

UDK-UDC 05:625; ISSN 0017-2774 • LJUBLJANA, JULIJ-AVGUST, 1995 • LETNIK XXXXIV • STR.: 131-178

GRADBENI VESTNIK

7-8

1995

UNIVERZA V MARIBORU  FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO



Courtesy of B.S. Bedenik 1995

Glavni in odgovorni urednik:

Franc ČAČOVIČ

Lektor:

Alenka RAIČ-BLAŽIČ

Tehnični urednik:

Danijel TUDJINA

Uredniški odbor:

Sergej BUBNOV, Stane PAVLIN,

Andrej KOMEL,

dr. Ivan JECELJ,

dr. Franci STEINMAN,

mag. Damijana DIMIC,

mag. Gojmir ČERNE

Tisk:

TISKARNA TONE TOMŠIČ

v LJUBLJANI

Revijo izdaja Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, Ljubljana, Karlovška 3, telefon: 061/221-587. Žiro račun pri Agenciji za plačilni promet, Enota Ljubljana, številka: 50101-678-47602. Tiska Tiskarna Tone Tomšič v Ljubljani. Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne člane društev znaša 2.310 SIT, za študente in upokoјence velja polovična cena. Naročnina za gospodarske naročnike znaša 26.250 SIT, za inozemske naročnike 100 US \$. V ceni je vključen 5% prometni davek.

Revija izhaja ob finančni pomoči Ministrstva za znanost in tehnologijo, Gradbenega inštituta ZRMK, Zavoda za gradbeništvo ZRMK, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Univerze v Ljubljani in Fakultete za gradbeništvo, Univerze v Mariboru.

GRADBENI VESTNIK

GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE
ŠT. 7-8 • LETNIK 44 • 1995 • ISSN 0017-2774

VSEBINA-CONTENTS

Članki, študije, razprave Articles studies, proceedings	Stojan Kravanja, Zdravko Kravanja, Branko S. Bedenik: SINTEZA KONSTRUKCIJ 140 SYNTHESIS OF STRUCTURES
	Matjaž Skrinar, Andrej Štrukelj: MERITVE LASTNEGA NIHANJA NA OBJEKTU KOROŠKI MOST V MARI- BORU 145 MEASUREMENTS OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE NEW KOROŠKA BRIDGE IN MARIBOR
	Peter Dobrila, Miroslav Premrov, Gorazd Lipnik: VPLIV RAZPOREDITVE ARMATURE NA RAZPOKE ARMIRANOBETON- SKIH NOSILCEV 152 THE BAR DISTRIBUTION INFLUENCE ON CRACKS IN REINFORCED CONCRETE BEAMS
	Stanislav Škrabl, Ludvik Trauner, Bojan Žlender: VPLIV TRENJA NA STABILNOST VITKIH VPETIH PODPORNIH KON- STRUKCIJ 156 INFLUENCE OF FRICTION ON THE STABILITY OF THIN FIXED RE- TAINING STRUCTURES
	Matjaž Lipičnik: UPRAVLJANJE PROMETNIH SISTEMOV 162 MANAGEMENT OF TRAFFIC SYSTEMS
	Uroš Krajnc: EVTROFIKACIJA SLOVENSКИH POVRŠINSКИH VODA 165 EUTROPHICATION OF SLOVENIAN RIVERS
Poročila – Informacije Reports – Information	Ludvik Trauner: NAGOVOR DEKANA OB PROMOCIJI FAKULTETE ZA GRADBENIŠTVO 132 DEAN ALLOCATION AT PROMOTION OF THE FACULTY OF CIVIL ENGI- NEERING
	Igor Pšunder: POZDRAV ŠTUDENTA PRODEKANA OB PROMOCIJI FAKULTETE ZA GRADBENIŠTVO 135 PRODEAN ALLOCATION
Novosti – Gradbeništvo Tehniška fakulteta Univerza v Mariboru Civil Engineering News University in Maribor	Andrej Štrukelj: POENOSTAVITEV IZRAČUNA TRIDIMENZIONALNE GREENOVE FUNK- CIJE 171 SIMPLIFICATION OF THREE-DIMENSIONAL GREEN'S FUNCTION CAL- CULATION

NAGOVOR DEKANA OB PROMOCIJI FAKULTETE ZA GRADBENIŠTVO

**Rector magnificus, Decani
spectabiles, Collegium
academicum, Doyen-Olimpijec
notabilis, Auditorium maximum!**

**Cenjena gospoda ministra in
visokospoštovani gospod župan!**

**Spoštovane kolegice in kolegi,
dame in gospodje, gosti in
predvsem dragi študenti!**

Dokler se človek ne dokoplje do popolnega zavedanja in celovite samoprepoznavne, je vse njegovo dožemanje sebe in sveta blede in sanjavo. Živimo v času ustoličenih in potrjenih vrednot, pa najsi se skrivajo v okvirih znanosti, umetnosti, religij in filozofij.

Zato ni slučajno, da so tu v pravkar odprtem Univerzitetnem športnem centru svečano odjeknile otvoritvene fanfare in je zabučala študentska himna v slavnostni pozdrav rojstvu nove fakultete Univerze v Mariboru – samostojni Fakulteti za gradbeništvo, ki je nastala iz Oddelka za gradbeništvo bivše Tehniške fakultete. Ponosni smo na ta lepi in pomembni hram, v katerega je vtkano veliko znanja in dela skoraj vseh sodelavcev naše fakultete, od zasnov do izvedbe.

Odkar se je človek sklonil in pobral kamen za svoje orodje ali ga uporabil pri gradnji svojega bivališča, se razvija gradbeništvo. Torej ta tehnika, ena izmed najstarejših znanstvenih disciplin, deduktivno izvira od prvih pojavov človečnosti – homo sapiensov in ni nekaj samozadostnega, od sorodnih znanosti ločenega. Interaktivno je povezana z naravoslovnimi vedami vse od začetka, od npr. gradenj piramid, preko renesančne umetnosti do snovanj sodobnih interdisciplinarnih objektov, celo vesoljskih.

Gradbeništvo povezuje številne dejavnosti, zato lahko pomembno vpliva na gospodarski razvoj, hkrati pa je od tega razvoja tudi samo odvisno. Zato ni nenavadno, da se je gradbeništvo ob nekoliko daljšem obdobju recesije, kot je značilno za celotno gospodarstvo, in visoki delovni intenzivnosti moralo boriti v začetku 90. let za preživetje.

Danes je gradbeništvo brezkompromisno naravnano v prihodnost. Bolj kot kdajkoli prevladuje v njem izumiteljstvo. Zato ima naša mlada fakulteta sloves doma in v svetu, ki ji ga ni moč odvzeti; je priznana pedagoško-znanstvena institucija, tesno povezana z gospodarstvom. Kakovost njenega dela je pogojena z nerazdružljivo zvezo med pedagoškim in raziskovalnim procesom. Poglobljeni raziskovalni pristopi na ključnih segmentih različnih disciplin tehniške znanosti se nedvomno zrcalijo v vse večji perfekciji izvajanja pedagoškega dela.

Študentom ponujamo širok spekter zanimivih in aktualnih študijskih programov iz področij gradbeništva, prometa in interdisciplinarnih disciplin gospodarskega inženirstva. Dosedanji višješolski dodiplomski študij pravkar spreminjamo v visoki strokovni program, univerzitetni študij pa intenziviramo predvsem na kakovostni osnovi in evropsko primerljivi ravni, usmerjeni v podiplomski specialistični, magistrski oz. doktorski študij.

Fakulteta za gradbeništvo integrirano deluje v sklopu Univerze v Mariboru, ki prav sedaj s sprejemanjem novega statuta dobiva novo avtonomno preobrazbo. Zametki študija gradbeništva v Mariboru segajo v leto 1960, ko je pričela delovati takratna Višja tehniška šola. V letu 1973 se je, s preoblikovanjem v Visoko Tehniško šolo, pričel študij tudi na ravni visoke in podiplomske izobrazbe. Leta 1985 se je ustanova preimenovala v Tehniško fakulteto, s čimer so bili dani pogoji za vse večji obseg študija in kakovostno raziskovalno delo.

Sedaj v okviru Fakultete za gradbeništvo deluje močan potencial znanstvene dejavnosti: 5 rednih profesorjev, 3 izredni profesorji, 10 docentov, 6 višjih predavateljev, 8 asistentov, 3 samostojni raziskovalci, 6 raziskovalcev, 6 tehniških sodelavcev in 9 tehničnih in administrativnih delavcev. Trenutno na fakulteti delujejo trije inštituti: Inštitut za gradbene vede (v katerega se vključuje 9 kateder), Inštitut za prometne vede (s tremi katedrami) in Raziskovalni inštitut za gradbeništvo, ki ima 6 laboratorijev in 2 centra. Doslej je diplomiralo 1671 prvostopenjskih gradbenih inženirjev, 316 pa je vseh diplomiranih drugostopenjskih inženirjev; 20 jih je magistriralo in 11 doktoriralo.

V tem študijskem letu je na fakulteto vpisanih skupno 604 študentov, od tega 413 v program gradbeništva (28 izredno), 106 v program prometa in 85 v interdisciplinarni program gospodarskega inženirstva. V podiplomski študij je vpisanih 20 študentov, od tega je devetim odobrena tema doktorske disertacije.

Letos z veseljem pričakujemo prve maturante, ki bodo predstavljali prve generacije v novem tisočletju. Zato upravičeno želimo, da bomo v sodelovanju z njimi uspeli postati vsi skupaj še boljši in odličnejši.

Spoštovani avditorij!

Z našo dejavnostjo kažemo okolju tudi svoje razpoloženje. Biti v imenu življenja, pomeni gledati z lastnimi očmi, spoznavati z lastnim razumom in ustvarjati z lastnim znanjem. Ko vse vidiš in prepoznaš pred sabo tako kot je, tedaj šele si v toku življenja samega in si pripravljen spoštovati tisto, kar daje življenje.

**Vivat, crescat, floreat, Alma Mater Mariborensis,
Facultas nova pro tota aedificatione!**

Dekan Fakultete za gradbeništvo
Prof. dr. Ludvik Trauner

**Rector magnificus, Decani
spectabiles, Collegium
academicum, Doyen-Olympian
notabilis, Auditorium maximum!**

**Ministers, Reverend Bishop,
Honourable Mayor!**

**Dear colleagues, ladies and
gentlemen, guests and students!**

As long as the man does not come to the complete self-awareness and recognition, all his comprehension of the world and himself are but a pale and dreamy

experience. We live in the time of established and confirmed values, let it be in science, art, religion, and philosophy.

Therefore it is not by chance that the just opened University Sports Centre has been resounding with the opening fanfares and the students' hymn to greet solemnly the beginning of the new faculty of the University of Maribor, the independent Faculty of Civil Engineering which evolved from the Department of Civil Engineering of the former Faculty of Technical Sciences. We are proud of this beautiful and important house of studies in which enormous knowledge and work of the whole staff have been accumulating from its beginnings to the final realization.

Ever since the man bent himself to pick up a stone for his tool or used it in building his shelter, civil engineering has been in the uprise. This technique is thus one of the oldest scientific disciplines arising deductively from the first creations of the homo sapiens. It is not a self-sufficient discipline separated from natural sciences but is interactively linked with them from the very beginnings, from the building of pyramids to renaissance arts and to modern interdisciplinary structures, even spacila.

Civil engineering interlinks numerous activities and can therefore exert an important influence on economic development while being itself dependent on it. Therefore it is not surprising that after a somewhat long period of recession compared to other economic branches, and in spite of highly intensive work, it had to fight, in the early nineties, for its survival.

Today civil engineering faces the future without compromise. More than any time before it is dominated by inventions. Our young Faculty has therefore acquired reputation at home and abroad which can not be denied: it is a renowned paedagogical and scientific institution closely linked with industry. The quality of its work has been obtained by an unseparable link between the paedagogical and research process. A thorough research approach to key segments of different disciplines of technical sciences is, without any doubt, reflected also in increasing perfection of paedagogical work.

Students are offered a wide spectrum of interesting modern study programs in the field of civil engineering, traffic and interdisciplinary fields of industrial engineering. Activities are under way to change the current four year study program into the professional program, and to intensify the academic program to gain the European quality level, giving the possibility of post-graduate specialist, master, and doctoral studies.

The Faculty of Civil Engineering is an integral part of the University in Maribor which, by adopting a new statute, is to gain new authority. The beginnings of civil engineering studies go back to 1960 when the Technical College was founded. In 1973 the College evolved into the Higher School of Engineering which offered 4-year and post-graduate programs of study. In 1985 the school took the name of the Faculty of Technical Sciences and acquired the bases for broader studies and research of higher quality.

Today the Faculty of Civil Engineering has a strong scientific potential: 5 professors, 3 associated professors, 10 assistant professors, 6 senior lecturers, 8 assistant lecturers, 3 senior researchers, 6 researchers, 6 technical assistants, and 9 office staff. There are 3 institutes active at the Faculty: Institute for Civil Sciences (comprising 9 chairs), Institute for Traffic Sciences (comprising 3 chairs), and Research Institute for Civil Engineering, comprising 6 laboratories and 2 centres. 1671 engineers have finished 2-year studies and 316 four-year studies; 20 candidates obtained the master's degree and 11 the doctor's degree.

In this academic year 604 students have enrolled at the Faculty, from this 413 in the Civil Engineering Course (28 part-time), 106 in the Traffic Course and 85 in the interdisciplinary Industrial Engineering Course; 20 students are enrolled in postgraduate studies and 9 doctoral themes have been approved.

In the autumn term we are eager to enroll the first generation of secondary school graduates who will form new generations of graduate engineers in the next millennium. We expect, not without justification, to succeed together with them in getting better and more distinguished.

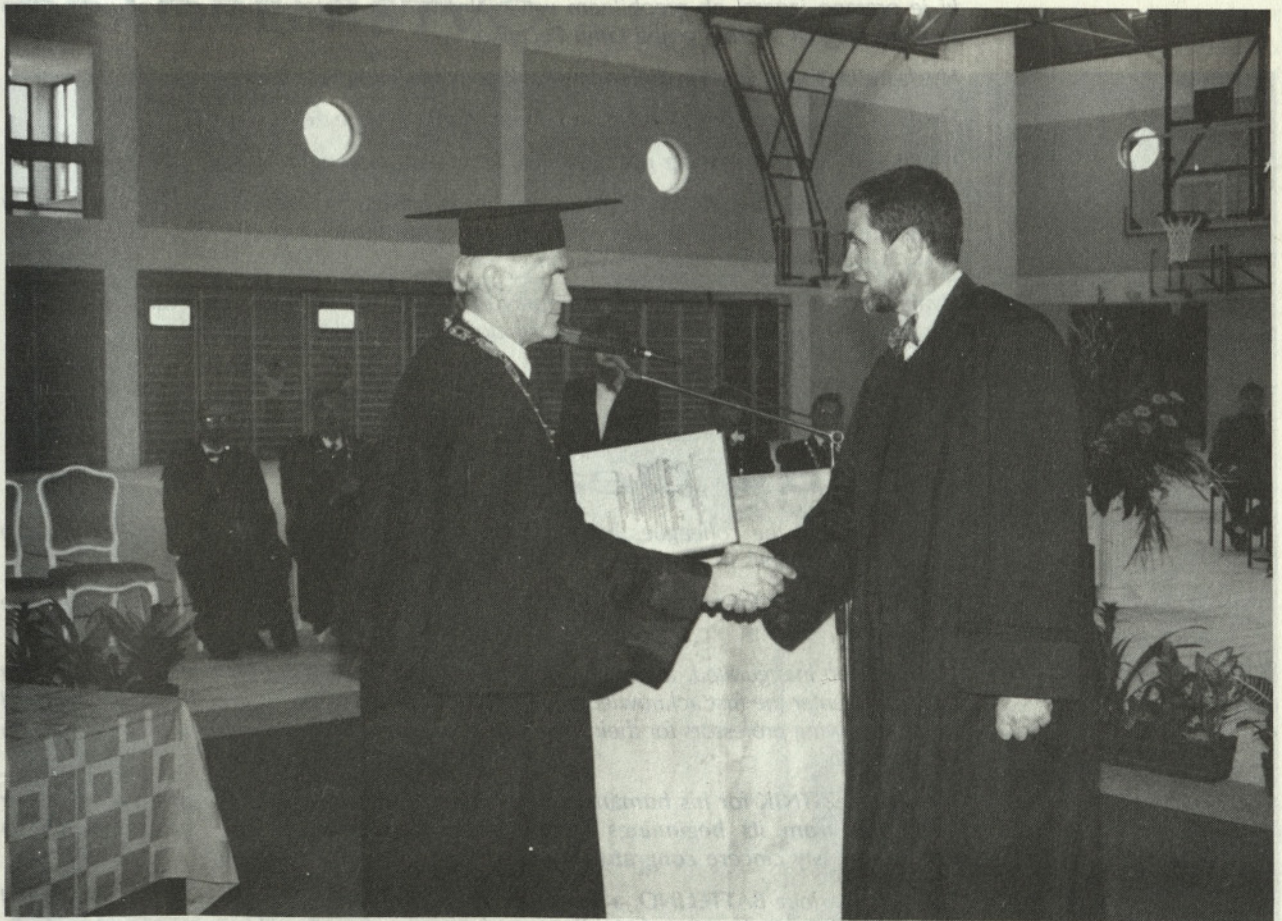
Honorable auditory!

With our activities we show to the surrounding world also our mood. To exist in the name of life means to watch with own eyes, recognize with own intellect and create with own knowledge. When one sees everything and recognizes the world such as it is, one is in life itself and ready to respect whatever it brings.

**Vivat, crescat, floreat, Alma Mater Mariborensis,
Facultas nova pro tota aedificatione!**

**Dean of the Faculty
of Civil Engineering
Prof. dr. Ludvik Trauner**

**POZDRAV ŠTUDENTIJA PRODEKANA
OB PROMOCIJI FAKULTE TE ZA**



REKTOR Univerze v Mariboru Prof. dr. Ludvik Toplak podeljuje svečano listino dekanu Fakultete za gradbeništvo Prof. dr. Ludviku Traunerju, s katero se potrjuje ustanovitev nove fakultete Univerze v Mariboru.

ZAHVALA dekana fakultete

V imenu sodelavcev Fakultete za gradbeništvo in v svojem imenu se zahvaljujem

– Magnificenci rektorju za razglasitev ustanovitve naše fakultete in izkazano čast s podelitvijo insignij.

– Sedaj, ko smo ustoličeni, mi dovolite, dragi prijatelji, da v znak zahvale najprej opravi prijetno dolžnost in podelim prva priznanja FG za dolgoletno sodelovanje v pedagoškem in raziskovalnem procesu, ki jih je izrekel znanstveno-pedagoški svet FG naslednjim profesorjem:

Prof. Egonu ŽITNIKU za njegovo humano, nesebično in plodno delo za uveljavljanje naše ustanove vse od ustanovitve pa do danes. Zato prejme plaketo FG. Iskreno čestitam!

Prof. dr. Darinki BATTELINO, profesorici iz bivše FAGG Univerze v Ljubljani, sedaj zaposleni na Tehniški univerzi v Trstu, predvsem za njeno pomoč pri prehodu na visokošolski in podiplomski študij. Ker naša Darinka žal zaradi poškodbe danes ne more prisostvovati tej slovesnosti, izročamo plaketo sinu mag. Tadeju, hkrati pa želimo Darinki skorajšnjega okrevanja. Iskrene čestitke!

Prof. dr. Adolfu SCHUBU, iz TU München, podeljuje FG plaketo za sodelovanje v znanstveno-raziskovalnih projektih in projektu Tempus, prek katerega je dobila naša fakulteta najsodobnejšo računalniško opremo. Iskreno čestitamo!

Ob tej priložnosti bi se rad zahvalil vsem tistim, predvsem tako imenovanim zaporožcem, ki so postavili temelje naši fakulteti.

Da smo danes v tej lepi zgradbi, gre zahvala tudi našemu dragemu prof. Borutu Pečenku, ki je prerano izgorel ob preobilnem ustvarjalnem delu. Zato se tukaj zahvaljujem s tem šopkom njegovi soprogi gospe Lidiji Pečenko.

Hvala našim sodelavcem in diplomantom, ki so ponesli ime naše fakultete doma in v svetu.

Hvala vsem govornikom za prisrčne besede, darila in lepe želje.

Hvala vsem dobrotnikom iz gospodarstva, ki so nam materialno omogočili to proslavo.

Hvala pihalnemu orkestru KUD Pošta Maribor in njegovemu dirigentu g. Ervinu Hartmanu ter Akademskemu pevskemu zboru Maribor in njegovemu zborovodji g. Simonu Robinsonu, da so ustvarili našo proslavo res svečano.

Hvala vsem, ki so pomagali skrbno pripraviti to prireditev in hvala vsem vam, ki ste prišli in ste s svojo prisotnostjo počastili naš zgodovinski praznik!

ACKNOWLEDGEMENTS of the Faculty Dean

In the name of the colleagues of the Faculty of Civil Engineering and in my own name I express my thanks to the:

Rector magnificus for announcing the establishment of our Faculty and for conferring me the insignia.

Having been inaugurated, allow me, dear friends, that in thanks of it I attend to a pleasant duty and confer the first acknowledgements of the Faculty approved by the Faculty Council to the following professors for their long-year cooperation in the paedagogical and research process:

Prof. Egon ŽITNIK for his humane, unselfish and fruitful work in the promotion of our institution from its beginnings to the present moment. He is awarded a golden decoration. My sincere congratulations.

Prof. Dr. Darinka BATTELINO, a professor at the former Faculty of Civil Engineering and Geodesy of the University of Ljubljana, and now employed at the Technical University in Trieste, for her help in creating four-year and post-graduate studies. As Prof. Batellino could not have attended our celebration today due to health problems, I shall hand a

decoration over to her son. We wish Prof. Batellino a quick recovery. Sincere congratulations.

Prof. Dr. Adolf SCHUBA, of the Technical University in Munich, for his cooperation in scientific research and the Tempus project through which our Faculty obtained the newest computer equipment, is awarded a decoration. Sincere congratulations.

I would like now to take the opportunity and thank to all those who have laid the foundations of our Faculty.

That we can be in this beautiful building today, thanks are due to our dear Prof. Borut Pečenko who wore himself out in his excessive creative work. Allow me to express thanks and hand this bunch of flowers to his spouse Lidija Pečenko.

Thanks to all collaborators and graduate students who have spread the name of our Faculty at home and abroad.

Thanks to all speakers for their hearty words, presents and good wishes.

Thanks to all sponsors from the industry who financially supported this celebration.

Thanks to the Brass Orchestra of the Maribor Post Office and the conductor Ervin Hartman, and to the Maribor Academic Choir and the conductor Simon Robinson for adding to the solemn atmosphere at this celebration.

Thanks to all who have helped to organize this celebration, and to all the present who have graced with their attendance this historical festive day.

POZDRAV ŠTUDENTA PRODEKANA OB PROMOCIJI FAKULTETE ZA GRADBENIŠTVO



Spoštovani:

- magnificienca rektor,
- dekani spektabiles,
- gospoda ministra,
- gospod župan,
- akademski zbor,
- gospe in gospodje,
- kolegice in kolegi!

Tudi če ne bi vedel, kaj beseda inavguracija pomeni in bi le opisal slovesen občutek, ki me v tem trenutku preveva, bi zadel bistvo. Ustoličenje fakultete, podelitev časti gospodu dekanu, insignije in slovesnost, ki jo doživljamo tudi študentje, dajejo današnjemu dnevu posebno obeležje. Prav zato lahko trdim, da je naša generacija srečna. Fantje smo še služili jugoslovanski vojski, pa vendar študiramo v samostojni Sloveniji – prvič v zgodovini slovenskega naroda in čeprav smo vpisali študij na Tehniški fakulteti, bomo zaključili na samostojni Fakulteti za gradbeništvo – prvič v zgodovini mariborske univerze. In prvič v zgodovini te univerze smo študentje dobili prekrasno športno dvorano.

Mi in študentje, ki so vpisali študij gradbeništva za nami, vemo, zakaj smo se odločili za ta študij. Čeprav je zahteven, imamo veliko možnosti medštudijskih povezav z drugimi znanstvenimi področji, tudi zato, ker se pod isto streho združuje več fakultet tehniških znanosti. Lahko se tudi obštudijsko udeležujemo in sočasno najdemo čas tudi za tisto, kar nas še posebej osrečuje.

Današnji dan in promocija Fakultete za gradbeništvo bosta gotovo zapisana v analih kronistov in zgodovinarjev in mi vsi bomo nevidni del teh zapisov. Le kako se kot študent ob tem trenutku ne bi počutil slovesno? In ker fakulteto posebljajo ljudje, mi dovolite, da v imenu študentov in v svojem imenu iskreno čestitam prvemu dekanu Fakultete za gradbeništvo, prof. dr. Traunerju, zato, ker je prvi in prvi mož tako pomembne univezitetne institucije, celotnemu akademskemu zboru in vsem kolegicam in kolegom gradbenikom.

Prodekan študent FG
Igor Pšunder

Honourable:

Rector magnificus

Decani spectabiles

Ministers

Mayor

Academic Choir

Ladies and Gentlemen

Even if I did not know the meaning of the word inauguration and would only describe the solemn feeling I am experiencing in this moment, I would keep to the very point of it. The inauguration of the Faculty, conferring the honours and the insignia to the dean, and the celebration in which also student are participating give to this day a special meaning. That is why our generation can be claimed to be happy. Young men who have served in the Yougoslav army are now studying

in the independent Slovenia – for the first time in the history of Slovene nation; and although we have enrolled at the Faculty of Technical Sciences, we will finish our studies at the independent Faculty of Civil Engineering – for the first time in the history of the Maribor University. Even more: we, the students, have obtained a beautiful Sports Hall – also for the first time in the history of this University.

Our generation and the students who have enrolled in civil engineering courses after us know why we have chosen this study program. Although it is demanding, we have numerous possibilities of study links with other scientific fields, also because more faculties of technical sciences are located under the same roof. We can also participate in extracurricular activities and be engaged in what makes us especially happy.

This day and the promotion of the Faculty of Civil Engineering will be written in the annals of chroniclers and historians and we will be an invisible part of these records. How could a student in this moment not feel in high spirits? And because faculty means people, allow me to congratulate in the name of the students and in my own name to the first dean of the Faculty of Civil Engineering, Prof. Dr. Trauner, because he is the first man and the first right man at the head of such an important university institution, to the academic staff and all colleagues in civil engineering.

Prodean: student F. of. C. E.
Igor Pšunder

(The following text is a mirrored bleed-through from the reverse side of the page and is largely illegible due to the quality of the scan and the nature of the bleed-through.)

SINTEZA KONSTRUKCIJ

UDK 624.2 + 624.041 + 519.87

STOJAN KRAVANJA, ZDRAVKO KRAVANJA, BRANKO S. BEDENIK

POVZETEK

V članku predstavljamo sintezo konstrukcij. Sinteza konstrukcij 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. Tudi dimenzije in ostali projektni parametri morajo biti izračunani. V članku opisujemo sintezo, ki temelji na optimizacijski metodi mešano-celoštevilskega nelinearnega programiranja (MINLP). Poleg različnih MINLP metod in strategij smo v članku tudi predstavili sintezo konstrukcije kotalne zapornice Intake Gate, Aswan.

SYNTHESIS OF STRUCTURES

SUMMARY

The paper describes the synthesis of structures. The synthesis of mechanical structures comprises the generation and the selection of different structure alternatives as well as a decision on which structure elements integrate the structure and how they should be interconnected. The sizes and other parameters should be determined, too. The synthesis described in the paper is performed by Mixed-Integer Nonlinear Programming approach (MINLP). Beside MINLP methods and strategies, also a practical example of the synthesis of the three-element hydraulic steel gate structure Intake Gate in Aswan is presented.

1. UVOD

Vsako aktivnost na področju optimiranja 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, pa čeprav temelji na nepopolnih začetnih informacijah. Za razliko od analize konstrukcij, kjer konstrukcijo naknadno, ko že imamo njeno obliko, preverjamo na nosilnost, stabilnost, dopustne napetosti in deformacije, pri sintezi konstrukcij računski preveritev konstrukcije poteka sočasno in avtomatsko z generiranjem in selekcioniranjem konstrukcijskih alternativ, katerih vsaka vsebuje različno število in konfiguracijo konstrukcijskih elementov, njihovih medsebojnih razdalj in dimenzij.

Sinteza konstrukcij v splošnem temelji na treh med seboj različnih pristopih:

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

V tem članku se bomo ukvarjali z optimizacijskim pristopom k sintezi konstrukcij. Ta pristop je izmed vseh najnovejši in daje najboljše rezultate.

Sinteza konstrukcij vsebuje torej 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. Dimen-

Avtor:

mag. Stojan Kravanja, dipl. inž. gradb., višji raziskovalec in asistent, Fakulteta za gradbeništvo, Smetanova 17, 62000 Maribor

Soavtorja:

dr. Branko Bedenik, dipl. inž. gradb., izredni profesor, Fakulteta za gradbeništvo, Smetanova 17, 62000 Maribor

dr. Zdravko Kravanja, dipl. inž. kem. tehnol., docent, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Smetanova 17, 62000 Maribor

zije in ostali parametri tudi morajo biti izračunani. Prejšnje nakazuje diskretno odločanje o elementih in slednje izračun znotraj zveznega prostora dimenzij in parametrov. Sinteza konstrukcij v osnovi 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).

2. MINLP OPTIMIZACIJSKI PRISTOP K SINTEZI KONSTRUKCIJ

Glede na dejstvo, da je večina problemov v mehaniki in računskem preverjanju konstrukcij nelinearnih, smo za reševanje problemov sinteze konstrukcij izbrali MINLP optimizacijsko metodo. Z MINLP metodo moremo konstrukciji sočasno v enovitem računskem procesu izračunati:

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

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

- *Generacija mehanske superstrukture* različnih konstrukcijskih/topoloških in drugih projektnih alternativ, ki kandidirajo za optimalni rezultat.
- *Razvoj MINLP modelne formulacije*, ki definirano superstrukture postavi v prostor enačb. Poleg zveznih spremenljivk za izračun zveznih dimenzij in parametrov, smo definirali tudi diskretne binarne 0–1 spremenljivke, s katerimi smo opisali potencialni obstoj konstrukcijskih elementov in standardnih dimenzij.
- *Reševanje definiranega MINLP problema* z Modificiranim algoritmom zunanje aproksimacije s sprostitvijo enačb (the Modified OA/ER), Kravanja in Grossmann [1] ter s predlagano Povezano dvofazno MINLP strategijo, ki v sočasnem MINLP optimizacijskem procesu daje optimalno topologijo, standardne dimenzije in zvezne parametre.

Materializacija zgornjih treh aktivnosti je *optimalna konstrukcija*, ki ob definiranemu namenu (npr. najnižji ceni) predstavlja rezultat sinteze po MINLP metodi.

3. GENERIRANJE MEHANSKE SUPERSTRUKTURE

Sintezo konstrukcij po MINLP optimizacijski metodi pričnemo izvajati z generiranjem MINLP superstrukture različnih konstrukcijskih/topoloških in drugih projektnih alternativ, ki se potegujejo za najboljši optimalni rezultat. Medtem ko topološke alternative predstavljajo izbor ustreznih konstrukcijskih elementov in njihovih povezav, projektne alternative navadno vsebujejo standardne dimenzije, različne materiale in obtežbe.

Superstruktura konstrukcije je opisana z množico konstrukcijskih elementov in njihovih vozlišč. Vsaka potencialna konstrukcija/topološka alternativa vsebuje različno število in konfiguracijo konstrukcijskih elementov in vsak element ima lahko več standard-dimenzijskih in materialnih alternativ. Zato je znotraj definirane superstrukture glavni namen najti takšno možno konstrukcijo, ki bo optimalna glede na topologijo, standardne dimenzije, materiale, dimenzije in ostale projektne parametre.

4. MINLP MODELNA FORMULACIJA SUPERSTRUKTURE

Ko smo definirali mehansko superstrukture, nadaljujemo sintezo z razvojem MINLP modelne formulacije. MINLP modelna formulacija nam bo rabila kot temeljni okvir, znotraj katerega bomo modelirali različne konstrukcije v matematično obliko.

4.1. Splošna MINLP modelna formulacija

Splošni nekonvexni in nelinearni diskretno/zvezni optimizacijski problem je formuliran kot MINLP problem (MINLP-G) v obliki:

$$\begin{aligned} \min \quad & z = c^T y + f(x) \\ \text{s.t.} \quad & h(x) = 0 \\ & g(x) \leq 0 \\ & By + Cx \leq b \\ & x \in X = \{x \in R^n : x^{LO} \leq x \leq x^{UP}\} \\ & y \in Y = \{0,1\}^m \end{aligned}$$

kjer je poleg vektorja zveznih spremenljivk x definiran tudi vektor diskretnih binarnih 0-1 spremenljivk y . Poleg nelinearnega izraza $f(x)$ je namenski funkciji dodan še linearen izraz $c^T y$, ki običajno predstavlja stalne stroške. Nelinearne enačbe $h(x) = 0$ in neenačbe $g(x) \leq 0$ kakor tudi spodnje in zgornje meje zveznih spremenljivk x predstavljajo rigorozni sistem pogojnih (ne)enačb. Dodana je tudi množica linearnih enačb in neenačb $By + Cx \leq d$, ki vsebujejo tako zvezne kot diskretne spremenljivke.

4.2. MINLP modelna formulacija mehanske superstrukture

Zgornjo splošno MINLP modelno formulacijo smo priredili

za sintezo konstrukcij, t.j. sintezo mehanskih superstruktur (MINLP-SMS). Rezultirajočo formulacijo predstavljamo v obliki:

$$\begin{aligned} \min \quad & z = c^T y + f(x) \\ \text{s.t.} \quad & h(x) = 0 \\ & g(x) \leq 0 \\ & A(x) \leq a \\ & Ey \leq e \\ & Dy^e + R(x) \leq r \quad (\text{MINLP-SMS}) \\ & Ky^e + L(d^{cn}) \leq k \\ & Py + S(d^{st}) \leq s \\ & x \in X = \{x \in R^n: x^{LO} \leq x \leq x^{UP}\} \\ & y \in Y = \{0,1\}^m \end{aligned}$$

MINLP modelna formulacija mehanske superstrukture vsebuje:

- Definirane so zvezne spremenljivke $x = \{d, p\}$ in diskretne spremenljivke $y = \{y^e, y^{st}\}$. Zvezne spremenljivke so nadalje razdeljene na design spremenljivke $d = \{d^{cn}, d^{st}\}$ in v izvedbene (nondesign) spremenljivke p , kjer podvektorja d^{cn} in d^{st} predstavljata zvezne in standardne dimenzije. Podvektorja binarnih spremenljivk y^e and y^{st} predstavljata potencialni obstoj konstrukcijskih elementov znotraj definirane superstrukture in potencialni izbor njihovih standard-dimenzijskih alternativ.
- Ekonomska namenska funkcija vsebuje stalne stroške v linearnem členu $c^T y$ in dimenzijsko pogojene stroške v izrazu $f(x)$.
- Nelinearne in linearne pogojne enačbe ter neenačbe $h(x) = 0, g(x) \leq 0$ in $A(x) \leq a$ predstavljajo rigorozni sistem oblikovnih, obremenitvenih, napetostnih, deformacijskih, stabilitetnih in drugih enačb, poznanih iz analize konstrukcij.
- Linearne pogojne (ne)enačbe $Ey \leq e$ opisujejo in določajo odnose med diskretnimi spremenljivkami.
- Mešane linearne (ne)enačbe $Dy^e + R(x) \leq r$ vzpostavljajo medsebojne relacije med trenutno izbranimi in obstoječimi konstrukcijskimi elementi (ustrezni $y^e = 1$) in ukinjajo vse zveze med trenutno zavrnjenimi oziroma neobstoječimi elementi (odgovarjajoči $y^e = 0$).
- Mešane linearne (ne)enačbe $Ky^e + L(d^{cn}) \leq k$ definirajo vsakemu izbranemu konstrukcijskemu elementu zvezne design spremenljivke (dimenzije). Le-te obstajajo samo takrat, kadar pripadajoči konstrukcijski element obstaja ($y^e = 1$), drugače padejo v nič.
- Mešane linearne (ne)enačbe $Py + S(d^{st}) \leq s$ definirajo spremenljivke standardnih dimenzij d^{st} . Vsaka standardna dimenzija d^{st} je določena kot skalarni produkt $d^{st} = \sum_{i \in I} q_i y_i^{st}$

med pripadajočim vektorjem diskretnih številskih vrednosti standardnih dimenzij q in vektorjem binarnih spremenljivk y^{st} . Samo ena (optimalna) vrednost je lahko izbrana za vsako standardno dimenzijo: $\sum_{i \in I} y_i^{st} = 1$.

5. REŠEVANJE MINLP PROBLEMA

Zatem ko smo zgenerirali superstrukturo konstrukcije in

jo v skladu z MINLP modelno formulacijo zapisali kot MINLP matematični optimizacijski model, sintezo konstrukcije zaključujemo z reševanjem definirane MINLP problema. Reševanje obsega razvoj, izbor ter uporabo primernih MINLP algoritmov in strategij.

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

- *Nonlinear Branch and Bound* algoritem, NBB, predložen in uporabljen s strani mnogih avtorjev, npr. Beale [2], Gupta and Ravindran [3];
- *Sequential Linear Discrete Programming* metoda, SLDP, avtorja Olsen in Vanderplaats [4];
- *Extended Cutting Plane* metoda, ECP, Westerlund in drugi [5];
- *Generalized Benders Decomposition*, GBD, Benders [6], Geoffrion [7];
- *Outer-Approximation/Equality-Relaxation* algoritem, OA/ER, avtorja Kocis in Grossmann [8]; in
- *Feasibility Technique*, avtorja Mawengkang in Murtagh [9].

5.1. Modificirani OA/ER algoritem

Algoritem zunanje aproksimacije s sprostivjo enačb, OA/ER, je trenutno najučinkovitejši algoritem za reševanje obsežnih in izrazito nelinearnih problemov. Primerjave z ostalimi algoritmi so pokazale, da OA/ER algoritem porabi neprimerno manj glavnih MINLP iteracij in hitreje skonvergira k optimalni vrednosti kot NBB, ECP ali GBD metode.

OA/ER algoritem se sestoji iz zaporednega izvajanja nelinearnega programiranja (NLP) ter mešano-celoštevilskega linearnega programiranja (MILP). Z NLP ob nespremenljivem vektorju binarnih spremenljivk in s tem pri držani topologiji izvajamo zvezno optimiranje parametrov (dimenzij) konstrukcije, z MILP pa za linearno aproksimacijo celotne superstrukture izračunamo novo (optimalnejšo) topologijo in standardne dimenzije oziroma nov vektor binarnih spremenljivk. NLP in MILP fazi ponavljamo vse do zadostitve konvergenčnega pogoja: račun ustavimo takrat, kadar postane MILP rezultat slabši od najboljšega NLP rezultata. Če je problem nekonvexen, računanje ustavimo, ko se NLP preneha izboljševati.

Tako OA/ER algoritem kakor tudi vse ostale MINLP metode v splošnem ne zagotavljajo, da je najdena rešitev globalni optimum. Prisotnost nekonvexnih funkcij v modelu namreč lahko odreže globalni optimum. Da bi zmanjšali nezaželeni učinek nekonvexnosti, sta Kravanja in Grossmann izdelala modificirani OA/ER algoritem (the Modified OA/ER) [1], 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.

5.2. MINLP strategije za mehanske probleme

Nedavno smo razvili dve MINLP strategiji za srednje velike optimizacijske probleme mehanike. Prva strategija je *Dvofazna MINLP strategija*, s katero izvajamo optimiranje topologije in standardnih dimenzij ločeno v dveh fazah, glej Kravanja in drugi [10]. Ta strategija potrebuje dvakrat večje število glavnih MINLP iteracij, da skonvergirata 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 [11]. Ta strategija izkazuje slabo konvergenco za velike MINLP probleme, ki velikokrat postanejo nerešljivi.

Za reševanje velikih problemov smo razvili *Povezano dvofazno MINLP strategijo* kot kombinacijo prej omenjenih dveh strategij. Na začetku optimiramo samo topologijo, medtem ko standardne dimenzije začasno relaksiramo v zvezne parametre. Optimiranje topologije in zveznih parametrov je kombinatorično neprimerno lažje rešljivo in hkrati akumulira precej boljšo glavno linearno aproksimacijo superstrukture v primerjavi z enofazno strategijo. Ko najdemo optimalno topologijo, standardne dimenzije ponovno vzpostavimo. Sočasno optimiranje topologije, parametrov in standardnih dimenzij nadaljujemo na podlagi dobljene glavne linearne aproksimacije, dokler ne dosežemo optimalni rezultat.

6. SINTEZA KONSTRUKCIJ, DA BI DOSEGLI OPTIMALNI EKONOMSKI REZULTAT

Pri izvajanju sinteze konstrukcij moramo definirati namen sinteze. Generiranje in selekcioniranje konstrukcijskih elementov ter izračun optimalnih dimenzij ne more biti samo sebi namen, temveč se mora izvajati z natančno določenim ciljem. Tako v optimizacijskem modelu konstrukcije z namensko funkcijo definiramo namen optimiranja. Največkrat je namen sinteze in optimiranja minimiziranje lastnih izdelavnih stroškov ali teže mehanske strukture, pa tudi maksimiranje prodajne cene ali profita mehanske strukture, itd. Če z namensko funkcijo definiramo ekonomske parametre, govorimo, da smo definirali ekonomsko namensko funkcijo.

Ekonomsko namensko funkcijo strukturiramo glede na različne delovne in materialne stroške ter storitve. V odvisnosti od spreminjanja odnosov med stroški, to je od favoriziranja ali zanemaritve nekaterih stroškov v primerjavi z drugimi, bo odvisen optimalni rezultat, ki običajno ne prinese samo drugačno cenovno vrednost, pač pa tudi drugačno topologijo in dimenzije. Tako bi na primer optimiranje teže konstrukcije sicer prineslo najmanjšo možno težo konstrukcije pri danih oblikovnih, napetostnih,

deformacijskih, stabilitetnih in drugih pogojih, vendar bi bila dobljena cena zaradi več opravljenega dela visoka. Enako bi optimiranje samo delovnih stroškov in storitev prineslo drago konstrukcijo z veliko maso uporabljenega materiala. Najboljši ekonomski rezultat bomo dosegli takrat, kadar bomo pri upoštevanju vseh danih pogojev v namensko funkcijo definirali čim večje število različnih stroškovnih parametrov in jih hkrati upoštevali pri sintezi oziroma optimiranju.

7. SINTEZA KONSTRUKCIJE ZAPORNICE INTAKE GATE

V Laboratoriju za analizo konstrukcij pri Fakulteti za gradbeništvo, Maribor, se s sintezo konstrukcij ukvarjamo zadnjih pet let. Največ smo se ukvarjali s sintezo konstrukcij tablastih zapornic hidrotehnike. Njihov optimizacijski model je nekonveksen, izrazito nelinearen in kot takšen zelo primeren za raziskovanje.

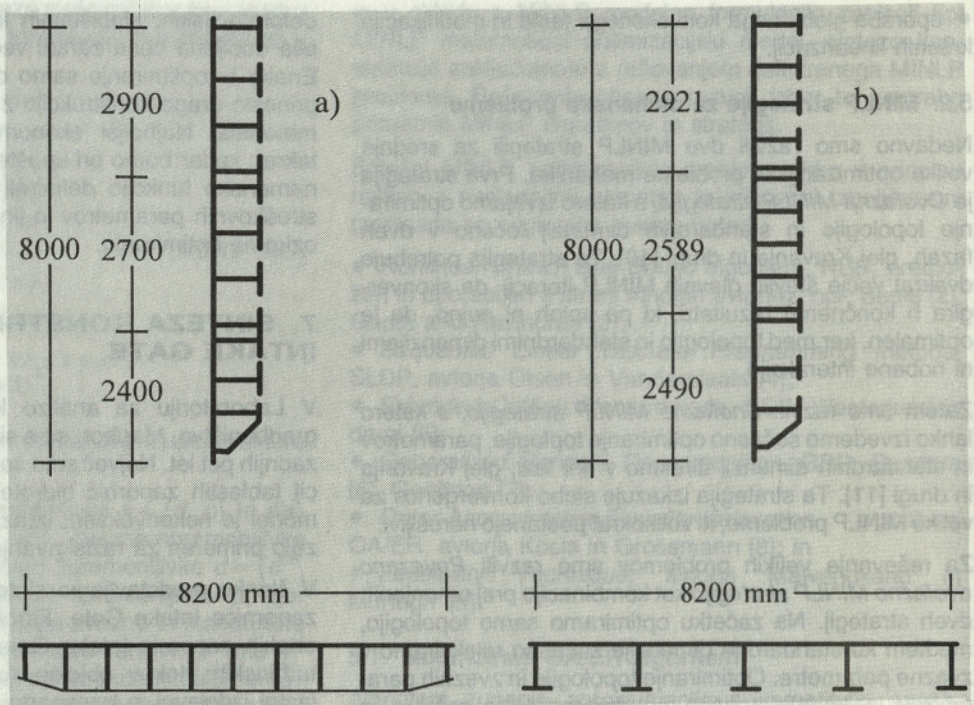
V članku predstavljamo sintezo celotne tridelne kotalne zapornice Intake Gate. Firma Metalna je izdelala osem enakih zapornic Intake Gate iz jekla St 44-2 za osem turbinskih vtokov objekta Aswan, Egipt [10]. Dejanski lastni izdelavni in transportni stroški znašajo 70518 \$ na zapornico z dejansko topologijo 4-4-4/11 (4 horizontalni nosilci za vsak glavni zapornični element in 11 vertikalnih nosilcev za celotno zapornico), glej sliko 1a.

Najprej smo zgenerirali superstrukturo konstrukcije zapornice, v kateri so vse možne konstrukcijske alternative podane z variiranjem topologije med 4 in 6 horizontalnimi nosilci za vsak glavni zapornični element in 5 do 9 vertikalnimi nosilci za celotno zapornico. 11 standard-dimenzijskih alternativ smo definirali za vse konstrukcijske elemente upoštevajoč standardne debeline jeklenih pločevin od 10 do 40 mm. Upoštevali smo material St 44-2.

Razvili smo matematični optimizacijski model za jeklene tablaste zapornice hidrotehnike GATOP (GATe OPTimization). Model smo zapisali v višjem algebrskem modelnem jeziku GAMS, glej Brooke in drugi [12]. V modelu smo definirali ekonomsko namensko funkcijo superstrukture tablaste zapornice. Sestavljajo jo parametri lastnih izdelavnih stroškov zapornice, kot so stroški materiala, varjenja, rezanja pločevin, antikorozijske zaščite ter transportni stroški.

Sintezo konstrukcije zapornice smo izvršili z lastnim računalniškim programskim paketom TOP (Topology Optimization Program) [10], ki predstavlja orodje optimizacijskih tehnik, kot sta Modificirani OA/ER algoritem in Povezana dvofazna MINLP strategija. Program MINOS, glej Murtagh in Saunders [13], rešuje NLP podprobleme, OSL [14] pa glavne MILP probleme.

Dosegli smo optimalen rezultat 49783 \$ pri dobljeni topologiji 4-5-5/5 (glej sliko 1b). Ta rezultat predstavlja 29.4 % čistega profita v primerjavi z dejansko konstrukcijo, dobljeno po klasični metodi z analizo konstrukcije. Za doseg tega rezultata smo potrebovali 5 MINLP iteracij in 293 sekund CPU na VAX 4100.



Slika 1. Konstrukcija zapornice Intake Gate, vertikalni in horizontalni prerez
 a) dejanska topologija 4-4-4/11, b) optimalna topologija 4-5-5/5, 29.4 % profita

8. SKLEP

Sintezo konstrukcij izvajamo po MINLP optimizacijski metodi. MINLP metoda sočasno izvaja optimiranje topologije, zveznih parametrov in standardnih dimenzij v enovitem računskem procesu. Za reševanje velikih problemov smo uporabili modificirani OAVER algoritem in Povezano

dvofazno MINLP strategijo. Prikazali smo primer sinteze konstrukcije kotalne zapornice Intake Gate, Aswan. Dobljeni primerjalni rezultati kažejo, da sinteza konstrukcije zapornice daje okoli 29.4 % čistega profita v primerjavi z dejansko ceno vgrajene zapornice, dobljene s klasično metodo analize konstrukcije.

LITERATURA

1. Kravanja, Z. in Grossmann, I.E., New Developments and Capabilities in PROSYN – An Automated Topology and Parameter Process Synthesizer, *Computers chem. Engng*, 1994, 18(11/12), pp. 1097–1114.
2. Beale, E.M.L., *Integer Programming. The State of the Art in Numerical Analysis*, ed D. Jacobs, pp. 409–448, Academic Press, London, 1977.
3. 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.
4. Olsen, G.R. in Vanderplaats, G.N., *Method for Nonlinear Optimization with Discrete Design Variables*, *AIAA Journal*, 1989, 27(11), pp. 1584–1589.
5. Westerlund, T., Pettersson, F. in Grossmann, I.E., Optimization of pump configurations as a MINLP problem, *Computers chem. Engng.*, 1994, Vol. 18(9), pp. 845–858.
6. Benders, J.F., *Partitioning Procedures for Solving Mixed-variables Programming Problems*, *Numerische Mathematik*, 1962, 4, pp. 238–252.
7. Geoffrion, A.M., *Generalized Benders Decomposition*, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1972, 10(4), pp. 237–260.
8. Kocis, G.R. in Grossmann, I.E., *Relaxation Strategy for the Structural Optimization of Process Flowsheets*, *Ind. Engng Chem. Res.*, 1987, 26, pp. 1869–1880.
9. Mawengkang, H. and Murtagh, B.A., *Solving Nonlinear Integer Programs with Large-Scale Optimization Software*, *Annals of Operations Research*, 1986, 5, pp. 425–437.

10. Kravanja, S., Kravanja, Z., Bedenik, B.S. in Faith, S., Simultaneous Topology and Parameter Optimization of Mechanical Structures, in Numerical Methods in Engineering '92 (ed Ch. Hirsch et al.), pp. 487–495, Proceedings of the First European Conference on Numerical Methods in Engineering, Brussels, Belgium, 1992, Elsevier, Amsterdam, 1992.
11. 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.
12. Brooke, A., Kendrick, D. in Meeraus, A., GAMS – A User's Guide, Scientific Press, Redwood City, CA, 1988.
13. Murtagh, B.A. in Saunders, M.A., MINOS User's Guide, Technical Report SOL 83–20, System Optimization Laboratory, Department of Operations Research, Stanford University, 1985.
14. OSL, Optimization Subroutine Library, From IBM, Release 2.

UNIVERZA V MARIBORU**FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO**

MERITVE LASTNEGA NIHANJA NA OBJEKTU KOROŠKI MOST V MARIBORU

UDK 624.21:624.04

MATJAŽ SKRINAR, ANDREJ ŠTRUKELJ

P O V Z E T E K

Objekt Koroški most zagotovo predstavlja eno največjih investicij, tako finančno kakor tudi fizično, ki se trenutno gradijo v Mariboru. Ker gre za tehnološko zelo zahteven objekt, je projektantska organizacija, na čelu z odgovornim projektatnom, zahtevala dodatno spremljanje obnašanja konstrukcije med gradnjo s pomočjo meritev dinamičnih karakteristik. Rezultati meritev služijo za kontrolo izbranega računskega modela, kakor tudi za kontrolo celotne izvedbe del. Izvedbo meritev, katerih financer je Mestna občina Maribor, smo prevzeli v laboratoriju TEKANKO na Fakulteti za gradbeništvo v Mariboru.

Avtorja:
mag. Matjaž Skrinar, mag. Andrej Štrukelj, FG Maribor

MEASUREMENTS OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE NEW KOROŠKA BRIDGE IN MARIBOR

S U M M A R Y

The construction of the new Koroška bridge that is currently being constructed in Maribor represents one of the largest investments not only in the financial but also in the physical sense. The responsible project engineer has demanded, due to the complexity of the construction, additional monitoring of the structure's behaviour during construction works. Such supervision is performed by measurements of the dynamic characteristics. The results of the investigation serve both for the control of the chosen mathematical model and for the control of the precision of the executed works. The measurements are financially supported by the Community of Maribor and performed by the laboratory TEKANKO at the Faculty of Civil Engineering in Maribor.

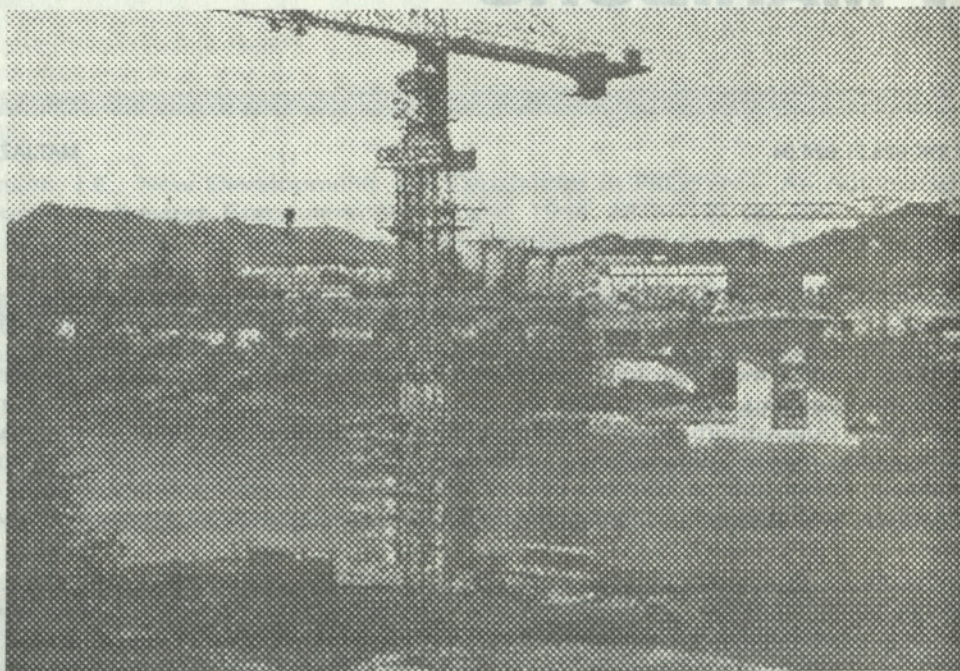
UVOD

V Mariboru poteka gradnja novega mostu (slika 1). Ker je Koroški most tako v konstrukcijskem kot tudi v tehnološkem smislu zelo zahteven objekt, so bile v projektne biroju PONTING poleg tehnične dokumentacije izdelane tudi natančne študije obnašanja mostu v vseh fazah gradnje. Odgovorni projektant projekta Koroški most, Marjan Pipenbaher, se je ne glede na to odločil še za dodatno spremljanje obnašanja konstrukcije med gradnjo s pomočjo meritev dinamičnih karakteristik mostu in sprotne primerjave izmerjenih vrednosti s pričakovanimi. Rezultati posameznih meritev bodo rabili tako za kontrolo izbranega računskega modela kakor tudi za kontrolo celotne izvedbe del. Financer meritev je Mestna občina Maribor. Izvedbo meritev smo prevzeli v Laboratoriju za teoretično in eksperimentalno analizo konstrukcij TEKANKO na Fakulteti za gradbeništvo v Mariboru.

OSNOVNI PODATKI O MOSTU PO PROJEKTI DOKUMENTACIJI

Koroški most je sestavljen iz dveh samostojnih, vendar enakih ločenih mostov. Vsak od njiju predstavlja asimetrični prostorski okvir. Element posamezne konstrukcije tvorijo: vzdolžno omejeno prednapeta betonska škatla spremenljive višine (2,80 m do 7,50 m), dve vmesni podpori in masivna krajna opornika. Celotna dolžina mostu znaša 237 m (56,0 m + 110,0 m + 71,0 m).

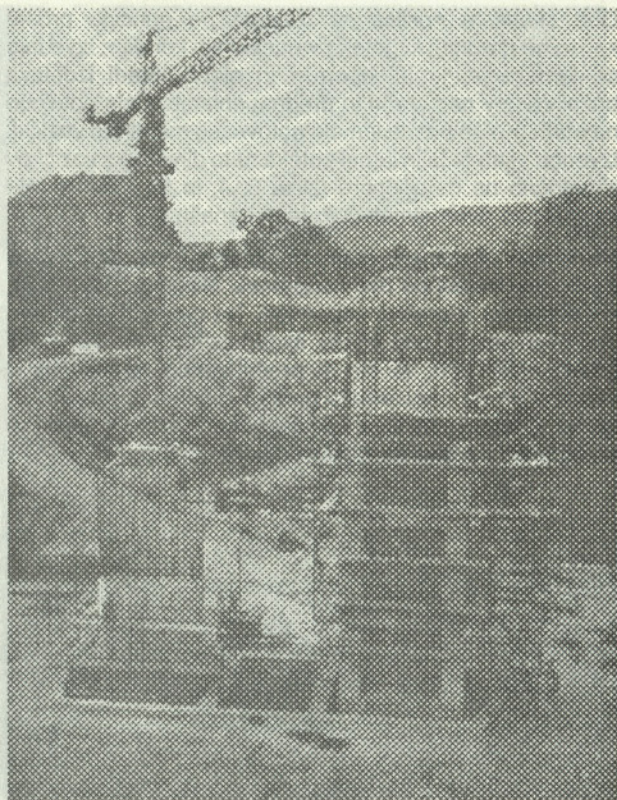
Voziščni plošči sta široki 11,20 m. Njuna debelina se spreminja od 20 cm na robu konzolnega dela, do 40 cm ob stojini škatle. Vmesna dela pa imata debelino 30 cm. V prečni smeri sta plošči armirani klasično z rebrasto armaturo. Dimenzionirani sta tako, da širina karakteristične razpoke po EC 2 ne presega 0,20 mm. Stojini škatle, ki sta sicer konstantne debeline 50 cm, se v



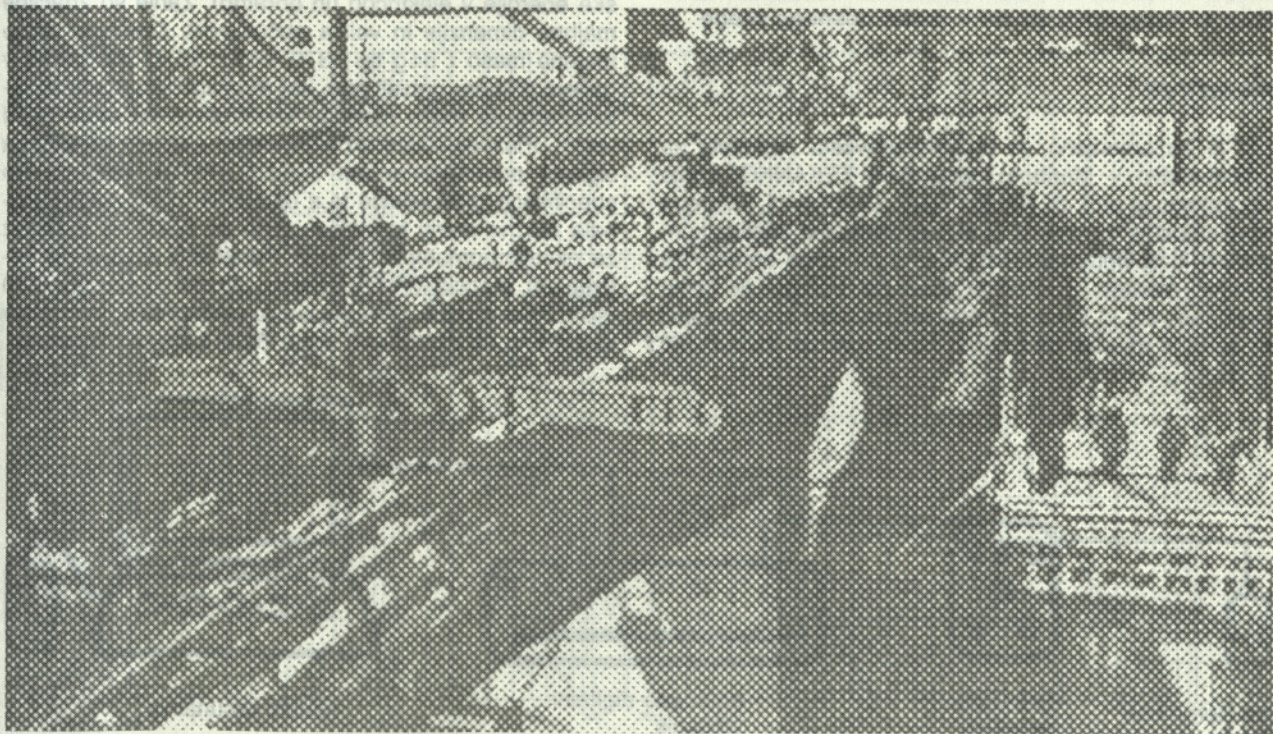
Slika 1. Prvi del Koroškega mostu ob zaključku proste konzolne gradnje z levega brega.

območju podpor odebelita na 60 cm nad levim stebrom oziroma 100 cm nad desnim stebrom. Ojačitve s prečniki nad podporami zagotavljajo zvezen prenos obtežbe na stebre in povečujejo torzijsko togost škatle. Oba škatlasta nosilca sta prednapeta s kablji LH 12 × 0,6, ki se napenjajo v skladu z napredovanjem proste konzolne gradnje in potekajo znotraj betonskega prereza. Po izvedbi vezne lamele se poleg kablov, ki potekajo znotraj betonskega prereza, napnejo še dodatni kablji, ki potekajo zunaj betonskega prereza. Injektiranje se izvaja sproti takoj po napenjanju kablov.

Škatlasta zgornja konstrukcija okvira je togo vpeta v obe vmesni podpori, ki ju predstavljata betonska stebra. Togost stebra na levem bregu Drave je bistveno večja od stebra ob desnem bregu, zato predstavlja leva podpora glede na to, da so podpore na krajnih opornikih drsne, center horizontalnih pomikov. Levi steber ima votli prerez pravokotne oblike dimenzij 6,0 × 4,5 m z debelino sten 80 in 60 cm. Vpet je v pilotno blazino. Temeljenje je globoko na 27 uvrtnih pilotih debeline 150 cm, ki segajo najmanj 4,5 m v kompakten lapor, ki se nahaja pod obrežnim prodom. Desni steber ima prerez elipsaste oblike 5,20 × 1,50 m in je vpet v vodnjak dimenzij 8,0 × 8,0 m, ki sega ca. 2,0 m v trden lapor. Krajna opornika sta globoko temeljena na sedmih uvrtnih pilotih premera 125 cm. Pred izvedbo temeljenja je bil na mestu, kjer se je kasneje izvajalo pilotiranje oziroma temeljenje z vodnjakom, izveden začasni utrjeni nasip, ki bo po končani gradnji odstranjen. V času gradnje se zraven stebrov ob desnem bregu Drave izvedejo pomožni stebri, ki zagotavljajo večjo stabilnost konstrukcije v fazi gradnje, in bodo po končani gradnji odstranjeni (slika 2).



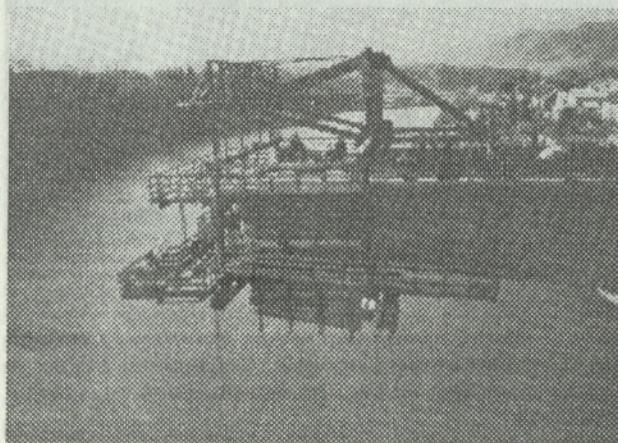
Slika 2. Stebra na desnem bregu, temeljena v vodnjaku, v ozadju obrežni opornik. Ob desnem steburu je viden pomožni steber, ki bo po končani gradnji odstranjen.



Slika 3. Simetrična konzolna gradnja

Oba škatlasta nosilca se izvajata po principu proste konzolne gradnje, ki poteka v naslednjih korakih: Izvedejo se temeljenje, krajni oporniki in stebri. Sledi izdelava baznih delov nad stebri in prednapenjanje. Dela potekajo na odrih. Ko so bazne lamele gotove, se montirajo vozički. Izvedba vseh ostalih lamel poteka nato direktno z vozičkov simetrično na os podpore (slike 3, 4, in 5). Delovni takt za izvedbo dveh simetričnih lamel znaša sedem dni.

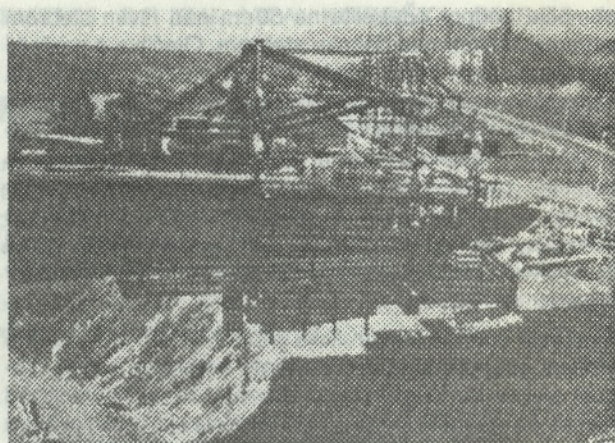
Na levem obrežnem krajnem oporniku sta pod vsako škatlo predvideni po dve neoprenski ležišči 500/600/174, ki sta sidrani in prečno nepomični. Na desnem obrežnem oporniku pa sta pod vsako škatlo predvideni dve drsni ležišči NGe 300, ki sta v prečni smeri nepomični, v vzdolžni pa ne prevzemata praktično nobenih horizontalnih sil. Dilatacije na levem in desnem obrežnem oporniku se vgradijo po izvedbi konstrukcije.



Slika 4. Napredovanje del v smeri desnega brega

MERITVE

Kot je že omenjeno, je meritve prevzela Fakulteta za gradbeništvo v Mariboru, laboratorij TEKANKO, vodja laboratorija je prof. dr. Andrej Umek. Laboratorij, katerega specialnost je teoretična in eksperimentalna analiza konstrukcij in optimizacija, razpolaga s potrebno opremo za izvedbo meritev. Poglavitna prednost opreme je njena mobilnost, saj jo je moč enostavno prenesti in usposobiti za sprotne meritve na terenu. Mednjo sodijo instrumenti

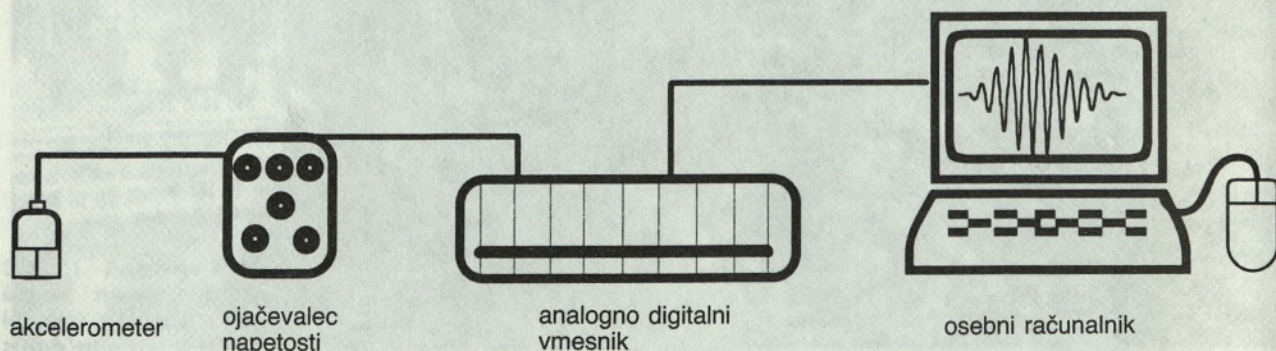


Slika 5. Napredovanje del proti levemu bregu

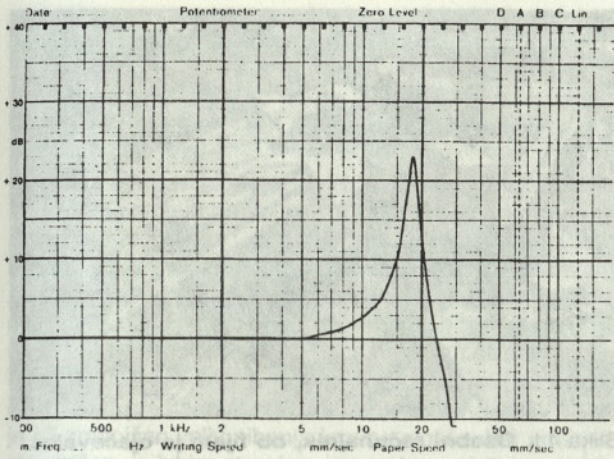
za meritve fizikalnih količin, instrumenti za zajemanje in registracijo podatkov, oprema za krmiljenje in oprema za obdelavo podatkov.

Za registracijo fizikalne količine smo uporabili akcelerometre (pospeškometre). To so instrumenti, ki jih pri dinamičnih preiskavah konstrukcij najpogosteje uporabljamo. Kot pove že samo ime, merijo pospeške v izbrani točki. V dinamiki konstrukcij pospeški običajno ponujajo več informacij kot pomiki ali hitrosti.

Uporabili smo različne vrste piezoelektričnih akcelerometrov Brüel & Kjaer (4370, 8306). Ti delujejo na principu piezoelektričnega efekta, ki predstavlja pretvorbo mehanske energije v električno (in obratno). Zanje so značilne majhne dimenzije in velika občutljivost. Običajno imajo majhno maso (54 g tip 4370, 507 g tip 8306), kar je v našem primeru nebitveno, saj je očitno, da masa akcelerometra na maso merjene konstrukcije ne more imeti vpliva. Piezoelektrični akcelerometri ne dajejo izhodnega signala pri stacionarnem dejstvu vhodne veličine. Po specifikaciji proizvajalca je z ustreznim ojačevalcem signala možno meriti frekvence višje od 0,003 Hz (0,08 Hz za akcelerometer tip 8306). Popačenje odziva pri frekvencah, manjših od 5 kHz, je za akcelerometer tip 4370 (slika 7) enako nič. Oprema je bila pred začetkom meritev kalibrirana na zastopstvu firme Brüel & Kjaer v Sloveniji.

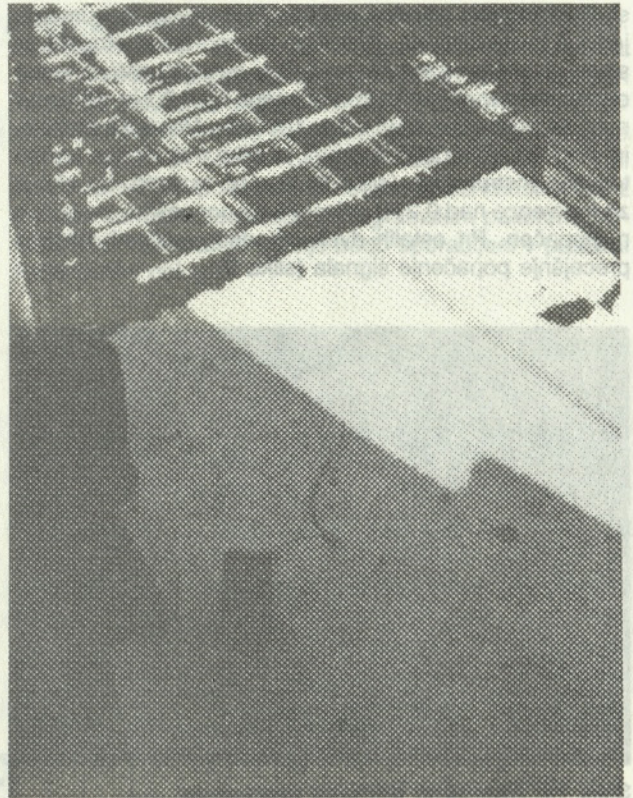


Slika 6. Shema povezave instrumentov

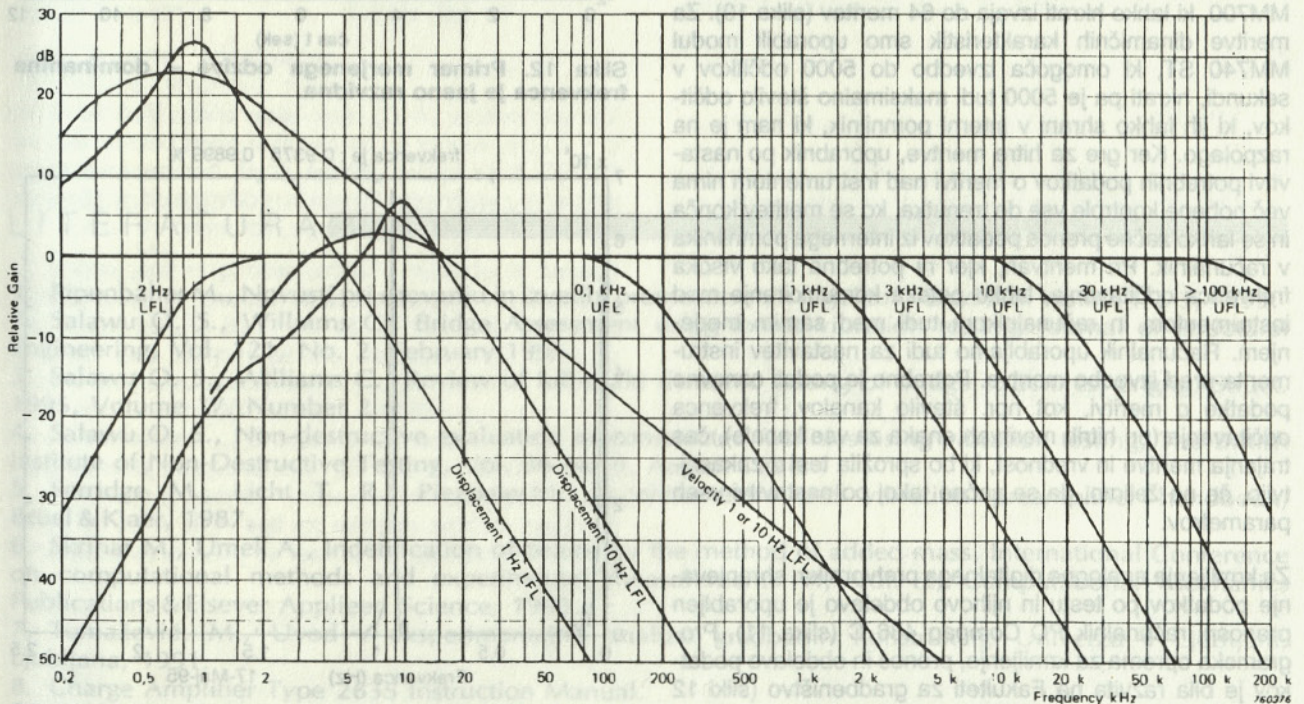


Slika 7. Področje uporabnosti akcelerometra Brüel & Kjaer 4370.

Ojačevalec napetosti je drugi člen verige (slika 8). Uporabljen je bil ojačevalec Brüel & Kjaer tip 2635, namenjen meritvam vibracij s piezoelektričnimi akcelerometri. Njegov teoretični frekvenčni razpon je med 0,1 Hz do 200 KHz. Izhodna veličina so lahko pospeški, hitrosti (enojna integracija) ali pomiki (dvojna integracija), spodnja frekvenčna meja je odvisna od izbrane izhodne veličine (pospeški 0,2 oz. 2 Hz, hitrosti in pomiki 1 oz. 10 Hz). Zgornja frekvenčna meja je lahko 0,1, 1, 3, 10, 30 in > 100 kHz (nastavimo jo glede na pričakovane vrednosti). Na instrumentu izberemo izhodno veličino in pripadajoče enote (pospeški 1 m/s^2 , hitrosti $0,01 \text{ m/s}$, pomiki $0,1 \text{ oz. } 1 \text{ mm}$). Ojačevalec ima vgrajen interni testni oscilator, ki

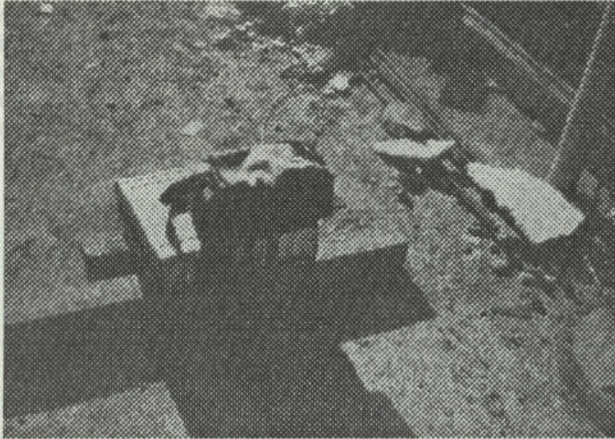


Slika 8. Lokacija akcelerometra. Viden je tudi ojačevalec.



Slika 9. Frekvenčne karakteristike ojačevalca

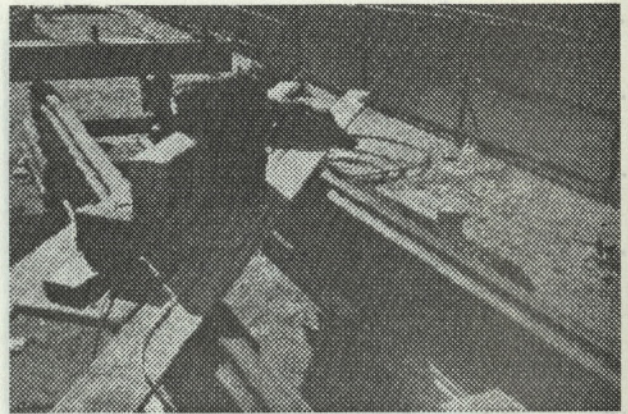
služi za kontrolo izhodne veličine. Občutljivost instrumenta je moč nastavljati, na razpolago imamo devet stopenj, in sicer je lahko razmerje med 0,1 in 1000 mV/ izhodno enoto. Instrument lahko ima razmerja med 0.1 in 1000 mV/ m/s² za pospeške, med 10 in 100000 mV/m/s za pomike, in med 0,1 in 100000 mV/mm. Iz slike frekvenčne karakteristike instrumenta (slika 9) je moč razbrati, da signal za frekvence nad 0,2 Hz pri meritvah pospeškov praktično ni popačen. Pri ostalih dveh izhodnih veličinah nastopi precejšnje popačenje signala (slika 9).



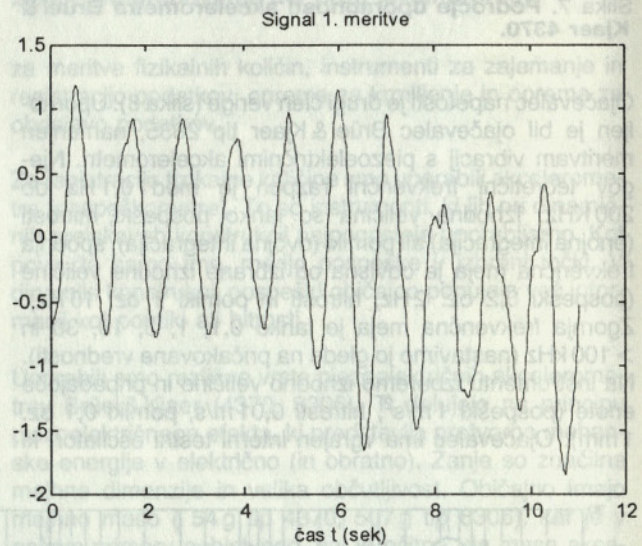
Slika 10. Analogno digitalni pretvornik

Predzadnji člen verige je analogno digitalni pretvornik. Služi za pretvorbo električnega signala v obliko, ki jo lahko najprej shranimo in (nato) obdelamo. Uporabljen je bil analogno digitalni pretvornik Mowlem Microsystem MM700, ki lahko hkrati izvaja do 64 meritev (slika 10). Za meritve dinamičnih karakteristik smo uporabili modul MM740 ST, ki omogoča izvedbo do 5000 odčitkov v sekundi, hkrati pa je 5000 tudi maksimalno število odčitkov, ki jih lahko shrani v interni pomnilnik, ki nam je na razpolago. Ker gre za hitre meritve, uporabnik po nastavitvi potrebnih podatkov o meritvi nad instrumentom nima več nobene kontrole vse do trenutka, ko se meritev konča in se lahko začne prenos podatkov iz internega pomnilnika v računalnik. Pri meritvah, kjer ni potrebna tako visoka frekvenca odčitavanja, lahko poteka komuniciranje med instrumentom in računalnikom tudi med samim merjenjem. Računalnik uporabljamo tudi za nastavitve instrumenta pred izvedbo meritve. Potrebno je podati osnovne podatke o meritvi, kot npr. število kanalov, frekvenca odčitavanja (pri hitrih meritvah enaka za vse kanale), čas trajanja meritve in vrednost, ki bo sprožila test z zakasnitvijo, če ne želimo, da se začne takoj po nastavitvi vseh parametrov.

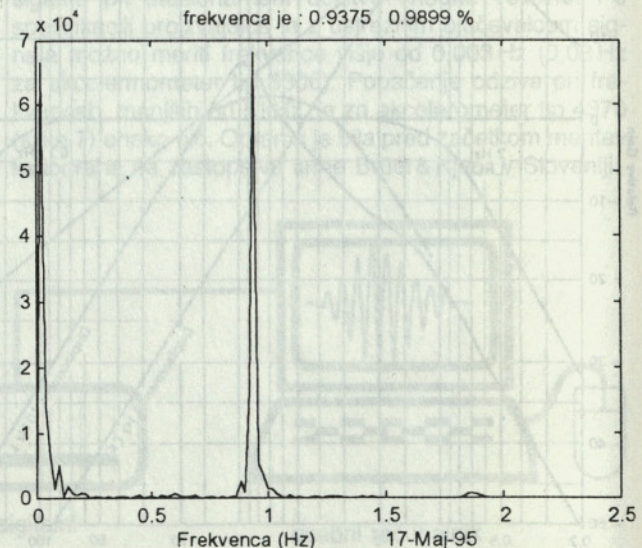
Za krmiljenje analogno digitalnega pretvornika, shranjevanje podatkov po testu in njihovo obdelavo je uporabljen prenosni računalnik PC Compaq 486 C (slika 11). Programska oprema za krmiljenje, prenos in obdelavo podatkov je bila razvita na Fakulteti za gradbeništvo (sliki 12 in 13). Za analizo podatkov je bil za programsko okolje



Slika 11. Osební računalnik, ob njem je ojačevalec.



Slika 12. Primer merjenega odziva – dominantna frekvenca je jasno razvidna.



Slika 13. Spektralna gostota moči signala

izbran programski paket Matlab, ki omogoča tudi enostavno in efektivno grafično predstavitev rezultatov meritev.

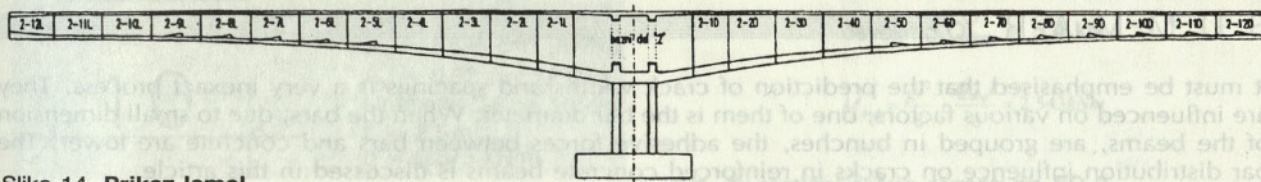
IZVEDBA MERITEV

Opisana meritev ni prva praktična izkušnja laboratorija TEKANKO na tem področju, vsekakor pa je Koroški most doslej največji objekt, na katerem smo meritve izvajali. Izvedli smo štiri začetne meritve, ki so dale koristne podatke, ki bodo služili pri načrtovanju in izvedbi nadaljnjih meritev. Merili smo v štirih različnih fazah gradnje prvega objekta (most bosta sestavljali dve samostojni ločeni enoti) na levem bregu Drave, akcelerometri pa so bili locirani na prostem robu konzole nad stojino (slika 8), da je bil zmanjšan vpliv nihanja krovne plošče. Ker je objekt simetričen, je izbira strani nepomembna – izbrana je bila vedno tista stran, kjer je bilo trenutno manj aktivnosti na objektu. Pred izvedbo prve meritve se je postavljalo vprašanje ustreznega vzbujanja objekta. Meritve so pokazale, da ambientno vzbujanje zadošča za izvedbo meritev, vendar so pomiki zelo majhni. Kot ambientno vzbujanje je služil veter, pa tudi delovni proces na objektu – premiki vozička, sunki, povzročeni s spuščanjem bremen na konstrukcijo ipd.

Ker je gradnja prvega objekta na levem bregu končana, se bodo meritve nadaljevale na sosednjem objektu na isti strani reke Drave. Delovni takt za izvedbo dveh simetričnih lamel bo praviloma sedem dni. Interni plan meritev predvideva izvedbo meritve za vsak simetrični par lamel (slika 15) in začetno meritev baznega dela. Planira se tudi sproti preračun poenostavljenega modela konstrukcije z metodo končnih elementov s programskim paketom COSMOS/M. Rezultati te študije bodo uporabljeni v posebni raziskovalni nalogi.

ZAHVALA

Avtorja se zahvalujeta financerju meritev – Mestni občini Maribor, ki je s financiranjem pokazala visoko stopnjo osveščenosti, kakor tudi vodji gradbišča, g. Dejanu Peršonu in ostalim delavcem, ki so vedno znali poskrbeti, da so instrumenti varno prispeli na mesto meritve.



Slika 14. Prikaz lamel

LITERATURA

1. Pipenbaher M., Novosti pri snovanju in izvedbi premostitvenih objektov, Gradbeni vestnik 1-2-3, 1995.
2. Salawu O. S., Williams C., Bridge Assessment using forced-vibration testing, Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 2, February 1995.
3. Salawu O. S., Williams C., Review of full-scale dynamic testing of bridge structures, Engng. Struct. 1995, Volume 17, Number 2.
4. Salawu O. S., Non-destructive evaluation of constructed facilities using vibration testing, The British Institute of Non-Destructive Testing, Vol. 36 No 8, August 1994.
5. Serridge M., Licht T. R., Piezoelectric accelerometers and vibration preamplifier handbook, Brüel & Kjaer, 1987.
6. Skrinar M., Umek A., Indentification of beams by the method of added mass, International Conference on computational methods and experimental measurements VI, Vol. 2, Computational Mechanics Publications & Elsevier Applied Science, 1993.
7. Tomažević, M., Uvod v eksperimentalno analizo gradbenih konstrukcij, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1991.
8. Charge Amplifier Type 2635 Instruction Manual.
9. Calibration Chart for Accelerometer type 4370 in tip 8306.

VPLIV RAZPOREDITVE ARMATURE NA RAZPOKE ARMIRANOBETONSKIH NOSILCEV

UDK 624.072.2:691.32

PETER DOBRILA, MIROSLAV PREMROV, GORAZD LIPNIK

P O V Z E T E K

Na razdalje med razpokami in tudi odprtine razpok vpliva med drugimi parametri tudi premer armature, saj vemo, da nastanejo tanjše razpoke, če uporabimo tanjšo armaturo. Ker pa nam mnogokrat dimenzije betonskih nosilcev (predvsem širina nosilca) onemogočajo normalno razvrstitev armaturnih palic, jih moramo povezati v svežnje, če želimo zadostiti statičnim zahtevam. V tem primeru so adhezijske sile manjše, kot če je armaturna palica z vseh strani ovita z betonom. Vpliv razporeditve armature na razpoke armiranobetonskih nosilcev obravnava ta prispevek.

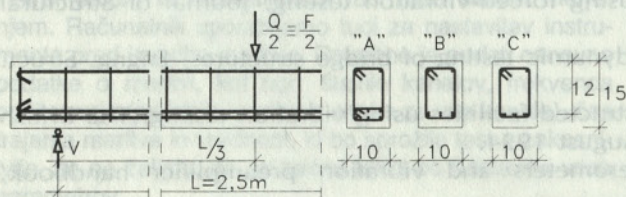
THE BAR DISTRIBUTION INFLUENCE ON CRACKS IN REINFORCED CONCRETE BEAMS

S U M M A R Y

It must be emphasised that the prediction of crack widths and spacings is a very inexact process. They are influenced on various factors, one of them is the bar diameter. When the bars, due to small dimension of the beams, are grouped in bunches, the adhesive forces between bars and concrete are lower. The bar distribution influence on cracks in reinforced concrete beams is discussed in this article.

1. UVOD

Na Tehniški fakulteti v Mariboru, oddelek gradbeništvo, smo analizirali razpoke treh tipov armiranobetonskih prostoležečih nosilcev MB 40. Dimenzije nosilcev znašajo 10/15 cm, dolgi so 2.5 m, armirani s 6 $\varnothing 6$ na različne načine položeno gladko armaturo (slika 1).



Slika 1

Vsi tipi nosilcev (A–C) imajo sicer enako statično višino $d = 12$ cm, vendar pa so zaščitne plasti betona različne. Po EC 2 se vpliv zaščitne plasti betona na razpoke privzame z vrednostjo 50 mm in ni odvisna od razporeditve armaturnih palic. Po PBAB pa, kot vemo, ni tako.

Nosilec je obtežen z lastno težo g in koncentriranima silama $Q/2$ v tretjinskih točkah razpona. Koristno obtežbo smo stopnjevali od 0 do vrednosti Q_1 , pri kateri smo ugotovili prvo razpoko. Ob tej razpoki smo namestili merilec odprtine razpoke (transducer), izmerjene vrednosti pa smo računalniško zajemali. Obtežbo Q smo povečevali do t. i. dopustne obtežbe Q_{dop} , izračunane v točki 2.2 po PBAB in EC 2. Po obeh predpisih je ta vrednost približno enaka. Pri »dopustni« (dejanski) obtežbi so se formirale različne razpoke za tipe A, B in C. Izmerjene odprtine in razdalje ter povesi so prikazani v preglednici

Avtorji:

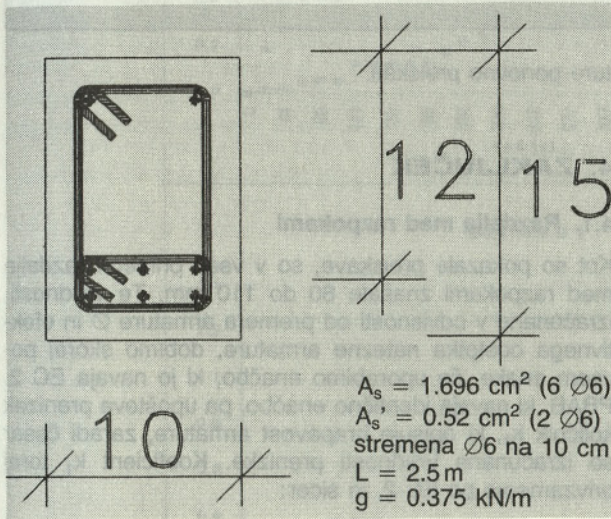
Peter Dobrila, višji predavatelj, mag.
Miroslav Premrov, asistent, d. i. g.
Gorazd Lipnik, asistent, mag.

1. Grafikoni sila-čas, razpoke-čas in sila-razpoke pa so prikazani na sliki 4.

Ko smo analizirali razpoke pri dopustni dejanski obtežbi, smo nadaljevali z obremenjevanjem do porušitve, ki je nastopila zaradi plastifikacije armature. Porušna koristna obtežba je znašala 10–12 kN.

2. DOPUSTNA OBTEŽBA Q_{dop} IN IZRAČUN RAZPOK

2.1. Izračun dopustne obtežbe po teoriji mejnih stanj ULS (LSD)



EC 2: C 32/40*

PBAB: MB 40

* z linearno interpolacijo izračunane vrednosti med C 30/37 in C 35/45

$f_{ck} = 31.88 \text{ MPa}$

$f_c = 40 \text{ MPa}$

$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 21.42 \text{ MPa}$

$f_B = 25.5 \text{ MPa}$

$f_{ct0.05} = 2.08 \text{ MPa}$

$f_{b2s} = 3.6 \text{ MPa}$

$f_{ctm} = 3.01 \text{ MPa}$

$\tau_{rd} = 0.351 \text{ MPa}$

$E_{cm} = 32000 \text{ MPa}$

$E_{b0} = 34000 \text{ MPa}$

Armatura GA 240/360

$f_{yk} = 240 \text{ MPa}$

$\sigma_v = 240 \text{ MPa}$

$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 208.7 \text{ MPa}$

$E_s = 200000 \text{ MPa}$

$E_s = 210000 \text{ MPa}$

$M_d = \gamma_s M_g + \gamma_Q M_Q \leq M_R$ (1)

$M_Q = M_R = \frac{M_R - \gamma_s M_g}{\gamma_Q}$ (2)

$M_R = \frac{bd^2 f_{cd}}{k_b^2}$

$\gamma_g = 1.35 \quad \gamma_Q = 1.5$

$M_R = \frac{bd^2 f_B}{k_b^2}$

$\gamma_g = 1.6 \quad \gamma_Q = 1.8$

$\mu = \rho = \frac{1.696}{12 \cdot 10} = 1.41$

$\bar{\mu} = \mu \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = 0.1374$

$\bar{\mu} = \mu \frac{\sigma_v}{f_B} = 0.133$ (3)

$k_b = 2.805$

$k_b = 2.85$

$M_R = \frac{10 \cdot 12^2 \cdot 2.142}{2.805^2} = 3.92 \text{ kNm}$

$M_R = \frac{10 \cdot 12^2 \cdot 2.55}{2.85^2} = 4.521 \text{ kNm}$

$M_Q = \frac{3.92 - 1.35 \cdot 0.293}{1.5} = 2.35 \text{ kNm}$

$M_Q = \frac{4.521 - 1.6 \cdot 0.293}{1.8} = 2.251 \text{ kNm}$

$Q_{dop} = \frac{6M_Q}{l}$ (4)

$Q_{dop} = 5.64 \text{ kN}$

$Q_{dop} = 5.4 \text{ kN}$

osvojimo $Q_{dop} = 5.4 \text{ kN}$

$M_{dop} = \frac{gl^2}{8} + \frac{Q_{dop}l}{6} = 2.543 \text{ kNm}$

2.2. Teoretični račun razpok po EC 2

odprtina razpoke po EC 2 tč. 4.424:

$w_k = \beta_{srm} \epsilon_{sm}$ (5)

$s_{rm} = 50 + 0.25k_1 k_2 \frac{\phi}{\rho_r} = 50 + 0.25 \cdot 1.6 \cdot 0.5 \frac{\phi}{\rho_r}$

$s_{rm} = 50 + 0.20 \frac{\phi}{\rho_r}$

srednja razdalja med razpokami (5a)

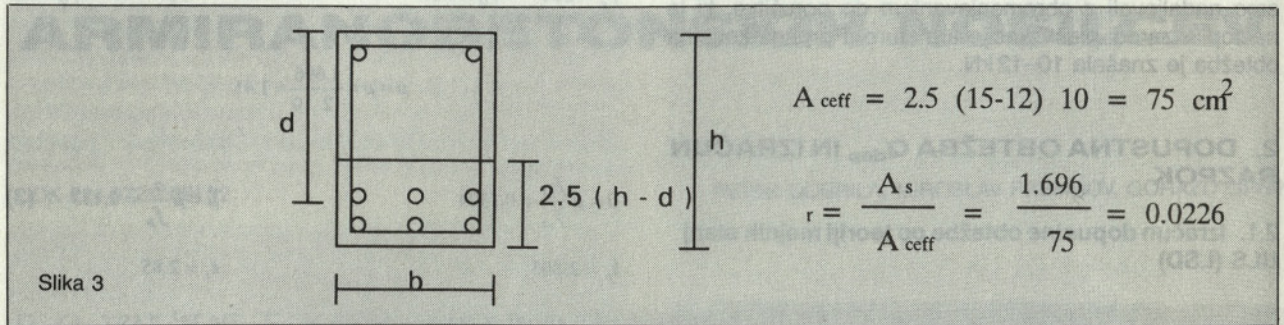
$\epsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{SR}}{\sigma_s} \right)^2 \right] = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - \beta_1 \beta_2^2 \left(\frac{M_{SR}}{M_s} \right)^2 \right]$

$\epsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - 0.5 \cdot 1.0 \left(\frac{M_{SR}}{M_s} \right)^2 \right]$ (5b)

$\beta = 1.7$ za 95% fraktilo

Prerezi A₁, A₂, A₃:

Za nosilec C1 so rezultati odprtih razpok neuporabni in jih nismo upoštevali pri izračunu povprečne vrednosti! Menimo, da bo potrebno nosilec s tako dispozicijo arma-



Slika 3

$$s_{rm} = 50 + 0.2 \frac{6}{0.0226} = 103 \text{ mm}$$

po PBAB: $s_{rm} = 65,7 \text{ mm}$... (ne ustreza vrednosti v preiskavah, kjer so znašale razdalje med razpokami 80–114 mm)

$$\sigma_s = \frac{M}{0.9dA_s} = \frac{254.3}{0.9 \cdot 12 \cdot 1.696} = 13.883 \text{ kN/cm}^2$$

$$M_{SR} = f_{ct0.05} W_b = 0.208 \cdot 375 = 78 \text{ kNcm}$$

$$W_b = \frac{10 \cdot 15^2}{6} = 375 \text{ cm}^3$$

$$w_k = 1.7 \cdot 103 \frac{13.883}{20000} \left[1 - 0.5 \left(\frac{78}{254.3} \right)^2 \right] = 0.1158 \text{ mm}$$

po PBAB: $w_k = 0.076 \text{ mm}$

ture ponovno preiskati.

4. ZAKLJUČEK

4.1. Razdalja med razpokami

Kot so pokazale preiskave, so v vseh primerih razdalje med razpokami znašale 80 do 110 mm. Te vrednosti, izračunane v odvisnosti od premera armature \varnothing in efektivnega odstotka natezne armature, dobimo skoraj povsem enake, če uporabimo enačbo, ki jo navaja EC 2. PBAB, ki navaja identično enačbo, pa upošteva prenike količnik k_1 , ki opisuje hrapavost armature, zaradi česar so izračunane vrednosti prenizke. Koeficient k_1 torej privzamemo po EC 2, in sicer:

$k_1 = 0.8$ za rebrasto armaturo

$k_1 = 1.6$ za gladko armaturo

Naše raziskave torej kažejo, da pri računu razdalje med razpokami lahko upošteevamo kar dejanski premer armature palice, neodvisno od tega, če so le-te zvezane v svežnje ali pa ne (tip A)!

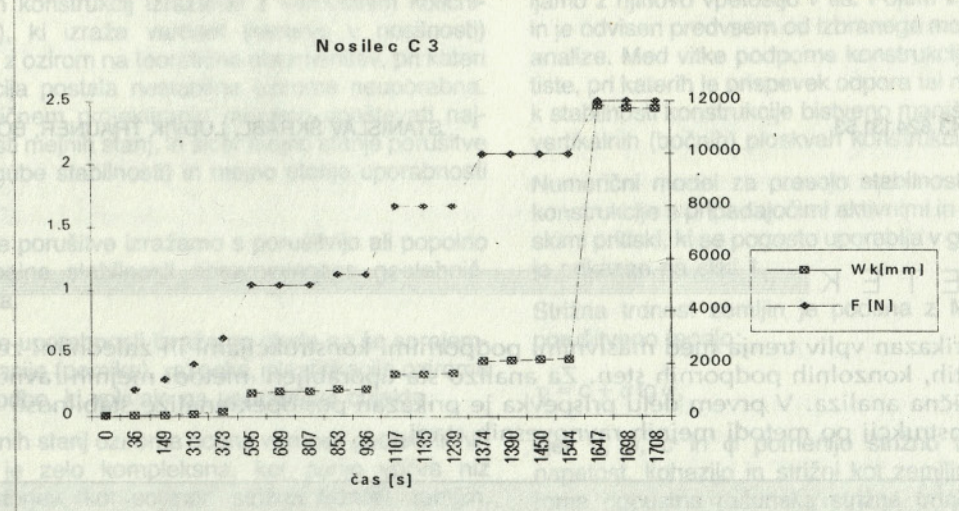
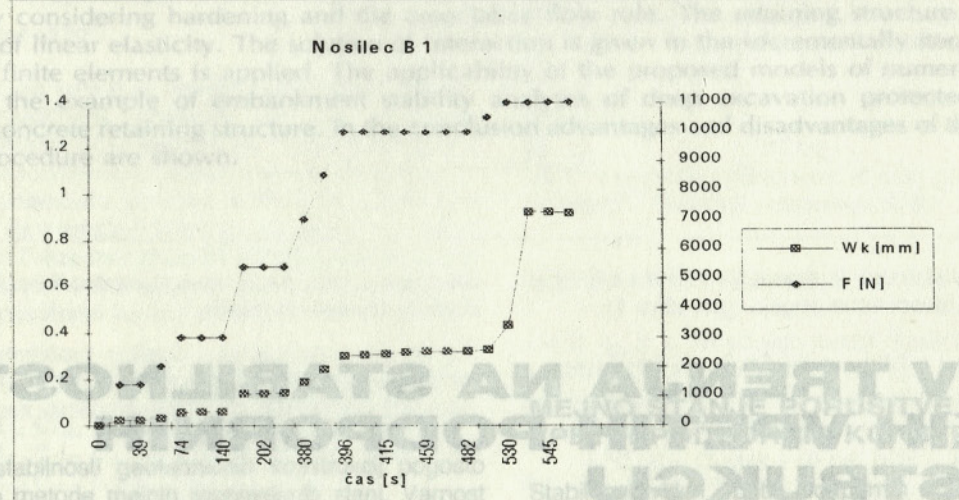
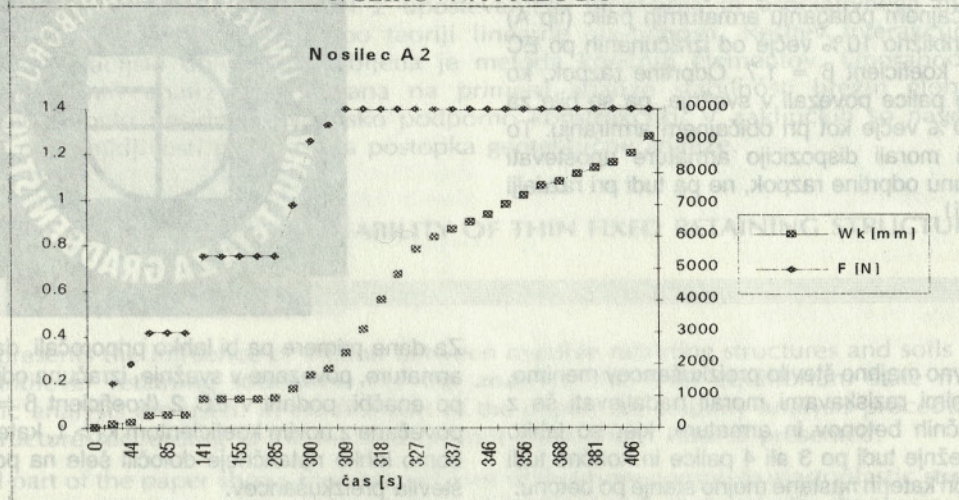
3. ANALIZA PREISKAV

Vsi nosilci so se izkazali kot visoko duktilni, kar je bilo glede na dimenzioniranje tudi pričakovati.

	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
w_k (mm)	0.129	0.124	0.130	0.137	0.190	0.118	0.025?	0.105	0.207
$\sum \frac{w_k}{3}$	0.128			0.148			0.156		
s_{rm} min (mm)	92	91	80	84	84	90	89	89	84
s_{rm} max (mm)	111	112	114	120	122	120	118	117	109
poves v_{Qdop} (mm)	9.1	7.5	8.5	5.6	4.9	7.6	5.1	6.9	7.9
v_{Qpor} (mm)	30.2	29.3	71!	40	65	29	26.8	56.9	51.2
Q_{por} (kN)	10	10	9.	11	10	11	12.3	12.0	12.0

Preglednica 1

6. SLIKOVNA PRILOGA



4.2. Odprtine razpok

Kot prikazuje preglednica 1, so najmanjše odprtine razpok nastale pri običajnem polaganju armaturnih palic (tip A) in so bile za približno 10% večje od izračunanih po EC 2, upoštevajoč koeficient $\beta = 1.7$. Odprtine razpok, ko smo armaturne palice povezali v svežnje, pa so bile za približno 16–20% večje kot pri običajnem armiranju. To pomeni, da bi morali dispozicijo armature upoštevati samo pri izračunu odprtine razpok, ne pa tudi pri razdalji med razpokami!

5. SKLEP

Glede na relativno majhno število preizkušancev menimo, da bi s tovrstnimi raziskavami morali nadaljevati še z uporabo drugačnih betonov in armature, kjer so lahko povezane v svežnje tudi po 3 ali 4 palice in končno tudi takih nosilcev, pri katerih nastane mejno stanje po betonu.



Za dane primere pa bi lahko priporočali, da se v primeru armature, povezane v svežnje, izračuna odprtina razpoke po enačbi, podani v EC 2 (koeficient $\beta = 1.7$), vendar povečana z novim koeficientom $k_3 > 1$, katerega vrednost bomo lahko natančneje določili šele na podlagi večjega števila preizkušancev.

VPLIV TRENJA NA STABILNOST VITKIH VPETIH PODPORNIH KONSTRUKCIJ

UDK: 624.16:531.43:624.131.53

STANISLAV ŠKRABL, LUDVIK TRAUNER, BOJAN ŽLENDER

POVZETEK

V članku je prikazan vpliv trenja med masivnimi podpornimi konstrukcijami in zalednimi zemljinami na stabilnost vpetih, konzolnih podpornih sten. Za analizo sta uporabljeni metodi mejnih ravnovesnih stanj in elasto-plastična analiza. V prvem delu prispevka je prikazan postopek analize stabilnosti vitkih vpetih podpornih konstrukcij po metodi mejnih ravnovesnih stanj.

Avtorji:

Stanislav Škrabl, Ludvik Trauner in Bojan Žlender
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo

V drugem delu prispevka so prikazane teoretične osnove popolnejše elasto-plastične napetostno-deformacijske analize interakcije med podporno konstrukcijo in zemljino. Za zemljine je uporabljen Mohr-Coulombov elasto-plastičen reološki model z upoštevanjem utrjevanja in asociativnega modela tečenja. Podporna konstrukcija je analizirana po teoriji linearne elastičnosti. Rešitev interakcije je podana v inkrementalno iteracijski obliki. Uporabljena je metoda končnih elementov. Uporabnost predlaganih modelov numeričnih analiz je prikazana na primeru analize stabilnosti brežin globokega izkopa, zavarovanega z vpeto nesidrano betonsko podporno konstrukcijo. V zaključkih so navedene nekatere prednosti in pomanjkljivosti prikazanega postopka geotehnične analize.

INFLUENCE OF FRICTION ON THE STABILITY OF THIN FIXED RETAINING STRUCTURES

S U M M A R Y

The paper presents the influence of friction between massive retaining structures and soils on the stability of fixed cantilever retaining structures. For the analysis, the limit equilibrium state method and the elasto-plastic analysis are used. In the first part of the paper, the stability analysis procedure of thin fixed retaining structures according to the method of limit equilibrium state is presented.

The second part of the paper shows theoretical bases of the more complete elastoplastic stress-deformation analysis of the retaining structure-soil interaction. Mohr-Coulomb elasto-plastic rheological model is used for soils by considering hardening and the associative flow rule. The retaining structure is analysed by the theory of linear elasticity. The solution of interaction is given in the incrementally iterative form. The method of finite elements is applied. The applicability of the proposed models of numerical analyses is shown on the example of embankment stability analyses of deep excavation protected by the fixed anchored concrete retaining structure. In the conclusion advantages and disadvantages of the geotechnical analysis procedure are shown.

UVOD

Za oceno stabilnosti geotehničnih konstrukcij pogosto uporabljamo metode mejnih ravnovesnih stanj. Varnost geotehničnih konstrukcij izražamo z varnostnim količnikom ($F > 1$), ki izraža varnost (rezerve v nosilnosti) konstrukcije z ozirom na teoretično obremenitev, pri kateri bi konstrukcija postala nestabilna oziroma neuporabna. Pri geotehničnem projektiranju moramo upoštevati najmanj dve vrsti mejnih stanj, in sicer mejno stanje porušitve (popolne izgube stabilnosti) in mejno stanje uporabnosti konstrukcije.

Mejno stanje porušitve izražamo s porušitvijo ali popolno izgubo globalne stabilnosti obravnavanega geotehničnega objekta.

Mejno stanje uporabnosti izražamo glede na še sprejemljive deformacije (pomike), razpoke, plastifikacije oziroma druge poškodbe, ki vplivajo na uporabnost objekta.

Analiza mejnih stanj oziroma ocena varnosti geotehničnih konstrukcij je zelo kompleksna, ker nanjo vpliva niz vplivnih faktorjev, kot so npr. strižna trdnost zemljin, njihove kompleksne reološke karakteristike, trenje med konstrukcijami in zemljino, hitrost naraščanja obremenitev, pogoji drenažiranja zemljin itd.

MEJNO STANJE PORUŠITVE VITKIH VPETIH PODPORNH KONSTRUKCIJ

Stabilnost vitkih vpetih podpornih konstrukcij zagotavljamo z njihovo vpetostjo v tla. Pojem vitkosti je relativen in je odvisen predvsem od izbranega modela geotehnične analize. Med vitke podporne konstrukcije prištevamo vse tiste, pri katerih je prispevek odpora tal na temeljni ploskvi k stabilnosti konstrukcije bistveno manjši od prispevka na vertikalnih (bočnih) ploskvah konstrukcije.

Numerični model za presojo stabilnosti nesidrane vitke konstrukcije s pripadajočimi aktivnimi in pasivnimi zemeljskimi pritiski, ki se pogosto uporablja v geotehnični praksi, je prikazan na sliki 1.

Strižna trdnost zemljin je podana z Mohr-Coulombovo porušitveno teorijo:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi, \quad (1)$$

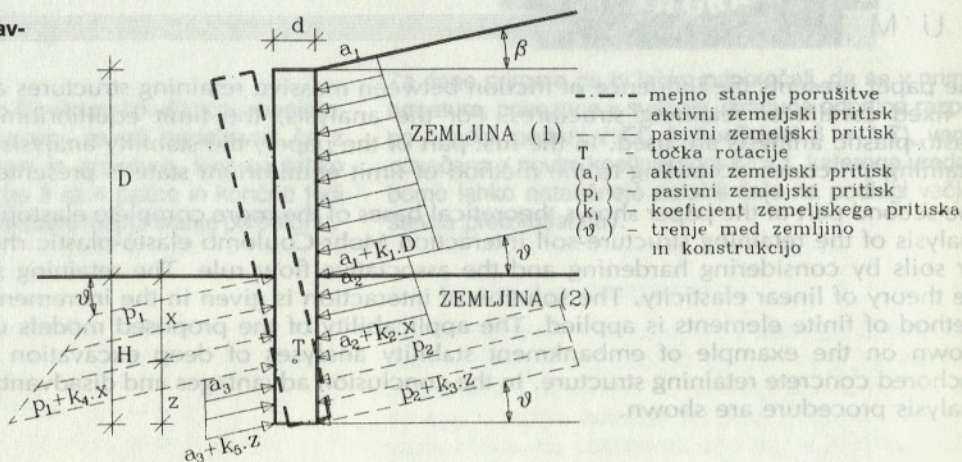
kjer τ_f , σ , c in φ pomenijo strižno trdnost, normalno napetost, kohezijo in strižni kot zemljine. Dejanska oziroma dopustna računrska strižna trdnost, ki zagotavlja varnost konstrukcije, lahko znaša:

$$\tau_m = c_m + \sigma \tan \varphi_m, \quad (2)$$

kjer c_m in φ_m označujeta dopustne oziroma mobilizirane deleže kohezijske in trenjske komponente strižne trdnosti, ki ju izvednotimo: $c_m = c/F_c$ in $\varphi_m = \arctg(\tg\varphi/F_\varphi)$. F_φ in F_c sta parcialna varnostna količnika za zemljine. Glede na zanesljivost posameznih deležev strižne trdnosti morata za zagotovitev varnosti konstrukcije dosegati vrednosti ($F_c = 2.0 - 3.0$) in ($F_\varphi = 1.2 - 1.8$). Za definicijo enotne varnosti konstrukcije (F) predlagamo, da se geotehnične analize po metodi mejnih ravnovesnih stanj izvajajo s parcialnima količnikoma $F_\varphi = F = (1.2 - 1.8)$ in $F_c = 5F/3$.

porušitvijo; velja kriterij, da lahko relativni pomiki znašajo 0.33 % višine obravnavane konstrukcije. Mejna stanja uporabnosti glede na še dopustne razpoke, kriterij zmrzovanja, trajnost konstrukcij ipd. so opredeljeni z ustreznimi predpisi in jih v članku ne bomo obravnavali. V numeričnih analizah pričakovanih deformacij podporne konstrukcije smo zamljine upoštevali kot elasto-plastične materiale z Mohr-Coulombovim kriterijem popuščanja, medtem ko smo podporno konstrukcijo v analizi obravnavali s predpostavko linearne elastičnosti. Rešitev problema je z upo-

Slika 1. Model mejnega ravnovesnega stanja



Za zagotovitev stabilnosti konstrukcije morata biti izpolnjena naslednja ravnovesna pogoja (glej sliko 1):

$$\sum H = 0; z^2(k_3 - k_5) + 2z(p_2 - a_3) + 2a_1D + k_1D^2 + 2a_2x + k_2x^2 - 2p_1x - k_4x^2 = 0 \quad (3)$$

$$\sum M = 0; z^2(p_2 - a_3 - 3k_5d \tan \vartheta) + z(4a_1D + 2k_1D^2 + 4(a_2 - p_1)x + 2(k_2 - k_4)x^2 - 6a_3d \tan \vartheta) + a_1D(3D + 6x) + k_1D^2(D + 3x) + 3(a_2 - p_1)x^2 + (k_2 - k_4)x^3 - (p_1x + k_4x^2/3)6d \tan \vartheta = 0 \quad (4)$$

Z rešitvijo prikazanega sistema nelinearnih enačb (3) in (4) izvednotimo potrebno minimalno globino vpetosti konstrukcije (x) in (z) za izbrani varnostni količnik F . Mejne vrednosti pasivnih in aktivnih zemeljskih pritiskov izvednotimo z uporabo poznanih in preizkušenih postopkov, bodisi za ravne ali ukrivljene potencialne porušne ploskve.

MEJNA STANJA UPORABNOSTI

Mejno stanje uporabnosti v geotehniko izražamo predvsem z dopustnimi (mejnimi) deformacijami (relativnimi pomiki), ki še zagotavljajo normalne pogoje uporabnosti konstrukcij. Pogoji uporabnosti so za posamezne geotehnične konstrukcije različni in so odvisni predvsem od funkcije, ki jo konstrukcija opravlja v prostoru. Za običajne podporne konstrukcije, ki varujejo zemljiška pobočja pred

rabo MKE podana v inkrementalno-iteracijski obliki s sistemom linearnih enačb.

Napetostno-deformacijska analiza problema temelji na simultanjem reševanju ravnotežnih enačb (5) z upoštevanjem kompabilitetnih (6) in konstitutivnih zvez (7).

$$\sigma_{ij,k} = \rho b_j \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ij} = (u_{j,i} + u_{i,j})/2 \quad (6)$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl} \quad (7)$$

kjer σ_{ij} , ρ , b_j , ε_{ij} in u_k označujejo napetostni tenzor, gostoto materialov, vektor prostorninskih sil, deformacijski tenzor in vektor pomikov. V območju elastičnosti (za vsa napestna stanja, kjer je $F(\sigma_{ij}) < 0$, $F(\sigma_{ij})$ označuje funkcijo tečenja zemljin), v analizi upoštevamo konstitutivni tenzor C_{ijkl} kot konstanto:

$$C_{ijkl} = E D_{ijkl} \quad (8)$$

$$D_{ijkl} = \nu \delta_{ij} \delta_{kl} / (1 - \nu - 2\nu^2) + \delta_{ik} \delta_{jl} / (1 + \nu), \quad (9)$$

kjer ν , E in δ_{ij} označujejo Poisson'ov količnik, model elastičnosti in Kroneckerjev delta simbol. Na ploskvi plastičnega tečenja zemljin ($F(\sigma_{ij}) = 0$) izvednotimo tenzor D_{ijkl} z izrazom (9) za pričakovana razbremenilna napestna stanja ($d\sigma_{ij} F_{,\sigma_{ij}} < 0$). Za obremenilna napestna stanja ($F(\sigma_{ij}) = 0$ in $d\sigma_{ij} F_{,\sigma_{ij}} > 0$), izvednotimo konstitutivni tenzor:

$$C_{ijkl} = E(D_{ijkl} - D_{ijmn}G_{\sigma mn} F_{\sigma pq} D_{pqkl}) / (A + F_{\sigma pq} D_{pqrs} G_{\sigma rs}), \quad (10)$$

kjer $G(\sigma_{ij})$ označuje funkcijo plastičnega potenciala in A skalarni parameter utrjevanja zemljin. Funkcijo plastičnega tečenja za zemljine z Mohr-Coulombovim kriterijem popuščanja podamo:

$$F = p \sin \varphi / 3 + q(\cos \varphi \sqrt{3} - \sin \theta \sin \varphi) / \sqrt{2} - c \cos \varphi, \quad (11)$$

kjer φ in c označujeta kot notranja trenja in kohezijsko trdnost zemljin; p in q ter θ podajajo sferno in distorzijsko komponento napetostnega tenzorja ter Lodejev kot v prostoru glavnih napetosti.

$$p = \delta_{ij} \sigma_{ij} / 3 \quad (12);$$

$$q = \sqrt{S_{ij} S_{ij}} / 3 \quad (13);$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} p \quad (14);$$

$$\sin 3\theta = 2\sigma_{ij} \sigma_{jk} \sigma_{kl} / (3q^3) \quad (15)$$

Pri zemljinah, za katere je značilen normalitetni princip, je funkcija plastičnega potenciala $G(\sigma_{ij})$ enaka funkciji plastičnega tečenja $F(\sigma_{ij})$ (asociativni modeli tečenja). Za zemljine z neasociativnim modelom tečenja lahko funkcijo plastičnega potenciala izrazimo s funkcijo plastičnega tečenja tako, da v izrazu (11) kot φ nadomestimo s kotom ψ ($0 \leq \psi \leq \varphi$). Zveze med prirastki vozliščnih obremenitev in pomikov za primere prostorske diskretizacije s poljubnimi izoparametričnimi končnimi elementi izvednotimo:

$$K \Delta V = \Delta R \quad (16);$$

$$K = \int_{\Omega} \begin{bmatrix} L_{i,k} & L_{j,l} & C_{1kl1} & L_{i,k} & L_{j,l} & C_{1kl2} & L_{i,k} & L_{j,l} & C_{1kl3} \\ L_{i,k} & L_{j,l} & C_{2kl1} & L_{i,k} & L_{j,l} & C_{2kl2} & L_{i,k} & L_{j,l} & C_{2kl3} \\ L_{i,k} & L_{j,l} & C_{3kl1} & L_{i,k} & L_{j,l} & C_{3kl2} & L_{i,k} & L_{j,l} & C_{3kl3} \end{bmatrix} d\Omega \quad (17)$$

K , ΔV in ΔR označujejo togostno matriko elastičnih oziroma elastoplastičnih zemljin, vektor vozliščnih pomikov in sprememb obremenitev za poljubni obremenitveni inkrement Δt . L_i označuje interpolacijske funkcije za

pomike v poljih končnih elementov ter Ω prostornino končnih elementov.

Dobljeni sistem linearnih enačb rešujemo iteracijsko za vse izbrane obremenitvene inkremente z računalniškim programom SPACESOIL. Uporabljena je frontalna metoda. Ker se v poljubnem obremenitvenem inkrementu pojavi tečenje zemljin le v omejenem območju končnega elementa oziroma le v posameznih Gaussovih točkah, je v programu predvidena tudi ustrezna korekcija rezultatov z upoštevanjem rezidualnih sil.

Reološki parametri zemljin so določeni z laboratorijskimi preiskavami. Na osnovi rezultatov enosnih in rotacijskih strižnih preiskav smo ugotovili, da so deformacijske karakteristike obravnavanih zemljin linearne v območjih napetostnih stanj $q \leq 2q_t/3$, pri večjih distorzijskih obremenitvah nastopi plastično tečenje. Območja elastičnosti oziroma elasto-plastičnosti so za obravnavane zemljine prikazana na sliki 2.

S pogojem plastičnega tečenja zemljin so določeni napetostni nivoji, kjer nastopijo plastične deformacije. Lahko ga podamo v naslednji posplošeni obliki:

$$F(\sigma_{ij}) = k(\kappa), \quad (18)$$

kjer je k materialni parameter, ki smo ga določili eksperimentalno v naslednji posplošeni obliki:

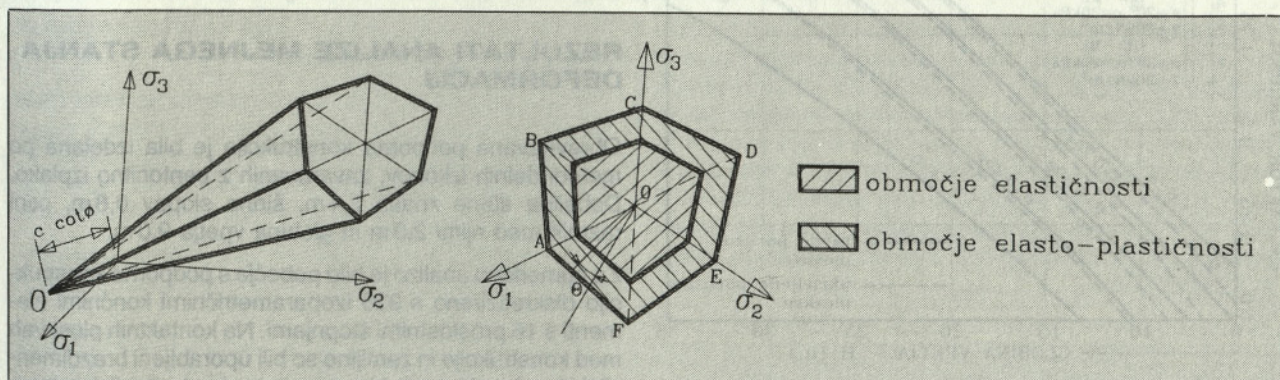
$$k(\kappa) = k(\varepsilon_p) = E(\varepsilon_1 \ln \varepsilon_p - \varepsilon_p), \quad (19)$$

kjer E , ε_p , in ε_1 označujejo modul elastičnosti, vsoto vseh plastičnih deformacij zemljine in mejno plastično deformacijo, ki jo zemljine dosežejo ob porušitvi. Skalarni parameter utrjevanja podamo:

$$A = -k(\varepsilon_p) \cdot \varepsilon_p \cdot d\varepsilon_p / d\lambda, \quad (20)$$

kjer je $d\lambda$ proporcionalna konstanta, ki je definirana z izrazom:

$$d\varepsilon_{ij(p)} = d\lambda G_{\sigma_{ij}}$$



Slika 2: Območja elastičnosti in elasto-plastičnosti

PRAKTIČNI PRIMER

Na osnovi prikazanih teoretskih osnov smo analizirali stabilnost vpete nesidrane podporne konstrukcije koristne višine $D = 12,00$ m, debeline $d = 2,4$ m s predvideno globino vpetja $H = 9,00$ m. Nivo talne vode je na obravnavani lokaciji v globini $12,00$ m. Geometrijski in stratigrafski podatki podporne konstrukcije so prikazani na sliki 3.

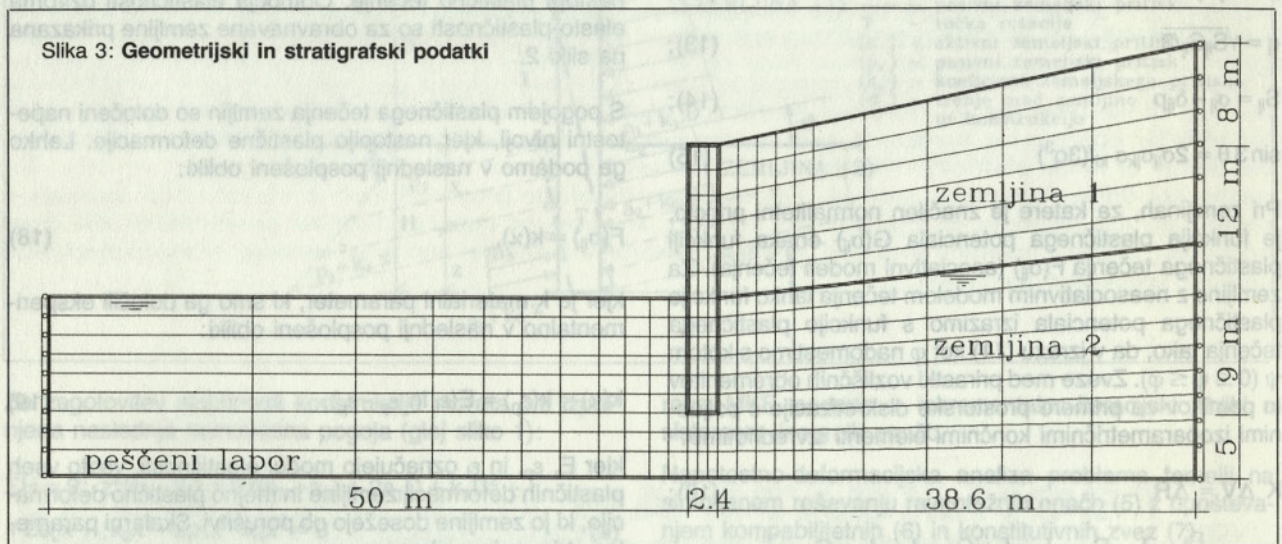
Za numerične analize smo upoštevali naslednje fizikalne karakteristike:

Zemljina (1): $\varphi = 30^\circ$, $c = 20$ kPa, $E = 40000$ kPa, $\nu = 0.3$, $G = F$, $\varepsilon_1 = 0.025$

Zemljina (2): $\varphi = 38^\circ$, $c = 20$ kPa, $E = 50000$ kPa, $\nu = 0.3$, $G = F$, $\varepsilon_1 = 0.02$

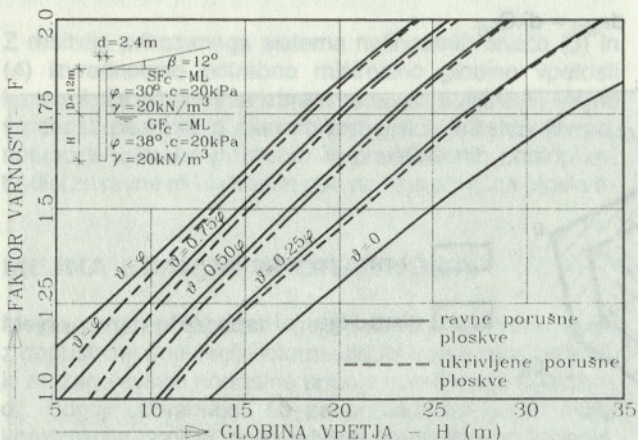


Slika 3: Geometrijski in stratigrafski podatki



Rezultati analize mejnega stanja porušitve

Mejno stanje porušitve s predpostavko vitke podporne konstrukcije je analizirano kombinacij za pet različnih



Slika 4: Sovisnice globine vpetosti, varnostnega količnika in trenja med konstrukcijo in zemljino

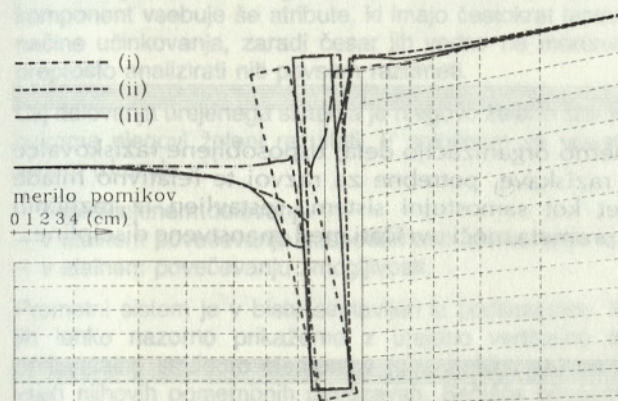
varnostnih količnikov in pet različnih vrednosti mobilizirane trenja med podporno konstrukcijo in zemljino. Mejne vrednosti aktivnih oziroma pasivnih pritiskov so bile določene po metodi ekstrema za ravne in ukrivljene potencialne porušne ploskve. Rezultati analiz so prikazani na sliki 4.

REZULTATI ANALIZE MEJNEGA STANJA DEFORMACIJ

Obravnavana podporna konstrukcija je bila izdelana po metodi delnih izkopov, zavarovanih z bentonitno izplako. Debelina stene znaša $2,4$ m, širina slopov $0,8$ m, osni razmik med njimi $2,0$ m in globina vpetja $9,0$ m.

Za numerično analizo je bilo pobočje s podporno konstrukcijo diskretizirano s 325 izoparametričnimi končnimi elementi s 16 prostostnimi stopnjami. Na kontaktnih ploskvah med konstrukcijo in zemljino so bili uporabljeni brezdimenzijski končni elementi, ki omogočajo simulacije diskontinuitet med zemljino in podporno konstrukcijo.

V analizi deformacij je bila upoštevana enakomerna obremenitev konstrukcije in tal z vplivi izkopa gradbene jame po inkrementih (plasteh) debeline 2,0 m. Analizirani so bili trije primeri: (i) – z dejanskimi strižnimi karakteristikami zemljin brez trenja, (ii) – z upoštevanjem trenja in dejanskimi strižnimi karakteristikami, (iii) – z upoštevanjem trenja in mobiliziranimi strižnimi karakteristikami ($F = 1.3$). Pomiki obravnavane konstrukcije in površine pobočja ob izkopu so za vse tri analizirane primere prikazani na sliki 5.



Slika 5: Pomiki podporne konstrukcije

SKLEPNE UGOTOVITVE

Rezultati geotehničnih analiz kažejo na zelo pomemben vpliv trenja med vitkimi podpornimi konstrukcijami in zemljinami na njihovo stabilnost. Hkrati z vplivi na minimalno potrebno globino zabijanja trenje tudi bistveno zmanjšuje notranje obremenitve podpornih konstrukcij. Rezultate analiz mejnega stanja deformacij ocenjujemo za realne, saj se sorazmerno dobro ujemajo z rezultati terenskih meritev premiki podporne konstrukcije ob izkopu gradbene jame so znašali do 15 mm v horizontalni ter do 5 mm v vertikalni smeri.

Na podlagi rezultatov opravljenih analiz ocenjujemo, da je vpliv trenja vsekakor ugoden za varnost kakršnihkoli podpornih konstrukcij, vendar dodajamo, da je pri projektiranju potrebno za vsak posamezni primer skrbno analizirati možnosti aktiviranja in predvsem trajnosti razbremenilnih vplivov trenja na stabilnost vitkih podpornih konstrukcij.

Menimo, da je za zagotovitev stabilnosti in ekonomičnosti začasnih podpornih konstrukcij (zaščita gradbenih jam) upoštevanje trenja primerno in zanesljivo, medtem ko je pri trajnih konstrukcijah nujno upoštevati kompleksnejše robne pogoje (način izvedbe konstrukcije, dejansko napestnostno oziroma deformacijsko stanje v zemljinah ipd.) ter morebitne dinamične obremenitve.

LITERATURA

1. DESAI, S. C., Constitutive Laws for Engineering Materials, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.
2. OWEN D. R. J. and HINTON E., Finite Element in Plasticity, Pineridge Press Limited Swansea U.K., 1980.
3. NAYLOR D. J., PANDE G. N., SIMPSON B. and TABB R. – Finite Elements in Geotechnical Engineering, Pineridge Press, Swansea U.K., 1981.
4. ŠKRABL, S., Interakcija členkasto povezanih temeljnih konstrukcij s tlemi, Disertacija, Tehniška fakulteta, Maribor, 1991.
5. TRAUNER, L. and ŠKRABL, S., Consolidation Analysis of Plate Foundations, V. International Conference Computational Plasticity, Barcelona, 1992.
6. SOUBURA, A. H., KASTNER, R., Passive Earth Pressures Using the Upper-bound Method in Limit Analysis, Limit state in geotechnical engineering, Copenhagen, 1993.

UPRAVLJANJE PROMETNIH SISTEMOV

UDK 656.02

MARTIN LIPIČNIK

POVZETEK

Preučevanje prometa s sistemskega vidika zahteva primerno organizacijo dela, usposobljene raziskovalce in institucijo, koder potekajo vsaj osnovne teoretične raziskave, potrebne za razvoj te relativno mlade znanstvene discipline. Članek skuša utemeljiti promet kot samostojni sistem, sestavljen iz različnih podsistemov in dokazati, da je tudi področje upravljanje prometa moči uvrščati med znanstvene discipline.

MANAGEMENT OF TRAFFIC SYSTEMS

SUMMARY

Traffic management demands systematical approach, which proves it to be scientific discipline. Studying of the traffic from the systematic point of view definitely requires appropriate organisation of work, qualified researchers and an institution where at least the basic theoretical examines, connected to this relatively young scientific discipline, will be carried out. The article offers the arguments for representing the traffic as an independent system, composed of different sub-system.

UPRAVLJANJE PROMETNEGA SISTEMA

Prometni sistem

Že davnega 1937. leta je slovit ameriški biolog madžarskega rodu LUDWIG VON BERTALANFY na nekem predavanju prikazal potrebo po ustvarjanju splošne teorije, ki bi jo lahko uporabljali za obravnavanje vseh različnih sistemov. Zamisel takrat še ni naletela na plodna tla, je pa zanimala zanimanje za teorijo sistemov, ki je kmalu po drugi svetovni vojni že postala resna znanstvena disciplina. Sprva se je ukvarjala z obravnavanjem teoretičnih sistemov, ki bi se lahko uporabljali na najširšem, kateremkoli znanstvenem področju in iskala področje koristne uporabe teoretičnih dognanj. Že zgodaj se je ukvarjala tudi s simuliranjem teoretičnih modelov na še neraziskanih znanstvenih in strokovnih področjih in s tem omogočila razvoj preučevanja posameznih, že zelo konkretno definiranih sistemov, kot je, denimo tudi prometni sistem, s svojimi podsistemi – cestno-prometnim sistemom, železniškim prometnim sistemom, zračnim prometnim sistemom in drugimi.

Opisana delitev sistema na podsisteme ima svoj praktični pomen: v teoretičnem smislu pa je pravzaprav nerelevantna. Sistem je pojem, ki pomeni celoto; prometni sistem si predstavljamo torej v celoto povezano množico sistemov in množico medsebojno odvisnih bodisi neodvisnih sistemov. Prometni sistem naj deluje čim bolj urejeno oziroma čim bolj kakovostno in gospodarno, tako tudi cestno-prometni sistem kot eden od najstarejših umetnih sistemov, ki si jih je zamislil človek zaradi svojih resničnih potreb. Prav tako je to sistem, ki ne prenese oznake »dokončnosti«; je živ sistem, podvržen stalnim spremembam, zato tudi zahteva neprekinjeno obravnavo in stalno dopolnjevanje tudi v svojem čisto teoretičnem pogledu. Zahteva torej sistemski pristop.

Teorija sistemov je rezultat preučevanja različnih modelov, njihovega razvrščanja in raziskovanja njihovih medsebojnih sovisnosti. Teorijo sistemov lahko zato predstavimo tudi kot množico splošnih metod in množico specifičnih tehnik ter algoritmov, nujnih za analizo in sintezo sistema.

Glavni poznani metodi raziskovanja v teoriji sistemov sta:
– empirična metoda, ki omogoča eksperimentalno preva-

Avtor:

Prof. dr. Martin Lipičnik, dipl. inž., Fakulteta za gradbeništvo – Institut prometnih ved, SI, 62000 Maribor, Smetanova 17

janje teoretičnih postavk in njihovo povezanost z resničnim okoljem

– logična metoda, ki sta ji stroga raziskava in logično izpeljani zaključki glavni načeli.

Elemente sistemov opazujemo na podlagi povezanosti in soodvisnosti. Sistem je zato funkcionalna celota vseh komponent, ki tvorijo posamezne elemente sistema. Učinek vsakega od elementov je odvisen od tega, kako se vključujejo v celoto; učinek celote (sistema) pa je odvisen od vsakega posameznega elementa. Sistem pa poleg komponent vsebuje še attribute, ki imajo čestokrat lastne načine učinkovanja, zaradi česar jih vedno ne moremo preprosto analizirati niti povsem razumeti.

Cilj delovanja urejenega sistema je njegovo zeleno stanje oziroma njegovi zeleni rezultati. V splošnem se urejen sistem izkazuje v:

- neprekinjenem delovanju
- v stalnem povečevanju gospodarnosti učinkovanja in
- v stalnem povečevanju zmogljivosti.

Prometni sistem je v bistu sestavljen iz podsistemov, ki jih lahko nazorno prikažemo z urejeno vertikalno in horizontalno strukturo elementov (glej grafični prikaz) v vseh njihovih pomembnih povezavah. Sečišča povezav definirajo torej elemente prometnih podsistemov. Povezave kažejo bolj ali manj izražene soodvisnosti znotraj in med posameznimi podsistemi, ki se zagotovo reflektirajo tudi v sistemih upravljanja.

Sistemi upravljanja združujejo na sebi lasten način vse sisteme, ki tvorijo posamezne horizontalne plasti grafično prikazane strukture. Povezave med elementi v vertikalni smeri so praviloma trdnejše od horizontalnih povezav v prikazani strukturi, kar znova kaže na pomembnost posameznih prometnih podsistemov. Enako so diferencirane tudi upravljalске povezave, ki so med horizontalno zniveliranimi elementi močnejše kot med kolonskimi elementi.

Upravljanje prometnega sistema

Upravljanje prometnega sistema/podsistema je sistematična aktivnost, ki naj zagotavlja nemoteno, stalno in gospodarno delovanje sistema ali podsistema. Zagotavlja usklajeno delovanje (pod)sistema z družbenega, ekonomskega, organizacijskega, tehnološkega in tehničnega vidika.

Tehnični vidik se izkazuje predvsem v preučevanju in optimiranju delovanja osnovnega elementa v prometu. Ta element je praviloma sredstvo za opravljanje dela. Sredstva za delo, ki jih poznamo v prometnem sistemu

- transportna sredstva (vozila);
- prostorski objekti, po katerih se gibljejo transportna sredstva (infrastruktura) in
- prometna stičišča kot mesta začetnih in končnih procesov pretovarjanja ali potovanja (skladišča ali terminali).

Pomembno je, da se upravljalci prometnega sistema zavedajo dejstva, da je tudi prometna infrastruktura v funkciji proizvodnega sredstva.

PROMETNI SISTEM

	CESTNO PROMETNI SISTEM	ŽELEZNIŠKI PROMETNI SISTEM	ZRAČNI PROMETNI SISTEM	VODNI PROMETNI SISTEM	ŽIČNIŠKI PROMETNI SISTEM	CEVOVODNI PROMETNI SISTEM	PTT PROMETNI SISTEM	PROMETNI SISTEM ZA PRENOS INFORMACIJ IN MISLI	
DRUŽBENI SISTEM									družbena razmerja v prometu
EKONOMSKI SISTEM									ekonomska razmerja v prometu
ORGANIZACIJSKI SISTEM									organizacijska razmerja v prometu
TEHNOLOŠKI SISTEM									tehnološka razmerja v prometu
TEHNIČNI SISTEM									tehnična razmerja v prometu
	cestni promet	železniški promet	zračni promet	vodni promet	žičniški promet	cevovodni promet	PTT promet	promet po etru	

Tehnološki vidik se izraža v procesu prometne storitve – prevozov. Prevoz poteka v prostoru, torej ni navezan na natančno določeno mesto; to je prva značilnost prometne storitve. Druga se kaže v prostorski in časovni enovitosti procesa proizvodnje in potrošnje, tretja pa v spoznanju, da prometna storitev sploh ne obstaja kot neki materialni izdelek.

Organizacijski vidik obravnave nas uči, da področje organizacije ni vezano le na organiziranje, poslovanje ter vodenje prometnega sistema in prometnih podsistemov, temveč tudi na vodenje in organiziranje posamezne prevozne enote.

Z ekonomskim vidikom se odpira povezava prometa kot podsistema z drugimi podsistemi celovitega ekonomskega sistema.

Upravljanje sistema je torej kompleksna naloga, ki jo je na preprost način nemogoče vnaprej določiti. Metod upravljanja je namreč veliko, odvisne pa so od izbire povezav, ki so mogoče med vhomom v in izhodom iz sistema. Te povezave predstavljajo tudi funkcionalne prometne informacije, ki so tako nujni del sistema in lahko nanj delujejo tako v pozitivnem kot v negativnem smislu. Že zgolj teoretična presoja nam pove, da ni urejenega



sistema, ki bi lahko deloval brez upravljanja, niti ni dobrega upravljanja sistema brez povratnih informacij. Z drugimi besedami: ni učinkovitega sistema brez dobrega upravljanja niti dobrega upravljanja brez učinkovitih informacij (vsestranskega prenosa informacij).

Kot smo že ugotovili, je tudi prometni sistem eden od umetnih sistemov, ki delujejo v prostoru in času; v skladu s svojimi povezavami nam omogočajo želeno, to je organizirano – urejeno delovanje.

Prometni sistem je tudi dinamičen sistem, saj je podvržen stalnemu spreminjanju svojega stanja; spremembe nastopajo pod vplivom notranjih dejavnikov, ki težijo k neprestanemu povečevanju njegove gospodarnosti kot tudi zaradi

zunanjih dejavnikov, ki težijo k večji učinkovitosti in kakovosti sistema. Predstavljajmo si, da nekateri elementi v sistem stalno vstopajo, drugi pa ga zapuščajo; vse to seveda pri pravilnem upravljanju sistema, že zaradi stalne želje po izboljšanju stanja.

Spremembe se opravijo, kadar so zato potrebe oziroma je razvoj dosegel potrebno raven. Zelo težko zato umetno vplivamo na njihovo dinamiko oziroma pogostnost.

Prometni sistemi so tudi odprti sistemi, kar je predvsem posledica njihovega povezovanja s širšim okoljem, ki je nasploh nujno potrebno za delovanje sistema.

Sistemska analiza prometnih sistemov

Z metodami sistemske analize prikazujemo učinkovanje strukture sistema z vsemi njegovimi sestavnimi deli. Sistemska analiza združuje postopke, tehnike in tehnološke procese in funkcije sistema, da bi pridobili spoznanja za pravilno upravljanje. Upravljanje torej temelji na sistemih zbiranja in distribucije najrazličnejših podatkov in informacij ter na sistemu organizacije.

Sistemska tehnika

Sistemska analiza je množica metod in postopkov, ki se uporabljajo za reševanje problemov znotraj sistema. Je torej osnovni pripomoček upravljanja sistema. Univerzalne sistemske tehnike pa so tehnike planiranja, informacijske tehnike in simulacijske tehnike. Vse so potrebne za analizo in sintezo najrazličnejših procesov in postopkov, ki potekajo znotraj sistema. V okviru sistemske tehnike se raziskujejo zlasti procesi, ki veljajo kot reprezentativni za vodenje sistema. V ospredju so »informacijske potrebe« nujne tako za neposredno kot za reprezentativno vodenje nekega prometnega sistema, pa tudi procesi načrtovanja, organizacije in vodenja sistema, upoštevaje globalne cilje. Organizacijski projekt je eden od rezultatov sistemske tehnike. Zagotavlja naj trdno povezavo vseh elementov iz množice, ki tvorijo sistem. Ta povezanost predstavlja torej integracijo vseh podsistemov. Prikazuje se s pretokom informacij. Vsak element prejme ali odda novo informacijo. Prav to neprestano kroženje informacij pa že prispeva k soustvarjanju vseh pomembnih ciljev sistema.

Preučevanje sistemov – tudi in predvsem prometnih sistemov – z vidika njihove stabilnosti, je torej pomembna naloga, ki jo je potrebno obravnavati tako s teoretično sistemske kot tudi praktične ravni, ne glede, katerega od podsistemov velikega prometnega sistema opazujemo. Pomembna je tudi stalnost te aktivnosti.

Upravljanje kateregakoli od podsistemov je kakovostno le, če smo po natančni preučitvi vseh elementov sistema, povezav med njimi, informacijskimi potrebami in vplivnimi dejavniki s pomočjo sistemske analize postavili trdno organizacijo podsistema, temelječo na motivaciji, komunikaciji in sodelovanju vseh udeležencev sistema.

EVTROFIKACIJA SLOVENSКИH POVRŠINSKIH VODA

UDK: 6271:574.5:582.26:504.03

UROŠ KRAJNC

POVZETEK

Ekološka sanacija slovenskih voda zahteva poleg izboljšanja klasičnih parametrov kakovosti voda (suspendirane snovi, BKP, raztopljeni kisik) tudi povrnitev naravnega trofičnega stanja voda. Modeli kakovosti rek se delijo na empirične modele ter konceptualne modele evtrofikacije rek. Problematika evtrofikacije slovenskih rek je razdeljena na probleme znotraj Slovenije ter evtrofikacijo v nizvodnih delih rek (Drava, Sava, Soča, Notranjska reka, Donava) ter končnih recipientih v Jadranskem in Črnem morju. Prihodnji programi vodooskrbe, namakanja in energetike bodo dodatno vplivali na evtrofikacijo slovenskih rek. Uporaba matematičnih limnoloških modelov je ponazorjena na Dravi, Savi, Savinji in Sotli.

EUTROPHICATION OF SLOVENIAN RIVERS

SUMMARY

When Slovenian freshwater is considered the improvement of ecological situation is conditioned not only by the improvement of classical parameters determining the water quality (suspended solids, BOD, dissolved oxygen), but also by the restitution of the natural trophic level of water bodies. River water quality models are classified into empirical models and conceptual models for river eutrophication. Specific problems of the eutrophication of Slovenian rivers can be divided into cases that can be solved within the Slovenian borders, the down-stream eutrophication of rivers (the Drava, the Sava, the Soča, the Notranjska reka, the Danube), and the eutrophication of final receiving bodies – the Adriatic and the Black Sea. Planned interventions into the water system (water supply programs, irrigation, power stations) will influence the eutrophication level of Slovenia rivers and have to be considered. Employment of mathematical limnological models illustrates the situation of the Drava, the Sava, the Savinja and the Sotla.

1.0 UVOD

Ker v naši mladi državi na področju kakovosti voda še nimamo uzakonjenega izrazoslovja, smo za najkrajšo definicijo prevedli kar DIN 4045, ki pravi:

evtrofikacija: obogatitev hranil v površinski vodi, ki pospešuje rast alg in višjih rastlin

Evtrofikacijo imenujemo tako visoko koncentracijo hranil za vodne rastline kot tudi visoko bioprodukcijo zaradi ugodnih pogojev za rast.

V Sloveniji so že opaženi primeri evtrofikacije vodnih teles, največkrat v naravnih in umetnih jezerih. Blejsko jezero je poleg izrednih naravnih lepot znano tudi po

metalimnijskem cvetenju modrozelenih alge *Oscillatoria rubescens* in pojavu površinskega cveta cianobakterijske vrste *Aphanizomenon flos*. Hkrati je tudi žalosten zgled, kako težko je v Sloveniji udejaniti strokovna spoznanja o sanaciji evtrofiziranih jezer. Tudi v Bohinjskem jezeru kažejo meritve kakovosti jezerske vode proces evtrofikacije, katerim botruje neurejena kanalizacija ter izpiranje zalednih površin. Študije, ki so preučevala razmere v akumulacijskih jezerih v podvodjih Savinje, Sotle, Drave in Mure (Vonarje, Slivniško jezero, Šmartinsko jezero, Radehovsko jezero), kažejo, da so v večini teh jezer prisotni procesi evtrofikacije v času, ko so za evtrofikacijo ugodni robni pogoji. Cvetenje Soče povzroča probleme pri oskrbi s pitno vodo. V ekstremno sušnih poletjih zadnjih let so meritve zabeležile hipersaturacijo kot rezul-

Avtor:

Dr. Uroš Krajnc, dipl. inž. gr., Univerze v Mariboru Fakulteta za gradbeništvo, Institut za ekološki inženiring Maribor

tat evtrofikacije v Savinji in Sotli, v pritokih Drave (Polskava, Dravinja, Trnava), akumulacijskih jezerih (Pernica), ribnikih (Rače) ter bagrskih jezerih (Hotinja vas).

Evtrofikacijo slovenskih rek moramo obravnavati tako v luči sedanjega stanja kot tudi načrtovanih posegov v vodni režim. Vodnogospodarske presoje vodnih količin kažejo, da je zmotna splošna trditev o ugodnih hidroloških pogojih v Sloveniji zaradi visoke letne višine padavin itd. Suše v zadnjih letih, ki so prizadele oskrbo s pitno in tehnološko vodo ter povzročile velik izpad kmetijske proizvodnje, potrjujejo, da bodo potrebne akumulacije za letne ter večletne izravnave vodnih količin. Želje po zaprtju nuklearke v Krškem in spoznanja o velikem negativnem vplivu termoelektrarn na okolje obujajo projekte o nadaljevanju izgradnje verige savskih vodnih elektrarn ter verige elektrarn na Muri. Ministrstvo za kmetijstvo je financiralo natečaj za nacionalni program namakanja z okvirno oceno površine 100.000 ha. Vsem tem idejam je skupna potreba po izgradnji zajezitev rek in potokov, kjer so zaradi daljših zadrževalnih časov ter ogrevanja vodne mase pogoji za evtrofikacijo rek bistveno ugodnejši. Primerjave porabe gnojil z državami z intenzivnim kmetijstvom kažejo, da je pri nas poraba gnojil še vedno nizka, tako da na primer v vodozaščitnih območjih omejitve vnosa gnojil ne predstavljajo posebnih težav po količini, kvečjemu na segmentih skladiščenja in časa gnojenja. Intenziviranje kmetijske proizvodnje pa bo potrebovalo večjo porabo gnojil, kar pa predstavlja enega potencialnih vzrokov za intenzivnejšo evtrofikacijo rek in akumulacij.

Evtrofikacija tekočih voda v slovenskih razmerah predstavlja specifično stanje. V slovenskih nezajezjenih hitro tekočih rekah je prisotna tako imenovana latentna evtrofikacija, ko je večina pogojev za nastop evtrofikacije izpolnjenih, eden od pogojev za nastop evtrofikacije pa izostane. Akutna evtrofikacija pa nastopi takrat, ko je ta manjkajoči pogoj izpolnjen.

Zato navajamo povzetek podatkov o bistvenih abiotičnih faktorjih za nekatere večje slovenske reke, katere smo porabili pri ovrednotenju intenzitete evtrofikacije (tabela 1).

Ti izračuni so pokazali, da so v Sloveniji glede temperature rek, svetlobe ter vsebnosti hranil v rekah prisotni ugodni pogoji za nastop evtrofikacije, saj nobeden teh pogojev ne nastopa kot omejitveni parameter primarne produkcije. Podane so vrednosti normirane funkcije temperature $f(T)$, svetlobe $f(I)$ in hranil $f(N)$, $f(P)$, ki nastopajo v kinetični enačbi rasti alg.

$$\mu = \mu_{\max(T_{\text{ref}})} \cdot f(I, n)$$

V vodnem gospodarstvu predstavljajo hidravlični in hidrološki matematični modeli že vrsto let nepogrešljiv pripomoček pri preučevanju količinskih pojavov vodnega režima. V zadnjih letih pa so si utrli pot tudi v slovenski praksi matematični modeli na področju kakovostnih problemov površinskih in talnih voda.

Kot prvi empirični model za napoved evtrofikacije v tekočih vodah navedimo Imhoffov model. Pri njem sloni ocena evtrofikacije na podatkih: hitrost vode, svetloba, dušik in fosfor. Model napoveduje povečano rast alg za naslednje pogoje:

Če primerjamo podatke o vsebnosti anorganskega dušika ter fosforja v večjih slovenskih rekah, podatke o svetlobi ter hitrosti vodnega toka z mejnimi vrednostmi po Imhoffu, ugotovimo, da je edini pogoj, ki ni v poletnem času a priori izpolnjen, hitrost vode. Glede vsebnosti hranil so (srednje vrednosti) v Savi vrednosti za dušik približno petkrat višje, za fosfor osemkrat višje, v Dravi za dušik trikrat višje ter za fosfor dvakrat višje za Savinjo za dušik sedemkrat višje ter fosfor petkrat višje, za Sotlo za dušik osemkrat višje in za fosfor dvanajstkrat višje od mejnih vrednosti po Imhoffu. Celo minimalne vrednosti vsebnosti hranil so za Savo in Dravo približno trikrat nižje od mejnih vrednosti, za Savinjo, Sotlo in Reko pa jih dosegajo ali celo ponekod presegajo.

Nastanek intenzivnejše evtrofikacije na ozemlju Slovenije preprečujejo kratki pretočni časi, zato ni pogojev za intenzivnejšo rast fitoplanktona. Hidrodinamski pogoji,

Reka	Drava	Savinja	Sava	Sava
Profil	Maribor	Celje	Ljubljana	Krško
$T_{\text{Julij}}(^{\circ}\text{C})$	15,6	17,2	12,9	17,6
$T_{\text{avgust}}(^{\circ}\text{C})$	16,0	16,9	13,2	17,5
$f(T_{\text{Julij}})$	0,75	0,84	0,64	0,86
$f(T_{\text{avgust}})$	0,77	0,82	0,65	0,85
$I_{\text{Julij}}(\text{kWh/m}^2)$	5,16	5,07	5,31	5,39
$I_{\text{avgust}}(\text{kWh/m}^2)$	5,10	4,41	5,29	4,68
$f(I_{\text{Julij}})$	0,61	0,63	0,61	0,63
$f(I_{\text{avgust}})$	0,56	0,58	0,56	0,58
$N_{\text{an}}(\text{mg/l})$	0,978	2,52	1,361	1,869
$P_{\text{an}}(\text{mg/l})$	0,016	0,08	0,015	0,161
$f(N)$	0,98	0,96	0,93	0,95
$f(P)$	0,78	0,92	0,67	0,95

Tabela 1. Povzetek podatkov, bistvenih za nastop evtrofikacije, za nekaj slovenskih rek

Preglednica 2. Pogoji za nastop evtrofikacije v tekočih vodah po Imhoffu

parameter	vrednost
hitrost vode	$\leq 0,3$ m/s
svetloba	dovolj
dušik	$\geq 0,3$ mg/l ¹
fosfor	$\geq 0,01$ mg/l

Preglednica 3. Primerjava mejnih vrednosti za hranila po Imhoffu s podatki za slovenske reke

Reka	Stat. vredn.	N _{an} (mg/l)	P _{an} (mg/l)
SAVA	povpr.	1,558	0,085
1989–1990	min.	0,139	0,003
Štev. mer. 158	maksim.	4,952	0,388
DRAVA	povpr.	1,023	0,021
1989–1990	min.	0,132	0,003
Štev. mer. 51	maksim.	2,225	0,176
SAVINJA	povpr.	2,047	0,052
1988–1990	min.	0,049	0,003
Štev. mer. 94	maksim.	4,510	0,290
SOTLA	povpr.	2,332	0,123
1988–1990	min.	0,254	0,010
Štev. mer. 32	maksim.	9,139	0,405
Mejne vrednosti po Imhoffu		$\geq 0,3$	$\geq 0,01$

predvsem hitrost vodnega toka, pa preprečujejo intenzivnejšo rast perifitona. Izdelali smo okvirne izračune pretočnih časov ob nizkih vodah za Savo, Savinjo, Sotlo ter Dravo od izvira do izliva ali meje. Pomemben je tudi čas nastopa nizkih pretokov rek in najdaljših potovalnih časov. Z izjemo Drave so nizki pretoki in daljši potovalni časi tipični za poletno obdobje, ko so tudi ostali pogoji za evtrofikacijo bolj ugodni. Podana sta pretočna časa za s_{Q_n} srednje male pretoke s_{Q_n} in n_{Q_n} za najmanjše dnevne pretoke n_{Q_n} .

Do klasične evtrofikacije bo prišlo v primeru posegov v hidrološki režim rek, predvsem zaradi zmanjšanih hitrosti vode. V Sloveniji lahko zato pričakujemo, da bo nastopila intenzivna evtrofikacija, ko se bodo reke upočasnile bodisi v akumulacijah na naših tleh, bodisi v dolvodnih odsekih rek v sosednjih državah. Za primerjavo navajamo spremembo zadrževalnih časov v akumulacijskem bazenu HE Vrhovo na Savi. Zadrževalni časi se bodo v akumulacijskem bazenu podaljšali od ca. 10,6-krat (pri pretoku $56,0 \text{ m}^3/\text{s}$ – pretok ranga trajanja dva dni v povprečnem hidrološkem letu) do 3,8-krat (pri pretoku $330 \text{ m}^3/\text{s}$ – pretok med $Q_{10\%}$ in $Q_{25\%}$).

Preglednica 4. Povzetek bistvenih podatkov o pretočnih časih za nekaj slovenskih rek

Reka	Dolžina (km)	s_{Q_n} (d)	n_{Q_n} (d)
Sava	219,27	5,0	7,2
Savinja	94,38	2,0	2,5
Sotla	93,92	3,6	5,4
Drava	142,34	9,7	18,0
Ljubljana	41,39	5,0	9,2

Preglednica 5. Zadrževalni časi v akumulacijskem bazenu HE Vrhovo

Pretok (m^3/s)	Zadrževalni čas pred zaježitvijo (h)	Zadrževalni čas po zaježitvi (h)
56,0	4,4	46,6
65,0	3,7	39,8
102,0	3,3	25,6
178,0	2,5	14,8
237,0	2,3	12,8
330,0	2,1	8,1

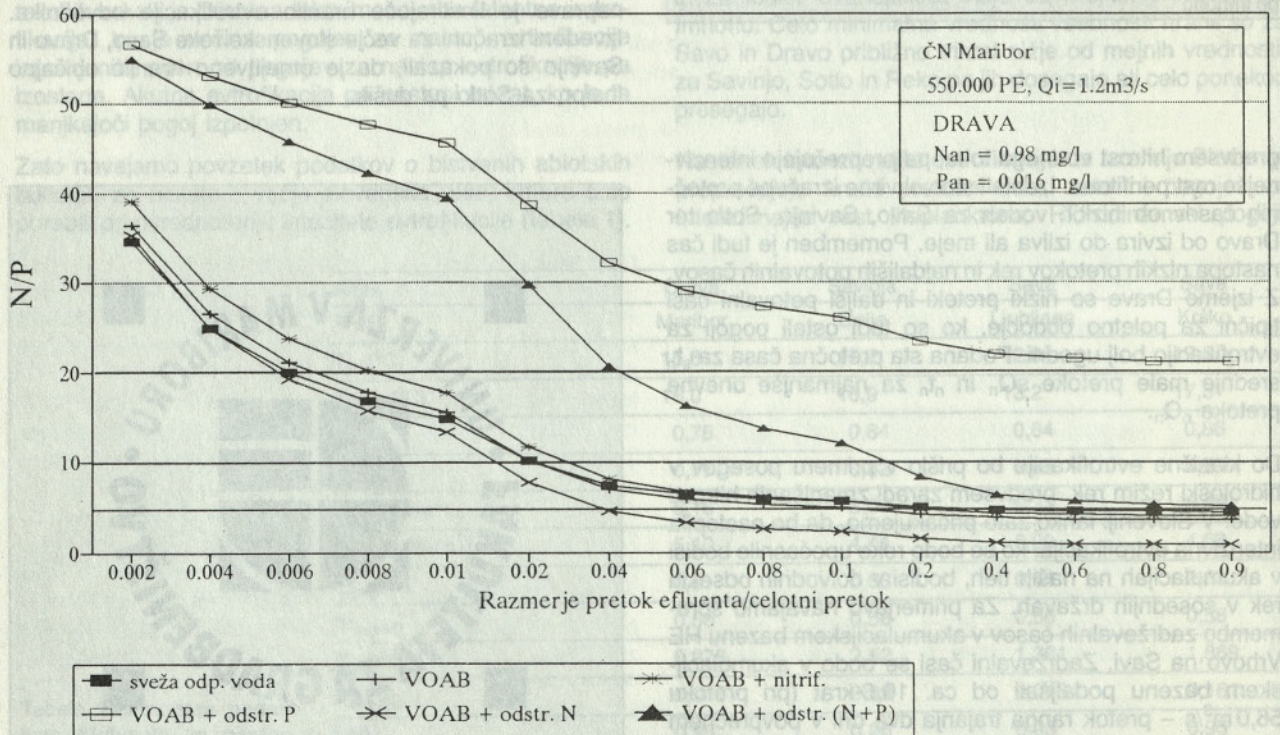
Razmerje dušik/fosfor

Obravnavanje razmerja dušik proti fosforju nudi osnovne podatke za zasnovano tretje stopnje čiščenja v komunalnih čistilnih napravah. Bistven podatek za projektanta čistilne naprave je limitirajoče hranilo evtrofikacije odvodnika. Izvedeni izračuni za večje slovenske reke Savo, Dravo in Savinjo so pokazali, da je omejitveno hranilo običajno fosfor, za Sotlo pa dušik.



Preglednica 6. Vsebnost hranil v odvodnikih odpadnih voda ter razmerja preto-kov

	DRAVA		SAVINJA	SOTLA
	Pod Mariborom		Pod Celjem	Pod Rogaško
sQs (m ³ /s)	296	sQs (m ³ /s)	40.47	3.69
sQn (m ³ /s)	98	sQn (m ³ /s)	8.18	0.23
nQn (m ³ /s)	52	nQn (m ³ /s)	5.30	0.10
Q9 mes (m ³ /s)	177	Q75 % (m ³ /s)	16.66	0.20
Q11 mes (m ³ /s)	131	Q90 % (m ³ /s)	11.54	0.11
Qbio.min.1 (m ³ /s)	20	Q95 % (m ³ /s)	9.30	0.09
Qbio.min.2 (m ³ /s)	10	Qmin reg (m ³ /s)	4.60	0.01
Nan	0.9775		2.7	1.053
Pan	0.016		0.05	0.147
ČN	MARIBOR		CELJE	SOT. JEZ.
PE	350000		150000	25000
Qi (m ³ /s)	1.20		0.61	0.14
RAZMERJA ODPADNIH VODA PROTI CELOTNEMU PRETOKU				
Qi/sQs	0.004	Qi/sQs	0.015	0.037
Qi/sQn	0.012	Qi/sQn	0.069	0.378
Qi/nQn	0.023	Qi/nQn	0.103	0.590
Qi/Q9mes	0.007	Qi/Q75	0.035	0.416
Qi/Q11mes	0.009	Qi/Q90	0.050	0.552
Qi/Qbio.min1	0.057	Qi/Q95	0.061	0.604
Qi/Qbio.min2	0.107	Qi/Qmin reg	0.117	0.996
nosilec fotosinteze	FITOPLANKTON		PERIFITON	PERIFITON
Nan omej mg/l	0.1		0.5	0.5
Pan omej mg/l	0.025		0.04	0.04



Slika 1: Podatki o vsebnosti dušika in fosforja v Dravi pod Mariborom

Izračuni so zajeli stanje pred izgradnjo čistilne naprave ter po izgradnji za različne tehnologije čiščenja. Za to presojo je potrebno dodatno določiti razmerje med vsebnostjo dušika in fosforja v nosilcih primarne produkcije (alge, makrofiti). V prvi aproksimaciji je mejno razmerje $N/P = 10$, niha pa od 5 do 20.

Če postavimo mejo med omejitvenimi hranili dušik in fosfor za razmerje N/P na 10, je v Dravi omejitveni faktor rasti vedno fosfor, če čistilna naprava obsega tudi odstranitev fosforja. Kolikor čistilna naprava zajema odstranitev dušika in fosforja, je omejitveni faktor do razmerja pretokov 0.15 fosfor, za višja razmerja pretokov pa dušik. Za ostale tehnologije čiščenja ter svežo odpadno vodo je do razmerja 0.1–0.2 omejitveno hranilo fosfor, za višja razmerja pa dušik.

Večparametrski modeli

Večparametrski modeli (Qual 2, Wasp IV, BfG, Mark 21) nudijo najboljši vpogled v dejanske procese kroženja snovi in energije v vodi, ki lahko pripeljejo do evtrofikacije. Kot tipični primer večparametrskega modela bomo opisali limnološki model Qual2, ki ga je razvila US Environmental Protection Agency (EPA) v 70-tih letih. Računalniška verzija, predstavljena v nadaljevanju, datira iz leta 1987, uporabljamo pa verzijo iz leta 1992 z oznako Qual2E. Model obravnava naslednje parametre tekočih voda: raztopljeni kisik, biokemijsko potrebo po kisiku, temperaturo, biomaso alg kot klorofil *a*, organski dušik kot *N*, amonijak kot *N*, nitrit kot *N*, nitrat kot *N*, organski fosfor kot *P*, raztopljeni fosfor kot *P* ter koliformne bakterije.

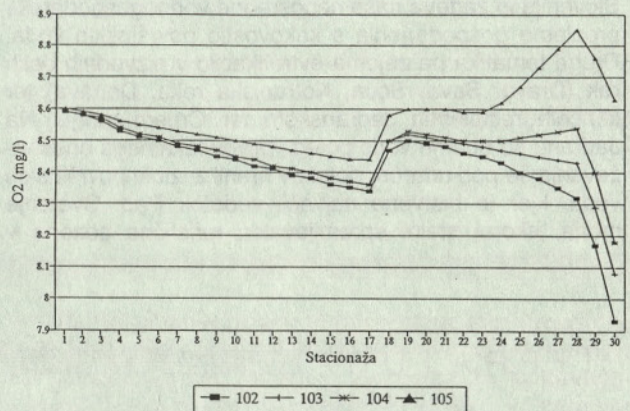
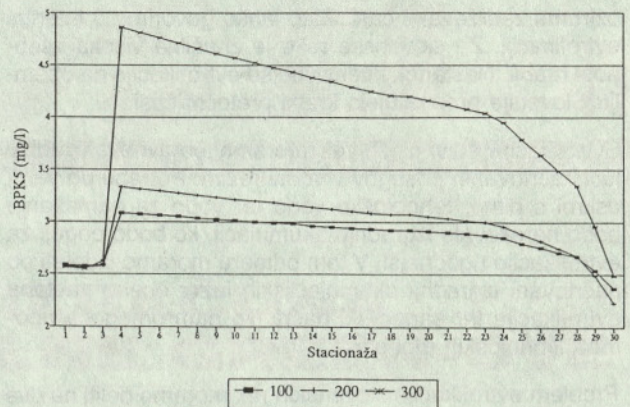
Uporabo modela Qual 2 smo ponazorili na odseku Drave med Mariborom in Ptujem, in sicer energetske kanal ter Ptujsko jezero. Obravnavali smo karakteristične pretoke 450 m^3 (oznaka 100), 296 m^3 (poletno obdobje – oznaka 200) ter 98 m^3 (zimsko obdobje – oznaka 300).

K izračunom podajamo naslednji komentar:

- večparametrski modeli, kamor prištevamo tudi Qual 2, vsebuje veliko število parametrov. Večino teh parametrov smo morali v pomanjkanju merjenih podatkov oceniti;
- program omogoča simulacijo temperature vodnega telesa glede na lokalne klimatske podatke, ki so v pretežni meri dosegljivi;
- na kisikov profil v Dragi ugodno vpliva ozračevanje na turbinah HE Zlatolčje. Kljub visokim pretokom Drave v poletnem obdobju ter relativno nizkim temperaturam je v Ptujskem jezeru prisotna pozitivna bilanca kisika;
- izračun skupnega prirastka kisika ranga $1 \text{ mg O}_2/\text{l}$ na potezi Maribor–Ptuj se ujema z lastnimi meritvami v letu 1992;
- na variacije rezultatov bistveno vpliva količina klorofila ter koeficienta ugašanja γ_0 (računi 102–105).

Prednosti večparametrskih modelov so naslednje:

- za obravnavani odsek reke lahko z izbiro relativno



Slika 2: Rezultati izračunov z modelom Qual 2 za Dravo med Mariborom in Ptujem

kratkih odsekov natančno upoštevamo dejanske hidrodinamske pogoje, odvzeme vode iz reke, dotok podtalnice, delitev reke v rokave itd.;

- ti modeli podajajo odgovore nosilcev primarne produkcije (fitoplankton, perifiton) na spremenjene abiotične pogoje;
- modeli omogočajo natančno bilanco organskega onesnaženja ter hranil s točkovnimi in linijskimi vnosi (odvzemi) ter z dotokom podtalnice;
- model Qual 2 izračuna potrebno povečanje pretoka v reki za želeno vsebnost kisika;
- modeli podajajo napoved učinkov sanacijskih ukrepov (gradnja čistilnih naprav, zmanjšanje vnosa s površinskim izpiranjem, spremembami hidrodinamskih pogojev itd.);
- nekateri teh modelov omogočajo dinamične simulacije (Qual 2, Wasp IV).

6.0 SKLEPNE UGOTOVITVE

V Sloveniji obstajajo zaradi temperature rek, svetlobe ter vsebnosti hranil v rekah ugodni pogoji za nastop evtrofikacije. Edini pogoj, ki ni vedno izpolnjen, so hitrosti vode

oziroma zadrževalni časi. Zato lahko govorimo o latentni evtrofikaciji. Za slovenske reke je značilna visoka vsebnost hranil. Nastanek intenzivnejše evtrofikacije na ozemlju Slovenije preprečujejo kratki pretočni časi.

Evtrofikacijo slovenskih rek moramo obravnavati tudi v luči načrtovanih posegov v vodni režim. Potrebe po varni oskrbi s pitno, tehnološko vodo ter vodo za namakanje bodo narekemale izgradnjo akumulacij, ko bodo pogoji za evtrofikacijo ugodnejši. V tem primeru moramo izdelati ob načrtovani izgradnji akumulacijskih jezer oceno nastopa evtrofikacije ter sanacijski načrt. To nam omogoča uporaba limnoloških modelov.

Problem evtrofikacije slovenskih rek moramo deliti na dve tematiki. Prva obsega problem evtrofikacije rek na ozemlju Slovenije in zadeva naše neposredne vodnogospodarske probleme gospodarjenja s kakovostjo površinskih voda. Druga tematika pa zajema evtrofikacijo v nizvodnih delih rek (Drava, Sava, Soča, Notranjska reka, Donava) ter končnih recipientih Jadranskem ter Črnem morju. Na Jadranu so obalne vode poleg vplivov lokalnega onesnaževanja še pod udarom dotokov hranil z iztoki površinskih voda, kjer je bistveno največji vodotok Pad. Cvetenje morja, skoraj stalni spremljevalec turistične sezone v

zadnjem desetletju, povzroča turizmu ogromno škodo. Države v povodju Donave so se lotile skupnega okoljevarstvenega programa za zaščito okolja, v okviru katerega bodo tudi podrobno preučeni problemi evtrofikacije.

Sanacijo kakovosti rek, ki ne odtekajo v končni odvodnik že v Sloveniji, je možno izvesti samo s skupnimi akcijami vseh držav v povodju rek. Za reševanje slednjih je nujna usklajena akcija vseh držav v povodju. Za izvedbo sanacijskih ukrepov bo potrebno vključiti mednarodne finančne institucije, strategijo za slovenski del pa moramo izdelati sami.

Posebno pozornost pri preučevanju evtrofikacije v slovenskih pogojih moramo usmeriti na perifiton ter makrofite. Večina raziskav evtrofikacije v svetu obravnava fitoplankton. Ker večina naših rek ni zajezenih oziroma ima bolj hudourniški značaj, je nosilec primarne produkcije perifiton.

Kakovostne večletne študije razmer v odvodniku bi morale rabiti kot osnova za odločitve o potrebni kakovosti čiščenja v čistilni napravi, tehnologiji čiščenja, fazni izgradnji čistilne naprave ter potreb po gradnji posameznih faz. Tovrstne študije uvrščamo k študijam ranljivosti okolja ter presoj vplivov na okolje po novem zakonu o varstvu okolja.

LITERATURA

- EPA 1987. *The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS Documentation and user model*. Athenes, U. S. Environmental Protection Agency, 189 s.
- Harper D. 1992. *Eutrophication of freshwaters – principles, problems and restoration*. London, Chapman & Hall, 327 s.
- Kakovosti voda v Sloveniji 1991. 1992. Ljubljana Ministrstvo za varstvo okolja ter urejanje prostora, Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije, Zavod Republike Slovenije za varstvo okolja in vodni režim, 176 s.
- Kirchesch V. 1990. Berechnung des Algenwachstums und mit ihm verbundenen Auswirkungen auf den Sauerstoffhaushalt von Fließgewässern. *Deutsche gewässsekundliche Mitteilungen*, 34, 4, s. 123–130.
- Knoblauch A. 1987. *Matematiske Simulation des Phosphorkreislaufs in einem gestauter Gewässer Schriftenreihe gfw Wasser – Abwasser Heft 17*. München, GWF, 195 s.
- Krajnc U. 1989. *Prognoza spremembe kakovosti Save v akumulacijskem bazenu HE Vrhov z matematičnim modelom*. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 110 s.
- Krajnc U. 1992. Uporaba matematičnih modelov kakovosti vodotokov pri določanju biološkega minimuma. V: *Kolokvij biološki minimum*. Ljubljana 6. 11. 1992, 24 s.
- Krajnc U. 1994. *Evtrofikacija voda v luči varstva in gospodarjenja z vodnim bogastvom Slovenije*. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 306 s.
- Krajnc U. / Rismal M. 1989. Modeling changes in the Sava river quality caused by impounding water at the Vrhov hydroelectric power plant. V: *Water pollution control in the basin of the river Danube*. Novi Sad, Yugoslavia, 20–23 June 1989, s. 160–166.
- Krajnc U. / Toman M. J 1994. Eutrophication Problems in Slovenian Rivers – Mediterranean Catchment Area. V: *Pollution of the Mediterranean Sea*. Nicosia, Cyprus, 2–4 November 1994, s. 145–155.
- Orlob G.T. 1983: *Mathematical modeling of water quality: streams, lakes, reservoirs*. Chichester, John Wiley & Sons, 518 s.
- Rismal M. 1984 a. *Aplikativna inženirska limnologija in gospodarjenje z vodnim bogastvom*. Bled 1984, s. 19–68.
- Rismal M. 1984 b. *Kakovostna analiza Soče z ozirom na načrtovane in obstoječe vodne akumulacije*. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za zdravstveno hidrotehniko, 37 s.
- Rismal M. / Kompare B. 1985. *Presoja spremembe kakovosti vode reke Save zaradi zaježitve hidrocentrale Mavčiče*. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za zdravstveno hidrotehniko, 8 s.
- Roš M. / Toman M. 1985. *Ovrednotenje vplivov načrtovanih energetskih stopenj na kakovost Save s predlogom sanacijskih ukrepov*. Ljubljana, Kemijski inštitut Boris Kidrič, 79 s.
- Thomann R.V. / Mueller J.A. 1987. *Principles of surface water quality modeling and control*. Cambridge, Harper & Row, 644 s.
- Toman M.J. 1992. Problemi in dileme pri ocenjevanju kvalitete vodnega ekosistema. V: *Mednarodna konferenca o Dravi, Maribor 28. in 29. maj 1992*, s. 163–168.
- Vollenweider R. 1982. *Eutrophication of waters – monitoring, assesment and control*. Paris, OECD, 154 s.

POENOSTAVITEV IZRAČUNA TRI-DIMENZIONALNE GREEN-OVE FUNKCIJE

UDK: ...

ANDREJ ŠTRUKELJ

P O V Z E T E K

V prispevku sta podana izračun Green-ove funkcije za vertikalno gibanje površine homogenega polprostora s pomočjo potencialov in na osnovi rezultatov omenjenega postopka razvita metoda poenostavitve njenega zapisa. Problem izračuna Green-ove funkcije v literaturi obravnava več avtorjev: Achenbach, Kobayashi in drugi. Njen zapis je v vseh primerih zelo zapleten in običajno podan v integralski obliki, ki zahteva precej računskega napora, da se prevede v zaporedje diskretnih vrednosti, ki omogočajo pri nadaljnji obdelavi le uporabo numeričnih postopkov. Za doseganje zadovoljive natančnosti je potrebno točke, v katerih računamo vrednost Green-ove funkcije, zelo zgostiti, kar predstavlja precejšnjo oviro na poti do rešitve. Pojavilo se je vprašanje, ali je mogoče Green-ovo funkcijo, ki je v končni obliki pravzaprav dokaj pravilna, zapisati s pomočjo katere od elementarnih funkcij oziroma kombinacije le-teh in ali je mogoče parametre, ki določajo aproksimacijske funkcije, identificirati že na osnovi manjšega števila izračunanih »točnih« vrednosti. Pokazalo se je, da je mogoče Green-ovo funkcijo, ki opisuje vertikalno gibanje homogenega polprostora, zelo natančno aproksimirati že na osnovi majhnega števila izračunanih vrednosti z eksponentno funkcijo. Vse za izračun potrebne module smo izdelali v okviru programskega paketa Mathematica in jih kasneje omenjenemu programskemu paketu dodali, tako da so pri nadaljnjih izračunih direktno dostopni.

SIMPLIFICATION OF THREE-DIMENSIONAL GREEN'S FUNCTION CALCULATION

S U M M A R Y

In the present paper the simplified form of the vertical component of the three-dimensional Green's function is given. It is developed on the basis of the results obtained by the improved potential method. In spite of the very complicated integral form of Green's functions given in the literature, their final numerical values show the possibility to write them in a more simple form. So we tried to find the appropriate elementary functions to approximate Green's function given by the discrete numerical values. In our case the best results are obtained by a simple exponential function. All modules needed for the evaluation of the above mentioned methods are made with the program package Mathematica, which is a powerful tool for symbolic and numerical problem solving.

Avtor:
mag. Andrej Štrukelj, dipl. inž. gradb.
Fakulteta za gradbeništvo – Maribor

1.0. UVOD

Okvir predstavljenega dela je razvoj metod in postopkov za opis gibanja temelja poljubne oblike in izračun dinamične togosti slojevitnega polprostora. Osnovni problem pri tem predstavljajo neskončne dimenzije polprostora in njegova nehomogenost. Ker polprostora z modeli končnih dimenzij ne moremo zadovoljivo opisati, smo se reševanja tega problema lotili po indirektni poti, kjer predstavlja prvi korak razvoj Green-ove funkcije, v kateri je že upoštevana nehomogenost polprostora in neskončnost njegovih dimenzij. Naslednji korak je izračun kontaktnih napetosti med temeljem in površino polprostora s pomočjo integralne enačbe, ki jo rešujemo le na območju temelja z Green-ovo funkcijo kot jedrom. Pravilnost opisanih postopkov je potrjena na primeru izvenravninskega gibanja trakastega temelja (enodimenzionalni problem) na modelu tal, ki se sestoji iz sloja na elastični podlagi. Težišče sedanjega dela je v dodatni izboljšavi in poenostavitvi računskih metod in oblike zapisa Green-ove funkcije za tridimenzionalni problem, ki nam omogoča izračun kontaktnih napetosti pod temeljem poljubne oblike.

2.0. SPLOŠNA ENAČBA GIBANJA IN REŠITEV S POMOČJO POTENCIALOV

Vzemimo homogen in izotropen polprostor, katerega prosta površina je obremenjena s koncentrirano normalno silo $P \cdot H(t)$. Valovno gibanje generirano na tak način je osno simetrično, zato je v nadaljnjih izvajanjih najprimerneje uporabljati cilindrični koordinatni sistem. Izhajamo iz znane enačbe gibanja:

$$\mu \cdot \nabla^2 \bar{U} + (\lambda + \mu) \cdot \bar{\nabla} \bar{\nabla} \cdot \bar{U} = \rho \cdot \ddot{\bar{U}} \quad (1)$$

Ob predpostavki, da je:

$$\bar{U} = \bar{u}(r, \vartheta, z) \cdot T(t), \quad (2)$$

separiramo gibalno enačbo na krajevni in časovni del:

$$\frac{\mu}{\rho} \cdot \nabla^2 \bar{u} + \frac{\lambda + \mu}{\rho} \cdot \bar{\nabla} \bar{\nabla} \cdot \bar{u} = -\omega^2 \cdot \bar{u} \quad \text{in} \quad \ddot{T} = -\omega^2 \cdot T. \quad (3)$$

Če zapišemo vektor pomika s pomočjo potencialov kot:

$$\bar{u} = \bar{\nabla} \varphi + \bar{\nabla} \times \bar{\psi}, \quad (4)$$

dobi prva od enačb (3) obliko:

$$\frac{\mu}{\rho} \cdot (\nabla^2 \cdot \bar{\nabla} \varphi + \nabla^2 \cdot \bar{\nabla} \times \bar{\psi}) + \frac{\lambda + \mu}{\rho} \cdot \bar{\nabla} (\bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} \varphi + \bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} \times \bar{\psi}) = -\omega^2 \cdot (\bar{\nabla} \varphi + \bar{\nabla} \times \bar{\psi}). \quad (5)$$

Upoštevamo še, da je:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} \times \bar{\psi} = 0 \quad (6)$$

ter definiramo hitrost longitudinalne in strižne valovne fronte:

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2 \cdot \mu}{\rho}}; \quad c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (7)$$

Enačba (5) sedaj razpade na dve valovni enačbi:

$$\nabla^2 \varphi + \frac{\omega^2}{c_L^2} \cdot \varphi = 0 \quad \text{in} \quad \nabla^2 \bar{\psi} + \frac{\omega^2}{c_T^2} \cdot \bar{\psi} = 0. \quad (8)$$

Ker je $\bar{\psi}_\vartheta$ v primeru osno simetričnega gibanja edina od nič različna komponenta vektorskega potenciala $\bar{\psi}$, slednjega v nadaljnjem tekstu označujemo kar s ψ . V cilindričnem koordinatnem sistemu se enačbi (8) torej glasita:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + k_L^2 \cdot \varphi = 0 \quad \text{in} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{\psi}{r^2} + k_T^2 \cdot \psi = 0, \quad (9)$$

Če zapišemo enačbo (4) v komponentni obliki, dobimo za posamezne komponente pomika v cilindričnem koordinatnem sistemu naslednje zveze:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad \text{in} \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r \cdot \varphi)}{\partial r} \quad (10)$$

Sledijo še zveze med napetostmi in pomiki:

$$\sigma_z = (\lambda + 2 \cdot \mu) \cdot \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\lambda}{r} \cdot \frac{\partial(r \cdot \psi)}{\partial r} \quad \text{in} \quad \tau_{rz} = \mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right). \quad (11)$$

Robne pogoje lahko zapišemo v obliki:

$$\tau_{rz}|_{z=0} = 0; \quad \sigma_z|_{z=0} = -\frac{P \cdot H(t) \cdot \delta(r)}{2 \cdot \pi \cdot r}. \quad (12)$$

Parcialne diferencialne enačbe (9) prevedemo na navadne diferencialne enačbe s pomočjo Hankel-ove integralne transformacije $r \rightarrow \xi$, ki je definirana kot:

$$\mathcal{H}^n(f(r)) = \bar{f}^n(\xi) = \int_0^\infty f(r) \cdot J_n(\xi \cdot r) \cdot r \cdot dr, \quad (13)$$

priladajoča inverzna transformacija pa se glasi:

$$f(r) = \int_0^\infty \bar{f}^n(\xi) \cdot J_n(\xi \cdot r) \cdot \xi \cdot d\xi. \quad (14)$$

Transformirani diferencialni enačbi (9) se potem glasita:

$$\frac{d^2 \bar{\varphi}^0}{dz^2} - (\xi^2 - k_L^2) \cdot \bar{\varphi}^0 = 0 \quad \text{in} \quad \frac{d^2 \bar{\psi}^1}{dz^2} - (\xi^2 - k_T^2) \cdot \bar{\psi}^1 = 0. \quad (15)$$

Splošni rešitvi imata obliko:

$$\bar{\varphi}^0 = \Phi_1 \cdot e^{\sqrt{\xi^2 - k_L^2} \cdot z} + \Phi_2 \cdot e^{-\sqrt{\xi^2 - k_L^2} \cdot z} \quad \text{in} \quad \bar{\psi}^1 = \Psi_1 \cdot e^{\sqrt{\xi^2 - k_T^2} \cdot z} + \Psi_2 \cdot e^{-\sqrt{\xi^2 - k_T^2} \cdot z} \quad (16)$$

V primeru, ko obravnavamo gibanje homogenega polprostora, lahko takoj upoštevamo radiacijski pogoj. Tedaj sta konstanti Φ_1 in Ψ_1 enaki nič, enačbi (16) pa se poenostavita v:

$$\bar{\varphi}_H^0 = \Phi_2 \cdot e^{-\sqrt{\xi^2 - k_T^2} \cdot z} \quad \text{in} \quad \bar{\psi}_H^1 = \Psi_2 \cdot e^{-\sqrt{\xi^2 - k_T^2} \cdot z} \quad (17)$$

Transformiramo še izraze za pomike (10):

$$\bar{u}^1 = -\xi \cdot \bar{\varphi}^0 - \frac{d\bar{\psi}^1}{dz}; \quad \bar{w}^0 = \frac{d\bar{\varphi}^0}{dz} + \xi \cdot \bar{\psi}^1, \quad (18)$$

napetosti (11):

$$\bar{\sigma}_z^0 = \mu \cdot \left[(2 \cdot \xi^2 - k_T^2) \cdot \bar{\varphi}^0 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{d\bar{\psi}^1}{dz} \right]; \quad \bar{\tau}_{rz}^1 = -\mu \cdot \left[2 \cdot \xi \cdot \frac{d\bar{\varphi}^0}{dz} + (2 \cdot \xi^2 - k_T^2) \cdot \bar{\psi}^1 \right] \quad (19)$$

in robne pogoje (12):

$$\bar{\sigma}_z^0|_{z=0} = -\frac{P}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{\infty} \frac{1}{r} \cdot \delta(r) \cdot J_0(\xi \cdot r) \cdot r \cdot dr = -\frac{P}{2 \cdot \pi}; \quad \bar{\tau}_{rz}^1|_{z=0} = 0. \quad (20)$$

Ko vstavimo transformirane robne pogoje (20) v transformirane izraze za napetosti (19), kjer upoštevamo izraze za potenciale (17) izvednotene v $z = 0$, dobimo sistem enačb za neznan konstanti Φ_2 in Ψ_2 :

$$\begin{bmatrix} 2 \cdot \xi^2 - k_T^2 & -2 \cdot \xi \cdot \sqrt{\xi^2 - k_T^2} \\ -2 \cdot \xi \cdot \sqrt{\xi^2 - k_T^2} & 2 \cdot \xi^2 - k_T^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Phi_2 \\ \Psi_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -P/(2 \cdot \pi \cdot \mu) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (21)$$

Rešitve sistema so:

$$\Phi_2 = -\frac{P \cdot (2 \cdot \xi^2 - k_T^2)}{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot D_H} \quad \text{in} \quad \Psi_2 = -\frac{P \cdot \xi \cdot \sqrt{\xi^2 - k_T^2}}{\pi \cdot \mu \cdot D_H}, \quad (22)$$

kjer je D_H determinanta sistema in znaša:

$$D_H = (2 \cdot \xi^2 - k_T^2)^2 - 4 \cdot \xi^2 \cdot \sqrt{\xi^2 - k_T^2} \cdot \sqrt{\xi^2 - k_L^2}. \quad (23)$$

Dobljene izraze vstavimo v enačbe (17) in (18). Ker nas zanima le gibanje površine polprostora, vzamemo še $z = 0$ in tako dobimo iskane komponente pomika:

$$\bar{u}_H^1 = \frac{P \cdot \xi \cdot (2 \cdot \xi^2 - k_T^2 - 2 \cdot \sqrt{\xi^2 - k_T^2} \cdot \sqrt{\xi^2 - k_L^2})}{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot D_H}; \quad \bar{w}_H^0 = \frac{P \cdot k_T^2 \cdot \sqrt{\xi^2 - k_L^2}}{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot D_H} \quad (24)$$

Izvršiti moramo še inverzno Hankel-ovo transformacijo enačb (24). Pri tem upoštevamo:

$$\xi = \eta \cdot k_T, \quad D_H = k_T^4 \cdot \bar{D}_H, \quad k_T = \omega/c_T, \quad k_L = \omega/c_L, \quad \gamma = c_T/c_L \quad \text{in} \quad a = r \cdot \omega/c_T. \quad (25)$$

Tako je:

$$u_H = \frac{P \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot c_T} \cdot \int_0^{\infty} \frac{\eta^2}{\bar{D}_H} \cdot [2 \cdot \eta^2 - 1 - 2 \cdot \sqrt{\eta^2 - \gamma^2} \cdot \sqrt{\eta^2 - 1}] \cdot J_1(\eta \cdot a) \cdot d\eta \quad \text{in} \quad (26)$$

$$w_H = -\frac{P \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot c_T} \cdot \int_0^{\infty} \frac{\eta \cdot \sqrt{\eta^2 - \gamma^2}}{\bar{D}_H} \cdot J_0(\eta \cdot a) \cdot d\eta. \quad (27)$$

Znano je, da vsebuje singularna rešitev v elastodinamiki singularnost prvega reda v krajevni spremenljivki. To

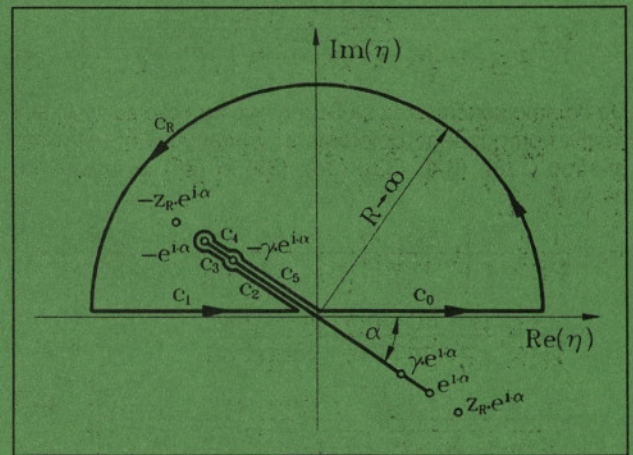
pomeni, da je tudi integral, ki nastopa v enačbi za inverzno Hankel-ovo transformacijo pomika, singularen. Naredimo ga regularnega z izločitvijo singularnosti $1/r$ iz integrala. Integrand razbijemo na dva sumanda. Izraz za pomik w_H lahko potem zapišemo v obliki:

$$w_H = \frac{P \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot \pi \cdot \mu} \cdot \frac{1}{r} \cdot \left(1 - \frac{a}{1 - \nu} \cdot I_{(\alpha)} \right), \quad (28)$$

kjer je:

$$I_{(\alpha)} = \int_0^{\infty} \left(\frac{\eta \cdot \sqrt{\eta^2 - \gamma^2}}{\bar{D}_H} + 1 - \nu \right) \cdot J_0(\eta \cdot a) \cdot d\eta. \quad (29)$$

Imenovalec v integrandu enačbe (29) je znana Rayleigh-jeva funkcija, ki ima dve kojugirani ničli in štiri paroma kojugirana razvejišča vzdolž premice, ki je v odvisnosti od koeficienta dušenja polprostora nagnjena za kot α glede na realno os (slika 1). Za nedušen polprostor je $\alpha = 0$, poli in razvejišča pa ležijo na realni osi kompleksne ravnine. V tem primeru so razvejišča pri $\eta = \pm \gamma$ in $\eta = \pm 1$, Rayleigh-jevi poli pa so pri $\eta = \pm Z_R$.



Slika 1. Integracijska pot

Integrand naredimo enoličen z vpeljavo razvejišnega reza, ki poteka po realni osi med -1 in 1 . Za določitev integrala vpeljemo pomožno funkcijo $h(\eta \cdot a)$, ki je definirana s:

$$h(\eta \cdot a) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} e^{i \cdot \eta \cdot a \cdot \sin(\zeta)} \cdot d\zeta. \quad (30)$$

Z gornjo funkcijo zamenjamo Bessel-ovo funkcijo J_0 v enačbi (29):

$$I_h = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\eta \cdot \sqrt{\eta^2 - \gamma^2}}{\bar{D}_H} + 1 - \nu \right) \cdot h(\eta \cdot a) \cdot d\eta. \quad (31)$$

Integral (31) izvednotimo s konturno integracijo vzdolž poti prikazane na sliki 1, ki smo jo zaradi preglednosti risali za dušen polprostor. Posamezne odseke integracijske poti označimo s C_i , ustrezne integrale po posameznih odsekih konture pa z I_i , kjer je $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, R$. Integral

po sklenjeni konturi C ima v našem primeru, ko gre $\alpha \rightarrow 0$, naslednjo obliko:

$$\oint_C \left(\frac{\eta \cdot \sqrt{\eta^2 - \gamma^2}}{D_H} + 1 - v \right) \cdot h(\eta \cdot a) \cdot d\eta = I_0 + I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_R =$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot i \cdot \text{Res} \left\{ \left(\frac{\eta \cdot \sqrt{\eta^2 - \gamma^2}}{D_H} + 1 - v \right) \cdot h(\eta \cdot a); \eta = -z_R \right\}. \quad (32)$$

Pokazati se da, da je:

$$I_0 + I_1 = 2 \cdot I_{(a)} \quad \text{in} \quad I_R = 0, \quad \text{ko gre } R \rightarrow \infty. \quad (33)$$

Naj bo $\eta = e^{i \cdot \beta}$. Upošteva je predznake in vrednosti kvadratnih korenov, ki nastopajo v števcu in imenovalcu integranda na posameznih odsekih integracijske poti, dobimo:

$$I_2 + I_5 = -2 \cdot i \cdot \int_0^\gamma \frac{\rho \cdot \sqrt{\gamma^2 - \rho^2} \cdot h(-\rho \cdot a) \cdot d\rho}{(2 \cdot \rho^2 - 1)^2 + 4 \cdot \rho^2 \cdot \sqrt{\gamma^2 - \rho^2} \cdot \sqrt{\gamma^2 - 1}}, \quad (34)$$

$$I_3 + I_4 = -2 \cdot i \cdot \int_\gamma^1 \frac{4 \cdot \rho^3 \cdot (\gamma^2 - \rho^2) \cdot \sqrt{1 - \rho^2} \cdot h(-\rho \cdot a) \cdot d\rho}{(2 \cdot \rho^2 - 1)^4 + 16 \cdot \rho^4 \cdot (\gamma^2 - \rho^2) \cdot (\gamma^2 - 1)}. \quad (35)$$

Vrednost residuuma v Rayleigh-jevem polu $\eta = -z_R$ znaša:

$$F_{\text{res}} = \frac{-\frac{1}{2} \cdot \sqrt{z_R^2 - \gamma^2} \cdot h(-z_R \cdot a)}{2 \cdot z_R^2 - 1 - \sqrt{z_R^2 - \gamma^2} \cdot \sqrt{z_R^2 - 1} - \frac{z_R^2}{2} \cdot \left(\sqrt{\frac{z_R^2 - 1}{z_R^2 - \gamma^2}} + \sqrt{\frac{z_R^2 - \gamma^2}{z_R^2 - 1}} \right)}. \quad (36)$$

Da dobimo končni izraz za Green-ovo funkcijo za vertikalni pomik homogenega polprostoru, v enačbo (28) vstavimo enačbe (29), (32), (33), (34), (35) in (36) in vzamemo, da je $P = 1$:

$$G_w = \frac{1-v}{2 \cdot \pi \cdot \mu} \cdot \frac{1}{r} \left\{ 1 - \frac{a \cdot i}{1-v} \cdot \left[\int_0^\gamma \frac{\rho \cdot \sqrt{\gamma^2 - \rho^2} \cdot h(-\rho \cdot a) \cdot d\rho}{(2 \cdot \rho^2 - 1)^2 + 4 \cdot \rho^2 \cdot \sqrt{\gamma^2 - \rho^2} \cdot \sqrt{\gamma^2 - 1}} \right. \right.$$

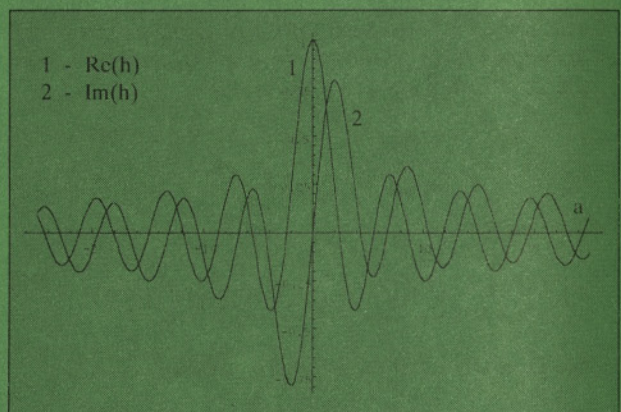
$$+ \left. \int_\gamma^1 \frac{4 \cdot \rho^3 \cdot (\gamma^2 - \rho^2) \cdot \sqrt{1 - \rho^2} \cdot h(-\rho \cdot a) \cdot d\rho}{(2 \cdot \rho^2 - 1)^4 + 16 \cdot \rho^4 \cdot (\gamma^2 - \rho^2) \cdot (\gamma^2 - 1)} \right.$$

$$\left. - \frac{\pi \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{z_R^2 - \gamma^2} \cdot h(-z_R \cdot a)}{2 \cdot z_R^2 - 1 - \sqrt{z_R^2 - \gamma^2} \cdot \sqrt{z_R^2 - 1} - \frac{z_R^2}{2} \cdot \left(\sqrt{\frac{z_R^2 - 1}{z_R^2 - \gamma^2}} + \sqrt{\frac{z_R^2 - \gamma^2}{z_R^2 - 1}} \right)} \right\}. \quad (37)$$

3.0. NUMERIČNA REŠITEV IN PRIKAZ REZULTATOV

V obeh integralih, ki nastopata v enačbi (37), nastopa funkcija $h(\rho \cdot a)$, ki jo je mogoče izvednotiti tako, da integrand v enačbi (30) aproksimiramo s polinomi različnih stopenj. Območje uporabnosti tako izračunane funkcije se z večanjem stopnje polinoma sicer večja, vendar pa je računski napor, ki je zato potreben pri večjih vrednostih argumenta, zelo velik in je v teh primerih ta postopek povsem neuporaben. Integrand v enačbi (30) z rastočo vrednostjo a vedno hitreje oscilira.

Zato smo argument eksponentne funkcije, ki v omenjenem integrandu nastopa, razdelili na končno število odsekov, funkcijo $h(\rho \cdot a)$ pa smo izvednotili kot vsoto integralov po posameznih odsekih. Modul, s katerim to naredimo, je v celoti podan na sliki 2. Na sliki 3 je prikazan potek funkcije $h(\rho \cdot a)$ na intervalu $-25 \leq \rho \cdot a \leq 25$.



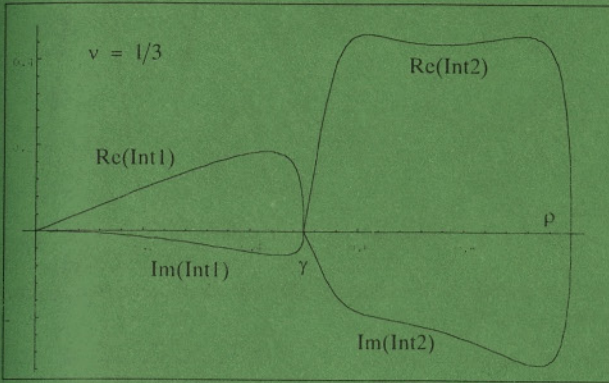
Slika 3: Realni in imaginarni del funkcije $h(\rho a)$

V nadaljnjem izračunu vrednosti Green-ove funkcije sledimo postopku opisanem pod točko 2. Integrandu v prvem in drugem intervalu v enačbi (37) sta za $v = 1/3$ prikazana

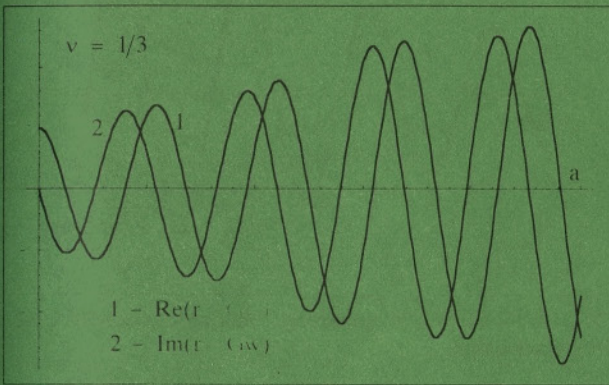
Slika 2: Modul za izračun funkcije $h(\rho a)$

```
BeginPackage["H "]
H::usage = "H[a] izracuna vrednost funkcije H[a] v poljubni
           tocki razen v a = 0."
Begin["`Private`"]
H[a_]:=
Module[{q,m,x},
  q = Quotient[Abs[a],2*Pi];
  N[2*(Sum[N[NIntegrate[(Cos[a*Sin[x]]+
  I*Sin[a*Sin[x]]],
  {x,N[ArcSin[2*m*Pi/Abs[a]],32],
  N[ArcSin[2*(m+1)*Pi/Abs[a]],32]}],32],
  {m,0,q-1}]+
  N[NIntegrate[(Cos[a*Sin[x]]+I*Sin[a*Sin[x]]],
  {x,N[ArcSin[2*q*Pi/Abs[a]],32],
  N[Pi/2,32]}])]/Pi,32];
]
End[]
EndPackage[]
```

na sliki 4, kjer sta označena z Int1 in Int2. Realni in imaginarni del produkta Green-ove funkcije z r sta prikazana za interval $0 < a \leq 25$ na sliki 5.



Slika 4: Potek integrandov v enačbi (37)



Slika 5: Green-ova funkcija za $\nu = 1/3$

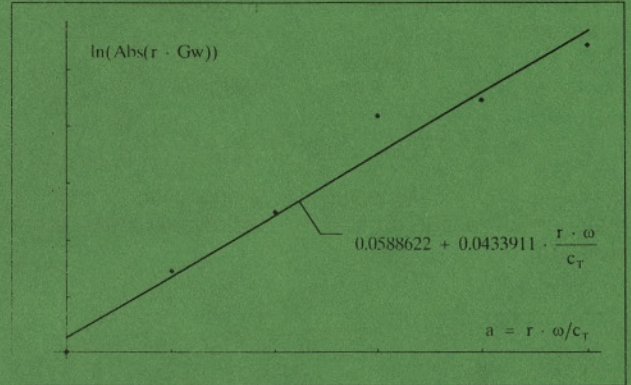
4.0. APROKSIMACIJA GREEN-OVE FUNKCIJE

Kot je razvidno iz opisanega postopka, je že izračun najenostavnejših Green-ovih funkcij izredno težaven in zahteven, končne rezultate pa je mogoče dobiti razen v povsem trivialnih primerih le v numerični obliki. Kljub temu pa oblika samih funkcij kaže na to, da bi jih bilo mogoče vsaj odsekoma, če že ne v celoti, aproksimirati s pomočjo elementarnih funkcij. Zato smo poskusili razviti metodo aproksimacije s pomočjo eksponentnih funkcij. Za osnovne podatke vzamemo kar primer, ki je prikazan na sliki 5. Za omenjeni prikaz je Green-ova funkcija izračunana v 250 diskretnih točkah. Za vhodne podatke pri razvoju aproksimacije smo iz omenjene množice izbrali 6 ekvidistantnih točk (preglednica 1).

a	r.Gw
0.0000	1.0000000000000000 + 0.0000000000000000*i
5.0000	1.195399130670977 + 0.598194135865847*i
10.0000	0.707230850394751 + 1.48585519916739*i
15.0000	-0.974529296145422 + 2.091147119250043*i
20.0000	-2.393911492156908 + 0.507685541799530*i
25.0000	-2.411471493839219 - 1.732291732169982*i

Preglednica 1. Vhodni podatki za aproksimacijo funkcije

Kot bo kasneje razvidno, je ujemanje aproksimacije in originala presenetljivo dobro. Prvi korak je račun naravnega logaritma absolutnih vrednosti funkcije v izbranih točkah. Skozi tako dobljene vrednosti po metodi najmanjših kvadratov potegnemo logaritično premico (slika 6).



Slika 6: Logaritična premica skozi izhodiščne vrednosti

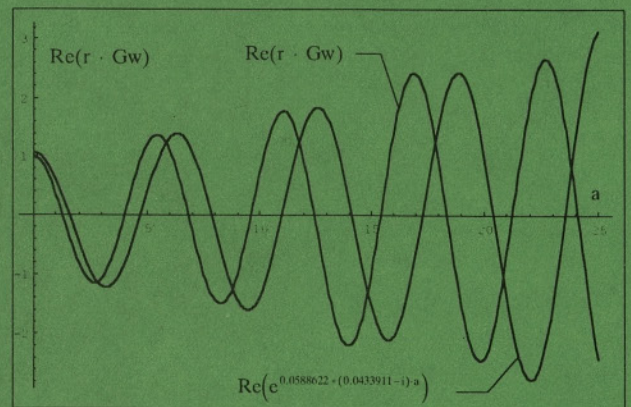
Enačba premice se glasi:

$$\ln(\text{Abs}(r \cdot \overline{Gw})) = 0.0588622 + 0.0433911 \cdot \frac{r \cdot \omega}{c_T} \quad (38)$$

Po antilogaritmiranju in množenju z $e^{-i \cdot a}$ dobimo:

$$r \cdot \overline{Gw} = \text{Exp}[0.0588622 + (0.0433911 - i) \cdot a] \quad (39)$$

Ko to primerjamo s točnimi vrednostmi, ki so za ta primer na voljo, vidimo, da se amplitude oscilacij funkcije dokaj dobro ujemajo, periode pa se z naraščanjem oddaljenosti od izhodišča vedno bolj razhajajo (slika 7):



Slika 7: Primerjava točnih vrednosti in prve aproksimacije

Pokazalo se je, da je mogoče naraščanje periode zelo dobro opisati z linearno funkcijo. Identifikacija njenih koeficientov poteka tako, da za znane ordinate točno izračunanih točk poiščemo abscise aproksimacijske funkcije. Tvorimo novo funkcijo, ki jo definiramo tako, da na absciso os nanesemo abscise točnih vrednosti, na ordinato pa izračunane abscise aproksimacijske funkcije. Vidimo, da ležijo nanešene točke praktično v ravni črti

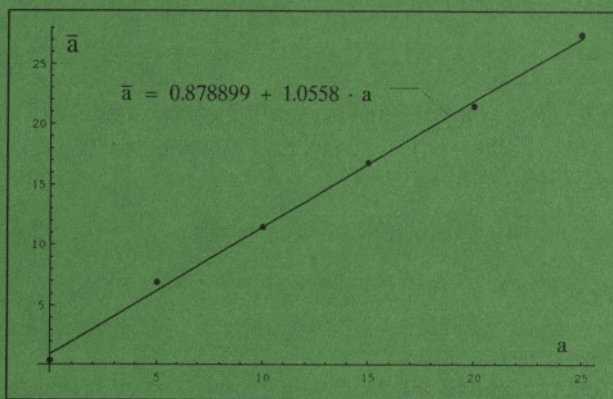
(slika 8). Po metodi najmanjših kvadratov skozi nje potegnemo premico, ki ima enačbo:

$$\bar{a} = 0.878899 + 1.0558 \cdot a \quad (40)$$

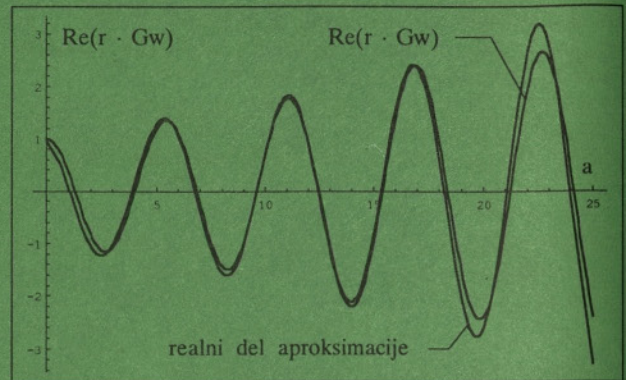
Z dobljenim izrazom zamenjamo vrednost a v enačbi (39) in dobimo:

$$r \cdot Gw \approx (0.702985 - 0.848472 \cdot i) \cdot \text{Exp}[(0.0458122 - 1.0558 \cdot i) \cdot a] \quad (41)$$

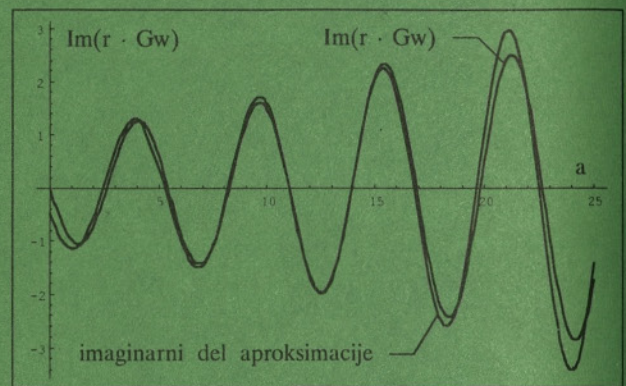
Ujemanje tako dobljene funkcije z originalno je za njen realni del prikazano na sliki (9), za imaginarni del pa na sliki (10).



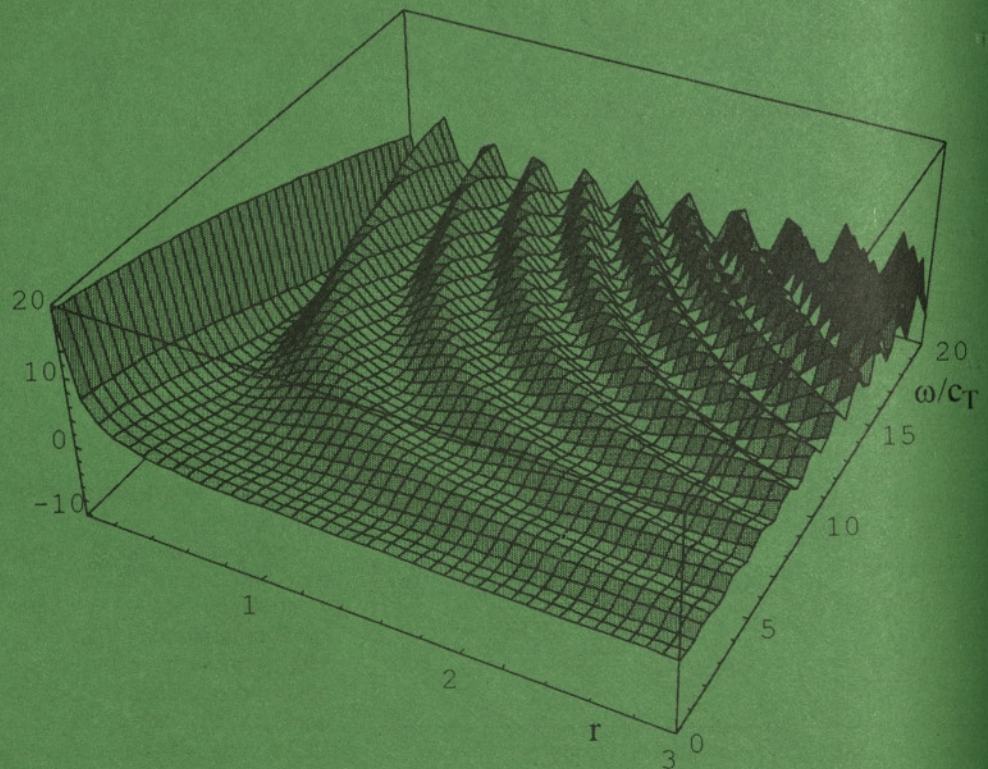
Slika 8. Korekcijska funkcija



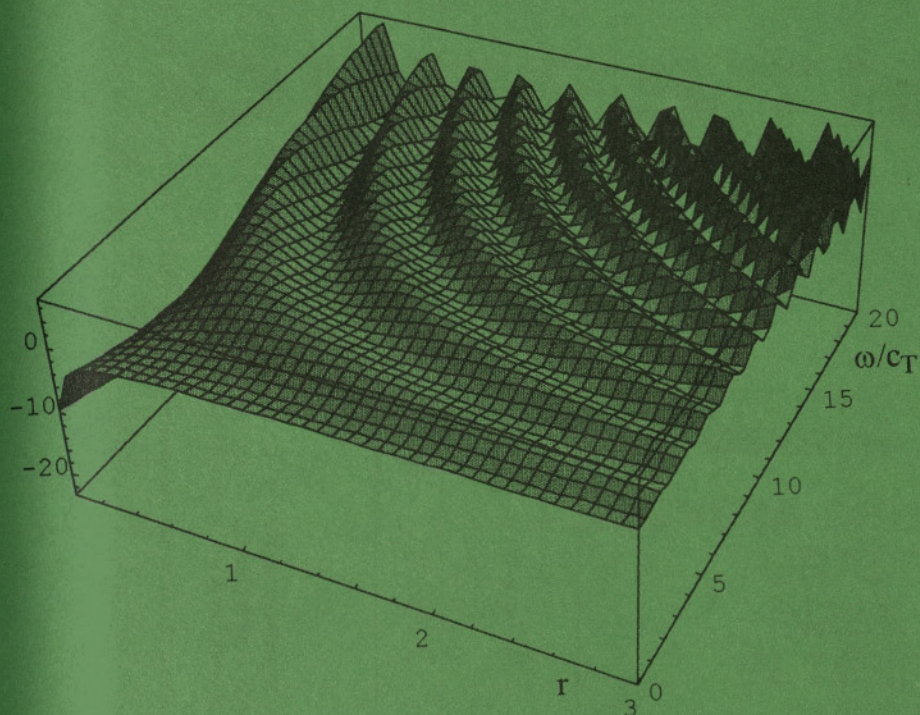
Slika 9. Primerjava realnega dela aproksimacije s točnimi vrednostmi



Slika 10: Primerjava imaginarnega dela aproksimacije s točnimi vrednostmi



Slika 11: 3D prikaz realnega dela aproksimacije Greenove funkcije



Slika 12: 3D prikaz imaginarnega dela aproksimacije Green-ove funkcije

Končna oblika izraza za Green-ovo funkcijo je v našem primeru:

$$G_w\left(r, \frac{\omega}{c_T}\right) \approx \frac{0.702985 - 0.848472 \cdot i}{r} \quad (42)$$

$$\text{Exp}\left[(0.0458122 - 1.0558 \cdot i) \cdot \frac{r \cdot \omega}{c_T}\right]$$

Tri-dimenzionalni grafični prikaz gornje enačbe je podan na slikah 11 (realni del) in 12 (imaginarni del).

5.0 ZAKLJUČEK

Predstavljena metoda izračuna Green-ove funkcije je hitra, enostavna in zanesljiva, opisani postopek pa je uporaben tudi na praktičnih primerih, ko vhodne vrednosti niso dobljene računsko, temveč so izmerjene. Analitična oblika zapisa Green-ove funkcije na tak način bistveno poenostavi nadaljnje korake pri reševanju problemov interakcije med objektom in tlemi, kar bomo skušali potrditi v naslednji fazi, ko bomo prikazane postopke za izračun Green-ove funkcije uporabili tudi na primeru slojevitega polprostora.



LITERATURA

1. Achenbach, J.D.: Wave Propagation in Elastic Solid, North-Holland Publishing Company – Amsterdam, 1975
2. Kobayashi, T.: Sasaki, F.: Evaluation of Green's Function on Semi-infinite Elastic Medium, Kajima Technical Research Institute, KICT Report, No. 86, 1991
3. Štrukelj, A.: Dinamika trakastega temelja na slojevitem polprostoru, Magistrsko delo, 1989
4. Wolfram, S.: Mathematica, A System for Doing Mathematics by Computer, Addison-Wesley Publishing Company, 1992
5. Abramowitz, M.: Stegun, I.A.: Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, Inc., 1972



STROKOVNI IZPITI ZA GRADBENIŠTVO IN ARHITEKTURO TER PRIPRAVLJALNI SEMINARJI ZA STROKOVNE IZPITE V LETU 1995

Rok	Leto	Mesec	A.		B.	
			SEMINAR	IZPIT		
				pisni	ustni	
VI.	1995	September	18.–22. september			
VII.	1995	Oktober	16.–20. oktober	21. oktober	6.–10. november	
VIII.	1995	November	13.–17. november	18. november	4.–8. december	
IX.	1995	December	11.–15. december			

A. Pripravljalni seminar za strokovne izpite organizira **ZVEZA DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE, LJUBLJANA**, Erjavčeva 15, telefon 061/221-587. Prijavo v obliki dopisa, skupaj z dokazilom o plačilu, pošlje organizatorju plačnik stroškov seminarja. Cena seminarja za posameznega udeleženca znaša 350 DEM, plačljivo v SIT po srednjem tečaju Banke Slovenije na dan plačila, z doplačilom 5% prometnega davka. Morebitno spremembo cene bomo objavili naknadno po njenem sprejetju.

B. Strokovni izpit organizira **ZAVOD ZA RAZISKAVO MATERIALA IN KONSTRUKCIJ LJUBLJANA**, Dimičeva 12, Ljubljana. Vse informacije dobite osebno ali prek telefona 061/342-671 vsak dan, razen sobote, nedelje in praznikov, od 8. do 12. ure pri inž. Grošlju oziroma g. Šubljevi.

OBVESTILO

Vse gradbenike, sodelavce, poslovne partnerje in člane, obveščamo, da smo sedež Zveze in Uredništvo »Gradbenega vestnika« preselili z Erjavčeve 15 na Karlovško 3 (nad grajskim tunelom).

Novi naslov se glasi:

**ZVEZA DRUŠTEV
GRADBENIH
INŽENIRJEV
IN TEHNIKOV
SLOVENIJE
61000 Ljubljana,
Karlovška 3**

Na novem naslovu (Karlovška 3, Ljubljana) se od 1. septembra 1995 nahajajo še naslednje zveze oziroma društva:

- ZVEZA INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE
- ZVEZA ARHITEKTOV SLOVENIJE
- ZVEZA GOZDARSKIH DRUŠTEV SLOVENIJE
(»Gozdarski vestnik«)
- ZVEZA DRUŠTEV INŽENIRJEV IN TEHNIKOV
LESARSTVA SLOVENIJE (»LES«)
- ZVEZA DRUŠTEV URBANISTOV SLOVENIJE
- ZVEZA DRUŠTEV ZA VARILNO TEHNIKO SLOVENIJE
- ELEKTROTEHNIŠKA ZVEZA SLOVENIJE



ŠTUDIJSKI PROGRAMI

ZNANSTVENO RAZISKOVALNE EDOTE

PROMET

GRADBENIŠTVO

GOŠPODARSKO INŽENIRSTVO



LABORATORIJ ZA MEHANIKO TAL IN TEMELJENJE

INŠTITUT PROMETNIH VED

INŠTITUT GRADBENIH VED

INTERDISCIPLINARNI ŠTUDIJ



LABORATORIJ ZA PREISKAVO MATERIALOV IN KONSTRUKCIJ

KATEDRA ZA SPLOŠNE PREDMETE



LABORATORIJ ZA KOMUNALNO HIDROTEHNIKO

KATEDRA ZA SPLOŠNI PROMET

KATEDRA ZA GEOMEHANIKO



CENTER ZA CESTE IN CESTNI PROMET

KATEDRA ZA ŽELEZNIŠKI PROMET

KATEDRA ZA GRADBENE KONSTRUKCIJE



RAZISKOVALNO PROJEKTIVNI BIRO

KATEDRA ZA CESTNI PROMET

KATEDRA ZA GRADBENO MEHANIKO IN RACUNALNIŠTVO



LABORATORIJ ZA ANALIZO KONSTRUKCIJ

KATEDRA ZA HIDROTEHNIKO



CENTER ZA ORGANIZACIJO, TEHNOLOGIJO IN EKONOMIKO GRAJENJA

KATEDRA ZA PROMETNE GRADNJE

KATEDRA ZA OPERATIVNO GRADBENIŠTVO



LABORATORIJ ZA TEORETIČNO IN EKSPERIMENTALNO ANALIZO KONSTRUKCIJ IN OPTIMIZACIJO

KATEDRA ZA JEDRSKO ENERGETIKO IN TEHNOLOGIJO

