

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Plahuta, J., 2014. Parametrična in povratna analiza gradnje predorov v anizotropnih kamninah s programom UDEC. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Logar, J., somentor Klopčič, J.): 81 str.

Datum arhiviranja:04-12-2014

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Plahuta, J., 2014. Parametrična in povratna analiza gradnje predorov v anizotropnih kamninah s programom UDEC. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Logar, J., co-supervisor Klopčič, J.): 81 pp.

Archiving Date: 04-12-2014

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*

Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si



UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM GRADBENIŠTVO  
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

**JERNEJ PLAHUTA**

**PARAMETRIČNA IN POVRATNA ANALIZA GRADNJE  
PREDOROV V ANIZOTROPNIH KAMNINAH S  
PROGRAMOM UDEC**

Diplomska naloga št.: 3412/KS

**PARAMETRIC AND BACK ANALYSIS OF TUNNEL  
CONSTRUCTION IN ANISOTROPIC ROCK MASS  
WITH UDEC CODE**

Graduation thesis No.: 3412/KS

**Mentor:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

asist. dr. Jure Klopčič

Ljubljana, 27. 11. 2014

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

**IZJAVA**

Podpisani **Jernej Plahuta** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »**Parametrična in povratna analiza gradnje predorov v anizotropnih kamninah s programom UDEC**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana,

Jernej Plahuta

---

(podpis)

## **BIBLIOGRAFSKODOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>624.19(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Jernej Plahuta</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Janko Logar</b>
<b>Somentor:</b>	<b>asist. dr. Jure Klopčič</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Parametrična in povratna analiza gradnje predorov v anizotropnih kamninah s programom UDEC</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>81 str., 21 pregl., 79 sl., 29 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>UDEC, numerična simulacija, gradnja predorov, anizotropija, MLE, predor Šentvid, NATM, skrilave kamenine, predori</b>

### **Izвлеček**

Diplomska naloga obravnava numerično simulacijo izkopa predora v anizotropnih tleh s pomočjo programskega orodja UDEC. Model sledi principu NATM, s postopnim izkopom čela (kalota, stopnica in talni obok), vendar brez upoštevanja postopnega sidranja ter brizganega betona po obodu predora.

Diplomska naloga je razdeljena na dva dela. V prvem delu obravnava parametrično analizo vpliva geometrije ter materialnega modela na obliko in velikost pomikov oboda predora. Pet poglavij obravnava geometrijo modela, znotraj katerih so uporabljeni posamezni materialni modeli (elastični, Mohr-Coulombov in ubiquitous). Drugi del naloge obravnava povratno analizo pomikov dvopasovne cevi predora Šentvid. Pri povratni analizi je uporabljen en geometrijski model in tri materialni modeli.

Rezultati so predstavljeni in komentirani na koncu vsakega poglavja ter povzeti na koncu dela.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

- UDK:** 624.19(043.2)
- Author:** Jernej Plahuta
- Supervisor:** Assoc. Prof. Janko Logar, Ph.D.
- Co-advisor:** Asist. Prof. Jure Klopčič, Ph.D.
- Title:** Parametric and back calculation analysis of tunnels construction in anisotropic rock mass with UDEC code
- Document type:** Graduation Thesis – University Degree
- Scope and tools:** 81 p., 21 tab., 79 fig., 29 eq.
- Key words:** UDEC, numeric simulation, tunnel construction, anisotropy, DEM, Šentvid tunnel, NATM, foliated rock mass, tunnels

**Abstract**

The thesis deals with numerical simulation of tunnel excavation in anisotropic soils by using UDEC software. The model follows the principles of NATM, with gradual excavation of the tunnel forehead (crown, bench, and invert) not accounting for the gradual anchoring and shotcrete on the tunnel walls.

The work is divided into two parts. The first part deals with parametric analysis of material model and geometry influences on the shape and magnitude of the tunnel wall displacements. Five chapters are dedicated to the model geometry. Within each, various material models (elastic, Mohr-Coulomb and ubiquitous) are studied. The second part of the thesis deals with reverse analysis of displacements in the two-lane tunnel Šentvid. Reverse analysis uses one geometric model and three material models.

The results are discussed at the end of each chapter and summarized at the end of work.

## ZAHVALA

Ob zaključku svoje diplomske naloge se zahvaljujem svojemu mentorju izr. prof. dr. Janku Logarju, ki mi je pri pisanju usmerjal in dajal nasvete ter somentorju asist. dr. Juretu Klopčiču.

Zahvalil bi se še tašči, tastu, sošolcem, sodelavcem ter vsem prijateljem predvsem Davorju, ki so po svojih močeh sodelovali in pripomogli pri nastajanju diplomske naloge ter verjeli vame.

Posebna zahvala gre mojim staršem, ki so mi omogočili študij, me podpirali in nikoli obupali nad menoj.

Ne nazadnje hvala moji ženi Katji za vso podporo in potrpljenje.

**KRATICE IN OKRAJŠAVE**

NATM	Nova avstrijska metoda gradnje predorov (angl. New Austrian Tunneling Method)
MKE (FEM)	Metoda končnih elementov (angl. Finite Element Method)
DEM	Diferenčna metoda (angl. Difference Element Method)
BEM	Metoda robnih elementov (angl. Boundary Element Method)
DEM	Metoda ločenih elementov (angl. Distinct Element Method)
DDA	Analiza diskontinuirnih deformacij (angl. Discontinuous Deformation Analysis)
BPM	Metoda povezanih delcev (angl. Bounded Particle Method)
UDEC	Universal Distinct Element Code
EL	Linearno elastičen materialni model
MOHR	Mohr–Coulomb materialni model
UB	Ubiquitous–joint materialni model. V primeru tretjega, četrtega in petega modula petega poglavja, predstavlja model sestavljen kot hibrid ubiquitous–joint in linearno elastičnega materialnega modela.



## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1	Splošno .....	1
1.2	Namen in cilji.....	2
1.3	Sestava diplomske naloge.....	3
<b>2</b>	<b>TEORETSKE OSNOVE .....</b>	<b>4</b>
2.1	Primarno podporje.....	4
2.2	Nova avstrijska metoda gradnje predorov (NATM) .....	8
2.2.1	Komentar k metodi NATM .....	10
2.3	Predori grajeni v podobnih anizotropnih kamninah .....	11
2.3.1	Predor Trojane .....	11
2.3.2	Predor Golovec .....	12
2.3.3	Predor Šentvid .....	13
2.4	Anizotropija .....	14
<b>3</b>	<b>PROGRAMSKA OPREMA .....</b>	<b>15</b>
3.1	Metoda kontinuiranega prostora .....	16
3.2	Metoda diskontinuiranega prostora .....	17
3.3	Komentar k metodam kontinuuma in diskontinuuma .....	19
<b>4</b>	<b>UDEC.....</b>	<b>20</b>
4.1	Materialni modeli deformabilnih blokov.....	20
4.1.1	Nični model .....	21
4.1.2	Linearno elastični model.....	21
4.1.3	Mohr–Coulombov model .....	21
4.1.4	Ubiquitous–joint model .....	22
4.1.4.1	Numerična formulacija plastičnih popravkov šibke ravnine .....	22
4.1.4.2	Postopek izvrševanja popravkov UB modela.....	28
4.2	Materialni modeli diskontinuitet .....	29
<b>5</b>	<b>PARAMETRIČNA ANALIZA.....</b>	<b>30</b>
5.1	Osnovni model brez skrilavosti.....	33
5.2	Skrilavost po celem območju modela .....	35
5.3	Skrilavost le v omejenem območju modela.....	41
5.4	Razčlenjena skrilavost le v omejenem območju modela .....	57
5.5	Razčlenjena skrilavost izven osi predora.....	65
<b>6</b>	<b>POVRATNA ANALIZA .....</b>	<b>72</b>

---

6.1	Elastičen (EL) model povratne analize .....	73
6.2	Mohr–Coulombov (MOHR) model povratne analize .....	75
6.3	Ubiquitous (UB) model povratne analize .....	76
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK</b> .....	<b>78</b>
<b>VIRI</b>	.....	<b>80</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1:	Kronološki razvoj, ki je vodil do metode NATM.	9
Preglednica 5.1:	Materialne karakteristike posameznih modelov kamnin.	31
Preglednica 5.2:	Materialne karakteristike stika.	31
Preglednica 5.3:	Normirano poimenovanje za prvi, drugi in tretji modul.	32
Preglednica 5.4:	Normirano poimenovanje za četrti in peti modul.	32
Preglednica 5.5:	Čas računanja posameznega modela prvega modula.	33
Preglednica 5.6:	Čas računanja (ur) posameznega modela drugega modula.	35
Preglednica 5.7:	Čas računanja (ur) posameznega modela tretjega modula.	42
Preglednica 5.8:	Čas računanja (ur) EL modela za $\alpha_F$ je $90^\circ$ .	58
Preglednica 5.9:	Čas računanja (ur) EL modela za $\alpha_F$ je $60^\circ$ .	58
Preglednica 5.10:	Čas računanja (ur) EL modela za $\alpha_F$ je $30^\circ$ .	58
Preglednica 5.11:	Čas računanja (ur) EL modela za $\alpha_F$ je $0^\circ$ .	59
Preglednica 5.12:	Čas računanja (ur) "UB-elast" modela za $\alpha_F$ je $90^\circ$ .	59
Preglednica 5.13:	Čas računanja (ur) "UB-elast" modela za $\alpha_F$ je $60^\circ$ .	59
Preglednica 5.14:	Čas računanja (ur) "UB-elast" modela za $\alpha_F$ je $30^\circ$ .	60
Preglednica 5.15:	Čas računanja (ur) "UB-elast" modela za $\alpha_F$ je $0^\circ$ .	60
Preglednica 5.16:	Čas računanja (ur) posameznega modela petega modula.	66
Preglednica 6.1:	Materialne karakteristike posameznih območij elastičnega modela povratnih analiz Šentvid.	74
Preglednica 6.2:	Materialne karakteristike stika diskontinuitet.	74
Preglednica 6.3:	Materialne karakteristike posameznih območij elastičnega modela povratnih analiz Šentvid.	75
Preglednica 6.4:	Materialne karakteristike posameznih območij UB modela povratnih analiz Šentvid	77

**KAZALO SLIK**

Slika 2.1:	Mobilizacija nosilnost – primer dobre samonosilne hribine.	4
Slika 2.2:	Mobilizacija nosilnosti – primer slabe samonosilne hribine.	4
Slika 2.3:	Shematski prikaz pravih in nepravilnih podpornih ukrepov.	5
Slika 2.4:	Primer SN sidra	6
Slika 2.5:	Primer IBO sidra	6
Slika 2.6:	Primer IBI sidra s primerom večkratnega injektiranja (zgoraj levo)	7
Slika 2.7:	Primer cevnega ščita (»dežnika«)	7
Slika 2.8:	Primer popustljivih elementov (LSC – Lining Stress Controller).	7
Slika 2.9:	Primer klasičnih metod: Belgijske, Nemške, Italijanske in Avstrijske	8
Slika 2.10:	Primer izgradnje predorskega profila z uporabo metode NATM	10
Slika 3.1:	Modeli kontinuuma in diskontinuuma	15
Slika 3.2:	Numerične metode kontinuuma v mehaniki kamnin.	16
Slika 3.3:	Model diskontinuuma: DEM in DDA diskretizacija	18
Slika 3.4:	Modeli predstavitve stikov: a) metoda DEM; b) metoda DDA	18
Slika 3.5:	Model diskontinuuma: BPM diskretizacija	19
Slika 4.1:	Mohr – Coulomb-ov kriterij porušitve z dodatnim pogojem natezne porušitve.	21
Slika 4.2:	Šibka ravnina, zasukana za kot $\theta$ glede na globalni koordinatni sistem.	22
Slika 4.3:	Porušni kriterij šibke ravnine.	23
Slika 4.4:	UB model: uporaba območij pri definiciji plastičnosti šibke ravnine.	24
Slika 5.1:	Geometrija modela in predora (veličine so v m).	30
Slika 5.2:	Metoda izkopa posameznih delov predora.	30
Slika 5.3:	Model prvega modula z robnimi pogoji.	33
Slika 5.4:	Primerjava pomikov oboda predora za EL in MOHR materialni model.	34
Slika 5.5:	Plastifikacija kamnine za MOHR materialni model kamnine.	34
Slika 5.6:	Model drugega modula z robnimi pogoji.	35
Slika 5.7:	Pomiki oboda predora EL (levo) in MOHR (desno) materialnega modela.	36
Slika 5.8:	Primerjava prvega in drugega modula za EL in MOHR materialni model.	36
Slika 5.9:	Primerjava pomikov oboda predora za EL in MOHR materialnega modela, pri nagibu skrivalosti $0^\circ$ , $30^\circ$ in $60^\circ$ .	37
Slika 5.10:	Pomiki oboda predora za UB materialni model.	38
Slika 5.11:	Primerjava rezultatov EL in MOHR modela iz prvega modula z rezultati UB modela za kot nagiba skrivalosti $0^\circ$ iz drugega modula.	38
Slika 5.12:	Rezultat analize "cel MOHR 90".	39
Slika 5.13:	Rezultat analize "cel UB-plast 90".	39
Slika 5.14:	Ponastavljeni robni pogoji za "cel UB-elast 60" in "cel UB-plast 60".	40
Slika 5.15:	Geometrija tretjega modula z robnimi pogoji za EL in MOHR model.	41
Slika 5.16:	Geometrija tretjega modula z robnimi pogoji za UB model.	41
Slika 5.17:	Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL in MOHR materialnega modela pri nagibu skrivalosti $0^\circ$ .	42

Slika 5.18: Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL in MOHR materialnega modela pri nagibu skrilaivosti 30°.	43
Slika 5.19: Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL in MOHR materialnega modela pri nagibu skrilaivosti 60°.	43
Slika 5.20: Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL materialnega modela pri nagibu skrilaivosti 90°.	44
Slika 5.21: Primerjava območja največjih medsebojnih relativnih zdrsov stika za model "cel EL 30" in "omejen EL 30".	44
Slika 5.22: Primerjava območja največjih medsebojnih relativnih zdrsov stika za model "cel EL 60" in "omejen EL 60".	45
Slika 5.23: Primerjava območja največjih medsebojnih relativnih zdrsov stika za model "cel EL 90" in "omejen EL 90".	45
Slika 5.24: Vektorji pomikov oboda predora za modela "omejen EL 60" (zgoraj) in "omejen EL 30" (spodaj).	46
Slika 5.25: Primerjava območja plastifikacije za model "cel MOHR 0" in "omejen MOHR 0"	47
Slika 5.26: Primerjava območja plastifikacije za model "cel MOHR 30" in "omejen MOHR 30"	47
Slika 5.27: Primerjava območja plastifikacije za model "cel MOHR 60" in "omejen MOHR 60"	48
Slika 5.28: Primerjava območja plastifikacije za model "cel MOHR 90" in "omejen MOHR 90"	48
Slika 5.29: Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, UB materialnega modela pri nagibu skrilaivosti 0°, 30°, 60° in 90°.	49
Slika 5.30: Primerjava območja plastifikacije za model: a) "cel UB-elast 0"; b) "omejen UB-elast 0"; c) "cel UB-plast 0"; d) "omejen UB-plast 0".	50
Slika 5.31: Primerjava območja plastifikacije za model: a) "cel UB-elast 30"; b) "omejen UB-elast 30"; c) "cel UB-plast 30"; d) "omejen UB-plast 30"	51
Slika 5.32: Primerjava območja plastifikacije za model: a) "cel UB-elast 60"; b) "omejen UB-elast 60"; c) "cel UB-plast 60"; d) "omejen UB-plast 60".	52
Slika 5.33: Primerjava območja plastifikacije za model: a) "cel UB-elast 90"; b) "omejen UB-elast 90"; c) "cel UB-plast 90"; d) "omejen UB-plast 90".	53
Slika 5.34: Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL, MOHR in UB materialnega modela pri nagibu skrilaivosti 30°.	54
Slika 5.35: Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL, MOHR in UB materialnega modela pri nagibu skrilaivosti 30°.	54
Slika 5.36: Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL, MOHR in UB materialnega modela pri nagibu skrilaivosti 60°.	55
Slika 5.37: Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL, MOHR in UB materialnega modela pri nagibu skrilaivosti 90°.	55
Slika 5.38: Geometrija četrtega modula z robnimi pogoji.	57
Slika 5.39: Primer razčlenjene skrilaivosti za kot nagiba $\alpha_1$ (60°), $\alpha_2$ (-60°) in kot nagiba ravnine razčlenjenosti $\alpha_F$ (90°, 60°, 30° in 0°).	57

Slika 5.40: Primerjava pomikov oboda predora EL ter UB modela, pri razčlenjeni skrtilavosti $\alpha_F$ ( $60^\circ$ ), $\alpha_1$ ( $60^\circ$ ), $\alpha_2$ ( $90^\circ$ , $60^\circ$ , $30^\circ$ , $0^\circ$ , $-30^\circ$ in $-60^\circ$ ).	61
Slika 5.41: Primerjava pomikov oboda predora EL ter UB modela, pri razčlenjeni skrtilavosti $\alpha_F$ ( $90^\circ$ ), $\alpha_1$ ( $30^\circ$ ), $\alpha_2$ ( $90^\circ$ , $60^\circ$ , $30^\circ$ , $0^\circ$ , $-30^\circ$ in $-60^\circ$ ).	61
Slika 5.42: Primerjava pomikov oboda predora EL ter UB modela, pri razčlenjeni skrtilavosti $\alpha_F$ ( $90^\circ$ , $60^\circ$ , $30^\circ$ in $0^\circ$ ), $\alpha_1$ ( $60^\circ$ ), $\alpha_2$ ( $-60^\circ$ ).	62
Slika 5.43: Primerjava pomikov oboda predora EL ter UB modela, pri razčlenjeni skrtilavosti $\alpha_F$ ( $90^\circ$ , $60^\circ$ , $30^\circ$ in $0^\circ$ ), $\alpha_1$ ( $30^\circ$ ), $\alpha_2$ ( $60^\circ$ ).	62
Slika 5.44: Primerjava pomikov oboda predora EL in UB modela, za posamezne primere razčlenjene skrtilavosti.	63
Slika 5.45: Geometrija petega modula z robnimi pogoji za EL model.	65
Slika 5.46: Geometrija petega modula z robnimi pogoji za UB model.	65
Slika 5.47: Primer geometrije opravljenih analiz petega modula s ponazorjenimi odmiki od osi predora.	66
Slika 5.48: Primerjava pomikov oboda predora petega in četrtega modula za razčlenjeno skrtilavost ( $\gg\alpha_F 90^\circ, -30^\circ - 90^\circ\ll$ ).	67
Slika 5.49: Primerjava pomikov oboda predora petega in četrtega modula za razčlenjeno skrtilavost ( $\gg\alpha_F 90^\circ, 60^\circ - 90^\circ\ll$ ).	68
Slika 5.50: Primerjava pomikov oboda predora petega in četrtega modula za razčlenjeno skrtilavost ( $\gg\alpha_F 90^\circ, -30^\circ - 60^\circ\ll$ ).	69
Slika 5.51: Primerjava območja plastifikacije UB modela četrtega in petega modula.	70
Slika 6.1: Geometrijske karakteristike profila in geološka sestava profila dvopasovnega predora Šentvid	72
Slika 6.2: Pomiki predora sosednjih profilov (geometrija : pomiki = 1 : 25): a) Izmerjeni in izračunani pomiki b) Izmerjeni pomiki	72
Slika 6.3: Geometrija modela povratnih analiz (veličine so v m).	73
Slika 6.4: Geometrija za elastičen materialni modela z robnimi pogoji.	73
Slika 6.5: Pomiki oboda predora za elastičen model povratne analize Šentvid.	74
Slika 6.6: Geometrija za MOHR materialni modela z robnimi pogoji.	75
Slika 6.7: Pomiki oboda predora za elastičen model povratne analize Šentvid.	76
Slika 6.8: Geometrija za UB materialni modela z robnimi pogoji.	76
Slika 6.9: Pomiki oboda predora za UB model povratne analize Šentvid.	77

## 1 UVOD

### 1.1 Splošno

Zaradi večanja prebivalstva se večajo tudi potrebe po vsakodnevni migraciji ljudi iz ruralnih krajev v center mest med tednom in obratno med vikendom. Poleti se povečuje tudi masivna migracija turistov v turistične kraje. Poleg ljudi se povečuje tudi pretok blaga oziroma se strmi k hitrejšemu pretoku tovora. Take potrebe obstoječe prometne povezave, kot so avtoceste, hitre ceste, glavne ceste, regionalne ceste ter železniške proge ne bodo zadostovale in bo potrebno zgraditi nove ali obstoječe razširiti.

Morfološki relief Slovenije je zelo razgiban. Kar 79,9% površine Slovenije pokrivajo gričevja in hribovja. Od tega: nerazgibano gričevje 20,4%, razgibano gričevje 24,9%, nerazgibano hribovje 26,4% in razgibano hribovje 8,2% površine Slovenije (Perko, 2001). Pri gradnji in projektiranju glavnih prometnih povezav avtocest, hitrih cest in železniških prog se je na takšnem območju zelo težko ali se smiselno ni mogoče izogniti gradnji predora skozi hribinsko maso. Gradnja predora je zahteven gradbeni poseg, ki pa ne predstavlja prevelike težavnosti, če ima hribina dobre lastnosti za gradnjo predora.

Po letu 1990, posebej pa po letu 1994, ko je bil implementiran Nacionalni program za izgradnjo avtocest, je bilo na slovenski avtocestni mreži zgrajenih veliko število podzemnih objektov (več kot 15 km dvocevni in en enocevni dolžine 250 m). Večina teh predorov je umeščenih v srednje do dobre kamnine (na apnencih in fliših oz flišu podobnih formacijah). Gradnja v takih formacijah je manj zahtevna zaradi manjšega pritiska kamninske mase na primarno podporje. V splošnem so se pojavile le manjše konvergence, večji pomiki so bili le v omejenih območjih s preperelim materialom. Na drugi strani so bili nekateri predori (Trojane, Golovec, predor V zideh in Debeli vrh, del predora Karavank in predor Jesovnik ter predor Šentvid) grajeni v mehkih klastičnih kamninah iz Permo-Karbonskega obdobja (izrazito anizotropne kamnine), kjer so znatni pritisk kamninske mase, velike konvergence, prekomerne razpoke in nestabilnosti pobočij nad predorom kot nestabilnosti samega čela predora povzročale težave med samim izkopom (Klopčič, 2009: str. 4).

Pri gradnji predora se odziv hribinske mase na poseg izkopa spremlja z geološkim, geotehničnim in/ali geodetskim nadzorom. *Geološki* nadzor običajno vsebuje geološke osnutke čela predora pripravljene od geologa v zelo omejenem času in neprijetnem delavnem okolju. S karakterističnimi geološkimi profili se dopolnjuje geološki model hribine. *Geotehnične* metode običajno omogočajo nadzor odziva podzemnih objektov in kamninske mase izven območja izkopa s spremljanjem relativnih pomikov v okoliški hribini ter deformacije in/ali napetosti v kamnini in konstrukcijskih elementih. *Geodetske* metode kot terestrično lasersko skeniranje in 3D geodetske meritve optičnih reflektorskih ciljnih točk z uporabo elektronskih tahimetrov omogočajo nadzor konvergence oboda podzemne konstrukcije, kot tudi površja nad predorom v absolutnih koordinatah (Klopčič, 2009: str. 2).

Zaradi dobro vzpostavljene povezave med konvergenco in napredovanjem izkopa čela, so radialni pomiki večinoma uporabljeni za ocenitev obnašanja predora. Z napredovanjem izkopa čela se spreminja napetostno stanje hribinske mase in posledično se vršijo

deformacije v okoliški hribini predora. Deformacije oziroma pomiki se vzdolž predora na razdalji 2-3D ( $D$  = premer predora), včasih tudi 4D, s hitrim pojemanjem približujejo k nič. Z uporabo analitičnih funkcij so lahko radialni pomiki hitro napovedani in vzorčno modelirani. S pomočjo naprednih računalniških algoritmov se bo lahko napovedalo velikost in obliko pomikov v delih predora, ki še niso bili izkopani (Klopčič, 2009: str 4).

Za napoved velikosti in oblike pomikov predora je potrebno poznati geološki model hribine ter njene fizikalne in mehanske lastnosti. Pri gradnji predorov v permo-karbonskih kamninah je bilo skoraj nemogoče zasnovati zanesljiv geološki model območja predora, kajti take kamnine so zaradi goste skrilavosti in širšega območja podvrženega intenzivnim tektonskim fazam preoblikovanja izrazito anizotropna. Točen in detajlen geološki model hribine (v profilu predora) je bil znan šele po izkopu predora.

V takih anizotropnih kamninah, je izkop in gradnja predora potekala ob upoštevanju principov Nove avstrijske metode (NATM), ki se uporablja v slabše in slabo nosilnih hribinah. Princip te metode je v tem, da hribina okrog predora sodeluje z vgrajenim, primarnim podporjem, kot podporni element. Prekomerne deformacije lahko delno preprečimo s pravočasno vgradnjo podporja, ki deformacijam preprečuje, da bi presegle dopustne vrednosti.

Pri določitvi dopustne amplitude in oblike deformacij brez primernega numeričnega ali analitičnega modela, na katerega se lahko nanašamo, se odločimo na osnovi izkušenj. Izbrane dopustne deformacije so za določeno hribino lahko zelo konzervativne, kar znatno poveča stroške gradnje, ali ne konzervativne, kar povzroča razne nestabilnosti in zahteva dodatne podporne ukrepe.

Primeren numerični model dobimo tako, da naredimo povratne numerične analize za pridobljene podatke že zgrajenih predorov, grajenih v podobnih geomehanskih okoliščinah. Splošen model, ki z upoštevanjem geoloških in geomehanskih značilnosti posameznega predora izračuna zelo podobne odzive izmerjenim, je primeren in upravičen za uporabo pri projektiranju prihodnjih predorov, grajenih v podobnih okoliščinah.

## 1.2 Namen in cilji

V diplomski nalogi so prikazane parametrične in povratne analize gradnje predorov v anizotropnih kamninah s pomočjo programskega orodja UDEC 4.01. V sklopu parametričnih analiz se ugotavlja splošne razlike oziroma podobnosti uporabljenih materialnih modelov kot tudi uporabljene geometrije modela na same rezultate. V sklopu povratne analize se ugotavlja kateri materialni model oziroma za katere materialne kot geometrijske karakteristike dobimo rezultate, ki se najbolj ujemajo z že izmerjenimi.

Cilji diplomske naloge:

- Spoznati programsko orodje UDEC;
- Preučiti vgrajene materialne modele;
- Primerjati rezultate različnih modelov in ugotoviti njihove podobnosti ter razlike;
- Spoznati vplive anizotropije na izračunane rezultate;
- Izdelati model, ki se čim boljše približa obnašanju realnega primera;
- Preučiti možne spremembe modela za boljše približke.



### **1.3 Sestava diplomske naloge**

Diplomsko nalogo sestavlja sedem poglavij. V prvem poglavju so predstavljeni razlogi, ki vodijo do problema ter namen in cilji diplomskega dela.

V drugem poglavju je predstavljen pomen primarnega podporja s kratko zgodovino in opisom nove avstrijske metode gradnje predorov (NATM) ter predstavitev treh slovenskih predorov, ki so bili grajeni po principu NATM v podobnih anizotropnih kamninah.

V tretjem poglavju so predstavljene osnovne numerične metode programskih orodij za reševanje problemov v mehaniki kamnin.

V četrtem poglavju je predstavljeno programsko orodje UDEC ter uporabljeni materialni modeli programa v diplomskem delu.

Peto poglavje obravnava parametrično analizo, kjer je predstavljenih in analiziranih pet modulov (različic) reševanja problema anizotropije. Prikazane so tudi slike primerjav rezultatov posameznih modulov ter porabljen čas računanja posamezne analize pri posameznem modulu.

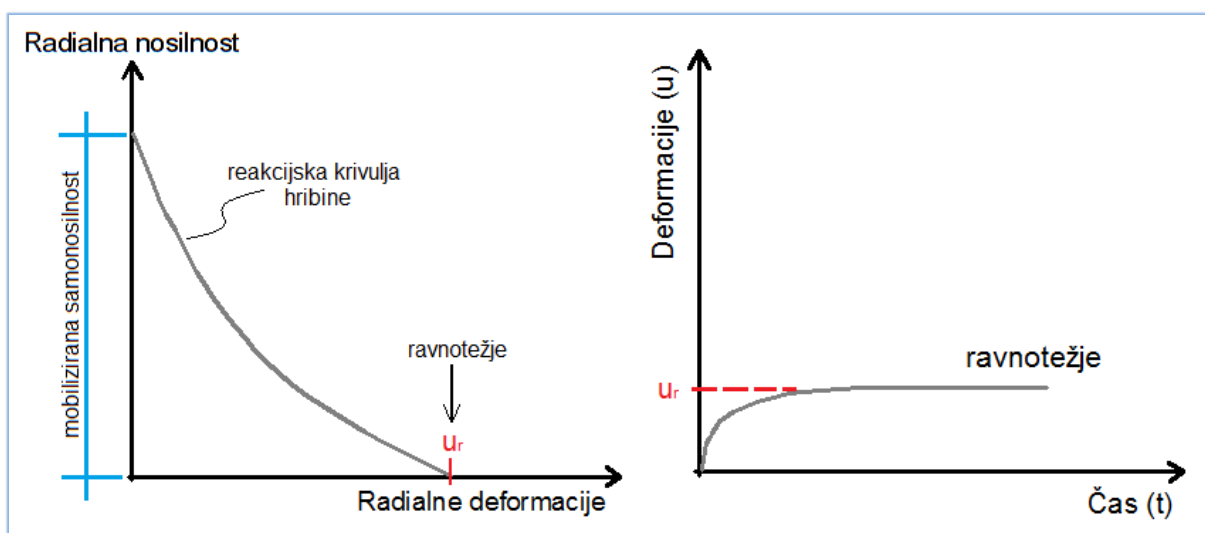
V šestem poglavju je opravljena povratna analiza pomikov predora za dvopasovno cev predora Šentvid.

V zadnjem, sedmem poglavju, so povzete ugotovitve opravljenih analiz ter kratek komentar o ugotovitvah.

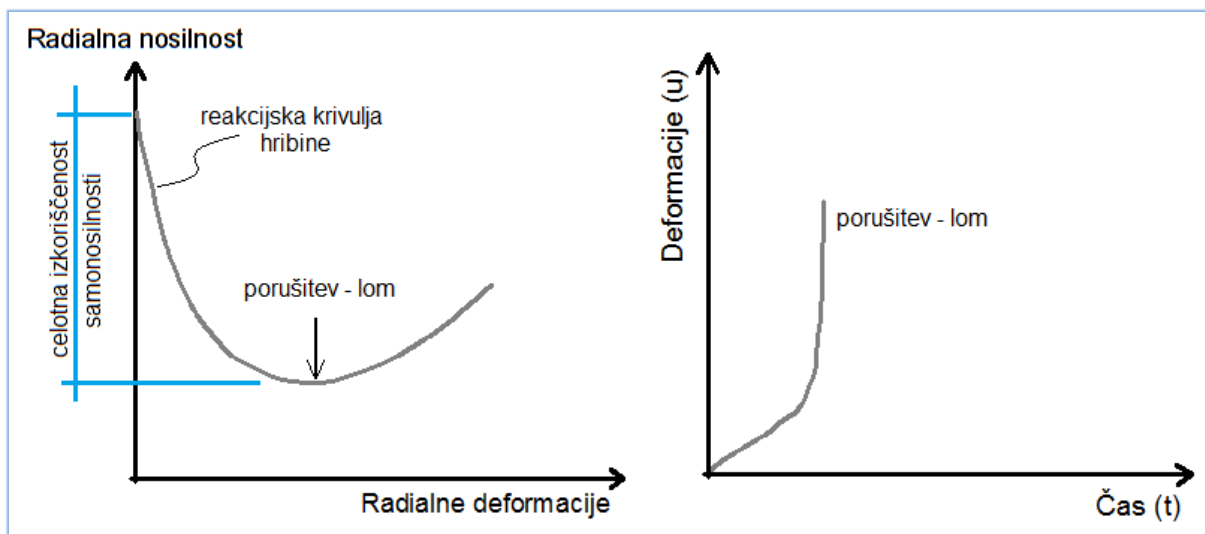
## 2 TEORETSKE OSNOVE

### 2.1 Primarno podporje

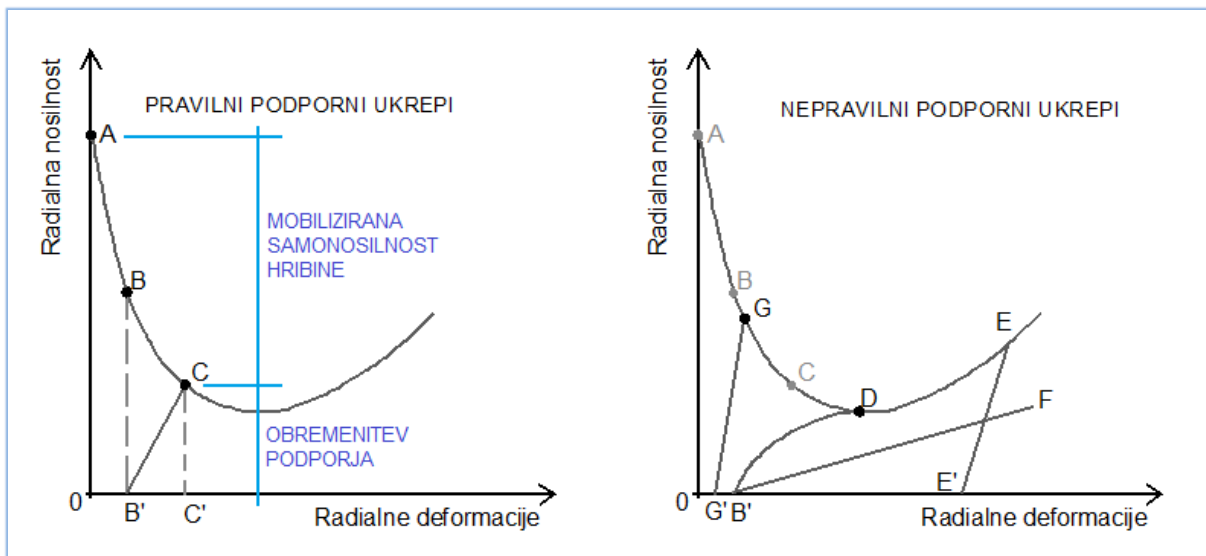
Pri izgradnji podzemnih prostorov se v hribini vzpostavi sekundarno napetostno stanje. Zaradi novega stanja se v kamnini izvršijo deformacije, ki povzročijo mobilizacijo napetosti za vzpostavitev ravnotežja. Če je hribina dovolj samonosilna, da prevzame nove nastale napetosti, se bodo deformacije s časoma umirile in konvergirale h končni vrednosti (Slika 2.1:). V nasprotnem primeru, v kamnini sledi progresivno naraščanje deformacij in napetosti, dokler ni presežena nosilna sposobnost le te in se zgodi porušitev – lom (Slika 2.2:). Da do porušitev ne bi prišlo, se v hribini izvede podporne ukrepe. Cilj podpiranja pa je, s čim manjšimi ukrepi doseči tako mobilizirano nosilno sposobnost kamnine, da prevzame večji del potrebne nosilnosti (Slika 2.3:).



**Slika 2.1:** Mobilizacija nosilnosti – primer dobre samonosilne hribine.



**Slika 2.2:** Mobilizacija nosilnosti – primer slabe samonosilne hribine.



**Slika 2.3:** Shematski prikaz pravih in nepravilnih podpornih ukrepov.

Zgornja slika (levo) prikazuje pravilno izvedbo podporja:

- krivulja B'C: podajno (fleksibilno) podporje se vgradi v času že izvršenih deformacij (0B'), z naraščanjem le-teh se povečuje obremenitev na podporju in mobilizira samonosilnost hribine, dokler skupna odpornost ni zadostna za vzpostavitev ravnotežja (točka C).

Zgornja slika (desno) pa prikazuje nepravilno izvedbo podporja:

- krivulja B'D: podporje ni sposobno prevzeti obremenitve in začne popuščati oz. se plastično deformirati;
- krivulja B'F: podporje je preveč podajno (fleksibilno) in ne opravlja svoje naloge podpiranja;
- krivulja E'E: prepozno podpiranje, ki vodi v porušitev in zahtevna dodatna dela;
- krivulja G'G: prezgodnje podpiranje, ki zahteva nepotrebno/prekomerno nosilnost podporja;

Tako sledi, da je pri izvedbi podpornih ukrepov zelo pomemben čas vgraditve in togost le teh. Običajno se, predvsem v slabo samonosilnih hribinah, podporje vgradi v času izkopa ali takoj po izkopa, ko so zagotovljeni varni pogoji gradnje.

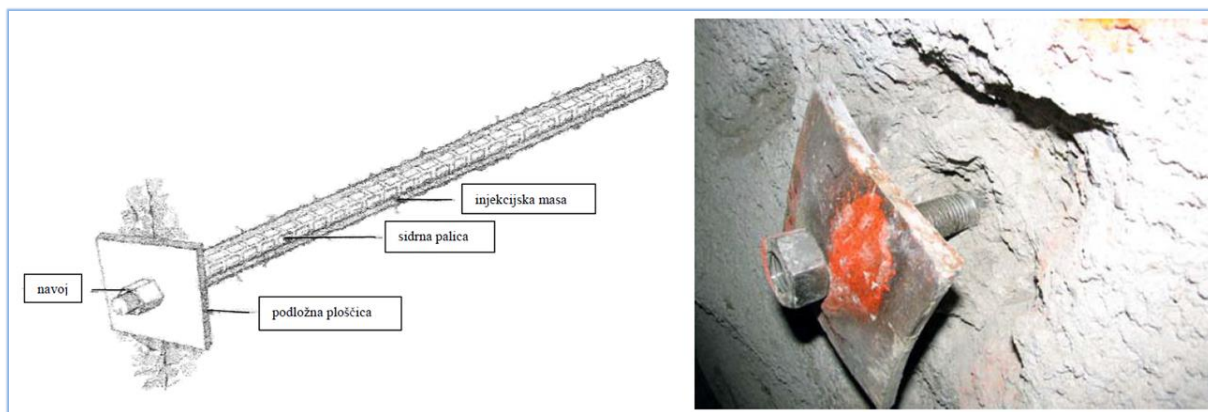
Za doseganje najboljših rezultatov podpiranja, morajo biti ukrepi prilagojeni razmeram hribine (vrsta kamnine, velikosti primarnih tlakov, prisotnost talne vode, itd.) in karakteristikam izkopa (geometrija, velikost, namembnost, itd.). Primernost oz. učinkovitost ukrepov se določa na podlagi sprotnih meritev deformacij in sekundarnih napetosti (v hribini kot v podporju). Pri gradnji predorov v Evropi je Nova avstrijska metoda (NATM) ena izmed najbolj razširjenih metod, ki upošteva zgoraj navedene lastnosti prilagajanja in opazovanja.

Primarno podporje predstavlja primarna obloga (brizgan beton) z vsemi njenimi sestavnimi deli (kamninska sidra, jekleni kabli, armaturne mreže, jekleni loki, cevni ščit). Glavna naloga primarnega podporja je trajno zagotavljanje oz. izboljšanje stabilnosti in samonosilnosti kamninske mase v okolici predora. Vsako podpiranje v kasnejših fazah se smatra kot sekundarno podpiranje.

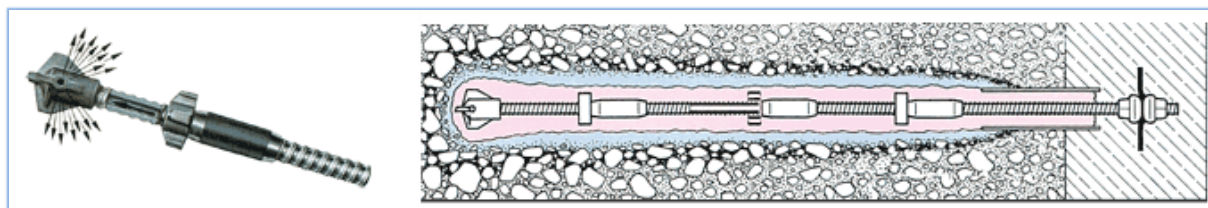
Elementi primarnega podporja, ki so uporabljeni v predorih in so obravnavani v tej nalogi so: pasivna kamninska sidra (SN, IBO in IBI), cevni ščit, brizgan beton (armiran z mrežami ter loki) in popustljivi elementi (LSC – lining stress controller).

SN sidro (Slika 2.4:) je navadna rebrasta armaturna palica, vtisnjena v vrtino, ki je bila predhodno zapolnjena z injekcijsko maso. Primerna so za trdnejše hribine, ki nudijo zadostno stabilnost, da se med polnjenjem in vtiskanjem sidra, izvrtine ne porušijo. Za mehkejše hribine je primerno IBO sidro (Slika 2.5:), ki je v sredini votlo in ki ima na koncu droga samouvrtalno krono, skozi katero se med ali na koncu uvrtnja injektira masa. IBI sidro (Slika 2.6: spodaj) je zelo podobno IBO sidru. Bistvena razlika je v tem, da IBI sidro po prvotnem injektiranju omogoča naknadno večkratno injektiranje po celotni dolžini sidra. Omenjena lastnost je zelo priročna v primeru poškodbe stika med sidrom in hribino pri prevelikih deformacijah. Cevni ščit »dežnik« (Slika 2.7:) sestavljajo profilirane cevi, ki imajo po obodu navrtane luknje. Po končani vgradnji cevi se vanjo vbrizga cementno maso, ki izboljša stabilnost ščitnega območja in ščiti pred zruški ter bistveno prispeva k zmanjšanju konvergenčnih deformacij. Brizgan beton je bistven del primarne obloge (podporja), saj ustvarja zunanji statično nosilni obod predora. Preden se aktivirajo zgoraj naštetih pasivni elementi podporja, se morajo izvršiti določene deformacije. Da zaradi teh deformacij ne bi prišlo do krhkega loma brizganega betona, se le-ta armira z varjenimi in pletenimi jeklenimi mrežami. Tudi popustljivi elementi (Slika 2.8:) omogočajo podajnost (fleksibilnost) podporja ter hkrati omogočajo kontroliran razvoj obremenitev in nudijo podporju upor proti deformacijam.

Karakteristike ter način vgradnje naštetih podpornih elementov (razen IBI sider ter popustljivih elementov) je opisal Nikić (2011).



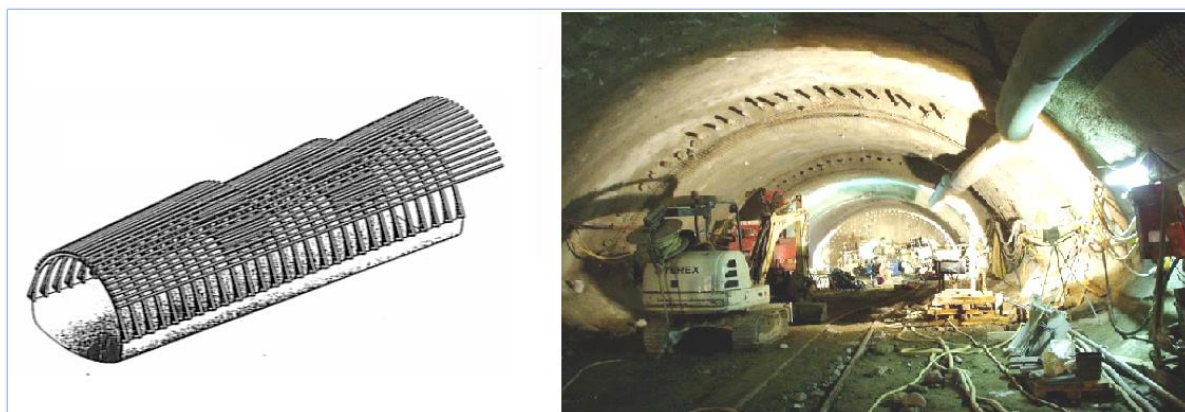
**Slika 2.4:** Primer SN sidra (prirejeno po Konjar: str 5 in Nikić, 2011: str 78).



**Slika 2.5:** Primer IBO sidra (prirejeno po Polimerinject, 2014).



**Slika 2.6:** Primer IBI sidra s primerom večkratnega injektiranja (zgoraj levo) (prirejeno po DSI, 2014).



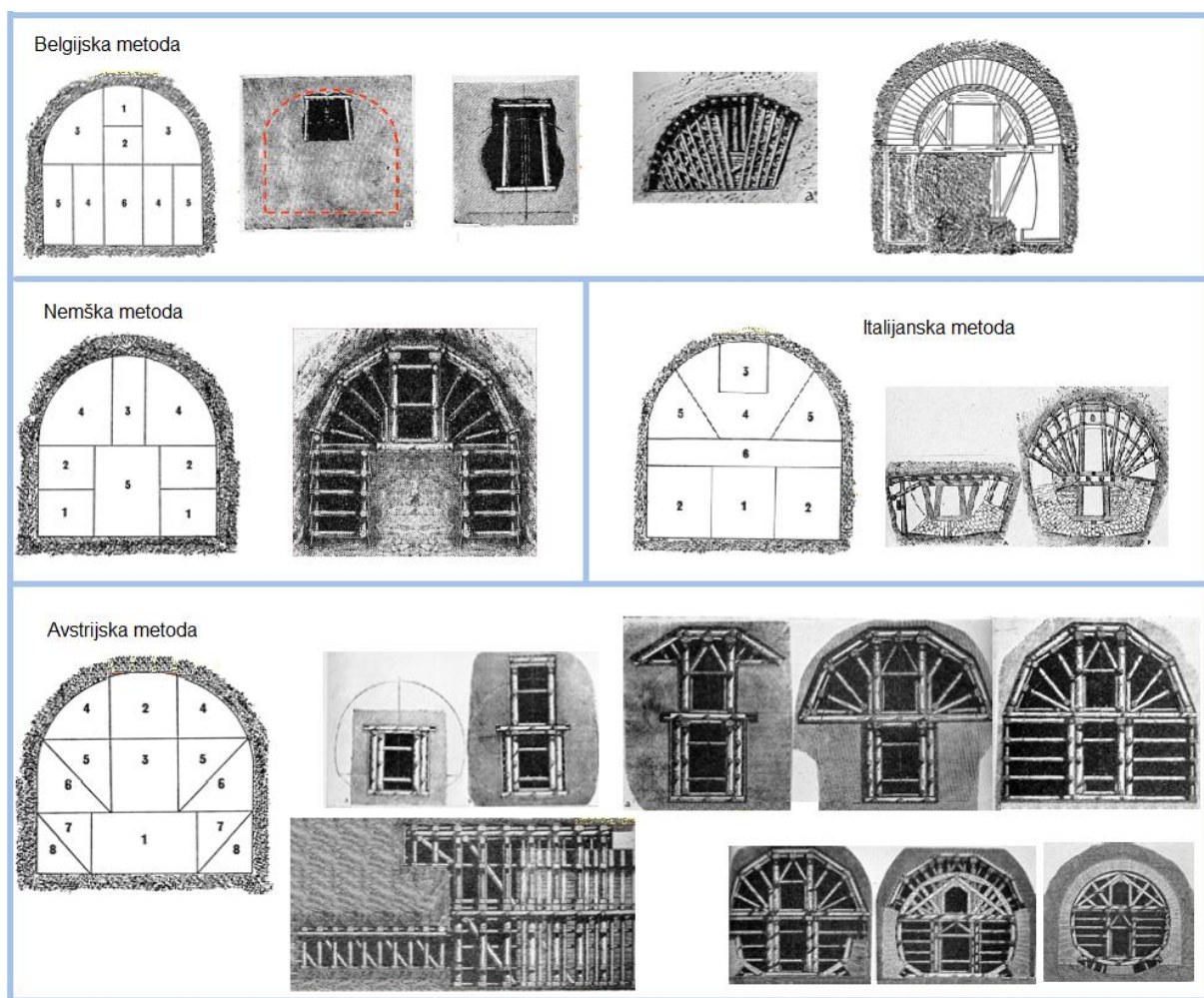
**Slika 2.7:** Primer cevnega ščita («dežnika») (prirejeno po Sigl, 2010: str 31).



**Slika 2.8:** Primer popustljivih elementov (LSC – Lining Stress Controller) (prirejeno po DSI, 2014: str 5 in Schubert et al., 1999: str 337).

## 2.2 Nova avstrijska metoda gradnje predorov (NATM)

Preden je bila zasnovana ideja in princip Nove avstrijske metode (NATM), se je predore v slabo nosilnih kamninah gradilo po principu klasičnih metod. Med njimi so najbolj znane: Belgijska, Angleška, Nemška, Avstrijska in Italijanska (Slika 2.9:). Skupna lastnost teh metod je bila uporaba začasnega gostega lesenega podporja ter masivna zaključna obloga iz opek. Podroben opis postopka gradnje, prednosti in slabosti, ter primeri uporabe posameznih metod je povzel Beaver (1972).



**Slika 2.9:** Primer klasičnih metod: Belgijske, Nemške, Italijanske in Avstrijske (prirejeno po Eberhardt, 2014).

Novo avstrijsko metodo gradnje predorov (NATM) so razvili Avstrijci Ladislaus von Rabcewicz, Franz Pacher in Leopold Müller v 50. letih prejšnjega stoletja. Do uradne potrditve metode so bila potrebna številna praktična apliciranja in analize ustreznosti. Leta 1962 jo je pod imenom Nova avstrijska metoda predstavil Rabcewicz na predavanju XIII Geomehanskega kolokvija v Salzburgu. Ime "nova" je bilo izbrano zaradi ločevanja s predhodno klasično avstrijsko metodo gradnje predorov (Austrian Tunneling Method), ki jo danes poimenujemo 'Old Austrian Tunneling Method'. Rabcewicz, Müller in Pacher so uporabili tehnologijo in znanja, ki so bila že dolgo znana, vendar so bila prvič združena v novo skoraj revolucionarno metodo gradnje. Namesto spopadanja s problematiko nadkritja z debelo podgradnjo so spoznali, da je okoliška hribina glavni podporni element predora, ne pa

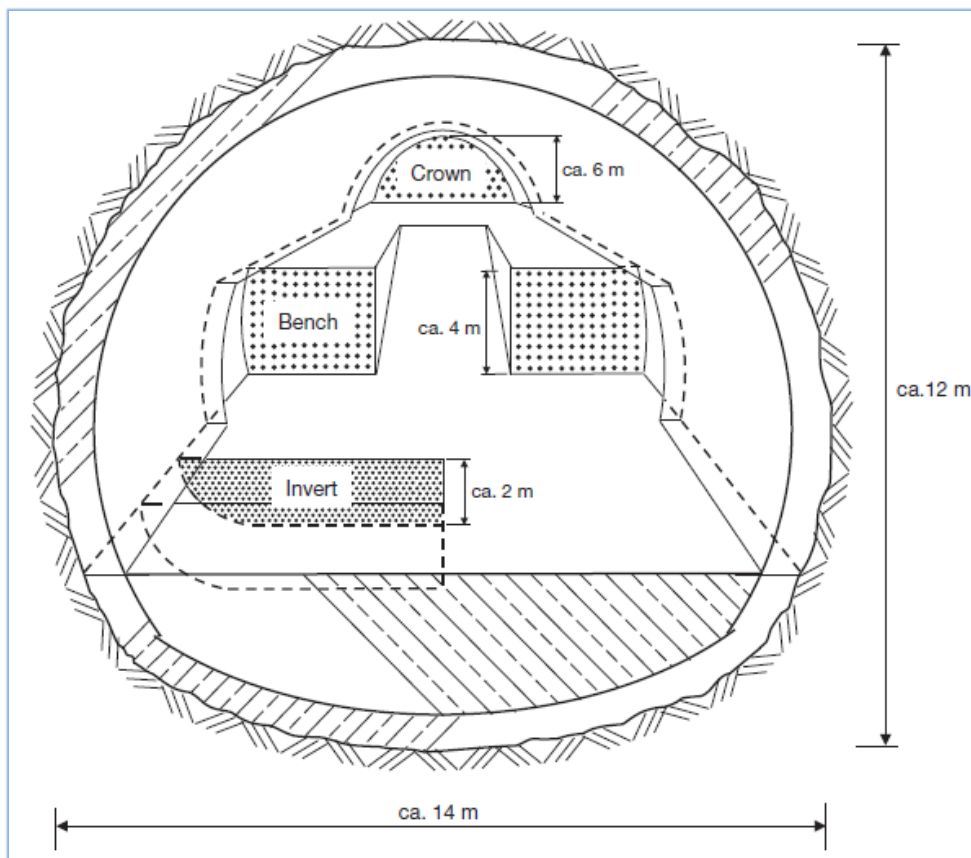
njegova podgradnja. Zmanjšali so debelino podporja na 20 cm ter uporabili brizgan beton (SCL – Sprayed Concrete Lining) namesto, v tistem času običajno uporabljene, debele opečne obloge. Nadalje je bilo zelo pomembno, da je bila obloga brizganega betona sistematično podprta s sidranjem v hribino. Prav tako so Rabcewicz, Müller in Pacher uporabili fleksibilen pristop gradnje, saj so opazovali odziv okoljske hribine glede na gradbene procese in uporabili to informacijo za določitev potrebne količine podporja in zaporedje gradnje. Ker računske metode tistega časa niso mogle dokazati stabilnosti tanke obloge, so spremljali pomike kot dokazilo učinkovitosti njihovega podporja (Schubert, W., 1999, cit. po Chapman, D., Metje, N., Stärk, A., 2010). V spodnji tabeli je predstavljeno kronološko zaporedje razvoja, ki je vodilo do metode NATM (Sauer, G., 1988, Sauer, G., 1990, Rabcewicz, L., 1964 cit. po Karakuş, M., Fowell, R. J., 2004).

**Preglednica 2.1:** Kronološki razvoj, ki je vodil do metode NATM (Karakuş, M., Fowell, R. J., 2004).

Leto	Razvoj
1811	Iznajdba krožne zaščite (Brunel).
1848	Prvi poskus uporabe hitro-vezoče malte (Wejwanow).
1872	Zamenjava lesenega podporja z železnim (Rziha)
1908-1911	Iznajdba stroja za brizganje betona (Akeley).
1914	Prva uporaba brizganega betona v rudniku premoga, Denver.
1948	Uvedba sistema dvojne obloge (Rabcewicz).
1954	Uporaba brizganega betona za stabilizacijo predora grajenega v iztisljivih hribinah (Bruner).
1955	Razvoj sidranja tal (Rabcewicz).
1960	Spoznanje pomembnosti sistema sistematičnega merjenja po Müller.
1962	Rabcewicz predstavi Novo Avstrijsko metodo na predavanju XIII Geomehanskega kolokvija v Salzburgu.
1964	Prvič v literaturi uporabljena angleška oblika izraza NATM.
1969	Prva urbana uporaba NATM v mehkih tleh (Frankfurt am Main).
1980	Ponovno definiranje NATM, zaradi številnih nasprotij v literaturi, Avstrijskega nacionalnega komiteja za podzemne konstrukcije pri Mednarodnem združenju za predorogradnjo (International Tunneling Association – ITA).

Popoln opis metode NATM sta z 22 načeli predstavila Müller in Fecker (1978) (cit. po Chapman, D., Metje, N., Stärk, A., 2010). Njihova načela so bila deležna velikih razprav, saj striktno upoštevanje vseh načel zmanjšuje prilagodljivost metode. Podobno je tudi Schubert (1999) (cit. po Chapman, D., Metje, N., Stärk, A., 2010) nekatera načela označil, da ne odražajo praktične uporabe ter nekatera ne upoštevajo lastnosti tal ali velikosti predora. Ker je literatura podajala številna nasprotna mnenja za definicijo metode NATM, je leta 1980 Avstrijski Nacionalni Komite za podzemne konstrukcije pri Mednarodnem združenju za predorogradnjo (International Tunneling Association – ITA) podal uradno definicijo metode NATM v 10 jezikih.

Pri uporabi metode NATM je bistvenega pomena, da okoljska hribina predora ohrani samonosilnost v vseh fazah napredovanja izkopa. Glede na filozofijo NATM-ja, je meja te gradbene tehnologije dosežena takrat, ko je potrebna izboljšava samonosilnosti hribine z zmrzovanjem ali injektiranjem. Za izvedbo izkopa se lahko uporabi tehnologijo razstreljevanja, delno strojnega vrtnanja čela ali z uporabo prilagojenega bagerja, odvisno od lastnosti hribine. Običajno je napredovanje izkopa prostorsko in časovno odvisno od napredka kalote, stopnice in talnega oboka. Na spodnji sliki (Slika 2.10.) je primer izgradnje predorskega profila z uporabo metode NATM.



**Slika 2.10:** Primer izgradnje predorskega profila z uporabo metode NATM  
(Povše, 2012: str 14).

### 2.2.1 Komentar k metodi NATM

Definicija, ki jo je leta 1980 podal Avstrijski Nacionalni Komite, naj ne bi bila povsem primerna, saj ni edinstvena metodi NATM, temveč skoraj vse metode želijo doseči ohranitev samonosilne sposobnosti hribine. Tako je več avtorjev predlagalo nove definicije, ki bi določile metodo NATM. Med drugimi je tudi Rokahr (1995) (cit. po Chapman, D., Metje, N., Stärk, A., 2010) v svoji definiciji poskušal povzeti prvotne cilje Rabcewicza, Pacherja in Müllerja (v angleškem jeziku cit. po Chapman, D., Metje, N., Stärk, A., 2010: str 185):

»NATM is a support method to stabilize the tunnel perimeter by means of sprayed concrete, anchors and other support, and uses monitoring to control stability.«

Ne glede na definicijo metode NATM, je pomembno razumevanje njenih principov oz filozofije.



## 2.3 Predori grajeni v podobnih anizotropnih kamninah

### 2.3.1 Predor Trojane

Predor Trojane so začeli graditi jeseni 2000, že eno leto prej pa so se začela gradbena dela na portalih. Za idejni projekt so se začele geološko geotehnične raziskave že leta 1995, za gradbeno dovoljenje pa leta 1999. Predor je dolg malo manj kot 3 km in je najdaljši avtocestni dvocevni predor v Sloveniji. Dolžina severne cevi je 2.840 m (2.812 m izkopanega predora) in 2.931 m južne cevi (2.850 m izkopanega predora). Nahaja se na odseku med Vranskem in Blagovico na avtocesti A1 Šentilj–Srmin na osi severovzhod–jugozahod, ki povezuje večja slovenska mesta, Maribor, Celje, Ljubljano, Vrhniko, Postojno in Koper. Avtocesta A1 je tudi sestavni del petega evropskega prometnega koridorja (Lyon–Kijev). Predor poteka pod vasjo Trojane, kar je dodatno otežilo njegovo izgradnjo zaradi nevarnosti poškodbe ali porušitve lokalne magistralne ceste, plinovoda, stanovanjskih objektov itd. Ravno zaradi prevelikega vpliva na površinske objekte je 20. 3. 2003 v južni predorski cevi (stacionaža 80 + 200) prišlo do ustavitve gradbenih del.

Predor je grajen v hribini, ki jo gradijo klastične sedimentne kamnine karbonske in permske starosti (stare približno 280 milijonov let). Kamnine so večinoma mehki gosto skrilavi glinovec od temno sive do črne barve z vključki leč trdnejšega sivega meljevca ter posameznimi lokalnimi lečami peščenjaka. Zaradi velikih tektonskih dogajanj se pojavljajo pregnetene cone, gube in značilne vertikalne in subvertikalne prelomne cone debeline od nekaj decimetrov do 15 m, zapolnjene s slabo nosilno in zelo deformabilno tektonsko glino. Višina nadkritja se spreminja od 2 m v dolini Učak, kjer praktično nadkritja ni, do maksimalnih 130 m. Površina izkopanega prečnega prereza predora je 89 m<sup>2</sup>, kar je približno ekvivalentno površini kroga s premerom 11 m.

Pri izgradnji predora je bilo vzpostavljeno obsežno območje spremljanja obnašanja hribine na površju kot v samem predoru. Na območju predora, kjer na površju ni bilo pomembnih objektov, so bila nameščena številna merska območja znotraj predora, na površju pa le v smeri osi predora. V takem območju je pomembno spremljanje obnašanja predora, da se ne pojavijo preveliki pomiki in deformacije in da je zagotovljena varnost le-tega. Na področju vasi Trojane, kjer so pomembni gospodarski in stanovanjski objekti, je bilo vzpostavljeno obsežno mersko območje površine in notranjosti predora. V takem območju je pomembno spremljanje obnašanja površja zaradi možnosti poškodb objektov. Prav tako je pomembno spremljanje v notranjosti, da so izvedeni ukrepi primerni in zadostni za prevzem obtežbe in da na površju ni prevelikega vpliva. Uporabljeni so bili naslednji tipi inštrumentov:

V predoru:

- Geodetske trigonometrične meritve pomikov predorske obloge s petimi merskimi točkami (tri v stropu kalote in dve na stenah stopnice) oz. sedmimi v parkirnih nišah, na povprečni razdalji 14,6 m po celi dolžini predorske cevi.
- Tritočkovni ekstenzometer vgrajen v stropni del in boke predora (dva dolžine 6 m in štiri dolžine 9 m). Služili so kot merilci pomikov, specifičnih deformacij, lezenja in relaksacije v okoliški hribini.
- Merska sidra (enako število in dolžine kot pri ekstenzometru), s katerimi se je opazovalo pomike hribine in ocenilo obremenitev na sidrni sistem.
- Tlačne celice (skupno 14 na merski profil) za opazovanje napetosti v tangencialni in radialni smeri predorske obloge.

- Horizontalni inklinometri vgrajeni v območju cevnega ščita v levi predorski cevi (odsek 80 + 220 do 80 + 360). Njihova vgradnja je služila opazovanju časovnega razvoja pomikov in njihovih velikosti pred in za izkopanim čelom.

Na površju:

- 3D geodetske meritve širšega območja točk postavljenih prečno na os predora na območju vasi Trojane.
- Trije tritočkovni vertikalni ekstenzometri dopolnjeni s pettočkovnimi prečnimi višinskimi profili so bili vgrajeni v bližini Garni hotela, za boljše razumevanje vplivnega območja gradnje predora, posebej pa za ugotavljanje razporeditve pomikov od predorske cevi do površine.
- Reperji na objektih (z vsaj tremi točkami na vsakem objektu) za 3D geodetsko merjenje pomikov.
- Točke v osi predora za nivelmansko merjenje pomikov.

Podatki v točki 2.3.1 so bili povzeti po doktorski disertaciji Klopčič (2009) in diplomski nalogi Despotović (2005).

### 2.3.2 Predor Golovec

Predor Golovec je edini (po celi dolžini) dvocevni tripasovni predor zgrajen na slovenskih avtocestah. Nahaja se na vzhodni strani avtocestnega obroča Ljubljane in povezuje severno oz. severno-vzhodno Slovenijo z jugo-zahodom (Koper) in jugo-vzhodom (Novo mesto). Teoretična površina izkopanega profila znašala 145,7 m<sup>2</sup> (svetla višina 11,6 m, svetla širina pa 14,6 m). Dolžina izkopane zahodne in vzhodne cevi meri 578 in 545 m, s povprečno razdaljo med osema cevi 50 m in največjo višino nadkritja 80 m.

Geološko - geotehnične raziskave za izdelavo idejnega projekta so bile opravljene že leta 1994, na osnovi katerega se je predvidevalo gradnjo predora samo z južne strani. Oktobra 1995 so se na južnem portalu pripravljala gradbena dela za prebitje portala in za začetek izgradnje predora, vendar so dela povzročila velik globinski plaz hribine, ki je vplival na območje portala in sam načrt projekta. Za varno nadaljevanje izgradnje predora so se izvedli ukrepi za stabilizacijo zemeljskega plazu. Prebitje čelnih pilotov na zahodni cevi južnega portala se je začela šele po dveh letih (junij 1997) z bistveno spremenjenim načrtom, ki je obsegal močno ojačeno konstrukcijo in galerijo obeh portalov (južnega in severnega). Mesec kasneje je bila tudi vzhodna cev pripravljena na preboj. Dejanske geološke razmere, poslabšane s plazenjem južnih brežin, so izredno otežile napredovanje izkopa čela. Pogosto se je pojavljala problematika nestabilnosti čela in stropa kalote, ki se je odražala z manjšimi in večjimi zruški. Večja težava se je pojavila novembra 1997 v zahodni cevi, ko je zrušek povzročil porušitev primarnega podporja v že izdelani kaloti in smernem rovu. V času sanacije, zaradi prekoračitve dopustnih pomikov obloge, je bil izdelan nov dopolnjen projekt gradnje, ki je predvideval dodatne podporne ukrepe (cevni ščit, debelejšo primarno oblogo, varovalno jedro čela kalote), ter pripravo severnega portala za sočasni izkop z obeh strani. Januarja 1998 so se izkopna dela na južnem portalu nadaljevala, aprila pa so se začela še na severnem portalu. Konec avgusta 1998 se je zgodil preboj zahodne cevi, marca 1999 pa vzhodne predorske cevi. Celoten predor Golovec je bil predan uporabi v prometu avgusta 1999.

Predor Golovec se nahaja na skrajnem zahodnem delu žirovskega nariva. Hribinsko maso sestavljajo kamnine zgodnje karbonske dobe, ki so v svojih približno 300 milijonih letih

doživele močna tektonska dogajanja (narivanje, gubanje in prelamljanje). Raziskave za idejni projekt so razkrile zelo heterogeno sestavo hribine. Prevladujoča kamnina je skrilavi meljevec in glinovec ter zdrobljen in močno prepusten kremenov peščenjak. Praktično predstavo celotnega območja lahko opišemo kot srednje zrnat kremenov, nizko metamorforiziran peščenjak in črni meljevec. Značilen je jugovzhodni, delno vzhodni vpad diskontinuitet z razmočenimi območji, kjer so diskontinuitete najbolj pretrte.

Zaradi zdrsa hribine na južnem portalu se je uredilo obsežen površinski program opazovanja nad celim predorom. Za opazovanje samega zdrsa je bilo vgrajenih 22 vertikalnih inklinometrov opremljenih z geodetskimi točkami, ki so omogočale opazovanje njihovih pomikov. Območje portalnih pilotov in galerije je bilo opazovano še z dodatnimi 15 točkami na južnem in 14 geodetskimi točkami na severnem portalu, s katerimi se je preverjalo učinkovitost podporne konstrukcije. Dodatnih 20 individualnih točk je bilo umeščenih na vplivno območje predora. Nad predorom se je naknadno namestilo še tri prečne nize geodetskih točk. V samem predoru pa je bilo skozi celotno dolžino postavljenih 97 merskih profilov (povprečno na 11 m) s 5 merskimi točkami. Preverjanje položaja točke se je opravljalo enkrat tedensko do enkrat dvotedensko, odvisno od napredka čela in njegovega položaja. Pomembno je omeniti, da se je zaradi stabilnostnih problemov in heterogenosti hribine prvič v Sloveniji uporabilo 3D merske točke na primarnem podporju, kar pa je kasneje postala stalnica pri vsakokratni gradnji predora.

Podatki v točki 2.3.1 so bili povzeti po doktorski disertaciji Klopčič (2009) in diplomski nalogi Šlibar (2005).

### **2.3.3 Predor Šentvid**

Celoten sistem predora Šentvid je dolg približno 1,5 km, sestavljata pa ga pokriti vkop (cut & cover section) dolžine približno 400 m in sam predor dolžine približno 1100 m. Šentviški predor je dvoceven, od priključka v predoru dalje je tripasoven (s severa (Kranja) proti jugu (Kopru)), ostali del pa je dvopasoven. Gradnja glavnih predorskih cevi predora Šentvid se je začela decembra 2004 s severnega portala in junija 2005 z južnega portala. Preboj zahodne (desne) cevi se je zgodil decembra 2006, preboj vzhodne (leve) cevi pa junija 2007. Junija 2008 je prišlo do predaje, vendar brez priključitvenih ramp, ki so bila še v izgradnji. Celoten predor s priključitvenimi rampami je bil predan prometu decembra 2009.

Pred začetkom izgradnje glavnih predorskih cevi je bil na severnem delu izveden raziskovalni rov ter podaljšanje pokritega vkopa, zgrajenega leta 1984 med gradnjo avtoceste Ljubljana–Kranj v dolžini 247 m, pod Celovško cesto do severnega portala v skupni dolžini 423 m. Podaljšanje pokritega vkopa je potekalo spomladi 2004. Raziskovalni rov je bil izveden z namenom pridobitve zanesljivejšega geološkega modela hribine in ugotovitve materialnih lastnosti le-te. Ključnega pomena je bilo podrobno poznavanje kamninske mase v okolici predora, saj je projekt vključeval izvedbo dveh velikih spojitvenih votlin (kavern), kjer se združijo priključitvene rampe z dvopasovnim predorom v tripasovnega. Raziskovalni rov se je začel graditi po principu NATM metode maja 2004, končal pa decembra istega leta. Primarno podporje rova je sestavljal brizgan beton, jeklen lok, armaturna mreža in pasivna sidra. Za pospešitev gradnje se je uporabilo mikroarmiran brizgan beton, opustilo pa se je vgrajevanje armaturne mreže in pasivnih sider, razen v območju pregnetenih con in razširitev. Rov ni služil samo spoznavanju hribine, ampak je bil kasneje uporabljen za opazovanje pomikov hribinske mase pred čelom izkopa med samim

izkopom. Brez raziskovalnega rova, z običajno geotehnično opremo, je nemogoče opraviti takšne meritve. Površina izkopanih profilov podzemnega vozlišča je znašala: tripasovni predor  $150 \text{ m}^2$ , kaverna (s tristopenjskim povečevanjem) 210, 280 in  $360 \text{ m}^2$ , dvopasovni predor  $90 \text{ m}^2$  in priključna rampa  $90 \text{ m}^2$ .

Predor je grajen v hribini, ki jo sestavljajo gosto skrilave klastične sedimentne kamnine karbonske starosti. Prevladujoče kamnine so peščenjak, meljevec in glinovec. Zaradi velikih tektonskih dogajanj se pojavljajo gube, pregnetene cone zapolnjene s tektonsko glino, debeline do nekaj metrov. Vdor vode v predor se pojavlja predvsem ob pregnetenih conah, kjer se voda pojavlja tudi vzdolž skrilavosti in tako zmanjšuje mehanske lastnosti kamnine ter poslabša pogoje gradnje v bližini takih območij. Zaradi takih pogojev se je zgodilo nekaj manjših zruškov.

Lastnost hribinske sestave predora Šentvid izstopa od ostalih zgoraj opisanih predorov grajenih v podobnih pogojih po tem, da so diskontinuitete v zahodni cevi vzporedne z osjo predora in tako je omogočena bolj natančna analiza pomikov z 2D numeričnim modelom. V ostalih primerih pa diskontinuitete vpadajo z ali proti smeri izkopa čela, a za bolj natančno analizo je potreben 3D numeričen model.

Zahtevna geometrija predora kot tudi geološka sestava hribine so zahtevale izvedbo predhodnega rova, ki je služil v raziskovalne in tudi razvojne namene. Poleg ugotovitve sestave tal v trasi predorskih cevi se je na primarno podporje rova, kot kasneje tudi v predor, vgradilo geodetske točke. Število točk in razmik med merskimi profili je bil predvsem odvisen od geologije hribine in geometrije prečnega prereza. Povprečna razdalja merskih profilov v tripasovnem (z 9 geodetskimi točkami) in dvopasovnem (s 7 geodetskimi točkami) delu je znašala približno 10 m, v območju kavern (z 10 geodetskimi točkami) pa 5,5 m.

S spremljanjem pomikov točk (programsko orodje Predor) v predoru kot v raziskovalnem rovu se je hitro ugotovilo odziv hribine na izkop ter primernost podpornih ukrepov. Razvojni del je zajemal ugotavljanje deleža izvršenih pomikov in vplivno območje pred čelom predora ter povezava pomikov (kdaj bodo večji in kdaj manjši) glede na smer skrilavosti (Klopčič, 2009).

## 2.4 Anizotropija

Izraz anizotropija nam pove, da ima neka snov/material (magnetno polje, kamnina, tekočina itd.) značilnost, da so nekatere njene do lastnosti (vpojnost, elastičnost, toplotno prevodnost, mehanska odpornost, optične lastnosti, itd.) odvisne od smeri, v kateri so merjene.

Nasprotni pojem anizotropije je izotropija, kjer so lastnosti snovi enake v vseh smereh merjenja (vulkansko steklo).

Poznamo tudi ortotropijo, ki predstavlja posebno vrsto anizotropije. Lahko si jo predstavljamo kot usmerjeno anizotropijo, v smislu, da ima material dve ali tri med seboj pravokotne osi, vzdolž katerih ima vsaka os svoje lastnosti (steblo iglavca v vzdolžni, radialni in obročni smeri).

Kamninska anizotropija se najpogosteje odraža s plastovitostjo (pri sedimentaciji), skrilavostjo (pri metamorfizmu) ter razpokanostjo (zaradi tektonike). Zgoraj opisane hribinske mase, v katerih so bili grajeni predori, so ravno take vrste kamnin, ki odražajo visoko stopnjo anizotropije. Ravno zaradi tega je projektiranje in gradnja v takih pogojih zelo zahtevna.

### 3 PROGRAMSKA OPREMA

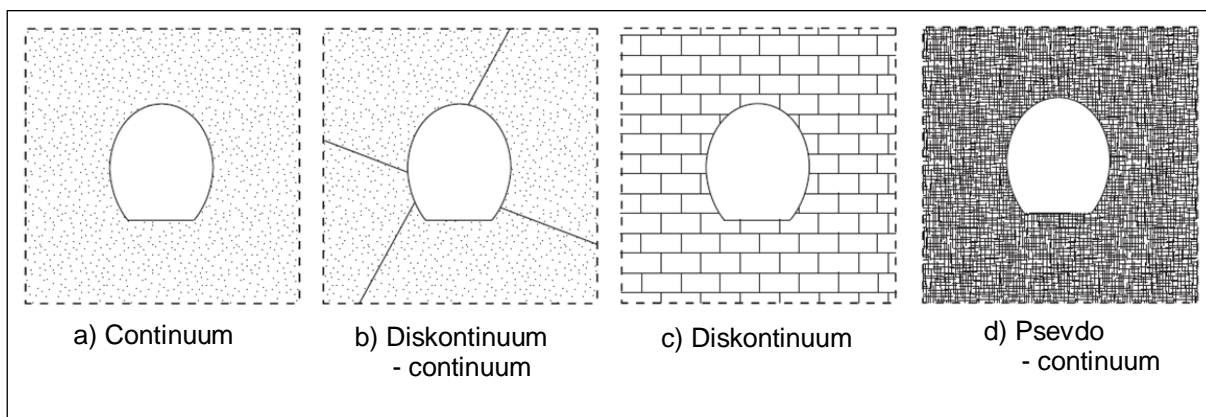
Programi, s katerimi opravljamo numerične analize podzemnih gradenj, temeljijo na matematičnih metodah, ki inženirju služijo kot orodje za kvalitativno in kvantitativno ovrednotenje vplivov geoloških in geotehničnih pogojev na projekt in vrednotenje posledic projekta na okolje. Metode se lahko uporablja: v naprej usmerjeno analizo, kjer so podane lastnosti in geometrija tal, rezultati pa so izračunani (n.p.r. napetosti, pomiki), ali v povratno analizo, kjer so podani rezultati oz. podatki predhodno opravljenih meritev, lastnosti in geometrija tal pa so aproksimirani, tako da se rezultati čim bolj ujemajo z izmerjenimi.

Na tržišču imamo veliko število programov, ki nam omogočajo numerično analizo hribinske mase za različne geoinženirske posege. Pri uporabi programske opreme se med modeliranjem porabi večino časa pred procesiranjem oz. za diskretizacijo problema in po procesiranju oz. za analizo rezultatov. Zaradi tega se v praksi velikokrat uporablja programe, ki nudijo uporabniku prijazne pred in po procesne sposobnosti. Take lastnosti ponavadi izpolnjujejo komercialni programi.

Glede na princip delovanja numeričnih metod, uporabljanih v večini dostopnih in široko uporabljenih programov, se jih lahko razdeli v dve skupini:

- (1) metode kontinuiranega prostora, kjer je anizotropija kamninske mase vključena v model s smerjo odvisnimi materialnimi (konstitutivnimi) zakoni
- (2) metode diskontinuiranega prostora, kjer je model sestavljen iz ločenih elementov kamnine in diskontinuitet, vsak s svojimi materialnimi lastnostmi.

Izbira numeričnega modela za določen problem je pogojena z velikostjo oz. razmerjem diskontinuitet in velikostjo oz. razmerjem problema, ki mora biti rešen. Brady (1987) (cit. po Bobet, A., et al., 2009) je podal kvalitativne (opisne) smernice (Slika 3.1:), Barton (1996) (cit. po Klopčič, J., 2009 stran 51) pa je predlagal kvantitativno oceno za izbiro primerne metode. Po Bartonu je metoda kontinuuma primerna za kamnine s  $Q$ -vrednostjo manjšo od 0.1 ali za masivne hribine z veliko večjimi razmiki med diskontinuitetami v primerjavi z velikostjo odprtine ( $Q$ -vrednost večja od 100). Za vmesno območje  $Q$ -vrednosti od 0.1 do 100 pa je primerna uporaba metode diskontinuitetnega prostora.



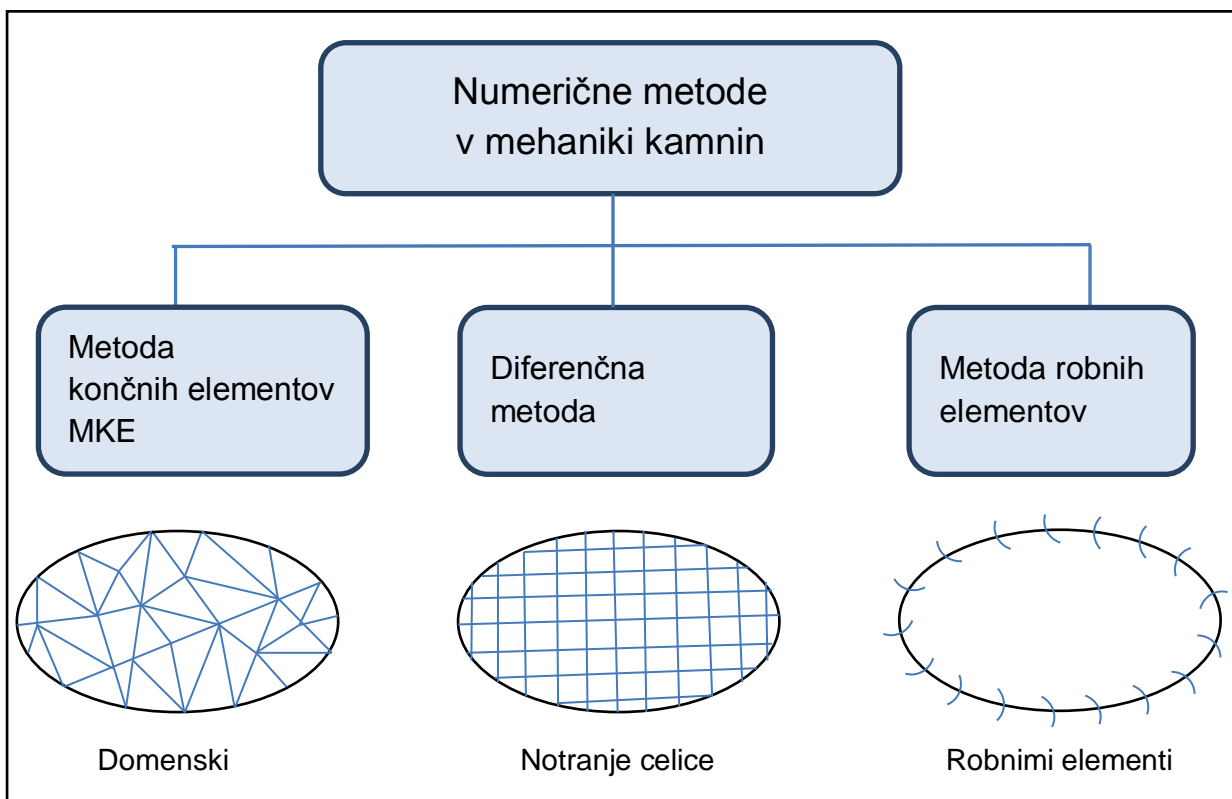
**Slika 3.1:** Modeli kontinuuma in diskontinuuma  
(prirejeno po Bobet, 2010: str 30).

Na sliki (Slika 3.1:) so prikazane smernice, ki jih je podal Brady. Slika 3.1 (a) prikazuje odprtino brez diskontinuitet, v tem primeru je polje pomikov zvezno in je uporaba metode kontinuiranega prostora primerna. Slika 3.1 (b) predstavlja predor grajen v hribini z majhnim številom diskontinuitet, ki razdeli hribino na manjša zvezna območja. Poje pomikov je zvezno znotraj posameznega območja, nezvezno pa preko območja. V primeru uporabe kontinuiranega modela, mora izbran model vsebovati zakonitosti, ki lahko zavzamejo lastnosti diskontinuitet. Na sliki 3.1 (c) diskontinuitete razdelijo hribinsko maso na številna območja (bloke), ki so v obsegu velikostnega reda odprtine. Pomiki so določeni z zdrsi blokov vzdolž diskontinuitet in njihovih rotacij. Pri takih pogojih je primernejša uporaba metode diskontinuiranega prostora. Za zelo razpokane kamnine, kot je prikazano na sliki 3.1 (d), kjer diskontinuitete določajo bloke veliko manjše od velikosti odprtine, polje pomikov je na prvi pogled zvezno, vendar ne točno tako, je uporaba kontinuiranega modela videti razumna.

### 3.1 Metoda kontinuiranega prostora

V to skupino spadajo metode, ki so najbolj razširjene in uporabljene za reševanje problemov mehanike kamnin. Med najpomembnejšimi so:

- metoda končnih elementov – MKE (finite element method – FEM); Plaxis, PHASE<sup>2</sup>
- diferenčna metoda (finite difference method – FDM); FLAC (Itasca)
- metoda robnih elementov (boundary element method – BEM); EXAMINE<sup>2D</sup>



**Slika 3.2:** Numerične metode kontinuuma v mehaniki kamnin.

Navedene metode na sliki (Slika 3.2:) rešujejo problem z diskretizacijo. Metode FEM in FDM diskretizirajo material in rob problema, BEM pa le rob (notranjost je obravnavana kot neskončni kontinuum). S tem se razsežnost problema zmanjša za 1 stopnjo.

Med naštetimi metodami se FEM najbolj uporablja v mehaniki kamnin, ki kontinuum diskretizira na majhne elemente, ki se stikajo v vozliščih. Metoda se opira na predpostavko, da je s poznavanjem pomikov vozlišč in z izbiro primerne interpolacijske funkcije možno natančno določiti pomik katerekoli točke znotraj elementa. Vpliv diskontinuitet in anizotropije je v določeni meri možno modelirati z uporabo določenih materialnih modelov. Težave nastopijo takrat, ko je relativni pomik snovi/materiala dovolj velik, da se lahko ustvarijo novi stiki elementov oz. se prekinejo že obstoječi. V takem primeru metode kontinuuma ne zadostujejo pogojem problematike.

### 3.2 Metoda diskontinuiranega prostora

V to skupino spadajo numerične metode, ki računsko domeno sestavljajo diskretni trdni elementi, medsebojno pa vplivajo preko skladnih stikov. Med najbolj uporabljenimi in razširjenimi metodami najdemo:

- Metodo ločenih elementov (distinct element method – DEM); UDEC, 3DEC (Itasca)
- Analiza diskontinuirnih deformacij (discontinuous deformation analysis – DDA);
- Metoda povezanih delcev (bounded particle method – BPM); PFC<sup>2D,3D</sup> (Itasca)

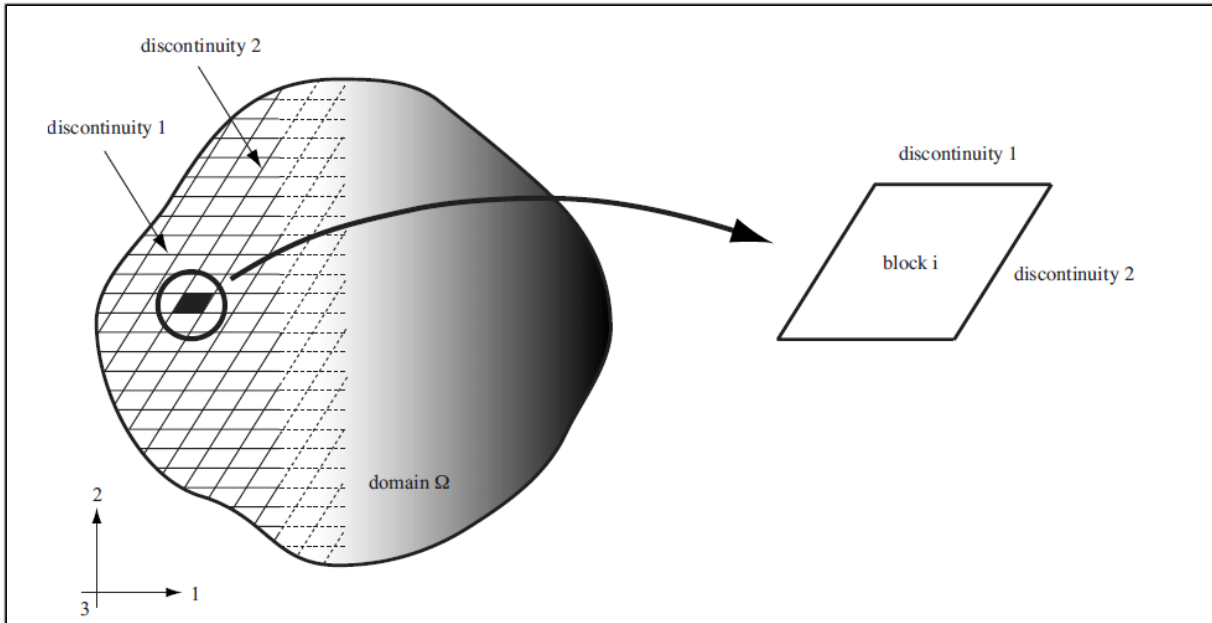
Po definiciji Cundall and Hart (1992) (cit. po Bobet, A., 2010) spadajo v družino ločenih elementov metode, ki: (1) dovoljujejo končne pomike in rotacije diskretiziranih teles, vključno z njihovo ločitvijo in (2) med računanjem med telesi avtomatično prepoznava nove stike.

Po njihovi definiciji pa morajo biti za pripadnost k metodi ločenih elementov izpolnjena tri ključna izhodišča, in sicer: (1) reprezentacija (predstavitev) stikov, (2) reprezentacija (predstavitev) trdnega materiala in (3) zaznavanje ter revizija stikov med samim reševanjem problema.

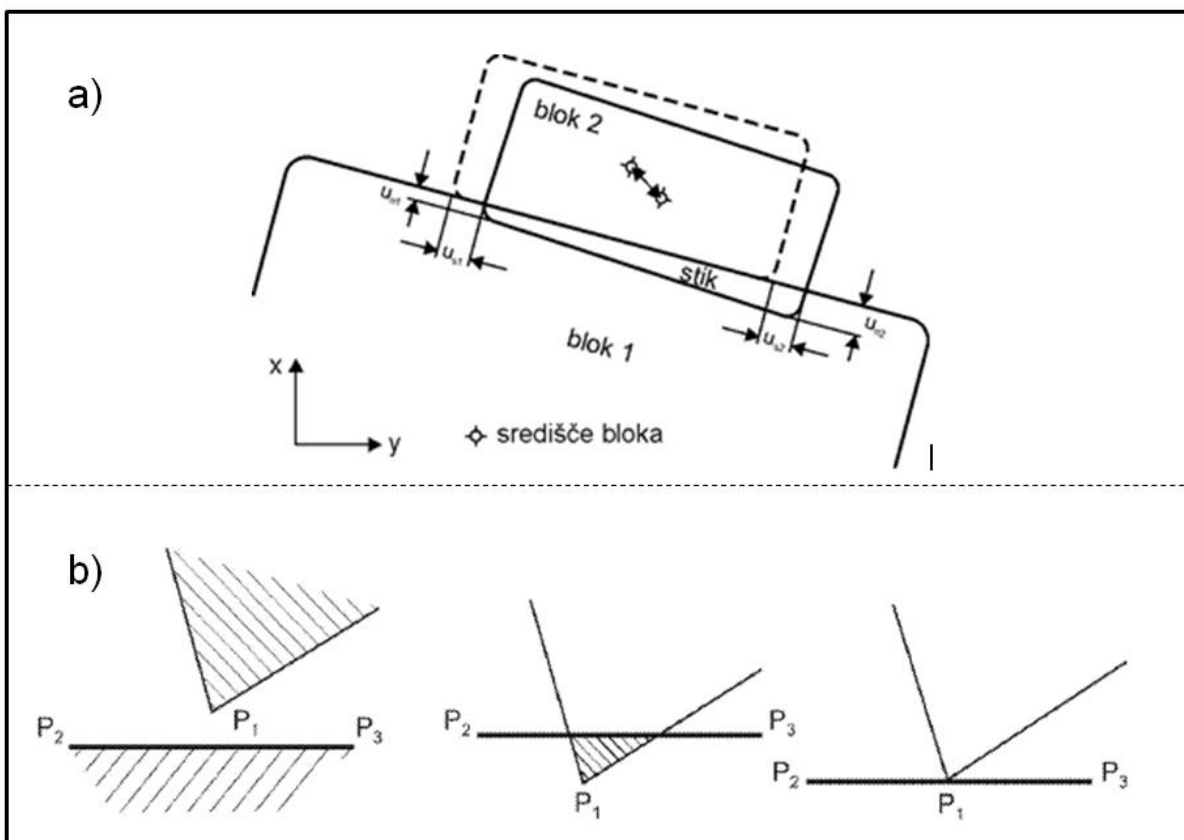
Po zgoraj navedeni definiciji je tudi DDA metoda ločenih elementov. Pri DEM in DDA je prevzeto, da je obravnavano območje razdeljeno z vnaprej predvidenimi diskontinuitetami, ki z njihovimi presečišči določajo končno število blokov (teles), ki se med seboj stikajo le preko teh diskontinuitet (Slika 3.3:). Glavne značilnosti DDA metode ter njeno primerjavo z DEM metodo je opisal in predstavil Khan (2010).

Pomembna razlika med DEM in DDA metodama je, da pri DEM stiki uporabljajo neko končno normalno togost, kar pomeni, da je možno prekrivanje dveh sosednjih diskretnih teles, pri DDA pa je prekrivanje onemogočeno, kar zagotavlja vgrajen algoritem (Slika 3.4:). Čeprav je DDA popolna analiza diskontinuumov, so procedure podobne in sledijo tistim razvitim za FEM. Podrobnejši opis teoretičnega ozadja in razlik FEM in DEM je predstavil Scheldt (2002).

Metoda BPM je zasnovana po zgledu DEM. Njena ključna ideja je aproksimacija geomateriala s konglomeratom zacementiranih zrn. Numerično je to predstavljeno tako, da je obravnavano območje sestavljeno iz togih okroglih teles (krogov pri 2D, sfer pri 3D), ki so po območju neenakomerno razporejeni. Telesa medsebojno vplivajo preko njihovih stikov tako, da se pomiki ustvarijo ravno v njih oz. pri relativnih pomikih teles (Slika 3.5:). Natezne in strižne razpoke med delci nastanejo takrat, ko je prekoračena natezna ali strižna trdnost stika. Razvijanje in napredovanje razpok je tako pogojeno s smerjo gradienta nateznih oz. strižnih napetosti in ne z vnaprej določenimi diskontinuitetami.

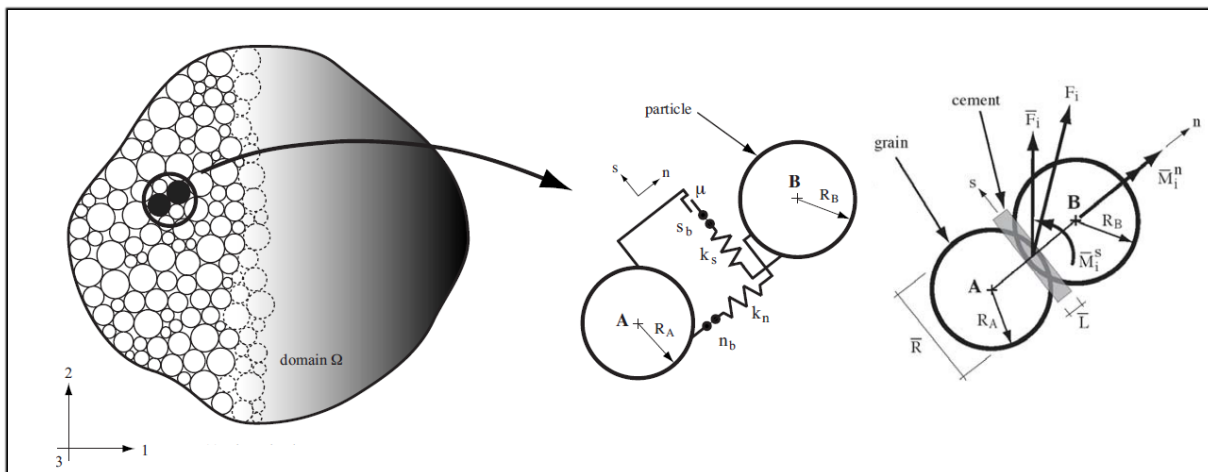


**Slika 3.3:** Model diskontinuuma: DEM in DDA diskretizacija  
(prirejeno po Bobet, 2010: str 33).



**Slika 3.4:** Modeli predstavitve stikov: a) metoda DEM; b) metoda DDA  
(prirejeno po Scheldt, 2002: str 65 in Gabrijel, 2002: str 16)





**Slika 3.5:** Model diskontinuum: BPM diskretizacija  
(prirejeno po Bobet et al., 2009: str 1555 in Bobet, 2010: str 39).

### 3.3 Komentar k metodam kontinuuma in diskontinuum

Zgoraj opisane lastnosti metod so le osnovne značilnosti, ki jih metode zmorejo oz. lastnosti njihovih omejitev. V večino metod je v numerični model možno integrirati linearne in nelinearne lastnosti snovi, tok tekočine, širjenje toplotnega toka, ki se lahko modelira kot radioaktivno sevanje, vgradnja različnih konstrukcijskih elementov (sidra, kabli, podporni elementi) itd.

Prav tako nekateri numerični modeli združujejo različne metode (FEM in DEM, FEM in BEM, itd.), tako so ustvarjeni hibridi. Metoda hibridov lahko določene probleme veliko natančneje aproksimira dejanskemu obnašanju kot rešitve pridobljene s posameznimi metodami. Miniranje kamninske mase je dober primer za uporabo FEM/DEM hibrida, saj imamo na začetku homogeno kompaktno območje, ki se po miniranju spremeni v močno razpokano območje. Podroben opis razvoja hibrida FEM/DEM pri določanju trdnosti kamnin je predstavil Elmo (2006).

## 4 UDEC

Programsko orodje UDEC (Universal Distinct Element Code) je primer programa ločenih elementov. Numerične metode uporabljene v programu spadajo v skupino splošnih analiz diskontinuuma.

Obravnavano območje se s pomočjo diskontinuitet razdeli na posamezna telesa (bloke), ki medsebojno vplivajo preko le-teh. Program omogoča obravnavo blokov kot togega ali deformabilna telesa (telo razdeli na cone). Ne glede na način obravnave bloka, je njihov stik numerično predstavljen tako, da omogoča njihovo prekrivanje oz. penetracijo, kot je razvidno na sliki (Slika 3.4: a)).

Za analizo problemov je v program vgrajen precejšen izbor materialnih (konstitutivnih) modelov obnašanja kamnine, tako za deformabilna telesa kot za diskontinuitete. Poleg materialnih modelov, program omogoča uporabo različnih konstrukcijskih elementov: **(1) ojačitve**, v katero spadajo sidra, kabli, ipd. ter **(2) podporje**, v katero spadajo površinska obloga oz. podporno zidovje ter enodimenzionalno podporje lesenih ali hidravličnih razpornikov.

Podroben opis numerične formulacije enačb gibanja, ohranjevanje momenta in energije, predstavitev kamninskega stika, deformabilnost bloka, dušenja, ugotavljanje mehanskega časovnega koraka, vpliva velikosti mase in robnih pogojev je opisano v diplomskem delu Gabrijel (2002).

Z UDEC-om lahko poleg statičnih analiz izvajamo tudi dinamične analize ter dodatno še obravnavamo problematiko tekočinskega toka (med diskontinuitetami) in toplotne analize, vendar je to področje izven obsega moje diplomske naloge.

### 4.1 Materialni modeli deformabilnih blokov

V programu UDEC je vgrajenih sedem materialnih modelov blokov:

- nični model
- elastični (izotropni) model
- Drucker – Prager-jev model
- Mohr – Coulomb-ov model
- model za močno razpokane kamnine (ubiquitous – joint model)
- model z upoštevanjem mehčanja in utrjevanja (strain – softening/hardening model)
- model z dvema ploskvama plastičnega tečenja (double – yield model)

Nični in elastični materialni model predstavljata vsak svojo skupino modelov, medtem ko pa ostali materialni modeli spadajo v skupino plastičnih modelov.

Glede na obseg moje diplomske naloge bom v nadaljevanju predstavil le nekatere materialne modele (nični, elastični, Mohr–Coulombov in ubiquitous–joint). Za elastični in Mohr–Coulombov model bom podal le najpomembnejše lastnosti, saj je njihovo teoretično ozadje že razloženo v diplomskem delu Gabrijel (2002).

#### 4.1.1 Nični model

Nični model se večinoma uporablja za ponazoritev materiala, ki ga odstranimo oz. odkopljemo. Napetosti znotraj ničnih blokov ali con se ponastavijo na 0 in nobena telesna sila (npr. gravitacija) ne deluje na te bloke ali cone. Kasneje se lahko tem blokom ali conam dodeli drugačen materialni model in se tako simulira ponovno zapolnjene z materialom.

#### 4.1.2 Linearno elastični model

Elastični model (EL) predstavlja najpreprostejšo obliko modela materialnega obnašanja. Primeren je za homogene, izotropne, kontinuirane materiale, ki odražajo linearno zvezo med deformacijami in napetostmi za primer obremenjevanja kot razbremenjevanja.

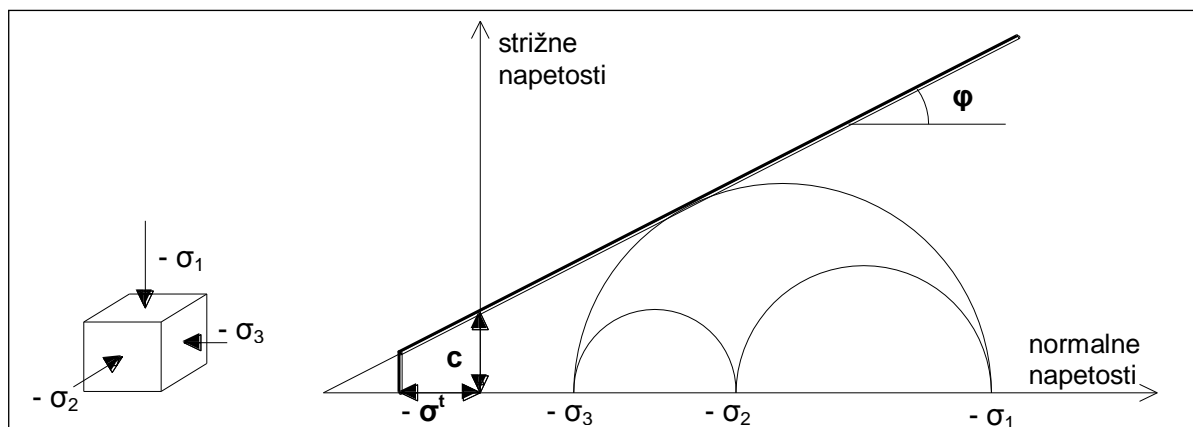
Za določanje njegovih karakteristik potrebujemo le tri parametre in sicer:

- $\rho$  ... gostoto
- $K$  ... kompresijski modul
- $G$  ... strižni modul

Bolj podroben opis numerične formulacije modela je predstavljen v diplomskem delu Gabrijel (2002) stran 36 in v priročniku UDEC (2006).

#### 4.1.3 Mohr–Coulombov model

Mohr–Coulombov model (MOHR) predstavlja preprosto obliko elasto-plastičnega materialnega modela. Pogoj plastifikacije (porušne ovojnice) ustreza Mohr–Coulombovem kriteriju strižne trdnosti ter dodatno še pogoju natezne porušitve. Na sliki (Slika 4.1:) je grafično prikazana ploskev oziroma črta kriterija plastičnega tečenja.



**Slika 4.1:** Mohr – Coulomb-ov kriterij porušitve z dodatnim pogojem natezne porušitve.

Za določanje karakteristik MOHR modela potrebujemo sedem parametrov in sicer:

$\rho$ ... gostoto	$\varphi$ ... strižni kot
$K$ ... kompresijski modul	$c$ ... kohezija
$G$ ... strižni modul	$\sigma^t$ ... natezna trdnost
	$\psi$ ... kot razmikanja

Bolj podroben opis numerične formulacije modela je predstavljen v diplomskem delu Gabrijel (2002) stran 37 in v priročniku UDEC (2006).

#### 4.1.4 Ubiquitous–joint model

Celotno poglavje Ubiquitous–joint modela je povzeto po UDEC (2006).

Ubiquitous–joint model (UB) predstavlja anizotropno obliko plastičnega materialnega modela za močno razpokane kamnine. Anizotropija modela je izražena s porušnimi ravninami določenih orientacij znotraj MOHR-ovega telesa.

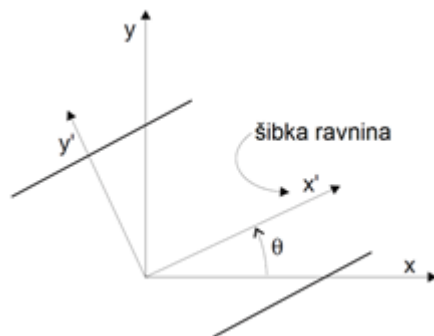
Plastifikacija se lahko pojavi ali v »šibki« ravnini ali v »močni« ravnini ali pa v obeh, odvisno od napetostnega stanja, orientacije šibke ravnine in materialnih lastnosti močne in šibke ravnine. Izraz »šibke« se nanaša na ravnine, ki so vzporedne porušnim, med tem ko se »močne« nanaša na ravnine, ki so pravokotno nanje.

Za določanje karakteristik UB modela potrebujemo dvanajst parametrov in sicer:

	»močne«	»šibke«
$\rho$ ... gostoto	$\varphi$ ... strižni kot	$\varphi_j$ ... strižni kot ravnin
$K$ ... kompresijski modul	$c$ ... kohezija	$c_j$ ... kohezija ravnin
$G$ ... strižni modul	$\sigma^t$ ... natezna trdnost	$\sigma_j^t$ ... natezna trdnost ravnin
	$\psi$ ... kot razmikanja	$\psi_j$ ... kot razmikanja ravnin
		$\theta$ ... kot orientacije ravnin

##### 4.1.4.1 Numerična formulacija plastičnih popravkov šibke ravnine

Slika 4.2: prikazuje obstoj šibke ravnine v MOHR-ovem telesu ter globalni (x y) in lokalni (x' y') koordinatni sistem.



**Slika 4.2:** Šibka ravnina, zasukana za kot  $\theta$  glede na globalni koordinatni sistem (prirejeno po UDEC, 2006: str. 30).

S  $\sigma_{ij}$  označimo komponente napetosti, ki jih prevedemo glede na lokalni koordinatni sistem z naslednjimi izrazi:

$$\begin{aligned}\sigma'_{11} &= \sigma_{11} \cos^2 \theta + 2\sigma_{12} \sin \theta \cdot \cos \theta + \sigma_{22} \sin^2 \theta \\ \sigma'_{22} &= \sigma_{11} \sin^2 \theta - 2\sigma_{12} \sin \theta \cdot \cos \theta + \sigma_{22} \cos^2 \theta \\ \sigma'_{33} &= \sigma_{33} \\ \sigma'_{12} &= -(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \theta \cdot \cos \theta + \sigma_{12} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)\end{aligned}\quad (1)$$

kjer je  $\theta$  kot orientacije razpoke (merimo ga v proti urni smeri glede na globalno x os).

Zaradi konvencije recimo, da  $\tau$  predstavlja velikost tangencialne trenjske komponente šibke ravnine, pripadajoča deformacijska spremenljivka je  $\gamma$  in tako dobimo:

$$\begin{aligned}\tau &= |\sigma'_{12}| \\ \gamma &= |e'_{12}|\end{aligned}\quad (2)$$

Inkrementni elastični zakon ima v lokalnem koordinatnem sistemu naslednjo obliko:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma'_{11} &= \alpha_1 \Delta e'_{11} + \alpha_2 (\Delta e'_{22} + \Delta e'_{33}) \\ \Delta\sigma'_{22} &= \alpha_1 \Delta e'_{22} + \alpha_2 (\Delta e'_{11} + \Delta e'_{33}) \\ \Delta\sigma'_{33} &= \alpha_1 \Delta e'_{33} + \alpha_2 (\Delta e'_{11} + \Delta e'_{22}) \\ \Delta\tau &= 2G\Delta\gamma^e\end{aligned}\quad (3)$$

kjer so:  $\alpha_1 = K + 4G/3$

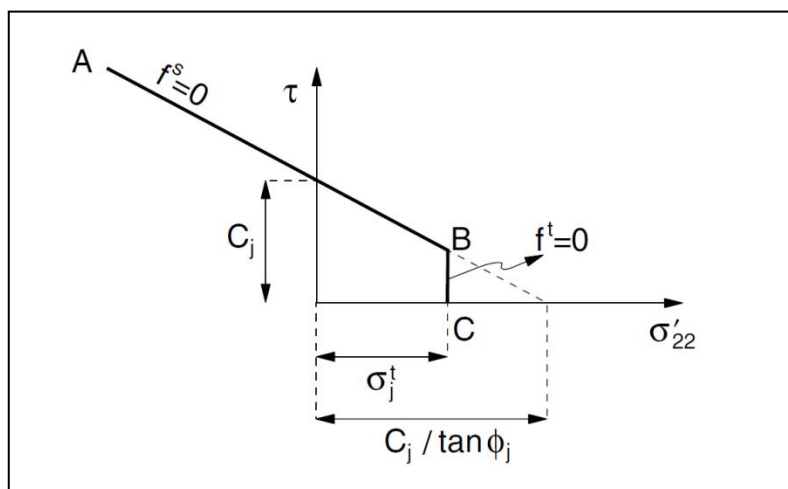
$\alpha_2 = K - 2G/3$

<sup>e</sup> ... elastični del

K ... kompresijski modul

G ... strižni modul

Porušni kriterij šibke ravnine predstavimo v ravnini  $(\sigma'_{22}, \tau)$ , kot ga prikazuje Slika 4.3:.



**Slika 4.3:** Porušni kriterij šibke ravnine (prirejeno po UDEC, 2006: str. 31).

Lokalna porušna ovojnica je definirana od točke A do točke B z Mohr – Coulombovim kriterijem  $f^S = 0$ :

$$f^S = -\tau - \sigma'_{22} \tan \phi_j + c_j \quad (4)$$

in od točke B do točke C z nateznim porušnim kriterijem  $f^t = 0$ :

$$f^t = \sigma'_j - \sigma'_{22} \quad (5)$$

kjer so  $\phi_j$ ,  $c_j$  in  $\sigma'_j$  strižni kot, kohezija in natezna trdnost šibke ravnine. Za šibko ravnino, ko je strižni kot različen od nič, je maksimalna vrednost natezne trdnosti podana s:

$$\sigma'_{j,\max} = \frac{c_j}{\tan \phi_j} \quad (6)$$

Strižna funkcija plastičnega potenciala  $g^S$  ustreza neasociativnemu plastičnemu kriteriju s kotom razmika  $\psi_j$ , natezna funkcija plastičnega potenciala  $g^t$  pa asociativnemu plastičnemu kriteriju. Njihova oblika je sledeča:

$$g^S = -\tau - \sigma'_{22} \tan \psi_j \quad (7)$$

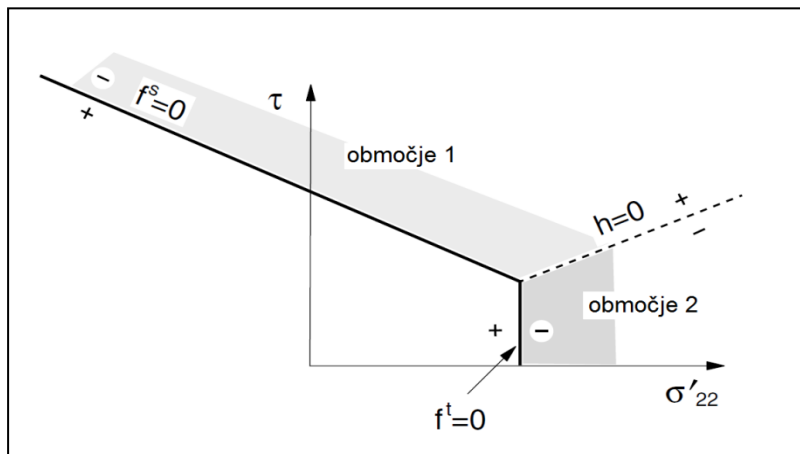
$$g^t = -\sigma'_{22} \quad (8)$$

Funkcija  $h(\sigma'_{22}, \tau) = 0$  predstavlja diagonalo med  $f^S = 0$  in  $f^t = 0$  v ravnini  $(\sigma'_{22}, \tau)$ , kot je prikazana na sliki (Slika 4.4:). To funkcijo lahko zapišemo kot:

$$h = \tau - \tau_j^P - \alpha_j^P (\sigma'_{22} - \sigma'_j) \quad (9)$$

kjer sta  $\tau_j^P$  in  $\alpha_j^P$  konstanti in ju definiramo kot:

$$\begin{aligned} \tau_j^P &= c_j - \tan \phi_j \sigma'_j \\ \alpha_j^P &= \sqrt{1 + \tan^2 \phi_j} - \tan \phi_j \end{aligned} \quad (10)$$



**Slika 4.4:** UB model: uporaba območij pri definiciji plastičnosti šibke ravnine (prirejeno po UDEC, 2006: str. 33).

Lokalno napetostno stanje, ki krši porušne kriterije, je predstavljeno s točko v ravnini ( $\sigma'_{22}, \tau$ ), ki se nahaja ali v območju 1 ali 2, odvisno od pozitivnega ali negativnega območja pri  $h = 0$ . Če se točka nahaja v območju 1, se v ravnini pojavi strižna porušitev, in napetostno točko prenesemo nazaj na krivuljo  $f^S = 0$  s pomočjo pravila, ki izhaja iz strižne funkcije plastičnega potenciala  $g^S$ . Če pa se točka pojavi v območju 2, pride do natezne porušitve. Napetostno točko prenesemo nazaj na  $f^t = 0$  s pomočjo pravila, ki izhaja iz natezne funkcije plastičnega potenciala  $g^t$ .

Najprej si pogledjmo primer kršenja strižnega porušitvenega kriterija. Oblika pomika za povrnitev napetostne točke na krivuljo  $f^S = 0$  ima naslednjo obliko:

$$\begin{aligned}\Delta e'_{11}{}^p &= \lambda^S \frac{\partial g^S}{\partial \sigma'_{11}} \\ \Delta e'_{22}{}^p &= \lambda^S \frac{\partial g^S}{\partial \sigma'_{22}} \\ \Delta e'_{33}{}^p &= \lambda^S \frac{\partial g^S}{\partial \sigma'_{33}} \\ \Delta \gamma^p &= \lambda^S \frac{\partial g^S}{\partial \tau}\end{aligned}\tag{11}$$

kjer se  $^p$  nanaša na plastični del pomikov pri porušitvi v šibki ravnini, amplituda  $\lambda^S$  pa je še neznan. S pomočjo uporabe enačb (7) za  $g^S$ , lahko te enačbe (11) po parcialnem odvajanju zapišemo kot:

$$\begin{aligned}\Delta e'_{11}{}^p &= 0 \\ \Delta e'_{22}{}^p &= -\lambda^S \tan \psi_j \\ \Delta e'_{33}{}^p &= 0 \\ \Delta \gamma^p &= -\lambda^S\end{aligned}\tag{12}$$

Novo napetostno stanje je dobljeno kot razlika med »začetnimi« totalnimi in lokalnimi popravki napetosti (enačba (13)) izraženih z inkrementnimi deformacijami za korak (enačba (14)).

$$\sigma_i^N = \sigma_i' - \Delta \sigma_{ii}' \quad i = 1, 2, 3\tag{13}$$

$$\begin{aligned}\Delta \sigma'_{11} &= \alpha_1 \Delta e'_{11}{}^p + \alpha_2 (\Delta e'_{22}{}^p + \Delta e'_{33}{}^p) \\ \Delta \sigma'_{22} &= \alpha_1 \Delta e'_{22}{}^p + \alpha_2 (\Delta e'_{11}{}^p + \Delta e'_{33}{}^p) \\ \Delta \sigma'_{33} &= \alpha_1 \Delta e'_{33}{}^p + \alpha_2 (\Delta e'_{11}{}^p + \Delta e'_{22}{}^p) \\ \Delta \tau &= 2G \Delta \gamma^p\end{aligned}\tag{14}$$

Z vstavitvijo izrazov enačb (12) v enačbe (14) in nato v enačbo (13), lahko novo napetostno stanje izrazimo kot:

$$\begin{aligned}
 \sigma'_{11}{}^N &= \sigma'_{11} + \alpha_2 \tan \psi_j \lambda^S \\
 \sigma'_{22}{}^N &= \sigma'_{22} + \alpha_1 \tan \psi_j \lambda^S \\
 \sigma'_{33}{}^N &= \sigma'_{33} + \alpha_2 \tan \psi_j \lambda^S \\
 \tau^N &= \tau + 2G\lambda^S
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Parameter  $\lambda^S$  pa je definiran tako, da je izpolnjen pogoj, da se nova točka napetosti nahaja na ploskvi plastičnega tečenja ( $f^S = 0$ ).

$$f^S = 0 \quad \Rightarrow \quad -\tau^N - \sigma'_{22}{}^N \tan \theta_j + c_j = 0 \tag{16}$$

Z vstavitvijo izrazov enačb (15) v enačbo (16) in po nekaj korakih lahko izpeljemo enačbo za parameter  $\lambda^S$ .

$$\lambda^S = \frac{f^S(\sigma'_{22}, \tau)}{2G + \alpha_1 \tan \phi_j \tan \psi_j} \tag{17}$$

kjer smo uporabili izraz enačbe (4) za  $f^S$ .

Novo strižno napetost šibke ravnine lahko pridobimo iz zveze  $\tau^N$  in  $\tau$ , kot sledi v izrazu:

$$\frac{\sigma'_{12}{}^N}{\sigma'_{12}} = \frac{\tau^N}{\tau} \quad \Rightarrow \quad \sigma'_{12}{}^N = \sigma'_{12} \frac{\tau^N}{\tau} \tag{18}$$

Popravke lokalnih napetosti dobimo z vstavitvijo izrazov enačb (12) v enačbe (14) in imajo naslednjo obliko:

$$\begin{aligned}
 \Delta \sigma'_{11} &= \alpha_2 \tan \psi_j \lambda^S \\
 \Delta \sigma'_{22} &= \alpha_1 \tan \psi_j \lambda^S \\
 \Delta \sigma'_{33} &= \alpha_2 \tan \psi_j \lambda^S \\
 \Delta \sigma'_{12} &= \sigma'_{12} \frac{\tau^N - \tau}{\tau}
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

kjer je  $\lambda^S$  podan z enačbo (17).

Popravke globalnih napetosti zaradi strižne porušitve na šibki ravnini lahko izrazimo kot:

$$\begin{aligned}
 \Delta \sigma_{11} &= -2\Delta \sigma'_{12} (\cos \theta \sin \theta) + \Delta \sigma'_{11} \cos^2 \theta + \Delta \sigma'_{22} \sin^2 \theta \\
 \Delta \sigma_{22} &= 2\Delta \sigma'_{12} (\cos \theta \sin \theta) + \Delta \sigma'_{11} \sin^2 \theta + \Delta \sigma'_{22} \cos^2 \theta \\
 \Delta \sigma_{33} &= \Delta \sigma'_{33} \\
 \Delta \sigma_{12} &= \Delta \sigma'_{12} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + (\Delta \sigma'_{11} - \Delta \sigma'_{22}) \cos \theta \sin \theta
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Te popravke prištejemo k napetostnim komponentam  $\sigma_{ij}$ , ki vsebujejo napetostne popravke za splošno porušitev (če je prišlo do popravkov), da dobimo novo napetostno stanje za korak.



Sedaj pa si pogledimo primer kršenja nateznega porušitvenega kriterija. Oblika pomika za povrnitev napetostne točke na krivuljo  $f^t = 0$  ima naslednjo obliko:

$$\begin{aligned}\Delta e'_{11}{}^p &= \lambda^t \frac{\partial g^t}{\partial \sigma'_{11}} \\ \Delta e'_{22}{}^p &= \lambda^t \frac{\partial g^t}{\partial \sigma'_{22}} \\ \Delta e'_{33}{}^p &= \lambda^t \frac{\partial g^t}{\partial \sigma'_{33}} \\ \Delta \gamma^p &= \lambda^t \frac{\partial g^t}{\partial \tau}\end{aligned}\tag{21}$$

kjer je velikost amplitude  $\lambda^t$  še nepoznana. S pomočjo uporabe enačb (8) za  $g^t$ , lahko te enačbe (21) po parcialnem odvajanju zapišemo kot:

$$\begin{aligned}\Delta e'_{11}{}^p &= 0 \\ \Delta e'_{22}{}^p &= -\lambda^t \\ \Delta e'_{33}{}^p &= 0 \\ \Delta \gamma^p &= 0\end{aligned}\tag{22}$$

Z enakim razmišljanjem kot v prejšnjem primeru, lahko zapišemo:

$$\begin{aligned}\sigma'_{11}{}^N &= \sigma'_{11} + \lambda^t \alpha_2 \\ \sigma'_{22}{}^N &= \sigma'_{22} + \lambda^t \alpha_1 \\ \sigma'_{33}{}^N &= \sigma'_{33} + \lambda^t \alpha_2 \\ \tau^N &= \tau\end{aligned}\tag{23}$$

in

$$\lambda^t = \frac{f^t(\sigma'_{22})}{\alpha_1}\tag{24}$$

Popravki lokalnih napetosti zaradi natezne porušitve šibke ravnine dobimo z vstavitvijo izraza enačbe (24) za  $\lambda^t$  v enačbe (23) in po nekaj korakih jih lahko izrazimo kot:

$$\begin{aligned}\Delta \sigma'_{11} &= (\sigma^t - \sigma'_{22}) \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \\ \Delta \sigma'_{22} &= (\sigma^t - \sigma'_{22}) \\ \Delta \sigma'_{33} &= (\sigma^t - \sigma'_{22}) \frac{\alpha_2}{\alpha_1}\end{aligned}\tag{25}$$

kjer smo uporabili izraz enačbe (5) za  $f^t$ .

Ko prevedemo te enačbe v globalni koordinatni sistem, dobijo popravki napetosti naslednjo obliko:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{11} &= (\sigma^t - \sigma'_{22})\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\cos^2\theta + \sin^2\theta\right) \\ \Delta\sigma_{22} &= (\sigma^t - \sigma'_{22})\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\sin^2\theta + \cos^2\theta\right) \\ \Delta\sigma_{33} &= (\sigma^t - \sigma'_{22})\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \\ \Delta\sigma_{12} &= -(\sigma^t - \sigma'_{22})\left(1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)\sin\theta\cos\theta\end{aligned}\tag{26}$$

Orientacija kota  $\theta$  šibke ravnine je pri računanju popravljena za primere rotacije togih teles in/ali rotacije zaradi deformacij. Popravek  $\Delta\theta$  ima naslednjo obliko:

$$\Delta\theta = e'_{12} + \omega\tag{27}$$

kjer sta

$$\begin{aligned}e'_{12} &= -(e_{11} - e_{22})\sin\theta\cos\theta + e_{12}(\cos^2\theta - \sin^2\theta) \\ \omega &= \frac{1}{2}(\dot{u}_{1,2} - \dot{u}_{2,1})\end{aligned}\tag{28}$$

in  $\Delta\theta$  je izražen v radianih.

#### 4.1.4.2 Postopek izvrševanja popravkov UB modela

Pri reševanju problema z uporabo UB modela se v UDEC-u najprej analizirajo elastični približki napetosti za generalno porušitev, če je potrebno se izvedejo še popravki. Popravki za generalno porušitev so predstavljeni v diplomskem delu Polona Gabrijel (2002) na strani 37. Rezultirajoče (»popravljen«) napetostne komponente, v tem poglavju označene s  $\sigma_{ij}$  v enačbi (1), so za UB model nadalje analizirane za porušitev v šibki ravnini.

Lokalne komponente napetosti  $\sigma'_{22}$  in  $\tau$  so izračunane z uporabo enačbe (1) in enačbe (2). Če te napetosti kršijo porušne kriterije (poglej enačbo (4) in (5)), se komponentam napetosti  $\sigma_{ij}$  dodajo popravki in tako pridobimo novo napetostno stanje koraka. V tej situaciji imamo  $h(\sigma'_{22}, \tau) > 0$  ali  $h(\sigma'_{22}, \tau) < 0$  (poglej enačbo (9) in (10)). V prvem primeru se v šibki ravnini pojavi strižna porušitev. Novo napetostno stanje je pridobljeno s prištetjem popravkov enačb (20) k  $\sigma_{ij}$ . V drugem primeru pa se v šibki ravnini pojavi natezna porušitev, novo napetostno stanje je pridobljeno s prištetjem popravkov enačb (26).

Orientacija šibke ravnine se med računanjem avtomatično popravlja za primere rotacije togih teles in/ali zaradi rotacije pri deformaciji (poglej enačbo (27) in (28)).

Privzeta vrednost za natezno trdnost šibke ravnine je nič. V primeru, da vnesena vrednost preseže vrednost  $\sigma^t_{j,max}$ , ki se izračuna po enačbi (6), se vrednost natezne trdnosti šibke ravnine ponastavi na vrednost  $\sigma^t_{j,max}$ . Če izračunana velikost napetosti  $\sigma'_{22}$  v neki coni preseže vrednost napetosti  $\sigma^t_{j,max}$ , potem se natezna trdnost šibke ravnine te cone ponastavi na vrednost nič. S tem se simulira takojšna popustitev.

## 4.2 Materialni modeli diskontinuitet

V programu UDEC je vgrajenih pet materialnih modelov obnašanja stika:

- Coulombov točkovni stik
- Coulombov površinski stik
- Coulombov površinski stik z rezidualno trdnostjo
- stik kontinuiranega tečenja (continuously yielding)
- Barton–Bandisov stik

Pri vseh analizah v tej nalogi je bil uporabljen Coulombov model površinskega stika. Za določanje njegovih osnovnih karakteristik potrebujemo le šest parametrov in sicer:

jkn ... normalna togost stika

jks ... strižna togost stika

jtension ... natezna trdnost stika

jfriction ... strižni kot stika

jcohesion ... kohezija stika

jdilatation ... kot razmikanja stika

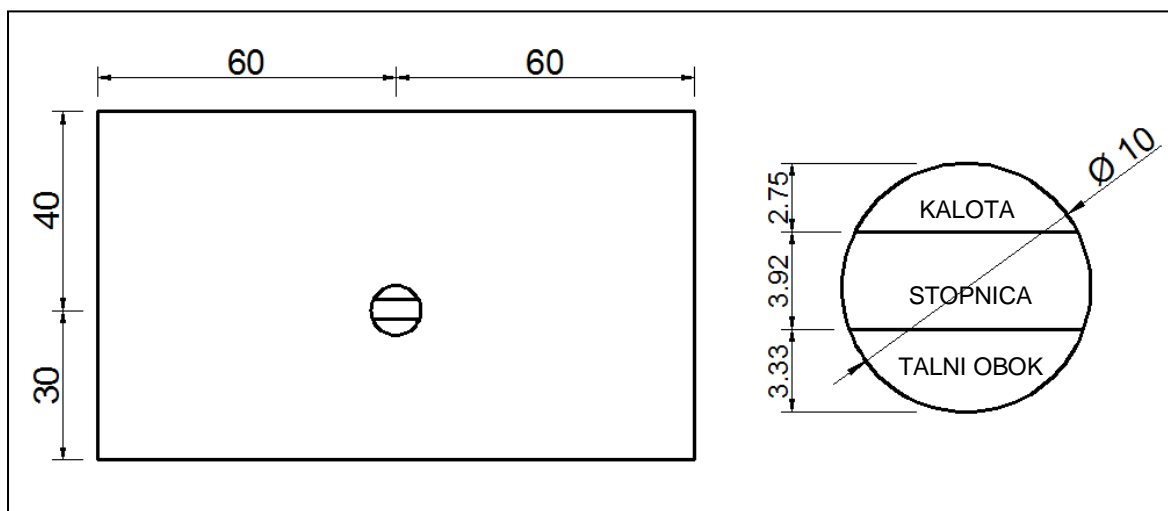
Bolj podroben opis numerične formulacije stikov je povzeto v diplomskem delu Gabrijel (2002) stran 19 ter v UDEC (2006).

## 5 PARAMETRIČNA ANALIZA

S parametrično analizo se ugotavlja in primerja izračunane pomike predora za posamezen materialni model kamnine v kombinaciji z različnimi geometrijami, te pa so določene z razsežnostjo in usmerjenostjo skrivalosti. Vsaka izmed geometrij je predstavljena v svojem modulu:

1. osnovni model brez skrivalosti,
2. skrivalost po celem območju modela,
3. skrivalost le v omejenem območju modela,
4. razčlenjena skrivalost le v omejenem območju modela,
5. razčlenjena skrivalost izven osi predora.

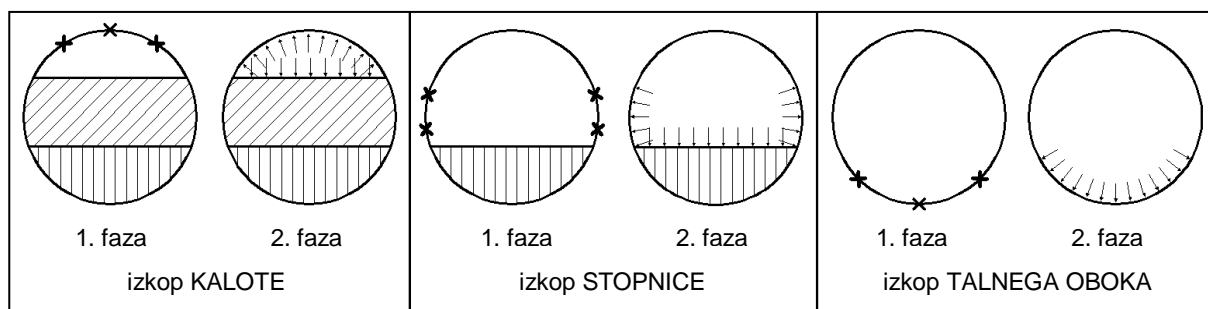
Skupna lastnost vseh modulov je enaka zunanja geometrija modela, velikost in položaj predora (Slika 5.1:). Poleg položaja in velikosti predora je enaka tudi geometrija izkopanih delov (kalote, stopnice in talnega oboka) ter metoda izkopa posameznih delov (Slika 5.2:).



**Slika 5.1:** Geometrija modela in predora (veličine so v m).

Izkop posameznega dela predora je razdeljen v dve fazi (Slika 5.2:):

- 1. faza: Izvede se odstranitev dela in namestitvev merskih točk.
- 2. faza: Na obod odstranjenega dela se namesti nadomestne sile, ki vzpostavijo začetno ravnotežno stanje. Med računanjem se nadomestne sile postopno zmanjšuje s 5 % vrednostjo začetne vrednosti nadomestnih sil.



**Slika 5.2:** Metoda izkopa posameznih delov predora.

Pri parametrični analizi so se spreminjali geometrijski parametri. Medtem pa so karakteristike posameznega materialnega modela, kot karakteristike diskontinuitet, ostale enake skozi vse module. S takim pristopom se lahko ugotavlja, kakšen vpliv ima sprememba območja skrilavosti in materialnega modela na same rezultate oziroma ali je novo določeno območje skrilavosti primerno in primerljivo za nadaljnjo analizo.

Uporabljeni materialni modeli kamnine so: (1) linearno elastični (EL); (2) Mohr–Coulombov (MOHR); in (3) ubiquitous–joint (UB). V vseh primerih analiz pa je za diskontinuitete uporabljen Coulombov model površinskega stika. Karakteristične lastnosti posameznih modelov so podane v preglednicah (Preglednica 5.1: in Preglednica 5.2:).

**Preglednica 5.1:** Materialne karakteristike posameznih modelov kamnin.

Materialne karakteristike	Materialni modeli			
	EL	MOHR	UB	
			-elast	-plast
Kompresijski modul (K) [MPa]	300	300	300	300
Strižni modul (G) [MPa]	120	120	120	120
Kohezija (c) [kPa]	/	150	350	150
Strižni kot ( $\phi$ ) [°]	/	25	36	25
Natezna trdnost ( $\sigma^t$ ) [MPa]	/	0,53	0,53	0,53
Kot razmikanja ( $\psi$ ) [°]	/	0	0	0
Kohezija šibke ravnine (c2) [kPa]	/	/	50	50
Strižni kot šibke ravnine ( $\phi_2$ ) [°]	/	/	15	15
Natezna trdnost šibke ravnine ( $\sigma^t_2$ ) [MPa]	/	/	0,5	0,5
Kot razmikanja šibke ravnine ( $\psi_2$ ) [°]	/	/	0	0
Poissonov količnik	0,324			

**Preglednica 5.2:** Materialne karakteristike stika.

Materialne karakteristike	Smer stika	
	JE vzporedna s skrilavostjo	NI vzporedna s skrilavostjo
Normalna togost (jkn) [MPa/m]	300	300
Strižna togost (jks) [MPa/m]	120	120
Kohezija (jcohesion) [kPa]	50	150
Strižni kot (jfriction) [°]	15	25
Natezna trdnost (jtension) [MPa]	0,5	0,53
Kot razmikanja (jdilatation) [°]	0	0

Rezultati modulov so predstavljeni na slikah, ki prikazujejo velikost in obliko pomika oboda predora za vse merske točke hkrati. Ker na isti sliki lahko primerjamo rezultate različnih materialnih modelov istega ali različnih modulov, se je za njihovo označevanje uvedlo normirano poimenovanje krivulj pomikov. V preglednici (Preglednica 5.3:) je predstavljeno normirano poimenovanje za prvi, drugi in tretji modul, v preglednici (Preglednica 5.4:) pa normirano poimenovanje za četrti in peti modul.

Vsak modul vsebuje preglednico z izpisanimi vrednostimi porabljenega časa računanja za posamezno analizo. Računanje analiz je potekalo na računalniku s procesorjem Intel(R) Core(TM) i7 CPU 920 @ 2.67 GHz 3.20 GHz in s 3.00 GB pomnilnika.

**Preglednica 5.3:** Normirano poimenovanje za prvi, drugi in tretji modul.

Obseg skrilavosti po modelu	Ime materialnega modela	Kot orientacije skrilavosti
/	EL	/
omejen	MOHR	0
cel	UB-elast	30
	UB-plast	60
		90

Primer rezultatov pomikov z imenom:

- "cel MOHR 60": Iz prvega dela imena (cel) se lahko razbere, da so to rezultati pomikov drugega modula (Skrilavost po celem območju modela). Iz drugega dela imena (MOHR) se razbere, da je uporabljen MOHR model kamnine. Iz tretjega dela imena (60) pa se razbere, da kot orientacije skrilavosti znaša 60°.
- "EL": Iz prvega dela imena (/) se lahko razbere, da so to rezultati pomikov prvega modula (Osnovni model brez skrilavosti). Iz drugega dela imena (EL) se razbere, da je uporabljen EL model kamnine. Iz tretjega dela imena (/) pa se razbere, da ni skrilavosti.

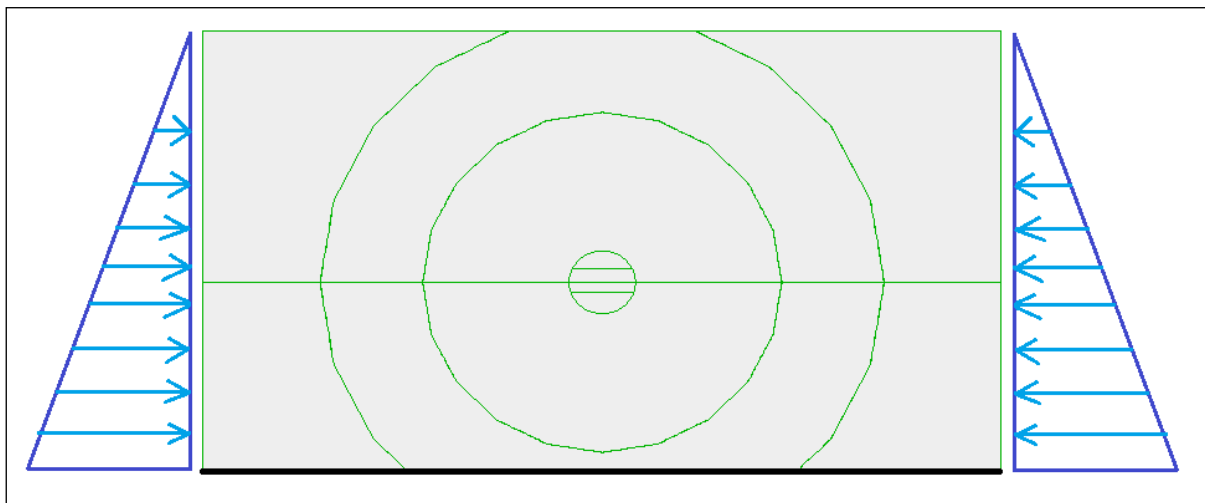
**Preglednica 5.4:** Normirano poimenovanje za četrti in peti modul.

Obseg skrilavosti po modelu	Ime materialnega modela	Naklon razčlenjenosti	Kot orientacije skrilavosti		Odmik iz osi predora	
			$\alpha_2$	$\alpha_1$		
omejen-	EL	a_F	90	90	90	/
				60	60	
pol-	UB		60	30	30	odmik __ m
			30	0	0	
		0	-30	-30		
			-60	-60		

Podobno kot v prejšnjem primeru, lahko za primer rezultatov pomikov z imenom:

- "omejen-EL a\_F 60, 30 - 60": Iz prvega dela imena (omejen-) se lahko razbere, da so to rezultati pomikov četrtega modula (Razčlenjena skrilavost le v omejen območju modela). Iz drugega dela imena (EL), da je uporabljen EL model kamnine, iz tretjega dela imena (a\_F 60) pa, da je kot nagiba razčlenjenosti 60°, iz četrtega dela imena (30 - 60), da je kot orientacije skrilavosti za  $\alpha_2$  enak 30°, za  $\alpha_1$  pa 60°, iz petega dela imena (/) pa, da ni odmika razčlenjenosti od osi predora oz. da le-ta znaša 0 m.
- "pol-UB a\_F 0, 90 - -30 odmik -4,5m": Iz prvega dela imena (pol-) se lahko razbere, da so to rezultati pomikov petega modula, iz drugega dela imena (UB), da je uporabljen UB model kamnine, iz tretjega dela imena (a\_F 0), da je kot nagiba razčlenjenosti 0°, iz četrtega dela imena (90 - -30), da je kot orientacije skrilavosti za  $\alpha_2$  enak 90°, za  $\alpha_1$  pa -30°, iz petega dela imena (odmik -4,5m) pa, da odmik razčlenjenosti od osi predora znaša -4,5 m.

## 5.1 Osnovni model brez skrilavosti



**Slika 5.3:** Model prvega modula z robnimi pogoji.

Na zgornji sliki (Slika 5.3:) je predstavljena geometrija modela za prvi modul z uporabljenimi robnimi pogoji. Ob straneh modela so uporabljeni napetostni robni pogoji, na spodnjem robu pa robni pogoji hitrosti. Napetostni robni pogoj je podan z enačbo (29), hitrostni robni pogoj pa predvideva, da je hitrost roba v X in Y smeri enaka 0.

$$\sigma_h = K_0 \cdot \rho \cdot g \cdot z \quad (29)$$

Kjer je:  $K_0$  ... koeficient mirnih zemeljskih pritiskov (0,5)  
 $\rho$  ... gostota kamnine ( $2650 \text{ kg/m}^3$ )  
 $g$  ... gravitacijski pospešek ( $10 \text{ m/s}^2$ )  
 $z$  ... globina, merjena od vrha modela (v m)

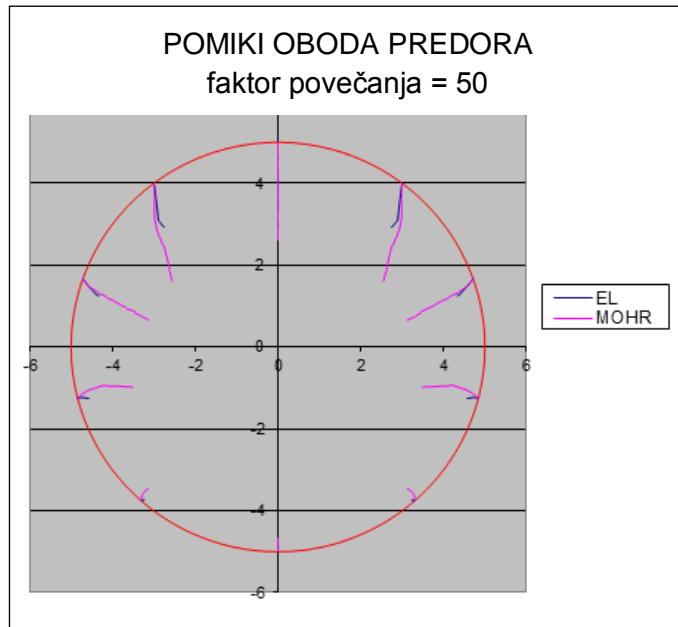
Čeprav prvi modul predstavlja model brez diskontinuitet, je vodoravna diskontinuiteta skozi model nujno potrebna, ker v nasprotnem primeru program UDEC problema ne bi mogel analizirati. Ostali krožni diskontinuiteti nista nujno potrebni, a omogočata boljše konstruiranje mreže con. Celoten model je bil razdeljen na približno 90.000 con. Čas računanja za posamezen model je podan v Preglednica 5.5:.

V tem modulu je uporabljen EL, MOHR in UB materialni model kamnine. Primerjava rezultatov EL in MOHR modela so predstavljeni na sliki (Slika 5.4:). Rezultati UB materialnega modela pa so predstavljeni v drugem modulu, kjer sta tudi EL in MOHR model modelirana z anizotropijo skrilavosti.

Največji medsebojni relativni zdrs dveh diskontinuitet za EL model znašal 0,213 mm in 0,8 mm za MOHR model. Na podlagi tako majhnega medsebojnega zdrsa diskontinuitet se lahko povzame, da je njihov vpliv zanemarljiv.

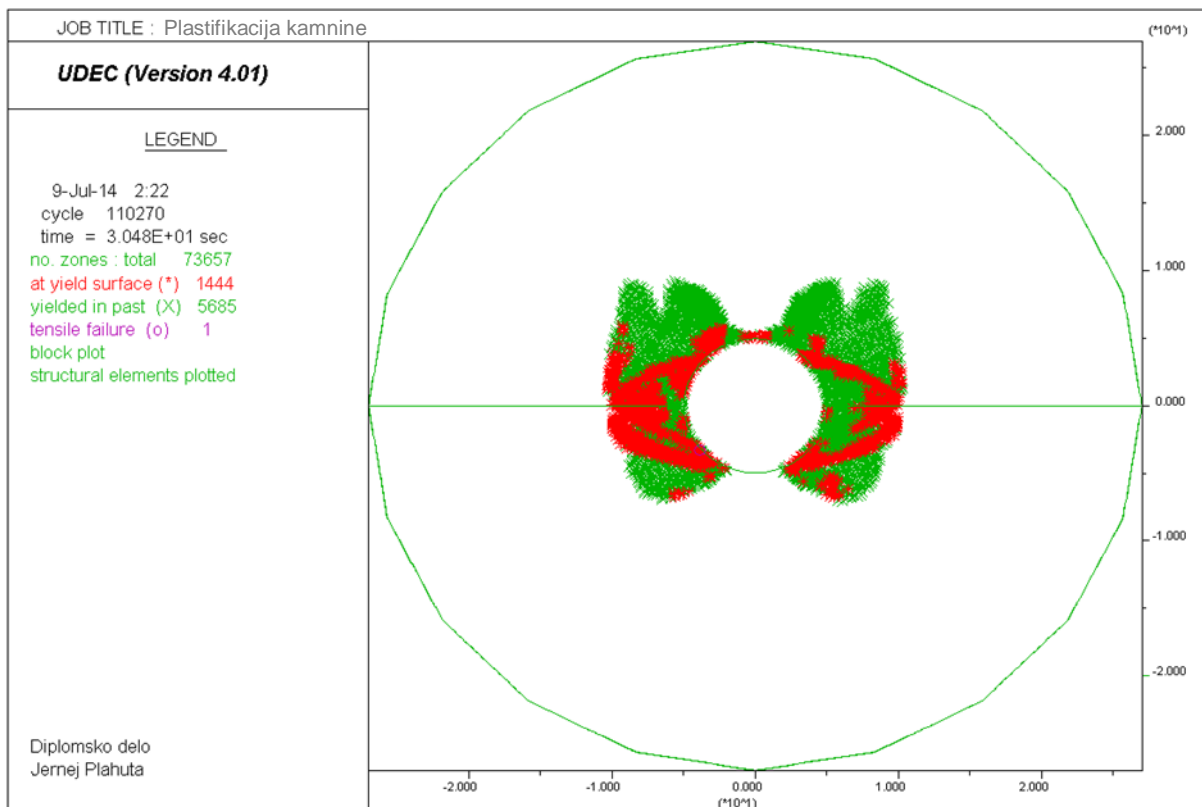
**Preglednica 5.5:** Čas računanja posameznega modela prvega modula.

Materialni model	EL	MOHR
Čas računanja [ur]	1	1



**Slika 5.4:** Primerjava pomikov oboda predora za EL in MOHR materialni model.

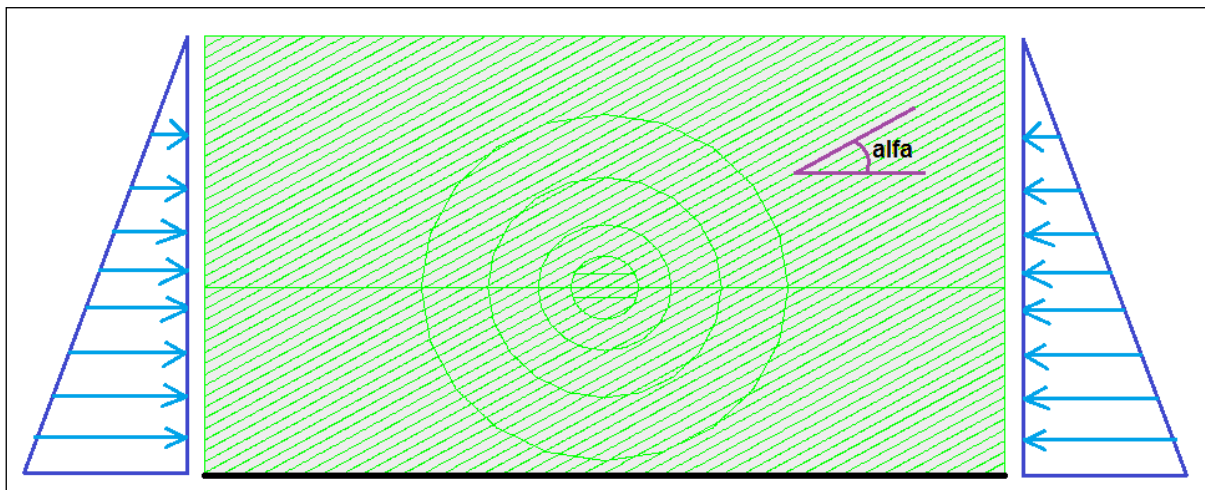
Iz rezultatov na sliki (Slika 5.4:) se lahko opazi, da se z MOHR modelom dobi veliko večje pomike, kar je posledica plastifikacije okoliške kamnine (Slika 5.5:).



**Slika 5.5:** Plastifikacija kamnine za MOHR materialni model kamnine.



## 5.2 Skrilavost po celem območju modela



**Slika 5.6:** Model drugega modula z robnimi pogoji.

Na zgornji sliki (Slika 5.6:) je predstavljena geometrija modelov za drugi modul. Uporabljeni robni pogoji so enaki kot za prvi modul.

V tem modulu so uporabljeni EL in MOHR materialni modeli kamnine. V primeru EL in MOHR modela je anizotropija (skrilavost) predstavljena z vzporednimi diskontinuitetami, z medsebojnim razmikom 1,5 m in pod kotom alfa ( $\alpha$ ).

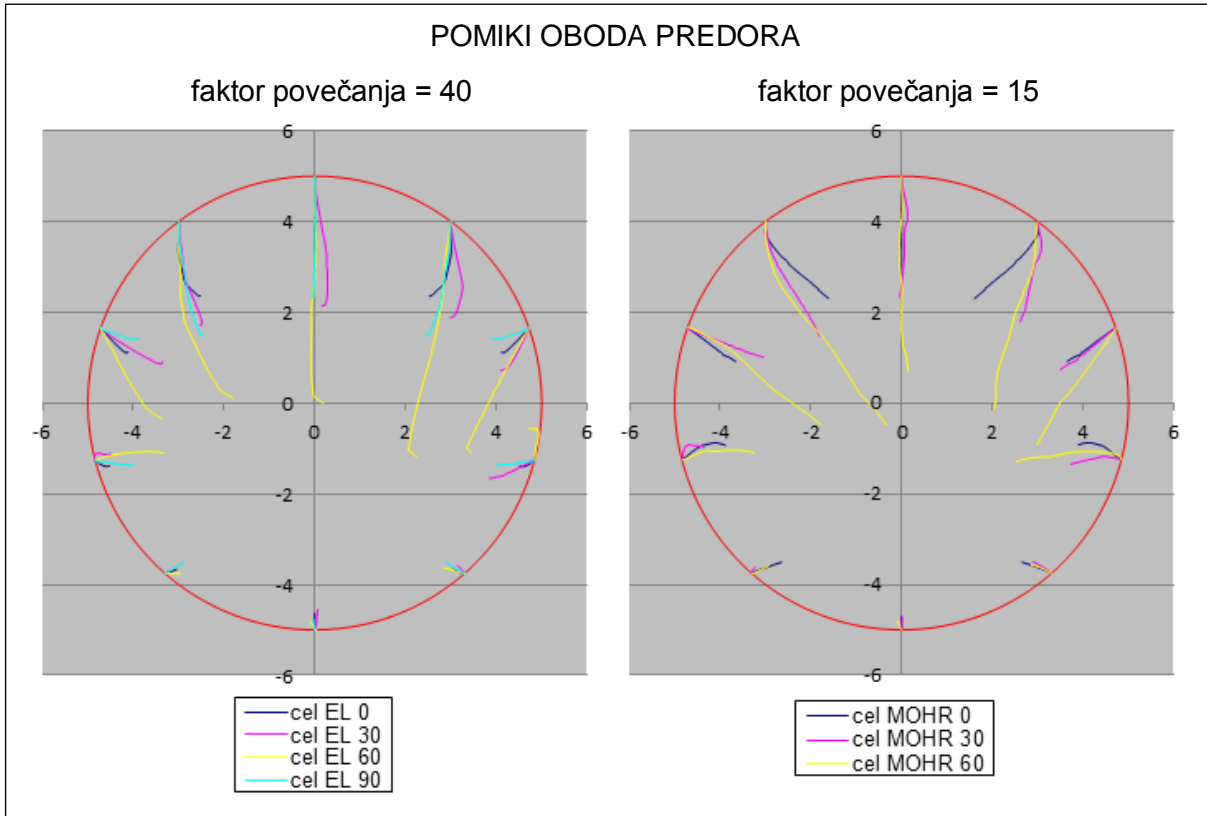
Prikazani pomiki UB modela so rezultat analize UB modela iz prvega modula, ki pa so zaradi znotraj samega UB modela modeliranja skrilavosti predstavljena v tem modulu.

Zaradi zmanjšanja velikosti posameznih blokov za EL in MOHR modela je število con, ki diskretizirajo telo, naraslo in tako je celoten model vseboval približno 200.000 con, kar je posledično povečalo čas računanja posamezne analize. Pri UB modelu pa je število con znašalo približno 90.000. Čas računanja za posamezen model je podan v Preglednica 5.6:.

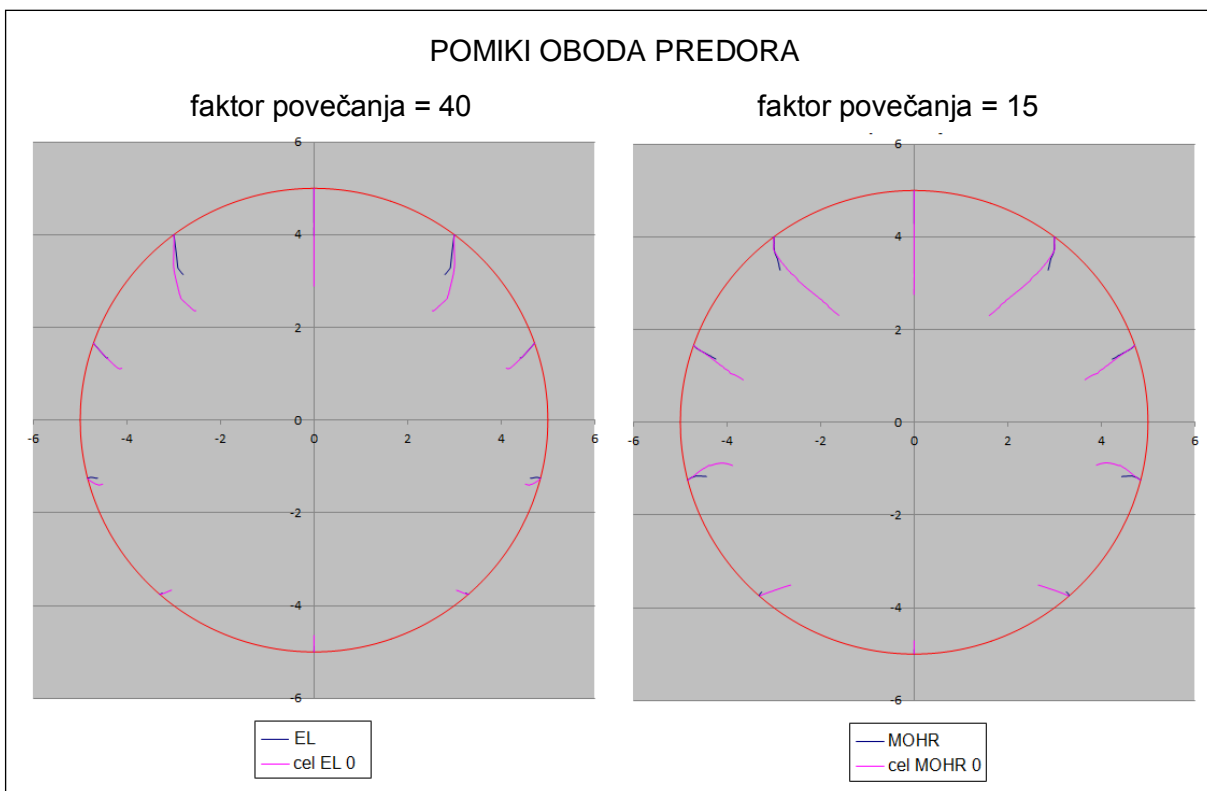
**Preglednica 5.6:** Čas računanja (ur) posameznega modela drugega modula.

Nagib diskontinuitet ( $\alpha$ )	EL	MOHR	UB-elast	UB-plast
0°	3	6	2	1,25
30°	6	13	2,25	8,75
60°	40	70	10,25	11,75
90°	4	6	2	4

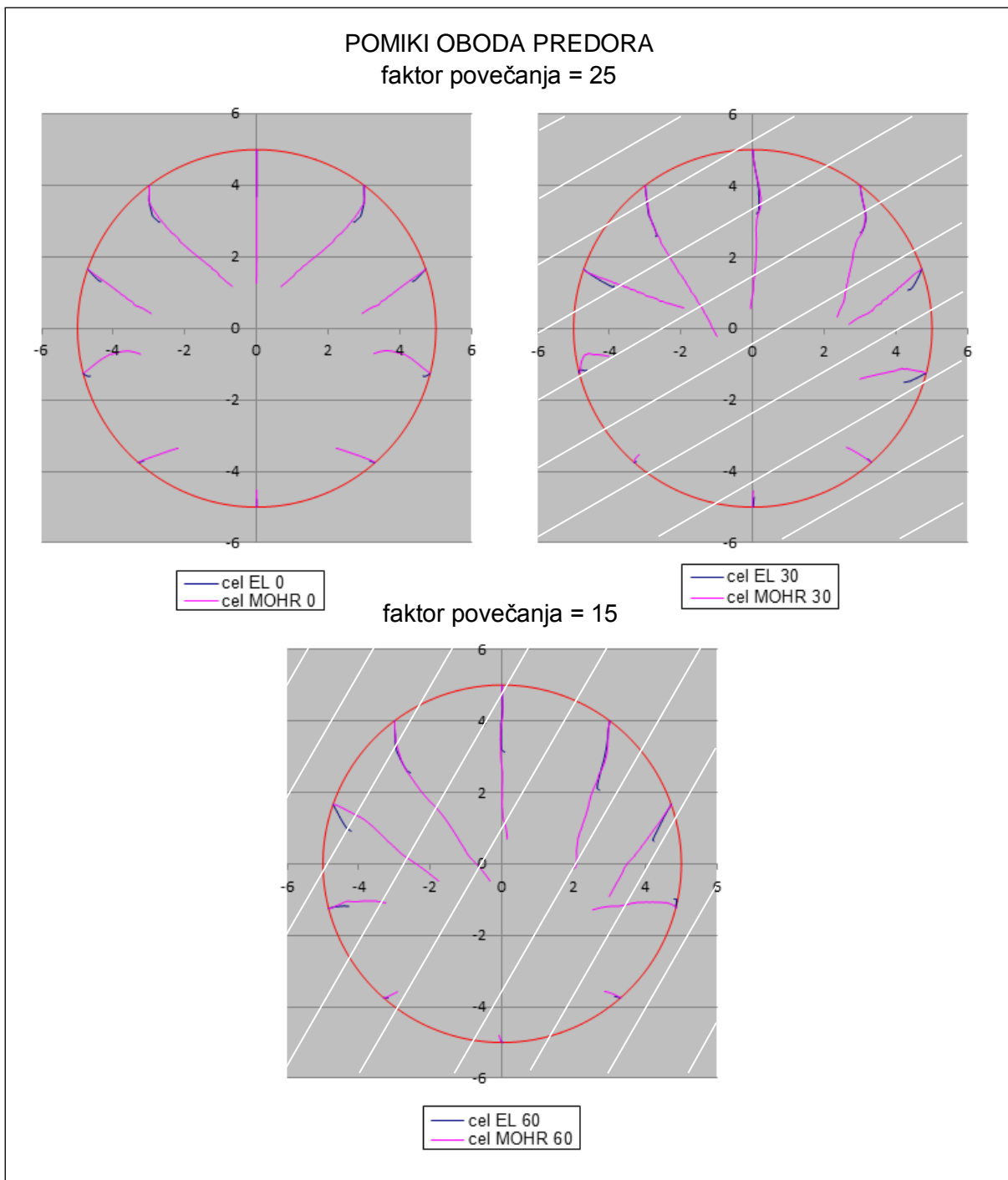
V nadaljevanju sledijo slike rezultatov posameznih modelov ter njihova medsebojna primerjava. V primerjavo niso vključeni rezultati analiz "cel MOHR 90" in "cel UB-plast 90", saj so se pojavili preveliki pomiki oboda, ki se jih lahko smatra kot primer porušitve predora (Slika 5.12: in Slika 5.13:). Rezultati analiz "cel UB-elast 60" in "cel UB-plast 60" so vključeni v primerjavo, vendar so le-ti rezultati izračunani za model z drugačnimi robnimi pogoji od ostalih modelov. Robne pogoje je bilo potrebno ponastaviti, saj za prvotne robne pogoje, model ni konvergirala k ravnotežju. Ponastavljeni robni pogoji so predstavljeni na Slika 5.14:.



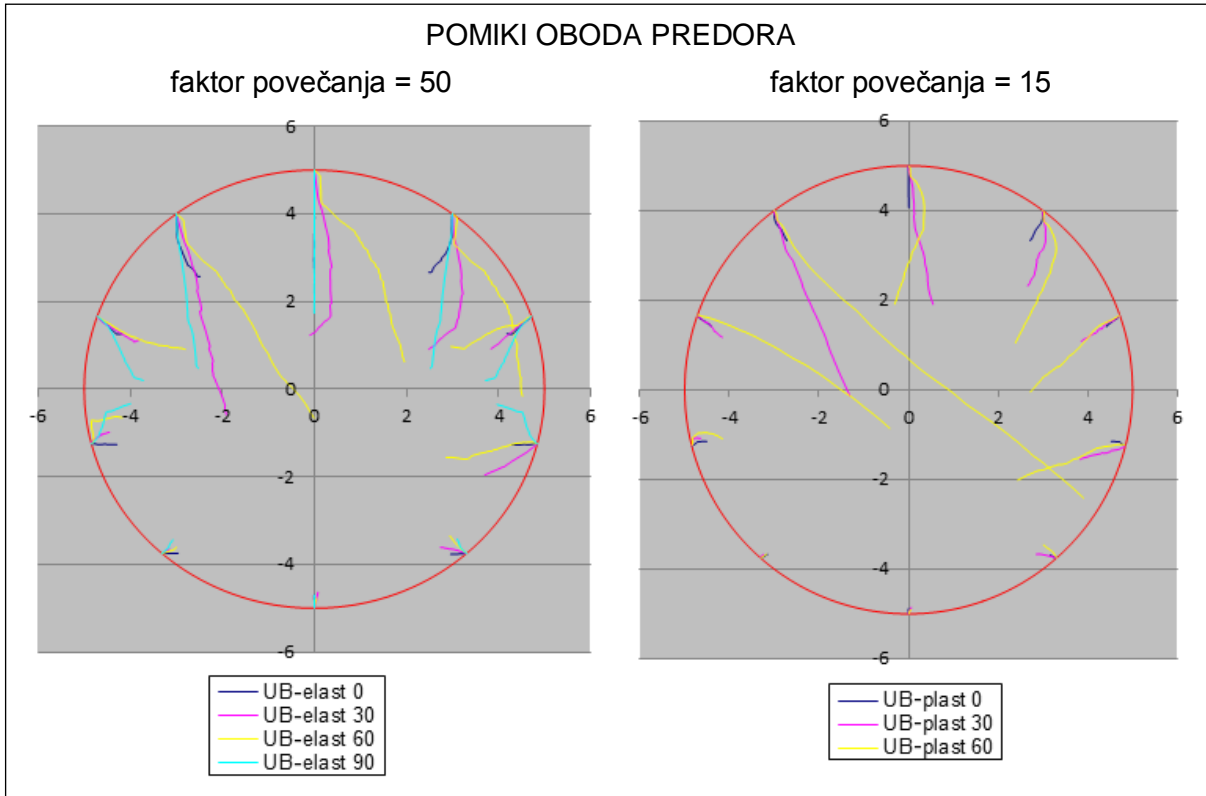
**Slika 5.7:** Pomiki oboda predora EL (levo) in MOHR (desno) materialnega modela.



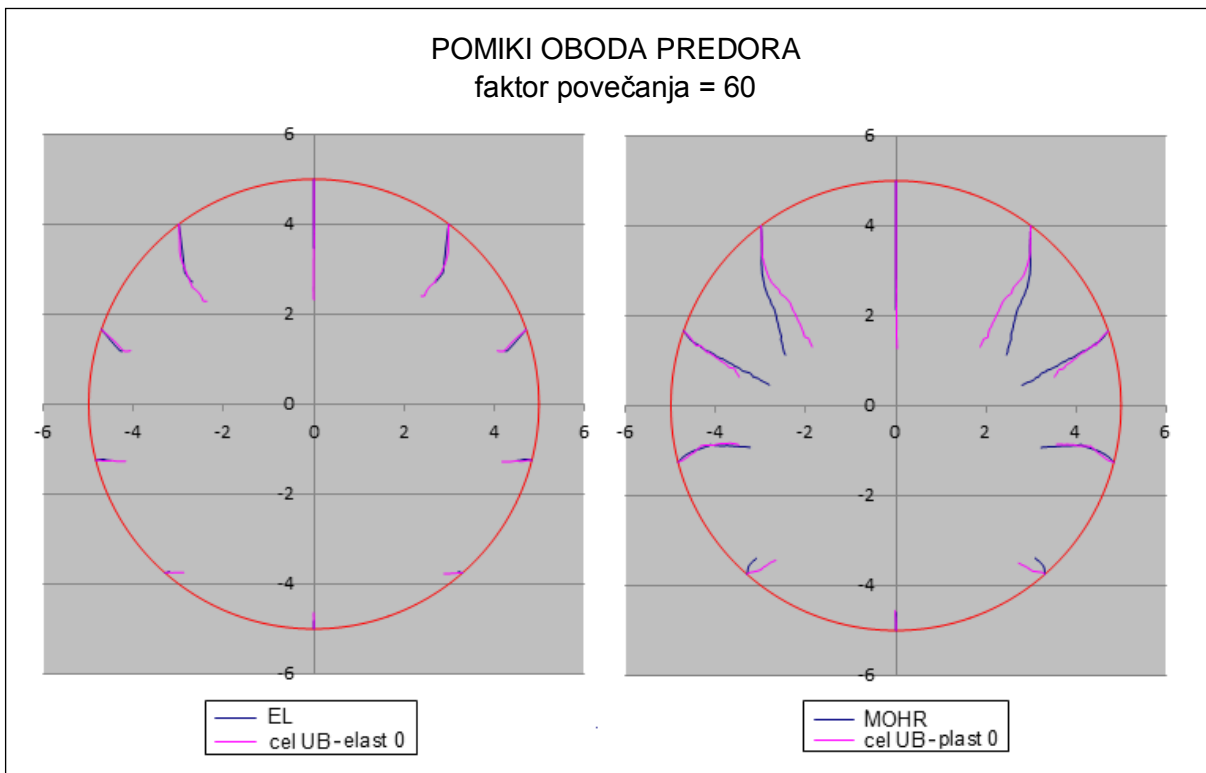
**Slika 5.8:** Primerjava prvega in drugega modula za EL in MOHR materialni model.



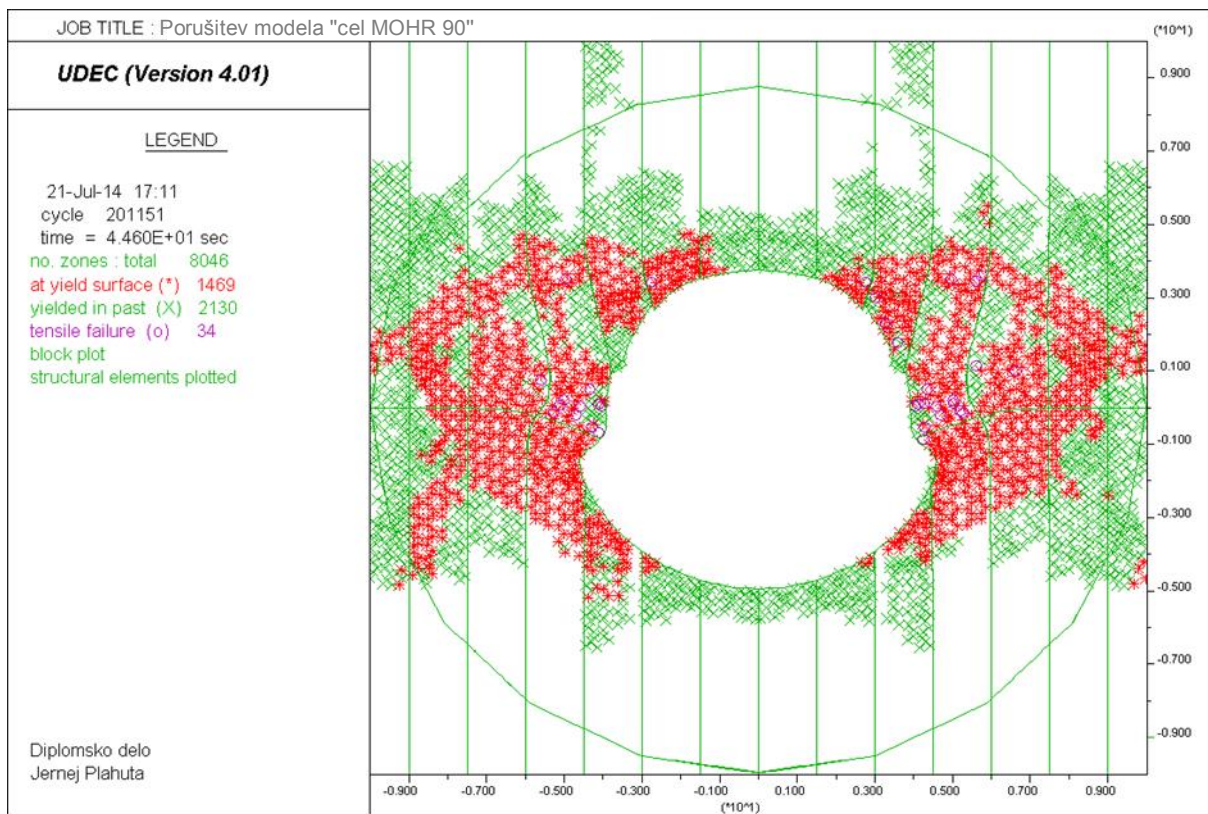
**Slika 5.9:** Primerjava pomikov oboda predora za EL in MOHR materialnega modela, pri nagibu skrilavosti  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  in  $60^\circ$ .



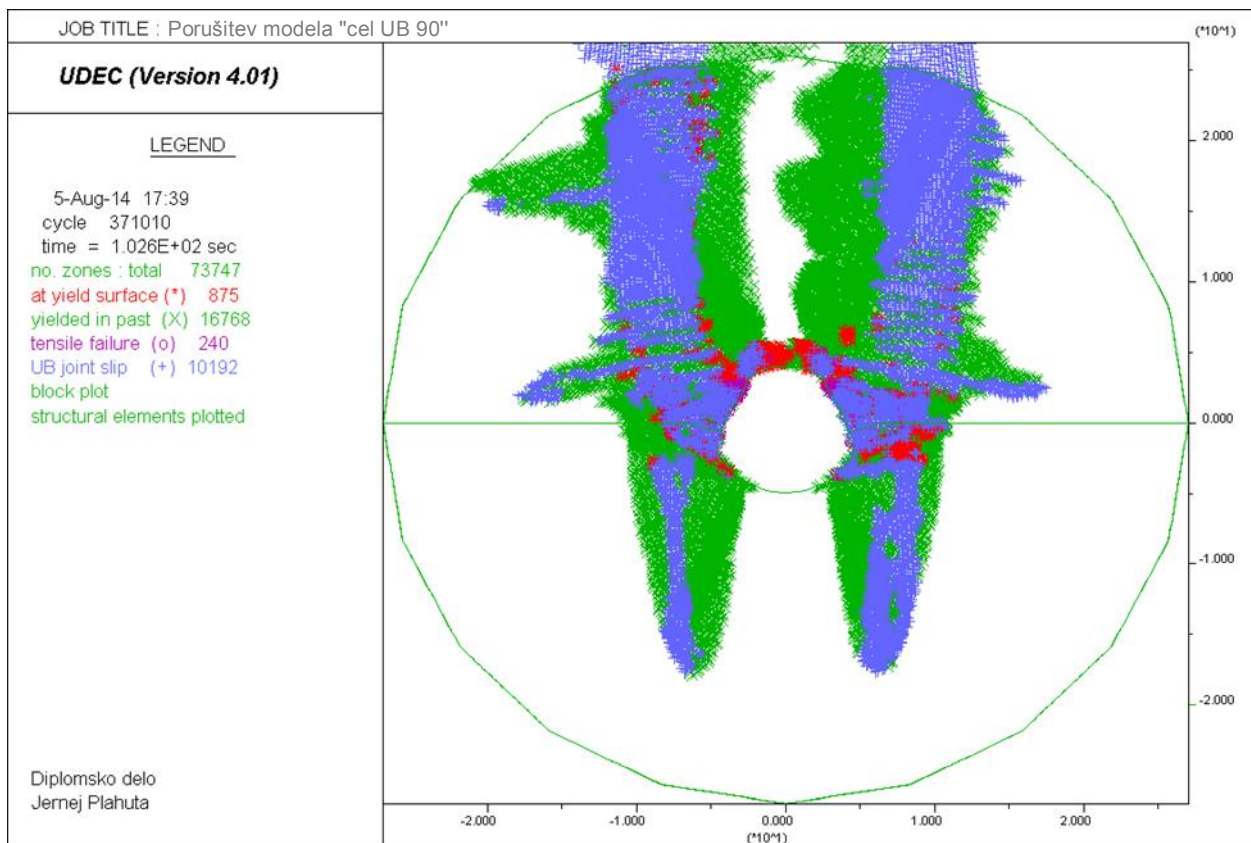
**Slika 5.10:** Pomiki oboda predora za UB materialni model.



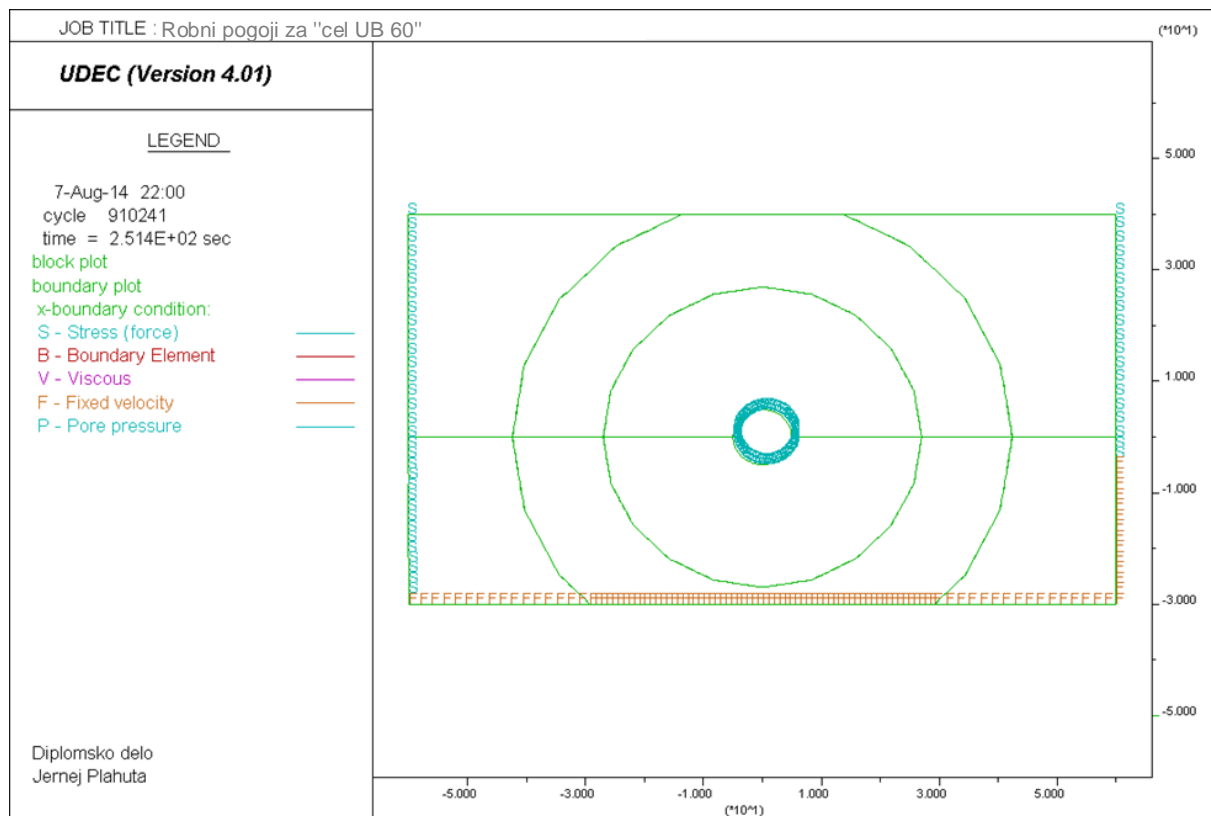
**Slika 5.11:** Primerjava rezultatov EL in MOHR modela iz prvega modula z rezultati UB modela za kot nagiba skrilavosti  $0^\circ$  iz drugega modula.



Slika 5.12: Rezultat analize "cel MOHR 90".



Slika 5.13: Rezultat analize "cel UB-plast 90".



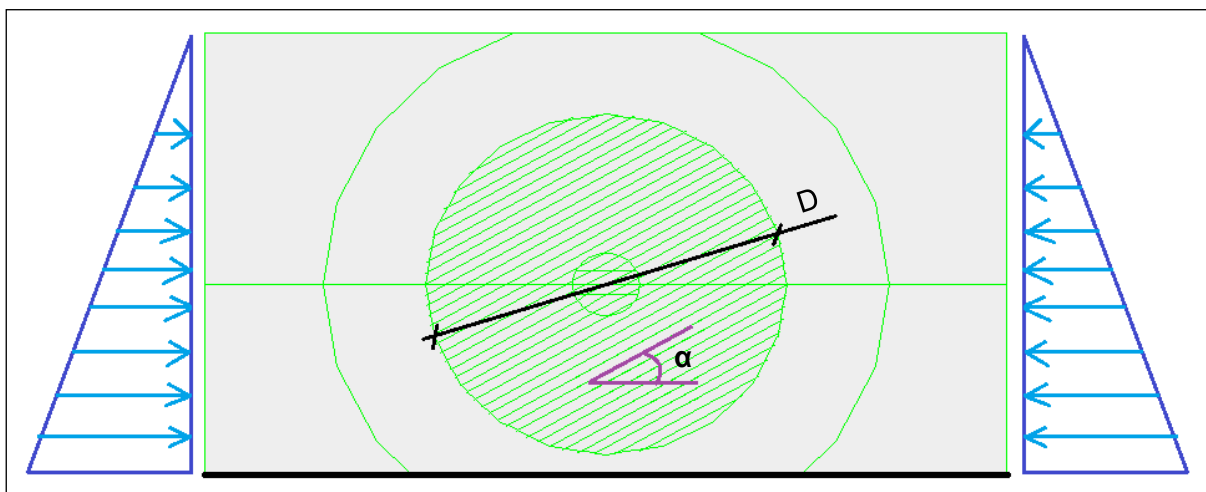
**Slika 5.14:** Ponastavljeni robni pogoji za "cel UB-elast 60" in "cel UB-plast 60".

Iz rezultatov na Slika 5.7: se lahko opazi, da naklon diskontinuitet vpliva na obliko in velikost pomikov. Iz Slika 5.9: je razvidna podobna oblika pomikov EL in MOHR modela, vendar se končna velikost pomika bistveno razlikuje. Razlog za razliko velikosti pomika je posledica plastifikacije MOHR kamnine v okolici predora.

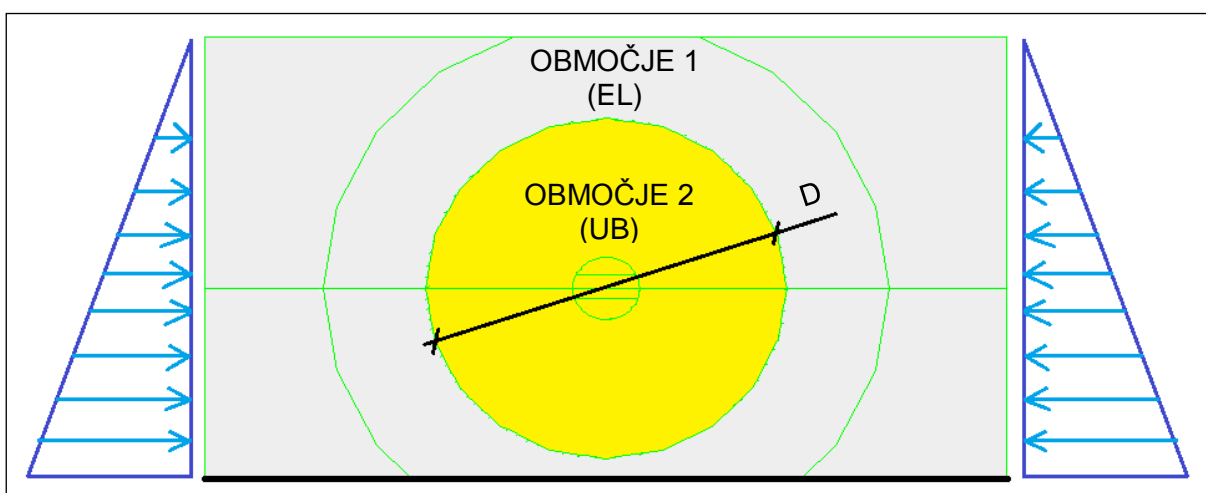
Iz rezultatov na Slika 5.10: se lahko opazi, da pomiki analiz "cel UB-elast 60" in "cel UB-plast 60" bistveno odstopata od ostalih analiz. Vzrok takih pomikov je plastifikacija velikega območja modela (Slika 5.32: (c)). Zaradi tako velike plastifikacije modela je bilo potrebno ponastaviti robne pogoje modela (Slika 5.14:), da se je omogočilo konvergirano računanje k ravnotežnemu stanju.

Pri primerjavi rezultatov na slikah (Slika 5.8: in Slika 5.11:), kjer se primerja model brez skrilavosti in model s skrilavostjo z nagibom  $0^\circ$ , se lahko ugotovi, da se z uporabo neposrednih diskontinuitet doseže večjo stopnjo anizotropije kot z uporabo UB modela, kjer je skrilavost posredno vključena v model.

### 5.3 Skrilavost le v omejenem območju modula



Slika 5.15: Geometrija tretjega modula z robnimi pogoji za EL in MOHR model.



Slika 5.16: Geometrija tretjega modula z robnimi pogoji za UB model.

Na zgornjih slikah (Slika 5.15: in Slika 5.16:) je predstavljena geometrija modelov za tretji modul. Uporabljeni robni pogoji so enaki kot za prvi modul.

V tem modulu so uporabljeni enaki materialni modeli kamnine kot v drugem modulu (EL, MOHR in UB). V primeru EL in MOHR je anizotropija (skrilavost) predstavljena z vzporednimi diskontinuitetami, z medsebojnim razmikom 1,5 m in pod kotom  $\alpha$ , a le v omejenem območju okoli predora, krožne oblike s premerom (D) 54 m, kot prikazuje Slika 5.15:.

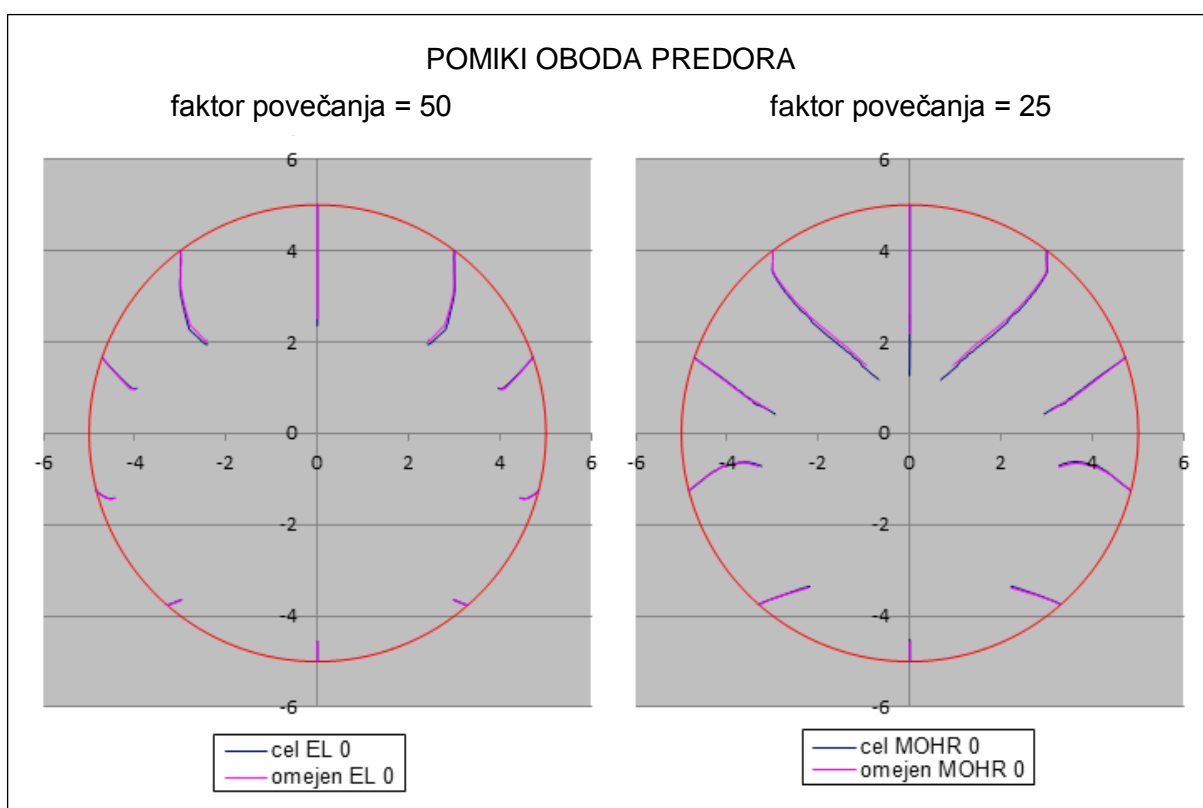
V primeru UB modela, ki ima skrilavost posredno vključeno v sam model, je le-ta določen materialu (conam) znotraj omejenega območja (OBMOČJE 2), materialu (conam) zunaj tega omejenega območja (v OBMOČJU 1) pa je določen EL materialni model. Omejeno območje okoli predora je krožne oblike s premerom (D) 54 m. Tako v tem modulu UB model predstavlja hibrid (združek) UB in EL materialnega modela kamnine, kot je prikazano na sliki Slika 5.16:.

Zaradi zmanjšanja obsega skrivalosti se je za EL in MOHR model zmanjšalo tudi število posameznih blokov in posledično tudi število con, ki diskretizirajo telo. Tako je celoten model vseboval približno 80.000 con, kar je 2,5 – krat manj kot v primeru drugega modula. Pri UB modelu pa je število con znašalo približno 90.000. Čas računanja za posamezen model je podan v Preglednica 5.7.:

**Preglednica 5.7:** Čas računanja (ur) posameznega modela tretjega modula.

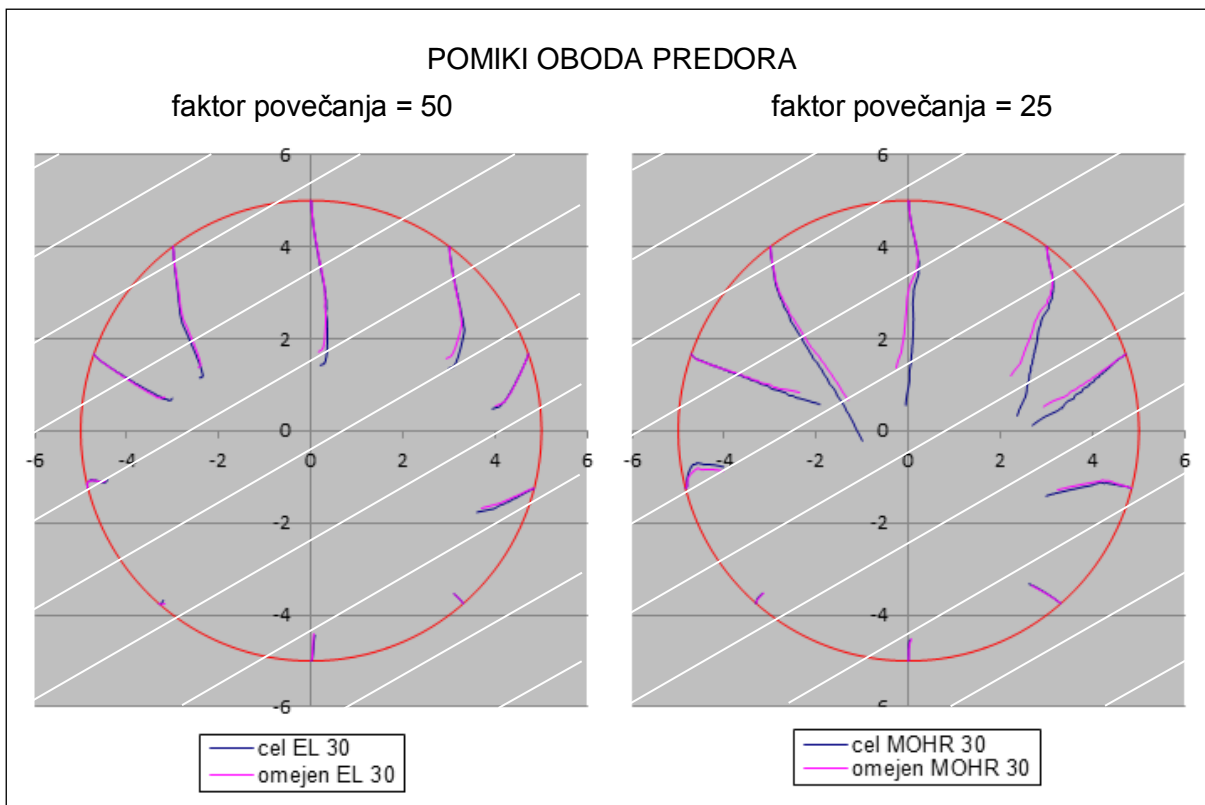
Nagib diskontinuitet ( $\alpha$ )	EL	MOHR	UB-elast	UB-plast
0°	0,5	1	1,5	2
30°	1	1,5	8,5	6,5
60°	2	1	7	6,75
90°	0,5	1,5	2	4,5

V nadaljevanju sledijo slike primerjav rezultatov posameznega modela iz tretjega modula z rezultati iz drugega modula. Pri rezultatih, ki prikazujejo primerjavo območja plastifikacije MOHR ali UB materialnega modela, so v primerjavo vključeni tudi rezultati modelov "cel MOHR 90" in "cel UB-plast 90". Rezultati teh modelov pa niso vključeni v primerjavo pomikov oboda predora, saj so se pojavili preveliki pomiki oboda, kar se lahko smatra kot primer porušitve predora (Slika 5.12.; Slika 5.13.; Slika 5.28: in Slika 5.33: (d)).

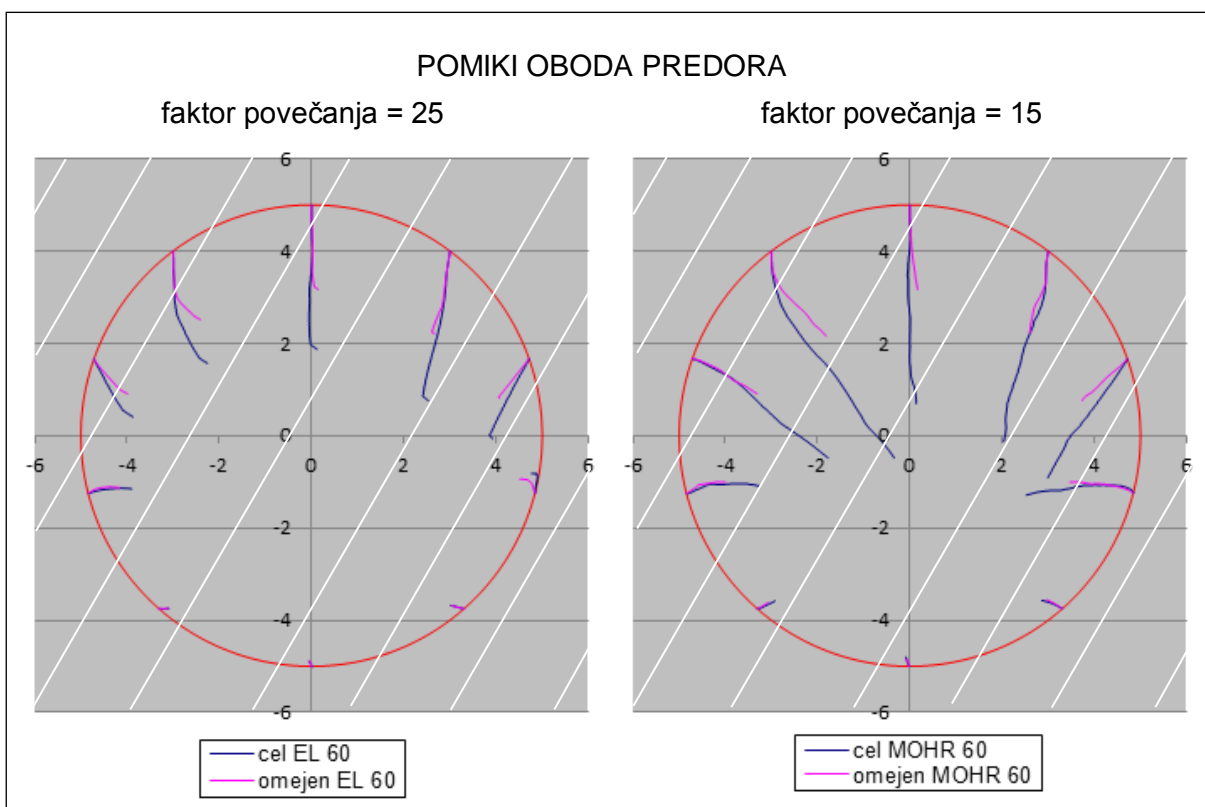


**Slika 5.17:** Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL in MOHR materialnega modela pri nagibu skrivalosti 0°.

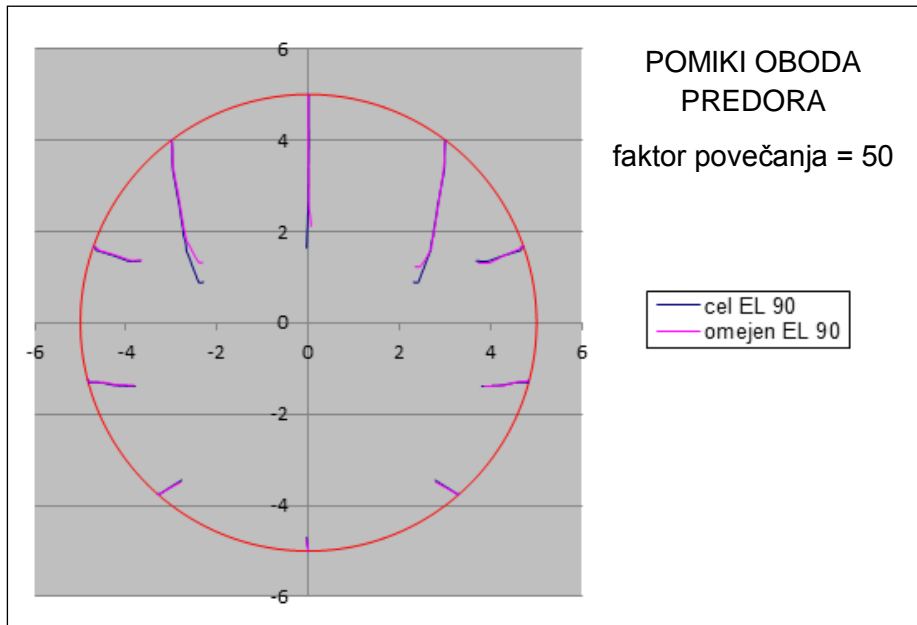




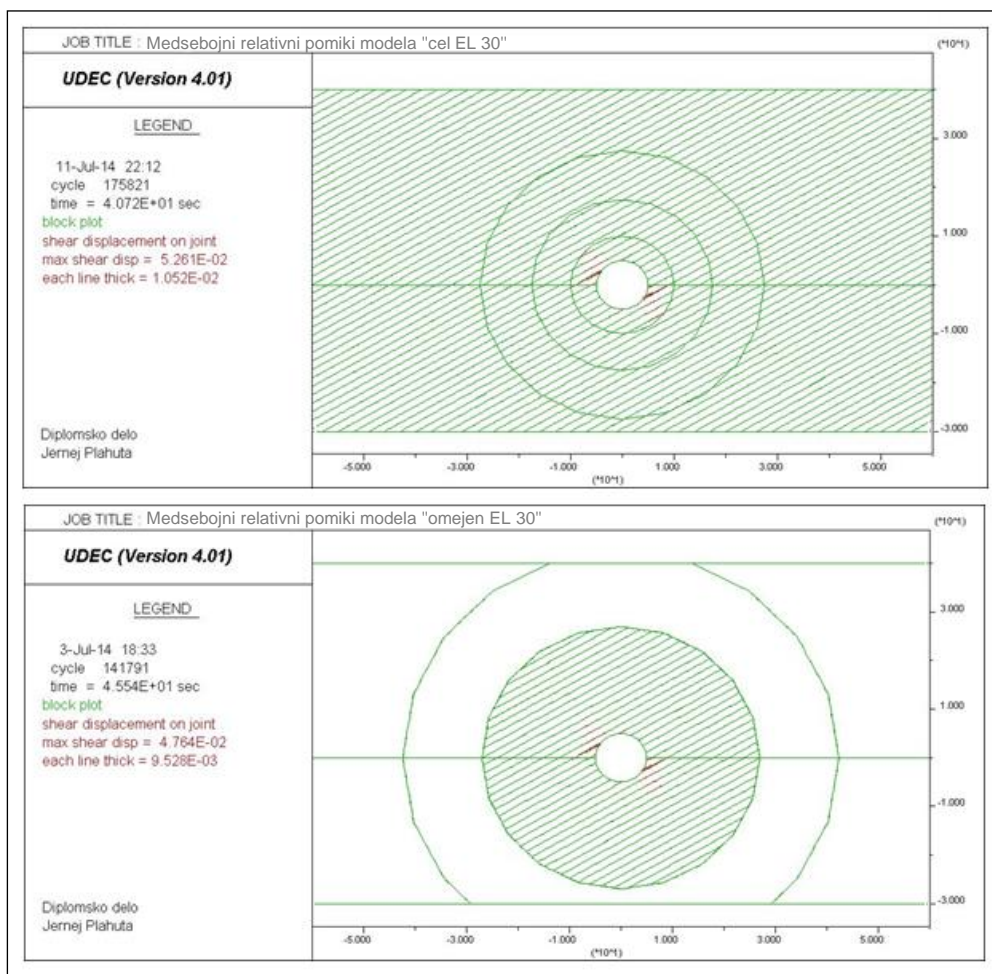
**Slika 5.18:** Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL in MOHR materialnega modela pri nagibu skrilavosti 30°.



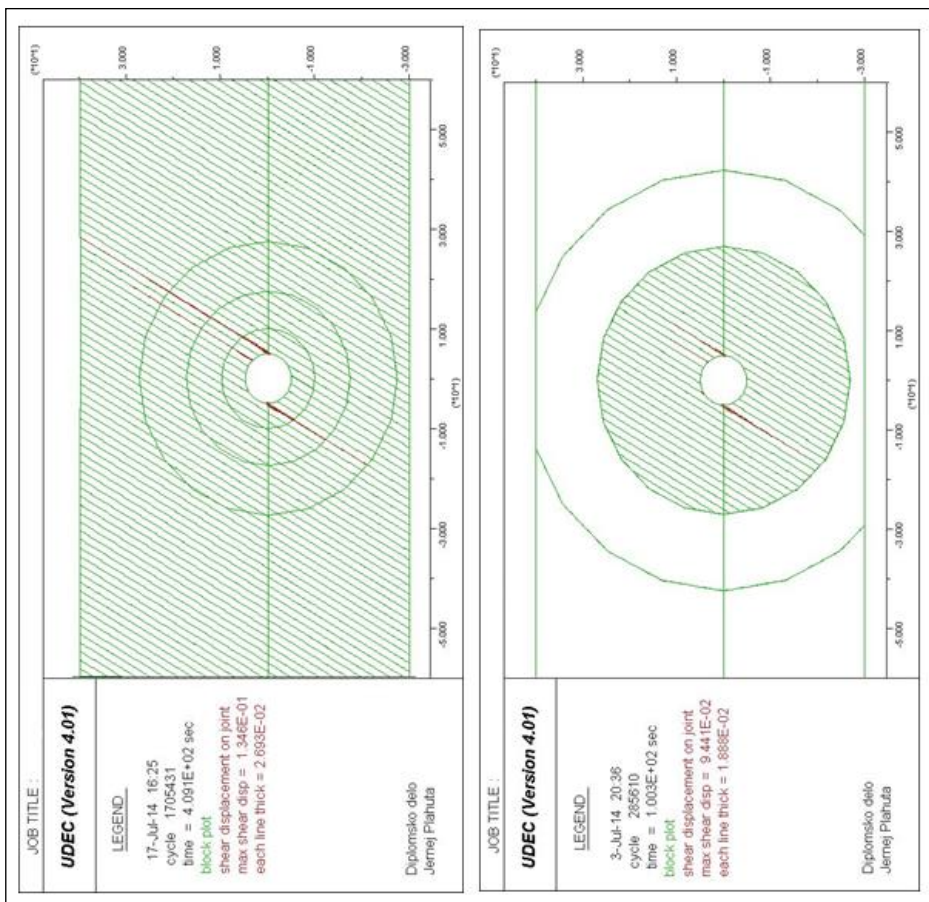
**Slika 5.19:** Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL in MOHR materialnega modela pri nagibu skrilavosti 60°.



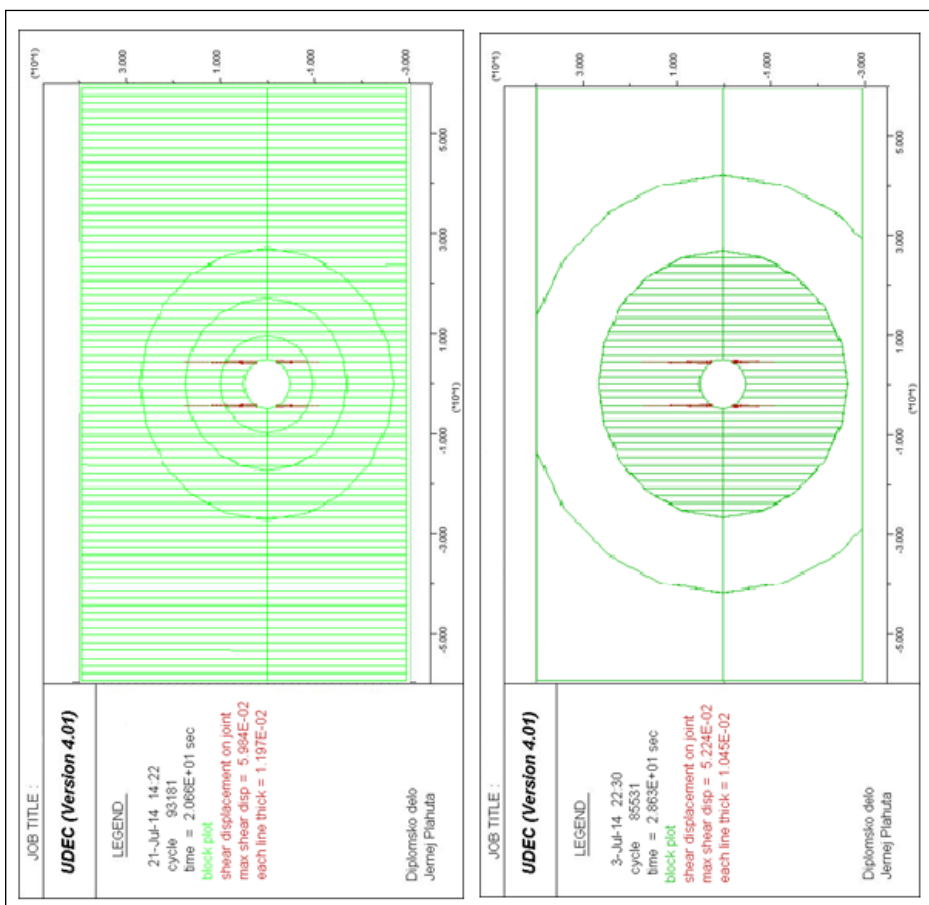
**Slika 5.20:** Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL materialnega modela pri nagibu skrilavosti  $90^\circ$ .



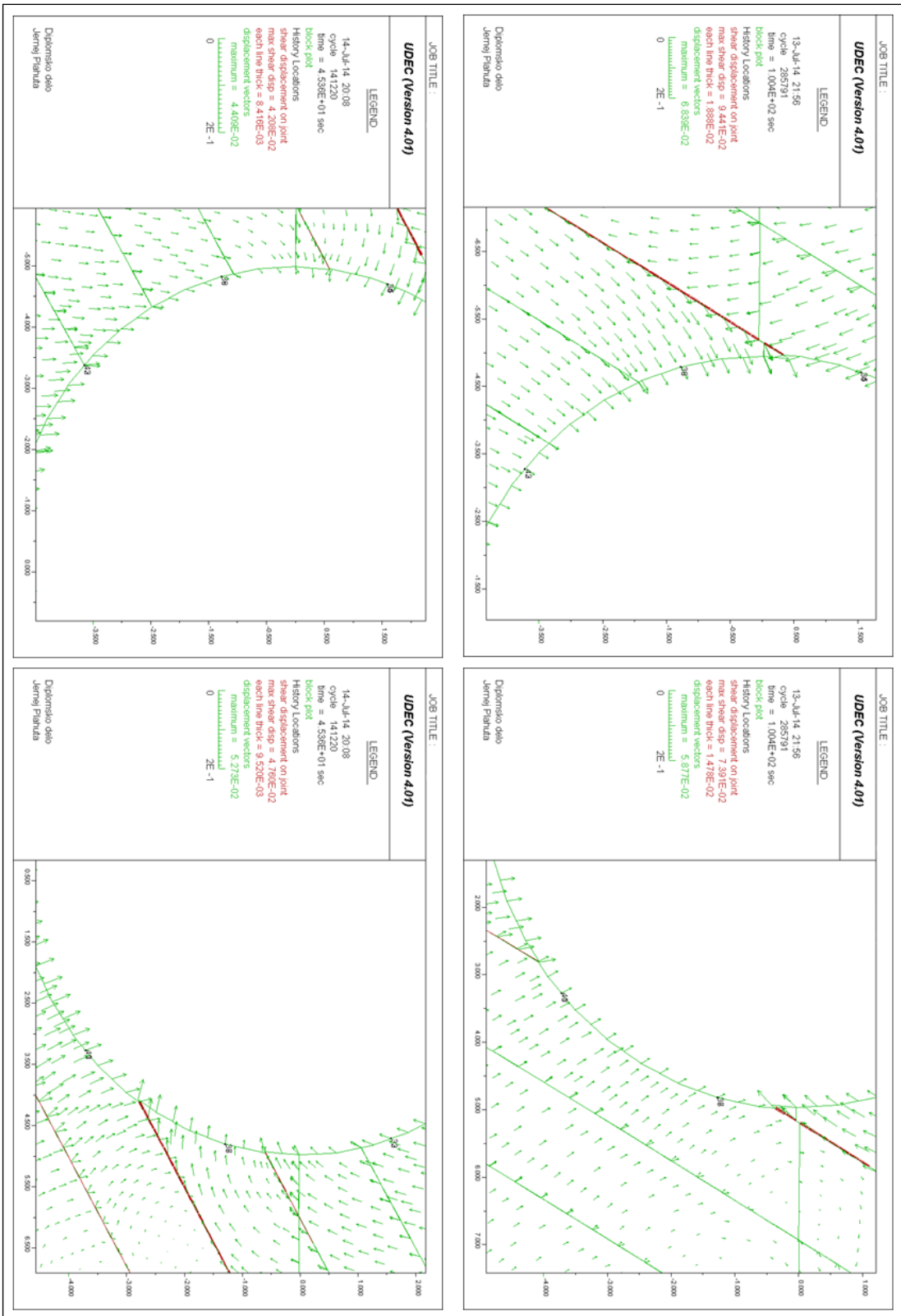
**Slika 5.21:** Primerjava območja največjih medsebojnih relativnih zdrsov stika za model "cel EL 30" in "omejen EL 30".



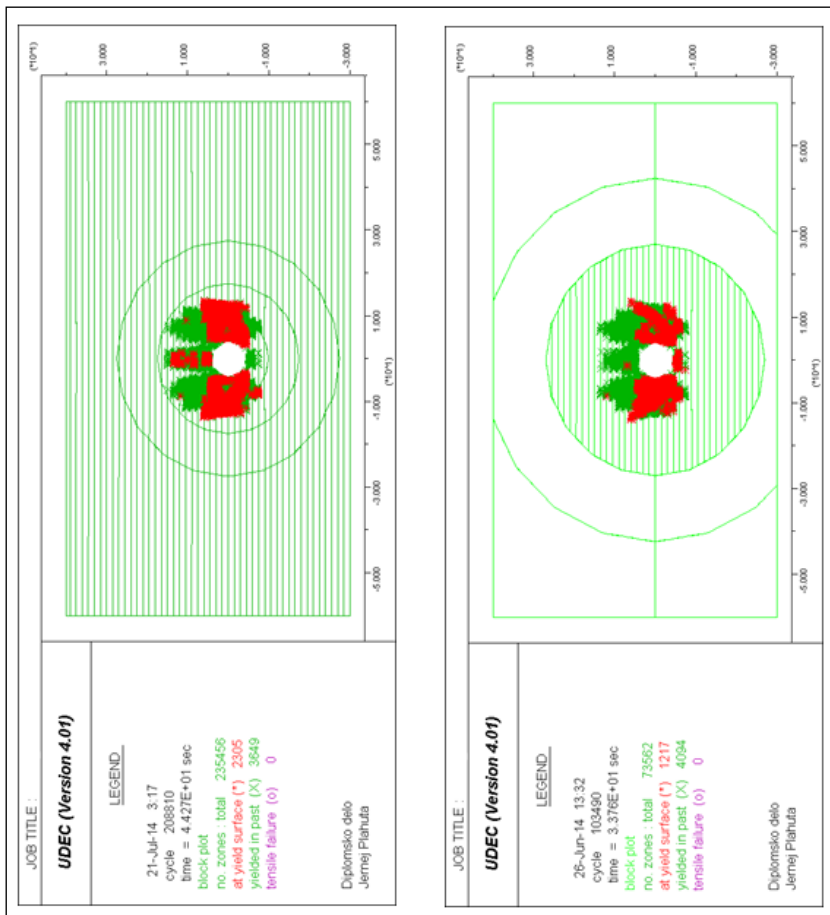
**Slika 5.22:** Primerjava območja največjih medsebojnih relativnih zdrsov stika za model "cel EL 60" in "omejen EL 60".



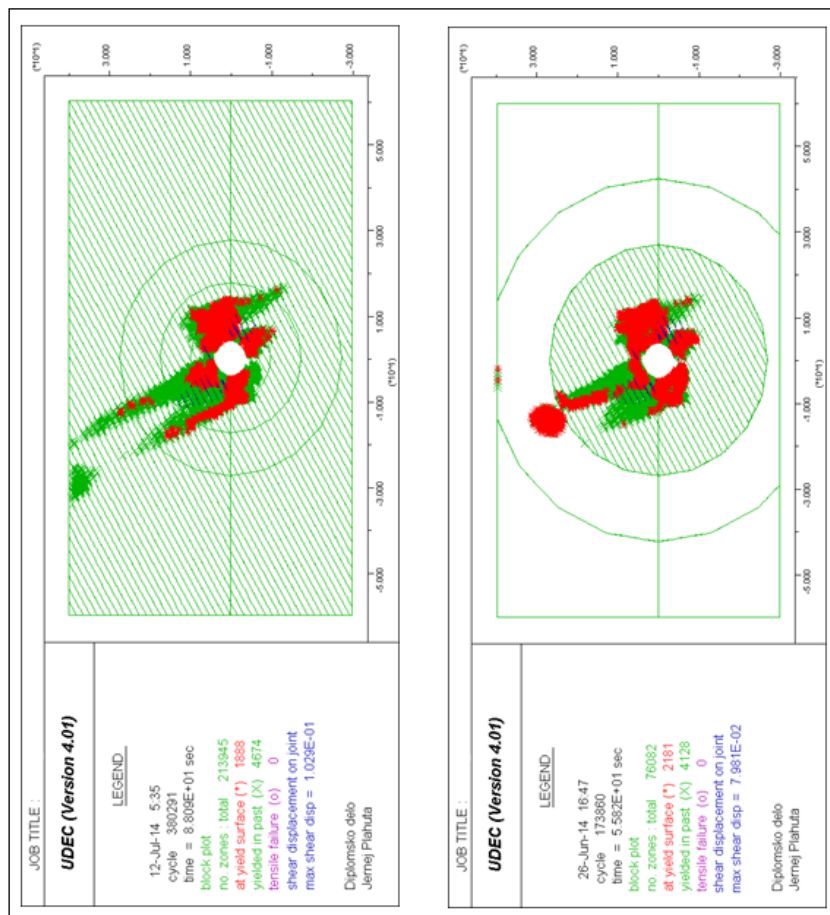
**Slika 5.23:** Primerjava območja največjih medsebojnih relativnih zdrsov stika za model "cel EL 90" in "omejen EL 90".



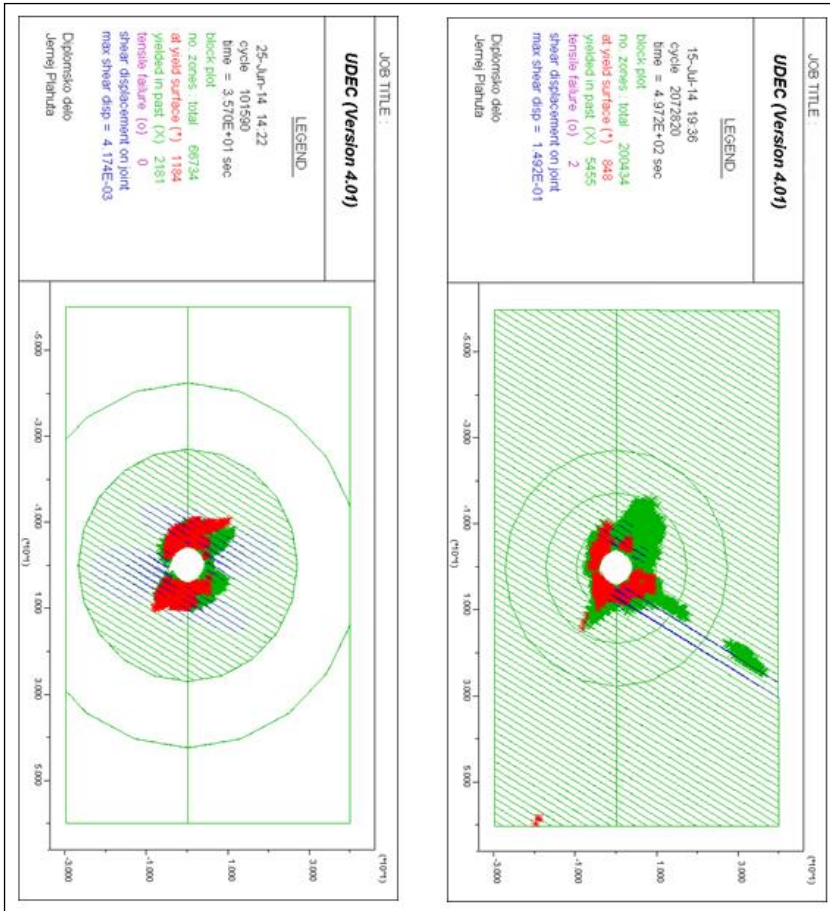
Slika 5.24: Vektorji pomikov oboda predora za modela "omejen EL 60" (zgoraj) in "omejen EL 30" (spodaj).



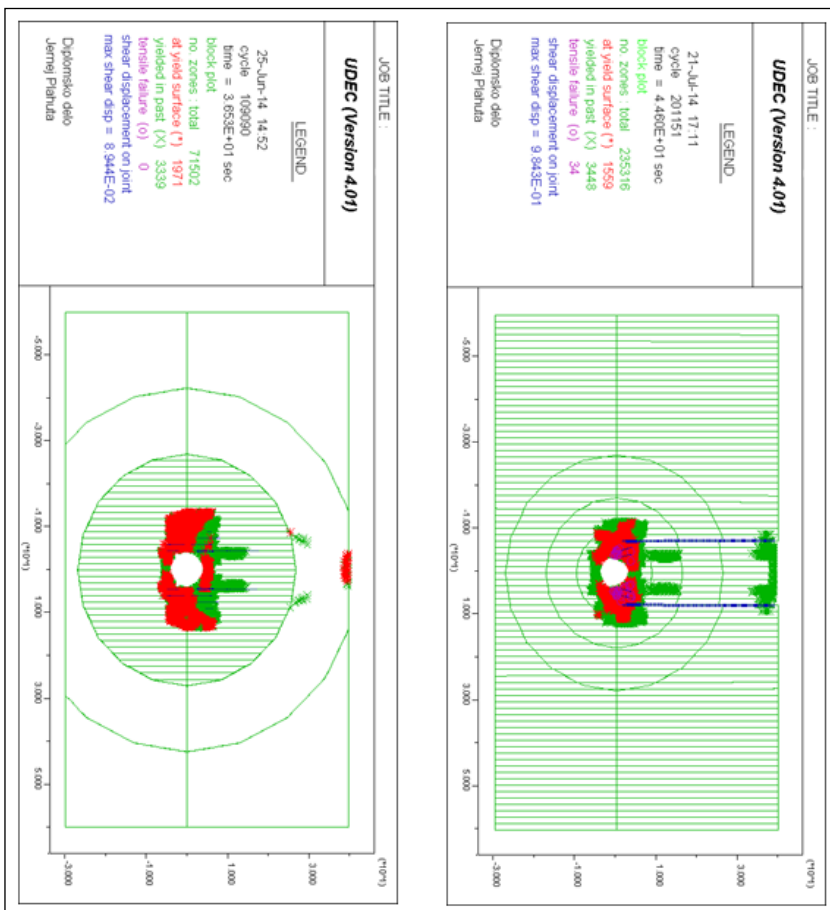
**Slika 5.25:** Primerjava območja plastifikacije za model "cel MOHR 0" in "omejen MOHR 0"



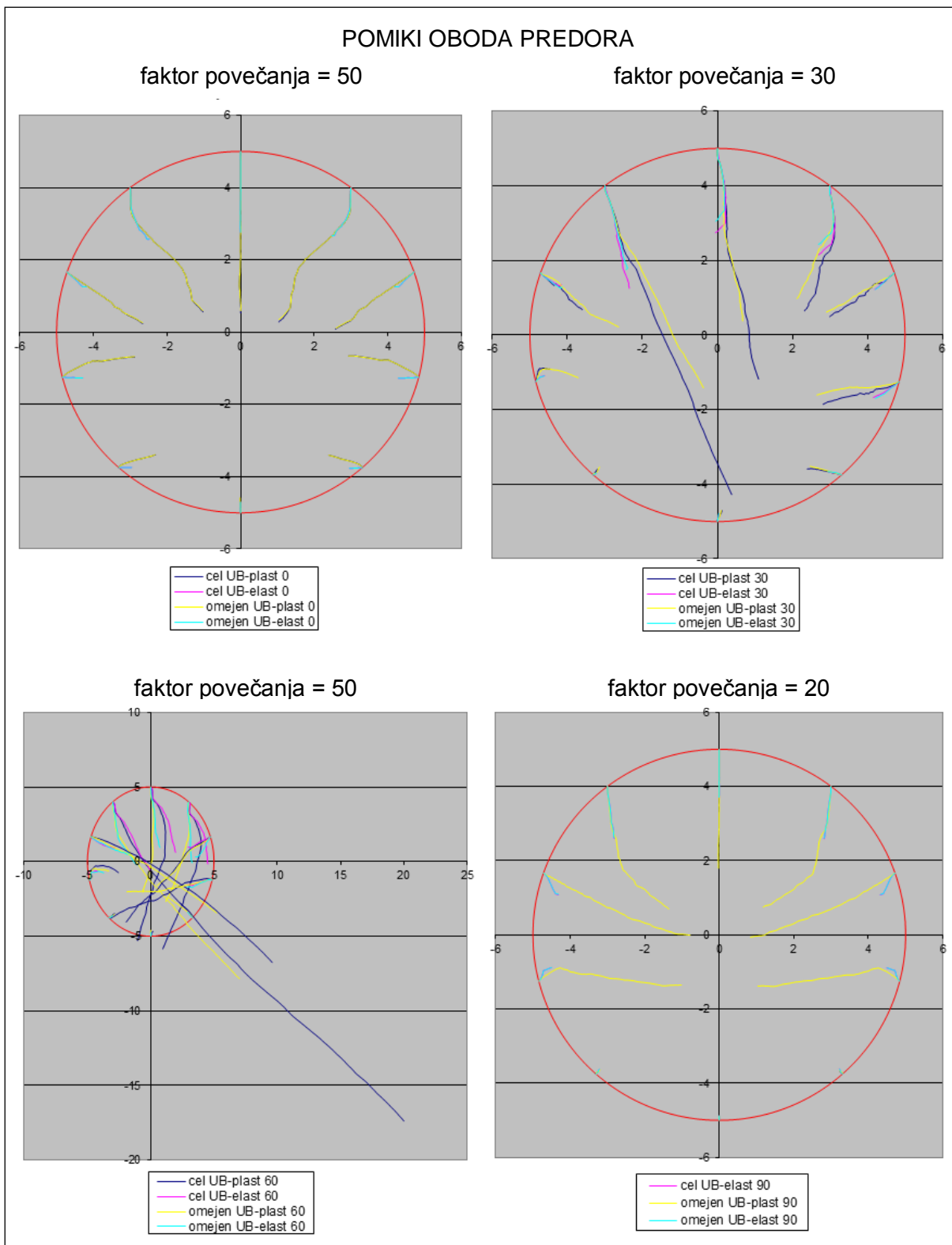
**Slika 5.26:** Primerjava območja plastifikacije za model "cel MOHR 30" in "omejen MOHR 30"



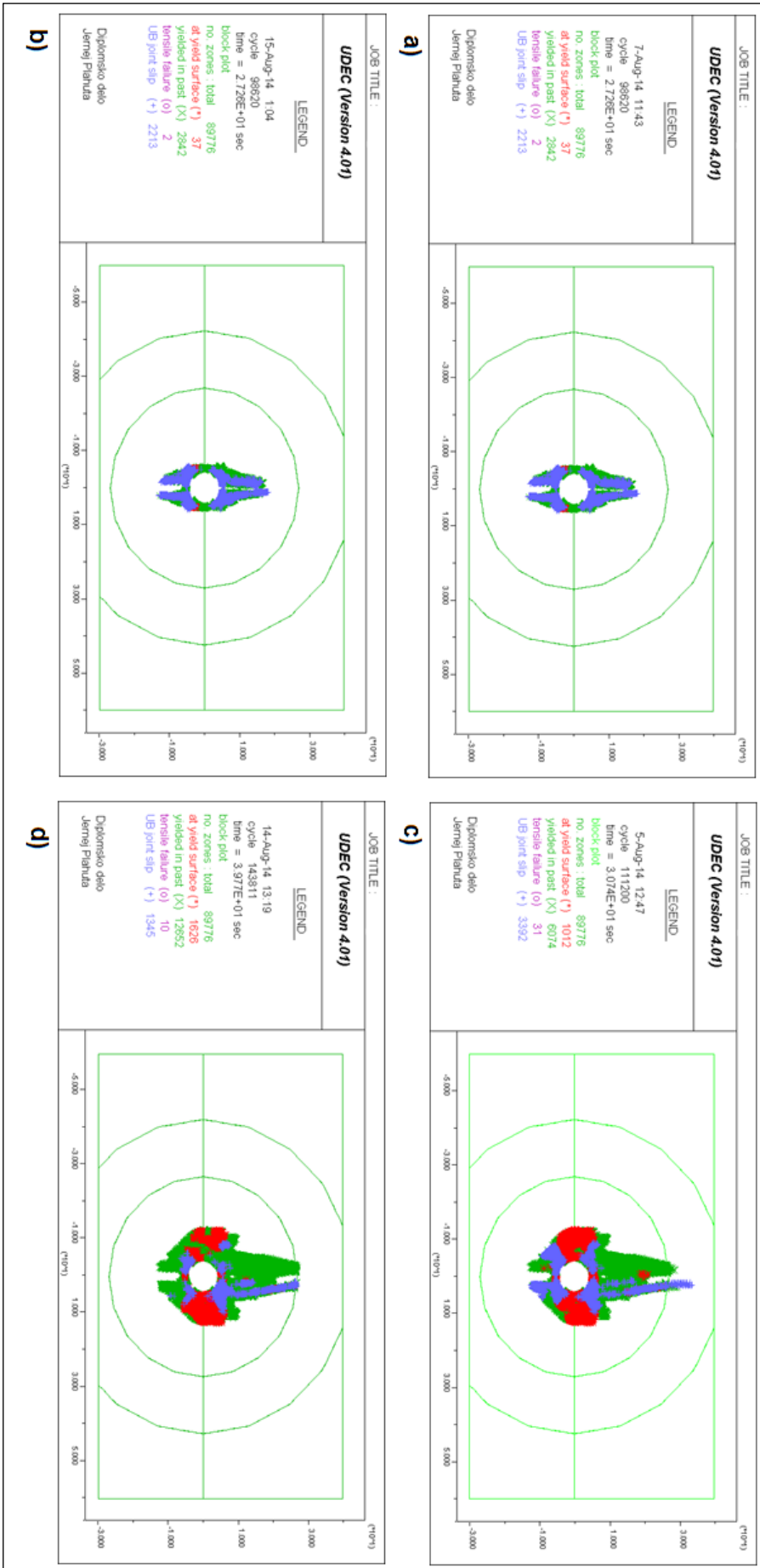
**Slika 5.27:** Primerjava območja plastifikacije za model "cel MOHR 60" in "omejen MOHR 60".



**Slika 5.28:** Primerjava območja plastifikacije za model "cel MOHR 90" in "omejen MOHR 90".

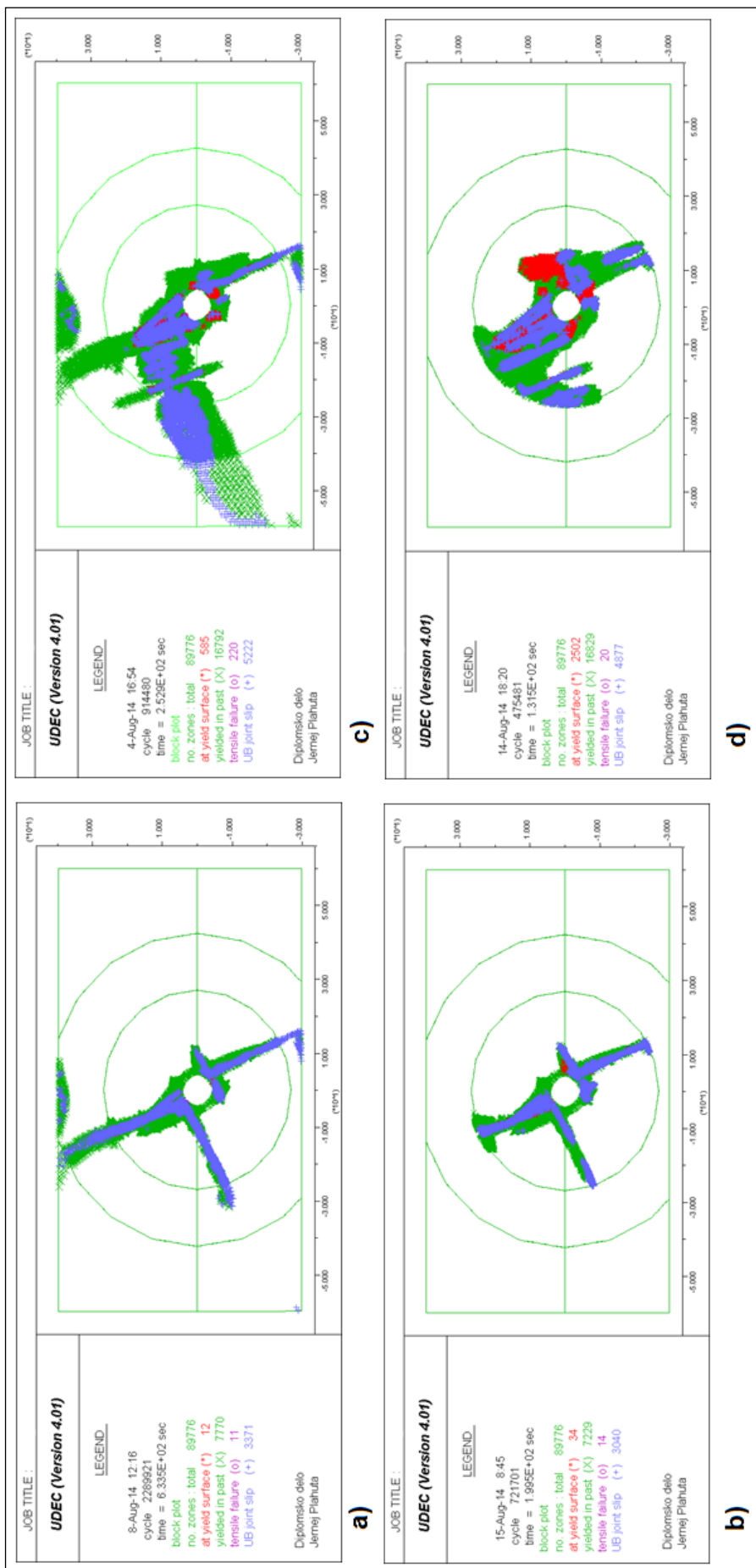


**Slika 5.29:** Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, UB materialnega modela pri nagibu skrilavosti  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  in  $90^\circ$ .

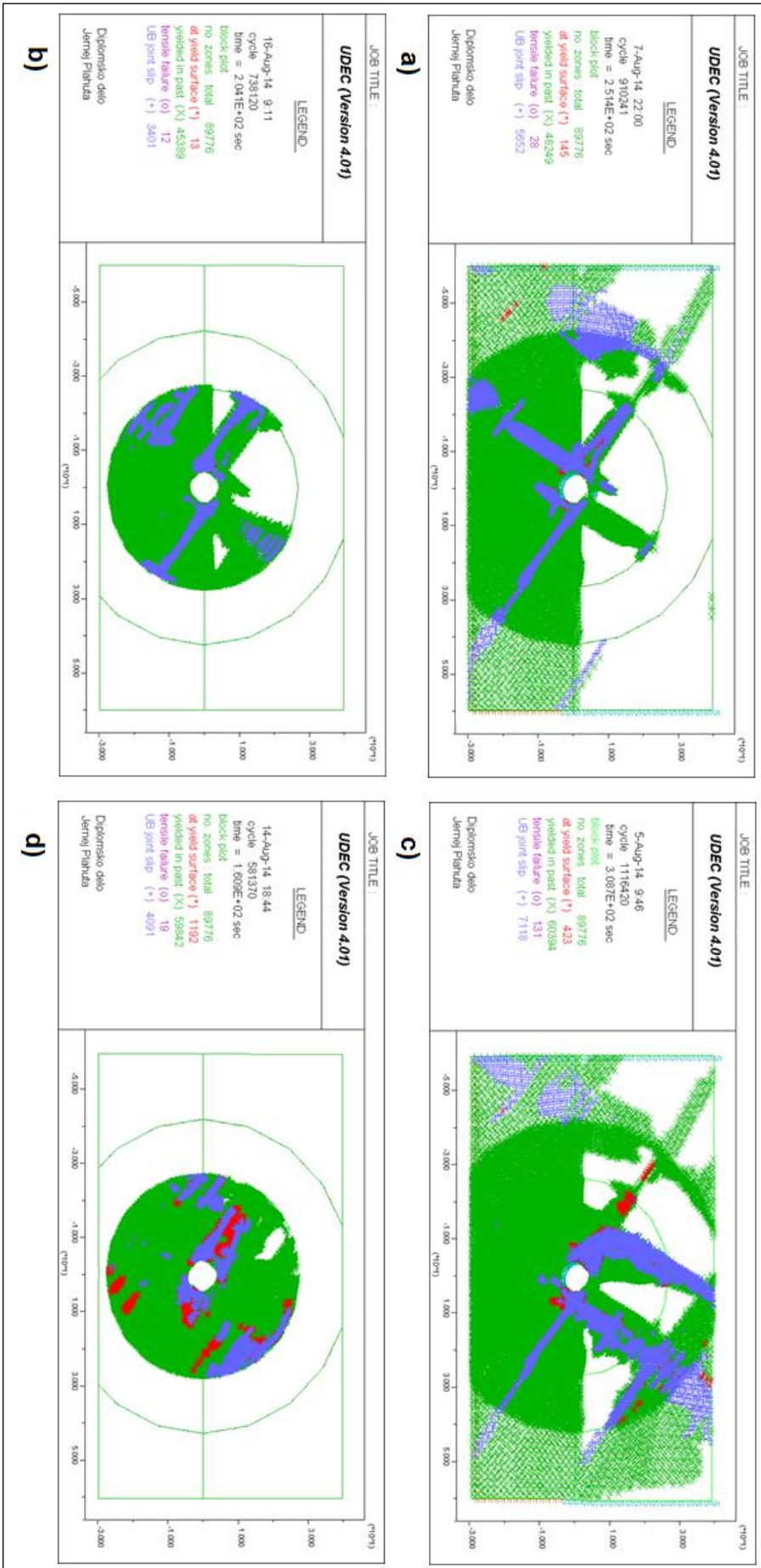


**Slika 5.30:** Primerjava območja plastifikacije za model: a) "cel UB-elast 0"; b) "omejen UB-elast 0";  
 c) "cel UB-plast 0"; d) "omejen UB-plast 0".



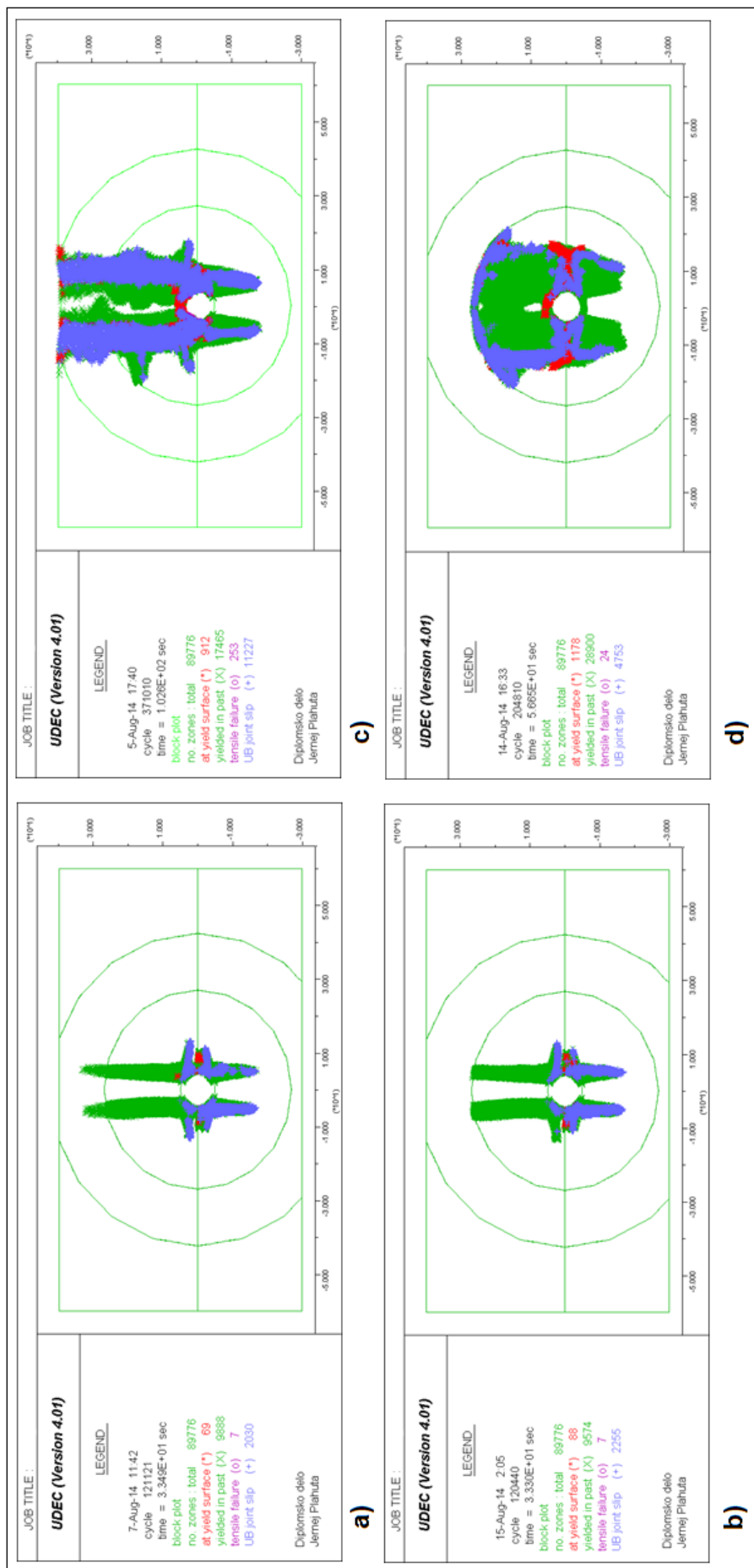


Slika 5.31: Primerjava območja plastifikacije za model: a) "cel UB-elast 30"; b) "omejen UB-elast 30"; c) "cel UB-plast 30"; d) "omejen UB-plast 30".

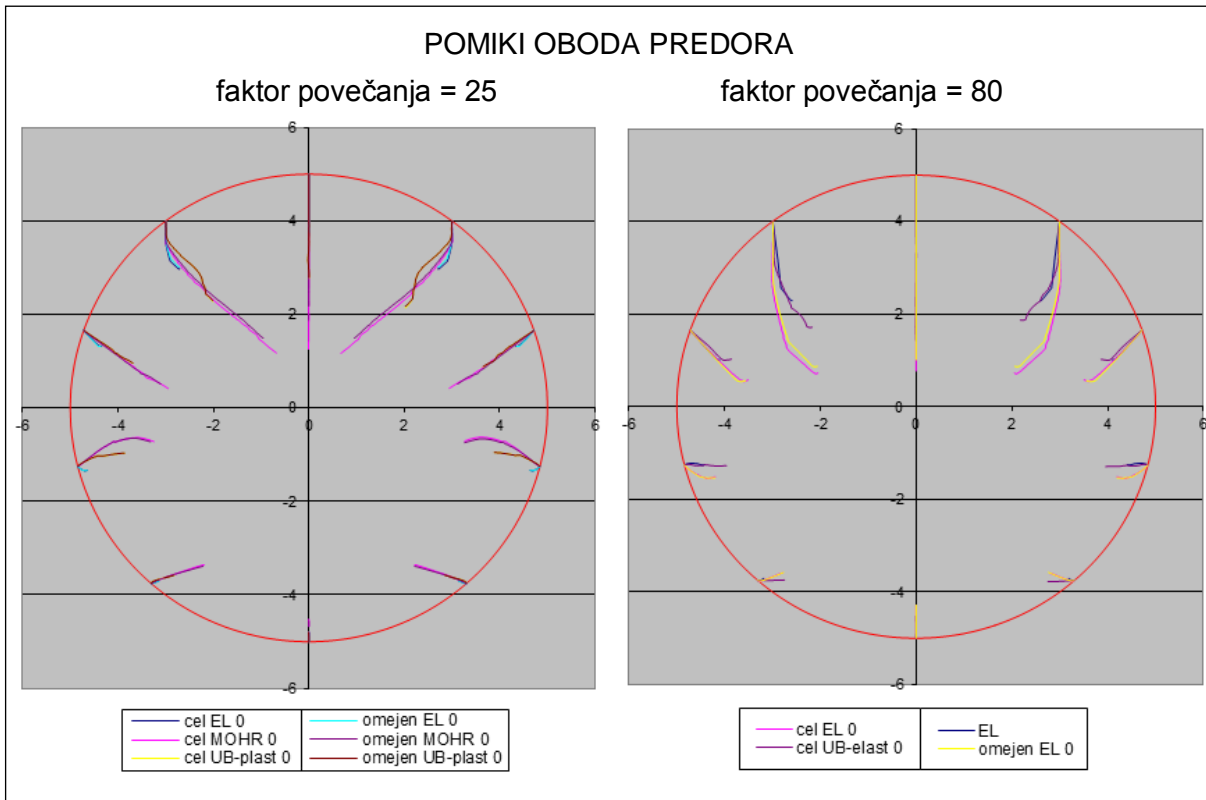


**Slika 5.32:** Primerjava območja plastifikacije za model: a) "cel UB-elast 60"; b) "omejen UB-elast 60";

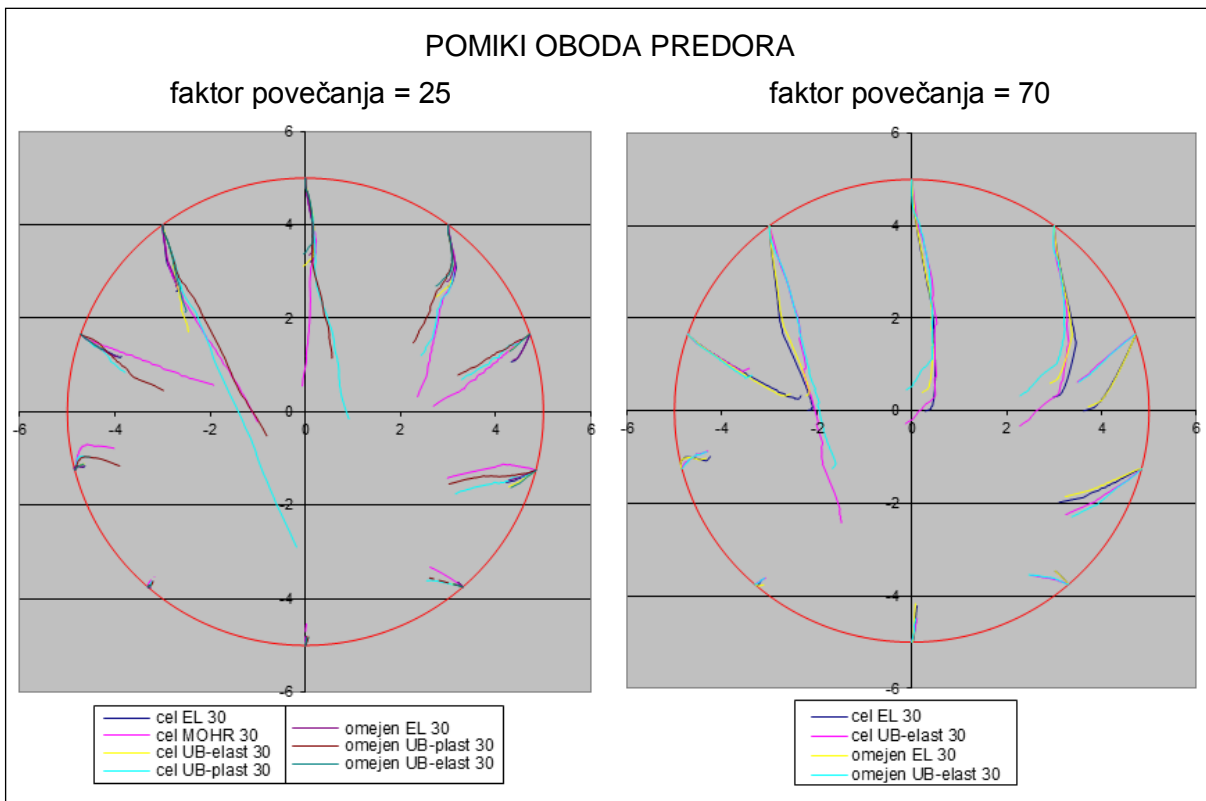
c) "cel UB-plast 60"; d) "omejen UB-plast 60".



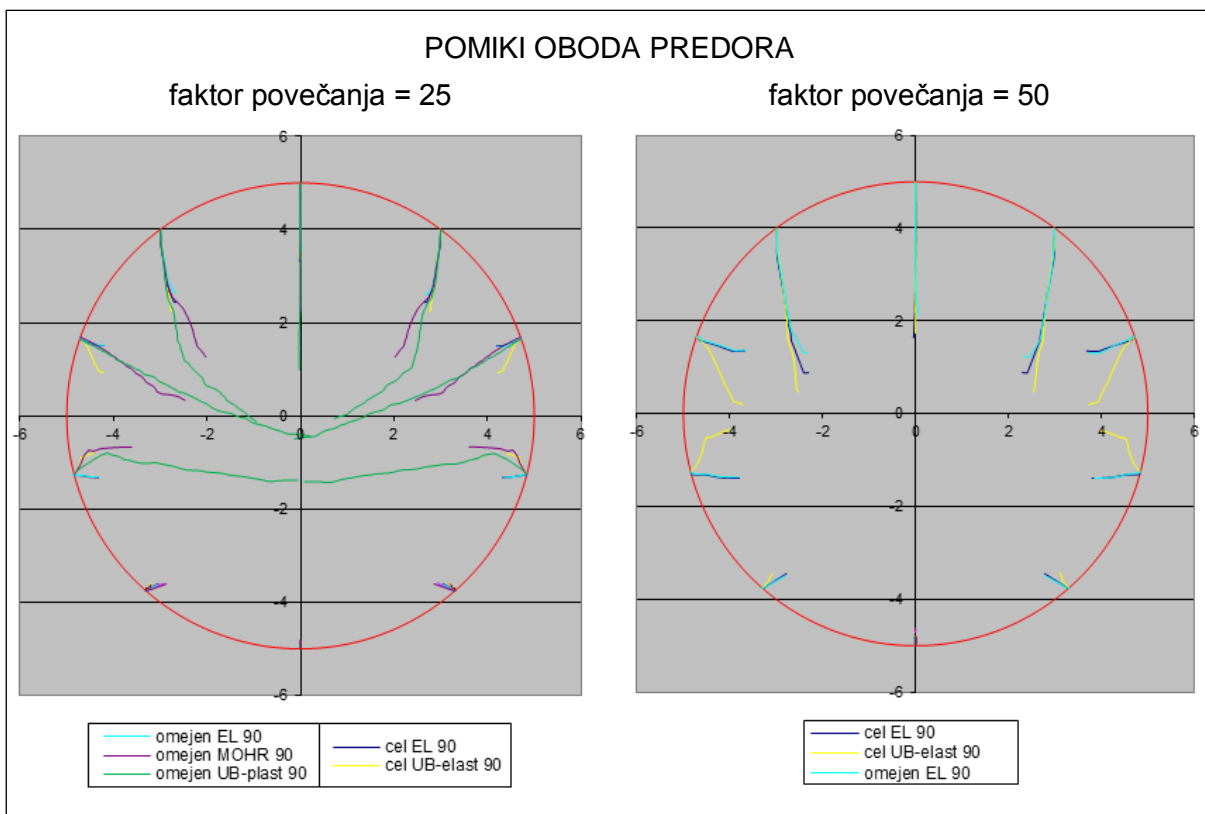
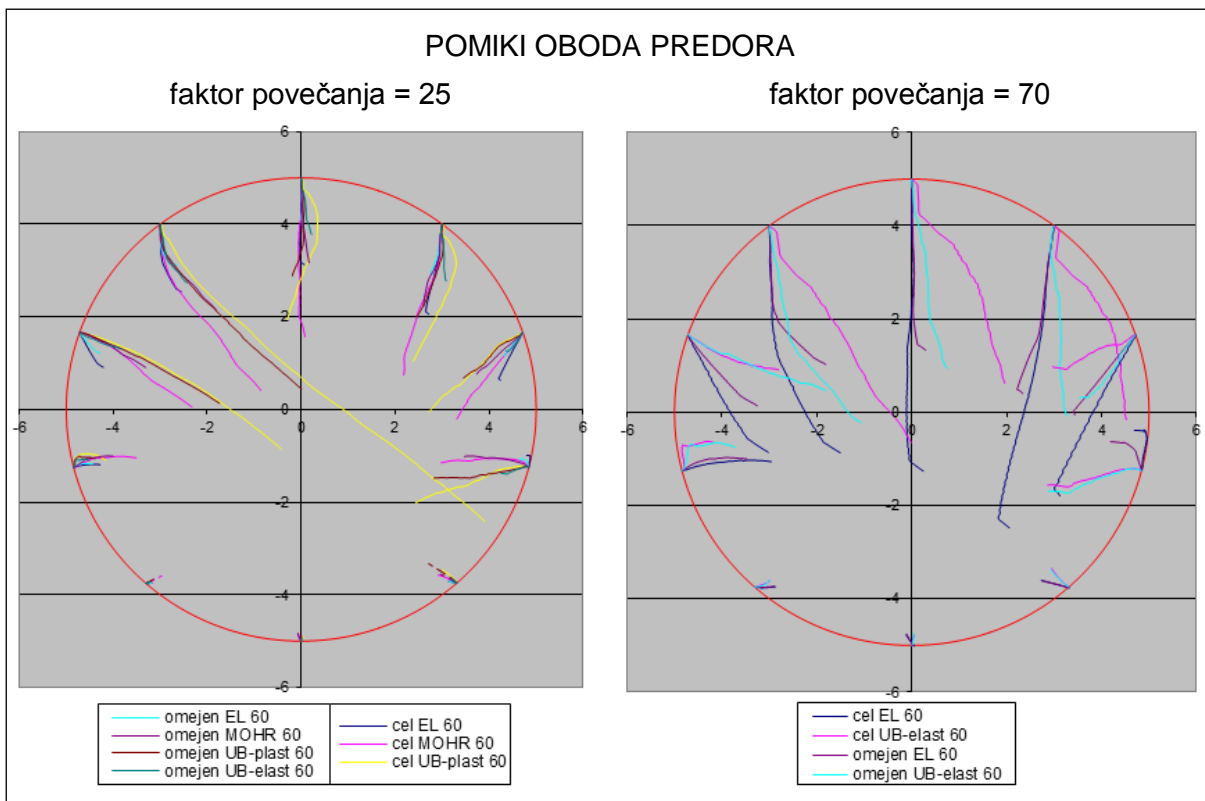
**Slika 5.33:** Primerjava območja plastifikacije za model: a) "cel UB-elast 90°"; b) "omejen UB-elast 90°"; c) "cel UB-plast 90°"; d) "omejen UB-plast 90°".



**Slika 5.34:** Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL, MOHR in UB materialnega modela pri nagibu skrilavosti 30°.



**Slika 5.35:** Primerjava pomikov oboda predora, drugega in tretjega modula, EL, MOHR in UB materialnega modela pri nagibu skrilavosti 30°.



Iz primerjave rezultatov EL in MOHR modela za drugi in tretji modul (Slika 5.17.; Slika 5.18.; Slika 5.19: in Slika 5.20:) je razvidno, da se rezultati EL modela obeh modulov ("cel" in "omejen") zelo dobro ujemajo, razen za primer skrilavosti z nagibom  $60^\circ$ . Razlog ujemanja oz. neujemanja rezultatov je predstavljen na slikah Slika 5.21.; Slika 5.22: in Slika 5.23:. V primeru podobnih rezultatov pomika oboda je razsežnost največjih medsebojnih relativnih zdrsov stika (v nadaljevanju »velikost glavnih razpok«) znotraj omejenega območja definirane za tretji modul (Slika 5.15:) tako v tretjem kot v drugem modulu. V primeru skrilavosti z nagibom  $60^\circ$  pa se velikost glavnih razpok, v drugem modulu, razteza izven omejenega območja definirane za tretji modul in zato se tudi rezultati pomikov oboda razlikujejo. Na sliki Slika 5.24: se lahko opazi, kakšen vpliv imajo glavne razpoke na smer vektorjev pomikov kamnine v okolici predora.

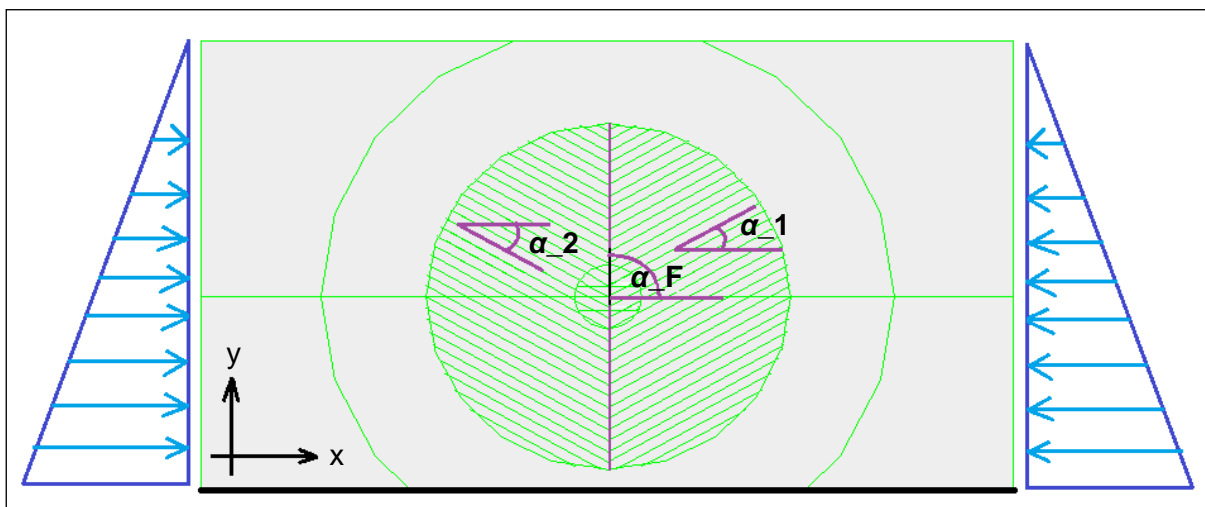
V primeru MOHR modela se rezultati pomikov oboda, drugega in tretjega modula, zelo dobro ujemajo le za skrilavost z nagibom  $0^\circ$ , pri nagibu  $30^\circ$  je odstopanje precejšnje, za nagib  $60^\circ$  pa so rezultati pomikov zelo različni. Vzrok različnih rezultatov se lahko pripiše različnemu območju pastifikacije in razporeditvi ter velikosti glavnih razpok za drugi in tretji modul, kot je prikazano na slikah Slika 5.25.; Slika 5.26.; Slika 5.27: in Slika 5.28:.

Iz primerjave rezultatov UB modela za drugi in tretji modul (Slika 5.29:) je razvidno, da se rezultati UB-elast modela obeh modulov ("cel" in "omejen") ekstremno dobro (skoraj identično) ujemajo za nagib skrilavosti  $0^\circ$  in  $90^\circ$ , dobro se ujemajo za primer nagiba  $30^\circ$  in zelo slabo se ujemajo za primer skrilavosti z nagibom  $60^\circ$ . Razlog ujemanja oz. neujemanja rezultatov je predstavljen s primerjavo slik a) in b) na slikah Slika 5.30.; Slika 5.31.; Slika 5.32: in Slika 5.33:. V primeru zelo podobnih rezultatov pomika oboda (za nagib  $0^\circ$  in  $90^\circ$ ) je področje plastifikacije kamnine znotraj omejenega območja definirane za tretji modul (Slika 5.15:) oz. se v primeru drugega modula le malo razteza izven tega območja. Za nagib skrilavosti  $30^\circ$  je delež plastifikacije izven omejenega območja večje in posledično je tudi napaka pomika večja. Pri nagibu  $60^\circ$  pa je, pri drugem modulu, poleg velikega deleža plastifikacije izven omejenega območja pomembno vplivala tudi uporaba različnih robnih pogojev (Slika 5.14:) tega modula v primerjavi z robnimi pogoji tretjega modula (Slika 5.15:).

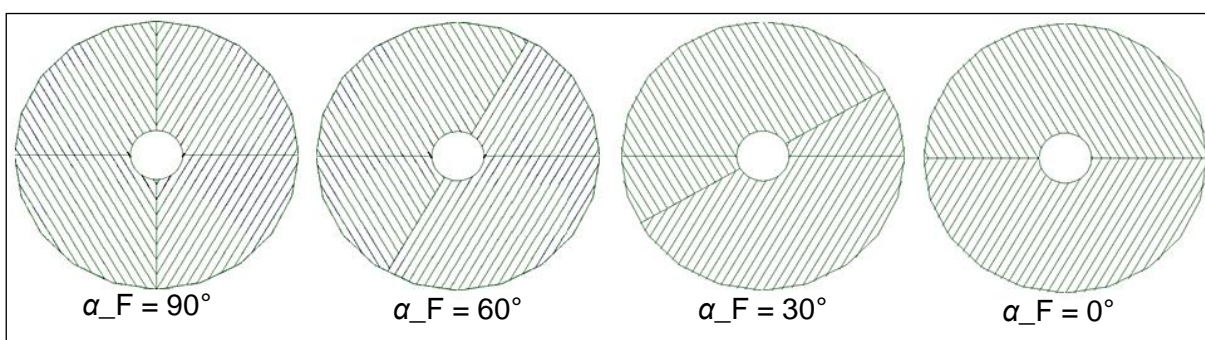
V primeru UB-plast modela se rezultati pomikov oboda, drugega in tretjega modula, slabo ujemajo v skoraj vseh primerih nagiba skrilavosti, razen za nagib  $0^\circ$ . Pri nagibu skrilavosti različne od  $0^\circ$  se lahko opazi nekakšno podobnost oblike pomika, vendar se velikost pomika vedno zelo razlikuje. Podobno kot za UB-elast je razlog neujemanja modela "cel UB-plast" in modela "omejen UB-plast" posledica deleža plastifikacije kamnine izven omejenega območja. Razliko plastifikacije kamnine se lahko opazi s primerjavo slik c) in d) na slikah Slika 5.30.; Slika 5.31.; Slika 5.32: in Slika 5.33:.

Na slikah (Slika 5.34.; Slika 5.35.; Slika 5.36: in Slika 5.37:) je predstavljena primerjava pomikov oboda predora različnih modelov (EL, MOHR in UB) iz vseh treh modulov (prvega, drugega in tretjega). Opazi se, da se oblika in velikost pomikov »elastičnih« modelov nekoliko bolje ujemajo kot pomiki »plastičnih« modelov, razen pri skrilavosti z nagibom  $60^\circ$ . Beseda »elastičnih« se navezuje na modele, kot so: "EL", "cel EL", "omejen EL", "cel UB-elast" in "omejen UB-elast", beseda »plastičnih« pa se navezuje na modele, kot so: "MOHR", "cel MOHR", "omejen MOHR", "cel UB-plast" in "omejen UB-plast".

#### 5.4 Razčlenjena skrilavost le v omejenem območju modela



**Slika 5.38:** Geometrija četrtega modula z robnimi pogoji.



**Slika 5.39:** Primer razčlenjene skrilavosti za kot nagiba  $\alpha_1$  ( $60^\circ$ ),  $\alpha_2$  ( $-60^\circ$ ) in kot nagiba ravnine razčlenjenosti  $\alpha_F$  ( $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$  in  $0^\circ$ ).

Na sliki (Slika 5.38:) je predstavljena geometrija četrtega modula. Značilnost geometrije tega modula je, da ima dva sklopa vzporednih diskontinuitet (skrilavosti), ki ju določata kota nagiba  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$ . Sklopa skrilavosti sta ločena z ravnino (črto) razčlenjenosti, ki poteka skozi središče predora pod kotom  $\alpha_F$ . Pozitivni koti nagiba so merjeni v nasprotni smeri urinega kazalca z začetkom na pozitivni x-osi. Uporabljeni robni pogoji so enaki kot pri prvem modulu.

Na sliki (Slika 5.39:) je predstavljen primer štirih geometrijskih modelov razčlenjene skrilavosti. Pri vseh modelih kot nagiba  $\alpha_1$  meri  $60^\circ$ ,  $\alpha_2$  meri  $60^\circ$ , kot nagiba  $\alpha_F$  pa  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$  in  $0^\circ$ .

V tem modulu so uporabljeni le EL ter "UB-elast" materialni modeli kamnine. V primeru EL modela je, podobno kot v prejšnjem modulu, anizotropija (skrilavost) predstavljena z vzporednimi diskontinuitetami, z medsebojnim razmikom 1,5 m, a le v omejenem območju okoli predora, krožne oblike s premerom 54 m, kot je prikazano na zgornji sliki (Slika 5.38:). V primeru UB modela je uporabljena enaka geometrija kot pri prejšnjem modulu (Slika 5.16:) s to razliko, da ima UB model v omejenem območju (OBMOČJE 2) skrilavost definirano tako kot določa geometrija četrtega modula (Slika 5.38:).

Zaradi podobne geometrije kot v prejšnjem modulu se število con ni veliko spremenilo. Čas računanja posameznega modela pri določenem  $\alpha_F$  je podan v preglednicah Preglednica 5.8:–5.16. Celice preglednic so pobarvane z odtenki od zelene preko rumene proti svetlo rdeči. Pobarvana polja omogočajo hitrejšo in boljše predstavo o porabljenem času računanja posamezne analize. Z zeleno so označene analize, katerih čas računanja je bil manjši od povprečnega. Z rumeno so označene analize, katerih čas računanja je bil blizu povprečnega. S svetlo rdečo so označene analize, katerih čas računanja je bil večji od povprečnega. Z rdečo barvo pa so označene le analize pri "UB-elast" modelu, katerih čas računanja je izrazito odstopal od povprečnega.

Povprečno porabljen čas za posamezno analizo EL modela znaša 1 uro in 15 minut, za "UB-elast" model pa 6 ur. Če se pri slednjem ne upošteva analiz, katerih čas izrazito odstopa od povprečja, se povprečno porabljen čas za analizo zmanjša na 4 ure in 15 minut.

Pri obravnavi tega modula ni bila zamudna posamezna analiza, temveč količina vseh analiz. Za obdelavo vseh možnih kombinacij za  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  ter  $\alpha_F$  je bilo potrebno opraviti približno 280 analiz.

**Preglednica 5.8:** Čas računanja (ur) EL modela za  $\alpha_F$  je  $90^\circ$ .

EL		alfa_2					
alfa_F = 90		-60	-30	0	30	60	90
alfa_1	-60	2,5	1,5	1,5	1,5	1,25	2
	-30	1,25	1,25	0,75	0,75	1,25	1
	0	1,25	1	0,5	0,75	1,5	0,75
	30	1,5	1,25	1	1,5	1,5	1,25
	60	1,25	1,75	1	1,25	2,5	1
	90	1	1,5	0,5	1	2	0,5
povprečno ur/analizo		1,26					

**Preglednica 5.9:** Čas računanja (ur) EL modela za  $\alpha_F$  je  $60^\circ$ .

EL		$\alpha_2$					
$\alpha_F = 60$		-60	-30	0	30	60	90
$\alpha_1$	-60	2	1,5	1,5	1,5	1,25	2
	-30	1,25	1,25	0,75	1	1,75	1
	0	1,25	1	0,75	0,75	1,5	0,75
	30	1,75	1,25	1	1,25	1,25	1,75
	60	1,25	1,5	1,25	1,25	2	1,25
	90	1,25	1,25	0,75	1,25	1,5	1
povprečno ur/analizo		1,29					

**Preglednica 5.10:** Čas računanja (ur) EL modela za  $\alpha_F$  je  $30^\circ$ .

EL		$\alpha_2$					
$\alpha_F = 30$		-60	-30	0	30	60	90
$\alpha_1$	-60	2,5	1,5	1,25	1,5	1,5	2
	-30	1,25	1	0,75	0,75	1,5	0,75

se nadaljuje ...



... nadaljevanje Preglednice 5.10

$\alpha_1$	0	1,5	0,75	0,75	0,75	1,5	1
	30	1,75	1,5	1,25	1,25	1	1,5
	60	1,5	1,25	2,25	1,25	2,25	1,25
	90	1,25	1	1	1	1,5	1
povprečno ur/analizo		1,31					

**Preglednica 5.11:** Čas računanja (ur) EL modela za  $\alpha_F$  je  $0^\circ$ .

EL		$\alpha_2$					
$\alpha_F = 0$		-60	-30	0	30	60	90
$\alpha_1$	-60	1,25	1	1,25	1,5	1	2,25
	-30	1,5	1,5	1	1,25	1,5	1,5
	0	1	1	0,5	1	1	0,75
	30	2	1,5	1	1,25	1,5	1,25
	60	1	1,5	1	1,25	2	1
	90	1	1	0,75	1	1,25	0,75
povprečno ur/analizo		1,22					

**Preglednica 5.12:** Čas računanja (ur) "UB-elast" modela za  $\alpha_F$  je  $90^\circ$ .

UB-elast		$\alpha_2$					
$\alpha_F = 90$		-60	-30	0	30	60	90
$\alpha_1$	-60	7	6	4	21	2,5	5
	-30	3,5	5,25	2,5	4	5,25	3
	0	3,5	2,5	1,5	3	4,75	1,5
	30	6	3,25	4	8,5	6,5	7,5
	60	20	4,75	3	7	7	3
	90	2,5	4	1,5	3	4,75	2
povprečno ur/analizo		5,11					

**Preglednica 5.13:** Čas računanja (ur) "UB-elast" modela za  $\alpha_F$  je  $60^\circ$ .

UB-elast		$\alpha_2$					
alfa_F = 60		-60	-30	0	30	60	90
$\alpha_1$	-60	/	5,5	4	9	2,5	4,5
	-30	3,5	/	2,25	8	3,25	3,75
	0	3,75	3,75	/	3,5	2,75	1,5
	30	5,5	9,25	3,75	/	3,25	6
	60	9	6,5	2	6	/	3,5
	90	5,75	7	1,5	26,5	5	/
povprečno ur/analizo		5,40					

**Preglednica 5.14:** Čas računanja (ur) "UB-elast" modela za  $\alpha_F$  je 30°.

UB-elast		$\alpha_2$					
$\alpha_F = 30$		-60	-30	0	30	60	90
$\alpha_1$	-60	/	14,5	6	19,25	8	6,75
	-30	25,5	/	3,25	16,75	3,5	3,5
	0	4,25	2,75	/	3,5	4,75	1,5
	30	5,5	5,75	3,5	/	6,75	4,5
	60	18,5	20,5	6,75	5,5	/	11,75
	90	4	4,5	1,75	11,5	6	/
povprečno ur/analizo		8,02					

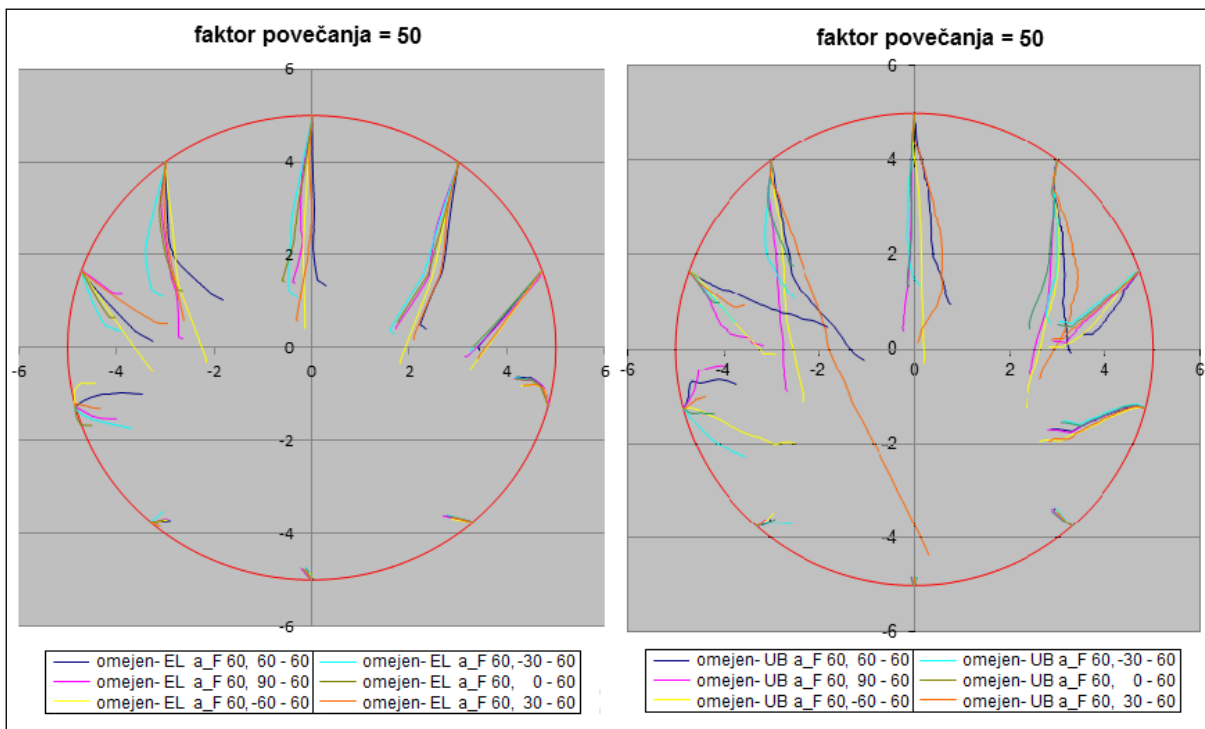
**Preglednica 5.15:** Čas računanja (ur) "UB-elast" modela za  $\alpha_F$  je 0°.

UB-elast		$\alpha_2$					
$\alpha_F = 0$		-60	-30	0	30	60	90
$\alpha_1$	-60	/	2	2,5	8,25	7	5,25
	-30	4,25	/	3,5	21,75	4,5	3
	0	2,25	2	/	3	2,25	1,25
	30	4,75	7	3	/	4,5	4
	60	4,5	5,5	2,5	18,5	/	7,5
	90	3	4	1,75	16,25	3,25	/
povprečno ur/analizo		5,43					

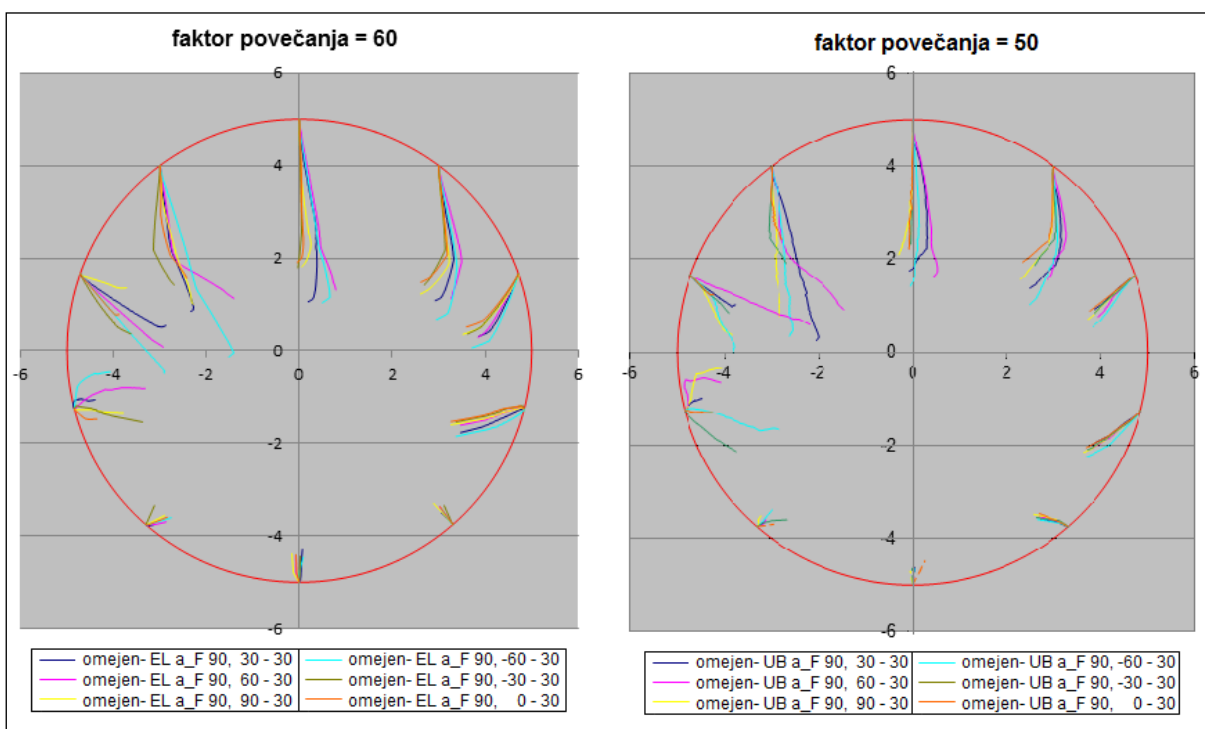
V nadaljevanju sledi nekaj slik primerjave rezultatov za posamezne modele ter primerjava rezultatov med modeloma. Primerjava rezultatov je organizirana v tri sklope: (1) primerjava posameznega modela glede vpliva nagiba  $\alpha_2$  pri konstantnem nagibu  $\alpha_1$  in  $\alpha_F$ ; (2) primerjava posameznega modela glede vpliva nagiba  $\alpha_F$  pri konstantnem nagibu  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$ ; (3) primerjava obeh modelov za posamezno kombinacijo nagiba  $\alpha_F$ ,  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$ .

Primerjave rezultatov vseh analiz posameznega sklopa so izrisane v prilogi (PRILOGA B, C in D). Poimenovanje rezultatov posamezne analize se v prilogah nekoliko razlikuje v primerjavi z normiranim poimenovanjem predstavljenim v preglednici (Preglednica 5.4:). Pri EL modelu je v poimenovanju rezultatov izpuščen del, ki opisuje obseg skrilavosti in ime materialnega modela ("omejen- EL"), pri UB modelu pa je izpuščen le del, ki opisuje obseg skrilavosti ("omejen-").

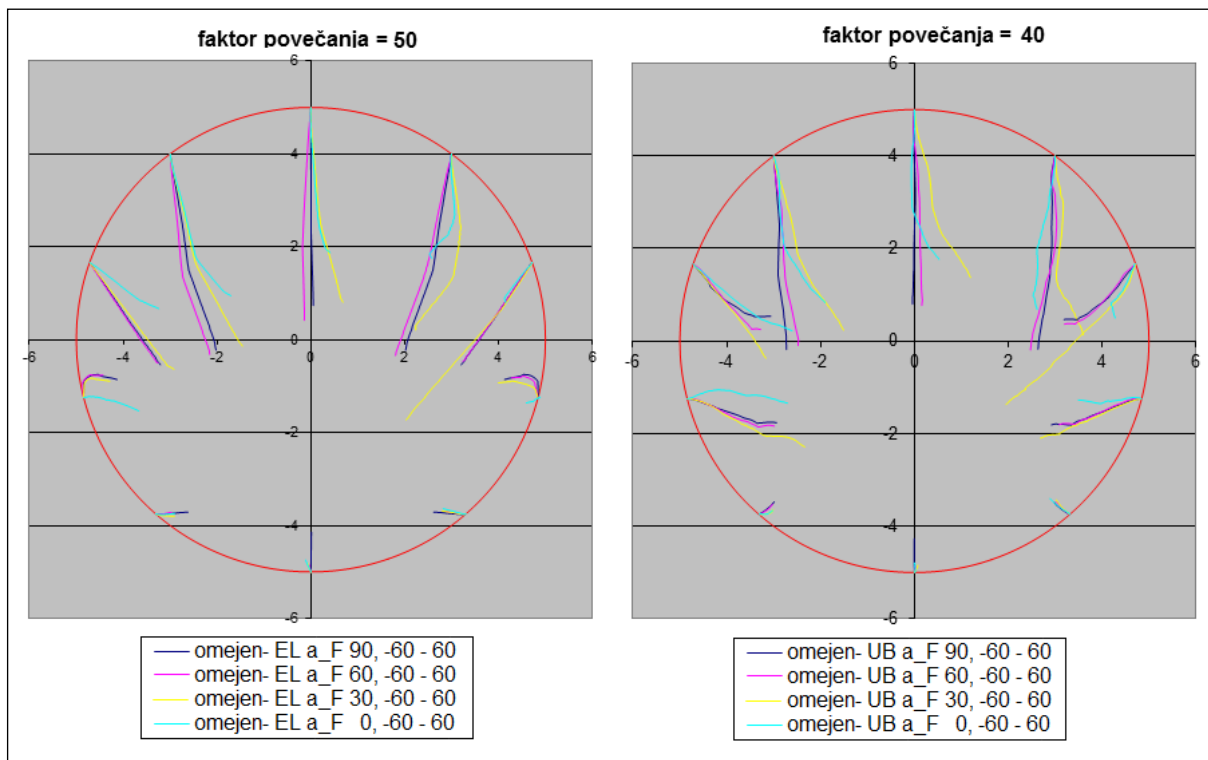
Rezultati v PRILOGI B z imenom "a\_F 90, 60 - -30" so rezultati, ki bi se po normiranem poimenovanju zapisali kot "omejen- EL a\_F 90, 60 - -30". Podobno bi se za primer "UB a\_F 30, 90 - 60" po normiranem poimenovanju zapisalo kot "omejen- UB a\_F 30, 90 - 60".



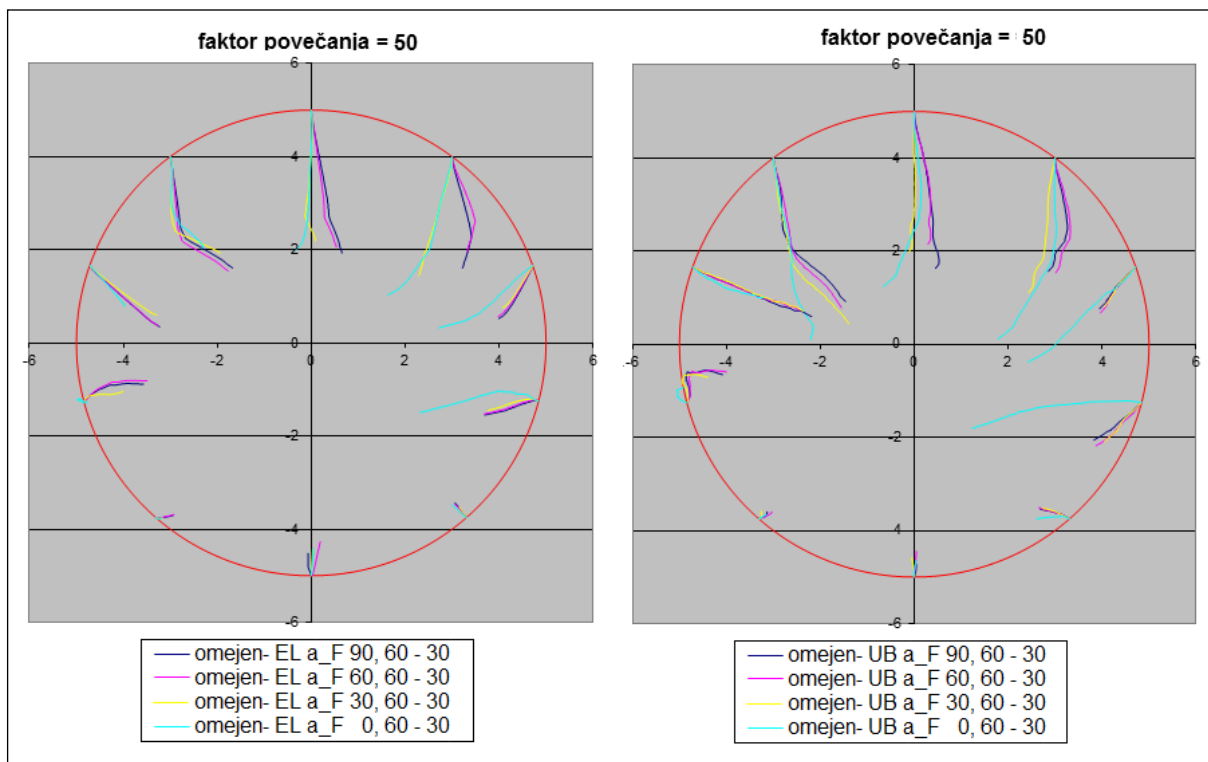
**Slika 5.40:** Primerjava pomikov oboda predora EL ter UB modela, pri razčlenjeni skrilavosti  $\alpha_F$  ( $60^\circ$ ),  $\alpha_1$  ( $60^\circ$ ),  $\alpha_2$  ( $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-30^\circ$  in  $-60^\circ$ ).



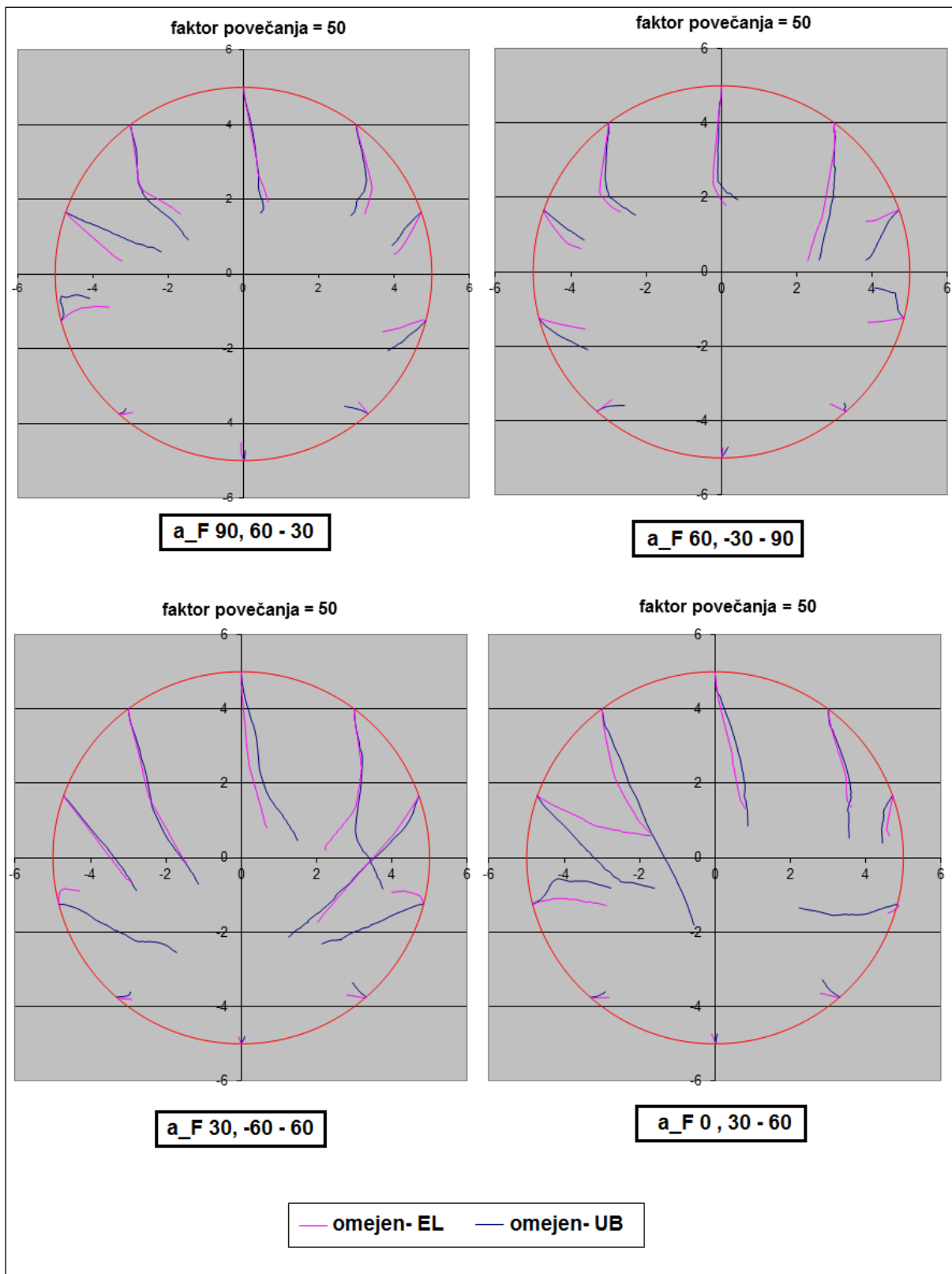
**Slika 5.41:** Primerjava pomikov oboda predora EL ter UB modela, pri razčlenjeni skrilavosti  $\alpha_F$  ( $90^\circ$ ),  $\alpha_1$  ( $30^\circ$ ),  $\alpha_2$  ( $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-30^\circ$  in  $-60^\circ$ ).



**Slika 5.42:** Primerjava pomikov oboda predora EL ter UB modela, pri razčlenjeni skrilavosti  $\alpha_F$  (90°, 60°, 30° in 0°),  $\alpha_1$  (60°),  $\alpha_2$  (-60°).



**Slika 5.43:** Primerjava pomikov oboda predora EL ter UB modela, pri razčlenjeni skrilavosti  $\alpha_F$  (90°, 60°, 30° in 0°),  $\alpha_1$  (30°),  $\alpha_2$  (60°).



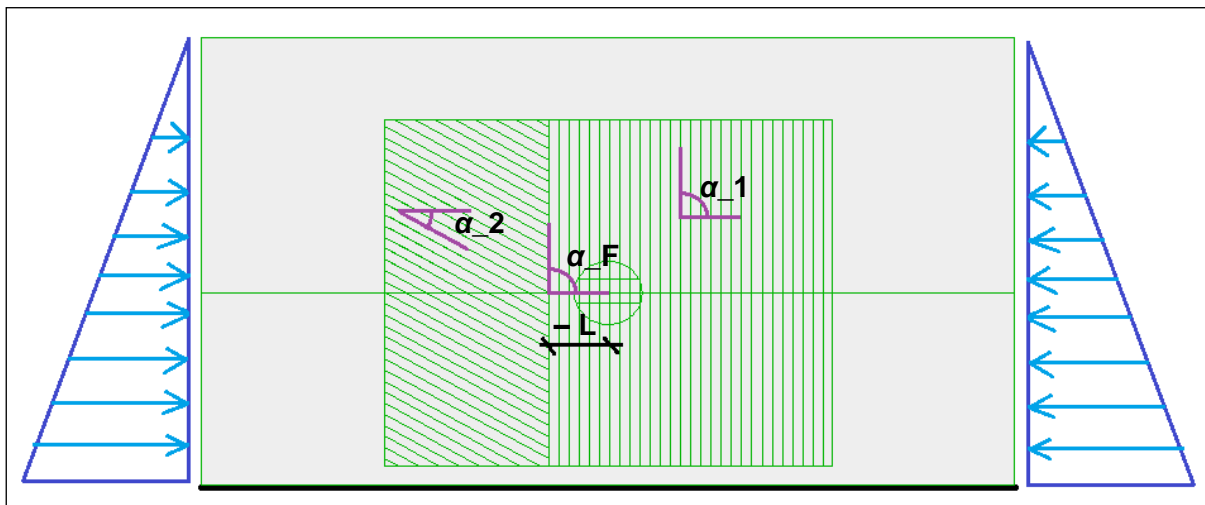
**Slika 5.44:** Primerjava pomikov oboda predora EL in UB modela, za posamezne primere razčlenjene skrilavosti.

Iz rezultatov, predstavljenih na slikah (Slika 5.40: in Slika 5.41:), ter preostalih rezultatov, predstavljenih v PRILOGI B, se opazi, da sprememba nagiba  $\alpha_2$  vpliva na obliko in velikost pomikov oboda predora pri vseh merskih točkah.

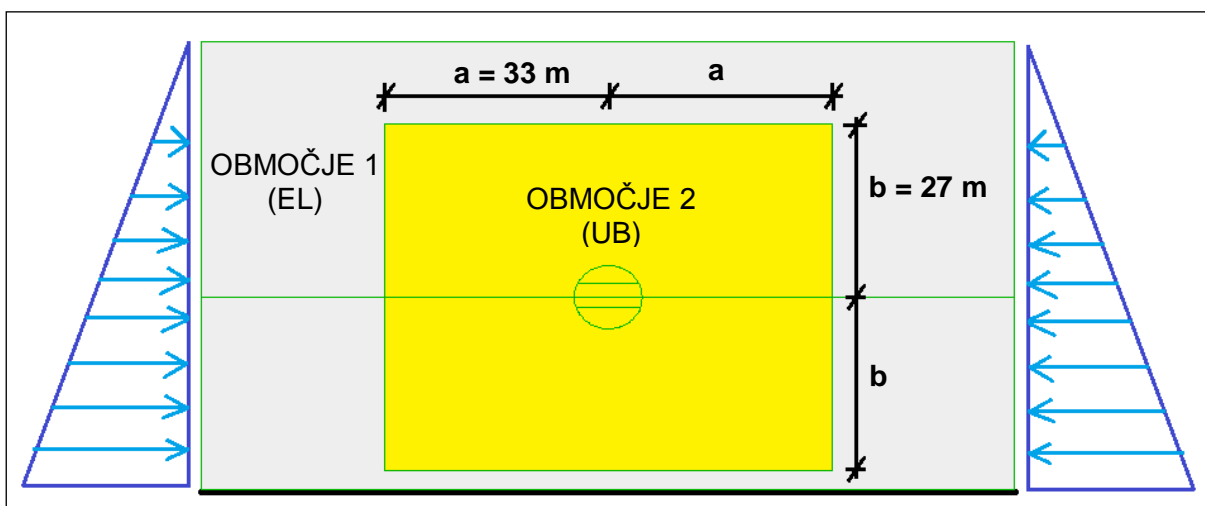
Iz rezultatov na slikah (Slika 5.42: in Slika 5.43:) ter preostalih rezultatov, predstavljenih v PRILOGI C, je razvidno, da so si pomiki oboda predora za posamezno kombinacijo  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$  pri vrednosti nagiba razčlenjenosti  $\alpha_F$   $90^\circ$  in  $60^\circ$  zelo podobni. Nasprotno pa so si pomiki oboda predora pri nagibu razčlenjenosti  $\alpha_F$   $30^\circ$  in  $0^\circ$  različni. Njuna podobnost je dosežena le v nekaterih primerih kombinacije nagiba skrivalosti  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$ . Podobna ugotovitev velja tudi pri primerjavi pomikov nagiba razčlenjenosti  $\alpha_F$   $30^\circ$  in  $60^\circ$  oziroma  $90^\circ$ .

Iz primerjave rezultatov EL in UB modela na sliki (Slika 5.44:) ter preostalih rezultatov, predstavljenih v PRILOGI D, je razvidno, da se rezultati pomikov modelov v nekaterih primerih zelo dobro ujemajo, v nekaterih se zelo razlikujejo, v preostalih pa se opazi le podobnost oblike pomika. V splošnem se izkaže, da so pomiki UB modela vedno večji v primerjavi s pomiki EL modela.

## 5.5 Razčlenjena skrilavost izven osi predora



Slika 5.45: Geometrija petega modula z robnimi pogoji za EL model.



Slika 5.46: Geometrija petega modula z robnimi pogoji za UB model.

Na zgornjih slikah (Slika 5.45: in Slika 5.46:) je predstavljena geometrija modelov za peti modul. Uporabljeni robni pogoji so enaki kot za prvi modul.

V tem modulu so uporabljeni enaki materialni modeli kamnine kot v četrtem modulu (EL in "UB-elast"). Tudi skrilavost je predstavljena na enak način kot v četrtem modulu, le geometrija omejenega območja ter položaj ravnine (črte) razčlenjenosti se razlikujeta. Za razliko od četrtega modula se v tem modulu analizira le nekaj primerov kombinacij nagibov skrilavosti  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$ , naklon ravnine razčlenjenosti  $\alpha_F$  ter odmik ( $L$ ) ravnine od osi predora. Kombinacije opravljenih analiz so predstavljene v preglednici (Preglednica 5.16:) ter na sliki (Slika 5.47:).

V tem modulu je geometrija omejenega območja predstavljena s pravokotnikom dolžine 66 m in višine 54 m, kot prikazuje slika (Slika 5.46:). Črta razčlenjenosti ni omejena s sekanjem središča predora, temveč se lahko v vodoravni smeri prestavi levo ali desno od središča predora za vrednost  $L$ . Če se črta razčlenjenosti prestavi levo od središča predora, je njena vrednost označena z negativnim predznakom, kot prikazuje slika (Slika 5.45:).

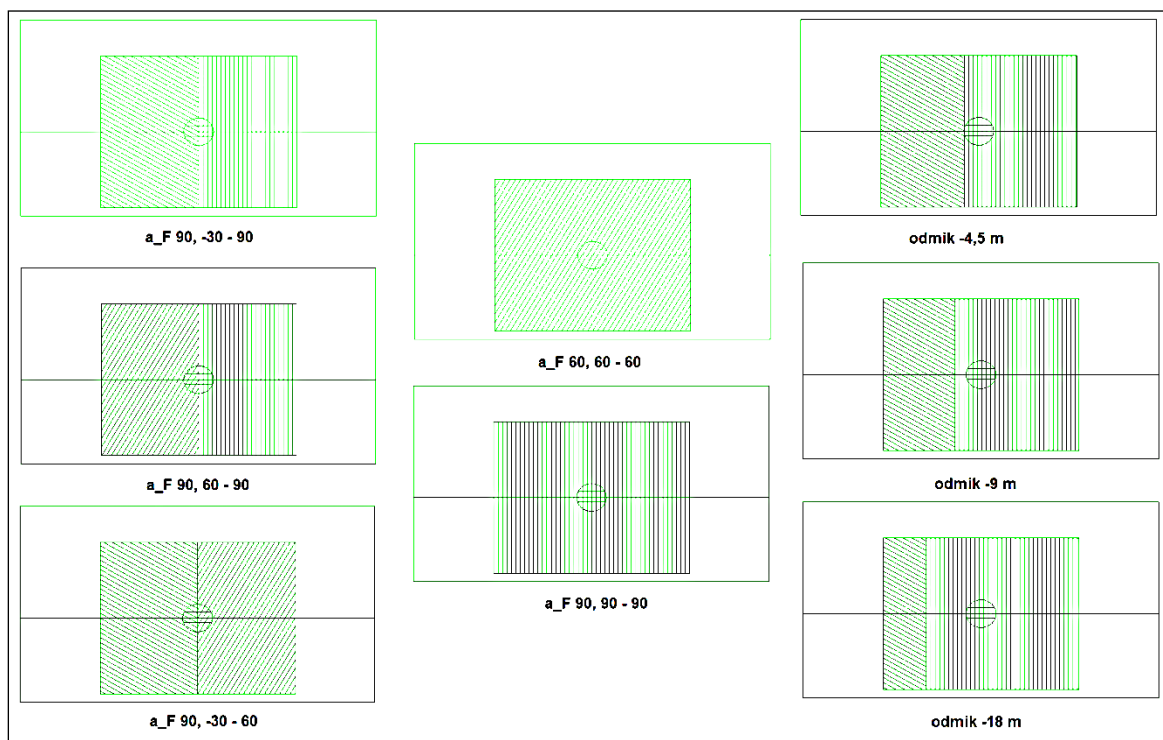
Zaradi povečanja omejenega območja skrilavosti v primerjavi s četrtim modulom se je za UB model povečalo tudi število con, ki diskretizirajo telo. Tako je celoten model vseboval približno 110.000 con, kar je 30.000 con več kot v primeru četrtega modula. Nasprotno se število con pri EL modelu, kljub povečanju omejenega območja, ni bistveno spremenilo. Število con za EL model znaša približno 80.000. Čas računanja za posamezen model je podan v preglednici (Preglednica 5.16:).

**Preglednica 5.16:** Čas računanja (ur) posameznega modela petega modula.

pomik od osi predora (L)	pol- EL a_F 90,		pol- UB a_F 90,		pol- EL a_F 90,	
	-30 - 90	60 - 90	-30 - 90	60 - 90	90 - 90	60 - 60
0	2,5	3,25	10,5	11,75	0,75	3
-4,5	1,5	2,75	11	22,5		
-9	1	1,25	3,5	20,75		
-18	/	1	2,25	4		

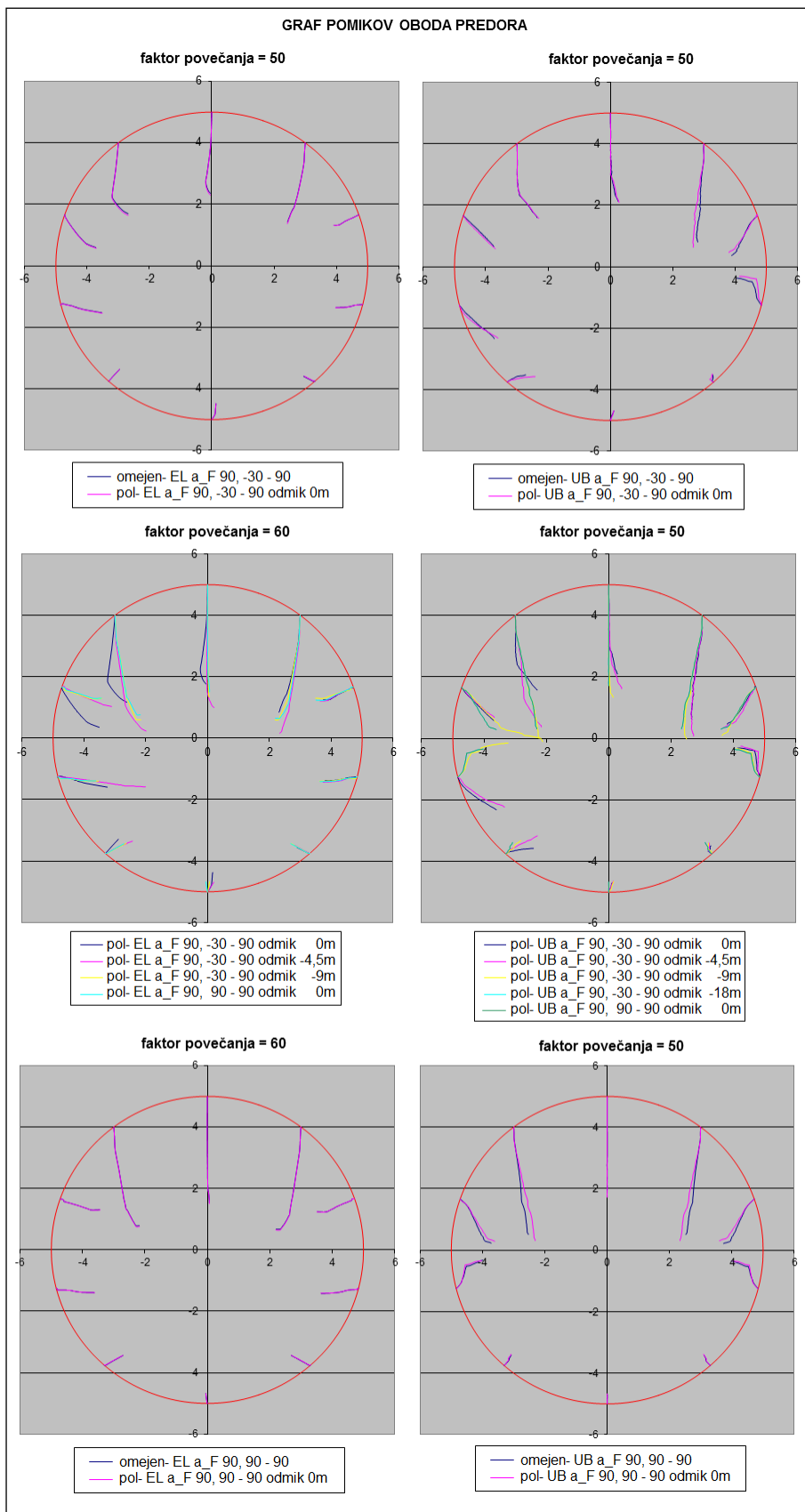
pomik od osi predora (L)	pol- EL a_F 90,		pol- UB a_F 90,		pol- UB a_F 90,	
	-30 - 60	-30 - 60	-30 - 60	-30 - 60	90 - 90	60 - 60
0	3,5	11	2,75	17,75		
-5,2	2,5	9				
-8,66	2,25	8,25				
-19,05	2,5	11,25				



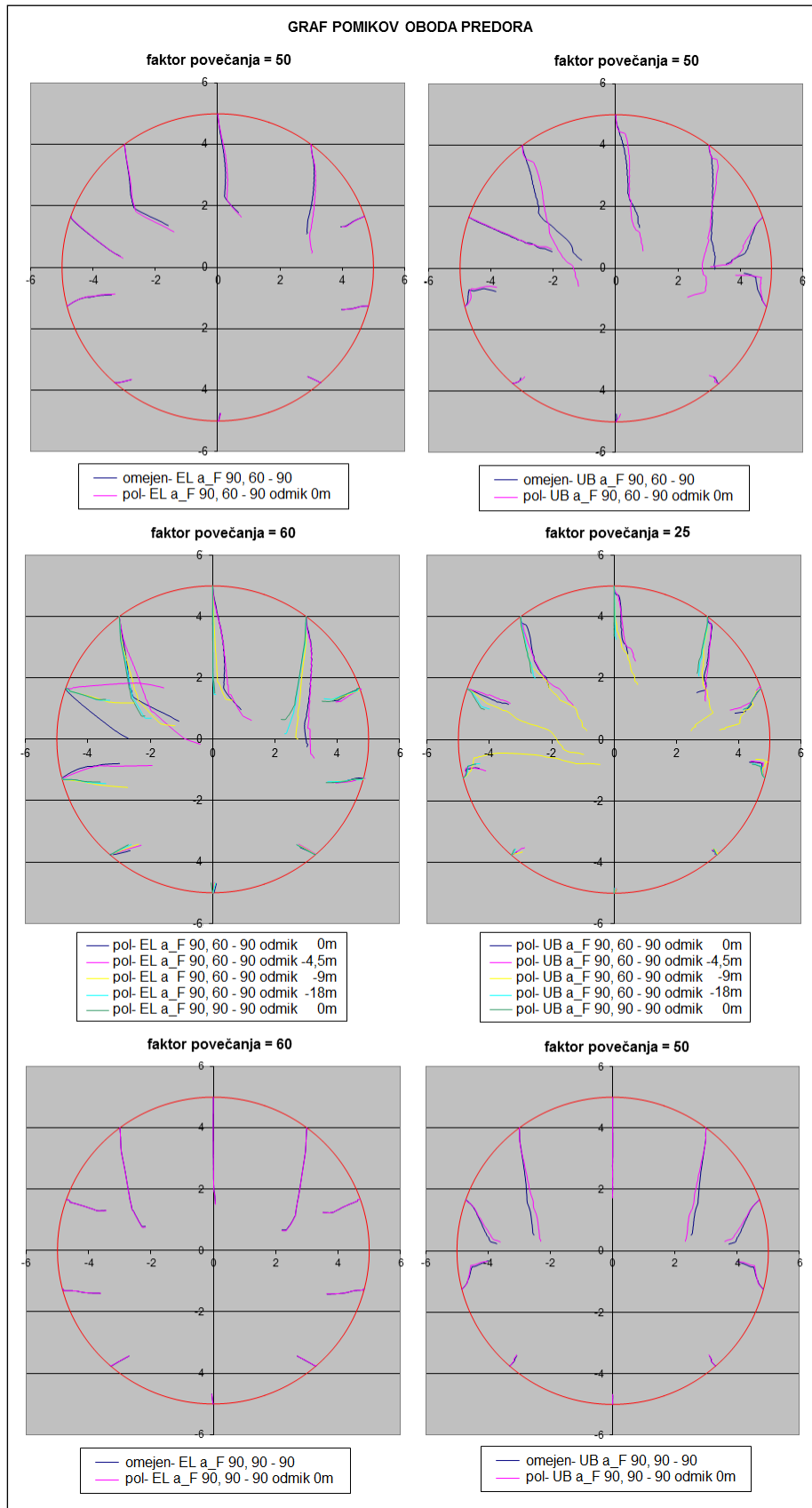
**Slika 5.47:** Primer geometrije opravljenih analiz petega modula s ponazorjenimi odmiki od osi predora.

V nadaljevanju sledijo slike primerjav rezultatov posameznega modela iz petega modula ter primerjava rezultatov petega in četrtega modula za primere, ko ravnina razčlenjenosti seka središče predora.

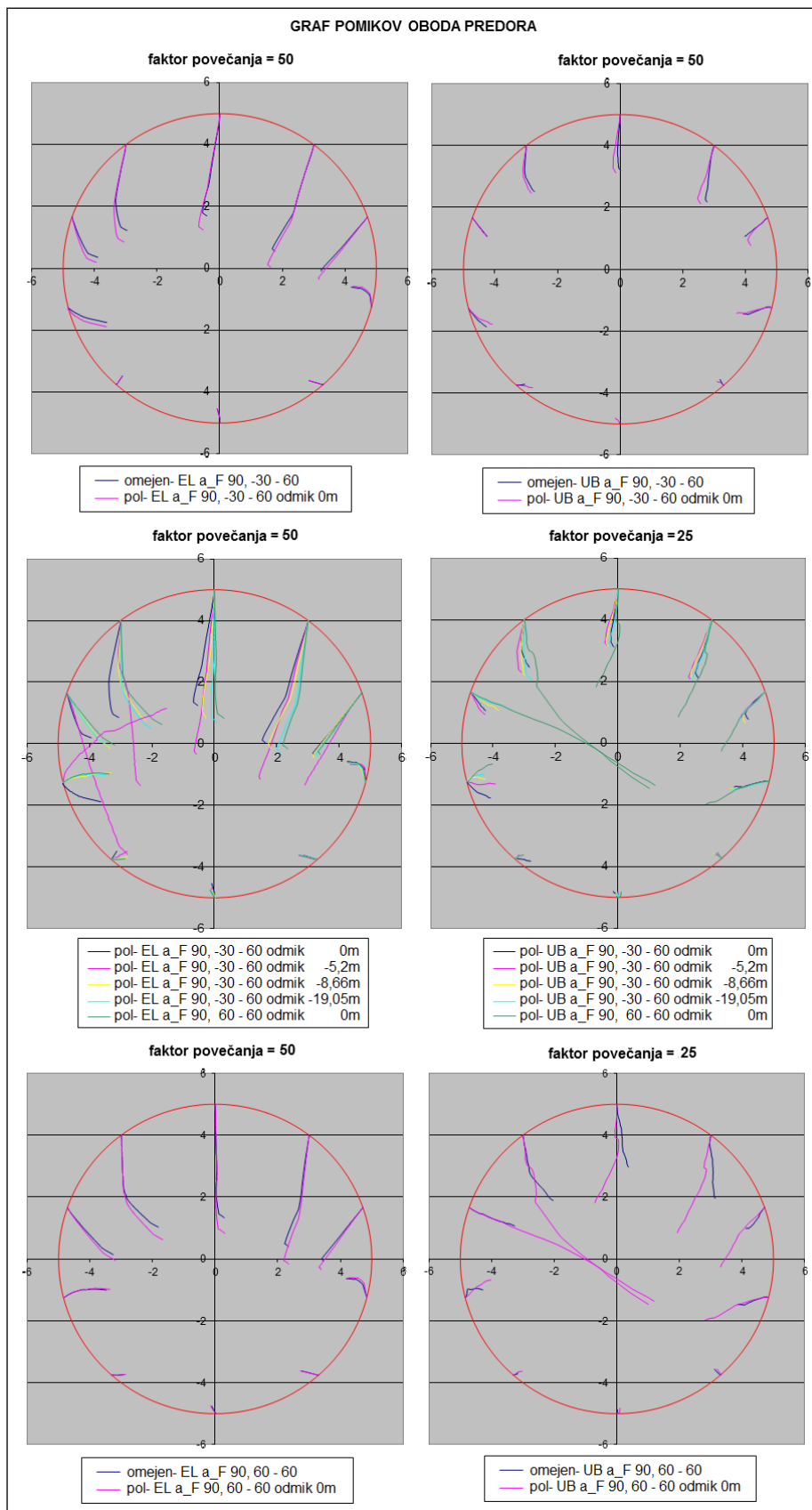




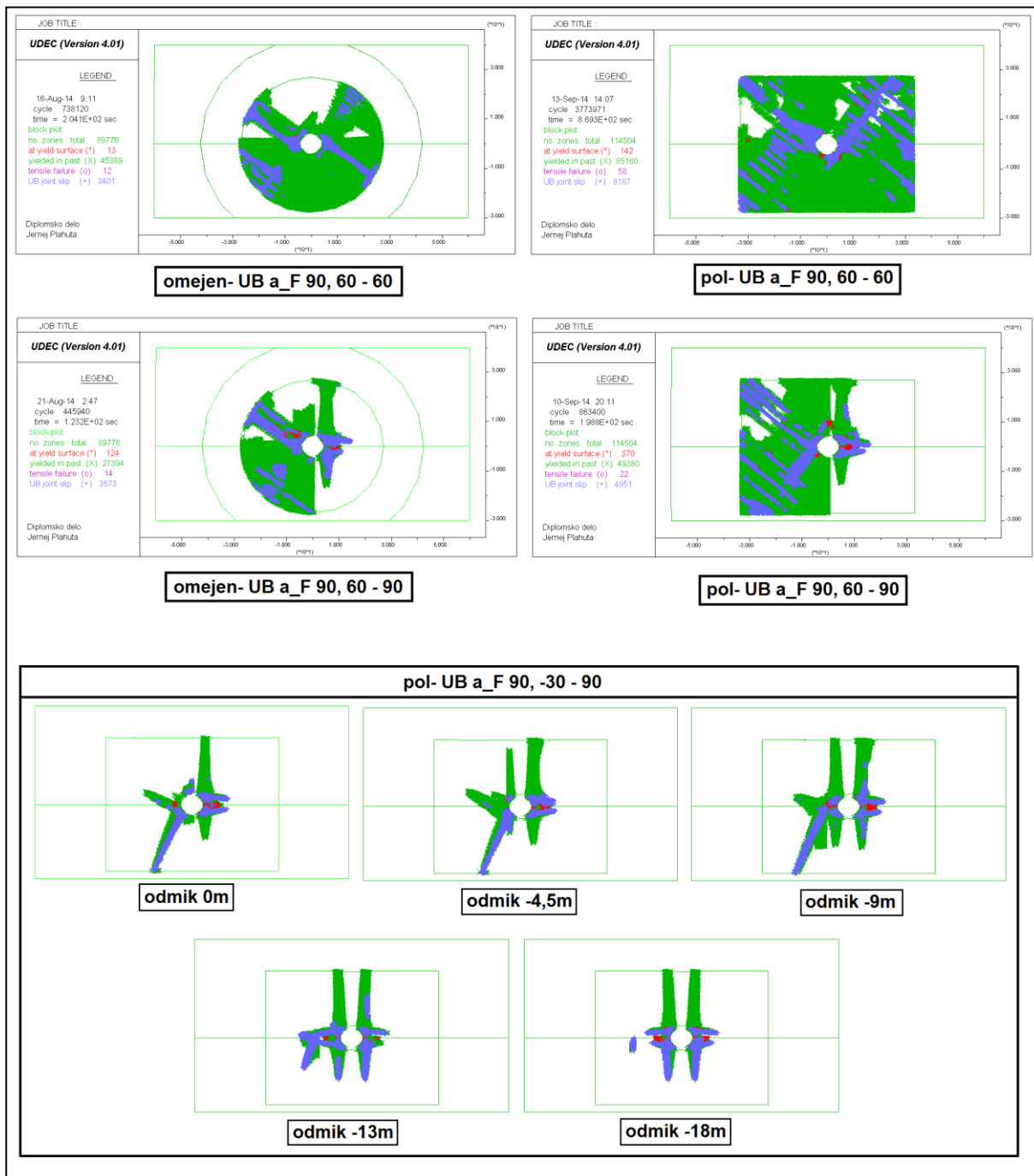
**Slika 5.48:** Primerjava pomikov oboda predora petega in četrtega modula za razčlenjeno skrilavost ( $\alpha_F 90^\circ, -30^\circ - 90^\circ$ ).



**Slika 5.49:** Primerjava pomikov oboda predora petega in četrtega modula za razčlenjeno skrilavost ( $\gg \alpha_F 90^\circ, 60^\circ - 90^\circ \ll$ ).



**Slika 5.50:** Primerjava pomikov oboda predora petega in četrtega modula za razčlenjeno skrilavost ( $\alpha_{F 90^\circ, -30^\circ - 60^\circ}$ ).



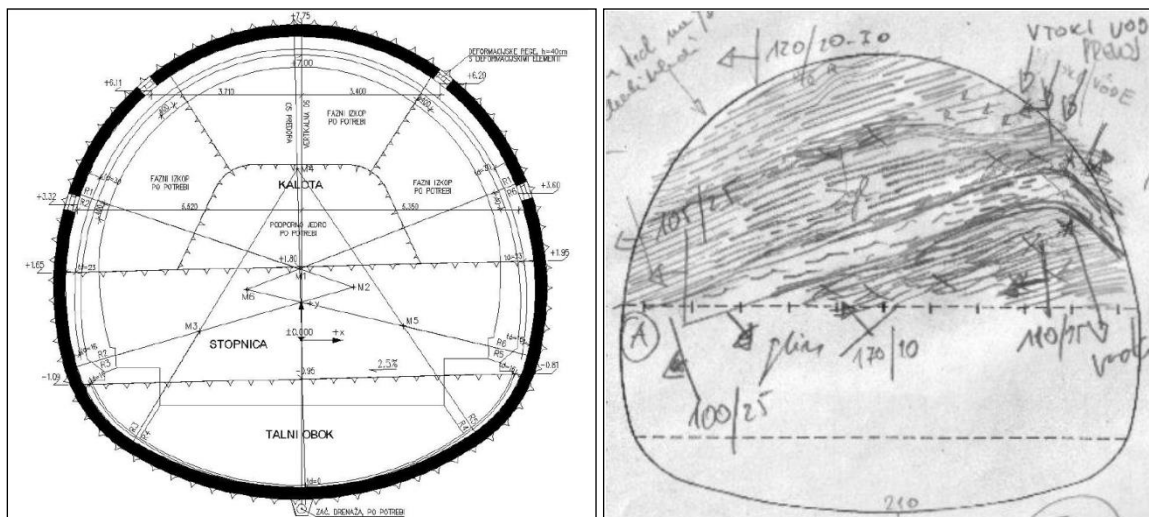
**Slika 5.51:** Primerjava območja plastifikacije UB modela četrtega in petega modula.

Iz primerjave rezultatov četrtega in petega modula (Slika 5.48:, Slika 5.49: in Slika 5.50:) za EL model je razvidno, da sprememba oblike omejenega območja ter njena velikost nista veliko vplivali na pomike oboda predora. V primeru UB modela pa sta ti spremembi vplivali v veliko večji meri. Najverjetnejši razlog različnih pomikov je posledica deleža plastifikacije okoliške kamnine. Razliko plastifikacije okoliške kamnine za primer "omejen-" in "pol-" pri "UB a\_F 90, 60 – 60" ter "UB a\_F 90,60 – 90" se lahko opazi na sliki (Slika 5.51:).

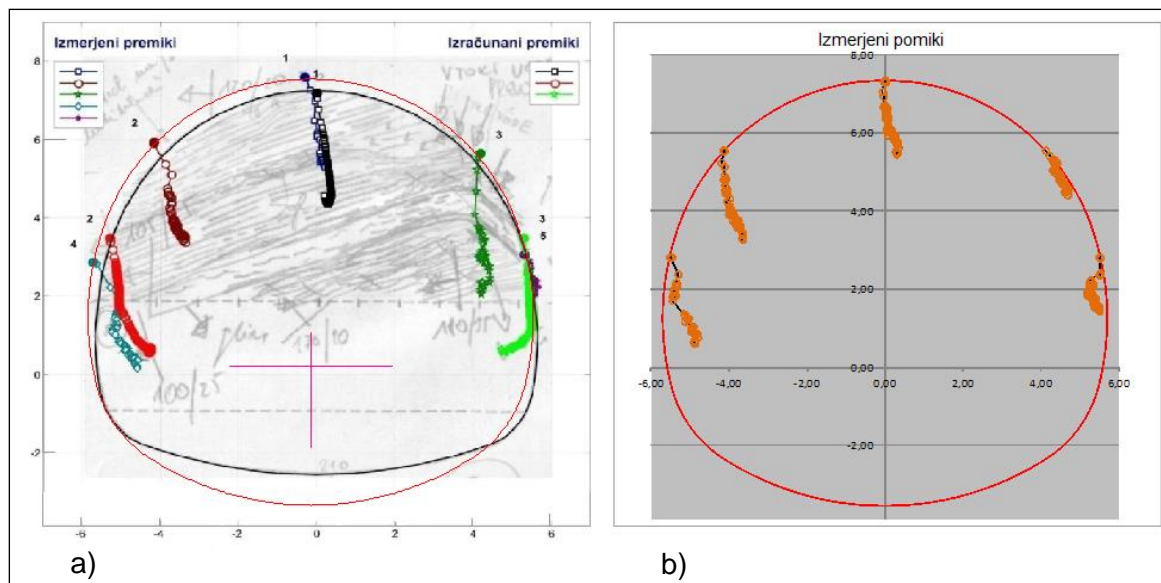
S primerjavo rezultatov samo petega modela (Slika 5.48:, Slika 5.49: in Slika 5.50:) bi se lahko sklepalo, da ima ravnina razčlenjenosti z nagibom  $90^\circ$ , ki se nahaja izven območja na razdalji dveh premerov predora, merjenih od središča le-tega, zanemarljiv vpliv na pomike oboda predora. Rezultati analiz "pol- UB a\_F 90, 90 - 90 odmik 0 m" in "pol- UB a\_F 90, -30 - 90 odmik -18 m" izračunata skoraj identične pomike. Zanimivo pa je, da se pomiki levega boka predora za primer "pol- UB a\_F 90, -30 - 90 odmik -9 m" bistveno razlikujejo od pomikov izračunanih za analize "pol- UB a\_F 90, -30 - 90 odmik -4,5 m" in "pol- UB a\_F 90, -30 - 90 odmik -18 m". Delež plastifikacije okoliške kamnine teh analiz ter nekaterih ostalih so predstavljeni na sliki (Slika 5.51:).

## 6 POVRATNA ANALIZA

Za povratno analizo gradnje predora v anizotropnih tleh je bila izbran odsek merskega prereza MS6 na stacijonaži km 1.1+23,3 desne cevi predora Šentvid. Podobno kot pri parametrični analizi se tudi pri povratni analizi opazuje pomike oboda predorske cevi. Geometrija predorske cevi ter obravnavan karakteristični geološki profil (Slika 6.1:) sta povzeta po diplomskem delu Markovič (2009). Za obravnavani profil dvopasovnega predora Šentvid je značilna subhorizontalna skrilavost s približno  $20^\circ$  vpadnim kotom v levo stran predora, če je izkop obravnavan s severa proti jugu.



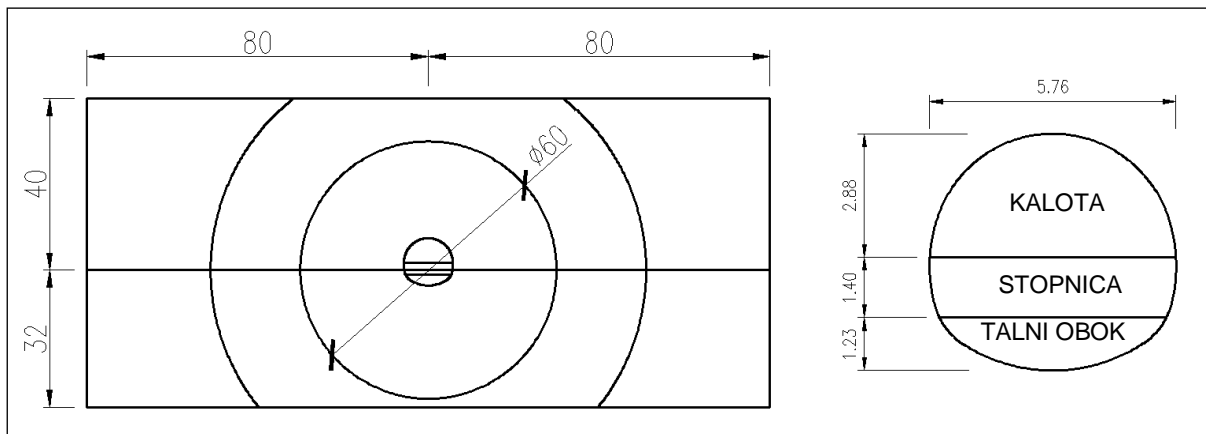
**Slika 6.1:** Geometrijske karakteristike profila in geološka sestava profila dvopasovnega predora Šentvid (Markovič, 2009: str 28 in 32).



**Slika 6.2:** Pomiki predora sosednjih profilov (geometrija : pomiki = 1 : 25):  
a) Izmerjeni in izračunani pomiki (prirejeno po Markovič, 2009: str 62)  
b) Izmerjeni pomiki (prirejeno po Klopčič, 2014)

Na zgornji sliki (Slika 6.2:) so predstavljene izmerjene pomike oboda predora za sosednja merska profila s podobno geološko sestavo.

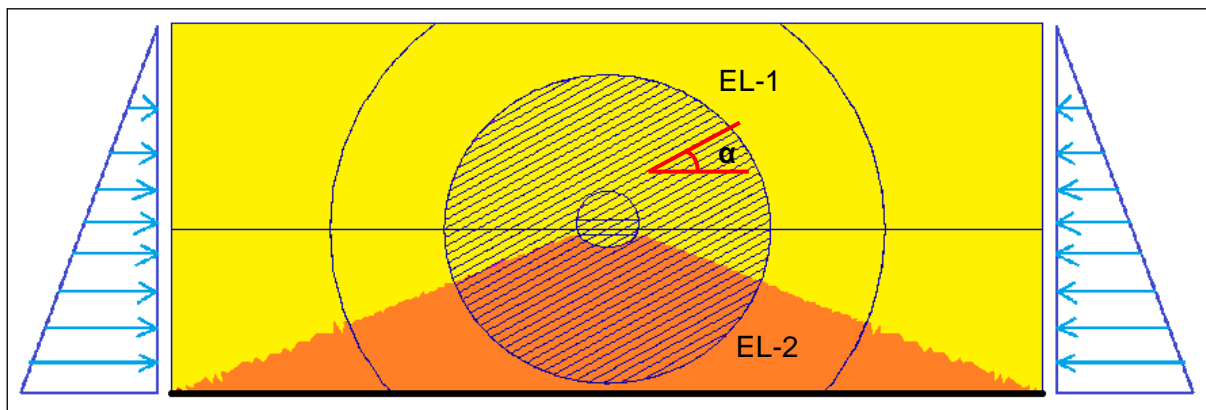
Glede na izkušnje s parametričnimi analizami se je za izvedbo povratne analize uporabilo le vzorce geometrije tretjega modula. Razlog take izbire je posledica majhnega naklona skrnavosti. Izbrani materialni modeli analiz so: EL, MOHR in UB. Njihova predstavitev sledi v nadaljevanju.



**Slika 6.3:** Geometrija modela povratnih analiz (veličine so v m).

Na zgornji sliki (Slika 6.3:) je predstavljena skupna geometrija vseh modelov povratne analize. Potek izkopa posameznega dela predora je enaka opisanemu postopku za parametrično analizo.

### 6.1 Elastičen (EL) model povratne analize



**Slika 6.4:** Geometrija za elastičen materialni modela z robnimi pogoji.

Na zgornji sliki (Slika 6.4:) je predstavljena geometrija elastičnega modela povratne analize z uporabljenimi robnimi pogoji. Ob straneh modela so uporabljeni napetostni robni pogoji, na spodnjem robu pa robni pogoji hitrosti, enako kot v primeru prvega modula parametrične analize.

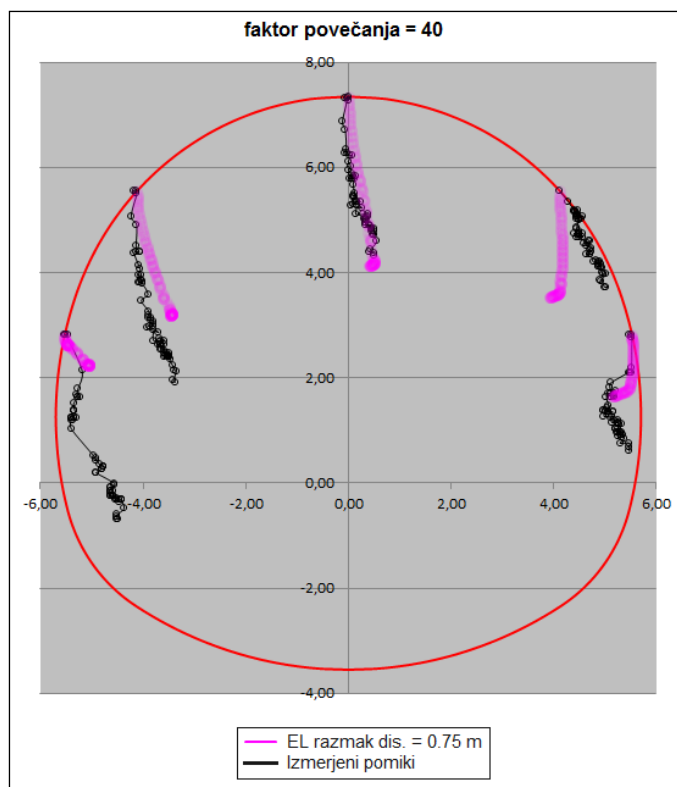
Model je razdeljen na materialni območji EL-1 in EL-2. Materialno območje EL-2 ima parametre togosti (kompresijski in strižni modul) trikrat večje od materialnega območja EL-1. S tako zasnovanim modelom se dvižki tal predora, ob izkopu materiala, znatno zmanjšajo in s tem je dosežen bolj realen odziv kamnine. Medsebojni razmik diskontinuitet znaša 0,75 m, naklon pa  $20^\circ$ . V spodnjih preglednicah (Preglednica 6.1: in Preglednica 6.2:) so navedene karakteristične lastnosti materialnega območja EL-1, EL-2 in diskontinuitet.

**Preglednica 6.1:** Materialne karakteristike posameznih območij elastičnega modela povratnih analiz Šentvid.

Materialne karakteristike	Material	
	EL-1	EL-1
Kompresijski modul (K) [MPa]	200	600
Strižni modul (G) [MPa]	120	360
Poissonov količnik	0,25	

**Preglednica 6.2:** Materialne karakteristike stika diskontinuitet.

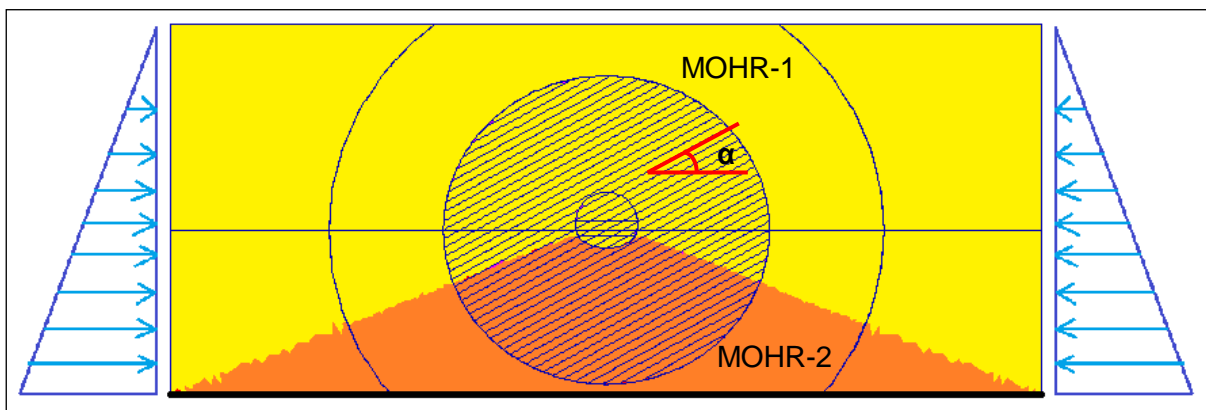
Materialne karakteristike	Smer stika	
	JE vzporedna s skrilavostjo	NI vzporedna s skrilavostjo
Normalna togost (jkn) [MPa/m]	600	600
Strižna togost (jks) [MPa/m]	360	360
Kohezija (jcohesion) [kPa]	25	50
Strižni kot (jfriction) [°]	15	35
Natezna trdnost (jtension) [MPa]	0	0
Kot razmikanja (jdilatation) [°]	0	0

**Slika 6.5:** Pomiki oboda predora za elastičen model povratne analize Šentvid.

Izračunani pomiki elastičnega modela povratne analize se v zgornjem delu predora dobro približajo izmerjenim, medtem ko je v spodnjem delu odstopanje precejšnje. Opazi se lahko pomik v smeri pravokotnice na smer skrilavosti.



## 6.2 Mohr–Coulombov (MOHR) model povratne analize



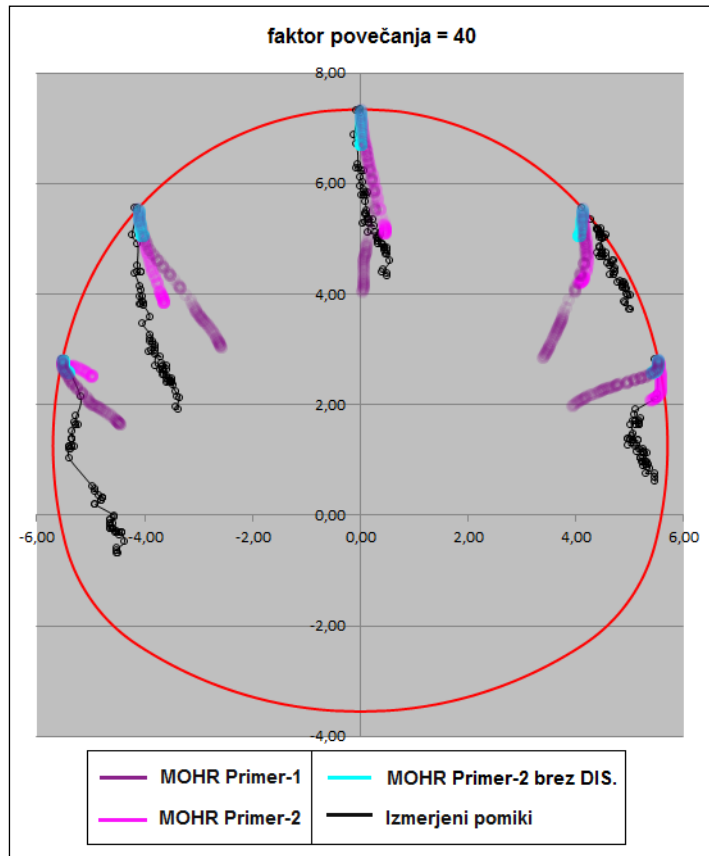
**Slika 6.6:** Geometrija za MOHR materialni modela z robnimi pogoji.

Na zgornji sliki (Slika 6.6:) je predstavljena geometrija MOHR modela povratne analize. Robni pogoji ter razporeditev materialnih območij (MOHR-1 in MOHR-2) je enaka kot pri elastičnem modelu.

V spodnji preglednici (Preglednica 6.3:) so navedene karakteristične lastnosti materialnega območja MOHR-1 in MOHR-2. Naklon, medsebojni razmik ter materialne karakteristike stikov diskontinuitet so enake kot v primeru elastičnega modela.

**Preglednica 6.3:** Materialne karakteristike posameznih območij elastičnega modela povratnih analiz Šentvid.

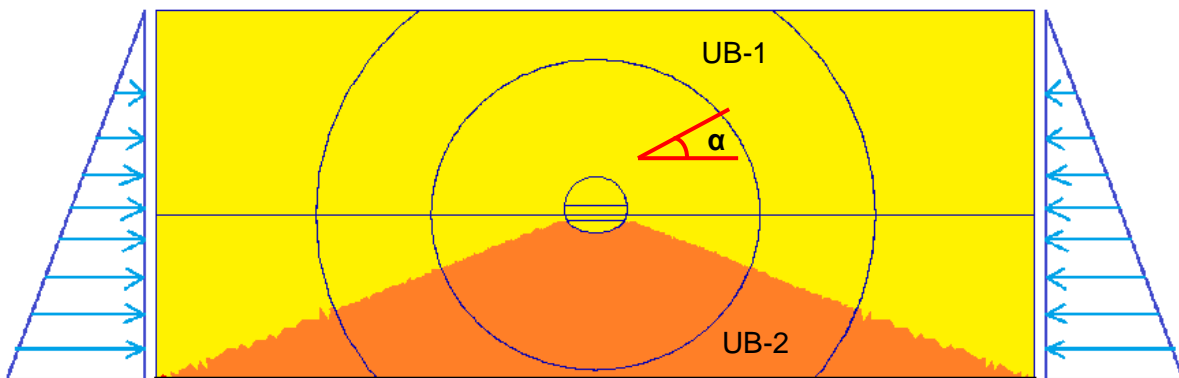
Materialne karakteristike	Materialni modeli			
	Primer-1		Primer-2	
	MOHR-1	MOHR-2	MOHR-1	MOHR-2
Kompresijski modul (K) [MPa]	400	1200	400	1200
Strižni modul (G) [MPa]	240	720	240	720
Kohezija (c) [kPa]	150	150	2000	2000
Strižni kot ( $\varphi$ ) [°]	30	30	36	36
Natezna trdnost ( $\sigma^t$ ) [MPa]	0,10	0,10	0	0
Poissonov količnik	0,25			



**Slika 6.7:** Pomiki oboda predora za Mohr-Coulombov model povratne analize Šentvid.

Izračunani pomiki MOHR modela povratne analize se po velikosti slabše ujemajo z izmerjenimi kot v primeru EL modela. Razlog manjših velikosti pomikov MOHR modela, je posledica večjega kompresijskega in strižnega modula v primerjavi z EL modelom. Tudi pomiki MOHR modela stremijo k pomiku pravokotno na smer skrilavosti.

### 6.3 Ubiquitous (UB) model povratne analize



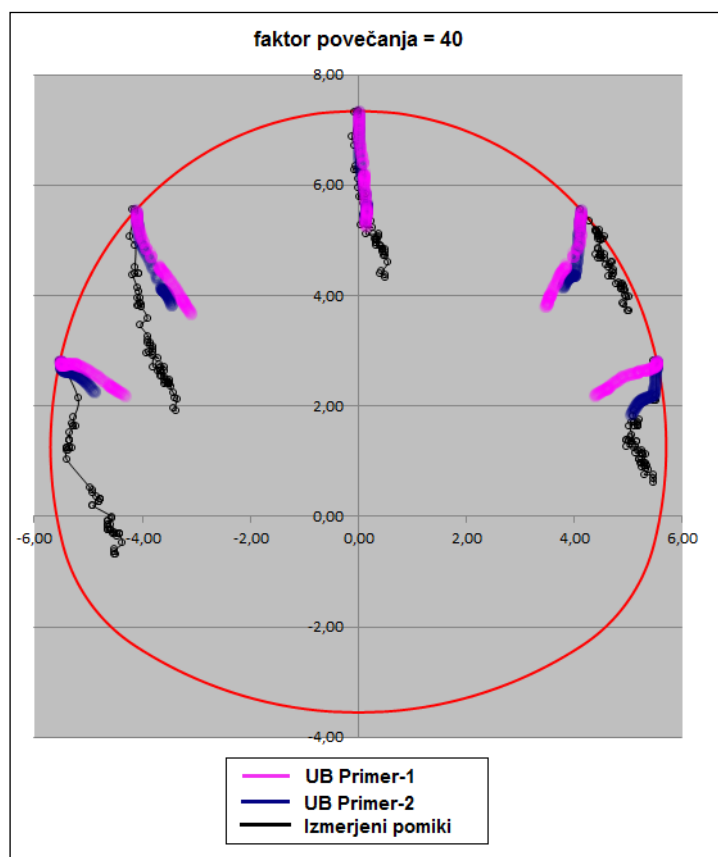
**Slika 6.8:** Geometrija za UB materialni model z robnimi pogoji.

Na zgornji sliki (Slika 6.8:) je predstavljena geometrija UB modela povratne analize. Robni pogoji ter razporeditev materialnih območij (UB-1 in UB-2) je enaka kot pri elastičnem modelu.

V spodnji preglednici (Preglednica 6.4:) so navedene karakteristične lastnosti materialnega območja UB-1 in UB-2. Materialne karakteristike stikov diskontinuitet so enake kot v primeru elastičnega modela.

**Preglednica 6.4:** Materialne karakteristike posameznih območij UB modela povratnih analiz Šentvid.

Materialne karakteristike	Materialni modeli			
	Primer-1		Primer-2	
	UB-1	UB-2	UB-1	UB-2
Kompresijski modul (K) [MPa]	400	1200	400	1200
Strižni modul (G) [MPa]	240	720	240	720
Kohezija (c) [kPa]	100	100	2000	2000
Strižni kot ( $\phi$ ) [°]	30	30	30	30
Natezna trdnost ( $\sigma^t$ ) [MPa]	0,10	0,10	0,10	0,10
Kot razmikanja ( $\psi$ ) [°]	0	0	0	0
Kohezija šibke ravnine (c2) [kPa]	70	70	70	70
Strižni kot šibke ravnine ( $\phi_2$ ) [°]	20	20	20	20
Natezna trdnost šibke ravnine ( $\sigma^t_2$ ) [MPa]	0,10	0,10	0	0
Kot razmikanja šibke ravnine ( $\psi_2$ ) [°]	0	0	0	0
Poissonov količnik	0,25			



**Slika 6.9:** Pomiki oboda predora za UB model povratne analize Šentvid.

Izračunani pomiki UB modela povratne analize so po velikosti primerljivi z izračunanimi pomiki MOHR modela. Opazi se, da smer pomikov UB modela ni izrazito usmerjana pravokotno na skrilavost.

## 7 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi je s pomočjo programskega orodja UDEC modelirana izgradnja (izkop) predora v anizotropnih tleh. Modeliranje sledi principu NATM s postopnim izkopom čela (kalota, stopnica in talni obok), vendar pa brez upoštevanja postopnega sidranja ter brizganega betona po obodu predora.

Prvi del naloge obravnava parametrično analizo za ugotavljanje vpliva geometrije ter materialnega modela na obliko in velikost pomikov oboda predora. Geometrija modela je razdeljena na pet modulov, znotraj katerega so uporabljeni posamezni materialni modeli (elastičen, mohr-coulombov in ubiquitous). Drugi del naloge pa obravnava povratno analizo pomikov dvopasovne predorske cevi predora Šentvid. Pri povratni analizi je uporabljen le en geometrijski model in trije materialni modeli.

V prvem modulu so izračunani pomiki za elastičen in mohr-coulombov model brez posredno ali neposredno modelirane skrivilavosti. Kljub odsotnosti skrivilavosti se na sliki pomikov lahko opazi anizotropne pomike, ki pa so posledica postopnega izkopa.

V drugem modulu so izračunani pomiki za modele s skrivilavostjo modelirano po celi geometriji modela. Rezultati izkazujejo izrazit vpliv skrivilavosti na pomike. Slabost modela je v velikem številu con, ki so potrebne za diskretizacijo tako modelirane geometrije.

V tretjem modulu so uporabljeni enaki materialni modeli kot v drugem modulu, le območje skrivilavosti je reducirano na krožno območje okoli predora. Rezultati analiz kažejo, da taka geometrijska poenostavitev skrivilavosti bistveno ne vpliva na rezultate pomikov, le če je naklon skrivilavosti manjši od  $30^\circ$ .

Četrty modul izhaja iz geometrijskega modela tretjega modula s to razliko, da skrivilavost ne poteka le v eni smeri temveč je razčlenjena z ravnino (črto), ki poteka skozi središče predora. Zaradi številnih možnih kombinacij so bili uporabljeni le elastičen in ubiquitous materialni model kamnine. Iz rezultatov sledi, da so za posamezne kombinacije nagiba skrivilavosti ( $\alpha_1$  in  $\alpha_2$ ) pomiki oboda predora pri nagibu razčlenjenosti ( $\alpha_F$ )  $60^\circ$  in  $90^\circ$  zelo podobni.

V petem modulu, podobno kot v četrtem modulu, je obravnavana razčlenjena skrivilavost. Glavni razliki petega in četrtega modula sta, da v petem modulu ravnina razčlenjenosti ne poteka skozi središče predora, temveč se lahko nahaja na poljubni oddaljenosti levo ali desno od središča predora ter da območje skrivilavosti ni krožne oblike, ampak je poljuben štirikotnik. Namen analize je razbrati vplivno območje ravnine razčlenjenosti na pomike oboda predora.

Model povratne analize izhaja iz tretjega modula parametrične analize, saj je na odseku obravnavanega profila predorske cevi naklon skrivilavosti približno  $20^\circ$ . Izračunani pomiki ne odgovarjajo izmerjenim, lahko pa se opazi podobnost oblike pomika. Iz izmerjenih kot izračunanih pomikov lahko opazimo, da pomiki v večji meri silijo v smer pravokotno na skrivilavost.

Pri povratni analizi se izračunani pomiki ne ujemajo z izmerjenimi, kar je pričakovano, saj okoliška hribina skriva mnoge nehomogenosti, ki jih ne upoštevamo v modelu. Ravno tako ni upoštevana vgraditev brizganega betona in sider, kar še dodatno popači rezultate.

Na podlagi opravljenih analiz in rezultatov, se lahko zaključi, da metoda ločenih elementov doseže zadovoljive rezultate, ki nakazujejo dejansko obnašanje pomikov. Z upoštevanjem ostalih podpornih ukrepov v modelu, ki so bili v tej nalogi zanemarjeni, bi bili rezultati lahko še boljši.

»Ta stran je namenoma prazna«

## VIRI

### Uporabljeni viri

Beaver, P. 1972. A history of tunnels. London, P. Davies: p. 21–30, 30–36.

Bobet, A., Fakhimi, A., Johson, S., Marris, J., Tonon, F., Ronald Yeung, R. 2009. Numerical Models in Discontinuous Media: Review of Advances for Rock Mechanics Applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135, 11: 1547–1561.

[doi:10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000133](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000133)

Bobet, A. 2010. Numerical Methods in Geomechanics. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 35, 1B: 27–48.

Chapman, D., Metje, N., Stärk, A., 2010. *Introduction to Tunnel Construction*. Abingdon, New York, Spon Press: 183, 185.

<http://books.google.si/books?hl=sl&id=3NnqOLD1RaIC&q=schubert+1999#v=snippet&q=schubert%201999&f=false> (Pridobljeno 13. 7. 2014.)

Despotović, G. 2005. Numerične analize predora Trojane v območju nizkega nadkritja pod poseljenim območjem s programom PHASE 2. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G. Despotović): p. 4–15, 16–32.

Gabrijel, P. 2002. Numerična analiza kamnin s programom UDEC. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Gabrijel): str. 4–29, 44–45.

Karakuş, M., Fowell, R. J., 2004. An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM). V: ROOCKMEC'2004-VIth Regional Rock Mechanics Symposium, Sivas, Türkiye, 21–22 October 2004: 2 str.

Khan, M. S. 2010. Investigation of Discontinuous Deformation Analysis for Application in Jointed Rock Masses. Doctoral Dissertation. Toronto, University of Toronto, Civil Engineering Department (samozaložba M. S. Khan): 21–84, 85–123.

Klopčič, J. 2009. Analyses and prediction of displacements for tunnels in foliated rock mass of Perm-Carboniferous age. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Klopčič): p. 2, 4, 51.

Klopčič, J. 2014. Podatki – Šentvid. Message to: Plahuta, J. 27.10.2014. Osebna komunikacija.

Nikić, D. 2011. Tehnologije izkopov predorov. Diplomsko delo. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba D. Nikić): str. 71–95.

Perko, D. 2001. Analiza površja Slovenije s stometrskim digitalnim modelom reliefa. Ljubljana. Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU: p. 158–204.

Povše, E. 2012. Geomehanska analiza tlačnega cevovoda črpalne hidroelektrarne. Diplomsko delo. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo (samozaložba E. Povše): str. 14.

Scheldt, T. 2002. Comparison of Continuous and Discontinuous Modelling for Computational Rock Mechanics. Doctoral Dissertation. Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, Department of Geology and Mineral Resources Engineering (samozaložba T. Scheldt): 5–17, 49–70, 71–80, 101–113.

Schubert, W., Moritz, B., Pöttler R. 1999. Highly Deformable Shotcrete Lining - Design and Experience. V: Celestino, T. B. (ur.), Parker, H. W. (ur.). Shotcrete for Underground Support : proceeding of the Eight International Conference in Campos do Jordão, Brazil, 11–15 April, 1999. Reston, American Society of Civil Engineering: p. 330–346.

Šlibar, M. 2005. Analiza merjenih pomikov v predoru Golovec. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Šlibar): p. 7-22

UDEC. 2006. UDEC 4.0 manual. Theory and background. Minesota, Itasca Consulting Group, Inc: p. 4–5, 16–22, 29–38.

### Ostali viri

Elmo, D. 2006. Evaluation of a hybrid FEM/DEM approach for determination of rock mass strength using a combination of discontinuity mapping and fracture mechanics modelling, with particular emphasis on modelling of jointed pillars. Doctoral Dissertation. Exter, University of Exter, School of Geography, Archaeology and Earth Resources (samozaložba D. Elmo): 25–55, 56–84.

### Uporabljeni internetni viri

DSI. 2014. IBI-Self-drilling Anchor.  
<http://www.docstoc.com/docs/87011380/IBI---Self-drilling-Anchor> (Pridobljeno 14. 6. 2014.)

DSI. 2014. LSC Elements.  
[http://www.dywidag-systems.com/uploads/media/DSI\\_ALWAG-Systems\\_LSC-Elements\\_EN\\_01.pdf](http://www.dywidag-systems.com/uploads/media/DSI_ALWAG-Systems_LSC-Elements_EN_01.pdf) (Pridobljeno 14. 6. 2014.)

Eberhardt, E. 2014. EOSC 547: Tunnelling and Underground design. Vancouver, University of British Columbia, Faculty of Science, Department of Earth, Ocean and Atmospheric Science. 2014.

<http://www.eos.ubc.ca/courses/eosc547/lecture-material/Topic6-WeakRockTunnelling.pdf>  
(Pridobljeno 5. 2. 2014.)

Inženirskogeološke metode pri projektiranju in izvedbi predorov in drugih podzemnih prostorov. 2014.

<http://www.geo.ntf.uni-lj.si/kfifer/AG/SKRIPTA/B4.0-PodzemniProstori.pdf>  
(Pridobljeno 17. 2. 2014.)

Konjar, G. 2014. Geotehnična sidra. Seminarska naloga.  
[www.student-info.net/sis.../1233995233\\_99\\_geotehnicna\\_sidra.pdf](http://www.student-info.net/sis.../1233995233_99_geotehnicna_sidra.pdf) (Pridobljeno 24. 2. 2014.)

Polimerinject Ltd. 2014. Materials – geotechnical solutions IBO.  
[http://www.polimerinjekt.com/eng\\_materials-iboinfo.html](http://www.polimerinjekt.com/eng_materials-iboinfo.html) (Pridobljeno 8. 6. 2014.)

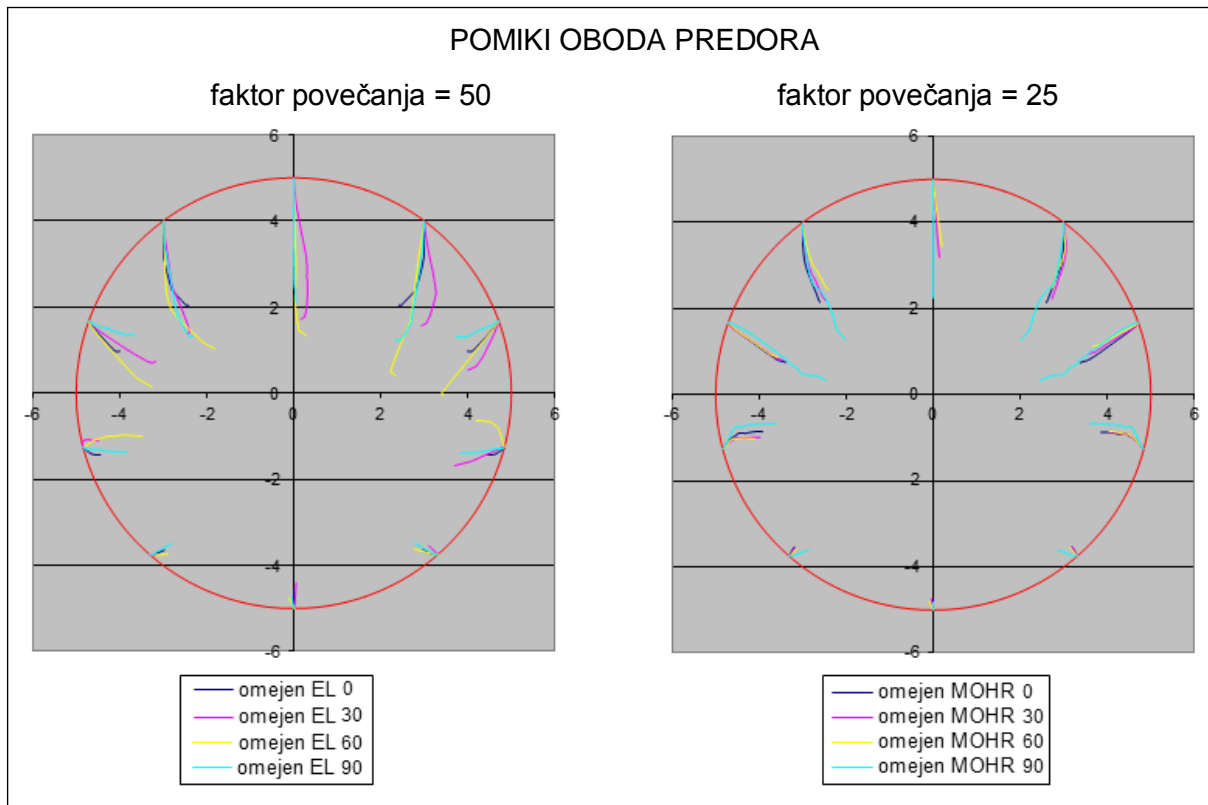
Sigl, O. 2010. NATM Applications in Singapore: Ground Conditions. V: NATM Workshop 2010. Geoconsult Asia Singapore: 31 str.  
[http://www.srmeg.org.sg/docs/Oskar\\_Sigl.pdf](http://www.srmeg.org.sg/docs/Oskar_Sigl.pdf) (Pridobljeno 20. 7. 2014.)

»Ta stran je namenoma prazna«

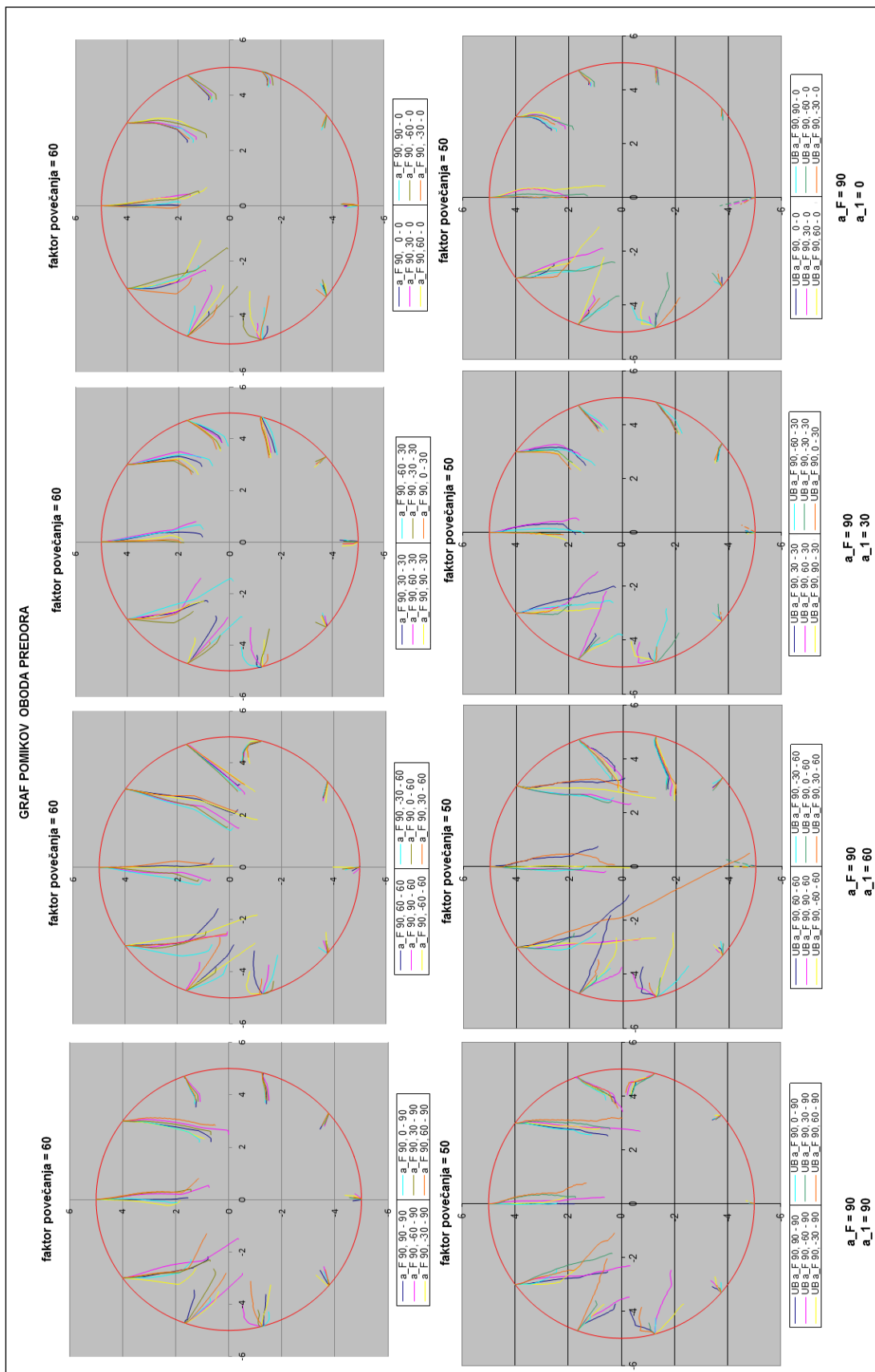


## SEZNAM PRILOG

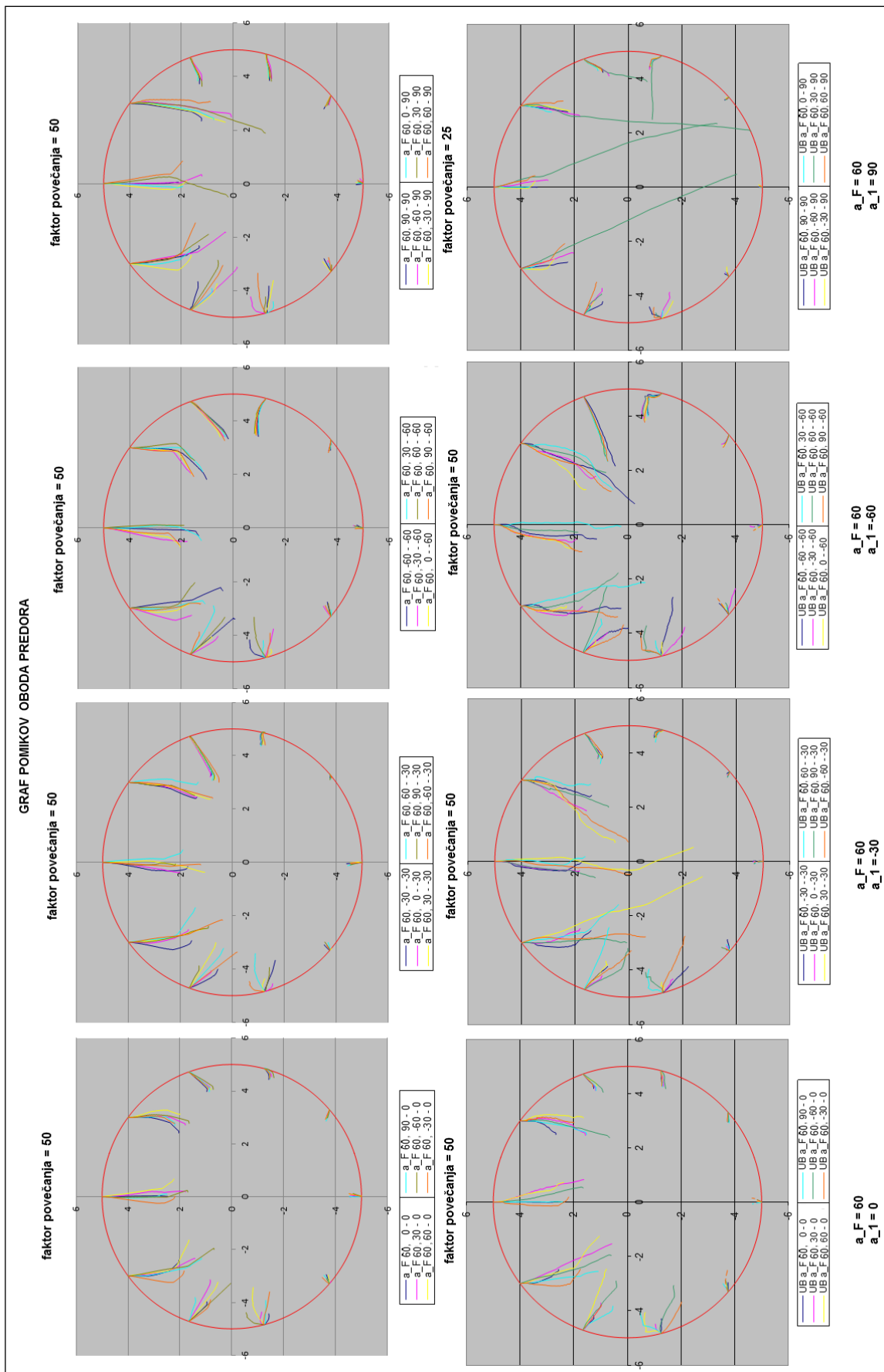
- PRILOGA A: POMIKI OBODA PREDORA TRETJEGA MODULA ZA ELASTIČEN TER MOHR-COULOMBOV MATERIALNI MODEL
- PRILOGA B: PRIMERJAVA POMIKOV OBODA PREDORA ČETRTEGA MODULA, ZA POSAMEZEN ELASTIČEN TER UBIQUITOUS MODEL, PRI RAZLIČNIH VREDNOSTIH NAGIBA SKRILAVOSTI  $\alpha_2$
- PRILOGA C: PRIMERJAVA POMIKOV OBODA PREDORA ČETRTEGA MODULA, ZA POSAMEZEN ELASTIČEN TER UBIQUITOUS MODEL, PRI RAZLIČNIH VREDNOSTI NAGIBA RAVNINE RAZČLENJENOSTI  $\alpha_F$
- PRILOGA D: PRIMERJAVA POMIKOV OBODA PREDORA ČETRTEGA MODULA, ZA ELASTIČEN IN UBIQUITOUS MODEL, ZA POSAMEZNO KOMBINACIJO RAZČLENJENE SKRILAVOSTI  $\alpha_F$ ,  $\alpha_1$  IN  $\alpha_2$

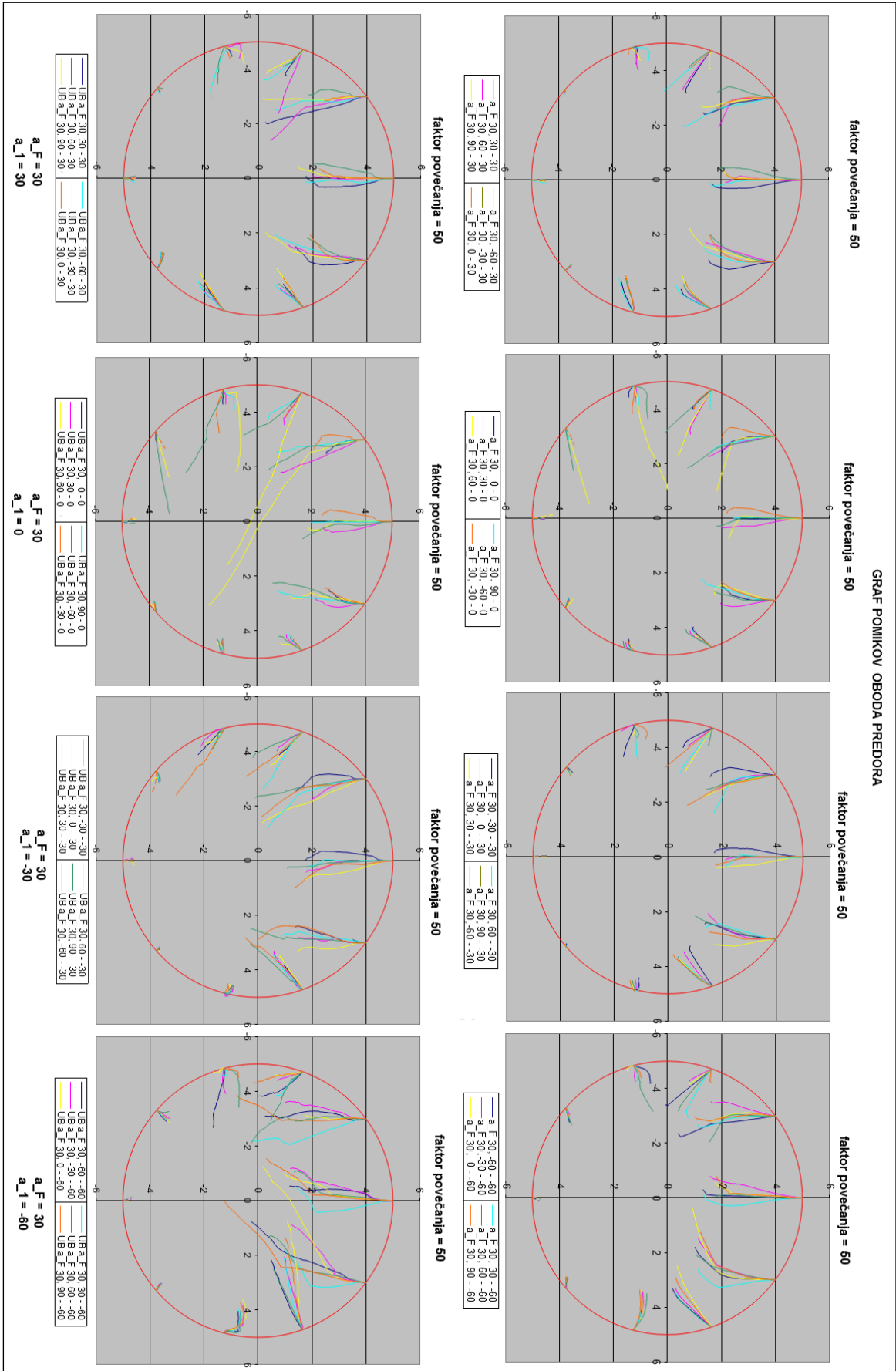
**PRILOGA A:** POMIKI OBODA PREDORA TRETJEGA MODULA ZA  
ELASTIČEN TER MOHR-COULOMBOV MATERIALNI MODEL

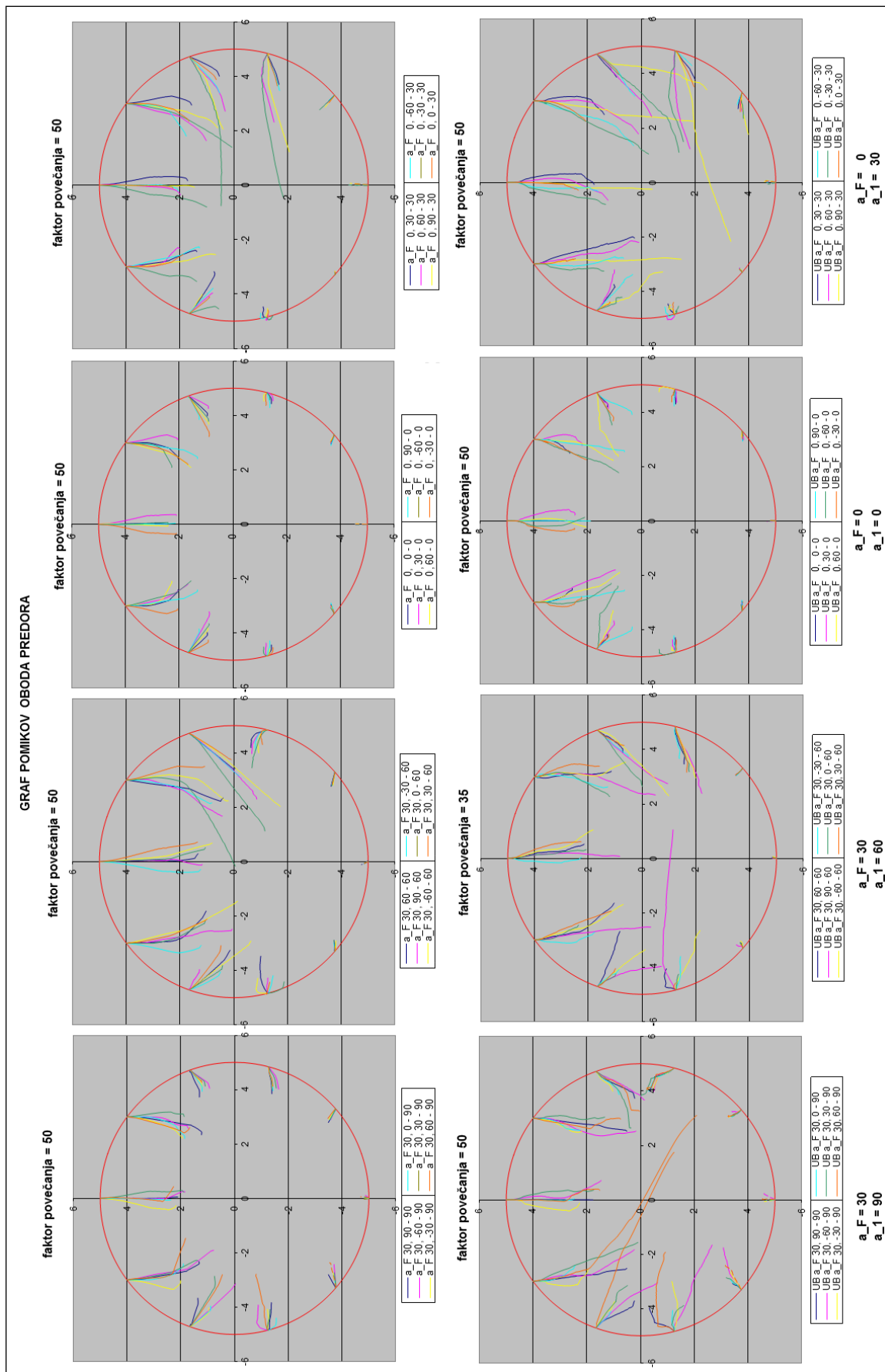
**PRILOGA B:** PRIMERJAVA POMIKOV OBODA PREDORA ČETRTEGA MODULA, ZA POSAMEZEN ELASTIČEN TER UBIQUITOUS MODEL, PRI RAZLIČNIH VREDNOSTIH NAGIBA SKRTLAVOSTI  $\alpha_2$

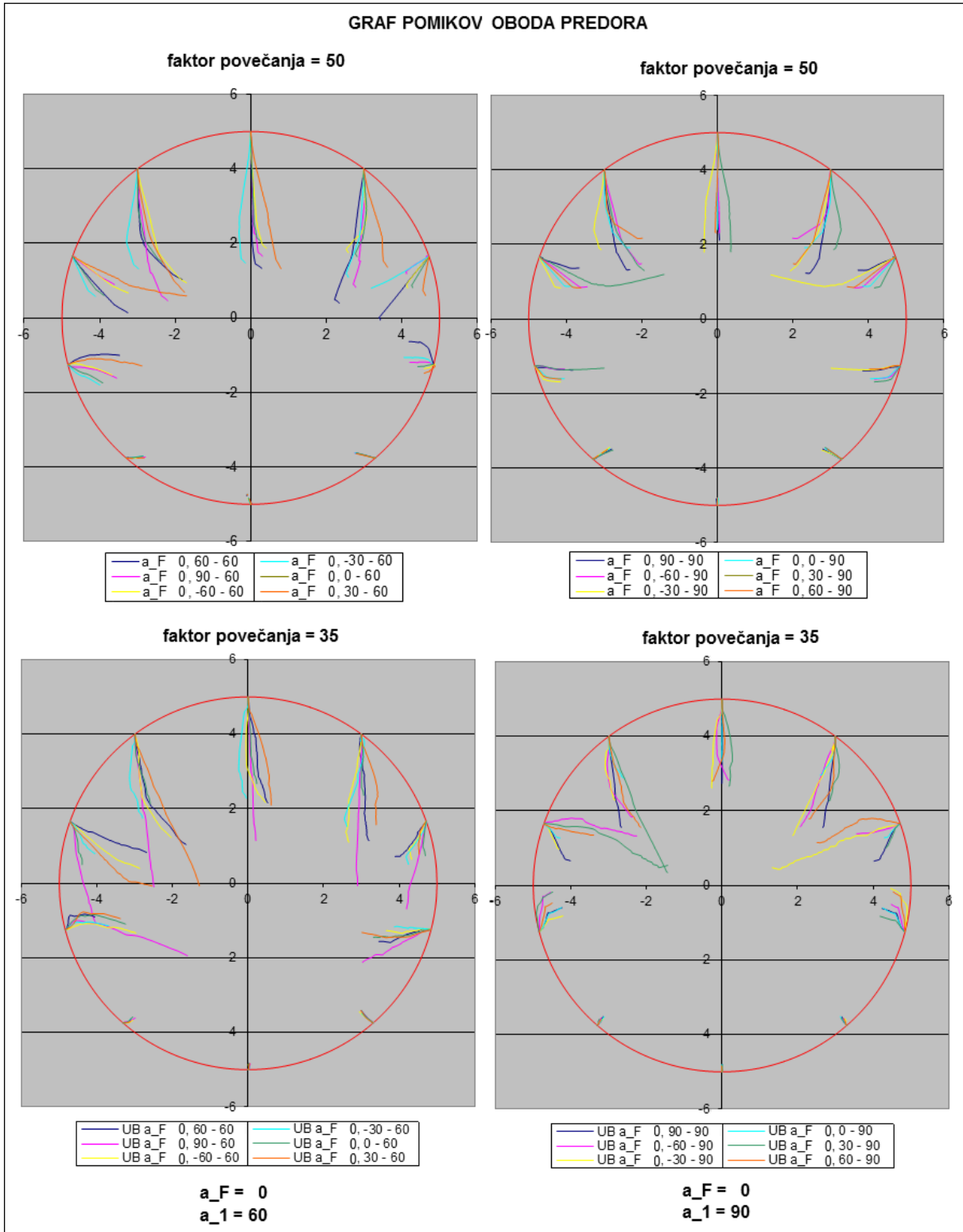






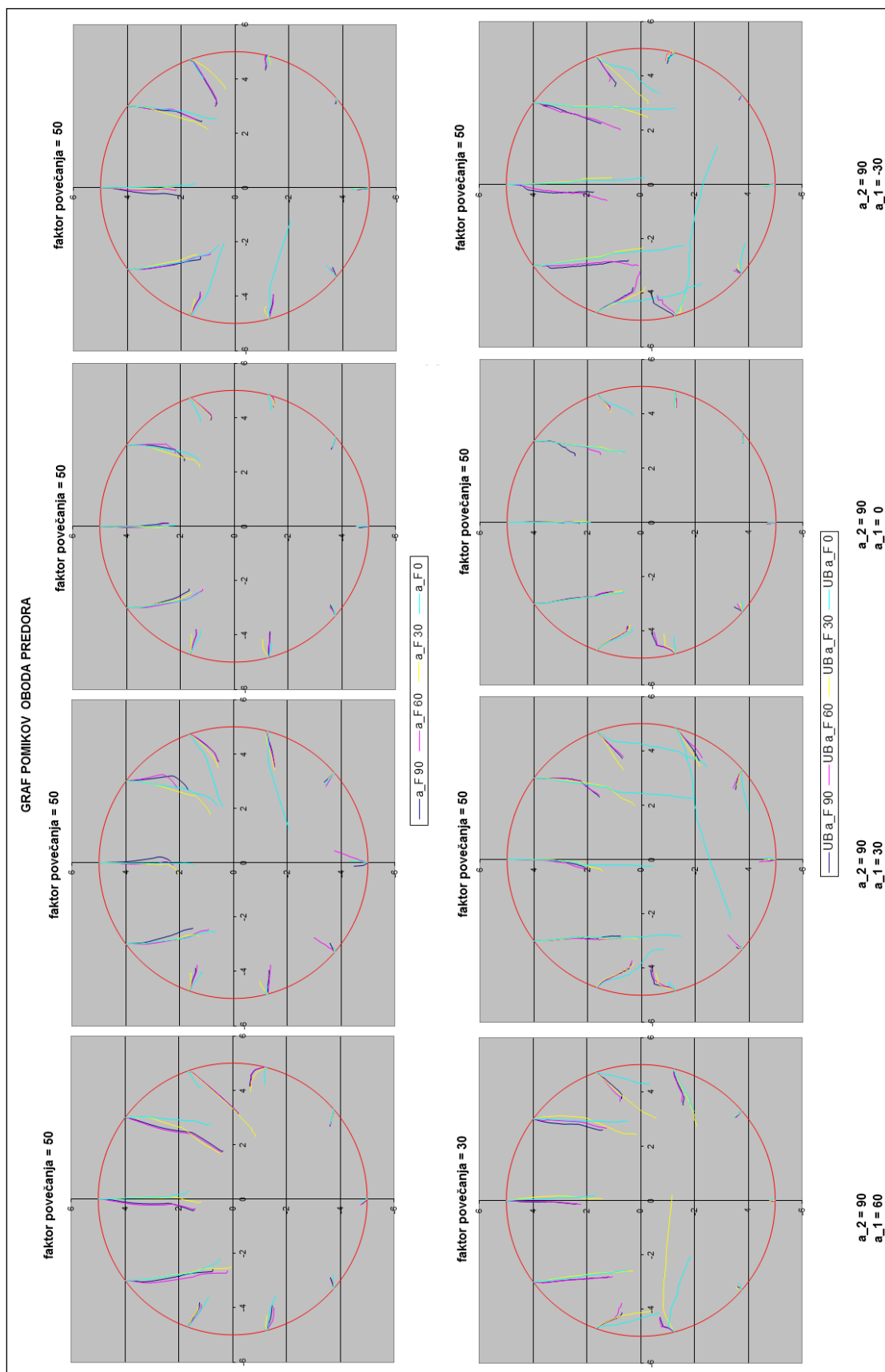


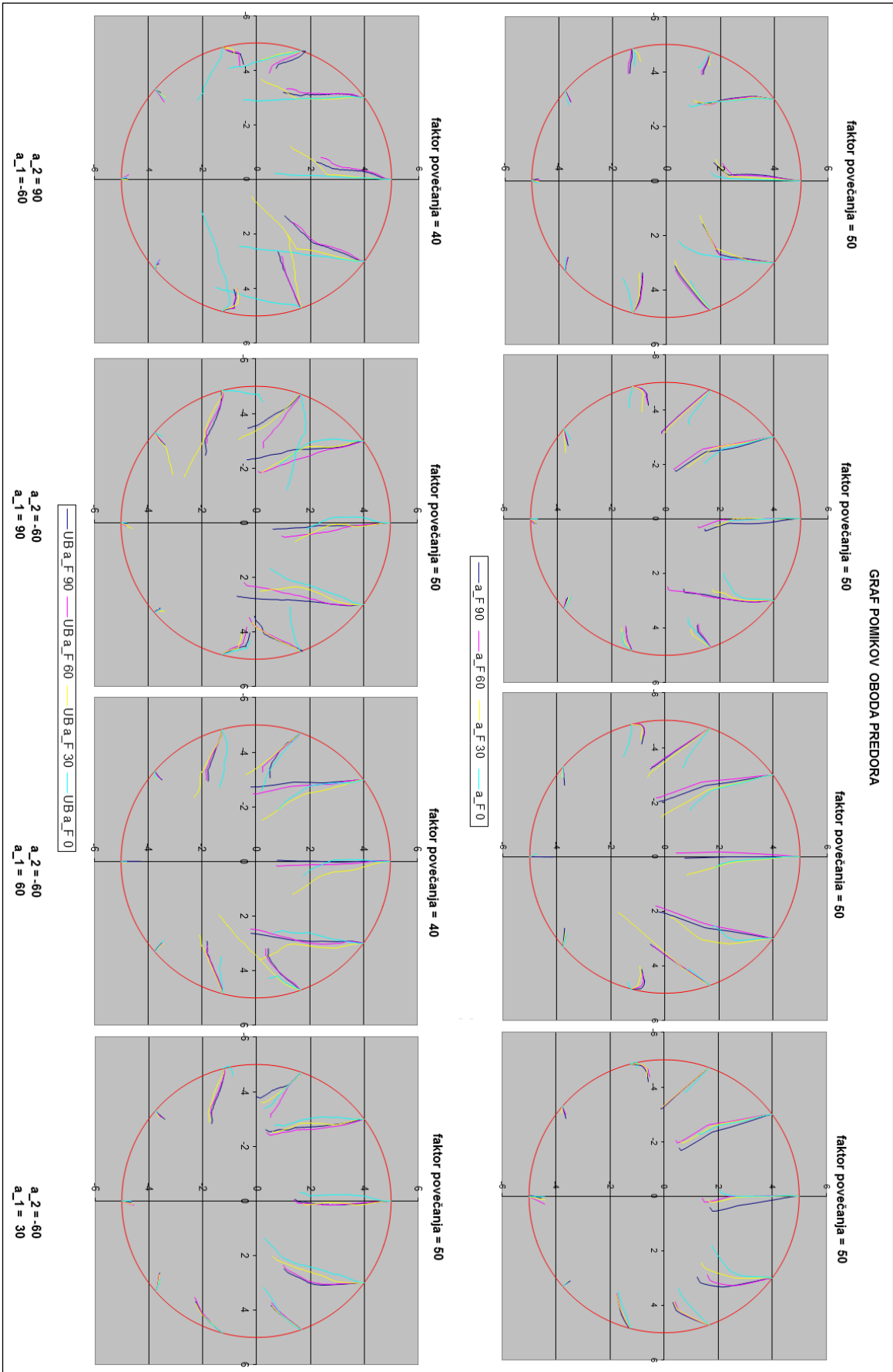


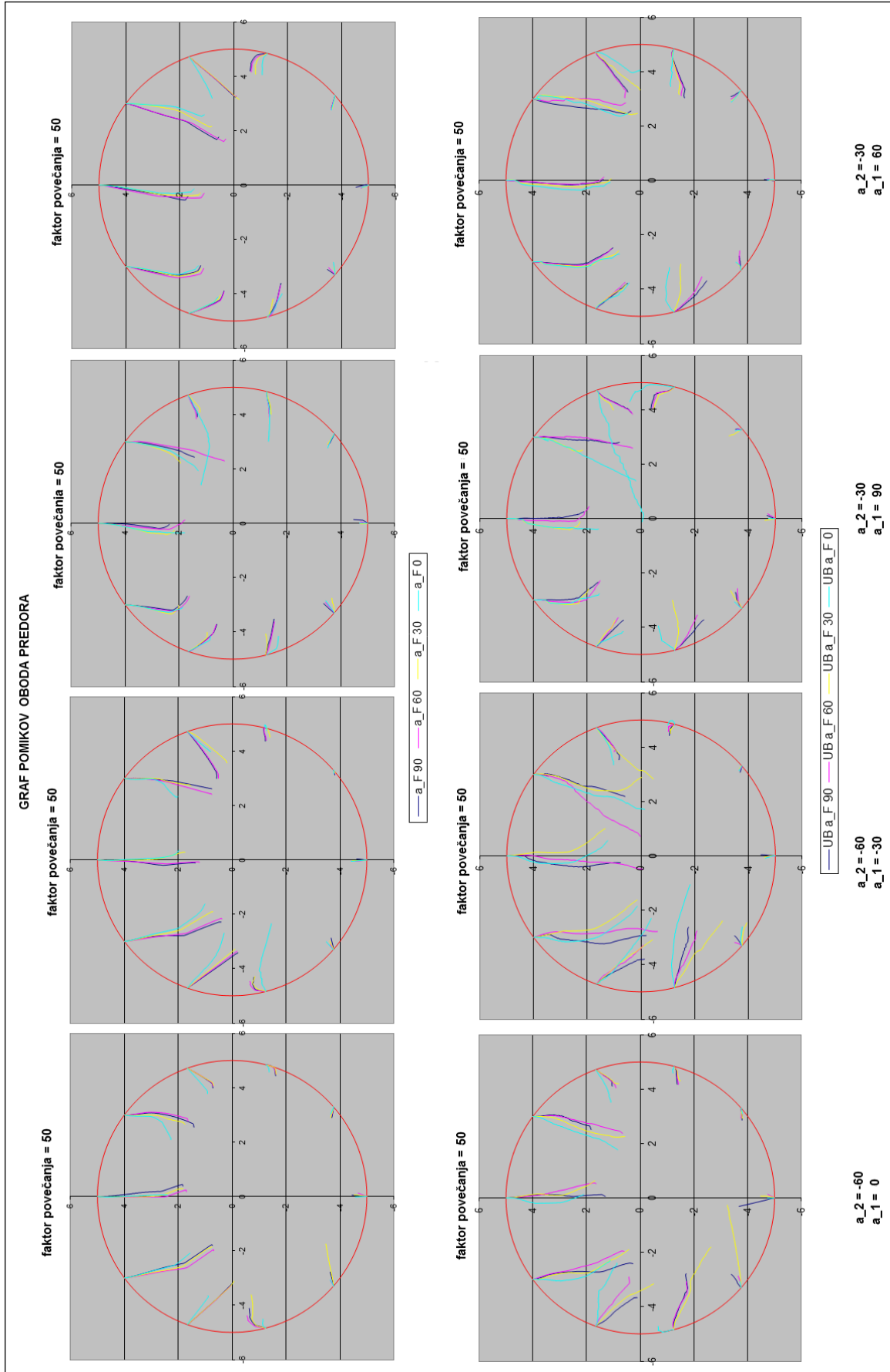


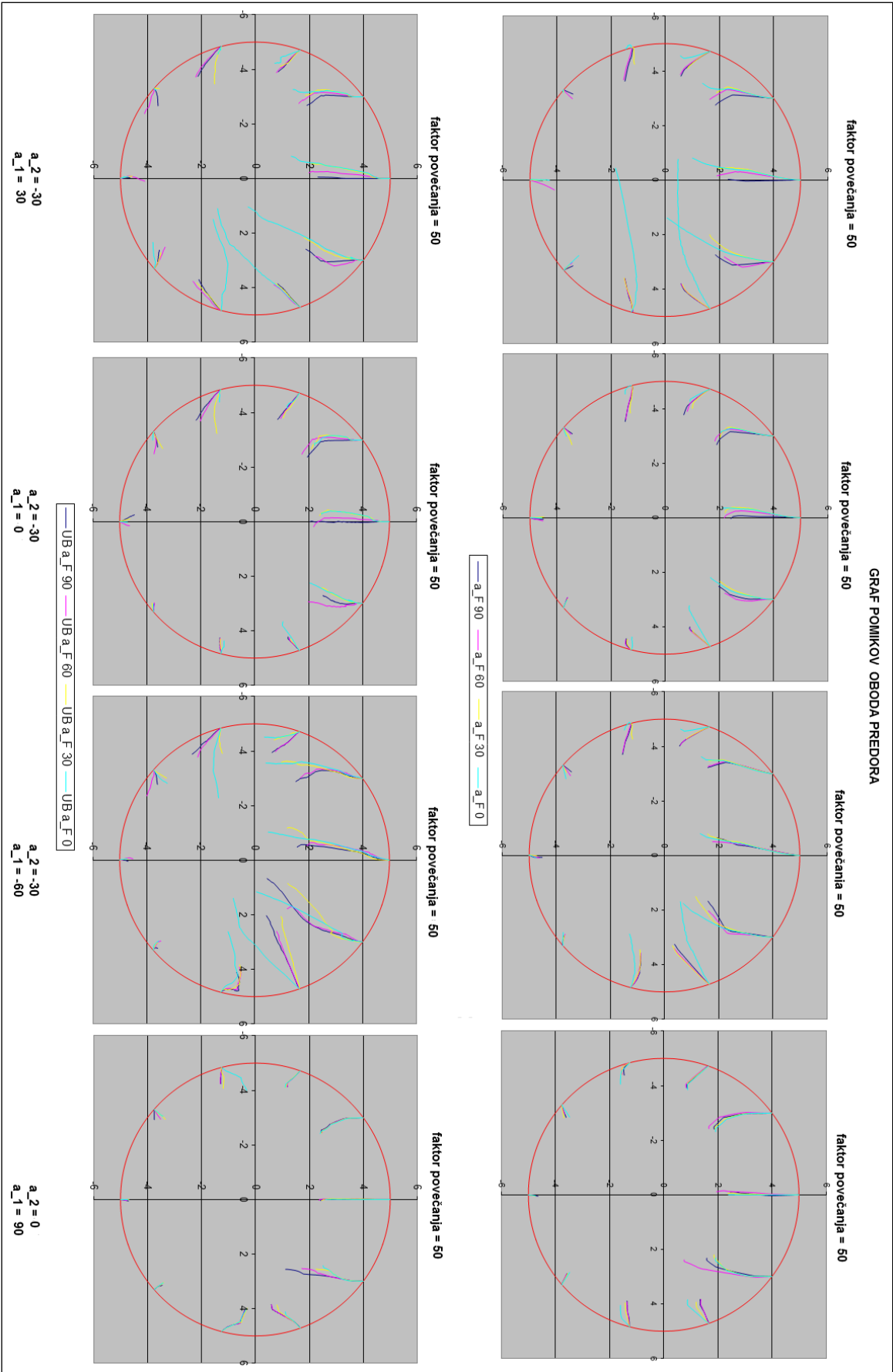


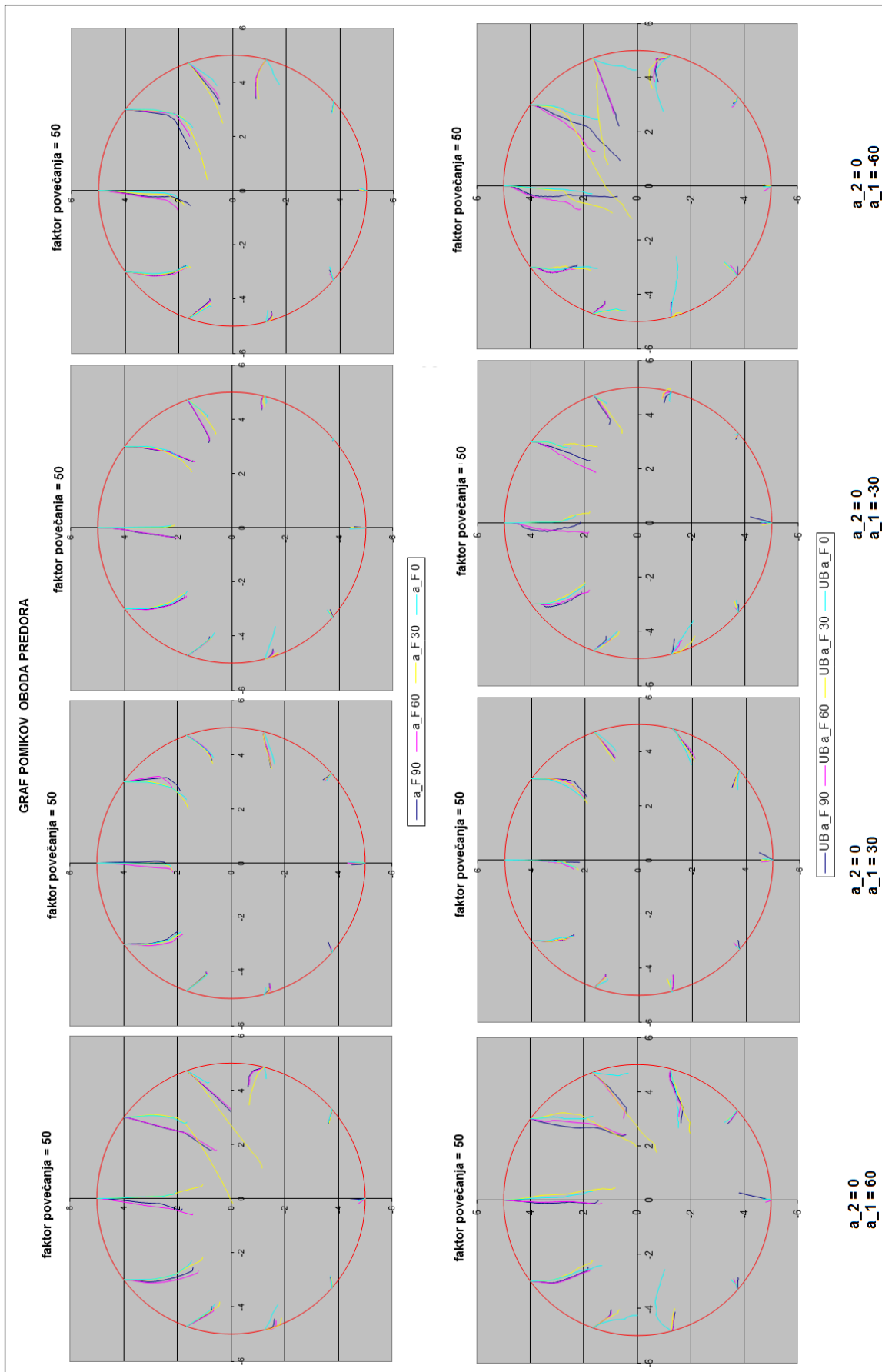
**PRILOGA C:** PRIMERJAVA POMIKOV OBODA PREDORA ČETRTEGA MODULA, ZA POSAMEZEN ELASTIČEN TER UBIQUITOUS MODEL, PRI RAZLIČNIH VREDNOSTI NAGIBA RAVNINE RAZČLENJENOSTI  $\alpha_F$

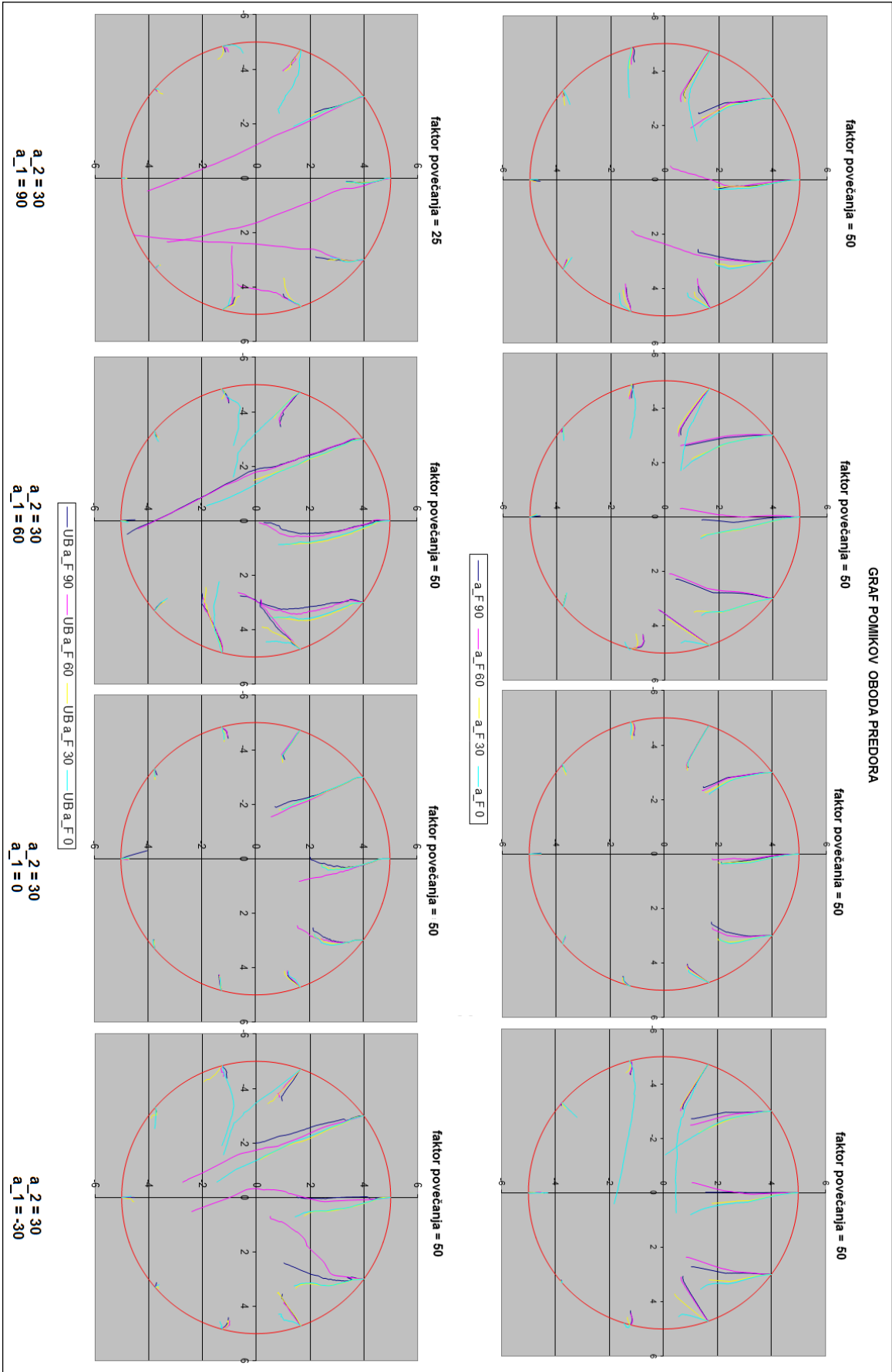


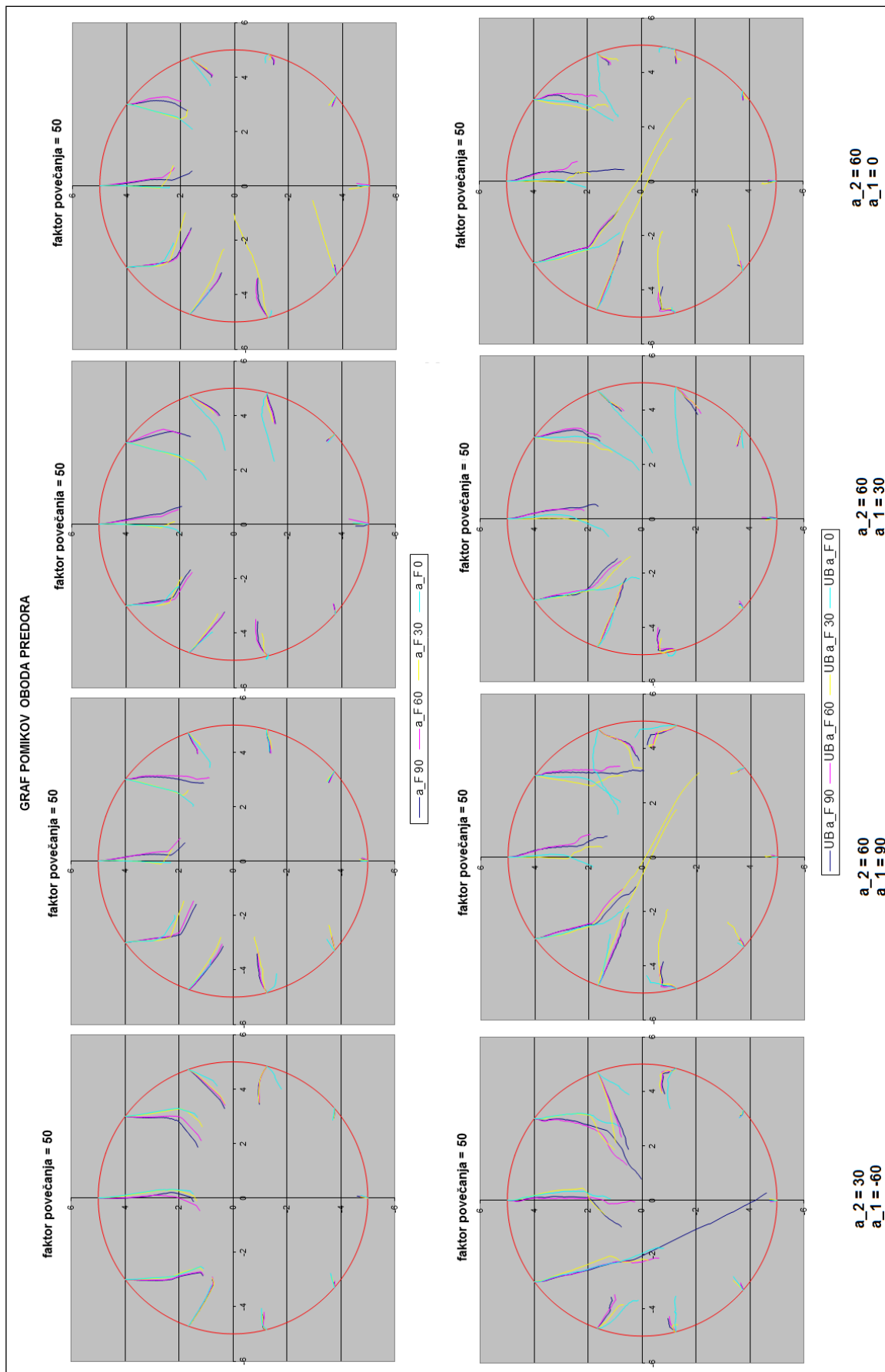


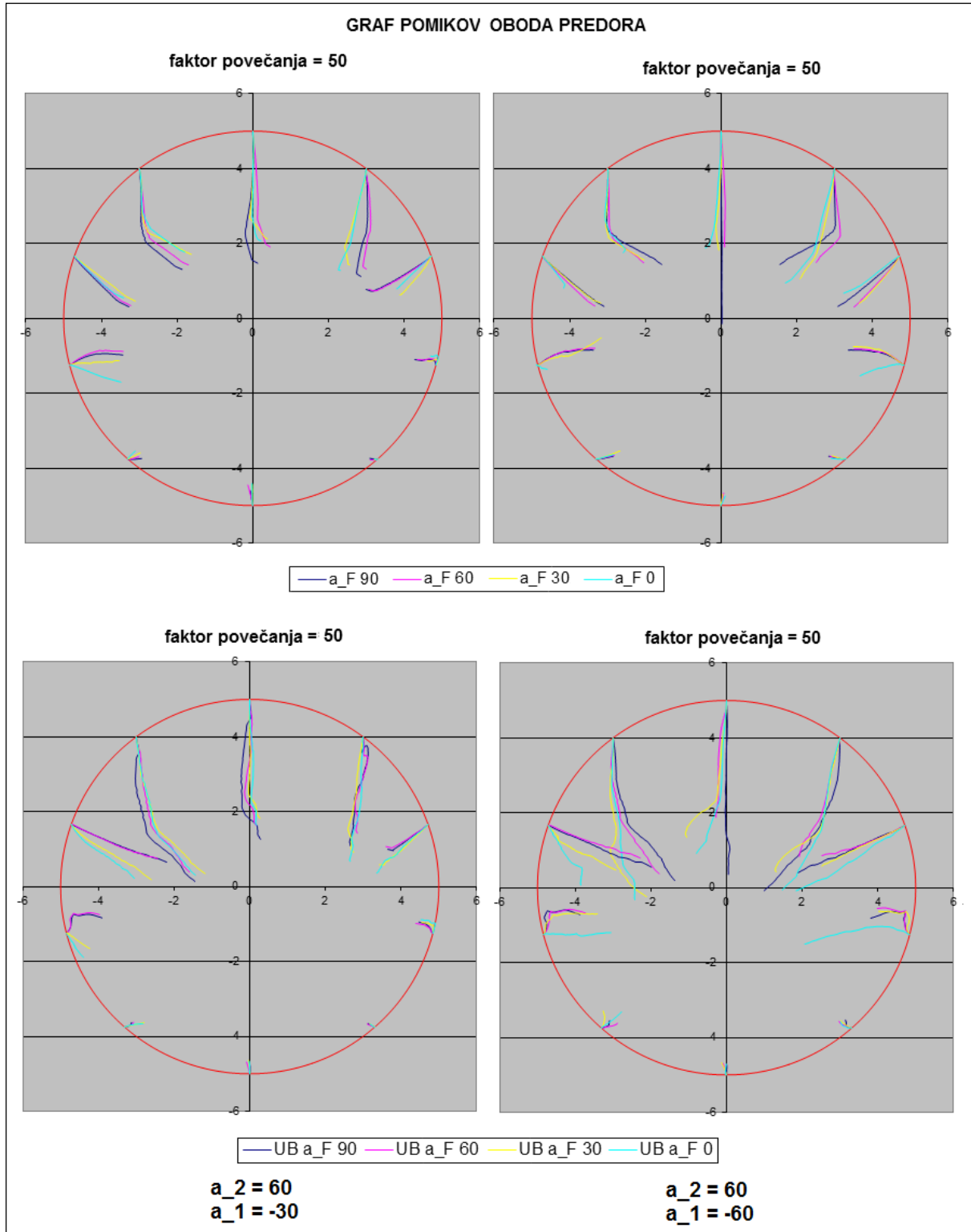














**PRILOGA D:** PRIMERJAVA POMIKOV OBODA PREDORA ČETRTEGA MODULA, ZA ELASTIČEN IN UBIQUITOUS MODEL, ZA POSAMEZNO KOMBINACIJO RAZČLENJENE SKRILAVOSTI  $\alpha_F$ ,  $\alpha_1$  IN  $\alpha_2$

