

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

ANAMARIJA ALAGUŠIĆ, GABRIJELA HRG, MARIJA LOKIN

**KARAKTERIZACIJA PONAŠANJA ČVORA ČELIČNE
GEODETSKE KUPOLE**

ZAGREB, 2017.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za konstrukcije Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Davor Skejića i doc. dr. sc. Domagoja Damjanovića, te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.

SADRŽAJ

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | UVOD..... | 1 |
| 1.1 | Općenito..... | 1 |
| 1.1 | Geodetske kupole..... | 4 |
| 1.1.1 | Općenito o geodetskim kupolama | 4 |
| 1.1.2 | Buckminster Fuller..... | 4 |
| 1.1.3 | Prijenos sila..... | 7 |
| 1.1.3.1 | Primjer 1..... | 7 |
| 1.1.3.2 | Primjer 2..... | 8 |
| 1.1.3.3 | Primjer 3..... | 8 |
| 1.2 | Određivanje djelovanja na stalne i privremene građevine..... | 9 |
| 1.2.1 | Usporedba opterećenja snijegom na stalne i privremene građevine | 9 |
| 1.2.2 | Usporedba opterećenja vjetrom na stalne i privremene građevine | 9 |
| 1.3 | Primjena geodetskih kupola..... | 15 |
| 1.6 | Tipična rješenja čvorova čeličnih geodetskih kupola..... | 26 |
| 2 | CILJ I HIPOTEZA RADA..... | 29 |
| 3 | ANALITIČKI PRORAČUN OTPORNOSTI ČVORA GEODETSKE KUPOLE ... | 30 |
| 3.1 | Općenito..... | 30 |
| 3.2 | Ekscentriciteti..... | 31 |
| 3.3 | Proračun otpornosti | 33 |
| 4 | LABORATORIJSKA ISPITIVANJA PONAŠANJA TIPIČNOG SPOJA U ČVORU KUPOLE..... | 35 |
| 4.1 | Opseg i ciljevi laboratorijskog ispitivanja spoja u čvoru kupole | 35 |
| 4.2 | Opis programa laboratorijskog ispitivanja spoja kupole..... | 35 |
| 4.2.1 | Geometrijska svojstva cijevnih uzoraka..... | 35 |
| 4.2.2 | Ispitivanje mehaničkih svojstava cijevnih uzoraka..... | 37 |
| 4.3 | Ispitivanje uzoraka | 41 |
| 4.3.1 | Općenito | 41 |
| 4.3.2 | Postupak provedbe ispitivanja..... | 41 |
| 4.4 | Rezultati ispitivanja | 48 |
| 4.4.1 | Eksperimentalni rezultati – odnos sile i pomaka na mjestu P1 i P2 | 48 |
| 4.4.1.1 | Vlačna ispitivanja | 48 |
| 4.4.1.2 | Tlačna ispitivanja..... | 51 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 4.4.2 | Eksperimentalni rezultati – odnos sile i pomaka preše | 53 |
| 4.4.2.1 | Vlačna ispitivanja | 54 |
| 4.4.2.2 | Tlačna ispitivanja..... | 56 |
| 4.4.3 | Načini otkazivanja i ponašanje uzoraka | 59 |
| 4.4.3.1 | Vlačno ispitivanje | 59 |
| 4.4.3.2 | Tlačno ispitivanje..... | 62 |
| 4.4.4 | Karakterizacija ponašanja uzoraka | 65 |
| 4.4.4.1 | Vlačni uzorci..... | 65 |
| 4.4.4.2 | Tlačni uzorci..... | 68 |
| 5 | NUMERIČKA PROCJENA PONAŠANJA SPOJA GEODETSKE KUPOLE | 69 |
| 5.1 | Općenito | 69 |
| 5.2 | Opis modela konačnih elemenata..... | 70 |
| 5.2.1 | Općenito | 70 |
| 5.2.2 | Geometrija | 71 |
| 5.2.3 | Uvjeti oslanjanja i opterećenja | 73 |
| 5.2.4 | Mehanička svojstva čeličnih komponenata..... | 74 |
| 5.2.5 | Diskretizacija modela..... | 78 |
| 5.2.6 | Kontakti..... | 78 |
| 5.3 | Numerički rezultati i diskusija | 79 |
| 5.4 | Karakterizacija ponašanja numeričkih modela | 86 |
| 6 | DISKUSIJA REZULTATA | 87 |
| 6.1 | Usporedba rezimiranih rezultata otpornosti | 87 |
| 6.2 | Prijedlog rješenja za oblikovanje čvora..... | 88 |
| 6.3 | Prikaz rezultata i zaključne napomene | 90 |
| 7 | ZAKLJUČAK | 92 |
| 7.1 | Neposredni zaključci iz provedenog istraživanja | 92 |
| 7.2 | Smjernice za daljnja istraživanja..... | 93 |
| 8 | ZAHVALA..... | 94 |
| 9 | POPIS LITERATURE | 95 |
| 10 | SAŽETAK..... | 101 |
| 11 | SUMMARY | 103 |

1 UVOD

1.1 Općenito

Kupole su konstrukcije šupljih polukugli razvijene iz lukova koje obično tvore svod ili krov. Prva kupola otkrivena je u Ukrajini, dok daljnja povijest seže u razdoblja mezopotamske, kineske, perzijske te posebice rimske arhitekture, koja se smatra pretečom današnjih kupola. Konstrukcija kupole leži na rotondi, građevini kružnog tlocrta ili na cilindru, a može biti pridržana stupovima, gdje se prijelaz u kupolu ostvaruje pandativima, ili sfernim trokutima, koji su posebice svojstveni za bizantsku arhitekturu. U najranijim vremenima kupole su bile građene od blata ili drva, no Rimljani su prvi počeli upotrebljavati beton u njihovoj gradnji te je to predstavljalo revolucionarnu prekretnicu u stabilnosti i trajnosti kupola. Najpoznatiji primjer rimske gradnje je Panteon, koji i danas ostaje najveća nearmirana kupola. Kasnije, za vrijeme Bizantskog carstva, sagrađena je u cigli Aja Sofija, dok se za ostale važne primjere mogu navesti Katedrala svetog Petra u Rimu te Katedrala svetog Pavla u Londonu.

Kako bi se vizualizirao prijenos sila kod betonskih kupola, za primjer je uzet virtualni model od konačnog broja lukova. Svaki luk preuzima opterećenje koje djeluje na odgovarajuću površinu. Intenzitet unutrašnje sile može se proračunati iz horizontalne komponente potiska. U zoni vrha opterećenja se ne prenose samo pomoću lukova postavljenih meridijalno, već i tlačnim prstenima koji služe stabilizaciji same kupole. Postoje i primjeri kupola sa otvorom na vrhu, gdje se ne umanjuje njena funkcionalnost, već se veći naglasak stavlja na prstenove, koji prenose veće unutrašnje sile.

U slučaju čeličnih kupola, uzimajući u obzir da one nemaju kontinuiranu strukturu, pravi lukovi i prstenovi moraju postojati. Možemo zamisliti strukturu sastavljenu samo od lukova koji se križaju, no upravo u toj zoni mora postojati element koji će prenositi unutrašnje sile u svim smjerovima. U čeličnim kupolama vrlo je korisno postaviti prstenove koji će dopuštati veću slobodu forme ili upotrebu otvora na vrhu, opisanu i kod betonskih kupola.

Kod vrlo velikih čeličnih konstrukcija kupola, prijenos nesimetričnih opterećenja postaje kompleksniji te se kao način stabilizacije koristi više rješenja. Moguće je povećati širinu lukova, kako bi se smanjile deformacije i stvaranje vlačnih unutrašnjih sila. Druga mogućnost je umetanje dijagonala unutar četverostranih oblika formiranih od meridijana i paralela, čime se smanjuje presjek meridijalnih lukova i paralelnih prstenova. Same dijagonale mogu biti od jednostavnih kablova. Treće rješenje bi bila upotreba sekundarnih lukova za preuzimanje

potiska. Negativna strana tog rješenja je smanjenje prozračnosti konstrukcije, zbog velikog broja upotrijebljenih šipki.



Slika 1.1 Kupola Panteona u Rimu [1]

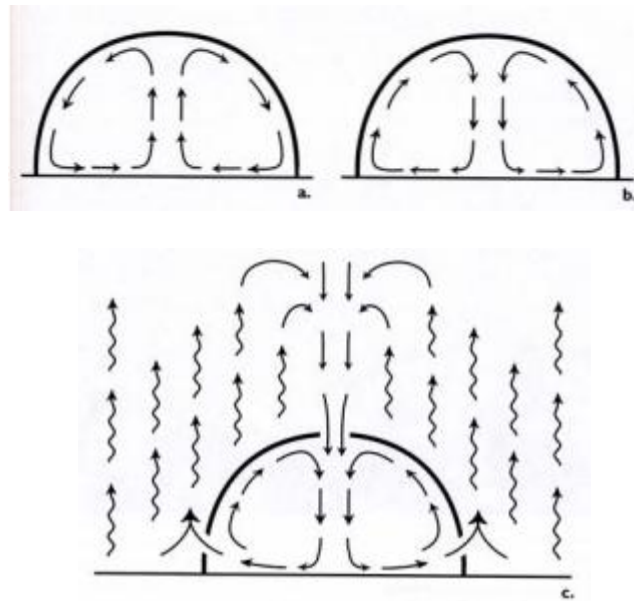
Tipovi kupola:

- a) Košnica - također nazvana i „lažna kupola“, sastoji se od horizontalnih slojeva koji se ponašaju kao konzole prema centru do spajanja na vrhu
- b) Poduprta kupola - jednoslojni prostorni okvir u obliku kupole, uključuje rebrastu, Schwedlerovu te geodetsku kupolu
- c) Manastirski svod - također se naziva poligonalna ili segmentna kupola, ima poligonalni oblik u horizontalnom poprečnom presjeku

- d) Složena kupola ili kupola na pandativima, sastoji se od pandativa ili sfernih trokuta na kojima se nalazi kupola manjeg promjera. Česta je u razdoblju renesanse, te rezultira većim visinama same konstrukcije
- e) Križni lukovi - jedan od najranijih tipova rebrastog svoda, rebra se križaju izvan centra, formirajući prazni poligonalni prostor u centru
- f) Geodetska kupola - struktura nastala od ikosaedra, može se konstruirati sa ograničenim brojem elemenata i učinkovito riješiti problem unutrašnjih sila
- g) Polukružna kupola - definirali su je Grci, a izvodili rimski graditelji
- h) Luk - veća nego polukružna kupola, sa lučno šiljastim vrhom. Najpoznatiji primjer je Taj Mahal
- i) Ovalna kupola - najpopularnije za vrijeme renesanse i baroka
- j) Parabolična kupola - naprezanje savijanjem je nula zbog jednoliko raspoređenog stalnog opterećenja. Ako se nanosi točkasto opterećenje na vrh kupole, tada naprezanje savijanjem postaje beskonačno, te se dodaju ukrute
- k) Jedro - sastoji se od pandativa koji nastavljaju svoju krivulju formirajući samu kupolu
- l) Tanjur - također nazvane segmentne kupole, smanjuju vlak ali je prisutan jaki radijalni potisak. Neke od najvećih kupola su ove vrste
- m) Kišobran - tip kupole koji je u bazi razdvojen na više zakrivljenih segmenata. Primjer je bazilika sv. Petra u Rimu [1]

Kupole se obično koriste u vojne, komercijalne svrhe te za sportske dvorane. Pokazuju jako dobra svojstva strujanja zraka unutar same kupole:

- a) U situacijama hladnoće, posebice noću, ljuska je hladna. Vrući zrak uspinje se iz sredine kupole, a hladna površina kupole osvježava zrak koji postupno pada na dno.
- b) U područjima vruće klime, visoke temperature povećavaju temperaturu vanjske površine kupole. Vrući zrak se uspinje uz zid ljuske i pada nakon osvježavanja u sredini.
- c) Fenomen se opisuje ako zamislimo otvor na vrhu i dva otvora na dnu kupole, gdje svjež zrak ulazi s vrha, dok se ustajali zrak i prašina izbacuju na dnu [2].



Slika 1.2 Primjeri strujanja zraka kod kupole [2]

1.1 Geodetske kupole

1.1.1 Općenito o geodetskim kupolama

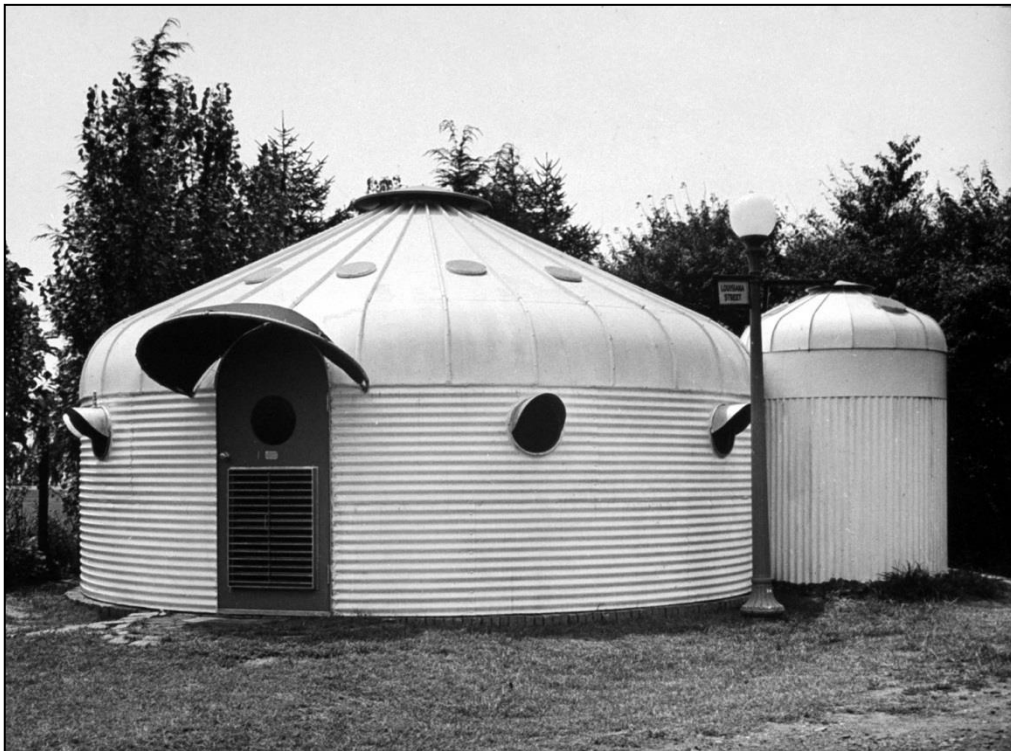
Iako je prvu kupolu koja se može nazvati geodetskom konstruirao Walther Bauersfeld, pravim ocem te vrste kupola se smatra Buckminster Fuller. Povijest geodetskih kupola seže u vrijeme Drugog svjetskog rata, kada su one korištene za skladišta te u vojne svrhe, no najviše su došle do izražaja nakon što je Fuller projektirao kupolu za Expo izložbu 1967.g. Dizajn kupole počinje sa ikosaedrom (koji se sastoji od 20 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 [3].

1.1.2 Buckminster Fuller

Richard Buckminster Fuller rođen je 12. srpnja 1895.g. u Miltonu u državi Massachusetts. Odmalena je bio povezan s prirodom i procesima koji se u njoj odvijaju te ga je upravo to potaklo na razvoj sinergetike kojom se ujedinjuju ljudi te okoliš koji ih okružuje u međusobno ovisnu cjelinu spremnu na razvijanje sudjelovanjem svih komponenata. Fuller je upisao harvardsko sveučilište 1913.g., no izbačen je zbog razuzdanog života te protivljenja ustaljenom režimu predavanja kojim se pojedinca potiče na pamćenje, ali ne i na razmišljanje usredotočeno na boljitak sveukupne ljudske zajednice. Počeci Fullerova zanimanja za mehaniku i gradnju se

vežu za njegov rad na mlinu u Kanadi, gdje je često popravljao opremu i dijelove bitne za funkcioniranje cijele manufakture. Tijekom narednih godina zaposlio se u jednoj građevinskoj tvrtki, no nakon što je propala, uslijedilo je teško razdoblje u kojem je razmišljao o samoubojstvu.

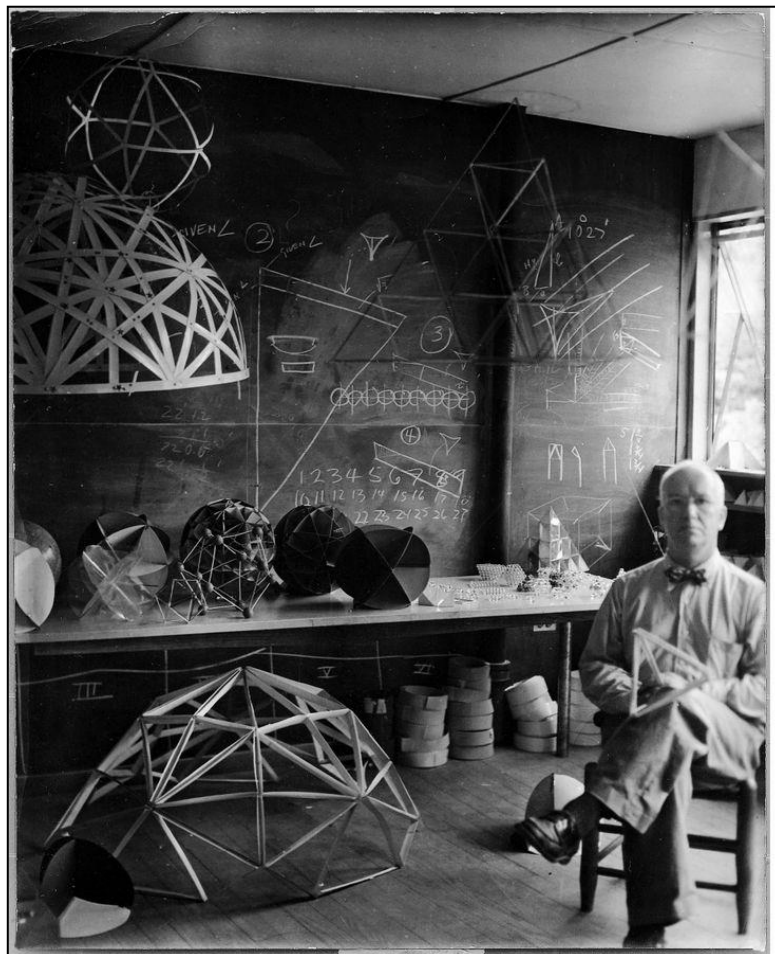
Prijelomni trenutak nastupio je kada je zaključio kako se mora fokusirati na dobrobit čovječanstva te ako više ne bude živ, tada će nestati i ideje koje će možda pokrenuti svijet u boljem smjeru. Jedan od Fullerovih životnih interesa bilo je korištenje tehnologije za poboljšanje kućanstava, stoga je 1927.g. izumio Dymaxion kuću, vrlo jeftinu i masovno proizvedenu. Kuća je bila od aluminijske, a sam naziv joj dolazi od riječi „dynamic“, „maximum“ i „ion“. Riječ Dymaxion kasnije je postala sinonim za filozofiju dizajna „manje je više“. Taj patent zaživio je posebno u vojne svrhe za vrijeme Drugog svjetskog rata, kao skladište za oružja, ali i zaštita vojnicima u mjestima oštih klima.



Slika 1.3 *Dymaxion kuća* [2]

Vrhunac Fullerova stvaranja je 1947.g. kada dobiva ideju o geodetskoj kupoli, koja i danas ostaje struktura koja može zauzeti najveći volumen za najmanju površinu. Geodetska kupola je jeftina, vrlo lagana i natkriva veliki prostor bez potrebe za dodatnim stupovima i ostalim elementima za podupiranje. Konstrukcija može izdržati teške klimatske uvjete, te se smatra revolucionarnim otkrićem u vezi ravnoteže vlačnih i tlačnih sila.

Fullerov institut danas broji oko 300 000 geodetskih kupola diljem svijeta; od zaklona u Kaliforniji i Africi do radarskih stanica u zapuštenim dijelovima svijeta. Buckminster Fuller je za života bio nagrađen sa 47 počasnih doktorata iako nikada nije diplomirao. Zaslužan je za stvaranje potpuno novog koncepta promatranja svijeta i njegovih nesavršenosti koje mogu biti integrirane u nešto novo i savršeno. Predavao je na mnogim američkim sveučilištima, uređivao časopise i konstantno imao nove ideje i patente koji su većina utrli put sljedećim generacijama znanstvenika i mislioca. Umro je 1. srpnja 1983.g., a njemu u čast je molekula ugljika povezana u strukturu sličnu geodetskoj kupoli nazvana *fuleren*. Za razumijevanje ovog atipičnog genijalca potrebno je napomenuti kako ga ne možemo isključivo definirati kao arhitekta, matematičara ili pak izumitelja, već i kao filozofa, umjetnika te futurista koji je spajanjem logike i intuicije dolazio do zaključaka čiji temelji i danas mijenjaju svijet. Buckminster Fuller bio je i ostao rijedak primjer renesansnog čovjeka spremnog na suočavanje s novim izazovima i odbijanje umnih granica tako svojstvenih svima nama. Snažna poruka njegovog postojanja i rada sadržana je u životnom credu kako smo ovdje radi sinergije nas i onog što nam je pruženo [4].



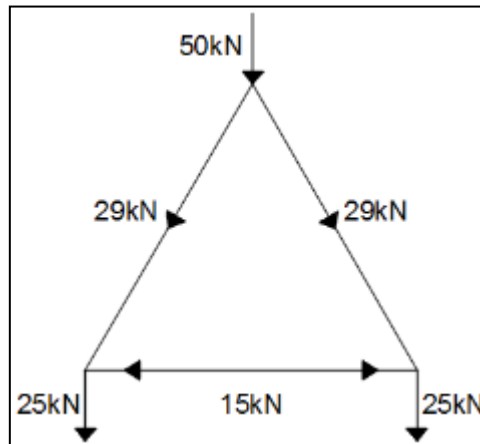
Slika 1.4 Buckminster Fuller u svom uredu [4]

1.1.3 Prijenos sila

Prijenos sila kod geodetskih kupola demonstrirat će se na sljedeća tri primjera.

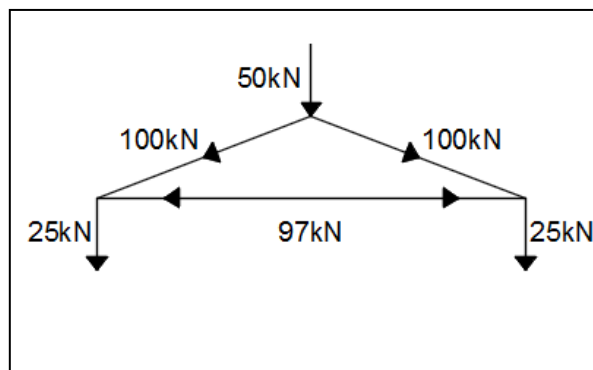
1.1.3.1 Primjer 1

Na vrh jednakostraničnog trokuta pridržanog na dva kraja nanosi se sila od 50 kN. Krakovi trokuta će tada imati unutrašnju tlačnu silu od 29 kN, dok će osnovica imati vlačnu silu od 15 kN. Na svakom ležaju ostvarit će se tlačna sila od 25 kN.



Slika 1.5 *Primjer prijena sila kod jednakostraničnog trokuta* [5]

Ako promijenimo vrstu trokuta iz jednakostraničnog u jednakokračni, gdje je osnovica dva puta veće duljine od kraka, tada uočavamo i povećanje unutrašnjih sila iako djeluje isto opterećenje od 50 kN kao u prethodnom primjeru.

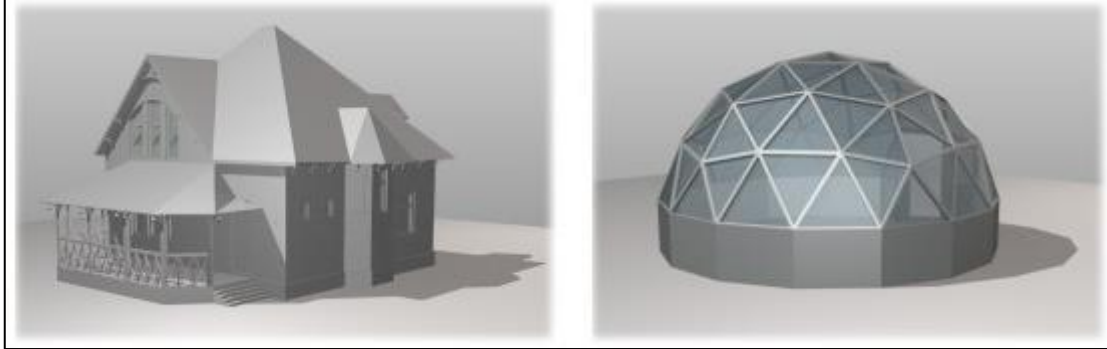


Slika 1.6 *Primjer prijena sila kod jednakokračnog trokuta* [5]

Zaključak je kako su u jednakostraničnom trokutu, koji se primjenjuje u strukturi geodetske kupole, puno manje unutrašnje sile nego u jednakokračnom, te se time potvrđuje hipoteza o velikoj stabilnosti tih vrsta kupola.

1.1.3.2 Primjer 2

Sljedeći primjer je usporedba djelovanja opterećenja vjetrom na geodetsku kupolu i drvenu obiteljsku kuću.



Slika 1.7 Usporedba djelovanja opterećenja vjetrom na geodetsku kupolu i obiteljsku kuću [5]

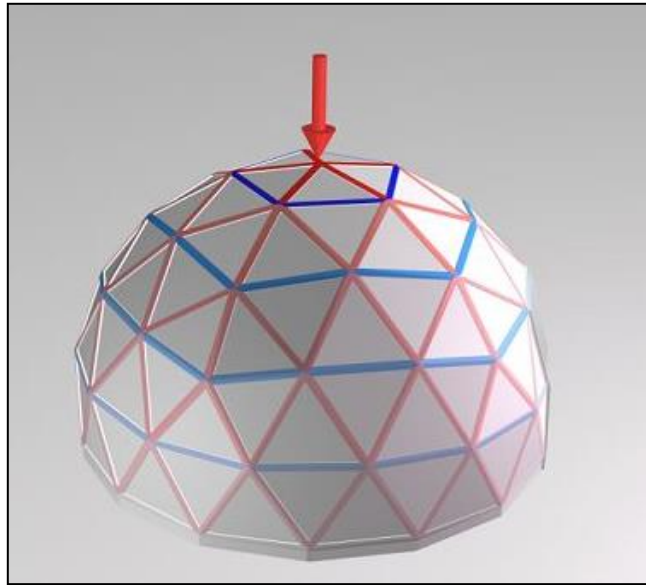
Ako se analizira djelovanje vjetra na obiteljsku kuću, tada moramo uzeti u obzir njegov smjer djelovanja koji je drugačiji na određenu površinu kuće. Proračuni naprezanja se tada vrše na minimalno četiri smjera djelovanja vjetra, a većinom i na osam smjerova. S druge strane, ako to isto opterećenje vjetrom djeluje na geodetsku kupolu, pošto su njena površina i oblik u svakom smjeru tog djelovanja isti, tada je dovoljno sagledati jedan smjer djelovanja vjetra.

Nadalje, drvena kuća ima pregršt različitih duljina i debljina drveta, varirajući od glavnih strukturnih elemenata krovnih rešetki do manjih strukturnih elemenata koji povezuju glavne u cjelinu. Geodetska kupola se sastoji od elemenata vrlo slične duljine i veličine kroz cijelu konstrukciju koji su povezani na isti način sa malim varijacijama kutova.

Zaključak ovog primjera je kako unatoč uvriježenom mišljenju da su geodetske kupole kompleksnije za statički proračun, to ipak nije istina, već su one vrlo jednostavne i učinkovite konstrukcije, sposobne preuzeti vrlo velike sile.

1.1.3.3 Primjer 3

Treći primjer opisuje trofrekventnu kupolu na koju djeluje tlačna sila na vrhu. Plavom bojom označeni su štapovi u vlaku, a crvenom u tlaku. Na samom vrhu su svi štapovi u tlaku, dok dalje uočavamo vlačne prstenove. Ako izdvojimo šesterokut, tada se vidi da se on sastoji od dva vlačna štapa i četiri tlačna. Ovaj primjer služi kako bi se slikovito prikazalo vrste sila u čvorovima geodetske kupole [5].



Slika 1.8 Trofrekventna kupola s tlačnom silom na vrhu [5]

1.2 Određivanje djelovanja na stalne i privremene građevine

U ovom poglavlju objasnit će se razlika opterećenja snijegom na stalne i privremene kupole prema HRN EN 1991-1-3 te HRN EN 13782 te opterećenja vjetrom, također na stalne i privremene kupole prema HRN EN 1991-1-4 i HRN EN 13782 [6] [7] [8].

1.2.1 Usporedba opterećenja snijegom na stalne i privremene građevine

Za razliku od stalnih građevina, kod privremenih kupola i šatora snježna opterećenja se ne moraju uzeti u obzir za građevine podignute na područjima gdje je mala vjerojatnost pojave snijega, gdje se one koriste samo u određeno doba godine kad se ne očekuje snijeg ili gdje se već unaprijed projektiranjem sprječava zadržavanje snijega na šator ili kupolu.

1.2.2 Usporedba opterećenja vjetrom na stalne i privremene građevine

Kod određivanja opterećenja vjetrom za privremene kupole i šatore, mora se uzeti u obzir lokacija te trajanje ugradnje pokrova, koji može biti napravljen od raznih materijala.

Za bilo koje mjesto gdje je temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra $v_{b,0} > 28\text{ m/s}$ izračuni moraju biti predviđeni za šator koji zadovoljava stabilnost i otpornost obzirom na lokalne uvjete. Potreban vršni tlak brzine $q_p(z_e)$ primjenjuje se u vezi sa zahtjevima iz Nacionalnih dodataka. Dobivene vrijednosti mogu se smanjiti za faktor 0.7.

Za mjesta na kojima je osnovna vrijednost brzine vjetra $v_{b,0} < 28m/s$ opterećenje vjetrom se procjenjuje kako slijedi.

Kod tlaka vjetra za stalne kupole, ovisno o kategoriji terena i maksimalnoj referentnoj visini danih u tablici 1.1, očitava se iz priloženog dijagrama koeficijent izloženosti $c_e(z)$. Nakon toga, iz vršnog tlaka brzine vjetra, koji je također naveden u tablici izračunava se stvarna brzina vjetra, što pokazuje da je za kategorije terena 0 i I, a moguće i ostale kategorije, $v_{b,0}$ uistinu manje od $28m/s$. Postupak je također prikazan preko formula:

$$w_e = c_e(z) \cdot q_b \cdot c_{pe}$$

$$q_p(z_e) = c_e(z) \cdot q_b$$

$q_p(z_e)$ vršni tlak brzine vjetra

$c_e(z)$ koeficijent izloženosti-očitava se ovisno o jednoj od pet kategorija terena

q_b tlak pri osnovnoj brzini vjetra

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

ρ gustoća zraka, $\rho = 1,25kg/m^3$

v_b brzina vjetra

Tlak vjetra kod privremenih kupola se računa prema sljedećem izrazu:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}, \text{ gdje je:}$$

$q_p(z_e)$ vršni tlak brzine vjetra

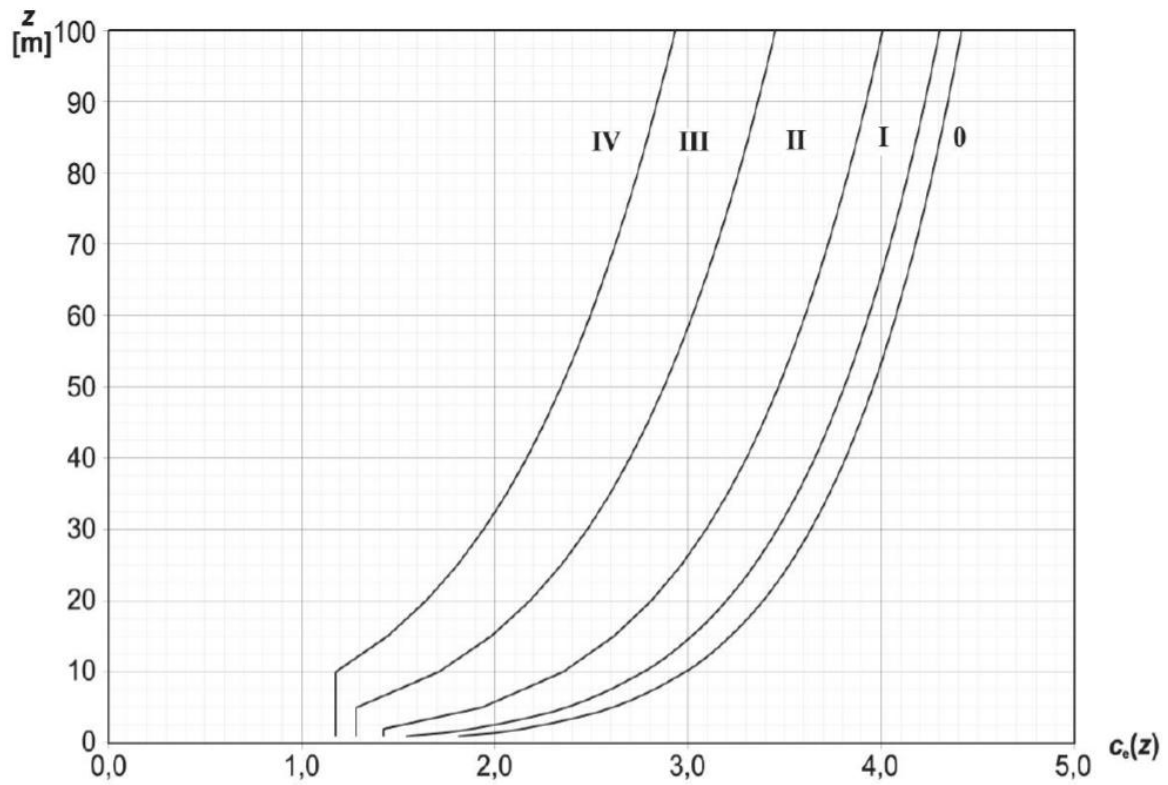
z_e referentna visina za vanjski tlak

c_{pe} koeficijent vanjskog tlaka

Prema referentnoj visini za vanjski tlak izraženoj u metrima očitava se iz priložene tablice vršni tlak brzine.

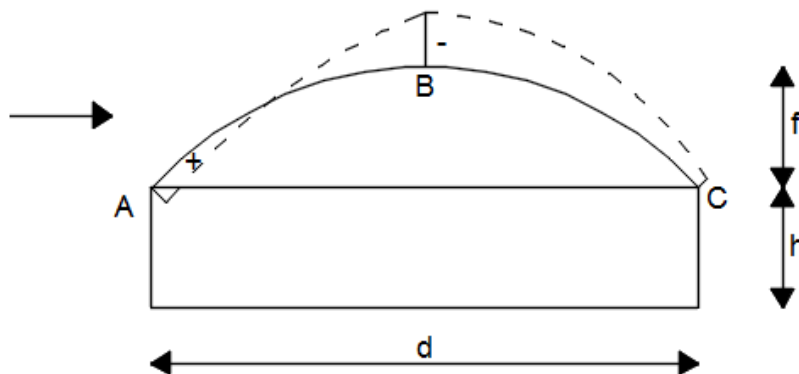
Tablica 1.1 Očitavanje vršnog tlaka brzine vjetra [8]

| Kategorija terena | Referentna visina, z_e [m] | Vršni tlak brzine vjetra, $q_p(z_e)$ [kN/m ²] |
|--|---------------------------------|--|
| Kategorija 0: more ili obalno područje uz otvoreno more | $z_e \leq 5$ | 0,50 |
| Kategorija I: jezera ili ravan teren bez prepreka | $5 < z_e \leq 10$ | 0,60 |
| Kategorija II: površine s niskom vegetacijom, povremene prepreke kao što su drveće ili zgrade na razmacima 20 puta većim od visine prepreke (poljoprivredno zemljište) | $10 < z_e \leq 15$ | 0,66 |
| Kategorija III: površine s uobičajenom vegetacijom ili zgradama ili preprekama na razmacima do 20 puta većim od visine prepreke (industrijske zone i šume) | $15 < z_e \leq 20$ | 0,71 |
| Kategorija IV: područja s najmanje 15% površine prekrivene zgradama srednje visine najmanje 15 m (gradska područja) | $20 < z_e \leq 25$ | 0,76 |

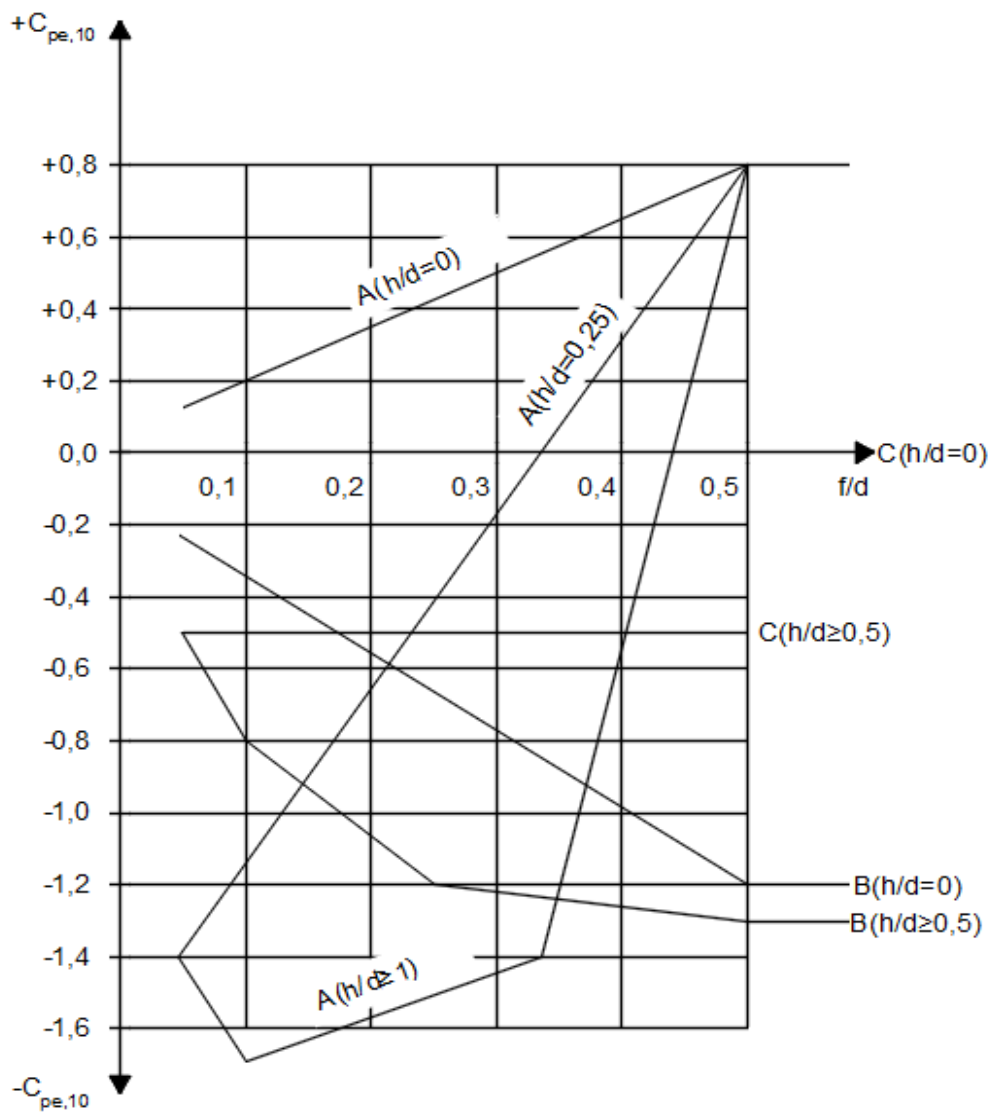


Slika 1.9 Koeficijent izloženosti $c_e(z)$ [7]

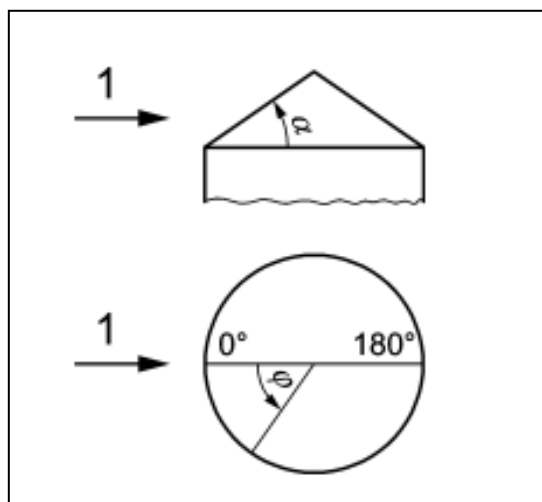
Za stalne kupole se koeficijent pritiska vjetra očitava iz dijagrama prikazanog na slici 1.12, ovisno o visini kupole h i promjeru d , dok se koeficijent za privremene zatvorene šatore (kupole) kružnog oblika iščitava prema Nacionalnom dodatku A norme HRN EN 13782 iz dijagrama na slici 1.14 koji ovisi o perifernom kutu φ i kutu nagiba šatora (kupole) α .



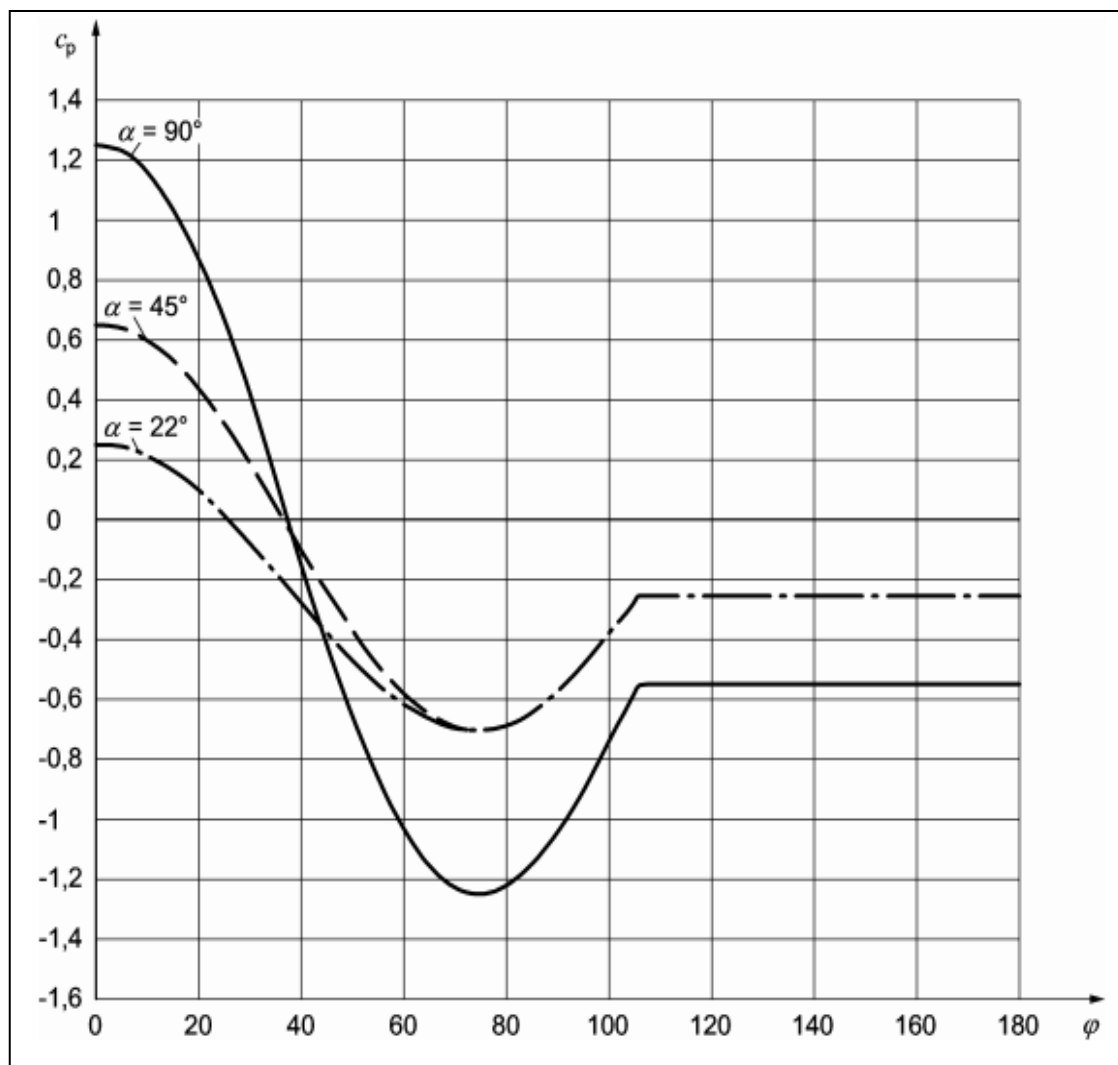
Slika 1.10 Djelovanje vjetra na kupolu [7]



Slika 1.11 Koeficijent pritiska vjetra za stalne kupole [7]



Slika 1.12 Zatvoreni šatori kružnog oblika [8]



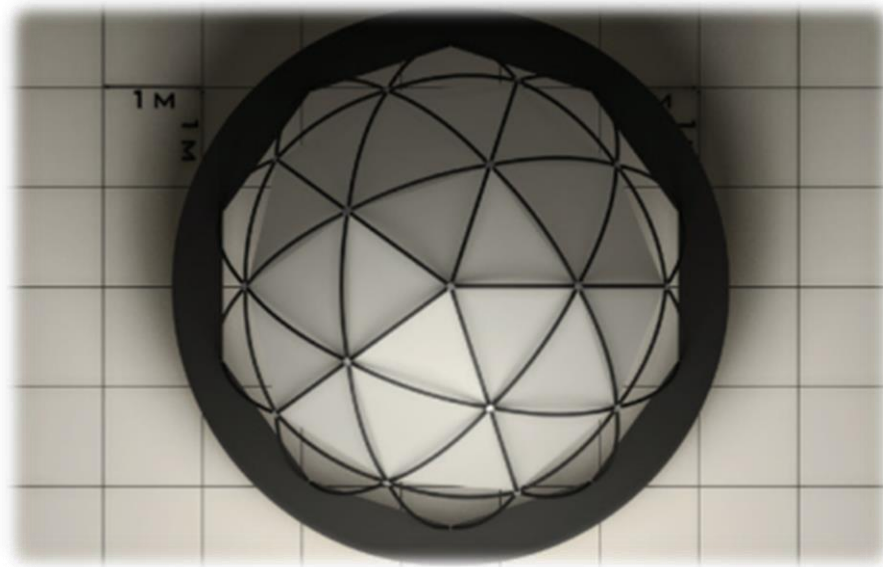
Slika 1.13 Koeficijent pritiska vjetra za privremene kupole [8]

1.3 Primjena geodetskih kupola

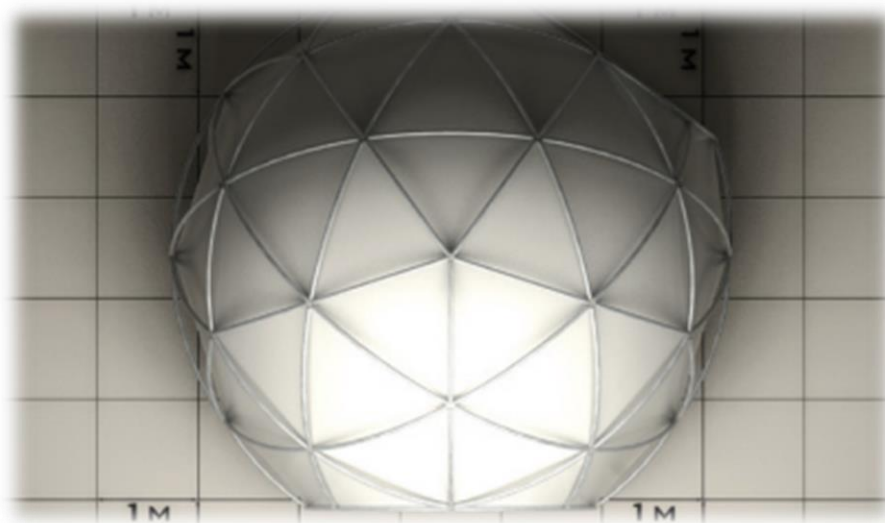
Kao što je navedeno, geodetske kupole su najstabilnije strukture ikad osmišljene, a njihov estetski izgled koji je vrlo jednostavan, ali ujedno atraktivan i elegantan doprinosi sve većoj primjeni njih u razne svrhe poput ljetnih pozornica, barova i sajmova. Vrlo brzo se montiraju, dakle ne zahtijevaju dodatnu opremu i pridržanja u samom procesu montaže te posjeduju znatnu otpornost na djelovanja vjetra i snijega što ih čini vrlo adekvatnim konstrukcijama za različite klimatske uvjete. U primjeni su najčešće dvofrekventne i trofrequentne kupole ili krovovi, s varirajućim promjerima, ovisno o namjeni. Za sidrenje se koriste utezi, klinovi i sidra, pokrov ulaza je uglavnom PVC, a vrijeme montaže par sati. U Hrvatskoj se geodetske kupole primjenjuju u sve više slučajeva; od božićnih sajmova u metropoli do ljetnih barova i pozornica na obali.

Navest će se nekoliko najaktualnijih vrsta geodetskih kupola i krovova, a u nazivu će prvi broj označavati frekvenciju, a drugi promjer.

- a) Kupola 2V5 - osmišljena je kao ugostiteljski montažni objekt za događanja festivalskog ili promotivnog tipa. Efektno funkcionira u prostoru, omogućava maksimalnu iskoristivost prostora te pristup sa svih strana. Za montažu su potrebna 2-3 tehničara, a materijal je polietilen ili čelik.



Slika 1.14 Polietilenska kupola 2V5 [9]

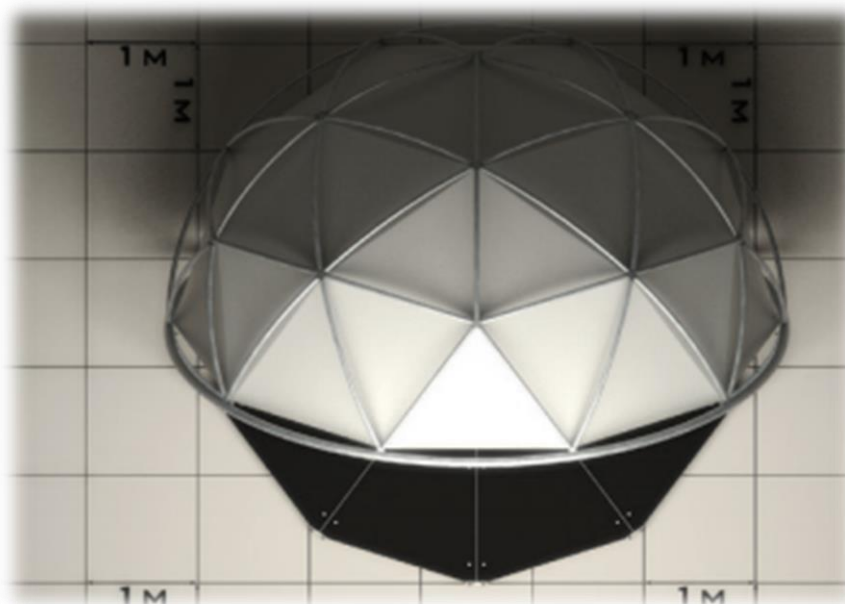


Slika 1.15 Čelična kupola 2V5 [9]



Slika 1.16 Spoj cijevi (čvor) čelične kupole [9]

- b) Krov 2V5 - izvedba kupole 2V5 u varijanti krovne konstrukcije. Zadržane su dobre strane kupole kao što su mogućnost modularnog spajanja, stvaranje niza povezanih objekata te primjena nove tehnologije podnog sustava. Ovakav model krova je izvrstan za natkrivanje sajamskih i promotivnih štandova ili za održavanje solo koncerata.



Slika 1.17 Čelični krov 2V5 [9]



Slika 1.18 Čelični krov 2V5 [9]

- c) Kupola 3V7- u najvećoj primjeni kao trgovačko- ugostiteljski objekt, a zbog svojih idealnih proporcija djeluje estetski uravnoteženo. Montira se najbrže od svih modela i bez upotrebe mehanizacije. Pokrov ulaza je PVC kao i kod kupole 2V5.



Slika 1.19 Montirana kupola 3V7 [9]

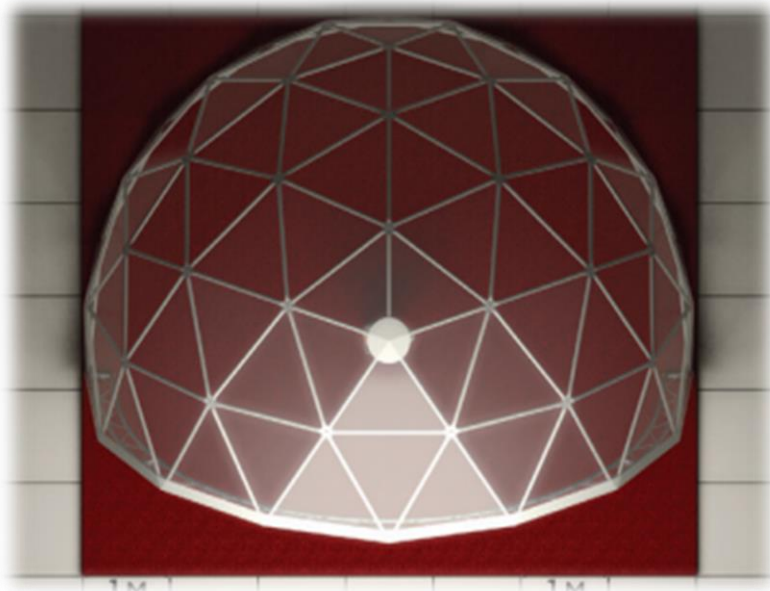


Slika 1.20 Kupola 3V7 gledana tlocrtno [9]

- d) Krov 3V7- promjer od 7 m i visina od 4,1 m su dimenzije koje odgovaraju pozornici od 7x5 m, stoga je ovaj model idealan za događanja gdje je prisutno preko 500 posjetitelja. Materijal konstrukcije je aluminij, a ovi krovovi se najčešće primjenjuju za natkrivanje promotivnih štandova.



Slika 1.21 Krov 3V7 korišten prilikom Božićnog sajma u Zagrebu [9]



Slika 1.22 Tlocrtni pogled na krov 3V7 [9]

- e) Kupola 3V9,4 - visina od 5,5 m i veća površina omogućuju ovoj vrsti kupole kapacitet od 100 stajaćih mjesta uz manju pozornicu ili šank. Minimalna rješenja scenografskog tipa mogu ovu kupolu prenamijeniti u zaseban bar ili vrlo atraktivnu prostoriju za druženje. Završna obrada je cinčanjem, a pokrov ulaza je PVC kao i kod prije navedenih veličina kupola.



Slika 1.23 Kupola 3V9,4 u zimskom okruženju nalikuje iglu kućici [9]



Slika 1.24 Božićne bar-kupole prekrivene ceradom [9]

- f) Krov 3V9,4 - promjer krova 9,4 m i visina 5,5 m odgovara pozornici 10x8 m za događanja pred 1000 do 5000 posjetitelja. Vrlo je pogodan za intervencije dekorativnog tipa kao i kupolasti krov 3V7, ali u većoj mjeri, što ga čini idealnim za natkrivanje aktivacijskih zona promotivnih štandova.



Slika 1.25 Krov 3V9,4 idealan za koncertna događanja [9]

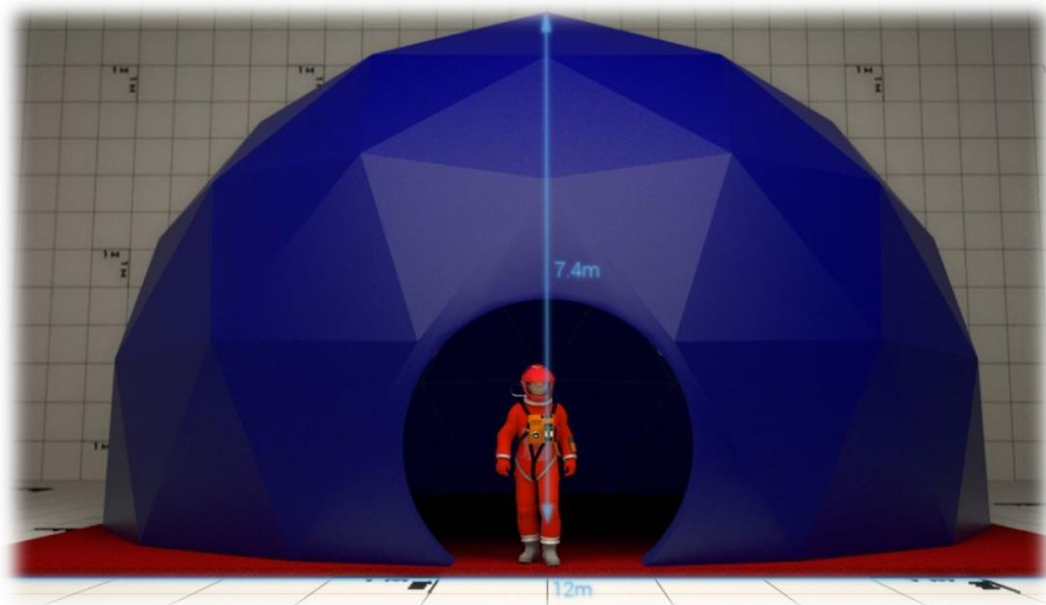


Slika 1.26 Krovovi za natkrivanje promotivnih štandova [9]

- g) Kupola 3V12 - popunjava prostor kupola između 3V9,4 i 3V14 sa visinom od 7,4 m te površinom od 100 m². Prostor je dovoljno velik za 200 stajaćih osoba, dok s druge strane zadržava određenu kompaktnost manjih modela kupola. Njezina veličina čini ju pogodnom za održavanje manjih glazbeno-scenskih nastupa, promocija te prezentacija.



Slika 1.27 *Idealna veličina i dizajn kupole za morski ambijent [9]*

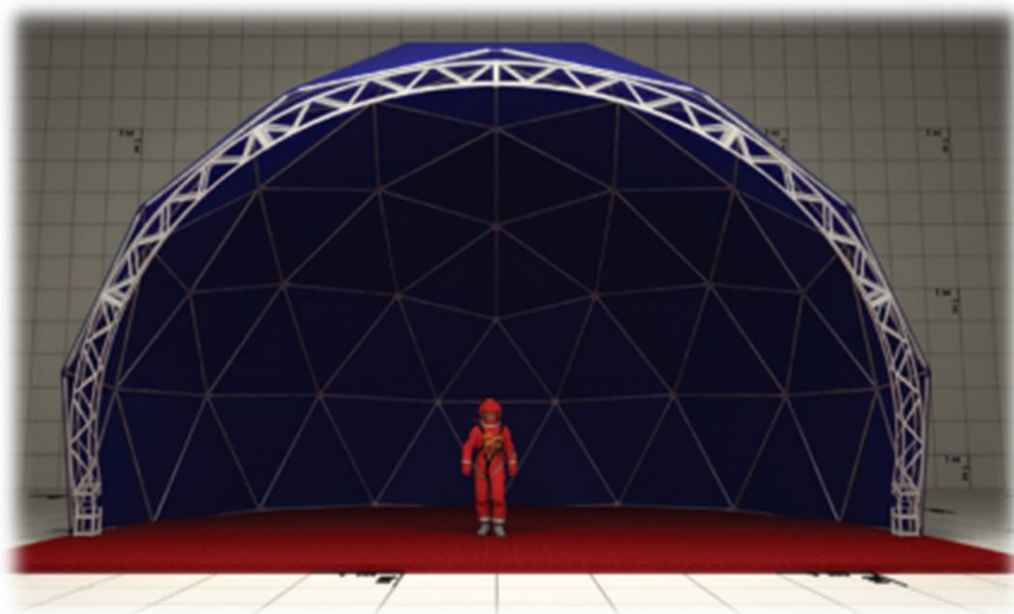


Slika 1.28 *Pogled na ulaz kupole [9]*

- h) Krov 3V12 - odgovara pozornici 12x10 m za događanja pred 1000 do 7000 posjetitelja. Pozornica natkrivena ovim kupolastim krovom zaštićena je od vremenskih uvjeta s tri strane što smanjuje njihov utjecaj na održavanje događanja. Pokrov je ostvaren cinčanjem, vrijeme montaže je 6 h te broj tehničara također 6.



Slika 1.29 *Atraktivan 3V12 krov kao pozornica* [9]



Slika 1.30 *Pogled na pozornicu* [9]

- i) Kupola 3V14 - visinom od 8,3 m te površinom od 150 m² pruža prostor za 100 osoba u sjedećem postavu te 300 osoba u stajaćem postavu. Visina kupole pruža mogućnost pregradnje na etažu, koja se spiralnim stepenicama povezuje s prizemnim dijelom. Pokrov ulaza je također PVC.



Slika 1.31 Kupola 3V14 na zagrebačkom trgu s poznatim „dodatkom“-naočalama Buckminstera Fullera [9]



Slika 1.32 Elegantan vanjski izgled koji se uklapa u raznovrstan okoliš [9]

- j) Krov 3V14 - odgovara pozornici 16x14 m za događanja pred 3000 do 10000 posjetitelja. Pozornica je zaštićena od vremenskih uvjeta s tri strane te je to vrlo pogodno za smanjivanje utjecaja vjetrova i kiše na održavanje događanja [5]



Slika 1.33 Održavanje koncerta ispred Umjetničkog paviljona u Zagrebu [9]



Slika 1.34 Futuristički dizajn kupolastog krova [9]

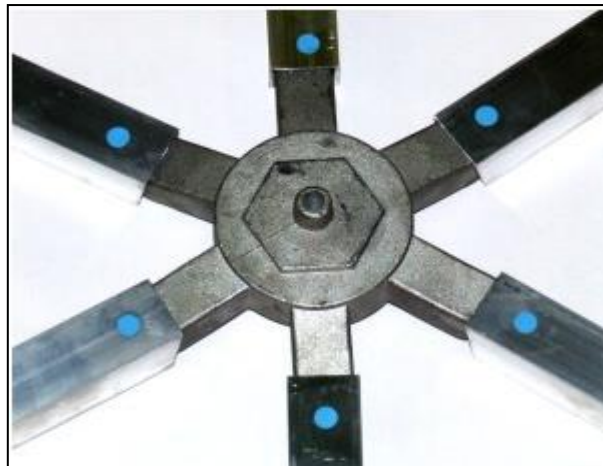
1.6 Tipična rješenja čvorova čeličnih geodetskih kupola

- a) Čvor je spoj čeličnih konstrukcijskih elemenata kupole. Na slici 1.36 je klasičan način povezivanja cijevi geodetskih kupola, korišten i u ovom radu, a dalje će se navesti ostali primjeri povezivanja. Rupa je izbušena u spljoštenim krajevima i zatim su oni vijcima povezani u cjelinu. Središte rupa bi trebalo biti izbušeno na $\frac{3}{4}$ od svakog kraja cijevi. Kod vijaka se provjerava otpornost na posmik te pritisak po omotaču rupe.



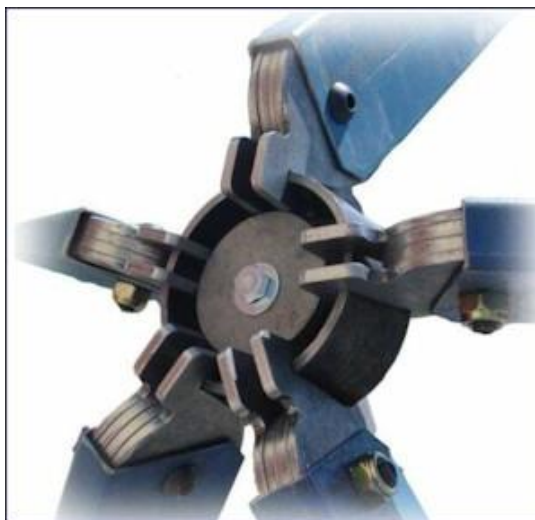
Slika 1.35 Spajanje cijevi na preklop s jednim vijkom [10]

- b) Geodetske kupole sa metalnim okvirom su najčešće korištene za gradnju staklenika zbog svoje čvrstoće i vijeka trajanja. Pozitivna strana je također fleksibilnost dizajna, dakle veličine nisu unaprijed određene i mogu se prilagoditi određenom opterećenju snijegom ili vjetrom.



Slika 1.36 Čvor s metalnim okvirom [10]

- c) Na sljedećoj slici je univerzalni priključak geodetskih kupola izumljen u Australiji. Cijevi se prihvaćaju za čelični prsten zupcima, za razliku od prethodna dva primjera.



Slika 1.37 Univerzalni čvor kupola [10]

- d) Ovaj primjer je korišten posebno za cijevi kvadratnog poprečnog presjeka koje su zavarene na kružni lim i time je ovaj dizajn vrlo jednostavan, ali i učinkovit.



Slika 1.38 Poseban primjer čvora za cijevne elemente kvadratnog presjeka [10]

- e) Primjer povezivanja čeličnih cijevi korišten u Americi gdje su cijevi povezane vijcima preko lima. Ovo omogućuje visoku čvrstoću samog spoja.



Slika 1.39 Američki način povezivanja cijevi [10]

- f) Ovo je prototip čvora geodetske kupole. Svaka pokretna cijev je napravljena za samopodešavanje. Ovaj sistem nije toliko u upotrebi zbog veće cijene, iako je vrlo fleksibilan i moderan.



Slika 1.40 Potpuno zglobni čvor [10]

- g) Ovaj se primjer naziva zračni čvor, a koristi se za povezivanje metalnih cijevi. [9]



Slika 1.41 Zračni čvor [10]

2 CILJ I HIPOTEZA RADA

Čelične geodetske kupole vrlo su atraktivne konstrukcije, koje se sve češće koriste, osobito za različita kulturna i sportska događanja. Budući da je riječ o relativno novom konstrukcijskom sustavu, još uvijek ne postoji opsežna literatura o njihovom proračunu, a rješenja iz prakse najčešće su nastala iz aspekta jednostavne montaže i često nisu dovoljno istražena. Geodetske kupole se uglavnom koriste kao privremene konstrukcije pa postoji potreba za jednostavnim i brzim, ali dovoljno pouzdanim proračunom kojim bi se mogla dokazati njihova pouzdanost i nosivost na vanjska djelovanja.

Jedno jednostavno rješenje čvora je spoj na preklop s jednim vijkom, gdje su cijevni elementi spljošteni i dodatno savinuti da se dobije tražena zakrivljenost kupole. U praksi se koristi pojednostavljeni analitički izraz za proračun otpornosti kritičnog presjeka spljoštenog i savinutog dijela cijevi. Taj izraz daje dovoljno pouzdane vrijednosti otpornosti na strani sigurnosti, ali se s njime dobije mala iskoristivost čvora u odnosu na iskoristivost konstrukcijskog elementa koji se spaja. Nameće se pitanje, radi li se o konzervativnom pristupu ili pak o rješenju čvora koji može izdržati sile skoro deset puta manje od elementa.

Kako bi to istražili, osnovni cilj ovog rada je eksperimentalno i numerički utvrditi ponašanje i otpornost navedenog tipa čvora kod čeličnih geodetskih kupola. Riječ je o vijčanom spoju 5, odnosno 6 cijevnih elemenata koji su na svom kraju spljošteni, zakrivljeni te međusobno povezani jednim vijkom. Kako bi se ostvario vijčani spoj i dobila tražena zakrivljenost kupole, spljoštene dijelove potrebno je savinuti pod određenim kutom. Posljedica toga je pojava učinaka drugog reda uslijed ekscentričnosti sile. Dakle, konstrukcijski elementi su osim uzdužne tlačne ili vlačne sile, izloženi i djelovanju momenata savijanja u blizini vijčanog spoja, koji mogu značajno reducirati otpornost spoja. Ovim radom karakterizirat će se ponašanje ovakvog tipa čvora te predložiti konstruktivno i efikasno rješenje kojim bi se poboljšala njegova otpornost i zadržala lakoća i brzina montaže. Rezultate dobivene originalnim laboratorijskim ispitivanjem i složenim numeričkim analizama usporedit će se s analitički utvrđenim vrijednostima. Na taj način procijenit će se ispravnost uvriježenog analitičkog pristupa, odnosno predložiti optimalno rješenje čvora.

3 ANALITIČKI PRORAČUN OTPORNOSTI ČVORA GEODETSKE KUPOLE

3.1 Općenito

Cilj ovog poglavlja je odrediti otpornost elemenata u vijčanom spoju kupole analitičkim postupkom, prema uvjetima za granično stanje nosivosti poprečnog presjeka. Za proračun se koriste izrazi prema HRN EN 1993-1-1 [11] te HRN EN 1993-1-8 [12]. Kod proračuna prema graničnim stanjima, konstrukcija se procjenjuje kao zadovoljavajuća ako računski učinak djelovanja nije prekoračio računsku otpornost. Računski učinci djelovanja, koji se dobivaju iz analize konstrukcije, su uzdužna sila N_{Ed} , moment savijanja M_{Ed} , poprečna sila V_{Ed} ili torzijski moment T_{Ed} [13]. Postupkom dimenzioniranja odabiru se potrebne dimenzije elemenata konstrukcije kako bi bio zadovoljen uvjet nosivosti, tj. da su proračunska djelovanja E_d manja ili jednaka proračunskoj otpornosti R_d . Dimenzioniranje se može provesti na razini poprečnog presjeka, konstrukcijskog elementa i konstrukcijskog sustava [14].

Geodetske kupole sastoje se od štapnih elemenata, što znači da ti elementi prenose uzdužne sile. Računska otpornost poprečnog presjeka na uzdužnu silu, prema EC3 dana je izrazom:

$$N_{Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.1)$$

gdje je:

A - površina poprečnog presjeka,

f_y - granica popuštanja,

γ_{M0} - parcijalni koeficijent sigurnosti, koji iznosi 1,0.

Osim uzdužne sile, u elementu se, zbog dodatnog savijanja spljoštenog dijela cijevi, u blizini spoja javlja i djelovanje momenta savijanja, koji je nastao kao posljedica ekscentričnosti sile, tablica 3.1. Ekscentriciteti su nastali zbog savinutosti spljoštenog dijela cijevi u odnosu na središnju uzdužnu os elementa. Rezultati dobiveni eksperimentalnom i numeričkom analizom pokazuju da u ovom slučaju dolazi do značajne redukcije otpornosti, upravo zbog djelovanja dodatnog momenta savijanja. Iznos dodatnog momenta savijanja dobiva se množenjem uzdužne sile i ekscentriciteta:

$$M^I = N \cdot e \quad (3.2)$$

Računska otpornost poprečnog presjeka na savijanje, u skladu s EC3 određuje se prema sljedećem izrazu:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.3)$$

gdje je

W_{pl} - plastični moment otpora

f_y - granica popuštanja

γ_{M0} - parcijalni koeficijent sigurnosti, koji iznosi 1,0

Za dokazivanje nosivosti poprečnog presjeka prilikom zajedničkog djelovanja uzdužne sile i momenta savijanja koristi se sljedeći interakcijski izraz:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.4)$$

3.2 Ekscentriciteti

Kako bi mogli odrediti otpornost cijevnog elementa u spoju potrebno je prvo definirati ekscentricitete ovisno o konfiguraciji spoja i smjera djelovanja sile u elementu (vlak ili tlak). Preliminarne analize pokazale su da oblici i mjesta otkazivanja pri vlačnoj i tlačnoj sili nisu ista, odnosno da je potrebno odrediti ekscentricitete za četiri različita slučaja. U tablici 3.1 prikazane su skice svih slučajeva te pripadni izrazi za određivanje ekscentriciteta. Na skicama su naznačena kritična mjesta otkazivanja, tj. formiranja linija tečenja, na kojima treba izmjeriti duljinu koja definiraju ekscentricitete. Oznake na skicama predstavljaju sljedeće:

- L duljina spljoštenog dijela cijevnog elementa
- a udaljenost rubova spojne čelične ploče i spljoštenog dijela cijevnog elementa
- α kut nagiba spljoštenog dijela cijevi
- h_w promjer glave vijka
- t debljina stjenke cijevnog elementa
- e traženi ekscentricitet

Tablica 3.1 Formule za određivanje ekscentriciteta po slučajevima

| AN_T1 | AN_C1 |
|--|--|
| | |
| $e_{T1} = \left((L - (a + h_w) / 2) \operatorname{tg} \alpha + t \right) / \cos \alpha$ | $e_{C1} = \left((L - a) \operatorname{tg} \alpha - t \right) / \cos \alpha$ |
| AN_T2 | AN_C2 |
| | |
| $e_{T2} = \left((L - (a + h_w) / 2) \operatorname{tg} \alpha - t \right) / \cos \alpha$ | $e_{C2} = \left((L - a) \operatorname{tg} \alpha + t \right) / \cos \alpha$ |

Analitički izrazi svrstani su u skupine C i T ovisno o načinu opterećenja te se unutar svake skupine razmatraju dva načina spajanja elementa. Pojedini slučajevi označeni su za tlak s AN_C1 i AN_C2, te analogno tome za vlak s AN_T1 i AN_T2 i te će se oznake koristiti u nastavku.

3.3 Proračun otpornosti

Tijekom analiziranja vijčanog spoja kupole, utvrđeno je da je kritično područje cijevnog elementa, u kojem dolazi do otkazivanja, prijelazni dio između punog i spljoštenog presjeka. Dakle potrebno je odrediti otpornost prijelaza spljoštenog u puni poprečni presjek. Traženu otpornost dobit ćemo raspisivanjem i sređivanjem izraza (3.4) za dokazivanje nosivosti:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.4)$$

Nakon uvrštavanja izraza (3.1), (3.2) i (3.3) i sređivanja formule, dobiva se izraz za otpornost presjeka na prijelazu iz spljoštenog u puni poprečni presjek cijevi. Ovim izrazom dobiva se minimalna potrebna površina poprečnog presjeka, kako bi uvjet otpornosti bio zadovoljen. Množenjem dobivene površine s granicom popuštanja čelika dobiva se otpornost prijelaznog presjeka.

$$A_{req} = \frac{1}{\frac{1}{A_c} + \frac{e}{W_u}} \quad (3.5)$$

gdje je

A_c . površina punog poprečnog presjeka cijevi

W_u . moment otpora spljoštenog dijela cijevi

Dopuštena priključna sila iznosi:

$$N_{dop} = A_{req} \cdot f_y \quad (3.6)$$

Uvrštavanjem potrebnih veličina u izraze (3.5) i (3.6) dobivaju se analitički izrazi za otpornost presjeka cijevnog elementa u vijčanom spoju kupole. Dobiveni rezultati prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 3.2 *Analitičke otpornosti cijevnog elementa u vijčanom spoju kupole u [kN]*

| | N_{AN_T1} | N_{AN_C1} | N_{AN_T2} | N_{AN_C2} |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Nominalne vrijednosti | 8,9 | 34,0 | 12,4 | 16,4 |
| Stvarne vrijednosti | 9,4 | 29,3 | 13,6 | 14,9 |

U prvom retku tablice, prikazane su otpornosti izračunate s nominalnim vrijednostima geometrije i granice popuštanja čeličnog cijevnog elementa, dok su otpornosti u drugom retku određene s kasnije izmjerenim i utvrđenim vrijednostima. Najmanja otpornost dobivena je za vlačni element za prvi slučaj konfiguracije spoja. Razlog tome je što je vrijednost ekscentriciteta u tom slučaju najveća, što se može vidjeti u tablici 3.1. Tlačni element u prvom slučaju konfiguracije ima najveću otpornost, zbog najmanje vrijednosti ekscentriciteta. U drugom slučaju kod vlačnog i tlačnog elementa nema velikih razlika u ekscentricitetima sile pa su i otpornosti približno jednakih vrijednosti. U nastavku proračuna korištene su vrijednosti otpornosti dobivene pomoću stvarno izmjerenih dimenzija i mehaničkih karakteristika.

4 LABORATORIJSKA ISPITIVANJA PONAŠANJA TIPIČNOG SPOJA U ČVORU KUPOLE

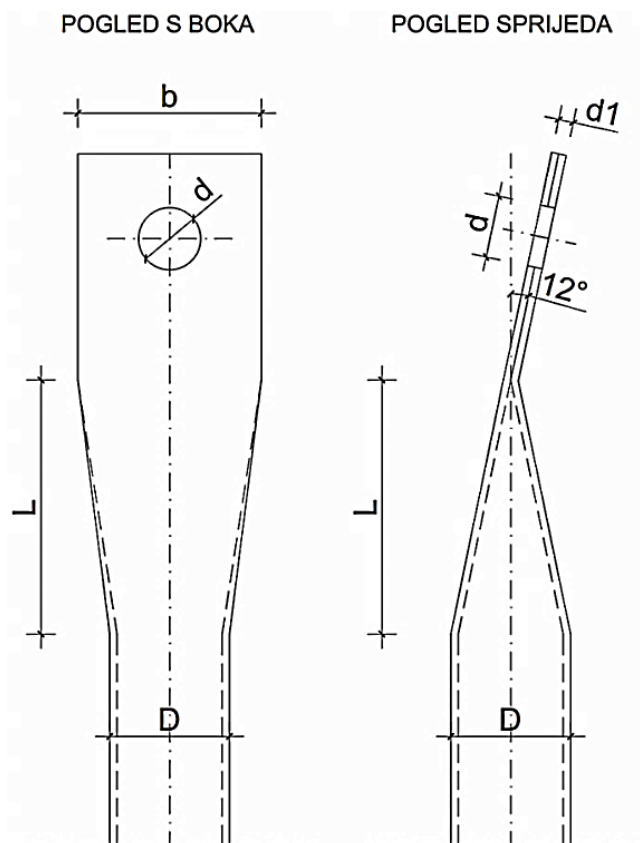
4.1 Opseg i ciljevi laboratorijskog ispitivanja spoja u čvoru kupole

Cilj ovog poglavlja je eksperimentalno ispitati ponašanje vijčanog spoja u čvoru geodetske kupole. U narednim točkama predstavljena su i objašnjena provedena laboratorijska ispitivanja. Zbog složenosti ispitivanja stvarne konfiguracije spoja, ispitana je pojednostavljena verzija s jednim elementom i debelom čeličnom pločom, koja predstavlja ostale elemente spoja. Ova pojednostavljena konfiguracija je odabrana da bi se isprovociralo otkazivanje kritičnog spljoštenog i dodatno savinutog dijela cijevi. 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.

4.2 Opis programa laboratorijskog ispitivanja spoja kupole

4.2.1 Geometrijska svojstva cijevnih uzoraka

Svi uzorci sastoje se od cijevnog elementa 42,4x2,6 koji se vijčano pričvršćuje na čeličnu ploču debljine 20 mm. Važno je naglasiti da je debljina stijenke od 2,6 mm nominalna vrijednost te se kasnije u proračunu debljina stijenke uzima kao srednja izmjerena vrijednost, tj. 1,9 mm. Nominalna kvaliteta čelika je S235, no ispitivanjem mehaničkih svojstava uzoraka utvrđeno je da se radi o čeliku veće čvrstoće i granice popuštanja. Cijevni element na jednom je kraju spljošten te savinut pod kutom od 12° te se zato i ploča postavlja pod jednakim kutom ukrućena s po dvije trapezne ukrute na svakoj strani. Uzorak cijevi na drugom je kraju ukrućen također trapeznim ukrutama koje su okomite jedna na drugu. Na slici 4.1 prikazane su oznake pojedinih dimenzija ispitnih uzoraka, a odgovarajuće vrijednosti istih dane su u tablici 4.1.



Slika 4.1 Oznake dimenzija cijevnog elementa

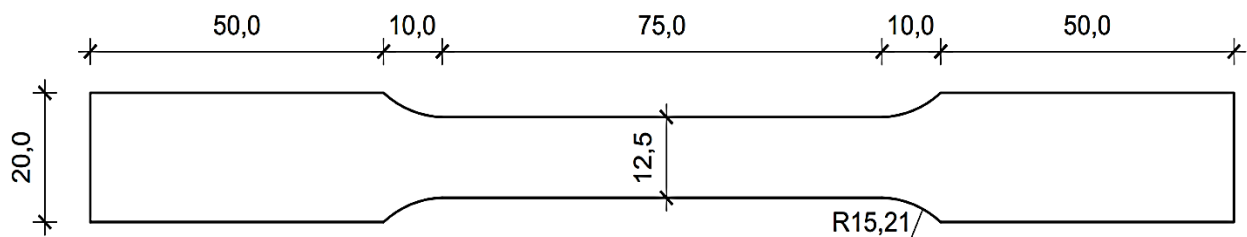
Tablica 4.1 Geometrijska svojstva cijevnih uzoraka

| UZORAK | T1 | T2 | T3 | C1 | C2 | C3 | Srednja vrijednost |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|--------------------|
| Promjer (D) [mm] | 42,5 | 42,5 | 42,4 | 42,3 | 42,5 | 42,7 | 42,5 |
| Širina (b) [mm] | 64,4 | 64,4 | 64,3 | 63,9 | 64,3 | 64,1 | 64,2 |
| Debljina (d1) [mm]* | 5,31 | 4,59 | 4,36 | 4,7 | 5,05 | 4,83 | 4,81 |
| Rupa za vijak (d) [mm] | 20,5 | 20,5 | 21,8 | 20,9 | 21,8 | 21,9 | 21,23 |
| Duljina spljoštavanja (L) [mm] | 90 | 90 | 92 | 91 | 90,7 | 93 | 91,1 |

* Debljina (d1) odnosi se na ukupnu debljinu spljoštenog dijela cijevnog elementa naznačenu na slici 4.1. Debljina stijenke cijevi dana je u tablici 4.2 u kojoj su opisana geometrijska svojstva epruveta za vlačno ispitivanje pod oznakom „Prosječna debljina (a)“

4.2.2 Ispitivanje mehaničkih svojstava cijevnih uzoraka

U svrhu utvrđivanja stvarnog materijala, provedena je vlačna proba čeličnih epruveta prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 [15]. Čelični uzorci, epruvete, izvađeni su iz cijevnih profila CHS 42,4 x 2,6. Ispitivanje se provodilo na Zwick&Roell statičkom uređaju za ispitivanje kapaciteta ± 600 kN, brzine unosa opterećenja 0,001 mm/min - 200 mm/min, s maksimalnim pomakom od 1700 mm. Zbog vrlo malih dimenzija uzoraka za ispitivanje, nisu se mogle koristiti standardne hidraulične čeljusti pa su unutar njih dodatno postavljene mehaničke čeljusti. Preko mehaničkih čeljusti vrši se unos vlačne sile. Cijeli uređaj pokreće elektromotor, a njime se upravlja pomoću računala i programskog paketa TestXpert. Određivanje sile vrši se pomoću mjerne doze smještene ispod mehaničkih čeljusti. Mjerenje deformacija vrši se pomoću ekstenzometara na mjernoj duljini koja ovisi o veličini poprečnog presjeka ispitnog uzorka. Normama [15] su za ovaj tip ispitivanja određeni oblik i mjere ispitnog uzorka, brzina opterećenja, temperatura prostora u kojem se provodi ispitivanje te način provođenja ispitivanja i izračunavanja rezultata.



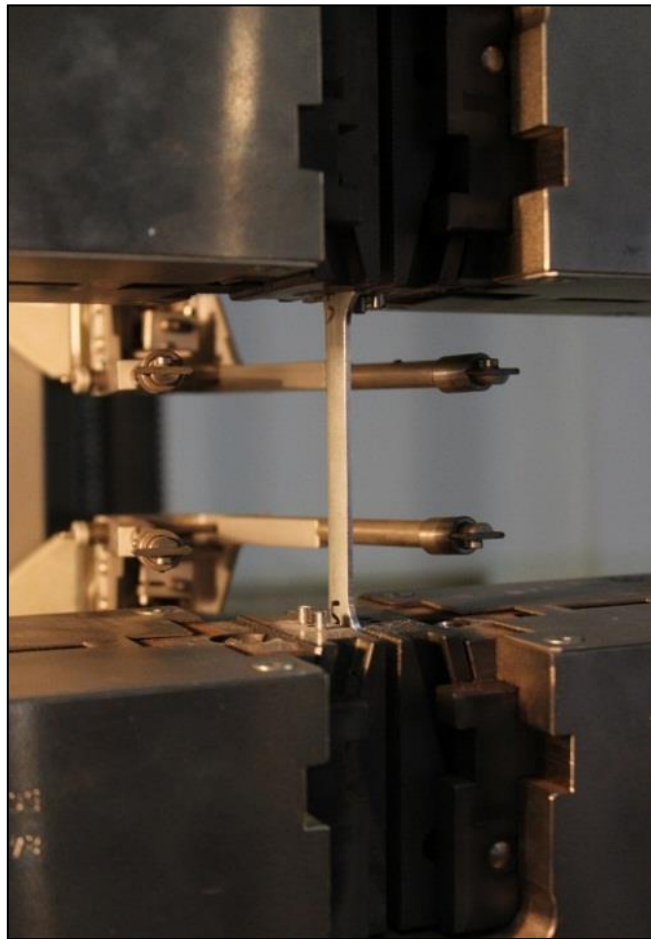
Slika 4.2 Dimenzije i oblik uzorka za ispitivanje materijala [15]

Ispitivanje se provelo na 6 uzoraka. Za svaki od uzoraka provjerene su i izmjerene dimenzije debljine i širine uzorka na mjernoj duljini iz kojih je izračunata površina poprečnog presjeka te određena nominalna širina, b_0 , za svaki od uzoraka, koja se koristi kao ulazni podatak.

Tablica 4.2 Izmjerene dimenzije pojedinih uzoraka materijala

| UZORAK | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Srednja vrijednost |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
| Prosječna širina (b_0) [mm] | 12,45 | 12,41 | 12,49 | 12,51 | 12,43 | 12,40 | 12,44 |
| Prosječna debljina (a) [mm] | 1,87 | 1,86 | 1,91 | 1,92 | 1,91 | 1,86 | 1,89 |
| Površina (S_0) [mm] | 23,64 | 23,40 | 24,25 | 24,36 | 24,17 | 23,47 | 23,88 |
| Nominalna širina (b_0) [mm] | 12,65 | 12,61 | 12,69 | 12,72 | 12,63 | 12,61 | 12,65 |

Zbog zakrivljenog oblika elementa iz kojeg su uzorci izvađeni, oni su imali određeni radijus, pa je prije početka samog ispitivanja uzorak opterećen u svrhu njegovog izravnavanja kako bi ekstenzometar na izvorno zakrivljenoj strani uzorka mogao mjeriti željene deformacije. Da bi se izbjegla oštećenja, nakon dosezanja maksimalne sile i pri početku suženja poprečnog presjeka, ekstenzometri se odmiču od uzorka te se mjerenje deformacije vrši samo na mjernom uređaju. Osim ranije navedenih problema, ispitivanje uzoraka izvađenih iz cijevnih profila dodatno je zakomplicirano tankom stijenkom profila.

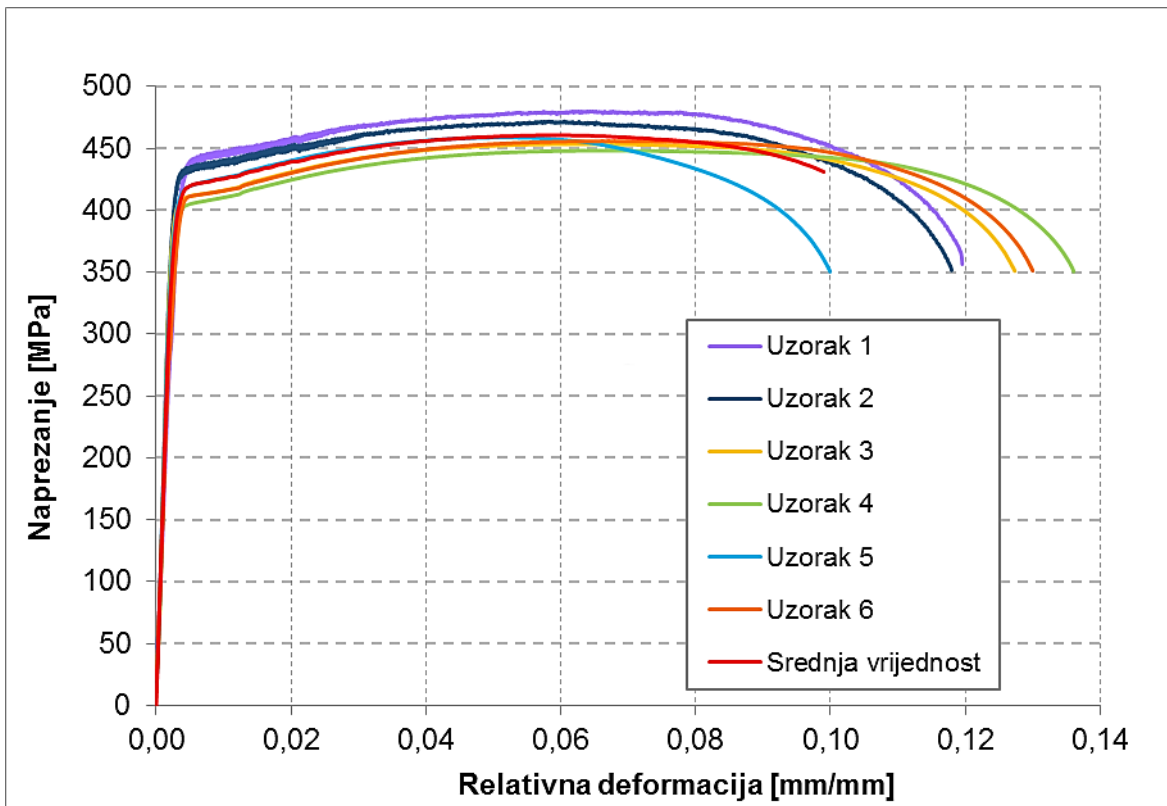


Slika 4.3 *Provedba ispitivanja uzorka prihvaćenog mehaničkim čeljustima*



Slika 4.4 Uzorci nakon loma

Na slici 4.5 prikazani su dijagrami naprezanje – deformacija dobiveni ispitivanjem. U tablici 4.3 dane su očitane inženjerske vrijednosti mehaničkih karakteristika materijala.



Slika 4.5 Inženjerski σ - ϵ dijagrami ispitanih čeličnih epruveta

Tablica 4.3 Mehaničke karakteristike ispitanih epruveta

| Uzorak | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Sr. vrijed. |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|
| Granica popuštanja f_y [MPa] | 431 | 431 | 410 | 403 | 417 | 407 | 417 |
| Čvrstoća f_u [MPa] | 480 | 472 | 453 | 448 | 459 | 456 | 461 |

Modul elastičnosti jednak je za sve uzorke i iznosi $E = 210000$ Mpa. Isto vrijedi i za Poissonov koeficijent koji iznosi $\nu = 0,3$.

4.3 Ispitivanje uzoraka

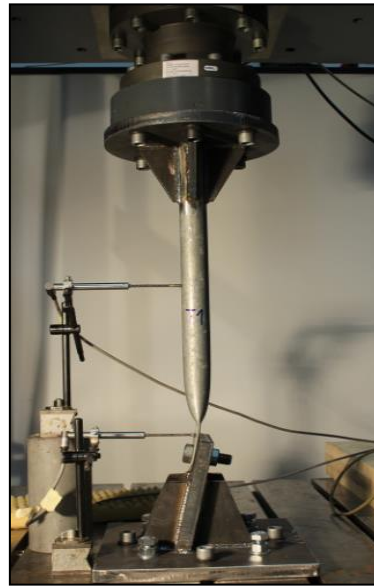
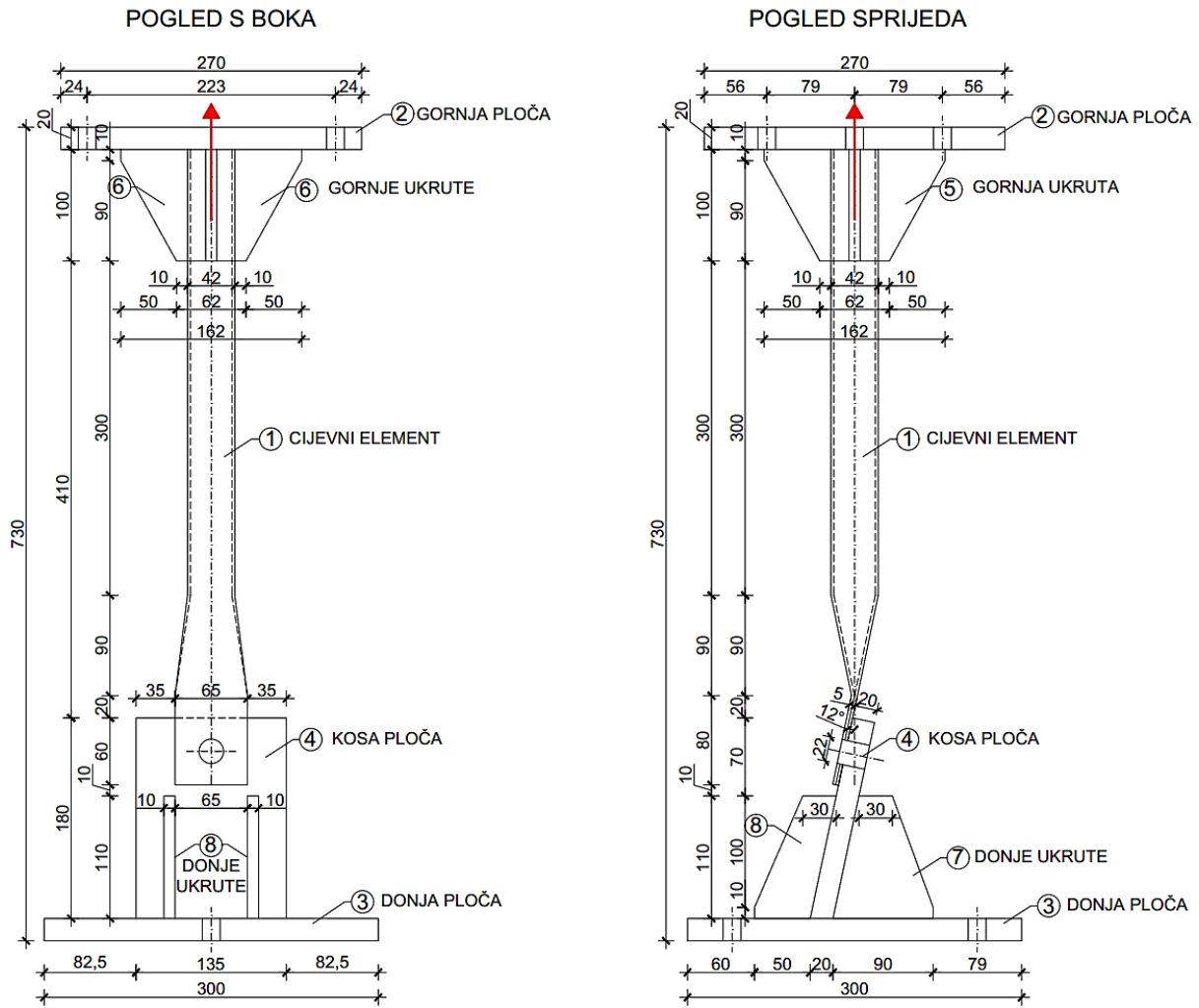
4.3.1 Općenito

Ispitivanje mehaničkih osobina materijala spojnih sredstava (vijci) i elemenata priključka (cijev) provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija na Građevinskom fakultetu u Zagrebu 19. prosinca 2016. te 6. ožujka 2017. godine. Ispitano je ukupno 12 uzoraka materijala, od toga 6 uzoraka cijevi i 6 uzoraka vijaka. Svi uzorci su ispitani na Zwick&Roell statičkom uređaju za ispitivanje kapaciteta ± 600 kN, brzine unosa opterećenja 0,001 mm/min – 200 mm/min, s maksimalnim pomakom od 1700 mm.

4.3.2 Postupak provedbe ispitivanja

Montaža opreme za ispitivanje i sama ispitivanja uzoraka spojeva kupole provedena su u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija na Građevinskom fakultetu u Zagrebu 19. prosinca 2016. godine.

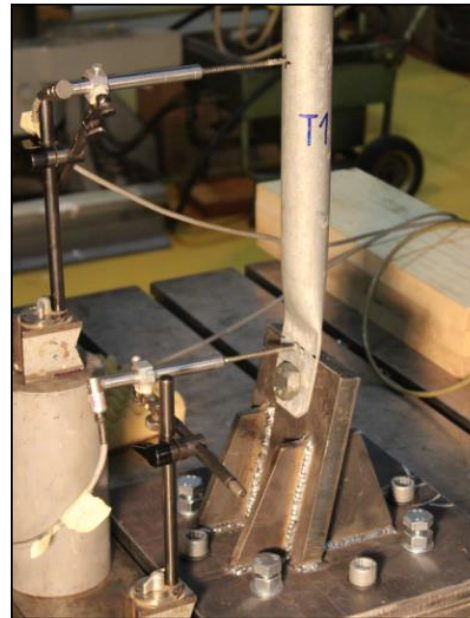
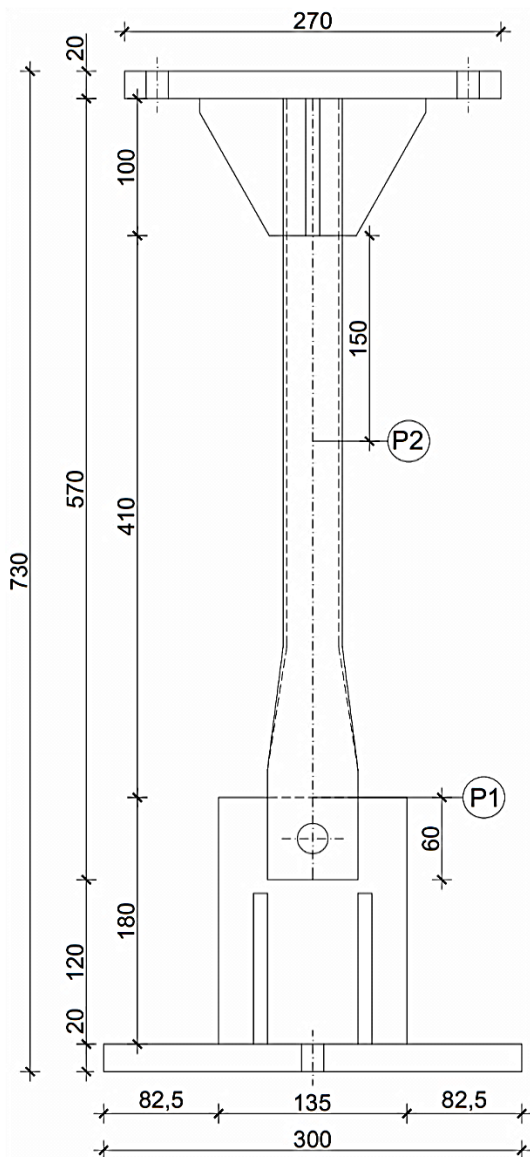
Od ukupno 6 uzoraka, 3 su ispitana na vlačnu, a 3 na tlačnu silu. Ispitivanje je započeto ispitivanjem uzoraka na vlačnu silu, tj. uzoraka s oznakama T1, T2 i T3. Sila je unesena u element cijevi (1) promjera prosječno 42,5 mm debljine stijenke 2,0 mm. Opterećenje je uneseno preko statičke preše prema slici 4.6. Na toj slici prikazan je razmještaj uzoraka i dodatne opreme za ispitivanje na vlak. Na podnožju preše se nalazi element sastavljen od kose ploče (4) debljine 20 mm, postavljene pod kutom od 12° u odnosu na os cijevi koja se na nju naslanja. Kosa ploča poduprta je trapeznim ukрутama (7,8) debljine 10 mm i zavarena na donju ploču (3) tlocrtnih dimenzija 30x30 cm, debljine također 20 mm. Donja ploča izrađena je s rupama za vijke odgovarajućeg promjera od 19 mm u svrhu vijčanog pričvršćivanja za podnožje preše. Na prethodno opisani element vijčano se spaja cijevni element navedenih dimenzija koji zbog savinutosti spljoštenog dijela na svojem jednom kraju odgovara nagibu kose ploče na koju se spaja vijkom M20. Taj spoj simulira traženi spoj više štapova kupole koji se naslanjaju jedan na drugi i međusobno spajaju zajedničkim vijkom. Na prešu je uzorak koji je dodatno ukručen dvjema trapeznim ukрутama (5, 6) spajan vijčano preko kružne gornje ploče (2) učvršćene pomoću 6 vijaka. U cilju postizanja istih laboratorijskih uvjeta svi su vijci pritegnuti s momentom od 140 Nm.



Slika 4.6 Razmještaj uzoraka i dodatne opreme za ispitivanje na vlak

Ispitivanja su provedena uz kontrolu pomaka s brzinom 0,5 mm/min s kasnijim povećanjem do otkazivanja uzorka. Kod prvih dva uzorka ispitana na vlak, T1 i T2 ispitivanje je provedeno do loma, dok je kod trećeg uzorka T3 zaustavljeno prije loma kada su deformacije postale velike.

Horizontalni pomaci su mjereni LVDT induktivnim osjetilima. LVDT uređaji (Linear Variable Differential Transformer - linearno promjenjivi diferencijalni transformator) su induktivna osjetila za mjerenje pomaka. Spadaju u električna osjetila te se njima mjere pomaci u opsegu od nekoliko nm do nekoliko cm, s granicama pogrešaka $\pm 0,5\%$ i linearnošću $\pm 0,5\%$. Mjerni uređaji kod vlačnih uzoraka su postavljeni na dva mjerna mjesta, 60 mm mjereno od donjeg ruba cijevnog elementa (P1) te 150 mm mjereno od ruba gornjih ukruta (P2). Razmještaj mjernih uređaja prikazan je na slici 4.7.



Slika 4.7 Razmještaj mjernih uređaja

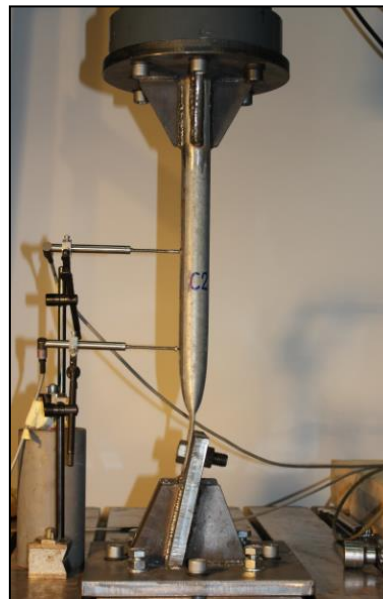
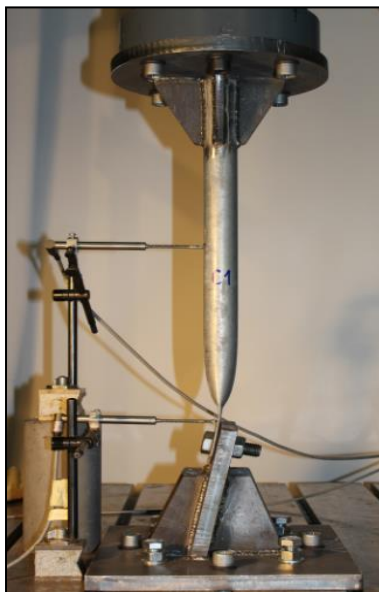
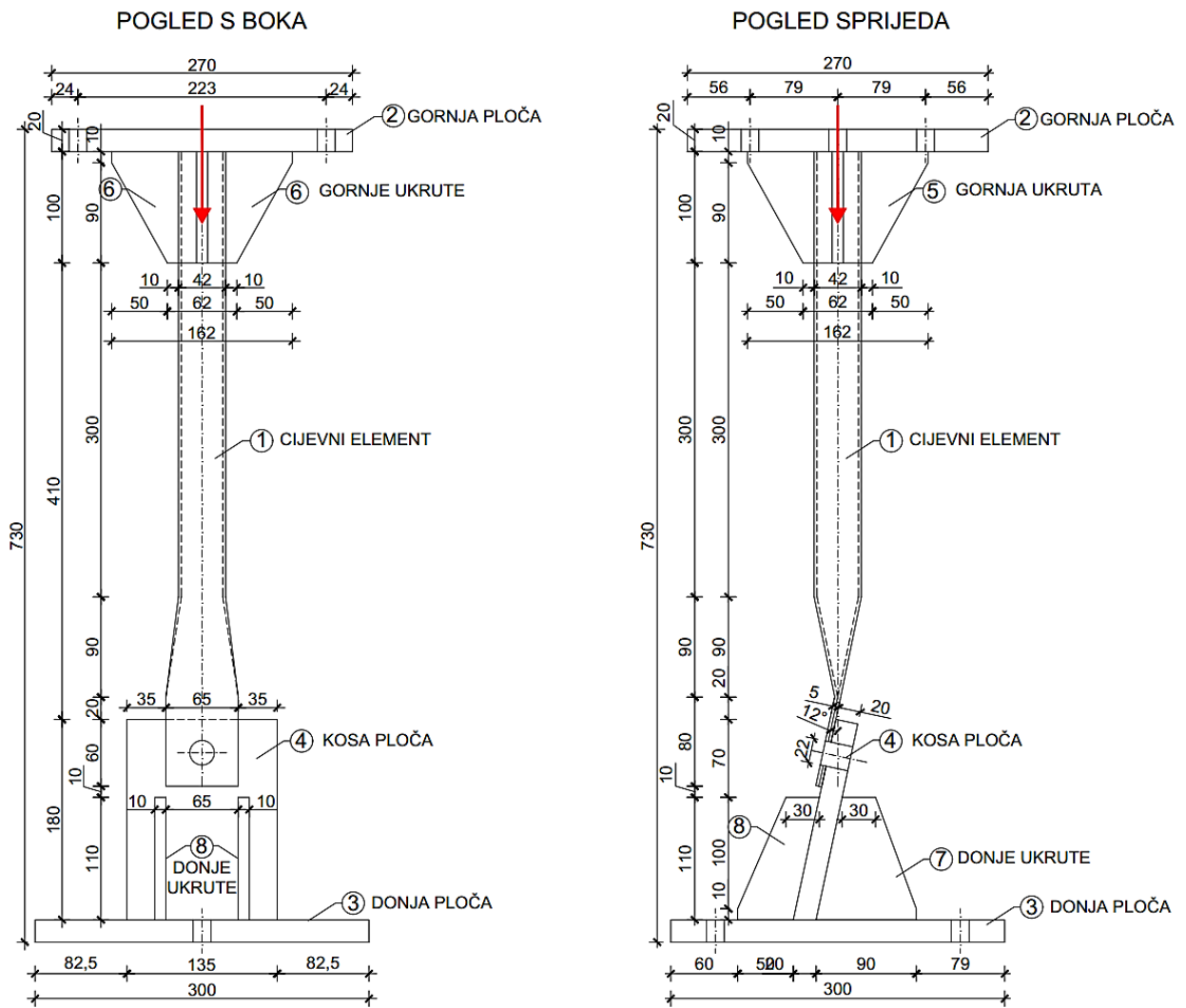
Ispitivanje prvog uzorka, T1, je provedeno kroz 3 ciklusa. Prvi ciklus je ciklus zagrijavanja, dok drugi započinje opterećivanjem uzorka do proklizavanja vijka. Opterećenje je statička sila koja se nanosi, kao što je već spomenuto, s kontrolom pomaka s brzinom unosa pomaka 0,5 mm/min. Prvo se provodi opterećenje do sile od 30 kN s korakom od 5 kN do proklizavanja vijka. Na sili od 18 kN vijak kliže, tj. u koraku između 15 i 20 kN. Potom se uzorak savija, a sila pada, dolazi do nalijeganja vijka (u koraku od 20 do 25 kN) i nakon toga uzorak očvršćava te se počinje ponašati prema očekivanom. Nakon zadržavanja od 30 sekundi kod sile od 30 kN, rasterećuje se do nule i u tom trenutku pomak traverze je 2,6 mm. Nakon rasterećenja počinje treći ciklus opterećenja. U ovom koraku opterećuje se s korakom od 10 kN do sile od 50 kN sa stajanjem na svakom koraku od 30 sekundi. Na pomaku traverze od 8,4 mm brzina unosa pomaka se povećava s 0,5 na 1,0 mm/min dok se na 11,5 mm pomaka traverze ubrzava na 2 mm/min te dolazi do otkazivanja uzorka na pomaku od 15,7 mm. Početna sila kod ispitivanja ovog uzorka je 0,9 kN.

Drugi uzorak, T2, opterećuje se do proklizavanja također do sile od 30 kN, ali bez stajanja, s brzinom unosa pomaka 0,5 mm/min. Početna sila je 1,36 kN. Do promjene nagiba, tj. do klizanja vijka dolazi na sili manjoj od 20 kN nakon čega slijedi pad sile te ponovni rast i očvršćivanje na 3 mm pomaka. Na sili od 30 kN rasterećuje se do nule te kreće ponovno opterećenje s korakom od 10 kN. Na 5,5 mm pomaka traverze povećava se brzina unosa pomaka s početnih 0,5 mm/min na 2 mm/min. Do loma uzorka dolazi, kao i kod prvog uzorka, na 15,06 mm pomaka traverze.

Treći vlačni uzorak ispituje se jednako kao i drugi uzorak, ali ne do loma. Ispitivanje je u ovom slučaju prekinuto na 13,75 mm pomaka traverze kad su uočene velike deformacije uzorka koje bi uskoro dovele do loma. Kod ovog uzorka bitno je napomenuti da je došlo do tehničkih poteškoća prilikom ispitivanja, u trećem ciklusu opterećenja, tj. u ciklusu opterećenja nakon faze rasterećenja od 30 kN do 0 kN. Zato su rezultati ovog ispitivanja razlomljeni u 3 faze pa su rezultati dobiveni spajanjem ta tri dijela.

Prosječno trajanje ispitivanja prva dva vlačna uzorka je bilo oko 30 min, kod zadnjeg nešto kraće zbog zaustavljanja prije loma. Kod sva tri uzorka za spoj koji simulira promatrani spoj kupole korišteni su vijci kvalitete 8.8.

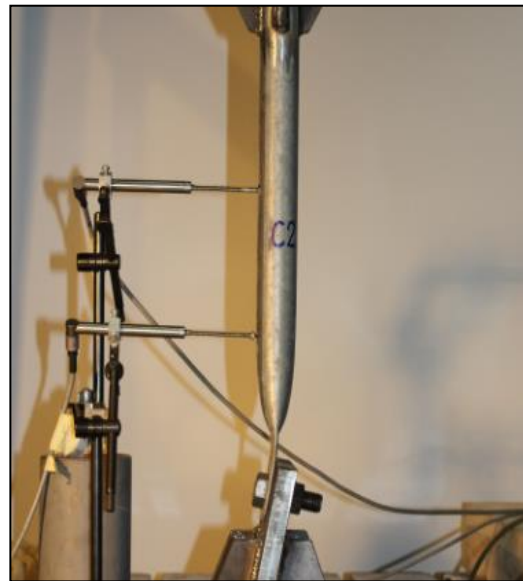
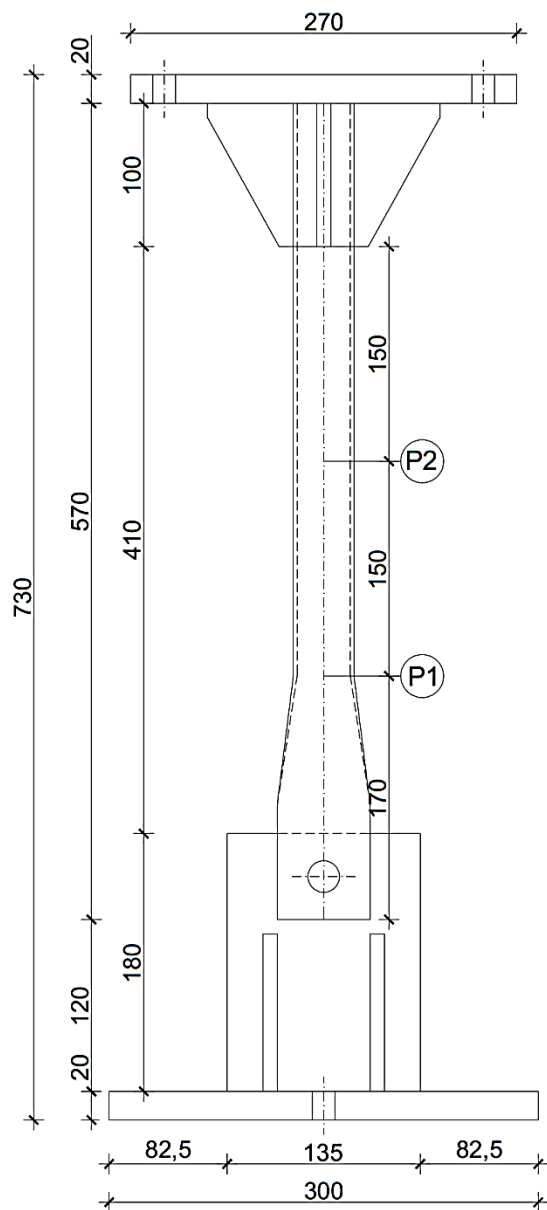
Nakon ispitivanja vlačnih uzoraka ispituju se tlačni uzorci, tj. uzorci s oznakom C, a to su C1, C2 i C3. Na slici 4.8 prikazan je razmještaj uzoraka i dodatne opreme za ispitivanje na tlak.



Slika 4.8 Razmještaj uzoraka i dodatne opreme za ispitivanje na tlak

Ispitivanja su provedena uz kontrolu pomaka s brzinom 0,5 mm/min s kasnijim povećanjem do uočavanja velikih deformacija te zaustavljanja prije loma.

Pomaci su mjereni LVDT induktivnim osjetilima. Mjerni uređaji kod prvog tlačnog uzorka su postavljeni kao i za vlak na dva mjerna mjesta, 60 mm mjereno od donjeg ruba cijevnog elementa (P1) te 150 mm mjereno od ruba gornjih ukruta (P2) (slika 4.8). Kod druga dva uzorka mjerni uređaj na mjestu P1 se pomiče iznad vijka na udaljenost 150 mm od P2, tj. 170 mm od donjeg ruba cijevi. Razmještaj mjernih uređaja prikazan je na slici 4.9.



Slika 4.9 Razmještaj mjernih uređaja

Ispitivanje prvog tlačnog uzorka, C1, provodi se po istom postupku kao i ispitivanja vlačnih uzoraka. Prvi ciklus je ciklus zagrijavanja, drugi je ciklus opterećenja do sile od 30 kN bez stajanja nakon čega slijedi rasterećenje te treći ciklus u kojem se opterećuje s korakom po 10 kN. Na pomaku traverze 4 mm povećava se brzina unosa pomaka na 2 mm/min. Na pomaku od 9,5 mm, pri kojem su uočene velike deformacije koje vode prema lomu, zaustavljeno je ispitivanje.

Drugi uzorak, C2, opterećuje se također kroz 3 ciklusa. Prvi ciklus je do sile od 10 kN nakon čega slijedi rasterećenje, zatim do 30 bez stajanja pa rasterećenje, pa treći ciklus s korakom od 10 kN. Pad sile uočen je tek pri sili od 40 kN. Brzina unosa pomaka u ovom se ispitivanju povećava na 4 mm pomaka traverze, a zaključeno je da uzorak kasnije otkazuje jer je 'prednapet' kod spajanja zbog nepoklapanja rupa za vijke. Kao i kod prethodnog uzorka ispitivanje se zaustavlja prije pucanja uzorka kod pomaka od 10 mm.

Treći tlačni uzorak, C3, ispitan je jednako kao i uzorak C2. Sila prije postavljanja uzorka bila je 0, dok je kod početka opterećivanja iznosila 872 N. Na 4,4 mm pomaka traverze povećava se brzina unosa pomaka, a taj pomak odgovara sili od 41 kN. Ispitivanje je zaustavljeno na pomaku od 9 mm, također prije loma.

Prosječno trajanje ispitivanja svakog od tlačnih uzoraka je bilo oko 25 min. Kod svih uzoraka za spoj koji simulira promatrani spoj kupole korišteni su vijci kvalitete 8.8.

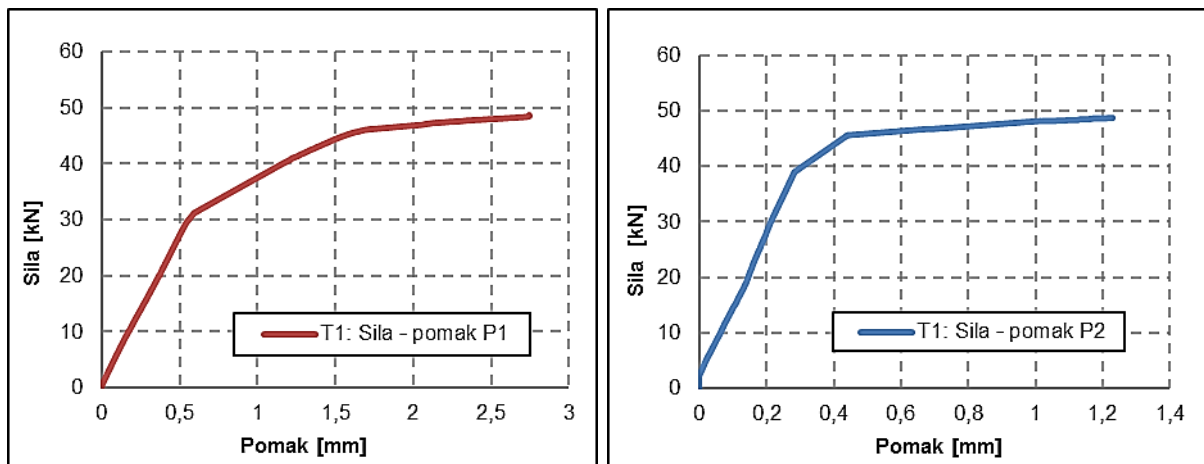
4.4 Rezultati ispitivanja

4.4.1 Eksperimentalni rezultati – odnos sile i pomaka na mjestu P1 i P2

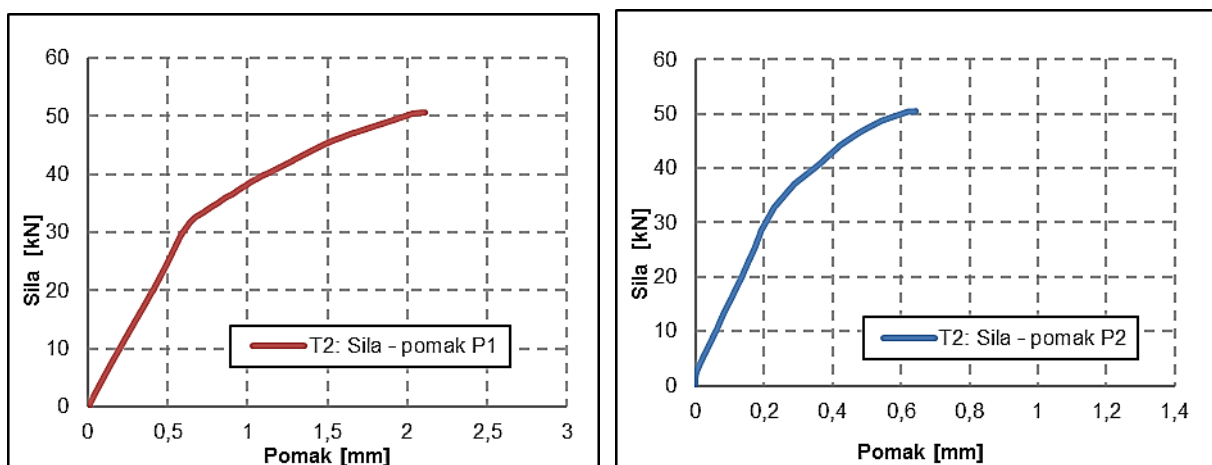
U ovoj točki prikazat će se rezultati u obliku dijagrama ovisnosti maksimalne sile i pomaka mjerenih LVDT uređajima na prethodno naznačenim mjernim mjestima P1 i P2 te ovisnosti maksimalne sile i pomaka preše.

4.4.1.1 Vlačna ispitivanja

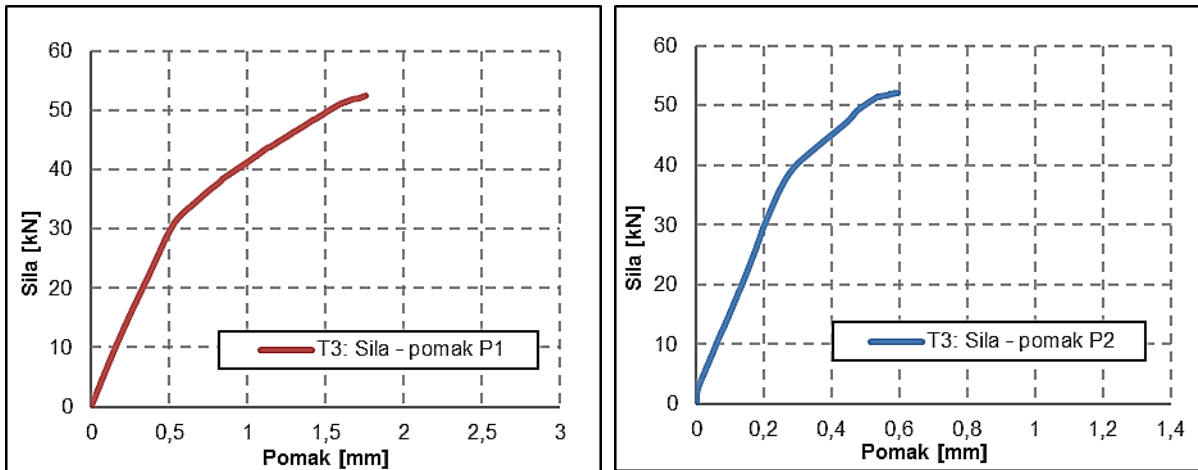
Na slikama 4.10 - 4.12 prikazani su dijagrami ovisnosti maksimalnih sila i pomaka na mjestu P1 i P2 za vlačne uzorke, tj. uzorke T1 do T3. Nakon toga, na slikama 4.13 i 4.14 priloženi su dijagrami na kojima je vidljiva usporedba ponašanja sva tri uzorka razmatrajući posebno pomak na mjernom mjestu P1 i pomak na mjestu P2.



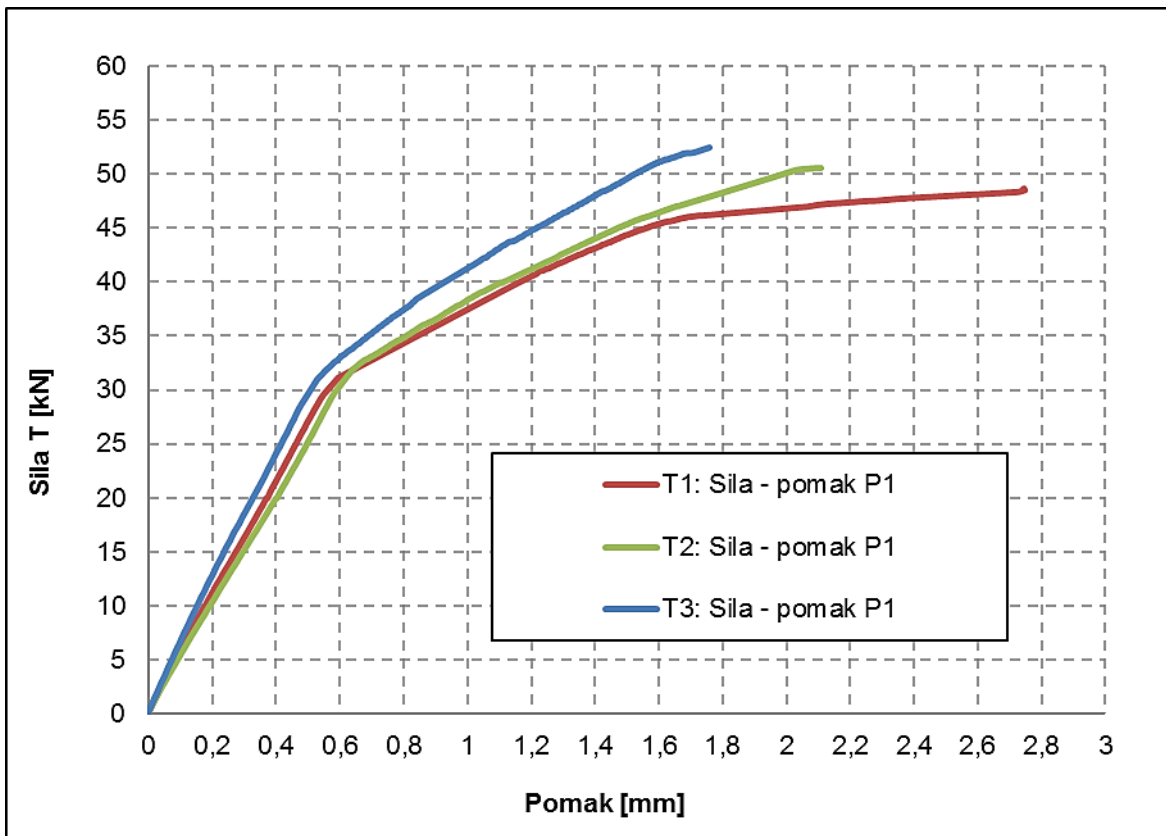
Slika 4.10 Pomak na mjestu P1 i P2 za uzorak T1



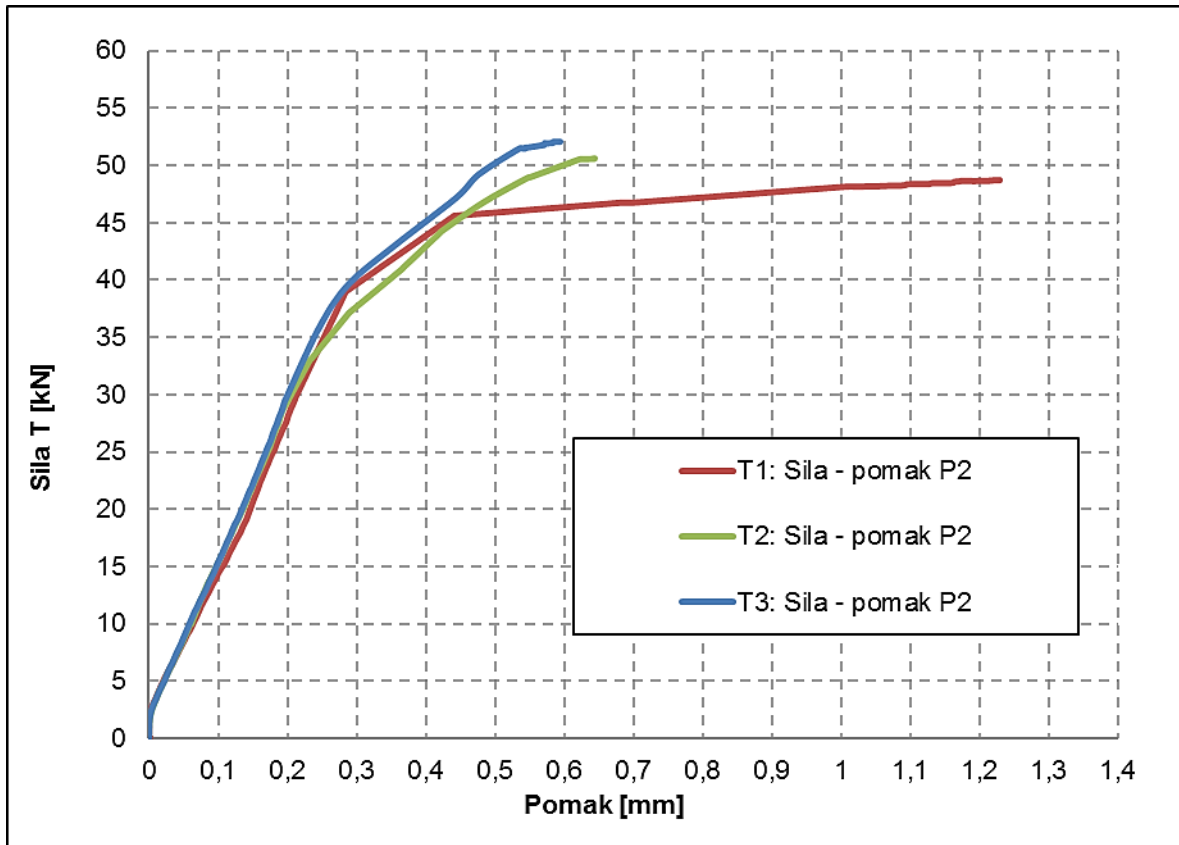
Slika 4.11 Pomak na mjestu P1 i P2 za uzorak T2



Slika 4.12 Pomak na mjestu P1 i P2 za uzorak T3



Slika 4.13 Pomak na mjestu P1 za sve vlačne uzorke (T1 – T3)

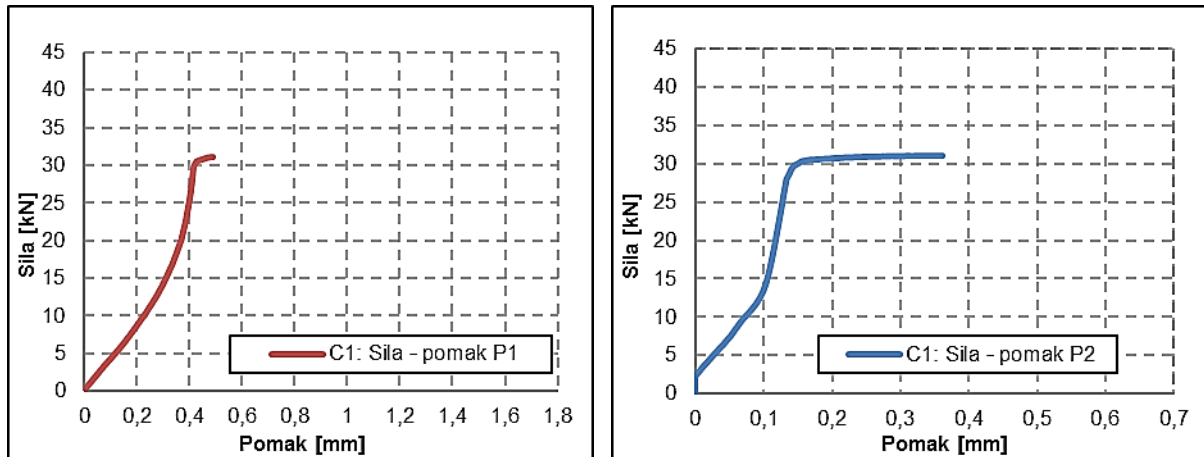


Slika 4.14 Pomak na mjestu P2 za sve vlačne uzorke (T1 – T3)

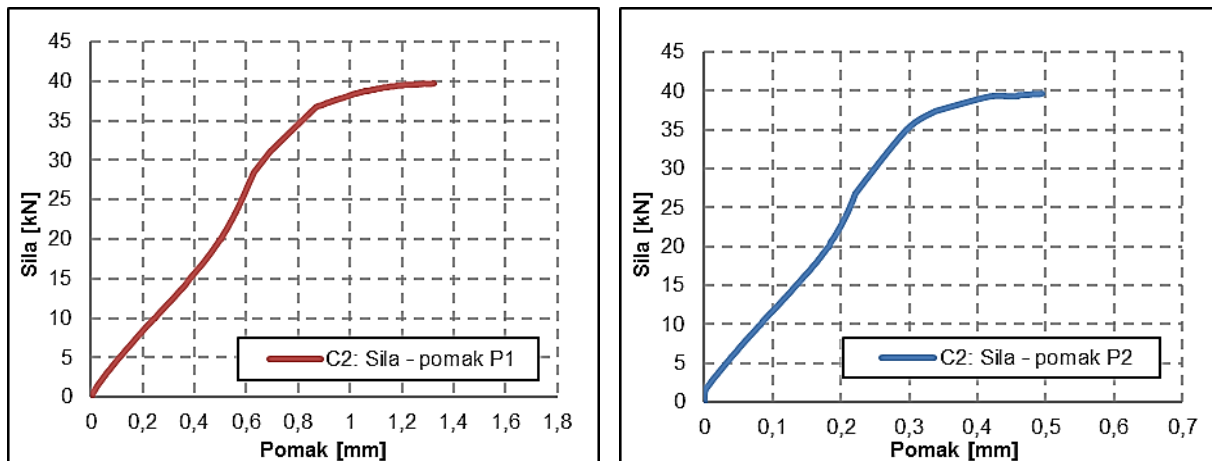
Uočava se vrlo slično ponašanje uzoraka s obzirom na pomake na prethodno određenim mjernim mjestima. Manje razlike u ponašanju javljaju se zbog načina ispitivanja te samih karakteristika materijala uzoraka. Iz priloženih grafova vidljivo je najveća sila u oba slučaja, tj. i kod praćenja pomaka na mjestu P1 i na mjestu P2 dosegnuta kod uzorka T3, dok je najmanja kod uzorka T1. Vezano za pomake, najveći pomak ostvaren je, također u oba slučaja, za uzorak T1, a najmanji za T3. Razlike koje se javljaju s obzirom na dosezanje maksimalne sile u odnosu na veličinu pomaka u tom trenutku, nastaju zbog provedbe ispitivanja, tj. kod uzorka T2 i T3 prilikom ispitivanja ranije je povećana brzina unosa pomaka s 0,5 mm/min na 2 mm/min (na oko 5,5 mm pomaka traverze) dok se kod uzorka T1 to povećanje izvodi značajno kasnije (na 11,5 mm pomaka traverze).

4.4.1.2 Tlačna ispitivanja

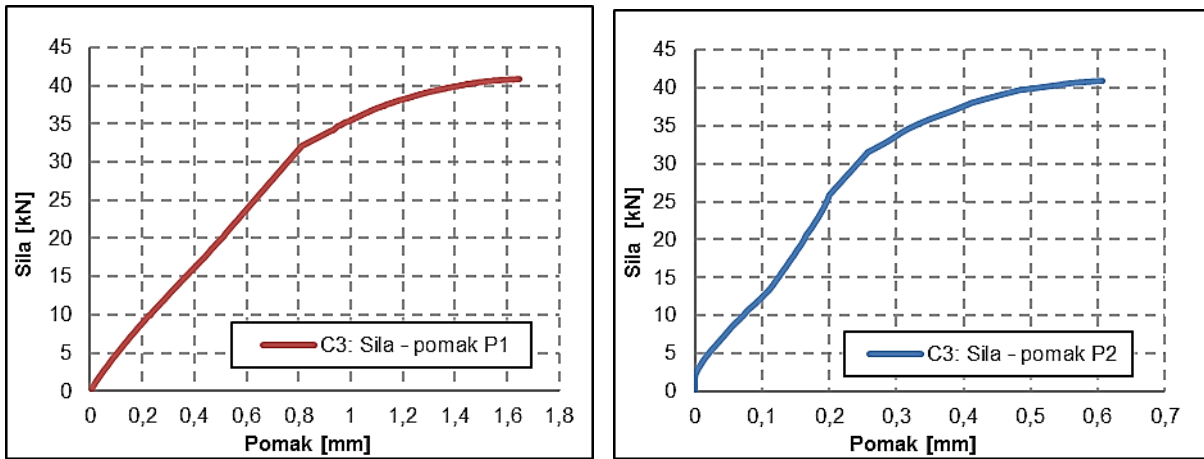
Na slikama 4.15 do 4.17 prikazani su dijagrami ovisnosti maksimalnih sila i pomaka P1 i P2 za tlačno ispitivane uzorke, tj. uzorke C1 do C3. Na slikama 4.18 i 4.19 priloženi su dijagrami na kojima je vidljiva usporedba ponašanja sva tri uzorka razmatrajući posebno pomak na mjernom mjestu P1 i pomak na mjestu P2.



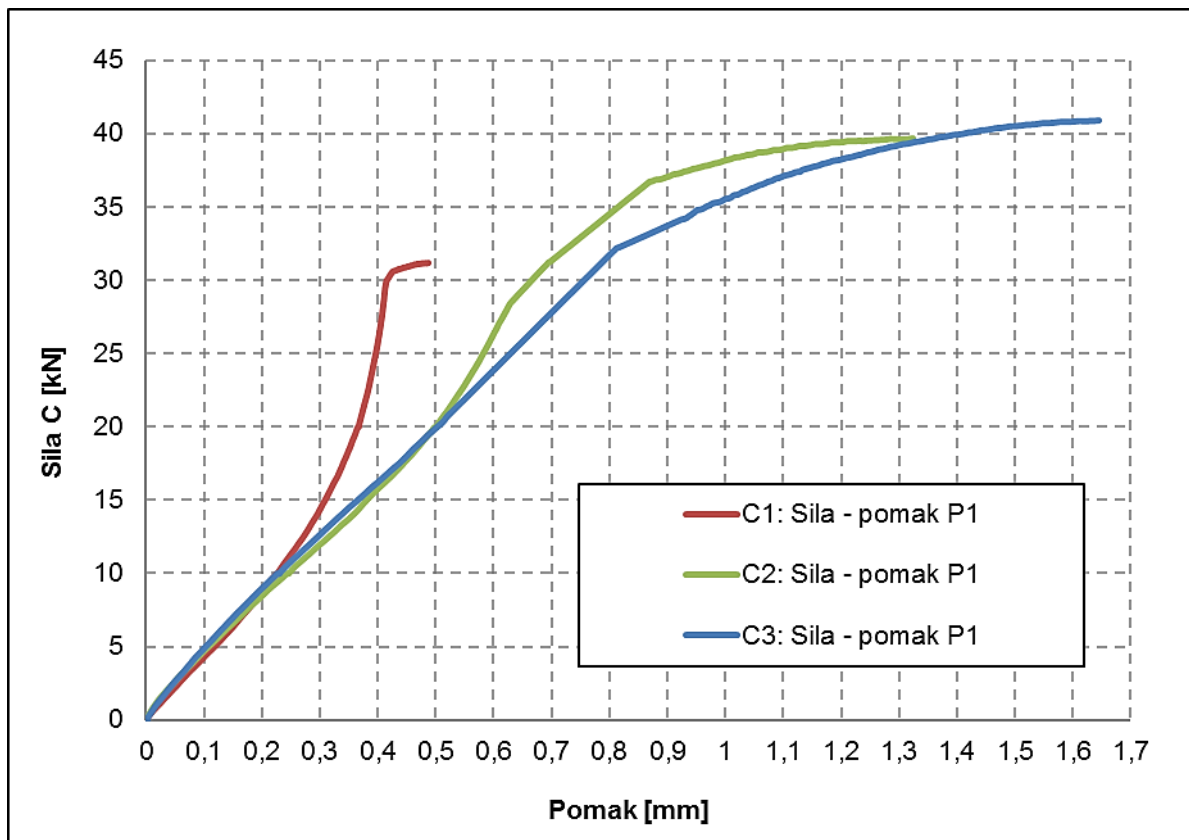
Slika 4.15 Pomak na mjestu P1 i P2 za uzorak C1



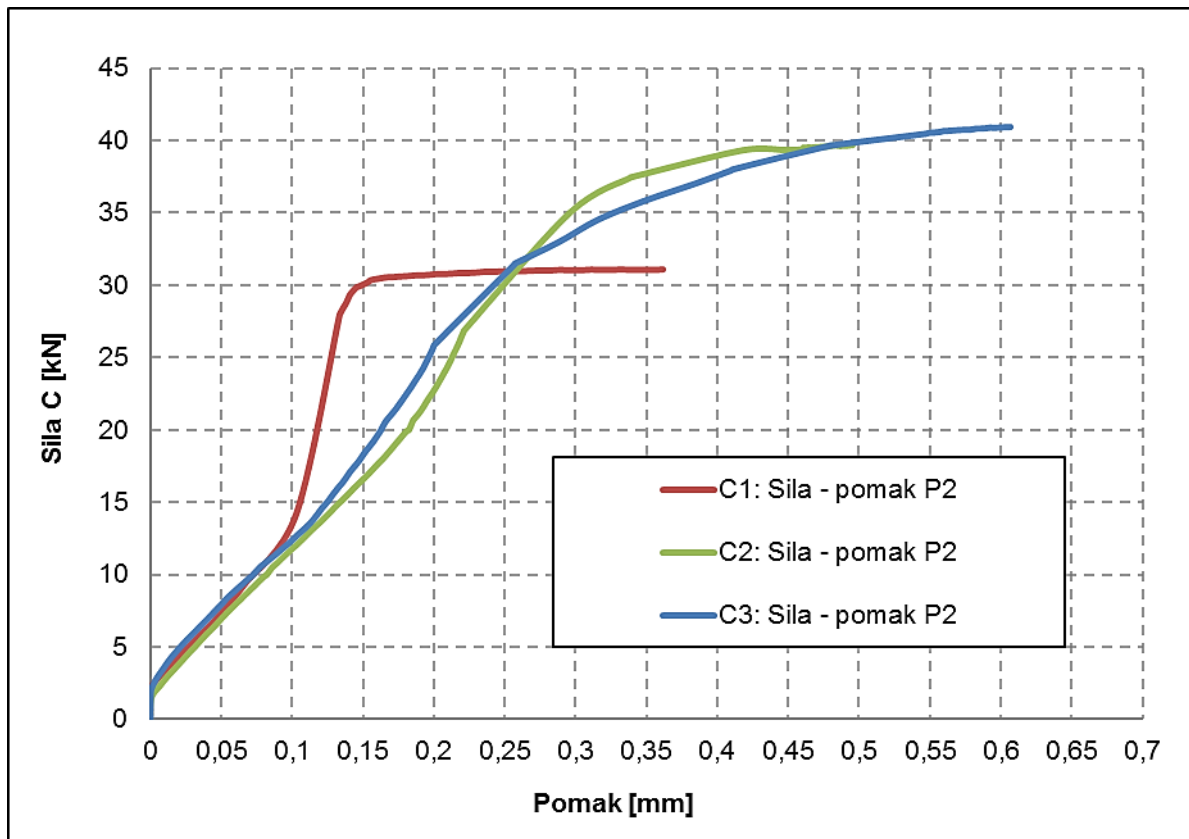
Slika 4.16 Pomak na mjestu P1 i P2 za uzorak C2



Slika 4.17 Pomak na mjestu P1 i P2 za uzorak C3



Slika 4.18 Pomak na mjestu P1 za sve tlačne uzorke (C1 – C3)



Slika 4.19 Pomak na mjestu P2 za sve tlačne uzorke (C1 – C3)

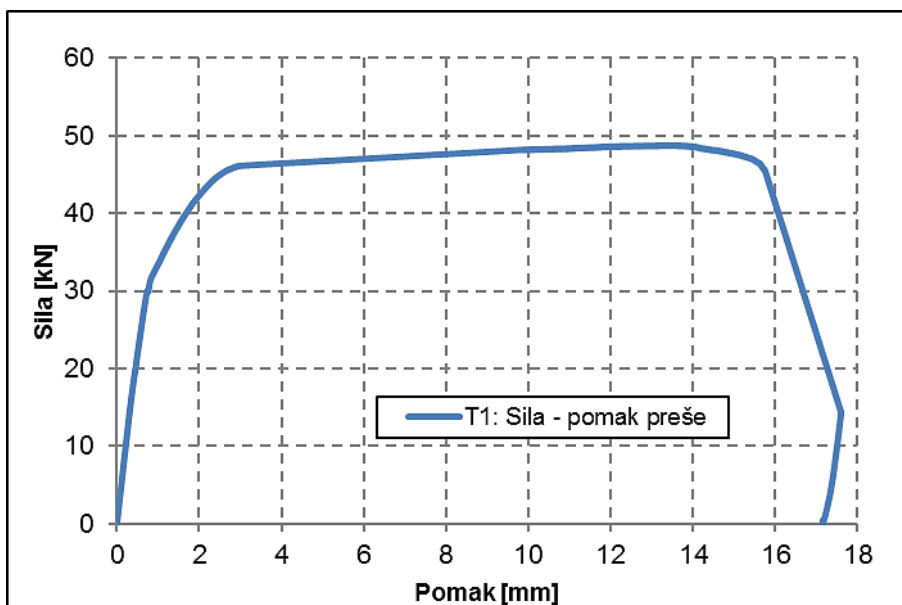
Na dijagramima priloženim za tlačne uzorke uočavaju se značajnije razlike kod uzorka C1 u odnosu na ostala dva uzorka C2 i C3. Te razlike nastaju zbog promjene mjernog mjesta P1 koje je pomaknuto s udaljenosti 60 mm od donjeg ruba cijevnog elementa, na udaljenosti od 150 mm u odnosu na mjerno mjesto P2. Maksimalna sila i pomak u oba slučaja, tj. i za pomak na mjestu P1 i za pomak na mjestu P2 ostvarene su za tlačni uzorak C3. Manje razlike u ponašanju kod uzoraka C2 i C3 koje su također vidljive nastaju zbog trenutka u kojem je, kao što je već spomenuto kod vlačnih uzoraka, povećava brzina unosa pomaka. Kod uzoraka C1 i C2 povećanje je pri 4 mm pomaka traverze, dok je kod uzorka C3 na 4,4 mm pomaka traverze pa je upravo zato kod tog uzorka dosegnut najveći pomak mjereno na oba mjerna mjesta.

4.4.2 Eksperimentalni rezultati – odnos sile i pomaka preše

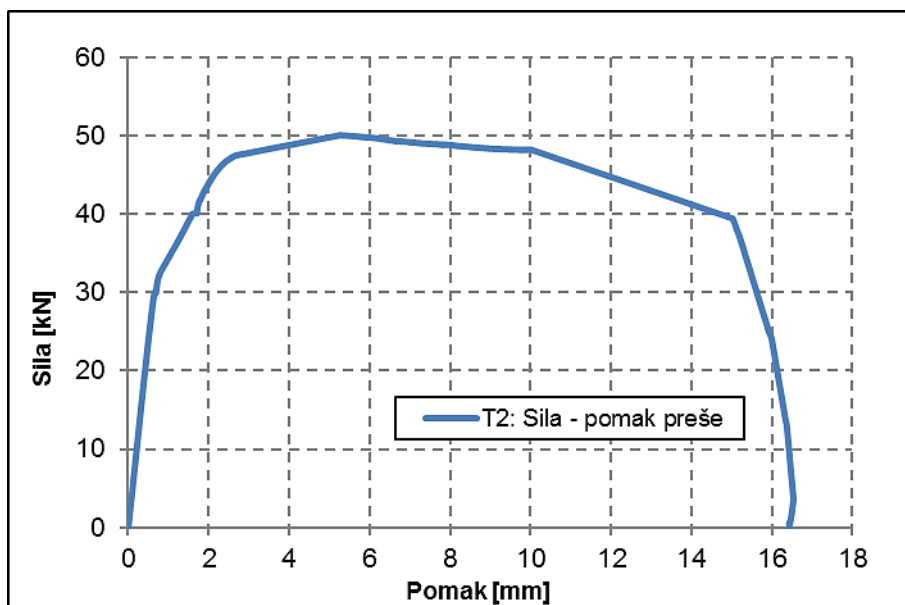
Drugi set dijagrama odnosi se na odnos maksimalne sile i pomaka traverze preše. Dijagrami su prikazani za svaki uzorak zasebno, kao i ukupno po grupama uzoraka, tj. zajednički za uzorke ispitivane na tlak, te one ispitivane na vlak.

4.4.2.1 Vlačna ispitivanja

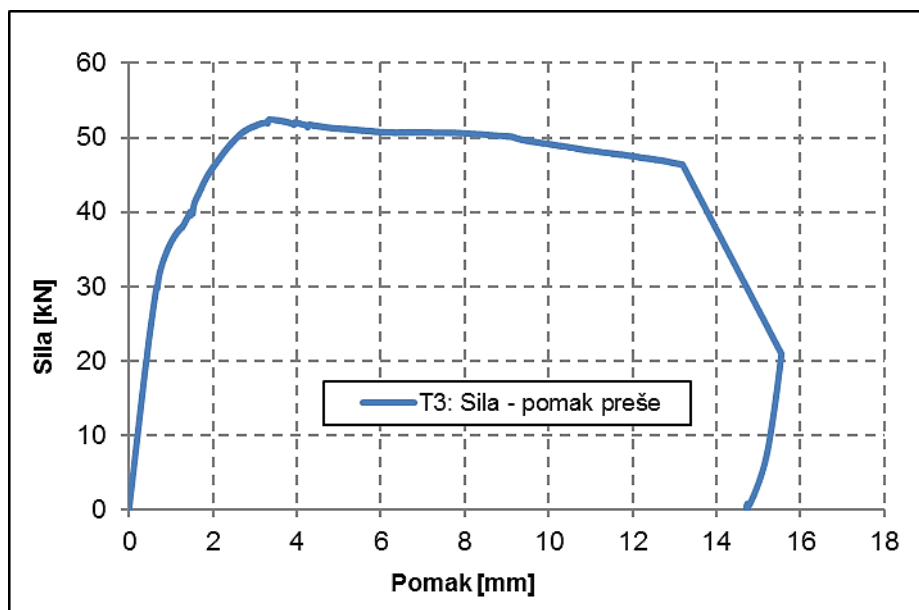
Prva tri dijagrama, slike 4.20 do 4.22, prikazuju odnos maksimalne sile i pomaka preše vlačnih uzoraka. Na slici 4.23 prikazan je zajednički dijagram usporedbe odnosa maksimalne sile i pomaka preše za sva ti vlačna uzorka T1 do T3.



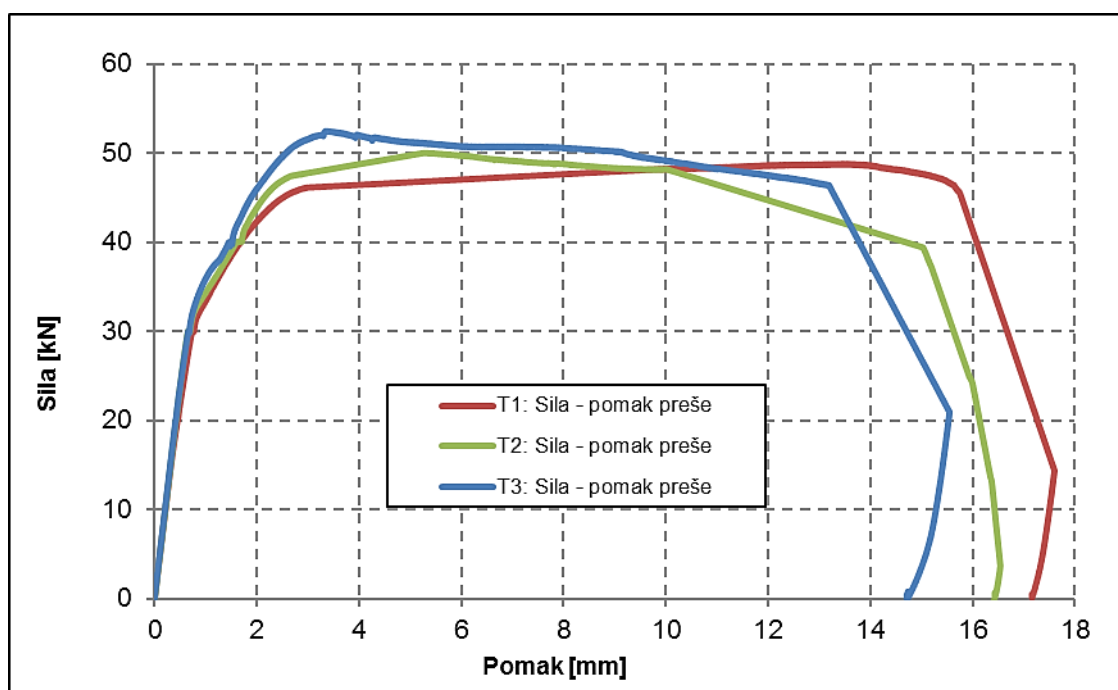
Slika 4.20 Pomak preše za uzorak T1



Slika 4.21 Pomak preše za uzorak T2



Slika 4.22 Pomak preše za uzorak T3

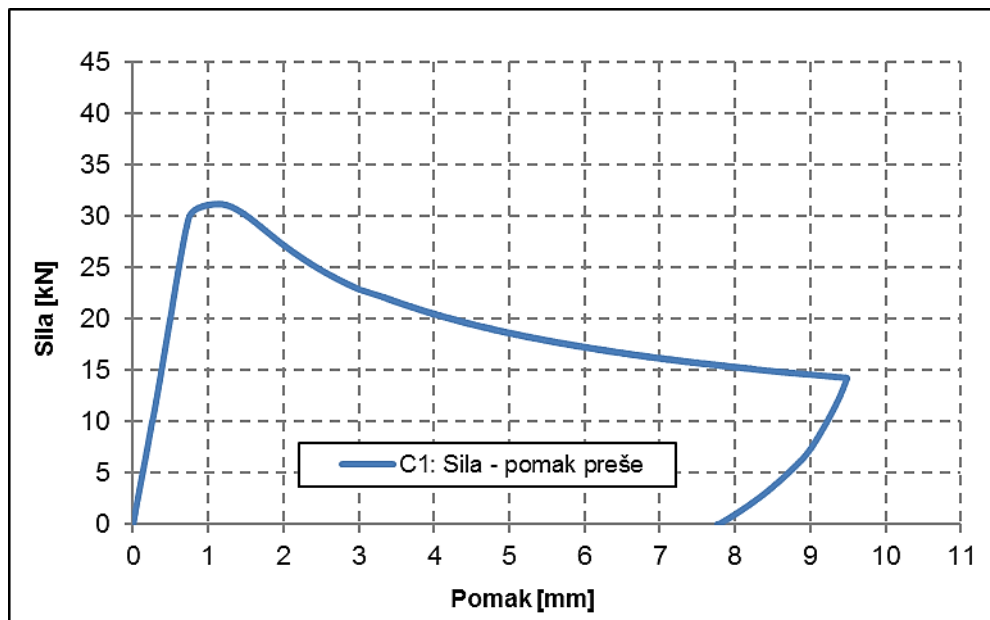


Slika 4.23 Pomak preše za vlačne uzorke (T1 – T3)

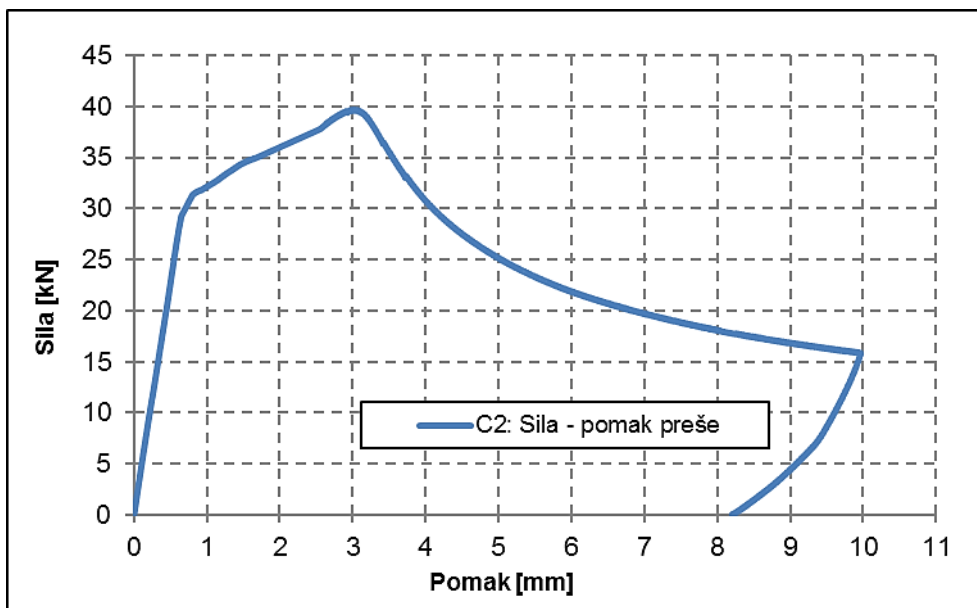
Usporedbom dijagrama za vlačne uzorke uočene su neke razlike u ponašanju. S obzirom da je ispitivanje, kao što je već rečeno, provedeno uz kontrolu pomaka, oblik ovih dijagrama stoga ovisi o tome. Kod uzoraka T1 i T2 ispitivanje je provedeno do kraja odnosno do loma pa je i sam pomak traverze zato veći, dok je za uzorak T3 ispitivanje ranije zaustavljeno pa je i krajnji pomak manji. Također, kao i kod ranije viđenih dijagrama ovisnosti sile i pomaka na mjernim mjestima P1 i P2, možemo zaključiti i da određene razlike nastaju zbog trenutka u kojem je povećana brzina unosa pomaka. Iz dijagrama je vidljivo da je maksimalni pomak prvog vlačnog uzorka 17,2 mm, drugog 16,4 mm, a trećeg 14,8 mm. Drugim riječima, maksimalni pomak preše ostvaren je kod uzorka T1, a najmanji kod uzorka T3. S druge strane, najveća sila od 51,7 kN ostvarena je za uzorak T3, dok je sila kod druga dva uzorka nešto manja. Maksimalna sila za drugi uzorak je 50,0 kN, dok je za prvi uzorak ostvarena najmanja maksimalna sila razmatrajući sva tri vlačna uzorka, a to je sila od 48,6 kN.

4.4.2.2 Tlačna ispitivanja

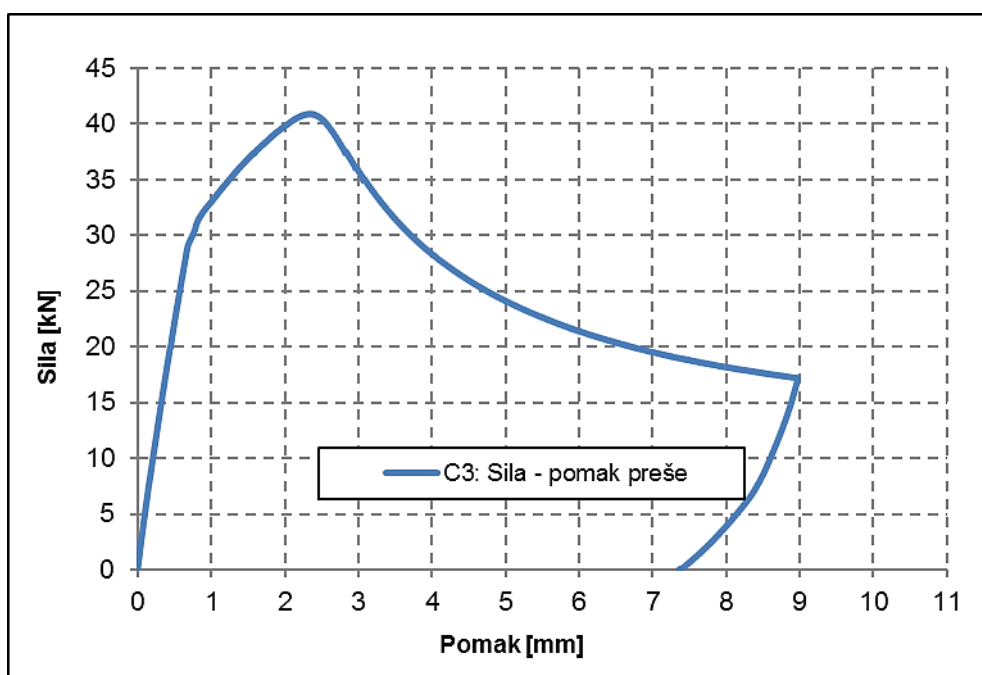
Na slikama 4.24 – 4.26, prikazuju se odnosi maksimalne sile i pomaka preše za tlačne uzorke C1 do C3. Na posljednjoj slici ovog dijela (slika 4.27) dana je , kao i za vlačne, usporedba pomaka za tlačno ispitane uzorke.



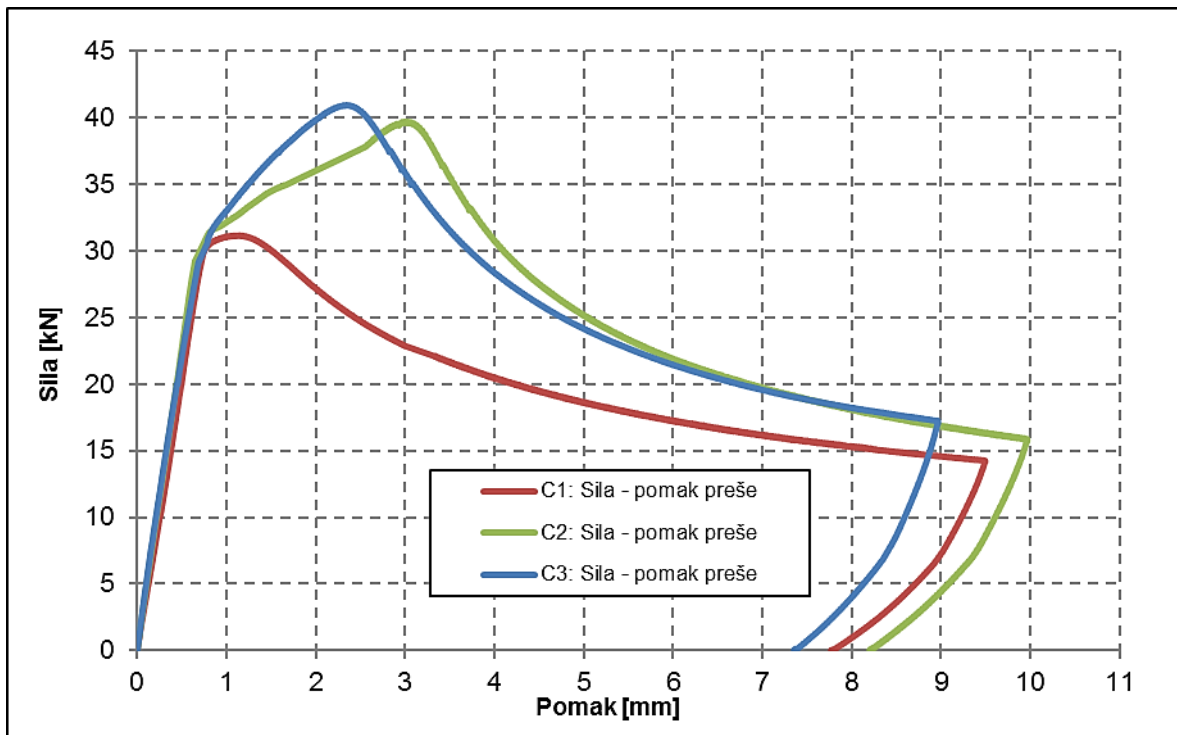
Slika 4.24 Pomak preše za uzorak C1



Slika 4.25 Pomak preše za uzorak C2



Slika 4.26 Pomak preše za uzorak C3



Slika 4.27 Dijagram usporedbe sila - pomak preše za tlačne uzorke (C1 – C3)

I ovdje, kao i kod dijagrama odnosa maksimalne sile i pomaka na mjernim mjestima P1 i P2, možemo uočiti značajnije razlike u ponašanju tlačnih uzoraka. Te razlike nastaju, kao što je spomenuto, zbog različitosti u provedbi ispitivanja. Maksimalni pomak uspoređujući sve uzorke nastaje kod uzorka C2 i iznosi 9,9 mm. Pomak uzorka C1 očitao je s vrijednošću od 9,5 mm. Najmanji pomak ostvaruje se kod uzorka C3 i iznosi 8,9 mm. Najveća sila postiže se za treći uzorak i njezina je vrijednost 40,7 kN. Vrijednost sile za drugi uzorak ne odstupa značajnije od trećeg i radi se o 39,5 kN. Za prvi uzorak maksimalna sila pokazuje značajnije odstupanje u usporedbi s prethodno navedenima, tj. najveća ostvarena sila kod ispitivanja prvog uzorka iznosi 31,2 kN.

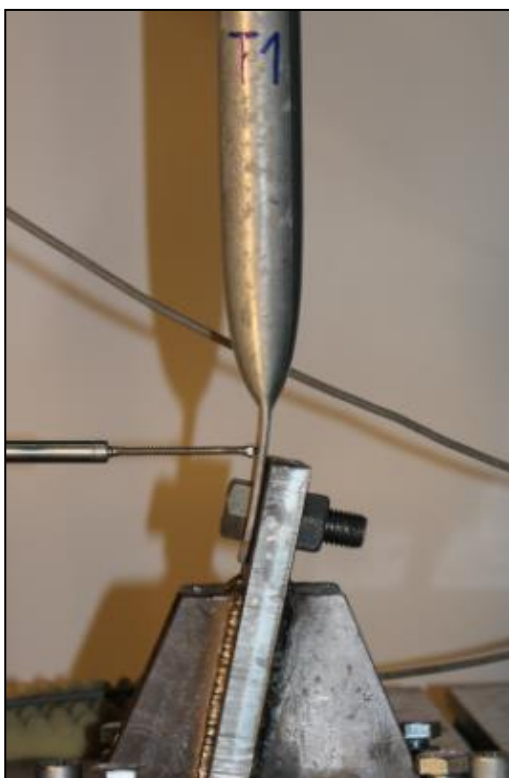
Ukoliko sada sagledamo globalno pomake i maksimalne sile svih uzoraka, i vlačnih i tlačnih, možemo zaključiti da uzorci mogu preuzeti oko 10 kN veće vlačne sile, nego što mogu preuzeti tlačne. Vezano za to, pomaci preše kod vlačno ispitanih uzoraka su i duplo veći nego kod tlačno ispitanih koji ranije otkazuju.

4.4.3 Načini otkazivanja i ponašanje uzoraka

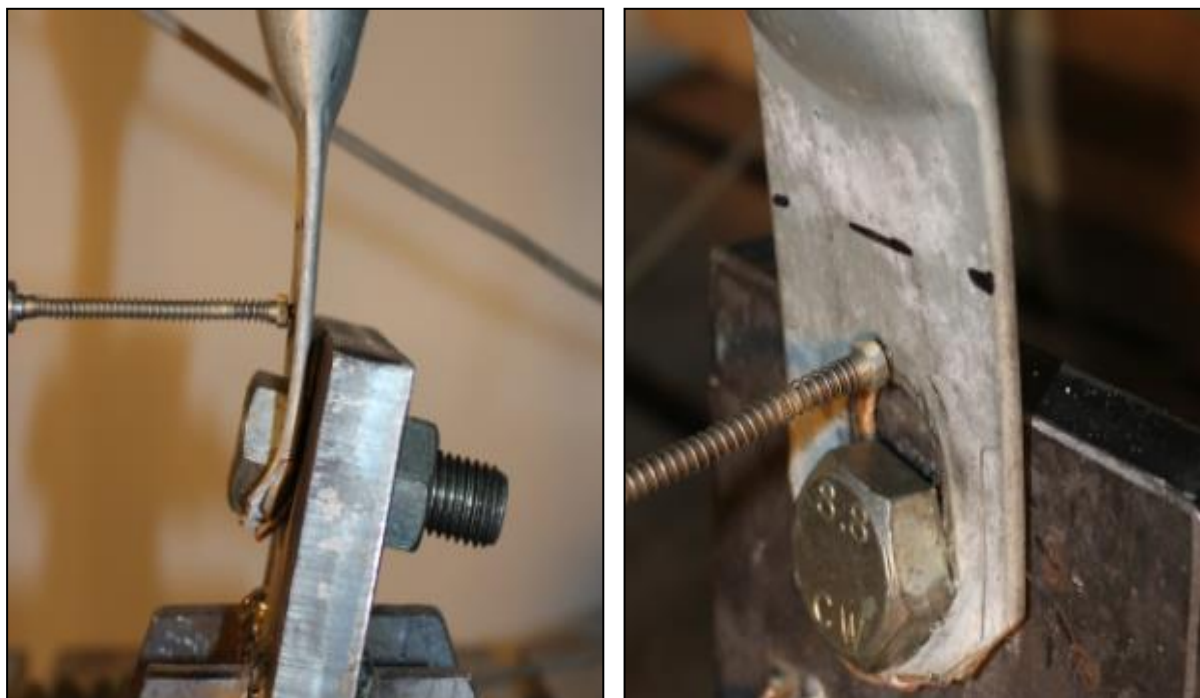
Sljedećim slikama prikazani su načini otkazivanja uzoraka.

4.4.3.1 Vlačno ispitivanje

Na slikama 4.28 do 4.32 prikazan je slijed deformiranja kroz tijek ispitivanja uzoraka opterećenih vlačnom silom.

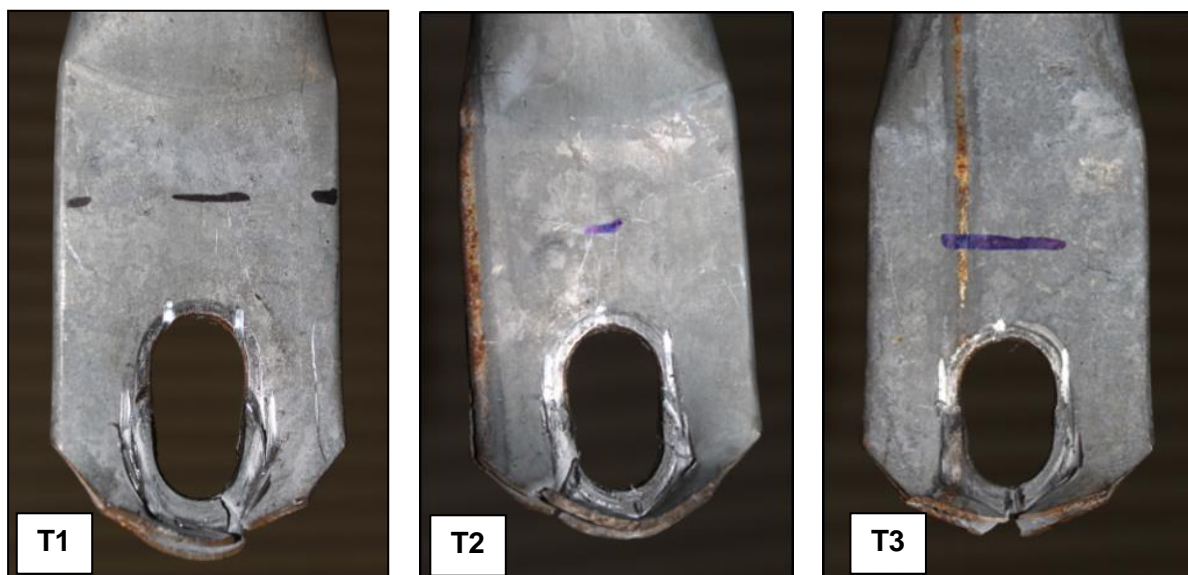


Slika 4.28 Početno stanje i početak deformiranja vlačno opterećenog uzorka T1

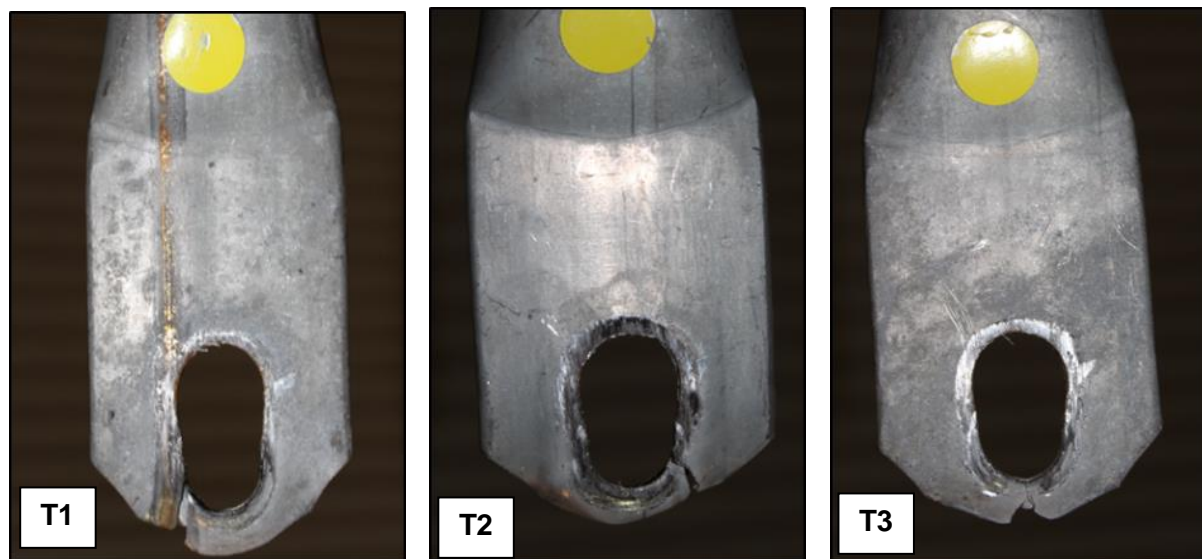


Slika 4.29 Nastavak deformiranja uzorka T1 do trenutka neposredno prije sloma

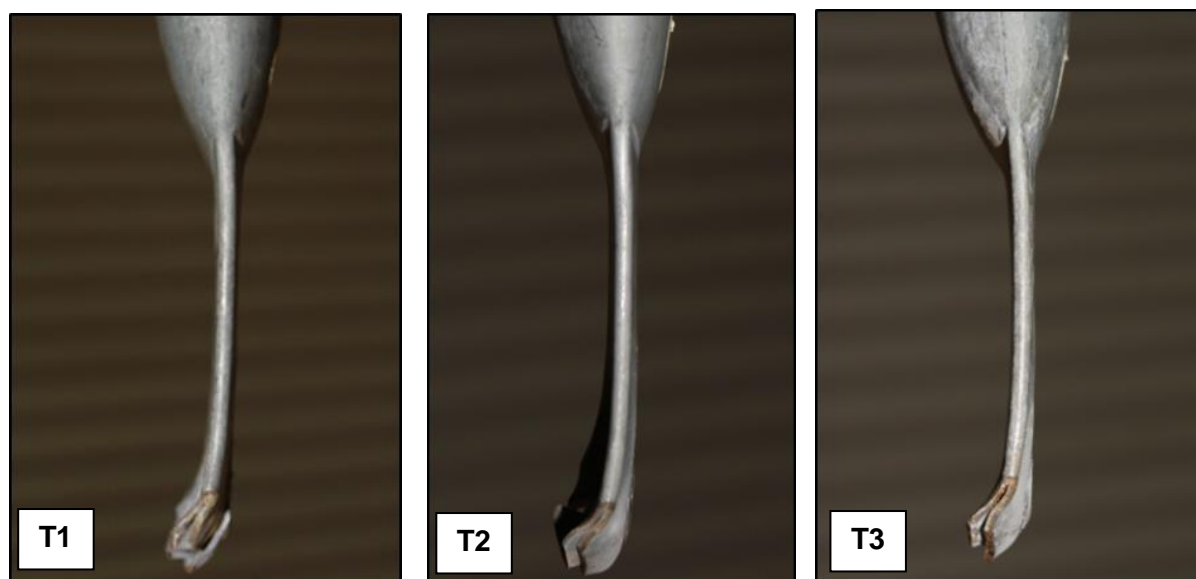
Na sljedećim slikama, 4.29 do 4.31 prikazani su deformirani vlačni uzorci nakon otkazivanja



Slika 4.30 Uzorci T1 do T3 nakon otkazivanja



Slika 4.31 Uzorci T1 do T3 nakon otkazivanja



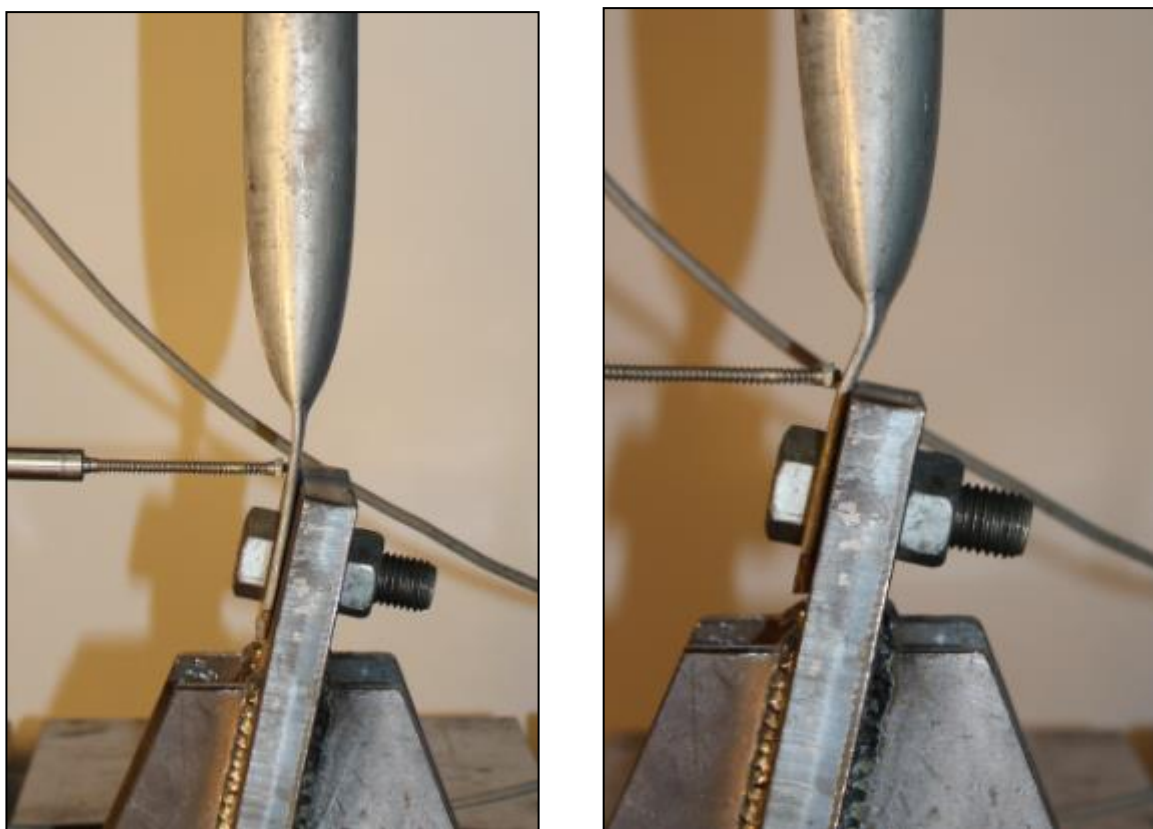
Slika 4.32 Uzorci T1 do T3 nakon otkazivanja

Na priloženim slikama vidljivo je ponašanje vlačno ispitivanih uzoraka. Uzorci se pod opterećenjem vlačnom silom počinju odmicati od kose ploče na koju su vijčano spojeni, tj. smanjuje se početni kut od 12° pod kojim je savinut spljoštjeni dio cijevi. Dakle, cijevni element se izravnavava tako da savinuti dio dolazi u položaj osi elementa. Uz to, zbog vlačnog djelovanja

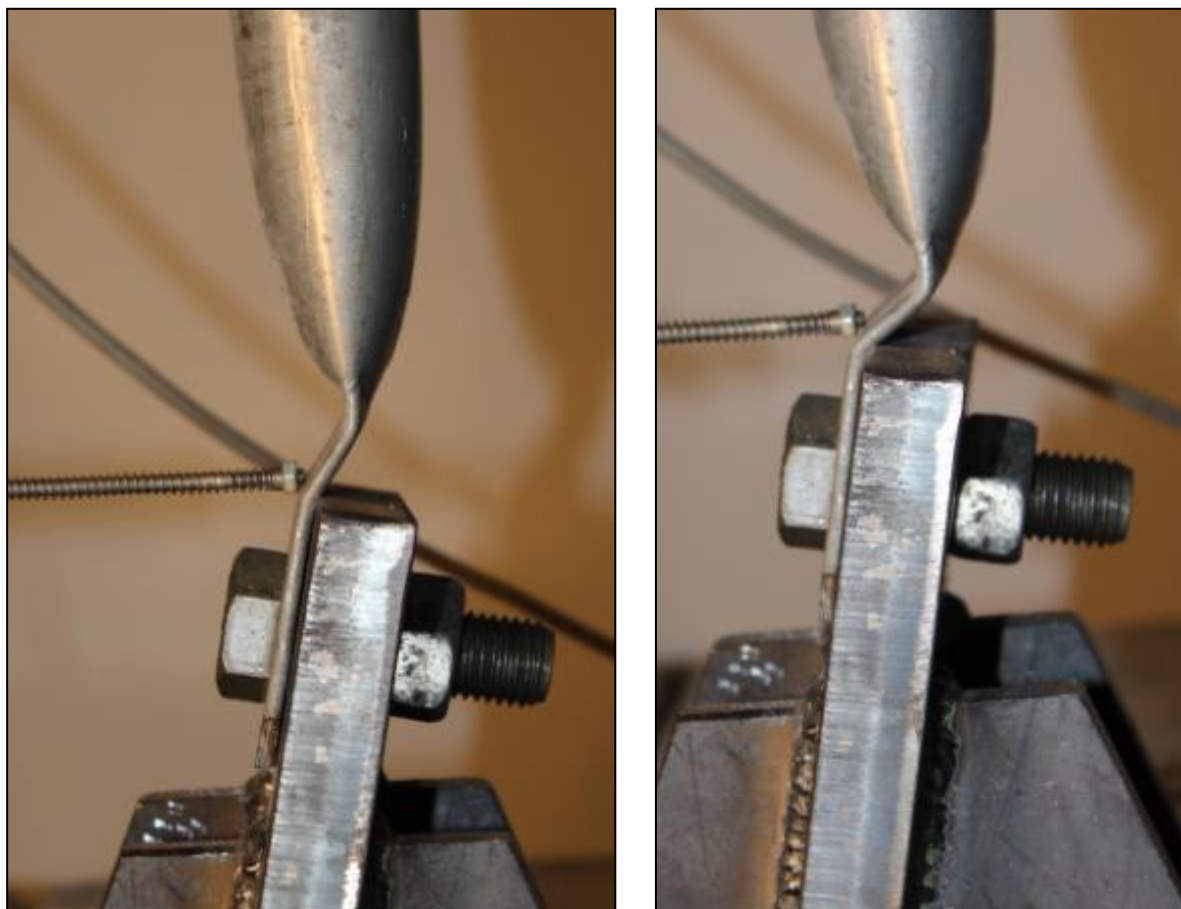
koje se nanosi prešom na gornjoj strani uzorka, uzorak se izvlači prema gore, vijak pritišće uzorak na njegovom rubu i dolazi do loma odnosno do otkazivanja uzorka. Način otkazivanja vlačnih uzoraka je pritiskom po omotaču rupe jer zbog izravnavanja uzorka prilikom opterećenja nestaje utjecaj ekscentriciteta.

4.4.3.2 Tlačno ispitivanje

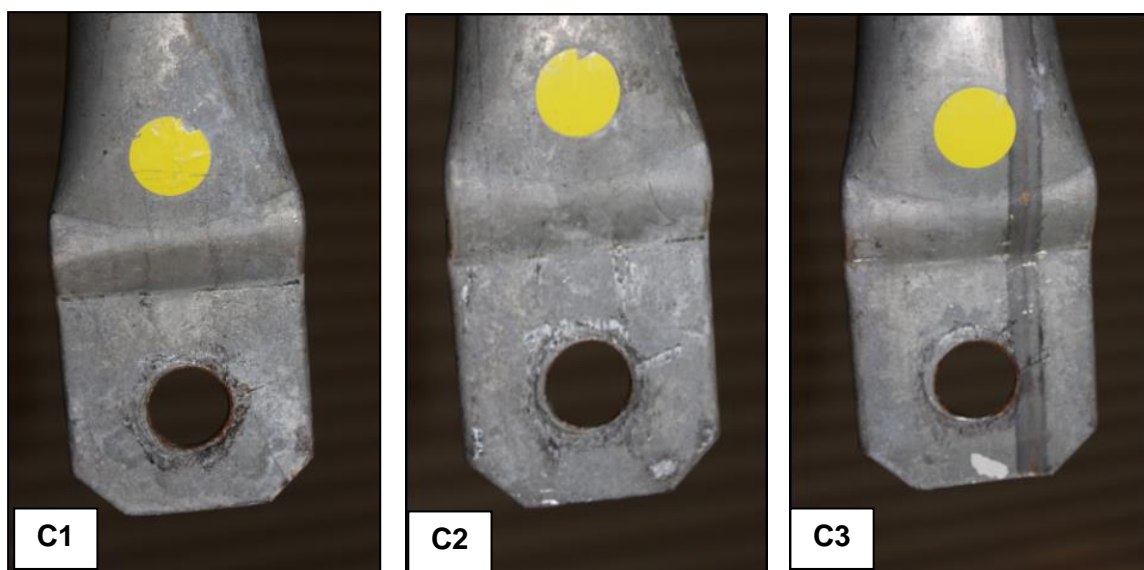
Sljedeći niz slika (slike 4.33 – 4.37) prikazuju ponašanje uzorka prilikom ispitivanja pod djelovanjem tlačne sile.



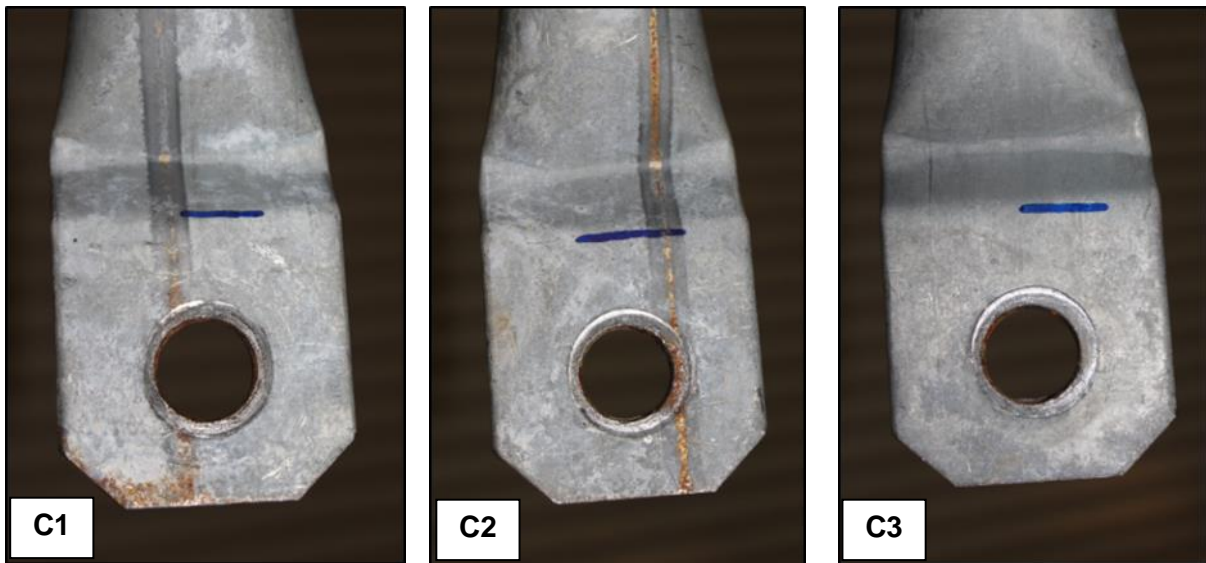
Slika 4.33 *Početno stanje i početak deformiranja uzorka C1*



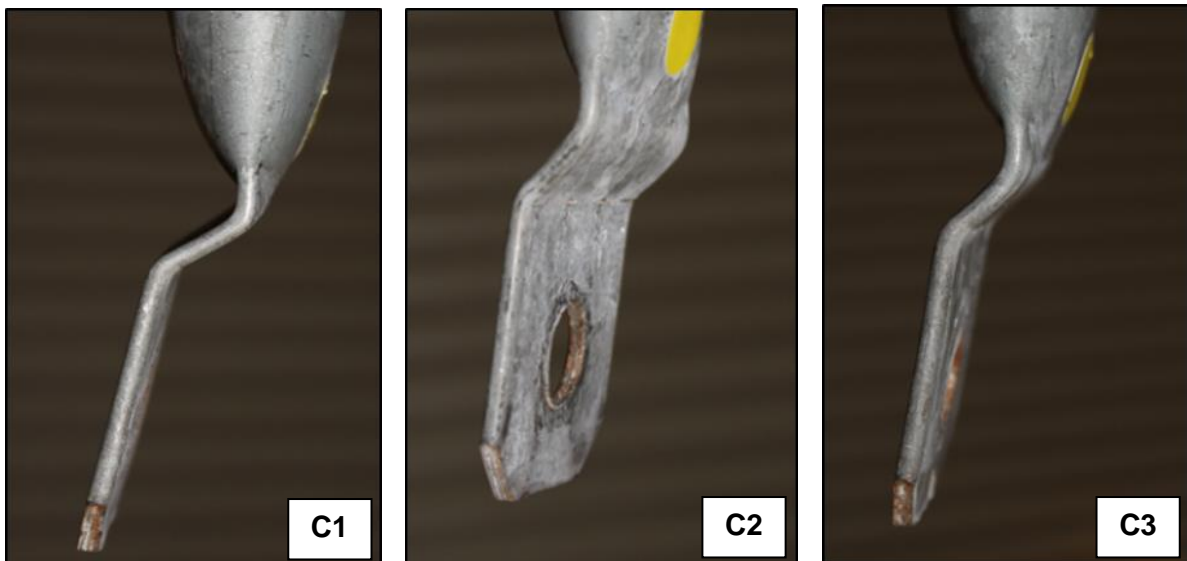
Slika 4.34 Daljnje deformiranje uzorka C1 pod djelovanjem tlačne sile



Slika 4.35 Uzorci C1 do C3 nakon otkazivanja



Slika 4.36 Uzorci C1 do C3 nakon otkazivanja



Slika 4.37 Uzorci C1 do C3 nakon otkazivanja

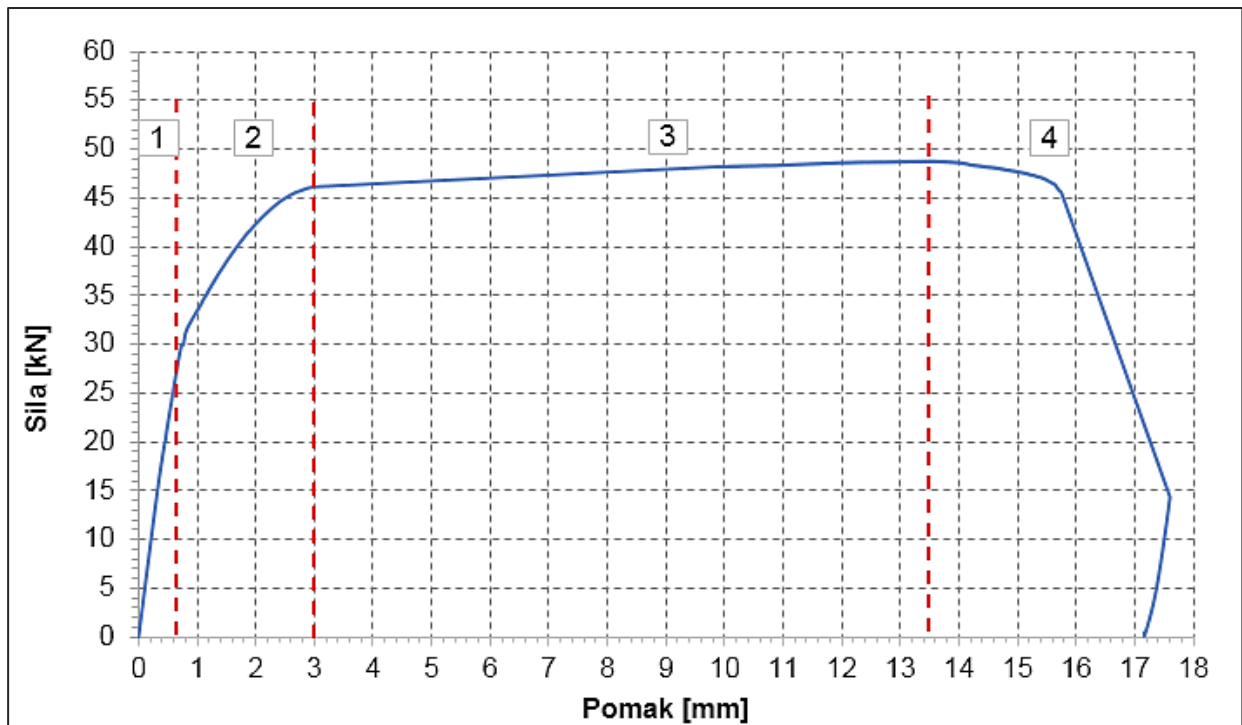
Na prethodno prikazanim slikama vidimo slijed deformiranja uzorka. Dolazi do savijanja cijevnog elementa na spljoštenom dijelu presjeka preko donje kose ploče kojom se simulira spoj više štapova kupole. Deformacija napreduje, povećava se, sve do otkazivanja uzorka. Tlačni uzorci otkazuju izbočivanjem spljoštenog dijela cijevnog elementa, tj. formiranjem plastičnog mehanizma koji se očituje s dvije linije tečenja te se zbog ekscentriciteta dobiva manja otpornost.

4.4.4 Karakterizacija ponašanja uzoraka

Kroz ovu točku provedena je karakterizacija ponašanja uzoraka. Iz prethodno prikazanih dijagrama sila – pomak preše u nastavku su određeni početna krutost uzoraka, otpornost, krajnja otpornost te deformacije koje odgovaraju pojedinim otpornostima.

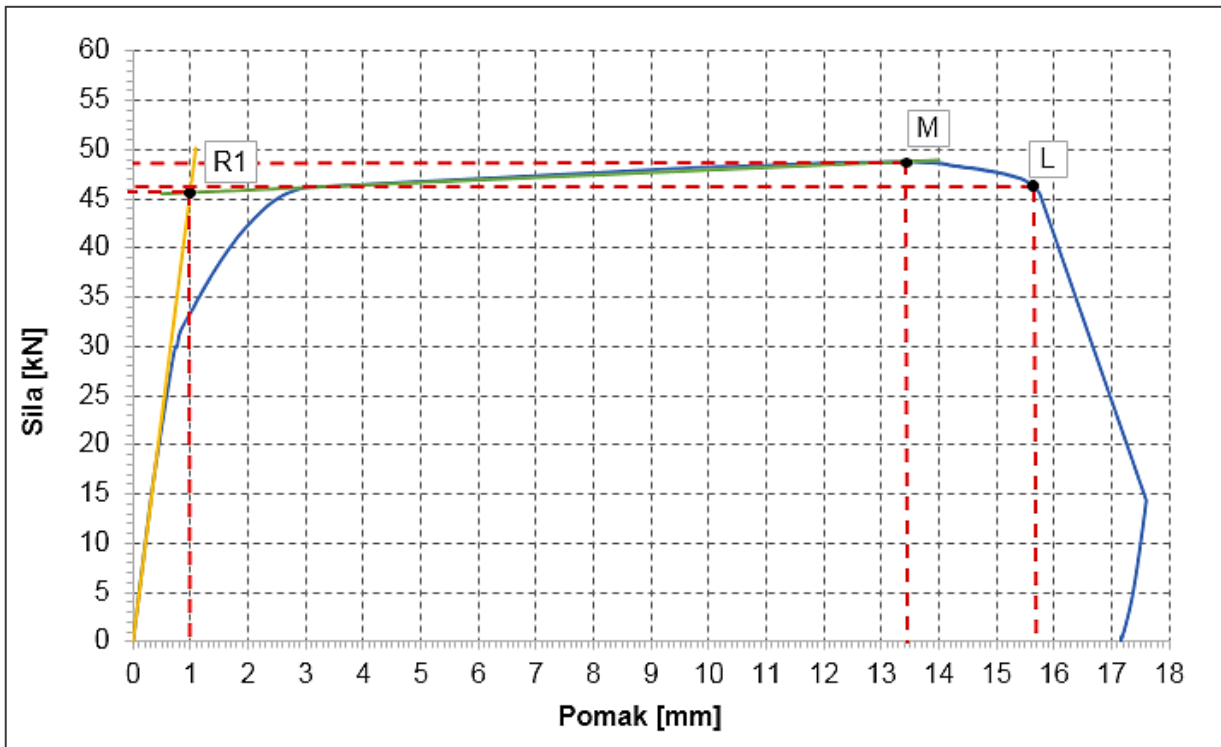
4.4.4.1 Vlačni uzorci

Određivanje otpornosti spoja određeno je preko dva načina su u nastavku prikazani. Prvi korak prikazan na slici 4.38 je podjela dijagrama sila – pomak preše na područja označena brojevima 1 do 4. područje 1 elastično područje, područja 2 i 3 do krajnje otpornosti te područje 4 od krajnje otpornosti do sloma uzorka.

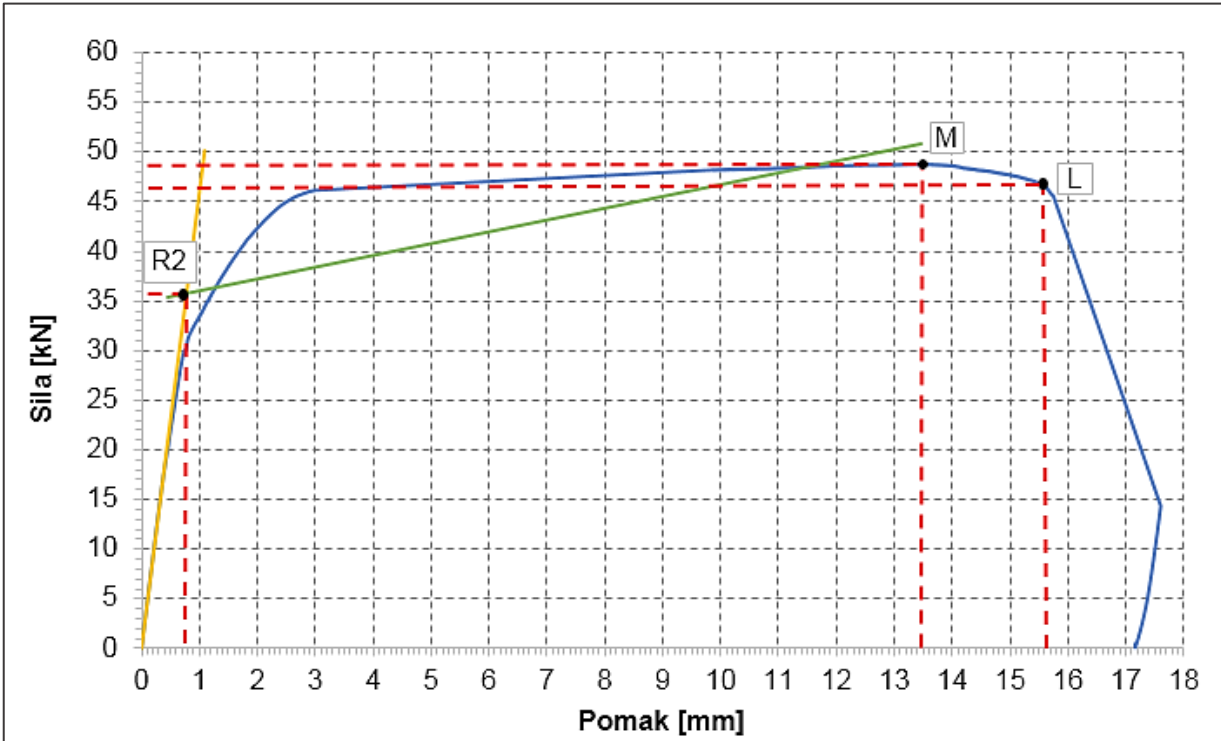


Slika 4.38 Podjela dijagrama na područja

U nastavku je, na slici 4.39, prikazan je prvi način određivanja otpornosti kod kojeg je otpornost spoja dobivena kao sjecište sekante na prvo područje i sekante trećeg područja. Na taj način dobivena je otpornost $N_{R1} = 45,5 \text{ kN}$. Na slici 4.40 prikazan je drugi način određivanja otpornosti preko sjecišta sekante drugog i trećeg područja i sekante prvog područja. Drugim načinom dobivena je otpornost $N_{R2} = 35,8 \text{ kN}$. Kao mjerodavna vrijednost usvaja se otpornost dobivena kao sjecište sekante trećeg područja i sekante elastičnog područja dijagrama, tj. vrijednost $N_{R1} = 45,5 \text{ kN}$.



Slika 4.39 Način određivanja otpornosti pomoću sjecišta sekante trećeg područja i sekante prvog područja



Slika 4.40 Način određivanja otpornosti pomoću sjecišta sekante drugog i trećeg područja i sekante prvog područja

Na prethodnim slikama primjer određivanja otpornosti dan je za prvi vlačni uzorak, T1. Analogno tome, za ostale uzorke određene su otpornosti preko oba načina, te očitani pripadni pomaci. Dobiveni podaci dani su u tablici 4.4, a u nastavku su objašnjene korištene oznake povezane sa slikama 4.39 i 4.40.

Tablica 4.4 Eksperimentalno utvrđene otpornosti i pripadni pomaci za vlačne uzorke

| UZORAK | T1 | T2 | T3 | Prosjek |
|------------------|-------|-------|-------|--------------|
| S_{ini} [kN/m] | 45960 | 47580 | 48110 | 47217 |
| N_{R1} [kN] | 45,6 | 45,4 | 47,0 | 46,0 |
| u_{R1} [mm] | 1,08 | 0,98 | 1,05 | 1,04 |
| N_{R2} [kN] | 35,8 | 32,0 | 33,4 | 33,7 |
| u_{R2} [mm] | 0,85 | 0,70 | 0,71 | 0,75 |
| N_M [kN] | 48,8 | 50,0 | 52,5 | 50,4 |
| u_M [mm] | 13,5 | 5,27 | 3,35 | 7,37 |
| u_L [mm] | 15,7 | 15,1 | 13,8 | 14,8 |

U priloženoj tablici je:

S_{ini} – početna krutost

N_{R1} – otpornost dobivena prvim načinom kao sjecište sekante prvog područja i sekante trećeg područja (otpornost koja odgovara točki „R1“ slici 4.39)

u_{R1} – pomak koji odgovara otpornosti N_{R1} (pomak u točki „R1“ na slici 4.39)

N_{R2} – otpornost dobivena drugim načinom kao sjecište sekante prvog područja i sekante drugog i trećeg područja (otpornost koja odgovara točki „R2“ slici 4.40)

u_{R2} – pomak koji odgovara otpornosti N_{R2} (pomak u točki „R2“ na slici 4.40)

N_M – krajnja otpornost (u točki na slikama 4.38 i 4.39 označenoj oznakom „M“)

u_M – pomak koji odgovara krajnjoj otpornosti (pomak u točki „M“ na slikama 4.39 i 4.40)

u_L – krajnji pomak pri lomu (pomak u točki „L“ na slikama 4.39 i 4.40)

4.4.4.2 Tlačni uzorci

Tlačni uzorci obrađeni su jednako kao i vlačni te su dobivene u nastavku prikazane vrijednosti. Oznake koje su objašnjene za vlačne uzorke vrijedi isto tako i za tlačne.

Tablica 4.5 Eksperimentalno utvrđene otpornosti i pripadni pomaci za tlačne uzorke

| UZORAK | C1 | C2 | C3 | Prosjek |
|---------------------------|-------|-------|-------|--------------|
| Inicijalna krutost [kN/m] | 40950 | 46630 | 47460 | 45013 |
| N_{R1} [kN] | 31,0 | 32,7 | 34,0 | 32,6 |
| u_{R1} [mm] | 0,76 | 0,71 | 0,78 | 0,75 |
| N_{R2} [kN] | 30,5 | 31,0 | 31,1 | 30,9 |
| u_{R2} [kN] | 0,75 | 0,69 | 0,69 | 0,71 |
| N_M [kN] | 31,2 | 39,7 | 40,9 | 37,3 |
| u_M [kN] | 1,15 | 3,00 | 2,35 | 2,17 |
| u_L [mm] | 9,50 | 9,97 | 8,97 | 9,48 |

Iz priloženih tablica (4.4 i 4.5) vidljivo je podudaranje rezultata za sva tri uzorka iz pojedine grupe za slučaj vlačnog i tlačnog opterećenja. Kod vlačnih uzoraka razlike u otpornostima i pripadnim pomacima nešto su manje nego kod tlačnih uzoraka, no u oba slučaja dobiveni su prihvatljivi rezultati, tj. ponašanje uzoraka. Kao mjerodavna otpornost, kao što je već navedeno, uzima se otpornost dobivena preko prvog načina. Na taj način, i za slučaj vlačnih i tlačnih uzoraka, dobivene su veće vrijednosti otpornosti nego za drugi slučaj.

5 NUMERIČKA PROCJENA PONAŠANJA SPOJA GEODETSKE KUPOLE

5.1 Općenito

Cilj ovog poglavlja je numerički simulirati ponašanje spoja kupole pri tlačnom i vlačnom uzdužnom opterećenju uz pomoć metode konačnih elemenata. Dobivene rezultate usporedili smo s podacima dobivenim laboratorijskim ispitivanjem. Spoj kupole modeliran je u programskom paketu ANSYS 15.0. Numeričko modeliranje ovog problema je složeno, jer zahtijeva usvajanje odgovarajuće geometrije spoja, svojstava materijala, uvjeta oslanjanja i uvjeta opterećivanja. Metoda konačnih elemenata (FEM) numerička je metoda za rješavanje skupa povezanih diferencijalnih jednažbi dobivenih aproksimacijom nepoznatih varijabli kontinuiranog područja skupom nepoznatih varijabli u konačnom broju diskretnih točaka tog polja [16]. Ova metoda danas je najrasprostranjenija numerička metoda za rješavanje složenih inženjerskih problema. Uporaba metode konačnih elemenata podrazumijeva podjelu promatranog tijela (kontinuum) u niz poddomena nazvanih konačnim elementima koji mogu biti jednodimenzionalni, dvodimenzionalni ili trodimenzionalni. Elementi su međusobno povezani u čvorovima. Gušća mreža konačnih elemenata iste vrste, tj. veći broj podjela promatranog tijela na elemente, općenito rezultira točnijim rezultatima analize, no uz to zahtijeva više računalne memorije i procesnog vremena [17]. Dakle, potrebno je optimalno dizajnirati mrežu konačnih elemenata, koja će uz minimalni utrošak računalne memorije i procesnog vremena dati točnije rezultate analize.

Model konačnih elemenata omogućava da se kompleksna geometrija modelira s dovoljnom točnošću. Osim toga, moguće je adekvatno simulirati materijalne i geometrijske nelinearnosti te uvjete oslanjanja i opterećivanja. Pri modeliranju geometrije potrebno je odabrati elemente iz skupine trodimenzionalnih elemenata: solid ili shell elementa. U ovom numeričkom modelu korišteni su solid elementi. Ovaj tip elemenata prikladan je za modeliranje međudjelovanja između elemenata te prikaz pripadnih mehanizama otkazivanja. Za dobivanje što točnijih rezultata, neophodno je modeliranje i elasto-plastičnog ponašanja čelika. Kod elastičnog ponašanja materijala ne događaju se trajne deformacije, dok je plastično ponašanje karakterizirano s vremenski neovisnim nepovratnim deformacijama koje mogu biti dosegnute jednom kada se dosegne odgovarajuća razina napona. Općenito, plastičnost se modelira s efektom očvršćivanja, tj. jednom kad je dosegnuta granica popuštanja, napon nastavlja rasti s deformacijom, ali s reduciranim modulom elastičnosti [18].

Prilikom definiranja međudjelovanja između elemenata, kod FE analize penetracija elemenata u zoni kontakata je spriječena dodavanjem specijalnih međudjelovanja između površina ili

dodavanjem kontaktnih elemenata. Općenito, nije moguće *a priori* definirati zone koje dolaze u kontakt zbog različitih stadija opterećivanja i pratećih deformacija. Ovo znači da se kontakt ne može postići za isti element pod različitim uvjetima opterećivanja. Kao rezultat, simulacija ponašanja kontakata između spojenih komponenata prilično je komplicirana. Fenomen kontakta je izrazito nelinearan: zone u kontaktu su izrazito krute (tlak), dok su zone koje nisu u kontaktu izrazito mekane (vlak). Sile međudjelovanja koje se razvijaju kada dva dijela dođu u kontakt prenose uneseno opterećenje. Ove sile kontakta su normalne na smjer međudjelovanja, a sile trenja se razvijaju duž tangencijalnog smjera međudjelovanja. Međutim, nepoznata je raspodjela napona uslijed međudjelovanja kao i uvjeti kontakta (lijepjenja ili klizanja). Većina FE paketa nudi neka sredstva za obuhvaćanje jednosmjernih kontaktnih problema trenjem [18].

Kao što je i naglašeno, modeliranje spoja u čvoru kupole je izrazito nelinearan problem, što znači da su u analizi uzeti u obzir učinci drugog reda nastali uslijed ekscentričnosti cijevnog elementa, zatim plastičnost materijala te jednosmjerni kontaktni rubni uvjeti. Spoj u čvoru kupole modeliran je u programskom paketu ANSYS 15.0 te će u sljedećim točkama biti opisan postupak modeliranja. Numerički model je kalibriran i vrednovan preko usporedbe s rezultatima provedenih laboratorijskih ispitivanja.

5.2 Opis modela konačnih elemenata

5.2.1 Općenito

Za procjenu $F - \Delta$ ponašanja cijevnog elementa u vlaku i u tlaku korišteni su trodimenzionalni modeli konačnih elemenata (FE modeli). Za provođenje 3D numeričkih analiza korišten je programski paket ANSYS 15.0. Provedene su detaljne parametarske analize kako bi se kalibrirao FE model koji može učinkovito generirati $F - \Delta$ odgovor cijevnog spoja kupole u vlaku i u tlaku u usporedbi s laboratorijskim ispitivanjima detaljno opisanim u točki 4.3.

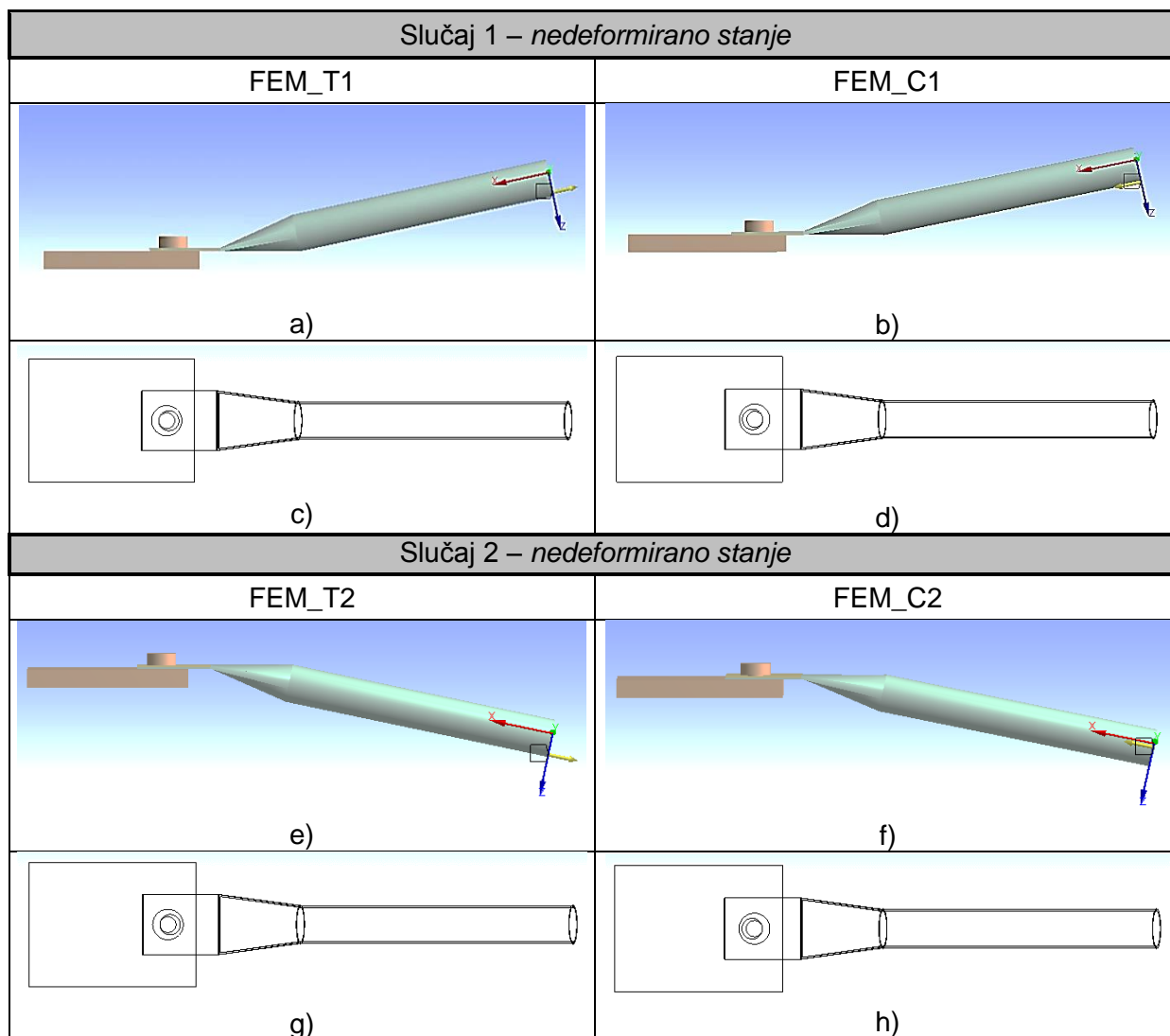
Geometrija spoja nešto je složenija, osobito prijelaz iz punog u spljošteni dio cijevnog elementa pa programski paket ANSYS nije bio prikladan za crtanje tražene geometrije. Za izradu geometrije svih modela korišten je programski paket CreoParametric 2.0. Budući da je geometrija naknadno importirana, nije bilo moguće jednostavno raditi promjene u geometriji modela. U ANSYS-u su definirana ostala svojstva modela, poput kontakata, rubnih uvjeta, uvjeta opterećivanja i sl., koje su se po potrebi mogle jednostavno promijeniti bez velikog gubitka vremena.

5.2.2 Geometrija

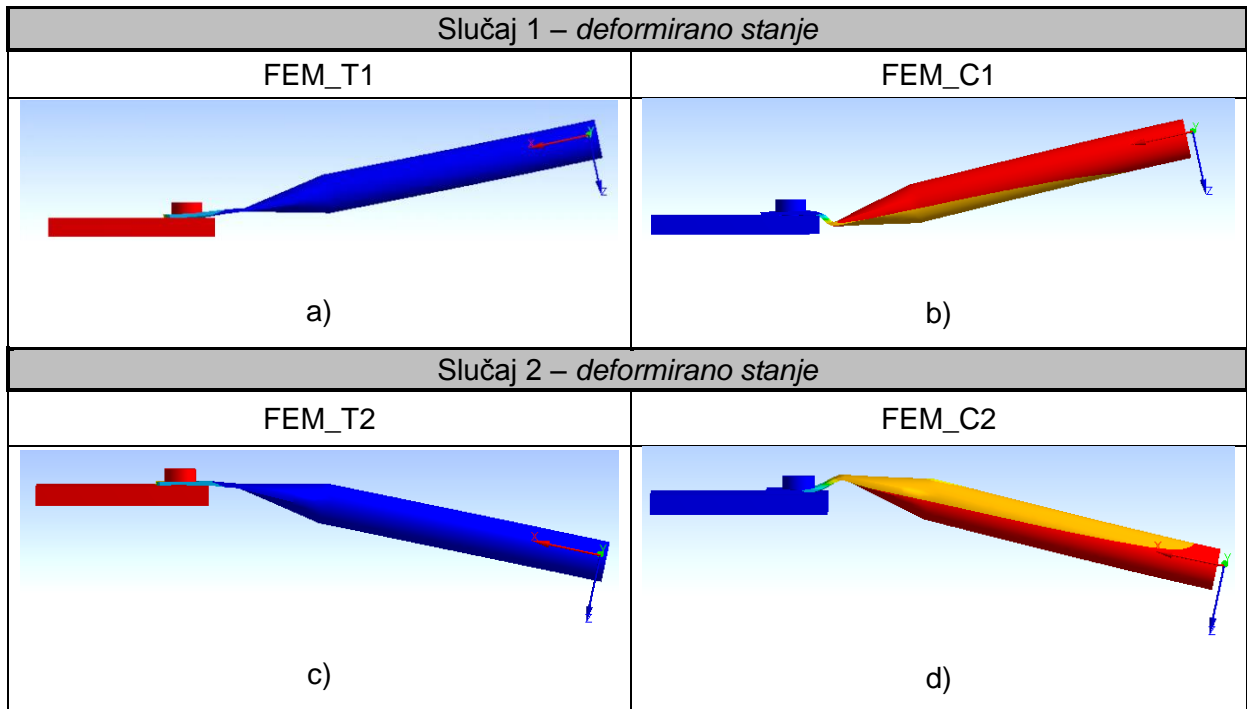
Modelirana su ukupno četiri različita modela, a svaki se sastoji od cijevnog elementa, spojne čelične ploče i vijka M20. Cijevni element modeliran je prema dimenzijama stvarnog uzorka, koje su navedene u tablici 4.1. Dio cijevnog elementa ukrućen trapeznim ukрутama je zanemaren te su na tom mjestu definirani pripadni rubni uvjeti (dopušten pomak samo u smjeru osi cijevnog elementa). Kako bi se što bolje simuliralo stvarno stanje, spljoštenu dio cijevi modeliran iz dva dijela, između kojih su definirani pripadni kontaktni uvjeti. Drugi dio uzorka, na koji se cijevni element vijčano spaja, modeliran je kao čelična ploča debljine 30mm, koja prati nagib spljoštenog dijela cijevnog elementa. Zbog pojednostavljenja vijak nije modeliran kao jedinstveni element, već on i čelična ploča čine jedan cjeloviti element. Vijak se sastoji od glave promjera 30 mm i tijela bez navoja promjera 17 mm. Dakle, numerička analiza provedena je za četiri različita modela, dva opterećena vlačnom i dva opterećena tlačnom silom. Cilj ovog postupka je uvidjeti koliki je utjecaj ekscentričnosti sile na nosivost promatranog spoja. U prva dva slučaja modeliran je uzorak s rasporedom elemenata identičnim kao što je bio kod laboratorijskog ispitivanja. U druga dva slučaja, cijevni element okrenut je za 180° i na taj način spojen na čeličnu ploču. U ovom slučaju ekscentriciteti sile su veći, što dovodi do pojave većih momenata drugog reda. Slučaj s ovakvim rasporedom elemenata u uzorku spoja nismo mogli laboratorijski ispitati pa je provedena samo numerička analiza.

Budući da je promjer tijela vijka manji od predviđene rupe za vijak na spljoštenom dijelu cijevnog elementa ($d_s = 17 \text{ mm}$, $d_0 = 22 \text{ mm}$), ovisno o načinu opterećenja namješten je i početni položaj elemenata kako bi se odmah na početku opterećivanja ostvario kontakt između vijka i stjenke cijevnog elementa te izbjegao proces nalijeganja vijka.

Promatrani FE modeli vijčanog spoja kupole prikazani su na sljedećim slikama. Na slikama 5.1.a), b), e) i f) prikazani su nedeformirani uzorci dok su na slikama 5.2.a)-d) prikazani deformirani uzorci nakon provedenih simulacija. Na slikama 5.1.c), d), g) i h) prikazani su tlocrti modela na kojima se može vidjeti položaj vijka u odnosu na cijevni element ovisno o načinu opterećivanja.



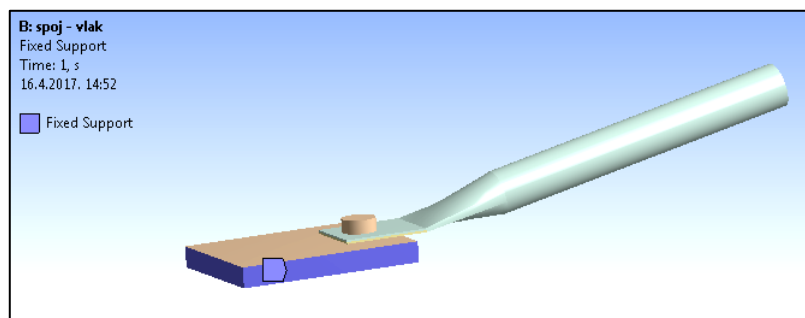
Slika 5.1 3D modeli konačnih elemenata po slučajevima u nedeformiranom stanju, (a),b),e) i f) - uzdužni pogled; c),d),g) i h) - tlocrt)



Slika 5.2 3D modeli konačnih elemenata po slučajevima u deformiranom stanju

5.2.3 Uvjeti oslanjanja i opterećenja

Spojna čelična ploča upeto je oslonjena duž tri manje stranice kako je prikazano na slici 5.3. Cijevni element je na svojem kraju slobodan, ali su onemogućeni pomaci u ravni poprečnog presjeka kako bi se što više ostvarili laboratorijski uvjeti. Provedene su numeričke simulacije spoja kupole pod utjecajem uzdužne tlačne i vlačne sile. Opterećenje je simulirano kontrolom pomaka na kraju cijevnog elementa. Pomak se linearno povećava u vremenskim koracima u smjeru uzdužne osi cijevi. U tablici 5.1 su prikazani ostvareni uzdužni pomaci (u smjeru osi x lokalnog koordinatnog sustava) u posljednjem vremenskom koraku po pojedinim slučajevima.



Slika 5.3 Uvjeti oslanjanja

Tablica 5.1 Vrijednosti ostvarenih pomaka

| Slučaj opterećenja | Ostvareni pomak [mm] |
|--------------------|----------------------|
| FEM_T1 | 9,58 |
| FEM_C1 | 7,85 |
| FEM_T2 | 7,00 |
| FEM_C2 | 7,50 |

5.2.4 Mehanička svojstva čeličnih komponenata

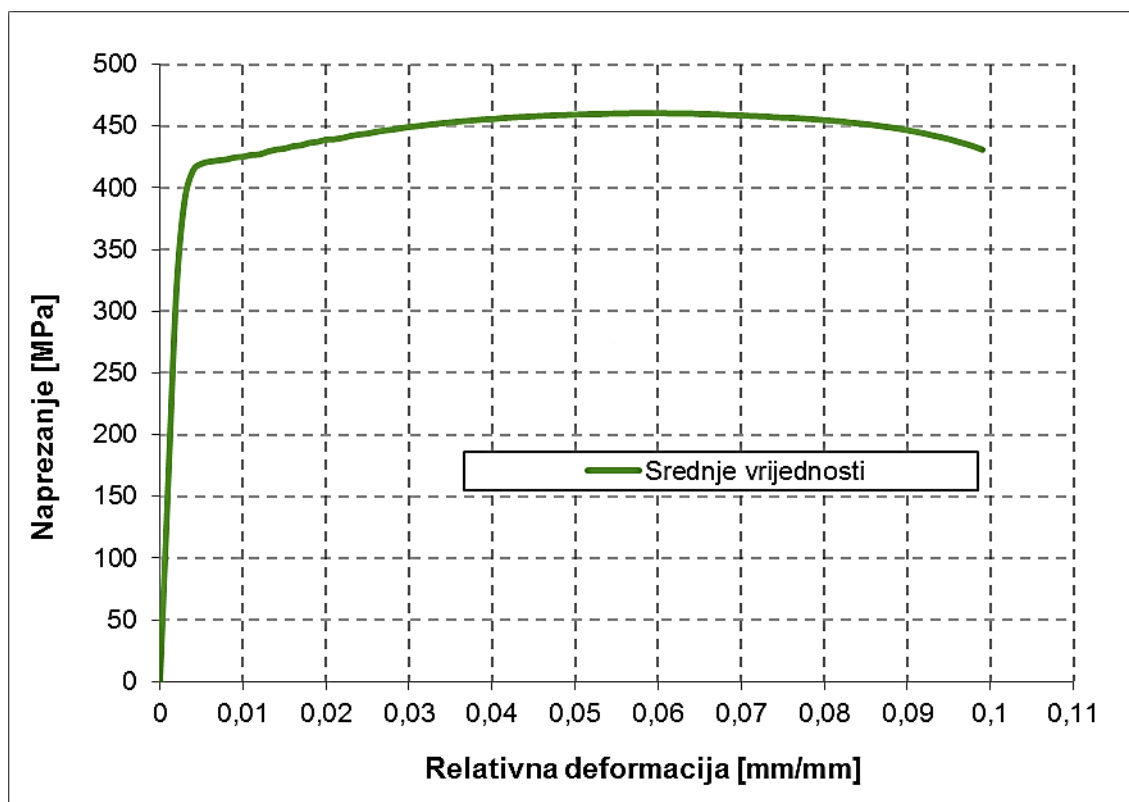
Za 3D modeliranje spoja primijenjena su dva različita modela materijala, jedan za cijevni element, a drugi za čeličnu ploču i vijak. Mehaničke osobine materijala cijevnog elementa u FE modelu su određene na temelju vlačnih ispitivanja koja su detaljno opisana u točki 4.2.2.

Za cijevni element primijenjen je izotropni multilinear model materijala, koji obuhvaća područje očvršćavanja između popuštanja i dostizanja vlačne čvrstoće materijala. Prilikom definiranja plastičnih svojstava čelika u ANSYS-u, moraju se koristiti stvarne vrijednosti naprezanja i relativnih deformacija kako bi se ostvarila dobra korelacija s laboratorijskim rezultatima. U numeričkim analizama s materijalnom nelinearnošću i s velikim pomacima i elasto-plastičnim deformacijama volumen tijela ne ostaje konstantan. Da bi ponašanje elementa pri velikim deformacijama bilo što realnije potrebno je posebno odrediti konstitutivne zakone materijala. Zahtijeva se korištenje dijagrama stvarno naprezanje – logaritamska relativna deformacija (σ_n - ϵ_n) za definiranje jednosmjernog odgovora materijala, umjesto klasičnog inženjerskog konstitutivnog zakona (σ - ϵ) [18].

Ove veličine definiraju se u ovisnosti o trenutnoj duljini i površini poprečnog presjeka epruvete za vlačna ispitivanja. Odnos između stvarnih napreznja σ_n i deformacija ε_n u odnosu na inženjerske (izmjerene) vrijednosti napreznja i deformacija definira se sljedećim izrazima [18]:

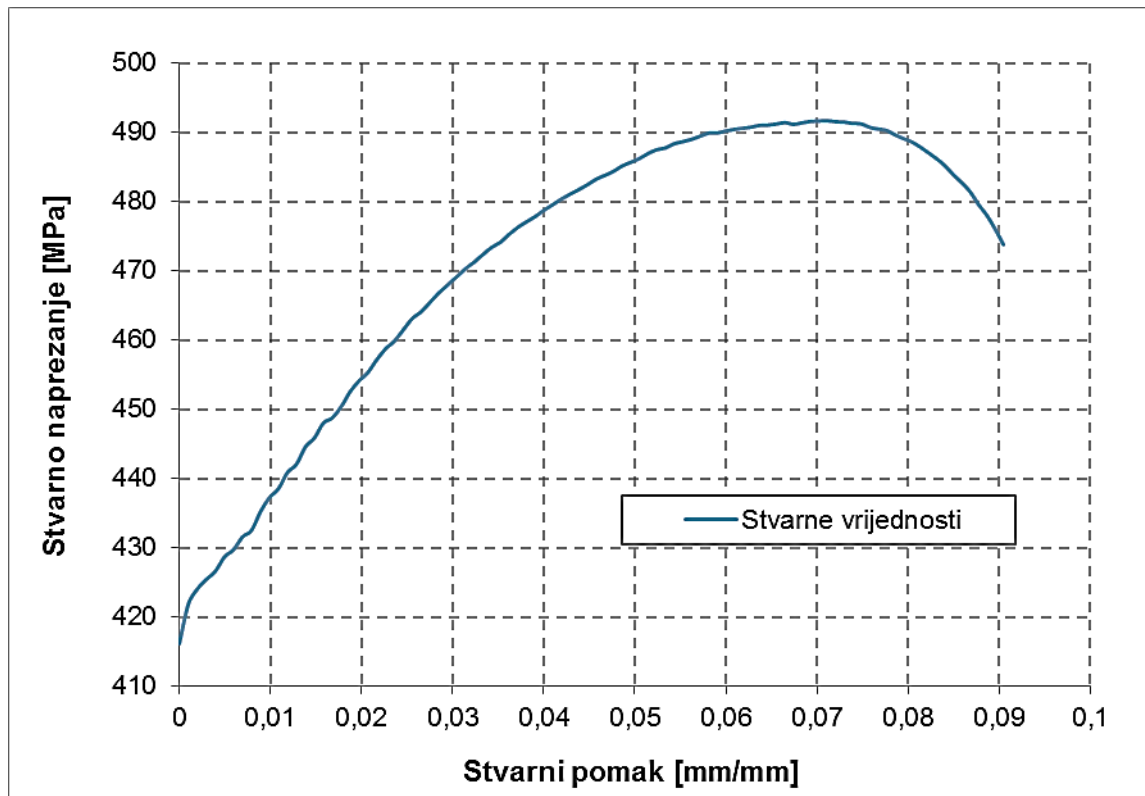
$$\sigma_n = \sigma(1 + \varepsilon), \quad \varepsilon_n = \ln(1 + \varepsilon) \quad (5.1)$$

Inženjerske vrijednosti određene su kao srednje vrijednosti rezultata dobivenih laboratorijskim ispitivanjima. Vlačnom probom provedenom na epruvetama izvađenim iz cijevnog elementa dobivena je granica popuštanja u iznosu od 417 MPa i vlačna čvrstoća u iznosu od 461 MPa.



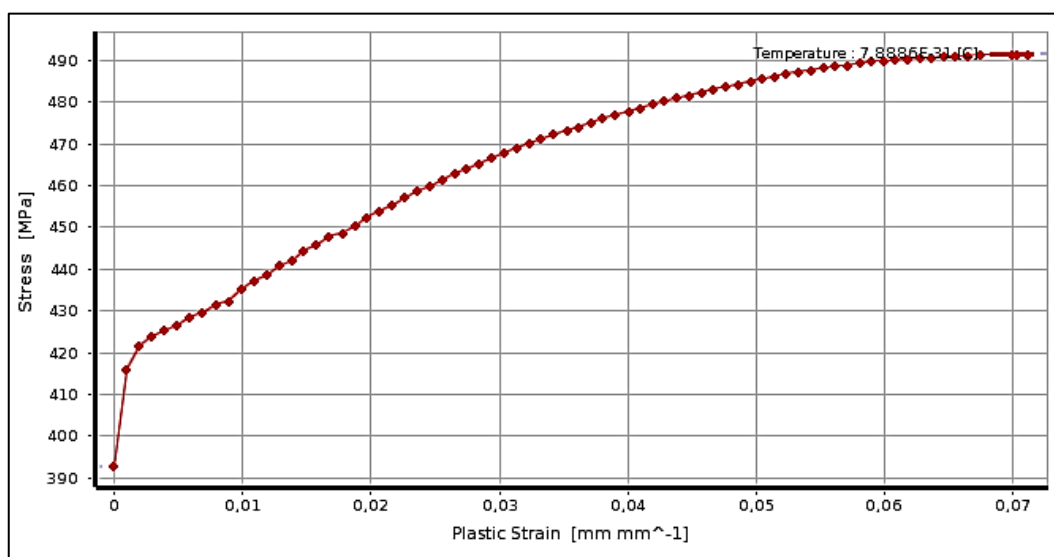
Slika 5.4 Inženjerski σ - ε dijagram ispitanog čelika cijevnih elemenata

Nakon provedene transformacije prema prethodno navedenim formulama dobivene su stvarne vrijednosti napreznja i deformacija. U obzir su uzete samo vrijednosti napreznja u plastičnom području. U nastavku je prikazan stvarni dijagram napreznje – relativna deformacija cijevnog elementa, koji je unesen u numerički model.



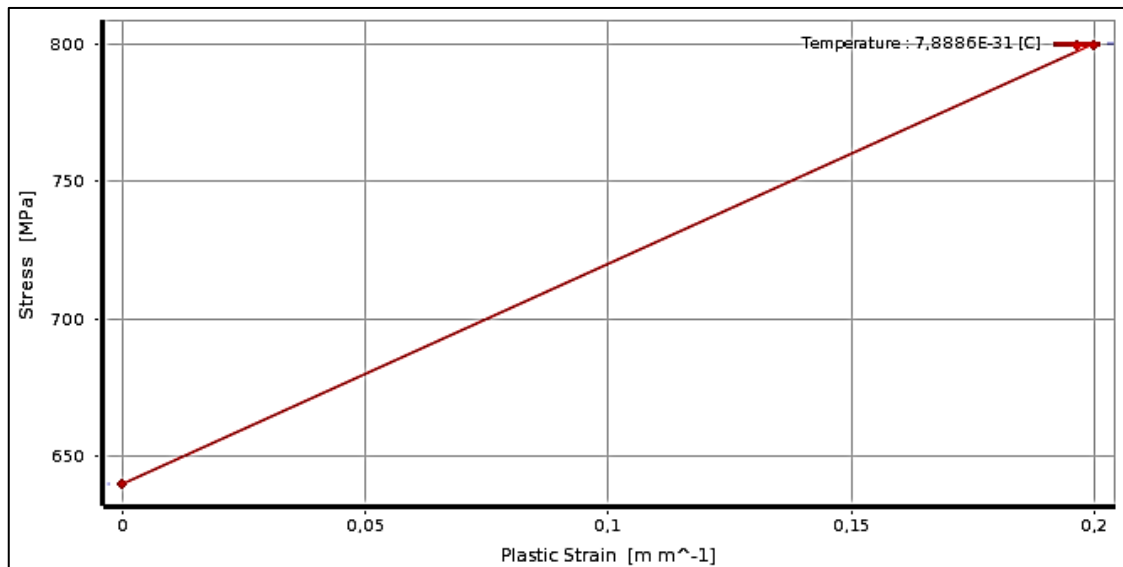
Slika 5.5 Stvarni σ_n - ϵ_n dijagram ispitanog čelika cijevnih elemenata

Dobivena stvarna granica popuštanja iznosi 422 MPa, dok stvarna vlačna čvrstoća iznosi 491MPa. Prilikom unosa podataka o ponašanju materijala, zanemarene su vrijednosti nakon dostizanja vlačne čvrstoće pa dijagram korišten u numeričkoj analizi izgleda kako je prikazano na slici 5.6.



Slika 5.6 Plastični dio stvarnog σ_n - ϵ_n dijagrama za numeričke simulacije

Za spojnu čeličnu ploču i vijak definiran je linearan zakon ponašanja materijala sa značajno većom vlačnom čvrstoćom (800 MPa) od čvrstoće materijala cijevnog elementa, kako bi se osiguralo da do otkazivanja cijevnog elementa dođe prije, nego otkazivanje vijka. Plastični dio dijagrama naprezanje – relativna deformacija za čeličnu ploču i vijak prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 5.7 Plastični dio σ - ϵ dijagram za vijak i čeličnu ploču

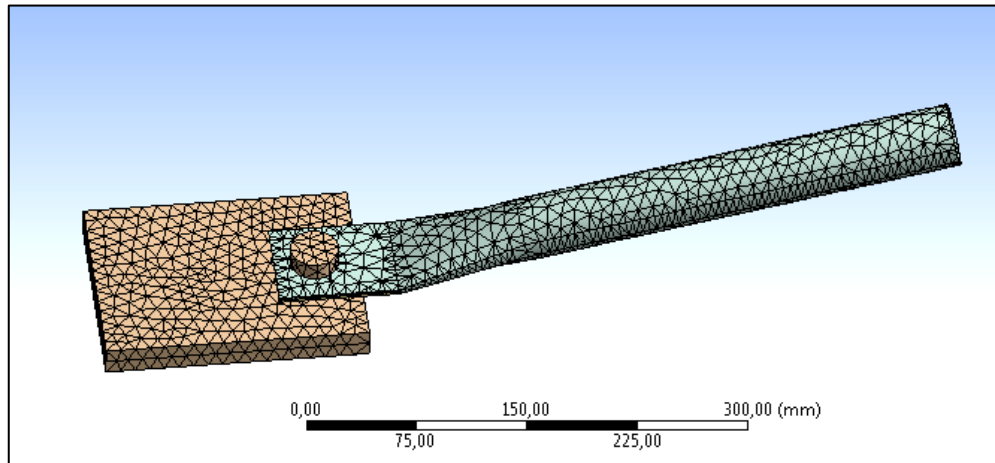
Vrijednosti modula elastičnosti, granice popuštanja i Poissonovog koeficijenta za pojedini materijal dane su u tablici:

Tablica 5.2 Mehaničke karakteristike za FE modele

| Komponente u FE modelu | Modul elastičnosti E [MPa] | Granica popuštanja f_y [MPa] | Poissonov koeficijent ν [-] |
|------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Cijevni element | 210 000 | 491 | 0,3 |
| Spojna ploča | 210 000 | 800 | 0,3 |
| Vijak | 210 000 | 800 | 0,3 |

5.2.5 Diskretizacija modela

S ciljem dobivanja što točnijih i reprezentativnijih rezultata elementi u modelima podijeljeni su na mrežu konačnih elemenata. Konačni elementi imaju trokutasti oblik, a odabrana veličina iznosi 10 mm. Modeli su podijeljeni na ukupno 10338 elemenata povezanih preko 19018 čvorova.



Slika 5.8 Prikaz mreže konačnih elemenata

5.2.6 Kontakti

Točnost numeričkih modela uvelike ovisi o definiranim svojstvima kontakata između površina pojedinih elemenata spoja. Kontakti između svih dijelova su modelirani eksplicitno. U spoju su modelirana kontaktna područja tijelo vijka – rupa za vijak, glava vijka – komponente te ostale komponente u kontaktu ploča-ploča. Vijak drži komponente spojene kako bi se mogle oduprijeti nanesenom pomaku. Dakle, naprezanja između elemenata prenose se posmikom vijka. Ovaj mehanizam najviše utječe na ponašanje spoja i njegov odgovor. Kontaktne površine su definirane i združene zajedno s površinama koje će biti u kontaktu uslijed klizanja. S ciljem pravilnog definiranja kontakta, svakom kontaktnom paru površina pridružena su pripadna interakcijska svojstva, koja će omogućiti prijenos sila i naprezanja s jednog elementa na drugi. Pridružena svojstva prikazana su u tablici 5.3.

Za modeliranje normalnih naprezanja odabrani su „Rough“ i „Bonded“ kontakti, dok su za tangencijalne komponente odabrani „Frictionless“ kontakti, koji omogućuju klizanje između površina bez trenja. Kako je prije objašnjeno spljošteni dio cijevnog elementa sastoji se od dva dijela. Između kontaktnih površina definiran je „Frictionless“ kontakt, dok je između kontaktnih

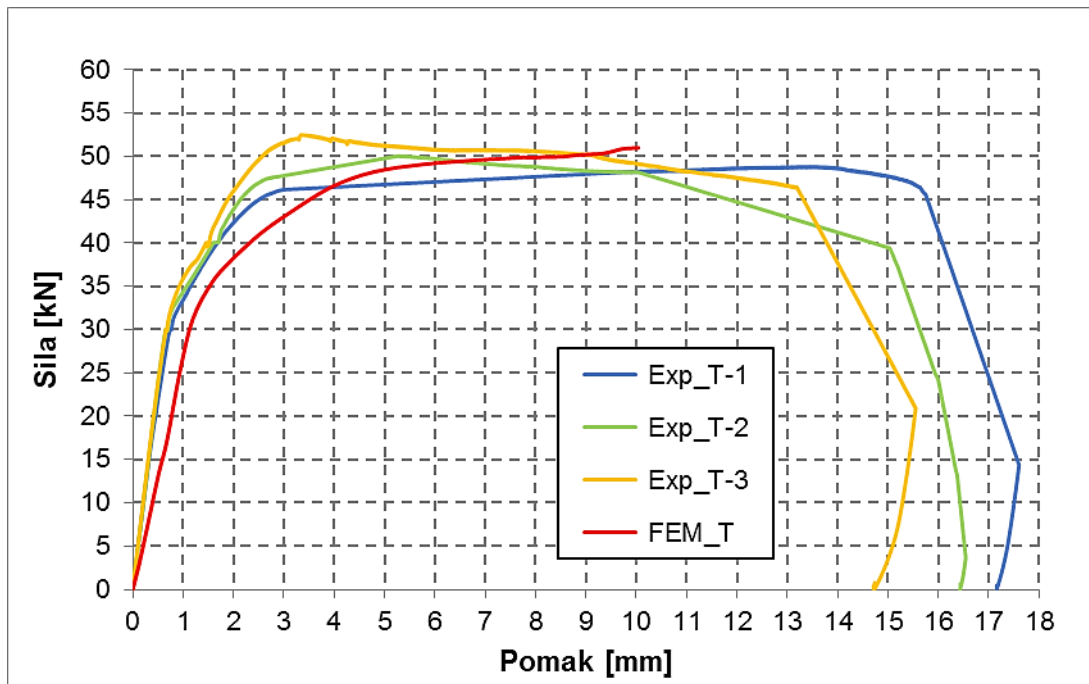
bočnih bridova odabran „Bonded“ kontakt kako bi se spriječilo odvajanje elemenata tijekom deformiranja i simuliralo stvarno ponašanje tog dijela cijevnog elementa.

Tablica 5.3 Interakcijska svojstva za definiranje kontakta između površina u FE modelima

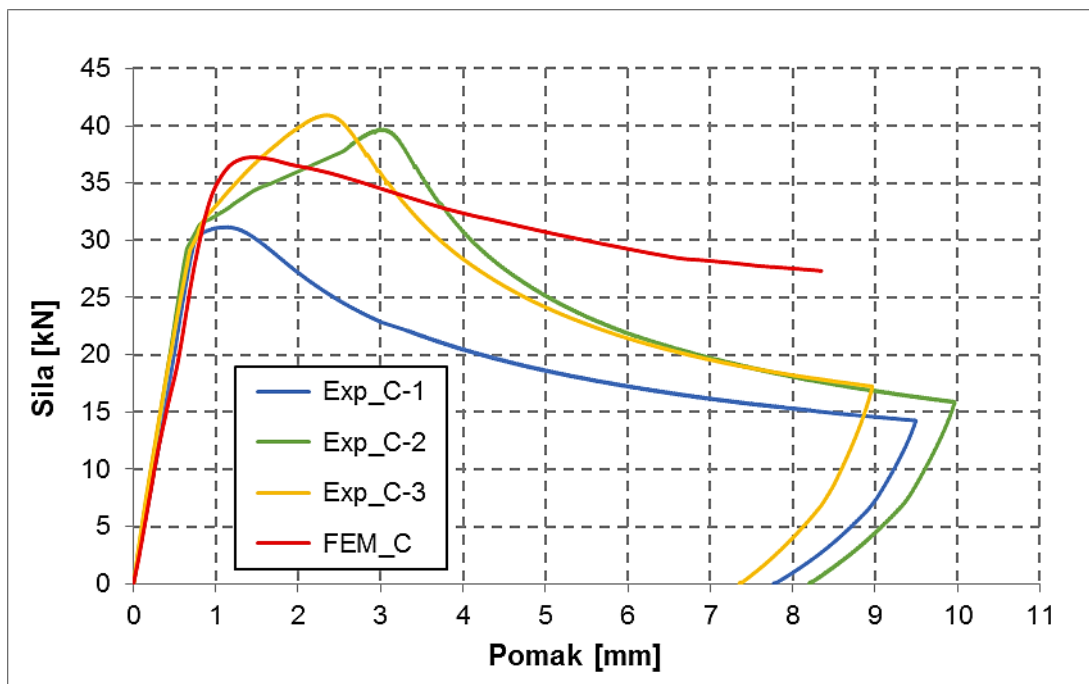
| Kontakt | Interakcijsko svojstvo |
|------------------------------|--|
| Tijelo vijka – rupa za vijak | Normalno ponašanje (Augmented Lagrange, 'Frictionless' contact) |
| Glava vijka – komponente | Normalno ponašanje (Augmented Lagrange, 'Rough' contact) |
| Komponente u posmiku | Tangencijalno ponašanje (Augmented Lagrange, 'Frictionless' contact) |
| Ostale komponente | Normalno ponašanje (Augmented Lagrange, 'Bonded' contact) |

5.3 Numerički rezultati i diskusija

Kao rezultat numeričkih analiza dobivene su krivulje odnosa sile i pomaka ($F-\Delta$ krivulja), koje opisuju ukupno ponašanje modela pri djelovanju uzdužnih sila i dodatnih momenata drugog reda nastalih kao posljedica ekscentriciteta uzdužne sile. Krivulje predstavljaju rezultate dobivene numeričkim simulacijama ponašanja spoja i uspoređene su s rezultatima laboratorijskog ispitivanja, što je i prikazano na slikama 5.9 i 5.10. Odvojeno su prikazani rezultati dobiveni za vlačno i tlačno opterećenje spoja.



Slika 5.9 $F-\Delta$ za vlačno opterećenje – usporedba numeričkih i laboratorijskih rezultata

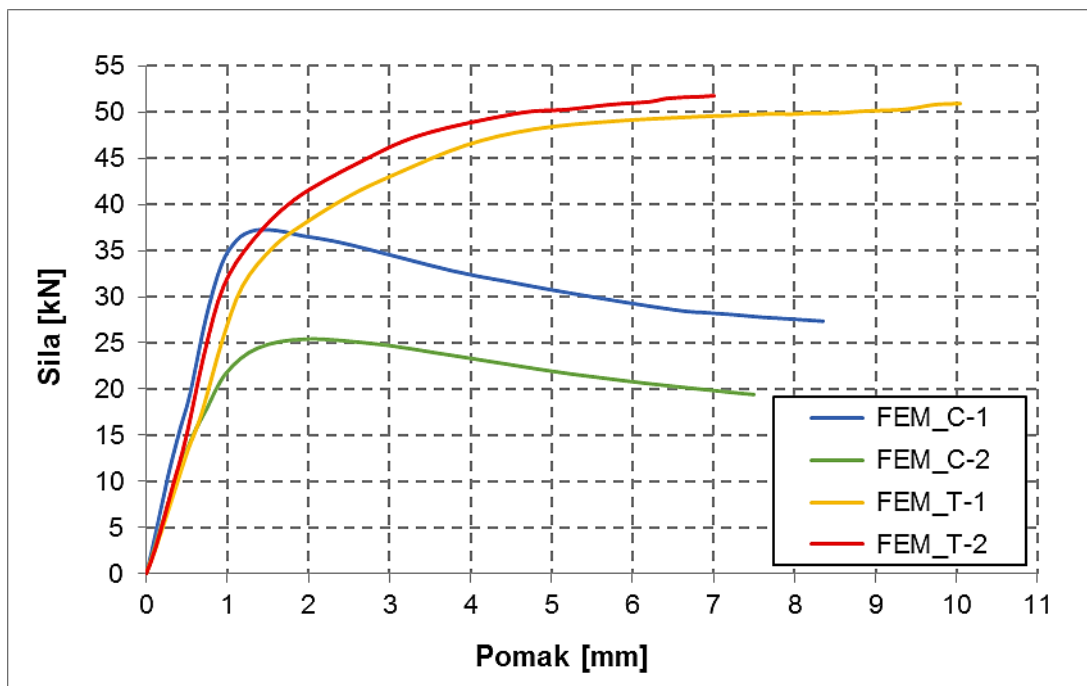


Slika 5.10 $F-\Delta$ za tlačno opterećenje – usporedba numeričkih i laboratorijskih rezultata

Rezultati dobiveni numeričkim simulacijama daju zadovoljavajuće rezultate. Kao što se vidi na slici 5.10 numerički rezultati za tlačno opterećeni spoj se u elastičnom području izuzetno dobro poklapaju s eksperimentalnima i to za sva tri uzorka. U post-kritičnom području dolazi do velikih razilaženja rezultata, ali to za potrebe karakterizacije ponašanja nije ključno. Kod vlačnog

opterećenja spoja, numerička simulacija daje nešto mekši odgovor u odnosu na laboratorijska ispitivanja. Ovaj problem može se riješiti dodavanjem utjecaja trenja u numeričkom modelu, ali to zbog složenosti problema i zanemarivih odstupanja ovdje nije učinjeno.

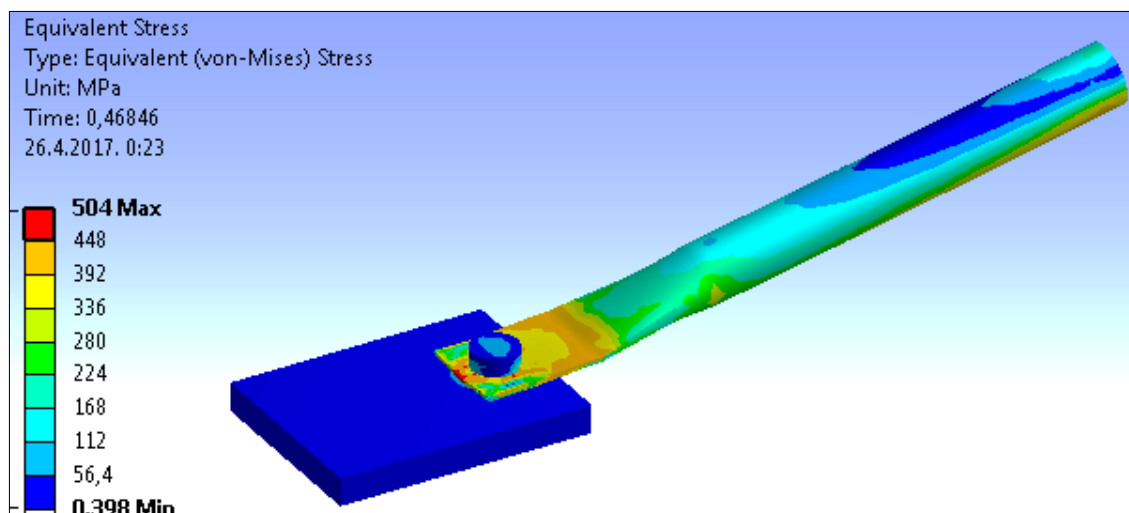
Na slici 5.11 uspoređeni su numerički rezultati dobiveni simulacijom četiri modela raspoređenih u dva slučaja s obzirom na raspored elemenata u spoju. Kao što je objašnjeno u prethodnim poglavljima, za drugi slučaj uzorka spoja nisu provedena laboratorijska ispitivanja pa nije bilo moguće napraviti usporedbu numeričkih i eksperimentalnih rezultata.



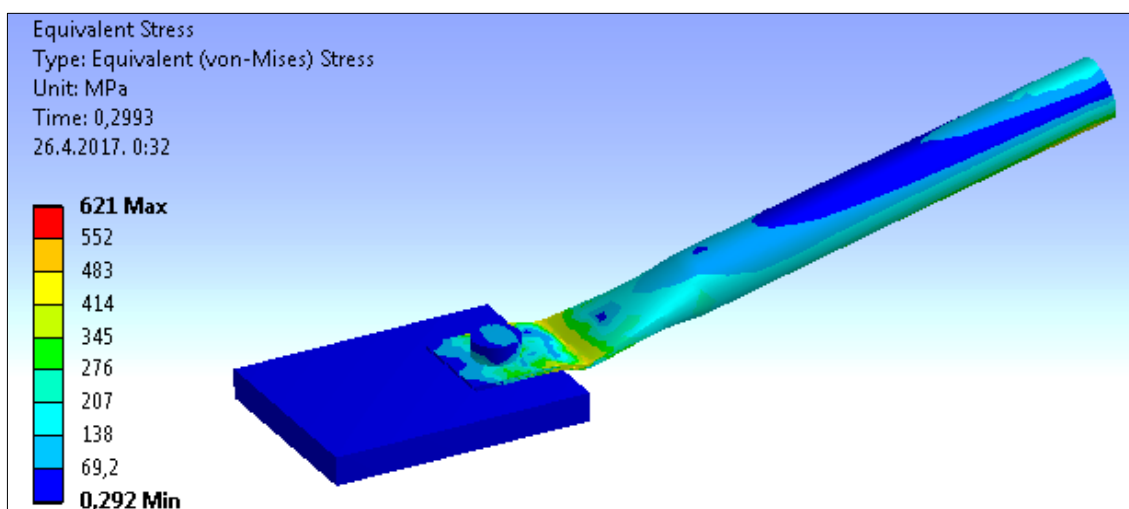
Slika 5.11 Usporedba numeričkih rezultata po slučajevima

Na temelju prikazanih krivulja može se zaključiti da spoj u drugom slučaju postiže veću vlačnu i manju tlačnu otpornost pri uzdužnom opterećenju u odnosu na prvi slučaj. Za razliku od vlačno opterećenog spoja, pri tlačnom opterećenju javlja se značajna razlika u otpornostima. Dakle, drugi slučaj rasporeda elemenata u tlačno opterećenom spoju je mjerodavan za dimenzioniranje. Razlog tome su veći ekscentriciteti uzdužne sile, koji uzrokuju pojavu većih momenata savijanja te značajnu redukciju nosivosti elementa u tlačno opterećenom spoju.

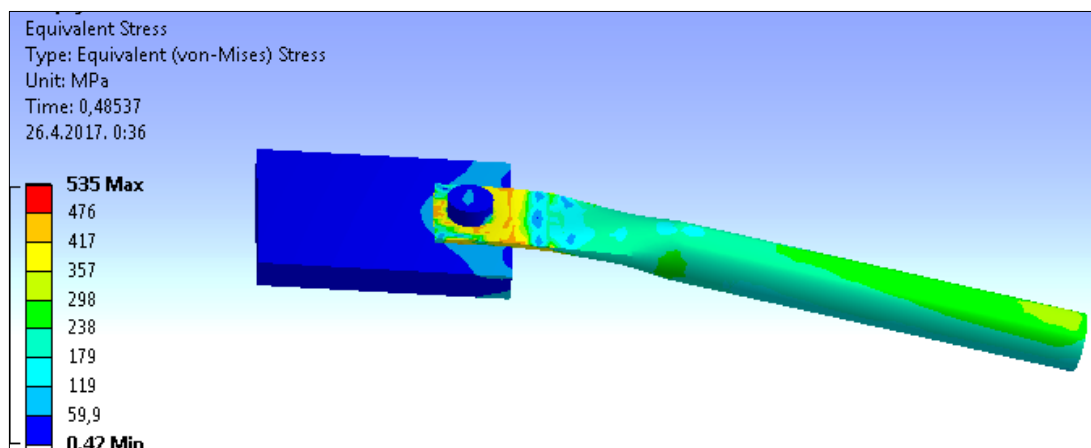
Na sljedećim slikama prikazana su stanja naprezanja u trenutku otkazivanja i načini otkazivanja analiziranih modela po slučajevima.



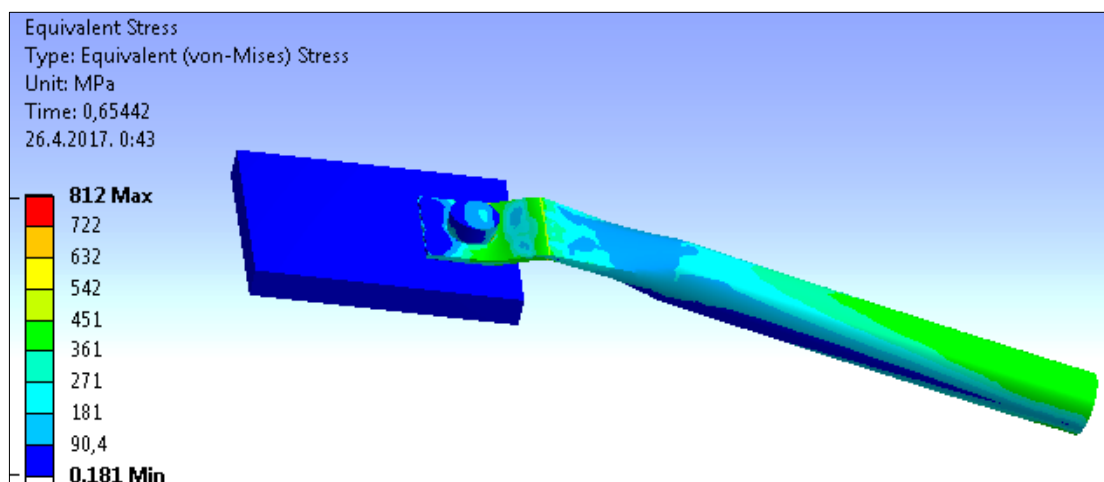
Slika 5.12 Stanje naprezanja pri otkazivanju modela FEM_T1



Slika 5.13 Stanje naprezanja pri otkazivanju modela FEM_C1

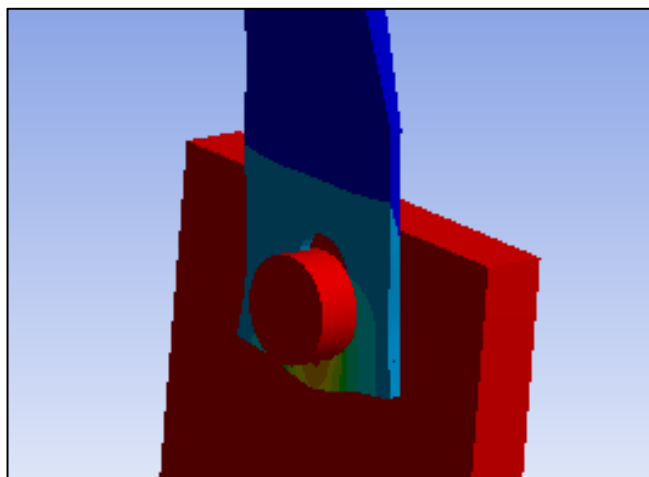


Slika 5.14 Stanje naprezanja pri otkazivanju modela FEM_T2



Slika 5.15 Stanje naprezanja pri otkazivanju modela FEM_C2

Oblici otkazivanja dobivenih numeričkim simulacijama za spoj u prvom slučaju uspoređeni su s laboratorijski ispitanim uzorcima spoja. Navedene usporedbe prikazane su na slikama 5.16 i 5.17. Na slikama 5.18 i 5.19 prikazani su oblici otkazivanja u drugom slučaju, dobiveni samo numeričkim simulacijama.

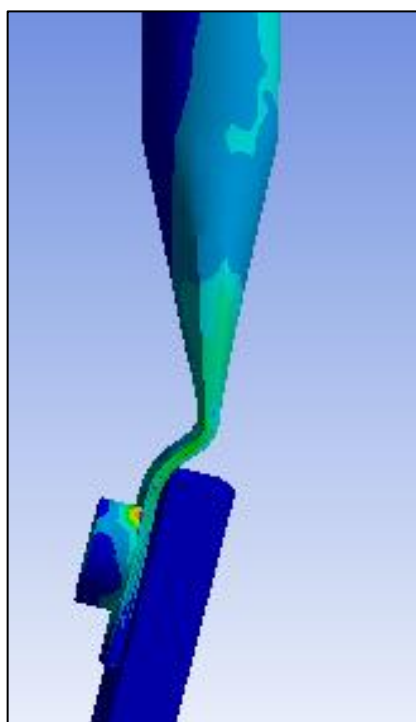


a) numerički model (FEM_T1)



b) laboratorijski uzorak T1

Slika 5.16 Oblik otkazivanja spoja pri vlačnom opterećenju

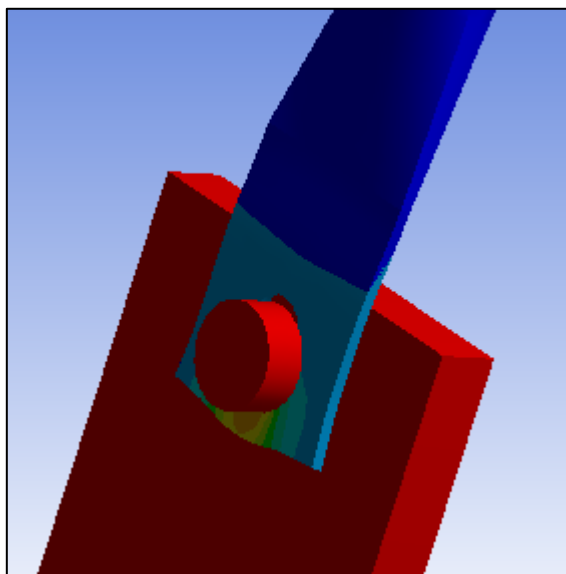


a) numerički model (FEM_C1)

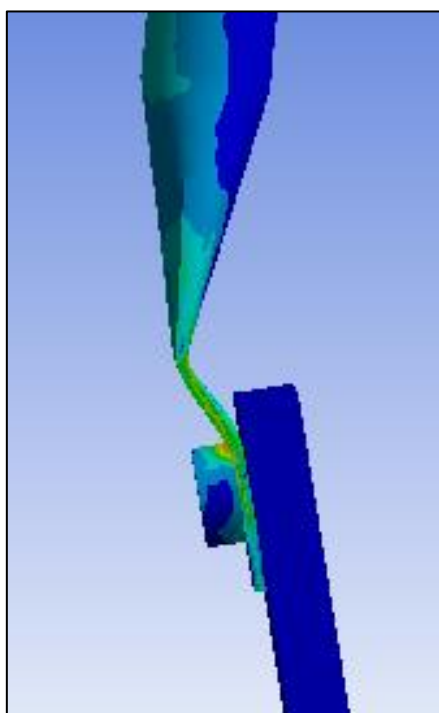


b) laboratorijski uzorak C1

Slika 5.17 Oblik otkazivanja spoja pri tlačnom opterećenju



Slika 5.18 Oblik otkazivanja spoja pri vlačnom opterećenju modela *FEM_T2*



Slika 5.19 Oblik otkazivanja spoja pri tlačnom opterećenju modela *FEM_C2*

Na temelju prikazanih slika može se zaključiti da vlačni uzorci otkazuju pritiskom po omotaču rupe, a tlačni izbočivanjem spljoštenog dijela cijevi.

5.4 Karakterizacija ponašanja numeričkih modela

Analogno točki 4.4.4 ovog rada napravljena je karakterizacija ponašanja numeričkih modela. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 5.4.

Tablica 5.4 Očitane otpornosti i pripadni pomaci za numeričke vlačne i tlačne modele

| UZORAK | FEM_T1 | FEM_T2 | FEM_C1 | FEM_C2 |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Inicijalna krutost [kN/m] | 27,0 | 33,3 | 37,6 | 28,1 |
| N_{R1} [kN] | 47,0 | 47,5 | 35,9 | 21,4 |
| u_{R1} [mm] | 1,78 | 1,45 | 0,97 | 0,81 |
| N_{R2} [kN] | 38,8 | 37,2 | 34,0 | 19,1 |
| u_{R2} [kN] | 1,48 | 1,19 | 0,90 | 0,72 |
| N_M [kN] | 51,0 | 51,8 | 37,2 | 25,4 |
| u_M [kN] | 10,0 | 7,00 | 1,50 | 1,98 |
| u_L [mm] | - | - | 8,35 | 7,50 |

U priloženoj tablici je:

S_{ini} – početna krutost

N_{R1} – otpornost dobivena kao sjecište sekante prvog područja i sekante trećeg područja (otpornost koja odgovara točki „R1“ slici 4.39)

u_{R1} – pomak koji odgovara otpornosti N_{R1} (pomak u točki „R1“ na slici 4.39)

N_{R2} – otpornost dobivena kao sjecište sekante prvog područja i sekante drugog i trećeg područja (otpornost koja odgovara točki „R2“ slici 4.40)

u_{R2} – pomak koji odgovara otpornosti N_{R2} (pomak u točki „R2“ na slici 4.40)

N_M – krajnja otpornost (u točki „M“ na slikama 4.39 i 4.40)

u_M – pomak koji odgovara krajnjoj otpornosti (pomak u točki „M“ na slikama 4.39 i 4.40)

u_L – krajnji pomak pri lomu (pomak u točki „L“ na slikama 4.39 i 4.40)

Oznake korištene u tablici 5.4 prethodno su objašnjene i u točki 4.4.4 gdje se nalaze i spomenute slike 4.39 i 4.40.

6 DISKUSIJA REZULTATA

6.1 Usporedba rezimiranih rezultata otpornosti

Kroz ovo poglavlje napravljen je pregled rezultata dobivenih pomoću triju metoda te je napravljena usporedba i analiza tih rezultata. Metode koje su se pri tome koristile su analitička, eksperimentalna te numerička. Prema svakoj od metoda određena je otpornost vijčanog spoja u čvoru kupole te su rezimirani rezultati prikazani u tablici 6.1.

Tablica 6.1 Rezime otpornosti spoja u čvoru kupole

| | VLAK [kN] | | TLAK [kN] | |
|-------------------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| ANALITIČKA METODA | AN_T1 | AN_T2 | AN_C1 | AN_C2 |
| | 42,0 | 42,0 | 29,3 | 14,9 |
| EKSPERIMENTALNA METODA | EXP_T | | EXP_C | |
| | 46,0 | - | 32,6 | - |
| | AN/EXP [%] | | | |
| | 8,0% | - | 10,0% | - |
| NUMERIČKA METODA | FEM_T1 | FEM_T2 | FEM_C1 | FEM_C2 |
| | 47,0 | 47,5 | 35,9 | 21,4 |
| | AN/NUM [%] | | | |
| | 12,0% | 11,6% | 18,4% | 30,4% |

Kao što je navedeno u točki 5.3, a sada vidljivo u tablici 6.1, eksperimentalnom metodom nije određena otpornost za drugi način spajanja elementa pa za taj slučaj uspoređujemo samo analitičke i numeričke rezultate. Očekivano, eksperimentalno i numerički određene otpornosti ispitanog spoja su veće od onih utvrđenih prema analitičkim izrazima. Kod tlačno opterećenog elementa odstupanja nisu značajna te možemo primijetiti veliku podudarnost u otpornostima određenima preko sve tri metode. Prilikom eksperimentalne i numeričke analize ponašanja spoja primijećeno je da se vlačni element izravnava što znači da se smanjuje utjecaj ekscentriciteta sile 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 vlačnog elementa pritiskom po omotaču rupe. Iz tog razloga su za vlačne elemente kod oba načina spajanja određene otpornosti na pritisak po omotaču rupe koristeći izraze prema HRN EN 1993-1-8 [12]. Nove otpornosti određene za vlačne elemente prikazane su u tablici 6.1 umjesto analitičkih otpornosti dobivenih u točki 3.3. S druge

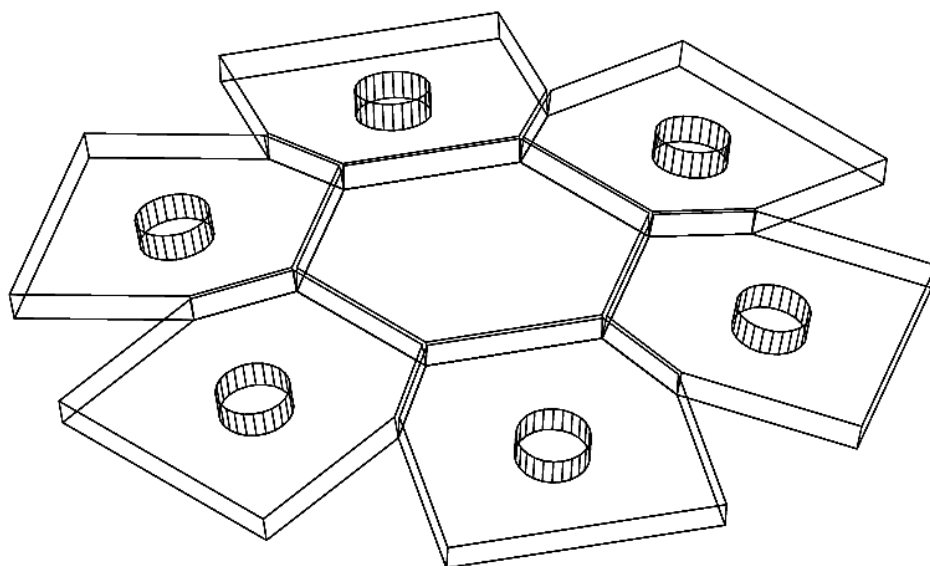
strane, tlačno opterećeni element se dodatno savija čime se povećava ekscentricitet odnosno dodatni moment savijanja i izbočivanje spljoštenog dijela cijevi nastupa brže. Analitički izraz daje zadovoljavajuće vrijednosti otpornosti za tlačno opterećene elemente, ali je potrebno odrediti pripadne vrijednosti početnih ekscentriciteta obzirom na konfiguraciju spoja, odnosno mjesto spajanja elementa u čvoru (tablica 3.1).

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 drugom slučaju spajanja i iznosi čak 30,4%.

Problematika analiziranog tipa spoja u čvoru geodetske kupole je u njegovom oblikovanju. Zbog savijanja spljoštenog dijela cijevi, odnosno na taj način dobivenog ekscentriciteta, tlačna otpornost je značajno manja u odnosu na vlačnu (oko 30% prema eksperimentalno dobivenim podacima). Najmanja otpornost dobiva se kod tlačnog elementa u drugom načinu spajanja (tablica 6.1) pa je taj slučaj mjerodavan za dimenzioniranje. U sljedećim točkama prikazan je prijedlog rješenja vijčanog spoja kojim bi se smanjile razlike u otpornostima te povećala efikasnost spoja.

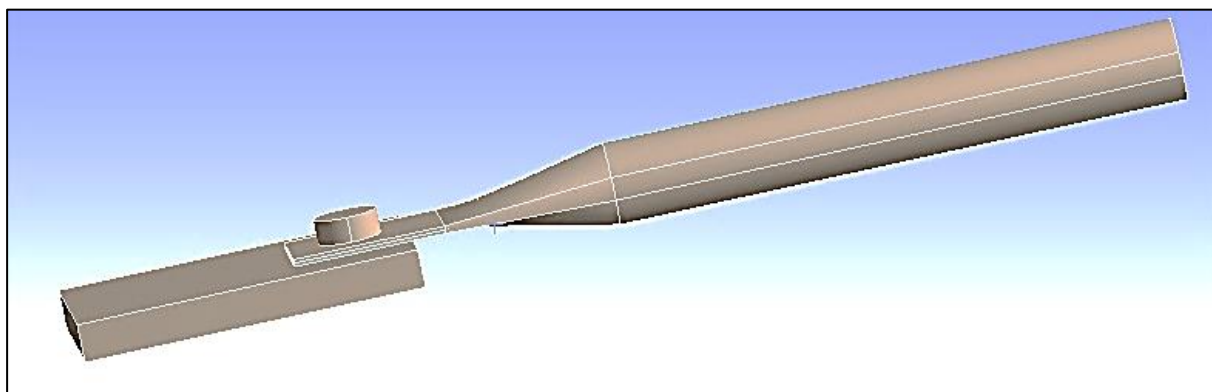
6.2 Prijedlog rješenja za oblikovanje čvora

U ovoj točki dan je novi prijedlog oblikovanja vijčanog spoja s ciljem anuliranja nepovoljnih utjecaja drugog reda na spljoštenom dijelu cijevi i povećanja otpornosti. Cilj je izbjeći savijanje spljoštenog dijela cijevnih elemenata pa se predlaže spajanje ravnih cijevi na posebno oblikovani čelični lim, prikazan na slici 6.1, preko kojeg bi se osigurala zakrivljena konfiguracija kupole.



Slika 6.1 Prijedlog rješenja za oblikovanje čvora

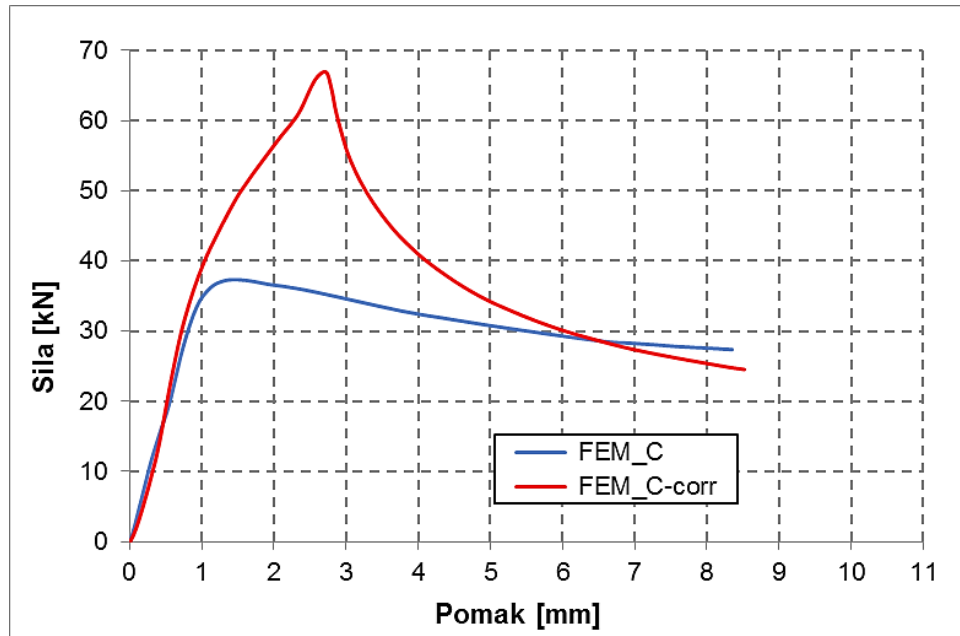
Kako bi se provjerila efikasnost takvog oblikovanja, bilo je potrebno ispitati otpornost ravnog spljoštenog dijela cijevnog elementa u spoju. Analiza je napravljena programskim paketom ANSYS 15.0. Izrađen je novi model ravnog cijevnog elementa koji je zatim opterećen vlačnim i tlačnim opterećenjem. Spomenuti model prikazan je na slici 6.2. Uvjeti oslanjanja, kontakti i opterećenja modelirani su na isti način kao u točki 5.2.



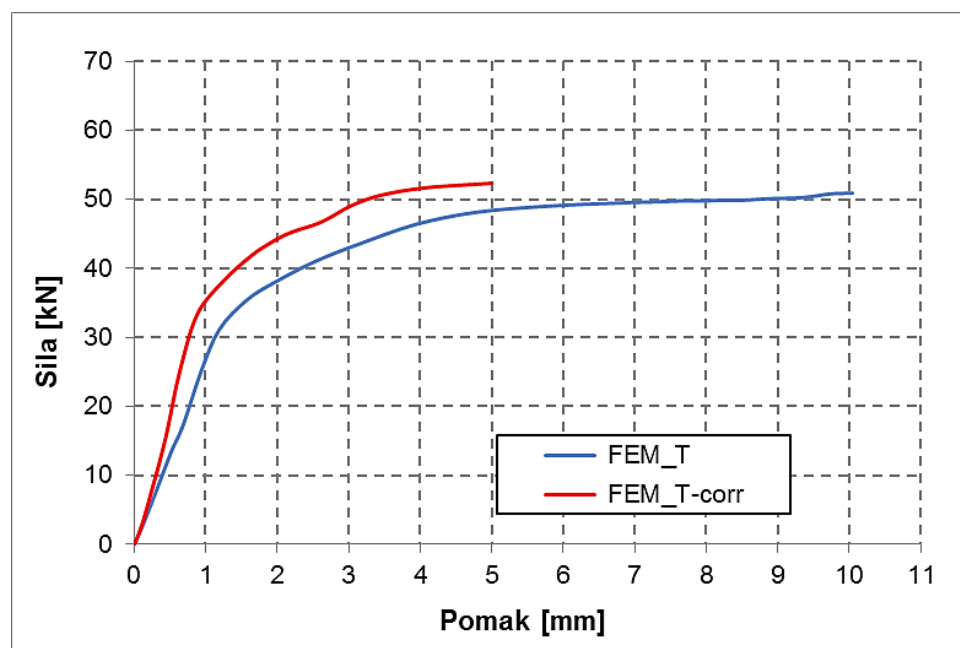
Slika 6.2 Numerički model novog rješenja za oblikovanje

6.3 Prikaz rezultata i zaključne napomene

Nakon provedene numeričke analize dobiveni su $F - \Delta$ dijagrami kojima je prikazano ponašanje elemenata u spoju pri tlačnom i vlačnom opterećenju. Dijagrami dobiveni za novo oblikovanje spoja prikazani su s prethodno dobivenim $F - \Delta$ dijagramima.



Slika 6.3 Usporedba ponašanja analiziranog spoja s novim prijedlogom rješenja za tlačne elemente



Slika 6.4 Usporedba ponašanja analiziranog spoja s novim prijedlogom rješenja za vlačne elemente

Na temelju dobivenih dijagrama može se zaključiti da se promjenom oblikovanja elementa u spoju značajno ne mijenja vlačna otpornost što potvrđuje činjenicu da oblikovanje, tj. ekscentričnost nema veliki utjecaj na ponašanje vlačnih elemenata i da tako naprezani elementi otkazuju ustvari pritiskom po omotaču rupe. S druge strane, izravnavanjem cijevnog elementa postignuta je približno 2,7 puta veća tlačna otpornost u odnosu na prethodno analiziran kritični numerički model. Time je riješen problem nepovoljnih učinaka dodatnog momenta zbog ekscentriciteta.

Tablica 6.2 Usporedba dobivenih rezultata s korigiranim numeričkim rješenjem

| | VLAK | | TLAK | |
|-------------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| ANALITIČKA METODA | AN_T1 | AN_T2 | AN_C1 | AN_C2 |
| | 42,0 | 42,0 | 29,3 | 14,9 |
| EKSPERIMENTALNA METODA | EXP_T | | EXP_C | |
| | 46,0 | - | 32,6 | - |
| | AN/EXP [%] | | | |
| | 8,0% | - | 10,0% | - |
| NUMERIČKA METODA | FEM_T1 | FEM_T2 | FEM_C1 | FEM_C2 |
| | 47,0 | 47,5 | 35,9 | 21,4 |
| | AN/NUM [%] | | | |
| | 12,0% | 11,6% | 18,4% | 30,4% |
| KORIGIRANO RJEŠENJE | FEM_T_corr | | FEM_C_corr | |
| | 48,1 | | 57,0 | |
| | Povećanje otpornosti [%] | | | |
| | 12,7% | 12,7% | 48,5% | 73,9% |

7 ZAKLJUČAK

7.1 Neposredni zaključci iz provedenog istraživanja

Iz usporedbe analitičkih, eksperimentalnih i numeričkih rezultata možemo zaključiti kako je analitička metoda, odnosno jednostavni teorijski interakcijski izraz, pouzdan za procjenu otpornosti analiziranog spoja u čvoru geodetske kupole. Međutim, uvriježena analitička procjena je prilično konzervativna. Naime, postojanje ekscentriciteta zbog savinutosti spljoštenog dijela cijevi se uzima u obzir bez obzira na predznak opterećenja spojnog elementa (tlak ili vlak). Nadalje, taj jednostavni analitički izraz zanemaruje stvarni položaja elementa u spoju (unutarnji, središnji ili vanjski). Činjenica je da vlačno opterećenje pozitivno djeluje na cijev u smislu izravnavanja spljoštenog dijela i mjerodavan način otkazivanja za vlačno opterećenje postaje pritisak po omotaču rupe spljoštenog dijela cijevi. S druge strane, kod tlačnog opterećenja cijev brže otkazuje i tu dolazi do izražaja važnost ispravnog definiranja ekscentriciteta. U radu su dani originalni prijedlozi za korekciju analitičkih izraza s kojima se definira ekscentricitet ovisno o konfiguraciji samog spoja u čvoru kupole.

Najvažniji rezultati laboratorijskog ispitivanja, odnosno eksperimentalne metode, su dijagrami sila - pomak s kojima je u potpunosti 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. Napominje se da su provedena i vlačna ispitivanja osnovnog materijala cijevnih uzoraka. Ti rezultati su poslužili za utvrđivanje stvarnih mehaničkih svojstava i oni su zajedno s izmjerenim stvarnim geometrijskim svojstvima korišteni za izračun otpornosti preko analitičkog pristupa.

Na temelju rezultata provedenih laboratorijskih ispitivanja kalibrirani su numerički (FEM) modeli u programskom paketu ANSYS 15.0. Kako je u laboratoriju ispitana jedna geometrijska konfiguracija čvornog spoja u vlaku i tlaku, na kalibriranim modelima razvijena su dodatna dva numerička modela (u vlaku i tlaku) za drugu konfiguraciju spoja. Nakon provedenih numeričkih simulacija utvrđeno je da je za otpornost čvora mjerodavno otkazivanje tlačnog elementa izbočivanjem spljoštenog dijela cijevi i to za drugu konfiguraciju spajanja. 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 položaj tlačnog elementa u spoju.

Nakon provedene laboratorijske i numeričke analize, na temelju dobivenih dijagrama sila - pomak, napravljena je karakterizacija ponašanja čvornog spoja. Tako utvrđene eksperimentalne

i numeričke otpornosti su ujednačene i pokazuju zadovoljavajuće poklapanje s analitičkim otpornostima izračunatim s izmjerenim geometrijskim i mehaničkim svojstvima.

Analizom i usporedbom rezultata utvrđeni su mjerodavni načini otkazivanja i predloženo je novo rješenje oblikovanja čvora kojim se anulira nepovoljni utjecaj ekscentriciteta i učinaka drugog reda. Predlaže se izvedba čvora spajanjem ravnih cijevi (bez savijanja spljoštenog dijela) na posebno oblikovani čelični lim kojim se osigurava potrebna zakrivljenost kupole. Kako bi se dokazala učinkovitost takvog rješenja, napravljeni su dodatni numerički modeli s ravnim cijevnim elementom. Na tako dobivenim krivuljama sila - pomak ponovno je provedena karakterizacija ponašanja te je utvrđeno da se takvim oblikovanjem čvora postiže povećanje otpornosti kritičnog tlačnog elementa od približno 2,7 puta u odnosu na savinutu cijev ($FEM_C_corr/FEM_C2 = 57,0/21,4$). Međutim, s ovim prijedlogom mijenja se način otkazivanja čvornog spoja u otkazivanje na pritisak po omotaču rupe. Tako da je stvarno povećanje otpornosti novog rješenja 2,2 puta ($FEM_T_corr/FEM_C2 = 48,1/21,4$).

7.2 Smjernice za daljnja istraživanja

Iako predloženi novi način oblikovanja prema numeričkoj analizi daje dobre rezultate potrebno ga je i laboratorijski ispitati kako bi se dodatno potvrdila njegova učinkovitost, odnosno detaljno razradila ideja oblikovanja čvorne ploče.

Zbog složenosti problematike u ovom radu ispitano je ponašanje samo jednog (rubnog) elementa u čvoru. Preporuča se ispitati ponašanje stvarnog čvora na jednom polju ili na stvarnoj kupoli. Dodavanjem specijalno oblikovanog čvornog lima povećava se cijena izrade. Upravo zbog toga postoji potreba za optimiziranjem predloženog rješenja. Specijalno oblikovanu univerzalnu čvornu ploču preporuča se laboratorijski ispitati i na temelju toga razviti kalibrirane numeričke modele. Takvi modeli poslužili bi za numeričke parametarske analize na temelju čega bi se mogle donijeti znanstveno argumentirane odluke o izboru geometrije i kvalitete materijala.

8 ZAHVALA

Zahvaljujemo se Građevinskom fakultetu na korištenju Laboratorija tehničke mehanike. Također, zahvaljujemo se tvrtki Kupole – bolje od šatora d.o.o. na sponzoriranju ispitivanja.

Posebno se zahvaljujemo mentoru doc.dr.sc. Domagoju Damjanoviću na pomoći u eksperimentalnom dijelu našeg rada te asistentu Janku Koščaku na iskazanom trudu i savjetima tokom izrade ovog rada.

Najveću zahvalu upućujemo mentoru izv.prof.dr.sc. Davoru Skejiću na vodstvu kroz stvaranje ovog rada, pregršt ideja, strpljenju koje je ukazao i volji da nas uputi u istraživanja i nova saznanja.

9 POPIS LITERATURE

- [1] <http://www.pbs.org/wgbh/buildingbig/dome/> [Pristup: 8. siječnja 2017.]
- [2] <http://www.geometer.org/mathcircles/geodesic.pdf> [Pristup: 8. siječnja 2017.]
- [3] <https://www.britannica.com/technology/geodesic-dome> [Pristup: 8. siječnja 2017.]
- [4] <https://www.bfi.org/> [Pristup: 23. ožujka 2017.]
- [5] <http://geo-dome.co.uk> [Pristup: 8. siječnja 2017.]
- [6] HRN EN 1991-1-3:2012, *Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije - Dio 1-3: Opća djelovanja - Opterećenja snijegom*
- [7] HRN EN 1991-1-4:2012, *Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije - Dio 1-4: Opća djelovanja - Djelovanja vjetra*
- [8] HRN EN 13782:2015, *Privremene konstrukcije - Šatori – Sigurnost*
- [9] <http://www.kupole.hr> [Pristup: 23. ožujka 2017.]
- [10] <http://www.domerama.com> [Pristup: 8. siječnja 2017.]
- [11] HRN EN 1993-1-1:2014, *Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade*
- [12] HRN EN 1993-1-8:2008/NA, *Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija - Dio 1-8: Proračun priključaka – Nacionalni dodatak*
- [13] 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)*
- [14] Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I.; *Čelične konstrukcije 1*, Tiskara Zelina, Zagreb, 2009.
- [15] Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I.; *Metalne konstrukcije 1*, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 1994
- [16] Skripta „Metoda konačnih elemenata“, M. Meštrović, Zagreb 2017.
- [17] Vukelić, G.: *Numerička analiza procesa širenja pukotina konstrukcija*, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet, Rijeka, 2011.
- [18] Skejić, D: *Procjena pouzdanosti priključaka nosač-stup izvedenih kutnicima*, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Zagreb, 2009.

Popis slika:

| | |
|--|----|
| Slika 1.1 Kupola Panteona u Rimu [1]..... | 2 |
| Slika 1.2 Primjeri strujanja zraka kod kupola [2]..... | 4 |
| Slika 1.3 Dymaxion kuća [2]..... | 5 |
| Slika 1.4 Buckminster Fuller u svom uredu [4] | 6 |
| Slika 1.5 Primjer prijenosa sila kod jednakostraničnog trokuta [5] | 7 |
| Slika 1.6 Primjer prijenosa sila kod jednakokračnog trokuta [5]..... | 7 |
| Slika 1.7 Usporedba djelovanja opterećenja vjetrom na geodetsku kupolu i obiteljsku kuću [5] . | 8 |
| Slika 1.8 Trofrekventna kupola s tlačnom silom na vrhu [5]..... | 9 |
| Slika 1.9 Koeficijent izloženosti $c_e(z)$ [7] | 12 |
| Slika 1.10 Djelovanje vjetra na kupolu [7]..... | 12 |
| Slika 1.11 Koeficijent pritiska vjetra za stalne kupole [7] | 13 |
| Slika 1.12 Zatvoreni šatori kružnog oblika [8]..... | 14 |
| Slika 1.13 Koeficijent pritiska vjetra za privremene kupole [8] | 14 |
| Slika 1.14 Polietilenska kupola 2V5 [9] | 15 |
| Slika 1.15 Čelična kupola 2V5 [9] | 16 |
| Slika 1.16 Spoj cijevi (čvor) čelične kupole [9]..... | 16 |
| Slika 1.17 Čelični krov 2V5 [9] | 17 |
| Slika 1.18 Čelični krov 2V5 [9] | 17 |
| Slika 1.19 Montirana kupola 3V7 [9]..... | 18 |
| Slika 1.20 Kupola 3V7 gledana tlocrtno [9]..... | 18 |
| Slika 1.21 Krov 3V7 korišten prilikom Božićnog sajma u Zagrebu [9] | 19 |
| Slika 1.22 Tlocrtni pogled na krov 3V7 [9]..... | 19 |
| Slika 1.23 Kupola 3V9,4 u zimskom okruženju nalikuje iglu kućici [9] | 20 |
| Slika 1.24 Božićne bar-kupole prekrivene ceradom [9] | 20 |
| Slika 1.25 Krov 3V9,4 idealan za koncertna događanja [9] | 21 |
| Slika 1.26 Krovovi za natkrivanje promotivnih štandova [9]..... | 21 |
| Slika 1.27 Idealna veličina i dizajn kupole za morski ambijent [9]..... | 22 |
| Slika 1.28 Pogled na ulaz kupole [9] | 22 |
| Slika 1.29 Atraktivan 3V12 krov kao pozornica [9] | 23 |
| Slika 1.30 Pogled na pozornicu [9]..... | 23 |
| Slika 1.31 Kupola 3V14 na zagrebačkom trgu s poznatim „dodatkom“-naočalama Buckminstera Fullera [9] | 24 |
| Slika 1.32 Elegantan vanjski izgled koji se uklapa u raznovrstan okoliš [9] | 24 |

| | |
|--|----|
| Slika 1.33 Održavanje koncerta ispred Umjetničkog paviljona u Zagrebu [9] | 25 |
| Slika 1.34 Futuristički dizajn kupolastog krova [9] | 25 |
| Slika 1.35 Spajanje cijevi na preklop s jednim vijkom [10]..... | 26 |
| Slika 1.36 Čvor s metalnim okvirom [10]..... | 26 |
| Slika 1.37 Univerzalni čvor kupola [10] | 27 |
| Slika 1.38 Poseban primjer čvora za cijevne elemente kvadratnog presjeka [10]..... | 27 |
| Slika 1.39 Američki način povezivanja cijevi [10]..... | 28 |
| Slika 1.40 Potpuno zglojni čvor [10]..... | 28 |
| Slika 1.41 Zračni čvor [10] | 28 |
| Slika 4.1 Oznake dimenzija cijevnog elementa | 36 |
| Slika 4.2 Dimenzije i oblik uzorka za ispitivanje materijala [15] | 37 |
| Slika 4.3 Provedba ispitivanja uzorka prihvaćenog mehaničkim čeljustima | 38 |
| Slika 4.4 Uzorci nakon loma..... | 39 |
| Slika 4.5 Inženjerski σ - ϵ dijagrami ispitanih čeličnih epruveta | 40 |
| Slika 4.6 Razmještaj uzoraka i dodatne opreme za ispitivanje na vlak | 42 |
| Slika 4.7 Razmještaj mjernih uređaja | 43 |
| Slika 4.8 Razmještaj uzoraka i dodatne opreme za ispitivanje na tlak..... | 45 |
| Slika 4.9 Razmještaj mjernih uređaja | 46 |
| Slika 4.10 Pomak na mjestu P1 i P2 za uzorak T1 | 48 |
| Slika 4.11 Pomak na mjestu P1 i P2 za uzorak T2..... | 48 |
| Slika 4.12 Pomak na mjestu P1 i P2 za uzorak T3..... | 49 |
| Slika 4.13 Pomak na mjestu P1 za sve vlačne uzorke (T1 – T3)..... | 49 |
| Slika 4.14 Pomak na mjestu P2 za sve vlačne uzorke (T1 – T3)..... | 50 |
| Slika 4.15 Pomak na mjestu P1 i P2 za uzorak C1 | 51 |
| Slika 4.16 Pomak na mjestu P1 i P2 za uzorak C2 | 51 |
| Slika 4.17 Pomak na mjestu P1 i P2 za uzorak C3 | 52 |
| Slika 4.18 Pomak na mjestu P1 za sve tlačne uzorke (C1 – C3)..... | 52 |
| Slika 4.19 Pomak na mjestu P2 za sve tlačne uzorke (C1 – C3)..... | 53 |
| Slika 4.20 Pomak preše za uzorak T1..... | 54 |
| Slika 4.21 Pomak preše za uzorak T2..... | 54 |
| Slika 4.22 Pomak preše za uzorak T3..... | 55 |
| Slika 4.23 Pomak preše za vlačne uzorke (T1 – T3) | 55 |
| Slika 4.24 Pomak preše za uzorak C1 | 56 |
| Slika 4.25 Pomak preše za uzorak C2 | 57 |
| Slika 4.26 Pomak preše za uzorak C3 | 57 |

| | |
|--|----|
| Slika 4.27 Dijagram usporedbe sila - pomak preše za tlačne uzorke (C1 – C3) | 58 |
| Slika 4.28 Početno stanje i početak deformiranja vlačno opterećenog uzorka T1 | 59 |
| Slika 4.29 Nastavak deformiranja uzorka T1 do trenutka neposredno prije sloma..... | 60 |
| Slika 4.30 Uzorci T1 do T3 nakon otkazivanja | 60 |
| Slika 4.31 Uzorci T1 do T3 nakon otkazivanja | 61 |
| Slika 4.32 Uzorci T1 do T3 nakon otkazivanja | 61 |
| Slika 4.33 Početno stanje i početak deformiranja uzorka C1..... | 62 |
| Slika 4.34 Daljnje deformiranje uzorka C1 pod djelovanjem tlačne sile | 63 |
| Slika 4.35 Uzorci C1 do C3 nakon otkazivanja..... | 63 |
| Slika 4.36 Uzorci C1 do C3 nakon otkazivanja..... | 64 |
| Slika 4.37 Uzorci C1 do C3 nakon otkazivanja..... | 64 |
| Slika 4.38 Podjela dijagrama na područja | 65 |
| Slika 4.39 Način određivanja otpornosti pomoću sjecišta sekante trećeg područja i sekante prvog područja | 66 |
| Slika 4.40 Način određivanja otpornosti pomoću sjecišta sekante drugog i trećeg područja i sekante prvog područja | 66 |
| Slika 5.1 3D modeli konačnih elemenata po slučajevima u nedeformiranom stanju, (a),b),e) i f) - uzdužni pogled; c),d),g) i h) - tlocrt) | 72 |
| Slika 5.2 3D modeli konačnih elemenata po slučajevima u deformiranom stanju | 73 |
| Slika 5.3 Uvjeti oslanjanja | 74 |
| Slika 5.4 Inženjerski σ - ε dijagram ispitanog čelika cijevnih elemenata | 75 |
| Slika 5.5 Stvarni σ_n - ε_n dijagram ispitanog čelika cijevnih elemenata | 76 |
| Slika 5.6 Plastični dio stvarnog σ_n - ε_n dijagrama za numeričke simulacije | 76 |
| Slika 5.7 Plastični dio σ - ε dijagram za vijak i čeličnu ploču | 77 |
| Slika 5.8 Prikaz mreže konačnih elemenata..... | 78 |
| Slika 5.9 F- Δ za vlačno opterećenje – usporedba numeričkih i laboratorijskih rezultata | 80 |
| Slika 5.10 F- Δ za tlačno opterećenje – usporedba numeričkih i laboratorijskih rezultata | 80 |
| Slika 5.11 Usporedba numeričkih rezultata po slučajevima..... | 81 |
| Slika 5.12 Stanje naprezanja pri otkazivanju modela FEM_T1 | 82 |
| Slika 5.13 Stanje naprezanja pri otkazivanju modela FEM_C1 | 82 |
| Slika 5.14 Stanje naprezanja pri otkazivanju modela FEM_T2..... | 83 |
| Slika 5.15 Stanje naprezanja pri otkazivanju modela FEM_C2 | 83 |
| Slika 5.16 Oblik otkazivanja spoja pri vlačnom opterećenju | 84 |
| Slika 5.17 Oblik otkazivanja spoja pri tlačnom opterećenju | 84 |
| Slika 5.18 Oblik otkazivanja spoja pri vlačnom opterećenju modela FEM_T2 | 85 |

| | |
|--|----|
| Slika 5.19 Oblik otkazivanja spoja pri tlačnom opterećenju modela FEM_C2..... | 85 |
| Slika 6.1 Prijedlog rješenja za oblikovanje čvora..... | 89 |
| Slika 6.2 Numerički model novog rješenja za oblikovanje | 89 |
| Slika 6.3 Usporedba ponašanja analiziranog spoja s novim prijedlogom rješenja za tlačne elemente | 90 |
| Slika 6.4 Usporedba ponašanja analiziranog spoja s novim prijedlogom rješenja za vlačne elemente | 90 |

Popis tablica:

| | |
|--|----|
| Tablica 1.1 Očitavanje vršnog tlaka brzine vjetra [8]..... | 11 |
| Tablica 3.1 Formule za određivanje ekscentriciteta po slučajevima..... | 32 |
| Tablica 3.2 Analitičke otpornosti cijevnog elementa u vijčanom spoju kupole u [kN] | 34 |
| Tablica 4.1 Geometrijska svojstva cijevnih uzoraka..... | 36 |
| Tablica 4.2 Izmjerene dimenzije pojedinih uzoraka materijala..... | 37 |
| Tablica 4.3 Mehaničke karakteristike ispitanih epruveta..... | 40 |
| Tablica 4.4 Eksperimentalno utvrđene otpornosti i pripadni pomaci za vlačne uzorke..... | 67 |
| Tablica 4.5 Eksperimentalno utvrđene otpornosti i pripadni pomaci za tlačne uzorke..... | 68 |
| Tablica 5.1 Vrijednosti ostvarenih pomaka..... | 74 |
| Tablica 5.2 Mehaničke karakteristike za FE modele..... | 77 |
| Tablica 5.3 Interakcijska svojstva za definiranje kontakta između površina u FE modelima..... | 79 |
| Tablica 5.4 Očitane otpornosti i pripadni pomaci za numeričke vlačne i tlačne modele..... | 86 |
| Tablica 6.1 Rezime otpornosti spoja u čvoru kupole..... | 87 |
| Tablica 6.2 Usporedba dobivenih rezultata s korigiranim numeričkim rješenjem..... | 91 |

10 SAŽETAK

Anamarija Alagušić, Gabrijela Hrg, Marija Lokin

Karakterizacija ponašanja čvora čelične geodetske kupole

Geodetske kupole su građevine koje 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, stambenim i sportskim objektima. Kroz godine su se postupno razvijali različiti oblici i tehnike montaže takvih vrsta kupola te čvorni spojevi kao važni dijelovi te cjeline. Kao predmet istraživanja u ovom radu odabrano je najjednostavnije rješenje čvora kupole koje je optimalno iz aspekta montaže. Taj je čvor oblikovan kao spoj na preklop sastavljen od 5 do 6 štapnih elemenata sa spljoštenim krajevima koji su savinuti i međusobno spojeni jednim vijkom. Nedostatak ovakvog oblikovanja 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 pojedinačnih elemenata. S ciljem poboljšanja ujednačavanja pouzdanosti konstrukcije kupole, odnosno procjene ponašanja takvog načina spajanja, detaljno je analizirano ponašanje jednog elementa u čvoru pri vlačnom i tlačnom opterećenju. Za određivanje otpornosti spoja korištena su tri pristupa, odnosno metodologije istraživanja - analitička, eksperimentalna i numerička.

U praksi se koristi pojednostavljeni teorijski interakcijski izraz za procjenu otpornosti kritičnog presjeka savinutog spljoštenog dijela cijevi. Iako je uvriježen u praksi, nedostatak ovog analitičkog pristupa je da se postojanje ekscentriciteta uzima u obzir bez uvažavanja predznaka opterećenja i položaja elementa u čvornom spoju. Izuzetno nepovoljni preliminarni analitički rezultati bili su motivacija za provedbu eksperimentalne i numeričke metodologije istraživanja.

Eksperimentalnom metodom u laboratoriju je ispitano 6 uzoraka spoja cijevi, od toga 3 na vlačnu te 3 na tlačnu silu. Utvrđeno je da vlačni uzorci otkazuju pritiskom po omotaču rupe, a tlačni izbočivanjem spljoštenog dijela cijevi. Dobiveni su dijagrami sila - pomak, za dva karakteristična mjerna mjesta te dijagrami sila - pomak preše kojima je opisano ponašanje uzoraka pod djelovanjem vlačne, odnosno tlačne uzdužne sile u cijevnom elementu. Analizom rezultata uočena je velika sličnost u ponašanju uzoraka. U svrhu utvrđivanja stvarnih svojstava materijala provedena je vlačna proba na 6 standardiziranih epruveta izvađenih iz uzoraka cijevi.

Numerička istraživanja su provedena koristeći programski paket ANSYS 15.0. Na temelju laboratorijskih ispitivanja kalibrirana su 2 numerička modela ovisno o smjeru opterećenja (vlak ili tlak). Budući da je u laboratoriju ispitana samo jedna geometrijska konfiguracija za vlak i tlak,

druga konfiguracije spoja analizirana je s dodatna dva numerička modela ovisno o smjeru opterećenja. Na temelju rezultata dobivenih numeričkim simulacijama utvrđeno je da je za otpornost čvora mjerodavno otkazivanje tlačnog elementa izbočivanjem spljoštenog dijela cijevi i to za drugu konfiguraciju spajanja.

Nakon provedenog laboratorijskog i numeričkog istraživanja, napravljena je karakterizacija ponašanja na temelju dijagrama sila - pomak. Između ostalog, time su utvrđene mjerodavne otpornosti razmatranog čvornog spoja. Tako utvrđene eksperimentalne i numeričke otpornosti pokazuju zadovoljavajuće poklapanje s analitičkim otpornostima izračunatim koristeći izmjerena geometrijska i mehanička svojstva.

Na temelju provedenih analiza predloženo je novo rješenje oblikovanja čvora, spajanjem ravnih (nesavinutih) spljoštenih dijelova cijevi na posebno oblikovani čelični lim. Na taj način se anulira nepovoljni utjecaj ekscentriciteta i učinaka drugog reda. Kako bi se dokazala učinkovitost takvog rješenja, napravljeni su dodatni numerički modeli te je na temelju rezultata te analize izvršena karakterizacija njihovog ponašanja.

Iako je numeričkim simulacijama potvrđeno da se predloženim oblikovanjem spoja mogu ukloniti prethodno navedeni nedostaci, potrebno je tu konfiguraciju dodatno ispitati. Kako bi se dobilo realnije ponašanje čvornog spoja, preporuka je ispitivanje provesti na stvarnom čvoru na jednom polju ili pak na stvarnoj kupoli.

Na kraju je potrebno naglasiti da je ovo istraživanje prvi korak rješenju inženjerskog problema iz prakse. Dobiveni rezultati i proizašli zaključci definitivno idu u prilog brze montaže i ujednačene pouzdanosti čitavog konstrukcijskog sustava geodetskih kupola. Provedeno istraživanje je doprinos povećanju sigurnosti ovog tipa konstrukcija koje se koriste na različitim manifestacijama s velikim brojem posjetitelja.

Ključne riječi: geodetska kupola, vijčani čvorni spoj, analitička metoda, laboratorijska ispitivanja, nelinearna numerička analiza

11 SUMMARY

Anamarija Alagušić, Gabrijela Hrg, Marija Lokin

Behaviour characterization of the steel geodesic dome node

Geodesic domes are structures that nowadays, with their stability and aesthetics, are increasingly competing with other types of buildings that are more common in the world. Since the 1950's their application has been found in cultural, housing and sports facilities. Throughout the years, various forms and techniques of mounting such dome types have been developed gradually together with nodal joints as important parts of the structure. The main subject of this research is the simplest solution of the dome node, which is optimal from the aspect of assembly. This node is formed as a lap connection composed of 5 to 6 truss members with flattened ends that are bent and interconnected by one bolt. The disadvantage of such a node design is the emergence of second-order effects near the connection due to the bending of the ends and the eccentricity of the force. As a consequence, the resistance of the connection, with respect to the resistance of the individual members, is significantly reduced. In order to improve the uniformity of the design of the dome structure, i.e. the assessment of the behaviour of such connecting mode the behaviour of one element in the node at the tensile and compressive loads was analysed in detail. Three approaches, i.e. research methods - analytical, experimental and numerical were implemented to determine the resistance of the connection.

In practice, a simplified theoretical interaction expression is used to evaluate the critical cross-sectional resistance of the bended flattened tube part. Although it is most commonly used in practice, the disadvantage of this analytical approach is that the existence of eccentricity is taken into account regardless of internal force direction and the position of the element in the junction. Extremely unfavourable preliminary analytical results were the motivation for the extended experimental and numerical research.

Experimental part of the research included testing of material properties of tubes and 6 specimens of tube connections. Three tube connections were tested in tension and 3 in compression. It was found that the failure of tensile specimens occurred due to the bearing around bolt hole and the failure of compressed specimens occurred due to the buckling of the flattened tube part. The force - displacement diagrams for two characteristic measuring points at the tube and force - stroke (testing machine) diagrams were obtained that describe the behaviour of samples under the tensile or compressive axial forces in the tube member. Analysis of the results revealed a great similarity in the behaviour of the samples. For the

purpose of determining the actual properties of the material, a tensile test was performed on 6 standardized tubes extracted from tube samples.

Numerical research was conducted using the ANSYS 15.0 software package. Based on the laboratory tests, 2 numerical models were calibrated depending on the load direction (tensile or compression). As only one geometric configuration in tension and compression was tested in the laboratory, the other configuration of the connection was analysed with two additional numerical models depending on the load direction. Based on the results obtained by numerical simulations, it was found that the buckling of the flattened part of the compressed element is relevant for the resistance of the node, for the second configuration of the connecting.

After the extensive experimental and numerical research, behavioural characterization was performed based on the force - displacement diagrams. Among other things, the relevant resistance of the considered node connection was determined. Experimentally and numerically determined resistances showed a satisfactory correlation with respect to the analytical resistances calculated using the measured geometrical and mechanical properties.

Based on the analyses carried out, a new solution for node design was proposed by connecting straight flattened tube end sections to a specially shaped steel plate. In this way, the adverse effects of eccentricity and second-order effects are annulled. In order to demonstrate the effectiveness of such a solution, additional numerical models have been made and based on the results of this analysis; the characterization of their behaviour was performed.

Although numerical simulations have confirmed that the proposed design of the connection can remove the aforementioned drawbacks, this configuration has to be further researched. In order to obtain a more realistic behaviour of the node, it is recommended that the test should be conducted on a real node in one field or in a real dome.

In the end, it should be emphasized that this is the first step in solving the practical engineering problem. The obtained results and the resulting conclusions are definitely in favour of fast assembly and uniform reliability of the entire structural system of geodesic domes. Conducted research is a contribution to safety of these structures which are used at various manifestations with large number of visitors.

Keywords: geodetic dome, bolted node connection, analytical method, laboratory tests, nonlinear numerical analysis