

Primjena programskoga paketa Abaqus u znanstvenom radu na Građevinskom fakultetu u Zagrebu

doc.dr.sc. **Mario Uroš**¹, izv.prof.dr.sc. **Davor Skejić**², dr.sc. **Krunoslav Pavković**³,
dr.sc. **Ivan Lukačević**⁴

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, uros@grad.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, davors@grad.hr

³ Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel, krunoslav.pavkovic@tvz.hr

⁴ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, ica@grad.hr

Sažetak

U radu će se dati kratki pregled znanstvenih projekata i uvid u mogućnosti numeričkih proračuna za potrebe znanstvenih projekata. Predstavljena su četiri znanstvena rada izrađena na doktorskom studiju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu čiji su numerički proračuni napravljeni u programskom paketu Simulia Abaqus, koji je jedan od široko primjenjivanih programa opće namjene za numeričke simulacije. Prikazat će se samo najosnovniji podaci o numeričkim modelima i metodama njihovoga rješavanja, s naglaskom na specifične detalje koji su vezani za svako pojedino područje istraživanja.

Ključne riječi: Simulia Abaqus, numerički model, metoda konačnih elemenata

Application of Abaqus software in scientific research work at the Faculty of Civil Engineering in Zagreb

Abstract

A brief overview of scientific projects and possibilities available for numerical calculations on such projects is provided in this paper. Four doctoral theses from the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, are presented. Numerical calculations for these theses were made using the Simulia Abaqus program package, which is one of the widely used general-purpose software programs for numerical simulations. Only the most important numerical model data and solution methods are given in the paper, and an emphasis is placed on specific details that are related to each area of research.

Key words: Simulia Abaqus, numerical model, finite element method

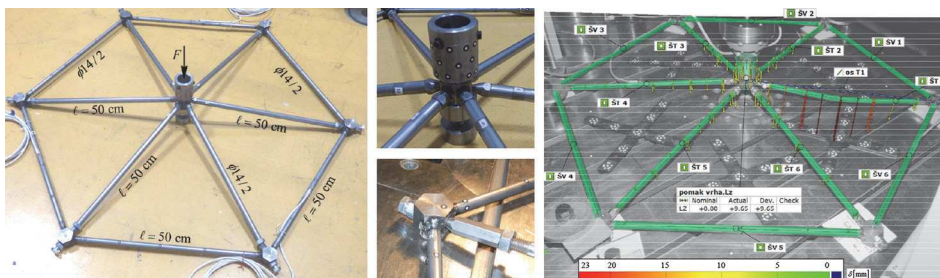
1 Uvod

U novije je vrijeme znanstveni rad postao gotovo nezamisliv bez uporabe računala. Razvojem numeričkih metoda u matematici do punoga su izražaja došle glavne prednosti računala, a to su brzina obrade podataka i veliki memorijski kapacitet. U novije vrijeme postoji znatan broj programskih paketa koji su prilagođeni pojedinim područjima znanstvenoga istraživanja. U području građevinarstva, kao i cijele tehničke struke, programi utemeljeni na metodi konačnih elemenata trenutačno imaju najširu primjenu. Simulia Abaqus (Dassault Systèmes) [1] jedan je od takvih programskih paketa koji se rabe za numeričke simulacije raznih fizikalnih procesa. U ovom su radu predstavljena četiri znanstvena rada izrađena na doktorskom studiju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u sklopu teme doktorskog rada, s naglaskom na provedeni numerički proračun.

2 Analiza izbočenja na nosivost rešetkaste kupole

2.1 Uvod i opis modela

U doktorskom radu [2] analiziran je utjecaj složenoga izbočenja na nosivost rešetkaste kupole. Proveden je postupak eksperimentalnoga ispitivanja čvora rešetkaste kupole uz numeričke proračune. Model se sastoji od šest zgloбно spojenih štapova promjera 14 mm i debljine stijenke 2 mm oslonjenih na vlačni prsten koji u prostoru tvore oblik piramide s vrlo malom visinom srednjega čvora (slika 1.). Geometrija sustava definirana je tako da teorijski dolazi do istodobnoga izvijanja svih tlačnih štapova i proboja središnjega čvora zbog vertikalne sile u njemu. Ova se pojava naziva složenim izbočenjem i poznato je da je u tom slučaju osjetljivost konstrukcije na imperfekciju velika, te da mala promjena ulaznih parametara uzrokuje veliku promjenu u nosivosti sustava [3]. Jedan je od ciljeva uspostaviti međusobnu ovisnost amplitude i oblika imperfekcije sa smanjenjem nosivosti rešetkaste jednoslojne kupole.



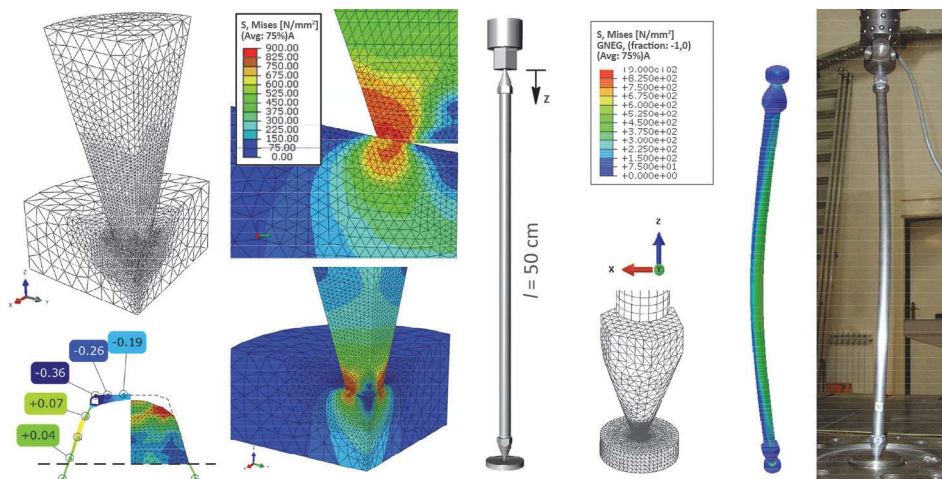
Slika 1. Fizički model rešetkaste kupole i prikaz rezultat optičkih mjerenje

S obzirom na to, od velikoga je značaja točnost mjerenja početne geometrije cijelog sustava. Optička mjerenja geometrije provedena su sustavom Tritop tvrtke Topomatika d.o.o. u karakterističnim fazama opterećenja, čime se dobio realni oblik rešetke sa svim njezinim geometrijskim imperfekcijama koje su upotrijebljene pri izradi numeričkih modela (slika 1.). Zbog osjetljivosti sustava na imperfekcije, proračuni i ispitivanja provedeni su na tri razine modela: kontakti spoj, štapni element i rešetkasta kupola, kako bi se odredio utjecaj svake pojedine komponente.

U modelu su se nastojala izbjeći dodatna mjesta unosa imperfekcija, te osigurati centrični prijenos opterećenja u spojevima. Ostvaren je točkasti spoj kontaktom metalnoga stošca i udubljenja u elementima čvorova. Vijci u čvorovima služe za "fino" namještanje visine rešetkaste kupole. Njihov je vrh zakaljen, čime im se povećala tvrdoća, a time se utiskivanje svelo na minimum. Širenje vlačnoga prstena omogućeno je izvedbom kliznih spojeva u horizontalnoj ravnini pomoću glatkih dodirnih ploha (slika 1.). Eksperimentalno je ispitivanje provedeno na statičkoj preši kontroliranim prorastom pomaka. Kao rezultat je dobivena ravnotežna krivulja čvora na temelju koje će se vršiti usporedbe s numeričkim modelima.

2.2 Numerički model

Numerički je proračun proveden u programskom paketu Abaqus 6.12 [1], dok su pojednostavljene analize radi praktične primjene napravljene u programskom paketu SAP2000 [4], a ovdje se neće opisivati. Kod modela je na svim razinama upotrijebljena geometrijski i materijalno nelinearna statička analiza uz kontrolu pomaka iteracijskom Newton-Raphsonovom metodom. Upotrijebljeni su volumni konačni elementi u obliku heksaedra s 8 čvorova i isto toliko Gaussovih točaka integracije. Provedeno je ispitivanje mehaničkih karakteristika materijala i dobivene su sljedeće karakteristike: modul elastičnosti $E = 205 \text{ GPa}$, granica tečenja $f_y = 404 \text{ MPa}$ i granica loma $f_u = 626 \text{ MPa}$. Na slici 2. prikazani su lokalni modeli kontaktnoga spoja i izdvojenog štapa rešetke s karakterističnim rezultatima i područjima plastifikacije materijala.

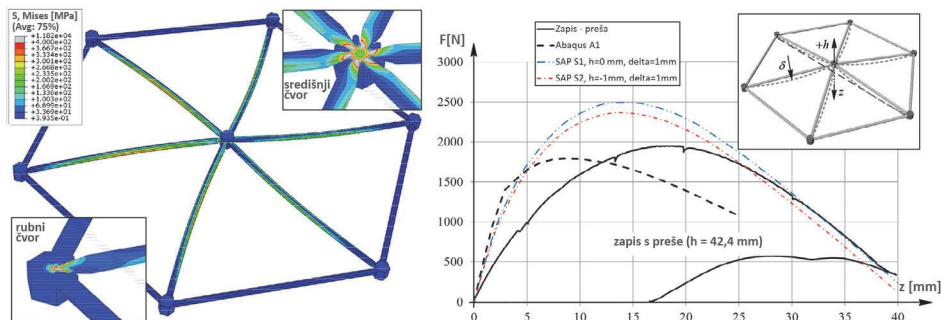


Slika 2. Numerički model detalja spoja i lokalni model štapa rešetke

U modelu su definirana razna kinematička ograničenje te ograničenja na kontaktnim ploham dvaju susjednih elemenata. Svojstva kontakta definirana su u tangencijalnom i normalnom smjeru u odnosu na ravninu kontakta. Radi što vjernije reprodukcije fizičkoga modela optički mjerena geometrijska imperfekcija preslikana je na čvorove numeričkih modela.

2.3 Rezultati i zaključak

Na temelju numeričkih proračuna prikazane su ravnotežne krivulje pri opterećenju središnjega čvora (slika 3.) te je dana usporedba s eksperimentalnim rezultatima. Također je prikazano stanje naprezanja u elementima rešetke te područja plastifikacije u čvorovima rešetkaste kupole. Zbog velikoga broja provedenih eksperimentalnih ispitivanja i pripadnih numeričkih proračuna u ovom su radu prikazani rezultati samo za slučaj jedne početne geometrije sustava. Za model u programskom paketu Abaqus imperfekcija je reproducirana prema rezultatima optičkih mjerenja. Modeli u programskom paketu SAP2000 znatno su jednostavniji i praktično su primjenljivi kod proračuna realnih konstrukcija, a samim time ne predstavljaju realnu imperfekciju već zamjensku (visine čvora w i odstupanje osi štapa od pravca δ). Tako npr. krivulja S1 predstavlja najčešće rabljeni model pri projektiranju ovakvoga sustava. Može se uočiti da bi primjenom takve krivulje nosivost bila precijenjena oko 25 %.



Slika 3. Naprezanja u elementima rešetkaste kupole i ravnotežne krivulje točke vrha rešetke

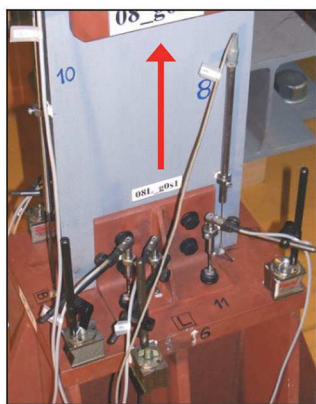
Složeniji numerički model daje dosta dobru procjenu nosivosti, ali i ovdje se može uočiti odstupanje ravnotežne krivulje od ekperimentalne u pomacima pri gubitku stabilnosti. Razlika se može objasniti imperfekcijama na kontaktnim ploham i nejednolikom plastifikacijom vrhova stožaca u čvorovima (razina ukupnoga utiskivanja na spoju je oko 0,2 mm). Također, početno "namještanje" sustava pri ispitivanju te vijčani spojevi imaju nezanemariv utjecaj na iznos vertikalnog pomaka. Takve imperfekcije, iako minimalne, imaju značajnu ulogu na ponašanje i nosivost konstrukcije u području složenoga izvijanja gdje je ona i najosjetljivija.

3 Procjena pouzdanosti priključaka nosač-stup izvedenih kutnicima

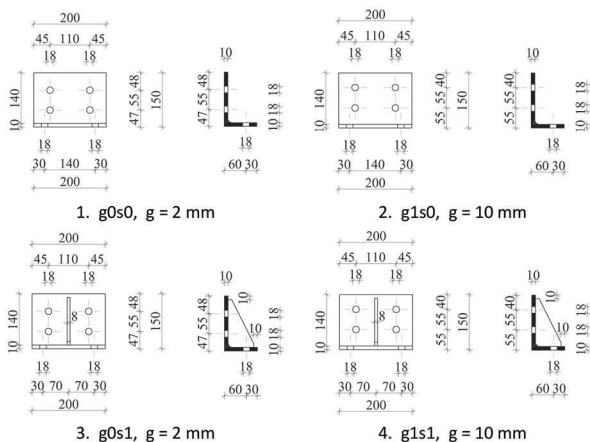
3.1 Uvod

Jedna od važnijih komponenata vijčanih čeličnih priključaka nosač-stup izvedenih s pojasnim kutnicima gornji je kutnik u savijanju. Karakterizacija te komponente može se procijeniti ponašanjem analognoga T-komada (para kutnika) u vlaku. Ponašanje vijčanih spojeva s T-komadom izrazito je nelinearno, a obuhvaća složene fenomene kao što su plastičnost materijala, učinci 2. reda i jednosmjerni kontaktni rubni uvjeti [5]. Osim navedenih učinaka i nelinearnosti kod priključaka s pojasnim kutnicima pojavljuje se i fenomen proklizavanja koji u kombinaciji s prednapinjanjem vijaka postaje još izraženiji. U nastavku je za simulaciju ponašanja pojasnih kutnika u vlaku opisan postupak primjene numeričkog modela uporabom FE paketa Abaqus [1]. Ovi su modeli kalibrirani i vrednovani usporedbom s rezultatima laboratorijskih ispitivanja provedenih na Građevinskom fakultetu u Zagrebu [6]. Kako bi se dobilo realno F - Δ ponašanje različitih konfiguracija kutnika u savijanju, ovisno o razmaku između nosača i pojasnice stupa, g, razmotrene su dvije osnovne grupe uzoraka (g_0 i g_1). U konačnici su razmotrene četiri grupe uzoraka, dvije bez ukrućenja (g_{0s0} i g_{1s0}), i dvije s ukrućenjem (g_{0s1} i g_{1s1}), slika 4. Svi uzorci kutnika izrađeni su iz istog profila L 150x90x10, kvalitete čelika S 235 JR. Upotrijebljeni su nominalno isti vijci M16

x 90, kv.10.9, koji su bili pritegnuti na 20 % vlačne otpornosti. Uzorci para kutnika opterećeni su statičkom vlačnom silom tako da je ostvaren simetričan unos sile u oba kutnika [6].



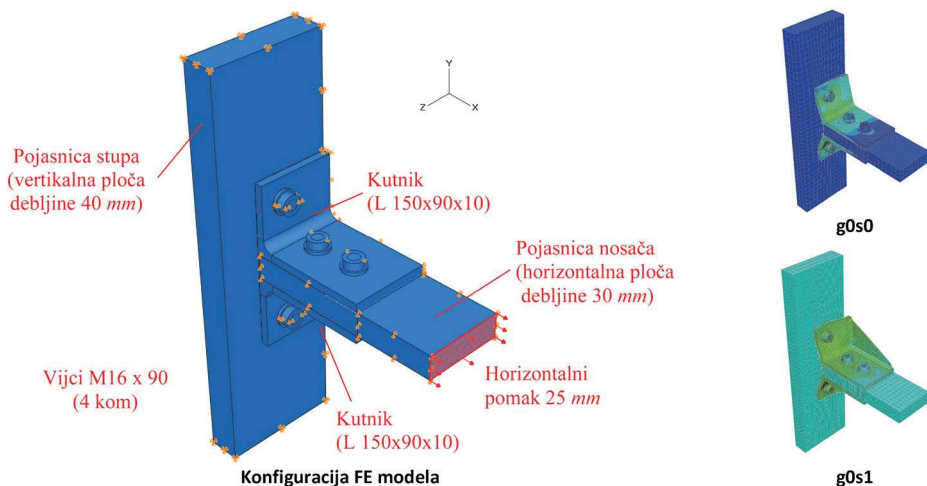
Ispitivanje para kutnika u vlaku



Slika 4. Ispitivanje para kutnika u vlaku i geometrijska svojstva laboratorijskih uzoraka po grupama

3.2 Numerički model

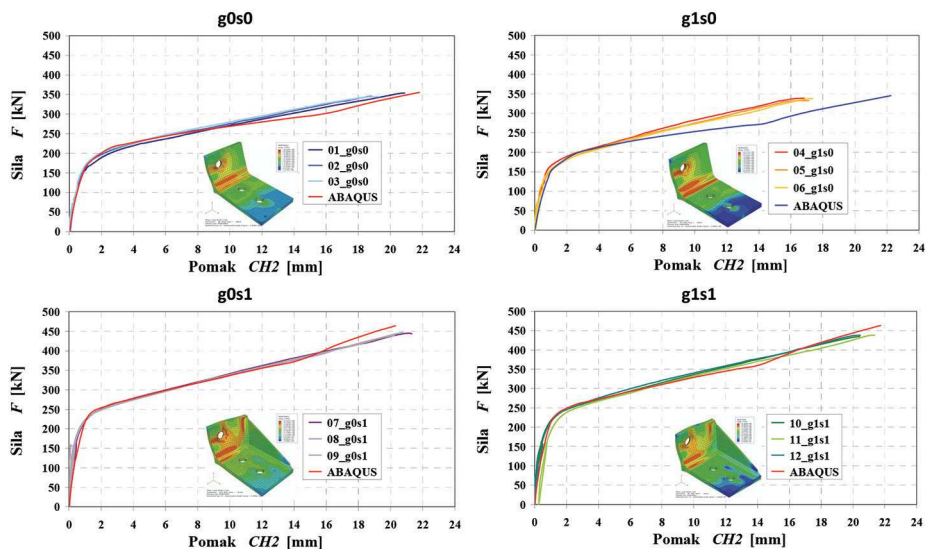
Modelirana je polovica spoja primjenom simetrije oko polovice svakoga od kutnika. Rubni uvjeti modela i prikaz unosa opterećenja vide se na slici 5. Opterećenje je uneseno kao vanjski pomak horizontalne ploče koja predstavlja pojasnicu nosača u stvarnoj funkciji u priključku. Realni uvjeti opterećivanja modelirani su u 3 faze; prve dvije - prednapinjanje vijaka i 3. - opterećivanje uzorka preko linearnoga unosa pomaka. Mehanička svojstva čeličnih komponenata (kutnika, ploča i vijaka) određena su iz vlačnih ispitivanja svojstava materijala [6]. Svi modeli su diskretizirani uporabom C3D8I osmeročvornih "brick" elemenata s punom integracijom i inkompatibilnim modovima. C3D6 šesteročvorni "wedge" elementi upotrijebljeni su za modeliranje tijela vijaka. Upotrijebljena su tri elementa po debljini krakova kutnika kako bi se što bolje obuhvatilo deformacijsko ponašanje. Kontakt između svih dijelova modeliran je eksplicitno. Opća formulacija za kontakt u Abaqusu uključuje tip "master-slave" algoritma [1]. Kontaktne su površine tijelo vijka - rupe za vijke i glava (matica) vijka - komponente te ostale komponente u kontaktu ploča - ploča.



Slika 5. Rubni uvjeti, unos opterećenja i deformirani modeli u trenutku otkazivanja

3.2 Rezultati i zaključak

Na slici 6. dane su usporedbe s laboratorijskim rezultatima koji predstavljaju odvajanja kutnika od pojasnice stupa, odnosno krivulje $F - \Delta$.



Slika 6. Krivulje $F - \Delta$ - usporedba numeričkih i laboratorijskih rezultata

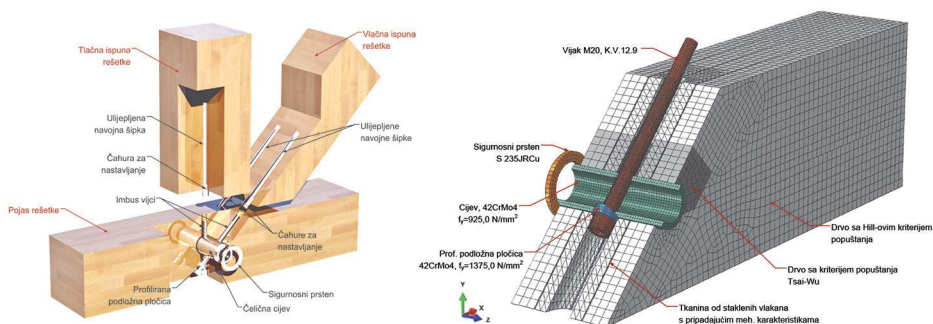
Numerički rezultati izuzetno se dobro poklapaju s eksperimentalnima za sve grupe uzoraka osim za uzorke s kutnicima g1s0. Za tu grupu uzoraka odstupanja se javlja tek nakon postkritičnoga područja gdje numeričke simulacije daju znatno mekši odgovor, ali je dobiveni deformacijski kapacitet puno veći. Kraj numeričkih krivulja, odnosno deformacijski kapacitet uzoraka određen je primjenom kriterija otkazivanja koji su detaljno objašnjeni u [5, 6].

Opisani numerički modeli daju zadovoljavajuću procjenu ponašanja svih analiziranih parova kutnika u vlaku. Uz dodatne parametarske analize na ovako definiranim FE modelima mogu se uz male troškove (materijalne i vremenske) razviti još pouzdanija pravila za projektiranje priključaka s pojasnim kutnicima.

4 Složeni priključak drvenih rešetkastih nosača

4.1 Uvod

Cilj je bio pronaći kvalitetno rješenje priključka koji će svojim mehaničkim karakteristikama biti primjenjiv za rešetkaste nosače, a ponajprije za rešetkaste nosače velikih raspona. Predloženi priključak za rešetkaste konstrukcije do sada nije istražen ni upotrijebljen u inženjerskim konstrukcijama (slika 7.). Sastoji od spojnoga sredstva velikog promjera koje se montira u pojas rešetke, ulijepljenih šipki u ispune rešetke te odgovarajućega broja vijaka kojima se povezuje pojas i ispune rešetke [7].



Slika 7. Ilustracija priključka čija su svojstva istraživana i prikaz numeričkog modela

Numeričke analize provedene su programskom podrškom Abaqus/CAE ver. 6.10 [1] s podrutinom UMAT. Podrutinom UMAT definirano je ortotropno elastoplastično ponašanje drva s kriterijima popuštanja: Tsai-Wu i kriterijem popuštanja razvijenim iz Hillovoga kriterija popuštanja. Otvaranje pukotine u drvu zbog vlačnih napreznja okomito na vlakanca i posmičnih paralelno s vlakancima modelirano je preko kohezijskih površina. Čelični elementi modelirani su kao homogeni elastoplastični materijali, a plastično područje definirano je preko dvadeset točaka. Svrha složenih

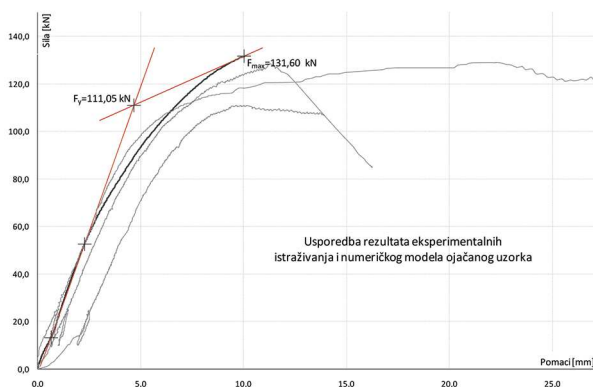
Numeričke analize uključuju geometrijsku i materijalnu nelinearnost. Za kontrolu sile primijenjena je Newton-Raphsonova metoda. Korak prirasta sile proveden je automatskom kontrolom, s time da je maksimalan korak ograničen na 0,25 t, a početni je postavljen na 0,1 t. Sila je modelirana s linearnim prirastom u jedinici vremena.

4.3 Rezultati i zaključak

Rezultati numeričkoga modela za ojačani priključak s unosom sile pod kutom od 45° u odnosu na vlakanca prikazani su u grafikonu (slika 9.). Rezultati su dani do trenutka otkazivanja uzorka zbog otvaranja pukotine uzrokovane vlačnim naprezanjima okomito na vlakanca i posmičnim paralelno s vlakancima.

Analizom rezultata dobivene su mehaničke karakteristične veličine: maksimalna sila $F_{\max} = 131,00$ kN, sila popuštanja $F_y = 123,68$ kN, krutost $K_s = 14,54$ i duktilnost $D = 2,79$.

Numeričkim modelom dobiven je oblik otkazivanja priključka uzrokovan otvaranjem pukotine u sredini uzorka zbog vlačnih naprezanja okomito na vlakanca i posmičnih naprezanja paralelno s vlakancima. Inicijalne pukotine koje su se otvorile u blizini spajala zaustavljene su, odnosno širile su se manjom brzinom zbog utjecaja tkanine koja je preuzela vlačna naprezanja. Daljnjim prirastom opterećenja iznad 90,0 kN uslijedilo je ubrzano širenje pukotine zbog interakcije posmičnih i vlačnih naprezanja.



Slika 9. Usporedba rezultata eksperimentalnih istraživanja i numeričkoga modela ojačanog uzorka

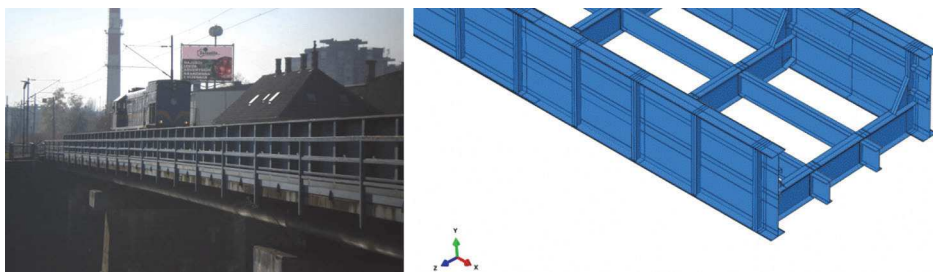
Nadalje, numeričkim modelima opisanim u prethodnim poglavljima ostvareno je vrlo dobro podudaranje s eksperimentalnim istraživanjima kao što je vidljivo iz rezultata. Ovime se može zaključiti da numerički modeli koji adekvatno obuhvaćaju oblike otkazivanja drva u određenoj mjeri mogu zamijeniti eksperimentalna istraživanja.

5 Ujednačavanje pouzdanosti kategorija detalja čeličnih konstrukcija izloženih umoru

5.1 Uvod i opis modela

U doktorskom radu [8] istraživanje obuhvaća model procjene umora vezan na nominalna naprezanja i krivulje S-N i ponajprije je usmjereno na ujednačavanje razina pouzdanosti različitih konstrukcijskih detalja budućih čeličnih konstrukcija izloženih umoru. Općenito je model procjene umora izložen nepouzdanostima na strani otpornosti i na strani djelovanja. Nepouzdanosti otpornosti analizirane su stohastičkim postupcima na postojećim podacima ispitivanja. Kao rezultat ovog dijela istraživanja nepouzdanosti na strani otpornosti kvantificirane su i svrstane u određene skupine u ovisnosti kategorija detalja. Nepouzdanosti na strani djelovanja istražene su na temelju provedenih eksperimentalnih ispitivanja i simulacija na numeričkim modelima. Kao rezultat razvijen je postupak procjene pouzdanosti postojećih čeličnih konstrukcija izloženih umoru. Konačno, s kvantificiranim nepouzdanostima na strani otpornosti i na strani djelovanja formiran je stohastički model na temelju kojega su postupkom kalibracije izračunani optimalni skupovi parcijalnih faktora otpornosti i djelovanja.

Za potrebe istraživanja odabrana je konstrukcija čeličnoga željezničkog mosta "Kupa-Karlovac". Prema statičkom sustavu most se sastoji od dva kontinuirana zavarena nosača preko 3 raspona ($32,20 + 38,42 + 32,02$), ukupno 103,56 m. Širina mosta iznosi 5,50 m. Na temelju rezultata provedenih eksperimentalnih ispitivanja na postojećoj konstrukciji mosta formiran je numerički model metodom konačnih elemenata u komercijalnom programu Abaqus verzija 6.12 [1] koji je upotrijebljen za potrebe simulacija prolaza različitih shema opterećenja. Na slici 10. prikazana je konstrukcija mosta za vrijeme ispitivanja te slika dijela numeričkoga modela.

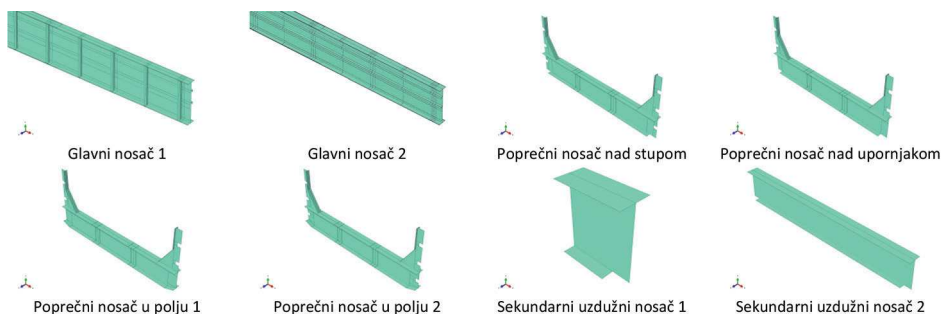


Slika 10. Konstrukcija mosta za vrijeme ispitivanja i dio numeričkog modela

5.2 Numerički model

Model mosta definiran konačnim elementima oblikovan je na temelju poznate geometrije konstrukcije. Nastojalo se obuhvatiti sve elemente konstrukcije koji direktno sudjeluju u prijenosu vertikalnoga prometnog opterećenja. Geometrija cijele konstrukcije dobivena je povezivanjem nekoliko posebno definiranih dijelova konstrukcije (slika 11.) u cjelinu, pri čemu su primijenjene master-slave veze tipa Tie.

U istraživanju je primijenjena statička analiza s koracima definiranim u ovisnosti o svakom pojedinom modelu opterećenja. Kako su u ovom dijelu istraživanja upotrijebljeni različiti modeli opterećenja od kojih je svaki karakteriziran s određenim brojem vozila, ukupno su analizirana 22 modela konstrukcije u ovisnosti o razmatranoj shemi vlaka iz modela opterećenja. Svaki se pojedini model sastoji od definirane geometrije i potprogramske ulazne datoteke "subrutine" u kojoj je definirano svako pojedino analizirano vozilo. Primjerice neki od analiziranih vlakova imali su duljinu preko 500 m, te uzevši u obzir duljinu mosta od 103 m i primijenjeni interval kretanja vozila od $\sim 0,5$ m dolazimo do broja od 1206 potrebnih koraka analize u jednom modelu.

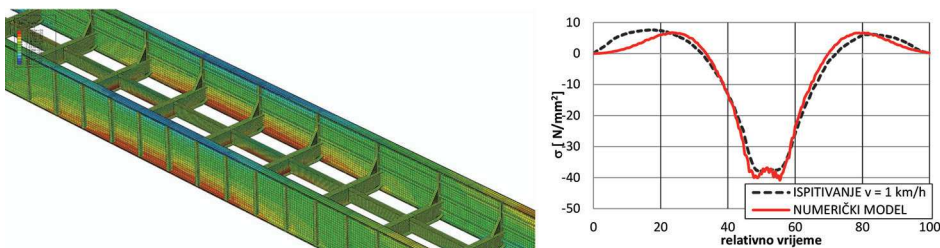


Slika 11. Dijelovi geometrije od kojih je oformljena geometrija cijele konstrukcije

Upotrijebljen je linearno elastičan materijal s modulom elastičnosti 210000 N/mm^2 i Poissonovim koeficijentom 0,3. Prema istraživanjima u [9] razmatran je utjecaj različitih tipova složenosti modela kod statičkih i dinamičkih analiza sličnih konstrukcija i zaključeno je da se uz pomoć plošnih elemenata mogu adekvatno modelirati konstrukcije za proračun umora utemeljen na nominalnim naprezanjima. Za potrebe analize konstrukcija izloženih umoru na temelju nominalnih naprezanja može se upotrijebiti jednostavna i relativno gruba mreža konačnih elemenata. Za modeliranje su upotrijebljeni linearni plošni elementi s četiri čvora reducirane integracije oznake S4R koji su rezultirali najboljim odgovorom u usporedbi s provedenim ispitivanjem. Rubni uvjeti modela definirani su prema statičkom sustavu konstrukcije mosta, a opterećenje je definirano kao statičko pomoću potprogramske ulazne datoteke "subrutine" DLOAD kojom je moguće definirati različite tipove opterećenja.

5.3 Rezultati i zaključak

Na temelju provedenih analiza iz svakoga od analiziranih modela može se u bilo kojemu konačnom elementu očitati dijagram naprezanje-vrijeme. Na slici 12. može se vidjeti grafički prikaz naprezanja u modelu konstrukcije za jedan korak analize i usporedba rezultata mjerenja i numeričkoga modela za prolaz lokomotive HŽ 2062 u kanalu CH_1 odnosno konačnom elementu 28392.



Slika 12. Naprezanja u konstrukciji za jedan korak analize i usporedba rezultata ispitivanja i numeričkoga modela

Kako je već spomenuto, analize su provedene za različite modele opterećenja. Prvo su provedene analize na temelju modela opterećenja formiranoga na realnom prometu. Na temelju ovih analiza oblikovan je stohastički model opterećenja za potencijalno kritična mjesta u konstrukciji koja nisu obuhvaćena ispitivanjem. Rezultati dobiveni na temelju ove faze istraživanja upotrebljavaju se za procjenu pouzdanosti postojećih konstrukcija. U drugoj su fazi provedene analize na temelju modela opterećenja definiranih u europskoj normi EN 1991-2 [10]. Cilj je ovih analiza oblikovanje stohastičkoga modela u različitim detaljima u konstrukciji. Zajedno s dobivenim rezultatima na temelju realnoga prometa podaci su upotrijebljeni za ujednačavanje razina pouzdanosti.

Oblikovani stohastički model na strani djelovanja sastoji se od baznih varijabli nepouzdanosti modela mjerenja opterećenja, nepouzdanosti numeričkog amodela i nepouzdanosti opterećenja u razmatranom detalju konstrukcije. Ako se usporede rezultati dobiveni ispitivanjem i numeričkim modelom, uočena su određena odstupanja. Ova odstupanja proizlaze iz činjenice da numerički model ne obuhvaća dinamičke učinke te činjenice da primijenjene sheme u numeričkim simulacijama potpuno ne opisuju stvarno opterećenje vlaka za koji je izvršeno ispitivanje. Međutim, ovi su nedostaci kod proračuna ekvivalentnih naponskih razlika uzeti u obzir dinamičkim faktorima te u probabilističkim analizama pomoću faktora nepouzdanosti numeričkoga modela.

6 Zaključak

U radu je dan kratak osvrt na četiri doktorska rada izrađena na doktorskom studiju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Nastojalo se ukratko opisati problem pojedinog znanstvenog istraživanja i numeričke metode koje su upotrijebljene pri njegovu rješavanju. Naglasak je dan na numeričko modeliranje i mogućnosti koje ono pruža kao pomoćni alat pri istraživanju. U sklopu istraživanja predstavljen je programski paket Simulia Abaqus koji je utemeljen na metodi konačnih elemenata i jedan je od najzastupljenijih i najsofisticiranijih programskih paketa opće namjene koji se primjenjuju u znanstvenim istraživanjima. Iako je u radu težište bilo na konstrukcijama ili dijelovima konstrukcije, primjena numeričkog modeliranja široko je zastupljena i u svim ostalim područjima građevinarstva i cijele tehničke struke.

Literatura

- [1] Abaqus v.6.7-6.12.: Analysis Users Manual & Theory Manual, Dassault Systemes Simulia Corp.
- [2] Uroš, M.: Utjecaj složenog izbočenja na poslijekritično ponašanje rešetkastih kupola, Doktorski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2013.
- [3] Gioncu, V.: Buckling of reticulated shells: state-of-art, *International Journal of Space Structures*, 10 (1995) 1, pp. 1–46.
- [4] SAP2000 v.15.1.: Analysis reference manual, Computers and Structures Inc., 2005. Berkeley, California, 2005.
- [5] Girão Coelho, A.M., da Silva, L.S., Bijlaard, F.S.K.: Finite-Element Modeling of the Nonlinear Behavior of Bolted T-Stub Connections, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, pp. 918-928, June 2006.
- [6] Skejić, D.: Procjena pouzdanosti priključaka nosač-stup izvedenih kutnicima, Doktorski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [7] Pavković, K.: Složeni priključak drvenih rešetkastih nosača, Doktorski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2013.
- [8] Lukačević, I.: Ujednačavanje pouzdanosti kategorija detalja čeličnih konstrukcija izložениh umoru, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Doktorski rad, Zagreb, 2014.
- [9] Lukić, M. et al: Bridge fatigue guidance-meeting sustainable design and assessment, Final report, European Commission, Research Fund for Coal and Steel, Luxembourg, 2013.
- [10] European Committee for Standardization (CEN), EN 1991-2: 2003, Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges, Final draft, Brussels, 2003.