

UTICAJNI FAKTORI NA POVRATNI UGAO SLOBODNOG V – SAVIJANJA LIMOVA KONSTRUKCIONIH ČELIKA / FACTORS INFLUENCING THE RETURN ANGLE OF THE FREE V - BENDING OF STRUCTURAL STEEL SHEETS

Darijo Božičković, Bsc., e-mail: darijobozickovic@gmail.com
Internacionalni Univerzitet Travnik u Travniku, Fakultet politehničkih nauka, BiH
prof. dr Zdravko Božičković, e-mail: zdravko.bozickovic@gmail.com
Internacionalni Univerzitet Travnik u Travniku, Fakultet politehničkih nauka, BiH
prof. dr Slavko Đurić, e-mail: slavko.djuric@sf.ues.rs.ba
Internacionalni Univerzitet Travnik u Travniku, Fakultet politehničkih nauka, BiH
prof. dr Milan Plavšić, e-mail: m.plavsic2013@gmail.com
Internacionalni Univerzitet Travnik u Travniku, Fakultet politehničkih nauka, BiH
prof. dr Ranko Božičković, e-mail: bozickovicranko@gmail.com
Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Saobraćajni fakultet, BiH

Izvorni naučni rad

Abstrakt: Proces savijanja lima je jedno od najznačajnijih područja primjene plastičnom deformacijom. U procesu savijanja vrlo je bitno da proizvod treba imati željeni ugao. Nadalje, kako bi dobili željeni ugao u savijenim dijelovima, moraju biti poznati iznosi povratnog ugla. U ovoj istraživanju, postupci savijanja primijenjeni su na lim kvaliteta S235JR debljine 3, 4, 6, 8 i 9 mm. Ugao savijanja je: 20°, 30°, 45°, 60°, i 70°. Ovi limovi su savijeni u normalizovanom stanju. Osim toga, proces savijanja je proveden tako da pritiskivač čeka na materijalu 3 sekunde. Kao rezultat eksperimenta utvrđeno je da dok se količina povratka unazad povećala u procesu savijanja od 30° ovisno o debljini materijala, smanjila se u primjenama od 60° i 90°.

Ključne riječi: Slobodno savijanje, povratni ugao, pritiskivač, prizma

Abstract: The sheet metal bending process is one of the most important areas of application of plastic deformation. In the bending process, it is very important that the product should have the desired angle. Furthermore, in order to obtain the desired angle in the bent parts, the return angle amounts must be known. In this research, bending procedures were applied to sheet metal quality S235JR with a thickness of 3, 4, 6, 8 and 9 mm. The bending angle is: 20°, 30°, 45°, 60°, and 70°. These sheets are bent in a normalized state. In addition, the bending process is carried out so that the presser waits on the material for 3 seconds. As a result of the experiment, it was determined that while the amount of backlash increased in the 30° bending process depending on the material thickness, it decreased in the 60° and 90° applications.

Key words: Air bending, return angle, presser, prism

1. UVOD

Kod slobodnog savijanja, gornji alat pritišće lim u V otvor na donjem alatu do unaprijed određene dubine, ali bez dodirivanja dna alata (Sl. 4). Ovo je vrsta savijanja u tri tačke, gdje samo radijusi savijanja gornjeg i donjeg alata dolaze u dodir s limom. Radijus pritiskivača gornjeg alata i V ugao donjeg alata ne moraju biti isti.

Stoga se može primijeniti kombinacija gornjih i donjih alata univerzalno, što znači da se jednom kombinacijom mogu proizvesti različiti proizvodi i oblici profila jednostavnim podešavanjem aktivnog hoda alata. Drugim riječima, jednom kombinacijom alata, višestruki materijali i debljine mogu se savijati u nizu uglova savijanja. To čini slobodno savijanje vrlo fleksibilnom tehnikom. To također znači da se broj izmjena alata može značajno ograničiti, čime se povećava produktivnost. Još jedna prednost: potrebna je manja sila savijanja, što znači manje glomazne alate i rezultira dodatnim dopuštenjem u planiranju proizvoda. Slobodno savijanje ima tačnost ugla od približno $\pm 0,5$ stupnjeva. Za razliku od savijanja u kalupu, radijus savijanja nije određen oblikom alata, već ovisi o elastičnosti materijala (slika 4).

Predmet istraživanja je slobodno V–savijanje limova konstrukcionih čelika. Savijanje na hidrauličnim apkant presama je proces koji se često koristi za izradu dijelova od lima. Problem se javlja nakon uklanjanja opterećenja pritiskivača. Konačni ugao savijanja, tj. ugao koji je postignut je manji od početnog zadanog ugla savijanja. Ovaj povratni ugao nastaje zbog elastičnog oporavka lima nakon rasterećenja. Istraživani su različiti teorijski modeli za predviđanje povratnog ugla kod slobodnog savijanja pomoću geometrije alata i poznatih karakteristika materijala obratka. Međutim, u proizvodnom okruženju, stvarne karakteristike bilo kojeg radnog komada mogu varirati od nominalnih svojstava materijala za svaku novu serijsku isporuku lima za izradu obratka. Ova varijacija uzrokuje odstupanje stvarnog povratnog ugla od teoretskih predviđanja. U predloženom pristupu, karakteristike obratka se kontroliše iz izmjerenih uglova savijanja pod opterećenjem i nakon rasterećenja. Procijenjene karakteristike koriste se za određivanje konačnog položaja pritiskivača potrebnog za postizanje željenog ugla savijanja nakon povratnog ugla.

Integracija povratnog ugla u projektovanju procesa V–savijanja predstavlja značajan izazov zbog poteškoća povezanih s njegovim predviđanjem.

1.1 Provedena istraživanja na povratnom uglu kod savijanja

Özdemir et al., istraživali su ponašanje ugla elastičnog vraćanja kod limova različite debljine i svojstava pod različitim uslovima toplinske obrade (netopliniska obrada, normalizirano i kaljeno), vrijeme zadržavanja i različite radijuse vrha proboja kako bi ispitali oprugu i vrijednosti povratnog ugla u procesima oblikovanja lima. Thipprakmas i dr., istraživali su efekat parametara kao što su debljina lima, ugao savijanja i radijus pritiskivača te aktivnog hoda alata u V procesima savijanja na vrijednosti povratnog ugla koristeći metodu konačnih elemenata (FEM) i ANOVA. Nakon studije; utvrđeno je da debljina čeličnog lima utiče na vrijednost veličine povratnog ugla [5-8]. Liu i dr., ispitali su efekat debljine lima, veličine zrna, u smjeru valjanja i parametara frekvencije savijanja na povratnu vrijednost pomoću metode mikro W savijanja. Kao rezultat ispitivanja

utvrđeno je da je debljina čeličnog lima i veličina zrna bila uticajna na veličinu povratnog ugla. Dobivene rezultate analizirali su taguchi metodom [9]. Tekaslan i dr. ispitali su efekat vremena držanja pritiskivača u krajnjem položaju u V matrici za savijanje [10,11]. Bakhshi-Jooybari i dr., numerički su i eksperimentalno ispitali efekat važnih parametara uključujući radijus savijanja, smjer valjanja i debljine lima. Prema dobivenim rezultatima utvrđeno je da se s povećanjem debljine lima smanjuju vrijednosti povratnog ugla. U postupcima savijanja utvrđeno je da radijus pritiskivača bitno ne utiče na povratni ugao. Utvrđeno je da je smjer valjanja uticajan na vrijednosti povratnog ugla [12]. Shukla i Gautam koristili su čelični lim s niskim udjelom ugljenika u različitim smjerovima valjanja kako bi istražili efekat anizotropije lima. Ispitivanja su provedena korištenjem radijusa vrha pritiskivača od 7,5 mm u V matrici za savijanje. Kao rezultat ispitivanja, utvrđeno je da su FEM rezultati i eksperimentalni podaci međusobno bliski. Fei i Hodgson eksperimentalno su i numerički ispitali ponašanje povratnog ugla kroz proces slobodnog V savijanja. Osim toga, istraživali su uticaj promjenjivog i konstantnog modula elastičnosti i trenja na povratni ugao.

1.2 Uzrok povratnog ugla

Prije svega, savijanje limova kao proces je operacija hladnog oblikovanja koja se postiže prekoračenjem granice elastičnosti lima. Zatim, nakon povlačenja pritiskivača i opuštanja naprezanja, dolazi do neposredne povratne opruge, trajna deformacija je izražena koja ostaje i dimenzije su van tolerancije. Zaista, povratni ugao ($\Delta\varphi$) dolazi u nekoliko oblika, kao što je razlika između ugla prije rasterećenja (α_1) i ugla nakon rasterećenja ploče (α_2), kao što je to definitivno naznačeno na slici 1.

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (1)$$

S jedne strane, odnosom radijusa zakrivljenosti prije povlačenja pritiskivača (R_p) i radijusa nakon opuštanja lima (R_s) izraženim pojednostavljenim modelom Hasforda i Cadell-a [3] koji je dat jednačinom (2).

$$\Delta\varphi = \frac{1}{R_p} - \frac{1}{R_s} = \frac{2\sqrt{3}}{t \cdot E} \sigma_e \cdot (1 - \nu^2) \quad (2)$$

$$\Delta\varphi = \frac{1}{R_p} - \frac{1}{R_s} = \frac{6 \cdot K \cdot (1 - \nu^2)}{(n+2) \cdot t \cdot E} \cdot \left(\frac{t}{2R_p}\right)^2 \quad (3)$$

S druge strane, razvijenim modelom Hasforda i Cadelala [3]-[5] korištenjem jednadžbe. (3). Alternativno, Gardinerovom modelom koji se najviše koristi u proračunu povratnog opterećenja [1]-[2] on je tačno dat jednadžbom. (4).

$$\Delta\varphi = \frac{R_p}{R_s} = 4 \cdot \left(\frac{R_p \cdot \sigma_e}{E \cdot t}\right)^3 - 3 \cdot \left(\frac{R_p \cdot \sigma_e}{E \cdot t}\right) + 1 \quad (4)$$

Inače, Queener modelom [4] koji je definisan jednadžbom. (5).

$$\Delta\varphi = \frac{R_p}{R_s} = 1 - \frac{3 \cdot K \cdot (1-v^2)}{(n+2) \cdot E \cdot \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{1+n}{2}}} \cdot \left(\frac{2 \cdot R_p}{t}\right)^{1-n} \quad (5)$$

2. METODOLOGIJA

Funkcija stanja procesa i granični uslovi definišu matematički model procesa slobodnog savijanja. Boks i Vilson su za nelinearne polinomijalne funkcije reagovanja drugog reda postavili poseban metod u osnovi kojeg je sadržan centralni kompozicioni plan, usaglašen sa eksperimentalnom koncepcijom. Pomoću ove metode može se:

- identifikovati optimalna oblast,
- matematički modelirati optimalnu oblast adekvatnim polinomom drugog i višeg reda i
- definisati tolerancije granice optimalnog područja svake od respektivnih promjenljivih višefaktornog procesa ili sistema.

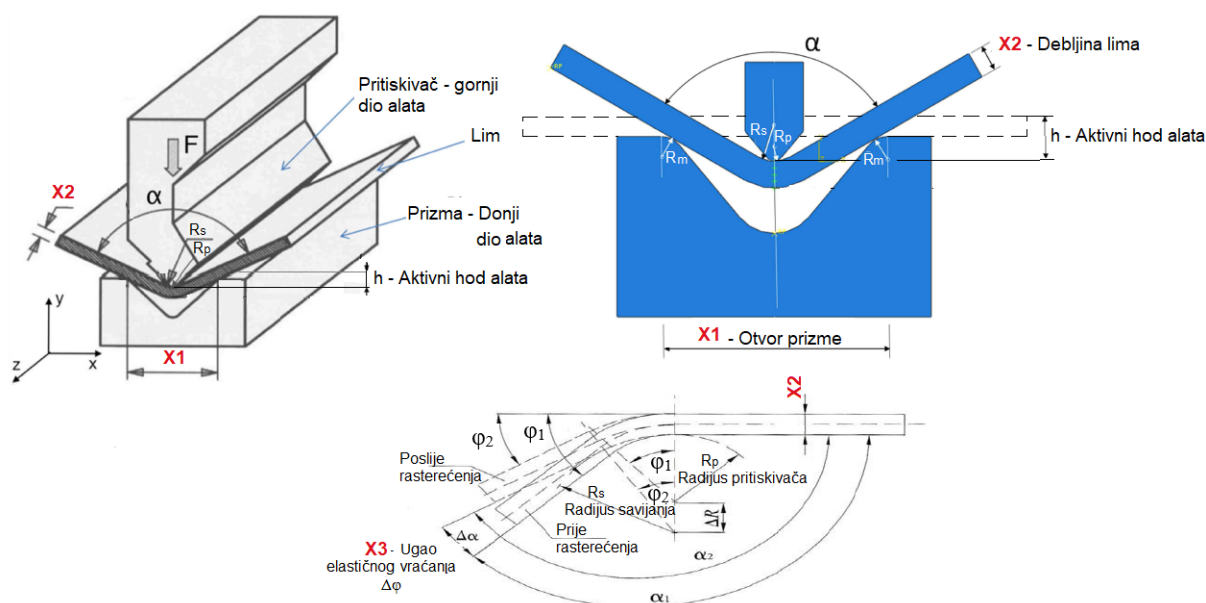
Da bi se definirao kvalitetan matematički model procesa, potrebna je detaljna analiza varijabli koje utiču na proces, što zahtijeva dugotrajnu specijalizovanu ekspertizu stručnjaka sa teoretskim i praktičnim znanjima iz područja koja se analiziraju. Modeliranje procesa izvedeno je korištenjem višefaktornog plana prvog reda 2^k i centralnog kompozicionog plana $2^k + 2k + n_0$ a odzivna funkcija definisana je matematičkom relacijom [14]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot X_i + \sum_{1 \leq i \leq m} b_{im} \cdot X_i \cdot X_m + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot X_i^2 + \sum_{1 \leq i \leq m \leq k} b_i \cdot X_i \cdot X_m \cdot X_k \quad (6)$$

U virtualnom eksperimentu varirana su tri uticajna faktora na pet nivoa. Varirani su slijedeći faktori na pet nivoa: Otvor prizme ($V=X_1$), debljina lima ($t=X_2$) i ugao savijanja ($\varphi=X_3$). Variranje osnovnih faktora prikazano je u tabeli 1. Desna strana tabele prikazuje rezultate mjerenja.

Tri glavna faktora sa tri nivoa posebno su uzeta u obzir kako bi se dobio empirijski model za predviđanje povratnog ugla. Značajno je da se interakcije reda jednakog ili većeg od tri uglavnom zanemaruju. Shodno tome, da bi se izvršila ova studija i statistička analiza, neophodno je izvršiti ponavljanje testova. Ilustracije radi, u našem slučaju smo izveli 3 ponavljanja.

Prikaz promjenljivih veličina u kodiranom obliku date su na slici 1.



Slika 1. Prikaz promjenljivih veličina u procesu slobodnog savijanja

Tabela 1. Prikaz nivoa variranja uticajnih faktora

X1 – Otvor prizme, [mm]. X2 – Debljina lima, [mm]. X3 – Ugao savijanja, [°].		Nivoi	X1 Otvor prizme	X2 Debljina lima	X3 Ugao savijanja
Skup tačaka na tjemenu kuba	Interval varijacije – I		10	2	15
	Gornji nivo – GN	1	70	8	60
	Osnovni nivo-ON	0	60	6	45
	Donji nivo – DN	-1	50	4	30
Skup tačaka na centralnim osama (2k=2·3)	Donji nivo – DN	- 1,682	43	3	20
	Gornji nivo – GN	1,682	77	9	70

Eksperimentalna oprema i aparatura

Za izvođenje eksperimentalnog istraživanja odabran je obradni sistem koji se koristi u proizvodnji. Tip sistema je vertikalna hidraulična presa za profilno savijanje – tandem presa tipa 2xPSH 800/6500 sa CNC upravljanjem. Hidrauličnu presu za profilno savijanje čine dvije spregnute prese, čime je omogućena izrada profila i poligonalnih cijevi od lima dužine do 12 m sa maksimalnom silom savijanja do 16.000 kN. Za dobijanje kvalitetnog obratka prilikom savijanja, rad prese u tandemu mora biti sinhronizovan da bi bilo obezbijeđeno paralalno vođenje oba pritiskivača u radnom hodu. Obradni sistem ima brzinu prilaza pritiskivača od 140 m/s, brzinu deformisanja od 2,5 mm/s i brzinu dizanja pritiskivača od 25 mm/s. Pri dostizanju svog krajnjeg donjeg položaja pritiskivači miruju oko tri sekunde.

Materijal uzoraka

Za ispitivanje uzet je čelilni lim kvaliteta S 235 koji ima sljedeće karakteristike

Zatezna čvrstoća $R_m = 340 \text{ N/mm}^2$,

Granica elastičnosti $R_{0,2} = 235 \text{ N/mm}^2$,

Modul elastičnosti $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$,

Poasonov broj $\nu = 0,3$.

Tabela 2. Hemijski sastav čelika S 235

Ugljik (C) max %	Mangan (Mn) max %	Silicijum (Si) max %	Fosfor (P) max %	Sumpor (S) max %
0.22	1,60	0.05	0.05	0.05

Mjerna oprema

Mjerenje radijusa savijanja vršeno je mjerilima za mjerenje radijusa, a ugao savijanja prije i poslije rasterećenja pritiskivača na lim prilikom savijanja mjereno je sa univerzalnim ugaonikom sa satom. Na kraju svakog testa savijanja, ugao koji formira komad za ispitivanje nakon povratnog ugla za tačna mjerenja se mjeri profilnim projektorom (PJ-A3000) sa tačnošću od $\pm 0,01$ stepena Slika 2.



Slika 2. Profilni projektor PJ-A3000

3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

3.1 Eksperiment 1

Da bi se dobio traženi ugao savijanja obradka bez škarta, a i time aktivni hod alata, izvršen je eksperiment na otvoru prizme $V=25$ mm sa debljinom lima 1 i 2 mm i sa dužinom linije savijanja 70 mm. Aktivni hod (h) alata je pređeni put pritiskivača lima od momenta dodira lima do krajnje donje tačke savijanja.

Odabrali smo da odredimo pomake svih čvorova koji se nalaze na gornjoj liniji kroz koordinatne tačaka pri opterećenju i nakon rasterećenja.

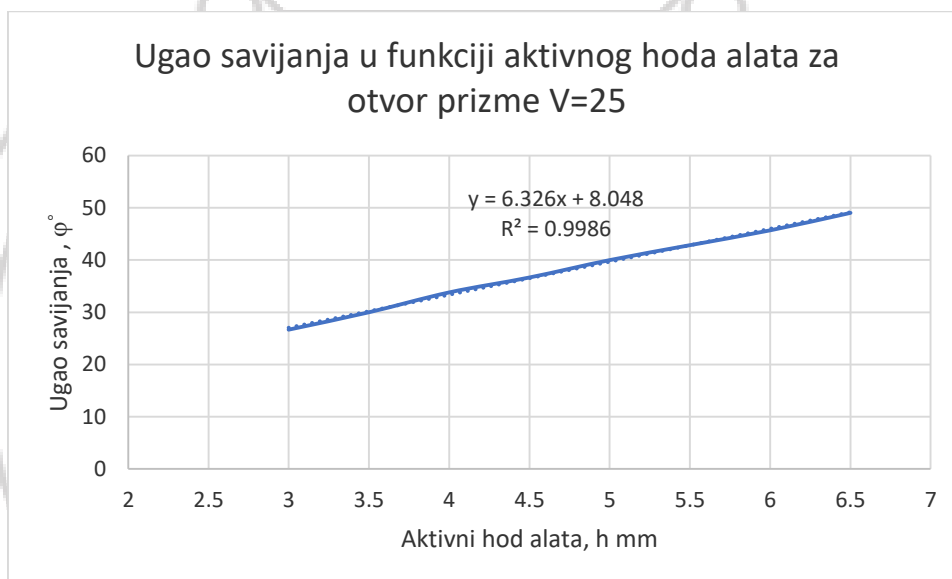
Ovi pomaci se zapisuju i zatim obrađuju kako bi se odredili uglovi savijanja, radijus zakrivljenosti i povratni ugao za savijanje lima debljine 1 mm od čelika (S 235) i za otvor matrice $V = 25$ mm sumirani su u tabeli 3.

Tabela 3. Povratni ugao sa radijusom prije i poslije savijanja lima od 1 mm za matricu širine $V = 25$ mm.

Aktivni hod alata h (mm)	R_p (mm)	R_s (mm)	α_s (°)	α_p (°)	$\Delta\alpha$ (°) = $\Delta\phi$ (°)
3	7,019	7,254	148,23	150,51	2,28
3,5	6,201	6,392	144,3	146,56	2,26
4	5,585	5,745	139,63	141,86	2,22
4,5	5,077	5,213	134,28	136,45	2,17
5	4,66	4,778	130,26	132,37	2,1
5,5	4,317	4,422	126,59	128,62	2,03
6	4,177	4,274	122,78	124,83	1,96
6,5	3,896	3,982	119,58	121,55	1,9
7	3,647	3,724	116,75	118,62	1,83

Tabela 4. Aktivni hod alata u funkciji ugla savijanja za lim debljine 1 mm i matricu širine $V = 25$ mm.

Aktivni hod alata, mm	Konačni ugao, α°	Ugao savijanja $\varphi = 180 - \alpha$
3,0	153,33	26,67
3,5	150,00	30
4,0	146,19	33,81
4,5	143,33	36,67
5,0	140,00	40
5,5	137,14	42,86
6,0	134,29	45,71
6,5	130,95	49,05

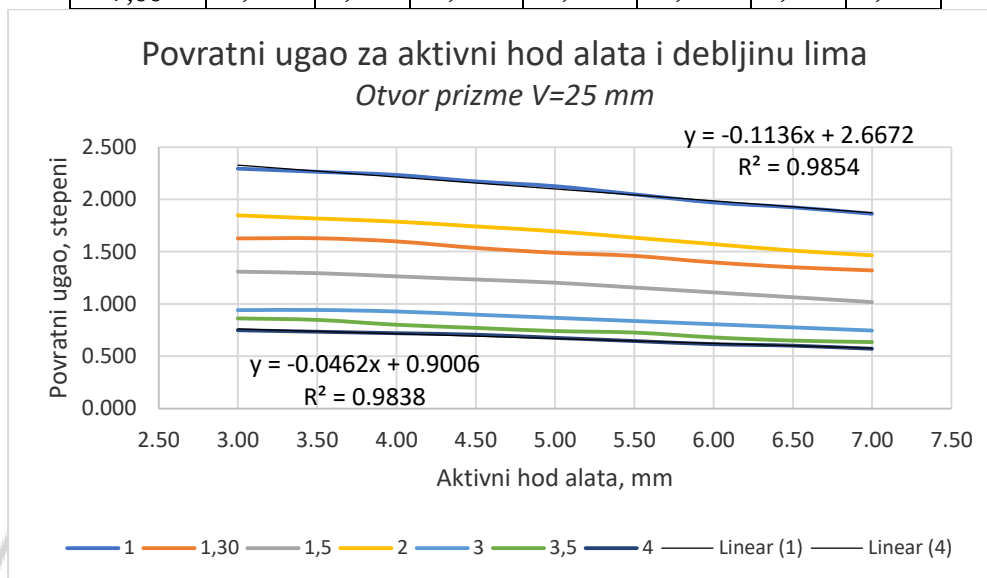


Slika 3. Ugao savijanja u funkciji aktivnog hoda alata.

Tabela 5. Povratni ugao ($\Delta\varphi^\circ$) lima od 1 do 4 mm za matricu širine $V = 25$ mm.

Aktivni hod alata, mm	Debljina lima, mm						
	1	1,30	1,5	2	3	3,5	4
3,00	2,295	1,626	1,307	1,849	0,941	0,861	0,750
3,50	2,264	1,627	1,293	1,818	0,943	0,847	0,736
4,00	2,234	1,597	1,263	1,788	0,928	0,801	0,721
4,50	2,172	1,535	1,233	1,742	0,898	0,771	0,707
5,00	2,126	1,489	1,202	1,696	0,868	0,740	0,677
5,50	2,048	1,459	1,156	1,634	0,838	0,726	0,647

6,00	1,970	1,397	1,110	1,572	0,807	0,680	0,616
6,50	1,924	1,350	1,064	1,510	0,777	0,650	0,602
7,00	1,862	1,320	1,018	1,463	0,747	0,635	0,572

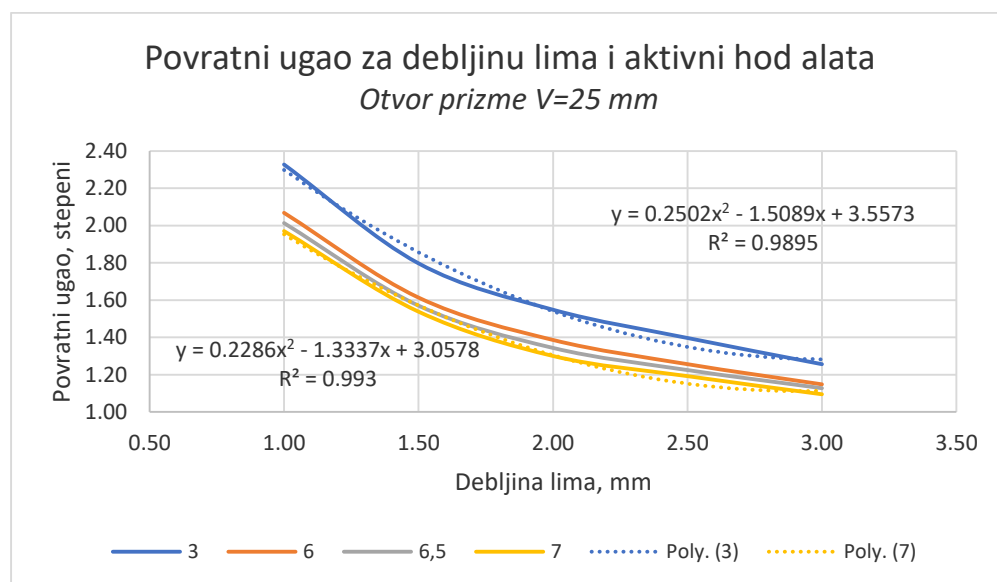


Slika 4. Povratni ugao u funkciji aktivnog hoda alata.

Slika 4. prikazuje povratni ugao kao glavne funkcije za aktivni hod alata za otvor matrice V = 25 mm pri različitim debljinama. Od sada, sve ove krive imaju isti izgled za različite vrijednosti debljine lima, imajte na umu da opružni nagib varira između 0,56 i 2,26 stepeni.

Tabela 6. Povratni ugao u u funkciji debljine lima i aktivnog hoda alata

Debljina lima, mm	Aktivni hod alata, mm			
	3	6	6,5	7
1,00	2,33	2,07	2,01	1,97
1,50	1,80	1,61	1,57	1,54
2,00	1,55	1,39	1,34	1,30
2,50	1,40	1,26	1,22	1,19
3,00	1,26	1,15	1,13	1,09



Slika 5. Povratni ugao u funkciji debljine lima.

Slika 5 predstavlja povratni ugao u funkciji debljine lima za hod alata od 3 do 7 mm. Međutim, napominjemo da se povratni ugao smanjuje s povećanjem debljine lima za savijanje.

Može se zaključiti, da je ugao savijanja i povratni ugao za aktivni hod alata koji je u funkciji ugla savijanja, (vidi sliku 3 i 4) linearna funkcija. Ugao savijanja se povećava sa povećanjem hoda alata, jednačina 7, dok se povratni ugao smanjuje sa povećanjem hoda alata, jednačina 8 i 9.

Ugao savijanja u funkciji aktivnog hoda alata je linearna funkcija i dat je jednačinom:

$$y = 6,326x + 8,048, \quad R^2 = 0,9986 \quad (7)$$

gdje je:

y – ugao savijanja, °

x – aktivni hod alata, mm

Povratni ugao u funkciji aktivnog hoda alata, za debljinu lima 4 i 1 mm (jednačina 8 i 9) odnosno ugla savijanja je takođe linearna funkcija, slika 4.

$$y = -0,1136x + 2,6672, \quad R^2 = 0,9854 \quad (8)$$

$$y = -0,0462x + 0,9006, \quad R^2 = 0,9838 \quad (9)$$

gdje je:

y = $\Delta\varphi$ – ugao elastičnog vraćanja ili povratni ugao, °

x – aktivni hod alata, mm

Povratni ugao u funkciji debljine lima 7 i 1 mm (jednačina 10 i 11) je jednačina drugog reda

$$y=0,2502x^2-1,5089x+3,5573, \quad R^2 = 0,9895 \quad (10)$$

$$y=0,286x^2-1,3337x+3,057, \quad R^2 = 0,9993 \quad (11)$$

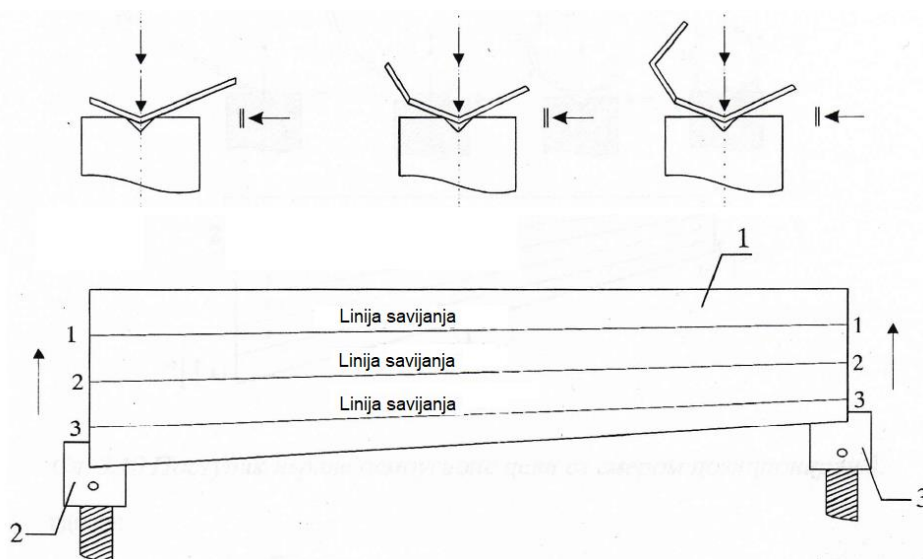
3.2 Eksperiment 2

S obzirom na raznolikost parametara savijanja za svaki nivo kao što je prikazano u tabeli 1 i da bismo imali jednostavno modeliranje, potrebno je dodijeliti, u skladu sa standardizacijom eksperimentalnog plana za svaki parametar, redukovane centrirane vrijednosti (-1; 0; 1). Stoga će ovo modeliranje u konačnici ponuditi jednostavnu matematičku prezentaciju značajnu za razvoj empirijskog modela.

Drugi dio eksperimenta izveden je prema tabeli 3 i slici 1. Podaci su sažeti u obliku matrice eksperimenata. Najuvjerljiviji dokaz je prikazan u kompletnom planu, broj mogućih kombinacija između svih nivoa je (20) ili (60) eksperimenata, tabela 7. Statistička obrada rezultata eksperimenta su rađena u MiniTAB softveru.

Ograničenja koja su bila u eksperimentalnom istraživanju su:

- Uzorci su bili limovi trapeznog oblika namijenjeni za plašteve poligonalnih konusnih cijevi.
- Savijanje je izvedeno na uzorcima dužine 12 m.
- Savijanje se izvodi duž linije valjanja, što čini nepovoljnim sa stanovišta slobodnog savijanja.
- Stranice profila nisu jednake duž linije savijanja.



Slika 6. Postupak izrade otvorenog profila sa smijerom pozicioniranja

Statistička obrada rezultata Eksperimenta pomoću softvera MiniTab

Obrada rezultata eksperimenta fokusirana je na prikazivanju polinomne jednačine nezavisne varijable Y-povratni ugao ($\Delta\phi$) lima nakon opercije savijanja u funkciji zavisnih varijabli: X1 - otvor prizme, X2 - debljine lima i X3 - ugao savijanja. U izvođenju eksperimenta primijenjen je model Centralnog kompozicionog plana [16], sa nekodiranim vrijednostima varijabli, kako je prikazano u tabela 7. Ulazni podaci za eksperiment su prikazani u listingu softvera, kako slijedi:

Central Composite Design

Factors: 3 Replicates: 3
 Base runs: 20 Total runs: 60
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Two-level factorial: Full factorialnju

Cube points: 24
 Center points in cube: 18
 Axial points: 18
 Center points in axial: 0
 Alpha: 1,68179

Analysis of Variance for Povratni ugao

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	10,8787	10,8787	1,2087	4,36	0,000
Linear	3	6,7978	0,4579	0,1526	0,55	0,650
Square	3	0,3325	0,3325	0,1108	0,40	0,754
Interaction	3	3,7483	3,7483	1,2494	4,51	0,007
Residual Error	50	13,8631	13,8631	0,2773		
Lack-of-Fit	5	6,3337	6,3337	1,2667	7,57	0,000
Pure Error	45	7,5294	7,5294	0,1673		
Total	59	24,7418				

Tabela 7. Plan i eksperimentalni rezultati provedenih ispitivanja.

Višefaktorni plan prvog reda 2 ^k i centralni kompozicioni plan 2 ^k +2k+n ₀							EKSPERIMENTALNI REZULTATI						
		Promjenljivi faktori						Povratni ugao Δφ [°]					
		Kodirani			Nekodirani			Rezultati mjerenja					
		X ₁	X ₂	X ₃	X1 Otvor prizme	X2 Debljina lima	X3 Ugao savijanj	1	2	3	Aritmetička sredina	Standardna devijacija	Koeficijent varijacije
1	Skup tačaka na tjemenu kuba (plan prvog reda 2k=23)	-1	-1	-1	50	4	30	1,5	1,6	1,9	1,67	0,17	10,20
2		1	-1	-1	70	4	30	1,6	3,7	3,1	2,80	0,88	31,54
3		-1	1	-1	50	8	30	1,2	1,3	2,8	1,77	0,73	41,42
4		1	1	-1	70	8	30	1,3	1,7	1,5	1,50	0,16	10,89
5		-1	-1	1	50	4	60	2,8	3,1	2,7	2,87	0,17	5,93
6		1	-1	1	70	4	60	2,3	2,3	2,8	2,47	0,24	9,56
7		-1	1	1	50	8	60	2,9	3,7	3,6	3,40	0,36	10,47
8		1	1	1	70	8	60	3	3	2,8	2,93	0,09	3,21
9	Skup tačaka na centralnim osama (2k=2-3)	-1,68	0	0	43	6	45	3,1	2,9	3,6	3,20	0,29	9,20
10		1,682	0	0	77	6	45	1,8	2	2,1	1,97	0,12	6,34
11		0	-1,68	0	60	3	45	3	3,4	3,6	3,33	0,25	7,48
12		0	1,68	0	60	9	45	1,5	1,8	1,6	1,63	0,12	7,64
13		0	0	-1,68	60	6	20	2	2,4	2,2	2,20	0,16	7,42
14		0	0	1,682	60	6	70	2,3	2,6	2,1	2,33	0,21	8,81
15	Skup centralnih tačaka (n ₀ =6)	0	0	0	60	6	45	2,3	2,1	2,5	2,30	0,16	7,10
16		0	0	0	60	6	45	2,7	3,1	2,3	2,70	0,33	12,10
17		0	0	0	60	6	45	2,3	2,4	3,1	2,60	0,36	13,69
18		0	0	0	60	6	45	2,6	2,3	1,9	2,27	0,29	12,65
19		0	0	0	60	6	45	1,9	2,2	2,3	2,13	0,17	7,97
20		0	0	0	60	6	45	2,6	2,5	2	2,37	0,26	11,09

Polinomna jednačina drugoga reda se dobiva na osnovu regresione analize:

Response Surface Regression: Povratni ugao versus Otvor prizme

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for Povratni ugao

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,364423	4,30285	0,085	0,933
Otvor prizme	0,030365	0,10669	0,285	0,777
Debljina lima	-0,054548	0,43517	-0,125	0,901
Ugao savijanja	0,071930	0,05802	1,240	0,221
Otvor prizme*Otvor prizme	0,000620	0,00080	0,775	0,442
Debljina lima*Debljina lima	0,006671	0,02002	0,333	0,740
Ugao savijanja*Ugao savijanja	-0,000222	0,00036	-0,623	0,536
Otvor prizme*Debljina lima	-0,009167	0,00537	-1,706	0,094
Otvor prizme*Ugao savijanja	-0,001444	0,00072	-2,016	0,049
Debljina lima*Ugao savijanja	0,009167	0,00358	2,559	0,014

S = 0,5266 R-Sq = 44,0% R-Sq(adj) = 33,9%

Analysis of Variance for Povratni ugao

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
--------	----	--------	--------	--------	---	---

Regression	9	10,8787	10,8787	1,2087	4,36	0,000
Linear	3	6,7978	0,4579	0,1526	0,55	0,650
Square	3	0,3325	0,3325	0,1108	0,40	0,754
Interaction	3	3,7483	3,7483	1,2494	4,51	0,007
Residual Error	50	13,8631	13,8631	0,2773		
Lack-of-Fit	5	6,3337	6,3337	1,2667	7,57	0,000
Pure Error	45	7,5294	7,5294	0,1673		
Total	59	24,7418				

Na osnovu prikaza iz softverskog listinga se izvodi polinomski model drugog reda, koji predstavlja predviđanje povratnog ugla. Ovaj model uzima u obzir efekte faktora i ove interakcije, eksplicitno je da tu nekodiranim koordinatama:

$$Y = 0,364423 - 0,030365 * X_1 - 0,054548 * X_2 + 0,071930 * X_3 + 0,000620 * X_{12} + 0,006671 * X_{22} - 0,000222 * X_{32} - 0,009167 * X_1 * X_2 - 0,001444 * X_1 * X_3 + 0,009167 * X_2 * X_3 \quad (12)$$

Tada je povratni ugao u nekodiranim vrijednostima;

$$Y = 0,364423 - 0,030365 * X_1 - 0,054548 * X_2 + 0,071930 * X_3 + 0,000620 * X_{12} + 0,006671 * X_{22} - 0,000222 * X_{32} - 0,009167 * X_1 * X_2 - 0,001444 * X_1 * X_3 + 0,009167 * X_2 * X_3 \quad (13)$$

Zaključuje se da su varijable X_1 , X_2 , $X_3 > p$ – vrijednost = 0,05, nisu signifikantne ili nemaju značajan uticaj na povratni ugao.

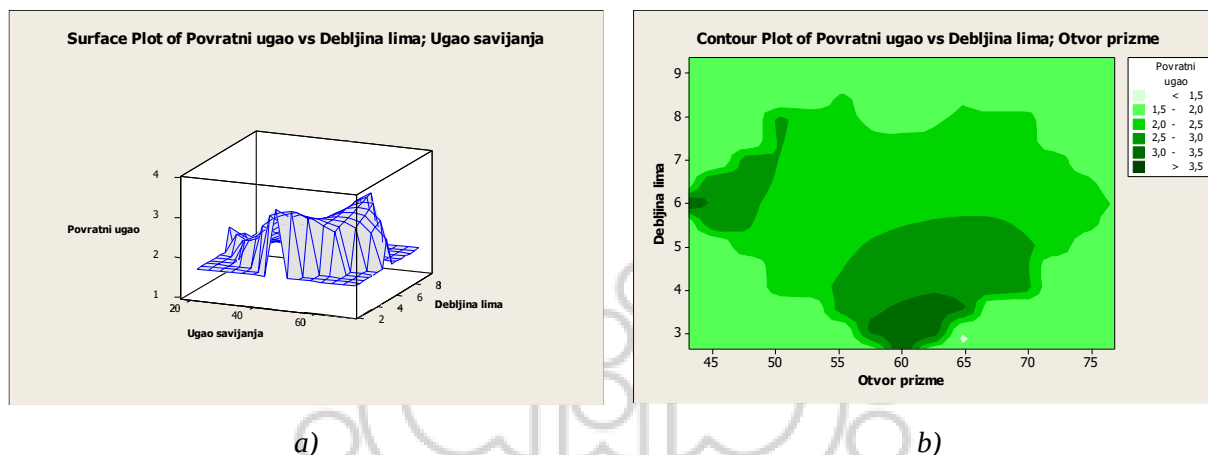
Adekvatnost modela je niska ($R-Sq = 44,0\%$), što znači da 44 % ukupne varijacije u Y može objasniti linearnom ovisnošću između nezavisnih X_1 , X_2 , X_3 , dok se preostalih 66 % ne može objasniti linearnom zavisnošću. Pored toga, interakcije nezavisnih su signifikantne samo u slučajevima "Otvor prizme*Ugao savijanja" = $p = 0,049 < 0,05$ i u slučaju "Debljina lima*Ugao savijanja" = $p = 0,014 < 0,05$.

Nakon odbacivanja varijabli i interakcija koje nisu signifikantne, naša jednačina izgleda:

$$Y = 0,364423 - 0,001444 * X_1 * X_3 + 0,009167 * X_2 * X_3 \quad (14)$$

Na osnovu regresionih koeficijenata može se dati ocjena:

Na promjene povratnog ugla nakon savijanja najbrže promjene ima " X_3 – ugao savijanja", zatim slijedi X_2 – debljina lima a najmanje promjena daje X_1 – otvor prizme, slika 7 (a, b).



Slika 7. Konturni dijagrami

Sa slika 7b (Contour Plot of Povratni ugao vs ...) se uočava da povratni ugao raste sa porastom otvora prizme od 45 do 60, nakon čega opada i to za debljine lima do 5 milimetara. Takođe, veći povratni ugao se pojavljuje za debljine lima od 5,5 do 7 milimetara kod otvora prizme do 50.

Zbog ovako kompleksne varijabilnosti posmatranih varijabli, prikazuje se i analiza varijanse koja posmatra polinom prvog reda:

Regression Analysis: Povratni uga versus Otvor prizme; Debljina lim; ...

The regression equation is

$$\text{Povratni ugao} = 3,09 - 0,0152 \text{ Otvor prizme} - 0,112 \text{ Debljina lima} + 0,0203 \text{ Ugao savijanja}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,0916	0,6540	4,73	0,000
Otvor prizme	-0,015188	0,008844	-1,72	0,091
Debljina lima	-0,11200	0,04422	-2,53	0,014
Ugao savijanja	0,020295	0,005896	3,44	0,001

S = 0,566065 R-Sq = 27,5% R-Sq(adj) = 23,6%

PRESS = 21,2651 R-Sq(pred) = 14,05%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	6,7978	2,2659	7,07	0,000
Residual Error	56	17,9440	0,3204		
Total	59	24,7418			

Durbin-Watson statistic = 2,15279

Analize varijanse kada se posmatra regresiona linearna jednačina nam pokazuje da varijabla "X1- otvor prizme" nije signifikantna a da varijable debljina lima i ugao savijanje su signifikantne, odnosno značajne. Tada se linarna regresiona prava predstavlja sa jednačinom:

$$\text{Povratni ugao} = 3,09 - 0,112 * \text{Debljina lima} + 0,0203 * \text{Ugao savijanja}$$

Odnosno, kada se uobziri uvodna simbolika varijabli:

$$\Delta\varphi = 3,09 - 0,112 \cdot t - 0,0203 \cdot \varphi \quad (15)$$

Adekvatnost ovoga modela je dosta niska ($R\text{-Sq} = 27,5\%$) i prisutna je negativna autokorelacija (Durbin-Watson statistic = 2,15279 > 2).

4. ZAKLJUČAK

Cilj ovog istraživanja je da se eksperimentalnim modeliranjem metodom eksperimentalnog plana na empirijski način predvidi povratni ugao pri slobodnom V-savijanju limova. U ovom radu proučavali smo efekte parametara V-savijanja limova kao što su otvor prizme V, debljina lima (t) i povratni ugao savijanja ($\Delta\varphi$) lima. U konačnoj analizi zaključujemo da su debljina lima i otvor prizme najdominantniji, eksperiment 1.

Predložena je empirijska formulacija povratnog ugla pri savijanju. Zaista, i kroz površine odgovora, razvijeni model je polinom drugog reda. Ovaj empirijski model se dobija nakon varijacije parametara procesa (V, t, α) na tri različita nivoa. Razlika između vrijednosti povratnog ugla predviđenih ovim razvijenim empirijskim modelom i onih izmjerenih je mala. Jednačina (7) za povratni ugao u funkciji aktivnog hoda alata je linearna funkcija u prvom i drugom eksperimentu, dok jednačina (8 i 9) za povratni ugao u funkciji debljine materijala je jednačina drugog reda.

Slaganje između dvije vrijednosti izmjerene i predviđene ovim modelom nam govori da nam razvijeni model nudi preciznu procjenu povratnog ugla.

Kod drugog eksperimenta postoje mnogi nedostaci koji su se pojavili na radnom komadu tokom i nakon svake operacije savijanja sa povratnim uglom. Disperzija podataka vezana za povratni ugao su moguća zbog sledećih faktora:

- uzorci su limovi trapeznog oblika dužine 12 m,
- stranice profila nisu jednake duž linije savijanja,
- savijanje se izvodi duž linije valjanja, što čini nepovoljnim sa stanovišta slobodnog savijanja i
- veliki uticaj anizotropije materijala.

Osim ovog efekta moguća su i različita iskrivljenja geometrije uzorka.

Jedno ograničenje slobodnog savijanja: manje je precizno od procesa u kojima lim u potpunosti održava kontakt s alatom. Zaista, ako je greška napravljena u procjeni povratnog ugla u simulaciji prevelika, onda svi ovi modeli riskiraju divergiranje ili konvergiranje prema izrazito lažnom optimumu. Može se reći da je cilj rada da se uzme u obzir uticaj parametara savijanja kako bi se modeliralo elastično ponašanje na povratni ugao metodom eksperimentalnog plana.

5. LITERATURA

- [1] Dilipak, H., Özdemir, M., Sarıkaya, M. (2013). Effects of Material Properties and Punch Tip Radius on Spring-Forward in 90° V Bending Processes. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 20(10), 64-69.
- [2] Özdemir, M., Gökmeşe, H., Dilipak, H., Yılmaz, V. (2015). "Aşınmaya Karşı Dirençli Sac Malzemenin Mikro Yapısal Karakterizasyonu ve Şekillendirilebilirliğinin İncelenmesi", *GU J SciPart:C* 3(1):385-393.
- [3] Özdemir, M., Gökmeşe, H., Yılmaz, V., Dilipak, H. (2015). Characterization of Microstructure and Bending Response of Sheet Material: Influence of Thickness. *Journal of Advanced Materials and Processing*, 3(1), 3-14.
- [4] Gökmeşe, H., Özdemir, M., The Effect Of Heat Treatment On The Formability Behavior Of Hardox-500 Sheet Material". *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 2016, vol. 4, no. 4, p. 343-349.
- [5] Thipprakmas, S. and Rojananan, S. (2008). Investigation of spring-go phenomenon using finite element method. *Materials and Design*, 29, 1526-1532.
- [6] Thipprakmas, S. and Phanitwong, W. (2011). Process Parameter Design of Spring-back and Spring-go in V-Bending Process using Taguchi Technique. *Materials and Design*, 32, 4430-4436.
- [7] Thipprakmas, S. (2010). Finite Element Analysis of Punch Height Effect on V-Bending Angle. *Materials and Design*, 31, 1593-1598.
- [8] Thipprakmas, S. (2011). Finite Element Analysis on The Coined-Bead Mechanism During The V Bending Process. *Materials and Design*, 32, 4909-4917.
- [9] Liu, X., Zhao, S., Qin, Y., Zhao, J., & Wan-Nawang, W. A. (2016). A parametric study on the bending accuracy in micro Wbending using Taguchi method. *Measurement*, 100, 233-242.
- [10] Tekaslan, Ö., Seker, U. and Özdemir, A. (2006). Determining Springback Amount of Steel Sheet Metal has 0,5 mm Thickness in Bending Dies. *Materials and Design*, 27, 251-258.
- [11] Tekaslan, Ö., Gerger N. and Şeker, U. (2008). Determination of Spring-Back of Stainless Steel Sheet Metal in V Bending Dies. *Materials and Design*, 29, 1043-1050.
- [12] M. Bakhshi-Jooybari, B. Rahmani, V. Daezadeh, A. Gorji, The study of springback of CK67 steel sheet in V-die and U-die bending processes, *Mater. Des.* 30 (2009) 2410–2419.

[13] Fei, D., Hodgson, P. (2006). Experimental and Numerical Studies of Springback in Air V-Bending Process for Cold Rolled TRIP Steels. Nuclear Engineering and Design, 236, 1847-1851.

[14] Jurković M. (1999): Matematičko modeliranje inženjerskih procesa i sistema, Tehnički fakultet Bihać.

[15] Stanić J. (1999): Metod inženjerskih mjerenja, Mašinski fakultet Beograd.

[16] Douglas C. Montgomery (2013), *Design and Analysis of Experiments*, Arizona State University, 5th edition.

