

prof. dr. Janez Duhovnik, univ. dipl. inž. grad.
janez.duhovnik@gmail.com



prof. dr. Boštjan Brank, univ. dipl. inž. grad.
bostjan.branc@fgg.uni-lj.si



Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR),
Jamova 2, 1000 Ljubljana

Pregledni znanstveni članek
UDK 624.07(497.4)(091)

50 LET KONSTRUKCIJSKEGA INŽENIRSTVA NA IKPIR

50 YEARS OF STRUCTURAL ENGINEERING AT IKPIR

Povzetek

Podajamo pregled aktivnosti, ki so bile v petdesetih letih obstoja Inštituta za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR) povezane s konstrukcijskim inženirstvom in numerično mehaniko. Opisane so pomembnejše raziskave ter tudi nekatere druge aktivnosti.

Ključne besede: konstrukcijsko inženirstvo, numerična mehanika, končni elementi, IKPIR

Summary

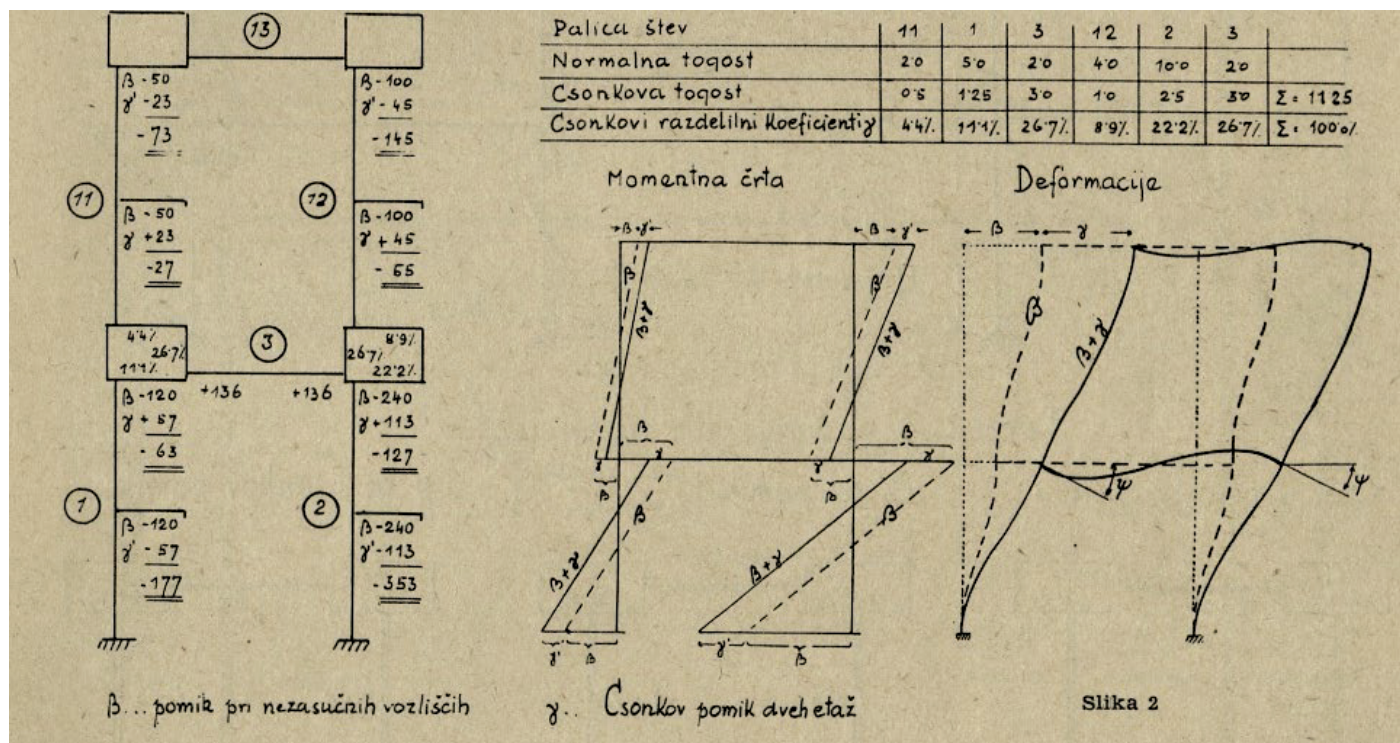
We present and overview of activities related to structural engineering and computational mechanics during the fifty years of existence of the Institute of Structural Engineering, Earthquake Engineering and Construction IT (IKPIR). The main research as well as other activities are briefly described.

Key words: structural engineering, numerical mechanics, finite elements, IKPIR

1 PROJEKTIRANJE GRADBENIH KONSTRUKCIJ V SLOVENIJI V LETIH 1960–1969

Razmere v gradbeništvu v Sloveniji v šestem desetletju prejšnjega stoletja so bile odsev razmer v družbi, ki jih je krojila gospodarska reforma, in kot njena posledica spremenljiva politika investiranja v gradnjo novih objektov vseh vrst. Kljub temu je gradbeništvo v tistem desetletju sorazmerno napredovalo

ša. Kot kažeta opisa mostov čez Dravo v Podvelki [Hvastja, 1963] in Mariboru [Pipan, 1963], so se obširnim računom izognili z uporabo enkrat statično nedoločene ali celo statično določene konstrukcije. Pri graditvi čedalje višjih stavb iz armiranega betona so bile pogosto uporabljene konstrukcije, sestavljene iz okvirjev in sten. Analizo takih konstrukcij po postopku »poskusi in popravi« je opisal takratni asistent pri prof. Lapajnetu prof. Blaž Vogelink [Vogelink, 1963]. V članku je kot primer opisana razdelitev vodoravne obtežbe med okvirje in stene pri stolpni-

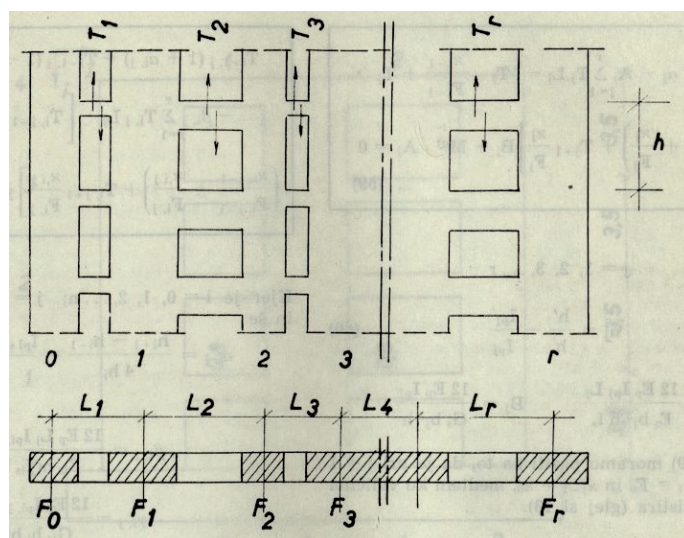


Slika 1. Račun pomičnih okvirjev po Csonkovi metodi [Lapajne, 1963].

in zgrajenih je bilo več pomembnih energetskih, prometnih, industrijskih, poslovnih in stanovanjskih objektov. Pri projektiranju gradbenih konstrukcij se je v tistem času zlasti spremenila analiza konstrukcij (račun notranjih in podpornih sil ter premikov), ki je doživela velik napredek. Ta je bil postopen in prehod na uporabo novih metod analize je trajal več let. Da bi vsaj delno ugotovili takratno stanje, smo pregledali članke o gradbenih konstrukcijah, ki so bili objavljeni v letih od 1960 do 1969 v Gradbenem vestniku [CV, 2021].

Okoli leta 1960 so za analizo ravninskih okvirnih konstrukcij pretežno uporabljali iteracijske metode po Crossu [Lapajne, 1949] in Kanyju. Prof. Svetko Lapajne je tudi leta 1963 pisal o dopolnjeni Crossovi metodi za analizo pomičnih ravninskih okvirjev, ki jo je predlagal Csonka [Lapajne, 1963], slika 1. Vse omenjene metode so temeljile na klasični metodi premikov, ki ne upošteva vpliva prečnih in osnih sil na premike. Metode so nazorne in omogočajo dober spolni nadzor nad potekom računa. Pri konstrukcijah z več polji in etažami pa postane račun zamuden.

Navedeno velja za konstrukcije pri nepomični obtežbi. Analiza konstrukcij mostov je zaradi pomične prometne obtežbe, ki zahteva določitev vplivnic, nekoliko bolj zapletena in obsežnej-



ci Metalka v Ljubljani. Istega problema se je lotil prof. Prelog, ki je pri reševanju uporabil diferenčno metodo [Prelog, 1965]. Avtor je za reševanje sistema linearnih enačb uporabil metodo eliminacije neznank. Iz članka [Vedlin, 1965], ki opisuje jekleno konstrukcijo športne hale Tivoli v Ljubljani, pa lahko zaključimo, da so tudi pri velikih jeklenih konstrukcijah uporabljali statično določene konstrukcije, ker so zahtevale manj obsežne račune. Prvič so računalniki v zvezi s projektiranjem konstrukcij obširneje omenjeni v članku, ki vsebuje zanimivo vizijo o predvideni uporabi na tem področju [Čačović, 1965]. Avtor našteva naloge, za katere predvideva, da jih bodo v prihodnje inženirjem pomagali opraviti računalniki. V skupni julijski in avgustovski številki Gradbenega vestnika leta 1966 je bilo objavljeno obvestilo Inštituta za matematiko, fiziko in mehaniko o večdnevem seminarju Uporaba elektronskih računalnikov v konstrukcijski mehaniki. Program seminarja, ki naj bi ga vodila prof. dr. inž. Ervin Prelog in dr. inž. Dragoš Jurišič, naj bi bil: (1) osnove računanja z matrikami, diferenčne metode za reševanje diferencialnih enačb in osnovne karakteristike računalnikov in programiranja, 6 ur; (2) a) reševanje nosilcev, okvirjev in skeletnih konstrukcij po redukcijski metodi, 16 ur, b) reševanje sten in plošč poljubnih oblik in poljubnih robnih pogojev, 10 ur, c) računanje nihajnih dob pri sistemu z več masnimi točkami, 4 ure; (3) prikaz reševanja zgornjih problemov z računalnikom Z23 na praktičnih zgledih. Seminar naj bi bil v drugi polovici oktobra 1966. Ali je bil seminar opravljen ali ne, nismo mogli ugotoviti. V bibliografiji predvidenih vodij seminarja pa sta navedeni dve njuni deli iz tega leta ([COBISS, 1966a], [COBISS, 1966b]). Analizo sten z odprtiniami je po diferenčni metodi obravnaval prof. Prelog v [Prelog, 1966], slika 2. Tudi tokrat je avtor za reševanje sistema linearnih enačb uporabil metodo eliminacije neznank.

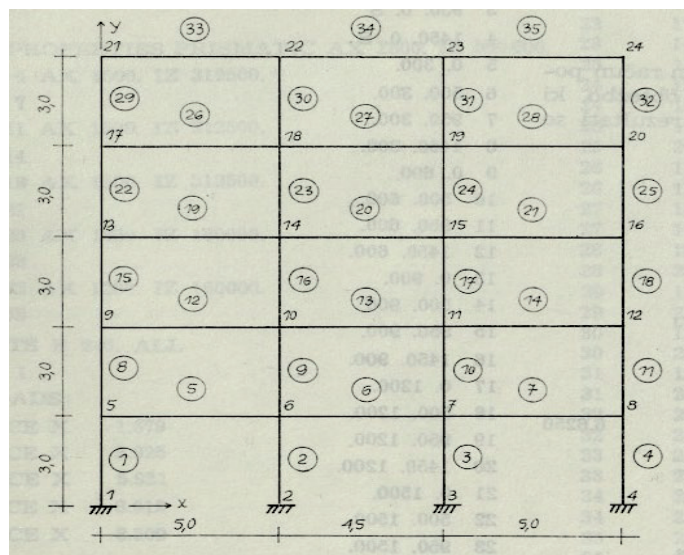
O plastostatični analizi okvirjev sta Carmen Jež-Gala in Franjo Šliber objavila članek [Jež-Gala, 1966]. Avtorja uporabe računalnika pri svojem delu ne omenjata. Crossovo in Kanyjevo metodo je za račun ravninskih okvirjev pri svojem doktorskem delu uporabil tudi Srečko Cerar, kar je opisal v [Cerar, 1967]. V svojem nastopnem predavanju ob izvolitvi v izrednega profesorja na FAGG, ki ga je objavil v [Pukl, 1967], je prof. Slavko Pukl sicer obravnaval širše področje analize konstrukcij, na koncu pa ugotovil, da nam bodo šele računalniki omogočili boljše spoznavanje obnašanja konstrukcij. O udeležbi na kongresu avstrijskega društva za beton ob Vrbskem jezeru na Koroškem je poročal prof. Svetko Lapajne v [Lapajne, 1968]. Zapisal je, da so bili mostovi na avtocesti Celovec-Beljak, ki se je takrat gradila, preračunani z računalniki. Račun po diferenčni metodi je pogosto uporabil tudi prof. Riko Rosman iz Zagreba, ki je v [Rosman, 1968] objavil članek o lomljenih stenastih nosilcih, oslabljenih s svetlobnimi pasovi. Zanimiva za primerjavo z drugimi področji gradbeništva sta članek [Avanzo, 1968], ki obravnava uporabo računalnika pri projektiranju cest, in [Bubnov, 1969], ki obravnava možnosti uporabe računalnikov na celotnem področju gradbeništva. Prof. Slavko Pukl je o uporabi računalnika v statiki pisal v [Pukl, 1969]. Članka [Fajfar, 1969] in [Reflak, 1969] sodelavcev prof. Marinčka omenjata uporabo računalnika pri raziskovanju elastoplastičnega obnašanja nosilcev. O metodi končnih elementov je članek napisal prof. Dragoš Jurišič [Jurišič, 1969].

Stanje gradbenega konstrukcijskega inženirstva v Sloveniji in drugih republikah Jugoslavije konec šestega desetletja prejšnjega stoletja je opisal prof. Svetko Lapajne v poročilu s kongresa jugoslovanskega društva gradbenih konstruktorjev

v Portorožu [Lapajne, 1969]: »Teorija konstrukcij raziskuje velikosti notranjih sil oziroma napetostno stanje v posameznih konstrukcijskih elementih. Sodobni razvoj pač zahteva, da se njih velikosti in smeri ugotovijo čim točneje vnaprej, saj je le na ta način možno oblikovanje in dimenzioniranje, ki naj bo istočasno gospodarno in varno. Vrsta posameznih primerov je zahtevala poseben študij, rešljiv zaradi svoje matematične kompliciranosti le s pomočjo računskega stroja (elektronskega). Tako imenovano »pešačenje« ostane le še za enostavne, lahke, že davno rešene naloge in za približno kontrolo rezultatov računalnika. Elektronski računalnik si je z bleščečim vzponom utrl pot v teorijo konstrukcij – brez njega si danes ne moremo več predstavljati znanstvenega raziskovanja na tem področju. V večini primerov služi za osnovo reševanja nalog matrični račun, sodobni matematični postopek. Tako je tudi velik del referatov podajal definicijo matric za rešitev danih nalog. V Beogradu imajo že sistematsko uvedeno računanje z elektronskim računalnikom. Pri nas pa se lahko pohvalimo le z dejstvom, da imamo nekaj mladih mož, katerih inženirska in matematična izobrazba je dovolj velika, da bomo lahko vsaj sledili svetovnemu razvoju na tem polju.«

2 PRVI RAČUNALNIŠKI PROGRAMI ZA ANALIZO KONSTRUKCIJ V SLOVENIJI

Konec šestdesetih let prejšnjega stoletja je bila na konstrukcijski smeri gradbenega oddelka FAGG v Ljubljani med sodelavci peščica mladih gradbenih inženirjev z nekaj malega operativnih in projektantskih izkušenj. Ker smo iz projektov, s katerimi smo imeli v preteklosti opravka, poznali obsežnost statičnih računov, nas je možnost uporabe posebnih računalniških programov za analizo konstrukcij takoj pritegnila. Prvi računalnik v Sloveniji Zuse Z23 (računalnike te vrste je izumil nemški gradbeni inženir Konrad Zuse (1919–1995)), s katerim so nekateri med nami že imeli opravka, je uporabljal programe za reševanje sistemov linearnih enačb, kar je pomenilo, da je opravil le del analize konstrukcije. Le za račun koeficientov enačb in obtežnih členov ter notranjih in podpornih sil



Slika 3. Ročno narisani računski model okvirne konstrukcije za račun s programom STRESS [Duhovnik, 1969].

pa je bilo treba opraviti še kopico t. i. peš računov. Pri enem od projektov okvirne konstrukcije za skladišče žita s šestimi etažami in okvirji s tremi polji v eni in štirimi polji v drugi smeri [Žerovnik, 1967] je bilo v statičnem računu za račun obtežbe in karakteristik konstrukcije ročno popisanih 24 strani formata A4, za račun potresnih sil po približni metodi in koeficientov ravnotežnih enačb ter obtežnih členov po klasični metodi premikov 43 strani, za račun upogibnih momentov in njihov prikaz pa še 82. Pri tem se je treba zavedati, da je bila uporabljena metoda v določenih primerih zaradi neupoštevanja vpliva prečnih in osnih sil na premike precej netočna. Program STRESS [Fenves, 1963] za analizo linijskih konstrukcij na računalniku IBM 1130, ki je bil konec leta 1968 inštaliran na Inštitutu za matematiko, fiziko in mehaniko v Ljubljani, je večji del analize opravil sam. Uporabljal je metodo končnih elementov, katere teoretično podlago smo poznali iz tuje in najnovejše domače literature. Projektant je moral določiti računski model konstrukcije (slika 3). Ustrezno oštevilčenje vozlišč in elementov je omogočalo generiranje podatkov in zmanjšanje števila luknjanih papirnatih kartic za njihovo pripravo. Na podlagi podatkov o konstrukciji in obtežbi je program poleg notranjih in podpornih sil izračunal tudi premike konstrukcije in vse izpisal v tabelarni obliki. Za tisto obdobje je bilo to izvrstno.

Na začetku uporabe smo imeli nekaj težav s pripravo podatkov na luknjanih karticah. Nekaj časa smo potrebovali za ugotovitev, da smo za napačne rezultate vedno odgovorni sami. Ker so bili podatki in rezultati le izpisani, brez grafične predstavitve, se je bilo treba navaditi na tak način branja in preverjanja rezultatov.

S programom STRESS na računalniku IBM 1130 smo po začetnih poskusih najprej analizirali nekaj konstrukcij, pri katerih smo bili projektanti, nato pa smo to počeli tudi za številne druge projektante konstrukcij. Naše prve izkušnje smo objavili v [Duhovnik, 1969].

Na pobudo gradbenega podjetja Tehnika je bil leta 1970 organiziran seminar o reševanju linijskih konstrukcij z uporabo računalnikov, naslednje leto pa izdana publikacija [Prelog, 1971].

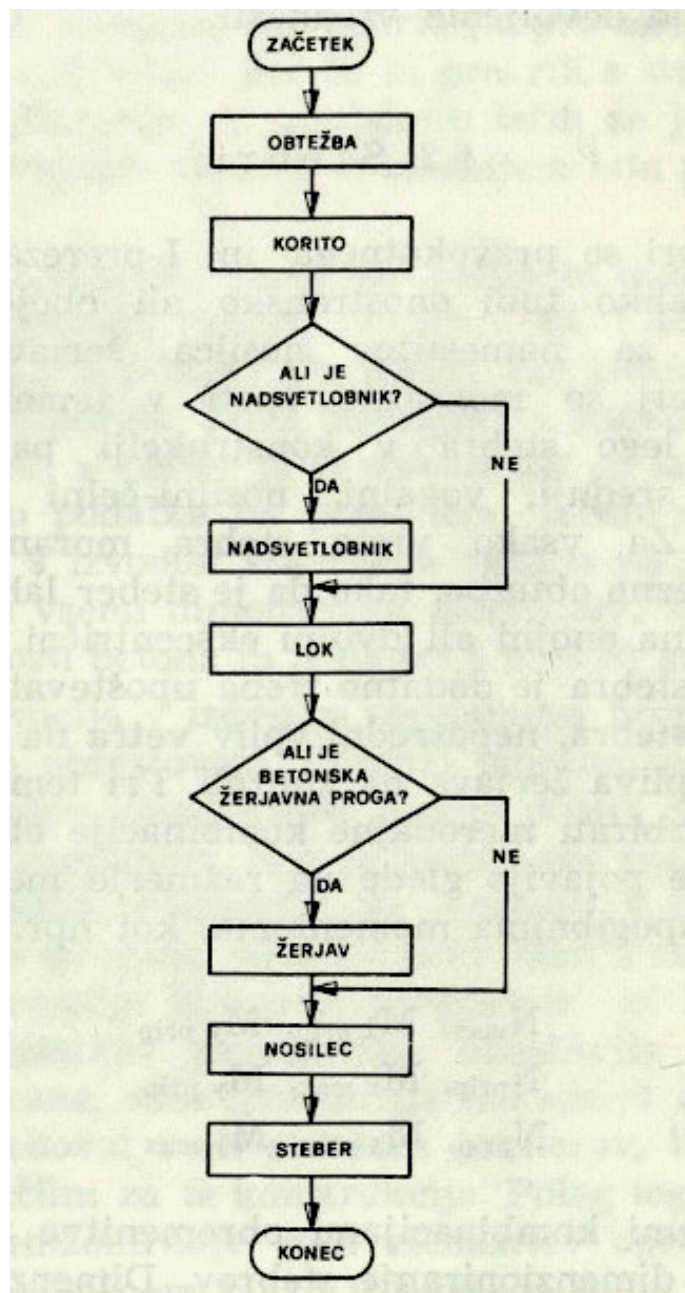
Zmogljivosti programa STRESS so bile omejene z velikostjo delovnega spomina računalnika IBM 1130. Od tega je bila odvisna največja velikost konstrukcije, ki jo je program lahko izračunal. Poleg velikosti konstrukcije je na porabo delovnega spomina vplival tudi tip konstrukcije. Zato smo velike konstrukcije, ki so presegle zmogljivosti programa STRESS, analizirali po metodi podkonstrukcij [Duhovnik, 1971].

Postopno smo začeli razvijati lastne splošne računalniške programe za račun konstrukcij, od katerih omenjamo le najbolj uporabljane. Prvi med njimi je bil program DAVEK za statično in dinamično analizo objektov visokogradnje pri vodoravni obtežbi, ki je kasneje prerasel v program EAVEK. Sledil je program RAVOK za statično analizo ravninskih okvirov [Planinc, 1975], ki ga je kasneje nadomestil splošnejši program OKVIR ([Marolt, 1981], [Marolt, 1989]) za račun prostorskih okvirnih konstrukcij. Za dimenzioniranje AB-prerezov je bil izdelan program DIMEN. Vzporedno z razvojem strojne in programske opreme so se programi sproti dopolnjevali in razvijali. Zadnje verzije programov so omogočale interaktivni vnos podatkov in grafično predstavitev rezultatov. Pri razvoju programa OKVIR so poleg Vida Marolta sodelovali še Matevž Dolenc, Andrej Kogovšek in Igor Potočan [Potočan, 1990].

Poleg programov za linijske konstrukcije smo razvijali tudi programe za račun plošč. Z metodo robnih elementov se je v svoji magistrski nalogi pod mentorstvom prof. Preloga ukvarjala Duška Tomšič [Tomšič, 1989]. Celovito projektiranje plošč pa je v svojem magistrskem delu pod mentorstvom doc. Janez Reflaka obdelal Vladimir Oštir [Oštir, 1994].

Za računalnikom IBM smo imeli na voljo precej zmogljivejši računalniki CDC in CYBER v Republiškem računskem centru, zatem pa smo programe prenesli na osebne računalnike.

Poleg razvoja lastnih programov smo vzporedno uvajali v uporabo številne tuje programe. Med njimi so bili najpopularnejši

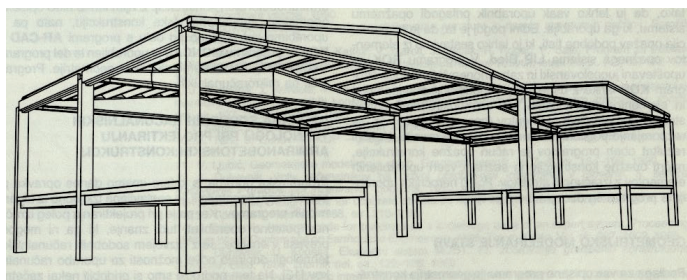


Slika 4. Diagram poteka programa za račun montažnih konstrukcij Sistema Gorica [Duhovnik, 1977].

programi iz skupine SAP (Structural Analysis Program) [Wilson, 1973], za katerega smo prejeli tudi zapise programov, ki smo jih lahko nadgrajevali in prilagajali svojim potrebam. Naše izkušnje in znanje smo z organizacijo seminarjev posredovali inženirjem v praksi.

3 PROGRAMI ZA PROJEKTIRANJE MONTAŽNIH AB-KONSTRUKCIJ

SGP Gorica je leta 1970 zgradil tovarno prefabriciranih montažnih elementov za gradnjo industrijskih dvoran pod imenom Sistem Gorica. Prvo leto je bilo izdelanih in montiranih 19.145 m² dvoran v občini Nova Gorica. Že naslednje leto pa so se pokazale vse prednosti montažne gradnje in v zelo kratkem času je bilo zgrajenih več kot 86.500 m² pokritih dvoran po vsej Jugoslaviji. Vsako leto se je število objektov večalo in s tem tudi najrazličnejše zahteve investitorjev. SGP Gorica je v ta namen naročila pri Računskem centru FAGG poseben program za statični izračun in dimenzioniranje konstrukcij teh dvoran [Duhovnik, 1977]. Izdelava programa je zahtevala nekajmesečno



Slika 5. Primer montažne konstrukcije, ki jo je bilo mogoče računati s programom MONCAD [Duhovnik, 1990a].

angažiranost strokovnjakov RC FAGG in SGP Gorica. Rezultat programa sta bila analiza in dimenzioniranje vseh elementov konstrukcije (slika 4). Program je močno skrajšal čas izdelave statičnega računa, istočasno pa so se zmanjšali za nekajkrat tudi stroški za statični izračun takšne dvorane poljubnih dimenzij s poljubno obtežbo, čeprav je bilo upoštevano mnogo več obtežnih primerov in variantnih izračunov pri elementih, kot je navada pri običajnih statičnih računih. Vzporedno z izdelavo programa so bili izdelani tudi tipski delavniški načrti vseh elementov. Vse to je proizvajalcu in njegovim sodelavcem omogočilo ponuditi investitorjem po celi Jugoslaviji skupaj s konstrukcijo tudi del tehnične dokumentacije, kar je bistveno skrajšalo čas gradnje. V letu 1972 se je proizvedlo in montiralo že 135.000 m² dvoran, v letu 1973 122.400 m², leta 1974 pa že 141.780 m². Tako je bila v tem letu dosežena skupna površina preko pol milijona m² pokritega prostora raznih dvoran. S programom je bilo v RC FAGG izračunanih 325 objektov. Povprečni čas izdelave statičnega elaborata (brez temeljev) je trajal 3 dni, v čemer je vračunan čas od takrat, ko so odposlali podatke, do povratka 9 izvodov statičnega računa na okoli 40 straneh.

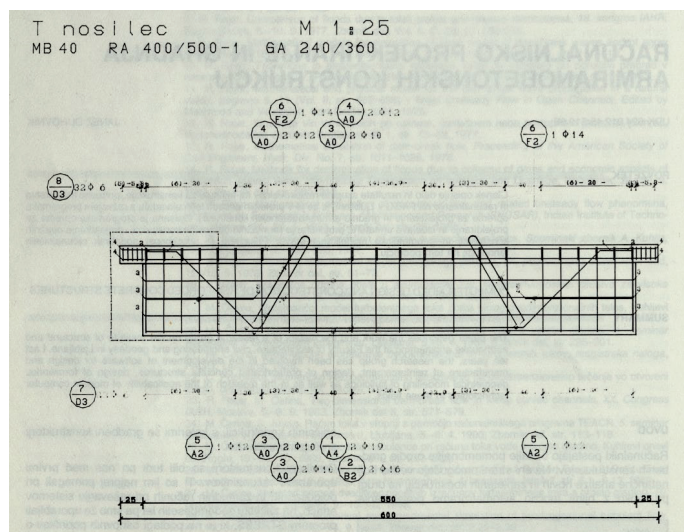
Izkušnje z razvojem omenjenega programa so nam omogočile razvoj splošnega programa za račun montažnih armiranobetonskih konstrukcij MONCAD [Duhovnik, 1990a]. Program je omogočal račun večetažnih konstrukcij z elementi najrazličnejših oblik (slika 5). Poleg analize in dimenzioniranja vseh montažnih elementov je opravil tudi analizo in dimenzionira-

nje čašastih temeljev stebrov. Interaktivni vnos podatkov, grafična predstavitev rezultatov in konstrukcije, ki jih je omogočal, so bili proti koncu njegovega razvoja že samoumevni. Program so uporabljali vsi pomembni proizvajalci montažnih elementov v Sloveniji: SGP INGRAD, SGP VEGRAD, SGP PRIMORJE, SGP PIONIR in drugi.

V skupini, ki je razvijala programe za račun montažnih konstrukcij, so bili takratni sodelavci IKPIR Matevž Dolenc, Janez Duhovnik, Peter Fajfar, Izток Kovačič, Vlado Ljubič, Vid Marolt, Janez Reflak in Žiga Turk; člana Katedre za masivne in lesene konstrukcije Franc Saje in Rajko Rogač; mladi raziskovalec Marko Verčnik in diplomanti Boštjan Brank, Tomaž Dimnik, Blaž Kuželički, Izток Likar, Igor Mozetič, Tomaž Pazlar, Bogomir Troha in Dejan Zupančič.

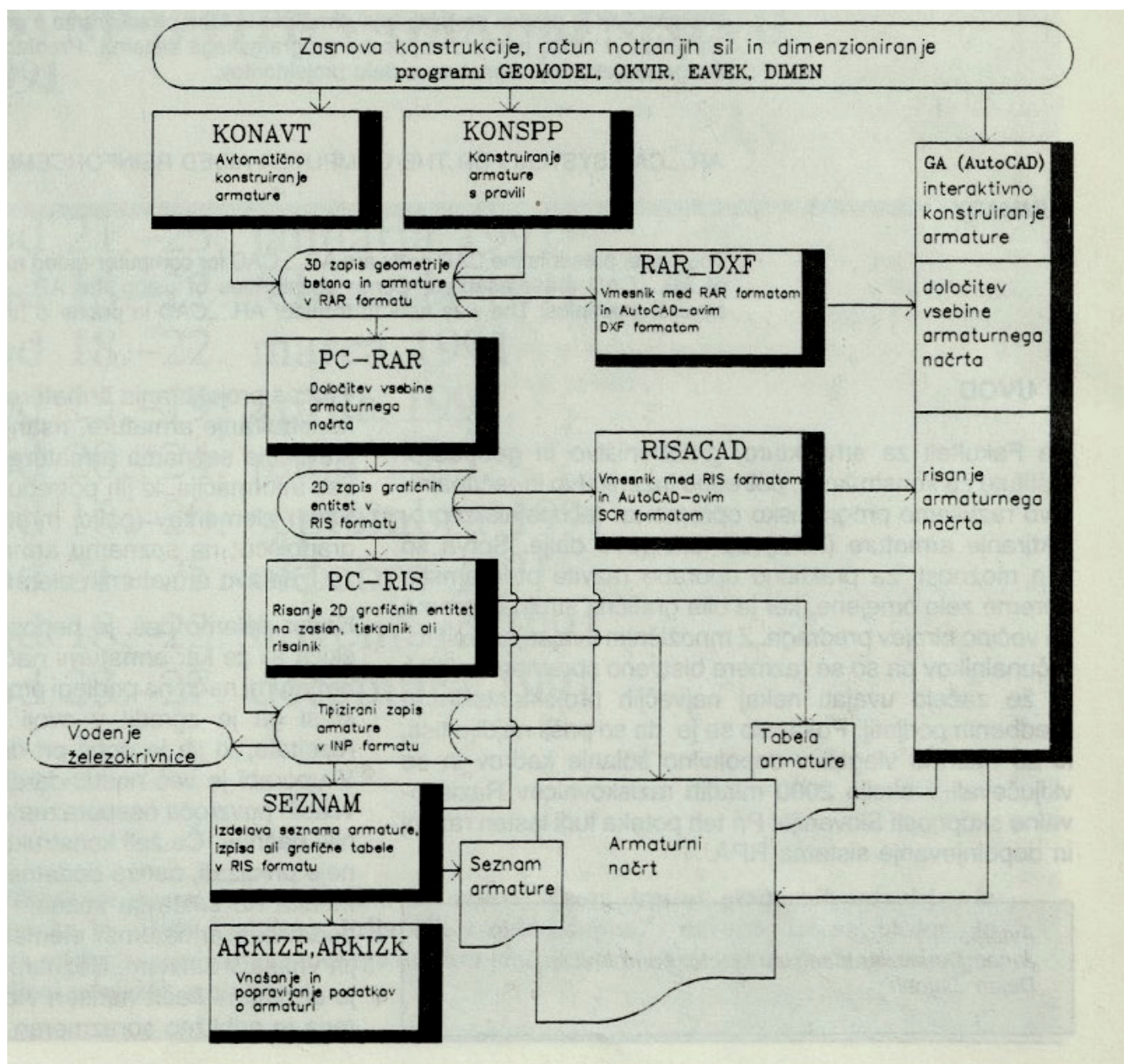
4 ŠIRJENJE UPORABE RAČUNALNIKOV NA DRUGA PODROČJA PROJEKTIRANJA KONSTRUKCIJ

Z razvojem računalniške grafike so se pojavile možnosti razvoja programov za naloge, ki so jih konstruktorji sicer opravljali »peš«. Med njimi so konstruiranje armature, risanje armaturnih načrtov, izdelava in montaža armature, ki so med časovno najboljše fazami pri projektiranju in gradnji armiranobetonskih konstrukcij. To je bil najpomembnejši razlog za nastanek predloga za raziskovalni projekt PIA (Projektiranje in izdelava armature), ki ga je konec leta 1979 IKPIR v sodelovanju z GIP Gradis predložil Raziskovalni skupnosti Slovenije. Ob dodatni denarni podpori večine najpomembnejših slovenskih gradbenih in projektantskih podjetij je bilo v letih 1980–85 opravljenih več raziskovalnih nalog. Na IKPIR, ki je prevzel raziskave v zvezi s projektiranjem armature, smo se ukvarjali



Slika 6. Armaturni načrt montažnega T-nosilca [Duhovnik, 1990a].

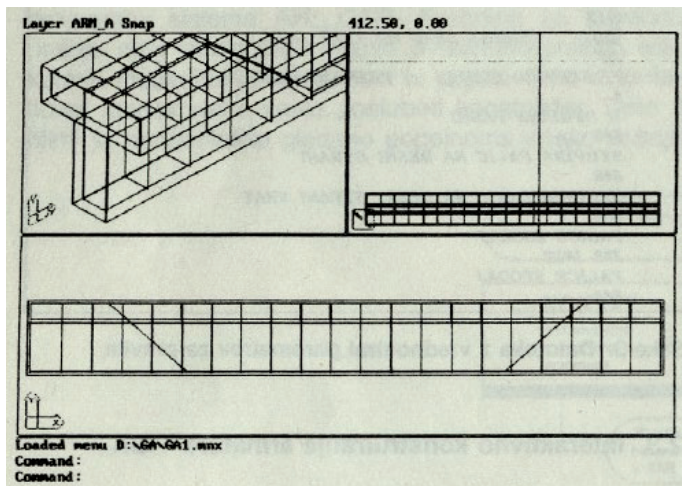
s splošnimi osnovami računalniškega projektiranja armature (1980) in z računalniškim konstruiranjem in risanjem armaturnih načrtov za elemente montažnih konstrukcij (1981) (slika 6), ravninskih okvirnih konstrukcij (1982), plošč (1983), sten (1984)



Slika 7. Diagram poteka programa AR-CAD [Duhovnik, 1990b].

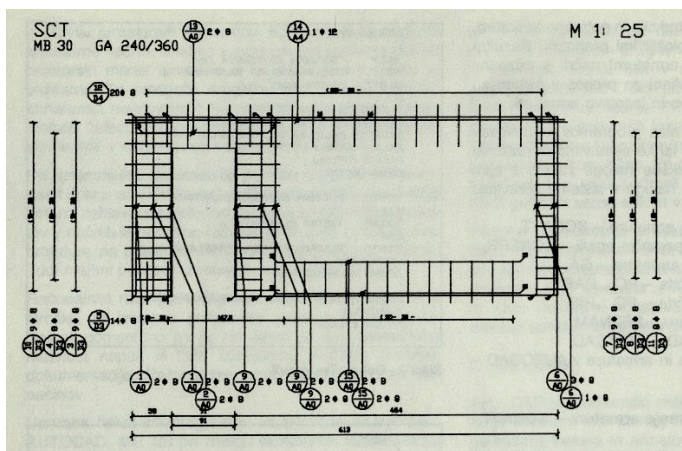
in splošnih konstrukcij (1985). Uporaben rezultat raziskovalnega in razvojnega dela so bili računalniški programi za konstruiranje armature in risanje armaturnih načrtov za različne vrste konstrukcij [Duhovnik, 1990b] ter usposobljeni kadri za razvojno delo na tem področju. Programe smo razvijali na velikih računalnikih CYBER in DEC, pri čemer smo uporabljali doma razvita orodja. Praktična uporaba programov je bila mogoča le z našim neposrednim sodelovanjem pri projektiranju konstrukcij, ker je bila draga grafična oprema za projektivne biroje takrat nedosegljiva. Na ta način smo sodelovali pri nekaj projektih, po katerih so se konstrukcije tudi zgradile. S pojavom mikroročunalnikov in drugih sorazmerno cenjenih grafičnih

naprav pa so se razmere bistveno spremenile. Vso programsko opremo za projektiranje armature smo prenesli na mikroročunalnike in jo tam razvijali naprej. Rezultat tega dela je bil programski sistem AR-CAD (slika 7). Ta je omogočal avtomatično in interaktivno konstruiranje armature različnih vrst konstrukcij, risanje armaturnih načrtov in avtomatično sestavljanje seznamov armature. Interaktivni del programa AR-CAD je bil izdelan v okolju programa AUTOCAD (sliki 8 in 9). Sistem je bil delno ali v celoti instaliran v več projektivnih podjetjih. Podatki o armaturi so se lahko neposredno uporabili v programih za vodenje proizvodnje v železokrivnici, ki so bili izdelani v GIP Vegrad.



Slika 8. Vsebina zaslona za interaktivno projektiranje armature s programom AR-CAD [Duhovnik, 1990b].

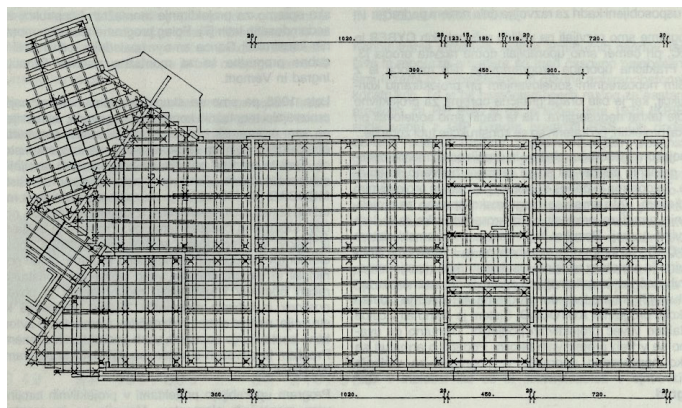
V skupini, ki je razvijala programe za konstruiranje armature in risanje armaturnih načrtov, so sodelovali Janez Duhovnik, Iztok Kovačič, Vlado Ljubič, Andrej Vitek; mladi raziskovalci Tone Knific, Žiga Turk in Dejan Žlajpah [Žlajpah, 1992] ter diplomanti Boštjan Brank, Aleš Hojs, Mitja Pangeršič, Rajko Strojani in Matjaž Šteblaj.



Slika 9. Armaturni načrt stenskega panela, izdelan s programom AR-CAD [Duhovnik, 1990b].

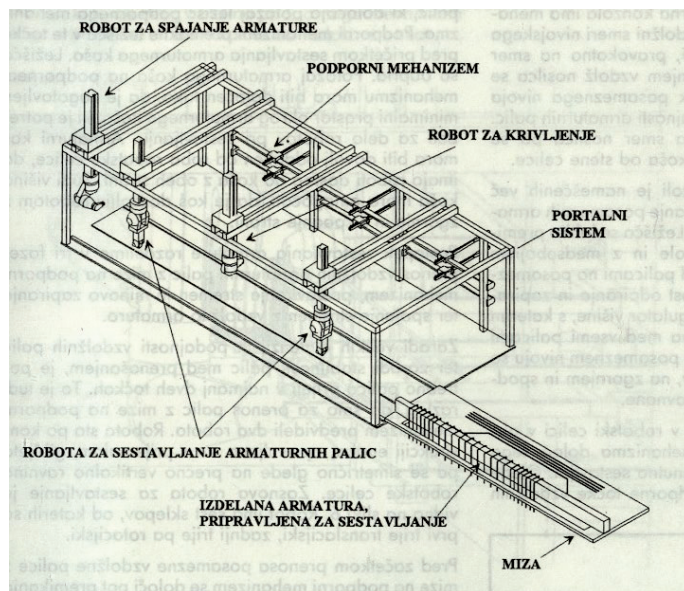
Ukvarjali smo se tudi z računalniškim projektiranjem opažnih konstrukcij. V sodelovanju z LIP Bled, proizvajalcem opažnih nosilcev in plošč, smo razvili programa ROK in KOP za računanje in konstruiranje opažev ([Samec, 1988], [Turk, 1988], slika 10).

Proučevali smo tudi možnosti za robotizirano sestavljanje armature [Dolinšek, 1997]. V svoji doktorski disertaciji je Blaž Dolinšek zasnoval robotski sistem za sestavljanje armature linijskih armiranobetonskih elementov in razvil postopek, primeren za robotizacijo sestavljanja armature na različne načine armiranih linijskih elementov. Na podlagi tega postopka je bila zasnovana robotska celica (slika 11), v kateri bi



Slika 10. Tloris opaža armiranobetonske plošče z opažnimi nosilci in ploščami LIP Bled [Turk, 1988].

potekalo sestavljanje. Vhodni elementi so že izdelane armaturne palice, izhodni pa sestavljeni armaturni koši. Sestavljanje izvajajo roboti, opremljeni z orodji za krivljenje armature, za spajanje armature ter s prijemale. Poleg robotov so pot-



Slika 11. Zasnova robotske celice za sestavljanje armature linijskih armiranobetonskih elementov [Dolinšek, 1997].

rebni še razni mehanizmi, ki služijo za podpiranje in logistiko med sestavljanjem. Zaradi posebnih zahtev glede prilagodljivosti robotov, ki morajo z orodji doseči določene položaje na armaturnem košu, hkrati pa se morajo izogibati oviram, ni bilo mogoče uporabiti standardnih robotov, ampak smo zasnovali nove. Prikazana robotska celica je bila modelirana s programom za simulacijo robotov WORKSPACE 3 [Robot Simulation, 1995], ki je omogočal proučevanje, optimizacijo in dimenzioniranje njenih sestavnih delov. Proučili smo tudi vlogo in mesto robotske celice v celotnem procesu proizvodnje armature.

5 DIGITALIZACIJA PREDPISOV ZA GRADBENE KONSTRUKCIJE

Standardi so pomemben vir znanja in podatkov. Število standardov, ki jih mora gradbenik pri svojem delu upoštevati, je zelo veliko, nekateri med njimi pa so zelo obsežni. Še nedolgo nazaj so bili večinoma dostopni le na papirju. Njihova glavna značilnost je, da zajemajo veliko znanja, ki temelji na dolgotrajnih izkušnjah. To znanje je navadno zelo široko in nepregledno, zato sta iskanje in interpretacija potrebnih informacij težka in dolgotrajna. S tem se srečujejo vsi sodelujoči v procesu projektiranja, gradnje, vzdrževanja in odstranjevanja gradbenih objektov. Zato naj bi vsak sistematični postopek objave standardov pripomogel odpraviti omenjene težave. Na IKPIR smo se s problematiko elektronske predstavitve standardov ukvarjali od sedemdesetih let prejšnjega stoletja [Turk, 1995]. Deli standardov so bili najprej vgrajeni v računalniške programe za račun konstrukcij. Razviti so bili prototipi ekspertnih sistemov za uporabo posameznih standardov. Standardi so bili zapisani v obliki datoteke za pomoč pri uporabi določenega programa, ukvarjali pa smo se tudi s splošno kompjuterizacijo gradbenih standardov. Gregor Šuligoj je v diplomski nalogi [Šuligoj, 2004] opisal postopek zapisa v slovenščino prevedenega evrokoda EN 1991-1-3 o obtežbi snega v HTML- in XML-obliko. Izhajali smo iz končnega osnutka standarda in standardu dodali še komentarje nekaterih členov, ki smo jih privzeli iz spremljajočih dokumentov. V diplomski nalogi je Luka Stanič [Stanič, 2004] obravnaval spletno objavo EN 1990 o osnovah projektiranja s komentarji.

6 TEMPUS ICADERS

V letih 1994/95 smo koordinirali evropski projekt JEP-03008-94 ICADERS – Integrated CAD of earthquake resistant buildings and civil engineering structures (Integrirano računalniško projektiranje potresoodpornih konstrukcij stavb in gradbenih inženirskih objektov). Njegov cilj je bil podpora poučevanju teorije in prakse računalniškega projektiranja. V projekt so bili vključeni univerze in podjetja iz Nemčije, Grčije, Italije, Slovenije in Velike Britanije: IEZ A.C., Bensheim; Ruhr-Universität Bochum; Universität Karlsruhe (Technische Hochschule); Siemens A.G. Nuclear Power Generation Division (KWU), Offenbach; Institute of Engineering Seismology and Earthquake Engineering, Thessaloniki; Ismes S.p.A. Bergamo; Università degli studi della Calabria, Cosenza; Università degli studi Federico II di Napoli; Università degli studi di Pavia; CAD Studio, Ljubljana; ZRMK, Ljubljana; SCT, Ljubljana; Univerza v Ljubljani; Univerza v Mariboru; Queen's University of Belfast; Imperial College of Science, Medicine and Technology, London. V Ljubljani so bili organizirani trije seminarji, na katerih so predavali profesorji in strokovnjaki s tujih univerz in iz podjetij. Več mladih slovenskih inženirjev je bilo na nekajmesečnih izpopolnjevanjih na univerzah in podjetjih v tujini. Za nekatere med njimi je to bila spodbuda za uspešno poslovno ali znanstveno kariero. S sredstvi projekta je bila opremljena prva računalniška učilnica na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo (FGG) Univerze v Ljubljani (UL).

7 SODELOVANJE PRI PRIPRAVI IN UVAJANJU EC 0 IN EC 1 O VPLIVIH NA KONSTRUKCIJE

Aktivno smo sodelovali v delovni skupini Konstrukcije na SIST, ki je pripravljala nacionalne dodatke in predloge za sprejem novih standardov EUROCODE za konstrukcije. Že v času veljavnosti predstandardov smo v Gradbenem vestniku ([Duhovnik, 2000], [Duhovnik, 2004]) in na zborovanjih Slovenskega društva gradbenih konstruktorjev [Duhovnik, 1997] udeležencem predstavili vsebino in časovni potek sprejemanja standardov. Prevedli smo standarde EC 0 in večino EC 1 v slovenščino ter pripravili del priročnika, ki ga je izdala Inženirska zbornica Slovenije kot gradivo za seminarje, ki so bili prirejeni v Ljubljani in Mariboru [Duhovnik, 2009].

8 ZAČETKI NELINEARNE NUMERIČNE MEHANIKE NA IKPIR

Na IKPIR smo se začeli intenzivneje ukvarjati z (nelinearno) numerično mehaniko leta 1987, po prihodu prof. Frana Damjaniča, ki je doktoriral na Univerzi v Swanseaju (Wales, Velika Britanija). Ta univerza je bila v takrat zibelka razvoja numeričnih metod za analizo inženirskih problemov, saj je tam deloval tudi prof. Olgierd Zienkiewicz, eden od začetnikov metode končnih elementov. Konec osemdesetih let smo začeli študirati in uporabljati raziskovalne računalniške programe, ki jih je Frano Damjanič prinesel iz Swanseaja. Programi so temeljili na metodi končnih elementov, kodirani so bili po pravilih, ki so jih uporabljali na Univerzi v Swanseaju in njihovem softverskem podjetju Rockfield Software, pripadajoči teoretični modeli pa so bile večinoma opisani v knjigah, ki jih je izdajala založba Pineridge Press. Te programe smo spreminjali in nadgrajevali, da smo jih lahko uporabili za naloge, ki smo jih reševali, pisali pa smo tudi svoje. Uporabljali smo programski jezik FORTRAN, kasneje pa tudi C in C++ [Vihtelič, 1994].

Prva sodelavca Frana Damjaniča sta bila mlada raziskovalca Jana Šelih (zdaj profesorica UL FGG) in Boštjan Brank, pridružili pa so se tudi takratni asistent Marjan Stanek (kasneje profesor na UL FGG), inženir matematike Andrej Vitek (zdaj vodja računskega centra na UL FGG), mladi raziskovalec Andrej Vihtelič ter nekateri študentje in raziskovalci s fakultet za strojništvo in elektrotehniko ljubljanske univerze pa tudi inženirji iz gradbene prakse.

Raziskovalne naloge so bile različne, večinoma s področja modeliranja in analize konstrukcij in materialov ter transporta toplote. Naj omenimo nekaj primerov. Jana Šelih se je ukvarjala s toplotnimi analizami inženirskih problemov ([Šelih, 1990], [Šelih, 1993]). Marjan Stanek z modeliranjem neelastičnega obnašanja betona in armiranega betona [Stanek, 1990], Boštjan Brank pa z velikimi deformacijami hiperelastičnih in elastoplastičnih tankostenskih konstrukcij [Brank, 1994]. Nadalje se je obravnavalo obnašanje kompozitnih polimernih konstrukcij pri velikih obremenitvah [Makarovič, 1996] ter simuliral pojav razpok v armiranobetonskih in prednapetih betonskih konstrukcijah [Damjanič, 1991]. Poleg gradbeno-konstruktorskih problemov smo analizirali tudi strojniške. Rajko Marinčič je na primer obravnaval problem tesnjenja glave motorja [Marinčič, 1991], in elektrotehniške [Benčič, 1993], že takrat pa smo se ukvarjali tudi z biomehaniko ([Herman, 1992], [Maček Lebar, 1996]), ki je zdaj pomembno področje numerične mehanike. Andrej Vitek je pripravil računalniški program za grafični prikaz rezultatov numeričnih analiz [Vitek, 1989].

Na ta način se je na IKPIR konec osemdesetih let prejšnjega stoletja vzpostavilo delovanje na področju numerične mehanike, ki še vedno poteka. Numerična mehanika predstavlja integracijo več disciplin, med njimi metode končnih elementov, teoretične in aplikativne mehanike, aplikativne matematike in numerične analize ter računalniških in informacijskih znanosti. Numerična mehanika je danes uveljavljena kot učinkovito orodje za simulacijo mnogih problemov v gradbeništvu pa tudi na ostalih inženirskih področjih ter v tehnologiji in naravoslovju. Vsi komercialni računalniški programi, ki se danes množično in vsakodnevno uporabljajo pri analizi in projektiranju konstrukcij, so produkt razvoja na področju numerične mehanike.

9 PROJEKT TEMPUS ACEM

Frano Damjanič je v letih 1991–1996 skupaj z Nenadom Bičaničem, ki je bil takrat profesor na Univerzi v Swanseju, organiziral projekt TEMPUS (Trans European Mobility Programme for University Studies) ACEM (Advanced Computational Engineering Mechanics), ki ga je financirala Evropska unija. V okviru projekta TEMPUS ACEM so v Ljubljano (na FGG) in v Maribor prihajali predavat priznani strokovnjaki s področja numerične mehanike, med njimi Mike Crisfield z Imperial Collegea v Londonu (Velika Britanija), Peter Wriggers s Tehniške univerze v Darmstadtu (Nemčija), D. Roger J. Owen, Richard D. Wood in Ken Morgan z Univerze v Swanseju (Velika Britanija), David V. Phillips z Univerze v Glasgowu (Velika Britanija), Bernhard Schrefler z Univerze v Padovi (Italija), Carlos A. Brebbia z Wessex Institute of Technology (Velika Britanija) ter Ionassis St. Doltsinis z Univerze v Stuttgartu (Nemčija). Predavali so tudi direktorji in lastniki softverskih podjetij: Tom Crook z Rockfield Softwera (Velika Britanija), Vladimir Červenka s Červenka Consulting (Češka) in T. K. Hellen z Berkeley Nuclear Laboratories (Velika Britanija).

Projekt je omogočil nekaterim mlajšim slovenskim raziskovalcem odhod na ugledne evropske ustanove. Tako je na primer k skupini D. Rogerja J. Owna odšel Boštjan Brank, k Petru Wriggersu je odšel Jože Korelc (zdaj profesor na UL FGG), pri Miku Crisfieldu je bil Gordan Jelenič (zdaj prorektor Univerze na Reki), na Univerzi v Delftu (Nizozemska) pa je bila Barbara Škraba Flis (zdaj generalna sekretarka Inženirske zbornice Slovenije). Projekt TEMPUS ACEM je imel izredno pozitiven in dolgotrajen učinek na razvoj numerične mehanike v Sloveniji in na priključitev slovenskih raziskovalcev s tega področja k evropskim trendom.

10 DOKTORATI Z DELJENIM MENTORSTVOM

Po smrti Frana Damjaniča leta 1998 je raziskave na področju numerične mehanike na IKPIR nadaljeval Boštjan Brank s svojimi doktorskimi študenti. Med prvimi na Univerzi v Ljubljani je vpeljal doktorat z deljenim mentorstvom. Pri takšnem načinu izvajanja doktorskega študija je slovenski doktorand dobil somentorja na tuji ustanovi, delno je raziskoval tudi v tujini pri somentorju, po zagovoru doktorata pa sta mu naziv podelili tako Univerza v Ljubljani kot tuja ustanova. Uroš Bohinc, Jaka Dujc in Miha Jukić so opravljali doktorat z deljenim mentorstvom v povezavi z elitno francosko visoko šolo École Normale Supérieure de Cachan, Andjelka Stanić pa v

povezavi z najboljšo francosko tehnološko univerzo v Compiègne. V vseh primerih je bil na francoski strani somentor prof. Adnan Ibrahimbegović, priznani strokovnjak s področja numerične mehanike, doma iz Sarajeva, ki je doktoriral na Kalifornijski univerzi v Berkeleyju v ZDA pri profesorjih Edwardu L. Wilsonu in Robertu Taylorju. Omenimo naj, da je prof. Ibrahimbegović vrsto let generator novih idej na področju nelinearne numerične mehanike, med drugim je tudi avtor ploskovnih končnih elementov, ki jih uporablja program SAP 2000 [Wilson, 1973], s katerim na FGG učimo študente modeliranja s končnimi elementi. Uroš Bohinc je bil po doktoratu vodja laboratorija za konstrukcije na Zavodu za gradbeništvo Slovenije (ZAG), Jaka Dujc je odšel na Zürich University of Applied Sciences, kjer se je ukvarjal z numeričnimi simulacijami gorivnih celic, zdaj pa dela na UL FGG, Miha Jukić je danes na ZAG, Andjelka Stanić pa je docentka na Univerzi Twente na Nizozemskem.

Obstajale so tudi druge močne formalne in neformalne mednarodne povezave na področju numerične mehanike (med drugim z Univerzo v Padovi, s Politehniko v Torinu in s Tehniško univerzo v Braunschweigu). Te povezave se zrcalijo v mnogih publikacijah sodelavcev IKPIR, ki so nastale v soavtorstvu s tujimi raziskovalci.

Po smrti prof. Frana Damjaniča smo začeli postopoma uporabljati dva nova raziskovalna programa po metodi končnih elementov – FEAP prof. Roberta Taylorja [Taylor, 2014] ter hišni program AceGen/AceFEM prof. Jožeta Korelca z UL FGG [Korelc, 2016] – ki sta nam omogočala hitro testiranje novih teoretičnih in numeričnih modelov in idej. FEAP je napisan v FORTRAN-u in ima arhitekturo, ki omogoča enostaven vnos kode novega končnega elementa, ki jo pripravi uporabnik. AceGen in AceFEM pa delujeta v programu Mathematica. AceGen je sposoben avtomatično odvajati zahtevne izraze in algoritme, kar se izkaže za zelo uporabno pri izpeljavi matrik za kompleksne končne elemente in sklopljene probleme. AceFEM je raziskovalni program za nelinearno analizo, v katerega se vstavi koda, dobljena z AceGen. Poleg tega smo za nekatere naloge začeli uporabljati tudi komercialne računalniške programe, ki delujejo po metodi končnih elementov, kot so NISA [Nisa, 2021], ABAQUS [Abaqus, 2021] in ANSYS [Ansys, 2021].

11 ORGANIZACIJA KONFERENC S PODROČJA MEHANIKE KONSTRUKCIJ V SLOVENIJI

Sodelavci IKPIR, ki smo se ukvarjali z numerično mehaniko, smo se zavedali pomembnosti organiziranja mednarodnih konferenc v Sloveniji. Tudi zato smo doma pripravili dve mednarodni konferenci s področja konstrukcijskega inženirstva in numerične mehanike. Leta 2003 je bila na Bledu raziskovalna delavnica s področja konstrukcij, ki jo je sponzoriral NATO in na kateri so se nakazale smeri razvoja numeričnih metod za večfizikalne in večnivojske inženirske probleme [Ibrahimbegović, 2005]. Vabljeni govorniki so bili slavna imena s področja numerične mehanike in konstrukcij: Erwin Stein (Univerza v Hannoveru, Nemčija), Bernhard Schrefler (Univerza v Padovi, Italija), Peter Fajfar in Miran Saje z UL FGG, Ekkehard Ramm (Univerza v Stuttgartu, Nemčija), K. C. Park in Carlos A. Felippa (Univerza v Coloradu, ZDA), D. R. J. Owen (Univerza v Swanseju, Velika Britanija), Hermann Matthies, (Tehniška univerza v Braunschweigu, Nemčija), Herbert Mang (Tehno-

loška univerza na Dunaju, Avstrija) ter Adnan Ibrahimbegović in Pierre Ladevèze (École Normale Supérieure de Cachan, Francija).

Leta 2017 je bila v Ljubljani mednarodna konferenca o numeričnih metodah za konstrukcije in fluide [Ibrahimbegović, 2017]. Hkrati se je izvedel tudi doktorski seminar Current Research on Solids and Fluids, ki smo ga organizirali skupaj s Tehniško univerzo iz Braunschweiga (Nemčija) in Tehnološko univerzo iz Compiègna (Francija). Zadnji doktorski seminar smo pripravili leta 2020. Njegov naslov je bil Bayesian (finite element) model updating, prikazal pa je, kako se posodablja-jo numerični modeli z uporabo probablističnih konceptov ob nekaj znanih eksperimentalnih podatkih.

To so bile priložnosti, da so se slovenski raziskovalci in doktorski študentje na domačih tleh lahko seznanili z trenutnimi raziskovalnimi trendi s področja numerične mehanike konstrukcij in materialov.

12 GEOMETRIJSKO IN MATERIALNO NELINEARNI PROBLEMI

O pomembnosti geometrijsko nelinearnih efektov pri vitkih in tankostenskih konstrukcijah se je v inženirski skupnosti vedelo že dolgo. Kljub temu so se robustni numerični modeli za geometrijsko nelinearne nosilce in lupine, ki niso dodatno poenostavljali osnovnih kinematičnih predpostavk, pojavili šele v 80. in 90. letih prejšnjega stoletja. Glavni preboj je naredil prof. Juan Carlos Simo (z Univerze v Stanfordu v ZDA) s svojimi sodelavci, ki je uspel na pravi in učinkovit način opisati velike zasuke, ki se pojavijo pri nelinearnih konstrukcijskih modelih. Na IKPIR smo se pridružili trendu izpeljevanja kinematično točnih formulacij in predstavili svoje ideje za modeliranje geometrijske nelinearnosti pri ukrivljenih tankostenskih konstrukcijah. Raziskave s tega področja, ki jih je naredil Boštjan Brank v svojem doktoratu ([Brank, 1994], [Brank, 1995]), se še zmeraj citirajo.

Modeliranje nelinearnega obnašanja gradbenih materialov je bilo na ljubljanski gradbeni fakulteti dolgo časa dokaj zapostavljeno, zato smo na IKPIR to želeli nekoliko spremeniti. Tako se je že Marjan Stanek v svojem doktoratu pod mentorstvom Frana Damjanića ukvarjal z neelastičnim modeliranjem betona in armiranega betona [Stanek, 1993], pri čemer je upošteval koncept razmazanih razpok in elastoplastičnost. V osemdesetih letih prejšnjega stoletja je v numerični mehaniki vpeljal pojem konsistentnega elastoplastičnega tangentnega modula, ki je zelo povečal robustnost numeričnih algoritmov za elastoplastične materiale. S konsistentnim elastoplastičnim tangentnim modulom so numerične simulacije obnašanja konstrukcij

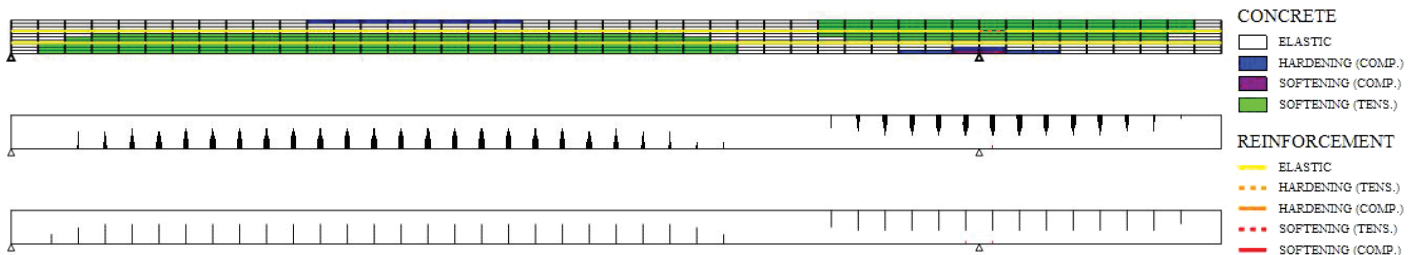
iz elastoplastičnih materialov (kot so jeklo in ostali metali ter beton v tlaku) postale mnogo hitreje, zanesljiveje in enostavnejše. Tudi na IKPIR smo se ukvarjali s tem. V [Brank, 1997] in [Dujc, 2012] smo takšne algoritme predstavili za ukrivljene tankostenske metalne konstrukcije. Nadalje so se v devetdesetih letih uveljavili neelastični poškodbeni modeli, primerni za krhke materiale, kot je beton v nategu, ki opišejo poškodbe materiala s spreminjanjem elastičnega modula. Na IKPIR smo jih študirali in numerično implementirali nekoliko kasneje, ko smo se ukvarjali z razvojem numeričnih metod za nelinearno mehaniko loma.

Na ta način smo postopoma akumulirali solidno znanje o neelastičnih numeričnih metodah za gradbene materiale, ki je področje s precejšnjo praktično vrednostjo. To je bila tudi osnova za kasnejše numerično modeliranje odpovedi materiala, to je modeliranje nastanka in širjenja razpok. Zdaj lahko pomagamo tudi drugim raziskovalcem pri izpeljavi in implementaciji neelastičnih materialnih modelov: pred kratkim smo z Luko Porento, doktorskim študentom strojništva, izpeljali in računalniško implementirali materialni model za zlitine z oblikovnim spominom [Porenta, 2021].

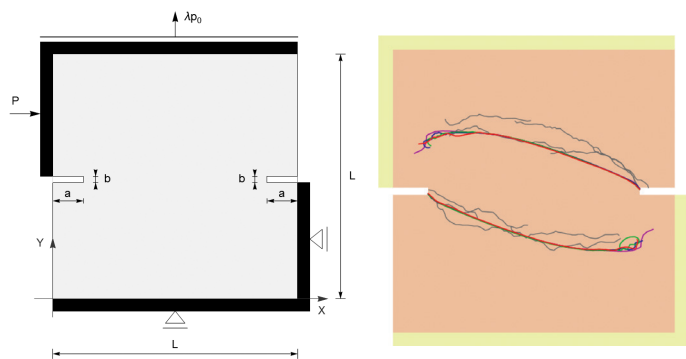
13 MODELIRANJE ODPOVEDI MATERIALA

Geometrijska in materialna nelinearnost nista dovolj za določitev mejne nosilnosti, mejne duktilnosti in pričakovanega mehanizma porušitve celotne konstrukcije, ki so včasih pomembni podatki pri projektiranju. V ta namen je treba opisati tudi nastanek in širjenje makroskopskih razpok. Lom materiala namreč povzroči zmanjšanje odpornosti ali celo odpoved konstrukcijskega elementa, vendar to še ne pomeni, da je s tem že avtomatično dosežena mejna nosilnost celotne konstrukcije, saj ta lahko še vedno funkcioniira pod mejnim stanjem nosilnosti.

S problemom numeričnega modeliranja nastanka in širjenja razpok v krhkih in duktilnih materialih so se na IKPIR ukvarjali trije doktorandi, Jaka Dujc [Dujc, 2010a], Miha Jukić [Jukić, 2013] in Andjelka Stanić [Stanić, 2017a]. Jaka Dujc in Andjelka Stanić sta modelirala odpoved ploskovnih konstrukcijskih elementov, Miha Jukić pa odpoved armiranobetonskih nosilcev in okvirjev. Vsi so uporabljali koncept vstavljene močne nezveznosti v povezavi z nelinearno mehaniko loma, slika 12. Osnovna ideja, ki so jo raziskovali, se lahko predstavi na naslednji način. Za opis obnašanja materiala pod ekstremno obtežbo se najprej uporabi elastoplastični ali elastopoškodbeni materialni model. Ko je izpolnjen kriterij, ki nakazuje nastanek makrorazpoke, se v kinematiko končnega elementa vstavi diskretno razpoko (močno nezveznost). V razpoki se v skladu z modelom kohezivne cone vpelje neelastični kohezijski materialni zakon



Slika 12. Napoved odpovedi materiala v previsnem armiranobetonskem nosilcu [Jukić, 2014].



Slika 13. Numerična ponovitev eksperimentalne strižne porušitve betonskega bloka [Stanić, 2020] (barvne črte na desni sliki so numerične napovedi, črne pa eksperimentalne razpoke).

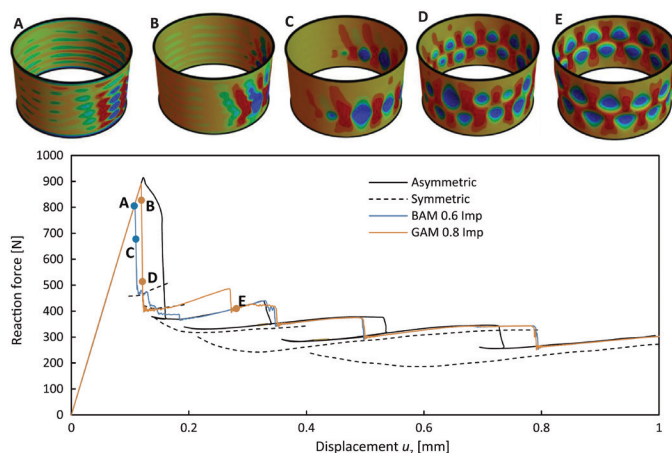
mehčanja, ki sipa lomno energijo ob odpiranju in širjenju razpoke. S tem se doseže neodvisnost numeričnih rezultatov od mreže končnih elementov. Enoličnost rešitve pa je zagotovljena z dodatno enačbo, preko katere komunicirata razpoka in ostali del končnega elementa.

Čprav je bilo v svetovnem merilu vloženi veliko naporov v robustne, natančne in za uporabnika enostavne numerične algoritme za (nelinearno) modeliranje odpovedi materiala (predvsem zaradi njihove velike praktične vrednosti), takšni algoritmi še vedno niso dosegli zadostne zrelosti za vključitev v komercialne računalniške programe za analizo konstrukcij, kar kaže na težavnost problema. Komercialni programi za analizo konstrukcij imajo sicer vgrajene različne algoritme za modeliranje razpok, vendar ti temeljijo na konceptu razmazane razpoke in so precej nerobustni (kar se kaže v hitri izgubi konvergence) pa tudi slabo dokumentirani. To je bila naša izkušnja, ko smo uporabljali program ABAQUS [Abaqus, 2021] za modeliranje širjenja razpok v lesenih rebrastih ploščah [Lavrenčič, 2018b], za modeliranje odpovedi sistema les-lepilo-steklo [Piculin, 2016], za modeliranje porušitve jeklenih okvirjev ([Dujc, 2010c], [Piculin, 2015]) ter za modeliranje poškodovanosti armiranobetonskega bloka pri padcu na togo podlago [Lavrenčič, 2016].

Na IKPIR nadaljujemo raziskovanje in testiranje različnih modelov in idej za robustno, natančno in enostavno numerično modeliranje nastanka in širjenja razpok, npr. ([Stanić, 2020], [Dujc, 2020]), slika 13, saj smo prepričani, da je to področje pomembno za konstrukcijsko gradbeništvo.

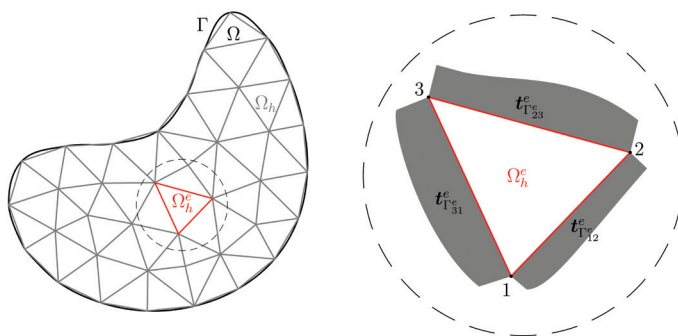
14 PLOSKOVNE KONSTRUKCIJE IN OPTIMIZACIJA KONSTRUKCIJ

Plošče in lupine so pogoste konstrukcije tako v gradbeništvo kot tudi na drugih inženirskih področjih. Zato so robustne numerične rešitve za tovrstne konstrukcije nepogrešljive pri analizi njihovega obnašanja in pri njihovem projektiranju. Lupinaste konstrukcije so lahko dimenzij od nekaj sto metrov (npr. hladilni stolpi) pa vse do nekaj nanometrov (npr. nanocevke), narejene pa so lahko iz različnih materialov. Na IKPIR imamo izkušnje z zahtevnejšim modeliranjem in analizo ploskovnih konstrukcij od leta 1988. Od takrat se ukvarjamo z modeliranjem različnih (nelinearnih) efektov



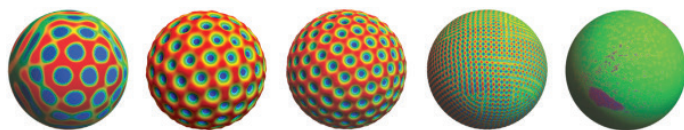
Slika 14. Simulacija uklona osno obremenjenega imperfektnega cilindra [Lavrenčič, 2018a].

pri ploskovnih konstrukcijah, ki so povezani z geometrijsko nelinearnostjo, s stabilnostjo, obnašanjem v pouklonskem območju, dinamiko, plastičnostjo, poškodovanostjo materiala in tudi z nastankom in širjenjem razpok, npr. ([Brank, 2000], [Brank, 2002], [Dujc, 2010b], [Lavrenčič, 2018a]), slika 14. Ukvarjamo se tudi s specializiranimi modeli lupin, npr. takšnimi za kompozitno laminatne konstrukcije ali takšnimi, ki uporabljajo 3D napetostno stanje, kar omogoča enostavno uporabo zahtevnih nelinearnih in neelastičnih konstitutivnih modelov, npr. [Brank, 2005]. Pomembno delo na področju modeliranja ploskovnih konstrukcij je opravil Uroš Bohinc, ki je v svojem doktoratu pripravil konsistentne postopke za oceno modelske [Bohinc, 2009] in diskretizacijske napake [Bohinc, 2014], slika 15.



Slika 15. Ocena napake z metodo uravnoveženih ostankov [Bohinc, 2009].

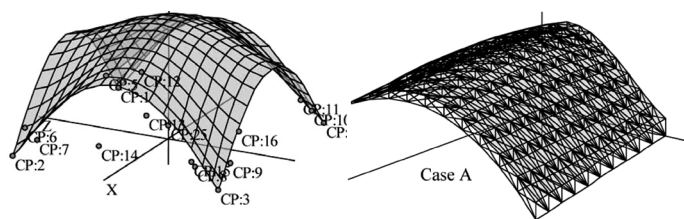
Bistvena lastnost tankostenskih ploskovnih konstrukcij je uklonska občutljivost. Uklonu se v gradbeništvo izogibamo za vsako ceno. Obstajajo pa tudi tehnologije, ki izkoriščajo uklon v pozitivne namene. Izkazalo se je, da so numerične simulacije, povezane s takšnimi tehnologijami, praviloma pretežka naloga za komercialne računalniške programe za nelinearno analizo konstrukcij. Zato smo z doktorandom Tomom Veldinom ter doc. Miho Brojanom s Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani pripravili teoretične in numerične modele za simulacijo površinskega gubanja togih open na mehki podlagi [Veldin,



Slika 16. Gubanje sferične opne na mehki notranjosti v odvisnosti od razmerja togosti opne in podlage [Veldin, 2020].

2020], slika 16. Takšne analize so mogoče le s specializiranimi algoritmi za sledenje ravnotežnih poti, katerih verzije smo razvili tudi na IKPIR ([Stanić, 2016a], [Stanić, 2017b]).

Čeprav se zdi nenavadno, je za nekatere gradbene konstrukcije optimalna oblika ključnega pomena za njihovo stabilnost. Pri tem gre predvsem za tankostenske ukrivljene konstrukcije pa tudi za prednapete membranske in kabelske konstrukcije. Znana inženirja Frei Otto (avtor mnogih zahtevnih kabelskih konstrukcij) ter Heinz Isler (avtor mnogih atraktivnih armiranobetonskih lupin) sta v 70. in 80. letih prejšnjega stoletja iskala optimalne oblike svojih konstrukcij s pomočjo domiselnih eksperimentov. Kasneje se je našlo načine za iskanje optimalnih oblik z numeričnimi algoritmi. Temu trendu smo se pridružili tudi na IKPIR in skupaj s prof. Markom Keglom s Fakultete za



Slika 17. Optimalni obliki armiranobetonske in jeklene palične strehe [Kegl, 2006].

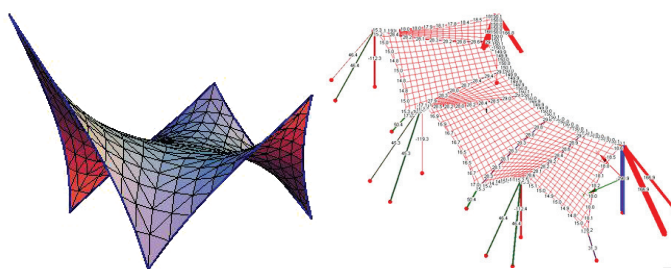
strojništvo Univerze v Mariboru pripravili algoritma za iskanjem optimalne oblike uklonsko neobčutljivih in uklonsko občutljivih ploskovnih konstrukcij [Kegl, 2006], slika 17. Ukvarjali smo se tudi z drugimi vidiki optimizacije konstrukcij. V [Stanić, 2016b] smo na primer pokazali, kako se optimizira rebraste križno lepljene lesene plošče ob upoštevanju standardov in priporočil proizvajalcev.

Med zanimivejšimi zaključnimi deli, ki smo jih na IKPIR mentorirali s področja ploskovnih konstrukcij, sta študija projektiranja silosov Simona Petrovičiča [Petrovičič, 2009], danes docenta na Fakulteti za arhitekturo Univerze v Ljubljani, ter modeliranje elastoplastičnega uklona velikega jeklenega rezervoarja med potresom Tonija Klemenčiča [Klemenčič, 2016]. Omenimo naj še dela Gorazda Brgleza in Matije Majhna (zračno podprti konstrukciji nad nogometnim igriščem), Sama Pergarca (mrežna kabelska konstrukcija), Jureta Turka (armiranobetonska lupina), Tanjo Srednik in Primoža Zelenca (prednapeti membranski konstrukciji), Ditko Čakš (hladilni stolp v Šoštanj), Katarino Smrke, Domna Ivanška in Uroša Kokota (Trimovi Qbiss One in Qbiss Air fasadni sistemi), Mihelo Baumgartner (jekleni cilindrični rezervoar), Davida Korena (modeliranje stikov konstrukcijskih elementov), Danijela Lisičiča in Tilna Klemenca (poliestrski kompozitni laminati) ter Mojco Usnik in Uroša Ristića (kombiniranje eksperimentov in numerične analize).

15 KOMPOZITNO LAMINATNE KONSTRUKCIJE IN PREDNAPETE MEMBRANE

Kompozitni laminati se v gradbenem konstruktorstvu uporabljajo v glavnem za rezervoarje. Na drugih inženirskih področjih, kjer jih je seveda tudi treba ustrezno konstrukcijsko projektirati, pa se uporabljajo v raznovrstne namene. V 90. letih smo se z Matjažem Makarovičem z ZAG lotili modeliranja in analize kompozitno laminatnih poliestrskih cistern, ki jih je proizvajalo podjetje Regeneracija [Makarovič, 1996]. V sodelovanju z oddelkom za aeronavtiko torinske politehniko pa smo nekoliko kasneje razvili posebne končne elemente za analizo slojevitih kompozitnih lupin [Brank, 2000].

Druge, nekoliko nekonvencionalne gradbene konstrukcije, s katerimi smo se tudi ukvarjali, so prednapete membrane, slika 18. To temo je preštudiral v svojem diplomskem delu Damir Kovačević [Kovačević, 2012] in s tem odprl pot drugim kvalitetnim zaključnim delom s področij prednapetih membran, napihljivih membran in kabelskih konstrukcij. Prednapete membrane, ki tudi v Sloveniji postajajo popularne strešne konstrukcije, se projektirajo drugače kot konstrukcije iz standardnih gradbenih materialov. Najprej se predpostavi ustrezno ortotropno prednapetje v membranski tkanini, nato pa se poišče geometrija, ki ustreza prednapetju. To se imenuje iskanje oblike, rezultat pa je začetna oblika membranske konstrukcije. V naslednji fazi se z geometrijsko nelinearno analizo preveri, kako se spreminjajo sile v membrani zaradi obtežb vetra in snega. Če se pri izračunu pojavijo tlačne napetosti, ki so seveda nefizikalne, je potrebna nova iteracija z novim prednapetjem

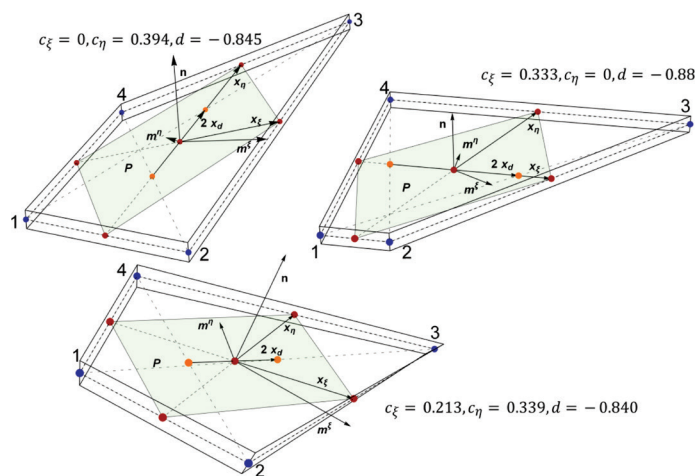


Slika 18. Iskanje oblike membrane (levo) [Jukić, 2013] in sile v membranski konstrukciji, podprti s kabli in jambori (desno) [Kovačević, 2012].

in novo začetno obliko. Zadnja faza projektiranja je določitev krojnih pol, ki se zvarijo med seboj, ko se tvori površina membrane.

16 TEHNOLOGIJE KONČNIH ELEMENTOV IN ČASOVNIH INTEGRACIJSKIH SHEM

Čeprav se zdi, da imamo že zdaj na razpolago robustne in zanesljive končne elemente za analizo konstrukcij, ki so na voljo tudi v komercialnih računalniških programih, je še vedno dovolj prostora za njihovo izboljšanje. Takšno početje imenujemo tehnologija končnih elementov, slika 19. S tem se je na IKPIR ukvarjal doktorand Marko Lavrenčič, ki je z uporabo različnih variacijskih principov razvil robustne in računsko hitre mešane ploskovne končne elemente [Lavrenčič, 2020], ki so precej hi-



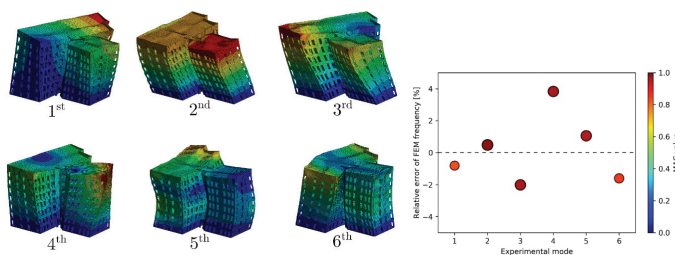
Slika 19. Tehnologija končnih elementov [Lavrenčič, 2020].

trejši in tudi natančnejši od tistih, ki se trenutno uporabljajo v komercialnih programih za nelinearno analizo konstrukcij. To se zdi pomembno, ker raziskave kažejo, da uporabniki komercialnih programov po metodi končnih elementov največ uporabljajo prav končne elemente za lupine (za področje gradbenih konstrukcij to najverjetneje ne velja, saj so linijski končni elementi še vedno prevladujoči).

Ukvarjali smo se tudi s časovnimi integracijskimi shemami za dinamiko konstrukcij. Klasične integracijske sheme je predstavil Newmark v petdesetih letih. Kasneje, v devetdesetih letih, so se začele razvijati sheme, ki ohranjajo osnovne fizikalne konstante gibanja, kot sta gibalna in vrtilna količina, pa tudi energija pri elastičnih konstrukcijah. Tudi na IKPIR smo se ukvarjali s razvojem takšnih integracijskih shem [Brank, 1998]. Razvijali pa smo tudi algoritme, ki numerično in kontrolirano sipajo energijo, in sicer tako, da se sipanje dogaja v območju visokih frekvenc, ki so popačene zaradi prostorske diskretizacije ([Brank, 2003], [Lavrenčič, 2021]).

17 POSODABLJANJE NUMERIČNIH MODELOV

V zadnjem času se na IKPIR ukvarjamo s posodabljanjem numeričnih modelov za konstrukcije. Ideja je, da se numerični model konstrukcije, ki je nastal z uporabo končnih elementov, parametrizira, nato pa se vrednosti parametrov posodobijo tako, da se numerični rezultati kar najbolj ujemajo z eksperimentalnimi. S posodabljanjem modelov visokih lesenih stavb se ukvarja doktorand Blaž Kurent [Kurent, 2021], slika 20, s posodabljanjem modelov mostnih konstrukcij (med njimi viadukta Ravbarkomanda) pa Nina Kumer. Največkrat se kot eksperimentalne rezultate uporabljajo meritve, dobljene z eksperimentalno ali operativno modalno analizo. Pri tem sodelujemo z Univerzo v Exeterju, francoskim Centre Scientifique et Technique du Bâtiment in Zavodom za gradbeništvo Slovenije. Pri apliciranju Bayesovega posodabljanja numeričnega modela, kjer se uporablja probabilistične koncepte, pa sodelujemo s prof. Noëmi Friedman s Computer Science and Automation Research Institute iz Budimpešte. Parametri modela postanejo naključne spremenljivke s porazdelitvami, z inverznim (Bayesovim) postopkom, ki vključuje numerične in eksperimentalne rezultate, pa se pride do posodobljenih porazdelitev parametrov. S probabilističnimi koncepti lahko



Slika 20. Osnovne nihajne oblike sedemnadstropne lesene stavbe in ujemanje numeričnih rešitev z eksperimenti po posodobitvi modela [Kurent 2021].

v modeliranje vključimo napako meritev, opravimo statistično analizo numeričnih rezultatov in dobimo vpogled v distribucijo napake po modelu.

Omenimo naj še delo Mitje Papinuttija, ki je pred kratkim doktoriral z zelo zanimivo temo modeliranja vpliva vetra na dinamičen odziv dolgih visečih (in plavajočih) mostov, ki se načrtujejo nad norveškimi fjordi (ob somentorstvu prof. Ola Øisetha z Norwegian University of Science and Technology iz Trondheima), ([Papinutti, 2020], [Papinutti, 2021]).

18 SKLEP

Področje konstrukcijskega inženirstva na IKPIR se je v petdesetih letih razvilo od prvih primerov uporabe tujih in lastnih računalniških programov za računanje linijskih konstrukcij do zahtevnih nelinearnih analiz številnih vrst konstrukcij, ki se izvajajo ali z lastno programsko opremo ali z na IKPIR izpopolnjeno opremo ali pa s komercialnimi računalniškimi programi. Poznavanje znanih tujih programov in razvoj lastne programske opreme sta omogočila postopen razvoj do današnjega, mednarodno priznanega delovanja raziskovalcev IKPIR. Z organizacijo več strokovnih in znanstvenih srečanj s področij uporabe računalnika v gradbeništvo in numerične mehanike je IKPIR imel pomembno vlogo pri širjenju znanja na področju konstrukcijskega inženirstva. Aktivno smo bili vključeni tudi v uvajanje evrokodov EC 0 in EC 1 o vplivih na konstrukcije.

19 LITERATURA

Abaqus, Dassault Systems Simulia Corp, 2021.

Ansys®, ANSYS, Inc., 2021.

Avanzo, L., Moderni načini projektiranja cest, Gradbeni vestnik, 6-7, 1968.

Benčić, Z., Bešič, A., Damjanić, F., Šelih, J., Estimation of transient thermal impedance for constant current of a power thyristor using temperature field calculation, IEEE Transactions on Electron Devices, 40, 1885-1887, 1993.

Bohinc, U., Ibrahimbegović, A., Brank, B., Model adaptivity for finite element analysis of thin or thick plates based on equilibrated boundary stress resultants, Engineering Computations, 26: 69-99, 2009.

Bohinc, U., Brank, B., Ibrahimbegović, A., Discretization error for the discrete Kirchhoff plate finite element approximation.

- Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 269: 415-436, 2014.
- Brank, B., Velike deformacije lupin pri nelinearnih materialnih modelih, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 1994.
- Brank, B., Perić, Damjanić, B. F., On implementation of a non-linear four-node finite element for thin multilayered elastic shells, Computational Mechanics, 16: 341-359, 1995.
- Brank, B., Perić, D., Damjanić, B. F., On large deformations of thin elasto-plastic shells: implementation of a finite rotation model for quadrilateral shell element, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 40: 689-726, 1997.
- Brank, B., Briseghella, L., Tonello, N., Damjanić, B. F., On non-linear dynamics of shells: implementation of energy-momentum conserving integration algorithm for a finite rotation shell model, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 42: 409-442, 1998.
- Brank, B., Carrera, E., Multilayered shell finite element with interlaminar continuous shear stresses: a refinement of the Reissner-Mindlin formulation, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 48: 843-874, 2000.
- Brank, B., Ibrahimbegović, A., On the relations between different parametrizations of finite rotations for shells, Engineering Computations, 18: 950-973, 2001.
- Brank, B., Korelc, J., Ibrahimbegović, A., Nonlinear shell problem formulation accounting for through-the-thickness stretching and its finite element implementation, Computers and Structures, 80: 699-717, 2002.
- Brank, B., Korelc, J., Ibrahimbegović, A., Dynamics and time-stepping schemes for elastic shells undergoing finite rotations, Computers and Structures, 81: 1193-1210, 2003.
- Brank, B., Nonlinear shell models with seven kinematic parameters, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 194: 2336-2362, 2005.
- Bubnov, S., Pomen elektronskih računalnikov za gradbeništvo, Gradbeni vestnik, 2, 1969.
- Cerar, S., Vpliv neposredne lastne teže stropne konstrukcije, krčenja in kvalitete betona na potek notranjih obtežb med gradnjo večetažne železobetonske okvirne konstrukcije, Gradbeni vestnik, 3, 1967.
- COBISS, Bibliografija Dragoš Jurišič, https://bib.cobiss.net/bibliographies/si/webBiblio/bib201_20210729_114726_a33410659.html, 1966a.
- COBISS, Bibliografija Ervin Prelog, https://bib.cobiss.net/bibliographies/si/webBiblio/bib201_20210729_114918_a1880419.html, 1966b.
- Damjanić, F., Šelih, J., Stanek, M., Prediction of the cyclic response of structural reinforced concrete, Structural engineering review, 3, 233-239, 1991.
- Dolinšek, B., Duhovnik, J., Robotizirano sestavljanje armature linijskih armiranobetonskih elementov, Gradbeni vestnik, 1-2-3, 1997.
- Duhovnik, J., Fajfar, P., Račun konstrukcij z elektronskimi računalniki, Teoretične osnove in praktični primeri, Gradbeni vestnik, 11 in 12, 1969.
- Duhovnik, J., Fajfar, P., Račun konstrukcij z metodo podkonstrukcij, Gradbeni vestnik, 3, 1971.
- Duhovnik, J., Jelinčič, B., Kajfež, B., Marolt, V., Reflak, J., Rogač R., Saje, F., Program za izdelavo statičnega računa montažne dvoranske konstrukcije, Gradbeni vestnik, 7-8, 1977.
- Duhovnik, J., Prvi slovenski predstandardi za vplive na konstrukcije, Zbornik 19. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 16. - 17. oktober 1997.
- Duhovnik, J., Računalniško projektiranje in gradnja armirano-betonskih konstrukcij, Gradbeni vestnik, 9-10-11, 1990a.
- Duhovnik, J., Ljubič, V., Knific, T., Žlajpah, D., AR-CAD programski sistem za projektiranje armature, Gradbeni vestnik, 12, 1990b.
- Duhovnik, J., EC 1 - osnove projektiranja in vplivi na konstrukcije = EC 1 - basis of design and actions on structures, Gradbeni vestnik, 4, 2000.
- Duhovnik, J., Stanje evropskih standardov osnove projektiranja konstrukcij (EN 1990) in vplivi na konstrukcije (EN 1991), Gradbeni vestnik, 1, 2004.
- Duhovnik, J., Evrokod 0: osnove projektiranja; Evrokod 1: vplivi na konstrukcije, v: BEG, Darko (ur.), POGAČNIK, Andrej (ur.), Priručnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih, Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije, 2009.
- Dujc, J., Finite element analysis of limit load and localized failure of structures, doctoral thesis, University of Ljubljana and École Normale Supérieure de Cahen, 2010a.
- Dujc, J., Brank, B., Ibrahimbegović, Quadrilateral finite element with embedded strong discontinuity for failure analysis of solids, Computer Modeling in Engineering & Sciences, 69, 223-260, 2010b.
- Dujc, J., Brank, B., Ibrahimbegović, Multi-scale computational model for failure analysis of metal frames that includes softening and local buckling, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 199, 1371-1385, 2010c.
- Dujc, J., Brank, B., Stress resultant plasticity for shells revisited, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 247-248, 146-165, 2012.
- Dujc, J., Brank, B., Modeling fracture in elasto-plastic solids by embedded-discontinuity stress-hybrid finite element formulation, Mechanics of Advanced Materials and Structures, DOI: 10.1080/15376494.2020.1786755, 2020.
- Fajfar, P., Marinček, M., Račun deformacij enostavnih upogibnih nosilcev po elasto-plastični teoriji, Gradbeni vestnik, 4-5, 1969.
- Fenves, S. J., STRESS, Structural Engineering System Solver: a computer programming system for structural engineering problems, Cambridge, School of Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil Engineering. Technical report, T63-2, 1963.

- GV, Gradbeni vestnik, arhiv, <https://www.zveza-dgits.si/gradbeni-vestnik-arhiv/>, 2021.
- Herman, S., Antolič, V., Igljič, A., Maček Lebar, A., Damjanič, F., Srakar, F., Bending moments and stress distribution in the proximal femur after total hip replacement, *Acta pharmaceutica*, 42, 337-340, 1992.
- Hvastja, B., Mušič, J., Most čez Dravo v Podvelki - projekt in izvedba, *Gradbeni vestnik*, 2, 1963.
- IMFM, Institut za matematiko, fiziko in mehaniko, Obvestilo o seminarju, *Gradbeni vestnik*, 6-7, 1966.
- Jež-Gala, C., Šliber, F., Plastostatična analiza in dimenzioniranje jeklenih okvirov, *Gradbeni vestnik*, 8-9, 1966.
- Ibrahimbegović, A., Brank, B., Engineering structures under extreme conditions: multi-physics and multi-scale computer models in non-linear analysis and optimal design, *NATO Sciences Series*, IOS Press, 2005.
- Ibrahimbegović, A., Brank, B., Kožar, I., Multiscale computational methods for solids and fluids, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2017.
- Jukić, M., Finite elements for modeling of localized failure in reinforced concrete, doctoral thesis, University of Ljubljana and École Normale Supérieure de Caen, 2013.
- Jukić, M., Brank, B., Ibrahimbegović, A., Failure analysis of reinforced concrete frames by beam finite element that combines damage, plasticity and embedded discontinuity, *Engineering Structures*, 75, 507-527, 2014.
- Jurišič, D., Računanje inženirskih konstrukcij po metodi končnih elementov, *Gradbeni vestnik*, 6, 1969.
- Kegl, M., Brank, B., Shape optimization of truss-stiffened shell structures with variable thickness, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, 2611-2634, 2006.
- Klemenčič, T., Brank, B., Potresna analiza jeklenih cilindričnih rezervoarjev, *Gradbeni vestnik* 65, 176-182, 2016.
- Korelc, J., Wriggers, P., *Automation of Finite Element Methods*, Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
- Kovačević, D., Prednapete membranske konstrukcije, diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2012.
- Kurent, B., Brank, B., Ao, W. K., Model updating of seven-storey cross-laminated timber building designed on frequency-responsefunctions-based modal testing, *Structure and Infrastructure Engineering*, DOI: 10.1080/15732479.2021.1931893, 2021
- Lapajne, S., Crossova metoda, 1949.
- Lapajne, S., Csonkova metoda računanja skeletov s horizontalnimi obremenitvami, *Gradbeni vestnik*, 1, 1963.
- Lapajne, S., Kongres jugoslovenskega društva gradbenih konstruktorjev v organizaciji ZGIT Slovenije, *Gradbeni vestnik*, 6, 1969.
- Lavrenčič, M., Numerično modeliranje padca velikega armiranobetonskega zabojnika, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2016.
- Lavrenčič, M., Brank, B., Simulation of shell buckling by implicit dynamics and numerically dissipative schemes, *Thin-Walled Structures*, 132, 682-699, 2018a.
- Lavrenčič, M., Brank, B., Failure analysis of ribbed cross-laminated timber plates, *Coupled Systems Mechanics*, 7, 79-93, 2018b.
- Lavrenčič, M., Brank, B., Hybrid-mixed shell quadrilateral that allows for large solution steps and is low-sensitive to mesh distortion, *Computational Mechanics*, 65, 177-192, 2020.
- Lavrenčič, M., Brank, B., Energy-decaying and momentum-conserving schemes for transient simulations with mixed finite elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 375, 113625, 2021.
- Maček Lebar, A., Damjanič, F., Antolič, V., Igljič, A., Srakar, F., Brajnik, D., Nepravilnosti v cementnem plašču: analiza z metodo končnih elementov, *Farmaceutski vestnik*, 47, 311-314, 1996.
- Makarovič, M., Damjanič, B. F., Konstruiranje in optimizacija izdelkov iz poliesterskih laminatov, *Kovine, zlitine, tehnologije*, 30, 409-412, 1996.
- Marinčič, R., Pavletič, R., Damjanič, F., Analiza tesnjenja glave motorja, *Strojniški vestnik*, 37, 70-75, 1991.
- Marolt, V., Okvir: program za račun linijskih konstrukcij, Publikacija IKPIR, št. 18, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1981.
- Marolt, V., Potočan, I., Okvir: verzija 4.0, Publikacija IKPIR, št. 1/90, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1989.
- Nisa, Cranes Software International Limited, 2021.
- Oštir, V., Prototip celovitega projektiranja armiranobetonskih plošč v stavbah, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 1994.
- Papinutti, M., Četina, M., Brank, B., Petersen, Ø. W., Øiseth, O., Nonparametric modeling of self-excited forces based on relations between flutter derivatives, *Wind and Structures*, 31, 561-573, 2020.
- Papinutti, M., Dynamic analysis of floating bridges, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2021.
- Petrovič, S., Guggenberger, W., Brank, B., Jekleni silosi za sipke materiale. 1. del, Vplivi pri polnjenju in praznjenju, *Gradbeni vestnik*, 58, 70-78, 2009.
- Piculin, S., Brank, B., Weak coupling of shell and beam computational models for failure analysis of steel frames, *Finite Elements in Analysis and Design*, 97, 20-42, 2015.
- Piculin, S., Nicklisch, F., Brank, B., Numerical and experimental tests on adhesive bond behaviour in timber-glass walls, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 70, 204-217, 2016.
- Pipan, B., Hvastja, B., Cimperšek, V., Mušič, J., Projekt in izvedba mostu čez Dravo v Mariboru, *Gradbeni vestnik*, 12, 1963.
- Planinc, J., RAVOK, Navodila za uporabo programa, Publikacija RC FGG št. 10, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1975 (Ponatis 1981).

- Porenta, L., Lavrenčič, M., Dujc, J., Brojan, M., Tušek, J., Brank, B., Modeling large deformations of thin-walled SMA structures by shell finite elements, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 101, 105897, str. 1-29, 2021.
- Potočan, I., Računalniška grafika pri analizi konstrukcij, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1990.
- Prelog, E., Stenasto skeletne konstrukcije pri potresni obremenitvi, *Gradbeni vestnik*, 5 in 10, 1965.
- Prelog, E., Horizontalna obremenitev stenastih objektov z odprtinami, *Gradbeni vestnik*, 4 in 8-9, 1966.
- Prelog, E., Cvetaš, F., Fajfar, P., Reševanje linijskih konstrukcij z uporabo računalnikov, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Fakulteta za strojništvo, 1971.
- Pukl, S., Obnašanje gradbenih konstrukcij pod vplivom dejanskih obremenitev, *Gradbeni vestnik*, 8-9, 1967.
- Pukl, S., Uporaba elektronskih računalnikov v statiki, *Gradbeni vestnik*, 2, 1969.
- Reflak, J., Marinček, M., Uporaba elektronskega računalnika za računanje nosilnosti tlačnih palic, *Gradbeni vestnik*, 4-5, 1969.
- Robot Simulation Ltd, *WORKSPACE 3, Reference Manual and Guided Tour*, 1994/95.
- Rosman, R., Lomljeni stenasti nosilci, oslabljeni s svetlobnimi pasovi, *Gradbeni vestnik*, 8-9, 1968.
- Samec, V., Duhovnik, J., R O K-program za račun opaznih konstrukcij, 4. seminar Računalnik v gradbenem inženirstvu, zbornik, 1988.
- Stanek, M., Damjanić, F., Celcer V., Cracking prediction of a prestressed concrete septic containment, *Engineering Modelling*, 3, 29-34, 1990.
- Stanek, M., Numerična analiza betonskih konstrukcij od nastanka razpok do porušitve, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1993.
- Stanič, L., Spletna objava EN 1990 s komentarji, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2004.
- Stanič, A., Brank, B., Korelc, J., On path-following methods for structural failure problems, *Computational Mechanics*, 58, 281-306, 2016a.
- Stanič, A., Hudobivnik, B., Brank, B., Economic-design optimization of cross laminated timber plates with ribs, *Composite Structures*, 154, 527-537, 2016b.
- Stanič, A., Solution methods for failure analysis of massive structural elements, doctoral thesis, University of Ljubljana and Université de Technologie de Compiègne - Sorbonne Universités, 2017a.
- Stanič, A., Brank, B., A path-following method for elasto-plastic solids and structures based on control of plastic dissipation and plastic work, *Finite Elements in Analysis and Design*, 123, 1-8, 2017b.
- Stanič, A., Brank, B., Brancherie, D., Fracture of quasi-brittle solids by continuum and discrete-crack damage models and embedded discontinuity formulation, *Engineering Fracture Mechanics*, 227, 106924, 2020.
- Šelih, J., Uporaba numeričnih metod v toplotni analizi inženjskih problemov, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 1990.
- Šelih, J., Damjanić, F., Trenc, F., Pavletič, R., A novel cylinder cooling system of air-cooled engines, *Engineering Modelling*, 6, 1-4, 1993.
- Šuligoj, G., Duhovnik, J., Cerovšek, T., Elektronska objava standardov, *Gradbeni vestnik*, 5, 2004.
- Taylor, R. L., *FEAP – Finite Element Analysis Program*, University of California Berkeley, 2014.
- Tomšič, D., Reševanje dvodimenzionalnih elastostatičnih problemov z metodo robnih elementov, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1989.
- Turk, Ž., Duhovnik, J., KOP - program za konstruiranje opaznih konstrukcij, 4. seminar Računalnik v gradbenem inženirstvu, zbornik, 1988.
- Turk, Ž., Duhovnik, J., Slovenia and computer representation of design standards and building codes, *International journal of construction information technology*, 3(1), 1995.
- Vedlin, B., Jeklena konstrukcija športne hale Tivoli – prva velika konstrukcija s tornimi spoji pri nas, *Gradbeni vestnik*, 6-7, 1965.
- Veldin, T., Lavrenčič, M., Brank, B., Brojan, M., A comparison of computational models for wrinkling of pressurized shell-core systems, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 127, 103611, 2020.
- Vihtelič, A., Objektni pristop v metodi končnih elementov, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 1994.
- Vitek, A., FEDRAW - grafični poprocesor za MKE, Zbornik 11. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, 116-121, 1989.
- Vogelnik, B., Prispevek k problemu preračunavanja skeletov z vetrnimi stenami na horizontalno obremenitev, *Gradbeni vestnik*, 6-7, 1963.
- Wilson, E. L., Bathe, K. J., Peterson, H. H., *SAP – A structural analysis program for linear systems*, *Nuclear Engineering and Design*, 25, 257-274, 1973.
- Žerovnik, J., Rogač, R., Reflak, J., Duhovnik, J., Skladišče žita 1500 ton, Statični račun, Projektivni biro Velenje, 1967.
- Žlajpah, D., Ekspertni sistem za projektiranje armature, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1992.