

Uloga kreativnosti i inženjerske prosudbe u konstruktorskom radu

Josip Dvornik, Damir Lazarević

Ključne riječi

kreativnost,
inženjerska prosudba,
intuicija,
konstrukcija,
statički tretman,
računalo

Key words

creativity,
technical judgement,
intuition,
structure,
static analysis,
computer

Mots clés

créativité,
jugement technique,
intuition,
structure,
analyse statique,
ordinateur

Ключевые слова

креативность,
инженерное суждения,
интуиция,
конструкция,
статическая
трактовка,
компьютер

Schlüsselworte

Schöpferkraft,
Ingenieur -
Urteilsfähigkeit,
Intuition,
Konstruktion,
statische Behandlung,
Rechneranlage

J. Dvornik, D. Lazarević

Pregledni rad

Uloga kreativnosti i inženjerske prosudbe u konstruktorskom radu

U članku se opisuje specifičan način razmišljanja inženjera konstruktora koji se pojavljuje u različitim fazama projektiranja građevine. Posebno su istaknute osobine kreativnosti i prosudbe koje često imaju ključnu ulogu u izboru ispravne konstrukcije i njezinog statičkog tretmana. Pri tome se pokušalo upozoriti na intuiciju koja bitno potiče razvoj takvih osobina. Ukratko je opisan i doprinos računala pri razmišljanju i odlučivanju uz isticanje problema koji još nisu riješeni.

J. Dvornik, D. Lazarević

Subject review

The role of creativity and technical judgement in structural engineering

Specific reasoning patterns of structural engineers, that appear in various phases of the design of structures, are described in the paper. A special emphasis is placed on indispensable faculties, namely creativity and judgement, as they are often of crucial importance during selection of an appropriate structural system and during its static analysis. At that, the attention is drawn to the intuition as it significantly fosters development of such faculties. The contribution of computers in the thinking and decision-making process is briefly described, and related problems that have not as yet been solved are outlined.

J. Dvornik, D. Lazarević

Ouvrage de syntaxe

Rôle de créativité et jugement technique en génie des structures

La manière spécifique de raisonnement des ingénieurs constructeurs, provenant du fait qu'ils sont engagés dans des phases différentes d'études structurelles, est décrite dans l'ouvrage. L'accent est mis sur les facultés indispensables, notamment la créativité et le jugement, étant donné que ces facultés sont souvent d'une importance décisive au cours de la sélection d'un système structurel approprié et pendant son analyse statique. Dans ce sens, l'attention est attirée sur l'intuition puisqu'elle contribue de manière importante au développement de ces facultés. La contribution des ordinateurs au procédé de raisonnement et de prise des décisions est brièvement décrite, et les problèmes qui n'ont pas encore été résolus dans ce domaine sont brièvement passés en revue.

Й. Дворник, Д. Лазаревич

Обзорная работа

Роль креативности и инженерного суждения в конструкторской работе

В статье описывается специфический способ мышления инженера-конструктора, появляющийся в различных фазах проектирования сооружения. Особо подчеркнуты особенности креативности, часто имеющие ключевую роль при выборе исправной конструкции и её статической трактовки. При этом сделана попытка предупредить об интуиции, в значительной мере влияющей на развитие таких особенностей. Вкратце описан и вклад компьютеров при размышлении и вынесении решений при выдвигении проблем, не являющимися ещё решёнными.

J. Dvornik, D. Lazarević

Übersichtsarbeit

Rolle der Schöpferkraft und der Ingenieur-Urteilsfähigkeit im Konstruktorschaffen

Im Artikel beschreibt man die spezifische Erwägungsweise der Ingenieure - Konstrukteure die in verschiedenen Entwurfsphasen eines Bauwerks auftritt. Besonders sind die Eigenheiten der Schöpferkraft und Urteilsfähigkeit hervorgehoben die oft eine entscheidende Rolle bei der Auswahl der richtigen Konstruktion und deren statischen Behandlung spielen. Dabei versuchte man auf die Intuition hinzuweisen die die Entwicklung solcher Eigenheiten wesentlich anregt. Kurz beschreibt man den Beitrag von Rechneranlagen beim Überlegen und Entscheiden, wobei Probleme hervorgehoben werden die noch nicht gelöst sind.

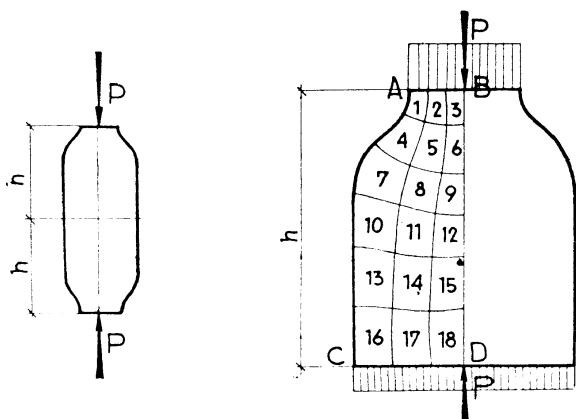
Autori: Prof. dr. sc. **Josip Dvornik**, dipl. ing. građ.; doc. dr. sc. **Damir Lazarević**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, Kačićeva 26

Ne postoji opasnost da će računala početi razmišljati kao ljudi, nego da će ljudi početi razmišljati kao računala.

Harris, Sydney J. [1]

1 Uvod

Naš nekadašnji profesor Otto Werner jednom je prelistavao Timošenkovu knjigu o pločama i ljuskama [2] i naišao na dijagram napreznja u ljusci koji mu se „nije sviđao”. Zaista, nisu bili zadovoljeni svi uvjeti ravnoteže. Unatoč tome nije uspio uvjeriti neke uvažene profesore da je dijagram pogrešan. Oni su nastojali naći neko „objašnjenje”. Više su vjerovali Timošenkovu autoritetu nego uvjetima ravnoteže i vlastitome zdravom razumu. U sljedećem izdanju knjige [3] pogreška je bila ispravljena. Prof. Werner je i u drugim prilikama pokazivao izuzetnu lucidnost i sposobnost za ispravnu prosudbu. Ponekad je gledajući samo nacрте i grafičke prikaze rezultata otkrivao pogreške u projektima i znanstvenim radovima. Nalazio je jednostavne putove za rješavanje problema koji su se činili vrlo teškima. Pri tome se nije trudio da rješenja budu „znanstveno” precizna. Primjerice, armaturu u kratkim konzolama približno bi odredio crtajući „po osjećaju” trajektorije napreznja i rastavlajući sile u njihovim smjerovima (slika 1.). Kasnijim numeričkim modelom nije se dobila razlika u odabranoj armaturi.



Slika 1. Trajektorije napreznja koje je skicirao profesor Werner [4]

I drugi se dobri inženjeri manje ili više (prema vlastitim sposobnostima) oslanjaju na inženjersku prosudbu (engl. *engineering judgement*), ali znaju da joj ne smiju u potpunosti vjerovati. Zaključke je potrebno provjeriti strožim metodama. I obratno – rezultate formalnoga proračuna treba razjasniti uz pomoć neformalne interpretacije.

2 Uloga inženjerske prosudbe

Inženjerska prosudba dolazi do izražaja u cjelokupnome konstruktorskom radu. Prije objašnjenja toga, ponajprije

misaonog, procesa opisat ćemo ukratko neke radnje u kojima ima značajnu ulogu.

2.1 Izbor konstrukcije

Većina mogućih rješenja nekoga projektnog zadatka kopije su ili prilagodbe već poznatih konstrukcija, ali i za uspješne je prilagodbe potrebna kreativnost i ispravna prosudba.

Kreativnost je sposobnost (često spontanoga) stvaranja izvan postojećih iskustava i pravila. Izraz „prosudba” obično se upotrebljava u postupku analize, a „kreativnost” u postupku sinteze nekoga rješenja. Ova raščlamba nije sasvim precizna jer i u analizi može postojati kreativnost (primjerice novi algoritam, interpretacija ili analogija). Mi ćemo u daljnjem tekstu mahom upotrebljavati izraz „prosudba”, koji će se odnositi i na jedan i na drugi pojam.

Početnu zamisao obično treba korigirati: promijeniti dimenzije, dodati ukrute, nosive elemente i slično. Tijekom rada često nastaju i nove ideje kojima se usavršava početno rješenje. Ponekad se nakon mnogo malih izmjena potpuno izgubi sličnost između početnoga i konačnoga izbora konstrukcije. Nije isključena ni nagla pojava bitnih poboljšanja ili posve novoga rješenja. Ipak u inženjerskome poslu izvornost i težnja za najvećim dometima ne bi smjeli biti sami sebi cilj.

Posljednjih smo godina imali prilike vidjeti „originalna” rješenja s nepotrebno velikim rasponima, iako je postojala mogućnost domišljatoga oslanjanja unutar konstrukcije, bez znatnijega odstupanja od zamisli arhitekta. Međutim, takvo se rješenje nije razmatralo jer bi rasponi bili premali za trajnu uspomenu na „genijalnost” konstruktora.

2.2 Proračun konstrukcije

Konstrukcija se može proračunati na mnogo načina. Ne može se reći koji je od njih najbolji. Svaki će inženjer odabrati različiti statički sustav konstrukcije, a potom i numerički model toga sustava. Pristup može biti ravninski ili prostorni, najčešće temeljen na štapnom ili plošnom tretmanu nosivih dijelova konstrukcije. Diskretizacija tih dijelova u numeričkome modelu danas se najčešće obavlja metodom konačnih elemenata koji mogu biti različitih veličina i oblika. Pri tome proračun može biti linearan ili nelinearan, statički ili dinamički.

Primjećujemo da i linearni problem, koji teorijski ima *jedinstveno rješenje*, pri praktičnoj realizaciji može imati mnogo *prihvatljivih rješenja* jer mu možemo pristupiti na mnogo načina. Pri tome smatramo da su svi modeli korektno zadani [5].

Odluke o izboru modela treba donijeti tako da se jednostavnim pristupom, uz što manje truda, dobiju pouzdani i jasni rezultati.

Pri pretjeranoj numeričkoj pa i modelskoj točnosti proračuna profesor Werner bi u šali govorio: „Ne treba dozvoliti da se faktor sigurnosti dosađuje”.

2.3 Interpretacija rezultata formalnoga proračuna

Rezultati složenijih numeričkih proračuna često su nepregledni i teško razumljivi, a ipak ih pojedini inženjeri nekritički prihvaćaju. Da bismo ih razjasnili, rezultate treba neformalno interpretirati. Ponekad će za to biti dovoljno razmišljanje, u nekim će slučajevima prikladni grafički prikazi razjasniti nedoumice, a za najsloženije će probleme trebati provesti dodatni jednostavniji proračun.

2.4 Nastava i komunikacija među inženjerima

Da bi se složeniji statički sustav ili algoritam proračuna objasnio studentima ili kolegama inženjerima, prikladno je upotrijebiti interpretaciju. Protivno mišljenju nekih profesora, za osnovno objašnjenje rijetko je potrebna složena teorija! Često je dovoljno upotrijebiti nekoliko crteža i dosjetljive usporedbe s lako shvatljivim pojavama iz svakodnevnice. Tek bi nakon slikovitoga uvoda trebalo pristupiti formalnoj teorijskoj razradbi teme.

3 O inženjerskoj prosudbi

Inženjersku je prosudbu teško definirati pa ćemo je samo približno opisati. Osim toga, problem je i interdisciplinaran – trebalo bi istraživati složene procese u mozgu u suradnji s psiholozima i neurolozima. Posljednjih se godina u te probleme uključuju i kvantni fizičari. Mi ćemo se ograničiti samo na posljedice tih procesa na inženjersko razmišljanje.

Inženjerska je prosudba neformalni pristup rješavanju problema i ne da se predočiti algoritmom.

Kada bi se inženjerska prosudba mogla predočiti algoritmom, lako bi se realizirala u nekome programskom jeziku i time postala dio računalnoga programa za proračun konstrukcija. Taj bi program imao znanje i kreativnost najboljeg inženjera. U postojećim ekspertnim je sustavima riješen samo djelić te problematike.

Proces prosuđivanja sadrži mnogo komponenata koje se međusobno isprepleću: intuiciju, vizualnu predočbu, heuristiku, iskustvo, teorijsko znanje, poznavanje uobičajenih postupaka, preporuka i propisa te prethodnih rješenja sličnih problema. Važna je i sposobnost brzoga, približnog računanja napamet ili na komadiću papira.

Profesor Werner bi odredio približnu površinu kose armature u gredi (u cm^2) kao iznos polovine poprečne sile u tonama ($A_a [\text{cm}^2] = T/2 [\text{t}]$). Izraz dimenzionalno nije ispravan, ali je

učinkovit. Jednostavno, komponenta poprečne sile T u smjeru vlačne trajektorije (pod kutom od 45°) iznosi $T\sqrt{2}/2$ što podijeljeno s dopuštenim naprezanjem u glatkoj armaturi od $1,4 \text{ t/cm}^2 \approx \sqrt{2} \text{ t/cm}^2$ daje armaturu od $T\sqrt{2}/(2\sqrt{2})$, odnosno $T/2$.

Ako inženjer pri formalnome proračunu otkrije veliko odstupanje od rezultata koje očekuje, može biti siguran da postoji pogreška u računu ili u prosudbi. Osvrnimo se u nastavku na osnovne sposobnosti i znanja pojedinca, ali i na stroge zakonitosti koje utječu na inženjersku prosudbu.

4 Intuicija

Prema jednoj definiciji [6] intuicija je sposobnost izravne spoznaje bez svjesnoga razmišljanja.

Poznata su mnoga velika umjetnička, znanstvena i izumiteljska djela u nastanku kojih je intuicija imala važnu ulogu. No važna je i u običnim inženjerskim aktivnostima. Djelomice je prirođena, ali se ponajprije nadopunjuje iskustvom stečenim učenjem na principu pokušaja i ispravljanja pogrešaka (engl. *trial and error*), zatim traženjem uzora u prirodnim oblicima i starim građevinama, estetskim kriterijima i školovanjem.

Prema [7] intuicija se sastoji od pripreme (engl. *preparation*), inkubacije, spoznaje (engl. *insight*) i provjere (engl. *verification*). Priprema je upoznavanje s problemom i početni pokušaji rješenja. (Ako problem nije jako težak, već se u toj fazi može naći rješenje.) Inkubacija je vrijeme koje protekne kada inženjer nakon više neuspješnih pokušaja odgađa rješavanje ili čak odustaje. Spoznaja nastaje kada čovjeku zaokupljenom nečim drugim iznenada „sine” ideja koja rješava problem koji ga je prije mučio. Stručnjaci kažu da tada ideja zapravo prelazi iz podsvijesti u svijest. Proces završava provjerom kao neizostavnim dijelom intuitivnoga procesa.

4.1 Izvori inženjerske intuicije

4.1.1 Urođeni osjećaji

Ljudi u većoj ili manjoj mjeri imaju urođeni osjećaj za geometriju i mehaniku. Za održavanje ravnoteže i stabilnosti ljudskoga tijela postoji posebno osjetilo u unutrašnjem uhu, a u tome sudjeluju i druga osjetila i organi, osobito vid i opip. O hodaњу po stubama ili izbjegavanju sudara s prolaznicima na ulici ni ne razmišljamo, iako to zahtijeva prostorno snalaženje i precizno upravljanje gibanjem tijela. Mnogi sportovi zahtijevaju još izoštriji zor i koordinaciju.

4.1.2 Prikupljanje iskustava

Čovjek od djetinjstva stječe različita iskustva povezana s mehanikom raznih predmeta.

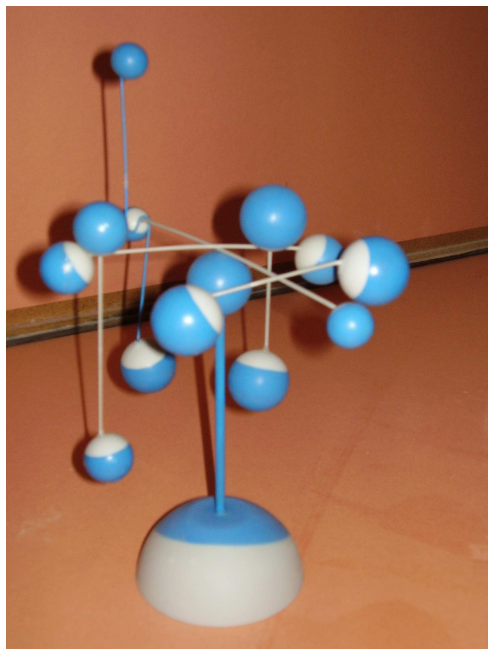
Riječ „iskustvo” znači spoznaju do koje se dolazi vlastitim doživljajem. Ovdje se upotrebljava u barem dva značenja od

kojih su oba potrebna za opis inženjerskoga razmišljanja. Čitatelj će ih lako razlikovati iz konteksta.

Jedno je racionalno iskustvo koje se može poopćiti induktivnim zaključivanjem i uobličiti u pravila. Pravila se zapisuju kao preporuke i propisi i tako se prenose s generacije na generaciju. Pravila se unapređuju sustavnim i ponekad neuspjelim pokušajima, ali i teorijskim rješenjima. Ova iskustva utječu na tzv. heurističko zaključivanje. O tome više u točki 6.

Drugo je podsvjesno iskustvo koje čovjek ne može eksplicitno formulirati niti neposredno objasniti drugome. Ono dolazi do izražaja pri trčanju, skakanju, hvatanju lopte i sličnim radnjama. Ova se iskustva najčešće povezuju s intuitivnim sposobnostima.

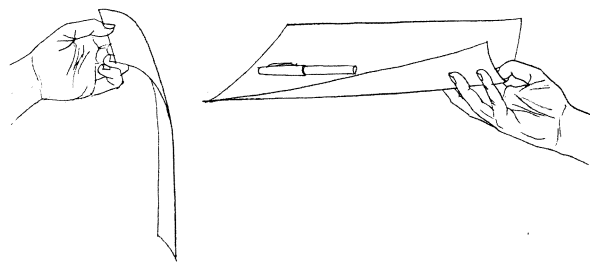
Dijete postupno uvježba slaganje kocaka i drugih predmeta u sve složenije „građevine” tako da se ne sruše (slika 2.); nauči se igrati loptom, zvrkom, koturaljkama, voziti bicikl i mnoštvo drugih stvari; stječe „osjećaj” za krutost, čvrstoću, elastičnost, plastičnost, žilavost, tvrdoću, površinsko trenje i ostala mehanička svojstva raznih materijala i predmeta.



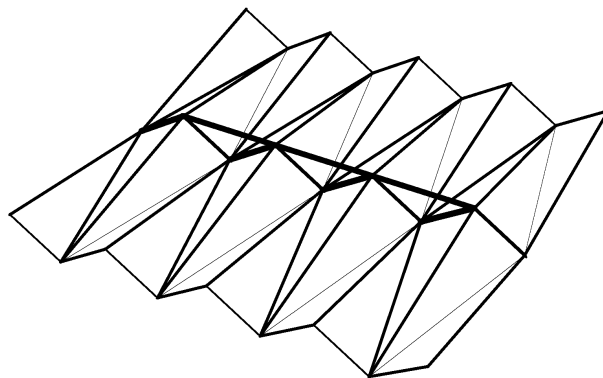
Slika 2. Ravnotežni položaj vrlo složene „konstrukcije” [8] koju je napravila devetogodišnja djevojčica

Dijete nauči prelomiti žicu savijajući je naizmjenice na dvije strane dok se materijal žice ne „umori”. Upoznalo je impuls (udarac nogom ili reketom po lopti), oscilacije (njihajluku), akumulaciju i oslobađanje deformacijske energije (praćku), poprečnu kontrakciju pri rastezanju (tijesto, guma za žvakanje), izbočenje ljustaka (ugaženu stolnotenisku lopticu, zgnječenu limenku), širenje pukotina (paranje papira, lom raznih predmeta), koncentraciju naprežanja (nož, iglu, čavao), prednapinjanje (remen na hlačama, kotač na biciklu, kvačicu). Pronicljivija djeca možda uočavaju i utjecaj oblika na nosivost: list papira

i tanki lim su mnogo krući u svojoj ravnini nego izvan nje (slika 3.), što se može iskoristiti za izradu naborane konstrukcije (slika 4.).



Slika 3. Utjecaj oblika na krutost [10]



Slika 4. Jedno od rješenja krovista sportske dvorane u Vodicama; autori J. Dvornik i D. Lazarević

Opisali smo da tijekom odrastanja dijete prikupi neočekivano veliko iskustvo iz mehanike. Ipak, ako nam nešto od toga pokušamo objasniti shvatit ćemo da su njegove interpretacije nespretne i pogrešne. Primjerice, kamen i metalni uteg djetetu se čine neizmjerne krutosti i čvrstoće. Tome se ne treba čuditi jer znamo da su i mnogi znanstvenici sve do Newtona (primjerice Aristotel ili Galileo [9]) imali krive predodžbe o nekim principima mehanike.

4.1.3 Uzori iz prirode i drevnoga graditeljstva

Nosivi oblici koje srećemo u prirodi, poput debla i grana drveta, puzeve kućice, školjke, paukove mreže i slično, optimizirane su dugotrajnom evolucijom. Prema tome, prirodni oblici mogu poslužiti inženjerima kao uzori za vrlo djelotvorne statičke sustave. Međutim, mi raspolažemo još jednim pouzdanim izvorom koji je prošao dugotrajnu provjeru. To su drevne građevine koje su se održale do danas.

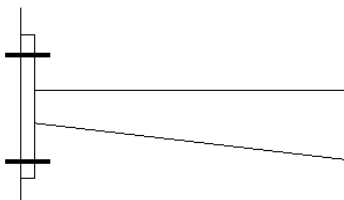
Jedno od obilježja Hrvatskoga zagorja su crkvice sagrađene na padinama brežuljaka. One se rijetko nalaze na klizištima i većina nema ozbiljnijih oštećenja konstrukcije. Možemo li na temelju ovoga zapažanja zaključiti da su seoski majstori znali izbjeći klizišta? Ne! Crkve koje vidimo potvrda su samo slučajno uspješnoga izbora lokacija za temeljenje! Ne znamo koliko je bilo neuspješnih pokušaja, jer srušene crkve nisu ostavile traga koji bi nam svjedočio o promašajima.

Ne možemo reći da su stari graditelji bili nepogrešivi, ali građevine koje su ostale do danas svakako mogu služiti kao dobar primjer uspješne gradnje.

4.1.4 Estetski kriteriji

S druge strane, dugotrajnom su se primjenom ljudi priviknuli na prirodne oblike i drevne proporcije pa su one postale i estetski privlačne. Ta povezanost između statički učinkovitih oblika i njihova sklada inženjeru može biti dobar put prema ispravnomu rješenju.

Zaista, ljudsko će oko (ne nužno inženjersko!) odmah zapaziti anomaliju u konstrukciji – primjerice konzolu manje visine na upetome nego na slobodnome kraju (slika 5.). Zanimljivo je da su takve pojave istodobno statički nelogične i estetski dvojbene i ne pripadaju načelima dobroga projektiranja. Zbog toga se ovakve „proporcije” nisu mogle zadržati kroz povijest. To se ne odnosi na umjetnost. U slikarstvu primjerice postoje različiti „nek-lasični” smjerovi pravila kojih (ako uopće postoje) ipak nisu nadahnula graditelje.



Slika 5. Neobičajena konzola

Spomenimo još jedno zapažanje koje ide u prilog estetiци: istraživanja psihologa pokazuju da slušanje ugodne glazbe u ranoj dobi života potiče razvoj prostornoga zora i matematičkoga, apstraktnoga razmišljanja [11, 12].

Ali, budući da se i ovdje radi o intuiciji, potreban je oprez i (samo)kritičnost. Lijepo rješenje konstrukcije ne mora biti statički učinkovito, niti logičan statički sustav jamči estetiku.

4.1.5 Obrazovanje

Učenjem fizike, mehanike, otpornosti materijala i stručnih konstruktorskih predmeta učenici i studenti se uz ostalo susreću s opisima pojava koje su podsvjesno iskusili. Zainteresirani studenti shvaćaju tumačenja iz nastave, ali ih rijetko odmah povezuju s iskustvom. Tome je dijelom razlog i previše formalno iznošenje gradiva u mnogim kolegijima. Naknadno povezivanje iskustva i stečenih znanja, uključujući ispravljanje krivih spoznaja, čini temelj inženjerske intuicije.

Intuicija se posebno potiče učenjem grafičkih metoda i vizualnoga prikaza rezultata, jer tada formulacije problema i rješenja postaju zorne. Ovamo pripadaju dijagrami deformacija, unutrašnjih sila i naprezanja, verižni poligon, Culmannova i Cremonina metoda za rešetkaste nosače, Williotov plan pomaka, trajektorije naprezanja, utjecajne

linije i plohe, relaksacijski postupci (Cross i Werner – Csonka) koji se provode na crtežu statičkoga sustava i daju vizualnu predodžbu o ponašanju konstrukcije i toku sila. Danas su grafičke i ručne relaksacijske metode zastarjele za primjenu, ali bi trebale ostati u nastavi kao nezamjenjivo pomagalo za pojašnjenje problema i razvijanje intuicije.

5 Paradoksi

Važno je istaknuti: intuitivne spoznaje smijemo prihvaćati samo kao slutnje i uvijek ih moramo provjeriti strožim metodama. Intuicija nas ponekad vara, a protuintuitivne se istine zovu paradoksi.

Kada je šira javnost saznala da je Zemlja okrugla mnogi su se čudili kako ljudi s druge strane Zemlje stoje naglavce i ne padnu u svemir, a vidjevši prve bicikliste pitali su se kako održavaju ravnotežu. Većina vještina iz cirkusa – od hodanja po žici do balansiranja s različitim predmetima protuintuitivna je, pa gledateljima izgledaju nemoguće. Baš to ih čini zanimljivima.

Kada se paradoks razjasni, intuicija se korigira. Ipak, uvijek mogu nastati novi paradoksi.

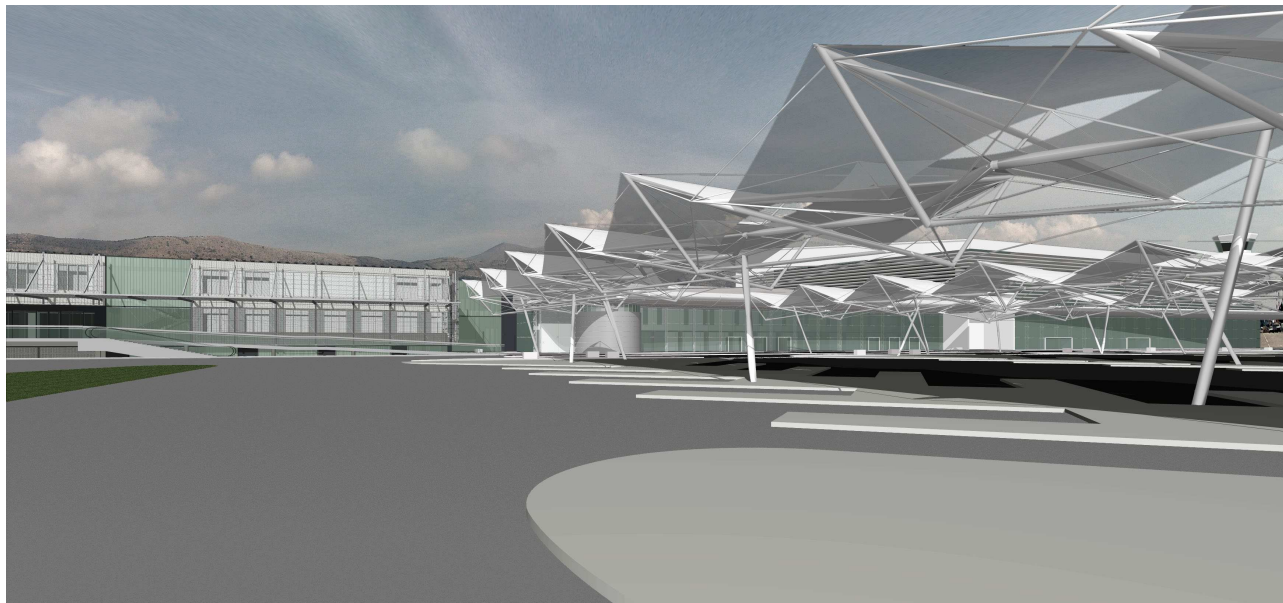
U povijesti graditeljstva često su se namjerno gradile paradoksalne konstrukcije, da bi se postigli posebni arhitektonski učinci. (Prolaznici bi se pitali: „Kako to uopće može stajati?”) Primjer su gotičke crkve s visokim šiljastim lukovima, kontraforima i vrlo vitkim tornjevima. Današnji se ljudi više ne čude gotičkim katedralama jer su se kroz stoljeća navikli na takve oblike, ali možemo samo nagađati kako su zadivljeno reagirali suvremenici. Noviji su primjeri paradoksalnih konstrukcija Gaudijeve nepravilne i prividno posve proizvoljno oblikovane konstrukcije od kamena s kosim stupovima i današnje vlačno – tlačne *tensegrity* konstrukcije [13, 14] (slika 6.).

U matematici se riječ paradoks upotrebljava u drugome smislu, nevezano za intuiciju. Matematički je paradoks logička proturječnost do koje se dolazi poštujući sustav aksioma i pretpostavki neke teorije, tako da nema sumnje u ispravnost svakoga koraka zaključivanja. Poznati su mnogi paradoksi od antičke Grčke do danas. (Primjerice, Zenonov opis trke između Ahila i kornjače poznati je paradoks o kojemu se raspravlja i danas.) Svakako, mogućnost nastanka kontradikcije dokazuje da aksiomi i pretpostavke nisu bili dobro odabrani, što znači da treba izgraditi strože temelje teorije. Tako su paradoksi bitno utjecali na razvoj matematike.

Matematički objekti koji se ne mogu intuitivno spoznati (primjerice krivulje koje ni u jednoj točki nisu derivabilne) zovu se „čudovišta” (engl. *monsters*). Budući da je pojava takvih tvorevina moguća, matematičari smatraju intuiciju nedopustivom, ali je „ilegalno” upotrebljavaju barem u početku svojih istraživanja. Naravno, naknadno provode vrlo stroge provjere.

6 Heuristika

Heuristika je gotovo suprotna intuiciji jer se zasniva na svjesnom zaključivanju, premda ne strogom.



Slika 6. Kompjutorska simulacija konstrukcije nadstrešnice na aerodromu Čilipi; autori J. Dvornik i D. Lazarević

Jednostavan zadatak kod kojega dolaze do izražaja heuristički postupci rješavanja punjenje je prtljažnika kutijama različite veličine.

Lanac zaključaka započinje od niza tvrdnji i ograničenja (što zamjenjuje aksiome u matematici). One potječu iz raznih izvora: teorijskih načela (aksioma i nekih teorema klasične mehanike), analogija, iskustvenih pravila, odredaba i ograničenja iz propisa, rezultata pokusa, podataka o izvedenim objektima, zahtjeva arhitekta ili investitora i slično. Tih je „aksioma” više nego što je logički nužno za zaključivanje, pa se u svakome pojedinom zadatku upotrebljavaju samo neki. Suvišna su pravila ili ekvivalentna ostalim pravilima ili su im samo „približno ekvivalentna” pa im u posebnim slučajevima mogu i proturječiti. Kontradikcije se tada razrješavaju daljnjim odbacivanjem pravila. Pri tome teorijska načela moraju nužno biti zadovoljena, a i odredbe propisa, ako nisu u proturječju s načelima. To je očigledno moguće jer pravila ne čine potpun i konzistentan sustav. Sam postupak zaključivanja nije strog jer se osim na formalnoj logici zasniva na pogađanju i na subjektivnoj (Bayesovoj) vjerojatnosti [15]. Višak pravila i nestrogo zaključivanje omogućuju da se problem interpretira na više različitih načina te odabere najlakši put kojim će se rješavati. Oda bir je osoban – put koji je jednomu inženjeru lagan drugomu možda nije.

Kad bi se dopustilo samo strogo zaključivanje, razmatranja bismo ograničili na formalne metode proračuna koje obično ne poistovjećujemo s „bljeskom” u glavi ili kratkom provjerom „na poleđini omotnice” (engl. *back of the envelope*).

Treba još jednom istaknuti: intuitivne i heurističke spoznaje nisu pouzdane i često se razlikuju među ljudima.

Dobri se inženjeri ipak obično slože nakon rasprave, a preostale nesuglasice nestaju nakon formalnih provjera koje su svima mjerodavne.

Važna je korist od heuristike što se brzo odbacuje veliki broj „očigledno loših” pokušaja pri rješavanju problema, čime se znatno smanjuje opseg pretraživanja. (Šahist i ne razmatra poteze koji mu se čine bez izgleda. U procjeni može pogriješiti, što se i dobrim igračima ponekad događa.)

U neke računalne programe za različite primjene ugrađeni su formalizirani heuristički postupci („heuritm” – heuristički algoritmi) koji rade po strogim, programskim jezikom utvrđenim naredbama koje nisu teorijska pravila. Oni su sastavni dio „umjetne inteligencije” i izlaze izvan područja ovoga članka.

Razmotrimo pobliže osnovna načela i izvore motivacije koji najviše utječu na heurističko razmišljanje.

6.1 Načela klasične mehanike

Pravila s najvećom „težinom” su načela – aksiomi i teoremi klasične mehanike. Za razliku od ostalih pravila, ta se načela nikada ne smiju prekršiti. Pogrešnih rješenja u kojima su ona narušena ima u inženjerskim projektima, znanstvenim radovima, čak i u znamenitim knjigama Lagrangea, Eulera i drugih velikana [16] (primjer s Timošenkom spomenut je u uvodu). Dotaknimo se načela koja se najčešće provjeravaju (ali i krše!).

6.1.1 Uvjeti ravnoteže

Ako opterećeno tijelo miruje, a prema rezultatima proračuna opterećenje i reakcije nisu u ravnoteži, proračun je sigurno pogrešan.

6.1.2 Zakon održanja energije

Energija se ne stvara niti može nestati – samo se transformira u drugi oblik. (Prema spoznajama suvremene fizike energija se može transformirati i u masu, ali to nije važno za naša razmatranja jer ne izlaze iz okvira Newtonove mehanike.) Iz toga načela slijedi da *perpetuum mobile* nije moguć. Ako nam neki „izumitelj” želi pokazati svoj najnoviji projekt takvoga stroja, mi ga nećemo ni pogledati. Time se izlažemo ogorčenoj kritici „izumitelja” koji će reći da su „... predstavnici službene znanosti arogantni, pa ne žele ni pogledati njegove genijalne nacрте, a kamoli provjeriti neoborive dokaze ili razgledati prototip koji će sigurno proraditi čim se uklone preostali sitni nedostaci.” Prema njima, „... tradicionalna je znanost konzervativna, a njezini se predstavnici boje novih ideja, jer bi mogli izgubiti svoje katedre i privilegirane pozicije u društvu... [17]”

Do sada nismo sreli takvoga „izumitelja”, ali povremeno otkrijemo da je u projektima, člancima i knjigama narušen zakon održanja energije. To se događa i u inženjerskim proračunima, naravno zbog grubih pogrešaka koje se načine bez namjere da se stvori savršeni stroj.

6.1.3 Minimum potencijalne energije

Ovo je načelo (zapravo teorem) ekvivalentno uvjetima ravnoteže i stabilnosti. Tijelo (preciznije: konzervativan mehanički sustav) u stabilnoj ravnoteži postiže minimum potencijalne energije, što znači da mora pružiti otpor pomacima. Drugim riječima, za deformiranje tijela iz ravnotežnoga položaja treba uložiti pozitivni rad. Ako rezultat proračuna nije u skladu s ovim načelom, proračun je pogrešan ili tijelo nije ni bilo u stabilnoj ravnoteži.

Iz toga načela slijede i posljedice koje također mogu poslužiti u mnogim provjerama: matrica krutosti modela tijela u stabilnoj ravnoteži mora biti pozitivno definitna, što znači da broj i raspored ležajeva moraju spriječiti slobodne pomake krutoga tijela. Iz toga odmah slijedi da sve svojstvene vrijednosti modela (kritične sile izvijanja ili periodi osciliranja) moraju biti pozitivne.

Bez dodatnih komentara nabrojimo još nekoliko načela koja se ne smiju prekršiti: pozitivnost mase, zakon održanja mase, poopćena ortogonalnost različitih oblika osciliranja, zakoni održanja količine gibanja i momenata količine gibanja.

6.2 Poznata rješenja jednostavnih problema

Realni se problem često može interpretirati kao modifikacija nekoga „školskog” primjera iz udžbenika ili prakse koji tada služi za procjenu rješenja toga problema.

Navedimo jednostavne primjere: homogeno stanje naprezanja ili deformacija, „kotlovska formula” za tanku cilindričnu ljusku pod djelovanjem konstantnoga pritiska iznutra (slično rješenje postoji i za sfernu ljusku),

rješenja za jednoliko opterećene pravokutne i kružne ploče s različitim rubnim uvjetima, oblik koncentracije naprezanja oko kružnoga otvora na jednoliko opterećenoj beskonačnoj stijeni, parazitni momenti na rubovima lju-saka, poznata analitička i numerička rješenja za visokostijene nosače, naborane konstrukcije, gljivaste stropove, kupole, hiperbolne paraboloidne i druge oblike s jednostavnim opterećenjima.

Inženjer obično vizualno zapamti takva rješenja (oblike dijagrama pomaka, unutrašnjih sila i slično), a u pojedinih jednostavnijim slučajevima i formule u zatvorenom obliku ili približne ekstremne vrijednosti numeričkoga rješenja.

6.3 Analogije

Već od daleke prošlosti graditelji su određivali optimalne oblike lukova, svodova, kupola i drugih tlačnih konstrukcija (uključujući već spomenute Gaudijeve paradoksalne konstrukcije) po analogiji s oblikom mreže vlačno opterećenih niti.

I danas se rješenje problema često nalazi (ili provjerava) prema analogiji s nekim drugim problemom koji je bolje istražen, ili se može jednostavnije riješiti, ili je s njim lakše eksperimentirati u laboratoriju, ili ga konstruktor bolje poznaje. Analogija može biti jaka (kada dva problema imaju zajednički matematički model – obično istu diferencijalnu jednadžbu) ili slaba (primjerice vizualni prikaz neke pojave, problema ili rješenja asocira na neku drugu pojavu, problem ili model).

6.3.1 Jaka analogija

Jaka se analogija upotrebljava u teorijskoj analizi konstrukcija i u pokusima. Nekoliko čestih primjera iz konstruktorske prakse i istraživanja jesu: analogija tlačne konstrukcije s vlačnom (pri nalaženju oblika), torzije u elastičnom području s deformacijom membrane, torzije u plastičnom području s hrpom pijeska ili krovnom plohom, graničnoga stanja ploče u plastičnom području s krovnom plohom, električnoga polja s poljem naprezanja i momentnoga dijagrama s progibnom linijom.

6.3.2 Slaba analogija

Slaba se analogija primjenjuje za jednostavne i brze provjere proračuna te ako jaka analogija ne postoji ili je teška za rješavanje. Neke od takvih analogija jesu: rešetkaste konstrukcije s punostijenom, trajektorija naprezanja sa strujnicama pri laminarnom tečenju, ploče u elastičnom području s roštiljem te cilindrične ljuske i naborane konstrukcije s gredom.

Primjer slabe analogije izvan graditeljstva: izum tipkovnice pisačega stroja inspiriran je analogijom s klavirskim tipkama [18].

6.4 Idealizacije

Idealizacija je pojednostavnjenje pri kojem se uzimaju u obzir samo ona svojstva modela za koja se (ovisno o problemu) pretpostavlja da su dominantna. Česti je primjer materijalna linearizacija kojom se pretpostavlja neograničena valjanost Hookeova zakona.

Ovako idealizirani model pregledniji je i dostupniji inženjerskoj prosudbi, ali i matematičkim formulacijama. U predračunalno je doba važna korist od toga pristupa bilo pojednostavnjenje i skraćenje proračuna, bez prevelikog utjecaja na točnost. Danas nije toliko važno trajanje proračuna koliko jasnoća interpretacije.

Nabrojimo još nekoliko idealizacija koje susrećemo u našim modelima: apsolutno kruto tijelo, geometrijska linearizacija, Winklerova podloga, Bernoulli–Navierova hipoteza za štapove, Kirchoffova hipoteza za ploče i membranska teorija ljusaka.

6.5 Aproksimacije

Aproksimacija je postupak kojim se izvorni model zamjenjuje približnom inačicom ponašanje koje je procijenjeno (više ili manje) „na sigurnu stranu”. Ponekad se, kod značajnih objekata, procjenjuje i pogreška zamjenskoga modela. (Spomenimo samo da i tvorba izvornoga modela znači aproksimaciju.) Približavanje se može primijeniti na model ili njegov dio, opterećenja, način proračuna i pojašnjenje rezultata. Spomenimo tri tipična postupka.

6.5.1 Interpolacija rješenja

Interpolacijom rješenja između dva idealizirana ekstrema često se može „omeđiti” rješenje nekoga problema ako pouzdano znamo da se ono nalazi među tim ekstremima. Takav je pristup osobito koristan kada ne raspoložemo pouzdanim podacima. Primjerice, rješenje elastično upete grede nalazi se između rješenja greda sa zglobnim i upetim rubnim uvjetima.

6.5.2 Kvizistatički proračun

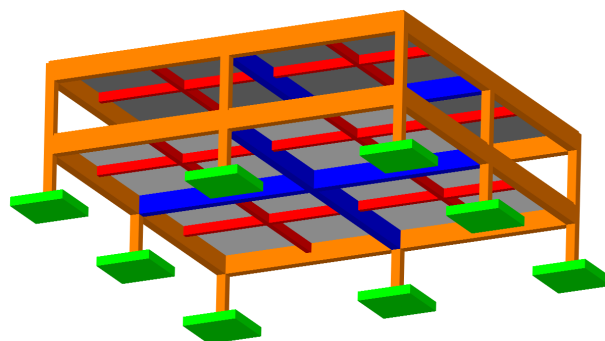
U mnogim se praktičkim primjerima dobivaju dovoljno dobri rezultati ako se dinamički proračun zamijeni mnogo jednostavnijim statičkim proračunom. Djelovanje vjetrova, potresa ili strojeva često se aproksimira statičkim rasporedom i iznosima sila uvećanima procijenjenim dinamičkim faktorom.

6.5.3 Hijerarhijski model konstrukcije

Hijerarhijski je model u predračunalno vrijeme bio gotovo jedini način proračuna složenih konstrukcija. Konstrukcija se rastavlja na niz hijerarhijski međusobno ovisnih elemenata, čime se zadatak raščlanjuje na nekoliko mnogo jednostavnijih koraka. Takvo je rastavljanje važno za inženjersku prosudbu jer je statički sustav mnogo lakše interpretirati, provesti kontrole, a često i rješavati bez po-

sebnih proračuna. To je moguće jer se model raščlanjuje na niz neovisnih cjelina s malim brojem nepoznanica.

Promotrimo poznati primjer – ručni hijerarhijski proračun zgrade na vertikalno opterećenje. Primarna je konstrukcija sastavljena od ploča na sekundarnim i glavnim gredama te okvira (ili zidova) s temeljima koji leže na tlu (slika 7.).



Slika 7. Bojama istaknuta hijerarhijska ovisnost među neovisnim elementima zgrade.

Faze proračuna jesu:

- 1. Proračun ploča (sivo).** Ploča leži na gredama i prečkama okvira koje se idealiziraju kao apsolutno krute i nepomične (nemaju ni pomake krutoga tijela) pa predstavljaju ležajevne ploče.
- 2. Proračun sekundarnih greda (crveno).** Pretpostavlja se da je ploča apsolutno gipka na savijanje te samo opterećuje sekundarne grede. Glavne grede i prečke okvira i dalje smatramo apsolutno krutima pa predstavljaju oslonce sekundarnih greda.
- 3. Proračun glavnih greda (plavo).** Ploča i sekundarne grede sada su apsolutno gipke, a prečke ostaju apsolutno krute i nepomične pa predstavljaju ležajevne glavnih greda.
- 4. Proračun okvira (narančasto).** Ploče, sekundarne i glavne grede apsolutno su gipke i djeluju u razini prečaka kao opterećenje okvira. Temelji su apsolutno kruti i nepomični, što znači da pretpostavljamo i apsolutno kruto temeljno tlo.
Membranska krutost ploče pridonosi krutosti svih greda i prečaka okvira. To se uzima u obzir „sudjelujućom širinom” ploče koja se uključuje u presjek grede. Tako dobivamo T – presjek. Međudjelovanje ploče i grede ne utječe na opisani hijerarhijski slijed.
- 5. Proračun temelja (zeleno).** Stupovi okvira prenose teret na temelje, a oni na tlo. Stupovi (zapravo okviri, sve grede i ploče) sada su apsolutno gipki, a samo tlo ostaje apsolutno kruto.

6. Proračun temeljnoga tla (nije prikazano). Temeljni prenose opterećenje na tlo. Pogađamo, oni su sada apsolutno gipki.

Uočavamo da se ponavljaju iste pretpostavke. U fazi proračuna unutrašnjih sila promatranoga elementa krutost se hijerarhijski nižih elemenata zanemaruje, a hijerarhijski viši elementi apsolutno su kruti i nepomični. Posljedica toga je da promatrani element uvijek nasljeđuje opterećenje od hijerarhijski nižeg, a rubne uvjete (ležajeve) dobiva od višeg elementa. Time je određen (lako rješiv!) zadatak za taj element.

Ovaj je pristup približan jer u stvarnosti ne postoji samo „jednosmjerni“ utjecaj hijerarhijski nižega elementa (opterećenjem) na viši, nego i obrnuto. Deformacije nekog elementa uzrokuju pomake i deformacije u svim elementima, što uzrokuje promjenu unutrašnjih sila u cijeloj konstrukciji. Zbog toga je točnije (premda ne uvijek) analizirati konstrukciju kao cjelinu, što se svodi na rješavanje većih sustava jednadžbi.

U današnje doba hijerarhijski nas proračun najviše zanima kao aproksimacija u ranoj fazi projektiranja, koji zbog svoje jednostavnosti omogućuje brzi izbor početnih dimenzija elemenata i jednostavno približno razjašnjenje ponašanja konstrukcije. Uglavnom smatramo da je kod statičkih sustava s jasnom hijerarhijom opisani pristup na strani sigurnosti.

I u složenijim se konstrukcijama procjenjuje put prijenosa sila, iako hijerarhijske ovisnosti među nosivim elementima nisu tako jasne. Primjerice, u nepravilnim plošnim nosačima pokušavaju se naći „skrivena grede“ ili „skriveni lukovi“ – područja koja se ponašaju kao hijerarhijski viša (kruća – prenose dominantni dio opterećenja). Takav je model još manje točan od modela zgrade, ali je prije pojave računala bio i jedini mogući način proračuna „nečistih“ statičkih sustava koji se nisu mogli analitički riješiti (poput konstrukcija Nervija, Torroje, Finsterwaldera i Freyssineta [19]). Ovaj je pristup i danas koristan, jer potiče na inženjersko rasuđivanje i olakšava analizu rezultata, premda u slučaju složenih prostornih konstrukcija može biti vrlo težak. Pri raščlanjivanju takvih statičkih sustava treba biti oprezan s uvođenjem hijerarhijskih pretpostavki. Pogreške mogu biti pogubne!

6.6 Iskustvena pravila

Graditelji su oduvijek nastojali prenositi iskustvo na mlađe pa su podatke bilježili u obliku niza pravila koja su se prenosila generacijama. Iz Rimskoga je Carstva poznata Vitruvijeva knjiga [20] kojom su se služili graditelji još dugo poslije propasti carstva. U njoj se nalazi velik broj iskustvenih pravila (engl. *rules of thumb*) koja su, izdržavši stoljeća provjere, jamčila starim majstorima sigurnost njihovih građevina. Tako je primjerice preporučeni omjer visine i debljine stupa od 9,5 ili

međusobnih razmaka i debljine stupova od 2,25 ulijevao graditeljima povjerenje u pouzdanost od rušenja.

Pravila se nisu uvijek mogla slijediti u potpunosti, ali su odstupanja obično bila mala. Najbolji i najhrabriji graditelji ponekad su se usudili znatno odstupiti od uzanca i dati novo rješenje. Ako je taj iskorak bio uspješan, nastalo je novo pravilo. Graditeljstvo je na taj način napredovalo, ali vrlo sporo. Neuspjesi su bili vrlo česti, a rušenja s tragičnim posljedicama bilo je neusporedivo više nego danas.

I u suvremenoj praksi postoje slično motivirana pravila koja se kod uobičajenih konstrukcija uvijek slijede: preporučljive dimenzije ravninskih i plošnih nosača u odnosu na raspon i opterećenje, spljoštenost luka, svoda ili kupole, prosječna težina konstrukcije ili utrošak čelika po kvadratnome ili kubnom metru, osnovna frekvencija i oblik osciliranja tipičnih konstrukcija zgrada te mnoga druga. I ta su pravila nastala modifikacijom starih preporuka zbog pojave novih materijala, konstrukcija, tehnologija izvedbe, namjena objekta, načina spajanja, ali i „mode“.

Iskusan će inženjer opaziti odstupanja od uobičajenih vrijednosti, što će ga potaknuti na provjeru.

Profesor Werner bi često u šali govorio da „svaka greška nastaje zbog kontrole“. Svi znamo da naknadnim provjerama često pronađemo nedostatke u vlastitome statičkom proračunu.

Iskustvena se pravila mijenjaju i nadopunjuju i danas, a Vitruvijeva je ideja aktualna još više u različitim oblicima *tipizacije* detalja i čitavih konstrukcija, uključujući i postupke njihove izvedbe.

6.7 Propisi

Današnja pravila nisu samo iskustvena, nego sadrže i stroge, teorijski i pokusima utemeljene formule. Štoviše, neka su pravila obvezatna, a to su norme i propisi. Naravno, takvi podaci postoje u priručnicima, ali korisno je vrijednosti koje se često primjenjuju znati napamet. (Njih se i nauči nakon više primjena.) Evo nekoliko primjera: mehanički podaci o materijalu (čvrstoća, modul elastičnosti, Poissonov koeficijent i granica popuštanja), faktori sigurnosti, dopušteni progibi, omjer debljine i promjera cijevi potreban za štapni pristup, formule za dimenzioniranje i slično.

Postoji analogija s učenjem stranoga jezika. Što više riječi i gramatičkih pravila nekoga jezika znamo napamet i njima se služimo bez svjesnoga razmišljanja, to bolje znamo taj jezik.

Zaključimo: svaki inženjer konstruktor posjeduje vlastiti skup podataka prikupljen kroz godine projektiranja. Obično govorimo o iskustvu. Ono je važan oslonac pri izboru i analizi konstruktivnoga rješenja.

7 Računalo i inženjerska prosudba

Unatoč snažnomu razvoju računala i programske podrške, rezultati istraživanja u području prosudbe vrlo su skromni. Pokušava se doduše s metodama „umjetne inteligencije” koje daju zanimljive rezultate, ali daleko od onih kojima bi računalo zamijenilo inženjera. Postoje relativno uspješni „ekspertni sustavi” i neuralne mreže temeljene na skupu pravila ili „učenu” iz prethodnih primjera kojima se mogu riješiti neki tipizirani inženjerski problemi. Međutim, to je samo rutinski pristup koji upotrebljava brzinu računala za analizu velikoga broja inačica kojima se dolazi do optimalnih (teško je reći izvornih!) rješenja iz zadanoga podskupa.

Ključno je pitanje: „Hoće li računalo moći inženjerski prosuđivati?”

O tome se danas vode burne rasprave, često s prizvukom filozofskih nadmetanja [21–23]. Mi ne znamo odgovor i ne usuđujemo se ništa predviđati. Poučeni primjerima iz prošlosti, možemo reći da je proricanje budućnosti u području razvoja računala i podrške vrlo nezahvalno. U vrlo kratkom vremenu ostvarilo se mnogo toga što se smatralo nemogućim, ali se istodobno nije ispunio veliki broj očekivanja (što ne znači da su neostvariva). Navest ćemo nekoliko ishitrenih prognoza.

Računala i šah. Kada su se pojavili prvi programi za igranje šaha, stručnjaci za računala i šahisti tvrdili su da računalo (s odgovarajućim programom) nikada neće pobijediti svjetskoga prvaka. To se ipak dogodilo 1997., a glavni uzrok poraza suvremenici su tražili u podcjenjivanju računala.

Zaista, tadašnji svjetski prvak Gari Kasparov pogriješio je u otvaranju i izgubio protiv IBM-ova računala *Deep Blue*. Tvrdi se da bi takvu pogrešku teško napravio u važnome meču protiv velemajestora. Argumenata za takvo razmišljanje ima i danas. Svjetski prvak Vladimir Kramnik nedavno je izgubio od (opet IBM-ova) računala *Deep Fritz* previdjevši mat u potezu. S druge strane, računalo protiv svih igra jednakom snagom. Ono „ne zna” podcijeniti protivnika!

S poboljšanjem računala i algoritama velemajestori su počeli sve češće gubiti, tako da pobjeda nad svjetskim prvakom više nije tako neobična. Suprotno predviđanjima, čini se da u bliskoj budućnosti čovjek neće moći pobijediti računalo. Ipak, računalo ne rasuđuje poput čovjeka. Ono nadoknađuje nedostatak intuicije golemom brzinom kojom analizira velik broj mogućnosti i odabire potez koji ocijeni najboljim.

Računala i egzaktna matematika. Mnogi su stručnjaci tvrdili da će računalo uvijek računati samo numerički i da neće moći teorijski rješavati matematičke probleme ili provoditi stroge dokaze. Ta su predviđanja također bila pogrešna. Danas postoje programi koji mogu analitički i simbolički derivirati, integrirati, rješavati nelinearne diferencijalne jednadžbe, dokazivati teoreme i još mnogo toga [24].

Računala i inteligencija. Evo i suprotnoga primjera kada se očekivanja nisu ostvarila. Osamdesetih godina dvadesetoga stoljeća japanski su stručnjaci najavili proizvodnju revolucionarnih računala „pete generacije” [25] koja su trebala biti inteligentna, temeljena na programskome jeziku *Prolog*. Te su najave izazvale paniku među proizvođačima računala, posebno u SAD-u. Nekoliko tvrtki, koje zbog međusobne konkurencije nikada nisu surađivale, udružilo se u stožer na čelu kojega je bio umirovljeni američki general?! Na njihovu sreću, ništa se revolucionarno nije dogodilo do danas.

8 Problem „kombinatoričke eksplozije”

Pitanje je mogu li se metode pretraživanja kakve se primjerice rabe u računalnome igranju šaha primijeniti u inženjerskim zadaćama? Teorijski gledano vjerojatno mogu, ali trajanje pretraživanja postaje ograničavajući faktor. Šah je određen sa 64 polja, 32 figure i razmjerno malim skupom pravila. Unatoč tome, broj mogućnosti u središnjici partije tako je velik da ih nije moguće pretražiti u razumnome vremenu. Zbog toga se za ograničavanje opsega pretraživanja upotrebljavaju različite heurističke metode. Skup pozicija na ploči koje treba provjeriti i dalje ostaje velik, ali se svladava „metodom grube sile” (engl. *brutal force method*), odnosno pretraživanjem svih pozicija, što s porastom brzine računala postaje sve manji problem.

Za razliku od šaha, inženjerski zadaci imaju mnogo redova veličine veći, ali i nepoznati broj mogućnosti, mnogo više složenijih i nejasno određenih pravila, a time i neusporedivo više određenih i slabo određenih inačica za pretraživanje. Razlog je tome nepredvidiv broj faktora koji mogu utjecati na projektiranje i izvođenje građevine. Naši problemi nisu zatvoreni sustavi temeljeni na jasno određenim pravilima koja određuju njihovo ponašanje.

Prema tome, pretraživanje svih rješenja ne može se prepuštiti računalu jer je broj mogućnosti golem. Obično se govori o „kombinatoričkoj eksploziji” koja se ne bi mogla svladati ni mnogostruko (recimo 10^6 i više) bržim računalima. Zbog toga je nužno ograničiti analize na mali broj smislenih inačica koje opet na temelju prosudbe mora odabrati konstruktor. Inače se praktični problemi ne bi ni mogli riješiti. Vrijeme će pokazati hoće li tako i ostati.

9 Zaključak

Nismo do sada imali prilike vidjeti neko izvorno umjetničko djelo (sliku, kip, operu ili fugu) koje bi svojim, neosporno velikim, mogućnostima kreiralo računalo. Slična se tvrdnja može izreći i za područje znanosti, pa tako i za graditeljstvo. Čini se ipak da u doglednoj budućnosti sposobnosti poput kreativnosti, prosudbe ili intuicije, toliko svojstvene konstruktoru računalo, neće moći oponašati ili nadmašiti.

LITERATURA

- [1] Sydney, J. Harris quotes, http://thinkexist.com/quotes/sydney-j._harris/
- [2] Timoshenko, S.: *Theory of plates and shells*, McGraw-Hill, New York, 1940.
- [3] Timoshenko, S.; Woinowsky-Krieger, S: *Theory of plates and shells*, McGraw-Hill, New York, 1959.
- [4] Werner, O.: Nešto o konzolama, *Građevinar* **51** (1999) 1, 13–29.
- [5] Dvornik, J.; Lazarević, D.: Manjkavosti proračunskih modela inženjerskih konstrukcija, *Građevinar* **57** (2005) 4, 227–236.
- [6] A Will Durant Glossary of Philosophical and Foreign Words, <http://www.willdurant.com/glossary.htm>
- [7] Split-Brains: Interhemispheric Exchange in Creativity, <http://www.its.caltech.edu/~jbogen/text/creat6.htm>
- [8] *Bobile*™, Hog Wild, LLC, Portland, 2003.
- [9] Timoshenko, S. P.: *History of strength of materials*, McGraw-Hill, New York, 1953.
- [10] Salvadori, M.: *Why Buildings Stand Up*, W. W. Norton & Company, New York, 2002.
- [11] Steen, L. A.: *Twenty Questions about Mathematical Reasoning*, St. Olaf College, <http://www.stolaf.edu/people/steen/Papers/reason.html>
- [12] Frances, R.; Shaw, G.: *Music Training Causes Long-Term Enhancement of Preschool Children's Spatial-Temporal Reasoning*, *Neurological Research* **19** (1997) 2–8.
- [13] Dvornik, J.; Lazarević, D.: *Prednapregnute gipke konstrukcije od užadi i tkanine*, *Građevinar* **47** (1995) 4, 185–199.
- [14] Dvornik, J.; Lazarević, D.: *Viseće konstrukcije od platna i užadi*, Građevni godišnjak '97, Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, Zagreb, 1997.
- [15] Jeffrey, R.: *Subjective Probability. The Real Thing*, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- [16] Panovko, Y. G.; Gubanova, I. I.: *Ustojčivost' i kolebaniya uprugikh sistem, Sovremennye kontseptsii, paradoksy i oshibki*, Nauka, Moskva, 1987.
- [17] Dudley, U.: *Mathematical Cranks*, The Mathematical Association of America, Washington, 1992.
- [18] Madhukar Shukla: *The Creative Muse: Stories of Creativity & Innovation*, http://www.geocities.com/madhukar_shukla/crebook/21.html
- [19] Mainstone, R. J.: *Developments in Structural Form*, Allen Lane/Penguin Books, Middlesex, 1983.
- [20] Marcus Vitruvius Pollio: *The ten books on architecture*, Dover Publications, New York, 1960.
- [21] von Neumann, J.: *The Computer and the Brain*, Yale University Press, New Haven, 2000.
- [22] Hofstadter, D. R.: *Goedel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid*, Basic Books, New York, 1999.
- [23] Penrose, R.: *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*, Oxford University Press, New York, 2002.
- [24] Wolfram, S.: *A New Kind of Science*, Wolfram Media, Champaign, 2002.
- [25] Feigenbaum, E. A., McCorduck, P.: *The Fifth Generation: Artificial Intelligence and Japan's Computer Challenge to the World*, Addison-Wesley, Boston, 1983.