mreže v gradbeništvu. Poleg prej omenjenega prispevka o napovedovanju rezultatov endometrijskih preiskav (*Logar in Turk*), je *Turk* (1994) uporabil nevronske mreže tudi pri analizi zanesljivosti konstrukcij po metodi odzivnih plošev.

## Sklepi

Prispevki in razprave na kolokviju v Bergamu so pokazale, da so današnje aplikacije umetne inteligence v gradbeništvu omejene na specialna, ozka področja. Malo je poskusov, da bi ustvarili bolj kompleksen sistem, ki bi pokrival širše področje, pa še tu avtorji pojasnjujejo, da sistemi še zdaleč niso popolni.

Morda presenetljiva, a nedvoumna ugotovitev prisotnih je bila, da na znanje oprti sistemi le stežka zaživijo v praksi, kar je na najbolj ironičen način pokazal *Ian Smith*, predsednik znanstvenega komiteja kolokvija, z vprašanjem vsem prisotnim: *Kdo izmed vas uporablja pri svojem delu tak sistem?* Dobil ni niti enega pozitivnega odgovora. Kljub temu so tisti prisotni, ki so uspeli vzpostaviti konstruktivno sodelovanje z eksperti v praksi, prispevali k optimističnemu pogledu v prihodnost. Njihov nauk pa je zgovoren: eksperti in uporabniki morajo biti prisotni pri nastajanju na znanje oprtih sistemov od začetka do konca razvoja. Sistemi, ki nastajajo v akademskih krogih brez sodelovanja industrije, niso perspektivni.

Končajmo s komentarjem o uporabi umetnih nevronske mreže. Izkazalo se je že, da lahko nevronske mreže uporabimo v zelo različnih aplikacijah. Posebej uspešne so v primerih, kjer želimo aproksimirati oziroma posnemati neko neznano in navidezno zelo zapleteno zvezo med vhodnimi in izhodnimi podatki.

## LITERATURA

1. M. Caudill, C. Butler, *Naturally intelligent systems*, MIT Press, Cambridge (MA), 1990.
2. J. Duhovnik, A. Berkopec, Tehniški predpisi kot ekspertni sistem, Zbornik 4. Seminarja Računalnik v gradbenem inženirstvu, str. 22–27, Ljubljana, 1988.

3. M. Funahashi, On the Approximate Realization of Continuous Mappings by Neural Networks, *Neural Networks*, Vol. 2, str. 183–192, 1989.
4. J. Ghaboussi, J.H. Garret Jr., X. Wu, Knowledge-Based Modeling of Material Behavior with Neural Networks, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 117, No. 1, str. 132–153, 1991.
5. K. Hornik, M. Stinchcombe, H. White, Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators, *Neural networks*, Vol. 2, str. 359–366, 1989.
6. IABSE Colloquium, Bergamo 1995, Knowledge Support Systems in Civil Engineering, IABSE Report, Vol. 72, 1995.
7. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Special issue: Expert systems in Civil Engineering, Vol. 1, No. 4, 1987.
8. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, s posebnim poglavjem: Knowledge-Based Systems in Design and Planning, Vol. 5, No. 1, 1991.
9. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Special issue: Neural Networks, Vol. 8, No. 2, 1994.
10. A. Krainer, R. Perdan, R. Zorman, Ekspertni sistem Ovoj, Zbornik 7. Seminarja Računalnik v gradbenem inženirstvu, str. 37–44, Ljubljana, 1994.
11. K. Lehner, Fundamentals of Knowledge Based Systems, Lecture notes on the 4th short intensive course TEMPUS JEP 3008 ICADERS, urednik Janez Duhovnik, Ljubljana, str. 187–241, 1994.
12. R.P. Lippmann, An Introduction to Computing with Neural Nets, *IEEE ASSP Magazine*, Vol. 4, No. 2, str. 4–22, 1987.
13. M.L. Maher, S.J. Fenves, HI-RISE: an Expert System for Preliminary Design of High Rise Buildings, Technical Report, Dept. of Civil Engineering, Carnegie Mellon University, 1984.
14. I. Peruš, Na znanje opt sistem za oceno potresne varnosti armiranobetonskih konstrukcij visokogradnje, Univerza v Ljubljani, doktorska disertacija, 1994.
15. G. Raič, Sestavljanje naložbenih predračunov z ekspertnim sistemom za upravljanje podatkov, *Gradbeni vestnik*, letnik 38, str. 109–113, 1989.
16. M.R. Ramirez, D. Arghya, A Faster Learning Algorithm for Back Propagation Neural Networks in NDE applications, *Artificial Intelligence in Structural Engineering*, Civil Comp-press, Edinburgh, str. 275–283, 1991.
17. R. Reed, Pruning Algorithms – A Survey, *IEEE transactions on neural networks*, Vol. 4, No. 5, str. 740–747, 1993.
18. D.E. Rumelhart, J.L. McClelland, *Parallel Distributed Processing, Volume 1: Foundations*, MIT Press, Cambridge (MA), 1986.
19. W.R. Spillers, Artificial Intelligence and Structural Design, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 92, No. ST6, str. 491–497, 1966.
20. G. Turk, Analiza zanesljivosti konstrukcij z upoštevanjem geometrijske in materialne nelinearnosti, Univerza v Ljubljani, doktorsko delo, 1994.
21. World Congress on Neural Networks, WCNN '93, 11.7.–15.7. 1993, Portland (Or), Zbornik del, 1993.
22. X. Wu, J. Ghaboussi, J.H. Garret Jr., Use of Neural Networks in Detection of Structural Damage, *Computers & Structures*, Vol. 42, No. 4, str. 649–659, 1992.
23. Y.-C. Yeh, Y.-H. Kuo, D.-S. Hsu, Building KBES for Diagnosing PC Pile with Artificial Neural Network, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 7, No. 1, str. 71–93, 1993.
24. Z. Žagar, D. Deliđ, Intelligent Computer Integrated Structures, *Microcomputers in Civil Engineering*, Vol. 8, str. 57–65, 1993.



## **SAIE BOLOGNA**

**V SODELOVANJU Z ZVEZO DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV VAS VABIMO NA OBISK JESENSKEGA GRADBENEGA SEJMA SAIE V BOLOGNI, KI BO OD 16. DO 20. OKTOBRA 1996.**

**PRIKAZANA BO ELEKTRONSKA OPREMA IN RAČUNALNIŠKA PODPORA, STROJI IN OPREMA, TEHNOLOGIJA GRADBIŠČ IN OPREMA ZANJE, TESTNI IN KONTROLNI INSTRUMENTI, GRADBENI MATERIALI IN IZDELKI.**

**ISTOČASNO SE ODVIJATA ŠE SEJMA CLIMATEC – OGREVANJE, HLAJENJE IN KLIMATSKE NAPRAVE IN SAIE – MARI – UPORABA KAMNA V GRADBENIŠTVU, STROJI IN OPREMA.**

PROGRAM POTOVANJA – ODHOD 18. 10. 1996, POVRATEK 19. 10. 1996

1. DAN: Odhod avtobusa ob 6. uri zjutraj s Kongresnega trga v Ljubljani. Vožnja do mejnega prehoda Fernetiči, prestop meje in nadaljevanje vožnje mimo Benetk, Padove in Ferrare do BOLOGNE. Obisk sejma. Pozno popoldne vožnja do Riminija, nastanitev v hotelu, večerja in prenočevanje.

2. DAN: Po zajtrku vožnja do sejmišča v Bologni in obisk sejma. Ob 17. uri odhod avtobusa proti Ljubljani. Prihod v večernih urah.

**CENA POTOVANJA:**

**139 DEM**

**Doplačilo za enoposteljno sobo:**

**50 DEM**

Cena je računana na 35 oseb in vključuje avtobusni prevoz na omenjeni relaciji s pripadajočimi cestninami, polpenzion v dvoposteljnih sobah, prha, wc v hotelu, vodenje in organizacijo potovanja.

Plačilo v tolarški protivrednosti po prodajnem tečaju Nove LB d.d. za devizne prilive in odlive podjetij na dan plačila.

Splošni pogoji Emone Globtoura so sestavni del programa.

Informacije in prijave: Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, Karlovška 3, Ljubljana, telefon 061/221 587 in Emona Globtour, Štefanova 13a, Ljubljana, telefon 061/217 565, fax 217 416, vse Globtourove poslovalnice in pooblašcene agencije.

**ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE  
EMONA GLOBTOUR**



## **PREDLOG DOPOLNITVE FORMUL ZA PRERAČUN VODOVODNEGA OMREŽJA**

### **A contribution to the completion of the equations for water networks estimation**

UDK 696.11.04:532.5

EUGEN PETREŠIN

#### **P O V Z E T E K**

Večina raziskav koeficienta hrapavosti za cevovode je bila izvedena v hidravličnih laboratorijih na podlagi eksperimentalnih metod. To pomeni, da so eksperimenti potekali pretežno v pogojih, ki jih v praksi praviloma težje srečujemo. Posebno velja to za vodovodno omrežje in pogoje obratovanja vodovodnih sistemov.

Za razliko od dosedanjih nekaterih klasičnih poti analize koeficienta hrapavosti so v nadaljnjem prikazani izsledki analize koeficienta hrapavosti za vodovodno omrežje. Analiza je v največji meri izvajana neposredno na fizičnem modelu z manjšim delom preciznih laboratorijskih meritev, kot so prečna in vzdolžna hrapavost, velikost profila, itn.

Na podlagi izvedenih meritev je izračunan koeficient hrapavosti za vodovodno omrežje. Glavna značilnost je možnost podajanja koeficienta hrapavosti v eksplicitni obliki po posameznih odsekih ter nekoliko z manjšo natančnostjo na celotnem intervalu uporabe. Glavne izsledke analize brez statistične obdelave podatkov z aplikacijo na druge formule poskusimo prikazati v skrajšani obliki, ki sledi. Poleg koeficienta hrapavosti je hkrati podan še poskus dopolnitve nekaterih obstoječih formul, ki jih večkrat srečujemo v praktični hidravliki s prosto gladino in tlačnih sistemih.

AVTOR:

dr. Eugen PETREŠIN, Univerza v Mariboru, GRADBENA FAKULTETA, Center za komunalno hidrotehniko, 2000 Maribor, Smetanova 17

## S U M M A R Y

The majority of the researches on the coefficient of roughness in the pipe lines have been executed in hydraulic laboratories and based on experimental methods. In means that the conditions, included in those experiments, can hardly be found in practical work, especially in waterworks with their conditions for systems' functioning.

Unlikely some previous classic ways of the coefficient of roughness analysis, the conclusions of the coefficient of roughness analysis for the water networks are presented. This analysis has been executed in the most cases directly on the physical model, including some precise measurements in laboratories, i.e. transverse and longitudinal roughness, profile dimensions etc.

The coefficient of roughness has been calculated from the base of the executed measurements. The main characteristic is the possibility of presenting the coefficient of roughness in an explicit form by using specific sequences as well as the total interval of use with a smaller precision. The main conclusions of the analysis are shown in a shorter version without a statistic classification of the information applied on other equations. The presentation of the coefficient of roughness is followed by an attempt of completion of some existing equations that often appear in practical hydraulics with a free waterlevel or in compression systems.

### 1.2 UPORABLJENI SIMBOLI

$F$  – sila  
 $\tau_0$  – hrapavostna ali trenjska napetost ob steni cevovoda  
 $S$  – površina omočenega oboda cevovoda na dolžini  $L$   
 $p$  – tlak  
 $\varphi$  – gostota vode  
 $g$  – pospešek gravitacije  
 $h_{1,2}$  – piezometrične višine  
 $\Delta h$  – razlika piezometričnih višin (tlačne izgube)  
 $s$  – površina prereza  
 $L$  – dolžina cevovoda  
 $o$  – omočeni obod  
 $R$  – hidravlični radij  
 $i$  – hidravlični gradient  
 $v^*$  – dinamična hitrost  
 $v$  – srednja hitrost pretoka v profilu  
 $u$  – hitrost  
 $F_u$  – inertne sile

$F_g$  – gravitacijske sile  
 $F_\mu$  – viskozne sile  
 $l$  – linearna dimenzija  
 $\mu$  – koeficient dinamične viskoznosti  
 $\nu$  – koeficient kinematične viskoznosti  
 $F^r$  – Reech – Froudovo število  
 $Fr$  – Froudovo število  
 $Re$  – Reynoldsovo število  
 $k$  – absolutna hrapavost  
 $\delta$  – debelina laminarne plasti  
 $\lambda_{EP}$  – obratovni koeficient hrapavosti  
 $D$  – profil cevovoda  
 $\lambda$  – koeficient hrapavosti  
 $C$  – de Chezyjev koeficient hrapavosti  
 $n$  – Manningov koeficient hrapavosti  
 $\Delta p$  – razlika tlaka  
 $Eu$  – Eulerjevo število  
 $\zeta$  – koeficient lokalnega hidravličnega upora  
 $t$  – temperatura

### 1.3 SPLOŠNE ENAČBE

Iz ravnovesja ali v obravnavanem delu cevovoda lahko povzamemo naslednjo odvisnost:

Vsota obravnavanih sil je:

$$F_1 + (-F_2) + (-F_0) = 0 \quad (1.1)$$

od koder sledi

$$F_0 = F_1 - F_2 \quad (1.2)$$

kjer pomenijo:

$$F_0 = \tau_0 S; F_{1,2} = p_{1,2} s; p_{1,2} = \rho g h_{1,2}$$

Zaradi tega lahko pišemo

$$\tau_0 S = p_1 s - p_2 s \quad (1.3)$$

kar tudi pomeni:

$$\tau_0 S = \rho g h_1 s - \rho g h_2 s \quad (1.4)$$

$$\tau_0 S = \rho g s (h_1 - h_2); h_1 - h_2 = \Delta h$$

$$\tau_0 S = \rho g s * \Delta h$$

$$\tau_0 = \frac{\rho g s * \Delta h}{S}$$

kjer pomenijo:

$$S = o \cdot L; R = \frac{s}{o}; i = \frac{\Delta h}{L}$$

$$\tau_0 = \frac{\rho g s^2 \Delta h}{oL}$$

in dobimo napetost hrapavosti ob steni cevovoda (trenjska napetost):

$$\tau_0 = \rho g R i \quad (1.5)$$

Na podlagi enačbe 1.5 zapišemo hitrost, ki jo lahko imenujemo tudi dinamična hitrost ali trenjska hitrost pa tudi hrapavostna hitrost.

$$\left(\frac{\tau_0}{\rho}\right)^{1/2} = (g R i)^{1/2} = v \quad (1.6)$$

Od notranjih in zunanjih sil upoštevamo:

$$F_u = \rho \cdot u^2 l^2 \quad \text{inertne sile}$$

$$F_g = \rho \cdot g l^3 \quad \text{gravitacijske sile}$$

$$F_\mu = \mu \cdot u l \quad \text{viskozne sile}$$

Na podlagi njihovega medsebojnega odnosa dobimo znana števila:

$$\frac{F_u}{F_g} = \frac{u^2}{gl} = F \quad \text{Reech-Froudejevo število}$$

$$(F)^{1/2} = \frac{u}{(gl)^{1/2}} = Fr \quad \text{Froudejevo število}$$

$$\frac{F_u}{F_\mu} = \frac{\rho \cdot u l}{\mu} = \frac{ul}{\nu} = Re \quad \text{Reynoldsovo število}$$

Glede na interakcijo inertnih, gravitacijskih in viskoznih sil v podanem sistemu na dinamične ( $v$ ,  $v_*$ ) ter geometrične ( $R$ ,  $k$ ,  $\zeta$ ) parametre lahko postavimo naslednjo obliko Froudejevih in Reynoldsovih števil, pri čemer velja  $u = v$ ,  $v_*$  ter  $l = R$ ,  $k$ ,  $\zeta$ :

$$Fr_R = \frac{v}{(gR)^{1/2}} \quad (1.7)$$

$$Fr_k = \frac{v_*}{(gk)^{1/2}} = i^{1/2} \quad (1.8)$$

$$Fr_k = \frac{v}{(gk)^{1/2}} \quad (1.9)$$

$$Fr_k = \frac{v_*}{(gk)^{1/2}} \quad (1.10)$$

$$Fr_\delta = \frac{v}{(g\delta)^{1/2}} \quad (1.11)$$

$$Fr_\delta = \frac{v_*}{(g\delta)^{1/2}} \quad (1.12)$$

$$Re_R = \frac{vR}{\nu} \quad (1.13)$$

$$Re_R = \frac{v_*R}{\nu} \quad (1.14)$$

$$Re_k = \frac{vk}{\nu} \quad (1.15)$$

$$Re_k = \frac{v_*k}{\nu} \quad (1.16)$$

$$Re_\delta = \frac{v\delta}{\nu} \quad (1.17)$$

$$Re_\delta = \frac{v_*\delta}{\nu} \quad (1.18)$$

Iz medsebojnih ustreznih odnosov med enačbami 1.7 do 1.12 in enačbami 1.13 do 1.18 izhajajo naslednje vrednosti:

$$\frac{v}{(gR)^{1/2}} = \frac{v}{(gk)^{1/2}} = \frac{v}{(g\delta)^{1/2}} = \frac{vR}{\nu} = \frac{vk}{\nu} = \frac{v\delta}{\nu} = \frac{v}{v_*} = \lambda_{EP} \quad (1.19)$$

Analogno z ustreznimi odnosi dobimo vrednosti

$$\frac{k}{R}, \frac{\delta}{R}, \frac{k}{\delta}$$

Za nas je zelo pomemben izraz v obliki 1.19 kot osnovna oblika enačbe za izgubo energije ali tlaka ter kot hidravlični gradient vzdolž cevovoda, ki ga lahko zapišemo izhajajoč iz enačbe 1.19 v obliki

$$\lambda_{EP} = \frac{v}{v_*} = \frac{v}{(gRi)^{1/2}} \quad (1.20)$$

od koder po kvadriranju dobimo hidravlični gradient:

$$i = \frac{v^2}{\lambda_{EP}^2 g R} \quad (1.21)$$

pri čemer je:  $i = \frac{\Delta h}{L}$  in dobimo tlačne izgube vzdolž cevovoda:

$$\Delta h = \frac{1}{\lambda_{EP}^2} \frac{L v^2}{R g} \quad (1.22)$$

Ob upoštevanju hidravličnega radija  $R = \frac{D}{4}$  tlačne izgube vzdolž cevovoda lahko zapišemo tudi v obliki:

$$\Delta h = \frac{4}{\lambda_{EP}^2} \frac{L v^2}{D g} \quad (1.23)$$

Enačbo 1.23 lahko zapišemo tudi v klasični obliki ob upoštevanju kinetične višine:

$$\Delta h = \frac{8}{\lambda_{EP}^2} \frac{L v^2}{D 2g} \quad (1.24)$$

V primeru, da v enačbi 1.24 upoštevamo hidravlični radij  $D = 4R$ , dobimo enačbo 1.22.

Analogno enačbi 1.24 zapišemo Darcy-Weisbachovo enačbo za tlačne izgube, ki se glasi:

$$\Delta h = \lambda \frac{L v^2}{D 2g} \quad (1.25)$$

Na podlagi enačb 1.24 in 1.25 vidimo, da obstaja povezava koeficientov hrapavosti v obliki:

$$\lambda = \frac{8}{\lambda_{EP}^2} \quad (1.26)$$

$$\lambda_{EP} = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \quad (1.27)$$

Ob upoštevanju hidravličnega radija lahko Darcy-Weisbachovo enačbo zapišemo v obliki

$$\Delta h = \lambda \frac{L v^2}{4R 2g} \quad (1.28)$$

od koder lahko dobimo srednjo hitrost pretoka

$$v = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \sqrt{gRi} \quad (1.29)$$

kar lahko zapišemo v obliki

$$v = \lambda_{EP} \sqrt{gRi} \quad (1.30)$$

ali s pomočjo dinamične hitrosti

$$v = \lambda_{EP} * v_* \quad (1.31)$$

Ob upoštevanju medsebojne povezanosti med hidravličnim radijem in profilom cevovoda enačbo 1.30 ali srednjo hitrost pretoka lahko pišemo tudi v obliki

$$v = \frac{1}{2} \lambda_{EP} \sqrt{gDi} \quad (1.32)$$

Na podlagi srednje hitrosti pretoka lahko ob upoštevanju obratovalnega koeficienta hrapavosti zapišemo pretok skozi cevovod:

$$Q = \frac{1}{2} \lambda_{EP} * s \sqrt{gDi} \quad (1.33)$$

ali ob upoštevanju hidravličnega radija

$$Q = \lambda_{EP} * s \sqrt{gRi} \quad (1.34)$$

Rezultate meritev in izračunane enačbe obratovalnega koeficienta hrapavosti v normalni eksplicitni obliki pa prikažemo po posameznih odsekih:

1. interval:  $\lambda = \frac{64}{Re}$ ;  $0 \leq Re \leq 197$  (Hagen-Poiseuille) ... (1.35)

2. interval:  $\lambda = \frac{65}{Re}$ ;  $197 \leq Re \leq 572$  ... (1.36)

3. interval:  $\lambda = \frac{67}{Re}$ ;  $572 \leq Re \leq 918$  ... (1.37)

4. interval:  $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \log \left( \frac{6.197}{Re^{0.926}} + \frac{k}{3.715D} \right)$ ;  $918 \leq Re \leq 10^8$  (1.38)

Iz praktičnih razlogov 4. interval lahko zapišemo v obliki:

$$\lambda = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{6.197}{Re^{0.926}} + \frac{k}{3.715D} \right) \right]^2}$$
;  $918 \leq Re \leq 10^8$  ... (1.39)

Zaradi večje praktičnosti z zadostno natančnostjo se priporoča uporaba enega izraza za večje področje, in sicer:

$$\lambda = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{8.494}{Re^{0.936}} + \frac{k}{3.715D} \right) \right]^2}$$
;  $5 \cdot 10^2 \leq Re \leq 10^8$  ... (1.40)

Prav gotovo se ob tem samo po sebi zastavlja vprašanje, kaj se dogaja v kritičnem področju prehoda iz laminarnega področja v turbulentno. Izvedene meritve so pokazale, da se prehod iz laminarnega v turbulentno področje opravi že okrog vrednosti Reynoldsovega števila  $Re \approx 1600$ . To pomeni, da so motnje na vodovodnem omrežju, ki so bile prisotne v času meritev, kot so zasuni, hidranti, hišni priključki, stiki cevi in podobno prispevali k hitrejšemu prehodu iz laminarnega v turbulentno področje.

Na podlagi povezave glede na enačbo 1.27 lahko zapišemo obratovalni koeficient hrapavosti za vodovodno omrežje, in sicer v eksplicitni obliki:

$$\lambda_{EP} = \sqrt{32 \left[ \log \left( \frac{8.494}{Re^{0.936}} + \frac{k}{3.715D} \right) \right]^2} \quad (1.41)$$

kar lahko zapišemo v obliki, ki sledi, pri čemer upoštevamo absolutno vrednost zaradi eliminacije vpliva drugega korena.

$$\lambda_{EP} = 4\sqrt{2} \left[ \log \left( \frac{8.494}{\text{Re}^{0.936}} + \frac{k}{3.715D} \right) \right]; 5 \cdot 10^2 \leq \dots \quad (1.42)$$

Grafični potek obratovalnega koeficienta hrapavosti vodovodnega omrežja v eksplicitni obliki se lahko prikaže tudi na diagramu.

V času izvajanja analize obratovalnega koeficienta hrapavosti za vodovodno omrežje so kontrolirani tudi drugi izrazi. Na podlagi tega pregleda lahko ugotovimo, da je za potrebe vodovodnega omrežja predlaganih zelo malo izrazov, ki niso doživeli večje aplikacije. Verjetno lahko razloge iščemo tudi v subjektivnem prepričanju. Ob tem ne gre prezreti dejstva, da je najbolj pogosta uporaba Colebrookovega izraza, ki je ponekod celo predpisan. Lahko povzamemo ugotovitev, da Colebrookov izraz ob nekaterih drugih pomanjkljivostih daje nekoliko prenizke vrednosti za vodovodno omrežje. Poleg tega Colebrookov izraz velja do določene meje. Pri manjši vrednosti Reynoldsovega števila je napaka precej velika, kar pomeni, da je uporaba Colebrookovega izraza za analizo področja sistemskih vododelnic v vodovodnem omrežju, blago povedano, zelo vprašljiva.

V času analize obratovalnega koeficienta hrapavosti za vodovodno omrežje so bile podane med drugim tudi osnovne usmeritve, kot so:

- 1) eliminacija logaritemskega pomena funkcije
- 2) podajanje koeficienta hrapavosti v eksplicitni obliki
- 3) iskanje funkcijske povezave med hrapavostjo in profilom ali hrapavostjo in Reynoldsovim številom, kar bi omogočilo še nadaljnjo poenostavitev izraza
- 4) povečanje področja uporabe izraza za manjše vrednosti Reynoldsovega števila.

Potrebno je takoj povedati, da je bila analiza prve točke neuspešna. Logaritemski pomen funkcije koeficienta hrapavosti kljub velikemu številu študiranih krivulj ostaja še naprej.

Glede na drugo točko se za potrebe vodovodnega omrežja obratovalni koeficient hrapavosti lahko uporablja v podani eksplicitni obliki.

Funkcijska povezanost za vodovodno omrežje med hrapavostjo in profilom ali hrapavostjo in Reynoldsovim številom po principu, kot ga je podal O. Kirschmer za kanalizacijsko omrežje, ni dosežena. Prevladalo je prepričanje, da je v tem delu nujno potrebno sodelovanje tehnologa. To se v danem primeru ni zgodilo. Četrta točka je bila potrjena.

#### 1.4 PREDLOG DOPOLNITVE OBSTOJEČIH FORMUL

V nadaljnjem naj prikažemo možnost aplikacije obratovalnega koeficienta hrapavosti za vodovodno omrežje kot dopolnilo nekaterim obstoječim izrazom.

##### 1.4.1 HAGEN – POISSEUILLE

Hagen-Poiseuillov izraz za laminarno področje lahko zapišemo v obliki:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \dots \quad (1.43)$$

kjer prevzamemo, da velja za okrogle profile  $\Phi = 1$  in dobimo po substituciji

$$\frac{8}{\lambda^2_{EP}} = \frac{64}{\text{Re}} \dots \quad (1.44)$$

od koder dobimo:

$$\lambda_{EP} = \sqrt{0.125 \cdot \text{Re}} = (0.125 \cdot \text{Re})^{1/2} \dots \quad (1.45)$$

##### 1.4.2 ANTOINE DE CHEZY

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \sqrt{g} \dots \quad (1.46)$$

$$C = \lambda_{EP} \sqrt{g} \dots \quad (1.47)$$

$$\lambda_{EP} = \frac{C}{\sqrt{g}} \dots \quad (1.48)$$

##### 1.4.3 R. MANNING

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \dots \quad (1.49)$$

ter na podlagi izraza 1.47 dobimo

$$\lambda_{EP} \sqrt{g} = \frac{1}{n} R^{1/6} \dots \quad (1.50)$$

$$\lambda_{EP} = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{1}{n} R^{1/6} \dots \quad (1.51)$$

Povezavo med Manningovim koeficientom hrapavosti in obratovalnim koeficientom hrapavosti lahko dobimo tudi na podlagi izraza

$$\lambda = 124.6 \frac{n^2}{\sqrt[3]{D}} \dots \quad (1.52)$$

od koder sledi

$$\frac{8}{\lambda^2_{EP}} = 124.6 \frac{n^2}{\sqrt[3]{D}}$$

$$\lambda_{EP} = \frac{0.2534}{n} D^{3/6} \dots \quad (1.53)$$

##### 1.4.4 F. COLEBROOK

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \log \left( \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3.7D} \right) \dots \quad (1.54)$$

$$\frac{\lambda_{EP}}{\sqrt{8}} = -2.0 \log \left( \frac{2.51 \lambda_{EP}}{\text{Re} \sqrt{8}} + \frac{k}{3.7D} \right) \dots \quad (1.55)$$

ter po ureditvi izraza dobimo:

$$\lambda_{EP} = 2\sqrt{2} \left[ -2.0 \log \left( 0.887 \frac{\lambda_{EP}}{\text{Re}} + 0.27 \frac{k}{D} \right) \right] \dots \quad (1.56)$$

##### 1.4.5 EULERJEVO ŠTEVILO

Eulerjevo število za tlake lahko zapišemo v obliki

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2} \dots\dots\dots (1.57)$$

$$Eu = \frac{\rho g h}{\rho v^2} = \frac{g h}{v^2} = \frac{g h}{\lambda_{EP}^2 \cdot v_*^2} = \frac{g h}{\lambda_{EP}^2 (\sqrt{g Ri})^2}$$

$$Eu = \frac{h}{\lambda_{EP}^2 \cdot Ri} \dots\dots\dots (1.58)$$

1.4.6 REYNOLDSOVO ŠTEVILO

Reynoldsovo število za vpliv viskoznosti in pretok v ceveh ob upoštevanju profila lahko zapišemo v klasični obliki:

$$Re = \frac{vD}{\nu} \dots\dots\dots (1.59)$$

$$Re = \frac{\lambda_{EP} \sqrt{\frac{g Di}{4}} \cdot D}{\nu}$$

$$Re = \frac{1}{2} \frac{\lambda_{EP}}{\nu} D \sqrt{g Di} \dots\dots\dots (1.60)$$

ali ob upoštevanju hidravličnega radija

$$Re = \frac{v \cdot 4R}{\nu} = \frac{\lambda_{EP} \sqrt{g Ri} \cdot 4R}{\nu}$$

$$Re = 4 \frac{\lambda_{EP}}{\nu} R \sqrt{g Ri} \dots\dots\dots (1.61)$$

1.4.7 FROUDOVO ŠTEVILO

Froudovo število za inertne in težnostne sile, valovni upor za odprta korita in kanale v prvi obliki se glasi:

$$Fr = \frac{v^2}{gL} \dots\dots\dots (1.62)$$

$$Fr = \frac{\lambda_{EP}^2 (\sqrt{g Ri})^2}{gL} = \frac{\lambda_{EP}^2 \cdot Ri}{L}$$

$$Fr = \frac{\lambda_{EP}^2 \cdot Ri}{L} \dots\dots\dots (1.63)$$

Froudovo število poznamo tudi v drugi obliki:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gR}} \dots\dots\dots (1.64)$$

$$Fr = \frac{\lambda_{EP} \sqrt{g Ri}}{\sqrt{gR}} = \lambda_{EP} \sqrt{i}$$

$$Fr = \lambda_{EP} \sqrt{i} \dots\dots\dots (1.65)$$

$$\lambda_{EP} = \frac{Fr}{\sqrt{i}} \dots\dots\dots (1.66)$$

1.5 LINIJSKI IN LOKALNI HIDRAVLIČNI UPORI

Kot smo že videli, lahko linijske tlačne izgube zapišemo v znani obliki:

$$\Delta h = \frac{4}{\lambda_{EP}^2} \frac{L v^2}{D g}$$

Lokalne tlačne izgube računamo po formuli:

$$\Delta h = \xi \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (1.67)$$

Celokupne tlačne izgube dobimo s seštevanjem:

$$\Sigma \Delta h = \frac{4}{\lambda_{EP}^2} \frac{L v^2}{D g} + \Sigma \xi \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (1.68)$$

kar zapišemo v obliki:

$$\Sigma \Delta h = \left( \frac{4}{\lambda_{EP}^2} \frac{L}{D} + \Sigma \frac{\xi}{2} \right) \frac{v^2}{g} \dots\dots\dots (1.69)$$

1.6 PRIMER PRERAČUNA OBRATOVALNEGA KOEFICIENTA HRPAVOSTI ZA VODOVODNO OMREŽJE IN TLAČNE IZGUBE

Izračunajmo obratovalni koeficient hrpavosti za vodovodno omrežje in tlačne izgube za naslednje vrednosti:

- L = 1650 m      dolžina cevododa
- Q = 30 l/s      pretok
- D = 250 mm    notranji profil cevododa
- k = 0.12 mm   hrpavost cevododa
- t = 11°C       temperatura pitne vode

Hitrost pretoka vode skozi cevodod:

$$v = \frac{Q}{s} = \frac{4 \cdot 0.030}{\Pi \cdot 0.25^2} = 0.611 \text{ m/s}$$

Relativna hrpavost cevododa:

$$\frac{k}{D} = \frac{0.12}{250} = 4.8 \cdot 10^{-4}$$

Koeficient kinematične viskoznosti lahko prevzamemo iz tabel:

$$\nu = 1.27387 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

ali izračunamo iz formule Brillouina:

$$\nu = \frac{1.775 \cdot 10^{-6}}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2}$$

$$\nu = \frac{1.775 \cdot 10^{-6}}{1 + 0.0337 \cdot 11 + 0.000221 \cdot 11^2} = 1.27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

Vrednost Reynoldsovega števila je:

$$\text{Re} = \frac{vD}{\nu} = \frac{0.611 \cdot 0.25}{1.27 \cdot 10^{-6}} = 1.2 \cdot 10^5$$

Na podlagi Reynoldsovega števila in relativne hrapavosti lahko pridemo do obratovalnega koeficienta hrapavosti, vendar ga za kontrolo izračunamo iz že podane oblike enačbe:

$$\lambda_{EP} = 4\sqrt{2} \left[ \log \left( \frac{8.494}{\text{Re}^{0.936}} + \frac{k}{3.715D} \right) \right]$$

$$\lambda_{EP} = 4\sqrt{2} \left[ \log \left( \frac{8.494}{(1.2 \cdot 10^5)^{0.936}} + \frac{0.12}{3.715 \cdot 250} \right) \right] = 20.11$$

Izračunamo tudi tlačne ali energijske izgube, ki so:

$$\Delta h = \frac{4 L v^2}{\lambda_{EP}^2 D g}$$

$$\Delta h = \frac{4}{20.11^2} \frac{1650}{0.25} \frac{0.611^2}{9.80665} = 2.48 \text{ m}$$

Na podlagi izvedenega preračuna vidimo, da lahko formiramo tudi ustrezne tabele za praktično uporabo obratovalnega koeficienta hrapavosti za vodovodno omrežje.

## LITERATURA

1. E. W. Steel, T. J. Mc Ghee: Water Supply and Sewerage, Fifth Edition, Mc Graw – Hill, 1984.
2. R. Manning: Flow of Water in Open Channels and Pipes. Trans. of the Inst. of Civ. Engrs. of Ireland, vol. 20, 1890.
3. R. V. Gils: Fluid Mechanics and Hydraulics, Schaums outline series.
4. J. Weisbach: Die Experimental – Hydraulik. J. G. Engelhardt, Freiburg, 1855.
5. V. Đurović: Izgube energije v turbelentnem toku vzdolž prevodnika enotnega prereza. Vodnogospodarski inštitut, Ljubljana.
6. E. Petrešin: Analysis of Existing Analytic Expressions for the Roughness Coefficients with a Proposal for their Improvement Concerning Application in Water Supply Network. Acta hydrotechnica, Ljubljana, 1987.



ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV  
IN TEHNIKOV SLOVENIJE,  
LJUBLJANA, KARLOVŠKA 3

STROKOVNI IZPITI ZA GRADBENIŠTVO IN ARHITEKTURO  
TER PRIPRAVLJALNI SEMINARJI ZA STROKOVNE IZPITE V LETU 1996

A.				B.	
Rok	Leto	Mesec	SEMINAR	IZPIT	
VI.	1996	September	16.–20. september	pisni	ustni
VII.	1996	Oktober	14.–18. oktober	19. oktober	4.–8. november
VIII.	1996	November	18.–22. november	16. november	2.–6. december
IX.	1996	December	16.–20. december		

- A. Pripravljalni seminar za strokovne izpite organizira **ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE, LJUBLJANA, KARLOVŠKA 3, telefon (061) 221-587**. Prijavo, v obliki dopisa, pošlje organizatorju plačnik seminarja za prijavljeno osebo. Če je plačnik seminarja podjetje (pravna oseba), priobči v prijavi izjavo, kdo je plačnik. Samoplačnik pošlje organizatorju prijavo v obliki dopisa, skupaj s kopijo dokazila o plačilu seminarja. Cena seminarja za eno osebo znaša 57.960,00 SIT (znesku je že prištet 5 % prometni davek). Številka žiro računa je 50101-678-47602. Prijave za seminar v določenem roku je potrebno poslati najmanj 14 dni prej.
- B. Strokovni izpit organizira **GRADBENI INŠTITUT ZRMK, Dimičeva 12, Ljubljana, Gradbeni center (Dimičeva 9), telefon (061) 342-671**. Prijave, v obliki obrazca, z vsemi prilogami, ki so razvidne iz obrazca, sprejema organizator 20 dni pred pisnim delom izpita. Obrazce je mogoče dobiti pri organizatorju, vse informacije pri inž. Jakobu Grošlju od 8.00 do 12.00 ure.