

# Devedeset godina Zavoda za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Prof. dr. sc. Mladenko Rak, predstojnik Zavoda

## 1 Uvod

Povijest Zavoda za tehničku mehaniku započinje 6. studenoga 1920. osnivanjem Zavoda za ispitivanje gradiva u Tehničkoj visokoj školi u Zagrebu.

Osnivač i prvi predstojnik Zavoda bio je profesor dr. Stjepan Prokofjevič Timošenko, već tada u svijetu poznati znanstvenik kao profesor na Politehničkom institutu u Petrogradu i Politehnici u Kijevu, te član Ukrajinske akademije znanosti. Na Tehničkoj visokoj školi predavao je Nauku o čvrstoći, Ispitivanje gradiva, Specijalna poglavlja iz tehničke mehanike i Građevnu statiku. Njegov je kratkotrajni boravak u Zagrebu, svega dvije godine, ostavio neizbrisive tragove. Prvu je godinu posvetio utemeljenju i organizaciji Zavoda za ispitivanje gradiva te nabavci strojeva i uređenju laboratorija, dok je tijekom druge godine objavio mnoge radove na više svjetskih jezika.



Prof. S. Timošenko

Prof. Timošenko, prozvan „ocem tehničke mehanike“, dao je izvanredan doprinos tehničkoj mehanici svojim teorijskim otkrićima i analizama, primjenom postupaka matematičke fizike u rješavanju brojnih praktičnih zadataka u području inženjerske mehanike. Može se reći da su razvitek i primjena numeričkih metoda u Zavodu započeli već u vrijeme Timošenkovog boravka.

Tehnička se visoka škola 1926. priključila Sveučilištu u Zagrebu kao Tehnički fakultet, koji krajem 1940. useljava u novu zgradu u Kačićevoj ulici. Zavod je u nove prostorije u dvorišnoj zgradi Fakulteta, gdje se i danas nalazi, preseljen 1942. godine.

Zbog velikog opterećenja rutinskim ispitivanjima, nakon II. svjetskog rata, kada se u Zavodu ispituju materijali i konstrukcije s područja cijele ondašnje države, na inicijativu Zavoda 1949. godine osnovan je Laboratorij Ministarstva građevina NRH iz kojeg se kasnije razvio Institut građevinarstva Hrvatske (IGH).

Radi preustroja Fakulteta kroz njegovu povijest, djelatnost i kolegiji koji su danas obuhvaćeni Zavodom za tehničku mehaniku bili su ponekad dijelovi više zavoda, odjela i katedri. Danas se djelatnost Zavoda može podijeliti na nastavnu, znanstvenu i stručnu.

## 2 Nastavni rad

Tradicija izvođenja nastave u Zavodu za tehničku mehaniku duga je koliko i njegovo postojanje. Osim temeljnih predmeta iz područja tehničke mehanike na nižim godinama studija kroz koje studenti stječu osnovna znanja, djelatnici Zavoda izvode niz stručnih predmeta dajući važne smjernice za kasniji inženjerski poziv. Uvođenjem novog sustava obrazovanja od akademske godine 2005./2006., usklađenoga s Bolonjskim procesom, na diplomskom je studiju osnovan novi smjer pod nazivom Teorija i modeliranje konstrukcija. Na poslijediplomskom doktorskom studiju djelatnici Zavoda izvode nastavu u okviru smjera Mehanika konstrukcija, a na specijalističkom studiju u okviru smjera Numerička i eksperimentalna analiza konstrukcija.

### *Kolegiji preddiplomskog studija:*

Mehanika 1, Mehanika 2, Otpornost materijala 1, Otpornost materijala 2, Građevna statika 1, Građevna statika 2 i Numeričko modeliranje konstrukcija

### *Kolegiji diplomskog studija, smjer Teorija i modeliranje konstrukcija:*

#### Obvezni:

Mehanika materijala, Nelinearna statika štapnih konstrukcija, Teorija elastičnosti i plastičnosti, Dinamika konstrukcija i potresno inženjerstvo, Eksperimentalne

metode 1, Teorija kompozita, Plošni nosači, Teorija stabilnosti i Ispitivanje konstrukcija

#### Izborni:

Numeričke metode u proračunu konstrukcija, Posebna poglavlja otpornosti materijala, Metoda konačnih elemenata, Programiranje postupaka proračuna konstrukcija, Polimeri, Metode teorije elastičnosti i plastičnosti, Stohastička analiza konstrukcija, Posebna poglavlja teorije stabilnosti i Osnove mehanike loma

#### Kolegiji diplomskog studija na drugim smjerovima:

Dinamika konstrukcija (Geotehnika, Konstrukcije, Hidrotehnika), Ispitivanje konstrukcija (Konstrukcije), Polimeri (Materijali), Mehanika materijala (Materijali) i Teorija elastičnosti i plastičnosti (Materijali, Geotehnika)

#### Kolegiji poslijediplomskog doktorskog studija (D), smjer Mehanika konstrukcija i specijalističkog studija (S), smjer Numerička i eksperimentalna analiza konstrukcija:

Nelinearna mehanika kontinuuma (D), Eksperimentalne metode 2 (D), Posebna poglavlja mehanike materijala (D, S), Mehanika loma (D, S), Plastičnost i puzanje u analizi konstrukcija (D, S), Numeričke metode teorije plastičnosti (D), Teorija tankostjenih nosača otvorenog profila (D, S), Primjena mehanike loma na betonske konstrukcije (D, S), Posebna poglavlja dinamike konstrukcije i potresnog inženjerstva (D, S), Trodimenzionalna analiza ploča (D, S), Numeričke metode za analizu diskontinuiranih sredina (D), Proračun pouzdanosti konstrukcija (D), Polimeri i kompoziti konstrukcija (D, S), Numerički modeli dinamike konstrukcija (D), Modelsko ispitivanje konstrukcija (S), Modeliranje konstrukcija konačnim elementima (S), Probabilistički proračun konstrukcija (S) I Građevine u potresnim područjima (S)

### 3 Znanstvena ostvarenja

U Zavodu za tehničku mehaniku provedena su mnogobrojna znanstvena istraživanja iz raznih područja, a mnoga su od njih rezultirala knjigama, magistarskim radovima i doktorskim disertacijama.

Znatan broj istraživanja bio je posvećen teoriji tankih i debelih ploča u elastičnom i plastičnom području (O. Werner, H. Werner). Šezdesetih godina u Zavodu se razvija metoda relaksacije i metoda konačnih razlika pri rješavanju ravninskih problema teorije elastičnosti, problema teorije ploča, te problema torzije u elastičnom i plastičnom području (Z. Kostrenčić, Z. Modor, K. Herman, V. Šimić).

Provedena su i istraživanja u rješavanju ravninskih zadaća teorije elastičnosti pomoću konformnog preslikavanja i primjene analitičkih funkcija (K. Herman, V. Šimić).

Problemi visokostjenih nosača rješavali su se na više različitih načina: metodom konačnih diferencija, analitičkom metodom pomoću beskonačnih redova te metodom konačnih elemenata (M. Anđelić). Analiziran je i utjecaj promjene temperature na naprezanja i pomake u zidovima (J. Petak).

Riješeno je više linearnih i nelinearnih problema dinamike konstrukcija, kao i problem štapnih konstrukcija s materijalnom i geometrijskom nelinearnošću te puzanjem i skupljanjem.

S. Timošenko, osnivač Zavoda, imao je goleme zasluge pri uvođenju znanstvenog pristupa u inženjerske probleme tijekom razvoja primijenjene mehanike. Problemi mehanike, koje su do tada formulirali matematičari i fizičari, svrstavali su se u matematičku fiziku i bili gotovo nepoznati inženjerima.

Timošenko je bez predrasuda prihvaćao numeričke metode za rješavanje problema koje nije moguće analitički riješiti. U to vrijeme su teoretičari tek počeli prihvaćati i primjenjivati numeričke metode u matematičkoj fizici. To je utjecalo na sadržaj nastave i davalo impuls početku razvoja numeričkih metoda u mehanici na Sveučilištu u Zagrebu.

Tada su se u svijetu počeli pojavljivati posebni postupci relaksacije, pogodni za okvirne konstrukcije. U Zavodu je razvijen jedan od prvih algoritama u svijetu, zasnovan na metodi pomaka i postupku relaksacije za okvirne konstrukcije u ravnini (K. Čališev). Zanimljivo je spomenuti da je i G. Kani, autor svojevremeno u svijetu vrlo raširene Kanijeve metode proračuna, bio neko vrijeme asistent u Zavodu. On je formulirao metodu relaksacije za rješavanje horizontalno pomičnih okvirnih konstrukcija u ravnini.

Razvijena je još jedna metoda relaksacije za horizontalno pomične okvirne konstrukcije u ravnini (O. Werner). Ta se metoda rabila u Hrvatskoj, ali nije bila objavljena. Sličnu je metodu 1952. godine objavio Csonka.

Znanstveni se rad u Zavodu poslije Drugog svjetskog rata obavljao znanstvenim projektima kojih su nosioci bili nastavnici Zavoda (O. Werner, Z. Kostrenčić, V. Simović, V. Šimić, K. Herman, M. Anđelić, V. Korošec, A. Kiričenko, J. Dvornik, Lj. Herceg, Ž. Šimunić, M. Rak), a koje su financirali Naučni fond SFRJ, SIZ-ovi znanosti, Hrvatske ceste, Građevinski institut, Građevinski fakultet te Ministarstvo znanosti Republike Hrvatske.

Nakon pojave dostupnih elektroničkih računala u Zavodu su se počeli razvijati programi za automatski proračun okvirnih konstrukcija, zasnovani na algoritmima relaksacije. U isto su se vrijeme počeli pojavljivati i univerzalni programi iz svijeta. Spomenut će se neki od cjelovitijih programa za proračun štapnih konstrukcija koji su razvijeni u Zavodu.

Program SAM je razvijen za praktični proračun zidanih i armiranobetonskih zgrada, program PL za proračun armiranobetonskih ploča, a programi MP i DIM za proračun ravninskih okvirnih konstrukcija za proračun ravninskih okvirnih konstrukcija. Java applet DiM (Displacement Method), kao i MP program, razvijen je za proračun ravninskih okvirnih konstrukcija (*M. Srkoč, M. Anđelić, K. Fresl i drugi*).

Prema postupku *V. Simovića* o proračunu zidova s otvorima izrađen je računalni program ZID-E (*H. Werner*). Program je upotrijebljen u proračunu velikog broja građevina koje imaju zidove s otvorima.

U Zavodu je razvijen algoritam i računalni program za optimalno dimenzioniranje poligonalnih armiranobetonskih presjeka za općenito zadane radne dijagrame betona i čelika. Poslije je program proširen i dotjeran, te je doživio vrlo široku primjenu u Hrvatskoj (*J. Dvornik i drugi*).

Primjena metode konačnih elemenata započela je kod nas sedamdesetih godina proteklog stoljeća. Prvi programi s kojim su tada radili članovi Zavoda bili su STRESS i SAP. Od tada je metoda konačnih elemenata postala nezaobilazno oruđe za proračun svih ozbiljnijih konstrukcija. Metoda konačnih elemenata ubrzo je ušla i u nastavu. Kao modifikacija programa SAP za osobna računala izrađen je program SPAN za statički i dinamički proračun štapnih i plošnih konstrukcija s automatskim dimenzioniranjem armiranobetonskih pravokutnih presjeka (*J. Ožbolt, J. Dvornik*).

Razvijen je algoritam i izrađen program NELIN2D za proračun ravninskih štapnih konstrukcija kojim se uzimaju u obzir geometrijska i materijalna nelinearnost te promjene modela konstrukcije tijekom izgradnje. Razvijen je i NELIN3D za prostorne štapne konstrukcije (*J. Ožbolt*).

Riješeni su teorijski problemi, razvijen algoritam te napisan opći programski paket CABLE za proračun konstrukcija od užadi, tkanine i kombinacija užadi i tkanine. Mogu se uključiti piloni i pojedinačni tlačni štapovi te tzv. *tensegrity* konstrukcije. Program se može primijeniti i na oblikovanje tlačnih konstrukcija po analogiji s vlačnima. Program sadrži više varijantnih algoritama integriranih u cjelinu (*J. Dvornik, D. Lazarević*).

Danas se u Zavodu uz programe, koje su razvili članovi Zavoda, upotrebljavaju i svjetski poznati programi SAP, ETABS, SAFE, SOFISTIK i CsiCol.

U Zavodu su se istraživale ljuske različitih oblika (dvo-cilindrična, eliptična, konična, sferna, toroidna itd.) te njihova optimalizacija. Zanimljivo je to da su rezultati upotrijebljeni za proračun podmornica.

Projektiran je i revidiran velik broj silosa i bunkera za rasuti materijal: žito, suncokret, cement, klinker itd. Proračun takvih konstrukcija bio je povezan sa znatnim teškoćama zbog nepoznavanja unutrašnjeg opterećenja. U vezi s tim pod vodstvom *J. Dvornika* istraživao se raspored pritisaka u znatnim materijalima uz pomoć metode diskretnih elemenata. Počelo je sa statičkim problemima, a nastavilo se s dinamičkim problemima kao što je pražnjenje silosa (*D. Lazarević*). Teškoće vezane uz opterećenja silosa nisu ni do danas u potpunosti znanstveno riješene. Pod vodstvom *J. Dvornika* obavljena su istraživanja u području nelinearnih parametarskih oscilacija (*V. Raduka*).

U području eksperimentalnih istraživanja provedena su znanstvena istraživanja na problemima određivanja deformacija i naprežanja čvrstog deformabilnog tijela putem tenzometrije i krhkih lakova te numerički (*Z. Kostrenčić, V. Šimić*). Eksperimentalnim su putem provedene dinamičke analize parametara stanja posebnih konstrukcija (*LJ. Herceg, K. Herman*). Kombiniranim eksperimentalno-teorijskim postupkom u Zavodu, a prvi put u Hrvatskoj, provedene su detekcije oštećenja na konstrukcijama na temelju izmjerenih vlastitih frekvencija (*M. Rak*). Provedena su istraživanja u području mehanike loma i učinka veličine modela na primjerima betonskih uzoraka s nehomogenom strukturom (*J. Krolo*). Obavljena su teorijska i eksperimentalna istraživanja ponašanja tankostjenih nosača otvorenog poprečnog presjeka u uvjetima složenih naprežanja (*D. Šimić*). Rađeni su eksperimenti sa spregnutim konstrukcijama lagani beton-drvo, ispitivanja zavarenih i vijčanih spojeva stupa i grede u čeličnim konstrukcijama, ispitivanja ponašanja tzv. seizmičkih spona za razgradnju seizmičke energije kod ravninskih čeličnih konstrukcija, ispitivanje ponašanja FRP armature u betonskim elementima (grede i ploče) do sloma i ispitivanja opečnih zidova i stupova ojačanih FRP-om.

#### 4 Stručna djelatnost

Stručnu djelatnost Zavoda možemo načelno podijeliti na djelatnosti projektiranja, proračuna i ispitivanja. U dugoj povijesti Zavoda riješeni su mnogi stručni problemi, ali će ovdje biti prikazana ona rješenja na kojima su primijenjena originalna konstruktorska rješenja i ona koja su u vrijeme kad su nastala bila na razini vrhunskih konstruktorskih ostvarenja, čak i na svjetskoj razini. Prvenstveno se to odnosi na izvanredno složene konstrukcije na kojima su njihovi konstruktori pokazali svoje bogato znanje i inventivnost. Neki od tih dometa nisu ni nakon dugog niza godina nadmašeni.

Brojni rezultati Zavoda u ovoj djelatnosti predstavljaju i znanstvena dostignuća.

#### 4.1 Ostvarenja u projektiranju i proračunu konstrukcija

Djelatnost projektiranja i proračuna konstrukcija obuhvaća: izradu konstruktorskih rješenja, provedbu statičkih i dinamičkih proračuna te izradu nacrtu armature i drugih konstrukcijskih detalja; stručna mišljenja i ocjene o konstruktorskim rješenjima te revizije projekata; izradu projekata i stručnih mišljenja o nadogradnjama i rekonstrukcijama postojećih građevina; stručna mišljenja i izradu projekata sanacije u potresu, požaru ili u ratu oštećenih građevina.



Ljuska u Venezueli projektirana u Zavodu

Tvornice cementa su najbrojnija skupina industrijskih građevina za koje su izrađivani konstruktorski projekti. Pripadnici Zavoda (*O. Werner, V. Simović, M. Anđelić, J. Dvornik, Z. Modor i drugi*), projektirali su konstrukcije u sklopu mnogih tvornica cementa ne samo u zemlji nego i u inozemstvu: Podsused, dalmatinske tvornice cementa (Prvoborac, Partizan, 10. kolovoz i Sv. Kajo), Našice, Kakanj, Lukavac, Popovac, Koromačno, Trbovlje, Reunione, Mauricius, Kenija, Nigerija, Brazil, Tanganjika, Venezuela, itd. Većinu tih objekata čine vrlo teške i složene armiranobetonske i čelične konstrukcije. Pripadaju im posebice: višetažni tornjevi izmjenjivača topline, temelji cementnih peći, mlinice sirovine, mlinice cementa, hale za sirovinu, hale za klinker, silosi za cement, silosi za sirovinu i mnogi drugi. Svaki od tih objekata pripada najsloženijim građevinama s konstruktorskog stajališta.

Wernerova ljuska jest konstrukcija nastala za primjenu poglavito u industriji, a proizašla je iz teorijske analize djelovanja cilindričnih ljusaka, posebice kratkih cilindričnih ljusaka kojima i pripada ova konstrukcija. Podrobno je razrađen konstrukcijski sustav s detaljima montaže i načinom izvedbe. Konstrukcija je polumontažna. Da bi se potvrdili rezultati teorijske analize izvedena su

dva pokusna objekta. Za prvi je pokusni objekt postavljen uvjet da mora ostati kao dio buduće konstrukcije objekta, što je značilo da se pri pokusnom opterećenju moralo voditi računa da oštećenja ne dovedu u pitanje dalju uporabu objekta. Drugi se pokusni objekt opterećivao do sloma. Izabran je oblik u kojem nastaju nepovoljni statički uvjeti, a osim toga dobiveni su neposredni podaci za primjenu ove konstrukcije kod Sched krovova. Wernerova ljuska je vrlo često izvođena konstrukcija u industrijskim objektima u zemlji i inozemstvu, najviše u cementnoj industriji.

Na objektima tvornice elektrolize Lozovac kod Šibenika prvi su put primijenjeni prednapeti nosači za krovne konstrukcije (*I. Cvetko*).

U konstruktorskoj praksi članova Zavoda bilo je više tvorničkih dimnjaka. Za dva dvjestometarska dimnjaka u Zagrebu, TE-TO i EL-TO, izrađeni su složeni dinamički proračuni (*J. Dvornik*). Projektiran je i dimnjak TE Plomin (*N. Bičanić*). Kotlovnica s dimnjakom termoelektre Rijeka-Urinj građevina je iznimno složene konstrukcije zbog neobičnog oblika te građevine; osim činjenice da se radi o nesvakidašnjoj i vrlo složenoj konstrukciji, značajka te građevine je u tome što je u njezinu proračunu primijenjen jedan od prvih prostornih modela metode konačnih elemenata uz obuhvaćanje cijele građevine (*J. Dvornik, N. Bičanić*).



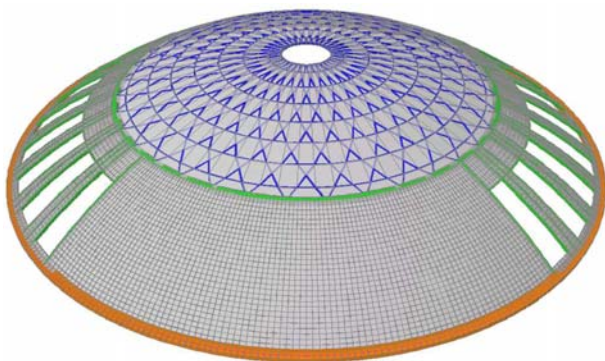
Poslovni toranj Cibona u Zagrebu



Zaštitni je spremnik za amonijak u Kutini cilindričnog oblika, promjera 54 m, visine 21 m i najveći je objekt te vrste u našoj zemlji. Konstrukcija je armiranobetonska, prednapeta, a zanimljiva je značajka tog objekta da leži na 32 elastomerna ležaja (*M. Srkoč, Ž. Šimunić*).

Valja spomenuti i dinamičke proračune temelja za razne industrijske pogone kao što su temelji turboagregata za tvornice u Hrvatskoj, BiH, Kanadi, Indiji itd. (*V. Korošec*).

Od poslovnih objekata dovoljno je nabrojiti neke: poslovni toranj Cibone, poslovna zgrada Euroherc u Zagrebu, INA-inu zgradu u Novom Zagrebu i Importanne Galleriu. Poslovni je toranj Cibone projekt za 25-etažnu zgradu kružnog tlocrta ukupne visine 92,0 m (*M. Anđelić*). Toranj je složena armiranobetonska prostorna konstrukcija u monolitnoj izvedbi. Osnovni nosivi dijelovi su: dvije središnje jezgre za dizala, zidovi i dva polukružna fasadna okvira. Armiranobetonska ploča debljine 20 cm horizontalno povezuje fasadne okvire sa središnjim jezgrama i djeluje kao kruta horizontalna dijafragma. Rješenje konstrukcije i provedene proračunske analize vrhunska su konstruktorska ostvarenja. Poslovna zgrada Euroherc, koja je naknadno dograđivana za 5 katova također je svojevrsno originalno rješenje u visokogradnji (*M. Anđelić, D. Lazarević*). Kod zgrade INA-e treba istaknuti dva konstruktorski posebno značajna zahvata: privremene dilatacije i isključivanje stubišnih jezgri iz sudjelovanja u preuzimanju horizontalnih opterećenja (nisu se mogle iskoristiti zbog malog vertikalnog opterećenja koji su preuzimale (*M. Srkoč, J. Dvornik*)). Stambeno-poslovna građevina s javnom garažom, Importanne Galleria, višekatna je građevina armiranobetonske konstrukcije s četiri podzemne i devet nadzemnih etaža (*V. Simović, Z. Despot*).



#### Numerički model kupole dvorane „Krešimir Ćosić“ u Zadru

Od objekata javne namjene valja svakako spomenuti stadion NK Dinamo u Maksimiru s istočnom i zapadnom tribinom (*E. Erlih, V. Simović*), zatim KD Vatroslava Lisinskog u Zagrebu, koju čini armiranobetonska konstrukcija s čeličnom krovnom konstrukcijom (*E. Erlih, V. Simović, Z. Žagar*), pristanišnu zgradu aerodroma u Ti-

togradu s prostornom naboranom krovnom konstrukcijom (*V. Simović*), sportsku dvoranu Cibone u sklopu sportsko-poslovnog kompleksa Cibone, kao dio kompleksa s konstruktorskog je stajališta najzanimljiviji objekt i vrhunski konstruktorski domet (*M. Anđelić*), te višenamjensku sportsku dvoranu „Krešimir Ćosić“ u sklopu sportskog centra Višnjik u Zadru (*J. Dvornik, M. Anđelić, D. Lazarević*).

Ubrzo nakon izvedbe Kompleksa bazena na Poljudu u Splitu nastali su problemi uzrokovani pogreškama u konstruktorskoj koncepciji. Preveliki rasponi premošćivani su gredama premalih poprečnih presjeka, a horizontalne sile prednapetoga krova preuzimane su pomoću torzijskog otpora greda. Pri izradi projekta sanacije provedena su opsežna konstruktorska istraživanja koja su obuhvatila sve glavne nosive elemente konstrukcije. Rješenje je provedeno dodavanjem stupova i razupore kao nosivih elemenata kojima su eliminirani preveliki rasponi glavnih nosivih greda tribine i bitno smanjeni torzijski utjecaji na rubnim masivnim gredama. Nosač iznad bazena ojačan je vanjskim sustavom za prednapinjanje. Kabeli krova naknadno su natezani kako bi se u njih vratile sile koje su u međuvremenu bile smanjene. Provedene su vrlo složene numeričke analize. Do danas se nisu pojavili nepoželjni pomaci, a konstrukcija se u cijelosti dobro ponaša. Voditelj projekta sanacije bio je *J. Dvornik*, a suradnici *R. Fejzo i J. Ožbolt*.

#### 4.2 Ostvarenja u području ispitivanja

Određivanje parametara stanja složenih konstrukcija proračunom ne jamči cjelovit i potpuno pouzdan pristup, što upozorava na potrebu eksperimentalnih istraživanja, pa se od osnutka Zavoda u njegovu laboratoriju permanentno provodi ispitivanje konstrukcija i materijala, istraživanja na modelima, provjera ponašanja i kontrola sigurnosti gotovih konstrukcija tijekom eksploatacije. Za provođenje eksperimentalnih istraživanja laboratorij Zavoda opremljen je strojevima, instrumentarijem, senzorima i potrebnim elektronskim sustavima za skupljanje podataka, njihovu registraciju i obradu. Zavod raspolaže s modernom opremom za nedestruktivna ispitivanja konstrukcija, zatim vrlo modernom opremom za registraciju pomaka i deformacija te digitalno skupljanje i obradu podataka pri ispitivanjima realnih konstrukcija.

U početnoj fazi razvoja eksperimentalnih istraživanja i ispitivanja najveći doprinos dali su *K. Čališev i Z. Kostrenčić*, koji su rukovodili laboratorijem Zavoda sve do kraja sedamdesetih godina prošlog stoljeća.

Djelatnost laboratorija povezana je s aktivnim znanstveno-istraživačkim i nastavnim radom, te suradnjom s privredom u izradi čitavog niza visokostručnih zadataka. Tako se provode istraživanja mehaničkih karakteristika materijala koji se upotrebljavaju u graditeljstvu, ispiti-

vanja umora materijala, istraživanja na materijalima izloženim višeosnim stanjima naprezanja, određivanje zaostalih naprezanja i deformacija te reoloških promjena pri skupljanju i puzanju materijala. Osim razornih metoda ispitivanja u laboratoriju se razvija niz bezrazornih metoda za određivanje mehaničkih karakteristika materijala i konstrukcija. Najveći dio djelatnosti Laboratorija u znanstvenoistraživačkom radu i suradnji s privredom pripada ispitivanju konstrukcija. Laboratorij je ekipiran i opremljen za ispitivanje konstrukcija u prirodnoj veličini pri utjecaju statičkih i dinamičkih opterećenja različite naravi, reoloških i atmosferskih promjena. Provode se ispitivanja svih vrsta čeličnih, drvenih, armiranobetonskih konstrukcija te konstrukcija od prednapetoga betona i od kompozitnih materijala. Pri utjecaju prirodnih fenomena, korisnog uporabnog opterećenja te umjetno izazvanih pobuda ispituju se: konstrukcije mostova, nova rješenja montažnih konstrukcija, visoki tornjevi i dimnjaci, sportska gledališta, dalekovodni stupovi, hidrotehničke građevine, silosi te ostale konstrukcije. U novije vrijeme provodi se monitoring na više značajnih objekata izloženih raznim utjecajima osnovnih i dopunskih opterećenja, u svrhu određivanja realnog ponašanja konstrukcija pri uporabi.



Iz Laboratorija za konstrukcije u Zavodu za tehničku mehaniku

U novije vrijeme laboratorij je opremljen specijaliziranom mobilnom opremom za mjerenje, registraciju i analizu podataka mjerenja, što omogućava moderan pristup eksperimentalnom istraživanju konstrukcija. Mobilnu opremu čine komponente za mjerenje pomaka i deformacija, niskofrekventni primači deformacija (akceleracija, brzina i pomak) te razni senzori za mjerenje sile, tlaka, temperature, vlage itd. Posebno treba još istaknuti najmodernije mjerne sklopove za digitalno skupljanje podataka velikog kapaciteta za simultana mjerenja s raznim vrstama senzora. Uz taj mjerni sustav upotrebljavaju se razni programski paketi za mjerenje, skupljanje, prikaz i analizu podataka u realnom vremenu. Ti sustavi bazirani na PC-u mogu prikupljati podatke vrlo velikom brzinom i slati ih na daljinu telefonskim linijama ili internetom (LabView, Pulse, Catman, PicoLog, Picoscope itd).

Godine 2004. Laboratorij je preuređen i obnovljen. Kao najzanimljivije treba spomenuti nabavu dvaju ispitnih strojeva: Z600E i Actuator 600/250 tipa Zwick. Z600E je univerzalni tlačno-vlačni stroj za ispitivanje kapaciteta 600 kN, upravljani računalom kojim se mogu postavljati parametri ispitivanja prema raznim postojećim svjetskim standardima. Actuator 600/250 je univerzalni tlačno-vlačni stroj kapaciteta 600 kN namijenjen statičkim i dinamičkim ispitivanjima većih elemenata i konstrukcija.



Probno ispitivanje mosta Krka kod Skradina

Tijekom svog djelovanja laboratorij Zavoda je radi dokaza sigurnosti proveo mnoge istraživačke radove i ispitivanja pri djelovanju statičkog opterećenja na nizu konstrukcija različitih namjena. Provedena su ispitivanja pri statičkom djelovanju pokusnog opterećenja na čitavom nizu mostovnih konstrukcija izvedenih od čelika, te armiranom i prednapetom betonu, kao što su veliki most Erdut-Bogojevo na Dunavu, stari Maslenički most, mostovi na Savi kraj Jasenovca, na Zrmanji, Uni kraj Ripača, Most mladosti u Zagrebu, most Rječina, most preko Pazinske jame, most preko Drave kod Belišća, most preko Rijeke dubrovačke, most preko Krke kod Skradina, most Kličevica, most preko Dobre kod Ogulina, most Kamačnik, most preko rijeke Mirne, novi Maslenički most (čelični), most Cetina kod Trilja, vijadukt Drežnik, vijadukt Zečeve drage, vijadukt Stara sušica, vijadukt Hreljin te čitav niz drugih mostova, cestovnih i željezničkih nadvožnjaka i vijadukata (LJ. Herceg, M. Rak, J. Krolo, Ž. Šimunić, H. Duboković, J. Kršul, D. Damjanović).

Statička i dinamička ispitivanja kranskih staza provedena su u čitavom nizu industrijskih postrojenja: u TLM-u u Šibeniku, u Željezari Sisak, tvornicama „Rade Končar“ i „Janko Gredelj“ u Zagrebu, brodogradilištima u Splitu, Rijeci, Trogiru, strojarnicama elektrana i na drugim objektima (V. Šimić, LJ. Herceg, M. Rak, J. Krolo, Ž. Šimunić).

Provedena su ispitivanja na nizu sportskih objekata pokusnim zamjenjujućim opterećenjem: na stadionima Poljud u Splitu, HNK Dinamo i Zagreb u Zagrebu, kom-

pleksu bazena u Splitu te sportskim dvoranama Cibona i Mladost, u sportskom domu u Zagrebu, dvorani Gripe, sportskoj dvorani Trogir, sportskoj dvorani Krešimira Ćosića u Zadru, sportskoj dvorani Arena-Zagreb u Zagrebu, sportskim dvoranama u Poreču, Varaždinu i Osijeku itd. (K. Herman, V. Šimić, L.J. Herceg, M. Rak, J. Krolo). Na nekim od spomenutih objekata uspostavljen je trajni elektronički monitoring s daljinskim prijenosom podataka.

Destruktivna i nedestruktivna istraživanja na konstrukcijama stradalima u požarima, elementarnim nepogodama ili ratnim djelovanjem rađena su na više objekata



Višenamjenska sportska dvorana „Arena Zagreb“ u Zagrebu

radi ocjene stupnja oštećenosti te načina sanacije konstrukcije: u hali „Tomo Vinković“ u Slavanskom Brodu, na čeličnoj konstrukciji Soko u Mostaru, Nama u Kumrovcu, u dvorcu u Belišću, silosima Koka u Varaždinu te u ratu stradalim objektima u Dubrovniku, Pakracu, Lipiku i Vukovaru (L.J. Herceg, M. Rak, J. Krolo).

Posebna pozornost pri istraživanjima posvećena je objektima kulturne baštine. Monitoring promjena, stanja deformacija i pomaka, pojava pukotina i diferencijalnih slijeganja provodi se na više objekata, kao što su Crkva sv. Jurja u Belcu, Crkva sv. Marije Snježne u Kamenskom, Knežev dvor i Crkva sv. Jakova u Dubrovniku, niz sakralnih objekata u Istri i sl. (L.J. Herceg, M. Rak).

Eksperimentalna istraživanja pri dinamičkim utjecajima korisnoga prometnog opterećenja provedena su na više mostovnih konstrukcija: Most kopno - otok Pag, Maslenički most, Morinski most kraj Šibenika, viseći pješački i željeznički most u Osijeku, Most mladosti i Most slobode u Zagrebu, most preko Rijeke dubrovačke i drugi. (L.J. Herceg, J. Krolo, M. Rak, D. Damjanović).

Pri dinamičkim utjecajima opterećenja vjetrom izvršena su istraživanja na više mostovnih konstrukcija i visokih

građevina, osobito u priobalnom pojasu: televizijski tornjevi Učka, Čelavac, Biokovo i drugi te dimnjak TE Plomin II (Z. Kostrenčić, L.J. Herceg).

Za potrebe željeznice rađena su istraživanja za izbor najpovoljnijeg sustava kolosiječnih veza, prednapetih, armiranobetonskih i drvenih pragova, tračnica i spojeva tračnica, a za potrebe ZET-a ispitivanja utjecaja tramvaja na kolosijeke u Zagrebu (L.J. Herceg, M. Rak).

Glede djelatnosti laboratorija ne može se zaobići čitav niz istraživanja obavljenih laboratorijskim ispitivanjima koja su poslužila za izradu tehničkih propisa i normi te u razvoju novih materijala i konstrukcija.

Ispitivanja zavarenih spojeva čeličnih rešetki od cijevi i prostornih rešetki sustava Mero za potrebe željezare Sisak poslužila su pri izradi propisa za takve konstrukcije (L.J. Herceg, K. Herman, H. Duboković).

U znanstvenoistraživačkom i nastavnom radu često se provode eksperimentalna istraživanja na modelima konstrukcija i elementima konstrukcija, pri čemu se stanja deformacija, naprezanja i sigurnosti prevođe na prave veličine konstrukcija primjenom dimenzionalne analize.

## 5 Nagrade i priznanja

Za bogatu znanstvenu, nastavnu i stručnu djelatnost kao i doprinos u obnovi i razvoju Republike Hrvatske članovi Zavoda za tehničku mehaniku višestruko su nagrađivani. Republičkom nagradom za životno djelo za doprinos u znanosti nagrađen je *Otto Werner*. Teslinom nagradom RH za znanstveni rad nagrađeni su: *Zlatko Kostrenčić*, *Veselin Simović* i *Josip Dvornik*. Nagradu Grada Zagreba dobio je *Veselin Simović*. Europsku nagradu za čelične konstrukcije za dvoranu Cibona dobio je *Milutin Anđelić*. Redom hrvatskog pletera odlikovani su *Ljudevit Herceg* i *Joško Krolo* za osobit doprinos razvoju i ugledu Republike Hrvatske.

## 6 Zaključak

Nastavna, znanstvena i stručna djelatnost Zavoda vrlo je bogata, o čemu svjedoči i ovaj prikaz, iako u njemu nije dan pregled cjelokupne konstruktorske djelatnosti Zavoda i njegovih članova. Izostavljeno je nabranjanje i opis brojnih građevina čije su konstrukcije rješavali ili ispitali bivši i sadašnji članovi Zavoda. Izostavljeni su veoma važni dijelovi naše djelatnosti kao što su: konzultaci-



je, ekspertize, stručna mišljenja, konstruktorske prosudbe, revizije i ocjene konstruktorskih projekata, razni istražni radovi, monitorinzi i ispitivanja na gotovim objektima.

Svi ti rezultati pokazuju da se s pravom može govoriti o zagrebačkoj konstruktorskoj školi modeliranja i ispitivanja konstrukcija koja je utemeljena na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Ovaj prikaz pokazuje da su svoj doprinos razvoju i afirmaciji te škole dali mnogi bivši i

sadašnji članovi Zavoda od kojih neki ovdje i nisu spomenuti.

Ovdje treba svakako izdvojiti prave utemeljitelje te škole (pok. prof. dr. Otta Wenera iz području projektiranja i proračuna konstrukcija i pok. prof. dr. Z. Kostrenčića iz područja ispitivanja konstrukcija) koji su svoje bogato iskustvo, znanje i kreativnost prenijeli i na svoje suradnike koji su također u svojoj praksi ostvarivali vrhunska konstruktorska djela.

