

Nastavno-naučnom veću
Građevinsko-arhitektonskog fakulteta
Univerziteta u Nišu

ГРАЂЕВИНСКО АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ
У НИШУ

Примљено: 15.10.2015			
Одр. Јед.	Број	Решава	Бројак
01	2/07	—	—

Odlukom Nastavno-naučnog veća Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu, br. 8/293 od 25.03. 2015. godine imenovani smo za članove Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidatkinje Dragane T. Turnić, dipl. građ. inž., pod nazivom:

Nelinearno ponašanje i granična nosivost limenih nosača opterećenih lokalizovanim opterećenjem

koju je 20.03. 2015. god. predala kandidatkinja Dragana Turnić, dipl. građ. inž.

U skladu sa ovom navedenom Odlukom podnosimo sledeći

IZVEŠTAJ

I PODACI O KOMISIJI

Sastav komisije

1. **Akademik Gradimir V. Milovanović**, Matematički institut SANU,
2. **Dr Nenad Marković**, docent Građevinskog fakulteta u Beogradu
3. **Dr Vlastimir Nikolić**, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu
4. **Dr Slavko Zdravković**, redovni profesor Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu
5. **Dr Todor Vacev**, docent Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu.

II PODACI O KANDIDATU

1. **Ime, ime jednog roditelja, prezime**
Dragana, Tomislav, Turnić
2. **Datum i mesto rođenja, opština, država**

24. maja 1980. godine Niš, Niš, Republika Srbija

3. Godina upisa upisa doktorskih studija

2007/2008

4. Uža naučna oblast iz koje su stečeni uslovi za prijavu doktorske disertacije

Tehnička mehanika i teorija konstrukcija

5. Kratka biografija

Kandidatkinja **Dragana T. Turnić** rođena je 24. maja 1980. godine u Nišu. Nakon gimnazije „Stevan Sremac“ u Nišu (matematički smer), završila je 2006. godine Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu (odsek građevinarstvo, smer konstrukcije) sa prosečnom ocenom 9,82 (devet i 82/100) i ocenom 10 (deset) na diplomskom radu, pod nazivom „*Sportska hala u Blacu*“ u okviru predmeta *Spregnute konstrukcije i ispitivanje konstrukcija*.

U toku studija dobitnik je stipendije za talente grada Niša i stipendije Norveške vlade za 500 najboljih studenata u Srbiji. Dve godine za redom je učestvovala u međunarodnim Workshop-ovima u okviru „DAAD“ projekta „*Pakt stabilnosti jugoistočne Evrope*“ u Pamporovu, Bugarska. Dobitnica je povelje fakulteta za najboljeg diplomiranog studenta na odseku građevinarstvo u godini diplomiranja.

Doktorske studije upisala je školske 2007/2008. godine na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu Univerziteta u Nišu, odsek građevinarstvo. U toku tih studija bila je angažovana kao stručni saradnik na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu na predmetima: *Statika konstrukcija I* (2006/2007), *Primena računara* (2007/2008) i *Organizacija građenja* (2008/2009).

Prvi radni odnos je zasnovala na Univerzitetu u Nišu, kao stručni saradnik na poslovima investicione izgradnje i održavanja objekata od 2007. do 2011. godine.

Od novembra 2011. godine zasniva radni odnos na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu, gde je izabrana u zvanje asistenta na *Katedri za tehničku mehaniku i teoriju konstrukcija*, a reizabrana je 2015. godine.

Učesnik je na naučno tehnološkom projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja počev od 2012. godine.

Autor je i koautor četrdeset i pet naučnih radova u domaćim i stranim časopisima, od kojih su 4 rada iz kategorije M20, a od toga jedan na SCI listi, kategorije M21, jedan na SCIE

listi, kategorije M23, i dva iz kategorije M24. Iz kategorije M30, ima 29 radova, 10 radova iz kategorije M50 i jedan rad iz kategorije M60. Udata je i majka dvoje dece.

I PREGLED DOKTORSKE DISERTACIJE

Doktorska disertacija je prikazana na sledeći način:

1. Uvod (5 stranica, od 1-5);
2. Prikaz metoda za rešavanje problema u teoriji ploča i primena integralnih jednačina u problemima u kojima se javljaju singulariteti (33 stranica, od 6-38);
3. Generalisane kvadrature formule Gauss-ovog tipa za funkcije sa singularitetima i moguće primene (26 stranica, od 39-64);
4. Ponašanje pločastih čeličnih konstrukcija pri statičkom opterećenju i lokalizovanom opterećenju (32 stranica, od 65-96);
5. Eksperimentalna istraživanja preuzeta iz literature i priprema modela za teorijsku studiju (9 stranica, od 97-105);
6. Modeliranje nosača i teorijsko-numerička analiza (15 stranica, od 106-120);
7. Nelinearno ponašanje i granična nosivost nosača dobijena numeričkom simulacijom uz poređenje sa eksperimentalnim rezultatima (35 stranica, od 121-155);
8. Zaključci i preporuke za budući rad (3 stranice, od 156-158);
9. Literatura (10 stranica, od 159-168).

Tehnička obrada disertacije je u celini na odgovarajućem nivou.

II VREDNOVANJE POJEDINIH DELOVA DOKTORSKE DISERTACIJE

U disertaciji je prikazano teorijsko, eksperimentalno i numeričko istraživanje koje se odnosi na limene nosače.

U prvom delu (**Poglavlje 1**) dat je značaj *patch loading*-a i put dolaženja do njegovog rešenja. Poseban značaj u okviru ovog problema ima modeliranje konstrukcije, eksperimentalno ispitivanje i numerička simulacija proračuna nosača. Razmatra se pojas limenog nosača preko

koga se na uskom pojasu nanosi lokalizovano opterećenje ispod koga se nalazi rebro bez i sa horizontalnim ukrućenjem. Takođe je dat i prikaz strukture rada.

U **Poglavlju 2** se kroz istorijski pregled prikazuju rešenja različitih problema teorije površinskih nosača. U okviru toga su date najznačajnije specijalne i približne metode koje su od teorijskog i praktičnog značaja pri rešavanju problema ploča. Posebno je dat osvrt na Metodu konačnih elemenata (MKE) i Metodu graničnih elemenata (MGE) koje se baziraju na numeričkoj analizi čija primena je danas veoma aktuelna pri korišćenju programskih paketa zasnovanim na ovim metodama.

Prikazani su neki karakteristični primeri singulariteta kod površinskih nosača koji su uz pomoć uticajnih polja određivali najnepovoljniji položaj tereta raspodeljenih na veoma male površine, tako da u teorijskom smislu predstavljaju koncentrisane sile koje deluju na pojedine tačke ploče.

Ukratko je prikazana metoda integralnih jednačina sa Green-ovom funkcijom i dati su opšti pojmovi o Gauss-ovim kvadraturnim formulama kroz više karakterističnih primera.

U **Poglavlju 3** je najsažetije prikazan efikasan metod za konstruisanje univerzalnih (direktnih) kvadraturnih formula Gauss-ovog tipa koje se mogu primeniti na integraciju neprekidno-glatkih funkcija, ali i na integraciju funkcija sa singularitetima. Pored direktne integracije, ove kvadraturne formule se, takođe, mogu uspešno primeniti i za rešavanje integralnih jednačina. Uopšteno, kvadraturne formule igraju veoma važnu ulogu u numeričkoj integraciji MGE, kao i MKE, a u ovom radu su data dva numerička primera i prikazana njihova primena. Važno je napomenuti da su date kvadraturne formule u stanju da numerički određuju vrednosti integrala sa dovoljnom tačnošću, bez obzira da li njihovi integrandi (podintegralne funkcije) sadrže singularitet ili ne. Pri konstrukciji formula, tj. kod određivanja parametara kvadraturnih formula, rešavan je specijalni oblik sistema nelinearnih jednačina, na koje je primenjen Newton-Kantorovičev metod, dobijen linearizacijom pomoću Taylor-ove formule. Prvi navedeni primer rešava problem integracije funkcije sa singularitetom, primenom dobijene kvadraturne formule, kao i poređenje sa rezultatima dobijenim korišćenjem Gauss-Legendre-ove kvadrature, koja pokazuje dobre konvergentne osobine samo u slučaju glatke funkcije. U

drugom primeru posmatra se Fredholm-ova integralna jednačina tipa prve vrste sa diferencnim jezgrom. Ovde je prezentovan slučaj sa singularnim rešenjem gde generalisane Gauss-ove formule daju znatno bolje rezultate što je i grafički predstavljeno.

U **Poglavlju 4** konkretno se razmatra čelični I nosač za slučaj bez i sa horizontalnim (podužnim) ukrućenjem opterećenog *patch loading*-om do graničnog opterećenja. Dat je i opšti prikaz ponašanja pločastih čeličnih konstrukcija i teorijske osnove proračuna pri statičkom opterećenju, kao i metode proračuna pri statičkom opterećenju u elastičnoj oblasti. Prikazane su preporuke za proračun prema Evrokodu 3, odnosno predstandardu EN 1993-1-5, kao i najnovija dostignuća u istraživanju granične nosivosti kada je u pitanju lokalizovano opterećenje pri nelinearnom ponašanju. Prikazani su tipovi geometrijskih i strukturnih-materijalnih imperfekcija nosača pri njihovom simultanom dejstvu u skladu sa Evropskim propisima i ispitivanih vrednosti. Diferencijalna jednačina elastične površine prikazana je za slučaj savijanja ploče usled poprečnog opterećenja složenog sa silama u srednjoj ravni ploče. Razmatrana je i granica stabilnosti slobodno oslonjene ploče u obliku dvostrukog trigonometrijskog reda a u vezi kritičnog napona izraženog preko Euler-ovog napona.

U **Poglavlju 5** dat je prikaz eksperimentalnih istraživanja limenih nosača bez i sa podužnim ukrućenjem, opterećenih *patch loading*-om, preuzetim iz literature. Ovi eksperimentalni podaci na modelima poslužili su za upoređenje sa adekvatnim podacima dobijenim numeričkom simulacijom čiji su rezultati analizirani u poglavlju 7. Ispitana su četiri nosača i to: 1) A1- bez ukrućenja i površinom unošenja opterećenja $c=50 \times 120$ mm; 2) A2-bez ukrućenja i površinom unošenja opterećenja $c=150 \times 120$ mm; 3) A3- sa podužnim ukrućenjem i površinom unošenja opterećenja $c=50 \times 120$ mm i 4) A4- sa podužnim ukrućenjem i površinom unošenja opterećenja $c=150 \times 120$ mm.

U početku je inkrement unošenja opterećenja bio 20kN do dostizanja vrednosti sile od 100kN, nakon toga inkrement je smanjen na 10kN, a sa približavanjem graničnom opterećenju (što je manifestovano izraženim deformacijama), smanjen je na 5kN do dostizanja granične vrednosti sile, što se manifestovalo naglim padom sile jer nije bilo moguće, u daljem, uspostavljanje statičke ravnoteže.

Poglavlje 6 odnosi se na modeliranje nosača i teorijsko numeričku analizu. Modeli nosača, njihova geometrija, granični uslovi i karakteristike materijala iz dela koji nije pretrpeo nikakve deformacije, usvojeni su prema uzoru na modele nosača iz eksperimenata opisanih u poglavlju 5. Znači, da je posebna pažnja posvećena karakteristikama materijala pri čemu su prikazani rezultati ispitivanja epruveta, kako je već naglašeno, uzeti iz modela ispitanih nosača (na izabranim mestima), a dobijene krive napon-dilatacija (σ - ε) su poslužile kao baza za formiranje nelinearnih materijalnih modela. Materijalni modeli su izabrani u skladu sa važećim propisima prema EN 1993-1-5 (multilinearna kriva i dve bilinearne krive), prema standardu BSK07 multilinearna kriva i još dve bilinearne krive u cilju dodatne analize. Detaljno je opisano modeliranje nosača koje je izvršeno u programskom paketu ANSYS Workbench 15. Za korišćenih šest prethodno navedenih uprošćenih materijalnih modela, izvršeno je njihovo poređenje, a dobijeni rezultati mogu biti od značaja za praktičnu primenu. U okviru numeričke analize, izvršena je kontaktna analiza nosača sa ocloncem i prikazana mreža konačnih elemenata korišćenih u okviru navedenog programa.

U **Poglavlju 7** prikazani su rezultati dobijeni numeričkom simulacijom i izvršeno je njihovo poređenje sa adekvatnim eksperimentalnim rezultatima iz poglavlja 5. Određena je granična nosivost nosača za šest različitih materijalnih modela i prikazani su dijagrami deformacije i ugiba pojasa i rebra, kao i napona, sa porastom sile do dostizanja graničnog opterećenja. Posebno je izvršena analiza u cilju praćenja porasta opterećenja do graničnog opterećenja za nosače bez podužnog ukrućenja i sa postojanjem podužnog ukrućenja na rebru nosača. Opterećenje je i za nosače bez i sa ukrućenjem nanošeno preko dodatnog dela na pojasu nosača površine 50×120mm i 150×120mm. Prikazane su karakteristične vrednosti deformacija, vertikalnih preseka rebra na polovini dužine, sa porastom sile za različite materijalne modele, za svaki od četiri tipa nosača. Takođe, karakteristične vrednosti napona su analizirane za nosače bez i sa imperfekcijom. Sve napred navedene veličine, za sve nosače, su grafički prikazane i upoređene sa eksperimentalnim podacima.

U **Poglavlju 8** su formulisani adekvatni zaključci zasnovani na rezultatima teorijskih, eksperimentalnih i numeričkih istraživanja. Pored toga, date su preporuke za projektovanje i za dalja istraživanja. Kroz 7 poglavlja dati su konkretni rezultati disertacije koji imaju praktičan značaj. Time je nesumljivo dat doprinos disertacije razvoju teorijske analize nelinearnom ponašanju i granične nosivosti izučavanih limenih nosača opterećenih lokalizovanim opterećenjem, što može poslužiti primeni u građevinskom konstrukterstvu.

Na kraju je dat pregled korišćene literature.

III OCENA DISERTACIJE

Predmet razmatrane doktorske disertacije je numeričko modeliranje ponašanja limenih konstrukcija bez ukrućenja i sa ukrućenjem pri lokalizovanom opterećenju.

U disertaciji je dato teorijsko razmatranje, radi matematičkog modeliranja, da bi se numeričkom simulacijom došlo do rešenja. Formuliseo bi se novi algoritam za efikasnije rešavanje problema koje je znatno preciznije i detaljnije od postojećih preporuka u literaturi, a bazira se na analizi nelinearnog ponašanja i granične nosivosti limenih nosača opterećenih lokalizovanim opterećenjem. Novoformirani proračunski model sa geometrijskim i materijalnim imperfekcijama uspešno bi simulirao nelinearno ponašanje implementirano u vidu paketa računarskog programa koji je pogodan za praktičnu upotrebu. Korišćenjem ovog paketa programa se na jednostavniji i efikasniji način dobijaju realni podaci o deformacijskim i naponskim karakteristikama nosača, koji se mogu koristiti i u drugim softverima za proračun limenih konstrukcija modeliranih kao površinski nosači ili elementi nosača.

Formiranje novorazvijenog softvera, na osnovu priložene teorijske osnove za rešavanje i vrlo komplikovanih problema sa i bez singulariteta, zahteva značajno povezivanje programiranja i posebno poznavanje problema koji se rešava, u ovom slučaju opisani limeni nosač. Na osnovu velikog broja numeričkih primera, sprovedena sveobuhvatna uporedna analiza rezultata dobijenih primenom dosadašnjih programa s jedne strane i novo formiranog sveobuhvatnog s druge strane, verifikovao bi verodostojnost novog softvera.

Na osnovu detaljnije analize i ponašanja površinskih nosača sa i bez imperfekcije, koji su u disertaciji dati prema postojećoj literaturi, dobijeni rezultati doprinose upoznavanju sa

najvažnijim problemima iz ove oblasti. Kompletan uvid u nelinearno ponašanje simulacijom ispitivanih modela u potpunosti odražava realne karakteristike i ima izuzetan značaj kao sigurna baza podataka za donošenje naučnih zaključaka za praktičnu primenu i formiranje navednog sveobuhvatnijeg softvera za rešavanje ove vrste problema.

IV DOPRINOS DOKTORSKE DISERTACIJE

Na osnovu vrednovanja pojedinih delova disertacije konstatovali smo da je kandidatkinja u rešavanju savremenog naučnog problema koristila poznate metode (dostupnu eksperimentalnu analizu, numeričko modeliranje, komparativnu analizu itd.). Rezultati istraživanja prikazani su na jasan i razumljiv način. Tačnost pojedinih parametara je verifikovana i eksperimentalnim putem dostupnih joj podataka. Značajan naučni doprinos predstavljaju teorijsko-analitička i numerička istraživanja, izvršena u okviru ove disertacije, koji svojim rezultatima doprinose formulisanju proračunskih modela koji bi sagledavali stvarno nelinearno ponašanje limenih nosača opterećenih lokalizovanim opterećenjem. U radu su sprovedeni testovi ponašanja modela nosača numeričkom simulacijom i određene su vrednosti graničnog opterećenja za različite materijalne modele. Analizom dobijenih rezultata došlo se do zaključka da početak plastifikacije nastaje već nakon 58,5% od graničnog opterećenja.

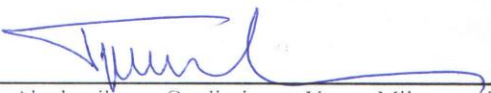
Dobijene su univerzalne (direktne) kvadrature formule koje dobro integrale i neprekidne (glatke) funkcije i funkcije sa algebarskim i/ili logaritamskim singularitetom. One se efikasno mogu primeniti za direktnu integraciju, kao i za rešavanje integralnih jednačina. Ove formule se mogu uspešno implementirati u odgovarajuće softverske pakete kojim se realizuje metod graničnih elemenata (MGE) i metod konačnih elemenata (MKE), što bi dovelo do jednostavnijih programskih rešenja, povećanje njihove brzine izvršenja, ali i dobijanje tačnijih krajnjih rezultata. U tom slučaju, ne bi se moralo voditi računa da li se u problemu javlja ili ne javlja singularitet, već bi koncepcija programa bila takva da automatski uključuje rešavanje singulariteta, ako postoji, što se može smatrati naučnim doprinosom. Međutim, mora se naglasiti da je neophodan rad eksperata u programiranju i poznavanju ovog problema da bi se dobijene kvadrature formule na adekvatan način implementirale. Takođe, pružaju se mogućnosti za dalje analize većeg broja parametara, promene geometrije nosača, ispitivanje nosača sa otvorima u


rebru (što ovde nije slučaj), kao i primena novih materijala u celini ili delu nosača i drugo, kao na primer, analiza mehanizma loma u neelastičnoj oblasti.


Imajući sve navedeno u vidu, Komisija sa zadovoljstvom predlaže Nastavno-naučnom veću Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu da prihvati pozitivnu ocenu i odobri usmenu odbranu doktorske disertacije pod nazivom **Nelinearno ponašanje i granična nosivost limenih nosača opterećenih lokalizovanim opterećenjem** kandidatkinje Dragane Turnić, dipl.građ.inž.


U Nišu,
2015. godine

Članovi Komisije:


1. Akademik Gradimir V. Milovanović,
Matematički institute SANU


2. Doc. Dr. Nenad Marković, Građevinski fakultet
Univerziteta u Beogradu, komentor


3. Prof. Dr. Vlastimir Nikolić, Mašinski fakultet
Univerziteta u Nišu


4. Prof. Dr. Slavko Zdravković, Građevinsko-
arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu


5. Doc. Dr. Todor Vacev, Građevinsko-
arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu