

# Računalom generirana optimalna inačica mosta

---

Pičulin, Srečko

Source / Izvornik: **Građevinar, 2000, 52, 451 - 458**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:443859>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-23**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



# Računalom generirana optimalna inačica mosta

Srečko Pičulin

## Ključne riječi

most, inačica mosta, integrirani računalni sustav, ekspertni sustav, baza znanja, slobodna prijepusna gradnja

## Key words

bridge, bridge alternative, integrated computer system, expert system, knowledge base, free cantilevering

## Mots clés

pont, variante d'un pont, système informatique intégré, système expert, base des connaissances, construction libre par encorbellement

## Schlüsselworte:

Brücke, Brückenvariante, integriertes Computersystem, Expertensystem, Kenntnisbasis, Freivorbau

S. Pičulin

Izvorni znanstveni rad

## Računalom generirana optimalna inačica mosta

Opisuje se integrirani računalni sustav RGOIM koji određuje optimalnu inačicu mosta. Dan je osvrt na numeričku optimalizaciju općenito te generiranje diskretnih rješenja primjenom ekspertnih sustava. Prikazani su dijelovi izgrađenoga integriranoga računalnog sustava. Navedeni su problemi koji se javljaju pri formulaciji i strukturiranju znanja na primjeru slobodne prijepusne gradnje betonskih grednih mostova. Sustav je primijenjen na primjeru jednoga izvedenog mosta u Sloveniji.

S. Pičulin

Original scientific paper

## Computer-generated optimal bridge design

The integrated computer system CGOBD that defines an optimum bridge alternative is described. A general review of the numerical optimization is presented, and generation of discrete solutions by means of expert systems is described. Individual portions of the integrated computer system are presented. Difficulties occurring while formulating and structuring the required knowledge base are illustrated by an example of free cantilevering of concrete girder bridges. The system was applied on a bridge realized in Slovenia.

S. Pičulin

Ouvrage scientifique original

## Variante optimale d'un pont générée par l'ordinateur

L'article décrit le système informatique intégré RGOIM qui détermine la variante optimale d'un pont. On donne un aperçu de l'optimisation numérique en général, ainsi que de la génération des solutions discrètes par l'application des systèmes experts. On présente les parties du système informatique intégré. On cite les problèmes qui se manifestent lors de la formulation et de la structuration des connaissances dans le cas de la construction libre par encorbellement des ponts à poutres en béton. Ce système a été appliqué à l'exemple d'un pont construit en Slovénie.

S. Pičulin

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Komputerbestimmte optimale Brückenvariante

Im Artikel ist das integrale Computersystem beschrieben mit dem die optimale Brückenvariante bestimmt wird. Abgefasst ist ein Rückblick auf die numerische Optimierung allgemein, sowie die Ausarbeitung diskreter Lösungen mit Anwendung von Expertensystemen. Dargestellt sind Teile des aufgebauten integrierten Computersystems. Am Beispiel des Freivorbau von Betonbalkenbrücken sind Probleme angeführt die beim Formulieren und Aufbau der Kenntnisse auftreten. Das System wurde am Beispiel einer erbauten Brücke in Slowenien angewendet.

Autor: Dr. sc. Srečko Pičulin, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb, Kačićeva 26

## 1 Računala u projektiranju mostova

### 1.1 Nove tehnologije zasnovane na primjeni računala

Na pragu trećeg milenija događa se nevjerojatna ekspanzija primjene računala i novih tehnologija zasnovanih na računalnoj industriji. Videokonferencije, 3D računalne animacije, 3D modeliranje, multimedija, elektronička pošta, računalne mreže, Internet, prividna stvarnost - sve su to tehnologije nastale u posljednjih nekoliko godina. Istraživački razvojni centri svakodnevno unapređuju stare i razvijaju nove tehnologije na svim područjima ljudske djelatnosti. Ovaj razvoj nije zaobišao ni važnu inženjersku djelatnost - projektiranje mostova.

### 1.2 Projektiranje mostova danas

Poznate su znanstvene studije [1, 2] koje govore o udjelu pojedinih faza projektiranja u ukupno utrošenom vremenu cjelokupnog posla. Posao projektanta može se podijeliti na tri osnovne faze:

- konceptualna faza projektiranja
- preliminarna faza projektiranja
- završna faza projektiranja.

U fazi konceptualnog projektiranja odabire se tip konstrukcije koji će odgovarati željenoj namjeni. Uspješan odabir konstrukcijskog rješenja mosta uvjetovan je istodobnim zadovoljenjem osnovnih kriterija:

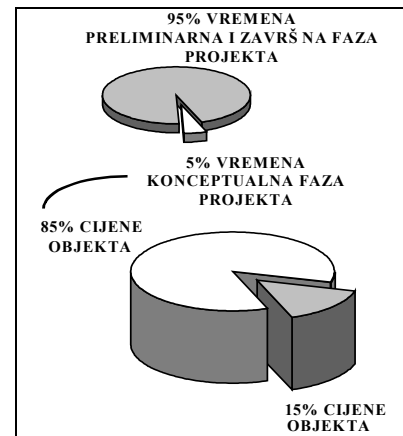
- funkcionalnost
- postojanost
- estetika
- gospodarnost
- ekologija.

Analize [2] potvrđuju da se na konceptualnu fazu utroši najmanje vremena (5%), a o njezinim značenjem govori podatak da se tad najčešće nepovratno odredi približno 85% cijene cijelog objekta. Sve odluke bitne za objekt i njegovo funkcioniranje donose se u ovoj najranijoj fazi projektiranja.

Dakle, kasnije faze mogu utjecati na konačnu cijenu s oko 15% ukupne cijene. Stoga su dobronamjerne preporuke da se konceptualnoj fazi pristupi kompleksnije uz posvećivanje više vremena nego što je uvriježeno. Tada dobro definirani objekt u najranijoj konceptualnoj fazi donosi znatne uštede investitoru, ali i projektantu u kasnijim fazama projektiranja. Postupak projektiranja ima iterativni karakter gdje se malim inkrementima dolazi do konačnih veličina. Veću prednost ima onaj koji u tom postupku kreće od bolje definirana osnovnog rješenja.

U preliminarnoj fazi projektiranja za odabrani se tip konstrukcije usvajaju početne dimenzije pojedinih elemenata konstrukcije, koje se provjeravaju jednostavnim numeričkim postupcima.

U završnoj fazi projektiranja obavlja se detaljna provjera svih elemenata konstrukcije kroz sve stadije gradnje i uporabe. Tada se provode opsežne i detaljne numeričke analize nakon kojih slijedi izrada tehničke dokumentacije.



Slika 1. U samo 5% vremena kroji se sudbina 85% cijene objekta

### 1.3 Računala u projektiranju mostova

Inženjerska je struka računalnu tehnologiju počela primjenjivati najranije u području projektiranja. Projektiranje složenih inženjerskih konstrukcija poput mostova danas je nezamislivo bez sustava vrlo složenih računalnih programa. Gotovo svi programski paketi za proračun mostova zasnivaju se na MKE (metodi konačnih elemenata) [3]. Podržavaju linearnu, a napredniji programi i nelinearnu prostornu analizu najbitnijih elemenata grede i ploče, a vrlo često i opruge, kabela, rubnih elemenata, ljsusaka i 3D elemenata. Programi pokrivaju područja prednapetih konstrukcija za gredne i pločaste elemente. Pojedinačno i u međudjelovanju simulira se cijeli niz fenomena karakterističnih nelinearnom ponašanju materijala. Programi omogućavaju praćenje faza gradnje s djelomičnim uključivanjem pojedinih poprečnih presjeka. Dinamičku analizu obično provode modalnom analizom i integracijom u vremenu. Upis geometrije modela obavlja se sve češće pomoću grafičkih pretprocesora. Rezultati se obvezatno prikazuju grafički.

Za crtanje nacрта najčešće se primjenjuju opći programi za crtanje. Specijalizirani programi za armaturne nacрте nisu najbolje prihvaćeni zbog posebnosti složenih mostovnih konstrukcija. Nažalost rijetki su međusklopovi (interfejsi) između rezultata proračuna i programa za crtanje nacрта.

Usprkos intenzivnoj primjeni računala projektiranje mostova je i dalje opterećeno:

- mukotrpnim definiranjem velike količine sličnih ali nejednakih detalja
- visokom složenosti proračuna
- višestrukim ponavljanjem proračuna radi približavanja najpovoljnijem rješenju

#### 1.4 Kompjutorski proračuni unapređuju tehnologiju građenja

U razvoju tehnologije proračuna posebno mjesto ima MKE (metoda konačnih elemenata) koja je s visokim dometima u svojoj nelinearnoj primjeni [4] u pravom smislu revolucionirala ovu problematiku. Omogućivši uvid u zbivanja u konstrukciji za vrijeme svih stadija gradnje, primjena ove metode ubrzala je revoluciju i u novim tehnologijama građenja. Te nove tehnologije zahtijevaju da se sve faze gradnje uz pomoć računala prethodno simuliraju, bilo da je riječ o terminskom planu montaže, stanju naprezanja u materijalima ili o geometriji konstrukcije uvažavajući nelinearno ponašanje konstrukcije. Pravo građenje treba potvrditi tek neznatna odstupanja od prethodno simuliranog građenja. Ako dođe do bitnijeg odstupanja u fazi izvedbe od rezultata postignutih simuliranim proračunom, postupak proračuna se ponavlja uz korigirane parametre.

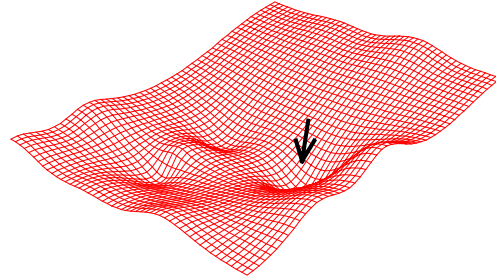
#### 1.5 Sve viši zahtjevi pred proračun konstrukcija

Dakle primjena računala dovela je do viših proračunskih zahtjeva koji se postavljaju pred projektanta mosta. Uza svu snagu koju posjeduju današnja računala, to je rezultiralo dodatnim opterećenjem projektanta. Pri tome je posve jasno da snažna računala i dostupni programi sami za sebe nisu jamstvo da će se dosegnuti, uvjetno rečeno, optimalno rješenje - inačica mosta. Računalo i postojeći programi su tek više ili manje dobar alat za dosizanje boljih inačica konstrukcije. Nema dileme oko stava da je za uspješnost tog ishoda odlučujuće bogato iskustvo i vrhunsko znanje projektanta mostova.

#### 1.6 Problemi numeričke optimalizacije općenito

Riječ "optimalizacija" tradicionalno znači numeričko određivanje minimuma funkcije cilja (npr. cijene) uz zadovoljenje niza propisanih ograničenja. Samo u slučaju konveksne funkcije cilja, koja je u praksi rijetka, te konveksnih ograničenja može se dokazati da postoji samo jedno rješenje koje zovemo optimalnim, odnosno gdje je vrijednost funkcije cilja najmanja. U ostalim slučajevima najčešće postoji puno lokalno boljih rješenja od "okolice" te ih zovemo lokalnim optimumima. "Najbolji" od svi lokalnih optimuma, ujedno je i glo-

balni optimum ili kraće optimum. Ne postoji algoritam koji jamči nalaženje globalnog optimuma. Slika 2. prikazuje predodžbu funkcije cilja u slučaju dviju neprekidnih varijabli. Kod više varijabli ta ploha postaje n-dimenzionalna hiperploha. U ovdje opisanoj problematici problem je što ploha nije glatka.



Slika 2. Predodžba funkcije cilja u slučaju dviju neprekidnih varijabli

U problemima iz prakse dalje teškoće nastaju zbog diskontinuiteta funkcije cilja i njezinih derivacija. Stoga se moramo zadovoljiti nekim lokalnim optimumom. Traženje takvog rješenja ipak je opravdano jer je to rješenje, u smislu zadovoljenja postavljenih kriterija, bolje od onog koje bismo odabrali bez optimizacije.

Projektiranje mosta svodi se na traženje više lokalnih optimuma te ocjene koji su od istraženih minimuma bolji. Pritom se uspoređuju rezultati ocjene uspješnosti pet osnovnih kriterija, svakog posebice – funkcionalnosti, postojanosti, gospodarstvenosti, estetike i ekologije. Rezultati se dobiju za diskretne točke gdje je svaka točka zasebna inačica. Nužno je istaknuti da se ovdje radi o diskretnom problemu, dok slika 2. predočuje neprekinuti problem. Ako se posebice analiziraju svaki od navedenih pet kriterija, dobiva se pet različitih "ploha", gdje se optimumi po različitim kriterijima postižu u različitim diskretnim točkama. Ili primjerice, nije sigurno da će se poklopiti optimalna inačica po kriteriju gospodarstvenosti i optimalna inačica po kriteriju estetike.

No, definiranje jedne inačice mnogo je složeniji posao kad se zna da ovisi o velikom broju parametara. Realno je neograničen broj mogućih inačica, a traženje optimuma moguće je tek uspoređivanjem suženog broja inačica iz neograničenog skupa svih mogućih inačica. Osnovni je problem kako odabrati one inačice koje će ući u analizu optimuma, te koliko se može biti siguran da optimum ne leži izvan skupa odabranih inačica. S obzirom na neograničen broj mogućih inačica, sa sigurnošću se može tvrditi da unutar suženog skupa odabranih inačica niti jedan nije optimum. Tek bogato iskustvo i vrhunsko znanje projektanta mostova može biti utjeha i nada da njegov odabir inačica omogućuje da utvrdimo inačicu koja se ne razlikuje bitno od optimalne inačice. Stoga uvjetno rečeno i takvu inačicu smijemo zvati optimalnom.

## 2 Ekspertni sustavi u projektiranju mostova

### 2.1 "Umjetna inteligencija" – nužan iskorak

Problematika projektiranja općenito, pa time i projektiranja velikih mostova, ne može se znatnije unaprijediti klasičnim metodama konvencionalnog programiranja. Veća brzina novijih generacija računala bitno ne ubrzava cijeli proces projektiranja. Najosjetljivija i najsporija karika u tom procesu jest čovjek. S druge strane, čovjek ekspert svojim iskustvom u odabiru skupa mogućih rješenja neizmjerljivo pridonese ubrzanju cijelog procesa. Umijeće projektiranja uvelike počiva na iskustvu pojedinca ili cijele struke, a ne isključivo na znanstveno dokazanim tvrdnjama. Takva je problematika izuzetno pogodna za obradu tehnologijom ekspertnih sustava (ES) [5].

Ekspertni sustavi su jedno od područja tzv. "umjetne inteligencije" [6]. Ovdje se kombiniraju prikazivanje znanja (knowledge representation) s tehnikama rješavanja problema (problem solving techniques). Te se aplikacije nazivaju "na znanju zasnovani ekspertni sustavi" (knowledge-based expert systems). Dakle, ekspertni sustav je računalni sustav koji tijekom rješavanja kompleksnog zadatka simulira proces razmišljanja eksperta iz određenog područja. Ekspertni sustav rabi se pri rješavanju problema ili pri donošenju odluka.

### 2.2 Zrela i dokazana tehnologija

Prvi ekspertni sustav [7] nazvan DENDRAL nastao je 1965. godine na Stanford univerzitetu na algoritmu dobitnika Nobelove nagrade - kemičara Joshua Lederberga. U osamdesetim godinama primjena ekspertnih sustava bila je ograničena na istraživačke i razvojne centre te nekolicinu najsnažnijih američkih korporacija. Tek devedesete godine donose eksploziju novih ekspertnih sustava razvijenih za rad na mikroracunalu. Danas tehnološki najrazvijenije tvrtke postižu goleme uštede primjenjujući ES.

U području mostova razvijen je veći broj ES koji uglavnom obrađuju neko specifično područje [8]. Većina je uglavnom rabila na pravilima zasnovan tip ekspertnih sustava. Obrađivala je različite problematike mostova koje nije bilo lako riješiti eksplicitnim metodama poput recimo ES za predviđanje mogućeg oštećenja mostovne betonske kolničke ploče ili ES za pomoć pri procjeni u održavanju mostova ili ES za odabir tipa i elemenata mostovne konstrukcije, te vrstu temeljenja ili ES za odabir cjelovitog rješenja betonskih sandučastih grednih mostova.

## 3 RGOIM - integrirani računalni sustav

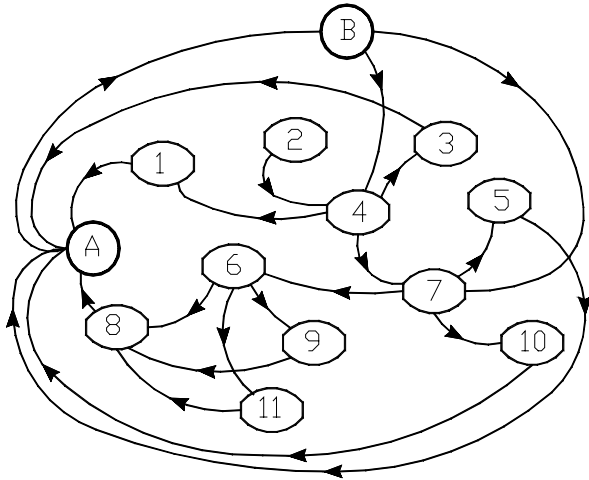
### 3.1 Dijelovi i veze unutar integriranog sustava RGOIM

Ekspertni sustavi su sustavi znanja. To su računalni sustavi koji simbolički predstavljaju znanje i upravljaju njime da bi riješili neki problem. Međutim ovdje izgrađen ES [11] nije samostojeći sustav. On je povezan s ostalim programima i odlukama podržanim sustavima (decision support systems), što zajedno čini kompleksni i sofisticirani integrirani sustav (IS) [9], nazvan RGOIM (Računalom Generirana Optimalna Inačica Mosta). Ovaj skup determinističkih programa i ekspertnih sustava objedinjen je s ciljem da ekspert-stroj simulira postupke i način razmišljanja eksperta čovjeka.

Iako sačinjen od programa koje je moguće pokretati nezavisno, integrirani sustav RGOIM tvori jedinstvenu cjelinu. Ovdje su nabrojani najbitniji dijelovi izgrađenoga integriranog sustava. Važno je naglasiti da je čovjek, inženjer, sastavni i nenadomjestivi dio integriranog sustava RGOIM. Jednako važna je baza znanja koju stvara inženjer ekspert po svom kriteriju.

TER_NIV	Program za proračun geometrije terena i nivelete
DISP_GEN	Program za generiranje rasporeda – inačica mosta
DISP_GRF	Program za grafičku prezentaciju izgeneriranih inačica mosta
SIMETRI	Program za ocjenu vrijednosti nekih estetskih parametara mosta
NM_GEN	Program za generiranje numeričkog modela mosta
NM_GRF	Program za grafičku prezentaciju izgeneriranih numeričkih modela mosta
CS_GRF	Program za grafičku prezentaciju izgeneriranih poprečnih presjeka
SEC_PROP	Program za proračun karakteristika poprečnih presjeka mosta
PREST_GEN	Program prilagođava rezultate programa MN_GEN za paket PREST
PREST	Program za statičku analizu numeričkog modela konstrukcije mosta
PRESTGRF	Program za grafičku prezentaciju rezultata paketa PREST
UTRAKE	Program za transformiranje općega poprečnog presjeka u trakasti model

AAEMM2	Program za proračun graničnih stanja uporabe armiranobetonskih prednapetih elemenata
ULS3	Program za proračun graničnog stanja nosivosti armiranobetonskih prednapetih elemenata
INŽINJER	Projektant mostova, živi ekspert.
BAZA ZNANJA	Baza znanja – temelj snage svakog ekspertnog sustava



Slika 3. Osnovni dijelovi i veze unutar integriranog sustava RGOIM

Na slici 3. prikazane su veze unutar integriranog sustava RGOIM koji čine osnovni podsustavi:

A) INŽENJER

B) BAZA ZNANJA

1. Estetska analiza vrijednosti inačica mosta
2. Prethodna analiza terena i nivelete
3. Grafička prezentacija inačica mosta
4. Generator inačica mosta
5. Grafička prezentacija poprečnih presjeka
6. Statička provjera inačica mosta
7. Generator numeričkih modela inačica mosta
8. Grafička prezentacija rezultata numeričke analize
9. Provjera presjeka po graničnom stanju sloma
10. Grafička prezentacija numeričkih modela inačica mosta
11. Provjera presjeka po graničnom stanju uporabe

### 3.2 Problem formulacije i strukturiranja znanja

Ekspertni sustav je sustav znanja. Da bi se znanjem moglo valjano koristiti potrebno ga je formulirati te nakon toga

spremiti u bazu znanja na način da je ES može pretraživati. Problem formulacije, odnosno strukturiranja znanja, jest ključni problem i tome je posvećen velik broj objavljenih istraživanja. Svodi se na aspekt tehnologije te na ništa manje značajan aspekt psihologije. Da bi se znanstveni aspekt ovog rada sveo na razumne okvire, izgradnja strukture znanja usmjerila se na uže područje slobodne prijepusne gradnje betonskih grednih mostova.

Znanje čini skup informacija i odnosa izvedenih:

- iz teorije konstrukcija
- iz estetičkih teorija
- iz propisa
- iz cijena materijala, znanja, radne snage
- iz iskustva o izvedenim objektima
- iz subjektivnih stavova i želja projektanta i/ili investitora.

Znanje se može "crpiti" iz pisanih izvora, ali ključni dio odluka živi ekspert drži u sebi u obliku intuitivnog znanja te taj dio znanja nije moguće eksplicitno preuzeti iz literature. Autor je u svojoj karijeri surađivao s nekolicinom vrhunskih projektanata mostova – eksperata u svojoj struci. Mnoge relevantne "heurističke" spoznaje prikupljao je na više načina:

- shvaćajući što ekspert radi u određenoj situaciji tijekom neposrednog rada s ekspertom na konkretnim projektnim zadacima
- ispitujući eksperta tijekom posebno dogovorenih razgovora koji su imali oblik klasičnih intervjua
- zapitkujući eksperta tijekom spontanijih situacija, istražujući stav dotičnog eksperta vezan za određeni problem.

Pri navedenom postupku istraživanja tajna vrhunskih vještina graditeljske struke, autor je bio u nekim situacijama kada se susretao s karakterističnim problemima psiholoških prepreka. Većinu problema svladao je zahvaljujući dobroti i iskrenosti eksperata s kojima je kontaktirao, a koji su bili upoznati s prvenstveno znanstvenim ciljevima ovog istraživanja. Dobri savjeti i tehnologije pristupa autor može zahvaliti izvanrednoj knjizi [10]. No, treba naglasiti da je problem prijenosa znanja čovjeka eksperta u bazu znanja računala često vremenski nepredvidljiv, te je to posao čije dovršenje treba prepuštiti samom čovjeku ekspertu, što je u ovom radu i omogućeno.

### 3.3 Baza znanja

Nakon dobro formuliranog i strukturiranog znanja izgradnja kvalitetne baze znanja manji je problem. ES daje uspješne rezultate ako ima kvalitetnu bazu znanja čak i

ako ima siromašnu logičku jedinicu. Osnovna je osobina ovdje oformljene baze fleksibilnost i laka izmjenjivost, odnosno prilagodljivost različitim konstruktorskim "škola", koje se često ne slažu oko svih detalja umijeća projektiranja. Za prethodno navedeno strukturirano (sistemizirano i klasificirano) "znanje" priređuje se ASCII datoteka. Ona je lako izmjenjiva uz pomoć bilo kojeg editora. Nekoliko stotina varijabli definira odnos između elemenata konstrukcije. Ovdje se daje primjer podataka vezenih za uzdužni raspored, a koji ulaze u bazu znanja:

#### 1 Unutarnji rasponi:

- 1.1 60-120 m optimum
- 1.2 120-130 m uobičajeni raspon u posljednje vrijeme
- 1.3 50-60 m, 120-150 m još uvijek normalni rasponi
- 1.4 150-180 m prihvatljivi rasponi
- 1.5 300 m veliki raspon
- 1.6 40-50m konkurentni samo u urbanim sredinama uz nepravilnu geometriju
- 1.7  $1.2/1.0 =$  najveći odnos visine stupa/unutarnji raspon

#### 2 Odnos unutarnjih i vanjskih raspona

- 2.1 - jednaki unutarnji rasponi (kad god je to moguće) - usvaja se!
  - tada se određuju krajnji rasponi prema točkama 2.1.1 do 2.1.3
- 2.1.1 0.51 (bez uporabe balasta i privremenih podupiranja te primjenom samo prijepusnog postupka uz dodavanje 1-2 segmenta samo iznad upornjaka) ili
- 2.1.2 0.75-0.81 (najekonomičniji u pogledu momenata - za  $>0.51$  potrebna klasična skela (to može poskupjeti gradnju) ili
- 2.1.3 0.65-0.71 (optimum iz oblikovnih razloga)
- 2.2 različiti unutarnji rasponi (kad to lokalni uvjeti nameću):
  - 2.2.1 1. kod širokih vodotoka dva različita standardna raspona :
    - 2.2.1.1 - u koritu veći rasponi (L)
    - 2.2.1.2 - na kopnu manji rasponi (l)
    - 2.2.1.3 - prijelazni raspon  $(L+l)/2$
  - 2.2.2 2. široka i duboka dolina gdje su rasponi nejednaki i konstantno varijabilni:
  - 2.2.3 3. kod slabih uvjeta temeljenja ili nekih prinudnih
    - 2.2.3.1 - rasponi variraju neočekivano
  - 2.2.4 4. kod širokih vodotoka
    - 2.2.4.1 - kratki centralni raspon u 1. fazi (20 do 70 m)
    - veliki krajnji rasponi u 2. fazi (110 do 180 m)

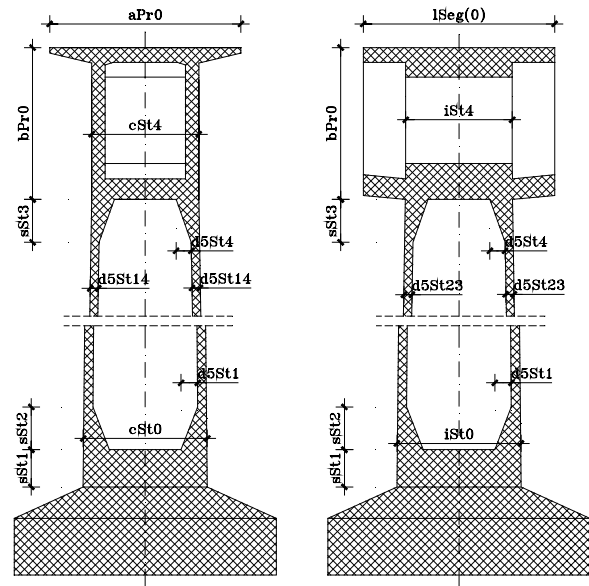
#### Ležajevi i zglobovi

....

### 3.4 Generator varijabilnih elemenata inačica

"Mozak" sustava RGOIM svakako je u dijelu nazvanom "generator varijabilnih elemenata inačica" ili kraće "generator inačica". Intenzivnom primjenom razvijene tehnologije heurističkog zaključivanja (heuristic reasoning), te niza tehnika na čijoj se osnovi grade ekspertni sustavi (ES), uz potporu pažljivo izgrađene baze znanja, razvijen je ES nazvan DISP\_GEN kojim se generira niz kvalitetnih inačica mosta.

Uzdužni i poprečni raspored dijelova mostovne konstrukcije, oni su elementi koji na najsnažniji način pridonose punoj vrijednosti pojedine inačice. Izbor suvislog, bistro osmišljenog i proporcionalnog rasporeda konstrukcije mosta, najbolji je put k "optimalnoj" inačici mosta.



Slika 4. Osnovni elementi izgeneriranoga jednostrukog stupa nekog mosta

No, postoji opasnost da bi ovako izgrađen sustav producirao jednu inačicu koja ima najviše vjerojatnosti da bude prosječna u odnosu prema već viđenim rješenjima spremljena u bazu podataka. Stav "inačica po uzoru uobičajene, odnosno prosječne", neprihvatljiv je s gledišta pozitivnih stremljenja k onim rješenjima koja bi trebala biti "bolja od prosječnih". Stoga se ovdje uvodi posebna procedura nazvana "generator varijabilnih elemenata rješenja". Procedura se oslanja na pretraživanje različitih, ali pri tom još uvijek racionalnih inačica. Posebnom se procedurom izbjegava generiranje dviju sličnih inačica.

### 3.5 Kriteriji pri generiranju inačica

Odabir elemenata inačice istodobno se odvija uz analizu vrijednosti tih elemenata. Svaki element inačice odabire se brižljivim simultano zadovoljenim različitim kriterijima na razini mosta kao cjeline:

### Funkcionalnost

IS zahtijeva potpuno zadovoljenje osnovnih funkcionalnih zahtjeva za objekt. Eventualno smanjenje funkcionalnosti radi probitačnije gospodarstvenosti ne predviđa se kao automatski postupak. U tom pogledu je moguće smanjenje kategorije prometnice i slično. Smanjenje oštrine kriterija za određene funkcionalne zahtjeve moglo bi s gospodarstvenog gledišta biti vrlo zanimljivo.

### Postojanost

Postojanost u širem smislu pokriva nosivost mostovnog sklopa i svakog dijela konstrukcije bez oštećenja ili zamora materijala tijekom projektom predviđenog trajanja konstrukcije. Ne dopušta se manja vrijednost od 100% dostatne nosivosti, uvažavajući propise, teoriju konstrukcija i otpornost materijala. Uvažavaju se propisi, teorija konstrukcija i teorija otpornosti materijala.

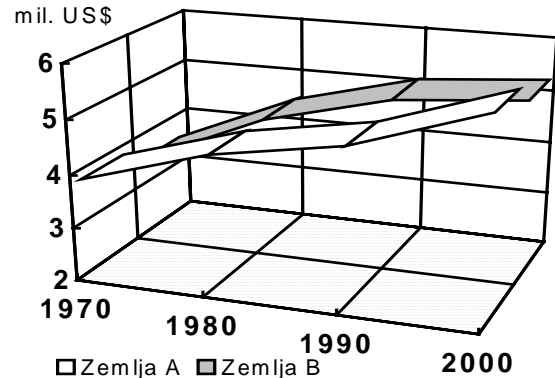
### Gospodarstvenost

Kriterij gospodarstvenosti najčešće je odlučujući pri odabiru konačnog rješenja. Uz zadane cijene materijala, radne snage i tehnologije za svaku izgeneriranu inačicu moguće je dobiti ukupan trošak građenja. Ipak odnos između cijena pojedinih materijala često varira i ne može se predvidjeti kakav će biti u doba gradnje.

Tržište i neprestana dinamika cijena odlučujući su za ocjenu gospodarstvenosti rješenja. Tako je moguće da je objekt odlično ocijenjen, što se tiče gospodarstvenosti, građen u Hrvatskoj 1990. godine, bude različito ocijenjen ako se gradi u SAD-u iste godine ili pak ako se gradi u Hrvatskoj 10 godina kasnije - 2000. godine. Stoga su gospodarstveno relevantni rezultati koji se računaju za svaku izgeneriranu inačicu sljedeći:

- utrošak materijala ( $m^3, m^2, m^3, t, \text{kom}, \text{lit}$ )
- utrošak rada ( $h \times \text{kategorija stručnosti}$ )
- cijena potrebne opreme ( $\text{kn}, \text{US\$}, \text{ECU}$ )
- ukupni troškovi izgradnje ovisno o godini gradnje ( $\text{kn}, \text{US\$}, \text{ECU}$ )

Troškove gradnje lako je moguće preračunati na aktualni ili bilo koji zanimljiv trenutak. Na ovaj se način omogućuje gospodarstvena usporedba novoizgeneriranih inačica u bilo kojem trenutku gradnje uzimajući u obzir vremenski pomak i gibanja cijena na tržištu. Problem postaje rješiv u okviru zadanih parametara koji vrijede za zadani trenutak. Ipak, ne treba smetnuti s uma da je dimenzioniranje po kriteriju minimalnih masa odavno napušten pristup. Tomu je presudila niska trajnost betonskih mostova nastalih u doba kada je takav pristup bio aktualan.



Slika 5. Kroz godine i u različitim makroekonomijama troškovi gradnje variraju

### Ekologija

Ekologija se sve više uspinje na listi prioritetnih zahtjeva prema konstrukciji. Čovjekov zahvat u prirodi može narušiti ekološku ravnotežu podizanjem konstrukcije koja je "estetski zagađivač". Također građenje konstrukcije mosta, sječa šume, izgradnja prilaznih putova i privremenih objekata šteti okolišu duže razdoblje ili zauvijek. Na temelju malog broja podataka dovoljnih za postupak optimalizacije, nije moguće dobiti cjelovit uvid u ekološki utjecaj inačice na okoliš. Može se pretpostaviti da će manji broj stupova manje "ozlijediti" Zemljanu koru, ali je pritom teško bez "snažnijih" analiza procijeniti estetsku vrijednost i prihvatljivost inačice s manjim brojem otvora.

### Estetika

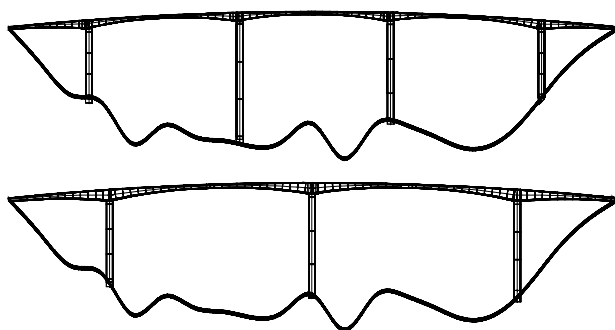
"Prizor mosta je ona elementarna vrijednost što je nudimo korisniku i promatraču, pa stoga ljepotu mosta valja staviti na najviši položaj na ljestvici činitelja vrijednosti naših tvorevina...". Tako je govorio i pisao pok. prof. dr. Kruno Tonković.

Mostovi su tehničke tvorevine, kod kojih se nerijetko postiže poklapanje relativne savršenosti svrhe i relativne savršenosti ljepote. Općeniti estetski zahtjev da most treba biti što ljepši, svodi se na uvažavanje niza estetskih zakonitosti. IS daje neke estetske smjernice tijekom generiranja inačice i podvrgava izgenerirano rješenje estetskoj analizi primjenjujući osnovne klasične preporuke za oblikovanje mostova. Estetska ocjena koju IS daje, ne obuhvaća neistražena područja estetskih osobitosti poput bizarnosti. Stoga je konačan sud prepušten čovjeku. Da bi se uključila mogućnost originalnosti, omogućava se zadavanje nepromjenjivih parametara i pored naznake IS, da bi takvi parametri mogli biti u konfliktu s nekim od estetskih zakonitosti.



#### 4 Testiranje sustava RGOIM

Za autora vrlo poznat most bio je vijadukt Moste izgrađen u Sloveniji [12, 13]. Sustav RGOIM podvrgnut je rigoroznom testu. Baza znanja uglavnom je formirana zahvaljujući iskustvu - projektanta vijadukta Moste prof. V. Ačanskom. Zadane su konfiguracije tla doline, određena zahtijevana niveleta, trasa i kategorija prometnice, a sve u skladu s uvjetima gradnje vijadukta Moste. Pod-sustav DISP\_GEN izuzetno je brzo izgenerirao dvije kvalitetne inačice. Analiza koja je uslijedila potvrdila je da je jedna inačica gospodarstveno superiornija, dok je druga inačica ekološki prihvatljivija. Ostale zahtjeve su obje inačice definirale na podjednakoj razini.

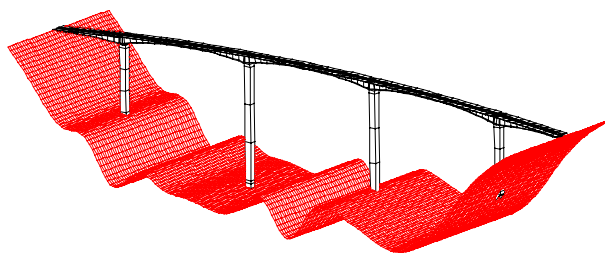


Slika 6. Sustav RGOIM generira dvije inačice na poziciji vijadukta Moste

Rezultati su potvrdili da se gospodarstveno superiornija inačica u većini ponuđenih rješenja podudara s izvedenim mostom. Navedeni test, kao i niz testova koji su uslijedili za još neizgrađene mostove potvrdili su vrijednost sustava RGOIM.

#### LITERATURA

- [1] Menn, C.: *Aesthetics and economy in bridge design*, XI Congress FIP '90, Hamburg, 1990.
- [2] Kolić, D.; Radić, J.: *Konceptualno projektiranje betonskih grednih mostova*, Zbornik radova 49.-58., Prvi znanstveni kolokvij Mostovi, Brijunski otoci, 1991.
- [3] Kardestuncer, H.; Norrie, D. H.: *Finite Element Handbook*, McGraw-Hill Inc., New York, 1987.
- [4] Mihanović, A.; Marović, P.; Dvornik, J.: *Nelinearni proračuni AB konstrukcija*, DHGK, Zagreb, 1993.
- [5] Žagar, Z.: *Razvoj ekspertnih sustava i umjetne inteligencije, IV. kongres DHGK - Zamah graditeljstva - temelj razvitka Hrvatske*, Zbornik radova, str.517.-531., Cavtat, 1996.
- [6] Brooks, R. A.: *Cambrian Intelligence - The Early History of the New Ai*, MIT Press; ISBN: 0262522632, Cambridge, 1999.
- [7] Harmon, P. et al.: *Expert systems - Tools and Applications*, John Wiley & Sons, New York, 1988.
- [8] Adeli, H. & Balasubramanyam, K. V.: *Expert Systems for Structural Design - A New Generation*, Prentice-Hall, New Jersey, 1988.
- [9] Durkin, J. & Durkin, J.: *Expert systems: Design and Development*, Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [10] Walters, J. R.: *Crafting knowledge-based systems: expert systems made easy/realistic*, John Wiley & Sons, New York, 1988.
- [11] Pičulin, S.: *Analiza preporuka za projektiranje prednapetih betonskih grednih mostova*, disertacija, Zagreb, 1996.
- [12] Ačanski, V.: *Projektiranje i izvođenje vijadukta Moste, knjiga M-1, IX. Kongres SDGKJ, Cavtat, 9.-12. travnja, 1991.*
- [13] Pičulin, S.; Novković, Z.: *Statička provjera vijadukta Moste uz pomoć kompjutorskog programa PREST*, Zbornik radova str.391.-399., Prvi znanstveni kolokvij Mostovi, Brijuni, 1991.



Slika 7. Pogled na jednu od izgeneriranih inačica

#### 5 Zaključak

Koristeći se suvremenom tehnologijom ekspertnih sustava, ovdje opisan rad potvrđuje da se izgradnjom niza ekspertnih sustava može dograditi i povećati efikasnost programskih paketa zasnovanih na tradicionalnoj tehnologiji programiranja. Postavlja se pristup da projektant rezultate ove tehnologije u svakom trenutku može provjeriti. Projektantu se omogućava formiranje vlastite baze podataka i specifične logike odlučivanja što još više produbljuje povjerenje u ovu novu tehnologiju. Razumljivo je da projektant preuzima i punu odgovornost za konačne rezultate pa se uklanjaju mogući pravni problemi. Dakle autor smatra da će projektant - živi ekspert biti spreman prepustiti ekspertu stroju projektiranje mosta isključivo ako je siguran da će to računalo učiniti koristeći se logikom projektanta, ali puno brže. No, bez obzira na ohrabrujuće rezultate, valja istaknuti da je nužno uložiti veliku količinu energije u propagiranje ove tehnologije. Otpore koji se pojavljuju kod projektanata nužno je ukloniti upoznavanjem i ispravnom primjenom ove tehnologije. Mnogi pogrešni i netaktični koraci, koji su u tom smjeru već učinjeni, nanijeli su štetu u formiranju mišljenja kako računalo "samostalno" donosi odluke. To je otvorilo cijeli niz etičkih i pravnih problema koji se mogu zaobići pristupom opisanim u ovom radu.