

# RAČUNAROM PODRŽANA SIMULACIJA PONAŠANJA STATIČKI OPTEREĆENOG PNEUMATIKA

**Mr Nikola Korunović,  
Prof. dr Miroslav Trajanović,  
Mr Miloš Stojković,  
Mašinski fakultet u Nišu**

*Projektovanje pneumatika može se značajno unaprediti u smislu povećanja kvaliteta pneumatika i skraćivanja procesa projektovanja, upotrebom savremenih metoda za računarom podržanu simulaciju njegovog ponašanja pri eksploataciji. Ove metode omogućavaju da se, primenom virtuelnih prototipova, za mnogo kraće vreme ispita mnogo veći broj konstruktivnih rešenja, pri čemu se prate parametri koji ukazuju na odziv pneumatika pri dejstvu mehaničkog opterećenja (npr. krutost, ugib) kao i izdržljivost budućeg pneumatika.*

*U radu su prikazani rezultati simulacija ponašanja pneumatika u toku montaže, napumpavanja i spuštavanja na podlogu pod dejstvom vertikalnog opterećenja. Simulacije su vršene na računarskim modelima pneumatika razvijenim od strane autora, pri čemu je korišćen metod konačnih elemenata (MKE). Namera autora je da dokaže izuzetnu upotrebljivost ovakvih analiza u procesu projektovanja pneumatika.*

*Ključne reči: pneumatik, statičko opterećenje, računarska simulacija*

## **UVOD**

Jedan od osnovnih problema koji se javlja u toku procesa projektovanja pneumatika, jeste predviđanje uticaja promene konstrukcionih parametara pneumatika na njegovu izdržljivost i mehaničko ponašanje pri eksploataciji. Ovo je posledica složenosti strukture pneumatika, kao i uslova eksploatacije za koje je predviđen. Matematički modeli pneumatika, koji se koriste uglavnom u automobilskoj industriji, nisu adekvatni za primenu u projektovanju pneumatika, pošto ne opisuju detaljno njegovu strukturu. Tako je ovaj proces i dalje u velikoj meri zasnovan na iskustvu i viziji projektanta. U toku projektovanja pneumatika kreira se veliki broj fizičkih prototipova, čije ispitivanje pomaže u određivanju njegovog konačnog dizajna. Vreme potrebno za izradu i ispitivanje prototipova, u velikoj meri produžava sam proces.

Ipak, primenom savremenih, računarom podržanih postupaka, projektovanje pneumatika se može značajno ubrzati. S jedne strane, moguće je značajno skratiti proces definisanja geometrije pneumatika i to upotrebom parametarskog projektovanja kao i raspoloživog projektantskog znanja. U ovu svrhu koriste se računarski programi namenjeni podršci istraživanja i projektovanja za privredu 10/2005

projektovanju proizvoda - parametarski CAD sistemi [Trajanović05]. Kako je uloga pneumatika na vozilu krajnje odgovorna, neophodno je sa sigurnošću utvrditi da će on zadovoljiti sve svoje funkcije. Stoga drugi pravac razvoja procesa projektovanja podrazumeva upotrebu simulacija odziva strukture pneumatika, koje se vrše na računarskim modelima (digitalnim prototipovima). Ove simulacije se najčešće vrše primenom metoda konačnih elemenata (MKE). Ni ovakvi postupci ne eliminišu u potpunosti potrebu za fizičkim prototipovima, ali se na ovaj način njihov broj značajno smanjuje.

Ovaj tekst rezultat je višegodišnjeg rada autora, u okviru nekoliko projekata\*. Primarni cilj istraživanja, čiji su rezultati opisani u radu, bio je razvoj dovoljno pouzdanog računarskog modela namenjenog analizi ponašanja pneumatika pri eksploataciji, kao i upotreba ovog modela za analizu ponašanja pneumatika izloženog dejstvu statičkih opterećenja.

\*"Projektovanje i analiza automobilskih pneumatika", 1997-2001, interni projekat fabrike TIGAR i MF Niš, "Računarski podržan razvoj pneumatika", projekat kofinansiran od strane Ministarstva nauke i zaštite životne sredine i fabrike TIGAR Pirot, 2002-2004.

Sekundarni cilj bio je da se uspostave metod za određivanje podataka potrebnih za analizu i metod za analizu, takvi da oni mogu da postanu sastavni deo rutinskih aktivnosti pri projektovanju pneumatika.

Različiti tipovi MKE analiza koji se mogu koristiti za simulaciju mehaničkog ponašanja pneumatika opisani su detaljnije u radu [Korunović03]. Potpuno opisivanje ponašanja pneumatika u toku eksploatacije zahteva multidisciplinarni pristup, koji se bavi pojavama dinamičke i termičke prirode kao i strujanjem fluida. Međutim, namera autora je da kroz praktične rezultate pokažu da i analiza statičkog ponašanja MKE modela pneumatika može poslužiti kao veoma koristan alat za podizanje efikasnosti procesa projektovanja pneumatika, kao i kvaliteta samih pneumatika.

### **TIPOVI RAČUNARSKIH MODELA NAMENJENIH SIMULACIJI MEHANIČKOG PONAŠANJA PNEUMATIKA**

Računarski modeli pneumatika koji se u industriji upotrebljavaju u cilju simulacije mehaničkog ponašanja pneumatika mogu se podeliti na više načina.

Prema *nameni*, razlikuju se:

1. Modeli pneumatika namenjeni simulaciji dinamičkog ponašanja vozila (uglavnom orijenisani prema proizvođačima vozila). Ovakve simulacije uglavnom se vrše u tzv. MBS (*Multi Body System*) programskim paketima i zahtevaju modele pneumatika sa brzim odzivom, koji stoga ne smeju biti previše složeni ili detaljni.
2. Modeli pneumatika namenjeni proučavanju uticaja variranja konstruktivnih parametara pneumatika na njegovo mehaničko ponašanje u toku eksploatacije i izdržljivost (uglavnom orijenisani prema proizvođačima pneumatika). Ovakvi modeli su često veoma detaljni, radi što vernijeg prikazivanja unutrašnje strukture. Simulacije koje obuhvataju upotrebu ovakvih modela uglavnom se vrše u programima za analizu primenom metoda konačnih elemenata (MKE).

Prema *tipu*, modeli pneumatika najčešće se dele na *analitičke*, *empirijske* i *numeričke*. Dok se za simulaciju dinamičkog ponašanja vozila zbog brzine odziva obično koriste prve dve vrste modela, za analize u industriji pneumatika obično se koriste numerički modeli (kakvi su i

MKE modeli), zbog mogućnosti detaljnog sagledavanja odziva strukture penumatika.

### **Osnovne funkcije pneumatika**

Ma koliko da je konstrukcija nekog drumskog vozila napredna, njegova jedina komunikacija sa podlogom odvija se posredstvom pneumatika. Pneumatik predstavlja složenu strukturu koja obavlja niz funkcija esencijalnih za funkcionisanje vozila. One obuhvataju [Ridha94]:

1. Nošenje težine vozila u pokretu.
2. Prenos pogonskih i kočionih sila na podlogu.
3. Generisanje bočnih sila za kontrolu skretanja i upravljanja vozilom, da bi se kontrolisao pravac kretanja vozila.
4. Održavanje nivoa buke, koja nastaje usled rezonantnog oscilovanja pneumatika i interakcije sa podlogom, u prihvatljivim granicama.

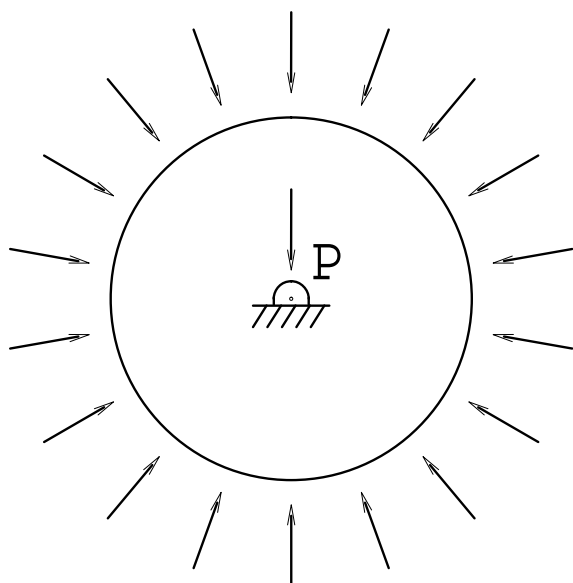
Ova četiri zahteva se moraju obezbediti istovremeno i dinamično u širokom dijapazonu brzina vozila i uslova okoline. Ovo nije jednostavan zadatak jer poboljšanje ponašanja pneumatika u odnosu na jedan zahtev, obično negativno utiče na ispunjenje ostalih. Da bi uspešno obavljao sve pomenute funkcije, pneumatik treba da se odlikuje dovoljnom krutošću da bi mogao da razvije potrebne sile u svim pravcima, dovoljnom fleksibilnošću da može da savlada prepreke a da ne pretrpi oštećenja, kao i dugim vekom trajanja pri cikličnom deformisanju. Pri tome mora da postoji dobro prijanjanje za podlogu, tj. odgovarajuće trenje između pneumatika i podloge.

### **Mehanizam nošenja vertikalnog opterećenja**

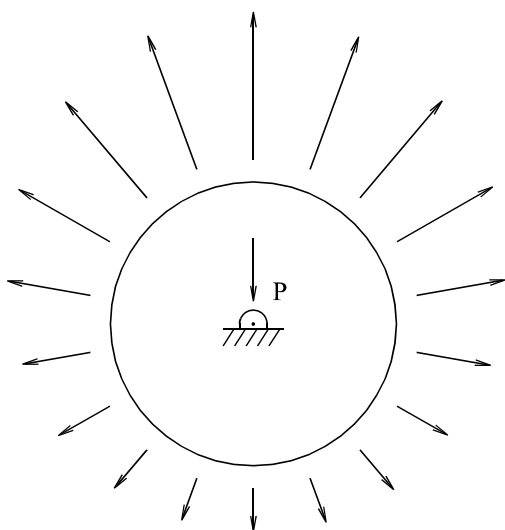
Pneumatici, prema inženjerskoj klasifikaciji, spadaju u prednapregnute strukture. Prednapregnute strukture uvek sadrže sabijeni član koji obezbeđuje prednapon na zatezanje u zategnutom članu. Zategnuti član obično ne može da prihvati sabijanje a sabijeni zatezanje. Ovakva struktura odlikuje se manjom težinom i mnogo je kompaktnija od strukture koja se sastoji od samo jednog člana koji trpi kako istežanje tako i sabijanje. Zategnute članove u pneumaticima predstavljaju vlakna korda a vazduh pod pritiskom predstavlja sabijeni član.

Ustaljeno je mišljenje da vazduh pod pritiskom podiže naplatak sa unutrašnje površine ispumpanog pneumatika. Međutim, rezultat integracije pritiska po površini naplatka (Slika 1) pobija ovu tvrdnju. Nošenje opterećenja mora

se, dakle, obezbediti preko spoljne strukture pneumatika, pri čemu se ono na naplatak Na slici (Slika 2) prikazana je shema naplatka sa označenim rezultujućim silama, koje su posledica naprezanja korda. Rezultante koje potiču sa oba bočna zida naplatka su sabrane, što poništava njihove komponente izvan posmatrane ravni. Sekundarno nošenje opterećenja obezbeđeno je putem momenta savijanja koji se kroz niže delove bočnih zidova prenosi na stopu. Detaljniji opis mehanizma nošenja vertikalnog opterećenja može se naći u literaturi [Potts79].



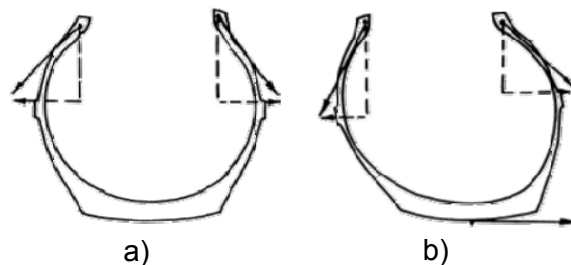
Slika 1. Rezultanta sile koje deluju na naplatak usled dejstva pritiska vazduha unutar pneumatika jednaka je nuli, te nema rezultujuće sile koja bi se suprotstavila sili opterećenja na osovini,  $P$  [Potts79].



Slika 2. Rezultante zatežućih sila u kordu sposobne su da generišu silu koja se suprotstavlja opterećenju  $P$ , koje deluje na osovini [Potts79].

prenosi preko stope pneumatika.

Bočne sile koje deluju na otisak gazećeg sloja pneumatika takođe deluju na točak preko zatezanja korda i ugiba. Slika 3 prikazuje nedeformisan i deformisan oblik poprečnog preseka pneumatika, gde vektori sile naprezanja u kordu, kada se sumiraju po obe stope, izazvaju bočno opterećenje osovine.



Slika 3. a) Kada je bočna sila koja deluje na otisak jednaka nuli, bočne komponente sile zatezanja u kordu su jednake. b) Dejstvo bočne sile na kontaktnu površinu utiče na pravce rezultujućih sila u kordu unutar stopa, prenoseći tako bočnu silu sa kontaktne površine na naplatak [Potts79].

Na osnovu izloženog, jasno je da kord igra najvažniju ulogu u mehaničkom ponašanju pneumatika kao i da je pritisak vazduha unutar pneumatika važan faktor koji određuje krutost njegove konstrukcije. Raspored napona u kordu karkasa izuzetno utiče na bočnu krutost pneumatika a samim tim i na odziv vozila pri skretanju. Ovaj raspored zavisi pre svega od oblika profila pneumatika a naročito od oblika unutrašnje šupljine pneumatika. Radijalna krutost, pak, pre svega zavisi od pritiska vazduha unutar pneumatika.

### Izdržljivost pneumatika

Izdržljivost pneumatika (*tyre durability*) određena je pojavom inicijalnih oštećenja komponenti pneumatika i njihovom propagacijom, sve do pojave pukotina ili rascepa, kada postaje neupotrebljiv. Uništenje pneumatika može da bude inicirano popuštanjem korda, gume ili popuštanjem veze između korda i gume.

Popuštanje korda se može predvideti na osnovu intenziteta napona i deformacija koji u njemu nastaju pod različitim vrstama opterećenja, tj. njihovim poređenjem sa podacima o zamoru materijala korda, uzimajući u obzir radne temperature i degradaciju osobina korda koja je posledica starenja i izloženosti dejstvu agresivnih materija. Izdržljivost čisto gumenih komponenti može se, usled približne ne-

stišljivosti gume kao materijala, predvideti na osnovu intenziteta devijatorske komponente Istraživanja čiji je cilj predviđanje izdržljivosti gume, takođe su usmerena uglavnom ka određivanju napona i deformacija koji nastaju u opterećenom pneumatiku. Do skora su se ova istraživanja većinom bazirala na eksperimentima ili na tehnikama klasične analitičke mehanike, dok se u poslednje vreme u ovu svrhu uspešno koristi MKE.

### **CILJEVI STATIČKE ANALIZE MEHANIČKOG PONAŠANJA PNEUMATIKA PRIMENOM MKE**

Sa stanovišta mehanike pneumatika, statička analiza primenom MKE može se koristiti za proučavanje prve funkcije pneumatika, nošenja opterećenja, i to u cilju predviđanja radijalne krutosti, radijalne deformacije, nosivosti pneumatika, kao i oblika kontaktne površine i rasporeda kontaktnog pritiska na njoj. Detaljnije objašnjenje pomenutih pojmova može se naći u literaturi [Danon99]. Statička analiza takođe se može koristiti i za inicijalnu procenu izdržljivosti pneumatika, na osnovu rasporeda i intenziteta napona i deformacija u strukturnim komponentama pneumatika [Ridha94]. Štaviše, analizom bočne krutosti ili rasporeda napona u karkasu napumpanog pneumatika, može se izvršiti procena manevarskih sposobnosti budućeg pneumatika [Cho02, Ridha94].

Upotrebom osnosimetričnih (dvodimenzionalnih) MKE modela, mogu se dobiti rezultati vezani za procese montaže i napumpavanja pneumatika, kao što su naponi u žičanom obroču, uticaj geometrije pneumatika i veličine naplatka na napone u kordu i raspored kontaktnog pritiska na dodiru naplatka i stope, inicijalni oblik pneumatika nakon svake od ovih faza, itd. [Ridha94, Mancosu95, Tönük98] Ovakvi modeli su važeći sve dok su i opterećenja koja deluju na pneumatik osnosimetrične prirode. Upotrebom trodimenzionalnih (3D) modela, mogu se dobiti isti rezultati kao i upotrebom osnosimetričnih, kao i rezultati vezani za dejstvo nesimetričnih statičkih opterećenja [Ridha94, Mancosu95, Tönük98, Danielson96, Meschke97, Hall01, Tönük01]. Kada se proučava dejstvo vertikalnog opterećenja, rezultati od interesa su krive opterećenje-ugib, naponi u strukturnim komponentama, oblik kontaktne površine i raspored kontaktnog pritiska i sl. Pregled stanja istraživanja u oblasti statičke analize mehaničkog ponašanja pneumatika može se naći u radu [Korunović03].

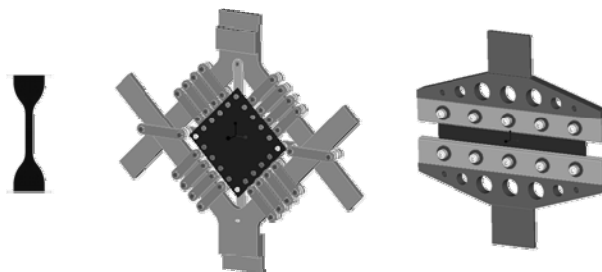
specifičnog deformacionog rada ili primenom principa mehanike loma [Ridha94].

### **MKE modeli PNEUMATIKA**

U ovom delu teksta dat je kratak opis MKE modela koje su autori kreirali i koristili za analizu procesa montaže, napumpavanja i spuštavanja pneumatika na podlogu pod dejstvom vertikalnog opterećenja. U ovu svrhu kreirani su osnosimetrični (dvodimenzionalni - 2D) i trodimenzionalni (3D) model. Razmatran je postojeći tip pneumatika, dimenzija 165/70 R13, da bi rezultati analiza mogli da se uporede sa eksperimentalnim.

Čisto gumene strukturne komponente pneumatika modelirane su upotrebom konačnih elemenata mešovite formulacije i to tzv. *Hermann* elemenata, pri čemu je guma kao materijal opisana upotrebom *Mooney-Rivlin* forme. Koeficijenti modela materijala ustanovljeni su regresionom analizom, na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka koji potiču od tri različite vrste ispitivanja: jednoosnog istezanja, jednako-dvoosnog istezanja i ravanskog istezanja (Slika 4). Definisani postupak modeliranja čisto gumenih materijala detaljno je opisan u radovima [Korunović04b, Korunović03].

Kompozitne strukturne komponente modelirane su superpozicijom elemenata tipa *rebar*, koji predstavljaju kord i *Hermann* elemenata koji predstavljaju gumenu matricu. *Rebar* elementima pridružen je bilinearno elastičan materijal a *Hermann* elementima je pridružen odgovarajući materijal za gumiranje korda, modeliran upotrebom *Mooney-Rivlin* forme.



Slika 4. Oblik gumenih uzoraka i dodatna oprema korišćena za njihovo ispitivanje na mašini za jednoosno istezanje.

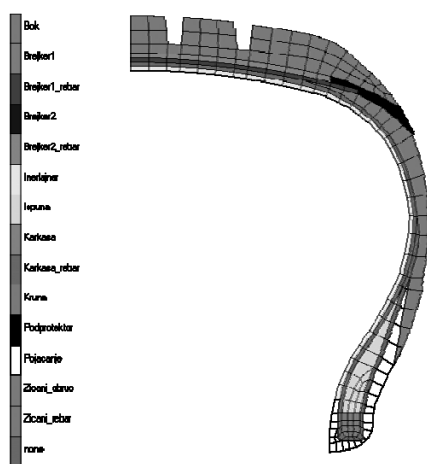
Geometrijski oblik profila pneumatika dobijen je na osnovu 3D parametarskog CAD modela pneumatika, razvijenog u okviru već pomenutih projekata [Stojković02]. Upotrebom ovog modela jednostavno se može dobiti geometrija profila pneumatika za svaku od dimenzija.

### Osnosimetrični model

U cilju analize mehaničkog ponašanja pneumatika pri montaži i napumpavanju korišćena su dva različita osnosimetrična MKE modela. Slika 5 prikazuje prvi, pri čemu je, usled postojanja simetrije kreiran model polovine pneumatika. U slučaju drugog modela, simetrija nije korišćena (Slika 6). U cilju postizanja veće tačnosti rezultata vezanih za pomeranja bočnih zidova pneumatika i kontaktni pritisak na dodiru stope i naplatka, uvedena je i opcija adaptivnog povećanja gustine mreže na mestu kontakta (Slika 10).

Naplatka je modeliran kao apsolutno kruto telo (sastavljeno od linija). Između naplatka i pneumatika zadat je konstantan koeficijent trenja, koji se koristi u okviru *Coulomb*-ovog modela trenja. U prvom koraku analize, montaža se simulira približavanjem polovine naplatka ravni simetrije pneumatika (Slika 7 a). U drugom koraku, postepeno se povećava pritisak, koji deluje na unutrašnju površinu pneumatika (Slika 7 b) i koji se menja od 0 – 0,3 – 0,2 N/mm<sup>2</sup> (0 – 3 – 2 bara).

Detalji vezani za osnosimetrične modele i opis nad njima vršenih analiza, mogu se naći u radovima [Korunović04a, Korunović03].

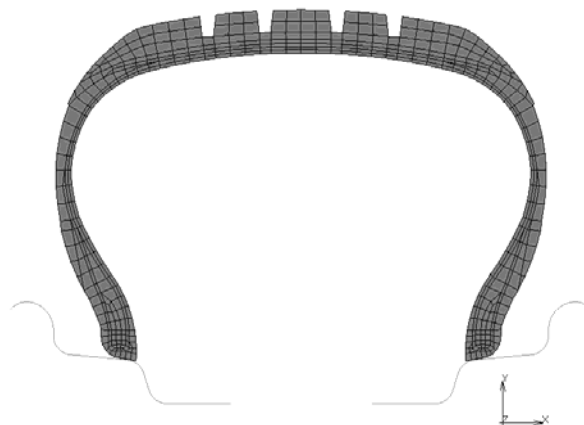


Slika 5. Osnosimetrični MKE model pneumatika namenjen statičkoj analizi procesa montaže i napumpavanja. Redukcija modela izvršena je na osnovu simetrije geometrije i opterećenja.

### 3D modeli

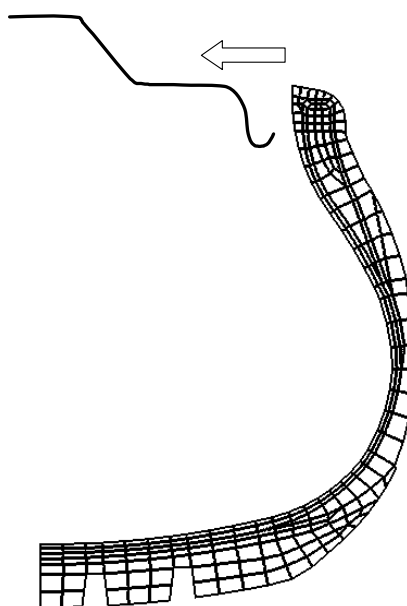
U cilju analize ponašanja vertikalno opterećenog pneumatika, korišćen je 3D MKE model (Slika 8). Radi pojednostavljenja modeliranja i skraćivanja vremena potrebnog za analizu, gazeći sloj pneumatika nije modeliran do

detalja, već su u obzir uzeti samo cirkularni kanali. Cirkularna gustina elemenata povećana je u zoni kontakta između pneumatika i podloge. Dok je gazna površina pneumatika u značajnoj meri idealizovana, unutrašnja struktura je modelirana detaljno, pri čemu je najvažnije da je geometrija segmenata koji se sastoje od kompozitnih materijala verno predstavljena, kako je njihov uticaj na mehanički odziv pneumatika najznačajniji (Slika 9).

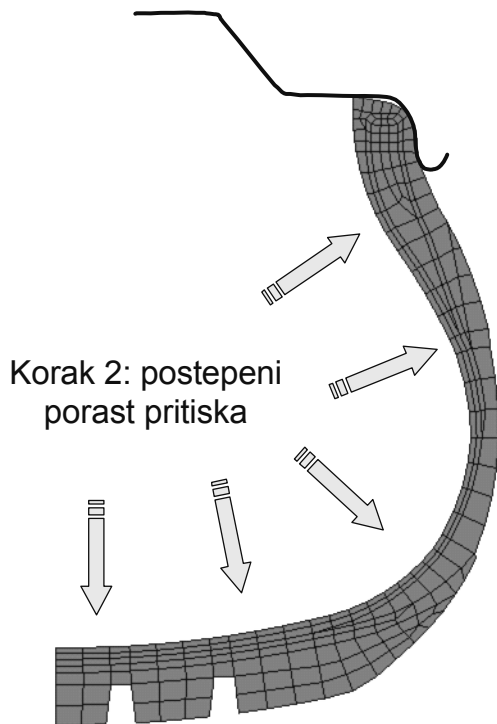


Slika 6. Osnosimetrični model pneumatika bez redukcije. Model je kreiran iz dva razloga: prvi je ispitivanja uticaja nesimetričnosti korda u brejkeru u odnosu na ravan točka na rezultate analize; drugi razlog je čisto vizuelne prirode i ogleda se u boljem sagledavanju deformisanog oblika i drugih veličina od interesa. Ispostavilo se da je razlika u odzivu dva modela neznatna, ali je zbog preglednosti ipak usvojen drugi. Vreme potrebno za analizu drugog modela je oko dva puta duže, ali i dalje prihvatljivo kratko.

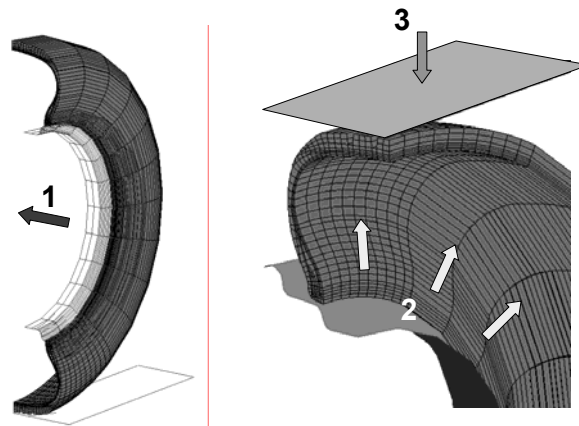
Korak 1: pomeranje naplatka



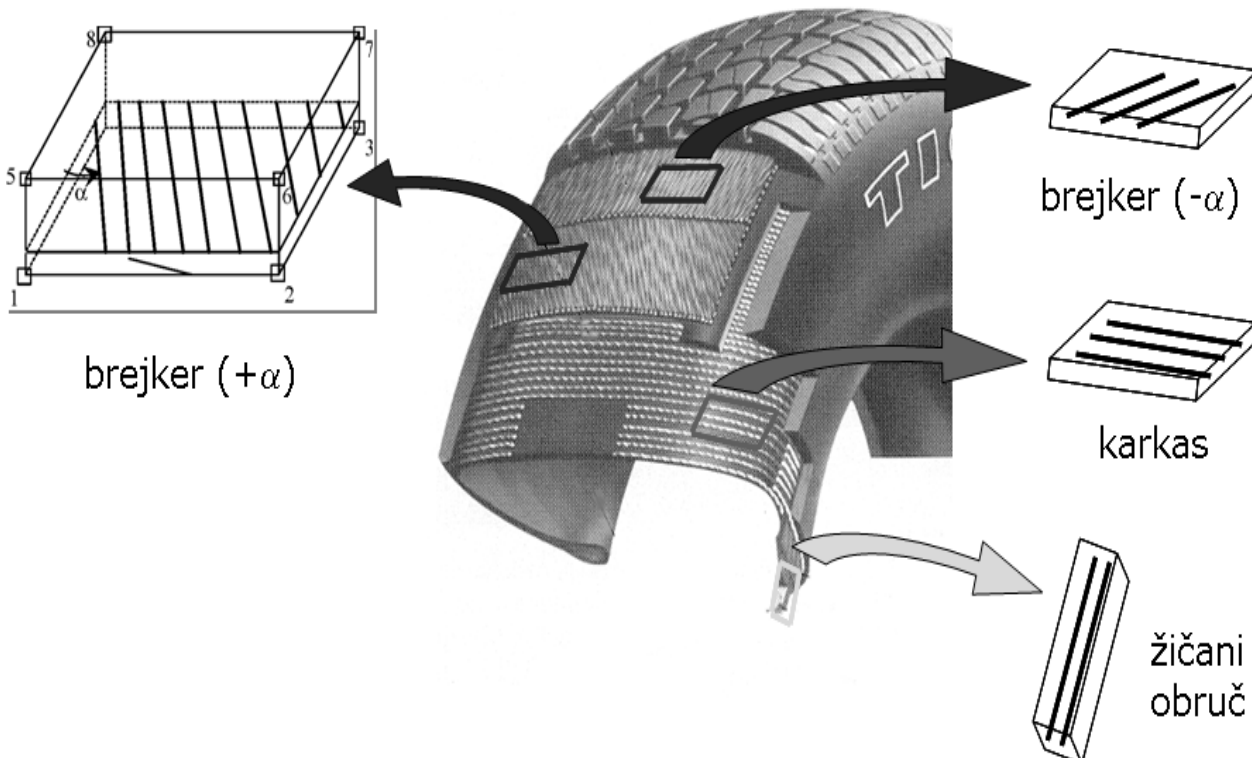
Slika 7a. Koraci u analizi procesa montaže osnosimetričnom modelu pneumatika i



Slika 7b. Koraci u analizi procesa napumpavanja na osnosimetričnom modelu pneumatika:



Slika 8. 3D model namenjen analizi procesa spuštanja pneumatika na podlogu i mehaničkog odziva vertikalno opterećenog pneumatika, sa naznačenim brojevima koraka u analizi. Usled postojanja simetrije geometrije i opterećenja dovoljno je koristiti četvrtinu modela. Naplatak i podloga modelirani su kao apsolutno krute površine. Prva dva koraka u analizi definisana su analogno 2D modelu. U trećem koraku, vršeno je pomeranje podloge u radijalnom pravcu, prema osi rotacije pneumatika, pri čemu je praćena sila reakcije koja na nju deluje.

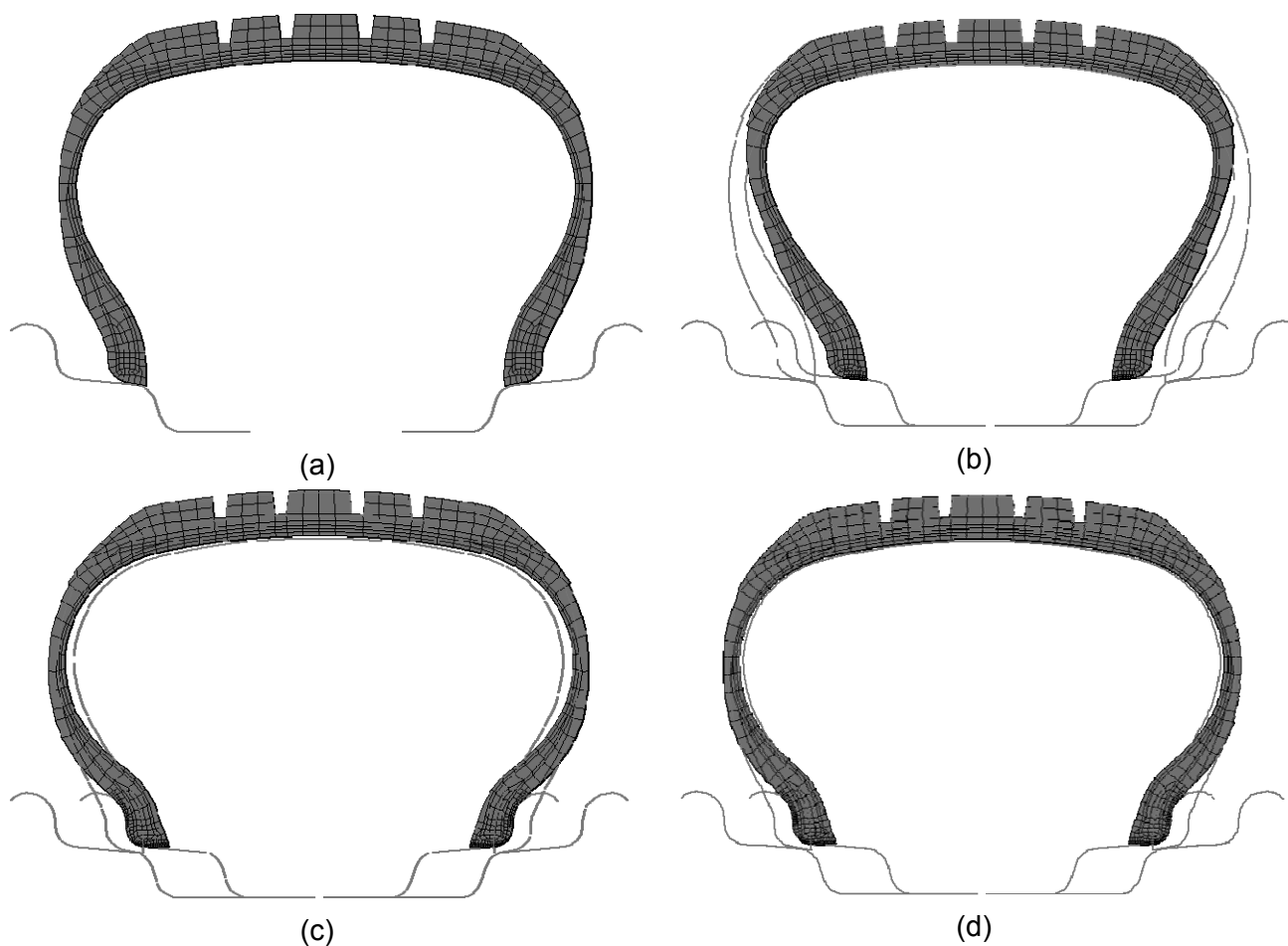


Slika 9. Različite strukturne komponente pneumatika sa shematskim prikazom "rebar" elemenata koji su korišćeni za modeliranje kompozitnih komponenti. Definisani su korisnički potprogrami koji omogućavaju da uglovi korda prate deformisani oblik pneumatika, što je učinjeno i u slučaju osnosimetričnih modela.

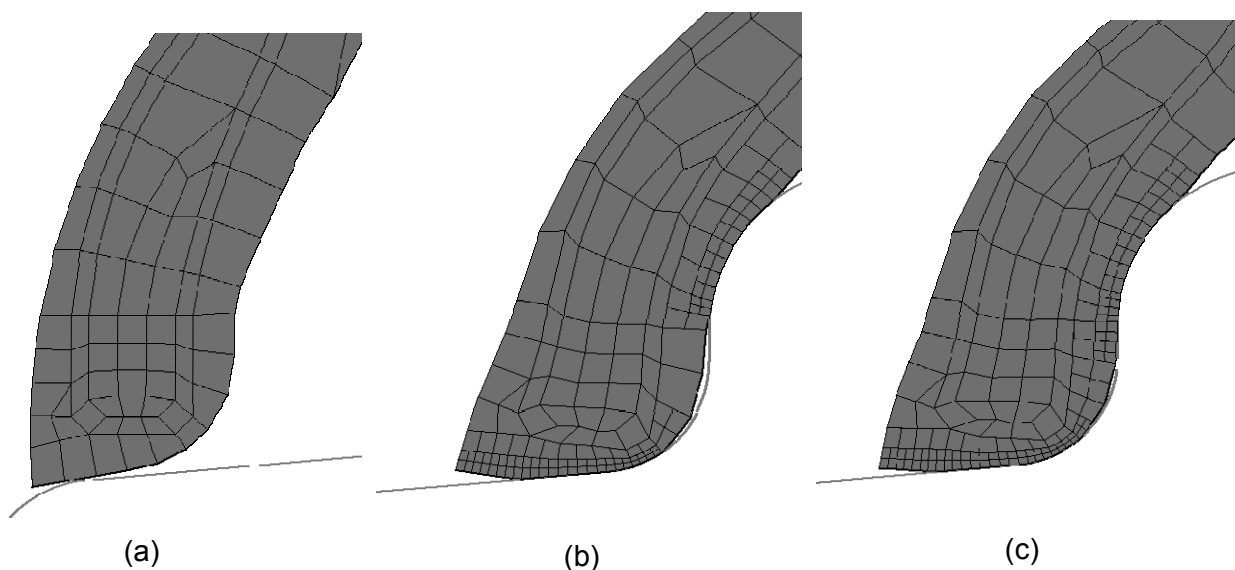
### Rezultati

MKE modeli opisani u prethodnom delu teksta korišćeni su za vršenje različitih analiza, u cilju dobijanja rezultata za koje se smatralo da su od koristi za konstruktore pneumatika.

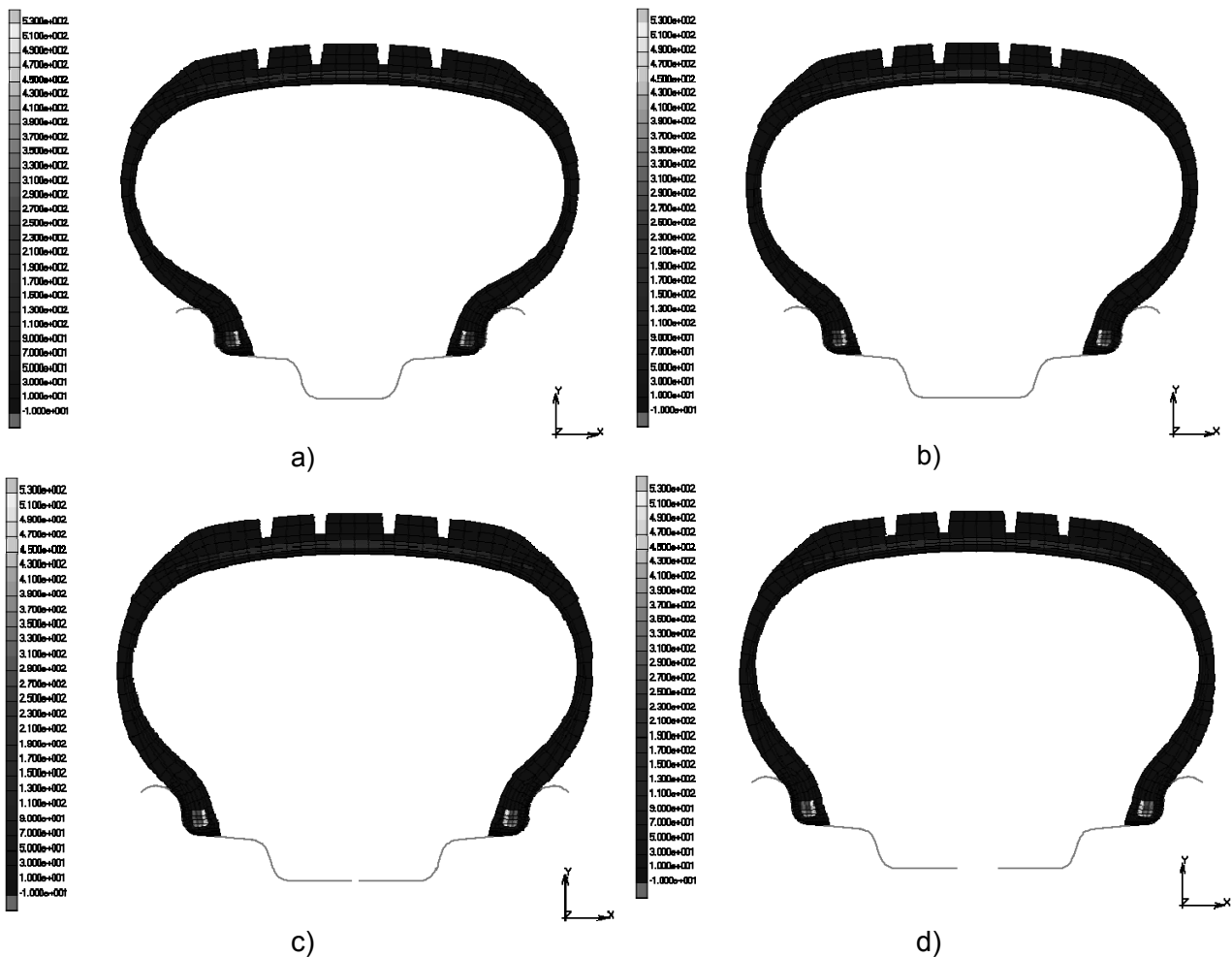
Analize su definisane tako da se njihovi rezultati mogu porediti sa eksperimentalnima, kao i rezultatima dostupnim u literaturi. Najvažniji rezultati prikazani su i prokomentarisani na slikama (10 - 24).



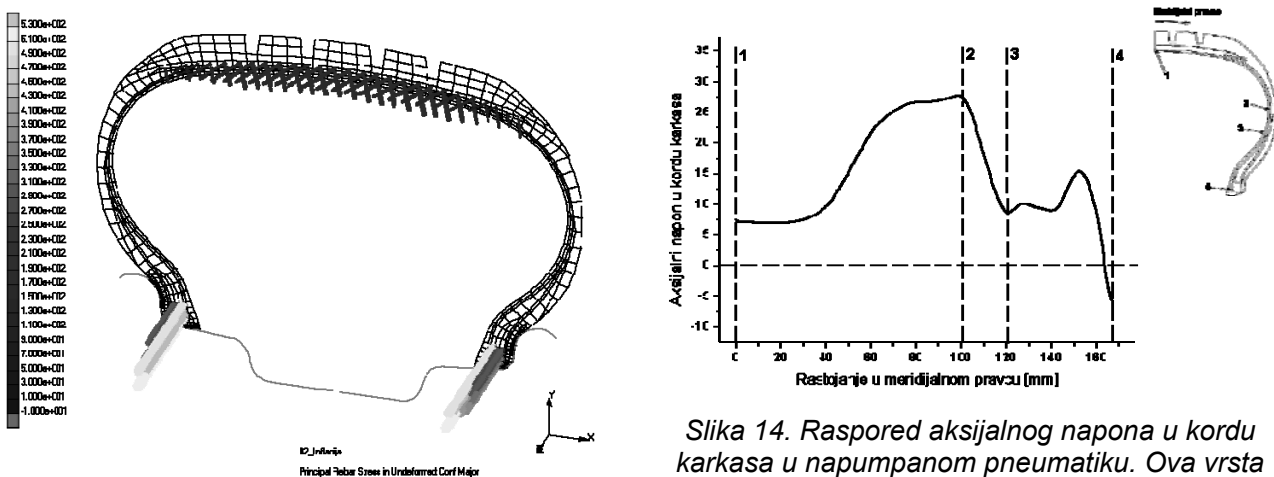
Slika 10. Deformisani oblik osnosimetričnog modela pneumatika: (a) na početku analize, (b) na kraju procesa montaže, (c) kada pritisak iznosi 3 bara, (d) nakon spuštanja pritiska na 2 bara.



Slika 11. Prikaz toka adaptivnog počinjenja mreže na kontaktu stope i naplatka pri montaži. Definisana su dva nivoa počinjenja mreže. Primećuje se bolje naleganje stope na naplatak nakon napumpavanja na veći pritisak i spuštanja na standardni (c), u poredjenju sa direktnim napumpavanjem na standardni pritisak (b).



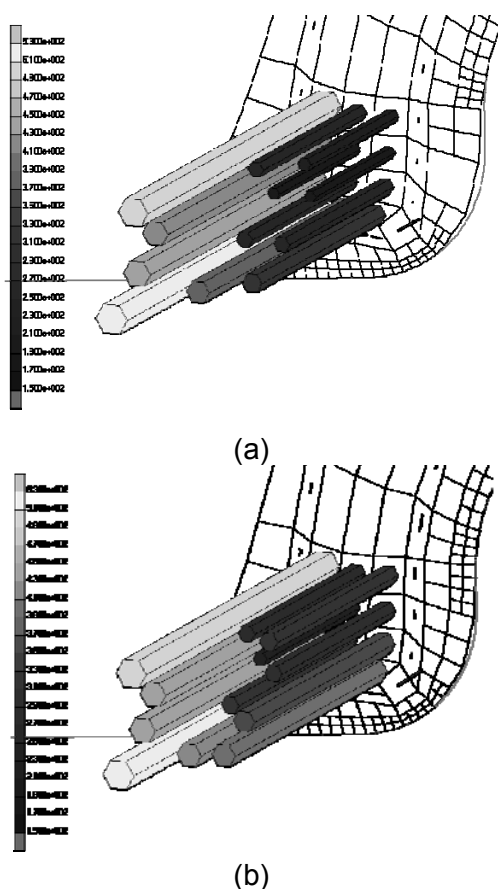
Slika 12. Prikaz deformisanog oblika i aksijalnih napona u žičanom obruču, kordu brejkera i kordu karkasa za pneumatik napumpnan na pritisak od 2 bara, montiran na naplatak: a) 4J, b) 4,5J, c) 5J (nominalni) i d) 5,5J. Prema očekivanju, naponi su najveći u žičanom obruču, a u određenoj meri zavise i od dimenzija naplatka.



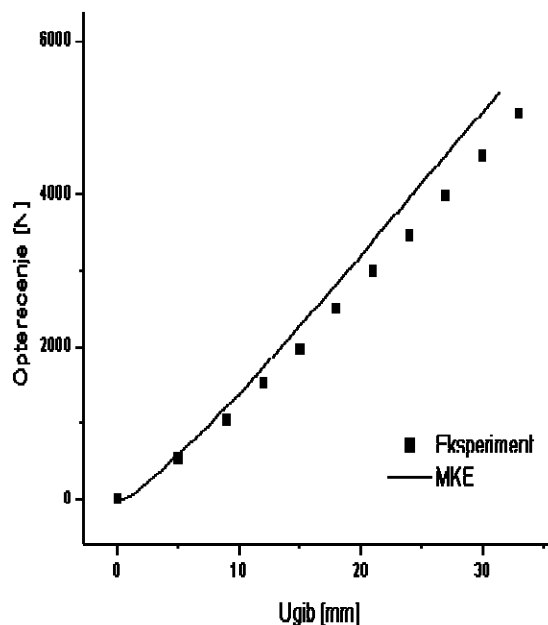
Slika 14. Raspored aksijalnog napona u kordu karkasa u napumpnanom pneumatiku. Ova vrsta rezultata od naročito je značaja za konstruktore pneumatika, sa stanovišta bočne krutosti i izdržljivosti pneumatika.

Slika 13. Prikaz aksijalnih napona u žičanom obruču, kordu brejkera i kordu karkasa pneumatika napumpnanog na 2 bara.





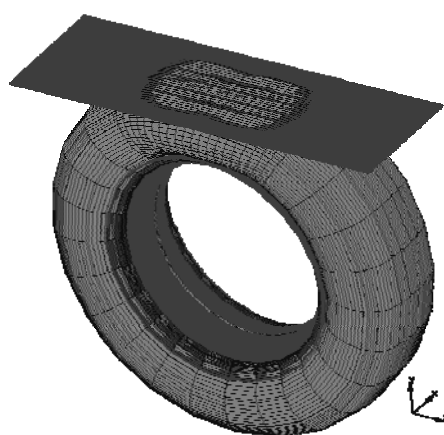
Slika 15. Prikaz aksijalnog napona u žičanom obruču, na kraju procesa napumpavanja, kada je pneumatik montiran na naplatke: (a) 4J, (b) 5,5J. Primetno je da napon nije podjednako raspoređen po poprečnom preseku obruča, a njegova raspodela zavisi od veličine naplatka.



Slika 16. Krive ugib (pomeranje osovine) – opterećenje pneumatika, dobijene numeričkim i eksperimentalnim putem. Imajući u vidu pretpostavke usvojene pri modeliranju materijala, kao i činjenicu da je prvenstvena namena modela određivanje pravca i relativnog intenziteta promene mehaničkih osobina pneumatika sa promenom konstruktivnih parametara, smatra se da je tačnost rezultata prihvatljiva.

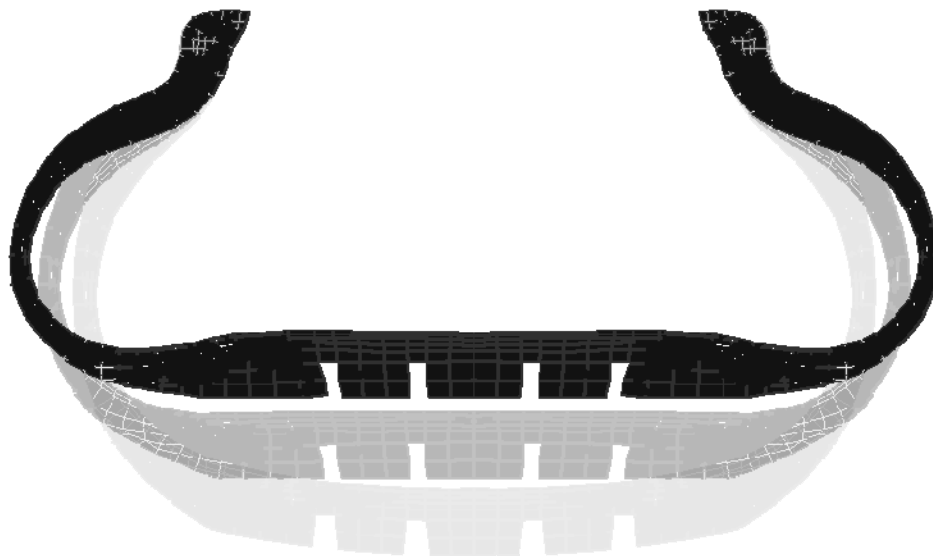


(a)

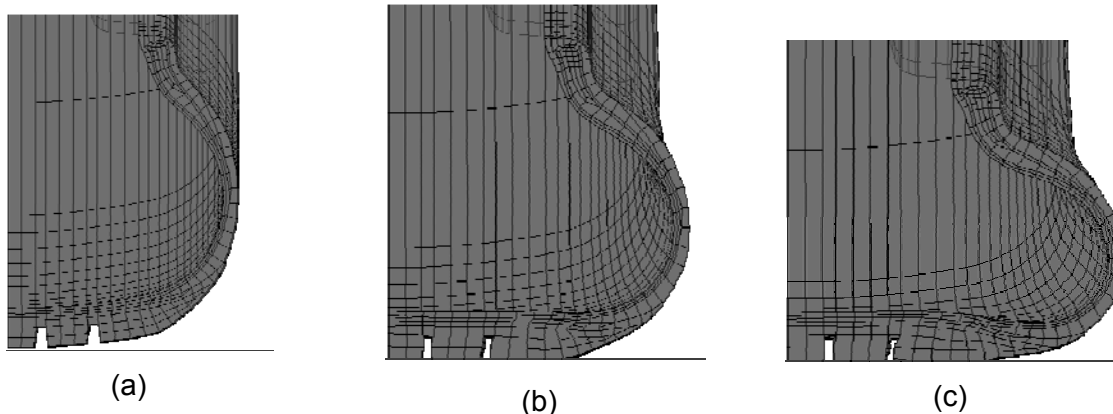


(b)

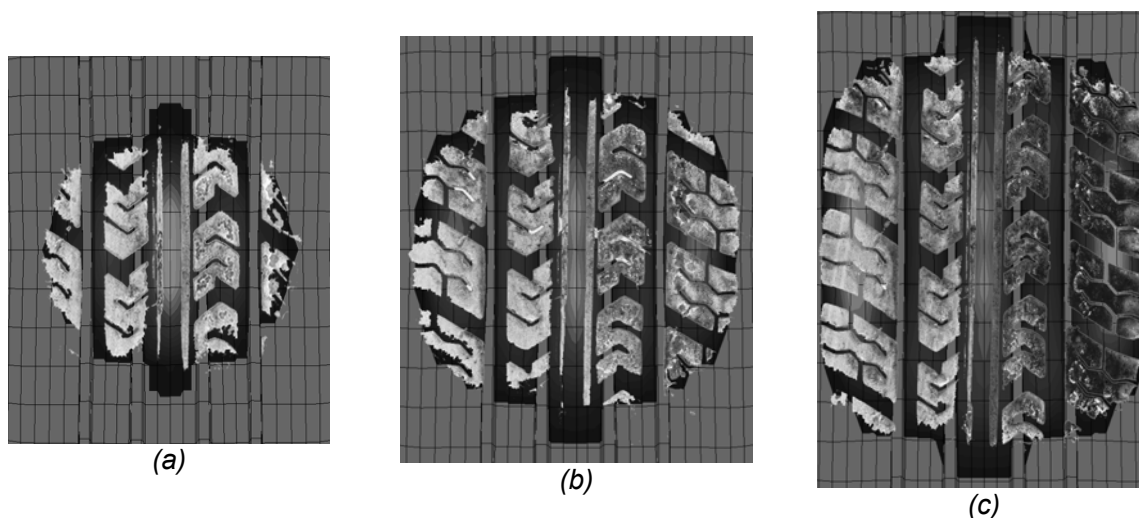
Slika 17. (a) mašina i pribor koji su na ispitnoj stanici fabrike TIGAR MH korišćeni za eksperimentalno utvrđivanje oblika krivih ugib – opterećenje pneumatika i oblika kontaktne površine pri različitim nivoima opterećenja. (b) MKE model celog pneumatika u deformisanom obliku, pri ugibu od 33mm. Model je dobijen postupkom pretvaranja koordinata čvorova sa deformisanog oblika modela četvrtine penumatika u tekuće koordinate čvorova, te kopiranjem ovog modela preko dve ravni simetrije točka, kao slike u ogledalu.



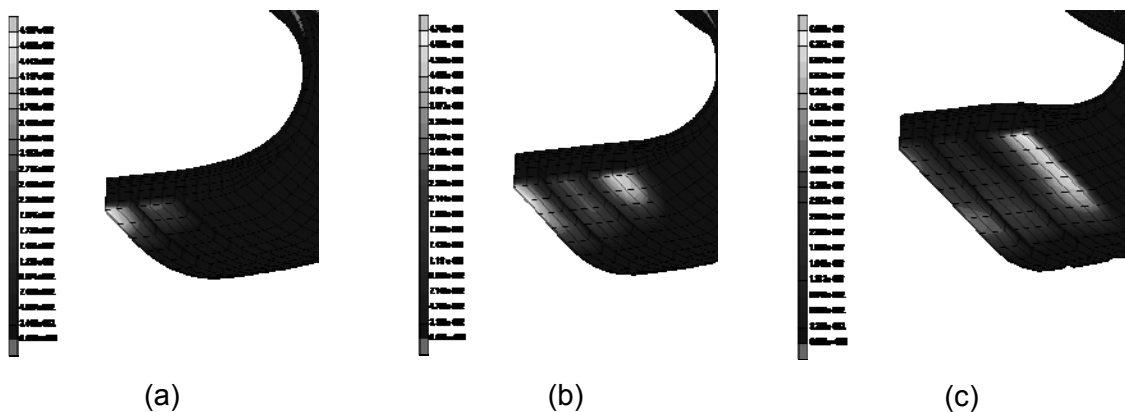
Slika 18. Deformisani oblici pneumatika pri spuštanju na podlogu, u preseku sa vertikalnom ravni koja sadrži osu pneumatika, zajedno sa oblikom na kraju napumpavanja. Ugibi iznose 16 i 33 mm



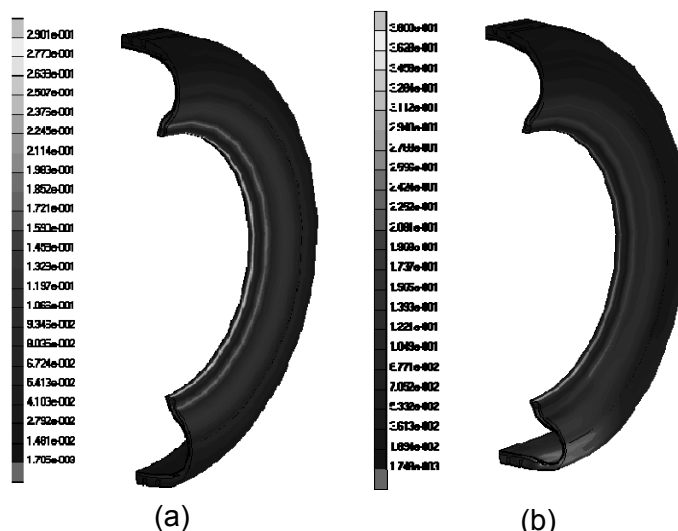
Slika 19. Deformisani oblik 3D MKE modela pneumatika u toku simulacije procesa montaže, napumpavanja i spuštanja na podlogu: (a) na kraju napumpavanja, (b) pri ugibu od 20mm, (c) pri ugibu od 33mm.



Slika 20. Oblik kontaktne površine i raspored kontaktnog pritiska pri opterećenju od (a) 1000N, (b) 2000N, (c) 3000N. Malo neslaganje oblika na sredini kontaktne površine posledica je različitog broja kanala na analiziranom i eksperimentalnom pneumatiku, mada je unutrašnja struktura oba pneumatika ista.



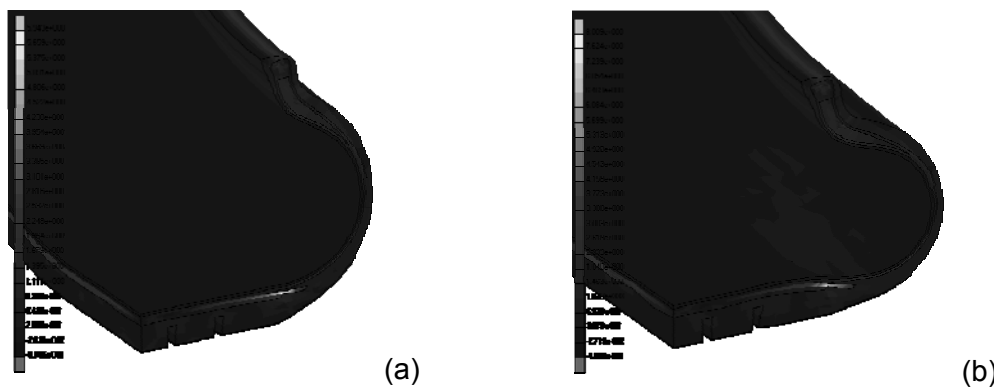
Slika 21. Oblik kontaktne površine i raspored kontaktnog pritiska, pri varijaciji opterećenja tokom analize spuštanja pneumatika na podlogu. (a) Pri manjim opterećenjima pritisak je najveći oko sredine gazne površine. (b) Pri srednjim opterećenjima, pritisak je ravnomernije raspoređen, a najveći je na sredini i na ramenima. (c) Pri velikim opterećenjima, pritisak je najveći na ramenima. Ovi rezultati su u skladu sa zapaženim ponašanjem pneumatika i rezultatima analiza drugih autora.



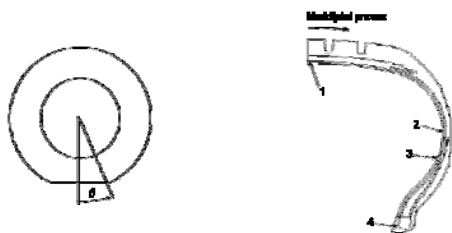
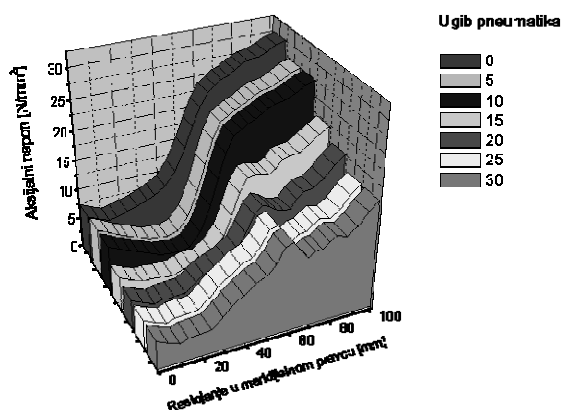
Slika 22.. Prikaz intenziteta deformacije na površini pneumatika: (a) na kraju napumpavanja, (b) na kraju spuštanja na podlogu.

Lista korisnih rezultata koji se mogu dobiti statičkom analizom MKE modela pneumatika, ovime nije ni u kom slučaju iscrpljena. Na konstruktorima pneumatika je da definišu koju

vrstu rezultata žele da razmatraju i koje će konstruktivne parametre menjati da bi došli do optimalne konstrukcije pneumatika.



Slika 23. Raspored i intenzitet ekvivalentnog stvarnog napona u čisto gumenim strukturnim komponentama pneumatika: (a) u srednje opterećenom, (b) u jako opterećenom pneumatiku.



Slika24. Aksijalni napon u kordu karkasa, u preseku koji se nalazi pod uglom od  $9^\circ$  u obimnom pravcu u odnosu na centar gazećeg sloja, pri različitim vrednostima ugiba opterećenog pneumatika. Inače, oblik krive za ugib jednak nuli, dobro se poklapa sa rasporedom napona u karkasu napumpanog pneumatika, dobijenim analizom osnosimetričnog modela (Slika).

Autori od skora raspolažu i rezultatima analiza vršenih na poboljšanim modelima pneumatika, pri čemu su za predstavljanje korda korišćeni elementi tipa membrana. Osim što su slaganja sa eksperimentalnim rezultatima još bolja nego u slučaju upotrebe u radu opisanih modela, značajno je ubrzano i kreiranje 3D modela na osnovu osnosimetričnih. Vreme potrebno za analizu je takođe skraćeno, pošto se u analizi 3D modela direktno koriste rezultati analiza montaže i napumpavanja vršenih na osnosimetričnim modelima. Poboljšani modeli i rezultati na njima vršenih analiza biće opisani u nekom od budućih radova. Osim toga, autori rade i na analizi kotrljajućeg pneumatika i tačnijem modeliranju trenja između pneumatika i podloge.

### Zaključak

U radu je opisan računarski model pneumatika, razvijen u cilju analize mehaničkog ponašanja pneumatika pri eksploataciji, primenom metoda konačnih elemenata (MKE). Prikazani su rezultati analiza vršenih na MKE modelima postojećeg tipa pneumatika, koji su radi verifikacije upoređivani sa podacima dobijenim ispitivanjem realnog pneumatika. Razvijena je procedura za brzu izradu modela bilo kog tipa pneumatika, koja omogućava da se opisane

analize vrše za prihvatljivo kratko vreme, u sklopu svakodnevnih projektantskih aktivnosti.

Prikazani rezultati potvrđuju izuzetnu upotrebljivost analize mehaničkog ponašanja statički opterećenog pneumatika u procesu projektovanja pneumatika i ilustruju koristi do kojih se njenom primenom može doći. Redovna upotreba ovakvih analiza dovodi do poboljšanja kvaliteta pneumatika i značajno skraćuje vreme potrebno za njegovo projektovanje.

### COMPUTER AIDED SIMULATION OF ACTING STATIC LOAD TIRE

*Tyre design may be significantly improved, in context of raising the quality of tyres and shortening the design process, if the latest methods for computer aided simulation of its mechanical behaviour are used. This methods make possible that, using virtual prototypes, much more design variations are explored in much shorter time. During those explorations, parameters that indicate mechanical response of tyre (e.g. stiffness or deflection) or its durability are being monitored.*

*This paper presents the results of the analyses that were conducted on finite element tyre models developed by the authors. The aim of the analyses was to simulate the processes of mounting, inflation and vertical loading of the tyre. For this purpose, finite element analysis (FEA) has been used. The authors intend to motivate the extreme usability of such analyses in tyre design process.*

### LITERATURA

- 1/1/ Cho, J.R., Jeong, W.S. and Yoo, W.S. (2002), *Multi-objective optimization of tire carcass contours using a systematic aspiration-level adjustment procedure*, Computational Mechanics Vol. 29, pp. 498-509, Springer-Verlag.
- 1/2/ Cho, J.R., Kim, K.W., Yoo, W.S. and Hong S.I. (2004), *Mesh generation considering detailed thread blocks for reliable tire analysis*, *Advances in Engineering Software* Vol. 35, pp. 105-113.
- 1/3/ Danielson K.T., Noor A.K., Green J.S. (1996), *Computational Strategies for Tire Modeling and Analysis*, *Computers & Structures* Vol 61, No 4, pp. 673-693, Elsevier Science.

- /4/ Danon G., Gavrić M., Vasić B (1999), *Pneumatici: karakteristike, izbor eksploatacija*, NIRO OMO Beograd.
- /5/ [Hall, W., Jones, R.P., Mottram, J.T., Hardy, K. and Nock, N. (2001), *Finite element analysis of a vertically loaded tyre*, IRC 2001, The Int. Rubber Conf., Institution of Materials Communications, pp. 535-545.
- /6/ Korunović N., Trajanović M., Manić M. (1999), *Opisivanje gume kao materijala u programima za analizu metodom konačnih elemenata*, Svet polimera vol. 2 (2-3) 39-84, 1999., pp 43-51.
- /7/ Korunović N., Trajanović M., Manić D. (2000), *Mogućnosti određivanja naponsko-deformacionog stanja gumenih proizvoda metodom konačnih elemenata*, PneuUMAtici 2000, Vrnjačka Banja.
- /8/ Korunović N., Trajanović M. (2001), *FEA model Building for Tire Analysis*, Proceedings of First National Conference on Recent Advances in Mechanical Engineering (ASME - Greek Section), Patras, Greece.
- /9/ Korunović N., Trajanović M., Manić D. (2002), *Model pneumatika za statičku analizu metodom konačnih elemenata*, PneuUMAtici 2002, Beograd.
- /10/ Korunović N. (2003), *Statička analiza ponašanja automobilskog pneumatika metodom konačnih elemenata*, magistarska teza, Mašinski fakultet u Nišu.
- /11/ N.Korunović, M.Trajanović, M. Stojković (2004), *Mogućnosti upotrebe osnosimetričnih MKE modela pri projektovanju pneumatika*, YU Info 2004, Kopaonik.
- /12/ N.Korunović, M.Trajanović, D.Manić, M.Manić (2004), *Modeliranje gume za analizu pneumatika primenom metoda konačnih elemenata* - Svet polimera, vol. 7 (3) 73-108, 2004., pp 85-94.
- /13/ Mancosu F. (1995), *Finite-Element Analysis for Tire Design*, Tire Technology International.
- /14/ Manić D. (2002), *Praktični vodič za autogume*, Tigar A.D. Fabrika Autoguma, Pirot.
- /15/ Meschke G., Payer H.J., Mang H.A. (1997), *3D Simulations of Automobile Tires: Material Modeling, Mesh Generation and Solution Strategies*, Tire Science & Technology, TSTCA, Vol. 25, No. 3. pp. 154-176.
- /16/ Potts G.R. (1979), *The Tire as a Vehicle Component*, Department of Textiles at UMIST and University of Acron.
- /17/ Ridha R.A., Theves M. (1994), *Advances in Tire Mechanics*, Rapra Review Report, Vol 7, Num 5, RAPRA Technology Ltd.
- /18/ Stojković M. (2002), *Virtuelni tehnološki savetnik*, magistarski rad, Mašinski fakultet u Nišu.
- /19/ Tönük E., Ünlüsoy S. (2001), *Prediction of automobile tire cornering force characteristics by finite element modeling and analysis*, Computers and Structures 79, pp. 1219–1232, Elsevier Science.
- /20/ Tönük E. (1998), *Computer simulation of dynamic behavior of pneumatic tires*, Ph.D. Thesis, Middle East technical University, Ankara.
- /21/ Trajanović M., Stojković M., Korunović N., *Računarom podržano projektovanje pneumatika*, Istraživanja i projektovanja za privredu, br.8, 2005, pp. 19-32