

DINAMIČKA ANALIZA MODELA PODLOGE MINOBACAČA PRIMENOM SOFTVERSKOG PAKETA PRO/ENGINEER

Dr Zoran Ristić, Beograd
major mr Aleksandar Kari, Vojna akademija
potporučnik Miloš Bajević, VP 5542 Beograd

Rezime:

Mehanički modela podloge minobacača kalibra 120 mm modeliran je primenom paketa Pro/Engineer Wildfire. Izrađeni model podloge potpuno je funkcionalan i realan. Takođe, izvršena je strukturna analiza naprezanja podloge minobacača usled opterećenja koja se javljaju u toku opaljenja. Dobijeni rezultati simulacije naprezanja upoređeni su sa eksperimentalnim podacima i rezultatima proračuna dobijenih klasičnim metodama. Na taj način utvrđene su veličine odstupanja i izvršena ocena kvaliteta modela.

Ključne reči: modeliranje, Pro/Engineer, podloga minobacača, naprezanje, deformacije.

DYNAMIC ANALYSIS OF A MODEL OF THE MORTAR BASE PLATE APPLYING THE PROENGINEER SOFTWARE

Summary:

A mechanical model of the mortar base plate is modelled using the Pro/Engineer Wildfire software. The manufactured model of the plate is fully functional and real. The structural stress and strain analysis of the mortar plate during firing has also been carried out. The obtained results of the simulation have been compared with the experimental data and the calculation results obtained by classical methods. The deviation values are thus established and the model quality assessed.

Key words: modeling, Pro/Engineer, mortar base plate, strain, deformations.

Uvod

Od 1988. godine softverski paket Pro/Engineer (Pro/E) postaje jedan od vodećih CAD sistema za potrebe projektovanja, proizvodnje i inženjerske analize.

Koje su prednosti programa Pro/E u odnosu na druge oblike osnovnih CAD paketa?

Pre svega, Pro/E je robustan sistem za 3D parametarsko asocijativno solid-modelovanje bazirano na tzv. tehničkim elementima ili formama. Namenjen je za modelovanje delova i sklopova, izradu tehničke dokumentacije, definisanje postupka izrade delova na NC upravljanim mašinama i inženjerskim analizama [1, 2]. Način modelovanja u programu Pro/E je jedinstven u odnosu na ostale CAD sisteme.

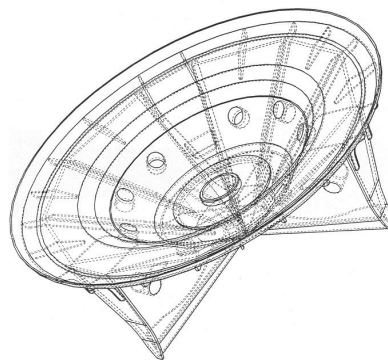
Da bi se kreirao model nekog dela ili sklopa, Pro/E koristi parametarsko modelovanje bazirano na tehničkim elementima. Termin „parametarski“ podrazumeva upotrebu parametara (npr. vrednosti dimenzija). Promena na geometriji utiče na ponovno izračunavanje i prikaz pridruženih dimenzija i obrnuto. Dimenzije su samo jedan od mnogih tipova parametara, a parametri mogu da se pozivaju na druge parametre putem relacija i jednačina.

U ovom radu izvršeno je modelovanje mehaničkog modela podloge minobacača kalibra 120 mm, primenom paketa ProEngineer Wildfire 2.0, i strukturna analiza naprezanja podloge usled opterećenja minobacača pri opaljenju lake trenutnofugasne (LTF) mine [3].

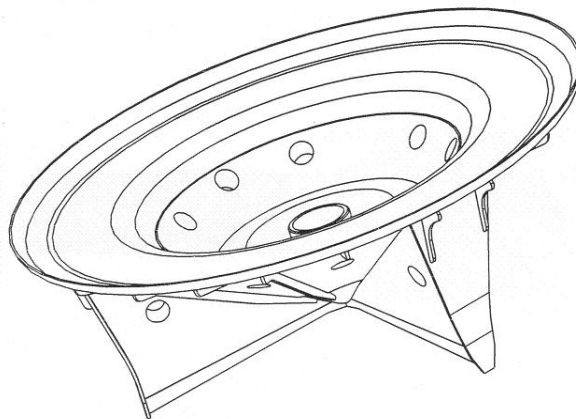
Osnovna verzija programa Pro/E daje veliki broj modula za rad, a ovde su upotrebljena samo dva: Part Modelling – osnova za modeliranje i Structure (FEM) modul – upotrebljen za analizu naprezanja. Model podloge minobacača (MB) urađen je kao jedan deo, odnosno realan sklop, po tačnim merama preuzetim iz tehničke dokumentacije za ovo sredstvo naoružanja [4].

Izrađeni model podloge potpuno je funkcionalan i sasvim realan po dimenzijama, a može se prikazati na više načina. Na slici 1 ilustrovan je model podloge u prikazu *Hidden Line*, a na slici 2 u prikazu *Wire frame*. Ulazak u proračun sa ovakvim realnim modelom podloge predstavlja mnogo više od svih ostalih modela i pojednostavljenja u nekim klasičnim metodama analize i dobar je preduslov za dobijanje tačnijih i preciznijih podataka nego što je inače bilo moguće.

U radu je značajna pažnja posvećena komentaru naprezanja podloge MB dobijenih na osnovu simulacije pomoću Pro/E i na osnovu proračunskih rezultata po klasičnoj teoriji. Dobijeni rezultati veličina naprezanja podloge za razmatrane slučajeve oslanjanja na zemljište upoređeni su sa eksperimentalnim rezultatima radi utvrđivanja veličine odstupanja i ocene tačnosti modela.



Slika 1 – Prikaz Hidden Line
(prikaz konturnih i nevidljivih linija)



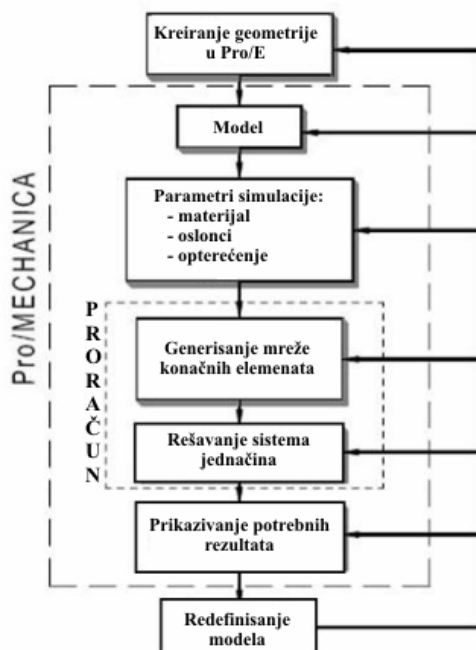
Slika 2 – Wire frame – prikaz modela podloge minobacača

Model podloge MB i rezultati simulacije primenom Pro/E

Model podloge MB 120 mm unapred je modelovan kao model za simulaciju, a ne za kvalitetan vizuelni prikaz realnog sklopa. Na samom modelu izvršena su određena pojednostavljena, neophodna za nesmetano simuliranje opterećenja i naprezanja podloge u procesu opaljenja, a koja su nebitna sa aspekta opterećenja i naprezanja materijala. Ceo sklop podloge modelovan je kao jedan mašinski deo (*Part*) sastavljen od 375 delova (*Features*), a ne kao sklop (*Assembly*). Model je rađen korišćenjem karakterističnih osnovnih alata *Extrude* i *Revolve*. Posle modeliranja podloge, korišćenjem osnovnog modula, pristupa se definisanju simulacionih parametara. Na osnovu realnog stanja dinamičkog ponašanja podloge u procesu opaljenja treba definisati veličine i karakteristike podloge, kao što su: materijal (čelični Č.4730, modul elastičnosti $E = 21 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$), sile i momenti koji deluju na model, i zameniti realan model oslanjanja podloge odgovarajućom aproksimacijom (tabela 2).

Tipičan koncept i algoritam rada u Pro/E prikazan je na slici 3.

Najveća sila pri opaljenju MB 120 mm sa LTF minom dobijena je unutrašnjim balističkim proračunom, a kao karakteristični pravci delovanja sile na model podloge izabrane su tri elevacije (položaja) cevi. Pretpostavljeno je da se maksimalna sila na dno cevi F_{max} preko kuglaste pete zadnjaka prenosi u ležište na podlozi preko cele površine polulopte. Veličine komponenta projekcije sile u horizontalnom i vertikalnom pravcu prikazane su u tabeli 1.



Slika 3 – Algoritam rada u Pro/E

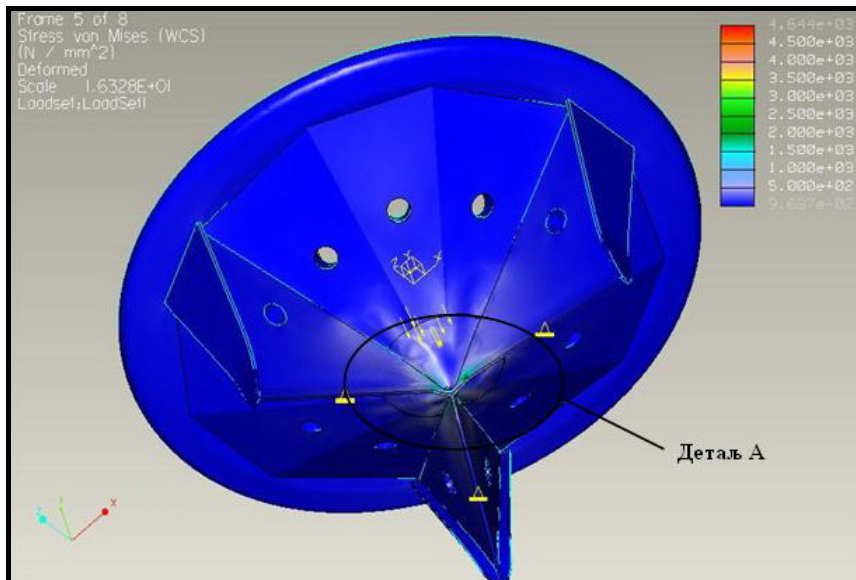
Tabela 1

Veličine sila pri opaljenju

$F_{max} = 1132,6 \text{ kN}$			
Ugao elevacije	45°	60°	85°
$F_H \text{ [kN]}$	800,9	566,3	98,7
$F_V \text{ [kN]}$	800,9	980,9	1128,35

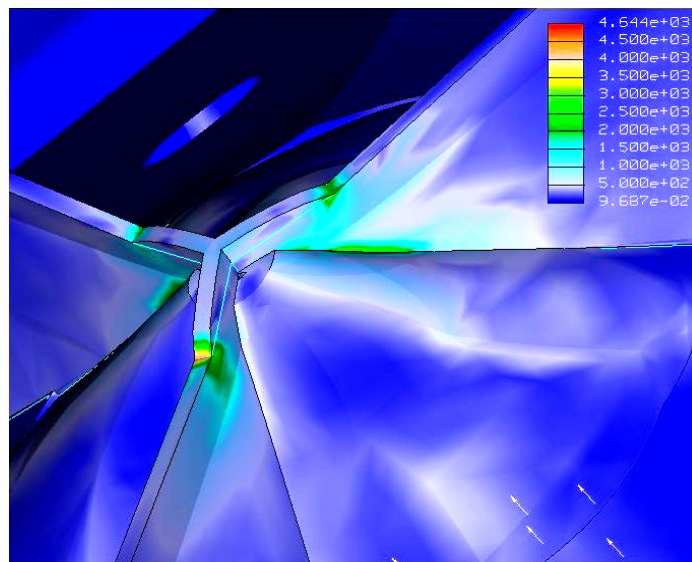
Pri analizi program izračunava geometrijske karakteristike modela podloge: ukupnu masu modela (80,7 kg), momente inercije, položaj osa simetrije, položaj centra mase i dr. Sam program omogućava prikaz veoma širokog spektra rezultata, jer može da obavlja veliki broj analiza. Tako, na primer, moguće je izračunati maksimalna pomeranja modela, energiju, deformacije, naprezanja, toplotne karakteristike za skoro svaku definisanu tačku, liniju ili površinu modela. Dobijeni rezultati mogu se prikazati u više različitih oblika kao što su: grafici, tabele ili animacija naprezanja celog modela ili nekog dela.

Na slici 4 prikazana je deformacija modela podloge MB usled realnih opterećenja pri opaljenju (*Fringe model*), a na slici 5 *detalj A* sa slike 4, sa vidljivim mestima koncentracije naprezanja [3].



Slika 4 – Prikaz realnih deformacija podloge

Što se tiče aproksimacije oslanjanja podloge MB na tlo, pretpostavljeno je da realan model može da ima tri različite mogućnosti oslanjanja prema tabeli 2.



Slika 5 – Detalj A sa mestima koncentracije naprezanja

Tabela 2

Aproksimacije oslanjanja podloge

I	II
U realnom slučaju podloga je na srednjjetvrdom tlu	U realnom slučaju podloga je na mekom tlu, došlo je do utapanja
Aproksimirano oslanjanjem po tri donje ivice krakova	Aproksimirano oslanjanjem po bočnim površinama krakova
III	
U realnom slučaju podloga je na tvrdom tlu, betonu ili asfaltu	
Aproksimirano oslanjanjem u tri donje krajnje tačke krakova	

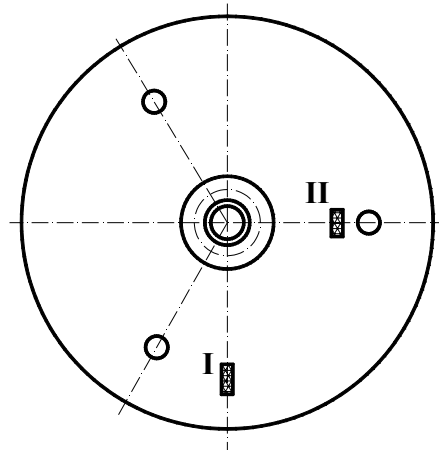
Za razmatrane vrste tla na koje se oslanja podloga MB usvojene su veličine dozvoljenih specifičnih pritisaka. Pod specifičnim pritiskom podrazumeva se statičko opterećenje tla za različite vrste zemljišta.

U slučaju gađanja MB pod uglom elevacije cevi od 45°, 60° i 85° na opitnom poligonu su izvršena merenja stanja naprezanja na gornjoj ploči podloge MB pomoću mernih traka [4]. Merenja su izvršena na dva merna mesta, prema slici 6, a eksperimentalni rezultati naprezanja prikazani su u tabeli 3.

Tabela 3

Eksperimentalni rezultati naprezanja podloge

σ (N/mm ²)	Meko tlo (pesak)		Srednje tvrdno tlo		Tvrdno tlo (beton)	
	I	II	I	II	I	II
45°	–	–	20,0	26,9	–	–
60°	–	–	21,8	24,8	25,0	31,5
85°	–	9,25	14,1	23,5	–	–



Slika 6 – Položaj mernih mesta

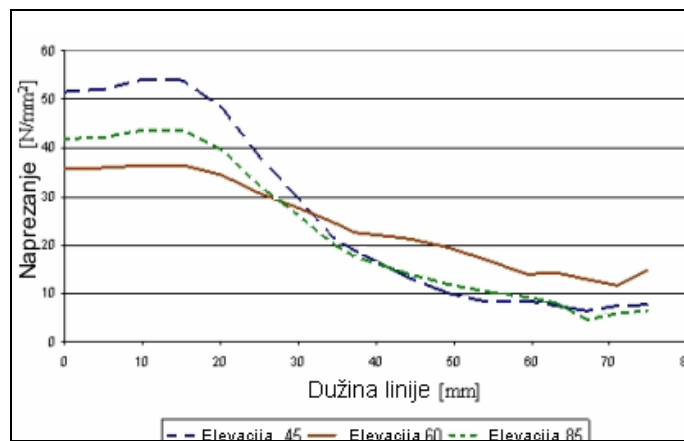
Rezultati naprezanja modela podloge dobijeni primenom Pro/E prikazani su u tabeli 4.

Tabela 4

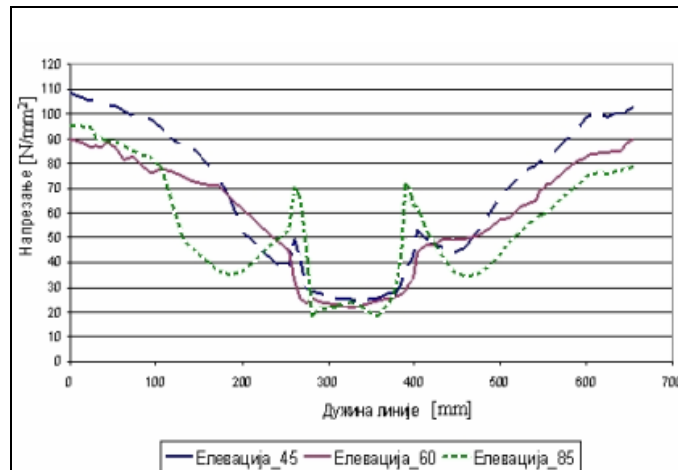
Rezultati naprezanja modela podloge dobijeni u Pro/E

σ (N/mm ²)	Meko tlo (pesak)		Srednje tvrdo tlo		Tvrdo tlo (beton)	
	I	II	I	II	I	II
45°	6,17	9,73	18,86	24,93	104,85	104,74
60°	5,01	7,94	22,47	22,16	117,46	128,81
85°	5,49	8,01	17,49	23,93	96,53	86,56

Na slikama 7 i 8 dati su dijagrami naprezanja podloge minobacača po linijama koje sadrže merna mesta I i II za sve položaje cevi MB pri opaljenju i u slučaju kada je podloga oslonjena na srednjetro tlo.



Slika 7 – Dijagram naprezanja materijala po liniji koja sadrži merno mesto I

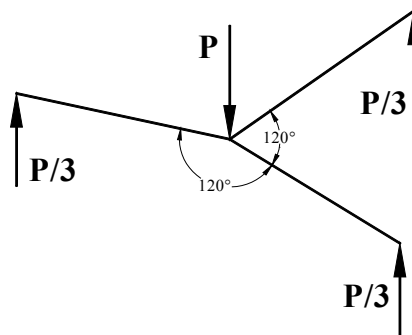


Slika 8 – Dijagram naprezanja materijala po liniji koja sadrži merno mesto II

Klasična metoda analize naprezanja podloge

Proračun naprezanja podloge minobacača po klasičnoj teoriji izvršen je za dva slučaja:

1. Podloga je oslonjena u tri tačke na krutoj površini (slučaj konzole ukleštene na mestu delovanja sile P) (slika 9):



Slika 9 – Aproximacija podloge pomoću konzola

Kompletna podloga zamenjena je sa tri konzole, jer je pretpostavljeno da one imaju najveću krutost. Izvršena je aproksimacija određenih preseka (6 karakterističnih preseka) konzole zbog njihove geometrijske složenosti. Za svaki presek izračunate su sve potrebne veličine. Momenti inercije i moment otpora izračunati su za osu oko koje se vrši savijanje, a na osnovu njih je izračunato maksimalno naprezanje u datom preseku [3].

Rezultati proračuna prikazani su u tabeli 5.

Tabela 5

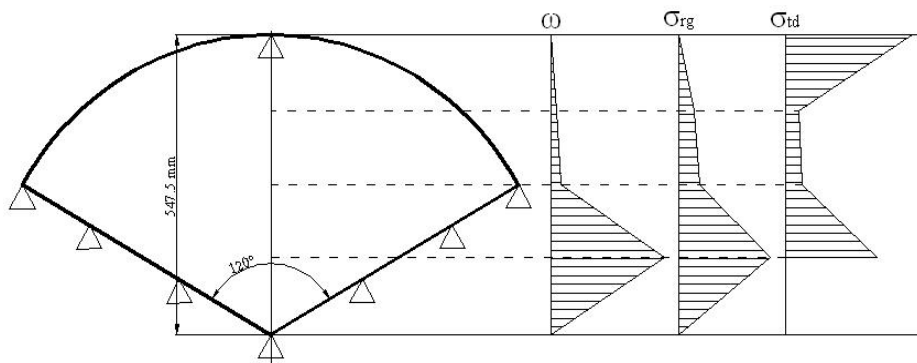
Rezultati proračuna prvom klasičnom metodom

Presek	I	II	III	IV	V	VI
z_i [mm]	49,5	94,5	122	187	247	302
J_{x_T} [cm ⁴]	4056,7	3013,5	1995,7	851,6	500,2	690,4
y_g [cm]	12,80	11,07	8,2	6,1	4,95	2,9
y_d [cm]	18,66	17,29	15,5	11,8	10,9	10,1
Z_g [cm ³]	316,9	272,23	243,7	139,8	101,1	238,1
Z_d [cm ³]	217,4	174,29	129,1	72,4	45,7	68,7
M [Nm]	17187	32812	42361	64930	85764	104862
σ_g [MPa]	54,23	120,53	173,8	464,3	848,7	440,5
σ_d [MPa]	79,06	188,26	328,1	896,6	1877,5	1526,4

Oznake veličina su:

 z_i – udaljenost posmatranog preseka od slobodnog kraja konzole, J_{x_T} – težišni moment inercije preseka u odnosu na h-osu, y_g – rastojanje od težišta do gornje površine preseka, y_d – rastojanje od težišta do donje površine preseka, Z_g – moment otpora za gornja vlakna, Z_d – moment otpora za donja vlakna, M – moment savijanja u preseku, σ_g – naprezanje u gornjim vlaknima preseka, σ_d – naprezanje u donjim vlaknima preseka.

2. Podloga je oslonjena celom površinom na tlo (slučaj ploče slobodno oslonjene po celoj konturi) (slika 10).



Slika 10 – Dijagram naprezanja kružnog isečka gornje ploče podloge

Proračun naprezanja izvršen je za deo ploče između ašova podloge. Pretpostavljeno je oslanjanje ploče po celoj konturi koja je zbog složenog oblika zamenjena kružnim isečkom sa uglom od 120°. Maksimalno savijanje i naprezanje javljaju se na simetrali kružnog isečka. Ugib i naprezanja proračunati su u karakterističnim tačkama, tj. presecima za $r/a = 1/4$, $r/a = 1/2$, $r/a = 3/4$, $r/a = 1$. Rezultati proračuna prikazani su u tabeli 6.

Tabela 6

Rezultati proračuna drugom klasičnom metodom

Presek	r/a = 1/4	r/a = 1/2	r/a = 3/4	r/a = 1
J_{x_T} [cm ³]	$4,3 \cdot 10^{-2}$	2,02	3,06	$5,3 \cdot 10^{-3}$
A [cm ²]	0,8	1,3	0,9	0,4
ω [mm]	14,9	0,38	0,29	0
Z_g [cm ³]	$1,07 \cdot 10^{-1}$	1,5	1,35	$2,7 \cdot 10^{-2}$
Z_d [cm ³]	$1,07 \cdot 10^{-1}$	1,12	1,62	$2,7 \cdot 10^{-2}$
M_r [Nm]	$4,1 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,04 \cdot 10^4$	0
M_T [Nm]	$7,7 \cdot 10^3$	$0,93 \cdot 10^4$	$1,04 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^3$
σ_{rg} [MPa]	384,4	83	77,04	0
σ_{rd} [MPa]	384,4	108,9	64,3	0
σ_{tg} [MPa]	725,6	63,5	61,1	1080
σ_{td} [MPa]	725,6	83,4	51	1080

Komentar dobijenih rezultata simulacije i uporedne analize

Kao što je i očekivano, najmanje vrednosti naprezanja podloge dobijene su kad je podloga oslonjena celom površinom na meko tlo – pesak, a najveće pri oslanjanju na tri krajnje tačke krakova podloge na tvrdo tlo – beton. U tabeli 4 nisu prikazana najveća naprezanja podloge, već naprezanja u tačkama mernih mesta radi daljeg poređenja sa eksperimentalnim rezultatima.

Tabela 7

Uporedni rezultati proračuna Pro/E i eksperimenta

Vrste tla i presek podloge		σ (N/mm ²), elevacija $\varphi = 60^\circ$			
		Eksper.	Pro/E	Klasične metode	
				Konzola	Ploča
		1	2	3	4
Meko tlo	I	–	5,02	–	77,04
	II	–	7,94	–	61,11
Srednje tvrdo tlo	I	21,8	22,47	–	–
	II	24,8	22,16	–	–
Tvrdo tlo	I	25,0	117,46	–	–
	II	31,5	128,81	848,73	–

Dobijene vrednosti naprezanja pri oslanjanju u tri krajnje tačke podloge pri gađanju sa izrazito tvrdog tla takođe su veće u odnosu na eksperimentalne rezultate. Ovakav način oslanjanja podloge u realnom slučaju je malo verovatan i, po pravilu, uvek će se raditi o površinskom ili, eventualno, linijskom oslanjanju. Uporedna analiza rezultata metodom Pro/E i eksperimenta izvršena je u istim presecima podloge i karakterističnim tačkama mernih mesta. Ovi rezultati prikazani su u tabeli 5, a zbog veće raspoloživosti podataka prikazan je slučaj pri gađanju sa elevacijom od 60° .

Na osnovu uporednih rezultata proračuna klasičnom metodom (tabela 7), modelovanjem u Pro/E, i eksperimentalnih rezultata vidi se da postoje velika međusobna odstupanja između datih metoda. Klasičnom metodom tipa konzole dobijeni rezultati mogu se uporediti sa eksperimentalnim samo

pri gađanju sa tvrdog tla zbog oslanjanja u samo tri tačke, jer se pri gađanju sa mekog ili srednjjetvrdog tla podloga minobacača oslanja znatno većom površinom. Najveća odstupanja napreznja su preko 25 puta veća od eksperimentalnih napreznja i prelaze granicu loma materijala podloge ($\sigma_m = 800 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$). U slučaju klasične metode tipa ploče dobijeni rezultati poređeni su sa slučajem oslanjanja podloge minobacača celom površinom, što je slučaj pri gađanju sa mekog tla. Odstupanja su manja i rezultati približniji realnim. Može se zaključiti da se klasične metode mogu primeniti samo za prethodne i grube preliminarne proračune u početnoj fazi projektovanja.

Rezultati dobijeni modelovanjem podloge MB i simulacijom napreznja u Pro/E su realni i bliski eksperimentalnim (razlike su od 5 do 10%), osim velikih odstupanja u slučaju gađanja sa tvrdog tla. Slični rezultati dobijeni su pri gađanju sa najmanjom (45°) i najvećom elevacijom cevi (85°). Ova činjenica pokazuje koliko je simulacija opterećenja podloge MB bila korektna i uspešna.

U odnosu na klasične metode proračuna koji model podloge MB tretiraju u obliku ploče ili tri međusobno uklještene konzole, pa čak i eksperimentalne metode, metoda Pro/E daje skoro neograničene mogućnosti izračunavanja i prikaza širokog spektra rezultata.

Zaključak

Za razliku od obimnog klasičnog proračuna podloge MB, primenom paketa Pro/E Wildfire 2.0, uz odgovarajuća pojednostavljenja i aproksimacije, na relativno jednostavan način dobijaju se realnija i tačnija napreznja i deformacije podloge u svim razmatranim presecima.

Maksimalna napreznja nalaze se na mestima oslanjanja gornje ploče podloge po kracima, ali zbog ojačanja na njima ta mesta nisu relevantna za traženje kritičnih preseka. Kritična mesta po pitanju napreznja su na donjoj strani podloge ispod kuglaste pete zadnjeg dela cevi. Pri projektovanju podloge ona u ovom preseku mora dodatno da se ojača.

Značaj kvalitetne računarske simulacije složenih delova i sklopova oruđa opterećenih velikim silama impulsnog delovanja pomoću paketa Pro/E u projektovanju naoružanja je od posebne važnosti. Zbog velikog broja podataka proračuna i analiza koje nudi treba da bude više primenljiv u inžinjerskoj praksi nego do sada.

Literatura

- [1] Toogood, R.: *Pro Mechanics Structure Tutorial*, 2002.
- [2] Graham, G., Steffen, D.: *Inside Pro/Engineer 2001*, 2002.
- [3] Bajević, M.: *Dinamička analiza opterećenja podloge minobacača*, diplomski rad, Vojna akademija Beograd, 2006.
- [4] Kari A., Bajević M.: *Modeliranje podloge minobacača – projektni zadatak*, Vojna akademija Beograd, 2005.
- [5] Elaborat br. 24-098 Rezultati merenja na oruđima, VTI, Beograd, 1981.