



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΠΜΣ ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ
ΕΠΙΣΤΗΜΗ**

**«Πειραματική και Υπολογιστική Μελέτη της Σεισμικής
Απόκρισης Φυσικών Ομοιωμάτων Ξηρών και
Ημιβυθισμένων Πρανών»**

Στέλλα Τσάφου, Πολιτικός Μηχανικός

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:

Μ. ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Ε. ΚΑΠΟΓΙΑΝΝΗ ΔΙΔΑΚΤΩΡ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2018

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΠΜΣ ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ
ΕΠΙΣΤΗΜΗ**

**«Πειραματική και Υπολογιστική Μελέτη της Σεισμικής
Απόκρισης Φυσικών Ομοιωμάτων Ξηρών και
Ημιβυθισμένων Πρανών»**

Στέλλα Τσάρου Πολιτικός Μηχανικός

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Μ. ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Σ. ΜΑΥΡΑΚΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Π. ΨΑΡΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΡ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.ΔΙ.Π./Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:

Μ. ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Ε. ΚΑΠΟΓΙΑΝΝΗ ΔΡ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2018

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Ομότιμο Καθηγητή Μιχαήλ Σακελλαρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ μαζί του στο εργαστήριο της γεωτεχνικής μηχανικής και να προσεγγίσω το πρόβλημα της παρούσας εργασίας μέσα από σύγχρονες μεθόδους, με τη βοήθεια της καθοδήγησης του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαιτέρως την Δρ. Έλενα Καπόγιαννη για την πολύτιμη βοήθεια, την καθοδήγηση και τις συμβουλές της καθώς επίσης και για το χρόνο που αφιέρωσε ώστε να καταφέρω να ολοκληρώσω την εργασία μου.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου για την υποστήριξη και την υπομονή τους.

Πρόλογος

Στο σύγχρονο παγκοσμιοποιημένο περιβάλλον η ανάγκη για διεύρυνση των γραμμών ζωής (Lifelines) είναι επιτακτική. Η Ελλάδα, μια χώρα σεισμογενής που περιβάλλεται από θάλασσα, δε μπορεί να μην ανταποκριθεί σε αυτή την ανάγκη παρά τις αντικειμενικές δυσκολίες που καλείται να αντιμετωπίσει, προσθέτοντας συνεχώς νέους υποθαλάσσιους αγωγούς στο θησαυροφυλάκιο της.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των πρανών με διάφορες μεθόδους προκειμένου να προκύψουν συμπεράσματα τόσο από γεωτεχνικής σκοπιάς όσο και από την σκοπιά των μεθόδων ανάλυσης. Ο στόχος αυτός επιτεύχθηκε με την δημιουργία των αναλυτικών, πειραματικών και υπολογιστικών μοντέλων.

Η εφαρμογή των διάφορων μεθόδων διερεύνησης των πρανών μπορεί να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες για την συμπεριφορά αυτών, ενώ η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων μπορεί να παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα τόσο για τις υπό μελέτη κατασκευές, όσο και για τις ίδιες τις μεθόδους που εφαρμόζονται. Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε αναλυτική, πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση ξηρών και ημιβυθισμένων επιχωμάτων υπό κλίμακα, έναντι σεισμικής φόρτισης.

Ειδικότερα στο πλαίσιο της πειραματικής διερεύνησης κατασκευάσθηκαν συνολικά 14 μοντέλα πρανών, τα οποία ήταν άοπλα, οπλισμένα ή με αγωγό υπό κλίμακα στο εσωτερικό τους, και τα οποία τοποθετήθηκαν στη σεισμική τράπεζα ενός βαθμού ελευθερίας του εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων του Ε.Μ.Π.. Ταυτόχρονα τοποθετήθηκαν οπτικών ινών για την καταγραφή των τροπών στο εσωτερικό των επιχωμάτων και και ελήφθησαν ψηφιακές φωτογραφίες προκειμένου να εφαρμοσθεί η οπτική μέθοδος παρακολούθησης της συμπεριφοράς τους. Ακολούθως πραγματοποιήθηκε διερεύνηση στα υπολογιστικά μοντέλα με τις διαστάσεις των αντίστοιχων φυσικών μοντέλων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραματικών, αναλυτικών και υπολογιστικών μεθόδων.

Abstract

In the modern globalized environment, the need to extend life lines to the rest of the world is imperative. Greece, a seismogenic country also surrounded by sea, cannot fail to meet this need by continuously adding new subsea pipelines to its vault. The aim of this master thesis is to study the behavior of the slopes by various methods in order to draw conclusions both geotechnical and analytical. This goal was achieved by creating analytical, experimental and computational models.

The application of the various methods of exploration of the slopes can provide useful conclusions about their behavior, while the comparison of the results of the methods can provide data for both the studied constructions and the methods applied. In the present study, analytical, experimental and computational exploration were carried out on a variety of slopes. A total of 14 models of slopes, were studied (with a variety of reinforced and not, with a pipeline added or not, and with or without the presence of water) and placed on the laboratory seismic shaker, with the addition of fiber optic sensors while taking digital photographs to apply the visual method of monitoring their behavior. Subsequently, the investigation of the respective original computer models with the finite element method was carried out and the results of the experimental, analytical and computational methods were compared.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των ημιβυθισμένων πρανών από τα οποία διέρχονται αγωγοί έναντι σεισμικής φόρτισης, με τη βοήθεια σεισμικής τράπεζας. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε αναλυτική, πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση των ημιβυθισμένων πρανών, αλλά και άλλων πρανών, καθώς και σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων, με στόχο να προκύψει μια ολοκληρωμένη εικόνα τόσο για τις υπό μελέτη κατασκευές, όσο και για τις ίδιες τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν.

Στο πρώτο μέρος (Α' Μέρος) της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται τα θεωρητικά στοιχεία της σύγχρονης βιβλιογραφίας που αφορούν γενικά τα εδαφικά πρανή, τη συμπεριφορά των εδαφικών υλικών και το μηχανισμός αστοχίας όπως και τις μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών.

Στο δεύτερο μέρος (Β' Μέρος) γίνεται παρουσίαση της σύγχρονης βιβλιογραφίας αναφορικά με τους αγωγούς που χρησιμοποιούνται σε υποθαλάσσια έργα. Περιγράφονται οι τρόποι υπολογισμού των βέλτιστων διαστάσεων τους, του κόστους και του είδους που θα επιλεγθούν ανάλογα με το έργο. Επίσης παρουσιάζονται οι σύγχρονες τεχνικές εναπόθεσης, συντήρησης, παρακολούθησης και ελέγχου των αγωγών.

Στο τρίτο μέρος (Γ' Μέρος) της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται πλήρως ο εργαστηριακός εξοπλισμός και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο για την διεξαγωγή των πειραμάτων και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους. Περιγράφονται αναλυτικά τα υλικά και τα τεχνικά μέσα, και οι μετρητικές διατάξεις και συσκευές που απαιτούνται προκειμένου να πραγματοποιηθούν τα πειράματα. Στο 5^ο Κεφάλαιο αναφέρονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των μετρήσεων μέσω αισθητήρων επιτάχυνσης, οπτικών ινών αλλά και της ψηφιακής συσχέτισης εικόνων. Επίσης επεξηγούνται οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν για την υπολογιστική ανάλυση των μοντέλων.

Στο 6^ο Κεφάλαιο του τρίτου μέρους της εργασίας παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη όπως χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα. Αρχικά γίνεται αναφορά των δοκιμαστικών εφαρμογών που πραγματοποιήθηκαν για να οδηγηθούμε στην τελική πειραματική διάταξη. Στην συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά τα 14 πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο όπως και οι μέθοδοι καταγραφής των δεδομένων και τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, η αναλυτική επίλυση των μοντέλων και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για κάθε πείραμα χωριστά ώστε να γίνει μια

αποτελεσματική σύγκριση των μεθόδων. Τα θέματα που εξετάζονται είναι η παρουσία νερού και οπλισμού, η τοποθέτηση αγωγού, η χρήση αισθητήρων οπτικών ινών για την καταγραφή των τροπών, ο αριθμός των δοκιμών στις οποίες υπόκεινται τα μοντέλα και τέλος το η χρήση λογισμικού για την υπολογιστική ανάλυση.

Synopsis

The purpose of this Master thesis is to study the behavior of the submerged slopes from which pipelines pass through against seismic loading, with the help of a stroke shaker. Particularly, analytical, experimental and computational exploration of the semi-precipitated (submerged) slopes, as well as other slopes, were carried out, for a comparison of the results of the methods, in order to obtain a full perception of both the experiments and the methods applied.

The content of the first part (Part I) is the theoretical elements of the current bibliography concerning the general slopes, the behavior of the soil materials and the failure mechanism, as well as the methods of analysis of the stability of the slopes.

The second part (Part B) includes a presentation of the modern bibliography regarding the pipelines used in subsea projects. It describes how to calculate their optimal dimensions, cost and type to be selected according to the project. It also presents modern techniques for depositing, maintaining, monitoring and controlling pipelines.

At the third part of this master thesis, and more particularly in the 4th chapter the laboratory equipment and the software used in the laboratory for conducting the experiments and processing their results, are fully presented. Analytically it describes the materials and technical means and the measuring devices and devices required to conduct the experiments. Also, the methods used for the processing of the measurements by means of accelerometers, optical fibers as well as the flashing of images are mentioned. In the 5th chapter there is a reference of the methods of analysis of the slopes stability of the software used for computational analysis of the models.

In the 6th chapter of the same part of the paper there is a presentation of the experimental layout as used in the experiments. Initially reference is made to the test applications that were conducted to lead to the final experimental layout. The 14 experiments performed in the laboratory, as well as the methods of recording the data and the data collected, the analytical solution of the models and the processing of the results for each experiment separately are described to make an effective comparison of the methods. The topics discussed are the presence of water and reinforcement, the installation of a conductor, the use of fiber optic sensors to record the paths, the number of tests to which the models are subjected to, and the use of software for computational analysis.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	- 1 -
Πρόλογος	- 3 -
Abstract.....	- 5 -
Περίληψη.....	- 7 -
Synopsis	- 9 -
Περιεχόμενα Πινάκων	- 14 -
Πίνακας Εικόνων.....	- 14 -
Μέρος Α - Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	- 17 -
Κεφάλαιο 1. Εδάφη και Πρανή.....	- 17 -
1.1 Έδαφος.....	- 17 -
1.1.1 Τεχνική συμπεριφορά των γεωϋλικών.....	- 20 -
1.2 Αστάθεια γεωλογικών σχηματισμών (καθιζήσεις-κατολισθήσεις).....	- 22 -
1.2.1 Καθιζήσεις.....	- 22 -
1.2.2 Κατολίσθηση.....	- 23 -
1.3 Πρανή.....	- 24 -
1.3.1 Ανάλυση Ευστάθειας.....	- 25 -
1.3.1.1 Μηχανισμοί Αστοχίας Πρανών	- 25 -
1.3.1.2 Ταξινόμηση των Κατολισθητικών Φαινομένων	- 27 -
1.3.1.3 Ερπυσμός - Αργή κατολισθητική κίνηση	- 32 -
Κεφάλαιο 2. Παράγοντες και διαδικασίες δημιουργίας - εκδήλωσης των Κατολισθήσεων ...	- 34 -
2.1 Συντελεστής Ασφάλειας ενός πρανούς.....	- 34 -
2.3.2.2 Διάκριση των παραγόντων εκδήλωσης των Κατολισθήσεων.....	- 35 -
2.4 Φαινόμενο ρευστοποίησης.....	- 40 -
2.4.1 Ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών.....	- 40 -
2.4.2 Μηχανισμός πρόκλησης ρευστοποίησης.....	- 41 -
2.4.3 Διαδικασία ρευστοποίησης.....	- 42 -
2.5 Μέθοδοι Ανάλυσης της Ευστάθειας των Πρανών	- 43 -
2.5.1 Εισαγωγή	- 43 -
2.5.2 Κατηγορίες μεθόδων ανάλυσης.....	- 43 -
2.5.3 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανούς εδαφικής συμπεριφοράς.....	- 44 -
2.5.5 Μέθοδοι ανάλυσης των επιπτώσεων της σεισμικής δράσης.....	- 47 -
Κεφάλαιο 3. Αγωγοί	- 49 -

3.1 Εισαγωγή	- 49 -
3.2 Χαρακτηριστικά αγωγών	- 50 -
3.2.1. Μέγεθος Σωλήνα	- 50 -
3.2.2 Βέλτιστη διάμετρος του αγωγού	- 51 -
3.2.3 Το πάχος των τοιχωμάτων.....	- 52 -
3.2.4 Γεωμετρία	- 52 -
3.2.5 Κόστος Αγωγών.....	- 53 -
3.3 Είδη αγωγών.....	- 53 -
3.3.1 Σωλήνες Ανύψωσης.....	- 53 -
3.3.1.1 Ιδιότητες των υλικών για Αγωγούς	- 55 -
3.3.1.2 Τεχνική εναπόθεσης	- 58 -
3.3.2 Σταθμοί Άντλησης.....	- 61 -
3.3.3 Σταθμοί Συμπίεσης.....	- 63 -
3.3.3.1 Συστατικά μέρη ενός Σταθμού Συμπίεσης	- 64 -
3.4 Έλεγχος & Συντήρηση Αγωγού	- 65 -
3.4.1 Συντήρηση	- 65 -
3.4.2 Έλεγχος.....	- 66 -
3.4.2.1 Επιθεώρηση.....	- 66 -
3.4.2.2 Παρακολούθηση.....	- 67 -
3.4.2.3 Τεχνικές Επιθεώρησης.....	- 67 -
Μέρος Β - Πειραματική Διερεύνηση	- 73 -
Κεφάλαιο 4. Πειραματική Διάταξη.....	- 73 -
4.1 Σεισμική τράπεζα.....	- 73 -
4.2 Ενισχυτής EP-124	- 74 -
4.3 Επιταχυνσιογράφος.....	- 76 -
4.4 LabView.....	- 82 -
4.5 Κάρτα NI USB-6211	- 83 -
4.6 Αισθητήρες Οπτικών Ινών	- 85 -
4.6.1 Γενικά για Αισθητήρες Οπτικών Ινών – Αρχές λειτουργίας	- 86 -
4.6.2 Βασικά Χαρακτηριστικά.....	- 87 -
4.6.3 Παραδείγματα Χρήσης Αισθητήρων Οπτικών Ινών	- 88 -
4.6.4 Ένωση Οπτικών Ινών - Splicing	- 90 -
4.7 Καταγραφέας Σήματος Αισθητήρων Οπτικών Ινών	- 92 -
4.8 Πενετρόμετρο	- 92 -

4.9 Εδαφικό Υλικό.....	- 95 -
4.10 Κάμερα Καταγραφής Ψηφιακών Φωτογραφιών	- 96 -
Κεφάλαιο 5. Μέθοδοι και Τεχνικές που εφαρμόζονται	- 98 -
5.1 Επεξεργασία Καταγραφής Αισθητήρα Οπτικών Ινών	- 98 -
5.1.1 Οπτικές ίνες	- 98 -
5.1.2 Προσδιορισμός τροπών.....	- 99 -
5.2 Επεξεργασία Εικόνων	- 100 -
5.2.1 DiC.....	- 100 -
5.2.2 Vic-2D.....	- 101 -
5.3 Υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης της οριακής ισορροπίας πρανών	- 105 -
5.3.1 Απλές υπολογιστικές μέθοδοι : Μέθοδος λωρίδων	- 105 -
5.3.2 Αριθμητικές μέθοδοι (μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, μέθοδος πεπερασμένων διαφορών)	- 110 -
Μέρος Γ – Πειράματα	- 113 -
Κεφάλαιο 6. Πειράματα	- 113 -
6.1 Εισαγωγή	- 113 -
6.2 Πειραματικές Δοκιμές	- 116 -
6.2.1 Δοκιμές για σύγκριση κόλλας.....	- 116 -
6.2.2 Δοκιμές για εύρεση επιτάχυνσης.....	- 117 -
6.3 Πείραμα 1ο.....	- 122 -
6.4 Πείραμα 2ο	- 126 -
6.5 Πείραμα 3ο	- 134 -
6.6 Πείραμα 4ο	- 140 -
6.7 Πείραμα 5ο	- 150 -
6.8 Πείραμα 6ο	- 158 -
6.9 Πείραμα 7 ^ο	- 178 -
6.9.1 Δοκιμή 1η.....	- 179 -
6.9.2 Δοκιμή 2η.....	- 182 -
6.9.3 Δοκιμή 3 ^η	- 184 -
6.4 Δοκιμή 4 ^η	- 187 -
6.9.5 Δοκιμή 5 ^η	- 189 -
6.10 Πείραμα 8ο	- 208 -
6.11 Πείραμα 9 ^ο	- 215 -
6.12 Πείραμα 10 ^ο	- 217 -

6.13 Πείραμα 11 ^ο	- 219 -
6.14 Πείραμα 12 ^ο	- 236 -
6.15 Πείραμα 13 ^ο	- 251 -
6.16 Πείραμα 14 ^ο	- 257 -
Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα και Προτάσεις Έρευνας.....	- 271 -
7.1 Συμπεράσματα.....	- 271 -
7.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα.....	- 280 -
Βιβλιογραφία.....	- 281 -
Πίνακας Εικόνων.....	- 287 -

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1 Ιζηματογενή πετρώματα και παράγωγα εδάφη (Καββαδάς και Πανταζίδου, 2007).....	- 18 -
Πίνακας 2 Ταξινόμηση των εδαφών με βάση την κοκκομετρία (Moris-Johnson, 1967).....	- 18 -
Πίνακας 3 Γεωτεχνική ταξινόμηση των εδαφών (Price, 2009).....	- 19 -
Πίνακας 4 Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (1978).....	- 30 -
Πίνακας 5 Ψηφιακή Ανάλυση του Αισθητήρα, Table 5 Digital Sensor Analysis.....	- 79 -
Πίνακας 6 Κοκκομετρική Ανάλυση Εδαφικού Υλικού, Table 6 Granulometric analysis of Ground material.....	- 95 -
Πίνακας 7 Συνοπτική Περιγραφή Πειραμάτων, Table 7 Brief Description of Experiments.....	- 115 -
Πίνακας 8 1 ^{ης} Σειράς Δοκιμών για Εύρεση επιτάχυνσης.....	- 118 -
Πίνακας 9 2 ^{ης} Σειράς Δοκιμών για Εύρεση επιτάχυνσης.....	- 120 -
Πίνακας 10 Σύγκριση Πειράματος 1 ^{ου} και Πειράματος 2ου.....	- 133 -
Πίνακας 11 Σύγκριση Πειράματος 2ου και Πειράματος 3ου.....	- 140 -
Πίνακας 13 Σύγκριση Πειράματος 5ου και Πειράματος 3ου.....	- 178 -
Πίνακας 14 Σύγκριση Πείραμα 6 και Πείραμα 11, Table 14 Comparison Experiment 6 and Experiment 11.....	- 235 -
Πίνακας 15 Σύγκριση Πειράματος 11 ^{ου} και Πειράματος 12 ^{ου} ,.....	- 250 -
Πίνακας 16 Σύγκριση Πειράματος 13 ^{ου} και Πειράματος 14 ^{ου}	- 270 -
Εξίσωση 1 Μετατροπή Μήκους κύματος σε τροπές.....	- 99 -

Πίνακας Εικόνων

Λόγω μεγάλου μεγέθους τοποθετήθηκε στο τέλος

Μέρος Α

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Μέρος Α - Θεωρητικό Υπόβαθρο

Κεφάλαιο 1. Εδάφη και Πρανή



Εικόνα 1 Αστοχία Πρανούς στο Hayden Hill, California

1.1 Έδαφος

Το έδαφος προκύπτει από τη διάβρωση ή την αποσάθρωση των πετρωμάτων και αποτελείται από ασύνδετους ή ελαφρά συνδεδεμένους στερεούς κόκκους. Οι στερεοί κόκκοι στις επαφές τους δημιουργούν κενά τα οποία περιέχουν νερό ή αέρια. Τα σκούρου χρώματος πυριγενή πετρώματα, τα οποία περιέχουν μεγάλες ποσότητες ασβεστίου, σιδήρου, μαγνησίου και καλίου, δημιουργούν εδάφη πλούσια σε αυτά τα συστατικά (Καββαδάς και Πανταζίδου, 2007). Τα ανοιχτόχρωμα πυριγενή πετρώματα είναι πλούσια σε χαλαζία και φτωχά σε θρεπτικές ουσίες. Παρά το γεγονός ότι τα ιζηματογενή πετρώματα καλύπτουν το ένα εικοστό του συνολικού όγκου των πετρωμάτων του ανώτερου τμήματος του φλοιού της Γης, καλύπτουν τα τρία τέταρτα του εδάφους. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα κυριότερα ιζηματογενή πετρώματα και τα αντίστοιχα παράγωγα εδάφη.

Πίνακας 1 Ιζηματογενή πετρώματα και παράγωγα εδάφη (Καθβαδάς και Πανταζίδου, 2007)

Ιζηματογενή πετρώματα	Παράγωγα εδάφη
Ασβεστόλιθος	Βασικά εδάφη πλούσια σε μαγνήσιο
Μάργα	Ασβεστούχα βασικά εδάφη
Ψαμμίτης	Όξινα εδάφη φτωχά σε θρεπτικά συστατικά
Σχιστόλιθος	Το έδαφος που προκύπτει εξαρτάται από τα ποσοστά σε χαλαζία και σιδηρομαγνητικά ορυκτά
Κροκαλοπαγή	Χονδρόκοκκα εδάφη με πολλά χαλίκια

Πολύ σημαντικά είναι τα οργανικά εδάφη. Η δημιουργία τους γίνεται συνήθως σε βάλτους και παράκτια έλη, όταν οι φυτικοί οργανισμοί νεκρώνονται ή ρίχνουν τα φύλλα τους, με αποτέλεσμα να δημιουργείται στον πυθμένα μια στρώση οργανικών καταλοίπων. Εξαιτίας της παρουσίας του νερού δεν γίνεται οξείδωση, και για τον λόγο αυτό διασπώνται ελάχιστα. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται οργανικές αποθέσεις μεγάλου πάχους. Οι οργανικές αποθέσεις μπορεί να έχουν μερικώς ή πλήρως αποσυντεθεί. Όταν οι οργανικές αποθέσεις έρθουν σε επαφή με την ατμόσφαιρα, αρχίζει η διάσπαση των οργανικών υπολειμμάτων με αποτέλεσμα τη δημιουργία οργανικού εδάφους. Τα εδάφη διακρίνονται με βάση την κοκκομετρία τους σε χονδρόκοκκα (μη συνεκτικά) και λεπτόκοκκα (συνεκτικά). Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ταξινόμηση κατά Moris-Johnson (1967). Μια άλλη κατηγοριοποίηση που αφορά γεωτεχνικούς σκοπούς παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2 Ταξινόμηση των εδαφών με βάση την κοκκομετρία (Moris-Johnson, 1967)

Υλικό	Μέγεθος κόκκων σε mm
Άργιλος	<0,004
Ιλύς	0,004-0,062
Πολύ λεπτόκοκκη άμμος	0,062-0,125
Λεπτόκοκκη άμμος	0,125-0,25
Μεσόκοκκη άμμος	0,25-0,5
Χονδρόκοκκη άμμος	0,5-1,0
Πολύ χονδρόκοκκη άμμος	1,0-2,0
Πολύ μικρά χαλίκια	2,0-4,0

Μικρά χαλίκια	4,0-8,0
Χαλίκια μεσαίου μεγέθους	8,0-16,0
Χαλίκια μεγάλου μεγέθους	16,0-32,0
Χαλίκια πολύ μεγάλου μεγέθους	32,0-64,0

Πίνακας 3 Γεωτεχνική ταξινόμηση των εδαφών (Price, 2009)

Ονομασία	Χαρακτηρισμός	Μέγεθος κόκκων (mm)
Ογκόλιθοι		>200
Κροκάλες		63-200
Χαλίκια	Χονδρόκοκκο	20-63
	Μεσόκοκκο	6,3-20
	Λεπτόκοκκο	2-6,3
Άμμος	Χονδρόκοκκη	0,63-2
	Μεσόκοκκη	0,2-0,63
	Λεπτόκοκκη	0,063-0,2
Ιλύς	Χονδρόκοκκη	0,02-0,063
	Μεσόκοκκη	0,006-0,02
	Λεπτόκοκκη	Λεπτόκοκκη
Λεπτόκοκκη Άργιλος		<0,002

Το έδαφος σαν υλικό κατασκευής, φέρον μέσο και φορτίζον στοιχείο

Το έδαφος αποτελεί μέσο έδρασης και υλικό κατασκευής όλων των ανθρώπινων συμβατικών και μη τεχνικών έργων, όπως γέφυρες, φράγματα, έργα οδοποιίας, κτίρια κ.λπ. Σε πολλά τεχνικά έργα η χρήση του επιτόπου διαθέσιμου εδαφικού υλικού μειώνει σημαντικά το οικονομικό κόστος του έργου και επομένως αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την οικονομικοτεχνική μελέτη του. Το έδαφος, συνήθως αφού συμπυκνωθεί για να αποκτήσει επαρκή αντοχή και μικρή συμπίεστικότητα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό κατασκευής, σε: Φράγματα σε ταμιευτήρες και υδραυλικά έργα, τα οποία έχουν πλεονέκτημα έναντι των φραγμάτων σκυροδέματος διότι παρουσιάζουν μεγαλύτερες ανοχές σε σχέση με το άκαμπτο σκυρόδεμα και έχουν μικρότερο κόστος κατασκευής. Επιχώσεις περιοχών που κατακλύζονται από νερά για την κατασκευή και επέκταση λιμένων, διαμορφώσεις παράκτιων περιοχών αεροδιαδρόμων, κ.λπ., πάντα βέβαια σε συνδυασμό με αποστραγγιστικά έργα. Επιχώματα σε συγκοινωνιακά έργα (οδικά και σιδηροδρομικά).

Μια πολύ σημαντική παράμετρος για την ασφάλεια των τεχνικών έργων αποτελεί η φέρουσα ικανότητα του εδάφους, η οποία σχετίζεται με τα εξής:

-Τη φέρουσα ικανότητα q , που αντιπροσωπεύει το φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας, το οποίο μπορεί να προκαλέσει θραύση στο έδαφος θεμελίωσης. Για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του εδάφους χρησιμοποιείται η μέθοδος του Terzaghi (1943).

-Επιτρεπόμενη τάση $q_s=q/F$ ονομάζεται το μέγιστο φορτίο ανά μονάδα επιφανείας εδάφους, το οποίο εφαρμόζεται στα πέδιλα θεμελίωσης χωρίς να προκύψουν παραμορφώσεις, ρηγματώσεις ή θραύση του έργου που θεμελιώνεται.

- Ωφέλιμο φορτίο ονομάζεται το ολικό φορτίο που μπορεί να μεταφέρει μια θεμελίωση, χωρίς να συμβεί καθίζηση.

Πολύ σημαντική διαδικασία, για την ασφάλεια των τεχνικών έργων, είναι η συμπύκνωση του εδάφους (Χρηστάρας και Χατζηαγγέλου, 2011), δηλαδή η αύξηση της πυκνότητάς του με μηχανικό τρόπο, με την οποία επιτυγχάνεται: αύξηση της αντίστασης του εδάφους, μείωση της διαπερατότητας του εδάφους, αύξηση της διατμητικής αντοχής και της φέρουσας ικανότητας και μείωση της συμπίεσότητας και επομένως των προκαλούμενων καθιζήσεων του εδάφους, σε συνθήκες εξωτερικής φόρτισης.

1.1.1 Τεχνική συμπεριφορά των γεωϋλικών

Το έδαφος αποτελεί φυσικό συσσωμάτωμα κόκκων, που διαχωρίζεται με μηχανική δράση (ανάδευση σε νερό). Το πέτρωμα αποτελεί συμπαγές συσσωμάτωμα κόκκων, που συνδέονται μεταξύ τους με συγκολλητική ύλη.

Μηχανικές ιδιότητες του εδάφους

- Πλαστικότητα: περιγράφει τη μη αναστρέψιμη παραμόρφωση του εδάφους, όταν ασκούνται σε αυτό εξωτερικές δυνάμεις.

- Συνεκτικότητα: περιγράφει τη συνοχή και συνάφεια του εδάφους.

- Όρια Atterberg ή όρια συνεκτικότητας:

-Όριο υδαρότητας: αναφέρεται στην περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία, για μετάπτωση από τη ρευστή (υδαρή) στην πλαστική κατάσταση.

- Όριο πλαστικότητας: αναφέρεται στην περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία για μετάπτωση από την πλαστική κατάσταση στην ημι-στερεή κατάσταση.

- Όριο συρρίκνωσης: αναφέρεται στην περιεκτικότητα του εδάφους με ποσοστό υγρασίας, κατά το οποίο ο όγκος του εδάφους παραμένει σταθερός σε συνεχιζόμενη ξήρανση.

- Ικανότητα διάβρωσης: περιγράφει την ευκολία μετακίνησης των εδαφικών υλικών κατά τη δράση διαφόρων παραγόντων (νερό, αέρα). Γενικά ισχύει ότι τα χαλαρά υλικά διαβρώνονται εύκολα ενώ τα συνεκτικά υλικά δύσκολα.

Υδραυλικές ιδιότητες

- Διαπερατότητα-Υδροπερατότητα: Είναι ένας γενικός όρος που περιγράφει την ικανότητα ενός πορώδους μέσου να επιτρέπει την κίνηση υγρού μέσα σε αυτό. Η παράμετρος με την οποία περιγράφεται ονομάζεται υδροπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα (k), έχει διαστάσεις ταχύτητας LT⁻¹ και περιγράφεται από τον νόμο του Darcy, που θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως πολύ υδροπερατοί όταν $k \geq 10^{-1}$ m/s, υδροπερατοί όταν $10^{-6} < k < 10^{-1}$ m/s, λίγο υδροπερατοί όταν $10^{-9} < k < 10^{-6}$ m/s, και πρακτικά στεγανοί όταν $k \leq 10^{-9}$ m/s. Επίσης συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος εσωτερική διαπερατότητα k_s , που σχετίζεται με την εσωτερική δομή του γεωλογικού σχηματισμού. Συνδέεται με την υδραυλική αγωγιμότητα με την παρακάτω σχέση: $k_s = k \cdot \mu / \gamma$ όπου μ = το δυναμικό ιξώδες (μονάδες ML⁻¹T⁻¹ δηλ. N.s/m² ή poise $P = \text{dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$) και γ =το ειδικό βάρος του ρευστού (N/m³).

- Μεταβιβαστικότητα: Περιγράφει τον όγκο του υγρού που διέρχεται από τη μοναδιαία διατομή υδροφόρου στρώματος και αποδίδεται από τη σχέση $T = k \cdot D$, όπου k =υδραυλική αγωγιμότητα και D =πάχος υδροφόρου στρώματος.

- Αποθηκευτικότητα: Περιγράφει τον όγκο του υγρού που λαμβάνεται ή αποθηκεύεται από το υδροφόρο στρώμα. Αποδίδεται από τον συντελεστή εναποθήκευσης $S = \Delta V / (A \cdot \Delta h)$, όπου ΔV είναι ο όγκος νερού που απελευθερώνεται (ή προστίθεται) από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας A , εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης (ή αύξησης) του φορτίου Δh (Καββαδάς και Πανταζίδου, 2007).

Αποσάθρωση και τεχνική συμπεριφορά των γεωυλικών

Η αποσάθρωση των πετρωμάτων αποτελεί σημαντική παράμετρο στην αξιολόγηση της τεχνικής συμπεριφοράς των γεωυλικών (εδάφη και πετρώματα), διότι σχετίζεται με την ασφάλεια του επιφανειακού ή υπόγειου έργου που κατασκευάζεται. Προφανώς η αξιολόγηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των γεωυλικών περιλαμβάνει και άλλες παραμέτρους, όπως για παράδειγμα την κατηγορία του πετρώματος, τον βαθμό του κατακερματισμού του, την κοκκομετρία

του και την αντοχή του. Ο βαθμός κατακερματισμού του πετρώματος σχετίζεται άμεσα με την αποσάθρωσή του. Όσο πιο κατακερματισμένος είναι ένας γεωλογικός σχηματισμός τόσο αυξάνει ο βαθμός της αποσάθρωσής του, επειδή διευκολύνεται η δράση των παραγόντων (π.χ. νερό) που την προκαλούν. Το υλικό της αποσάθρωσης είτε αποτίθεται κοντά στο μητρικό (ελλούβιο) είτε μεταφέρεται με τη βοήθεια του αέρα ή του νερού και αποτίθεται σε απομακρυσμένη περιοχή (αλλούβιο). Σε περιπτώσεις θεμελίωσης τεχνικών έργων θα πρέπει να γίνεται εξυγίανση τέτοιων εδαφών ή απομάκρυνση αν έχουν μικρό πάχος ή ακόμη και να μεταφέρεται το φορτίο της ανωδομής σε μεγαλύτερα βάθη.

1.2 Αστάθεια γεωλογικών σχηματισμών (καθιζήσεις-κατολισθήσεις)

Οι καθιζήσεις και οι κατολισθήσεις εντάσσονται στα πιο γνωστά και συχνότερα φαινόμενα που συνδέονται με την αστάθεια του γεωυλικού. Στις Εικόνες 2 και 3 που ακολουθούν παρουσιάζονται 2 χαρακτηριστικά παραδείγματα από τον Ελλαδικό χώρο.



Εικόνα 2 Καθίζηση λόγω Βροχόπτωσης στο δήμο Μεγαλόπολης (πηγή: iefimerida.gr)

Εικόνα 3 Κατολίσθηση λόγω Σεισμού στην παραλία Μύρτος, Κεφαλονιά

1.2.1 Καθιζήσεις

Καθίζηση ονομάζεται η υποχώρηση ή παραμόρφωση του εδάφους χωρίς πλευρική διόγκωση, η οποία προκαλείται από το βάρος εδρασμένου, πάνω σε αυτό, τεχνικού έργου. Μπορεί βέβαια να συμβεί καθίζηση και σε περίπτωση υπεράντλησης του υδροφόρου στρώματος ή υπόγειας διάβρωσης. Αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα στο έδαφος στην περιοχή της φόρτισης είναι η σταδιακή

αναδιάταξη των κόκκων του και η απομάκρυνση του νερού από τους πόρους του εδάφους. Το φαινόμενο της καθίζησης του εδάφους συνδέεται με διάφορους γεωλογικούς και γεωτεχνικούς παράγοντες, τη μορφολογική δομή της ευρύτερης περιοχής έδρασης του τεχνικού έργου, τις βροχοπτώσεις, τη σεισμικότητα αλλά και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου.

Οι καθιζήσεις διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Γενικές ή ολικές καθιζήσεις, κατά τις οποίες το έδαφος υποχωρεί ομοιόμορφα και «συμπαράσφύρει» ομοιόμορφα το υπερκείμενο έργο. Σε αυτή την περίπτωση, οι ρωγμές που δημιουργούνται στο τεχνικό έργο είναι συνήθως λίγες και μικρές.

- Διαφορικές καθιζήσεις, κατά τις οποίες το έδαφος υποχωρεί ανομοιόμορφα, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται συνήθως πολλές και μεγάλες ρωγμές στο τεχνικό έργο. Οι διαφορικές καθιζήσεις, σύμφωνα με τους Λέκκα και Κράνη (2001), είναι συχνό φαινόμενο που εκδηλώνεται εκατέρωθεν των ρηγμάτων και των ρηξιγενών ζωνών. Οι διαφορικές καθιζήσεις μπορεί να οφείλονται σε: παρουσία διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών εκατέρωθεν του ρήγματος, παρουσία τεκτονισμένων πετρωμάτων κατά μήκος της ρηξιγενούς ζώνης, διαφοροποίηση των γεωτεχνικών συνθηκών εκατέρωθεν του ρήγματος, και διαφοροποίηση των υδρογεωλογικών συνθηκών. Οι παραπάνω συγγραφείς, σε ό,τι αφορά την έρευνα σε περιοχές που αντιμετωπίζουν τέτοιου είδους πρόβλημα, προτείνουν: (i) γεωλογική χαρτογράφηση σε λεπτομερή κλίμακα, (ii) γεωτεχνική χαρτογράφηση, (iii) διερεύνηση των υδρογεωλογικών συνθηκών, (iv) επιτόπιες και εργαστηριακές γεωτεχνικές εργασίες και (v) υπολογισμό των αναμενόμενων καθιζήσεων (στατικών – δυναμικών) κατά μήκος ή εκατέρωθεν των ρηγμάτων.

1.2.2 Κατολίσθηση

Κατολίσθηση σύμφωνα με τον Terzaghi (1950) είναι «μια γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος, υπολειμματικού εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω». Η κατολίσθηση αφορά μικρή ή μεγάλη μεταβολή της επιφάνειας φυσικού ή τεχνητού πρανούς, η οποία συνοδεύεται από μετακίνηση υλικού. Μπορεί επίσης να συμβεί αργή/απότομη ρήξη ή και όχι της συνέχειας της επιφάνειας του φυσικού ή τεχνητού πρανούς, προερχόμενη από δυνάμεις βαρύτητας. Τα αίτια της κατολίσθησης μπορεί να είναι φυσικά ή τεχνικά. Την κατολίσθηση θα τη δούμε αναλυτικά παρακάτω στους μηχανισμούς αστοχίας των πρανών.

Οι παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων είναι οι εξής:

Εδαφικές συνθήκες: χαμηλής αντοχής πλαστικό υλικό, ευαίσθητο υλικό, υλικό επιρρεπές σε θραύση, αποσαθρωμένο υλικό, κατατμημένο υλικό, βραχομάζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών, διαφορές στην υδροπερατότητα, διαφορές στη δυσκαμψία (στιφρό ή πυκνό υλικό υπερκείμενο πλαστικού υλικού).

Γεωμορφολογικές διεργασίες: τεκτονική ανύψωση, ανύψωση λόγω ηφαιστείου, επίδραση παγετώννα, ποτάμια, θαλάσσια ή παγετώδη διάβρωση της βάσης του πρανούς, διάβρωση των πλευρών του πρανούς, εσωτερική διάβρωση, φόρτιση από απόθεση υλικού στη στέψη του πρανούς, απομάκρυνση φυτοκάλυψης.

Φυσικές διεργασίες: μικρής διάρκειας ραγδαία βροχόπτωση ή παρατεταμένη μεγάλη έντασης βροχόπτωση, ταχύ λιώσιμο χιονιού, γρήγορη πτώση στάθμης νερού μετά από πλημμύρες, παλίρροιες, ή διάρρηξη φραγμάτων, σεισμοί, εκρήξεις ηφαιστείων, διάρρηξη λιμνών σε κρατήρες ηφαιστείων, λιώσιμο παγωμένου εδάφους, αποσάθρωση λόγω παγετού, αποσάθρωση από διόγκωση και συρρίκνωση εδαφών.

Ανθρωπογενείς διεργασίες: εκσκαφές στο πόδι πρανούς, φόρτιση στο μέτωπο ή πάνω από τη στέψη πρανούς, ταπείνωση της στάθμης σε ταμειυτήρες, άρδευση, κακή συντήρηση αποστραγγιστικών έργων, διαρροή νερών από τεχνικά έργα, αποψίλωση, δημιουργία χωματερών, τεχνητές δονήσεις.

1.3 Πρανή

Πρανή ονομάζονται οι κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί του εδάφους ή του βράχου. Τα πρανή παρουσιάζουν αστάθεια λόγω παρουσίας διατμητικών τάσεων και μόνο από την κλίση των σχηματισμών. Η βαρύτητα προκαλεί την τάση οι εδαφικές μάζες που βρίσκονται πίσω από την κεκλιμένη επιφάνεια να μετακινηθούν προς τα κατώτερα επίπεδα.

Τα πρανή διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Σε φυσικά πρανή, όπως αυτό στην Εικόνα 4, τα οποία εμφανίζονται στη δύση με τη μορφή συσσωρευμένης εδαφικής μάζας υπό κλίση, έχουν δημιουργηθεί σε βάθος χρόνου και είναι αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Και σε τεχνητά πρανή που συναντώνται σε γεωτεχνικά και μεταλλευτικά έργα και προκύπτουν από την εκσκαφή του φυσικού εδάφους (ορύγματα) ή από την εναπόθεση εδαφικού υλικού (επιχώματα).



Εικόνα 4 Φυσικά Πρανή

Τα πρανή βιώνουν διάφορες καταστάσεις ισορροπίας που κυμαίνονται από ευσταθείς έως οριακά ευσταθείς και ασταθείς. Η αστοχία των πρανών είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο και αναπόσπαστο κομμάτι της γεωλογικής και γεωτεχνικής ιστορίας κάθε περιοχής. Η ευστάθεια των πρανών αποτελεί σημαντικό πρόβλημα των εδαφομηχανικών εδώ και πολλές δεκαετίες καθώς εμπλέκονται πολλοί παράγοντες επιρροής του φαινομένου της αστοχίας. Για αυτό το λόγο η ανάγκη για διερεύνηση και ανάπτυξη βέλτιστων τρόπων επίλυσης και πρόβλεψης αστοχίας στα πρανή συνεχώς αυξάνεται.

1.3.1 Ανάλυση Ευστάθειας

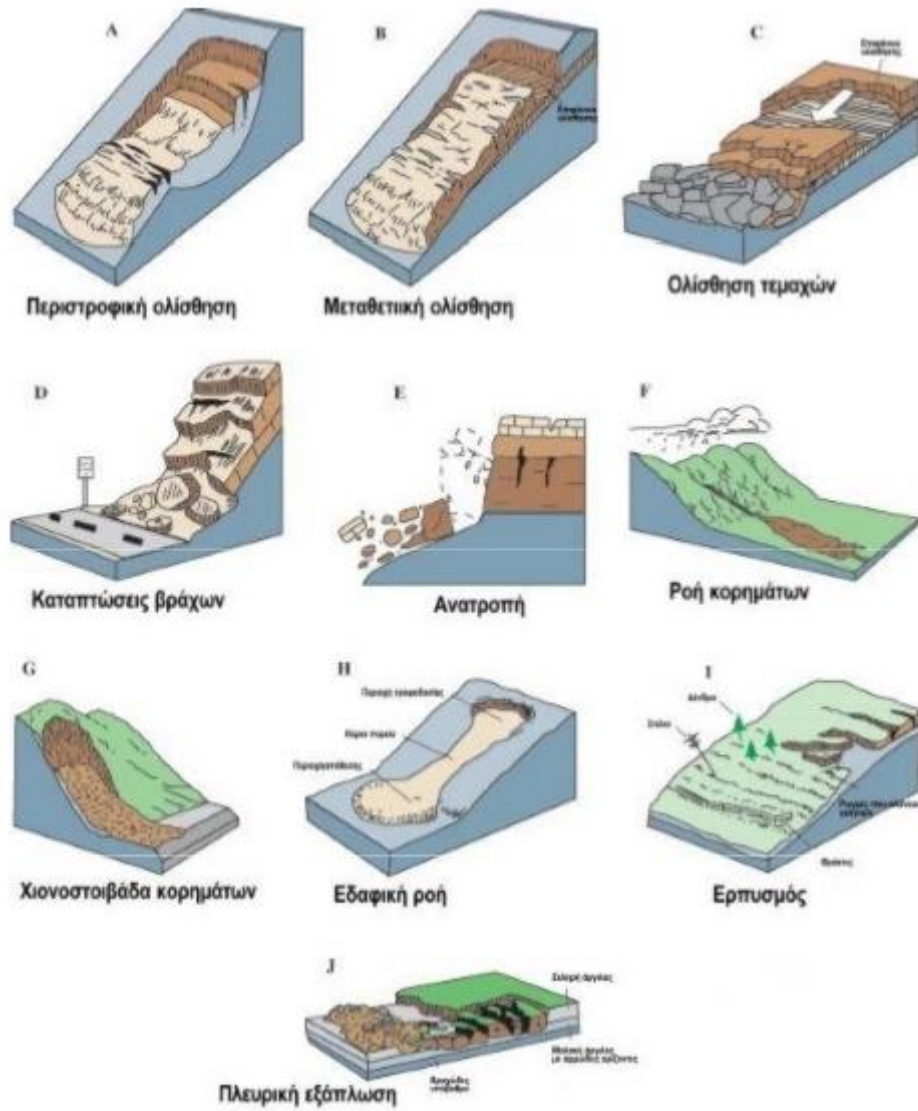
Για την ανάλυση της ευστάθειας πρέπει να ακολουθηθούν τα εξής βήματα:

- Να γίνει αναγνώριση των γεωμετρικών, γεωλογικών, και μορφολογικών χαρακτηριστικών της αστοχίας. Δηλαδή, αναγνώριση του μηχανισμού εκδήλωσης της αστοχίας.
- Προσδιορισμός των φυσικομηχανικών παραμέτρων των σχηματισμών.
- Επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ανάλυσης ευστάθειας
- Συσχέτιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με τα δεδομένα των επιτόπου παρατηρήσεων.

Έλεγχος αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της επίλυσης.





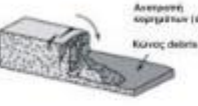


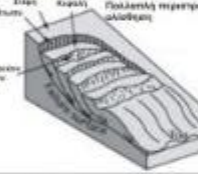

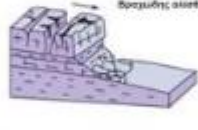


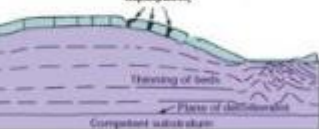




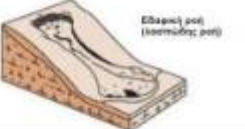

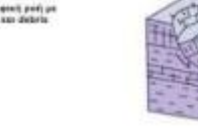
1.3.1.1 Μηχανισμοί Αστοχίας Πρανών

Τα πιο συχνά και κατ' επέκταση τα κύρια είδη των μηχανισμών αστοχίας, φαίνονται στην εικόνα 1 που ακολουθεί και συμπεριλαμβάνουν την Περιστροφική και Μεταθετική ολίσθηση, την ολίσθηση τεμαχών, την Κατάπτωση Βράχων, την Ανατροπή, τη Ροή ή τη Χιονοστιβάδα Κορημάτων, την Εδαφική Ροή τον Ερπυσμό και τη Πλευρική εξάπλωση.



Εικόνα 5 Είδη μηχανισμών αστοχίας

Στην Εικόνα 6 που ακολουθεί, φαίνεται μια πιο αναλυτική κατάταξη των μηχανισμών αστοχίας κατά Varnes (1978).

Υλικό	Βράχος	Debris	Έδαφος
Τύπος αλυσίδας			
ΚΑΤΑΠΤΩΣΕΙΣ	 Κατάπτωση βράχων	 Κατάπτωση κορμητών (debris) Κοπήματα Κύμας debris	 Έδαφος κατάπτωσης Κολλήματα Κύμας debris
ΑΝΑΤΡΟΠΕΣ	 Ανατροπή βράχων	 Ανατροπή κορμητών (αυτίλι) Κύμας debris	 Cracks Ανατροπή εδάφους Debris cover
ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	 Μηχανική περιστροφική αλυσίδα	 Διαρ. κύμα Καύση Εξολισθητή περιστροφική αλυσίδα Απορροή υγρού	 Διεδομείς περιστροφικές αλυσίδες
	 Μεταθετικές (Επίπεδες)	 Ολισθητή κορμητών (αυτίλι)	 Έδαφος ολισθητή
ΕΞΑΠΤΩΣΕΙΣ	 Ερόδος Χαμηλύνσεις Αργαλούς ηχηστάτες Thinning of beds Flats of disintegration Constant water table	 E.g. Πρωτογενή κοιλώδες λόγω διάδοσης και κορυφαία κλασική	 Έδαφος εξόχωση
ΡΟΕΣ	 Παρατακτάτος ροή debris	 Ροή κορμητόν debris	 Έδαφος ροή (κορμητός ροή)
ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ	 P.χ. Κατάπτωση - εδαφική ροή με καταπτώσεις βράχων και έδαφος	 P.χ. Συνθετή μηχανική, μηχανική παρατηρητή/μηχανική μεταθετική αλυσίδα με μεταβολή σε εδαφική ροή στην κορυφή	

Εικόνα 6 Τύποι κατολισθήσεων (Varnes1978, τροποποιημένο από τους Cruden & Varnes 1996)

1.3.1.2 Ταξινόμηση των Κατολισθητικών Φαινομένων

1. Παράμετροι ταξινόμησης

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορα συστήματα ταξινόμησης των Κατολισθητικών Φαινομένων βασισμένα κυρίως σε μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- τύπος μετακινούμενου υλικού
- τύπος-μορφή μετακίνησης

- περιεχόμενη υγρασία-νερό
- ταχύτητα κίνησης
- αίτιο και έναυσμα κίνησης (δυναμικό-στατικό φορτίο, πίεση νερού, ανθρώπινος παράγοντας)
- περιβάλλον μετακίνησης (ξηρά, θάλασσα, λίμνη)
- γεωμετρία και μορφολογία δημιουργούμενης σταθερής επιφάνειας
- καθεστώς φυτοκάλυψης και χρήσης γης
- μέγεθος και σπουδαιότητα
- σχέση με ενεργότητα (ενεργή κατολίσθηση, ανενεργή, παλιά)
- ακολουθία μηχανισμών από την αρχή ως το τέλος της μετακίνησης
- κλιματικές συνθήκες.

- το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης σε αβαθείς (shallow) και βαθιές (deep-seated). Οι βαθιές κατολισθήσεις περιλαμβάνουν συνήθως μεγάλου πάχους βραχομάζες ή τμήμα από το βραχώδες υπόβαθρο (bedrock) πρηνών ταυτόχρονα με το επιφανειακό εδαφικό τους κάλυμμα (συνήθως μανδύας αποσάθρωσης) και είναι περιστροφικές ολισθήσεις.

Βασικά συστήματα ταξινόμησης

Τα δύο πιο γνωστά συστήματα ταξινόμησης των κατολισθήσεων, που εξελίχθηκαν βέβαια στην πορεία του χρόνου και είναι γενικότερα αποδεκτά σήμερα, είναι αυτά που προτάθηκαν από τον J.N. Hutchinson (1968) και D.J. Varnes (1978). Και τα δύο βασίζονται στις παρακάτω τέσσερις κύριες παραμέτρους:

- α. τύπος κίνησης, (5 τύποι: ολισθήσεις, καταπτώσεις, ανατροπές, πλευρικές εξαπλώσεις, ροές-ρεύματα)
- β. τύπος υλικού, (3 τύποι: βραχώδες, εδαφικό, κορήματα),
- γ. ταχύτητα κίνησης, (7 φάσματα τιμών: από εξαιρετικά ταχεία 5m/sec, έως εξαιρετικά αργή $\leq 50\text{mm}/\text{έτος}$)
- δ. περιεχόμενη υγρασία. (4 κατηγορίες: ξηρή κατάσταση, παρουσία υγρασίας αλλά όχι κινούμενο νερό, σημαντική παρουσία νερού κινούμενου ή επιφανειακά λιμνάζοντος, και πλήρως κορεσμένο με νερό υλικό που ρέει σαν ρευστό σε μικρές κλίσεις πρηνούς)

Σημείωση: Ο τύπος κίνησης και ο τύπος υλικού είναι τα απαραίτητα συστατικά του ονόματος (forming names) κάθε τύπου κατολισθητικού φαινομένου. Π.χ. ολίσθηση κορημάτων, κατάπτωση βράχων, ροή γαιών, κλπ.

Παρά τις αρχικές τους διαφορές τα συστήματα αυτά συνέκλιναν σταδιακά και χρησιμοποιούν σήμερα την ίδια βασικά ορολογία. Η παραμένουσα διαφορά έγκειται στο ότι το σύστημα του Varnes, είναι ίσως πιο εύκολο στην εφαρμογή, ενώ του Hutchinson έλκει περισσότερο το μηχανικό που ασχολείται με την ανάλυση της ευστάθειας του υπό μελέτη πρανούς (Crozier, 1986).

Το σύστημα ταξινόμησης του Varnes (1978) περιλαμβάνει όλους τους τύπους μετακίνησης που θα μπορούσαν να παρατηρηθούν σε πρανή (εκτός κλασικών καθιζήσεων) και όχι μόνο των κατολισθήσεων με τη στενή έννοια. Η κάθε ταξινομικός τύπος εκφράζεται από δύο ονόματα (forming names). Το πρώτο αναφέρεται στον τεχνικογεωλογικό τύπο του υλικού και το δεύτερο στον τεχνικογεωλογικό τύπο της κίνησης.

Έτσι, ανάλογα με τον τεχνικογεωλογικό τύπο του υλικού, διακρίνουμε:

- την κατηγορία των βραχωδών σχηματισμών (rock), όπου η κίνηση αναφέρεται είτε σε συμπαγή-μεμονωμένα τεμάχια, είτε σε βραχομάζα (rockmass) αποτελούμενη από σύνολο βραχωδών τεμαχίων διακεκριμένων μέσω δομικών ασυνεχειών (διακλάσεις, στρώσεις, κλπ) , και

- δύο κατηγορίες εδαφικών σχηματισμών : τα κορήματα (debris) με επικράτηση αδρομερούς-χονδρόκοκκου υλικού και τις γαίες (earth) με επικράτηση του λεπτομερούς-λεπτόκοκκου υλικού

Ανάλογα δε, με τον τύπο της κίνησης, διακρίνουμε:

- τις καταπτώσεις (falls)
- τις ανατροπές (topples)
- τις ολισθήσεις (slides)
- τις πλευρικές εξαπλώσεις (lateral spreads)
- τις ροές (flows)
- τις σύνθετες κινήσεις (complex)

Ας σημειωθεί τέλος ότι, ο τύπος της σύνθετης κατολίθησης δεν εμφανίζεται στην επίσημη, ισχύουσα σήμερα ταξινόμηση, παρά το γεγονός ότι οι περισσότερες κατολισθητικές κινήσεις είναι σύνθετες. Δηλαδή, συνδυάζουν περισσότερες του ενός τύπου κινήσεις, πλην όμως, σχεδόν πάντοτε ένας τύπος είναι ο χαρακτηριστικός που επικρατεί.

Ο Erskine (1973), παίρνοντας υπόψη περιβαλλοντολογικά στοιχεία και τις απαιτήσεις για επιμέρους χρήσεις γης, εισάγει πρώτος το κριτήριο της ενεργότητας τους (activity), με βάση το οποίο ταξινομεί τις κατολισθήσεις στις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες:

- σταθεροποιημένες κατολισθήσεις (αυτές που δεν έχουν ενδείξεις πρόσφατης ενεργοποίησης)
- πρόσφατα ενεργές κατολισθήσεις (αυτές όπου εκδηλώνονται πρόσφατες κινήσεις, χωρίς προηγούμενο παρελθόν)
- κατολισθήσεις που ανέδρασαν πρόσφατα (μετά από μία περίοδο σταθεροποίησης) και
- ενεργές κατολισθήσεις (αυτές με μακρύ, χρονικά, παρελθόν μετακινήσεων που δείχνουν να μην έχουν σταθεροποιηθεί).

Πίνακας 4 Ταξινόμηση μετακίνησης πρανών κατά Varnes (1978)

Τύπος Κίνησης		Τύπος Σχηματισμών			
		Σχηματισμοί Υποβάθρου	Εδαφικά Υλικά		
			Κυρίως Αδρομερή	Κυρίως Λεπτομερή	
Καταπτώσεις	Αφορούν κυρίως βραχώδεις μάζες ποικίλων μεγεθών που μετακινούνται λόγω βαρύτητας μετά από απώλεια στήριξης. Γρήγορη κίνηση	Καταπτώσεις Βραχών	Καταπτώσεις Αδρομερών Υλικών	Καταπτώσεις Εδαφών	
Ανατροπές		Ανατροπές Βραχών	Ανατροπές Συνεκτικών Αδρομερών Υλικών	Ανατροπές Εδαφών	
Ολισθήσεις	Περιτροφικές Κυκλική επιφάνεια, με θραύσεις στην κεφαλή σημαντικού πολλές φορές άλματος και συσσώρευση υλικών στον πόδα. Αφορούν κυρίως εδαφικούς σχηματισμούς.	Λίγες Ενότητες	Ολισθήσεις Βραχών	Ολισθήσεις Αδρομερών Υλικών	Ολισθήσεις Εδαφών
	Μεταθετικές Κατά μήκος σχεδόν επίπεδης επιφάνειας και αφορούν κύρια βραχώδεις μάζες που ολισθαίνουν σαν μπλοκ ή σαν κατακερματισμένα τεμάχια που συνήθως πλέουν μέσα σε εδαφικό υλικό.		Ολισθήσεις Βραχωδών Τεμαχίων	Ολισθήσεις Τεμαχίων Αδρομερών Υλικών	Ολισθήσεις Τεμαχίων Εδαφών
		Πολλές Ενότητες	Ολισθήσεις Βραχών	Ολισθήσεις Αδρομερών Υλικών	Ολισθήσεις Εδαφών
Πλευρικές (Υποοριζόντιες, Εξαπλώσεις)		Εξαπλώσεις Βραχωδών Μαζών	Εξαπλώσεις Συνεκτικών Αδρομερών Υλικών	Εξαπλώσεις Εδαφών	
Ροές	Γρήγορες ή και αργές μετακινήσεις ρευστοποιηθέντων εδαφικών μαζών. Η ρευστοποίηση εφικτή κυρίως μετά από ισχυρές βροχοπτώσεις. Χιονοστιβάδες φυσικών κορημάτων (προϊόντων αποσάθρωσης κυρίως βραχωδών σχηματισμών). Τεχνητά κορημάτα, τα προϊόντα εκοκαφών διάνοιξης δρόμων ή άλλων τεχνητικών έργων που συνήθως αποτίθενται στα πρανή χωρίς προστασία. Οι ροές στα τελευταία οδηγούν τα υλικά αυτά στις κοίτες των ρεμάτων και σε περπτώσεις πλημμυρών προκαλούν καταστροφικά φαινόμενα σε οικισμούς.	Ροές Βραχωδών Μαζών	Ροές Αδρομερών Υλικών	Ροές Εδαφών	
Μικτές Μετακινήσεις		Συνδυασμός Δύο ή Και περισσότερων Τύπων Κίνησης			
Ερπυσμοί	Αργές έως πολύ αργές παραμορφώσεις στο χώρο έως πολύ αργές ολισθήσεις εδαφικών μαζών, που αν δεν αντιμετωπισθούν εξελίσσονται σε περιστροφικές ολισθήσεις.				

Οι Zaruba - Mencl (1976,1982) χρησιμοποιώντας την εμπειρία της γεωλογικής δομής της χώρας τους κατέταξαν τις κατολισθητικές κινήσεις σε δύο κατηγορίες γεωλογικού υλικού:

- αυτές που αφορούν τους εδαφικούς σχηματισμούς του τεταρτογενούς καλύμματος (χαλαρές αποθέσεις, ζώνη αποσάθρωσης ή κερματισμού), και

- αυτές που αφορούν τη βραχομάζα του προ-τεταρτογενούς υποβάθρου (διάφορες κατηγορίες γεωλογικής δομής)

Οι τύποι μετακίνησης που αντιστοιχούν σ' αυτές είναι οι εξής:

περιστροφικές, μεταθετικές-στρωματοειδείς, καταπτώσεις, ροές-ρεύματα, ερπυσμοί, συνθλίψεις-εξαπλώσεις μαλακών πετρωμάτων.

Η ταξινόμηση αυτή είναι σχετικά απλή και χρησιμοποιήθηκε αρκετά στην Ελλάδα επειδή θεωρείται ότι ανταποκρίνεται στις γεωλογικές συνθήκες της χώρας μας (Κούκης, 1980). Οι ασυνέχειες των επιφανειών ελέγχονται κυρίως από προϋπάρχουσες επιφάνειες ασυνέχειας (π.χ. στρώση, διάρρηξη, κλ.π.).

- Οι περιστροφικές κατολισθήσεις είναι ολισθήσεις επί κυκλοειδούς τομής επιφανειών και εκδηλώνονται κυρίως σε σχηματισμούς χαλαρούς ή με μέτρια διαγένεση και είναι γενικά σημαντικού πάχους. Οι κατολισθήσεις επί σύνθετων

- Καταπτώσεις βράχων παρατηρούνται σε πολύ απότομα πρηνή και βραχώδεις ακτές. Πρόκειται για αποκολλήσεις τεμαχών και στη συνέχεια κίνηση στην επιφάνεια του πρηνούς ή ελεύθερη πτώση στο κενό.

- Οι ολισθήσεις βραχωδών μαζών εκδηλώνονται κατά μήκος προετοιμασμένων (μίας, δύο-σφηνοειδείς ή και περισσότερων) επιφανειών ασυνέχειας που κλίνουν προς το πρηνές.

- Οι μεταθετικές ή στρωματοειδείς κατολισθήσεις εκδηλώνονται σε πρηνή, όπου τα κορήματα και τα υλικά αποσάθρωσης επικάθονται σε αργιλομαργαϊκά ή σχιστολιθικά πετρώματα ή όπου το ίδιο το πέτρωμα είναι σε κατάσταση κερματισμού και αποσάθρωσης. Το πάχος του μετακινούμενου υλικού είναι γενικά μικρό. Το επίπεδο ολίσθησης είναι περίπου παράλληλο προς το φυσικό πρηνές. Ανάλογες κατολισθητικές κινήσεις εκδηλώνονται σε ιζηματογενείς σχηματισμούς με σαφώς εκφρασμένη στρώση και κλίση στρωμάτων ομόρροπη προς το πρηνές.

- Οι συνθλίψεις-εξαπλώσεις μαλακών πετρωμάτων, αφορούν πρηνή δομημένα από σύνθετους στρωσιγενείς γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως ο φλύσχης, όπου στρώματα μαλακών πετρωμάτων αργιλοπηλιτικής σύστασης παρεμβάλλονται μεταξύ σκληρών ανθεκτικών πετρωμάτων. Η υπέρβαση της κρίσιμης μηχανικής αντοχής των μαλακών πετρωμάτων (λόγω του βάρους των υπερκείμενων ή και λόγω αποσάθρωσης) έχει σαν πρώτο αποτέλεσμα την θραύση ή λέπτυνση του πάχους και ταπείνωση της άνω επιφάνειας με ταυτόχρονη πλευρική τους εξάπλωση (spreading). Συνοδευτικό

αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η αστοχία και μετακίνηση προς τα κάτω της συνολικής βραχομάζας του πρανούς αναφοράς.

- Σε ρεύμα γαιών μπορεί να μεταπέσει οποιαδήποτε κατολίσθηση, όταν τα εδαφικά υλικά διαβραχούν, ώστε να επέλθει κορεσμός τους, που έχει σαν συνέπεια την αύξηση του φορτίου, τη μείωση της διατμητικής αντοχής και της τριβής. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη κινητική ενέργεια της ολισθαίνουσας μάζας. Τα ρεύματα κορημάτων θεωρούνται περισσότερο σαν μεταφερόμενο υλικό με συνεχή αλλαγή μετώπου κίνησης και εσωτερική αναδιάταξη του υλικού και όχι σαν ολίσθηση μάζας. Πρόκειται για την γνωστή ταχεία κίνηση πλευρικών κορημάτων φυσικών κλιτύων.

- Ροή από υγροποίηση της άμμου ή παρεμφερούς κοκκομετρικά αδρομερούς υλικού, μπορεί να προκληθεί τόσο από απότομες μεταβολές της στάθμης του υπόγειου νερού όσο και από δονήσεις. Απόπλυση στρώματος άμμου και ροής είναι δυνατή όταν αμμώδες στρώμα παρεμβάλλεται μεταξύ δύο υδατοστεγών συνεκτικών εδαφικών στρώσεων.

Οι Hoek και Bray (1977) στην ταξινόμησή τους, που έγινε ευρέως αποδεκτή, διακρίνουν τύπους μετακίνησης που επιμερίζονται στις (δύο) κατηγορίες των απλών και σύνθετων θραύσεων και αφορούν βραχώδη πρανή

Στις απλές θραύσεις (ή αστοχίες: failures) ανήκουν:

- Επίπεδες ολισθήσεις
- Κυκλικές ολισθήσεις
- Ανατροπές τεμαχών
- Πτώσεις τεμαχών

Και στις σύνθετες θραύσεις (ή αστοχίες: failures)

- Σφηνοειδείς ολισθήσεις (ελεγχόμενες από δύο επιφάνειες)
- Ολισθήσεις και ανατροπές
- Προοδευτικές θραύσεις-μετακινήσεις

1.3.1.3 Ερπυσμός - Αργή κατολισθητική κίνηση

Ο όρος κατολίσθηση αποτελεί όνομα κάθε τύπου μετακίνησης βραχώδους, εδαφικής ή μικτής μάζας χαλαρών κλαστικών υλικών που δομεί ένα πρανές, στη διάρκεια της οποίας της οποίας το κέντρο βάρους (της μάζας) εκτελεί κίνηση με διεύθυνση προς την κατωφέρεια του πρανούς.

Επομένως, δεν τίθεται σήμερα κριτήριο ταχύτητας για να χαρακτηριστεί μια μετακίνηση γεωϊλικού στην κατωφέρεια ενός πρανούς ως κατολίσθηση.

Με βάση τις προτάσεις της ομάδας εργασίας της Διεθνούς Επιτροπής Τεχνικής Γεωλογίας και UNESCO (WP/WLI, 1993, b), οι κατολισθητικές κινήσεις διακρίνονται σε 7 κατηγορίες (φάσματα τιμών ταχύτητας), με τυπικές τιμές :

1. εξαιρετικά αργή, με τυπική ταχύτητα : <math>< 16\text{mm}/\text{έτος}</math>
2. πολύ αργή, « : 1,6 m/ έτος
3. αργή, « : 13 m/μήνα
4. μέτρια, « : 1,8 m/ώρα
5. γρήγορη, « : 3 m/λεπτό
6. πολύ γρήγορη, « : 5 m/δευτ.
7. εξαιρετικά γρήγορη « : >5 m/δευτ.

Μια κατολισθητική κίνηση που ανήκει στις 1η και 2η κατηγορίες ταχύτητας και γίνεται δύσκολα έως καθόλου αντιληπτή (παρά μόνο από ειδικά όργανα), έχει επικρατήσει να ονομάζεται ερπυσμός (creep).

Κεφάλαιο 2. Παράγοντες και διαδικασίες δημιουργίας - εκδήλωσης των Κατολισθήσεων

2.1 Συντελεστής Ασφάλειας ενός πρανούς

Για να γίνει κατανοητή η αιτιολογία και ο μηχανισμός εκδήλωσης των κατολισθήσεων, είναι σκόπιμο να εισαχθεί η έννοια του Συντελεστή Ασφάλειας (ΣΑ).

1. Κάθε πρανός αποτελεί ένα πολύπλοκο δυναμικό σύστημα του οποίου η συμπεριφορά σχετικά με την κατάσταση ευστάθειάς του μεταβάλλεται συνεχώς στην πορεία του χρόνου.

2. Σε κάθε χρονική στιγμή, η κατάσταση ή ο βαθμός ευστάθειας του πρανούς εκφράζεται ποσοτικά, από την αριθμητική τιμή του Συντελεστή Ασφάλειας ΣΑ. Ο Συντελεστής Ασφάλειας είναι ο λόγος της διατμητικής αντοχής της μάζας του γεωλογικού του υλικού (εδαφική μάζα ή βραχομάζα ή μεικτού τύπου μάζα) του (δηλαδή της αντίστασης στη μετακίνηση της κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών, προς τις επικρατούσες σ' αυτήν διατμητικές τάσεις (εγγενείς ή επιβαλλόμενες που επικουρούν το έργο της βαρύτητας). Δηλαδή, $\Sigma A = s/\tau$, όπου s είναι η διατμητική αντοχή και τ οι διατμητικές τάσεις. Όταν έχουμε $\Sigma A = 1$, σημαίνει ότι βρισκόμαστε σε κατάσταση οριακής ή ασταθούς ισορροπίας, και οδηγούμαστε σε εκδήλωση κατολίσθησης. Βεβαίως, ο ΣΑ δεν είναι ο ίδιος κατά μήκος μιας επιφάνειας d διάτμησης-ολίσθησης ενός εδαφικού, για παράδειγμα πρανούς. Σωστότερη επομένως είναι η έκφραση $\Sigma A = \int s dl / \int \tau dl$, όπου l είναι το μήκος της επιφάνειας αναφοράς του ΣΑ.

Διαδικασίες εκδήλωσης των Κατολισθήσεων

Με βάση τα προαναφερθέντα στα 1 και 2, μπορούμε να πούμε ότι η εκδήλωση κάθε μορφής κατολισθητικής κίνησης, σε ορισμένη χρονική στιγμή, στο πρανός συντελείται όταν επέρχεται:

- είτε μείωση της εγγενούς-διαθέσιμης διατμητικής αντοχής, κάτω από το κρίσιμο όριο (κάτω κατώφλι, που ισούται με τις υπάρχουσες, τη δεδομένη χρονική στιγμή, διατμητικές τάσεις)
- είτε αύξηση των εξασκούμενων διατμητικών τάσεων, πάνω από το κρίσιμο όριο (άνω κατώφλι, που ισούται με τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή)
- είτε ταυτόχρονη ανοδική πορεία των τάσεων και καθοδική της αντοχής μέχρι την κρίσιμη συνάντηση-εξίσωσή τους, που εκφράζει το όριο της ασταθούς ισορροπίας και την υπέρβασή του.

Οι προαναφερθείσες διαδικασίες που οδηγούν στην εκδήλωση μια κατολισθητικής κίνησης, μπορεί να συντελεστούν σε μακρύ ή πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Το διάστημα αυτό ονομάζεται και χρόνος ωρίμανσης μιας κατολισθητικής κίνησης.

2.3.2.2 Διάκριση των παραγόντων εκδήλωσης των Κατολισθήσεων

Οι παράγοντες που ενεργοποιούν-ελέγχουν τις διαδικασίες εκδήλωσης των Κατολισθήσεων διακρίνονται σε εσωτερικούς (εγγενή αίτια) και εξωτερικούς παράγοντες (προέλευση εκτός πρηνούς). Οι εξωτερικής προέλευσης παράγοντες διακρίνονται σε φυσικούς και ανθρωπογενείς. Όταν οι παράγοντες αυτοί (είτε φυσικοί είτε ανθρωπογενείς), δρουν σε σχετικά μακρύ χρονικό διάστημα, προπαρασκευάζοντας την εκδήλωση των κατολισθήσεων, ονομάζονται αιτιώδεις παράγοντες ή αίτια (causative factors or causes), ενώ, όταν δρουν σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα (ραγδαία επιδείνωση της ευστάθειας), ονομάζονται εναυσματικοί παράγοντες ή εναύσματα (triggering factors or triggers). Αποτελούν δηλαδή την αφορμή εκδήλωσης κατολίστεσης. Επομένως, η διάκριση των παραγόντων εκδήλωσης των κατολισθήσεων σε αιτιώδεις και εναυσματικούς είναι διάκριση με βάση το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δράσης – αποτελέσματος (cause-effect time).

Είναι ίσως προφανές να κατανοηθεί ότι: οι κατολισθήσεις μπορεί να έχουν πολλές αιτίες αλλά μόνο μία αφορμή (Cruden and Varnes 1996, Alexander 1992). Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου ένα κατολισθητικό φαινόμενο μπορεί να εκδηλωθεί χωρίς να έχει υπάρξει (εμφανώς τουλάχιστον) δράση ενός εναυσματικού παράγοντα. Στις περιπτώσεις αυτές η εκδήλωση της κατολίστεσης είναι αποτέλεσμα σχετικά μακρόχρονης σταδιακής μείωσης-υποβάθμισης της διατμητικής αντοχής του πρηνούς, λόγω εγγενών αιτιών. Π.χ. παρουσία ευαποσάθρωτων ορυκτολογικών υλικών που αποσαθρώνονται από τη δράση του νερού.

A. Αιτιώδεις παράγοντες δημιουργίας Κατολισθήσεων

1. Εσωτερικοί παράγοντες δημιουργίας

Οι εσωτερικοί παράγοντες που διευκολύνουν την δημιουργία-εκδήλωση των κατολισθήσεων αφορούν τα ιδιαίτερα εγγενή χαρακτηριστικά του γεωλογικού υλικού του πρηνούς είτε σε επίπεδο ορυκτολογικού-πετρολογικού υλικού (π.χ. παρουσία αργιλικών ορυκτών) είτε σε επίπεδο εδαφο-βραχο-μάζας (π.χ. ευνοϊκή εσωτερική γεωμετρία λόγω τεκτονισμού ή ιζηματογένεσης, παρουσία

Δ.Π.Μ.Σ Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη εναλλαγών σκληρών-μαλακών πετρωμάτων όπως στην περίπτωση των φλυσχικών σχηματισμών). Η παρουσία των παραγόντων αυτών διευκολύνει την δράση των εξωτερικών παραγόντων μέσω μηχανισμών αλληλεπίδρασης. Η κύρια συμβολή των εσωτερικών παραγόντων στην εκδήλωση κατολισθήσεων αναφέρεται στη μείωση της διατμητικής αντοχής της μάζας του πρανούς.

2. Εξωτερικοί παράγοντες δημιουργίας Κατολισθήσεων

Οι εξωτερικοί παράγοντες μπορούν να διακριθούν όπως προαναφέρθηκε σε ανθρωπογενείς (π.χ. εκσκαφή, φόρτιση στατική ή δυναμική, άρδευση, στο σώμα του πρανούς) και φυσικούς.

Οι τελευταίοι αναφέρονται κυρίως στις:

- κλιματικές διαδικασίες (όπως ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα κυρίως βροχόπτωση ή χιόνι, μεταβολές θερμοκρασίας, κλπ), και στις

- τεκτονικές-σεισμικές διαδικασίες.

- επίσης στη δράση φυτών και ζώων (μικρότερη σημασία-συμβολή).

Η δράση των εξωτερικών παραγόντων, τόσο των ανθρωπογενών όσο και των φυσικών προκαλεί σταδιακά (προπαρασκευή) ή ραγδαία (έναυσμα) την εκδήλωση κατολισθήσεων λόγω:

- είτε αύξησης των δρώντων διατμητικών τάσεων στη μάζα του πρανούς (in situ stresses),
-είτε μείωσης της μηχανικής αντοχής της.

- αίτια αύξησης των τάσεων (κυρίως μέσω αύξησης του ειδικού βάρους του γεωλογικού υλικού)

1. απώλεια στήριξης στις πλευρές ή στον πόδα του πρανούς. Οφειλόμενη στη δράση φυσικών φαινομένων (π.χ. χειμάρρια διάβρωση), ή σε ανθρωπινες ενέργειες (π.χ., εκσκαφή πόδα πρανούς)

2. επιβολή στατικών φορτίων στην κεφαλή ή στο σώμα του πρανούς. Είτε φυσικής προέλευσης (γεωλογικό υλικό από δράση φυσικής μορφογένεσης, ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, ανάπτυξη φυτικής μάζας, κ.λ.π.). Είτε ανθρωπογενούς προέλευσης (γεωϋλικά, μπάζα, απορρίμματα, δομικές κατασκευές, διαρροές νερού από κανάλια, ταμιευτήρες, δεξαμενές, σηπτικούς βόθρους και επιμέρους δίκτυα άρδευσης, ύδρευσης, αποχέτευσης).

3. επιβολή δυναμικών φορτίων στο σώμα του πρανούς, από δονήσεις φυσικής προέλευσης (σεισμοί, σεισμική κίνηση)) ή παραγόμενες τεχνητά (εκρήξεις, βαριά κυκλοφορία, βιομηχανική δραστηριότητα). Η έμπηξη πασσάλων μπορεί να προκαλέσει σημαντική δυναμική φόρτιση στο πρανός.

4. δράση τεκτονικών δυνάμεων, που προκαλούν ευνοϊκές για τη δράση της βαρύτητας, παραμορφώσεις της δομής και της μορφολογίας (ανόρθωση και κλίση : uplift or tilting) του πρανούς. Με συνεπαγόμενες αλυσιδωτές συνέπειες, την έκλυση δεσμευμένων τοπικά τάσεων, δημιουργία εφελκυστικών και διατμητικών ρωγμών και άρα την μηχανική χαλάρωση της βραχομάζας και τη διευκόλυνση της διόδου και αποσταθεροποιητικής δράσης του νερού (π.χ. Αύξηση υδραυλικής πίεσης ή τάσης πόρων, μηχανική και χημική αποσάθρωση-διάβρωση), σε μεγαλύτερη έκταση και βάθος εντός της μάζας του πρανούς (κυρίως στους βραχώδεις αλλά και στους εδαφικούς σχηματισμούς).

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, όταν ένα εξωτερικό αίτιο προκαλέσει κατολίσθηση, πρέπει να συμπεραθεί ότι προκάλεσε αύξηση στη διατμητική τάση κατά μήκος της πιθανής επιφανείας ολίσθησης μέχρι του σημείου της αστοχίας (εξίσωση μέσης διατμητικής τάσης και μέσης αντίστασης σε διάτμηση).

- αίτια μείωσης της αντοχής

Η μείωση της αντοχής διευκολύνεται (πρωτογενής αιτία) από την ενδεχόμενη παρουσία προαναφερθέντων εσωτερικών παραγόντων (εγγενή χαρακτηριστικά υλικού ή και μάζας). Προκύπτει δε, ως γνωστόν, έμμεσα μέσω της μείωσης των παραμέτρων συνοχής και τριβής, ή αύξησης της πίεσης νερού-αέρα των πόρων του υλικού (κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb). Τη μείωση αυτή προκαλεί η φυσικά (κυρίως κλιματικά) ή ανθρώπινα ελεγχόμενη παρουσία και ποσοτική μεταβολή του νερού και οι κλιματικά ελεγχόμενες ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές. Η παρουσία του στους πόρους του εδαφικού υλικού και τις ασυνέχειες του βραχώδους υλικού ενεργοποιεί μια σειρά πολύπλοκων και αλληλεξαρτώμενων φυσικών, φυσικοχημικών και χημικών διεργασιών που επιφέρουν είτε προοδευτική είτε ραγδαία υποβάθμιση της διατμητικής αντοχής του υλικού και συνολικά της μάζας του συστήματος του πρανούς. Οι διεργασίες αυτές είναι π.χ., ενυδάτωση και ιοντο-ανταλλαγή στο αργιλικό υλικό, χημική και μηχανική αποσάθρωση στο συνολικό υλικό. Παράλληλα οι απότομες μεταβολές και εναλλαγές της υγρασίας και θερμοκρασίας έχουν σαν αποτέλεσμα την (μέσω π.χ. συρρίκνωσης-διόγκωσης) δημιουργία ή διεύρυνση μικροασυνεχειών και ρωγμών με συνέπεια τη μείωση των παραμέτρων συνοχής και τριβής και άρα της διατμητικής αντοχής της μάζας του πρανούς.

- αίτια ταυτόχρονης αύξησης των διατμητικών τάσεων και μείωσης της διατμητικής αντοχής

Ιδιαίτερη περίπτωση, όπου έχουμε και αύξηση των διατμητικών τάσεων και μείωση της διατμητικής αντοχής, στα πρανή με λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό είναι η (ανθρωπογενής) απότομη πτώση (με ρυθμό τουλάχιστον μερικών μέτρων ανά ημέρα) στάθμης νερού σε ταμιευτήρες (λόγω

Δ.Π.Μ.Σ Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη ανομβρίας και ανάγκης χρήσης του ταμιευθέντος νερού) ή αντίστοιχη (κλιματικά ελεγχόμενη) σε άλλα επιφανειακά σώματα νερού (λίμνες, ποτάμια κ.λ.π.), αμέσως μετά από έντονες πλημμύρες (rapid draw-down) ή λιώσιμο χιονιού.

B. Εναυσματικοί παράγοντες (αφορμές) εκδήλωσης Κατολισθήσεων

1. έντονη βροχόπτωση

Η έντονη-ραγδαία βροχόπτωση (μεγάλο ύψος βροχής σε μικρό χρονικό διάστημα) αποτελεί βασικό εναυσματικό παράγοντα κατολισθητικών κινήσεων. Είναι γενικότερη διαπίστωση, ότι ακόμα και λίγες ώρες έντονης βροχόπτωσης (καταιγίδα) αποτελούν κατώφλια έναρξης πολλών τύπων αβαθών κατολισθητικών κινήσεων σε εδαφικούς σχηματισμούς ή σε αποσαθρωμένες ζώνες ή μανδύες βραχωδών σχηματισμών. Οι συνήθεις κατολισθητικοί τύποι που παρατηρούνται είναι αβαθείς περιστροφικές ή επίπεδες ολισθήσεις, και ροές (σε εδαφικό υλικό ή κορήματα) και οφείλονται στην κρίσιμη αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, με αποτέλεσμα την υπέρβαση της διατμητικής αντοχής και την αστοχία του πρανούς. Ταυτόχρονα η παρουσία του βάρους του νερού στο σώμα του πρανούς (εσωτερικά ή και εξωτερικά) αυξάνει τις προϋπάρχουσες επί τόπου τάσεις και διευκολύνει το έργο της βαρύτητας.

Πολλές μελέτες σε διάφορες περιοχές, εμφανίζουν συγκεκριμένες συσχετίσεις μεταξύ συνδυασμού τιμών κατωφλίων έντασης και διάρκειας βροχόπτωσης, και της εκδήλωσης συγκεκριμένων τύπων κατολισθητικών φαινομένων. Όμως, ιδιαίτερα σε περιοχές έντονης και συνεχούς παρουσίας φαινομένων αστάθειας, είναι προφανής η συνεχής μεταβολή του ανάγλυφου που συνεπάγεται αντίστοιχες μεταβολές των υδρολογικών, υδρογεωλογικών και τεχνικογεωλογικών παραμέτρων. Επομένως, είναι εύλογο να προκύπτουν συνεχείς ποσοτικές μεταβολές (χωρικές και χρονικές) της σχέσης μεταξύ κατωφλίων βροχόπτωσης και κατολισθητικών φαινομένων.

Για να εκδηλωθούν βαθιές κατολισθητικές κινήσεις (π.χ. μέχρι το βραχώδες υπόβαθρο) απαιτείται μεγάλης διάρκειας βροχόπτωση ώστε το νερό να έχει τον απαιτούμενο χρόνο να εισχωρήσει σε μεγάλο βάθος.

Παρατήρηση: Η δημιουργία λεπτής εδαφικής υδρόφοβης στρώσης λόγω πυρκαγιάς και η έλλειψη βλάστησης στις καμένες περιοχές, προκαλούν αυξημένη απορροή και εκδήλωση ροών λάσπης-κορημάτων και γενικότερη αστάθεια στις περιοχές αυτές.

2. λιώσιμο χιονιού

Το λιώσιμο του συσσωρευμένου στα πρανή χιονιού, αποτελεί σημαντικό εναυσματικό κατολισθητικό παράγοντα στις περιοχές υψηλού υψόμετρου. Μεγάλου πάχους κάλυμμα χιονιού τροφοδοτεί με νερό το πρανές για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι είναι ο χρόνος κατείσδυσης στις συνήθους διάρκειας βροχοπτώσεις και επομένως είναι αναμενόμενο να μεταφέρει την αποσταθεροποιητική του δράση σε βαθύτερες περιοχές της μάζας, διαβρέχοντας αλλά και διαπερνώντας τον τυχόν υπάρχοντα αποσαθρωμένο εδαφικό μανδύα. Η ενεργοποίηση των κατολισθητικών μηχανισμών είναι ταχύτερη και ευρύτερης έκτασης, όταν μετά έντονες χιονοπτώσεις ακολουθήσουν διαλείμματα αυξημένων θερμοκρασιών ή έντονων βροχοπτώσεων που επιταχύνουν ραγδαία το λιώσιμο του χιονιού και άρα αυξάνουν το ρυθμό φόρτισης του πρανούς με νερό. Αν κάτω από το στρώμα πάγου υπάρχει εδαφικός μανδύας, παρατηρούνται πολλές φορές φαινόμενα «λασπώματος» του υλικού ή εκδηλώνονται ροές παγωμένου εδάφους.

Σε ορισμένες περιπτώσεις το συσσωρευμένο χιόνι (ή πάγος) μπορεί να λειτουργήσει, προφανώς, και ως κρίσιμο (εναυσματικός παράγοντας) στατικό φορτίο στο σώμα του πρανούς.

3. απότομη πτώση ή άνοδος στάθμης νερού

1) Πτώση στάθμης.

Καταρχήν, η απότομη πτώση στάθμης του νερού (rapid draw-down) σε ταμειυτήρες και άλλα σώματα επιφανειακής παρουσίας νερού (λίμνες, ποταμοί, θάλασσα), είναι διαπιστωμένο πως αποτελεί εναυσματικό παράγοντα εκδήλωσης κατολισθητικών κινήσεων. Π.χ. η αργιλοπηλιτική φάση του φλύσχη είναι, αποδεδειγμένα, ιδιαίτερα επιρρεπής σε εκδηλώσεις κατολισθήσεων (π.χ. περίπτωση ταμειυτήρα Κρεμαστών).

Στην περιοχή του υλικού που βρίσκεται κάτω από τη στάθμη, η πίεση του νερού των πόρων είναι υδροστατική. Με την απότομη όμως πτώση της στάθμης, οι υφιστάμενες, στο χαμηλής περατότητας αργιλικό υλικό, υδροστατικές πιέσεις δεν εκτονώνονται γρήγορα, με συνέπεια να αυξηθούν δραματικά οι διατμητικές τάσεις. Όταν δε αυτές υπερβούν την αντοχή του υλικού επέρχεται αστοχία και εκδήλωση κατολισθητικών κινήσεων στο πρανές αναφοράς.

2) Άνοδος στάθμης.

Άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού στα πρανή λόφων, παρατηρείται μετά από παρατεταμένες βροχοπτώσεις (μεγαλύτερης διάρκειας από τις μέση τιμή της περιοχής), ή συνδέεται με ανύψωση της στάθμης γειτνιαζόντων σωμάτων νερού. Η άνοδος αυτή συνεπάγεται αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και αντίστοιχη, προφανή, μείωση της ενεργού διατμητικής αντοχής του

Δ.Π.Μ.Σ Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη κορεσμένου υλικού των πρανών. Η υπέρβαση δε του κατωφλίου της κρίσιμης αντοχής, οδηγεί το πρανές σε αστοχία και εκδήλωση κατολίσθησης.

4. σεισμική φόρτιση

Η σεισμική φόρτιση, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις (ένταση σεισμού, δομή και μηχανική κατάσταση θιγόμενου γεωλογικού σχηματισμού), αποτελεί εναυσματικό παράγοντα εκδήλωσης πολλών τύπων κατολισθητικών φαινομένων τόσο σε βραχώδη (κυρίως απότομα και πολυδιακλασμένα) πρανή όσο και σε μικρών ακόμα κλίσεων εδαφικά πρανή.

2.4 Φαινόμενο ρευστοποίησης

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στο φαινόμενο της ρευστοποίησης (liquefaction) σε σχετικά χαλαρά, ιλυο-αμμώδους σύστασης υδατοκορεσμένα εδαφικά πρανή. Η παροδική-στιγμιαία επενέργεια της σεισμικής κίνησης σε μη συνεκτικά και κορεσμένα με νερό εδαφικά πρανή, αυξάνει απότομα την πίεση του νερού των πόρων και άρα προκαλείται ραγδαία μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού. Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν την δεκτικότητα ενός εδαφικού πρανούς στη ρευστοποίηση είναι: τα γεωλογικά χαρακτηριστικά-ιστορικό του ιζηματογενούς περιβάλλοντος που ανήκει το πρανές, ηλικία απόθεσης του υλικού, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, το πάχος του εδαφικού σχηματισμού, η εδαφική πυκνότητα και η χωρική κατανομή της κοκκομετρίας του (grain-size distribution).

2.4.1 Ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών

Μη συνεκτικοί κορεσμένοι εδαφικοί σχηματισμοί έχουν την τάση όταν υπόκεινται σε άμεση φόρτιση κάτω από αστράγγιστες συνθήκες να τείνουν προς συμπύκνωση, όμως λόγω της αδυναμίας μεταβολής του όγκου τους παρουσιάζεται αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων τους με ταυτόχρονη μείωση έως και μηδενισμό της διατμητικής τους αντοχής. Κατά την παραπάνω διαδικασία μετατρέπεται η κατάσταση αυτών των εδαφικών στρωμάτων από τη στερεά στη ρευστή φάση, δηλαδή προκαλείται ρευστοποίηση αυτών. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται αναλυτικά ο μηχανισμός δημιουργίας του φαινομένου καθώς επίσης και οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνεται. Βασικό ρόλο στην πρόκληση ρευστοποίησης διαδραματίζουν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες οι εδαφικοί σχηματισμοί συναντώνται στη φύση. Αυτοί οι μη συνεκτικοί λεπτόκοκκοι κορεσμένοι

Δ.Π.Μ.Σ Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη
σηματισμοί έχουν μεγάλες πιθανότητες ρευστοποίησης, όμως πριν το στάδιο της τελικής εκτίμησης του δυναμικού αυτής, επιβάλλεται η εξέταση συγκεκριμένων κριτηρίων τα οποία καθιστούν ένα εδαφικό υλικό επιδεκτικό προς ρευστοποίηση. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις προϋποθέσεις τις οποίες πρέπει να πληροί ένας εδαφικός σχηματισμός ώστε να χαρακτηριστεί εν δυνάμει ρευστοποιήσιμος.

2.4.2 Μηχανισμός πρόκλησης ρευστοποίησης

Η αύξηση της πίεσης των πόρων μη συνεκτικών κορεσμένων εδαφικών σχηματισμών η οποία προκαλείται από δυναμικού τύπου δονήσεις (σεισμικές ταλαντώσεις κλπ) υπό αστράγγιστες συνθήκες, μπορεί να επιφέρει τη μείωση έως και την απώλεια της διατμητικής αντοχής του υλικού δημιουργώντας το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Η διαδικασία αυτή παρατηρείται κυρίως σε ομοιόμορφα χαλαρά, λεπτά έως μεσοκοκκώδη, ιζήματα. Ο όρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή αυτής της κατάστασης είναι ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών.

Τα φαινόμενα ρευστοποίησης διακρίνονται με βάση το μηχανισμό γένεσης σε δύο γενικές κατηγορίες: την εδαφική ροή (flow failure) και την ανακυκλική κινητικότητα (cyclic mobility). Μολονότι η εδαφική ροή παρουσιάζει λιγότερες πιθανότητες εμφάνισης από την ανακυκλική κινητικότητα, οι επιπτώσεις της είναι αρκετά πιο σοβαρές. Η εδαφική ροή συναντάται συνήθως σε χαλαρά μη συνεκτικά ιζήματα τα οποία είναι τοποθετημένα σε πρηνή με σημαντική κλίση και στα οποία η διατμητική τάση η οποία απαιτείται για τη στατική ισορροπία της εδαφικής μάζας είναι μεγαλύτερη από την υπολειπόμενη διατμητική αντοχή του εδάφους. Οι εφαρμοσμένες ανακυκλιζόμενες τάσεις οδηγούν τον εδαφικό σχηματισμό σε αστάθεια καθώς η αντοχή του μειώνεται με αποτέλεσμα οι υπάρχουσες στατικές φορτίσεις να προκαλέσουν στη συνέχεια την δημιουργία εδαφικής ροής. Ένα τέτοιο μηχανισμό μονοτονικής φόρτισης αποτελεί η διάβρωση του πόδα ενός πρηνούς ή αντίστοιχα η φόρτιση της κεφαλής του. Το συγκεκριμένο φαινόμενο χαρακτηρίζεται από την απότοκή εμφάνιση, την ταχύτατη κίνηση και τη μεγάλη σε κλίμακα απόσταση στην οποία μπορεί να κινηθούν τα υλικά του ρευστοποιημένου εδάφους.

Η ανακυκλική κινητικότητα (cyclic mobility) η οποία χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, μπορεί να προκληθεί σε περιοχές χωρίς ή με μικρή κλίση (έως 3°) ενώ οι επιπτώσεις αυτής χαρακτηρίζονται ελαφριές έως πολύ σοβαρές. Σε αντίθεση με την εδαφική ροή, φαινόμενα

Δ.Π.Μ.Σ Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη
ρευστοποίησης λόγω ανακυκλικής κινητικότητας προκαλούνται όταν η στατική διατμητική τάση είναι μικρότερη της διατμητικής αντοχής του εδαφικού σχηματισμού.

2.4.3 Διαδικασία ρευστοποίησης

Όταν ένας χαλαρός κοκκώδης εδαφικός σχηματισμός υπόκειται σε ανακυκλική δόνηση, όπως στην περίπτωση ενός σεισμού, τότε επιδεικνύει τάση συμπίκνωσης δηλαδή μεταβολής του όγκου. Συγκεκριμένα, οι κόκκοι από τους οποίους αποτελείται το εδαφικό υλικό μετακινούνται έχοντας ως στόχο την μείωση των μεταξύ τους κενών. Όμως, η παρουσία νερού σε αυτά τα κενά, στην περίπτωση κορεσμένων χαλαρών εδαφών σε αστράγγιστες συνθήκες, εμποδίζει αυτήν την μετατόπιση. Αυτή η πίεση που μεταφέρεται στο νερό των πόρων, λόγω των αστράγγιστων συνθηκών δεν μπορεί να εκτονωθεί με συνέπεια την απότομη αύξηση της πίεσης των πόρων u . Η συνεχιζόμενη αύξηση της u αντιστοιχεί σε μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους έως και την πλήρη απώλεια αυτής σύμφωνα με τον νόμο του Coulomb:

$$\tau = \sigma'_v \cdot \tan \phi'$$

όπου $\sigma'_v = \sigma - u$, σ : τάση, σ'_v : ενεργή τάση, ϕ' : ενεργός (δρώσα) γωνία τριβής και u : πίεση των πόρων. Ο όρος της συνοχής c δεν υπάρχει διότι αναφερόμαστε σε μη συνεκτικά εδάφη.

Στο στάδιο αυτό, το οποίο ονομάζεται ολική ρευστοποίηση, η πίεση του νερού των πόρων, το οποίο δεν έχει απεγκλωβιστεί από το εδαφικό στρώμα, ανταποκρίνεται στην πίεση που ασκούν τα υπερκείμενα στρώματα διατηρώντας τον όγκο του σχηματισμού. Παράλληλα οι δυνάμεις σύνδεσης μεταξύ των κόκκων, ο δομικός ιστός, του εδάφους έχει καταρρεύσει με αποτέλεσμα αυτό να συμπεριφέρεται πλέον ως ρευστό. Η εκτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων στη συνέχεια θα προκαλέσει την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους και την ταυτόχρονη μείωση του όγκου του. Η ποσότητα του νερού που παρέμεινε εγκλωβισμένη στο ίζημα, θα διοχετευτεί προς την επιφάνεια λόγω της μεγάλης υδραυλικής κλίσης παρασέρνοντας εδαφικό υλικό. Η διάρκεια αυτής της ροής προς την επιφάνεια εξαρτάται από το χρόνο που χρειάζεται για να αποκατασταθεί η υδραυλική ισορροπία στην εδαφική στήλη. Έτσι λοιπόν, είναι σύνηθες φαινόμενο η συνέχιση αυτής της ροής και μετά το τέλος της σεισμικής δόνησης.

2.5 Μέθοδοι Ανάλυσης της Ευστάθειας των Πρανών

2.5.1 Εισαγωγή

Είναι γνωστό, ότι το βασικό κριτήριο επιλογής της μεθόδου ανάλυσης ευστάθειας ενός πρανούς, είναι η μηχανική συμπεριφορά του γεωλογικού υλικού του πρανούς. Επομένως η κατ' αρχήν επιλογή της μεθόδου θα συναρτηθεί με το κατά πόσον αυτό εμφανίζει συμπεριφορά εδαφικού ή βραχώδους σχηματισμού. Σε πολλές περιπτώσεις η διάκριση αυτή είναι ιδιαίτερα δύσκολη και η ορθή αντιμετώπιση-επιλογή είναι συνάρτηση της εμπειρίας του μελετητή στο πεδίο (φυσικός χώρος).

Ο βαθμός υπολογιστικής ακρίβειας κάθε μεθόδου ανάλυσης της ευστάθειας, εξαρτάται από την προσεγγιστική ισχύ (σε σχέση με την πραγματικές συνθήκες) των αναπόφευκτων απλουστευτικών παραδοχών με τις οποίες είναι συναρτημένα.

Η παρουσία των απλουστευτικών παραδοχών είναι επιβεβλημένη για την μαθηματική επίλυση του προβλήματος της ευστάθειας, αφού, ως γνωστόν, οι χρησιμοποιούμενες εξισώσεις ισορροπίας (δυνάμεων και ροπών) είναι λιγότερες από τους αγνώστους που εμπλέκονται σ' αυτές.

2.5.2 Κατηγορίες μεθόδων ανάλυσης

Οι μέθοδοι ανάλυσης των πρανών μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

α. υπολογισμός της ευστάθειας: η ευστάθεια των πρανών αναλύεται, συνήθως, με μεθόδους οριακής ισορροπίας (limit equilibrium methods). Η ανάλυση αυτή απαιτεί γνώση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής του γεωλογικού υλικού όχι όμως γνώση της σχέσης μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης. Ως μέτρο ευστάθειας υπολογίζεται, καταρχήν, ο συντελεστής ασφάλειας.

β. υπολογισμός της μετακίνησης: το καθεστώς και μέγεθος μετακίνησης του υλικού του πρανούς, αναλύεται, συνήθως, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (finite-element method). Η μέθοδος αυτή υπολογίζει τις μετακινήσεις και τις επενεργούσες τάσεις στο σώμα του πρανούς αλλά δεν παρέχουν ένα άμεσο μέτρο της ευστάθειας του πρανούς, όπως είναι ο συντελεστής ασφάλειας που υπολογίζεται μέσω των αναλύσεων οριακής ισορροπίας.

2.5.3 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρानούς εδαφικής συμπεριφοράς

Στην περίπτωση υλικού εδαφικής συμπεριφοράς, είναι γνωστό ότι η θέση και η μορφή της επιφάνειας αστοχίας του δεν ελέγχονται (σε αντίθεση με το βραχώδους συμπεριφοράς) από την παρουσία τεκτονικών και δομικών προϋπαρχόντων επιφανειών.

Μέθοδοι οριακής ισορροπίας

- συντελεστής ασφάλειας, F

Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας σε εδαφικής συμπεριφοράς πρानή, είναι οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας. Αφορούν, ως τελικό αποτέλεσμα, τον υπολογισμό του γνωστού συντελεστή ασφάλειας, F ($F =$ διατμητική αντοχή της εδαφικής μάζας / διατμητική τάση απαιτούμενη για ισορροπία). Η τιμή του υπολογίζεται (ως συνισταμένη των επιμέρους σημείων) για την κάθε δυνητικά πιθανή επιφάνεια αστοχίας. Η μικρότερη τιμή του συντελεστή ασφάλειας αναφέρεται στην πλέον πιθανή επιφάνεια αστοχίας, που ονομάζεται κρίσιμη επιφάνεια

Η υπολογιζόμενη δε, αριθμητική τιμή του, είναι η, πρακτικής σημασίας, απάντηση στο ερώτημα: κατά πόσο πρέπει να μειωθεί η αντοχή της εδαφικής μάζας, ώστε να οδηγηθεί σε αστοχία και ολίσθηση κατά μήκος της δυνητικά πλέον πιθανής επιφάνειας ολίσθησης;

Ο τελικά λαμβανόμενος στο σχεδιασμό των έργων συντελεστής ασφάλειας είναι μεγαλύτερος του υπολογιζόμενου γιατί πρέπει να ενσωματώνει αφενός μεν το ποσοστό άγνοιας των πραγματικών εδαφικών συνθηκών, αφετέρου δε (βάσει των ισχυόντων κανονισμών) πρέπει να ανταποκρίνεται στις συγκεκριμένες, κατά περίπτωση, απαιτήσεις προστασίας επηρεαζόμενων ανθρώπινων δραστηριοτήτων και του γειτνιάζοντος φυσικού περιβάλλοντος.

Η συνήθης διεθνής γεωτεχνική πρακτική (σχετικοί κανονισμοί) στα συγκοινωνιακά έργα, αναφέρεται σε τιμές συντελεστή ασφάλειας, F :

1. $F = 1,5 - 2,0$ όταν η δυνητική αστοχία του πρानούς επηρεάζει μόνιμες κατασκευές
2. $F = 1,25 - 1,5$ όταν δεν επηρεάζονται μόνιμες κατασκευές ή δραστηριότητες..

Χαρακτηριστικά και υπολογιστική ακρίβεια των μεθόδων

Όλες οι πρακτικά χρήσιμες μέθοδοι ανάλυσης είναι μέθοδοι των (κατακόρυφων) λωρίδων (slices), στις οποίες διαιρείται η δυνητικά κατολισθαίνουσα μάζα. Ο αριθμός των εξισώσεων ισορροπίας (δυνάμεων ή και ροπών, ανάλογα με τη μέθοδο), εξαρτάται από τον αριθμό, N , των

Δ.Π.Μ.Σ Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη λωρίδων (κυμαίνεται συνήθως από 10 έως 40), και τον αριθμό των συνθηκών ισορροπίας (δυνάμεων, ροπών) που χρησιμοποιούνται. Εκτός της περίπτωσης μιας λωρίδας (1), ο αριθμός των αγνώστων είναι μεγαλύτερος των εξισώσεων και η μαθηματική αοριστία εξισορροπείται με τη χρήση απλουστευτικών παραδοχών.

Στις αναλύσεις που ικανοποιούν τις συνθήκες ισορροπίας μόνο όλων των δυνάμεων, οι άγνωστοι υπερβαίνουν τις εξισώσεις κατά $(N-1)$.

Ενώ, όταν ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και όλων των δυνάμεων και όλων των ροπών, οι άγνωστοι υπερβαίνουν τις εξισώσεις κατά $(2N-2)$.

Σχετικά με την υπολογιστική ακρίβεια των επιμέρους χρησιμοποιουμένων μεθόδων, παραθέτουμε τις ακόλουθες παρατηρήσεις με βάση την ενδελεχή αξιολογική θεώρηση της διαθέσιμης, σύγχρονης διεθνούς εμπειρίας :

1. Εάν η μέθοδος ανάλυσης ικανοποιεί όλες τις συνθήκες ισορροπίας (δυνάμεων και ροπών) και οι παραδοχές είναι σχετικά σωστές, τότε ο υπολογιζόμενος συντελεστής ασφάλειας κινείται σε πεδίο ακρίβειας (σε σχέση με την πραγματικότητα της τάξης του $\pm 6\%$).

2. Οι μέθοδοι: Morgenstern and Price (1965), Spencer (1967), γενικευμένη μέθοδος Janbu (1968), και Sarma (1973), είναι οι πλέον ακριβείς, ικανοποιούν όλες τις συνθήκες ισορροπίας, εφαρμόζονται για κάθε μορφής δυνητική επιφάνεια ολίσθησης, και περιλαμβάνουν ικανοποιητικές παραδοχές. Συγκριτικές μελέτες έχουν δείξει (Duncan, 1996), ότι οι τιμές του F που υπολογίσθηκαν με τις μεθόδους αυτές δεν διαφέρουν περισσότερο από 6%, από τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίσθηκαν με τη μέθοδο του λογαριθμικού έλικα (log spiral method) και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που ικανοποιούν όλες τις συνθήκες ισορροπίας αλλά δεν είναι μέθοδοι των λωρίδων.

3. Η τροποποιημένη μέθοδος Bishop (1955), αποτελεί ειδική περίπτωση, όπου ενώ δεν ικανοποιούνται όλες οι συνθήκες ισορροπίας, είναι το ίδιο ακριβής με τις μεθόδους που το πράττουν. Όμως, περιορίζεται στις κυλινδρικές επιφάνειες ολίσθησης.

4. Ανεξάρτητα από την μέθοδο ανάλυσης, είναι πολύ βασικό να διενεργηθεί εξαντλητική έρευνα για να ευρεθεί η κρίσιμη επιφάνεια που εκφράζει τον μικρότερο συντελεστή ασφάλειας.

5. Επειδή οι πλέον ακριβείς μέθοδοι είναι επίπονες και απαιτούν τη χρήση εξειδικευμένων προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή, είναι σκόπιμο να διενεργούνται και απλές μέθοδοι χειρός, για να ελέγχονται τα αποτελέσματα του υπολογιστή. Επίσης η χρήση νομογραμμάτων και πινάκων στον υπολογισμό του F, παρά τον προσεγγιστικό χαρακτήρα τους, μπορεί να αποτελέσει

Δ.Π.Μ.Σ Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη
δυνατότητα ελέγχου των αποτελεσμάτων του υπολογιστή. Επίσης, η χρήση διαφορετικών προγραμμάτων υπολογιστή ή διαφορετικών προσώπων για την ανάλυση, είναι χρήσιμοι μέθοδοι συγκριτικού ελέγχου των αποτελεσμάτων.

6. Προφανώς, η επιλογή του κατάλληλου υπολογιστικού προγράμματος είναι κρίσιμης σημασίας. Τα προγράμματα αυτά συνεχώς βελτιώνονται (παραγωγή με ρυθμό διετίας περίπου), και επιβάλλεται σχετική περιοδική ενημέρωση.

Μέθοδος αντίστροφης ανάλυσης (υπολογισμός διατμητικής αντοχής)

Σε περιπτώσεις που έχει ήδη εκδηλωθεί το κατολισθητικό φαινόμενο, οι παράμετροι αντοχής που θα χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό και διαστασιολόγηση των επανορθωτικών μέτρων, πρέπει να βασίζονται στις γεωμετρικές και υδραυλικές συνθήκες του πρανούς τη χρονική στιγμή της αστοχίας. Όταν, οι τιμές των παραμέτρων αντοχής των επιμέρους τμημάτων της εδαφικής μάζας, φτάσουν να δίνουν, μέσω των επαναλαμβανόμενων αναλυτικών λύσεων, τιμή συντελεστή ασφάλειας, $F=1$, για τις εκτιμώμενες το χρόνο τις αστοχίας προαναφερθείσες συνθήκες, τότε αυτές οι τιμές πρέπει να χρησιμοποιηθούν ως κατάλληλες για το σχεδιασμό των επανορθωτικών τεχνικών μέτρων (κλίση πρανούς, εσωτερική αποστράγγιση, κ.λ.π.).

Ανάλυση ευστάθειας σε τρεις διαστάσεις (3D analysis)

Παρόλο ότι η αστοχία στα πρανή είναι, προφανώς, τρισδιάστατης μορφής, η χρήση της τρισδιάστατης ανάλυσης δεν χρησιμοποιείται συχνά. Εκτός του ότι είναι δυσκολότερη μέθοδος, τα ερευνητικά συγκριτικά αποτελέσματα έχουν δείξει (Κανουνίδης, 1987), ότι η μέθοδος αυτή δίνει λίγο μεγαλύτερες (πιο αισιόδοξες) τιμές του F , απ' ό,τι γνωστές μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των δύο διαστάσεων. Επομένως οι τιμές του F που παρέχουν οι δισδιάστατες μέθοδοι κινούνται στην ασφαλή πλευρά (πιο συντηρητικές), και παρέχουν ικανοποιητική ακρίβεια για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές των αναλύσεων ευστάθειας πρανών.

Μέθοδοι ανάλυσης της παραμόρφωσης- μετακίνησης (Deformation analysis)

Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν την τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων, για την ανάλυση των τάσεων και τον υπολογισμό των προκαλούμενων μετακινήσεων του εδαφικού υλικού του πρανούς. Απαιτούν γνώση των παραμέτρων της σχέσης τάση-παραμόρφωση (stress-strain), ως

Δ.Π.Μ.Σ Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη
εισαγόμενα δεδομένα για τον υπολογισμό των αναμενόμενων μετακινήσεων. Είναι δυσκολότερης
χρήσης και πιο χρονοβόρες μέθοδοι από τις μεθόδους ανάλυσης ευστάθειας, και απαιτούν ιδιαίτερη
εμπειρία για την αποτελεσματική εφαρμογή τους. Συνδυάζονται συνήθως με αποτελέσματα
ενόργανων επιτόπου μετρήσεων των παραμέτρων κίνησης του πρανούς.

Δεν ενδείκνυνται για φυσικά εδαφικά πρανή και ιδίως αυτά με αυξημένη πολυπλοκότητα της
μηχανικής τους συμπεριφοράς (λόγω ετερογένειας και ανισοτροπίας) όπως τα φλυσχικά. Επειδή, οι
απαιτούμενες για τους υπολογισμούς παράμετροι τάσης και παραμόρφωσης, δεν είναι εύκολα
αποτιμήσιμες μέσω εργαστηριακών δοκιμών.

Πολύ συχνά ακόμα και σε τεχνητά πρανή (επιχωμάτων), τα παρεχόμενα αποτελέσματα
(πρόβλεψη μετακινήσεων) δεν προσεγγίζουν ικανοποιητικά την πραγματικότητα (ανάλυση 100
παραδειγμάτων εφαρμογής της μεθόδου: Duncan, 1992).

2.5.5 Μέθοδοι ανάλυσης των επιπτώσεων της σεισμικής δράσης

Στις περιπτώσεις περιοχών με αυξημένη σεισμικότητα, επιβάλλεται η ανάλυση της ευστάθειας
των πρανών να περιλαμβάνει και την απόκριση της βραχομάζας σε σεισμική δυναμική καταπόνηση.
Ως βάση για τον καθορισμό των εισαγόμενων στην ανάλυση τιμών των δυναμικών παραμέτρων
(συνήθως επιτάχυνση) της σεισμικής κίνησης, λαμβάνεται συγκεκριμένος (στατιστικά αναμενόμενος)
σεισμός σχεδιασμού, που αντιστοιχεί στα επιμέρους, σεισμογόνα ρήγματα της περιοχής επιρροής
(όπου εντάσσεται η θέση του πρανούς αναφοράς).

Οι πλέον χρησιμοποιούμενες στον τεχνικό σχεδιασμό μέθοδοι είναι:

1. η ψευδοστατική μέθοδος ανάλυσης. Είναι ιδιαίτερα συντηρητική μέθοδος και πολλές
φορές δίνει τιμές συντελεστή ασφάλειας μικρότερες από τις υπολογιζόμενες από τη στατική ανάλυση.

2. η μέθοδος ανάλυσης του Newmark (από 1965)

Σήμερα βρίσκονται σε χρήση και πολλές επιμέρους παραλλαγές των βασικών αυτών μεθόδων

Μέθοδοι ανάλυσης μη οριακής ισορροπίας

Στις περιπτώσεις όπου δεν διαπιστώνεται συγκεκριμένος τύπος αστοχίας-μετακίνησης, αλλά η
επιτόπια έμπειρη παρατήρηση ή οι ενόργανες μετρήσεις διαπιστώνουν ωριμότητα ή έναρξη
μετακίνησης σε τμήμα της βραχομάζας, εφαρμόζονται μέθοδοι μη οριακής ισορροπίας.

Η πιο σημαντική και γνωστή, ίσως, τέτοιας κατηγορίας μέθοδος είναι η μέθοδος του διακεκριμένου στοιχείου (distinct-element method), (αφορά το βραχώδες συμπαγές τέμαχος, δομικό λίθο της θεωρούμενης βραχομάζας). Η μέθοδος αυτή αναφέρεται και ως μέθοδος ανάλυσης

τεμάχους (block-analysis method). Δεν απαιτεί προδιαγραμμαμένη επιφάνεια αστοχίας για να οδηγηθεί σε λύση.

Εισηγητές της μεθόδου είναι οι Cundall (1987) και Lorig (1991). Τα κύρια σημεία διάκρισης της μεθόδου αυτής από τις άλλες μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης είναι τα εξής :

Η βραχομάζα συνίσταται (θεωρούμενη ως ολικό σύστημα), από διακριτά τεμάχη-μέλη, το καθένα από τα οποία μπορεί να υποστεί ιδιαίτερη, σε σχέση με τα άλλα, περιστροφή και μετακίνηση

1. Οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των τεμαχών, οφείλονται στη μεταβολή της γεωμετρικής τους συνδεσμολογίας (αλλαγή σχετικής θέσης),

2. Η πορεία της ανάλυσης, παρακολουθεί την μεταβολή των σχετικών θέσεων των επιμέρους τεμαχών του συστήματος της θεωρούμενης βραχομάζας, στην πορεία του χρόνου.

Κεφάλαιο 3. Αγωγοί



Εικόνα 7 Αγωγοί Φυσικού Αερίου

3.1 Εισαγωγή

Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται σταθερά από τη δεκαετία του 1950. Παρά τις πρωτοβουλίες και εφευρέσεις στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με στόχο την μείωση της χρήση ορυκτών καυσίμων, τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακας) εξακολουθούν να αντιπροσωπεύουν το 80% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Αυτή η αύξηση της ζήτησης οδήγησε στη ραγδαία αύξηση των τιμών του αργού πετρελαίου κατά τα τέλη του 2000. Η υπεράκτια βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου που ξεκίνησε το 1947, όταν Kerr-McGee ολοκλήρωσε την πρώτη επιτυχή υπεράκτια εξόρυξη στον Κόλπο του Μεξικού έξω από Λουϊζιάνα σε 15 ft (4,6 m) βάθος νερού. Η έννοια της ανάπτυξης του υποθαλάσσιου τομέα προτάθηκε στις αρχές του 1970 με την τοποθέτηση φρέατος και εξοπλισμού παραγωγής στον βυθό της θάλασσας με ορισμένα ή όλα τα συστατικά έγκλειστα σε ένα σφραγισμένο θάλαμο. Ο υδρογονάνθρακας που θα παραγόταν τότε θα έρρεε από το πηγάδι σε μία κοντινή εγκατάσταση επεξεργασίας, είτε στην ξηρά είτε σε μια υπάρχουσα υπεράκτια πλατφόρμα. Η έννοια αυτή ήταν η αρχή της υποθαλάσσιας μηχανικής. Κατά τα τελευταία 40 χρόνια, τα υποθαλάσσια συστήματα έχουν προχωρήσει από τα ρηχά νερά, με συστήματα χειροκίνητης λειτουργίας σε συστήματα που μπορούν να λειτουργούν μέσω του τηλεχειριστηρίου σε βάθη νερού έως 3.000 μέτρα.

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί είναι οι αρτηρίες της βιομηχανίας υδρογονανθράκων, με την τεχνολογία να παρουσιάζει δραματική πρόοδο σε αυτόν τον τομέα. Έργα που ήταν σχεδόν αδύνατα

Δ.Π.Μ.Σ Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη πριν από 20 χρόνια τώρα γίνονται πραγματικότητα. Η ανθρωπότητα χρειάζεται μεταφορά υγρών από τόπο σε τόπο σε τεράστιες ποσότητες και σε μεγάλες αποστάσεις: νερό, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, και το διοξείδιο του άνθρακα είναι μερικά από αυτά τα παραδείγματα. Ένας αγωγός είναι ένα πάγιο περιουσιακό στοιχείο με μεγάλο κόστος κεφαλαίου. Ωστόσο, όταν ο αγωγός είναι στη θέση του, τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης είναι σχετικά μικρά, και ο αγωγός έχει διάρκεια ζωής 40 ετών ή και περισσότερο. Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί, επιλέγονται για διάφορες χρήσεις. Όλο και περισσότερο βλέπουμε να παράγεται πετρέλαιο και αέριο σε υπεράκτια πεδία. Το προϊόν πρέπει να μεταφερθεί στην ακτή, και αυτό γίνεται συνήθως μέσω αγωγών.

Η υποθαλάσσια τεχνολογία χρησιμοποιείται για την υπεράκτια παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι ένας πολύ εξειδικευμένος τομέας που έχει μεγάλες απαιτήσεις σε μηχανική. Το σύστημα υποθαλάσσιας παραγωγής φέρει μερικές μοναδικές πτυχές που σχετίζονται με την αδυναμία πρόσβασης στις εγκαταστάσεις για τη λειτουργία τους και την εξυπηρέτησή τους. Ως εκ τούτου, η ανάγκη ενός στερεού και τεχνολογικά προηγμένου σχεδίου υποθαλάσσιου αγωγού μηχανικής είναι απαραίτητη περισσότερο από ποτέ.

3.2 Χαρακτηριστικά αγωγών

3.2.1. Μέγεθος Σωλήνα

Είναι εξαιρετικά σημαντικό να καθοριστεί το μέγεθος και η συνολική γεωμετρία του αγωγού μεταφοράς υδρογονανθράκων. Αυτοί οι παράγοντες έχουν δραματική επίδραση στο κόστος, την ενεργειακή απόδοση και την ασφάλεια του αγωγού. Ως εκ τούτου, υπάρχουν 3 σημαντικές πτυχές της διαδικασίας σχεδιασμού του αγωγού που θα εξεταστούν:

1: Προσδιορισμός της βέλτιστης εσωτερικής διαμέτρου του αγωγού D , σε σχέση με το υλικό του επιλεγμένου αγωγού

2: Προσδιορισμός του πάχους τοιχώματος σύμφωνα με την πίεση σχεδιασμού. Δυνατότητα να δημιουργούν νέα γεωμετρία προκειμένου να διατηρηθεί η ασφάλεια και να ελαχιστοποιηθεί η μάζα του αγωγού

3: Σύμφωνα με το μήκος και τη συνολική κατασκευή του αγωγού, καθορισμός του ελάχιστου δυνατού κόστους.

3.2.2 Βέλτιστη διάμετρος του αγωγού

Οι αγωγοί συνήθως έχουν σχεδιαστεί για να μεταφέρουν υδρογονάνθρακες ρευστού στην απαιτούμενη κεφαλή και τον ρυθμό ροής αποτελεσματικό και οικονομικό τρόπο. Η αύξηση της διαμέτρου του αγωγού οδηγεί σε αύξηση του ετήσιου κόστους του κεφαλαίου, και αύξηση των λειτουργικών δαπανών. Η επιλογή της βέλτιστης διαμέτρου του αγωγού για μια συγκεκριμένη ροή ρευστού θα είναι επομένως θέμα μέγιστης σημασίας όσον αφορά στις οικονομικές αποφάσεις. Σε αυτό το κεφάλαιο σκοπός είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης διαμέτρου του σωλήνα για την μη ομαλή ροή του ρευστού με διαφορετική συμπίεστικότητα, μέσω της ολοκλήρωσης της ανάλυσης κόστους στις αρχές της δυναμικής ρευστού, υιοθετώντας τη μικρότερη συνολική προσέγγιση κόστους. Πολλά μοντέλα έχουν παραχθεί για τη βέλτιστη διάμετρο του αγωγού. Η βελτιστοποίηση του κόστους αγωγών είναι ένα θέμα που συζητήθηκε περισσότερο από μία φορά, από την πρώτη δημοσιοποίηση μοντέλου βελτιστοποίησης που εκδόθηκε το 1937 [34]. Ωστόσο, σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη παρουσιάζεται ένα εναλλακτικό και πολύ αποτελεσματικό μοντέλο [35]. Το μοντέλο αυτό περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$D_{opt}^{5+m+x} = [8*(5+m)*M/\pi^2] * [(1+J)*Y*C_{en}/X*\chi E*(1+F)*(a+b)] * (\epsilon^m * G^3/\rho^2)$$

Όπου

M, m = Παράμετροι ανάλογα με το συντελεστή τριβής

J = Αναλογία μικρής απώλειας πίεσης και πτώση της πίεσης τριβής

Y = Plant επίτευξη (h / έτος)

C_{en} = Κόστος ενέργειας (€ / Wh)

X, χ = Παράμετροι που εξαρτώνται από το είδος του υλικού του και του πάχους τοιχώματος του σωλήνα

E = Απόλυτη τραχύτητα του σωλήνα εσωτερικής επιφάνειας (m)

F = συντελεστής που περιλαμβάνει το κόστος των βαλβίδων, των εξαρτημάτων και της κατασκευής

β = κόστος συντήρησης (ετήσια)

G = ρυθμός ροής μάζας (kg / s)

ρ = Πυκνότητα (kg / m³)

E = Αποδοτικότητα

ξ = M * Rm = M * (ε / D) m = συντελεστής τριβής

3.2.3 Το πάχος των τοιχωμάτων

Για τον υπολογισμό του κατάλληλου πάχους τοιχώματος του αγωγού, πρέπει να καθορίζεται πρώτα η πίεση. Έχουμε αρχικά την πίεση που απαιτείται για τη μεταφορά ενός δεδομένου όγκου αερίου ή πετρελαίου μέσω ενός αγωγού (εσωτερικό) και, δεύτερον, η εξωτερική πίεση του αγωγού. Η εσωτερική πίεση σε ένα σωλήνα αναγκάζει το τοίχωμα του σωλήνα να ενταθεί, και αν αφεθεί να φθάσει στο όριο διαρροής του υλικού του σωλήνα, θα μπορούσε να προκληθεί μόνιμη παραμόρφωση του σωλήνα και τελικώς αστοχία του. Προφανώς, ο σωλήνας θα πρέπει να έχει επαρκή αντοχή για να διαχειριστεί την εσωτερική πίεση με ασφάλεια. Εκτός από την εσωτερική πίεση λόγω του φυσικού αερίου ή του πετρελαίου που ρέει μέσω του σωλήνα, ο σωλήνας υποβάλλεται σε εξωτερική πίεση. Η εξωτερική πίεση που προκαλείται λόγω του βάθους της περιοχής πόντισης των αγωγών, καθώς μιλάμε για υποθαλάσσιο αγωγό. Είναι επίσης πιθανή η άμεση αύξηση στην εξωτερική πίεση, ως αποτέλεσμα των επιπτώσεων κρούσεων ή κυμάτων. Γενικά, όσο βαθύτερα είναι θαμμένος ή ποντισμένος ένας αγωγός, τόσο υψηλότερο θα είναι το εξωτερικό φορτίο του σωλήνα (νερό και προκειμένο έδαφος). Στις περισσότερες περιπτώσεις των βυθισμένων αγωγών μεταφοράς αερίου ή πετρελαίου, η επίδραση της εσωτερικής πίεσης είναι μεγαλύτερη από εκείνη της πίεσης που οφείλεται σε εξωτερικά φορτία. Ως εκ τούτου, το απαιτούμενο ελάχιστο πάχος τοιχώματος υπαγορεύεται κυρίως από την εσωτερική πίεση σε έναν αγωγό υδρογονανθράκων και ειδικά στο πετρέλαιο, όπου έχουμε σχεδόν μηδενική συμπίεση. [36,37,38]

3.2.4 Γεωμετρία

Είναι γνωστό ότι το σχήμα του αγωγού είναι ένας κύλινδρος με λείες επιφάνειες. Ωστόσο, προκειμένου να αυξηθεί η ικανότητα διάδοσης λυγισμού ενός αγωγού χωρίς να αυξηθεί το πάχος τοιχώματος, προτείνεται πολύπλευρη γεωμετρία του σωλήνα. Προκαταρκτικά αποτελέσματα από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων του παρόντος προτεινόμενου πολύπλευρου σωλήνα δείχνει μια σημαντική αύξηση στην έναρξη και στη διάδοση της ικανότητας λυγισμού για την ίδια αναλογία D/t (διάμετρος / πάχος) (σε σύγκριση με τους συμβατικούς κυλινδρικούς σωλήνες). Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεγάλη εξοικονόμηση υλικών και κόστους κατασκευής. Η πολύπλευρη γεωμετρία θα πρέπει να οδηγήσει σε 76% αύξηση της πίεσης έναρξης και 127% αύξηση στην διάδοση πίεσης για τον ίδιο λόγο D/t . Για παράδειγμα, μια αύξηση της ικανότητας λυγισμού για τον ίδιο λόγο D/t

μπορεί να μεταφραστεί σε περίπου 22% εξοικονόμηση υλικών. Έτσι, σύμφωνα με τα προηγούμενα αποτελέσματα για το αρχικό κόστος του αγωγού, μπορούμε τώρα να εξοικονομήσουμε ένα σημαντικό χρηματικό ποσό από την εφαρμογή αυτού του νέου και βελτιωμένου σχήματος. [42]

3.2.5 Κόστος Αγωγών

Γνωρίζοντας το μήκος του αγωγού, την εσωτερική διάμετρο και το πάχος τοιχώματος, μπορεί να υπολογιστεί ο ακριβής όγκος του αγωγού, ως εκ τούτου, το αρχικό κόστος κεφαλαίου ανάλογα με το υλικό τιμή (€ / τόνο) ή (\$ / τόνο). Η απλή εξίσωση είναι η ακόλουθη:

Συνολικό κόστος κεφαλαίου = μάζα * Cmaterial (€ / τόνο) = $\rho * \pi * (D_{out}-D_{inner})^2 * \text{Μήκος} * C_{material}$ (€ / τόνο)

Επιπλέον, υιοθετώντας τη νέα πολύπλευρη γεωμετρία του αγωγού που εξοικονομεί περίπου 22% του υλικού

(Συνεπώς μάζα), τα τελικά αποτελέσματα μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

Νέο Συνολικό κόστος κεφαλαίου = μάζα (νέα) * Cmaterial (€ / τόνο) = 0,78 * μάζα * Cmaterial (€ / τόνο) = 0,78 * Σύνολο κόστος κεφαλαίου (αρχικό)

Μια αξιοσημείωτη εξοικονόμηση στο συνολικό κόστος κεφαλαίου λόγω της υιοθέτησης της πολύπλευρης γεωμετρίας του αγωγού.

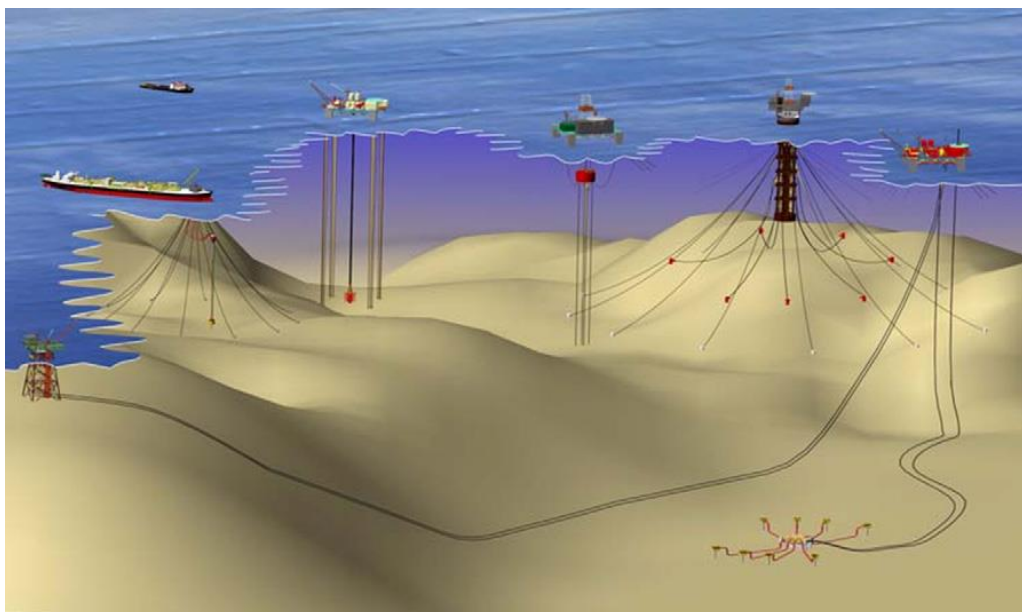
Έτσι, έχοντας υπολογίσει τη βέλτιστη εσωτερική διάμετρο του αγωγού και το απαιτούμενο πάχος τοιχώματος, μπορούμε να ελέγξουμε τις προδιαγραφές των αγωγών που προσφέρονται στην αγορά. Είναι προφανές ότι το υλικό επιλογής καθορίζει το πάχος διαμέτρου και του τοιχώματος του αγωγού. Επίσης τα χαρακτηριστικά της ροής που μεταφέρονται διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο.

3.3 Είδη αγωγών

3.3.1 Σωλήνες Ανύψωσης

Σωλήνες Ανύψωσης είναι η σύνδεση μεταξύ του υποθαλάσσιου πεδίου ανάπτυξης και παραγωγής και τις εγκαταστάσεις γεωτρήσεων (στην επιφάνεια). Είναι εύκαμπτοι πολυστρωματικοί σωλήνες που αποτελούνται από μία εσωτερική εύκαμπτη μεταλλική δομή, που περιβάλλεται από στρώματα πολυμερών και σπειροειδούς περιέλιξης συνδέσμους από χάλυβα, επίσης γνωστά ως

σύρματα πανοπλίας (ή μανδύας). Δεδομένου ότι αυτοί οι σωλήνες ανύψωσης χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν τους υποθαλάσσιους αγωγούς με τις πλωτές εγκαταστάσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου, η αποτυχία τους θα μπορούσε να παράγει καταστροφικές συνέπειες. Υπάρχουν διάφοροι τύποι αυτών των αγωγών, συμπεριλαμβανομένων συνδεόμενοι σωλήνες ανύψωσης, σωλήνες ανύψωσης έλξης, αλυσοειδείς σωλήνες ανύψωσης από χάλυβα, τεταμένοι στην κορυφή σωλήνες ανύψωσης, πύργοι ανύψωσης και ευέλικτες διαμορφώσεις ανύψωσης, καθώς σωλήνες ανύψωσης γεώτρησης.



Εικόνα 8 Σωλήνες ανύψωσης – Risers. Πηγή:

www.tenaris.com/en/products/offshorelinepipe/risers.aspx

Οι σωλήνες ανύψωσης έλξης είναι αγωγοί ή γραμμές ροής που το σπείρωμα τους φτάνει μέχρι το κέντρο της εγκατάστασης. Ένας σωλήνας έλξης με διάμετρο μεγαλύτερη από τη διάμετρο του σωλήνα ανύψωσης είναι προεγκατεστημένος στην εγκατάσταση. Στη συνέχεια, ένα συρματόσχοινο συνδέεται με μια γραμμή αγωγού ή της ροής στον πυθμένα. Η γραμμή στη συνέχεια έλκεται μέσω του σωλήνα έλξεως προς την υπερκείμενη κατασκευή, φέρνοντας τον σωλήνα μαζί με αυτό.

Οι αλυσοειδείς σωλήνες ανύψωσης από χάλυβα χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν τον θαλάσσιο πυθμένα με τις εγκαταστάσεις παραγωγής από πάνω, καθώς και τη σύνδεση δύο πλωτών εξεδρών παραγωγής. Οι αλυσοειδείς σωλήνες ανύψωσης από χάλυβα είναι κοινά γνωστά ως TLPs, FPSOs και ορθοστάτες, καθώς ως σταθερές δομές, και είναι συμβατοί με τους πύργους και τις δομές βαρύτητας. Ενώ αυτός η κυρτός σωλήνας ανύψωσης μπορεί να αντέξει μερικές κινήσεις, η υπερβολική κίνηση όμως μπορεί να προκαλέσει προβλήματα.

Σε προκαταρκτικό στάδιο, το πάχος διαμέτρου και το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα ανύψωσης πρέπει να προσδιορίζονται για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος των σωλήνων.

Στους παράγοντες που επηρεάζουν τη διάμετρο των σωλήνων ανύψωσης και το πάχος τοιχώματος περιλαμβάνονται:

- Η φιλοσοφία της λειτουργίας: η στρατηγική μεταφοράς, η διάβρωση, η επιθεώρηση
- Τα χαρακτηριστικά του πηγαδιού : η πίεση, η θερμοκρασία, ο ρυθμός ροής, η απώλεια θερμότητας
- Κατασκευαστικοί περιορισμοί: έκρηξη, κατάρρευση, λυγισμός,
- Προβλήματα εγκατάστασης: ικανότητα τάνυσης των διαθέσιμων πλοίων
- Προβλήματα κατασκευής: ικανότητα διαχείρισης , ανοχές, διαδικασίες συγκόλλησης, επιθεώρηση
- Μετατοπίσεις του σκάφους και κινήσεις
- Περιβάλλοντα Μεγάλου

3.3.1.1 Ιδιότητες των υλικών για Αγωγούς

Η επιλογή του ιδανικού υλικού για το έργο του αγωγού είναι πρόκληση. Ο κύριος ρόλος του σχεδιασμού του αγωγού είναι η ασφάλεια. Οι περισσότεροι αγωγοί μεταφοράς έχουν σχεδιαστεί με τις προδιαγραφές ή τα πρότυπα (ASME) που βασίζονται σε αυτά.

Αναλυτικά, έχουμε τα ακόλουθα πρότυπα:

- ASME (Αμερικανική Ένωση Μηχανολόγων Μηχανικών) .Για το συγκεκριμένο έργο, θα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν

σε δύο τομείς.

1) Κωδικός ASME B31.4: Αγωγός Συστήματα Μεταφορών για υγρών υδρογονανθράκων και άλλων υγρά

2) Κωδικός ASME B31.8: Συστήματα σωληνώσεων φυσικού αερίου Μεταφοράς και Διανομής

- ASTM International (Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών).
- API (Αμερικανικό πετρελαϊκό Ινστιτούτο)

Συνήθως, αυτά τα τρία πρότυπα είναι συμπληρωματικά, σχηματίζοντας ένα ενιαίο κώδικα.

Οι αγωγοί γίνονται με συγκόλληση των σωλήνων χάλυβα (που ονομάζεται «linerpipe»), συνήθως αγοράζονται στο πρότυπο API 5L του American Petroleum Institute. Υπάρχουν 4 σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή του υλικού, με διαφορετική βαρύτητα το καθένα: Μηχανικές ιδιότητες (αντοχή, ολκιμότητα, σκληρότητα, συγκολλησιμότητα), Φυσική (ειδικό βάρος, μέτρο Young, συντελεστής θερμικής διαστολής), Χημική (Αντοχή στη διάβρωση) και Κόστος.

1. Μηχανικές Ιδιότητες: Ένας χαλύβδινος αγωγός πρέπει να έχει υψηλή αντοχή ενώ διατηρεί την ολκιμότητα, αντοχή σε θραύση, και συγκολλησιμότητα. Αντοχή είναι η ικανότητα του χαλύβδινου σωλήνα (και των συναφών συγκολλήσεων) να αντισταθεί στις διαμήκεις και εγκάρσιες δυνάμεις εφελκυσμού που επιβάλλονται επί του σωλήνα σε λειτουργία και κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, η τελική αντοχή σε εφελκυσμό (UTS), είναι η μέγιστη πίεση που μπορεί να αντέξει το υλικό ενώ βρίσκεται υπό θλίψη ή εφελκυσμό πριν την αστοχία ή τη ρήξη. Το όριο διαρροής ή το σημείο απόδοσης ορίζεται ως η τάση στην οποία ένα υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά. Πριν από το όριο διαρροής του υλικού θα παραμορφωθεί ελαστικά και θα επιστρέψει στο αρχικό του σχήμα όταν το εφαρμοζόμενο φορτίο πάψει να επιβάλλεται. Ακριβώς στο όριο διαρροής και μετά από αυτό, κάποιες παραμορφώσεις θα είναι μόνιμες και μη αναστρέψιμες. Πλαστιμότητα είναι η ικανότητα του σωλήνα να απορροφά υπερβολική καταπόνηση με την παραμόρφωση. Ανθεκτικότητα είναι η ικανότητα του υλικού του σωλήνα να αντέχει επιπτώσεις ή κρουστικά φορτία και για το υλικό να ανεχθεί την παρουσία ελαττωμάτων, για παράδειγμα, ρωγμές και λάκκους. Τα μεταλλικά υλικά μηχανικής είναι γενικά σκληρά και αστοχούν κατά τρόπο όλκιμο. Δηλαδή, διαρρέουν πριν σπάσουν. Σε σύγκριση δηλαδή με τα εύθραυστα υλικά που είναι σαν γυαλί και αστοχούν ξαφνικά με θραύση. Συγκολλησιμότητα είναι η ικανότητα και η ευκολία παραγωγής μιας ποιότητας των συγκολλήσεων και ζώνη θερμοσυγκόλλησης (HAZ) επαρκούς αντοχής και σκληρότητας. Τα περισσότερα μέταλλα μπορούν να συγκολληθούν, αλλά δεν έχουν όλα καλή συγκολλησιμότητα. Για τους υποθαλάσσιους αγωγούς, ο κύριος παράγοντας που οδηγεί στην ανάγκη για καλή ικανότητα συγκόλλησης είναι οικονομικός. Το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους ενός υποθαλάσσιου αγωγού είναι η εγκατάσταση του, λόγω του υψηλού κόστους λειτουργίας της φορτηγίδας. Όσο ταχύτερα συγκολληθούν οι σωλήνες, τόσο πιο γρήγορα θα μπορεί να εγκατασταθούν και τόσο μικρότερη θα είναι και η περίοδος χρήσης της φορτηγίδας.

2. Φυσικές Ιδιότητες: Οι φυσικές ιδιότητες συνήθως περιλαμβάνουν τη πυκνότητα ή το ειδικό βάρος, το μέτρο ελαστικότητας του Young και το συντελεστή θερμικής διαστολής. Το ειδικό βάρος είναι ο λόγος της μάζας ενός υλικού ανά μονάδα όγκου. Μέτρο Young είναι ένα μονάδα μέτρησης της

ελαστικότητας του υλικού. Το πιο σημαντικό, ο συντελεστής θερμικής διαστολής, είναι ένας παράγοντας σημασμένος τυπικά με «α», σε ότι αφορά τη θερμική διαστολή (AL) ενός υλικού από το αρχικό του μήκος L, καθώς αυτό θερμαίνεται σε ένα ποσό AT. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής α δεν είναι ιδιότητα που ορίζεται στο πρότυπο ASTM με τις προδιαγραφές υλικών, αλλά μπορεί να ληφθεί για διαφορετικές ομάδες υλικών, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας από το ASME Λεβήτων & Πιέσεων Δοχείου του κώδικα [ASME II]. Ο συντελεστής α είναι κρίσιμος στην ευελιξία της ανάλυσης των συστημάτων σωληνώσεων:

$$AL = \alpha * L * AT$$

όπου:

AL = αλλαγή μήκους, (mm)

α = συντελεστής θερμικής διαστολής του υλικού, 1 / ° C

L = αρχικό μήκος του υλικού, (mm)

AT = αλλαγή θερμοκρασίας, ° C

3. Χημικές: Το πρωτεύον στοιχείο (σίδηρος στην περίπτωση των σιδηρούχων μετάλλων), στοιχεία κράματος (νικέλιο, χρώμιο, κ.λπ. με σιδηρούχα μέταλλα), τα παρεπόμενα στοιχεία (μικρό ποσό των ακούσιων στοιχείων), και προσμείξεις (θείο, φωσφόρο, κλπ), με κύριο σκοπό να αυξηθεί η αντίσταση στη διάβρωση του αγωγού, επομένως να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά που αφορούν στη διάρκεια της ζωής και της ασφάλειας. Η διάβρωση είναι η επιδείνωση της φυσικής κατάστασης μιας ουσίας, συνήθως σε ένα μέταλλο, οφείλεται σε αλληλεπίδραση με το περιβάλλον του. Οι αγωγοί πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι ευάλωτοι στη διάβρωση εν μέρει λόγω της χρήσης του ανθρακικού και χαμηλού κράματος χάλυβα. Οι τυπικοί μηχανισμοί διάβρωσης περιλαμβάνουν ομοιόμορφη διάβρωση, ρωγμές και σκασίματα λόγω διάβρωσης. Οι βλάβες λόγω διάβρωσης και η αστοχία δεν λαμβάνονται πάντα υπόψη κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή πολλών μηχανικών συστημάτων. Ακόμη και αν ληφθεί υπόψη η διάβρωση, απρόβλεπτες αλλαγές στο περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί η κατασκευή μπορεί να οδηγήσει σε απρόσμενη εξέλιξη της διάβρωσης. Η προσθήκη αναστολέων διάβρωσης, ή χημικές ουσίες που μειώνουν τα ποσοστά διάβρωσης, είναι μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για τον έλεγχο της εσωτερικής διάβρωσης των αγωγών. Η ιδανική μέθοδος για να προσδιορίσει τον καταλληλότερο αναστολέα διάβρωσης αναπαράγει τέσσερα στοιχεία ενός αγωγού λειτουργίας: τη σύνθεση του μεταφερόμενου υγρού (πετρελαίου ή φυσικού αερίου), το υλικό του αγωγού (π.χ., ανθρακικός χάλυβας), την πίεση στο τοίχωμα του

αγωγού, και τη θερμοκρασία του υγρού και οι συνθήκες ροής. Τέλος, ένα άλλο πολύ σημαντικό ζήτημα είναι η στατική ηλεκτρική ενέργεια που δημιουργείται μεταξύ του μεταφερόμενου αερίου και του αγωγού. Η ταχύτητα του ρευστού καθώς και το υλικό του αγωγού να παίζει σημαντικό ρόλο.

Κόστος: Το πραγματικό κόστος του αγωγού περιλαμβάνει τα κόστη που σχετίζονται με το υλικό του σωλήνα, την επίστρωση, τα εξαρτήματα του σωλήνα, και το πραγματικό κόστος εγκατάστασης ή εργασίας. Από την πλευρά του υλικού, ένας απλός τύπος μπορεί να υπολογίσει το συνολικό κόστος κεφαλαίου, γνωρίζοντας την εσωτερική και εξωτερική διάμετρο του σωλήνα, όπως και το μήκος για τον όγκο του σωλήνα και επίσης την πυκνότητα του υλικού που έχουμε επιλέξει.

$$M = \rho * V, \quad M = \rho * \pi (R_{out} - R_{in})^2 * L$$

$$\text{Επομένως το κόστος είναι: } C = M (\text{€/tn})_{material}$$

Όπου

M=μάζα (kg)

ρ = πυκνότητα (kg/lt)

R=ακτίνα (m)

L=μήκος(m)

3.3.1.2 Τεχνική εναπόθεσης

Μέθοδος εναπόθεσης ή τοποθέτησης αγωγού

Μια πολύ σημαντική πτυχή που πρέπει να εξεταστεί είναι η εναπόθεση αγωγών ή τεχνική τοποθέτησης αυτών. Υπάρχουν 2 βασικές μέθοδοι. Η πρώτη είναι να τοποθετηθεί ακριβώς πάνω από τον πυθμένα της θάλασσας και η δεύτερη είναι να το θαφτεί κάτω από το έδαφος. Η απόφαση για τη βέλτιστη μέθοδο εξαρτάται από διάφορους παράγοντες: από τη μία πλευρά, ένας θαμμένος αγωγός επιτρέπει την συντομότερη διαδρομή (λιγότερες στροφές) από σημείο σε σημείο και αποφεύγει τα πιθανά εμπόδια του θαλάσσιου πυθμένα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο θαμμένος αγωγός μπορεί να είναι η μόνη δυνατή λύση. Από την άλλη πλευρά, ένας θαμμένος αγωγός παρουσιάζει ιδιαίτερες προκλήσεις διάβρωσης που μπορεί να υπαγορεύουν την χρήση επίστρωσης και καθοδικής προστασίας, απαιτεί πιο περίτεχνες επισκευές, λόγω της ανάγκης να εντοπιστεί ο αγωγός, μπορεί ακόμη να υπάρχει διαρροή που δε θα εντοπιστεί για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα, απαιτεί προσεκτική εκχωμάτωση ή επιχωμάτωση, και πρέπει να σχεδιαστεί για τα φορτία του εδάφους, κάτι που απαιτεί πολύ καλή κατανόηση της κατάστασης και των ιδιοτήτων του εδάφους. Σε ορισμένες

εφαρμογές το θάψιμο του αγωγού έχει αποδειχθεί πολύ δαπανηρή απόφαση. Οι θαμμένοι αγωγοί (είτε θάβονται υποθαλάσσια ή καλύπτονται από ένα ανάχωμα) μπορούν να βιώσουν ένα ευρύ φάσμα φορτίων που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό. Τα κανονικά φορτία λειτουργίας περιλαμβάνουν την εσωτερική πίεση, τη συγκεντρωμένη διαστολή ή συστολή λόγω των αλλαγών στη θερμοκρασία του ρευστού, και την κανονική θεμελίωση του εδάφους. Τα ασυνήθιστα (ατυχηματικά) φορτία περιλαμβάνουν μεγάλες υπερπίεσεις (όπως λόγω ενός υδραυλικού πλήγματος), μεγάλος όγκος του υπερκείμενου εδάφους (εδαφική αστοχία), και σεισμικές δυνάμεις. Σύμφωνα με τον S.W. Gong, για την εφαρμογή μίας από τις δύο μεθόδους (1. Αγωγός βυθισμένος στο νερό (πάνω από τον πυθμένα της θάλασσας ή 2. αγωγός θαμμένος στο βυθό) με εφικτή προσέγγιση για την αξιολόγηση της ασφάλειας του υποθαλάσσιου αγωγού θα έχει τα παρακάτω αποτελέσματα:

1. Η μέγιστη τάση που προκαλείται από υποβρύχια έκρηξη μειώνεται κατά 30%, με επικάλυψη από σκυρόδεμα στον αγωγό.

2. Η μέγιστη τάση που προκαλείται από υποβρύχια έκρηξη μειώνεται κατά 12%, με την ταφή του αγωγού στην άμμο.

3. Η μέγιστη τάση σε ένα άδειο αγωγό είναι 12% υψηλότερη από ότι σε έναν αγωγό γεμάτο με υγρό.

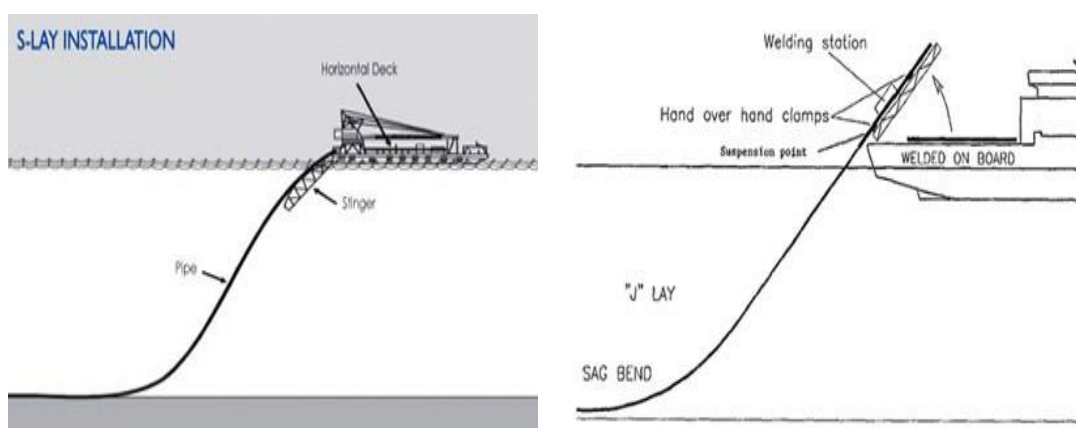
Σε περαιτέρω ανάλυση σχετικά με τον βυθισμένο αγωγό ποντισμένο πάνω από τον πυθμένα της θάλασσας υπάρχουν τρεις προσεγγιστικές καταστάσεις που μπορεί να συμβούν. Στην πρώτη περίπτωση, ο αγωγός παραμένει σε συνεχή επαφή με κάποιο διακριτό κατακόρυφο κυματισμό σε μια κατά τα άλλα οριζόντια ευθεία γραμμή, αν και θα υπάρχει σαφώς θέμα λόγω κάποιας ανωμαλίας του εδαφικού προφίλ του πυθμένα. Στη δεύτερη περίπτωση, η απομονωμένη σφήνα διαθέτει μια απότομη κάθετη παρατυπία έτσι ώστε τα κενά που θα υπάρχουν και από τις δύο πλευρές θα καλυφθούν με το θαλασσινό νερό. Η σφήνα αντιπροσωπεύει την δυνατότητα διέλευσης κάτω από ένα μη παράλληλο σωλήνα ή την παρουσία ενός παρεμβαλλόμενου βράχου. Η έναρξη και η παύση των διαδικασιών εκσκαφής μπορεί επίσης να είναι υπεύθυνες. Τέλος, η τρίτη περίπτωση συμβαίνει όταν τα παραπάνω κενά αδειάζουν με έκπλυση άμμου που αποτελεί μια ειδική υπό-περίπτωση της πρώτης.

Σύμφωνα με τον Neil Taylor & Vinh Tran για την μοντελοποίηση των τριών πιο πάνω περιπτώσεων, συνιστάται οι σχεδιαστές να αποφεύγουν ή να εμποδίζουν το γέμισμα κενών σφήνας όπου είναι δυνατόν εξαιτίας του ρόλου τους στην παροχή προ-αναταραχής λόγω απώλειας ελαστικής ενέργειας στην μεμονωμένη περίπτωση της σφήνας.

Τέλος, ένα άλλο πολύ σημαντικό ζήτημα που προκύπτει σε αγωγούς ποντισμένους στο βυθό. όταν οι υποθαλάσσιοι αγωγοί ποτίζονται σε ρηχά ή μεσαίου βάθους νερά, υποβάλλονται σε κυματικά ρεύματα που επάγονται δυνάμεις. Ένα ουσιαστικό βήμα για το σχεδιασμό του αγωγού είναι η ακριβής αξιολόγηση των υδροδυναμικών δυνάμεων. Ένα τρέχων κύμα σε ένα αγωγό δημιουργεί μια δύναμη Υδροδυναμικής. Μια περιοχή υψηλής πίεσης εμφανίζεται στο κάτω μέρος της ανάντη πλευρά. Πέρα από την κορυφή του αγωγού, η ταχύτητα είναι υψηλότερη από την τρέχουσα θέση ελεύθερης ροής. Η ροή χωρίζεται σε μια θέση που εξαρτάται από την ταχύτητα της. Η ροή είναι ασταθής στη ζώνη ανάμιξης κατάντη του σημείου διαχωρισμού, και μια σειρά από δίνες αποβάλλονται. Ένα επακόλουθο χαμηλής πίεσης αναπτύσσεται στην κατάντη πλευρά. Αν ο αγωγός είναι ελαφρώς πάνω από τον πυθμένα η ροή έχει τροποποιηθεί ουσιαστικά. Στη συνέχεια, υπάρχει μια ροή υψηλής ταχύτητας κάτω από τον αγωγό, που δημιουργείται από την διαφορά πίεσης μεταξύ των ανάντη και κατάντη πλευρών.

Αν ο πυθμένας αποτελείται από ιζήματα, η υψηλή ταχύτητα θα διαβρώσει το κάτω μέρος και θα διευρύνει το χάσμα μεταξύ του αγωγού και το βυθό της θάλασσας, τότε η ταχύτητα θα μειωθεί μέχρι να επιτευχθεί ένα διατρέχων σταθερό βάθος. Αν ο αγωγός είναι σε μια τάφρο η ροή μπορεί να διαχωριστεί από την ανάντη πλευρά, και ο αγωγός κείτεται μερικώς στο ίχνος που δημιουργήθηκε από την πλευρά της τάφρου.

Το μοντέλο τύπου Ίχνος II λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις στο πεδίο μετά την κινηματική και τη χρονική διακύμανση των υδροδυναμικών συντελεστών τριβής και ανέλκυσης. Προτάθηκε από τον Soedigdo για τα ημιτονοειδή κύματα, καθώς και από τον Sabag για τα ημιτονοειδή κύματα που αλληλοεπιδρούν με ένα θετικό ομοιόμορφο ρεύμα.

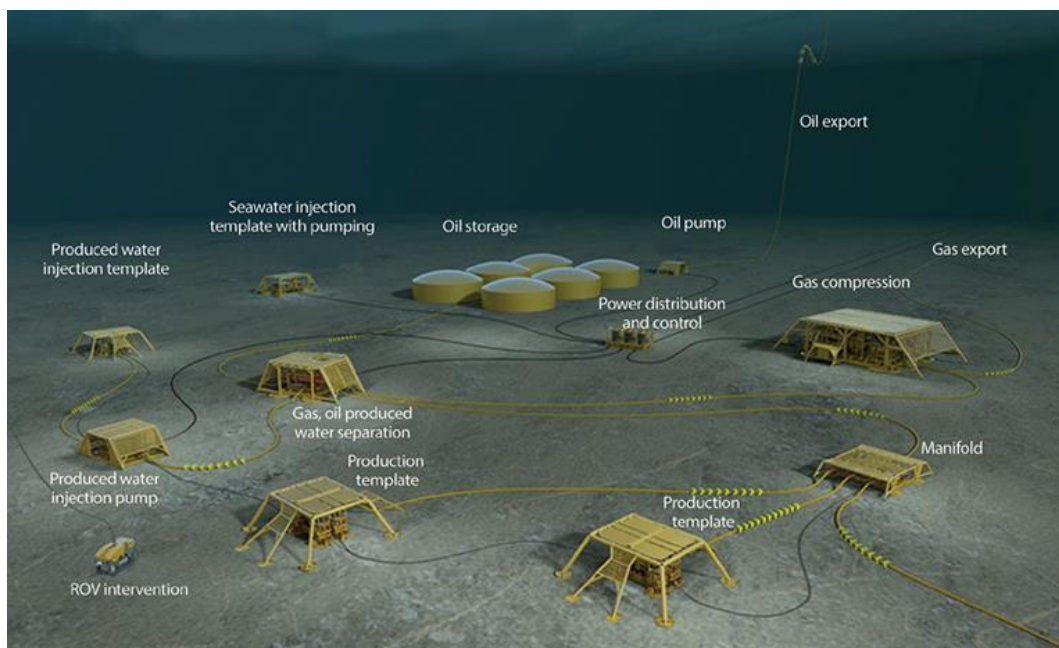


Εικόνα 9 τεχνικές πόντισης αγωγών a.S-Lay b.J-Lay Πηγή:

septyanifajar.wordpress.com/tag/pipeline/page/2/

Σταθμοί Συμπίεσης - Σταθμοί Άντλησης

Για τη μεταφορά των υδρογονανθράκων μέσω ενός συστήματος αγωγών είναι πολύ σημαντικό να δημιουργηθεί ένας Σταθμός Συμπίεσης ή ένας Σταθμός Άντλησης ανάλογα με το αν το υλικό μεταφοράς είναι το φυσικό αέριο ή το πετρέλαιο. Όλοι οι παράγοντες σχεδιασμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, μεγιστοποιώντας την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα του έργου.



Εικόνα 10 Σχηματισμός μίας τυπικής υποθαλάσσιας διάταξης Πηγή: www.spe.org/en/ogf/ogf-article-detail/?art=222

3.3.2 Σταθμοί Άντλησης

Καθώς το πετρέλαιο ρέει στον αγωγό, οι συνθήκες όπως η αλλαγή ανύψωσης, η τριβή του ρευστού και το σημείο παροχής αλλάζουν την πίεση κατά μήκος του σωλήνα. Από το σημείο εκκίνησης του αγωγού και σε ενδιάμεσες θέσεις, οι αντλίες αυξάνουν την πίεση ώστε να επιτευχθεί ο ρυθμός ροής του σχεδιασμού. Η πίεση κατά μήκος του αγωγού μεταξύ των σταθμών πέφτει προοδευτικά από το σημείο εκκένωσης του ενός σταθμού έως το σημείο αναρρόφησης του επόμενου σταθμού, αυτό οφείλεται στην τριβή του υγρού που ρέει στη γραμμή του αγωγού. Οι αντλίες κινούνται από ηλεκτροκινητήρες και βρίσκονται σε σταθμούς με μεταβλητή απόσταση κατά μήκος της διαδρομής ανάλογα με το έδαφος και τη διάμετρο του αγωγού. Οι επιθυμητές πιέσεις λειτουργίας και οι αλλαγές τους υπαγορεύουν το μέγεθος της ατομικής αντλίας και την αποδεκτή

πτώση της πίεσης (δηλαδή, η ελάχιστη πίεση αγωγού που μπορεί να γίνει ανεκτή) κατά μήκος της κύριας γραμμής. Οι σταθμοί άντλησης είναι συχνά πλήρως αυτοματοποιημένοι, αλλά μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να είναι επανδρωμένοι και να περιλαμβάνουν βοηθητικές λειτουργίες όπως να χρησιμοποιηθούν ως βάση από την οποία διεξάγονται οι επιθεωρήσεις των κύριων σωλήνων. Το συνολικό μήκος του αγωγού (σε τερματικό προορισμό του) και η ευελιξία που απαιτείται για την προσθήκη ή αφαίρεση υλικών κατά μήκος της διαδρομής του αγωγού καθιστούν αναγκαία την τοποθέτηση του Σταθμού.

Ωστόσο, η απόφαση για το κατά πόσο ή όχι χρειάζεται ένας σταθμός αντλίας για τη μεταφορά του πετρελαίου με σωστή ταχύτητα ροής κατά μήκος ενός υποθαλάσσιου αγωγού είναι μεγάλη πρόκληση. Ο σημαντικότερος παράγοντας που ορίζει αυτή την απόφαση είναι το μήκος του αγωγού. Συνήθως χρειάζονται περισσότερα από ένα αντλιοστάσια. Το πετρέλαιο λόγω της σχεδόν μηδενικής συμπίεσότητας του, έχει μικρότερη απώλεια πίεσης σε σύγκριση με έναν αγωγό ροής αερίου. Η πίεση λειτουργίας είναι επίσης χαμηλότερη από ένα σύστημα αγωγών φυσικού αερίου.

Τα αντλιοστάσια περιλαμβάνουν αντλίες (συστατικά που πραγματικά έρχονται σε επαφή με τα ρευστά στον αγωγό και παρέχουν κινητική ενέργεια) και κινητήριους (πηγές ενέργειας που παρέχουν ενέργεια, συνήθως κάποια μορφή μηχανικής ενέργειας) με τις αντλίες. Για τη διευκόλυνση της συντήρησης και για την πρόληψη των διαταραχών της λειτουργίας, ως αποτέλεσμα της αποτυχίας του εξοπλισμού, τα περισσότερα αντλιοστάσια χρησιμοποιούν πολλές αντλίες σε παράλληλη διάταξη. Όλες οι αντλίες εκτός από μία είναι ικανές να παράγουν τις επιθυμητές πιέσεις λειτουργίας και διακίνησης, έτσι μία αντλία είναι συνεχώς off-line και σε κατάσταση αναμονής. Τα αντλιοστάσια αποτελούν επίσης σημεία όπου οι ιδιοκτήτες ή οι επιμελητές του υλικού μεταφέρονται, για χάρη της επιθεώρησης. Οι σταθμοί αυτοί είναι επίσης εξοπλισμένοι με συσκευές παρακολούθησης της ροής. Τα αντλιοστάσια έχουν συνήθως συνδυασμένες εγκαταστάσεις που υποστηρίζουν τη λειτουργία του αγωγού ή διευκολύνουν τη διακοπή της λειτουργίας ή τη συντήρηση σε τμήματα του αγωγού. Έτσι υπάρχουν δεξαμενές για την προσωρινή αποθήκευση των υλικών ή για χρήση στη διαχείριση των πιέσεων της γραμμής του αγωγού και για τον έλεγχο της διακύμανσης κυμάτων του προϊόντος. Τέλος, αντλιοστάσια είναι, σε ορισμένες περιπτώσεις, στον ίδιο χώρο με τερματικούς σταθμούς ή με εγκαταστάσεις δεξαμενών.

Η επιλογή του σχεδιασμού της αντλίας βασίζεται στην επιθυμητή απόδοση, καθώς και στις φυσικές ιδιότητες του μεταφερόμενου ρευστού, ιδιαιτέρως στο ιξώδες και στο ειδικό βάρος. Η πίεση

στην κορυφή της αντλίας, ή η διαφορική πίεση που μπορεί να επιτευχθεί, είναι κρίσιμης σημασίας για την επιλογή της αντλίας που είναι ικανή να κινεί υγρά σε διαφορετικά υψόμετρα.

Δύο σχέδια αντλίας χρησιμοποιούνται κυρίως: οι φυγόκεντρες αντλίες και οι αντλίες θετικής μετατόπισης. Οι φυγόκεντρες αντλίες προτιμώνται για τη μετακίνηση μεγάλου όγκου του υλικού σε μέτρια πίεση, ενώ οι αντλίες θετικής μετατόπισης επιλέγονται για την μετακίνηση μικρών όγκων υλικού σε υψηλότερες πιέσεις γραμμής. Οι φυγόκεντρες αντλίες αποτελούνται από δύο κύρια μέρη: την περρωτή και τον έλικα. Η περρωτή, το μόνο περιστρεφόμενο εξάρτημα της αντλίας, μετατρέπει την ενέργεια που λαμβάνει από τη δύναμη που προκαλεί την περιστροφή του σε κινητική ενέργεια στο αντλούμενο ρευστό, ενώ ο έλικας μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ρευστού σε πίεση. Οι αντλίες θετικής μετατόπισης μπορεί να έχουν ποικίλα σχέδια αλλά δύο σχέδια είναι που κυριαρχούν σε εφαρμογές αγωγών: παλινδρομικές και περιστροφικές αντλίες. Οι περιστροφικές αντλίες επιλέγονται συχνότερα για το σχεδιασμό αντλίας που θα μεταφέρει παχύρρευστα υγρά, όπως ακατέργαστα έλαια. Αντίθετα με μια φυγοκεντρική αντλία όπου οι απαιτήσεις ισχύος αυξάνονται απότομα όσο αυξάνεται το ιξώδες του υγρού, η απόδοση των περιστρεφόμενων αντλιών είναι γενικά ανεπηρέαστη από τις διακυμάνσεις είτε στο ιξώδες του υγρού είτε στην πίεση της γραμμής.

3.3.3 Σταθμοί Συμπίεσης

Οι σταθμοί συμπίεσης εγκαθίστανται σε αγωγούς φυσικού αερίου ώστε να παρέχουν την πίεση που απαιτείται για τη μεταφορά φυσικού αερίου από μία θέση σε μία άλλη. Λόγω των περιορισμών των πιέσεων αγωγού, μπορεί να απαιτηθούν πολλαπλοί σταθμοί συμπίεσης για τη μεταφορά ενός μεγάλου όγκου αερίου μέσω ενός αγωγού μεγάλου μήκους. Οι θέσεις των σταθμών και οι πιέσεις στις οποίες λειτουργούν οι συμπιεστές καθορίζονται από τις επιτρεπόμενες πιέσεις του αγωγού, τη διαθέσιμη ισχύ, και από περιβαλλοντικούς και γεωτεχνικούς παράγοντες.

Υπάρχει μια μεγάλη διακύμανση της πίεσης λειτουργίας μέσα σε ένα τμήμα του αγωγού. Η τυπική πίεση μπορεί να κυμαίνεται από 200 psi έως 1500 psi. Αυτό το μεγάλο εύρος διακύμανσης οφείλεται στην περιοχή στην οποία λειτουργεί ο αγωγός, στην ανύψωση του, και στη διάμετρο του αγωγού. Λόγω της αλλαγής του περιβάλλοντος, οι σταθμοί συμπίεσης μπορεί να συμπίεσουν το φυσικό αέριο σε διάφορα επίπεδα. Η αγορά, δηλαδή η προσφορά και η ζήτηση του φυσικού αερίου, μπορεί επίσης να επηρεάσει κατά καιρούς το επίπεδο της συμπίεσης που απαιτείται για τη ροή του

φυσικού αερίου. Οι σταθμοί περιλαμβάνουν συνήθως καθαριστές, διηθητήρες ή φίλτρα διαχωρισμού που απομακρύνουν τα υγρά, τη βρωμιά, τα σωματίδια, και άλλες ακαθαρσίες από το φυσικό αέριο. Αν και το φυσικό αέριο θεωρείται ξηρό καθώς περνά μέσα από τους αγωγούς, το νερό και άλλοι υδρογονάνθρακες μπορεί να συμπυκνωθούν μαζί με το αέριο καθώς μεταφέρεται. Έτσι στο σταθμό συμπίεσης θα αφαιρεθούν αυτές οι ακαθαρσίες από το αέριο, έτσι ώστε να μπορούν να πεταχτούν ή να πωληθούν ανάλογα με την περίπτωση.

3.3.3.1 Συστατικά μέρη ενός Σταθμού Συμπίεσης

1. Μονάδα Συμπίεσης - Είναι το κομμάτι του εξοπλισμού που συμπιέζει πραγματικά το φυσικό αέριο. Ορισμένοι σταθμοί συμπίεσης μπορεί να έχουν πολλαπλές μονάδες συμπίεσης ανάλογα με τις ανάγκες του αγωγού. Η μονάδα συμπίεσης συνήθως λειτουργεί με έναν από τους κάτωθι τρόπους:

1a. Τουρμπίνα με φυγοκεντρικούς συμπιεστές - Αυτός ο τύπος του συμπιεστή τροφοδοτείται από μια τουρμπίνα για να λειτουργήσει το φυγοκεντρικό συμπιεστή και τροφοδοτείται από το φυσικό αέριο που μεταφέρει ο ίδιος ο αγωγός. Στις περισσότερες περιπτώσεις πανομοιότυποι φυγοκεντρικοί συμπιεστές τοποθετούνται σε παράλληλη διάταξη.

1b. Ηλεκτροκίνητες μηχανές με φυγοκεντρικούς συμπιεστές - Αυτός ο τύπος του συμπιεστή χρησιμοποιεί επίσης φυγόκεντρους συμπιεστές για τη συμπίεση του αερίου. Ωστόσο, αντί να τροφοδοτείται με φυσικό αέριο του αγωγού, βασίζονται σε υψηλής τάσης ηλεκτρικό κινητήρα.

1c. Παλινδρομικός κινητήρας με παλινδρομικό συμπιεστή - Αυτός ο τύπος του συμπιεστή χρησιμοποιεί μεγάλους κινητήρες με έμβολα για στρέψει εναλλασσόμενα έμβολα που βρίσκονται εντός κυλινδρικού θηκών στο πλάι της μονάδας. Αυτά τα εναλλασσόμενα έμβολα συμπιέζει το αέριο. Οι κινητήρες αυτοί τροφοδοτούνται με φυσικό αέριο.

2. Φίλτρα και Καθαριστές - Όπως προαναφέρθηκε άλλο συστατικό σταθμών συμπίεσης είναι τα φίλτρα και οι καθαριστές που αφαιρούν νερό, υδρογονάνθρακες και άλλες ακαθαρσίες από το φυσικό αέριο.

3. Συστήματα ψύξης του αερίου - Όταν το φυσικό αέριο συμπιέζεται αυξάνεται η θερμοκρασία του. Αυτό συνήθως αντισταθμίζεται θέτοντας το αέριο να μετακινηθεί μέσα από τα συστήματα ψύξης που το επαναφέρουν σε θερμοκρασίες που δεν θα βλάψουν τον αγωγό.

4.εξατμίσεις - Οι εξατμίσεις υπάρχουν συνήθως για να βοηθήσουν να μειωθεί το επίπεδο θορύβου στους σταθμούς συμπίεσης. Είναι ιδιαίτερα σημαντικές εάν ο σταθμός συμπίεσης βρίσκεται κοντά σε κατοικημένες περιοχές.

3.4 Έλεγχος & Συντήρηση Αγωγού

Ο έλεγχος και η συντήρηση είναι οι πιο σημαντικές πτυχές μετά την κατασκευή ενός αγωγού. Ιδίως όταν αφορά έναν υποθαλάσσιο αγωγό μεταφοράς υδρογονανθράκων πρέπει να δείχνουμε ακόμη περισσότερη προσοχή σε αυτά τα δύο θέματα. Ο έλεγχος μπορεί να διαχωριστεί στην επιθεώρηση και στην εποπτεία. Η συντήρηση εξασφαλίζει τη βέλτιστη και ασφαλέστερη λειτουργία του συστήματος αγωγών και ουσιαστικά εξαρτάται από την ορθή εφαρμογή του ελέγχου.

3.4.1 Συντήρηση

Ο ρόλος και ο στόχος της συντήρησης είναι να εγγυηθεί ότι οι αγωγοί εξακολουθούν να επιτυγχάνουν το σκοπό για τον οποίο προορίζονταν με ασφαλές και αξιόπιστο τρόπο. Η λειτουργία τους και τα σχετικά πρότυπα επιδόσεων για τα οποία σχεδιάστηκαν αποτελούν τη βάση για τους στόχους της συντήρησης. Η συντήρηση οφείλει να γίνεται σε όλα τα συστήματα αγωγών, συμπεριλαμβανομένων και των παρελκόμενων εξοπλισμών. Οι δράσεις συντήρησης και οι μορφές συντήρησης πρέπει να αναπτυχθούν ώστε να αντιπροσωπεύουν το προηγούμενο ιστορικό του εξοπλισμού και των επιδόσεων του.

Υπάρχουν δύο στρατηγικές συντήρησης: 1) μια αντιδραστική προσέγγιση (διορθωτική συντήρηση, κατά τη λειτουργία του εξοπλισμού κατά την αστοχία ή κοντά σε αστοχία), ή 2) μια προληπτική προσέγγιση (επιθεώρηση του εξοπλισμού και λήψη μέτρων για γενική επισκευή, επισκευή ή αντικατάσταση, πριν από την αστοχία). Η προληπτική στρατηγική, μπορούμε να διακριθεί σε προληπτική συντήρηση, όπου οι έλεγχοι γίνονται με βάση το χρόνο, προγραμματίζονται σε τακτά χρονικά διαστήματα (όπως η αλλαγή του πετρελαίου ανά ένα χρονικό διάστημα), και την προληπτική συντήρηση, όπου οι επιθεωρήσεις γίνονται με βάση την κατάσταση, και η συντήρηση προκύπτει από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της επιθεώρησης. Ο στόχος της προληπτικής συντήρησης είναι να επιτευχθεί η αναγκαία και επαρκής αξιοπιστία. Με την αναγκαία αξιοπιστία εννοούμε ότι η προσέγγιση αυτή θα πρέπει να εφαρμοστεί μόνο όταν είναι απαραίτητο. Υπάρχουν συστήματα όπου

η προληπτική συντήρηση είναι περιττή, αυτά είναι τα συστήματα των οποίων η παράλειψη θα ήταν μικρής σημασίας για την ασφάλεια και τη λειτουργία και μπορούν εύκολα να επισκευαστούν. Η διορθωτική συντήρηση είναι σκόπιμη σε αυτές τις περιπτώσεις. Με τον όρο επαρκή αξιοπιστία εννοούμε ότι, όταν η προληπτική συντήρηση κρίνεται απαραίτητη, πρέπει να διεξάγεται με τρόπο που ελαχιστοποιεί το κόστος ενώ επιτυγχάνεται το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας.

Σε περίπτωση βλάβης αγωγού που απειλεί την ασφαλή συνεχή μεταφορά των υδρογονανθράκων, οι ενέργειες επιθεώρησης, επαναξιολόγησης, συντήρησης και επισκευής που πρέπει να ληφθούν αμέσως, είναι οι εξής:

- Προσδιορισμός πιθανής αιτίας της βλάβης
- Προσδιορισμός του τύπου της βλάβης που ανέκυψε
- Καθορισμός της ζώνης κρισιμότητας του αγωγού και κατηγοριοποίηση των ζημιών
- Εντοπισμός της θέσης της βλάβης και των τεχνικών για την αξιολόγηση της
- Τεχνικές επισκευής εκτός συνηθισμένου πλαισίου, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε

συγκεκριμένα σενάρια βλάβης

3.4.2 Έλεγχος

3.4.2.1 Επιθεώρηση

Η επιθεώρηση και οι δοκιμές είναι σύνηθες να διεξάγονται καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του αγωγού. Η επιθεώρηση είναι απαραίτητη πριν και κατά τη διάρκεια της κατασκευής για να εξασφαλιστεί ότι ο αγωγός κατασκευάζεται όπως προβλέπεται. Η επιθεώρηση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ελέγχει ότι ο αγωγός παραμένει κατάλληλος για το σκοπό που προορίζεται. Αν και αθροιστικά τα δεδομένα της επιθεώρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αξιολογήσουν το ιστορικό της διάβρωσης, η επιθεώρηση προσφέρει στιγμιότυπα της κατάστασης των υλικών και ρεαλιστικά στοιχεία της κατάστασης του αγωγού από τα οποία μπορεί υπολογισθεί η εναπομείνασα διάρκεια ζωής του έργου. Τα δεδομένα των επιθεωρήσεων και των μετρήσεων του ρυθμού διάβρωσης αφορούν ειδικά στη θέση του αισθητήρα μέτρησης και η προέκταση σε ολόκληρη αγωγή πρέπει να γίνει με προσοχή. Υπάρχουν στατιστικές τεχνικές που μπορούν να προσφέρουν λογικές εκτιμήσεις της χειρίστης περίπτωσης απώλεια μετάλλου σε ένα αγωγό.

3.4.2.2 Παρακολούθηση

Η παρακολούθηση γίνεται συνήθως σε πιο συχνή βάση από την επιθεώρηση, και παρέχει πιο σφαιρική εικόνα. Οι παραδοσιακές τεχνικές παρακολούθησης είναι παρεμβατικές, απαιτώντας την επαφή των ανιχνευτών ή των δειγμάτων με το υγρό του αγωγού. Η παρακολούθηση παρέχει μια εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης με τον οποίο μπορεί να αποφασιστεί η στρατηγική για τον περιορισμό του. Η παρακολούθηση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορισθούν οι μεταβολές της διαβρωτικής ικανότητας των υγρών. Τα ποσοστά διάβρωσης που προέρχονται από την παρακολούθηση των δεδομένων θεωρούνται ως ενδεικτικά των τάσεων και δεν από μόνα τους για να αξιολογήσουν την κατάσταση ενός αγωγού, αν και οι πληροφορίες για τη διάβρωση αποτελούν ένα απαραίτητο συμπλήρωμα για την επιθεώρηση.

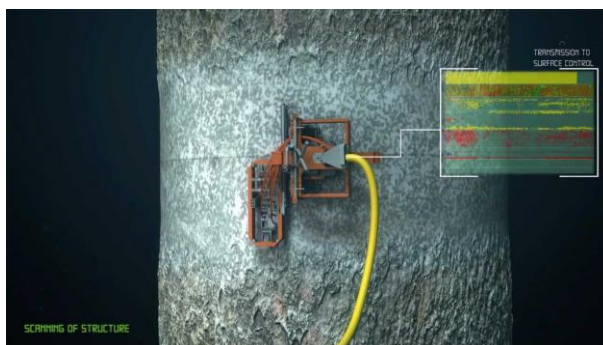
Η Σύγκριση

Οι εξελίξεις στις δύο τεχνικές επιθεώρησης και παρακολούθησης, ιδιαίτερα η ανάπτυξη τεχνικών σε πραγματικό χρόνο, επιτρέπουν ημι-συνεχή, μη επεμβατική αξιολόγηση, έχουν εξαλείψει τη διάκριση μεταξύ επιθεώρησης και παρακολούθησης. Ολοένα και περισσότερο, τα υπολογιστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση των διαφόρων τομέων μέσα σε ένα σύστημα αγωγών, και τα δεδομένα μπορούν να παραχθούν σε συνδυασμό με την παρακολούθηση και την επιθεώρηση, για τον προσδιορισμό του προφίλ της διάβρωσης κατά μήκος του αγωγού. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να γίνεται μια περιοδική επιθεώρηση του πλήρη αγωγού. Η παρακολούθηση της διάβρωσης από μόνη της είναι πιθανό να καταργηθεί σταδιακά, και αντικατασταθεί από ημι-συνεχείς τεχνικές επιθεώρησης. Οι συμβατικές τεχνικές παρακολούθησης της διάβρωσης απαιτούν πρόσβαση στο υγρό, και ως εκ τούτου πρέπει να δημιουργηθεί ένα σημείο εισόδου στον αγωγό για τη λήψη δειγμάτων ή τοποθέτηση ανιχνευτών.

3.4.2.3 Τεχνικές Επιθεώρησης

Υπέρηχος

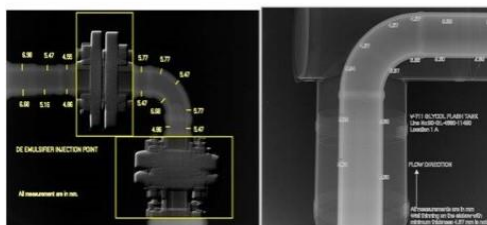
Η Εικόνα 11 που ακολουθεί περιέχει τον τρόπο τοποθέτησης ενός συστήματος υπερήχων σε έναν αγωγό με σκοπό την επιθεώρησή του.



Εικόνα 11 Σύστημα Υπερήχων τοποθετημένο σε αγωγό προς επιθεώρηση Πηγή: www.youtube.com/watch?v=lxnfqzqYjiY

Τα συστήματα υπερήχων παρέχουν τρισδιάστατες πληροφορίες σχετικά με τη θέση των ελαττωμάτων και χρησιμοποιούνται μόνα τους ή ως ένα συμπλήρωμα στην ακτινογραφία. Ο υπέρηχος είναι ήχος υψηλής συχνότητας στο φάσμα των kHz έως MHz συχνοτήτων που δημιουργούνται όταν ένα δονούμενο πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο που βρίσκεται σε ένα ανιχνευτή εισάγεται στο μέταλλο μέσω ενός υλικού συζεύξεως. Τα ηχητικά κύματα ανακλώνται από περιοχές με διαφορετική πυκνότητα, για παράδειγμα, από το πίσω τοίχωμα του σωλήνα ή σε οποιοδήποτε σημείο με ατέλειες στο εσωτερικό του μετάλλου. Μερικό από το ανακλώμενο σήμα ανιχνεύεται, και ο χρόνος μεταξύ της αποστολής του σήματος έως την παραλαβή του ήχου χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του πάχους του μετάλλου και / ή τη θέση του ελαττώματος. Όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα του ήχου, τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος και, κατά συνέπεια, τόσο καλύτερη είναι η ευκρίνεια. Ωστόσο, το μήκος κύματος περιορίζεται από το μέσο μέγεθος των κόκκων του μετάλλου, και σε μικρότερα μήκη κύματος, ο δείκτης θόρυβος προς σήμα γίνεται υπερβολικός. Η τεχνική μπορεί να καλύψει τα 3 m / hr με ένα υψηλό επίπεδο διακρίσεων, που αντιπροσωπεύουν μια σχετικά καλή αξία για τα χρήματα που δαπανούνται για αυτή την τεχνική .

Ακτινογραφία



Εικόνα 12 Παράδειγμα ακτινογραφίας κατά τη λειτουργία των ανοιγμάτων με μετρήσεις του απομένουτος πάχους τοιχώματος.



Εικόνα 13 Παράδειγμα ακτινογραφίας με εναπόθεση υλικού και απώλεια μετάλλου

Πηγή: divemarinendt.com/advanced-ndt/computed-radiography-inspection/

Η ακτινογραφία χρησιμοποιεί υψηλής ενέργειας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται είτε από μια ηλεκτρική μηχανή (δηλαδή, οι ακτίνες Χ) ή από ραδιενεργή πηγή (δηλαδή, οι ακτίνες γάμμα). Όπου είναι εφικτό, η ακτινογραφία ακτίνων Χ προτιμάται επειδή ο επιθεωρητής έχει τον έλεγχο στην ευαισθησία και στην επαναληψιμότητα. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι η πηγή μπορεί να συντονιστεί για να προσδιορίσει το ελάχιστο αποδεκτό ελάττωμα και δεν δείχνει καν τα μη σημαντικά ελαττώματα.

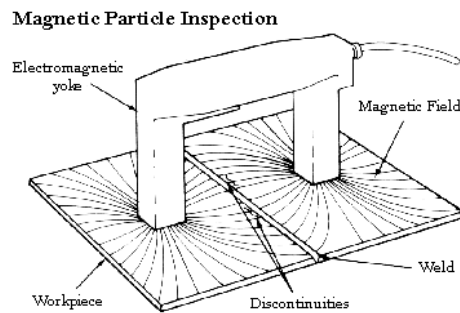
Κατά την εγκατάσταση του αγωγού, η πηγή ακτινοβολίας μπορεί να βρίσκεται στη μία πλευρά του σωλήνα και το φιλμ να βρίσκεται στην απέναντι πλευρά. Η φωτογραφία ακτίνων Χ λαμβάνεται μέσω του διπλού τοιχώματος. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται μόνο για αγωγό μικρής διαμέτρου, και λεπτού τοιχώματος. Εναλλακτικά, η πηγή μπορεί να εγκατασταθεί στο εσωτερικό του αγωγού, και το φιλμ τυλίγεται γύρω από την εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα. Αυτή είναι η πιο κοινή διαδικασία και δίνει εξαιρετικά βελτιωμένη αναγνώριση της συγκόλλησης και τις ελλείψεις του υλικού. Οι φωτογραφίες διαβάζονται ως αρνητικά και γενικά δεν παράγονται οι κανονικές εικόνες. Τα ελαττώματα του υλικού – όπως ρωγμές, το πορώδες, και περιοχές με έλλειψη σύντηξης είναι ουσιαστικά περιοχές που λείπει μέταλλο και ανιχνεύονται όπου υπάρχει λιγότερη απορρόφηση της ακτινοβολίας. Εμφανίζονται ως λευκές περιοχές στο μαύρο φόντο του αρνητικού φιλμ, αν η πηγή είναι σωστά καλιμπραρισμένη με το ονομαστικό πάχος του αγωγού.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης ακτινογραφίας για την αξιολόγηση της απώλειας μετάλλου είναι η ταχύτητα εκτέλεσης και η παροχή ενός μόνιμου αρχείου. Επίσης, οι ενώσεις, οι μονώσεις και τα επιχρίσματα του αγωγού είναι περατά και δεν χρειάζεται να αφαιρεθούν. Το μειονέκτημα είναι ότι μόνο τοπικά μπορεί να επιθεωρηθεί ο αγωγός, καθώς χρειάζεται πολύς χρόνος για να καλυφθεί ένα μεγάλο μήκος του αγωγού.

Έλεγχος με Μαγνητική (MPI)

Ο έλεγχος με μαγνητική (MPI) χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ρωγμών στην επιφάνεια. Μπορεί να εφαρμοστεί σε χάλυβα υποθαλάσσια και χρησιμοποιείται τακτικά για έλεγχο για ρωγμές κόπωσης στους διαρθρωτικούς κόμβους. Η επιφάνεια του σωλήνα μαγνητίζεται χρησιμοποιώντας ηλεκτρικούς ή μόνιμους μαγνήτες. Το μαγνητικό πεδίο παραμορφώνεται στις περιοχές με ρωγμές και σε άλλα ελαττώματα της επιφάνειας που δεν είναι παράλληλα προς την μαγνητικής ροή.

Το κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής MPI είναι η ανίχνευση των λεπτών ρωγμών που δεν είναι ορατές με το μάτι. Ωστόσο, απαιτεί μια καθαρή επιφάνεια και είναι σχετικά αργή. Εάν χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ελασματοποιήσεων, ο αγωγός πρέπει να απομαγνητιστεί αργότερα για την πρόληψη του παραμένουστος μαγνητικού πεδίου από την αποκάλυψη της συγκόλλησης όταν γίνεται σε περίμετρο συγκόλλησης.



Εικόνα 14 Σχηματική Παρουσίαση του ελέγχου Μαγνητικού Πεδίου Πηγή: www.core-irm.com/2013/991/subsea-cp-mpi/

Μέρος Β

Πειραματική Διερεύνηση

Μέρος Β - Πειραματική Διερεύνηση

Κεφάλαιο 4. Πειραματική Διάταξη

4.1 Σεισμική τράπεζα

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία της κίνησης είναι σεισμική τράπεζα ενός βαθμού ελευθερίας κατασκευασμένη από την APS Dynamics . Αποτελείται από δύο κύρια τμήματα, το τμήμα ενίσχυσης του αναλογικού σήματος και το τμήμα κίνησης. Το πρώτο ευθύνεται για την μετατροπή του χαμηλής ισχύος σήματος τροφοδοσίας σε σήμα κατάλληλο για την απ' ευθείας οδήγηση της τράπεζας (τύπος EP- 124), ενώ το δεύτερο για την μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος υψηλής ισχύος σε κινητική ενέργεια (τύπος ELECTRO-SEIS Shaker 400). Τόσο το πρώτο όσο και το δεύτερο τμήμα χαρακτηρίζονται από λειτουργικούς περιορισμούς, οι οποίοι λήφθηκαν υπόψη κατά το σχεδιασμό της μεθοδολογίας των πειραμάτων. Το τμήμα ενίσχυσης τροφοδοτεί με πεπερασμένη ηλεκτρική ισχύ την τράπεζα, κάτι που σημαίνει πρακτικά ότι όσο η συχνότητα ταλάντωσης αυξάνεται τόσο το εύρος της τείνει να μειωθεί και για το λόγο αυτό απαιτείται διόρθωση. Η δε τράπεζα περιορίζεται από το μέγιστο εύρος ταλάντωσης ($\pm 6\text{cm}$) του ελεύθερου πλαισίου. Το δυναμικό εύρος συχνοτήτων ταλάντωσης φτάνει τα 100Hz με δραστικά μειωμένο το πλάτος της ταλάντωσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα των αισθητήρων που τοποθετούνται στο φορείο της σεισμικής τράπεζας τόσο μεγαλύτερη αδράνεια παρουσιάζει αυτό και συνακόλουθα μειώνεται το εύρος συχνοτήτων ταλάντωσης.



Εικόνα 15 Σεισμική Τράπεζα APS 400 ELECTRO-SEIS®

Figure 15 APS 400 ELECTRO-SEIS® Seismic Shaker

Ο APS 400 ELECTRO-SEIS® δονητής, που βλέπουμε στην Εικόνα 16, είναι μια μεγάλης κίνησης, ηλεκτροδυναμική γεννήτρια δύναμης που έχει σχεδιαστεί ειδικά για να χρησιμοποιηθεί μόνη της ή σε συστοιχίες για τη μελέτη δυναμικών χαρακτηριστικών απόκρισης των διαφόρων δομών. Χρησιμοποιείται για την τροπική διέγερση των πολύπλοκων δομών, ιδιαίτερα όταν απαιτούνται χαμηλές συχνότητες. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των κραδασμών χαμηλών συχνοτήτων των εξαρτημάτων και συνελύσεων.

Εφαρμογές: Ο προσδιορισμός των φυσικών συχνοτήτων λειτουργίας, τα σχήματα, τα ποσοστά απόσβεσης και διανομές πίεσης. Η διέγερση των κατασκευασθέντων εξοπλισμών στο εργοστάσιο ή των εγκατεστημένων στο πεδίο για να αποδειχθεί η συμμόρφωση σε προδιαγραφές με σεισμικά κριτήρια. Η σεισμική προσομοίωση για τις συνιστώσες. Ο έλεγχος και η βαθμονόμηση των σεισμικών οργάνων. Και τέλος στις Γεωλογικές υπηρεσίες, Επιστήμη, Φυσική και Σεισμική

Χαρακτηριστικά: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ημιτονοειδούς κύματος, να σαρώσει ημιτονοειδές κύμα, τυχαίες ή επιβαλλόμενες κυματομορφές δύναμης, πλήρως ρυθμιζόμενο στην θέση της πηγής. Η δοκιμή της διάταξης δείχνει ευελιξία – λειτουργεί σε σταθερό σώμα, χωρίς σώμα, χωρίς σπλισμό. Το νέο μοντέλο είναι βελτιστοποιημένο ώστε να μεταφέρει τη δύναμη για το συντονισμό του φορτίου με το ελάχιστο δυνατό βάρος του δονητή και την ελάχιστη αγόμενη δύναμη. Ρυθμιζόμενος σπλισμός για να μπορεί να κάνει εκ νέου κεντράρισμα για οριζόντια και κατακόρυφη λειτουργία ή άλλες εξωτερικές προ-φορτίσεις. Φορητότητα από δύο άτομα – συνολικό βάρος 73 kg (160 lb).

4.2 Ενισχυτής EP-124

Ο ενισχυτής EP-124, που βλέπουμε στην Εικόνα 17, αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της σεισμικής τράπεζας και ευθύνεται για την μετατροπή του χαμηλής ισχύος σήματος τροφοδοσίας σε σήμα κατάλληλο για την απ' ευθείας οδήγηση της τράπεζας



Εικόνα 16 Ενισχυτής EP-124, Figure 16 EP-124 Amplifier

Εφαρμογές :

- Ενίσχυση ισχύος για τροπικές δοκιμές της σεισμικής τράπεζας.
- Ενισχυτής ισχύος για τα συστήματα περιβαλλοντικής δοκιμής

Φάσμα Χρήσης:

- Έρευνα και ανάπτυξη των υπηρεσιών στη βιομηχανία
- Περιβαλλοντικές δοκιμές σε εργαστήρια. Πανεπιστήμια και ερευνητικά ιδρύματα

Χαρακτηριστικά :

• Επιλογές τάσης ή ρεύματος ενίσχυση. Φάσμα συχνότητα DC ... 150 kHz. Δυνατότητα παρακολούθησης ρεύματος ή τάσης. Έλεγχος της ενίσχυσης. Έλεγχος ορίου ρεύματος. Οθόνη πολλαπλών λειτουργιών

- Διακόπτης για αναστροφή φάσης (0 ° ή 180 °)
- Είσοδοι ελέγχου για απομακρυσμένη διακοπή λειτουργίας σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

Έλεγχος σίγασης εισόδου

- Προστασία υπερφόρτωσης • Αναγκαστική ψύξη του αέρα σε συνεχή λειτουργία
- Λειτουργία Υψηλής αξιοπιστίας

Περιγραφή

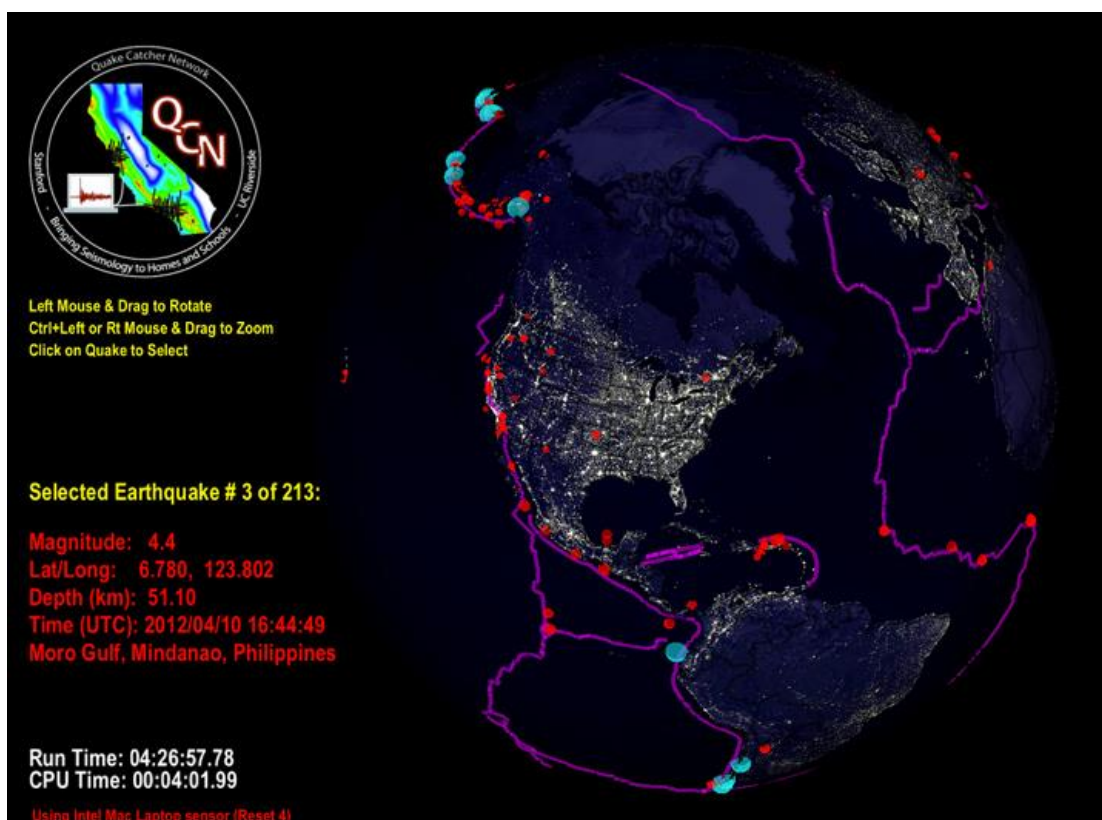
Ο ενισχυτής ισχύος Τύπος APS 124 έχει σχεδιαστεί για να οδηγεί οποιαδήποτε δόνηση ή τροπική διέγερση που απαιτεί έναν ενισχυτή ισχύος 810 VA. Η ονομαστική ισχύς AC είναι 810 VA σε 2,5 Ohm διέγερση ή φορτίο αντίστασης. Το αρμονικό περιεχόμενο της εξόδου είναι πολύ μικρό, όσο χρησιμοποιείται βαριά αρνητική ανάδραση. Το όργανο μπορεί να ανεχθεί διακυμάνσεις στη θερμοκρασία και στη γραμμή τροφοδοσίας, διατηρώντας παράλληλα εξαιρετική σταθερότητα.

Το APS 125 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γεννήτρια τάσης με χαμηλή σύνθετη αντίσταση εξόδου και μία επίπεδη τάση απόκρισης συχνότητας, είτε ως γεννήτρια ρεύματος με υψηλής απόδοσης αντίσταση και μία επίπεδου ρεύματος απόκριση συχνότητας. Το όριο RMS εξόδου ρεύματος είναι ρυθμιζόμενο.

4.3 Επιταχυνσιογράφος

Το Quake-Catcher Network είναι μια πρωτοβουλία συνεργασίας για την ανάπτυξη του μεγαλύτερου στον κόσμο, χαμηλού κόστους, ισχυρού σεισμικού δικτύου, με τη χρήση αισθητήρων που συνδέονται με συνδεδεμένους στο διαδίκτυο υπολογιστές. Με τη βοήθειά όλων, το Quake-Catcher Network μπορεί να παρέχει καλύτερη κατανόηση των σεισμών, δίνει έγκαιρη προειδοποίηση σε σχολεία, συστήματα αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, και άλλους οργανισμούς. Το Quake-Catcher Network παρέχει επίσης εκπαιδευτικό λογισμικό που έχει σχεδιαστεί για να βοηθήσει στην διδασχία σχετικά με τους σεισμούς και τους κινδύνους ενός σεισμού.

Στην Εικόνα 18 βλέπουμε ένα στιγμιότυπο της οθόνης έναρξης του λογισμικού QCN, το λογισμικό που χρησιμοποιούμε για να ελέγξουμε τον επιταχυνσιογράφο.



Εικόνα 17 Τα χαρακτηριστικά των πρόσφατων σεισμών που καταγράφηκαν από το πρόγραμμα ανά τον κόσμο

Figure 17 Characteristics of recent earthquakes recorded by the QCN program around the world

Η αντισεισμική προστασία είναι μια κοινή ευθύνη για δισεκατομμύρια ανθρώπων σε όλο τον κόσμο. Το Quake-Catcher Network (QCN) παρέχει λογισμικό έτσι ώστε τα άτομα να μπορούν να ενώσουν τις δυνάμεις τους για να βελτιωθεί η παρακολούθηση των σεισμών, η ενημέρωση και η ευαισθητοποίηση έναντι σεισμού, και η επιστήμη των σεισμών. Το Quake-Catcher Network (QCN) συνδέει τους υφιστάμενους δικτυωμένους φορητούς και επιτραπέζιους υπολογιστές με την ελπίδα να σχηματίσουν το μεγαλύτερο ισχυρής-κίνησης σεισμικό δίκτυο του κόσμου. (Εικόνα 19)



Εικόνα 18 Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι θέσεις των χρηστών του Quake-Catcher Network (QCN)
Figure 18 Map depicting the user's locations of the Quake-Catcher Network (QCN)

Διανεμόμενα υπολογιστικά προγράμματα

Το Quake-Catcher Network είναι ένα δίκτυο υπολογιστών που συνδέει τους εθελοντές υπολογιστές που φιλοξενούν το πρόγραμμα σε ένα δίκτυο ανίχνευσης κίνησης σε πραγματικό χρόνο. Το QCN είναι ένα από τα πολλά επιστημονικά προγράμματα υπολογιστών που τρέχει στην κατακευματισμένη υπολογιστική πλατφόρμα του παγκοσμίου φήμης Berkeley. Έχει ανοικτή Υποδομή

Υπολογιστικού Δικτύου (BOINC). Οι εθελοντές υπολογιστές παρακολουθούν αισθητήρες δόνησης που ονομάζονται MEMS επιταχυνσιόμετρα, και μεταδίδουν ψηφιακά «εναύσματα» στους διακομιστές QCN όποτε παρατηρούνται ισχυρές νέες κινήσεις. Οι servers του QCN κοσκινίζουν αυτά τα σήματα, ώστε να καθορίσουν ποια αντιπροσωπεύουν σεισμούς, και ποια αντιπροσωπεύουν τον πολιτιστικό θόρυβο (όπως οι πόρτες που κλείνουν με πάταγο, ή φορτηγά κατά την οδήγηση).

Δύο Τύποι αισθητήρων

Υπάρχουν δύο κατηγορίες των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται από το QCN: 1) εσωτερικοί αισθητήρες σε κινητή συσκευή, και 2) εξωτερικοί αισθητήρες USB.

Φορητές συσκευές: Οι MEMS αισθητήρες που βλέπουμε στην Εικόνα 20, συχνά περιλαμβάνονται σε φορητούς υπολογιστές, παιχνίδια, κινητά τηλέφωνα και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές για την προστασία του υλικού, την πλοήγηση και τον έλεγχο του παιχνιδιού. Όταν αυτές οι συσκευές είναι ακόμα συνδεδεμένες με το QCN, το λογισμικό QCN παρακολουθεί το εσωτερικό επιταχυνσιόμετρο για ισχυρή νέα κίνηση. Δυστυχώς, αυτές οι συσκευές είναι σπάνια στέρες στο πάτωμα, κι έτσι μπορεί να αναπηδήσουν όταν παρουσιαστεί ένας μεγάλος σεισμός. Παρόλο που αυτό δεν είναι ιδανικό για τον χαρακτηρισμό της περιφερειακής κίνησης του εδάφους, πολλοί τέτοιοι αισθητήρες εξακολουθούν να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις θέσεις ενός σεισμού και το μέγεθος του.



Εικόνα 19 Αισθητήρας MEMS, Figure 19 MEMS Sensor

Αισθητήρες USB: Οι MEMS αισθητήρες μπορεί να τοποθετηθούν στο πάτωμα και να συνδεθούν με έναν επιτραπέζιο υπολογιστή μέσω ενός καλωδίου USB. Αυτοί οι αισθητήρες έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των αισθητήρων κινητής συσκευής. 1) Με την τοποθέτησή τους στο πάτωμα, μετρούν περισσότερο αξιόπιστα την κίνηση από τις κινητές συσκευές. 2) Αυτοί οι αισθητήρες έχουν

συνήθως χαμηλότερο θόρυβο και καλύτερη ανάλυση των τριών διαστάσεων της κίνησης. 3) Ο αισθητήρας USB πρέπει φυσικά να αφαιρεθεί ή να απενεργοποιηθεί από το παιχνίδι, τηλέφωνο, ή το φορητό υπολογιστή, κατά τη διάρκεια της ανθρώπινης αλληλεπίδρασης με τη συσκευή έτσι ώστε μην μειώσει την απόδοση των αισθητήρων. 4) Οι αισθητήρες USB μπορούν να ευθυγραμμιστούν με το Βορρά, έτσι ώστε να γνωρίζουμε ποια κατεύθυνση είναι η οριζόντια του άξονα "X" και που αντιστοιχούν οι άξονες "Y" και "Z".

Κάθε αισθητήρας έχει διαφορετική ευαισθησία που οφείλεται 1) στο θόρυβο του επιταχυνσιόμετρου ή στον ηλεκτρικό θόρυβο και 2) στη μετατροπή αναλογικού σε ψηφιακού σήματος. Ο θόρυβος του επιταχυνσιόμετρου είναι πολύ δύσκολο να μειωθεί με πολύ μικρά ισοζύγια μετρούμενα από πολύ μικρές ηλεκτρικές τάσεις. Αυτό γίνεται ακόμη δυσκολότερο όταν συνδυάζεται με στάνταρ συσκευές όπως USB, η οποία μπορεί να προκαλέσει μεγάλες διακυμάνσεις στην παροχή ρεύματος. Η ψηφιακή ανάλυση περιορίζεται από τον αριθμό των bits και την ποιότητα του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό φίλτρο που εφαρμόζεται στο σήμα. Σε γενικές γραμμές, οι αισθητήρες QCN διαθέτουν υψηλότερο θόρυβο και ταχεία ψηφιακή ανάλυση από τα παραδοσιακά σεισμόμετρα έρευνας, αλλά στη συνέχεια και πάλι, κοστίζουν λιγότερο του 1/100^{ου} έως 1/1000^{ου} του αρχικού κόστους, και ακόμα λιγότερο για τη μακροπρόθεσμη συντήρηση.

Ψηφιακή Ανάλυση

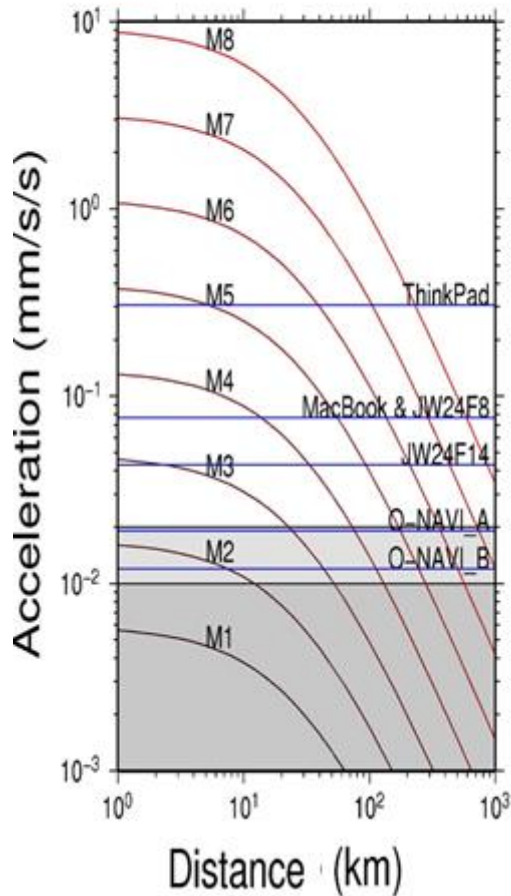
Όλες οι επιταχύνσεις ξεκινούν ως συνεχείς ιδιότητες, αλλά πρέπει να ψηφιοποιηθούν για τους υπολογιστές για να τους χειριστούμε. Η ψηφιακή ανάλυση δίνεται ως εύρος του αισθητήρα (π.χ., -2g έως 2 g, 1g όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας της Γης 9.8m/s²) διαιρούμενο διά του συνολικού αριθμού των ψηφιακών μονάδων. Για ένα αναλυτή 8bit, υπάρχουν 2⁸= 256 τιμές.

Πίνακας 5 Ψηφιακή Ανάλυση του Αισθητήρα, Table 5 Digital Sensor Analysis

Αριθμός των bits	Αριθμός των ψηφιακών μονάδων	Ψηφιακή Ανάλυση (σε m / s ²)
8	256	0.15
10	1024	0.04
12	4096	0.01
14	16384	0.002
16	65536	0.0006

Θόρυβος του Αισθητήρα

Sensor Noise



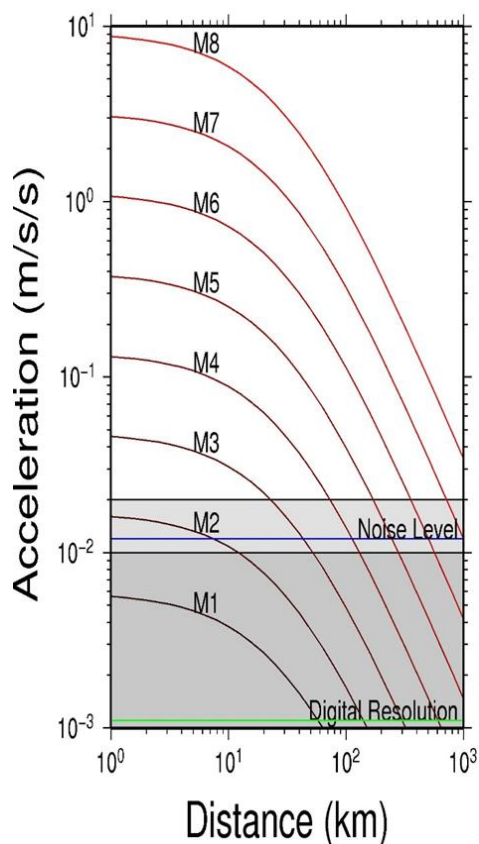
Εικόνα 20 Διάγραμμα Θορύβου του Αισθητήρα, Figure 20 Sensor Noise Chart

Η στάθμη θορύβου του κάθε αισθητήρα είναι στο ελάχιστο 1 ψηφιακή μονάδα, αλλά μπορεί να φτάσει σε 30 ψηφιακές μονάδες. Η στάθμη θορύβου (μπλε γραμμή) του κάθε τύπου αισθητήρα είναι σχεδιασμένη στην Εικόνα 20. Για λόγους σύγκρισης, οι ακατέργαστες επιταχύνσεις που αναμένονται από ένα σεισμό διαφόρων μεγεθών (M1-8) σχεδιάζονται. Για αισθητήρες σε σπίτια και κτίρια, οι διαλείπουσες ανθρωπογενείς πηγές θορύβου καλύπτουν συχνά τα χαμηλής έντασης σήματα. Ο ανώτερου πλάτους διακεκομμένος θόρυβος εμφανίζεται σε ανοιχτό γκρι. Οι τυπικοί θόρυβοι του περιβάλλοντος φαίνονται στη σκούρα γκρι περιοχή. Υψηλότερα επίπεδα θορύβου (πάνω από 0.1 g) μπορεί να εμφανίζονται συχνά σε σπίτια και επιχειρήσεις. Πόρτες που κλείνουν με πάταγο, εκκίνηση κλιματιστικών μονάδων και παιδιά που τρέχουν μπορεί να προκαλέσουν μεγάλο θόρυβο δόνησης πάνω από την ανοιχτή γκρι περιοχή. Ποτέ δεν πρέπει να περιμένουμε να καταγράψουμε ένα M2

σεισμό. Θα χάσουμε συχνά σεισμούς M3, διότι προσπαθούμε να φιλτράρουμε τα ψευδώς θετικά αποτελέσματα που θα μπορούσαν να οφείλονται σε πολιτιστικούς θορύβους.

Ο O-NAVI αισθητήρας είναι η πιο πρόσφατη προσθήκη στην ομάδα των QCN USB αισθητήρων. Ο O-NAVI B είναι ένας 16-bit αισθητήρας που χρησιμοποιεί το KXR5 Επιταχυνσιόμετρο MEMS από την Kionix. Ο O-NAVI B έχει πολλές περισσότερες ψηφιακές κατηγορίες ψηφιακού θορύβου, αλλά γενικά εξασφαλίζει μία οριακή βελτίωση σε σχέση με το θόρυβο του πατώματος συγκριτικά με τον O-NAVI A αισθητήρα.

O-NAVI_B



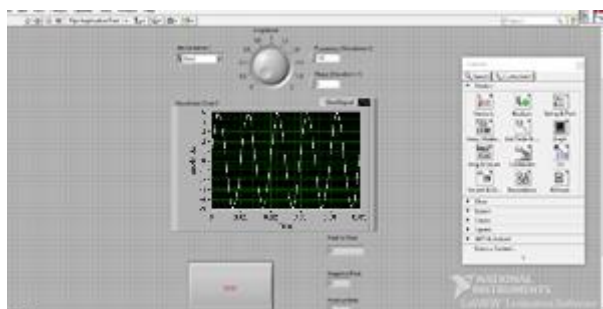
Εικόνα 21 Διάγραμμα του θορύβου του αισθητήρα O-NAVI B,

Figure 21 O-NAVI B sensor noise diagram

Η απόδοση των O-NAVI B παρουσιάζεται στη Εικόνα 21. Η μπλε γραμμή είναι η τυπική στάθμη θορύβου. Η πράσινη γραμμή δείχνει την μετατροπή από αναλογική σε ψηφιακή ανάλυση. Οι γραμμές με μαύρο και κόκκινο δείχνουν τις επιταχύνσεις που αναμένεται για διάφορες εκδηλώσεις μέγεθος (M1-8). Τα γκριζα κουτιά δείχνουν το εύρος των τυπικών θορύβου.

4.4 LabView

Το LabView είναι μια εξειδικευμένη γλώσσα προγραμματισμού για τη συλλογή δεδομένων, την ανάλυση δεδομένων, την προσομοίωση και τον έλεγχο οργάνων και μετρήσεων μέσω υπολογιστή. Στηρίζεται στον γραφικό προγραμματισμό μέσω αντικειμένων και αποτελεί ένα καλό παράδειγμα του «αντικειμενοστραφή προγραμματισμού» (object oriented programming). Αυτός ο όρος χρησιμοποιείται στην πληροφορική σε αντιδιαστολή με τον λεγόμενο «προγραμματισμό διαδικασιών», όπου ο προγραμματιστής γράφει κώδικα εντολών που εκτελούνται με γραμμική διαδοχή. Στο γραφικό περιβάλλον του LabView ο προγραμματιστής δεν χειρίζεται κώδικα, αλλά γραφικά αντικείμενα, όπως κουμπιά, ενδείκτες, οθόνες ή τετραγωνίδια που παριστάνουν συναρτήσεις ή εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες με τη μορφή υπορουτινών. Αυτά τα εικονίδια έχουν εισόδους και εξόδους και επιδέχονται προγραμματισμό των ιδιοτήτων τους. Το όνομα LabView είναι το ακρωνύμιο των λέξεων «Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench» (Σχεδιαστήριο για την Κατασκευή Εργαστηριακών Εικονικών Οργάνων) και αναπτύχθηκε κατά το τέλος της δεκαετίας του 80 από την εταιρία National Instruments (βλ. www.ni.com). Η εταιρία αυτή ειδικεύεται σε συστήματα συλλογής δεδομένων, σε αισθητήρες, αυτοματισμούς και λογισμικό μετρήσεων και ελέγχου. Προγραμματίζοντας με τα αντικείμενα που μας δίνει το περιβάλλον του LabView δημιουργούμε τα λεγόμενα «εικονικά όργανα» (Virtual Instruments ή απλώς VIs). Η γραφική γλώσσα που χρησιμοποιεί το LabView για τον προγραμματισμό και τη δημιουργία εικονικών οργάνων ονομάζεται γλώσσα G. Είναι πάντως δυνατό να χρησιμοποιήσει κανείς το LabView σε απλό επίπεδο, χρησιμοποιώντας έτοιμα εικονικά όργανα, χωρίς να μπαίνει σε λεπτομέρειες με τη γλώσσα G. Στα σχήματα της επόμενης σελίδας παρουσιάζονται δύο απλά εικονικά όργανα που κατασκευάστηκαν με το γραφικό περιβάλλον LabView. Βλέπουμε ότι περιλαμβάνουν διάφορους μεταβολείς, ενδείκτες, οθόνες καταγραφής, κουμπιά επιλογής τιμών κλπ.



Εικόνα 22 Επιφάνεια Εργασίας του λογισμικού LabView, Figure 22 Desktop LabView software

Ένα εικονικό όργανο μπορεί να προσομοιώνει απλώς μια λειτουργία και να την παρουσιάζει στην οθόνη του υπολογιστή, για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Όμως, είναι δυνατό να συνδέεται με τις θύρες εισόδου/εξόδου του υπολογιστή ή με επιπρόσθετες κάρτες επέκτασης, προκειμένου να κάνει πραγματική εισαγωγή ή εξαγωγή δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή ο υπολογιστής με τη βοήθεια των εισόδων και των εξόδων μετατρέπεται σε ένα ισχυρό εργαλείο μετρήσεων, με πολλές δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων.

Το LabVIEW είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης έχει σχεδιαστεί ειδικά για τους μηχανικούς και τους επιστήμονες για κατασκευή συστημάτων μέτρησης και ελέγχου. Με μια μητρική γραφική γλώσσα προγραμματισμού, ενσωματωμένη IP για την ανάλυση των δεδομένων και την επεξεργασία σήματος, και μια ανοικτή αρχιτεκτονική που επιτρέπει την ενσωμάτωση οποιασδήποτε συσκευής υλικού και κάθε προσέγγιση του λογισμικού. Η Αυτοματοποίηση μετρήσεων είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση των δοκιμών για το χρόνο, απόδοση και αξιοπιστία. Το LabVIEW βοηθά να αναπτυχθούν συστήματα αυτοματισμού πιο γρήγορα με πάνω από 850 μαθηματικές και αναλυτικές λειτουργίες. Τα στοιχεία UI drag-and-drop, και οι οδηγοί οργάνων που χειρίζονται την επικοινωνία διαύλου επίπεδο που απαιτείται για την επικοινωνία με αυτοτελή όργανα. Με τη χρήση του LabVIEW για την αυτοματοποίηση των οργάνων, μπορούν να ενσωματωθούν χιλιάδες NI και μέσων τρίτων κατασκευαστών για την κατασκευή επαναχρησιμοποιήσιμων λύσεων τεστ που μπορούν να προγραμματισθούν και να αναμορφωθούν ώστε να ανταποκριθούν στις εξελισσόμενες ανάγκες.

4.5 Κάρτα NI USB-6211



Εικόνα 23 Κάρτα NI USB-6211, Figure 23 NI USB-6211 card

Η κάρτα NI USB-6211 είναι μια κάρτα συλλογής μετρήσεων (DAQ, Data Acquisition) και ελέγχου με αναλογικές και ψηφιακές εισόδους και εξόδους.

Σχεδιασμός ποιότητας υλικού

Η απόκτηση μετρήσεων ακριβείας είναι το πρώτο βήμα για να πάρει την σωστή απόφαση. Το υλικό της NI έχει σχεδιαστεί, ελεγχθεί και βαθμονομηθεί με τις υψηλότερες προδιαγραφές, με αποτέλεσμα τα προϊόντα να είναι ακριβή, ανθεκτικά και αξιόπιστα.

Κάθε επιπλέον στοιχείο του συστήματος αυξάνει την πιθανότητα σφάλματος. Το hardware της NI περιλαμβάνει ενσωματωμένο σήμα και συνδεσιμότητα για κάθε αισθητήρα, το οποίο εξασφαλίζει πιο ακριβείς μετρήσεις και μειώνει το συνολικό κόστος του συστήματος. Με αισθητήρα έναρξης/τέλους I/O, δεν χρειάζεται να δημιουργήσει και να διατηρήσει ειδικών συνθηκών σήμα.

Η κάρτα NI παρέχει την ευρύτερη επιλογή του υλικού απόκτηση δεδομένων που κυμαίνονται από τις συσκευές χαμηλού κόστους για υψηλής απόδοσης, modular συστήματα για τη μέτρηση κάθε τύπο σήματος ή αισθητήρα, εξασφαλίζοντας μπορεί κάποιος να επιλέξει το υλικό για να ταιριάζει με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τον προϋπολογισμό. Αποφεύγοντας τη σπατάλη υλικού και κόστους.

Το hardware της NI παρέχει ανώτερη χρονική στιγμή, προκαλώντας και το συγχρονισμό ώστε να μπορείτε να προσαρμόσετε το χρονοδιάγραμμα για κάθε σήματος και του αισθητήρα, το οποίο σημαίνει ότι δεν θα χάσετε σημαντικά δεδομένα και να συλλάβει μόνο τα δεδομένα που χρειάζεστε. Αυτή η λειτουργικότητα μπορεί να διαμορφωθεί γρήγορα στο λογισμικό για την εύκολη προσαρμογή.

Για περισσότερα από 20 χρόνια, οι συσκευές για την απόκτηση δεδομένων της National Instruments PC-based (DAQ) έχουν καθορίσει το πρότυπο για την ακρίβεια και την απόδοση. Η ακρίβεια μέτρησης είναι αναμφισβήτητα ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα στο σχεδιασμό κάθε αίτηση απόκτησης δεδομένων. Ωστόσο, εξίσου σημαντική είναι η συνολική απόδοση του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των I/O ρυθμών δειγματοληψίας, διακίνησης, και λανθάνουσας κατάστασης. Για τους περισσότερους μηχανικούς και επιστήμονες, το να θυσιάζεται η ακρίβεια για τις επιδόσεις απόδοση ή ο ρυθμός δειγματοληψίας για την ανάλυση δεν αποτελεί επιλογή. Μέσα από χρόνια εμπειρίας, η NI έχει αναπτύξει διάφορες τεχνολογίες-κλειδιά για τη μεγιστοποίηση της απόλυτης ακρίβειας των μετρήσεων, παρέχοντας παράλληλα κορυφαία απόδοση σε PC-based απόκτηση δεδομένων από PCI σε PXI και USB σε ασύρματη σύνδεση.

4.6 Αισθητήρες Οπτικών Ινών

Περιγραφή:

Οι αισθητήρες οπτικών ινών βασίζονται στην τεχνολογία οπτικών φραγμάτων Bragg (optical fiber Bragg grating technology), σύμφωνα με την οποία η ανάκλαση του οπτικού κύματος λόγω "ανωμαλιών" στην κατασκευή των αισθητήρων επηρεάζεται από τις θερμοκρασιακές και μηχανικές μεταβολές. Οι οπτικές ίνες είναι ανθεκτικές στην κάμψη, μπορούν να δεχτούν έως και 15 οπτικούς αισθητήρες με μήκος έως 40 χιλιόμετρα, δε διαβρώνονται, δεν είναι εύφλεκτες ή εκρηκτικές, ούτε επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Η καινοτόμος αυτή τεχνολογία, σε συνδυασμό με τα κατάλληλα συστήματα αυτοματοποιημένης καταγραφής μετρήσεων, χρησιμοποιείται ήδη στην δυναμική παρακολούθηση κατασκευών, την παρακολούθηση ανεμογεννητριών, καθώς επίσης και σε άλλες εφαρμογές. Στην εικόνα που ακολουθεί υπάρχει ένας αισθητήρας οπτικών ινών με την επικάλυψη του.



Εικόνα 24 Αισθητήρας Οπτικών Ινών, Figure 24 Fiber Optical Sensor

Τύποι Αισθητήρων οπτικών ινών για μέτρηση:

Τάσης (strain gauges)

Θερμοκρασίας (temperature sensors)

Μετακίνησης (displacement sensors)

Κλίσης (tilt-meters)

4.6.1 Γενικά για Αισθητήρες Οπτικών Ινών – Αρχές λειτουργίας

Η ανάπτυξη της οπτικό-ηλεκτρονικής έφερε προϊόντα όπως τα compact disc players, τα laser pointers, τα bar code scanners και τους laser printers. Η βιομηχανία οπτικών ινών, βοήθησε τις τηλεπικοινωνίες προσφέροντας μεγαλύτερης απόδοσης και αξιοπιστίας δίκτυα τηλεπικοινωνιών με ολοένα και μικρότερο κόστος. Αυτή η επανάσταση προσέφερε στους χρήστες τα οφέλη του μεγάλου όγκου παραγωγής αλλά και της ταχύτατης μετάδοσης πληροφοριών. Η τεχνολογία των αισθητήρων οπτικών ινών συνδέθηκε άμεσα με τις εξελίξεις στις βιομηχανίες της οπτικό-ηλεκτρονικής και των επικοινωνιών με οπτικές ίνες. Πολλά από τα εξαρτήματα που σχετίζονται με αυτές τις βιομηχανίες συχνά αναπτύσσονταν για εφαρμογές αισθητήρων οπτικών ινών. Από την άλλη μεριά η τεχνολογία οπτικών αισθητήρων προωθούνταν συχνά από την ανάπτυξη και την μετέπειτα μαζική παραγωγή εξαρτημάτων, για την υποστήριξη αυτών των βιομηχανιών. Με το κόστος των εξαρτημάτων να πέφτει και τις συνεχείς βελτιώσεις στην ποιότητα, οι αισθητήρες οπτικών ινών άρχισαν να αντικαθιστούν τους παραδοσιακούς αισθητήρες για μέτρηση θερμοκρασίας, πίεσης, παραμόρφωσης, υγρασίας, περιστροφής, επιτάχυνσης, ακουστικής, δόνησης, ιξώδους αλλά και άλλων παραμέτρων. Κατά τις πρώτες ημέρες της τεχνολογίας των οπτικών ινών, οι πιο εμπορικά επιτυχημένοι αισθητήρες οπτικών ινών ήταν αυτοί που στόχευαν σε αγορές που η τεχνολογία οπτικών αισθητήρων ήταν ελάχιστα ανεπτυγμένη έως ανύπαρκτη. Τα εγγενή πλεονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών, όπως το μικρό βάρος και μέγεθος, η χαμηλή κατανάλωση, η αντίσταση στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, η μεγάλη ευαισθησία τους και η ανθεκτικότητά τους στο περιβάλλον αντιστάθμιζαν κατά πολύ τα βασικά μειονεκτήματα του υψηλού κόστους και της μη εξοικείωσης του χρήστη. Η κατάσταση όμως άλλαξε αφού το κόστος των οπτικών ινών μειώθηκε σημαντικά και με πολύ καλύτερες οπτικές και μηχανικές ιδιότητες. Ολοκληρωμένες οπτικές συσκευές που δεν ήταν διαθέσιμες για χρήση τότε, τώρα χρησιμοποιούνται ευρέως σε μοντέλα παραγωγής. Στο μέλλον οι τιμές μπορεί να πέσουν ακόμα περισσότερο, προσφέροντας ταυτόχρονα πιο εξελιγμένα οπτικά κυκλώματα. Σήμερα οι αισθητήρες οπτικών ινών χαίρουν μεγάλης αποδοχής στην παρακολούθηση της ακεραιότητας των κατασκευών (Structural Health Monitoring, SHM). Χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στα κτίρια, τις γέφυρες, τα αεροσκάφη, τα πλοία κ.α. για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της ακεραιότητάς τους. Η χρήση των αισθητήρων οπτικών ινών είναι τεράστιας σημασίας αν αναλογιστούμε την ασφάλεια που μπορούν να προσφέρουν σε ακριβές και κρίσιμες κατασκευές.

Πόσο μάλλον όταν αυτές οι κατασκευές χρησιμοποιούνται καθημερινά από τον άνθρωπο και οποιαδήποτε καταστροφή τους μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια ζωών.

4.6.2 Βασικά Χαρακτηριστικά

Παρόλο που χρειάζεται η θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για να μελετηθεί η διάδοση του φωτός μέσα στις οπτικές ίνες, στην πράξη μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλοί νόμοι της οπτικής για να γίνει αυτή κατανοητή. Μπορούμε να θεωρήσουμε το φως ως ακτίνες που ταξιδεύουν σε ευθείες γραμμές και μεταδίδονται μέσα στις οπτικές ίνες εξαιτίας του φαινομένου της εσωτερικής ανάκλασης. Οι οπτικές ίνες διαθέτουν έναν πυρήνα με μεγάλο δείκτη διάθλασης, ο οποίος περιβάλλεται από μια επικάλυψη μικρότερου δείκτη διάθλασης. Το φως ανακλάται στα όρια μεταξύ του πυρήνα της ίνας και της επικάλυψής του. Όσο ο πυρήνας περιβάλλεται από την επικάλυψή του, τόσο το φως που βρίσκεται μέσα σε αυτόν ανακλάται ξανά και ξανά και έτσι καθοδηγείται μέσα στην οπτική ίνα. Ο πυρήνας (core) και η επικάλυψη (cladding) μιας τυπικής οπτικής ίνας κατασκευάζονται από γυαλί (πυρίτια). Ο πυρήνας κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από την επικάλυψή του. Συνήθως η διαφορά του δείκτη διάθλασης είναι μικρότερη του 1%. Ο αυστηρός ποιοτικός έλεγχος κατά την διάρκεια της κατασκευής μιας οπτικής ίνας, εξασφαλίζει την σταθερότητα των ιδιοτήτων της καθ' όλο το μήκος της. Οι ίνες έχουν μεγάλη αντοχή αλλά είναι ταυτόχρονα και εύκαμπτες. Στο τέλος μια εξωτερική επένδυση (jacket), συνήθως ακρυλική ή πολυαμιδική (σε σπάνιες περιπτώσεις μεταλλική) εφαρμόζεται στις ίνες για προστασία από το περιβάλλον. Η εξωτερική επένδυση μπορεί να αποτελείται από πολλά στρώματα ανάλογα με την προστασία που χρειάζεται. Ουσιαστικά, ένας αισθητήρας οπτικής ίνας λειτουργεί με την αυξομείωση μίας ή περισσότερων ιδιοτήτων του φωτός που διαδίδεται μέσα στην ίνα. Οι ιδιότητες αυτές μπορεί να είναι η ένταση, η φάση, η συχνότητα, ή η πόλωση και μεταβάλλονται ανάλογα με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους που μετριοούνται σε κάθε περίπτωση [3]. Στην απλούστερη μορφή του, ένας αισθητήρας οπτικών ινών αποτελείται από μια πηγή φωτός, μια οπτική ίνα, ένα αισθητήριο στοιχείο (το οποίο μετατρέπει την μέτρηση σε ένα οπτικό σήμα) και έναν οπτικό ανιχνευτή (ο οποίος μπορεί να είναι ένας παλμογράφος ή ένας οπτικός αναλυτής φάσματος)

4.6.3 Παραδείγματα Χρήσης Αισθητήρων Οπτικών Ινών

1. Η τεχνολογία που αλλάζει το παιχνίδι

Η Επιχείρηση Αερίου (SoCalGas) ανακοίνωσε στις 10 Ιανουαρίου, 2017 η εταιρεία θα είναι μία από τις πρώτες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας φυσικού αερίου στις Ηνωμένες Πολιτείες θα ενσωματώσουν την πρωτοποριακή τεχνολογία καλωδίων οπτικών ινών για την ανίχνευση επιπτώσεων και διαρροές κατά μήκος της μετάδοσης και υψηλής πίεσης του συστήματος αγωγών.

Στην Εικόνα 26 παρουσιάζεται ένα φυσικό παράδειγμα από την εταιρεία καθώς τοποθετεί τις οπτικές ίνες σε έναν αγωγό.



Εικόνα 25 Τοποθέτηση οπτικών ινών σε αγωγό, Πηγή: scvnews.com,

Figure 25 Optical Fiber Insertion, Source: scvnews.com

Η τεχνολογία χρησιμοποιεί δέσμες οπτικών ινών για τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις, και μπορεί να στείλει έγκαιρη προειδοποίηση των μεταβολών της πίεσης ή δονήσεις που μπορεί να υποδηλώνουν μια διαρροή ή επίπτωση στη γραμμή αερίου. Η τεχνολογία ανιχνεύει γρήγορα, όταν υπάρχουν μη φυσιολογική τάση, την κίνηση ή τις θερμοκρασιακές συνθήκες. Η συνεχής παρακολούθηση και μέτρηση θα βοηθήσει την εταιρεία να εντοπίζει γρήγορα απειλές σε έναν αγωγό από τη λειτουργία του βαριού εξοπλισμού, απρόσμενη κίνηση της γης, ή κάποιο φυσικό αντίκτυπο. Όταν μια απειλή αναγνωρίζεται, οι πληροφορίες θα σταλούν μέσα σε δευτερόλεπτα κατά μήκος του καλωδίου οπτικών ινών σε έναν απομακρυσμένο σταθμό παρακολούθησης. Το σύστημα μπορεί να εντοπίσει τη θέση ενός πιθανού προβλήματος που μπορεί να έχει αναπτυχθεί κατά μήκος 20 ποδών.

Το σύστημα μπορεί να αποτρέψει βλάβη αγωγού από μη εξουσιοδοτημένες κατασκευαστικές εργασίες, γεωλογικές συνθήκες ή άλλες φυσικές αλλαγές, όπως τη διαρθρωτική τάση από σπασμένα

δίκτυο ύδρευσης. Μπορεί επίσης να ανιχνεύσει τις διαρροές αγωγών μέσω ανάλυσης σημάτων ήχου ή θερμοκρασίας. Η πρόσβαση σε δεδομένα μεγαλύτερης ακρίβειας τόσο χρονικά όσο και χωρικά θα δώσουν στην εταιρεία και στην ομάδα αντιμετώπισης της περισσότερο χρόνο για να σχεδιάσουν, να κατανεύσουν πόρους, και να λάβουν αποτελεσματικά μέτρα για τον περιορισμό διαρροών ή πιθανών διαρροών.

Το σύστημα λειτουργεί με την αρχή ότι τα φωτεινά σήματα διαφέρουν όταν ένα καλώδιο οπτικών ινών εκτίθεται σε κραδασμούς, τάση ή μια μη φυσιολογική μεταβολή στη θερμοκρασία. Η προηγμένη τεχνολογία βοηθά τους παρόχους να ερμηνεύσει αυτές τις αλλαγές του σήματος και να καθορίσει το είδος της απειλής που συνιστά και την ακριβή τοποθεσία κατά μήκος του συνεχούς μήκους του καλωδίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι φορείς θα είναι σε θέση να διακρίνουν σκάψιμο χέρι και τη συνήθη κυκλοφορία από βαριά χρήση εξοπλισμού κοντά τον αγωγό.

"Αυτή είναι η τεχνολογία παιχνίδι που αλλάζει», δήλωσε ο Jimmie Cho, ανώτερος αντιπρόεδρος των εργασιών του φυσικού αερίου και την ακεραιότητα του συστήματος, SoCalGas. "Θα βοηθήσει να κρατήσει τις κοινότητές μας ασφαλείς και θα μας επιτρέψει να αντιμετωπίσουμε πιο γρήγορα τυχαία ανασκαφή από τους αναδόχους τρίτων και διακοπές λειτουργίας των υπηρεσιών που συμβαίνουν κάθε χρόνο."

Για να δοκιμάσουν και να αποκτήσουν μια καλύτερη κατανόηση του πώς το νέο σύστημα λειτουργεί, οι μηχανικοί στις εγκαταστάσεις δοκιμών Pico Rivera της εταιρείας δημιούργησαν ένα τμήμα λειτουργικού αγωγού υπό κλίμακα και εγκατάσταση καλωδίωσης οπτικών ινών σε ένα χαντάκι του αγωγού.

Το προσωπικό σφυροκόπησε και έσκαψε στο έδαφος, τα πεζοδρόμια και άλλες επιφάνειες, οδήγησε βαρύ εξοπλισμό πάνω και γύρω από την περιοχή δοκιμής, και προσομοίωσαν διαρροές αερίου διαφόρων μεγεθών. Από μια απομακρυσμένη τοποθεσία, ο ειδικός εξοπλισμός παρακολούθησης εντόπισε επιτυχώς κάθε μία από αυτές τις δραστηριότητες από τη μοναδική υπογραφή των δεδομένων τους.

Η SoCalGas σχεδιάζει την εγκατάσταση του καλωδίου οπτικών ινών κατά μήκος όλων των νέων και αντικατάσταση τμημάτων αγωγών 12 ίντσών ή και μεγαλύτερων σε διάμετρο και ένα μίλι μήκους. Τα καλώδια οπτικών ινών θα εγκατασταθούν περίπου 36 ίντσες κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και 12 ίντσες πάνω από τους αγωγούς. Η SoCalGas σχεδιάζει να ξεκινήσει την εγκατάσταση καλωδίων οπτικών ινών σε μια έκταση 7 μιλίων του αγωγού στο Μπέικερσφιλντ.

2. Στις εικόνες που ακολουθούν περιλαμβάνονται οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στην διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας έρευνας. Στην Εικόνα 27 βλέπουμε τον αισθητήρα που χρησιμοποιείται ως ελεύθερος αισθητήρας, η επικάλυψη που βλέπουμε είναι επικάλυψη κόλλας που υπάρχει για την προστασία του αισθητήρα. Το ταμπελάκι δείχνει το ονομαστικό μήκος κύματος του αισθητήρα “1556 nm”, το οποίο όμως δεν αντιστοιχεί με το πραγματικό αρχικό μήκος κύματος του. Στην Εικόνα 28 είναι ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται στο 4^ο πείραμα και έχει επικάλυψη όπως βλέπουμε και στην εικόνα. Στην Εικόνα 29, είναι ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται στα πειράματα 13 και 14. Ο αισθητήρας αυτός έχει πλεχθεί επί του υφάσματος με το οποίο προσομοιώνεται ένα γεωϋφασμα, ο οπλισμός δηλαδή ενός πρανούς. Δεξιά και αριστερά από τις άκρες του αισθητήρα, και εκτός του ορίου δράσης του, έχει τοποθετηθεί κόλλα για τη συγκράτηση του επί του οπλισμού.



Εικόνα 26 Ελεύθερος αισθητήρας
Figure 26 Unrestrained Sensor

Εικόνα 27 Αισθητήρας με Επικάλυψη
Figure 27 Sensor with sheathing

Εικόνα 28 Αισθητήρας σε Οπλισμό
Figure 28 Sensor in Geotextile

4.6.4 Ένωση Οπτικών Ινών - Splicing

Στα πλαίσια των πειραμάτων υπήρξε η ανάγκη συν-ένωσης (Splicing) των αισθητήρων οπτικών ινών με κατάλληλους υποδοχείς οπτικών ινών. Με άλλα λόγια να ενωθεί η οπτική ίνα ενός αισθητήρα με την οπτική ίνα ενός προσαρμογέα ή ενός άλλου αισθητήρα οπτικών ινών. Για την επίτευξη της ένωσης χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα συνδετικής σύντηξης της Techwin (China) Industry Co., Ltd το Fusion Splicer TCW 505 που φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

Η διαδικασία συν-ένωσης (Splicing) είναι σχετικά απλή αρκεί προϋποθέτοντας όμως ότι θα γίνει με προσοχή. Παίρνουμε την κάθε οπτική ίνα, αφαιρούμε το προστατευτικό της κάλυμμα σε μήκος 1,5 με 2 εκατοστά από την άκρη που θέλουμε να ενώσουμε, την καθαρίζουμε με ειδικό υγρό αντιστατικό πανάκι και κόβουμε ώστε η άκρη της να είναι εντελώς κάθετη η το μη της. Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για την άλλη οπτική ίνα και τις τοποθετούμε στην ειδική υποδοχή του μηχανήματος σύνδεσης. Αν οι τομές είναι επιτυχείς το TCW 505 θα κεντράρει απόλυτα τις δύο οπτικές ίνες και θα

δούμε στην οθόνη τις γραμμές όπως στη φωτογραφία που ακολουθεί και έτσι θα πραγματοποιήσει την ένωση τους. Ύστερα θα τοποθετηθεί στην ένωση ένα ειδικό κάλυμμα σιλικόνης, για την προστασία της ένωσης.



Εικόνα 29 Fusion Splicer TCW-505, Figure 29 Fusion Splicer TCW-505

Χαρακτηριστικά του Fusion Splicer TCW-505

Χρησιμοποιείται ευρέως για ίνες SM και MM Quartz Fiber με διάμετρο 125 μm , διάμετρο στρώματος επίστρωσης 0,2-1,5mm και γυμνό μήκος ίνας 16mm περισσότερο ή λιγότερο. Ιδανικά εργαλεία για την κατασκευή και συντήρηση ινών και καλωδίων σε εφαρμογές τόσο στο χώρο όσο και στο εργαστήριο.

- * Ευθυγράμμιση από πυρήνα σε πυρήνα του συστήματος ινών (PAS)
- * Εμφανίζεται ο άξονας X και Y
- * Μεγάλος πολλαπλός & ορατός πυρήνας ινών
- * Οθόνη επαναφοράς για εύκολη χρήση
- * Εσωτερικό φως για να ρυθμίσετε τις ίνες τη νύχτα
- * Αυτόματος έλεγχος της τελικής επιφάνειας των ινών
- * Αυτόματος υπολογισμό απώλειας ματίσματος
- * Αυτόματη επιλογή του κατάλληλου προγράμματος σύντηξης
- * Μικρό μέγεθος και βάρος και κατάλληλο είτε για εναλλασσόμενο είτε συνεχές ρεύμα.
- * Μενού οθόνης για απλή λειτουργία
- * Κοντό προστατευτικό κάλυμμα και για μέγιστη ταχύτητα ανέμου 15 m / s

4.7 Καταγραφέας Σήματος Αισθητήρων Οπτικών Ινών

Στην Εικόνα που ακολουθεί βλέπουμε τον καταγραφέα και μετατροπέα σήματος των αισθητήρων οπτικών ινών της εταιρείας SMART FIBRES, όπου καταλήγει ο αισθητήρας οπτικών ινών και μεταδίδει τη μεταβολή του μήκους κύματος κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 30 Καταγραφέας Σήματος Αισθητήρων Οπτικών Ινών SMART FIBRES

Ο καταγραφέας αυτός μας δίνει τη δυνατότητα σε απευθείας μετάδοση της μεταβολής του σήματος των οπτικών ινών αλλά και τη δυνατότητα αποθήκευσης των καταγραφών αυτών. Η καταγραφή του σήματος γίνεται ανα 2 εκατοστά του δευτερολέπτου και το μήκος κύματος μετράται σε νανόμετρα (nm).

4.8 Πενετρόμετρο

Η άμμος που χρησιμοποιούμε στο εργαστήριο είναι μηδενικής συνοχής, παρουσιάζει όμως ένα παράδοξο, όταν βραχεί συμπεριφέρεται σαν συνεκτικό έδαφος. Αποκτά δηλαδή φαινόμενη συνοχή χαμηλής τιμής η οποία όμως προσδίδει τελείως διαφορετική συμπεριφορά στο υλικό. Για τον υπολογισμό αυτής της φαινόμενης συνοχής ώστε να μπορέσουμε να την αξιοποιήσουμε στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιούμε το πενετρόμετρο που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο.



Εικόνα 31 Πενετρόμετρο ST 308, Figure 31 ST 308 penetrometer

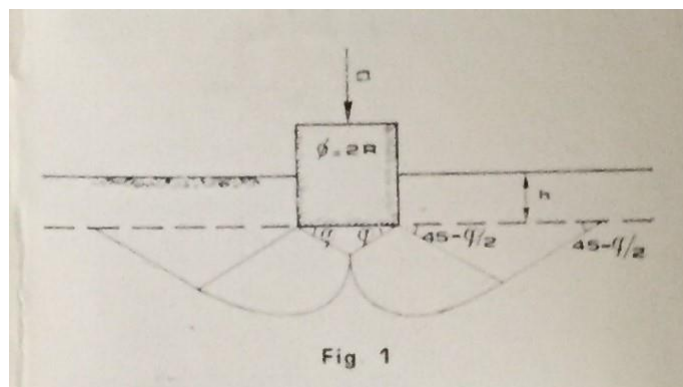
Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται ένα σύστημα ταχείας προσδιορισμού της εσωτερικής γωνίας τριβής και της συνοχής των εδαφών, στα οποία δεν αλλάζει η υγρασία στο σύντομο χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η δοκιμή.

Αυτό το είδος του προσδιορισμού είναι, ως εκ τούτου ενδιαφέρον σε γεωτεχνικά προβλήματα κατά τα οποία ο χρόνος φόρτισης είναι μικρότερος από το χρόνο ενοποίησης: για παράδειγμα, στη μελέτη της κατάρτισης σχεδίων για την δημιουργία και τη σταθερότητα των αναχωμάτων με κυρίως αργιλώδη υλικά. Συνήθως, ο προσδιορισμός των συστατικών της εδαφικής αντοχής διεξάγεται στο εργαστήριο με τη μηχανή τριαξονικής κοπής ή Casagrande. Η χρήση αυτού του εξοπλισμού δεν είναι δύσκολη, αλλά απαιτεί χρόνο και χώρο για να πραγματοποιηθεί και δεν επιτυγχάνεται εύκολα στα εργαστήρια του εργοταξίου.

Εδώ παρουσιάζουμε μία συσκευή, η οποία είναι εύκολη στη χρήση και επιτρέπει πολύ γρήγορο προσδιορισμό των τιμών των παραμέτρων.

Ο προσδιορισμός της εσωτερικής τριβής ϕ και της συνοχής C των εδαφών που προτείνονται στην παρούσα μελέτη, βασίζεται στη χρήση του τύπου Terzaghi για τον προσδιορισμό του φορτίου θραύσης του συστήματος.

Το φορτίο θραύσης είναι το οριακό φορτίο, πέρα από το οποίο διασπάται η ισορροπία του εδάφους. Το φορτίο αυτό συχνά λαμβάνεται ως αναφορά για τη μελέτη της σταθερότητας των θεμελιωδών στοιχείων. Στη θεωρία του, ο Terzaghi θεωρεί ότι σχηματίζεται κάτω από τη βάση του θεμελίου ένας σφηνοειδής πυρήνας με γωνία κλίσης ϕ , που παραμένει στην ελαστική κατάσταση και ότι η ολίσθηση του εδάφους λαμβάνει χώρα σύμφωνα με την επιφάνεια του είδους που υποδεικνύεται στο Σχήμα 1



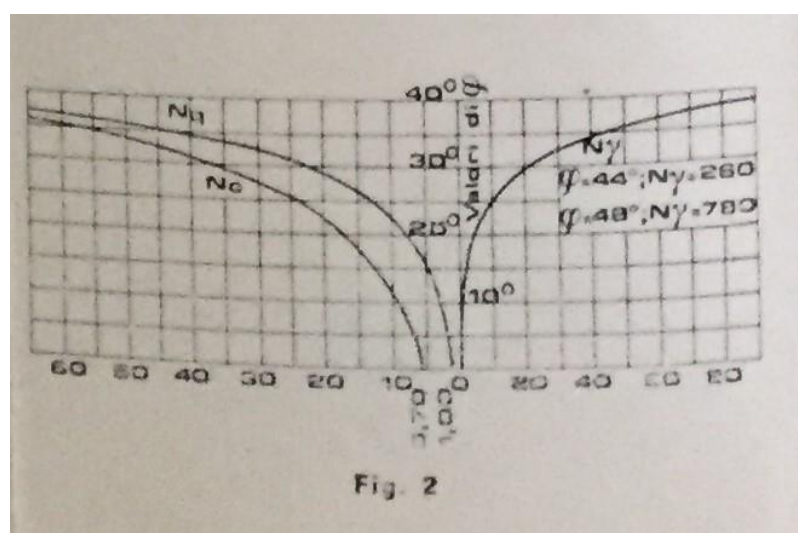
Εικόνα 32 Σχήμα 1, Ολίσθηση Εδάφους, Figure 32 Sliding Ground

Η βάση του θεμελίου, προκειμένου να αποφευχθεί η ολίσθηση του εδάφους κατά μήκος της επιφάνειας έδρασης, πρέπει να τσαλακωθεί. Με τη συσκευή αυτή εξετάζεται κυκλική επιφάνεια διότι η συσκευή επιβάλλει φορτίο μέσω κυκλικής επιφάνειας επομένως προσομοιώνει κυκλική θεμελίωση.

Για κυκλικές επιφάνειες φόρτισης και για συμπαγή εδάφη, ο τύπος του Terzaghi γράφεται ως εξής:

$$q = 1,3 * C * N_c + \gamma * h * N_q + 0,6 * \gamma * R * N_\gamma \quad (1)$$

Όπου q είναι το συγκεκριμένο φορτίο θραύσης, h το βάθος έδρασης του θεμελίου, R η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας του φορτίου, γ το ειδικό βάρος του εδάφους, το C είναι η συνοχή. N_c , N_γ , N_q (συντελεστής της φέρουσας ικανότητας) είναι αδιάστατες ποσότητες που εξαρτώνται από την τιμή της εσωτερικής γωνίας τριβής του εδάφους, σύμφωνα με τις καμπύλες του Σχήματος 2.



Εικόνα 33 Σχήμα 2, Καμπύλες N_c , N_γ , N_q ,

Figure 33 Curves N_c , N_γ , N_q

4.9 Εδαφικό Υλικό

Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε στα εργαστηριακά πειράματα είναι λευκή λεπτόκοκκη, δωρεά της εταιρείας MINERAL TRADE Μ.Ε.Π.Ε..



Εικόνα 34 Εδαφικό Υλικό, Figure34 White Sand

Το ειδικό της βάρος υπολογίζεται περί τα $17,00 \text{ kN/m}^3$ η γωνία τριβής της περί τις 35° και η κοκκομετρική της ανάλυση είναι η ακόλουθη:

Πίνακας 6 Κοκκομετρική Ανάλυση Εδαφικού Υλικού, Table 6 Granulometric analysis of Ground material

Οπές κόσκινου σε mm	Συγκρατούμενο	Ποσοστό που διαπερνά
+ 1,250	0,00	100,00
-1,250 +	0,12	99,88
-1,000 +	0,14	99,74
-0,800 +	1,78	97,96
-0,600 +	1,80	96,16
-0,500 +	2,13	94,03
-0,425 +	11,02	83,01
-0,250 +	35,03	47,98
-0,180 +	16,26	31,72
-0,150 +	28,75	2,97
-0,100 +	1,62	1,35
-0,075	1,35	0,00

4.10 Κάμερα Καταγραφής Ψηφιακών Φωτογραφιών

Η κάμερα που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο είναι μια action camera της εταιρείας Turbo, και τη βλέπουμε στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 35 Κάμερα Καταγραφής Ψηφιακών Φωτογραφιών Figure 35 Action Camera

Τα χαρακτηριστικά αυτής της κάμερας είναι τα εξής:

Τύπος Λήψης	Full HD
Ανάλυση Αισθητήρα (Φωτογραφίας)	5 MP
Τύπος Αισθητήρα	CMOS
Μέγιστο Οπτικό Πεδίο	120 °
Βάρος	82 gr

Οι λόγοι που επιλέχθηκε αυτού του τύπου κάμερα είναι οι εξής:

1. Το μικρό της βάρους. Εφόσον η κάμερα πρέπει να ακολουθεί το δοκίμιο κατά τη φόρτιση του, απαιτείται κάμερα μικρού βάρους για να αποφευχθεί το φαινόμενο της ταλάντωσης, στο μηχανισμό στήριξης, φαινόμενο που θα προκαλούσε αλλοιωμένες ψηφιακές φωτογραφίες.
2. Η δυνατότητα λήψης φωτογραφικών καρτέ, ώστε μετά την ολοκλήρωση του πειράματος να μπορούμε να επιλέξουμε τα φωτογραφικά στιγμιότυπα που χρειαζόμαστε για επεξεργασία, χωρίς να χάνουμε σημαντικές πληροφορίες.
3. Ο ευρυγώνιος φακός της, μας δίνει την δυνατότητα να καταγράψουμε ολόκληρο το δοκίμιο ακόμα και από μικρή απόσταση. Εξαιτίας του φαινομένου της ταλάντωσης και για την αποφυγή του, χρησιμοποιήθηκε μηχανισμός στήριξης μικρού μήκους (ακόμα και στη χαμηλού βάρους κάμερα), έτσι ήταν απαραίτητο αυτό το χαρακτηριστικό στην κάμερα. Ταυτόχρονα όμως αυτό το ίδιο χαρακτηριστικό είναι και το ελάττωμα αυτής της μετρητικής συσκευής.

Παραμόρφωση λόγω ευρυγώνιου Φακού

Οι πιο αναγνωρίσιμες εκτροπές (σφάλματα) των φωτογραφικών φακών είναι οι παραμορφώσεις. Οι παραμορφώσεις συμβαίνουν γιατί τα καμπύλα στοιχεία των φωτογραφικών φακών δεν καταφέρνουν να μεταφέρουν την εικόνα επίπεδη επάνω στο φιλμ ή στον αισθητήρα. Επειδή το φως διανύει άλλη απόσταση στις άκρες και άλλη στο κέντρο του φακού έχουμε διαφορά μεγέθυνσης που δημιουργεί την παραμόρφωση της εικόνας. Οι παραμορφώσεις των φωτογραφικών φακών είναι συνήθως τριών ειδών. Στην πρώτη περίπτωση οι ευθείες γραμμές γίνονται καμπύλες που συγκλίνουν προς τα μέσα, αυτή η παραμόρφωση ονομάζεται βαρελοειδής γιατί οι γραμμές μοιάζουν σαν τις φέτες ενός βαρελιού, ενώ στην δεύτερη περίπτωση που οι καμπύλες γραμμές ανοίγουν προς τα έξω, αυτή η παραμόρφωση ονομάζεται τραπεζοειδής ή παραμόρφωση μαξιλαριού για καρφίτσες. Κι αν δεχτούμε ότι αυτοί οι όροι κάπως αποδίδουν τους αγγλικούς όρους barrel distortion και pincushion distortion. Υπάρχει και ένας τρίτος τύπος

παραμόρφωσης στους φωτογραφικούς φακούς που είναι συνδυασμός των δυο παραπάνω, αλλά τον συναντάμε πιο σπάνια και ονομάζεται μουστακοειδής παραμόρφωση (mustache distortion). Η διόρθωση των παραμορφώσεων των φωτογραφικών φακών γίνεται πλέον στα περισσότερα προγράμματα επεξεργασίας εικόνας, αλλά και από το λογισμικό των φωτογραφικών μηχανών. Σε γενικές γραμμές οι φακοί που υποφέρουν από παραμορφώσεις είναι οι ευρυγώνιοι και οι ζουμ, αν και μπορεί να συναντήσουμε παραμορφώσεις και σε φακούς που δεν είναι αναμενόμενο.

Στην Πειραματική Διερεύνηση της παρούσας εργασίας δεν καταφέραμε να αποφύγουμε αυτό το σφάλμα, και συγκεκριμένα τη βαρελοειδή παραμόρφωση που σχηματίστηκε στα φωτογραφικά μας καρέ.

Κεφάλαιο 5. Μέθοδοι και Τεχνικές που εφαρμόζονται

5.1 Επεξεργασία Καταγραφής Αισθητήρα Οπτικών Ινών

5.1.1 Οπτικές ίνες

Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενο κεφάλαιο μια οπτική ίνα είναι μια γυάλινη ή πλαστική ίνα που μεταφέρει το φως κατά μήκος της. Υπάρχει ιδιαίτερος κλάδος της επιστήμης που ασχολείται με έρευνα για τις δυνατότητες και εφαρμογές των οπτικών ινών. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα επικοινωνιών, και επιτρέπουν την μετάδοση σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερου εύρους ζώνης (ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων) σε σχέση με άλλες μορφές επικοινωνίας όπως ο χαλκός. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται αντί των μεταλλικών καλωδίων, διότι τα σήματα ταξιδεύουν μαζί τους με λιγότερη απώλεια, και δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται και για φωτισμό, οπότε είναι σε δέσμες, ενώ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά εικόνων, επιτρέποντας έτσι την προβολή σε στενούς χώρους. Ειδικά σχεδιασμένες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται και για πολλές άλλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών βασίζονται στην τεχνολογία οπτικών φραγμάτων Bragg (optical fiber Bragg grating technology), σύμφωνα με την οποία η ανάκλαση του οπτικού κύματος λόγω "ανωμαλιών" στην κατασκευή των αισθητήρων επηρεάζεται από τις θερμοκρασιακές και μηχανικές μεταβολές.

Οι οπτικές ίνες είναι ανθεκτικές στην κάμψη, μπορούν να δεχτούν έως και 15 οπτικούς αισθητήρες με μήκος έως 40 χιλιόμετρα, δε διαβρώνονται, δεν είναι εύφλεκτες ή εκρηκτικές, ούτε επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Η καινοτόμος αυτή τεχνολογία, σε συνδυασμό με τα κατάλληλα συστήματα αυτοματοποιημένης καταγραφής μετρήσεων, χρησιμοποιείται ήδη στην δυναμική παρακολούθηση κατασκευών, την παρακολούθηση ανεμογεννητριών, καθώς επίσης και σε άλλες εφαρμογές.

Τύποι:

Αισθητήρες οπτικών ινών για μέτρηση:

- Τάσης (strain gauges)
- Θερμοκρασίας (temperature sensors)
- Μετακίνησης (displacement sensors)
- Κλίσης (tilt-meters)

Τα πλεονεκτήματα των οπτικών αισθητήρων είναι τα εξής:

- Μικρό μέγεθος αισθητήρων της τάξεως του 1cm κατά το μήκος και αμελητέο βάρος

- Μεγάλη ελαστικότητα των αισθητήρων που επιτρέπει την κάλυψη και των πιο ασυνήθιστων κατασκευών
- Μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας
- Δυνατότητα τοποθέτησης σε σεισμογενείς περιοχές
- Φιλικό προς το περιβάλλον
- Δυνατότητα λήψης μετρήσεων, σε σημεία και διατάξεις που καθίσταται πιο δύσκολο έως και αδύνατο να χρησιμοποιηθούν συμβατικοί αισθητήρες
- Μεγάλη ταχύτητα μετρήσεων και δυνατότητα επαναληψιμότητας
- Δεν απαιτούνται επιπλέον ρυθμίσεις μετά την τοποθέτηση
- Πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς ηλεκτρικούς αισθητήρες όσον αφορά την υγρασία, σπινθηρισμούς, γειώσεις, ραδιοκύματα και γενικότερα Η/Μ ακτινοβολίες
- Δυνατότητα πολυπλεξίας σε ένα ή και περισσότερα κανάλια
- Δυνατότητα επιτήρησης από απόσταση με απλά τηλεπικοινωνιακά καλώδια οπτικής ίνας ή μέσω ασύρματων δικτύων
- Ακτινοβολία χαμηλής ισχύος και επομένως απουσία κινδύνου εφαρμογής τους σε εύφλεκτο περιβάλλον

5.1.2 Προσδιορισμός τροπών

Οι μεταβολές του μήκους κύματος των αισθητήρων που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μετατρέπονται με την εφαρμογή της παρακάτω εξίσωσης σε τροπές.

$$\Delta_{\varepsilon} = \frac{\Delta\lambda - K_{\tau} \cdot \Delta_{\tau}}{K_{\varepsilon}}$$

Εξίσωση 1 Μετατροπή Μήκους κύματος σε τροπές

Equation 1 Convert Wavelength to Strain

όπου: Δ_{ε} [%] είναι η μετρούμενη τροπή

$\Delta\lambda$ η μεταβολή του μήκους κύματος

K_{ε} συντελεστής που εκφράζει τη σχέση τροπής-τάσης και είναι ίσος με 1,2 picometer(pm)/μstrain για τον τύπο αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία

$K_{\tau} \cdot \Delta_{\tau}$ η σχέση που ενσωματώνει τις μεταβολές των τροπών λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας (μηδέν στα πειράματα της παρούσας εργασίας καθώς δεν υπήρχε μεταβολή στη θερμοκρασία)

5.2 Επεξεργασία Εικόνων

5.2.1 DiC

Η συσχέτιση ψηφιακών εικόνων (digital image correlation) είναι μία οπτική μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί μία ανάλυση μαθηματικής συσχέτισης για να εξετάσει δεδομένα ψηφιακών εικόνων, οι οποίες λαμβάνονται κατά τη διάρκεια πειραμάτων με δείγματα από διάφορα υλικά. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη διαδοχική λήψη εικόνων με ψηφιακή κάμερα κατά τη διάρκεια του πειράματος, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η αλλαγή στα επιφανειακά χαρακτηριστικά του δείγματος και να κατανοηθεί η συμπεριφορά του καθώς υπόκειται σε φόρτιση.

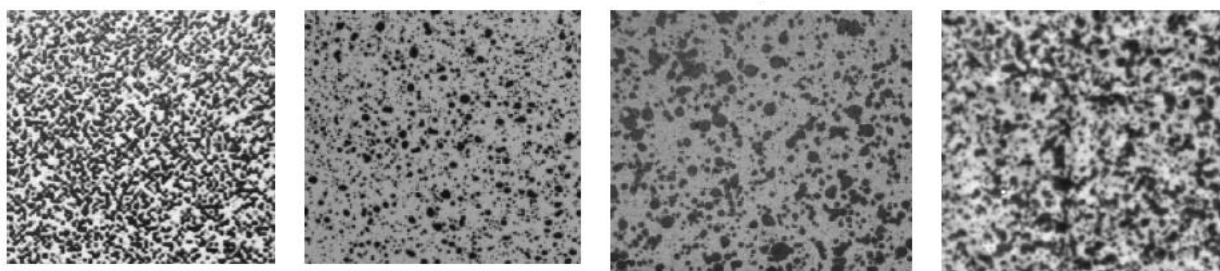
Η μέθοδος πρωτοαναπτύχθηκε τη δεκαετία του '80 από μια ομάδα ερευνητών στο Πανεπιστήμιο της Νότιας Καρολίνας, όταν η επεξεργασία ψηφιακών εικόνων και οι αριθμητικές υπολογιστικές μέθοδοι ήταν ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Τα τελευταία χρόνια μελετήθηκε και ερευνήθηκε σε βάθος ώστε σήμερα πια με τη χρήση μιας απλής ψηφιακής κάμερας και κατάλληλου λογισμικού, να καταγράφεται σε δύο διαστάσεις το πεδίο παραμορφώσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου, όπως αυτό εξελίσσεται κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει τρία βήματα: α) προετοιμασία του δείγματος και του πειραματικού εξοπλισμού β) καταγραφή με ψηφιακή κάμερα της επίπεδης επιφάνειας του δοκιμίου πριν την επιβολή της φόρτισης και κατά τη διάρκεια αυτής γ) επεξεργασία των εικόνων με κατάλληλο λογισμικό για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε σχέση με τις μετατοπίσεις και τις (ορθές και διατμητικές) παραμορφώσεις του δοκιμίου.

Για την εφαρμογή της μεθόδου, το δείγμα χρειάζεται κατάλληλη προετοιμασία, δηλαδή χρειάζεται να δημιουργηθεί στην επιφάνειά του ένα τυχαίο μοτίβο σιγμάτων (speckle pattern) για να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή αντίθεση κατά την σύγκριση των εικόνων. Ένα ικανοποιητικό σχέδιο σιγμάτων πρέπει να έχει μία σεβαστή ποσότητα μαύρων σιγμάτων διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών. Η αποτελεσματικότητά του μπορεί να προσδιοριστεί από την ποσότητα των pixels για κάθε μαύρο στίγμα. Ένα καλό σχέδιο σιγμάτων πρέπει να έχει ταυτόχρονα μικρά μαύρα στίγματα (10 pixels), μεσαία μαύρα στίγματα (20 pixels) και μεγάλα μαύρα στίγματα (30 pixels). Η ποσότητα των pixels κάθε μαύρου στίγματος προσεγγίζεται.

Η διαδικασία αυτή αρχίζει με τη λήψη μίας εικόνας αναφοράς (reference image), πριν ξεκινήσει η φόρτιση του δοκιμίου. Κατόπιν λαμβάνεται μια σειρά από εικόνες κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της φόρτισης (deformed images). Όλες οι εικόνες κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης του δοκιμίου απεικονίζουν ένα τυχαίο διαφορετικό κάθε φορά μοτίβο, το οποίο συσχετίζεται με την εικόνα αναφοράς. Η βασική αρχή της μεθόδου 2D DIC είναι ο εντοπισμός ίδιων σημείων (ή pixels) ανάμεσα στη φωτογραφία αναφοράς και κάθε μιας από τις εικόνες σε παραμορφωμένη κατάσταση. Με χρήση κατάλληλου λογισμικού, οι διαφορές μεταξύ των μοτίβο μπορούν να υπολογιστούν συσχετίζοντας όλα τα pixels της εικόνας αναφοράς με τα αντίστοιχα από τις εικόνες σε παραμορφωμένη κατάσταση και τελικά να εξαχθούν αποτελέσματα μετατοπίσεων και παραμορφώσεων.

Οι μεταβλητές που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την εφαρμογή της μεθόδου είναι: η ανάλυση της ψηφιακής εικόνας (pixels), οι διαστάσεις του δοκιμίου, η απόσταση μεταξύ κάμερας και δοκιμίου, η εστιακή απόσταση των φακών και η εφαρμογή του μοτίβο σιγμάτων (speckle pattern).



Εικόνα 36 Εικόνες με διάφορα μοτίβα και διαφορετική ψηφιακή ανάλυση

Figure 36 Images with different patterns and different digital resolution

5.2.2 Vic-2D

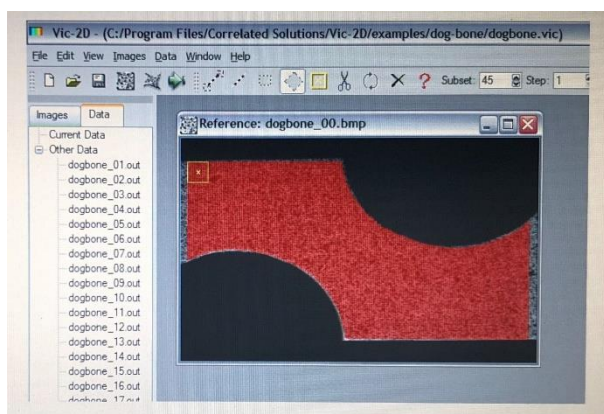
Πρόκειται για ένα καινοτόμο λογισμικό που χρησιμοποιεί την τεχνική συσχέτισης ψηφιακών εικόνων για να υπολογίσει τις ανηγμένες παραμορφώσεις. Παρέχει δισδιάστατη απεικόνιση των μετατοπίσεων και παραμορφώσεων υπό μορφή ισარიθμικών καμπυλών (contour maps) σε όλη την επιφάνεια του εξεταζόμενου δείγματος.

Βήματα εκτέλεσης:

1) Αρχικά επιλέγεται η εικόνα αναφοράς (reference image) που αντιστοιχεί σε αφόρτιστη κατάσταση.

2) Κατόπιν εισάγονται οι εικόνες που αντιστοιχούν σε παραμορφωμένη κατάσταση (deformed images) που αντιπροσωπεύουν στιγμιότυπα όπου παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στην παραμορφωσιακή κατάσταση του δοκιμίου.

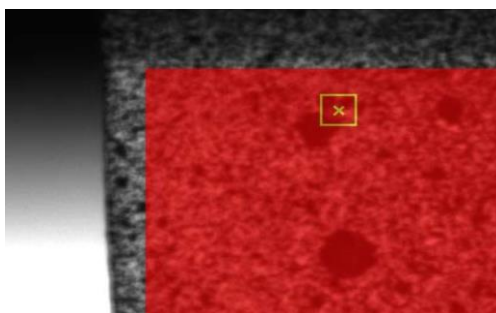
3) Στην εικόνα αναφοράς επιλέγεται η περιοχή ενδιαφέροντος (Area Of Interest, AOI), ανάλογα το σχήμα του δοκιμίου και την περιοχή όπου επιθυμούμε να γίνει ο υπολογισμός των παραμορφώσεων.



Εικόνα 37 Εικόνα αναφοράς και περιοχή ενδιαφέροντος

Figure 37 Reference image and Area of Interest

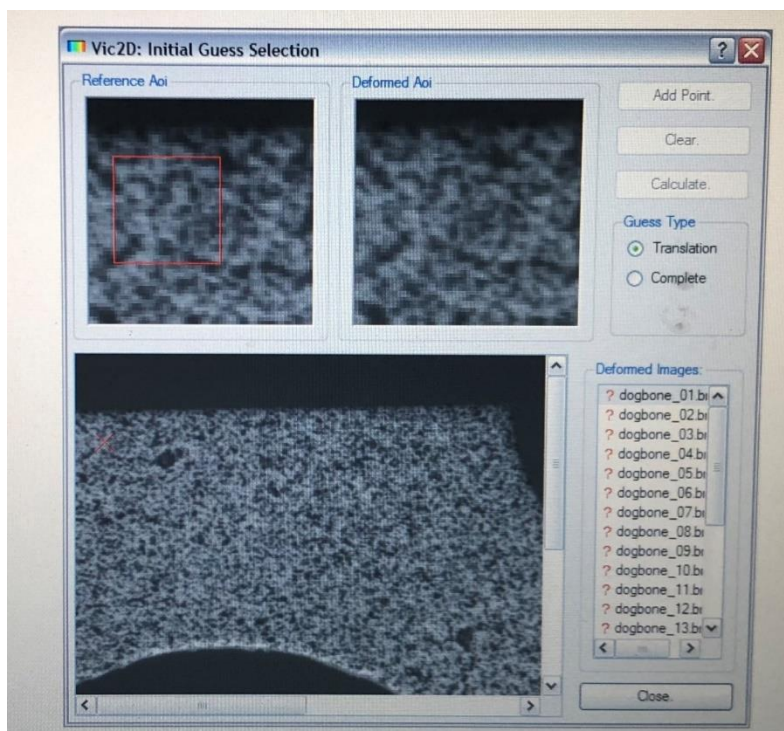
4) Εντός της περιοχής ενδιαφέροντος που ορίσαμε, επιλέγεται ένα σημείο (seed point) που θα αποτελεί το σημείο αναφοράς για την σύγκριση με τις διαδοχικές εικόνες σε παραμορφωμένη κατάσταση.



Εικόνα 38 Επιλογή σημείου αναφοράς Seed point

Figure 38 Selecting a reference point Seed point

5) Κατόπιν, επιλέγω την εντολή "Initial Guesses" και ανοίγει ένα παράθυρο όπου πάνω αριστερά εμφανίζεται η περιοχή γύρω από το seed point στην εικόνα αναφοράς και πάνω δεξιά η πρώτη από τις εικόνες σε παραμορφωμένη κατάσταση, ενώ η κάτω εικόνα χρησιμεύει για να αναζητούμε στο παραμορφωμένο στιγμιότυπο την περιοχή που συμπίπτει με την αντίστοιχη στην εικόνα αναφοράς .



Εικόνα 39 Προεπιλογή σημείων,

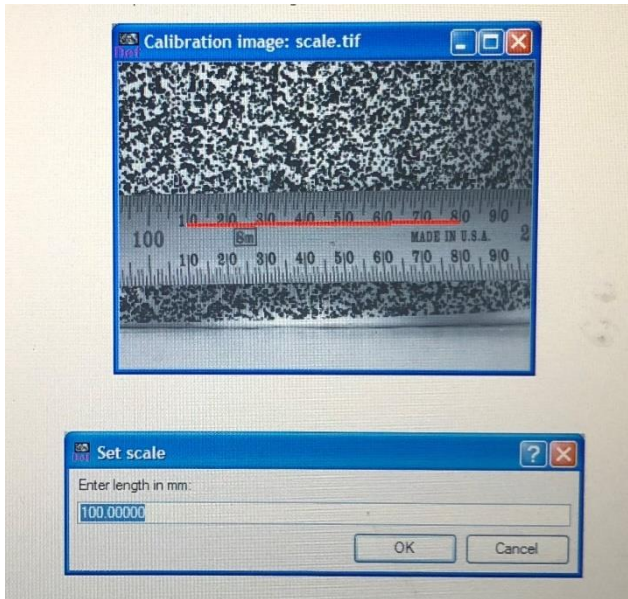
Figure 39 Presetting points

6) Προσθέτω ένα σημείο στην εικόνα αναφοράς και προσθέτω το ίδιο σημείο στην deformed image. Κάνω το ίδιο για άλλα δύο σημεία φροντίζοντας να είναι μη συνευθειακά για πιο ακριβή αποτελέσματα.

7) Τα βήματα 5&6 επαναλαμβάνονται για κάθε μία από τις εικόνες σε παραμορφωμένη κατάσταση και έτσι ολοκληρώνονται όλες οι αρχικές προβλέψεις (initial guesses).

8) Στη συνέχεια, επιλέγω την εντολή "Run correlation" και ξεκινά να τρέχει ο αλγόριθμος συσχέτισης των ψηφιακών εικόνων. Ο αριθμός επαναλήψεων (iterations) που θα εκτελέσει το πρόγραμμα εξαρτάται από το πόσο ακριβείς ήταν οι αρχικές προβλέψεις.

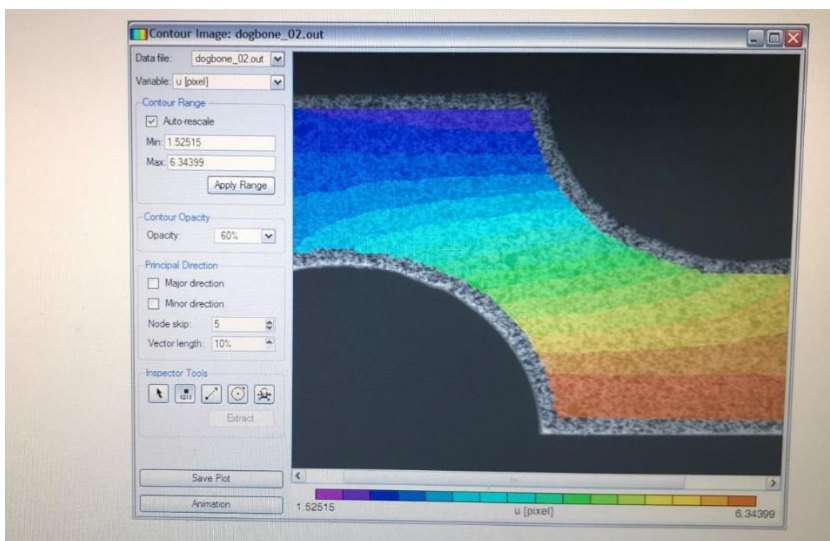
9) Όταν ολοκληρωθεί η συσχέτιση (correlation) γίνεται η βαθμονόμηση (calibration) στην εικόνα αναφοράς όπου επιλέγω σαν μέτρο μια γνωστή απόσταση πάνω στο δοκίμιο.



Εικόνα 40 Εικόνα Βαθμονόμησης,

Figure 40 Calibration Image

10) Τέλος , επιλέγω να μου εμφανίσει τις μετατοπίσεις u,v (κατά τους άξονες x,y αντίστοιχα) και τις παραμορφώσεις $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{xy}$, οι οποίες αποτυπώνονται υπό μορφή ισαριθμικών καμπυλών (contour map of strains) σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου.



Εικόνα 41 Δημιουργία Διαγραμμάτων Μετατοπίσεων και Παραμορφώσεων

Figure 41 Contour Plots of Displacements and distortions

5.3 Υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης της οριακής ισορροπίας πρανών

5.3.1 Απλές υπολογιστικές μέθοδοι : Μέθοδος λωρίδων

Για τη διευκόλυνση της ανάλυσης ευστάθειας με κυκλική (ή μη κυκλική) επιφάνεια ολίσθησης, χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι των λωρίδων (μέθοδος Fellenius, μέθοδος Bishop, μέθοδος Janbu κ.τ.λ). Κατά τις μεθόδους αυτές η εδαφική μάζα χωρίζεται σε κατακόρυφες λωρίδες.

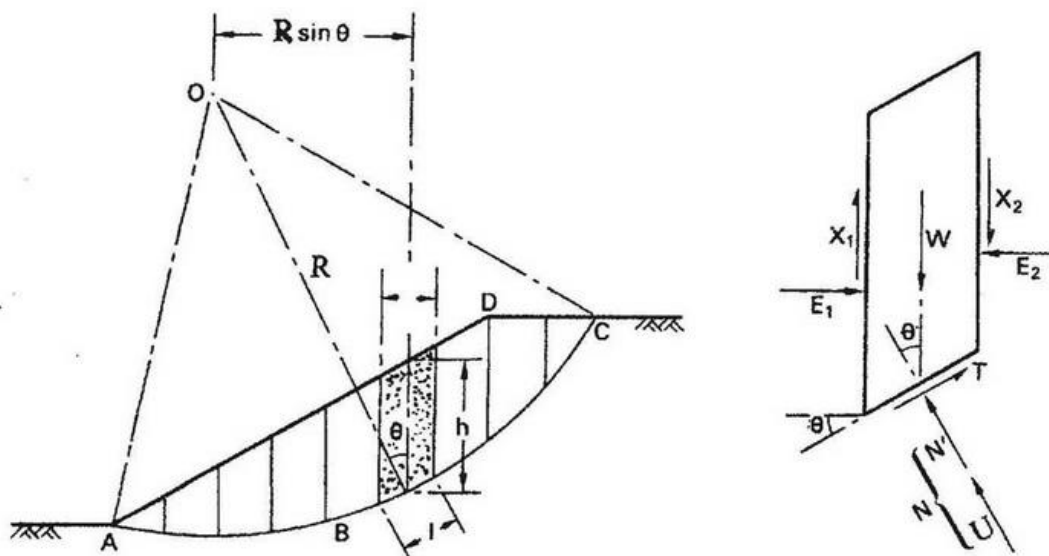
Έστω επιφάνεια ολίσθησης σχήματος κυκλικού τόξου με ακτίνα R. Το εδαφικό τμήμα επάνω από αυτό το κυκλικό τόξο έχει μοναδιαίο πάχος και χωρίζεται σε έναν αριθμό κατακόρυφων λωρίδων πλάτους b και μέσου ύψους h . Η βάση κάθε λωρίδας μπορεί να θεωρηθεί ευθεία γραμμή με κλίση θ ως προς την οριζόντια και μήκος $l=b/\cos\theta$.

Υποτίθεται ότι το τμήμα (όλες οι λωρίδες) περιστρέφεται ως προς το κέντρο του κύκλου O ως άκαμπτο σώμα, έτσι ώστε ο συντελεστής ασφαλείας να είναι ίδιος για κάθε λωρίδα, δηλαδή υπάρχει ενιαίος συντελεστής ασφαλείας για τη δοκιμαστική επιφάνεια που επιλέχθηκε. Αυτό συνεπάγεται ότι ανάμεσα στις λωρίδες πρέπει να ενεργούν δυνάμεις, που είναι γνωστές ως πλευρικές δυνάμεις και συνήθως λαμβάνονται κάθετα και εφαπτομενικά στις πλευρές των λωρίδων.

Οι δυνάμεις που δρουν σε μια τυπική λωρίδα (i) είναι:

- Το βάρος (W_i) της λωρίδας και η τυχόν εξωτερική επιφόρτιση (κατακόρυφη συνιστώσα P_i και οριζόντια συνιστώσα H_i).
- Οι ορθές πλευρικές δυνάμεις (E_i και E_{i+1}) και οι αντίστοιχες διατμητικές (X_i και X_{i+1}) που δρουν στις διεπιφάνειες μεταξύ της λωρίδας (i) και των γειτονικών της.
- Η ορθή ενεργός δύναμη ($N'_i = \sigma' \cdot l_i$), η δύναμη ($U_i = u_i \cdot l_i$) που οφείλεται στην πίεση πόρων (u_i) και η διατμητική δύναμη (T_i) στη βάση της λωρίδας

Στην προσπάθεια των δυνάμεων βαρύτητας να περιστρέψουν το κυκλικό τμήμα γύρω από το κέντρο του κύκλου του, αντιστέκεται η διατμητική αντοχή του εδάφους η οποία ενεργοποιείται κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, οπότε εφαρμόζεται η ισορροπία ροπών ως προς το κέντρο O της κυκλικής επιφάνειας.



Εικόνα 42 Σχήμα δυνάμεων που δρουν σε μια τυπική λωρίδα
Figure 42 Figure of forces acting on a standard lane

Απλουστευμένη και Γενική Μέθοδος Janbu (1954 και 1968)

Η απλουστευμένη μέθοδος Janbu (1954) αναφέρεται σε μη-κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης. Ο συντελεστής ασφαλείας προσδιορίζεται από την ισορροπία των οριζοντίων δυνάμεων. Η εν λόγω μέθοδος λαμβάνει υπόψη τις ορθές δυνάμεις (E) μεταξύ των λωρίδων, αλλά αγνοεί τις αντίστοιχες διατμητικές (T). Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\sum (c \cdot l + (N - u \cdot l) \cdot \tan \phi') \cdot (1 / \cos a)}{\sum W \cdot \tan a + \sum \Delta E}$$

όπου, $\sum \Delta E = E_2 - E_1$ ορθή δύναμη μεταξύ των λωρίδων (μηδέν αν δεν ασκούνται οριζόντιες δυνάμεις).

Εκφρασμένος υπό μορφή τάσεων, ο συντελεστής ασφαλείας της παραπάνω εξίσωσης δίνεται ως εξής (Janbu, 1954):

$$F_o = \frac{\sum \frac{(c' \cdot l + (W - u \cdot l) \cdot \tan \phi')}{n_a}}{\sum W \cdot \tan a}$$

Όπου

$$n_a = \cos^2 a \cdot \left(1 + \tan a \cdot \frac{\tan \phi'}{F} \right)$$

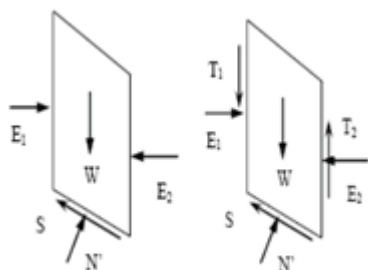
Η μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση ότι οι δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των λωρίδων είναι οριζόντιες (κάθετες δηλαδή στις παρειές των λωρίδων). Επειδή η υπόθεση αυτή και μόνο οδηγεί σε συντελεστές ασφαλείας μικρότερους των πραγματικών, ο Janbu εισήγαγε έναν συντελεστή διόρθωσης (f_o) στον αρχικό συντελεστή ασφαλείας (F_o), ώστε να συμπεριλαμβάνεται η επίδραση των διατμητικών δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των λωρίδων. Ο διορθωμένος συντελεστής ασφαλείας δίδεται ως εξής:

$$F = f_o \cdot F_o$$

Ο συντελεστής διόρθωσης, f_o , είναι ένας εμπειρικός συντελεστής ο οποίος προέκυψε από μελέτη 40 περιπτώσεων και ο οποίος εξαρτάται από το λόγο βάρους προς μήκος της επιφάνειας ολίσθησης και προσαυξάνει το συντελεστή ασφαλείας κατά 5% - 12%.

Η χαμηλότερη τιμή προσαύξησης αντιστοιχεί σε ψαθυρά εδάφη, ενώ η μεγαλύτερη σε αργιλικά (Abramson et al., 1996, 2002).

Η γενική μέθοδος Janbu (1968) λαμβάνει υπόψη τις ορθές αλλά και τις διατμητικές τάσεις μεταξύ των λωρίδων.



Εικόνα 43 Απλουστευμένη και Γενική μέθοδος λωρίδων Janbu: Απεικόνιση λωρίδων ως διαγράμματα ελευθέρου σώματος,

Figure 43 Simplified and General Janbu Strip Method: Stripping as free body diagrams

Απλουστευμένη και Γενική Μέθοδος Bishop (1955)

Η μέθοδος Bishop αποτελεί μία παραλλαγή της μεθόδου Fellenius και στηρίζεται στην παραδοχή ότι η διατμητική αντοχή s , που είναι η εφαπτομενική συνιστώσα της αντίδρασης σε κάθε τόξο του κρίσιμου κύκλου, δεν είναι η μέγιστη δυνατή, αλλά η πραγματική αντίσταση σε διάτμηση:

$$s = \frac{c' \cdot \ell + (G \cdot \cos \alpha - u \cdot \ell) \cdot \tan \varphi'}{F}$$

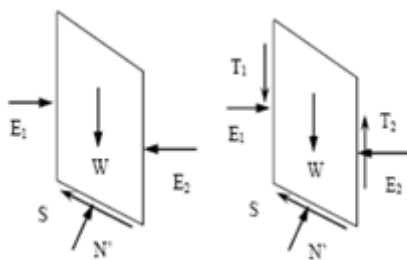
Στη γενική της μορφή, εξάλλου, η μέθοδος δέχεται ότι οι δυνάμεις επί των κατακόρυφων επιπέδων πρέπει να ληφθούν υπ' όψη στους υπολογισμούς. Οι κατακόρυφες συνιστώσες T1, T2 των ωθήσεων αυτών δεν ισορροπούν και υπεισέρχονται στην έκφραση του συντελεστή ασφαλείας:

$$F = \frac{\sum_n [c' \cdot \ell \cdot \cos \alpha + (W + \Delta T) \cdot \tan \varphi] [\cos \alpha + \tan \varphi \cdot \sin \alpha / F]^{-1}}{\sum_n (W \cdot \sin \alpha)}$$

Συνήθως χρησιμοποιείται η απλουστευμένη μέθοδος Bishop (Bishop simplified) που δέχεται ότι $\Delta T = 0$. Επομένως ο συντελεστής ασφαλείας για $\Delta T = 0$ παίρνει την μορφή της εξίσωσης:

$$F = \frac{\sum_n [c \cdot b + G \cdot \tan \varphi] \cdot [\cos \alpha + \tan \varphi \cdot \sin \alpha / F]^{-1}}{\sum_n (G \cdot \sin \alpha)}$$

όπου, για την επίλυση της απαιτείται μία επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού.



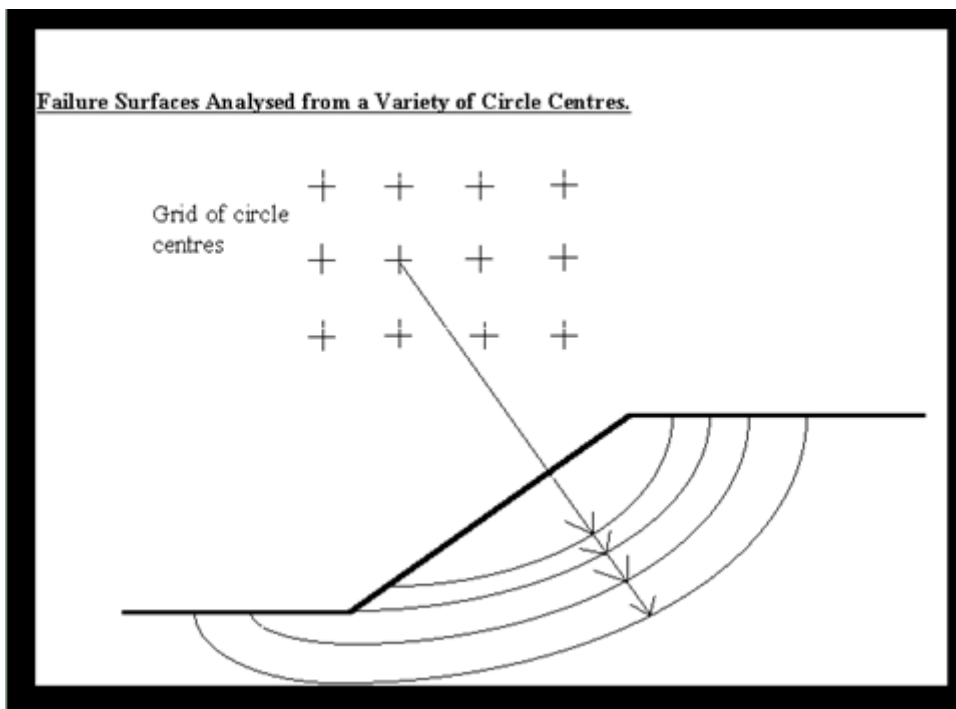
Εικόνα 44 Απλουστευμένη και Γενική μέθοδος λωρίδων Bishop: Απεικόνιση λωρίδων ως διαγράμματα ελευθέρου σώματος

Figure 44 Simplified and General Method of Bishop Strip: Stripping as Unstrained Body Diagrams

Κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας (critical failure surface)

Ο έλεγχος της ευστάθειας ενός πρανούς δεν εξαντλείται με τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας κάποιου πιθανού κύκλου ολίσθησης, εκτός εάν πρόκειται για συγκεκριμένη αστοχία με γνωστή τη θέση της επιφάνειας. Κατά τη μελέτη πρανών που πρόκειται να κατασκευασθούν ζητείται να προσδιορισθεί ο *κρίσιμος κύκλος ολίσθησης*, δηλαδή το κέντρο και η ακτίνα του κύκλου που δίνει τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας.

Για την εύρεση της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας το υπολογιστικό πρόγραμμα υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας για κύκλους με διάφορες θέσεις του κέντρου και για κάθε θέση του κέντρου με διάφορες τιμές της ακτίνας. Έτσι με τη χρήση ενός Κανάβου κέντρων πιθανών κύκλων ολίσθησης, από όλους τους δοκιμαστικούς κύκλους ολίσθησης υπολογίζεται η θέση του κρίσιμου κύκλου.



Εικόνα 45 Κανάβος των κέντρων κύκλων των επιφανειών αστοχίας

Figure 45 Cavity of circle centers of failure surfaces

5.3.2 Αριθμητικές μέθοδοι (μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, μέθοδος πεπερασμένων διαφορών)

Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Ο υπό μελέτη χώρος διαιρείται σε ισοδύναμα στοιχεία από το ίδιο συνεχές μέσο (πεπερασμένα στοιχεία), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε συγκεκριμένα μόνον σημεία , τους κόμβους. Η συμπεριφορά του κάθε στοιχείου περιγράφεται μέσα από διαφορικές εξισώσεις. Η διακριτοποίηση γίνεται με πεπερασμένα στοιχεία οποιουδήποτε σχήματος (ευθύγραμμα τμήματα, τρίγωνα, ορθογώνια παραλληλόγραμμα, με καμπύλες πλευρές..)

Βήματα ανάλυσης:

1. Διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου σε πεπερασμένα στοιχεία
2. Επιλογή συναρτήσεων παρεμβολής
3. Κατάστρωση εξισώσεων σε επίπεδο (πεπερασμένου) στοιχείου
4. Κατάστρωση εξισώσεων σε καθολικό (global) επίπεδο
5. Επίλυση - υπολογισμός κύριων (βασικών) και δευτερογενών (παραγώγων) αποτελεσμάτων

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα διακριτοποίησης του χώρου, δηλαδή ο διαχωρισμός του σε μικρών διαστάσεων υποχώρους (στοιχεία). Με αυτό τον τρόπο ένα ανομοιογενές συνεχές μέσο μπορεί να μετατραπεί σε διακριτό μέσο αποτελούμενο από μικρότερα στοιχεία με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες το καθένα, τα οποία αλληλοεπιδρούν μέσω των κοινών κόμβων. Η μέθοδος εξασφαλίζει τη συνολική ισορροπία του κάθε στοιχείου καθώς και την ισορροπία των δράσεων στους κόμβους. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς των στοιχείων που προκύπτουν από την διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου χρησιμοποιούνται μαθηματικά προσομοιώματα που βασίζονται σε διάφορες θεωρίες.

Μέρος Γ

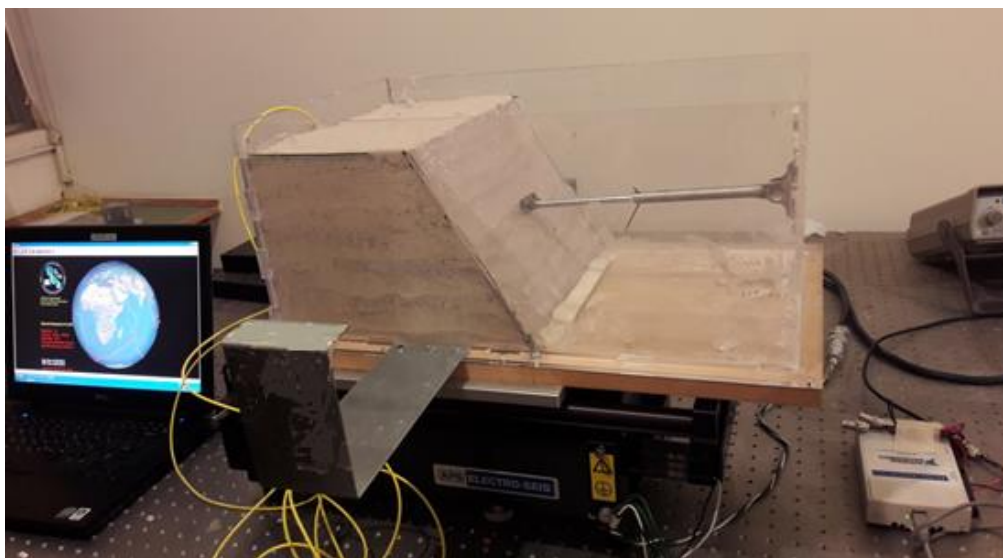
Πειράματα

Μέρος Γ – Πειράματα

Κεφάλαιο 6. Πειράματα

6.1 Εισαγωγή

Για τις ανάγκες της έρευνας δημιουργήθηκαν 14 πειραματικά μοντέλα επιχωμάτων υπό κλίμακα, στο εσωτερικό άκαμπτου και στεγανού κουτιού κατασκευασμένο από Plexiglass και ξύλινη βάση. Η γεωμετρία του δοχείου των πειραμάτων είναι ορθογώνιο κουτί διαστάσεων 30 cm x 50 cm x 22 cm. Το βάρος του κουτιού είναι 5,7 Kg. Το κουτί τοποθετείται επάνω στη σεισμική τράπεζα που έχουμε περιγράψει σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στην Εικόνα που ακολουθεί βλέπουμε αυτή την πειραματική διάταξη.



Εικόνα 46 Πειραματική Διάταξη, Figure 46 Experimental layout

Στα μοντέλα ενσωματώθηκαν αισθητήρες οπτικών ινών για την αποτύπωση των μετακινήσεων (τροπών). Οι αισθητήρες οπτικών ινών τοποθετήθηκαν εντός των μοντέλων των πρανών, είτε ελεύθεροι είτε σε υφάσματα που προσομοιώνουν γεωϋφάσματα, δηλαδή σπλισμό πρανών. Οι αισθητήρες οπτικών ινών ενώνονται με τον αντάπτορα (οπτικών ινών) προκειμένου να συνδεθεί με τον «μεταφραστή» του σήματος που δίνουν. Ενώ στο κουτί τοποθετήθηκε αισθητήρας επιτάχυνσης τύπου MEMS ο οποίος λειτουργεί με το λογισμικό του QCN.

Πριν από τη διεξαγωγή κάθε πειράματος, ελέγχουμε τις συνδέσεις όλων των αισθητήρων και σετάρουμε τα υπολογιστικά προγράμματα που θα χρειαστούμε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων: όπως το LabVIEW για τον έλεγχο της Σεισμικής Τράπεζας, το πρόγραμμα για την παρακολούθηση των οπτικών ινών και φυσικά το λογισμικό του QCN.

Στις αρχικές πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των υλικών και η δημιουργία της πειραματικής διάταξης. Η πρώτη πειραματική δοκιμή αφορά διερεύνηση επί των υλικών συγκόλλησης των αισθητήρων οπτικών ινών με το ύφασμα που προσομοιώνει το γεωϋφασμα. Οι επόμενες πειραματικές δοκιμές αφορούν την διερεύνηση της διάταξης του ενισχυτή και ταυτόχρονα του λογισμικού LabView για τον εντοπισμό της κατάλληλης επιτάχυνσης που χρησιμοποιείται στα πειράματα που ακολουθούν.

Στη συνέχεια περιγράφονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, με τη χρονική σειρά που πραγματοποιήθηκαν. Σημειώνεται πως η σειρά αυτή παίζει ρόλο καθώς σε κάθε πείραμα εισάγεται και κάποιο νέο στοιχείο, είτε καταγραφής είτε κάποιες μικροαλλαγές οι οποίες αν και μικρές επηρεάζουν ουσιαστικά τα αποτελέσματα. Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται όλα τα πειράματα που διεξήχθησαν συνοπτικά, τα θέματα που εξετάζονται είναι η παρουσία νερού και σπλισμού, η τοποθέτηση αγωγού, η χρήση αισθητήρων οπτικών ινών για την καταγραφή των τροπών, ο αριθμός των δοκιμών στις οποίες υπόκεινται τα μοντέλα και τέλος το η χρήση λογισμικού για την υπολογιστική ανάλυση.

Πίνακας 7 Συνοπτική Περιγραφή Πειραμάτων,

Table 7 Brief Description of Experiments

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ								
Αριθμός Πειράματος	Παρουσία Νερού	Παρουσία Οπλισμού	Αγωγός	Αισθητήρες Οπτικών Ινών	Αριθμός Δοκιμών/ Επιταχύνσεις	Υπολογιστική Ανάλυση		
						Slide	Phase	Vic2D
1	ΌΧΙ	ΝΑΙ	-	1	1 - 3,4 m/s ²	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΌΧΙ
2	ΌΧΙ	ΝΑΙ	-	1	2 - 1,9 m/s ² - 2,8 m/s ²	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΌΧΙ
3	ΝΑΙ	ΝΑΙ	-	1	1 - 2,0 m/s ²	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΌΧΙ
4	ΝΑΙ	ΌΧΙ	-	1	1 - 3,8 m/s ²	ΌΧΙ	ΌΧΙ	ΝΑΙ
5	ΌΧΙ	ΌΧΙ	-	0	1 - 3,6 m/s ²	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
6	ΝΑΙ	ΌΧΙ	-	1	1 - 2,85 m/s ²	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
7	ΌΧΙ	ΌΧΙ	-	1	5 - 2,4 m/s ² - 2,82 m/s ² - 3,6 m/s ² - 6,5 m/s ² - 10,0 m/s ²	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
8	ΌΧΙ	ΌΧΙ	-	1	3 - 2,5 m/s ² - 3,0 m/s ² - 3,6 m/s ²	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΌΧΙ
9	ΝΑΙ	ΌΧΙ	Αλουμινίου	1	1 - 2,6 m/s ²	ΌΧΙ	ΌΧΙ	ΌΧΙ
10	ΌΧΙ	ΌΧΙ	Αλουμινίου	1	1 - 8,5 m/s ²	ΌΧΙ	ΌΧΙ	ΌΧΙ
11	ΝΑΙ	ΌΧΙ	Χαλκού	2	4 - 2,3 m/s ² - 2,6 m/s ² - 3,1 m/s ² - 3,6 m/s ²	ΝΑΙ	ΌΧΙ	ΝΑΙ
12	ΝΑΙ	ΌΧΙ	Χαλκού	1	4 - 2,6 m/s ² - 3,0 m/s ² - 3,4 m/s ² - 4,0 m/s ²	ΝΑΙ	ΌΧΙ	ΝΑΙ
13	ΌΧΙ	ΝΑΙ	-	2	2 - 3,0 m/s ² - 4,0 m/s ²	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
14	ΝΑΙ	ΝΑΙ	-	2	2 - 3,0 m/s ² - 4,0 m/s ²	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ

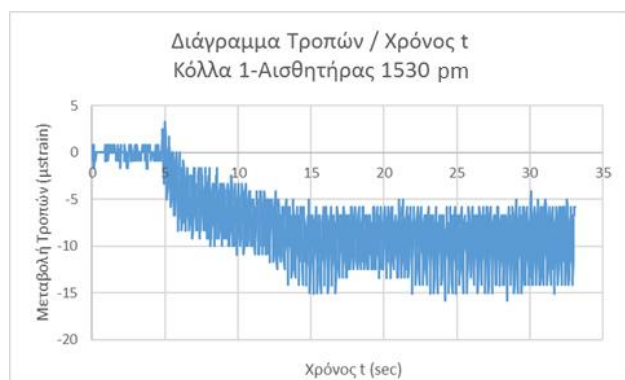
6.2 Πειραματικές Δοκιμές

6.2.1 Δοκιμές για σύγκριση κόλλας

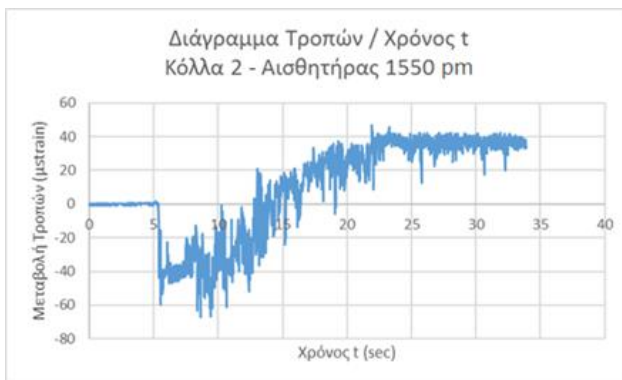
Για τις ανάγκες αυτών των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν 2 ίδια κομμάτια γεωσυνθετικού υλικού, ίδιας ύφανσης και σε κάθε ένα από αυτά ενσωματώθηκε με χρήση κόλλας από ένας αισθητήρας οπτικών ινών με διαφορετικό όμως είδος κόλλας σε κάθε αισθητήρα. Ο ένας έχει ονομαστικό μήκος κύματος 1550 nm και ο άλλος 1530 nm.

Τα κομμάτια αυτά του γεωσυνθετικού υλικού τοποθετήθηκαν κατευθείαν στην σεισμική τράπεζα με ίδιο βάρος στην επιφάνεια προκειμένου να τα συγκρατεί αλλά και να παραμορφώνει τους αισθητήρες. Διεξήχθησαν δύο δοκιμές με ακριβώς ίδιες παραμέτρους συχνότητας και έντασης 4 Hz και 1 Volt αντίστοιχα.

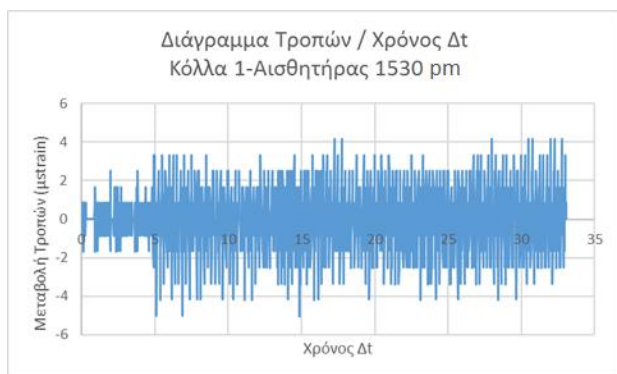
Σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος ήταν να προσδιορίσουμε ποιοτικά την επιρροή που έχει η σκληρότητα της κόλλας που χρησιμοποιήθηκε στις παραμορφώσεις που καταγράφει ο αισθητήρας οπτικών ινών όταν βρίσκεται στην επιφάνεια του γεωυφάσματος και επομένως και σε οποιοδήποτε άλλο υλικό. Παρακάτω θα δούμε τα διαγράμματα μεταβολής τροπών που προκύπτουν από τις μετρήσεις του μήκους κύματος που εξήχθησαν από τις δοκιμές αυτές.



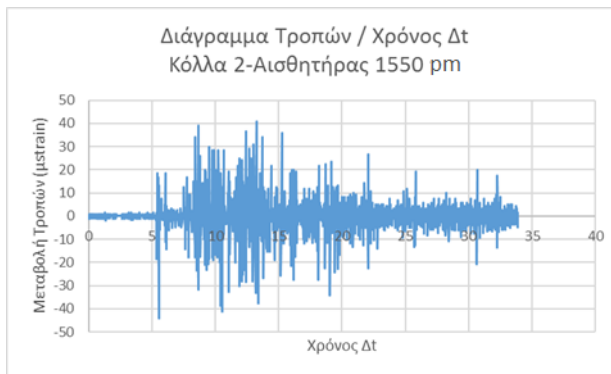
Εικόνα 47 Διάγραμμα Τροπών προς Χρόνο,
Figure 47 Strain to Time Chart



Εικόνα 48 Διάγραμμα Τροπών προς Χρόνο,
Figure 48 Strain to Time Chart



Εικόνα 49 Διάγραμμα Μεταβολής Τροπών,
Figure 49 Strain Modification Chart



Εικόνα 50 Διάγραμμα Μεταβολής Τροπών,
Figure 50 Strain Modification Chart of

Η Κόλλα 1 είναι πιο συμπαγής και σκληρή στην αφή. Αντίθετα η κόλλα 2, είναι πιο μαλακή στην αφή. Σε αντιστοιχία με τις μετρήσεις όσο πιο εύπλαστη είναι η κόλλα τόσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία του αισθητήρα σε παραμορφώσεις, αυτό σημαίνει Η 2^η κόλλα είναι καταλληλότερη για πειράματα όπως αυτά που διεξάγουμε αφού μας ενδιαφέρει και η ελάχιστη παραμόρφωση του πρανούς.

6.2.2 Δοκιμές για εύρεση επιτάχυνσης

Επειδή η σεισμική τράπεζα είχε διττή δυνατότητα διαχείρισης της έντασης της, είτε μέσω του προγράμματος LabView που χρησιμοποιούμε αλλά και από τον ενισχυτή της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα, θεωρήθηκε σκόπιμο να εξετάσουμε τις επιταχύνσεις μέσα από δύο σειρές πειραμάτων.

Στην πρώτη σειρά αυτών των δοκιμών χρησιμοποιήσαμε μικρότερο δοχείο διαστάσεων, γεμισμένο με άμμο ώστε το συνολικό του βάρος να φτάνει στα 17 Kg, όσο περίπου είναι και το βάρος των δοχείων των πειραμάτων.

Τοποθετήσαμε χειροκίνητα το διακόπτη του εύρους του ρεύματος (με την ονομασία επί του διακόπτη: «amplitude» και στη συνέχεια θα αναφέρουμε ως ο «διακόπτης») σε 7 διαφορετικές θέσεις, και για κάθε θέση δοκιμάσαμε διάφορες τιμές του ρεύματος και της συχνότητας μέσω LabView. Μέσω του επιταχυνσιογράφου που ήταν τοποθετημένος στην αριστερή πλευρά του δοχείου καταγράφηκαν οι μέγιστες επιταχύνσεις και για τους 3 άξονες. Η καταγραφή των επιταχύνσεων γίνεται όχι μόνο στον άξονα κίνησης Z αλλά και στον X και στον Y άξονα για να ξέρουμε πότε συνδυασμός συχνότητας - ρεύματος προκαλεί έντονο “θόρυβο” προς τις άλλες κατευθύνσεις που θα επηρεάσει την υπολογιστική διαδικασία των πειραμάτων μας.

Πίνακας 8 1^{ης} Σειράς Δοκιμών για Εύρεση επιτάχυνσης

Table 8 The 1st Test Series for Finding Acceleration

Αριθμός Δοκιμής	Θέση Amplitude στον ενισχυτή	Δοκιμές Amplitude στον ενισχυτή σήματος της Σεισμικής Τράπεζας					Παρατηρήσεις
		1η Σειρά Δοκιμών					
		Στοιχεία στο Labview	Επιτάχυνση ανά άξονα (m/s ²)				
Αριθμός Δοκιμής	Θέση Amplitude στον ενισχυτή	Συχνότητα (Hz)	Amplitude	άξονας Z	άξονας Y	άξονας X	Παρατηρήσεις
A1	↓	8	2	2,35	0,32	1,32	Η επιτάχυνση αντιστοιχεί σχεδόν σε ζώνη II στον χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας
A2	↓	10	2	2,34	0,727	1,314	Ζώνη II. Χάνει κάποιες κορυφές στο QCN λόγω υψηλής συχνότητας. Και έχει αρκετό θόρυβο στις άλλες κατευθύνσεις.
A3	↓	8	1	1,216	0,338	0,58	Μικρότερη επιτάχυνση και από ζώνη I
A4	↓	10	1	1,16	0,41	0,423	Μικρότερη επιτάχυνση και από ζώνη I
B1	←	8	2	6,996	1,342	4,328	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Πολύ υψηλός θόρυβος.
B2	←	10	2	5,958	2,74	4,918	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Πολύ υψηλός θόρυβος.
B3	←	8	1	3,607	0,959	2,654	Η επιτάχυνση αντιστοιχεί σχεδόν σε ζώνη III στον χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας
B4	←	10	1	3,56	0,948	1,627	Η επιτάχυνση αντιστοιχεί σχεδόν σε ζώνη III στον χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας. Έχει λιγότερο θόρυβο προς τον άξονα X
Γ1	↑	8	2	12,478	1,66	6,75	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Πολύ υψηλός θόρυβος.
Γ2	↑	10	2	11,235	2,42	8,26	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Πολύ υψηλός θόρυβος.
Γ3	↑	8	1	3,84-9,5	1,91	6,943	Ανομοιομορφία στην επιτάχυνση. Η κυρίως επιτάχυνση αντιστοιχεί σε ζώνη III, αλλά υπάρχουν κορυφές (2 στις 8) που αγγίζουν μέγιστη επιτάχυνση 9,5 m/s ²
Γ4	↑	10	1	5,5	1,479	5,347	Η αύξηση της επιτάχυνσης έγινε με πολύ αργό ρυθμό.
Δ1	→	8	2	9,58-14,18	1,758	9,124	Ανομοιομορφία στην επιτάχυνση. Πολύ υψηλές επιταχύνσεις και θόρυβος.
Δ2	→	10	2	13,184	2,562	4,385	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Πολύ υψηλός θόρυβος.
Δ3	→	8	1	4,1-10,102	0,945-2,448	1,956-6,61	Ανομοιομορφία στην επιτάχυνση. Υπάρχουν κορυφές (2 στις 8) που αγγίζουν μέγιστη επιτάχυνση 10 m/s ² . Ανάλογα εκδλώνεται και ο θόρυβος και στους άλλους δύο άξονες.
Δ4	→	10	1	5,0-9,1	1,685	3,128	Ανομοιομορφία στην επιτάχυνση. Το 50% των κορυφών αγγίζουν μέγιστη επιτάχυνση 9 m/s ²
E1	↗	8	2	3,8-7,5-11	1,5-4,0	3,5-6,3	Ανομοιομορφία στην επιτάχυνση. Υπάρχουν κορυφές (2 στις 8) που αγγίζουν μέγιστη επιτάχυνση 11 m/s ² , άλλες (3 στις 8) σε 7,5 m/s ² και άλλες (3 στις 8) σε 3,8 m/s ² . Ανάλογα εκδλώνεται και ο θόρυβος και στους άλλους δύο άξονες.
E2	↗	10	2	7,5	3,599	6,123	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Πολύ υψηλός θόρυβος.
E3	↗	8	1	3,5-5,5	1,7	5,802	Ανομοιομορφία στην επιτάχυνση. Η κυρίως επιτάχυνση αντιστοιχεί σε ζώνη III, αλλά υπάρχουν κορυφές (2 στις 8) που αγγίζουν μέγιστη επιτάχυνση 5,5 m/s ²
E4	↗	10	1	4,4	1,05	2,4	Λίγο πάνω από τη ζώνη III. Η αύξηση της επιτάχυνσης έγινε αργά
ΣΤ1	↘	8	2	5,0-12,76	51,225-5,4	8,023	Διαφοροποιήσεις στις κορυφές. Ανάλογα εκδηλώνεται και ο θόρυβος.
ΣΤ2	↘	10	2	6,1-14,0	4,53	6,56	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Πολύ υψηλός θόρυβος. Διαφοροποιήσεις στις κορυφές.
ΣΤ3	↘	8	1	3,7-10,1	3,5	5,33	Ανομοιομορφία στην επιτάχυνση. Η κυρίως επιτάχυνση αντιστοιχεί σε ζώνη III, αλλά υπάρχουν κορυφές (2 στις 8) που αγγίζουν μέγιστη επιτάχυνση 10,1 m/s ² . Πολύ υψηλός θόρυβος
ΣΤ4	↘	10	1	7,7	2	4,41	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Πολύ υψηλός θόρυβος.
Z1	↘	8	2	10,4	2,984	6,144	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Πολύ υψηλός θόρυβος.
Z2	↘	10	2	8,1	2	9,008	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Πολύ υψηλός θόρυβος.
Z3	↘	8	1	3,5-9,5	1,01	6,09	Ανομοιομορφία στην επιτάχυνση. Η κυρίως επιτάχυνση αντιστοιχεί σε ζώνη III, αλλά υπάρχουν κορυφές (2 στις 8) που αγγίζουν μέγιστη επιτάχυνση 9,5 m/s ² . Πολύ υψηλός θόρυβος
Z4	↘	10	1	4,957	2,249	5,31	Υψηλή επιτάχυνση. Πολύ υψηλός θόρυβος.
H1	↘	8	2	16,006	5,177	7,583	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Πολύ υψηλός θόρυβος. Σε αυτή τη δοκιμή καταστράφηκε το μικρό κουτί δοκιμών

Αυτή η σειρά πειραμάτων αστόχησε στην εύρεση των κατάλληλων παραμέτρων για την εφαρμογή τους στα πειράματα που ακολουθούν. Η αστοχία των αποτελεσμάτων αποδείχθηκε στο αμέσως επόμενη δοκιμαστική εφαρμογή, όπου η επιτάχυνση που αναμενόταν είχε σημαντική απόκλιση από αυτή που τελικά επιτεύχθηκε. Ο λόγος δεν είναι άλλος από τη διαφορετική γεωμετρία του δοχείου που χρησιμοποιήθηκε.

Στην δεύτερη σειρά αυτών των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το ίδιο δοχείο που χρησιμοποιείται στα υπόλοιπα πειράματα, γεμισμένο με άμμο ώστε το συνολικό του βάρος να φτάνει στα 17 Kg, όσο περίπου είναι και το βάρος των ομοιωμάτων των πειραμάτων.

Τοποθετήσαμε χειροκίνητα το διακόπτη του ρεύματος (Amplitude) σε 5 διαφορετικές θέσεις, και για κάθε θέση δοκιμάσαμε διάφορες τιμές του ρεύματος και της συχνότητας μέσω LabView. Μέσω του επιταχυνσιογράφου που ήταν τοποθετημένος στην αριστερή πλευρά του δοχείου καταγράψαμε τις μέγιστες επιταχύνσεις και για τους 3 άξονες.

Πίνακας 9 2^{ης} Σειράς Δοκιμών για Εύρεση επιτάχυνσης

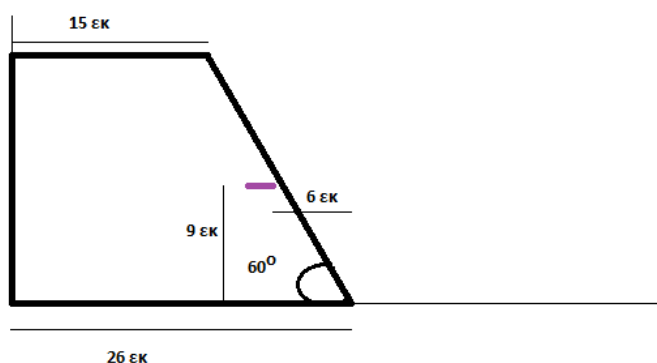
Table 9 The 2nd Test Series for Finding Acceleration

		Δοκιμές Amplitude στον ενισχυτή σήματος της Σεισμικής Τράπεζας					
		2η Σειρά Δοκιμών					
		Στοιχεία στο Labview		Επιτάχυνση ανά άξονα (m/s ²)			
Αριθμός Δοκιμής	Θέση Amplitude στον ενισχυτή	Συχνότητα (Hz)	Amplitude	άξονας Z	άξονας Y	άξονας X	Παρατηρήσεις
A1	↑	4	1	0	0	0	Μηδενική επιτάχυνση σε αυτή τη θέση
B1	→	4	1	2,4	0,077	0,093	Επιτάχυνση ζώνης II στους χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας. Πιθανώς κατάλληλη για χρήση παραμέτρων στα πειράματα.
B2	→	6	1	2,112	0,116	0,146	Χαμηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή για χρήση παραμέτρων στα πειράματα.
B3	→	8	1	1,745	0,339	0,387	Χαμηλή επιτάχυνση, με θόρυβο στους άλλους άξονες.
B4	→	10	1	1,627	0,187	0,102	Χαμηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή.
B5	→	4	2	4,849	0,305	0,212	Υψηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή
B6	→	6	2	4,245	0,177	0,187	Υψηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή
B7	→	8	2	3,573	0,62	1,024	Επιτάχυνση ζώνης III στους χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας. Πολύ υψηλός θόρυβος. Ακατάλληλη για χρήση παραμέτρων στα πειράματα.
B8	→	10	2	3,159	0,341	0,685	Λίγο χαμηλότερη από επιτάχυνση ζώνης III. Πολύ υψηλός θόρυβος. Ακατάλληλη για χρήση παραμέτρων στα πειράματα.
B9	→	4	1,5	3,59	0,107	0,209	Επιτάχυνση ζώνης III. Ικανοποιητικός θόρυβος. Κατάλληλη για χρήση.
B10	→	6	1,5	3,156	0,153	0,0384	Λίγο χαμηλότερη από επιτάχυνση ζώνης III. Μη προτιμητέα για χρήση.
B11	→	8	1,5	2,718	0,451	0,59	Χαμηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή.
B12	→	10	1,5	2,352	0,312	0,417	Χαμηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή.
G1	↓	4	1	4,679	0,184	0,284	Υψηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή
G2	↓	6	1	4,252	0,286	0,502	Υψηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή
G3	↓	8	1	3,63	0,601	0,778	Επιτάχυνση ζώνης III. Υψηλός θόρυβος. Ακατάλληλη για χρήση.
G4	↓	10	1	2,86	0,434	0,35	Χαμηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή.
G5	↓	4	0,75	3,517	0,116	0,245	Επιτάχυνση ζώνης III. Ικανοποιητικός θόρυβος. Πιθανώς κατάλληλη για χρήση.
G6	↓	6	0,9	3,623	0,197	0,381	Επιτάχυνση ζώνης III. Ικανοποιητικός θόρυβος. Πιθανώς κατάλληλη για χρήση.
G7	↓	8	0,9	3,192	0,491	0,658	Επιτάχυνση ζώνης III. Υψηλός θόρυβος. Ακατάλληλη για χρήση.
G8	↓	10	1,27	3,87	0,559	0,616	Επιτάχυνση ζώνης III. Υψηλός θόρυβος. Ακατάλληλη για χρήση.
Δ1	←	4	1	7,766	-	-	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή
Δ2	←	6	1	6,2	-	-	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή
Δ3	←	8	1	5,264	-	-	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή
Δ4	←	10	1	4,438	0,51	0,336	Υψηλή επιτάχυνση. Υψηλός θόρυβος. Ακατάλληλη δοκιμή
Δ5	←	4	0,5	3,5	0,127	0,133	Επιτάχυνση ζώνης III. Ικανοποιητικός θόρυβος. Πιθανώς κατάλληλη για χρήση.
Δ6	←	6	0,6	3,584	0,223	0,238	Επιτάχυνση ζώνης III. Ικανοποιητικός θόρυβος. Πιθανώς κατάλληλη για χρήση.
Δ7	←	8	0,7	3,624	0,647	1,198	Επιτάχυνση ζώνης III. Υψηλός θόρυβος. Ακατάλληλη για χρήση.
Δ8	←	10	0,8	3,611	0,556	1,471	Επιτάχυνση ζώνης III. Υψηλός θόρυβος. Ακατάλληλη για χρήση.
E1	↑	4	1	7,021	-	-	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή
E2	↑	6	1	6,81	-	-	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή
E3	↑	8	1	5,578	-	-	Πολύ υψηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή
E4	↑	10	1	4,69	-	-	Υψηλή επιτάχυνση. Ακατάλληλη δοκιμή
E5	↑	10	0,5	2,39	0,206	0,472	Επιτάχυνση ζώνης II. Υψηλός θόρυβος. Ακατάλληλη για χρήση.
E6	↑	10	0,7	3,6	0,439	0,572	Επιτάχυνση ζώνης III. Υψηλός θόρυβος. Ακατάλληλη για χρήση.
E7	↑	8	0,65	3,7	0,656	1,125	Επιτάχυνση ζώνης III. Υψηλός θόρυβος. Ακατάλληλη για χρήση.
E8	↑	6	0,625	3,654	0,645	1,053	Επιτάχυνση ζώνης III. Υψηλός θόρυβος. Ακατάλληλη για χρήση.
E9	↑	4	0,6	3,499	0,623	0,985	Επιτάχυνση ζώνης III. Υψηλός θόρυβος. Ακατάλληλη για χρήση.

Τα αποτελέσματα αυτής της σειράς των δοκιμών δεν είναι τα βέλτιστα αλλά είναι αρκετά ικανοποιητικά. Καθώς μας επιτρέπουν να έχουμε μια αρκετά κοντινή στην πραγματική αναμενόμενη επιτάχυνση στα πειράματα που ακολούθησαν αυτές τις δοκιμές, αλλά και να αποφύγουμε συνδυασμούς συχνότητας-ρεύματος που θα προκαλέσουν έντονο θόρυβο, οδηγώντας τα πρηνή μας σε αστοχία λόγω παραμέτρων που δε λαμβάνονται υπ' όψιν στην υπολογιστική μας διαδικασία. (Πιθανόν αυτό να οφείλεται στην ακανόνιστη μορφή της άμμου στο δοχείο.)

Δοκιμαστική Εφαρμογή της Επιτάχυνσης σε Μοντέλο Πρανούς

Η δοκιμή έγινε σε ξηρό πρανές. Το καθαρό βάρος της άμμου που χρησιμοποιήθηκε είναι 11 Kg. Το συνολικό (μικτό) βάρος είναι 16,7 Kg. Το πρανές δεν φέρει οπλισμό. Σε αυτό το πείραμα δεν χρησιμοποιήσαμε την κάμερα. Ο επιταχυνσιογράφος έχει στην αριστερή πλευρά του δοχείου, ακριβώς στο κέντρο της επιφάνειας. Ο αισθητήρας οπτικών ινών έχει αρχικό μήκος κύματος 1551,694 nm.



Εικόνα 51 Τομή Μοντέλου Πρανούς, Πείραμα Δοκιμής,

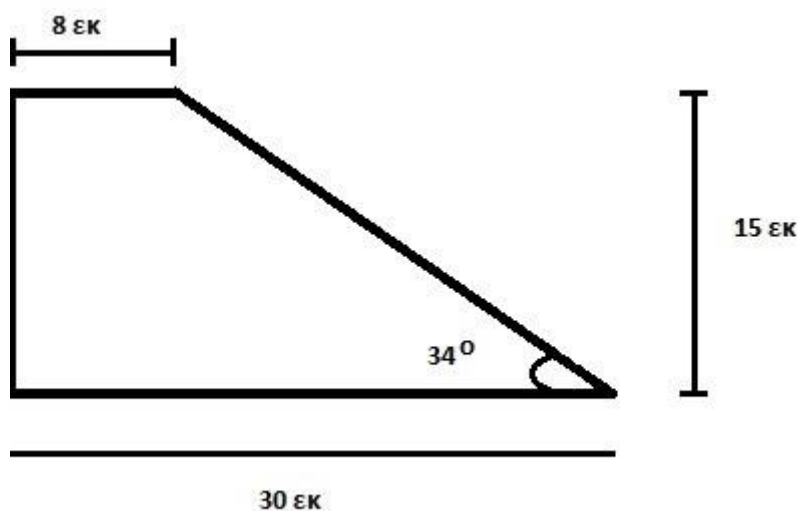
Figure 51 Side view of the Slope Model, Experimental Test

Τοποθετήθηκε το Διακόπτη της σεισμικής τράπεζας σε θέση <- και στο LabView θέσαμε συχνότητα 10 και ρεύμα στο 1. Η αναμενόμενη μέγιστη επιτάχυνση ήταν $3,56 \text{ m/s}^2$ δηλαδή ζώνη III βάσει των ελληνικών αντισεισμικών κανονισμών (0,36g). Η επιτάχυνση του πειράματος δεν ήταν η προβλεπόμενη της πρώτης σειράς δοκιμών, και έτσι οδηγηθήκαμε στη 2η σειρά δοκιμών.

6.3 Πείραμα 1ο.

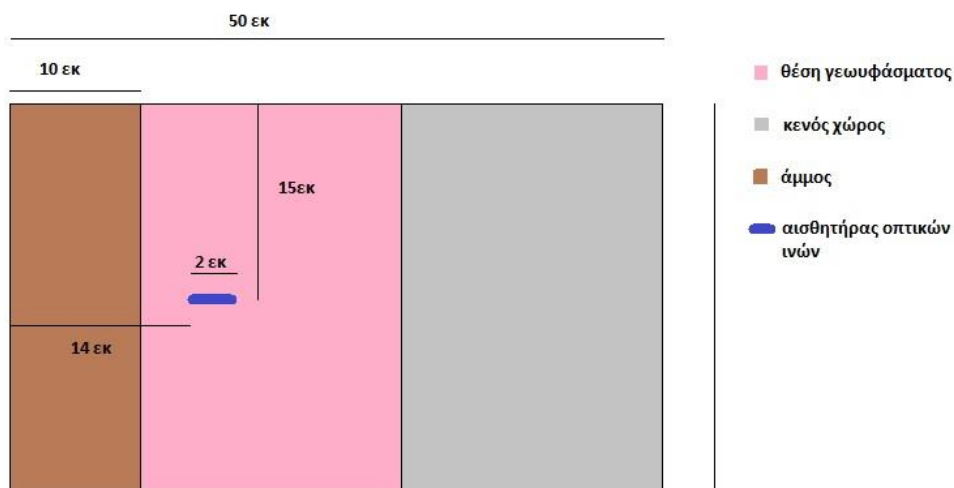
➤ Περιγραφή

Το πείραμα αυτό, είναι η 1^η ολοκληρωμένη δοκιμή στη σεισμική τράπεζα με την πειραματική διάταξη που δημιουργήθηκε. Σκοπός του είναι η εξέταση της λειτουργικότητας της πειραματικής διάταξης, και ειδικότερα η χρήση του πλαισίου (κουτί Plexiglass) που κατασκευάστηκε καθώς και η εφικτότητα δημιουργίας πρανούς υπό κλίμακα με το εδαφικό υλικό που επιλέχθηκε. Ειδικότερα πραγματοποιείται διερεύνηση του τρόπου κατασκευής του πρανούς, της μεταφοράς του στη σεισμική τράπεζα και της σύνδεσης του με αυτή ώστε να αποφεύγονται κατά το δυνατόν ανεπιθύμητες πρόσθετες ταλαντώσεις. Επιπροσθέτως πραγματοποιείται διερεύνηση της δυνατότητας καταγραφής τροπής μέσω αισθητήρων οπτικών ινών στον πυθμένα του πρανούς και της επιτάχυνσης που επιβάλλεται. Περιγράφονται επίσης τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, και η θέση των μετρητικών διατάξεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταγραφών και της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Slide και του Phase.



Εικόνα 52 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 1, Figure 52 Side view of Experimental Model 1

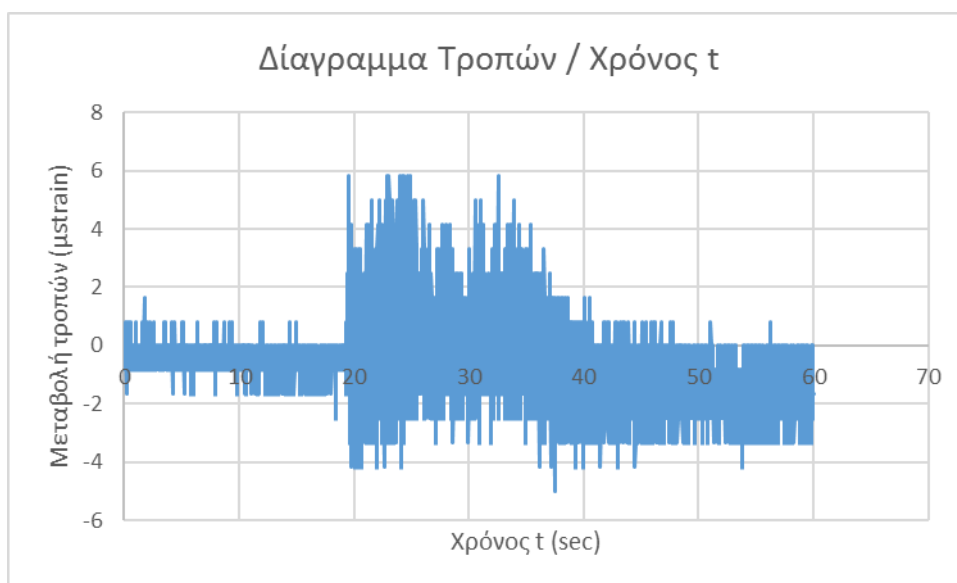
Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε ξηρό πρανές και η μέγιστη επιτάχυνση είναι $3,4 \text{ m/s}^2$. Το καθαρό βάρος της άμμου που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσο με 11 Kg και το συνολικό βάρος συμπεριλαμβανομένου του κουτιού Plexiglass είναι ίσο με 16,7 Kg. Επιπροσθέτως έχει τοποθετηθεί μία στρώση σπλισμού, στον πυθμένα του πρανούς. Στο μοντέλο τοποθετείται αισθητήρας καταγραφής επιτάχυνσης στην αριστερή παρειά του κουτιού. Σε αυτό το πείραμα δεν χρησιμοποιείται η κάμερα καταγραφής ψηφιακών φωτογραφιών.



Εικόνα 53 Κάτοψη Πειραματικού Μοντέλου 1, Figure 53 Top view of Experimental Model 1

➤ Αποτελέσματα Καταγραφών Αισθητήρων

Ο αισθητήρας οπτικών ινών έχει αρχικό μήκος κύματος 1550,39 nm και οι καταγραφές του παρουσιάζονται στην Εικόνα 54, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1

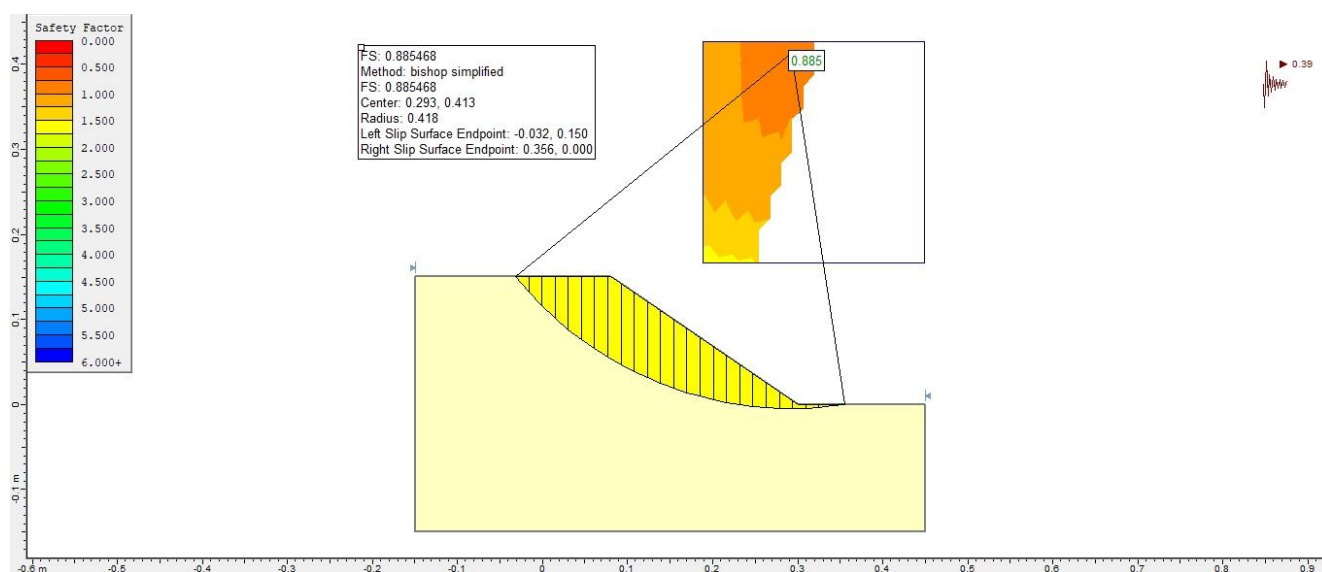


Εικόνα 54 Διάγραμμα Τροπών προς το Χρόνο, Figure 54 Strain-to-Time Chart

Η επιτάχυνση επιβάλλεται στο μοντέλο 20 sec αφού άρχισε η καταγραφή. Παρατηρείται πως παρότι η επιτάχυνση είναι μεγάλη δεν οδήγησε το μοντέλο σε μόνιμες παραμορφώσεις, που σημαίνει ότι δεν υπήρχαν οι αιτιώδεις παράγοντες για να προκαλέσουν αστοχία παρά μόνο η εναυσματική αιτία του σεισμού.

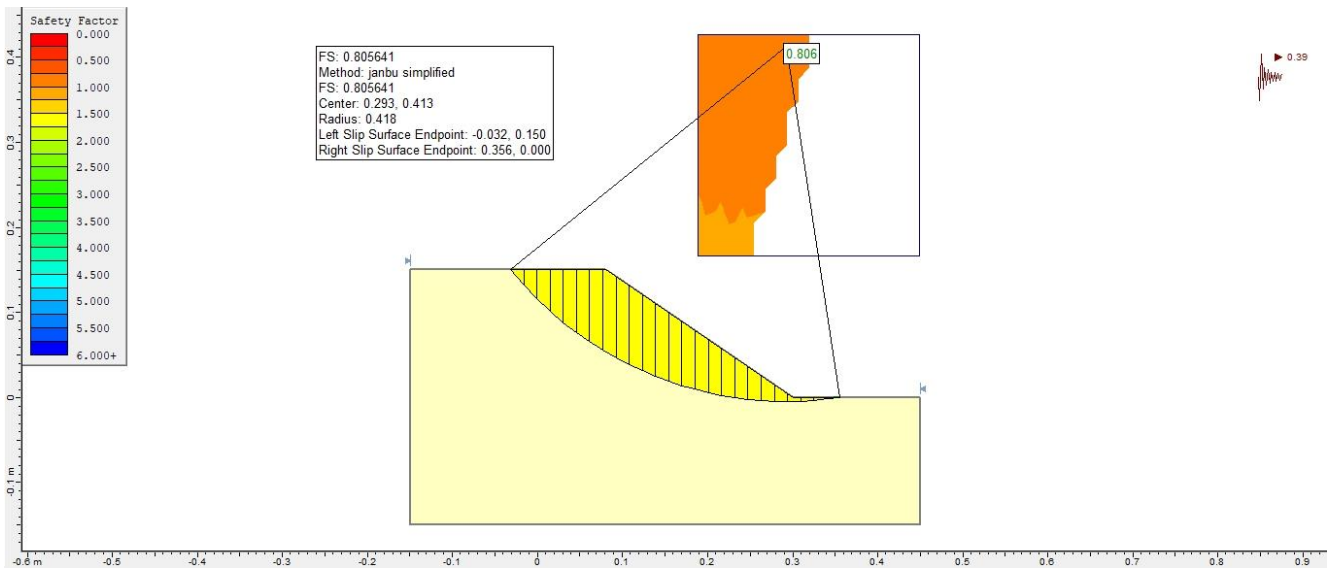
➤ Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide και Phase

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα υπολογιστικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν σύμφωνα με τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά που περιγράφονται στα πειράματα καθώς και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και το λογισμικό της Rocscience. Ειδικότερα πραγματοποιείται για όλα τα πειράματα που ακολουθούν υπολογιστική διερεύνηση με τα λογισμικά Slide και Phase σε μοντέλα υπό 1:1 κλίμακα. Με το λογισμικό του Slide αναζητείται ο Συντελεστής Ασφαλείας κατά Bishop και κατά Janbu, καθώς και οι επιφάνειες των μηχανισμών αστοχίας στις οποίες αντιστοιχεί ο κάθε Σ.Α. Στην συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με την χρήση του λογισμικού Phase, όπου και εφαρμόζεται η Μέθοδος Μείωσης της Αντοχής (Strength Reduction Method) και υπολογίζεται ο Συντελεστής Μείωσης της Αντοχής (Strength Reduction Factor-SRF). Ο συντελεστής SRF, είναι αντίστοιχος του Συντελεστή Ασφαλείας (SF) και εκφράζει το πόσο επιπλέον αντοχή διαθέτει η κατασκευή.



Εικόνα 55 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,885$

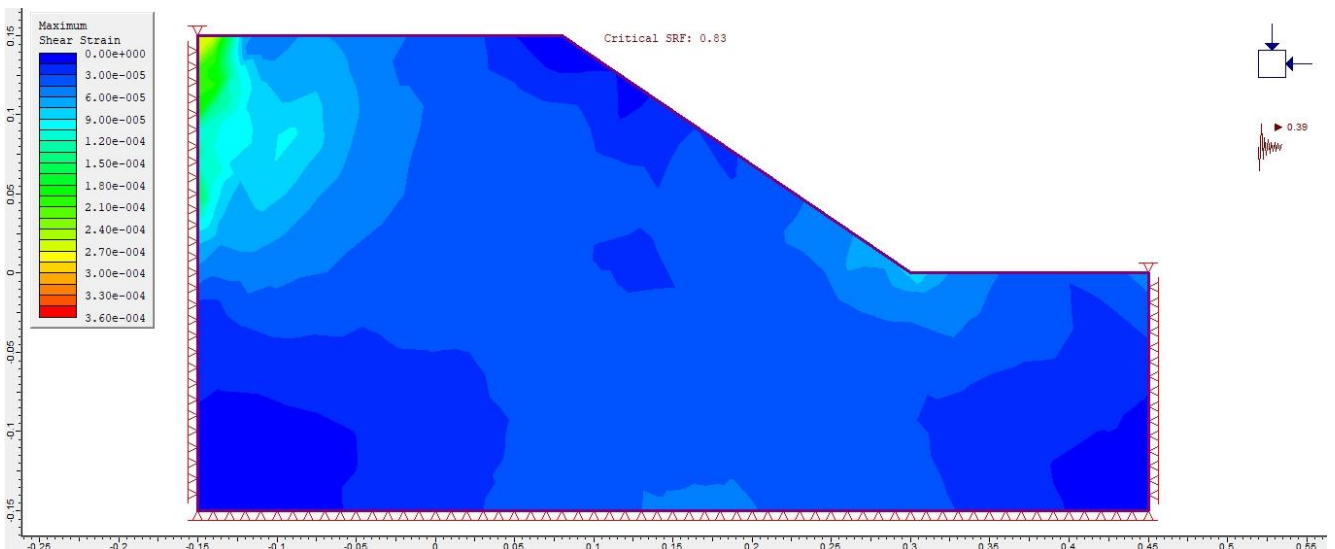
Figure 55 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0.885$



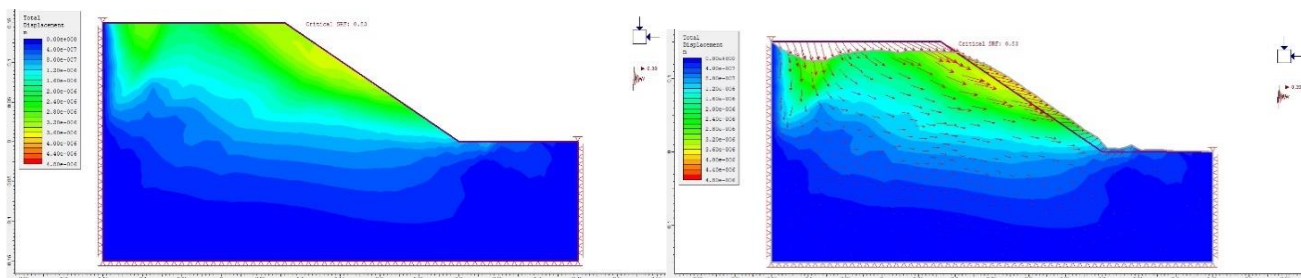
Εικόνα 56 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,806$

Figure 56 Analysis by the Janbu method - Safety factor $FS = 0.806$

Παρατηρείται ότι συντελεστής ασφαλείας έχει μικρή απόκλιση από μέθοδο σε μέθοδο. Η πιο συντηρητική μέθοδος φαίνεται να είναι η επίλυση με Slide κατά την απλοποιημένη μέθοδο του Janbu, ενώ η επίλυση κατά Bishop είναι εκείνη που δίνει το μεγαλύτερο κρίσιμο συντελεστή ασφαλείας.



Εικόνα 57 Μέγιστες Διατμητικές τροπές κατά Phase - Συντελεστής Μείωσης της Αντοχής Critical SRF = 0,83, Figure 57 Phase Maximum Shear Strain - Critical Strength Reduction Factor SRF = 0.83



Εικόνα 58 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,83,

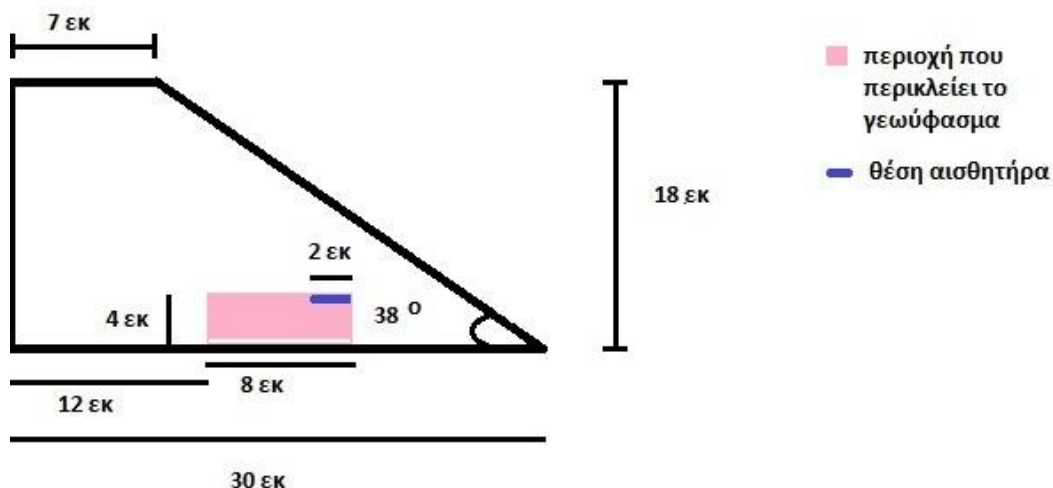
Εικόνα 61 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,83

Παρότι το μοντέλο δεν αστοχεί, το διάγραμμα της συνολικής μετατόπισης μας δείχνει την περιοχή με τη μεγαλύτερη τρωτότητα, καθώς και τα διανύσματα τροπών του πρανούς (δεξιά). Σύμφωνα με το λογισμικό του Phase υπάρχει έλλειμα αντοχής κατά 17%.

6.4 Πείραμα 2ο

➤ Περιγραφή

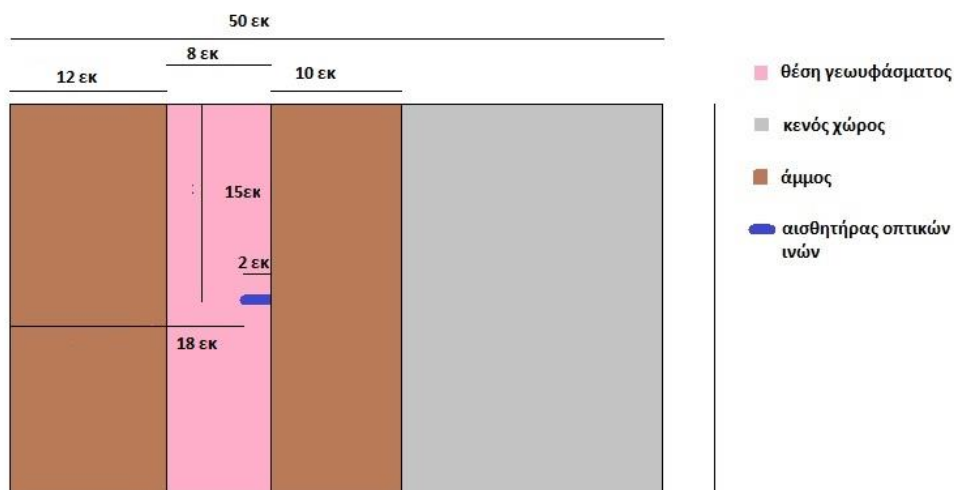
Σε αυτό το πείραμα η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε ξηρό πρανές όπως και το προηγούμενο. Σκοπός του είναι η εξέταση της λειτουργικότητας της νέας πειραματικής διάταξης. Η αλλαγή με το προηγούμενο είναι πως εδώ χρησιμοποιήθηκε αναδιπλούμενη στρώση σπλισμού σε υψηλότερη θέση από αυτή του πυθμένα, στο οποίο τοποθετείται και ο αισθητήρας οπτικών ινών. Σκοπός είναι να δούμε την επιρροή της θέσης του σπλισμού. Έγιναν δύο δοκιμές με διαφορετικές επιταχύνσεις. Περιγράφονται επίσης τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, και η θέση των μετρητικών διατάξεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταγραφών και της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Slide και του Phase.



Εικόνα 59 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 2,

Figure 59 Side View of Experimental Model 2

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε ξηρό πρανές και οι επιταχύνσεις που επιτυγχάνονται είναι $1,9 \text{ m/s}^2$ και $2,8 \text{ m/s}^2$. Το καθαρό βάρος της άμμου που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσο με 11 Kg και το συνολικό βάρος συμπεριλαμβανομένου του κουτιού Plexiglass είναι ίσο με 16,7 Kg. Επιπροσθέτως έχει τοποθετηθεί μία στρώση σπλισμού, σε ύψος 4 cm από τον πυθμένα του πρανούς. Στο μοντέλο τοποθετείται αισθητήρας καταγραφής επιτάχυνσης στην αριστερή παρειά του κουτιού. Σε αυτό το πείραμα δεν χρησιμοποιείται η κάμερα καταγραφής ψηφιακών φωτογραφιών.



Εικόνα 60 Κάτοψη Πειραματικού Μοντέλου 2,

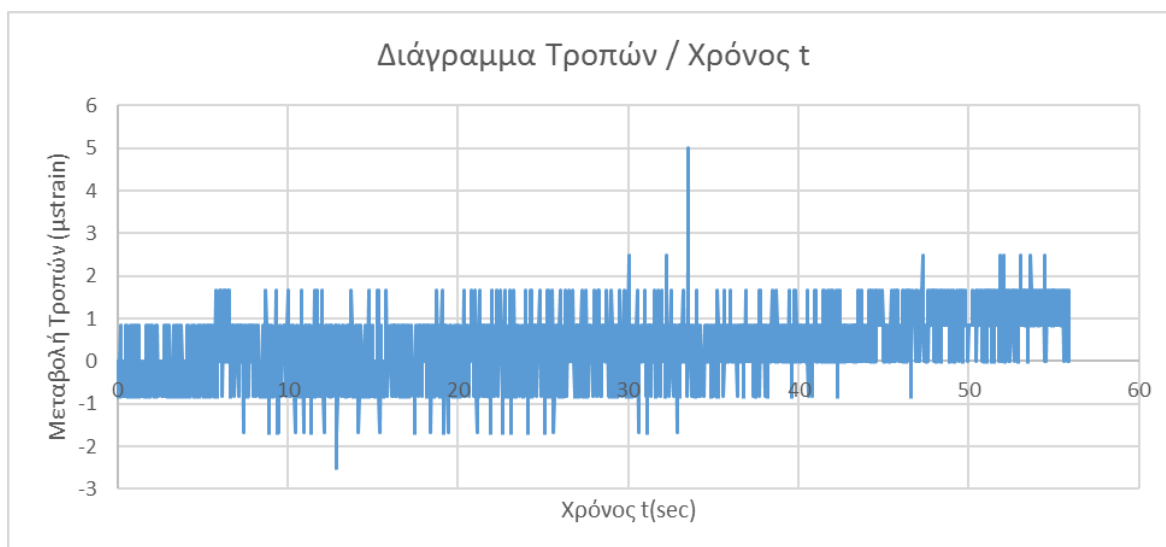
Figure 60 Top view of Experimental Model 2

➤ Αποτελέσματα Καταγραφών Αισθητήρων

Ο αισθητήρας οπτικών ινών έχει αρχικό μήκος κύματος 1550,422 nm και οι καταγραφές του παρουσιάζονται στην Εικόνα 64, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.

Παρατηρήσεις:

Στην πρώτη δοκιμή: Για συχνότητα 4 Hz και για 1,9 Volt η επιτάχυνση έφτασε στο $1,9 \text{ m/s}^2$ και παρατηρήθηκαν μικρές μετακινήσεις.



Εικόνα 61 Διάγραμμα Τροπών Προς Χρόνο,

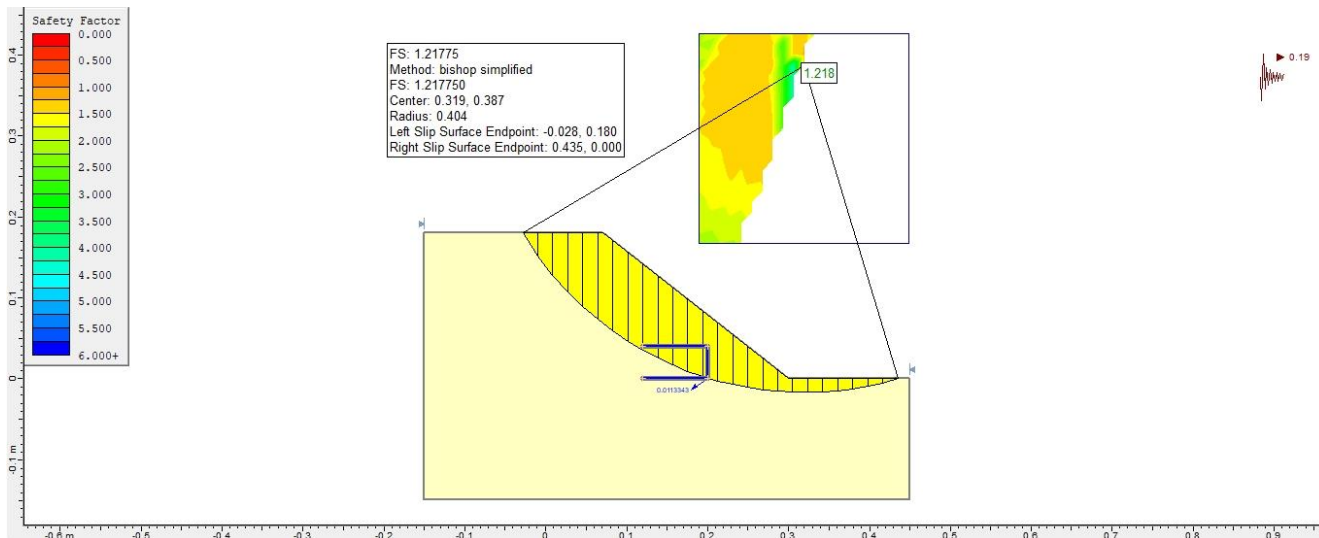
Figure 61 Strain To Time Chart

Το διάγραμμα έρχεται να επιβεβαιώσει τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις. Η τελική παραμόρφωση είναι πολύ μικρή, της τάξεως του $1,2 \text{ μstrain}$, και θα μπορούσε να ληφθεί υπόψιν ως «θόρυβος»

Στη δεύτερη δοκιμή: Για ίδια συχνότητα 4 Hz και για 2 Volt η επιτάχυνση έφτασε στα $2,8 \text{ m/s}^2$ και δεν παρατηρήθηκαν μετακινήσεις. Το μοντέλο δεν αστοχεί.

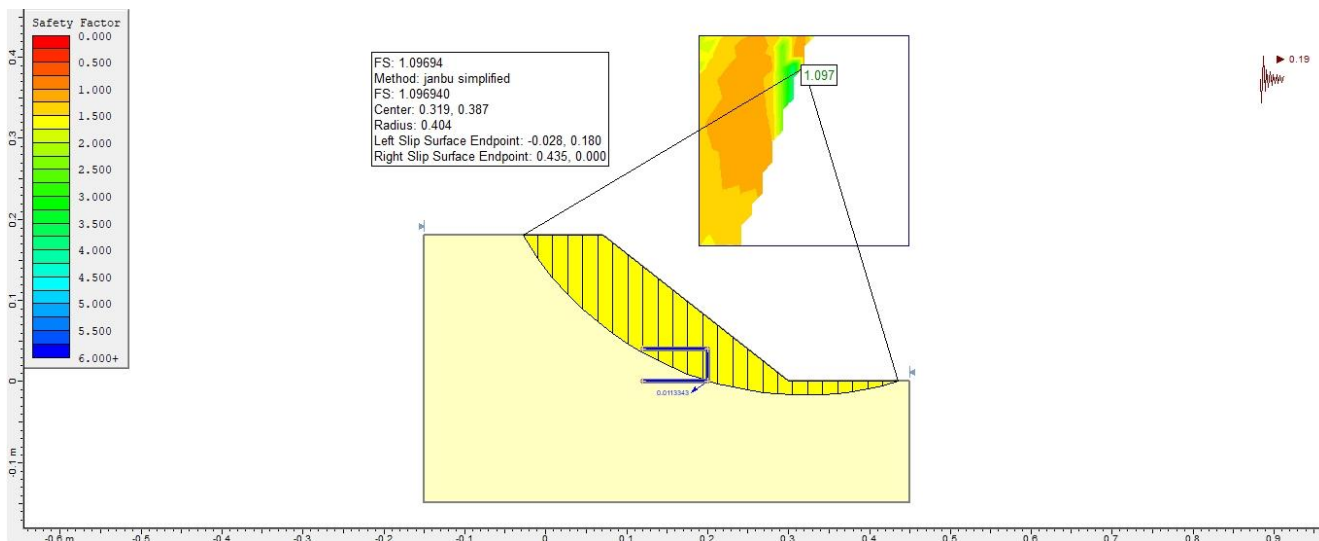
➤ Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide και Phase

✚ Επιτάχυνση: 1,9 m/s²



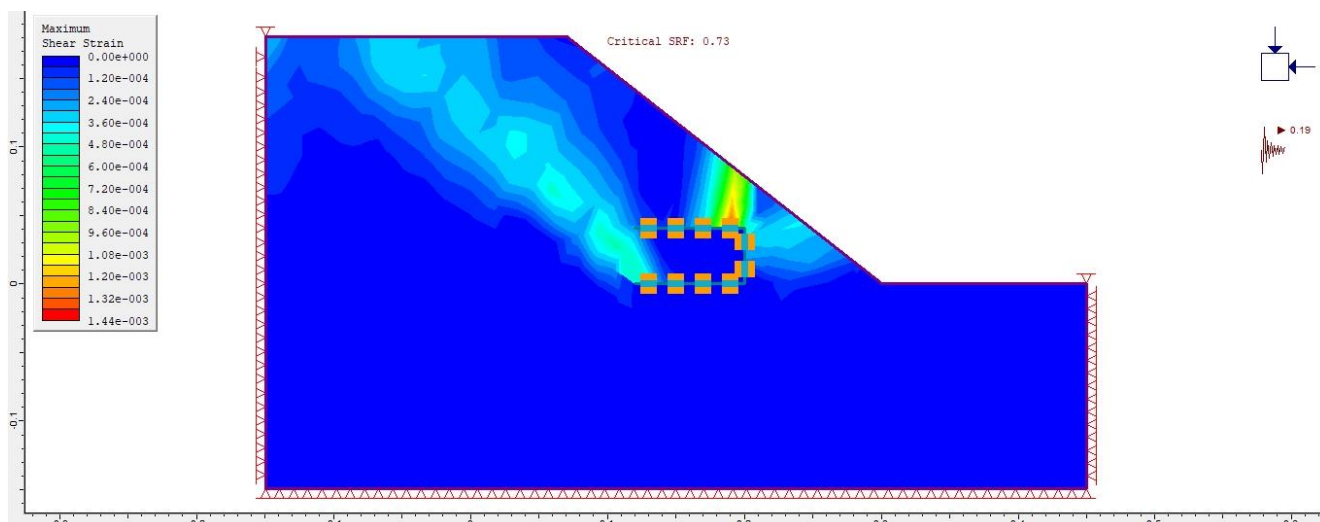
Εικόνα 62 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=1,218

Figure 62 Analysis by the Bishop method - Safety factor FS = 1.218



Εικόνα 63 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=1,097

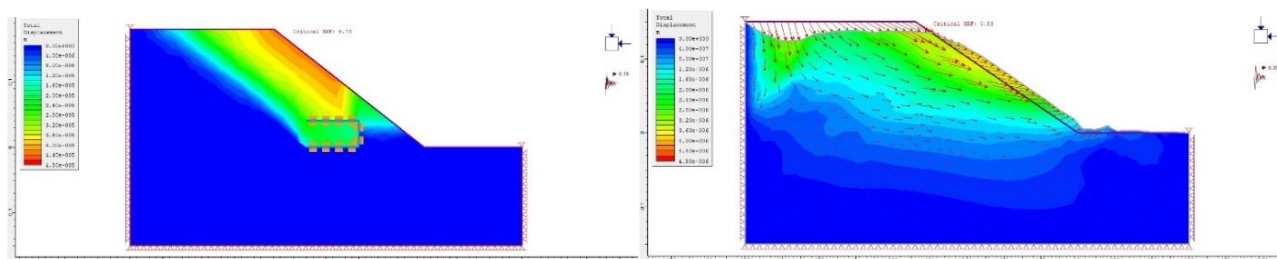
Figure 63 Janbu method analysis - Safety factor FS = 1.097



Εικόνα 64 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,73

Figure 64 maximum shear strain by Phase - Critical SRF = 0,73

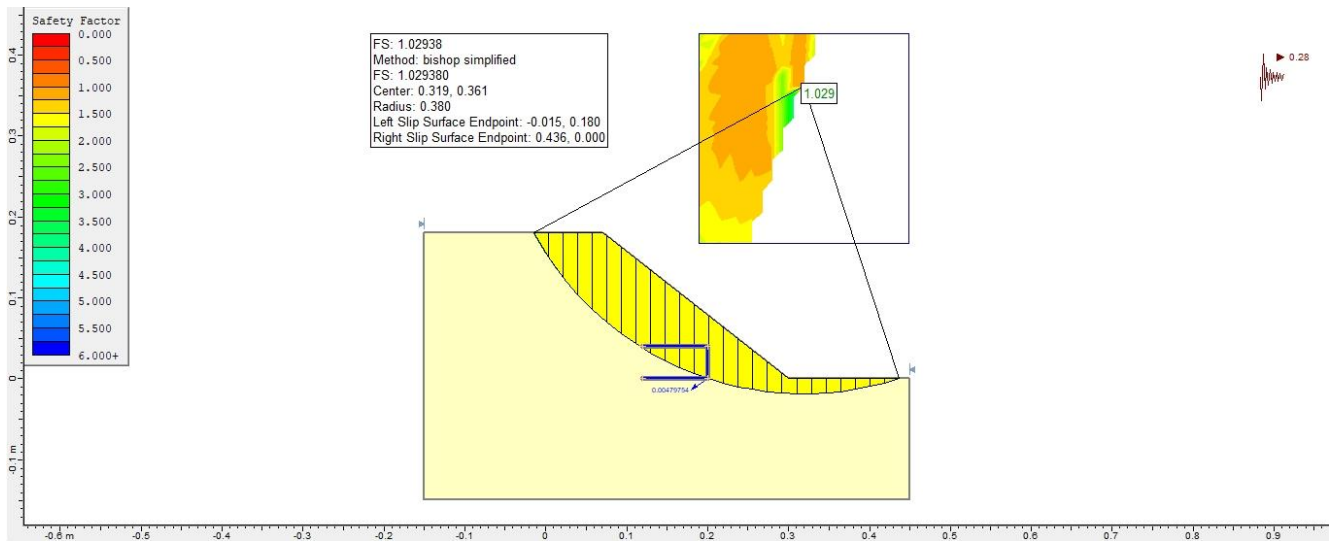
Αυτή τη φορά η πιο συντηρητική μέθοδος φαίνεται να είναι η κατά Phase, φαίνεται πως η χρήση ενίσχυσης δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα σε αυτή τη μεθόδου, η οποία δείχνει αστοχία ενώ οι μέθοδοι του Slide όχι. Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει αστοχία, αλλά δεν μπορούμε να κάνουμε ακόμα μια ξεκάθαρη σύγκριση. Την ίδια στιγμή η μέθοδος κατά Bishop στο λογισμικό του Slide είναι πιο αισιόδοξη καθώς δίνει τιμές συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερες της μονάδας.



Εικόνα 65 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF =0,73

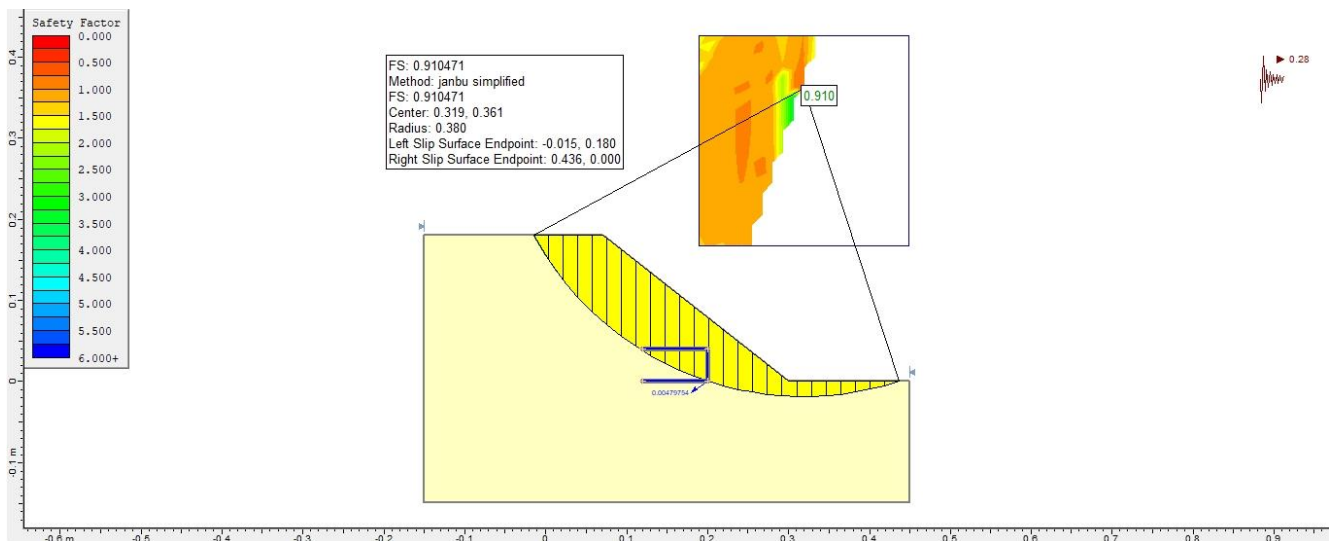
Figure 65 Total displacement by Phase - Critical SRF = 0,73

Επιτάχυνση: 2,8 m/s²



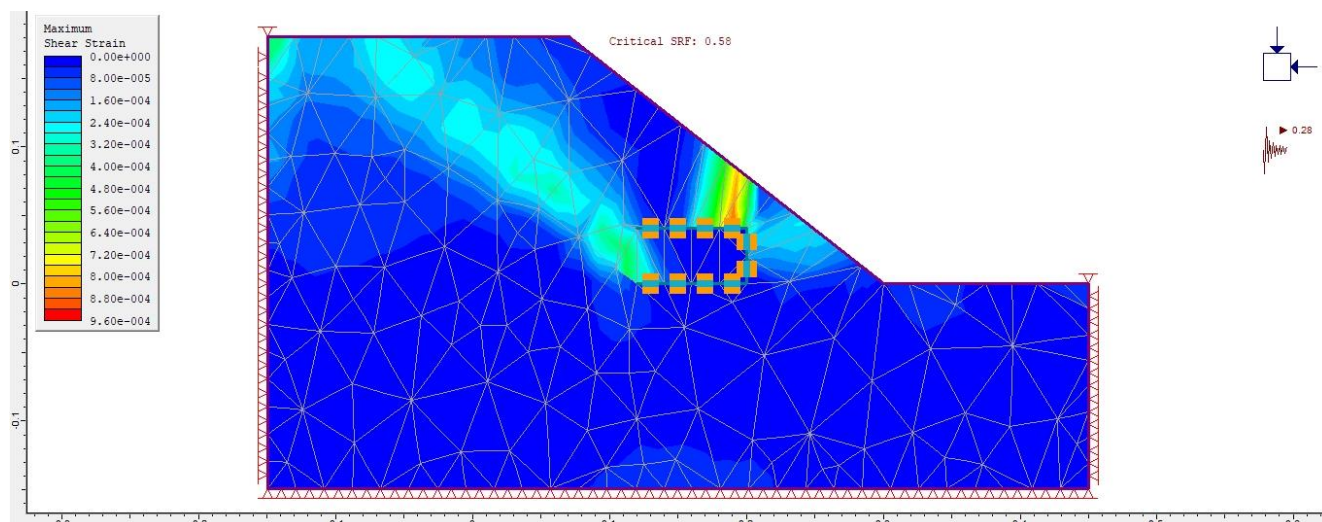
Εικόνα 66 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=1,029

Figure 66 Analysis by the Bishop method - Safety factor FS = 1.029



Εικόνα 67 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,91

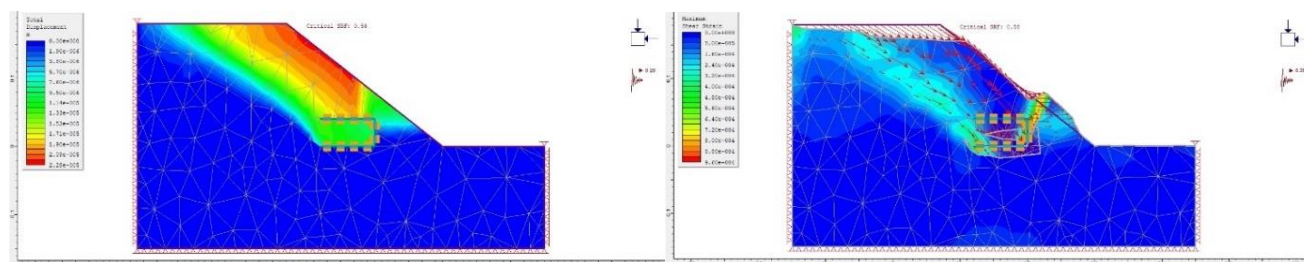
Figure 67 Analysis by the Janbu method - Safety factor FS = 0.91



Εικόνα 68 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,56

Figure 68 Maximum shear strain by Phase - Critical SRF = 0,56

Και εδώ η πιο συντηρητική μέθοδος φαίνεται να είναι η κατά Phase, φαίνεται πως η χρήση ενίσχυσης δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα σε αυτή τη μεθόδου. Τώρα όμως που έχουμε αστοχία και οι δύο μέθοδοι του slide δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα, έχουμε την ευκαιρία να κάνουμε σύγκριση: Η μέθοδος κατά Bishop δίνει Συντελεστή Ασφαλείας $FS=1,029$ ενώ η μέθοδος κατά Janbu δίνει Συντελεστή Ασφαλείας $FS=0,91$. Ξέροντας ότι το μοντέλο αστοχεί και για μικρότερη επιτάχυνση, είναι σαφές ότι η μέθοδος κατά Bishop είναι εξαιρετικά επιεικής και δεν αποτυπώνει την πραγματικότητα.



Εικόνα 69 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,56

Figure 69 Total displacement by Phase - Critical SRF = 0.56

❖ Σύγκριση Πειράματος 1^{ου} και Πειράματος 2^{ου}

Χάρη στην πολύ κοντινή γεωμετρία των μοντέλων των δύο πειραμάτων, δίνεται η δυνατότητα να γίνει διερεύνηση στην επιρροή στα αποτελέσματα των τροπών εξαιτίας των διαφορών που υπάρχουν ανάμεσά τους. Στον Πίνακα 7 βλέπουμε συγκεντρωτικά τα στοιχεία των δύο πειραμάτων ώστε να διευκολυνθεί η μεταξύ τους σύγκριση.

Πίνακας 10 Σύγκριση Πειράματος 1^{ου} και Πειράματος 2ου

Table 10 Comparison of Experiment 1 and Experiment 2

Αριθμός Πειράματος	1 ^ο	2 ^ο
Επιτάχυνση	3,4 m/s ²	2,8 m/s ²
Γεωμετρία Τραπεζίου	B=30cm β=8cm υ=15cm φ=34°	B=30cm β=7cm υ=18cm φ=38°
Αισθητήρας Οπτικών Ινών	Στον Πυθμένα	4cm από τον Πυθμένα
Μέγιστες Τροπές Πειράματος	6 μstrain	2 μstrain
F.S. κατά Bishop	0,885	1,029
F.S. κατά Janbu	0,806	0,91
S.R.F. κατά Phase	0,85	0,56

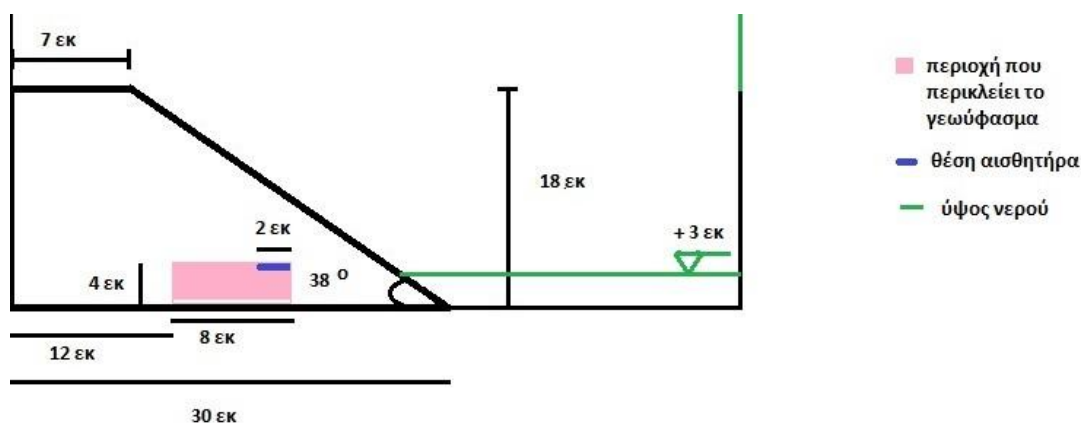
Όσον αφορά τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης, η διαφοροποίηση είναι μικρή. Ωστόσο στο 1^ο πείραμα όπου ο αισθητήρας έχει τοποθετηθεί στον πυθμένα αποτυπώνεται καλύτερα η σεισμική διέγερση, ενώ στο 2^ο πείραμα η σεισμική διέγερση αποτυπώνεται σα θόρυβος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η σεισμική φόρτιση είναι μεγαλύτερη στο 1^ο πείραμα, σε συνδυασμό με τη θέση του αισθητήρα. Επομένως εύκολα εξάγεται το συμπέρασμα πως ο αισθητήρας οπτικών ινών έχει μεγάλη ευαισθησία στις αλλαγές της επιτάχυνσης.

Αναφορικά με το υπολογιστικό μοντέλο, η γεωμετρία του μοντέλου του 2^{ου} πειράματος, με το πιο μεγάλο ύψος και την πιο απότομη κλίση του πρανούς, μας οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι αναμένονται χαμηλότεροι συντελεστές ασφαλείας σε αυτό το πείραμα. Κατά την υπολογιστική ανάλυση όμως των μοντέλων βρίσκουμε Σ.Α. μεγαλύτερο στο υπολογιστικό μοντέλο που αντιστοιχεί στο μοντέλο του 2^{ου} πειράματος από ότι σε αυτό του 1^{ου}. Γεγονός που σημαίνει ότι είναι σημαντική η επιρροή του γεωφάσματος ως σπλισμού ενισχύοντας την αντοχή του πρανούς καθώς επίσης επηρεάζει η ελαφρώς χαμηλότερη επιτάχυνση. Εξετάζοντας παράλληλα τα αποτελέσματα με τη μέθοδο του Phase παρατηρούμε πως ο Συντελεστής Μείωσης της Αντοχής είναι μειωμένος στο 2^ο υπολογιστικό μοντέλο, επομένως συμπεραίνουμε πως ο σπλισμός σε αυτό το λογισμικό δεν προσομοιώνεται όπως αναμενόταν και συνεπώς η αρνητική επιρροή της γεωμετρίας του μοντέλου είναι μεγαλύτερη της θετικής επιρροής της μειωμένης φόρτισης. Όπως αναφέραμε και στα πρώτα κεφάλαια το λογισμικό Phase δε δύναται να αποτιμήσει εύκολα τις απαιτούμενες παραμέτρους τάσης και παραμόρφωσης λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας του πρανούς του 2^{ου} πειράματος.

6.5 Πείραμα 3ο

➤ Περιγραφή

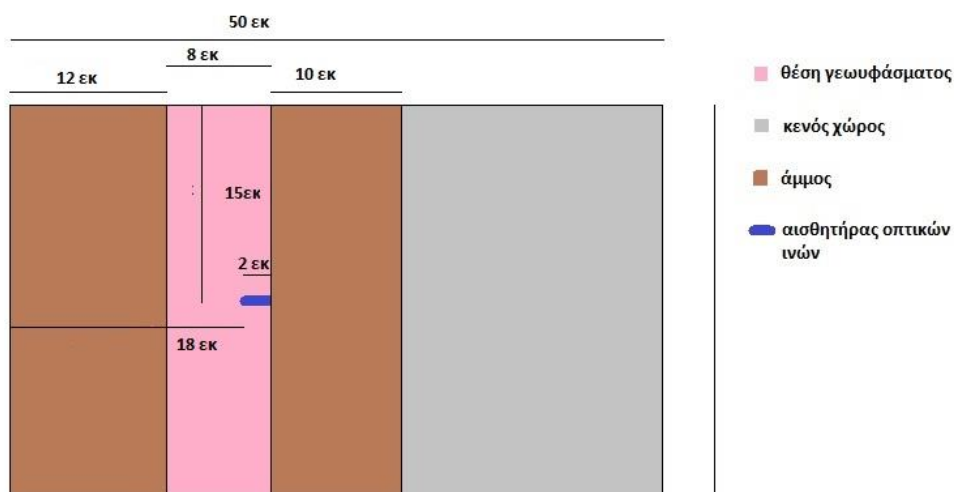
Το πείραμα αυτό, είναι η 1η δοκιμή στη σεισμική τράπεζα με την πειραματική διάταξη που δημιουργήθηκε στην οποία εισάγεται νερό. Σκοπός του είναι η εξέταση της λειτουργικότητας της πειραματικής διάταξης με την παρουσία νερού. Ειδικότερα πραγματοποιείται διερεύνηση της επιρροής του νερού στο πρανές. Περιγράφονται επίσης τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, και η θέση των μετρητικών διατάξεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταγραφών και της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Slide και του Phase.



Εικόνα 70 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 3,

Figure 70 Side View of Experimental Model 3

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε ημιβυθισμένο πρανές και η μέγιστη επιτάχυνση είναι $2,0 \text{ m/s}^2$. Το καθαρό βάρος της άμμου που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσο με 11 Kg Σε αυτό προστίθενται και 2 Kg νερό και το συνολικό βάρος συμπεριλαμβανομένου του κουτιού Plexiglass είναι ίσο με 18,7 Kg. Επιπροσθέτως έχει τοποθετηθεί μία στρώση σπλισμού σε ύψος 4cm από τον πυθμένα του πρανούς. Σε αυτό το πείραμα δεν χρησιμοποιείται η κάμερα καταγραφής ψηφιακών φωτογραφιών.

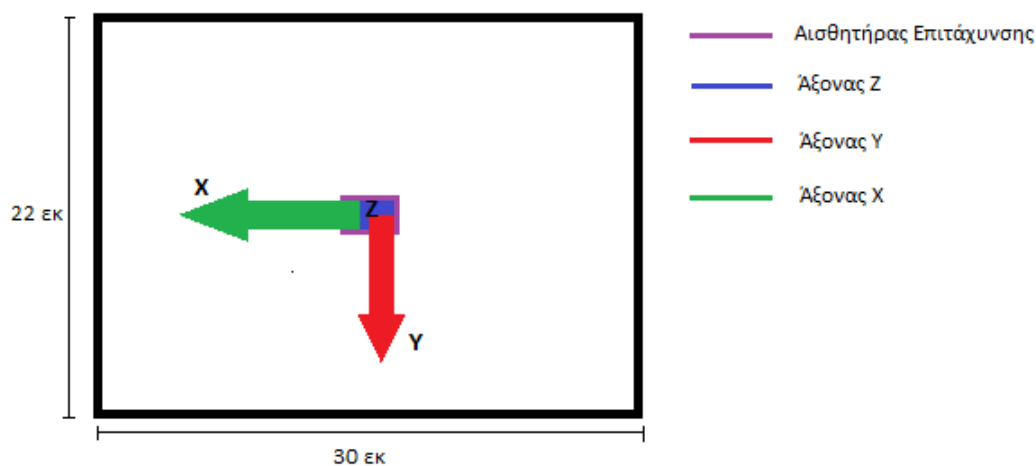


Εικόνα 71 Κάτοψη Πειραματικού Μοντέλου 3,

Figure 71 Top view Experimental Model 3

➤ Αποτελέσματα Καταγραφών Αισθητήρων

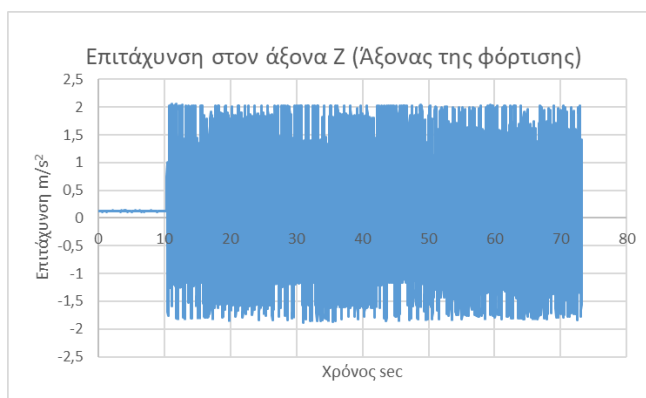
Στο μοντέλο τοποθετείται αισθητήρας καταγραφής επιτάχυνσης στην αριστερή παρειά του κουτιού όπως φαίνεται στην Εικόνα 73 όπου παρατηρούνται και οι τρεις άξονες καταγραφής επιτάχυνσης (X,Y,Z).



Εικόνα 72 Θέση επιταχυνσιογράφου στην Αριστερή Παρειά του κουτιού Plexiglass

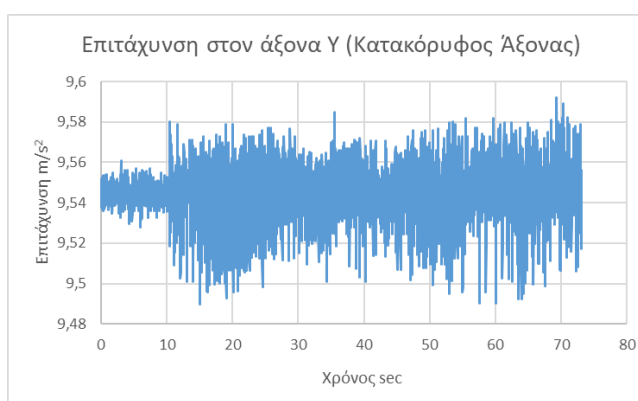
Figure 72 Position of an accelerometer on the left side of the Plexiglass box

Σε αυτό το μοντέλο έγινε μία δοκιμή. Για συχνότητα 4 Hz και για 1,5 Volt η επιτάχυνση έφτασε στα $2,0 \text{ m/s}^2$ και δεν παρατηρήθηκαν μετακινήσεις. Το μοντέλο δεν αστοχεί.



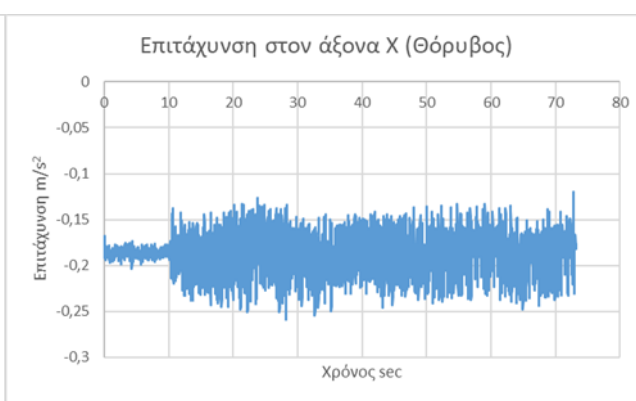
Εικόνα 73 Επιτάχυνση στον άξονα της φόρτισης

Figure 73 Acceleration in the axis of the load



Εικόνα 74 Επιτάχυνση στον Κατακόρυφο άξονα

Figure 74 Acceleration on the vertical axis

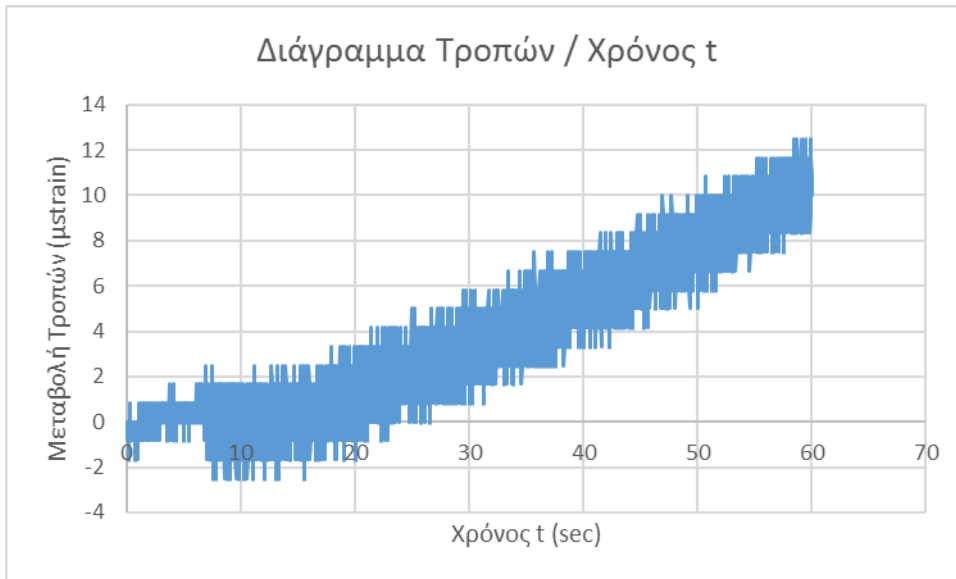


Εικόνα 75 Επιτάχυνση στον άξονα Y

Figure 75 Accelerating on the Y axis

Στις εικόνες που προηγούνται βλέπουμε τις επιταχύνσεις που αναπτύσσονται σε κάθε έναν από τους τρεις άξονες. Στον άξονα Z ο οποίος είναι και ο άξονας της φόρτισης του δοκιμίου, έχουμε σταθερή επιτάχυνση 2 m/s^2 . Στα γραφήματα της επιτάχυνσης των άλλων αξόνων, βλέπουμε να αποτυπώνονται χαμηλές επιταχύνσεις εξαιτίας των μικροταλαντώσεων που προκαλούνται κατά τη φόρτιση της κύριας διεύθυνσης υπό τη μορφή θορύβου.

Ο αισθητήρας οπτικών ινών έχει αρχικό μήκος κύματος $1550,533 \text{ nm}$ και οι καταγραφές του παρουσιάζονται στην Εικόνα, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.

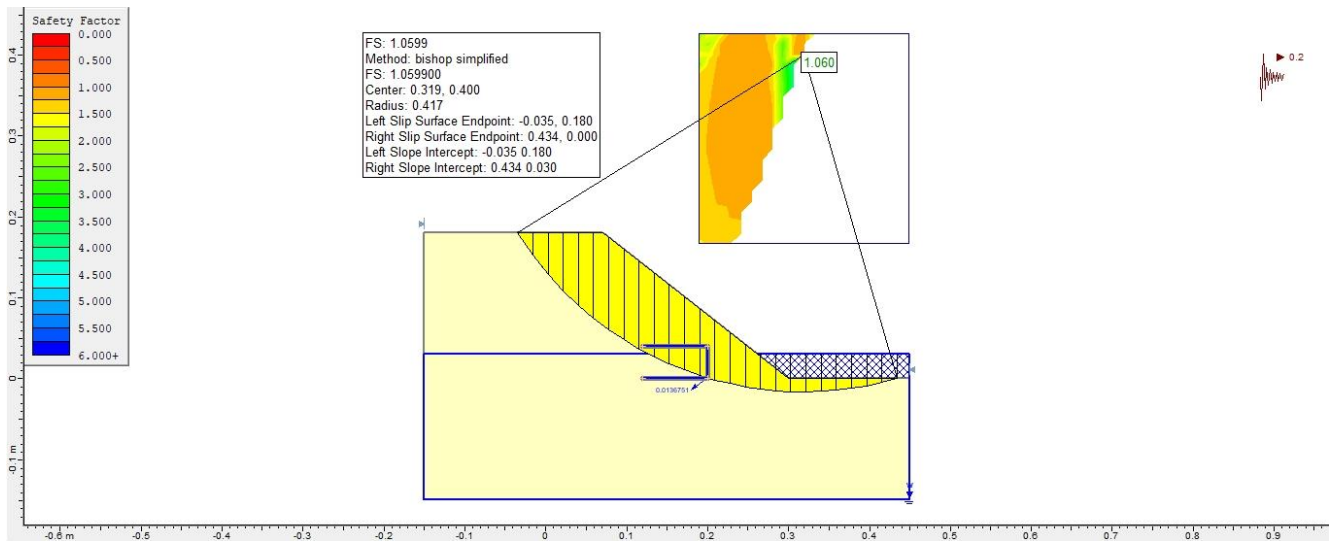


Εικόνα 76 Διάγραμμα Τροπών Προς Χρόνο,

Figure 76 Strain To Time Chart

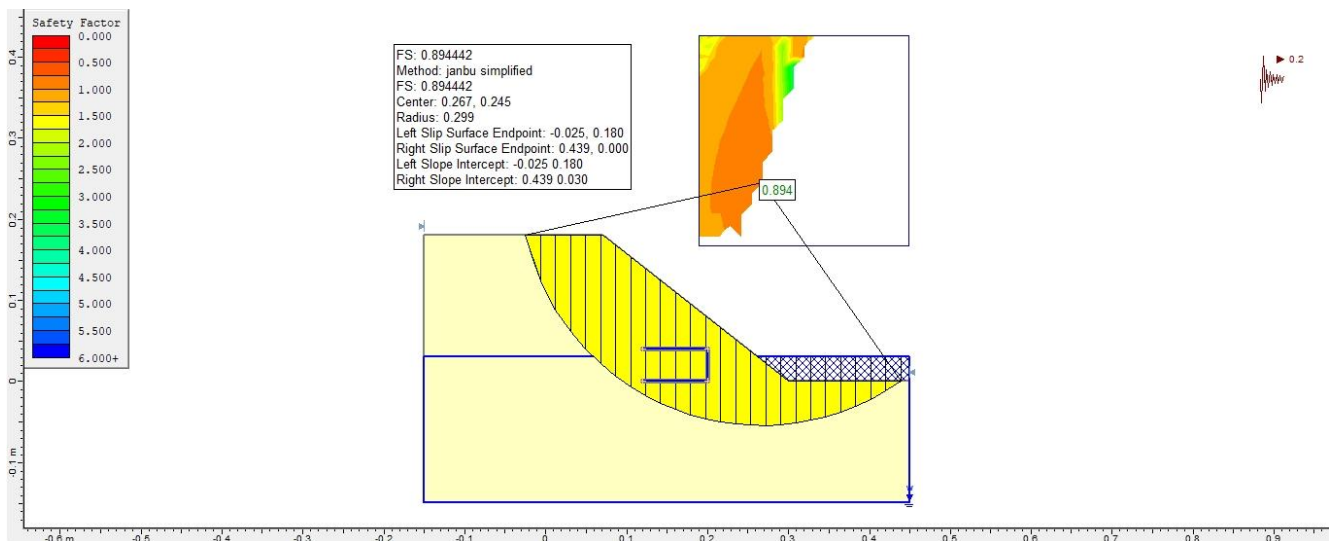
Αν και δεν σημειώθηκαν παραμορφώσεις ή μετατοπίσεις μακροσκοπικά, καταγράφηκαν από τον αισθητήρα οπτικών ινών. Αν και δεν υπήρχε μετακίνηση υλικού, το πρανές δέχθηκε σημαντική παραμόρφωση στο σημείο του αισθητήρα όπως βλέπουμε και στο διάγραμμα που προέκυψε από τις μετρήσεις.

➤ Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide και Phase



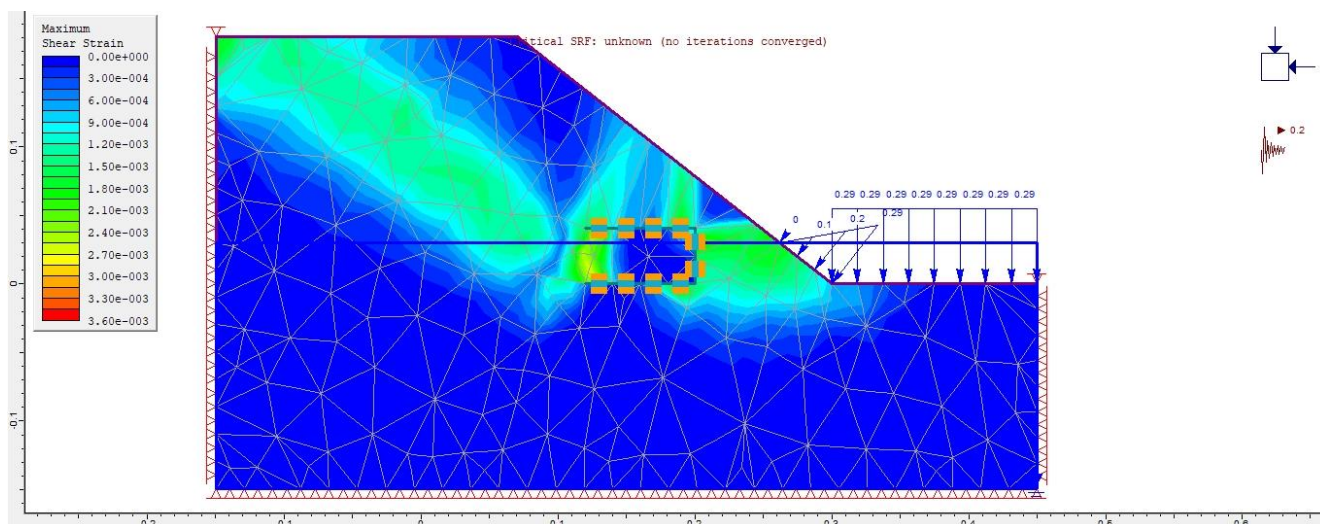
Εικόνα 77 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=1,06$

Figure 77 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 1.06$



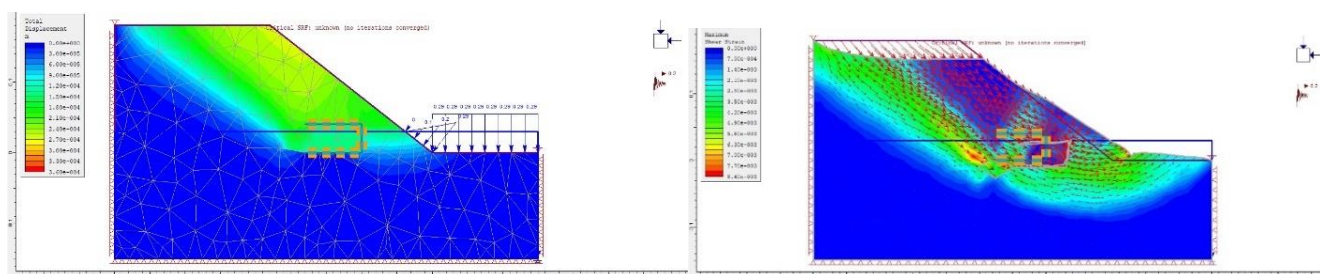
Εικόνα 78 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,894$

Figure 78 Analysis by the Janbu method - Safety factor $FS = 0.894$



Εικόνα 79 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = -

Figure 79 Maximum shear strain by Phase - Critical SRF = -



Εικόνα 80 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = -

Figure 80 Total displacement by Phase - Critical SRF = -

Και πάλι η πιο συντηρητική μέθοδος είναι εκείνη του Slide κατά Janbu με Συντελεστή Ασφαλείας $FS=0,894$ ενώ εκείνη κατά Bishop είναι αισιόδοξη αφού είχε συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο της μονάδας. Πάλι βρισκόμαστε σε αδυναμία να συγκρίνουμε τις δύο μεθόδους. Παρόλο που το πρανές δεν αστόχησε μακροσκοπικά, ο αισθητήρας οπτικών ινών κατέγραψε αλλαγές του μήκους κύματος, δηλαδή τροπές στο εσωτερικό του

❖ Σύγκριση Πειράματος 2^{ου} και Πειράματος 3^{ου}

Χάρη στην πανομοιότυπη γεωμετρία των μοντέλων των δύο πειραμάτων, δίνεται η δυνατότητα να γίνει διερεύνηση στην επιρροή του νερού στα αποτελέσματα των υπολογιστικών και πειραματικών αναλύσεων. Στον Πίνακα 11 βλέπουμε συγκεντρωτικά τα στοιχεία των δύο πειραμάτων ώστε να διευκολυνθεί η μεταξύ τους σύγκριση.

Πίνακας 11 Σύγκριση Πειράματος 2ου και Πειράματος 3ου

Table 11 Comparison of Experiment 2 and Experiment 3

Αριθμός Πειράματος	2 ^ο	3 ^ο
Επιτάχυνση	1,9 m/s ²	2,0 m/s ²
Γεωμετρία Τραπεζίου - Θέση Αισθητήρων Οπτικών Ινών & Οπλισμού	Κοινή	Κοινή
Παρουσία Νερού	Όχι	Ναι
Μέγιστες Τροπές Πειράματος	2 μstrain	12 μstrain
F.S. κατά Bishop	1,218	1,06
F.S. κατά Janbu	1,097	0,894
S.R.F. κατά Phase	0,73	-

Στα δύο πειραματικά μοντέλα η μόνη διαφορά είναι η παρουσία νερού στο 3^ο πείραμα, ενώ τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, η θέση των οπλισμών και η θέση των μέσων καταγραφής είναι ακριβώς ίδια. Αρχικά παρατηρούμε πως η παρουσία νερού επηρεάζει τις τροπές που καταγράφει ο αισθητήρας οπτικών ινών, αυξάνοντας σημαντικά την τιμή τους. Όσον αφορά τα υπολογιστικά μοντέλα με το λογισμικό Slide, το νερό επιδρά αρνητικά στους συντελεστές ασφαλείας, απομειώνοντας τη τιμή τους. Ενώ στο λογισμικό του Phase δεν κατάφερε να επιτευχθεί σύγκλιση ώστε να μετρηθεί ο Συντελεστής Μείωσης της Αντοχής στο 3^ο υπολογιστικό μοντέλο. Η επιρροή του νερού στη μείωση της αντοχής του ήταν αναμενόμενη αφού η άνοδος της στάθμης του νερού συνεπάγεται αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και αντίστοιχη μείωση της διατμητικής -αντοχής του κορεσμένου υλικού του πρανούς. Όσο για το Phase, μάλλον έπρεπε να είναι αναμενόμενο αφού η παρουσία νερού αυξάνει την ετερογένεια και την ανισοτροπία στο πρανές και συνεπώς δυσχεραίνει την επίτευξη σύγκλισης από το λογισμικό.

6.6 Πείραμα 4ο

➤ Περιγραφή

Σκοπός του είναι η εξέταση της λειτουργικότητας της πειραματικής διάταξης με την παρουσία νερού. πραγματοποιείται διερεύνηση της επιρροής του νερού στο πρανές. Περιγράφονται επίσης τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, και η θέση των μετρητικών διατάξεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταγραφών και της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Slide και του Phase.

Το πείραμα αυτό, είναι η 1η δοκιμή στη σεισμική τράπεζα με την πειραματική διάταξη που δημιουργήθηκε στην οποία εισάγεται η κάμερα καταγραφής ψηφιακών φωτογραφιών και η επεξεργασία των φωτογραφιών της με το λογισμικό. Ειδικότερα διαπιστώθηκε πως τα φωτογραφικά καρέ είναι παραμορφωμένα καθώς έχουν έντονη καμπυλότητα λόγω του ευρυγώνιου φακού της κάμερας και της μικρής της απόστασης από το δοκίμιο. Ένα πρόβλημα που ανήκει στα σφάλματα των φωτογραφικών φακών, το οποίο αναλύεται στη συνέχεια. Επιπροσθέτως περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε προσπάθεια διόρθωσης αυτού του σφάλματος. Παρακάτω περιγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, και η θέση των μετρητικών διατάξεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταγραφών και της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Vic2D.

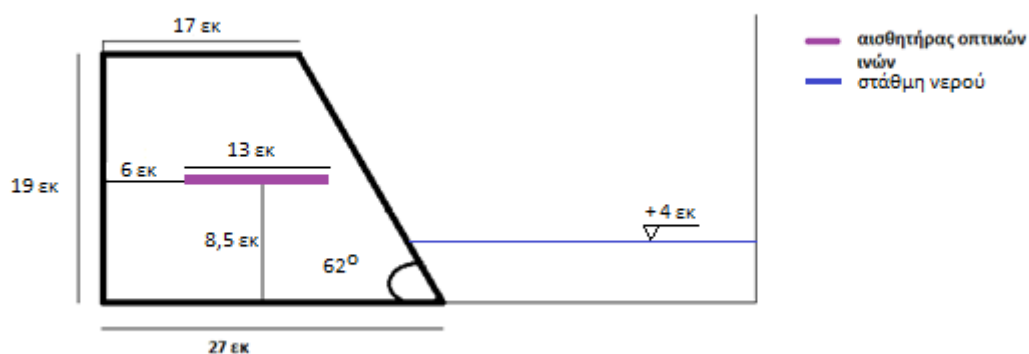
Οι πιο αναγνωρίσιμες εκτροπές (σφάλματα) των φωτογραφικών φακών είναι οι παραμορφώσεις. Οι παραμορφώσεις συμβαίνουν γιατί τα καμπύλα στοιχεία των φωτογραφικών φακών δεν καταφέρνουν να μεταφέρουν την εικόνα επίπεδη επάνω στο φιλμ ή στον αισθητήρα. Επειδή το φως διανύει άλλη απόσταση στις άκρες και άλλη στο κέντρο του φακού έχουμε διαφορά μεγέθυνσης που δημιουργεί την παραμόρφωση της εικόνας. Οι παραμορφώσεις των φωτογραφικών φακών είναι συνήθως τριών ειδών. Στην πρώτη περίπτωση οι ευθείες γραμμές γίνονται καμπύλες που συγκλίνουν προς τα μέσα (όπως και η παραμόρφωση που συναντάται στο πείραμα), αυτή η παραμόρφωση ονομάζεται βαρελοειδής γιατί οι γραμμές μοιάζουν σαν τις φέτες ενός βαρελιού. - Πληροφορικά οι άλλοι δύο τύποι ονομάζονται: τραπεζοειδής παραμόρφωση και μουστακοειδής παραμόρφωση (mustache distortion). Η διόρθωση των παραμορφώσεων των φωτογραφικών φακών γίνεται πλέον στα περισσότερα προγράμματα επεξεργασίας εικόνας, αλλά και από το λογισμικό των φωτογραφικών μηχανών. Σε γενικές γραμμές οι φακοί που υποφέρουν από παραμορφώσεις είναι οι ευρυγώνιοι και οι ζουμ, αν και μπορεί να συναντήσουμε παραμορφώσεις και σε φακούς που δεν είναι αναμενόμενο.

Έγινε προσπάθεια να μειωθεί η καμπυλότητα αυτή, η τεχνική που ακολουθήθηκε είναι η γεωμετρική διόρθωση. Γίνεται εγγραφή εικόνας σε άλλη εικόνα, δηλαδή μετασχηματισμός του συστήματος συντεταγμένων μιας εικόνας σε κάποιο άλλο μιας δεύτερης εικόνας. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ήδη μια εικόνα γεωμετρικά διορθωμένη σε ένα συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων από την οποία θα αντληθεί η σχετική πληροφορία. Η παραμόρφωση εξομαλύνθηκε με το πρόγραμμα Nero Photo Snap Viewer η θετική ή πιθοειδής συμμετρική ακτινική διαστροφή που

παρουσίασε το τελικό βίντεο λόγω της μικρής εστιακής απόστασης του φακού άρα της μεγάλης γωνίας κάλυψης του (120ο), φαινόμενο που έχει σημαντική επίδραση στη κλίμακα της απεικόνισης, αφού διαφοροποιείται τοπικά όσο απομακρύνεται από το κέντρο της φωτογραφίας, δηλαδή το πρωτεύον σημείο της.

Το πείραμα της παρούσας εργασίας έγινε με σκοπό να διαπιστωθεί αν δύναται να βελτιωθεί η εικόνα των στιγμιότυπων που εισάγονται στο πρόγραμμα του Vic2D μέσω μια τεχνικής που χρησιμοποιήσαμε, ώστε να εξλειφθεί η καμπυλότητα λόγω της μεγάλης ευρυγωνίας της κάμερας χωρίς όμως να αλλοιωθούν τα δεδομένα που αντιλαμβάνεται το πρόγραμμα και συνεπώς και τα διαγράμματα παραμορφώσεων αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό το πείραμα που διεξήχθη είναι ένα από τα κλασικά πλέον αυτής της εργασίας, με τα εξής χαρακτηριστικά:

Το μοντέλο αυτό κατασκευάστηκε με βρεγμένη άμμο και το αφήσαμε να στεγνώσει πριν την διεξαγωγή του πειράματος. Οι διαστάσεις είναι όπως φαίνονται στην εικόνα.



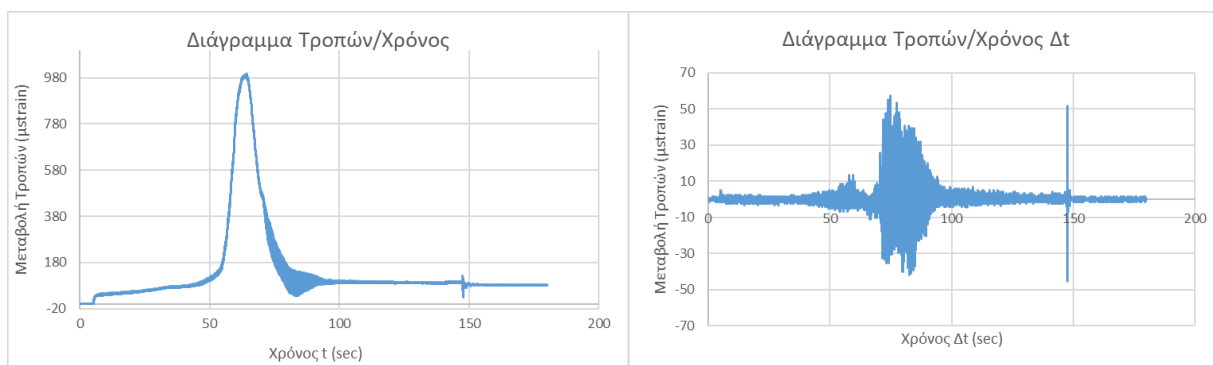
Εικόνα 81 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 4,

Figure 81 Side View of Experimental Model 4

➤ Αποτελέσματα Καταγραφών Αισθητήρων

Αριστερά στο κουτί, ακριβώς στο μέσο της επιφάνειας, τοποθετούμε τον QCN επιταχυνσιογράφο μας με τον άξονα Z στην κατεύθυνση της κίνησης και τον Y => .

Δοκιμή: Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη B9 με συχνότητα 4 ρεύμα στο 1,5 και θέση σεισμικής τράπεζας Ampl. => Η επιτάχυνση που επιτυγχάνεται είναι $3,8 \text{ m/s}^2$ και είναι σταθερή σε όλη την διεξαγωγή του πειράματος. Οι καταγραφές του παρουσιάζονται στην Εικόνα 82 κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.



Εικόνα 82 Διάγραμμα Μεταβολής Τροπών και Διάγραμμα Ρυθμού Μεταβολής Τροπών

Figure 82 Strain Modification Chart and Strain Modulation Rate Chart

Σύμφωνα με τα διαγράμματα τροπών υπήρξε αστοχία στο πρανές κατά τη φόρτιση του, αφού υπάρχει απότομη μεταβολή στο Διάγραμμα τροπών. Πράγματι όπως θα δούμε και παρακάτω, το πρανές αστόχησε λόγω του μηχανισμού υποσκαφής.

➤ **Μηχανισμός Αστοχίας του πρανούς**

Στο πρανές του πειράματος αυτού παρατηρείται ο μηχανισμός αστοχίας λόγω υποσκαφής. Το φαινόμενο ξεκινάει με υποσκαφή στον πόδα του πρανούς λόγω της δράσης των θαλάσσιων κυμάτων που προκαλούν παρακατακόρυφες ρωγμές παράλληλες με τη διεύθυνση των πρανών και στη συνέχεια αποκόλληση και ανατροπή των υπερκείμενων εδαφικών στρωμάτων.

Ο μηχανισμός αστοχίας φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν:



Εικόνα 83 Αρχική κατάσταση πρανούς προ Φόρτισης
Figure 83 Initial Slope Condition before Load

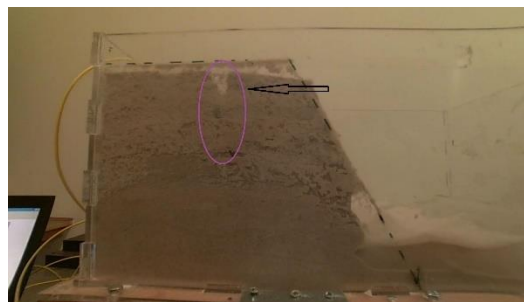


Εικόνα 84 Μηχανισμός Υποσκαφής στον Πόδα του πρανούς
Figure 84 Undercut mechanism at the foot of the slope



Εικόνα 85 Δημιουργία Εφελκυστικής Ρωγμής

Figure 85 Initiating a Tensile Crack



Εικόνα 86 Έναρξη Διάτμησης

Figure 86 Initiating a Shear

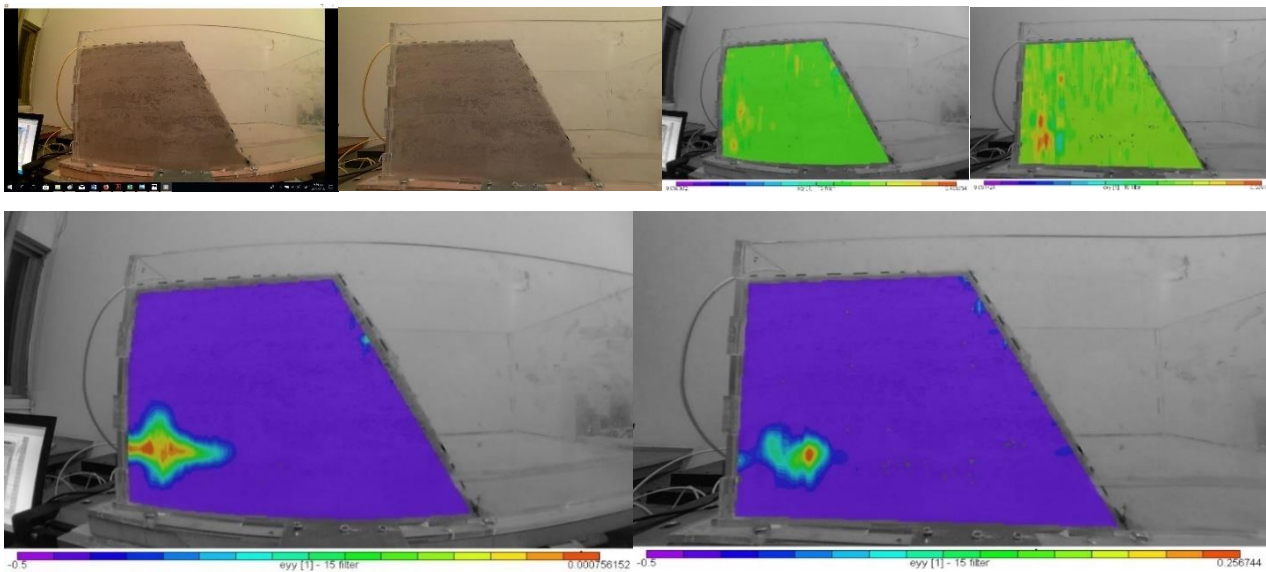


Εικόνα 87 Αστοχία Πρανούς, Figure 87 Slope Failure

➤ Υπολογισμός τροπών με την εφαρμογή της μεθόδου Vic2D

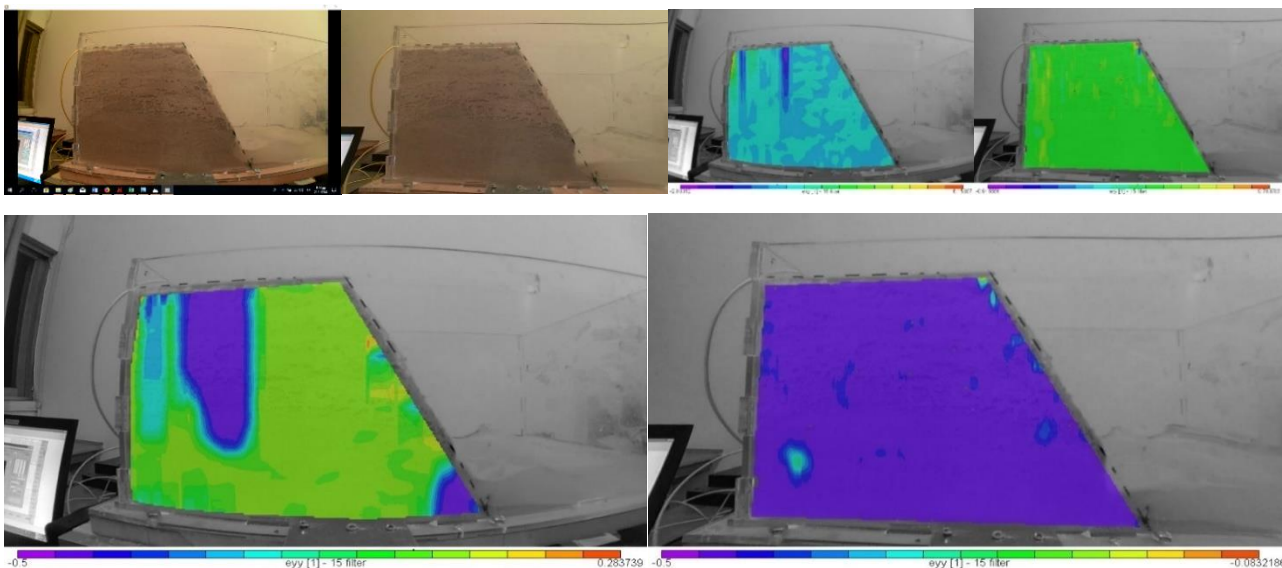
Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με την μέθοδο Vic2D. Γι' αυτό το σκοπό επεξεργαστήκαμε τα φωτογραφικά καρέ που εξήχθησαν από την κάμερα που κατέγραφε το πείραμα, ώστε να μειώσουμε την καμπυλότητα που υπάρχει εξαιτίας της απόστασης της κάμερας από το δοκίμιο. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των μη επεξεργασμένων εικόνων όπως και των διορθωμένης ακτίνας εικόνων, για να διερευνήσουμε κατά πόσο η διόρθωση αυτή επηρεάζει τα αποτελέσματα του λογισμικού Vic2D. Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιούνται πολλαπλές εικόνες αναφοράς. Δηλαδή κάθε στάδιο ανάλυσης έχει τη δική του εικόνα αναφοράς που είναι το προηγούμενο στιγμιότυπο της φόρτισης σε ολόκληρο το πρανές. Η πρώτη σειρά εικόνων που θα δούμε παρακάτω, δείχνει το μη διορθωμένο στιγμιότυπο στο οποίο έγινε η ανάλυση με Vic2D. Η δεύτερη σειρά εικόνων δείχνει τα διαγράμματα που προέκυψαν από την ανάλυση των μη διορθωμένων στιγμιότυπων. Η Τρίτη σειρά εικόνων δείχνει το διορθωμένο στιγμιότυπο στο οποίο έγινε η ανάλυση με Vic2D. Τέλος η τέταρτη σειρά εικόνων δείχνει τα διαγράμματα που προέκυψαν από την ανάλυση των μη διορθωμένων στιγμιότυπων. Για διευκόλυνση στην παρατήρηση των αποτελεσμάτων μπορούμε να θεωρήσουμε αυτόματα ότι το χρώμα που καλύπτει τη μεγαλύτερη

επιφάνεια είναι εκείνο που αντιστοιχεί σε μηδενική τιμή τροπής, τα πιο θερμά από αυτό χρώματα αντιστοιχούν σε θετικές τροπές και τα πιο ψυχρά από αυτό σε αρνητικές τροπές.



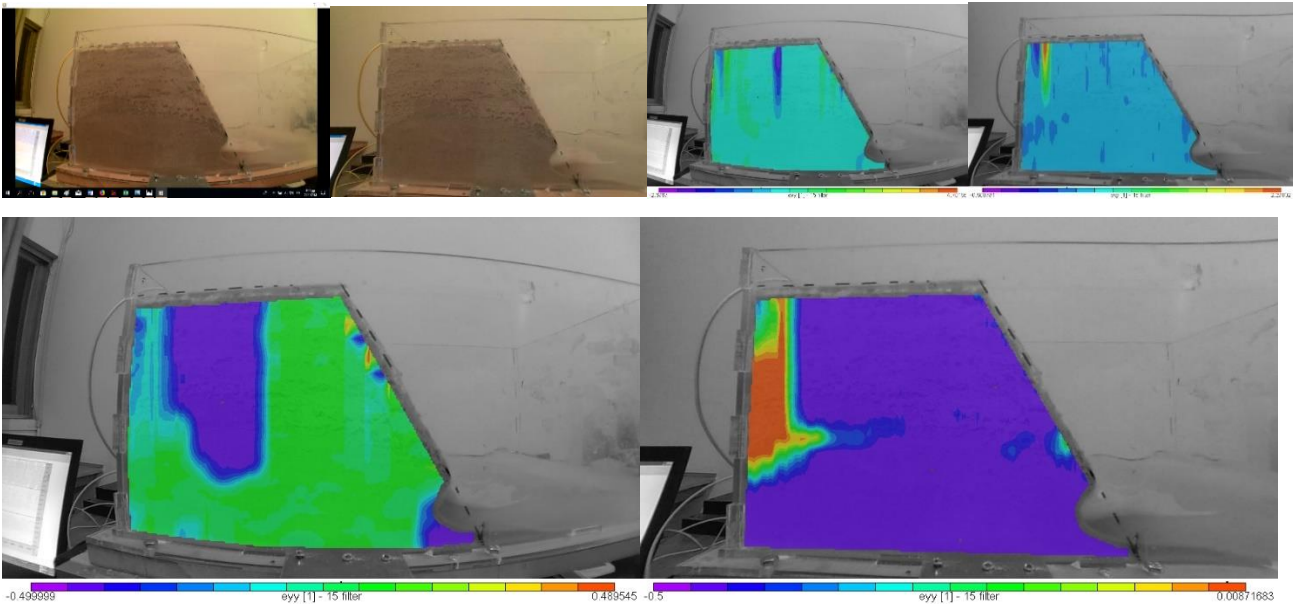
Εικόνα 88 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο/ σε διορθωμένο στιγμιότυπο

Figure 88 Uncorrected snapshot While Loading / Repaired Snapshot While Loading / Shear Strain e_{xy} by Vic 2D program in uncorrected snapshot / repaired snapshot / Reduced Strain e_{yy} in uncorrected snapshot / in repaired snapshot



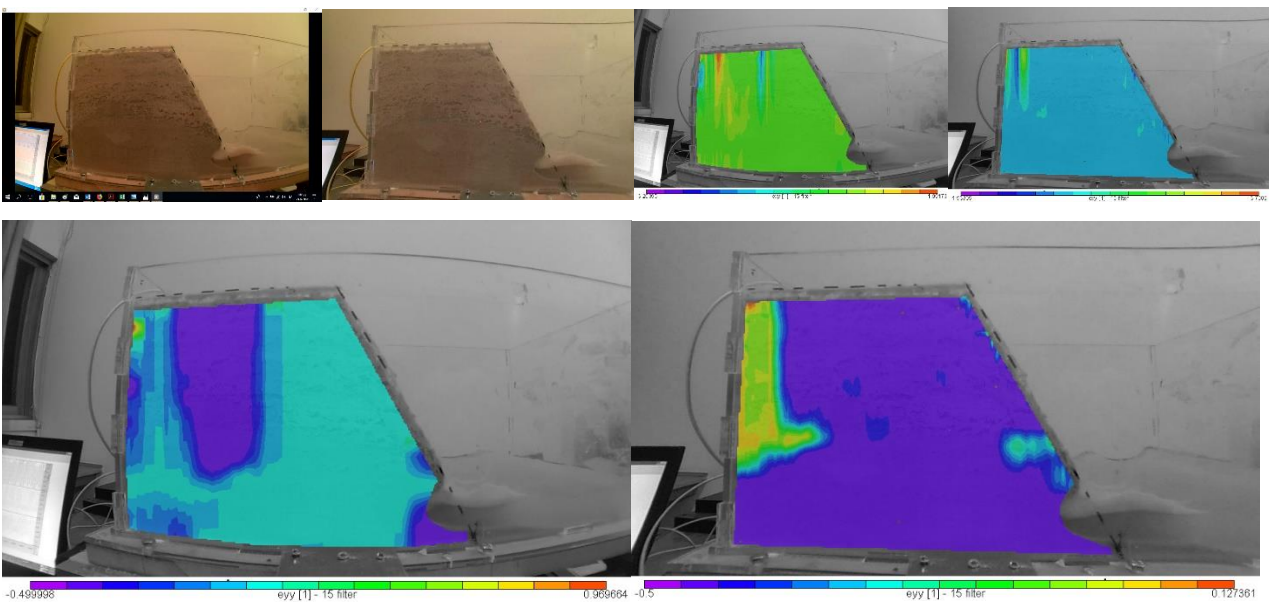
Εικόνα 89 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο/ σε διορθωμένο στιγμιότυπο

Figure 89 Uncorrected snapshot While Loading / Repaired Snapshot While Loading / Shear Strain e_{xy} by Vic 2D program in uncorrected snapshot / repaired snapshot / Reduced Strain e_{yy} in uncorrected snapshot / in repaired snapshot



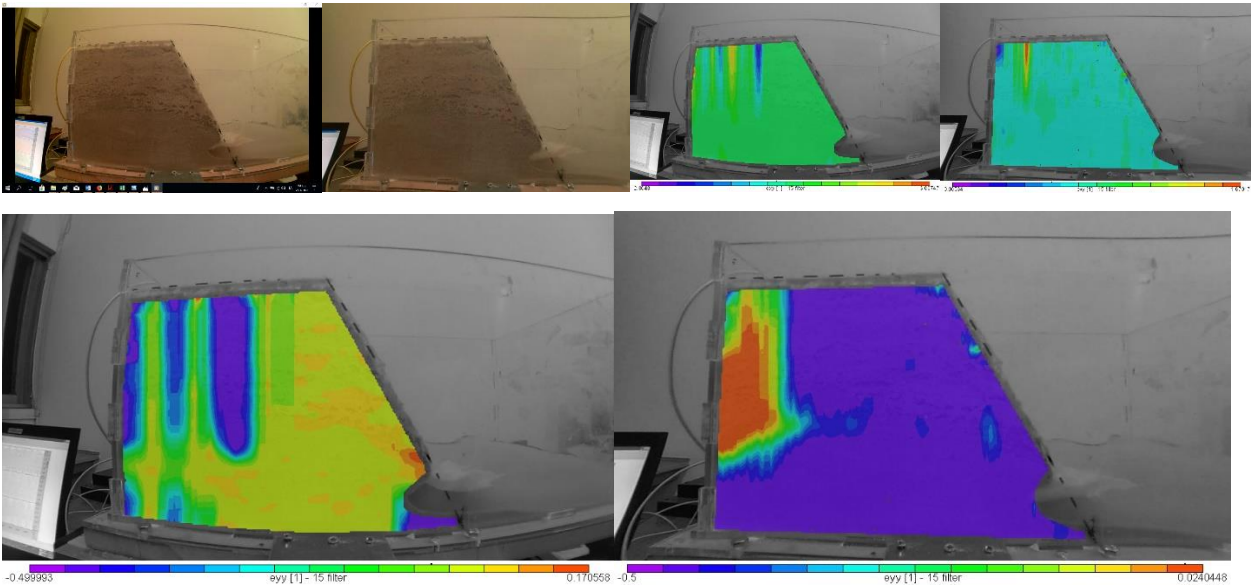
Εικόνα 90 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο

Figure 90 Uncorrected snapshot While Loading / Repaired Snapshot While Loading / Shear Strain e_{xy} by Vic 2D program in uncorrected snapshot / repaired snapshot / Reduced Strain e_{yy} in uncorrected snapshot / in repaired snapshot



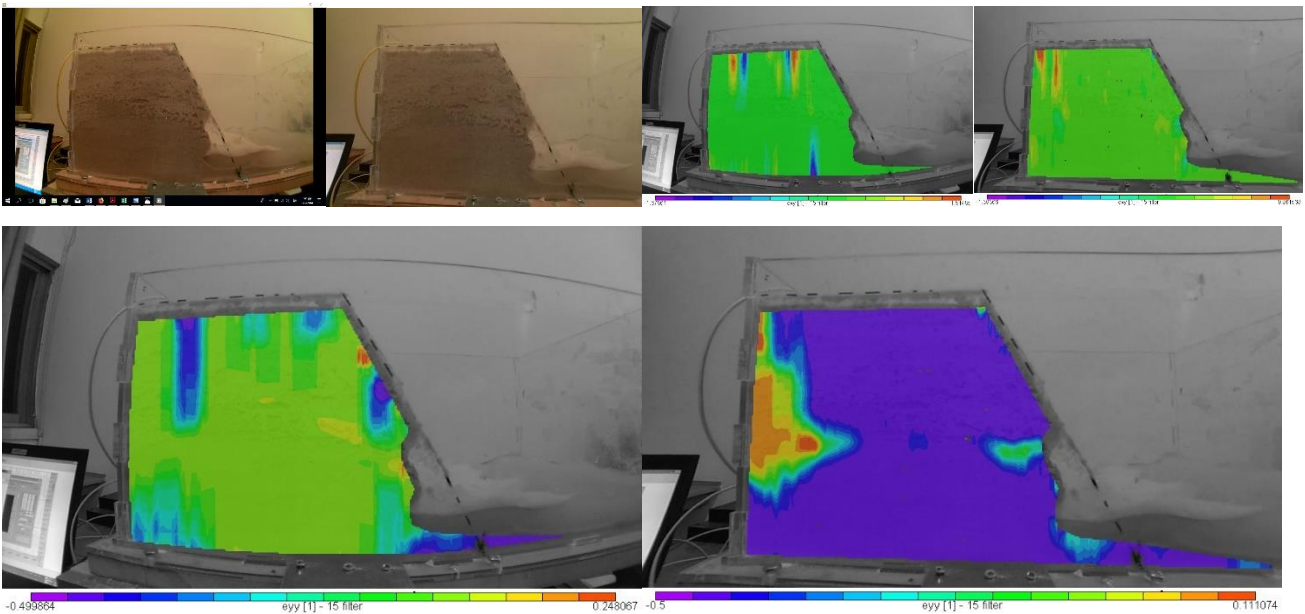
Εικόνα 91 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο

Figure 91 Uncorrected snapshot While Loading / Repaired Snapshot While Loading / Shear Strain e_{xy} by Vic 2D program in uncorrected snapshot / repaired snapshot / Reduced Strain e_{yy} in uncorrected snapshot / in repaired snapshot



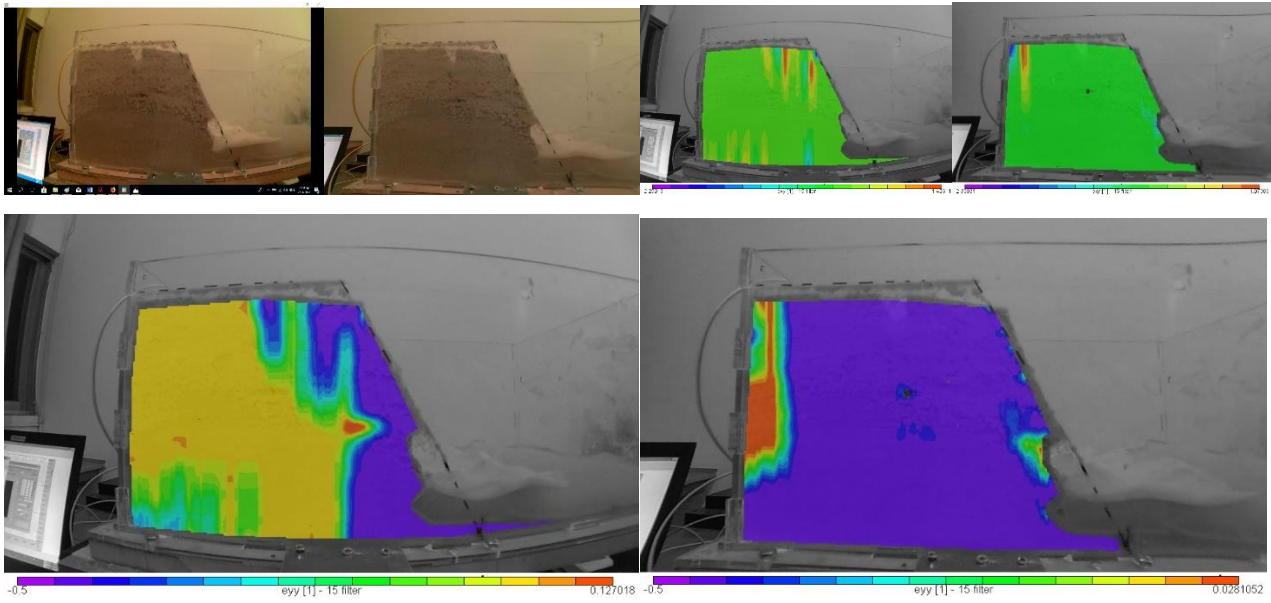
Εικόνα 92 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο/ σε διορθωμένο στιγμιότυπο

Figure 92 Uncorrected snapshot While Loading / Repaired Snapshot While Loading / Shear Strain e_{xy} by Vic 2D program in uncorrected snapshot / repaired snapshot / Reduced Strain e_{yy} in uncorrected snapshot / in repaired snapshot



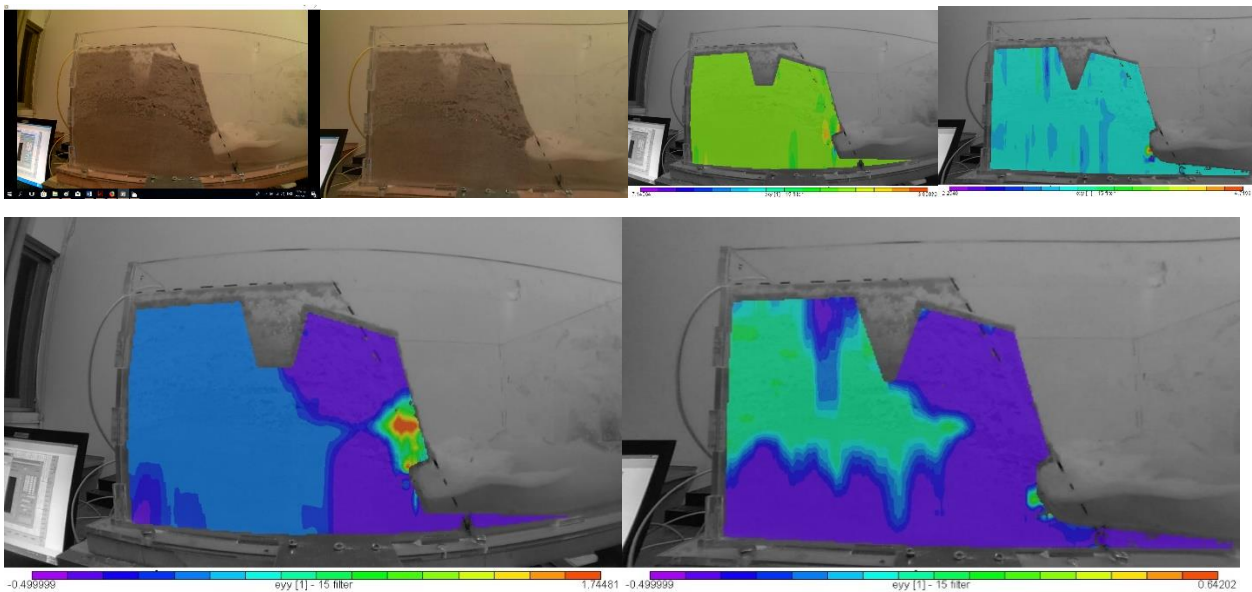
Εικόνα 93 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο/ σε διορθωμένο στιγμιότυπο

Figure 93 Uncorrected snapshot While Loading / Repaired Snapshot While Loading / Shear Strain e_{xy} by Vic 2D program in uncorrected snapshot / repaired snapshot / Reduced Strain e_{yy} in uncorrected snapshot / in repaired snapshot



Εικόνα 94 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις ϵ_{yy} σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο/ σε διορθωμένο στιγμιότυπο

Figure 94 Uncorrected snapshot While Loading / Repaired Snapshot While Loading / Shear Strain ϵ_{xy} by Vic 2D program in uncorrected snapshot / repaired snapshot / Reduced Strain ϵ_{yy} in uncorrected snapshot / in repaired snapshot



Εικόνα 95 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις ϵ_{yy} σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο/ σε διορθωμένο στιγμιότυπο

Figure 95 Uncorrected snapshot While Loading / Repaired Snapshot While Loading / Shear Strain ϵ_{xy} by Vic 2D program in uncorrected snapshot / repaired snapshot / Reduced Strain ϵ_{yy} in uncorrected snapshot / in repaired snapshot

➤ Συμπεράσματα

Από τη σύγκριση των πεδίων τιμών των ανηγμένων διατμητικών παραμορφώσεων που προέκυψαν από την ψηφιακή συσχέτιση των εικόνων, αντιλαμβανόμαστε ότι στις εικόνες στις οποίες δεν έγινε διόρθωση του φωτογραφικού σφάλματος, οι πληροφορίες που λαμβάνουμε από τη χρήση του λογισμικού Vic2D είναι περισσότερες. Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού η συγκεκριμένη διόρθωση δεν θα μπορούσε να αφήσει ανεπηρέαστη την ανάλυση των εικόνων, και όπως όλα τα προγράμματα ψηφιακής συσχέτισης εικόνων, έτσι και το Vic2D, βασίζεται ιδιαιτέρως στην ποιότητα, δηλαδή στην ανάλυση (και στον αριθμό των pixels) της κάθε εικόνας, προκειμένου να επιτύχει το μέγιστο της απόδοσης του. Επίσης δεν θα πρέπει να παραλειφθεί, το γεγονός ότι η διόρθωση του φωτογραφικού σφάλματος αν δε γίνει με απόλυτη ακρίβεια σε όλα τα φωτογραφικά καρέ που θα επεξεργαστούμε, τίθεται σε κίνδυνο η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, αφού υπάρχει ο κίνδυνος να επηρεαστεί η σύμπτωση της αρχής των αξόνων που θεωρεί το λογισμικό κατά την υπολογιστική του διαδικασία.

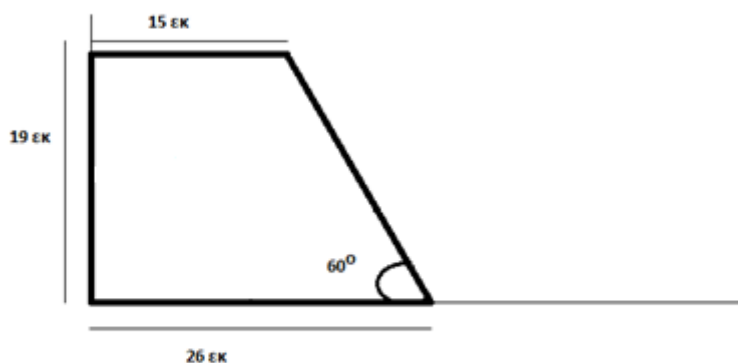
Επιπροσθέτως πρέπει να τονισθεί πως στα διαγράμματα των πεδίων τροπών είναι εμφανής η εμφάνιση της τοπικής συγκέντρωσης τροπών (strain localization) που παρατηρείται στην περιοχή αστοχίας του πρανούς προ της αστοχίας. Αυτό το φαινόμενο είναι χαρακτηριστικό των κοκκωδών υλικών, και η χρήση του λογισμικού Vic2D μας επιβεβαιώνει αυτή τη θεωρία. Η τοπική συγκέντρωση τροπών είναι πολυπαραγοντική και οφείλεται στον προσανατολισμό και το πάχος των ζωνών διάτμησης, στην ογκομετρική συμπεριφορά μέσα σε μια ζώνη μετά τον σχηματισμό της, στην αρχική κατάσταση της άμμου (ή άλλων κοκκωδών υλικών) το μέγεθος του δείγματος, καθώς και το μέγεθος των κόκκων. Η ζώνη διάτμησης, ο εντοπισμός της παραμόρφωσης σε λεπτές ζώνες έντονης διάτμησης, είναι φαινόμενο που παρατηρείται συχνά στα εδάφη. Έχει μια αρκετά πρακτική σημασία, καθώς η σταθερότητα και τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης των δομών της γης συχνά ελέγχονται από τη συμπεριφορά του εδάφους μέσα στις ζώνες διάτμησης. Αν και η τοπική συγκέντρωση τροπών έχει παρατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα τόσο στην κλίμακα των γεωτεχνικών δομών και σε εργαστηριακά πειράματα, ήταν μόνο τα τελευταία 20 ή 30 χρόνια στα οποία διεξήγαγαν συστηματικές μελέτες για την κατανόηση της διάτμησης των γεωτρήσεων στα γεωυλικά.

6.7 Πείραμα 5ο

➤ Περιγραφή

Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιείται για πρώτη φορά το πενετρόμετρο. Ο λόγος είναι πως η άμμος αν και είναι υλικό μηδενικής συνοχής, λόγω της παρουσίας νερού αποκτά φαινόμενη συνοχή. Χάρη στο πενετρόμετρο, έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε αυτή τη συνοχή ακολουθώντας τις οδηγίες που είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Παρακάτω σε αυτό το κεφάλαιο υπάρχει περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού της συνοχής. Τα αποτελέσματα της οποίας θα χρησιμοποιηθούν στην υπολογιστική ανάλυση με το λογισμικό του Slide και του Phase. Η δοκιμή έγινε σε ημιβυθισμένο πρανές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του πρανούς, τα μέσα που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των παραμέτρων. Και έπειτα αναφέρονται η επεξεργασία των καταγραφών αυτών και στο τέλος γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Slide και του Phase, όπως και εκτενής ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με το λογισμικό Vic 2D.

Το μοντέλο αυτό κατασκευάστηκε με βρεγμένη άμμο και το αφήσαμε να στεγνώσει πριν την διεξαγωγή του πειράματος. Οι διαστάσεις είναι όπως φαίνονται στην εικόνα.



Εικόνα 96 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 5,

Figure 96 Side View of Experimental Model 5

Μετρήσαμε με Penetrometro: για $d_1 = 20\text{mm}$ και $d_2 = 25\text{mm}$, έχω αντίστοιχα $q_1 = 0,85 \text{ kg/cm}^2$ και $q_2 = 1,05 \text{ kg/cm}^2$ και $Q_2 = 1,9 \text{ kg}$ ώστε να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τη συνοχή του εδάφους μας. Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη B9 με συχνότητα 4 ρεύμα στο 1,5 και

θέση σεισμικής τράπεζας Ampl. =>. Αναμενόμενη επιτάχυνση σύμφωνα με τις δοκιμαστικές φορτίσεις $3,6 \text{ m/s}^2$ όση δηλαδή και στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας III. Επιλέξαμε αυτή ανάμεσα στις άλλες δοκιμές καθώς μας δίνει το λιγότερο θόρυβο στις άλλες δύο κατευθύνσεις (Y: $0,107 \text{ m/s}^2$ και στον X: $0,209 \text{ m/s}^2$). Αριστερά στο κουτί, ακριβώς στο μέσο της επιφάνειας, τοποθετούμε τον QCN επιταχυνσιογράφο μας με τον άξονα Z στην κατεύθυνση της κίνησης και τον Y =>. Η επιτάχυνση ήταν μικρότερη από την αναμενόμενη και δεν αστόχησε το μοντέλο μας. Ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα μέχρις ότου φτάσαμε την επιτάχυνση στα $3,6 \text{ m/s}^2$

➤ Υπολογισμός Φαινόμενης Συνοχής και Γωνίας Τριβής

Σύμφωνα με τις οδηγίες για το πενετρόμετρο από το κεφάλαιο 1.7 του τρίτου μέρους: Για αμμώδη υλικά χρησιμοποιώ τις διαμέτρους των $d_1 = 20 \text{ mm}$ και $d_2 = 25 \text{ mm}$, και βρίσκω $q_1 = 0,85 \text{ kg/cm}^2$ και $q_2 = 1,05 \text{ kg/cm}^2$ και $Q_2 = 1,9 \text{ kg}$

Για τον υπολογισμό της γωνίας τριβής: Χρησιμοποιώ τον τύπο : $N\gamma = Q * \pi * \gamma * R^3 / 0.6$ και για $d_2 = 25 \text{ mm}$ και $Q_2 = 1,9 \text{ kg}$ υπολογίζω $N\gamma = 0,26703536$

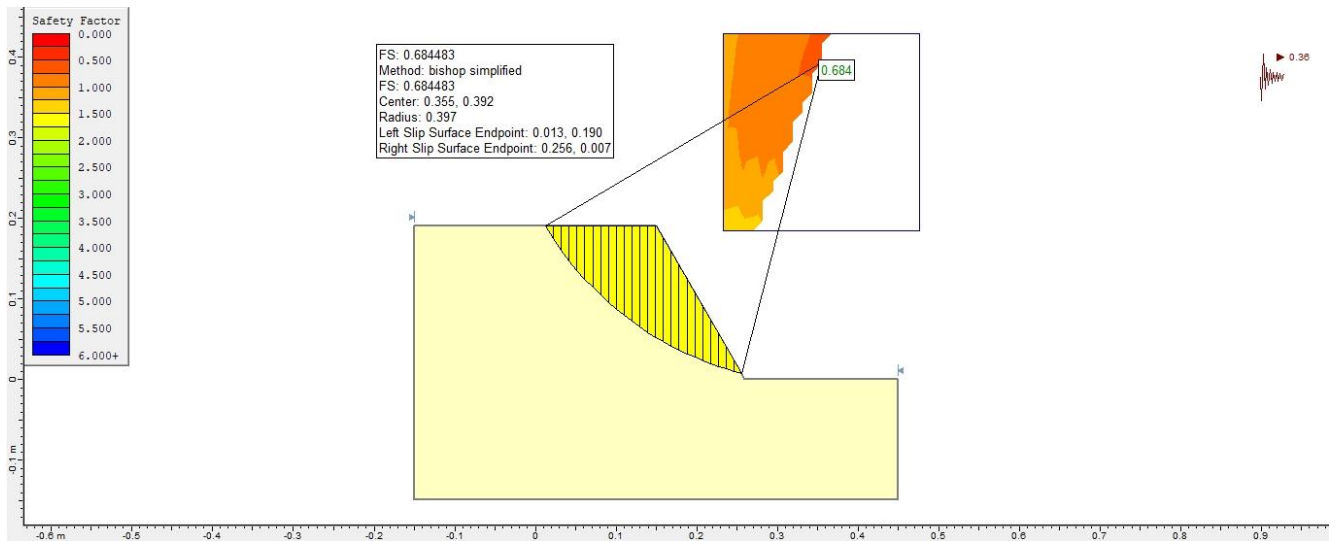
Από τον πίνακα υπολογίζω τη γωνία τριβής $\phi = 42^\circ$ και λαμβάνοντας υπόψιν την ποσοστιαία απόκλιση των αποτελεσμάτων περί το 10%, η τελική γωνία τριβής που θα χρησιμοποιήσω και στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι $\phi = 38^\circ$.

Για τον υπολογισμό της φαινόμενης συνοχής: Από το σχήμα 5 βρίσκω $N_c = 60$ και υπολογίζω το $N\gamma$ από τον τύπο $N\gamma = (q_1 - q_2) / [0,6 * \gamma * (R_1 - R_2)]$ και τη φαινόμενη συνοχή από τον τύπο

$C = q_2 * 0,6 * \gamma * R_2 * N\gamma / 1,3 * N_c$ η οποία είναι ίση με $C = 0,0133 \text{ kN/m}^2$ και πάλι συνυπολογίζουμε την ποσοστιαία απόκλιση των αποτελεσμάτων στη φαινόμενη συνοχή η οποία είναι περί το 6% και παίρνουμε τελική φαινόμενη συνοχή $C = 0,014 \text{ kN/m}^2$

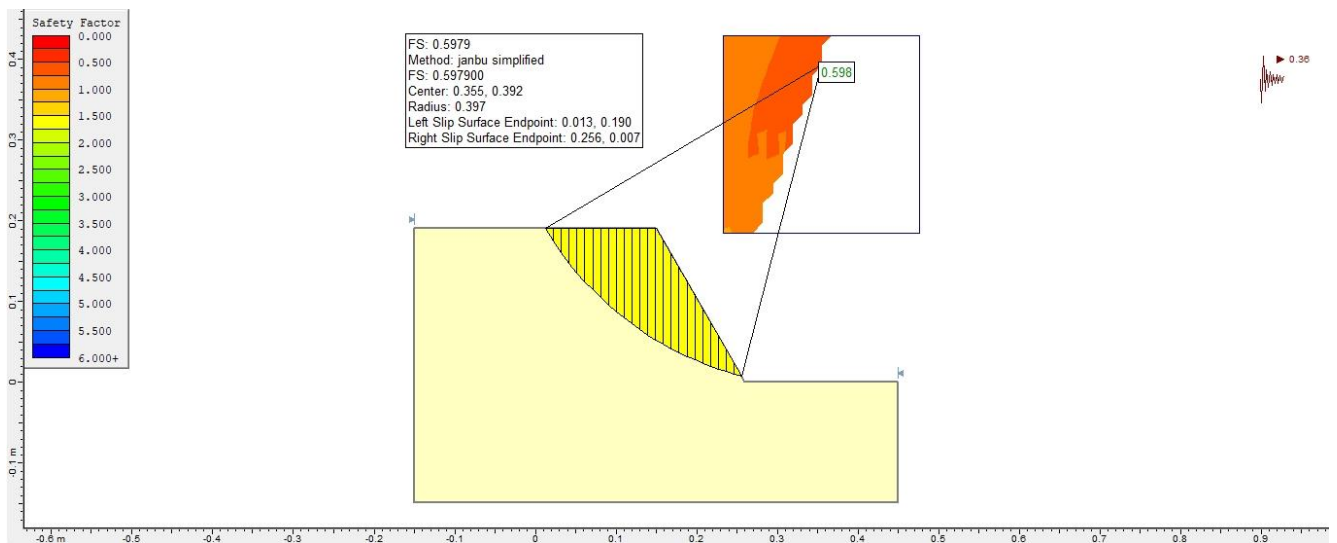
Αν παρατηρήσουμε οι μετρήσεις με το πενετρόμετρο σε όλα τα πειράματα που ακολουθούν είναι σχεδόν ίδιες (με εξαίρεση τα τελείως ξηρά πρανή), οπότε θα ήταν ασφαλές να θεωρήσουμε μία κοινή γωνία τριβής $\phi = 38^\circ$ και μία κοινή φαινόμενη συνοχή $C = 0,014 \text{ kN/m}^2$

➤ Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide και Phase



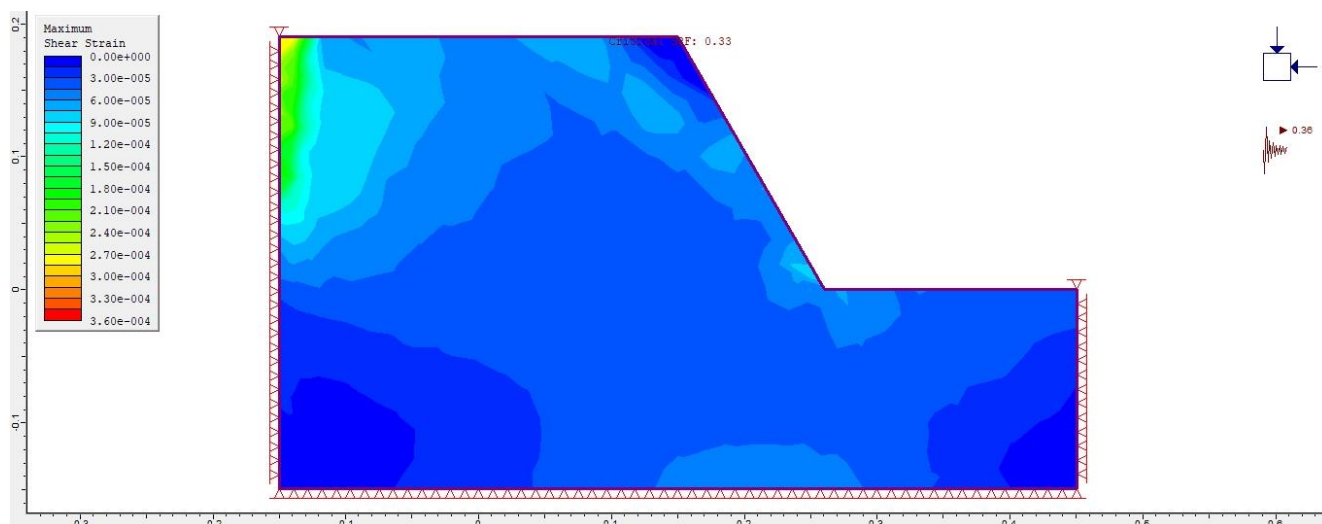
Εικόνα 97 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,684$

Figure 97 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0.684$



Εικόνα 98 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,598$

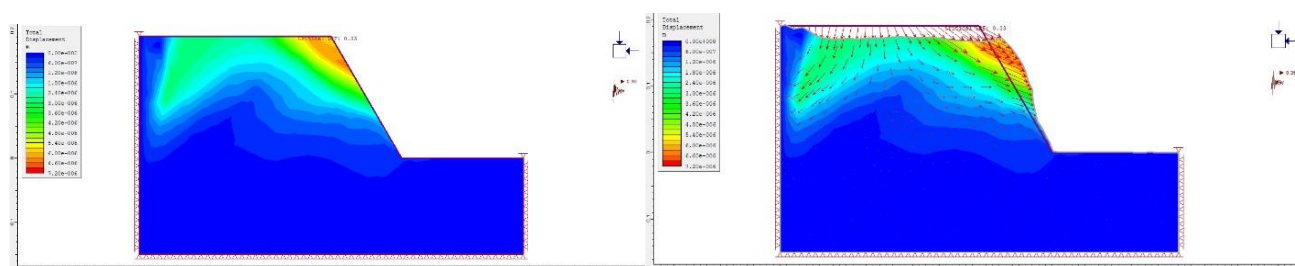
Figure 98 Analysis by Janbu method - Safety factor $FS = 0.598$



Εικόνα 99 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,33

Figure 99 Maximum Shear Strain by Phase - Critical SRF = 0,33

Σε αυτή την επεξεργασία, τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα, δίνονται από το πρόγραμμα Phase. Φυσικά όλες οι μέθοδοι έδωσαν συντελεστή ασφαλείας κάτω της μονάδας, που επισημαίνει την αστοχία του πρανούς, όπως και έγινε σε αυτή την φόρτιση.



Εικόνα 100 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,33

Figure 100 Total displacement by Phase - Critical SRF = 0,33

➤ Μηχανισμός Αστοχίας του πρανούς

Το πρανές αυτού του πειράματος είναι χαμηλού ύψους με απότομη κεκλιμένη επιφάνεια. Επίσης έχει σχεδόν μηδενική συνοχή, και συνεπώς αποτελείται από μη συνεκτικό έδαφος. Η αστοχία που παρατηρείται κατά τη φόρτιση του είναι μορφής, μη κυκλικής περιστροφικής ολίσθησης.



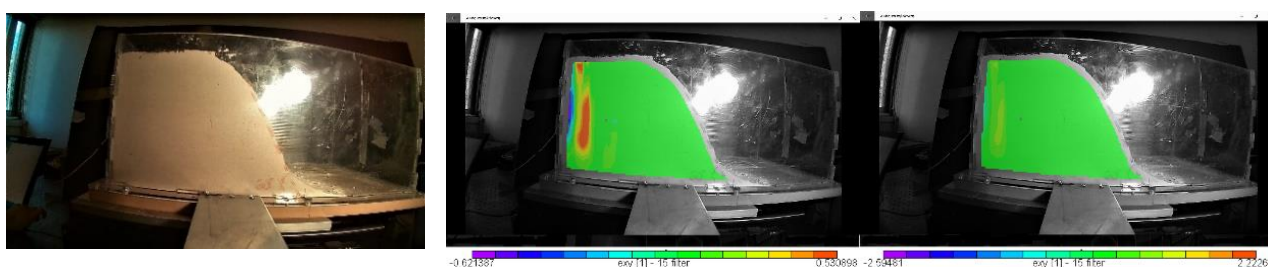
Εικόνα 101 Αρχική κατάσταση πρανούς προ Φόρτισης
Figure 101 Initial Slope Condition before Loading



Εικόνα 102 Μηχανισμός Αστοχίας Πρανούς
Figure 102 Slope Failure Mechanism

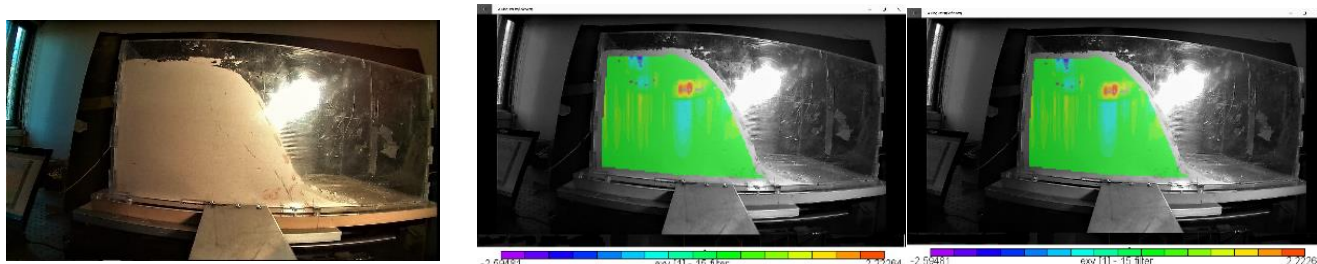
➤ Υπολογισμός τροπών με την εφαρμογή της μεθόδου Vic2D

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με την μέθοδο Vic2D. Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιούνται πολλαπλές εικόνες αναφοράς. Δηλαδή κάθε στάδιο ανάλυσης έχει τη δική του εικόνα αναφοράς που είναι το προηγούμενο στιγμιότυπο της φόρτισης σε ολόκληρο το πρανές. Η πρώτη σειρά εικόνων που θα δούμε παρακάτω, δείχνει το στιγμιότυπο στο οποίο έγινε η ανάλυση με Vic2D. Η δεύτερη σειρά εικόνων δείχνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης όπως προκύπτουν χωρίς επεξεργασία. Τέλος στη Τρίτη σειρά εικόνων, για τη διευκόλυνση της σύγκρισης έχουμε θέσει την ίδια χρωματική κλίμακα σε όλα τα αποτελέσματα ώστε να μπορούμε μακροσκοπικά να αντιληφθούμε εύκολα και γρήγορα τις διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα αποτελέσματα των διαφορετικών στιγμιότυπων. Σε αυτή τη σειρά εικόνων το ανοιχτό πράσινο αντιστοιχεί σε μηδενικές τροπές. Τα ψυχρά χρώματα (μπλε μωβ) αντιστοιχούν σε αρνητικές τροπές. Και τα θερμά χρώματα (κίτρινο, κόκκινο) σε θετικές τροπές. Στη δεύτερη σειρά όμως εικόνων το χρωματικό εύρος διαφοροποιείται από στάδιο σε στάδιο όπως και η αντιστοίχιση των χρωμάτων σε αρνητικές ή θετικές τροπές.



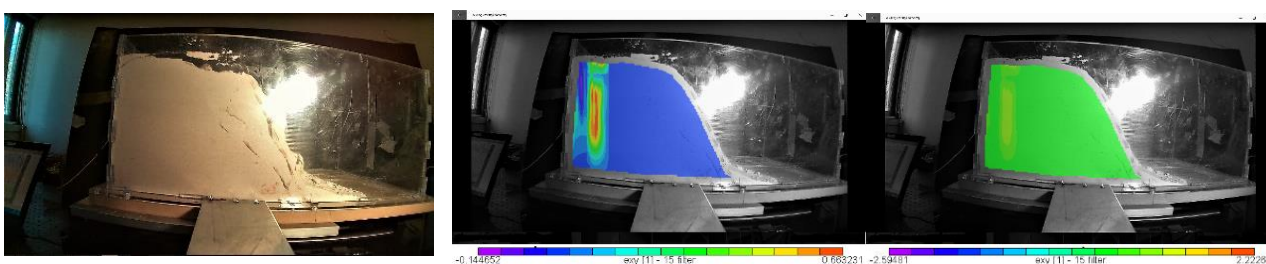
Εικόνα 103 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
Figure 103 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Στα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης αναγνωρίζεται συγκέντρωση τροπών δεξιά του ορίου-θετική διατμητική τροπή. Καθώς επίσης παρατηρείται μια ελαφριά συμπίεση στο όριο του πρανούς – αρνητική διατμητική τροπή



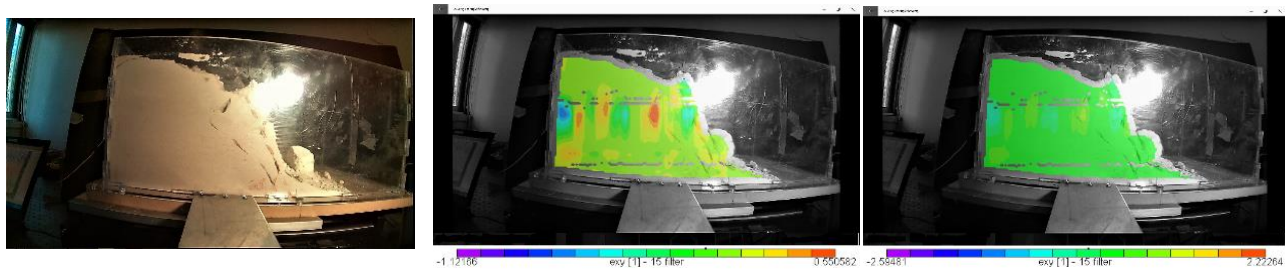
Εικόνα 104 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων Figure 104 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Το στάδιο αυτό είναι εκείνο με τις μεγαλύτερες διατμητικές τροπές (αρνητικές και θετικές) για αυτό και οι εικόνες είναι πανομοιότυπες. Παρατηρείται εφελκυστική τροπή στην κορυφή της αντίστοιχης διατμητικής ρωγμής που παρατηρείται στην εικόνα από το στιγμιότυπο. Η οποία ακολουθείται από συμπίεση των κατώτερων εδαφικών στρωμάτων. Αριστερά αυτής προς το όριο παρατηρείται κατακόρυφη απεικόνιση εφελκυστικών τροπών.



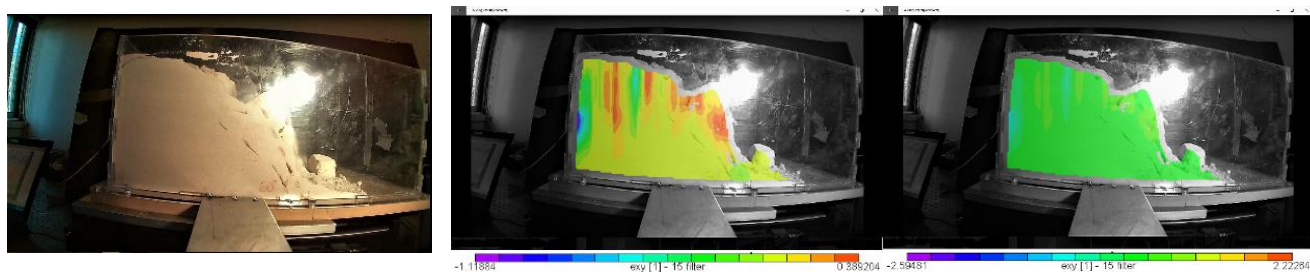
Εικόνα 105 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων Figure 105 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Στα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης αναγνωρίζεται εφελκυστική τροπή δεξιά του ορίου-θετική διατμητική τροπή. Καθώς επίσης παρατηρείται μια ελαφριά συμπίεση στο όριο του πρανούς – αρνητική διατμητική τροπή.



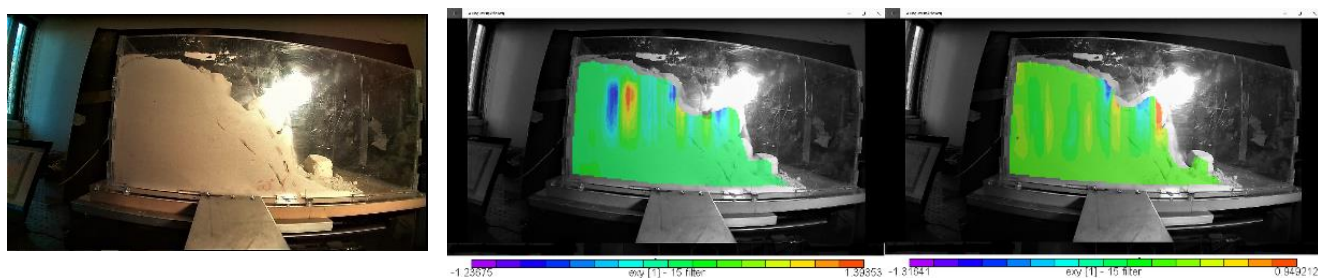
Εικόνα 106 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 106 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Σε αυτό το στιγμιότυπο έχουμε απεικόνιση κατακόρυφων τάσεων εφελκυστικών και θλιπτικών χαμηλών τιμών.



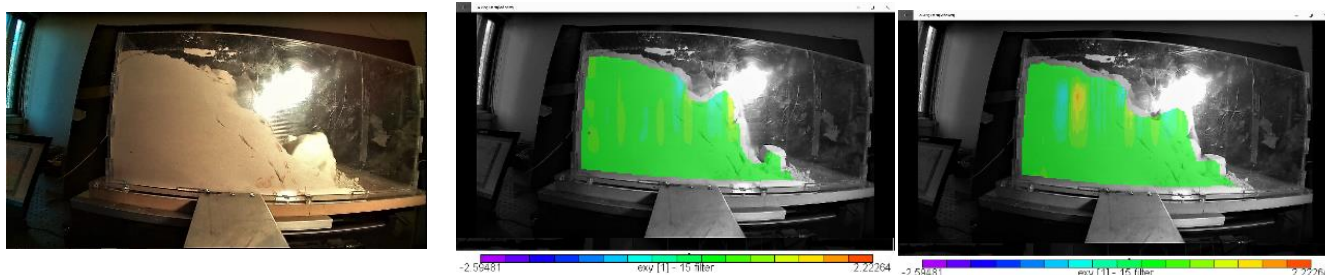
Εικόνα 107 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 107 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Σε αυτό το στάδιο παρατηρούνται και πάλι κατακόρυφες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις, οι οποίες αποτυπώνονται εναλλάξ στο πρανές και ξεκινούν από την επιφάνεια του πρανούς.



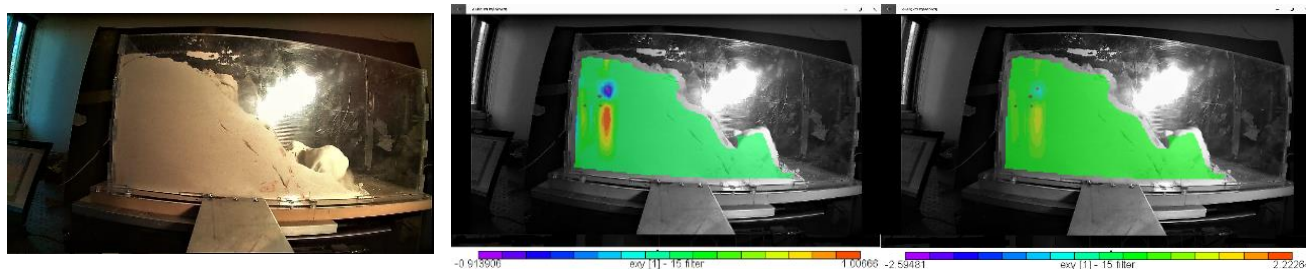
Εικόνα 108 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 108 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Σε αυτό το στάδιο παρατηρούνται και πάλι κατακόρυφες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις, οι οποίες αποτυπώνονται εναλλάξ στο πρανές και ξεκινούν από την επιφάνεια του πρανούς



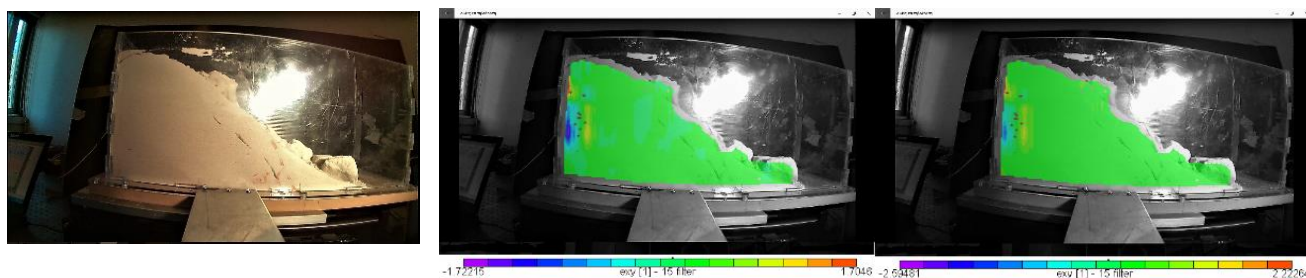
Εικόνα 109 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 109 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Σε αυτό το στάδιο παρατηρούνται και πάλι κατακόρυφες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις, υψηλότερων τιμών από τις προηγούμενες, οι οποίες αποτυπώνονται εναλλάξ στο πρηνές και ξεκινούν από την επιφάνεια του πρηνούς.



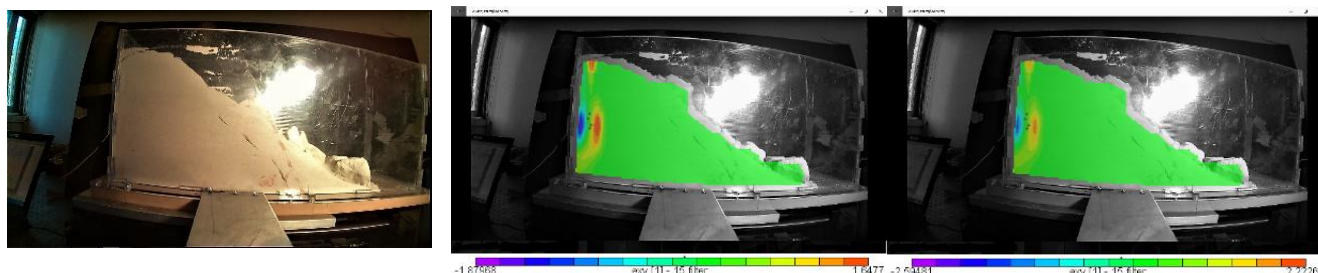
Εικόνα 110 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 110 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Εάν παρατηρήσουμε προσεκτικά τη φωτογραφία του πρηνούς θα δούμε την έναρξη μιας ρωγμής δεξιά του ορίου και περίπου στο $\frac{1}{4}$ του συνολικού μήκους του πρηνούς, στο ίδιο ακριβώς σημείο αποτυπώνεται στα αποτελέσματα της ανάλυσης η εφελκυστική ρωγμή με την θετική τροπή και στην κορυφή της αναπτύσσεται θλίψη.



Εικόνα 111 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 111 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Σε αυτό το στάδιο παραμένει η εφελκυστική τιμή, με χαμηλότερη όμως τιμή, που σημαίνει ότι η εφελκυστική ρωγμή μεγάλωσε αλλά λίγο, και αριστερά της προκάλεσε συμπίεση στο πρανές προς το όριο που αποτυπώνεται με θλιπτική τροπή.



Εικόνα 112 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 112 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Τέλος σε αυτό στάδιο η εφελκυστική ρωγμή μεγάλωσε περισσότερο από ότι στο προηγούμενο στάδιο, δίνοντας μεγαλύτερη τιμή θετικής διατμητικής τροπής στα αποτελέσματα της ανάλυσης. Ενώ ταυτόχρονα προκαλεί συμπίεση στο πρανές προς το όριο του. Παρ' όλο που φαίνεται στην ανάλυση η ρωγμή να μεγαλώνει, παραμένει δύσκολο να εντοπιστεί με το μάτι στη φωτογραφία του πρανούς.

➤ Συμπεράσματα ανάλυσης Vic 2D

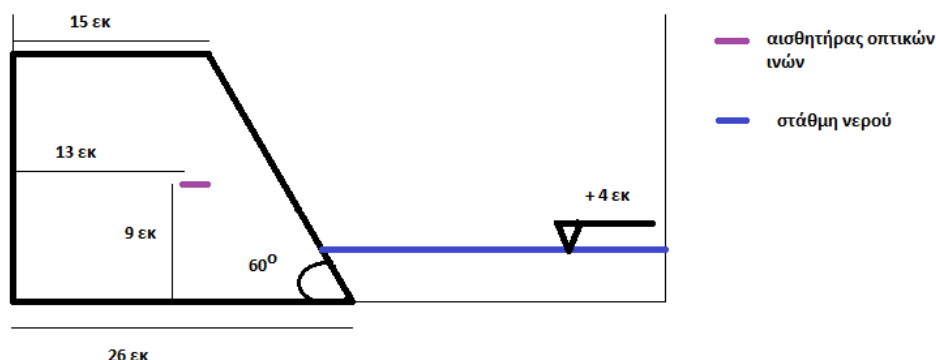
Όσον αφορά την ανάλυση με το Vic 2D μας παραξένεψε αρχικά η παρουσία εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων σε σημεία που δεν υπήρχαν ανάλογες ενδείξεις στις εικόνες των στιγμιότυπων. Μετά όμως από την παρατήρηση των τελευταίων σταδίων της ανάλυσης με την έντονη εφελκυστική τάση στην αχνή ρωγμή, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι αναγνωρίζει εφελκυσμό και θλίψη ακόμα και όταν δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτά με το μάτι.

6.8 Πείραμα 6ο

➤ Περιγραφή

Το πείραμα αυτό, είναι η 1η δοκιμή στη σεισμική τράπεζα με πλήρη την πειραματική διάταξη που δημιουργήθηκε. Σκοπός του είναι η διερεύνηση των τροπών και των παραμορφώσεων που προκύπτουν με όλες τις μεθόδους ανάλυσης. Ειδικότερα πραγματοποιείται διερεύνηση της επιρροής του νερού στο πρανές. Περιγράφονται επίσης τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, και η

θέση των μετρητικών διατάξεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταγραφών και της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Slide, του Phase και του Vic2D.



Εικόνα 113 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 6,

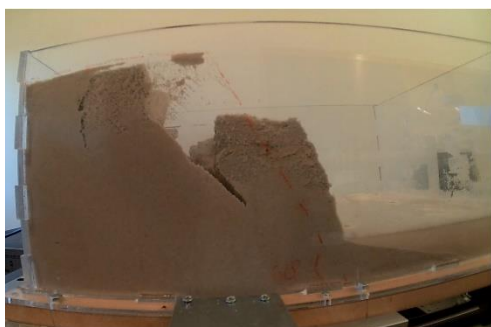
Figure 113 Side View of Experimental Model 6

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε ημιβυθισμένο πρανές. Το μοντέλο αυτό κατασκευάστηκε με βρεγμένη άμμο στο οποίο προστέθηκαν 5,25 λίτρα νερού. Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιείται η κάμερα καταγραφής ψηφιακών φωτογραφιών.

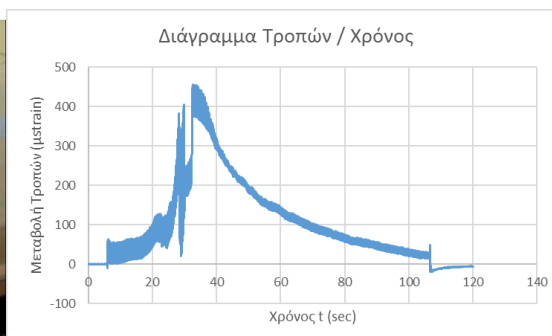
Μετρήσαμε με Penetrometro: για $d_1 = 20\text{mm}$ και $d_2 = 25\text{mm}$, έχω αντίστοιχα $q_1 = 0,71 \text{ kg/cm}^2$ και $q_2 = 0,89\text{kg/cm}^2$ και $Q_2 = 1,7 \text{ kg}$ ώστε να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τη συνοχή του εδάφους μας. Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη B9 με συχνότητα 4 ρεύμα στο 1,5 και θέση σεισμικής τράπεζας Ampl. =>. Αναμενόμενη επιτάχυνση $3,6 \text{ m/s}^2$ όση δηλαδή και στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας III. Επιλέχθηκε αυτή ανάμεσα στις άλλες δοκιμές καθώς μας δίνει το λιγότερο θόρυβο στις άλλες δύο κατευθύνσεις (Y: $0,107 \text{ m/s}^2$ και στον X: $0,209\text{m/s}^2$)

➤ Αποτελέσματα Καταγραφής Αισθητήρων

Στο μοντέλο τοποθετείται αισθητήρας καταγραφής επιτάχυνσης στην αριστερή παρειά του κουτιού. Η μέγιστη επιτάχυνση είναι $2,85 \text{ m/s}^2$. Αλλά ήταν αρκετή για να αστοχήσει το μοντέλο μας. Το πρανές αστόχησε όπως βλέπουμε στη φωτογραφία. Οι καταγραφές του αισθητήρα οπτικών ινών παρουσιάζονται στην Εικόνα 111, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.



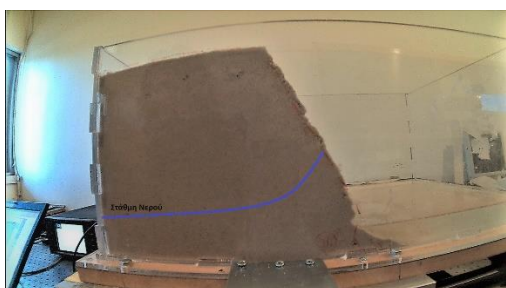
Εικόνα 114 Αστοχία Πρανούς
Figure 114 Slope Failure



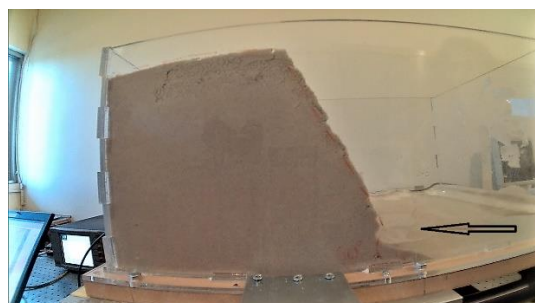
Εικόνα 115 Διάγραμμα Τροπών/Χρόνου
Figure 115 Strain / Time Chart

➤ **Μηχανισμός Αστοχίας του πρανούς**

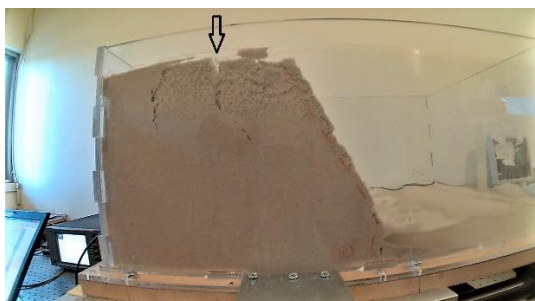
Στο πρανές του πειράματος αυτού παρατηρείται ο μηχανισμός αστοχίας λόγω υποσκαφής. Το φαινόμενο ξεκινάει με υποσκαφή στον πόδα του πρανούς λόγω της δράσης των θαλάσσιων κυμάτων που προκαλούν παρακατακόρυφες ρωγμές παράλληλες με τη διεύθυνση των πρανών και στη συνέχεια αποκόλληση και ανατροπή των υπερκείμενων εδαφικών στρωμάτων. Στην Εικόνα 109 όπου απεικονίζεται η αρχική κατάσταση του πρανούς, έχει σχεδιασθεί η στάθμη του νερού στο εσωτερικό του πρανούς. Ο μηχανισμός αστοχίας φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν:



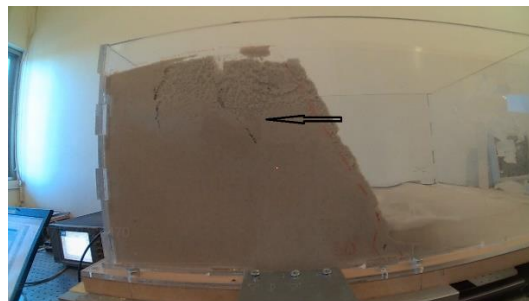
Εικόνα 116 Αρχική κατάσταση πρανούς προ Φόρτισης
Figure 116 Initial Slope Condition before Loading



Εικόνα 117 Μηχανισμός Υποσκαφής στον Πόδα του πρανούς
Figure 117 Undercut mechanism at the foot of the slope



Εικόνα 118 Δημιουργία Εφελκυστικής Ρωγμής
Figure 118 Initiating a Tensile Crack



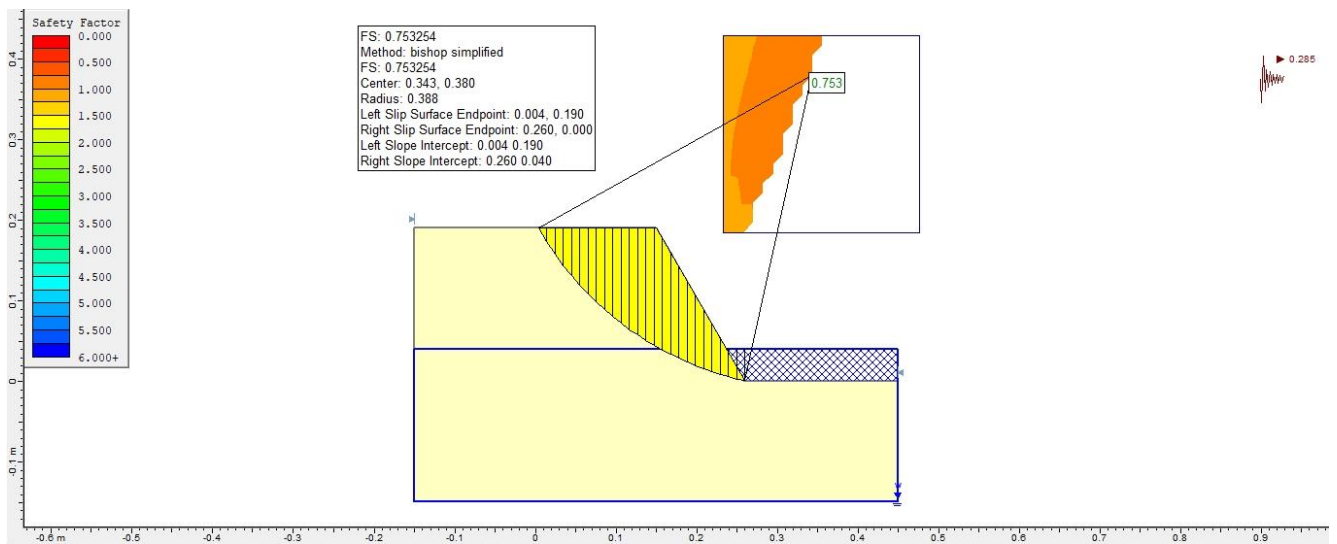
Εικόνα 119 Έναρξη Διάτμησης
Figure 119 Initiating a Shear



Εικόνα 120 Αστοχία Πρανούς,

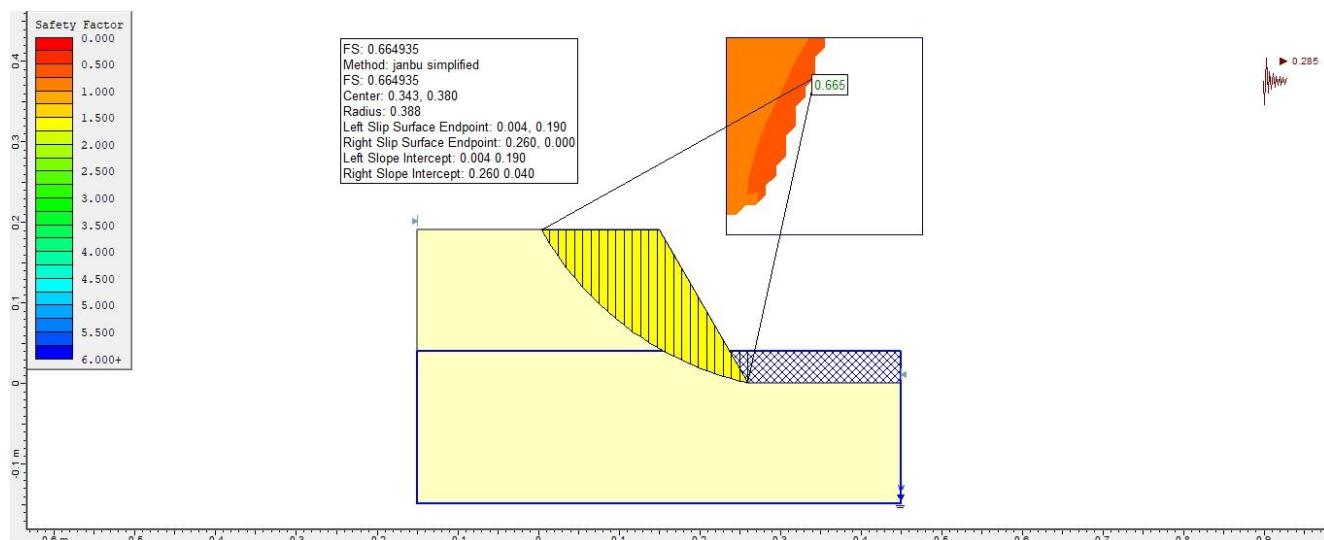
Figure 120 Failure Slope

➤ Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide και Phase



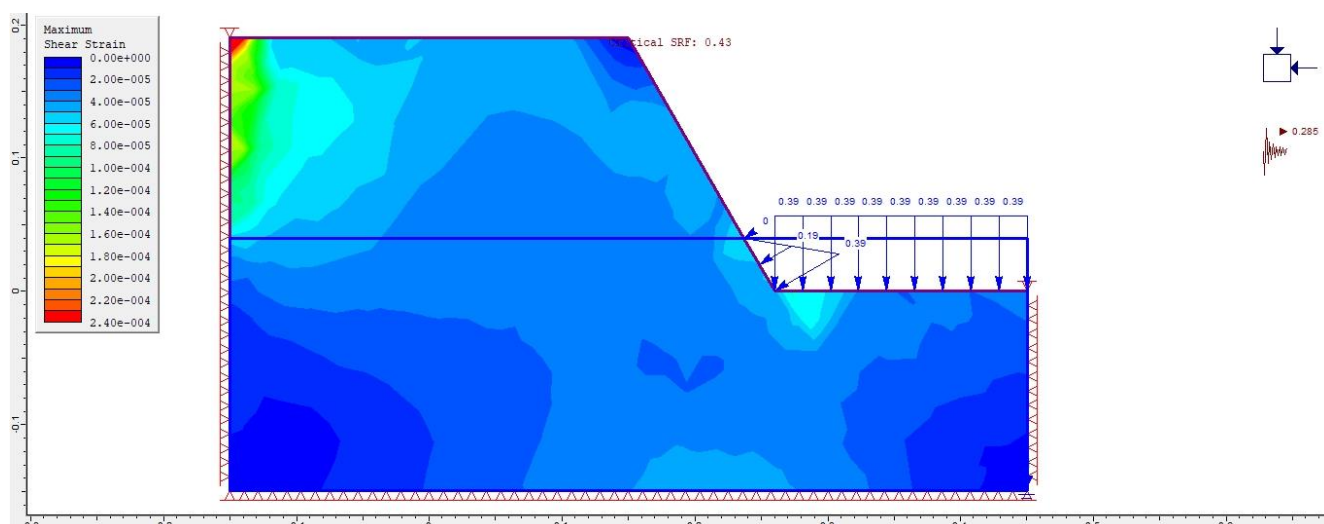
Εικόνα 121 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,753$

Figure 121 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0.753$



Εικόνα 122 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,665$

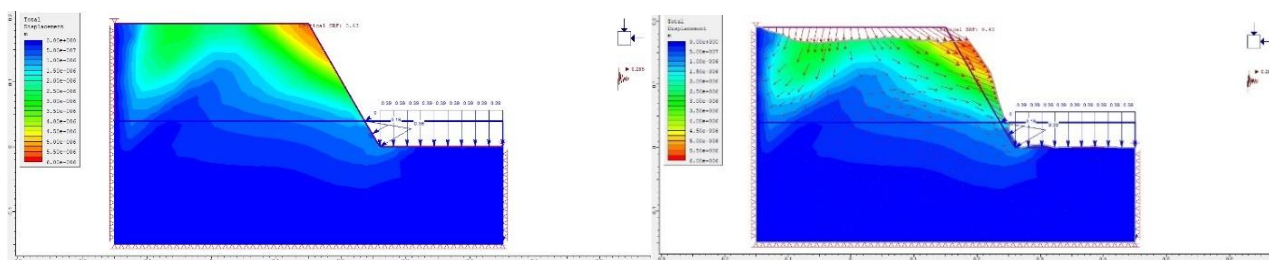
Figure 122 Analysis by Janbu method - Safety factor $FS = 0.665$



Εικόνα 123 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,43

Figure 123 Maximum shear Strain by Phase - Critical SRF = 0.43

Σε αυτή την επεξεργασία, τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα, δίνονται από το πρόγραμμα Phase. Φυσικά όλες οι μέθοδοι έδωσαν συντελεστή ασφαλείας κάτω της μονάδας, που επισημαίνει την αστοχία του πρανούς, όπως και έγινε σε αυτή την φόρτιση.



Εικόνα 124 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,43

Figure 124 Total displacement by Phase - Critical SRF = 0,43

➤ Υπολογισμός τροπών με την εφαρμογή της μεθόδου Vic2D

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει σύγκριση σε τρεις διαφορετικούς τρόπους ανάλυσης των αποτελεσμάτων με την ίδια όμως μέθοδο την Vic2D. Η πρώτη ανάλυση (Α') έγινε διατηρώντας σε όλα τα στάδια της ανάλυσης μια κοινή εικόνα αναφοράς, συγκεκριμένα την πρώτη εικόνα που τραβήχτηκε προτού εφαρμοσθεί φόρτιση στο πρανές μας. Στη δεύτερη ανάλυση (Β') χρησιμοποιούνται πολλαπλές εικόνες αναφοράς. Δηλαδή κάθε στάδιο ανάλυσης έχει τη δική του εικόνα αναφοράς που είναι το προηγούμενο στιγμιότυπο της φόρτισης σε ολόκληρο το πρανές. Τέλος στην Τρίτη ανάλυση (Γ') όπως και στη Β' η ανάλυση γίνεται για κάθε στάδιο με εικόνα αναφοράς την προηγούμενη, όμως γίνονται χωριστές αναλύσεις για το μέρος του πρανούς που παραμένει σταθερό(Γ1) και για εκείνο που μετατοπίζεται(Γ2) κατά τη διάρκεια της φόρτισης του πρανούς.

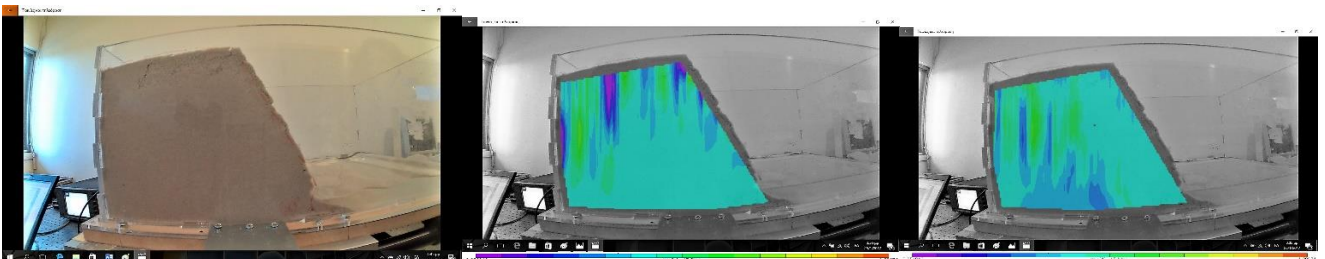
Για τη διευκόλυνση της σύγκρισης έχουμε θέσει την ίδια χρωματική κλίμακα σε όλα τα αποτελέσματα ώστε να μπορούμε μακροσκοπικά να αντιληφθούμε εύκολα και γρήγορα τις διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα αποτελέσματα των διαφορετικών τρόπων ανάλυσης. Το ανοιχτό μπλε-γαλάζιο αντιστοιχεί σε μηδενικές παραμορφώσεις. Τα ψυχρά χρώματα (μπλε μωβ) αντιστοιχούν σε αρνητικές παραμορφώσεις. Και τα θερμά χρώματα (πράσινο κόκκινο) σε θετικές παραμορφώσεις. Παράλληλα στην 1^η σύγκριση παρατίθενται και οι εκάστοτε εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.



Εικόνα 125 Το πρανές πριν τη φόρτιση. Και η πρώτη εικόνα αναφοράς.

Figure 125 The slope before loading. And the first reference image.

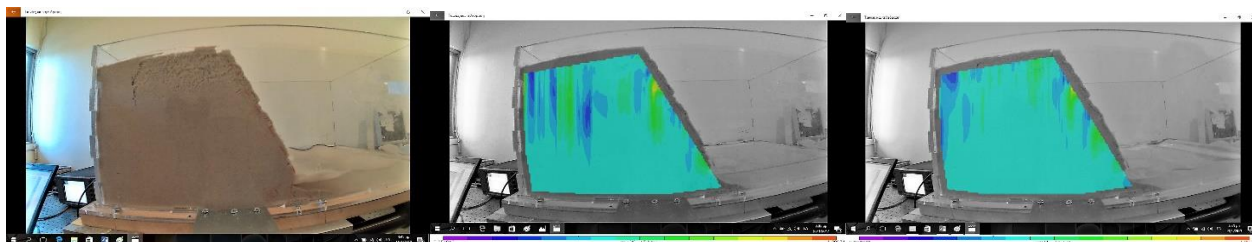
1^η Σύγκριση ανάμεσα σε Α' και Β' ανάλυση



Εικόνα 126 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα

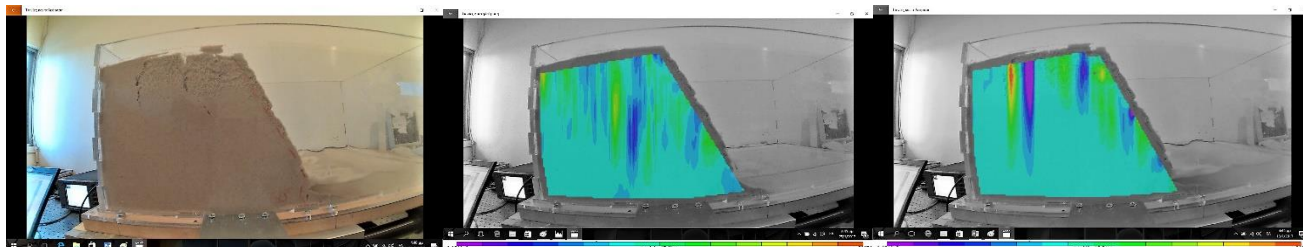
Figure 126 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A' and B' analysis method respectively

Στην Β' ανάλυση παρατηρούνται αρνητικές και θετικές παραμορφώσεις κατά μήκος της γραμμής όπου εκκινεί η ρηγμάτωση. Στην Α' παρατηρείται εναλλαγή αρνητικών και θετικών παραμορφώσεων στα επιφανειακά εδαφικά στρώματα και στο αριστερό όριο του υλικού παρατηρείται έντονη αρνητική τροπή



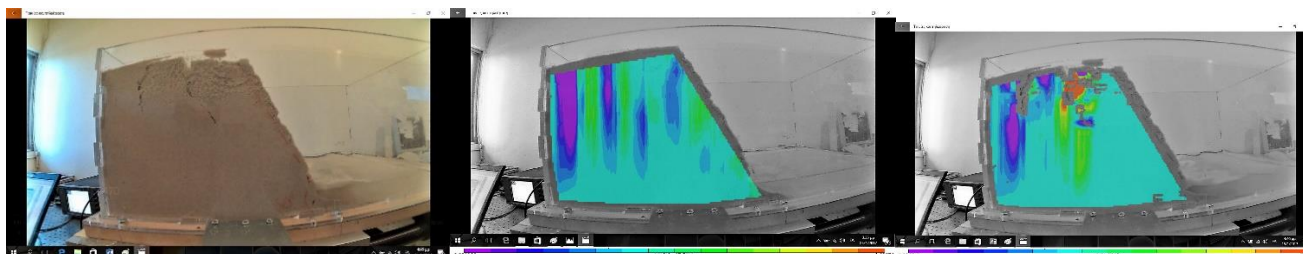
Εικόνα 127 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 127 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain ϵ_{xy} in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

Στην Α' ανάλυση παρατηρούνται κατακόρυφες παραμορφώσεις εφελκυσμού και θλίψης (αρνητικές και θετικές) στα ανώτερα εδαφικά στρώματα και στην κεκλιμένη επιφάνεια του πρανού. Στην Β' παρατηρούνται όμοιες ποιοτικά αλλά μικρότερης έντασης παραμορφώσεις με την Α'.



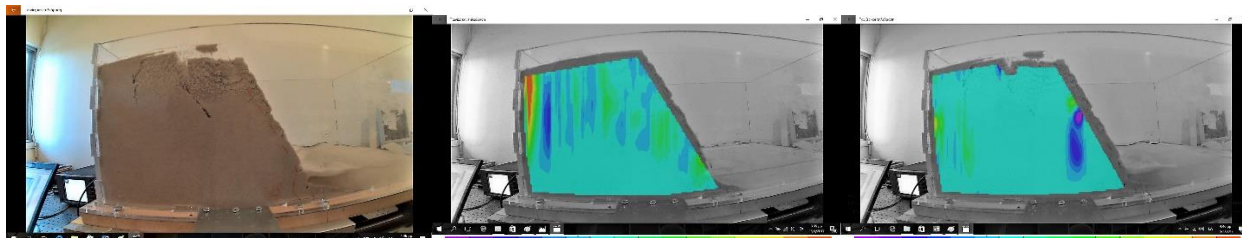
Εικόνα 128 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 128 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain ϵ_{xy} in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

Στη Β' ανάλυση παρατηρούνται κυρίως επιφανειακές παραμορφώσεις. Έντονη εφελκυστική τροπή στο σημείο της αριστερής ρηγμάτωσης του πρανού η οποία ακολουθείται από θλιπτική τροπή, όπου λογικά το έδαφος ανάμεσα στις δύο αστοχίες συμπιέζεται. Στην Α' ανάλυση έχουμε λιγότερες επιφανειακές παραμορφώσεις. Αλλά προδίδει τη θέση της δεύτερης ρηγμάτωσης με πιο έντονες αρνητικές και θετικές διατμητικές παραμορφώσεις.



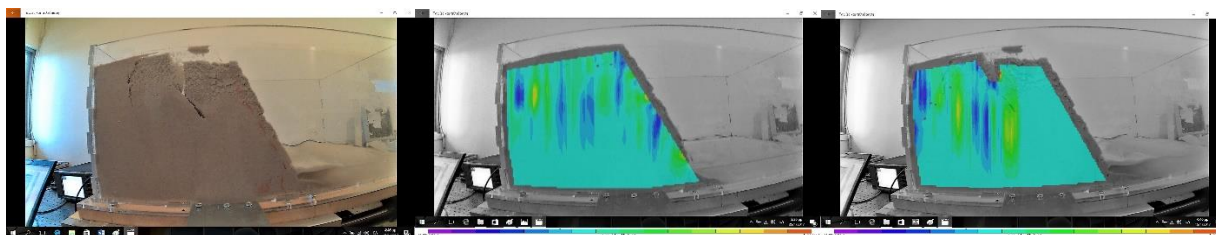
Εικόνα 129 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 129 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain ϵ_{xy} in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

Και στην Α' και στη Β' ανάλυση έχουμε μεγάλης τιμής αρνητική τροπή στο μέρος του πρανούς που παραμένει σταθερό και προφανώς συμπιέζεται κατά την ταλάντωση. Στην Α' συνεχίζεται με εναλλαγή εφελκυσμού στην αριστερή ρηγμάτωση και θλίψης και συνεχίζεται η εναλλαγή έως την κεκλιμένη επιφάνεια χωρίς όμως μεγάλες (απόλυτες) τιμές. Στη Β' ανάλυση έχουμε έντονη εφελκυστική τροπή στη δεξιά ρηγμάτωση, αλλά οι παραμορφώσεις σταματούν εκεί.



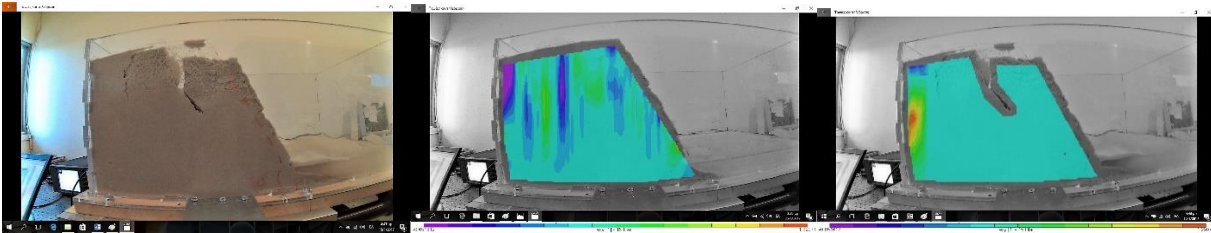
Εικόνα 130 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 130 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain ϵ_{xy} in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

Στην πρώτη ανάλυση παρατηρούμε εφελκυσμό ανάμεσα στο όριο και στην αριστερή ρηγμάτωση χωρίς όμως να αποτυπώνεται κάτι ανάλογο και στο πραγματικό στιγμιότυπο. Σε πιο μικρό βαθμό (αχνές αποχρώσεις του κίτρινου) αυτό το φαινόμενο παρατηρείται και στην Β' ανάλυση. Στον Α' τρόπο αχνές αποχρώσεις του μπλε και του πράσινου παρατηρούνται και στο υπόλοιπο πρανές στα σημεία της ρηγμάτωσης. Στη Β' ανάλυση πλην της τροπής στα σημεία επιρροής του ορίου, παρατηρείται θλίψη στην κεκλιμένη επιφάνεια του πρανούς ίσως λόγω της συμπίεσης που υπέστη εξαιτίας της προσθήκης υλικού από τα ανώτερα εδαφικά στρώματα.



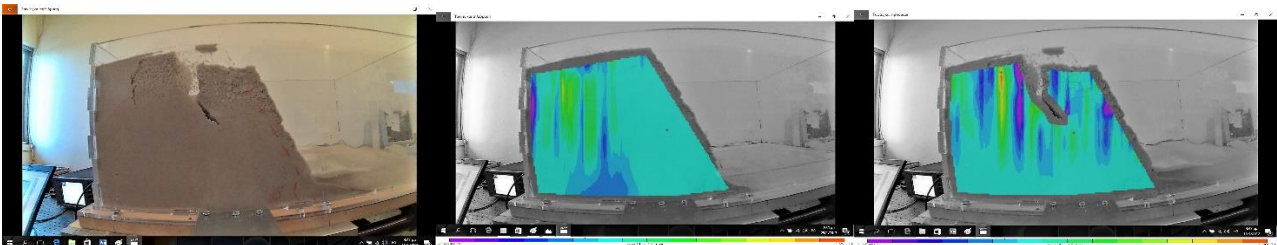
Εικόνα 131 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 131 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain ϵ_{xy} in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

Και στους δύο τρόπους παρατηρείται η ίδια εναλλαγή εφελκυσμού (στις ρηγματώσεις) και θλίψης ανάμεσα. Στην πρώτη όμως η εναλλαγή είναι μικρότερης τιμής και μεγαλύτερης διασποράς σε όλο το πρανές καθώς επίσης παρατηρείται και στην κεκλιμένη επιφάνεια.



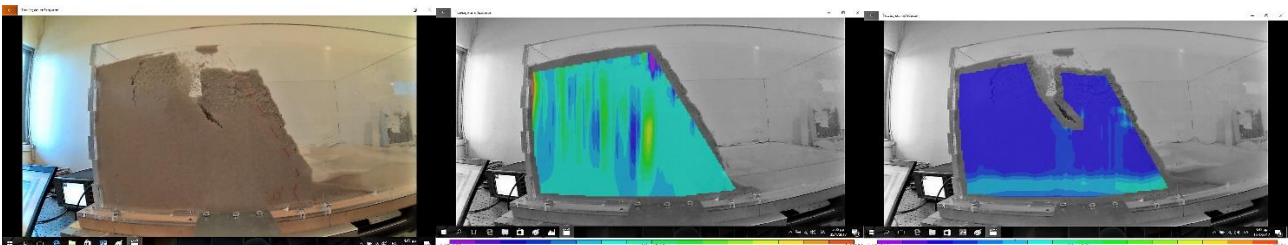
Εικόνα 132 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 132 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

Στην Α' ανάλυση παρατηρείται θλίψη στο όριο του πρανούς και εναλλαγή εφελκυσμού και θλίψης όπως και στα προηγούμενα στάδια. Στη Β' ανάλυση δεν αποτυπώνονται παραμορφώσεις στο σύνολο του πρανούς πλην της έντονης εφελκυστικής τροπής στο μέσο του ορίου με το κουτί.



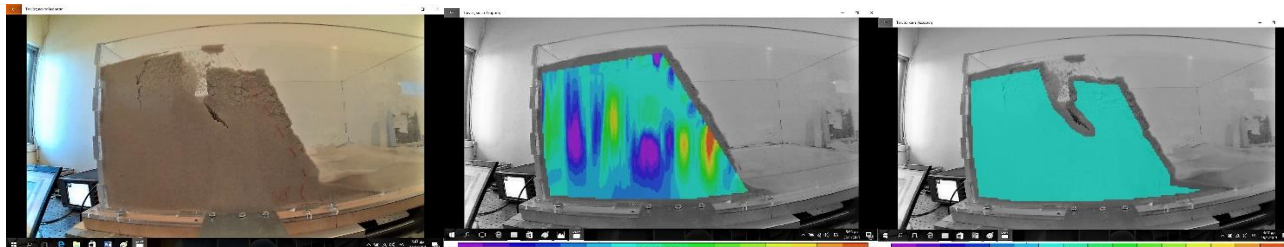
Εικόνα 133 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 133 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

Στην Α' ανάλυση δεν αποτυπώνεται η επιπλέον ρηγματώση, αποτυπώνεται όμως η θλίψη στα κατώτερα στρώματα του πρανούς που δεν είχε παρατηρηθεί μέχρι τώρα σε προηγούμενα στάδια. Στη Β' ανάλυση παρατηρείται χαλάρωση του εδάφους ανάμεσα στις δύο ρηγματώσεις που αποτυπώνεται με εφελκυσμό. Παρατηρείται επίσης θλίψη στην κεκλιμένη επιφάνεια όπου προστίθεται συνεχώς νέο εδαφικό υλικό, δεν παρατηρείται όμως η θλίψη στα κατώτερα στρώματα του εδάφους.



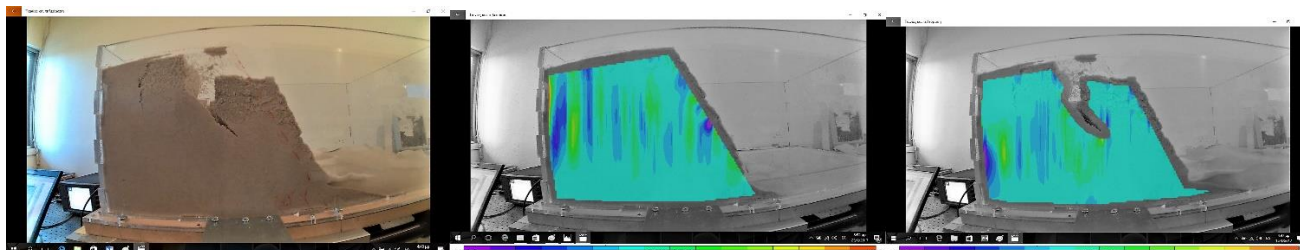
Εικόνα 134 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 134 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

Στην Α' ανάλυση παρατηρείται εναλλαγή εφελκυσμού (στις ρηγματώσεις) και θλίψης ανάμεσα. Καθώς επίσης μικρές θλιπτικές παραμορφώσεις στην κεκλιμένη επιφάνεια. Στη Β' ανάλυση παρατηρείται συμπίεση όλου του πρανούς με εξαίρεση το κατώτατο εδαφικό στρώμα όπου δεν υπόκειται σε καμία τροπή.



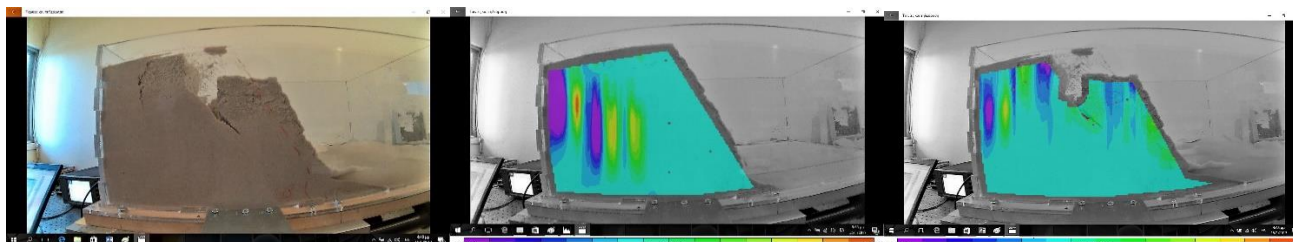
Εικόνα 135 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 135 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

Παρά το γεγονός ότι το στιγμιότυπο είναι σχεδόν πανομοιότυπο με το στιγμιότυπο του προηγούμενου σταδίου, στην Α' ανάλυση παρατηρούνται διαφορές σε αυτό το στάδιο από το προηγούμενο όχι όμως ποιοτικές. Οι διαφορές είναι αριθμητικές, σε αυτό το στάδιο παρατηρούνται οι ίδιες παραμορφώσεις με το προηγούμενο σε μεγαλύτερες όμως τιμές. Αντίθετα η Β' ανάλυση αποτυπώνει ακριβώς αυτό που βλέπουμε στα στιγμιότυπα, δηλαδή μηδενική τροπή σε ολόκληρο το πρανές.



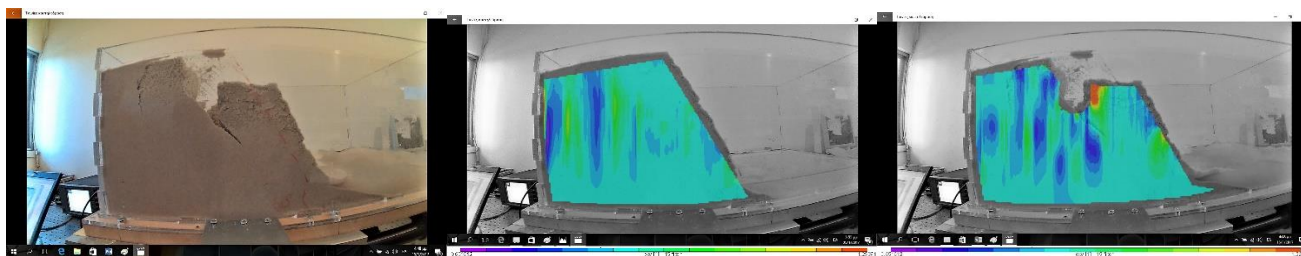
Εικόνα 136 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 136 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

Και στις δύο αναλύσεις παρατηρείται εναλλαγή εφελκυσμού (στις ρηγματώσεις) και θλίψης ανάμεσα. Καθώς επίσης μικρές αρνητικές και θετικές παραμορφώσεις στην κεκλιμένη επιφάνεια.



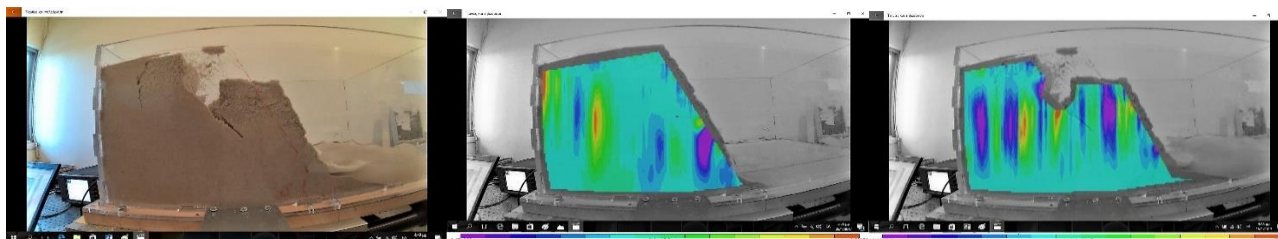
Εικόνα 137 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 137 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain ϵ_{xy} in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

Στην Α' ανάλυση παρατηρούμε εφελκυσμό στην αριστερή ρηγμάτωση και θλίψη αριστερά και δεξιά αυτής. Παρατηρείται επίσης και εφελκυσμός ανάμεσα στις δύο ρηγματώσεις, ίσως λόγω της μετατόπισης του ανώτερου εδαφικού στρώματος να αποφορτίστηκε και αποτυπώνεται με εφελκυστική τροπή. Στην Β' ανάλυση οι τροπές ακολουθούν την ίδια λογική με την Α' είναι όμως πιο επιφανειακές και σε ολόκληρη την επιφάνεια του πρανούς.



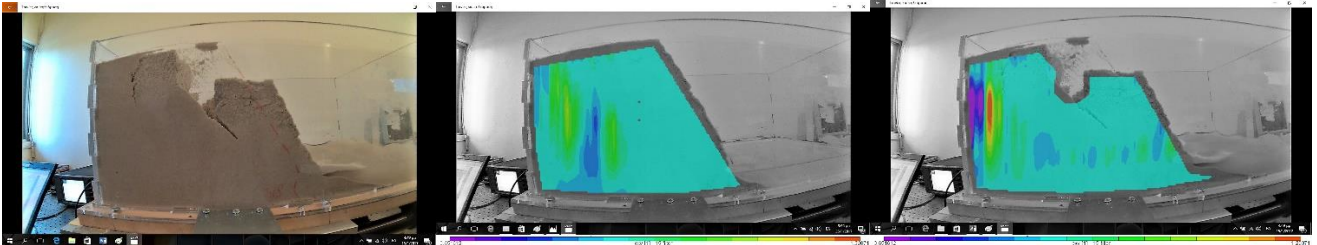
Εικόνα 138 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 138 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain ϵ_{xy} in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

Και στις δύο αναλύσεις παρατηρείται εναλλαγή εφελκυσμού και θλίψης. Καθώς επίσης μικρές αρνητικές και θετικές παραμορφώσεις στην κεκλιμένη επιφάνεια. Επιπρόσθετα στην Β' ανάλυση αποτυπώνεται μεγάλη εφελκυστική τροπή στη δεξιά ρηγμάτωση στο μετατοπιζόμενο μέρος που πιθανώς υπόκειται σε μεγαλύτερη χαλάρωση εδαφικού υλικού στην επιφάνεια του.



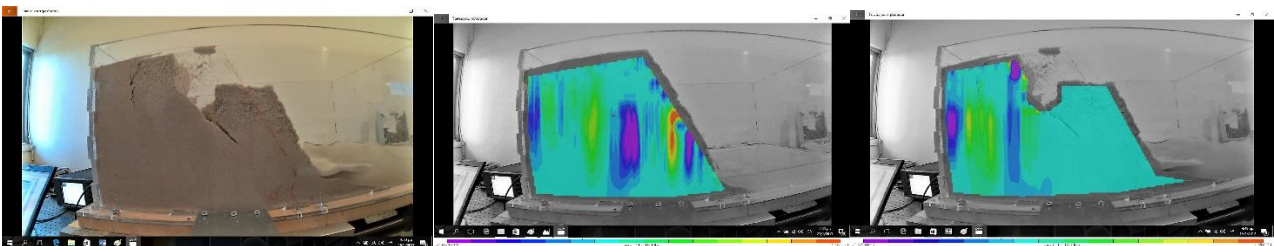
Εικόνα 139 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 139 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain ϵ_{xy} in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

Στην Α' ανάλυση έχουμε θλίψη κάτω από τις ρηγματώσεις και εφελκυσμό ανάμεσα του. Στην κεκλιμένη επιφάνεια παρατηρείται μεγάλη θλιπτική τροπή στο σημείο όπου προστίθεται το επιπλέον εδαφικό υλικό που αποσπάται από τα ανώτερα εδαφικά στρώματα. Στη Β' ανάλυση έχουμε ανάλογες αλλά μεγαλύτερης τιμής παραμορφώσεις και επιπρόσθετα παρατηρείται η θλιπτική τροπή στο εσωτερικό του μετατοπιζόμενου μέρους του πρανούς.

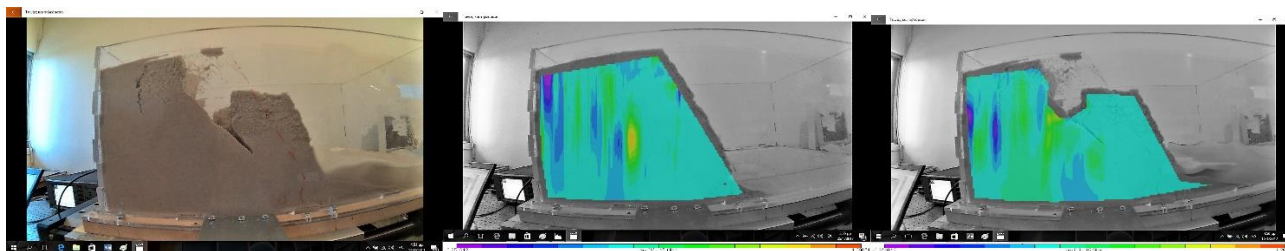


Εικόνα 140 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 140 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain ϵ_{xy} in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

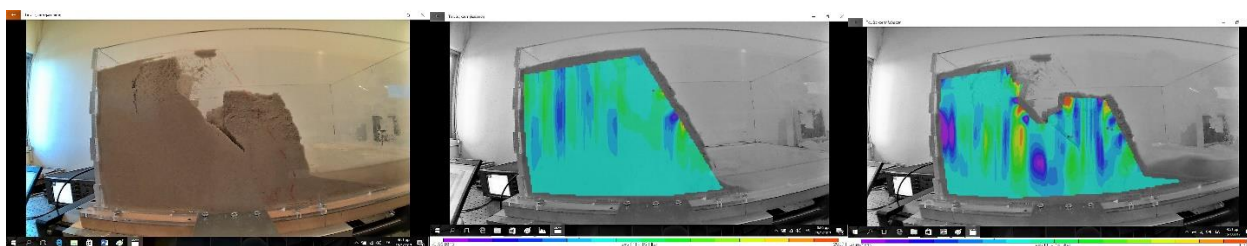
Στην Α' ανάλυση παρατηρείται εφελκυσμός στην αριστερή ρηγμάτωση όπως και στη Β' αλλά μεγαλύτερης τιμής. Και συνεχίζει με θλίψη στα κατώτερα στρώματα δεξιά της πρώτης ρηγμάτωσης και συνεχίζει με εφελκυσμό, κανένα από τα δύο δεν παρατηρείται στη Β ανάλυση. Αντίθετα αυτό που βλέπουμε στη Β' μέθοδο είναι μικρές κυρίως αρνητικές παραμορφώσεις στα κατώτερα στρώματα του πρανούς. Καθώς επίσης αποτυπώνεται έντονη θλιπτική τροπή ανάμεσα στο όριο του πρανούς και τη ρηγμάτωση.



Εικόνα 141 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 141 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain ϵ_{xy} in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively



Εικόνα 142 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 142 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

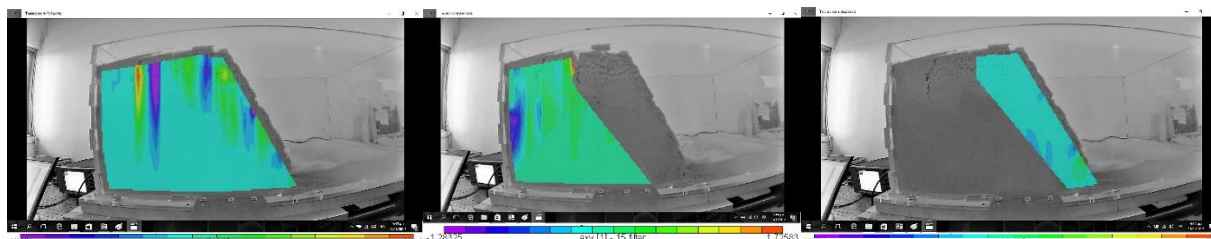


Εικόνα 143 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα
 Figure 143 Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively

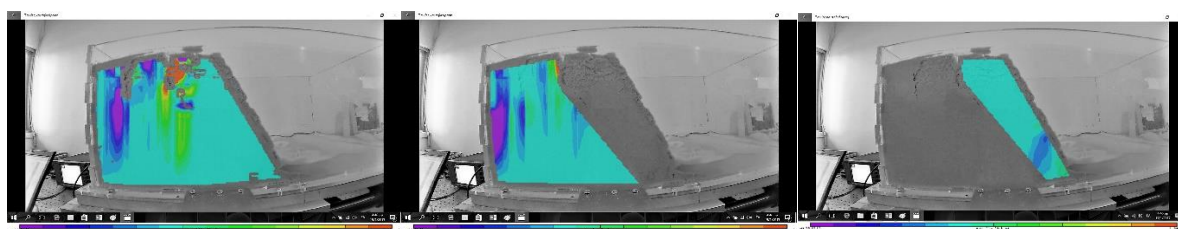
➤ Συμπεράσματα

Μετά από αυτή την συγκριτική παράθεση των αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών τρόπων προσέγγισης της ανάλυσης με τη μέθοδο Vic2D εύλογα συμπεραίνουμε ότι η ανάλυση με μία κοινή εικόνα αναφοράς (αυτή του αρχικού σταδίου) σε όλα τα στάδια της ανάλυσης παράγει αποτελέσματα με πιο έντονες παραμορφώσεις, και λογικά, αφού κάθε στιγμιότυπο αναλύεται με βάση την αρχική αφόρτιστη κατάσταση. Ο Β' τρόπος ανάλυσης αυτός των πολλαπλών εικόνων αναφοράς, που θέτει εικόνα αναφοράς κάθε σταδίου το στιγμιότυπο του προηγούμενου σταδίου, εστιάζει στις αλλαγές που γίνονται από καρέ σε καρέ και εντοπίζει καλύτερα τις αλλαγές. Το μειονέκτημα που οφείλουμε να αναφέρουμε και εντοπίζεται και στις δύο μεθόδους, είναι ότι καμία δεν αποτύπωσε την αναμενόμενη τροπή στα κατώτατα εδαφικά στρώματα, εξαιτίας της αναμενόμενης καθίζησης λόγω ταλάντωσης. (εκτός εάν τα μεσαία εδαφικά στρώματα απορρόφησαν το σύνολο της συμπίεσης στο εσωτερικό τους και δεν το μετακύλησαν στα κατώτερα αυτών εδαφικά στρώματα)

2η Σύγκριση ανάμεσα σε Β' και Γ' ανάλυση

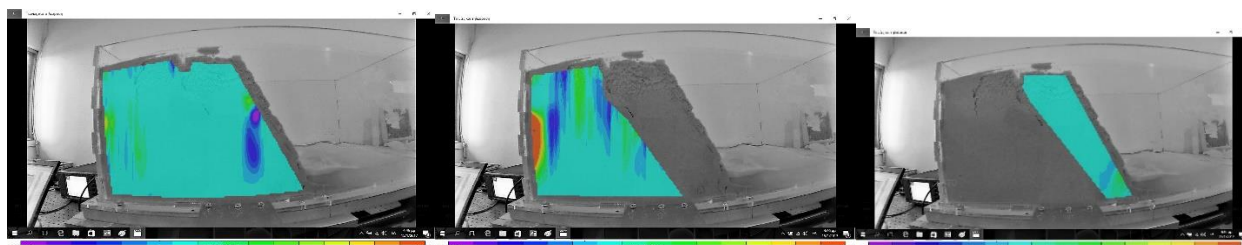


Εικόνα 144 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 144 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the Β', C1 and C2 analysis respectively



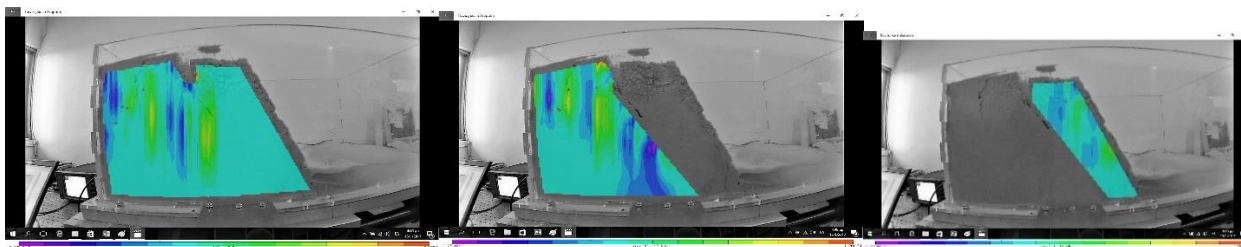
Εικόνα 145 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 145 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the Β', C1 and C2 analysis respectively

Στα αποτελέσματα της Γ1 ανάλυσης παρατηρούμε πιο έντονες αρνητικές παραμορφώσεις αριστερά της 1^{ης} ρηγμάτωσης και μικρές αρνητικές παραμορφώσεις ανάμεσα στα ρήγματα. Στη Γ2 ανάλυση παρατηρούμε θλιπτική τροπή στα κατώτερα στρώματα λόγω της συμπίεσης του εδαφικού υλικού.



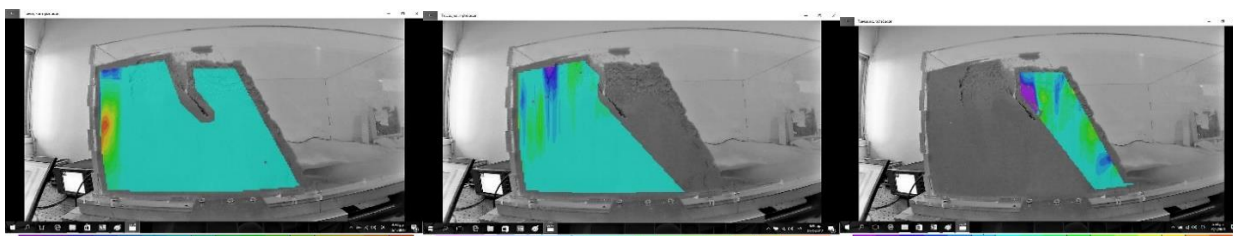
Εικόνα 146 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 146 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the Β', C1 and C2 analysis respectively

Στη Γ1 ανάλυση παρατηρούμε πάλι την εφελκυστική τροπή στο όριο του πρανούς με το κουτί, μόνο που έχει σαφώς μεγαλύτερη τιμή και εκτείνεται σε μεγαλύτερη έκταση. Αποτυπώνονται επίσης οι παραμορφώσεις κατά μήκος της δεξιάς ρηγμάτωσης. Στα αποτελέσματα από την ανάλυση του κινούμενου μέρους του πρανούς δεν αποτυπώνονται οι έντονες θλιπτικές παραμορφώσεις από την προσθήκη εδαφικού υλικού.



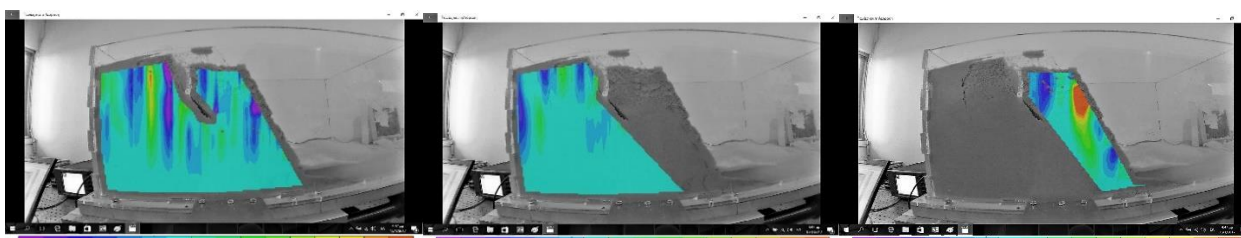
Εικόνα 147 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 147 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B', C1 and C2 analysis respectively

Στην ανάλυση Γ1 του σταθερού μέρους παρατηρούμαι όμοιες αλλά μεγαλύτερης τιμής παραμορφώσεις σε σχέση με αυτές στα αποτελέσματα της Β' ανάλυσης. Στη Γ2 ανάλυση παρατηρούμε διάσπαρτες παραμορφώσεις σε όλη την έκταση, οι οποίες δεν αποτυπώνονται στην Β' ανάλυση. Αναμενόμενες όμως λόγω της μετατόπισης ολόκληρου του υπό κατολίθηση μέρους.



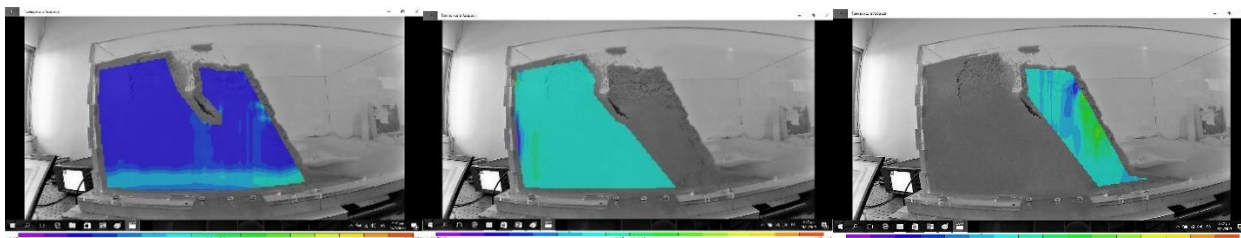
Εικόνα 148 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 148 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B', C1 and C2 analysis respectively

Στη Γ1 ελαχιστοποιείται η εφελκυστική τροπή στο όριο που παρατηρείται έντονη στη Β'. Παρατηρείται όμως θλίψη στο άνω σημείο της ρηγμάτωσης (?). Στη Γ2 ανάλυση παρατηρούμε διάσπαρτες παραμορφώσεις σε όλη την έκταση, οι οποίες δεν αποτυπώνονται στην Β' ανάλυση.



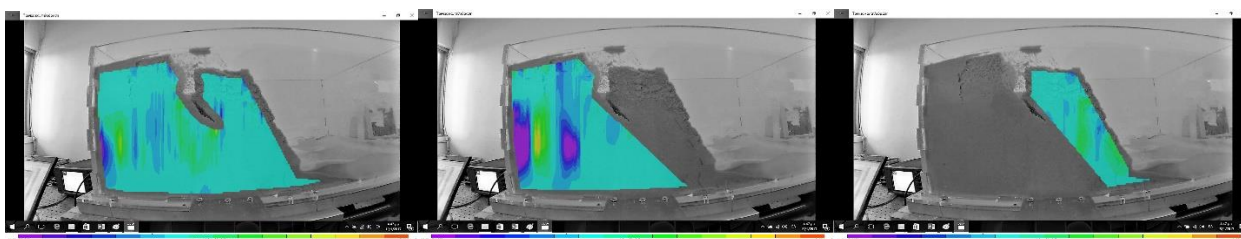
Εικόνα 149 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 149 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B', C1 and C2 analysis respectively

Παρατηρούνται λιγότερες κατακόρυφες παραμορφώσεις στα αποτελέσματα της Γ1. Στη Γ2 παρατηρούνται εφελκυστικές παραμορφώσεις στην άνω κεκλιμένη επιφάνεια, ίσως να δικαιολογούνται αν από τη μετατόπιση σε αυτό το κομμάτι του πρανούς χαλαρώνει το εδαφικό υλικό.



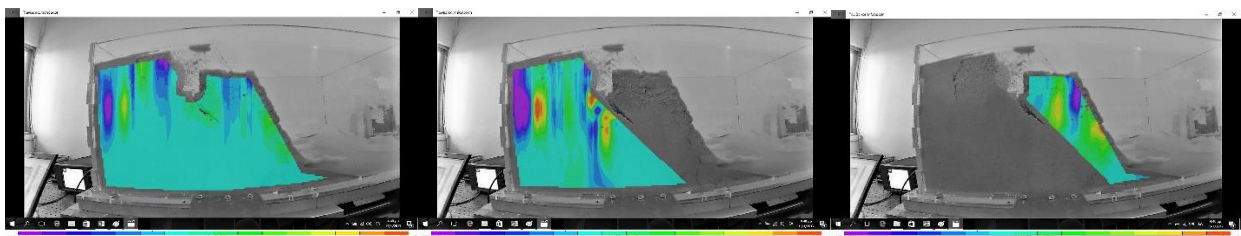
Εικόνα 150 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 150 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B', C1 and C2 analysis respectively

Ενώ στην Β' ανάλυση παρατηρούμε συμπίεση σχεδόν στο σύνολο του πρανούς στην Γ1 ανάλυση παρατηρούμε μηδενικές παραμορφώσεις σχεδόν σε ολόκληρο το πρανές. Ενώ στη Γ2 ανάλυση παραμένει η λογική των διάφορων διάσπαρτων αρνητικών και θετικών παραμορφώσεων.



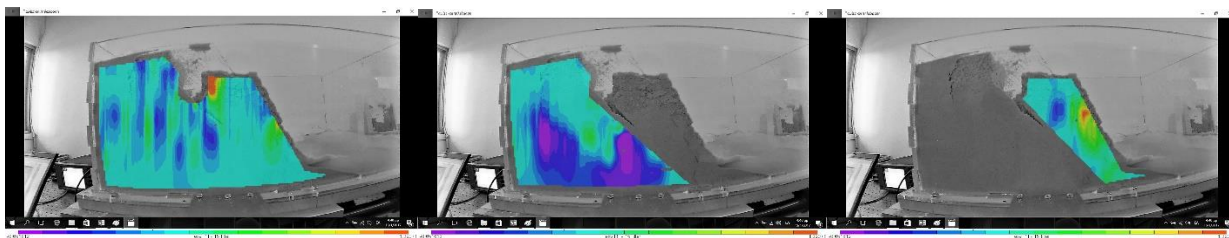
Εικόνα 151 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 151 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B', C1 and C2 analysis respectively

Στην Γ1 ανάλυση βλέπουμε ανάλογες της Β' παραμορφώσεις με μεγαλύτερες τιμές. Ενώ στη Γ2 ανάλυση παραμένουν οι διάσπαρτες αρνητικές και θετικές παραμορφώσεις.



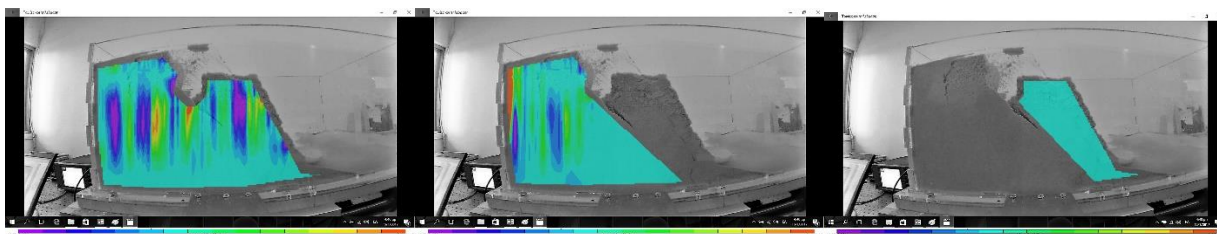
Εικόνα 152 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 152 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B', C1 and C2 analysis respectively

Οι ρηγματώσεις και οι συνέπειες τους (εφελκυσμός στις ρηγματώσεις και θλίψη γύρω τους) αποτυπώνονται πιο έντονα στη Γ1 ανάλυση. Στη Γ2 ομοίως παρατηρούνται μεγαλύτερης τιμής παραμορφώσεις και εφελκυσμού και θλίψης.



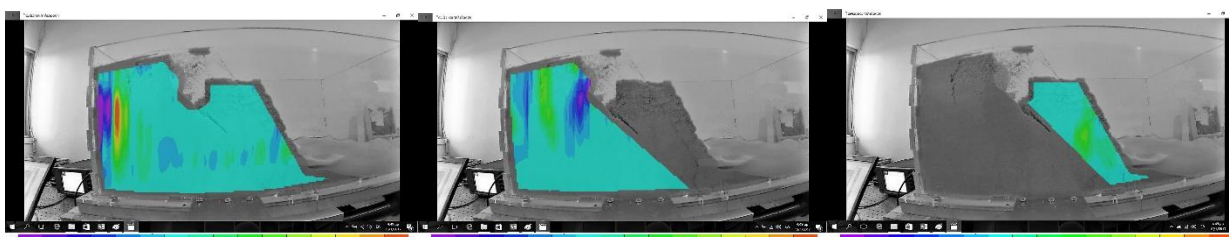
Εικόνα 153 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 153 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B', C1 and C2 analysis respectively

Στη Γ1 ανάλυση δεν παρατηρούνται οι κατακόρυφες παραμορφώσεις της Β' ανάλυσης. Αποτυπώνονται όμως οι θλιπτικές τάσεις στα κατώτερα και κατώτατα εδαφικά στρώματα του πρανούς. Στο μετατοπιζόμενο μέρος με τη Γ2 ανάλυση καταγράφονται έντονες παραμορφώσεις λόγω της μετατόπισης.



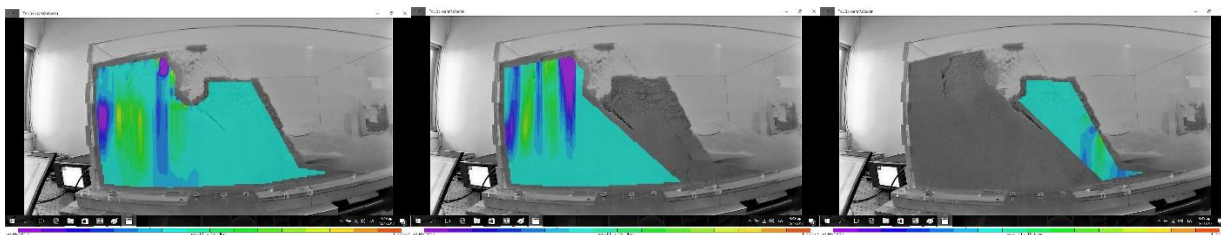
Εικόνα 154 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 154 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B', C1 and C2 analysis respectively

Παρατηρούνται και εδώ στη Γ1 οι παραμορφώσεις κατακόρυφα όπως και στη Β' αλλά οι τιμές τους είναι μικρότερες. Παρατηρείται επίσης έντονη μικρής έκτασης τροπή στο άνω όριο του πρανούς. Στην Γ2 δεν καταγράφεται καμία τροπή, ενώ στη Β' καταγράφονται και σε αυτό το μέρος.



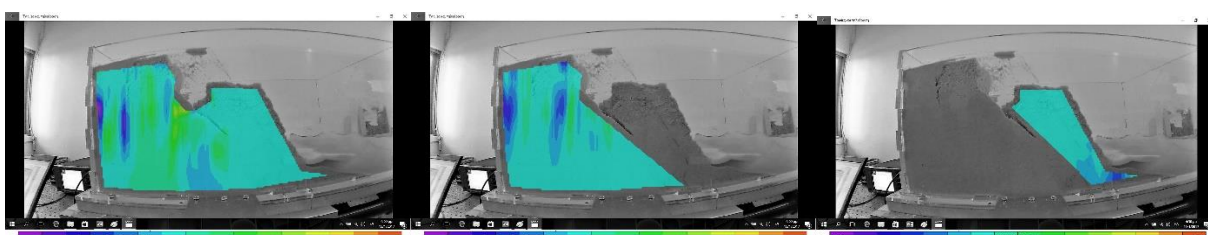
Εικόνα 155 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 155 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B', C1 and C2 analysis respectively

Παρατηρούνται και εδώ στη Γ1 οι παραμορφώσεις κατακόρυφα όπως και στη Β' αλλά οι τιμές τους είναι μικρότερες. Στη Γ2 ανάλυση παρατηρούνται διάσπαρτες αρνητικές και θετικές χαμηλής όμως τιμής παραμορφώσεις.



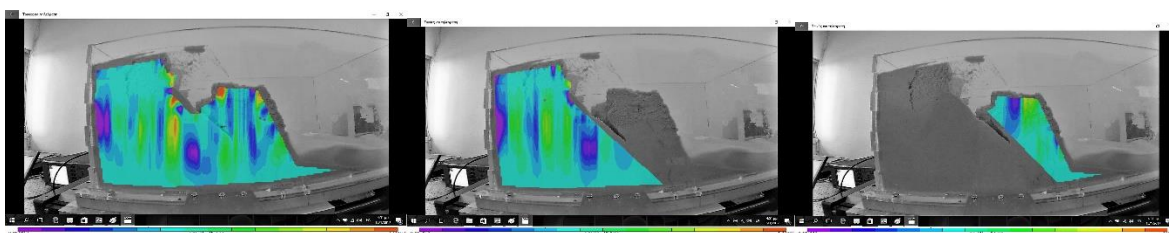
Εικόνα 156 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 156 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B', C1 and C2 analysis respectively

Στη Γ1 ανάλυση παρατηρούνται μεγάλης τιμής κατακόρυφες παραμορφώσεις που ξεκινούν από την επιφάνεια. Στη Γ2 βλέπουμε μόνο στο κάτω μέρος εφελκυστικές και θλιπτικές παραμορφώσεις λόγω της μετατόπισης και εναπόθεσης εδαφικού υλικού στην περιοχή.



Εικόνα 157 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 157 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B', C1 and C2 analysis respectively

Στη Γ1 ανάλυση παρατηρούμε μικρές και αχνές παραμορφώσεις, δεν αποτυπώνεται όμως η συμπίεση στον πυθμένα όπως φαίνεται αν και αχνά στη Β' ανάλυση. Στη Γ2 βλέπουμε μόνο στο κάτω μέρος θλιπτικές παραμορφώσεις λόγω της μετατόπισης και εναπόθεσης εδαφικού υλικού στην περιοχή.



Εικόνα 158 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β', Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 158 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B', C1 and C2 analysis respectively

Σε αυτό το στάδιο παρατηρούνται πολλές ομοιότητες ανάμεσα στις 2 μεθόδους όπως αποτυπώνονται από τα αποτελέσματα της διατμητικής τροπής.

➤ Συμπεράσματα

Μετά από αυτή την συγκριτική παράθεση των αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών τρόπων προσέγγισης της ανάλυσης με τη μέθοδο Vic2D εύλογα συμπεραίνουμε ότι η ανάλυση με πολλαπλές εικόνες αναφοράς ξεχωριστά στο μέρος του πρανούς που μετατοπίζεται και αυτού που παραμένει σταθερό, δίνει περισσότερες πληροφορίες για τη συμπεριφορά του πρανούς έναντι της ανάλυσης ολόκληρου του πρανούς με πολλαπλές εικόνες αναφοράς. Μια ακόμη παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι στη Γ' ανάλυση μειώνονται αισθητά η κατακόρυφη αποτύπωση των παραμορφώσεων.

Σε αυτό το πείραμα, παρατηρείται εμφάνιση του φαινομένου της τοπικής συγκέντρωσης τροπών. Λόγω της παρουσίας νερού και των κυματικών σχηματισμών που δημιουργούνται κατά τη φόρτιση, ο μηχανισμός αστοχίας προκαλεί επίπεδη αστοχία στο πρανές, και στο φαινόμενο της τοπικής συγκέντρωσης τροπών, αυτή εμφανίζεται σε μία διάσταση λιγότερη από ότι η θραύση. Επομένως εφόσον εδώ η θραύση είναι δισδιάστατη, η συγκέντρωση τροπών αναμένεται μίας διάστασης, όπως δηλαδή αποτυπώνονται οι τροπές στη Β' μέθοδο ανάλυσης. Έτσι στις αναλύσεις με το λογισμικό Vic2D των πειραμάτων που ακολουθούν επιλέγεται η διαδικασία της συσχέτισης εικόνων, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς πάντοτε την προηγούμενη εικόνα από την εικόνα που εξετάζεται και ως παραμορφωμένη την εικόνα που εξετάζεται, για ολόκληρο το πρανές.

❖ Σύγκριση Πειράματος 5^{ου} και Πειράματος 6^{ου}

Χάρη στην πανομοιότυπη γεωμετρία των μοντέλων των δύο πειραμάτων, δίνεται η δυνατότητα να γίνει διερεύνηση στην επιρροή του νερού στα αποτελέσματα των υπολογιστικών και πειραματικών αναλύσεων. Στον Πίνακα 13 βλέπουμε συγκεντρωτικά τα στοιχεία των δύο πειραμάτων ώστε να διευκολυνθεί η μεταξύ τους σύγκριση.

Πίνακας 12 Σύγκριση Πειράματος 5ου και Πειράματος 3ου

Table 12 Comparison of Experiment 2 and Experiment 3

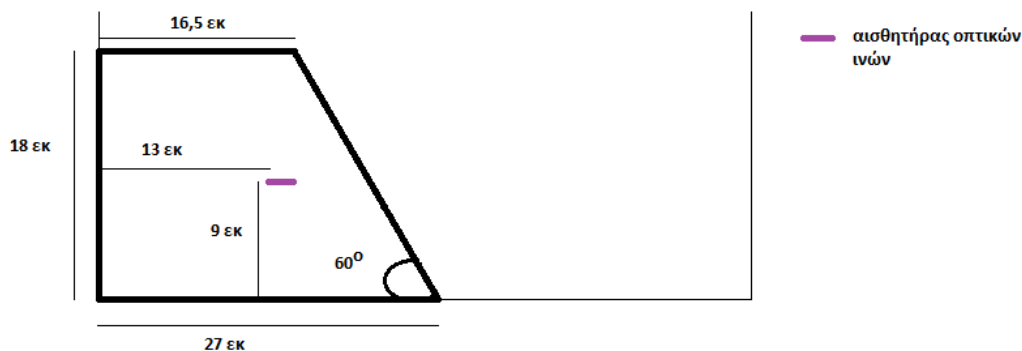
Αριθμός Πειράματος	5°	6°
Επιτάχυνση	3,6 m/s ²	2,85 m/s ²
Γεωμετρία Τραπεζίου	B=26cm β=15cm υ=19cm φ=60°	B=26cm β=15cm υ=19cm φ=60°
Στάθμη Νερού	0 cm (χωρίς νερό)	4 cm
Τροπές Ελεύθερου Αισθητήρα Οπτικών Ινών	- (χωρίς αισθητήρα)	450 μstrain
F.S. κατά Bishop	0,684	0,753
F.S. κατά Janbu	0,598	0,665
S.R.F. κατά Phase	0,33	0,43
Μηχανισμός Αστοχίας	Μη Κυκλική Περιστροφική Ολίσθηση	Ανατροπή Τεμαχών Λόγω Υποσκαφής

Στα δύο πειραματικά μοντέλα η μόνη διαφορά είναι η παρουσία νερού στο 6° πείραμα όπως και η απουσία αισθητήρα οπτικών ινών στο 5° πείραμα, ενώ τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η θέση των υπόλοιπων μέσων καταγραφής είναι ακριβώς ίδια. Αρχικά παρατηρούμε πως παρά την μεγαλύτερη επιτάχυνση στην οποία επιβάλλεται το μοντέλο του 5^{ου} πειράματος όσον αφορά τα υπολογιστικά μοντέλα με το λογισμικό Slide και Phase, στο 6° πείραμα οι συντελεστές είναι ελαφρώς υψηλότεροι. Συνεπώς το νερό επιδρά αρνητικά στους συντελεστές ασφαλείας, απομειώνοντας τη τιμή τους. Η επιρροή του νερού στη μείωση της αντοχής του ήταν αναμενόμενη αφού η άνοδος της στάθμης του νερού συνεπάγεται αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και αντίστοιχη μείωση της διατμητικής -αντοχής του κορεσμένου υλικού του πρανούς. Επιπροσθέτως, οφείλουμε να τονίσουμε πως η παρουσία νερού επιδρά στο μηχανισμό αστοχίας. Σαφώς και τα δύο μοντέλα αστοχούν με την επιβολή της επιτάχυνσης από τη σεισμική τράπεζα. Το ξηρό πρανές όμως αστοχεί σε μη κυκλική περιστροφική ολίσθηση εδάφους, ενώ το ημιβυθισμένο πρανές αστοχεί με ανατροπή τεμαχών εδάφους λόγω υποσκαφής στον πόδα του πρανούς.

6.9 Πείραμα 7°

➤ Περιγραφή

Σε αυτό το πείραμα πραγματοποιήθηκαν 5 δοκιμές με διαφορετική επιτάχυνση έως ότου αστόχησε το πρανές. Σκοπός του είναι η διερεύνηση των τροπών και των παραμορφώσεων που προκύπτουν με όλες τις μεθόδους ανάλυσης. Ειδικότερα περιγράφονται επίσης τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, και η θέση των μετρητικών διατάξεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταγραφών και της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Slide, του Phase και του Vic2D.



Εικόνα 159 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 7,

Figure 159 Side View of Experimental Model 7

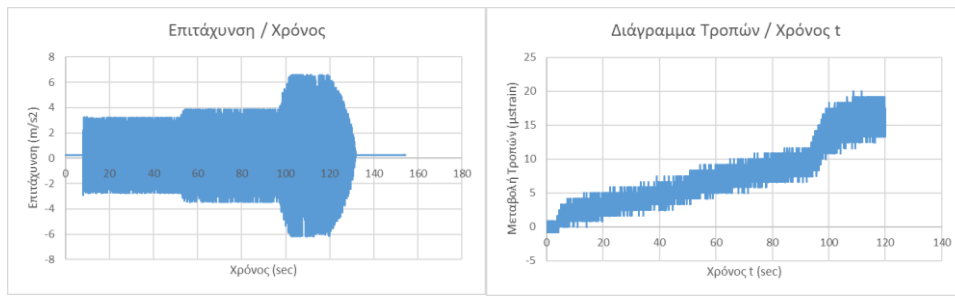
Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε ξηρό πρανές. Το μοντέλο αυτό κατασκευάστηκε με βρεγμένη άμμο και το αφήσαμε να στεγνώσει πριν την διεξαγωγή του πειράματος. Οι διαστάσεις είναι όπως φαίνονται στην εικόνα. Στο μοντέλο τοποθετείται αισθητήρας καταγραφής επιτάχυνσης στην αριστερή παρειά του κουτιού. Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιείται η κάμερα καταγραφής ψηφιακών φωτογραφιών.

Μετρήσαμε με Penetrometro: για $d_1 = 20\text{mm}$ και $d_2 = 25\text{mm}$, έχω αντίστοιχα $q_1 = 0,85\text{ kg/cm}^2$ και $q_2 = 1,05\text{ kg/cm}^2$ και $Q_2 = 1,9\text{ kg}$ ώστε να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τη συνοχή του εδάφους μας. Στην αριστερή παρειά του κουτιού, ακριβώς στο μέσο της επιφάνειας, τοποθετούμε τον QCN επιταχυνσιογράφο μας με τον άξονα Z στην κατεύθυνση της κίνησης και τον Y => .

6.9.1 Δοκιμή 1η

➤ Αποτελέσματα Καταγραφής Αισθητήρων

Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη B9 με συχνότητα 4 ρεύμα στο 1,5 και θέση σεισμικής τράπεζας Ampl. =>. Αναμενόμενη επιτάχυνση $3,6\text{ m/s}^2$ όση δηλαδή και στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας III. Το μοντέλο δεν αστοχεί. Ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα μέχρις ότου φτάσαμε την επιτάχυνση στα $6,5\text{ m/s}^2$ αλλά και πάλι το μοντέλο δεν αστόχησε. Οι καταγραφές του αισθητήρα οπτικών ινών παρουσιάζονται στην Εικόνα, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.

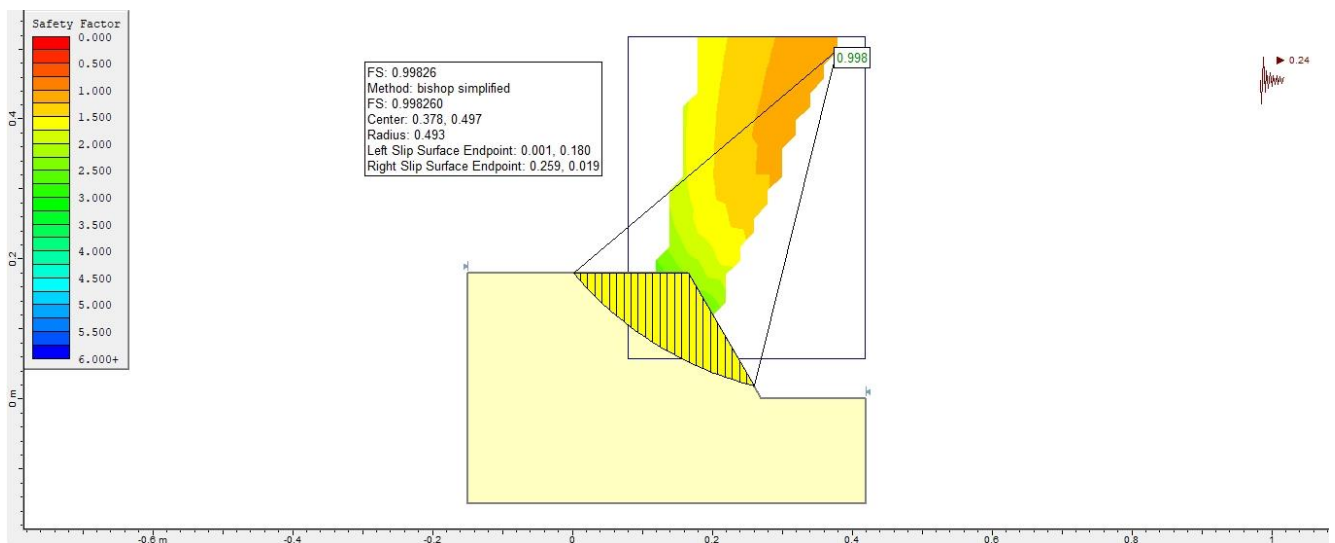


Εικόνα 160 Διαγράμματα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών

Figure 160 Acceleration Chart and Strain Modification Charts

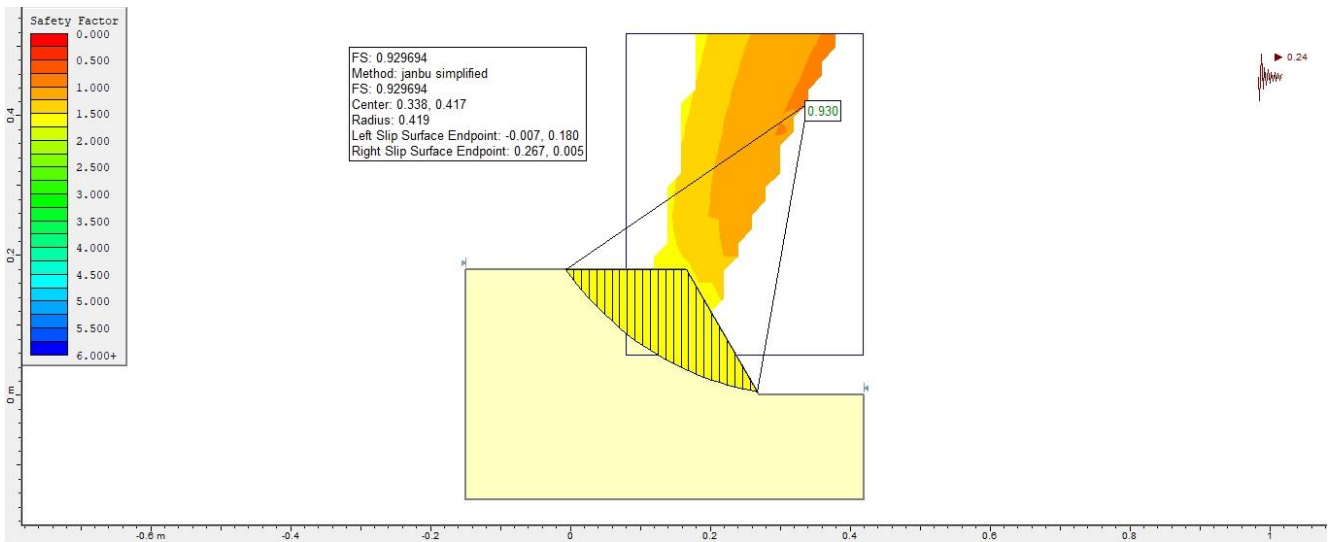
Το μοντέλο ενώ δεν αστοχεί οπτικά με μετακινήσεις υλικού, δέχεται σημαντικές παραμορφώσεις εσωτερικά. Στο παραπάνω διάγραμμα παρακολουθούμε την πορεία των τροπών και τον ρυθμό αύξησής τους με το χρόνο, αλλά και την απότομη αύξηση αυτού του ρυθμού σε κάθε μεταβολή της επιτάχυνσης.

➤ **Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide και Phase**



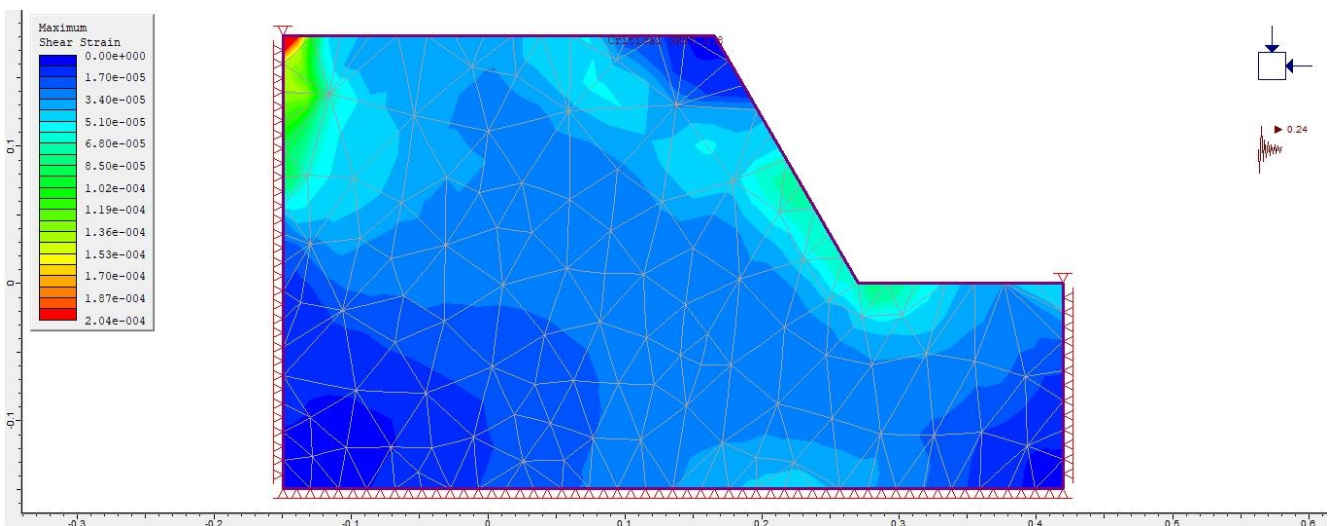
Εικόνα 161 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,998$

Figure 161 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0.998$



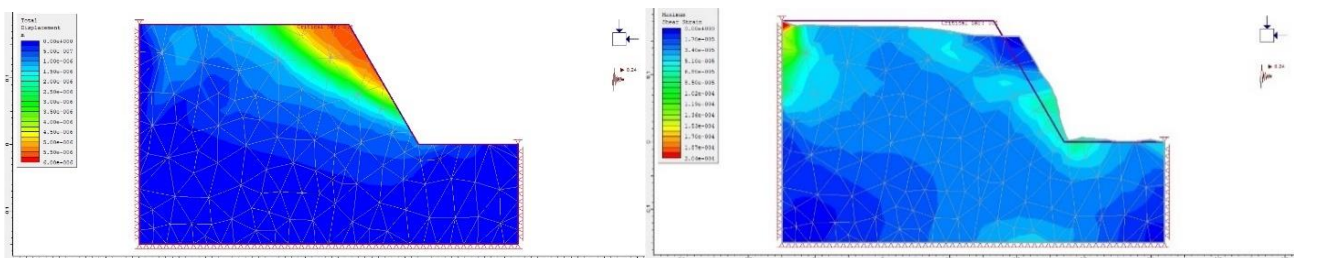
Εικόνα 162 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,930$

Figure 162 Analysis by the Janbu method - Safety factor $FS = 0.930$



Εικόνα 163 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,8

Figure 163 Maximum shear Strain by Phase - Critical SRF = 0.8



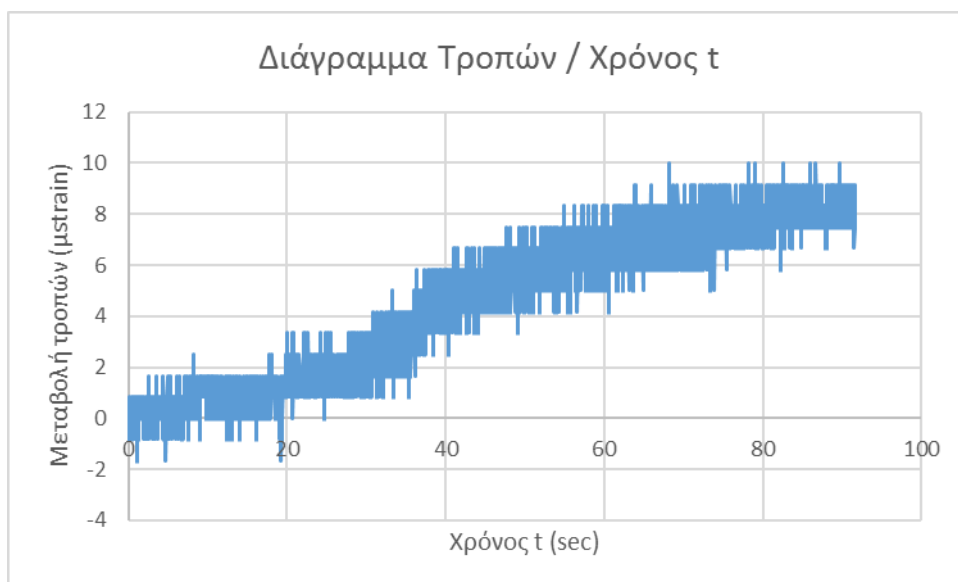
Εικόνα 164 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,8

Figure 164 Total displacement by Phase - Critical SRF = 0,8

6.9.2 Δοκιμή 2η

➤ **Αποτελέσματα Καταγραφής Αισθητήρων**

Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη E5 με συχνότητα 10 ρεύμα στο 0,5 και θέση σεισμικής τράπεζας Ampl. Προς τα επάνω (δηλαδή σε θέση ηρεμίας). Ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα μέχρις ότου κάναμε μια πλήρη περιστροφή και πάλι το μοντέλο δεν αστόχησε. Αναμενόμενη επιτάχυνση $2,4 \text{ m/s}^2$ όση δηλαδή και στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II. Το μοντέλο δεν αστοχεί. Οι καταγραφές του αισθητήρα οπτικών ινών παρουσιάζονται στην Εικόνα, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.

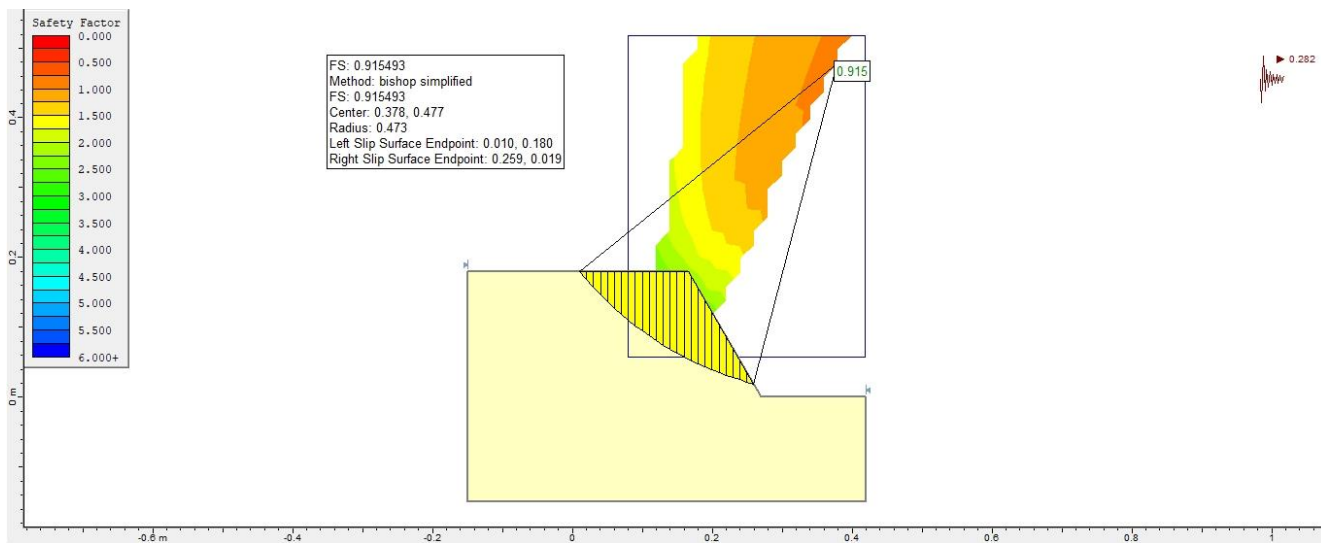


Εικόνα 165 Διάγραμμα Τροπών/Χρόνου,

Figure 165 Strain / Time Chart

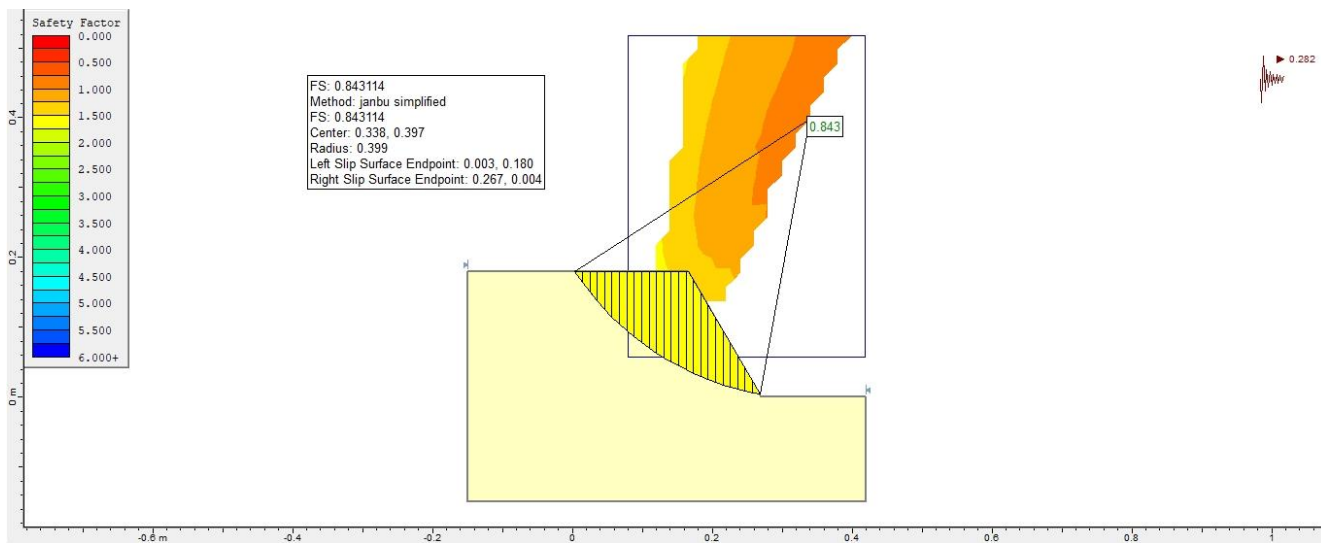
Ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα από θέση ηρεμίας μέχρις ότου κάναμε μια πλήρη περιστροφή και πάλι το μοντέλο δεν αστόχησε. Η μέγιστη επιτάχυνση που επιτεύχθηκε ήταν $2,82 \text{ m/s}^2$, αλλά δεν ήταν αρκετή να αστοχήσει το πρανές. Σημειώθηκαν μόνο κάποιες μικρές παραμορφώσεις εσωτερικά του πρανούς από τον αισθητήρα οπτικών ινών.

➤ Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide και Phase



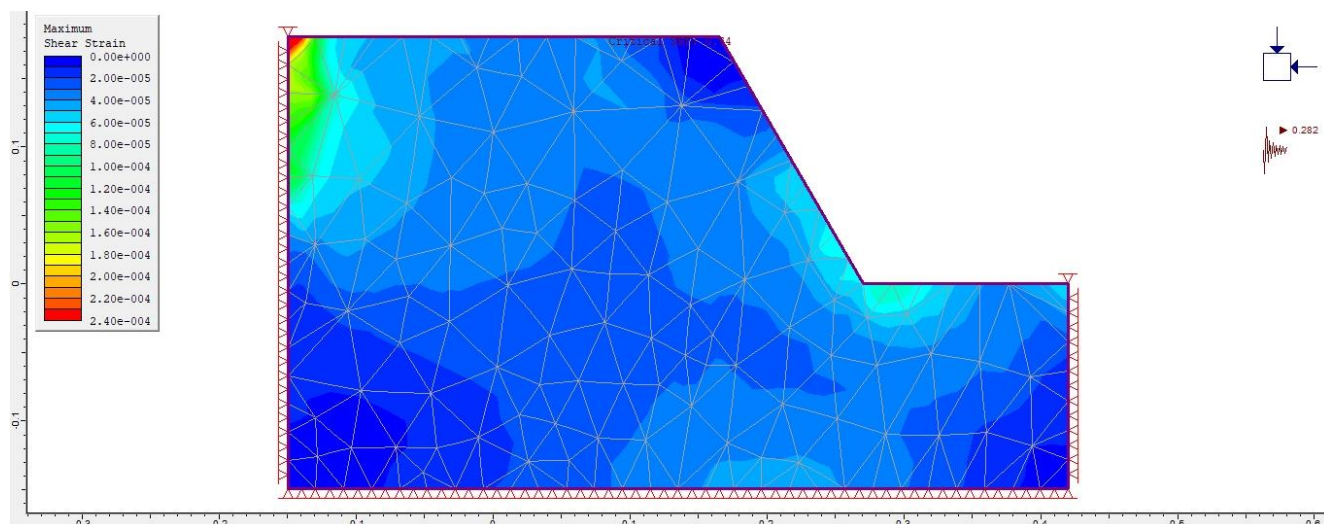
Εικόνα 166 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,915$

Figure 166 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0,915$



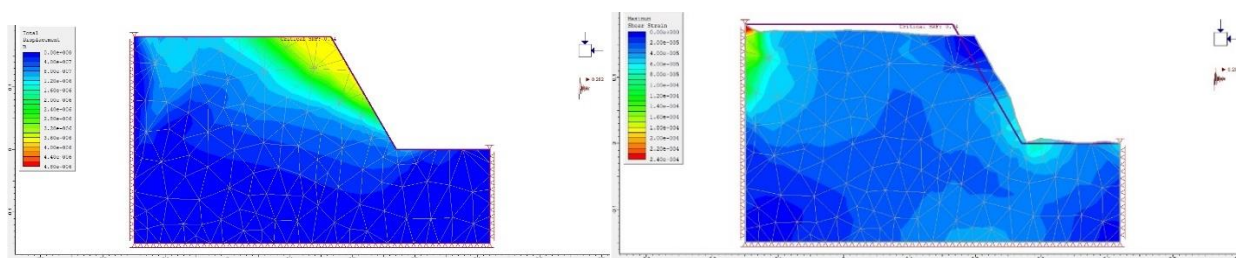
Εικόνα 167 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,843$

Figure 167 Analysis by Janbu method - Safety factor $FS = 0.843$



Εικόνα 168 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,74

Figure 168 Maximum shear Strain by Phase - Critical SRF = 0.74



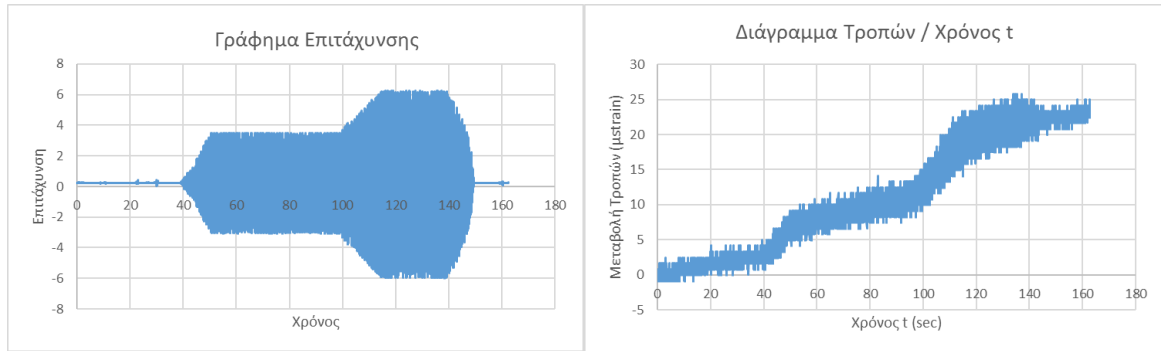
Εικόνα 169 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,74

Figure 169 Total displacement by Phase - Critical SRF = 0,74

6.9.3 Δοκιμή 3^η

➤ Αποτελέσματα Καταγραφής Αισθητήρων

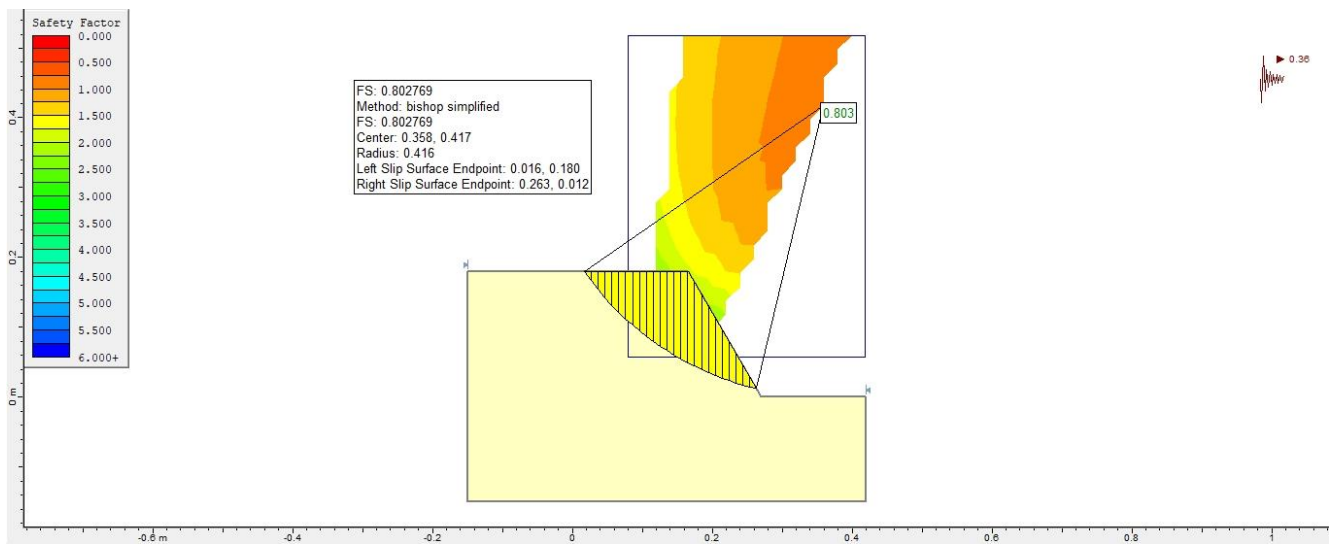
Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη Γ6 με συχνότητα 6 ρεύμα στο 0,9 και θέση σεισμικής τράπεζας Ampl. Προς τα κάτω. Ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα από θέση ηρεμίας μέχρις ότου κάναμε μια πλήρη περιστροφή και πάλι το μοντέλο δεν αστόχησε. Αναμενόμενη επιτάχυνση $3,6 \text{ m/s}^2$ όση δηλαδή και στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας III. Το μοντέλο δεν αστοχεί. Οι καταγραφές του αισθητήρα οπτικών ινών παρουσιάζονται στην Εικόνα, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.



Εικόνα 170 Διαγράμματα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών

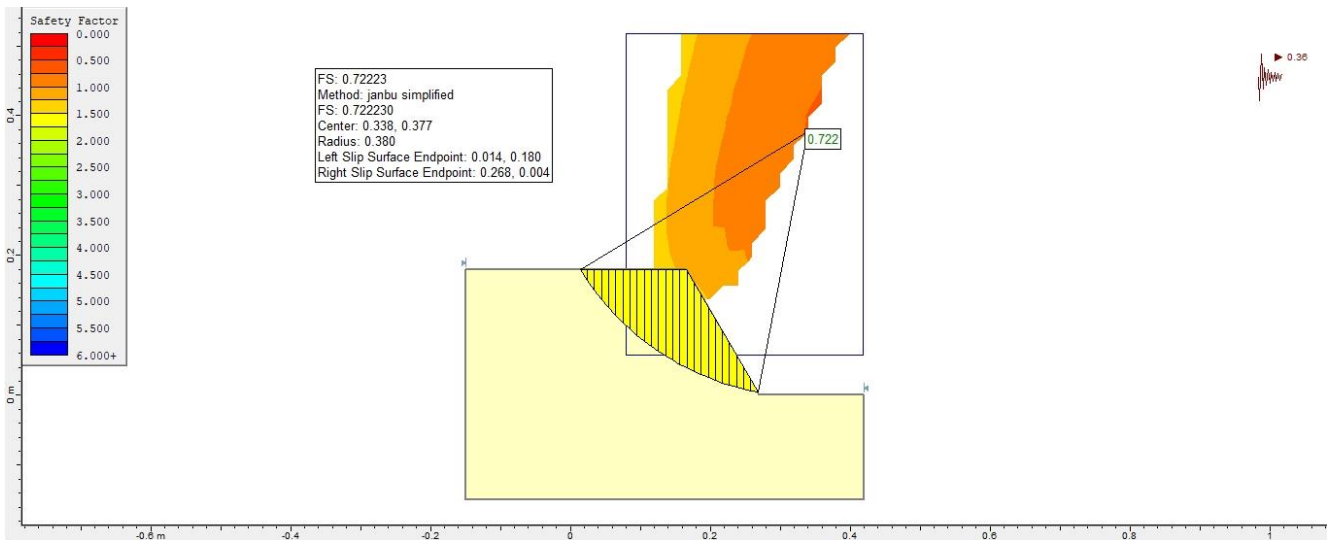
Figure 170 Acceleration Charts and Strain Modification Charts

➤ **Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide και Phase**



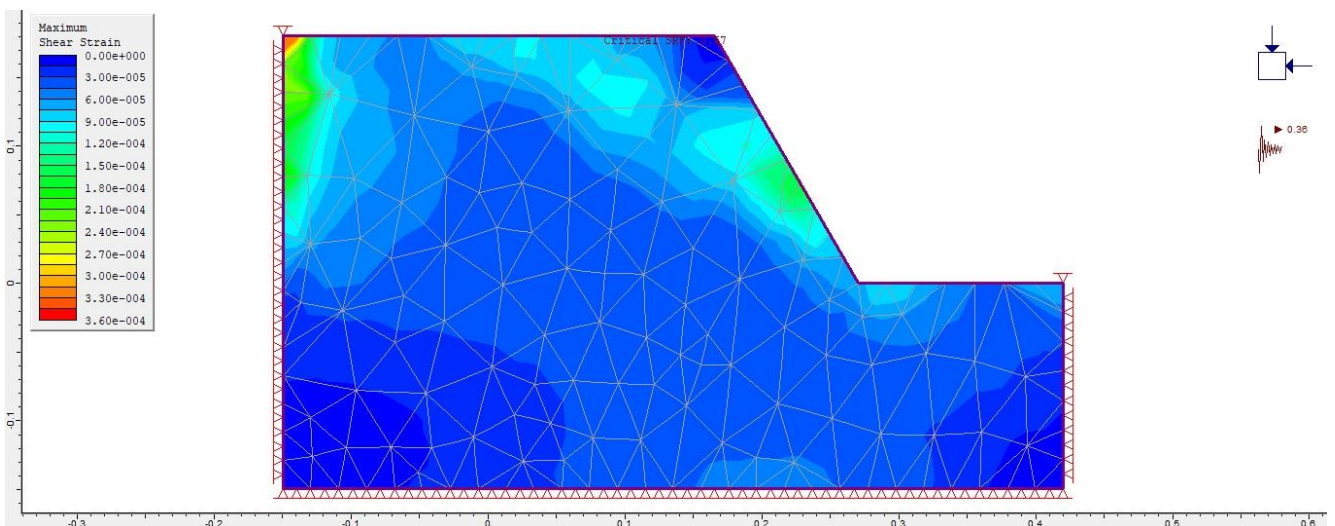
Εικόνα 171 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,803$

Figure 171 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0.803$



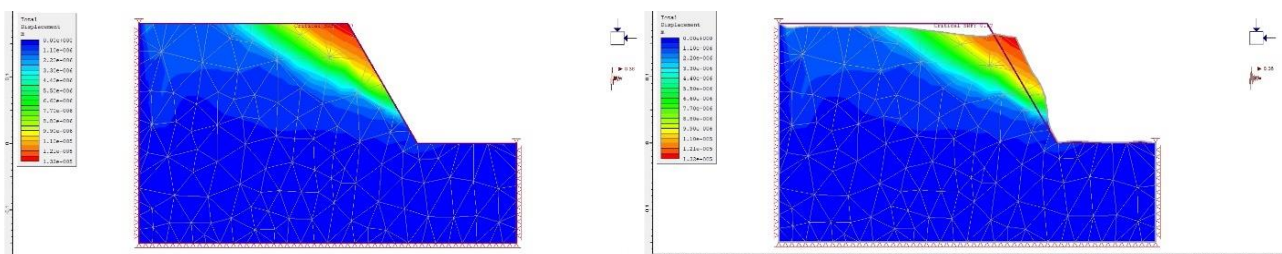
Εικόνα 172 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,722$

Figure 172 Analysis by the Janbu method - Safety factor $FS = 0.722$



Εικόνα 173 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,57

Figure 173 Maximum shear Strain by Phase - Critical SRF = 0,57

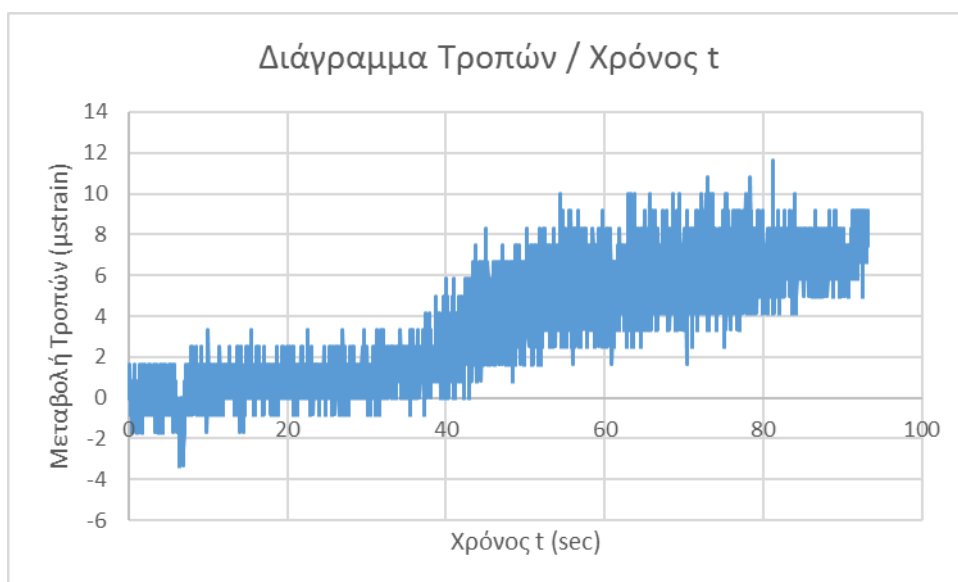


Εικόνα 174 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,57

Figure 174 Total displacement by Phase - Critical SRF = 0,57

6.4 Δοκιμή 4^η➤ **Αποτελέσματα Καταγραφής Αισθητήρων**

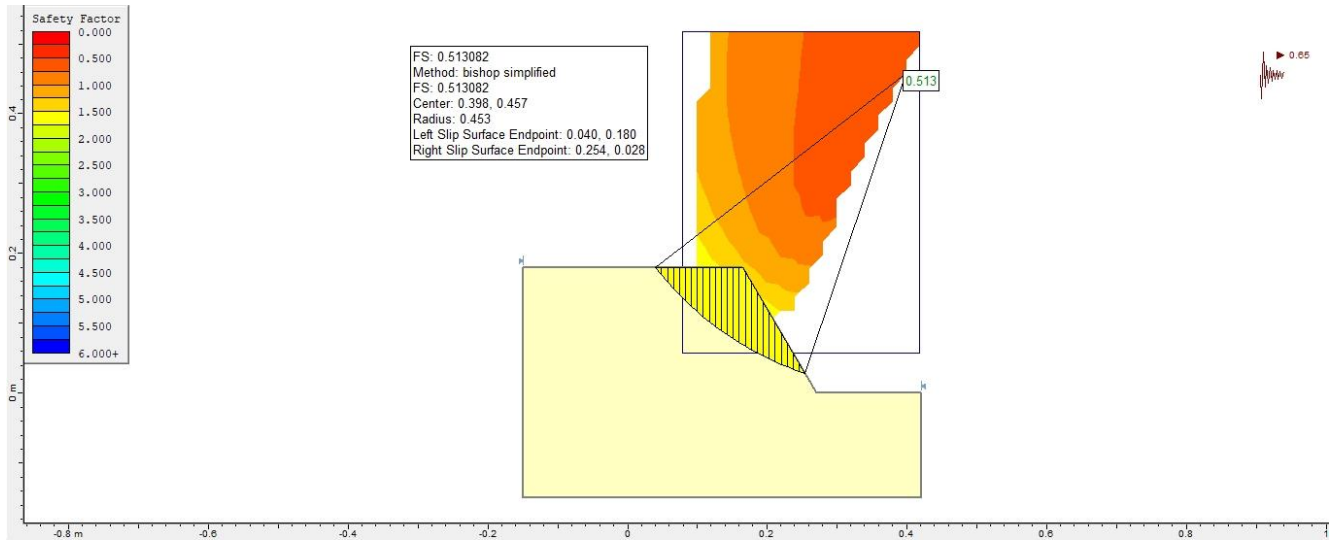
Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη E5 με συχνότητα 8 ρεύμα στο 0,7 και θέση σεισμικής τράπεζας Ampl. Προς τα αριστερά <=. Ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα από θέση ηρεμίας μέχρις ότου να φτάσουμε σε θέση <= και πάλι το μοντέλο δεν αστόχησε. Αναμενόμενη επιτάχυνση $3,6 \text{ m/s}^2$ όση δηλαδή και στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας III. Το μοντέλο δεν αστοχεί. Παρατηρούμε όμως την μεταβολή των τροπών που επιβάλλονται από τη σεισμική επιβάρυνση, όπως αυτές καταγράφονται από τον αισθητήρα οπτικών ινών. Οι καταγραφές του αισθητήρα οπτικών ινών παρουσιάζονται στην Εικόνα 175, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1



Εικόνα 175 Διάγραμμα Τροπών/Χρόνου,

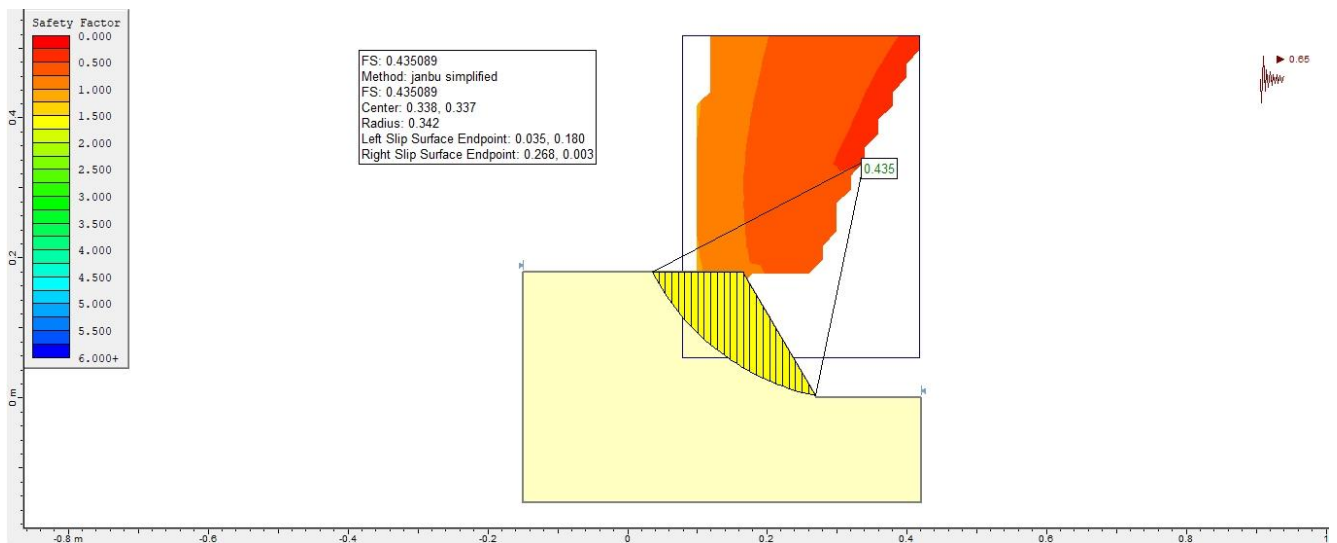
Figure 175 Strain / Time Chart

➤ **Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide και Phase**



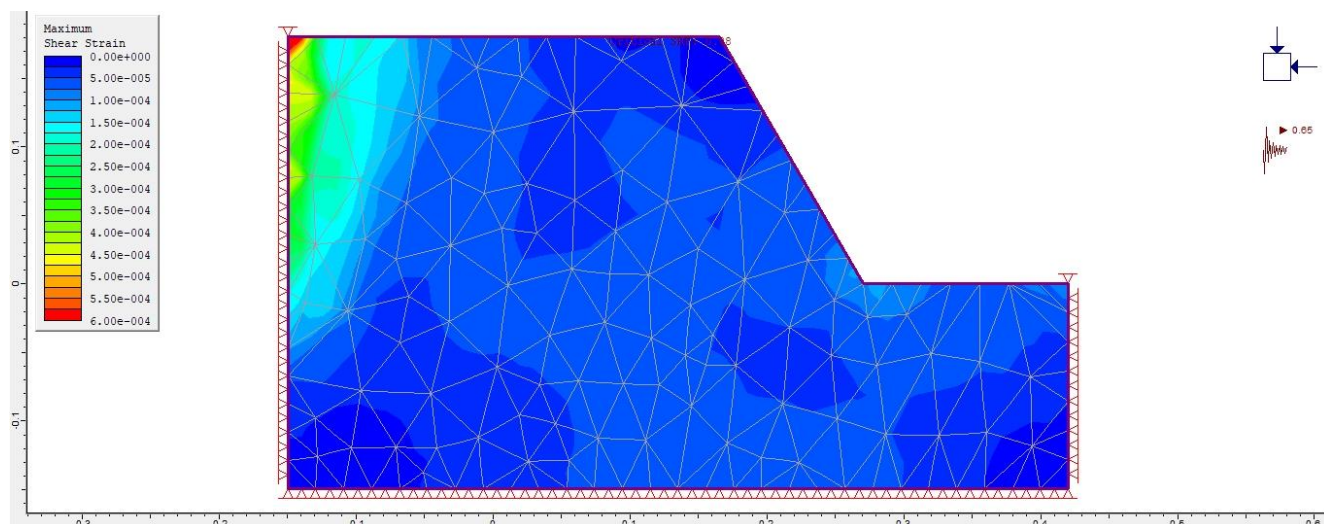
Εικόνα 176 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,513$

Figure 176 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0.513$



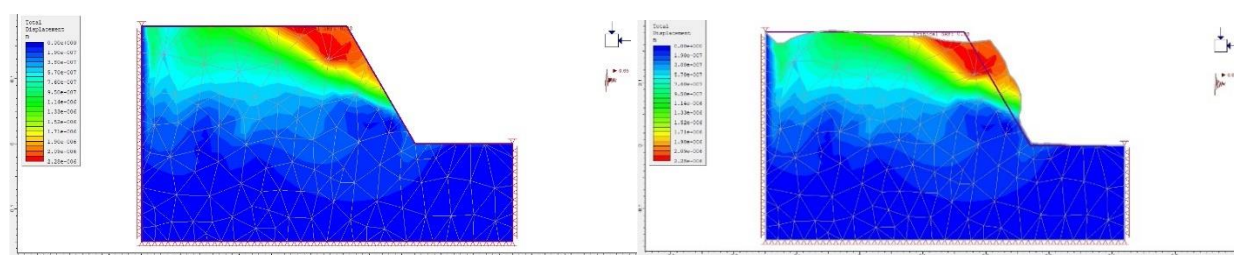
Εικόνα 177 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,435$

Figure 177 Analysis by Janbu method - Safety factor $FS = 0.435$



Εικόνα 178 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,38

Figure 178 Maximum shear Strain by Phase - Critical SRF = 0,38



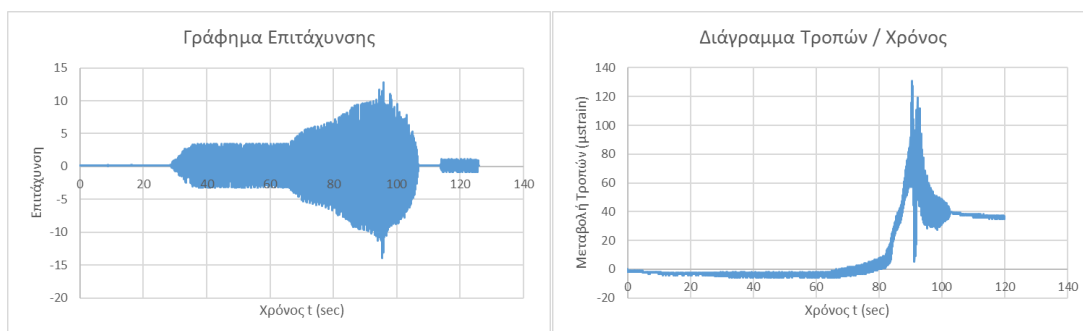
Εικόνα 179 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,38

Figure 179 Total displacement by Phase - Critical SRF = 0,38

6.9.5 Δοκιμή 5^η

➤ Αποτελέσματα Καταγραφής Αισθητήρων

Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη Β9 με συχνότητα 4 ρεύμα στο 1,5 και θέση σεισμικής τράπεζας Ampl. =>. Αναμενόμενη επιτάχυνση $3,6 \text{ m/s}^2$ όση δηλαδή και στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας III. Το μοντέλο δεν αστοχεί. Ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα μέχρις ότου φτάσαμε την επιτάχυνση στα 10 m/s^2 και το μοντέλο αστοχεί. Οι καταγραφές του αισθητήρα οπτικών ινών παρουσιάζονται στην Εικόνα 180, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.

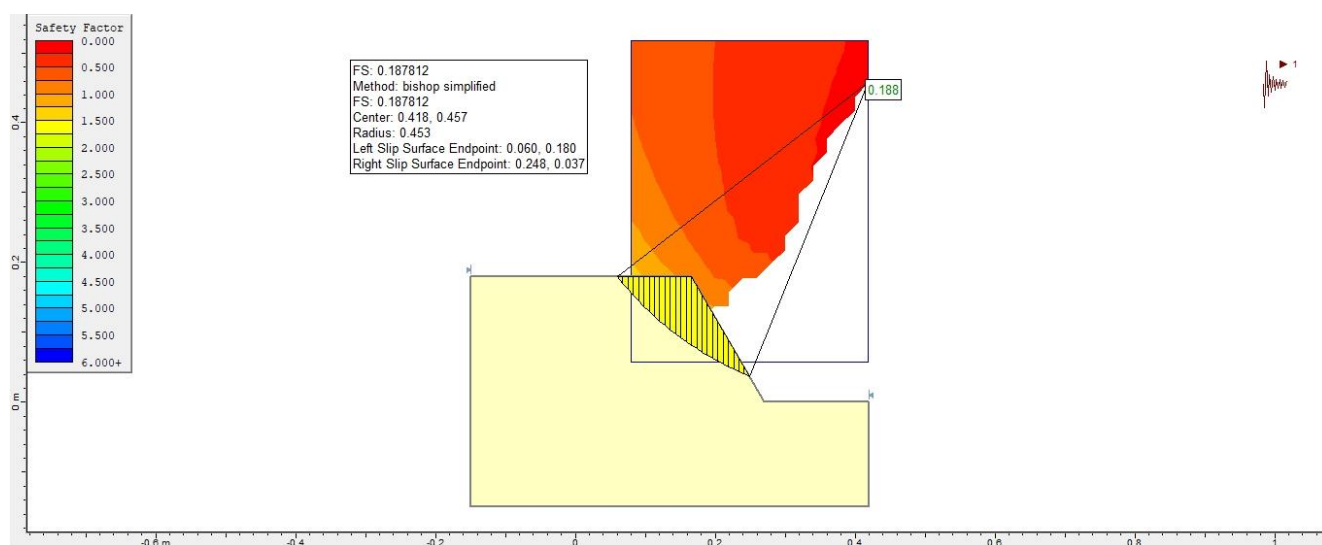


Εικόνα 180 Διαγράμματα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών

Figure 180 Acceleration and Strain Modification Charts

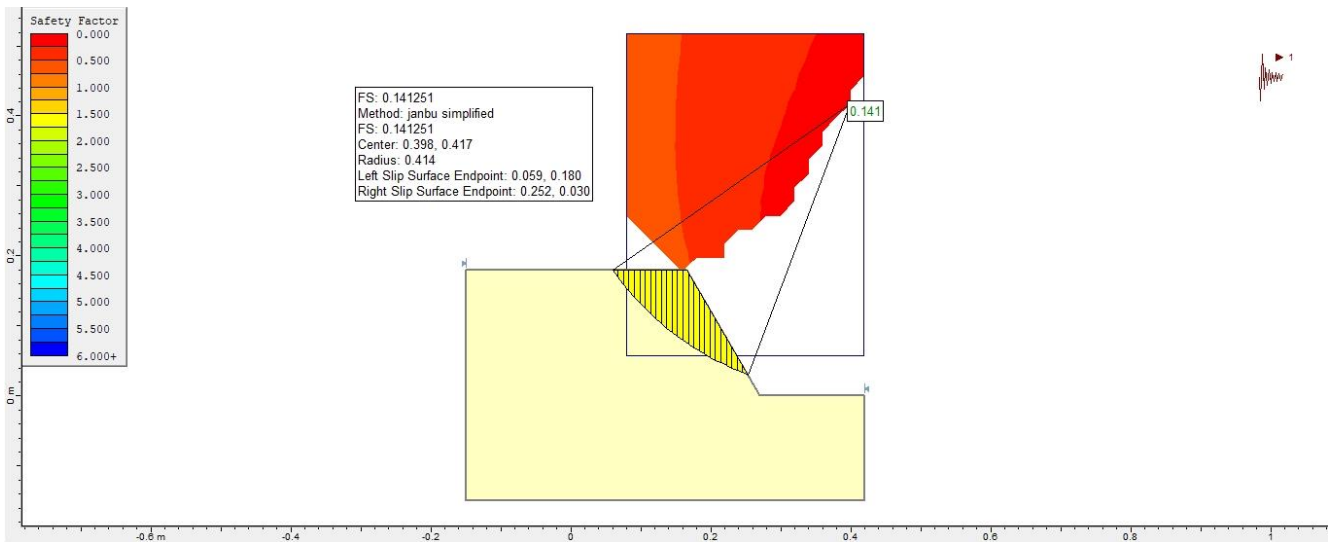
Από τα δεδομένα καταγραφών του QCN (επιτάχυνση) και του αισθητήρα οπτικών ινών (μήκος κύματος που μετατρέπουμε σε τροπές) βλέπουμε τη συσχέτιση επιτάχυνσης και τροπών. Για 40 δευτερόλεπτα σταθερής επιτάχυνσης παρατηρούμε τη μικρή άνοδο στο ρυθμό μεταβολής των τροπών. Η αύξηση της επιτάχυνσης προκαλεί απότομη αύξηση και στο ρυθμό μεταβολής τροπών μέχρι να φτάσει το πρηνές σε αστοχία.

➤ Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide και Phase



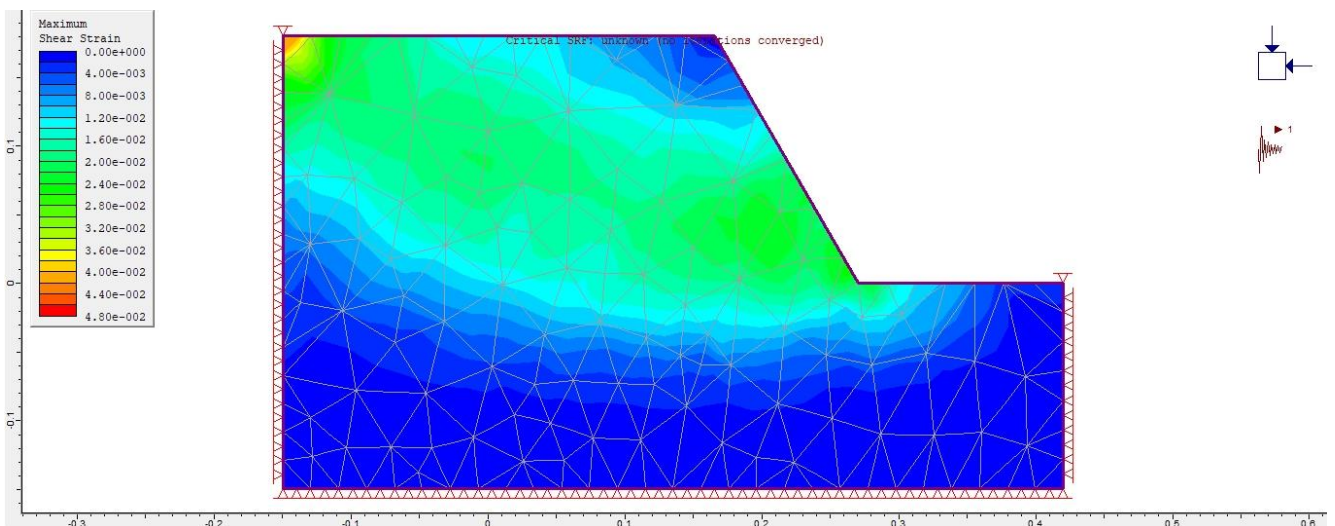
Εικόνα 181 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,188

Figure 181 Analysis by the Bishop method - Safety factor FS = 0.188



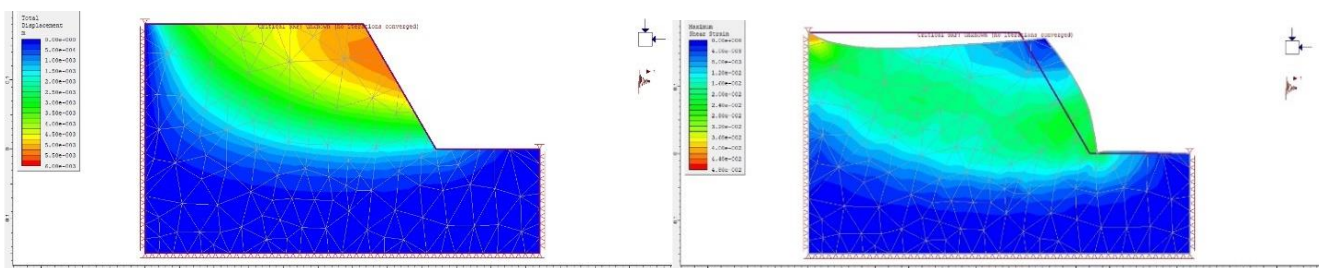
Εικόνα 182 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,141$

Figure 182 Analysis by Janbu method - Safety factor $FS = 0.141$



Εικόνα 183 Μέγιστες Διαμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = -

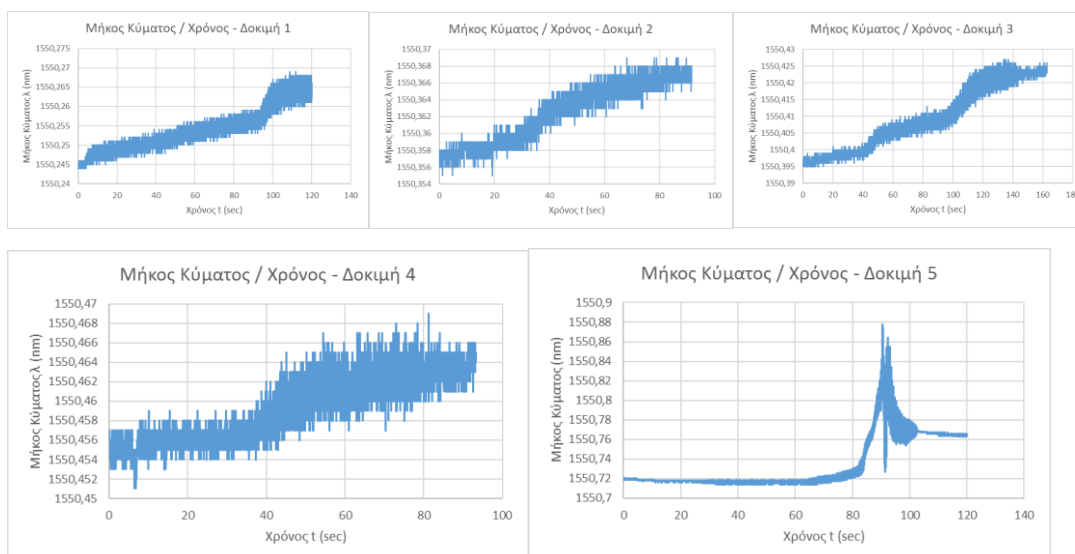
Figure 183 Maximum shear Strain by Phase - Critical SRF = -



Εικόνα 184 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = -

Figure 184 Total displacement by Phase - Critical SRF = -

❖ **Συνολικά για το πείραμα.**



Εικόνα 185 Το σύνολο των Διαγραμμάτων Μήκος Κύματος προς χρόνο για το Πείραμα 7

Figure 185 Total Charts of Wavelengths to Time for the Experiment 7

Όπως βλέπουμε και στα παραπάνω διαγράμματα με το μήκος κύματος προς το χρόνο, στο τέλος κάθε δοκιμής η τροπή παραμένει εσωτερικά του πρανούς και η κάθε επόμενη δοκιμή ξεκινάει σε ήδη παραμορφωμένο πρανές. Το σημείο αναφοράς του μήκους κύματος σε κάθε δοκιμή είναι περίπου το μήκος κύματος που έδωσε ο αισθητήρας οπτικών ινών στο τέλος της αμέσως προηγούμενης δοκιμής.

➤ **Μηχανισμός Αστοχίας Πρανούς**

Το πρανές αυτού του πειράματος είναι χαμηλού ύψους με απότομη κεκλιμένη επιφάνεια. Επίσης έχει σχεδόν μηδενική συνοχή, και συνεπώς αποτελείται από μη συνεκτικό έδαφος. Η αστοχία που παρατηρείται κατά τη φόρτιση του είναι μορφής, κυκλικής περιστροφικής ολίσθησης. Η ακτίνα του επιπέδου αστοχίας είναι πολύ μεγάλη, το οποίο πιθανώς να οφείλεται στην αναβάθμιση του σεισμικού κινδύνου. Ανεβάσαμε την ένταση της σεισμικής τράπεζας δίνοντας έτσι πολύ μεγαλύτερη επιτάχυνση στο πρανές.



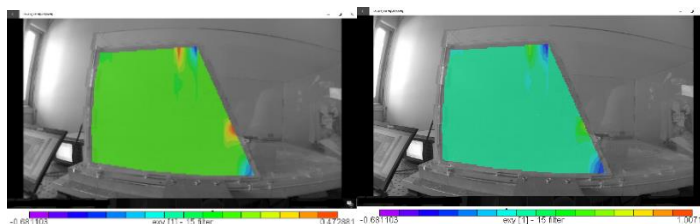
Εικόνα 186 Αρχική κατάσταση πρανούς προ φόρτισης
Figure 186 Initial Pre-Load State of Slope



Εικόνα 187 Μηχανισμός Αστοχίας Πρανούς
Figure 187 Slope Failure Mechanism

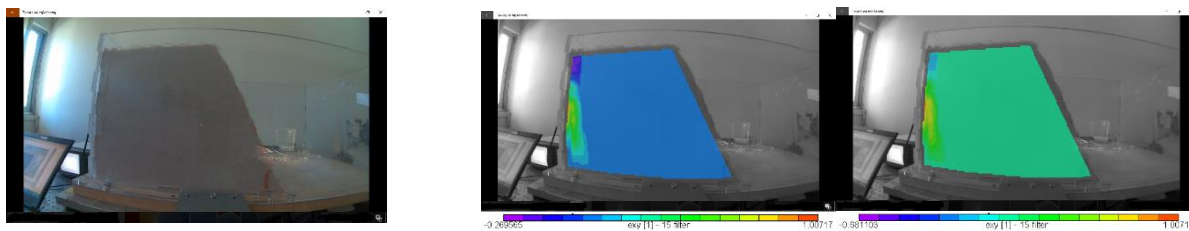
➤ **Υπολογισμός τροπών με την εφαρμογή της μεθόδου Vic2D**

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με την μέθοδο Vic2D. Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιούνται πολλαπλές εικόνες αναφοράς. Δηλαδή κάθε στάδιο ανάλυσης έχει τη δική του εικόνα αναφοράς που είναι το προηγούμενο στιγμιότυπο της φόρτισης σε ολόκληρο το πρανές. Η πρώτη σειρά εικόνων που θα δούμε παρακάτω, δείχνει το στιγμιότυπο στο οποίο έγινε η ανάλυση με Vic2D. Η δεύτερη σειρά εικόνων δείχνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης όπως προκύπτουν χωρίς επεξεργασία. Τέλος στη Τρίτη σειρά εικόνων, για τη διευκόλυνση της σύγκρισης έχουμε θέσει την ίδια χρωματική κλίμακα σε όλα τα αποτελέσματα ώστε να μπορούμε μακροσκοπικά να αντιληφθούμε εύκολα και γρήγορα τις διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα αποτελέσματα των διαφορετικών στιγμιότυπων. Σε αυτή τη σειρά εικόνων το ανοιχτό γαλαζοπράσινο αντιστοιχεί σε μηδενικές παραμορφώσεις. Τα ψυχρά χρώματα (μπλε μωβ) αντιστοιχούν σε αρνητικές παραμορφώσεις. Και τα θερμά χρώματα (κίτρινο, κόκκινο) σε θετικές παραμορφώσεις. Στη δεύτερη σειρά όμως εικόνων το χρωματικό εύρος διαφοροποιείται από στάδιο σε στάδιο όπως και η αντιστοίχιση των χρωμάτων σε αρνητικές ή θετικές παραμορφώσεις.



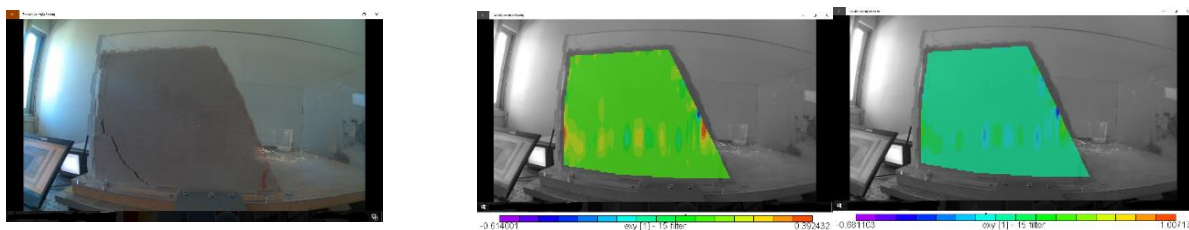
Εικόνα 188 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
Figure 188 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Παρατηρούνται πολύ μικρές παραμορφώσεις στην κορυφή και στην κεκλιμένη επιφάνεια του πρανούς.



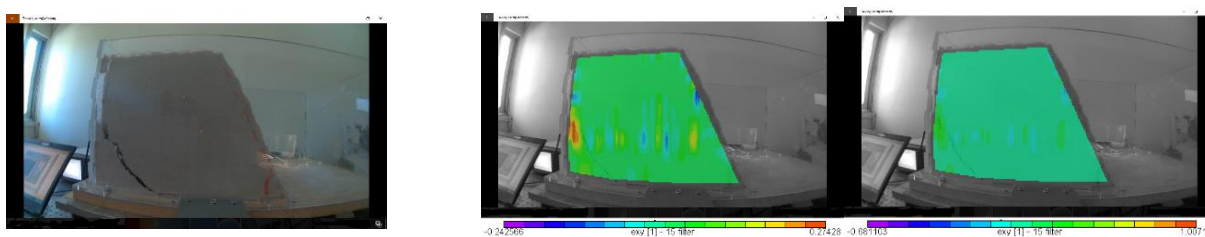
Εικόνα 189 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 189 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Στα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης αναγνωρίζεται εφελκυστική τροπή δεξιά του ορίου-θετική διατμητική τροπή, εκεί που σε επόμενο καρέ θα σημειωθεί εφελκυστική ρωγμή. Καθώς επίσης παρατηρείται μια ελαφριά συμπίεση στο όριο του πρανούς – αρνητική διατμητική τροπή.



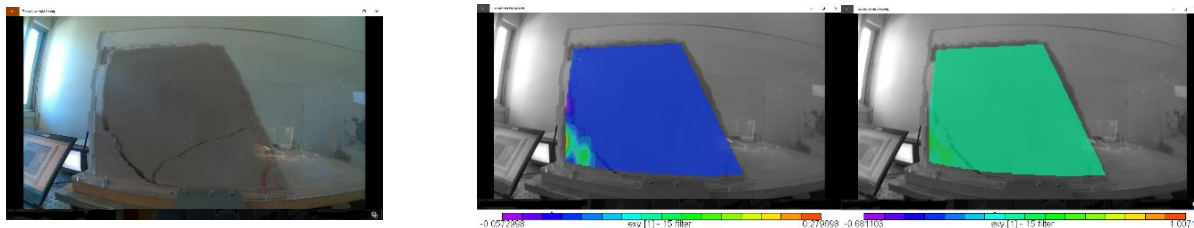
Εικόνα 190 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 190 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Σε αυτό το στιγμιότυπο έχουμε απεικόνιση κατακόρυφων τάσεων εφελκυστικών και θλιπτικών χαμηλών τιμών. Με πιο έντονη την εφελκυστική τροπή στο σημείο της ρωγμής αριστερά του πρανούς.



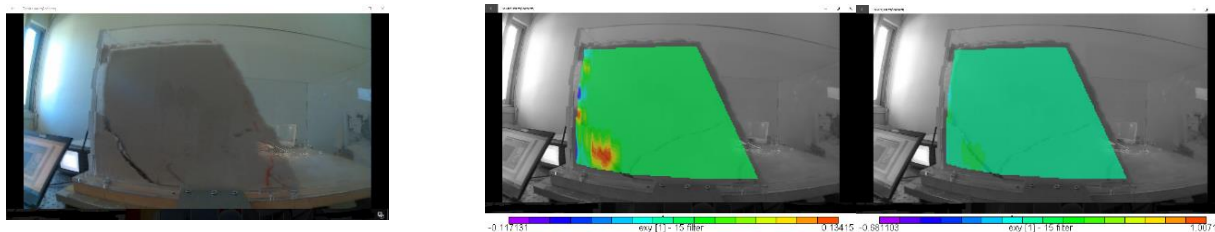
Εικόνα 191 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 191 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Όπως και στο προηγούμενο έτσι και σε αυτό το στιγμιότυπο έχουμε απεικόνιση κατακόρυφων τάσεων εφελκυστικών και θλιπτικών χαμηλών τιμών.



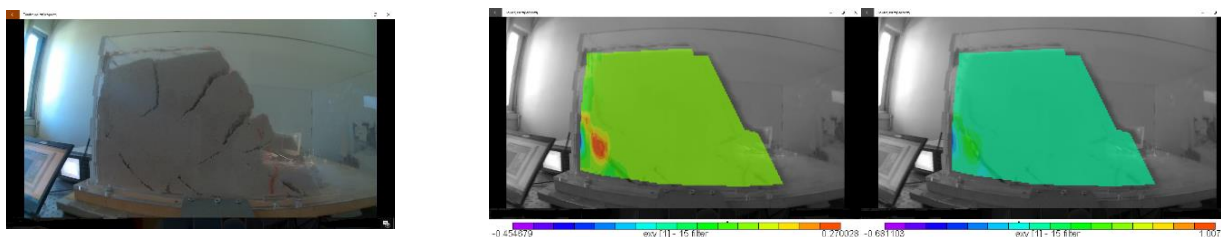
Εικόνα 192 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 192 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Σε αυτό το στιγμιότυπο αναγνωρίζουμε μόνο τον εφελκυσμό κάτω από τη ρωγμή που διανοίχθηκε. Αφού τα κατώτερα εδαφικά στρώματα δε συμπιέζονται πια από το ανώτερο εδαφικό υλικό. Δεν παρατηρούνται όμως ανάλογα ευρήματα και στη δεξιά ρωγμή.



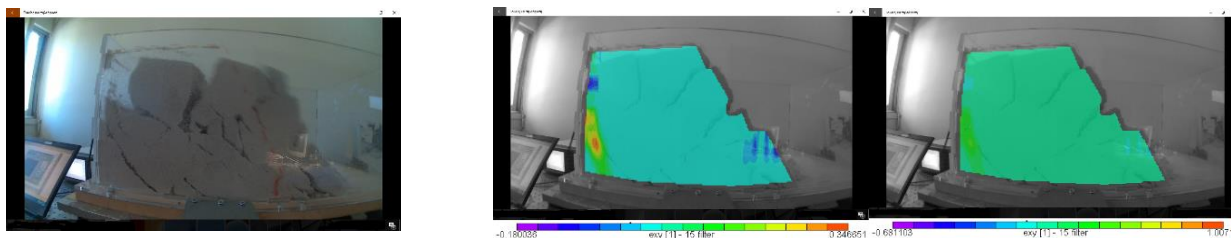
Εικόνα 193 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 193 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Και σε αυτό το στιγμιότυπο παρατηρείται μόνο η εφελκυστική τροπή στο ύψος της ρωγμής που έχει σχηματισθεί στο αριστερό όριο.



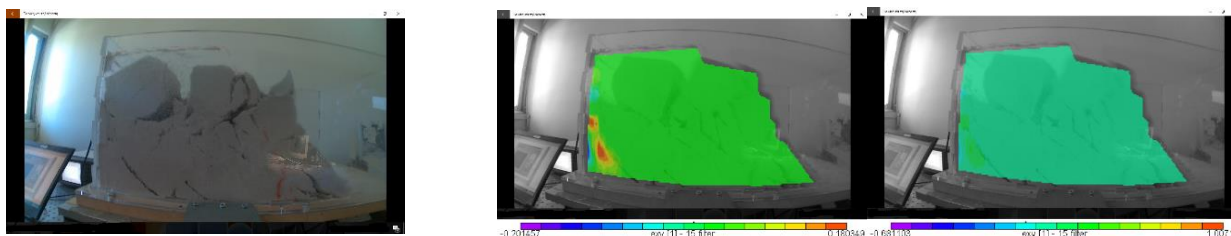
Εικόνα 194 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 194 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Σε αυτό το στιγμιότυπο παρατηρείται μόνο η εφελκυστική τροπή στο ύψος της ρωγμής που έχει σχηματισθεί στο αριστερό όριο. Τις μεγάλες ρωγμές δεν τις αναγνωρίζει το λογισμικό.



Εικόνα 195 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 195 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Και εδώ έχουμε εφελκυστική τροπή στο ύψος της ρωγμής που έχει σχηματισθεί στο αριστερό όριο. Καθώς επίσης θλίψη στην ελεύθερη κεκλιμένη επιφάνεια του πρανούς, καθώς τα υπερκείμενα εδαφικά στρώματα συμπιέζουν την επιφάνεια κατά την πτώση τους, σε μικρή όμως τιμή.



Εικόνα 196 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων
 Figure 196 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range

Και πάλι η εφελκυστική τροπή στο ύψος της ρωγμής που έχει σχηματισθεί στο αριστερό όριο έχει πρωταγωνιστικό ρόλο. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και σε όλα τα στιγμιότυπα που ακολούθησαν.

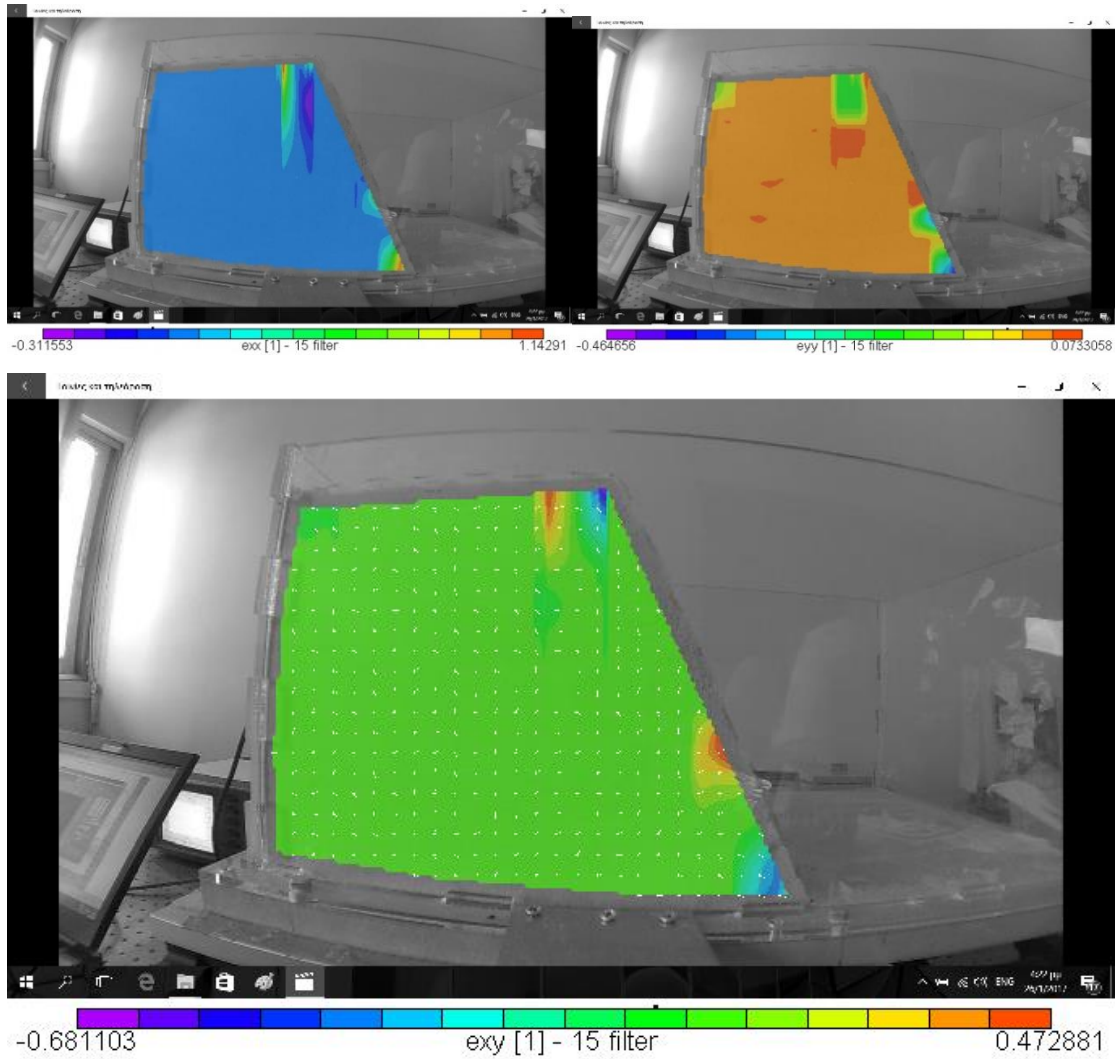
Συμπεράσματα Ανάλυσης

Η ανάλυση με Vic 2D, εντοπίζει αναμφισβήτητες θλιπτικές και εφελκυστικές παραμορφώσεις πριν ακόμα γίνουν αντιληπτές από το χρήστη δια γυμνού οφθαλμού. Χωρίς όμως να γνωρίζουμε το λόγο υπάρχουν άλλες ορατές παραμορφώσεις που δε συμπεριλαμβάνονται στα διαγράμματα του προγράμματος. Το κοινό γνώρισμα αυτών των ρωγμών που αναγνωρίζονται από το λογισμικό είναι το μεγάλο τους μέγεθος.

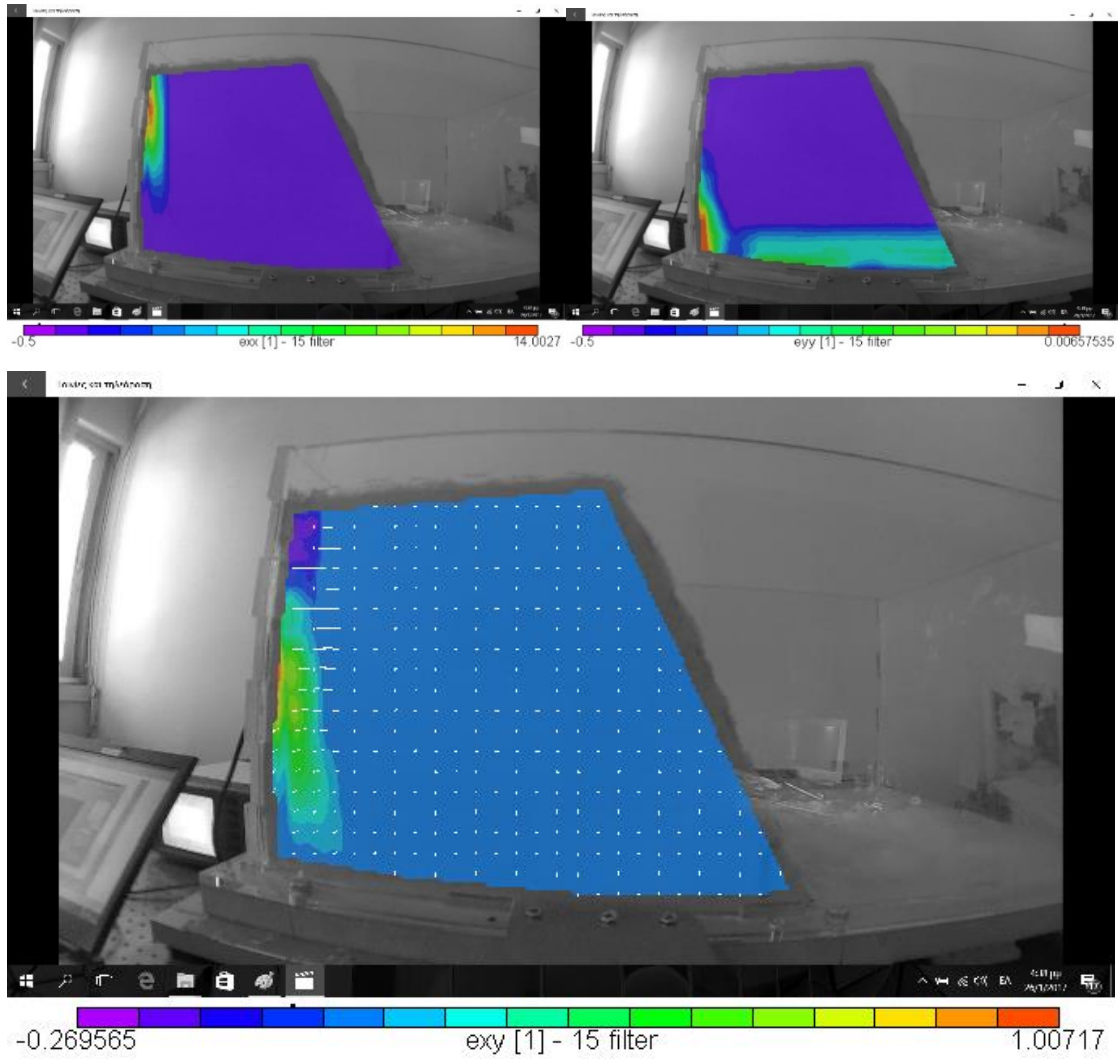
➤ **Ανηγμένη Παραμόρφωση κατά X_{exx} και κατά Y_{eyy} – Τα βέλη των Τάσεων της Μέγιστης Διεύθυνσης**

Με τη διαδικασία της συσχέτισης εικόνων, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς πάντοτε την προηγούμενη εικόνα από την εικόνα που εξετάζεται και ως παραμορφωμένη την εικόνα που εξετάζεται, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα για τις ανηγμένες παραμορφώσεις κατά X_{exx} και τις ανηγμένες παραμορφώσεις κατά Y_{eyy} . Στις εικόνες που ακολουθούν παρατίθενται τα σχήματα των παραμορφωμένων εικόνων τα οποία απεικονίζουν το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων.

Το Vic 2D παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να εμφανίζει επάνω στους χάρτες ισοϋψών καμπυλών τα βέλη των ανηγμένων παραμορφώσεων οι οποίες θεωρείται ότι συμπίπτουν με τις κύριες τάσεις, μέγιστες και ελάχιστες. Στις εικόνες που ακολουθούν παρατίθενται τα σχήματα των παραμορφωμένων εικόνων τα οποία απεικονίζουν τα βέλη των τάσεων της μέγιστης διεύθυνσης επί το πεδίο των ανηγμένων διατμητικών παραμορφώσεων κατά exy .

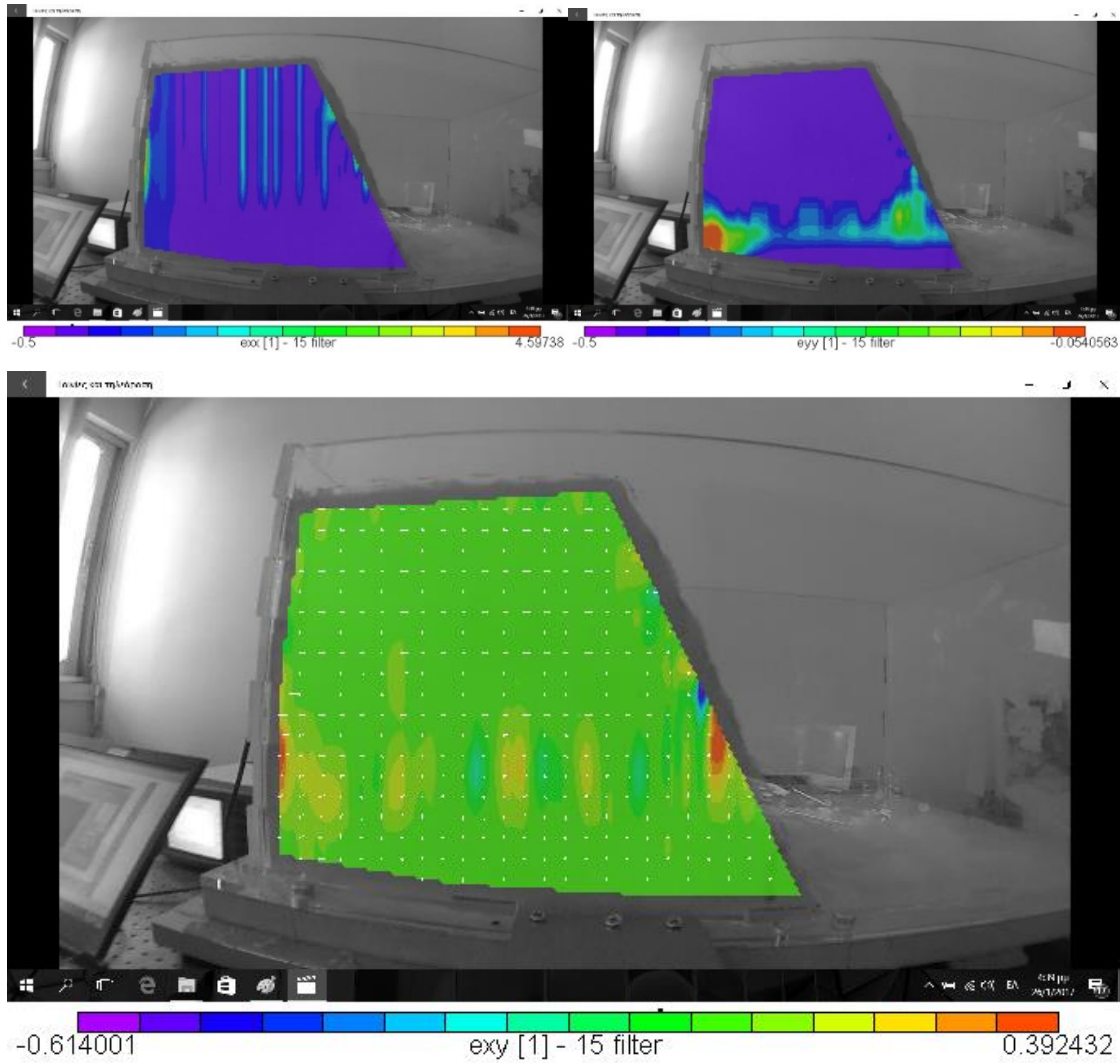


Εικόνα 197 Ανηγγμένη Παραμόρφωση exx / eyy / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy
Figure 197 Reduced Strain exx / eyy / Strain Arrows of maximum Direction on exy plot

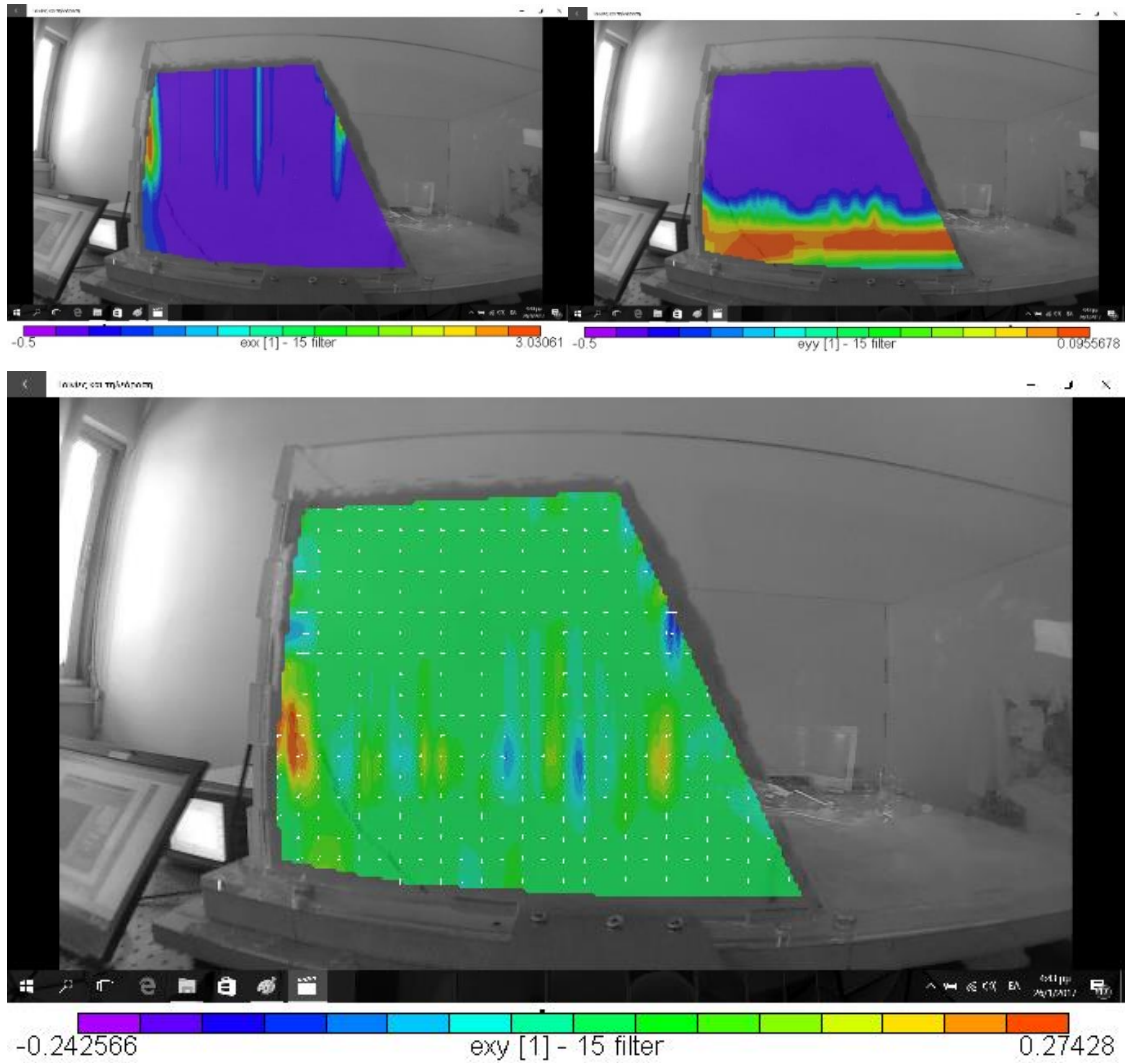


Εικόνα 198 Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / eyy / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy

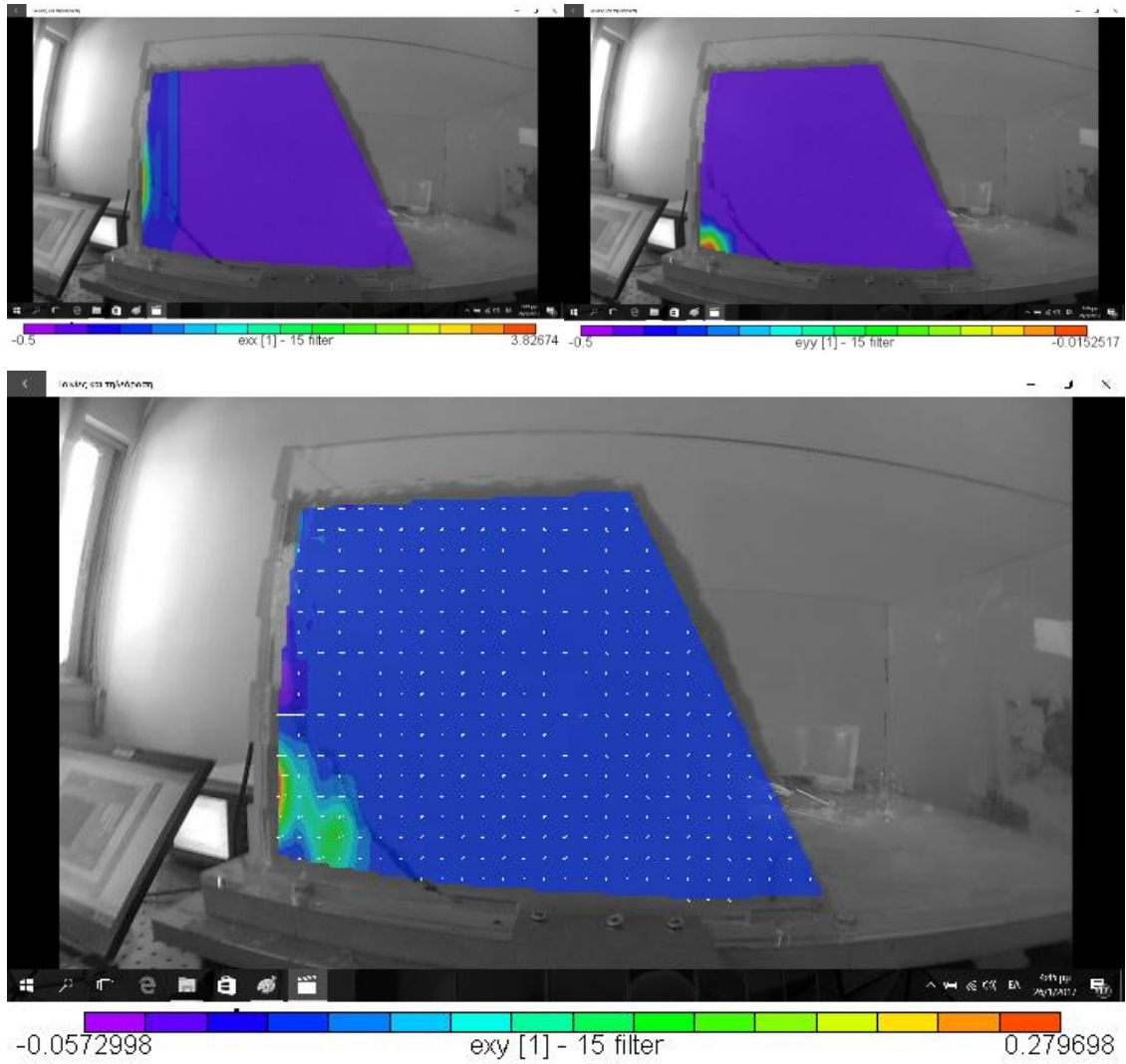
Figure 198 Reduced Strain exx / eyy / Strain Arrows of maximum Direction on exy plot



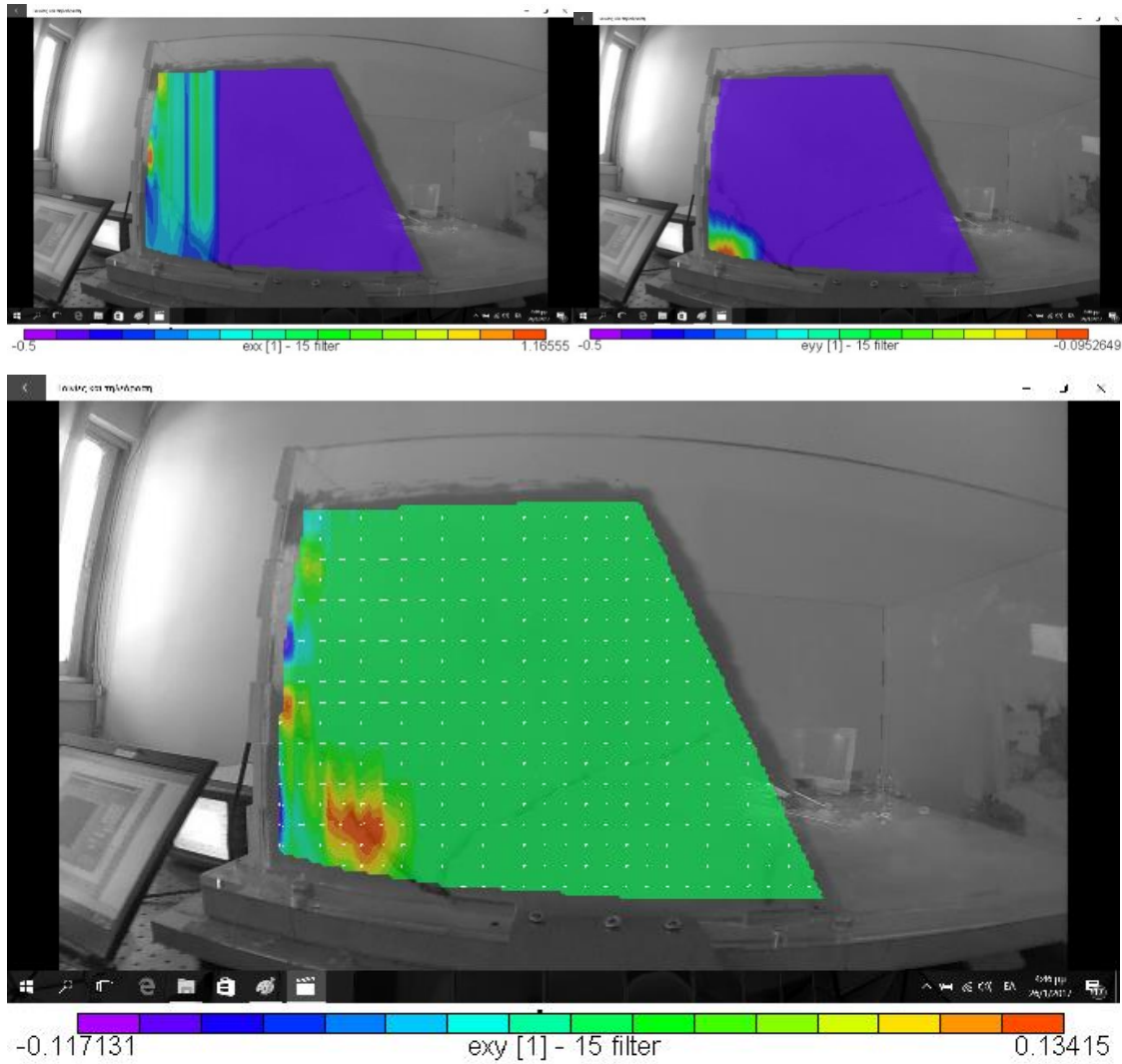
Εικόνα 199 Ανηγγμένη Παραμόρφωση exx / eyy / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy
Figure 199 Reduced Strain exx / eyy / Strain Arrows of maximum Direction on exy plot



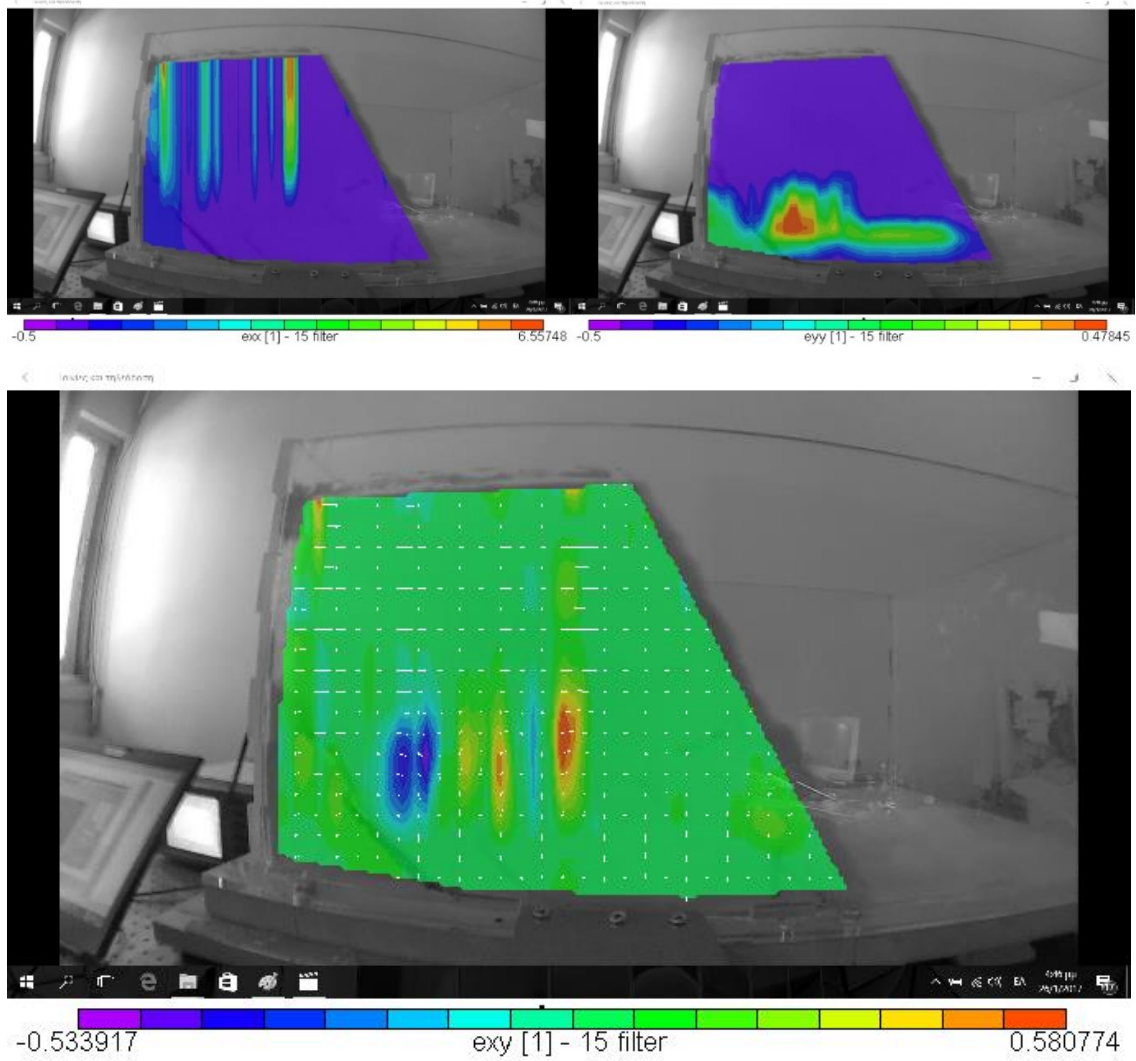
Εικόνα 200 Ανηγγμένη Παραμόρφωση ϵ_{xx} / κατά Y ϵ_{yy} / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των ϵ_{xy}
Figure 200 Reduced Strain ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Strain Arrows of maximum Direction on ϵ_{xy} plot



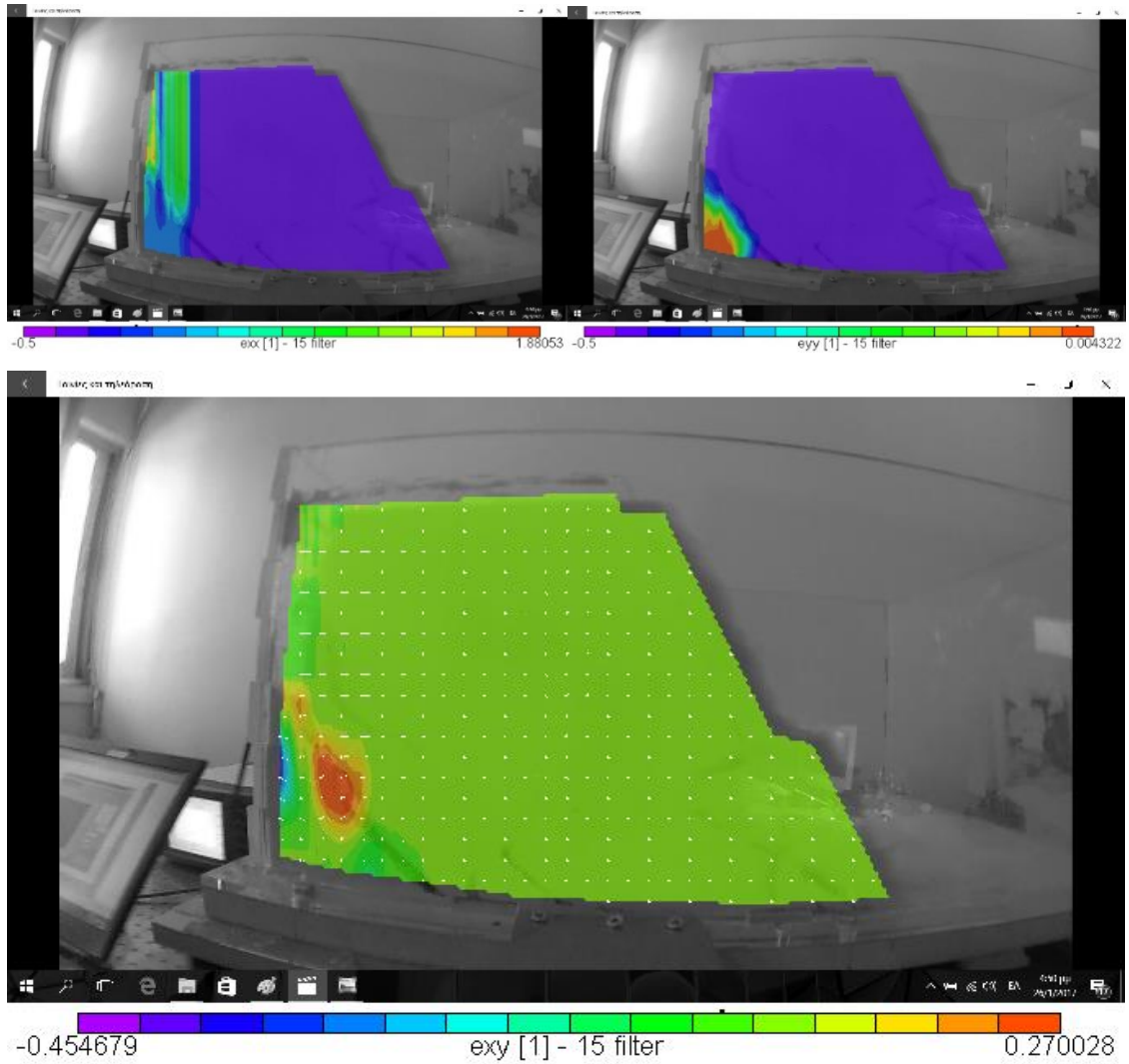
Εικόνα 201 Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / eyy / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy
Figure 201 Reduced Strain exx / eyy / Strain Arrows of maximum Direction on exy plot



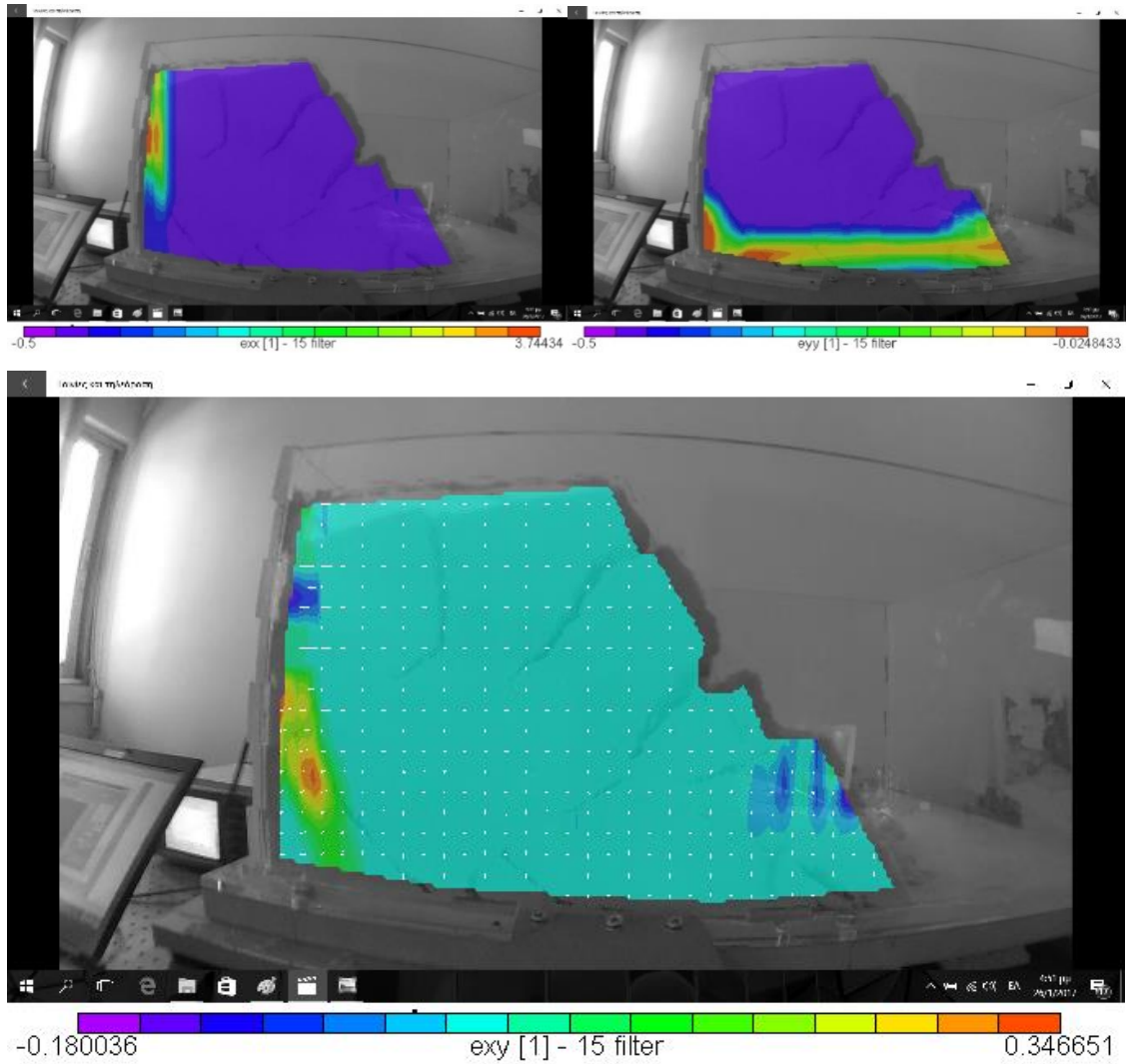
Εικόνα 202 Ανηγγμένη Παραμόρφωση exx / eyy / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy
Figure 202 Reduced Strain exx / eyy / Strain Arrows of maximum Direction on exy plot



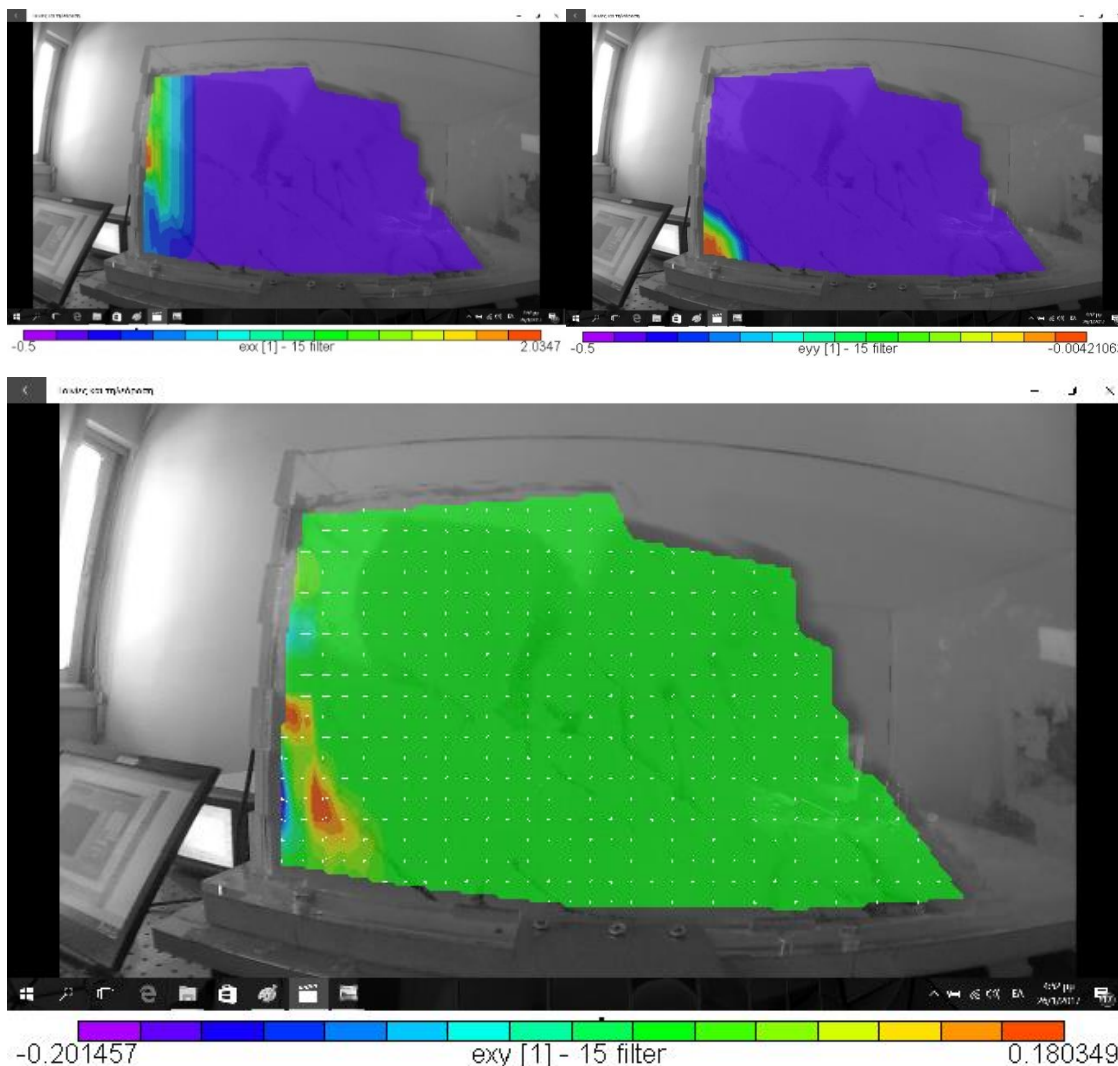
Εικόνα 203 Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / eyy / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy
Figure 203 Reduced Strain exx / eyy / Strain Arrows of maximum Direction on exy plot



Εικόνα 204 Ανηγγμένη Παραμόρφωση exx / eyy / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy
Figure 204 Reduced Strain exx / eyy / Strain Arrows of maximum Direction on exy plot



Εικόνα 205 Ανηγγμένη Παραμόρφωση exx / eyy / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy
Figure 205 Reduced Strain exx / eyy / Strain Arrows of maximum Direction on exy plot



Εικόνα 206 Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / eyy / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy
 Figure 206 Reduced Strain exx / eyy / Strain Arrows of maximum Direction on exy plot

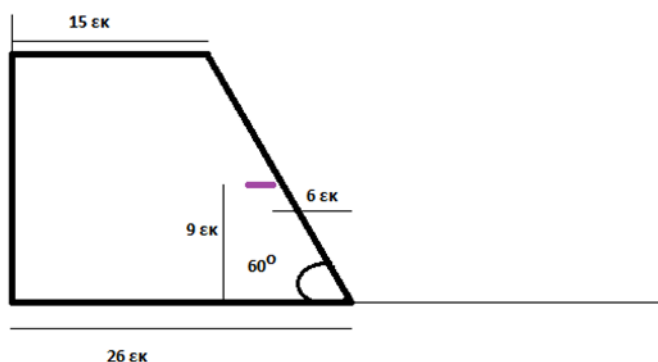
Σχόλια Επί των Ανηγμένων Παραμορφώσεων

Όσον αφορά την κλίμακα που χρησιμοποιείται στο πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων κατά X, η μωβ περιοχή αντιπροσωπεύει στην υψηλότερη αρνητική τιμή και η κόκκινη περιοχή στην μεγαλύτερη θετική τιμή. Ομοίως η ίδια κατάσταση ισχύει και για την χρωματική κλίμακα των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά Y. Γενικά οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά X, exx στις κόκκινες περιοχές είναι κατά απόλυτο τιμή μεγαλύτερες από αυτές των μωβ περιοχών. Επομένως με κόκκινο χρώμα φαίνεται η περιοχή που δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση το δοκίμιο που εξετάζεται. Αντίθετα οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά Y, eyy στις μωβ περιοχές είναι κατά απόλυτο τιμή μεγαλύτερες από αυτές των κόκκινων περιοχών. Επομένως με μωβ χρώμα φαίνεται η περιοχή που δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση το δοκίμιο που εξετάζεται.

6.10 Πείραμα 8ο

➤ Περιγραφή

Σε αυτό το κεφάλαιο υπάρχει περιγραφή του πειράματος που διεξήχθη σε ένα τελείως ξηρό πρανές με κλίση 60 μοιρών και διαστάσεις όπως φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του πρανούς, τα μέσα που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των παραμέτρων. Και έπειτα αναφέρονται η επεξεργασία των καταγραφών αυτών και στο τέλος γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Slide και του Phase για τις τρεις δοκιμές φόρτισης με διαφορετικές επιταχύνσεις.

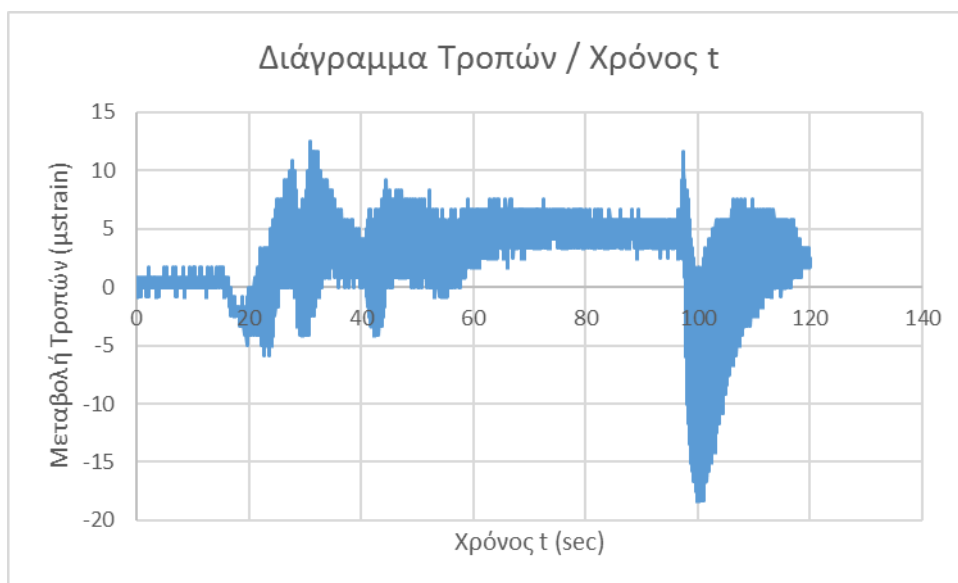


Εικόνα 207 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 8, Figure 207 Side View of Experimental Model 8

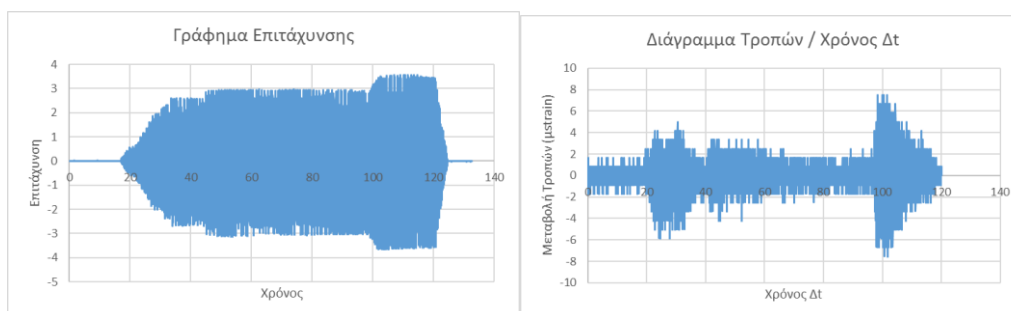
Οι διαστάσεις είναι όπως φαίνονται στην εικόνα. Στο μοντέλο τοποθετείται αισθητήρας καταγραφής επιτάχυνσης στην αριστερή παρειά του κουτιού. Σε αυτό το πείραμα δεν χρησιμοποιείται η κάμερα καταγραφής ψηφιακών φωτογραφιών. Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη B9 με συχνότητα 4 ρεύμα στο 1,5 και θέση σεισμικής τράπεζας Amplitude =>. Αναμενόμενη επιτάχυνση $3,6 \text{ m/s}^2$ όση δηλαδή και στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας III. Ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα μέχρις ότου φτάσαμε την επιτάχυνση στα $3,6 \text{ m/s}^2$ και το μοντέλο αστοχεί. Η τελική κλίση του μοντέλου είναι στις 18 μοίρες.

➤ Αποτελέσματα Καταγραφής Αισθητήρων

Οι καταγραφές του αισθητήρα οπτικών ινών παρουσιάζονται στην Εικόνα 209, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.



Εικόνα 208 Διάγραμμα Τροπών/Χρόνου, Figure 208 Strain / Time Chart



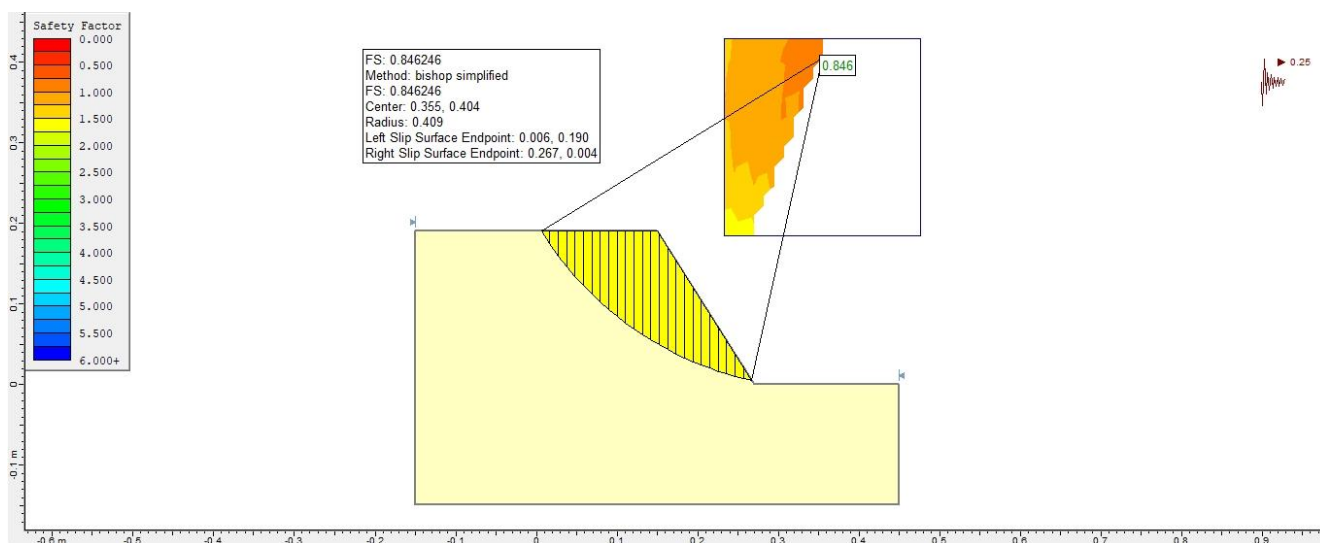
Εικόνα 209 Διαγράμματα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών

Figure 209 Acceleration and Strain Modification Charts

Από τα διαγράμματα επιτάχυνσης και τροπών μας δίνεται η ευκαιρία να παρατηρήσουμε την εναλλαγή στο ρυθμό και στον τρόπο μεταβολής των τροπών για σε κάθε στιγμιότυπο της επιτάχυνσης. Στα πρώτα 20 sec για μηδενική επιτάχυνση η μεταβολή των τροπών κινείται γύρω από το μηδέν. (Εικόνα 212) Σε επόμενο χρόνο με την επιβολή της επιτάχυνσης έχουμε την πρώτη αστοχία του πρανούς εσωτερικά, και στη συνέχεια αύξηση στο ρυθμό μεταβολής των τροπών. Μέχρι τα 40 sec όπου με νέα αύξηση της επιτάχυνσης έχουμε νέα μετακίνηση εσωτερικά του πρανούς. Στην τελευταία αύξηση επιτάχυνσης στα 100 sec έχουμε και την αστοχία του πρανούς. Η αστοχία συνοδευόταν με ολίσθηση και μεταφορά υλικού από τα ανώτερα προς τα χαμηλότερα επίπεδα του πρανούς.

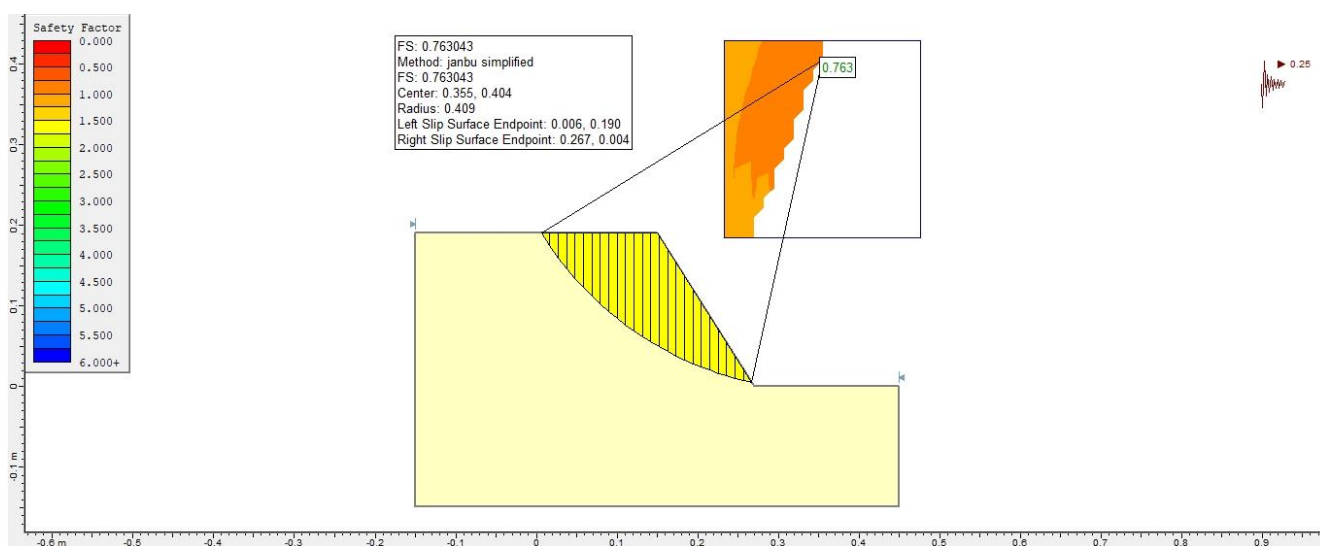
➤ Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide και Phase

✚ Επιτάχυνση: 2,5 m/s²



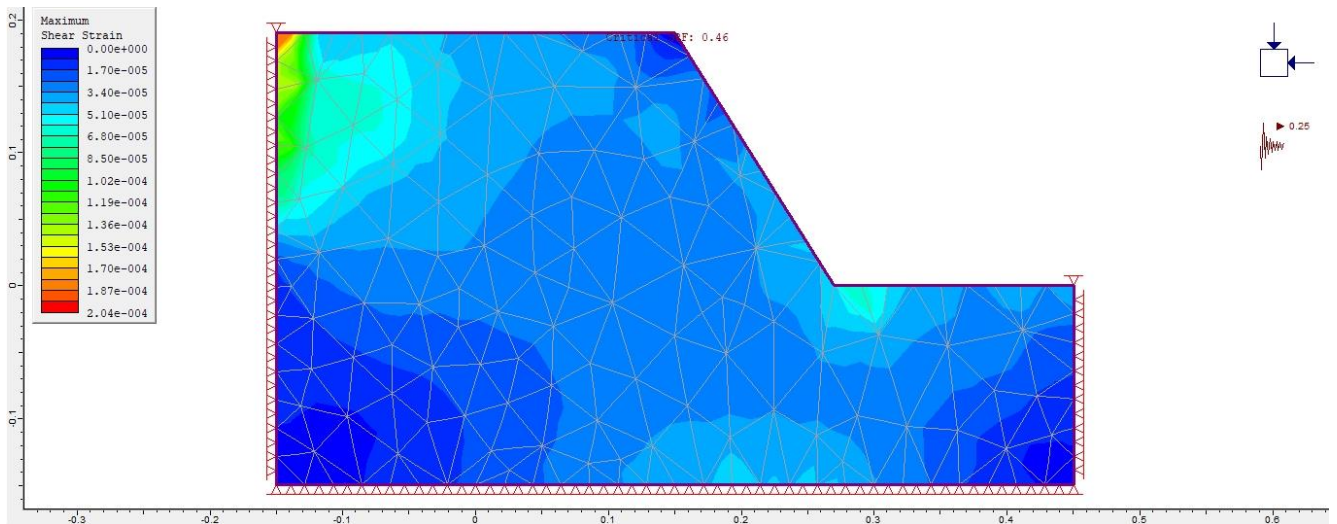
Εικόνα 210 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,846

Figure 210 Analysis by the Bishop method - Safety factor FS = 0.846



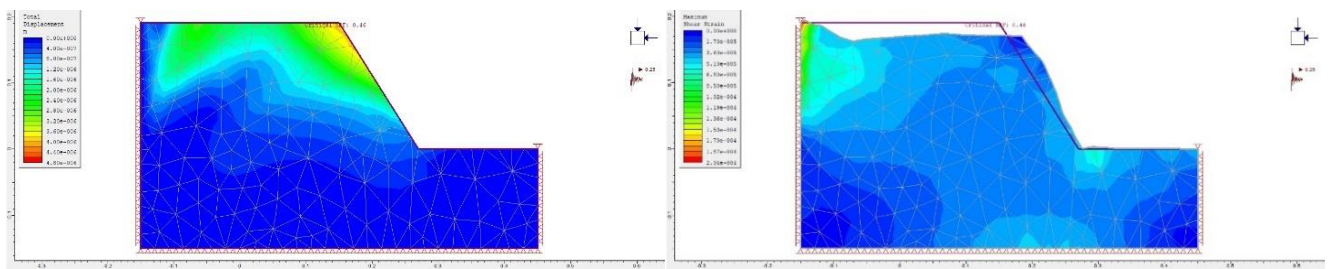
Εικόνα 211 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,763

Figure 211 Analysis by Janbu method - Safety factor FS = 0.763



Εικόνα 212 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,46

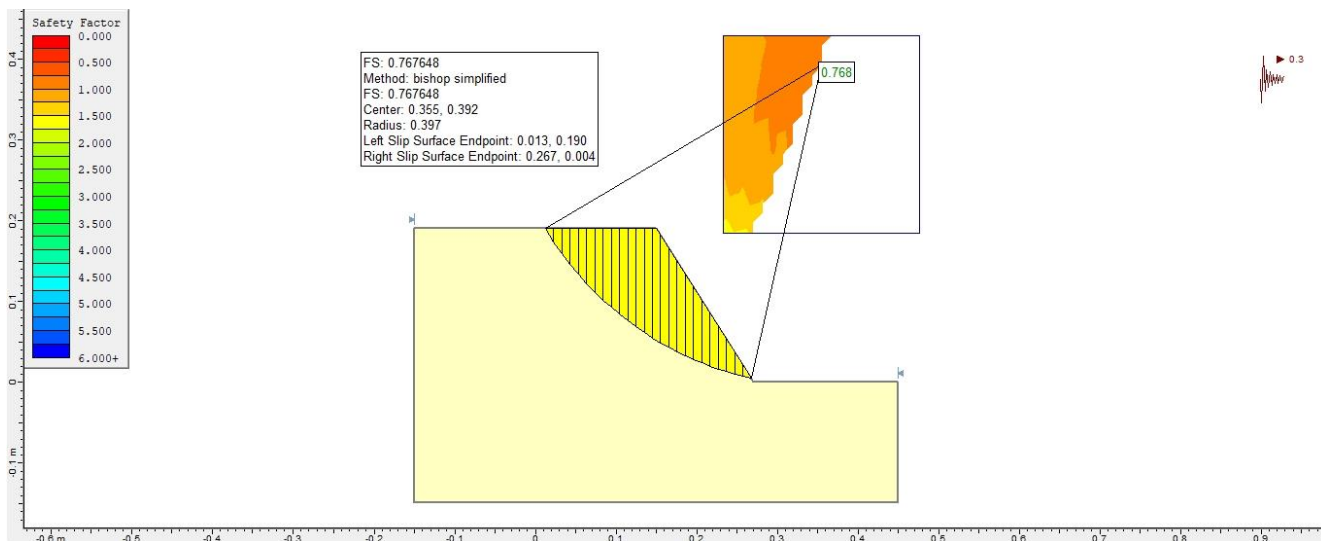
Figure 212 Maximum shear Strain by Phase - Critical SRF = 0,46



Εικόνα 213 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,46

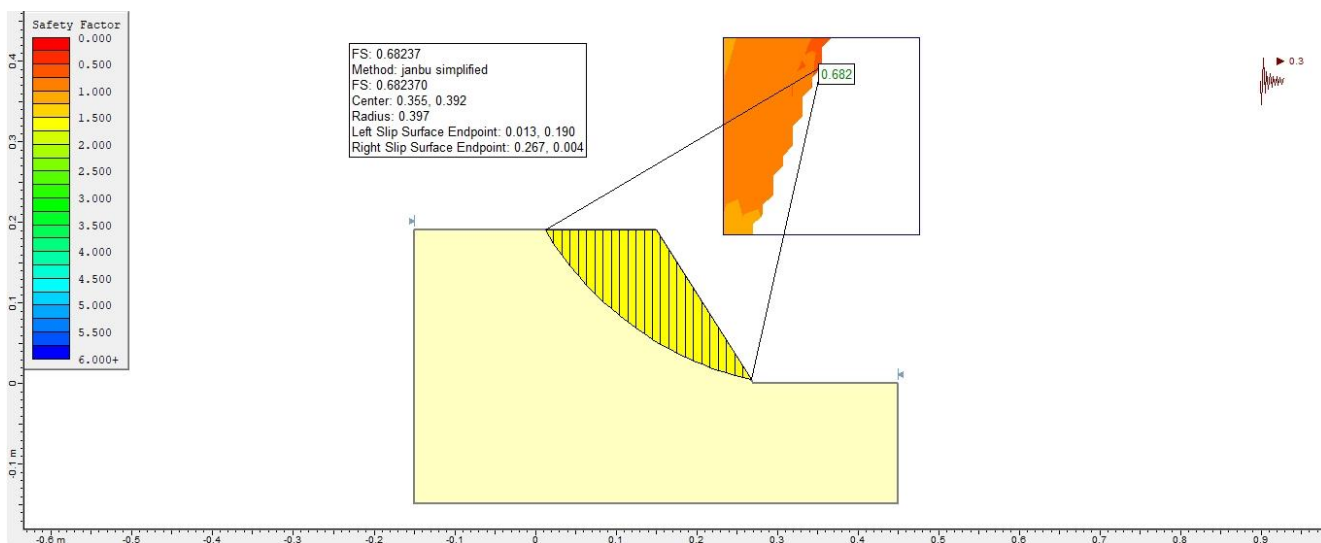
Figure 213 Total displacement by Phase - Critical SRF = 0,46

✚ Επιτάχυνση: 3,0 m/s²



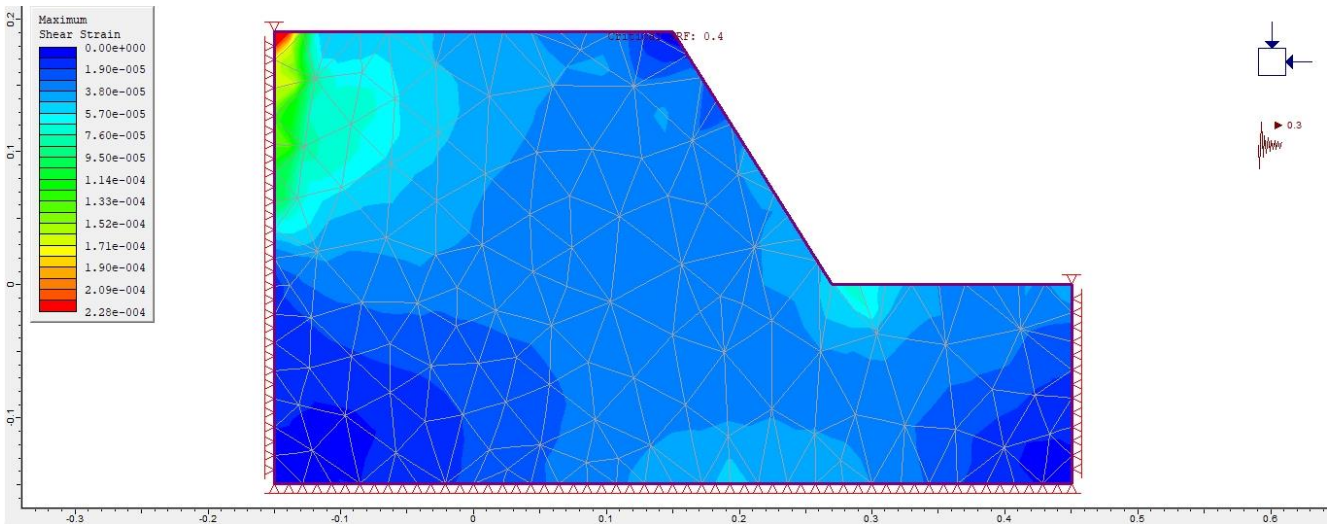
Εικόνα 214 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,768

Figure 214 Analysis by the Bishop method - Safety factor FS = 0.768



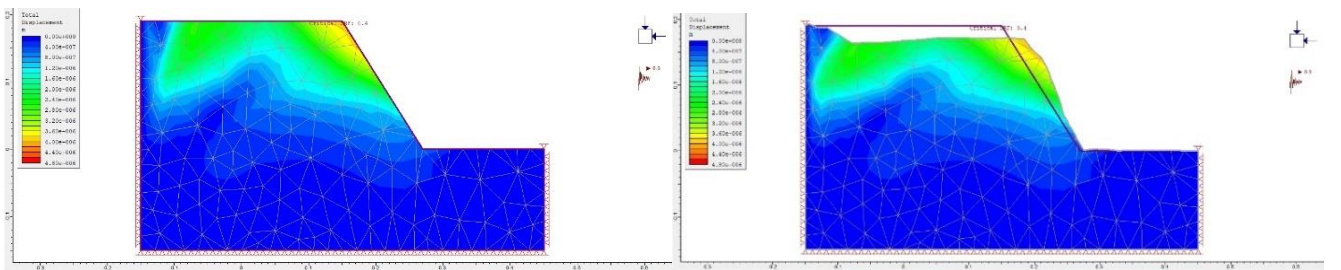
Εικόνα 215 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,682

Figure 215 Analysis by Janbu method - Safety factor FS = 0.682



Εικόνα 216 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,4

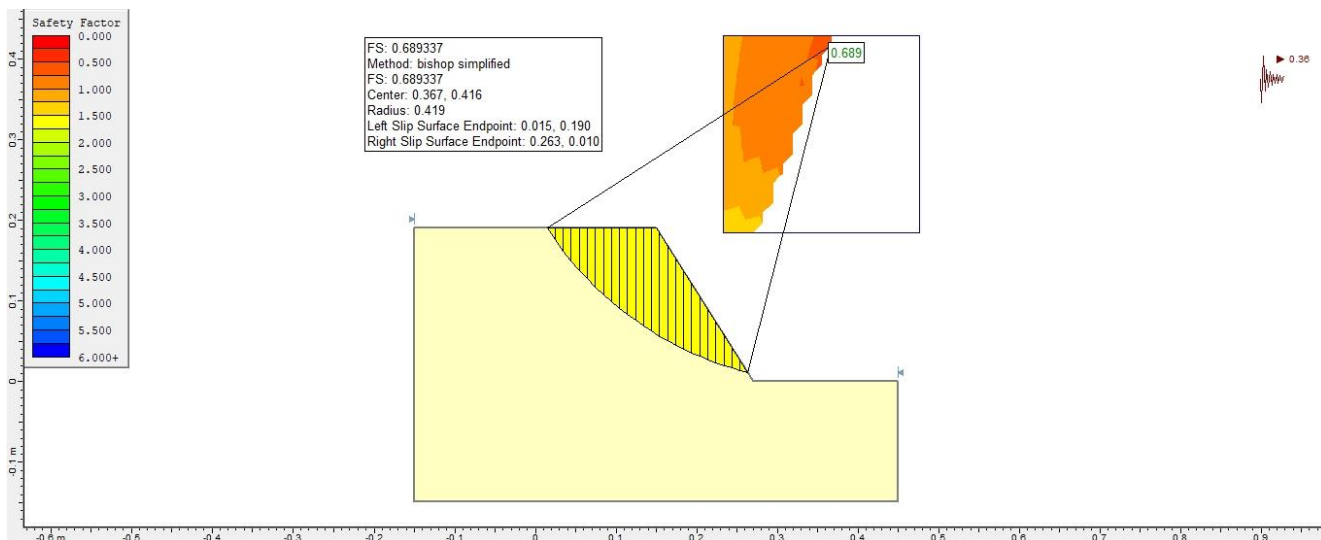
Figure 216 Maximum shear Strain by Phase - Critical SRF = 0,4



Εικόνα 217 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,4

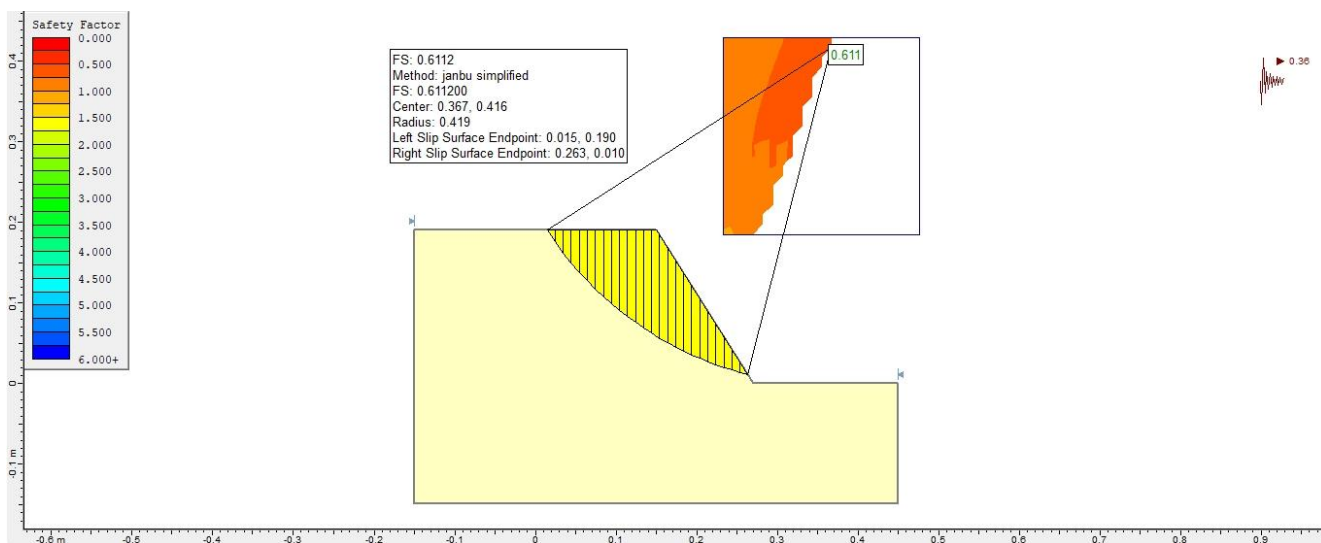
Figure 217 Total displacement by Phase - Critical SRF = 0,4

✚ Επιτάχυνση: 3,6 m/s²



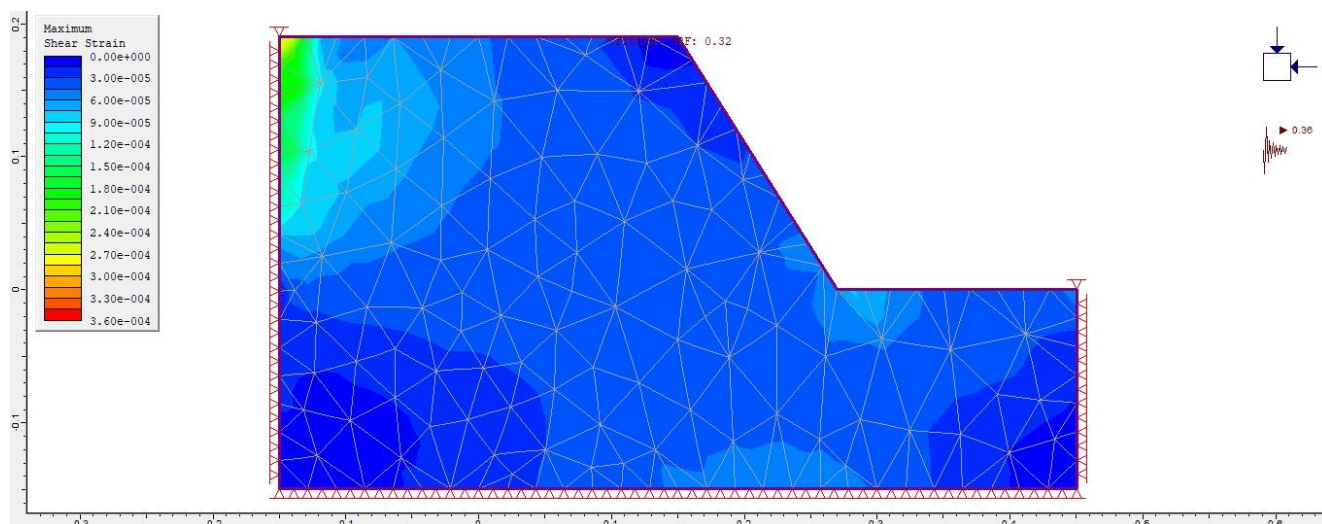
Εικόνα 218 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,689

Figure 218 Analysis by the Bishop method - Safety factor FS = 0.689



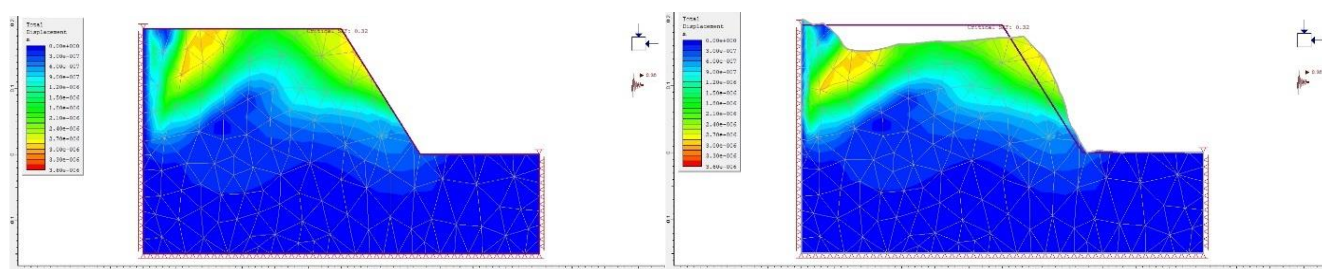
Εικόνα 219 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,611

Figure 219 Analysis by Janbu method - Safety factor FS = 0.611



Εικόνα 220 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,32

Figure 220 Maximum shear Strain by Phase - Critical SRF = 0,32



Εικόνα 221 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,21

Figure 221 Total displacement by Phase - Critical SRF = 0,32

6.11 Πείραμα 9^ο

➤ Περιγραφή

Το πείραμα αυτό αποτελεί προπαρασκευαστικό πείραμα για την δημιουργία κατάλληλου αγωγού και πρανούς ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά τους σε φόρτιση. Σκοπός του είναι η διερεύνηση των υλικών που θα προσομοιάσουν τον αγωγό Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε αγωγός αλουμινίου πάχους ενός χιλιοστού. Σε αυτό το κεφάλαιο υπάρχει περιγραφή του πειράματος που διεξήχθη σε ένα ημιβυθισμένο πρανές με κλίση 60 μοιρών. Ειδικότερα περιγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, και η θέση των μετρητικών διατάξεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταγραφών του αισθητήρα οπτικών ινών και του επιταχυνσιογράφου.

Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν φύλλο αλουμινίου πάχους ενός χιλιοστού, κυλινδρικό καλούπι διαμέτρου 1 εκατοστού και κόλλα γενικών χρήσεων.



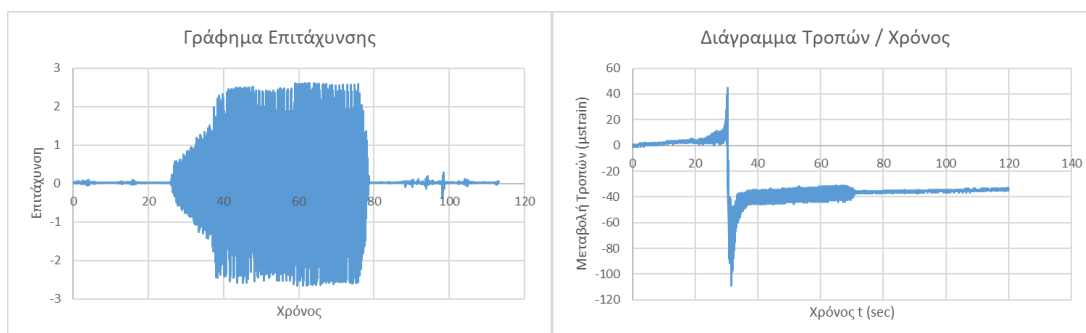
Εικόνα 222 Κυλινδρικό Καλούπι & Φύλλο Αλουμινίου, Figure 222 Cylindrical Mold & Aluminum Sheet

Το μοντέλο αυτό κατασκευάστηκε με βρεγμένη άμμο. Μετά την κατασκευή του μοντέλου προσθέσαμε 5 λίτρα νερού. Μετρήσαμε με Penetrometro: για $d_1 = 20\text{mm}$ και $d_2 = 25\text{mm}$, έχω αντίστοιχα $q_1 = 0,80 \text{ kg/cm}^2$ και $q_2 = 1,0 \text{ kg/cm}^2$ και $Q_2 = 1,7 \text{ kg}$ ώστε να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τη συνοχή του εδάφους μας. Αριστερά στο κουτί, ακριβώς στο μέσο της επιφάνειας, τοποθετούμε τον QCN επιταχυνσιογράφο μας με τον άξονα Z στην κατεύθυνση της κίνησης και τον Y => . Ο αισθητήρας οπτικών ινών τοποθετείται ελεύθερος ακριβώς κάτω από το σημείο του σωλήνα που αναμένονται οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη B9 με συχνότητα 4 ρεύμα στο 1,5 και θέση σεισμικής τράπεζας Amplitude =>. Αναμενόμενη επιτάχυνση $3,6 \text{ m/s}^2$ όση δηλαδή και στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας III. Ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα από ηρεμία μέχρι τη θέση Διακόπτη =>.

➤ Αποτελέσματα Καταγραφής Αισθητήρων

Οι καταγραφές του αισθητήρα οπτικών ινών παρουσιάζονται στην Εικόνα 223, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.



Εικόνα 223 Διάγραμμα Επιτάχυνσης και Διάγραμμα Μεταβολής Τροπών

Figure 223 Acceleration and Strain Modification Charts

Η επιτάχυνση επιβάλλεται περί τα 50 sec συνολικά, και η μέγιστη τιμή της είναι στα $2,6 \text{ m/s}^2$ αντί για $3,6 \text{ m/s}^2$ που περιμέναμε. Αρκεί όμως αυτή η επιτάχυνση για να αστοχήσει το πρανές. Αμέσως μετά τη σταθεροποίηση της επιτάχυνσης – κάτι λιγότερο από 10 sec αφού επιβλήθηκε- το πρανές αστοχεί.

6.12 Πείραμα 10°

➤ Περιγραφή

Το πείραμα όπως και το 9° αποτελεί προπαρασκευαστικό πείραμα για την δημιουργία κατάλληλου αγωγού και πρανούς ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά τους σε φόρτιση. Σκοπός του είναι η διερεύνηση των υλικών που θα προσομοιώσουν τον αγωγό Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε αγωγός αλουμινίου πάχους ενός χιλιοστού. Σε αυτό το κεφάλαιο υπάρχει περιγραφή του πειράματος που διεξήχθη σε ένα ημιβυθισμένο πρανές με κλίση 60 μοιρών. Ειδικότερα περιγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, και η θέση των μετρητικών διατάξεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταγραφών του αισθητήρα οπτικών ινών και του επιταχυνσιογράφου.

Το μοντέλο του πρανούς κατασκευάστηκε με τη μέθοδο της ξηρής απόθεσης. Σε κάθε στρώμα άμμου 2 εκατοστών ψεκάσαμε ομοιόμορφα νερό. Ο σκοπός αυτής της μεθόδου είναι η άμμος να αποκτήσει φαινόμενη συνοχή και το πρανές να μπορεί να σταθεί σε μεγαλύτερη γωνία από τη γωνία τριβής της άμμου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του πρανούς, τα μέσα που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των παραμέτρων. Και στη συνέχεια αναφέρονται η επεξεργασία των καταγραφών αυτών.

Ο αισθητήρας οπτικών ινών τοποθετείται ελεύθερος. Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη Β9 με συχνότητα 4 ρεύμα στο 1,5 και θέση σεισμικής τράπεζας Ampl. =>. Ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα από ηρεμία μέχρι τη θέση Διακόπτη =>. Το μοντέλο δεν αστόχησε. Ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα μέχρις ότου φτάσαμε την επιτάχυνση στα $8,5 \text{ m/s}^2$ όπου και το μοντέλο αστόχησε όπως βλέπουμε στην Εικόνα 224 που ακολουθεί.

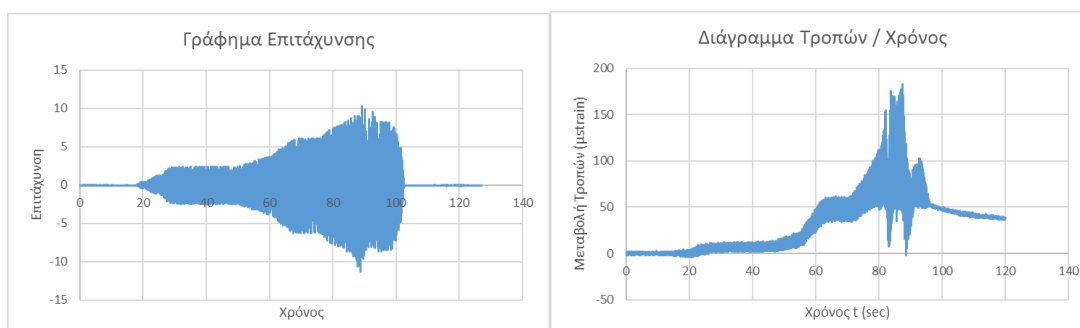


Εικόνα 224 Αστοχία Πειραματικού Μοντέλου

Figure 224 Slope Failure of Experimental Model

➤ Αποτελέσματα Καταγραφής Αισθητήρων

Οι καταγραφές του αισθητήρα οπτικών ινών παρουσιάζονται στην Εικόνα 225, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.



Εικόνα 225 Διάγραμμα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών

Figure 225 Acceleration and Strain Modification Charts

6.13 Πείραμα 11°

➤ Περιγραφή

Το πείραμα αποτελεί προπαρασκευαστικό πείραμα για την δημιουργία κατάλληλου αγωγού και πρανούς ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά τους σε φόρτιση. Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ο αγωγός χαλκού. Σκοπός του είναι η διερεύνηση των υλικών που θα προσομοιώσουν τον αγωγό. Σε αυτό το κεφάλαιο υπάρχει περιγραφή του πειράματος που διεξήχθη σε μοντέλο πρανούς με την προσθήκη αγωγού. Ειδικότερα περιγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, και η θέση των μετρητικών διατάξεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταγραφών του αισθητήρα οπτικών ινών και του επιταχυνσιογράφου. Στο τέλος υπάρχει ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με το λογισμικό Vic 2D.

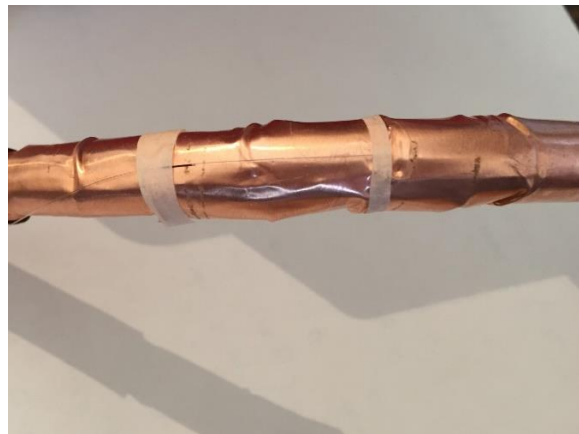
Το μοντέλο πραγματοποιήθηκαν 4 δοκιμές με διαφορετική επιτάχυνση έως ότου αστόχησε το πρανές, για τις οποίες έγινε η επεξεργασία των καταγραφών αυτών και γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Slide για κάθε επιτάχυνση. Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήσαμε αγωγό χαλκού πάχους ενός χιλιοστού και διαστάσεις όπως φαίνεται στο σχέδιο. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν φύλλο χαλκού πάχους ενός χιλιοστού, κυλινδρικό καλούπι διαμέτρου 1 εκατοστού και κόλλα γενικών χρήσεων.



Εικόνα 226 Φύλλο Χαλκού και Κυλινδρικό Καλούπι, Figure 226 Copper Sheet and Cylindrical Mold

Η δοκιμή έγινε σε ημιβυθισμένο πρανές. Το μοντέλο αυτό κατασκευάστηκε με βρεγμένη άμμο. Και κατά τη δημιουργία του η άμμος συμπιέστηκε. Έτσι όπως θα δούμε στις εικόνες που ακολουθούν από την αρχική του κιάλας κατάσταση έχει μία διατμητική ρωγμή στο μέσο του. Θα εξετάσουμε παρακάτω την συμπεριφορά αυτού του πρανούς στη φόρτιση.

Στον αγωγό που κατασκευάστηκε κολλήσαμε τον αισθητήρα οπτικών ινών με ειδική εποξειδική κόλλα 2 συστατικών με χρόνο σκλήρυνσης περί των 90 λεπτών (Εικόνα 227). Είναι ιδανική για όλα τα μέταλλα, αλουμίνιο, ξύλο, σκληρά συνθετικά υλικά, πορσελάνη, πέτρα, πηλός, τερακότα, μπετόν, μάρμαρα, κεραμικά, πολύτιμους λίθους, γυαλί, Plexiglass, τα περισσότερα πλαστικά και πολλά άλλα είδη. Ιδανικό επίσης και για την σύνδεση διαφορετικών μεταξύ τους υλικών. Στην εικόνα 228 φαίνεται ο αισθητήρας πριν κολληθεί επί τον αγωγό. Στην εικόνα 229 βλέπουμε τη θέση του αισθητήρα στον αγωγό, καθώς και την τελική κατάσταση του αγωγού μετά την επιβολή της σεισμικής φόρτισης.



Εικόνα 227 Εποξειδική Κόλλα δύο Συστατικών Εικόνα 228 Αισθητήρας οπτικών ινών επάνω στον αγωγό χαλκού
 Figure 227 Two Component Epoxy Glue Figure 228 Optical fiber sensor onto the copper conductor



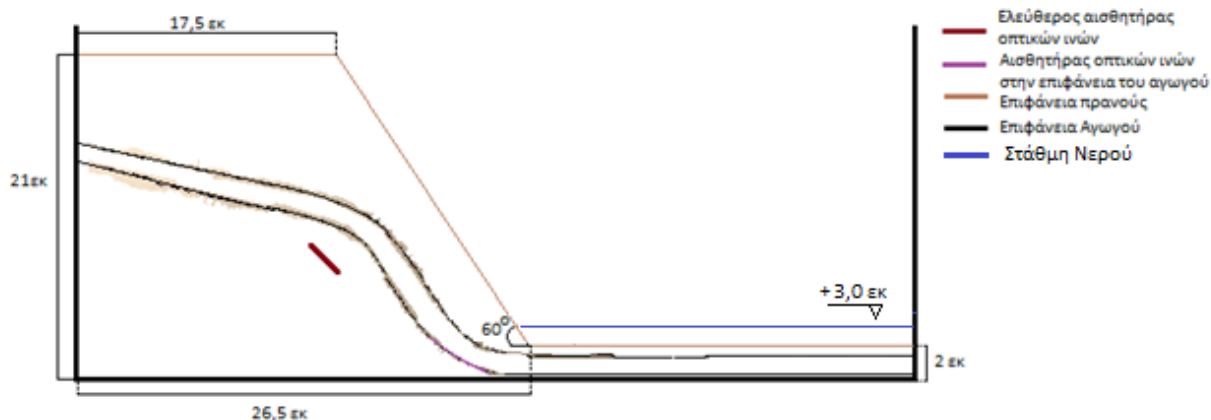
Εικόνα 229 Τελική Κατάσταση αγωγού μετά την επιβολή φόρτισης
 Figure 229 Final pipeline condition post Loading



Εικόνα 230 Κατασκευή του πειραματικού μοντέλου,

Figure 230 Construction of the experimental model

Στην εικόνα 232 βλέπουμε στιγμιότυπο κατά τη δημιουργία του πειραματικού μοντέλου. Μετά την κατασκευή του μοντέλου προσθέσαμε 5 λίτρα νερού. Οι διαστάσεις είναι όπως φαίνονται στην εικόνα 231.



Εικόνα 231 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 11, Figure 231 Side View of Experimental Model 11

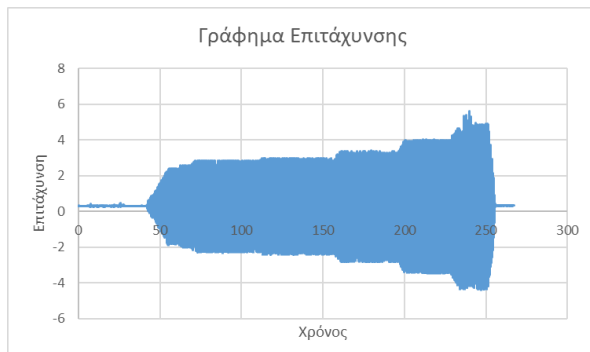
Οι τιμές του Penetrometro είναι: για $d_1 = 20\text{mm}$ και $d_2 = 25\text{mm}$, έχω αντίστοιχα $q_1 = 0,80 \text{ kg/cm}^2$ και $q_2 = 1,00 \text{ kg/cm}^2$ και $Q_2 = 1,9 \text{ kg}$ ώστε να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τη συνοχή του εδάφους μας. Στην αριστερή παρειά του κουτιού, ακριβώς στο μέσο της επιφάνειας, τοποθετήθηκε ο QCN επιταχυνσιογράφος μας με τον άξονα Z στην κατεύθυνση της κίνησης και τον Y => .

Έχουμε τοποθετήσει δύο αισθητήρες οπτικών. Ο πρώτος αισθητήρας οπτικών ινών τοποθετείται με ειδική κόλλα ακριβώς κάτω από τον αγωγό στο σημείο του σωλήνα που αναμένονται οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα. Ο δεύτερος τοποθετείται ελεύθερος στη μέση περίπου του πρανούς όπως βλέπουμε στο σχήμα. Οι καταγραφές του πρώτου αισθητήρα αποθηκεύτηκαν σε δύο αρχεία λόγω της μεγάλης διάρκειας καταγραφής ενώθηκαν αργότερα. Ο δεύτερος αισθητήρας καταγράφηκε με μηχάνημα διαφορετικό από όλα τα υπόλοιπα πειράματα, έναν φορητό μεταφραστή σήματος, οι καταγραφές του οποίου είναι μικρότερης συχνότητας, δίνοντας σαν αποτέλεσμα «αραιά» γραφήματα.

Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη Β9 με συχνότητα 4 ρεύμα στο 1,5 και θέση σεισμικής τράπεζας Ampl. =>. Ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα από ηρεμία μέχρι τη θέση Διακόπτη =>. Το πρανές αστόχησε σε 2,3 m/s².

➤ Αποτελέσματα Καταγραφής Αισθητήρων

Οι καταγραφές του αισθητήρα οπτικών ινών παρουσιάζονται στην Εικόνα 232, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1. Η μέγιστη τροπή σε αυτή την επιτάχυνση είναι 5,6 μstrain .

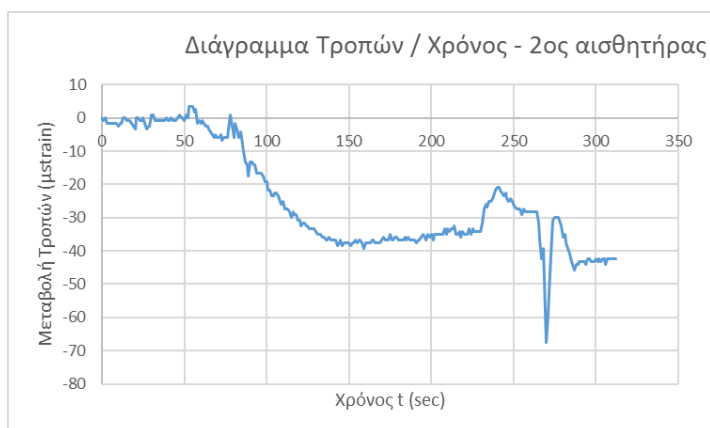


Εικόνα 232 Διάγραμμα Επιτάχυνσης, Figure 232 Acceleration Chart



Εικόνα 233 Διάγραμμα Μεταβολής Τροπών 1^{ου} αισθητήρα,

Figure 233 1st Sensor Strain Modification Chart



Εικόνα 234 Διάγραμμα Μεταβολής τροπών 2^{ου} αισθητήρα

Figure 234 2nd Sensor Strain Modification Chart

➤ **Μηχανισμός Αστοχίας του πρανούς**

Στο πρανές του πειράματος αυτού παρατηρείται ο μηχανισμός αστοχίας λόγω υποσκαφής. Το πρανές αυτού του πειράματος έχει την εξής ιδιομορφία, λόγω της υψηλής του συνεκτικότητας και είναι ήδη τόσο συμπιεσμένο ώστε να παρουσιάζει εφελκυστική ρωγμή περί το μέσον του. Το φαινόμενο ξεκινάει με υποσκαφή στον πόδα του πρανούς λόγω της δράσης των θαλάσσιων κυμάτων που προκαλούν περαιτέρω διάτμηση στις παρακατακόρυφες ρωγμές που είναι παράλληλες με τη διεύθυνση των πρανών και στη συνέχεια αποκόλληση και ανατροπή των υπερκείμενων εδαφικών στρωμάτων. Στην Εικόνα 225 όπου απεικονίζεται η αρχική κατάσταση του πρανούς, έχει σχεδιασθεί η στάθμη του νερού στο εσωτερικό του πρανούς.

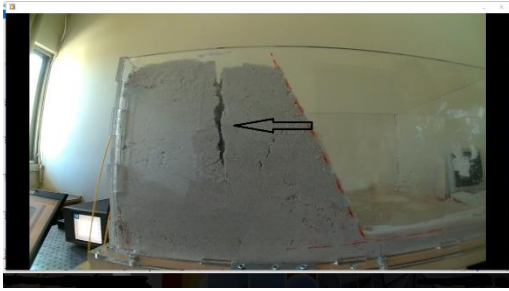
Ο μηχανισμός αστοχίας φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν:



Εικόνα 235 Αρχική κατάσταση πρανούς προ Φόρτισης
Figure 235 Initial Slope Condition before Loading



Εικόνα 236 Μηχανισμός Υποσκαφής στον Πόδα του πρανούς
Figure 236 Undercut mechanism at the foot of the slope



Εικόνα 237 Έναρξη Διάτμησης στην προϋπάρχουσα εφελκυστική ρωγμή
Figure 237 Initiation of shear in the pre-existing crack

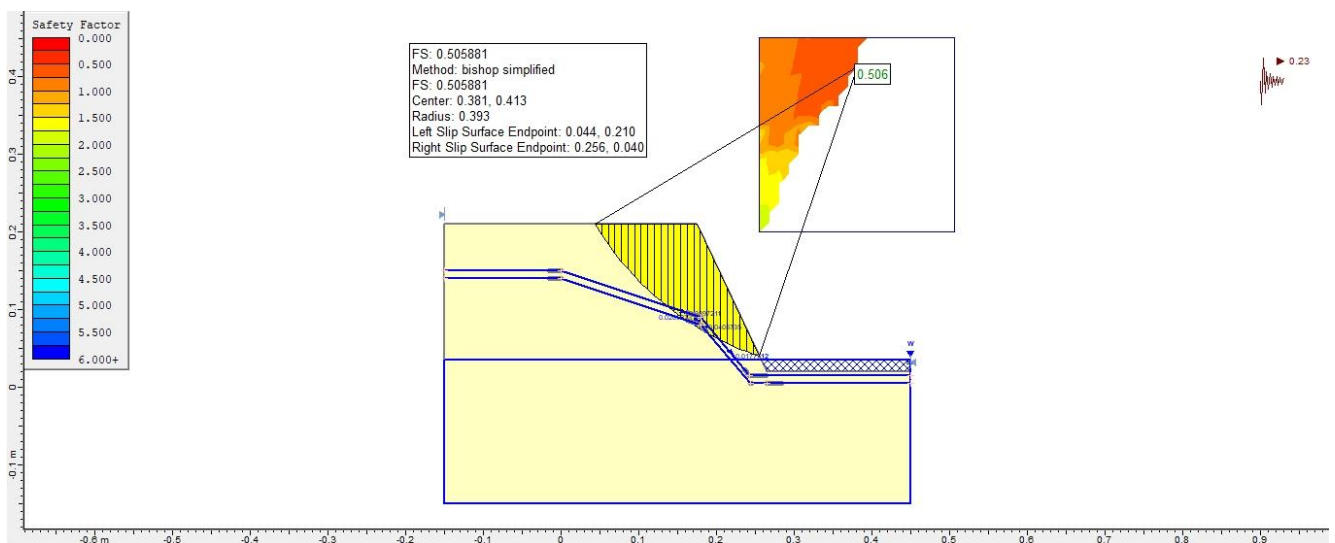


Εικόνα 238 Αστοχία Πρανούς
Figure 238 Slope Failure

Αν και η παραμόρφωση του πρανούς επήλθε σε μέτρια επιτάχυνση, είναι ασφαλές να πούμε ότι η συμπίεση του πρανούς κατά την κατασκευή όπως και η ύπαρξη αγωγού, δρουν ενισχυτικά προς το πρανές.

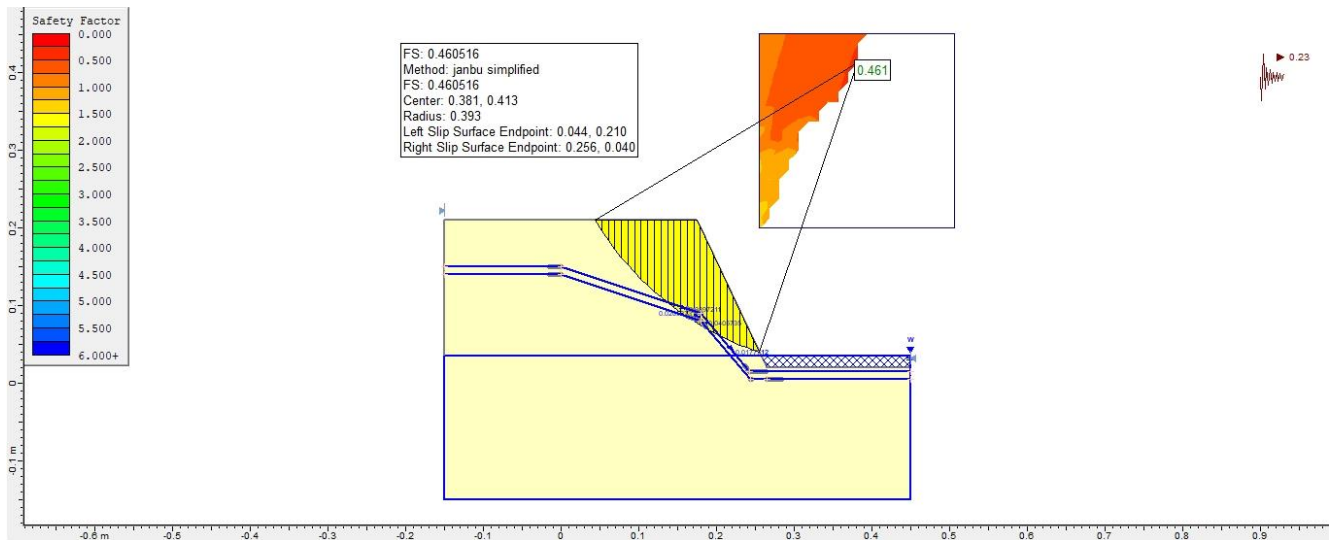
➤ **Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide**

✚ **Επιτάχυνση: 2,3 m/s²**



Εικόνα 239 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,506

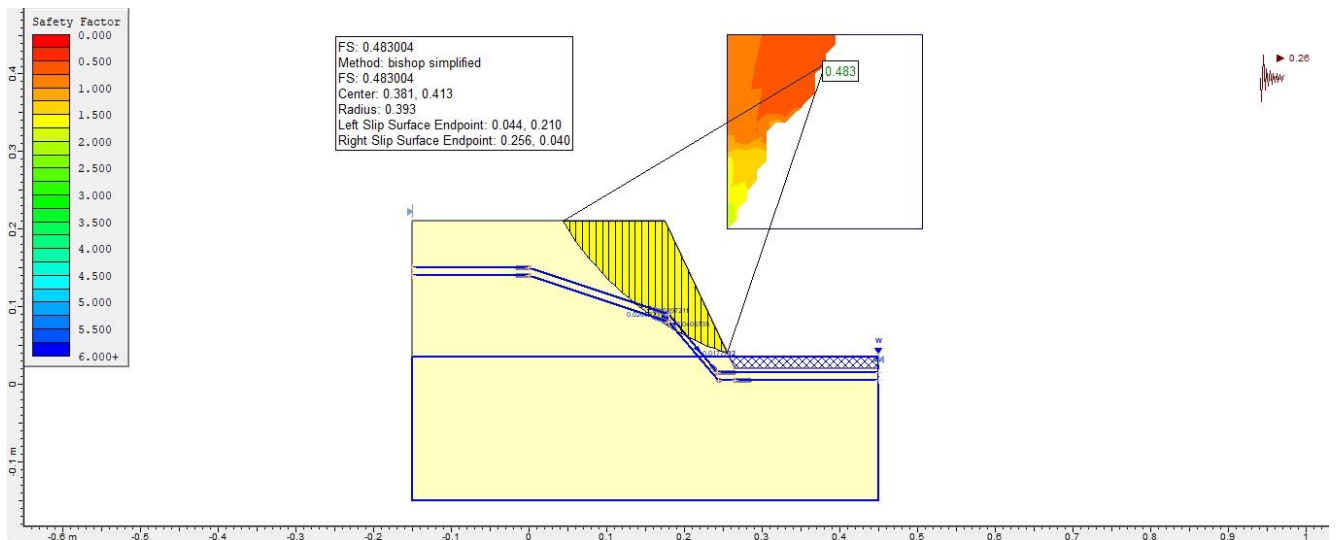
Figure 239 Analysis by the Bishop method - Safety factor FS = 0.506



Εικόνα 240 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,461$

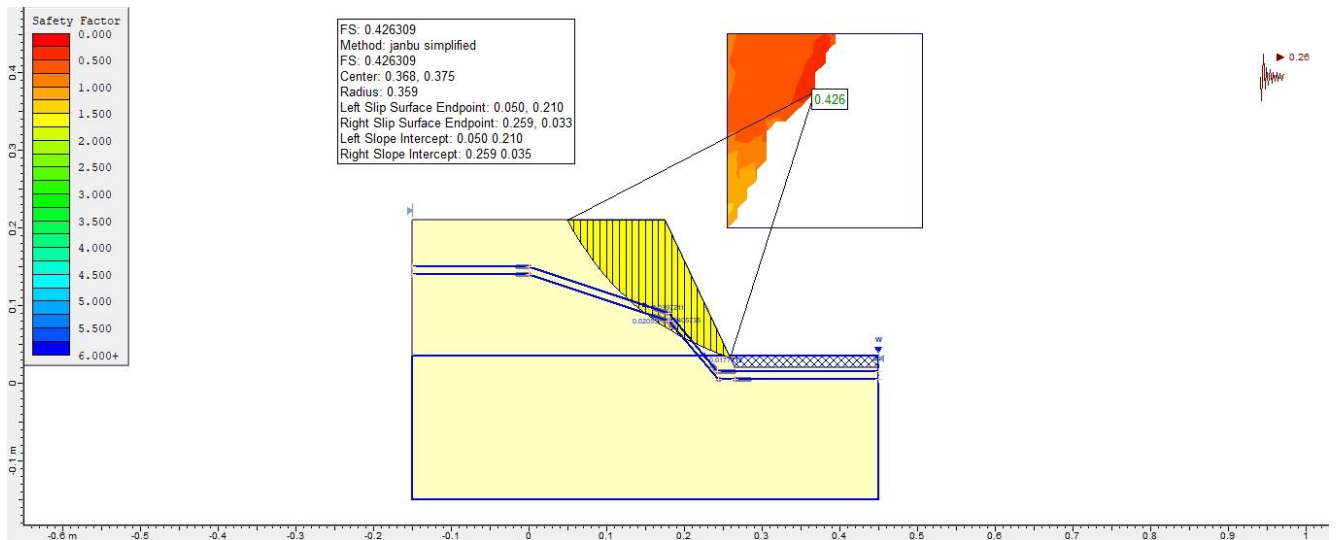
Figure 240 Analysis by Janbu method - Safety factor $FS = 0.461$

 Επιτάχυνση: $2,6 \text{ m/s}^2$



Εικόνα 241 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,483$

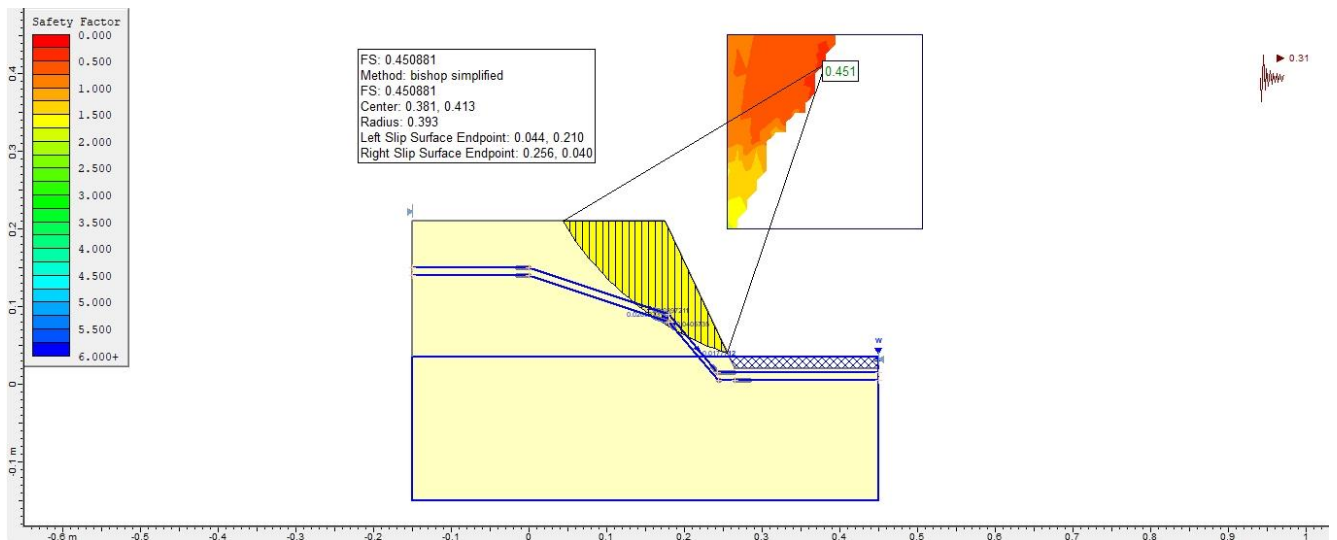
Figure 241 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0.483$



Εικόνα 242 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,426$

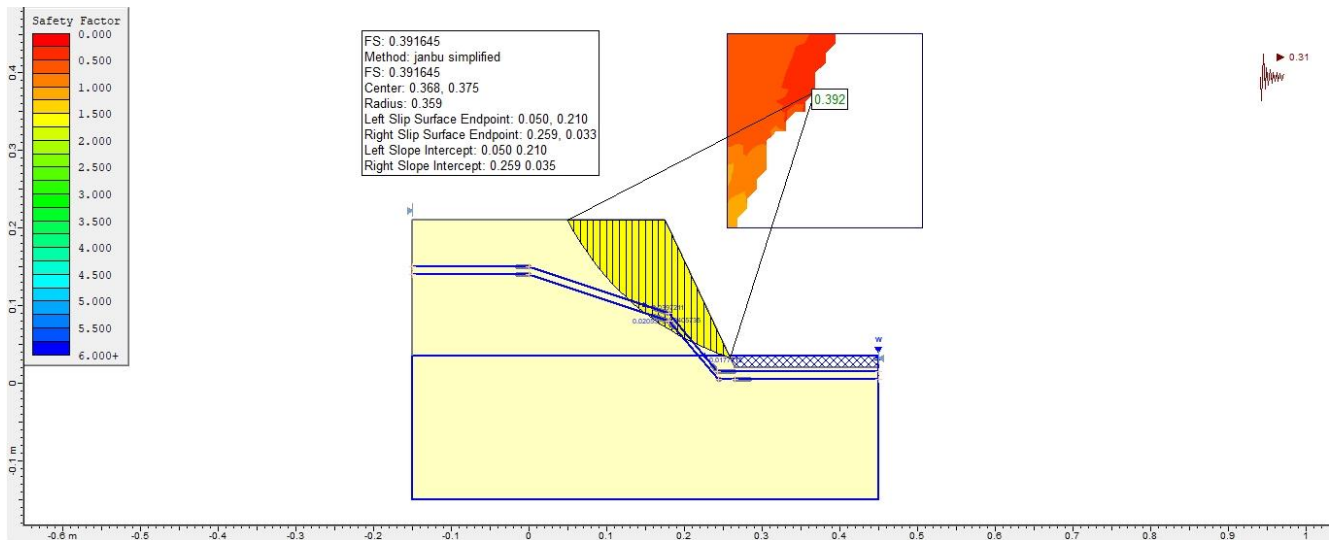
Figure 242 Analysis by Janbu method - Safety factor $FS = 0.426$

Επιτάχυνση: $3,1 \text{ m/s}^2$



Εικόνα 243 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,451$

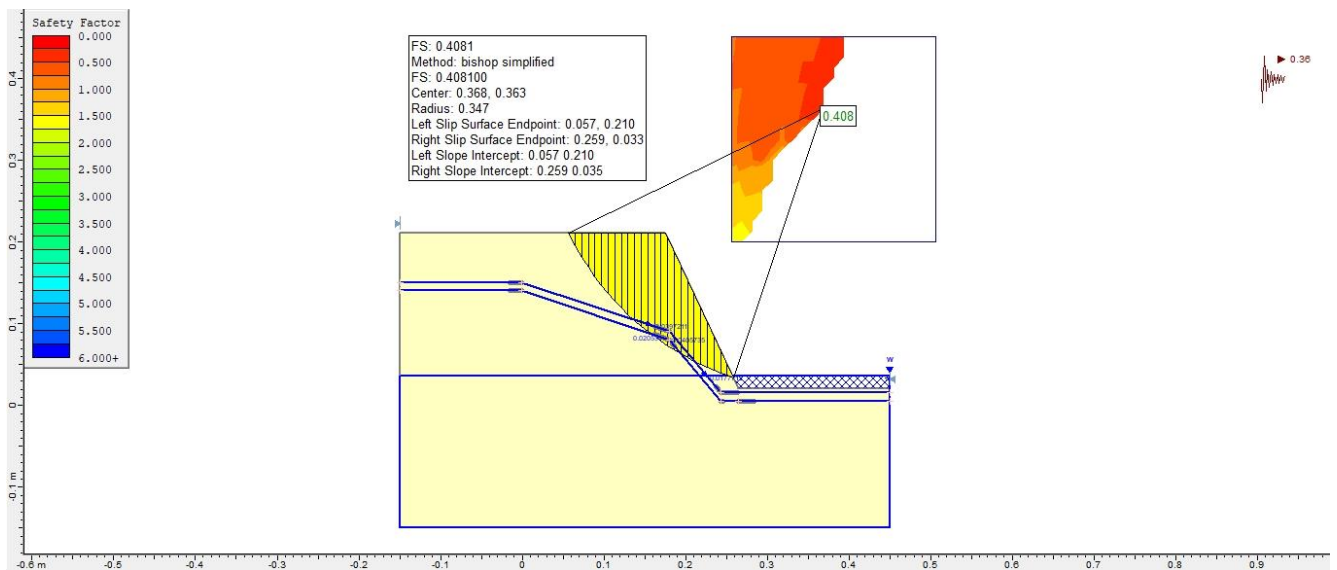
Figure 243 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0.451$



Εικόνα 244 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,392$

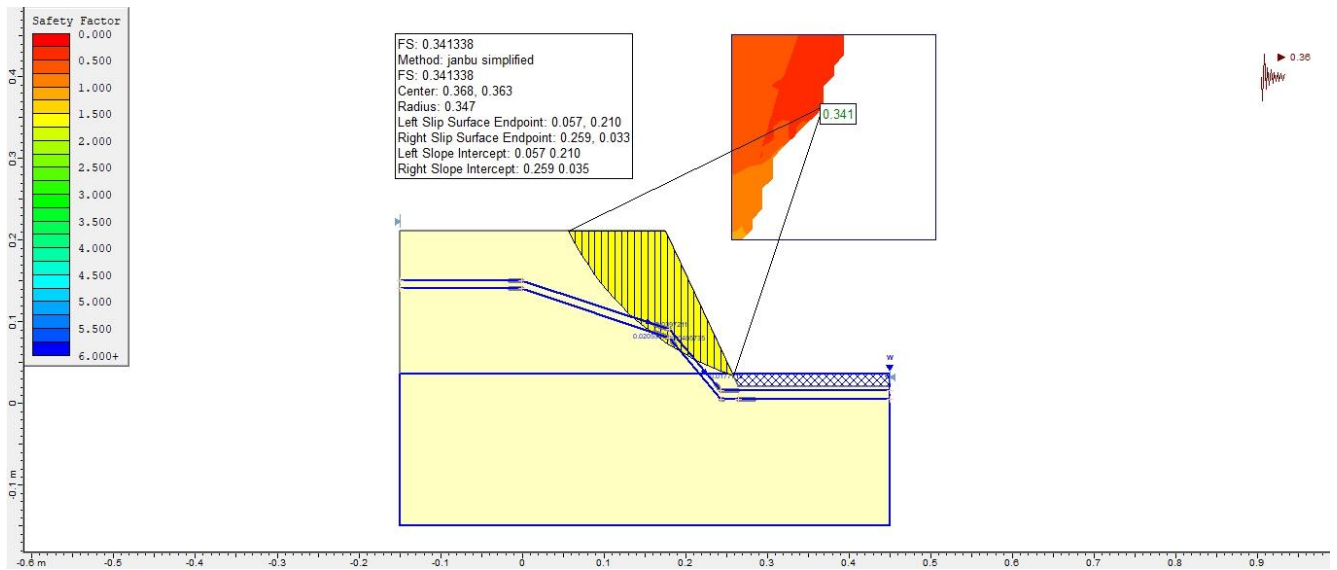
Figure 244 Analysis by the Janbu method - Safety factor $FS = 0.392$

✚ Επιτάχυνση: $3,6 \text{ m/s}^2$



Εικόνα 245 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,408$

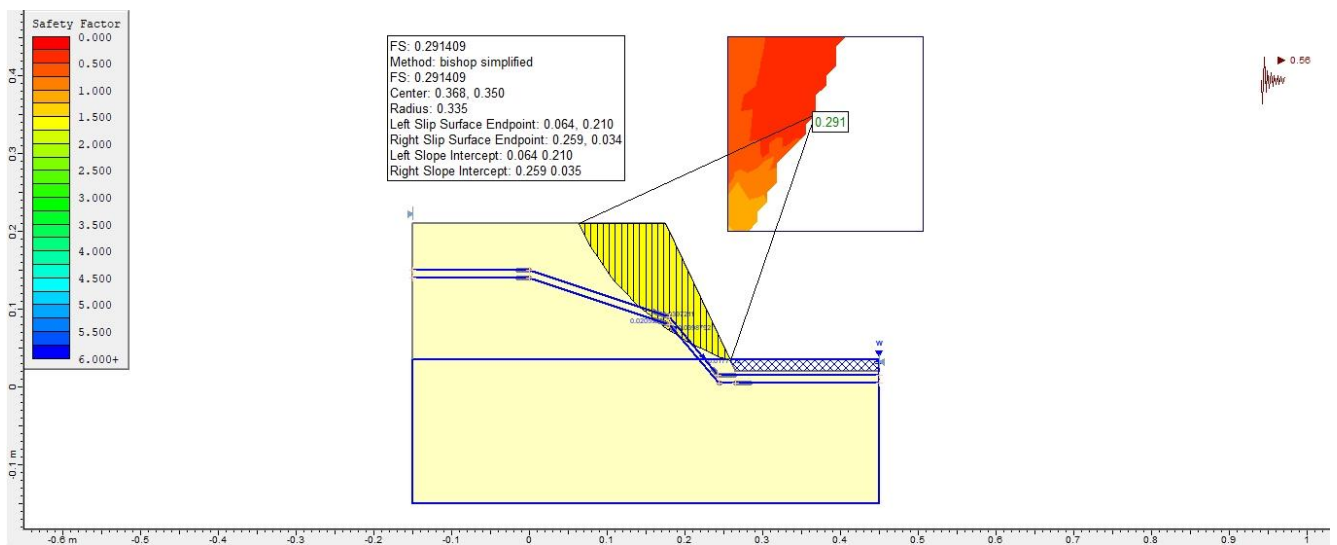
Figure 245 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0,408$



Εικόνα 246 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,341$

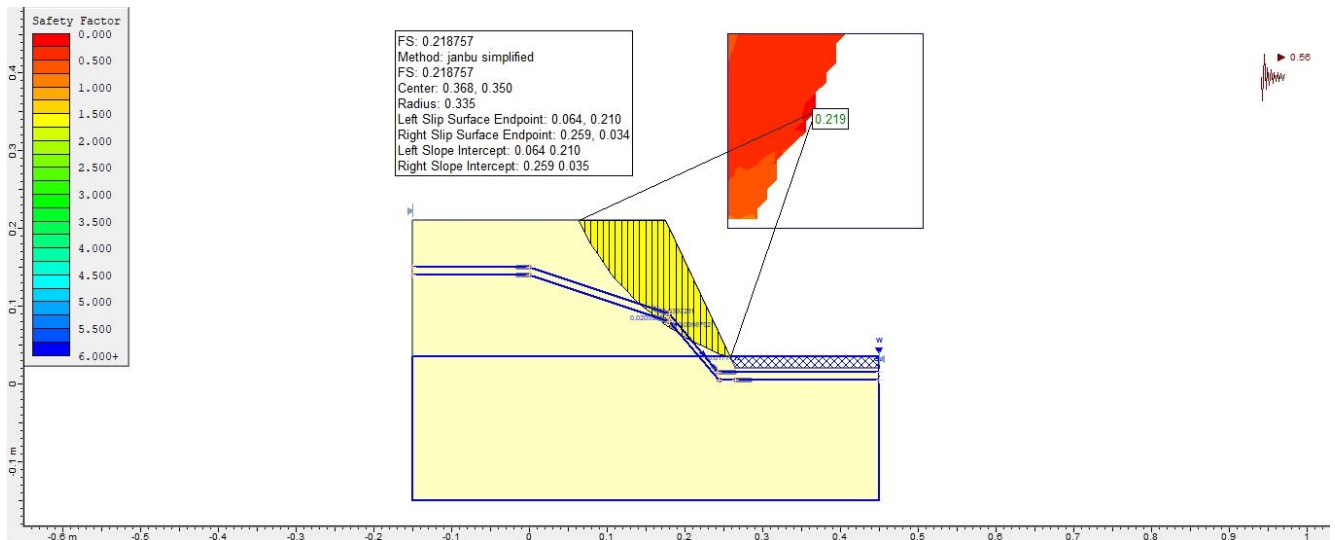
Figure 246 Analysis by Janbu method - Safety factor $FS = 0.341$

📏 Επιτάχυνση: $5,6 \text{ m/s}^2$



Εικόνα 247 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,291$

Figure 247 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0.291$



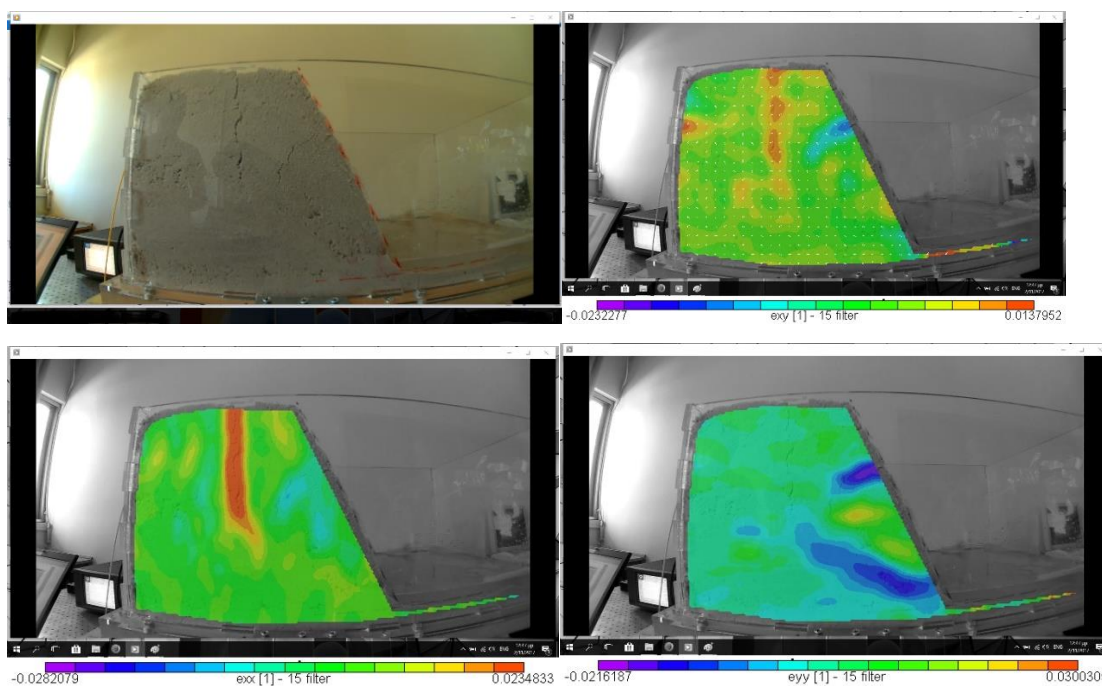
Εικόνα 248 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,219$

Figure 248 Analysis by the Janbu method - Safety factor $FS = 0.219$

➤ **Υπολογισμός τροπών με την εφαρμογή της μεθόδου Vic2D**

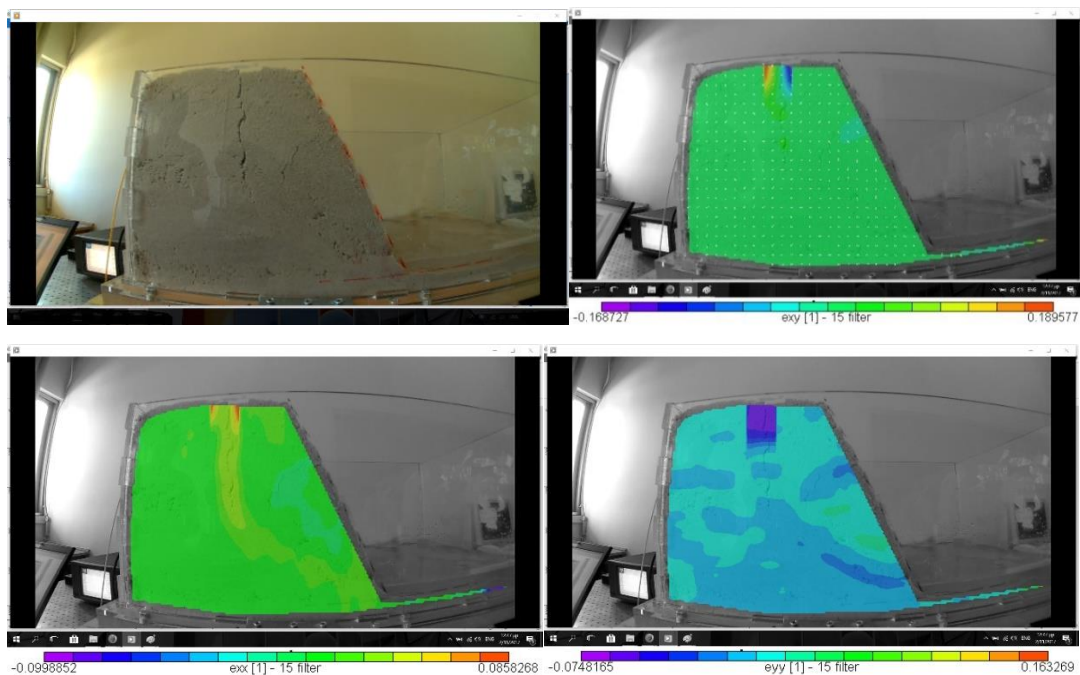
Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με την μέθοδο Vic2D. Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιούνται πολλαπλές εικόνες αναφοράς. Δηλαδή κάθε στάδιο ανάλυσης έχει τη δική του εικόνα αναφοράς που είναι το προηγούμενο στιγμιότυπο της φόρτισης σε ολόκληρο το πρανές. Η πρώτη σειρά εικόνων που θα δούμε παρακάτω, δείχνει το στιγμιότυπο στο οποίο έγινε η ανάλυση με Vic2D. Η δεύτερη σειρά εικόνων δείχνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης όπως προκύπτουν χωρίς επεξεργασία. Για διευκόλυνση στην παρατήρηση των αποτελεσμάτων μπορούμε να θεωρήσουμε αυτόματα ότι το χρώμα που καλύπτει τη μεγαλύτερη επιφάνεια είναι εκείνο που αντιστοιχεί σε μηδενική τιμή τροπής, τα πιο θερμά από αυτό χρώματα αντιστοιχούν σε θετικές παραμορφώσεις και τα πιο ψυχρά από αυτό σε αρνητικές παραμορφώσεις. Το Vic 2D παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να εμφανίζει επάνω στους χάρτες ισοϋψών καμπυλών τα βέλη των ανηγμένων παραμορφώσεων οι οποίες θεωρείται ότι συμπίπτουν με τις κύριες τάσεις, μέγιστες και ελάχιστες. Στις εικόνες που ακολουθούν παρατίθενται τα σχήματα των παραμορφωμένων εικόνων τα οποία απεικονίζουν τα βέλη των τάσεων της μέγιστης διεύθυνσης επί το πεδίο των ανηγμένων διατμητικών παραμορφώσεων κατά exy . Στη Τρίτη σειρά εικόνων αποτυπώνεται το πεδίο τιμών της ανηγμένης τροπής κατά $X exx$ και στην τέταρτη κατά $Y eyy$. Με τη διαδικασία της συσχέτισης εικόνων, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς πάντοτε την προηγούμενη εικόνα από την εικόνα που εξετάζεται και ως παραμορφωμένη την εικόνα που εξετάζεται, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα για τις ανηγμένες παραμορφώσεις κατά $X exx$ και τις ανηγμένες παραμορφώσεις κατά $Y eyy$.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρατίθενται τα σχήματα των παραμορφωμένων εικόνων τα οποία απεικονίζουν το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων. Όσον αφορά την κλίμακα που χρησιμοποιείται στο πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων κατά X , η μωβ περιοχή αντιπροσωπεύει στην υψηλότερη αρνητική τιμή και η κόκκινη περιοχή στην μεγαλύτερη θετική τιμή. Ομοίως η ίδια κατάσταση ισχύει και για την χρωματική κλίμακα των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά Y . Γενικά οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά X , e_{xx} στις κόκκινες περιοχές είναι κατά απόλυτο τιμή μεγαλύτερες από αυτές των μωβ περιοχών. Επομένως με κόκκινο χρώμα φαίνεται η περιοχή που δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση το δοκίμιο που εξετάζεται. Αντίθετα οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά Y , e_{yy} στις μωβ περιοχές είναι κατά απόλυτο τιμή μεγαλύτερες από αυτές των κόκκινων περιοχών. Επομένως με μωβ χρώμα φαίνεται η περιοχή που δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση το δοκίμιο που εξετάζεται.



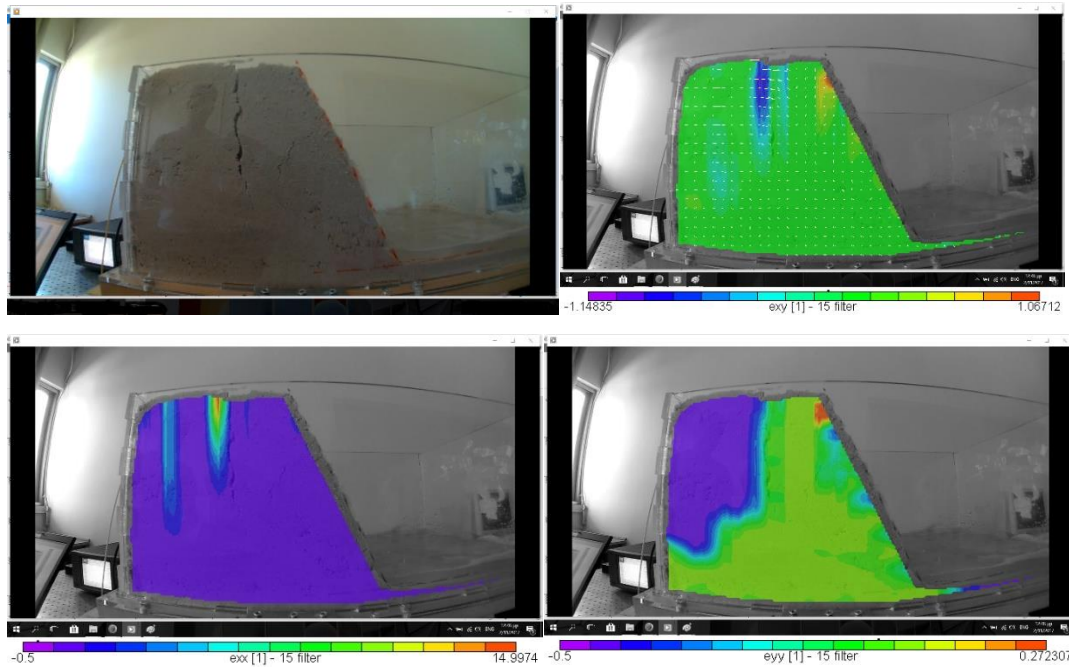
Εικόνα 249 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy}
 Figure 249 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} in Vic 2D / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}

Στο 1^ο στιγμιότυπο της ανάλυσης αναγνωρίζουμε την εφελκυστική ρωγμή στο μέσον του πρανούς και η οποία αποτυπώνεται ξεκάθαρα στο διάγραμμα παραμορφώσεων που προέκυψε από το πρόγραμμα. Στο διάγραμμα παρατηρούνται διάσπαρτες εφελκυστικές τάσεις στην τομή του πρανούς.



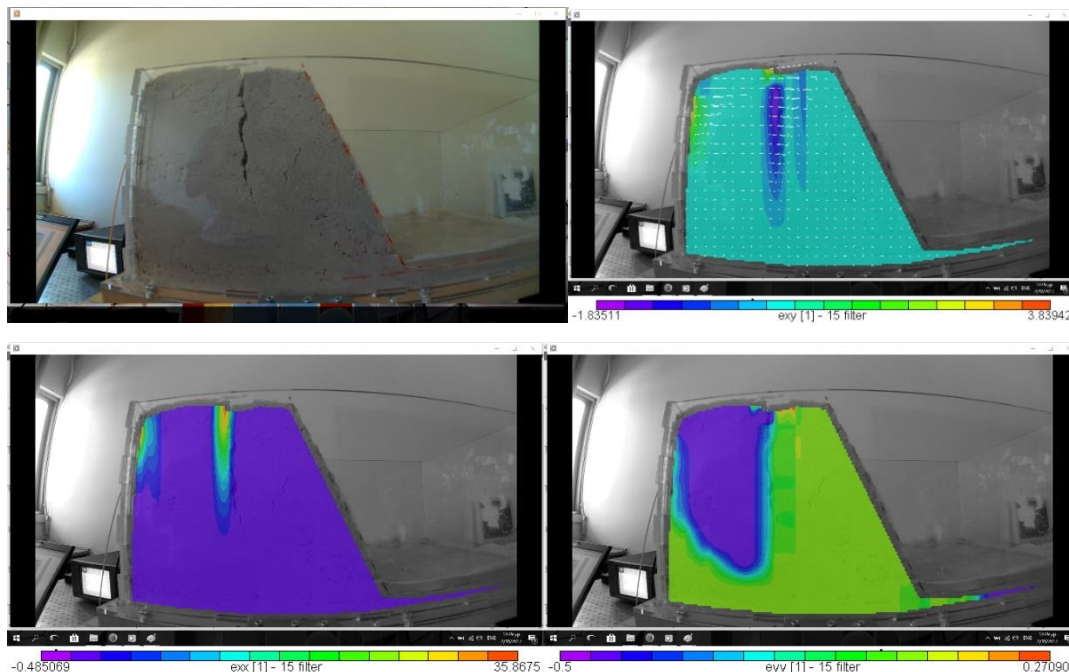
Εικόνα 250 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy}
 Figure 250 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} in Vic 2D / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}

Σε αυτό το στιγμιότυπο η εφελκυστική ρωγμή δεν εντείνεται σε σχέση με την πρότερη κατάσταση της και αυτό προκύπτει και από το καρέ του στιγμιότυπου αλλά και από το διάγραμμα παραμορφώσεων, όπου οι θετικές παραμορφώσεις αν και υπάρχουν είναι πού χαμηλής τιμής. Στην κορυφή όμως του πρηνούς διακρίνουμε στο διάγραμμα μια εφελκυστική και μία θλιπτική τροπή αριστερά και δεξιά της ρωγμής αντίστοιχα. Αυτές οι τάσεις δεν έχουν αντίκρισμα σε εμφανείς παραμορφώσεις στο παρόν στιγμιότυπο, ίσως όμως να εξηγηθούν παρακάτω αναλόγως με τη συμπεριφορά του πρηνούς.

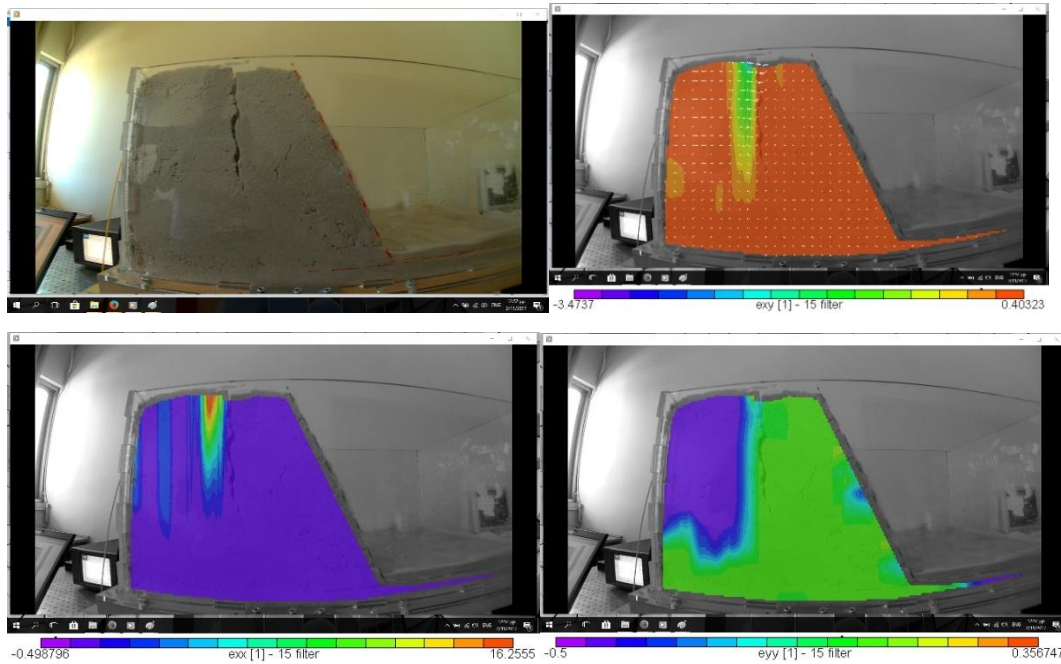


Εικόνα 251 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις exx / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eyy
 Figure 251 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in Vic 2D / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy

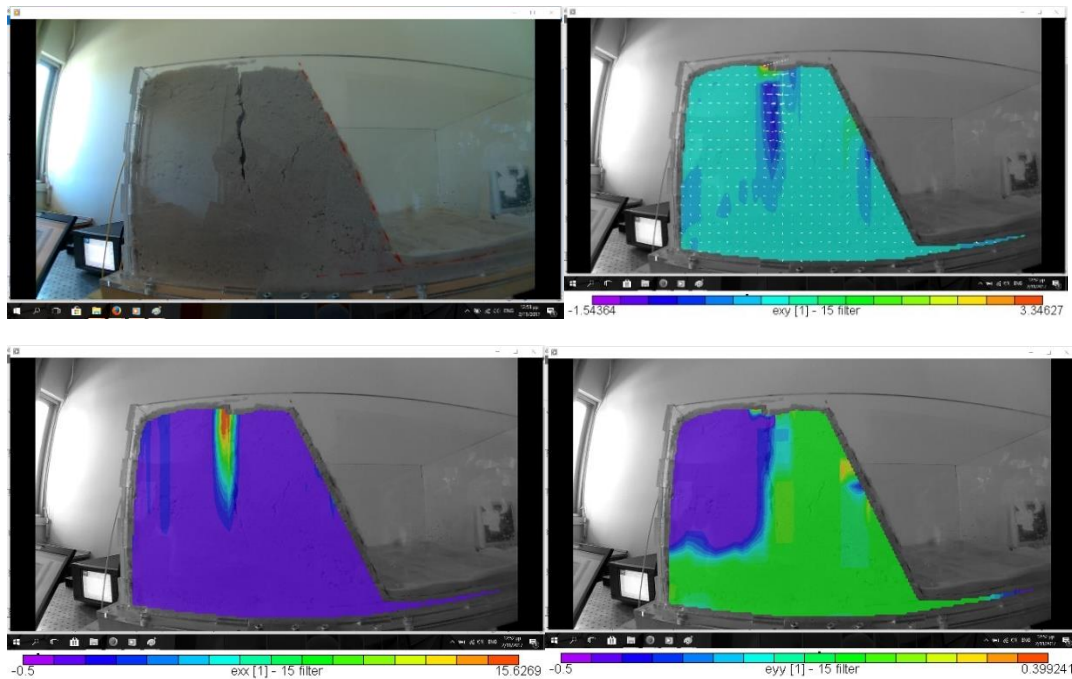
Στο διάγραμμα παραμορφώσεων παρατηρείται εναλλαγή κατακόρυφων εφελκυστικών και θλιπτικών κατακόρυφων παραμορφώσεων που ξεκινούν από την κορυφή του πρανούς



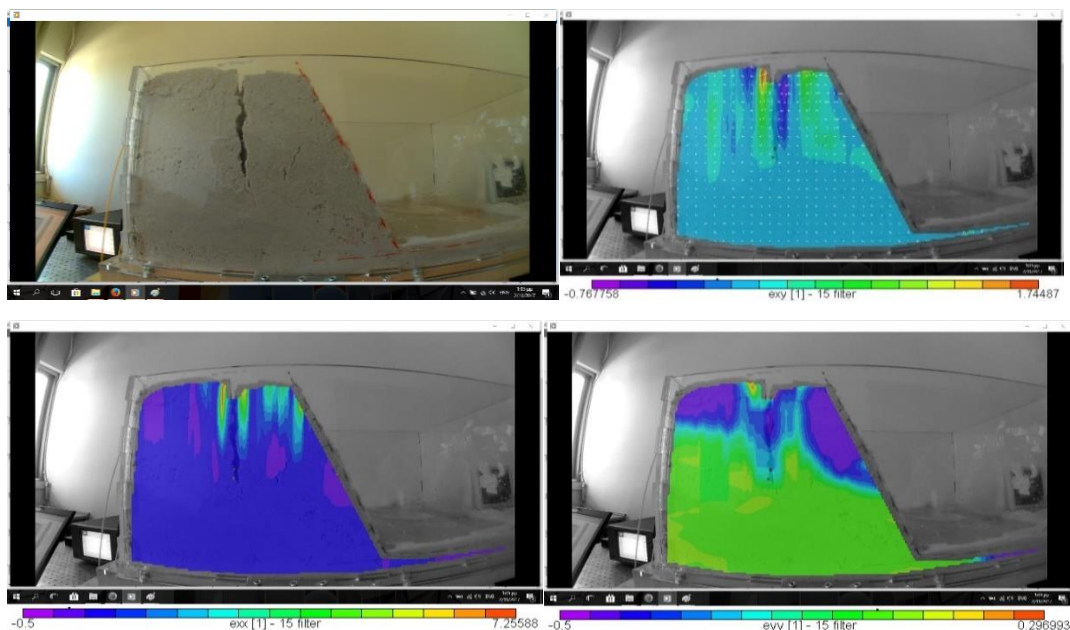
Εικόνα 252 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις exx / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eyy
 Figure 252 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in Vic 2D / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy



Εικόνα 253 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις exx / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eyy
 Figure 253 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in Vic 2D / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy

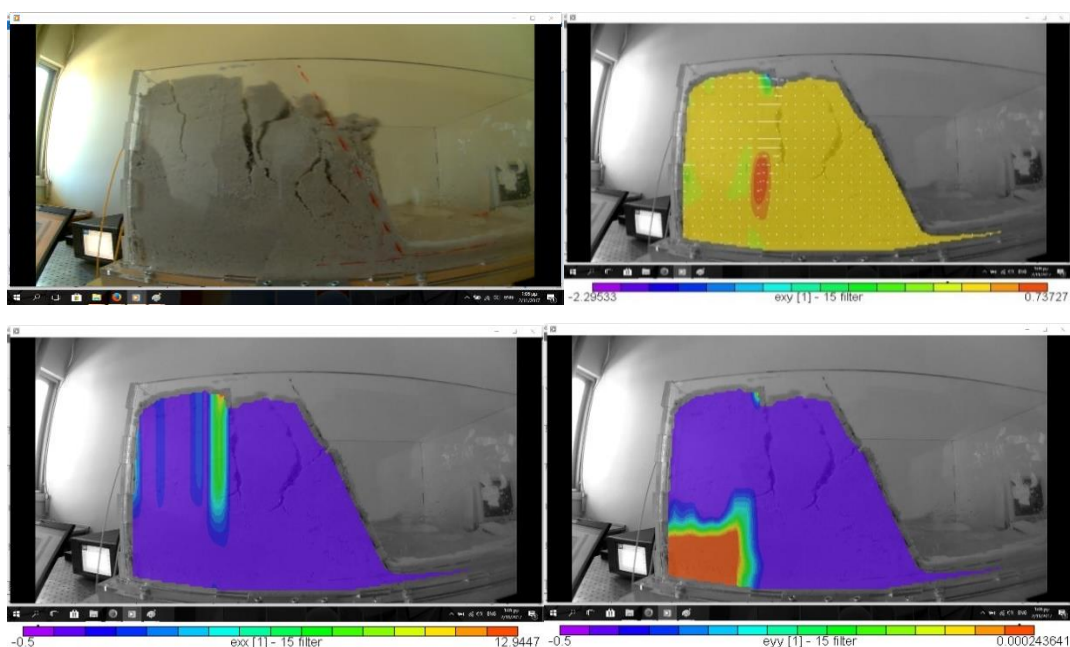


Εικόνα 254 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις exx / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eyy
 Figure 254 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in Vic 2D / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy



Εικόνα 255 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις exx / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eyy
 Figure 255 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in Vic 2D / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy

Οι κατακόρυφες θλιπτικές και εφελκυστικές παραμορφώσεις που αποτυπώνονταν στα προηγούμενα διαγράμματα αρχίζουν να αποκτούν νόημα καθώς διαφαίνονται οι πρώτες κατακόρυφες ρωγμές που προκαλούσαν αυτές τις τάσεις.



Εικόνα 256 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις exx / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eyy
 Figure 256 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in Vic 2D / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy

Συμπεράσματα ανάλυσης Vic2D

Παρατηρώντας συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των εικόνων με Vic2D, προκύπτει πως το διάγραμμα του πεδίου τιμών του ϵ_{xx} αποτυπώνει καλύτερα τις ανηγμένες παραμορφώσεις από τις εικόνες που πήραμε από τη διεξαγωγή του πειράματος. Το πεδίο τιμών της ανηγμένης τροπής κατά γ δεν δίνει σαφή και αξιοποιήσιμα αποτελέσματα. Ενώ τα διαγράμματα του πεδίου τιμών των διατμητικών παραμορφώσεων αποτυπώνουν εξίσου με εκείνα των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά X , δίνοντας όμως λιγότερη πληροφορία.

Επίσης παρατηρείται η απουσία του φαινομένου της τοπικής συγκέντρωσης τροπών (strain localization), όπως είδαμε λόγω της παρουσίας νερού και των κυματικών σχηματισμών που δημιουργούνται κατά τη φόρτιση, ο μηχανισμός αστοχίας προκαλεί επίπεδη αστοχία στο πρηνές, και στο φαινόμενο της τοπικής συγκέντρωσης τροπών, αυτή εμφανίζεται σε μία διάσταση λιγότερη από ότι η θραύση. Αντιθέτως υπάρχει διάχυτη θραύση και σταθεροποιείται στην έκταση του πρηνούς καθώς θρυμματίζεται το σύνολο του ολισθαίνοντος σώματος. Αυτή η διαφοροποίηση στη συμπεριφορά του πρηνούς οφείλεται στην παρουσία του αγωγού.

Σύγκριση Πειράματος 6° και Πειράματος 11°

Τα δύο μοντέλα των πειραμάτων έχουν παρόμοια γεωμετρία με μικρές διαφορές στις τιμές τους, χάρη σε αυτό δίνεται η δυνατότητα να γίνει διερεύνηση στην επιρροή του αγωγού στα αποτελέσματα των υπολογιστικών και πειραματικών αναλύσεων. Στον Πίνακα 14 βλέπουμε συγκεντρωτικά τα στοιχεία των δύο πειραμάτων ώστε να διευκολυνθεί η μεταξύ τους σύγκριση.

Πίνακας 13 Σύγκριση Πείραμα 6 και Πείραμα 11, Table 13 Comparison Experiment 6 and Experiment 11

Αριθμός Πειράματος	6°	11°	11°
Επιτάχυνση	2,85 m/s ²	2,6 m/s ²	3,1 m/s ²
Γεωμετρία Τραπεζίου	B=26cm β=15cm u=19cm φ=60°	B=26,5cm β=17,5cm u=21cm φ=60°	B=26,5cm β=17,5cm u=21cm φ=60°
Στάθμη Νερού	4 cm	3 cm	3 cm
Τροπές Ελεύθερου Αισθητήρα Οπτικών Ινών	450 μstrain	10 μstrain	20 μstrain
Τροπές Αισθητήρα Οπτικών Ινών σε Αγωγό	-	10 μstrain	15 μstrain
F.S. κατά Bishop	0,753	0,483	0,451
F.S. κατά Janbu	0,665	0,426	0,392
S.R.F. κατά Phase	0,43	-	-

Στα δύο πειραματικά μοντέλα οι διαφορές είναι η παρουσία αγωγού στο 11^ο πείραμα, ενώ οι θέσεις των αισθητήρων οπτικών ινών διαφοροποιούνται όπως και ο αριθμός τους. Αρχικά, σε πειραματικό επίπεδο, παρατηρούμε πως η παρουσία αγωγού επηρεάζει τις τροπές που καταγράφει ο ελεύθερος αισθητήρας οπτικών ινών, μειώνοντας σημαντικά την τιμή τους και στις δύο επιταχύνσεις. Μπορούμε να θεωρήσουμε ο αγωγός αφενός λειτουργεί ενισχυτικά υποκαθιστώντας έναν οπλισμό στο πρανές, αφετέρου προστατεύει των αισθητήρα οπτικών ινών που βρίσκεται σε κατώτερη θέση και επομένως οι τροπές κάτω από τον αγωγό μειώνονται αισθητά. Όσον αφορά τα υπολογιστικά μοντέλα με το λογισμικό Slide, ο αγωγός επιδρά αρνητικά στους συντελεστές ασφαλείας, απομειώνοντας τη τιμή τους. Παρόλο που στο πειραματικό μέρος ο αγωγός δρα ενισχυτικά προς το πρανές. Ενώ στο λογισμικό του Phase δεν κατάφερε να επιτευχθεί σύγκλιση ώστε να μετρηθεί ο Συντελεστής Μείωσης της Αντοχής στο 11^ο υπολογιστικό μοντέλο.

6.14 Πείραμα 12^ο

➤ Περιγραφή

Το πείραμα αυτό, είναι η τελική δοκιμή του μοντέλου με την παρουσία αγωγού στη σεισμική τράπεζα με πλήρη την πειραματική διάταξη που δημιουργήθηκε. Σκοπός του είναι η διερεύνηση των τροπών και των παραμορφώσεων που προκύπτουν με όλες τις μεθόδους ανάλυσης. Περιγράφονται επίσης τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, και η θέση των μετρητικών διατάξεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταγραφών και της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Slide και του Vic2D.

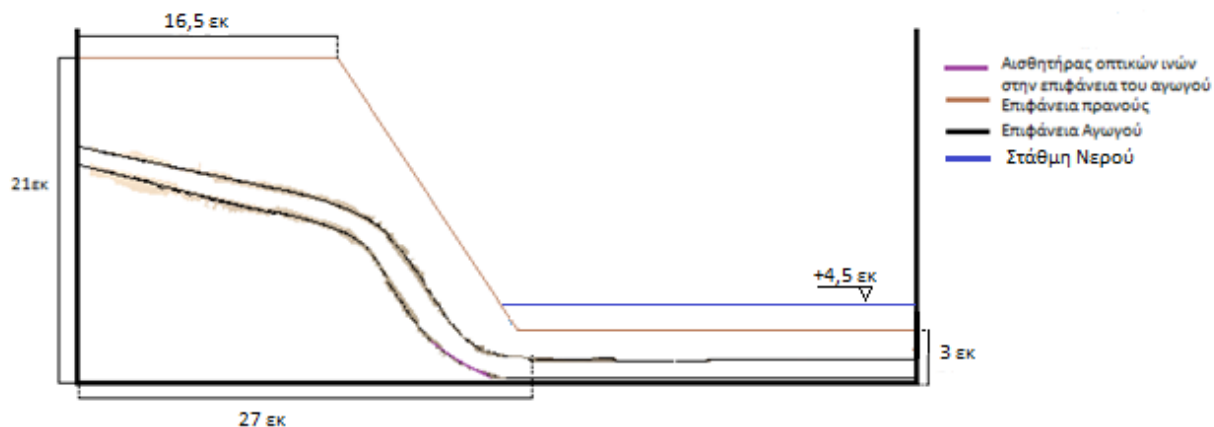


Εικόνα 257 Ολοκλήρωση κατασκευής του Πειραματικού μοντέλου

Figure 257 Construction of the Experimental Model

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με 4 διαφορετικές επιταχύνσεις έως ότου αστόχησε το πρανές, για κάθε μία από τις οποίες γίνεται η επεξεργασία των καταγραφών και υπολογιστική ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Slide για κάθε επιτάχυνση. Στο τέλος υπάρχει ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με το λογισμικό Vic 2D.

Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε αγωγός χαλκού πάχους ενός χιλιοστού και διαστάσεις όπως φαίνεται στο σχέδιο. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν φύλλο χαλκού πάχους ενός χιλιοστού, κυλινδρικό καλούπι διαμέτρου 1 εκατοστού και κόλλα γενικών χρήσεων. Το μοντέλο αυτό κατασκευάστηκε με βρεγμένη άμμο. Μετά την κατασκευή του μοντέλου προσθέσαμε 5 λίτρα νερού. Οι διαστάσεις είναι όπως φαίνονται στην εικόνα.



Εικόνα 258 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 12, Figure 258 Side View of Experimental Model 12

Οι μετρήσεις με το Penetrometro είναι: για $d_1 = 20\text{mm}$ και $d_2 = 25\text{mm}$, έχω αντίστοιχα $q_1 = 0,80\text{ kg/cm}^2$ και $q_2 = 0,95\text{kg/cm}^2$ και $Q_2 = 1,85\text{ kg}$ ώστε να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τη συνοχή του εδάφους μας. Αριστερά στο κουτί, ακριβώς στο μέσο της επιφάνειας, τοποθετούμε τον QCN επιταχυνσιογράφο μας με τον άξονα Z στην κατεύθυνση της κίνησης και τον Y \Rightarrow . Ο αισθητήρας οπτικών ινών τοποθετείται με κόλλα στον αγωγό στο σημείο του σωλήνα που αναμένονται οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 257 που ακολουθεί.



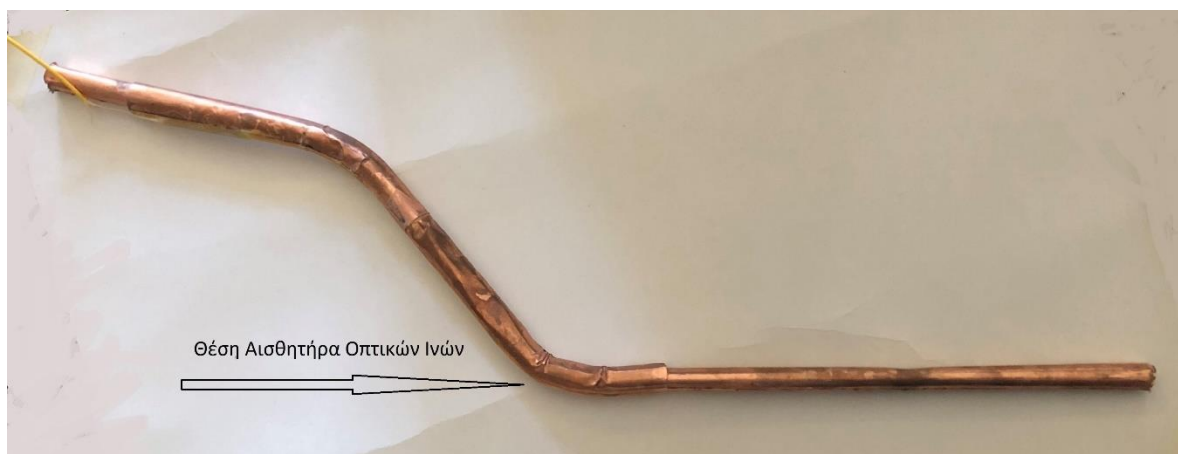
Εικόνα 259 Αισθητήρας Οπτικών Ινών στον Αγωγό Χαλκού,

Figure 259 Fiber Optic Sensor on the Copper Pipe

Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη B9 με συχνότητα 4 ρεύμα στο 1,5 και θέση σεισμικής τράπεζας Ampl. \Rightarrow . Ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα από ηρεμία μέχρι τη θέση Διακόπτη \Rightarrow . Το πρανές αστόχησε σε 40sec μετά την επιβολή της επιτάχυνσης, και σε αυτό το χρόνο μόλις που είχε φτάσει σε επιτάχυνση περίπου 3 m/s^2 . Η τροπή σε αυτή την επιτάχυνση 140 μstrain όπως καταγράφηκε από τον αισθητήρα και είχε και εμφανή αστοχία που

καταγράφηκε τόσο από τα οπτικά μέσα όσο και από τον αισθητήρα (το σημείο της απότομης πτώσης της μεταβολής τροπών). Στη συνέχεια η μεταβολή τροπών παρέμεινε σταθερή, μέχρις ότου αυξήσαμε την ένταση της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα. Η επιτάχυνση έφτασε σε $4,0 \text{ m/s}^2$ και είχαμε νέα αστοχία σε συνέχεια της προηγούμενης, με την τροπή να φτάνει σε 160 μstrain .

Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε στη θέση που βλέπουμε στην Εικόνα 258, που ακολουθεί. Στην ίδια εικόνα έχουμε την ευκαιρία να δούμε την τελική κατάσταση στην οποία περιέρχεται ο αγωγός μετά τη φόρτιση του.

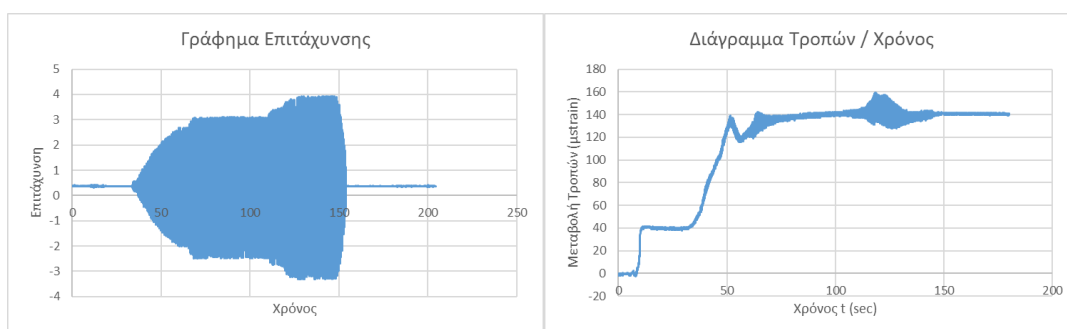


Εικόνα 260 Τελική Κατάσταση Αγωγού Μετά την Επιβολή της Φόρτισης

Figure 260 Final Pipeline Status Post Loading

➤ Αποτελέσματα Καταγραφής Αισθητήρων

Οι καταγραφές του αισθητήρα οπτικών ινών παρουσιάζονται στην Εικόνα 261, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.



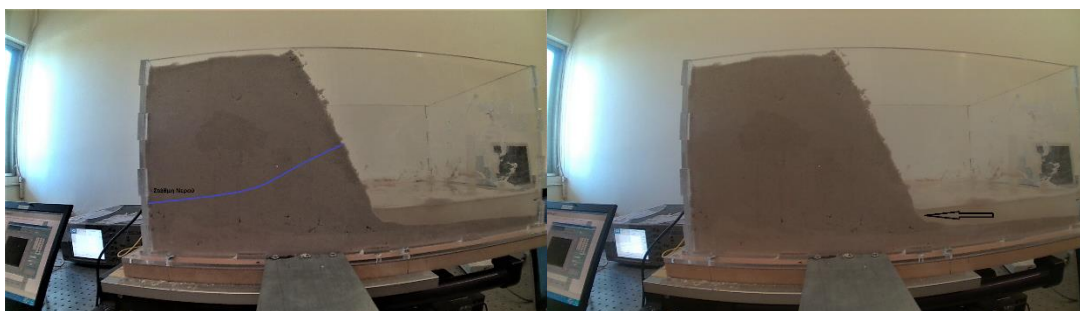
Εικόνα 261 Διάγραμμα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών

Figure 261 Acceleration and Strain Modification Chart

➤ **Μηχανισμός Αστοχίας του πρανούς**

Στο πρανές του πειράματος αυτού παρατηρείται ο μηχανισμός αστοχίας λόγω υποσκαφής. Το φαινόμενο ξεκινάει με υποσκαφή στον πόδα του πρανούς λόγω της δράσης των θαλάσσιων κυμάτων που προκαλούν παρακατακόρυφες ρωγμές παράλληλες με τη διεύθυνση των πρανών και στη συνέχεια αποκόλληση και ανατροπή των υπερκείμενων εδαφικών στρωμάτων. Στην Εικόνα 260 όπου απεικονίζεται η αρχική κατάσταση του πρανούς, έχει σχεδιασθεί η στάθμη του νερού στο εσωτερικό του πρανούς.

Ο μηχανισμός αστοχίας φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν:



Εικόνα 262 Αρχική κατάσταση πρανούς προ Φόρτισης
Figure 262 Initial Slope Condition before Loading

Εικόνα 263 Μηχανισμός Υποσκαφής στον Πόδα του πρανούς
Figure 263 Undercut Mechanism at the Foot of the Slope



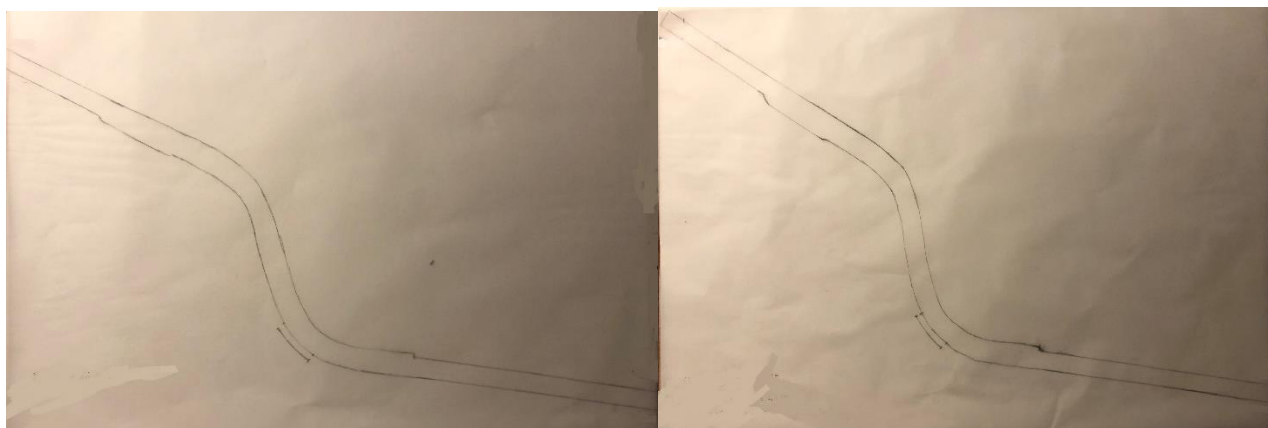
Εικόνα 264 Δημιουργία Εφελκυστικής Ρωγμής
Figure 264 Initiating tensile cracks

Εικόνα 265 Έναρξη Διάτμησης
Figure 265 Initiating a Shear



Εικόνα 266 Αστοχία Πρανούς, Figure 266 Slope Failure

Στις Εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε την επίδραση της αστοχίας του πρανούς στον αγωγό. Στην Εικόνα 267 παρουσιάζεται το προφίλ του αγωγού στην αρχική κατάσταση του, και στην Εικόνα 268 βλέπουμε το προφίλ του αγωγού στην τελική του κατάσταση, μετά την επιβολή της φόρτισης.

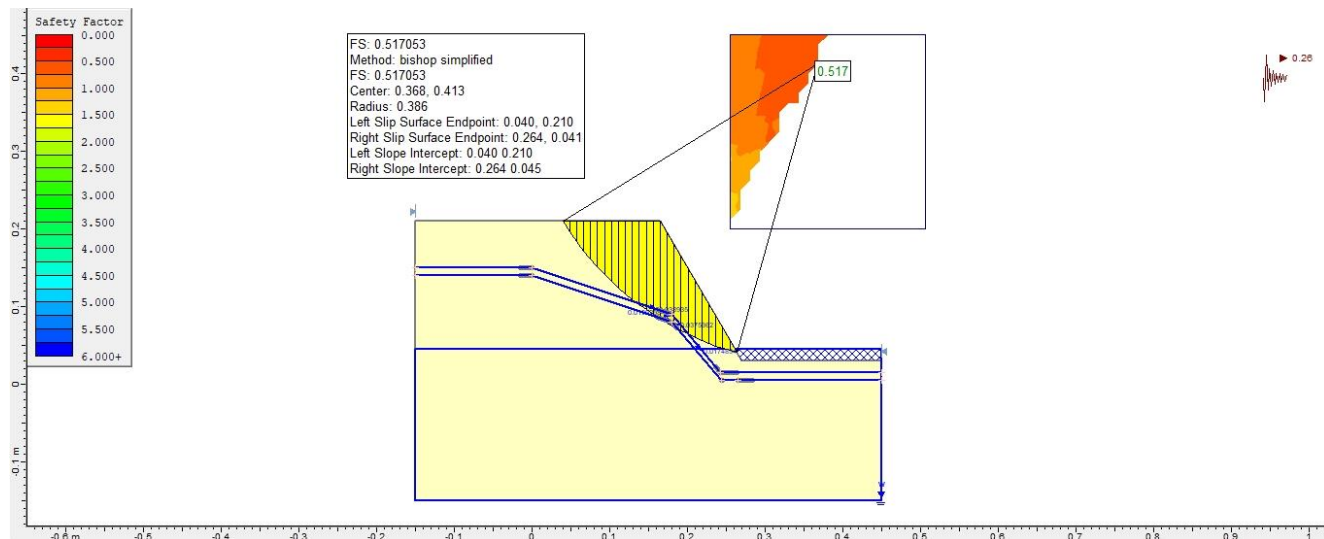


Εικόνα 267 Προφίλ Αγωγού Πριν τη Φόρτιση
Figure 267 Pipeline Profile Pre-Loading

Εικόνα 268 Προφίλ Αγωγού Μετά τη Φόρτιση
Figure 268 Pipeline Profile Post-Loading

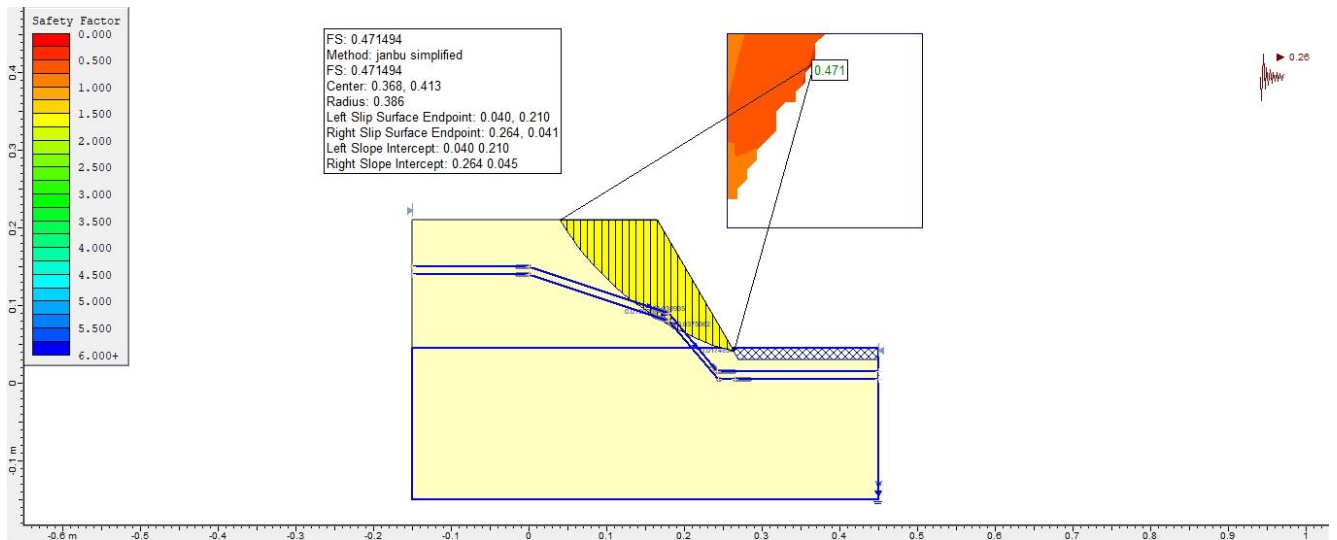
➤ **Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide**

🚧 **Επιτάχυνση: 2,6 m/s²**



Εικόνα 269 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,517

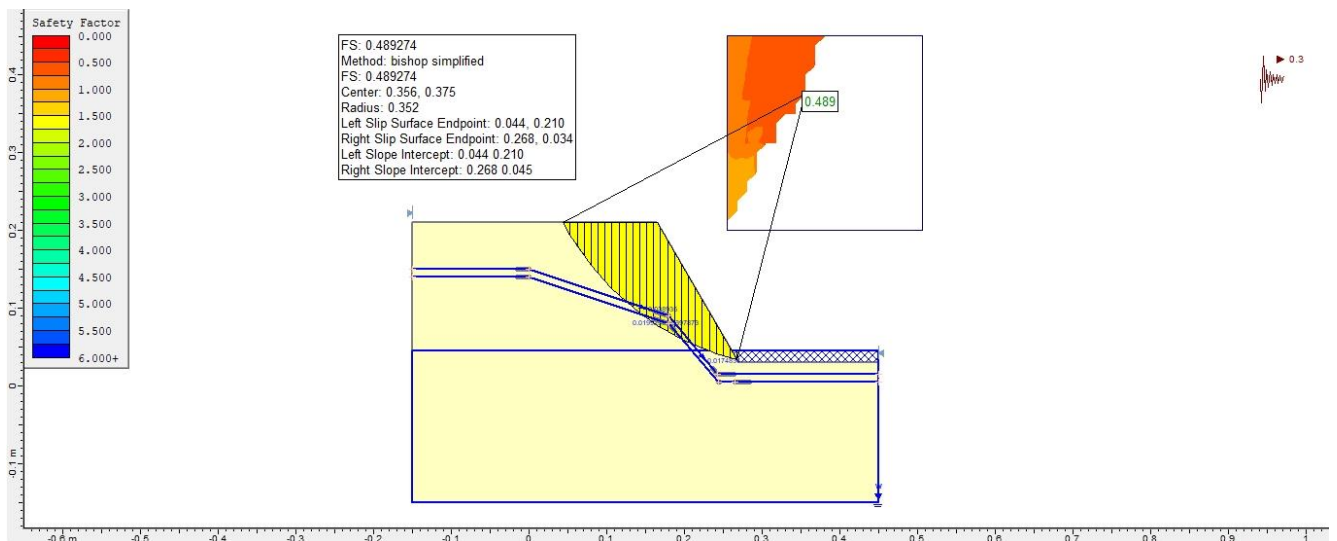
Figure 269 Analysis by the Bishop method - Safety factor FS = 0.517



Εικόνα 270 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,471$

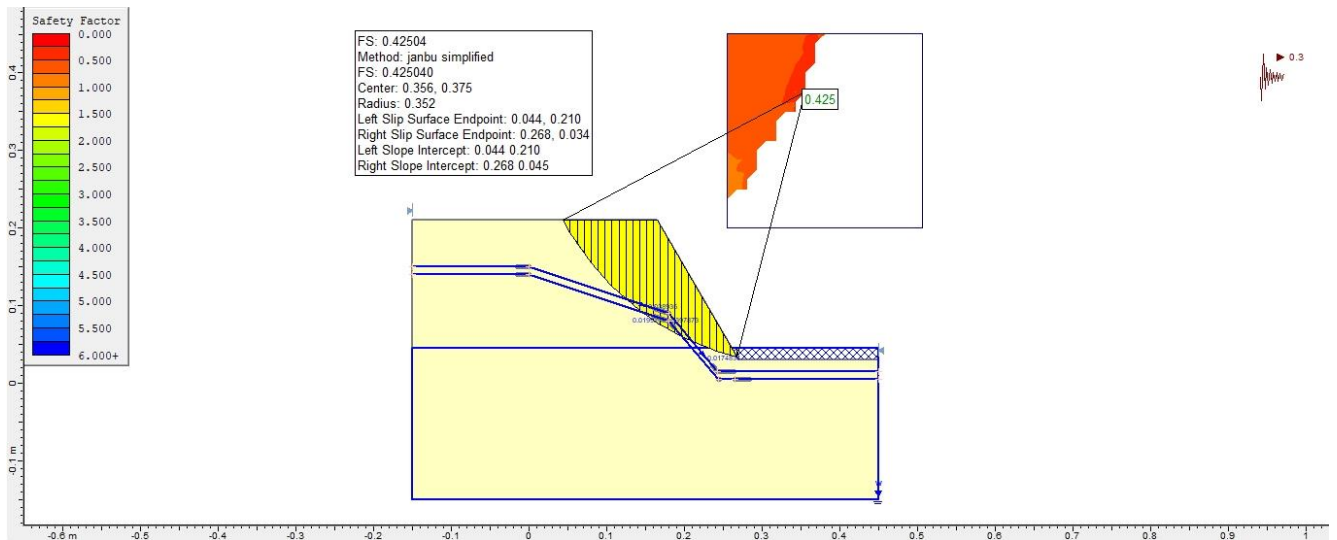
Figure 270 Analysis by the Janbu method - Safety factor $FS = 0.471$

 Επιτάχυνση: $3,0 \text{ m/s}^2$



Εικόνα 271 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,485$

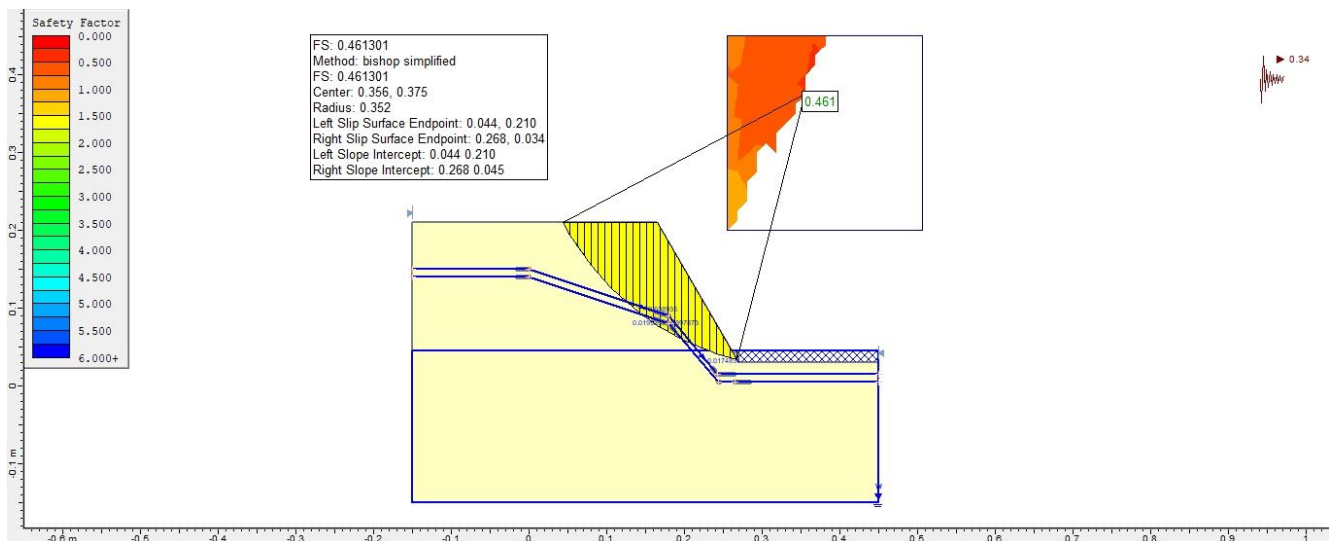
Figure 271 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0.485$



Εικόνα 272 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,425$

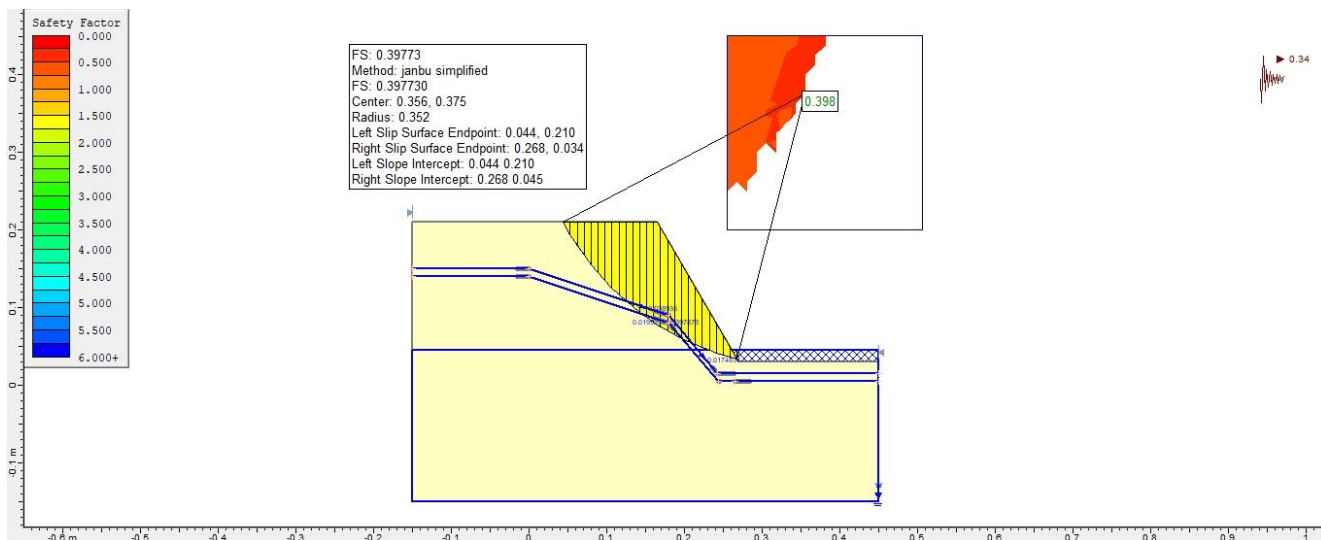
Figure 272 Analysis by Janbu method - Safety factor $FS = 0.425$

 Επιτάχυνση: $3,4 \text{ m/s}^2$



Εικόνα 273 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,461$

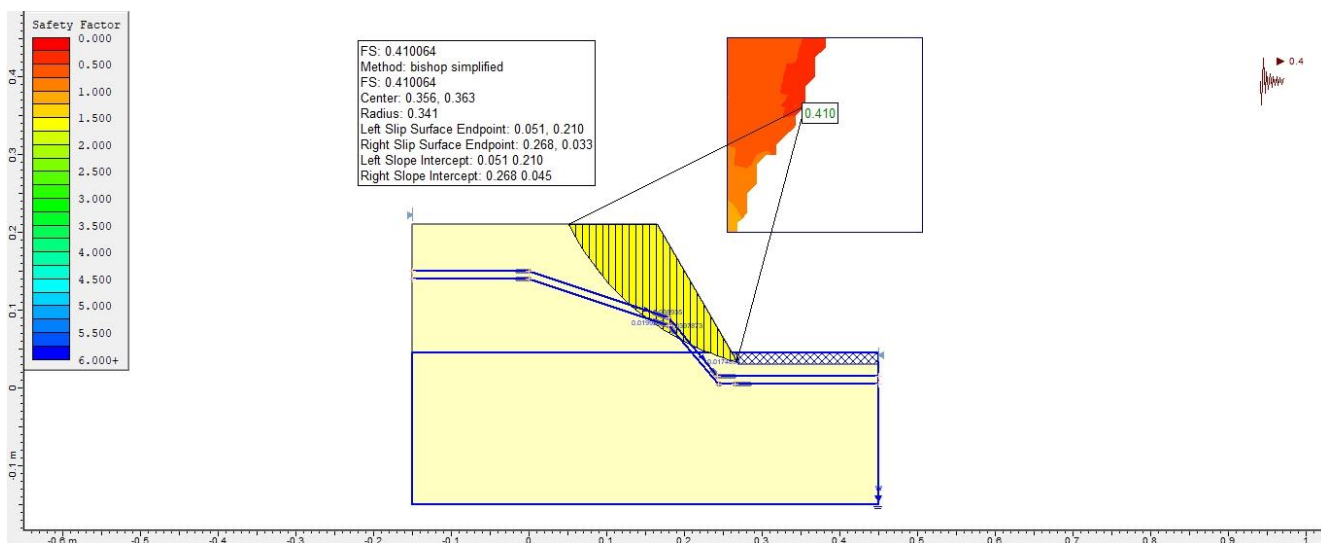
Figure 273 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0.461$



Εικόνα 274 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,398$

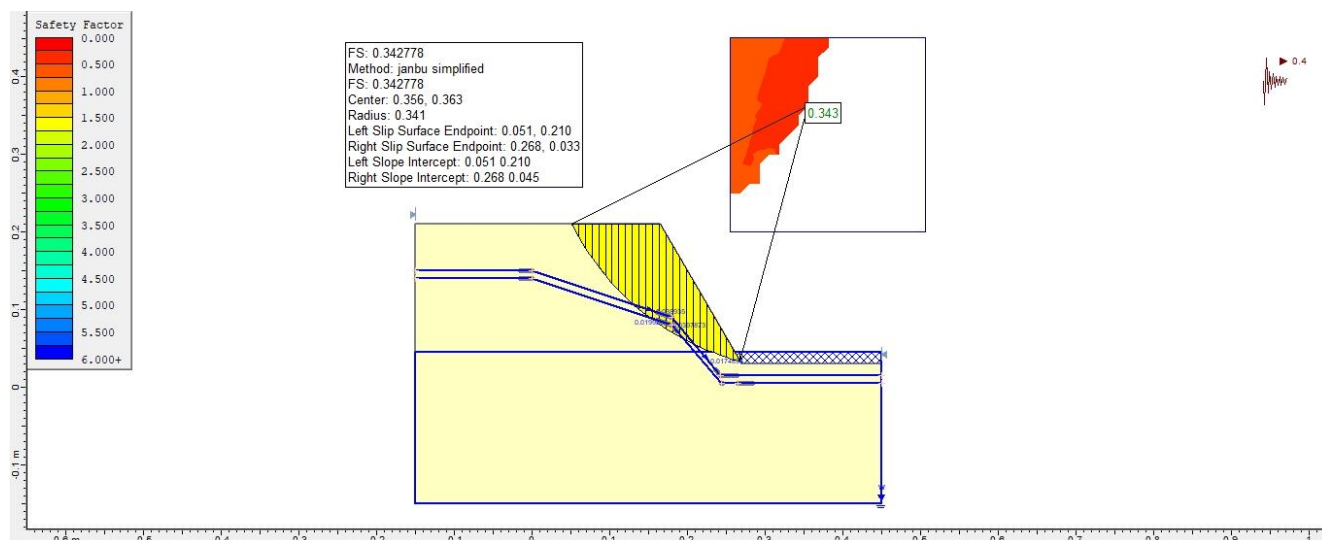
Figure 274 Analysis by the Janbu method - Safety factor $FS = 0,398$

 Επιτάχυνση: $4,0 \text{ m/s}^2$



Εικόνα 275 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,410$

Figure 275 Analysis by the Bishop method - Safety factor $FS = 0,410$



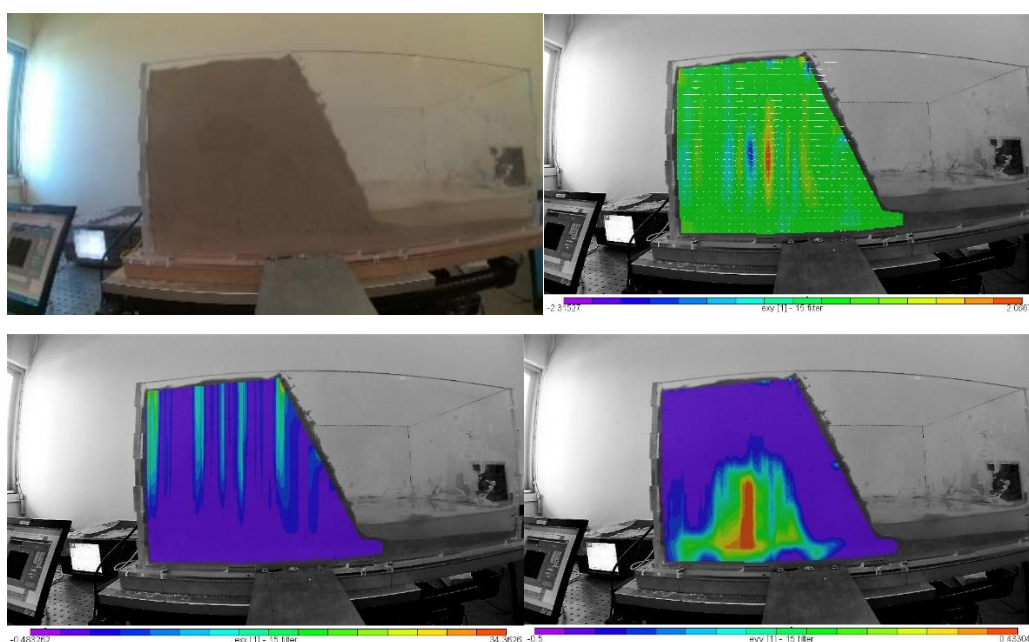
Εικόνα 276 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,343$

Figure 276 Analysis by the Janbu method - Safety factor $FS = 0,343$

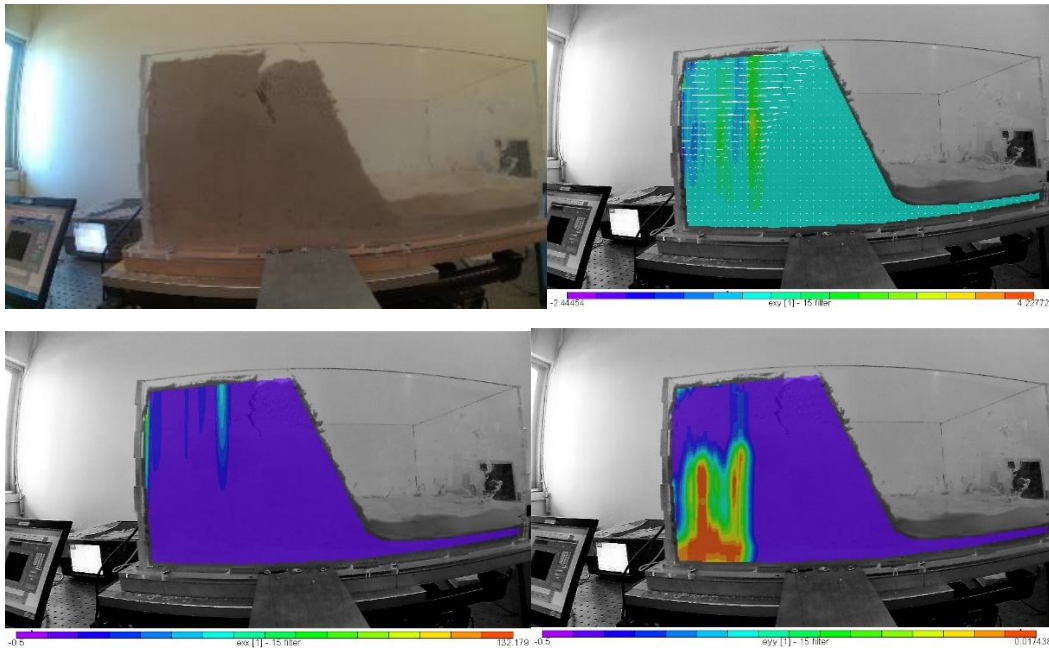
➤ Υπολογισμός τροπών με την εφαρμογή της μεθόδου Vic2D

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με την μέθοδο Vic2D. Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιούνται πολλαπλές εικόνες αναφοράς. Δηλαδή κάθε στάδιο ανάλυσης έχει τη δική του εικόνα αναφοράς που είναι το προηγούμενο στιγμιότυπο της φόρτισης σε ολόκληρο το πρανές. Η πρώτη σειρά εικόνων που θα δούμε παρακάτω, δείχνει το στιγμιότυπο στο οποίο έγινε η ανάλυση με Vic2D. Η δεύτερη σειρά εικόνων δείχνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης όπως προκύπτουν χωρίς επεξεργασία. Για διευκόλυνση στην παρατήρηση των αποτελεσμάτων μπορούμε να θεωρήσουμε αυτόματα ότι το χρώμα που καλύπτει τη μεγαλύτερη επιφάνεια είναι εκείνο που αντιστοιχεί σε μηδενική τιμή τροπής, τα πιο θερμά από αυτό χρώματα αντιστοιχούν σε θετικές παραμορφώσεις και τα πιο ψυχρά από αυτό σε αρνητικές παραμορφώσεις. Στη Τρίτη σειρά εικόνων αποτυπώνεται το πεδίο τιμών της ανηγμένης τροπής κατά X exx και στην τέταρτη κατά Y eyy . Με τη διαδικασία της συσχέτισης εικόνων, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς πάντοτε την προηγούμενη εικόνα από την εικόνα που εξετάζεται και ως παραμορφωμένη την εικόνα που εξετάζεται, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα για τις ανηγμένες παραμορφώσεις κατά X exx και τις ανηγμένες παραμορφώσεις κατά Y eyy . Στις εικόνες που ακολουθούν παρατίθενται τα σχήματα των παραμορφωμένων εικόνων τα οποία απεικονίζουν το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων. Όσον αφορά την κλίμακα που χρησιμοποιείται στο πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων κατά X , η μωβ περιοχή αντιπροσωπεύει την υψηλότερη αρνητική τιμή και η κόκκινη περιοχή στην μεγαλύτερη θετική τιμή. Ομοίως η ίδια κατάσταση ισχύει και για την χρωματική κλίμακα των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά Y .

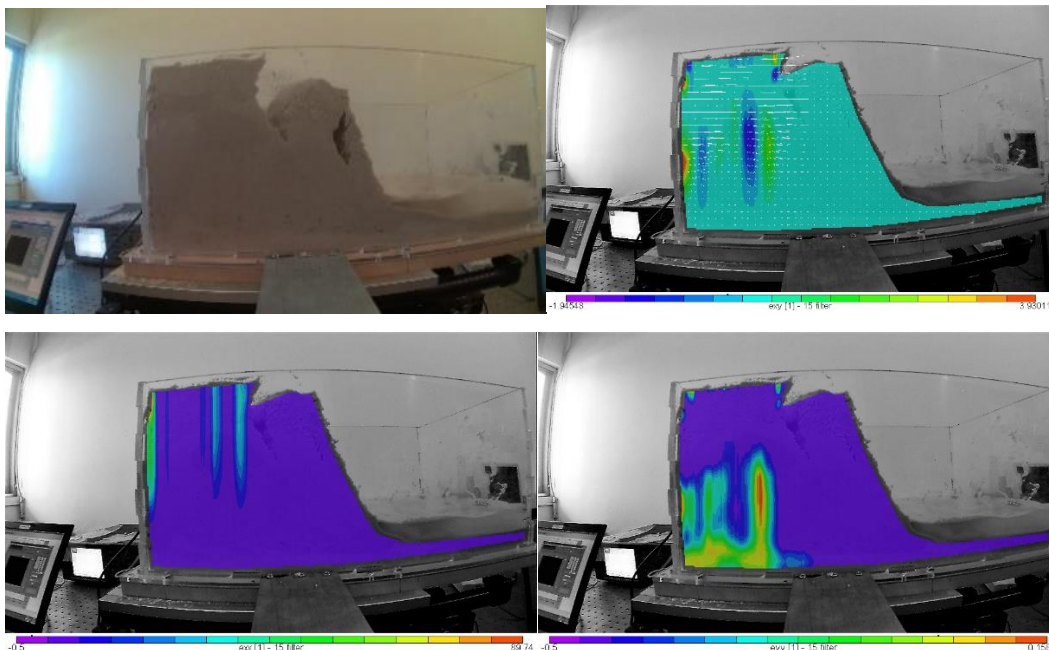
Γενικά οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά X , exx στις κόκκινες περιοχές είναι κατά απόλυτο τιμή μεγαλύτερες από αυτές των μωβ περιοχών. Επομένως με κόκκινο χρώμα φαίνεται η περιοχή που δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση το δοκίμιο που εξετάζεται. Αντίθετα οι τα μεγέθη κατά απόλυτο τιμή των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά Y , eyy εναλλάσσονται, δηλαδή σε κάποιες υπό εξέταση παραμορφωμένες εικόνες οι τιμές στις μωβ περιοχές είναι κατά απόλυτο τιμή μεγαλύτερες από αυτές των κόκκινων περιοχών. Επομένως με μωβ χρώμα φαίνεται η περιοχή που δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση το δοκίμιο που εξετάζεται. Και σε κάποιες άλλες εικόνες συμβαίνει το αντίστροφο.



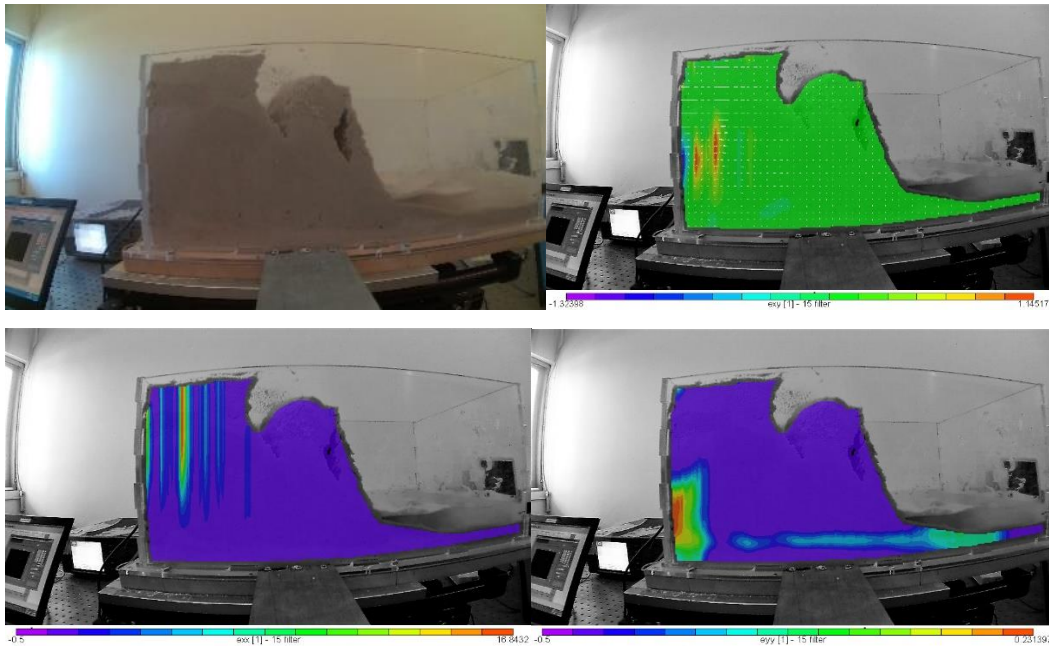
Εικόνα 277 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy με τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy / Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / Ανηγμένη Παραμόρφωση eyy
 Figure 277 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy with Drift Arrows of Maximum Direction on exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy



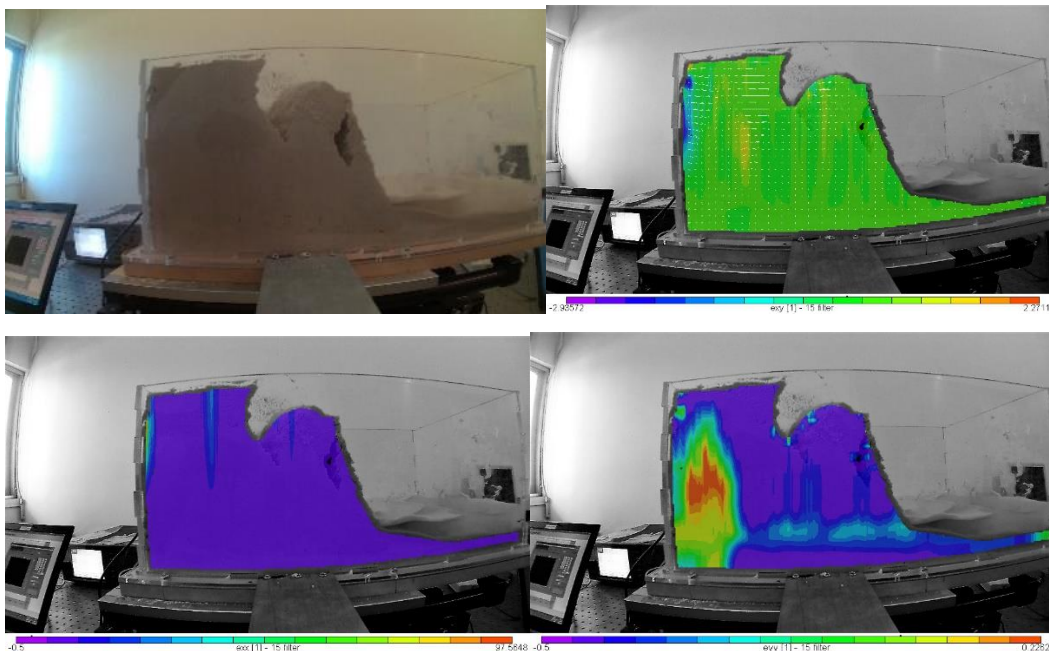
Εικόνα 278 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} με τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των ϵ_{xy} / Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{xx} / Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{yy}
 Figure 278 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} with Drift Arrows of Maximum Direction on ϵ_{xy} / Reduced Strain ϵ_{xx} / Reduced Strain ϵ_{yy}



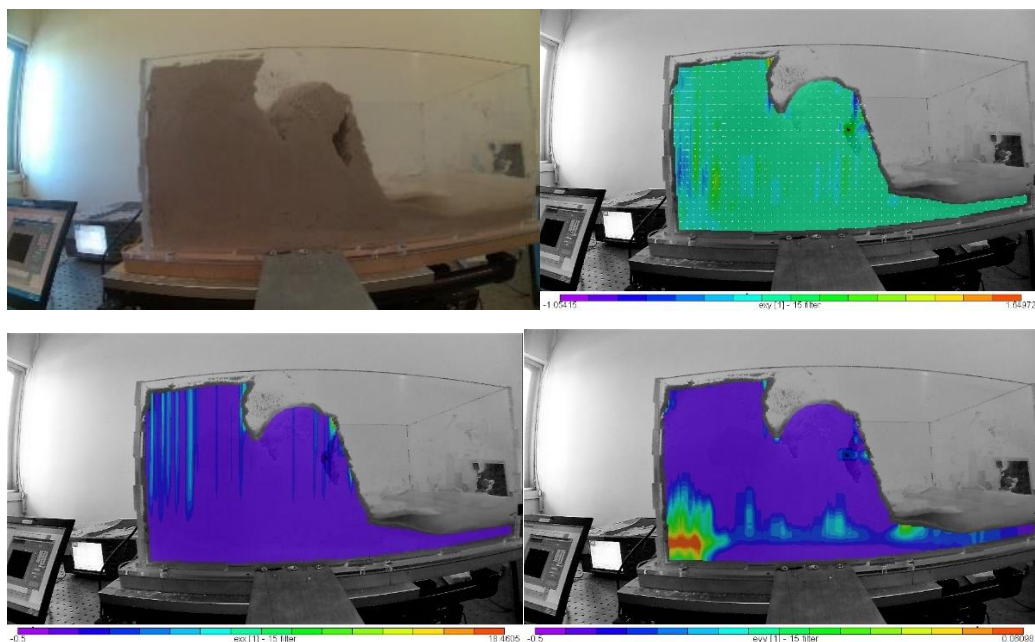
Εικόνα 279 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} με τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των ϵ_{xy} / Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{xx} / Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{yy}
 Figure 279 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} with Drift Arrows of Maximum Direction on ϵ_{xy} / Reduced Strain ϵ_{xx} / Reduced Strain ϵ_{yy}



Εικόνα 280 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy με τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy / Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / Ανηγμένη Παραμόρφωση eyy
 Figure 280 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy with Drift Arrows of Maximum Direction on exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy



Εικόνα 281 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy με τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy / Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / Ανηγμένη Παραμόρφωση eyy
 Figure 281 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy with Drift Arrows of Maximum Direction on exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy



Εικόνα 282 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy με τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy / Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / Ανηγμένη Παραμόρφωση eyy
 Figure 282 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy with Drift Arrows of Maximum Direction on exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy

Συμπεράσματα Επί των Ανηγμένων Παραμορφώσεων

Σε όλα τα διαγράμματα παραμορφώσεων που προηγήθηκαν παρατηρείται το ίδιο μοτίβο εναλλαγής κατακόρυφων εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων, αν και μόνο μία εφελκυστική ρωγμή απεικονίζεται στα στιγμιότυπα, στα διαγράμματα διαφαίνονται περισσότερες. Αυτό οφείλεται στο μηχανισμό της αστοχίας λόγω υποσκαφής. Αν και μόνο μία ρωγμή δημιουργείται, υπάρχει η τάση για δημιουργία περισσότερων λόγω της ύπαρξης του φαινομένου της υποσκαφής καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης του δοκιμίου. Η φαινόμενη συνοχή του εδαφικού πρανούς είναι που συγκρατεί το πρανές από περαιτέρω αστοχία. Μπορούμε να πούμε πως το διάγραμμα πεδίου τιμών των διατμητικών παραμορφώσεων κατά τον άξονα ΧΥ αποτυπώνει καλύτερα, και με περισσότερη ακρίβεια την πραγματική κατάσταση στην οποία επέρχεται το μοντέλο. Πρέπει να σημειωθεί όμως πως το διάγραμμα του πεδίου τιμών των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά τον άξονα Υ μας δείχνει την επιρροή του νερού στα κατώτερα εδαφικά στρώματα, όπου η άνωση που προκαλείται λόγω της παρουσίας του απεικονίζεται σαν εφελκυστική τροπή στο διάγραμμα.

Επιπροσθέτως όπως και στο 11^ο πείραμα που προηγήθηκε παρατηρείται η απουσία του φαινομένου της τοπικής συγκέντρωσης τροπών (strain localization), όπως είδαμε λόγω της παρουσίας νερού και των κυματικών σχηματισμών που δημιουργούνται κατά τη φόρτιση, ο μηχανισμός αστοχίας προκαλεί επίπεδη αστοχία στο πρανές, και στο φαινόμενο της τοπικής συγκέντρωσης τροπών, αυτή εμφανίζεται σε μία διάσταση λιγότερη από ότι η θραύση. Αντιθέτως υπάρχει διάχυτη θραύση και σταθεροποιείται στην έκταση του πρανούς καθώς θρυμματίζεται το σύνολο του ολισθαίνοντος σώματος. Αυτή η διαφοροποίηση στη συμπεριφορά του πρανούς οφείλεται στην παρουσία του αγωγού.

Σύγκριση Πειράματος 11^ο και Πειράματος 12^ο

Τα δύο μοντέλα των πειραμάτων έχουν παρόμοια γεωμετρία με μικρές διαφορές στις τιμές τους, χάρη σε αυτό δίνεται η δυνατότητα να γίνει διερεύνηση στην επιρροή του αγωγού και του νερού στα αποτελέσματα των υπολογιστικών και πειραματικών αναλύσεων. Στον Πίνακα 15 βλέπουμε συγκεντρωτικά τα στοιχεία των δύο πειραμάτων ώστε να διευκολυνθεί η μεταξύ τους σύγκριση.

Πίνακας 14 Σύγκριση Πειράματος 11^{ου} και Πειράματος 12^{ου},

Table 14 Comparison of Experiment 11 and Experiment 12th

Αριθμός Πειράματος	11 ^ο	11 ^ο	12 ^ο	12 ^ο
Επιτάχυνση	2,6 m/s ²	3,1 m/s ²	2,6 m/s ²	3,0 m/s ²
Γεωμετρία Τραπεζίου	B=26,5cm β=17,5cm υ=21cm φ=60°	B=26,5cm β=17,5cm υ=21cm φ=60°	B=26,5cm β=17,5cm υ=21cm φ=60°	B=26,5cm β=17,5cm υ=21cm φ=60°
Στάθμη Νερού	3 cm	3 cm	4,5 cm	4,5 cm
Κατασκευή Πρανούς	Με τη μέθοδο της συμπίεσης	Με τη μέθοδο της συμπίεσης	Με τη μέθοδο της ξηράς απόθεσης	Με τη μέθοδο της ξηράς απόθεσης
Τροπές Αισθητήρα Οπτικών Ινών σε Αγωγό	10 μstrain	15 μstrain	120 μstrain	140 μstrain
F.S. κατά Bishop	0,483	0,451	0,517	0,485
F.S. κατά Janbu	0,426	0,392	0,471	0,398

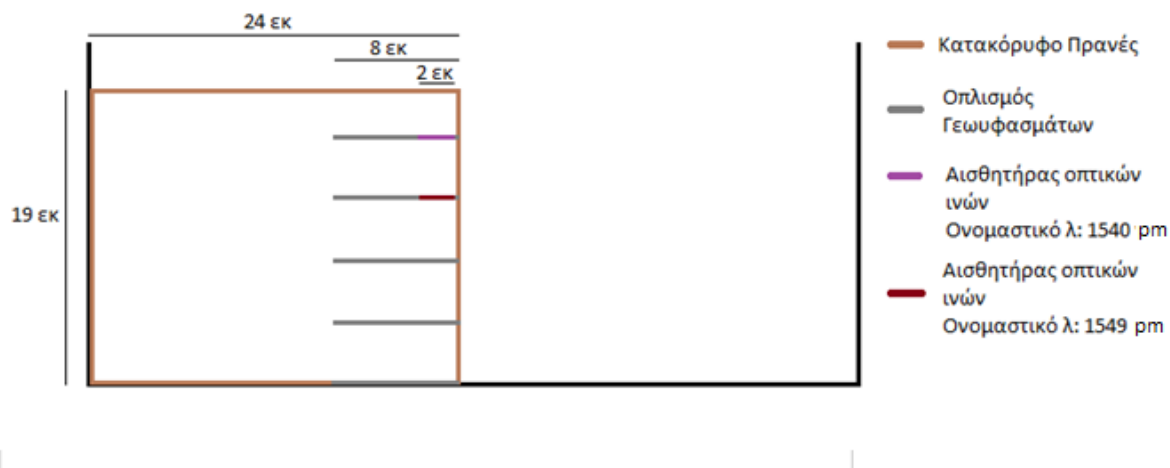
Στα δύο πειραματικά μοντέλα οι διαφορές είναι μικρές και αφορούν την γεωμετρία του πρανούς και τη στάθμη του νερού. Οι διαφορές στα αποτελέσματα της υπολογιστικής ανάλυσης είναι απειροελάχιστες και οφείλονται αποκλειστικά στις μικρές διαφοροποιήσεις της γεωμετρίας των δύο μοντέλων. Όσον αφορά το πειραματικό μέρος υπάρχουν μεγαλύτερες διαφορές στις τροπές που καταγράφονται από τους δύο αισθητήρες οπτικών ινών παρότι είναι τοποθετημένοι ακριβώς στις ίδιες θέσεις των αγωγών. Με την παραδοχή ότι οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι με ακριβώς τα ίδια υλικά, τον ίδιο τρόπο και από τον ίδιο άνθρωπο, η διαφορά που μένει είναι η μέθοδος κατασκευής του πρανούς. Η μέθοδος της κατασκευής του πρανούς με συμπίεση κατά την κατασκευή του οδηγεί σε πρανές με λιγότερες τροπές και ανατροπή λιγότερου εδάφους κατά την αστοχία και συνεπώς μικρότερη παραμόρφωση στον αγωγό.

6.15 Πείραμα 13^ο

➤ Περιγραφή

Σε αυτό το πείραμα εξετάζεται το οπλισμένο πρανές με πολλές στρώσεις οπλισμού. Ειδικότερα πραγματοποιείται διερεύνηση της επιρροής του οπλισμού στο πρανές. Σε αυτό το κεφάλαιο υπάρχει περιγραφή του πειράματος που διεξήχθη στο μοντέλο. Επίσης περιγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, και η θέση των μετρητικών διατάξεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταγραφών και της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Slide και του Phase.

Σε αυτό το πείραμα δημιουργήσαμε κατακόρυφο πρανές διαστάσεων 24 εκατοστά μήκος επί 19 εκατοστά ύψος, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



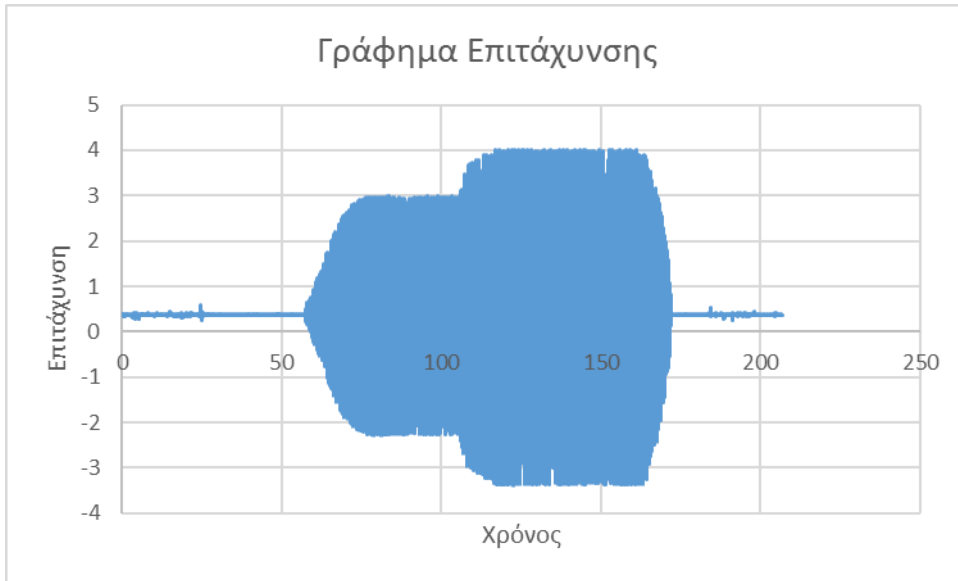
Εικόνα 283 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 13, Figure 283 Side View of Experimental Model 13

Το πρανές φτιάχτηκε με τη μέθοδο της ξηρής απόθεσης άμμου και χρήση νερού με ψεκασμό. Και μετά αφέθηκε να στεγνώσει. Από προηγούμενη εμπειρία μας δεν κατέστη δυνατή η μη χρήση νερού, καθώς το πρανές έχανε το σχήμα του μετά την αφαίρεση του καλουπιού. Ενδιάμεσα του πρανούς τοποθετήθηκε οπλισμός 5 στρώσεων με πολύ λεπτά υφάσματα που προσομοιώνουν τα γεωϋφάσματα. Στα δύο ανώτερα γεωϋφάσματα, πλέχθηκαν οι αισθητήρες οπτικών ινών (δε χρησιμοποιήθηκε κόλλα) στην ακραία πλευρά, όπως φαίνεται και στο σχήμα

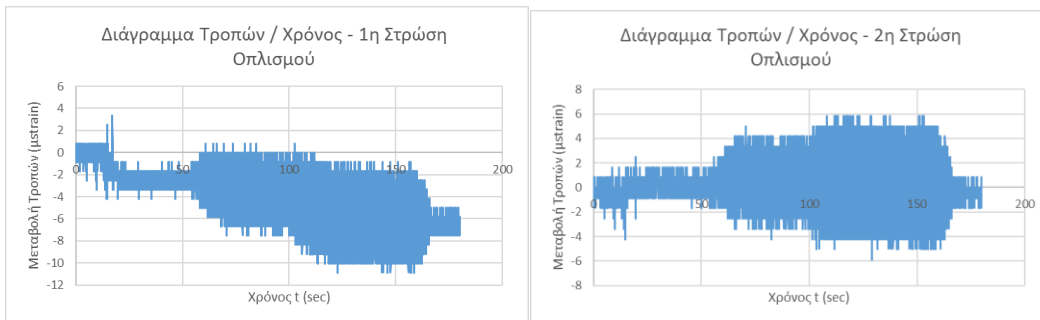
Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη Β9 με συχνότητα 4 ρεύμα στο 1,5 και θέση σεισμικής τράπεζας Ampl. =>. Η επιβληθείσα επιτάχυνση έφτασε σε $3,0 \text{ m/s}^2$ και δεν καταγράφηκε αστοχία παρά ελάχιστες παραμορφώσεις στην ανώτερη στρώση του οπλισμού. Εν συνεχεία ανεβάσαμε το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα από ηρεμία μέχρι τη θέση Διακόπτη =>. Η επιτάχυνση έφτασε περί τα $4,0 \text{ m/s}^2$. Και πάλι δε σημειώθηκε αστοχία στο πρανές αλλά υπήρξε και πάλι μια μικρή αύξηση της απόλυτης τιμής στις παραμορφώσεις του ανώτερου τμήματος του οπλισμού, της τάξεως των $-6 \text{ } \mu\text{strain}$.

➤ Αποτελέσματα Καταγραφής Αισθητήρων

Οι καταγραφές του αισθητήρα οπτικών ινών παρουσιάζονται στην Εικόνα 284, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.



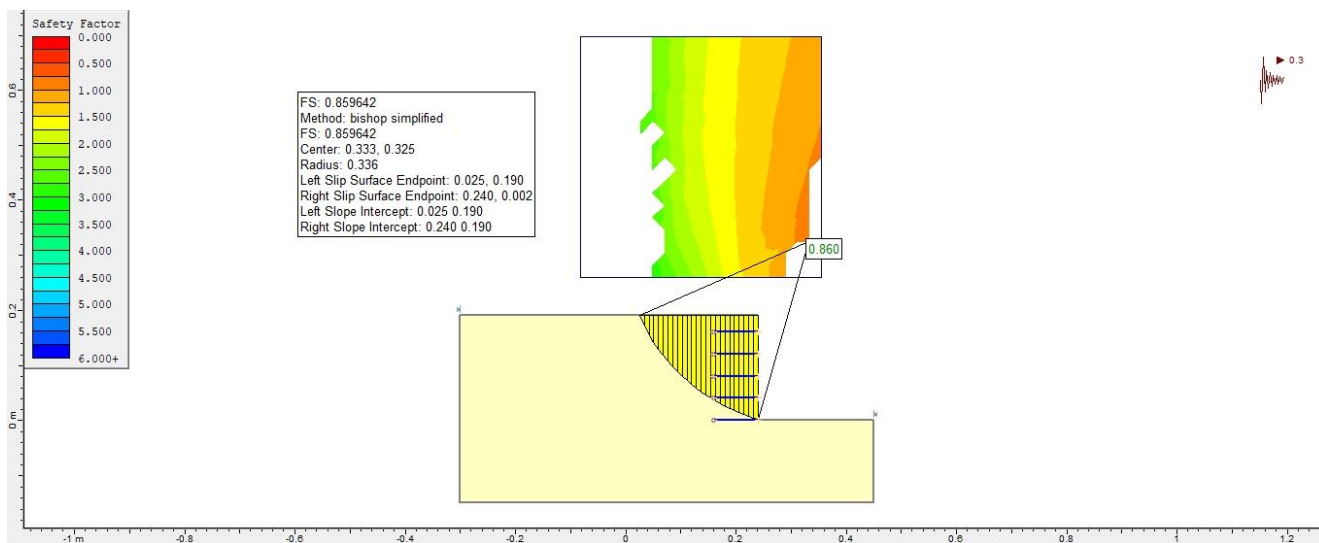
Εικόνα 284 Διάγραμμα Επιτάχυνσης, Figure 284 Acceleration Chart



Εικόνα 285 Διάγραμμα Μεταβολής Τροπιών 1^{ης} και 2^{ης} Στρώσης οπλισμού
Figure 285 1st and 2nd Geotextile Layer Strain Modification Chart

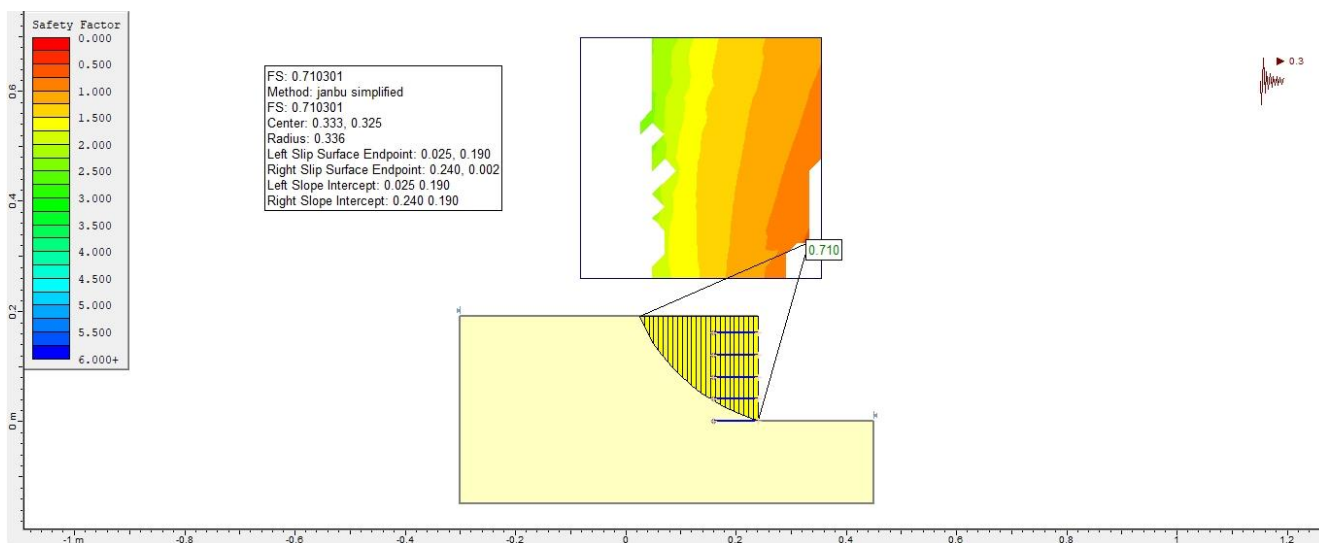
➤ Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide και Phase

✚ Επιτάχυνση: 3,0 m/s²



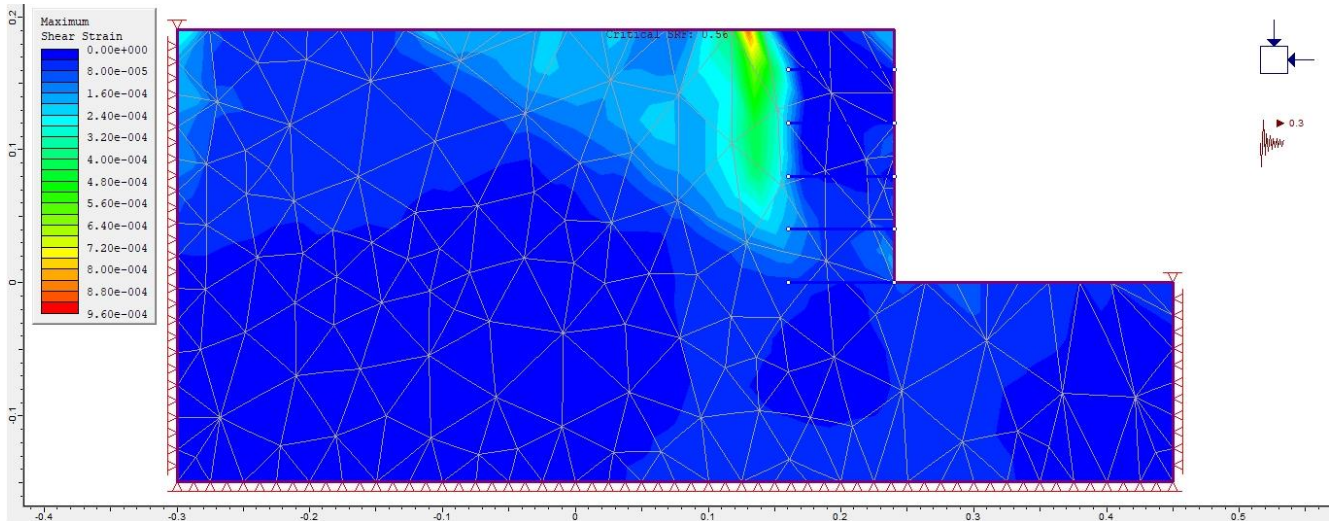
Εικόνα 286 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,860

Figure 286 Analysis by the Bishop method - Safety factor FS = 0.860



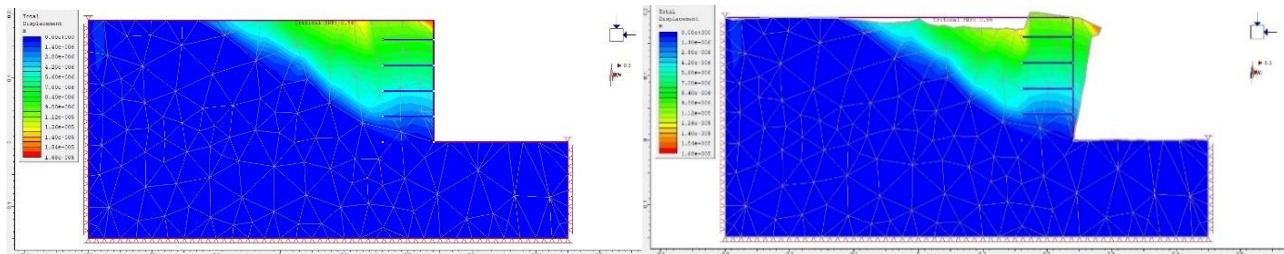
Εικόνα 287 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,710

Figure 287 Analysis by the Janbu method - Safety factor FS = 0.710



Εικόνα 288 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,56

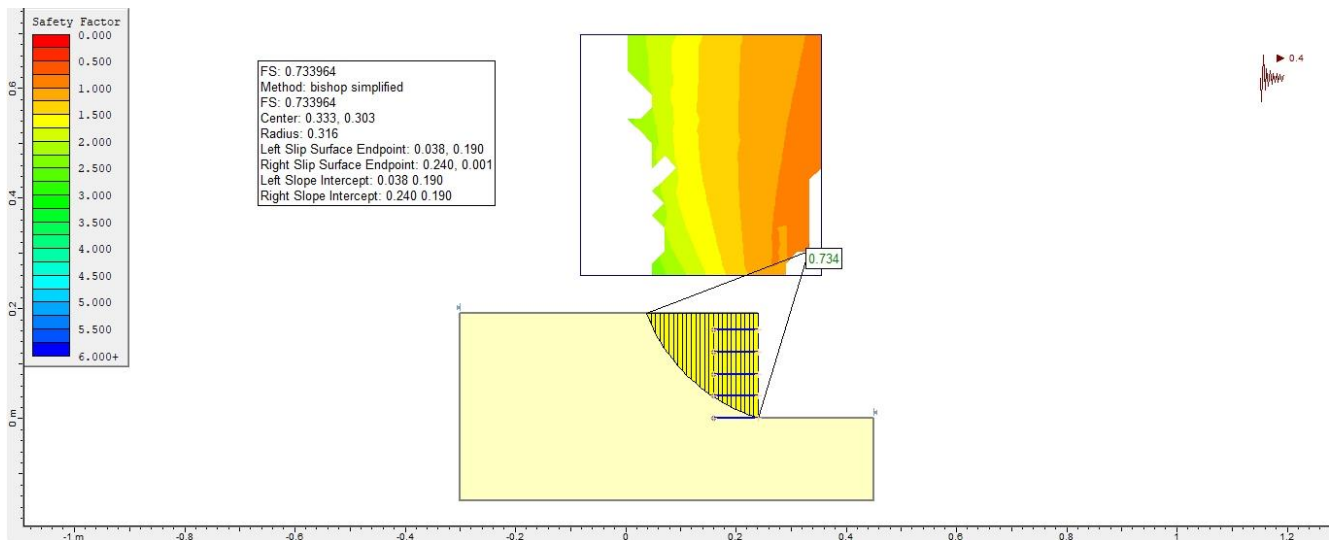
Figure 288 Maximum shear Strain by Phase - Critical SRF = 0,56



Εικόνα 289 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,56

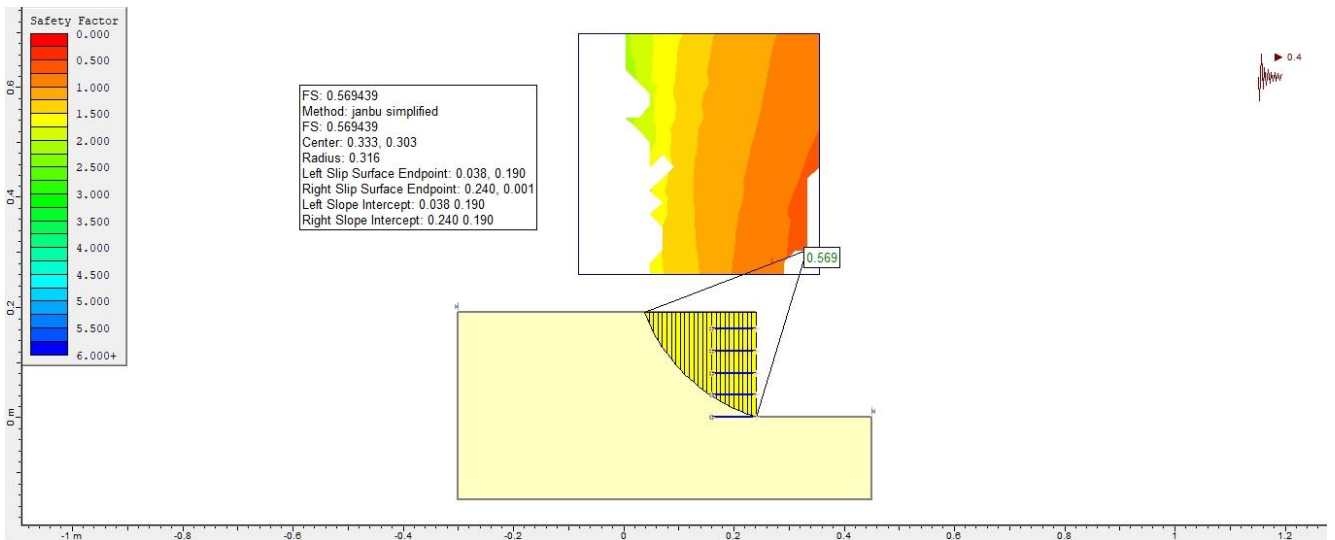
Figure 289 Total displacement by Phase - Critical SRF = 0,56

 Επιτάχυνση: 4,0 m/s²



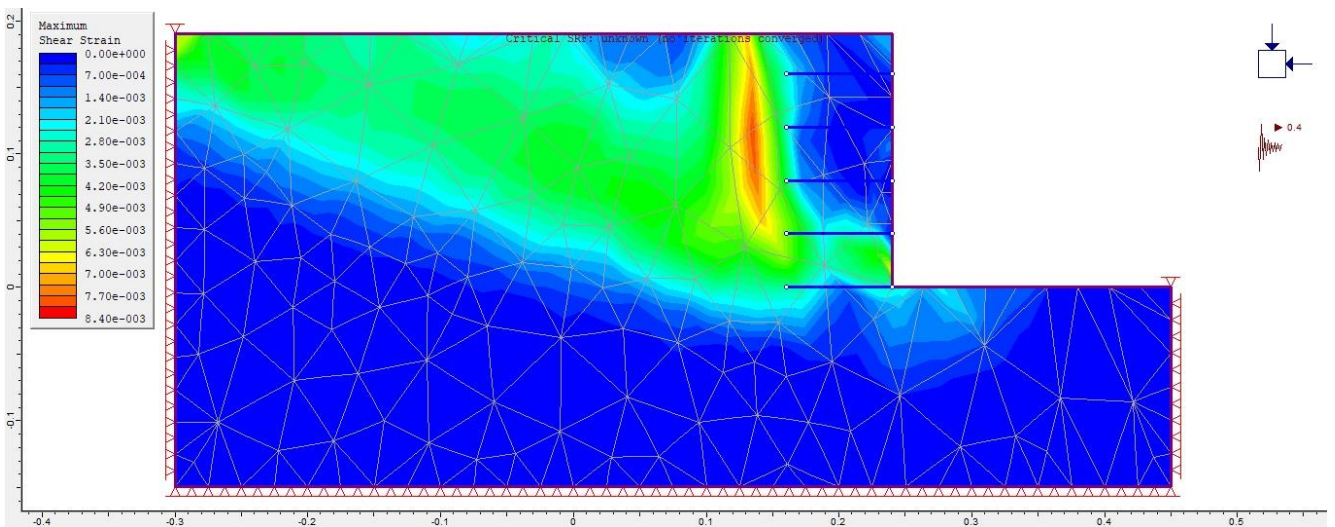
Εικόνα 290 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,734

Figure 290 Analysis by the Bishop method - Safety factor FS = 0.734



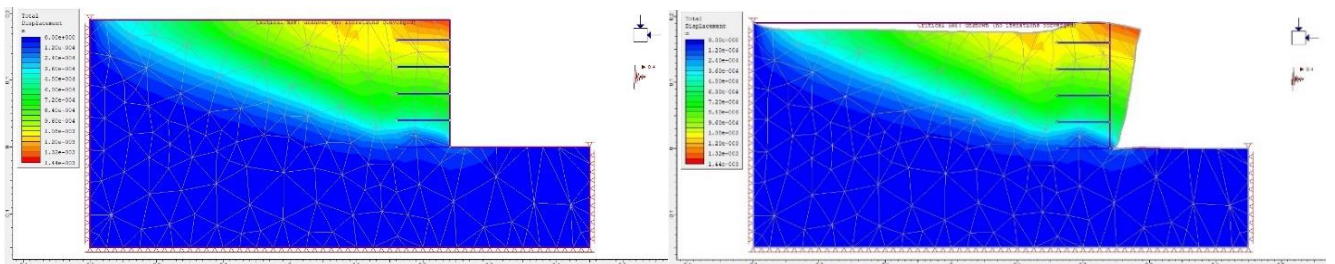
Εικόνα 291 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,569$

Figure 291 Analysis by Janbu method - Safety factor $FS = 0.569$



Εικόνα 292 Μέγιστες Διαμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = -

Figure 292 Maximum shear Strain by Phase - Critical SRF = -



Εικόνα 293 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = -

Figure 293 Total displacement by Phase - Critical SRF = -

6.16 Πείραμα 14ο

➤ Περιγραφή

Σε αυτό το πείραμα εξετάζεται το οπλισμένο πρανές με πολλές στρώσεις οπλισμού. Ειδικότερα πραγματοποιείται διερεύνηση της επιρροής του οπλισμού στο πρανές σε συνδυασμό με την παρουσία νερού. Σε αυτό το κεφάλαιο υπάρχει περιγραφή του πειράματος που διεξήχθη στο μοντέλο. Επίσης περιγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, και η θέση των μετρητικών διατάξεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των καταγραφών και της υπολογιστικής ανάλυσης με το λογισμικό του Slide, του Phase και του Vic2D.

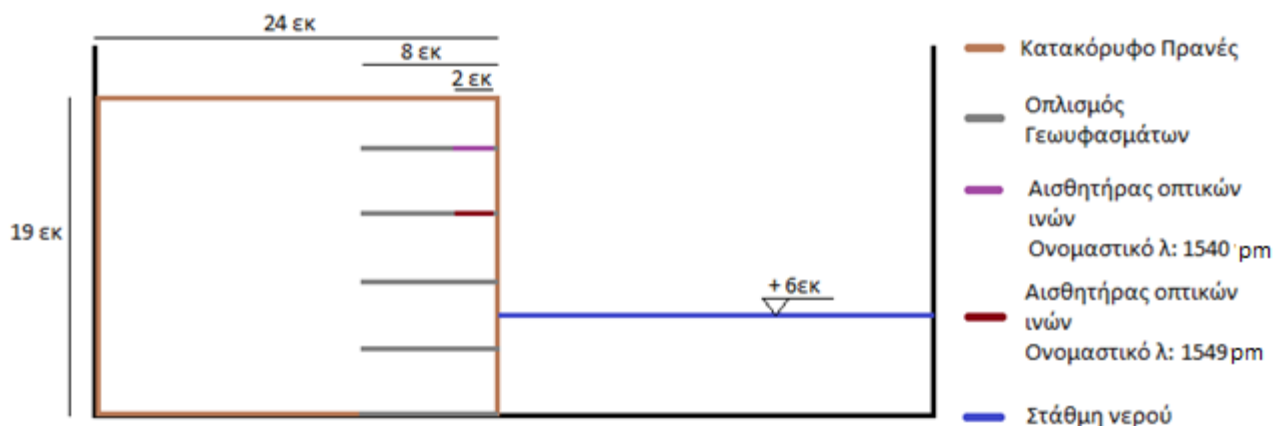
Η Εικόνα 296 που ακολουθεί παρουσιάζει το μοντέλο κατά την κατασκευή του με τη μέθοδο της ξηρής απόθεσης με τη βοήθεια καλουπιού.



Εικόνα 294 Κατασκευή του Πειραματικού Μοντέλου με τη Βοήθεια Καλουπιού

Figure 294 Construction of the Experimental Model

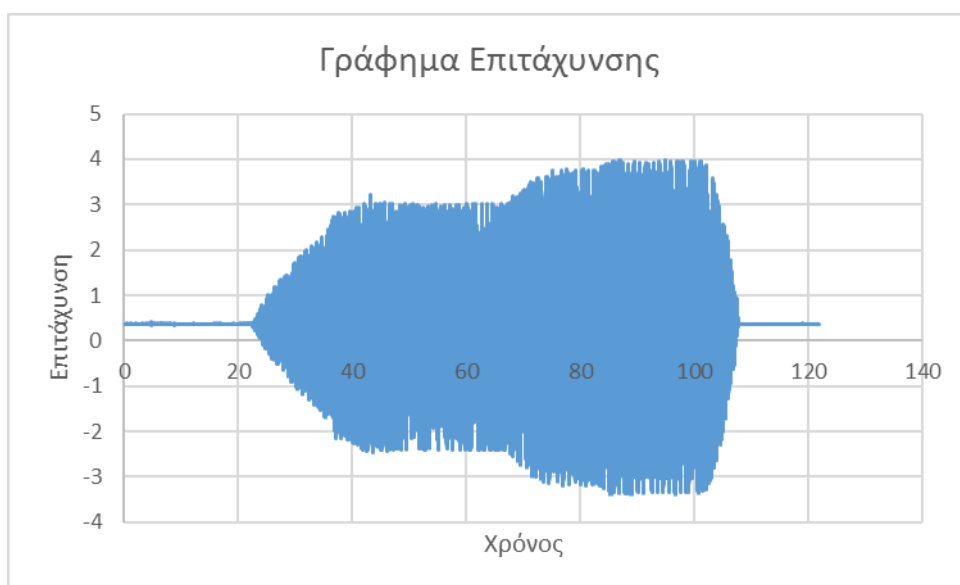
Σε αυτό το πείραμα δημιουργήσαμε κατακόρυφο πρανές διαστάσεων 24 εκατοστά μήκος επί 19 εκατοστά ύψος, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 295 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 14, Figure 295 Side View of Experimental Model 14

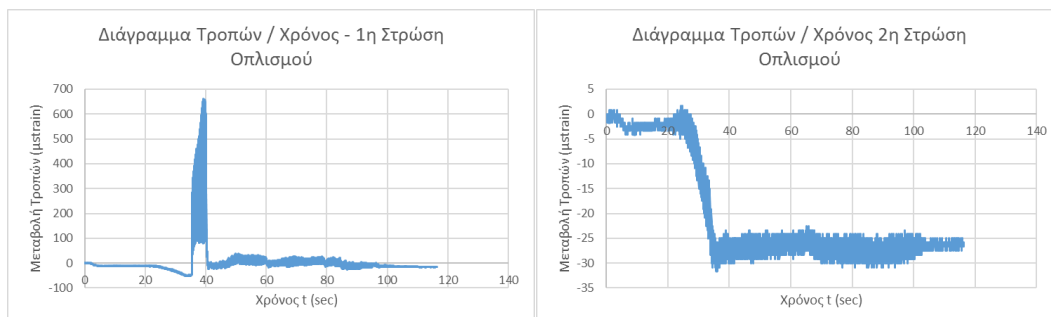
Το πρανές φτιάχτηκε με τη μέθοδο της ξηρής απόθεσης άμμου και χρήση νερού με ψεκασμό. Και προσθέσαμε 5,25 λίτρα νερό. Ενδιάμεσα του πρανούς τοποθετήθηκε οπλισμός 5 στρώσεων με πολύ λεπτά υφάσματα που προσομοιώνουν τα γεωϋφάσματα. Στα δύο ανώτερα γεωϋφάσματα, πλέχθηκαν οι αισθητήρες οπτικών ινών (δε χρησιμοποιήθηκε κόλλα) στην ακραία πλευρά, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Από τη δεύτερη σειρά δοκιμών επιτάχυνσης επιλέγουμε τη Β9 με συχνότητα 4 ρεύμα στο 1,5 και θέση σεισμικής τράπεζας Ampl. => . Η επιτάχυνση έφτασε σε 3 m/s^2 .

➤ Αποτελέσματα Καταγραφής Αισθητήρων



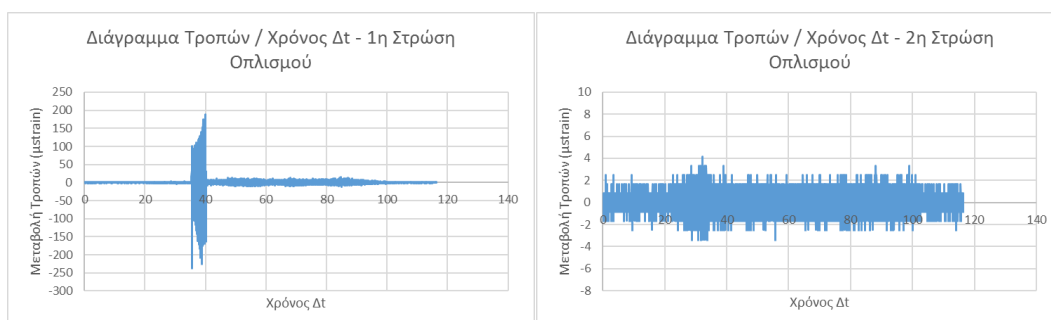
Εικόνα 296 Διάγραμμα Επιτάχυνσης, Figure 296 Acceleration Chart

Ανεβάζοντας το διακόπτη της σεισμικής τράπεζας χειροκίνητα από ηρεμία μέχρι τη θέση Διακόπτη =>, επιτάχυνση φτάνει τα 4m/s^2 . Οι καταγραφές του αισθητήρα οπτικών ινών παρουσιάζονται στην Εικόνα 297, κατόπιν μετατροπής τους σε τροπές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.



Εικόνα 297 Διάγραμμα Μεταβολής Τροπών 1^{ης} και 2^{ης} Στρώσης Οπλισμού

Figure 297 1st and 2nd Geotextile Layer Strain Modification Chart

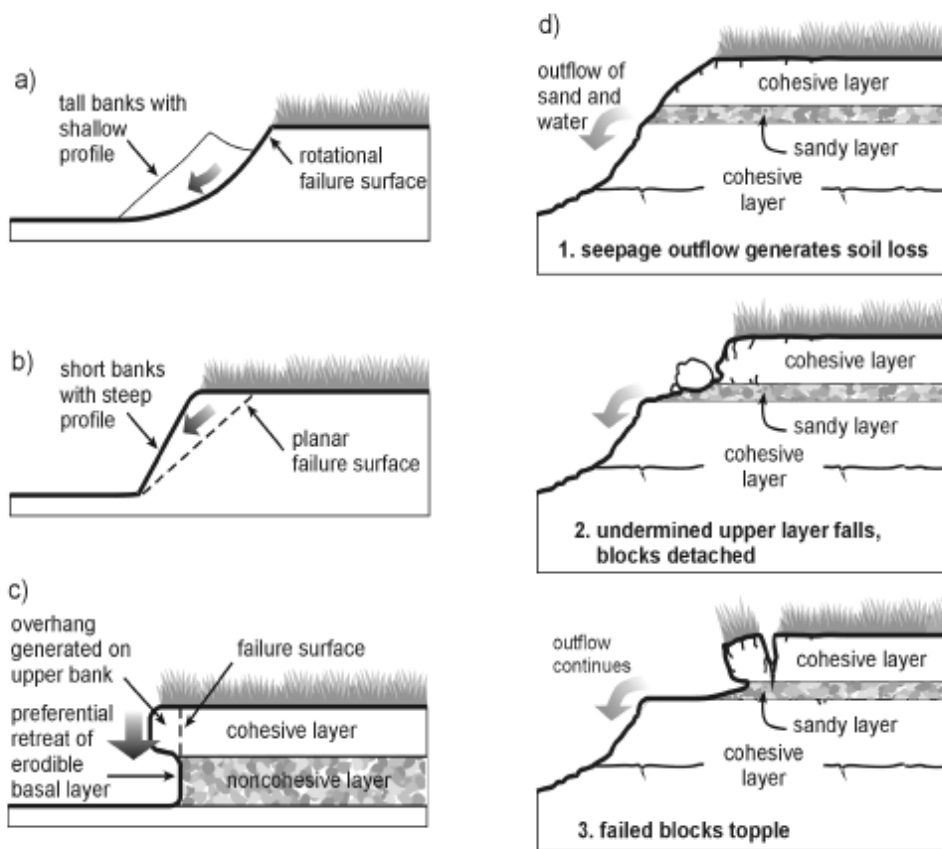


Εικόνα 298 Διάγραμμα Ρυθμού Μεταβολής Τροπών 1^{ης} και 2^{ης} Στρώσης Οπλισμού

Figure 298 Strain to Time Rate Chart of 1st and 2nd Geotextile Layer

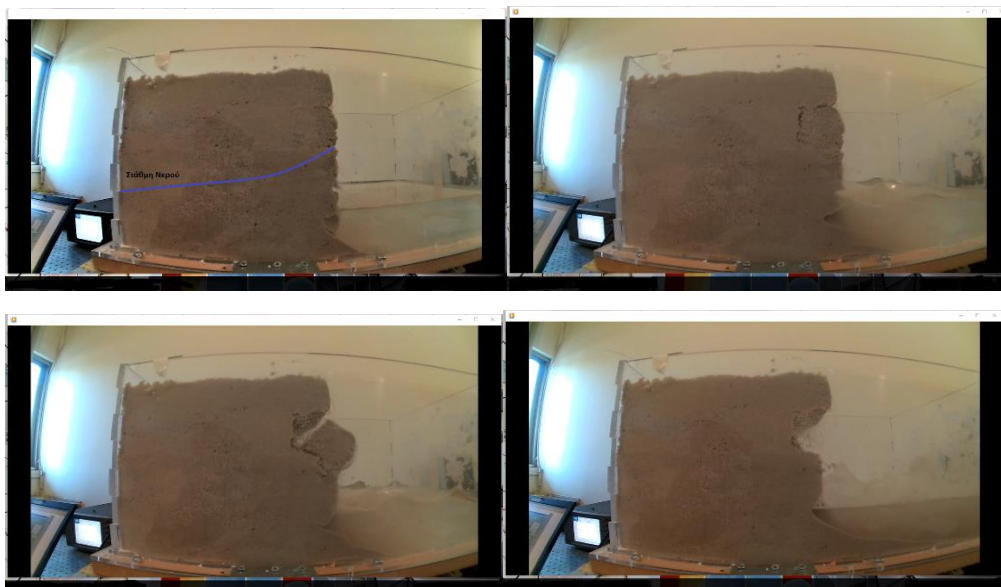
➤ Μηχανισμός Αστοχίας

Ο μηχανισμός αστοχίας στο συγκεκριμένο πρανές παρουσιάζει μία ιδιαιτερότητα. Όπως βλέπουμε και στην εικόνα που ακολουθεί μπορεί να σχηματισθεί πρόβολος στο εδαφικό πρανές όταν το υπερκείμενο στρώμα είναι συνεκτικό και το κατώτερο δεν είναι. Εδώ όμως ολόκληρο το πρανές είναι κατασκευασμένο από μη συνεκτική άμμο, που έχει αποκτήσει φαινόμενη συνοχή λόγω της διαβροχής της. Στην Εικόνα 302 όπου απεικονίζεται η αρχική κατάσταση του πρανούς, έχει σχεδιασθεί η στάθμη του νερού στο εσωτερικό του πρανούς.



Εικόνα 299 Τύποι Αστοχιών που συναντώνται στο πεδίο (πηγή: Ιωάννα Κότση)

Figure 299 Types of Failures encountered in the field (source: Ioanna Kotsi)



Εικόνα 300 Χρονικό Μηχανισμού αστοχίας,

Figure 300 Timeline of Slope Failure Mechanism



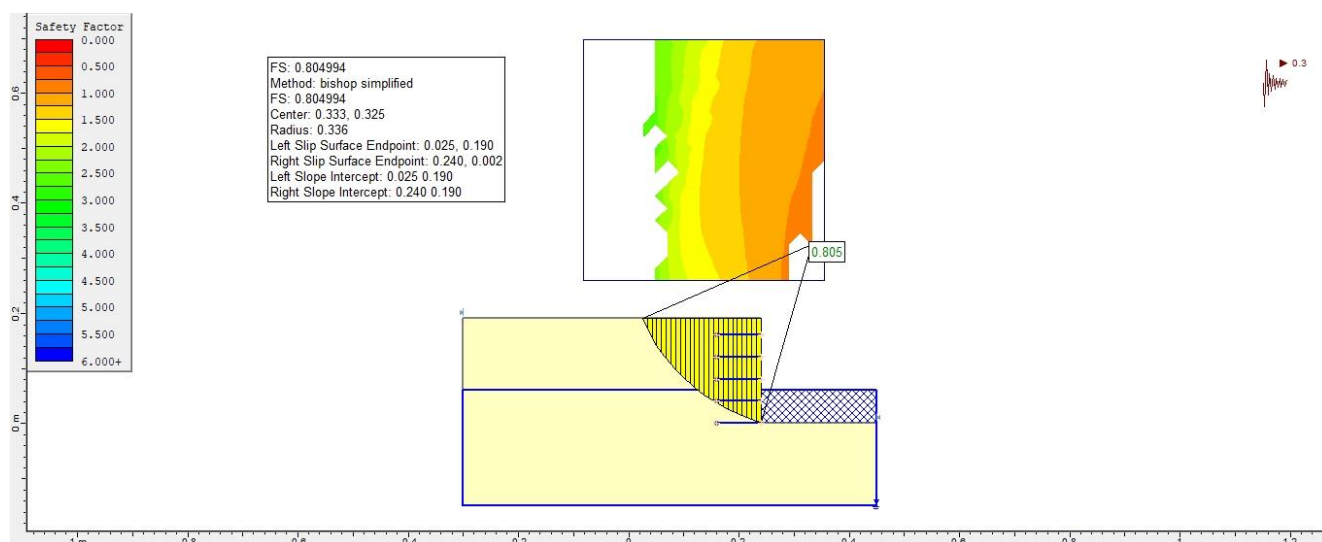
Εικόνα 301 Αστοχία Πειραματικού Μοντέλου λόγω Υποσκαφής του κατώτερου στρώματος και Δημιουργία Προβόλου στο ανώτερο

Figure 301 Slope Failure on Overhung generated on upper bank after preferential retreat of erodible basal layer

Παρατηρούμε πως το πρανές υπόκειται σε υποσκαφή. Στη συνέχεια το ανώτερο στρώμα αποκτά ρωγμές και ώσπου αποκολλάται και ανατρέπεται. Και εν συνεχεία ο μηχανισμός υποσκαφής συνεχίζει να δρα στο πρανές για όλη τη διάρκεια της φόρτισης του.

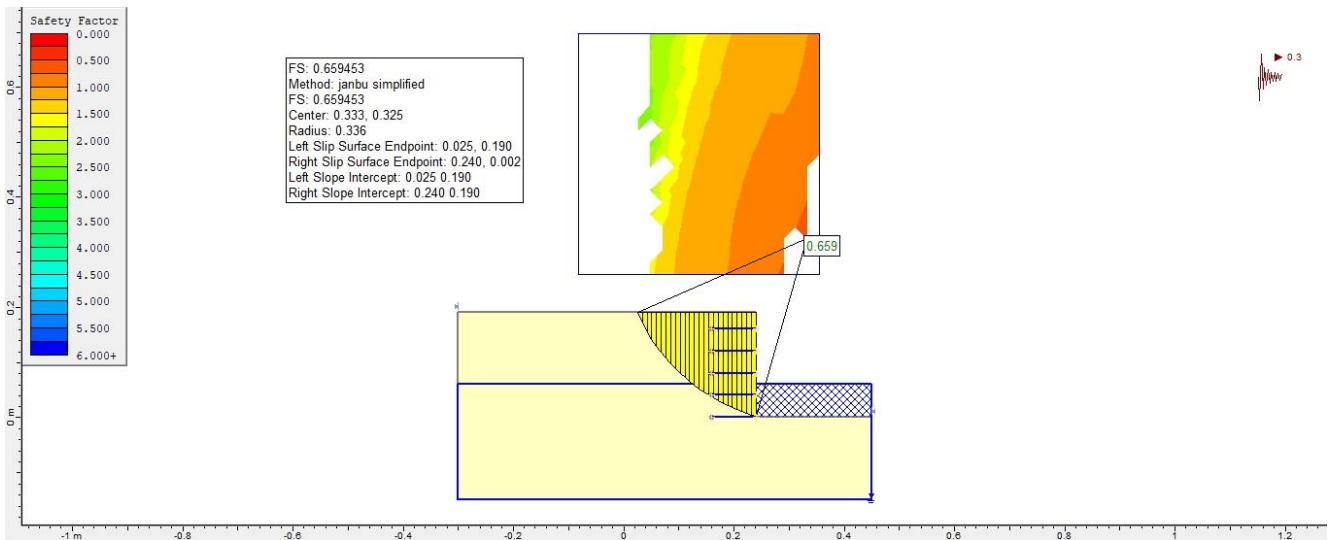
➤ **Αποτελέσματα Επεξεργασίας με Slide και Phase**

✚ **Επιτάχυνση: 3,0 m/s²**



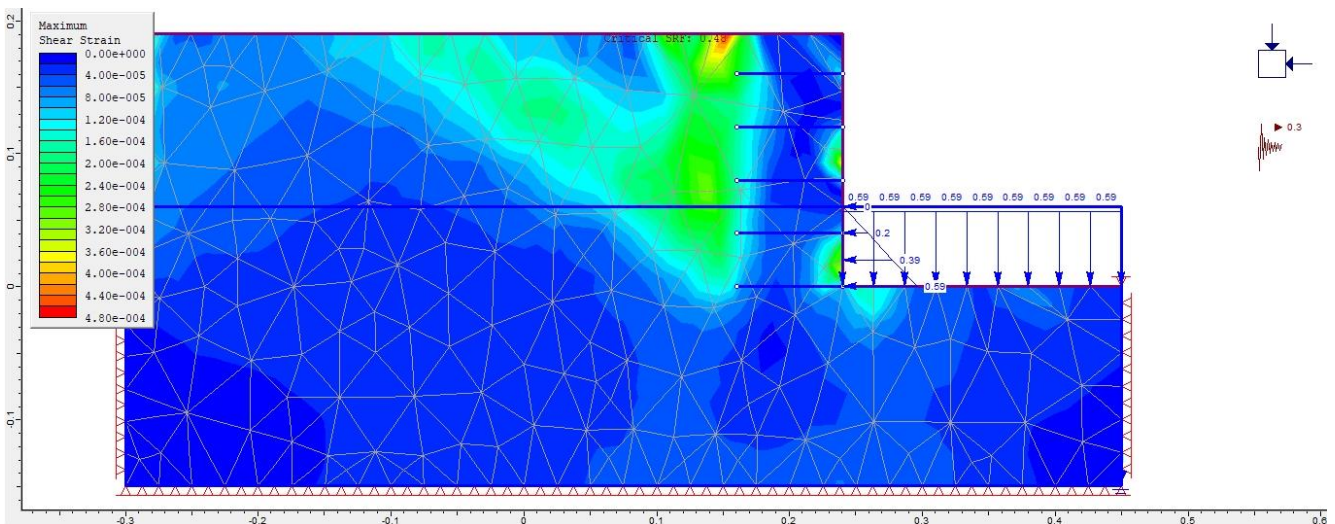
Εικόνα 302 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,805

Figure 302 Analysis by the Bishop method - Safety factor FS = 0.805



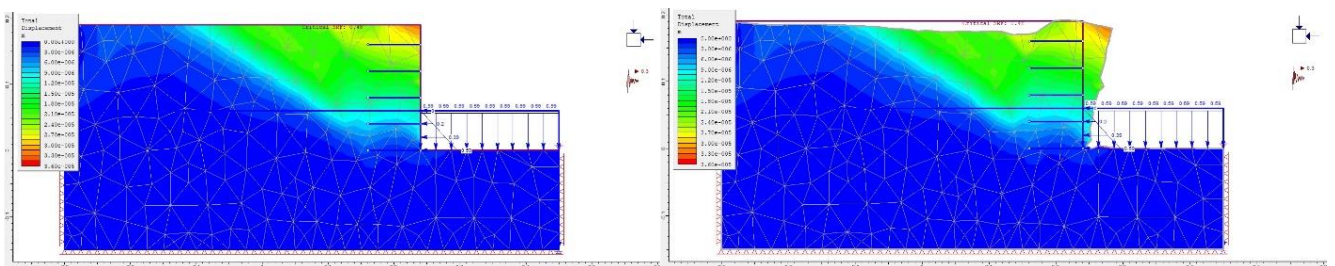
Εικόνα 303 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,659$

Figure 303 Analysis by the Janbu method - Safety factor $FS = 0.659$



Εικόνα 304 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical $SRF = 0,48$

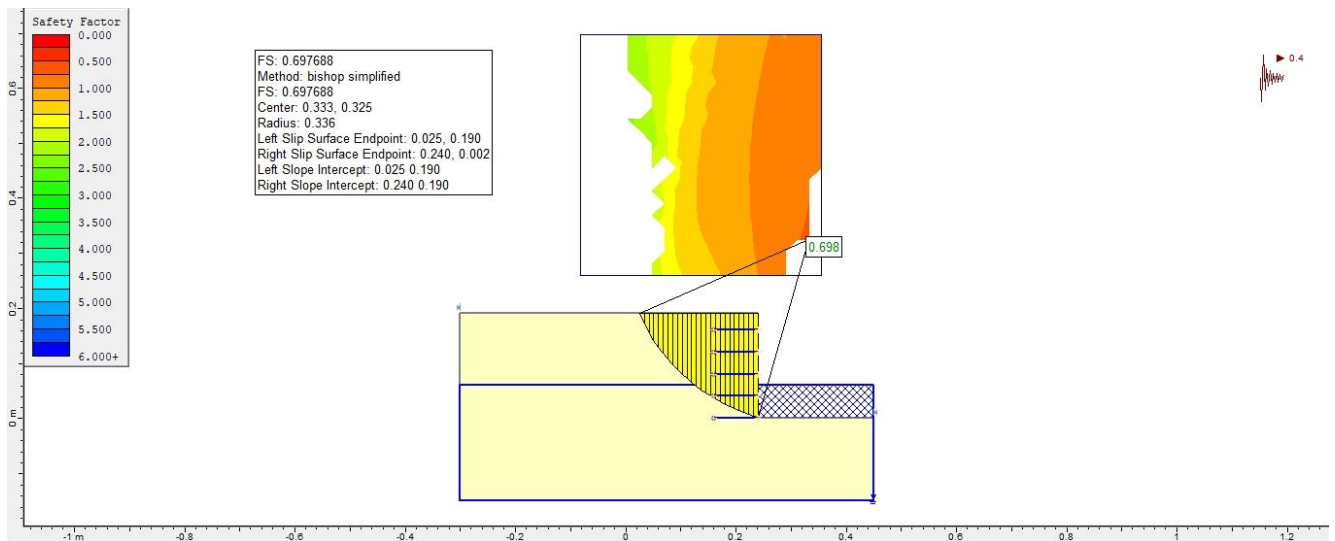
Figure 304 Maximum shear Strain by Phase - Critical $SRF = 0,48$



Εικόνα 305 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical $SRF = 0,48$

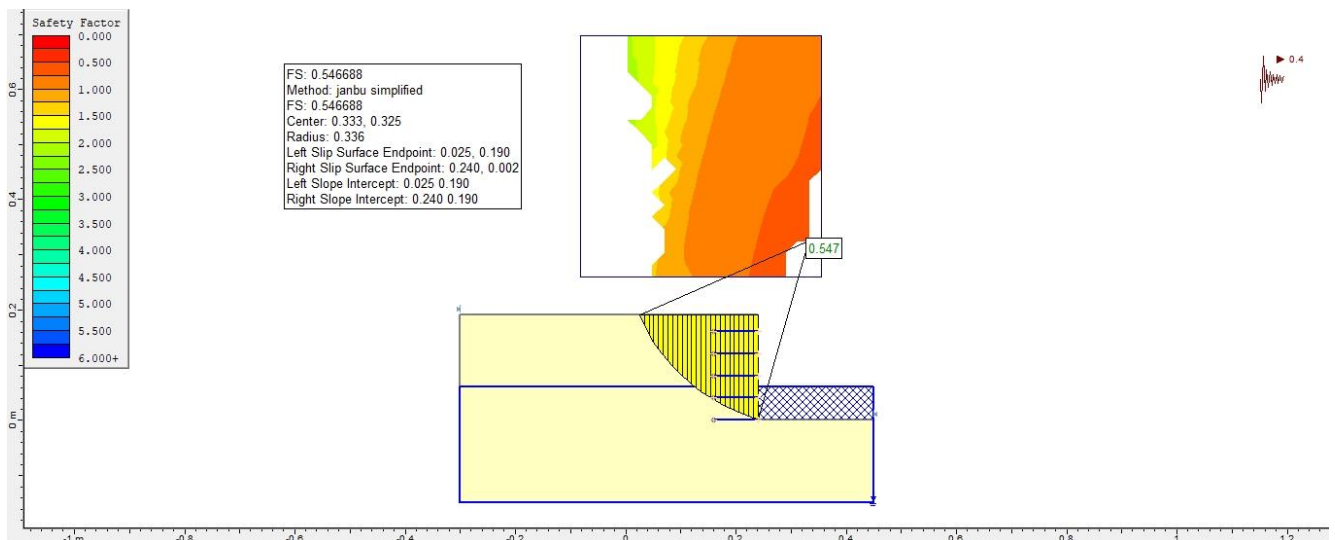
Figure 305 Total displacement by Phase - Critical $SRF = 0,48$

Επιτάχυνση: 4,0 m/s²



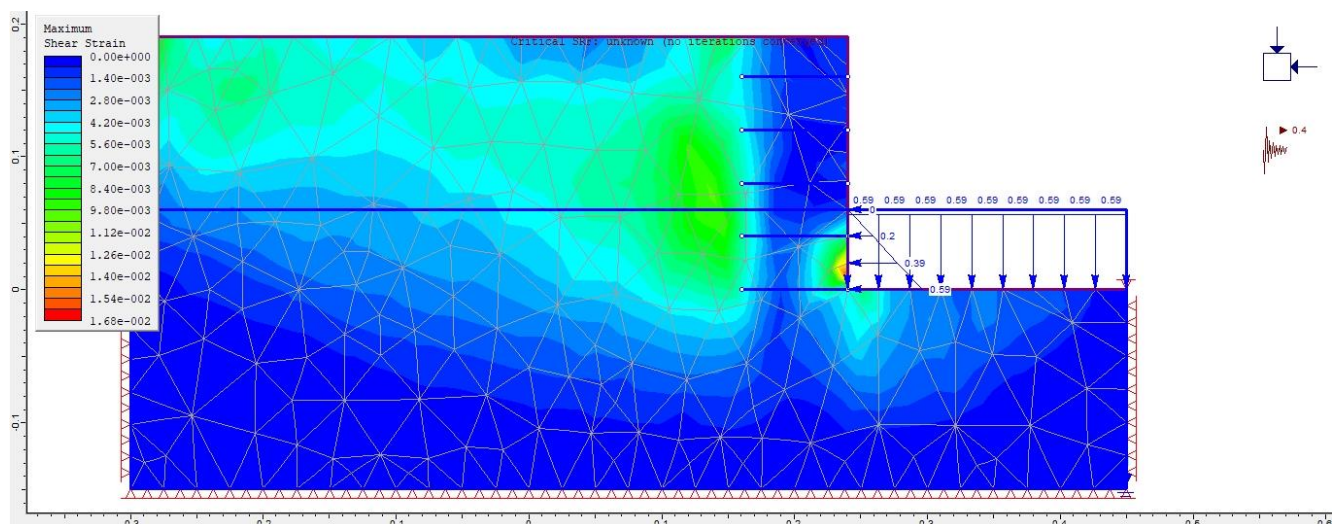
Εικόνα 306 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,698

Figure 306 Analysis by the Bishop method - Safety factor FS = 0.698



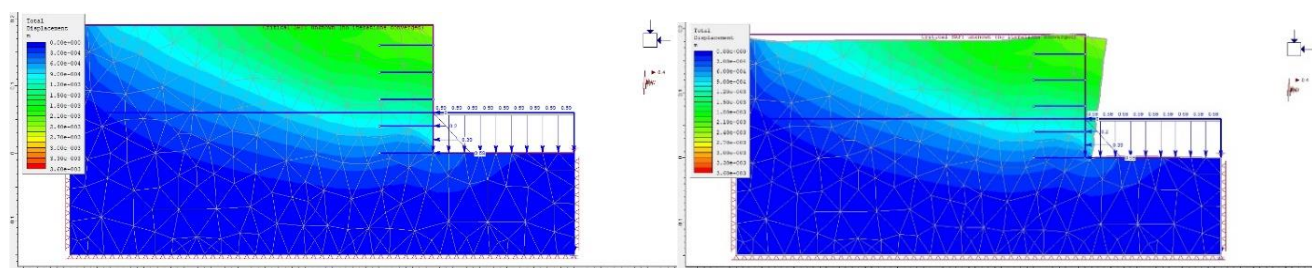
Εικόνα 307 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,547

Figure 307 Analysis by the Janbu method - Safety factor FS = 0.547



Εικόνα 308 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = -

Figure 308 Maximum shear Strain by Phase - Critical SRF = -



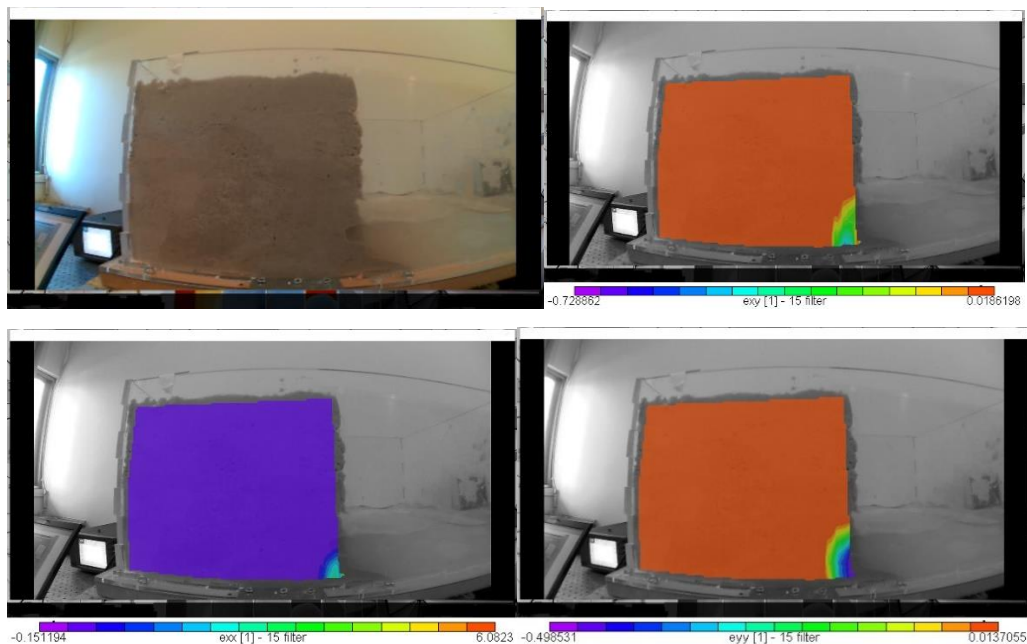
Εικόνα 309 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = -

Figure 309 Total displacement by Phase - Critical SRF = -

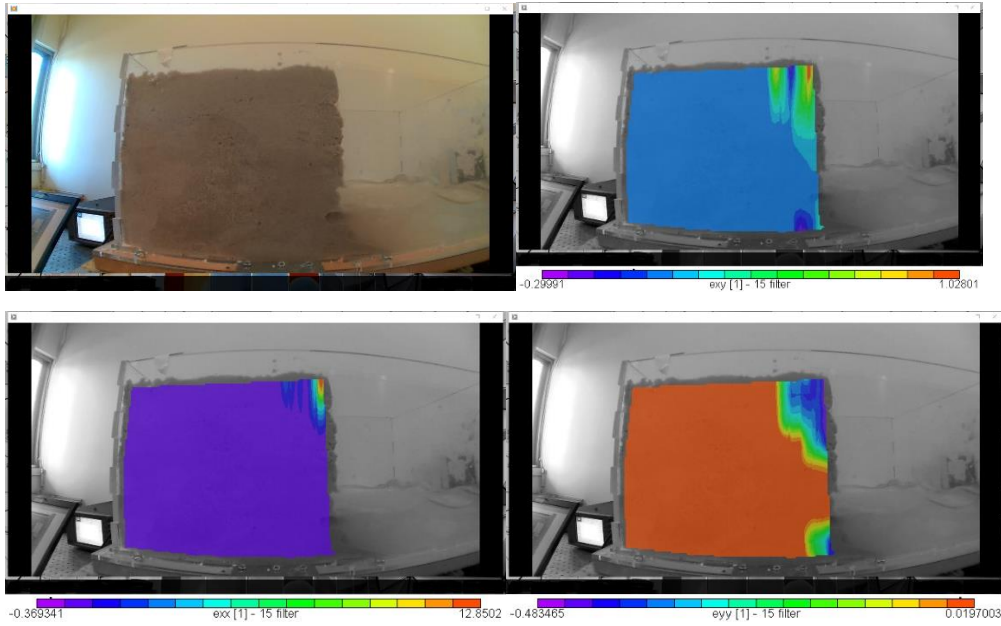
➤ Υπολογισμός τροπών με την εφαρμογή της μεθόδου Vic2D

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με την μέθοδο Vic2D. Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιούνται πολλαπλές εικόνες αναφοράς. Δηλαδή κάθε στάδιο ανάλυσης έχει τη δική του εικόνα αναφοράς που είναι το προηγούμενο στιγμιότυπο της φόρτισης σε ολόκληρο το πρσανές. Η πρώτη σειρά εικόνων που θα δούμε παρακάτω, δείχνει το στιγμιότυπο στο οποίο έγινε η ανάλυση με Vic2D. Η δεύτερη σειρά εικόνων δείχνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης όπως προκύπτουν χωρίς επεξεργασία. Για διευκόλυνση στην παρατήρηση των αποτελεσμάτων μπορούμε να θεωρήσουμε αυτόματα ότι το χρώμα που καλύπτει τη μεγαλύτερη επιφάνεια είναι εκείνο που αντιστοιχεί σε μηδενική τιμή τροπής, τα πιο θερμά από αυτό χρώματα αντιστοιχούν σε θετικές παραμορφώσεις και τα πιο ψυχρά από αυτό σε αρνητικές παραμορφώσεις. Στη Τρίτη σειρά εικόνων αποτυπώνεται το πεδίο τιμών της ανηγμένης τροπής κατά X exx και στην τέταρτη κατά Y eyy.

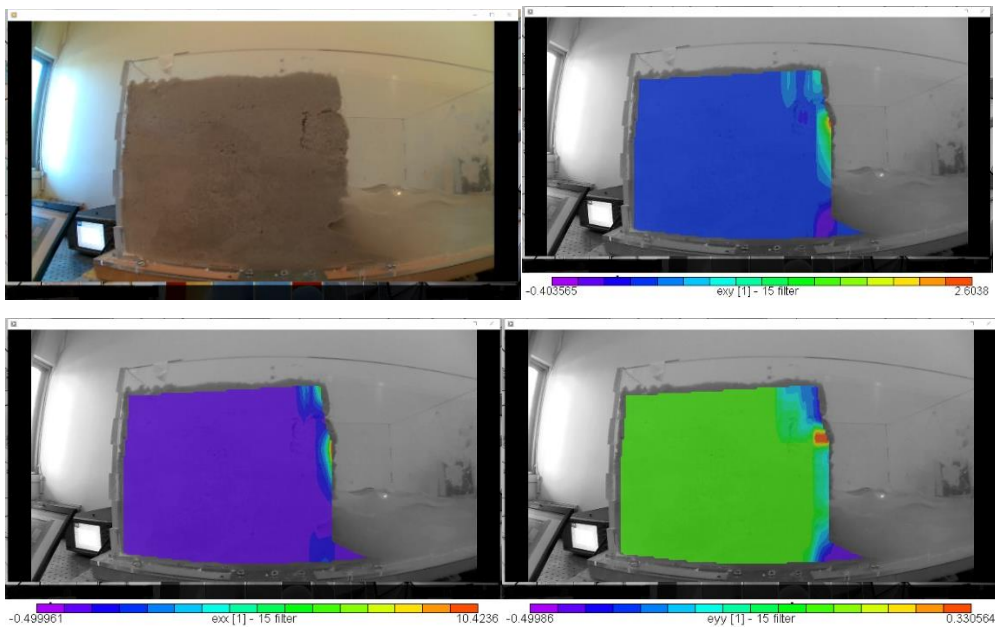
Με τη διαδικασία της συσχέτισης εικόνων, ορίζοντας ως εικόνα αναφοράς πάντοτε την προηγούμενη εικόνα από την εικόνα που εξετάζεται και ως παραμορφωμένη την εικόνα που εξετάζεται, λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα για τις ανηγμένες παραμορφώσεις κατά X e_{xx} και τις ανηγμένες παραμορφώσεις κατά Y e_{yy} . Στις εικόνες που ακολουθούν παρατίθενται τα σχήματα των παραμορφωμένων εικόνων τα οποία απεικονίζουν το πεδίο των ανηγμένων παραμορφώσεων. Όσον αφορά την κλίμακα που χρησιμοποιείται στο πεδίο των διατμητικών παραμορφώσεων κατά X , η μωβ περιοχή αντιπροσωπεύει στην υψηλότερη αρνητική τιμή και η κόκκινη περιοχή στην μεγαλύτερη θετική τιμή. Ομοίως η ίδια κατάσταση ισχύει και για την χρωματική κλίμακα των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά Y . Γενικά οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά X , e_{xx} στις κόκκινες περιοχές είναι κατά απόλυτο τιμή μεγαλύτερες από αυτές των μωβ περιοχών. Επομένως με κόκκινο χρώμα φαίνεται η περιοχή που δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση το δοκίμιο που εξετάζεται. Αντίθετα οι τα μεγέθη κατά απόλυτο τιμή των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά Y , e_{yy} αντιστρέφονται, δηλαδή στις υπό εξέταση παραμορφωμένες εικόνες οι τιμές στις μωβ περιοχές είναι κατά απόλυτο τιμή μεγαλύτερες από αυτές των κόκκινων περιοχών. Επομένως με μωβ χρώμα φαίνεται η περιοχή που δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση το δοκίμιο που εξετάζεται.



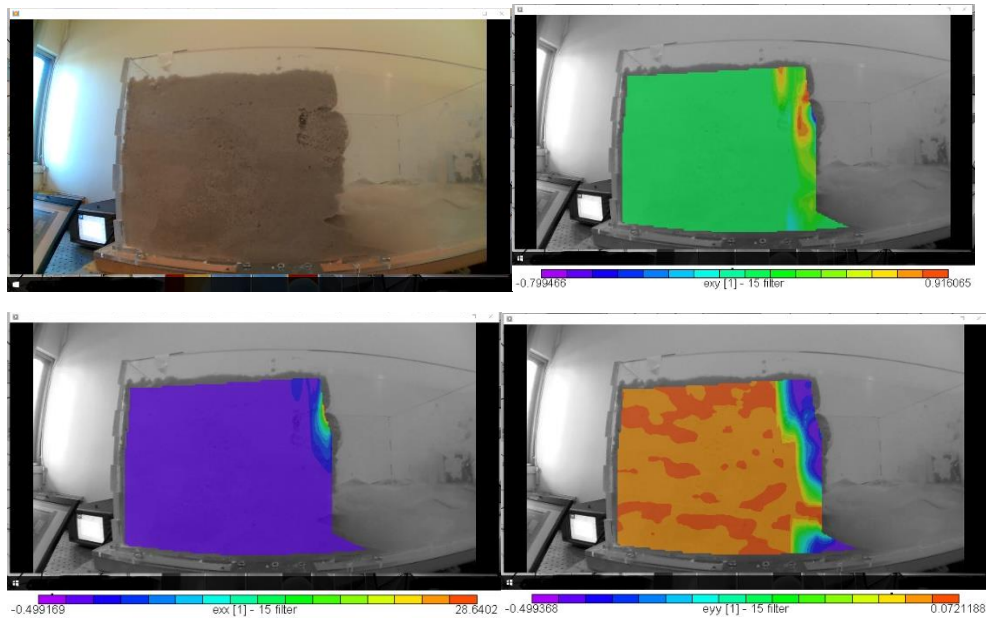
Εικόνα 310 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy}
 Figure 310 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}



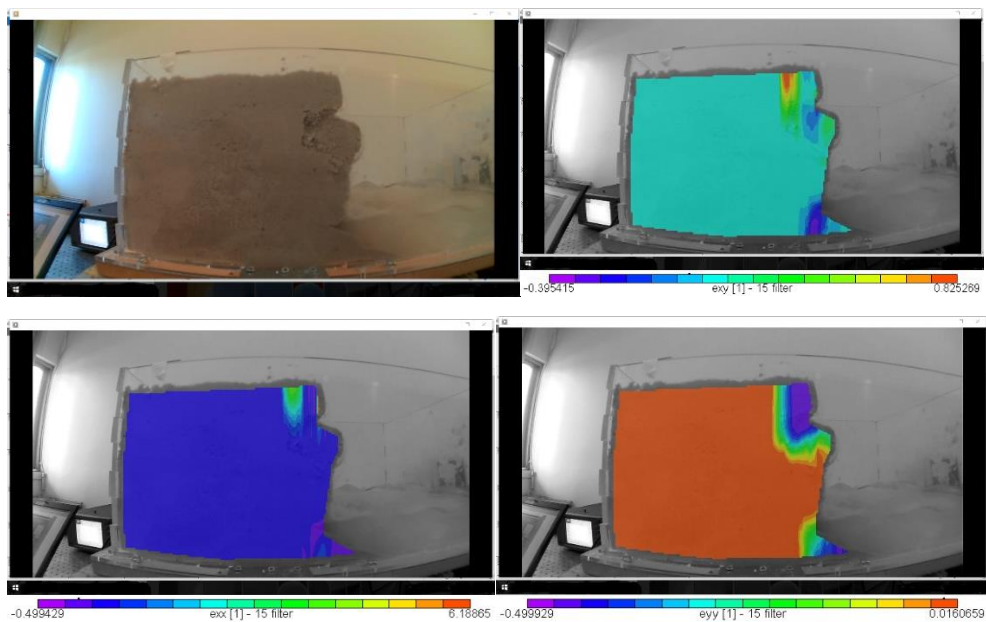
Εικόνα 311 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy / Ανηγμένες Παραμορφώσεις exx / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eyy
 Figure 311 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy



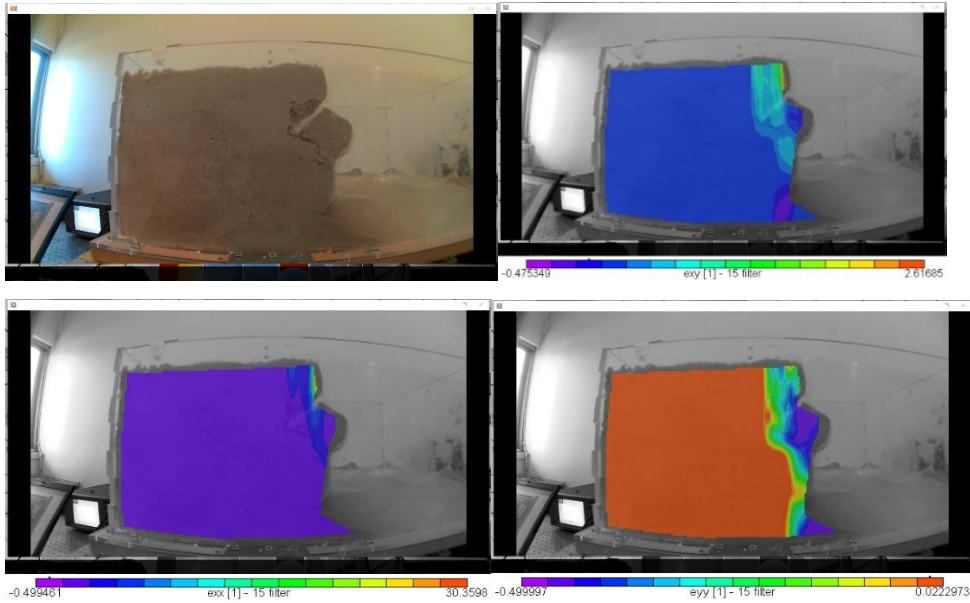
Εικόνα 312 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy / Ανηγμένες Παραμορφώσεις exx / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eyy
 Figure 312 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy



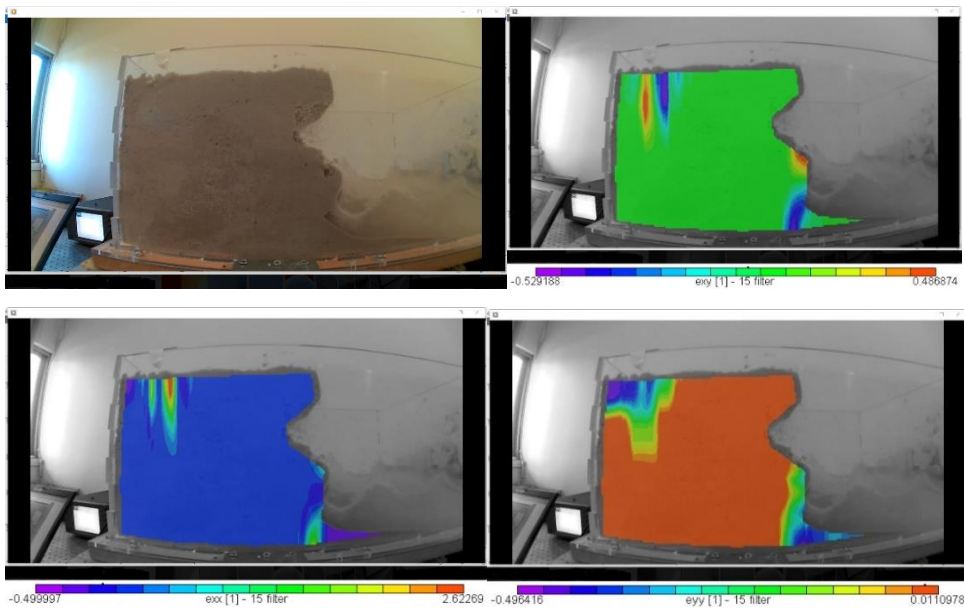
Εικόνα 313 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διαμητικές Παραμορφώσεις exy / Ανηγμένες Παραμορφώσεις exx / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eyy
 Figure 313 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy



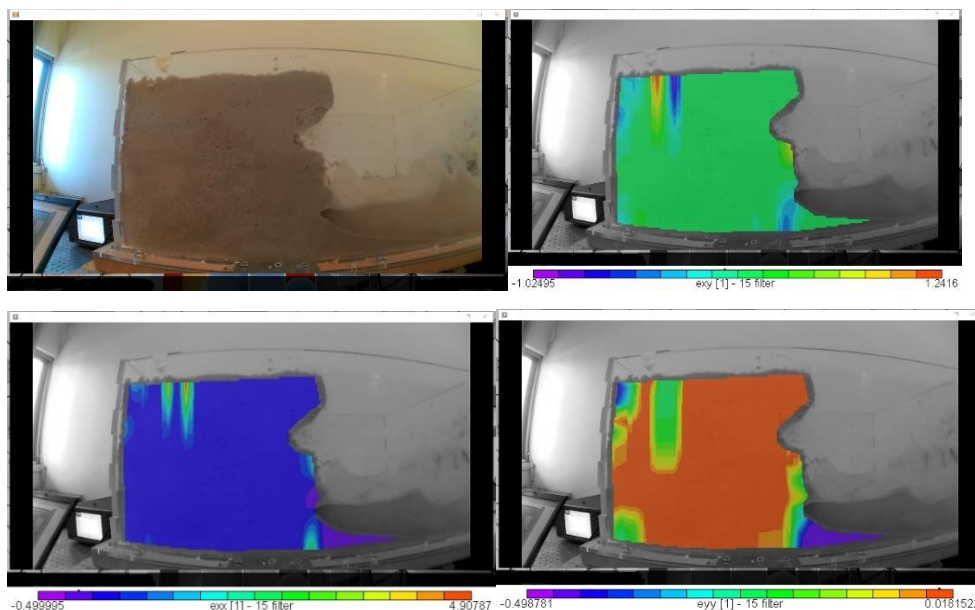
Εικόνα 314 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διαμητικές Παραμορφώσεις exy / Ανηγμένες Παραμορφώσεις exx / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eyy
 Figure 314 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy



Εικόνα 315 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy / Ανηγμένες Παραμορφώσεις exx / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eyy
 Figure 315 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy



Εικόνα 316 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy / Ανηγμένες Παραμορφώσεις exx / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eyy
 Figure 316 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy



Εικόνα 317 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy}
 Figure 317 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}

Συμπεράσματα Μεθόδου Vic2D

Σε αυτή την επεξεργασία βλέπουμε πως στα πεδία των παραμορφώσεων κατά όλων των αξόνων, προβάλλονται οι επιφάνειες αστοχίας του μοντέλου στην πλάγια όψη του πρσανούς σε μία διάσταση λιγότερη. Οι όποιες διαφοροποιήσεις είναι κυρίως ποσοτικές και όχι ποιοτικές. Επίσης βλέπουμε πως όλα τα πεδία τροπών (e_{xy} , e_{xx} και e_{yy}) αποτυπώνουν το μηχανισμό υποσκαφής που δημιουργείται κατά τη φόρτιση και είναι ο υπαίτιος για την αστοχία του πρσανούς. Επιπροσθέτως παρατηρείται το φαινόμενο της τοπικής συγκέντρωσης τροπών (strain localization) που είδαμε και σε προηγούμενα πειράματα. Ειδικότερα το πρόγραμμα αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να δούμε την τομή των πιθανών επιπέδων αστοχίας που δημιουργούνται λόγω της φόρτισης. Αν και δεν αστοχούν εν τέλει όλα, δημιουργείται η τάση αστοχίας σε αυτά τα επίπεδα, και συνεπώς συγκέντρωση τροπών.

❖ Σύγκριση Πειράματος 13^{ου} και Πειράματος 14^{ου}

Χάρη στην πανομοιότυπη γεωμετρία των μοντέλων των δύο πειραμάτων και την ίδια επιτάχυνση που επιβάλλεται κατά τη φόρτιση δίνεται η δυνατότητα να γίνει διερεύνηση στην επιρροή του νερού στα αποτελέσματα των υπολογιστικών και πειραματικών αναλύσεων. Στον Πίνακα 16 βλέπουμε συγκεντρωτικά τα στοιχεία των δύο πειραμάτων ώστε να διευκολυνθεί η μεταξύ τους σύγκριση.

Πίνακας 15 Σύγκριση Πειράματος 13^{ου} και Πειράματος 14^{ου}Table 15 Comparison of Experiment 13th and Experiment 14th

Αριθμός Πειράματος	13 ^ο	13 ^ο	14 ^ο	14 ^ο
Επιτάχυνση	3,0 m/s ²	4,0 m/s ²	3,0 m/s ²	4,0 m/s ²
Γεωμετρία Τραπεζίου - Θέση Αισθητήρων Οπτικών Ινών & Οπλισμού	Κοινή	Κοινή	Κοινή	Κοινή
Παρουσία Νερού	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι
Μέγιστες Τροπές 1η στρώση οπλισμού	8 μstrain	11 μstrain	650 μstrain	20 μstrain
Μέγιστες Τροπές 2η στρώση οπλισμού	4 μstrain	6 μstrain	32 μstrain	30 μstrain
F.S. κατά Bishop	0,860	0,734	0,805	0,698
F.S. κατά Janbu	0,710	0,569	0,659	0,547
S.R.F. κατά Phase	0,56	-	0,48	-

Στα δύο πειραματικά μοντέλα η μόνη διαφορά είναι η παρουσία νερού στο 14^ο πείραμα, ενώ τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, η θέση των οπλισμών και η θέση των μέσων καταγραφής είναι ακριβώς ίδια. Αρχικά όσον αφορά τα υπολογιστικά μοντέλα με το λογισμικό Slide, το νερό επιδρά αρνητικά στους συντελεστές ασφαλείας, απομειώνοντας τη τιμή τους σε πολύ μικρό όμως ποσοστό. Ενώ στο πειραματικό μέρος οι διαφορές είναι μεγάλες. Αρχικά παρατηρούμε πως, εξαιτίας της παρουσίας νερού και του μηχανισμού υποσκαφής που προκαλούν τα κύματα που δημιουργούνται κατά την επιβολή της φόρτισης, το μοντέλο στο 14^ο πείραμα οδηγείται σε αστοχία κιόλας από την επιβολή της επιτάχυνσης των 3,0 m/s². Ενώ το μοντέλο του 13^{ου} πειράματος δεν αστοχεί ούτε με την επιβολή μεγαλύτερης φόρτισης και την επιτάχυνση να αγγίζει τα 4,0 m/s². Οι επιταχύνσεις στις οποίες αστόχησαν τα μοντέλα αναγράφονται με κόκκινη γραμματοσειρά στον Πίνακα 16. Αυτή η αστοχία αποτυπώνεται και στην καταγραφή των τροπών από τους αισθητήρες οπτικών ινών. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενα κεφάλαια η παρουσία νερού είναι ένας αιτιώδης παράγοντας δημιουργίας κατολισθητικών φαινομένων. Το νερό και μόνο στα υπόγεια ενός πρανούς έχει την ιδιότητα να αυξάνει την πίεση των πόρων του εδαφικού υλικού μειώνοντας έτσι την ενεργό διατμητική αντοχή των κορεσμένων εδαφών. Συνδυασμένο δε με τη δημιουργία κυμάτων και με την επιβολή σεισμικής φόρτισης και μάλιστα υψηλής επιτάχυνσης έχουμε και τον εναυσματικό παράγοντα για την δημιουργία κατολισθητικών φαινομένων.

Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα και Προτάσεις Έρευνας

7.1 Συμπεράσματα

➤ Εισαγωγή

Η εφαρμογή των διάφορων μεθόδων διερεύνησης των πρανών μπορεί να προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά τους, ενώ η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων μπορεί να παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα τόσο για τις υπό μελέτη κατασκευές, όσο και για τις ίδιες τις μεθόδους που εφαρμόζονται. Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε αναλυτική, πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση οπλισμένων πρανών με απλή και σύνθετη γεωμετρία, έναντι στατικής και σεισμικής φόρτισης.

Πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση όπου και κατασκευάσθηκαν συνολικά 14 μοντέλα πρανών, άοπλων, οπλισμένων και με προσθήκη αγωγού, και νερού τα οποία τοποθετήθηκαν στη σεισμική τράπεζα του εργαστηρίου, με προσθήκη αισθητήρων οπτικών ινών και λαμβάνοντας ψηφιακές φωτογραφίες προκειμένου να εφαρμοσθεί η οπτική μέθοδος παρακολούθησης της συμπεριφοράς τους. Ακολούθως πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των αντίστοιχων πρωτότυπων υπολογιστικών μοντέλων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραματικών, αναλυτικών και υπολογιστικών μεθόδων.

➤ Συμπεριφορά Πρανών

Ξεκινώντας από το πρόβλημα της συμπεριφοράς ενός ξηρού πρανούς έναντι δυναμικής φόρτισης, παρατηρήσαμε ότι ο τρόπος με τον οποίο αστοχεί είναι η ολίσθηση, όπως ήταν αναμενόμενο. Δημιουργείται, δηλαδή, μια ζώνη αστοχίας παράλληλα με το πρανές. Συνεχίζοντας με τη μελέτη του προβλήματος της υποσκαφής ημιβυθισμένου πρανούς, ο μηχανισμός αστοχίας ήταν εντελώς διαφορετικός όπως αναμενόταν άλλωστε. Ουσιαστικά αυτό που είδαμε, είναι να υποσκάπτει το νερό το έδαφος, στη συνέχεια το έδαφος να καταρρέει και να παρασύρεται μέχρι να παρασυρθεί όλη η μάζα του εδάφους.

Συνοπτικά καταλήγουμε στην επιβεβαίωση του θεωρητικού μας υποβάθρου όπως γνωρίζαμε πως η παρουσία νερού ή η μεταβολή της στάθμης του υπόγειου νερού, αυξάνει τις πιέσεις νερού-αέρα των πόρων με αντίστοιχη μείωση της διατμητικής αντοχής του κορεσμένου υλικού του πρανούς.

Ταυτόχρονα όμως η παρουσία του νερού στην άμμο προσδίδει φαινόμενη συνοχή και ταυτόχρονα αύξηση της γωνίας τριβής της, που είναι αίτιο αύξησης της αντοχής του πρανούς. Στους αιτιώδεις παράγοντες της αντοχής του πρανούς ανήκει και ο τρόπος κατασκευής του πρανούς. Είδαμε πως η κατασκευή μοντέλου με τη μέθοδο της ξηράς απόθεσης οδηγεί σε πρανές χαμηλότερης αντοχής από εκείνο που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο της προφόρτισης (στο πείραμα 11), προσομοιώνοντας την προφόρτιση του εδάφους πριν από την κατασκευή ενός έργου. Τέλος, στους εναυσματικούς παράγοντες δημιουργίες κατολισθητικών φαινομένων, δηλαδή στα εξωτερικά αίτια που θα προκαλέσουν αύξηση της διατμητικής τάσης κατά μήκος της πιθανής επιφάνειας ολίσθησης μέχρι το σημείο αστοχίας, είναι φυσικά ο σεισμός όπου εδώ προσομοιώνεται με την επιβολή ταλάντωσης σταθερής επιτάχυνσης από τη σεισμική τράπεζα. Και οι κυματικοί σχηματισμοί που είναι και οι υπαίτιοι για τη δημιουργία του μηχανισμού υποσκαφής.

➤ Πειραματικές Μετρήσεις

Κατά την πειραματική διερεύνηση των γεωτεχνικών κατασκευών στη σεισμική τράπεζα εφαρμόζονται διάφορες μετρητικές μέθοδοι για την συλλογή πληροφοριών σχετικές με την απόκριση των κατασκευών κάτω από τις διάφορες συνθήκες φόρτισης. Οι μετρητικές μέθοδοι επιλέγονται ανάλογα με τον διαθέσιμο υλικοτεχνικό εξοπλισμό των εργαστηρίων, τις πληροφορίες που επιθυμούμε να συλλέξουμε καθώς επίσης και τις ειδικότερες κατασκευαστικές λεπτομέρειες των μοντέλων.

Οι μετρητικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της έρευνας και παρουσιάστηκαν στα Κεφάλαια 10 και 12, είχαν σαν στόχο την ταυτόχρονη παρακολούθηση των τροπών και την σύγκριση των αποτελεσμάτων με στόχο να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για την εφαρμογή των μεθόδων καθώς και για τις ίδιες τις μετρήσεις. Ειδικότερα, οι μετρήσεις με τους αισθητήρες οπτικών ινών πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες θέσεις στο εσωτερικό των πρανών, (είτε πάνω στις στρώσεις των οπλισμών στα οπλισμένα πρανή, είτε πάνω στους αγωγούς, είτε ελεύθεροι στο εσωτερικό των πρανών) ενώ οι μετρήσεις με την οπτική μέθοδο με τη χρήση ψηφιακών φωτογραφιών αφορούσαν την πλάγια όψη του πρανούς. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων είχε σαν στόχο να δώσει μια ολοκληρωμένη εικόνα για την συμπεριφορά των μοντέλων τόσο στο εσωτερικό τους μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών, πράγμα δύσκολο για οπτικές μεθόδους, όσο και στην πλάγια όψη του πρανούς όπου είναι αδύνατο να τοποθετηθούν αισθητήρες καθ' όλη την επιφάνεια του.

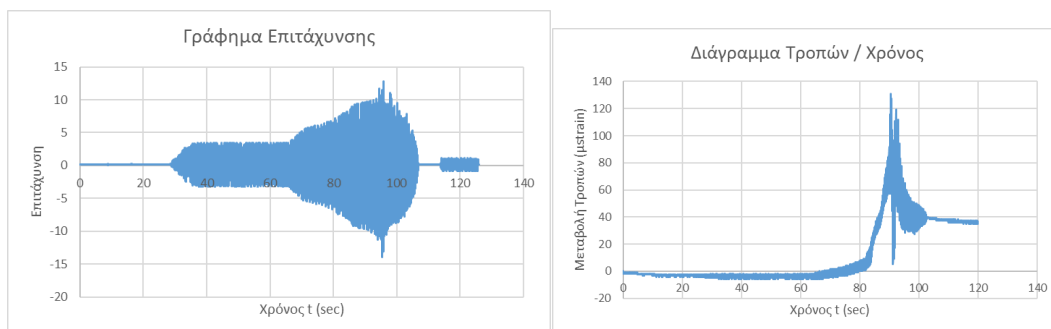
Όσον αφορά τους αισθητήρες οπτικών ινών στην περίπτωση των γεωτεχνικών μοντέλων, η καλύτερη λύση θα ήταν η χρήση αισθητήρων οπτικών ινών χωρίς επικάλυψη προκειμένου να ελαχιστοποιείται η επιρροή αυτών στα μοντέλα. Οι αισθητήρες όμως οπτικών ινών είναι ιδιαιτέρως εύθραυστοι και ταυτόχρονα είναι ιδιαιτέρως κοστοβόροι, γεγονός που καθιστά ασύμφορη τη χρήση τους χωρίς επικάλυψη ή προστασία. Έτσι οι αισθητήρες οπτικών ινών προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε γεωτεχνικά μοντέλα θα πρέπει να βρεθεί ο κατάλληλος τρόπος συγκράτησής τους στα επιθυμητά σημεία που θα ληφθούν οι μετρήσεις χωρίς να απειληθεί η αριτιότητα τους. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να επιλέγεται το κατάλληλο υλικό συγκόλλησης των αισθητήρων στην υπό εξέταση επιφάνεια και η επιρροή του να συνυπολογίζεται στα αποτελέσματα που προκύπτουν. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου μέτρησης τροπών μέσω αισθητήρων οπτικών ινών στο γεωτεχνικό μοντέλο είναι ότι μπορούν να ληφθούν περισσότερες από μία μετρήσεις σε διάφορες θέσεις στο εσωτερικό των μοντέλων και τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αξιόπιστα και συγκρίσιμα. Μία αδυναμία της μεθόδου προκύπτει κατά την εφαρμογή της σε μοντέλα υπό κλίμακα και ειδικά γεωτεχνικά μοντέλα καθώς είναι ιδιαίτερα δύσκολο να βρεθεί και να επιλεγεί ο κατάλληλος τρόπος συνένωσης των αισθητήρων στις υπό εξέταση περιοχές. Στην παρούσα έρευνα κατά την διερεύνηση των οπλισμένων πρανών, οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε διάφορες θέσεις είτε σε στρώσεις οπλισμού είτε ελεύθεροι στο εσωτερικό του πρανούς με κάποια επικάλυψη για την προστασία τους είτε πάνω σε επιφάνεια αγωγού, ωστόσο δυσκολίες παρουσιάσθηκαν κατά την επιλογή της κόλλας και την επιρροή της στα αποτελέσματα.

Σχετικά με την μετρητική μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση με Vic2D, θα πρέπει να δίνεται προσοχή κατά τη χρήση της άμμου στο μοντέλο για την ποσοτικοποίηση των τροπών. Συγκεκριμένα, η άμμος θα πρέπει να βαφεί σε μεγάλο βαθμό ώστε να δημιουργηθεί μεγάλες οπτικές χρωματικές αντιθέσεις ανάμεσα στους κόκκους που την αποτελούν, ώστε να δημιουργηθούν τα απαιτούμενα σχήματα που απαιτούνται για την ανάλυση με Vic2D Επιπλέον. Τέλος σε αυτό θα πρέπει να συνυπολογιστεί και το νερό που θα προστεθεί στα ημιβυθισμένα μοντέλα το οποίο θα αμβλύνει αυτές τις αντιθέσεις δυσχεραίνοντας την προεπεξεργασία των φωτογραφιών κατά την επιλογή του initial guess, ίσως μειώνοντας και την απόδοση του προγράμματος.

➤ **Αισθητήρες Οπτικών Ινών**

Αρχικά επισημαίνεται ότι οι μετρήσεις που ελήφθησαν μέσω αισθητήρων οπτικών ινών αφορούν τροπή μετρούμενη κατά μήκος των αισθητήρων (linear strain). Το γεγονός ότι για

διαφορετικά πειράματα προκύπτουν παρόμοια αποτελέσματα σχεδόν για όλες τις φάσεις φορτίσεων, δείχνει ότι η μετρητική μέθοδος που εφαρμόστηκε για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας είναι επιτυχής και μπορεί να δώσει χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά του μοντέλου κατά την φόρτιση του. Η αύξηση λοιπόν της τροπής που υπολογίζεται από το μήκος κύματος που μετρείται προκύπτει ανάλογη με την αύξηση της επιτάχυνσης. Επίσης γίνεται αισθητό το φαινόμενο της αστοχίας του πρανούς στο διάγραμμα χάρη στην απότομη μεταβολή της τροπής. Όπως φαίνεται και στο παράδειγμα που εξάγουμε από 7^ο πείραμα, στην αμέσως επόμενη εικόνα.

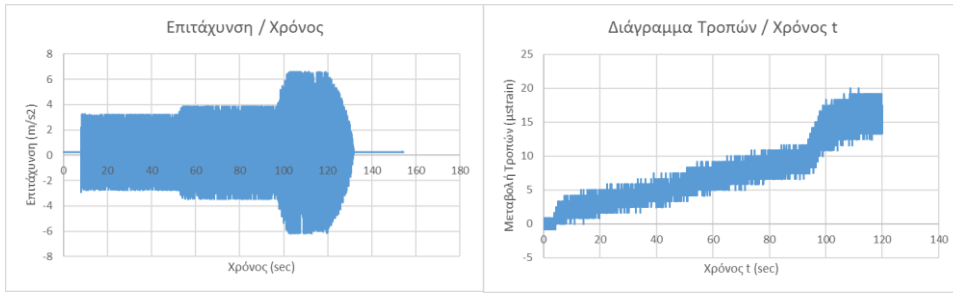


Εικόνα 318 Διαγράμματα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών Πείραμα 7^ο, Δοκιμή 5^η

Figure 318 Charts of Acceleration and Strain Modification, Experiment 7th, Test 5th

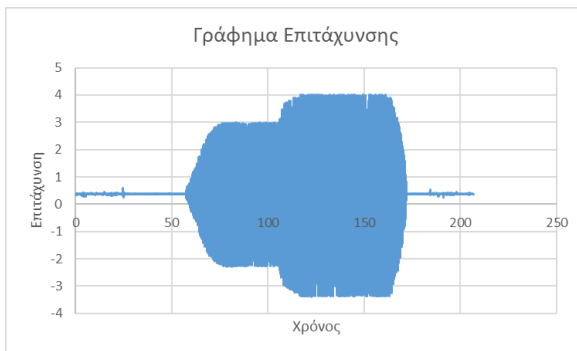
Γενικά, από την σύγκριση των μετρήσεων που ελήφθησαν για διάφορα πειράματα μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών προκύπτει ότι τα αποτελέσματα είναι λογικά και αναμενόμενα, τόσο από πλευράς μορφής των διαγραμμάτων, όσο και από πλευράς τάξης μεγέθους.

Έχοντας δει συνολικά όλα τα πειράματα που διεξήχθησαν στο εργαστήριο, είναι ασφαλές να παρατηρήσουμε πως στα διαγράμματα τροπών που αποκτήθηκαν μέσω της καταγραφής των αισθητήρων οπτικών ινών και στα διαγράμματα επιτάχυνσης που αποκτήθηκαν χάρη στην καταγραφή του επιταχυνσιογράφου του QCN έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό. Και τα δύο είδη διαγραμμάτων είναι επηρεασμένα από την παρουσία «θορύβου». Ο θόρυβος αυτός προέρχεται από την επιβολή επιτάχυνσης σε άλλες κατευθύνσεις όπως και από την υψηλή ευαισθησία των αισθητήρων των οπτικών ινών και του επιταχυνσιογράφου. Όπως φαίνεται ο θόρυβος αυτός είναι ανάλογος της τιμής της επιτάχυνσης. Όσο αυξάνεται η απολυτή τιμή της τόσο πιο έντονη είναι παρουσία του θορύβου κατά μήκος των διαγραμμάτων. Στις προτάσεις της παρούσας εργασίας για μελλοντική έρευνα είναι η αναζήτηση τρόπου αφαίρεσης του θορύβου από τις καταγραφές.

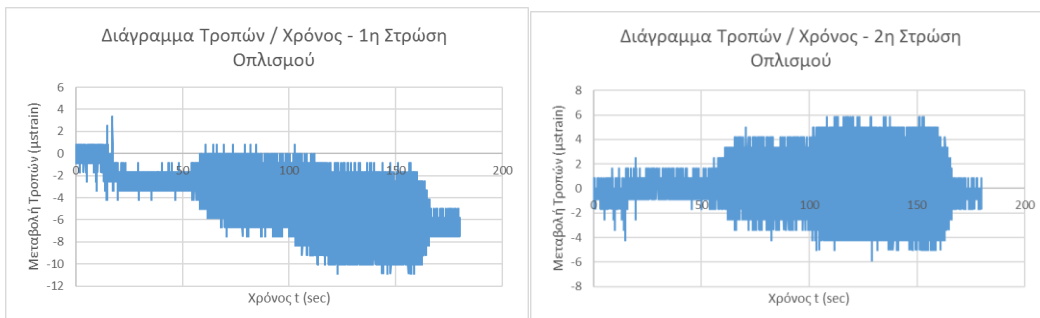


Εικόνα 319 Διαγράμματα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών Πείραμα 7^ο

Figure 319 Charts of Acceleration and Strain Modification, Experiment 7th



Εικόνα 320 Διάγραμμα Επιτάχυνσης, Figure 320 Acceleration Chart

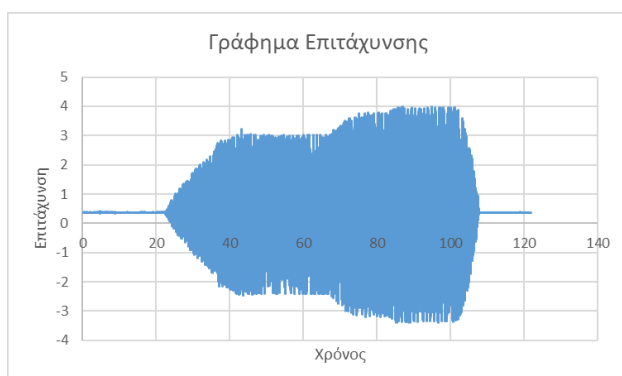


Εικόνα 321 Διαγράμματα Μεταβολής Τροπών Πείραμα 13^ο

Figure 321 Charts of Strain Modification, Experiment 13th

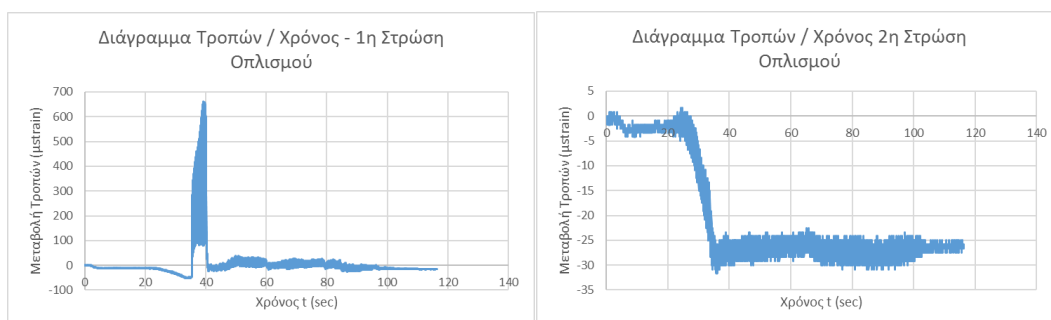
Χαρακτηριστικά είναι τα παραπάνω διαγράμματα από το 7^ο και 13^ο πείραμα. Είναι ξεκάθαρο πως με κάθε αύξηση της επιτάχυνσης αυξάνεται και το εύρος γύρω από το οποίο ταλαντώνεται διάγραμμα τροπών. Στο 13^ο πείραμα του οποίου τα στοιχεία φαίνονται παραπάνω, δεν μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για το «θόρυβο» ανάλογα με τη θέση του αισθητήρα, καθώς όπως βλέπουμε το εύρος της μεταβολής τροπών είναι ίδιο και στους δύο αισθητήρες. Η επόμενη εικόνα όμως δείχνει τα αντίστοιχα διαγράμματα για το πείραμα 14, εκεί όπως παρατηρούμε το εύρος διαφοροποιείται αναλόγως με το ύψος στο οποίο έχει τοποθετηθεί ο αισθητήρας. Και για την ακρίβεια

αισθητήρας που είναι τοποθετημένος στη δεύτερη στρώση του οπλισμού, δηλαδή περί το μέσο ύψος του πρανούς, παρουσιάζει εντονότερα το πρόβλημα του θορύβου.



Εικόνα 322 Διάγραμμα Επιτάχυνσης Πείραμα 14^ο,

Figure 322 Acceleration Chart Experiment 14th



Εικόνα 323 Διαγράμματα Μεταβολής Τροπών Πείραμα 14^ο

Figure 323 Charts of Strain Modification, Experiment 14th

➤ Αξιολόγηση ανάλυσης με το λογισμικό Slide και Phase

Κατά την αναγωγή των πειραματικών μοντέλων σε αντίστοιχα μοντέλα πρωτότυπων κατασκευών και την ανάλυσή τους με το λογισμικό Slide, προέκυψε ότι οι Συντελεστές Ασφαλείας (Σ.Α.) των μοντέλων είχαν διάφορες τιμές ανεξαρτήτως είτε άνω της είτε κάτω της μονάδας για όλες τις περιπτώσεις. Υπήρχαν περιπτώσεις μη αστοχίας του πρανούς όπου ο ΣΑ. Υπολογίστηκε κάτω της μονάδας. Σημειώνεται βέβαια ότι δεν παρατηρήθηκε το αντίστροφο φαινόμενο, δηλαδή δεν υπήρξε αστοχία πρανούς που να συνοδεύεται από υπολογισμό του Σ.Α. μεγαλύτερο της μονάδας. Επίσης οι τιμές των Σ.Α. που προέκυψαν κατά την ανάλυση με την μέθοδο Bishop είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που προέκυψαν με την μέθοδο Janbu.

Σημειώνεται επίσης ότι στα μοντέλα που δημιουργήθηκαν για την ανάλυση με το λογισμικό Slide και Phase έγινε επέκταση των ορίων ώστε να εξαλειφθεί το φαινόμενο της επιρροής του συνόρου στα αποτελέσματα. Στην συνέχεια υπολογίσθηκαν μέσω του λογισμικού Phase και την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, οι τιμές του Συντελεστή Μείωσης της Αντοχής (SRF) οι οποίες και είναι χαρακτηριστικές για το κάθε μοντέλο και εκφράζουν την αντοχή του.

Αυτό που εξάγουμε σαν τελικό συμπέρασμα από τη χρήση των λογισμικών για την υπολογιστική ανάλυση των μοντέλων είναι όσον αφορά τη μέθοδο Janbu πως σε γενικές γραμμές, κινείται στην ασφαλή πλευρά δίνοντας πιο συντηρητικές τιμές για τον Συντελεστή ασφαλείας παρέχει όμως ταυτόχρονα ικανοποιητική ακρίβεια για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές των αναλύσεων ευστάθειας πρανών. Ενώ η μέθοδος Bishop του ίδιου λογισμικού είναι πιο αισιόδοξη αφού δίνει πάντα μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή ασφαλείας. Ταυτόχρονα είδαμε πως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με το λογισμικό Phase ειδικότερα, δεν ενδείκνυται για πρανή με αυξημένη πολυπλοκότητα της μηχανικής συμπεριφοράς τους, λόγω ετερογένειας και ανισοτροπίας, επειδή οι απαιτούμενες για τους υπολογισμούς παράμετροι δεν είναι εύκολα αποτιμήσιμες μέσω εργαστηριακών δοκιμών.

➤ **Αξιολόγηση ανάλυσης με το λογισμικό Vic 2D**

Οι ψηφιακές φωτογραφίες που ελήφθησαν στην τομή των οπλισμένων πρανών κατά τη φόρτιση της σεισμική τράπεζας και η επεξεργασία αυτών με το λογισμικό Vic 2D, δείχνουν καθαρά ότι τροπές αυξάνουν καθώς αυξάνει η επιβαλλόμενη από τη σεισμική τράπεζα επιτάχυνση, όπως ήταν αναμενόμενο. Με την εφαρμογή της μεθόδου δόθηκε η δυνατότητα να προσδιοριστούν και οι μηχανισμοί αστοχίας των πρανών.

Αναφορικά με το πρόγραμμα οπτικής ανάλυσης Vic 2D, το πρόγραμμα αυτό δίνει πολύτιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά των πρανών. Συχνά ακόμα και για παραμορφώσεις μη ορατές με γυμνό μάτι, οι οποίες όμως γίνονται αντιληπτές από το πρόγραμμα χάρη στην υψηλή ευαισθησία στις εναλλαγές του φωτός. Για να γίνει αντιληπτό θα δούμε παρακάτω το παράδειγμα του 7^{ου} πειράματος.



Εικόνα 324 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων

Figure 324 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values

Σε αυτό το στιγμιότυπο έχουμε απεικόνιση κατακόρυφων τάσεων εφελκυστικών και θλιπτικών χαμηλών τιμών. Και φαίνεται να δημιουργείται μια μεγάλη ρωγμή (εφελκυστική) αριστερά και χαμηλά του πρानούς.



Εικόνα 325 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων

Figure 325 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values

Και στο αμέσως επόμενο εμφανίζεται η ρωγμή που είχε προβλέψει το πρόγραμμα στο προηγούμενο βήμα. Τέτοια παραδείγματα υπάρχουν σχεδόν σε όλα τα πειράματα που επεξεργαστήκαμε με το πρόγραμμα Vic 2D.

Συνεπώς το φως που εφαρμόζεται πρέπει να είναι σταθερό, και για αυτό κατά προτίμηση τεχνητό, χωρίς να αλλοιώνει το δοκίμιο. Ιδανικά η κάμερα πρέπει να έχει τέτοια απόσταση από το δοκίμιο που να αποτρέπει την εμφάνιση καμπυλότητας κατά τη λήψη των στιγμιότυπων. Εδώ δεν ήταν να δυνατό να επιτευχθεί αυτή η απόσταση λόγω της ταλάντωσης που αποκτούσε ο μηχανισμός

στήριξης της κάμερας κατά τη φόρτιση του δοκιμίου. Στις προτάσεις για περαιτέρω έρευνα δε θα μπορούσε να λείπει η αναζήτηση κατάλληλου υλικού και κατάλληλης διάταξης του μηχανισμού στήριξης της κάμερας, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση του προγράμματος. Επίσης πρέπει να σημειωθεί για αποφυγή σφαλμάτων κατά τη χρήση του λογισμικού πως η επεξεργασία των φωτογραφιών ώστε να αφαιρεθούν τυχόν σφάλματα που προέκυψαν κατά τη λήψη τους δεν ήταν δυνατή καθώς η αλλαγή της ανάλυσης των φωτογραφιών, επηρεάζει την ακρίβεια του λογισμικού.

Όσον αφορά την επιλογή του καταλληλότερου διαγράμματος του πεδίου τιμών των ανηγμένων παραμορφώσεων, ανάμεσα στα τρία είδη που παράγονται με αυτό το λογισμικό, η επιλογή εξαρτάται από το είδος της αστοχίας του πρανούς, καθώς υπάρχουν επιφάνειες αστοχίας που αποτυπώνονται καλά μόνο σε ένα από τα τρία είδη διαγραμμάτων, υπάρχουν όμως και άλλες επιφάνειες αστοχίας που αποτυπώνονται από όλα. Για αυτό το λόγο συνίσταται να μελετώνται όλα πριν επιλεγθεί το καταλληλότερο.

Τέλος πρέπει να τονισθεί πως στα διαγράμματα των πεδίων τροπών είναι εμφανής η εμφάνιση και η εξέλιξη της τοπικής συγκέντρωσης τροπών (strain localization) που παρατηρείται στην περιοχή αστοχίας του πρανούς προ της αστοχίας. Αυτό το φαινόμενο είναι χαρακτηριστικό των κοκκωδών υλικών, και η χρήση του λογισμικού Vic2D μας επιβεβαιώνει αυτή τη θεωρία. Η τοπική συγκέντρωση τροπών είναι πολυπαραγοντική και οφείλεται στον προσανατολισμό και το πάχος των ζωνών διάτμησης, στην ογκομετρική συμπεριφορά μέσα σε μια ζώνη μετά τον σχηματισμό της, στην αρχική κατάσταση της άμμου (ή άλλων κοκκωδών υλικών) το μέγεθος του δείγματος, καθώς και το μέγεθος των κόκκων. Όπως είδαμε λόγω της παρουσίας νερού και των κυματικών σχηματισμών που δημιουργούνται κατά τη φόρτιση, ο μηχανισμός αστοχίας προκαλεί επίπεδη αστοχία στο πρανές, και στο φαινόμενο της τοπικής συγκέντρωσης τροπών, αυτή εμφανίζεται σε μία διάσταση λιγότερη από ότι η θραύση. Ειδικότερα το πρόγραμμα Vic2D μας δίνει τη δυνατότητα να δούμε την τομή των πιθανών επιπέδων αστοχίας που δημιουργούνται λόγω της φόρτισης. Αν και δεν αστοχούν εν τέλει όλα, δημιουργείται η τάση αστοχίας σε αυτά τα επίπεδα, και συνεπώς συγκέντρωση τροπών. Αντιθέτως μοντέλα όπου έχει τοποθετηθεί αγωγός υπάρχει διάχυτη θραύση και σταθεροποιείται στην έκταση του πρανούς καθώς θρυμματίζεται το σύνολο του ολισθαίνοντος σώματος. Αυτή η διαφοροποίηση στη συμπεριφορά του πρανούς οφείλεται στην παρουσία του αγωγού.

7.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Α. Η αναζήτηση μεθοδολογίας που θα αφαιρεί το θόρυβο από τις καταγραφές των επιταχυνσιογράφων και αισθητήρων οπτικών ινών.

Β. Η αναζήτηση κατάλληλου υλικού και κατάλληλης διάταξης του μηχανισμού στήριξης της κάμερας, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση του προγράμματος.

Γ. Διερεύνηση υλικών συγκόλλησης αισθητήρων ώστε να μην πλήγεται η ευαισθησία τους και δημιουργία σταθερότερων συνθηκών για την ασφάλεια τους κατά τη φόρτιση των μοντέλων.

Δ. Δημιουργία νέας μεγαλύτερης βάσης ή επέκταση της υπάρχουσας βάσης της σεισμικής τράπεζας, από σύνθετα υλικά μικρού βάρους και άκαμπτα, ώστε να έχει απειροελάχιστη ή καθόλου ταλάντωση κατά τη λειτουργία της σεισμικής τράπεζας. Ο σκοπός που θα εξυπηρετεί θα είναι η αντικατάσταση του μηχανισμού στήριξης της κάμερας ώστε να αυξηθεί το μήκος και να δύναται να χρησιμοποιηθεί κάμερα χωρίς ευρυγώνιο φακό.

Ε. Με την προϋπόθεση της επέκτασης της βάσης εκατέρωθεν της σεισμικής τράπεζας, θα είχε ενδιαφέρον να χρησιμοποιηθεί κάμερα εκατέρωθεν του κουτιού Plexiglass ώστε να μελετηθούν ταυτόχρονα οι δύο πλάγιες όψεις του πρανούς.

Στ. Τέλος, θα είχε ενδιαφέρον να γίνει ταυτόχρονα ανάλυση ψηφιακής συσχέτισης εικόνων σε λογισμικό Vic2D και σε PIV, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα και τα βήματα χρήσης και των δύο σε γεωτεχνικά προβλήματα. Και για καλύτερη σύγκριση των δύο λογισμικών μπορεί να υπολογισθεί το volumetric strain στο λογισμικό Vic2D με χρήση των exx και eyy , ώστε να συγκριθεί με το volumetric strain του λογισμικού PIV.

Βιβλιογραφία

1. Σακελλαρίου Μ., Γεωτεχνική Μηχανική, ΕΜΠ, 2017
2. Καββαδάς Μ., Στοιχεία Εδαφομηχανικής, ΕΜΠ, 2003
3. Καββαδάς Μ., Πανταζίδου Μ., Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής, 2007
4. Kapogianni, E., Sakellariou, M., 2017. Application of Particle Image Velocimetry (PIV) and Digital Image Correlation (DIC) techniques on scaled slope models. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Volume 4 Issue 9. pp. 853-860
5. Kapogianni, E., Sakellariou, M.G., Laue, J., 2017. "Experimental investigation of reinforced soil slopes in a geotechnical centrifuge, with the use of optical fibre sensors". *Journal: Geotechnical and Geological Engineering*, Springer International Publishing, V35, I2, pp 1-21.
6. Kapogianni, E., Sakellariou, M.G., Laue, J., Springman, S.M., 2016. "Investigation of the mechanical behavior of the interface between soil and reinforcement, via experimental and numerical modelling". *Advances in Transportation Geotechnics 3. Procedia Engineering*, Elsevier, V143, pp 419–426 (open access).
7. Καπόγιαννη Ε., Σακελλαρίου Μ., Αναλυτική, Πειραματική και Υπολογιστική Διερεύνηση Οπλισμένων Πρανών Έναντι Στατικής και Σεισμικής Φόρτισης, Διδακτορική Διατριβή, 2013
8. D.A. Morris and A.I. Johnson, Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948-60, 1967
9. Karl von Terzaghi, Theoretical Soil Mechanics, 1943
10. Χρηστάρας Β., Χατζηαγγέλου Μ., Απλά βήματα στην εδαφομηχανική, 2011
11. Karl von Terzaghi, Mechanism of Landslides, Geological Society of America, Engineering geology, Berkley. Vol., November, pp. 83-123 1950
12. Varnes D. J., Slope movement types and processes, In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) Landslides, analysis and control, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC., pp. 11–33, 1978
13. Cruden D.M., VARNES D. J., Landslide types and processes, In: Turner AK, Schuster RL (eds) Landslides investigation and mitigation. Transportation research board, US National Research Council. Special Report 247, Washington, DC, Chapter 3, pp. 36–75, 1996
14. Hutchinson J. N., Mass Movement., In The Encyclopedia of Geomorphology, 1968
15. Crozier Michael J., Landslides: Causes, Consequences & Environment, 1986

16. Erskine, C. F., Landslides in the vicinity of the Fort Randall Reservoir, US. Geological Survey Professional Paper 675, 1973
17. <https://eclass.duth.gr>
18. Záruba Q., Mencil V., Landslides and Their Control, Elsevier, New York, 1982
19. Κούκης, Γ., Κατολισθητικά φαινόμενα στον Ελληνικό χώρο και η σημασία τους στην οδοποιία, Δελτίο ΚΕΔΕ 2: 106-149, 1980
20. Hoek E, Bray J., Rock Slope Engineering: Third Edition, 1981
21. WP/ WLI. 1993. A suggested method for describing the activity of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Bulletin 47, 53-57
22. Κότση Ι., Σακελλαρίου Μ., Διερεύνηση του φαινομένου της διάβρωσης των ακτών. Εφαρμογή σε ακτή της Ρόδου, Αθήνα, 2008, Διπλωματική
23. Φραγκούλη Γ., Σακελλαρίου Μ., Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους, 2012, Διπλωματική
24. Morgenstern, N. R., Price, The analysis of the stability of general slip surfaces, Geotechnique 15(1), 79-93, 1965
25. Spencer, E., A Method of analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces, Geotechnique 17(1), 11-26, 1967
26. Janbu N., Slope stability computations, Soil mechanics and foundation engineering report, Technical University of Norway, Trondheim, 1968
27. Duncan J. M., State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 122, 577-596. 1996
28. Sarma, S. K., Seismic stability of earth dams and embankments, Geotechnique, 25 (4): 743–761, 1975
29. Bishop, The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes, Geotechnique, vol. 5, no. 1. 1955. pp. 7-17, 1955
30. Cavounidis S., On the ratio of factors of safety in slope stability analyses, Geotechnique, 37(2), 207-210, 1987
31. Newmark N. M., Effects of earthquakes on dams and embankments, Geotechnique, London 15(2): 139–160, 1965
32. Cundall P. A., Distinct element models of rock and soil structure. Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics 129-163, 1987

33. Lorig L., Hart R.D., Cundall P.A., Slope stability Analysis of jointed rock using distinct element method, Publisher: Transportation Research Board, Issue Number: 1330, 1991
34. Desrues J., Viggianiny G., Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry, Int. Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics vol.28 No 4, pp. 279-321, 2004
35. Genereaux R.P., Fluid-flow design methods, Industrial and Engineering Chemistry 29, 385–388, 1937
36. Srblav B. Genić, Branislav M. Jaćimović, Vojislav B. Genić, Economic optimization of pipe diameter for complete turbulence, Energy and Buildings 45 (2012) 335–338
37. <http://phmsa.dot.gov/pipeline/guidance>
38. <http://pipeng.com/index.php/ts/itdmotdiam003a/>
39. <http://files.asme.org/Catalog/Codes/PrintBook/33734.pdf>
40. Palmer AC, Martin JH., Buckle propagation in submarine pipelines. Nature 1975
41. Kyriakides S, Edmundo C. Mechanics of offshore pipelines, vol. 1. London: Elsevier, 2007.
42. George A. Antaki., Piping and Pipeline engineering, 2003
43. F. Albermani, H. Khalilpasha, H. Karampour, Propagation buckling in deep sub-sea pipelines, Engineering Structures 33, 2547–2553 2011
44. Gabriella Bolzon, Taoufik Boukharouba, Giovanna Gabetta. Integrity of pipelines transporting Hydrocarbons
45. Shashi Menon, Gas pipeline Hydrolics, New York 2005
46. Andrew Palmer and Roger King, Subsea pipeline engineering, Oklahoma 2008
47. Duraid Alkazraji, Pipeline engineering, Cambridge 2008
48. www.corrosionmaterials.com
49. <https://exchange.dnv.com/servicedocuments/dnv/>
50. C.W. Gong, K.Y. Lam, C. Lu, Structural analysis of a submarine pipeline subjected to underwater shock, International Journal of Pressure Vessels and Piping 77, 417-423, 2000
51. Neil Taylor, Vinh Tran, Experimental and Theoretical Studies in Subsea Pipeline Buckling, Sheffield Hallam University, 1994
52. DEEPSTAR, The State of Art of Subsea Processing, Part A, Stress Engineering Services, 2003
53. G. Mogseth, M. Stinessen, Subsea Processing as Field Development Enabler, FMC, Kongsberg Subsea, Deep Offshore Technology Conference and Exhibition, New Orleans, 2004

54. AOPL (Association of Oil Pipe Lines), 2006, Pipelines and Water Carriers Continue to Lead All Other Modes of Transport in Ton-Miles Movement of Oil, 2004
55. AOPL/API (Association of Oil Pipe Lines and American Petroleum Institute), 2002
56. <http://www.sipiem.com/files/api-610-11th1.pdf>
57. Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe, Crane Company, New York, 1976.
58. Engineering Data Book, 10th ed., Gas Processors Suppliers Association, Tulsa, OK, 1994
59. McCain, W.D. Jr., The Properties of Petroleum Fluids, Petroleum Publishing Company, Tulsa, OK, 1973
60. Paulo M. Coelh, Carlos Pinho, Considerations About Equations for Steady State Flow in Natural Gas Pipelines, University of Porto, 2007
61. Jim Cordell, Hershel Vanzant, Pipeline Pigging Handbook, 2009
62. S.T. Tolmasquim, A.O. Nieckele, Design and control of pig operations through pipelines, Department of Mechanical Engineering, Brazil, 2008
63. API 5L, Specification for Line Pipe, American Petroleum Institute, Washington, DC.
64. API 5L3, Drop Weight Tear Tests on Line Pipe, American Petroleum Institute, Washington, DC.
65. API 578, Material Verification Program for New and Existing Alloy Piping Systems, American Petroleum Institute, Washington, DC.
66. ASM, Atlas of Stress-Strain Curves, Boyer, H.E., ed., ASM International, Materials Park, OH.
67. ASM, Handbook of Corrosion Data, ASM International, Materials Park, OH.
68. ASM, Metals Reference Book, ASM International, Materials Park, OH.
69. ASME B36.10, Welded and Seamless Wrought Steel Pipe, American Society of Mechanical Engineers, New York.
70. ASME B36.19, Stainless Steel Pipe, American Society of Mechanical Engineers, New York.
71. ASME B46.1, Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay), American Society of Mechanical Engineers, New York.
72. ASME II, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Materials, Part II Properties, American Society of Mechanical Engineers, New York.
73. ASTM G59, Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements, 2014
74. Horner, R.A., The Technical Integrity Management of Sour Service Ageing Facilities. UK Corrosion, 96, London, 1996

75. Commercial Programmes, including Electrical Corrosion Engineer, Intetech, Waverton, UK.
Corrosion Watch, Corrosion Watch, Calgary, Canada; Predict, InterCorr, Houston, TX.
76. King R.A., Production Flowline Analysis as an Aid to Corrosion Management of Networks:
Advances in Pipeline Technology. Dubai: IBC Gulf,1998
77. ASME V, Nondestructive Examination, American Society of Mechanical Engineers, New York.
78. ASTM E 94 Standard Guide for Radiographic Testing, American Society for Testing and
Materials, West Conshohocken, PA.
79. ASTM E 114, Standard Practice for Ultrasonic Pulse-Echo Straight-Beam Examination by the
Contact Method, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA
80. ASTM E 428, Standard Practice for Fabrication and Control of Steel Reference Blocks Used in
Ultrasonic Examination, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA
81. www.apsdynamics.com
82. <http://quakecatcher.net/>
83. <http://www.ni.com/white-paper/9209/en/>
84. Εγχειρίδιο Χρήσης Penetrometro ST 308
85. Εγχειρίδιο Χρήσης LabView
86. <http://www.ni.com/en-us/LabVIEW>
87. Εγχειρίδιο Χρήσης Vic2D
88. Εγχειρίδιο Χρήσης Slide
89. Εγχειρίδιο Χρήσης Phase
90. www.tenaris.com/en/products/offshorelinepipe/risers.aspx
91. www.spe.org/en/ogf/ogf-article-detail/?art=222
92. septyanifajar.wordpress.com/tag/pipeline/page/2/
93. www.youtube.com/watch?v=lxnfgzqYJiY
94. www.core-irm.com/2013/991/subsea-cp-mpi/
95. divemarinendt.com/advanced-ndt/computed-radiography-inspection/
96. scvnews.com
97. <http://users.softlab.ntua.gr/~ipanag/photo/section-b/index.html#b8>

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 Αστοχία Πρανούς στο Hayden Hill, California.....	- 17 -
Εικόνα 2 Καθίζηση λόγω Βροχόπτωσης στο δήμο Μεγαλόπολης (πηγή: iefimerida.gr).....	- 22 -
Εικόνα 3 Κατολίσθηση λόγω Σεισμού στην παραλία Μύρτος, Κεφαλονιά	- 22 -
Εικόνα 4 Φυσικά Πρανή.....	- 25 -
Εικόνα 5 Είδη μηχανισμών αστοχίας.....	- 26 -
Εικόνα 6 Τύποι κατολισθήσεων (Varnes1978, τροποποιημένο από τους Cruden & Varnes 1996) .	- 27 -
Εικόνα 7 Αγωγοί Φυσικού Αερίου	- 49 -
Εικόνα 8 Σωλήνες ανύψωσης – Risers. Πηγή: www.tenaris.com/en/products/offshorelinepipe/risers.aspx	- 54 -
Εικόνα 9 τεχνικές πόντισης αγωγών a.S-Lay b.J-Lay Πηγή: septyanifajar.wordpress.com/tag/pipeline/page/2/.....	- 60 -
Εικόνα 10 Σχηματισμός μίας τυπικής υποθαλάσσιας διάταξης Πηγή: www.spe.org/en/ogf/ogf-article-detail/?art=222	- 61 -
Εικόνα 11 Σύστημα Υπερήχων τοποθετημένο σε αγωγό προς επιθεώρηση Πηγή: www.youtube.com/watch?v=lxnfaqzYJiY.....	- 68 -
Εικόνα 12 Παράδειγμα ακτινογραφίας κατά τη λειτουργία των ανοιγμάτων με μετρήσεις του απομένουτος πάχους τοιχώματος.	- 68 -
Εικόνα 13 Παράδειγμα ακτινογραφίας με εναπόθεση υλικού και απώλεια μετάλλου	- 69 -
Εικόνα 14 Σχηματική Παρουσίαση του ελέγχου Μαγνητικού Πεδίου Πηγή: www.core-irm.com/2013/991/subsea-cp-mpi/	- 70 -
Εικόνα 15 Σεισμική Τράπεζα APS 400 ELECTRO-SEIS®	- 73 -
Εικόνα 16 Ενισχυτής EP-124, Figure 16 EP-124 Amplifier	- 74 -
Εικόνα 17 Τα χαρακτηριστικά των πρόσφατων σεισμών που καταγράφηκαν από το πρόγραμμα ανά τον κόσμο	- 76 -
Εικόνα 18 Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι θέσεις των χρηστών του Quake-Catcher Network (QCN) Figure 18 Map depicting the user’s locations of the Quake-Catcher Network (QCN).....	- 77 -
Εικόνα 19 Αισθητήρας MEMS, Figure 19 MEMS Sensor	- 78 -
Εικόνα 20 Διάγραμμα Θορύβου του Αισθητήρα, Figure 20 Sensor Noise Chart	- 80 -
Εικόνα 21 Διάγραμμα του θορύβου του αισθητήρα O-NAVI B,	- 81 -
Εικόνα 22 Επιφάνεια Εργασίας του λογισμικού LabView, Figure 22 Desktop LabView software... -	82 -
Εικόνα 23 Κάρτα NI USB-6211, Figure 23 NI USB-6211 card	- 83 -
Εικόνα 24 Αισθητήρας Οπτικών Ινών, Figure 24 Fiber Optical Sensor	- 85 -
Εικόνα 25 Τοποθέτηση οπτικών ινών σε αγωγό, Πηγή: scvnews.com,	- 88 -
Εικόνα 26 Ελεύθερος αισθητήρας Εικόνα 27 Αισθητήρας με Επικάλυψη Εικόνα 28 Αισθητήρας σε Οπλισμό Figure 26 Unrestrained Sensor Figure 27 Sensor with sheathing Figure 28 Sensor in Geotextile	- 90 -
Εικόνα 29 Fusion Splicer TCW-505, Figure 29 Fusion Splicer TCW-505	- 91 -
Εικόνα 30 Καταγραφέας Σήματος Αισθητήρων Οπτικών Ινών SMART FIBRES	- 92 -
Εικόνα 31 Πενετρόμετρο ST 308, Figure 31 ST 308 penetrometer	- 93 -
Εικόνα 32 Σχήμα 1, Ολίσθηση Εδάφους, Figure 32 Sliding Ground	- 94 -
Εικόνα 33 Σχήμα 2, Καμπύλες Nc, Nγ, Nq,	- 94 -
Εικόνα 34 Εδαφικό Υλικό, Figure34 White Sand	- 95 -

Εικόνα 35 Κάμερα Καταγραφής Ψηφιακών Φωτογραφιών Figure 35 Action Camera	- 96 -
Εικόνα 36 Εικόνες με διάφορα μοτίβα και διαφορετική ψηφιακή ανάλυση	- 101 -
Εικόνα 37 Εικόνα αναφοράς και περιοχή ενδιαφέροντος	- 102 -
Εικόνα 38 Επιλογή σημείου αναφοράς Seed point.....	- 102 -
Εικόνα 39 Προεπιλογή σημείων,	- 103 -
Εικόνα 40 Εικόνα Βαθμονόμησης,.....	- 104 -
Εικόνα 41 Δημιουργία Διαγραμμάτων Μετατοπίσεων και Παραμορφώσεων	- 104 -
Εικόνα 42 Σχήμα δυνάμεων που δρουν σε μια τυπική λωρίδα Figure 42 Figure of forces acting on a standard lane.....	- 106 -
Εικόνα 43 Απλουστευμένη και Γενική μέθοδος λωρίδων Janbu: Απεικόνιση λωρίδων ως διαγράμματα ελευθέρου σώματος,	- 107 -
Εικόνα 44 Απλουστευμένη και Γενική μέθοδος λωρίδων Bishop: Απεικόνιση λωρίδων ως διαγράμματα ελευθέρου σώματος	- 108 -
Εικόνα 45 Κάναβος των κέντρων κύκλων των επιφανειών αστοχίας	- 109 -
Εικόνα 46 Πειραματική Διάταξη, Figure 46 Experimental layout	- 113 -
Εικόνα 47 Διάγραμμα Τροπών προς Χρόνο, Εικόνα 48 Διάγραμμα Τροπών προς Χρόνο, ..	- 116 -
Εικόνα 49 Διάγραμμα Μεταβολής Τροπών, Εικόνα 50 Διάγραμμα Μεταβολής Τροπών, ...	- 117 -
Εικόνα 51 Τομή Μοντέλου Πρανούς, Πείραμα Δοκιμής,	- 121 -
Εικόνα 52 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 1, Figure 52 Side view of Experimental Model 1	- 122 -
Εικόνα 53 Κάτοψη Πειραματικού Μοντέλου 1, Figure 53 Top view of Experimental Model 1.....	- 123 -
Εικόνα 54 Διάγραμμα Τροπών προς το Χρόνο, Figure 54 Strain-to-Time Chart	- 123 -
Εικόνα 55 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,885$	- 124 -
Εικόνα 56 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,806$	- 125 -
Εικόνα 57 Μέγιστες Διατμητικές τροπές κατά Phase - Συντελεστής Μείωσης της Αντοχής Critical SRF $= 0,83$, Figure 57 Phase Maximum Shear Strain - Critical Strength Reduction Factor $SRF = 0.83$..	- 125 -
Εικόνα 58 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,83,.....	- 126 -
Εικόνα 59 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 2,	- 127 -
Εικόνα 60 Κάτοψη Πειραματικού Μοντέλου 2,	- 127 -
Εικόνα 61 Διάγραμμα Τροπών Προς Χρόνο,.....	- 128 -
Εικόνα 62 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=1,218$	- 129 -
Εικόνα 63 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=1,097$	- 129 -
Εικόνα 64 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,73	- 130 -
Εικόνα 65 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF =0,73	- 130 -
Εικόνα 66 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=1,029$	- 131 -
Εικόνα 67 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,91$	- 131 -
Εικόνα 68 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,56.....	- 132 -
Εικόνα 69 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,56	- 132 -
Εικόνα 70 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 3,	- 134 -
Εικόνα 71 Κάτοψη Πειραματικού Μοντέλου 3,	- 135 -
Εικόνα 72 Θέση επιταχυνσιογράφου στην Αριστερή Παρειά του κουτιού Plexiglass.....	- 135 -
Εικόνα 73 Επιτάχυνση στον άξονα της φόρτισης	- 136 -
Εικόνα 74 Επιτάχυνση στον Κατακόρυφο άξονα Εικόνα 75 Επιτάχυνση στον άξονα Y	- 136 -
Εικόνα 76 Διάγραμμα Τροπών Προς Χρόνο,.....	- 137 -
Εικόνα 77 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=1,06$	- 138 -
Εικόνα 78 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,894$	- 138 -

Εικόνα 79 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = -	- 139 -
Εικόνα 80 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = -	- 139 -
Εικόνα 81 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 4,	- 142 -
Εικόνα 82 Διάγραμμα Μεταβολής Τροπών και Διάγραμμα Ρυθμού Μεταβολής Τροπών	- 143 -
Εικόνα 83 Αρχική κατάσταση πρανούς προ Φόρτισης Εικόνα 84 Μηχανισμός Υποσκαφής στον Πόδα του πρανούς Figure 83 Initial Slope Condition before Load Figure 84 Undercut mechanism at the foot of the slope	- 143 -
Εικόνα 85 Δημιουργία Εφελκυστικής Ρωγμής Εικόνα 86 Έναρξη Διάτμησης	- 144 -
Εικόνα 87 Αστοχία Πρανούς, Figure 87 Slope Failure	- 144 -
Εικόνα 88 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eγγ σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο/ σε διορθωμένο στιγμιότυπο.....	- 145 -
Εικόνα 89 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eγγ σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο/ σε διορθωμένο στιγμιότυπο.....	- 145 -
Εικόνα 90 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eγγ σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο/ σε διορθωμένο στιγμιότυπο.....	- 146 -
Εικόνα 91 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eγγ σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο.....	- 146 -
Εικόνα 92 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eγγ σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο/ σε διορθωμένο στιγμιότυπο.....	- 147 -
Εικόνα 93 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eγγ σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο/ σε διορθωμένο στιγμιότυπο.....	- 147 -
Εικόνα 94 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eγγ σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο/ σε διορθωμένο στιγμιότυπο.....	- 148 -
Εικόνα 95 Μη διορθωμένο στιγμιότυπο της φόρτισης / Διορθωμένο Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο / σε διορθωμένο στιγμιότυπο / Ανηγμένες Παραμορφώσεις eγγ σε μη διορθωμένο στιγμιότυπο/ σε διορθωμένο στιγμιότυπο.....	- 148 -
Εικόνα 96 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 5,	- 150 -
Εικόνα 97 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,684	- 152 -
Εικόνα 98 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,598.....	- 152 -
Εικόνα 99 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,33	- 153 -

Εικόνα 100 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,33	- 153 -
Εικόνα 101 Αρχική κατάσταση πρανούς προ Φόρτισης	Εικόνα 102 Μηχανισμός Αστοχίας Πρανούς
Figure 101 Initial Slope Condition before Loading	Figure 102 Slope Failure Mechanism .
Εικόνα 103 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων.....	- 154 -
Εικόνα 104 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων	Figure 104 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....
Εικόνα 105 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων	Figure 105 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....
Εικόνα 106 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων	Figure 106 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....
Εικόνα 107 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων	Figure 107 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range
Εικόνα 108 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων	Figure 108 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....
Εικόνα 109 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων	Figure 109 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range
Εικόνα 110 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων	Figure 110 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....
Εικόνα 111 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων	Figure 111 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....
Εικόνα 112 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων	Figure 112 Snapshot of the Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....
Εικόνα 113 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 6,	- 159 -
Εικόνα 114 Αστοχία Πρανούς	Εικόνα 115 Διάγραμμα Τροπών/Χρόνου
	- 160 -

Εικόνα 116 Αρχική κατάσταση πρανούς προ Φόρτισης στον Πόδα του πρανούς Undercut mechanism at the foot of the slope	Εικόνα 117 Μηχανισμός Υποσκαφής Figure 117	
Εικόνα 118 Δημιουργία Εφελκυστικής Ρωγμής	Εικόνα 119 Έναρξη Διάτμησης	- 160 -
Εικόνα 120 Αστοχία Πρανούς,		- 161 -
Εικόνα 121 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,753		- 161 -
Εικόνα 122 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,665		- 162 -
Εικόνα 123 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,43		- 162 -
Εικόνα 124 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,43		- 163 -
Εικόνα 125 Το πρανές πριν τη φόρτιση. Και η πρώτη εικόνα αναφοράς.		- 164 -
Εικόνα 126 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 126	
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively		- 164 -
Εικόνα 127 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 127	
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively		- 165 -
Εικόνα 128 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 128	
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively		- 165 -
Εικόνα 129 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 129	
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively		- 165 -
Εικόνα 130 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 130	
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively		- 166 -
Εικόνα 131 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 131	
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively		- 166 -
Εικόνα 132 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 132	
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively		- 167 -
Εικόνα 133 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 133	
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively		- 167 -
Εικόνα 134 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 134	

Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively	- 167 -
Εικόνα 135 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 135
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively	- 168 -
Εικόνα 136 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 136
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively	- 168 -
Εικόνα 137 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 137
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively	- 169 -
Εικόνα 138 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 138
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively	- 169 -
Εικόνα 139 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 139
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively	- 169 -
Εικόνα 140 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 140
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively	- 170 -
Εικόνα 141 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 141
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively	- 170 -
Εικόνα 142 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 142
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively	- 171 -
Εικόνα 143 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Α' και Β' ανάλυση αντίστοιχα	Figure 143
Snapshot of the Slope During Loading / Shear strain exy in Vic 2D program within the A 'and B' analysis method respectively	- 171 -
Εικόνα 144 Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα	Figure 144 Shear Strain exy in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....
	- 172 -
Εικόνα 145 Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα	Figure 145 Shear Strain exy in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....
	- 172 -

Εικόνα 146 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 146 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....	- 172 -
Εικόνα 147 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 147 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....	- 173 -
Εικόνα 148 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 148 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....	- 173 -
Εικόνα 149 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 149 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....	- 173 -
Εικόνα 150 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 150 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....	- 174 -
Εικόνα 151 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 151 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....	- 174 -
Εικόνα 152 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 152 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....	- 174 -
Εικόνα 153 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 153 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....	- 175 -
Εικόνα 154 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 154 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....	- 175 -
Εικόνα 155 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 155 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....	- 175 -
Εικόνα 156 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 156 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....	- 176 -
Εικόνα 157 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 157 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....	- 176 -
Εικόνα 158 Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D κατά την Β' , Γ1 και Γ2 ανάλυση αντίστοιχα Figure 158 Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program during the B' , C1 and C2 analysis respectively.....	- 176 -
Εικόνα 159 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 7,	- 179 -
Εικόνα 160 Διαγράμματα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών.....	- 180 -
Εικόνα 161 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,998	- 180 -
Εικόνα 162 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,930.....	- 181 -
Εικόνα 163 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,8	- 181 -
Εικόνα 164 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,8.....	- 181 -

Εικόνα 165 Διάγραμμα Τροπών/Χρόνου,	- 182 -
Εικόνα 166 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,915$	- 183 -
Εικόνα 167 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,843$	- 183 -
Εικόνα 168 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical $SRF = 0,74$	- 184 -
Εικόνα 169 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical $SRF = 0,74$	- 184 -
Εικόνα 170 Διαγράμματα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών	- 185 -
Εικόνα 171 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,803$	- 185 -
Εικόνα 172 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,722$	- 186 -
Εικόνα 173 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical $SRF = 0,57$	- 186 -
Εικόνα 174 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical $SRF = 0,57$	- 186 -
Εικόνα 175 Διάγραμμα Τροπών/Χρόνου,	- 187 -
Εικόνα 176 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,513$	- 188 -
Εικόνα 177 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,435$	- 188 -
Εικόνα 178 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical $SRF = 0,38$	- 189 -
Εικόνα 179 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical $SRF = 0,38$	- 189 -
Εικόνα 180 Διαγράμματα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών	- 190 -
Εικόνα 181 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,188$	- 190 -
Εικόνα 182 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,141$	- 191 -
Εικόνα 183 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical $SRF = -$	- 191 -
Εικόνα 184 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical $SRF = -$	- 191 -
Εικόνα 185 Το σύνολο των Διαγραμμάτων Μήκος Κύματος προς χρόνο για το Πείραμα 7.....	- 192 -
Εικόνα 186 Αρχική κατάσταση πρανούς προ φόρτισης Figure 186 Initial Pre-Load State of Slope	Εικόνα 187 Μηχανισμός Αστοχίας Πρανούς Figure 187 Slope Failure Mechanism. - 193 -
Εικόνα 188 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων Figure 188 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....	- 193 -
Εικόνα 189 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων Figure 189 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....	- 194 -
Εικόνα 190 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων Figure 190 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....	- 194 -
Εικόνα 191 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων Figure 191 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....	- 194 -
Εικόνα 192 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων Figure 192 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....	- 195 -
Εικόνα 193 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών	

παραμορφώσεων	Figure 193 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....	- 195 -
Εικόνα 194 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων	Figure 194 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....	- 195 -
Εικόνα 195 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων	Figure 195 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range.....	- 196 -
Εικόνα 196 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων / με κοινό εύρος τιμών παραμορφώσεων	Figure 196 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} in the Vic 2D program without processing the range of strain values / with a common strain range	- 196 -
Εικόνα 197 Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των ϵ_{xy}	Figure 197 Reduced Strain ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Strain Arrows of maximum Direction on ϵ_{xy} plot.....	- 198 -
Εικόνα 198 Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των ϵ_{xy}	- 199 -
Εικόνα 199 Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των ϵ_{xy}	Figure 199 Reduced Strain ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Strain Arrows of maximum Direction on ϵ_{xy} plot.....	- 200 -
Εικόνα 200 Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{xx} / κατά γ ϵ_{yy} / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των ϵ_{xy}	Figure 200 Reduced Strain ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Strain Arrows of maximum Direction on ϵ_{xy} plot....	- 201 -
Εικόνα 201 Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των ϵ_{xy}	Figure 201 Reduced Strain ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Strain Arrows of maximum Direction on ϵ_{xy} plot.....	- 202 -
Εικόνα 202 Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των ϵ_{xy}	Figure 202 Reduced Strain ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Strain Arrows of maximum Direction on ϵ_{xy} plot.....	- 203 -
Εικόνα 203 Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των ϵ_{xy}	Figure 203 Reduced Strain ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Strain Arrows of maximum Direction on ϵ_{xy} plot.....	- 204 -
Εικόνα 204 Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των ϵ_{xy}	Figure 204 Reduced Strain ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Strain Arrows of maximum Direction on ϵ_{xy} plot.....	- 205 -
Εικόνα 205 Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των ϵ_{xy}	Figure 205 Reduced Strain ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Strain Arrows of maximum Direction on ϵ_{xy} plot.....	- 206 -
Εικόνα 206 Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των ϵ_{xy}	Figure 206 Reduced Strain ϵ_{xx} / ϵ_{yy} / Strain Arrows of maximum Direction on ϵ_{xy} plot.....	- 207 -
Εικόνα 207 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 8, Figure 207 Side View of Experimental Model 8.....		- 208 -
Εικόνα 208 Διάγραμμα Τροπών/Χρόνου, Figure 208 Strain / Time Chart		- 209 -
Εικόνα 209 Διαγράμματα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών.....		- 209 -
Εικόνα 210 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,846$		- 210 -
Εικόνα 211 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,763$		- 210 -
Εικόνα 212 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,46		- 211 -
Εικόνα 213 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,46.....		- 211 -
Εικόνα 214 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,768$		- 212 -
Εικόνα 215 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,682$		- 212 -
Εικόνα 216 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,4		- 213 -

Εικόνα 217 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,4	- 213 -
Εικόνα 218 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,689	- 214 -
Εικόνα 219 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,611	- 214 -
Εικόνα 220 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,32	- 215 -
Εικόνα 221 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,21	- 215 -
Εικόνα 222 Κυλινδρικό Καλούπι & Φύλλο Αλουμινίου, Figure 222 Cylindrical Mold & Aluminum Sheet	- 216 -
Εικόνα 223 Διάγραμμα Επιτάχυνσης και Διάγραμμα Μεταβολής Τροπών	- 217 -
Εικόνα 224 Αστοχία Πειραματικού Μοντέλου	- 218 -
Εικόνα 225 Διάγραμμα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών	- 218 -
Εικόνα 226 Φύλλο Χαλκού και Κυλινδρικό Καλούπι, Figure 226 Copper Sheet and Cylindrical Mold	- 219 -
Εικόνα 227 Εποξειδική Κόλλα δύο Συστατικών Εικόνα 228 Αισθητήρας οπτικών ινών επάνω στον αγωγό χαλκού Figure 227 Two Component Epoxy Glue Figure 228 Optical fiber sensor onto the copper conductor	- 220 -
Εικόνα 229 Τελική Κατάσταση αγωγού μετά την επιβολή φόρτισης	- 220 -
Εικόνα 230 Κατασκευή του πειραματικού μοντέλου,	- 221 -
Εικόνα 231 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 11, Figure 231 Side View of Experimental Model 11..	- 221 -
Εικόνα 232 Διάγραμμα Επιτάχυνσης, Figure 232 Acceleration Chart	- 222 -
Εικόνα 233 Διάγραμμα Μεταβολής Τροπών 1 ^{ου} αισθητήρα,	- 222 -
Εικόνα 234 Διάγραμμα Μεταβολής τροπών 2 ^{ου} αισθητήρα	- 223 -
Εικόνα 235 Αρχική κατάσταση πρανούς προ Φόρτισης Εικόνα 236 Μηχανισμός Υποσκαφής στον Πόδα του πρανούς Figure 235 Initial Slope Condition before Loading Figure 236 Undercut mechanism at the foot of the slope	- 223 -
Εικόνα 237 Έναρξη Διάτμησης στην προϋπάρχουσα εφελκυστική ρωγμή Εικόνα 238 Αστοχία Πρανούς Figure 237 Initiation of shear in the pre-existing crack Figure 238 Slope Failure-	- 224 -
Εικόνα 239 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,506	- 224 -
Εικόνα 240 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,461	- 225 -
Εικόνα 241 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,483	- 225 -
Εικόνα 242 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,426	- 226 -
Εικόνα 243 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,451	- 226 -
Εικόνα 244 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,392	- 227 -
Εικόνα 245 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,408	- 227 -
Εικόνα 246 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,341	- 228 -
Εικόνα 247 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,291	- 228 -
Εικόνα 248 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας FS=0,219	- 229 -
Εικόνα 249 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις ϵ_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις ϵ_{yy} Figure 249 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} in Vic 2D / Reduced Strain ϵ_{xx} / Reduced Strain ϵ_{yy}	- 230 -
Εικόνα 250 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις ϵ_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις ϵ_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις ϵ_{yy} Figure 250 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain ϵ_{xy} in Vic 2D / Reduced Strain ϵ_{xx} / Reduced Strain ϵ_{yy}	- 231 -

Εικόνα 251 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy}	Figure 251	- 232 -
Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} in Vic 2D / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}		
Εικόνα 252 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy}	Figure 252	- 232 -
Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} in Vic 2D / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}		
Εικόνα 253 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy}	Figure 253	- 233 -
Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} in Vic 2D / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}		
Εικόνα 254 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy}	Figure 254	- 233 -
Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} in Vic 2D / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}		
Εικόνα 255 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy}	Figure 255	- 234 -
Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} in Vic 2D / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}		
Εικόνα 256 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} κατά το πρόγραμμα Vic 2D / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy}	Figure 256	- 234 -
Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} in Vic 2D / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}		
Εικόνα 257 Ολοκλήρωση κατασκευής του Πειραματικού μοντέλου.....		- 237 -
Εικόνα 258 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 12, Figure 258 Side View of Experimental Model 12..		- 238 -
Εικόνα 259 Αισθητήρας Οπτικών Ινών στον Αγωγό Χαλκού,		- 238 -
Εικόνα 260 Τελική Κατάσταση Αγωγού Μετά την Επιβολή της Φόρτισης		- 239 -
Εικόνα 261 Διάγραμμα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών		- 239 -
Εικόνα 262 Αρχική κατάσταση πρανούς προ Φόρτισης	Εικόνα 263 Μηχανισμός Υποσκαφής στον Πόδα του πρανούς	Figure 262 Initial Slope Condition before Loading
Figure 262 Initial Slope Condition before Loading	Figure 263 Undercut Mechanism at the Foot of the Slope.....	Figure 263 Undercut Mechanism at the Foot of the Slope.....
		- 240 -
Εικόνα 264 Δημιουργία Εφελκυστικής Ρωγμής	Εικόνα 265 Έναρξη Διάτμησης	
Figure 264 Initiating tensile cracks	Figure 265 Initiating a Shear	- 240 -
Εικόνα 266 Αστοχία Πρανούς, Figure 266 Slope Failure		- 240 -
Εικόνα 267 Προφίλ Αγωγού Πριν τη Φόρτιση	Εικόνα 268 Προφίλ Αγωγού Μετά τη Φόρτιση	
Figure 267 Pipeline Profile Pre-Loading	Figure 268 Pipeline Profile Post-Loading.....	Figure 268 Pipeline Profile Post-Loading.....
		- 241 -
Εικόνα 269 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,517$		- 241 -
Εικόνα 270 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,471$		- 242 -
Εικόνα 271 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,485$		- 242 -
Εικόνα 272 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,425$		- 243 -
Εικόνα 273 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,461$		- 243 -
Εικόνα 274 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,398$		- 244 -
Εικόνα 275 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,410$		- 244 -

Εικόνα 276 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,343$	- 245 -
Εικόνα 277 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy με τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy / Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / Ανηγμένη Παραμόρφωση eyy Figure 277 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy with Drift Arrows of Maximum Direction on exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy	- 246 -
Εικόνα 278 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy με τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy / Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / Ανηγμένη Παραμόρφωση eyy Figure 278 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy with Drift Arrows of Maximum Direction on exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy	- 247 -
Εικόνα 279 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy με τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy / Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / Ανηγμένη Παραμόρφωση eyy Figure 279 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy with Drift Arrows of Maximum Direction on exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy	- 247 -
Εικόνα 280 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy με τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy / Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / Ανηγμένη Παραμόρφωση eyy Figure 280 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy with Drift Arrows of Maximum Direction on exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy	- 248 -
Εικόνα 281 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy με τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy / Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / Ανηγμένη Παραμόρφωση eyy Figure 281 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy with Drift Arrows of Maximum Direction on exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy	- 248 -
Εικόνα 282 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις exy με τα βέλη των Τάσεων Μέγιστης Διεύθυνσης επί των exy / Ανηγμένη Παραμόρφωση exx / Ανηγμένη Παραμόρφωση eyy Figure 282 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain exy with Drift Arrows of Maximum Direction on exy / Reduced Strain exx / Reduced Strain eyy	- 249 -
Εικόνα 283 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 13, Figure 283 Side View of Experimental Model 13..	- 252 -
Εικόνα 284 Διάγραμμα Επιτάχυνσης, Figure 284 Acceleration Chart	- 253 -
Εικόνα 285 Διάγραμμα Μεταβολής Τροπών 1 ^{ης} και 2 ^{ης} Στρώσης οπλισμού	- 253 -
Εικόνα 286 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,860$	- 254 -
Εικόνα 287 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,710$	- 254 -
Εικόνα 288 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = 0,56	- 255 -
Εικόνα 289 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = 0,56.....	- 255 -
Εικόνα 290 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,734$	- 255 -
Εικόνα 291 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,569$	- 256 -
Εικόνα 292 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = -	- 256 -
Εικόνα 293 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = -	- 256 -
Εικόνα 294 Κατασκευή του Πειραματικού Μοντέλου με τη Βοήθεια Καλουπιού	- 257 -
Εικόνα 295 Τομή Πειραματικού Μοντέλου 14, Figure 295 Side View of Experimental Model 14..	- 258 -
Εικόνα 296 Διάγραμμα Επιτάχυνσης, Figure 296 Acceleration Chart	- 258 -
Εικόνα 297 Διάγραμμα Μεταβολής Τροπών 1 ^{ης} και 2 ^{ης} Στρώσης Οπλισμού.....	- 259 -
Εικόνα 298 Διάγραμμα Ρυθμού Μεταβολής Τροπών 1 ^{ης} και 2 ^{ης} Στρώσης Οπλισμού	- 259 -
Εικόνα 299 Τύποι Αστοχιών που συναντώνται στο πεδίο (πηγή: Ιωάννα Κότση).....	- 260 -
Εικόνα 300 Χρονικό Μηχανισμού αστοχίας,	- 260 -
Εικόνα 301 Αστοχία Πειραματικού Μοντέλου λόγω Υποσκαφής του κατώτερου στρώματος και Δημιουργία Προβόλου στο ανώτερο.....	- 261 -

Εικόνα 302 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,805$	- 261 -
Εικόνα 303 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,659$	- 262 -
Εικόνα 304 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = $0,48$	- 262 -
Εικόνα 305 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = $0,48$	- 262 -
Εικόνα 306 Ανάλυση με τη μέθοδο Bishop - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,698$	- 263 -
Εικόνα 307 Ανάλυση με τη μέθοδο Janbu - Συντελεστής Ασφαλείας $FS=0,547$	- 263 -
Εικόνα 308 Μέγιστες Διατμητικές Τροπές κατά Phase - Critical SRF = -	- 264 -
Εικόνα 309 Συνολική μετατόπιση κατά Phase - Critical SRF = -	- 264 -
Εικόνα 310 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} Figure 310 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}	- 265 -
Εικόνα 311 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} Figure 311 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}	- 266 -
Εικόνα 312 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} Figure 312 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}	- 266 -
Εικόνα 313 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} Figure 313 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}	- 267 -
Εικόνα 314 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} Figure 314 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}	- 267 -
Εικόνα 315 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} Figure 315 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}	- 268 -
Εικόνα 316 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} Figure 316 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}	- 268 -
Εικόνα 317 Στιγμιότυπο της φόρτισης./ Διατμητικές Παραμορφώσεις e_{xy} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{xx} / Ανηγμένες Παραμορφώσεις e_{yy} Figure 317 Snapshot of Slope during Loading / Shear Strain e_{xy} / Reduced Strain e_{xx} / Reduced Strain e_{yy}	- 269 -
Εικόνα 318 Διαγράμματα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών Πείραμα 7° , Δοκιμή 5^{η}	- 274 -
Εικόνα 319 Διαγράμματα Επιτάχυνσης και Μεταβολής Τροπών Πείραμα 7°	- 275 -
Εικόνα 320 Διάγραμμα Επιτάχυνσης, Figure 320 Acceleration Chart.....	- 275 -
Εικόνα 321 Διαγράμματα Μεταβολής Τροπών Πείραμα 13°	- 275 -
Εικόνα 322 Διάγραμμα Επιτάχυνσης Πείραμα 14° ,	- 276 -

Εικόνα 323 Διαγράμματα Μεταβολής Τροπών Πείραμα 14^ο - 276 -
Εικόνα 324 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D
χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων - 278 -
Εικόνα 325 Στιγμιότυπο της φόρτισης / Διατμητικές Παραμορφώσεις exy κατά το πρόγραμμα Vic 2D
χωρίς επεξεργασία του εύρους των τιμών των παραμορφώσεων - 278 -