A THE REPORT OF THE REPORT OF

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ.: Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων

# «Επίδραση της ετερογένειας του πετρώματος στην καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης κατά την αριθμητική ανάλυση υπόγειας εκσκαφής σε ασυνεχή βραχόμαζα»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λαθουράκης Νικόλαος Μηχανικός Μεταλλείων

### Επιβλέπων: Π. Γιούτα-Μήτρα, ΕΔΙΠ ΕΜΠ

Μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής:

- Π. Γιούτα-Μήτρα, ΕΔΙΠ ΕΜΠ (Επιβλέπουσα)
- Π. Νομικό, Καθηγητή ΕΜΠ
- Α. Μπενάρδο, Καθηγητή ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

# Contents

Εισαγωγή	5
Extended Abstarct	7
1. Περιγραφή ασυνεχειών	7
2. Επίδραση των ασυνεχειών στην ευστάθεια υπόγειας εκσκαφής2	7
3. Επίδραση μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών	4
4. Επίδραση της εμμονής των ασυνεχειών στην ευστάθεια υπόγειας εκσκαφής	9
5. Εκδήλωση πλαστικής ζώνης σε υπόγειες εκσκαφές44	4
6. Αριθμητικό προσομοίωμα	9
6.1. Παραδοχές Προσομοίωσης	9
6.2. Επαλήθευση προσομοιώματος5	2
6.2.1. Επαλήθευση προσομοιώματος ελαστικής βραχομάζας με μία οικογένεια ασυνεχειών5	2
6.2.2 Συμπεράσματα σύγκρισης αριθμητικής και αναλυτικής λύσης στον προσδιορισμό βάθους ολίσθησης	5
6.2.3 Επαλήθευση προσομοιώματος συνεχούς βραχομάζας5	5
6.2.4 Διάγραμμα σύγκλισης – αποτόνωσης μέσω αριθμητικής λύσης	6
6.2.5 Αριθμητική επίλυση συνεχούς προσομοιώματος5	7
6.2.5 Συμπεράσματα σύγκρισης αριθμητικής και αναλυτικής λύσης για τον προσδιορισμό του λcr	
	8
7. Παραμετρικές αναλύσεις	9
7.1 Προσομοιώσεις με μέγιστη εμμονή59	9
7.1.1 Προσομοιώσεις με μέγιστη εμμονή με μία οικογένεια ασυνεχειών	0
7.1.2 Προσομοιώσεις με μέγιστη εμμονή με δύο οικογένειες ασυνεχειών	4
7.1.3 Προσομοιώσεις με μέγιστη εμμονή με τρείς οικογένειες ασυνεχειών	7
7.2 Προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενη εμμονή70	0
7.2.1 Προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενη εμμονή και μία οικογένεια ασυνεχειών	2
7.2.2 Προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενη εμμονή και δύο οικογένειες ασυνεχειών	3
7.2.3 Προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενη εμμονή και τρείς οικογένειες ασυνεχειών	5
8. Στατιστική ανάλυση	9
8.1 Βασικά στατιστικά μεγέθη7	9
8.2 Ανάλυση διασποράς (ANOVA)82	1
8.3 Ανάλυση συσχέτισης κατά Pearson8	1

8.4 Ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis)	82
8.5 Ομαδοποίηση δεδομένων ανά τιμή παραμέτρου	82
8.5.1 Σύγκριση βασικών στατιστικών δεδομένων διαφορετικής εμμονής	83
8.5.2 Σύγκριση βασικών στατιστικών δεδομένων οικογένειας ασυνεχειών	85
8.5.3 Σύγκριση βασικών στατιστικών δεδομένων απόστασης ασυνεχειών	87
8.5.4 Σύγκριση βασικών στατιστικών δεδομένων γωνίας τριβής	88
8.5.5 Σύγκριση βασικών στατιστικών δεδομένων συνοχής – λόγος c/P $_{ m o}$	90
8.6 Στατιστική Ανάλυση όλων των δεδομένων	92
8.6.1 Δοκιμές με την εξίσωση παλινδρόμησης	95
Συμπεράσματα	97
Βιβλιογραφία	99
Παράρτημα	100

## Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία ερευνά την επίδραση της ετερογένειας του πετρώματος στην απόκριση του κατά την εκσκαφή κυκλικής σήραγγας σε υδροστατικό πεδίο. Η ετερογένεια εκφράζεται μέσω των ασυνεχειών και λαμβάνει υπόψη συγκεκριμένες ιδιότητες τους και την επίδραση που αυτές έχουν στην εκδήλωση πλαστικής ζώνης πέριξ της εκσκαφής. Πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση ώστε να προσδιοριστεί η συγκεκριμένη επίδραση.

Τα πρώτα πέντε κεφάλαια (1-5) αφορούν το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζεται η εργασία και γίνεται παρουσίαση σχετικών ερευνών. Τα τρία τελευταία κεφάλαια (6-8) αφορούν τα στοιχεία δημιουργίας των προσομοιώσεων, επεξήγησης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

Στο κεφάλαιο ένα αναφέρονται οι βασικές ιδιότητες των ασυνεχειών που διέπουν την βραχόμαζα, όπως αυτές αναφέρονται κατά Διεθνή Εταιρεία Βραχομηχανικής - ISRM (Brown, 1981).

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η έννοια της ανισοτροπίας και πως αυτή επηρεάζει τις ιδιότητες της βραχόμαζας. Γίνεται αναφορά σε έρευνα του Alejano LR et al.(2010) που περιλάμβανε τριαξονικές δοκιμές θλίψης σε τεχνητά δοκίμια υπό την επίδραση δύο και τριών οικογενειών ασυνεχειών. Επίσης περιγράφεται η έννοια του REV (representative elementary volume) και η επίδραση της κλίμακας του έργου σε σχέση με τις ανομοιογένειες που υπάρχουν στην βραχόμαζα.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών με αναφορά στην αναλυτική λύση του Daemen (1989) που αφορά συμπεριφορά εκσκαφής σε ελαστικό πέτρωμα υπό την επίδραση μίας οικογένειας ασυνεχειών. Μέσω αυτής της λύσης σχεδιάζονται οι περιοχές ολίσθησης γύρω από την εκσκαφή, που η έκταση τους εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες των ασυνεχειών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η επίδραση του βαθμού εμμονής των ασυνεχειών στην συμπεριφορά της βραχόμαζας. Γίνεται αναφορά στους Einstein et al. (1983) και Kim & Kaiser (2004) που έκαναν έρευνα στην επίδραση της εμμονής για την ευστάθεια πρανούς και συμπεριφορά βραχόμαζας πέριξ υπόγειας σήραγγας αντίστοιχα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η συμπεριφορά της βραχόμαζας γύρω από κυκλική διατομή. Εξηγείτε η αλλαγή της συμπεριφοράς της όπου από ελαστική γίνεται πλαστική και πως αυτή μπορεί να απεικονιστεί με τα διαγράμματα σύγκλισης αποτόνωσης.

Στο κεφάλαιο έξι παρουσιάζονται οι παραδοχές του αριθμητικού προσομοιώματος που κατασκευάστηκε. Επίσης γίνεται η επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του προσομοιώματος μέσω σύγκρισης με δύο αναλυτικές λύσεις. Η μία αφορά τη συμπεριφορά εκσκαφής σε ελαστικό πέτρωμα υπό την επίδραση μίας οικογένειας ασυνεχειών (Daemen, 1983). Η δεύτερη αναλυτική λύση προέρχεται από Καββαδά (2012) και αφορά την καμπύλη σύγκλισης - αποτόνωσης συνεχούς πετρώματος. Επίσης αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό του λ<sub>cr</sub>.

Στο κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση συγκεκριμένων παραμέτρων που αφορούν ιδιότητες ασυνεχειών, στην εκδήλωση της πλαστικής ζώνης όπως αυτή εκφράζεται μέσω του κρίσιμου λ<sub>cr</sub>.

Στο κεφάλαιο 8 χρησιμοποιούνται στατιστικά μεγέθη και μεθοδολογίες για να ερευνηθεί η επιρροή των παραμέτρων των ασυνεχειών ως προς την τιμή του λ'<sub>cr</sub>. Παρουσιάζονται βασικά στατιστικά μεγέθη, όπως μέσος όρος, τυπική απόκλιση κτλ. (descriptive statistics). Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση διασποράς (ANOVA), παλινδρόμησης (regression), στατιστική συσχέτιση κατά Pearson (correlation).

## Extended Abstarct

# Effect of rock heterogeneity on the Convergence-Confinement curve during numerical analysis of underground excavation in discontinuous rock mass

### ABSTRACT:

The presence of discontinuities in strong rock masses creates blocky structures that give an overall different behaviour than an assumed continuous medium with "equivalent" mechanical properties if the non-jointed rockmass shear strength is higher than that of the rock joint. In this research, numerical simulation is used to investigate the effect of persistent and non-persistent discontinuities in the formation of plastic zone around a deep, circular tunnel. Parametric analyses for persistent joint sets are initially carried out investigating the effect of the presence of up to three joint sets, their spacing with respect to the excavation scale, and their strength parameters, i.e., joint friction angle and joint cohesion with respect to the initial stress field. Then, statistical analysis is used to deepen the understanding of the effects of joint length and spacing for non-persistent discontinuities, i.e., when rock bridges are formed around the excavation. The analyses results are used to identify the critical level of deconfinement in the development of plastic zone around the excavation.

#### 1. Introduction

Rock mass, which contains discontinuities in various distributions and frequency of occurrence, behaves as a discontinuous medium, with these discontinuities determining its mechanical behavior. It is therefore necessary for the description of the rock mass to make an analytical characterization of the properties of the discontinuities that govern it. According to ISRM (Brown, 1981), eleven parameters are required to characterize discontinuities: orientation, spacing, persistence, roughness, wall strength, filling, aperture, seepage, joint sets, block size, drill core. The existence of the discontinuities and their characteristics cause anisotropy in both the deformability measure and the strength of the rock mass (Jaeger & Cook, 1979, Alejano LR et al., 2010).

Among the geometrical properties of the discontinuities the persistence parameter is the most important one due to the creation of rock bridges, that have a beneficial effect on the behaviour of the rock mass Einstein et al. (1983) and Kim & Kaiser (2004) investigated the effect of persistence on slope stability and rock mass behavior around an underground tunnel respectively, concluding the statistical importance of persistence.

The effect of the size of the project in relation to the inhomogeneities naturally present in the rock mass is considerable in terms of the assessment of the mechanical behavior. One way to quantify the effect of size is by introducing the representative elementary volume (REV) of the rock mass. REV expresses the elementary volume size which contains a representative number of inhomogeneities so that the value of the mechanical properties remains constant (Hudson JA and Harrison JP, 1997).

The instabilities that will occur around the excavation because of a single-persistent joint set can be calculated according to the analytical solution of Daemen (1989) (equation 1), assuming an elastic stress distribution around a circular opening.

$$(\frac{r}{R})^2 = \frac{(P-P_s)[S_e cos2(\alpha-\theta)tan\phi\pm sin2(\alpha-\theta)}{-S_e(c+Ptan\phi)}, \text{ (eq. 1)}$$

After reviewing the relevant literature, a need was identified to systematically examine the behavior of strong discontinuous rock mass with one to three discontinuity nets. In that case, the behavior of the rock mass is expected to be mainly determined by the behavior of the discontinuities and to differ significantly from that of a continuous medium.

### 2. Methodology

Simulation with the finite element method was chosen. Rockscience's RS2 was selected to implement the simulations. It is a two-dimensional finite element analysis code, chosen for its ability to simulate geotechnical problems as well as discontinuous rock mass characteristics and the ease of stochastic display of discontinuities and their persistence.

The rock mass is assumed to be isotropic, elastoplastic, and described by the Mohr-Coulomb failure criterion. The values of the rock and field stress properties are presented in table 1. The discontinuities are described by the Mohr-Coulomb failure criterion. The range of values for discontinuity properties are summarized in table 2. The cohesion parameter is expressed by the ratio c/Po, to include in the analysis, the field stress, based on which the temporary and permanent support can be decided. Also, the distance of the discontinuities is expressed by the ratio s/R, to relate to the scale of the project.

Property	Value	Unit of measurement		
Circular opening Radius	R=1	m		
Specific weight (γ)	0.027	MN/m3		
Excavation Depth (H)	200	m		
$\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_z = \gamma^* H$	5.4	MPa		
Poisson	0.2	-		
Young Modulus	15	GPa		
Friction angle (φ)	33	degrees		
Cohesion (c)	1.5	МРа		

Table 1. Rock and field stress propertie
--

#### Table 2. Discontinuities properties

Friction angle (φ)	Cohesion/overburden stress (c/P <sub>o</sub> )	Joint Persistence	Joint Spacing/Radius (s/R)	Joint net orientation
10 <sup>°</sup>	0.001 MPa	100%	0.25m	$1^{st}$ joint net: $40^{\circ}$
20 <sup>°</sup>	0.01 MPa	75%	0.5m	$2^{nd}$ joint net: -50°
30 <sup>°</sup>	0.1 MPa	50%	1m	$3^{rd}$ joint net: -15°
-	-	25%	-	-

The calibration of the simulation was performed for two analytical solutions. The first concerns the excavation behavior in elastic rock with a single set of joints (Deamen, 1990) to verify the behavior of the rock - discontinuity combination. The second verification was performed according to Kavvadas (2012) and concerns the convergence-confinement curve of continuous rock.

#### 2.1 Numerical simulation of jointed rock mass

Figure 1 presents the graphical comparison of the numerical solutions with Daemen's solution. Discontinuities that have exceeded their shear strength are marked in red. The displacements are marked with color map while the analytical solution for the areas where the discontinuities have slipped are marked with a blue line according to equation 1. The calibration with the analytical solution was carried out for three cases of discontinuity spacing: a. s=1, b. s=0.5, c. s=0.25



Figure 1. Calibration with analytical solution for three cases of discontinuity spacing: a. s=1, b. s=0.5, c. s=0.25

From figure 1, it is observed that during the numerical analysis in all three cases, the slip zone depth is greater than that of the analytical solution. This deviation occurs at the discontinuity which is tangent to the perimeter of the cross-section. This difference between the solutions is as expected and is because of the distance of the discontinuities.

#### 2.2 Numerical modeling of deconfinement during excavation

The simulation consists of 20 stages as presented in table 3, where the deconfinement level is raised by 0.05. From the numerical solution, a displacement is calculated at the crown of the excavation for each stage, i.e., for each  $\lambda$  that has been selected, then the Convergence-Confinement diagram is created.

The determination of  $\lambda_{cr}$  is performed by calculating the percentage difference in gradient between the points of the curve. The sensitivity of the measurement is defined as a difference of 5%. Figure 2 presents the numerical solution of a continuum simulation (without the effect of discontinuities). The  $\lambda_{cr}$  in this case is 0.8 (cause 1-  $\lambda_{cr}$  = 0.2, as seen in figure 2).

Stage Num.	1	2	ß	4	5	6	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1-λ	1	0.9 5	0.9	0.8 5	0.8	0.7 5	0.7	0.6 5	0.6	0.5 5	0.5	0.4 5	0.4	0.3 5	0.3	0.2 5	0.2	0.1 5	0.1	0.0 5

Table 3. simulation stage number for each deconfinement level



Figure 2. Convergence-Confinement diagram of a continuum simulation using numerical solution

Figure 3 presents the correlation of the Convergence-Confinement curve of the analytical and numerical solution in the case of continuous rock. The two solutions give similar results with a difference of 0.02 in the determination of  $\lambda_{cr}$ . The analytical calculation of  $\lambda_{cr}$  is:

$$\lambda_{cr} = 1 - (\frac{2}{1+k})(\frac{N_s - 1}{N_s})$$
, (eq. 2)

Where:  $k = tan^2 (45 + \frac{\varphi}{2}), N_s = \frac{2p_o}{\sigma_{cm}}, p_o = \gamma H, \sigma_{cm} = 2c\sqrt{k}$ 

In the elastic region where  $\lambda \le \lambda_{cr}$ , the displacements in the tunnel wall (u<sub>el</sub>) are given by relation 3 (Kavvadas, 2012), where:  $G = \frac{Em}{2(1+\nu)}$ , v = Poisson ratio.

$$u_{el} = \lambda R \frac{p_o}{2G}$$
, (eq. 3).

In the plastic region where  $\lambda > \lambda_{cr}$ , the displacements in the tunnel wall (u<sub>p</sub>) are given by relation 4 (Kavvadas, 2012), where:  $\frac{r_p}{R} = \left[\left(\frac{2}{k+1}\right) \frac{N_s + \frac{2}{k-1}}{(1-\lambda)N_s + \frac{2}{k-1}}\right]^{\frac{1}{k-1}}$ :

$$u_p = r_p \left(\frac{p_o}{2G}\right) \frac{(k-1)N_s+2}{(k+1)N_s}$$
, (eq. 4).



*Figure 3. Correlation of the Convergence-Confinement between numerical and analytical solution.* 

#### 3. Parametric analyses

To collect the appropriate data, 648 simulations were performed as seen in table 4. The starting position (seed) refers to the position from which the production of the discontinuities by the simulation program begins and it is not directly included in the analysis, but together with the persistence parameter it gives the data randomness.

Parameter name	Number of different values
c/Po	3
s/R	3
Joint network	3
φ	3
persistence	4
Starting position (seed)	2
multiplication of different values = Set of simulations	648

Table 4. Number of different values for each parameter

From the parametric analyses results, the factor which governs the inclination change in the convergence-confinement curve is the discotinuity slip around the opening. In Figure 4 3 cases are presented with one, two and three perisistent joint sets, one simulation stage after that of  $\lambda'_{cr}$  (as determined by the percentage difference in inclination at the critical point of the convergence-confinement curve. It was observed, especially in the case of low mechanical propeties values, that the discontinuity around the opening had already slipped at the first stage of simulation, but the displacements did not cause significant changes in the convergence-confinement curve. In fact, up to stage of  $\lambda'_{cr}$  the sliding depth of the discontinuity does not seem to increase. However, immediately after the critical stage, a significant change in the slip zone depth for the discontinuities becomes obvious and failure occurs progressively until the final stage of deconfinement.



Figure 4. One simulation stage after that of  $\lambda'_{cr}$  with: a. one joint net, b. two joint nets, c. three joint nets, and fixed c=0.054, s=0.5,  $\varphi$ =10.

As expected, when the mechanical characteristics of the discontinuities are higher, the stage of occurrence of larger displacements moves to higher numbered stages where the confinement is greater. This is depicted in figure 5 which shows the confinement - convergence curve for varying  $\phi$  in the case of three joints network.



Figure 5. Confinement - convergence curve for varying  $\varphi$  in the case of three joints net with fixed c=0.054, s=0.5

The sliding depth of the discontinuities increases with decreasing distance as shown in figure 6. In the case of a dense distribution of discontinuities the failure is driven to a greater depth.



Figure 6. Final simulation stage ( $\lambda$ '=0.1) in relation to s/R=0.25, 0.5, 1, under the influence of 3 joints net.

In the case of non-persistence joints, as the persistence decreases, the simulation results tend to behave like that of the continuous medium. In figure 7, the differentiation of the failure extension in the final simulation stage  $\lambda'= 0.1$  ( $\lambda'=1-\lambda$ ) is observed, in terms of the degree of persistence. Figure 8 shows the confinement - convergence curve for varying persistence in the case of three joints network.



Figure 7. Final stage of simulation ( $\lambda$ '=0.1) in relation to the degree of persistence with fixed c/Po=0.01,  $\varphi$ =10, s=0.5 and three families of discontinuities, a. per=100%, b. per=75%, c. per=50%, d. per=25%.



Figure 8. Convergence-confinement curves for varying persistence in the case of three joints net with fixed c=0.054, s=0.5,  $\varphi$ =10.

#### 4. Statistical analysis

The large amount of data obtained from the numerical analysis enables statistical analysis. The data are grouped by parameter value and the results of variance analysis (ANOVA) are shown in Table 5. It is observed that the parameter with the greatest statistical significance is the friction angle due to the greater F value calculated. Tables 6, 7 and 8 contain the descriptive statistics, ANOVA and Pearson correlation respectively, for the entire data set. According to the descriptive statistics table, the kurtosis is -1.06 which means that the distribution is not normal. ANOVA table confirms the statistical significance of  $\phi$ , persistence and cohesion due to the large values of F. This case is supported from Pearson correlation as well. Regression analysis is performed on all  $\lambda$ cr data calculated during the parametric analysis. The regression equation created is:

$$\lambda' cr = 0.5778 - 1.521 \frac{c}{P_o} - 0.0698 \frac{s}{R} + 0.03462 joint net - 0.014038 \varphi + 0.2982 persistence (eq. 4)$$

The equation offers a confidence level of  $R^2 = 0.63$  so there is a moderate fit of the linear regression. The average deviation between the actual and the estimated value of the variable is s=0.124.

Group by persistence													
			Per	= 1	Per=	0.75	Per= 0.5		Per=	= 0.25			
		Source	<b>F</b> value	Pvalue	<b>F</b> value	Pvalue	<b>F</b> value	Pvalue	<b>F</b> value	Pvalue			
		c/Po	377.62	0	158.51	0	47.34	0	11.21	0.001			
		s/R	3.08	0.081	10.1	0.002	18.65	0	26.7	0			
		JointNet	3.62	0.059	4.79	0.03	28.63	0	6.03	0.015			
		ф	1154.8	0	532.16	0	122.5	0	24.71	0			
		Group b	oy joint ne	et					Group b	y friction	angle		
	١٢	N= 1	JN=	: 2	JN=	: 3		ф=	10	ф=2	20 φ=30		30
Source	$\mathbf{F}_{value}$	$\mathbf{P}_{value}$	$\mathbf{F}_{value}$	$\mathbf{P}_{value}$	$\mathbf{F}_{value}$	$\mathbf{P}_{value}$	Source	$\mathbf{F}_{value}$	P <sub>value</sub>	$\mathbf{F}_{value}$	$\mathbf{P}_{value}$	$\mathbf{F}_{value}$	Pvalue
c/Po	32.61	0	77.47	0	122.68	0	c/Po	68.7	0	100.21	0	94.85	0
s/R	9.5	0.002	6.37	0.012	7.44	0.007	s/R	12.95	0	14.95	0	16.95	0
ф	105.54	0	240.02	0	305.74	0	JointNet	20.4	0	11.12	0.001	3.23	0.074
persist.	133.7	0	71.78	0	96.46	0	persist.	120.74	0	155.65	0	73.51	0
		Group	by spacing	3			Group by cohesion						
	s	= 1	s= 0	).5	s=0.	.25		c/Po	=0.1	c/Po=	0.01	c/Po=	0.001
Source	Fvalue	Pvalue	Fvalue	Pvalue	Fvalue	Pvalue	Source	<b>F</b> value	Pvalue	Fvalue	Pvalue	Fvalue	Pvalue
c/Po	53.74	0	53.55	0	103.78	0	s/R	5.22	0.023	10.48	0.001	7.63	0.006
JointNet	10.28	0.002	15.76	0	5.5	0.02	JointNet	6.31	0.008	8.51	0.004	27.54	0
ф	149.71	0	175.99	0	272.14	0	ф	183.21	0	189.65	0	234.63	0
persist.	112.53	0	79.81	0	99.07	0	persist.	81.46	0	100.69	0	119.84	0

Table 5. variance analysis (ANOVA) for grouped data by parameter value

Table 6. Descriptive statistics for the entire data set.

Varia	Me	SE	Tr.Me	St.D	Varian	minim	Q1	medi	Q	maxim	ran	Skewen	kurto
ble	an	Mean	an	ev	ce	um		an	3	um	ge	ess	sis
λ'cr	0.45	0.007 97	0.449 23	0.2	0.04	0.2	0.2 5	0.4	0. 6	0.85	0.65	0.35	-1.06

Table 7. ANOVA for entire data set									
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value					
c/Po	-1.521	0.109	-13.98	0.000					
s/R	-0.0698	0.0156	-4.48	0.000					
Joint net	0.03462	0.00593	5.84	0.000					
ф	-0.01403	0.00059	-23.67	0.000					
persistence	0.2982	0.0173	17.20	0.000					

Table 8. Pearson correlation for entire data set					
	λcr 5%				
c/Po	-0.335				
s/R	-0.109				
Joint net	0.136				
ф	-0.564				
persistence	0.407				

5. Conclusions

For the specific cases of discontinuous rockmass with one up to three sets of discontinuities examined in this research, it has been seen that with respect to the convergence-confinement curve, the behavior follows certain patterns.

- The beginning of the non-linear part of the confinement convergence curve is related to the slip of discontinuities around the cross-section.
- The change in the inclination of the convergence-confinement curve is directly related to the discontinuities slip.
- The parameter with the greatest statistical significance is the friction angle φ. This result is logical since, as mentioned, the cause of the plasticization of the medium is the sliding of the discontinuities around the excavation and the friction angle largely determines this phenomenon.
- Second most statistically important parameter is the persistence. It largely determines the presence of discontinuities around the cross-section so that their slip eventually occurs.
- Third most statistically important parameter is the cohesion for the same reasons as the friction angle.
- It is also concluded that the data distribution is not normal as shown by the kurtosis value.
- The regression equation provides a simple linear model and a modest fit for the data which, as mentioned, does not have a normal distribution.

In future studies the orientation of the discontinuities relative to the intensive field should be considered, with expected results of better fitting the data during regression. Probabilistic analyses can also be performed considering the most important parameters as variables with a normal distribution and a standard deviation of 20%.

# 1. Περιγραφή ασυνεχειών

Η βραχόμαζα, η οποία περιέχει ασυνέχειες σε διάφορες κατανομές και συχνότητα εμφάνισης, συμπεριφέρεται ως ένα ασυνεχές μέσο, με τις ασυνέχειες αυτές να καθορίζουν την μηχανική συμπεριφορά της. Είναι επομένως αναγκαίο για την περιγραφή της βραχόμαζας να γίνει αναλυτικός χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων των ασυνεχειών που την διέπουν.

Σύμφωνα με την Διεθνή Εταιρεία Βραχομηχανικής (Brown, 1981), δέκα παράμετροι απαιτούνται για τον χαρακτηρισμό των ασυνεχειών.

1. Προσανατολισμός (Orientation):

Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών στον χώρο περιγράφεται από τη διεύθυνση κλίσης ή αζιμούθιο και την (μέγιστη) κλίση του επιπέδου της ασυνέχειας. Στο σχήμα 1.1 φαίνονται ο γωνίες χαρακτηρισμού του προσανατολισμού των ασυνεχειών, όπου:

- Γωνία παράταξης (α) παίρνει τιμές στο διάστημα [0,180]
- Κλίση (β) παίρνει τιμές στο διάστημα [0,90] •
- Διεύθυνση κλίσης δ, (δ =  $\alpha \pm 90$ ) παίρνει τιμές στο διάστημα [0,360]
- Διάνυσμα κλίσης =  $\frac{\Delta$ ιεύθυνση κλίσης (δ)}{K\lambda (ση (β)} •
- Σε πολική προβολή η θέση του πόλου του επιπέδου ορίζεται από τις γωνίες : •
  - δπόλου=ακλίσης±180°,
  - βπόλου=90°-βκλίσης



Σχήμα 1.1 Χαρακτηριστικά προσανατολισμού ασυνεχειών (Brown, 1981)

2. Απόσταση (Spacing):

Είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ασυνεχειών, όπου για κάθετη απόσταση μικρότερη των 20mm χαρακτηρίζονται ως εξαιρετικά πυκνές ενώ για απόσταση μεγαλύτερη των 6m ως εξαιρετικά αραιές (Πίνακα 1.1). Για αλλεπάλληλες μετρήσεις χρησιμοποιείται η συνηθέστερα μετρούμενη κάθετη απόσταση. Η συνηθέστερη ορθή απόσταση (s) υπολογίζεται μέσω της σχέσης 1.1, όπου d<sub>m</sub> η συνηθέστερη (λοξή) απόσταση:

$$s = d_m sina$$
 (1.1)

Ενδεικτικά στο Σχήμα 1.3 φαίνονται οι συνηθέστερες ορθές αποστάσεις s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub>, s<sub>3</sub>, τριών οικογενειών ασυνεχειών, καθώς και η τυχαία μετρούμενη συνηθέστερη απόσταση d<sub>2</sub> της οικογένειας 2.

Χαρακτηρισμός	Κάθετη απόσταση (mm)
Εξαιρετικά Πυκνές	<20
Αρκετά πυκνές	20-60
Μέτρια πυκνές	60-200
Μέση κατάσταση	200-600
Μέτρια αραιές	600-2000
Αρκετά αραιές	2000-6000
Εξαιρετικά αραιές	>6000

Πίνακας 1.1 Χαρακτηρισμός μεγέθους ορθής απόστασης ασυνεχειών. (Brown, 1981)



Σχήμα 1.2 Μέτρηση της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών σε επιφάνεια πετρώματος. (Brown, 1981)

3. Εμμονή (Persistence)

Η έννοια της εμμονής περιγράφει την χωρική έκταση της ασυνέχειας σε μία επιφάνεια. Η εμμονή μίας ασυνέχειας μπορεί να υπολογισθεί με το άθροισμα του ίχνους της (Ι<sub>i</sub>) διαιρώντας το συνολικό μήκος (L) της ευθείας όπου εμφανίζεται δηλαδή σύμφωνα με την σχέση 1.2.

Eμμονή = 
$$\frac{\sum li}{L}$$
 (1.2)

Στο σχήμα 1.3 απεικονίζεται η εμμονή των ασυνεχειών, όπου φαίνεται η διαφορά μίας ασυνέχειας με μέγιστη εμμονή ( $\sum li = L$ ) και μίας ασυνέχειας η οποία διακόπτεται.



Σχήμα 1.3 Απεικόνιση της εμμονής των ασυνεχειών (Kim et al., 2007)

4. Τραχύτητα

Η τραχύτητα είναι ένας σημαντικός παράγοντας της διατμητικής αντοχής της ασυνέχειας ειδικά στην καθώς επηρεάζει την γωνίας τριβής (φ). Η εκτίμηση της τραχύτητας γίνεται για τρείς κλίμακες παρατήρησης (Σχήμα 1.4):

- Μικρή κλίμακα παρατήρησης μερικών cm, όπου διακρίνει τις ασυνέχειες σε τραχείες, λείες και ολισθηρές.
- Μεσαία κλίμακα παρατήρησης μερικών m, όπου διακρίνει τις ασυνέχειες σε βαθμιδωτές, κυματοειδείς και επίπεδες
- Μεγάλη κλίμακα παρατήρησης μεγαλύτερη από 10 m, αλλάζει τοπικά την κλίση.

	rough	
н	smooth	
m	siickensided	
	STEPPED	
IV	rough	
v	smooth	
vi	slickensided	
	UNDULATIN	G
VII	rough	
VIII	smooth	
ыx	slickensided	
	PLANAR	

Σχήμα 1.4 (Brown, 1981)

5. Αντοχή τοιχώματος

Αφορά την θλιπτική αντοχή του πετρώματος των τοιχωμάτων της ασυνέχειας και αποτελεί σημαντικό παράγοντα της διατμητικής αντοχής της όταν δεν υπάρχει υλικό πλήρωσης. Δηλαδή τα τοιχώματα βρίσκονται σε επαφή. Η αντοχή των τοιχωμάτων πολύ πιθανό να είναι χαμηλότερη σε σχέση με του πετρώματος λόγω της αποσάθρωσης που επηρεάζει περισσότερο τα τοιχώματα. Η αποσάθρωση της βραχόμαζας διακρίνεται σε έξι κατηγορίες από υγιές πέτρωμα (1) έως παραμένον έδαφος (6). Η αποσάθρωση των τοιχωμάτων της ασυνέχειας διακρίνεται

- υγιές πέτρωμα
- αποχρωματισμένο
- αποσυντεθειμένο
- διαμελισμένο

Η εκτίμηση της αντοχής μπορεί να γίνει είτε απλά με χρήση γεωλογικού σφυριού, είτε με χρήση της σφύρας Schmidt.

6. Άνοιγμα

Είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων της ασυνέχειας, όπου ο χώρος που δημιουργείται μπορεί να είναι πληρωμένος με αέρα ή νερό (Σχήμα 1.5). Ο χαρακτηρισμός του ανοίγματος διακρίνεται σε 3 κατηγορίες.

- Κλειστές, με άνοιγμα <0.5mm
- Διάκενο, με άνοιγμα 0.5 έως 10mm
- Ανοικτό, με άνοιγμα >10mm



Σχήμα 1.5 Απεικόνιση του μεγέθους ανοίγματος ασυνέχειας (Brown, 1981)

### 7. Πλήρωση

Πλήρωση ονομάζεται το υλικό όπου εμπεριέχεται μεταξύ των τοιχωμάτων της ασυνέχειας και είναι συνήθως ασθενέστερο από το μητρικό πέτρωμα. Το κενό μεταξύ των τοιχωμάτων όταν είναι πληρωμένο με κάποιο υλικό ονομάζεται πλάτος. Η πλήρωση μπορεί να περιέχει υλικά όπως άμμος, η ιλύς, η άργιλος, το λατυποπαγές, ο μυλονίτης ή μπορεί να περιέχει τις λεπτές ορυκτές επιστρώσεις και τις θεραπευμένες (συγκολλημένες) ασυνέχειες, π.χ. (φλέβες χαλαζία ή ασβεστίτη). Η γεωμετρική πολυπλοκότητα των πληρωμένων ασυνεχειών φαίνεται στο Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6 Παράδειγμα γεωμετρικής πολυπλοκότητας πληρωμένων ασυνεχειών (Brown, 1981).

8. Παρουσία νερού

Η παράμετρος αυτή αφορά την εμφάνιση υγρασίας και ροής νερού είτε σε μεμονωμένες ασυνέχειες είτε στην βραχόμαζα σαν σύνολο. Στην ανάλυση για μεμονωμένες ασυνέχειες γίνεται διαχωρισμός ως προς την ύπαρξη ή μη υλικού πλήρωσης και σε κάθε περίπτωση βαθμονομούνται σε 6 στάδια, το πρώτο αφορά στεγνή και αδιαπέρατη ασυνέχεια μέχρι το πέμπτο που περιγράφει διαπερατή ασυνέχεια με ροή νερού υπό πίεση. Βαθμονόμηση παρουσίας ύδατος μπορεί να γίνει και για την βραχόμαζα (πίνακας 1.2).

Βαθμός Διήθησης Βραχόμαζας	Περιγραφή παρουσίας νερού
1	Αδύνατη η εμφάνιση νερού
2	Στεγνές ασυνέχειες χωρίς εμφάνιση νερού
3	Στεγνές ασυνέχειες με στοιχεία όμως εμφάνισης νερού
4	Υγρές ασυνέχειες χωρίς ροή νερού
5	Παρουσία νερού με πολύ μικρή ροή
6	Εμφανής ροή νερού

	Πίνακας 1.2 Βαθμονόμηση	παρουσία νερού σε	βραχόμαζα (Brown,	1981)
--	-------------------------	-------------------	-------------------	-------

### 9. Οικογένειες ασυνεχειών

Το σύνολο των ασυνεχειών που είναι παράλληλες μεταξύ τους ονομάζονται οικογένειες ασυνεχειών, και αυτή η οικογένεια χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο προσανατολισμό (Σχήμα 1.7). Εμφάνιση μεμονωμένων ασυνεχειών που δεν έχουν κοινό προσανατολισμό με αυτόν κάποιας οικογένειας

καταγράφονται ατομικά. Η βραχόμαζα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί από τον αριθμό οικογενειών όπως φαίνεται στον πίνακα 1.3.

Βαθμονόμηση Βραχόμαζας βάση οικογενειών ασυνεχειών	Περιγραφή οικογενειών ασυνεχειών
1	Συμπαγής, περιοδικές εμφανίσεις ασυνεχειών
2	1 οικογένεια ασυνεχειών
3	1 οικογένεια ασυνεχειών και εμφάνιση τυχαίων ασυνεχειών
4	2 οικογένειες ασυνεχειών
5	2 οικογένειες ασυνεχειών και εμφάνιση τυχαίων ασυνεχειών
6	3 οικογένειες ασυνεχειών
7	3 οικογένειες ασυνεχειών και εμφάνιση τυχαίων ασυνεχειών
8	4 οικογένειες ασυνεχειών
9	Συντετριμένη βραχόμαζα – εδαφική συμπεριφορά

Πίνακας 1.3 Βαθμονόμηση βραχόμαζας σε σχέση με τον αριθμό οικογενειών ασυνεχειών (Brown, 1981)



Σχήμα 1.7 Σύγκριση μίας και τριών οικογενειών ασυνεχειών και η επιρροή τους στην δημιουργία ογκοτεμάχων (Brown, 1981)

10. Μέγεθος ογκοτεμάχους

Το μέγεθος του ογκοτεμάχους εξαρτάται από το άνοιγμα, εμμονή και αριθμό οικογενειών των ασυνεχειών. Ο προσανατολισμός και ο αριθμός οικογενειών των ασυνεχειών καθορίζει το σχήμα του τεμάχους. Το μέγεθος των τεμαχών μπορεί να εκτιμηθεί σε σχέση με τον συντελεστή J<sub>v</sub> (ασυνέχειες / m<sup>3</sup>) που εκφράζει τον αρισμό ασυνεχειών που εντοπίζονται σε ένα κυβικό βραζόμαζας.

Περιγραφή μεγέθους του τεμάχους	J <sub>v</sub> (ασυνέχειες / m³)
Πολύ μεγάλα τεμάχη	<1
Μεγάλα τεμάχη	1-3
Μέτρια τεμάχη	3-10
Μικρά τεμάχη	10-30
Πολύ μικρά τεμάχη	>30
Κατακερματισμένη μάζα	>60

Πίνακας 1.4 Εκτίμηση	μεγέθους του	τεμάχους	σε σχέση με τον	ν συντελεστή J <sub>v</sub> (Brov	wn, 1981).
	p 1 ,				, == ==,.

Η βραχόμαζα μπορεί επίσης να χαρακτηριστεί ως προς την μορφή της όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8 όπου:

- Σχήμα 1.9.α: συμπαγής, ογκοτεμαχισμένη (επιρροή λίγων ή πολύ αραιών ασυνεχειών)
- Σχήμα 1.9.β: ακανόνιστη θρυμματισμένη
- Σχήμα 1.9.γ: πλακοειδής
- Σχήμα 1.9.δ: στηλοειδής



Σχήμα 1.8 Απεικόνιση δομής της βραχομαζας (Brown, 1981)

# 2. Επίδραση των ασυνεχειών στην ευστάθεια υπόγειας εκσκαφής

Η ύπαρξη των ασυνεχειών και τα χαρακτηριστικά τους που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1 προκαλούν ανισοτροπία τόσο στο μέτρο παραμορφωσιμότητας όσο και στην αντοχή της βραχομάζας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση μία οικογένειας ασυνεχειών και η επίδραση της στην αντοχή ενός δοκιμίου που φαίνεται στο σχήμα 2.1. Σε αυτό φαίνεται η επιρροή της κλίσης της ασυνέχειας (β) όπου όταν είναι 0° και 90° η τιμή της αντοχής παραμένει σταθερή και ίση με την αντοχή του άρρηκτου δοκιμίου σε αντίθεση με τις τιμές στο διάστημα (φ<sub>w</sub>, 90) όπου η αντοχή μειώνεται. Σε γωνία ίση με 45 + φ<sub>w</sub>/2 υπολογίζεται η χαμηλότερη τιμή αντοχής.

Όπου:

- φ<sub>w</sub> = γωνία τριβής πετρώματος
- β = κλίσης της ασυνέχειας
- σ<sub>1</sub> = μέγιστη κύρια τάση



Σχήμα 2.1 α) επίδραση κλίσης μίας οικογένειας ασυνεχειών στην αντοχή (Sainsbury & Sainsbury, 2017), β) Προσανατολισμός της ασυνέχειας σε σχέση με την φόρτιση.

Το διάγραμμα του σχήματος 2.1α προκύπτει από την σχέση 2.1 όπου βασίζεται στην θεωρία μεμονωμένου επιπέδου ασυνέχειας (Jaeger & Cook 1979). Συγκεκριμένα η τάση που εφαρμόζεται στο δοκίμιο αναλύεται στην ορθή και διατμητική τάση στο επίπεδο της ασυνέχειας και στην συνεχεία εφαρμόζεται το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για να εξετάσει τη δυνατότητα ολίσθησης.

$$(\sigma 1 - \sigma 3) = \frac{2*(cw + \sigma n * tan\varphi w)}{(1 - |cot\beta w| * tan\varphi w) * |sin2\beta w|} \ge 0, (\sigma \chi \acute{\epsilon} \sigma \eta 2.1)$$

Τη θεωρία ενός μοναδικού επιπέδου αδυναμίας μπορούμε να επεκτείνουμε για δύο ή περισσότερες ασυνέχειες με διαφορετικό προσανατολισμό στο δοκίμιο του πετρώματος όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2. Παρατηρούνται πολλαπλά επίπεδα αδυναμίας σε σημείο όπου το πέτρωμα τείνει να γίνει ισότροπο ως προς την αντοχή.



Σχήμα 2.2 Επίδραση κλίσης πολλαπλών οικογενειών ασυνεχειών στην αντοχή ((Hudson JA, and Harrison JP, 1997)

Παράδειγμα της μεθοδολογίας για την εισαγωγή τις επιρροής των ιδιοτήτων των ασυνεχειών στις μηχανικές ιδιότητες της βραχόμαζας αποτελεί το κριτήριο Hoek Brown.

Το εμπειρικό κριτήριο Hoek Brown έχει εφαρμογή τόσο σε άρρηκτα πετρώματα αλλά και στη βραχόμαζα. Το κριτήριο έχει σαν βάση τις ιδιότητες του άρρηκτου βράχου και στην συνέχεια εισάγοντας παραμέτρους όπως το RMR και GSI γίνεται απομείωση αυτών των ιδιοτήτων λόγω της επίδρασης των ασυνεχειών. Η ταξινόμηση κατά GSI (σχήμα 2.3) αναλύει τις ιδιότητες τον ασυνεχειών που αφορούν αριθμό οικογενειών, απόσταση και κατάσταση της επιφάνειας των ασυνεχειών όπως υλικό πλήρωσης, αποσάθρωση, διήθηση.



Σχήμα 2.3 Εκτίμηση του GSI με βάση τον τεκτονισμό και την ποιότητα των ασυνεχειών της βραχομάζας (Hoek et al., 1995).

Πειράματα βραχομηχανικής πραγματοποιήθηκαν από τον Alejano LR et al.(2010) που περιλάμβαναν τριαξονικές δοκιμές θλίψης σε τεχνητά δοκίμια υπό την επίδραση δύο και τριών οικογενειών ασυνεχειών. Στόχος της έρευνας η ανάδειξη της επίδρασης που έχει η αύξηση οικογενειών ασυνεχειών στις μηχανικές ιδιότητες. Παρατηρήθηκε μείωση της μέγιστης αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου σχέση με το άρρηκτο.

Είναι φανερό ότι η επίδραση των ασυνεχειών επιφέρει μείωση στις ιδιότητες της βραχόμαζας, γεγονός που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα υπόγεια έργα μηχανικού. Στην πραγματικότητα, είναι πολύ σπάνιο η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών να είναι τόσο μεγάλη σε σχέση με το μέγεθος του υπόγειου έργου ώστε η εκσκαφή του να γίνει σε συνθήκες άρρηκτου βράχου (Hudson & Harrison, 1997). Στο σχήμα 2.4 φαίνεται αυτή η θεώρηση όπου συγκρίνεται η περίπτωση γεώτρησης πολύ μικρής διαμέτρου (Α) που πραγματοποιείται σε άρρηκτο βράχο, με διατομή σήραγγας (Β) που την επηρεάζουν ασυνέχειες και με ένα μεγάλο υπόγειο άνοιγμα (Γ) με παρουσία ασυνεχειών σε μεγαλύτερο βαθμό.



Σχήμα 2.4 Ασυνέχειες σε σχέση με έργο μηχανικού (Hudson JA, and Harrison JP, 1997)

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, η επίδραση του μεγέθους του έργου σε σχέση με τις ανομοιογένειες που υπάρχουν φυσικά στην βραχόμαζα είναι μεγάλη ως προς την εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς. Ένας τρόπος ποσοτικοποίησης της επίδρασης του μεγέθους είναι με την εισαγωγή του representative elementary volume (REV) της βραχόμαζας. Με το REV εκφράζεται το στοιχειώδες μέγεθος όγκου το οποίο περιέχει έναν αντιπροσωπευτικό αριθμό ανομοιογενειών ώστε η τιμή των μηχανικών ιδιοτήτων να παραμένει σταθερή. Στο σχήμα 2.5 φαίνεται η σημασία του REV. Παρατηρείται μεγάλη διασπορά των τιμών μίας τυχαίας μεταβλητής μέχρι το μέγεθος αναφοράς REV, όπου μετά από αυτό (και πλησιάζοντας το) αυτή η διασπορά μηδενίζεται. Στο σχήμα παρατηρούνται επίσης δυο καμπύλες όπου η μία που παριστάνει ανομοιογενές (inhomogeneous) μέσο, για τις αρκετά



Σχήμα 2.5 Η έννοια του REV (Hudson JA, and Harrison JP, 1997)

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, το μέγεθος ογκοτεμαχίων που θα δημιουργηθούν εξαρτάται από τον αριθμό οικογενειών, απόσταση και εμμονή των ασυνεχειών σε σχέση με την επιφάνεια που δημιουργεί η εκσκαφή. Ο Cai et al. (2004) συσχέτισε το διάγραμμα GSI, με το μέγεθος ογκοτεμαχίων (block size) που δημιουργούνται από τις εκάστοτε ασυνέχειες, προσθέτοντας τον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα V<sub>b</sub> (σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6 Υπολογισμός μεγέθους τεμάχους βάση του GSI Cai et al. (2004)

Ο υπολογισμός του όγκου τεμάχους υπό επίδραση τριών οικογενειών ασυνεχειών υπολογίζεται με την σχέση 2.2:

$$V_b = \frac{s_1 s_2 s_3}{\sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \sin \gamma_3}$$
, (σχέση 2.2)

Όπου:

- s<sub>i</sub>: η απόσταση κάθε οικογένειας ασυνεχειών
- γ<sub>i</sub>: η γωνία μεταξύ των ασυνεχειών

Ο υπολογισμός των παραμέτρων της σχέσης (2.2) φαίνεται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Cai et al. (2004)

## 3. Επίδραση μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών

Η μηχανική συμπεριφορά μεμονωμένων ασυνεχειών εκτιμάται με βάση την τραχύτητα, την αντοχή του τοιχώματος, το άνοιγμα ή την πλήρωση και την παρουσία νερού. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η δυστροπία μίας ασυνέχειας υπό θλίψη, εφελκυσμό και διάτμηση. Στην περίπτωση της θλίψης παρατηρείται βαθμιαία αύξηση καθώς αυξάνεται η τάση, με την αντοχή να τείνει σε αυτή του άρρηκτου πετρώματος. Όσον αφορά τον εφελκυσμό, οι ασυνέχειες έχουν μηδενική αντοχή σε εφελκυσμό εξ' ορισμού. Σε διάτμηση η καμπύλη είναι μη γραμμική, μοιάζει με την καμπύλη τάσης παραμόρφωσης άρρηκτου δοκιμίου.



Σχήμα 3.1 Ασυνέχεια υποκείμενη σε θλίψη, διάτμηση, εφελκυσμό. Hudson JA & Harrison JP (1997).

Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της ασυνέχειας θεωρούμε μία γραμμική συμπεριφορά, παρόλο που έχει διαπιστωθεί ότι δεν είναι πάντα έτσι. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούμε την σχέση 3.1, τάσης - μετακίνησης η οποία χρησιμοποιεί την έννοια του ελατήριου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.

$$\begin{bmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{sn} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \end{bmatrix}$$

$$\sigma = k * \delta$$
(5xéon 3.1)



Σχήμα 3.2 Απεικόνιση έννοιας ελατηρίου για την περιγραφή της τραχύτητας (Flac Itasca manual)

Οι διαγώνιοι συντελεστές k<sub>nn</sub> και k<sub>ss</sub> εκφράζουν την συμπεριφορά της ασυνέχειας ως προς την ορθή και διατμητική τάση αντίστοιχα. Ένας πρακτικός τρόπος υπολογισμού των k<sub>nn</sub> και k<sub>ss</sub> δίνεται από την σχέση 3.2.

$$kn and ks \leq 10 \left[ \max \left[ \frac{K + \frac{4}{3G}}{\Delta zmin} \right] \right]$$
, Σχέση 3.2 (Udec Itasca manual)

Όπου:

- K = μέτρο διόγκωσης
- G = μέτρο διάτμησης
- Δ<sub>zmin</sub> = μήκος του μικρότερου στοιχείου σε αριθμητική ανάλυση

Το κριτήριο Mohr – Coulomb μπορεί να εφαρμοστεί για να υπολογισθεί η αντοχή της ασυνέχειας (σχέση 3.3) και απαιτεί την γνώση δύο παραμέτρων, αυτή της συνοχής (c) και της γωνίας τριβής (φ).

$$τ = c + \sigma \tan \varphi$$
, (σχέση 3.3)

Στις φυσικές τραχείες ασυνέχειες παρατηρούμε κατά την διάτμησή τους, την επίτευξη σχετικά γρήγορα μιας μέγιστης διατμητικής τάσης (τ), η οποία εν συνεχεία σταδιακά μειώνεται ασυμπτωτικά προς μία ελάχιστη τιμή. Αυτές οι τιμές ονομάζονται μέγιστη και παραμένουσα αντοχή αντίστοιχα. Σύμφωνα με το κριτήριο του Patton (1966), τ= σn·tan (φ+i) για μικρές τιμές της ορθής τάσης (σ<sub>n</sub>) η τραχύτητα της επιφάνειας προκαλεί κατά τη διάτμηση διόγκωση, δίνοντας μία αυξημένη φαινόμενη γωνία τριβής (φ+i). Για μεγαλύτερες τιμές ορθής τάσης ο συντελεστής i μηδενίζεται λόγω θραύσης των ακίδων του πετρώματος στο τοίχωμα της ασυνέχειας. Μεταξύ των δύο ακραίων καταστάσεων ο συντελεστής i λαμβάνει ενδιάμεσες τιμές.

Ο Barton (1973, 1976) έχει διατυπώσει την εμπειρική σχέση 3.4, όπου εισάγει για εκτίμηση της διατμητικής αντοχής της ασυνέχειας παραμέτρους όπως αποσάθρωση και τραχύτητα:

$$τ^P = σ_n \tan \left[ JRC * log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right] = σ_n * tan \varphi_{sec},$$
Σχέση 3.4

Όπου:

- JCS = αντοχής ασυνέχειας
- JRC = τραχύτητας ασυνέχειας
- φ<sub>b</sub> = παραμένουσα γωνία τριβής (μικρότερη της βασικής φ λόγω αποσάθρωσης)



ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ για τιμές του JRC :

Σχήμα 3.3 Τομές τραχύτητας και αντίστοιχες τιμές της παραμέτρου JRC

Στην περίπτωση υπόγειας κυκλικής εκσκαφής η οποία διατρέχεται από παράλληλες ασυνέχειες, είναι δεδομένη η περίπτωση αστάθειας των τοιχωμάτων της. Αυτές οι αστάθειες θα συμβούν σε συγκεκριμένα σημεία πέριξ της εκσκαφής όπου η θέση τους, καθορίζεται από τον προσανατολισμό των ασυνεχειών σε σχέση με αυτή. Θεωρώντας μία ελαστική κατανομή τάσεων γύρω από την κυκλική εκσκαφή, μπορεί να υπολογισθεί η διατμητική και ορθή τάση που εφαρμόζεται στις ασυνέχειες. Υπολογίζοντας εν συνεχεία την διατμητική αντοχή των ασυνεχειών (θεωρώντας κριτήριο Mohr –
Coulomb), όταν αυτή είναι μικρότερη από την τάση που εφαρμόζεται σε αυτές τότε η ασυνέχεια ολισθαίνει.



Σχήμα 3.4 Κυκλικό άνοιγμα με ακτίνα R σε ένα διαξονικό πεδίο (S<sub>h</sub>, S<sub>v</sub>) σε σχέση με μία αυθαίρετη ασυνέχεια με κλίση α. Το σημείο (r, θ) είναι όταν η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών είναι ίση με την τάση που τους ασκείται. P<sub>s</sub> η ισοδύναμη εσωτερική πίεση (Daemen (1989)).

Ο Daemen (1989) έκανε ακριβώς αυτή την θεώρηση και ανέπτυξε την σχέση 3.5 που υπολογίζει το βάθος ολίσθησης για οποιαδήποτε γωνία θ υπό το καθεστώς υδροστατικού πεδίου.

$$\left(\frac{r}{R}\right)^2 = \frac{(P-P_s)[S_e cos2(\alpha-\theta)tan\phi\pm sin2(\alpha-\theta)]}{-S_e(c+Ptan\phi)}$$
, σχέση 3.5

Όπου:

- φ = εσωτερική γωνία τριβής
- c = συνοχή
- R = ακτίνα της σήραγγας
- P = πίεση υπερκειμένων
- P<sub>s</sub> = εσωτερική πίεση υποστήριξης
- α = κλίση ασυνεχειών
- Se = ο συντελεστής διατμητικής υπερφόρτισης των ασυνεχειών
- α = κλίση ασυνεχειών
- R = ακτίνα της σήραγγας

• r = απόσταση από το κέντρο της σήραγγας

Η σχέση όπου γίνεται υπολογισμός του μέγιστου βάθους ολίσθησης (Rmax/R) και της γωνίας εμφάνισης της παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\frac{Rmax}{R} = \left(\frac{1 - \frac{P_s}{p}}{ccos^{\varphi}/p + sin\varphi}\right)^{1/2}, (\text{σχέση 3.6})$$
$$\theta = \alpha \pm \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right), (\text{σχέση 3.7})$$

Στο πλαίσιο της εργασίας έγινε προγραμματισμός της σχέσης 3.5 σε υπολογιστικό φύλλο excel και στο σχήμα 3.5 φαίνεται η διαγραμματική απεικόνισή της όπου διαγράφονται και οι ζώνες ολίσθησης για τρείς περιπτώσεις γωνίας τριβής, φ=10 (α), φ=20 (β), φ=30 (γ). Με μείωση της φ παρατηρείται και μείωση των ζωνών ολίσθησης.







Σχήμα 3.5 διαγραμματική απεικόνισή Σχέσης 3.5

# 4. Επίδραση της εμμονής των ασυνεχειών στην ευστάθεια υπόγειας εκσκαφής

Ο παράγοντας της εμμονής έχει σημαντική επιρροή στις μηχανικές ιδιότητες της βραχόμαζας. Λόγω της εμμονής σε μια ασυνέχεια δημιουργούνται σχετικά μικρές γέφυρες άρρηκτου πετρώματος (rock bridges που ουσιαστικά αυξάνουν την αντοχή, όμως στην πραγματικότητα ο εντοπισμός όλων είναι πρακτικά αδύνατος.

Ένας τρόπος προσδιορισμού της εμμονής γίνεται μέσω της σχέσης 4.1:

$$K = \frac{\sum JL}{\sum JL + \sum RBR}$$
, σχέση 4.1 (Einstein et al. 1983)

Όπου:

- $\sum JL = άθροισμα κομματιών ασυνέχειας$
- $\sum RBR =$ άθροισμα γέφυρας πετρώματος
- $\sum JL + \sum RBR = \sigma u v o \lambda i k o \mu \eta k o \varsigma \alpha \sigma u v \epsilon \chi \epsilon i a \varsigma$



Σχήμα 4.1 Απεικόνιση εμμονής ασυνεχειών (Einstein et al. 1983)

Σε πολλές αναλύσεις ευστάθειας σηράγγων γίνεται η θεώρηση ασυνεχειών με μέγιστη εμμονή, γεγονός που οδηγεί σε υπερεκτιμημένα αποτελέσματα αριθμού και μεγέθους ογκοτεμαχίων πέριξ της εκσκαφής με αποτέλεσμα υπερεκτιμημένα μέτρα προσωρινής υποστήριξης. Ο Barton (2014) έπειτα από έρευνα για την διατμητική αντοχή της βραχόμαζας, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο προσδιορισμός δεν είναι ρεαλιστικός με χρήση αναλύσεων μέγιστης εμμονής.

Ο προσδιορισμός της εμμονής σίγουρα είναι σημαντικός, ταυτόχρονα όμως είναι από τα πιο δύσκολα θέματα της βραχομηχανικής. Οι Kim & Kaiser (2004) χρησιμοποιούν μέθοδο διακριτών στοιχείων σε συνδυασμό με σχεδιασμό πειραμάτων για την έρευνα της επίδρασης της εμμονής στην μηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας πέριξ υπόγειας εκσκαφής. Για την μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης επέλεξαν το UDEC (μέθοδο διακριτών στοιχείων) για τις δυνατότητες στην εισαγώγή των ασυνεχειών. Χρησιμοποιούν συγκεκριμένο σχεδιασμό πειραμάτων ώστε να μειώσουν τον αριθμό προσομοιώσεων που έχουν να διαχειριστούν, χωρίς να χάνεται η στατιστική ακεραιότητα της έρευνας. Για την εκτίμηση επιρροής των διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών ως προς την αντοχή της βραχόμαζας έκαναν 49 προσομοιώσεις.

Στο σχήμα 4.2 α φαίνεται η δημιουργία ογκοτεμαχίων υπό την επίδραση 2 οικογενειών - μη συνεχών ασυνεχειών. Σαν αποτέλεσμα κάποιες ασυνέχειες καταλήγουν σε άρρηκτο πέτρωμα σχηματίζοντας γέφυρες πετρώματος. Τα κομμάτια ασυνεχειών που καταλήγουν στο άρρηκτο πέτρωμα αφαιρούνται και δημιουργείται το σχήμα 4.2 β όπου φαίνονται ξεκάθαρα τα ογκοτεμάχια με το μέγεθος τους να ποικίλει.



Σχήμα 4.2 Παράδειγμα δημιουργίας ογκοτεμαχίων υπό την επίδραση 2 οικογενειών μη συνεχών ασυνεχειών Kim & Kaiser (2004)

Η παρουσία γέφυρών πετρώματος σε ασυνέχειες με μεταβαλλόμενη εμμονή επιδρούν ευεργετικά στην αντοχή της βραχόμαζας. Η παρουσία γέφυρών δημιουργεί έναν 'σκελετό' στην βραχόμαζα που αυξάνει την αντοχή της. Αντιθέτως ασυνέχειες με μέγιστη εμμονή οδηγούν την βραχόμαζα να αστοχεί παράλληλα σε αυτές αυξάνοντας το βάθος ολίσθησης, όπου σε αυτή την περίπτωση λίγες μόνο παραμορφώσεις εμφανίζονται στις γέφυρες πετρώματος. Στο σχήμα 4.3 Φαίνεται η επίδραση ασυνεχειών μέγιστης και μεταβαλλόμενης εμμονής στην αντοχή της βραχόμαζας.



Σχήμα 4.3 Λόγος διατμητικής προς ορθή τάση σε σχέση την οριζόντα μετακίνηση για την περίπτωση ογκοτεμαχίων με επίδραση μέγιστης εμμονής (•) και με επίδραση μεταβαλλόμενης εμμονής(□) - Kim & Kaiser (2004).

Στο σχήμα 4.4 φαίνεται η ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) ογκοτεμαχίων (οριζόντιος άξονας) σε σχέση με την διατμητική τάση (κατακόρυφος άξονας). Τα ογκοτεμάχια υπολογίζονται με την σχέση 4.2. Παρατηρείται πάρα πολύ καλή συσχέτιση του μεγέθους ογκοτεμαχίων με την διατμητική τάση καθώς επιτυγχάνεται βαθμός προσαρμογής r<sup>2</sup>=0.9 (όπου για r<sup>2</sup>=1 θα υπήρχε η απόλυτη προσαρμογή). Τα μεγέθη είναι ανάλογα μεταξύ τους.

$$\frac{A}{Amax}$$
,  $A = \frac{s_{1xs_2}}{\sin(a_{1}+a_2)}$ , Σχέση 4.2



Σχήμα 4.4 ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) ογκοτεμαχίων (οριζόντιος άξονας) σε σχέση με την διατμητική τάση (κατακόρυφος άξονας) - Kim & Kaiser (2004).

Για την εκτίμηση επιρροής των διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών ως προς την αντοχή της βραχόμαζας πραγματοποίησαν ανάλυση διασποράς (ANOVA), καταλήγουν ότι η παράμετρος της εμμονής είχε την σημαντικότερη στατιστική επίδραση σε αυτά. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει λόγω των τιμών F και στην περίπτωση μέγιστης εμμονής και μεταβαλλόμενης (εκφράζει την σημαντικότητα μία παραμέτρου ως προς τα αποτελέσματα), όπου η τιμή F παίρνει τιμές:

- Περίπτωση μέγιστης εμμονής
  - Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών: F = 8.135

- Γωνία μεταξύ ασυνεχειών: F = 0.463
- Περίπτωση μεταβαλλόμενης εμμονής
  - Εμμονή: F = 10.022
  - Απόσταση μεταξύ ασυνεχειών: F = 5.749
  - Γωνία μεταξύ ασυνεχειών: F = 4.439

Σε συνέχεια της έρευνας αυτή την φορά σε τρισδιάστατο περιβάλλον φαίνεται στο πίνακα 4.1 η επίδραση της εμμονής να είναι πιο σημαντική όσον αφορά την μετακίνηση στην οροφή σε σχέση με τις παρειές όπως υποδεικνύει η τιμή F.

Source	Dependence	Sum of square	Degree of freedom	Square of average	F	Significance	
Persistence factor	Settlement	5.387E - 02	7	7.695E - 03	43.792	0.005	
	Convergence	1.994E - 02	7	2.848E - 03	7.215	0.036	

Πίνακας 4.1 ανάλυση διασποράς (ANOVA) - Kim & Kaiser (2004).

Ο Einstein et al. (1983) εξέτασε την επιρροή της εμμονής στην ευστάθεια πρανούς με χρήση στατιστικών μεθόδων. Χρησιμοποίησε έναν κώδικα με όνομα SLOPESIM που χρησιμοποιεί την μέθοδο Monte Carlo για την αναπαραγωγή τυχαίων πρότυπων συστημάτων μίας οικογένειας ασυνεχειών ακολουθώντας τις 'κρίσιμες' διαδρομές (critical paths) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5 Για κάθε ασυνέχεια με μεταβαλλόμενη εμμονή υπολογίζεται η τιμή SM που είναι η διαφορά κομματιών ασυνέχειας (L) και άρρηκτου-γέφυρες πετρώματος (R): SM = R – L, όταν SM < 0 τότε επέρχεται αστοχία της βραχόμαζας.



Σχήμα 4.5 Einstein et al. (1983)

Πραγματοποίησε παραμετρική ανάλυση για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών και του πρανούς και τις μηχανικές ιδιότητες των ασυνεχειών. Συμπεραίνει ότι στην περίπτωση όπου οι τιμές συνοχής (c) και γωνίας τριβής (φ) των ασυνεχειών έχουν υψηλές τιμές τότε έχουν μεγάλη στατιστική σημαντικότητα στα αποτελέσματα. Αντιθέτως, όταν λαμβάνουν σχετικά μικρές τιμές τότε αρχίζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανάλυσης να γίνονται σημαντικό, από αυτά η παράμετρος της εμμονής είναι η πιο σημαντική.

Και από τις δύο μελέτες ( των Kim & Kaiser (2004) και Ο Einstein et al. (1983)) αναδεικνύεται ότι η παράμετρος της εμμονής έχει την μεγαλύτερη επιρροή όσον αφορά τις περιπτώσεις που εξέτασαν. Επίσης αναγνωρίζεται η σημασία της εμμονής ως προς την δημιουργία γέφυρών πετρώματος που επιδρούν ευεργετικά στην αντοχή της βραχόμαζας.

## 5. Εκδήλωση πλαστικής ζώνης σε υπόγειες εκσκαφές

Η εκσκαφή υπόγειων ανοιγμάτων σε σκληρά πετρώματα δημιουργεί μία περιοχή γύρω από αυτά που αποτελείται από πιο μαλακή ή κερματισμένη γεωμάζα, που δύναται να προσφέρει ακόμη αντίσταση σε σχέση με την αρχική τους κατάσταση. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αξιοποιηθεί κατά την διάνοιξη σηράγγων με αρκετούς τρόπους για την βελτιστοποίηση της υποστήριξης.

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της γεωμάζας αυτή θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ισότροπα και ότι είναι ένα ομοιογενές και συνεχές μέσο μέχρι το σημείο διαρροής της λόγω διάτμησης σύμφωνα με την θεωρεία της πλαστικότητας. Μέχρι το σημείο διαρροής θεωρείται ως ελαστικό μέσο, μετά από αυτό ως πλαστικό. Το σημείο έναρξης της διαρροής εξαρτάται από την εντατική κατάσταση του πετρώματος και προσδιορίζεται από τα κριτήρια που συνδέουν τις κύριες τάσεις που εφαρμόζονται σε αυτό.

Για κυκλικό άνοιγμα με ακτίνα R μέσα σε ελαστοπλαστική γεωμάζα που εκφράζεται μέσω του κριτηρίου Mohr-Coulomb, υπό την επίδραση υδροστατικού πεδίου p₀, με την εσωτερική πίεση να είναι ομοιόμορφη προκύπτει το σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 Δημιουργία ζώνης διαρροής γύρω από υπόγειο άνοιγμα (Σοφιανός, 2015)

Επειδή το πέτρωμα αντιστηρίζεται από μία πίεση piπου είναι μικρότερη από την προ υπάρχουσα πίεση του εντατικού πεδίου p₀, το περιβάλλον πέτρωμα εκτονώνεται. Ο συντελεστής αποτόνωσης λ εκφράζεται ως:

$$\lambda = 1 - rac{p}{p_o}$$
, (σχέση5.1)

Όπου:

- p: η ισοδύναμη εσωτερική πίεση
- p<sub>o</sub>: πίεση υπερκείμενων

Στο σχήμα 5.2 φαίνεται η απομείωση της εσωτερικής πίεσης σε σχέση με το λ, όπου:

- Στο σημείο  $\lambda$ =0 η εσωτερική πίεση p είναι ίση με αυτή της p<sub>o</sub>
- Στο σημείο 0< $\lambda$ <1 η εσωτερική πίεση p = (1- $\lambda$ ) p<sub>o</sub>
- Στο σημείο λ=0 η εσωτερική πίεση p είναι ίση με μηδέν



Σχήμα 5.2 Απομείωση της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της σήραγγας (Καββαδάς, 2012)

Η πίεση του εντατικού πεδίου δημιουργεί τάσεις στην περιφέρεια της διατομής που ξεπερνούν την αντοχή της βραχομάζας και δημιουργείται γύρω από την αυτή ένας δακτύλιος βραχομάζας ακτίνας r<sub>e</sub> που υπόκεινται σε πλαστικοποίηση (περιοχή με υπόδειξη συντετριμμένο πέτρωμα σχήμα 5.1). Εκτός της περιοχής αυτής η βραχόμαζα συμπεριφέρεται ελαστικά.

Με την βαθμιαία αύξηση του συντελεστή αποτόνωση η ελαστική συμπεριφορά που παρουσιάζει η βραχόμαζα αρχικά, γίνεται πλαστική κοντά στο τοίχωμα της διατομής. Ο συντελεστής αποτόνωσης που αντιστοιχεί στην έναρξη πλαστικοποίησης ονομάζεται κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης και συμβολίζεται ως λ<sub>cr</sub>. Το λ<sub>cr</sub> δίνεται από την σχέση (5.2):

$$λ_{cr} = 1 - (\frac{2}{1+k})(\frac{N_s - 1}{N_s})$$
, σχέση 5.2

Όπου:

- Συντελεστής υπερφόρτισης:  $N_s = \frac{2p_o}{\sigma_{cm}}$ , σχέση 5.3
  - ο Πίεση υπερκείμενων:  $p_o = \gamma H$ , σχέση 5.4
  - ο Ειδικό βάρος: γ
  - Βάθος εκσκαφής: Η
  - ο Αντοχή βραχόμαζας:  $\sigma_{cm}=2c\sqrt{k}$ , σχέση 5.5
  - ο  $k = tan^2 (45 + \frac{\varphi}{2})$ , σχέση 5.6

Ο υπολογισμός των μετακινήσεων του τοιχώματος της σήραγγας διαφέρει για την ελαστική και πλαστική περιοχή της βραχόμαζας.

Στην ελαστική περιοχή οι μετακινήσεις στο τοίχωμα της σήραγγας (uel) δίνονται από την σχέση 5.7 (Καββαδάς, 2012), όπου ισχύει όταν:

- $\lambda \leq \lambda_{cr}$ , στην περίπτωση ελαστο-πλαστικής βραχόμαζας
- $λ_{cr} \ge 1$  πλήρως ελαστική συμπεριφορά

$$u_{el} = \lambda R \frac{p_o}{2G}$$
, σχέση 5.7

Όπου:

- Μέτρο διάτμησης:  $G = \frac{Em}{2(1+\nu)}$ , σχέση 5.8
  - ο Μέτρο παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας: Em
  - ο Λόγος Poisson: v
  - ο Ακτίνα διατομής: R

Στην πλαστική περιοχή οι μετακινήσεις στο τοίχωμα της σήραγγας (u<sub>p</sub>) δίνονται από την σχέση 5.9 (Καββαδάς, 2012), που ισχύει όταν:

- $\lambda > \lambda_{cr}$ , στην περίπτωση ελαστο-πλαστικής βραχόμαζας
- λ<sub>cr</sub> < 1
- k≠0

$$u_p = r_p \left(\frac{p_o}{2G}\right) \frac{(k-1)N_s + 2}{(k+1)N_s}$$
, σχέση 5.9

Όπου:

$$\frac{r_p}{R} = \left[\left(\frac{2}{k+1}\right) \frac{N_s + \frac{2}{k-1}}{(1-\lambda)N_s + \frac{2}{k-1}}\right]^{\frac{1}{k-1}}$$
, σχέση 5.9

Συνήθης είναι η χρήση των διαγραμμάτων σύγκλισης – αποτόνωσης. Σε αυτά παρουσιάζονται οι μετακινήσεις του τοιχώματος της σήραγγας σε σχέση με τον συντελεστή αποτόνωσης λ. Ενδεικτικά παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3 Διάγραμμα σύγκλισης – αποτόνωσης

Σε αυτό φαίνεται η ελαστική περιοχή, από λ=0 μέχρι λ=0.65, όπου η καμπύλη συμπεριφέρεται γραμμικά σε σχέση με την μετακίνηση. Από το σημείο λ=0.65 μέχρι την πλήρη αποτόνωση λ=1, είναι η πλαστική περιοχή όπου χάνεται η γραμμικότητα. Αυτή την εναλλαγή της γραμμικότητας καθορίζει το λ<sub>cr</sub>, που σε αυτή την περίπτωση είναι 0.65.

# 6. Αριθμητικό προσομοίωμα

Μετά από την εξέταση της σχετικής βιβλιογραφίας, διαπιστώθηκε η ανάγκη να εξεταστεί συστηματικά η συμπεριφορά ισχυρής ασυνεχούς βραχομάζας με ένα έως τρία συστήματα ασυνεχειών. Σε μία τέτοια περίπτωση, η συμπεριφορά αναμένεται να καθορίζεται κυρίως από την αντίστοιχη συμπεριφορά των ασυνεχειών. Η θεώρηση ισότροπης χαμηλότερων μηχανικών χαρακτηριστικών βραχομάζας αναμένεται να αποκλίνει από την πραγματική. Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκε η προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι παραδοχές του αριθμητικού προσομοιώματος που κατασκευάστηκε. Επίσης παρουσιάζεται και η επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του προσομοιώματος μέσω σύγκρισης με δύο αναλυτικές λύσεις. Η μία αφορά τη συμπεριφορά εκσκαφής σε ελαστικό πέτρωμα υπό την επίδραση μίας οικογένειας ασυνεχειών (Daemen, 1983). Η δεύτερη αναλυτική λύση προέρχεται από Καββαδά (2012) και αφορά την καμπύλη σύγκλισης - αποτόνωσης συνεχούς πετρώματος. Επίσης αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό του λ<sub>cr</sub>.

### 6.1. Παραδοχές Προσομοίωσης

Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων επιλέχθηκε ο κώδικας RS2 της Rockscience. Είναι ένας κώδικας δισδιάστατης ανάλυσης (2D) πεπερασμένων στοιχείων, επιλέγεται για τις δυνατότητές του στην προσομοίωση γεωτεχνικών προβλημάτων καθώς και χαρακτηριστικών ασυνεχούς βραχόμαζας και την ευκολία στοχαστικής εμφάνισης των ασυνεχειών και της εμμονής τους.

Το προσομοίωμα είναι τετραγωνικό και τα όρια του αντιστοιχούν σε εννέα φορές την ακτίνα της εκσκαφής. Για την διακριτοποίηση επιλέχθηκαν τριγωνικά – εξακομβικά στοιχεία διαβαθμισμένου μεγέθους. Για τις συνοριακές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν πακτώσεις λόγω του μεγάλου πάχους υπερκειμένων. Η διατομή της εκσκαφής είναι κυκλική με ακτίνα (R) 1m ώστε να αδιαστατοποιούνται αυτόματα όλα τα παράγωγα μεγέθη και βρίσκεται σε βάθος (H) 200m. Το εντατικό πεδίο είναι υδροστατικό και σταθερό ( $\sigma_1=\sigma_3=\sigma_z=\gamma^*H=5.4$  MPa).

Η συμπεριφορά της βραχομάζας θεωρείται ισότροπη, ελαστοπλαστική και περιγράφεται με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Οι τιμές των ιδιοτήτων του πετρώματος παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1 και επιλέχθηκαν ως συνήθεις τιμές που παρουσιάζονται σε πετρώματα του ελληνικού χώρου όπως ασβεστόλιθοι.

Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Ειδικό βάρος (γ)	0.027	MN/m3
Λόγος Poisson	0.2	-
Young Modulus	14656.3	MPa

#### Πίνακας 6.1 Τιμές ιδιοτήτων πετρώματος

Γωνία τριβής (φ)	33	μοίρες
Συνοχή (c)	1.5	MPa

Κατά τις προσομοιώσεις εξετάζεται η επίδραση μίας, δύο και τριών οικογενειών ασυνεχειών, η συμπεριφορά των οποίων περιγράφεται με το κριτήριο Mohr-Coulomb. Η επιλογή του συγκεκριμένου κριτηρίου όπως και στην περίπτωση της βραχόμαζας γίνεται ώστε τα δύο στοιχεία της προσομοίωσης (ασυνέχειες-βραχομάζα) να εκφράζονται με τις ίδιες παραμέτρους (συνοχή και γωνία τριβής) και να είναι ξεκάθαρη η μεταξύ τους διαφορά διατμητικής αντοχής. Οι ιδιότητες των ασυνεχειών λαμβάνουν ένα εύρος τιμών όσον αφορά τις μηχανικές και γεωμετρικές τους ιδιότητες, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2.

Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Γωνία τριβής (φ)	10	μοίρες
	20	μοίρες
	30	μοίρες
Συνοχή (c)	0.0054	MPa
	0.054	MPa
	0.54	MPa
Εμμονή (persistence)	100	%
	75	%
	50	%
	20	%
Απόσταση (s)	0.25	m
	0.5	m
	1	m
Κλίση ασυνεχειών		
1 οικογένεια	40	μοίρες
2 οικογένειες	40 και -50	μοίρες
3 οικογένειες	40, -50, -15	μοίρες
Θέση εκκίνησης (seed)	0	-
	0.3	_

Πίνακας 6.2 Τιμές ιδιοτήτων ασυνεχειών που εισήχθησαν στον κώδικα RS2.

Η θέση εκκίνησης αφορά την θέση από την οποία ξεκινά η παραγωγή των ασυνεχειών από τον κώδικα όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1



Σχήμα 6.1 θέση εκκίνησης (seed)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται ενδεικτικά 2 προσομοιώσεις, όπου φαίνεται η στοχαστική επιρροή της εμμονής για την περιγραφή των ασυνεχειών.



Σχήμα 6.2: (α) Ενδεικτική προσομοίωση με μία οικογένεια ασυνεχειών, κάθετη απόσταση 1m και εμμονή σε ποσοστό 50%. (β) Ενδεικτική προσομοίωση με τρείς οικογένειες ασυνεχειών, κάθετη απόσταση 0.25m και εμμονή σε ποσοστό 50%.

## 6.2. Επαλήθευση προσομοιώματος

Η επαλήθευση έγινε για δύο αναλυτικές λύσεις. Η πρώτη αφορά τη συμπεριφορά εκσκαφής σε ελαστικό πέτρωμα με μία οικογένεια ασυνεχειών (Deamen, 1990) ώστε να επαληθευτεί η συμπεριφορά του συνδυασμού πετρώματος-ασυνεχειών. Η δεύτερη επαλήθευση έγινε σύμφωνα με τον Καββαδά (2012) και αφορά στην καμπύλη σύγκλισης - αποτόνωσης συνεχούς πετρώματος.

# 6.2.1. Επαλήθευση προσομοιώματος ελαστικής βραχομάζας με μία οικογένεια ασυνεχειών

Για την επαλήθευση χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (3.5) ενώ η γραφική απεικόνισή της δίνεται στο σχήμα 6.3 σε πολικές συντεταγμένες, για τις τιμές παραμέτρων του Πίνακα 6.3.

Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Ακτίνα (R)	1	m
Απόσταση από κέντρο διατομής (r)	1	m
Πίεση υπερκείμενων (Ρ)	5.4	MPa
Συντελεστής διατμητικής υπερφόρτισης των ασυνεχειών (Se)	1	-
Κλίση ασυνεχειών (α)	40	μοίρες
Γωνία τριβής (φ)	20	
Συνοχή (c)	0.054	MPa

#### Πίνακας 6.3: Αριθμητικές τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης (3.5)



Σχήμα 6.3 Γραφική απεικόνηση αναλυτικής λύσης Daemen

Το μέγιστο βάθος ολίσθησης σύμφωνα με την εξίσωσεη (3.6) υπολογίζεται ως <u>Rmax=1.68m</u> και η γωνία εμφάνισης στις 95° και 5°.

Πραγματοποιήθηκε αριθμητική επίλυση τριών προσομοιωμάτων με δράση μίας οικογένειας ασυνεχειών με μέγιστη εμμονή και κανονική δυστροπία (stiffness) ίση με 100000 MPa/m. Η αλλαγή σε κάθε ένα από αυτά είναι η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών. Η απόσταση των ασυνεχειών s παίρνει τιμές σε σχέση με την ακτίνα της διατομής R (ώστε να σχετίζεται με την έννοια της κλίμακας του έργου) ως:

- s/R = 1
- s/R = 0.5
- s/R = 0.25

Παρακάτω φαίνεται η γραφική σύγκριση των αριθμητικών επιλύσεων με την λύση του Daemen. Οι ασυνέχειες που έχει ξεπεραστεί η διατμητική τους αντοχή και έχουν ολισθήσει, σημειώνονται με κόκκινο. Οι μετακινήσεις σημειώνονται με χρωματική κλίμακα ενώ η αναλυτική λύση για τις περιοχές που οι ασυνέχειες έχουν ολισθήσει σημειώνονται με γαλάζια γραμμή (σχήμα 6.4)





Г. s=0.25



Σχήμα 6.4 Γραφική σύγκριση των αριθμητικών επιλύσεων με την λύση του Daemen

# 6.2.2 Συμπεράσματα σύγκρισης αριθμητικής και αναλυτικής λύσης στον προσδιορισμό βάθους ολίσθησης

Από την γραφική σύγκριση του σχήματος 6.4, παρατηρείται ότι κατά την αριθμητική ανάλυση και στις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, το βάθος ολίσθησης είναι μεγαλύτερο από αυτό της αναλυτικής λύσης. Αυτή η απόκλιση εμφανίζεται στην ασυνέχεια η οποία εφάπτεται στην περίμετρο της διατομής. Η διαφορά αυτή μεταξύ των λύσεων είναι η αναμενόμενη και οφείλεται στην επίδραση της απόστασης των ασυνεχειών.

6.2.3 Επαλήθευση προσομοιώματος συνεχούς βραχομάζας

Λύνοντας της σχέση 5.2, προκύπτει <u>λcr=0.78</u>

Όπου οι όροι της εξίσωσης υπολογίζονται ως:

•  $k = tan^2(45 + \frac{\varphi}{2}) = 3.39$ 

• 
$$N_s = \frac{2p_o}{\sigma_{cm}} = 1.95$$

$$\circ p_o = \gamma H = 5.4$$

 $\circ \quad \sigma_{cm} = 2c\sqrt{k} = 5.5$ 

Στην συνέχεια δημιουργείται το διάγραμμα σύγκλισης αποτόνωσης που προκύπτει από την αναλυτική λύση που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.5. Ο υπολογισμός των μετακινήσεων για την δημιουργία του διαγράμματος έχουν προκύψει ως εξής:

• <u>Για την ελαστική περιοχή</u> μέχρι το λ<sub>cr</sub>, οι μετακινήσεις δίνονται από την σχέση 5.7

Όπου:

$$\circ \quad G = \frac{Em}{2(1+\nu)} = 6106,6MPa$$

Για την πλαστική περιοχή μετά το λ<sub>cr</sub>, οι μετακινήσεις δίνονται από την σχέση 5.9:

Έτσι προκύπτει το σχήμα 6.5



Σχήμα 6.5 διάγραμμα σύγκλισης αποτόνωσης μέσω αναλυτικής λύσης (Καββαδά 2012).

#### 6.2.4 Διάγραμμα σύγκλισης – αποτόνωσης μέσω αριθμητικής λύσης

Στο σημείο αυτό αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθείται κατά την παρούσα εργασία για τον υπολογισμό του  $\lambda_{cr}$ .

Η προσομοίωση περιλαμβάνει 20 στάδια κατά τα οποία ο συντελεστής σύγκλισης αποτόνωσης λαμβάνει τιμές σύμφωνα με τον Πίνακα 6.4.. Όλα τα στάδια ξεκινούν πριν την εκσκαφή της διατομή όπου λ=0, όπου με βήμα 0.05 φτάνουν στο τελικό στάδιο αποτόνωσης όπου λ=0.95 για την περίπτωση μίας – δύο οικογενειών και λ=0.9 για την περίπτωση τριών οικογενειών. Λόγω πολύ μεγάλων μετακινήσεων σε συγκεκριμένες περιπτώσεις επιλέγεται να μην προσομοιώνεται το τελικό στάδιο αποτόνωσης λ=1.

Στάδιο	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1-λ	1	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05

Πίνακας 6.4 Στάδια προσομοίωσης και αντίστοιχος συντελεστής αποτόνωσης.

Από την αριθμητική επίλυση υπολογίζεται στην στέψη της διατομής μία μετακίνηση για κάθε στάδιο δηλαδή για κάθε λ που έχει επιλεχθεί. Με το σύνολο των μετακινήσεων προκύπτει το διάγραμμα σύγκλισης – αποτόνωσης. Ο προσδιορισμός του λ<sub>cr</sub> γίνεται υπολογίζοντας την ποσοστιαία διαφορά κλίσης μεταξύ των σημείων της καμπύλης. Ως ευαισθησία της μέτρησης ορίζεται η διαφορά 5%.

#### 6.2.5 Αριθμητική επίλυση συνεχούς προσομοιώματος

Πραγματοποιήθηκε η αριθμητική επίλυση συνεχούς προσομοιώματος (χωρίς επίδραση ασυνεχειών) με ιδιότητες της βραχόμαζας που έχουν αναλυθεί στην αρχή του κεφαλαίου. Σύμφωνα με την επίλυση προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα σύγκλισης αποτόνωσης.



Σχήμα 6.6 Διάγραμμα σύγκλισης αποτόνωσης συνεχούς βραχόμαζας που προκύπτει από την αριθμητική λύση.

Η καμπύλωση του διαγράμματος που καταδεικνύει την έναρξη της πλαστικοποίησης της βραχομάζας πέριξ της εκσκαφής εμφανίζεται για 1-λ<sub>cr</sub>=0.2, επομένως <u>λ<sub>cr</sub>=0.8</u>. Το αποτέλεσμα αυτό επαληθεύεται αριθμητικά καθώς αλλάζει η κλίση της ευθείας στο σημείο αυτό (βλ. πίνακα 6.5).

Ποσοστιαία διαφορά κλίσης	Συνολικές Μετακινήσεις [m]	1-λ
	0	1
	2.15E-05	0.95
0.00465506	4.30E-05	0.9
-0.004654843	6.44E-05	0.85
-1.9984E-13	8.59E-05	0.8
0.018622841	0.00010741	0.75
-0.051186598	0.0001289	0.7
0.046554935	0.00015038	0.65
3.55271E-13	0.00017186	0.6
-2.10942E-13	0.00019334	0.55
-0.046533271	0.00021483	0.5
0.046554935	0.00023631	0.45
2.02061E-12	0.00025779	0.4

Πίνακας 6.5 Ποσοστιαία διαφορά κλίσης καμπύλης σύγκλισης αποτόνωσης

-0.046533271	0.00027928	0.35
0.046554935	0.00030076	0.3
0	0.00032224	0.25
-2.00729927	0.00034416	0.2
-15.04205263	0.000369961	0.15
-23.44371254	0.000403663	0.1
-16.49239308	0.000444021	0.05
-22.97944617	0.00049642	0

6.2.5 Συμπεράσματα σύγκρισης αριθμητικής και αναλυτικής λύσης για τον προσδιορισμό του λcr

Οι δύο λύσεις δίνουν παρόμοια αποτελέσματα με διαφορά της τάξης του 0.02 στον προσδιορισμό του λ<sub>cr</sub>. Επίσης στο σχήμα 6.7 που παρατίθενται παρακάτω, φαίνεται η συσχέτιση των καμπύλων σύγκλισης αποτόνωσης των δύο λύσεων.



Σχήμα 6.7 Διαγράμματα σύγκλισης αποτόνωσης των δύο λύσεων

# 7. Παραμετρικές αναλύσεις

Στο κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση συγκεκριμένων παραμέτρων που αφορούν ιδιότητες ασυνεχειών, στην εκδήλωση της πλαστικής ζώνης όπως αυτή εκφράζεται μέσω του κρίσιμου λ<sub>cr</sub>. Κατά την ανάλυση στο κεφάλαιο αυτό ο βαθμός αποτόνωσης αναφέρεται ως λ' όπου λ'=1-λ, συνεπώς λ'<sub>cr</sub> = 1 - λ<sub>cr</sub>.

Για την συλλογή των κατάλληλων δεδομένων έγιναν 648 προσομοιώσεις. Ο συνολικός αριθμός των προσομοιώσεων προκύπτει όπως φαίνεται στον πίνακα 7.1. Η παράμετρος της συνοχής εκφράζεται με τον λόγο c/P<sub>o</sub>, ώστε να ενταχθεί στην ανάλυση η πίεση των υπερκείμενων, βάση των οποίων θα μπορεί αποφασιστεί η προσωρινή και μόνιμη υποστήριξη. Επίσης η απόσταση των ασυνεχειών εκφράζεται με τον λόγο s/R, ώστε να σχετίζεται με την κλίμακα του έργου και να γίνει αδιαστατοποίηση. Η θέση εκκίνησης δεν συμπεριλαμβάνεται άμεσα στην ανάλυση όμως μαζί με την παράμετρο της εμμονής προσδίδει στα δεδομένα τυχαιότητα.

Ονομασία Παραμέτρου	Σύνολο διαφορετικών τιμών
c/Po	3
s/R	3
Joint network	3
Φ	3
Εμμονή (persistence)	4
Θέση εκκίνησης (seed)	2
Γινόμενο παραμέτρων=Σύνολο προσομοιώσεων	648

Πίνακας	7.1
---------	-----

Στο παράρτημα υπάρχουν οι πίνακες με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ομαδοποιημένα κατά αριθμό οικογένειας ασυνεχειών.

#### 7.1 Προσομοιώσεις με μέγιστη εμμονή

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε να γίνει με ομαδοποίηση κατά αριθμό οικογένειας ασυνεχειών. Επιπλέον, λόγω του μεγάλου όγκου αναλύσεων και σταδίων μέσα σε κάθε ανάλυση, επιλέχθηκαν ως ενδεικτικότερες οι εικόνες εκείνες που αφορούν την κατάσταση της βραχόμαζας και των ασυνεχειών της σε τέσσερα χαρακτηριστικά στάδια:

(α) πρώτη εκδήλωση ολίσθησης ασυνεχειών (χωρίς μεγάλες μετακινήσεις)

- (β) στάδιο προσομοίωσης όπου αλλάζει κλίση η καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης
- (γ) ένα στάδιο αμέσως μετά το (β)
- (δ) το τελικό στάδιο αποτόνωσης.

Στα σχήματα απεικονίζεται η κατάσταση της βραχομάζας και των ασυνεχειών της όσον αφορά την αστοχία. Το υπόμνημα της εικόνας 7.1. αφορά την βραχομάζα ενώ η διατμητική αστοχία των ασυνεχειών δηλώνεται με κόκκινο χρώμα.



Σχήμα 7.1 Υπόμνημα αστοχίας στοιχείων.

#### 7.1.1 Προσομοιώσεις με μέγιστη εμμονή με μία οικογένεια ασυνεχειών

Στο σχήμα 7.2 φαίνονται τα στάδια α ως δ όπως περιγράφησαν στην προηγούμενη παράγραφο.





Σχήμα 7.2 Στάδια από την αρχική ολίσθηση των ασυνεχειών μέχρι τελική αποτόνωση, για φ=10°, c=0.054 MPa, s=0.5 m.

Παρατηρήθηκε ότι η ασυνέχεια πέριξ της διατομής ολίσθησε ήδη από το πρώτο στάδιο προσομοίωσης χωρίς όμως μεγάλες μετακινήσεις που να προκαλούν αλλαγή στην καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης. Μάλιστα, μέχρι το στάδιο 6 (β) δεν φαίνεται να αυξάνεται το βάθος ολίσθησης της ασυνέχειας. Όμως αμέσως μετά το κρίσιμο στάδιο όπου έχει θεωρηθεί η εκδήλωση του λ'<sub>cr</sub> φαίνεται σημαντική αλλαγή στο βάθος ολίσθησης για τις ασυνέχειες και κλιμακωτά μέχρι το τελικό στάδιο πλήρους αποτόνωσης επέρχεται διάδοση της αστοχίας πέριξ της διατομής. Τα στάδια εμφάνισης της πρώτης ολίσθησης, του λ'<sub>cr</sub> και της διάδοσης της αστοχίας πέριξ της διατομής. Τα στάδια εμφάνισης της πρώτης ολίσθησης, του λ'<sub>cr</sub> και της διάδοσης της αστοχίας μεταβάλλονται όσο μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών. Όπως είναι αναμενόμενο, όταν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών είναι υψηλότερα, το στάδιο εκδήλωσης μεγαλύτερων μετακινήσεων μετακινείται προς στάδια με μεγαλύτερη αρίθμηση, όπου η αποτόνωση είναι μεγαλύτερη. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 7.3 που φαίνεται η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης για μεταβαλλόμενο φ.



Σχήμα 7.3 Διαγράμματα σύγκλισης - αποτόνωσης για μεταβαλλόμενη φ.

Βάση των καμπυλών σύγκλισης αποτόνωσης μπορούμε να δούμε το σημείο όπου κάθε καμπύλη χάνει την γραμμικότητα και εκφράζει το λ'<sub>cr</sub>.

Στο σχήμα 7.4 φαίνεται το τελικό στάδιο προσομοίωσης (λ'=0.05) σε σχέση με μεταβαλλόμενη απόσταση ασυνεχειών s/R=0.25, 0.5, 1. Με πράσινο κύκλο στην περίπτωση s/R = 0.25 παρατηρείται ότι μεταξύ των ασυνεχειών που έχουν ολισθήσει, αστοχεί και η γέφυρα πετρώματος μεταξύ τους κάτι που δεν παρατηρείται στις άλλες περιπτώσεις λόγω μεγαλύτερης απόστασης ασυνεχειών.





Σχήμα 7.4 Τελικό στάδιο προσομοίωσης (λ'=0.05) σε σχέση με μεταβαλλόμενη s/R=0.25, 0.5, 1, σταθερή c/P₀=0.01, φ=20 και μία οικογένεια ασυνεχειών

### 7.1.2 Προσομοιώσεις με μέγιστη εμμονή με δύο οικογένειες ασυνεχειών



Στο σχήμα 7.5 φαίνονται τα στάδια α ως δ όπως περιγράφησαν στην παράγραφο 7.1.

Σχήμα 7.5 Στάδια από την αρχική ολίσθηση των ασυνεχειών μέχρι τελική αποτόνωση, για φ=10°, c=0.054 MPa, s=0.5 m.

Παρατηρήθηκε ότι η ασυνέχεια πέριξ της διατομής ολίσθησε ήδη από το πρώτο στάδιο προσομοίωσης χωρίς όμως μεγάλες μετακινήσεις που να προκαλούν αλλαγή στην καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης. Μάλιστα, μέχρι το στάδιο 6 (β) δεν φαίνεται να αυξάνεται το βάθος ολίσθησης της ασυνέχειας. Όμως αμέσως μετά το κρίσιμο στάδιο όπου έχει θεωρηθεί η εκδήλωση του λ'<sub>cr</sub> φαίνεται αλλαγή στο βάθος ολίσθησης για τις ασυνέχειες και κλιμακωτά μέχρι το τελικό στάδιο πλήρους αποτόνωσης επέρχεται

διάδοση της αστοχίας πέριξ της διατομής. Τα στάδια εμφάνισης της πρώτης ολίσθησης, του λ'<sub>cr</sub> και της διάδοσης της αστοχίας μεταβάλλονται όσο μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών. Όπως είναι αναμενόμενο, όταν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών είναι υψηλότερα, το στάδιο εκδήλωσης μεγαλύτερων μετακινήσεων μετακινείται προς στάδια με μεγαλύτερη αρίθμηση, όπου η αποτόνωση είναι μεγαλύτερη. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 7.6 που φαίνεται η καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης για μεταβαλλόμενο φ.



Σχήμα 7.6 Διαγράμματα σύγκλισης - αποτόνωσης των μεταβαλλόμενης φ.

Βάση των καμπύλων σύγκλισης αποτόνωσης μπορούμε να δούμε το σημείο όπου κάθε καμπύλη χάνει την γραμμικότητα και εκφράζει το λ'<sub>cr</sub>.

Στο σχήμα 7.7 φαίνεται το τελικό στάδιο προσομοίωσης (λ'=0.05) σε σχέση με μεταβαλλόμενη απόσταση ασυνεχειών s/R=0.25, 0.5, 1.



Σχήμα 7.7 Τελικό στάδιο προσομοίωσης (λ'=0.05) σε σχέση με μεταβαλλόμενη s/R=0.25, 0.5, 1, σταθερή  $c/P_o$ =0.01,  $\varphi$ =20 και δύο οικογένειες ασυνεχειών.

## 7.1.3 Προσομοιώσεις με μέγιστη εμμονή με τρείς οικογένειες ασυνεχειών



Στο σχήμα 7.8 φαίνονται τα στάδια α ως δ όπως περιγράφησαν στην παράγραφο 7.1.

Σχήμα 7.8 Σημαντικά στάδια από αρχική ολίσθηση ασυνεχειών μέχρι τελική αποτόνωση για φ=10, c=0.054, s=0.5.

Παρατηρήθηκε ότι η ασυνέχεια πέριξ της διατομής ολίσθησε ήδη από το πρώτο στάδιο προσομοίωσης χωρίς όμως μεγάλες μετακινήσεις που να προκαλούν αλλαγή στην καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης. Μάλιστα, μέχρι το στάδιο 5 (β) δεν φαίνεται να αυξάνεται το βάθος ολίσθησης της ασυνέχειας. Όμως αμέσως μετά το κρίσιμο στάδιο όπου έχει θεωρηθεί η εκδήλωση του λ'<sub>cr</sub> φαίνεται αλλαγή στο βάθος

ολίσθησης για τις ασυνέχειες και κλιμακωτά μέχρι το τελικό στάδιο πλήρους αποτόνωσης επέρχεται διάδοση της αστοχίας πέριξ της διατομής. Τα στάδια εμφάνισης της πρώτης ολίσθησης, του λ'<sub>cr</sub> και της διάδοσης της αστοχίας μεταβάλλονται όσο μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών. Όπως είναι αναμενόμενο, όταν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών είναι υψηλότερα, το στάδιο εκδήλωσης μεγαλύτερων μετακινήσεων μετακινείται προς στάδια με μεγαλύτερη αρίθμηση, όπου η αποτόνωση είναι μεγαλύτερη. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 7.9 που φαίνεται η καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης για μεταβαλλόμενο φ.



Σχήμα 7.9 Διαγράμματα σύγκλισης – αποτόνωσης των μεταβαλλόμενης φ.

Βάσει των καμπυλών σύγκλισης αποτόνωσης μπορούμε να δούμε το σημείο όπου κάθε καμπύλη χάνει την γραμμικότητα και εκφράζει το λ'<sub>cr</sub>.

Στο σχήμα 7.10 φαίνεται το τελικό στάδιο προσομοίωσης (λ'=0.1) σε σχέση με μεταβαλλόμενη απόσταση ασυνεχειών s/R=0.25, 0.5, 1.



Σχήμα 7.10 Τελικό στάδιο προσομοίωσης (λ'=0.1) σε σχέση με την s/R=0.25, 0.5, 1 με σταθερή c/P₀=0.01 και φ=20 τρείς οικογένειες ασυνεχειών.

Το βάθος ολίσθησης των ασυνεχειών αυξάνεται με μείωση της απόστασης όπως φαίνεται στο σχήμα 7.10. Στην περίπτωση με πυκνή κατανομή ασυνεχειών η αστοχία οδηγείται σε μεγαλύτερο βάθος.

#### 7.2 Προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενη εμμονή

Όπως έχει ήδη αναδειχθεί από τα προηγούμενα κεφάλαια η επιρροή της εμμονής είναι σημαντική. Μέσω του κώδικα, αλλάζοντας την εμμονή των ασυνεχειών από την μέγιστη, κάθε μία ασυνέχεια διακόπτεται κατά μήκος της, δημιουργώντας σε τυχαία σημεία γέφυρες πετρώματος. Όσο μειώνεται η εμμονή τόσο το προσομοίωμα τείνει να συμπεριφερθεί όπως αυτό του συνεχούς μέσου. Ενδεικτικά φαίνεται στο σχήμα 7.11 η περίπτωση προσομοιώματος με εμμονή 25%, όπου η αστοχία οφείλεται στην αστοχία της βραχόμαζας με μηδενική στην ουσία επιρροή από τις ασυνέχειες.



Σχήμα 7.11 Ενδεικτική απεικόνιση προσομοιώματος με εμμονή 25%, s/R=1, μία οικογένεια ασυνεχειών.

Αντιθέτως όταν τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών (απόσταση, οικογένειες) προκαλούν πύκνωση των ασυνεχειών, τότε η επίδραση που τείνει να έχει η εμμονή είναι μικρότερη. Ενδεικτικά στο σχήμα 7.12 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ δύο προσομοιώσεων που έχουν ως κοινό στην γεωμετρία τους 3 οικογένειες ασυνεχειών και απόσταση 0.5m και διαφορά στην εμμονή όπου το ένα έχει μέγιστη (100%) και το άλλο 50%. Η τιμή του λ'<sub>cr</sub> που υπολογίζεται με τις αριθμητικές αναλύσεις είναι η ίδια και στις 2 περιπτώσεις Α και Β. Παρόλα αυτά αλλάζουν οι περιοχές που εκδηλώνεται η πλαστικοποίηση (στο τελευταίο στάδιο προσομοίωσης) αφού η δημιουργία γεφυρών πετρώματος λόγω της εμμονής που δημιουργεί άλλη προδιάθεση στην κατεύθυνση εξάπλωσης της αστοχίας όπως φαίνεται στα Γ και Δ.



Σχήμα 7.12 Σύγκριση μεταξύ δύο προσομοιώσεων με διαφορετική εμμονή.

## 7.2.1 Προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενη εμμονή και μία οικογένεια ασυνεχειών

Στο σχήμα 7.13 παρατηρείται η διαφοροποίηση της επέκτασης της αστοχίας στο τελικό στάδιο προσομοίωσης λ'= 0.05, ως προς τον βαθμό εμμονής. Όπου:

- α = βαθμός εμμονής 100%
- β = βαθμός εμμονής 75%
- γ = βαθμός εμμονής 50%
- δ = βαθμός εμμονής 25%



Σχήμα 7.13 Τελικό στάδιο προσομοίωσης (λ'=0.05) σε σχέση με τον βαθμό εμμονής με σταθερή c/P₀=0.01 και φ=10 μία οικογένεια ασυνεχειών.

Παρατηρείται ότι τείνει προς τον τρόπο αστοχίας της συνεχούς βραχόμαζας με μείωση της εμμονής, όπως φαίνεται στα αντίστοιχα διαγράμματα σύγκλισης αποτόνωσης στο σχήμα 7.14


Σχήμα 7.14 Διάγραμμα u-λ 1 οικογένεια, με σταθερή s=0.5, c=0.054, φ=10

Βάση των καμπύλων σύγκλισης αποτόνωσης μπορούμε να δούμε το σημείο όπου κάθε καμπύλη χάνει την γραμμικότητα και εκφράζει το λ'<sub>cr</sub>. Παρατηρείται στο σχήμα 7.14 η καμπύλη για εμμονή 0.75 να συμπίπτει με αυτή της συνεχούς βραχόμαζας.

### 7.2.2 Προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενη εμμονή και δύο οικογένειες ασυνεχειών

Στο σχήμα 7.15 παρατηρείται η διαφοροποίηση της επέκτασης της αστοχίας στο τελικό στάδιο προσομοίωσης λ'= 0.05, ως προς τον βαθμό εμμονής. Όπου:

- α = βαθμός εμμονής 100%
- $\beta = \beta \alpha \theta \mu \delta \varsigma \epsilon \mu \mu o v \eta \varsigma 75\%$
- γ = βαθμός εμμονής 50%
- $\delta = \beta \alpha \theta \mu \delta \zeta \epsilon \mu \mu o v \eta \zeta 25\%$



Σχήμα 7.15 Τελικό στάδιο προσομοίωσης (λ'=0.05) σε σχέση με τον βαθμό εμμονής με σταθερή c/Po=0.01, φ=10 και δύο οικογένειες ασυνεχειών.

Παρατηρείται ότι τείνει προς τον τρόπο αστοχίας της συνεχούς βραχόμαζας με μείωση της εμμονής, όπως φαίνεται στα αντίστοιχα διαγράμματα σύγκλισης αποτόνωσης στο σχήμα 7.16.



Σχήμα 7.16 Διάγραμμα υ-λ 2 οικογένειες, με σταθερή s=0.5, c=0.054, φ=10.

Βάση των καμπύλων σύγκλισης αποτόνωσης μπορούμε να δούμε το σημείο όπου κάθε καμπύλη χάνει την γραμμικότητα και εκφράζει το λ'<sub>cr</sub>.

## 7.2.3 Προσομοιώσεις με μεταβαλλόμενη εμμονή και τρείς οικογένειες ασυνεχειών

Στο σχήμα 7.17 παρατηρείται η διαφοροποίηση της επέκτασης της αστοχίας στο τελικό στάδιο προσομοίωσης λ'= 0.1, ως προς τον βαθμό εμμονής. Όπου:

- α = βαθμός εμμονής 100%
- β = βαθμός εμμονής 75%
- γ = βαθμός εμμονής 50%
- δ = βαθμός εμμονής 25%



Σχήμα 7.17 Τελικό στάδιο προσομοίωσης (λ'=0.1) σε σχέση με τον βαθμό εμμονής με σταθερή c/P₀=0.01, φ=10 και τρείς οικογένειες ασυνεχειών.

Παρατηρείται ότι τείνει προς τον τρόπο αστοχίας της συνεχούς βραχόμαζας με μείωση της εμμονής, όπως φαίνεται στα αντίστοιχα διαγράμματα σύγκλισης αποτόνωσης στο σχήμα 7.18.



Σχήμα 7.18 Διάγραμμα u-λ 3 οικογένειες, s=0.5, 3 J, με σταθερή c=0.054, φ=100 Per=1.

Βάση των καμπύλων σύγκλισης αποτόνωσης μπορούμε να δούμε το σημείο όπου κάθε καμπύλη χάνει την γραμμικότητα και εκφράζει το λ'<sub>cr</sub>. Στην περίπτωση με εμμονή 0.75 η αστοχία είναι παρόμοια με αυτή με μέγιστη εμμονή όπως φαίνεται και στις καμπύλες σύγκλισης αποτόνωσης του σχήματος 7.18.

Μία παρατήρηση που γίνεται ανεξαρτήτως βαθμού εμμονής (αφορά 473 από τις 648 μετρήσεις) είναι μία απότομη αλλαγή της καμπύλης σύγκλισης - αποτόνωσης που ενδεικτικά φαίνεται στο σχήμα 7.19. Αυτή συμβαίνει στην αρχή του διαγράμματος μεταξύ του λ'=1 και λ'=0.95. Αιτία είναι η παρουσία των ασυνεχειών που δρούν πέριξ της εκσκαφής και ειδικά όταν αστοχούν από το πρώτο κιόλας στάδιο όπως φάνηκε στο υποκεφάλαιο 7.1.1. Η απότομη αυτή αλλαγή δεν έχει θεωρηθεί ως το σημείο που ορίζει την έναρξη της πλαστικοποίησης διότι δεν αιτιολογείται από τη μετέπειτα εξέλιξη του φαινομένου.



Σχήμα 7.19 Ενδεικτική απεικόνιση απότομης αλλαγής

# 8. Στατιστική ανάλυση

Ο μεγάλος όγκος δεδομένων που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση μας επιτρέπει κάνουμε στατιστική ανάλυση. Έτσι στο κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιούνται στατιστικά μεγέθη και μεθοδολογίες για να ερευνηθεί η επιρροή των παραμέτρων των ασυνεχειών ως προς την τιμή του  $\lambda'_{cr}$ . Παρουσιάζονται βασικά στατιστικά μεγέθη, όπως μέσος όρος, τυπική απόκλιση κτλ. (descriptive statistics). Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση διασποράς (ANOVA), παλινδρόμησης (regression), στατιστική συσχέτιση κατά Pearson (correlation). Κατά την ανάλυση στο κεφάλαιο αυτό ο βαθμός αποτόνωσης αναφέρεται ως  $\lambda'$  όπου  $\lambda'=1-\lambda$ , συνεπώς  $\lambda'_{cr} = 1 - \lambda_{cr}$ .

### 8.1 Βασικά στατιστικά μεγέθη

Εάν οι τιμές της μεταβλητής είναι  $x_1$ ,  $x_2$ ,.... $x_n$ , βασικά στατιστικά μεγέθη υπολογίζονται παρακάτω:

- Μέσος όρος (x): Είναι το άθροισμα των τιμών μιας ομάδας αριθμών διαιρούμενο με το πλήθος των αριθμών αυτής της ομάδας. Εκφράζει με μία τιμή την μέση του δείγματος. Επηρεάζεται έως ένα βαθμό από ακραίες τιμές.
- Περικομμένος μέσος όρος: Ίδιος υπολογισμός με τον μέσο όρο αφαιρώντας το 5% των ακραίων τιμών. Μεγάλη διαφορά μεταξύ περικομμένου και κανονικού μέσου όρου σημαίνει ότι οι ακραίες τιμές έχουν μεγάλη επιρροή στο σύνολο δεδομένων.
- Διάμεσος: Είναι η μεσαία τιμή των δεδομένων. Τα μισά δεδομένα είναι μεγαλύτερα από την διάμεσο και τα υπόλοιπα μισά μικρότερα. Δεν επηρεάζεται από ακραίες τιμές όσο επηρεάζεται ο μέσος όρος. Σε περίπτωση συμμετρικής κατανομής ο μέσος όρος και η διάμεσος είναι ίσες.
- Διασπορά: Ένα μέγεθος υπολογισμού της κατανομής των δεδομένων γύρω την μέση τιμή.
   Υπολογίζεται ως: 
   <sup>n</sup><sub>i=1</sub>(xi-x̄)<sup>2</sup>/(n-1)
   <sup>n</sup>
- Τυπική απόκλιση (SD): Εκφράζει πόσο αποκλίνουν τα δεδομένα από την μέση τιμή, Είναι η τετραγωνική ρίζα της διασποράς:  $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(xi-\bar{x})^2}{(n-1)}}$
- **Q1:** Τιμή όπου το 25% των δεδομένων είναι μικρότερα ή ίσα με αυτή.
- **Q2:** Είναι η διάμεσος
- **Q3:** Τιμή όπου το 75% των δεδομένων είναι μικρότερα ή ίσα με αυτή.
- IQR: Η απόσταση μεταξύ Q1 και Q3
- Λοξότητα (Skewness): Δείχνει κατά πόσο η κατανομή των δεδομένων είναι συμμετρική, όπου όσο περισσότερο πλησιάζει το 0 τόσο πιο συμμετρική είναι. Το πρόσημο της τιμής δείχνει την κατεύθυνση της ουράς της κατανομής. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται αυτή η κατεύθυνση όπου Α δείχνει θετικό πρόσημο ενώ η Β αρνητικό.



Κύρτωση (Kurtosis): Δείχνει κατά πόσο η κατανομή αποκλίνει από την κανονική κατανομή.
 Κύρτωση με τιμή 0 εκφράζει την κανονική κατανομή. Στο σχήμα παρακάτω φαίνεται η σημασία του πρόσημου της τιμής.



# 8.2 Ανάλυση διασποράς (ANOVA)

Η ανάλυση διασποράς (ANOVA) ελέγχει την μηδενική υπόθεση (null hypothesis) ότι οι μέσοι όροι δύο ή περισσότερων παραμέτρων είναι ίσοι και ως εναλλακτική ότι όλες οι μέσες τιμές δεν είναι ίσες. Οι σημασία των παραμέτρων του πίνακα διασποράς είναι:

Πίνακας διασποράς:

- DF (degrees of freedom): Στάδια ελευθερίας. Εάν μία μεταβλητή εκφράζεται με τρία στάδια, τα στάδια ελευθερίας είναι δύο (3-1).
- Adj SS (Adjusted sums of squares): Τα προσαρμοσμένα αθροίσματα τετραγώνων είναι μέτρα διακύμανσης για διαφορετικά στοιχεία του μοντέλου. Η σειρά των προβλέψεων στο μοντέλο δεν επηρεάζει τον υπολογισμό των προσαρμοσμένων αθροισμάτων τετραγώνων. Στον πίνακα Ανάλυση διακύμανσης, διαχωρίζονται τα αθροίσματα των τετραγώνων σε διαφορετικά στοιχεία που περιγράφουν τη διακύμανση λόγω διαφορετικών πηγών.
- Adj SS error: Το άθροισμα των τετραγώνων σφάλματος είναι το άθροισμα των τετραγωνικών καταλοίπων. Προσδιορίζει ποσοτικά τη διακύμανση στα δεδομένα που οι προβλέψεις δεν εξηγούν.
- Adj MS (Adjusted mean squares): Τα προσαρμοσμένα μέσα τετράγωνα μετρούν πόση παραλλαγή εξηγεί ένας όρος ή ένα μοντέλο, υποθέτοντας ότι όλοι οι άλλοι όροι περιλαμβάνονται στο μοντέλο, ανεξάρτητα από τη σειρά που εισήχθησαν. Σε αντίθεση με τα προσαρμοσμένα αθροίσματα τετραγώνων, τα προσαρμοσμένα μέσα τετράγωνα λαμβάνουν υπόψη τους βαθμούς ελευθερίας.
- F value: Είναι ο λόγος μεταξύ της διακύμανσης των μέσων όρων των δειγμάτων με την διακύμανση των ίδιων δειγμάτων. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή F, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδειξη ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ των μέσων τιμών των δειγμάτων και επομένως είναι ανεξάρτητες παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη.
- P value: Η τιμή p είναι μια πιθανότητα που μετρά τα στοιχεία έναντι της μηδενικής υπόθεσης (null hypothesis) η οποία είναι ότι η διαφορά μεταξύ των μέσω όρων που εξετάστηκαν είναι σημαντική. Οι χαμηλότερες πιθανότητες παρέχουν ισχυρότερα στοιχεία ενάντια στη μηδενική υπόθεση και ότι είναι στατιστικά σημαντική.

### 8.3 Ανάλυση συσχέτισης κατά Pearson

Η ανάλυση κατά Pearson αφορά στον έλεγχο ύπαρξης συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών. Η ανάλυση δείχνει αν υπάρχει στατιστική συσχέτιση καθώς και την κατεύθυνση και την ένταση της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών. Η τιμές που μπορεί να λαμβάνει βρίσκονται στο κλειστό διάστημα [-1,1] όπου για τις τιμές των άκρων (-1 ή 1) υπάρχει απόλυτη συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών, ενώ τιμή ίση με 0 δείχνει μηδενική συσχέτιση μεταξύ τους. Αρνητικό πρόσημο δηλώνει αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ των μεταβλητών ενώ θετικό δηλώνει μία ανάλογη σχέση.

## 8.4 Ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis)

Παλινδρόμηση (regression analysis) καλείται η μέθοδος εκτίμησης της μιας μεταβλητής, της εξαρτημένης (στην περίπτωση εδώ για το λ'<sub>cr</sub>) από άλλες ανεξάρτητες μεταβλητές (στην περίπτωση εδώ οι ιδιότητες των ασυνεχειών). Η εξίσωση με την οποία πρόκειται να εκτιμηθεί η εξαρτημένη μεταβλητή καλείται εξίσωση παλινδρόμησης. Η πιο απλή περίπτωση είναι του γραμμικού μοντέλου όπου η εξαρτημένη μεταβλητή γ εκφράζεται ως εξής:

 $y_i = a + \beta x_i + \varepsilon_i$ 

Όπου:

- *y<sub>i</sub>* = εξαρτημένη μεταβλητή
- $x_i$  = ανεξάρτητες μεταβλητές
- ε<sub>i</sub> = τυχαίο σφάλμα και παριστάνει τη διαφορά της παρατηρούμενης τιμής γ<sub>i</sub>, για δοσμένο x<sub>i</sub>, από τη θεωρητική τιμή α + β\*x<sub>i</sub>.
- *a*, β = συντελεστές εξίσωσης
- $\beta$  = Συντελεστής παλινδρομήσεως, είναι η κλίση της ευθείας.

Ο προσδιορισμός των συντελεστών α, β γίνεται με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων που έγκειται στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων.

Κατά την ανάλυση παλινδρόμησης δημιουργούνται πίνακες αποτελεσμάτων με την σημασία τους να δίνεται παρακάτω:

- s (τυπικό σφάλμα εκτίμησης): Ονομάζεται η μέση απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της εκτιμηθείσας τιμής της μεταβλητής.
- R<sup>2</sup> (συντελεστής προσαρμογής): Λαμβάνει τιμές μεταξύ κλειστού διαστήματος [0,1]. Όταν R<sup>2</sup>=1 τότε υπάρχει τέλεια προσαρμογή της ευθείας παλινδρομήσεως.

## 8.5 Ομαδοποίηση δεδομένων ανά τιμή παραμέτρου

Γίνεται ομαδοποίηση των δεδομένων ανά τιμή παραμέτρου και εξετάζονται τα βασικά στατιστικά μεγέθη τους καθώς επίσης γίνεται και ανάλυση διασποράς.

#### 8.5.1 Σύγκριση βασικών στατιστικών δεδομένων διαφορετικής εμμονής

Variable	λ'cr (per=1)	λ'cr (per=0.75)	λ'cr (per=0.5)	λ'cr (per=0.25)
Mean	0.5407	0.5182	0.4463	0.3201
SE Mean	0.0142	0.014	0.0157	0.0139
TrMean	0.5408	0.5171	0.439	0.301
StDev	0.1806	0.1781	0.2001	0.1769
Variance	0.0326	0.0317	0.04	0.0313
minimum	0.2	0.2	0.2	0.2
Q1	0.4	0.4	0.25	0.2
median	0.55	0.55	0.4	0.2
Q3	0.65	0.65	0.6	0.4
maximum	0.85	0.85	0.85	0.85
range	0.65	0.65	0.7	0.65
Skeweness	0.11	0.17	0.46	1.46
kurtosis	-0.95	-0.95	-1	1.02

Πίνακας 8.1 Βασικά στατιστικά μεγέθη δεδομένων διαφορετικής εμμονής.

Από τον πίνακας 8.1 παρατηρείται ότι ο μέσος όρος του λ'<sub>cr</sub> μειώνεται με μείωση του βαθμού εμμονής, γεγονός αναμενόμενο αφού όσο μειώνεται ο βαθμός εμμονής λιγότερες ασυνέχειες δρουν με αποτέλεσμα το λ<sub>cr</sub> να πλησιάζει την τιμή συνεχούς μέσου. Η τυπική απόκλιση του μέσου όρου (SE mean) σε όλες τις περιπτώσεις είναι μικρότερη του 0.05 που αποτελεί το βήμα αλλαγής βαθμού αποτόνωσης κατά τις προσομοιώσεις. Ο διάμεσος ακολουθεί παρόμοια μείωση σε σχέση τον βαθμό εμμονής όπως ο μέσος όρος. Ο περικομμένος μέσος δεν έχει μεγάλη διαφορά σε όλες τις περιπτώσεις με την μεγαλύτερη από αυτές να είναι για εμμονή βαθμού 0.25, που σημαίνει ότι επηρεάζεται περισσότερο από ακραίες τιμές. Η τυπική απόκλιση όπως και η διασπορά είναι μικρές.

Η λοξότητα (skewness) φαίνεται να αυξάνεται με μείωση του βαθμού εμμονής. Για εμμονή 0.25 η λοξότητα είναι ίση με 1.46 αρκετά μεγαλύτερη από 0 και καθιστά την κατανομή εξαιρετικά ασύμμετρη όπως φαίνεται στο σχήμα 8.1.

Η κύρτωση (kurtosis) δεν παρουσιάζει μεγάλη διαφορά σε σχέση με τον βαθμό εμμονής και οι τιμές κυμαίνονται περί το -1. Αυτό δείχνει ότι οι κατανομές των συνόλων δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή διότι αποκλίνουν από το 0.



Σχήμα 8.1 Ιστόγραμμα κατανομής για βαθμό εμμονής=1, 0.75, 0.5, 0.25

Στον πίνακα 8.2 που φαίνεται παρακάτω παρουσιάζεται η ανάλυση διασποράς για κάθε περίπτωση συνόλων. Παρατηρείται ότι για μέγιστη εμμονή οι μηχανικές ιδιότητες c και φ έχουν είναι τα πιο στατιστικά σημαντικά λόγω υψηλών τιμών της F. Αντιθέτως οι τιμές απόστασης και οικογενειών ασυνεχειών δεν δείχνουν τέτοια στατιστική σημαντικότητα λόγω χαμηλών F και τιμές P > 0.05. Όσο μειώνεται ο βαθμός εμμονής τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τείνουν να γίνουν στατιστικά σημαντικά.

	Pei	r= 1	Per=	0.75	Per	= 0.5	Per=	0.25
Source	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value
c/Po	377.62	0	158.51	0	47.34	0	11.21	0.001
s/R	3.08	0.081	10.1	0.002	18.65	0	17.02	0
joint net	3.62	0.059	4.79	0.03	28.63	0	6.03	0.015
ф	1154.8	0	532.16	0	122.5	0	24.71	0

Πίνακας 8.2 ανάλυση διασποράς δεδομένων ομαδοποιημένων ανά βαθμό εμμονής

#### 8.5.2 Σύγκριση βασικών στατιστικών δεδομένων οικογένειας ασυνεχειών

Variable	λ'cr JN=1	λ'cr JN=2	λ'cr JN=3
Mean	0.428	0.4472	0.4937
SE Mean	0.0137	0.0132	0.0142
TrMean	0.4196	0.441	0.4905
StDev	0.2013	0.1943	0.2082
Variance	0.0405	0.0377	0.0434
minimum	0.2	0.2	0.2
Q1	0.25	0.25	0.3
median	0.4	0.4	0.45
Q3	0.6	0.55	0.65
maximum	0.85	0.85	0.85
range	0.65	0.65	0.7
Skeweness	0.46	0.36	0.22
kurtosis	-1.07	-1.03	-1.08

Πίνακας 8.3 Βασικά στατιστικά μεγέθη δεδομένων διαφορετικής οικογένειας ασυνεχειών (JN).

Από τον πίνακα 8.3 παρατηρείται ότι ο μέσος όρος τιμών του λ'<sub>cr</sub> αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός οικογενειών ασυνεχειών (JN) αφού επιδρούν περισσότερες ασυνέχειες. Η τυπική απόκλιση του μέσου όρου (SE mean) σε όλες τις περιπτώσεις είναι μικρότερη του 0.05 που αποτελεί το βήμα αλλαγής βαθμού αποτόνωσης κατά τις προσομοιώσεις. Ο περικομμένος μέσος δεν έχει μεγάλη διαφορά σε όλες τις περιπτώσεις που σημαίνει ότι επηρεάζεται περισσότερο από ακραίες τιμές.

Η λοξότητα (skewness) φαίνεται να μειώνεται με αύξηση των JN, όπου για JN=3 είναι 0.22, σχετικά κοντά στο 0.

Η κύρτωση (kurtosis) αυξάνεται με αύξηση των JN με τις τιμές να κυμαίνονται περί το -1. Αυτό δείχνει ότι οι κατανομές των συνόλων δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή διότι αποκλίνουν από το 0.





Σχήμα 8.2 Ιστόγραμμα κατανομής για αριθμό οικογενειών (JN) = 1, 2, 3.

Στον πίνακα 8.4 παρουσιάζεται η ανάλυση διασποράς παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός οικογενειών οι παράμετροι μηχανικών ιδιοτήτων γίνονται στατιστικά πιο σημαντικές. Από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά η παράμετρος εμμονής είναι η πιο σημαντική στατιστικά. Σε όλες τις περιπτώσεις επαληθεύεται η μηδενική υπόθεση.

	JN	= 1	JN	= 2	JN	= 3
Source	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value
c/Po	32.61	0	77.47	0	122.68	0
s/R	9.5	0.002	6.37	0.012	7.44	0.007
ф	105.54	0	240.02	0	305.74	0
persistence	133.7	0	71.78	0	96.46	0

Πίνακας 8.4 ανάλυση διασποράς δεδομένων ομαδοποιημένων ανά οικογένεια ασυνεχειών

#### 8.5.3 Σύγκριση βασικών στατιστικών δεδομένων απόστασης ασυνεχειών

Variable	λ'cr s=1	λ'cr s=0.5	λ'cr s=0.25
Mean	0.4259	0.462	0.481
SE Mean	0.0137	0.0139	0.0137
TrMean	0.4162	0.4557	0.4765
StDev	0.2013	0.2038	0.2007
Variance	0.0405	0.0416	0.0403
minimum	0.2	0.2	0.2
Q1	0.25	0.25	0.3
median	0.4	0.45	0.45
Q3	0.55	0.6	0.6
maximum	0.85	0.85	0.85
range	0.65	0.65	0.7
Skeweness	0.51	0.3	0.26
kurtosis	-0.99	-1.07	-1.05

Πίνακας 8.5 Βασικά στατιστικά μεγέθη δεδομένων διαφορετικής απόστασης ασυνεχειών.

Από τον πίνακα 8.5 παρατηρείται ότι ο μέσος όρος των τιμών του λ'<sub>cr</sub> αυξάνεται με μείωση του s/R αφού επιδρούν περισσότερες ασυνέχειες. Η τυπική απόκλιση του μέσου όρου (SE mean) σε όλες τις περιπτώσεις είναι μικρότερη του 0.05 που αποτελεί το βήμα αλλαγής βαθμού αποτόνωσης κατά τις προσομοιώσεις. Ο διάμεσος ακολουθεί παρόμοια αύξηση σε σχέση με την s/R όπως ο μέσος όρος. Ο περικομμένος μέσος δεν έχει μεγάλη διαφορά σε όλες τις περιπτώσεις που σημαίνει ότι επηρεάζεται περισσότερο από ακραίες τιμές. Η τυπική απόκλιση όπως και η διασπορά είναι σταθερή.

Η λοξότητα (skewness) φαίνεται να μειώνεται με μείωση της S/R, όπου για s/R=0.25 είναι 0.26.

Η κύρτωση (kurtosis) είναι σταθερή με τις τιμές να κυμαίνονται περί το -1. Αυτό δείχνει ότι οι κατανομές των συνόλων δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή διότι αποκλίνουν από το 0.





Σχήμα 8.3 Ιστόγραμμα κατανομής για αριθμό απόστασης ασυνεχειών (s) = 1, 0.5, 0.25.

Στον πίνακα 8.6 παρουσιάζεται η ανάλυση διασποράς όπου φαίνεται η αύξηση της στατιστικής σημαντικότητας της γωνίας τριβής φ (αύξηση τιμής F) με μείωση της απόστασης των ασυνεχειών. Η τιμή της συνοχής φαίνεται και αυτή να γίνεται πιο σημαντική στην περίπτωση όπου η απόσταση των ασυνεχειών είναι 0.25. Η στατιστική σημασία του αριθμού οικογενειών ασυνεχειών μειώνεται όσο μειώνεται η απόσταση των ασυνεχειών.

	S=	= 1	s=	0.5	s=0	).25
Source	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value
c/Po	53.74	0	53.55	0	103.78	0
joint net	10.28	0.002	15.76	0	5.5	0.02
φ	149.71	0	175.99	0	272.14	0
persistence	112.53	0	79.81	0	99.07	0

	c /	C C /	<b>c</b> '	, ,	,
Πινακας Χ 6 αναλιιση	διασπορας	<u>Λελομενων</u>	ομαδοποιημενών	' ανα αποσταση	ασυνενειών
11. vanaç 0.0 avanoon	οιαοπορας	0000 μ01 ω1	σμασσποτημενων	ava anooraon	acoregetar

8.5.4 Σύγκριση βασικών στατιστικών δεδομένων γωνίας τριβής

Πίνακας 8.7 Βασικά στατιστικά μεγέθη δεδομένων διαφορετικής γωνίας τριβής (φ)

Variable $\lambda'$ cr φ=10 $\lambda'$ cr φ=20 $\lambda'$ cr φ=30
---

Mean	0.6037	0.4458	0.31944
SE Mean	0.0153	0.0104	0.00645
TrMean	0.6126	0.4477	0.31675
StDev	0.2254	0.1529	0.09483
Variance	0.0508	0.0234	0.00899
minimum	0.2	0.2	0.2
Q1	0.45	0.3	0.25
median	0.7	0.5	0.3
Q3	0.8	0.55	0.4
maximum	0.85	0.7	0.55
range	0.65	0.5	0.4
Skeweness	-0.75	-0.43	0.19
kurtosis	-0.91	-1.19	-1.19

Ο μέσος όρος μειώνεται με αύξηση της φ δηλαδή πλησιάζει την τιμή συνεχούς μέσου. Η τυπική απόκλιση του μέσου όρου (SE mean) σε όλες τις περιπτώσεις είναι μικρότερη του 0.05 που αποτελεί το βήμα αλλαγής βαθμού αποτόνωσης κατά τις προσομοιώσεις. Ο διάμεσος ακολουθεί παρόμοια μείωση σε σχέση την φ όπως ο μέσος όρος. Ο περικομμένος μέσος δεν έχει μεγάλη διαφορά που σημαίνει ότι δεν επηρεάζεται περισσότερο από ακραίες τιμές. Η τυπική απόκλιση όπως και η διασπορά μειώνεται με αύξηση της φ όπου για φ=30° η διασπορά των δεδομένων είναι πολύ μικρή.

Η λοξότητα (skewness) φαίνεται να μειώνεται με μείωση της φ. Για φ=30 η λοξότητα είναι ίση με 0.19 αρκετά κοντά στο 0 όπως φαίνεται στο σχήμα 8.4.

Η κύρτωση (kurtosis) φαίνεται να μειώνεται με μείωση της φ με τις τιμές να κυμαίνονται περί το -1. Αυτό δείχνει ότι οι κατανομές των συνόλων δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή διότι αποκλίνουν από το 0.





Σχήμα 8.4 Ιστόγραμμα κατανομής για τιμή γωνίας τριβής ( $\varphi$ ) = 10°, 20°, 30°.

Στον πίνακα 8.8 παρουσιάζεται η ανάλυση διασποράς όπου φαίνεται η παράμετρος της εμμονής να είναι η πιο στατιστικά σημαντική από τις γεωμετρικές ιδιότητες των ασυνεχειών βάση των τιμών F που λαμβάνει.

	ф=	:10	ф=	20	ф=	=30
Source	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value
c/Po	68.7	0	100.21	0	94.85	0
s/R	12.95	0	14.95	0	16.95	0
joint net	20.4	0	11.12	0.001	3.23	0.074
persistence	120.74	0	155.65	0	73.51	0

Πίνακας 8.8 Ανάλυση διασποράς δεδομένων ομαδοποιημένων ανά γωνία τριβής

8.5.5 Σύγκριση βασικών στατιστικών δεδομένων συνοχής – λόγος c/Po

Πίνακας 8.9 Βασικά στατιστικά μεγέθη δεδομένων διαφορετικής συνοχής λόγος c/P<sub>o</sub>

Variable	λ'cr c/Po=0.1	λ'cr c/Po=0.01	λ'cr c/Po=0.001
Mean	0.3597	0.4991	0.5102
SE Mean	0.0101	0.0141	0.0144
TrMean	0.3518	0.4969	0.5085
StDev	0.1484	0.2066	0.2123
Variance	0.022	0.0427	0.0451

minimum	0.2	0.2	0.2
Q1	0.25	0.3	0.3
median	0.3	0.5	0.55
Q3	0.45	0.7	0.7
maximum	0.7	0.85	0.85
range	0.55	0.65	0.65
Skeweness	0.6	0.11	0.01
kurtosis	-0.89	-1.21	-1.23

Ο μέσος όρος αυξάνεται με μείωση του c/P<sub>o</sub>. Η τυπική απόκλιση του μέσου όρου (SE mean) σε όλες τις περιπτώσεις είναι μικρότερη του 0.05 που αποτελεί το βήμα αλλαγής βαθμού αποτόνωσης κατά τις προσομοιώσεις. Ο διάμεσος ακολουθεί παρόμοια αύξηση σε σχέση την c/P<sub>o</sub> όπως ο μέσος όρος. Ο περικομμένος μέσος δεν έχει μεγάλη διαφορά σε όλες τις περιπτώσεις που σημαίνει ότι επηρεάζεται περισσότερο από ακραίες τιμές. Η τυπική απόκλιση όπως και η διασπορά αυξάνεται με μείωση της c/P<sub>o</sub>.

Η λοξότητα (skewness) φαίνεται να μειώνεται με μείωση της c/P<sub>o</sub>. Για c/P<sub>o</sub> = 0.01 και 0.001 η τιμή της είναι αντίστοιχα 0.11 και 0.01 όπως φαίνεται στο σχήμα 8.5.

Η κύρτωση (kurtosis) αυξάνεται με μείωση της c/P₀ με τις τιμές να κυμαίνονται περί το -1. Αυτό δείχνει ότι οι κατανομές των συνόλων δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή διότι αποκλίνουν από το 0.



#### λ'<sub>cr</sub> για c/Po=0.001



Σχήμα 8.5 Ιστόγραμμα κατανομής για c/P<sub>o</sub> =0.1, 0.01, 0.001

Στον πίνακα 8.10 παρουσιάζεται η ανάλυση διασποράς όπου φαίνεται η παράμετρος της εμμονής και της γωνίας τριβής να είναι οι πιο στατιστικά σημαντικές σε σχέση με μείωση της c/P<sub>o</sub>.

	c/Pc	<b>)=0.1</b>	c/Po	=0.01	c/Po=	0.001
Source	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value
s/R	5.22	0.023	10.48	0.001	7.63	0.006
joint net	6.31	0.008	8.51	0.004	27.54	0
ф	183.21	0	189.65	0	234.63	0
persistence	81.46	0	100.69	0	119.84	0

Πίνακας 8.10 Ανάλυσr	η διασποράς	δεδομένων	<sup>,</sup> ομαδοποιr	γμένων α	ινά τιμή	c/Po
----------------------	-------------	-----------	------------------------	----------	----------	------

## 8.6 Στατιστική Ανάλυση όλων των δεδομένων

Πίνακας 8.11 Βασικά στατιστικά μεγέθη δεδομένων

Variable	λ'cr
Mean	0.45
SE Mean	0.00797
TrMean	0.44923
StDev	0.2
Variance	0.04

minimum	0.2
Q1	0.25
median	0.4
Q3	0.6
maximum	0.85
range	0.65
Skeweness	0.35
kurtosis	-1.06

Από τον πίνακα 8.11 παρατηρείται ότι η τυπική απόκλιση του μέσου όρου (SE mean) είναι μικρότερη του 0.05 που αποτελεί το βήμα αλλαγής βαθμού αποτόνωσης κατά τις προσομοιώσεις. Ο περικομμένος μέσος δεν έχει μεγάλη διαφορά σε όλες τις περιπτώσεις που σημαίνει ότι επηρεάζεται περισσότερο από ακραίες τιμές.

Η λοξότητα (skewness) είναι 0.35 που σημαίνει μικρή συμμετρία της κατανομής. Η κύρτωση (kurtosis) είναι -1.06 που σημαίνει ότι κατανομή δεν είναι κανονική



Σχήμα 8.6 Ιστόγραμμα κατανομής λ'<sub>cr</sub>

Γίνεται ανάλυση παλινδρόμησης σε όλα δεδομένα λ<sub>cr</sub> που υπολογίστηκαν κατά την παραμετρική ανάλυση. Δημιουργείται η εξίσωση παλινδρόμησης σχέση 8.1

$\lambda' cr = 0.5778 - 1.521 ^{c}/_{P} - 0.06$	98 <sup> s</sup> / <sub>R</sub> + 0.03462joint net – 0.01403	$8 \varphi + 0.2982 persistence$	ξχέση 8.1
---	--	----------------------------------	-----------

Η εξίσωση προσφέρει έναν βαθμό εμπιστοσύνης R<sup>2</sup> = 0.63 οπότε υπάρχει μέτρια προσαρμογή της ευθείας παλινδρόμησης. Η μέση απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της εκτιμηθείσας τιμής της μεταβλητής είναι s=0.124.

Ο πίνακας των συντελεστών φαίνεται στον πίνακα 8.12. Εκεί φαίνεται ότι η τυπική απόκλιση του συντελεστή της φ είναι η μικρότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες που σημαίνει ότι θα έχει την μικρότερη απόκλιση στην περίπτωση που λαμβάναμε δείγματα από την συγκεκριμένη κατανομή ξανά και ξανά. Αντιθέτως για την παράμετρο c/P<sub>o</sub> έχει την μεγαλύτερη. Τ - value είναι ο λόγος μεταξύ συντελεστή και τυπικής απόκλισης του. Η P-value είναι ίση με 0 και δείχνει ότι όλοι οι συντελεστές είναι στατιστικά σημαντικοί.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	0.5778	0.0225	25.65	0.000
c/Po	-1.521	0.109	-13.98	0.000
s/R	-0.0698	0.0156	-4.48	0.000
Οικογένεια ασυνεχειών	0.03462	0.00593	5.84	0.000
φ	-0.014038	0.000593	-23.67	0.000
Εμμονή	0.2982	0.0173	17.20	0.000

Πίνακας 8.12 Πίνακας συντελεστών σχέσης 8.1

Η ανάλυση Διασποράς φαίνεται στον πίνακα 8.13. Παρατηρείται ότι η παράμετρος με την μεγαλύτερη στατιστική σημασία είναι η γωνία τριβής λόγω της μεγαλύτερης τιμής F που λαμβάνει. Η επόμενη σημαντικότερη είναι η παράμετρος της εμμονής. Όλες οι παράμετροι επαλήθευσαν την μηδενική υπόθεση.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	16.8494	3.36988	219.75	0.000
c/Po	1	2.9967	2.99669	195.42	0.000
s/R	1	0.3084	0.30839	20.11	0.000
Οικογένεια ασυνεχειών	1	0.5224	0.52244	34.07	0.000

Πίνακας 8.13 Ανάλυση διασπορά όλων των δεδομένων

ф	1	8.5902	8.59018	560.18	0.000
Εμμονή	1	4.5369	4.53694	295.86	0.000

Από την συσχέτιση κατά Pearson στον πίνακα 8.14 προκύπτει πως ο συντελεστής της φ και της εμμονής παρουσιάζουν την μεγαλύτερη στατιστική συσχέτιση αφού οι τιμές τους έχουν την μεγαλύτερη απόσταση από το 0. Επόμενη παράμετρος με την μεγαλύτερη συσχέτιση είναι αυτή της c/P<sub>o</sub>.

	λcr 5%
c/Po	-0.335
s/R	-0.109
Οικογένεια ασυνεχειών	0.136
φ	-0.564
Εμμονή	0.407

#### Πίνακας 8.14 Συσχέτιση κατά Pearson όλων των δεδομένων

## 8.6.1 Δοκιμές με την εξίσωση παλινδρόμησης

Στην συνέχεια γίνεται επαλήθευση της εξίσωσης 8.1 με αριθμητικά αποτελέσματα προσομοιώσεων στον προσδιορισμό της λ'<sub>cr</sub>. Τα στοιχεία των προσομοιώσειων φαίνονται στον πίνακα 8.15.

Πίνακας 8.15 Στοιχεία παραμέτρων προσομοιωμάτων για την επαλήθευση της εξίσωσης παλινδρόμησης.

	Προσομοίωμα 1	Προσομοίωμα 2	Προσομοίωμα 3
c/Po	0.054	0.01	0.034
s/R	0.7	1	0.75
Οικογένεια ασυνεχειών	1	2	3
ф	15	25	22

Εμμονή	0.35	0.65	0.6
--------	------	------	-----

Στον πίνακα 8.16 φαίνεται η σύγκριση του υπολογισμού της λ'<sub>cr</sub> σε σχέση με την εξίσωση παλινδρόμησης και την αριθμητική λύση προσομοιώματος.

Πίνακας 8.16 σύγκριση του υπολογισμού της λ'<sub>cr</sub> σε σχέση με την εξίσωση παλινδρόμησης και την αριθμητική λύση προσομοιώματος.

Προσομοίωμα	λ' <sub>cr</sub> – εξίσωση παλινδρόμησης	λ' <sub>cr</sub> – αριθμητική λύση	Απόκλιση τιμών (%)
1	0.37	0.25	32
2	0.4	0.45	11
3	0.44	0.35	20

Παρατηρείται σημαντική απόκλιση, αρκετά μεγαλύτερη από το 0.05 που αποτελεί το βήμα βαθμού αποτόνωσης των σταδίων της προσομοίωσης.

Πρέπει να ληφθούν υπόψη και δεύτερου βαθμού όροι για την δημιουργία της εξίσωσης παλινδρόμησης.

# Συμπεράσματα

Πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ώστε να εξεταστεί η επίδραση συγκεκριμένων παραμέτρων που αφορούν ιδιότητες ασυνεχειών, στην εκδήλωση της πλαστικής ζώνης όπως αυτή εκφράζεται μέσω του συντελεστή αποτόνωσης λ<sub>cr</sub> βάσει του οποίου θα μπορεί αποφασιστεί η προσωρινή και μόνιμη υποστήριξη. Το σύνολο των προσομοιώσεων ανήλθε σε 628. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι:

- Η συνοχή των ασυνεχειών εκφράστηκε ως ο λόγος c/P<sub>o</sub> ώστε να ενταχθεί στην ανάλυση και η πίεση των υπερκείμενων (P<sub>o</sub>).
- Η απόσταση των ασυνεχειών εκφράστηκε ως ο λόγος s/R ώστε να σχετίζεται με την κλίμακα του έργου και να γίνει αδιαστατοποίηση.
- Η γωνία τριβής φ των ασυνεχειών.
- Ο αριθμός οικογενειών των ασυνεχειών ειδικά για τρείς περιπτώσεις που παράγουν μεγάλο μέγεθος ογκοτεμαχίων.
- Η εμμονή των ασυνεχειών που είναι ο παράγοντας που προσφέρει στοχαστικότητα στα δεδομένα.

Κάθε προσομοίωμα με μεταβαλλόμενη εμμονή δημιουργεί μία μοναδική κατάσταση ως προς την κατανομή των ασυνεχειών στον χώρο.

Ο υπολογισμός του λ<sub>cr</sub> από τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν βασίστηκε στις εξής παρατηρήσεις:

- Η έναρξη του μη γραμμικού τμήματος της καμπύλης σύγκλισης αποτόνωσης σχετίζεται με την ολίσθηση ασυνεχειών πέριξ της διατομης.
- Στα στάδια αποτόνωσης πριν το στάδιο υπολογισμού του λ<sub>cr</sub> που αφορά την ελαστική περιοχή των διαγραμμάτων σύγκλισης αποτόνωσης, δεν εκδηλώνονται φαινόμενα αστοχίας.
- Στο αμέσως επόμενο στάδιο από το στάδιο υπολογισμού του λ<sub>cr</sub> που αφορά την πλαστική περιοχή των διαγραμμάτων σύγκλισης αποτόνωσης, παρατηρείται σημαντική αλλαγή στην έκταση που ολισθαίνουν οι ασυνεχειες. Η ολίσθηση αυτή κλιμακώνεται μέχρι το τελικό στάδιο πλήρους αποτόνωσης.
- Η εμμονή έχει άμεση επίδραση στον υπολογισμό του λ<sub>cr</sub> καθώς και στην εκδήλωση των φαινομένων αστοχίας λόγω της τυχαιότητας που προσφέρει στην κατανομή των ασυνεχειών πέριξ της διατομής.

Από την στατιστική ανάλυση των δεδομένων υπολογισμού του λ<sub>cr</sub> προκύπτει:

- Η παράμετρος με την μεγαλύτερη στατιστική σημασία είναι <u>η γωνία τριβής φ</u>. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό αφού όπως αναφέρθηκε η αιτία εκδήλωσης της πλαστικοποίησης του μέσου είναι η ολίσθηση των ασυνεχειών πέριξ της εκσκαφής και η γωνία τριβής σε μεγάλο βαθμό καθορίζει αυτό το φαινόμενο.
- Δεύτερη πιο σημαντική στατιστικά είναι η παράμετρος της <u>εμμονής</u>. Η εμμονή με την σειρά της καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την παρουσία ασυνεχειών πέριξ της διατομής ώστε να συμβεί τελικά η ολίσθηση τους.

- Τρίτη πιο σημαντική στατιστικά είναι η παράμετρος της συνοχής για τους ίδιους λόγους με την γωνία τριβής.
- Επίσης συμπεραίνεται πως η κατανομή των δεδομένων δεν είναι κανονική όπως φαίνεται από την τιμή της κύρτωσης (πίνακας 8.11 και σχήμα 8.6).
- Η εξίσωση παλινδρόμησης που δημιουργήθηκε αφορά απλό γραμμικό μοντέλο και παρέχει μέτρια προσαρμογή σε σχέση με τα δεδομένα που όπως αναφέρθηκε δεν έχουν κανονική κατανομή.

Σε μελλοντικές έρευνες πρέπει να ληφθεί υπόψιν η κλίση και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με το εντατικό πεδίο, με αναμενόμενα αποτελέσματα καλύτερης προσαρμογής των δεδομένων κατά την παλινδρόμηση. Επίσης μπορεί να γίνουν πιθανοτικές αναλύσεις θεωρώντας τις πιο σημαντικές παραμέτρους ως μεταβλητές με κανονική κατανομή και τυπική απόκλιση 20%.

# Βιβλιογραφία

- 1. Brown ET ed. (1981). Rock Characterization Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods, Pergamon Press.
- 2. Kim BH, Kaiser PK, Grasselli G (2007). Influence of persistence on behaviour of fractured rock masses, *Geological Society, London, Special Publications* 2007; v. 284; p. 161-173.
- Sainsbury BL, Sainsbury DP (2017). Practical Use of the Ubiquitous-Joint Constitutive Model for the Simulation of Anisotropic Rock Masses, Rock Mech Rock Eng (2017) 50:1507–1528 DOI 10.1007/s00603-017-1177-3
- 4. Jaeger JC and Cook NGW (1979). Fundamentals of rock mechanics. Chapman and Hall, London, 593pp.
- Alejano LR, Arzúa J, Bozorgzadehc N, Harrison JP (2010). Triaxial strength and deformability of intact and increasingly jointed granite samples, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 95 (2017) 87–103
- 6. Hudson JA, and Harrison JP (1997). Engineering Rock Mechanics An Introduction to the Principles, Pergamon.
- 7. Hoek E, Kaiser PK, Bawden WF (1995). Support of Underground Excavations in Hard Rock, p.215. Balkema, Rotterdam.
- Esmaieli K, Hadjigeorgiou J, Grenon M (2010). Estimating geometrical and mechanical REV based on synthetic rock mass models at Brunswick Mine, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 47 (2010) 915–926
- Cai M, Kaiser PK, Uno H, Tasaka Y, Minami M (2004). Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41 (2004) 3–19
- 10. Patton ED (1966). Multiple modes of shear failure in rock, Proc. 1st Congress of the ISRM, Lisbon, 509-513.
- 11. Daemen JJK (1983). Slip Zones for Discontinuities Parallel to Circular Tunnelsor Shafts. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20, No. 3, pp. 135-148.
- Einstein HH, Veneziano D, Baecher GB, O'Reilly KJ (1983). The Effect of Discontinuity Persistence on Rock Slope Stability, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20, No. 5. pp. 227-236, 1983
- 13. UDEC itasca Universal Distinct Element Code manual (2015)
- 14. Barton N. (1973). "Review of a new shear strength criterion for rock joints", Engineering Geology, 7, 287-332.
- 15. Barton N. (1976). "The shear strength of rock and rock joints", Int. J. Rock Mech., Min. Sci. Geomech. Abstr. 13, 255-279.
- 16. Καββαδάς Μ. ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ, (2012), ΕΜΠ
- 17. Σοφιανός Α. Υποστήριξη υπογείων έργων, (2015), ΕΜΠ

# Παράρτημα

c/Po	s/R	joint net	ф	persistence	λ'cr (1-λcr)
0.1	1	1	10	1	0.55
0.1	1	1	10	1	0.65
0.1	1	1	10	0.75	0.55
0.1	1	1	10	0.75	0.65
0.1	1	1	10	0.5	0.2
0.1	1	1	10	0.5	0.2
0.1	1	1	10	0.25	0.2
0.1	1	1	10	0.25	0.65
0.1	1	1	20	1	0.4
0.1	1	1	20	1	0.4
0.1	1	1	20	0.75	0.4
0.1	1	1	20	0.75	0.4
0.1	1	1	20	0.5	0.25
0.1	1	1	20	0.5	0.3
0.1	1	1	20	0.25	0.2
0.1	1	1	20	0.25	0.2
0.1	1	1	30	1	0.3
0.1	1	1	30	1	0.25
0.1	1	1	30	0.75	0.2
0.1	1	1	30	0.75	0.2
0.1	1	1	30	0.5	0.3
0.1	1	1	30	0.5	0.2
0.1	1	1	30	0.25	0.25
0.1	1	1	30	0.25	0.2
0.1	0.5	1	10	1	0.55
0.1	0.5	1	10	1	0.65
0.1	0.5	1	10	0.75	0.55
0.1	0.5	1	10	0.75	0.65
0.1	0.5	1	10	0.5	0.2
0.1	0.5	1	10	0.5	0.2
0.1	0.5	1	10	0.25	0.2
0.1	0.5	1	10	0.25	0.25
0.1	0.5	1	20	1	0.4
0.1	0.5	1	20	1	0.45
0.1	0.5	1	20	0.75	0.4
0.1	0.5	1	20	0.75	0.45
0.1	0.5	1	20	0.5	0.4

Πίνακας Π.1 Ομαδοποίηση ανά 1 οικογένεια ασυνεχειών

0.1	0.5	1	20	0.5	0.4
0.1	0.5	1	20	0.25	0.2
0.1	0.5	1	20	0.25	0.2
0.1	0.5	1	30	1	0.3
0.1	0.5	1	30	1	0.25
0.1	0.5	1	30	0.75	0.3
0.1	0.5	1	30	0.75	0.25
0.1	0.5	1	30	0.5	0.3
0.1	0.5	1	30	0.5	0.25
0.1	0.5	1	30	0.25	0.3
0.1	0.5	1	30	0.25	0.2
0.1	0.25	1	10	1	0.55
0.1	0.25	1	10	1	0.65
0.1	0.25	1	10	0.75	0.6
0.1	0.25	1	10	0.75	0.65
0.1	0.25	1	10	0.5	0.3
0.1	0.25	1	10	0.5	0.45
0.1	0.25	1	10	0.25	0.25
0.1	0.25	1	10	0.25	0.2
0.1	0.25	1	20	1	0.45
0.1	0.25	1	20	1	0.45
0.1	0.25	1	20	0.75	0.4
0.1	0.25	1	20	0.75	0.45
0.1	0.25	1	20	0.5	0.25
0.1	0.25	1	20	0.5	0.45
0.1	0.25	1	20	0.25	0.2
0.1	0.25	1	20	0.25	0.2
0.1	0.25	1	30	1	0.35
0.1	0.25	1	30	1	0.45
0.1	0.25	1	30	0.75	0.3
0.1	0.25	1	30	0.75	0.3
0.1	0.25	1	30	0.5	0.25
0.1	0.25	1	30	0.5	0.45
0.1	0.25	1	30	0.25	0.3
0.1	0.25	1	30	0.25	0.2
0.01	1	1	10	1	0.75
0.01	1	1	10	1	0.8
0.01	1	1	10	0.75	0.7
0.01	1	1	10	0.75	0.8
0.01	1	1	10	0.5	0.2
0.01	1	1	10	0.5	0.25

0.01	1	1	10	0.25	0.7
0.01	1	1	10	0.25	0.2
0.01	1	1	20	1	0.55
0.01	1	1	20	1	0.55
0.01	1	1	20	0.75	0.55
0.01	1	1	20	0.75	0.55
0.01	1	1	20	0.5	0.25
0.01	1	1	20	0.5	0.4
0.01	1	1	20	0.25	0.2
0.01	1	1	20	0.25	0.2
0.01	1	1	30	1	0.4
0.01	1	1	30	1	0.3
0.01	1	1	30	0.75	0.4
0.01	1	1	30	0.75	0.2
0.01	1	1	30	0.5	0.2
0.01	1	1	30	0.5	0.3
0.01	1	1	30	0.25	0.2
0.01	1	1	30	0.25	0.2
0.01	0.5	1	10	1	0.75
0.01	0.5	1	10	1	0.8
0.01	0.5	1	10	0.75	0.25
0.01	0.5	1	10	0.75	0.8
0.01	0.5	1	10	0.5	0.75
0.01	0.5	1	10	0.5	0.8
0.01	0.5	1	10	0.25	0.7
0.01	0.5	1	10	0.25	0.8
0.01	0.5	1	20	1	0.55
0.01	0.5	1	20	1	0.6
0.01	0.5	1	20	0.75	0.55
0.01	0.5	1	20	0.75	0.55
0.01	0.5	1	20	0.5	0.2
0.01	0.5	1	20	0.5	0.55
0.01	0.5	1	20	0.25	0.2
0.01	0.5	1	20	0.25	0.2
0.01	0.5	1	30	1	0.45
0.01	0.5	1	30	1	0.35
0.01	0.5	1	30	0.75	0.4
0.01	0.5	1	30	0.75	0.35
0.01	0.5	1	30	0.5	0.2
0.01	0.5	1	30	0.5	0.3
0.01	0.5	1	30	0.25	0.4

0.01	0.5	1	30	0.25	0.2
0.01	0.25	1	10	1	0.75
0.01	0.25	1	10	1	0.8
0.01	0.25	1	10	0.75	0.8
0.01	0.25	1	10	0.75	0.8
0.01	0.25	1	10	0.5	0.75
0.01	0.25	1	10	0.5	0.8
0.01	0.25	1	10	0.25	0.25
0.01	0.25	1	10	0.25	0.25
0.01	0.25	1	20	1	0.6
0.01	0.25	1	20	1	0.6
0.01	0.25	1	20	0.75	0.6
0.01	0.25	1	20	0.75	0.65
0.01	0.25	1	20	0.5	0.6
0.01	0.25	1	20	0.5	0.55
0.01	0.25	1	20	0.25	0.25
0.01	0.25	1	20	0.25	0.2
0.01	0.25	1	30	1	0.5
0.01	0.25	1	30	1	0.45
0.01	0.25	1	30	0.75	0.45
0.01	0.25	1	30	0.75	0.4
0.01	0.25	1	30	0.5	0.3
0.01	0.25	1	30	0.5	0.4
0.01	0.25	1	30	0.25	0.35
0.01	0.25	1	30	0.25	0.2
0.001	1	1	10	1	0.75
0.001	1	1	10	1	0.8
0.001	1	1	10	0.75	0.75
0.001	1	1	10	0.75	0.25
0.001	1	1	10	0.5	0.7
0.001	1	1	10	0.5	0.35
0.001	1	1	10	0.25	0.2
0.001	1	1	10	0.25	0.2
0.001	1	1	20	1	0.55
0.001	1	1	20	1	0.6
0.001	1	1	20	0.75	0.55
0.001	1	1	20	0.75	0.6
0.001	1	1	20	0.5	0.25
0.001	1	1	20	0.5	0.55
0.001	1	1	20	0.25	0.55
0.001	1	1	20	0.25	0.2

0.001	1	1	30	1	0.45
0.001	1	1	30	1	0.3
0.001	1	1	30	0.75	0.4
0.001	1	1	30	0.75	0.3
0.001	1	1	30	0.5	0.2
0.001	1	1	30	0.5	0.2
0.001	1	1	30	0.25	0.4
0.001	1	1	30	0.25	0.2
0.001	0.5	1	10	1	0.75
0.001	0.5	1	10	1	0.8
0.001	0.5	1	10	0.75	0.75
0.001	0.5	1	10	0.75	0.8
0.001	0.5	1	10	0.5	0.25
0.001	0.5	1	10	0.5	0.3
0.001	0.5	1	10	0.25	0.2
0.001	0.5	1	10	0.25	0.2
0.001	0.5	1	20	1	0.6
0.001	0.5	1	20	1	0.6
0.001	0.5	1	20	0.75	0.55
0.001	0.5	1	20	0.75	0.6
0.001	0.5	1	20	0.5	0.55
0.001	0.5	1	20	0.5	0.55
0.001	0.5	1	20	0.25	0.55
0.001	0.5	1	20	0.25	0.2
0.001	0.5	1	30	1	0.45
0.001	0.5	1	30	1	0.35
0.001	0.5	1	30	0.75	0.35
0.001	0.5	1	30	0.75	0.35
0.001	0.5	1	30	0.5	0.45
0.001	0.5	1	30	0.5	0.2
0.001	0.5	1	30	0.25	0.4
0.001	0.5	1	30	0.25	0.2
0.001	0.25	1	10	1	0.8
0.001	0.25	1	10	1	0.85
0.001	0.25	1	10	0.75	0.8
0.001	0.25	1	10	0.75	0.8
0.001	0.25	1	10	0.5	0.7
0.001	0.25	1	10	0.5	0.75
0.001	0.25	1	10	0.25	0.25
0.001	0.25	1	10	0.25	0.25
0.001	0.25	1	20	1	0.65

0.001	0.25	1	20	1	0.65
0.001	0.25	1	20	0.75	0.6
0.001	0.25	1	20	0.75	0.6
0.001	0.25	1	20	0.5	0.2
0.001	0.25	1	20	0.5	0.6
0.001	0.25	1	20	0.25	0.2
0.001	0.25	1	20	0.25	0.2
0.001	0.25	1	30	1	0.5
0.001	0.25	1	30	1	0.45
0.001	0.25	1	30	0.75	0.5
0.001	0.25	1	30	0.75	0.4
0.001	0.25	1	30	0.5	0.2
0.001	0.25	1	30	0.5	0.4
0.001	0.25	1	30	0.25	0.25
0.001	0.25	1	30	0.25	0.2

Πίνακας Π.2 Ομαδοποίηση ανά 2 οικογένειες ασυνεχειών

c/Po	s/R	joint net	ф	persistence	λ'cr (1-λcr)
0.1	1	2	10	1	0.55
0.1	1	2	10	1	0.6
0.1	1	2	10	0.75	0.55
0.1	1	2	10	0.75	0.65
0.1	1	2	10	0.5	0.55
0.1	1	2	10	0.5	0.25
0.1	1	2	10	0.25	0.2
0.1	1	2	10	0.25	0.2
0.1	1	2	20	1	0.4
0.1	1	2	20	1	0.4
0.1	1	2	20	0.75	0.4
0.1	1	2	20	0.75	0.4
0.1	1	2	20	0.5	0.4
0.1	1	2	20	0.5	0.25
0.1	1	2	20	0.25	0.2
0.1	1	2	20	0.25	0.2
0.1	1	2	30	1	0.3
0.1	1	2	30	1	0.25
0.1	1	2	30	0.75	0.2
0.1	1	2	30	0.75	0.25
0.1	1	2	30	0.5	0.25
0.1	1	2	30	0.5	0.25

0.1	1	2	30	0.25	0.2
0.1	1	2	30	0.25	0.2
0.1	0.5	2	10	1	0.5
0.1	0.5	2	10	1	0.6
0.1	0.5	2	10	0.75	0.5
0.1	0.5	2	10	0.75	0.6
0.1	0.5	2	10	0.5	0.5
0.1	0.5	2	10	0.5	0.55
0.1	0.5	2	10	0.25	0.5
0.1	0.5	2	10	0.25	0.2
0.1	0.5	2	20	1	0.35
0.1	0.5	2	20	1	0.4
0.1	0.5	2	20	0.75	0.4
0.1	0.5	2	20	0.75	0.4
0.1	0.5	2	20	0.5	0.2
0.1	0.5	2	20	0.5	0.2
0.1	0.5	2	20	0.25	0.4
0.1	0.5	2	20	0.25	0.2
0.1	0.5	2	30	1	0.25
0.1	0.5	2	30	1	0.25
0.1	0.5	2	30	0.75	0.25
0.1	0.5	2	30	0.75	0.25
0.1	0.5	2	30	0.5	0.3
0.1	0.5	2	30	0.5	0.25
0.1	0.5	2	30	0.25	0.2
0.1	0.5	2	30	0.25	0.2
0.1	0.25	2	10	1	0.4
0.1	0.25	2	10	1	0.55
0.1	0.25	2	10	0.75	0.45
0.1	0.25	2	10	0.75	0.55
0.1	0.25	2	10	0.5	0.45
0.1	0.25	2	10	0.5	0.6
0.1	0.25	2	10	0.25	0.6
0.1	0.25	2	10	0.25	0.55
0.1	0.25	2	20	1	0.3
0.1	0.25	2	20	1	0.35
0.1	0.25	2	20	0.75	0.35
0.1	0.25	2	20	0.75	0.35
0.1	0.25	2	20	0.5	0.35
0.1	0.25	2	20	0.5	0.4
0.1	0.25	2	20	0.25	0.3

0.1	0.25	2	20	0.25	0.25
0.1	0.25	2	30	1	0.2
0.1	0.25	2	30	1	0.2
0.1	0.25	2	30	0.75	0.3
0.1	0.25	2	30	0.75	0.25
0.1	0.25	2	30	0.5	0.25
0.1	0.25	2	30	0.5	0.2
0.1	0.25	2	30	0.25	0.2
0.1	0.25	2	30	0.25	0.2
0.01	1	2	10	1	0.75
0.01	1	2	10	1	0.8
0.01	1	2	10	0.75	0.75
0.01	1	2	10	0.75	0.8
0.01	1	2	10	0.5	0.7
0.01	1	2	10	0.5	0.25
0.01	1	2	10	0.25	0.2
0.01	1	2	10	0.25	0.2
0.01	1	2	20	1	0.55
0.01	1	2	20	1	0.55
0.01	1	2	20	0.75	0.55
0.01	1	2	20	0.75	0.5
0.01	1	2	20	0.5	0.55
0.01	1	2	20	0.5	0.55
0.01	1	2	20	0.25	0.5
0.01	1	2	20	0.25	0.2
0.01	1	2	30	1	0.4
0.01	1	2	30	1	0.3
0.01	1	2	30	0.75	0.4
0.01	1	2	30	0.75	0.3
0.01	1	2	30	0.5	0.4
0.01	1	2	30	0.5	0.3
0.01	1	2	30	0.25	0.2
0.01	1	2	30	0.25	0.25
0.01	0.5	2	10	1	0.7
0.01	0.5	2	10	1	0.8
0.01	0.5	2	10	0.75	0.7
0.01	0.5	2	10	0.75	0.8
0.01	0.5	2	10	0.5	0.7
0.01	0.5	2	10	0.5	0.7
0.01	0.5	2	10	0.25	0.2
0.01	0.5	2	10	0.25	0.8

0.01	0.5	2	20	1	0.55
0.01	0.5	2	20	1	0.6
0.01	0.5	2	20	0.75	0.55
0.01	0.5	2	20	0.75	0.55
0.01	0.5	2	20	0.5	0.2
0.01	0.5	2	20	0.5	0.25
0.01	0.5	2	20	0.25	0.2
0.01	0.5	2	20	0.25	0.2
0.01	0.5	2	30	1	0.4
0.01	0.5	2	30	1	0.4
0.01	0.5	2	30	0.75	0.4
0.01	0.5	2	30	0.75	0.4
0.01	0.5	2	30	0.5	0.4
0.01	0.5	2	30	0.5	0.4
0.01	0.5	2	30	0.25	0.4
0.01	0.5	2	30	0.25	0.25
0.01	0.25	2	10	1	0.7
0.01	0.25	2	10	1	0.8
0.01	0.25	2	10	0.75	0.75
0.01	0.25	2	10	0.75	0.8
0.01	0.25	2	10	0.5	0.75
0.01	0.25	2	10	0.5	0.8
0.01	0.25	2	10	0.25	0.7
0.01	0.25	2	10	0.25	0.75
0.01	0.25	2	20	1	0.55
0.01	0.25	2	20	1	0.55
0.01	0.25	2	20	0.75	0.55
0.01	0.25	2	20	0.75	0.55
0.01	0.25	2	20	0.5	0.25
0.01	0.25	2	20	0.5	0.6
0.01	0.25	2	20	0.25	0.5
0.01	0.25	2	20	0.25	0.4
0.01	0.25	2	30	1	0.4
0.01	0.25	2	30	1	0.4
0.01	0.25	2	30	0.75	0.4
0.01	0.25	2	30	0.75	0.35
0.01	0.25	2	30	0.5	0.4
0.01	0.25	2	30	0.5	0.4
0.01	0.25	2	30	0.25	0.4
0.01	0.25	2	30	0.25	0.2
0.001	1	2	10	1	0.75
0.001	1	2	10	1	0.8
-------	-----	---	----	------	------
0.001	1	2	10	0.75	0.75
0.001	1	2	10	0.75	0.8
0.001	1	2	10	0.5	0.75
0.001	1	2	10	0.5	0.8
0.001	1	2	10	0.25	0.25
0.001	1	2	10	0.25	0.2
0.001	1	2	20	1	0.55
0.001	1	2	20	1	0.55
0.001	1	2	20	0.75	0.55
0.001	1	2	20	0.75	0.55
0.001	1	2	20	0.5	0.55
0.001	1	2	20	0.5	0.25
0.001	1	2	20	0.25	0.55
0.001	1	2	20	0.25	0.55
0.001	1	2	30	1	0.4
0.001	1	2	30	1	0.3
0.001	1	2	30	0.75	0.4
0.001	1	2	30	0.75	0.3
0.001	1	2	30	0.5	0.2
0.001	1	2	30	0.5	0.25
0.001	1	2	30	0.25	0.3
0.001	1	2	30	0.25	0.2
0.001	0.5	2	10	1	0.75
0.001	0.5	2	10	1	0.8
0.001	0.5	2	10	0.75	0.75
0.001	0.5	2	10	0.75	0.75
0.001	0.5	2	10	0.5	0.65
0.001	0.5	2	10	0.5	0.8
0.001	0.5	2	10	0.25	0.7
0.001	0.5	2	10	0.25	0.2
0.001	0.5	2	20	1	0.55
0.001	0.5	2	20	1	0.6
0.001	0.5	2	20	0.75	0.55
0.001	0.5	2	20	0.75	0.5
0.001	0.5	2	20	0.5	0.2
0.001	0.5	2	20	0.5	0.55
0.001	0.5	2	20	0.25	0.2
0.001	0.5	2	20	0.25	0.45
0.001	0.5	2	30	1	0.4
0.001	0.5	2	30	1	0.4

0.001	0.5	2	30	0.75	0.4
0.001	0.5	2	30	0.75	0.4
0.001	0.5	2	30	0.5	0.4
0.001	0.5	2	30	0.5	0.25
0.001	0.5	2	30	0.25	0.2
0.001	0.5	2	30	0.25	0.2
0.001	0.25	2	10	1	0.75
0.001	0.25	2	10	1	0.85
0.001	0.25	2	10	0.75	0.75
0.001	0.25	2	10	0.75	0.75
0.001	0.25	2	10	0.5	0.75
0.001	0.25	2	10	0.5	0.75
0.001	0.25	2	10	0.25	0.25
0.001	0.25	2	10	0.25	0.8
0.001	0.25	2	20	1	0.55
0.001	0.25	2	20	1	0.6
0.001	0.25	2	20	0.75	0.55
0.001	0.25	2	20	0.75	0.55
0.001	0.25	2	20	0.5	0.55
0.001	0.25	2	20	0.5	0.6
0.001	0.25	2	20	0.25	0.35
0.001	0.25	2	20	0.25	0.4
0.001	0.25	2	30	1	0.45
0.001	0.25	2	30	1	0.4
0.001	0.25	2	30	0.75	0.4
0.001	0.25	2	30	0.75	0.4
0.001	0.25	2	30	0.5	0.45
0.001	0.25	2	30	0.5	0.35
0.001	0.25	2	30	0.25	0.2
0.001	0.25	2	30	0.25	0.35

c/Po	s/R	joint net	ф	persistence	λ'cr (1-λcr)
0.1	1	3	10	1	0.6
0.1	1	3	10	1	0.7
0.1	1	3	10	0.75	0.55
0.1	1	3	10	0.75	0.4
0.1	1	3	10	0.5	0.55
0.1	1	3	10	0.5	0.25
0.1	1	3	10	0.25	0.2
0.1	1	3	10	0.25	0.2
0.1	1	3	20	1	0.4
0.1	1	3	20	1	0.45
0.1	1	3	20	0.75	0.45
0.1	1	3	20	0.75	0.3
0.1	1	3	20	0.5	0.35
0.1	1	3	20	0.5	0.25
0.1	1	3	20	0.25	0.2
0.1	1	3	20	0.25	0.2
0.1	1	3	30	1	0.3
0.1	1	3	30	1	0.2
0.1	1	3	30	0.75	0.3
0.1	1	3	30	0.75	0.25
0.1	1	3	30	0.5	0.3
0.1	1	3	30	0.5	0.25
0.1	1	3	30	0.25	0.2
0.1	1	3	30	0.25	0.2
0.1	0.5	3	10	1	0.6
0.1	0.5	3	10	1	0.7
0.1	0.5	3	10	0.75	0.6
0.1	0.5	3	10	0.75	0.4
0.1	0.5	3	10	0.5	0.6
0.1	0.5	3	10	0.5	0.7
0.1	0.5	3	10	0.25	0.2
0.1	0.5	3	10	0.25	0.6
0.1	0.5	3	20	1	0.4
0.1	0.5	3	20	1	0.5
0.1	0.5	3	20	0.75	0.4
0.1	0.5	3	20	0.75	0.55
0.1	0.5	3	20	0.5	0.45
0.1	0.5	3	20	0.5	0.5
0.1	0.5	3	20	0.25	0.45

Πίνακας Π.3 Ομαδοποίηση ανά 3 οικογένειες ασυνεχειών

0.1	0.5	3	20	0.25	0.2
0.1	0.5	3	30	1	0.3
0.1	0.5	3	30	1	0.25
0.1	0.5	3	30	0.75	0.3
0.1	0.5	3	30	0.75	0.25
0.1	0.5	3	30	0.5	0.25
0.1	0.5	3	30	0.5	0.35
0.1	0.5	3	30	0.25	0.2
0.1	0.5	3	30	0.25	0.2
0.1	0.25	3	10	1	0.55
0.1	0.25	3	10	1	0.6
0.1	0.25	3	10	0.75	0.55
0.1	0.25	3	10	0.75	0.65
0.1	0.25	3	10	0.5	0.6
0.1	0.25	3	10	0.5	0.6
0.1	0.25	3	10	0.25	0.5
0.1	0.25	3	10	0.25	0.25
0.1	0.25	3	20	1	0.4
0.1	0.25	3	20	1	0.4
0.1	0.25	3	20	0.75	0.4
0.1	0.25	3	20	0.75	0.5
0.1	0.25	3	20	0.5	0.45
0.1	0.25	3	20	0.5	0.3
0.1	0.25	3	20	0.25	0.2
0.1	0.25	3	20	0.25	0.25
0.1	0.25	3	30	1	0.25
0.1	0.25	3	30	1	0.25
0.1	0.25	3	30	0.75	0.25
0.1	0.25	3	30	0.75	0.25
0.1	0.25	3	30	0.5	0.25
0.1	0.25	3	30	0.5	0.15
0.1	0.25	3	30	0.25	0.2
0.1	0.25	3	30	0.25	0.25
0.01	1	3	10	1	0.8
0.01	1	3	10	1	0.85
0.01	1	3	10	0.75	0.75
0.01	1	3	10	0.75	0.85
0.01	1	3	10	0.5	0.75
0.01	1	3	10	0.5	0.5
0.01	1	3	10	0.25	0.75
0.01	1	3	10	0.25	0.2

0.01	1	3	20	1	0.6
0.01	1	3	20	1	0.6
0.01	1	3	20	0.75	0.6
0.01	1	3	20	0.75	0.6
0.01	1	3	20	0.5	0.5
0.01	1	3	20	0.5	0.3
0.01	1	3	20	0.25	0.5
0.01	1	3	20	0.25	0.2
0.01	1	3	30	1	0.45
0.01	1	3	30	1	0.35
0.01	1	3	30	0.75	0.4
0.01	1	3	30	0.75	0.35
0.01	1	3	30	0.5	0.4
0.01	1	3	30	0.5	0.3
0.01	1	3	30	0.25	0.4
0.01	1	3	30	0.25	0.3
0.01	0.5	3	10	1	0.8
0.01	0.5	3	10	1	0.85
0.01	0.5	3	10	0.75	0.8
0.01	0.5	3	10	0.75	0.85
0.01	0.5	3	10	0.5	0.8
0.01	0.5	3	10	0.5	0.75
0.01	0.5	3	10	0.25	0.35
0.01	0.5	3	10	0.25	0.2
0.01	0.5	3	20	1	0.6
0.01	0.5	3	20	1	0.65
0.01	0.5	3	20	0.75	0.65
0.01	0.5	3	20	0.75	0.6
0.01	0.5	3	20	0.5	0.65
0.01	0.5	3	20	0.5	0.55
0.01	0.5	3	20	0.25	0.55
0.01	0.5	3	20	0.25	0.25
0.01	0.5	3	30	1	0.45
0.01	0.5	3	30	1	0.45
0.01	0.5	3	30	0.75	0.45
0.01	0.5	3	30	0.75	0.3
0.01	0.5	3	30	0.5	0.55
0.01	0.5	3	30	0.5	0.45
0.01	0.5	3	30	0.25	0.4
0.01	0.5	3	30	0.25	0.35
0.01	0.25	3	10	1	0.85

0.01	0.25	3	10	1	0.85
0.01	0.25	3	10	0.75	0.8
0.01	0.25	3	10	0.75	0.85
0.01	0.25	3	10	0.5	0.85
0.01	0.25	3	10	0.5	0.8
0.01	0.25	3	10	0.25	0.45
0.01	0.25	3	10	0.25	0.3
0.01	0.25	3	20	1	0.65
0.01	0.25	3	20	1	0.5
0.01	0.25	3	20	0.75	0.6
0.01	0.25	3	20	0.75	0.65
0.01	0.25	3	20	0.5	0.55
0.01	0.25	3	20	0.5	0.55
0.01	0.25	3	20	0.25	0.4
0.01	0.25	3	20	0.25	0.25
0.01	0.25	3	30	1	0.5
0.01	0.25	3	30	1	0.25
0.01	0.25	3	30	0.75	0.45
0.01	0.25	3	30	0.75	0.45
0.01	0.25	3	30	0.5	0.45
0.01	0.25	3	30	0.5	0.3
0.01	0.25	3	30	0.25	0.4
0.01	0.25	3	30	0.25	0.2
0.001	1	3	10	1	0.85
0.001	1	3	10	1	0.85
0.001	1	3	10	0.75	0.75
0.001	1	3	10	0.75	0.6
0.001	1	3	10	0.5	0.75
0.001	1	3	10	0.5	0.85
0.001	1	3	10	0.25	0.75
0.001	1	3	10	0.25	0.3
0.001	1	3	20	1	0.6
0.001	1	3	20	1	0.65
0.001	1	3	20	0.75	0.6
0.001	1	3	20	0.75	0.6
0.001	1	3	20	0.5	0.55
0.001	1	3	20	0.5	0.6
0.001	1	3	20	0.25	0.55
0.001	1	3	20	0.25	0.2
0.001	1	3	30	1	0.45
0.001	1	3	30	1	0.35

0.001	1	3	30	0.75	0.45
0.001	1	3	30	0.75	0.35
0.001	1	3	30	0.5	0.4
0.001	1	3	30	0.5	0.35
0.001	1	3	30	0.25	0.2
0.001	1	3	30	0.25	0.2
0.001	0.5	3	10	1	0.85
0.001	0.5	3	10	1	0.85
0.001	0.5	3	10	0.75	0.8
0.001	0.5	3	10	0.75	0.85
0.001	0.5	3	10	0.5	0.85
0.001	0.5	3	10	0.5	0.85
0.001	0.5	3	10	0.25	0.85
0.001	0.5	3	10	0.25	0.75
0.001	0.5	3	20	1	0.65
0.001	0.5	3	20	1	0.65
0.001	0.5	3	20	0.75	0.65
0.001	0.5	3	20	0.75	0.65
0.001	0.5	3	20	0.5	0.55
0.001	0.5	3	20	0.5	0.45
0.001	0.5	3	20	0.25	0.55
0.001	0.5	3	20	0.25	0.2
0.001	0.5	3	30	1	0.5
0.001	0.5	3	30	1	0.45
0.001	0.5	3	30	0.75	0.45
0.001	0.5	3	30	0.75	0.35
0.001	0.5	3	30	0.5	0.45
0.001	0.5	3	30	0.5	0.3
0.001	0.5	3	30	0.25	0.2
0.001	0.5	3	30	0.25	0.2
0.001	0.25	3	10	1	0.85
0.001	0.25	3	10	1	0.85
0.001	0.25	3	10	0.75	0.8
0.001	0.25	3	10	0.75	0.85
0.001	0.25	3	10	0.5	0.8
0.001	0.25	3	10	0.5	0.85
0.001	0.25	3	10	0.25	0.75
0.001	0.25	3	10	0.25	0.8
0.001	0.25	3	20	1	0.65
0.001	0.25	3	20	1	0.7
0.001	0.25	3	20	0.75	0.6

0.001	0.25	3	20	0.75	0.55
0.001	0.25	3	20	0.5	0.7
0.001	0.25	3	20	0.5	0.65
0.001	0.25	3	20	0.25	0.25
0.001	0.25	3	20	0.25	0.55
0.001	0.25	3	30	1	0.5
0.001	0.25	3	30	1	0.45
0.001	0.25	3	30	0.75	0.5
0.001	0.25	3	30	0.75	0.45
0.001	0.25	3	30	0.5	0.4
0.001	0.25	3	30	0.5	0.35
0.001	0.25	3	30	0.25	0.2
0.001	0.25	3	30	0.25	0.35