

Zvonimir Žagar¹, Goran Janjuš²

Nove mogućnosti projektiranja i ispitivanja drvenih konstrukcija?

New possibilities in structural design and testing of wooden structures?

Pregledni rad • Review paper

Prispjelo - received: 07. 01. 2003. • Prihvaćeno - accepted: 21. 04. 2004.

*UDK 630*832.286; 630*833*

SAŽETAK • *Do sada je postojao standardizirani način projektiranja drvenih konstrukcija. Obuhvaćao je statički proračun, eventualno dinamički proračun, provjeru naprezanja i provjeru stabilnosti, te provjeru detalja u skladu s važećim propisima. Proračuni su se provodili na različite i ustaljene, često manualne načine, a u posljednje vrijeme i primjenom proračuna modela konačnih elemenata ili primjenama zatvorenih programskih računalnih rješenja. U radu se iznose nove mogućnosti dizajna GLULAM (lijepljenih lameliranih drvenih) krovnih konstrukcija primjenom na primjerima treniranih neuronskih mreža. Mreže se treniraju ili ekspertnim domenski orijentiranim i na pravilima zasnovanim ekspertnim sustavima ili/i primjerima izvedenih objekata.*

Ključne riječi: *drvene konstrukcije, GLULAM, neuronske mreže (ANN), neuronske ljuske, ekspertni sustavi, parametarski FE modeli, FE analize, EC propisi, run-time ANN moduli.*

ABSTRACT • *Until recently there was a standard way of designing structures. The accepted way involved a standard calculation and static analysis, seldom a dynamic one, the calculation of stability and the application of accepted standards: the proofs of safety and serviceability of the whole and all parts and details, according to materials applied in the structure. The calculations and analysis were carried out in different ways, frequently manually and lately using FE modelling and analysis. The calculations of safety, stability and serviceability have lately been mostly performed by use of various closed programs and mighty FE based and material based computer codes. In this paper new possibilities are shown in designing GLULAM timber roof structures based on the use of artificial neural networks trained on samples. The networks are trained on samples generated by rule based expert systems and/or historical design samples (from engineering practice).*

Key words: *timber structures, GLULAM, artificial neural networks (ANN), neural shells, expert systems, parametric FE models, FE analysis, Eurocodes (EC), run-time ANN module.*

¹Autor je redovni profesor u mirovini Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. ²Autor je dipl.ing., HIMK, Zagreb.

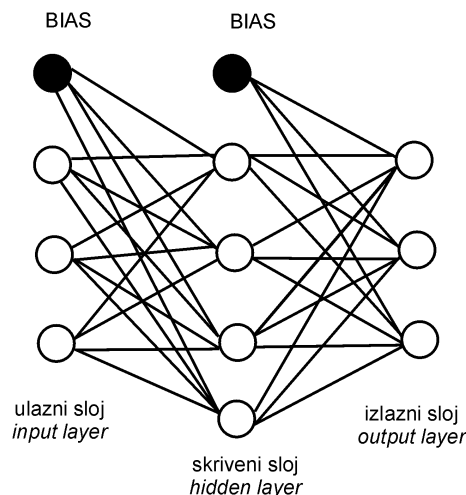
¹The author is retired professor at the Faculty of Civil Engineering of the Zagreb University. ²The author is BSc, HIMK, Zagreb.

1 UVOD
1 INTRODUCTION

Do sada je postojao standardizirani način projektiranja konstrukcija koji je obuhvaćao statički proračun, eventualno dinamički proračun, provjeru napreznja i provjeru stabilnosti u skladu s važećim propisima (provjeru nosivosti, stabilnosti i upotrebljivosti) te provjeru detalja. Većinom su se provjeravali ravninski elementi, ili su se pak 3D elementi preformulirali u ravninske i onda su proračunavani.

Proračuni su se provodili na razne i ustaljene, često manualne načine, a u posljednje vrijeme to se čini i primjenom proračuna modela od konačnih elemenata ili primjenama zatvorenih programskih računalnih rješenja. Provjere nosivosti i upotrebljivosti rađene su manualno ili raznim prikladnim programima, a katkad i primjenama kompleksnih programa za dizajn određenih konstrukcija. S obzirom na složenost provjera prema novim EC5 (Eurocode5) standardima, ustanovljeno je

Slika 1.
Shematski prikaz neuronske mreže
Figure 1
Schematic presentation of a neural network with three layers: input, hidden and output layers



da bi bilo prikladno EC5 standarde prikazati u obliku ekspertnih, na pravilima zasnovanih sustava (RBES - rule based expert systems), čime bi se umnogome pomoglo inženjskoj struci.

U ovom se radu govori o nekim sada već provjerenim mogućnostima primjena na primjerima naučenih neuronskih (živčanih) mreža (NN - neural networks ili ANN - artificial neural networks) u projektiranju drvenih GLULAM (lijepljeno lamelirano drvo) nosača. Pri tome se primjenjuju 3D prostorni modeli konstrukcija. Postignuti rezultati pokazuju da je to mogući način "instantnog" projektiranja drvenih lameliranih nosača.

1.1 Neuronske (živčane) mreže
1.1 Neural networks

Neuronske (živčane) mreže (NN, ANN) danas su sasvim uobičajeni alat u primjeni analiza i prognoza baziranih na prošlim stvarnim i simuliranim događajima. Ma kako to nevjerojatno zvučalo, primjenjuju se u gotovo svim djelatnostima znanosti i prakse kao pomoć pri raznim analizama, prognozama i upravljanjem procesima. Otkrivene su još 1943. godine (McCulloch i Pitts, 1943), no sve do razvoja računala nisu se mogle primjenjivati u praksi. Neuronske mreže danas služe za prognoziranje poslovanja, raspoznavanje i prepoznavanje, u bankarstvu, u strojevima za prepoznavanje postupaka, robotici, pa i u konvencionalnim FE (Finite Element) programima za nelinearne analize konstrukcija.

Definicija i opis neuronske mreže izvanredno je dan u Leksikonu građevinarstva (2002): "To je struktura koja omogućuje paralelno procesiranje informacija, a sastoji se od elemenata (neurona) i njihovih međusobnih veza (kanala). Elementi su razvrstani u slojeve (slabs) i svaka neuronska mreža ima bar dva sloja (ploče): ulazni (input) i izlazni (output), a može imati i tzv. skrivene (hidden)-unutrašnje slojeve." Na slici 1 dan je shematski prikaz neuronske mreže. Prikazana je mreža s tri sloja: ulaznim, skrivenim i izlaznim. Vide se i tzv. bias čvorovi, kojima je uvijek stimulans neka određena vrijednost.

Raspored i način povezivanja slojeva kanalima (vezama) zove se arhitektura neuronske mreže. Svaki element ima svoju "prijenosnu funkciju" (transfer funkciju) i lokalnu memoriju.

U raspoloživoj ljusci, moguć je odabir ovih prijenosnih funkcija: linearne, sigmoidne, tanh (tangens hiperbolne), tanh15, Gaussove, komplementarno Gaussove, simetrično sigmoidne i sinusne. U svim je primjerima korištena sigmoidna prijenosna funkcija.

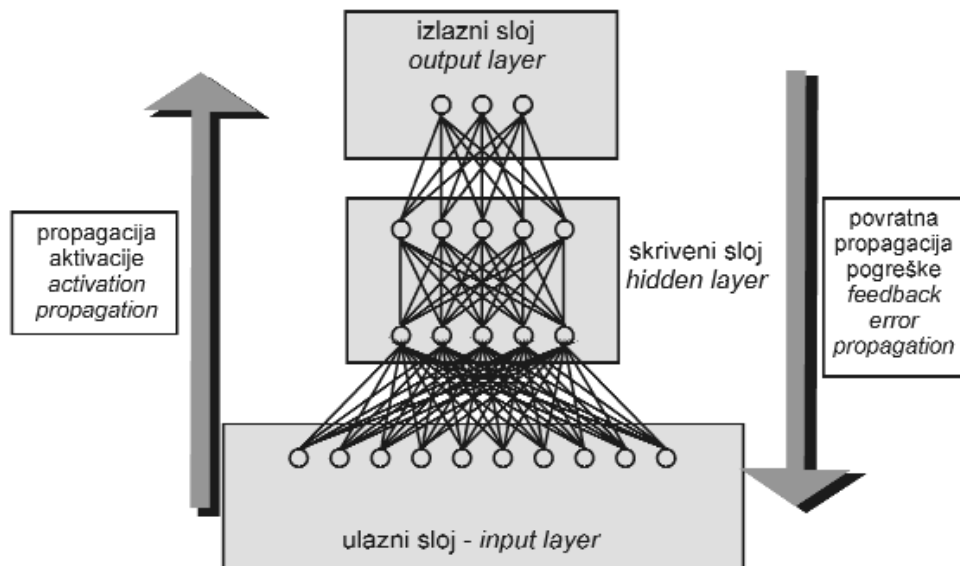
Uz svaki kanal (vezu) koji povezuje dva neurona vezana je odgovarajuća težina (weight), ponder, realni broj. Te se težine tijekom procesa učenja (learning) mijenjaju u skladu s određenim pravilima učenja da bi se neuronsku mrežu naučilo rješavati određene vrste problema (prognoziranje, klasificiranje, prepoznavanje i sl.). Za praktične primjene neuronske se mreže simuliraju na računalima. Neuronske se mreže uče na primjerima (learning examples) tako da

se primjeri upisuju pojedinačno ili unose putem datoteka (npr. EXCEL) odnosno predočivanjem vizualnih podataka i slika ili skupljanjem informacija (npr. različitim senzovima), što se zove treniranje ili učenje neuronske mreže. Najpoznatije su arhitekture BNN (Backpropagation Neural Network), PNN (Probabilistic Neural Networks) i druge. U korištenim neuronskim ljuskama (Ward NeuroShell2) tipovi mreže odabiru se iz izbornika, a onda se može odabrati i arhitektura mreže i svojstva samih neurona u pojedinim slojevima.

Nakon što se na neki određeni način neuronskoj mreži (ljusci) određene odabrane arhitekture predoči skup za učenje (treniranje), neuronskoj se mreži prepušta učenje na predočenim primjerima koje se sastoji od prilagođivanja veza (težina) među neuronima.

Nakon što je neuronska mreža "nauči-

ljuska GURU) i neuronskih mreža (NeuroShell2) kreirana za prikaz Eurokoda5 (EC5) europskih propisa za dizajn, proračun i kontrolu dizajna drvenih lameliranih konstrukcija (Bjelanović, 2001). Prethodno je i Delić (1990) pokazao da se cijeli EC propisi o projektiranju i proračunu spregnutih armiranobetonskih stupova s krutom i vitkom armaturom mogu dizajnirati i ispitati na nosivost prema EC i raznim drugim još važećim standardima. U toj je kompleksnoj mreži korištena objektno orijentirana ekspertna ljuska KAPA i dvije neuronske mreže trenirane s Wardovom ljuskom NeuroShell2. Također je poznato da su Žagar i Delić (1993a, 1993b, 1993c, 1994a, 1994b) uspjeli trenirati neuralnu ljusku na primjerima motrenja ljudskog ponašanja operatera te su pokazali da se mogu ostvariti tzv. žive (*smart*) konstrukcije mostova i drugih građevnih struktura



Slika 2.
Proces "učenja"
(prikazana je ANN
shema s dva skrivena
sloja neurona)
Figure 2.
Learning process -
network architecture
with two hidden layers

la" gradivo, može se kreirati tzv. *run-time* opcija u nekom odabranom računalnom jeziku (C++, BASIC, FORTRAN i sl.) te tako generirana run-time verzija rabiti izvan okruženja stroja na kojemu je neuronska ljuska instalirana i neuronska mreža kreirana, kao samostojeći program koji "instantno" daje odgovore na određena pitanje iz područja za koje je neuronska mreža napravljena. U složenim situacijama može se paralelno koristiti više mreža koje međusobno komuniciraju, a te se mreže također mogu "uklopiti" u druge programe kao potprogrami (*subroutines*).

Često se neuronske mreže kombiniraju s ekspertnim sustavima kreiranim na bazi pravila (RBES), pa se dobivaju složeni ekspertni sustavi različitih namjena. Takva je mreža složena od pravila (korištena je

koje su do tada smatrane samo neživom materijom. Općenito, to je vrlo slično upravljanju "pametnim" bespilotnim letjelicama ili "pametnim" automobilima bez vozača (npr. ALLVIN). No to je kao pokušaj prvi put primijenjeno na modele građevnih konstrukcija. Niz "malih" neuronskih mreža danas se rabi u svakodnevnim poslovima, a većina korisnika nekih uređaja i programa i ne sluti da se koristi ugrađenim (u čipovima) neuronskim mrežama.

Neuronske se mreže danas rabe u programima za prepoznavanje pisma i govora, prevođenje jezika, simulaciju ponašanja (ljudi i drugih živih bića), upravljanje vozilima, procesima i raznim drugim domenama (npr. upravljanje sustavima), u medicini za dijagnostiku (npr. za rano otkrivanje raka i

sl.). Koriste se i u igračkama (npr. pas AIBO), robotici i drugim djelatnostima.

Da bi se ubrzao proces "učenja" primjenjuju se razni hardverski dodaci, npr. neuroploče (*neural slabs*) - procesori koji običan PC "pretvaraju" u stroj s paralelnim procesiranjem.

O neuralnim mrežama postoji opsežna i dostupna literatura, a najbolje informacije o njima nalaze se na stranicama Interneta.

Navodimo neke takve web stranice:

<http://www.emsl.pnl.gov:2080/proj/neuron/neural/neural.homepage.html> - službena stranica projekata neuronskih mreža (NN)

<http://iinwww.ira.uka.de/bibliography/Neural/index.html> - s bibliografijama i indeksima NN

<http://www.phys.uni.torun.pl/neural/neural.html> - jedna stranica poljske i međunarodne udruge za neuronske mreže s mnogim linkovima

<http://www.hav.com/> - s demoverzijama i aplikacijama

<http://dsii.dsi.unifi.it/neural/> - talijanska istraživačka grupa za neuronske mreže s mnogim linkovima

<http://cns-web.bu.edu/inns/nn.html> - službena stranica međunarodne udruge (Neural Network Society) i časopisa za NN, te europske i japanske udruge za NN, kojoj je home-page na adresi: <http://cns-web.bu.edu/inns/> i adresi europske udruge: <http://www.ida.his.se/ida/enns/>

<http://www.soc.staffs.ac.uk/research/groups/ai/> - stranica istraživanja umjetne inteligencije (AI) i kognitivnih znanosti Sveučilišta Staffordschire (Stafford, UK)

<http://www.cs.stir.ac.uk/~lss/NNIntro/InvSlides.html> - posebice važna stranica za informacije o NN, s objašnjenjima, primjerima i demoprimjerima Centra za kognitivnu znanost i matematiku Odjela za matematiku i računalstvo Sveučilišta Stirling.

Nezaobilazna je stranica www.KurzwailAI.net te razne druge web stranice dostupne putem web pretraživača (npr. Copernic i sl.).

U našim je istraživanjima korištena neuronska ljuska NeuroShell1 i NeuroShell2 Ward System Co., čije su mogućnosti i nova unapređenja detaljno opisani na stranici

<http://www.wardsystems.com/products.asp?p=neuroshell2>

Također nam je bila dostupna i ljuska Brainmaker <http://www.calsci.com/> (stranica California Scientific software, s iscrpnim opisima primjena ANN). Nažalost, imali smo samo Brainmaker neuroljusku u DOS verziji, jer nije bilo sredstava za nabavu suvremene WIN verzije s MXX akceleratorom. Wardove NeuroShell ljuske koje su nam bile dostupne s obzirom na naše financijske mogućnosti za sada sasvim udovoljavaju našim potrebama.

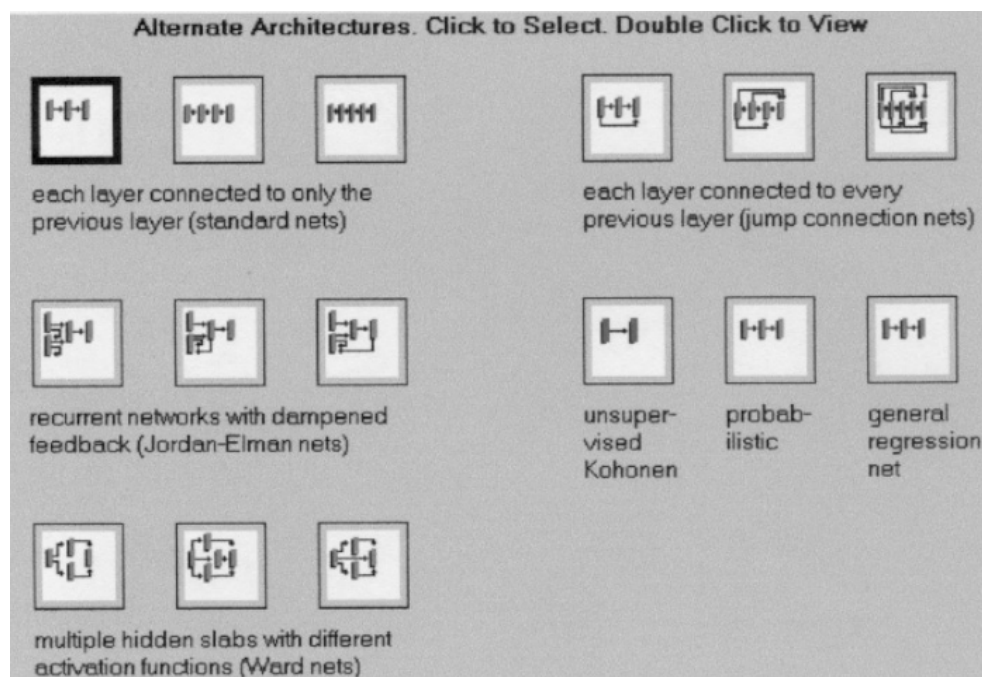
Na slici 3 prikazane su moguće arhitekture ANN-a iz izbornika Wardove NeuroShell 2 ljuske. Prikazane su ove arhitekture: svaki je sloj spojen s prethodnim i sljedećim slojem (*standard nets*), svaki je sloj spojen s prethodnim (*jump connection nets*), rekurentna mreža (*Jordan-Elman nets*), mreža s više skrivenih slojeva (*Ward nets*), nenadzirana, probabilistička i regresijska mreža.

Slika 3.

Moguće arhitekture ANN-a iz izbornika Wardove NeuroShell2 ljuske

Figure 3

Various architectures in the Ward NeuroShell2 pull down menu



2 DOSADAŠNJA ISKUSTVA 2 PAST EXPERIENCES

S navedenom neuronskom ljuskom (NeuroShell2 za Windowse) izrađene su operabilne neuronske mreže, u daljnjem tekstu ANN, za provjere i dizajn raznih pojavnosti, kao i za projektiranje cjelina i detalja konstrukcija. Tako je još prije više od deset godina načinjen ANN za upravljanje deformacijama mostova na osnovi njezina treniranja na manualnom reagiranju operatera (Delić, 1990). To je bila i osnova nove generacije "inteligentnih" konstrukcija u kojima je ANN sastavni dio konstrukcija. Prvi je put i ANN primijenjen kao modul za dizajn drvenih podrožnica u ekspertnom sustavu zasnovanome na pravilima (korištenjem GURU ljuske) za dizajn 3D hala od lameliranih (GLULAM) trozglobnih okvira, podrožnica i X-vezova (Delić, 1990). Također je u sklopu dvaju diplomskih radova (Denić, 1996; Tkalčević, 1997) načinjen ANN za projektiranje 3D lučnih drvenih lijepljenih lameliranih konstrukcija koje se sastoje od trozglobnih lukova, drvenih ili lameliranih podrožnica, čeličnih X-spregova, čeličnih zglobova i betonskih temelja. Delić (1997) je pak pokazao da je moguće neuronsku mrežu naučiti provjeravati vrlo složene odnose spregnutih betonskih stupova, čeličnih profila i meke armature opterećene zadanim (generiranim) uzdužnim silama i momentima.

Džajić (1999) pokazao je da se neuronska mreža može primjenjivati i u projektiranju cestovnih tipskih mostova tipa Viadukt. Ta je mreža trenirana na bogatim arhivskim podacima projekata poduzeća Viadukt. Saler je pokazala da se perkusijska analiza kakvoće drvene građe može provoditi pomoću ANN-a koji je treniran na prirodnim i umjetno generiranim primjerima uzoraka drvene građe, testiranim u laboratoriju. Ima mnogo sličnih radova objavljenih u bogatoj stručnoj i znanstvenoj literaturi u svijetu, a ti se postupci sve više koriste u industriji, u projektiranju i praktičnim primjenama, pa i u sportu. Naša su iskustva i dostignuća u smislu generiranja i primjene ANN-a sasvim skromna, ali ipak zanimljiva za širi krug građevnih i drvnotehnoloških inženjera.

Na slici 4 dan je dijagram tijeka postupka generiranja neuronske mreže za dizajn određenih, u konkretnom slučaju drvenih 3D konstrukcija od lameliranog drva. Nezavisni život ANN-a omogućen je kreiranjem „run-time“ verzije ANN-a.

U radu se opisuje postupak generiranja jednog ANN-a za "instantno" projektiranje uobičajenih GLULAM (drvenih lijepljenih lameliranih) nosača, djelomično je prikazan model generiranja ANN-a za projektiranje 3D sustava krovnih trapeznih GLULAM nosača, s pripadnim podrožnicama i vezovima. Valja napomenuti da ovdje opisani ANN sadržava cjelokupno danas dostupno znanje statike, teorije provjere nosivosti i stabilnosti, znanje modeliranja 3D konstrukcija od konačnih elemenata, kompleksno znanje o GLULAM drvenim konstrukcijama, spregovima, opterećenjima, detaljima i EC5 provjerama nosivosti i upotrebljivosti, dakle sve ono što čini kompleksno znanje inženjera projektanta takvih konstrukcijskih entiteta. Prikazani model kreiranja ANN-a za projektiranje konstrukcija razvila je Bjelanović (2001) tijekom izrade doktorske disertacije. Ovdje se samo prikazuje jedan opći postupak koji smo primijenili, ali se on, naravno, može primijeniti i na projektiranje svih ostalih inženjerskih konstrukcija i strukturalnih entiteta. Naime, u projektnim organizacijama postoji bogata arhiva koja se (potencijalno) može iskoristiti za buduća projektiranja strukturalnih entiteta.

3 MODEL UČENJA ANN-a 3 ANN TRAINING MODEL

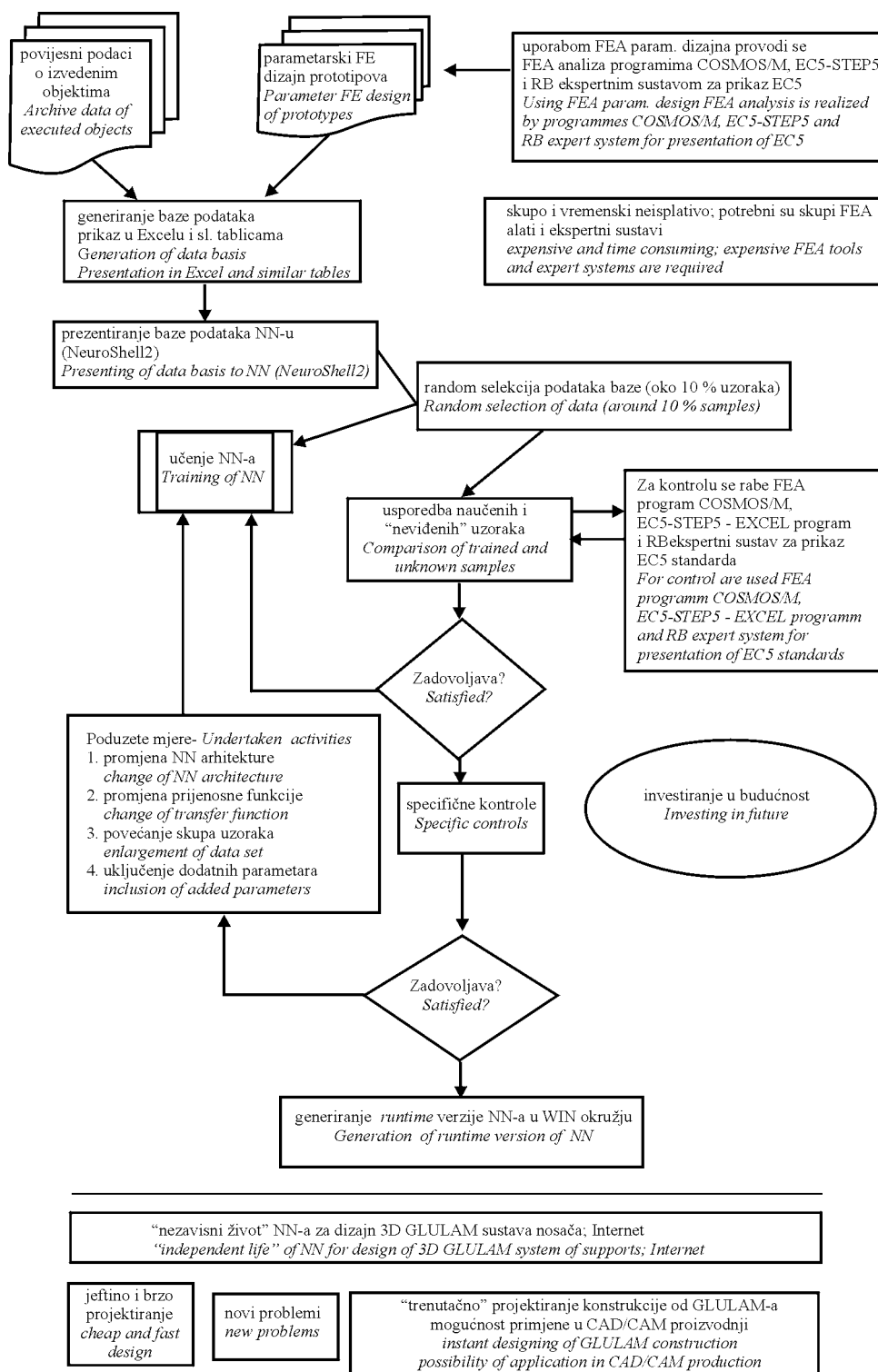
Da bi se ANN mogao koristiti u nekoj domeni, mora se učiti na primjerima. Ti primjeri mogu biti arhivski podaci, opažanje, reakcije organizama, inženjersko iskustvo i generirani primjeri. Poznati se podaci neuronskoj ljusci mogu prikazati u obliku tabličnih podataka, za što je pogodan Excel i slični programi. Ti se podaci grupiraju u dvije kategorije: ulazni i izlazni. Ulazni se podaci prikazuju u ulaznom sloju (input slab) a izlazni u izlaznom sloju (output slab). Broj neurona ulaznog sloja ovisi o broju ulaznih parametara, kao što i broj izlaznih neurona u izlaznom sloju ovisi o broju izlaznih parametara.

Na dijagramu toka generiranja ANN-a (sl. 4) za rješavanje problema iz inženjerskih analiza pokazuje se mogućnost iskoristenja generiranih i arhivskih podataka. Neuroni slojeva ljuske spojeni su vezama s ispočetka nepoznatim težinama (ponderima, weights). Između ulaznoga i izlaznog sloja obično se umeće jedan ili više skrivenih slojeva (*hidden slabs*), što omogućuje ljusci veću fleksibilnost učenja. Arhitektura neuronske ljuske može se odabrati iz ponuđenih menija dizajna ljuske.

Slika 4.

Dijagram tijeka postupka generiranja ANN-a za dizajn drvenih lameliranih 3D konstrukcija

Figure 4
Flow diagram of the ANN generation for the design of specific 3D GLULAM structures



Sam procesorski element - neuron (živčana stanica), može biti podvrgnut raznim procesorskim funkcijama, koje se također mogu odabrati iz ponuđenih programskih menija. Mi smo se uvijek koristili relativno jedno-stavnom arhitekturom s jednim skrivenim slojem (ulazni-skriveni-izlazni) i jednostavnom procesorskom sigmoidnom funkcijom. U nekim problemima kao što je

analiza ponašanja betonskih podova na standardizirane udare, primjenjena je i složenija arhitektura, s povratnom vezom ulaznih informacija ulaznoj ploči. Gabussi i Garrett Jr. (1990, 1995) pri treniranju ANN-a za imitiranje dinamičkoga linearnog i nelinearnog ponašanja materijala koristili su se višeslojnim ljuskama.

Njihova je ljuska trenirana na laboratorijskoj dinamičkoj kidalici uzoraka, a potom je kao modul uklopljena u FE program za analize nelinearnih ponašanja konstrukcija.

Kakva će se arhitektura ANN-a odabrati ovisi o iskustvu i drugim "ezoteričnim" uvjetima. Obvezno je imati velik broj uzoraka kako bi mreža dobila dojam o problemu koji se razmatra. Od predloženog skupa podataka izdvaja se jedan dio (obično 10 % uzoraka) kako bi se odabrao tzv. lju-sci neviđen uzorak. Taj će se uzorak primjenjivati za kontrolu učenja ljuske, te će ljuska prekinuti učenje u času najboljeg približavanja rezultata predloženom skupu učenja i odabranom isključenom skupu uzoraka. Naime, pokazalo se da se ANN može "preučiti", te onda nema dovoljno fleksibilnosti u odabiru rješenja. Stoga se u sve moderne ljuske ugrađuju mehanizmi sprječavanja tog fenomena (*overlearning*).

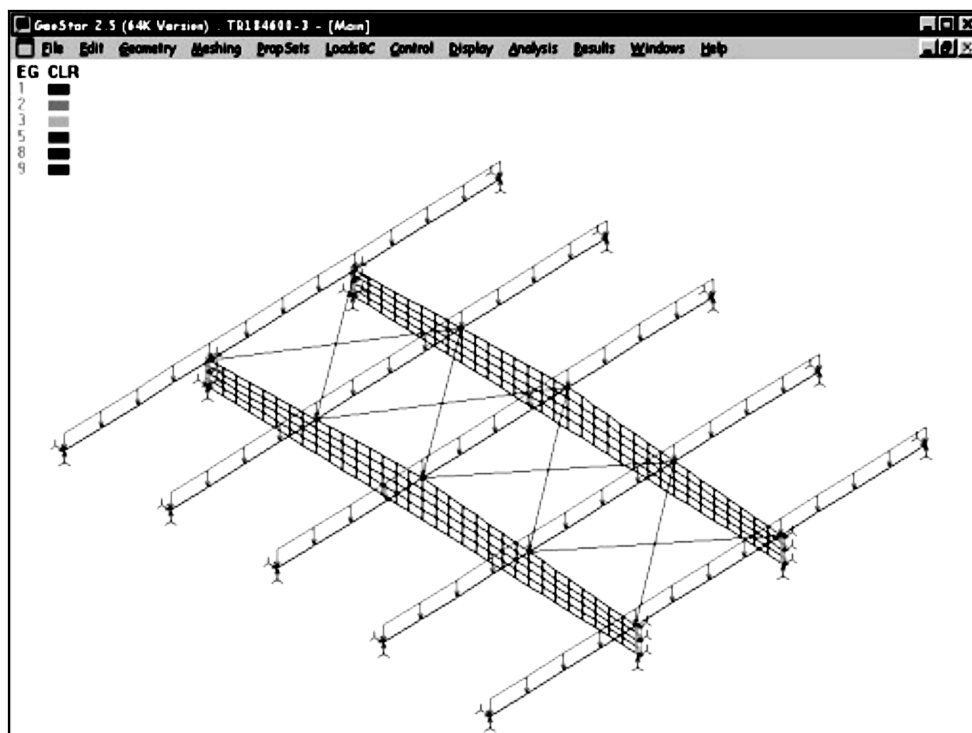
Nakon što se preostali skup podataka nakon izdvajanja kontrolnog skupa podataka za učenje predoči ANN-u počinje učenje mreže. Pri tome se može odabrati predočivanje uzoraka putem redoslijeda slučajnih brojeva ili lančanim redoslijedom.

Nakon prekida učenja (prema postavljenim kriterijima kontrole putem izdvojenoga kontrolnog skupa) mreža je sposobna donositi zaključke. Pregledom rezultata može se razmotriti važnost doprinosa pojedinih parametara te, eventualno, neke od tih (recimo, nevažnih) parametara isključiti, pa ponovno ljusku trenirati.

U primjenjenom modelu učenja ANN-a razmotren je sustav (modul) dvaju paralelnih trapeznih GLULAM nosača, dakle triju polja s podrožnicama od lameliranog drva s pripadnim čeličnim X-vezom od čeličnih šipki određenog promjera, što je u skladu s uobičajenim projektiranjem takvih entiteta. U drvenim konstrukcijama na najviše pet polja dolazi jedan stabilizacijsko-vjetrovni vez. Opterećenje je, u skladu s EC propisima, priloženo izravno na podrožnice, na kojima i djeluje.

Da bi se generirala serija nosača, načinjeni su 3D parametarski modeli konačnih elemenata (FEM), koji su razmatrani uz pomoć FEA programa COSMOS/M. U FE modelu primjenjuju se grupe elemenata SHELL4L (za GLULAM), BEAM3D (za podrožnice), TRUSS3D (za dijagonale vezova od čelika), SHELL4 (za eventualna ojačanja greda uz ležaj). Razmatrane su FEA statičke analize (STATIC) i analize gubitka stabilnosti (BUCKLING).

Da bi se odabrale "realne" dimenzije, primjenjene su tablice tvrtke HOJA koja ima donekle sređene podatke o već izvedenim objektima. Također se u većini primjera koristio već operabilni savjetodavni ekspertni sustav (uz GURU ljusku) za prikaz EC5 standarda za dizajn drvenih konstrukcija (Bjelanović, 1996). Varirani su elementi raspona, dimenzije podrožnica, razmaci vezača, broj polja rešetkastog veza, dimenzije GLULAM nosača (visina na ležaju, visina u sredini - apeksu, širina presjeka nosača). Ulaznim parametrima obu-



Slika 5.
FE model jedne parametarski određene generirane 3D strukture za generiranje ulaznih skupova podataka za učenje ANN-a

Figure 5
FE model of a particular parametrically generated 3D structure for the generation of the ANN training sets

hvaćene su četiri ulazne odrednice: raspon (LL), razmak vezača (EE), broj spregova (M) i širina nosača (B). Ti su se elementi ulaza pokazali važnima (sl. 7). Ostali su parametri tretirani kao izlazni: širina podrožnice (BP), visina podrožnice (HP), visina nosača na ležaju (HA), visina nosača u apeksu (HAPEX), promjer šipki sprega (DIA), nadvišenje nosača (U), faktor izbočenja (Buckling), izbor najveće reakcije nosača (RRJA), najveće naprezanje (SIGMAX) paralelno s vlakancima drva, najveće naprezanje (SIGMAY) okomito na vlakanca drva, najveće posmično naprezanje (TAUXY), debljina eventualnoga potrebnog postranog ojačanja (T) nosača pri ležaju ako TAU naprezanja prelaze određenu granicu te duljina i debljina čelične ležajne ploče. Mogle su se pridodati i druge informacije, ali su navedene dovoljne za projektiranje takvih sustava.

Na slici 5 prikazan je FE model 3D strukture s ispisom grupa elemenata. GAP elementi korišteni su za isključenje tlačnih elemenata dijagonala - šipki vjetrovno-stabilizacijskih vezova. Na slici 6 prikazani su rezultati proračuna uzdužnih naprezanja SIGMAX za određeni sustav i skup opterećenja prema EC propisima, kao i dijagram varijacija tih naprezanja po gornjem rubu nosača od ležaja do sredine nosača. Također je na slici 7 prikazan jedan od modela modova gubitka stabilnosti nosača s ispisanom vrijednosti koeficijenta sigurnosti na gubitak stabilnosti.

Mora se napomenuti da su podaci dobiveni analizom FEA programom COSMOS/M vrlo opsežni, te je rezultate trebalo filtrirati i reducirati samo na nužnu mjeru.

Pri učenju ANN-a koristila se napredna verzija NeuroShell2 ljuske (sl. 8).

Na slici 9 prikazan je dio ulaznih podataka prvotno generiranih ekspertnim sustavom za EC5, te potom provjerenim EC5 STEP 5 EXCEL sustavom, a na kraju FEA COSMOS/M sustavom za sva djelovanja predviđena Eurocodom (EC).

Ukupno je generirano provjerenih 45 primjera.

Prva četiri stupca (LL - raspon, EE - razmak, M - broj polja vjetrovno-stabilizacijskog veza, B-širina nosača) elementi su ulazne ploče. Ostala su polja slijedni rezultati geometrije i konvencionalnih proračuna te provjera primjenom MKE, RB ekspertnog sustava za EC5 standarde, EXCEL EC5 STEP 5 programa i arhivskih podataka izvedenih objekata (tablice slovenske tvrtke HOJA) i čine elementi izlazne ploče ljuske.

Na slici 10 dan je prikaz grafa doprinosa ulaznih parametara nakon učenja mreže.

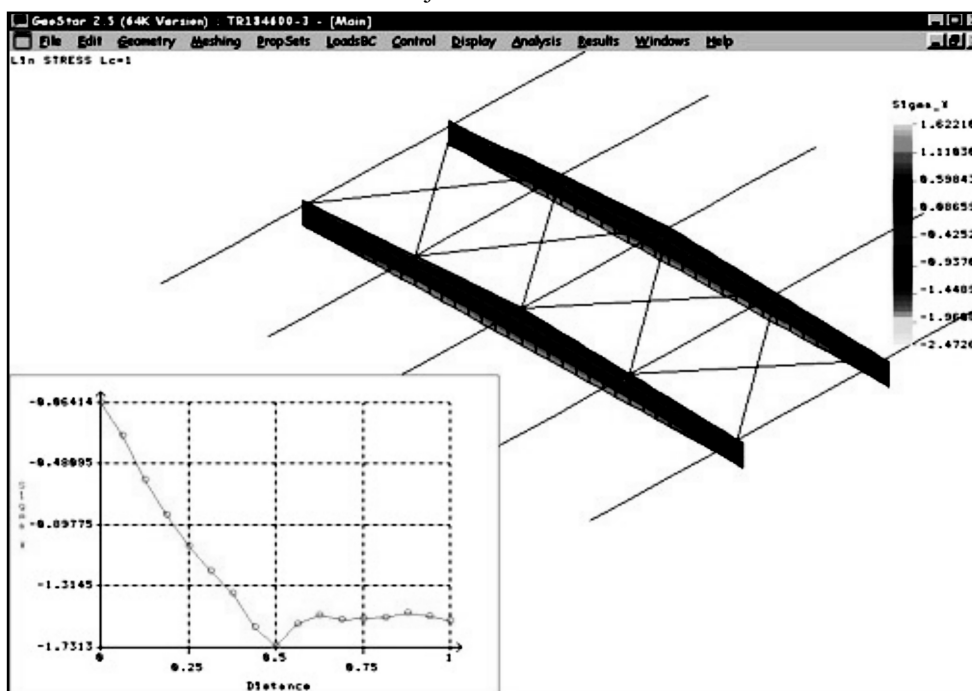
4 REZULTATI I PRIMJENE 4 RESULTS AND APPLICATIONS

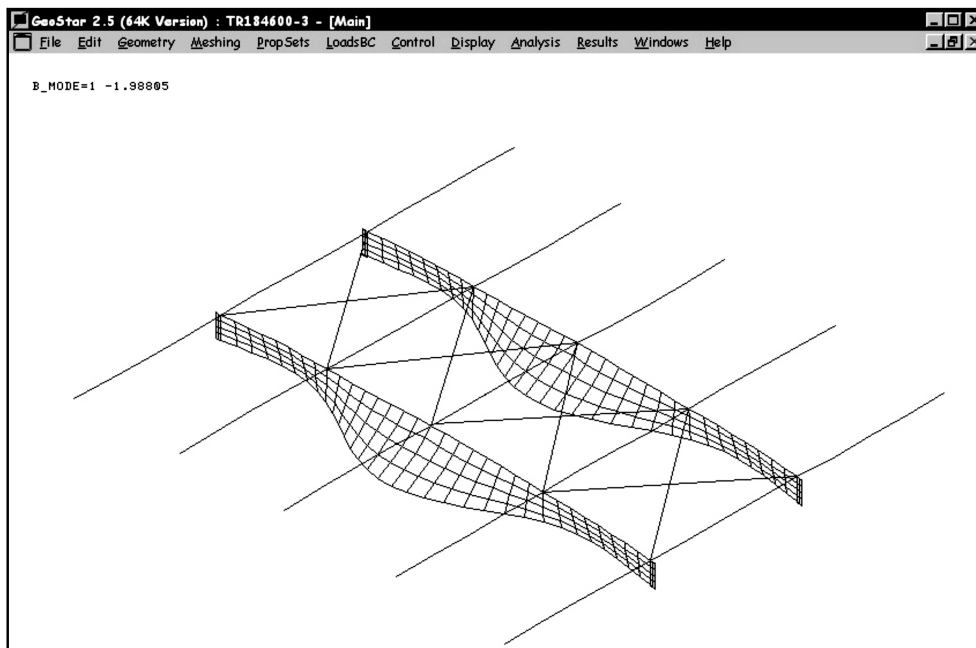
Nakon odabira jednostavne troslojne arhitekture mreže (direktno vezani ulazni, skriveni i izlazni sloj) i odabira sigmoidne transferne funkcije započelo je učenje mreže. Na priloženim dijagramima prikazan je samo dio izvornih i usporednih rezultata učenja NN-a.

Provjera rezultata učenja pokazuje dobra slaganja između stvarnog skupa (*actual set*) i predviđanja s pomoću modela mreže (*network set*) za sve elemente.

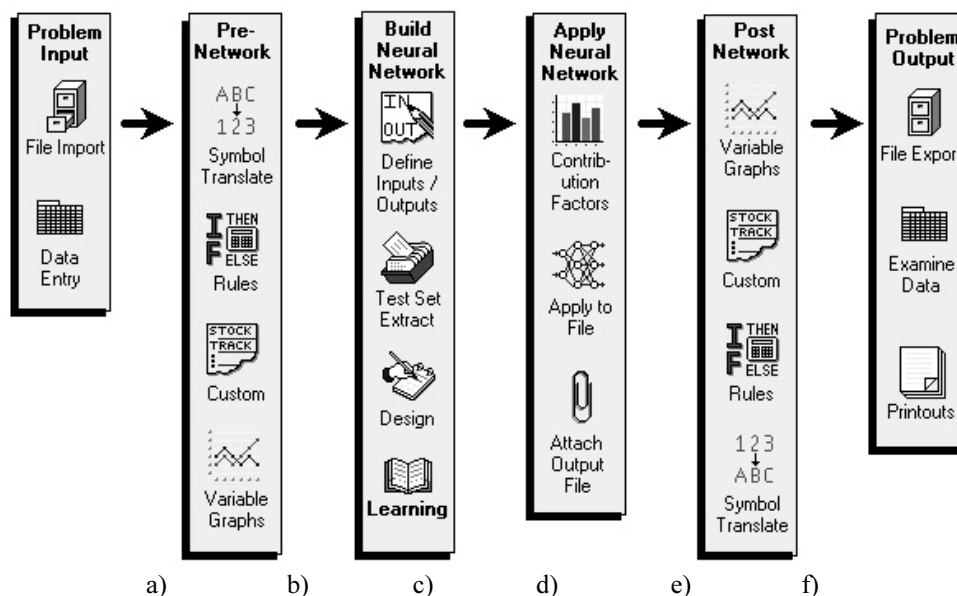
Slika 6.
Grafički prikaz rezultata FE analize naprezanja (SIGMAX) paralelno s vlakancima drva i dijagram varijacija tih naprezanja po gornjem rubu nosača

Figure 6
Presentation of the FE analysis (stresses SIGMAX) parallel to the timber grains and the variation of the stresses at the upper side of the GLULAM structure





Slika 7.
Prikaz analize stabilnosti za jedan primjer geometrije i za određeno opterećenje
Figure 7
Results of stability FE analysis for a particular loading case and for a particular structure configuration



Slika 8.
Preslik izbornika NeuroShell2 neuronske ljuske s generatorom "runtime" opcija
Figure 8
A screen shot of the WARD NeuroShell2 with options for the beginners and advanced options and for generating the "runtime" option

a) **Ulazne opcije** (import datoteka, upis podataka u EXCEL tablice), b) **pretprocesiranje** (translacija simbola iz alfanumerike u binarne vrijednosti, upis pravila, grafički prikazi ulaznih rezultata), c) **građenje neuronske mreže** (definiranje ulaza i izlaza, izdvajanje podataka, odabir arhitekture neuronske mreže, učenje), d) **primjena "trenirane" neuronske mreže** (čimbenici doprinosa, primjena "treniranog" ANN-a na novim primjerima, izbor načina priključivanja postojećih datoteka i treniranih datoteka), e) **naknadno procesiranje** (razne opcije grafičkih prikaza, primjena pravila, prijevod simbola iz binarnih u alfanumeričke podatke), f) **izlazni rezultati** (export datoteka, tablični pregled podataka, ispisi).

Bjelanović (2001) provodi provjeru na novim primjerima (dopuna tablice, aplikacija na datoteku, tablični ispis u Excelu te daljnje provjere konvencionalnim postupcima, primjenom EXCEL EC5 STEP5 programa i parametarskog FE modela s FEA programom COSMOS/M i provjerama putem RB ekspertnog sustava za EC5) kojima potvrđuje vjerodostojnost dobivenih rezultata. Te naknadne provjere elemenata sustava dobivenog trenutačnim ("instantnim") projektiranjem uz pomoć

neuronske mreže samo su nužne provjere sustava, no kasnije se u praksi, naravno, više ne provode. Iako generiranje i upisivanje datoteka iziskuje dosta vremena, konačni rezultat opravdava cijeli postupak jer je dizajn putem naučenog ANN-a jednostavan, ultrabrz (praktično trenutačan) i nadasve jeftin. Generirani run-time ANN nije više vlasništvo Wardove kompanije i kupca ljuske, već se može slobodno primjenjivati u skladu s tržišnim zakonima.

Slika 9.

Prikaz dijela upisne datoteke

Figure 9

Part of the generated data input set

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	LL	M	EE	B	BJP	HJP	HJA	HJAP	DJD	RRJVJD	SNAPJD	SNX
2	1500.00	4.00	500.00	18.00	14.00	30.00	57.00	96.00	1.60	108.20	17.68	
3	1500.00	4.00	500.00	16.00	14.00	30.00	63.00	102.00	1.60	108.30	17.67	
4	1500.00	4.00	500.00	14.00	14.00	30.00	72.00	111.00	1.60	108.80	17.24	
5	1500.00	4.00	400.00	18.00	14.00	24.00	51.00	90.00	1.60	86.10	16.17	
6	1500.00	4.00	400.00	16.00	14.00	24.00	54.00	93.00	1.60	85.90	16.91	
7	1500.00	4.00	400.00	14.00	14.00	24.00	60.00	99.00	1.60	86.10	17.06	
8	1800.00	4.00	600.00	20.00	16.00	36.00	72.00	120.00	1.60	157.30	17.76	
9	1800.00	4.00	600.00	18.00	16.00	36.00	81.00	129.00	1.60	157.90	17.23	
10	1800.00	4.00	600.00	16.00	16.00	36.00	90.00	138.00	1.60	158.10	17.11	
11	1800.00	4.00	500.00	20.00	16.00	30.00	63.00	111.00	1.60	130.20	17.23	
12	1800.00	4.00	500.00	18.00	16.00	30.00	69.00	117.00	1.60	130.40	17.24	
13	1800.00	4.00	500.00	16.00	16.00	30.00	75.00	123.00	1.60	130.40	17.55	
14	1800.00	4.00	400.00	20.00	16.00	24.00	54.00	102.00	1.60	103.10	16.34	
15	1800.00	4.00	400.00	18.00	16.00	24.00	60.00	108.00	1.60	103.60	16.22	
16	1800.00	4.00	400.00	16.00	16.00	24.00	63.00	111.00	1.60	103.10	17.05	
17	1800.00	6.00	400.00	14.00	14.00	22.00	69.00	117.00	1.60	102.60	17.36	

5 POSLJEDICE I BUDUĆNOST ANN-a

5 CONSEQUENCES AND ANN FUTURE PROSPECTS

U radu je pokazano da se ANN može sigurno koristiti u projektiranju određenih struktura. Činjenica da se mi bavimo drvenim konstrukcijama upućuje nas na primjenu u drvenim konstrukcijama. No ništa ne stoji na putu projektiranju i drugih konstrukcija i struktura. To se pokazalo i na primjeru generiranja ANN-a za projektiranje montažnih mostova (Džajić, 1999). Jenkins (1995) slično je pokazao na primjeru projektiranja čeličnih višeetažnih okvira, kao i projektiranju stanova (Baletić, 1995).

Primjer koji je ovdje pokazan i detaljno razrađen predočuje postupak kojim se mogu projektirati i provjeravati druge konstrukcije i strukture od drugih materijala. Naravno, mogu se generirati razni prostorni okviri, složenice, ploče, grede, temelji i tuneli, provjeravati kakvoća raznih proizvoda, pa i provjeravati i dizajnirati složeni prostorni strukturalni sustavi.

Treba napomenuti da je na primjerima prikazanog ANN-a uključeno cjelokupno

inženjersko znanje potrebno za projektiranje opisanih konstrukcija. To nam se može činiti pretjeranim, ali je zaista tako. Postupno će takvi sustavi, kao i RB ekspertni sustavi, "istisnuti" konstruktore iz njihove dosad neosporavane domene rutinskih poslova projektiranja konstrukcija.

Međutim, gledajući naličje tog postupka, dolazimo do zaključka da postignuto nije uopće različito od mnoštva tablica i grafikona kojima su se konstruktori odvajkada koristili.

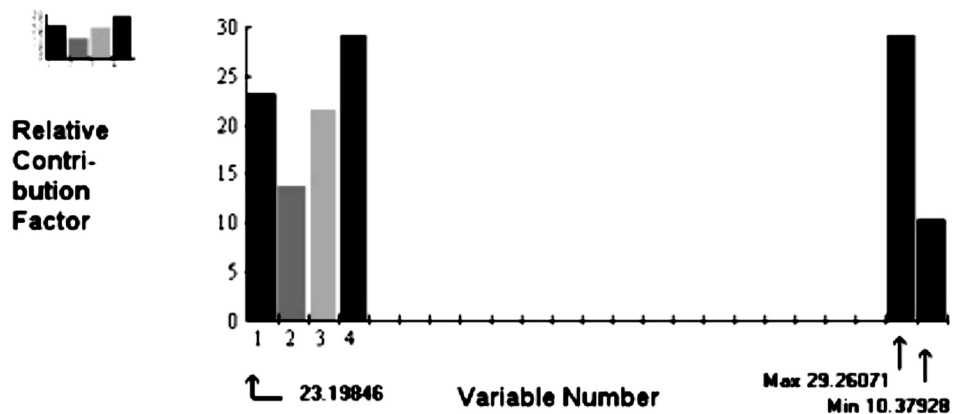
Generirani *run-time* ANN-ovi nisu ništa drugo doli vrsta višedimenzionalnih "inteligentnih" tablica, a hoće li se one nalaziti kao CD-ovi ili diskete u regalu biblioteke, instalirane na računalu ili na mreži (webu), ugrađene u neke buduće čipove, pitanje je navike te ekonomskih i tehnoloških mogućnosti, ali i tradicija struke, kao i lomova s edukacijskom tradicijom diseminacije znanja. Instalirane na webu, *run-time* ANN verzije za primjenu na raznim područjima ljudskog znanja i djelovanja razdijeljena su inteligencija i znanje i time se bitno razlikuju od konvencionalnih programa, knjiga i tablica.

Slika 10.

Prikaz grafa doprinosa ulaznih parametara nakon učenja mreže

Figure 10

Presentation of the contribution of various input parameters after the ANN training



6 JOŠ NEKE PRIMJENE ANN-a 6 SOME OTHER APPLICATIONS OF ANN

Kad je riječ o uporabi ANN-a u drvarstvu, na primjerima trenirani ANN moguće je primijeniti za klasifikaciju drvene građe ili kao dijela sustava za strojnu klasifikaciju drva (Saler) te za bezrazorno određivanje mehaničkih karakteristika drva (Rajčić, 1996; Rajčić, 1997). Također je moguća njegova primjena za kontrolu kvalitete proizvoda drvarske struke, te svuda gdje je moguća perkusija spojeva ili dijelova proizvoda, na određenim mjestima s određenim odazivom, a potom testiranoga na primjerima razaranja uzoraka u laboratoriju.

Taj sustav perkusije, zasniva se na istom načelu na kojemu se zasniva i medicinska perkusija (na primjer prsnoga koša i trbuha). Liječnik na osnovi iskustva zaključuje o stanju tih organa. Naime, svaki određeni udarac rezultira određenim zvučnim odgovorom, koji se procjenjuje iskustveno ili tumačenjem digitaliziranog odziva. Udarac kojim pobuđujemo predmet može biti izveden batom ili/i ultrazvučnom pobudom, a motrenje se obavlja osciloskopom s digitalnim analizatorom, ali i iskustveno (čekičanjem).

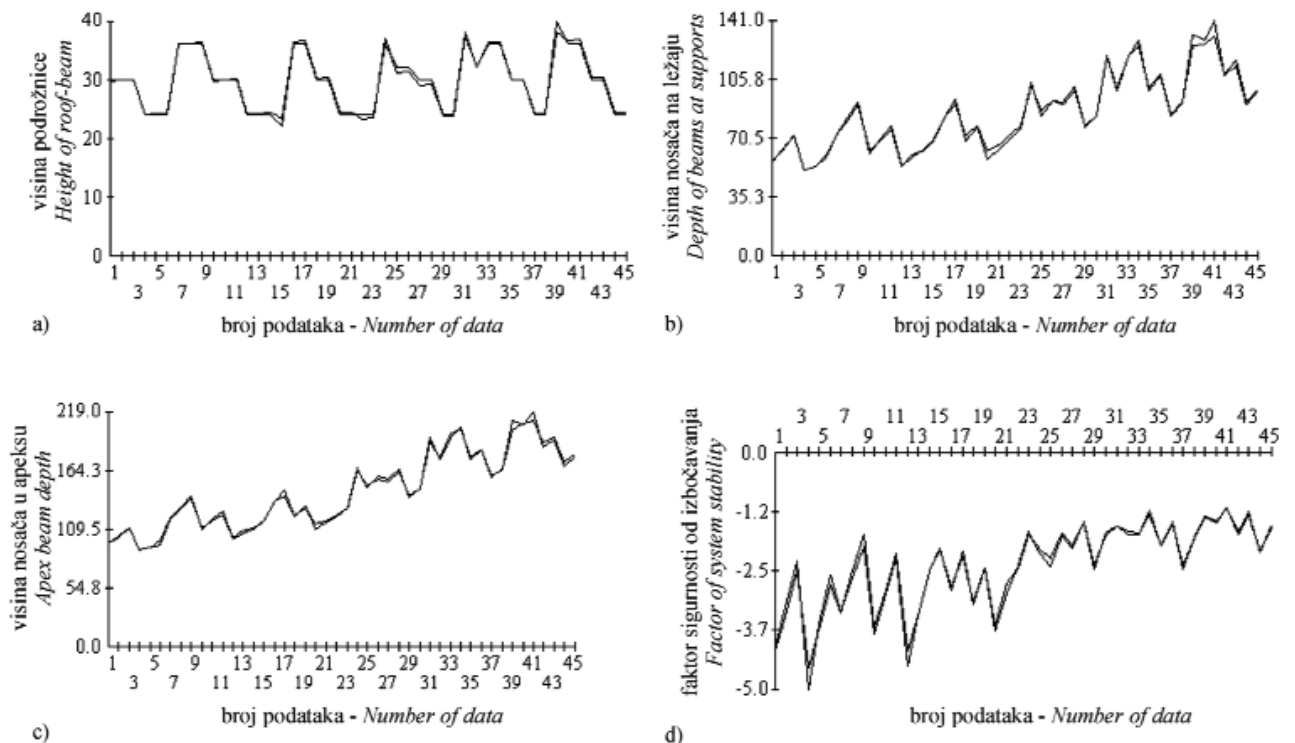
Stvaranjem odgovarajućih ANN-ova skupa laboratorijska ispitivanja (ili nesigurne subjektivne procjene) mogu se zamijeniti brzim, pouzdanim i relativno jeftinim nerazarajućim postupcima, koji se mogu primijeniti na svim proizvodima. Na taj se

način mogu kontrolirati i razne ploče (izrađene na bazi drva i drugog materijala) pomoću ultrazvuka ili sličnim akustičnim načinima (npr. u graditeljstvu već postoje uređaji na osnovi treniranih ANN-ova za kontrolu kvalitete žbuke na fasadama i kvalitete slojeva betonskih podova, te za brzo otkrivanje pukotina i grešaka u materijalu).

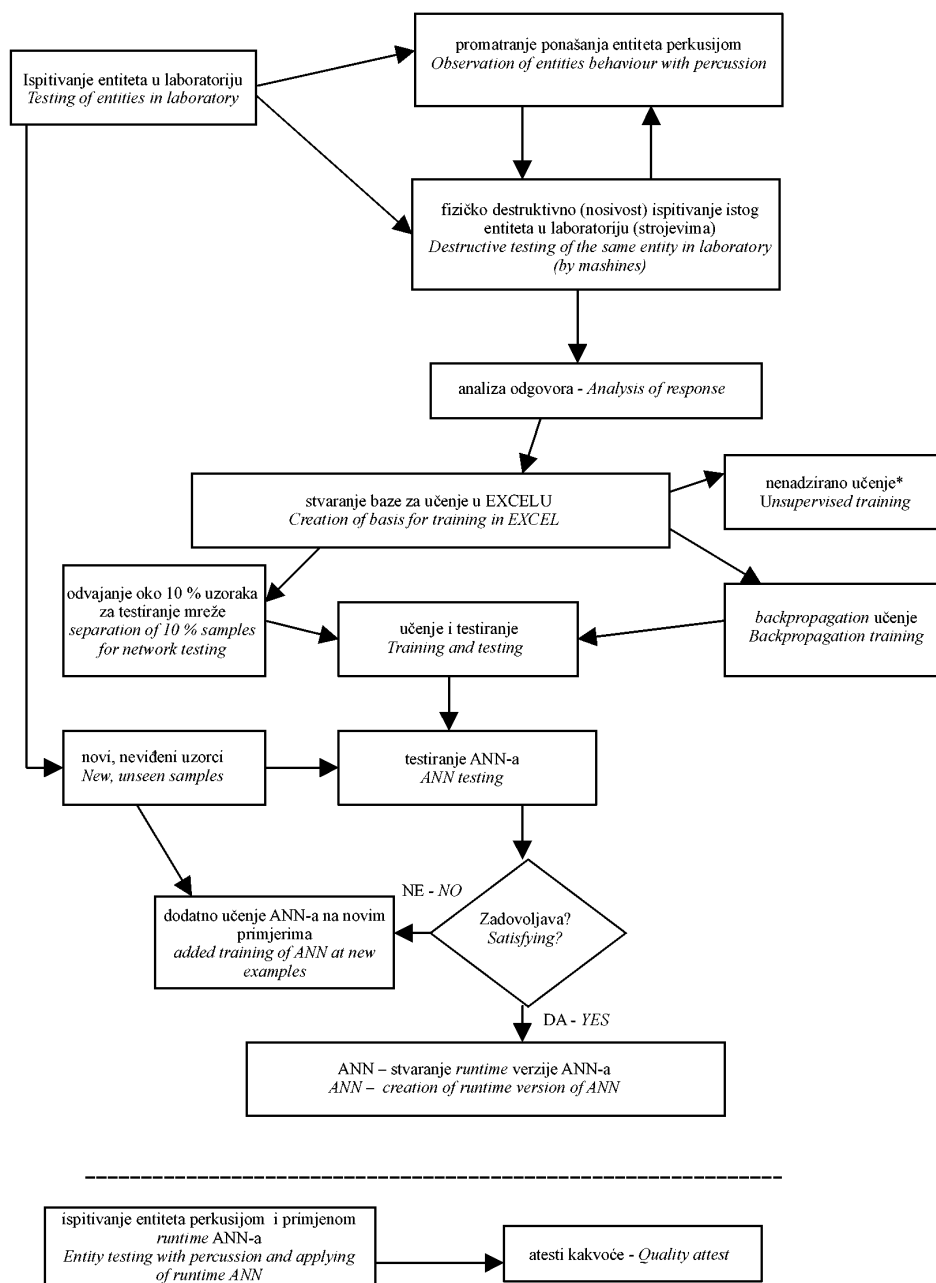
Pri stvaranju ANN-ova problem je samo u prikupljanju dovoljnog broja pouzdanih testnih podataka kako bi se kreirao opsežni skup za učenje neuralne mreže. Međutim, vjerojatno svuda gdje se testiraju uzorci, već postoje i podaci testiranja određenih struktura u laboratorijima, ali vjerojatno bez podataka perkusije! No s vremenom se laboratorijski nalazi mogu upotpuniti i tim podacima. Naravno, na sličan je način moguće i procijeniti stupanj propadanja drvenih konstrukcija, dijelova, spojeva, uz stalno ili povremeno praćenje odziva konstrukcije i primjenom ekspertnog sustava za razaznavanje propadanja. Time bi se mogla uštedjeti znatna financijska sredstva. No uvjet za to su relativno skupi prethodni postupci u kreiranju odgovarajućih ekspertnih sustava i prikupljanju podataka za stvaranje skupa za učenje ANN-a.

Na slici 12 dan je prijedlog dijagrama toka formiranja ANN-a za nedestruktivno testiranje kakvoće određenih struktura.

Slika 11.
Prikaz rezultata stvarnih (actual) i naučenih (network) parametara: a) visina podrožnice, b) visina lameliranih nosača na ležaju, c) visina nosača u apeksu, d) vrijednosti faktora sigurnosti gubitka stabilnosti
Figure 11
The actual results (Actual) and the learned (Network) parameters of a) the height of roof-beam b) depth of the GLULAM beams at the supports, c) apex beam depth, d) system stability



Slika 12.
 Prijedlog dijagrama toka formiranja ANN za nedestruktivno testiranje kakvoće određenih entiteta
Figure 12
 Proposed flowchart forming of ANN for nondestructive testing of any particular entities



* Trebalo bi ispitati mogućnosti nenadziranog ANN-a koji donosi zaključke na osnovi promatranja (testa) uzorka.
 * The unsupervised training of ANN should be investigated.

7 ZAKLJUČAK 7 CONCLUSION

U radu su prikazani rezultati uspješnog stvaranja jednog novog tehničkog sustava projektiranja i provjeravanja sigurnosti nosivih sustava primjenom akumuliranih tehničkih i praktičnih inženjerskih znanja u određenom aspektu inženjerskog djelovanja i kognitivne inteligencije. Taj se sustav može, međutim, primijeniti i na raznim drugim strukama i raznim drugim (tehničkim i netehničkim) područjima ljudske djelatnosti.

8 LITERATURA 8 REFERENCES

1. Baletić, B. 1995: Informacijski kodovi mutantnih oblika i njihova uloga u koncipiranju i vrednovanju stana. Disertacija, Zagreb, Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
2. Bjelanović, A. 1996: Prikaz EC5 standarda u obliku ekspertnog sustava. Magistarski rad, Zagreb, Građevinski fakultet Zagreb.
3. Bjelanović, A. 2001: Umjetna inteligencija u proračunu i dizajnu drvenih konstrukcija. Disertacija, Zagreb, Građevinski fakultet Zagreb.

4. Bjelanović, A. 2001: Structural Design of GLULAM Roof using AI Techniques. Zbornik seminarja Gradbena informatika 2001 (ob 30 letnici inštituta IKPIR), Fakulteta za gradbeništvo in geodeziju, IKPIR, Univerza v Ljubljani (ed. J. Duhovnik, Ž. Turk, T. Cerovšek), Ljubljana, 161-168.
5. Delić, D. 1990: Optimalni dizajn drvenih konstrukcija s GURU ljuškom. Diplomski rad, Zagreb, Građevinski fakultet Zagreb.
6. Delić, D. 1997: Design of Structural Elements by use of Expert Networks. Symposium report Computers in the Practice of Building and Civil Engineering, Worldwide ECCE Symposium, Lahti (Fin.), 141-148.
7. Denić, J. 1996: Parametarsko projektiranje 3D drvenih hala u GEOSTAR-u uz primjenu FE analiza s COSMOS/M programom. Diplomski rad, Zagreb, Građevinski fakultet Zagreb.
8. Džajić, I. 1999: Ekspertni sustavi: NM za dizajn montažnih mostova. Seminarski rad, Građevinski fakultet Zagreb.
9. Gabrić, I. 1997: Parametarsko projektiranje trozglobnih lukova i ANM. Diplomski rad, Zagreb, Građevinski fakultet Zagreb.
10. Garrett, J.H. Jr. 1990: Knowledge Based Expert Systems: Past, Present and Future, IABSE Periodica, Surveys, S-45/90.
11. Garrett, J.H. Jr. 1995: Artificial Neural Networks. Proceedings of ISMES Conference, Bergamo, Italija.
12. Janjuš, G. 2000: Kreiranje neuralne mreže za proračun trapeznih lameliranih nosača u prostoru (prema postavkama EC5). Diplomski rad, Zagreb, Građevinski fakultet Zagreb.
13. Jenkins, W.M. 1995: Neural Networks Based Approximations for Structural Analysis. Development in Neural Networks and Evolutionary Computing for Civil and Structural Engineers (Ed. B.H.V. Topping), Cvil Comp. Press, 23 - 35.
14. Lawrence, J. 1993: Introduction to Neural Network Design, Theory and Application. California Scientific Software, Nevada City.
15. McCulloch, W.S.; Pitts, W. 1943: A logical calculus of the idea immanent in nervous activity. Bulletin of Mth/Biophysics, 5: 115 - 133.
16. Rajčić, V. 1996: Bezrazorni postupci određivanja mehaničkih karakteristika drveta. Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
17. Rajčić, V. 1997: Neural Network for Wood Member Classification Based on the Result from Nondestructive testing of Wood Samples. The 4th International Conference of Slovenian society for nondestructive testing "Applications of Contemporary Nondestructive Testing in Engineering", Ljubljana, Slovenija.
18. Tkalčević, I. 1997: Parametarsko projektiranje 3D hala od drvenih lukova primjenom ANN. Diplomski rad, Zagreb, Građevinski fakultet Zagreb.
19. Žagar, Z. 1989: Knowledge Based System for GLULAM Laminated Structures. IABSE Colloquium: Expert Systems in Civil Engineering, Bergamo (Italija), 239 - 248.
20. Žagar, Z. 1990: Knowledge Based Expert System for GLULAM Structure Design: TRADA conference: Intern. Timber Engineering Conference Proceedings, London, Vol. 2.
21. Žagar, Z. 1991: Ekspertni sustavi, skripta (interno izdanje), Zagreb: Građevinski fakultet Zagreb.
22. Žagar, Z.; Delić, D. 1992: U realnom vremenu kompjutorom regulirane konstrukcije, Ljubljana. Zbornik 6. Seminarja Računalnik v gradbenom inženirstvu, Univ. v Ljubljani, FAGG, 174 - 181.
23. Žagar, Z.; Delić, D. 1993a: Expert System for the Design of 3D GLULAM One-bay Structures, ICCE Proceedings of the Internat. Conference on Computer Aided Engineering and Design, China Eng. Soc. and China Exploration and Design Ass., Beiging, 52 - 59.
24. Žagar, Z.; Delić, D. 1993b: Intelligent Computer integrated Structures: a New Generation of Structures. Advanced Technologies: architecture, planning, civil engineering, Elsevier, 52 - 59.
25. Žagar, Z.; Delić, D. 1993c: Intelligent Computer Integrated Structures. Microcomputer in Civil Engineering 8: 57 - 65.
26. Žagar, Z.; Delić, D. 1994a: In Echtzeit computegeregelte Konstruktionen, Computer controlled structures in realtime, Bauingenieur, Band 69, Heft 2, 63 - 72.
27. Žagar, Z.; Delić, D. 1994b: U realnom vremenu kompjutorom regulirane konstrukcije. Znanstveni skup Razvitak i dostignuća tehničkih područja u Hrvatskoj, Zagreb, Zbornik radova Sveučilišta u Zagrebu, 36 - 55.
28. Žagar, Z.; Bjelanović, A. 1997: CN(EC5) Standards for Design of Timber Structures in Expert System Form. Symposium report: Computers in the Practice of Building and Civil Engineering, Worldwide ECCE Symposium, Lahti (Fin.), 228 - 232.
29. Žagar, Z. 1998: ANN for design of 3D GLULAM three-hinged arches. Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering (Ed. J. Natterer & J. L. Sandoz), Montreaux, Švicarska, Vol 1, 478 - 485.
30. Žagar, Z. 1999: ANN for Design of 3D GLULAM Three-hinged Arches. Proceedings of the 1st RILEM Symposium Timber Engineering (ed. L. Bostom), RILEM, Stockholm, Švedska, 45 - 52.
31. Žagar, Z. 2001: ANN in Structural Design. Zbornik seminarja Gradbena informatika 2001 (ob 30 letnici inštituta IKPIR), Fakulteta za gradbeništvo in geodeziju, IKPIR, Univerza v Ljubljani (ed. J. Duhovnik, Ž. Turk, T. Cerovšek), Ljubljana, 197 - 204.

32. Žagar, Z. 2003: Drvene konstrukcije 2, PRETEI d.o.o. Zagreb, str. 538.
33. Yamamoto, K. 1999: Neural Network and Computer Simulation in Structural Engineering, Bridging the generations. The future of Computer-Aided Engineering, Dept. of Civil and env. Engineering, Carnegie Mellon Univ., 227 - 230.
34. *** 1993: Getting started with Brain-Maker, Simulated Biological Intelligence, California Scientific Software, Nevada City.
35. *** 1993: Priručnik za primjenu Neuro-Shell2 for Widows, Ward System Group, Inc., Frederic, USA.
36. *** U radu navedene web stranice i linkovi s njih. Web stranica autora (publicirani radovi, knjige, skripta): <http://www3.telus.net/MAPAZ/zvonimirzagar.htm>

Corresponding address:

Professor ZVONIMIR ŽAGAR, PhD
Prilaz Ivana Visine 1
HR-10020 ZAGREB
CROATIA
E-mail: zvonimir.zagar@htnet.hr