

Primljen / Received: 10.8.2018.

Ispravljen / Corrected: 27.10.2018.

Prihvaćen / Accepted: 18.12.2018.

Dostupno online / Available online: 10.3.2019.

Analiza ponašanja čvornog spoja montažne čelične kupole

Autori:



¹Izv.prof.dr.sc. **Davor Skejić**
davors@grad.hr



²**Anamarija Alagušić**, mag.ing.aedif.
anamarija.alagusic@gmail.com



³**Gabrijela Hrg**, mag.ing.aedif.
hrggabrijela@gmail.com



⁴**Marija Lokin**, mag.ing.aedif.
marija.lokin7@gmail.com



¹Izv.prof.dr.sc. **Domagoj Damjanović**
ddomagoj@grad.hr

¹Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

²Intrados projekt d.o.o.

³Institut IGH d.d.

⁴Struktura-Projekt d.o.o.

Prethodno priopćenje

Davor Skejić, Anamarija Alagušić, Gabrijela Hrg, Marija Lokin, Domagoj Damjanović

Analiza ponašanja čvornog spoja montažne čelične kupole

U radu je karakterizirano ponašanje čvora čelične geodetske kupole koji je optimalan s aspekta montaže. Riječ je o spoju na preklop s jednim vijkom, gdje su cijevni elementi spljošteni i dodatno savinuti da se dobije tražena konfiguracija kupole. Rezultati dobiveni originalnim laboratorijskim ispitivanjem i numeričkim analizama uspoređeni su s analitičkim vrijednostima određenim preko pojednostavljenih izraza za proračun otpornosti kritičnog presjeka, odnosno mjerodavnog načina otkazivanja. Predloženo je konstrukcijsko rješenje s ciljem poboljšanja ponašanja navedenog spoja kupole i optimizacije konstrukcije u cijelosti.

Ključne riječi:

geodetska kupola, čelik, vijčani čvorni spoj, laboratorijska ispitivanja, numerička analiza, optimizacija

Preliminary note

Davor Skejić, Anamarija Alagušić, Gabrijela Hrg, Marija Lokin, Domagoj Damjanović

Analysis of prefabricated steel dome nodal connection behaviour

The behaviour of a steel geodesic dome node, optimised from the aspect of its assembly, is characterized in the paper. It is an overlap connection with one bolt, where tubular members are flattened and additionally bent to obtain the required dome configuration. Results obtained by means of original laboratory testing and numerical analyses are compared with analytic values determined via simplified expressions for calculation of cross sectional resistance, i.e. govern failure mode. A structural solution is recommended in order to improve this dome connection behaviour and optimise the structure as a whole.

Key words:

geodesic dome, steel, bolted nodal connection, laboratory testing, numerical analysis, optimisation

Vorherige Mitteilung

Davor Skejić, Anamarija Alagušić, Gabrijela Hrg, Marija Lokin, Domagoj Damjanović

Analyse des Verhaltens der Knotenverbindung bei vorgefertigten Stahlkuppeln

In der Abhandlung wird das Verhalten der Knoten geodätischer Stahlkuppeln gekennzeichnet, das vom Aspekt der Montage optimal ist. Hierbei handelt es sich um eine Verbindung an der Überlappung mit einer Schraube, wo die Rohrelemente abgeflacht und zusätzlich gebogen sind, um die geforderte Konfiguration der Kuppel zu erreichen. Die durch die ursprünglichen Laboruntersuchungen und numerischen Analysen erhaltenen Ergebnisse wurden mit den analytischen Werten verglichen, die über die vereinfachten Modelle für die Berechnung des kritischen Querschnittswiderstandes beziehungsweise durch relevante Aufhebungsarten ermittelt wurden. Vorgeschlagen wird eine Konstruktionslösung mit dem Ziel, das Verhalten der besagten Kuppelverbindung zu verbessern sowie die Konstruktion im Ganzen zu optimieren.

Schlüsselwörter:

geodätische Kuppel, Stahl, geschraubte Knotenverbindung, Laboruntersuchungen, numerische Analyse, Optimierung

1. Uvod

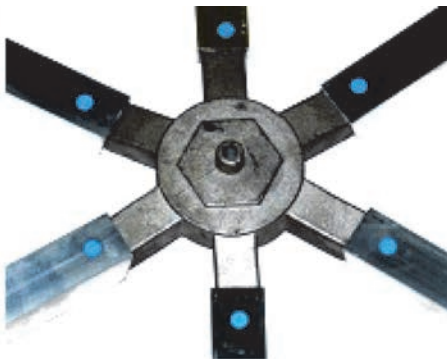
1.1. Općenito o geodetskim kupolama

Iako je prvu kupolu koja se može nazvati geodetskom konstruirao Walther Bauersfeld, pravim ocem te vrste kupola se smatra Buckminster Fuller. Povijest geodetskih kupola seže u vrijeme Drugog svjetskog rata, kada su one korištene za skladišta te u vojne svrhe, no najviše su došle do izražaja nakon što je Fuller projektirao kupolu za izložbu Expo 1967. godine u Montrealu. Geodetska sfera je konstrukcija po čijoj su površini razmješteni poligoni tako da oni približno odgovaraju stvarnoj sferi, dok je geodetska kupola dio geodetske sfere [1]. Oblikovanje kupole počinje s ikosaedrom (koji se sastoji od 20 jednakih trostraničnih trokuta) upisanim u hipotetičnu sferu. Svaki trokutasti dio ikosaedra je podijeljen u n^2 sličnih trokutastih elemenata, gdje je n izabrani stupanj podjele, koji se također naziva frekvencijom. Postoje dvofrekventne, trofrequentne i višefrekventne kupole, a sam broj frekvencija povećava stabilnost kupole. Geodetske kupole svojom stabilnošću, ali i estetikom danas sve više konkuriraju drugim vrstama građevina koje su raširenije u svijetu. Od pedesetih godina prošlog stoljeća svoju primjenu nalaze u kulturnim (slike 1. i 2.), stambenim i sportskim objektima [2].



Slika 1. Geodetska kupola [4]

U pogledu unutarnjeg prostora, geodetske kupole zatvaraju najveći volumen prostora koristeći najmanju količinu materijala [3]. Zauzvrat, vrlo su lagane s obzirom na količinu materijala



Slika 3. Neka rješenja čvorova čeličnih geodetskih kupola [5]

koju njihova izgradnja zahtijeva, a sama geometrija kupole pruža konstrukciji veliku stabilnost [1]. Također, posjeduju znatnu otpornost na djelovanja vjetera i snijega što ih čini prikladnim konstrukcijama za različite klimatske uvjete. Prednost montažnih čeličnih kupola je u tome što su lagane i brzo se montiraju, te ne zahtijevaju dodatnu opremu i pridržanja prilikom montaže.



Slika 2. Biosphere, Montreal [1]

1.2. Problematika čvora kupole

Postoji nekoliko mogućih rješenja čvorova čeličnih geodetskih kupola, a neki od njih prikazani su na slici 3. Kao predmet istraživanja u ovom radu odabrano je rješenje čvora kupole koje je optimalno s aspekta montaže. Taj je čvor oblikovan kao spoj na preklop sastavljen od 5 do 6 štapnih elemenata (cijevi) sa spljoštenim krajevima koji su savinuti i međusobno spojeni jednim vijkom, slika 3.a). Nedostatak ovakvog rješenja čvora je pojava učinaka drugog reda u blizini spoja, uslijed savinutosti krajeva i ekscentriciteta sile. Posljedica toga je značajno reducirana otpornost spoja u odnosu na otpornosti pojedinih elemenata. S ciljem ujednačavanja pouzdanosti konstrukcije kupole, detaljno je analizirano ponašanje jednog elementa u čvoru pri vlačnom i tlačnom opterećenju. Za određivanje otpornosti spoja primijenjena su tri pristupa, odnosno metodologije istraživanja - analitička, eksperimentalna i numerička [2].

2. Analitička procjena otpornosti čvornog spoja na preklap

2.1. Uvod

Montažne geodetske kupole su relativno novi konstrukcijski sustavi i još uvijek ne postoji opsežna literatura o njihovom proračunu. Rješenja iz prakse najčešće su nastala s aspekta jednostavne montaže i često nisu dovoljno istražena. Montažne kupole se uglavnom koriste kao privremene konstrukcije pa postoji potreba za jednostavnim i brzim, ali dovoljno pouzdanim proračunom kojim bi se mogla procijeniti njihova otpornost. Osim uzdužne sile, u štapnom se elementu, zbog dodatnog savijanja spljoštenog dijela cijevi, u blizini spoja javljaju momenti savijanja, koji nastaje kao posljedica ekscentriciteta, tablica 1. Osim o smjeru opterećenja (vlak ili tlak), iznos ekscentriciteta sile ovisi i o konfiguraciji spoja. Budući da su u ovom slučaju moguća dva karakteristična slučaja spajanja elemenata u čvoru, analizirane su otpornosti spoja za četiri slučaja. U tablici 1. prikazane su skice svih slučajeva s označenim mjestima formiranja linija tečenja na kojima je potrebno izmjeriti veličinu ekscentriciteta.

2.2. Analitički proračun otpornosti

Općenito, posmični vijčani spojevi mogu otkazati na nekoliko karakterističnih načina: popuštanje bruto presjeka elementa, lom neto presjeka elementa, otpornost vijka na posmik te otpornost elementa na pritisak po omotaču rupe za vijak. Analizom ovog specifičnog tipa i konfiguracije spoja utvrđeno je da vlačni elementi otkazuju pritiskom po omotaču rupe za vijak, a tlačni elementi otkazuju savijanjem spljoštenog dijela cijevi, tj. formiranjem plastičnog mehanizma. Budući da se ekscentricitet kod vlačno opterećenog elementa smanjuje prilikom povećanja djelovanja, mjerodavni način otkazivanja postaje pritisak po omotaču rupe za vijak na spljoštenom dijelu cijevi, F_b . Prema HRN EN 1993-1-8 [6], F_b se može izračunati kao:

$$F_b = k_1 \cdot a_b \cdot f_u \cdot d \cdot t \quad (1)$$

gdje je:

k_1 - koeficijent redukcije okomito na smjer djelovanja (vidi tablicu 3.4 [6])

Tablica 1. Ekscentriciteti ovisno o smjeru sile i položaju elementa u čvornom spoju

Vlak (T1)	Tlak (C1)
Vlak (T2)	Tlak (C2)

Oznake na skicama predstavljaju sljedeće:
 L - duljina spljoštenog dijela cijevnog elementa, a - duljina preklopa u spoju, α - kut nagiba spljoštenog dijela cijevi, h_w - promjer glave vijka, t - debljina stijenke cijevnog elementa, e - ekscentricitet

- a_b - koeficijent redukcije paralelno sa smjerom djelovanja (vidi tablicu 3.4 [6])
- f_u - čvrstoća čelika
- d - promjer vijka
- t - debljina elementa na mjestu rupe za vijak.

Ponašanje tlačno opterećenog elementa je sasvim drugačije. Za razliku od vlačno opterećenog elementa, u ovom slučaju ekscentricitet se povećava s povećanjem djelovanja te mjerodavni način otkazivanja postaje savijanje savinutog spljoštenog dijela cijevi. Dakle, formira se mehanizam popuštanja između početka spljoštenog dijela cijevi i centra rotacije oko susjednih elemenata u čvoru, tablica 1., slučajevi (C1) i (C2). U praksi se koristi pojednostavljeni analitički

izraz za proračun otpornosti kritičnog presjeka spljoštenog i savinutog dijela tlačno opterećene cijevi.

Sređivanjem općeg interakcijskog izraza za otpornost poprečnog presjeka na uzdužnu silu i moment savijanja (koji proizlazi iz ekscentriciteta), prema HRN EN 1993-1-1 [7] dobije se uzdužna otpornost koja uzima u obzir učinak ekscentriciteta:

$$N'' = \frac{1}{1/A + e/W_{pl}} \cdot f_y \tag{2}$$

gdje je:

- A - površina spljoštenog poprečnog presjeka cijevi,
- W_{pl} - plastični moment otpora spljoštenog dijela cijevi,
- e - ekscentricitet, tablica 1., slučajevi (C1) i (C2),
- f_y - granica popuštanja čelika.

Navedeni, u praksi davno provjereni, analitički izrazi daju pouzdane vrijednosti otpornosti na strani veće sigurnosti. Međutim, tako dobivene otpornosti čvornog spoja su višestruko manje u odnosu na otpornost na izvijanje konstrukcijskog elementa koji se spaja [2]. Nameće se pitanje je li posrijedi konzervativni pristup ili pak rješenje čvora koji može izdržati značajno manje sile od samog elementa koji se spaja. Upravo ova preliminarna analitička razmatranja bila su motivacija za provedbu laboratorijskih ispitivanja i naknadnih numeričkih simulacija ponašanja ovog karakterističnog spoja [2].

3. Laboratorijska ispitivanja čvornog spoja kupole

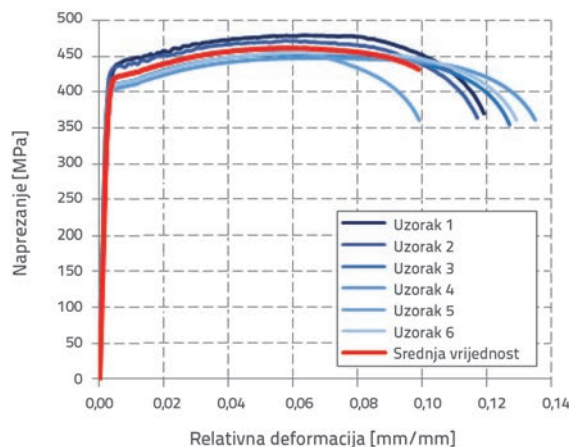
3.1. Opseg i ciljevi laboratorijskog ispitivanja

Laboratorijska ispitivanja ponašanja vijčanog čvornog spoja provedena su u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Zbog složenosti ispitivanja stvarne konfiguracije čvora, ispitana je pojednostavljena verzija s jednim elementom i debelom čeličnom pločom, koja predstavlja ostale elemente u spoju. Ta pojednostavljena konfiguracija je odabrana da bi se isprovociralo otkazivanje kritičnog spljoštenog i dodatno savinutog dijela cijevnog elementa uz spoj. Uzorci za ispitivanje svrstani su u dvije grupe ovisno o opterećenju, tj. grupa T (engl. *Tension* - vlak) i grupa C (engl. *Compression* - tlak). Svaka grupa imala je po 3 uzorka, tako da je ukupno ispitano 6 uzoraka.

3.2. Geometrijska i mehanička svojstva cijevnih uzoraka

Svi uzorci sastoje se od kružnog cijevnog elementa 42,4 x 2,0 mm koji se vijčano pričvršćuje na čeličnu ploču debljine 20 mm. Srednja izmjerena vrijednost debljine stijenke cijevi je 1,9 mm. U svrhu utvrđivanja stvarnih mehaničkih svojstava ugrađenog materijala, prije samog ispitivanja cijevnih uzoraka provedeno je

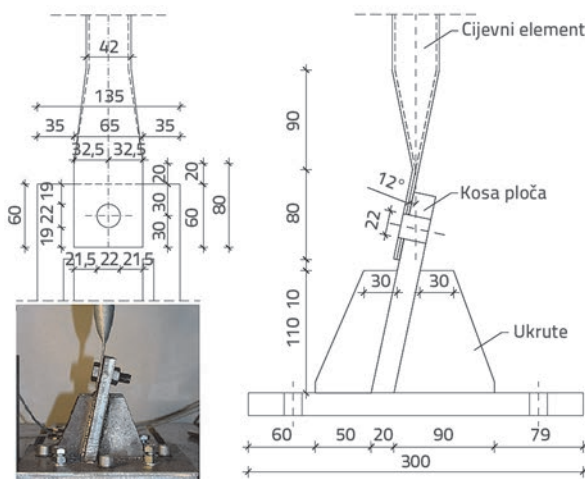
vlačno ispitivanje materijala prema normi HRN EN ISO 6892-1 [8]. Ispitano je 6 uzoraka, a dobiveni dijagrami naprezanje – deformacija su prikazani na slici 4. Iako je nominalna kvaliteta čelika trebala biti S235, ispitivanjem mehaničkih svojstava uzoraka utvrđeno je da se radi o čeliku veće čvrstoće i granice popuštanja. Uočeno povećanje svojstava čvrstoće materijala, kao i karakterističan oblik dijagrama, može se povezati s načinom proizvodnje hladno dogotovljenih cijevnih elemenata. Obradom eksperimentalnih rezultata dobivena je srednja vrijednost granice popuštanja od 417 MPa i čvrstoće od 461 MPa. Za modul elastičnosti usvojena je nominalna vrijednost od 210000 MPa.



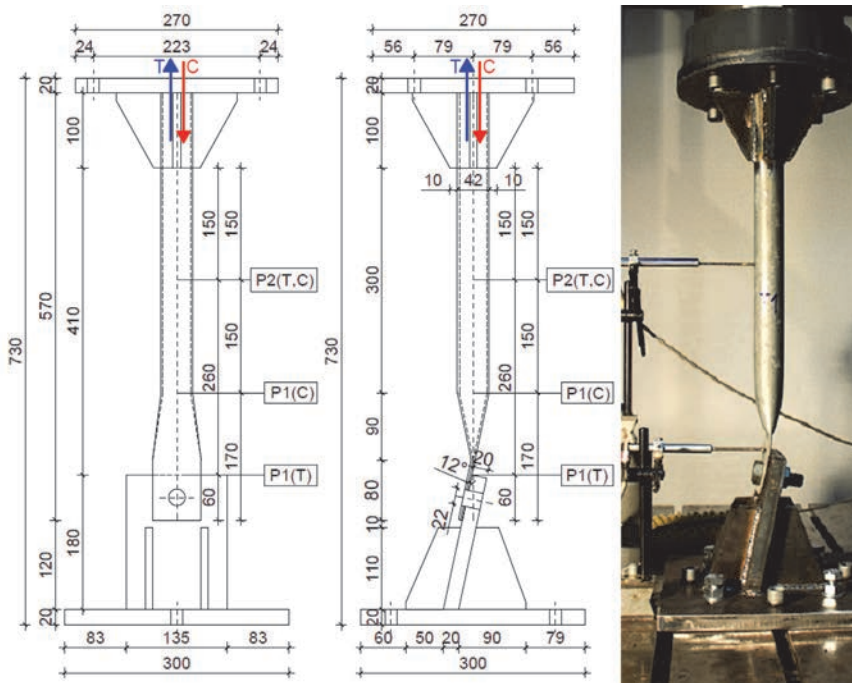
Slika 4. Inženjerski σ - ϵ dijagrami ispitanih čeličnih uzoraka

3.3. Provedba ispitivanja

Cijevni element na jednom je kraju spljošten te savinut pod kutom od 12°. Ploča je postavljena pod jednakim kutom, ukrućena s po dvije trapezne ukrute na svakoj strani, slika 5. Uzorak cijevi na drugom je kraju ukrućen također trapeznim ukrutama koje su okomite jedna na drugu, slika 6.



Slika 5. Detalj spoja cijevi na oslonac (simulacija čvornog spoja)



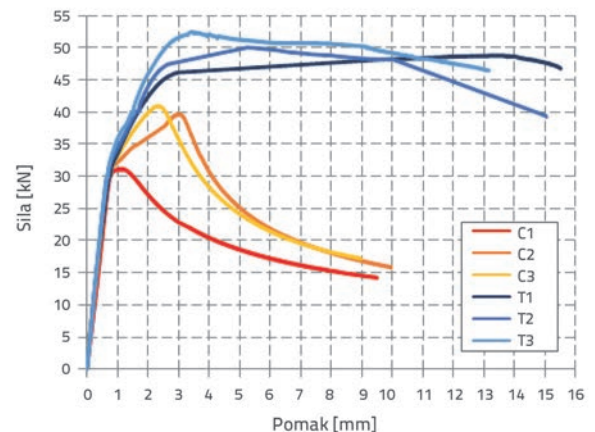
Slika 6. Položaj mjernih mjesta za ispitivanje uzoraka

Ispitivanje je provedeno na Zwick&Roell statičkom uređaju za ispitivanje kapaciteta ± 600 kN. Uzorci su najprije ispitani na vlačnu (T1, T2 i T3), a potom na tlačnu silu (C1, C2 i C3). Opterećenje je uneseno preko statičke preše prema slikama 5. i 6., a ispitivanja su provedena uz kontrolu pomaka s brzinom od 0,5 mm/min u elastičnom području. Brzina je nakon ulaska u područje plastifikacije povećana na vrijednost od 2 mm/min do otkazivanja uzorka. Horizontalni pomaci su mjereni LVDT induktivnim uređajima, slika 6. Kod vlačnih uzoraka LVDT-ovi su postavljeni 60 mm mjereno od donjeg ruba cijevnog elementa, oznaka P1(T) te 150 mm mjereno od ruba gornjih ukruta P2. Nakon ispitivanja vlačnih uzoraka ispitani su tlačni uzorci C1, C2 i C3. Nakon ispitivanja prvog tlačnog uzorka, mjerni uređaj na mjestu P1(C) se pomiče iznad vijka na udaljenost 150 mm od P2, tj. 170 mm od donjeg ruba cijevi, slika 6.

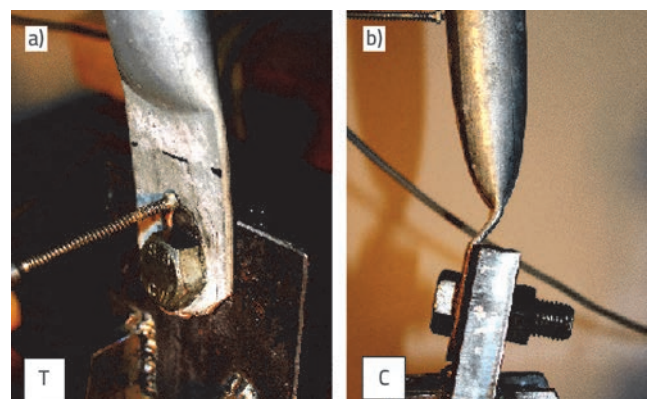
3.4. Rezultati ispitivanja i ponašanje uzoraka

Kao rezultati ispitivanja dobiveni su dijagrami odnosa sila i pomaka na mjernim mjestima P1 i P2 te dijagrami koji pokazuju odnos sile i pomaka traverze preše. Na slici 7. prikazani su dijagrami sila - pomak preše za sve ispitane uzorke. Za razliku od vlačnih (T), tlačni uzorci (C) pokazuju značajnije razlike u ponašanju. Uočene razlike, posebice odstupanje kod uzorka C1, nastaju zbog početnih razlika u geometriji prilikom izrade savinutog završetka cijevi i kod montaže uzoraka. Ako općenito sagledamo pomake preše i maksimalne sile vlačnih i tlačnih uzoraka, može se zaključiti da uzorci mogu preuzeti oko 10 kN veće sile kada su opterećeni na vlak. Međutim, pomaci preše kod vlačno opterećenih uzoraka su i dvostruko veći.

Laboratorijskim ispitivanjem je utvrđen i način otkazivanja uzoraka. Pod opterećenjem vlačnom silom cijevni element se izravna tako da se savinuti dio ravna i dolazi u položaj osi elementa. Uz to, zbog vlačnog djelovanja koje se nanosi prešom na gornjoj strani uzorka, uzorak se izvlači prema gore i pritišće vijak, te na njegovom rubu dolazi do loma, slika 8.a. Dakle, način krajnjeg otkazivanja vlačnih uzoraka je pritisak po omotaču rupe za vijak jer zbog izravnavanja uzorka tijekom opterećivanja utjecaj ekscentriciteta iščezava. Kod tlačnih uzoraka dolazi do savijanja spljoštenog dijela cijevnog elementa preko donje kose ploče kojom se simulira druge štapove u čvoru kupole, slika 8.b. Savijanje napreduje formiranjem dviju linija tečenja, odnosno plastičnog mehanizma u trenutku otkazivanja uzorka. Dakle, tlačni uzorci otkazuju savijanjem uslijed početnog ekscentriciteta spljoštenog dijela cijevnog elementa koja se kontinuirano povećava i time ubrzava formiranje plastičnog mehanizma.



Slika 7. Dijagram sila - pomak preše za tlačne i vlačne uzorke



Slika 8. Načini otkazivanja: a) vlačni (T) uzorak; b) tlačni (C) uzorak

3.5. Karakterizacija ponašanja uzoraka

Iz prethodno prikazanih dijagrama "sila - pomak" preše (slika 7.) određena je početna krutost, otpornost, krajnja otpornost te pomaci koji odgovaraju pojedinim otpornostima. Srednje vrijednosti mehaničkih karakteristika vlačnih i tlačnih uzoraka prikazane su u tablici 2., a sam postupak karakterizacije eksperimentalnih krivulja detaljno je objašnjen u [2].

Tablica 2. Rezultati karakterizacije eksperimentalnih krivulja sila - pomak (srednje vrijednosti) [2]

Uzorak	S_{ini} [kN/m]	N_R [kN]	u_R [mm]	N_u [kN]	u_{Nu} [mm]	u_u [mm]
Vlak (T)	47217	46,0	1,04	50,4	7,37	14,8
Tlak (C)	45013	32,6	0,75	37,3	2,17	9,48


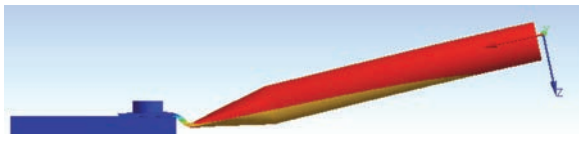
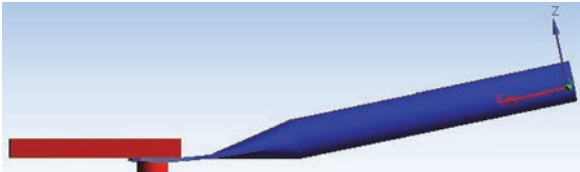

U tablici 2. S_{ini} je početna krutost, N_R je otpornost dobivena kao sjecište sekante elastičnog područja i post-kritičnog područja do krajnje otpornosti, a u_R pomak koji odgovara otpornosti N_R . N_u predstavlja krajnju otpornost, a u_{Nu} pripadni pomak, dok je u_u krajnji pomak pri lomu.

4. Numerička simulacija ponašanja spoja kupole

4.1. Općenito

U ovom poglavlju prikazana je numerička simulacija ponašanja čvornog spoja kupole pri tlačnom i vlačnom opterećenju. Spoj kupole je modeliran uz pomoć metode konačnih elemenata u programskom paketu ANSYS 15.0 [9]. Numeričko modeliranje ovog problema je složeno, jer zahtijeva usvajanje odgovarajuće geometrije spoja, svojstava materijala, uvjeta oslanjanja, kontakata i uvjeta opterećivanja. U analizi su također uzeti u obzir učinci drugog reda, plastičnost materijala, te jednosmjerni kontaktni rubni uvjeti.

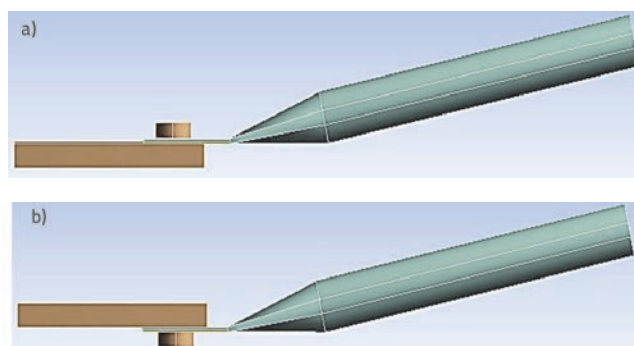
Tablica 3. Deformirani oblici analiziranih 3D modela konačnih elemenata

Konfiguracija 1	
FEM_T1	FEM_C1
	
Konfiguracija 2	
FEM_T2	FEM_C2
	

Stvarno ponašanje materijala cijevi simulirano je izotropnim multilinearnim modelom koji je dobiven na temelju rezultata vlačnih ispitivanja (slika 4.). Numerički model je kalibriran i vrednovan preko usporedbe s rezultatima provedenih laboratorijskih ispitivanja.

4.2. Opis modela konačnih elemenata

Za simulaciju F-Δ ponašanja uzoraka u vlak u i u tlaku korišteni su trodimenzionalni modeli konačnih elemenata (FE modeli). Korišteni su volumni elementi u obliku tetraedra s 10 čvorova - SOLID187 [9]. Provedene su detaljne parametarske analize kako bi se kalibrirao FE model koji može učinkovito simulirati F-Δ odgovor spoja cijevnih elemenata kupole u vlak u i u tlaku u usporedbi s laboratorijskim ispitivanjima.



Slika 9. Analizirane konfiguracije spoja

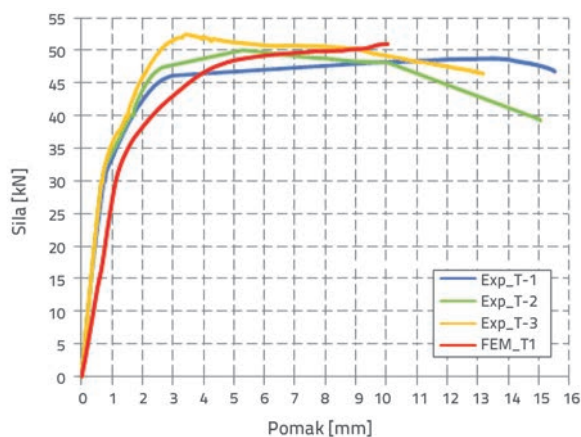
Natemeđu laboratorijskih ispitivanja kalibrirana su dva numerička modela ovisno o smjeru opterećenja (vlak ili tlak). Budući da je u laboratoriju ispitana ista geometrijska konfiguracija za vlak i tlak, druga konfiguracija spoja analizirana je s dodatna dva numerička modela ovisno o smjeru opterećenja, slika 9. Prva konfiguracija modelirana je s potpuno jednakim rasporedom elemenata kakav je bio kod laboratorijskog ispitivanja, slika 9.a). U slučaju druge

konfiguracije cijevni element spojen je s druge strane čvrne ploče, slika 9.b). Analizirana su ukupno četiri različita modela, a svaki se sastoji od cijevnog elementa, spojne čelične ploče i vijka M 20. Cilj numeričke analize različitih modela je uvidjeti koliki je utjecaj ekscentriciteta sile na otpornost promatranog spoja.

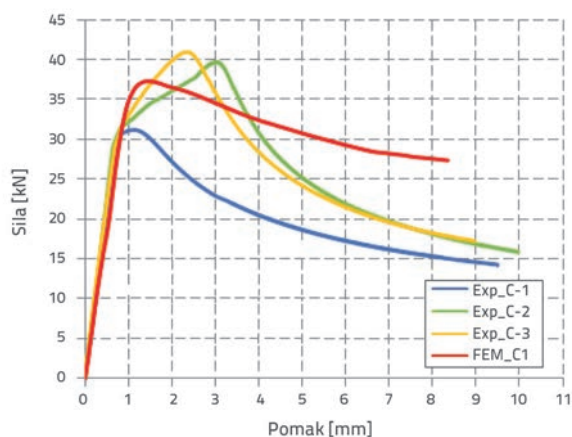
U tablici 3. prikazani su deformirani modeli nakon provedenih simulacija. Obje konfiguracije ispitane su na vlačno (FEM_T1 i FEM_T2) i tlačno opterećenje (FEM_C1 i FEM_C2). Može se zaključiti da vlačni uzorci otkazuju pritiskom po omotaču rupe, a tlačni savijanjem spljoštenog dijela cijevi, što je analogno laboratorijskim zapažanjima.

4.3. Numerički rezultati i rasprava

Kao rezultat numeričkih analiza dobivene su krivulje odnosa sile i pomaka (F- Δ krivulja), koje opisuju ukupno ponašanje razmatranih modela pri djelovanju vlačnih i tlačnih uzdužnih sila. Usporedbe rezultata numeričkih simulacija spoja konfiguracije 1 s rezultatima laboratorijskog ispitivanja prikazane su odvojeno za vlačno i tlačno opterećenje na slikama 10. i 11.



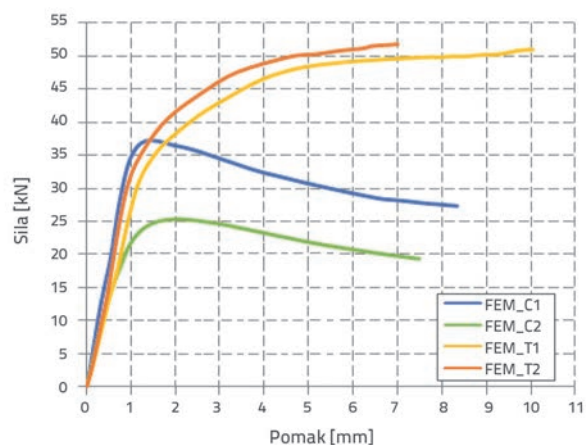
Slika 10. Usporedba numeričkih (FEM) i laboratorijskih (Exp) F- Δ krivulja za vlačno (T) opterećenje spoja konfiguracije 1



Slika 11. Usporedba numeričkih (FEM) i laboratorijskih (Exp) F- Δ krivulja za tlačno (C) opterećenje spoja konfiguracije 1

Rezultati dobiveni numeričkim simulacijama dobro se poklapaju s eksperimentalnim. Kod vlačnog opterećenja spoja, numerička simulacija daje nešto mekši odgovor u odnosu na laboratorijska ispitivanja, slika 10. Ovaj problem može se objasniti različitim položajem vijka i utjecajem trenja, što je u numeričkim simulacijama maksimalno pojednostavljeno. Naime, pretpostavljen je početni kontakt između elemenata i vijka, a utjecaj trenja je zanemaren. Kao što se vidi na slici 11., numerički rezultati za tlačno opterećeni spoj se u elastičnom području izuzetno dobro poklapaju s eksperimentalnim, i to za sva tri uzorka. U postkritičnom području dolazi do velikih razilaženja rezultata, ali to za potrebe karakterizacije ponašanja spoja nije presudno.

Na slici 12. uspoređeni su numerički rezultati dobiveni simulacijom sva četiri modela s obzirom na konfiguraciju, odnosno raspored elemenata u spoju, i smjer opterećenja.



Slika 12. Usporedba numeričkih (FEM) simulacija ponašanja svih analiziranih modela

Na temelju rezultata dobivenih numeričkim simulacijama utvrđeno je da je za otpornost čvornog spoja mjerodavno otkazivanje tlačnog elementa savijanjem spljoštenog dijela cijevi i to za drugu konfiguraciju spajanja, tablica 3. (FEM_C2). Razlog tome je najveći ekscentricitet uzdužne sile koja uzrokuje pojavu najvećih momenata savijanja te značajnu redukciju nosivosti tlačno opterećenog elementa u spoju.

5. Razmatranje rezultata i prijedlog novog rješenja

5.1. Usporedba otpornosti

Otpornosti razmatranog vijčanog čvornog spoja za svaki od četiri analizirana slučaja (dvije konfiguracije i dva smjera opterećenja) dobivene su analitičkom, eksperimentalnom i numeričkom metodom. Te vrijednosti su ukratko prikazane u tablici 4. Napominje se da su analitičke otpornosti izračunane sa srednjim vrijednostima izmjerenih geometrijskih i mehaničkih svojstava, vidi točku 3.2.

Tablica 4. Ukratko izložene otpornosti čvornog spoja kupole

Metoda	Vlak [kN]		Tlak [kN]	
Analitička (AN)	AN_T1	AN_T2	AN_C1	AN_C2
	42,0	42,0	29,3	14,9
Eksperimentalna (Exp)	Exp_T1	-	Exp_C1	-
	46,0	-	32,6	-
	AN/Exp [%]			
	8,0	-	10,0	-
Numerička (FEM)	FEM_T1	FEM_T2	FEM_C1	FEM_C2
	47,0	47,5	35,9	21,4
	AN/FEM [%]			
	12,0	11,6	18,4	30,4

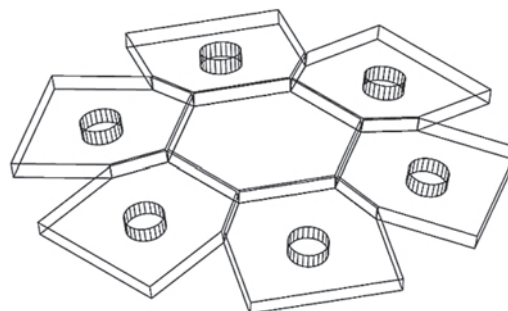
Očekivano, eksperimentalne i numeričke vrijednosti otpornosti analiziranog spoja su veće od onih utvrđenih prema analitičkim izrazima. Kod vlačno opterećenog elementa odstupanja nisu značajna te možemo primijetiti veliku podudarnost u otpornostima određenima pomoću sve tri metode. Prilikom eksperimentalne i numeričke analize ponašanja spoja primijećeno je da se vlačni element izravna, što znači da se smanjuje utjecaj ekscentriciteta i učinaka drugog reda. Na temelju tih opažanja predlaže se zanemarivanje utjecaja djelovanja momenta savijanja u analitičkom izrazu te proračun otpornosti samo na djelovanje uzdužne sile. Na taj način značajno se povećava otpornost vlačno opterećenog spoja pa je mjerodavni način otkazivanja pritiskom po omotaču rupe za vijak. S obzirom na to, za vlačne elemente kod obje konfiguracije spajanja otpornosti su na pritisak po omotaču rupe za vijak određene izrazom (1). S druge strane, tlačno opterećeni element se dodatno savija čime se povećava ekscentricitet, odnosno dodatni moment savijanja, i savijanje spljoštenog dijela cijevi nastupa brže. Analitički izraz daje zadovoljavajuće vrijednosti otpornosti za tlačno opterećene elemente, ali je potrebno odrediti pripadne vrijednosti početnih ekscentriciteta s obzirom na konfiguraciju spoja, odnosno mjesto spajanja elementa u čvoru. Odstupanja analitičkih rezultata od onih dobivenih eksperimentalnom metodom (8 % za vlačni i 10 % za tlačni element) nešto su manja u odnosu na odstupanja od numerički dobivenih otpornosti. Međutim, najveće odstupanje javlja se kod tlačnog elementa u drugoj konfiguraciji spajanja i iznosi čak 30,4 %.

5.2. Prijedlog novog rješenja čvornog spoja

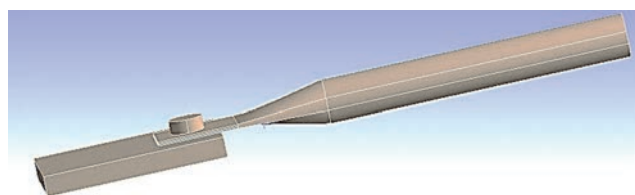
5.2.1. Nova konfiguracija spoja

Na temelju provedenih analiza predloženo je novo rješenje oblikovanja čvora, spajanjem ravnih (nesavinutih) spljoštenih dijelova cijevi na posebno oblikovani prostorno zakrivljen

čelični lim, slika 13. Na taj bi se način poništio nepovoljni utjecaj ekscentriciteta i učinaka drugog reda. Kako bi se dokazala učinkovitost takvog rješenja, ne razmatrajući pri tome nešto kompliciraniju izradu, napravljeni su dodatni numerički modeli, slika 14., te je na temelju rezultata te analize izvršena karakterizacija njihovog ponašanja.



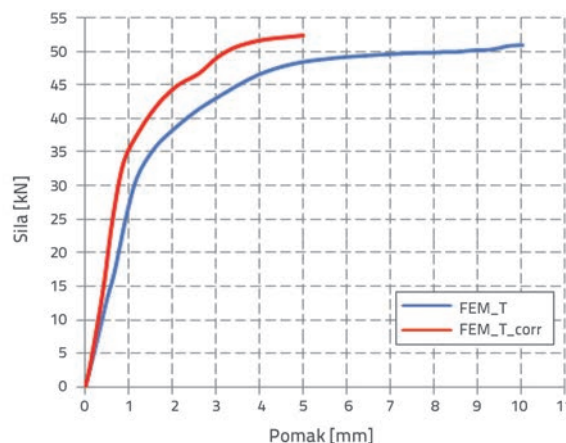
Slika 13. Načelni prijedlog rješenja čvornog lima



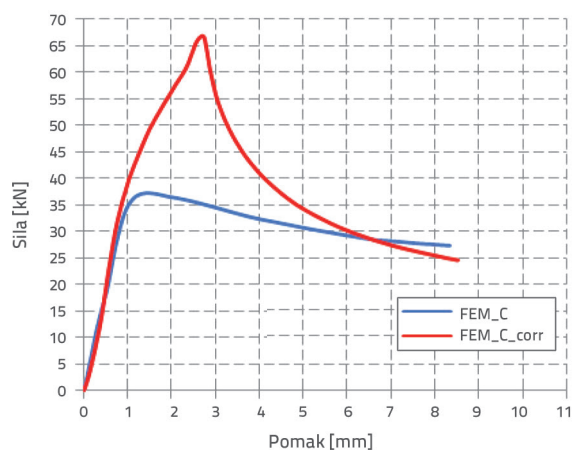
Slika 14. Numerički model novog rješenja čvornog spoja (isti za vlak i tlak)

5.3. Analiza nove konfiguracije spoja

Nakon provedene numeričke analize novog rješenja dobivene su F-Δ krivulje kojima je prikazano ponašanje elemenata u spoju pri vlačnom (FEM_T_corr) i tlačnom (FEM_C_corr) opterećenju. Ponašanja novooblikovanog spoja uspoređena su s mjerodavnim ponašanjima tradicionalnog rješenja posebno za vlak, slika 15., a posebno za tlak, slika 16.



Slika 15. Usporedba ponašanja analiziranog spoja s novim prijedlogom rješenja za vlačne elemente



Slika 16. Usporedba ponašanja analiziranog spoja s novim prijedlogom rješenja za tlačne elemente

Iako se može uočiti povećanje početne krutosti novog rješenja vlačno opterećenog elementa, slika 15., može se zaključiti da se promjenom oblikovanja elementa u spoju vlačna otpornost značajno ne mijenja ($FEM_T_corr/FEM_T1 = 48,1/47,0 = 1,02$ puta). To potvrđuje činjenicu da savijanje spljoštenog dijela elementa nema velik utjecaj na ponašanje vlačnih elemenata i da tako naprezani elementi otkazuju pritiskom po omotaču rupe za vijak. S druge strane, izravnivanjem cijevnog elementa postignuta je približno 2,66 puta veća tlačna otpornost u odnosu na prethodno analiziran kritični numerički model ($FEM_C_corr/FEM_C2 = 57,0/21,4$). Time je riješen problem nepovoljnih učinaka dodatnog momenta zbog ekscentriciteta, odnosno zbog savinutosti spljoštenog dijela cijevi. Budući da se ovim prijedlogom mijenja način otkazivanja čvornog spoja, stvarno povećanje otpornosti novog rješenja iznosi 2,25 puta ($FEM_T_corr/FEM_C2 = 48,1/21,4$).

6. Zaključak

Usporedbom analitičkih, eksperimentalnih i numeričkih rezultata možemo zaključiti kako je analitička metoda

pouzdana za procjenu otpornosti analiziranog čvornog spoja geodetske kupole. Međutim, uvriježena analitička procjena tlačne otpornosti, izraz (2), prilično je nedorečena. Naime, u praksi se postojanje ekscentriciteta zbog savinutosti spljoštenog dijela cijevi uzima u obzir bez obzira na predznak opterećenja spojnog elementa (tlak ili vlak). Nadalje, taj jednostavni analitički izraz zanemaruje stvarni položaj elementa u spoju (unutarnji, središnji ili vanjski).

Laboratorijskim ispitivanjem dobivene su stvarne krivulje sila - pomak pomoću kojih je potpuno definirano ponašanje ovog tipa spoja. Uočeno je dobro poklapanje s predloženim analitičkim izrazima u slučaju tlačnog, odnosno s postojećim izrazima za pritisak po omotaču rupe u slučaju vlačnog djelovanja.

Na temelju rezultata provedenih laboratorijskih ispitivanja kalibrirani su numerički (FEM) modeli u programskom paketu ANSYS 15.0 [9]. To je poslužilo za dodatne numeričke parametarske analize gdje je variran položaj spojnih elemenata, odnosno konfiguracija spoja. Numerički je dokazano da način spajanja, odnosno oblikovanje razmatranog tipa čvornog spoja ima značajan utjecaj na otpornost i da analitički izrazi moraju uzeti u obzir najnepovoljniji mogući položaj tlačnog elementa u spoju.

Analizom i usporedbom rezultata utvrđeni su mjerodavni načini otkazivanja i predloženo je novo rješenje čvora. To novo rješenje, uz nešto složeniju izvedbu čvornog lima, poništava nepovoljni utjecaj ekscentriciteta i učinaka drugog reda. Takvo oblikovanje čvora rezultira otkazivanjem elementa pritiskom po omotaču rupe te se postiže povećanje otpornosti od 2,25 puta u odnosu na rješenje sa savinutim spljoštenim dijelom cijevi. Naravno, takvo rješenje povlači za sobom nešto složeniji oblik čvorne ploče. Međutim, zbog svoje relativno male debljine, čvorna ploča se može izraditi postupkom hladnog oblikovanja pa samim time ne predstavlja značajniji trošak.

Zbog činjenice da je ispitivan spoj samo jednog elementa, preporučuje se istraživanje proširiti. Korisno bi bilo ispitati ponašanje stvarnog čvora na jednom polju ili na stvarnoj kupoli kako bi se dodatno potvrdila njegova učinkovitost i optimiziralo predloženo rješenje.

LITERATURA

- [1] Horvat, M.: Projekt montažne čelične geodetske kupole 3v7, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, završni rad - diplomski studij, Zagreb, 2016.
- [2] Alagušić, A., Hrg, G., Lokin, M.: Karakterizacija ponašanja čvora čelične geodetske kupole, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Studentski rad za Rektorovu nagradu, Zagreb, 2017.
- [3] Sieden, L. S.: The birth of the geodesic dome; how Bucky did it, The Futurist, 26 (1989) 6, pp. 14-18.
- [4] <http://www.kupole.hr>, pristupljeno 13. 02. 2018.
- [5] <http://www.domerama.com>, pristupljeno 08. 01. 2017.
- [6] HRN EN 1993-1-8:2014, Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija - Dio 1-8: Proračun priključaka (EN 1993-1-8:2005+AC:2009)
- [7] HRN EN 1993-1-1:2014, Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1993-1-1:2005+AC:2009)
- [8] HRN EN ISO 6892-1:2016, Metalni materijali – Vlačno ispitivanje – 1. dio: Metode ispitivanja pri sobnoj temperaturi (ISO 6892-1:2016; EN ISO 6892-1:2016)
- [9] ANSYS, Users Manual (Version 15.0), Houston, TX, USA, Swanson Analysis Systems Inc., 2013.