Strukturna analiza ronilice od kompozitnih materijala primjenom metode konačnih elemenata

Drobilo, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2011

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:002290

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Z A V R Š N I R A D

Luka Drobilo

Zagreb, 2011

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Z A V R Š N I R A D

Strukturna analiza ronilice od kompozitnih materijala primjenom metode konačnih elemenata

Voditelj rada:
doc. dr. sc. Smiljko Rudan

Luka Drobilo

Zagreb, 2011

Tekst zadatka rada

Sažetak

U modernim istraživanjima podmorja i drugim podvodnim aktivnostima, pored ljudima upravljanih podmorica sve se više pažnje posvećuje autonomnim podvodnim vozilima – AUV (Autonomous Underwater Vehicle). U ovom radu analizirana je jedna takva ronilica, odnosno otpornost njezine strukture na tlačno opterećenje, kako bi se ustanovilo zadovoljava li osnovne preduvjete za rad na predviđenim morskim dubinama te istražile kritične točke strukture. Tlačno opterećena struktura ronilice izrađena je od kompozita roving staklenih vlakana i epoksidne smole u jednoj te dvo-osnih prošivenih ugljičnih vlakana i epoksidne smole planirana u drugoj izvedbi. Analiza je provedena pomoću metode konačnih elemenata na modelu izrađenom u aplikaciji Siemens Femap v10 i proračunom u aplikaciji LSTC LS-DYNA. Za provjeru točnosti ispitnog modela korišteni su rezultati ispitivanja izdržljivosti epruveta izrađenih od kompozita roving i mat staklenih vlakana te epoksidne smole. Točnost modela provjerena je simulacijom eksperimentalnog ispitivanja izdržljivosti i usporedbom numeričkih rezultata sa eksperimentalnim.

Sadržaj

Tekst zadatka rada 3
Sažetak 4
Sadržaj 5
Popis slika 7
Popis tablica 9
Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina 10
Izjava 11
Projekt Bubblebee II 12
Uvod 12
O projektu 12
Ciljevi i ograničenja 13
Metodologija rada 16
Izrada mreže konačnih elemenata 17
SolidWorks 2010 17
SolidWorks model ronilice 18
Femap v10 21
Unošenje geometrije u Femap i prilagodba za umrežavanje 22
Generiranje mreže konačnih elemenata 26
Mreža prednjeg dijela 28
Mreža glavnog rebra 29
Mreža stražnjeg dijela 30
Konačna mreža ronilice 32
Eksperimentalno ispitivanje savojne čvrstoće 34
Značajke numeričkog ispitivanja 37
Opterećenje ronilice 37
Materijal ronilice 37
LSTC LS-DYNA v971 38
Metoda konačnih elemenata 40
Ljuskasti konačni elementi i Belytschko – Lin – Tsay formulacija 41
Materijalni modeli 42

Model 22 – composite damage 43
Modeli 54 i 55 – enhanced composite damage 44
Model 59 – composite failure shell model 45
Ispitivanje savojne čvrstoće u LS-DYNA-i 47
Numerička analiza savojne čvrstoće epruveta 47
Analiza numeričke stabilnosti 50
Hourglassing 50
Prigušenje 50
Trajanje simulacije 50
Dodatni rubni uvjeti i preciznost rješavača 50
Odabir i definiranje postavki materijalnog modela 51
Primjena čvršćih materijala 55
Ispitivanje ronilice 57
Numerički model ronilice 57
Analiza rezultata numeričkih proračuna 60
Slučaj 1 60
Slučaj 2 63
Slučaj 3 65
Analiza strukture ronilice 66
Glavno rebro 67
Slobodne površine 67
Bridovi 68
Stakalca 68
Utjecaj vrste materijala 68
Zaključna razmatranja 70
Zaključak 71
Literatura 72
Prilog 1: k- file ispitivanja epruvete 73
Prilog 2: k – file ispitivanja ronilice 76

Popis slika

Slika 1 – Projekcije ronilice 14
Slika 2 – Renderirani finalni model ronilice 15
Slika 3 – Prikaz SolidWorks 2010 aplikacije 17
Slika 4 – Otvoreni SolidWorks sklop ronilice 18
Slika 5 – Prednji dio ronilice u SolidWorksu 19
Slika 6 – Glavno rebro (rastavljeno) u SolidWorksu 20
Slika 7 – Stražnji dio u SolidWorksu 20
Slika 8 – Prikaz Femap v10 aplikacije 21
Slika 9 – Solid model prednjeg dijela u Femapu 22
Slika 10 - Solid model spojenog glavnog rebra u Femapu 23
Slika 11 - Solid model stražnjeg dijela u Femapu 23
Slika 12 – Generirane središnje plohe prednjeg dijela 24
Slika 13 – Generirane središnje plohe stražnjeg dijela 24
Slika 14 – Konačna geometrija prednjeg dijela 25
Slika 15 – Konačna geometrija stražnjeg dijela 25
Slika 16 – Konačna geometrija glavnog rebra 26
Slika 17 – Primjer korištenja Surface Mesh Approach opcije 27
Slika 18 – Mreža prednjeg dijela 28
Slika 19 – Detalj mreže prednjeg dijela – donji prozor 28
Slika 20 – Detalj mreže prednjeg dijela – prednji prozor 29
Slika 21 – Mreža glavnog rebra 29
Slika 22 – Detalj mreže glavnog rebra - provrt 30
Slika 23 – Mreža stražnjeg dijela 30
Slika 24 – Detalj mreže stražnjeg dijela – gornji prozor 31
Slika 25 – Detalj mreže stražnjeg dijela - provrt 31
Slika 26 - Konačna mreža ronilice 32
Slika 27 – Konačna mreža ronilice – bočni prikaz 32
Slika 28 – Konačna mreža ronilice - donja strana 33
Slika 29 - Konačna mreža ronilice - prednja strana 33
Slika 30 - Orijentacija slojeva uzoraka po debljini 34
Slika 31 - Ispitivanje savojne čvrstoće epruvete 35
Slika 32 - Uređaj za ispitivanje savojne čvrstoće 35
Slika 33 - Rezultati experimentalnih ispitivanja 36
Slika 34 - LS PrePost 40
Slika 35 - Ravninski ljuskasti element sa koordinatnim sustavom [4] 41
Slika 36 – Primjer *hourglassinga* (dolje) na usporedbi potpuno integriranog i pod-integriranog ljuskastog elementa (gore) [6] 42
Slika 37 – Model epruvete 47
Slika 38 – Epruveta sa pritiskom i SPC osloncima 48
Slika 39 – Epruveta sa solid elementima 48

SLIKA 40 – EPRUVETA SA SOLID OPTEREĆENJEM I SPC OSLONCIMA 49
SLIKA 41 - EPRUVETA SA X I Y SIMETRALAMA 49
SLIKA 42 - USPOREDBA MATERIJALNIH MODELA 53
SLIKA 43 – EPRUVETA PRI POČETKU POPUŠTANJA 53
SLIKA 44 - USPREDBA EKSPERIMENTALNIH I NUMERIČKIH PODATAKA 54
SLIKA 45 - USPOREDBA NUMERIČKIH REZULTATA SAVOJNOG ISPITIVANJA EPRUVETA ZA TRI RAZMATRANA MATERIJALA 56
SLIKA 46- PODEBLJANI ELEMENTI KUĆIŠTA 58
SLIKA 47 - PRIKAZ TLAČNOG OPTEREĆENJA NA RONILICU 58
SLIKA 48 - PRIKAZ RUBNIH UVJETA RONILICE 59
SLIKA 49 - POČETNO PUCANJE REBRA SA VON MISES NAPREZANJIMA – PRESJEK STRAŽNJEG DIJELA 61
SLIKA 50 – SLUČAJ 1 - PRESJEK POPUŠTANJA RONILICE , DONJA STRANA 61
SLIKA 51 – SLUČAJ 1 – POPUŠTANJE RONILICE, DONJA STRANA 62
SLIKA 52 – SLUČAJ 2 – POPUŠTANJE RONILICE, GORNJA STRANA 64
SLIKA 53 - SLUČAJ 2 – POPUŠTANJE RONILICE, DONJA STRANA 64
SLIKA 54 - SLUČAJ 3 – POPUŠTANJE RONILICE, GORNJA STRANA 65
SLIKA 55 – POLJE VON MISES NAPREZANJA RONILICE ZA SLUČAJ 2 66
SLIKA 56 - USPOREDBA GLAVNOG REBRA BEZ (LIJEVO) I SA (DESNO) ŠIRIM LUKOM I VEĆIM RADIJUSOM VRHA KUTA 67

Popis tablica

TABLICA 1 - POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA 10
TABLICA 2- ZNAČAJKE ISPITNE EPRUVETE 34
TABLICA 3 - SVOJSTVA MATERIJALA PREMA "COMPOSITE MATERIALS FATIGUE AND FRACTURE" 51
TABLICA 4 - KONAČNA SVOJSTVA MATERIJALA 54
TABLICA 5 - USPOREDBA SVOJSTAVA ISPITIVANIH MATERIJALA 56
TABLICA 6 – PARAMETRI PRORAČUNA I KONAČNI REZULTAT TRI NUMERIČKA MODELA RONILICE 66

Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

Fizikalna veličina	Oznaka	Mjerna jedinica
Dužina	L	[m]
Širina	B	[m]
Debljina	D	[m]
Gustoća	ρ	[kg/m^3]
Masa	m	[kg]
Tlak	p	[Pa]
Dubina	h	[m]
Gravitacijsko ubrzanje	g	[m/s^2]
Poissonov omjer	ν	-
Modul elastičnosti	E, E_1, E_2	[Pa]
Modul smičnosti	G, G_{12}, G_{ab}	[Pa]
Uzdužna / poprečna vlačna čvrstoća	S_1, X_T/ S_2, Y_T	[Pa]
Uzdužna /poprečna tlačna čvrstoća	C_1, X_C / C_2, Y_C	[Pa]
Smična čvrstoća	S_{12}, S_C	[Pa]
Normalno naprezanje	σ, σ_{aa}, σ_{bb}, σ_1 , σ_2	[Pa]
Smično naprezanje	τ, σ_{ab}, σ_{12}	[Pa]
Parametar nelinearnosti kod smika	α	-
Težinski faktor za smični uvjet	β	-
Sila	F	[N]
Istezanje	ε	[%]
Kut deformacije	γ	[%]

Tablica 1 - Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno, služeći se dostupnom literaturom i znanjem stečenim tijekom studija te stručnom pomoći i savjetima voditelja rada, doc. dr. sc. Smiljka Rudana.

Zahvala:

Želio bih se zahvaliti svom mentoru doc. dr. sc. Smiljku Rudanu na svim savjetima koje mi je pružio i vremenu koje je nesebično posvetio razmatranju ovoga rada. Kolegama Juri Uremu i Marinu Rajiću se zahvaljujem na pomoći pri prikupljanju materijala i informacija vezanih uz projekt ronilice Bublebee II. No prije svega želio bih se zahvaliti svojoj obitelji bez koje ništa od ovoga ne bi bilo moguće.

Projekt Bubblebee II

Uvod

Zbog nepristupačnosti morskih dubina te opasnosti tog okruženja, istraživanje morskih dubina je ljudima uvijek predstavljalo značajan problem. Razvojem tehnologije i raznih vrsta podmornica ipak su omogućeni znatno bolji uvjeti i pristup u područja koja nikad prije nisu bila viđena. No zbog iznimno teških uvjeta pri većim dubinama, unatoč modernim rješenjima, svaki takav pothvat sa sobom nosi velike rizike za one koji se u njega upuštaju. Stoga se moderna znanost sve više okreće alternativnim rješenjima i razvoju računalno upravljanih autonomnih ronilica, bez ljudske posade. Osim što se ljudski životi ne bi dovodili u opasnost, takve ronilice bi donijele i uštedu pri njihovoj izradi budući bi mogle biti znatno manje i ne bi trebalo brinuti o osiguravanju uvjeta za život čovjeka unutar njih.

Daljinski upravljana vozila ili ROV (Remotely Operated Vehicle) danas se u svijetu naveliko koriste i našla su svoju primjenu u raznim znanstvenim, industrijskim te vojno - redarstvenim primjenama. Kako su ova vozila računalno upravljana, predstavljaju odlično rješenje za primjenu u uvjetima opasnima za ljude. No rješenje jednog problema, često vodi do pojave drugog. Iako su ova vozila računalno upravljana, ona svejedno trebaju biti spojena sa izvorom napajanja i upravljačkom jedinicom putem posebnog kabla – pupčane vrpce. Samim time zahtjevaju složeniju logističku potporu gdje god se koristila, čime im se ograničava pokretljivost.

Uvidjevši ograničenja ROV-ova i napretkom moderne tehnologije, sve više pažnje posvećuje se razvoju autonomnih podvodnih vozila – AUV. Dok su i ROV i AUV ronilice bez ljudske posade i kontrolirane računalom, osnovna razlika između ove dvije vrste je u tome što ROV zahtjeva povezanost kablom dok AUV ne. AUV je potpuno autonoman, sa sobom nosi izvor napajanja, a sa upravljačkim računalom i ljudima koji njime rukuju komunicira bežičnom vezom tako da je posve slobodan od ikakvih veza sa kopnom dok god ima dovoljno energije, što mu daje znatno veće mogućnosti.

Kao što je čest slučaj u razvoju tehnologije, vojska prva uočava tehnologije koje bi mogle biti korisne te ulaže svoja sredstva u njihov razvoj. Mornarice diljem svijeta počele su iskorištavati prednosti AUV-ova, pa tako i Hrvatska ratna mornarica i to prvenstveno za potrebe razminiranja, tj. traženje eksplozivnih sredstava u podmorju te pri sprječavanju krijumčarenja robe i za potrebe sigurnosti luka.

O projektu

Projekt Bublebee II je nastao s ciljem uključivanja sveučilišnih institucija te studenata u razvoj AUV-ova. Ovakve inicijative potiče i AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International), fond koji već tradicionalno organizira studentska natjecanja autonomnih podvodnih ronilica RoboSub u NATO-voj bazi Transdec u San Diegu u Kaliforniji. Zadatak natjecanja je konstruirati i izraditi te potom demonstrirati mogućnosti AUV-a da samostalno prepozna određene parametre zadatka i uspješno ih izvrši koristeći ugrađene senzore.

Budući je problem razvoja jedne takve ronilice kompleksan zadatak i zahtjeva primjenu mnogih područja znanja, za potrebe projekta okupljen je multidisciplinaran tim koji sačinjavaju studenti i istraživači raznih područja te institucije kao što su Fakultet elektrotehnike i računarstva (FER), Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), Prirodoslovno - matematički fakultet (PMF) i Institut za istraživanje i razvoj obrambenih sustava (IROS).

Cilj pri realizaciji ovoga prvog hrvatskog autonomnog podvodnog vozila bio je napraviti ga što kvalitetnijim u svim aspektima kako bi bilo primjenjivo u mnogim svrhama, bilo znanstvenim ili vojno – redarstvenim, te kako bi poslužilo kao dobra platforma studentima i znanstvenicima pri daljnjem razvoju sličnih sustava. Neke od mogućih primjena uključivale bi ispitivanje cjevovoda, brana, brodskih trupova, istraživanje morskog dna u svrhu mapiranja ili proučavanja arheoloških nalazišta te mnoge druge.

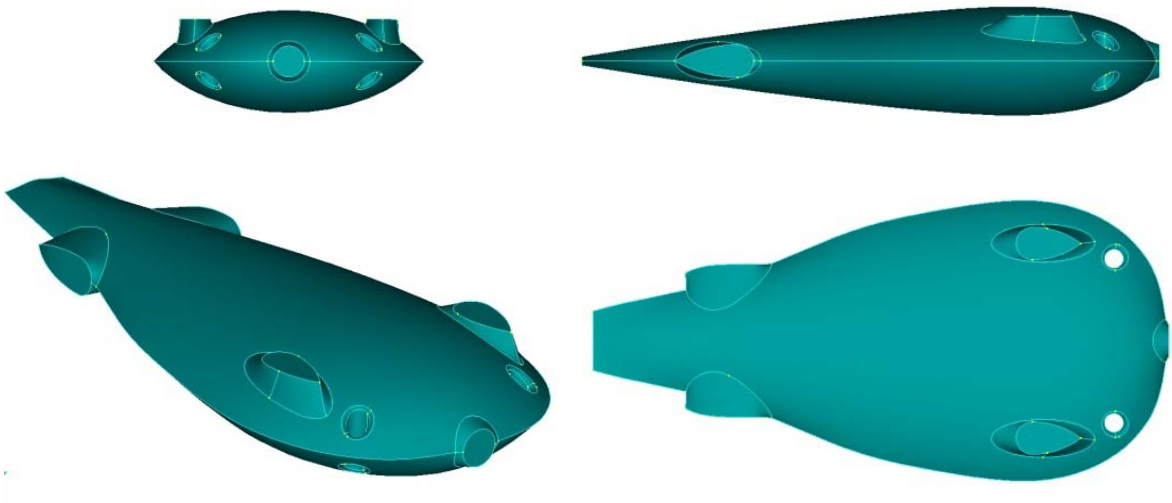
Ciljevi i ograničenja

Kako bi ronilica stvarno bila i praktično primjenjiva, zahtjevi projekta definirani su prema zadacima natjecanja ali i prema uvjetima koji vladaju u Jadranskom moru. Neki od osnovnih zahtjeva koji se postavljaju na ronilicu su dobra plovna svojstva i visok stupanj upravljivosti, koji automatski definiraju i velik dio ostalih karakteristika ronilice kao što su oblik, pogon, maksimalna brzina i masa ronilice. U ovom slučaju najzanimljiviji će nam biti oblik ronilice iz razloga što on, uz materijal, u najvećem djelu utječe na njenu strukturnu postojanost i izdržljivost.

Budući je za postizanje dobrih plovnih svojstava oblik ronilice izrazito bitan, potrebno je bilo pronaći oblik podmornice koji će imati najbolja hidrodinamička svojstva, omogućiti ugradnju svih potrebnih pogonskih uređaja i senzora te zadovoljiti sve druge zahtjeve. Kako bi se to ostvarilo, kao početna točka uzeta je tradicionalna torpedo forma koja je u poprečnom presjeku „razvučena“ i dorađena kako bi se dobio prethodno određeni optimalni presjek trupa te strujanje oko ronilice.

Na optimalnu formu, na prednjem i stražnjem kraju dodane su kratke „peraje“ koje služe kao nosači azimutnih propulzora, tuneli za pramčane porivnike i izdanci za stakalca iza kojih će biti smještene kamere. Uz sve ove elemente uključene u strukturu, dobiva se konačni oblik ronilice prikazan na slici 1.

Uz formu ronilice koja zadovoljava plovna svojstva, na ronilicu je postavljen još jedan veoma bitan zahtjev, a to je maksimalni pritisak koji ronilica može podnijeti, tj. maksimalna dubina na kojoj može funkcionirati. To će u konačnici biti i uvjet izdržljivosti cjelokupne strukture ronilice. Kako bi se ronilica mogla koristiti u realnim istraživačkim zadacima, jedan od projektnih zahtjeva definira kako ronilica mora izdržati tlak od minimalno 15 bara, tj. da ronilica mora moći djelovati na dubinama barem do 150 m.

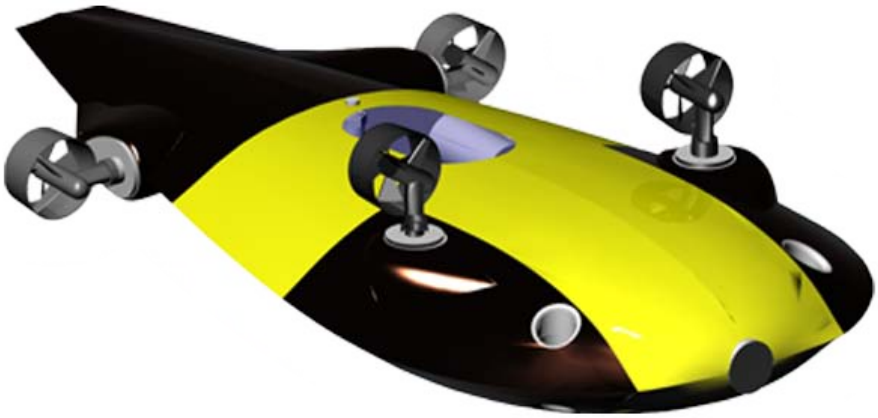


Slika 1 – Projekcije ronilice

Kako bi se udovoljilo tom zahtjevu ronilica je podijeljena na dva dijela: U jednom dijelu bila bi smještena sva upravljačka elektronika, senzori, kamere, pogonski motori i izvori energije (baterije). Taj dio bio bi posve zabrtvljen tako da će na njega prilikom urona tlačno djelovati okolni fluid. Budući je 150 bara veliko opterećenje, biti će potreban materijal koji zadovoljava potrebne uvjete čvrstoće strukture, koji nije osjetljiv na vlagu te koji poželjno ima što manju masu. Takvi materijali su svakako prilično skupi te je bilo potrebno dobro razmotriti koji bi materijal bio optimalno rješenje, o čemu će još riječi biti kasnije.

Drugi dio ronilice nije zabrtvljen nego je u njega dopušteno utjecanje vode. Budući u tom dijelu nema prisutstva zraka nego je u potpunosti ispunjen vodom, na njega ne djeluje pritisak kojim okoliš djeluje na zabrtvljeni dio. Samim time za taj dio nije potreban skup materijal dobrih mehaničkih svojstava nego će poslužiti i znatno jeftinije plastike. U tim dijelovima ne bi bilo nikakvih uređaja osjetljivih na vlagu nego bi sadržavali elemente koji bi prenosili moment s pogonskih elemenata u zabrtvljenom dijelu na pogonjene elemente smještene na nosačima.

Konačni raspored zabrtvljenih (tlačno opterećenih) i potopljenih dijelova ronilice može se vidjeti na slici 2. Žutom bojom označen je tlačno opterećeni dio ronilice, dok su crnom bojom označeni potopljeni dijelovi:



Slika 2 – Renderirani finalni model ronilice

Nakon što je definiran dio ronilice na koji će djelovati pritisak, možemo detaljnije analizirati parametre tog dijela i započeti sa strukturnom analizom ronilice. U daljnjem radu naziv „ronilica“ odnosit će se samo na zabrtvljeni dio cjelokupne strukture ronilice.

Metodologija rada

Rad počinje preuzimanjem postojećeg SolidWorks modela ronilice te njegovim unošenjem u softverski paket Femap/Nastran. U Femapu će potom biti obavljena prilagodba geometrije modela te izrada mreže konačnih elemenata diskretizacijom geometrije ljuskastim konačnim elementima.

Prije pristupanja analizi ronilice, potrebno je odabrati materijalni model koji dobro opisuje stvarni materijal. Referentni mjerni rezultati dobiveni su eksperimentalnim ispitivanjem savojne čvrstoće na epruvetama izrađenim od istog materijala kao i jedan prototip ronilice.

Kako bi se postavio vjerodostojan numerički model, potrebno je analizirati njegove značajke: opterećenje, rubne uvjete te vrstu korištenih konačnih elemenata i materijalnih modela.

U prvom koraku provest će se numeričko ispitivanje savojne čvrstoće epruveta kojim se želi verificirati odabir materijalnog modela i svojstava materijala koji će opisati ponašanje modela sukladno onom u eksperimentalnim ispitivanjima.

U drugom koraku analizirat će se ponašanje ronilice s porastom opterećenja. Uz svojstva materijala od kojega je izrađen prototip ronilice, definirana su i dva dodatna materijala koja će biti uključena u analizu ronilice radi usporedbe ponašanja i izdržljivosti konstrukcije u ovisnosti o korištenom materijalu. Numeričkom analizom tri modela ronilice dobivena su tri slučaja popuštanja na osnovi kojih je obavljena analiza mjesta i redoslijeda popuštanja strukture ronilice.

Na osnovi rezultata strukturne analize iznijeti su prijedlozi za modificiranje kućišta kojima bi se ojačala kritična područja i povećala izdržljivost konstrukcije.

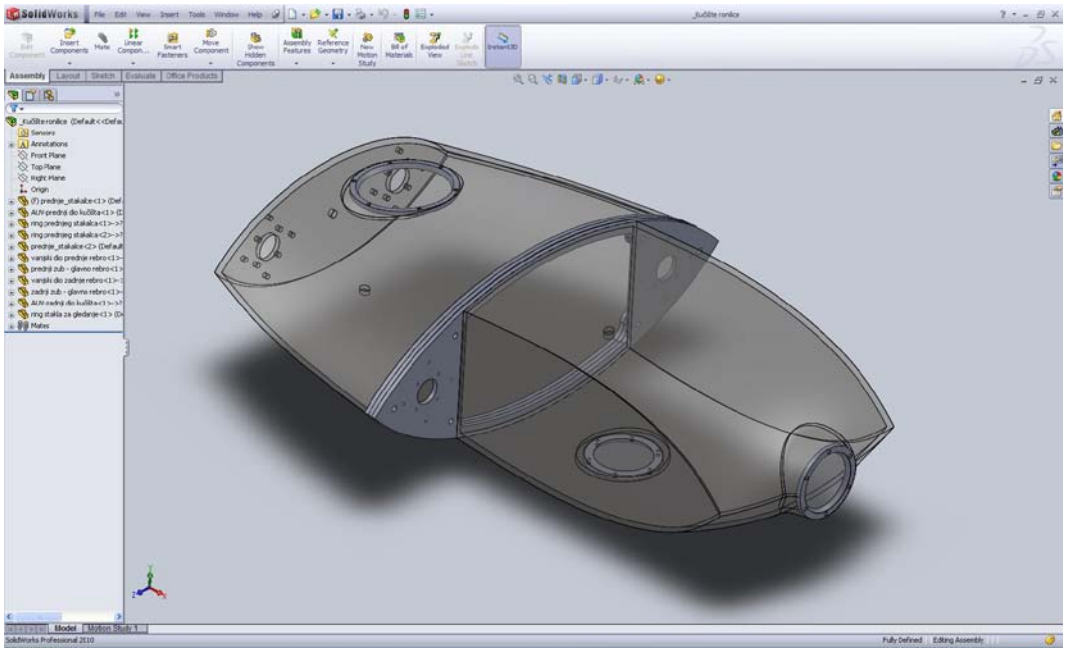
Naposljetku, analizirane su potencijalne pogreške i aproksimacije u numeričkom modelu, mogućnost njihova utjecaja na rezultat ispitivanja te konačno, donesena ocjena ispravnosti mjera poboljšanja konstrukcije dobivene strukturnom analizom.

Izrada mreže konačnih elemenata

Prvi korak strukturne analize metodom konačnih elemenata je izrada mreže konačnih elemenata, a da bi se mreža izradila potrebno je prvo proučiti i modelirati geometriju trupa ronilice. U tu svrhu koristiti će se već gotovi 3D CAD modeli izrađeni u aplikaciji SolidWorks 2010 koje je na korištenje ustupio kolega Jure Urem sa FSB-a, član razvojnog tima na projektu Bublebee II. Te gotove modele prenijet ćemo u aplikaciju Femap v10 u kojoj ćemo zatim izraditi model pomoću konačnih elemenata.

SolidWorks 2010

SolidWorks je 3D CAD (Computer Aided Design) program za Microsoft Windows platformu razvijen od strane SolidWorks korporacije, ogranka Dassault Systems korporacije [1]. Osmišljen kao povoljna alternativa 2D CAD paketima, predstavljen je 1993. godine u svom prvom izdanju kao konkurencija poznatim proizvodima kao što su AutoCAD, I-DEAS, Pro/ENGINEER i mnogi drugi.



Slika 3 – Prikaz SolidWorks 2010 aplikacije

Osnovni cilj je pružiti korisniku mogućnost upotrebe aplikacije za 3D dizajn koja će cijenom parirati prosječnom 2D CAD softveru uz pristup i drugim mogućnostima kao što su generiranje 2D crteža direktno iz 3D modela te implementacije analize metodom konačnih elemenata, sve u jednom paketu.

SolidWorks koristi jednostavan parametarski pristup modeliranju i sklapanju koji je prvotno korišten u PTC-ovom Pro/ENGINEER-u, u kojemu sve dimenzije definiraju konačnu geometriju. Pri izradi i modificiranju volumena, SolidWorks koristi sustav baziran na značajkama (features), koji se jednostavno može vratiti u neko od prethodnih stanja u slučaju da dio modela mora biti promijenjen ili izvršeno više rekonfiguracija na istom modelu. Za sklapanje više dijelova koristi se više vrsta spojeva kojima se definiraju međusobni relativni položaji komponenti.

Uz početne mogućnosti koje su uključivale 3D modeliranje, sklapanje modela, iscrtavanje 2D crteža modela i sklopova te analizu metodom konačnih elemenata, tijekom godina razvijeni su i brojni dodaci osnovnom SolidWorks paketu tako da danas sadrži programske pakete za sljedeće namjene:

- konstruiranje 3D dijelova i sklopova
- provjera konstrukcija
- upravljanje proizvodnim podacima
- izmjena datoteka i suradnja u procesu konstruiranja
- povećanje produktivnosti konstruiranja
- konstrukcija i provjera kalupa za lijevanje

SolidWorks model ronilice

Kao ulazni podatak koristiti ćemo postojeći 3D model ronilice u koji su uključeni svi elementi prisutni na trupu ronilice, kao što je prikazano rastavljenim sklopom ronilice na slici 4:



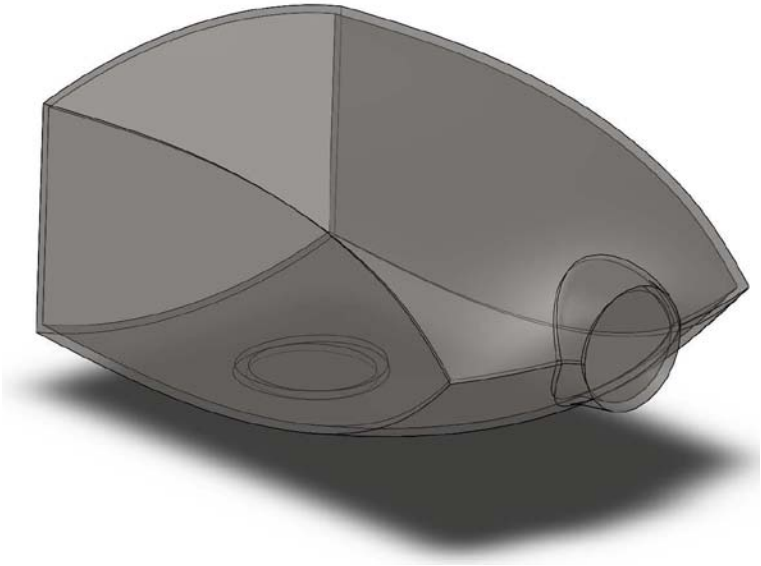
Slika 4 – Otvoreni SolidWorks sklop ronilice

Radi preglednosti, model ćemo podijeliti na tri dijela, gledajući sliku 4 s desna na lijevo, na:

- prednji dio
- glavno rebro
- stražnji dio

Na prednjem dijelu ronilice nalaze se dva stakalca postavljena na pozicijama na kojima će biti smještene dvije kamere: jedna koja će snimati područje ispred ronilice i jedna koja će snimati područje ispod ronilice. Prednji dio će pri izradi nerastavljivim spojem biti povezan prednjim glavnim rebrom kao

što je prikazano na slici 4. No u postupku izrade mreže konačnih elemenata, taj spoj će se uzeti u obzir tek kod sklapanja konačnog modela.



Slika 5 – Prednji dio ronilice u SolidWorksu

U sredini ronilice nalazi se glavno rebro. Kao što je prema slici 6 vidljivo, sastoji se od dva odvojena dijela od kojih je jedan nerastavljivim spojem povezan s prednjim a drugi sa stražnjim krajem. Ta dva dijela međusobno se povezuju vijcima i maticama te omogućavaju otvaranje ronilice kako bi se olakšao pristup njenoj unutrašnjosti i komponentama koje se tamo nalaze. Na dijelovima se nalaze utori i izdanci koji moraju biti precizno izrađeni budući njihov dosjed osigurava zabrtvljenost ronilice i sigurnost komponenti unutar nje. Na glavnom rebru se također nalaze dva veća kružna provrta na koje će biti montirane magnetske spojke, tj. kroz koje će se prenositi moment sa pogonskog sustava na prednje azimutne propulzore i pramčane porivnike.



Slika 6 – Glavno rebro (rastavljeno) u SolidWorksu

Stražnji dio ronilice na svom stražnjem kraju ima još jedno rebro koje je fiksno i njegov je sastavni dio. To rebro također sadrži dva veća provrta na koji će biti smještene magnetske spojke preko kojih će se moment prenositi na dva stražnja azimutna propulzora. Na gornjoj strani nalazi se staklo koje služi za vizualnu kontrolu unutarnjih komponenti bez potrebe za rastavljanjem ronilice.



Slika 7 – Stražnji dio u SolidWorksu

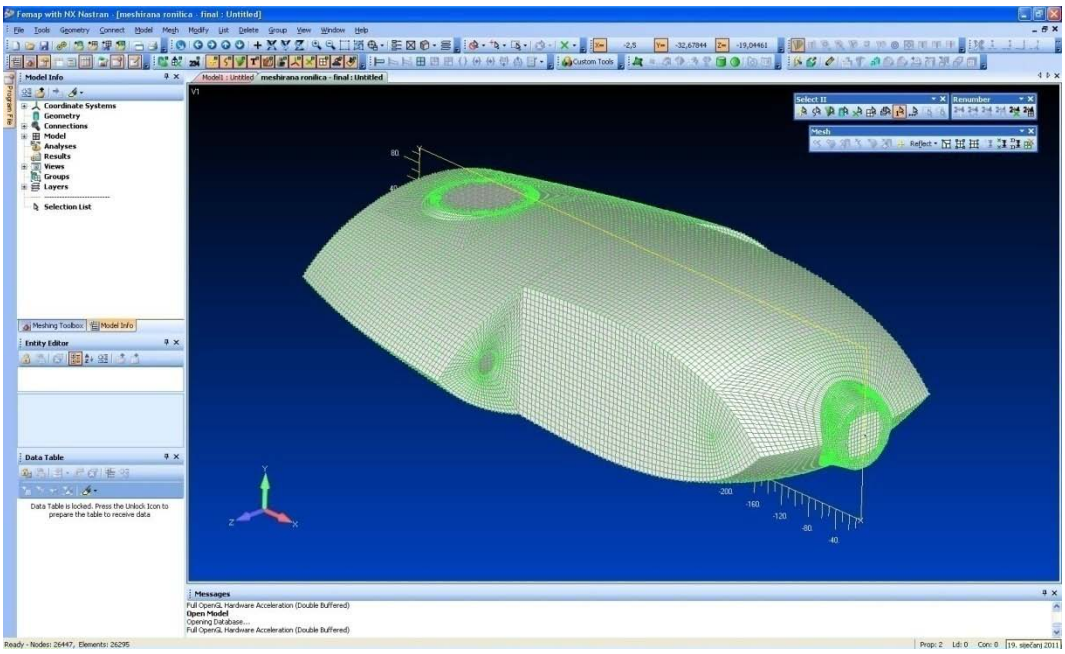
Sada kada su određeni dijelovi koji će se koristiti, svaki od njih biti će pohranjen u parasolid formatu. Parasolid je format koji je podržan na velikom broju 3D računalnih grafičkih aplikacija te je povoljan za unošenje modela iz jedne aplikacije u drugu. Pretvorbom modela u parasolid format izgubit će se mogućnost promjene prethodnih stanja koju pruža SolidWorks, no zato se omogućava promjena krivulja modela koja će biti potrebna u kasnijem radu.

Femap v10

Siemensova aplikacija (razvijena u Siemens PLM Software) Femap (Finite Element Modeling and Postprocessing) je napredni inženjerski softver za izradu modela konačnih elemenata kompleksnih inženjerskih proizvoda i sustava te za prikazivanje rezultata njihovih proračuna [2]. U Femapu je moguće virtualno modelirati komponente, sklopove ili cjelokupne sustave te proučiti njihovo ponašanju u zadanom radnom okruženju.

Korištenjem Femapovih mogućnosti moguće je:

- predvidjeti i poboljšati ponašanje i pouzdanost proizvoda u radu
- smanjiti potrebu za dugotrajnim i skupim ispitivanjem fizičkih prototipova
- ispitati i usporediti različite modele i materijale
- optimizirati konstrukciju i smanjiti količinu potrebnog materijala



Slika 8 – Prikaz Femap v10 aplikacije

Femap je neovisan o pojedinačnim CAD aplikacijama i podržava velik broj formata tako da može koristiti geometrijske podatke iz svih većih CAD sustava kao što su CATIA, Pro/ENGINEER, SolidWorks, Solid Edge i AutoCAD. Ova mogućnost olakšava primjenu Femapa budući nije potrebno ponovno modeliranje geometrije nego se jednostavnom pretvorbom formata rad nastavlja na već korištenim modelima.

Tako unesena geometrija se potom u Femapu može dorađivati prema potrebi te zatim pomoću mnogih Femapovih alata kvalitetno diskretizirati konačnim elementima, tj. kako će biti navedeno dalje u tekstu: umrežavati. Femap podržava 2D i 3D umrežavanje geometrije uz veliki broj vrsta konačnih elemenata te uz bazu podataka elemenata koji se lako generiraju jednostavnim zadavanjem parametara (primjerice gredni elementi raznih presjeka).

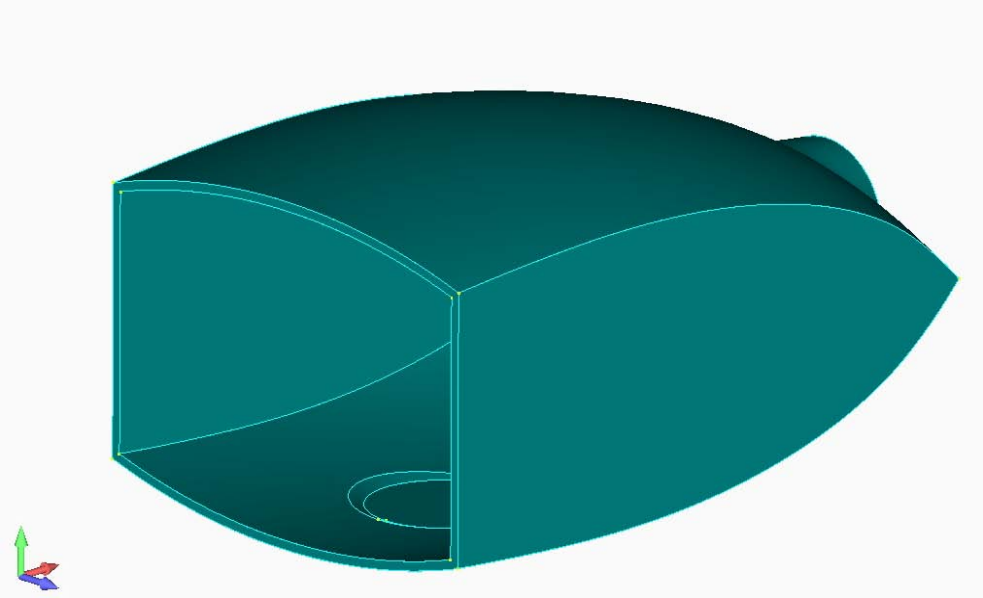
Uz umrežavanje, Femap omogućava i potpuno definiranje svih parametara potrebnih za analizu metodom konačnih elemenata uključujući i naprednije opcije kao što su definiranje kompleksnijih svojstava slojeva kompozita ili kontakata i gibanja unutar sklopova te među dijelovima.

Budući Femap sam po sebi nije namijenjen izvođenju proračuna, modele definirane u Femapu lako se može pohraniti u velik broj formata te zatim proračunati pomoću mnogih numeričkih alata danas prisutnih na tržištu kao što su NX Nastran, LS-Dyna, Ansys, Abaqus i drugi. Tako dobivene rezultate potom se može ponovno unijeti u Femap radi pregleda i analize dobivenih rezultata.

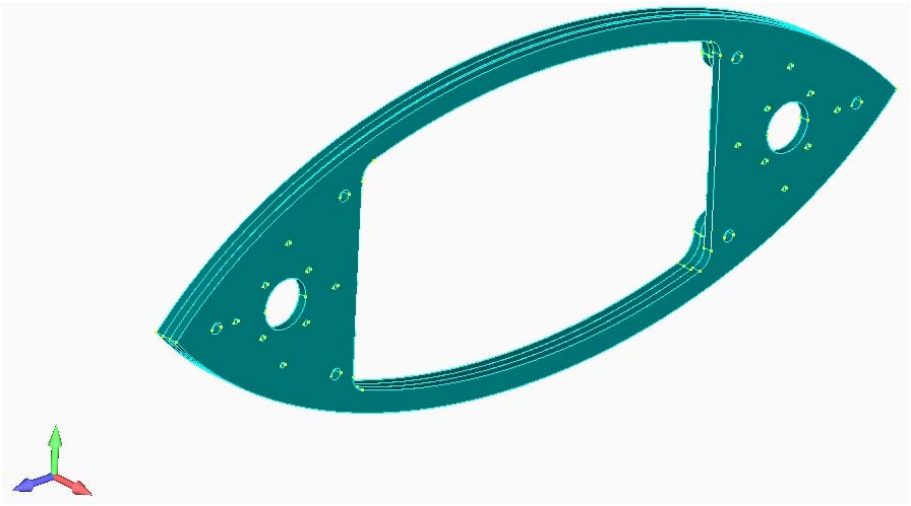
Jedna od korisnih mogućnosti Femapa je intuitivno i lako prilagodljivo sučelje koje omogućuje svakom korisniku jednostavno i efikasno podešavanje korištenih opcija tako da mu uvijek budu lako dostupne.

Unošenje geometrije u Femap i prilagodba za umrežavanje

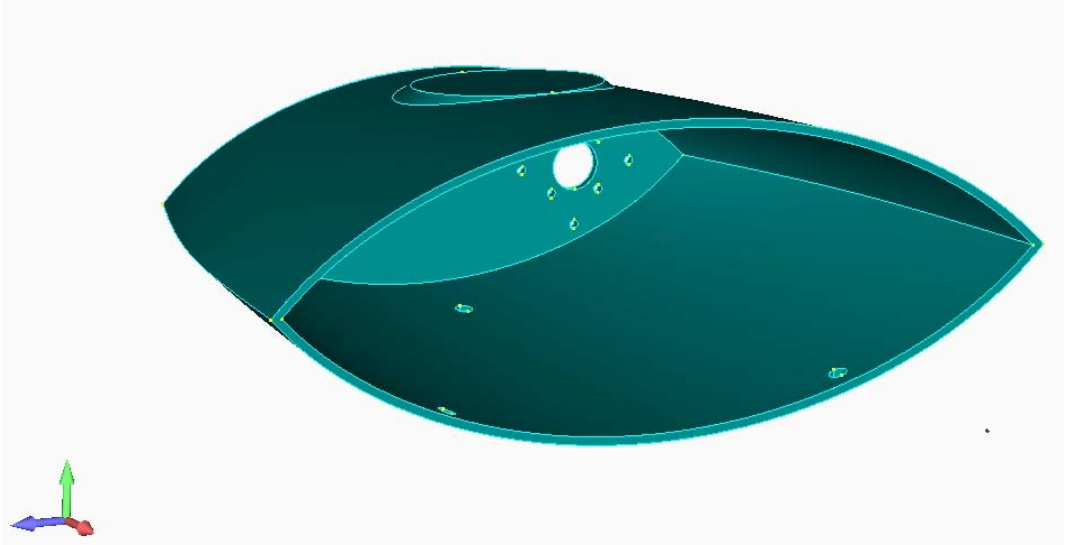
Parasolid geometrija prethodno pripremljena u SolidWorksu i unesena u Femap ispravno je prepoznata kao solid element. Kao što je prije navedeno, ograničenjem parasolid formata izgubljeni su podaci o značajkama tako da geometrija sada više nije definirana značajkama kojima je prvotno kreirana, nego površinama koje su omeđene krivuljama. No budući će se dalje ionako koristiti postojeća geometrija, mogućnost promjene pomoću značajki ionako više nije potrebna.



Slika 9 – Solid model prednjeg dijela u Femapu



Slika 10 - Solid model spojenog glavnog rebra u Femapu

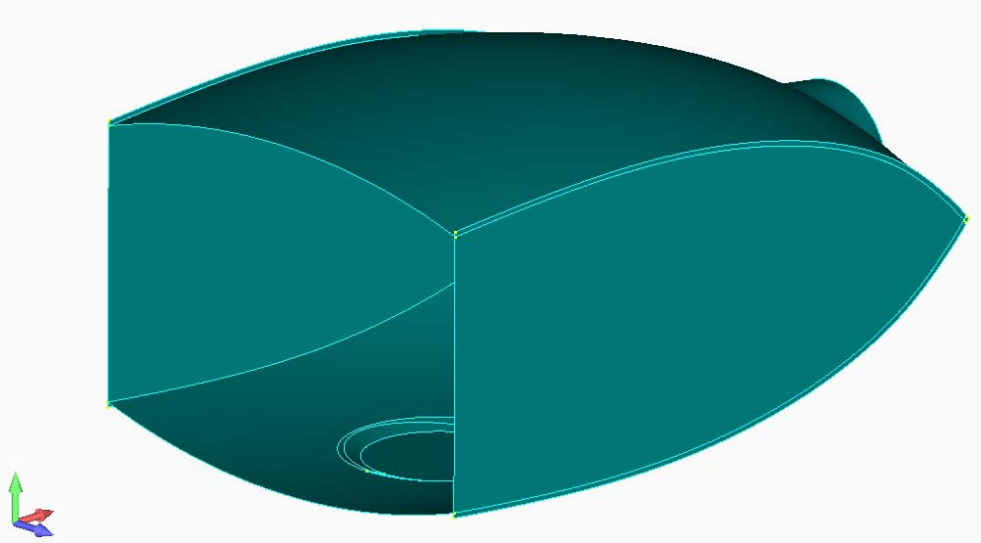


Slika 11 - Solid model stražnjeg dijela u Femapu

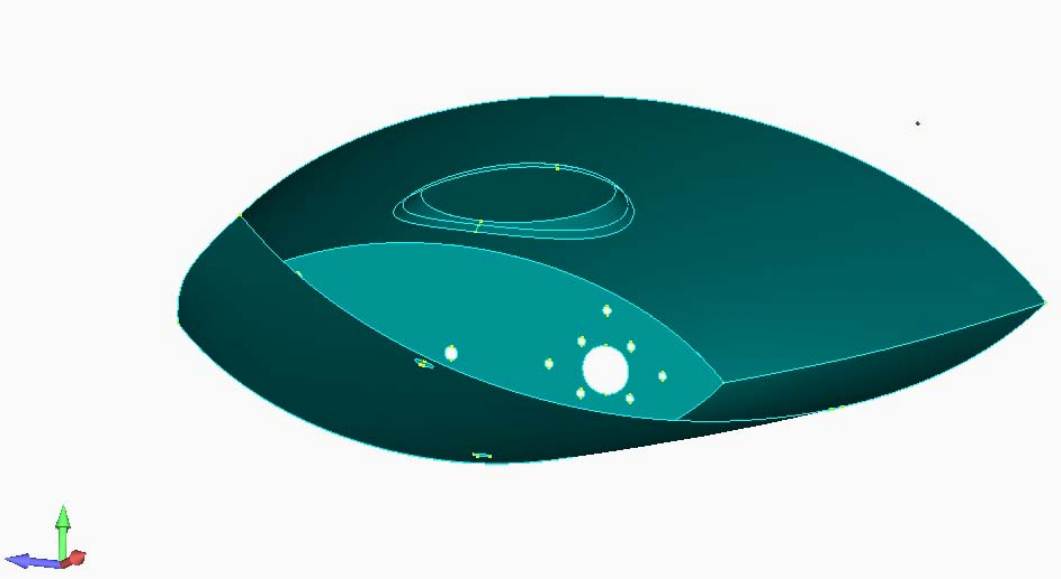
Za umrežavanje modela koristiti ćemo ljuskaste (shell) elemente o kojima će biti riječi kasnije. Za sada je bitno da su to ravninski (2D) četverokutni elementi koji se definiraju zadavanjem četiri točke koje određuju oblik i orijentaciju elementa. Kako su to ravninski elementi, kasnije je im za potrebe proračuna numerički potrebno zadati i debljinu.

Kako će u ovoj analizi biti korišteni ravninski elementi, solid modele u kojima je geometrijski definirana i debljina stjenki je potrebno prilagoditi. U tu svrhu iskoristit ćemo Femapovu opciju *Automatic Midsurface*. Pomoću ove opcije Femap će generirati središnju plohu, tj. površinu koja prolazi samim središtem debljine stjenke odabranih solid elemenata, koja u našem slučaju iznosi 5mm.

Ovu opciju ćemo primjeniti na prednji i stražnji kraj te ćemo nakon generiranja središnje plohe i uklanjanja solid elemenata dobiti sljedeću geometriju:



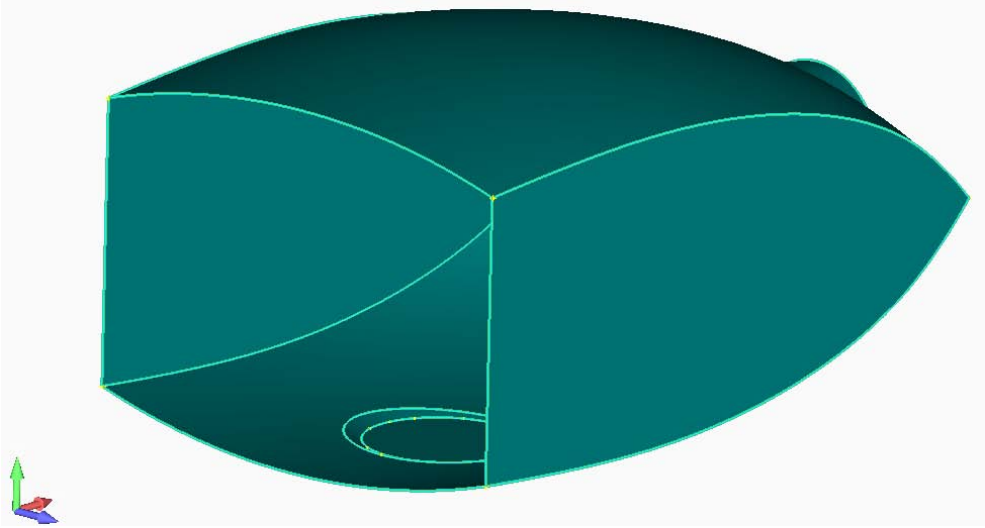
Slika 12 – Generirane središnje plohe prednjeg dijela



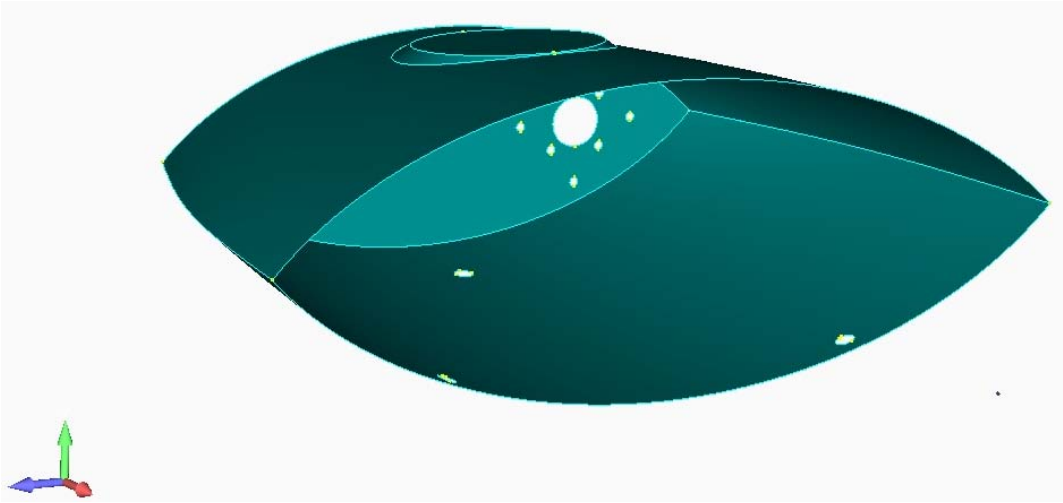
Slika 13 – Generirane središnje plohe stražnjeg dijela

Kao što je vidljivo na slikama, automatskim postupkom generiranja središnje plohe, na modelima su ostale neke nepotrebne plohe: neke vidljive na prvi pogled a neke tek pri kasnijem uređivanju. Te površine biti će potrebno ručno ukloniti jednostavnim brisanjem tih površina. No radi specifičnosti geometrije koja je na nekim mjestima jako zahtjevna, ova automatska opcija na tim je mjestima generirala blago deformirane ili nepovezane površine koje onemogućavaju jednostavno brisanje. Na tim mjestima bit će potrebno ručno ih prilagoditi kako bi se dobila kompletna cjelina koja dobro opisuje model. No unatoč tome ova opcija predstavlja daleko jednostavniji i brži način dobivanja središnjih ploha nego modeliranje dijelova od početka.

Nakon što su nepotrebne površine uklonjene i pogrešno generirane površine dorađene, dobiven je konačan izgled prednjeg i stražnjeg dijela definiran preko središnjih plohi, prikazan na slikama 14 i 15:



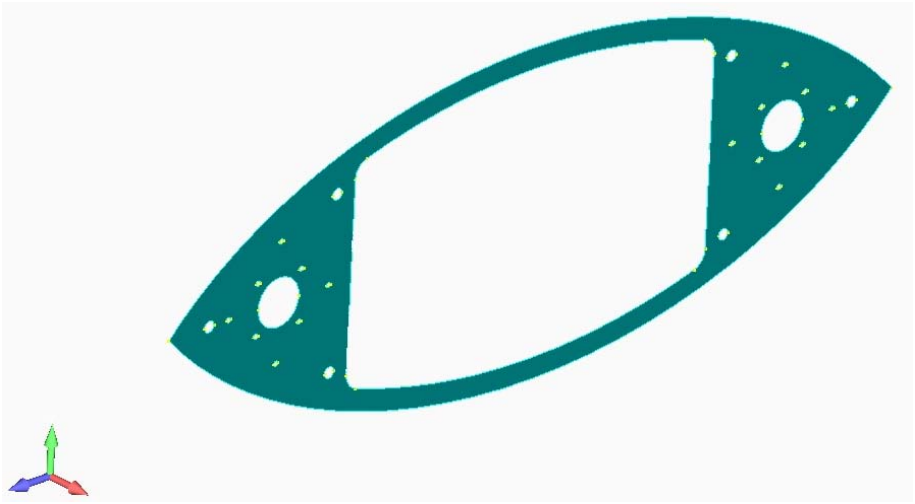
Slika 14 – Konačna geometrija prednjeg dijela



Slika 15 – Konačna geometrija stražnjeg dijela

Dok su solid modeli prednjeg i stražnjeg dijela direktno modificirani u geometriju opisanu središnjim plohama, kod glavnog rebra ćemo taj postupak morati provesti na malo drugačiji način. Kako je već navedeno ranije, u analizi se koriste ravninski elementi, te se sukladno tome geometrija mora dodatno modificirat. To se posebno odnosi na geometriju glavnog rebra u koju ćemo morati unijeti jedno pojednostavljenje.

U realnoj izvedbi glavno rebro je izvedeno od dva dijela koja na sebi sadrže utore i izdanke koji usjedaju jedni u druge te spajanjem tvore cjelinu. Budući je kod ravninskih konačnih elemenata debljina geometrijski definirana samo jednom ravninom, tako će i geometrija na kojoj ćemo elemente generirati biti definirana plohom jedinične debljine. Zbog toga nismo u mogućnosti modelirati glavno rebro u dva dijela nego ćemo ga predstaviti onako kako u konačnoj, složenoj izvedbi ronilice i izgleda – kao jedno rebro. Kada je to određeno može se uzeti geometrija spojenog rebra te izvesti središnja ploha tog oblika prikazana na slici 16:



Slika 16 – Konačna geometrija glavnog rebra

Ovako izvedena ploha biti će diskretizirana konačnim elementima. Elementima će kasnije numerički biti zadana debljina koju imaju dva spojena dijela glavnog rebra u iznosu od 15 mm.

U cilju pojednostavljenja modela i dobivanja što kvalitetnije mreže konačnih elemenata, manji provrti koji služe za fiksiranje magnetskih spojki na rebra i za povezivanje samih rebara, te provrti na stražnjem dijelu, budući ne utječu znatno na rezultate a imaju velik utjecaj na izgled mreže konačnih elemenata, bit će uklonjeni s modela. Veći provrti ostati će nepromijenjeni.

Generiranje mreže konačnih elemenata

Nakon konačnog definiranja geometrije po kojoj će se napraviti model mreže konačnih elemenata, može se konačno započeti i sa samim umrežavanjem. Kao što je već prije spomenuto, koristiti će se ravninski ljuskasti elementi koji su definirani sa svoja četiri rubna čvora.

U Femapu korisnik ima razmjerno veliku slobodu kreiranja mreže konačnih elemenata (dalje u tekstu „mreža“). Moguće ih je kompletno definirati ručno točku po točku, što je za manje mreže ili fino modificiranje kompleksnijih mreža često praktično, no dugotrajno. Drugi izbor je automatsko generiranje zadavanjem površine, definiranjem veličine i svojstava mreže, koji je u najvećoj mjeri korišten u ovom radu.

Za definiranje mreže ravninskih konačnih elemenata, kakvi su ovdje korišteni, postoje razni mogući parametri:

- **Područje (veličina) mreže** može se definirati rubnim točkama umrežavanog područja, rubnim linijama, rubnim područjem određenim većim brojem zatvorenih krivulja, već definiranim ravnim ili zakrivljenim površinama, ekstrudiranim površinama, itd.
- **Veličina elemenata** može biti definirana parametrima kao što su prosječna veličina elementa, minimalni broj elemenata u kutevima, brojem elemenata ili čvorova na pojedinoj stranici umrežavanog područja, minimalnim brojem elemenata na određenim površinama, itd.

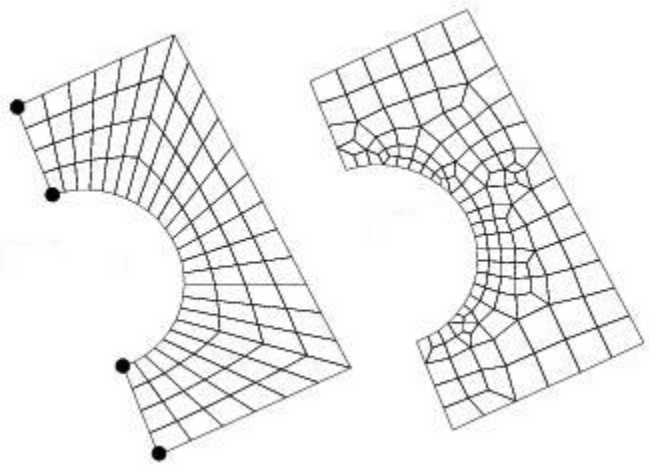
- **Atributi mreže** kao što su tolerancije udaljenosti pri povezivanju susjednih čvorova, maksimalna odstupanja kuteva, minimalni kutevi, omjer duljina stranica, broj redova elemenata po opsegu oko kružnog ruba, maksimalan broj iteracija, minimalan broj elemenata između granica područja, itd.

Kako je ronilica projektirana da bi imala što bolja hidrodinamička svojstva, tako je i njezina forma prilično kompleksna. To čini automatsko umrežavanje kompletnih površina na ronilici nemogućim ukoliko se želi dobiti kvalitetna mreža. Stoga je umrežavanje dijelova ronilice podijeljeno u više koraka.

U prvom koraku kompleksnije površine su razdijeljene na što pravilnije, jednostavne četverokutne površine. Na takvim površinama nije problem zadati brojeve čvorova na rubnim krivuljama kako bi se dobila kvalitetna i ujednačena mreža određene veličine. Zbog prilično simetričnog oblika ronilice, manje, nepravilnije površine često možemo podijeliti na dva dijela kako bismo olakšali postupak njihova umrežavanja. Kasnije će mreža takvih površina biti jednostavno zrcalno preslikana.

Pri umrežavanju takvih manjih površina, ukoliko se želi dobiti mreža samo sa četverokutnim elementima, potrebno je posebno voditi računa o broju čvorova na krivuljama koje opisuju umrežavano područje. U slučaju kada neka od krivulja opisuje i susjedno polje, treba koristiti broj čvorova prema već postavljenoj mreži susjednog polja. Stoga prije umrežavanja jednostavnijih površina treba uzeti u obzir i kompleksnije, ili čak umrežavanje prvo obaviti upravo na kompleksnijim površinama.

Iako automatsko generiranje mreže na takvim površinama katkada poluči dobre rezultate samo modificiranjem nekih od prije navedenih parametara, često (pogotovo na jako kompleksnim površinama), unatoč brizi o broju čvorova na rubovima, na taj način jednostavno nije moguće dobiti kvalitetnu mrežu. U tom slučaju se pomoću opcije *Surface Mesh Approach* mreža na kompleksnijim površinama može jednostavno jako fino definirati odabirom jednog od principa slaganja elemenata pomoću referentnih točaka. Ovaj primjer prikazan je na slici 17 na primjeru mreže koja koristi *mapped* pristup sa četiri točke (lijevo) i koja ne koristi *Surface Mesh Approach* opciju (desno):

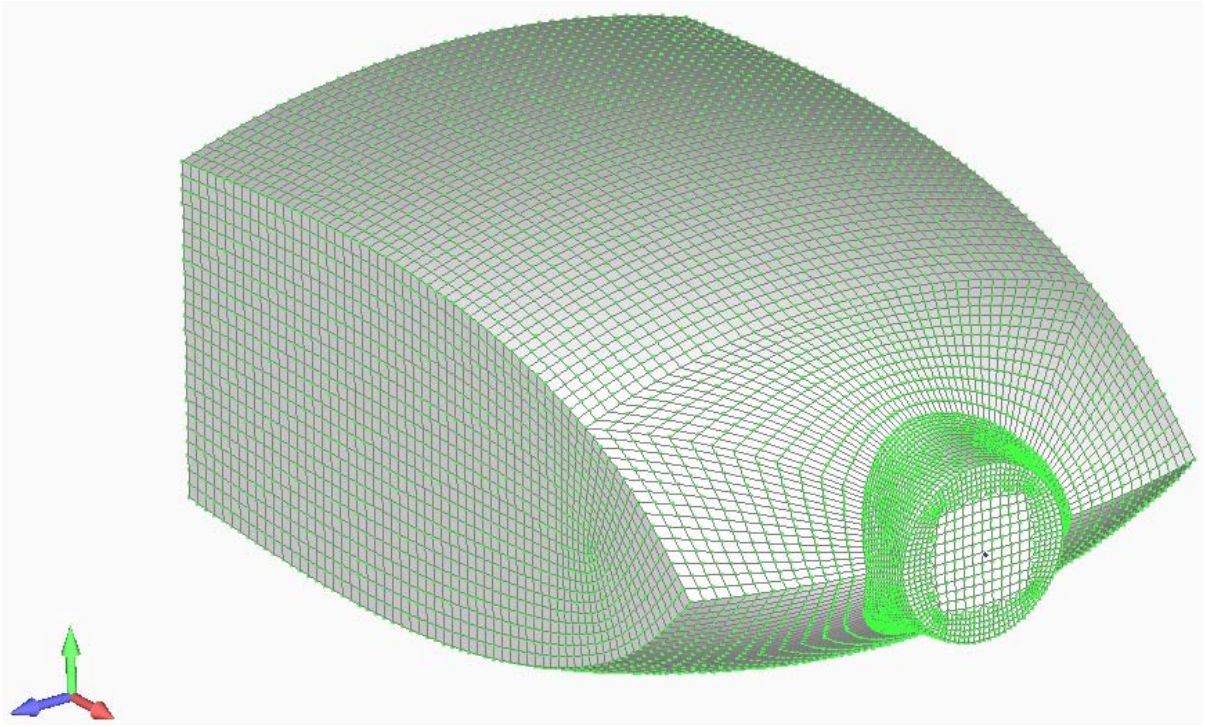


Slika 17 – Primjer korištenja Surface Mesh Approach opcije

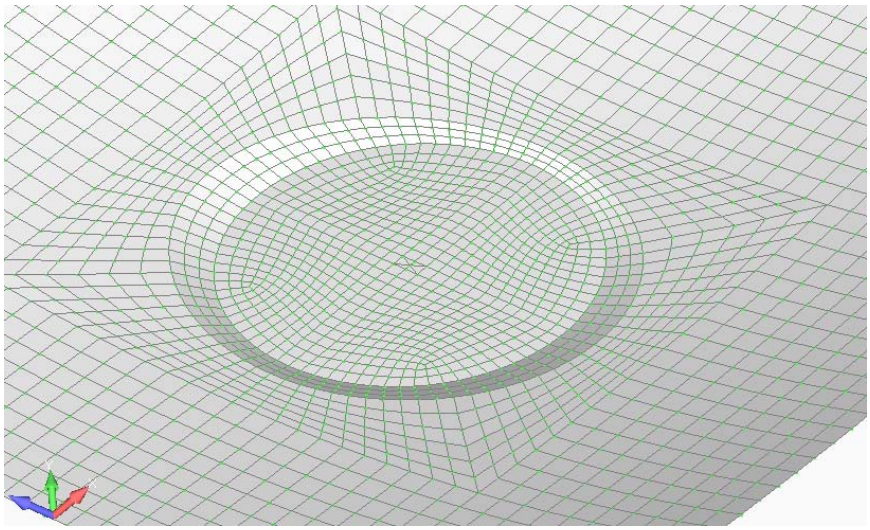
Budući je postupak umrežavanja iterativan proces i zahtjeva konstantno kombiniranje, vraćanje i ponovno podešavanje postavki kako bi se dobilo najbolje moguće rješenje, ne postoji neka fiksno definirana formulacija postupka. O pojedinoj geometriji ovisi kako je najbolje pristupiti problemu.

U konačnici nakon što smo sve dijelove opisali zadovoljavajućom mrežom konačnih elemenata koja bi trebala biti adekvatna za rješavanje danog problema, dobivena je mreža dijelova prikazana na sljedećim slikama:

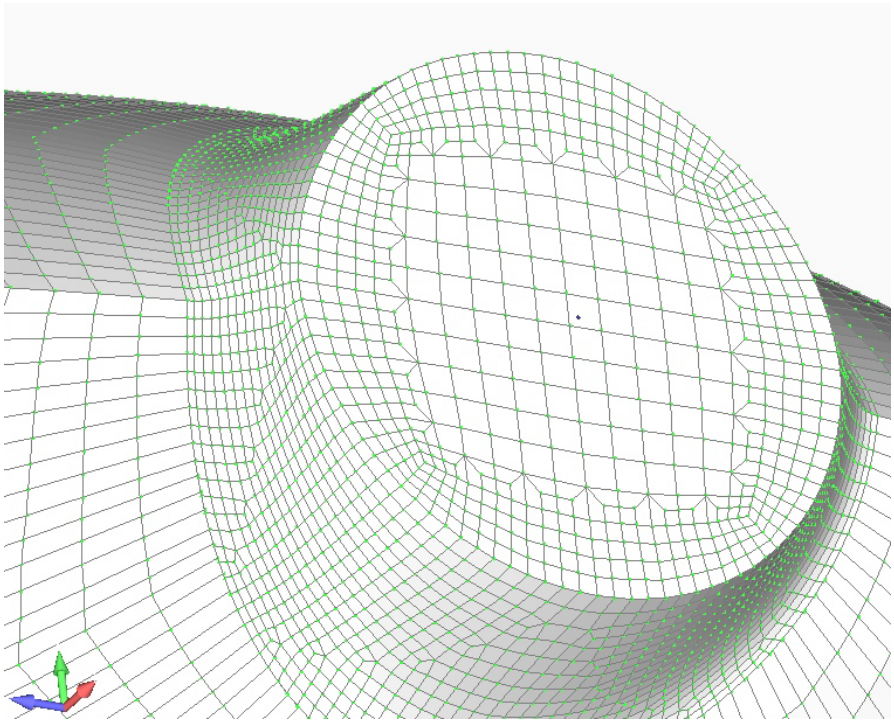
Mreža prednjeg dijela



Slika 18 – Mreža prednjeg dijela

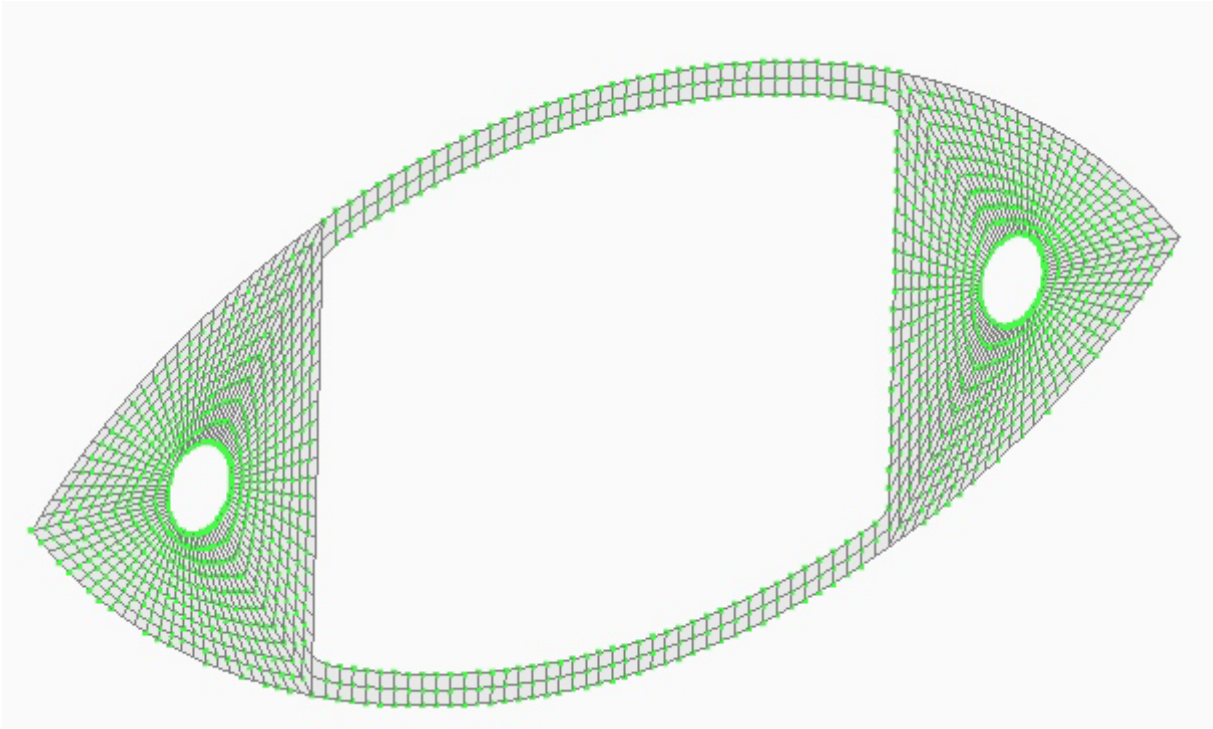


Slika 19 – Detalj mreže prednjeg dijela – donji prozor

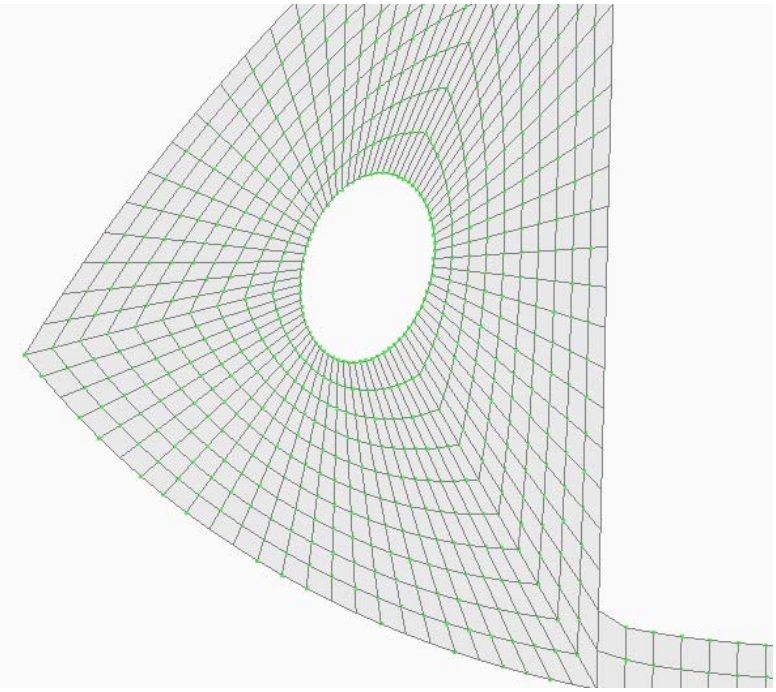


Slika 20 – Detalj mreže prednjeg dijela – prednji prozor

Mreža glavnog rebra

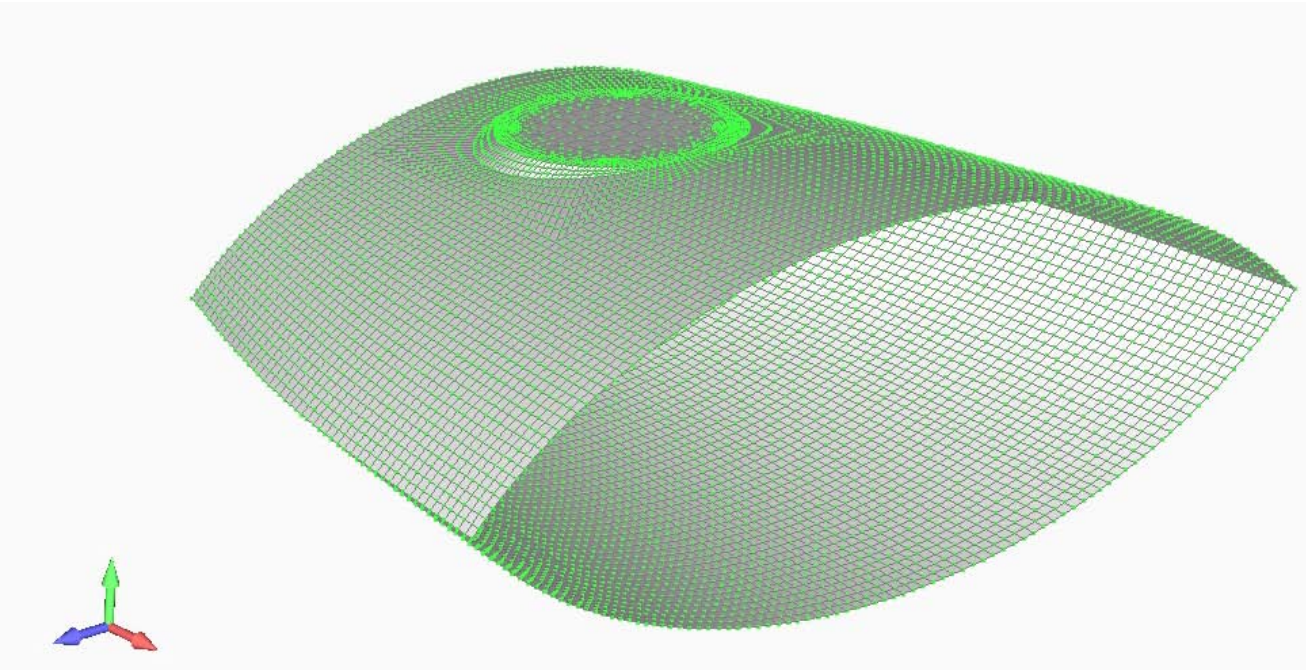


Slika 21 – Mreža glavnog rebra

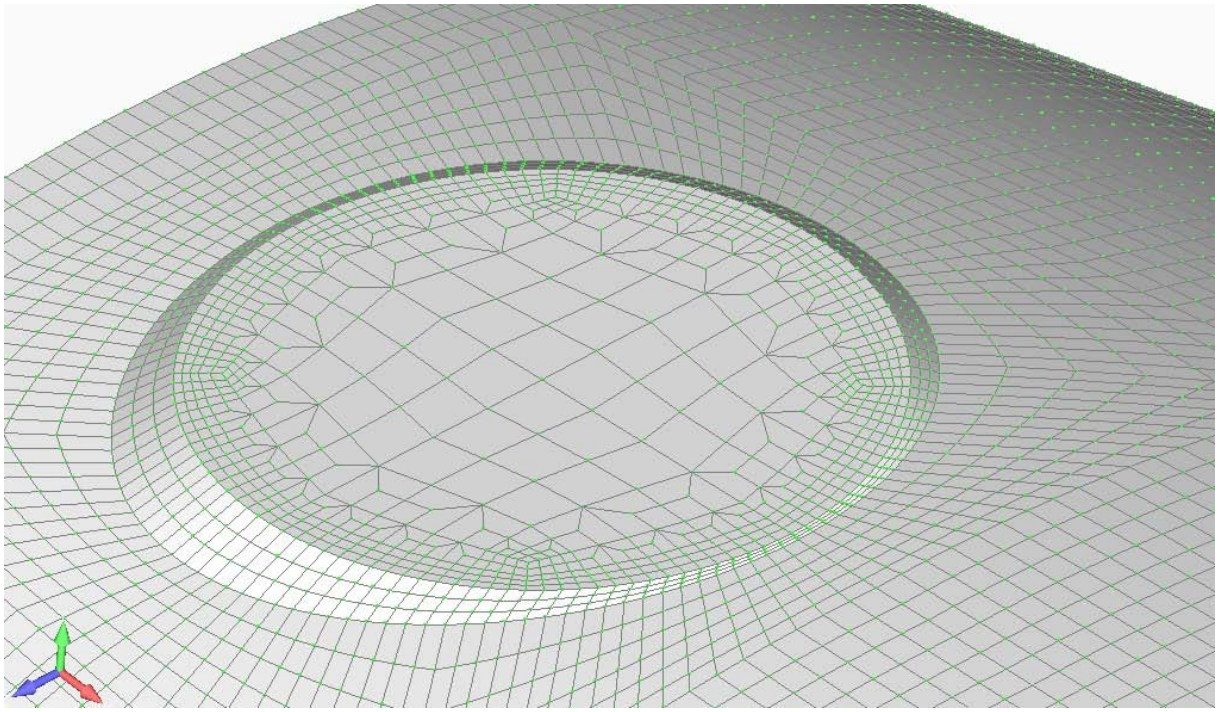


Slika 22 – Detalj mreže glavnog rebra - provrt

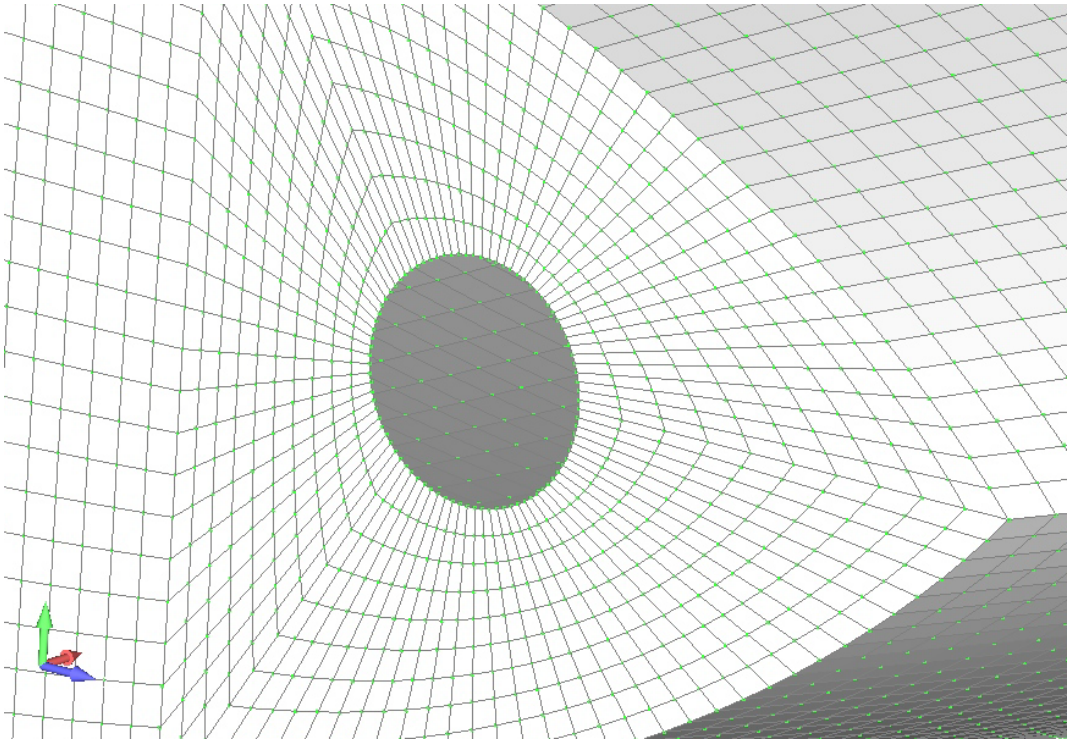
Mreža stražnjeg dijela



Slika 23 – Mreža stražnjeg dijela



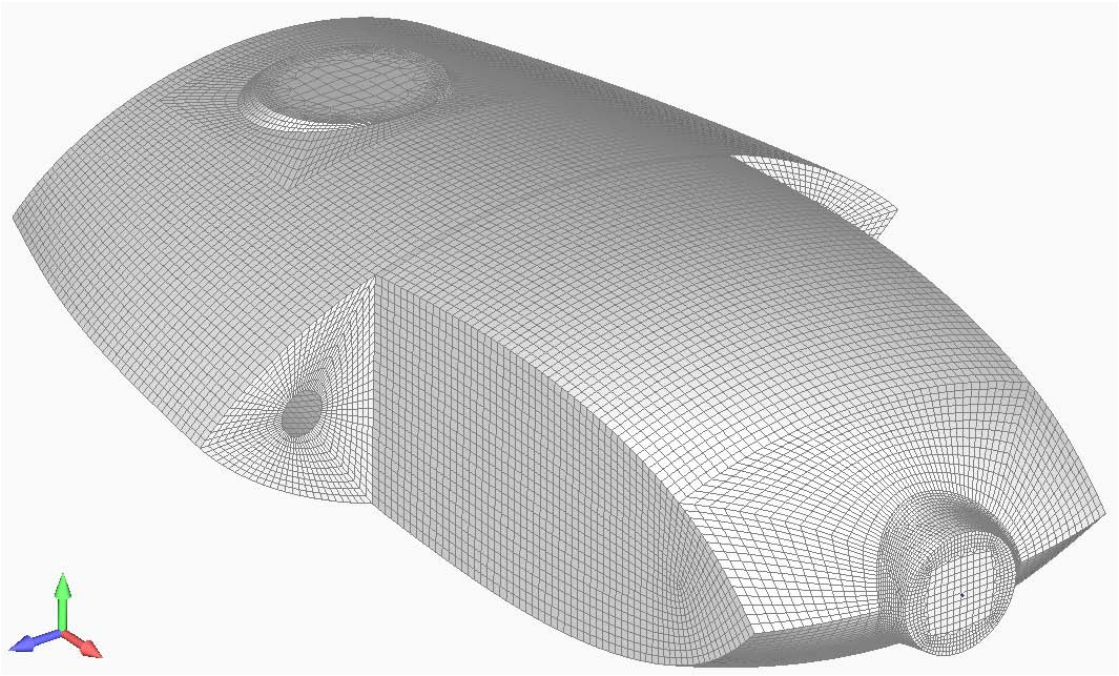
Slika 24 – Detalj mreže stražnjeg dijela – gornji prozor



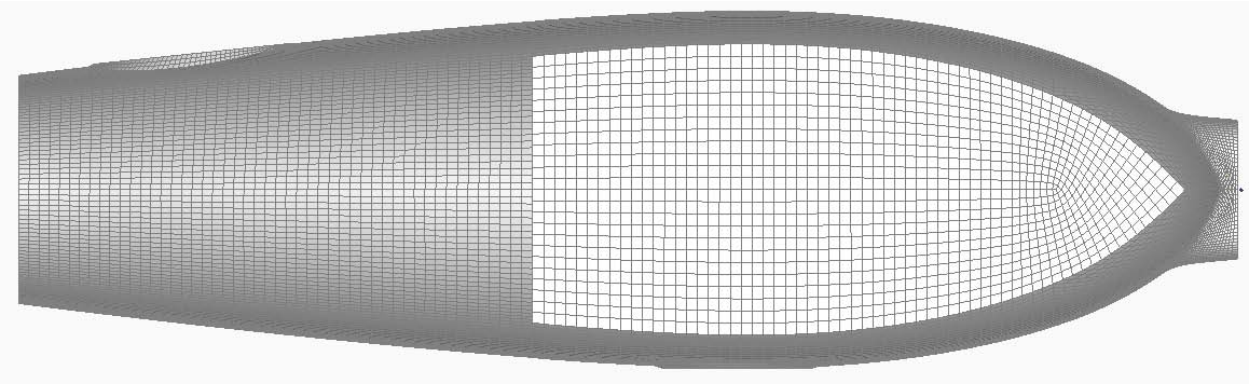
Slika 25 – Detalj mreže stražnjeg dijela - provrt

Konačna mreža ronilice

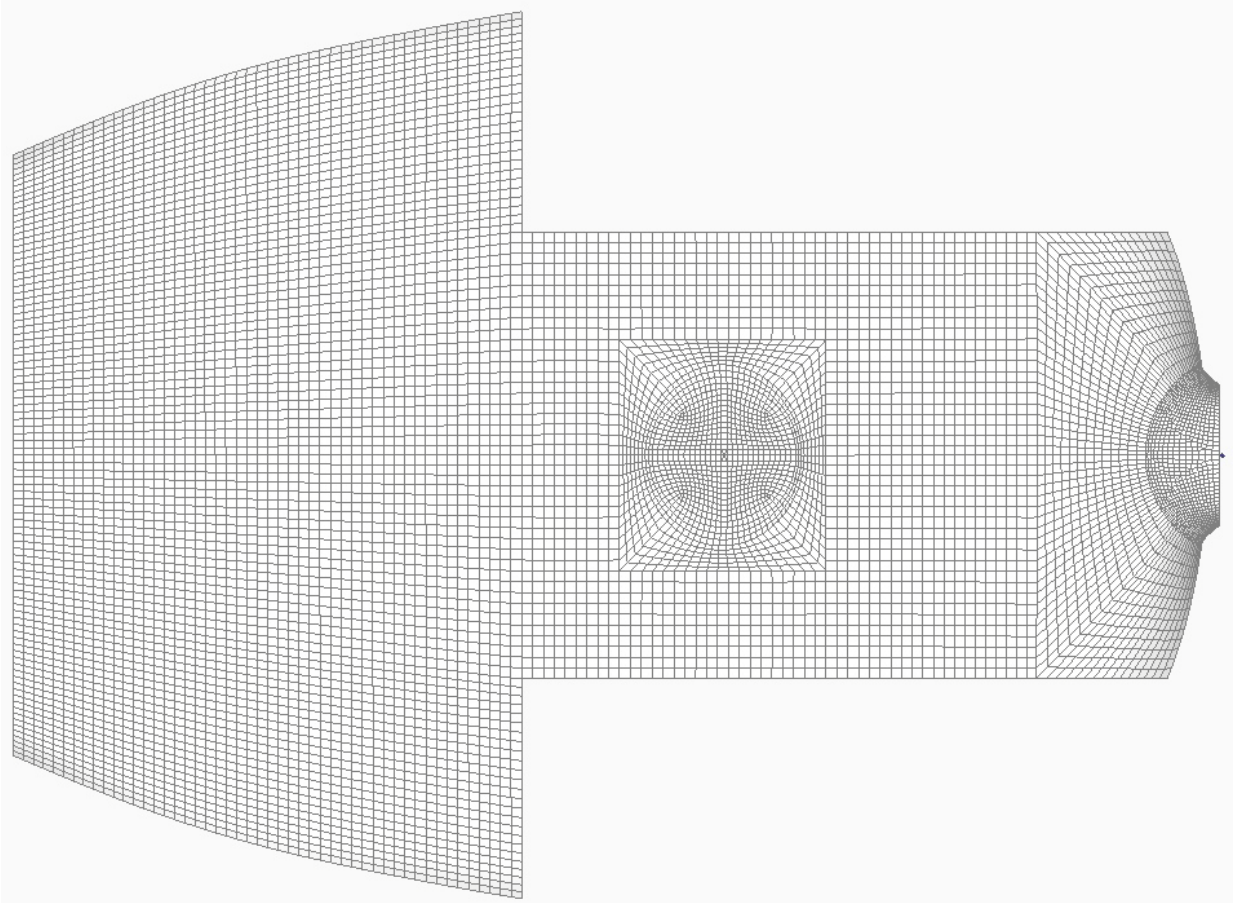
Kada su definirane mreže rebra te prednjeg i stražnjeg dijela, dijelovi modela mogu se učitati zajedno i postaviti u sastavljeni položaj ronilice. Naredbom *Check Coinident Nodes* mogu se provjeriti međusobni položaji čvorova na mjestima u kojima bi dijelovi trebali biti spojeni. Odabirom opcije *Merge Coincident Entities* i ukoliko je potrebno, smanjenjem tolerancije njihove udaljenosti, preklapajući čvorovi bit će spojeni i mreža ronilice završena. Prikaz konačne mreže ronilice može se vidjeti na sljedećim slikama:



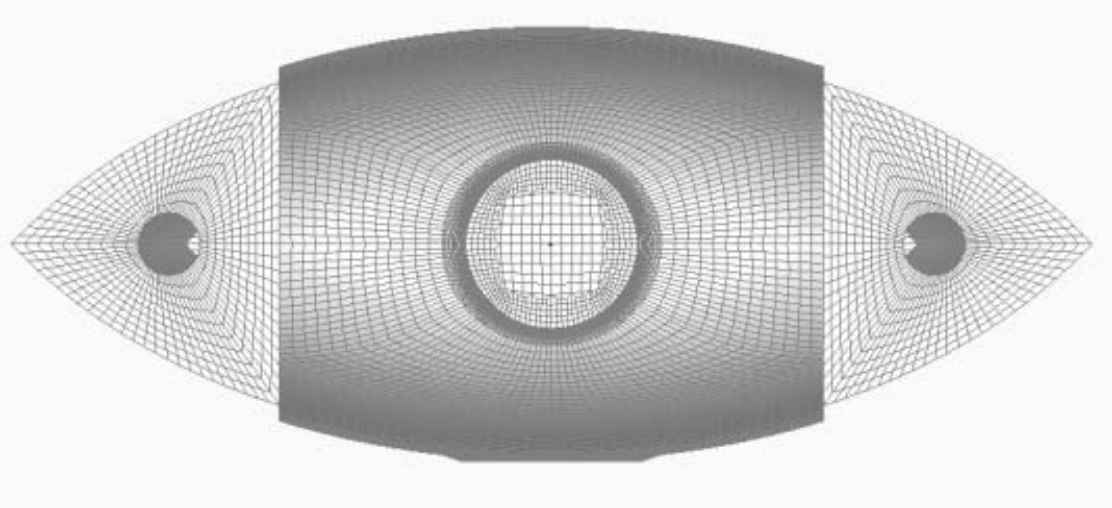
Slika 26 - Konačna mreža ronilice



Slika 27 – Konačna mreža ronilice – bočni prikaz



Slika 28 – Konačna mreža ronilice - donja strana

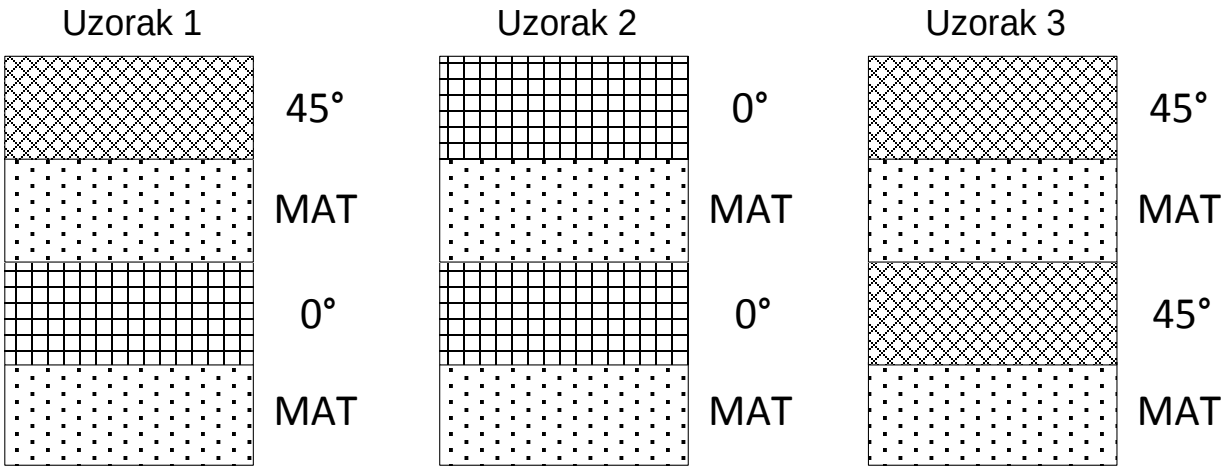


Slika 29 - Konačna mreža ronilice - prednja strana

Eksperimentalno ispitivanje savojne čvrstoće

Prvu, prototipnu verziju ronilice napravili su studenti članovi tima Bubblebee II u jednoj od radionica Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a kao materijal je korišten kompozit staklenih vlakana i epoksidne smole. No prije izrade ronilice, od toga istoga materijala izrađene su epruvete kojima se željelo eksperimentalnim putem ispitati utjecaj orijentacije staklenih vlakana po sloju laminata.

Postupkom ručnog laminiranja, slijednog nanošenja slojeva vlakana i smole, napravljene su ploče od kojih su potom izrezane epruvete dimenzija 42 x 21 x 2 mm. Korištene su dvije vrste staklenih vlakana: mat vlakna u kojima je usmjerenje vlakana nasumično te roving vlakna u kojima su vlakna tkana u dva smjera pod kutem od 90°. Od tri ploče svaka je imala drugačiju kombinaciju orijentacije vlakana po slojevima, kao što je prikazano na slici 30:



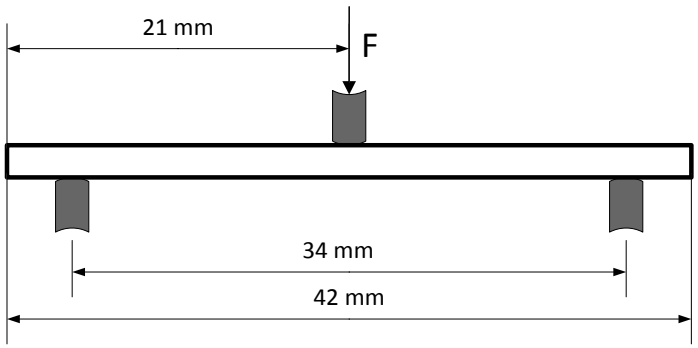
Slika 30 - Orijentacija slojeva uzoraka po debljini

Ovako pripremljene epruvete podvrgnute su ispitivanju savojne čvrstoće. Ispitivanja je vršio kolega Božidar Bušetinčan na uređaju za ispitivanje savojne čvrstoće u Laboratoriju za nemetale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U tablici 2 su navedene osnovne značajke ispitne epruvete:

Parametar	Iznos	Mjer. jed.
Dužina	42	[mm]
Širina	21	[mm]
Debljina	2	[mm]
Gustoća	2	[g/cm^3]
Masa	3,53	[g]

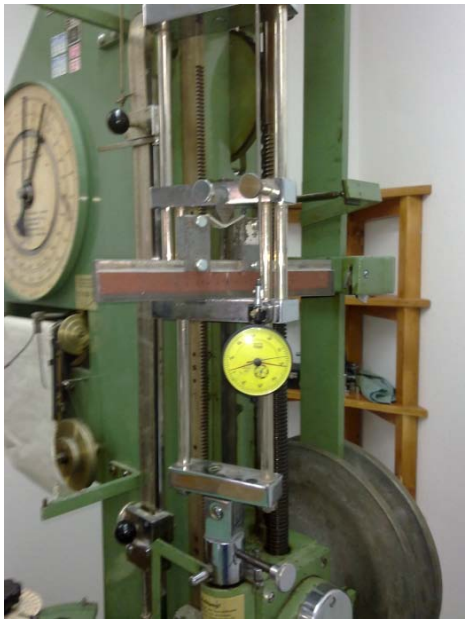
Tablica 2- Značajke ispitne epruvete

Ispitivanje savojne čvrstoće se provodi tako da se epruveta postavi na dva oslonca te se po sredini epruvete vrši pritisak posmakom opteretnog elementa prema epruveti. Postupak se provodi do konačnog pucanja epruvete, a kao izlazni podatak se dobiva ovisnost sile kojom se na epruvetu djeluje o progibu opterećenog dijela epruvete, tj. posmaku opteretnog elementa. Postupak ispitivanja savojne čvrstoće prikazan je na slici 31:



Slika 31 - Ispitivanje savojne čvrstoće epruvete

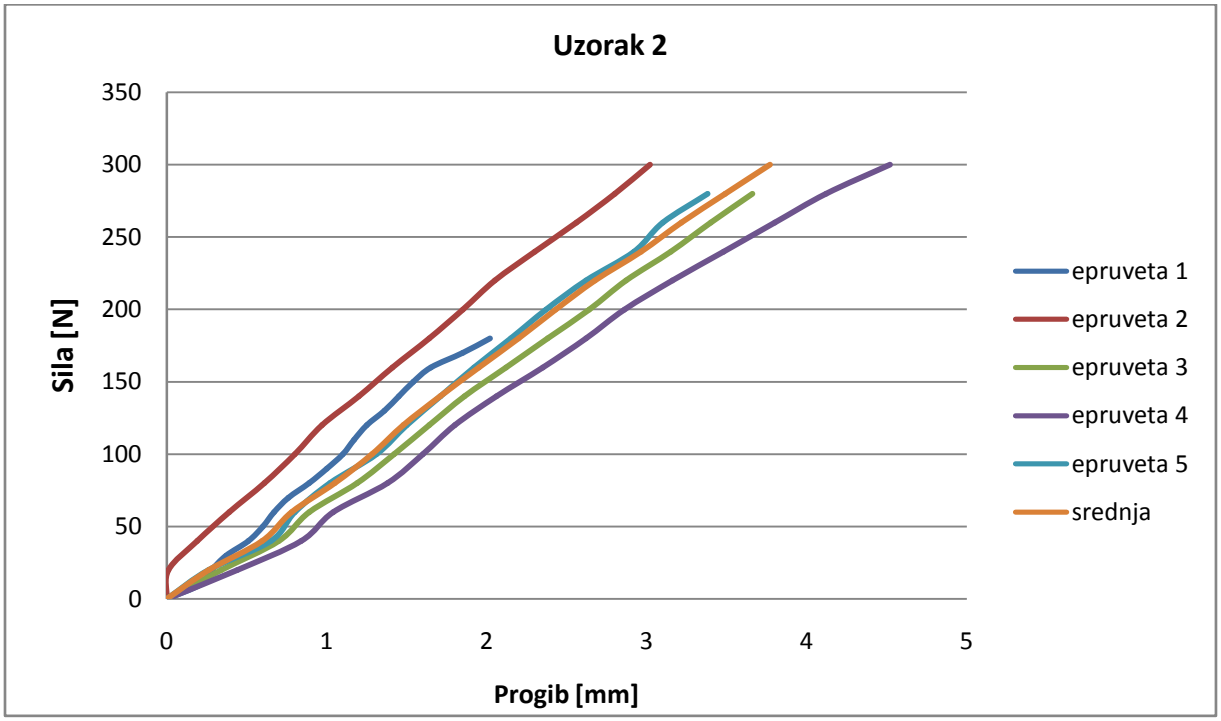
Ispitivanje savojne čvrstoće vršeno je na uređaju za ispitivanje VEP Thuringer Industriewerk Rauenstein, model 2132 iz 1961. godine prikazanom na slici 32:



Slika 32 - Uređaj za ispitivanje savojne čvrstoće

Kako je uređaj za ispitivanje na kojemu se vršilo ispitivanje nešto starijeg datuma proizvodnje, zbog nepostojanja digitalnog komparatora se umjesto kontinuiranog opterećenja tijekom ispitivanja rade kratke stanke. Budući se kazaljka koja pokazuje trenutnu silu stalno giba, teško je točno očitati silu. Stoga su određeni periodi od po 10 ili 20 N na kojima je gibanje na par sekundi zaustavljano kako bi se mogla očitati točna vrijednost. Unatoč tome što gibanje nije posve kontinuirano, ovako kratke stanke ne bi smjele značajno utjecati na ispitivanje, pa se dobiveni rezultati smatraju referentnima.

Cilj ispitivanja bio je pronaći najizdržljiviju kombinaciju orijentacija slojeva. Kako najveća naprezanja materijala djeluju u uzdužnom smjeru epruvete, tj. pod 0°, bilo je i za očekivati da će uzorak 2 pokazati najbolja svojstva. Rezultati ispitivanja pet epruveta za uzorak 2 prikazani su na slici 33:



Slika 33 - Rezultati experimentalnih ispitivanja

Uočljivo je kako rezultati za epruvetu 1 znatno odskaču od ostalih epruveta. Ti rezultati su stoga odbačeni, a prema vrijednostima rezultata za ostale četiri epruvete ucrtana je krivulja srednje vrijednosti ispitivanja. Ta krivulja će se koristiti kod usporedbe rezultata eksperimentalnih i numeričkih ispitivanja.

Sa dostupnim rezultatima eksperimentalnih ispitivanja i definiranim vrstama opterećenja i zahtjevima na materijal, može se preći na numerički dio analize. Ovaj dio izvršiti će se u aplikaciji LSTC LS-DYNA.

Značajke numeričkog ispitivanja

Izradom kvalitetne mreže ronilice zadovoljen je tek osnovni preduvjet za dobivanje točnih rezultata. Pažnju sada treba posvetiti parametrima ispitivanja. Ispitivanje će se vršiti pomoću metode konačnih elemenata koristeći programski alat LSTC LS-DYNA namijenjen analizi u vremenskoj domeni.

Kako bi se moglo prijeći na analizu, potrebno je prvo postaviti numerički model i provjeriti točnost modela usporedbom numeričkih rezultata sa realnim, eksperimentalnim ili empirijskim saznanjima. U ovom slučaju dostupni su bili rezultati ispitivanja savojne čvrstoće korištenog materijala pa će radi usklađivanja numeričkog modela sa realnim fizičkim sustavom prvo biti simulirano to ispitivanje i pomoću te simulacije potvrđen model analize.

Da bi se krenulo sa izradom numeričkog modela potrebno je prvo proučiti uvjete u kakvim će se ronilica nalaziti kako bi se mogla odrediti opterećenja na pojedine segmente konstrukcije, te materijal ronilice kako bi se moglo definirati ponašanje ronilice pod djelovanjem tog opterećenja.

Opterećenje ronilice

Kada se ronilica tek postavi u fluid, pretpostavimo vodu, ona će plutati i na nju će djelovati sila gravitacije s jedne strane te sila uzgona vodene mase s druge strane. Kolikom mjerom će ronilica pod utjecajem sile teže djelovati na vodenu površinu, tolikom silom će preko uronjenog volumena ronilice djelovati i vodena masa na ronilicu.

No kako ronilica počinje zaranjati, vodena masa će se naći svuda oko nje i tlačno djelovati na sve površine koje omeđuju zabrtvljene volumene u kojima ima zraka. Povećanjem dubine povećavati će se i težina vode iznad ronilice te će se tlačno djelovanje mijenjati prema formuli:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

gdje je p vrijednost hidrostatskog tlaka kojim fluid gustoće ρ djeluje u gravitacijskom polju akceleracije iznosa g pri dubini h. Ako se za vrijednost gustoće fluida u kojem se ronilica nalazi uzme vrijednost gustoće vode, iznos akceleracije za Zemljino gravitacijsko polje te vrijednost maksimalne radne dubine zahtjevane za ronilicu od 150 m, dobiti ćemo vršnu vrijednost pritiska koji ronilica mora podnijeti:

$$p = \rho \cdot g \cdot h = 1000\,{}^{kg}/_{m^3} \cdot 9.81\,{}^{m}/_{s^2} \cdot 150m = 1471500Pa \approx 1.5MPa$$

Materijal ronilice

Kao što je ranije navedeno, na materijal zabrtvljenog dijela ronilice koji prima svo opterećenje i jedan je od ključnih čimbenika izdržljivosti strukture, postavljeni su visoki zahtjevi. Na svako tijelo u tekućini djeluje uzgon. To je sila koja tijelo uronjeno u tekućini potiskuje uvis, a po iznosu je jednaka težini tekućine što ga tijelo istisne svojim obujmom. U skladu s djelovanjem hidrostatskog tlaka, te sile

uzgona i težine u uronjenom stanju, na materijal ronilice se postavljaju zahtjevi visoke čvrstoće i krutosti te male mase.

Čvrstoća materijala bitna je radi konačne izdržljivosti i maksimalnog dopuštenog opterećenja na strukturu. Što će materijal biti čvršći to će ronilica moći funkcionirati na većim dubinama. Kako je radno okruženje ronilice pod vodom, nepromjenjivost volumena je također veoma bitna. U svom izvornom stanju ronilica je blago pozitivno plovna, te ukoliko dođe i do relativno malih deformacija, zbog malih dimenzija kućišta, ronilica bi izgubila istisninu i počela nepovratno tonuti. U tom pogledu je kritično svojstvo i masa. Dok je sila uzgona ono što ronilicu sprječava da potone, masa pod utjecajem gravitacije ronilicu vuče prema većoj dubini. Zbog toga težina ronilice uvijek mora biti manja od sile uzgona.

Jedna skupina materijala pokazala se posebno prikladna za ovakvu namjenu: kompoziti. Kompoziti omogućavaju izradu dijelova vrlo složenih oblika, posjeduju malu masu, otpornost na koroziju, a uz pravilan odabir i raspored matrice i ojačala, mogu se postići i odlična mehanička svojstva i dimenzijska postojanost.

Za ronilicu Bubblebee II odlučeno je kako će se izraditi verzije kućišta od dva različita materijala:

- kompozitni materijal sa roving staklenim vlaknima kao ojačalom i epoksidnom smolom kao vezivom
- kompozitni materijal sa dvo-osnim prošivenim ugljičnim vlaknima kao ojačalom i epoksidnom smolom kao vezivom

Kako je razlika ova dva materijala u vrsti ojačala, tako će i razlika njihovih svojstava biti ovisna o svojstvima ojačala. Ugljična vlakna posjeduju znatno bolja mehanička svojstva od staklenih tako da su i kompoziti sa ugljičnim vlaknima bolji od onih sa staklenima. No budući su ugljična vlakna i osjetno skuplja od staklenih, za izradu prototipova ronilice te za primjene u manje zahtjevnim uvjetima rada, staklena vlakna predstavljaju bolji izbor.

LSTC LS-DYNA v971

Podrijetlo LS-DYNA-e seže do 3D FEA (Finite element analysis) programa DYNA3D, kojega je razvio dr. John O. Hallquist 1976.g. kako bi simulirao udar FUFO (Full Fusing Option) nuklearne bombe prilikom ispuštanja pri malim visinama. U to vrijeme nije postojao drugi 3D software koji bi mogao simulirati takav udar, a 2D software nije bio pogodan. I dok je projekt FUFO bombe naposljetku otkazan, razvoj DYNA3D softvera se nastavio. [3]

LS-DYNA je kod opće namjene koji se koristi metodom konačnih elemenata za analizu dinamike deformacija velikih struktura, uključujući strukture spregnute fluidima. Glavna metodologija rješavanja nelinearnih dinamičkih problema temelji se na eksplicitnoj vremenskoj integraciji. Implicitni rješavač (solver) je također dostupan, uključujući strukturnu analizu i prijenos topline, no uz određena ograničenja. Kontaktno – udarni algoritam omogućava jednostavno rješavanje zahtjevnih problema te omogućava analizu prijenosa topline duž kontaktnih površina. [4]

Diskretizacija strukture omogućena je postojanjem velikog broja vrsta konačnih elemenata: tetraedara sa četiri čvora i solid elemenata sa osam čvorova, dvo-čvornih grednih elemenata, tro i četvero-čvornih ljuskastih elemenata, solid ljuskastih elemenata sa osam čvorova, štapnih i membranskih elemenata, diskretnih elemenata i krutih tijela. Za svaku vrstu elemenata dostupan je i određeni broj numeričkih formulacija. [4]

Specijalizirane mogućnosti simulacije i analize zračnih jastuka, senzora i sigurnosnih pojaseva učinile su LS-DYNA-u važnim alatom u automobilskoj industriji. Prilagođeno umrežavanje dostupno za ljuskaste elemente je često korišteno u kovačkim procesima štancanja. LS-DYNA trenutno sadrži približno stotinu konstitutivnih modela i deset jednadžbi stanja kojima pokriva širok spektar materijala i njihovog ponašanja. LS-DYNA se koristi na velikom broju super računala, radnih stanica i osobnih računala, a pojavom pristupačnijih višeprocesorskih sustava njena primjena postala je još češća. [4]

Nelinearni problemi podrazumijevaju neku od, a ponekad i sve sljedeće značajke:

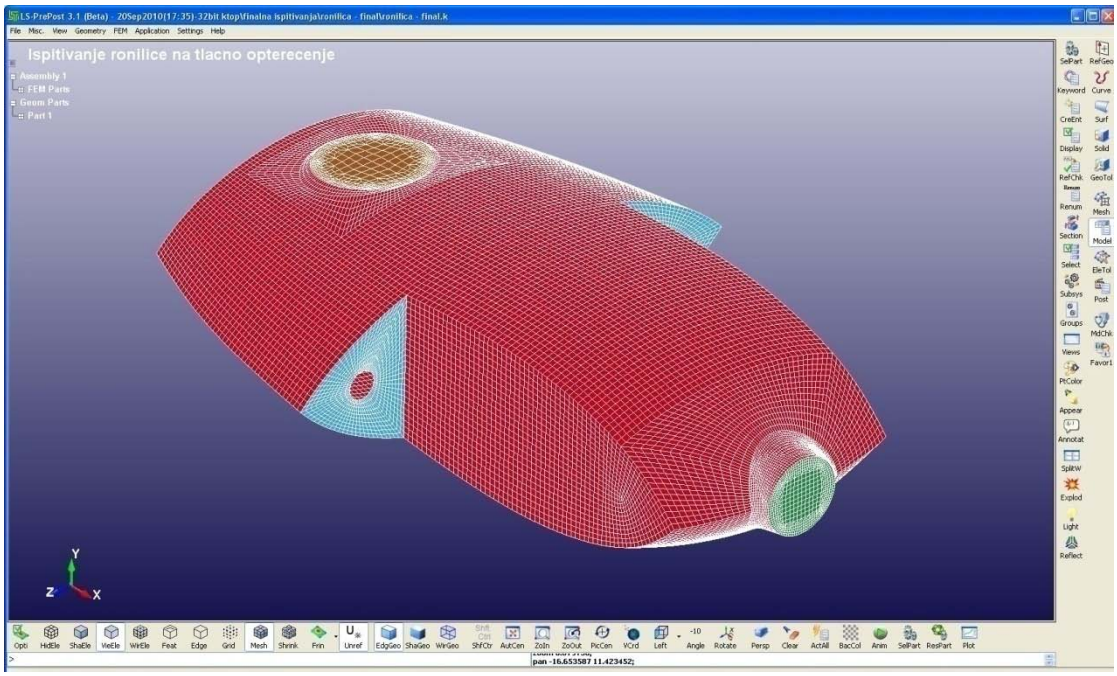
- promjenjive rubne uvjete (kao što je promjena kontakta među elementima)
- velike deformacije (npr. gužvanje velikih metalnih komada)
- nelinearno ponašanje materijala (materijali koji se ne ponašaju idealno-elastično)

Tranzijentna dinamika podrazumijeva događaje izrazito kratkog trajanja, koji se odvijaju velikom brzinom, gdje su inercijske sile od značajne važnosti. Neki od primjera su:

- eksplozije
- sudari
- postupci štancanja

LS-DYNA se sastoji od jedne izvršne datoteke preko koje se pristupa svim opcijama aplikacije. Problemi su zadani u potpunosti tekstualno i zapisuju se u jednostavnom ASCII formatu koji može biti mijenjan u bilo kojoj aplikaciji za uređivanje teksta. Svaka opcija prisutna u LS-DYNA-i ima svoju naredbu, keyword, preko čijih parametara se opisuje numerički model i postupak analize. Osim tekstualnog zadavanja, svi parametri analize mogu se postavljati i pomoću LSTC-ovog pre/postprocesora LS PrePost. [3]

LS PrePost je napredan alat za uređivanje modela prije i pregledavanje rezultata nakon analize. Iako dolazi zajedno u paketu, nije vezan uz LS-DYNA rješavač nego je dostupan i zasebno te za njega nije potrebna licenca. Grafičko sučelje je (pogotovo u novijim verzijama) pregledno i intuitivno i čini rad znatno bržim i lakšim naspram starog tekstualnog sučelja. Nove grafičke mogućnosti čine LS-DYNA-u još moćnijom aplikacijom koja pruža cjelovito rješenje za pripremu geometrijskih modela, mreže konačnih elemenata, numeričke izračune i analize rezultata simulacija.



Slika 34 - LS PrePost

Metoda konačnih elemenata

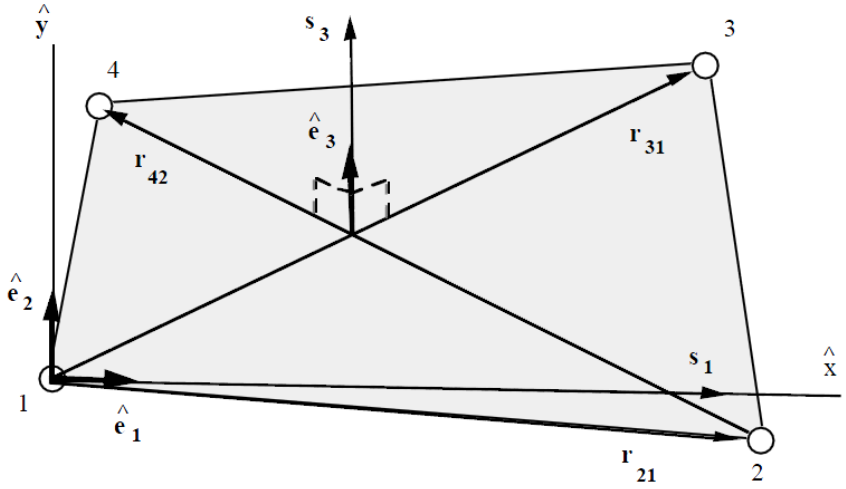
Metoda konačnih elemenata je numerička metoda koja je nezaobilazna u analizi inženjerskih konstrukcija. Temelji se na fizičkoj diskretizaciji, pri čemu se kontinuum s beskonačno stupnjeva slobode zamjenjuje diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s konačnim brojem stupnjeva slobode. Rješavanje inženjerskih problema često se svodi na rješavanje sustava algebarskih jednadžbi s velikim brojem nepoznatih veličina u diskretnim točkama, što je naročito pogodno rješavati računalima. Metoda konačnih elemenata primjenjuje se u mehanici deformabilnih tijela za rješavanje statičkih i dinamičkih problema, te jednako tako za rješavanje općih problema polja kao što su proračuni temperaturnih polja, strujanja te analiza elektromagnetskih polja. [5]

Metoda konačnih elemenata približna je numerička metoda. Svaki njezin korisnik treba imati na umu da su dobivena rješenja približna, a realnim vrijednostima mogu se približiti samo uz pravilan izbor proračunskog modela i uz pravilno odabrane konačne elemente koji su u mogućnosti opisati realni fizikalni proces. Da bi to bilo moguće, potrebno je razumjeti fizikalno ponašanje konstrukcije koja se analizira te poznavati teorijsku osnovu konačnih elemenata, a na taj način i ograničenja njihove primjene. Osim toga, korisnik mora biti u stanju dobivene rezultate kritički analizirati. U protivnom, rješenja dobivena pomoću raspoloživih programskih paketa mogu biti pogrešna, što može, na primjer pri analizi konstrukcija, dovesti do pogrešne procjene stanja naprezanja i deformacije, a to može ugroziti čvrstoću i stabilnost konstrukcije. [5]

Ljuskasti konačni elementi i Belytschko – Lin – Tsay formulacija

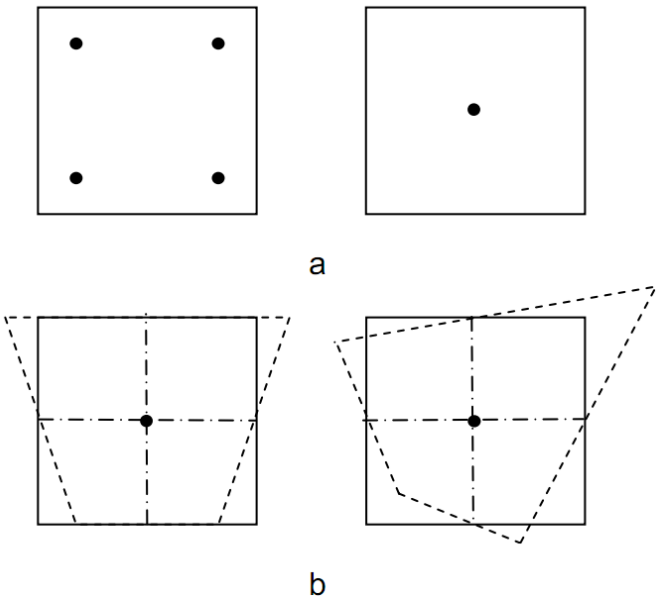
Ljuskasti konačni elementi ravninski su (2D) elementi koji se tvore povezivanjem četiri čvora linijama, stranicama elementa. Ovisno o redosljedu povezivanja prve dvije točke definira se koordinatni sustav elementa a četvrom usmjerenje normale na površinu. Kod kompozitnih materijala koje u velikoj mjeri odlikuju izražena ortotropna svojstva, orijentacija elementa je jako bitna budući se prema njoj najčešće određuje i smjer svojstava materijala. Kod ljuskastih elemenata će tako smjer lokalne osi X određivati uzdužni (indeks 1 ili a), a osi Y poprečni smjer (indeks 2 ili b).

U strukturnoj analizi koriste se, uz ostale, i ljuskasti elementi sa šest stupnjeva slobode u svakom od čvorova – tri translacije i tri rotacije, što im omogućava dobro opisivanje svih vrsta gibanja. Iako svi solid modeli mogu biti opisani solid elementima, umrežavanje tanjih modela solid elementima zbog potrebe smanjivanja elemenata radi dobivanja dobre mreže, uzrokuje velik broj elemenata (ako želimo da elementi zadrže omjere veličina ploha). Za ovakve primjene su ravninski ljuskasti elementi idealni te predstavljaju odlično rješenje za analizu tankostjenih konstrukcija. Za razliku od „debelih“ ljuskastih elemenata sa osam čvorova, u formulaciji ravninskih ljuskastih elemenata smične deformacije u smjeru debljine elementa su zanemarene. U oba slučaja zadana debljina elementa je jednolika po cijeloj površini.



Slika 35 - Ravninski ljuskasti element sa koordinatnim sustavom [4]

Najčešće korištena formulacija ljuskastih elemenata je tzv. Belytschko – Lin – Tsay. Kako numerički proračuni često zahtijevaju znatnu količinu računalnih resursa i vremena, želja je korisnika to vrijeme i hardverske zahtjeve što više smanjiti. Ovaj element prvotno je uveden u LS-DYNA-u kao računalno ekonomičnija formulacija od svog prethodnika. Prednost Belytschko – Lin – Tsay elementa počiva na nekoliko matematičkih pojednostavljenja koja ga čine znatno učinkovitijim od ostalih tipova ljuskastih elemenata. No upravo zbog tih pojednostavljenja ima i nekih nedostataka. Pri uvijanju elementa dolazi do velikog gubitka krutosti te stoga nije prikladan za uvijane strukture. Kako koristi samo jednu integracijsku točku na površini elementa, moguće je da dođe do deformacija no bez adekvatnog pomaka čvorova. Primjer jedne ovakve pogreške, zbog svog oblika poznate i kao *hourglass*, prikazan je na slici 36. [6]



Slika 36 – Primjer *hourglassinga* (dolje) na usporedbi potpuno integriranog i pod-integriranog ljuskastog elementa (gore) [6]

Radi kompleksnosti geometrije ronilice i debljine stjenki od svega 5 mm te jednostavne, ravne površine debljeg glavnog rebra, za primjenu na ronilici su odabrani upravo ljuskasti elementi. Kompleksnost geometrije ronilice zahtjeva upotrebu velikog broja konačnih elemenata što zahtjeva velike hardverske resurse. Upravo zbog ograničenosti resursa i svoje efikasnosti, kao formulacija elementa odabrana je Belytschko – Lin – Tsay formulacija.

Materijalni modeli

U LS-DYNA-u je uključen velik broj materijalnih modela. To su formulacije koje numerički opisuju ponašanje određenog materijala i koriste se pri simulaciji u numeričkim proračunima. Kako bi rezultati proračuna bili ispravni, potrebno je pažljivo odabrati materijalni model. Kompoziti, kao materijal nastao povezivanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava u svrhu dobivanja jednog materijala sa svojstvima kakva nema niti jedan od konstituenata sam za sebe, zahtjevaju posebnu pažnju pri odabiru materijalnog modela.

Prema preporuci LSTC-a [7] i u skladu sa svojstvima korištenih materijala i uvjeta opterećenja, razmatrano je pet materijalnih modela:

- mat 22 – composite_ damage
- mat 54,55 – enhanced_composite_damage
- mat 58 – laminated_composite_fabric
- mat 59 – composite_failure_shell_model

Početnim proučavanjem podataka koje je za svaki pojedini materijalni model potrebno definirati, ustanovljeno je kako materijalni model 58 - laminated_composite_fabric zahtjeva definiranje parametara do kojih ne bi bilo moguće doći. Stoga je odmah u početku odlučeno kako će taj materijalni model biti isključen iz daljnjeg razmatranja.

Kriteriji popuštanja materijalnih modela izneseni u nastavku preuzeti su iz LS-DYNA Theory manuala [4] dostupnog na internetskim stranicama proizvođača: http://www.lstc.com/manuals.htm za materijalne modele 22, 54 i 55, te iz članka „Crashworthiness Analysis with Enhanced Composite Material Models in LS-DYNA – Merits and Limits“ [8] za model 59.

Model 22 – composite damage

Kod modela 22, pet parametara materijala se koristi pri određivanju tri kriterija popuštanja:

- S_1 - uzdužna vlačna čvrstoća
- S_2 - poprečna vlačna čvrstoća
- S_{12} - smična čvrstoća
- C_2 - poprečna tlačna čvrstoća
- α -parametar nelinearnosti kod smika

S_1, S_2 ,S_{12}, i C_2 su dobiveni mjerenjem čvrstoće materijala, dok je α definiran mjerenjima smičnih naprezanja i deformacija. Kod naprezanja u ravnini, deformacija je definirana preko naprezanja kao:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1}(\sigma_1 - \upsilon_1\sigma_2)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2}(\sigma_2 - \upsilon_2\sigma_1)$$

$$2\varepsilon_{12} = \frac{1}{G_{12}}\tau_{12} + \alpha\tau_{12}^3$$

gdje treća jednadžba definira nelinearni parametar smičnog naprezanja α .

Izraz za modus oštećenja uvećan za smični izraz:

$$\bar{\tau} = \frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha\tau_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha S_{12}^4}$$

što predstavlja omjer smičnog naprezanja i smične čvrstoće.

Kriterij popuštanja matrice je određen iz:

$$F_{\text{matrix}} = \left(\frac{\sigma_2}{S_2}\right)^2 + \bar{\tau}$$

gdje je popuštanje pretpostavljeno kad god je $F_{matrix} > 1$. Ako je $F_{matrix} > 1$, materijalne konstante E_2, G_{12}, υ_1 i υ_2 su postavljene u nulu.

Kriterij kod tlačnog popuštanja dan je izrazom

$$F_{comp} = \left(\frac{\sigma_2}{2S_{12}}\right)^2 + \left[\left(\frac{C_2}{2S_{12}}\right)^2 - 1\right]\frac{\sigma_2}{C_2} + \bar{\tau}$$

gdje je popuštanje pretpostavljeno kad god je $F_{comb} > 1$. Ako je $F_{comb} > 1$, materijalne konstante E_2, υ_1 i υ_2 su postavljene u nulu.

Konačni uvjet pucanja uvjetovan pucanjem vlakna je:

$$F_{\text{fiber}} = \left(\frac{\sigma_1}{S_1}\right)^2 + \bar{\tau}$$

gdje je popuštanje je pretpostavljeno kad god je $F_{\text{fiber}} > 1$. Ako je $F_{\text{fiber}} > 1$, konstante E_1, E_2, G_{12}, υ_1 i υ_2 su postavljene u nulu.

Modeli 54 i 55 – enhanced composite damage

Materijalni modeli 54 i 55 primjenjivi su samo za ravninske ljuskaste elemente, a formulacija im je jako slična. Osnovna razlika među njima je kriterij popuštanja: model 54 koristi kriterij popuštanja Chang matrice, dok model 55 koristi Tsay – Wu kriterij. Pomoću ovoga materijala mogu se zadati proizvoljni ortotropni materijali, npr. jednosmjerni slojevi u strukturi ljuskastih elemenata. Po izboru mogu biti određeni razni kriteriji popuštanja bazirani prema prijedlozima Chang – Chang ili Tsay – Wu. Također, popuštanje pod pritiskom je posebno razmotreno.

Karakteristike Tsay – Wu kriterija [10]:

- kriterij ne indicira način na koji će sloj popustiti već samo naprezanje kod kojeg će sloj popustiti
- kriterij je postavljen samo jednim izrazom što dovodi do znatno jednostavnije primjene
- ako treba odrediti najveće dopušteno naprezanje, kriterij uvijek daje dva rješenja – jedno s pozitivnim, a drugo s negativnim predznakom

Chang - Chang kriterij dan je kako slijedi:

- za vlačno opterećenje vlakana

$$\sigma_{aa} > 0 \quad then \quad e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t}\right)^2 + \beta\left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right) - 1 \begin{cases} \geq 0 \; failed \\ < 0 \; elastic \end{cases},$$

$$E_a = E_b = G_{ab} = \nu_{ba} = \nu_{ab} = 0.$$

- za tlačno opterećenje vlakana

$$\sigma_{aa} < 0 \quad then \quad e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 \; failed \\ < 0 \; elastic \end{cases},$$

$$E_a = \nu_{ba} = \nu_{ab} = 0.$$

- za vlačno opterećenje matrice

$$\sigma_{bb} > 0 \quad then \quad e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 \; failed \\ < 0 \; elastic \end{cases},$$

$$E_b = \nu_{ba} = 0. \quad \rightarrow G_{ab} = 0.$$

- za tlačno opterećenje matrice

$$\sigma_{bb} < 0 \quad then \quad e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right]\frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 \; failed \\ < 0 \; elastic \end{cases}$$

$$_b = \nu_{ba} = \nu_{ab} = 0. \quad \rightarrow G_{ab} = 0$$
$$X_c = 2Y_c \quad for\ 50\%\ fiber\ volume$$

Prema Tsay – Wu kriteriju, uvjeti za vlačno i tlačno popuštanje vlakana su definirani jednako kao i preama Chang – Chang kriteriju. Kriterij popuštanja za vlačno i tlačno opterećenje matrice je dan prema izrazu:

$$e_{md}^2 = \frac{\sigma_{bb}^2}{Y_c Y_t} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 + \frac{(Y_c - Y_t)\sigma_{bb}}{Y_c Y_t} - 1 \begin{cases} \geq 0 \; failed \\ < 0 \; elastic \end{cases}$$

Za $\beta = 1$ dobiven je izvorni Hashinov kriterij za vlačno opterećena vlakna. Za $\beta = 0$ dobiven je kriterij najvećih naprezanja koji se pokazao točniji u usporedbi sa eksperimentalnim rezultatima. [4]

Popuštanje se odvija na jedan od četiri moguća načina:

1. Ako je DFAILT = 0 – do popuštanja dolazi kada je zadovoljen Chang – Chang kriterij za vlačno opterećenje vlakana
2. Ako je DFAILT > 0 – do popuštanja dolazi kada je produljenje uslijed vlačnog opterećenja veće od DFAILT ili manje od DFAILC
3. Ako je EFS > 0 – do popuštanja dolazi ako je efektivno produljenje veće od zadanog
4. Ako je TFAIL > 0 – do popuštanja dolazi prema zadanom vremenskom koraku

Kada dođe do popuštanja u svim slojevima kompozita, element se briše, a elementi koji dijele čvorove s izbrisanim elementima postaju fronta pukotine.

Model 59 – composite failure shell model

Za materijalni model 59 je teško naći informacije. Model 59 se spominje u LSTC LS-DYNA Keyword manualu gdje su objašnjeni parametri koji mu se zadaju, no nema spomena o kriterijima popuštanja niti ikakvih drugih dodatnih podataka. Najviše podataka o tom modelu može se naći u gore navedenom članku o analizi popuštanja kompozitnih materijalnih modela iz kojega je prenesen ovaj isječak i to za formulacije materijalnih modela 59a i 59b:

Model 59a je elasto – plastični materijal u kojemu su vrijednosti čvrstoća u svakom smjeru ortotropije, kao i smična čvrstoća, korišteni za definiranje funkcije popuštanja. To rezultira ovojnicom podijeljenom na površine koja vrijedi samo za ljuskaste elemente. Površine popuštanja su:

$$\begin{aligned} \sigma_{1t} &= \alpha X_T \\ \sigma_{1c} &= -X_c \\ \sigma_{2c} &= \alpha Y_t \\ \sigma_{2c} &= -Y_c \\ \sigma_{12} &= \sigma_{23} = \sigma_{13} = \pm S_c \end{aligned}$$

Potrebno je napomenuti kako je poprečni smik također uključen u materijal 59b. Postavljanje α na određene vrijednosti omogućava ograničenje vlačnog dijela površine popuštanja nakon prvog vlačnog popuštanja. Ako je odabran α =1, materijal će se ponašati idealno elasto – plastično sa početnim vrijednostima čvrstoća za površine popuštanja. α =0 postavlja sve vlačne čvrstoće u nulu nakon popuštanja, te samo tlačna opterećenja i smik mogu biti prenošeni nakon odgovarajućeg popuštanja.

Materijal 59b je elasto – plastični materijal za koji se iznosi čvrstoća koriste kako bi se formirala elipsoidna površina sa osima paralelnim osima ortotropije. Izraz za površinu popuštanja glasi:

$$f = \frac{4[\sigma_1 - \frac{X_t - X_c}{2}]^2}{(X_t + X_c)^2} + \frac{4[\sigma_2 - \frac{Y_t - Y_c}{2}]^2}{(Y_t + Y_c)^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{S_c^2} + \frac{\sigma_{13}^2}{S_c^2} + \frac{\sigma_{23}^2}{S_c^2} - 1$$

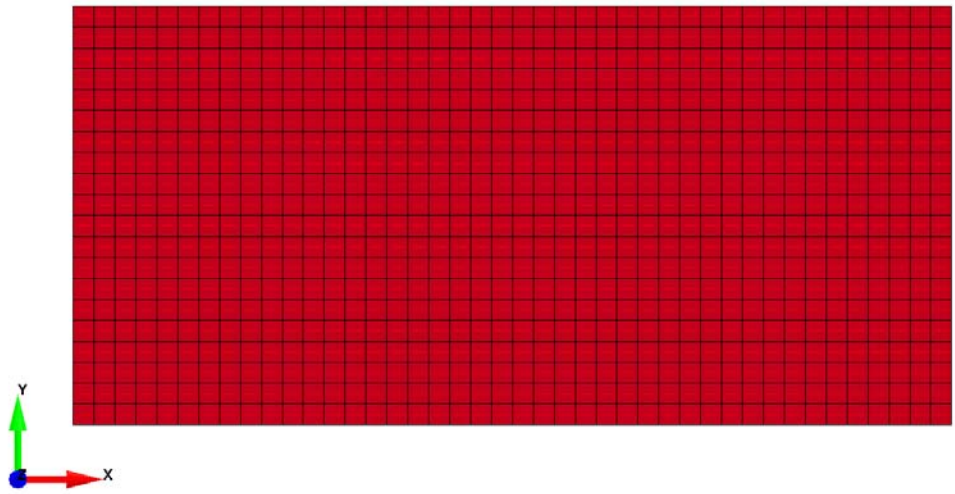
Ova površina je slična, ali ne identična Tsay – Wu kriterij. Konkretnije, ova formulacija ne sadrži vezu između ortotropnih smjerova. Čini se kako bi ovaj model dobro funkcionirao sa materijalima čiji se iznosi čvrstoća ne razlikuju znatno.

Ispitivanje savojne čvrstoće u LS-DYNA-i

Numerička analiza savojne čvrstoće epruveta

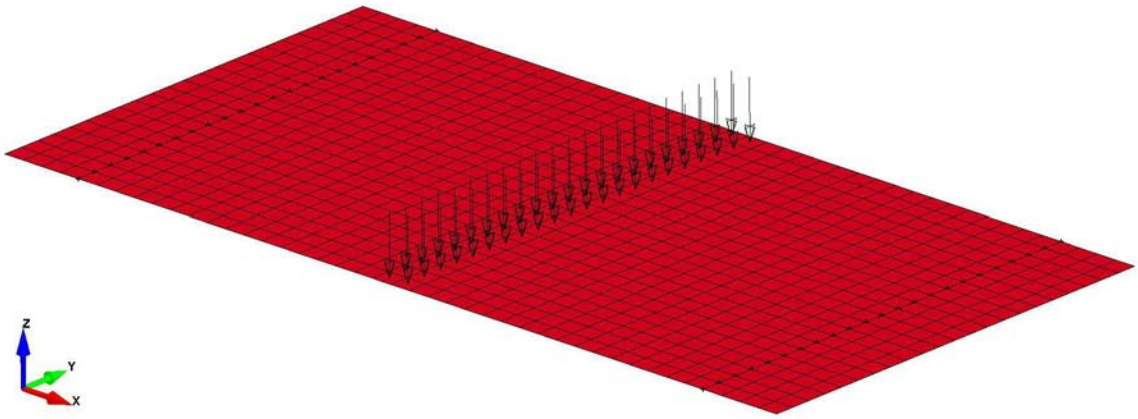
Radi usporedbe i kontrole ponašanja materijala u numeričkoj analizi, pomoću LS-DYNA-e će biti simulirano ispitivanje savojne čvrstoće epruveta od kompozita staklenih vlakana i epoksidne smole. U radu će umjesto tekstualnog načina unosa biti korišten LS PrePost 3.1.

Postupak započinje generiranjem mreže ljuskastih elemenata koja će predstavljati epruvetu. Veličina elemenata biti će 1 mm^2 tako da će po dužini epruvetu opisivati 42 elementa, dok je po širini radi postizanja simetrije mreže, jedan red elemenata izbačen tako da će po širini model biti opisan sa 20 elemenata.



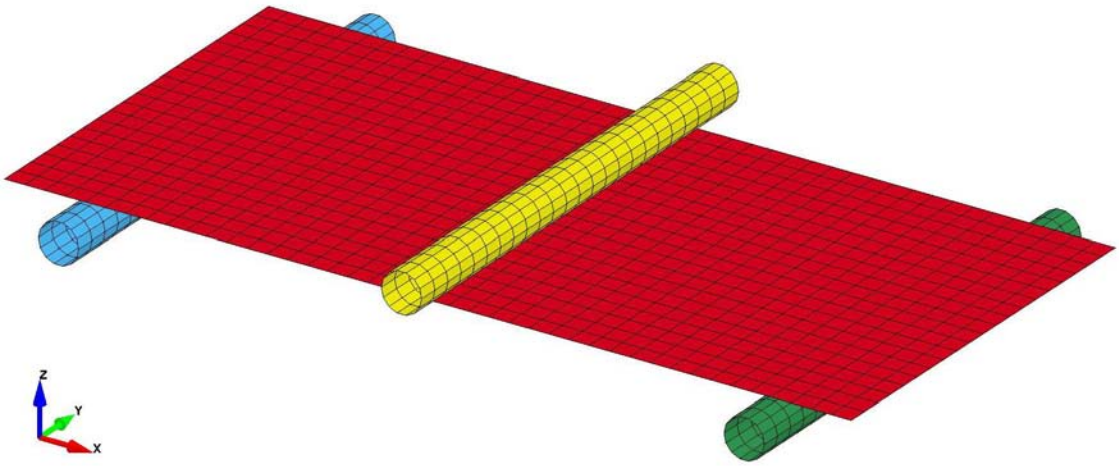
Slika 37 – Model epruvete

Postoji nekoliko načina na koje opterećenja i rubni uvjeti mogu biti definirani. Jedna od opcija je pomoću opterećenja i rubnih uvjeta zadanih tako da djeluju na elemente/čvorove. Na ovaj način opterećenje će biti definirano tlakom koji će se primjeniti na središte elementa. Po sredini epruvete bit će odabran niz elemenata koji će biti opterećeni tlakom i tako simulirati opteretni element pri ispitivanju. Oslonci mogu biti simulirani postavljanjem SPC (Single Point Constraint) rubnih uvjeta. SPC rubni uvjeti priječe gibanje po z-osi na 2 linije čvorova, u smjeru osi x svaki po 4 mm udaljen od ruba epruvete.



Slika 38 – Epruveta sa pritiskom i SPC osloncima

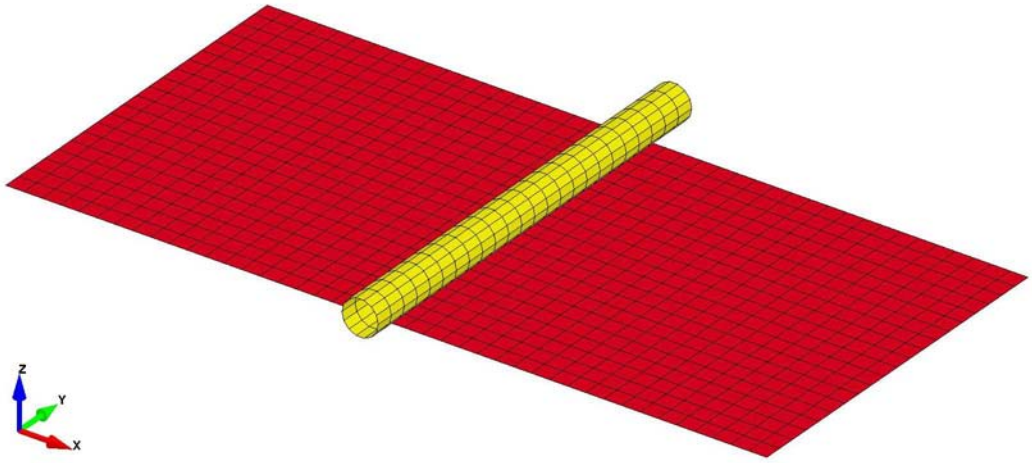
Drugi način je da se pokuša što vjernije prikazati stvarni postupak ispitivanja. Umjesto modeliranja opteretnog elemenata i oslonaca preko tlaka i rubnih uvjeta, oni mogu biti izravno modelirani. U tom slučaju između njih i epruvete će se definirati kontaktne površine te zadati pomak opteretnog elementa koji vrši pritisak na epruvetu kao i u stvarnom ispitivanju. Kako bi se spriječilo deformiranje oslonaca i opteretnog elementa te uštedilo proračunsko vrijeme, oni će biti definirani kao *rigid* materijal koji predstavlja kruto, nedeformabilno tijelo.



Slika 39 – Epruveta sa solid elementima

U konačnici je za ispitivanje odlučeno upotrijebiti kombinaciju ova dva rješenja tako da će oslonci biti definirani preko rubnih uvjeta a opteretni element napravljen kao kruto tijelo. Za definiranje rubnih uvjeta korištena je ključna riječ (keyword) SPC_SET, dok je kontakt između opteretnog elementa i epruvete definiran ključnom riječi CONTACT_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE. Svojstva epruvete (formulacija elemenata, debljina, broj integracijskih točaka kroz debljinu...) su zadana pomoću SECTION_SHELL ključne riječi a za definiranje krutog materijala opteretnog elementa upotrijebljen je

materijalni model 20 – rigid. Gibanje opteretnog dijela u smjeru z-osi definirano je preko ključne riječi BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID za krivulju opterećenja koja se kreće u negativnom smjeru osi. Radi osiguranja gibanja opteretnog elementa samo u pretpostavljenom smjeru, na svim njegovim čvorovima spriječeno je svako gibanje osim translacije po z-osi.



Slika 40 – Epruveta sa solid opterećenjem i SPC osloncima

Osim gore navedenih postavki, potrebno je definirati i određeni broj drugih parametara ispitivanja kojima će biti određen njegov tijek i točnost te ispis podataka. Da bi se omogućilo testiranje numeričkog modela uneseni su podaci za proizvoljni materijal i materijalni modul. Kako bi se spriječile veće numeričke pogreške i osiguralo realno ponašanje modela, iskorištena je simetrija te su po čvorovima na osi simetrije u smjeru x-osi spriječene translacije u y-smjeru a po čvorovima na osi simetrije u smjeru y-osi u x-smjeru:



Slika 41 - Epruveta sa x i y simetralama

Analiza numeričke stabilnosti

Hourglassing

Hourglassing je pojava ne-fizikalnih deformacija koja ne uzrokuju niti naprezanja niti izduženje elementa a pojavljuju se kod elemenata sa manjim brojem integracijskih točaka, kao što su i ljuskasti elementi. Početni rezultati numeričkog proračuna nisu odgovarali realnom ponašanju epruvete, što je bilo posve iznenađujuće za ovako jednostavan model i režim opterećenja, te je potrebno bilo uvesti još neke elemente osiguranja točnosti. Po prvom pogledu na rezultate proračuna, očito je bilo kako je na modelu došlo do pojave *hourglassinga* koji je posve iskrivio rezultat. Kako bi se ova pojava spriječila ili smanjila na prihvatljivu razinu, aktivirana je HOURGLASSING ključna riječ koja kontrolira i sprječava njegovu pojavu.

Prigušenje

Nastavak pojave fizikalno nerealnih rezultata, uz razinu *hourglassinga* na nuli, pokazao je kako problem još uvijek nije riješen. Pri detaljnijoj analizi gibanja središnjih čvorova primjećeno je kako u određenom trenutku ispitivanja dolazi do pojave oscilatorne promjene njihovih brzina čija amplituda s vremenom sve više raste sve dok ne dovede do pucanja epruvete. Zato je aktivirana i ključna riječ DAMPING_GLOBAL kojom se nastojalo prigušiti gibanja uzrokovana dinamičkim efektima te tako spriječiti nestabilno ponašanje ispitnog modela.

Trajanje simulacije

No kako ni time problem oscilacija nije riješen i rezultati još uvijek nisu bili fizikalno ispravni, daljnje rješavanje problema okrenulo se razmatranju fizike koju LS-DYNA pri izračunu uključuje u proračun. Kako je za ove proračune potrebno dosta hardverskih resursa, a povećanje trajanja ispitivanja uzrokuje višestruko povećanje vremena proračuna, česta je praksa kod ispitivanja realnih situacija numeričkim metodama, smanjiti trajanje ispitivanja na veličine ispod jedne sekunde. U takvim okolnostima može doći do velikih vibracija uzrokovanih naglom promjenom oblika i/ili udarom. Kako je u ispitivanju na čvorovima došlo do pojave brzina i njihove oscilacije (uz postupno povećavanje amplitude), trebalo je provjeriti mogućnost utjecaja prebrzog odvijanja postupka na rezultate. Rezultati su provjereni povećanjem trajanja ispitivanja 2, 4, 8 i 16 puta pri čemu su u svim verzijama oscilacije i dalje bile prisutne, te je vrijeme trajanja simulacije odbačeno iz razmatranja uzroka nestabilnosti.

Dodatni rubni uvjeti i preciznost rješavača

Sljedećim pokušajem stabiliziranja proračuna odlučeno je uvesti dodatna ograničenja gibanja preko rubnih uvjeta. Daljnje ograničavanje translacija u x, y, ili z-osi više nije bilo moguće bez komprimitiranja rezultata tako da je bilo potrebno utjecati na rotacije oko tih istih osi. Zbog mjestimične pojave nerealnog uvijanja dijelova epruvete oko x-osi na kontaktu sa opteretnim elementom, prvi korak je bio onemogućavanje x-rotacije. Iako se postiglo poboljšanje rezultata, konačno rješenje i dalje nije bilo zadovoljavajuće. Posljednji mogući korak, budući je y-rotacija ključna za cijeli postupak i ne smije se ograničavati, bilo je ograničavanje z-rotacije. Kako je blago zakretanje elemenata oko z-osi tijekom deformacije normalna pojava, primjena ove mjere izbjegavana je iz straha od prevelikog utjecaja na smična naprezanja u epruveti, ali kako niti jedna od prijašnjih mjera nije postigla željene rezultate, bilo je

potrebno ispitati i tu mogućnost. Postavljanje rubnog uvjeta rotacije po z-osi na središnji element ili na središnju liniju elemenata nije davalo pozitivne promjene. No postavljanjem rubnog uvjeta na sve čvorove epruvete konačno su postignuti u potpunosti ispravni rezultati ispitivanja, ali i to tek primjenom rješavača dvostruke preciznosti.

Stabilna numerička analiza omogućila je prelazak na sljedeći stupanj ispitivanja: primjenu različitih materijalnih modela i usporedbu njihovih numeričkih rješenja sa eksperimentalnim.

Odabir i definiranje postavki materijalnog modela

Potrebno je odabrati materijalni model pri kojemu će krivulja sila – progib iscrtana prema rezultatima numeričke analize biti što sličnija krivulji sila – progib za srednju vrijednost rezultata eksperimentalnih ispitivanja.

Kako bi materijalni model bio odgovarajući, preduvjet je da i mehanička svojstva materijala unesena u definiciju materijala budu istovjetna ili barem što sličnija materijalu za koji je model namijenjen. Budući su kompoziti grupa materijala sa izrazito velikim brojem mogućih kombinacija konstituenata i njihovog slaganja (od kojih će ovisno o postupku i kvaliteti izrade i svaki materijal unutar kombinacije biti međusobno drugačiji), teško je odrediti njihova točna svojstva. To je moguće samo ukoliko se za svako od mehaničkih svojstava izvrši potrebno ispitivanje sa primjerkom korištenog materijala, što je prilično skupo i dugotrajno. Iz tog razloga su dostupni podaci o mehaničkim svojstvima kompozita malobrojni i šturi. Podaci za sličan materijal preuzeti su iz knjige Eriana A. Armaniosa: „Composite materials fatigue and fractue“ (ASTM, 1997.g., 483.str.) [9] i prikazani u tablici 3. Vrijednost maksimalne deformacije matrice prije popuštanja preuzeta je iz skripte „Mehanika kompozitnih materijala“ profesora Ivice Smojvera sa Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu [10].

Svojstvo	Iznos	Mjer. jed.
Gustoća	2,0	[g/cm^3]
Poissonov omjer	0,144	
Uzdužni modul elastičnosti	26600	[MPa]
Poprečni modul elastičnosti	26600	[MPa]
Modul smičnosti	4630	[MPa]
Uzdužna vlačna čvrstoća	422	[MPa]
Poprečna vlačna čvrstoća	422	[MPa]
Uzdužna tlačna čvrstoća	410	[MPa]
Poprečna tlačna čvrstoća	410	[MPa]
Smična čvrstoća	121	[MPa]
Najveće produljenje vlakana	1,85	[%]
Najveće skraćenje vlakana	2	[%]
Najveća deformacija matrice	8,5	[%]
Najveći kut deformacije	8,48	[%]

Tablica 3 - Svojstva materijala prema "Composite materials fatigue and fracture"

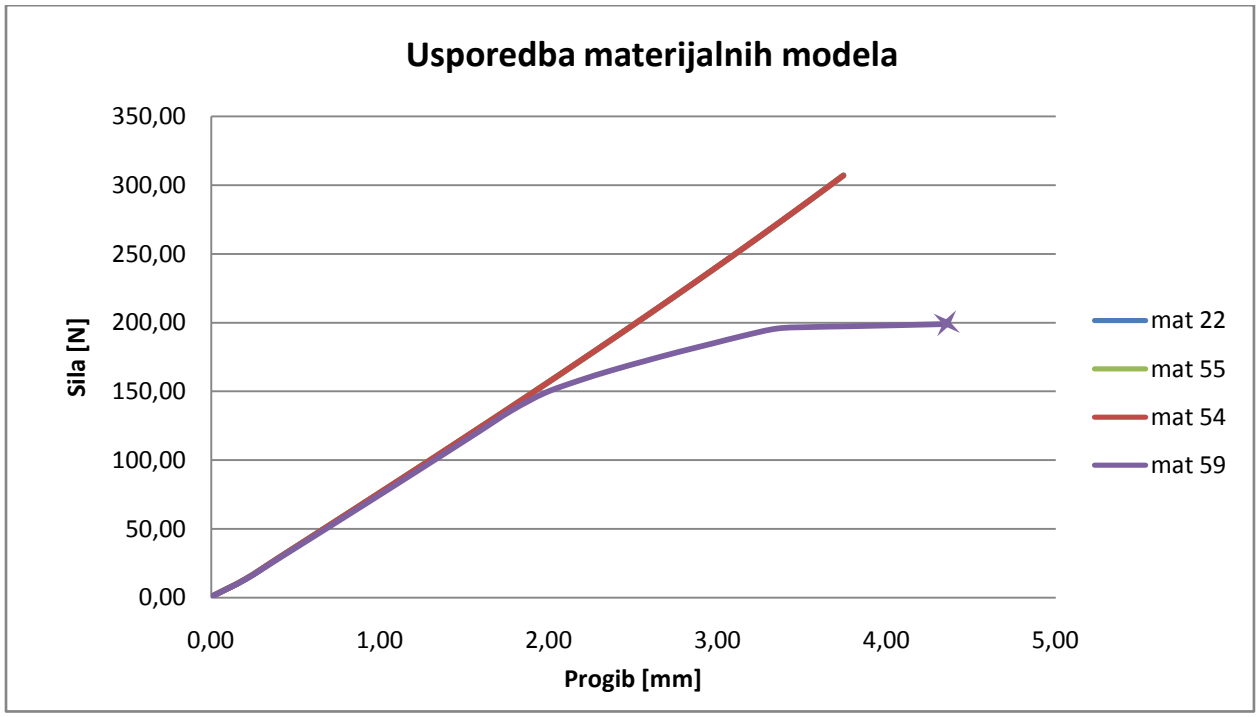
Početna svojstva se uvrštavaju u jedan od materijalnih modela i njihove vrijednosti prilagođavaju sve dok se ne postigne krivulja sila – progib što sličnija krivulji srednje vrijednosti eksperimentalnih ispitivanja. Kako je krivulja ustvari pravac, glavni utjecaj na sličnost imati će nagib koji je definiran modulom elastičnosti u uzdužnom (x) smjeru. Zbog jednakog rasporeda vlakana u uzdužnom i poprečnom smjeru, sukladno je korigiran i modul elastičnosti u poprečnom (y) smjeru. Znatnim smanjenjem modula elastičnosti nagib linije se sve više smanjivao, no kako je vrijednost modula elastičnosti postajala sve bliža vrijednosti modula smičnosti, tako je modul smičnosti počeo imati sve veći utjecaj na rezultate. U realnom materijalu modul smičnosti je uvijek osjetno manji od modula elastičnosti te do ovakve situacije ne dolazi. Stoga je i vrijednost modula smičnosti smanjena. Daljnjim smanjivanjem i usklađivanjem vrijednosti modula elastičnost i modula smičnosti postignuto je zadovoljavajuće preklapanje krivulja.

Uvrštavanjem korigiranih vrijednosti modula elastičnosti i modula smičnosti u četiri uspoređivana materijalna modela, formirana su četiri numerička modela identična u svim postavkama osim u materijalnom modelu. Usporedbom rezultata ispitivanja vidljivo je kako se krivulje tri od četiri modela gotovo u potpunosti preklapaju. No velika razlika uočena je u njihovoj duljini, odnosno najvećem postignutom opterećenju. Detaljnijom usporedbom parametara zadanih u svakom od materijalnih modela te njihovih kriterija popuštanja, ustanovljeno je kako je materijalni model 54 prvi popustio zbog zadovoljenja uvjeta maksimalnih deformacija vlakna u uzdužnom smjeru. Budući se točka pucanja nalazila znatno ispod točke pucanja pri eksperimentalnom ispitivanju, maksimalno produljenje vlakana bilo je potrebno povećati. Povećanjem maksimalnog produljenja vlakana do iznosa 3.6% postignuta je točka pucanja materijala gotovo identična ispitivanom materijalu.

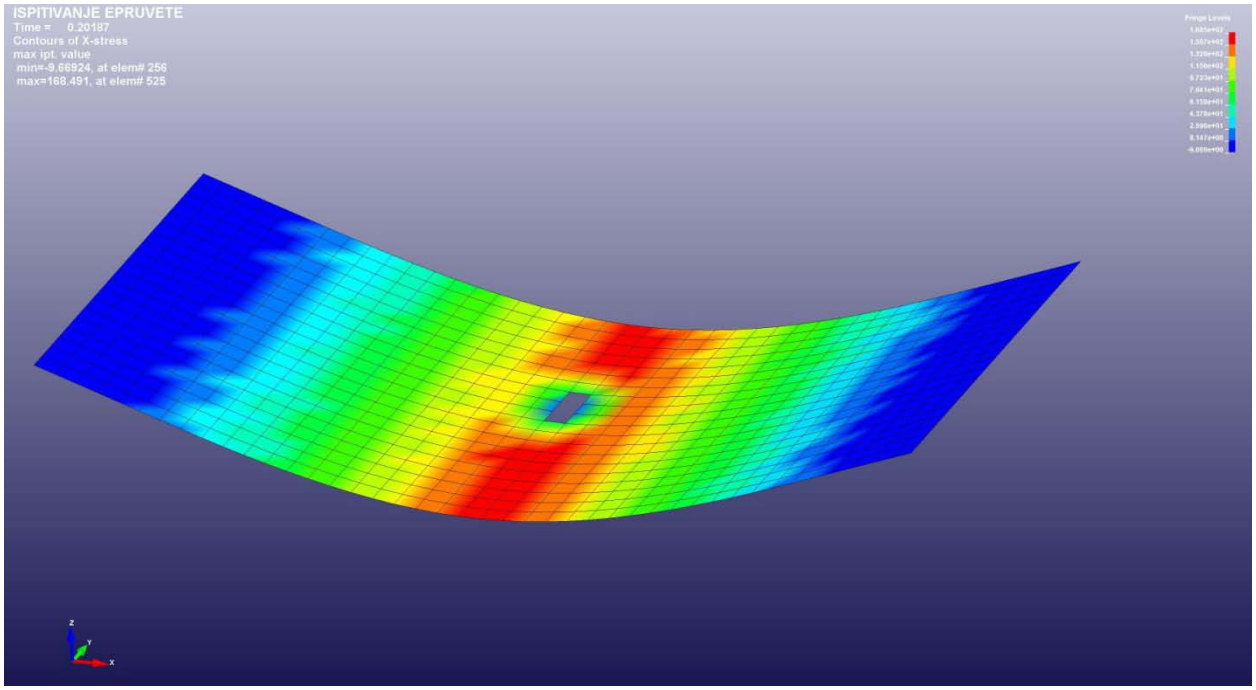
Kako bi i ostali materijalni modeli zadovoljili uvjete popuštanja potrebno je bilo smanjiti parametre vlačne čvrstoće. Sukladno njima smanjene su i vrijednosti tlačne i smične čvrstoće na 170, odnosno 50 MPa. Materijalni modeli 22 i 55 su smanjenjem vrijednosti čvrstoća zadovoljili svoje kriterije popuštanja te su popustili u istoj točki kao i materijalni model 54. Postizanjem istog trenutka popuštanja, njihove krivulje su se u potpunosti preklopile, kao što je vidljivo na slici 42. Budući krivulja materijalnog modela 59 znatno odskače od preostale tri krivulje i od krivulje srednje vrijednosti rezultata eksperimentalnih ispitivanja, to rješenje je odbačeno kao netočno. Krivulja materijalnog modela 59 je na označenom mjestu na slici 42 ručno prekinuta.

Budući su sva tri materijalna modela: 22, 54 i 55 postigla identične rezultate i zadovoljavajuće opisali rezultate ispitivanja savojne čvrstoće, sva tri bi sasvim sigurno poslužila u daljnjem ispitivanju. Osnovne razlike njihovih formulacija su u kriterijima popuštanja elementa. U definiciji modela 22 kriterij popuštanja moguće je modificirati, osim iznosima čvrstoća materijala, samo preko parametra nelinearnosti kod smika, α. Model 55 koji koristi Tsay Wu kriterije popuštanja određuje koristeći samo jedan izraz što je znatno jednostavnije, no zato omogućava upotrebu samo čvrstoća materijala kao kriterija popuštanja. Materijal 54 pak uz korištenje naprezanja pri određivanju kriterija omogućuje i definiranje vrijednosti najvećeg istezanja kompozita i to za vlačni i tlačni smjer vlakana, smik te matricu. Kako je za materijal 59 teško naći detaljniji opis, teško je reći zašto njegovo ponašanje odstupa od ostala tri materijala, no svakako nije prikladan za primjenu u daljnjim ispitivanjima. Kako su preostala tri materijalna modela pokazala gotovo identično ponašanje, konačan odabir pada na materijalni model 54 koji uz to što se pokazao stabilnijim od ostalih modela, omogućuje detaljniju definiciju modela

uvrštavanjem vrijednosti najvećeg istezanja koja bi se mogla pokazati veoma korisnom pri daljnjoj analizi ronilice.

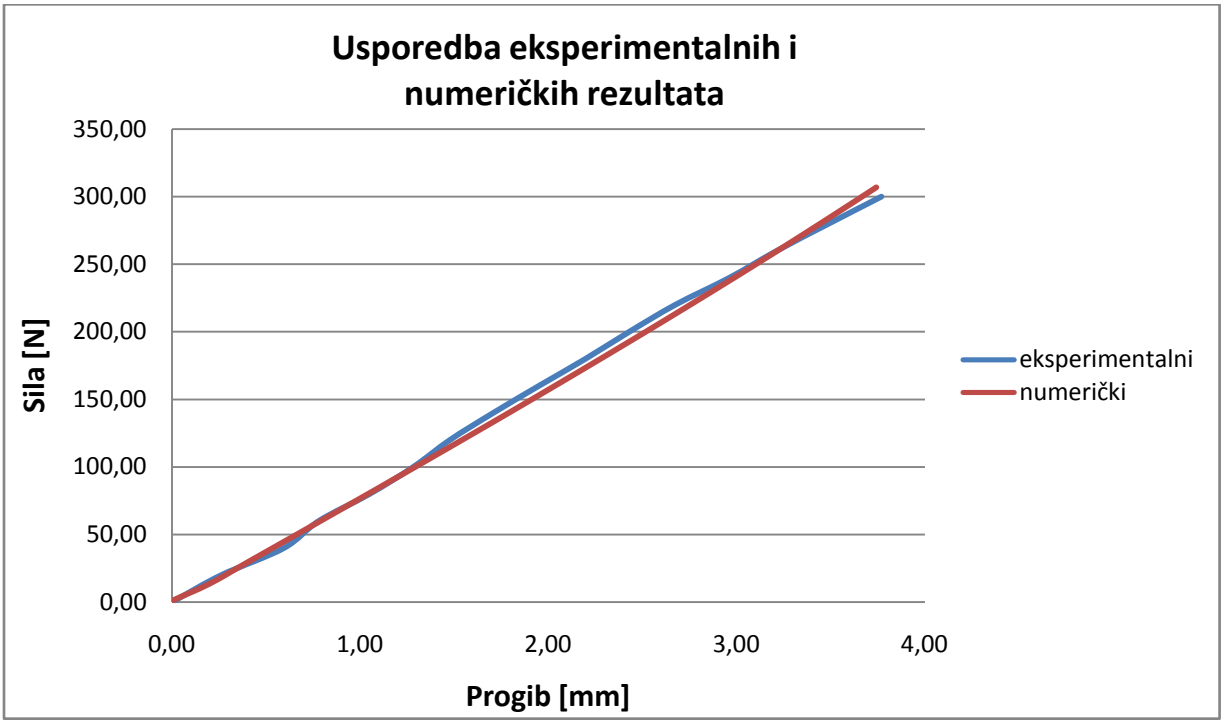


Slika 42 - Usporedba materijalnih modela



Slika 43 – Epruveta pri početku popuštanja

Usporedba konačnog modela numeričkog ispitivanja savojne čvrstoće (upotrebom materijalnog modela 54 i konačnih ispitnih svojstava materijala), te srednjih vrijednosti rezultata eksperimentalnih ispitivanja prikazana je na slici 44:



Slika 44 - Uspredba eksperimentalnih i numeričkih podataka

Konačna mehanička svojstva koja će se koristiti u ispitivanju ronilice, a definirana su korigiranjem početnih svojstava materijala, prikazana su u tablici 4:

Svojstvo	Iznos	Mjer. jed.
Gustoća	2,0	[g/cm^3]
Poissonov omjer	0,144	
Uzdužni modul elastičnosti	4750	[MPa]
Poprečni modul elastičnosti	4750	[MPa]
Modul smičnosti	3000	[MPa]
Uzdužna vlačna čvrstoća	170	[MPa]
Poprečna vlačna čvrstoća	170	[MPa]
Uzdužna tlačna čvrstoća	170	[MPa]
Poprečna tlačna čvrstoća	170	[MPa]
Smična čvrstoća	50	[MPa]
Najveće produljenje vlakana	3,6	[%]
Najveće skraćenje vlakana	3,6	[%]
Najveća deformacija matrice	8,5	[%]
Najveći kut deformacije	8,48	[%]

Tablica 4 - Konačna svojstva materijala

Primjena čvršćih materijala

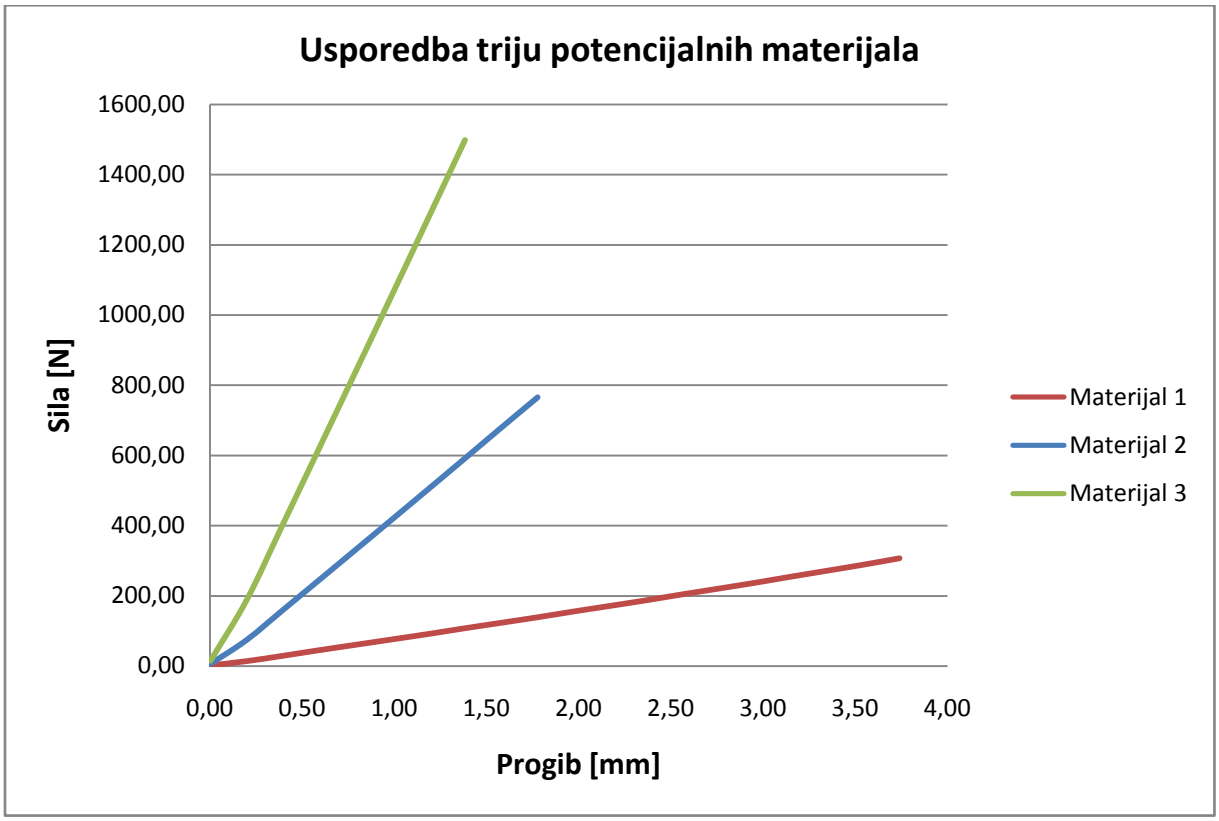
Ako pogledamo svojstva materijala od kojega je prvi prototip ronilice napravljen (slučaj 1) i koji je korišten u ovom ispitivanju, uočava se kako su ona ustvari prilično loša. Promotre li se vrijednosti na grafu sila – progib, može se zamijetiti veoma mali nagib krivulje, tj. veoma mali modul elastičnosti. Ako se usporedi vrijednost modula elastičnosti korištenoga materijala s vrijednostima modula elastičnosti sličnih staklo/epoksi kompozita dostupnih na tržištu, primjetit će se kako se one znatno razlikuju. Dok je iznos modula elastičnosti korištenog materijala 4.75 GPa, uobičajene vrijednosti modula elastičnosti u smjeru vlakana za ovaj tip kompozita kreću se u rasponima 20 – 30 GPa, što je višestruko veći iznos. Pogledom na ostala svojstva (npr. vlačnu i tlačnu čvrstoću) također se može uočiti kako su vrijednosti materijala prototipa u pravilu znatno niže od uobičajenih. Razlog tome može se pronaći u načinu izrade. Ispitne epruvete i ronilica izrađene su ručnim laminiranjem: ručnim nanašanjem slojeva ojačala i veziva. Stoga, kvaliteta izratka i konačna svojstva materijala ovisit će uvelike o vještini osobe koja obavlja postupak. U konačnici, svaki pojedinačni materijal može imati drugačija svojstva. To je dobro vidljivo prema iskustvu nastavnika kolegija „Kompozitni materijali“ na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na praktičnom dijelu nastave studenti su podijeljeni u radne grupe od kojih svaka mora napraviti svoj primjerak kompozita koji se sastoji od poliesterske matrice ojačane staklenim vlaknima te potom izvršiti ispitivanje njegovih svojstava. Ispitivanjem savojne čvrstoće kompozita sličnog rasporeda slojeva kao i kod materijala prototipa ronilice, dobivene su prosječne vrijednosti modula elastičnosti od oko 8000 MPa što je unatoč korištenju slabije matrice osjetno više od materijala primjenjenog na ronilici. Mikroskopskim ispitivanjem presjeka ploča primjećene su velike količine zračnosti koja će veoma negativno utjecati na konačna mehanička svojstva materijala. Očigledno je dakle da bi profesionalno ručno izrađen kompozit ili kompozit izrađen tvornički imao bolja svojstva od ovdje korištenoga.

Kako će na konačnoj izvedbi ronilice zasigurno raditi profesionalci, tako će i njezina svojstva gotovo sigurno biti osjetno bolja od dosadašnjih. U svrhu procjene sposobnosti konstrukcije ronilice da izvrši projektni zadatak postizanja dubine od 150 m, izvedena su dva dodatna ispitivanja za dva različita materijala koja bi odgovarala toj primjeni. Prvi materijal je kompozit načinjen od pletenih staklenih vlakana povezan matricom od epoksidne smole čija su svojstva poznata iz literature [9] i korištena kao početni set parametara pri pronalaženju svojstava materijala izrađenog u radionici. Drugi materijal je kompozit također s epoksidnom matricom, no kao ojačalo služi tkanina načinjena od ugljičnih vlakana. Svojstva tog trećeg materijala preuzeta su iz članka J. L. Abott: „Hygroscopic behaviour of woven fabric carbon – epoxy composites“ [11]. Usporedba svojstava triju materijala korištenih u ispitivanjima ronilice prikazana je u tablici 5:

Svojstvo	Mjer. jed.	Materijal 1 staklo/epoksi epruveta	Materijal 2 staklo/epoksi kompozit	Materijal 3 ugljik/epoksi kompozit
Gustoća	[g/cm^3]	2,0	2,0	1,6
Poissonov omjer		0,144	0,144	0,07
Uzdužni modul elastičnosti	[MPa]	4750	26600	70000
Poprečni modul elastičnosti	[MPa]	4750	26600	70000
Modul smičnosti	[MPa]	3000	4630	6500
Uzdužna vlačna čvrstoća	[MPa]	170	422	963
Poprečna vlačna čvrstoća	[MPa]	170	422	963
Uzdužna tlačna čvrstoća	[MPa]	170	410	873
Poprečna tlačna čvrstoća	[MPa]	170	410	873
Smična čvrstoća	[MPa]	50	121	99
Najveće produljenje vlakana	[%]	3,6	1,85	1,25
Najveće skraćenje vlakana	[%]	3,6	2,0	1,5
Najveća deformacija matrice	[%]	8,5	8,5	8,58
Najveći kut deformacije	[%]	8,48	8,48	3,0

Tablica 5 - Usporedba svojstava ispitivanih materijala

Uvrstimo li svojstva svih triju materijala u numeričke modele ispitivanja savojne čvrstoće epruvete i iscrtavanjem rezultata na grafu sila – progib dobiti će se sljedeći odnosi:



Slika 45 - Usporedba numeričkih rezultata savojnog ispitivanja epruveta za tri razmatrana materijala

Ispitivanje ronilice

Odabirom odgovarajućeg materijalnog modela i prilagođavanjem parametara materijala kako bi se rezultati numeričkih analiza što više približili rezultatima eksperimentalnih ispitivanja, osigurala se točnost numeričkog modela. Tako definirani materijalni model sada će se primjeniti za numeričko ispitivanje strukture ronilice na tlačno opterećenje. Radi usporedbe ponašanja i ispitivanja konačne najveće izdržljivosti ronilice, izvršit će se još dva dodatna ispitivanja sa materijalima 2 i 3.

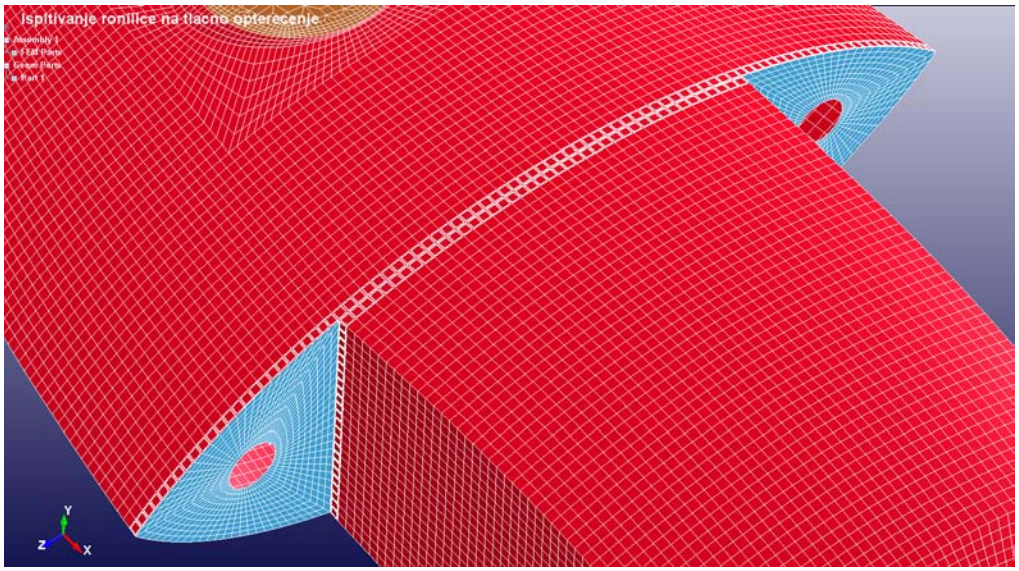
U postupku strukturne analize ronilice promatrat će se ponašanje strukture ronilice pri linearnom povećanju tlaka te analizirati kritična mjesta konstrukcije sklona popuštanju.

Numerički model ronilice

Postavljanje numeričkog modela ronilice započinje unošenjem mreže ronilice u LS PrePost. Mreža generirana u Femapu, izvezena je i pohranjena u LS-DYNA k-file formatu kompatibilnom sa LS PrePost aplikacijom. Na modelu ronilice prisutne su tri različite vrste dijelova (PART):

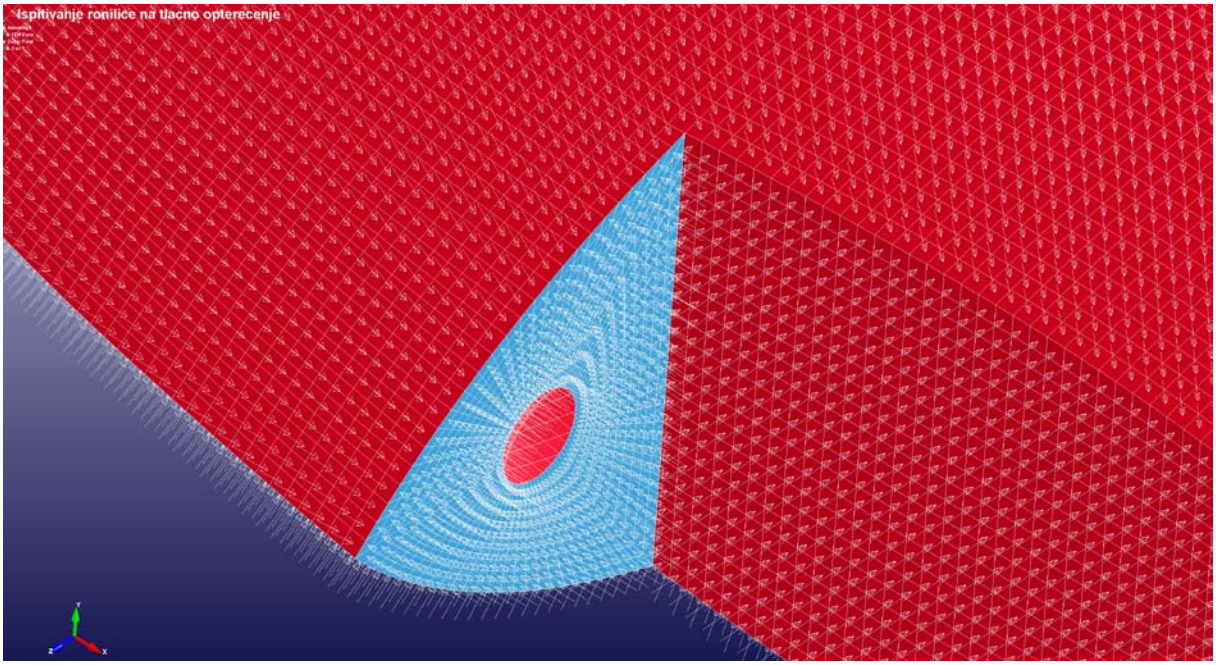
- **kućište** – Osnovna forma ronilice koji čine spojeni prednji i stražnji kraj ronilice. Ponašanje kućišta opisano je materijalnim modelom 54 sa konačnim parametrima materijala. Ključnom riječi SECTION_SHELL definirana je debljina stijenki 5 mm, formulacija ljuskastog elementa broj 2 – Belytschko – Lin – Tsay te 4 integracijske točke kroz debljinu elementa.
- **rebro** – Rebra ronilice aproksimirana u jedan dio također su opisana materijalnim modelom 54 i konačnim parametrima materijala. U SECTION_SHELL ključnoj riječi također je određena formulacija ljuskastog elementa broj 2 – Belytschko – Lin –Tsay te 4 integracijske točke kroz debljinu elementa, no sa 15 mm ukupne debljine elementa.
- **stakla** – Budući će prema predviđanjima konstruktora stakalca biti najkrući i najizdržljivi element strukture ronilice, stakla su definirana koristeći materijalni model 20 – rigid te su, osim njihovih rubova koji su u kontaktu sa elementima drugih dijelova, isključeni iz proračuna naprezanja i istezanja.

Kako bi se osigurala čvrstoća modela i realno ponašanje rebra, unesena je mala promjena debljine nekih elemenata dijela kućište. U realnoj situaciji rebro ne bi bilo spojeno sa prednjim i stražnjim krajem samo u ravnini spoja, kako je dosadašnjim modelom opisano, nego bi na mjestu spoja bilo ojačano dodatnim materijalom. Time bi se na tom području ulaženja rebra u prednji i stražnji dio ukupna debljina na tom dijelu povećala. Kako bi se takvi uvjeti primjenili na numerički model ronilice, liniji elemenata kućišta po rubu spoja prednjeg, odnosno stražnjeg kraja sa rebrom dodijeljena je debljina iznosa 15 mm. Elementi kućišta veće debljine prikazani su na slici 46:



Slika 46- Podebljani elementi kućišta

Opterećenje ronilice uzrokovano hidrostatskim tlakom definirano je ključnom riječi LOAD_SHELL_SET kojom se tlak primjenjuje na grupu ljuskastih elemenata. Tlak definiran u smjeru normale djeluje na površinu pojedinog elementa a njegov iznos određen je krivuljom uključenom u definiciju. Pri tlačnom ispitivanju ronilice korištena je linearna funkcija porasta tlaka koja se vremenskim korakom proračuna postupno povećava. Budući su ostali elementi ronilice potopljeni, kako je već navedeno, oni ne ulaze u proračun naprezanja. Definirano opterećenje djelovat će na vanjske plohe zabrtvljenog dijela ronilice opisane mrežom konačnih elemenata kako je prikazano na slici 47:

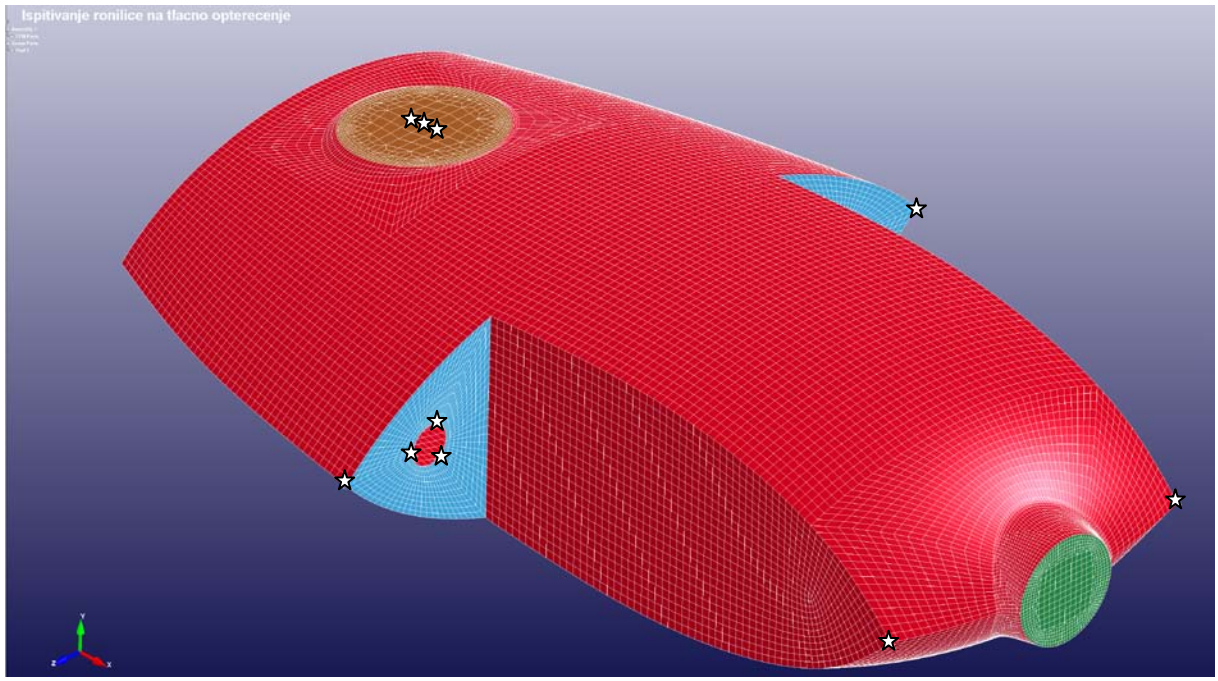


Slika 47 - Prikaz tlačnog opterećenja na ronilicu

Radi postizanja stabilnog i točnog proračuna, u numerički model su uključene metode praćenja i kontrole numeričkih pogrešaka u obliku *hourglassinga* i vibracija. Pojava *hourglassinga* kontrolirana je aktiviranjem formulacije broj četiri unutar ključne riječi HOURGLASS, dok će sve vibracije biti prigušene preko ključne riječi GLOBAL_DAMPING. Na pojedine čvorove ronilice ujedno je postavljen i minimalan broj rubnih uvjeta kako bi se smanjio njihov utjecaj na točnost proračuna i spriječilo nerealno ponašanje modela:

- šest čvorova glavnog rebra – spriječena translacija po x-osi (duljini ronilice)
- tri čvora gornjeg stakla – spriječena translacija po z-osi (širina ronilice)
- četiri rubna čvora ronilice – spriječena translacija po y-osi (visina ronilice)

Zadani rubni uvjeti prikazani su na slici 48:



Slika 48 - Prikaz rubnih uvjeta ronilice

Postavkama numeričke analize određen je prekid proračuna nakon popuštanja 200 elemenata.

Analiza rezultata numeričkih proračuna

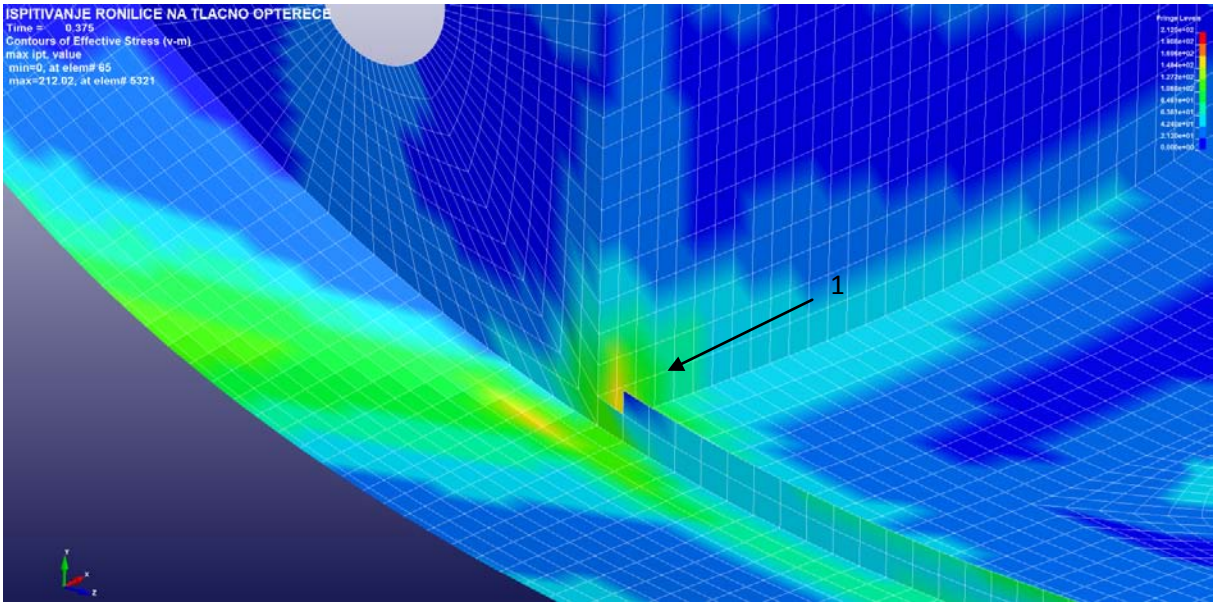
Slučaj 1

Dobiveni rezultati pokazuju kako će struktura ronilice za slučaj 1 početi popuštati pri tlaku od 0.155 MPa, što je ekvivalent dubini od 15 m, tj. svega desetini dubine koju bi projektnim zadatkom definirana ronilica trebala biti sposobna postići.

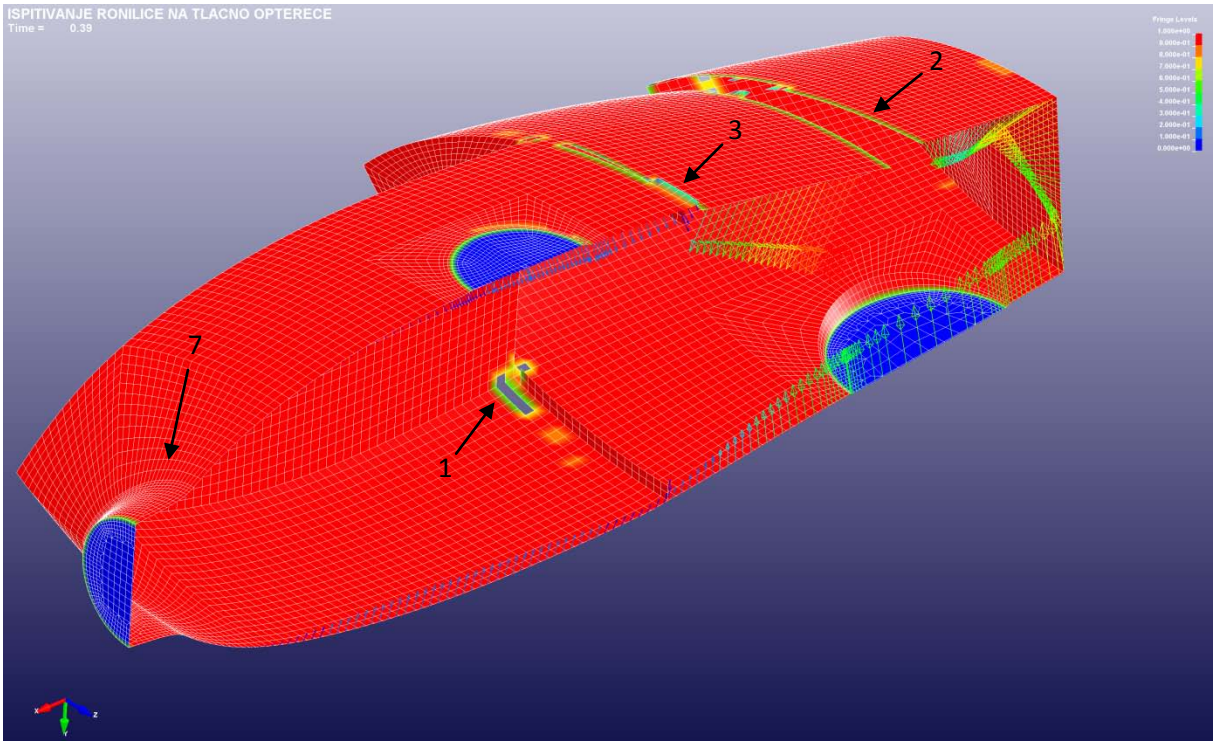
Kao što je bilo i očekivano, najveći dio opterećenja nosi središnje rebro gdje su na kritičnim mjestima u trenutku prije pucanja prvog elementa zabilježene najviše vrijednosti von Mises opterećenja u iznosu od 168 MPa (tlačno opterećenje). Glavno rebro, osim što spaja prednji i stražnji kraj, osigurava stabilnost strukture ronilice i njen je kritični dio. Zbog velike debljine rebra spram debljine ostatka kućišta, smatrano je kako će rebro biti to koje će izdržati opterećenja i držati dimenzije ronilice, dok će se neke od većih površina zbog svoje veličine pod djelovanjem tlaka istegnuti do konačnog loma. U slučaju veoma elastičnog staklo/epoksi kompozita, kakvog su ručnim laminiranjem izradili studenti na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, glavno mjesto popuštanja bila je upravo donja površina stražnjeg dijela. Kako je to najveća površina na cijeloj ronilici i budući na njoj nema nikakvih drugih strukturnih elemenata, osim zakrivljenosti plohe nije bilo ničega što bi je ukrutilo i spriječilo njeno istezanje prema unutrašnjosti ronilice.

1. Unatoč očitim početnim pukotinama na stražnjem dijelu, pomnijim promatranjem razvoja naprezanja te potom i pukotina, ustanovljeno je kako je prije pojave popuštanja elemenata donje površine stražnjeg dijela, pri spomenutom opterećenju od 0.155 Mpa došlo do popuštanja unutarnjih kutnih elemenata glavnog rebra na kojima su i uočena gore spomenuta kritična naprezanja. Gubitkom tih elemenata rebro je izgubilo svoju krutost i pod djelovanjem sve većeg pritiska više nije moglo održavati formu ronilice te se polako počelo savijati. Savijanje glavnog rebra omogućilo je sve veću deformaciju donje površine stražnjeg dijela te u konačnici njen lom. Promatranjem polja von Mises naprezanja na ronilici uočeno je kako na četiri područja rebra, u unutrašnjim kutevima u kojima dolazi do kontakta rebra sa prednjim i stražnjim dijelom, dolazi do visoke koncentracije naprezanja koja prije ili kasnije dovodi do pucanja. Na slici 49 prikazano je pucanje prvog elementa rebra koje je omogućilo daljnje popuštanje stražnjeg kraja, te visoka koncentracija naprezanja u čvorovima oko njega koja će u konačnici također dovesti do pucanja elemenata.
2. Daljnjim deformiranjem donje površine stražnjeg dijela, pri opterećenju od 0.18 MPa, što je ekvivalent dubini od 18 m, pojavljuju se na bočnim stranama prve pukotine koje uz daljnju deformaciju brzo propagiraju te konačno uzrokuju pucanje stranice po cijeloj širini ronilice.
3. Zbog velikog naprezanja uzrokovanog znatnom deformacijom, elementi puknute površine koji povezuju stražnji dio s podebljanim elementima rebra su također popucali po liniji uz rub rebra.
4. Uz pucanje elemenata posred donje stražnje površine, pod velikom kutnom deformacijom očekivano su popucali i elementi duž bočnog brida stražnjeg dijela ronilice.
5. Dok se stražnja gornja i prednja donja površina zbog stakalaca (koja su pružila značajnu ukrutu) nisu znatnije deformirala, upravo zbog krutosti stakalca je na prednjoj donjoj površini na kontaktu sa elementima kućišta došlo do koncentracije naprezanja te naposljetku i pucanja.

   Model ronilice sa navedenim puknutim dijelovima, uz prikaz plastičnog istezanja prikazan je na slikama 50 i 51:



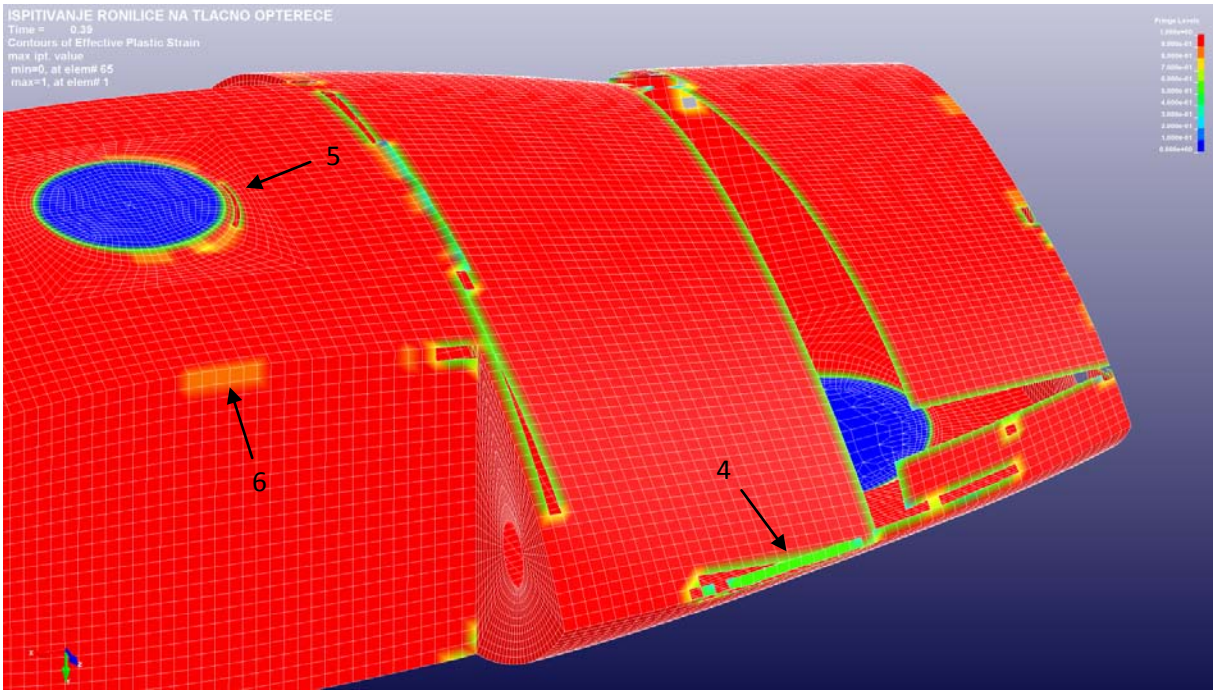
Slika 49 - Početno pucanje rebra sa von Mises naprezanjima – presjek stražnjeg dijela



Slika 50 – Slučaj 1 - presjek popuštanja ronilice , donja strana

6. Osim navedenih područja, potencijalna mjesta loma pri popuštanju strukture nalaze se i na bočnim rubovima prednjeg dijela gdje uslijed značajne deformacije gornje te bočnih površina dolazi do značajnih naprezanja. Za razliku od stražnje donje površine, deformacije površina prednjeg dijela su znatno manje te ne dolazi do pucanja uslijed njihove deformacije. Iako nisu popustili, na bočnim rubovima prednjeg dijela svejedno dolazi do značajnih koncentracija naprezanja te predstavljaju moguće mjesto puknuća u realnim uvjetima kao što vidljivo i na slici 51.

7. Zbog oblika prednjeg dijela koji mu pruža veliku krutost, stakalce i okolni elementi zadržali su svoj oblik uz neznatne deformacije te nije došlo do pojave značajnijih naprezanja pa se taj dio može proglasiti sigurnim dijelom konstrukcije.



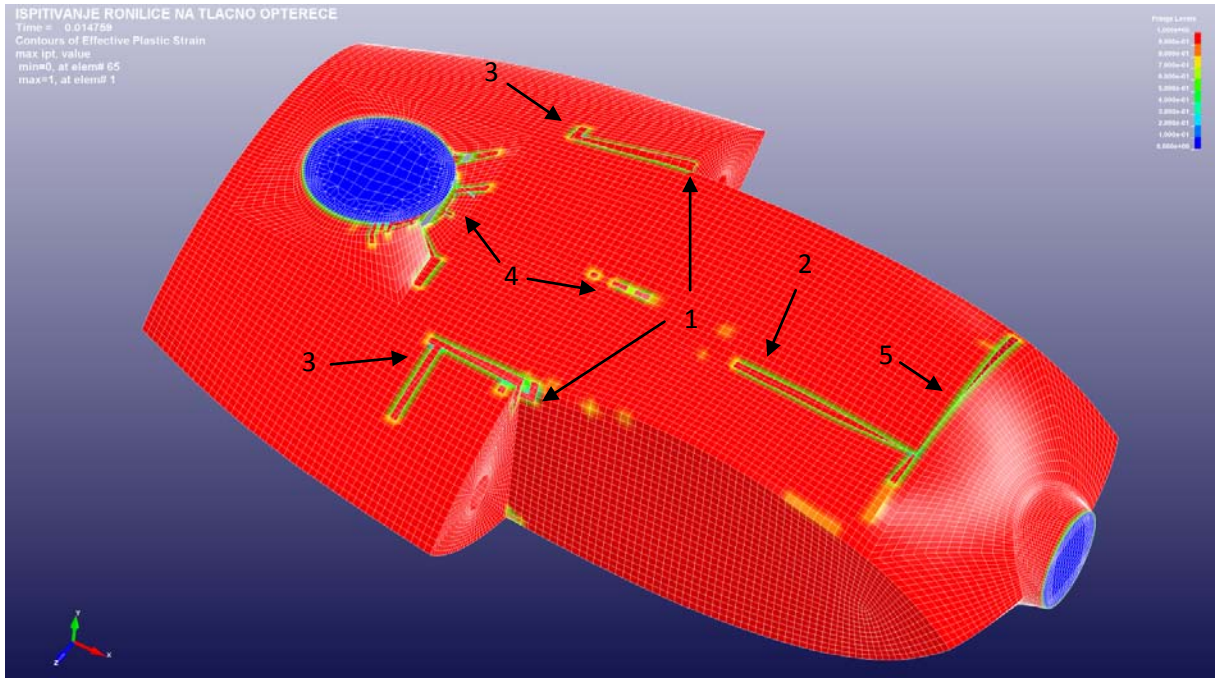
Slika 51 – Slučaj 1 – popuštanje ronilice, donja strana

Slučaj 2

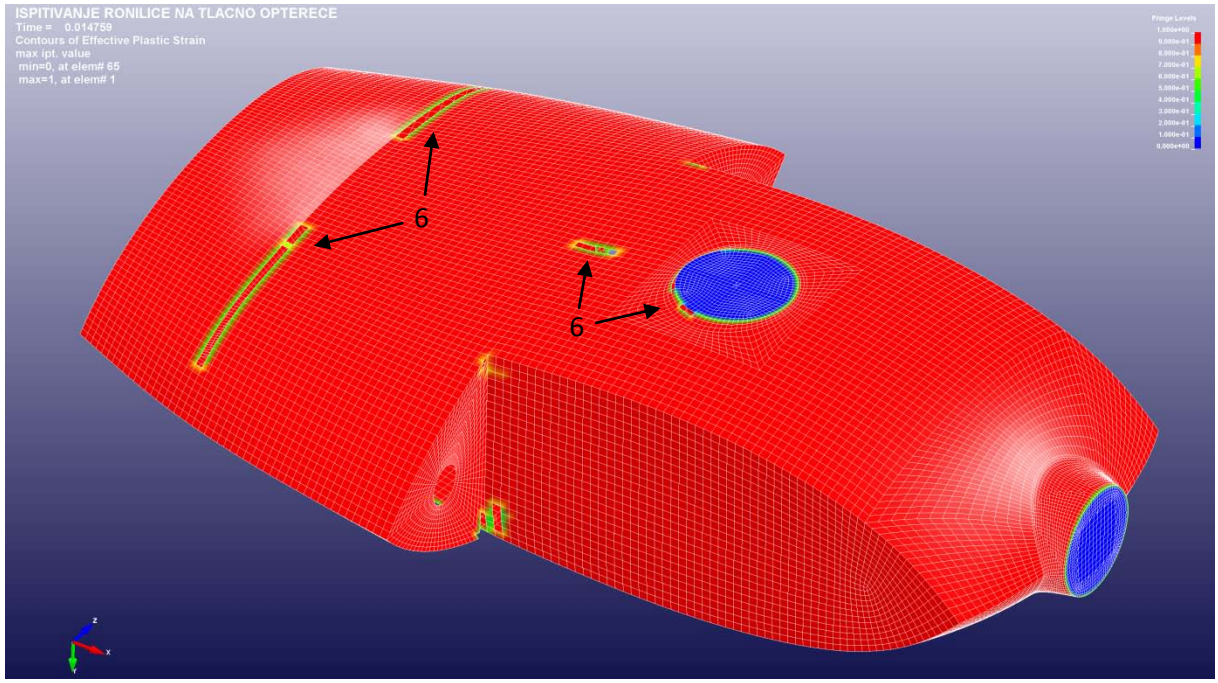
Ispitivanje ronilice sa svojstvima materijala 2 očekivano je dalo znatno bolje rezultate od dosad korištenog materijala – materijala 1. Nasuprot prijašnjih 0.15 MPa, sa novim materijalnim svojstvima ronilica je uspjela izdržati opterećenja od 0.6 MPa prije popuštanja prvog elementa, što ronilicu dovodi do dubine od 60 m. No unatoč poboljšanju rezultata, projektni zadatak i dalje nije zadovoljen. Za razliku od prvog slučaja, do loma ostatka strukture dolazi ubrzo nakon loma prvog elementa i to u veoma kratkom vremenskom periodu.

1. Kao i u prethodnom ispitivanju, i ovdje je kritična točka prije pucanja spoj rebra čijim pucanjem rebro oslabljuje te se luk rebra koji drži formu ronilice počinje znatno deformirati. Uslijed toga površine oslonjene na rebro počinju se sve više deformirati sve do početka loma. No za razliku od ispitivanja u prethodnom slučaju gdje je korišten znatno elastičniji materijal, u ovom slučaju donja površina stražnjeg dijela ima znatno manju deformaciju te ne dovodi do daljnjeg popuštanja materijala.
2. Kako se ovdje početno popuštanje glavnog rebra dogodilo na gornjoj strani ronilice, sljedeći element koji popušta nalazi se također na gornjoj strani, i to na središtu gornje površine prednjeg dijela. Popuštanjem glavnog rebra i savijanjem luka, olakšava se deformacija te plohe koja postaje sve ravnija. Kada dosegne oblik ravne ploče, naprezanja postaju sve veća, no zbog znatno veće krutosti ne postiže deformaciju kao u prethodnom slučaju te daljnjim povećanjem tlaka i udubljivanjem prema unutrašnjosti ronilice gornja ploha počinje popuštati.
3. Otprilike u isto vrijeme kada popusti prvi element prednje gornje površine, u zonama u kojima su popustili prvi elementi glavnog rebra dolazi do razvoja velikog naprezanja koje uzrokuje pucanje elemenata rebra sa vanjske strane. Daljnjim djelovanjem opterećenja te pukotine propagiraju po dužini ronilice šireći se preko gornje stražnje površine.
4. Deformacija gornjeg dijela rebra uzrokuje uleknuće cijelog gornjeg dijela ronilice što za posljedicu ima popuštanje elemenata po dužini od prednjeg kraja ronilice pa sve do gornjeg stakalca.
5. Zbog veće krutosti dobivene oblikom na samom prednjem dijelu donilice i velikog uleknuća prednje gornje površine, na tom mjestu dolazi do velikih naprezanja te poprečne pukotine po cijeloj širini prednjeg dijela ronilice.
6. Tek kasnijim djelovanjem opterećenja popuštaju i donji rubovi glavnog rebra. Lomom donjeg luka rebra dolazi do znatnije deformacije i donje stražnje površine te naposljetku pucanja istovjetnog prošlom primjeru, no u znatnom manjoj mjeri.
7. Konačno popuštanjem donjeg luka glavnog rebra dolazi do velikog opterećenja i popuštanja elemenata u području donjeg stakalca.

   Gore navedena mjesta loma prikazana su na slikama 52 i 53:



Slika 52 – Slučaj 2 – popuštanje ronilice, gornja strana

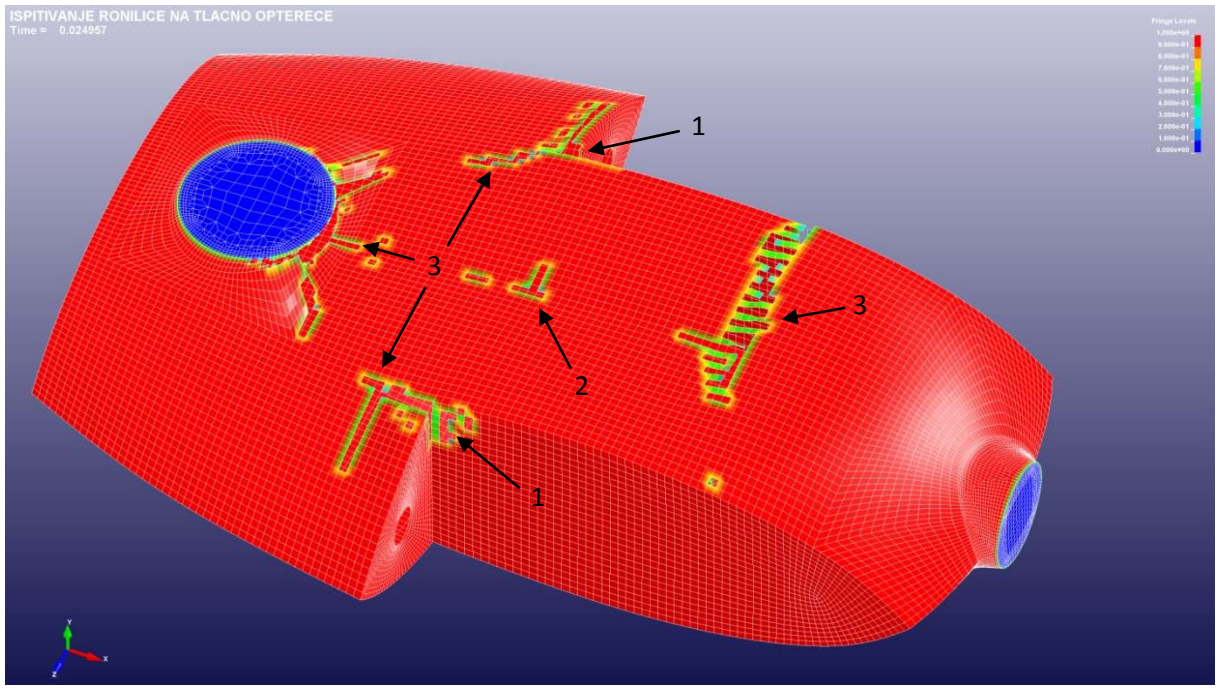


Slika 53 - Slučaj 2 – popuštanje ronilice, donja strana

Slučaj 3

Primjena materijala 3 postigla je gotovo dvostruko bolje rezultate nego materijal 2 te je dosegla vrijednost opterećenja od 1.15 MPa što ronilicu dovodi na 115 m dubine i znatno bliže konačnom rješenju, no ipak ga ne postiže. Zbog krutosti materijala, lom nastupa otprilike u isto vrijeme na svim područjima popuštanja elemenata.

1. Kao i kod prethodna dva primjera, mjesta prvog popuštanja elemenata nalazit će se u rubovima rebara i to u gornjim rubovima rebara.
2. No za razliku od prethodnih slučajeva gdje je savijanje luka rebra dovelo do loma sljedećeg elementa, zbog visoke krutosti materijala sljedeće područje popuštanja bilo je upravo središte luka rebra.
3. Tek nakon što je rebro popustilo značajnije su se počela deformirati i ostala područja gdje su se pri znatno manjim deformacijama nego prije pojavile i prve pukotine. Propagiranjem pukotina razvijene su zone popuštanja veoma slične onima u prošlom primjeru kao što je i prikazano na slici 54.



Slika 54 - Slučaj 3 – popuštanje ronilice, gornja strana

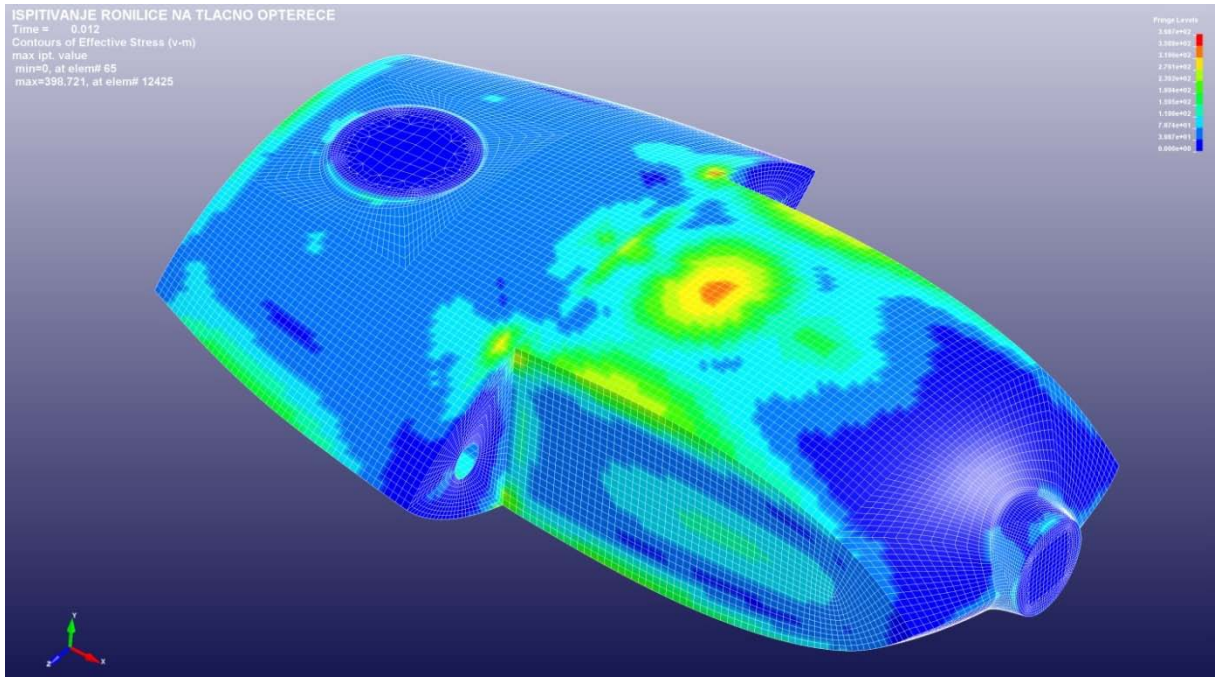
Najznačajnija razlika između posljednja dva ispitivanja, osim znatno većeg konačnog opterećenja, je puno brža propagacija pukotina. Zbog znatno veće krutosti, pukotine se više ne šire samo pravilno po liniji nego se vrlo brzo povećavaju i po širini linije propagacije. Također, zbog uvjeta prekida proračuna od 200 obrisanih elemenata, u ovom ispitivanju nije uopće došlo do pucanja elemenata na donjoj strani ronilice.

Analiza strukture ronilice

Parametar	Slučaj 1	Slučaj 2	Slučaj 3
Masa ronilice	9,51 kg	9,51 kg	8,2 kg
Broj konačnih elemenata	26294		
Broj čvorova	26447		
Točnost rješavača	Single precision		
Režim opterećenja	5 Pa / 1 s	50 Pa / 1 s	50 Pa / 1 s
Vrijeme djelovanja opterećenja	0,31 s	0,012 s	0,023 s
Trajanje proračuna	7h 43min	42min	2h 7min
Postignuta dubina	15,5 m	60 m	115 m

Tablica 6 – Parametri proračuna i konačni rezultat tri numerička modela ronilice

Rezultati ispitivanja ronilica od tri različita materijala pružili su dobru sliku ponašanja ronilice pri djelovanju tlačnog opterećenja te se sa velikom pouzdanošću mogu odrediti slabe točke na strukturi ronilice. Unatoč različitom vremenskom redoslijedu pucanja, pukotine su kod svakog materijala nastale na istim mjestima i iz istog razloga. U stvarnosti bi pri pojavi popuštanja prvih vanjskih elemenata kućišta došlo do prodiranja vode u unutrašnjost te popuštanja cjelokupne strukture. Kako je cilj strukturne analize otkrivanje slabih točaka i sprječavanje pucanja trupa uopće, potrebno je promotriti naprezanja netom prije pucanja prvog elementa koji su u sve tri varijante bili veoma slični. Na slici 55 prikazano je polje von Mises naprezanja za ronilicu sa srednje krutim staklo / epoksi kompozitom (materijal 2) u trenutku prije pucanja prvog elementa:

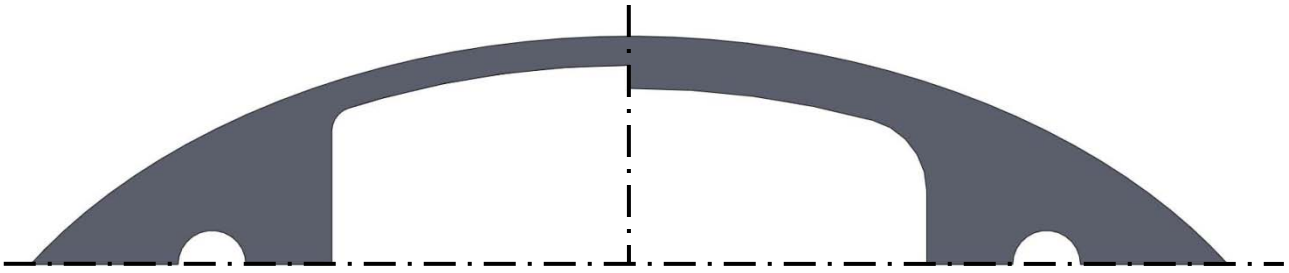


Slika 55 – Polje von Mises naprezanja ronilice za slučaj 2

Glavno rebro

Zahvaljujući svojem ovalnom obliku, ronilica ima veoma dobru početnu krutost i opire se deformaciji. No kako se naprezanje povećava, porastom deformacije taj oblik se gubi, a s njime i krutost gornje površine. U tom trenu glavno rebro preuzima znatna naprezanja i postaje najbitniji nosivi element, koji osigurava održanje ovalne forme i priječi daljnje deformacije okolnih ploha. No kao nosivi dio najvećeg dijela konstrukcije, upravo glavno rebro se pokazalo i kao njen najkritičniji element. Djelovanjem naprezanja, luk glavnog rebra se savija i tim savijanjem tlačno djeluje na unutrašnje kuteve glavnog rebra. Upravo pod utjecajem tog tlačnog djelovanja dolazi do pucanja elemenata u samom kutu (slika 49) i oslabljivanja glavnog rebra koje u konačnici oslabljuje cjelokupnu konstrukciju. Kako bi se popuštanje glavnog rebra spriječilo ili makar odgodilo postoji nekoliko načina na koje ga se može modificirati:

- **Prva mogućnost:** smanjiti naprezanje u unutrašnjem kutu. Naprezanje u unutrašnjem kutu glavnog rebra može se smanjiti tako da se na vrh kuta doda radijus. Time će se spriječiti pojava koncentracija naprezanja što će omogućiti bolju raspodjelu opterećenja te prijenos opterećenja na više susjednih nosivih elemenata što će pak osigurati kasnije pucanje kutnog elementa.
- **Druga mogućnost:** povećati širinu lukova glavnog rebra. Dodavanjem materijala na lukove glavnog rebra prema unutrašnjosti ronilice značajno bi se pridonijelo otporu lukova na savijanje. Uz veću postojanost oblika ronilice, zbog veće širine bi i utjecaj savijanja na kutni element bio znatno manji.
- **Treća mogućnost:** Povećati debljinu rebra. Povećanjem ukupne debljine glavnog rebra omogućila bi se znatno veća izdržljivost i podnošenje mnogo većih opterećenja uz manje deformacije.



Slika 56 - Usporedba glavnog rebra bez (lijevo) i sa (desno) širim lukom i većim radijusom vrha kuta

Idealno bi bilo kada bi se sve ove mjere mogle primjeniti na glavno rebro, čime bi se postiglo najbolje ojačanje glavnog rebra. No ako se uzmu u obzir komponente koje tek trebaju biti ugrađene u ronilicu, mogućnosti implementacije ovih mjera se znatno smanjuju i uvelike ovise o gabaritima i rasporedu ugrađenih komponenti.

Slobodne površine

Sljedeći problem koji je uočljiv promatranjem simulacija su deformacije većih površina ronilice. Velike deformacije tih površina koje kasnije uzrokuju pucanje omogućene su popuštanjem glavnog rebra. No čak i kada bismo glavno rebro ukrutili do te mjere da je posve nepomično, na većim praznim površinama bi svejedno dolazilo do znatnih deformacija i naposljetku pucanja. Dok su površine na kojima

su smještena stakalca upravo zahvaljujući njima znatno ukrućene, donja stražnja i gornja prednja površina su posve nepoduprte, bez ikakve ukrute po svojoj sredini osim ovalnog oblika ronilice. Potencijalno rješenje koje bi spriječilo veće udubljivanje središta tih ploha bilo bi ugradnja jednog ili više rebara, tj. lukova sličnih onima glavnog rebra. Time bi se tim površinama dodala krutost i otežala deformacija a samim time i znatno smanjilo opterećenje glavnog rebra. Ovo rješenje također ovisi o rasporedu unutarnjih komponenti, no sudeći prema rasporedu praznina u unutrašnjosti i malom zauzeću prostora koje bi uzrokovali, ova mjera bi vjerojatno bila provediva.

Bridovi

Kako je na slici 55 vidljivo, na bridovima stražnje pregrade te bočnim bridovima duž forme ronilice također dolazi do koncentracije naprezanja koja su potencijalni izvor puknuća. Ova naprezanja su uzrokovana savojnim opterećenjem kojemu je također uzrok deformacija velikih slobodnih površina. Primjenom prethodno navedenog rješenja ovaj problem bi bio do određene mjere riješen. No kako bi se u potpunosti osiguralo od pojavljivanja pukotina na tim mjestima moguća je ugradnja većeg broja koljena koja bi spriječila savijanje elemenata na bridovima. Kako ne zauzimaju mnogo mjesta i nalaze se u području koje je teško iskoristivo za smještaj unutrašnjih komponenti, velika je vjerojatnost da bi ih bilo moguće primjeniti.

Stakalca

Posljednji detalj na koji se treba osvrnuti su stakalca i područja oko njih. Rezultati ispitivanja su pokazali kako će u većini slučajeva doći do pucanja rubnih elemenata kraj gornjeg ili donjeg stakalca. Stoga, iako ta mogućnost nije za isključiti, u realnoj izvedbi će to područje najvjerojatnije biti izvedeno znatno deblje nego što je to preko ljuskastih elemenata bilo modelirano. Zbog veće debljine će i opasnost od popuštanja tih područja biti znatno manja. No i u tom slučaju zbog velike razlike u krutosti, pri deformaciji tanjih dijelova moglo bi doći do prevelikih naprezanja i pucanja. Ugradnjom dodatnih rebara kao što je ranije navedeno i taj bi se problem znatno smanjio.

Utjecaj vrste materijala

Zanimljivo je također razmotriti utjecaj različite elastičnosti / krutosti materijala na pojavu popuštanja elemenata. Kod elastičnijih materijala popuštanje je u najvećoj mjeri uzrokovano velikim deformacijama slobodnih površina. Zbog elastičnosti materijala i male krutosti uzrokovane geometrijom, te površine se deformiraju sve dok ne postignu konačne vrijednosti čvrstoće materijala i tada pucaju. Kako materijal postaje krući uočljiv je puno veći utjecaj krutosti geometrije. Iako i tada nakon nekog vremena dolazi do deformacije i pucanja uslijed deformacije, to se događa znatno kasnije i u znatno manjoj mjeri. Kod najkrućeg materijala deformacije prije pucanja su minimalne, oblik geometrije ima jako velik utjecaj i slobodne površine se deformiraju u maloj mjeri prije dosezanja granične čvrstoće. Kod krutih materijala najkritičnije su zato površine koje na sebi imaju krute elemente, kao što su one sa stakalcima. Zbog krutosti stakalaca znatno veće od krutosti krutog materijala, pri pojavi već i malih deformacija, između površine i stakalca će doći do tako velikog naprezanja da će elementi površine popustiti.

Promotrimo li korištene materijale logičan je zaključak kako je materijal 3 zbog izrazito dobrih mehaničkih svojstava od svih ispitivanih materijala pokazao najbolje rezultate. No ako su dostupna tri

materijala sličnih čvrstoća ali različitih modula elastičnosti, koji bi predstavljao najbolji izbor? Nepromjenjivost volumena za ronilicu je veoma bitna, pa tako i krutost za materijal. No kao što primjer veoma krutog materijala 3 pokazuje, u takvim uvjetima će zbog malih razlika u deformaciji vrlo brzo doći do pucanja onih dijelova konstrukcije koji su smatrani najizdržljivijima. Kod materijala 1 s druge strane, izražena elastičnost uzrokuje prevelike deformacije slobodnih površina koje će uzrokovati velika dodatna opterećenja na ostalim elementima. Srednja vrijednost modula elastičnosti prikazana u primjeru materijala 2 pružiti će možda najbolje i najjednolikije ponašanje strukture. Slobodne površine će tako biti u mogućnosti duže održati oblik i tako bolje iskoristiti krutost koju geometrija ronilice daje. S druge strane, opterećenje na granicama krutih elemenata (stakalca) i slobodnih površina će zbog manje krutosti također biti znatno manje i omogućiti veću fleksibilnost materijala.

U konačnici će najbitnija odlika materijala biti njegova čvrstoća i sposobnost podnošenja opterećenja što većih iznosa. No pravilan odabir modula elastičnosti (koji će uvjetovati krutost konstrukcije) može uvelike pridonijeti izdržljivosti ronilice te mu također treba posvetiti pažnju pri odabiru materijala.

Zaključna razmatranja

Kako je metoda konačnih elemenata numerička metoda, sa svojim pojednostavljenjima i pogreškama, tako se ni konačni rezultati sami za sebe ne mogu uzeti bez rezerve nego ih je potrebno pomno analizirati.

Početnim numeričkim ispitivanjima savojne čvrstoće epruveta i usporedbom sa eksperimentalnim rezultatima cilj je bio postići što točnije opisivanje stvarnog ponašanja materijala. Kako su prototip izradili studenti, neiskusni u izradi kompozitnih materijala, postoji mogućnost da uslijed opterećenja dođe do delaminacije kompozita, što u ovom ispitivanju zbog ograničenosti resursa i kompleksnosti tog problema nije bilo moguće ispitati.

Usporedbom numeričkih modela samo s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja savojne čvrstoće nije moguće sa sigurnošću reći kako je materijal u potpunosti točno opisan, makar se numerički rezultati savršeno poklapali sa eksperimentalnima. Kriični detalji konstrukcije ronilice – unutrašnji kutevi rebara, popuštaju zbog dosezanja vršne tlačne čvrstoće koja nije bila posebno ispitivana. Ako bi se željelo dodatno ispitati točnost numeričkog modela, eksperimentalno ispitivanje tlačne čvrstoće te usporedba sa numeričkim modelom ispitivanja tlačne čvrstoće znatno bi doprinjeli ukupnoj točnosti numeričke analize.

Zbog korištenja ljuskastih elemenata određene dijelove ronilice nije bilo moguće u potpunosti vjerno prikazati mrežom konačnih elemenata. Zbog toga su uvedena pojednostavljenja koja su, unatoč pažnji pri njihovoj implementaciji, mogla uzrokovati drugačije ponašanje modela u odnosu na stvarnu ronilicu.

No važna značajka metode konačnih elemenata je upravo komparativna analiza na kojoj su zaključci ovoga rada temeljeni. Analiza modela ronilice u tri odvojena slučaja pokazala je slično ponašanje konstrukcije koje je sukladno predviđenom realnom ponašanju. Kako su rasporedi kritičnih naprezanja i mjesta popuštanja u velikoj mjeri zajednička svim numeričkim modelima, može se zaključiti kako će i strukturna analiza modela potvrđena na tri zasebna modela biti pouzdana. Samim time zaključci dobiveni u ovome radu mogu se sa velikom sigurnošću primjeniti na buduće konstrukcije ronilice u svrhu poboljšanja otpornosti na tlačno opterećenje.

Zaključak

Provođenjem numeričke analize ispitivanja savojne čvrstoće epruveta, za daljnja ispitivanja odabran je materijalni model 54 sa svojstvima koja su pokazala dobro poklapanje numeričkih i eksperimentalnih rezultata. Uz taj početni materijal korišten na prvom prototipu ronilice, u numeričku analizu uključena su još dva materijala različitog sastava i svojstava radi usporedbe ponašanja i ispitivanja najveće konačne izdržljivosti strukture ronilice.

Unatoč primjeni kompozita veoma dobre čvrstoće, izrađenog od tkanih ugljičnih vlakana i epoksidne smole, konačni cilj zadatka, dosezanje radne dubine od 150 m nije postignut. Primjenom ovog materijala ronilica može izdržati najveće opterećenje od 1.15 MPa, što je ekvivalent dubini od 115 m i još uvijek dosta daleko od zadane projektne dubine od 150 m. Analizom rezultata numeričke analize uočeno je kako se u unutrašnjem kutu glavnog rebra ronilice nalazi kritičan strukturni detalj, u kojemu dolazi do velike koncentracije naprezanja te čijim se lomom u sva tri slučaja omogućava veća deformacija te konačno i popuštanje ostalih dijelova konstrukcije.

Strukturnom analizom izvedeno je nekoliko zaključaka koji bi mogli povećati čvrstoću konstrukcije i odgoditi popuštanje materijala. Kao najbitnija poboljšanja glavnog rebra predlaže se: dodavanje većeg radijusa na vrh unutrašnjeg kuta, povećanje širine luka ili ukupne debljine. Uz ojačanje glavnog rebra, znatnije ojačanje strukture postiglo bi se i dodavanjem još jednog ili dva rebra po dužini prednjeg te stražnjeg dijela zabrtvljenog volumena ronilice, koji bi spriječili deformaciju slobodnih površina i smanjili opterećenje glavnog rebra. Dodavanjem koljena koja bi podupirala bočne bridove ronilice te rub stražnje pregrade, smanjio bi se stupanj deformacije prisutan u tim dijelovima te samim time i koncentracija naprezanja. U konačnici, najveći utjecaj na izdržljivost strukture ronilice ipak imaju svojstva materijala. Poželjna bi bila upotreba materijala što više čvrstoće te pravilno odabrane krutosti kako bi se osigurala određena doza elastičnosti, no ipak omogućilo iskorištavanje krutosti strukture koja proizlazi iz geometrije ronilice.

Primjenom kombinacije rješenja iznesenih u zaključcima strukturne analize, mogu se očekivati znatno bolji rezultati koji bi, ukoliko primjenjeni u dovoljnoj mjeri i sa dovoljno čvrstim materijalom, mogli dovesti i do postizanja zahtjeva projektnog zadatka, tj. radne dubine od 150 m.

Literatura

[1] SolidWorks, http://www.gvltec.edu/display.aspx?id=2867

[2] Femap, http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/velocity/femap/features/

[3] LS-DYNA, http://en.wikipedia.org/wiki/LS-DYNA

[4] Hallquist J. O.: LS-DYNA Theoretical manual, Livermore Software Technology Corporation, 1998

[5] Sorić J., Tonković Z.: Primjena metode konačnih elemenata za analizu konstrukcija, letak za seminar, Fakultet strojarstva i brodogradnje , 2011

[6] Oskarsson I.: A new h-adaptive method for shell elements in LS-DYNA, Lund Institute od Technology - Lund University, Lund, 2006

[7] LSTC LS-DYNA preporuke, http://www.dynasupport.com/howtos/material/composite-models

[8] Schweizerhof K., Weimar K., Munz Th., Rottner Th.: Crashworthiness Analysis with Enhanced Composite Material Models in LS-DYNA – Merits and Limits, LS-DYNA World Conference, Detroit, 1998

[9] Armanios Erian A.: Composite Materials Fatigue and Fracture, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 1997

[10] Smojver I: Mehanika kompozitnih materijala, skripta kolegija „Kompozitni materijali“ na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006

[11] Abot J.L., Yasmin A., Daniel I. M.: Hygroscopic Behaviour of Woven Fabric Carbon – Epoxy Composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, God. 2/2005, Vol. 24, str. 195 – 206

Prilog 1: k- file ispitivanja epruvete

```
$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 3.1 (Beta) - 20Sep2010(17:35)
$# Created on Jan-31-2011 (21:50:56)
*KEYWORD
*TITLE
$Ispitivanje izdržljivosti epruvete sa osloncima i rigid nozem
$# title
ispitivanje epruvete
*CONTACT_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_ID
$#     cid                                                                title
         3noz - epruveta
$#    ssid      msid     sstyp     mstyp    sboxid    mboxid       spr       mpr
         1         4         3         3         0         0         0         0
$#      fs        fd        dc        vc       vdc    penchk        bt        dt
     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000         0     0.0001.0000E+20
$#     sfs       sfm       sst       mst      sfst      sfmt       fsf       vsf
  1.000000  1.000000  2.000000  2.000000  1.000000  1.000000  1.000000  1.000000
*CONTROL_TERMINATION
$#  endtim    endcyc     dtmin    endeng    endmas
  1.000000         0     0.000     0.000     0.000
*DAMPING_GLOBAL
$#    lcid    valdmp       stx       sty       stz       srx       sry       srz
         0 10.000000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
*DATABASE_MATSUM
$#      dt    binary      lcur     ioopt
  0.010000         3         0         1
*DATABASE_RCFORC
$#      dt    binary      lcur     ioopt
  0.010000         3         0         1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam     npltc    psetid
  0.001000         0         0         0         0
$#   ioopt
         0
*DATABASE_EXTENT_BINARY
$#   neiph     neips    maxint    strflg    sigflg    epsflg    rltflg    engflg
         0         0         4         1         1         1         1         1
$#  cmpflg    ieverp    beamip     dcomp      shge     stssz    n3thdt   ialemat
         0         0         0         1         1         1         2         1
$# nintsld   pkp_sen      sclp    unused     msscl     therm    intout    nodout
         0         0  1.000000         0         0         0ALL       ALL
*DEFINE_CURVE_TITLE
krivulja pomaka noza
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp
         1         0  1.000000  1.000000     0.000     0.000         0
$#               a1                  o1
             0.000               0.000
           1.0000000         -20.0000000
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_ID
$#      id                                                           heading
         1rigid gibanje noza
$#     pid       dof       vad      lcid        sf       vid     death     birth
         4         3         2         1  1.000000         01.0000E+28     0.000
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id                                                           heading
         2spc simetrale po x
$#    nsid       cid      dofx      dofy      dofz     dofrx     dofry     dofrz
         5         0         1         0         0         0         0         0
*SET_NODE_LIST_TITLE
tocke simetrale po duzini
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
```

```
         5     0.000     0.000     0.000     0.000MECH
$#    nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
       839       796       753       710       667       624       581       882
       538       495       452       409       366       323       280       237
       194       151       108        65        22         0         0         0
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id                                                                heading
         1osiguranje smjera noza
$#    nsid       cid      dofx      dofy      dofz     dofrx     dofry     dofrz
         4         0         1         1         0         1         1         1
*SET_NODE_LIST_GENERATE_TITLE
cvorevi noza
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         4     0.000     0.000     0.000     0.000MECH
$#   b1beg     b1end     b2beg     b2end     b3beg     b3end     b4beg     b4end
      1604      1953         0         0         0         0         0         0
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id                                                                heading
         3spc simetrale po y
$#    nsid       cid      dofx      dofy      dofz     dofrx     dofry     dofrz
         1         0         0         1         0         0         0         0
*SET_NODE_LIST_GENERATE_TITLE
simetrala
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         1     0.000     0.000     0.000     0.000MECH
$#   b1beg     b1end     b2beg     b2end     b3beg     b3end     b4beg     b4end
       431       473         0         0         0         0         0         0
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id                                                                heading
         4spc oslonaca po z
$#    nsid       cid      dofx      dofy      dofz     dofrx     dofry     dofrz
         6         0         0         0         1         0         0         0
*SET_NODE_LIST_TITLE
cvorovi oslonaca
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         6     0.000     0.000     0.000     0.000MECH
$#    nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
         5        48        91       134       177       220       263       306
       349       392       435       478       521       564       607       650
       693       736       779       822       865        39        82       125
       168       211       254       297       340       383       426       469
       512       555       598       641       684       727       770       813
       856       899         0         0         0         0         0         0
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id                                                                heading
         5spc rotacije oko x
$#    nsid       cid      dofx      dofy      dofz     dofrx     dofry     dofrz
         7         0         0         0         0         1         0         1
*SET_NODE_LIST_GENERATE_TITLE
cvorevi za spc rotacije oko x
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         7     0.000     0.000     0.000     0.000MECH
$#   b1beg     b1end     b2beg     b2end     b3beg     b3end     b4beg     b4end
         1       903         0         0         0         0         0         0
*HOURGLASS_TITLE
definicija hourglassa
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
         1         4  0.100000         0  1.500000  0.060000  0.100000  0.100000
*MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE_TITLE
mat 54 epruvete - konacni materijal
$#     mid        ro        ea        eb      (ec)      prba    (prca)    (prcb)
         1 2.0000E-9 4750.0000 4750.0000     0.000  0.144000     0.000     0.000
$#     gab       gbc       gca      (kf)      aopt
 3000.0000 3000.0000 3000.0000     0.000     0.000
$#      xp        yp        zp        a1        a2        a3    mangle
```

```
     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
$#      v1        v2        v3        d1        d2        d3    dfailm    dfails
     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000  0.085000  0.084800
$#   tfail      alph      soft      fbrt     ycfac    dfailt    dfailc       efs
     0.000     0.000     0.000     0.000  2.000000  0.036000 -0.036000     0.000
$#      xc        xt        yc        yt        sc      crit      beta
 170.00000 170.00000 170.00000 170.00000 50.000000 54.000000     0.000
*MAT_RIGID_TITLE
mat20 rigid - oslonci i noz
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
         2 7.8500E-9 2.0980E+5  0.300000     0.000     0.000     0.000
$#     cmo      con1      con2
 -1.000000         0         0
$# lco or a1      a2        a3        v1        v2        v3
     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
*PART
$# title
epruveta
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         1         1         1         0         1         0         0         0
*SECTION_SHELL_TITLE
epruveta
$#   secid    elform      shrf       nip     propt   qr/irid     icomp     setyp
         1         2  1.000000         4         1         0         0         1
$#      t1        t2        t3        t4      nloc     marea      idof    edgset
  2.000000  2.000000  2.000000  2.000000     0.000     0.000     0.000         0
*PART
$# title
noz
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         4         2         2         0         1         0         0         0
*SECTION_SHELL_TITLE
noz
$#   secid    elform      shrf       nip     propt   qr/irid     icomp     setyp
         2         2  1.000000         2         1         0         0         1
$#      t1        t2        t3        t4      nloc     marea      idof    edgset
  2.000000  2.000000  2.000000  2.000000     0.000     0.000     0.000         0
*TERMINATION_DELETED_SHELLS
$#     pid       nds
         1         1
*END
*COMPONENT
$#    clid    color1    color2    color3    color4
         1  0.769000  0.004000  0.110000     0.000         0         0         0
$# name
Part 1
*COMPONENT_PART
$#     pid      clid
         1         1
$#     pid      clid
         4         1
*COMPONENT_END
```

Prilog 2: k – file ispitivanja ronilice

```
$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 3.1 (Beta) - 20Sep2010(17:35)
$# Created on Jan-31-2011 (18:37:43)
*KEYWORD
*TITLE
$# title
Ispitivanje ronilice na tlacno opterecenje
*CONTROL_TERMINATION
$#  endtim    endcyc     dtmin    endeng    endmas
  5.000000         0     0.000     0.000     0.000
*DAMPING_GLOBAL
$#    lcid    valdmp       stx       sty       stz       srx       sry       srz
         0 50.000000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
*DATABASE_ELOUT
$#      dt    binary      lcur     ioopt
  0.010000         3         0         1
*DATABASE_MATSUM
$#      dt    binary      lcur     ioopt
  0.010000         3         0         1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam     npltc    psetid
  0.001000         0         0         0         0
$#   ioopt
         0
*DATABASE_EXTENT_BINARY
$#   neiph     neips    maxint    strflg    sigflg    epsflg    rltflg    engflg
         0         0         4         0         1         1         1         1
$#  cmpflg    ieverp    beamip     dcomp      shge     stssz    n3thdt   ialemat
         0         0         0         1         1         1         2         1
$# nintsld   pkp_sen      sclp    unused     msscl     therm    intout    nodout
         0         0  1.000000         0         0         0ALL       ALL_GL
*DEFINE_CURVE_TITLE
linearno opt.
$#    lcid      sidr       sfa       sfo      offa      offo    dattyp
         1         0  1.000000  1.000000     0.000     0.000         0
$#               a1                  o1
             0.000               0.000
          10.000000           5.0000000
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id                                                          heading
         1x constraint rebra
$#    nsid       cid      dofx      dofy      dofz     dofrx     dofry     dofrz
         1         0         1         0         0         0         0         0
*SET_NODE_LIST_TITLE
cvorovi provrta rebra za x spc
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         1     0.000     0.000     0.000     0.000MECH
$#    nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
     25438     25818     25589     25063     24834     24682         0         0
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id                                                          heading
         2z constraint gornjeg stakla
$#    nsid       cid      dofx      dofy      dofz     dofrx     dofry     dofrz
         2         0         0         0         1         0         0         0
*SET_NODE_LIST_TITLE
cvorovi gornjeg stakla za z spc
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         2     0.000     0.000     0.000     0.000MECH
$#    nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
     22389     22368     23401         0         0         0         0         0
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
```

```
$#      id                                                                heading
         3y constraint ronilice
$#    nsid       cid      dofx      dofy      dofz     dofrx     dofry     dofrz
         3         0         0         1         0         0         0         0
*SET_NODE_LIST_TITLE
cvorovi za y spc
$#     sid       da1       da2       da3       da4    solver
         3     0.000     0.000     0.000     0.000MECH
$#    nid1      nid2      nid3      nid4      nid5      nid6      nid7      nid8
       250      8869     24705     12313         0         0         0         0
*HOURGLASS_TITLE
hourglass control
$#    hgid       ihq        qm       ibq        q1        q2    qb/vdc        qw
         1         4  0.100000         0  1.500000  0.060000  0.100000  0.100000
*LOAD_SHELL_SET
$opterecenje po shell elementima definiranim u shell setu 1 i opisano sa load curve 1
$#    esid      lcid        sf        at
         1         1  1.000000     0.000
*MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE_TITLE
mat 54 epruvete - konacni materijal
$#     mid        ro        ea        eb      (ec)      prba    (prca)    (prcb)
         1 2.0000E-9 4750.0000 4750.0000     0.000  0.144000     0.000     0.000
$#     gab       gbc       gca      (kf)      aopt
 3000.0000 3000.0000 3000.0000     0.000     0.000
$#      xp        yp        zp        a1        a2        a3    mangle
     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
$#      v1        v2        v3        d1        d2        d3    dfailm    dfails
     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000  0.085000  0.084800
$#   tfail      alph      soft      fbrt     ycfac    dfailt    dfailc       efs
     0.000     0.000     0.000     0.000  2.000000  0.036000 -0.036000     0.000
$#      xc        xt        yc        yt        sc      crit      beta
 170.00000 170.00000 170.00000 170.00000 50.000000 54.000000     0.000
*MAT_RIGID_TITLE
rigid - stakla
$#     mid        ro         e        pr         n    couple         m     alias
         2 7.8500E-9 2.0980E+5  0.300000     0.000     0.000     0.000
$#     cmo      con1      con2
     0.000         0         0
$# lco or a1      a2        a3        v1        v2        v3
     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
*PART
$# title
Property 1 kuciste
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         1         1         1         0         1         0         0         0
*SECTION_SHELL_TITLE
stjenke
$#   secid    elform      shrf       nip     propt   qr/irid     icomp     setyp
         1         2     0.000         4         3         0         0         1
$#      t1        t2        t3        t4      nloc     marea      idof    edgset
  5.000000  5.000000  5.000000  5.000000     0.000     0.000     0.000         0
*PART
$# title
Property 2 pregrada
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         2         2         1         0         1         0         0         0
*SECTION_SHELL_TITLE
pregrada
$#   secid    elform      shrf       nip     propt   qr/irid     icomp     setyp
         2         2     0.000         4         3         0         0         1
$#      t1        t2        t3        t4      nloc     marea      idof    edgset
 15.000000 15.000000 15.000000 15.000000     0.000     0.000     0.000         0
*PART
$# title
Property 3 staklo 1
```

```
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         3         3         2         0         1         0         0         0
*SECTION_SHELL_TITLE
staklo
$#   secid    elform      shrf       nip     propt   qr/irid     icomp     setyp
         3         2     0.000         0         3         0         0         1
$#      t1        t2        t3        t4      nloc     marea      idof    edgset
 20.000000 20.000000 20.000000 20.000000     0.000     0.000     0.000         0
*PART
$# title
Property 4 staklo 2
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         4         4         2         0         1         0         0         0
*SECTION_SHELL_TITLE
staklo
$#   secid    elform      shrf       nip     propt   qr/irid     icomp     setyp
         4         2     0.000         0         3         0         0         1
$#      t1        t2        t3        t4      nloc     marea      idof    edgset
 20.000000 20.000000 20.000000 20.000000     0.000     0.000     0.000         0
*PART
$# title
Property 5 staklo 3
$#     pid     secid       mid     eosid      hgid      grav    adpopt      tmid
         5         5         2         0         1         0         0         0
*SECTION_SHELL_TITLE
staklo
$#   secid    elform      shrf       nip     propt   qr/irid     icomp     setyp
         5         2     0.000         0         3         0         0         1
$#      t1        t2        t3        t4      nloc     marea      idof    edgset
 20.000000 20.000000 20.000000 20.000000     0.000     0.000     0.000         0
*SET_SHELL_LIST_GENERATE_TITLE
optereceni elementi
$#     sid       da1       da2       da3       da4
         1     0.000     0.000     0.000     0.000
$#   b1beg     b1end     b2beg     b2end     b3beg     b3end     b4beg     b4end
         1     24647         0         0         0         0         0         0
     24649     26128         0         0         0         0         0         0
*TERMINATION_DELETED_SHELLS
$#     pid       nds
         1       300
*END
*COMPONENT
$#    clid    color1    color2    color3    color4
         1  0.769000  0.004000  0.110000     0.000         0         0         0
$# name
Part 1
*COMPONENT_PART
$#     pid      clid
         1         1
$#     pid      clid
         2         1
$#     pid      clid
         3         1
$#     pid      clid
         4         1
$#     pid      clid
         5         1
*COMPONENT_END
```