

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επίδραση του Σχήματος του Τεμάχους στις Καταπτώσεις Βράχων



Ναπολέων Καραγιαννόπουλος

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Τσιαμπάος

Αθήνα, Μάρτιος 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αφορά στην πειραματική διερεύνηση που εκπονήθηκε στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και είχε ως σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης του σχήματος στους συντελεστές αναπήδησης που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις καταπτώσεων βραχωδών τεμαχών.

Για την διερεύνηση της επίδρασης του σχήματος αναπτύχθηκε μια πειραματική διάταξη και διαμορφώθηκαν κατάλληλα δοκίμια ελλειπτικού σχήματος με διαφορετικούς λόγους ημιαξόνων. Συνολικά διαμορφώθηκαν ελλείψεις με 4 λόγους ημιαξόνων, πιο συγκεκριμένα 1,25, 1,5, 1,75 και 2. Οι ρίψεις έγιναν σε επίπεδα με διαφορετική κλίση ώστε να εξετασθεί η σχέση των συντελεστών αναπήδησης με την γωνία πρόσπτωσης. Τόσο οι ελλειπτικοί δίσκοι όσο και τα επίπεδα πρόσκρουσης διαμορφώθηκαν από φυσικό μάρμαρο Πεντέλης. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 80 δοκιμές.

Οι δοκιμές κατεγράφησαν με ειδική φωτομηχανή υψηλής ταχύτητας και η επεξεργασία των δοκιμών έγινε με κώδικα μηχανικής όρασης που αναπτύχθηκε για τον σκοπό αυτό στο υπολογιστικό περιβάλλον της MatLab.

Προσδιορίστηκαν οι συντελεστές αναπήδησης, χρησιμοποιώντας όλους τους προτεινόμενους στην βιβλιογραφία ορισμούς, και εξετάσθηκε η συσχέτιση τους με διάφορα κινηματικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Τέλος, εξετάστηκαν αναφορικά με την αξιοπιστία και τις παραδοχές τους, τρεις αναλυτικές λύσεις προσδιορισμού των συντελεστών, σύμφωνα με τις αρχικές συνθήκες της κίνησης.

ABSTRACT

This thesis concerns an experimental investigation held in the Laboratory of Engineering Geology and Rock Mechanics of the School of Civil Engineering at the National Technical University of Athens. The scope of this thesis is to investigate the shape effect of the Coefficients of Restitution used in rockfall analysis

A laboratory apparatus was developed for the tests and the falling blocks were simulated as elliptical discs, with various semi-axes ratios. Four different semi-axes were developed, in particular 1.25, 1.5, 1.75 and 2. The blocks were released to impact surfaces with various inclinations in order to examine the effect of slope angle into the Coefficient of Restitution values. The elliptical discs and the impact surfaces were modulated from natural rock material; precisely a fine graded Penteli Marble. In total 80 tests were performed.

Tests were recorded with a high speed camera, while data acquisition was performed by a machine vision computer code in MatLab, specially developed for this cause.

The Coefficients of Restitution were determined; using all available definitions in relevant literature, and their correlations with various kinematical and geometrical characteristics was examined.

Finally, some models found in literature that predict the coefficients according to the characteristics of the trajectory were evaluated and compared to the results of present study.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 Γενικά Στοιχεία			1			
	1.1	Αίτι	α καταπτώσεων	2		
2	Ανάλυση τροχιάς					
	2.1	2.1 Προσδιόρισμος των Συντελέστων αναπήδησης				
	2.1.1		Ανάδρομες αναλύσεις φυσικών καταπτώσεων	7		
	2.1.2		Επί τόπου δοκιμές	8		
	2.2 Μα		θηματική προσέγγιση φαινομένου αναπήδησης	9		
	2.3	Mα	θηματική προσέγγιση της επίδρασης του σχήματος	12		
	2.3.1		Υπολογιστικό μοντέλο SASS	12		
	2.3.2		Προσομοίωση κατά Vijayakumar et al. (2012)	15		
	2.3.3		Προσομοίωση κατά Azzoni et al. (1995)	23		
3	Πειραματική διαταξη		ατική διαταξη	26		
	3.1	Επι	φάνειες πρόσπτωσης	26		
	3.2 Διαμόρφωση δοκιμίων		μόρφωση δοκιμίων	26		
	3.3	νανα και συσκευές	28			
	3.3.1		Συσκευή παραβολικων ρίψεων	28		
	3.3.2		Κάμερα ταχείας λήψης	30		
	3.4	Δια	δικασία εκτέλεσης δοκιμών	31		
4	Επε	Επεξεργασία αποτελεσμάτων32				
	4.1	MA	TLAB	32		
	4.1	.1	Επεξεργασία εικόνας	32		
	4.1.2		Κωδικας προσαρμογής έλλειψης	33		
	4.1.3		Υπολογισμός ταχυτήτων	36		
5	Εργαστηριακές δοκιμές		ηριακές δοκιμές			
	5.1	Πυκνότητα				
	5.2	.2 Μονοαξονική θλιπτική αντοχή και παραμορφωσιμότητα				
	5.3	Εφελκυστική αντοχή		41		
	5.4	4 Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων		42		
	5.5	Σημειακή φόρτιση		45		
	5.6 Σφύρα Schmidt		46			

L

6	6 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ				
	6.1	AΞI	ΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ	47	
	6.1.1		Σχέση γωνιών πρόσπτωσης και αναπήδησης	47	
	6.1	.2	Κάθετος συντελεστής αναπήδησης	48	
	6.1.3 6.1.4		Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης	50	
			Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης	51	
	6.1.5		Ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης	52	
	6.2	ΣΥΓ	ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ	53	
	6.2.1		Υπολογιστικό μοντέλο SASS	53	
	6.2	.2	Αναλυτική λύση Bozzolo & Pamini (1986)	54	
	6.2	.3	Μέθοδος φαινόμενου συντελεστή αναπήδησης	55	
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		ΡΑΣΜΑΤΑ	57	
	7.1	Πει	ραματική διάταξη	57	
7.2		Συν	τελεστές αναπήδησης	57	
	7.3	Σύγ	κριση με αναλυτικές λύσεις	58	
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ59				
ПАРАРТНМА					

L

1 Γενικά Στοιχεία

Ως κατάπτωση βράχου ορίζεται η αποκόλληση τμήματος ενός πρανούς από το μητρικό πέτρωμα και η προς τα κάτω κίνησή του μέχρι τη σταθεροποίησή του σε νέα θέση ισορροπίας χαμηλότερης ενέργειας.

Καταπτώσεις βράχων παρατηρούνται συχνά σε ορεινές περιοχές αλλά και σε ακτές. Ιδιαίτερα επικίνδυνη είναι η περίπτωση των καταπτώσεων σε ορεινές περιοχές καθώς τυχόν οικισμοί και έργα υποδομής που βρίσκονται σε χαμηλότερες υψομετρικά θέσεις περιμετρικά των πρανών πλήττονται από βραχοπτώσεις με αποτέλεσμα καταστροφές σε υποδομές και απώλειες σε ανθρώπινες ζωές. Παραδείγματα τέτοιων καταστροφικών καταπτώσεων μπορούν να βρεθούν εύκολα σε όλο τον κόσμο. Ένα αντιπροσωπευτικό τέτοιο παράδειγμα είναι η πρόσφατη και τραγική περίπτωση της βραχόπτωσης στην κοιλάδα των Τεμπών το 2009.



Εικόνα 1.1 Πτώση βράχων στο οδικό δίκτυο

Η αντιμετώπιση του φαινομένου των καταπτώσεων βράχων προϋποθέτει συνήθως την κατασκευή ειδικών έργων, η διαστασιολόγηση των οποίων γίνεται με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών. Ωστόσο, παρόλη την εκτενή έρευνα που έχει ήδη γίνει, η συμπεριφορά των βραχοτεμαχών την στιγμή της πρόσκρουσης σε μία πλαγιά παραμένει σε μεγάλο βαθμό αδιευκρίνιστη, γεγονός που προκαλεί πολλές δυσκολίες στην προσομοίωση της εκτελούμενης τροχιάς.

Η προσέγγιση που γίνεται για τις αναλύσεις βασίζεται στον προσδιορισμό της απώλειας ταχύτητας (ή ενέργειας) σύμφωνα με τους συντελεστές αναπήδησης. Στην βιβλιογραφία, προτείνονται διάφορες τιμές των συντελεστών αυτών που συνδέονται με ένα ορισμένο γεωλογικό υλικό. Ωστόσο, κρίνεται ιδιαίτερα απλουστευτικό να θεωρείται ότι οι συντελεστές αναπήδησης είναι ανεξάρτητοι από άλλους παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά του τεμάχους (βάρος, μέγεθος, σχήμα, αντοχή, στιβαρότητα), την κινηματική του τεμάχους (ταχύτητα πρόσκρουσης μεταφορική ή γωνιακή, γωνία πρόσκρουσης, προσανατολισμός του τεμάχους), ή τα χαρακτηριστικά της βραχώδους επιφάνειας της πλαγιάς (κλίση, τραχύτητα, αντοχή, στιβαρότητα).

1.1 Αίτια καταπτώσεων

Οι καταπτώσεις δύναται να προκληθούν από γεωλογικές - υδρογεωλογικές διεργασίες, πιο συγκεκριμένα με τη γένεση και την επακόλουθη τεκτονική καταπόνηση κάθε πετρώματος, με την ρωγμάτωσή του, έχουν σαν αποτέλεσμα να προσδίδονται σε αυτό διαφορετικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Ακόμα περισσότερο, η διαφορετική ορυκτολογική σύσταση και η αντοχή κάθε επιμέρους ορυκτού που συνιστά το πέτρωμα έχουν ιδιαίτερη βαρύτητα στη τιμή της αντοχής και στην ευκολία αποσάθρωσης του σχηματισμού, και έτσι στο μεγάλο εύρος διαφορετικών γεωλογικών συμπεριφορών.

Το φαινόμενο της αποσάθρωσης καθορίζει κυρίως την ποιότητα της βραχομάζας. Διακρίνεται στη μηχανική αποσάθρωση (θρυμματισμός του πετρώματος χωρίς αλλαγή της χημικής σύστασης του) και τη χημική αποσάθρωση. Κύριοι συντελεστές της μηχανικής αποσάθρωσης είναι :

 η παγετώδης αποσφήνωση (η διόγκωση του περιεχόμενου νερού, στους πόρους και τις ρωγμές, λόγω της πήξης του προκαλεί μεγάλες δυνάμεις επί του πετρώματος),

- η κρυστάλλωση αλάτων (όμοια με τον πάγο, διαλυμένα άλατα που βρίσκονται σε πόρους, ρωγμές ή εξωτερικά έγκοιλα του πετρώματος όταν κρυσταλλωθούν αυξάνουν σε όγκο),
- η θερμική διαστολή και συστολή (τα διάφορα ορυκτά του πετρώματος έχουν διαφορετική τιμή συστολής ή διαστολής),
- η βιογενής ενέργεια (οι ρίζες των φυτών ή οι υπόγειες εκσκαφές από ζώα, διευρύνουν τις ρωγμές και χαλαρώνουν το πέτρωμα).

Κατά την χημική αποσάθρωση συμβαίνει εξαλλοίωση των πετρωμάτων, δηλαδή αλλαγή της ορυκτολογικής του σύστασης κυρίως με τη βοήθεια αντιδράσεων όπου συμμετέχει το νερό. Διακρίνονται τρεις βασικές διεργασίες χημικής αποσάθρωσης :

- η διάλυση (η παρουσία ακόμα και μικρής ποσότητας οξέως στο νερό αυξάνει τη διαλυτική του ικανότητα),
- η υδρόλυση (θετικά ιόντα του πλέγματος των ορυκτών αντικαθίστανται από ελεύθερα ιόντα υδρογόνου του νερού, με αποτέλεσμα τα ορυκτά να αποσυντίθενται),
- η οξείδωση (χημικές ενώσεις με το οξυγόνο).

Οι βροχοπτώσεις έχουν και αυτές σημαντική επίδραση στην ποιότητα της βραχομάζας. Το επιφανειακό νερό εισέρχεται στις ανοιχτές ρωγμές-ασυνέχειες που αναπτύσσονται συνήθως στην επιφανειακή ζώνη της βραχομάζας των πρανών με αποτέλεσμα:

- να παρέχει το νερό για την επίτευξη του φαινομένου της παγετώδους αποσφήνωσης,
- σε περίπτωση μη επαρκούς αποστράγγισης, να ασκεί υδροστατική πίεση στη βραχομάζα συμβάλλοντας έτσι σε καταπτώσεις ήδη ασταθών τεμαχών,
- κατά την ροή του δια μέσω των ασυνεχειών, ξεπλένει το εδαφικό υλικό από αυτές, χαλαρώνοντας περαιτέρω τη βραχομάζα,
- να έχει διαβρωτική δράση εντείνοντας έτσι τις διεργασίες χημικής αποσάθρωσης.

Επί πρόσθετα, πολλές φορές οι σεισμικές δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν το έναυσμα για βραχοπτώσεις. Τεμάχη τα οποία είναι ασταθή ή βρίσκονται σε οριακή ισορροπία είναι πολύ πιθανό να εξαναγκαστούν σε κίνηση υπό την σεισμική διέγερση. Η επιτάχυνση του εδάφους έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του αλληλοκλειδώματος μεταξύ των κόκκων με επακόλουθη τη μείωση της συνοχής και της γωνίας τριβής του πετρώματος - εδάφους. Έτσι εδάφη που η σύσταση τους είναι χαλαρή ή εμφανίζουν μικρή συνεκτικότητα

καθώς και πρανή που επηρεάζονται από νεοτεκτονικές διεργασίες παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο καταπτώσεων λόγω της σεισμικής καταπόνησης.

Τέλος, ενας ακόμα παράγοντας που μπορεί να προκαλέσει βραχοπτώσεις είναι η ανθρώπινη δραστηριότητα. Για παράδειγμα, σε προγραμματισμένες εργασίες καθαίρεσης, η ελεγχόμενη απομάκρυνση ενός μικρού τεμάχους μπορεί να προκαλέσει την αποσφήνωση ενός μεγαλύτερου βράχου. Ακόμα, οι εργασίες ανατίναξης βραχωδών όγκων προκαλούν δυναμική διέγερση (τεχνητές δονήσεις) παρόμοια με αυτή των σεισμικών φαινομένων, με διαφορά την πολύ μικρότερη έντασή της. Έτσι με τον μηχανισμό που προαναφέρθηκε δύνανται να αποκολληθούν επισφαλή τεμάχη.



Εικόνα 1.2 Κύριοι μηχανισμοί πρόκλησης βραχοπτώσεων

2 Ανάλυση τροχιάς

Κατά την διάρκεια της κατάπτωσης, η τροχιά ενός τεμάχους μπορεί να προσομοιωθεί ως ένας συνδυασμός τεσσάρων τύπων κίνησης. Με βάση τους Descoeudres and Zimmermann (1987), οι τύποι κίνησης είναι:

- ελεύθερη πορεία (free flight),
- αναπήδηση (bouncing),
- κύλιση (rolling),
- Ολίσθηση (sliding).



Σχήμα 2.1 Τύποι κίνησης που συνθέτουν το φαινόμενο της κατάπτωσης. (Descoeudres and Zimmermann, 1987)

Αναπήδηση συμβαίνει όταν το τέμαχος προσκρούει στην επιφάνεια της πλαγιάς, σε δέντρα ή άλλα εμπόδια. Λόγω της πολυπλοκότητας της, θεωρείται ως το τμήμα της τροχιάς το οποίο έχει κατανοηθεί λιγότερο από όλα και είναι το πιο δύσκολο να προβλεφθεί.

Η ελεύθερη παραβολική πορεία του τεμάχους μπορεί να περιγραφεί, εύκολα και με ακρίβεια, από μια δευτεροβάθμια εξίσωση.

Από επί τόπου δοκιμές (Ritchie, 1963) έχει παρατηρηθεί ότι το κύριο είδος της κίνησης (σχήμα 2.2.) εξαρτάται από την κλίση του πρανούς, Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται οι περιπτώσεις:

- κύλιση σε πλαγιές με κλίση μέχρι 45° (όπου γωνία κλίσης η γωνία μεταξύ οριζόντιου επιπέδου και επιπέδου πρανούς),
- αναπήδηση για γωνίες κλίσης μεταξύ 46° και 63°, και
- ελεύθερη πτώση για γωνίες κλίσης μεγαλύτερες από 64° .



Σχήμα 2.2 Είδη κίνησης ανάλογα με την κλίση του πρανούς (Ritchie, 1963).

Σε γενικές γραμμές, τα τεμάχη μεγάλου όγκου διανύουν μεγάλες αποστάσεις και τείνουν να κυλούν ή και να ολισθαίνουν κατά μήκος του πρανούς, αναπτύσσοντας μικρά ύψη αναπήδησης (Ritchie, 1963), (Bozzolo and Pamini, 1986).

Τα μικρά τεμάχη συνήθως ολοκληρώνουν την κίνηση τους κοντά στο σημείο εκκίνησής τους (Hungr and Evans, 1988). Αυτό οφείλεται στη τραχύτητα μεταξύ του τεμάχους και της επιφάνειας του πρανούς όπου οι τοπικές ανωμαλίες του πρανούς προκαλούν στα μικρά τεμάχη μεγαλύτερη αλληλοεμπλοκή, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η δυνατότητα μετακίνησης, σε αντίθεση με τα μεγάλα τεμάχη που επηρεάζονται και εκτρέπονται λιγότερο από την τραχύτητα της πλαγιάς (Statham, 1976).

Οι περισσότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα αναπαριστούν την αναπήδηση με έναν απλοποιημένο τρόπο, χρησιμοποιώντας συντελεστές για να περιγράψουν την απώλεια ταχύτητας που συμβαίνει κατά την διάρκεια της πρόσκρουσης. Οι συντελεστές αυτοί καλούνται συντελεστές αναπήδησης και εκφράζουν το ποσό της ταχύτητας ή ενέργειας που χάνεται κατά την κρούση.

Στην βιβλιογραφία συναντώνται διαφορετικές εκφράσεις για τους συντελεστές αναπήδησης, καταδεικνύοντας έτσι την ελλιπή κατανόηση του φαινομένου. Ωστόσο, οι συντελεστές αναπήδησης αποτελούν την πιο κρίσιμη παράμετρο για την προσομοίωση της τροχιάς και τον έλεγχο της απώλειας ταχύτητας και κινητικής ενέργειας κατά την κρούση. Συνεπώς η αξιοπιστία οποιασδήποτε ανάλυσης τροχιάς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ορθή επιλογή παραμέτρων υπολογισμού.

2.1 Προσδιορισμός των Συντελέστων αναπήδησης

Η ακριβής παρατήρηση και ανάλυση του φαινομένου για την εξακρίβωση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις μεθόδους ανάλυσης καταπτώσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εκτέλεση μιας πιο ορθολογικής ανάλυσης όπως και την επίτευξη πιο λογικών προβλέψεων είναι επιβεβλημένη η καλύτερη δυνατή γνώση του φαινομένου της αναπήδησης και της απώλειας ενέργειας κατά την κρούση.

Για την συλλογή αυτών των πληροφοριών χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μέθοδοι:

- Ανάδρομες αναλύσεις φυσικών συμβάντων καταπτώσεων,
- Ειδικές επί τόπου δοκιμές (in situ)
- Εργαστηριακές δοκιμές υπό κλίμακα.

2.1.1 Ανάδρομες αναλύσεις φυσικών καταπτώσεων

Μετά την εκδήλωση φυσικών φαινομένων βραχοπτώσεων, γίνεται επί τόπου προσδιορισμός της τροχιάς από τα ίχνη που διακρίνονται στο πρανές, ώστε αυτά να χρησιμοποιηθούν στην εκτέλεση ανάδρομων αναλύσεων, εκτιμώντας έτσι την αναπτυσσόμενη ταχύτητα ή ενέργεια, το ποσοστό της ταχύτητας ή ενέργειας που χάθηκε κατά την πρόσκρουση, καθώς και το ύψος ή και το μήκος αναπήδησης (Lied, 1977), (Hungr and Evans, 1996).

Οι παρατηρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση των προγραμμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών για αναλύσεις τροχιάς στο χώρο ενδιαφέροντος ή σε άλλα πεδία με παρόμοια χαρακτηριστικά (Labiouse and Descoeudres, 1999).

Αν και η παρατήρηση και ανάδρομη ανάλυση φυσικών φαινομένων είναι απαραίτητη για την ορθή βαθμονόμηση των προγραμμάτων ανάλυσης τροχιάς, αυτό το είδος της έρευνας δεν είναι κατάλληλο για παραμετρική μελέτη ή για εξαγωγή στατιστικώς σημαντικών συμπερασμάτων. Αυτό οφείλεται στη φυσική ανομοιογένεια του υλικού που μελετάται (τραχύτητα επιφάνειας, σχήμα και μέγεθος τεμαχών, γωνία κλίσης κ.α.).

2.1.2 Επί τόπου δοκιμές

Οι επί τόπου δοκιμές παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την μελέτη του φαινομένου, την αξιολόγηση των σχετικών φυσικών παραμέτρων καθώς και για την ορθή βαθμονόμηση των αριθμητικών μοντέλων.

Για την διενέργεια επί τόπου δοκιμών, το τεμάχος απελευθερώνεται στην κορυφή μίας πλαγιάς με γνωστά γεωλογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Η τροχιά καταγράφεται από ειδικά συστήματα συνήθως φωτογραφικών μηχανών και αναλύεται ώστε να προσδιοριστεί η ταχύτητα του τεμάχους σε διάφορες θέσεις, το ύψος αναπήδησης σε κάθε κρούση και οι αποστάσεις που διανύθηκαν, και κατά συνέπεια οι συντελεστές αναπήδησης.

Πολλά πειράματα έχουν ήδη πραγματοποιηθεί και αναλυθεί σε παγκόσμιο επίπεδο (Ritchie, 1963), (Broili, 1977), (Lied, 1977), (Statham, 1976), (Bozzolo and Pamini, 1986), (Pfeiffer and Bowen, 1989), (Fornaro et al., 1990), (Azzoni et al., 1992), (Giani, 1992), (Yoshida, 1998), (Giacomini et al., 2009, Giacomini et al., 2012), (Spadari et al., 2012a, Spadari et al., 2012b), (Asteriou et al., 2012, Asteriou et al., 2013b, Asteriou et al., 2013a).

Μεταξύ αυτών των επί τόπου δοκιμών, η πιο πλήρης σειρά έγινε από το Ιταλικό ινστιτούτο πειραματικών μοντέλων και κατασκευών (ISMES) μεταξύ του 1989 και 1995, σε πρανή διαφόρων γεωλογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών. Οι δοκιμές αυτές επέτρεψαν την ανάλυση της επιρροής των παραμέτρων τόσο του τεμάχους (μέγεθος, σχήμα, μηχανικά χαρακτηριστικά), όσο και του εδάφους (γεωλογική σύσταση, γεωμετρία) στην τροχιά που ακολουθείται (Azzoni et al., 1992).

Οι επί τόπου δοκιμές είναι εξαιρετικά σημαντικές για την μελέτη των κατολισθήσεων, διότι επιτρέπουν την οπτικοποίηση πολλών διαφορετικών και περίπλοκων πτυχών αυτού του εξαιρετικά τυχαίου φαινομένου (Azzoni and de Freitas, 1995).

Οι συντελεστές αναπήδησης που προκύπτουν από επί τόπου δοκιμές, σε συνδυασμό με τη γεωμετρία του πρανούς και τις ιδιότητες των τεμαχών, θεωρούνται ως οι πλέον κατάλληλες παράμετροι για τον ορισμό των χαρακτηριστικών των καταπτώσεων.

Ωστόσο, οι επί τόπου δοκιμές είναι δαπανηρές και χρονοβόρες και (ως φυσικά φαινόμενα) δεν είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για τη στατιστική και παραμετρική ανάλυση, λόγω των αβεβαιοτήτων που υπάρχουν από την διακύμανση των παραμέτρων στην φύση. Ως εκ τούτου, οι δοκιμές εργαστηριακής κλίμακας αποτελούν σημαντικό συμπλήρωμα για την ακριβή πειραματική έρευνα.

2.2 Μαθηματική προσέγγιση φαινομένου αναπήδησης

Την στιγμή που ένα τεμάχος προσκρούει στην επιφάνεια του πρανούς, ασκεί μια δύναμη στο πρανές και από αντίδραση αναπηδά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Το ύψος της αναπήδησης, η κατεύθυνση και η ταχύτητα (μεταφοράς και περιστροφής) που προκαλείται στο τέμαχος κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης εξαρτάται από τις συνθήκες πρόσκρουσης οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων.

Κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης, ένα ορισμένο ποσό ενέργειας απελευθερώνεται. Η διάχυση της ενέργειας οφείλεται στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά του γεωυλικού του πρανούς, στη δημιουργία ελαστικού κύματος, στην αντίσταση κύλισης και ολίσθησης ή και σε ενδεχόμενη καταστροφή του (Giani, 1992).

Σε γενικές γραμμές, διακρίνονται δύο κύριες λειτουργίες διάχυσης της ενέργειας. Η κινητική ενέργεια κάθετα στην επιφάνεια του πρανούς καθορίζεται από την πλαστικότητα του εδαφικού υλικού και η αντίσταση παράλληλα με το επίπεδο πρόσκρουσης εξαρτάται από την τριβή ολίσθησης και κύλισης.

Συνεπώς, λόγω των διαφορετικών μηχανισμών που εμπλέκονται στην αντίσταση της κίνησης κατά την κάθετη και την εφαπτομενική συνιστώσα (ως προς το πρανές), χρησιμοποιούνται επί μέρους ορισμοί για τη μέτρηση της αντίστασης. Το μέτρο της αντίστασης κάθετα στο επίπεδο του πρανούς ονομάζεται κάθετος συντελεστής αναπήδησης (normal coefficient of restitution), ενώ το μέτρο της αντίστασης παράλληλα στο επίπεδο του πρανούς ονομάζεται εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης (tangential coefficient of restitution).

Ανάλογα με τις συνθήκες, η πρόσκρουση διαφοροποιείται περαιτέρω την στιγμή της επαφής του τέμαχους με το πρανές. Αν η εφαπτομενική ταχύτητα του τμήματος του τεμάχος που έρχεται σε επαφή με το πρανές είναι μηδέν, η πρόσκρουση καλείται πρόσκρουση "προσκόλλησης" (sticking impact) και μπορεί να περιγραφεί ως μια καθαρή στιγμιαία κύλιση. Στην περίπτωση μη μηδενικής εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας στο σημείο επαφής, η πρόσκρουση καλείται πρόσκρουση κύλισης ή ολίσθησης (sliding ή sliping impact). Στην περίπτωση αυτή, η κίνηση του τεμάχους είναι ένας συνδυασμός ανάμεσα στις δύο κινήσεις. Από μαθηματική σκοπιά, διάφορες σχέσεις έχουν προταθεί για να περιγράψουν τους μηχανισμούς που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης. Ως σήμερα φαίνεται να μην υπάρχει διεθνώς συμφωνία για το ποία μαθηματική σχέση είναι καταλληλότερη για την περιγραφή του φαινομένου των καταπτώσεων.

Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες σχέσεις είναι εκφρασμένες σε όρους ταχύτητας ή ενέργειας, ενώ συναντούνται στην βιβλιογραφία και σχέσεις που χρησιμοποιούν τον λόγο της ώθησης πριν και μετά την κρούση (Descoeudres and Zimmermann, 1987), (Bozzolo and Pamini, 1986).

Οι συντελεστές αυτοί, που εκφράζουν το ποσό της ταχύτητας ή ενέργειας που χάνεται κατά την κρούση, αποκαλούνται "συντελεστές αναπήδησης", ακόμη και αν αυτή η ορολογία δεν είναι απολύτως σωστή όπως διατυπώθηκε από τον Νεύτωνα, ο οποίος ορίζει τον συντελεστή επιστροφής - αναπήδησης μόνο από την αναλογία των ταχυτήτων.

Σύμφωνα με τη θεωρία του Νεύτωνα για κεντρική σύγκρουση 2 σωματιδίων, ο συντελεστής αναπήδησης (επιστροφής) R είναι:

$$R = \frac{V_{r,2} - V_{r,1}}{V_{i,2} - V_{i,1}}$$
(2.1)

Όπου vi αρχική ταχύτητα των σωματιδίων, vr ταχύτητα μετά την σύγκρουση των δύο σωματιδίων 1 και 2

Ο συντελεστής αναπήδησης R μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ Ο και 1. Για R=Ο συμβαίνει απολύτως ανελαστική σύγκρουση ενώ ο συντελεστής R=1 περιγραφεί την τέλεια ελαστική σύγκρουση.

Σε περίπτωση που ένα τέμαχος προσκρούσει σε ακλόνητη επιφάνεια, π.χ. ένα βραχώδες πρανές, ο συντελεστής αναπήδησης απλοποιείται ως εξής :

$$R = \frac{V_r}{V_i}$$
(2.2)

Όπου vi και vr είναι τα μέτρα των ταχυτήτων πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα

Για δοκιμές με αρχική ελεύθερη πτώση, η εξίσωση (2.2) μπορεί να γραφτεί ως:

$$\mathsf{R}_{\mathsf{H}} = \sqrt{\frac{\mathsf{H}_{\mathsf{r}}}{\mathsf{H}_{\mathsf{i}}}} \tag{2.3}$$

Όπου Ηi το ύψος εκκίνησης της πτώσης Hr το ύψος αναπήδησης

Πειραματικά στοιχεία δείχνουν ότι ο καλύτερος ορισμός λαμβάνεται από διαχωρισμό σε κάθετη και εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας πριν και μετά την κρούση. Οι συντελεστές αναπήδησης Rn και Rt, ορίζονται ως εξής:

$$R_{n} = -\frac{V_{n,r}}{V_{n,i}}$$
(2.4)

$$R_{n} = -\frac{V_{t,r}}{V_{t,i}}$$
(2.5)

Όπου, vn και vt είναι οι κάθετες και εφαπτομενικές συνιστώσες των ταχυτήτων του τεμάχους σε σχέση με την κλίση της επιφάνειας (σχήμα 2.3)



Σχήμα 2.3 Συνιστώσες ταχυτήτων πριν (i) και μετά την αναπήδηση (r), (Heidenreich, 2004)

Κατά τη διάρκεια της κρούσης, η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας αλλάζει πρόσημο. Για να υπάρξει ένας θετικός ορισμός του συντελεστή της αναπήδησης και σύμφωνα με το νόμο του Νεύτωνα για την κρούση, η έκφραση περιλαμβάνει τον πολλαπλασιαστικό συντελεστή (-1). Οι συντελεστές αναπήδησης Rn και Rt, που ορίζονται από το λόγο της ορθής και εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας του κέντρου μάζας πριν και μετά την κρούση, αναφέρονται στο ποσοστό των μεταφορικών ταχυτήτων που χάνονται κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης.

Στην βιβλιογραφία, προτείνονται διάφορες τιμές που συνδέονται με ένα ορισμένο γεωυλικό (βλ. Πίνακα 2.1). Ωστόσο, οι τιμές των συντελέστων δίνονται ως σταθερές, αγνοώντας άλλους παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά του τεμάχους (βάρος, μέγεθος, σχήμα, αντοχή, στιβαρότητα), την κινηματική του (ταχύτητα πρόσκρουσης μεταφορική ή γωνιακή, γωνία πρόσκρουσης, προσανατολισμός του τεμάχους), ή τα χαρακτηριστικά της πλαγιάς (αντοχή, κλίση, τραχύτητα, στιβαρότητα). Οι παραγόντες αυτοί, σύμφωνα με αρκετές επιστημονικές εργασίες, έχουν σημαντική επίδραση στην εκτελούμενη τροχιά και

2.3 Μαθηματική προσέγγιση της επίδρασης του σχήματος

Δεδομένου ότι η τροχιά επηρεάζεται, εκτός των άλλων, και από το σχήμα του τεμάχους, έχουν προταθεί στην διεθνή βιβλιογραφία μαθηματικές προσεγγίσεις προς αυτή την κατεύθυνση. Λόγω της προφανούς δυσκολίας έκφρασης μαθηματικών σχέσεων για τεμάχη ακανόνιστου σχήματος έχει επικρατήσει η διατύπωση σχέσεων θεωρώντας το τέμαχος ως έναν ελλειπτικό δίσκο. Στην συνέχεια, αναλύονται οι προτεινόμενες προσεγγίσεις

2.3.1 Υπολογιστικό μοντέλο SASS

Στο Υπολογιστικό μοντέλο SASS (Bozzolo and Pamini, 1986) το τέμαχος προσεγγίζεται ως άκαμπτο ελλειψοειδές με μήκος αξόνων μεταξύ ορισμένων ορίων. Το μοντέλο μπορεί να λάβει υπόψη την ολίσθηση, την κύλιση, την κρούση και την ελεύθερη πτώση του βράχου. Τα γεωλογικά και μορφολογικά δεδομένα της πλαγιάς ορίζονται από τον χρήστη και με βάση αυτά μπορεί να υπολογιστεί η κατανομή των γραμμικών και γωνιακών ταχυτήτων, η ανύψωση και το συνολικό μήκος τροχιάς.

Αναφόρικα με την ολισθηση το τέμαχος θεωρείται ότι έρχεται σε επαφή με το πρανές χωρίς να περιστρέφεται παρά μόνο ολισθαίνοντας. Η δύναμη αντίστασης, η οποία επηρεάζει το μήκος που θα διανυθεί από το βραχοτέμαχος μέχρι την θέση ηρεμίας του περιγράφεται από τον νόμο του Coulomb μέσω της σχέσης:

Όπου	μ	ο συντελεστής τριβής,
	m	μάζα του βραχοτεμάχους,
	g	η επιτάχυνση της βαρύτητας και

β η κλίση του πρανούς.

Η φορά της δύναμης F είναι αντίθετη της ταχύτητας του τεμάχους και εφαρμόζεται στο σημείο επαφής. Τυπικές τιμές του συντελεστή τριβής μ κυμαίνονται από 0,6 έως 1. Ένα τέμαχος μπορεί να ολισθήσει μέχρι το τέλος της κίνησής του σε μία νέα θέση ισορροπίας ή η ολίσθηση να μετατραπεί σε περιστροφή..

Στην περίπτωση της κύλισης θεωρείται ότι το τέμαχος έρχεται σε επαφή με το πρανές αναπτύσσοντας μόνο περιστροφική κίνηση. Πολλές φορές η κύλιση συνδυάζεται με την ολίσθηση με αποτέλεσμα να προκύπτει ένα πιο πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο κάθε φορά θα πρέπει να αναλύεται σε δύο συνιστώσες. Σύμφωνα με τον Statham (1979), ο οποίος διεξήγαγε μια σειρά εργαστηριακών και επί τόπου πειραμάτων, μια πιο ακριβής περιγραφή αυτού του σύνθετου φαινομένου μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας και πάλι τον νόμο του Coulomb με τον συντελεστή ολίσθησης να εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του πρανούς, από την παρακάτω σχέση.

$$F = mg\mu\cos\beta \tag{2.6}$$

με τον συντελεστή ολίσθησης μ, να ισούται με:

$$\mu = \mu_0 + \kappa \frac{d}{d} \tag{2.7}$$

Όπου μ_0 , κ σταθερές με τιμές από, $0.37 \le \mu_0 \le 0.67$ και $0.16 \le k \le 0.27$

d' το μήκος επαφής του εδάφους με το τέμαχος, και

d η διάμετρός του τεμάχους.

Η αναπήδηση είναι ένα φαινόμενο ιδιαίτερα πολύπλοκο και απρόβλεπτο, κάτι που αυξάνει τη δυσκολία μελέτης και κατανόησής του. Μπορεί ωστόσο να απλουστευθεί με ορισμένες υποθέσεις.

Με θεώρηση σημειακής πρόσκρουσης, μία απλούστευση που μπορεί να γίνει μόνο σε κρούση βράχων, η περιστροφική ορμή στο σημείο επαφής διατηρείται. Έτσι έχουμε:

 $I\omega + yv_x - xv_y = I\omega_0 + yv_{0x} - xv_{0y}$

χ, γ οι συντεταγμένες του κέντρου μάζας στο καρτεσιανό επίπεδο
 ν_{0x}, ν_x οι συνιστώσες της ταχύτητας του κέντρου μάζας πριν και μετά την κρούση ως προς τον άξονα x

ν_{0y}, ν_y οι συνιστώσες της ταχύτητας του κέντρου μάζας πριν και μετά την κρούση ως προς τον άξονα γ

Όπως φαίνεται στο σχήμα η τριβή κατά την πρόσκρουση μεταξύ του τεμάχους και της βραχώδους επιφάνειας είναι συνήθως αρκετά υψηλή για την αποφυγή οποιασδήποτε οριζόντιας μετατόπιση του σημείου πρόσκρουσης Π.

Έτσι, το σημείο επαφής γίνεται ένα στιγμιαίο κέντρο περιστροφής, και οι σχέσεις της εφαπτομενικής και κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας του κέντρου μάζας είναι

$$v_{\chi} = y\omega$$
(2.9)
$$v_{\chi}y = -x\omega$$
(2.10)

Με συνδυασμό των εξισώσεων έχουμε

$$\omega = \frac{I\omega_0 + yv_{0x} - xv_{0y}}{I + x^2 + y^2}$$
(2.11)

Η απώλεια ενέργειας κατά την κρούση ορίζει τον συντελεστή αναπήδησης. Αν Κ₀ και Κ είναι η κινητική ενέργεια πριν και μετά την κρούση, τότε:

$$\mathbf{K} = \eta \mathbf{K}_0 \tag{2.12}$$

Όπου, n ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης

(2.8)

2.3.2 Προσομοίωση κατά Vijayakumar et al. (2012).

Γίνεται η παραδοχή ότι ένα ελλειπτικό σώμα είναι επαρκώς γενικό για τον καθορισμό του φαινόμενου συντελεστή αναπήδησης για τις διάφορες θέσεις κρούσης. Ως φαινόμενο συντελεστή αναπήδησης ορίζεται ο συντελεστής αναπήδησης που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους του τεμάχους. Ο φαινόμενος συντελεστής διαφοροποιείται από τον συντελεστή που προσδιορίζεται στο σημείο επαφής, αφού οι ταχύτητες είναι διαφορετικές εξ αιτίας της επενέργειας της γωνιακής ταχύτητας.

Έτσι, σε μια προσπάθεια να επεξηγηθεί η αιτία που προκαλεί την σημαντική μεταβλητότητα των συντελεστών που προκύπτουν από πειραματικές διερευνήσεις και αφορούν στο κέντρο βάρους του τεμάχους, γίνεται η παραδοχή ότι ο συντελεστής αναπήδησης που προκύπτει από τα κινηματικά μεγέθη στο σημείο επαφής είναι σταθερός και η μεταβλητότητα που παρατηρείται οφείλεται στον υπολογισμό των συντελεστών σύμφωνα με τις ταχύτητες του κέντρου βάρους.

Η επαγωγή του φαινόμενου συντελεστή αναπήδησης σε μία έλλειψη περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της σχέσης της εξερχόμενων και εισερχόμενων ταχυτήτων στο σημείο επαφής μεταξύ της έλλειψης και της πλαγιας. Η γεωμετρία και τα κινηματικά μεγέθη που σχετίζονται με μια έλλειψη που προσκρούει σε ένα οριζόντιο επίπεδο απεικονίζεται στα σχήματα 2.4, 2.5, 2.6



Σχήμα 2.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά σώματος



Σχήμα 2.5 Ταχύτητα και Ταχύτητα και Περστροφή πριν την κρούση περστροφή μετά την κρούση



Σχήμα 2.6 Ώθηση κατά την κρούση

όπου ν η ταχύτητα,

ω η γωνιακή ταχύτητα,

a το μήκος του μεγάλου ημιάξονα,

b το μήκος του μικρού ημιάξονα,

η γωνία πρόσκρουσης, που μετράται από τον μεγάλο άξονα της
 έλλειψης προς το σημείο επαφής

φ η γωνία που μετράται μεταξύ της πλαγιάς και το μεγάλου άξονα της έλλειψης

Ο δείκτης 1 ή 2 υποδηλώνει τα στιγμιότυπα πριν και μετά την κρούση, αντίστοιχα.

Κατά τους Vijayakumar et al. ορίζεται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης στο σημείο επαφης του τεμάχους με την πλαγιά

$$R_n = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{in}\sin(\theta_{in} - \alpha)}{V_{out}\sin(-\theta_{out} + \alpha)}$$
(2.13)

Η εξίσωση της έλλειψης γράφεται

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$
(2.14)

Με διαφόριση της εξίσωσης προκύπτει

$$\theta = \tan^{-1}(-\frac{b^2 x_1}{a^2 y_1})$$
(2.15)

$$\varphi = \tan^{-1}(\frac{-y_1}{-x_1})$$
(2.16)

Η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας στο σημείο επαφής πριν την κρούση είναι

$$\downarrow V_1^n = V_1 + r\omega_1 \cos(\theta + \phi) \tag{2.17}$$

όπου r η απόσταση του σημείου επαφής από το κέντρο της έλλειψης

Η ταχύτητα μετά την κρούση με χρήση του συντελεστή αναπήδησης γράφεται

$$\uparrow V_2^n = R_n \Big[V_1 + r\omega_1 \cos(\theta + \phi) \Big] \Longrightarrow$$

$$V_2 + r\omega_2 \cos(\theta + \phi) = R_n V_1 + R_n \omega_1 \cos(\theta + \phi) \qquad (2.18)$$

Η ώθηση στο σημείο C είναι

$$J = m(V_2 + V_1)$$
(2.19)

Και η στροφορμή, συναρτήσει της ώθησης

$$r\cos(\theta + \phi)J = -I(\omega_1 + \omega_2)$$
(2.20)

Με αντικατάσταση της (2.19) στην (2.20) προκύπτει

$$mr\cos(\theta + \phi)V_2 + I\omega_2 = -mr\cos(\theta + \phi)V_1 + I\omega_1$$
(2.21)

Με χρήση των εξισώσεων (2.21) και (2.18) μπορούν να υπολογιστούν οι άγνωστοι V_2 ω₂..Με αντικατάσταση ως προς το ω₂ προκύπτει

$$\begin{bmatrix} mr^{2}cos^{2}(\theta+\phi)-I \end{bmatrix} V_{2} = \begin{bmatrix} R_{n}I + mr^{2}cos^{2}(\theta+\phi) \end{bmatrix} V_{1} + [IR_{n}rcos(\theta+\phi)-Ircos(\theta+\phi)]\omega_{1}$$
(2.22)

Έτσι ορίζεται ο φαινόμενος συντελεστής αναπήδησης στο κέντρο βάρους

$$Rn^{*} = \frac{V2}{V1} = \frac{\left[RnI - mr^{2}cos^{2}\left(\theta + \phi\right)\right]}{\left[I + mr^{2}cos^{2}\left(\theta + \phi\right)\right]} + \frac{\left[Ircos\left(\theta + \phi\right)\left(1 + Rn\right)\right]\frac{\omega_{1}}{\left(V_{1}\right)}}{\left[I + mr^{2}cos^{2}\left(\theta + \phi\right)\right]}$$
(2.23)

Στην ανάλυση που παρουσιάζεται παραπάνω υπάρχουν διαφοροποιήσεις από αυτή που παρουσιάζεται στην εν λόγω δημοσίευση, λόγω εμφανών αλγεβρικών σφαλμάτων.

Σύμφωνα με την σχέση 2.23 η σχέση του φαινόμενου συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα της έλλειψης, για διάφορους λόγους ημιαξόνων παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα.







Σχήμα 2.8 Φαινόμενος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα της ἑλλειψης, για λόγο ημιαξόνων a/b = 1,5



Σχήμα 2.9 Φαινόμενος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα της ἑλλειψης, για λόγο ημιαξόνων a/b = 1,75



Σχήμα 2.10 Φαινόμενος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα της ἑλλειψης, για λόγο ημιαξόνων a/b = 2

Επίσης, διατηρώντας σταθέρο τον λόγο γωνιακής προς μεταθετικής ταχύτητας και μεταβάλλοντας τον λόγο των ημιαξόνων, η σχέση μετάξυ του φαινόμενου συντελέστη αναπήδησης και του προσατολισμού του μεγάλου άξονα της έλλειψης, παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 2.11 Φαινόμενος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα της έλλειψης, για λόγο γωνιακής προς μεταθετικής ταχύτητας ίσο με 0



Σχήμα 2.12 Φαινόμενος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα της έλλειψης, για λόγο γωνιακής προς μεταθετικής ταχύτητας ίσο με -1



Σχήμα 2.13 Φαινόμενος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα της ἑλλειψης, για λόγο γωνιακής προς μεταθετικής ταχύτητας ίσο με 1



Σχήμα 2.14 Φαινόμενος συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει του προσανατολισμού του μεγάλου άξονα της ἑλλειψης, για λόγο γωνιακής προς μεταθετικής ταχύτητας ίσο με 3

2.3.3 Προσομοίωση κατά Azzoni et al. (1995)

Ο Azzoni εξετάζει την συμπεριφορά πίπτοντος τεμάχους ελλειπτικού σχήματος ως προς την σχετική θέση του κέντρου μάζας του με το σημείο επαφής με επιφάνεια πρόσπτωσης



Σχήμα 2.15 Γενική διαμόρφωση της θέσης του τεμάχους πριν και μετά την κρούση

Με βάση την αρχή διατήρησης στροφορμής, για το απειροστό χρονικό διάστημα πριν και μετά την κρούση, μπορεί να γραφεί η εξίσωση

$$I\omega_{0} + V_{0x}d_{y} - V_{0y}d_{x} = I\omega + V_{x}d_{y} - V_{y}d_{x}$$
(2.24)

Όπου Ι

I	η ροπή αδράνειας του ελλειπτικού τεμάχους
ω ₀ και ω :	οι γωνιακές ταχύτητες πριν και μετά την κρούση <i>,</i>
$X_{G_{\prime}} Y_{G}$	οι συντεταγμένες του κέντρου μάζας
$X_{P_{i}}Y_{P}$	οι συντεταγμένες του σημείου επαφής
V _{0x} ,V _x	οι συνιστώσες των ταχυτήτων πριν και μετά την κρούση κατά
	τον άξονα Χ,
V _{0y} ,V _y	οι συνιστώσες των ταχυτήτων πριν και μετά την κρούση κατά
	τον άξονα Υ
dx=X _G -X _P	
dy=Y _G -Y _P	

Με την υπόθεση ότι η έλλειψη περιστρέφεται ως προς το σημείο επαφής P, η ταχύτητα του κέντρου μάζας της μπορεί να ληφθεί διανυσματικά

$$V = \omega \times PG = \begin{pmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & -\omega_2 \\ (X_G - X_P) & (Y_G - Y_P) & 0 \end{pmatrix}$$

= $-\omega_2 (Y_G - Y_P) i - (X_G - X_P) j$ (2.25)

Και επομένως

$$V_x = \omega_z d_y \tag{2.26}$$

$$V_y = -\omega_z d_x \tag{2.27}$$

Επειδή πάντα θα ισχύει YG>YP, η Vx θα είναι μεγαλύτερη του μηδενός.Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5 ανάλογα με τη θέση του κέντρου βάρους σε σχέση με το σημείο επαφής, μπορούν να διακριθούν 3 περιπτώσεις



Σχήμα 2.16 Διαφορες σχετικές θέσεις του κέντρου μάζας ως προς το σημείο επαφής κατά την κρούση

$$\begin{split} X_{G} > X_{P} & \Longrightarrow d_{x} > 0 \Rightarrow V_{y} < 0 \\ X_{G} = X_{P} & \Longrightarrow d_{x} = 0 \Rightarrow V_{y} = 0 \\ X_{G} < X_{P} & \Longrightarrow d_{x} = 0 \Rightarrow V_{y} > 0 \end{split}$$

Επειδή όμως για Vy<0 δεν μπορεί να υπάρξει αναπήδηση εισάγεται η θεώρηση δέυτερης κρούσης κατά τρόπο ώστε το τέμαχος να λαμβάνει συμμετρική θέση ως προς την προηγούμενη ώστε η Vy να γίνεται τελικά θετική.

Με αντικατάσταση των εξισώσεων (2.23)(2.25) και επίλυση ως προς ω έχουμε την σχέση

$$\omega = \frac{I\omega_0 + V_{0x}d_y - V_{0y}d_x}{I + d_x^2 + d_y^2}$$
(2.28)

Με επίλυση της εξίσωσης και αντικατάσταση στις προηγούμενες σεξισώσεις μπορούν να υπολογιστούν οι συνιστώσες της ταχύτητας μετά την κρούση.

Η ολική κινητική ενέργεια ανα μονάδα μάζας μετά την κρούση δίνεται από την σχέση

$$K = \frac{1}{2} (I\omega^{2} + V_{x}^{2} + V_{y}^{2}) = \frac{1}{2} \omega^{2} (I + d_{x}^{2} + d_{y}^{2}) = \frac{1}{2} \omega^{2} (I + r^{2})$$
(2.29)

Επομένως μπορεί να οριστεί ο συντελεστής αναπήδησης (ε*) με βάση τις κινητικές ενέργειες ως εξής

$$\varepsilon^* = \frac{K}{K_0} = \frac{Q_0^2}{2K_0(\mathbf{I} + \mathbf{r}^2)} = \frac{\omega^2}{2K_0}(\mathbf{I} + \mathbf{r}^2) = \frac{\omega Q_0}{2K_0}$$
(2.30)

Όπου,

$$Q_0 = I\omega_0 + V_{0x}d_y - V_{0y}d_x$$
(2.31)

$$r^2 = d_x^2 + d_y^2 \tag{2.32}$$

3 Πειραματική διαταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις παραβολικές ρίψεις αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής του τομέα Γεωτεχνικής και βασίστηκε σε προηγούμενη έρευνα των Αστερίου και Ευθυμίου με ορισμένες παραλλαγές.

3.1 Επιφάνειες πρόσπτωσης

Οι επιφάνεια πρόσπτωσής, είναι από μάρμαρο Πεντέλης . Η λήψη των υλικών έγινε από τη φυσική τους θέση και η κοπή τους έγινε στο εργαστήριο με προσπάθεια να τους δοθεί σε κάτοψη ένα περίπου τετράγωνο σχήμα ακμής 10cm, πάχους περίπου 5cm.Στη συνέχεια οι διαμορφωμένες πλέον επιφάνειες εγκιβωτίστηκαν σε πρότυπες μήτρες σκυροδέματος με ειδική συνδετική κονία ώστε τελικά να διαθέτουν τετραγωνική κάτοψη ακμής 15cm και πάχους περί τα 5cm.

3.2 Διαμόρφωση δοκιμίων

Για τη διαμόρφωση των πίπτοντων τεμαχών χρησιμοποιήθηκε επίσης μάρμαρο Πεντέλης. Αρχικά λήφθηκαν πυρήνες με χρήση της ειδικής συσκευής του εργαστηρίου, οι οποίοι κόπηκαν σε δίσκους ίσου πάχους. Πάνω στους δίσκους αυτούς σχεδιάστηκαν ελλείψεις με λόγους αξόνων από 1.25 ως 2 και στη συνέχεια κόπηκαν προσεκτικά ώστε να λάβουν το τελικό τους σχήμα



Εικόνα 3.1 Αρχική διαμόρφωση πυρήνων



Εικόνα 3.2 Συσκευή κοπής και διαμόρφωσης δοκιμίων



Εικόνα 3.3 Τελική διαμόρφωση δοκιμίων

3.3 Όργανα και συσκευές

3.3.1 Συσκευή παραβολικων ρίψεων

Για την προσομοίωση και την καταγραφή πτώσεων με από παραβολικές ρίψεις χρησιμοποιήθηκε μία πρωτότυπη διάταξη που είναι υπό ανάπτυξη στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Βραχομηχανικής.

Ο σκελετός της διάταξης αποτελείται από μεταλλικά στοιχεία τύπου dexion που επιτρέπουν την άμεση και εύκολη ρύθμιση των επιμέρους στοιχείων της Τα βασικά μέρη της κατασκευής είναι η βάση τοποθέτησης των επιφανειών πρόσκρουσης και η επιφάνεια στην οποία επιταχύνονται τα δοκίμια Η κλίση και των 2 αυτών στοιχείων μπορεί να μεταβληθεί. Η κάμερα καταγραφής τοποθετείται πάντα παράλληλη στην επιφάνεια πρόσπτωσης.



Εικόνα 3.4 Διάταξη συσκευής παραβολικών ρίψεων

Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση των πειραμάτων ήταν απαραίτητο να εξασφαλιστεί η ορθή πτώση του ελλειπτικού δοκιμίου στην επιφάνεια πρόσκρουσης. Το δοκίμιο ήταν απαραίτητο να προσκρούει δηλαδή με τους άξονές του κάθετους ως προς τον άξονα καταγραφής ώστε να προβάλλεται στην κάμερα ως μια πλήρης έλλειψη. Η ορθότητα και επαναληψιμότητα τον δοκιμών εξασφαλίστηκε με την ρίψη του δοκιμίου με την ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Για τον λόγο αυτό κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο όχημα με ορθοστάτη, πάνω στο οποίο τοποθετούνταν τα δοκίμια, το οποίο κινείτο σε μεταλλικές ράγες. Το όχημα σταματούσε με ένα ξύλινο εμπόδιο στο τέλος της διαδρομής και ελευθέρωνε το δοκίμιο, το οποίο λόγω της σωστής τοποθέτησής του προσέκρουε κατά τρόπο ικανοποιητικό στην επιφάνεια πρόσπτωσης.



Εικόνα 3.5 Βαγονέτο μεταφοράς των ελλειπτικών δοκιμίων

3.3.2 Κάμερα ταχείας λήψης

Για την ακριβή καταγραφή της εκτελούμενης τροχιάς κάθε δοκιμής χρησιμοποιήθηκε κάμερα ταχείας λήψης με δυνατότητα καταγραφής έως και 500 καρέ το δευτερόλεπτο (frames per second). Η φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε είναι η TroubleShooter LE της εταιρείας Fastec Imaging η οποία διαθέτει φακό 16mm τύπου C-mount.



Εικόνα 3.6 Φωτογραφική μηχανή ταχείας λήψης TroubleShooter LE

Για τις δοκιμές επιλέχθηκε καταγραφή 500 καρέ το δευτερόλεπτο και η ανάλυση της εικόνας ορίστηκε στα 440×330 εικονοστοιχεία. Ανάλογα με τον τύπο της δοκιμής (παραβολική ρίψη ή ελεύθερη πτώση) η κάμερα τοποθετήθηκε σε διαφορετική θέση στην κάθε διάταξη, σταθερή σε κάθε περίπτωση.
Για την ακριβή καταγραφή της τροχιάς είναι απαραίτητο να μην υπάρχουν σκιές στο φόντο, καθώς μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στην αναγνώριση της τροχιάς από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο προβολείς οι οποίοι παρείχαν τον απαιτούμενο φωτισμό και οι σκιές που προκαλούσαν ήταν εκτός του πεδίου καταγραφής της κάμερας..

3.4 Διαδικασία εκτέλεσης δοκιμών

Για τις ρίψεις αρχικά τοποθετήθηκε η επιφάνεια πρόσπτωσης στην ειδική θέση της διάταξης. Τονίζεται ότι η θέση αυτή μπορούσε να αλλάζει κλίση ώστε να πραγματοποιηθούν δοκιμές υπό διαφορετικές συνθήκες, με γωνίες από 0° ως 40° Στη συνέχεια ορίζεται η θέση και η κλίση της διάταξης ρίψης ανάλογα με την απαιτούμενη ταχύτητα και γωνία ρίψης μέσα από μία σειρά δοκιμαστικών ρίψεων.

Αφού οριστικοποιηθεί κάθε φορά η θέση της διάταξης, ενεργοποιείται η κάμερα ταχείας λήψης και πραγματοποιείται η ρίψη. Η κάμερα είναι συνδεδεμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο αποθηκεύεται το αρχείο της λήψης σε μορφή .avi για περαιτέρω επεξεργασία

4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων (βίντεο δοκιμών) έγινε με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και των προγραμμάτων MATLAB και Excel.

4.1 MATLAB

Για τις ανάγκες της εργασίας (επεξεργασία βίντεο και εξαγωγή αποτελεσμάτων) συντάχθηκαν τρεις διαφορετικοί πρωτότυποι κώδικες στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Μέσα στους παραπάνω κώδικες ενσωματώθηκαν και έτοιμοι υποκώδικες, οι οποίοι είναι διαθέσιμοι στο διαδίκτυο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα σημαντικότερα μέρη της διαδικασίας.

Κατά την επεξεργασία της κάθε δοκιμής, το πρόγραμμα αναλύει το βίντεο της πτώσης διαβάζοντας κάθε διαφορετικό στιγμιότυπο. Για κάθε ένα από αυτά προσδιορίζεται αυτόματα η θέση του δοκιμίου. Αφού οριστεί το σημείο και το στιγμιότυπο στο οποίο γίνεται η κρούση από το χρήστη το πρόγραμμα διαχωρίζει και αναλύει την κίνηση του δοκιμίου στις φάσεις πριν και μετά την κρούση και υπολογίζει έτσι τα απαραίτητα για τον χρήστη δεδομένα για την περαιτέρω επεξεργασία.

Τα βασικά μέρη του κώδικα που αναλύονται περισσότερο στη συνέχεια είναι η επεξεργασία της κάθε εικόνας, η προσέγγιση του δοκιμίου ως έλλειψης και ο ορισμός του σημείου κρούσης.

4.1.1 Επεξεργασία εικόνας

Το πρόγραμμα MATLAB αναγνωρίζει τις εικόνες σαν πίνακες το κάθε στοιχείο των οποίων αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο και παίρνει τιμές ανάλογα με το χρώμα της εικόνας, έγχρωμη, με αποχρώσεις του γκρι ή ασπρόμαυρη.

Η αρχικά έγχρωμη εικόνα που αντιπροσωπεύει το κάθε καρέ του βίντεο της δοκιμής μετατρέπεται σε ασπρόμαυρη με χρήση των εντολών rgb2gray και im2bw. Στη συνέχεια ορίζεται μόνο το περίγραμμα του δοκιμίου με χρήση της εντολής edge.



Εικόνα 4.1 Διαδικασία απομόνωσης των σημείων περιφέρειας της έλλειψης

Στην εικόνα 3.1 φαίνεται ένα παράδειγμα της σειράς επεξεργασίας μιας εικόνας δοκιμής ξεκινώντας με την έγχρωμη και συνεχίζοντας με την ασπρόμαυρη εικόνα και την εικόνα του περιγράμματος του δοκιμίου

Μετά τη δημιουργία των περιγραμμάτων ορίζεται ένας πίνακας στον οποίο περιλαμβάνονται για κάθε στιγμιότυπο οι συντεταγμένες των εικονοστοιχείων που αποτελούν το περίγραμμα του δοκιμίου και αποτελεί το δεδομένο εισόδου για την περαιτέρω επεξεργασία των πειραμάτων.

Η κίνηση του δοκιμίου θεωρείται ότι γίνεται σε ένα επίπεδο παράλληλο στην κάμερα καταγραφής και κάθετο στην επιφάνεια πρόσπτωσης. Το ελλειπτικό δοκίμιο προσεγγίζεται με έλλειψη με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων

4.1.2 Κωδικας προσαρμογής έλλειψης

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την προσέγγιση της έλλειψης ονομάζεται fit_ellipse και μπορεί να βρεθεί ελεύθερα στο διαδίκτυο. Για την επίλυση του προβλήματος ο κώδικάς αυτός χρησιμοποιεί την κωνική εξίσωση της έλλειψης, η οποία είναι

$$Ax^{2} + Bxy + Cy^{2} + Dx + Ey + F = 0$$
(4.1)

Η γνωστή εξίσωση της έλλειψης είναι

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \qquad (4.2)$$

και αν ορίσουμε $f^2 = \frac{1}{a^2}$, $g^2 = \frac{1}{b^2}$ έχουμε

$$f^2 x^2 + g^2 y^2 - 1 = 0 \tag{4.3}$$

Το μητρώο περιστροφής R των αξόνων της έλλειψης είναι

$$R = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix}$$
(4.4)

Με βάση το οποίο οι συντεταγμένες των σημείων της έλλειψης μπορούν να γραφούν

$$x = (X - X_0)\cos\varphi - (Y - Y_0)\sin\varphi$$

$$y = (Y - Y_0)\cos\varphi - (X - X_0)\sin\varphi$$
(4.5)
(4.6)

Όπου X₀,Y₀ οι συντεταγμένες του κέντρου της έλλειψηςφ ο προσανατολισμός της

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις αυτές στην γενική εξίσωση της έλλειψης (4.2) προκύπτουν οι συντελεστές

$$A = f^{2} \cos^{2} \varphi + g^{2} \sin^{2} \varphi$$
(4.7)

$$B = 2(f^{2} - g^{2}) \cos \varphi \sin \varphi$$
(4.8)

$$C = f^{2} \sin^{2} \varphi + g^{2} \cos^{2} \varphi$$
(4.9)

$$D = -2(f^{2} \cos^{2} \varphi + g^{2} \sin^{2} \varphi)X_{0} - 2(f^{2} - g^{2}) \cos \varphi \sin \varphi Y_{0}$$
(4.10)

$$E = 2(f^{2} - g^{2}) \cos \varphi \sin \varphi X_{0} - 2(f^{2} - g^{2}) \cos \varphi \sin \varphi Y_{0}$$
(4.11)

$$E = -2(f - g) \cos \varphi \sin \varphi X_0 - 2(f \sin \varphi + g) \cos \varphi \sin \varphi X_0 Y_0$$
(4.11)

$$F = (f^2 \cos^2 \varphi + g^2 \sin^2 \varphi) + 2(f^2 - g^2) \cos \varphi \sin \varphi X_0 Y_0$$
(4.12)

$$+2(f^{2}\cos^{2}\varphi+g^{2}\sin^{2}\varphi)Y_{0}$$

Διανυσματικά, η εξίσωση μπορεί να γραφεί

$$f(a, (x, y)) = V \cdot a = 0 \tag{4.13}$$

Όπου τα διανύσματα α και V ορίζονται ως

$$a = (A, B, C, D, E, F)$$

 $V = (x^2, xy, y^2, x, y, 1)$

Η προσαρμογή των σημείων σε έλλειψη γίνεται με ελαχιστοποίηση της απόστασης

$$\Delta(a,x) = \sum_{i=1}^{N} (f(a,xi))^2$$
(4.14)
 $\dot{\eta}$

$$\Delta(a,x) = \sum_{i=1}^{N} a^{T} V^{T} V a \qquad (4.15)$$

Τα δεδομένα που εισάγονται στις παραπάνω σχέσεις μέσω του κώδικα είναι οι συντεταγμένες των σημείων της περιμέτρου του δοκιμίου που προέκυψαν από την επεξεργασία των εικόνων . Τα σημεία αυτά εισάγονται ως ένας πίνακας ΧΥ διαστάσεων n×2, όπου n το πλήθος των σημείων. Τα δεδομένα εξόδου μετά την επεξεργασία είναι ένας πίνακας με τα στοιχεία της έλλειψης που προσεγγίζει καλύτερα το σχήμα του ελλειπτικού δοκιμίου. Συγκεκριμένα ο πίνακας αυτός περιλαμβάνει τα εξής

- α ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης (m)
- β ο μικρός ημιάξονας της έλλειψης (m)
- φ ο προσανατολισμός της έλλειψης (rad)
- X, Y συντεταγμένες του κέντρου της έλλειψης (m)



Εικόνα 4.2 Προσαρμογή έλλειψης πάνω στο πραγματικό δοκίμιο

4.1.3 Υπολογισμός ταχυτήτων

Στη συνέχεια με τη θέση και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της έλλειψης δεδομένα για κάθε καρέ της δοκιμής προσδιορίζεται από το χρήστη το σημείο της κρούσης και ακολουθεί ο υπολογισμός των τροχιών και των ταχυτήτων πριν και μετά την κρούση.

Ο προσδιορισμός του σημείου επαφής γίνεται από τον χρήστη διότι το πρόγραμμα θεωρεί πως η κρούση γίνεται στο καρέ όπου το δοκίμιο είναι στη χαμηλότερη καταγεγραμμένη θέση. Υπάρχει όμως πιθανότητα σφάλματος στην παραπάνω θεώρηση, καθώς η κρούση μπορεί να γίνει ανάμεσα στη λήψη δύο διαδοχικών στιγμιότυπων από την κάμερα. Για το λόγο αυτό ορίζεται από το χρήση το ακριβές σημείο κρούσης. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της εντολής impoint.

Πιο αναλυτικά, μετά τον αρχικό ορισμό της έλλειψης στην χαμηλότερη θέση ως στιγμή της κρούσης οι ελλείψεις ομαδοποιούνται σε εκείνες πριν και μετά την κρούση. Η κίνηση των κέντρων μάζας προσεγγίζονται (με χρήση των εντολών polyfit και polyval) με κατάλληλου βαθμού πολυωνυμικές εξισώσεις. Οι παραστάσεις των εξισώσεων αυτών αποτελούν την τροχιά (μετατόπιση) του δοκιμίου. Όσον αφορά το βαθμό των πολυωνυμικών αυτών εξισώσεων μετατόπισης στον άξονα γ η επιτάχυνση είναι σταθερή (9,81 m/s²) άρα η μετατόπιση είναι δευτέρου βαθμού πολυώνυμο. Στον άξονα x δεν επιδρά κάποια επιπλέον δύναμη και η επιτάχυνση είναι μηδενική άρα η μετατόπιση προσεγγίζεται με πολυώνυμο πρώτου βαθμού. Μετά τον ορισμό του σημείου κρούσης γίνεται επαναπροσδιορισμός της τροχιάς του δοκιμίου και υπολογίζονται οι ταχύτητες πριν και μετά την κρούση στους δύο άξονες. Ο υπολογισμός των ταχυτήτων από το πρόγραμμα γίνεται με αναγωγή των μετακινήσεων που λαμβάνουν χώρα στα βίντεο στον χρόνο μεταξύ 2 συνεχόμενών στιγμιοτύπων, ο οποίος στην κάμερα που χρησιμοποίθηκε είναι 1/500 του δευτερολέπτου.

Από τα παραπάνω προσδιορίζονται τελικά οι συντελεστές αναπήδησης και άλλα δεδομένα της κίνησης οποία χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία και συσχέτιση των αποτελεσμάτων. Τα δεδομένα αυτά ειναι

V _{i,} V _r	η ταχύτητα πριν και μετά την κρούση	(m/s)
$V_{xi}V_{xr}$	οι ταχύτητες κατά τον άξονα χ	(m/s)
$\mathbf{V}_{yl}\mathbf{V}_{yr}$	οι ταχύτητες κατά τον άξονα γ	(m/s)
ω _i ,ω _r	οι γωνιακές ταχύτητες πριν και μετά την κρούση	(s ⁻¹)
Φ_{i}	η γωνία πρόσπτωσης	(rad)
φ _r	η γωνία αναπήδησης	(rad)
θ_{i}	η γωνία μεταξύ κέντρου και σημείου επαφής	(rad)
	πρίν την κρούση	
θ_{i}	η γωνία μεταξύ κέντρου και σημείου επαφής	(rad)
	μετά την κρούση	
ε _i , ε _r	η εκκεντρότητα του κέντρου ως προς το σημείο	(m)
	επαφής κατά τον άξονα χ	
n _{cor}	ο ορθός συντελεστής αναπήδησης	
t _{COR}	ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης	
V _{COR}	ο συνολικός κινηματικός συντελεστής αναπήδησης	
E _{COR}	ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης	
nc _{cor}	ο φαινόμενος ορθός συντελεστής σναπήδησης	
nc _{cor}	ο φαινόμενος εφαπτομενικός συντελεστής σναπήδη	σης

5 Εργαστηριακές δοκιμές

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποήθηκαν στο υλικό με το οποίο έγιναν τα πειράματα, το μάρμαρο Πεντέλης, ώστε να μπορούν να συσχετισθούν τα αποτελέσματα με τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

5.1 Πυκνότητα

Η παρουσία κενών σε ένα βραχώδες υλικό μειώνει την αντοχή του και αυξάνει την παραμορφωσιμότητά του. Ακόμα και μία μικρή σχετικά ποσότητα αέρα μπορεί να προκαλέσει σημαντική μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών ενός πετρώματος.

Αρχικά μετράται η μάζα (M_{sat}) των δοκιμίων και, μετά την ξήρανσή τους, σημειώνεται η νέα (ξηρή) τους μάζα (M_s). Στη συνέχεια μετράται και ο συνολικός όγκος των δοκιμίων (V). Έτσι μπορούν να υπολογιστούν ο συνολικός όγκος κενών (V_v) και ο όγκος στερεών του υλικού (V_s).

Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε νερό, του πορώδους, της πυκνότητας και του ειδικού βάρους γίνεται χρήση των παρακάτω εξισώσεων:

Περιεκτικότητα νερού:	$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100$	(%)	(5.1)
Πορώδες:	$n = \frac{V_{\nu}}{V_{s}} \times 100$	(%)	(5.2)
Πυκνότητα:	$\rho = \frac{M_s + M_v}{V}$	(kg/m ³)	(5.3)
Ξηρή πυκνότητα:	$ \rho_d = \frac{M_s}{V} $	(kg/m ³)	(5.4)
Ειδικό βάρος:	$\gamma = \rho \cdot g$	(N/m ³)	(5.5)

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν δεν περιείχαν σημαντικό ποσοστό υγρασίας επομένως μπορεί να προσδιοριστεί η πυκνότητά τους από τη μέτρηση της μάζας και των διαστάσεων των δοκιμίων

α/α L δοκιμής		d w		ρ	γ	
	mm	mm	gr	kg/m ³	kN/m ³	
1	106	52 <i>,</i> 0	579 <i>,</i> 7	2575 <i>,</i> 3	25,26	
2	107	52,2	610,4	2665,6	26,15	
				2620,5	25,71	

Πίνακας 5.1Αποτελεσματα μετρήσεων πυκνότητας

5.2 Μονοαξονική θλιπτική αντοχή και παραμορφωσιμότητα

Κατά τη δοκιμή αυτή, ένα κυλινδρικό δοκίμιο το οποίο λαμβάνεται με την συσκευή με τη πυρηνοληψίας φορτίζεται με σταθερό ρυθμό θλιπτικά μέχρις να αστοχήσει. Πάνω στο δοκίμιο είναι τοποθετημένα ειδικά μηκυνσιόμετρα με σκοπό να καταγραφεί τόσο η αξονική όσο και η πλευρική παραμόρφωσή του. Με τον τρόπο αυτό, κατασκευάζονται καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων και προσδιορίζονται το μέτρο ελαστικότητας Young (E) και ο λόγος Poisson (v).



Εικόνα 5.1 Συσκευή μονοαξονικής θλίψης



Εικόνα 5.2 Τυπική αστοχία μαρμάρου κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

α/α δοιγιμός	d	L	Α	rate	time	$\sigma_{\alpha\sigma\tau}$	$P_{\alpha\sigma\tau}$	Ε	v	σ _{c50}
ουκιμης	mm	mm	mm ²	kN/s	mins	kPa	kN	GPa	-	kPa
1	52	106	2123,7	0,2	10,1	56,8	120,8	37,9	0,31	57,2
2	52,2	107	2140,1	0,25	10,6	74,3	159,1	42,5	0,21	74,9
								40,2	0,261	

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής



Σχήμα 5.1 Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής

5.3 Εφελκυστική αντοχή

Η εφελκυστική αντοχή των υλικών που μελετήθηκαν προσδιορίστηκε εμμέσως με τη δοκιμή δίσκου (Brazilian test). Η δοκιμή αυτή βασίζεται στο γεγονός πως όταν ένα δείγμα πετρώματος υπόκειται σε διαξονική καταπόνηση αυτό αστοχεί λόγω εφελκυσμού όταν η μία κύρια τάση είναι εφελκυστική και η άλλη θλιπτική, αλλά όχι περισσότερη από τρεις φορές την κύρια εφελκυστική τάση.



Σχήμα 5.2 Σχηματική αναπαράσταση συσκευής Brazilian test

Η μηχανή επιβολής του φορτίου είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε και για τον προσδιορισμό της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Μετά την απαραίτητη προετοιμασία των δοκιμίων πραγματοποιούνται οι δοκιμές και η εφελκυστική αντοχή του υλικού (σ_t) προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_t = 0.636 \frac{P}{Dt} \quad (MPa) \tag{5.6}$$

όπου: Ρ	το φορτίο κατά την αστοχία	(N)
---------	----------------------------	-----

D η διάμετρος του δοκιμίου (mm)

t το πάχος του δοκιμίου μετρημένο στο κέντρο (mm)

α/α	d	t	w	ρ	Р	σ_t
δοκιμής	mm	mm	gr	kg/m ³	kN	MPa
1	52,1	24,5	138,08	2650,7	12,0	6,01
2	51,9	25,7	146,91	2664,7	14,0	6,59
3	52,1	24,6	139,21	2644 <i>,</i> 9	12,3	6,09
						6,23

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυστικής αντοχής

5.4 Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων

Η μέθοδος ελέγχου των υλικών με τη χρήση υπερήχων (ultrasonic testing) είναι μία μη καταστροφική μέθοδος, με την οποία συνήθως ανιχνεύονται επιφανειακές ή εσωτερικές ατέλειες-ασυνέχειες των υλικών. Επίσης, με τη μέθοδο των υπερήχων προσδιορίζονται δυναμικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών, όπως το μέτρο ελαστικότητας Ε, ο λόγος του Poisson v, το μέτρο διάτμησης G κ.ά., χωρίς να απαιτείται η κατασκευή και θραύση ειδικών δοκιμίων (Πρασιανάκης & Κουρκουλής, 1999).

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας, η μέθοδος των υπερήχων επικεντρώθηκε στον προσδιορισμό μηχανικών ιδιοτήτων (Ε, ν και G) των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια.



Εικόνα 5.3 Διάυαξη συσκευής διάδοσης υπερήχων

Κατά τη δοκιμή αυτή χρησιμοποιούνται μηχανικά κύματα. Κάθε μηχανικό κύμα συντίθεται από ταλαντώσεις των δομικών στοιχείων των υλικών που εξετάζονται. Διακρίνονται δύο είδη κυμάτων: τα διαμήκη (longitudinal waves l) και τα εγκάρσια (transverse waves t).

Η διάδοση του ήχου εξαρτάται από τη φύση του υλικού (ελαστικές ιδιότητες) μέσα από το οποίο διαδίδεται. Άρα οι ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων c_l και των εγκαρσίων κυμάτων c_t είναι σταθερές των υλικών, ανεξάρτητες από τη συχνότητα του ήχου και τις διαστάσεις των σωμάτων και συνδέονται με τις ελαστικές σταθερές των υλικών με τις σχέσεις:

$$c_{l} = \sqrt{\frac{E(1-v)}{\rho(1+v)(1-2v)}}$$

$$c_{t} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+v)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$
(5.8)

$$v = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{c_l}{c_t}\right)^2 - 1}{\left(\frac{c_l}{c_t}\right)^2 - 1} = \frac{c_l^2 - 2c_t^2}{2c_l^2 - 2c_t^2}$$
(5.9)

$$E = \rho c_t^2 \frac{3c_l^2 - 4c_t^2}{c_l^2 - 2c_t^2} = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \rho c_l^2 = 1(1+\nu)\rho c_t^2$$
(5.10)

$$G = \rho c_t^2 \tag{5.11}$$

Όπου ρ: πυκνότητα του υλικού c_l, c_{t:} ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων και των εγκάρσιων κυμάτων

Οι ταχύτητες αυτές ορίζονται με τη μέτρηση του χρόνου διάδοσης (t_i και t_t) και της απόστασης d μεταξύ του πομπού και του δέκτη κατά την πραγματοποίηση της δοκιμής:

$$v_l = \frac{d}{t_l} \tag{5.12}$$

και

$$v_t = \frac{d}{t_t} \tag{5.13}$$

Πίνακας	5.4	Αποτελέσματα	δοκιμών	διάδοσης	υπερήχων
---------	-----	--------------	---------	----------	----------

α/α	d	Н	w	t _p	ts	Vp	Vs	γ
δοκιμής	(mm)	(mm)	(gr)	(µs)	(µs)	(m/s)	(m/s)	(kN/m ³)
1	52,1	107,8	648,9	26,1	38,2	4130,27	2821,99	27 <i>,</i> 69
2	51,9	99,4	592,7	17,2	29,9	5779,07	3324,41	27,64
3	52,2	107	610,4	21,6	37,4	4953,7	2860,96	26,14
								27,16

5.5 Σημειακή φόρτιση

Η δοκιμή σημειακής φόρτισης έχει σκοπό τον έμμεσο προσδιορισμό της αντοχής βραχωδών υλικών. Επίσης χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη άλλων συσχετισμένων παραμέτρων αντοχής, όπως η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό. Μέσω της δοκιμής αυτής μετρώνται ο δείκτης σημειακής φόρτισης (I_{s(50)}) και ο δείκτης ανισοτροπίας (I_{a(50)}) βραχωδών υλικών.



Εικόνα 5.4 Συσκευή σημειακής φόρτισης



Εικόνα 5.5 Θραύση δοκιμίου κατά τη δοκιμή σημειακής φόρτισης

Τα δοκίμια μπορεί να είναι κυλινδρικά (πυρήνες), ορθογώνια (block) ή ακανόνιστου σχήματος και δε χρειάζονται ιδιαίτερη προετοιμασία. Επίσης, η δυνατότητα χρήσης φορητής συσκευής κάνει εφικτή την πραγματοποίηση της δοκιμής είτε στο εργαστήριο είτε στο πεδίο.

α/α	d		2L	Р	ls	F		ls(50)
δοκιμής	mm		mm	kN	MPa	-		MPa
1		1	55,12	4,89	1,81		1,02	1,84
2		2	52,64	5,29	1,95		1,02	1,99
3		3	53,08	5,11	1,9		1,02	1,93
4		5	53 <i>,</i> 7	13,03	4,82		1,02	4,9

Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα δοκιμών σημειακής φόρτισης

5.6 Σφύρα Schmidt

Η μέτρηση της αναπήδησης (R) με τη σφύρα Schmidt είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος κατάταξης στη βραχομηχανική για τον έμμεσο προσδιορισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο. (Aydin, 2007)

Η σφύρα Schmidt αποτελείται από ένα έμβολο που συγκρατείται με ένα ελατήριο το οποίο ελευθερώνεται όταν το έμβολο πιέζεται πάνω σε μια επιφάνεια. Η ενέργεια που έχει το ελατήριο όταν επιστρέφει εξαρτάται από τη σκληρότητα του υλικού και εκφράζεται ως λόγος των μηκών του ελατηρίου πριν και μετά την κρούση.

Για τις δοκιμές στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε σφύρα Schmidt τύπου L. Ως δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν οι διαμορφωμένες επιφάνειες πρόσπτωσης που ήταν εγκιβωτισμένες σε πλάκες 15cm×15cm×5cm, ώστε να διατηρούνται σταθερά. Οι μετρήσεις σκληρότητας έγιναν με την σφύρα κάθετη στην επιφάνεια των δοκιμίων.

α/α RL α/α RL

Πίνακας 5.6 Αποτελέσματα δοκιμών κρούσης με σφύρα Schmidt

6 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην ενότητα αυτή, αρχικά εξετάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης ανεξάρτητα, ώστε να αξιολογηθούν οι τιμές που προκύπτουν και να εντοπισθούν τυχόν συσχετίσεις. Στην συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας διερευνήσεις με τα μαθηματικά προσομοιώματα που παρουσιάζονται στην ενότητα ΧΧ

6.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

6.1.1 Σχέση γωνιών πρόσπτωσης και αναπήδησης

Παρατηρείται ότι στο σύνολο σχεδόν των δοκιμών, η γωνία πρόσπτωσης λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από την γωνία αναπήδησης. Αναφορικά, με τους συντελεστές αναπήδησης του κέντρου βάρους έχει παρατηρηθεί σε προηγούμενες έρευνες (Asteriou et al., 2012) ότι εφόσον η γωνία αναπήδησης είναι μεγαλύτερη της γωνίας πρόσπτωσης δύναται ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης να προκύψει μεγαλύτερος της μονάδας. Σύμφωνα με το Σχήμα 6.1, κάτι τέτοιο δεν αναμένεται να προκύψει από την παρούσα πειραματική διερεύνηση.



Σχήμα 6.1 Σχέση γωνίας αναπήδησης με γωνία πρόσπτωσης

6.1.2 Κάθετος συντελεστής αναπήδησης

Εξετάζοντας την σχέση μεταξύ του κάθετου συντελεστή αναπήδησης (nCOR) και της γωνίας πρόσπτωσης (Σχήμα 6.2) δεν προκύπτει κάποια σχέση, παρά διακρίνονται τρεις περιοχές συγκέντρωσης των δεδομένων, που αντιστοιχούν στις αλλαγές κλίσης του επίπεδου πρόσκρουσης που έγιναν κατά την εκτέλεση των δοκιμών, που είχαν σαν αποτέλεσμα την μεταβολή των γωνιών πρόσκρουσης.



Σχήμα 6.2 Σχέση κάθετου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία πρόσπτωσης

Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης σχετίζεται με την γωνία αναπήδησης όπως προκύπτει από το σχήμα 6.3. Παρατηρείται ότι με την αύξηση της γωνίας αναπήδησης αυξάνονται και οι τιμές που λαμβάνει ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης. Παρόλα αυτά, η διασπορά των τιμών του συντελεστή αυξάνει με την αύξηση της γωνίας αναπήδησης με συστηματικό τρόπο, υπονοώντας ότι παρεμβαίνει κάποιος ακόμη παράγοντας επιρροής.



Σχήμα 6.3 Σχέση κάθετου συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης

Εξετάζοντας τον κάθετο συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει του λόγου των γωνιών αναπήδησης προς πρόσπτωσης προκύπτει πολύ καλή γραμμική συσχέτιση, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση του λόγου της γωνίας αναπήδησης προς την γωνία πρόσπτωσης παρατηρείται αύξηση του κάθετου συντελεστή. Η σχέση αυτή είναι ανεξάρτητη του σχήματος του τεμάχους αφού τα σημεία συμπίπτουν ανεξάρτητά του λόγου των ημιαξόνων της έλλειψης.



Σχήμα 6.4 Σχέση κάθετου συντελεστή αναπήδησης με τον λόγο των γωνιών αναπήδησης με πρόσπτωσης

6.1.3 Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης

Εξετάζοντας τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης, προκύπτει ότι μειώνεται καθώς αυξάνει η γωνία αναπήδησης (σχήμα Χ). Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, φαίνεται ότι η ελάχιστη τιμή για τον κινηματικό συντελεστή αναπήδησης θα προέκυπτε για γωνία αναπήδησης 90°, για την επίτευξη της οποίας απαιτείται η ρίψη του τεμάχους να είναι κατακόρυφη. Αυτό συμβαδίζει με τα αποτελέσματα αντίστοιχων διερευνήσεων όπου σημειώνεται ότι η ελάχιστη τιμή του συντελεστή αναπήδησης προκύπτει για δοκιμές ελεύθερης πτώσης, δηλαδή χωρίς εφαπτομενική, προς το επίπεδο του πρανούς, ταχύτητα.



Σχήμα 6.5 Κινηματικός συντελεστής αναπήδησης ως προς την γωνία αναπήδησης

Επιπρόσθετα, προκύπτει από το σχήμα 6.6 ότι ο κινηματικός συντελεστής αναπήδησης είναι ανεξάρτητος του λόγου των γωνιών αναπήδησης προς πρόσπτωσης, αφού δεν προκύπτει μετάξυ τους συσχέτιση. Έτσι, προκύπτει η δυνατότητα έκφρασης της αλληλεπίδρασης του τεμάχους κατά την κρούση σύμφωνα με τον κινηματικό συντελεστή και της γωνίας αναπήδησης.



Σχήμα 6.6 Σχέση κινηματικού συντελεστή αναπήδησης με τον λόγο των γωνιών αναπήδησης με πρόσπτωσης

6.1.4 Εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης

Από το σχήμα 6.7, προκύπτει ότι ο εφαπτομενικός συντελεστής αναπήδησης σχετίζεται με την γωνία αναπήδησης γραμμικά, πιο συγκεκριμένα μειώνεται με την αύξηση της γωνίας. Μέγιστες τιμές προκύπτουν όταν η γωνία αναπήδησης τείνει στο μηδέν. Περαιτέρω συσχετίσεις του εφαπτομενικού συντελεστή δεν προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας έρευνας.



Σχήμα 6.7 Εφαπτομενικός συντελέστης αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης

6.1.5 Ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης

Αναφόρικά με τον ενεργειακό συντελέστη αναπήδησης παρατηρούνται αντίστοιχες τάσεις με τον κινηματικός συντέλεστη, χώρις όμως να επιτυγχάνονται τόσο καλές συσχετίσεις. Όπως παρατηρείται στα σχήματα 6.8 και 6.9, φαίνεται ότι υπάρχει μείωση του ενεργειακού συντελεστή με την αύξηση της γωνίας αναπήδησης, ενώ δεν επήρέαζεται από τον λόγο των γωνιών αναπήδησης προς πρόσπτωσης.



Σχήμα 6.8 Ενεργειακός συντελέστης αναπήδησης συναρτήσει της γωνίας αναπήδησης



Σχήμα 6.9 Σχέση ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης με τον λόγο των γωνιών αναπήδησης με πρόσπτωσης

6.2 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ

Στην ενότητα αυτή συγκρίνονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών, με τα αναλυτικά προσομοιώματα που προτείνονται στην βιβλιογραφία. Τα προσομοίωματα αυτά στοχεύουν στον προσδιορισμό των κινηματικών μεγεθών του τεμάχους μετά την κρούση, έχοντας σαν δεδομένα τις αρχικές κινηματικές συνθήκες. Τα αναλυτικά στοιχεία αυτών παρουσιάζονται στην ενότητα Χ.

6.2.1 Υπολογιστικό μοντέλο SASS

Από το υπολογιστικό μοντέλο SASS προσδιορίζεται η γωνιακή ταχύτητα μετά την κρούση συναρτήσει των κινηματικών μεγεθών πριν την κρούση, πιο συγκεκριμένα της γωνιακής ταχύτητας, της κάθετης και εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας αλλά και της απόστασης του κέντρου βάρους της έλλειψης από το σημείο επαφής, καθώς και της ροπής αδρανείας της.

Όλα τα δεδομένα προσδιοριστήκαν πειραματικά, οπότε για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του μοντέλου, υπολογίστηκε η γωνιακή ταχύτητα συναρτήσει των μετρούμενων στοιχείων πριν την κρούση και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με την πραγματική τιμή που μετρήθηκε στο εργαστήριο.

Για την σύγκριση, κατασκευάστηκε διάγραμμα όπου στον κατακόρυφο άξονα σημειώθηκαν οι μετρούμενες τιμές της γωνιακής ταχύτητας και στον οριζόντιο οι τιμές που προέκυψαν από την αναλυτική λύση. Στο διάγραμμα έχει σημανθεί και η γραμμή γ=x όπου αντιπροσωπεύει την ταύτιση των δυο μεγεθών. Συνεπώς όσο κοντύτερα σε αυτήν προβάλλονται τα σημεία τόσο καλύτερη είναι η αξιοπιστία της αναλυτικής λύσης.



Σχήμα 6.10 Σύγκριση της γωνιακής ταχύτητας που μετρήθηκε με αυτήν που υπολογίστηκε από την αναλύτικη σχέση των Azzoni et al. (1995).

Παρατηρείται ότι τα σημεία απέχουν σημαντικά από την ευθεία y=x, γεγονός που καταδεικνύει την μη συμβατότητα της αναλυτικής λύσης με τα πειραματικά αποτελέσματα. Αν και η απόσταση είναι σημαντική, η αναλυτική λύση καταλήγει σε κάθε περίπτωση σε ομόσημα αποτελέσματα, εντοπίζοντας την αλλαγή στην φορά της περιστροφής, αφού όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, δεν προβάλλονται τιμές στο δεύτερο και στο τέταρτο τεταρτημόριο.

6.2.2 Αναλυτική λύση Bozzolo & Pamini (1986)

Από την μέθοδο αυτή προσδιορίζεται ο ενεργειακός συντελεστής αναπήδησης συναρτήσει της ταχύτητας (κάθετης και εφαπτομενικής συνιστώσας), της γωνιακής ταχύτητας, της απόστασης του σημείου επαφής από το κέντρο βάρους της έλλειψης και της ροπής αδρανείας.

Η διαδικασία αξιολόγησης της αναλυτικής αυτής λύσης είναι όμοια με αυτή που αναφέρθηκε παραπάνω και παρουσιάζεται στο σχήμα 6.11.



Σχήμα 6.11 Σύγκριση ενεργειακού συντελέστη αναπήδησης που προσδιορίστηκε πειραματικά με αυτόν που υπολογίστηκε από την αναλύτικη σχέση των Bozzolo and Pamini (1986)

Ομοίως, ούτε με αυτή την μέθοδο επιτυγχάνεται ταύτιση ή καλή σχέση με τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης. Αυτό γίνεται εμφανές εξετάζοντας την προβολή των σημείων στο παραπάνω γράφημα, όπου απέχουν σημαντικά από την ευθεία y=x.

6.2.3 Μέθοδος φαινόμενου συντελεστή αναπήδησης

Ο φαινόμενος συντελεστής διαφοροποιείται από τον συντελεστή που προσδιορίζεται στο σημείο επαφής, αφού οι ταχύτητες είναι διαφορετικές εξ αιτίας της επενέργειας της γωνιακής ταχύτητας. Έτσι, υπολογίστηκε ο συντελεστής αναπήδησης που αντιστοιχεί στο σημείο επαφής, για κάθε δοκιμή και εν συνεχεία προσδιορίστηκε από την αναλυτική λύση ο κάθετος (φαινόμενος) συντελεστής, σύμφωνα με τα κινηματικά μεγέθη κάθε δοκιμής.

Η αξιολόγηση της αξιοπιστίας της μεθόδου έγινε πάλι με τον ίδιο τρόπο, συγκρίνοντας τον κάθετο συντελεστή που μετρήθηκε από τα πειράματα με τον φαινόμενο που υπολογίστηκε αναλύτικα.



Σχήμα 6.12 Σύγκριση του κάθετουσυντελέστη αναπήδησης που προσδιορίστηκε πειραματικά με αυτόν που υπολογίστηκε από την αναλύτικη σχέση των (Vijayakumar et al., 2012)

Παρατηρείται ότι με την μέθοδο αυτή υπερεκτιμάται ο συντελεστής αναπήδησης, αφού σε κάθε περίπτωση τα σημεία προβάλλονται κάτω από την ευθεία y=x, που σημαίνει ότι ο φαινόμενος συντελεστής αναπήδησης εμφανίζει υψηλότερες τιμές από τον πραγματικό.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την διερεύνηση της επίδρασης του σχήματος αναπτύχθηκε μια πειραματική διάταξη και διαμορφώθηκαν κατάλληλα δοκίμια ελλειπτικού σχήματος με διαφορετικούς λόγους ημιαξόνων. Συνολικά διαμορφώθηκαν ελλείψεις με 4 λόγους ημιαξόνων, πιο συγκεκριμένα 1,25, 1,5, 1,75 και 2. Οι ρίψεις έγιναν σε επίπεδα με διαφορετική κλίση ώστε να εξετασθεί η σχέση των συντελεστών αναπήδησης με την γωνία πρόσπτωσης. Έγιναν 5 δοκιμές για κάθε συνδυασμό λόγου ημιαξόνων και κλίσης επιπέδου πρόσκρουσης, πραγματοποιώντας συνολικά 80 δοκιμές. Τόσο οι ελλειπτικοί δίσκοι όσο και τα επίπεδα πρόσκρουσης διαμορφώθηκαν από φυσικό μάρμαρο Πεντέλης.

7.1 Πειραματική διάταξη

Οι δοκιμές κατεγράφησαν με ειδική φωτομηχανή υψηλής ταχύτητας και η επεξεργασία των δοκιμών έγινε με κώδικα μηχανικής όρασης που αναπτύχθηκε για τον σκοπό αυτό στο υπολογιστικό περιβάλλον της MatLab. Η χρήση των τεχνικών μηχανικής όρασης στα πειράματα καταπτώσεων βράχων κρίνεται ως εξαιρετικά επιτυχημένη αφού η επεξεργασία γίνεται ταχύτατα και με υψηλή ακρίβεια. Το μειονέκτημα έγκειται στον μεγάλο απαιτούμενο χρόνο δημιουργίας του κώδικα, ο οποίος όμως αποσβήνεται σε πολλαπλάσιο βαθμό κατά την επεξεργασία των δοκιμών.

7.2 Συντελεστές αναπήδησης

Ο κάθετος συντελεστής αναπήδησης βρέθηκε να συσχετίζεται εξαιρετικά με τον λόγο των γωνιών αναπήδησης προς πρόσπτωσης, ανεξάρτητα του σχήματος των τεμαχών ή της γωνιακής ταχύτητας. Σε καμία περίπτωση όμως δεν δύναται να θεωρηθεί σταθερά υλικού, όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία, αφού η εξάρτησή του από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς είναι σημαντική.

Επίσης, προέκυψε ικανοποιητική συσχέτιση του κινηματικού και του ενεργειακού συντελεστή αναπήδησης με την γωνία αναπήδησης. Ομοίως, ούτε αυτοί οι συντελεστές μπορούν να χαρακτηρισθούν σταθερές υλικού.

7.3 Σύγκριση με αναλυτικές λύσεις

Εξετάστηκαν αναφορικά με την αξιοπιστία και τις παραδοχές τους, τρεις αναλυτικές λύσεις προσδιορισμού των χαρακτηριστικών της κίνησης μετά την κρούση. Οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιούν για τον σκοπό αυτό τις γεωμετρικές και κινηματικές ιδιότητες πριν την κρούση. Καμιά από τις λύσεις αυτές δεν παρουσίασε καλή συμπεριφορά με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Η λύση των Bozzolo and Pamini (1986), που προβλέπει τον ενεργειακό συντελεστή αναπήδησης, εμφανίζει σημαντική διαφοροποίηση από τα πειραματικά αποτελέσματα.

Αντίστοιχα συμβαίνει και με την λύση των (Azzoni et al., 1995), η οποία υπολογίζει την γωνιακή ταχύτητα μετά την κρούση. Όμως, η λύση αυτή για το σύνολο των περιπτώσεων εντόπισε σωστά την φορά της γωνιακής ταχύτητας, όχι όμως το μέτρο της.

Τέλος, ούτε η προτεινόμενη λύση των Vijayakumar et al. (2012), η οποία εκτιμά των συντελεστή αναπήδησης του κέντρου βάρους συναρτήσει των κινηματικών μεγεθών στο σημείο επαφής, έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, αφού σε κάθε περίπτωση υπερεκτιμά τον συντλέστη σε σχέση με αυτόν που προσδιόριστηκε από την πειραματική διαδικασία.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASTERIOU, P., SAROGLOU, H. & TSIAMBAOS, G. 2012. Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 54, 103-113.
- ASTERIOU, P., SAROGLOU, H. & TSIAMBAOS, G. 2013a. Rockfall: Scaling Factors for the Coefficient of Restitution. *Proceedings of EUROCK2013 - The 2013 ISRM International Symposium*, 195-200.
- ASTERIOU, P., SAROGLOU, H. & TSIAMBAOS, G. 2013b. Rockfalls: Influence of Rock Hardness on the Trajectory of Falling rock Blocks. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, XLVII.
- AZZONI, A. & DE FREITAS, M. H. 1995. Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28, 111-124.
- AZZONI, A., LA BARBERA, G. & ZANINETTI, A. 1995. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32, 709-724.
- AZZONI, A., ROSSI, P. P., DRIGO, E., GIANI, G. P. & ZANINETTI, A. 1992. In situ observation of rockfall analysis parameters. *Landslides, Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides in Christchurch,* 1, 307-314.
- BOZZOLO, D. & PAMINI, R. 1986. Simulation of rock falls down a valley side. *Acta Mechanica*, 63, 113-130.
- BROILI, L. 1977. Relations between scree slope morphometry and dynamics of accumulation processes. *Rock Fall Dynamics and Protective Work Effectiveness*, 90, 11-23.
- DESCOEUDRES, F. & ZIMMERMANN, T. 1987. Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. *Proc. 6th Congress International Society for Rock Mechanics, Montreal, 1987. Vol.* **1,** 337-342.
- FORNARO, M., PEILA, D. & NEBBIA, M. 1990. Block falls on rock slopes-application of a numerical simulation program to some real cases. *Int. Congress IAEG*, 2173-2180.
- GIACOMINI, A., BUZZI, O., RENARD, B. & GIANI, G. P. 2009. Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 708-715.
- GIACOMINI, A., THOENI, K., LAMBERT, C., BOOTH, S. & SLOAN, S. W. 2012. Experimental study on rockfall drapery systems for open pit highwalls. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 56, 171-181.
- GIANI, G. P. 1992. Rock Slope Stability Analysis.
- HEIDENREICH, B. 2004. Small- and half-scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes. Ph.D Thesis, EPFL.
- HUNGR, O. & EVANS, S. G. 1988. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. *Landslides. Proc. 5th symposium, Lausanne, 1988. Vol.* 1, 685-690.
- HUNGR, O. & EVANS, S. G. 1996. Rock avalanche runout prediction using a dynamic model. *Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides*, 1, 233-238.

- LABIOUSE, V. & DESCOEUDRES, F. 1999. Possibilities and difficulties in predicting rockfall trajectories. *Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rock Falls and Design of Protection Structures*, 29-36.
- LIED, K. 1977. Rockfall problems in Norway. *Rockfall Dynamics and Protective Work Effectiveness*, 90, 51-53.
- PFEIFFER, T. J. & BOWEN, T. D. 1989. Computer simulation of rockfalls. *Bulletin Association of Engineering Geologists,* 26, 135-146.
- RITCHIE, A. M. 1963. Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Record*, 17, 13-28.
- SPADARI, M., GIACOMINI, A., BUZZI, O., FITYUS, S. & GIANI, G. P. 2012a. In situ rockfall testing in New South Wales, Australia. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 49, 84-93.
- SPADARI, M., GIACOMINI, A., BUZZI, O. & HAMBLETON, J. P. 2012b. Prediction of the bullet effect for rockfall barriers: A scaling approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 131-134.
- STATHAM, I. 1976. A scree slope rockfall model. *Earth Surface Processes*, 1, 43-62.
- VIJAYAKUMAR, S., YACOUB, T., RANJRAM, M. & CURRAN, J. H. Effect of Rockfall Shape on Normal Coefficient of Restitution. 46th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, 24-27 June 2012 2012 Chicago, IL, USA.
- YOSHIDA, H. 1998. Movement of boulders on slope and its simulation, Recent studies on rockfall control in Japan. *Tech. Rep*.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,613
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,670
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,619
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,383
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,567
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,471

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

1

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,30 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	2,00
Περίμετρος έλλειψης	L	12,59 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

	ΠΡΙΝ	META	
v	2,88	1,78 m/	s
Vn	2,74	-1,68 m/	s
Vt	-0,91	-0,61 m/	S 5
α	71,6	70,1 [°]	a la
ω	-50,04	-30,49 s ⁻¹	
f	7,96	4,85 Hz	2
	ΠΡΙΝ	META	
φ	77,9	84,9 [°]	
θ	3,7	1,8 °	
\mathbf{e}_{n}	-2,53	-2,58 cm	า
\mathbf{e}_{t}	0,54	0,23 cm	า
Δt	2,	24 ms	5
Lc	0,	00 cm	l i
	V Vn Vt α f f e _n e _t Lc	$\begin{array}{c} \mbox{$\Pi$\mbox{$P$\sc in}$} \\ V & 2,88 \\ Vn & 2,74 \\ Vt & -0,91 \\ \alpha & 71,6 \\ \omega & -50,04 \\ f & 7,96 \\ \hline \mbox{Π\sc in}$ \\ \mbox{ϕ} & 77,9 \\ \theta & 3,7 \\ e_n & -2,53 \\ e_t & 0,54 \\ \Delta t & 2, \\ Lc & 0, \\ \end{array}$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$



10 12 14 16 18

8 Frame Number



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,423
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	1,469
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,657
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,601
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,801
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,142

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,30 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	2,00
Περίμετρος έλλειψης	L	12,59 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	2,93	1,92	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,74	-1,16	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,05	-1,54	m/s
Γωνιά Επαφής	α	69,1	36,9	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-39,13	-88,43	s⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	6,23	14,07	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	МЕТА	
Προσανατολισμός	φ	22,8	35,9	0

2





50

(xd) K 200 250 300







ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

n _{COR}	0,399
t _{COR}	1,436
V _{COR}	0,557
E _{COR}	0,520
nC _{COR}	0,590
tC _{COR}	5,231
	n _{COR} t _{COR} V _{COR} E _{COR} nC _{COR}

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,30 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	2,00
Περίμετρος έλλειψης	L	12,59 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ

4

				50	
Μέτρο Ταχύτητας	v	2,94	1,64 m/s	2.12	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,82	-1,12 m/s	100-	
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-0,83	-1,19 m/s	€ 150	
Γωνιά Επαφής	α	73,6	43,4 °	y (p	
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-42,32	-97,51 s ⁻¹	200	
Συχνότητα Περιστροφής	f	6,73	15,52 Hz	250	
				300 -	
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		пріл ме	TA		50 5
Προσανατολισμός	φ	19,5	56,9 [°]		
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	40,8	11,0 °	2	
Εκκεντρότητα κατά n	en	-0,84	2,11 cm	1 -	-
Εκκεντρότητα κατά t	et	-2,37	-1,37 cm	÷.	
Διάρκεια κρούσης	Δt	11,	39 ms	E) U	
Μήκος Επαφής	Lc	0,0	00 cm	tatio	
				nien ⁵	
				xis 0	
				por p	
				¥ 4	
				-5	



150 200 250 300 350 400 x (px)

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ





ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,157
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,498
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,225
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,509
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,716
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	4,239

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

5

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,30 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	2,00
Περίμετρος έλλειψης	L	12,59 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	2,93	0,66 m/s	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,75	-0,43 m/s	
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,00	-0,50 m/s	ġ
Γωνιά Επαφής	α	70,0	40,9 °	
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-10,57	136,72 s⁻¹	
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,68	21,76 Hz	
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	46,0	45,2 [°]	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	14,2	16,5 °	
Εκκεντρότητα κατά n	\mathbf{e}_{n}	-1,82	-1,79 cm	
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	1,75	1,78 cm	
Διάρκεια κρούσης	Δt	0	,08 ms	
Μήκος Επαφής	Lc	0	, 00 cm	



Frame Number

25

35



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,30 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	2,00
Περίμετρος έλλειψης	L	12,59 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

6

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,01	0,00 m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,25	0,00 m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,01	0,00 m/s
Γωνιά Επαφής	α	48,2	0,0 °
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-12,97	-82,63 s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,06	13,15 Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META
Προσανατολισμός	φ	10,5	34,8 °
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	60,1	23,0 °
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-0,46	1,43 cm
Εκκεντρότητα κατά t	et	-2,46	-2,06 cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	7,	89 ms
Μήκος Επαφής	Lc	1,	28 cm



TPOXIA



tation (rad)

Axis Or

-23

10

Frame Number

25

20



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{COR}	0,000
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,000
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,000
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,000
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,000
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,000


ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,30 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	2,00
Περίμετρος έλλειψης	L	12,59 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

7

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,01	1,65	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,32	-0,55	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,91	-1,55	m/s
Γωνιά Επαφής	α	50,5	19,6	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-12,52	-52,16	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,99	8,30	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	0,1	1,1	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	88,3	88,3	0
Εκκεντρότητα κατά n	e n	0,00	0,05	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-2,51	-2,51	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	1,	00	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



TPOXIA



25

30

15

20

Frame Number

35

tation (rad)

ò Axis

31

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{COR}	0,238
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,810
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,547
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,362
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,254
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,530



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,30 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	2,00
Περίμετρος έλλειψης	L	12,59 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

8

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	2,97	2,07	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,35	-1,34	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,81	-1,57	m/s
Γωνιά Επαφής	α	52,5	40,4	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-8,87	-80,73	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,41	12,85	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	24,0	45,9	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	32,4	14,9	0
Εκκεντρότητα κατά n	\mathbf{e}_{n}	-1,04	1,84	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-2,34	-1,78	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	10	,94	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	49	cm



TPOXIA

50

(xd) K 200 250 300





ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,570
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,871
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,697
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,642
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	1,277
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,751



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,30 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	2,00
Περίμετρος έλλειψης	L	12,59 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

9

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,10	0,00 m/s	5
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,19	0,00 m/s	5
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,20	0,00 m/s	\$
Γωνιά Επαφής	α	44,9	0,0 °	
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-11,18	-57,52 s ⁻¹	
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,78	9,15 Hz	
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	

Προσανατολισμός
Γωνία άξονα-σημείου επ.
Εκκεντρότητα κατά n
Εκκεντρότητα κατά t
Διάρκεια κρούσης
Μήκος Επαφής



φ

en



ΤΡΟΧΙΑ









ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,000
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,000
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,000
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,000
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,000
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,000



Μήκος Επαφής

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

10 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,30 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	2,00
Περίμετρος έλλειψης	L	12,59 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	2,22	1,68	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,67	-0,74	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,46	-1,51	m/s
Γωνιά Επαφής	α	48,8	26,0	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-36,21	-44,42	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	5,76	7,07	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	84,7	77,5	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	1,9	3,9	0
Εκκεντρότητα κατά n	e n	-2,51	-2,46	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	0,23	0,55	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	-1,	,58	ms

Lc

0,04

cm

-15



ΤΡΟΧΙΑ

50



15

20

Frame Number

25

35

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ

ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,440
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	1,033
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,756
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,622
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,265
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,777



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 11

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,31 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,98
Περίμετρος έλλειψης	L	12,62 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	26,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,03	2,27	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,52	-0,41	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,62	-2,23	m/s
Γωνιά Επαφής	α	30,1	10,4	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-17,51	65,76	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,79	10,47	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	40,7	38,5	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	18,4	18,4	0
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-1,67	-1,60	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	1,94	2,01	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	1,	52	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



TPOXIA

50

(xd) K 200 250 300





ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,270
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,852
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,749
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,657
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,701
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,559



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

12 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,31 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,98
Περίμετρος έλλειψης	L	12,62 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	26,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,15	2,37	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,54	-0,34	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,75	-2,35	m/s
Γωνιά Επαφής	α	29,2	8,2	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-18,69	47,30	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,97	7,53	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	МЕТА	
Προσανατολισμός	φ	43,7	43,5	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	16,3	16,3	0
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-1,76	-1,75	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	1,84	1,84	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	41	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



TPOXIA





3.8

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,221
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,854
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,753
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,611
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,502
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,409



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

13 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,31 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,98
Περίμετρος έλλειψης	L	12,62 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	26.9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ Μέτρο Ταχύτητας V 0,00 2,20 m/s 0,00 -1,10 m/s Ορθή Συνιστώσα Vn Εφαπτομενική Συνιστώσα 0,00 -1,91 m/s Vt 0,0 **29,9** ° Γωνιά Επαφής α

ω -15,74 -74,26 s⁻¹ Γωνιακή ταχύτητα Συχνότητα Περιστροφής f 2,51 11,82 Hz

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ

Προσανατολισμός Γωνία άξονα-σημείου επ. Εκκεντρότητα κατά η Εκκεντρότητα κατά t Διάρκεια κρούσης Μήκος Επαφής

ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ **43,4** ° 29,0 φ θ 27,1 17,8 ° -1,22 1,73 cm **e**_n -2,20 -1,83 cm \mathbf{e}_{t} 14,41 ms Δt

5,20

Lc

(peu

õ

cm



TPOXIA



20

Frame Number

25

ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

n _{cor}	0,000
t _{COR}	0,000
V _{COR}	0,000
E _{COR}	0,000
nC _{COR}	0,000
tC _{COR}	0,000
	n _{COR} t _{COR} V _{COR} E _{COR} nC _{COR}

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

14 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,31 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,98
Περίμετρος έλλειψης	L	12,62 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	26,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,16	2,40 m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,54	-0,77 m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,76	-2,27 m/s
Γωνιά Επαφής	α	29,1	18,8 [°]
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-16,11	-63,09 s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,56	10,04 Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META
Προσανατολισμός	φ	6,4	34,2 [°]
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	65,5	22,7 °
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-0,28	1,42 cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-2,52	-2,09 cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	9,	61 ms
Μήκος Επαφής	Lc	3,	69 cm



TPOXIA



tation (rad)

Axis Ori

-25

10

Frame Number

25

20

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,502
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,821
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,758
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,655
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	1,097
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,757



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

15 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,31 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,98
Περίμετρος έλλειψης	L	12,62 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	26,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,00	0,00	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,47	0,00	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,62	0,00	m/s
Γωνιά Επαφής	α	29,3	0,0	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-11,36	-83,30	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,81	13,26	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	39,8	33,2	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	19,1	23,0	0
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-1,61	1,38	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-1,93	-2,10	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	15	,27	ms
Μήκος Επαφής	Lc	5,	29	cm



TPOXIA



Frame Number

20

tation (rad)

Axis Orie

-2.5

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,000
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,000
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,000
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,000
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,000
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,000



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 16

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,31 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,99
Περίμετρος έλλειψης	L	12,61 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,57	2,96	m/s	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,50	-0,87	m/s	
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,25	-2,83	m/s	Ŷ
Γωνιά Επαφής	α	24,7	17,2	0	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-27,33	-69,70	s ⁻¹	
Συχνότητα Περιστροφής	f	4,35	11,09	Hz	
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	87,7	89,8	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	0,0	0,0	0	
Εκκεντρότητα κατά η	en	-2,49	-2,50	cm	
Εκκεντρότητα κατά t	et	0,10	0,01	cm	Ŧ
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	88	ms	e) u
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm	ientatio
					Axis Or
					ajor /



TPOXIA



Frame Number

20

25

-0.5

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,584
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,872
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,829
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,759
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,570
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,426



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,287
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,756
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,570
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,326
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,298
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,830

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3.19	1.82	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,26	-0,65	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,24	-1,70	m/s
Γωνιά Επαφής	α	45,3	20,9	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-17,06	-12,54	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,71	2,00	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	3,4	2,8	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	82,5	82,5	0
Εκκεντρότητα κατά n	\mathbf{e}_{n}	0,15	0,12	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-2,53	-2,53	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	-0	,17	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	68	cm



Frame Number

20

-0.1



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,31 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,99
Περίμετρος έλλειψης	L	12,61 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
					50
Μέτρο Ταχύτητας	V	3,54	2,93	m/s	5.53
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,49	-0,94	m/s	100
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,21	-2,78	m/s	
Γωνιά Επαφής	α	24,9	18,6	0	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-21,61	-54,69	s ⁻¹	200
Συχνότητα Περιστροφής	f	3,44	8,70	Hz	250 -
					300 -
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	82,3	81,3	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	2,0	2,0	0	2
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,48	-2,47	cm	
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	0,34	0,38	cm	G 15-
Διάρκεια κρούσης	Δt	-1	,32	ms	u (La
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm	entatio
					SX 05
					or A
					Waj



TPOXIA



Frame Number

-0.5

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,626
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,864
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,826
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,728
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,502
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,530



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,31 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,99
Περίμετρος έλλειψης	L	12,61 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,72	2,72	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,54	-1,01	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,38	-2,52	m/s 👳
Γωνιά Επαφής	α	24,5	21,7	o 9
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-19,39	#####	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	3,09	19,78	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	ΜΕΤΑ	
Προσανατολισμός	φ	85,1	80,5	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	2,0	2,0	0
Εκκεντρότητα κατά n	e n	-2,49	-2,47	cm
Εκκεντρότητα κατά t	et	-0,21	-0,41	cm 🗧
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	88	ms 🚦
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm the
				Drian
				e Avis
				Maio



ΤΡΟΧΙΑ



10

Frame Number

15

20

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,651
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,747
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,731
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,767
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,930
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,190



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,31 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,99
Περίμετρος έλλειψης	L	12,61 cm
Μάζα τεμάχους	m	26,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ Μέτρο Ταχύτητας V 3,66 2,79 m/s **-1,03** m/s Ορθή Συνιστώσα Vn 1,54 Εφαπτομενική Συνιστώσα **-2,60** m/s Vt -3,32 21,5 ° Γωνιά Επαφής 24,9 α ω -18,76 -115,69 s⁻¹ Γωνιακή ταχύτητα Συχνότητα Περιστροφής 2,99 f 18,41 Hz ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ Προσανατολισμός 88,2 ° 87,6 φ **0,0** ° Γωνία άξονα-σημείου επ. θ 0,0 Εκκεντρότητα κατά η en -2,50 -2,51 cm Εκκεντρότητα κατά t 0,08 cm -0,10 \mathbf{e}_{t} (rad) Διάρκεια κρούσης -0,97 ms Δt 5 Μήκος Επαφής Lc 0,00 cm datio



TPOXIA 50 100 (xd) K 200 250 300 50 150 200 250 300 350 400 500 x (px) ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ

Major Axis Orientation (rad)

Frame Number

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,664
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,782
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,763
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,789
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,614
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,105



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,186
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	1,317
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,493
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,446
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,466
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-1,898

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 21

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	288,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
Μέτρο Ταχύτητας	v	2,95	1,45	m/s	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,76	-0,51	m/s	
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,03	-1,36	m/s	(x
Γωνιά Επαφής	α	69,5	20,6	0	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-25,30	-90,16	s ⁻¹	
Συχνότητα Περιστροφής	f	4,03	14,35	Hz	
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	64,4	63,4	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	8,8	11,1	0	
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,30	-2,28	cm	
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-1,10	-1,14	cm	Ð
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	36	ms	el) u
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm	ntatic
					Major Axis Oriel



15

Frame Number

20

25

ΤΡΟΧΙΑ



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 22

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	288,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,05	1,85	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,80	-1,79	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,21	-0,43	m/s
Γωνιά Επαφής	α	66,6	76,5	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-18,30	-35,91	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,91	5,71	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	

Προσανατολισμός
Γωνία άξονα-σημείου επ.
Εκκεντρότητα κατά n
Εκκεντρότητα κατά t
Διάρκεια κρούσης
Μήκος Επαφής



50

(xd) K 200 250 300





25

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,642
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,356
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,606
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,395
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,583
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,642



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{COR}	0,308
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	1,137
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,512
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,451
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,646
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,060

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 23

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	288,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
					50
Μέτρο Ταχύτητας	V	3,03	1,55	m/s	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,81	-0,87	m/s	100
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,13	-1,29	m/s	€ 150
Γωνιά Επαφής	α	68,1	33,9	0	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-4,53	-88,04	s ⁻¹	200
Συχνότητα Περιστροφής	f	0,72	14,01	Hz	250
					300
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	14,3	0,1	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	52,9	88,2	0	0.5
Εκκεντρότητα κατά n	e n	-0,62	-0,01	cm	
Εκκεντρότητα κατά t	e,	-2,46	-2,53	cm	a
Διάρκεια κρούσης	Δt	1,	15	ms	E os-
Μήκος Επαφής	Lc	1,	53	cm	tation
					Lien
					Xis C
					A role



-25

10

Frame Number

25

20

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

n _{cor}	0,498
t _{COR}	0,493
V _{COR}	0,498
E _{COR}	0,405
nC _{COR}	0,705
tC _{COR}	5,948
	n _{COR} t _{COR} V _{COR} E _{COR} nC _{COR}

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 24

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	288,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,00	1,49 m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,77	-1,38 m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,15	-0,56 m/s
Γωνιά Επαφής	α	67,5	67,8 [°]
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-31,54	81,80 s⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	5,02	13,02 Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META
Προσανατολισμός	φ	54,3	53,2 °
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	13,5	15,9 °
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,07	-2,04 cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	1,49	1,52 cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	52 ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00 cm



Frame Number

25

30

35

25



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΤΡΟΧΙΑ

50

-0,87 -0,97 cm

ms

cm

0,53

0,00

 \mathbf{e}_{t}

Δt

Lc

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{COR}	0,479
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	1,188
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,647
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,643
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,731
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,932

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 25

Εκκεντρότητα κατά t

Διάρκεια κρούσης

Μήκος Επαφής

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	288,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,08	1,99	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,82	-1,35	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,23	-1,47	m/s
Γωνιά Επαφής	α	66,4	42,6	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-10,73	-97,56	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,71	15,53	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	70,0	67,8	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	6,5	8,8	0
Εκκεντρότητα κατά n	en	-2,40	-2,36	cm





ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,414
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,795
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,634
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,606
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	1,203
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,278

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 26

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,22	2,04	m/s	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,27	-0,94	m/s	
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,27	-1,81	m/s	x
Γωνιά Επαφής	α	45,0	27,5	0	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-15,06	-97,76	s ⁻¹	
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,40	15,56	Hz	
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	27,3	6,2	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	32,8	70,7	0	
Εκκεντρότητα κατά n	\mathbf{e}_{n}	-1,17	0,28	cm	
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-2,27	-2,54	cm	(p
Διάρκεια κρούσης	Δt	4,	61	ms	u (ra
Μήκος Επαφής	Lc	3,	20	cm	entatio
					xis On
					ajor A
					N
					3







Διάρκεια κρούσης

Μήκος Επαφής

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{COR}	0,287
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,756
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,570
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,326
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,298
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,830

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 27

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ Μέτρο Ταχύτητας V 3,19 1,82 m/s Ορθή Συνιστώσα Vn 2,26 -0,65 m/s Εφαπτομενική Συνιστώσα Vt -2,24 -1,70 m/s 45,3 **20,9** ° Γωνιά Επαφής α ω -17,06 -12,54 s⁻¹ Γωνιακή ταχύτητα Συχνότητα Περιστροφής 2,71 2,00 Hz f ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ **2,8** ° Προσανατολισμός 3,4 φ 82,5 82,5 [°] Γωνία άξονα-σημείου επ. θ Εκκεντρότητα κατά η 0,12 cm en 0,15 Εκκεντρότητα κατά t -2,53 -2,53 cm \mathbf{e}_{t}

-0,17

0,68

Δt

Lc

ms

cm

Major Axis Orie



10 15 Frame Number



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 28

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,13	1,99	m/s	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,24	-0,67	m/s	
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,18	-1,87	m/s	(x
Γωνιά Επαφής	α	45,7	19,5	0	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-11,29	-82,78	s ⁻¹	
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,80	13,17	Hz	
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	43,8	5,8	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	21,0	73,6	0	
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-1,76	-0,26	cm	
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-1,84	-2,53	cm	(p
Διάρκεια κρούσης	Δt	3,	98	ms	n (ra
Μήκος Επαφής	Lc	3,	44	cm	entatio
					is Orie
					or Ax
					Maj



TPOXIA



Frame Number

20

25

-15

ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,297
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,859
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,636
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,561
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	1,116
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,530

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 29

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
					50
Μέτρο Ταχύτητας	V	3,33	2,12	m/s	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,31	-0,24	m/s	100
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,40	-2,11	m/s	€ 150
Γωνιά Επαφής	α	43,9	6,5	0	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-11,31	-120,98	s ⁻¹	200
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,80	19,25	Hz	250
					300
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	63,3	61,9	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	7,8	7,8	0	1.5
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,42	-2,39	cm	1-
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-1,21	-1,27	cm	T 05
Διάρκεια κρούσης	Δt	0	,11	ms	e) u
Μήκος Επαφής	Lc	6	i,13	cm	viatio
					Orier O
					r Axis
					oley .15



ΤΡΟΧΙΑ



Frame Number

10

25

20

-25

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,104
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,878
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,636
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,699
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,608
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,423



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,238
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,890
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,659
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,712
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,779
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,322

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
					50
Μέτρο Ταχύτητας	۷	3,28	2,16	m/s	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,28	-0,54	m/s	100
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,35	-2,09	m/s	
Γωνιά Επαφής	α	44,1	14,5	0	y (F
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-11,20	#####	s ⁻¹	200
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,78	18,39	Hz	254
					300
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	66,6	58,8	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	8,1	10,2	0	1.5
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,44	-2,27	cm	1
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-1,05	-1,38	cm	T
Διάρκεια κρούσης	Δt	1,	47	ms	u (La
Μήκος Επαφής	Lc	6,	06	cm	otatio
					or or
					Axis
					ajor
					≥ -15
					-2



TPOXIA



-25

10

Frame Number

25

20



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	26,6 °

31

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META
Μέτοο Ταγύτρτας	v	3 17	2 16 m/s
Ορθή Συνιστώσα	v Vn	1 54	-0.83 m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2.77	-2.32 m/s
Ξφαιποροτική Ξοτιοτώσα Γωνιά Επαφής	α	29.2	19.7 ⁰
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-17.83	43.47 s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,84	6,92 Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META
Προσανατολισμός	φ	22,4	22,6 [°]
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	41,8	41,8 °
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	0,97	0,98 cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-2,36	-2,36 cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	-0,	, 89 ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00 cm



TPOXIA



Mation (rad)

Major Axis Orie

-92

10

Frame Number

20

25

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ

ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,537
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,837
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,776
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,640
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,352
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,298



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 32

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	26,6 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,21	2,55 m/s	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,54	-0,54 m/s	
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,82	-2,49 m/s	
Γωνιά Επαφής	α	28,6	12,2 [°]	
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-19,51	38,25 s ⁻¹	
Συχνότητα Περιστροφής	f	3,11	6,09 Hz	
ΣΤΟΙΧΕΙΔ ΚΡΟΥΣΗΣ			ΜΕΤΔ	
Προσανατολισμός	φ	29,8	28,3 [°]	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	31,1	34,5 [°]	
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	1,27	1,21 cm	
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-2,22	-2,25 cm	
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	89 ms	
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00 cm	



TPOXIA









ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,351
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,885
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,794
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,657
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,102
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,336



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

33 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	26,6 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,20	2,38	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,56	-0,69	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,79	-2,27	m/s
Γωνιά Επαφής	α	29,3	16,9	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-19,34	49,04	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	3,08	7,80	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	МЕТА	
Προσανατολισμός	φ	22,7	22,3	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	39,4	39,4	0
Εκκεντρότητα κατά n	\mathbf{e}_{n}	-0,99	-0,98	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	2,38	2,38	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	49	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



TPOXIA

50 100

200

300

4.6

Axis Ori

Ma





ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,442
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,815
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,743
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,600
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,634
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,322



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 34

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	26,6 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META
144 T			0.00 m/a
Μετρο Ταχυτήτας	v	3,23	2,39 m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,55	-0,54 m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,84	-2,33 m/s
Γωνιά Επαφής	α	28,6	13,1 °
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-18,91	42,38 s⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	3,01	6,75 Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META
Προσανατολισμός	φ	29,6	29,2 °
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	32,9	32,9 °
Εκκεντρότητα κατά n	e n	-1,26	-1,24 cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	2,22	2,22 cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	43 ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00 cm



TPOXIA





ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,349
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,820
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,739
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,580
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,536
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,286



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

36

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
					50
Μέτρο Ταχύτητας	۷	3,48	3,16	m/s	5.83
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,49	-0,44	m/s	100
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,15	-3,13	m/s	
Γωνιά Επαφής	α	25,2	8,1	0	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-24,34	17,72	s ⁻¹	200
Συχνότητα Περιστροφής	f	3,87	2,82	Hz	250
					300
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	67,8	67,0	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	8,9	8,9	0	2.45
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,35	-2,34	cm	2.4
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	0,96	0,99	cm	Q 2.35
Διάρκεια κρούσης	Δt	-0	,78	ms	E) 23
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm	1910 2.25
					BC 22
					SIX 2.15
					JOE 21
					2.05



TPOXIA





ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,299
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,995
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,909
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,822
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,339
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,398



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 37

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,47	3,07 m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,53	0,08 m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,11	-3,07 m/s
Γωνιά Επαφής	α	26,2	-1,5 °
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-23,35	32,54 s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	3,72	5,18 Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	МЕТА
Προσανατολισμός	φ	48,9	46,3 °
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	18,6	18,6 °
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-1,91	-1,83 cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	1,66	1,75 cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	1,	72 ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00 cm



TPOXIA

50

(xd) K 200 250 300

3.2





ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	-0,054
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,987
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,886
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,797
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,138
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,466



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

38 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

	ΠΡΙΝ	META	
v	3,57	2,98	m/s
Vn	1,50	-0,77	m/s
Vt	-3,24	-2,88	m/s 🧧
α	24,8	14,9	0
ω	-22,70	-41,89	s⁻¹
f	3,61	6,67	Hz
	ΠΡΙΝ	МЕТА	
φ	75,9	75,8	0
θ	4,4	4,4	0
e _n	-2,45	-2,45	cm
et	0,61	0,62	cm 💡
Δt	-0	,78	ms 🖁
Lc	0,	00	cm 💱
			v Avia Oria
	V Vn Vt α f Φ e _n e _t Lc	ΠΡΙΝ V 3,57 Vn 1,50 Vt -3,24 α 24,8 ω -22,70 f 3,61 ΠΡΙΝ φ 75,9 θ 4,4 e _n -2,45 e _t 0,61 Δt -0 Lc 0,	ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ V 3,57 2,98 Vn 1,50 -0,77 Vt -3,24 -2,88 α 24,8 14,9 ω -22,70 -41,89 f 3,61 6,67 ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ φ 75,9 75,8 θ 4,4 4,4 en -2,45 -2,45 et 0,61 0,62 Δt -0,78 Lc



TPOXIA



10 12 14 16 18

8 Frame Number

ntation (rad)

No. 0.8 ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,511
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,888
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,834
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,720
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,368
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,688



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

39 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
					50
Μέτρο Ταχύτητας	V	3,68	3,02	m/s	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,55	-0,73	m/s	100
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,33	-2,93	m/s	
Γωνιά Επαφής	α	25,0	13,9	0	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-21,91	-31,95	s ⁻¹	200
Συχνότητα Περιστροφής	f	3,49	5,09	Hz	250
					300
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	74,4	74,8	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	6,7	6,7	0	22
Εκκεντρότητα κατά n	e n	-2,44	-2,44	cm	2,1
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	0,68	0,66	cm	÷,
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	13	ms	u (ra
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm	ottett
					Orier
					SIX 17
					ajor
					¥ 1.6



TPOXIA

1.5 1.4

-5

Frame Number



ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,468
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,879
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,821
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,685
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,371
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,768



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,559
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,866
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,818
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,720
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,310
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,327

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 40

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ Μέτρο Ταχύτητας V 3,88 3,17 m/s Vn 1,66 -0,93 m/s Ορθή Συνιστώσα Εφαπτομενική Συνιστώσα Vt -3,50 -3,03 m/s α 25,4 17,1 ° Γωνιά Επαφής ω -18,52 60,73 s⁻¹ Γωνιακή ταχύτητα Συχνότητα Περιστροφής 2,95 9,67 Hz f ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ Προσανατολισμός **23,8** ° 22,7 φ 41,6 37,8 [°] Γωνία άξονα-σημείου επ. θ Εκκεντρότητα κατά η **e**_n 0,99 1,03 cm Εκκεντρότητα κατά t -2,36 -2,34 cm \mathbf{e}_{t} Διάρκεια κρούσης -0,66 ms Δt Μήκος Επαφής Lc 0,00 cm



TPOXIA



Frame Number

0.2

Major Axis Orientati



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,10	1,65	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,78	-1,09	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,38	-1,23	m/s
Γωνιά Επαφής	α	63,6	41,6	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-19,77	-47,72	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	3,15	7,60	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	МЕТА	

41



0,08

cm

φ

θ

en

et

Δt

Lc

50

(xd) K 200 250 300





ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,393
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,895
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,531
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,336
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,492
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,053



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,528
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,410
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,507
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,267
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,558
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,025

42 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,04	1,54	m/s	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,72	-1,44	m/s	
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,35	-0,56	m/s	×
Γωνιά Επαφής	α	63,6	68,9	0	V (P
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-13,64	20,99	s ⁻¹	
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,17	3,34	Hz	
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	МЕТА		
Προσανατολισμός	φ	57,2	57,1	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	18,2	18,2	0	
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,13	-2,13	cm	
Εκκεντρότητα κατά t	et	1,37	1,38	cm	(p
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	47	ms	n (ra
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm	Axis Orientation



10 12 14 16. 18.

Frame Number

20

-8

Mailot



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,770
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,483
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,719
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,584
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,719
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,570

43 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
Μέτρο Ταχύτητας	۷	2,98	2,14	m/s	63
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,65	-2,04	m/s	1
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,37	-0,66	m/s	x1
Γωνιά Επαφής	α	62,6	72,0	0	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-12,38	-50,54	s ⁻¹	2
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,97	8,04	Hz	2
					3
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	71,3	75,3	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	10,1	7,5	0	2
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,42	-2,47	cm	2
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	0,82	0,65	cm	Ŧ
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	62	ms	E) u
Μήκος Επαφής	Lc	0,	08	cm	Drientatio








ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,787
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,870
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,804
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,709
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,839
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,134

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 44

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,13	2,52	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,81	-2,21	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,38	-1,20	m/s 🤿
Γωνιά Επαφής	α	63,8	61,5	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-18,51	-52,60	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,95	8,37	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ПРІМ	МЕТА	
Προσανατολισμός	φ	81,6	79,6	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	5,1	5,1	0
Εκκεντρότητα κατά n	e n	-2,51	-2,50	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-0,37	-0,46	cm 💡
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	44	ms 🚦
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm cutation





10 12 14 16 18

Frame Number

-26

-8

Major Axis



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 45

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
Μέτρο Ταχύτητας	v	2,94	1,69	m/s	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,68	-1,15	m/s	
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,22	-1,24	m/s 😪	8
Γωνιά Επαφής	α	65,5	42,8	o 0,	
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-26,73	-87,69	s ⁻¹	
Συχνότητα Περιστροφής	f	4,25	13,96	Hz	3
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	8,2	8,6	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	75,9	70,9	0	1
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-0,36	-0,38	cm	
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-2,50	-2,49	cm 🕤	
Διάρκεια κρούσης	∆t	0,	09	ms 🚆	1
Μήκος Επαφής	Lc	0,	22	cm it	1
				Oriei	3
				Axis	1
				ajor	
				×	ų



TPOXIA



10 12 14 16 18

Frame Number

-0.4

ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,429
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	1,019
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,575
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,535
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,498
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,594

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,464
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,801
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,655
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,600
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,834
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,091

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 46

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,50
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
				5
Μέτρο Ταχύτητας	۷	3,17	2,08	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,24	-1,04	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,24	-1,80	m/s 😪 15
Γωνιά Επαφής	α	45,0	30,1	o () Y
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-12,47	-84,87	s ^{-1 20}
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,98	13,51	Hz 25
				30
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	30,7	24,5	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	40,8	46,5	0 1
Εκκεντρότητα κατά n	e n	-1,29	1,04	cm
Εκκεντρότητα κατά t	et	-2,17	-2,30	cm 🕤
Διάρκεια κρούσης	Δt	9,	19	ms 🚆
Μήκος Επαφής	Lc	0,	22	cm 👬
				orier orier
				ar Axis
				Majo
				-1.5



10

Frame Number

25

20



Μήκος Επαφής

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{COR}	0,287
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,756
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,570
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,326
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,298
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,830

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 47

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,49 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,74
Περίμετρος έλλειψης	L	13,09 cm
Μάζα τεμάχους	m	28,8 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ Μέτρο Ταχύτητας V 3,19 1,82 m/s Ορθή Συνιστώσα Vn 2,26 -0,65 m/s Εφαπτομενική Συνιστώσα Vt -2,24 -1,70 m/s 45,3 **20,9** ° Γωνιά Επαφής α ω -17,06 -12,54 s⁻¹ Γωνιακή ταχύτητα Συχνότητα Περιστροφής 2,71 2,00 Hz f ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ **2,8** ° Προσανατολισμός 3,4 φ 82,5 82,5 [°] Γωνία άξονα-σημείου επ. θ Εκκεντρότητα κατά η 0,12 cm en 0,15 Εκκεντρότητα κατά t -2,53 -2,53 cm \mathbf{e}_{t} Διάρκεια κρούσης -0,17 ms Δt

Lc

0,68

cm



Frame Number



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,50
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

49

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,01	1,89	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,18	-0,31	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,08	-1,87	m/s
Γωνιά Επαφής	α	46,3	9,4	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	1,08	-99,48	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	0,17	15,83	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	50,4	43,7	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	21,2	27,2	0
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-1,95	-1,75	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-1,61	-1,83	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	-1,	12	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	20	cm



TPOXIA



10

Frame Number

25

20

(lad)



ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ

ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,142
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,897
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,628
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,659
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,599
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,128



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{COR}	0,609
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,700
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,654
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,608
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,630
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,369

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 50

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,00	1,96	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,17	-1,32	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,07	-1,45	m/s
Γωνιά Επαφής	α	46,3	42,3	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-14,01	-82,57	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,23	13,14	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	МЕТА	
Προσανατολισμός	φ	90,0	88,8	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	0,0	0,0	0
Εκκεντρότητα κατά n	e n	-2,53	-2,53	cm
Εκκεντρότητα κατά t	et	0,00	-0,05	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	24	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



Frame Number

25

30



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,581
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,795
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,752
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,650
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,633
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,473

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 51

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,24	2,43	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,54	-0,90	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,85	-2,26	m/s
Γωνιά Επαφής	α	28,5	21,6	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-15,03	-61,98	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,39	9,86	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	2,0	0,1	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	86,1	88,5	0
Εκκεντρότητα κατά n	\mathbf{e}_{n}	-0,09	0,00	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-2,52	-2,52	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	72	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



Frame Number

Axis Or

-0.6



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,574
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,822
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,775
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,670
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,818
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,350

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 52

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,34	2,59	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,56	-0,89	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,96	-2,43	m/s
Γωνιά Επαφής	α	27,7	20,1	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-8,07	-56,91	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,28	9,06	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	81,5	73,9	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	2,3	6,9	0
Εκκεντρότητα κατά n	\mathbf{e}_{n}	-2,64	-2,56	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-0,39	-0,74	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	2,	57	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ



Orientation (rad)



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 53

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META
· · · · ·	.,		
Μετρο Ταχυτητας	v	3,12	2,39 m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,50	-0,62 m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,73	-2,31 m/s
Γωνιά Επαφής	α	28,8	15,2 [°]
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-19,23	-23,09 s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	3,06	3,68 Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META
Προσανατολισμός	φ	62,1	73,4 [°]
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	15,6	7,7 °
Εκκεντρότητα κατά n	e n	-2,23	-2,42 cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	1,18	0,72 cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	3,	67 ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00 cm



ΤΡΟΧΙΑ





ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,416
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,844
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,766
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,595
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,383
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,772



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,574
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,822
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,775
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,670
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,818
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,350

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 54

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

	ΠΡΙΝ	META	
v	3,34	2,59	m/s
Vn	1,56	-0,89	m/s
Vt	-2,96	-2,43	m/s
α	27,7	20,1	0
ω	-8,07	-56,91	s ⁻¹
f	1,28	9,06	Hz
	ΠΡΙΝ	МЕТА	
φ	81,5	73,9	0
θ	2,3	6,9	0
e _n	-2,64	-2,56	cm
\mathbf{e}_{t}	-0,39	-0,74	cm
Δt	2,	57	ms
١c	0	00	cm
	V Vn Vt α ω f Φ e _n e _t Δt	ΠΡΙΝ V 3,34 Vn 1,56 Vt -2,96 α 27,7 ω -8,07 f 1,28 ΠΡΙΝ φ 81,5 θ 2,3 e _n -2,64 e _t -0,39 Δt 2, Lc 0	ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ V 3,34 2,59 Vn 1,56 -0,89 Vt -2,96 -2,43 α 27,7 20,1 ω -8,07 -56,91 f 1,28 9,06 ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ φ 81,5 73,9 θ 2,3 6,9 en -2,64 -2,56 et -0,39 -0,74 Δt 2,57 Lc 0.00



Frame Number



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,541
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,729
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,688
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,511
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,612
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,543

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 55

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,15	2,17 m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,55	-0,84 m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,75	-2,00 m/s
Γωνιά Επαφής	α	29,5	22,7 °
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-14,18	-40,24 s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,26	6,40 Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META
Προσανατολισμός	φ	0,9	10,0 °
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	88,7	68,5 [°]
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	0,04	0,44 cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-2,52	-2,48 cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	3,	24 ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00 cm



10

Frame Number

25

20

-0.8



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 56

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,98	3,13 m	/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,70	-0,46 m	/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,59	-3,10 m	/s 🤿
Γωνιά Επαφής	α	25,4	8,5 °	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-16,48	60,34 s	1
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,62	9,60 H	z
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	39,4	37,6 [°]	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	24,0	26,9 °	
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-1,73	-1,66 cr	n
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	2,10	2,15 cr	n 🕤
Διάρκεια κρούσης	Δt	1,02	m	S u
Μήκος Επαφής	Lc	0,00	cr	n itati
				Orie
				Axis
				Major
				~



ΤΡΟΧΙΑ



ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ





ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,272
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,863
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,788
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,674
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,606
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,369



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 57

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,25	2,88	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,41	-0,42	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,92	-2,85	m/s
Γωνιά Επαφής	α	25,7	8,3	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-25,83	17,12	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	4,11	2,73	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	46,6	46,2	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	24,2	24,2	0
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-1,84	-1,82	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	1,73	1,75	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	-0	,62	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



TPOXIA

50

(xd) K 200 250 300

2.9

ntation (rad)

Major Axis Orie

23



10 12 14 16 18

Frame Number

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ

ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,296
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,974
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,887
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,782
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,340
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,397



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,291
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,906
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,829
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,692
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,365
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,227

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 58

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,78	3,13	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,60	-0,47	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,42	-3,10	m/s 🧧
Γωνιά Επαφής	α	25,1	8,6 [°]	
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-20,92	23,42 \$	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	3,33	3,73	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	МЕТА	
Προσανατολισμός	φ	38,8	38,8 [°])
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	30,3	30,3 [°])
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-1,59	-1,59	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	1,97	1,97 (cm 💡
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	18 I	ms 🚦
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00 0	cm 🚦
				and of the
				avia a
				taine



10 12 14 16 18

Frame Number

-26

-8

2.5

ΤΡΟΧΙΑ



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,704
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,858
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,832
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,690
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,682
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,075

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 59

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,76	3,13	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,60	-1,13	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,40	-2,92	m/s
Γωνιά Επαφής	α	25,2	21,1 ິ	D .
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-19,71	9,68	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	3,14	1,54	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	54,6	55,7 [°]	C
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	18,3	18,3 [°]	D
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,06	-2,09	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	1,47	1,43	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	46	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



Frame Number

20

2.1



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,465
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,805
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,757
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,571
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,504
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,865

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 60

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,86	2,92 m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,61	-0,75 m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,51	-2,82 m/s
Γωνιά Επαφής	α	24,7	14,9 °
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-15,19	-6,28 s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,42	1,00 Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META
Προσανατολισμός	φ	14,3	15,1 [°]
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	63,6	59,1 [°]
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	0,62	0,66 cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-2,45	-2,44 cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	83 ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00 cm







ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,694
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,762
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,706
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,567
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,719
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,363

62 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ Μέτρο Ταχύτητας V 3,11 **2,20** m/s Ορθή Συνιστώσα 2,83 -1,96 m/s Vn Vt -1,29 -0,98 m/s Εφαπτομενική Συνιστώσα 65,5 63,4 [°] Γωνιά Επαφής α Γωνιακή ταχύτητα ω -17,27 -50,69 s⁻¹ Συχνότητα Περιστροφής f 2,75 8,07 Hz

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ

Προσανατολισμός
Γωνία άξονα-σημείου επ.
Εκκεντρότητα κατά n
Εκκεντρότητα κατά t
Διάρκεια κρούσης
Μήκος Επαφής

ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ 84,4 ° 87,2 **3,0** ° θ 2,5 -2,55 -2,54 cm -0,12 -0,25 cm e, 0,38 ms Δt 0,00

cm

õ

0.6 0.4

φ

e_n

Lc





11

10 Frame Number



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{COR}	0,194
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,865
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,368
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,190
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,218
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,096

63 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ Μέτρο Ταχύτητας 3,01 1,11 m/s V Ορθή Συνιστώσα Vn 2,80 -0,54 m/s Εφαπτομενική Συνιστώσα Vt -1,12 -0,97 m/s 68,2 **29,2** ° Γωνιά Επαφής α Γωνιακή ταχύτητα **-4,68 -42,36** s⁻¹ ω Συχνότητα Περιστροφής 0,75 6,74 Hz f ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ

Προσανατολισμός
Γωνία άξονα-σημείου επ.
Εκκεντρότητα κατά n
Εκκεντρότητα κατά t
Διάρκεια κρούσης
Μήκος Επαφής

ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ 74,2 [°] 72,6 φ 12,2 12,2 [°] θ -2,43 -2,45 cm e_n -0,76 -0,69 cm e, 0,60 ms Δt 0,00

Lc

cm

-15





20

Frame Number

15

25



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{COR}	0,091
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	1,127
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,451
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,257
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,188
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,568

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 64

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
					50
Μέτρο Ταχύτητας	V	3,12	1,41	m/s	1
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,87	-0,26	m/s	100
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,23	-1,38	m/s	¥ 150
Γωνιά Επαφής	α	66,8	10,7	0	y (F
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-30,17	-46,19	s ⁻¹	200
Συχνότητα Περιστροφής	f	4,80	7,35	Hz	250
					300
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	58,2	55,8	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	21,4	24,6	0	2
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,17	-2,12	cm	1.0
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-1,35	-1,44	cm	© 16
Διάρκεια κρούσης	Δt	-1	,13	ms	E L 14
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm	Matio
					Orier
					axis 1
					10 0.0
					×

0.4



100 150 200 250 300 350 400 ΓΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ		1				
100 150 200 250 300 350 400 χ (px) ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ		1				
100 150 200 250 300 350 400 χ (px) ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ	*****					
100 150 200 250 300 350 400 χ (px) ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ						
100 150 230 250 300 350 400 χ (px) ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ						
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ		150	200 250 x (ny)	300	350	400
	100		~ (Po)			

Frame Number

25



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,375
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,773
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,470
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,284
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,354
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,227

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 65

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	۷	3,09	1,45	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,81	-1,05	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,29	-1,00	m/s 😪
Γωνιά Επαφής	α	65,2	46,5	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-14,29	-47,22	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,27	7,52	Hz
				13
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	Ø	82.0	81.5	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	0	5.9	5.9	o 3
Εκκεντρότητα κατά η	e,	-2,55	-2,55	cm
Εκκεντρότητα κατά t	e,	0,36	0,38	cm 📻
Διάρκεια κρούσης	Δt	-0	,33	ms 🦉
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm offer
				Drien
				xis O
				Of A
				Maj



10 12 14 16 18

8 10 12 Frame Number



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

66

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	Г	IPIN	META		
					50
Μέτρο Ταχύτητας	V	3,18	1,72	m/s	5.22
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,26	-0,54	m/s	100-
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,23	-1,63	m/s	€ 150
Γωνιά Επαφής	α	45,3	18,4	0	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-8,47	-58,04	s ⁻¹	200
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,35	9,24	Hz	250 -
					300 -
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ	Г	IPIN	META		
Προσανατολισμός	φ	89,4	85,2	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	0,0	3,0	0	2
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,55	-2,54	cm	1.5-
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-0,03	-0,21	cm	÷
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,78		ms	t lug
Μήκος Επαφής	Lc	0,00		cm	ematic
					vis Or
					Major
					-1-
					-1.5



TPOXIA

150 200

250 300

× (px) ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ

Frame Number

350

400

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,240
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,729
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,540
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,383
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,295
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,076



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

67 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META		
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,06	1,72	m/s	
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,26	-0,56	m/s	
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,06	-1,63	m/s	x
Γωνιά Επαφής	α	47,7	19,0	0	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-10,53	-69,57	s ⁻¹	
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,68	11,07	Hz	
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	68,3	64,7	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	15,2	18,3	0	
Εκκεντρότητα κατά n	e n	-2,37	-2,31	cm	
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-0,94	-1,09	cm	(p
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	40	ms	n (ra
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm	entatio
					xis On
					ajor A
					W



TPOXIA





Frame Number

25

30

-1.5





ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,248
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,793
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,564
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,459
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,389
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,051



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	1,72 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,52
Περίμετρος έλλειψης	L	13,70 cm
Μάζα τεμάχους	m	32,3 gr
Κλίση επιπέδου	θ	0 °

68

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,87	3,17	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,64	-0,47	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,51	-3,13	m/s
Γωνιά Επαφής	α	25,0	8,5	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-19,67	22,44	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	3,13	3,57	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	38,6	39,7	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	30,4	30,4	0
Εκκεντρότητα κατά n	e n	-1,58	-1,61	cm
Εκκεντρότητα κατά t	et	1,97	1,94	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	-1,	,21	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



TPOXIA



Unit of the second seco

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,287
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,893
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,819
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,674
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,353
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	1,185



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

69 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	2,99	1,62	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,22	-0,67	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-1,99	-1,47	m/s
Γωνιά Επαφής	α	48,1	24,5	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-12,55	-60,66	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	2,00	9,65	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	86,1	87,8	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	3,0	1,4	0
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,55	-2,55	cm
Εκκεντρότητα κατά t	et	0,18	0,10	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	-0,	44	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



TPOXIA





(tation (rad)

Major Axis Orie

-25

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,302
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,738
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,541
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,405
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,292
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,047



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,225
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,753
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,548
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,316
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,190
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,564

80 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	14,4 °

	ΠΡΙΝ	META		
				5
v	3,07	1,68	m/s	
Vn	2,21	-0,50	m/s	10
Vt	-2,13	-1,61	m/s	¥ 15
α	46,0	17,2	0	y (p
ω	-14,92	-24,98	s ⁻¹	20
f	2,37	3,98	Hz	25
				30
	ΠΡΙΝ	META		
φ	61,7	62,4	0	
θ	21,3	18,2	0	2.8
e _n	-2,26	-2,27	cm	2.6
et	1,22	1,19	cm	÷.
Δt	1,	69	ms	u (ia
Lc	0,	00	cm	oitetu 22
				orie a
				Axis 1.0
				ajor
				\$ 1.6
	V Vn Vt α f Φ e _n e _t Lc	$\begin{tabular}{lllllllllllllllllllllllllllllllllll$	$\begin{array}{c ccccc} \Pi PIN & META \\ V & 3,07 & 1,68 \\ Vn & 2,21 & -0,50 \\ Vt & -2,13 & -1,61 \\ \alpha & 46,0 & 17,2 \\ \omega & -14,92 & -24,98 \\ f & 2,37 & 3,98 \\ \hline \end{array}$ $\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{c c c c c c c c } \hline ΠPIN $ META \\ \hline V 3,07 $ 1,68 $ m/s \\ \hline V 2,21 $ -0,50 $ m/s \\ \hline V 2,21 $ -0,50 $ m/s \\ \hline V 2,21 $ -0,50 $ m/s \\ \hline V -2,13 $ -1,61 $ m/s \\ \hline α 46,0 $ 17,2 $ ^{\circ} \\ ω -14,92 $ -24,98 $ s^{-1} \\ f 2,37 $ 3,98 $ Hz \\ \hline ΠPIN $ META \\ \hline Ψ 61,7 $ 62,4 $ ^{\circ} \\ θ 21,3 $ 18,2 $ ^{\circ} \\ \hline θ 21,3 $ 18,2 $ 1,1 $ 0 $ m $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ 1,0 $ $







ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,269
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,812
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,727
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,620
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,450
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,300

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 71

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	26,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,39	2,46 m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,59	-0,43 m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,99	-2,43 m/s
Γωνιά Επαφής	α	28,0	10,0 °
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-10,74	-61,91 s⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,71	9,85 Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ Προσανατολισμός	φ	ПРIN 75,6	META 72,1 ⁰
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ Προσανατολισμός Γωνία άξονα-σημείου επ.	φ θ	ПРIN 75,6 8,3	META 72,1 [°] 11,1 [°]
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ Προσανατολισμός Γωνία άξονα-σημείου επ. Εκκεντρότητα κατά n	φ θ e _n	ПРIN 75,6 8,3 -2,58	META 72,1 [°] 11,1 [°] -2,54 cm
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ Προσανατολισμός Γωνία άξονα-σημείου επ. Εκκεντρότητα κατά n Εκκεντρότητα κατά t	φ θ e _n e _t	ΠΡΙΝ 75,6 8,3 -2,58 -0,66	META 72,1 ° 11,1 ° -2,54 cm -0,82 cm
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ Προσανατολισμός Γωνία άξονα-σημείου επ. Εκκεντρότητα κατά n Εκκεντρότητα κατά t Διάρκεια κρούσης	φ θ e _n e _t	ΠΡΙΝ 75,6 8,3 -2,58 -0,66 0,	META 72,1 ° 11,1 ° -2,54 cm -0,82 cm 00 ms
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ Προσανατολισμός Γωνία άξονα-σημείου επ. Εκκεντρότητα κατά n Εκκεντρότητα κατά t Διάρκεια κρούσης Μήκος Επαφής	φ θ e _n e _t Lc	ΠΡΙΝ 75,6 8,3 -2,58 -0,66 0, 0,	META 72,1 ° 11,1 ° -2,54 cm -0,82 cm 00 ms 00 cm
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ Προσανατολισμός Γωνία άξονα-σημείου επ. Εκκεντρότητα κατά n Εκκεντρότητα κατά t Διάρκεια κρούσης Μήκος Επαφής	φ e _n e _t Δt Lc	ΠΡΙΝ 75,6 8,3 -2,58 -0,66 0, 0,	META 72,1 ° 11,1 ° -2,54 cm -0,82 cm 00 ms 00 cm



TPOXIA



Frame Number

õ

-0.2



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,188
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,908
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,805
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,765
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,286
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,333

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 72

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	26,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,31	2,66	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,57	-0,29	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,91	-2,65	m/s
Γωνιά Επαφής	α	28,2	6,4	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-8,10	-68,55	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,29	10,91	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	88,1	85,0	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	0,0	3,0	0
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,55	-2,54	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-0,09	-0,22	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	74	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm







ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

72 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	26,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	I	ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,23	2,55	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,55	-0,69	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,84	-2,46	m/s
Γωνιά Επαφής	α	28,6	15,8	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-9,89	-68,63	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,57	10,92	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ	I	ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	78,9	84,6	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	5,8	2,9	0
Εκκεντρότητα κατά n	e n	-2,56	-2,60	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	0,50	0,25	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	2,	04	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



TPOXIA

50 100

200

300





ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,449
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{cor}	0,866
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,790
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,746
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,435
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,259



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 75

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	26,4 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
				50
Μέτρο Ταχύτητας	۷	3,05	1,70 m/s	5.52
Ορθή Συνιστώσα	Vn	2,25	-0,55 m/s	100 -
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-2,06	-1,61 m/s	
Γωνιά Επαφής	α	47,5	18,9 [°]	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-10,94	-69,60 s ⁻¹	200 -
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,74	11,08 Hz	250 -
				300 -
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	68,0	64,8 [°]	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	15,2	18,3 [°]	1.5
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,37	-2,31 cm	1-
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-0,96	-1,09 cm	÷
Διάρκεια κρούσης	Δt	(),31 ms	E) os-
Μήκος Επαφής	Lc	(),00 cm	o-
				e Otie
				r Axi
				Wajo



ΤΡΟΧΙΑ



Frame Number

10

25

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,245
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,781
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,558
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,453
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,385
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	-0,063



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 76

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	I	ΠΡΙΝ	META		
					50 -
Μέτρο Ταχύτητας	V	3,88	2,85	m/s	5.22
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,64	-1,16	m/s	100 -
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,51	-2,60	m/s	
Γωνιά Επαφής	α	25,1	24,0	0	y (p
Γωνιακή ταχύτητα	ω	0,34	-67,76	s ⁻¹	200 -
Συχνότητα Περιστροφής	f	0,05	10,78	Hz	250 -
					300 -
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ	I	ΠΡΙΝ	META		
Προσανατολισμός	φ	80,1	88,3	0	
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	5,9	0,0	0	2
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,54	-2,57	cm	-
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	0,44	0,08	cm	÷
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,31	I	ms	E) 1-
Μήκος Επαφής	Lc	0,00)	cm	Itatio
					a Oriet
					Aajor Ax
					-0.5
					-10



ΤΡΟΧΙΑ







ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,705
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,741
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,735
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,624
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,628
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,247



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 77

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	I	IPIN	META	
Μέτοο Ταγύτητας	v	3 69	2 94	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1.61	-0.27	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,32	-2,92	m/s
Γωνιά Επαφής	α	25,9	5,2	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-7,00	-54,65	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,11	8,70	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	МЕТА	
Προσανατολισμός	φ	72,7	74,5	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	12,1	12,1	0
Εκκεντρότητα κατά n	\mathbf{e}_{n}	-2,44	-2,46	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-0,76	-0,68	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	-0,	97	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



TPOXIA



Frame Number

20

25

Major Axis Orientation (rad)

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,165
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,882
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,797
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,695
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,217
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,493



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 78

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,67	3,02	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,61	-0,73	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,29	-2,93	m/s
Γωνιά Επαφής	α	26,1	14,1	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-8,56	-67,44	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,36	10,73	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	64,2	63,8	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	18,4	18,4	0
Εκκεντρότητα κατά η	en	-2,30	-2,29	cm
Εκκεντρότητα κατά t	e,	-1,11	-1,12	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	-0	39	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm



TPOXIA



10 12 14 16 18

Frame Number

-0.4

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,455
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,890
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,824
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,771
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,606
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,411



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΝΑΠΗΔΗΣΗΣ

Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{COR}	0,386
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,947
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,880
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,871
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,661
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,464

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ 79

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΠΡΙΝ	META	
Μέτρο Ταχύτητας	v	3,97	3,50	m/s
Ορθή Συνιστώσα	Vn	1,61	-0,62	m/s
Εφαπτομενική Συνιστώσα	Vt	-3,63	-3,44	m/s
Γωνιά Επαφής	α	23,8	10,2	0
Γωνιακή ταχύτητα	ω	-10,85	-75,09	s ⁻¹
Συχνότητα Περιστροφής	f	1,73	11,95	Hz
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ		ΠΡΙΝ	META	
Προσανατολισμός	φ	67,3	63,1	0
Γωνία άξονα-σημείου επ.	θ	14,5	17,5	0
Εκκεντρότητα κατά n	e _n	-2,42	-2,34	cm
Εκκεντρότητα κατά t	\mathbf{e}_{t}	-1,01	-1,18	cm
Διάρκεια κρούσης	Δt	0,	69	ms
Μήκος Επαφής	Lc	0,	00	cm









ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ



ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μεγάλος ημιάξονας	а	2,60 cm
Μικρός ημιάξονας	b	2,08 cm
Λόγος ημιαξόνων	a/b	1,25
Περίμετρος έλλειψης	L	14,73 cm
Μάζα τεμάχους	m	41,0 gr
Κλίση επιπέδου	θ	36,9 °

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΙΝ ΜΕΤΑ





ΤΡΟΧΙΑ



Frame Number

ΕΝΑΡΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ

ΛΗΞΗ ΚΡΟΥΣΗΣ



Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	n _{cor}	0,112
Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	t _{COR}	0,900
Κινηματικός Συντελεστής Αναπήδησης	V _{COR}	0,813
Ενεργειακός Συντελεστής Αναπήδησης	E _{COR}	0,739
Φαινόμενος Ορθός Συντελεστής Αναπήδησης	nC _{COR}	0,163
Φαινόμενος Εφαπτομενικός Συντελεστής Αναπήδησης	tC _{COR}	0,475