

GRADBENI VESTNIK

GLASILO
ZVEZE DRUŠTEV
GRADBENIH
INŽENIRJEV
IN TEHNIKOV
SLOVENIJE

**FEBRUAR
2001**



**1951
2001**

Glavni in odgovorni urednik:

Prof.dr. Janez **DUHOVNIK**

Lektorica:

Alenka **RAIČ - BLAŽIČ**

Tehnični urednik:

Danijel **TUDJINA**

Uredniški odbor:

Doc.dr. Ivan **JECELJ**

Andrej **KOMEL**, u.d.i.g.

Mag. Gojmir **ČERNE**

Prof.dr. Franci **STEINMAN**

Prof.dr. Miha **TOMAŽEVIČ**

Janja **PEROVIC-MAROLT**, u.d.i.g.

Tisk:

TISKARNA LJUBLJANA, d.d.

Ljubljana

Količina: 900 Izvodov

Revijo izdaja ZVEZA DRUŠTEV GRAD-BENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE, Ljubljana, Karlovska 3, telefon/faks: 01 422-46-22, ob finančni pomoči Ministrstva RS za znanost in tehnologijo, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani ter Zavoda za gradbeništvo Slovenije.

<http://www.zveza-dgits.si>

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 5000 SIT; za študente in upokoјence 2000 SIT; za gospodarske naročnike (podjetja, družbe, ustanove, obrtnike) 40500 SIT za 1 izvod revije; za naročnike v tujini 100 USD. V ceni je všteti DDV.

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

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.

2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.

3. Besedilo prispevkov mora biti napisano v slovenščini.

4. Besedilo mora biti izpisano z dvojnimi presledki med vrsticami.

5. Prispevki morajo imeti naslov, imena in priimke avtorjev ter besedilo prispevka.

6. Besedilo člankov mora obvezno imeti: naslov članka (velike črke); imena in priimke avtorjev; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; naslov SUMMARY, naslov članka v angleščini (velike črke) in povzetek v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so dodatki označeni še z A, B, C, itn.

7. Poglavja in razdelki so lahko oštevilčeni.

8. Slike, preglednice in fotografije morajo biti oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino. Slike in fotografije, ki niso v elektronski obliki, morajo biti priložene prispevku v originalu in dveh kopijah.

9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.

10. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki [priimek

prvega avtorja, leto objave]. V istem letu objavljena dela istega avtorja morajo biti označena še z oznakami a, b, c, itn.

11. V poglavju LITERATURA so dela opisana z naslednjimi podatki: priimek, ime avtorja, priimki in imena drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.

12. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.

13. Pod črto na prvi strani, pri prispevkih, krajših od ene strani pa na koncu prispevka, morajo biti navedeni obsežnejši podatki o avtorjih: znanstveni naziv, ime in priimek, strokovni naziv, podjetje ali zavod, naslov.

14. Prispevke je treba poslati glavnemu in odgovornemu uredniku prof. dr. Janezu Duhovniku na naslov: FGG, Jamova 2, 1000 LJUBLJANA. V spremnem dopisu mora avtor članka napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren. Prispevke je treba poslati v treh izvodih in v elektronski obliki (WORD, EXCEL, AVTODAC, DESIGNER).

Uredniški odbor

VSEBINA - CONTENTS

Članki, študije, razprave
Articles, studies, proceedings

Stran 26

Gorazd Humar, Juhani Virola

MOST AKAŠI-KAIKJO NA JAPONSKEM

Most z največjim glavnim razponom na svetu

THE AKASHI-KAIKYO BRIDGE IN JAPAN

Bridge with world's longest centre span

Stran 38

Stojan Kravanja

SINTEZA KONSTRUKCIJ:

RAČUNALNIŠKO OPTIMIRANJE

JEKLENIH KONSTRUKCIJ Z

MATEMATIČNIM PROGRAMIRANJEM

STRUCTURAL SYNTHESIS:

COMPUTER AND MATHEMATICAL

PROGRAMMING BASED OPTIMIZATION

OF STEEL STRUCTURES



PROJEKTIRANJE KONSTRUKCIJ

ANALIZA KONSTRUKCIJ

SINTEZA KONSTRUKCIJ

Mnenja in odmevi

Stran 33

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

PRIPOMBE FAKULTETE ZA

GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

UNIVERZE V LJUBLJANI NA OSNUTKA

ZAKONA O UREJANJU PROSTORA IN

ZAKONA O GRADITVI OBJEKTOV

G. HUMAR, J. VIROLA: Most Akaši-Kaikjo na Japonskem - most z največjim glavnim razponom na svetu

MOST AKAŠI-KAIKJO NA JAPONSKEM

Most z največjim glavnim razponom na svetu

THE AKASHI-KAIKYO BRIDGE IN JAPAN

Bridge with world's longest centre span

STROKOVNI ČLANEK

UDK 624.5 (520)

GORAZD HUMAR, JUHANI VIROLA

POVZETEK

Leta 1998 je bil na Japonskem predan v promet most Akaši-Kaikjo, most, ki je z glavnim razponom dolžine 1991 m postavil nove mejnike v razvoju mostne gradnje. Človek se zato upravičeno vprašuje, kje so meje možnega. Most, ki ima dva pilona, visoka skoraj kot Eifflov stolp, je nastajal kar deset let. Med gradnjo se je dogodilo mnogo zanimivih stvari, najmočnejše pa je gradnjo leta 1995 zaznamoval močan potres 8.0 stopnje po Richterju, ki je za dober meter povečal razdaljo med piloni.

SUMMARY

The Akashi-Kaikyo bridge in Japan was opened to traffic in 1998. The length of its main span, 1991 m, was a new milestone in the history of bridge construction, and justifies the question "What are the boundaries of the possible?" It took almost ten years to build this bridge, which has two piers almost as high as the Eiffel Tower. Many interesting events took place during its construction. The most impressive of these events was undoubtedly the 1995 earthquake of 8.0 degrees of the Richter scale. This earthquake increased the distance between the bridge's piers by more than one meter.

Avtorja:

Gorazd HUMAR, univ.dipl. inž.grad., Šempeter pri Gorici, Slovenija
Juhani VIROLA, Eur Ing-FEANI, Helsinki, Finska

UVOD

Ali si lahko predstavljate most, ki ima tako dolg razpon, da lahko v enem skoku premosti razdaljo med stavbo slovenskega parlamenta na Šubičevi ulici v Ljubljani in nogometnim stadionom za Bežigradom? Razdalja med obema, vsem Slovencem znanimi točkama, znaša natanko 2 km ali toliko, kot znaša glavni razpon med dvema nosilnima stebroma največjega mostu na svetu z imenom Akaši-Kaikjo ($l = 1991$ m) (slika 1). Celotna dolžina tega znamenitega mostu znaša toliko, da bi z njim lahko premostili razdaljo med Ankaranom in Semedelo - z dvema vmesnima stebroma, visokima kot Eifflov stolp.

Verjetno vsi Slovenci poznajo Zmajski most v Ljubljani¹. Most, ki je bil zgrajen leta 1901, je bil v času izgradnje eden največjih armaranobetonskih mostov na svetu. Manj pa nam je znano to, da je glavni konstruktor Zmajskega mostu avstrijski inženir Joseph Melan, ki je bil tudi utemeljitelj teorije statičnega računa za velike viseče mostove (objavljena leta 1888), na podlagi katere so nastale največje mostne gradnje v 20. stoletju.

Aprila 1998 je bil torej predan v promet most Akaši-Kaikjo, most z največjim razponom, ki je bil zgrajen v zgodovini človeške civilizacije².

Most je z razponom 1991 metrov močno prekosil vse do danes zgrajene mostove. Celo sloviti Golden Gate v San Franciscu, ki je bil prvi na lestvici največjih mostov kar 27 let, je v primerjavi z njim pravi pritlikavec. Ta veliki dosežek človeškega uma je najdržnejša gradbena konstrukcija na področju mostogradnje, ki hkrati nakazuje, da gre tudi v gradbeništvu razvoj s časom, hkrati pa ta veliki most odpira povsem nove perspektive in možnosti na področju razvoja še sodobnejših in večjih mostov. Človekovo hopenje pač nikoli ne pozna meja in človekov raziskovalni duh vedno išče novih možnosti za prekoračitve še večjih ovir. Le kje je tista meja, ki jo je možno še doseči?

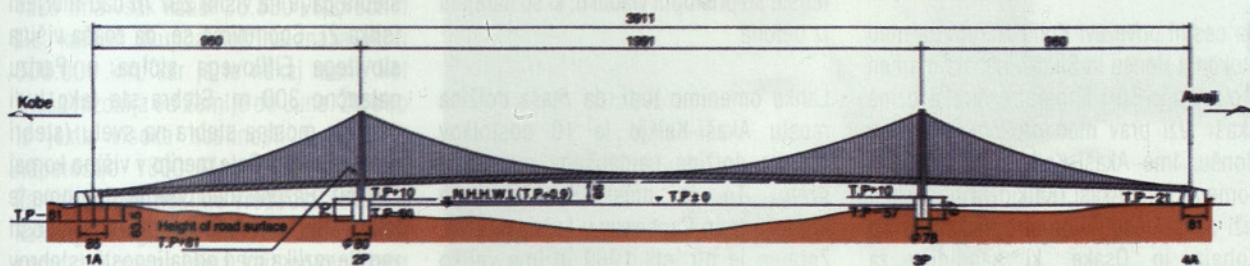
GLAVNE POVEZAVE MED GLAVNIMI JAPONSKIMI OTOKI

Japonska je dežela, ki po površini meri

378.000 km² in ima 126 milijonov prebivalcev. Japonsko otočje sestoji v glavnem iz štirih velikih otokov. Le ti so gledano od jugozahoda proti severovzhodu: Kjušu, Šikoku, Honšu in Hokaido. Med otokoma Kjušu in Honšu poteka povezava s pomočjo predora in mostu, medtem ko med otokoma Kjušu in Šikoku še ni direktnih povezav. Prav zato je načrtovanje med slednjima otokoma predmet številnih preučevanj.

Med največjim japonskim otokom Honšu in Hokaidom na severu je bil pod ožino Cugaru že leta 1980 zgrajen predor, ki je danes najdaljši na svetu. Z dolžino 53,85 km je železniški predor za nekaj kilometrov daljši od nam bolj znanega predora pod Rokavskim prelivom med Francijo in Veliko Britanijo.

Med otokoma Honšu in Šikoku sta zgrajeni že dve cestni povezavi, tretjo pa je možno pričakovati v kratkem. Te povezave imajo več velikih mostov. Najvzhodnejša je povezava Kobe-Naruto, dolga 89 km, ki je bila dokončana spomladi leta 1998. Najmarkantnejši objekt na tej trasi je prav most Akaši-Kaikjo, most z razponom 1991 m, ki je



Slika 1: Vzdolžni prerez mostu Akaši-Kaikjo na Japonskem.

¹ Soavtor članka Gorazd Humar je leta 1998 izdal knjigo z naslovom ZMAJSKI MOST, v kateri je poleg znamenitega ljubljanskega mostu s štirimi krilatimi zmaji opisana tudi svetovna zgodovina gradnje mostov, med katerimi so tudi veliki viseči mostovi. Knjiga je pred kratkim izšla še v angleškem prevodu.

² Članek je soavtor Gorazd Humar pripravil v sodelovanju z gospodom Juhaniem Virolo, diplomiranim inženirjem gradbeništva iz Finske, ki se ukvarja s opisovanjem velikih mostov in je strokovni sodelavec slovite Guinnessove knjige rekordov. Zapis o mostu Akaši-Kaikjo je bil objavljen v finski strokovni reviji RIA, glasilu finskih arhitektov (št. 1/99). Soavtor je članek prevedel iz angleščine in ga dopolnil s komentarji.

najdaljši na svetu.

Posebej zanimiva je tudi zahodna povezava med otokoma Honšu in Šikoku prek ceste Onomiči-Imabari, ki je bila dokončana maja 1999. Nahaja se ca. 200 km zahodno od Kobeja in ima številne mostove. V svetu je na tej povezavi najbolj poznan most TATARA, ki ima najdaljši razpon ($l = 890$ m) med mostovi s poševnimi zategami na svetu (v Sloveniji je en sam manjši most s poševnimi zategami oziroma jeklenimi kabli prek Ljubljane na vzhodnem delu ljubljanske obvoznice). Naslednji veliki most na tej povezavi je še most Kurišima-Kaikjo. To je edinstvena kombinacija treh zaporednih visečih mostov s šestimi piloni, štirimi sidrišči kablov in glavnimi razponi $1030 + 1020 + 600$ m in vključno z dostopnimi deli skupne dolžine 4015 m.

Skupna dolžina vseh povezav med otokoma Honšu in Šikoku znaša torej celih 186 km. Celoti stroški tega gradbenega posega so znašali 3400 milijard jenov (ca. 6400 milijard SIT).

ZGODOVINA GRADNJE MOSTU AKAŠI-KAIKJO

Na cestni povezavi Kobe-Naruto se med otokoma Honšu in Šikoku nahaja majhen otok Avaji. Štiri kilometre široka ožina Akaši leži prav med otokoma Avaji in Honšu. Ime Akaši-Kaikjo po japonsko pomeni ožina Akaši (Kaikjo-ožina). Most leži nekaj deset kilometrov zahodno od Kobeja in Osake, ki kandidira za olimpijske igre leta 2008. Skozi ožino poteka gost ladijski promet (okoli 1400 ladij na dan). Prav gostota tega prometa je določala dolžino glavnega razpona mostu. Največja hitrost vodnega toka v ožini znaša največ kar 4,5 vozla (ca. 8 km/uro). Na tej cestni povezavi je še en velik viseči most z imenom Ohnaruto z razponom 876 m.

Prvotni načrt za gradnjo mostu Akaši-Kaikjo sega v leto 1950. Dolžina glavnega

loka se je na projektih načrtovalcev iz leta v leto večala. Sredi šestdesetih let 20. stoletja so načrtovali razpon med 1300 in 1500 m, kar bi pomenilo, da bo to most z najdaljšim razponom na svetu. V 70. letih je predvideni razpon narasel že na 1780 m. Predlagali pa so tudi naj poleg ceste čez most teče še železnica. Leta 1985 so opustili misel o železniški povezavi in čez most so načrtovali samo še avtocestno povezavo. Na podlagi skrbnih preučevanj, ki jih je pogojeval v glavnem gost ladijski promet kot tudi težki pogoji temeljenja, se je glavni razpon približeval dolžini med 1950 in 2050 m.

Končno je padla odločitev za razpon 1990 m, ki je le za malenkost manjši od magične dolžine 2 km. Ta dolžina je za 41 odstotkov prekašala do takrat najdaljši mostni razpon na svetu, ki ga je od leta 1981 imel most Humber Bridge v Veliki Britaniji (glej preglednico 1).

Gradnja mostu Akaši-Kaikjo se je pričela maja 1988, gradnja je torej trajala celih 10 let. Viseči most ima tri velike razpone dolžine $960 + 1990 + 960 = 3910$ m. Na kablji so obešene vešalke, ki nosijo jekleno paličasto konstrukcijo, na kateri leži voziščna cesta. Na obeh straneh mostu so pristopni viadukti, ki so narejeni iz betona.

Lahko omenimo tudi, da znaša dolžina mostu Akaši-Kaikjo le 10 odstotkov skupne dolžine najdaljšega mostu na svetu. To je most Second Lake Pontchartrain Causeway v Luisiani, ZDA. Zgrajen je bil leta 1969 in ima veliko število razpinskih polj povprečne dolžine komaj 25 m, medtem ko znaša skupna dolžina mostu 38.422 m. Vendar se velikost gradbenih dosežkov v mostnigradnji meri le po dolžini glavnega razpona med dvema stebroma in ne po skupni dolžini mostu, saj je težavnost gradnje mostu prav v doseganju velikih razponov in ne v celotni dolžini mostu.

Glavni razpon mostu Akaši-Kaikjo je prvi, ki je presegel tako angleško miljo (1609 m)

in celo navtično miljo (1852 m). S popolno upravičenostjo lahko rečemo, da je v več pogledih to najznamenitejša mostna gradnja tega tisočletja. V naslednjem tisočletju bo morda možno zgraditi nekaj novih velikih mostov, kot npr. čez Gibraltarski preliv, kjer načrtujejo 5 km dolg glavni razpon za viseči del mostu in celo 8 km za most s poševnimi zategami. Predviden je tudi most dolžine 3 km čez Mesinski preliv na Sicilijo in most čez ožino Cugaru (2-4 km) na Japonskem.

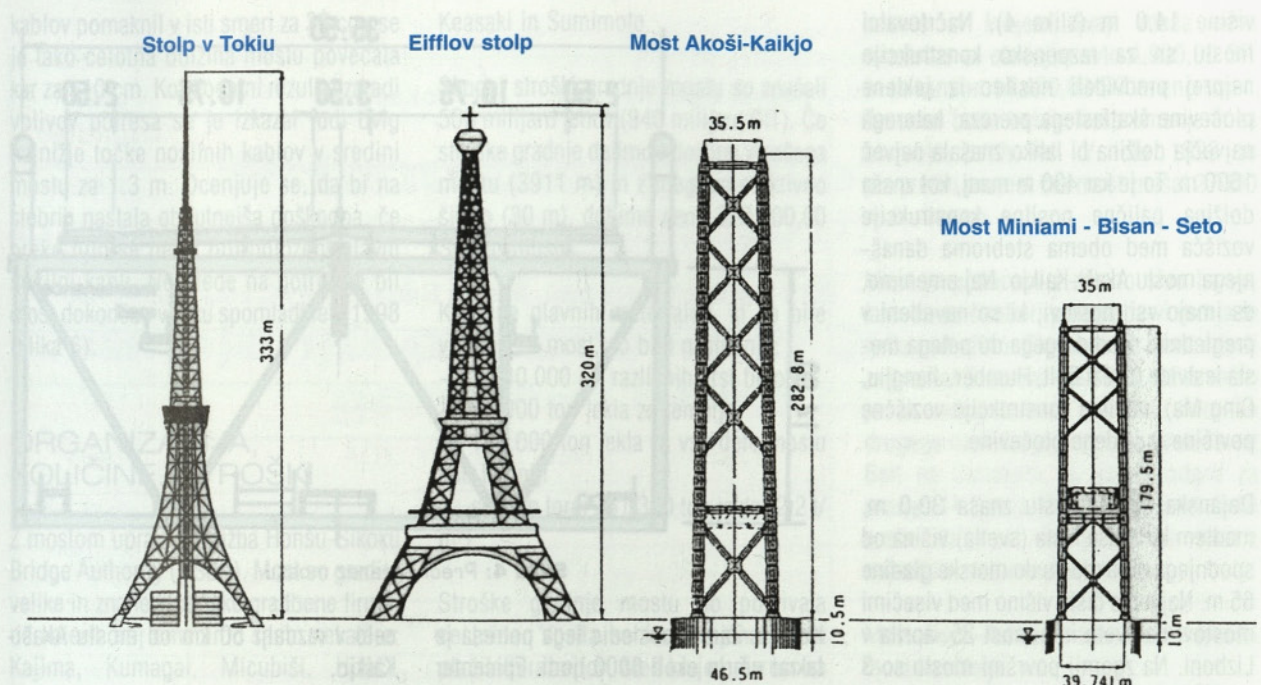
TEMELJENJE IN STEBRI

Veliki sidrni bloki dolgih jeklenih kablov se nahajajo na obeh bregovih preliva. Da bi preprečili korozijo žic nosilnih kablov mostu, so morali vzpostaviti v sidrnih betonskih blokih vlažnost, ki ne presega 60 odstotkov, povprečna vlažnost pa znaša vsega 40 odstotkov. Oba stebra sta temeljena na velikih kesonih višine 70 m in premera 80 m. Globina temeljenja je le nekaj manjša od rekordne globine 80 m, ki je bila dosežena pri gradnji mostu 25. april v Lizboni.

Stebri mostu Akaši-Kaikjo so iz jekla. Višina obeh stebrov znaša 283 m, vrh stebra pa je na višini 297 m nad morjem (slika 2). Spomnimo se, da znaša višina slovitega Eifflovega stolpa v Parizu natančno 300 m. Stebra sta tako tudi najvišja mostna stebra na svetu (stebri mostu Golden Gate merijo v višino komaj 227 m). Razpon med obema stebroma je tako velik, da znaša zaradi ukrivljenosti zemlje razlika med oddaljenostjo stebrov v vznožju in oddaljenostjo na vrhu stebrov kar 93 mm.

V preglednici 1 je seznam 25 največjih mostov na svetu. Velika večina teh mostov ima stebre narejene iz jekla. Betonske stebre imajo npr. mostovi Great Belt, Humber, Cing Ma, Jiongjiu in drugi.

G. HUMAR, J. VIROLA: Most Akaši-Kaikjo na Japonskem - most z največjim glavnim razponom na svetu



Slika 2: Primerjava velikosti stolpov

GLAVNI KABLI IN VEŠALKE

Most Akaši-Kaikjo ima dva glavna nosilna kabla, vsak je premera 1122 mm. Vsak kabel sestoji iz 290 jeklenih vrvi s paralelnimi žicami. Vsaka vrv ima 127 visokonosilnih žic premera 5,23 mm. Tako ima vsak kabel 36.830 vzporednih žic, katerih skupna dolžina znaša okoli 300.000 km, kar je le nekaj manj, kot znaša razdalja od Zemlje do Lune. Žice so iz jekla visoke nosilnosti s porušno napetostjo 1800 Mpa (180 kg/mm²). Zaradi visoke nosilne vrednosti jekla, iz katerega so glavni kabli, sta zadostovala samo dva glavna kabla, kajti prvotni načrt kablov z jeklom porušne trdnosti 1600 Mpa je predvideval kar 4 nosilne kabla.



Slika 3: Prerez glavnega kabla

Žice glavnih kablov so skrbno zaščitene pred korozijo (slika 3). Notranjost kabla je pod zaščito ovojnega plašča prezračevana s suhim zrakom, ki se pod pritiskom premika vzdolž kabla. Velika večina do sedaj zgrajenih visečih mostov ima kabla, ki so med sabo prepleteni. Ta način se je uporabljal pri gradnji visečih mostov vse od leta 1800 naprej.

V sodobni PPWS tehniki (Prefabricated Parallel Wire Strands) je kabel sestavljen iz prefabriciranih vzporednih žic. Ta tehnika je bila uporabljena tudi pri gradnji nekaterih drugih velikih mostov na Japonskem in na Kitajskem. Nosilne vešalke mostu Akaši-Kaikjo, ki visijo na glavnih kablilih, so navpične. Razen treh mostov (Humber, Bospor in Severn), ki

imajo poševne vešalke, imajo vsi mostovi v preglednici 1 navpične vešalke.

VOZIŠČNA KONSTRUKCIJA

Vozišče mostu Akaši-Kaikjo nosi jeklena palična konstrukcija širine 35,5 m in

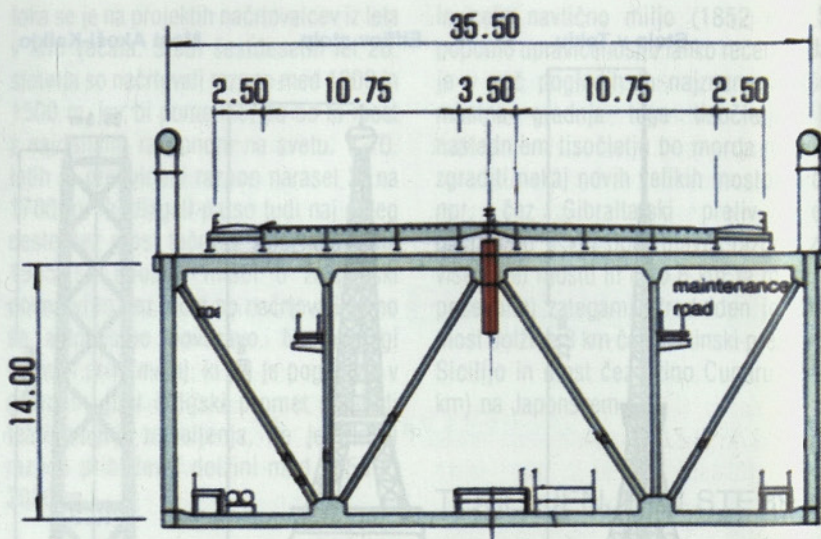
višine 14,0 m (slika 4). Načrtovalci mostu so za razponsko konstrukcijo najprej predvideli nosilec iz jeklene pločevine škatlastega prereza, katerega največja dolžina bi lahko znašala največ 1600 m. To je kar 400 m manj, kot znaša dolžina palične nosilne konstrukcije vozišča med obema stebroma današnjega mostu Akaši-Kaikjo. Naj omenimo, da imajo vsi mostovi, ki so navedeni v preglednici 1 od drugega do petega mesta lestvice (Great Belt, Humber, Jiangjiu, Cing Ma), nosilno konstrukcijo voziščne površine iz jeklene pločevine.

Dejanska širina mostu znaša 30,0 m, medtem ko znaša čista (svetla) višina od spodnjega roba mostu do morske gladine 65 m. Največjo čisto višino med visečimi mostovi na svetu ima most 25. aprila v Lizboni. Na zgornji površini mostu so 3 voziščni pasovi na eni polovici in trije enaki pasovi na drugi polovici mostu. Računska hitrost znaša 100 km na uro. Za vzdrževanje mostu je predvideno vozišče na spodnji strani palične konstrukcije.

Ovisno od obremenitev se maksimalni pomiki voziščne konstrukcije lahko spreminjajo v naslednjih mejah: 8 m navzgor in 5 m navzdol, v horizontalni smeri pa 27 m levo ali desno. To niti niso več tako majhni pomiki, ki pa jih voznik na mostu komaj občuti. Vzdolžna jeklena rešetkasta konstrukcija, ki nosi vozišče, ima dilatacijske naprave na obeh sidriščih kablov, medtem ko ima v točki, ki seče stebra, vgrajene členke. Raztezki in skrčki mostu so zaradi vplivov predvsem temperaturnih razlik in ostalih vplivov (veter) kar veliki.

MOČAN POTRES PRI KOBEJU

Most Akaši-Kaikjo je načrtovan tako, da brez resnih posledic lahko prenese hitrosti vetra do 80 m/s (288 km/h), prav tako pa lahko prenese potrese velikosti 8,5 stopnje po Richterjevi lestvici. Dne 17. januarja 1995 je močan potres stopnje 7,2 po Richterju prizadel okolico

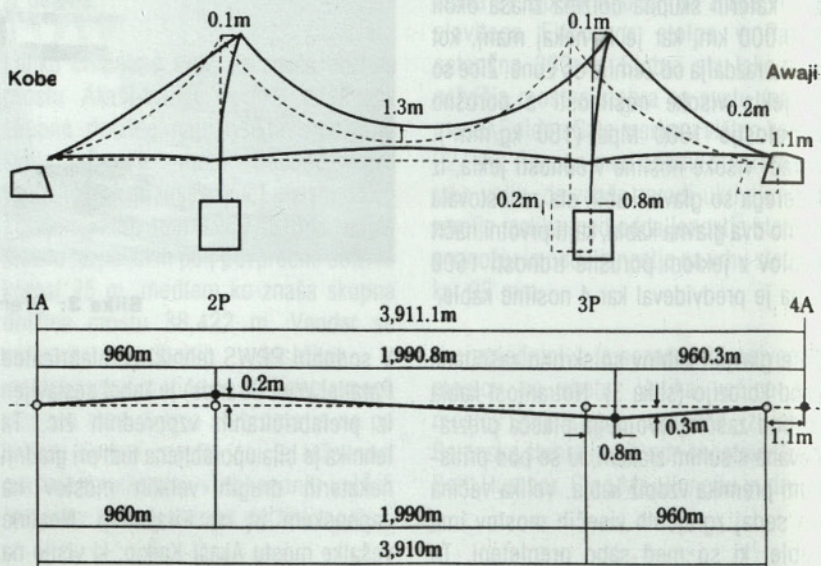


Slika 4: Prečni prerez mostu

Kobeja. Zaradi posledic tega potresa je takrat umrlo okoli 6000 ljudi. Epicenter potresa je bil v bližini južnega dela mostu Akaši-Kaikjo, le nekaj kilometrov od samega mesta Kobe. Most je preživel zelo resno preizkušnjo v razmerah močnega potresa, ki je v bližini mostu dosegel stopnjo okoli 8,0 po Richterju. V času potresa so bili stebri že zgrajeni, glavni nosilni kabli pa položeni. Gradnja nosilne paličaste konstrukcije vozišča se je pravkar pričela. Učinek potresa je bil tako močan, da so se stavbe in mostovi rušili

celo v razdalji 50 km od mostu Akaši-Kaikjo.

Pokazalo se je, da je most Akaši-Kaikjo potres preživel le z manjšimi posledicami. Zaradi premikov tal se je južni stebel pomaknil za 80 cm južneje, prav tako pa so se pomaknili za 10 cm proti južni smeri tudi vrhovi stebrov (slika 5). Na ta način se je zaradi potresa glavni razpon povečal za 80 cm in tako po sili razmer dosegel dolžino skoraj 1991 m. Ker se je tudi južni del mostu ob sidrišču



Slika 5: Premiki mostu, ki jih je povzročil potres v Kobeju

kablov pomaknil v isti smeri za 30 cm, se je tako celotna dolžina mostu povečala kar za 110 cm. Kot dodatni rezultat zaradi vplivov potresa se je izkazal tudi dvig najnižje točke nosilnih kablov v sredini mostu za 1.3 m. Ocenjuje se, da bi na stebrih nastala občutnejša poškodba, če preko njih še ne bi bili položeni glavni nosilni kabli. Ne glede na potres je bil most dokončan v roku spomladi leta 1998 (slika 6).

ORGANIZACIJA, KOLIČINE, STROŠKI

Z mostom upravlja družba Honšu-Šikoku Bridge Authority (HSBA). Most so gradile velike in znane japonske gradbene firme, od katerih naj omenimo samo nekatere: Kajima, Kumagai, Micubiši, Hitači,

Keasaki in Sumimoto.

Skupni stroški gradnje mostu so znašali 500 milijard jenov (940 milijard SIT). Če stroške gradnje delimo z dolžino visečega mostu (3911 m) in z njegovo efektivno širino (30 m), dobimo ceno 320.000,00 SIT/m² mostu.

Količine glavnih materialov, ki so bile vgrajene v most, so bile naslednje:

- 1.440.000 m³ različnih vrst betona
- 68.000 ton jekla za temelje
- 193.000 ton jekla za vse dele mostu nad temelji
- skupno torej 261.300 ton jekla (2,2 t/m²).

Stroške gradnje mostu bo pokrivala cestnina. Vozila so razporejena v pet plačilnih razredov. Med krajem Taruni na

severu in krajem Avaji znaša cena mostnine za običajen avto 4.900,00 SIT in za kamion 14.400,00 SIT za eno smer. Te cene bodo ostale nespremenjene za obdobje petih let. V letu 1998 je povprečni promet čez most znašal 27000 vozil dnevno.

Most je pobarvan z zeleno sivo barvo, tako da se čimbolj prilega barvi morja in neba nad ožino. Slovesno so most odprli za promet 5. aprila leta 1998. Na ta način je za nekaj tednov prehitel otvoritev drugega največjega mostu na svetu Great Belt na Danskem, ki so ga odprli za promet 14. junija 1998 in ki ni imel nikoli sreče, da bi bil vsaj za en dan most z največjim razponom na svetu.

Most Akaši-Kaikjo je tako ostal največji most tisočletja.



Slika 6: Most Akaši-Kaikjo

Preglednica 1: Mostovi z največjimi razponi na svetu (dograjeni ali v gradnji do leta 1998)

Št.	Most	Glavni razpon	Lokacija	Leto izgradnje
1.	Akaši-Kaikjo	1991 m	Kobe-Naruto, Japonska	1998
2.	Great Belt East	1624 m	Korso/r, Danska	1998
3.	Humber	1410 m	Hull, Velika Britanija	1981
4.	Jiangjin	1385 m	Jiangsu, Kitajska	1999
5.	Cing Ma	1377 m	Hong Kong, Kitajska	1997
6.	Verrazano	1298 m	New York, NY, ZDA	1964
7.	Golden Gate	1280 m	San Francisco, CA, ZDA	1937
8.	Höga Kusten	1210 m	Veda, Švedska	1997
9.	Mackinack	1158 m	Macikinaw City, MI, ZDA	1957
10.	Minami Bisan-seto	1100 m	Kojima-Sakaide, Japonska	1988
11.	Fatih Sultan Mehmed	1090 m	Istanbul, Turčija	1988
12.	Bospor	1074 m	Istanbul, Turčija	1973
13.	George Washington	1067 m	New York, NY, ZDA	1931
14.	Kurušima-3	1030 m	Onomiči-Imabari, Japonska	1999
15.	Kurušima-2	1020 m	Onomiči-Imabari, Japonska	1999
16.	Ponte 25 de Abril	1013 m	Lizbona, Portugalska	1966
17.	Forth	1006 m	Edinburg, Škotska	1964
18.	Kita Bisan-seto	990 m	Kojima-Sakaide, Japonska	1988
19.	Severn	988 m	Bristol, Velika Britanija	1966
20.	Yicang	960 m	Hubei, Kitajska	2001
21.	Šimocui-seto	940 m	Kojima-Sakaide, Japonska	1988
22.	Šiling	900 m	Sanšhia, Kitajska	1996
23.	Tatara**	890 m	Onomiči-Imaburi, Japonska	1999
24.	Boca Tigris- 1	888 m	Humen, Kitajska	1997
25.	Pont De Normandie**	856 m	Le Havre, Francija	1995

LITERATURA

Virola, J., The Akaši-Kaikjo Bridge - Millenium's greatest bridge, RIA, 1/99, str.26-30, Helsinki, Finska, 1999.

M N E N J A

in

O D M E V I

V rubriki so objavljena mnenja, ki spodbujajo razmišljanja o aktualnih problemih gradbene stroke in odmeve na že objavljene prispevke v Gradbenem vestniku ali drugod. Prispevki izražajo osebna stališča njihovih avtorjev.

Pripombe Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani na osnutka Zakona o urejanju prostora in Zakona o graditvi objektov

Dekan Fakultete za gradbeništvo in geodezijo prof. dr. Jurij Banovec je dne 8.1.2001 imenoval delovno skupino za pripravo pripomb FGG k osnutku ZureP in ZGO v sestavi:

izr. prof. dr. D. Beg (vodja delovne skupine)
prof. dr. M. Brilly
doc. dr. S. Juvanc
izr. prof. dr. A. Krainer
doc. dr. J. Lopatič
prof. dr. A. Pogačnik
izr. prof. dr. A. Rakar
izr. prof. dr. F. Steinman.

Delovna skupina je pripravila pripombe k osnutkoma obeh zakonov, ki jih v naslednjem navajamo.

1. Splošne pripombe k obema zakonoma

Pri pripravi novih zakonodajnih aktov je potrebno najprej verificirati cilje, načela in pglavitne rešitve zakona (tudi s primerjavo tuje zakonodaje), nato pa izdelati še presojo za obremenitev državnega proračuna, ki jo novi predpis prinaša kot obveznost za državni proračun.

Pri pregledu obeh predlaganih zakonov najprej ugotavljamo, da analiza finančnih posledic sprejema zakonov (za državni proračun) ni pripravljena. Če namerava pripravljavec podati le posplošeno ugotovitev, da "uveljavitev predlaganega zakona ne bo povzročila dodatnih

proračunskih obremenitev", bo to lahko pomenilo le, da rešitve predlaganih zakonov vse novo nastale stroške prelagajo na druge (IZS, investitorje, lokalne skupnosti idr.) in s tem storitve države za državljane minimizirajo. Pri pripravi (in utemeljitvah) končnega predloga zakonov bo zato nujna tudi presoja, kakšne obveznosti za vse udeležence zakonov prinaša, da bi se lahko izbrale tudi s tega vidika (naj)ugodnejše rešitve.

Samo po sebi umevno je, da mora vsakdo spoštovati veljavno zakonodajo. Zato v predloge zakonov ni potrebno dodatno vnašati zahtev, da je potrebno pri posegih v prostor ali pri gradnji spoštovati npr. okoljsko zakonodajo, predpise o varnosti pri delu, predpise o izobraževanju (npr. meddržavno priznavanje diplom ipd.). Področni predpisi pa seveda lahko le podrobneje določijo pogoje, ki so še potrebni (npr. dodatne zahteve za opravljanje dejavnosti – potrebno delovno dobo glede na stopnjo zahtevnosti in druge kriterije).

Pri navajanju podzakonskih predpisov (vlade, ministra) morajo biti **z zakonom določeni kriteriji**, na podlagi katerih je možno uveljaviti takšen podzakonski akt. Zato ni sprejemljivo, da je v zakonu napisano le, da bo posamezno področje podrobneje uredila vlada ali minister, temveč mora biti v zakonu določeno, kakšni so kriteriji, na podlagi katerih je to možno enolično določiti. Takšen primer je npr. v ZGO navedba v

47. členu, da "podrobnejša merila za to, kaj se šteje za zahtevne gradnje, predpiše pristojni minister". Kriterije, kaj so to zahtevne gradnje (npr. objekt z več kot 4 stanovanji (hipotetično), protipoplavni nasip, ki ščiti več kot eno območje poselitve, itd.) mora določati zakon.

Predlagatelji ugotavljajo, da je bistveno več kršitev prostorske zakonodaje kot pa kršitev predpisov o gradnji objektov – torej je potrebno ustrezno urediti prostorsko zakonodajo. Logično je namreč, da investitorji ne tvegajo pri zagotavljanju varnosti in funkcionalnosti (črnih, sivih ipd.) gradenj, tudi kadar zanje ni pridobljenih potrebnih prostorskih aktov. Kljub temu pa je nujno upravno ukrepanje, zato je potrebno leto zagotoviti po ZUreP in po ZGO.

Ni jasno, zakaj so predvidene le "določene izjeme za udeležence iz držav članic EU". V RS velja načelo svobodne gospodarske pobude, zato ni sprejemljivo drugačno obravnavanje udeležencev iz EU. Pri prilagoditvenem (prehodnem) obdobju pa je najbrž bolje, da prične le-to veljati od dneva sprejema RS v EU.

2. Zakon o urejanju prostora

Ocena stanja v RS in pričakovane spremembe glede razvoja dejavnosti v prostoru

Prebivalci RS živimo v skupno ca. 6.000 naseljih, od tega je le 91 takšnih, ki imajo 2.000 prebivalcev ali več. Imamo tudi 197 lokalnih skupnosti, s praviloma skromno personalno zasedbo. Rezultati raziskav kažejo, da so bile lokacijske namere graditeljev v preteklosti usmerjene prvenstveno na manjša naselja in sedanje občine, ki sodijo, po sedaj veljavni zakonodaji, v skupino posegov »zunaj območja urejanja«. Zanje pa so značilna predvsem ohlapna določila PUP-ov in nikakršne obveznosti glede plačevanja komunalnega prispevka.

Hkrati pa se pojavljajo veliki posegi v prostor, povezani zlasti s programi na področju državne in lokalne infrastrukture, investicije posameznih propulzivnih dejavnosti (trgovina, turizem, ipd.), pa tudi programi individualne gradnje, spodbujane npr. s stanovanjsko varčevalno shemo, programa CRPOV, regionalnih razvojnih programov, ipd..

Nova prostorska zakonodaja bi morala zato izhajati iz temeljnih razmerij (91 : 5900 naselij) in strukturirati dovoljevanje posegov v prostor glede na stopnjo zahtevnosti (oz. vpliva) posega in glede na naravne danosti. Pri dovoljevanju posegov pa je seveda nujno z zakonom urediti prioritete javnega interesa, skupne rabe (npr. funkcionalno zaokroženih območij), spoštovanja že dodeljenih pravic in šele nato določati kriterije za odločanje o pravici posebne rabe izmed evidentiranih konkurenčnih rab.

Številčnost in raznolikost pojava ti. »črnih gradenj« opozarjata, da je potrebna analiza vzrokov za nastalo stanje. Nepoznavanje vzrokov (pravnih, institucionalnih, ekonomskih, ipd.) in nato ciljnega reševanja problematike (po načelu od najbolj k najmanj pomembnim) vodi le k izvajanju pristopa »poskusi in pogreši«. Takšen pristop pa je značilen za ureditve, kjer ni transparentne izpeljave postopka odločanja. Uvajanje (po)sve-tovalnih organov (npr. občinski urbanist) v procese priprave podlag za odločanje je

seveda kadarkoli možno, ne more pa to prevzemati funkcije odločanja ne v upravnih postopkih ne v postopkih dovoljevanja rabe oz. dejavnosti. Posvetovalni organi pa tudi niso nadomestilo za oblike samoorganiziranosti, ki smo jih v preteklosti že poznali, in so vedno imele urejene organe odločanja (in s tem prevzemale nase obveznosti: finančne, organizacijske, ipd.) in predpisane vire prihodkov.

Pripombe, mnenja, pobude

Primerjava (ki so jo podali pripravljalci zakona) z ureditvami drugih držav pokaže, da je eden od skupnih imenovalcev tuje zakonodaje **izdajanje gradbenih dovoljenj**. Predlagane rešitve pa temeljijo na tem, da bi v Sloveniji **ukinili gradbeno dovoljenje!** Druga značilnost tujine je, da **ni** enotne ureditve o **obvezujočih aktih** prostorskega planiranja. Pripravljalci predlogov zakonov pa enostavno prenašajo parcialne rešitve ene države (bolje, ene dežele – Bavarske), ne da bi upoštevali, da je posamična rešitev vedno vpeta v ostalo zakonodajo. Zato bi takšen prenos lahko bil uporabljen, če bi povzeli celotni pristop reševanja celotne problematike, ki pa je bistveno povezana tudi z drugo relevantno zakonodajo (rudarsko, vodnogospodarsko, gozdarsko, kmetijsko, ipd.).

Pri urejanju podzakonskih predpisov (vlade, ministra) smo pričakovali, da bodo z **zakonom določeni kriteriji**, na podlagi katerih je možno uveljaviti kakšen podzakonski akt. Zato ni sprejemljivo, da je v zakonu napisano le, da bo posamezno področje podrobneje uredila vlada ali minister s predpisom, temveč mora biti že v zakonu določeno, kakšni so kriteriji, na podlagi katerih je to možno enolično določiti. Takšen primer je npr. navedba v 39. čl., da »sprejme Vlada RS Prostorski red Slovenije«, s katerim določi tudi npr. »pravila za določanje namenske rabe prostora«. Kriteriji, na podlagi katerih lahko vlada

določi navedena pravila kot podlago za omejevanje sicer vsakršne dovoljene rabe prostora, mora določati zakon.

Zato tudi ni razvidno, na podlagi katerih kriterijev naj bi **pripravljaivec** prostorskih aktov odločal o ugotovljenih neusklajenostih (rabe nepremičnin – zgradb in zemljišč, ipd.), saj gre za omejevanje lastninskih upravičenj. Poseganje v lastninske pravice pa lahko določa le zakon v obsegu, ki ga določa npr. stopnja javnega interesa. Ker pri nas velja, da je dovoljeno vse, kar ni prepovedano, mora biti z zakonom navedeno vse, kar je neposredno prepovedano, ali pa morajo biti podani kriteriji (kaj se šteje npr. kot javni interes), ki enolično vsakomur omogočajo, da razbere, kakšne omejitve mora upoštevati pri gospodarjenju s svojo nepremičnino ali pri opravljanju svoje dejavnosti. Na ta način je namreč izključeno poseganje v lastninska upravičenja s podzakonskimi akti.

Menimo tudi, da sklepanje (civilno-pravnih) pogodb o opremljanju zemljišč (in koncesijskih pogodb) sodi v zakon le v omejenem obsegu, in le tedaj, ko bi zakon določal obvezne dodatne vsebine takšne pogodbe, saj ostale vsebine že ureja zakonodaja ali pa je to prosta volja obeh strani. Zato tudi ni jasno izhodišče pripravljalcev zakona, zakaj »občina hoče imeti kontrolo nad stroški zasebnega opremljanja in standardi komunalne opreme«. Ker veljajo načela svobodne gospodarske pobude, lahko zasebnik vgradi kakršnokoli opremo, ki je boljša, kot so predpisani standardi, ki zadoščajo stopnji javnega interesa – občina torej ne more nasprotovati vgradnji bistveno boljših (in zato dražjih) elementov, če je takšna volja zasebnega investitorja (npr. na podlagi njegove ekonomske presoje)!

Ker imamo v RS enovito lastnino, tudi ni jasno, kakšno ureditev naj bi predstavljala »zasebna lastnina na javni infrastrukturi«. Javne so namreč stvari v lasti oseb javnega prava. Če pa se že

uvajajo nova »zasebna omrežja« (ob tem da imamo že danes omrežja v zasebni lasti – npr. instalacije znotraj industrijskega kompleksa), je potrebno z zakonom urediti le primere morebitnega obveznega priključevanja zasebnega omrežja na posameznem območju na javno omrežje, npr. s Pogodbo o storitvah javne službe (npr. Pogodba o oskrbi z vodo, ipd.), kjer pa je zopet potrebno z zakonom le določiti morebitne obvezne dodatne vsebine pogodbe, kot je npr. določanje načina obračunavanja, ipd.

Pri uvajanju novih poimenovanj za obstoječe pojme (pa čeprav z razširjeno vsebino) zagovarjamo konzervativni pristop, tj. ohranitev dosedanje terminologije. Če pa so že potrebni novi pojmi, jih je potrebno pred uporabo pogledati z več strani, da se ne izvaja preimenovanje enakih vsebin, da se ne pojavlja več poimenovanj (praktično) iste vsebine ali predolgovezno poimenovanje. Takšen primer je npr. »odgovorni vodja projektna dokumentacije« (OP: manjka najbrž »priprave« dokumentacije?), namesto že uveljavljenega pojma »odgovorni projektant«, ki bi se povrh vsega lahko nanašal na delo na področju vseh 7 vrst namenske rabe zemljišč. Pri tem naj opozorimo še na dejstvo, da bi le težko zagovarjali predvideno rešitev, da naj bi odgovorni izdelovalec lokacijskega projekta (185.čl.) podal izjavo, da so arhitekturne in konstrukcijske rešitve ustrezne z vidika tehnološke izvedbe, saj za to v večini primerov (od 7 vrst namenske rabe) ne bo usposobljen. Pogrešamo tudi ureditev vprašanj, ki se pojavijo, ko se pojavijo kombinacije ali sočasnosti 7 namenskih vrst rabe (ki so npr. še vse v javnem interesu).

Pred nadaljnjim uvajanjem ti. 7 vrst (primarne) namenske rabe bi morali tudi doreči njihovo uporabnost. Že izraz »poselitve« zbuja dvom, saj je pri nas praviloma vezan na »prebivanje«, torej na stanovanje. Zato bi bilo smotno iz »poselitve« izločiti smiselno zaključene celote, kot so industrijske ali obrtne cone, ipd., tudi zato, ker se že selijo zunaj

območij poselitve (stanovanjskih območij), praviloma pa potrebujejo tudi drugačne pogoje oskrbe (z elektriko, s tehnološko vodo, ipd.). Takšna razčlenjenost bi tudi omogočila, da bi lahko ločili med odgovornimi projektanti za območje poselitve (stanovanjsko gradnjo), za industrijska območja (npr. s specifično tehnologijo), za območja državne infrastrukture s spremljajočimi objekti (npr. prometnice), za gradnjo kmetijskih zaključenih zaselkov (bivalni in kmetijsko-tehnološki objekti – silosi, sušilnice, ipd.), ipd.. Iz opisa je namreč razvidno, da le ena vrsta (arhitekturne) izobrazbe ne zadošča za vse primere.

V besedilu Zakona o urejanju prostora so v posameznih členih dokaj podrobno opisana področja dela in obveznosti oziroma pravice posameznih strok pri izvajanju del, nujnih za pripravo dokumentacije, ki je potrebna pri prostorskem planiranju. Nekatere stroke, ki se izobražujejo na UL, FGG, so komaj omenjene (geodezija), nekatere pa popolnoma izpuščene, kot so posamezne smeri gradbeništva (komunalna smer, prometna smer, hidrotehnična smer) in strokovnjaki novega univerzitetnega programa Vodarstvo in komunalno inženirstvo. Zato predlagamo, da se tudi omenjena strokovna področja uvrstijo v ustrezne člene Zakona o urejanju prostora, kot je to storjeno s krajinskimi arhitekti in arhitekti urbanisti.

Odgovornost naj bo zato naložena tistemu, ki je strokovno usposobljen za posamezno vrsto primarne rabe, le-ta pa bi za posamezna podpodročja vključeval odgovorne projektante za posamezne podsisteme (objekti za zaposlene v ind. kompleksu, ipd.). Enak pristop bi morali uveljaviti tudi za ostale udeležence (npr. revizorje, ipd.). Tako bi dosegli, da je odgovorni izvajalec del vedno usposobljen glede na vrsto namembnosti, kar naj ugotavlja Inženirska zbornica (v okviru javnih pooblastil). S tem bi obdržali tudi ločenost izdajanja pooblastil (s tujko »licenca«) za inženirske naloge (IZS) in upravne naloge (minister).

Menimo tudi, da opremljanje zemljišč za gradnjo ni identično s pojmom komunalno opremljanje zemljišč. Glede na opredelitev za sedem vrst (primarne) namenske rabe zemljišč, je izpolnjevanje pogojev za dovoljeno poseganje v prostor bistveno več kot le komunalno opremljanje zemljišč (npr. oprema območij infrastrukture, industrijskih, rudarskih ali kmetijskih površin, itd.). Hkrati pa je potrebno urediti tudi vse pojavne oblike posegov v prostor, posegov v objekte in naprave (vgradnja strojev in naprav, namestitve anten oddajnikov, ipd.), nadomestnih gradenj, rekonstrukcij (npr. z uporabo novih materialov), obsega obnovitvenih in večjih (ter rednih) vzdrževalnih del, ipd. Zakaj bi npr. za gradnjo vmesne (nenosilne) stene v že zgrajenem objektu potrebovali »enostavni lokacijski projekt« in ne dovoljenja za izvedbo priglasenih del?

Čemu tudi bi morali nadomestiti izraz »lokacijska dokumentacija« z novo skovanko iz tujk »lokacijski projekt«? Po vsebini sta namreč oba »dokumentacija« (po novem lahko tudi z več vsebinami), izdelana kot strokovna podlaga za izdajo upravnega akta. Po drugi strani pa pojem »projekt« že ima oz. pridobiva pri nas vse širši pomen, zato je označevanje (npr. v mapo vezane) dokumentacije s tem pojmom vse bolj neustrezno.

Pričakujemo tudi, da bo poimenovanje nove prostorsko-načrtovalske dokumentacije usklajeno s strokovnim izrazoslovjem. Izraz »zasnova« (s tujko »koncept«) pomeni le neko izhodiščno idejo, zamisel, začetno stanje, ki se bo šele izoblikovalo v (sprejemljivo) rešitev. Zato z izrazom »zasnova« ni mogoče označevati pravnoveljavno uveljavljene urbanistične, krajinske, regionalne, ipd. končno izoblikovane načrte (plane!), ki uveljavljajo na določenem območju pravni režim! In šele z uveljavljenim pravnim režimom je mogoče povezati tudi druge posege v lastninska razmerja (npr. zemljiške operacije, služnosti, razlastitve).

Z urejenim dostopom do javnih baz podatkov bi moral biti že danes vsakomur omogočen vpogled v stanje nepremičnin, o bremenih na nepremičninah, o obsegu komunalne in druge opremljenosti, o sedanjih in predvideni namembnosti (o sedanjem pravnem režimu in že sprejetih, a še ne uveljavljenih pravnih režimih, ipd.). Seveda je vedno možno vzpostaviti

posvetovalne organe (svete, konference) ali celo osebne svetovalce (občinski arhitekt), pa tudi posebne storitve (ti. »lokacijsko svetovanje«) neukim strankam. Že sedaj ima namreč upravni organ vedno možnost pridobiti strokovno mnenje (svetovanje), če ugotovi, da obravnavana zadeva preseže (v upravnem organu) razpoložljivo usposobljenost. Kako nekdo (občina, regija, ipd.) uredi svetovanje, najbrž ni potrebno urejati z zakonom, razen če predlagatelji predvidevajo, da se bodo takšne storitve izvajale v obliki javne službe (kar zahteva urejeno financiranje le-te). Vendar pa (po)svetovalni organi tudi po predlogu zakona niso **organi odločanja**. Pravico odločanja (v skladu z obsegom izdanih pooblastil) je seveda potrebno urediti z zakonom, ki pa mora eksplicitno določati, po katerih kriterijih bo pooblaščenec odločal. Predlagamo, da so osnovni kriteriji vsaj naslednji: ali so upoštevani vsi (sedanji in bodoči) javni interesi, ali ima prioriteto skupna raba, ali so spoštovane že podeljene pravice, ali bodo lahko spoštovani vsi predpisi – šele nato pa se odloča, katera izmed konkurenčnih rab (glede na obseg izpolnjevanja drugih kriterijev, npr. o smotrni rabi prostora, vode, energije, ipd.) bo dovoljena.

Naj na koncu še enkrat poudarimo, da izdano dovoljenje za poseg v prostor ne more nadomestiti gradbenega dovoljenja. Tudi ko bodo znani vsi prostorski pogoji, okoljevarstveni, delovarstveni, idr. (z drugo zakonodajo določeni) pogoji, bo še vedno potrebno gradbeno dovoljenje. Z njim se namreč dovoli gradnja, ker je (na podlagi PGD) ugotovljeno, da so vsi k posegu podani pogoji upoštevani, izvedena gradnja pa bo zagotavljala tako

varnost kot doseganje funkcije (namena) objekta v mejah dovoljenih vplivov na okolje, ljudi, naravne vire, ipd..

Navedeno kaže, da se v delovnem osnutku zakona še vedno pojavljajo nedorečenosti pri zastavljenih ciljih in predlaganih rešitvah. Zato je potrebna pred nadaljnjim delom še temeljita razprava in navezava na ureditve v drugih zakonih, da bi dobili konsistentni in izvedljivi pravni red. Ocenjujemo, da je takšen pristop še tembolj nujen zaradi predlaganega sprejemanja predloga zakona po hitrem postopku.

3. Zakon o graditvi objektov

3.1 Splošne pripombe k ZGO

Osnovni namen Zakona o graditvi objektov mora biti, da zagotovi ustrezno raven projektiranja, gradnje in uporabe objektov, ki bo v skladu z bistvenimi zahtevami direktive 89/106/EEC Sveta Evrope o gradbenih proizvodih. S spoštovanjem te direktive naj bi bili zagotovljeni vsi vidiki varnosti in zaščite, povezani z gradnjo in uporabo objektov.

V uvodnih določbah so bistvene zahteve direktive sicer navedene in na kratko komentirane, v nadaljnjem besedilu pa se bistvene zahteve običajno pojavljajo pod "ostalimi zahtevami", v ospredju pa so vedno znova zahteve v zvezi z umeščanjem objektov v prostor, ki so predmet ZUreP. Bistvene zahteve je potrebno vedno postaviti na prvo mesto in tudi tako poudariti njihovo pomembnost.

Istočasno z osnutkom ZGO je potrebno pripraviti vse spremljajoče pravilnike.

V zvezi z Inženirsko zbornico je neumestno govoriti o zbornici inženirjev in tehnikov. V času, ko se zaradi tehnološkega napredka vedno bolj kaže potreba po podiplomskem izobraževanju, je

povsem neprimerno, da bi bili tehniki s srednješolsko izobrazbo nosilci zahtevnih nalog pri gradnji objektov. Podrobneje je potrebno opredeliti enostavnejše objekte, pri katerih je lahko odgovorni vodja gradbišča ali odgovorni nadzornik oseba z dokončano srednjo tehniško šolo.

3.2 Pripombe k posameznim členom ali poglavjem

Gradbeno dovoljenje

Podpiramo težnjo, da se spet uvede eno samo dovoljenje za gradnjo. Pri tem se je treba zavedati, da je bila taka ureditev pri nas že v navadi in da je bilo kot drugo dodatno dovoljenje uvedeno lokacijsko dovoljenje. Zato je pri spremembi zakonodaje treba ukiniti lokacijsko dovoljenje s tem, da bodo vsi prostorski pogoji, ki so sedaj predpisani v lokacijskem dovoljenju in lokacijski dokumentaciji, vključeni v prostorske akte. Prostorski pogoji morajo biti splošni in neodvisni od bodočih investitorjev. Take ureditve veljajo v večini držav EU.

Dovoljenje za gradnjo se mora imenovati gradbeno dovoljenje in mora biti izdano na podlagi dokumentacije za konkreten objekt. **Dokumentacija mora vsebovati dokaze, da objekt ustreza prostorskim pogojem in bistvenim tehničnim zahtevam.** Podrobnejši projekti za izvedbo se izdelujejo naknadno, vendar vedno pred pričetkom gradnje tistega dela objekta, na katerega se nanašajo. Projektna dokumentacija mora biti za pomembne objekte shranjena ves čas obstoja objekta.

Do določene stopnje obdelana projektna dokumentacija je nujno potrebna za obvladovanje stroškov gradnje. Če to ni mogoče, je ogrožen smisel in cilj graditve kateregakoli objekta. Še zlasti je to pomembno pri javnih investicijah, kjer pa to še dodatno ureja področna zakonodaja.

Uporabno dovoljenje

Pridobitev uporabnega dovoljenja je potrebno diferencirati. Verjetno bo potrebno ločeno urediti postopke za enostavne gradnje, zahtevne gradnje, javne zgradbe in infrastrukturo itd. – glede na stopnjo javnega interesa. Povezave z drugimi predpisi so potrebne, vendar ne sme biti podvajanja – obratovalni monitoring po predpisih o varstvu okolja ima druge cilje (in naloge) kot pa poskusno delovanje objektov, naprav in ureditev po ZGO (varnost, doseganje funkcije ipd.).

Projektiranje in projektna dokumentacija

Poglavje o projektni dokumentaciji brez pravega vsebinskega razloga uvaža novo klasifikacijo projektov in novo terminologijo, ki po našem mnenju ni ustrezna. Osnovne vrste projektov so idejni, glavni in izvedbeni projekt. Potrjeni projekt ni nov projekt, ampak le pregledan in potrjen glavni projekt. Prav tako je projekt izvedenih del le izvedbeni projekt, ki mu je potrebno dodati dopolnitve, ki so posledica manjših sprememb med gradnjo. Večje spremembe verjetno zahtevajo nov glavni projekt. Iz neznanih razlogov je povsem izpuščen izvedbeni projekt, na podlagi katerega se objekt gradi. Na podlagi glavnega projekta, kot to predvideva 95. člen, gradnja ni mogoča, saj glavni projekt ne vsebuje npr. delavniške dokumentacije (jelekne konstrukcije), armaturnih načrtov (betonske konstrukcije), detajlnih načrtov konstrukcijskih sklopov s stališča toplotne, hidro in zvočne izolacije, protipožarne zaščite in varnosti pri uporabi. Vsi ti načrti so potrebni za izpolnjevanje posameznih bistvenih zahtev direktive 89/106/EEC Sveta Evrope. Poglavje je potrebno napisati na novo in vzporedno pripraviti tudi pravilnik o tehnični dokumentaciji, ki naj bi podrobneje opredeljeval vsebino projektna dokumentacije in ostale podrobnosti.

Vsebina in obseg projektna dokumen-

tacije bi morala biti odvisna od pomembnosti in funkcije objekta. Ko bodo precizirani kriteriji za razvrščanje objektov, naprav in ureditev, je možno določiti tudi obvezno minimalno vsebino projektna dokumentacije za posamezne kategorije.

V besedilu so v členih, ki govorita o vrstah načrtov in o usposobljenosti odgovornih projektantov podrobno opisana področja dela in obveznosti oziroma pravice posameznih strok pri izvajanju del, nujnih za pripravo dokumentacije, ki je potrebna pri gradnji objektov. Od področij in strok, ki se izobražujejo na FGG UL, so omenjene samo konstrukcije in gradbeništvo, nekatera področja in stroke so pa popolnoma izpuščene, kot so področje komunalne infrastrukture in vodarstva, ki jih pa strokovno pokrivajo posamezne smeri gradbeništva (komunalna smer, prometna smer, hidrotehnična smer) in strokovnjaki novega univerzitetnega programa Vodarstvo in komunalno inženirstvo. Zato predlagamo, da se tudi omenjene vrste objektov in strokovna področja uvrstijo v ustrezne člene Zakona o graditvi objektov, kot je to storjeno z ostalimi področji.

Revidiranje projektna dokumentacije

Področje revidiranja projektna dokumentacije je urejeno povsem na novo. Predlagane rešitve je potrebno dobro pretehtati, saj dobre rešitve na tem področju lahko znatno prispevajo k večji kvaliteti projektov in izvedenih objektov. Na FGG imamo npr. na področju gradbenih konstrukcij obilo izkušenj s svetovanjem v primeru težav zaradi pomanjkljivo izdelanih projektov. Kvalitetne revizije bi lahko veliko teh težav odpravile še pred začetkom gradnje, kar je tudi najceneje. V zakonu je predvideno, da država z javnim pooblastilom del dejavnosti, ki jo sedaj opravlja sama, prepusti revizorskim podjetjem in samostojnim podjetnikom. Ti naj bi namesto upravnih organov preverjali, ali

je priloženo veljavno lokacijsko dovoljenje, ali ima projekt vse predpisane sestavine, ali so pritisnjeni vsi žigi, ali je projekt izdelan v skladu s lokacijskim dovoljenjem in naj bi organizirali izvedbo tehničnih pregledov. Ti "revizorji" naj bi najemali tudi "prave" revizorje tehnične dokumentacije, katerih naloga pa je vsebinski pregled in kontrola projektov, predvsem v smislu zagotavljanja bistvenih zahtev direktive 89/106/EEC Sveta Evrope.

Takšni rešitvi odločno nasprotujemo. Menimo, da mora prve štiri naloge ukrepov pri reviziji (1. odstavek 80. člena) opraviti državni (upravni) organ (saj gre za upravni postopek), ki mora imeti zaposlene za to usposobljene strokovnjake (opravljen upravni in strokovni izpit).

Za "prave" revizorje po našem mnenju javno pooblastilo ni potrebno, potrebna pa je univerzitetna izobrazba ustrezne smeri, vpis v register odgovornih projektantov pri inženirski zbornici in izpolnjevanje dodatnih zahtev (delovne izkušnje, reference). Imenovanje revizorja s strani ministra je sicer mogoče, vendar mora minister v predpisanem roku za revizorja imenovati vsakega kandidata, ki izpolnjuje vse predpisane zahteve. Mnogo bolje je imenovanje prepustiti inženirski zbornici, tako kot je bilo to rešeno za odgovorne projektante.

S posebnim pravilnikom (na podlagi kriterijev, zapisanih v zakonu) je potrebno natančno določiti, za katere vrste projektov in za kakšne objekte je potrebno obvezno opraviti revizijo.

Ljubljana, 23.01.2001

OPOMBA: Pripombe so bile 26.1.2001 poslani ministru za okolje in prostor mag. Janezu Kopaču

SINTEZA KONSTRUKCIJ: RAČUNALNIŠKO OPTIMIRANJE JEKLENIH KONSTRUKCIJ Z MATEMATIČNIM PROGRAMIRANJEM

STRUCTURAL SYNTHESIS: COMPUTER AND MATHEMATICAL PROGRAMMING BASED OPTIMIZATION OF STEEL STRUCTURES

ZNANSTVENI ČLANEK

UDK 624.014.2 : 519.85

STOJAN KRAVANJA

POVZETEK

V članku smo predstavili metode, algoritme in računalniške programe matematičnega programiranja mehanskih struktur, ki jih uspešno uporabljamo pri optimiranju jeklenih konstrukcij. Poudarek dajemo sintezi konstrukcij z optimizacijsko metodo mešano-celoštevilskega nelinearnega programiranja, MINLP. Predstavili smo programski paket TOP, modificirani OA/ER algoritem in LMH MINLP strategijo.

Prikazali smo praktičen primer sinteze tablastih zapornic Tunnel Intake Bulkheads za hidroelektrarno Sultartangi na Islandiji. Konstrukcijo zapornic smo optimirali z MINLP. Primerjava dobljenih optimalnih rezultatov kaže na okoli 30 odstotkov prihranka investicijskih sredstev glede na ceno zapornice, ki je bila projektirana na klasični način z analizo konstrukcije.

Avtor:

Doc.dr. Stojan Kravanja, univ. dipl. inž. grad., Fakulteta za gradbeništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor
in BIROMETAL, Strossmayerjeva 26, 2000 Maribor; e-mail: stojan.kravanja@uni-mb.si

S U M M A R Y

The paper presents different methods, algorithms and computer programs of mathematical programming, used at the structural optimization and synthesis. The structural synthesis is performed by the Mixed-Integer Nonlinear Programming approach, MINLP. The computer package TOP, the Modified OA/ER algorithm, and the LMH strategy are introduced.

The synthesis of hydraulic steel gates Tunnel Intake Bulkheads for Hydroelectric Power Plant in Sultartangi, Iceland, is shown. The gates have been optimised by the MINLP approach. The obtained optimal result yields about 30 per cent of savings in investment costs if compared to the design obtained by the classical method of structural analysis.

1. UVOD

Vse hujša konkurenca na vse bolj povezanem svetovnem trgu zahteva od projektantov in proizvajalcev tehnične in investicijske opreme ter objektov vse večjo ekonomičnost in produktivnost. Energetska kriza je vspodbudila strokovnjake, da so se, poleg shranjevanja energije in pridobivanja njenih alternativnih virov, začeli predvsem ukvarjati z razvojem metod in tehnologij za varčnejšo porabo energije in surovin ter racionalnejšo proizvodnjo.

Na tehničnih področjih se je rodilo spoznanje, da je potrebno razvijati takšno znanost, ki bo vodila ne samo v razvoj učinkovitih in konkurenčnih, temveč tudi varčnih in ekološko prijaznih tehnik in tehnologij; porabo energije in surovin, načrtovanje proizvodnih procesov, izdelkov ter trženje pa je potrebno smotno načrtovati in optimirati. Zato razvoj in uporaba modernih optimizacijskih metod postajata nujnost modernega tehničnega človeka. Kljub temu da moderne optimizacijske metode pretežno uporabljajo le v najsodobnejših znanstveno-raziskovalnih okoljih (npr. NASA), pa postaja optimiranje vse bolj uporabna znanstvena disciplina v vsakdanji inženirski praksi.

2. OPTIMIRANJE KONSTRUKCIJ

Odkar obstaja graditeljstvo in odkar se gradijo konstrukcije, so se le-te načrtovale in gradile vselej znotraj okvirja, ki ga je na eni strani pogojevala zahteva po *funkcionalnem, stabilnem in estetsko zasnovanem* objektu, na drugi strani pa potreba po *racionalni in ekonomični gradnji ter uporabi* objekta. Graditelji so ne glede na dobo, v kateri so živeli, vedno želeli premagati omenjeno osnovno protislovje. V točki, kjer bi se popolnoma zožil omenjeni okvir oziroma bi se združile vse prej omenjene funkcije, bi namreč dobili optimalni objekt oziroma konstrukcijo.

V starem in srednjem veku so graditelji porabo materiala načrtovali predvsem na podlagi izkušenj in intuicije. Razvoj naravoslovnih in tehničnih ved v prejšnjem stoletju pa je graditelje vspodbudil h gradnji modernih, ekonomičnih, vse bolj vitkih in drznih konstrukcij. Konstruktorji so tedaj optimiranje konstrukcij razumeli predvsem kot optimalno izbiro prereзов in materialov, kjer je bilo potrebno zaporedoma analizirati veliko število variant kake konstrukcije, prereзов, da bi dobili cenovno ugodnejšo

ali pa lažjo konstrukcijo. Takšen klasičen način snovanja in optimiranja konstrukcij je večidel prisoten v inženirski praksi še danes.

Na prevesu stoletja leta 1904 je A.G.M. Michell s svojim klasičnim delom [1] začrtal razvoj modernega optimiranja konstrukcij. Zaradi računske zahtevnosti problema pa se je optimiranje konstrukcij, kakršnega poznamo danes, dejansko začelo razvijati šele v šestdesetih letih, kar je bilo v zvezi z razvojem računalniške opreme in numeričnih optimizacijskih metod matematičnega programiranja. Kot prvi pisni vir s področja modernega optimiranja konstrukcij različni avtorji pogosto omenjajo delo L.A. Schmitta iz leta 1960 [2].

Moderno optimiranje konstrukcij temelji na metodah matematičnega programiranja [3].

3. MATEMATIČNO PROGRAMIRANJE KONSTRUKCIJ

Matematično programiranje konstrukcij

imenujemo vsakršno optimiranje konstrukcij, ki temelji na optimizacijskih metodah matematičnega programiranja. Na ta način smo potegnili dovolj prepoznavno črto, ki ločuje *moderno rigorozno optimiranje konstrukcij po metodah matematičnega programiranja* od *klasičnega kvazi optimiranja*, ki je kot rutinski način izbire najugodnejših prerezov danes še vedno zelo aktualno in prevladuje v inženirski praksi.

V nasprotju s klasično metodo optimiranja konstrukcij, kjer se "optimalnemu" rezultatu približujemo z računskim ponavljanjem dimenzioniranja prerezov konstrukcije, da bi z vsako računsko ponovitvijo dobili ugodnejši rezultat, poteka pri matematičnem programiranju konstrukcij izvajanje analize, oblikovanje geometrije, dimenzioniranje prerezov in konstrukcijskih elementov sočasno z optimiranjem.

Pri matematičnem programiranju konstrukcij vsako konstrukcijo opišemo z matematičnim optimizacijskim modelom. Le-ta sestoji iz namenske funkcije, sistema pogojev (ne)enačb in pridruženih spremenljivk in konstant (vhodni podatki). Dimenzije konstrukcijskih elementov ter razpore konstrukcije obravnavamo kot spremenljivke. Zaradi tega so posledično tudi obremenitve, napetosti in deformacije neznane. S skalarji definiramo vse potrebne vhodne podatke kot so obtežba globalna geometrija, materialne karakteristike, dopustne napetosti in deformacije, idr. V sistem pogojev (ne)enačb zapišemo enačbe za analizo konstrukcije, oblikovanje in dimenzioniranje ter meje spremenljivk, z namensko funkcijo pa definiramo kriterij optimiranja: npr. najmanjšo težo ali ceno konstrukcije. Za podane vhodne podatke in v odvisnosti od definiranega sistema pogojev (ne)enačb so v enovitem računskem procesu neznane spremenljivke, dimenzije in razponi, sočasno izračunani tedaj, kadar je dosežen optimum v smeri minimiziranja ali maksimiranja namenske funkcije. Izračunane vrednosti spre-

menljivk imenujemo optimalne spremenljivke, optimalne dimenzije in razpore, dobljen rezultat namenske funkcije pa optimum konstrukcije.

4. OSNOVNE METODE OPTIMIRANJA

Najpogostejše uporabljena optimizacijska metoda matematičnega programiranja v tehniki je metoda *nelinearnega programiranja* (Nonlinear Programming, NLP), ker metodi *linearnega programiranja* (Linear Programming, LP) in *mešano celoštevilskega linearnega programiranja* (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) zaradi večinoma nelinearnih problemov tehnike ne dajeta dobrih (natančnih) rezultatov. Poleg LP, NLP in MILP pa kot osnovno metodo matematičnega programiranja poznamo še *mešano celoštevilsko nelinearno programiranje* (Mixed-Integer Nonlinear Programming, MINLP). LP in NLP uporabljamo pri zveznem optimiranju parametrov, pri parametričnem optimiranju, kjer imamo opraviti s samo zveznimi spremenljivkami. MILP in MINLP pa uporabljamo za diskretno-zvezno optimiranje strukture in parametrov, strukturno optimiranje. Pri MILP in MINLP poleg zveznih spremenljivk za izračun zveznih parametrov definiramo tudi diskretne spremenljivke (binarne, celoštevilске) za izračun diskretnih odločitev.

4.1 LINEARNO PROGRAMIRANJE, LP

Optimizacijski problem rešujemo z metodo LP, kadar le-ta vsebuje samo linearne funkcije in kadar so vse spremenljivke pozitivne. Ker so linearne funkcije konveksne, LP vsebuje le en minimum, vendar različne rešitve za (zvezne) spremenljivke x . LP problem zapišemo v naslednji obliki:

$$\min \quad Z = b^T x$$

pri pogojih:

$$\begin{aligned} Ax &\leq c \\ x &\geq 0 \end{aligned} \quad (\text{LP})$$

Standardna metoda za reševanje LP je simpleks algoritem. Simpleks algoritem rešuje LP le po ogliščih dopustnega območja, ker optimum pri LP leži v enem od oglišč. S komercialnimi računalniški programi MPSX, LINDO, LAMPS, SCICONIC, OSL, ZOOM lahko rešujemo zelo obsežne probleme več deset tisoč spremenljivk in podobnega števila pogojev (ne)enačb.

4.2 MEŠANO - CELOŠTEVILSKO - LINEARNO PROGRAMIRANJE, MILP

MILP predstavlja razširitev problema LP. Poleg zveznih spremenljivk x so v MILP definirane še diskretne, večinoma binarne 0-1 spremenljivke y :

$$\min \quad Z = a^T y + b^T x$$

pri pogojih:

$$\begin{aligned} Ax &\leq c \\ By + Cx &\leq d \\ y &\in \{0, 1\}^m \end{aligned} \quad (\text{MILP})$$

Z vektorjem binarnih spremenljivk y in logičnimi pogoji (ne)enačbami definiramo diskretne odločitve med optimiranjem. Vsaki alternativni pridružimo binarno spremenljivko tako, da vrednost $y=1$ pomeni izbor, vrednost $y=0$ pa zavrnitev alternative. Možen način, kako poiskati globalni minimum pri MILP problemih, bi bil ta, da bi poiskali minimum vseh LP za vse 0-1 kombinacije binarnih spremenljivk. To je seveda mogoče izvesti le za zelo majhne probleme, saj število vseh kombinacij znaša 2^m , kjer smo s črko m označili število binarnih spremenljivk. MILP probleme rešujemo z algoritmom [vejenja in omejevanja] (branch and

bound). Večina LP računalniških programskih paketov vsebuje tudi razširitve za reševanje MILP problemov: MPSX/MIP, LINDO, LAMPS, SCICONIC, OSL, ZOOM.

4.3 NELINEARNO PROGRAMIRANJE, NLP

Nelinearno programiranje, NLP, je najpogostejše uporabljena metoda za sočasno reševanje analize in optimiranja struktur v mehaniki. NLP metodo uporablja večina konstruktorjev za optimiranje parametrov (dimenzij) konstrukcij pri nespremenljivi strukturi (držani topologiji), tj. pri konstantnem številu in nespremenljivem razporedu konstrukcijskih elementov (nosilcev, plošč). Nekateri raziskovalni centri uporabljajo NLP metodo tudi za optimiranje topologije, npr. [4]; velik napredek je bil dosežen z razvojem homogenizacijske metode [5]. Nelinearni optimizacijski problem zapišemo v naslednji obliki:

$$\min Z = \mathbf{b}^T \mathbf{x} + f(\mathbf{x})$$

pri pogojih:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0$$

$$\mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{c}$$

(NLP)

$$\mathbf{x} \in X = \{ \mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{x}^l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^u \}$$

Namenska funkcija (spremenljivka) Z je sestavljena iz linearnega izraza $\mathbf{b}^T \mathbf{x}$ in nelinearnega izraza $f(\mathbf{x})$. Enačba $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0$ predstavlja množico nelinearnih pogojev enačb, neenačba $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0$ pa množico nelinearnih pogojev neenačb. Neenačba $\mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{c}$ definira množico linearnih enačb in neenačb. Učinkovitejše metode rešujejo NLP problem z neposredno zadostitvijo Karush-Kuhn-Tuckerjevega pogoja. Najpomembnejše metode za reševanje NLP problemov so zaporedno kvadratno programiranje (SQP), metoda reduciranega gradienta (RG), splošna

metoda reduciranega gradienta (GRG) in razširjeni Lagrangian (AL). Komercialni računalniški programi so NPSOL za SQP, MINOS za RG, programi GRG2, LSGRG, CONOPT za GRG in LANCELOT za AL.

4.4 MEŠANO - CELOŠTEVILSKO - NELINEARNO - PROGRAMIRANJE, MINLP

MINLP predstavlja razširitev NLP ter MILP problemov. Med optimizacijskimi problemi so MINLP problemi najtežje rešljivi. MINLP vsebuje tako diskretne kot zvezne spremenljivke. Diskretne spremenljivke so namenjene za diskretno odločanje (optimiranje strukture/topologije in diskretnih parametrov) in zvezne spremenljivke za zvezno odločanje (parametrično optimiranje). Pri MINLP potekata diskretno in zvezno optimiranje sočasno, zato rezultat tovrstnega optimiranja predstavljajo optimalna topologija mehanske strukture (optimalno število konstrukcijskih elementov), optimalni diskretni parametri (standardne in zaokrožene dimenzije konstrukcijskih elementov) in optimalni zvezni parametri (teža, cena, ipd.). MINLP formulacijo optimizacijskega problema definiramo z naslednjim zapisom:

$$\min Z = \mathbf{a}^T \mathbf{y} + \mathbf{b}^T \mathbf{x} + f(\mathbf{x})$$

pri pogojih:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0$$

$$\mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{c}$$

$$\mathbf{B}\mathbf{y} + \mathbf{C}\mathbf{x} \leq \mathbf{d}$$

$$\mathbf{x} \in X = \{ \mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{x}^l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^u \}$$

$$\mathbf{y} \in Y = \{ \mathbf{y} \mid \mathbf{y} \in \{0,1\}^m, \mathbf{D}\mathbf{y} \leq \mathbf{e} \}$$

Poleg linearnega izraza $\mathbf{b}^T \mathbf{x}$ in nelinearnega izraza $f(\mathbf{x})$ je namenski funkciji dodan še linearni izraz $\mathbf{a}^T \mathbf{y}$, ki običajno predstavlja stalne stroške.

Enačba $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0$ predstavlja množico nelinearnih pogojev enačb, neenačba $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0$ pa množico nelinearnih pogojev neenačb. Neenačba $\mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{c}$ definira množico linearnih enačb in neenačb. Dodana je tudi množica linearnih enačb in neenačb $\mathbf{B}\mathbf{y} + \mathbf{C}\mathbf{x} \leq \mathbf{d}$, ki vsebujejo tako zvezne kot diskretne spremenljivke.

Upošteva optimizacijske probleme v mehaniki z vektorjem zveznih spremenljivk $\mathbf{x}$ najpogostejše definiramo vse potrebne dimenzije konstrukcijskih elementov, razpone, karakteristike prečnih prereзов konstrukcijskih elementov, koeficiente za stabilnostno analizo, osnovne napetosti, deformacije konstrukcijskih elementov in podobno. Z diskretnimi spremenljivkami $\mathbf{y}$ definiramo potencialni obstoj konstrukcijskih elementov znotraj definirane mehanske superstrukture. Optimalna topologija (struktura) je dobljena z izračunano optimalno izbiro vektorja diskretnih spremenljivk $\mathbf{y}$ med optimizacijskim računom. Z diskretnimi spremenljivkami definiramo tudi standardne in zaokrožene dimenzije konstrukcijskih elementov.

Nelinearne enačbe $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0$ in neenačbe $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0$ kakor tudi spodnje in zgornje meje zveznih spremenljivk $\mathbf{x}$ predstavljajo rigorozni sistem pogojev enačb in neenačb, s katerimi bo izbrana in izračunana optimalna struktura znotraj definirane superstrukture, predstavljata množici linearnih enačb ali neenačb $\mathbf{B}\mathbf{y} + \mathbf{C}\mathbf{x} \leq \mathbf{d}$ in $\mathbf{D}\mathbf{y} \leq \mathbf{e}$.

Z namensko funkcijo (spremenljivko) Z definiramo kriterij oz. namen optimiranja. Največkrat je namen analize in optimiranja minimiranje lastnih izdelavnih stroškov ali teže mehanske strukture, pa tudi maksimiranje prodajne cene ali profita mehanske strukture. Če z namensko funkcijo definiramo ekonomske parametre, govorimo, da smo definirali ekonomsko namensko funkcijo. Ekonomska namenska funkcija Z vsebuje tako stalne

stroške za izdelavo, definirane s funkcijo $a^T y$, kakor tudi dimenzijsko pogojene stroške, zapisane v funkcijah $b^T x$ in $f(x)$.

MINLP optimizacijski problem lahko v principu rešimo z naslednjimi algoritmi in njihovimi izboljšavami (zapisana so originalna imena metod):

- *Nonlinear Branch and Bound* algoritem, NBB, predlaga in uporablja ga mnogo avtorjev, npr. Beale [6], Gupta and Ravindran [7];
- *Sequential Linear Discrete Programming* metoda, SLDP, avtorja Olsen in Vanderplaats [8];
- *Extended Cutting Plane* metoda, ECP, Westerlund in drugi [9];
- *Generalized Benders Decomposition*, GBD, Benders [10], Geoffrion [11];
- *Outer-Approximation/Equality-Relaxation* algoritem, OA/ER, avtorja Kocis in Grossmann [12]; in
- *Feasibility Technique*, avtorja Mawengkang in Murtagh [13].

Najpomembnejša algoritma za reševanje MINLP problemov sta algoritem zunanje aproksimacije (Outer Approximation algorithm, OA) [14] in posplošena Benderjeva dekompozicija (Generalized Benders Decomposition). Najpogosteje uporabljamo OA algoritem. Le-ta ne dovoljuje uporabe pogojnih nelinearnih enačb. Ta pomanjkljivost je odpravljena s posebno sprostitevjo linearizacij pogojnih nelinearnih enačb. Izboljšani AO algoritem se imenuje algoritem zunanje aproksimacije s sprostitevjo enačb (Outer-Approximation/Equality-Relaxation algorithm, OA/ER). Nekonveksne probleme rešujemo s pomočjo kazenske funkcije [15] ter z modificiranim OA/ER algoritmom [16], ki vsebuje globalni konveksni test.

5. RAČUNALNIŠKI PROGRAMSKI PAKET TOP

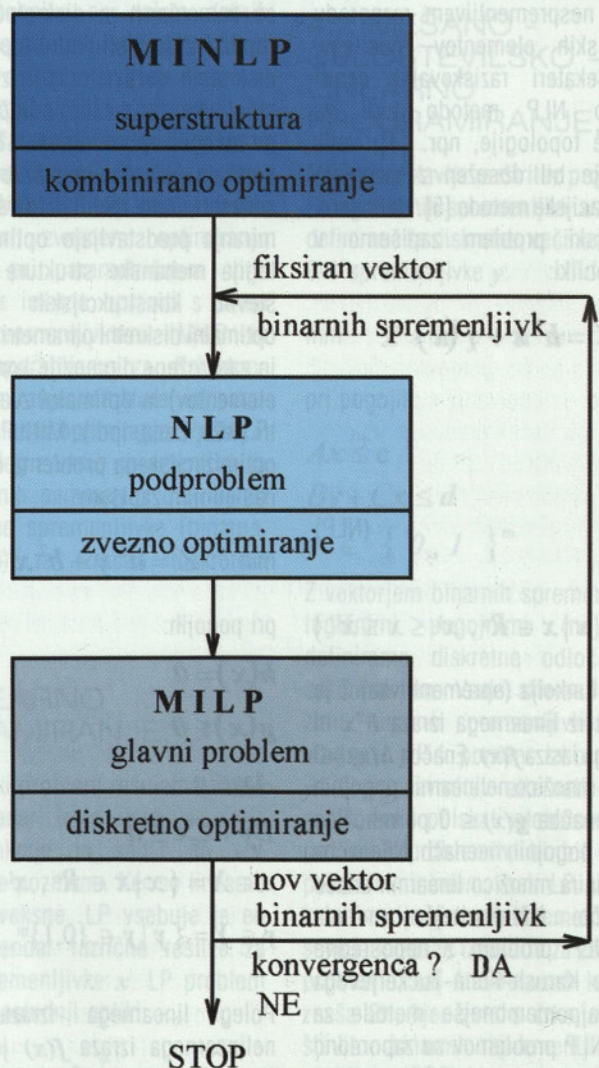
Komercialni MINLP računalniški programi za reševanje problemov v mehanski

strukturi še niso razviti. Naša raziskovalna skupina je razvila lastni MINLP računalniški programski paket TOP (Topology Optimization Program) [17], s katerim uspešno izvajamo sočasno optimiranje topologije in parametrov mehanskih struktur. TOP je posplošena verzija programskega paketa PROSYN, ki je bil izdelan za reševanje sinteze procesov v kemijski tehnologiji [18], [19]. TOP je orodje najsodobnejših optimizacijskih tehnik, katerih najvažnejši sestavni del sta modificirani OA/ER algoritem in povezana večnivojna hierarhična MINLP strategija [20]. S programom TOP lahko računamo probleme različnih stopenj zahtevnosti: od lažjih LP, NLP in MILP optimizacijskih

problemov enostavnejših mehanskih struktur vse do zelo zahtevnih MINLP optimizacijskih problemov kompleksnih mehanskih superstruktur.

5.1 MODIFICIRANI ALGORITEM ZUNANJE APROKSIMACIJE S SPROSTITVIJO ENAČB

OA/ER algoritem sestoji iz zaporednega izvajanja nelinearnega programiranja (NLP) ter mešano celoštevilskega linearnega programiranja (MILP), glej sliko (1). Z NLP ob nespremenljivem vektorju binarnih spremenljivk in s tem pri držani



Slika 1: Koraki OA/ER algoritma

topologiji izvajamo zvezno optimiranje parametrov mehanske strukture, z MILP pa za linearno aproksimacijo celotne superstrukture izračunamo novo (optimalnejšo) topologijo oz. nov vektor binarnih spremenljivk. NLP in MILP fazi (MINLP iteracija) ponavljamo vse do zadostitve konvergenčnega pogoja: račun ustavimo takrat, kadar MILP rezultat postane slabši od najboljšega NLP rezultata. Če je problem nekonvexen, računanje ustavimo, ko se NLP preneha izboljševati.

Pomembni lastnosti OA/ER algoritma sta, da le-ta potrebuje majhno število MINLP iteracij, od 3 do 10, ter da konveksnemu optimizacijskemu problemu najde globalni optimum. Običajno so problemi v mehaniki nekonvexni, zato v programu TOP operiramo z modificiranim OA/ER algoritmom.

Tako OA/ER algoritem kakor tudi vse ostale MINLP metode v splošnem ne zagotavljajo, da je najdena rešitev globalni optimum (najboljša rešitev). Prisotnost nekonvexnih funkcij v modelu namreč lahko odreže globalni optimum. Da bi zmanjšali nezaželeni efekt nekonvexnosti sta Z. Kravanja in I.E. Grossmann izdelala modificirani OA/ER algoritem (the Modified OA/ER), ki glavnemu problemu priredi naslednje modifikacije:

- uporaba deaktivacije linearizacij nelinearnih pogojnih (ne)enačb,
- izvedba dekompozicije in deaktivacije linearizacij namenske funkcije,
- uporaba povečane kazenske funkcije,
- uporaba spodnje meje namenske spremenljivke (funkcije) in
- uporaba globalnega konveksnega testa in modifikacija kršenih linearizacij.

Optimizacijski program MINOS ali CONOPT uporabljamo za reševanje NLP problema, SCICONIC, OSL ali ZOOM pa

za reševanje MILP problema.

5.2 MINLP STRATEGIJE ZA MEHANSKE PROBLEME

Nedavno smo razvili več MINLP strategij za srednje velike optimizacijske probleme mehanike. Prva pomembnejša strategija je *Dvofazna MINLP strategija*, s katero izvajamo optimiranje topologije in standardnih dimenzij ločeno v dveh fazah (glej Kravanja in drugi [20]). Ta strategija potrebuje dvakrat večje število glavnih MINLP iteracij, da skonvergira h končnemu rezultatu, ki pa sploh ni nujno, da je optimalen, ker med topologijo in standardnimi dimenzijami ni nobene interakcije.

Zatem smo razvili *enofazno MINLP strategijo*, s katero lahko izvedemo sočasno optimiranje topologije, parametrov in standardnih dimenzij direktno v eni fazi (glej Kravanja in drugi [21]). Ta strategija izkazuje slabo konvergenco za velike MINLP probleme, ki velikokrat postanejo nerešljivi.

Za reševanje velikih problemov smo razvili *povezano večfazno hierarhično MINLP strategijo* (Linked Multilevel Hierarchical MINLP Strategy, LMH), S. Kravanja idr. [22], kot kombinacijo prej omenjenih dveh strategij. Na začetku optimiramo samo topologijo (prvi nivo), medtem ko standardne dimenzije začasno relaksiramo v zvezne parametre. Optimiranje topologije in zveznih parametrov je kombinatorično neprimerno lažje rešljivo in hkrati akumulira precej boljše glavno linearno aproksimacijo superstrukture v primerjavi z enofazno strategijo. Ko najdemo optimalno topologijo, ponovno vzpostavimo standardne dimenzije. Na drugem nivoju nato sočasno optimiramo topologijo in standardne dimenzije na podlagi dobljene glavne linearne aproksimacije iz prvega nivoja, dokler ne dosežemo optimalnega rezultata. Zatem na tretjem nivoju izvedemo vseobsežno diskretno/

zvezno optimiranje topologije, standardnih in zaokroženih dimenzij. Na ta način vse zvezne dimenzije izračunamo kot optimalne zaokrožene dimenzije, kar bistveno poenostavi proizvodnjo.

6. RAZLIČNI PRISTOPI K PROJEKTIRANJU KONSTRUKCIJ

V bistvu sestavljata projektiranje konstrukcij prostorsko oblikovanje in računska preverba nosilnosti. Odvisno od tega, ali oblikovanje in računska kontrola upoštevamo pri projektiranju konstrukcij sočasno ali ne, ločimo dva pristopa k projektiranju:

- **Analiza konstrukcij:** oblikovanje in računska kontrola konstrukcij potekata ločeno. Najprej konstrukciji podamo neko prostorsko obliko in dimenzije, zatem pa izvedemo računska kontrola; in sicer za konstrukcijo kot celoto, za vsak konstrukcijski element posebej in za vezna sredstva. Če računska kontrola pokaže v nekem elementu konstrukcije premajhno nosilnost ali pa če neka projektna zahteva ni izpolnjena (dobljena je npr. previsoka cena konstrukcije), je potrebno dimenzije ali material konstrukcije ustrezno spremeniti. Zatem ponovimo računska analizo in ponovno preverimo, ali so vse projektne zahteve zadostene. Opisani postopek analize konstrukcij v splošnem ponavljamo večkrat, in sicer vse dokler ne dobimo zadosti dobrega rezultata.
- **Sinteza konstrukcij:** oblikovanje in računska kontrola konstrukcij potekata sočasno. Glede na računske pogoje nosilnosti, stabilnosti, napetosti in deformacij so v enovitem in sočasnem računskem postopku izračunane dimenzije, oblika, geometrija in topologija konstrukcije glede na definirane posebne projektne pogoje (npr. ceno konstrukcije). Sinteza se torej izvede s sočasnim upoštevanjem vseh projektnih kriterijev v enovitem postopku avtomatsko. Ponavljanja računskega

postopka sinteze zaradi potrebne spremembe dimenzij ali konstrukcije niso potrebna, ker se konstrukcija in njene dimenzije pri izvajanju sinteze spreminjajo samodejno in avtomatsko.

Med analizo in sintezo konstrukcij torej obstaja bistvena razlika pri spreminjanju, modifikaciji konstrukcije in njenih dimenzij med računskim izvajanjem. Pri analizi obravnavamo konstrukcijo in njene dimenzije konstantne. Konstantno je tudi število konstrukcijskih elementov. Če analiza pokaže, da nekateri pogoji niso izpolnjeni (npr. premajhna nosilnost), moramo analizo ponoviti pri spremenjenih dimenzijah konstrukcije. Včasih pa je potrebno tudi spremeniti število konstrukcijskih elementov, tj. statični sistem. Dimenzije in statični sistem spreminjamo sami. Pri sintezi konstrukcij se konstrukcija med računskim izvajanjem samodejno in avtomatsko spreminja tako, da se posamezni konstrukcijski elementi računsko odvezemajo in/ali dodajajo, izračunavajo pa se tudi vse dimenzije in oblika konstrukcije. Dobljeni rezultat sinteze konstrukcije je optimalna konstrukcija.

Sinteza konstrukcij je torej superiorna glede na analizo konstrukcij. S sintezo dosežemo ugodnejši rezultat, za računsko izvajanje porabimo manj časa, sprememba dimenzij in statičnega sistema poteka avtomatsko in samodejno, izvajanje sinteze pa poteka v enovitem računskem procesu. Da bi sinteza

konstrukcije potekala avtomatsko, sprememba števila konstrukcijskih elementov in dimenzij pa samodejno, je potrebno razviti posebne algoritme in strategije. Če hkrati s sintezo izvajamo tudi optimiranje konstrukcij na osnovi metod matematičnega programiranja, rezultat sinteze še dodatno izboljšamo.

7. SINTEZA KONSTRUKCIJ

Vsako aktivnost na področju projektiranja konstrukcij, ki za neko konstrukcijo *avtomatsko generira* različne možne konstrukcijske alternative in *avtomatsko izbira* boljše izmed njih za končni design, lahko štejemo za sintezo konstrukcij. Sinteza konstrukcij v splošnem lahko temelji na treh med seboj različnih pristopih:

- hevristici, ki združuje intuicijo in inženirsko znanje,
- fizikalnem uvidu, ki uporablja osnovne fizikalne principe in
- optimiranju, ki uporablja različne metode matematičnega programiranja.

V članku obravnavamo optimizacijski pristop k sintezi konstrukcij. Ta pristop je izmed vseh najnovejši, najtežavnejši in daje najboljše rezultate. Da bi dosegli boljši rezultat sinteze oz. da bi do rezultata prišli hitreje, optimizacijski pristop često kombiniramo z ostalima dvema pristopoma.

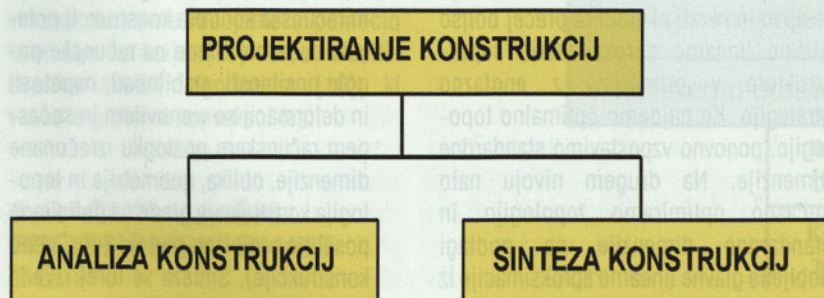
Sinteza konstrukcij torej vsebuje tako generiranje in selekcioniranje različnih konstrukcijskih alternativ, kakor tudi odločitev o tem, kateri konstrukcijski elementi naj sestavijo konstrukcijo in kako naj bodo med seboj povezani. Dimenzije, geometrija, oblika in drugi parametri so tudi izračunani. Prvo nakazuje diskretno odločanje o konstrukcijskih elementih in njihovih medsebojnih povezavah, slednje pa zahteva izračun znotraj zveznega prostora dimenzij in parametrov. Sinteza konstrukcij v bistvu torej ustreza kombiniranemu diskretno-zveznemu optimizacijskemu problemu, ki ga je s stališča matematičnega programiranja možno rešiti z mešano-celoštevilskim linearnim programiranjem (MILP) ali pa z mešano-celoštevilskim nelinearnim programiranjem (MINLP).

Pri izvajanju sinteze konstrukcij definiramo njen namen z namensko funkcijo. Največkrat je namen sinteze in optimiranja minimiziranje lastnih izdelavnih stroškov ali teže konstrukcije.

8. MINLP OPTIMIZACIJSKI PRISTOP K SINTEZI KONSTRUKCIJ

Glede na dejstvo, da je večina problemov v mehaniki in računskem preverjanju konstrukcij nelinearnih, uporabljamo za reševanje problemov sinteze konstrukcij optimizacijske metode mešano-celoštevilskega nelinearnega programiranja, MINLP. Z metodami MINLP moremo konstrukciji sočasno v enovitem računskem procesu izračunati:

- optimalne prečne dimenzije konstrukcijskih elementov (sizing optimization),
- optimalne medsebojne razdalje in dolžine konstrukcijskih elementov, kar spremeni geometrijo in obliko konstrukcije (geometrical optimization, shape optimization),
- optimalno topologijo konstrukcije z optimalno konfiguracijo in številom



Slika 2: Analiza konstrukcij in sinteza konstrukcij, dva različna osnovna pristopa pri projektiranju konstrukcij

konstrukcijskih elementov (topology optimization).

- optimalne standardne dimenzije pre-rezov (standard dimension optimization),
- optimalne zaokrožene dimenzije (rounder dimension optimization) in
- optimalne parametre, kot sta npr. najmanjša cena ali teža.

Reševanje z MINLP metodami je od vseh metod matematičnega programiranja najtežavnejše, vendar pa daje tudi najboljše rezultate. MINLP optimizacijski problemi sinteze zahtevnejših konstrukcij so lahko obsežni, nekonveksni in izrazito nelinearni. Sintezo konstrukcij rešujemo korakoma na treh različnih nivojih dejavnosti:

- z generiranjem mehanske superstrukture,
- z razvojem specialne MINLP modelne formulacije in
- z reševanjem definiranega MINLP problema.

Materializacija gornjih treh aktivnosti je *optimalna konstrukcija*, ki ob definirane namenu (npr. najnižji ceni) predstavlja rezultat sinteze.

Konstrukcija je v bistvu nosilna struktura, ki jo tako kot večina tujih avtorjev enostavno lahko imenujemo tudi struktura. Nosilne strukture obravnava mehanika, zato tudi strukturo imenujemo mehansko strukturo, superstrukturo pa mehansko superstrukturo.

Sintezo konstrukcije začnemo izvajati z generiranjem mehanske superstrukture različnih strukturnih/topoloških alternativ, ki se potegujejo za optimalni rezultat. Mehanska superstruktura je opisana z izborom strukturnih elementov in njihovih vozlišč. Različni izbor strukturnih elementov daje različne strukturne alternative. Nadalje lahko vsak strukturni element vsebuje več različnih alternativ standardnih dimenzij in materialov. Zvezne dimenzije naj bodo zaokrožene. Znotraj definirane mehanske super-

strukture je zato glavni namen sinteze izračunati takšno možno strukturo (konstrukcijo), ki bo optimalna glede na topologijo (išče se optimalno število konstrukcijskih elementov), materiale in standardne ter zaokrožene dimenzije pri definirani najnižji možni ceni.

Ko je mehanska superstruktura generirana, sintezo nadaljujemo z razvojem specialne MINLP modelne formulacije mehanskih superstruktur, MINLP-MS (glej. S. Kravanja idr. [23], [24]). Zadnji korak sinteze mehanskih struktur pa predstavlja reševanje definiranega MINLP-MS problema, ki ga rešujemo npr. z računalniškim programskim paketom TOP ob uporabi modificiranega OA/ER algoritma in LMH strategije.

Od poznanih MINLP metod naj omenimo v zadnjem času vse bolj aktualno metodo optimiranja topologije in parametrov, ki jo je predložil E. Sandgren [25]. Sandgren je združil genetski algoritem avtorja D.E. Goldberga [26] z metodami NLP. Z genetskim algoritmom izvaja E. Sandgren diskretno optimiranje topologije, z NLP pa zvezno optimiranje parametrov (dimenzij).

9. SINTEZA KONSTRUKCIJE ZAPORNIC TUNNEL INTAKE BULKHEADS, SULTARTANGI HYDROELECTRIC PROJECT, ISLANDIJA

V članku predstavljamo praktičen primer sinteze konstrukcije jeklenih tablastih zapornic Tunnel Intake Bulkheads, ki jih je Metalna Maribor izdelala za Islandijo leta 1999 (glej sliko 3.)

V hribovitem področju južne Islandije se približno 80 km od morske obale navzgor na reki Pjorsa gradi hidrotehnični objekt Sultartangi Hydroelectric Project [27]. V okviru omenjenega projekta je zgrajen 6 km dolg protipotresni jez s prelivom in talnim iztokom. Ta jez zapira 26 km dol-

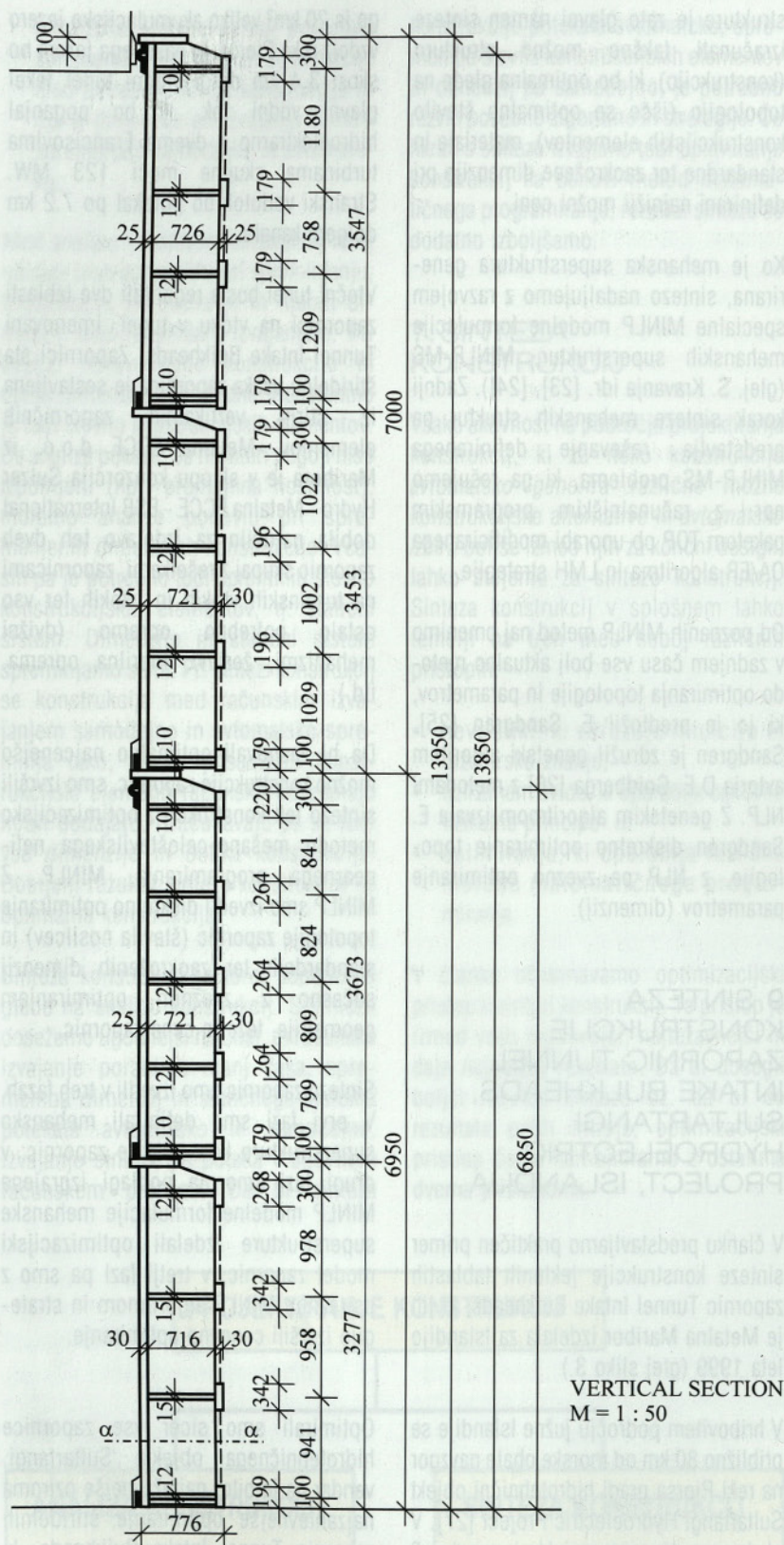
go in 20 km² veliko akumulacijsko jezero vzdolž reke Pjorsa. Iz nastalega jezera bo skozi 3.4 km dolgi vtočni tunel tekel glavni vodni tok, ki bo poganjal hidroelektrarno z dvema Francisovima turbinama skupne moči 123 MW. Stranski vodotok bo potekal po 7.2 km dolgem kanalu.

Vtočni tunel bosta regulirali dve tablasti zapornici na vtoku v tunel, imenovani Tunnel Intake Bulkheads. Zapornici sta štiridelni: vsaka zapornica je sestavljena iz štirih vertikalnih zaporničnih elementov. Metalna ECCE d.o.o. iz Maribora je v sklopu konzorcija Sulzer Hydro - Metalna ECCE - ESB International dobila naročilo za izdelavo teh dveh zapornic skupaj z rešetkami, zapornicami na turbinskih vtokih in iztokih ter vso ostalo potrebno opremo (dvižni mehanizmi, žerjavi, merilna oprema, itd.).

Da bi zasnovali optimalno najcenejšo možno konstrukcijo zapornic, smo izvršili sintezo teh konstrukcij z optimizacijsko metodo mešano-celoštevilskega nelinearnega programiranja, MINLP. Z MINLP smo izvedli diskretno optimiranje topologije zapornic (števila nosilcev) in standardnih ter zaokroženih dimenzij sočasno z zveznim optimiranjem geometrije, teže in cene zapornic.

Sintezo zapornic smo izvedli v treh fazah. V prvi fazi smo definirali mehansko superstrukturo konstrukcije zapornic, v drugi fazi smo na podlagi izgrajene MINLP modelne formulacije mehanske superstrukture izdelali optimizacijski model zapornic, v tretji fazi pa smo z ustreznim MINLP algoritmom in strategijo izvršili cenovno optimiranje.

Optimirali smo sicer vse zapornice hidrotehničnega objekta Sultartangi, vendar pa je bilo najtežavnejše oziroma najzahtevnejše optimiranje štiridelnih zapornic Tunnel Intake Bulkheads, ki bodo zapirale vtok vtočnega tunela. Omenjene zapornice so na objektu



Slika 3: Optimalna konstrukcija zapornice Tunnel Intake Bulkheads, Sultartangi Hydroelectric Project, Islandija

Sultartangi največje zapornice: visoke so 14 m in široke 6.65 m. Za material zapornic smo predvideli jeklo St 52-3N.

Tablaste zapornice Tunnel Intake Bulkheads so sestavljene iz štirih delov, zato je njihova superstruktura bistveno večja kot pri ostalih zapornicah istega objekta, ki so dvodelne. Spodnja dva elementa štiridelne zapornice sta ob delstvu, da sta lahko sestavljena v dvodelno zapornico in prenesena na turbinski vtok, predvidena tudi za zapiranje le-tega. To seveda samo še dodatno zaplete projektiranje zapornic, predvsem zaradi različnih dveh vodnih obtežb, tesnjenja in dvižnih mehanizmov. Projektni horizontalni potresni pospešek znaša 0.7g! Potresna vodna obtežba na turbinskem vtoku je približno dvakrat večja kot pri tunelskem vtoku, zato bo pri optimiranju štiridelna zapornica tunelskega vtoka računsko obremenjena z nezvezno vodno obtežbo: spodnja dva zapornična elementa obremenjuje bistveno večji vodni potresni pritisk kot zgornja dva. Odločujoča obtežba za dimenzioniranje zapornic je sila hidrostaticnega pritiska 16606 kN/zapornico ter potresna sila 27243 kN/zapornico.

Zapornice se spuščajo (ali dvigajo) v mirno vodo pri izenačenem hidrostatičnem pritisku. Spuščanje/dvigovanje zapornic je urejeno s portalnim žerjavom. Ker je prenos spodnjih dveh elementov od tunelskega vtoka do turbinskega vtoka (in nazaj) predviden z avtožerjavom nosilnosti 200 kN, znaša, ob upoštevanju teže dvizhnih klešč 30 kN in faktorja varnosti dvigovanja 1.4, največja možna teža posameznega elementa 112.86 kN. Omenjeno največjo možno težo posameznega zaporničnega elementa smo pri optimiranju omejili z dodatnimi pogojnimi neenačbami.

Generalni smo superstrukturo konstrukcije štiridelne tablaste zapornice, v kateri so vse možne konstrukcijske alternative podane z variiranjem topologije 3 do 6 horizontalnih nosilcev za vsak

glavni zapornični element in 5 do 9 vertikalnih nosilcev za celotno zapornico. Definirali smo 14 alternativ različnih standardnih debelin jeklenih pločevin in 2958 alternativ različnih diskretnih zaokroženih dimenzij, t.j. na 1 mm zaokroženih vrednosti zveznih dimenzij. S tem smo dobili zelo zapleten, nelinearni, diskretno/zvezni in nekonveksni optimizacijski problem s prek 10^{50} različnih konstrukcijskih alternativ.

Na podlagi MINLP modelne formulacije smo izdelali MINLP optimizacijski model zapornice GATOP (GATe Optimization), ki smo ga za ta primer posebej nadgradili s potresno obtežbo. Vodno potresno obtežbo smo definirali po Westergaardu [28]. Optimizacijski model zapornice GATOP (GATe Optimization), [29], smo zapisali z višjim algebrskim modelskim jezikom GAMS [30]. Definirali smo ekonomsko namensko funkcijo lastnih izdelavnih stroškov, med katere smo uvrstili: materialne stroške, stroške varjenja, rezanja pločevin in antikorozijske zaščite. Namenska funkcija je podvržena sistemu oblikovnih, materialnih, napetostnih, deformacijskih in stabilitetnih pogojnih (ne)enačb, sicer poznanih iz strukturne analize. Sintezo zapornice smo izvajali v skladu z DIN 19704 [31].

Ker je optimizacijski model konstrukcije zapornice nekonveksen in nelinearen, smo za optimiranje uporabili modificirani OA/ER algoritem ter povezano večfazno hierarhično MINLP strategijo, ki smo jo nadgradili s posebno proceduro, ki

avtomatsko poišče najugodnejše optimalne zaokrožitvene dimenzije, katerih vrednosti so najbližje vrednostim že dobljenih zveznih dimenzij prejšnjih MINLP iteracij. Kljub temu da je skupno število binarnih spremenljivk celotnega problema izredno veliko oz. preveliko za normalno rešitev, smo s to proceduro bistveno zmanjšali število binarnih spremenljivk za vsako posamezno MINLP iteracijo, s čimer smo dobili dobre rezultate. Sintezo konstrukcije zapornice Tunnel Intake Bulkheads smo izvajali z lastnim MINLP računalniškim programom TOP (Topology Optimization Program). Program MINOS [32] smo uporabili za izračun NLP podproblemov in OSL [33] za reševanje MILP glavnih problemov.

S sintezo konstrukcije - MINLP optimiranjem - smo dosegli okoli 30 odstotkov prihranka lastne cene konstrukcije tablastih zapornic Tunnel Intake Bulkheads glede na vrednost, dobljeno na podlagi klasične analize konstrukcije. Z MINLP optimiranjem smo v enovitem računskem procesu sočasno izračunali: optimalne stroške za izdelavo konstrukcije zapornic (stroški materiala, rezanja pločevin, varjenja in protikorozijske zaščite), optimalno topologijo z optimalnim številom nosilcev, optimalne standardne debeline pločevin in optimalne zaokrožene vrednosti vseh ostalih dimenzij.

Poleg cene smo bistveno zmanjšali tudi težo štiridelne zapornice na 414 kN. Najtežji (spodnji) zapornični element je

težak natančno 112.86 kN, kar je najvišja mogoča obremenitev, ki jo predvideno avtodvigalo nosilnosti 200 kN lahko še prenese.

10. SKLEP

V članku smo predstavili metode, algoritme in računalniške programe matematičnega programiranja mehanskih struktur, ki jih uspešno uporabljamo pri optimiranju jeklenih konstrukcij. Poudarek dajemo sintezi konstrukcij z optimizacijsko metodo mešano celoštevilskega nelinearnega programiranja, MINLP. Predstavili smo programski paket TOP, Modificirani OA/ER algoritem in LMH MINLP strategijo.

Prikazali smo praktični primer sinteze tablastih zapornic Tunnel Intake Bulkheads, ki jih je Metalna izdelala in vgradila na Islandiji leta 1999 po našem designu. Konstrukcijo zapornic smo optimirali z MINLP. Primerjava dobljenih optimalnih rezultatov kaže na okoli 30 odstotkov prihranka investicijskih sredstev glede na ceno zapornice, ki je bila projektirana na klasični način z analizo konstrukcije, [34]. Pri tem naj poudarimo, da smo tako pri sintezi kot pri analizi konstrukcije upoštevali enake pogoje/enačbe nosilnosti, deformacij in napetosti. S tem smo dokazali, da z uporabo modernih računalniških metod matematičnega programiranja postanemo bistveno cenejši, ekonomsko uspešnejši in konkurenčnejši od klasične analize konstrukcij.

LITERATURA

[1] Michell, A.G.M., The Limits of Economy in Frame Structures, Philosophical Magazine, Series 6, Vol. 8, No. 47, pp. 589-597, 1904.

[2] Schmitt, L.A., Structural Design by Systematic Synthesis, Proceedings of 2nd Conference on Electronic Computation, ASCE, New York, pp. 105-122, 1960.

- [3] Reklaitis, G.V., A. Ravindran, K.M. Ragsdell, Engineering Optimization, Methods and Applications, John Wiley and Sons, New York, 1983.
- [4] Kirsch, U., Optimal Topologies of Truss Structures, Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg. 72, str. 15-28, 1989.
- [5] Bendsoe, M.P. and N. Kikuchi, Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg. 71, str 197-224, 1988.
- [6] Beale, E.M.L., Integer Programming. The State of the Art in Numerical Analysis, ed D. Jacobs, pp. 409-448, Academic Press, London, 1977.
- [7] Gupta, O.K. in Ravindran, A., Nonlinear Mixed Integer Programming and Discrete Optimization, Progress in Engineering Optimization, ed R.W. Mayne and K.M. Ragsdell, pp. 297-520, New York, 1984.
- [8] Olsen, G.R. in Vanderplaats, G.N., Method for Nonlinear Optimization with Discrete Design Variables, AIAA Journal, 27(11), pp. 1584-1589, 1989.
- [9] Westerlund, T., Pettersson, F. in Grossmann, I.E., Optimization of pump configurations as a MINLP problem, Computers chem. Engrg., Vol. 18(9), pp. 845-858, 1994.
- [10] Benders, J.F., Partitioning Procedures for Solving Mixed-variables Programming Problems, Numerische Mathematik, 4, pp. 238-252, 1962.
- [11] Geoffrion, A.M., Generalized Benders Decomposition, Journal of Optimization Theory and Applications, 10(4), pp. 237-260, 1972.
- [12] Kocis, G.R. in Grossmann, I.E., Relaxation Strategy for the Structural Optimization of Process Flowsheets, Ind. Engrg Chem. Res., 26, pp. 1869-1880, 1987.
- [13] Mawengkang, H. and Murtagh, B.A., Solving Nonlinear Integer Programs with Large-Scale Optimization Software, Annals of Operations Research, 5, pp. 425-437, 1986.
- [14] M.A. Duran and I.E. Grossmann, 'An Outer-Approximation Algorithm for a Class of Mixed-Integer Nonlinear Programs', *Mathematical Programming*, 36, 307-339, 1986.
- [15] Viswanathan, J. and I.E. Grossmann, A Combined Penalty Function and Outer-Approximation Method for MINLP Optimization, Computers Chem. Engrg. 14, str. 769-782., 1990.
- [16] Kravanja Z. and I.E. Grossmann, New developments and capabilities in Prosyn. An automated topology and parameter process synthesizer, Computers Chem. Engrg., 1994.
- [17] Kravanja, S., Z. Kravanja, B.S. Bedenik and J. Faith, Simultaneous Topology and Parameter Optimization of Mechanical Structures, First European Conference on Numerical Methods in Engineering, Brussels, Belgium, September 1992, Numerical Methods in Engineering '92 (Elsevier, Amsterdam, 1992), str. 487-495, 1992.
- [18] Kravanja, Z. and I.E. Grossmann, PROSYN - an MINLP Process Synthesizer, Computers chem. Engrg. 14, str. 1363-1378, 1990.
- [19] Kravanja, Z. and I.E. Grossmann, PROSYN - An Automated Topology and Parameter Process Synthesizer, European Symposium on Computer Aided Process Engineering -2, Toulouse, France, October 1992, Computers chem. Engrg., Supplement 1993, 17, str. S87-S94, 1993.

[20] Kravanja, S., Kravanja, Z. and Bedenik, B.S., Linked multilevel hierarchical approach to the MINLP synthesis of mechanical structures, *Computer Aided Optimum Design of Structures V*, ed. S. Hernandez and C.A. Brebbia, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston, pp. 203-212, 1997.

[21] Kravanja, S., Kravanja, Z. in Bedenik, B.S., MINLP Optimization of Mechanical Structures, in *Structural Optimization 93* (ed J. Herskovits), pp. 21-28, Proceedings, Volume I, The World Congress on Optimal Design of Structural Systems, Rio de Janeiro, Brazil, 1993, Federal University of Rio de Janeiro, 1993.

[22] Kravanja, S., Kravanja, Z. and Bedenik, B.S., Linked multilevel hierarchical approach to the MINLP synthesis of mechanical structures, Fifth International conference on computer aided optimum design of structures, Rome, September 8-10, Computer aided optimum design of structures (S. Hernandez, C.A. Brebbia), Computational Mechanics Publications, Southampton; Boston, pp. 203-212, 1997.

[23] Kravanja, S., Kravanja, Z. and Bedenik, B.S., The MINLP optimization approach to structural synthesis. Part I: A general view on simultaneous topology and parameter optimization, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 43, pp. 263-292, 1998.

[24] Kravanja, S., Kravanja, Z. and Bedenik, B.S., The MINLP optimization approach to structural synthesis. Part II: Simultaneous topology, parameter and standard dimension optimization by the use of the Linked two-phase MINLP strategy, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 43, pp. 293-328, 1998.

[25] Sandgren, E., Multiple-objective, shape optimal design via genetic optimization, in: *Structural optimization* (Computational Mechanics Publications, Edts. S. Hernandez, M. El-Sayed and C.A. Brebbia), Southampton, Boston, pp. 3-10, 1995.

[26] Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Co., MA., 1989.

[27] Sultartangi Hydroelectric Project, Contract Documents SUL-30, Electromechanical Equipment, Landsvirkjun, February 1997.

[28] Westergaard, Dynamic Water Pressure During Earthquake, From TVA Technical Report No. 13, "Kentucky Project".

[29] Kravanja, S., Kravanja, Z. and Bedenik, B.S., The MINLP optimization approach to structural synthesis. Part III: Synthesis of roller and sliding hydraulic steel gate structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 43, pp. 329-364, 1998.

[30] Brooke, A., Kendrick, D. and Meeraus, A., *GAMS - A User's Guide*, Scientific Press, Redwood City, CA, 1988.

[31] DIN 19704, Stahlwasserbauten, Berechnungsgrundlagen, 1990.

[32] Murtagh, B.A. and Saunders, M.A., *MINOS User's Guide, Technical Report SOL 83-20*, System Optimization Laboratory, Department of Operations Research, Stanford University, 1985.

[33] OSL, Optimization Subroutine Library, From IBM, Release 2.

[34] Kravanja, S., Kravanja, Z. and Bedenik, B.S., The MINLP optimization of Tunnel intake bulkheads at Sultartangi Hydroelectric Project, Iceland, Sixth International conference on computer aided optimum design of structures, Orlando, March 1999, Computer aided optimum design of structures VI (S. Hernandez, A.J. Kassab and C.A. Brebbia), WITpress, Southampton; Boston, pp. 107-116, 1999.



**Kakovost
s
tradicijo**

**ISO
9001**



**tiskarna
ljubljana, d.d.**

1000 Ljubljana, Tržaška 42,
SLOVENIJA
telefon: ++386 1 423 15 15
telefax: ++386 1 257 14 61, 423 41 23
e-mail: tiskarna.ljubljana@mrak.si

