

“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΠΜΣ «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη»**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”**

Εκπόνηση εργασίας: **Φραγκούλη Γιοβάννα**  
Επιβλέπων: **Σακελλαρίου Μιχαήλ, Καθηγητής ΕΜΠ**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Σακελλαρίου Μιχαήλ, Καθηγητής ΕΜΠ  
Μαυράκος Σπυρίδων, Καθηγητής ΕΜΠ  
Χατζηγεωργίου Ιωάννης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2012**

## **Ευχαριστίες**

*Η εργασία αυτή μου έδωσε την ευκαιρία να πειραματιστώ πάνω σε πολύ ενδιαφέροντα φυσικά προβλήματα που σχετίζονται με τα πρανά και τους τοίχους αντιστήριξης. Η ενασχόληση μου με το εργαστήριο απετέλεσε μια πολύ σημαντική εμπειρία για εμένα, καθώς με βοήθησε να παρατηρήσω την εξέλιξη του κάθε φαινομένου από κοντά και να το κατανοήσω καλύτερα .*

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κύριο Μιχάλη Σακελλαρίου, που με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε την ευκαιρία να εκπονήσω μια πολύ ενδιαφέρουσα εργαστηριακή μεταπτυχιακή εργασία. Οι συμβουλές που μου έδωσε κατά την εκπόνηση της εργασίας μου ήταν εξαιρετικά πολύτιμες.*

*Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα, κύριο Βασίλη Ματζιάρη, που με κατατόπισε σχετικά με το εργαστήριο.*

*Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, που με στηρίζει σε ότι και να κάνω.*

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, της συμπεριφοράς ξηρών και ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους, σε δυναμική (σεισμική) φόρτιση. Οι εργαστηριακές δοκιμές διεξήχθησαν στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι υπολογισμού των ανηγμένων παραμορφώσεων. Και οι δύο μέθοδοι είναι ψηφιακές, αφού χρησιμοποιούν ψηφιακές εικόνες και βίντεο για τον υπολογισμό των ανηγμένων παραμορφώσεων του εδάφους. Η πρώτη ονομάζεται, Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων (DIC). Για τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Vic-2D, το οποίο διαθέτει το εργαστήριο. Η δεύτερη, ονομάζεται PIV (Particle Image Velocimetry) και το αντίστοιχο λογισμικό ονομάζεται geoPIV, το οποίο λειτουργεί μέσω του MATLAB. Οι δύο μέθοδοι περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές είναι η εξής: Αρχικά, έγινε κοκκομετρική ανάλυση του εδάφους για να προσδιοριστεί ο τύπος του εδάφους και κατ' επέκταση οι ιδιότητες του. Εν συνέχεια, τοποθετούνταν το έδαφος σε κουτί από Plexiglass, διαμορφώναμε το πρανές ούτως ώστε να έχει την κατάλληλη γωνία βάσει της γωνίας τριβής του υλικού και του συντελεστή ασφαλείας, που είχε επιλεγεί για την περίπτωση των πρανών και στη συνέχεια, τοποθετούσαμε το δοκίμιο πάνω σε σεισμική τράπεζα 1-D και επιβάλλαμε σεισμική φόρτιση, μέσω του λογισμικού LabView, το οποίο είναι εγκατεστημένο στον σταθερό υπολογιστή του εργαστηρίου. Πριν και μετά την φόρτιση καταγράφονταν εικόνες από την αρχική και τελική κατάσταση του μοντέλου. Κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης καταγράφονταν βίντεο. Μέσω του επιταχυνσιογράφου καταγράφονταν οι επιταχύνσεις που αναπτύσσονταν κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης.

Συνολικά, διεξήχθησαν τέσσερα πειράματα: Στο πρώτο πείραμα μελετήθηκε η ολίσθηση των κόκκων ξηρού πρανούς λόγω σεισμικής φόρτισης και στο δεύτερο μελετήθηκε το φαινόμενο της υποσκαφής του εδάφους σε ημιβυθισμένο πρανές. Στην επόμενη δοκιμή μελετήθηκε η συμπεριφορά διαφράγματος, που λειτουργεί ως τοίχος αντιστήριξης για την σταθεροποίηση μάζας εδάφους, σε ξηρό έδαφος και στην τελευταία δοκιμή μελετήθηκε το διάφραγμα παρουσία νερού.

Τέλος, διερευνήθηκε η ακρίβεια με την οποία η καθεμιά μέθοδος υπολογίζει τις μετατοπίσεις των κόκκων του εδάφους.

## **Abstract : Experimental research of the dynamic response of semi - submerged slopes of granular soil, under seismic loads, using physical models**

The present postgraduate study refers to the experimental research of the dynamic response of semi- submerged slopes of granular soil , using physical models. The experiments carried out at the Geotechnical Engineering Laboratory of the Department of Rural and Surveying Engineering of the National Technical University of Athens.

The experiments' results analyzed with two deformation measurement systems. Both of them are digital, as they use digital images and videos to measure the soil's displacements. The first one, is the DIC (Digital Image Correlation) method. This method is based on the contrast differentiation of the images analyzed, to calculate the displacements of the grains. For this method we used the software Vic-2D. The second method called PIV (Particle Image Velocimetry) uses close range photogrammetry to calculate the displacements of the soil. For the PIV analysis, we used the software geoPIV , which was conceived as a MATLAB module.

The process we followed during the lab tests, begins with the grain size analysis of the soil, in order to specify the soil type. The results of the analysis, proved that the soil is sand. After that, we placed the soil into a box, made by Plexiglass . Then we configured the soil to have the appropriate angle, for the safety factor (FS), we chose. The next step, is the placement of the model on the 1-D shake table of the laboratory and the imposition of seismic signal. The seismic signal was given from the LabView software. Before and after, the seismic loading we captured images of the initial and final situation of the model. During the test, we placed a digital camera on the table to capture the video of the test.

We carried out four experiments, totally. The first one is related to the study of the problem of landslide in dry soil, due to seismic loads. At the second one, we studied the problem of soil scour of a submerged slope. The next test investigates the behavior of a retaining wall for the soil stabilization under seismic load and the last one checks the behavior of the retaining wall, in wet soil.

Finally, we tried to evaluate the measurements' precision of the methods we used.

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Abstract : Experimental research of the dynamic response of semi - submerged slopes of granular soil, under seismic loads, using physical models .....	4
Εισαγωγή .....	7
1. Περιγραφή του φυσικού προβλήματος : Μελέτη του μηχανισμού υποσκαφής πρανών .....	9
1.1. Ορισμός του πρανούς .....	9
1.2. Ευστάθεια πρανών .....	10
1.2.1. Επίδραση σεισμικών φορτίων στην ευστάθεια των πρανών .....	11
1.3. Μηχανισμός υποσκαφής ημιβυθισμένων πρανών .....	12
1.4. Γενικά στοιχεία, από τη θεωρία των τοίχων αντιστήριξης .....	12
1.4.1. Μελέτη υποσκαφής σε παράκτιους τοίχους που χρησιμοποιούνται ως μέτρα προστασίας των ακτών.....	13
2. Περιγραφή των μεθόδων ανάλυσης των πειραμάτων .....	15
2.1. Η μέθοδος Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων (Digital Image Correlation).....	15
2.1.1. Το σύστημα Vic-2D.....	16
2.1.2. Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού μετατοπίσεων και παραμορφώσεων.....	18
2.2. Περιγραφή της μεθόδου PIV (Particle Image Velocimetry) .....	20
2.2.1. Προ-επεξεργασία .....	21
2.2.2. Διεξαγωγή ανάλυσης PIV .....	23
2.2.3. Βαθμονόμηση.....	24
2.2.4. Εξαγωγή μετατοπίσεων και ανηγμένων διατμητικών παραμορφώσεων	26
3. Πειραματικό μέρος: Διεξαγωγή πειραμάτων και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.....	30
3.1. Κοκκομετρική ανάλυση δείγματος εδάφους.....	30
3.2. Περιγραφή της πειραματικής διάταξης .....	34
3.3. Πείραμα 1 <sup>ο</sup> : Έλεγχος της σεισμικής απόκρισης, ξηρού πρανούς.....	39
3.4. Πείραμα 2 <sup>ο</sup> : Έλεγχος της σεισμικής απόκρισης, ημιβυθισμένου πρανούς .	47
3.5. Πείραμα 3 <sup>ο</sup> : Έλεγχος της συμπεριφοράς διαφράγματος σε σεισμική φόρτιση, σε ξηρό έδαφος.....	66

“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”

3.6. Πείραμα 4 <sup>ο</sup> : Έλεγχος της συμπεριφοράς διαφράγματος σε σεισμική φόρτιση, παρουσία νερού .....	71
4. Έλεγχος ακρίβειας των δύο μεθόδων ανάλυσης .....	93
4.1. Έλεγχος ακρίβειας της μεθόδου PIV.....	93
4.2. Έλεγχος ακρίβειας του Vic-2D .....	95
Συμπεράσματα .....	96
Προτάσεις.....	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	98
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	99
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Αποτελέσματα δοκιμής σε ξηρό πρανές για μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0,30 \cdot g$ .....	100
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Αποτελέσματα δοκιμής με διάφραγμα σε ξηρό έδαφος .....	109

## Εισαγωγή

Σε πολλά τεχνικά έργα, συναντούμε είτε φυσικά, είτε τεχνητά πρανή αλλά και τοίχους αντιστήριξης για την σταθεροποίηση του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, σε έργα οδοποιίας, όπως για παράδειγμα στην Εγνατία Οδό, χρειάστηκε να γίνουν εκτεταμένες μελέτες για την σταθεροποίηση των πρανών, είτε χρησιμοποιώντας την τεχνική της οπλισμένης γης είτε με την κατασκευή τοίχων αντιστήριξης για τη συγκράτηση του εδάφους. Όμως, τα πρανή δεν αποτελούν πρόβλημα μόνο σε κατασκευές στην ξηρά αλλά και σε παράκτια έργα. Σε παράκτιες περιοχές συναντούμε ημιβυθισμένα πρανή. Η προστασία των παράκτιων περιοχών από τη διάβρωση και την υποσκαφή αποτελεί μείζον πρόβλημα σε χώρες όπως η Ελλάδα, που έχουν μεγάλη ακτογραμμή (η Ελλάδα διαθέτει περίπου 16000 km ακτογραμμή) και μεγάλο μέρος του πληθυσμού ζει σε παράκτιες περιοχές. Οι ακτές διαβρώνονται λόγω της πρόσπτωσης των κυμάτων και των ρευμάτων. Εκτός από τα κύματα, σημαντικό ρόλο στην αλλαγή της μορφολογίας των ακτών παίζουν και οι σεισμοί, που είναι συνηθισμένο φαινόμενο στη χώρα μας. Πολλές παράκτιες περιοχές έχουν αλλάξει και έχει εξαφανιστεί η παραλία λόγω κάποιου σεισμού.

Η εργασία αυτή πραγματεύεται τα προβλήματα, της ολίσθησης ξηρών πρανών και της διάβρωσης ημιβυθισμένων πρανών, λόγω δυναμικών φορτώσεων (σεισμοί). Επίσης, θίγεται το πρόβλημα της σεισμικής απόκρισης τοίχου αντιστήριξης τόσο σε ξηρό όσο και σε έδαφος παρουσία νερού. Όλα τα παραπάνω προβλήματα μελετήθηκαν, μέσω εργαστηριακών δοκιμών.

Στο πρώτο κεφάλαιο, αναφέρονται γενικά στοιχεία για τα πρανή και την ευστάθεια τους και αναλύεται το φαινόμενο της υποσκαφής σε παράκτιες περιοχές. Γίνεται αναφορά τους τοίχους αντιστήριξης και παρουσιάζονται παραδείγματα μέτρων προστασίας των παρακτίων περιοχών με ιδιαίτερη έμφαση στους παράκτιους τοίχους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφονται αναλυτικά οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Πρώτα περιγράφεται η μέθοδος DIC (Digital Image Correlation) και το λογισμικό Vic-2D, που χρησιμοποιήθηκε για τη μέθοδο αυτή και στη συνέχεια περιγράφεται η μέθοδος PIV (Particle Image Velocimetry). Αναφέρονται όλες οι δυνατότητες που μας παρέχουν οι δύο μέθοδοι.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφεται το πειραματικό μέρος της εργασίας. Περιγράφονται αναλυτικά όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που έγιναν με τα δύο προαναφερθέντα λογισμικά. Σκοπός μας είναι, τόσο η εξαγωγή συμπερασμάτων για το φυσικό πρόβλημα και η επαλήθευση της σχετικής θεωρίας όσο και η σύγκριση των δύο μεθόδων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται εκτίμηση της ακρίβειας με την οποία οι δύο μέθοδοι υπολογίζουν τις μετατοπίσεις του εδάφους.



## **1. Περιγραφή του φυσικού προβλήματος : Μελέτη του μηχανισμού υποσκαφής πρανών**

### **1.1. Ορισμός του πρανούς**

Πρανή καλούνται κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Σε κάθε πρανές η διαφορά στάθμης και οι κλίσεις που το χαρακτηρίζουν δημιουργούν δυνάμεις βαρύτητας οι οποίες σε συνδυασμό με την ενδεχόμενη παρουσία νερού στο έδαφος, δημιουργούν διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό τους που τείνουν να μετακινήσουν τη μάζα τους, ούτως ώστε να εξομαλύνουν το έδαφος. Στις διατμητικές αυτές τάσεις αντιτίθεται η διατμητική αντοχή του εδάφους. Σε περίπτωση υπέρβασης της διατμητικής αντοχής του εδάφους, οδηγούμαστε σε θραύση του πρανούς και σε κατολίσθηση (Σακελλαρίου 2005).

Τα πρανή χωρίζονται σε φυσικά και τεχνητά. Ένα φυσικό πρανές μπορεί να αστοχήσει εξαιτίας γεωλογικών, γεωτεκτονικών ή φυσικών παραγόντων, όπως η διάβρωση, ο παγετός, η μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα και οι σεισμοί. Αστοχία ενός φυσικού πρανούς, καλείται η κατάρρευση κυρίως εδαφικής μάζας. Επίσης, αστοχία μπορεί να προκαλέσει και η ανθρώπινη επέμβαση στη φύση με την κατασκευή τεχνικών έργων. Οι τρόποι με τους οποίους αστοχούν τα πρανή χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες:

- Πτώσεις
- Ανατροπές
- Ολισθήσεις
- Εξαπλώσεις
- Ροές

## 1.2. Ευστάθεια πρανών

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των πρανών, είτε φυσικών είτε τεχνητών, είναι η ευστάθεια τους. Δεδομένου ότι τα πρανά αποτελούν πολύ ιδιαίτερους σχηματισμούς, υπεισέρχονται πολλοί παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την ευστάθεια τους, όπως:

- Η βαρύτητα, η οποία δρα ως παράγοντας αστάθειας αφού τείνει να παρασύρει ορισμένη εδαφική μάζα.
- Η συνοχή και η εσωτερική τριβή, που τείνουν να κρατήσουν ενωμένα τα υλικά που συνθέτουν το πρανές και αντιστέκονται σε οποιαδήποτε μετακίνηση, συμβάλλοντας στην ευστάθεια τους.
- Η στρώση και η κατάτμηση του εδάφους.
- Η αποστράγγιση του πρανούς και κατ’ επέκταση το υλικό που συνθέτει το πρανές (αν έχει μεγάλη διαπερατότητα ή όχι).
- Η επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών (βροχή, παγετός).
- Οι χρονικές μεταβολές των τάσεων και των παραμορφώσεων.
- Η επιβολή δυναμικών φορτίων, όπως οι σεισμοί.

Η ανάλυση της ευστάθειας ενός πρανούς, πραγματοποιείται με μεθόδους οριακής ισορροπίας. Από τις αναλύσεις αυτές προκύπτει ο στατικός συντελεστής ασφαλείας  $F$  (ή  $F.S.$ ), ο οποίος ορίζεται ως:

$$F = \frac{\text{Δυνάμεις} - \text{Ροπές Αντιδρώσες}}{\text{Δυνάμεις} - \text{Ροπές Δρώσες}} \quad (1.1)$$

Αν  $F=1$ ,  $\Rightarrow$  Οριακή Ισορροπία –Ευστάθεια του πρανούς

Αν  $F>1$ ,  $\Rightarrow$  Ευστάθεια του πρανούς

Αν  $F<1$ ,  $\Rightarrow$  Αστάθεια του πρανούς, Πιθανή εκδήλωση κατολίσθησης

### 1.2.1. Επίδραση σεισμικών φορτίων στην ευστάθεια των πρανών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένας από τους παράγοντες που μπορεί να επιδράσει αρνητικά στην ευστάθεια των πρανών είναι η σεισμική φόρτιση. Ο σεισμός μπορεί να προκαλέσει σημαντικές μετατοπίσεις εδαφικού υλικού και παραμορφώσεις οι οποίες μπορεί να είναι μόνιμες ή μη. Κατά πόσο οι παραμορφώσεις θα είναι μόνιμες ή όχι, εξαρτάται από την αντοχή του υλικού, τη σύσταση του πρανούς και από την εδαφική κίνηση.

Η ανάλυση ευστάθειας ενός πρανούς έναντι σεισμικών φορτίων, βασίζεται στον υπολογισμό της κρίσιμης επιτάχυνσης  $k_{cr}$ . Η κρίσιμη επιτάχυνση ολίσθησης αντιστοιχεί στην μικρότερη δυνατή τιμή επιτάχυνσης που μπορεί να επιφέρει αρχική αστοχία στο πρανές και αποτελεί το πλέον κατάλληλο μέτρο αντίστασης στην ολίσθηση μιας εδαφικής μάζας, η οποία υπόκειται στην επίδραση σεισμού.

Η κρίσιμη επιτάχυνση υπολογίζεται από τον στατικό συντελεστή ασφαλείας (σχέση 1.1), μέσω της σχέσης:

$$F = 1.0 + b * k_{cr} \quad (1.2)$$

Ο συντελεστής  $b$ , εξαρτάται από τη γωνία κλίσης του πρανούς  $b=f(\beta)$ :

$$b = 1.18 + \frac{0.66}{\tan \beta} \quad (1.3)$$

### **1.3. Μηχανισμός υποσκαφής ημιβυθισμένων πρανών**

Ημιβυθισμένα πρανή συναντούμε συνήθως σε παράκτιες περιοχές. Στις περιοχές αυτές, εμφανίζεται το φαινόμενο της υποσκαφής των ακτών λόγω της πρόσπτωσης των κυματισμών. Υποσκαφή καλείται η διάβρωση του εδάφους και η σταδιακή υποχώρηση του υλικού από τις ακτές λόγω των δυνάμεων που αναπτύσσονται λόγω των κυμάτων και των ρευμάτων. Η συνδυασμένη δράση των κυμάτων και των ρευμάτων δημιουργούν διατμητικές τάσεις στον πυθμένα. Η υπέρβαση της κρίσιμης διατμητικής τάσης του πυθμένα, οδηγεί στην αποκόλληση και αποσταθεροποίηση των κόκκων.

Η υποσκαφή σε αμμώδεις παραλίες εξαρτάται από το ύψος του κύματος και από το βάθος της ροής. Συγκεκριμένα, η υποσκαφή συντελείται εντός περιορισμένου εύρους τιμών του λόγου του ύψους κύματος προς του βάθους ροής. Το βάθος της υποσκαφής αυξάνεται αρχικά, με την αύξηση του αριθμού των κυμάτων που δρουν στον πυθμένα. Όταν το βάθος υποσκαφής αποκτήσει μια τελική τιμή, γίνεται ανεξάρτητο του αριθμού των κυμάτων. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι επιπτώσεις στην υποσκαφή των ακτών από τους τυχαίους κυματισμούς είναι λιγότερες σε σχέση με εκείνες που προκαλούν οι περιοδικοί κυματισμοί.

### **1.4. Γενικά στοιχεία, από τη θεωρία των τοίχων αντιστήριξης**

Οι τοίχοι αντιστήριξης αποτελούν τις πιο συνηθισμένες κατασκευές για την αντιστήριξη του εδάφους. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους τοίχους βαρύτητας και τους τοίχους από οπλισμένο σκυρόδεμα. Όπως είναι αναμενόμενο, το έδαφος ασκεί πιέσεις λόγω του βάρους του, σε οτιδήποτε τείνει να το περιορίσει. Οι πιέσεις αυτές ονομάζονται ωθήσεις γαιών και μπορεί να είναι είτε ενεργητικές, όταν το έδαφος ωθεί τον τοίχο, είτε παθητικές όταν το έδαφος ωθείται από τον τοίχο. Οι δύο αυτές καταστάσεις ονομάζονται καταστάσεις Rankine. Η εδαφική μάζα πίσω από τον τοίχο αντιστήριξης, φθάνει την οριακή κατάσταση Rankine, υπό τις εξής προϋποθέσεις:

- Η επιφάνεια του εδάφους είναι επίπεδη και η αρχική γεωστατική κατάσταση γεωστατική και ομοιόμορφη.
- Η κατακόρυφη εσωτερική παρειά του τοίχου θεωρείται τελείως λεία, δηλαδή δεν αναπτύσσονται διατμητικές δυνάμεις μεταξύ στην επιφάνεια επαφής τοίχου και εδάφους.
- Ο τοίχος στρέφεται περί τη βάση του.

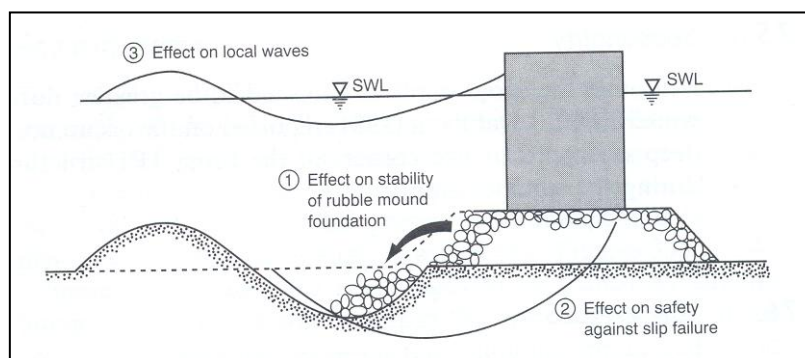
Στις εργαστηριακές δοκιμές που θα γίνουν, θα διερευνήσουμε αν επιβεβαιώνεται η θεωρία Rankine.

#### 1.4.1. Μελέτη υποσκαφής σε παράκτιους τοίχους που χρησιμοποιούνται ως μέτρα προστασίας των ακτών

Για την προστασία των ακτών από τη διάβρωση και την υποσκαφή, υπάρχουν πολλές κατασκευές που εγκαθίστανται ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε περιοχής, όπως, κυματοθραύστες, παράκτιοι τοίχοι μέσα στη θάλασσα και πρανή από χαλίκια ή μεγάλους λίθους. Οι παράκτιοι τοίχοι είναι δομές παράλληλες προς την ακτή και κατασκευάζονται για να προστατεύουν την ακτή από την διάβρωση και την υποσκαφή λόγω της πρόσπτωσης των κυματισμών. Τα κύματα ανακλώνται από τον τοίχο με αποτέλεσμα να εμφανίζεται το φαινόμενο της υποσκαφής στη βάση του τοίχου, το λεγόμενο «toe scour». Οι επιπτώσεις του φαινομένου αυτού είναι:

- Η σταδιακή μετακίνηση του αναχώματος από χαλίκια ή της ξύλινης θεμελίωσης, που είναι εγκατεστημένος ο τοίχος,
- Μείωση της ευστάθειας της κατασκευής,
- Αλλαγή των συνθηκών ροής και των κυματικών συνθηκών μπροστά από την κατασκευή.

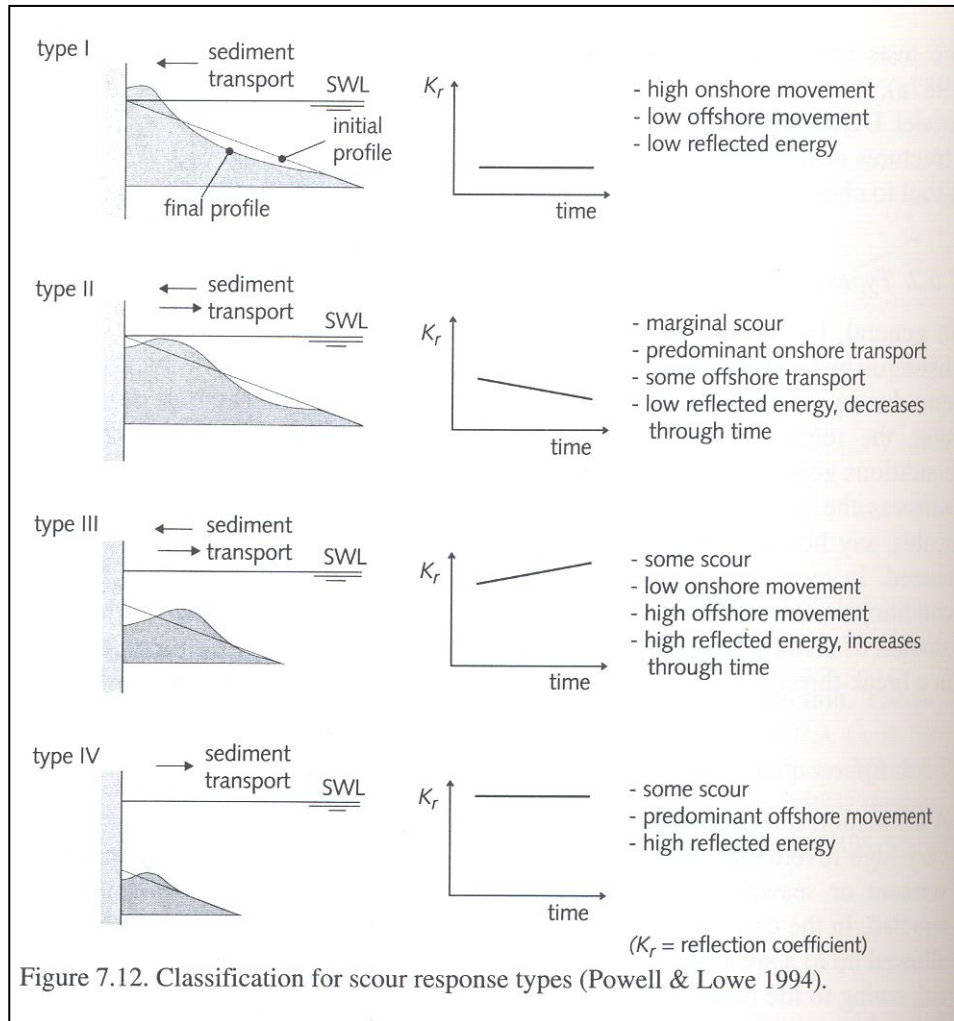
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται σχηματικά οι παραπάνω επιπτώσεις:



Εικόνα 1.1: Οι επιπτώσεις της υποσκαφής στη βάση κατακόρυφου τοίχου

Οι τοίχοι που κατασκευάζονται είναι συνήθως μονολιθικές κατασκευές και μπορεί να είναι είτε κατακόρυφοι ( $90^\circ$ ), είτε να έχουν κλίσεις μικρότερες των  $90^\circ : 15^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ . Η κλίση επηρεάζει το βάθος της υποσκαφής. Για μικρές κλίσεις, π.χ.  $15^\circ$ , το βάθος υποσκαφής είναι μικρότερο. Στην περίπτωση των κατακόρυφων τοίχων, εμφανίζεται η μέγιστη τιμή του βάθους της υποσκαφής.

Στην εικόνα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τέσσερις τύποι απόκρισης έναντι της υποσκαφής στην περίπτωση κατακόρυφου τοίχου (Powell & Lowe 1994). Η εμφάνιση του κάθε τύπου, εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή (είδη κυματισμών) και από το βάθος της ροής.



Εικόνα 1.2: Ταξινόμηση των τύπων της απόκρισης έναντι της υποσκαφής, για κατακόρυφο τοίχο

Οι δύο πρώτοι τύποι αφορούν στη επικάθηση της ακτής, ενώ οι δύο τελευταίοι σχετίζονται με την διάβρωση ή την υποσκαφή.

## **2. Περιγραφή των μεθόδων ανάλυσης των πειραμάτων**

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι ανάλυσης των πειραμάτων, η μέθοδος PIV (Particle Image Velocimetry) και η μέθοδος DIC (Digital Image Correlation). Οι δύο προαναφερθείσες μέθοδοι, υπολογίζουν τις ανηγμένες παραμορφώσεις που υφίσταται ένα πειραματικό μοντέλο, συσχετίζοντας ψηφιακές εικόνες που έχουν καταγραφεί. Είναι και οι δύο οπτικές μέθοδοι αφού βασίζονται στην επεξεργασία εικόνων και βίντεο. Επίσης, είναι ψηφιακές μέθοδοι αφού βασίζονται στην καταγραφή ψηφιακών εικόνων. Παρακάτω ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των μεθόδων και των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις.

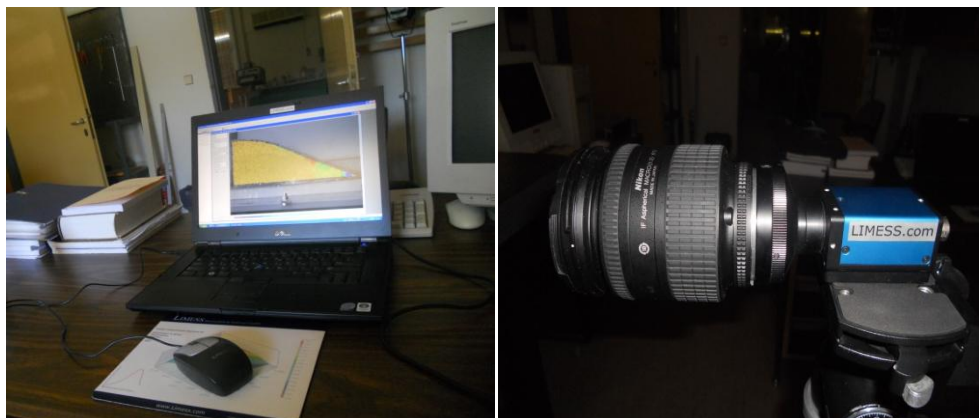
### **2.1. Η μέθοδος Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων (Digital Image Correlation)**

Η μέθοδος συσχέτισης ψηφιακών εικόνων (DIC) βασίζεται στην καταγραφή εικόνων ενός δοκιμίου, από ψηφιακή φωτογραφική, κατά τη διάρκεια φόρτισης του. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια λογισμικού γίνεται η επεξεργασία των εικόνων με σκοπό την εξαγωγή διαγραμμάτων που απεικονίζουν τις μετατοπίσεις και τις ανηγμένες παραμορφώσεις, σε μορφή contour. Σημαντικό ρόλο στην ορθότητα των αποτελεσμάτων της μεθόδου είναι η σωστή προετοιμασία του δοκιμίου. Επειδή η μέθοδος DIC είναι μια οπτική μέθοδος και βασίζεται στις διαφοροποιήσεις στην αντίθεση των φωτογραφιών, θα πρέπει το δοκίμιο να έχει στην επιφάνεια του τελείες σε διάφορους τόνους του γκρι, έτσι ώστε να μπορεί το σύστημα να υπολογίσει με ακρίβεια τις μετατοπίσεις των κόκκων. Στην παρούσα εργασία, θα χρησιμοποιηθεί το σύστημα Vic-2D της εταιρείας LIMESS Messtechnik und Software GmbH. Το σύστημα αυτό υπάρχει στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Τεχνικών Έργων, της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ.

### 2.1.1. Το σύστημα Vic-2D

Το σύστημα Vic-2D έχει ως βάση την συσχέτιση ψηφιακών εικόνων (Digital Image Correlation) και έχει τη δυνατότητα υπολογισμού των μετατοπίσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων και εξαγωγή τους σε μορφή εικόνων contour, σε δύο διαστάσεις.

Το σύστημα αποτελείται από έναν φορητό υπολογιστή στον οποίο είναι κλειδωμένο το λογισμικό για τη λήψη των εικόνων (Vic-Snap) καθώς και το πρόγραμμα για την επεξεργασία των εικόνων (Vic-2D), μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή υψηλής ανάλυσης, η οποία διαθέτει φακό NIKON AF NIKKOR IF Aspherical Macro (1:2) η οποία συνδέεται με τον υπολογιστή για τη λήψη των φωτογραφιών μέσω του Vic-Snap και έναν προβολέα για τον φωτισμό του δοκιμίου (Εικόνα 2.1).



(α)

(β)



(γ)

Εικόνα 2.1: (α) Φορητός ηλεκτρονικός υπολογιστής, (β) Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, (γ) Προβολέας





Εικόνα 2.2: Εικόνες από την εργαστηριακή διάταξη του Vic-2D

Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται για στατικά και όχι δυναμικά πειράματα, δηλαδή λαμβάνεται μια αρχική εικόνα πριν τη διέγερση, επιβάλλεται η διέγερση και λαμβάνεται μια δεύτερη εικόνα μετά τη διέγερση. Οι δύο αυτές εικόνες συσχετίζονται και εξάγονται τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων. Δεν μπορούν, δηλαδή, να ληφθούν εικόνες κατά τη διάρκεια της δυναμικής διέγερσης (επιβολή σεισμικής φόρτισης). Για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα της επεξεργασίας θα πρέπει να πληρούνται οι εξής προϋποθέσεις:

- Το δοκίμιο του πειράματος πρέπει να είναι επίπεδο 2D, δηλαδή δεν θα πρέπει να υπάρχει υποψία της τρίτης διάστασης Z, διότι μπορεί να δημιουργηθούν σκιές με αποτέλεσμα να υπάρχει πρόβλημα στη συσχέτιση.
- Η φωτογραφική μηχανή θα πρέπει να είναι τοποθετημένη κάθετα στο δοκίμιο για ακριβέστερη λήψη φωτογραφιών.

### 2.1.2. Περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού μετατοπίσεων και παραμορφώσεων

Για τη συσχέτιση δύο διαδοχικών εικόνων επιλέγεται αρχικά η εικόνα αναφοράς (Reference Image) και στη συνέχεια μία ή περισσότερες παραμορφωμένες εικόνες (Deformed Images). Εν συνεχεία, επιλέγεται η περιοχή ενδιαφέροντος (Area Of Interest) στην εικόνα αναφοράς. Η περιοχή ενδιαφέροντος μπορεί να οριστεί από μια απλή γραμμή, ένα τετράγωνο ή ένα πολύγωνο. Πριν ή μετά την επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος ορίζεται το μέγεθος βήματος (step size) και το subset size. Το subset size ελέγχει την περιοχή της εικόνας η οποία χρησιμοποιείται για την μέτρηση της μετατόπισης μεταξύ των εικόνων. Το subset size θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να διασφαλίζει ότι υπάρχει επαρκώς διακριτό πρότυπο στην περιοχή που χρησιμοποιείται για τη συσχέτιση. Το μέγεθος βήματος ελέγχει την απόσταση μεταξύ των σημείων που αναλύονται κατά τη διάρκεια της συσχέτισης. Αφού επιλεγεί η περιοχή ενδιαφέροντος (AOI), ορίζεται το Seed Point το οποίο αναφέρεται στο σημείο της εικόνας αναφοράς από το οποίο θα ξεκινήσει η συσχέτιση. Το Seed Point τοποθετείται σε σημείο της εικόνας με όσο το δυνατόν μικρότερη παραμόρφωση για να είναι αξιόπιστη η συσχέτιση.

Επόμενο βήμα είναι η αρχική πρόβλεψη (Initial Guess) κατά την οποία εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου στο οποίο φαίνεται αριστερά η αρχική εικόνα και δεξιά η παραμορφωμένη εικόνα. Κατά το στάδιο αυτό επιλέγονται κοινά σημεία της εικόνας αναφοράς και της παραμορφωμένης. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της αρχικής πρόβλεψης μπορεί να τρέξει η συσχέτιση και να εξαχθούν οι κατά  $x$  μετατοπίσεις ( $U$ ) και οι κατά  $y$  μετατοπίσεις ( $V$ ) σε pixels.

Στη συνέχεια, γίνεται η βαθμονόμηση των δεδομένων με σκοπό την εξαγωγή των μετατοπίσεων σε mm. Για την βαθμονόμηση απαιτείται μια εικόνα βαθμονόμησης στην οποία έχει τοποθετηθεί ένας χάρακας και έχει μετρηθεί μια συγκεκριμένη απόσταση πάνω στο δοκίμιο. Γίνεται η επιλογή της εικόνας, καταγράφεται η μετρημένη απόσταση και στη συνέχεια με την εντολή Scale ξεκινάει η διαδικασία της βαθμονόμησης των δεδομένων. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία οι μετατοπίσεις κατά  $x$  και  $y$  δίνονται και σε mm.

Τέλος, με την εντολή **strains** υπολογίζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις κατά x και y.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{du}{dx} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{dv}{dy} \quad (2.2)$$

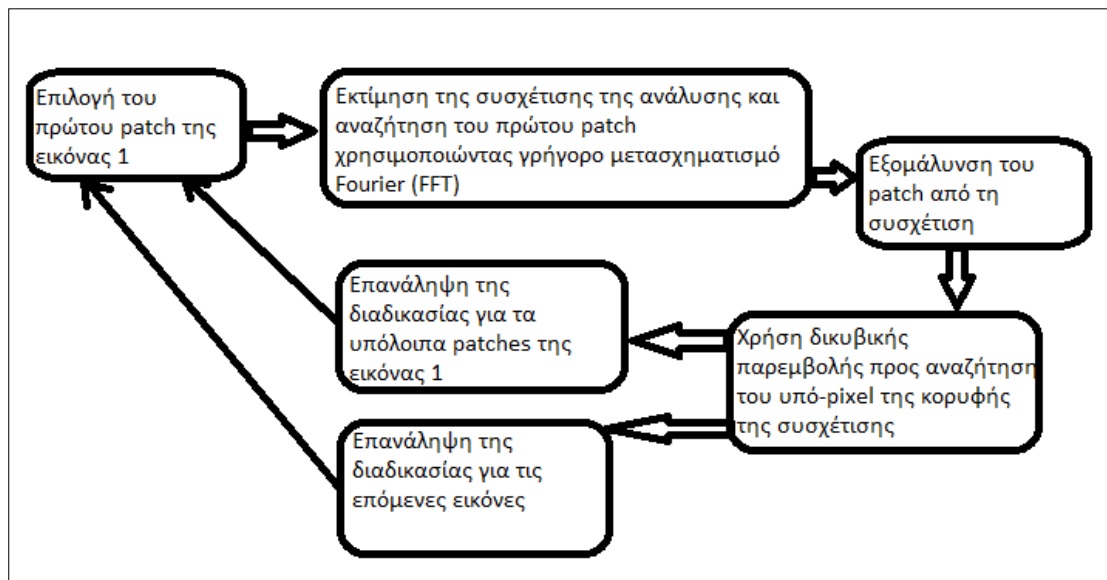
και οι ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \quad (2.3)$$

Ο αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων, υπολογίζει τις μερικές παραγώγους του πεδίου των μετατοπίσεων από μια προσέγγιση πολυωνύμου πρώτου βαθμού, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Lagrange.

## 2.2. Περιγραφή της μεθόδου PIV (Particle Image Velocimetry)

Η μέθοδος PIV (Particle Image Velocimetry) είναι μια οπτική μέθοδος, η οποία ξεκίνησε να χρησιμοποιείται στις αρχές της δεκαετίας του 1980 για την μέτρηση της ταχύτητας ροής των ρευστών από ψηφιακές εικόνες. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε από ερευνητές του πανεπιστημίου Cambridge στην Αγγλία και σε γεωτεχνικές εφαρμογές με σκοπό τον υπολογισμό των μετατοπίσεων και των παραμορφώσεων των κόκκων του εδάφους. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε πειραματικές εφαρμογές. Για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων χρησιμοποιείται φωτογραμμετρία κοντινής απόστασης (close range photogrammetry) και οι ανηγμένες παραμορφώσεις προκύπτουν ως παράγωγοι των μετατοπίσεων. Η ανάλυση γίνεται μέσω του λογισμικού geoPIV το οποίο λειτουργεί μέσω του προγράμματος τεχνικού προγραμματισμού MATLAB. Το λογισμικό geoPIV αναπτύχθηκε από τους A.Take και D.White (πανεπιστήμιο Cambridge) με σκοπό την ανάλυση των πεδίων διατμητικών παραμορφώσεων μέσω ψηφιακών εικόνων σε πειράματα με γεωτεχνικούς φυγοκεντριστές. Το geoPIV χωρίζει μια αρχική απαραμόρφωτη εικόνα αναφοράς σε μικρότερα τμήματα και στη συνέχεια αναζητεί τα τμήματα αυτά στις διαδοχικές εικόνες, με σκοπό την εξαγωγή διανυσμάτων μετατοπίσεων. Το διάγραμμα ροής που ακολουθείται από το geoPIV για την εξαγωγή των διανυσμάτων μετατόπισης των κόκκων του εδάφους ακολουθεί παρακάτω:



Εικόνα 2.3: Διάγραμμα ροής της ανάλυσης του geoPIV

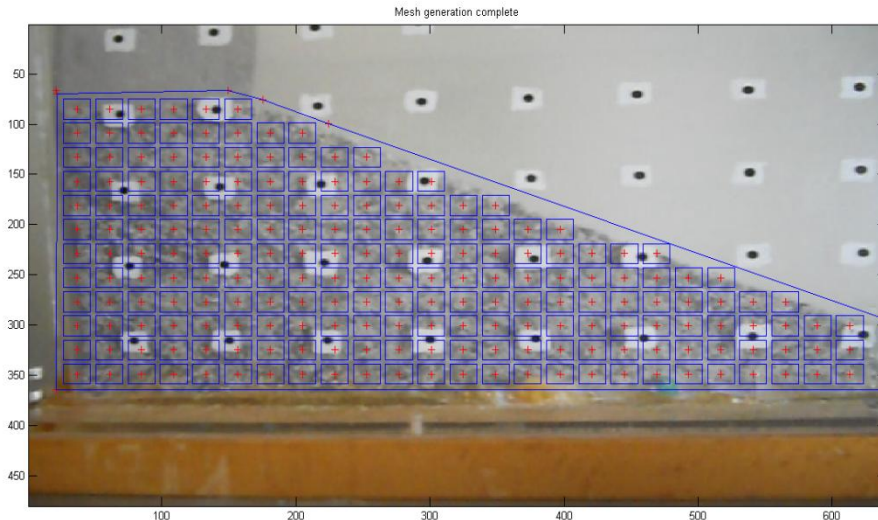
Αφού διεξαχθεί το πείραμα και έχει καταγραφεί το βίντεο από το οποίο εξάγονται οι εικόνες (frames) ή κατευθείαν οι εικόνες μπορεί να αρχίσει η ανάλυση για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων (μετατοπίσεις, ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις). Εγκαθίστανται τα αρχεία του geoPIV (M-Files, αρχεία p) αλλά και οι εικόνες από το πείραμα στον σκληρό δίσκο του υπολογιστή και αρχίζει η ανάλυση. Ακολουθεί αναλυτικά η περιγραφή της ανάλυσης:

### 2.2.1. Προ-επεξεργασία

Αφού έχουν αποθηκευτεί οι φωτογραφίες μπορεί να αρχίσει η επεξεργασία τους. Το πρώτο βήμα είναι να χωριστούν οι εικόνες σε μικρότερα τμήματα, τα λεγόμενα patches. Η αντίστοιχη εντολή στο MATLAB είναι η παρακάτω:

**geoMESHuv8('filename.txt', Patch Size, Patch Spacing);**

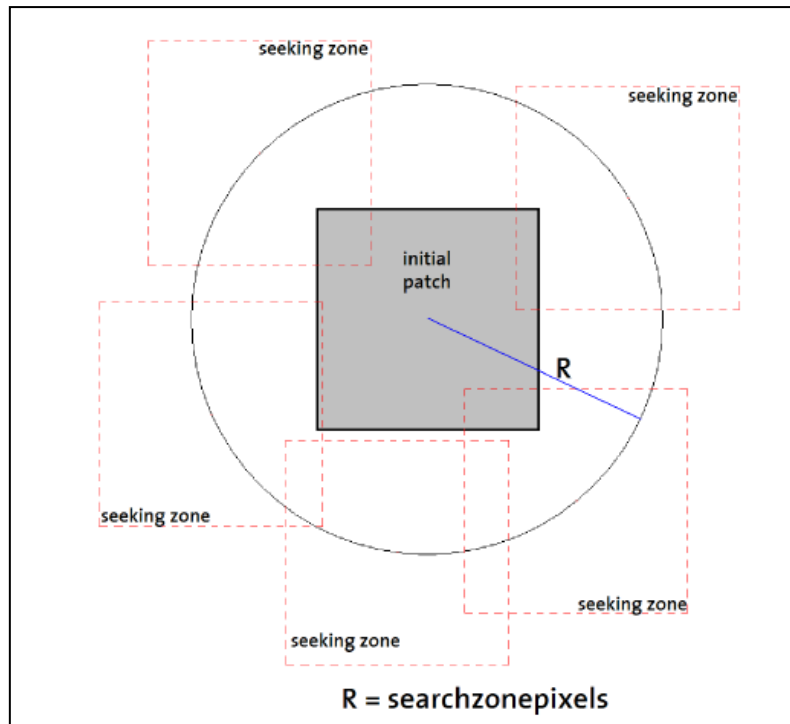
Το μέγεθος των patches (Patch Size) καθώς και η μεταξύ τους απόσταση (Patch Spacing) δίνονται σε pixels από τον χρήστη. Το μέγεθος των patches θα πρέπει να είναι τόσο μεγάλο ώστε να περιέχει αναγνωρίσιμη οπτική πληροφορία αλλά και τόσο μικρό ώστε να υπάρχει επαρκής αριθμός patches για να εξαχθούν τα διανύσματα των μετατοπίσεων. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνουν δοκιμές από τον χρήστη για το κατάλληλο μέγεθος αλλά και την απόσταση μεταξύ των patches.



Εικόνα 2.4: Δημιουργία των patches

Επειδή μια από τις βασικές προϋποθέσεις για την εξαγωγή ορθών αποτελεσμάτων από το PIV , είναι η αντίθεση στις εικόνες θα πρέπει οι διαδοχικές εικόνες οι οποίες αναλύονται να είναι αρκετά όμοιες ώστε να μπορούν να αναγνωριστούν τα patches από εικόνα σε εικόνα.

Επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του φακέλου έναρξης (launch file) της ανάλυσης, ο οποίος αποτελεί ένα αρχείο κειμένου στο οποίο ορίζονται κάποιες πολύ βασικές παράμετροι της ανάλυσης όπως, η ζώνη αναζήτησης (searchzonepixels) των patches από εικόνα σε εικόνα η οποία ορίζεται με σκοπό την ελάττωση του χρόνου και της ενέργειας που χρειάζεται ο υπολογιστής για να διεξάγει την ανάλυση. Η ζώνη αναζήτησης δίνεται σε pixels. Επίσης, στο αρχείο αυτό μπορεί να οριστεί και ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει η συσχέτιση των εικόνων, δηλαδή αν θα συσχετιστούν όλες οι φωτογραφίες με την εικόνα αναφοράς (1-2, 1-3, 1-4 κλπ), ή αν θα συσχετιστούν διαδοχικά η μια με την άλλη (1-2, 2-3, 3-4 κλπ).



Εικόνα 2.5: Επιλογή της περιοχής αναζήτησης των patches

## 2.2.2. Διεξαγωγή ανάλυσης PIV

Αφού ολοκληρωθεί η προ-επεξεργασία μπορεί να διεξαχθεί η ανάλυση του PIV. Η εντολή για την έναρξη της ανάλυσης είναι η παρακάτω:

### geoPIV8

Στη συνέχεια επιλέγεται ο φάκελος έναρξης της ανάλυσης (launch file) και αρχίζει το πρόγραμμα να τρέχει ακολουθώντας την διαδικασία που φαίνεται στην εικόνα 2.3. Ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η ανάλυση εξαρτάται από τον αριθμό των εικόνων, το μέγεθος και την απόσταση μεταξύ των patches αλλά και από την ζώνη αναζήτησης των patches, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

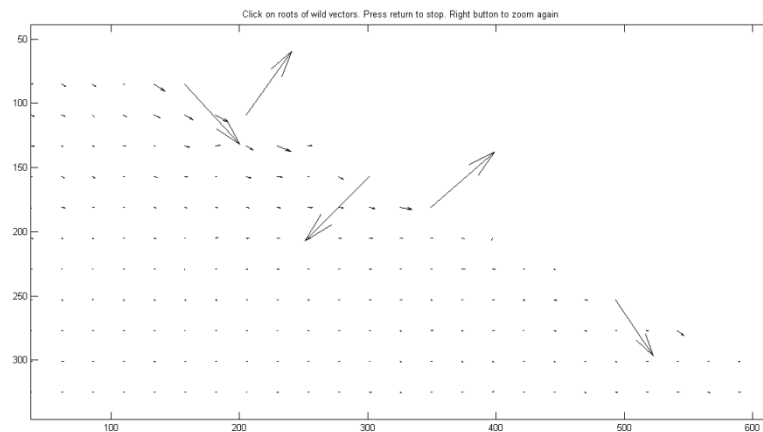
Αφού ολοκληρωθεί η πρώτη φάση της ανάλυσης, θα πρέπει να γίνουν κάποιες διορθώσεις στα αποτελέσματα, καθώς υπάρχει η πιθανότητα να έχουν δημιουργηθεί τα λεγόμενα wild vectors, τα οποία είναι κάποια ασύμβατα διανύσματα μετατοπίσεων, που δημιουργούνται λόγω:

- Των μεγάλων παραμορφώσεων που υφίστανται οι κόκκοι
- Του μεγάλου εύρους της ζώνης αναζήτησης
- Της έλλειψης επαρκούς διαφοροποίησης στην αντίθεση μεταξύ των patches

“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”

- Του μικρού μεγέθους των patches, με αποτέλεσμα αρκετά patches να έχουν παρόμοιο μοτίβο.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται τα διανύσματα των μετατοπίσεων και τα wild vectors, πριν γίνει η διόρθωση τους:



Εικόνα 2.6: Πεδίο μετατοπίσεων, στο οποίο εμφανίζονται wild vectors

Για τη διόρθωση των wild vectors χρησιμοποιείται η παρακάτω εντολή:

```
uvdataclean=geoWILD(uvdata,figure1,figure2,scale);
```

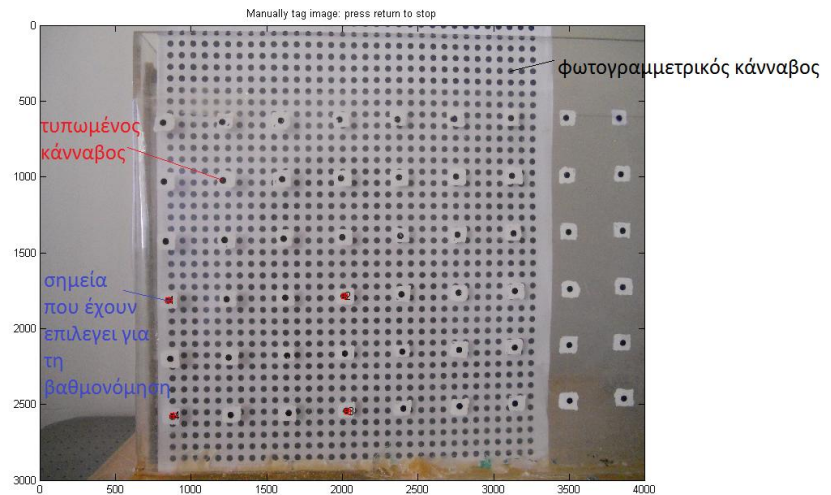
### 2.2.3. Βαθμονόμηση

Αφού ολοκληρωθεί η διόρθωση των wild vectors σε όλες τις εικόνες, ακολουθεί η βαθμονόμηση των δεδομένων. Βαθμονόμηση είναι η διαδικασία με την οποία μετατρέπονται τα δεδομένα από μονάδες εικόνας (pixel) σε συνήθεις μονάδες μέτρησης (mm, in, m). Ουσιαστικά με τη βαθμονόμηση καθορίζεται πόσα pixels αντιστοιχούν σε μια μονάδα (mm, in, m). Αυτό γίνεται αν συσχετιστούν τα δεδομένα που έχουν εξαχθεί σε pixels με κάποια καθορισμένα σημεία στόχους των οποίων είναι γνωστές οι συντεταγμένες σε mm. Τα σημεία αυτά δεν είναι τυχαία, αλλά ανήκουν σε έναν κάρναβο ο οποίος είναι τοποθετημένος στην εξωτερική πλευρά του plexiglass, στην περίπτωση μας, καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Τα σημεία αυτά είναι κουκκίδες μαύρου χρώματος με διάμετρο 3mm και λευκό τετράγωνο φόντο για να είναι καλύτερα ορισμένα. Οι συντεταγμένες των σημείων αυτών μετρώνται με τη βοήθεια του φωτογραμμετρικού καννάβου, ο οποίος τοποθετείται πριν ξεκινήσει το πείραμα πίσω από τον κάρναβο του πειράματος (εσωτερικά του plexiglass). Η διαδικασία της βαθμονόμησης ακολουθεί δύο στάδια:



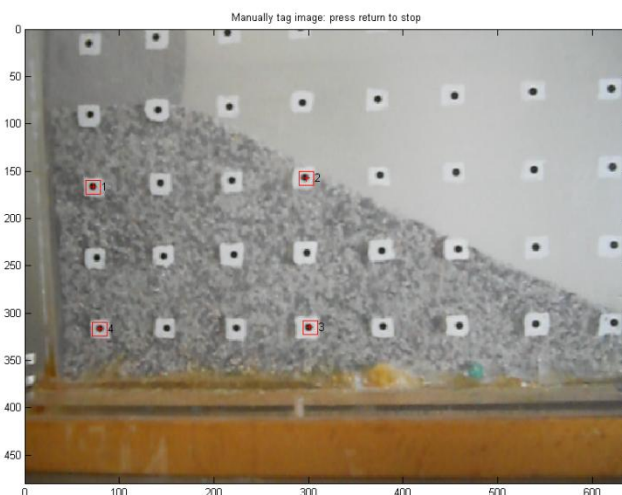
“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”

- Τον ακριβή υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων στόχων σε συνήθεις μονάδες μέτρησης (π.χ. mm). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η διαδικασία επιλογής των σημείων, μέσω των οποίων θα γίνει η βαθμονόμηση.



Εικόνα 2.7 : Επιλογή σημείων στον τυπωμένο κάρναβο για τη βαθμονόμηση

- Την ακριβή τοποθέτηση των παραπάνω σημείων στις εικόνες που περιγράφουν το πείραμα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



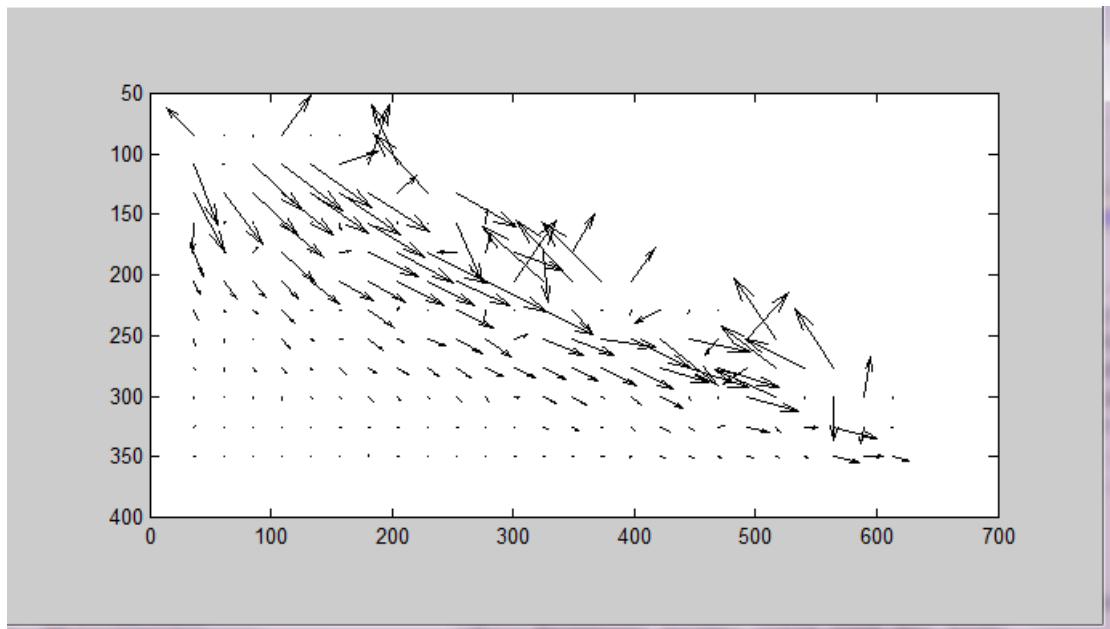
Εικόνα 2.8: Τοποθέτηση των σημείων που επελέγησαν στην εικόνα 2.7, στις εικόνες που περιγράφουν το πείραμα

#### 2.2.4. Εξαγωγή μετατοπίσεων και ανηγμένων διατμητικών παραμορφώσεων

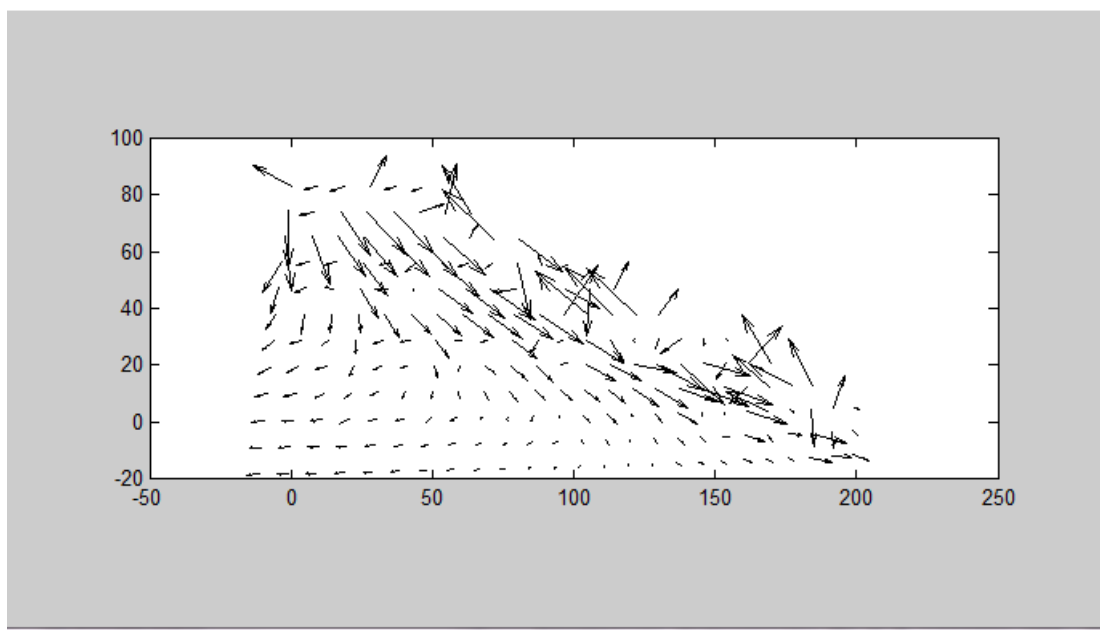
Αφού ολοκληρωθεί η βαθμονόμηση των δεδομένων, μπορούν τώρα να εξαχθούν τα διαγράμματα των πεδίων μετατοπίσεων και οι χάρτες contour που δείχνουν τις ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις. Τα διαγράμματα των μετατοπίσεων (σε pixels και mm) προκύπτουν πληκτρολογώντας τις παρακάτω εντολές, αντίστοιχα:

```
qq(uvdataclean,1,2,5);
```

```
qq(XYdata,1,2,5);
```



Εικόνα 2.9: Πεδίο μετατοπίσεων σε pixels (image-space)



Εικόνα 2.10: Πεδίο μετατοπίσεων σε mm (object-space)

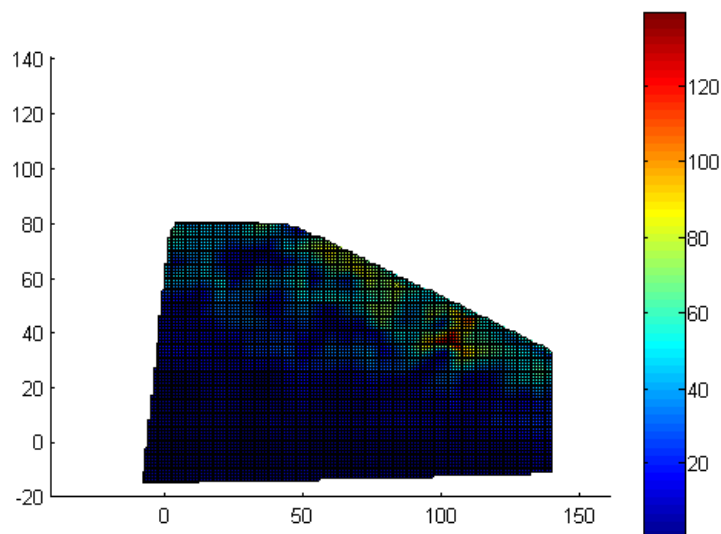
Όσον αφορά στις ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις, αποτελούν τις παραγώγους των μετατοπίσεων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Για τον υπολογισμό τους, το geoPIV χρησιμοποιεί τα βαθμονομημένα αποτελέσματα των μετατοπίσεων (σε mm). Η αντίστοιχη εντολή είναι η παρακάτω:

**[strains]=geoSTRAIN8(XYdata);**

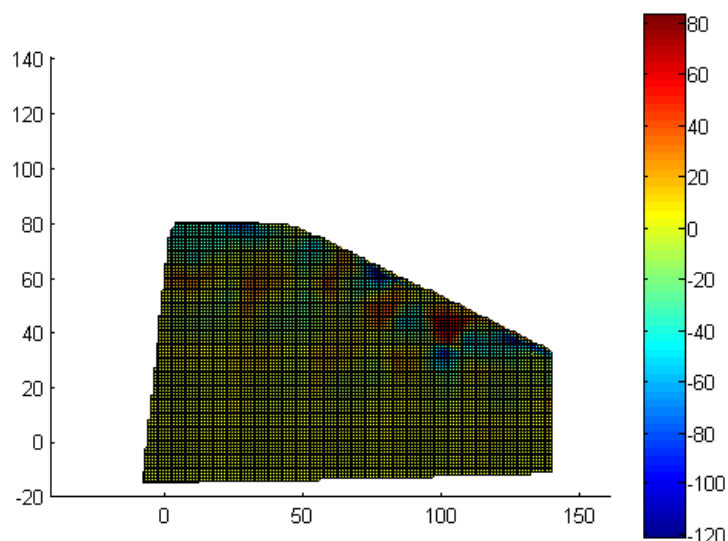
Το λογισμικό geoPIV δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής:

- Της συνολικής μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης ( $\epsilon_{xy}$ )
- Της συνολικής ογκομετρικής παραμόρφωσης
- Της μέγιστης οριακής διάτμησης

“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”



Εικόνα 2.11: Απεικόνιση της συνολικής μέγιστης διατμητικής παραμόρφωσης

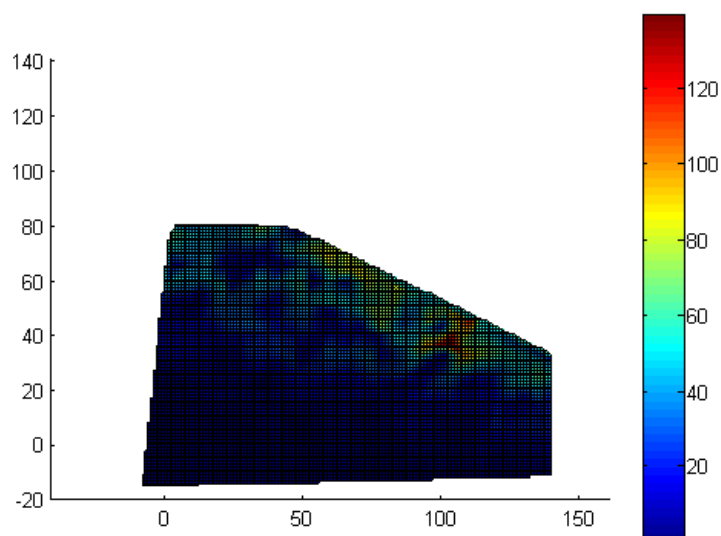


Εικόνα 2.12: Απεικόνιση της ογκομετρικής παραμόρφωσης

Η ογκομετρική παραμόρφωση δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{(Ογκομετρική Παραμόρφωση)} = \frac{\Delta V}{V_{\text{αρχ}}} = \frac{V_{\text{τελ}} - V_{\text{αρχ}}}{V_{\text{αρχ}}} \quad (2.4)$$

Σχετίζεται με την διόγκωση ή τη συρρίκνωση του εδάφους, δηλαδή, όταν η τιμή της είναι θετική υπάρχει διόγκωση (αύξηση όγκου), ενώ όταν η τιμή της είναι αρνητική, σημαίνει ότι ο όγκος μειώνεται και άρα έχουμε συρρίκνωση. Επίσης, αξιοποιώντας τις πληροφορίες που μας δίνει το παραπάνω διάγραμμα, θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να διερευνηθεί αν στις περιοχές που παρατηρείται διόγκωση του εδάφους είναι οι περιοχές που υφίστανται διάτμηση.



Εικόνα 2.13: Απεικόνιση της μέγιστης οριακής διάτμησης

### 3. Πειραματικό μέρος: Διεξαγωγή πειραμάτων και παρουσίαση των αποτελεσμάτων

#### 3.1. Κοκκομετρική ανάλυση δείγματος εδάφους

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σκοπός των πειραμάτων που διεξήχθησαν είναι η μελέτη της απόκρισης ξηρών και ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους υπό σεισμική φόρτιση. Το πρώτο βήμα της πειραματικής διαδικασίας είναι η κοκκομετρική ανάλυση του δείγματος, δηλαδή ο προσδιορισμός της συμμετοχής των διαμέτρων των κόκκων, ως ποσοστών, στο συνολικό όγκο του θεωρούμενου εδάφους (Σακελλαρίου 2003). Η κοκκομετρική ανάλυση μας χρησιμεύει στην κατάταξη του εδάφους και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του, όσον αφορά στην αντοχή και στην παραμόρφωση, την δυνατότητα κίνησης του υπογείου νερού μέσα από τα κενά και την επιρροή του παγετού σε αυτό.

Αρχικά, χωρίστηκε το υπάρχον δείγμα σε μικρότερα δείγματα και ακολουθήθηκε η διαδικασία της ανάλυσης για το κάθε δείγμα ξεχωριστά. Το πρώτο βήμα είναι να ζυγιστεί το κάθε κόσκινο σε ζυγαριά ακριβείας που διαθέτει το εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν κόσκινα διαμέτρων : 2 / 0.850 / 0.425 / 0.150 / 0.075 mm, τα οποία τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο, με τη διάμετρο να αυξάνει από κάτω προς τα πάνω. Στη συνέχεια, τοποθετείται το δείγμα στα κόσκινα και ζυγίζεται το δείγμα με τα κόσκινα μαζί.



Εικόνα 3.1 : Ζύγισμα δείγματος και κοσκίων

Επόμενο βήμα είναι να τοποθετηθούν τα κόσκινα μαζί με το δείγμα στην συσκευή κοσκινίσματος (κοσκινιέρα) και να τεθεί σε λειτουργία η κοσκινιέρα. Τα δείγματα κοσκινίστηκαν για 8 λεπτά, το καθένα. Αφαιρούνται τα κόσκινα και ζυγίζονται το καθένα μαζί με την ποσότητα που έχει συγκρατήσει. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή, υπολογίζεται το ποσοστό διερχόμενου από κάθε κόσκινο καθώς και κάποιοι συντελεστές που βοηθούν στην κατάταξη του εδάφους. Οι συντελεστές αυτοί ορίζονται παρακάτω:

- **Ενεργός διάμετρος  $D_{10}$**  : Ορίζεται ως η διάμετρος από την οποία διέρχεται το 10% του δείγματος. Μικρή τιμή της ενεργού διαμέτρου δείχνει ότι το έδαφος περιέχει μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκου.
- **Συντελεστής ομοιομορφίας  $C_u = D_{60}/D_{10}$**  : Μεγάλη τιμή του συντελεστή δηλώνει ότι τα μεγέθη των κόκκων είναι καλά διαβαθμισμένα από τους μικρότερους κόκκους προς του μεγαλύτερους.  
Αν  $C_u = 1$ , τότε το έδαφος αποτελείται από κόκκους ίδιας διαμέτρου.  
Αν  $C_u < 5$ , τότε το έδαφος χαρακτηρίζεται σχετικά ομοιόμορφο.  
Αν  $C_u > 5$ , τότε το έδαφος καλείται καλά διαβαθμισμένο.
- **Συντελεστής καμπυλότητας  $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60})$**  : Αποτελεί μέτρο καμπυλότητας της καμπύλης μεταξύ των σημείων  $D_{60}$  και  $D_{10}$ .



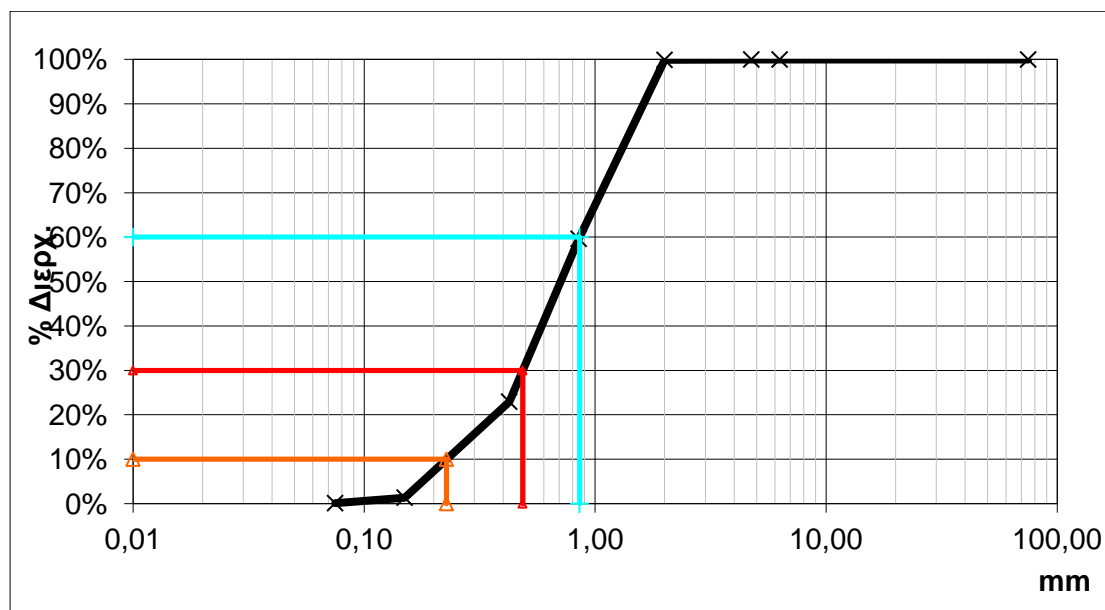
Εικόνα 3.2 : Συσκευή κοσκινίσματος(κοσκινιέρα)

Αφού επαναλήφθηκε η διαδικασία και για τα δύο δείγματα, σχεδιάστηκαν οι κοκκομετρικές καμπύλες σε GrainSize Graph στο Ms Excel.

“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιομάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ							
	Βάρος Δείγματος:	815,90	(από ζυγ. κοσκίνων)		Απώλεια:	0,0 0%	
	Αρχικό Βάρος Δείγματος:	815,90					
Φίλτρα	Διάμετρος (mm)	Βάρος κοσκ.	Βάρος κοσκ+δείγμ	% Κατακρ.	% Διερχ.		
3"	75,000	0,00	0,00	0,00%	100,0 0%	D <sub>10</sub> (mm) =	0,22 7
1/4"	6,300	0,00	0,00	0,00%	100,0 0%	D <sub>30</sub> (mm) =	0,48 5
N4	4,750	0,00	0,00	0,00%	100,0 0%	D <sub>60</sub> (mm) =	0,85 7
N10	2,000	377,80	378,50	0,09%	99,91 %		
N20	0,850	341,20	669,90	40,29 %	59,63 %	Χαλίκια (%)=	0,00 %
N40	0,425	298,20	597,30	36,66 %	22,97 %	Άμμος (%)=	99,8 8%
N100	0,150	265,80	442,10	21,61 %	1,36 %	Άργιλος (%)=	0,12 %
N200	0,075	304,70	314,80	1,24%	0,12 %		
Πιάτο	Πιάτο	283,90	284,70	0,10%		C <sub>u</sub> =	3,77
						C <sub>c</sub> =	1,21

Πίνακας 3.1: Υπολογισμός των ποσοστών των διερχόμενων από κάθε κόσκινο για το δείγμα 1

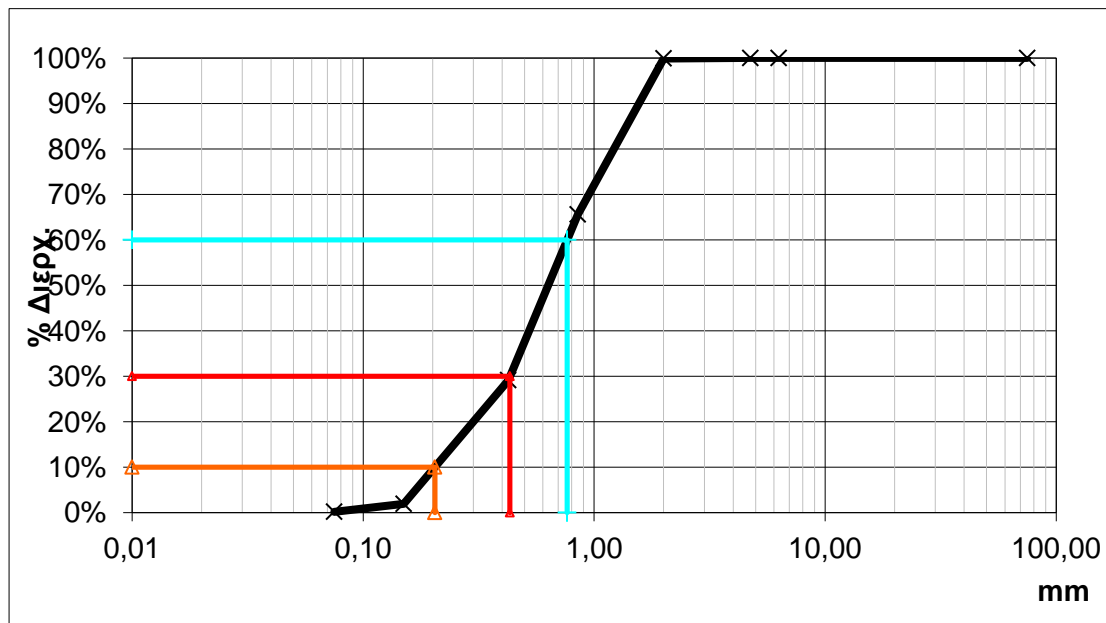


Διάγραμμα 3.1: Κοκκομετρική ανάλυση δείγματος 1



ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ							
	Βάρος Δείγματος:	778,50	(από ζυγ. κοσκίνων)		Απώλεια:	0,00%	
	Αρχικό Βάρος Δείγματος:	778,50					
Φίλτρα	Διάμετρος (mm)	Βάρος κοσκ.	κοσκ+δείγμ	% Κατακ. ρ.	% Διερχ.		
3"	75,000	0,00	0,00	0,00%	100,00%	D <sub>10</sub> (mm) =	0,20 4
1/4"	6,300	0,00	0,00	0,00%	100,00%	D <sub>30</sub> (mm) =	0,43 2
N4	4,750	0,00	0,00	0,00%	100,00%	D <sub>60</sub> (mm) =	0,76 4
N10	2,000	377,80	378,40	0,08%	99,92%		
N20	0,850	341,30	608,60	34,34%	65,59%	Χαλίκια (%)=	0,00%
N40	0,425	298,30	582,10	36,45%	29,13%	Άμμος (%)=	99,82%
N100	0,150	265,80	477,70	27,22%	1,91%	Άργιλος (%)=	0,18%
N200	0,075	304,70	318,20	1,73%	0,18%		
Πιάτο	Πιάτο	283,90	285,00	0,14%		C <sub>u</sub> =	3,74
						C <sub>c</sub> =	1,19

Πίνακας 3.1: Υπολογισμός των ποσοστών των διερχόμενων από κάθε κόσκινο για το δείγμα 2



Διάγραμμα 3.2: Κοκκομετρική ανάλυση δείγματος 2

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, συμπεραίνουμε ότι το υλικό μας είναι άμμος λεπτόκοκκη σχετικά ομοιόμορφη, αφού ο συντελεστής ομοιομορφίας είναι 3.77 και 3.74, αντίστοιχα. Πρόκειται, δηλαδή, για ένα κοκκώδες υλικό χωρίς συνοχή. Η υγρή άμμος εμφανίζει συνοχή λόγω των επιφανειακών τάσεων του νερού (φαινόμενη συνοχή), η οποία εξαφανίζεται όταν η άμμος ξεραθεί.

### 3.2. Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Τα πειράματα που ακολουθούν, διεξήχθησαν στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων, της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Η εργαστηριακή διάταξη, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα αποτελείται από:

- Μια σεισμική τράπεζα
- Έναν επιταχυνσιογράφο
- Έναν σταθερό ηλεκτρονικό υπολογιστή (Λογισμικό LabView)
- Έναν ενισχυτή σήματος
- Μια κάρτα συλλογής δεδομένων
- Μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή
- Την εργαστηριακή διάταξη του Vic-2D

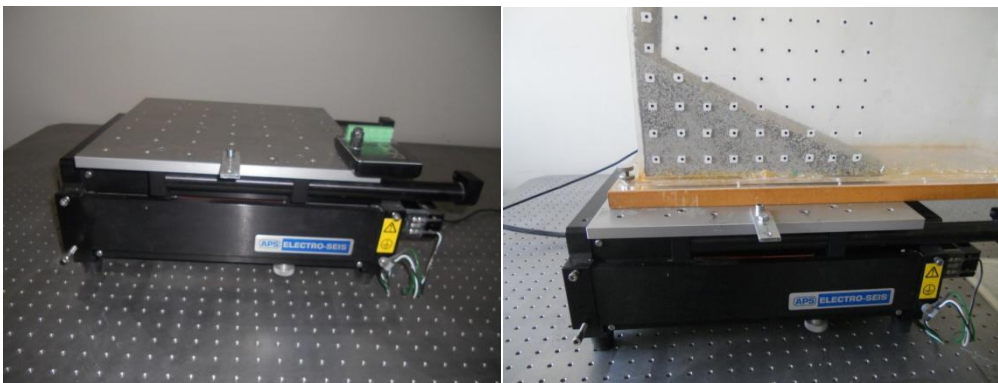


Εικόνα 3.3: Πειραματική διάταξη

Ακολουθεί σχετική περιγραφή για καθεμιά από τις παραπάνω συσκευές:

### ➤ Σεισμική τράπεζα

Πρόκειται για μια μικρή σεισμική τράπεζα ELECTRO-SEIS 1-D, της εταιρείας APS Dynamics (εικόνα 3.4). Η σεισμική τράπεζα λαμβάνει ηλεκτρικό παλμό τον οποίο μετατρέπει σε μηχανικό και αναγκάζει το κινούμενο τμήμα της σε ταλάντωση. Το σήμα το δίνουμε μέσω του LabView και το ενισχύουμε μέσω του ενισχυτή σήματος. Πάνω στην σεισμική τράπεζα είναι τοποθετημένος ο επιταχυνσιογράφος για την καταγραφή των επιταχύνσεων.



Εικόνα 3.4: Σεισμική τράπεζα

### ➤ Επιταχυνσιογράφος

Ο 3-D επιταχυνσιογράφος QDR(Quake Data Recorder) (εικόνα 3.5(α)) , της εταιρείας kinemetrics τοποθετείται πάνω στην σεισμική τράπεζα, όπως φαίνεται στις εικόνες 3.5(β) και 3.5(γ) και καταγράφει την ασκούμενη ταλάντωση μέσω του επιταχυνσιογραφήματος. Καταγράφει τις επιταχύνσεις και ως προς τους τρεις άξονες (X,Y,Z). Το λογισμικό για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων , ονομάζεται QDRTalk και είναι εγκατεστημένο στον σταθερό υπολογιστή.

“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”



(α)

(β)



(γ)

Εικόνα 3.5: Επιταχυνσιογράφος

### ➤ Σταθερός ηλεκτρονικός υπολογιστής

Ο σταθερός υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε, έχει εγκατεστημένο το λογισμικό LabView, μέσω του οποίου δίνουμε το σήμα γνωστής συχνότητας για την ταλάντωση (Seismic Signal from file) της σεισμικής τράπεζας. Επίσης, έχει εγκατεστημένο το λογισμικό QDRTalk, μέσω του οποίου μεταφέρονται τα καταγεγραμμένα δεδομένα από τον επιταχυνσιογράφο στον υπολογιστή.



Εικόνα 3.6: Σταθερός ηλεκτρονικός υπολογιστής

“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”

### ➤ Ενισχυτής σήματος

Ο ενισχυτής σήματος μας βοηθάει να ελέγχουμε την ταλάντωση μεταβάλλοντας την ένταση του σήματος. Ο ενισχυτής που χρησιμοποιήσαμε είναι της εταιρείας APS Dynamics (εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Ενισχυτής σήματος

### ➤ Κάρτα συλλογής δεδομένων

Η κάρτα συλλογής δεδομένων είναι συνδεδεμένη με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και μας επιτρέπει να ελέγχουμε την κίνηση της σεισμικής τράπεζας μέσω του λογισμικού LabView.



Εικόνα 3.8: Κάρτα συλλογής δεδομένων

### ➤ Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή

Για την καταγραφή των βίντεο των πειραμάτων τοποθετούνταν μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Nikon ανάλυσης 12 Megapixel πάνω στην σεισμική τράπεζα, έτσι ώστε να ακολουθεί την ταλάντωση. Δηλαδή, εκτός από τις εικόνες που λαμβάναμε με την ψηφιακή κάμερα του εργαστηρίου, καταγράφαμε και βίντεο.



*Εικόνα 3.9: Τοποθέτηση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής για την καταγραφή βίντεο του πειράματος*

### ➤ Την εργαστηριακή διάταξη του Vic-2D

Η εργαστηριακή διάταξη του Vic-2D, έχει περιγραφεί αναλυτικά στην παράγραφο 2.1.1. Αποτελείται, από μια ψηφιακή κάμερα υψηλής ανάλυσης, έναν φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή και έναν προβολέα.

### 3.3. Πείραμα 1<sup>ο</sup> : Έλεγχος της σεισμικής απόκρισης, ξηρού πρανούς

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, της σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους. Πριν όμως διερευνηθεί η συμπεριφορά των ημιβυθισμένων πρανών, θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να μελετηθεί το πρανές απουσία νερού. Για το λόγο αυτό, το πρώτο πείραμα που διεξήχθη αφορά την μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ξηρού πρανούς.

Αφού ολοκληρώθηκε η κοκκομετρική ανάλυση και προσδιορίστηκε η ταυτότητα του εδάφους, υπολογίζουμε τη γωνία τριβής του εδάφους στο εργαστήριο. Γωνία τριβής, καλείται η μέγιστη γωνία κλίσης κεκλιμένου επιπέδου και είναι η παράμετρος που καθορίζει την αντοχή των μη συνεκτικών εδαφών (άμμος, χαλίκια). Για τον προσδιορισμό της αποθέσαμε την άμμο μέσα στο κουτί από Plexiglass, με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματιστεί ένα κεκλιμένο επίπεδο και μετρήσαμε την μέγιστη γωνία κλίσης του επιπέδου αυτού, η οποία μετρήθηκε ίση με:  $\varphi=35^\circ$ .

Επόμενο βήμα είναι η επιλογή του συντελεστή ασφαλείας. Οι τιμές ποικίλουν ανάλογα με την ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας της κάθε περιοχής. Στα πειράματα, επιλέξαμε συντελεστή ασφαλείας ίσο με  $F=1,3$ . Ενδεικτικά, αναφέρουμε ότι στα πρανή της Εγνατίας Οδού ο συντελεστής ασφαλείας είναι  $F=1,3$  και στον ΠΑΘΕ  $F=1,2$ . Η σχέση που συνδέει τον συντελεστή ασφαλείας με τη γωνία τριβής  $\varphi$  και τη γωνία του πρανούς  $\beta$ , δίνεται παρακάτω:

$$F = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \quad (3.1)$$

Άρα προκύπτει, ότι για τον συγκεκριμένο συντελεστή ασφαλείας, η γωνία του πρανούς θα είναι:

$$\beta = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{F}\right) \rightarrow \beta \approx 28^\circ$$

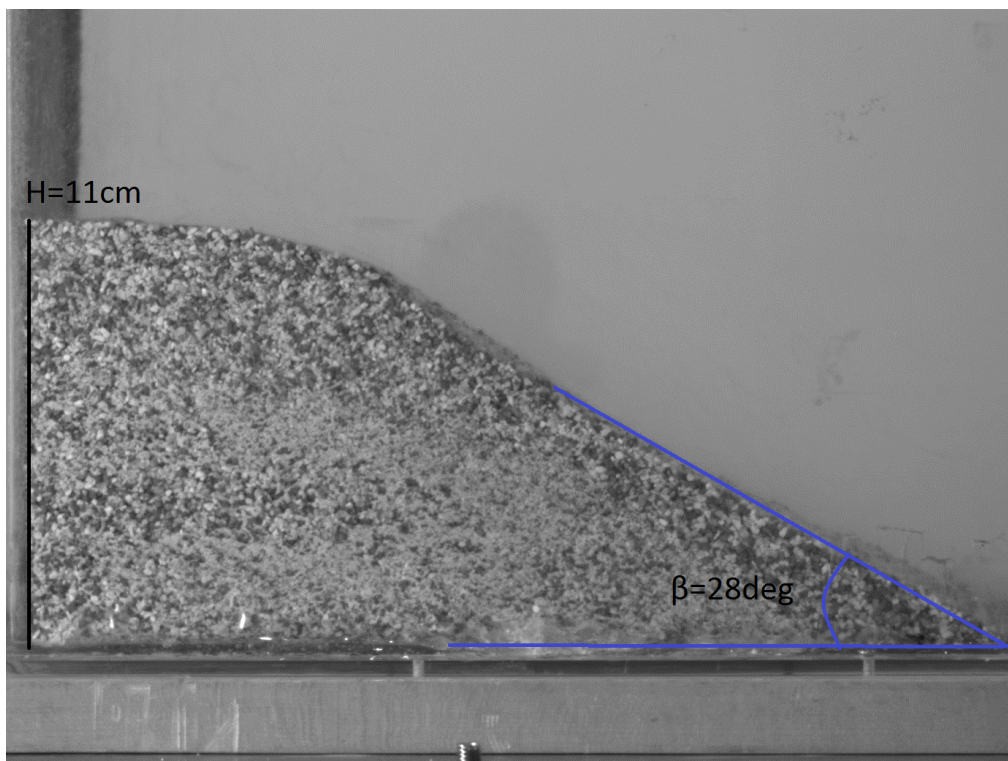
Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η κρίσιμη σεισμική επιτάχυνση, μέσω των σχέσεων (1.2) και (1.3), ίση με:  $k_{cr}=0,12g$ . Δηλαδή, για τιμές μεγαλύτερες της κρίσιμης επιτάχυνσης, αναμένεται ολίσθηση του εδάφους.

“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”

Αφού έγιναν, όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί, διεξήχθη το πείραμα. Τοποθετήθηκε η άμμος μέσα στο κουτί από Plexiglass και διαστρώθηκε ούτως ώστε η γωνία του πρανούς να είναι ίση με  $\beta=28^\circ$ . Πρέπει να σημειωθεί, ότι σε όλα τα πειράματα που έγιναν, τοποθετήθηκε γεωϋφασμα στην επιφάνεια επαφής της άμμου με το Plexiglass, για να αναπτύσσεται η απαραίτητη τριβή ούτως ώστε να μπορεί να σταθεί το έδαφος χωρίς να γλιστράει, μέσα στο κουτί.



Εικόνα 3.10 : Τοποθέτηση γεωϋφάσματος στην επιφάνεια επαφής της άμμου με το plexiglass

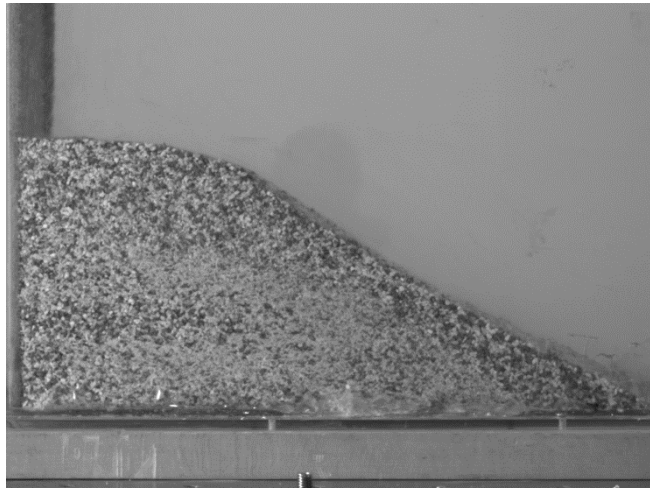


Εικόνα 3.11: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρανούς για το πείραμα 1

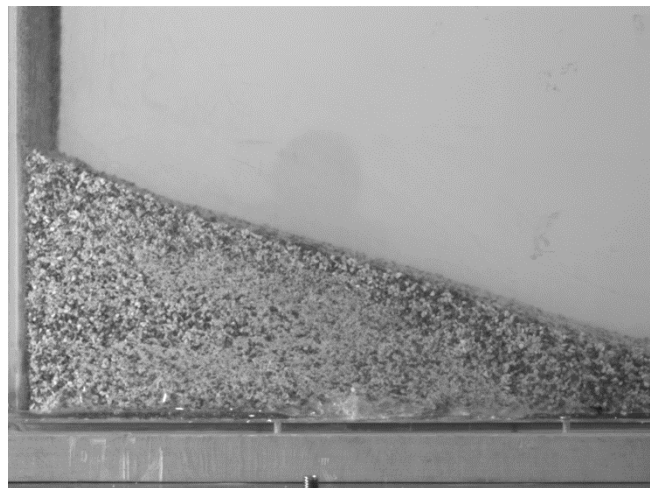


“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”

Τοποθετείται το μοντέλο πάνω στη σεισμική τράπεζα, και μέσω του προγράμματος LabView, επιβάλλεται σεισμική φόρτιση. Πάνω στην σεισμική τράπεζα έχει τοποθετηθεί η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή με την οποία καταγράφεται το βίντεο της δοκιμής. Εν τω μεταξύ, πριν επιβληθεί η φόρτιση έχει γίνει λήψη φωτογραφιών του μοντέλου με την ψηφιακή κάμερα του συστήματος Vic-2D, με κάνναβο (PIV) και χωρίς κάνναβο (DIC). Αφού ολοκληρωθεί η δυναμική διέγερση, γίνεται λήψη των φωτογραφιών μετά την ολίσθηση του πρανούς. Στις παρακάτω εικόνες, παρουσιάζεται η αρχική και η τελική κατάσταση του πρανούς:



(α)



(β)

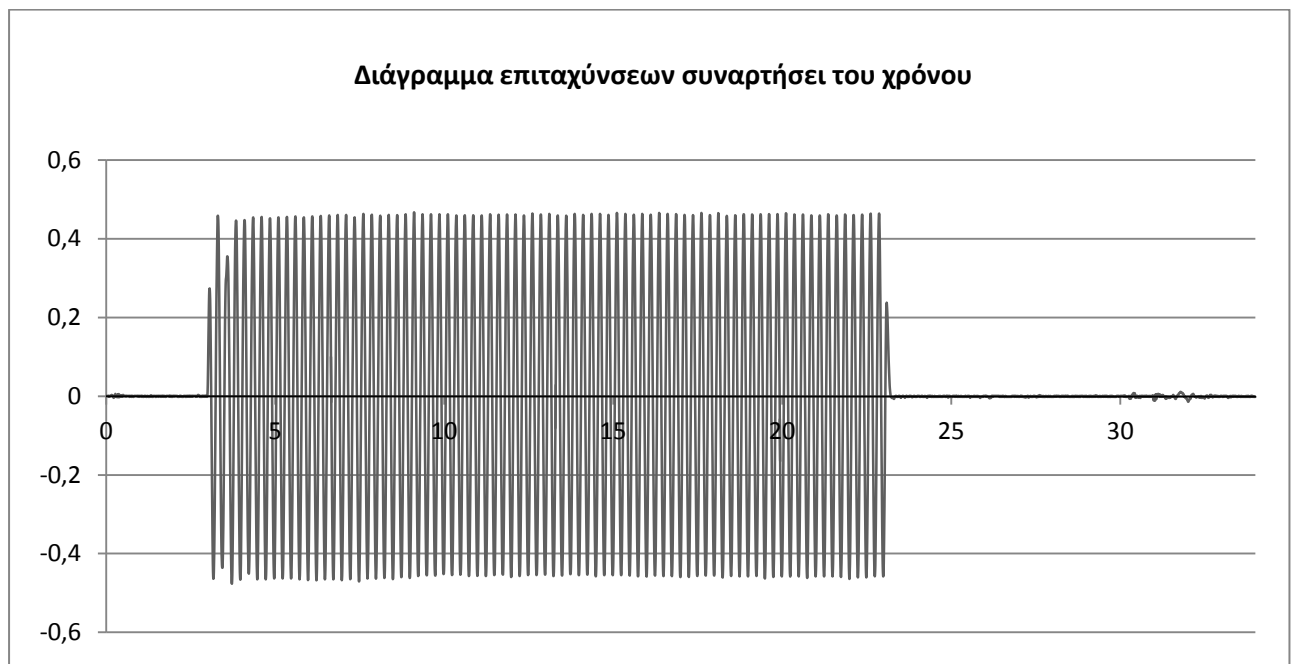
Εικόνα 3.12 : (α) Αρχική κατάσταση πρανούς, (β) Τελική κατάσταση πρανούς

“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”

Παρατηρούμε ότι η αστοχία έχει πραγματοποιηθεί στο «φρύδι» του πρανούς, από όπου έχει ολισθήσει κυρίως η εδαφική μάζα. Από την καταγραφή του επιταχυνσιογράφου, η μέγιστη επιτάχυνση η οποία αναπτύχθηκε είναι:

$$a_{\max} \approx 0,36g > k_{cr}$$

Το διάγραμμα που ακολουθεί δείχνει την επιτάχυνση, ως ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας (g) που αναπτύχθηκε συναρτήσει του χρόνου, σύμφωνα με την καταγραφή από τον επιταχυνσιογράφο.



Διάγραμμα 3.3: Διάγραμμα επιταχύνσεων συναρτήσει του χρόνου, στην περίπτωση του ξηρού πρανούς

Πρόκειται για ένα ημιτονοειδές σήμα με περίοδο  $T=0.25\text{sec}$ . Η σχέση που συνδέει την περίοδο με τη συχνότητα είναι:

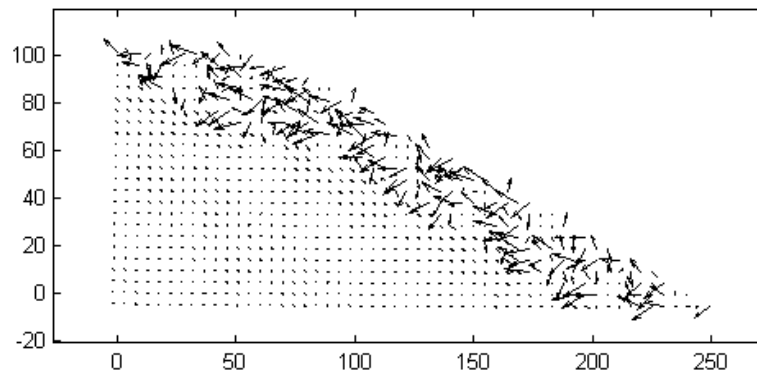
$$f = \frac{1}{T}$$

άρα η συχνότητα είναι  $f = 4\text{Hz}$ .

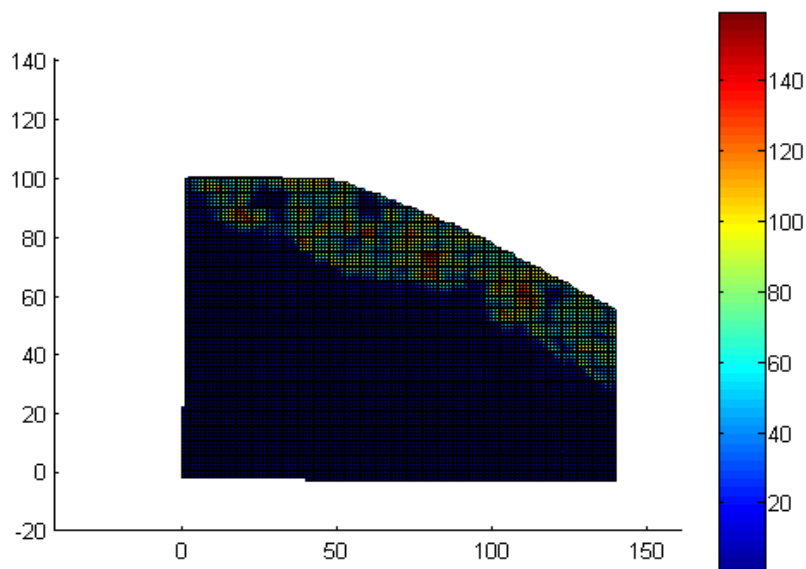
“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρηνών κοκκώδους εδάφους”

Στη συνέχεια, έγινε η ανάλυση των παραπάνω εικόνων με τις δύο μεθόδους: PIV (geoPIV) και DIC (Vic-2D).

### Ανάλυση με το geoPIV



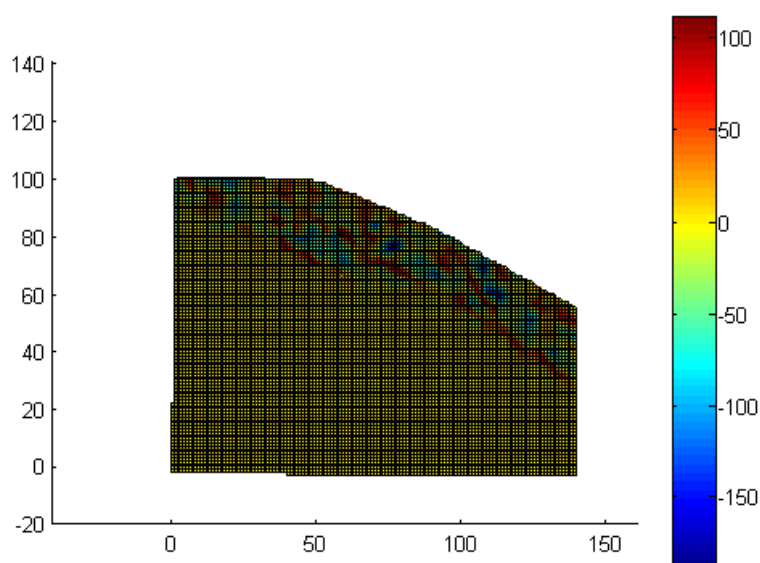
Εικόνα 3.13 : Πεδίο μετατοπίσεων των κόκκων του εδάφους



Εικόνα 3.14 : Συνολική μέγιστη διατμητική παραμόρφωση του εδάφους

Όπως φαίνεται, τόσο από το διάγραμμα των μετατοπίσεων όσο και από το διάγραμμα των διατμητικών παραμορφώσεων, οι κόκκοι του εδάφους έχουν ολισθήσει από την στέψη του πρανούς προς τα κάτω.

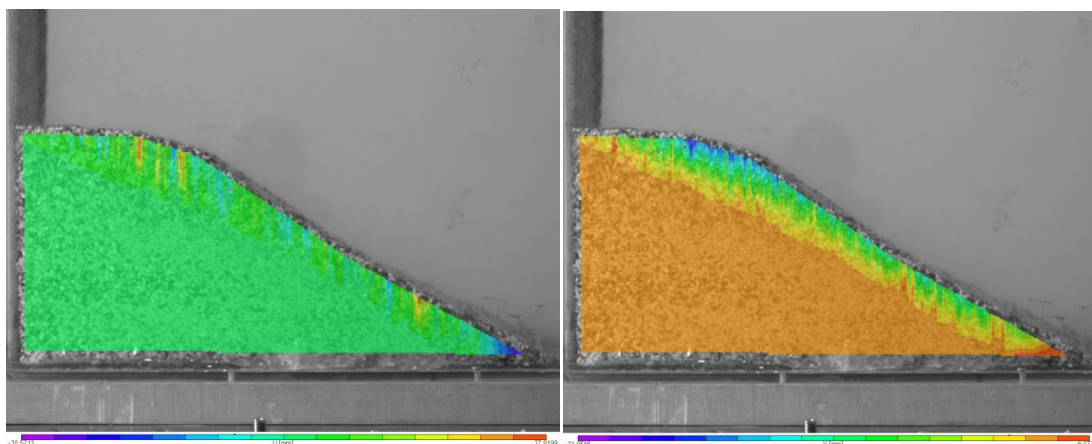
Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται η μεταβολή του όγκου του εδάφους. Οι περιοχές που εμφανίζονται με μπλε χρώμα, δείχνουν τη συρρίκνωση του εδάφους στις περιοχές αυτές, δηλαδή, το έδαφος έχει ολισθήσει.



Εικόνα 3.15: Ογκομετρική παραμόρφωση

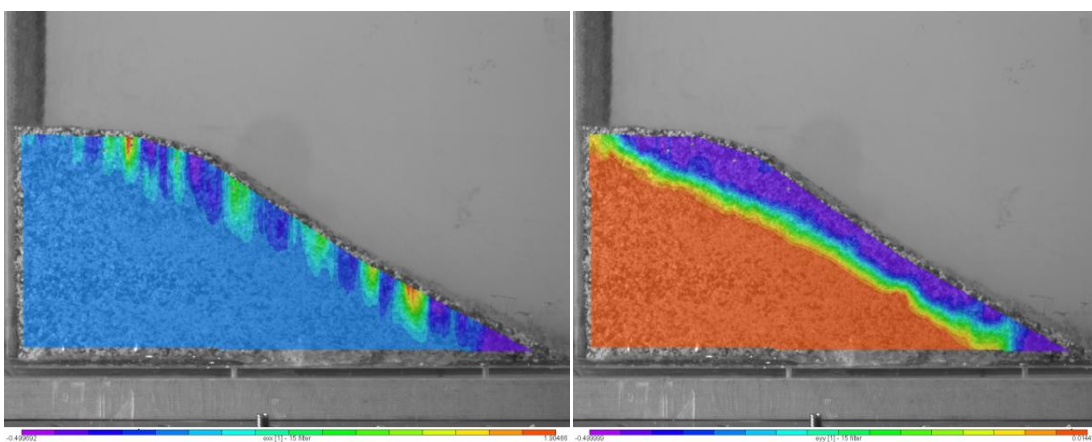
Από τις παραπάνω εικόνες που δείχνουν τις ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις και τις ογκομετρικές παραμορφώσεις, παρατηρούμε ότι στις περιοχές όπου έχουμε διόγκωση του εδάφους είναι οι περιοχές που υφίστανται διάτμηση.

### Ανάλυση με το Vic-2D



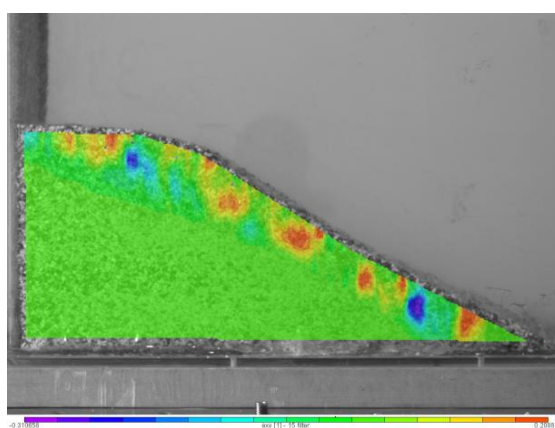
(α)

(β)



(γ)

(δ)



(ε)

Εικόνα 3.16: (α) Μετατοπίσεις κατά x (U), (β) Μετατοπίσεις κατά y (V), (γ) Ανηγμένες παραμορφώσεις ως προς x ( $\epsilon_{xx}$ ), (δ) Ανηγμένες παραμορφώσεις ως προς y ( $\epsilon_{yy}$ ), (ε) Ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις ( $\epsilon_{xy}$ )

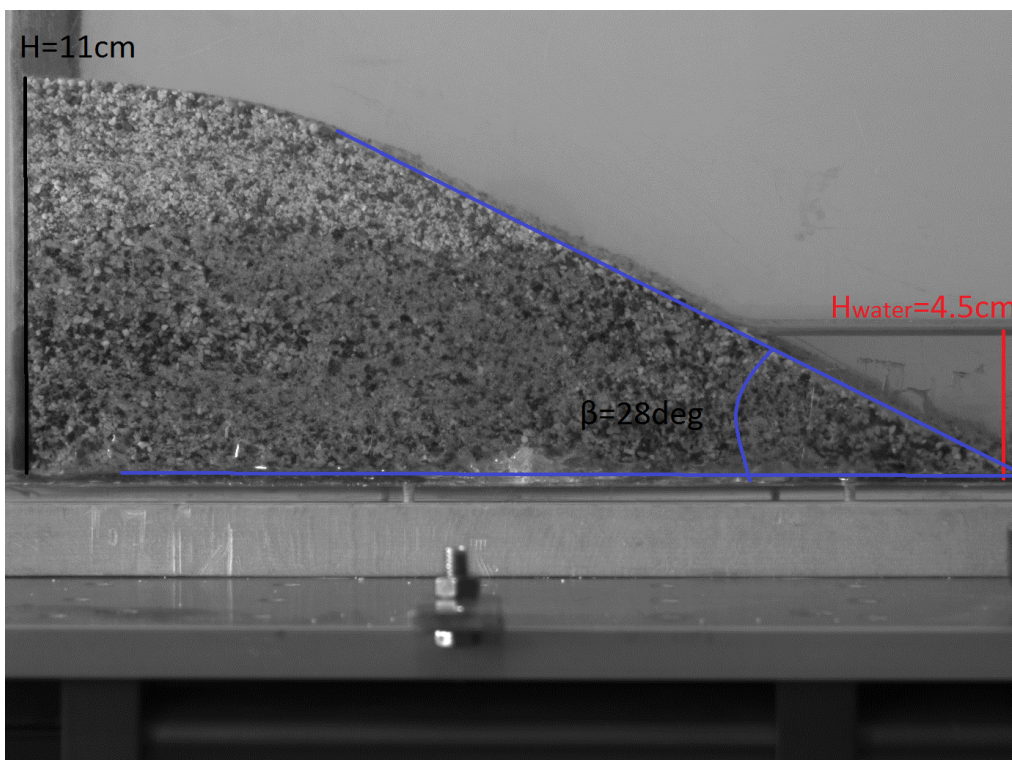
Όπως και στο geoPIV, έτσι και στο Vic-2D φαίνεται καθαρά η περιοχή της ολίσθησης των κόκκων. Η χρωματική διαβάθμιση που χρησιμοποιεί το Vic-2D, στα αποτελέσματα που εξάγει, μας δίνει μια πιο ρεαλιστική παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Εκτός από την παραπάνω δοκιμή, διεξήχθησαν και άλλες δοκιμές σε ξηρό πρανές σε μικρότερες επιταχύνσεις. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1.

### 3.4. Πείραμα 2<sup>ο</sup> : Έλεγχος της σεισμικής απόκρισης, ημιβυθισμένου πρανούς

Στην επόμενη εργαστηριακή δοκιμή, μελετήθηκε η συμπεριφορά ενός ημιβυθισμένου πρανούς, δηλαδή, ενός πρανούς που βρίσκεται κατά το ήμισυ σχεδόν μέσα στο νερό. Στην δοκιμή αυτή το μοντέλο φορτίστηκε τέσσερις φορές για να διερευνηθεί ο μηχανισμός της υποσκαφής του εδάφους από το κύμα που προκαλεί η διέγερση.

Αρχικά, διαστρώθηκε το έδαφος μέσα στο κουτί Plexiglass, ώστε η γωνία του πρανούς να είναι στις  $28^\circ$  ( $\beta=28^\circ$ ). Το ύψος του πρανούς είναι  $H=11\text{cm}$ . Τοποθετήθηκε το μοντέλο πάνω στη σεισμική τράπεζα και στη συνέχεια προστέθηκε με πολλή προσοχή το νερό.



Εικόνα 3.17: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ημιβυθισμένου πρανούς, του πειράματος 2

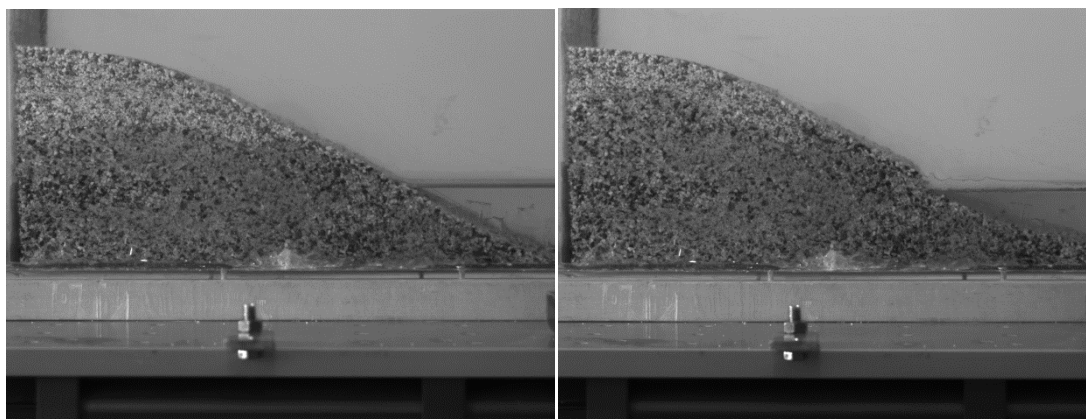
Η παραπάνω εικόνα δείχνει την αρχική κατάσταση του μοντέλου, πριν ακόμα επιβληθεί η δυναμική φόρτιση. Παρατηρούμε πολύ καθαρά, πόσο έχει ποτίσει το έδαφος και πάνω από το ύψος που βρίσκεται η στάθμη του νερού.

Αφού έγινε η απαραίτητη προεργασία, ξεκίνησε το πείραμα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ο αριθμός των φορτίσεων, η χρονική τους διάρκεια και η μέγιστη επιτάχυνση που αναπτύχθηκε:

Σεισμική Φόρτιση	Χρονική διάρκεια (sec)	Μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}$
1 <sup>η</sup>	20	0.24*g
2 <sup>η</sup>	20	0.27*g
3 <sup>η</sup>	20	0.27*g
4 <sup>η</sup>	20	0.30*g
5 <sup>η</sup>	60	0.30*g

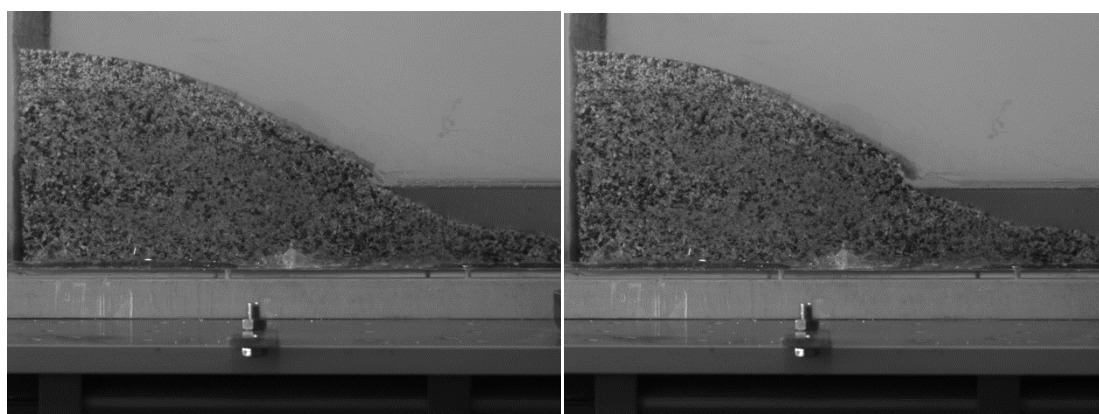
Πίνακας 3.4.1: Σεισμικές φορτίσεις και επιταχύνσεις του πειράματος 2

Ακολουθούν οι εικόνες που παρουσιάζουν την κατάσταση του πρανούς μετά από κάθε φόρτιση:



(α)

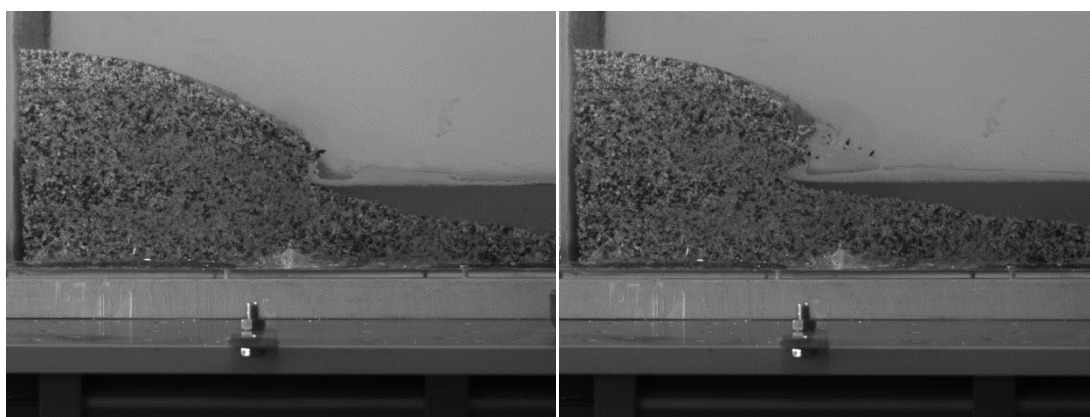
(β)



(γ)

(δ)





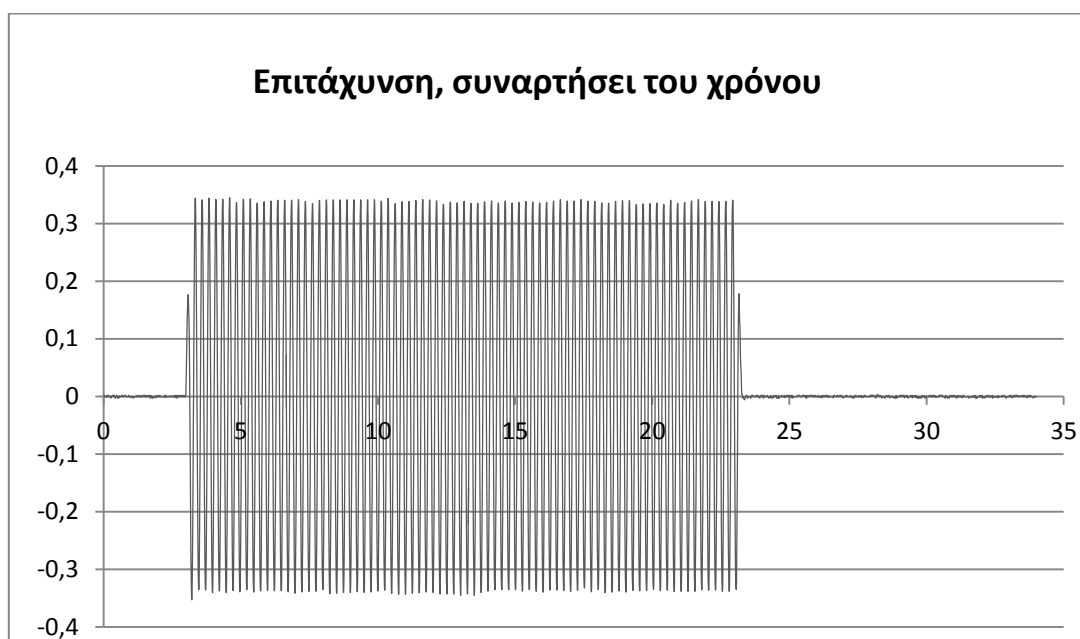
(δ)

(ε)

Εικόνα 3.18 (α), (β), (γ), (δ), (ε): Διαδοχικές φάσεις υποχώρησης του ημιβυθισμένου πρανούς λόγω δυναμικής φόρτισης

Από τις εικόνες παραπάνω, φαίνεται πόσο διαφορετικά αστοχεί ένα ημιβυθισμένο πρανές σε σχέση με το ξηρό.

Ακολουθεί το διάγραμμα που παρουσιάζει τις επιταχύνσεις που κατεγράφησαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

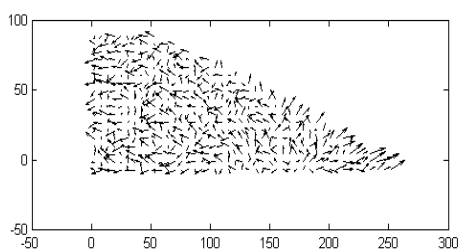


Διάγραμμα 3.4: Διάγραμμα επιταχύνσεων συναρτήσει του χρόνου, στην περίπτωση του ημιβυθισμένου πρανούς

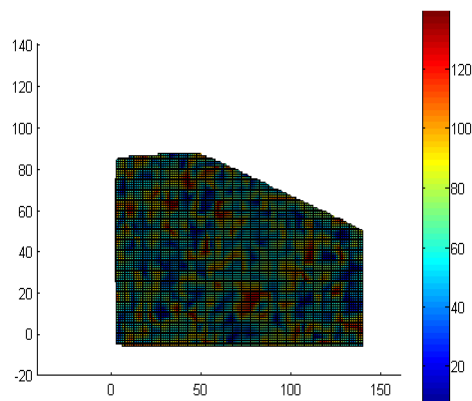
Ακολουθούν οι συσχετίσεις των εικόνων χρησιμοποιώντας τα δύο λογισμικά. Θα παρουσιαστούν δύο αναλύσεις για κάθε λογισμικό, η πρώτη θα συσχετίζει τις εικόνες διαδοχικά τη μια με την άλλη και η δεύτερη θα συσχετίζει όλες τις εικόνες με την αρχική. Από το geoPIV, εξάγονται τα διαγράμματα μετατοπίσεων και οι χάρτες contour που δείχνουν τις ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις. Από το Vic-2D, μπορούμε να εξάγουμε τις μετατοπίσεις κατά x, τις μετατοπίσεις κατά y, τις ανηγμένες παραμορφώσεις ως προς x και y και τις ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις.

## 1<sup>η</sup> Ανάλυση με το geoPIV

### Εικόνες 1-2



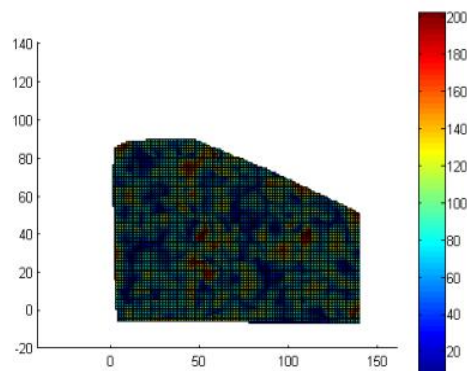
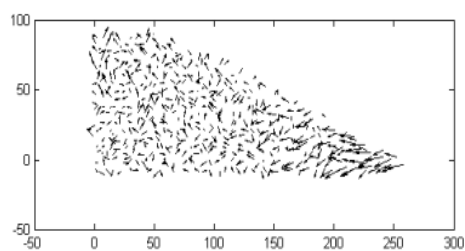
(α)



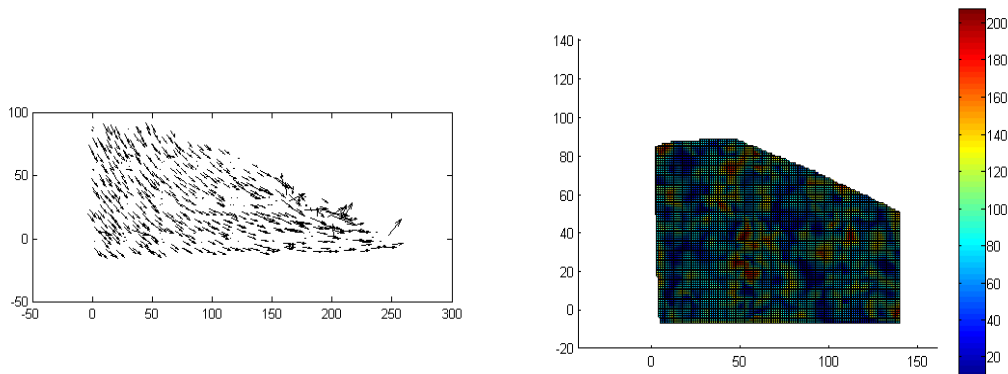
(β)

(α) Πεδίο μετατοπίσεων, (β) Ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις

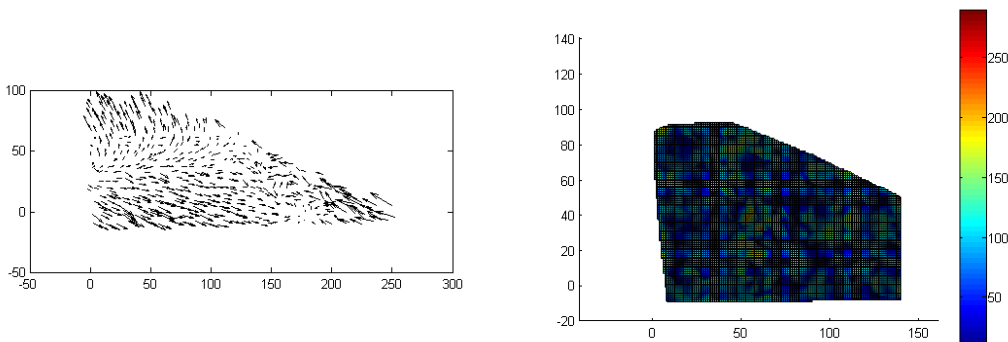
### Εικόνες 2-3



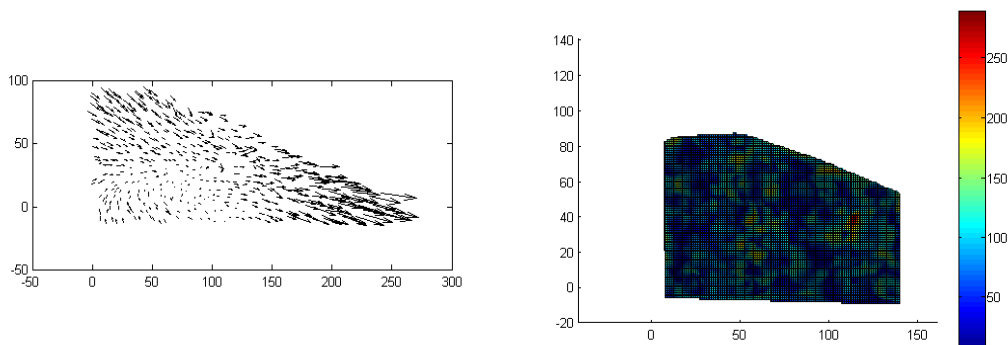
### Εικόνες 3-4



### Εικόνες 4-5

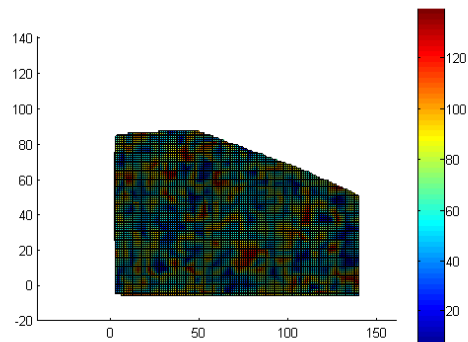
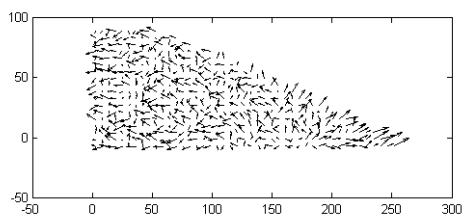


### Εικόνες 5-6

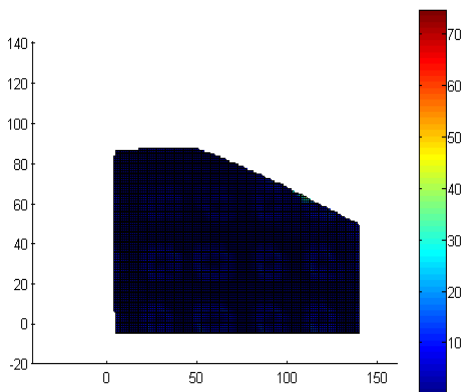
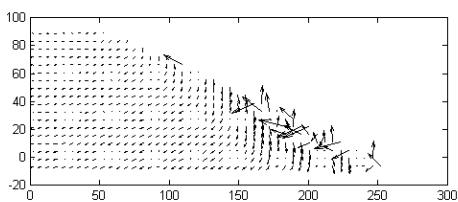


## 2<sup>η</sup> Ανάλυση με το geoPIV

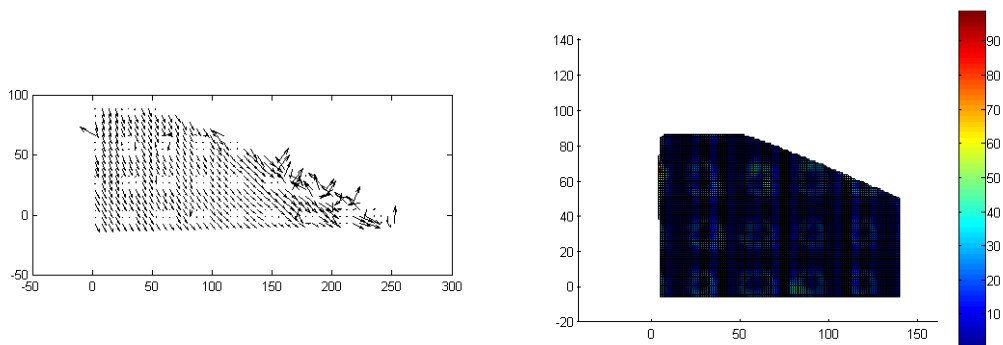
### Εικόνες 1-2



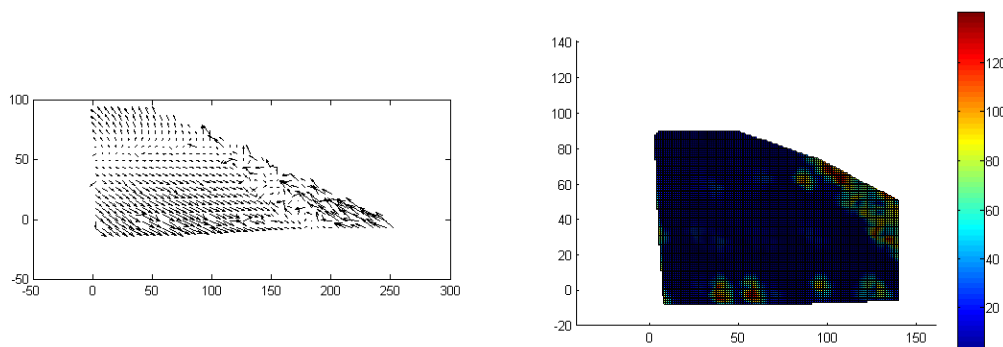
### Εικόνα 1-3



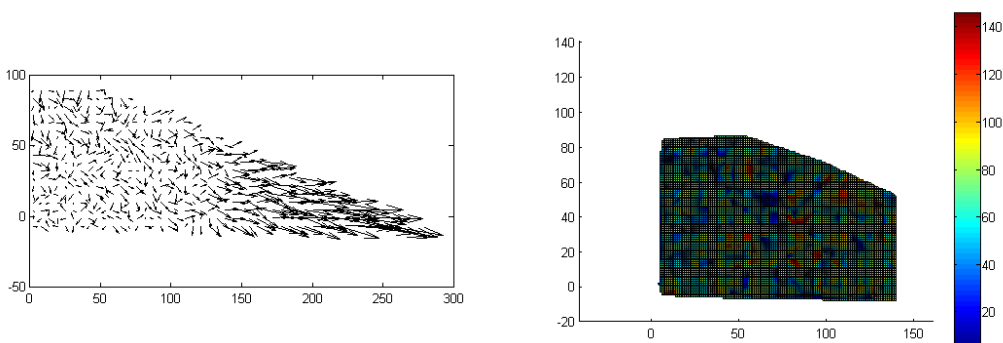
**Εικόνα 1-4**



**Εικόνες 1-5**



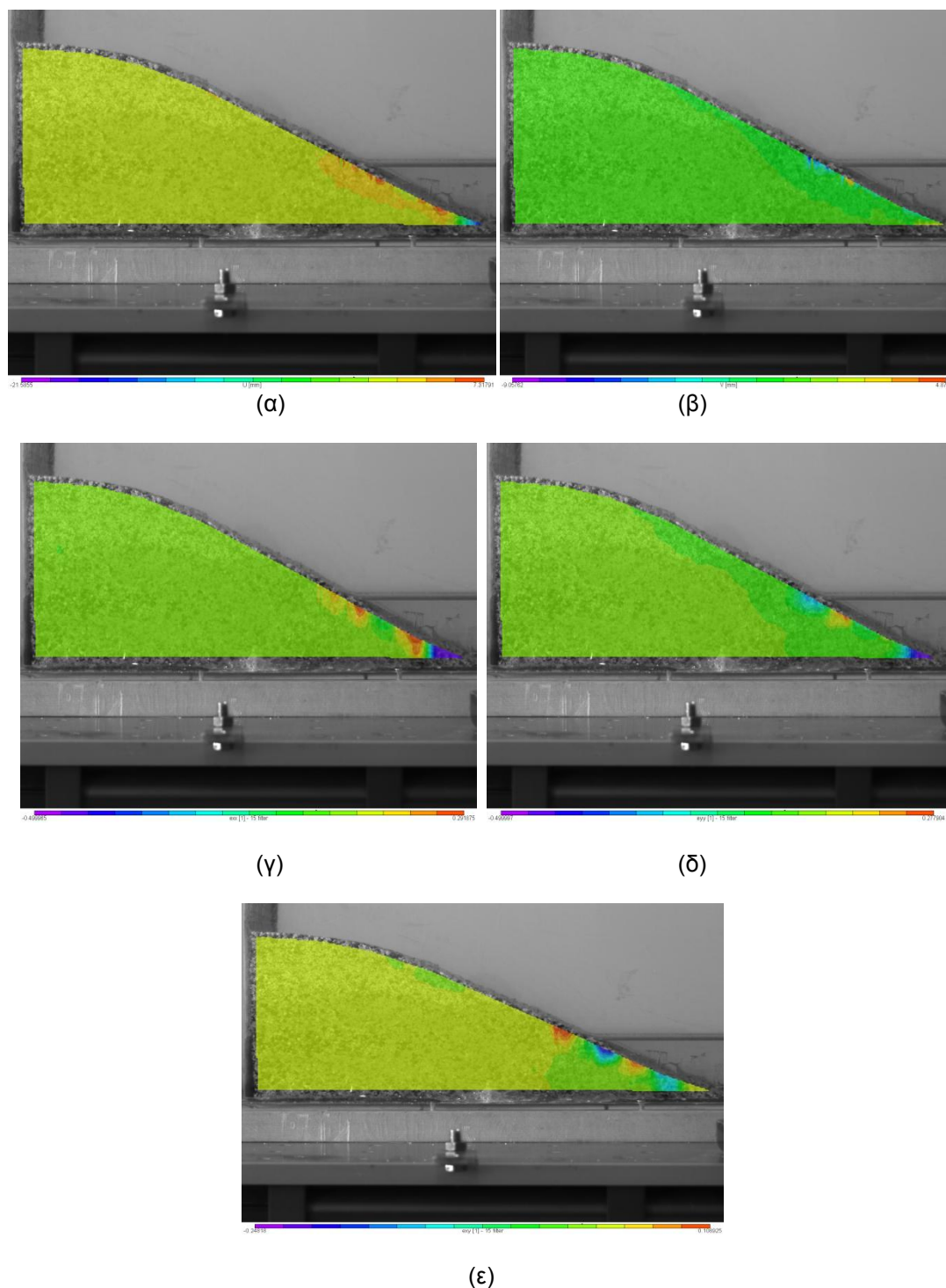
**Εικόνες 1-6**



Παρατηρώντας τις δύο παραπάνω αναλύσεις, συμπεραίνουμε ότι από την καθεμιά μπορούμε να αποκομίσουμε διαφορετική πληροφορία. Στην πρώτη ανάλυση που συγκρίνουμε διαδοχικές φάσεις της αστοχίας του πρανούς, βλέπουμε πώς εξελίσσεται σταδιακά το φαινόμενο της υποσκαφής. Από την άλλη, στη δεύτερη ανάλυση που συγκρίνουμε όλες τις φάσεις με την πρώτη και οι μετατοπίσεις είναι πολύ μεγάλες βλέπουμε ξεκάθαρα την αστοχία.

## 1<sup>η</sup> Ανάλυση με το Vic-2D

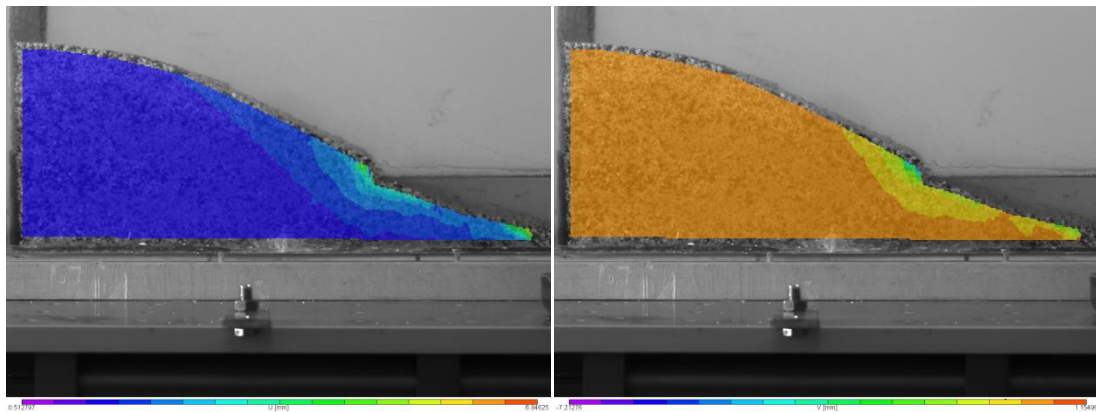
### Εικόνες 1-2



Εικόνα 3.19: (α) Μετατοπίσεις κατά  $x$  ( $U$ ), (β) Μετατοπίσεις κατά  $y$  ( $V$ ), (γ) Ανηγμένες παραμορφώσεις ως προς  $x$  ( $\epsilon_{xx}$ ), (δ) Ανηγμένες παραμορφώσεις ως προς  $y$  ( $\epsilon_{yy}$ ), (ε) Ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις ( $\epsilon_{xy}$ )

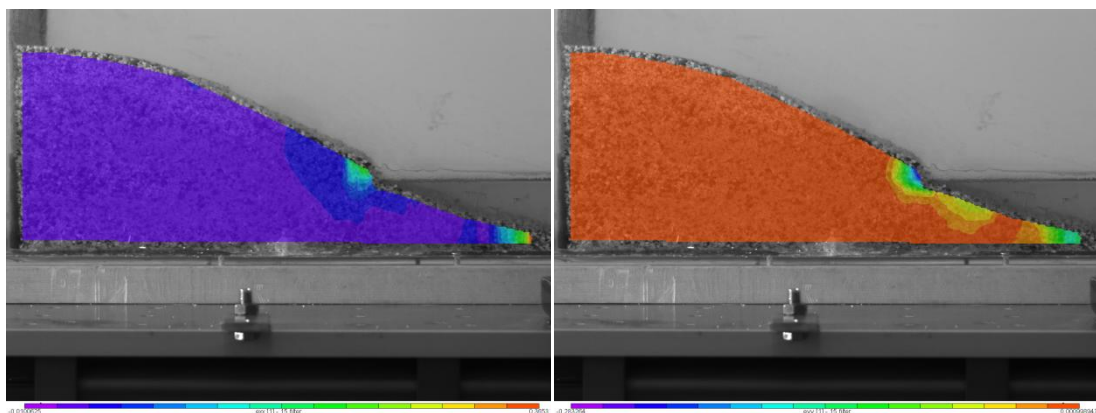


**Εικόνες 2-3**



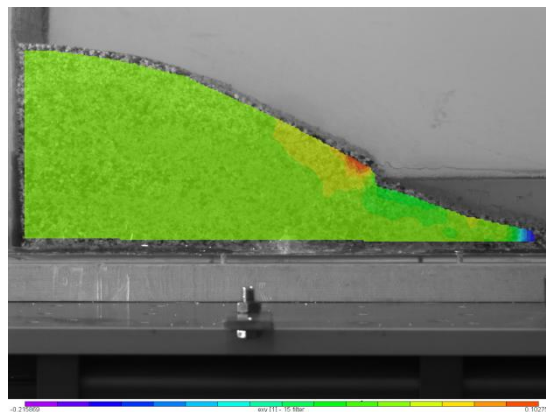
$U(mm)$

$V(mm)$



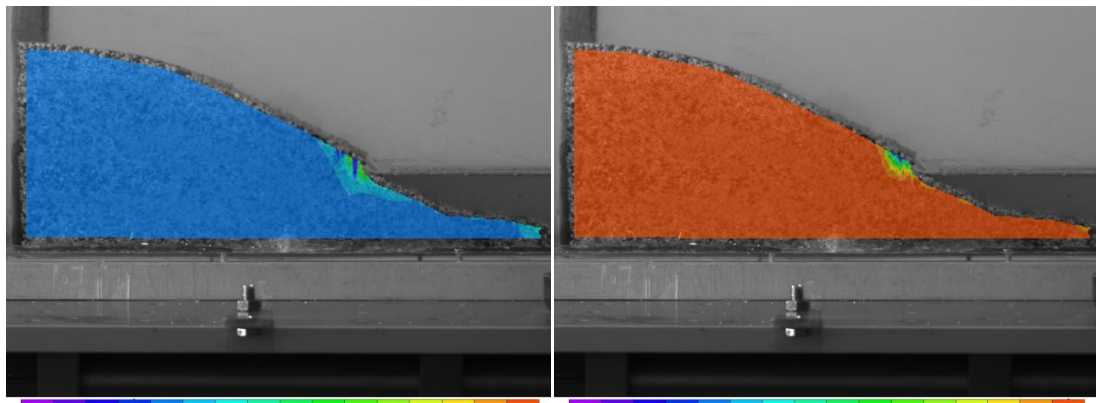
$e_{xx}$

$e_{yy}$



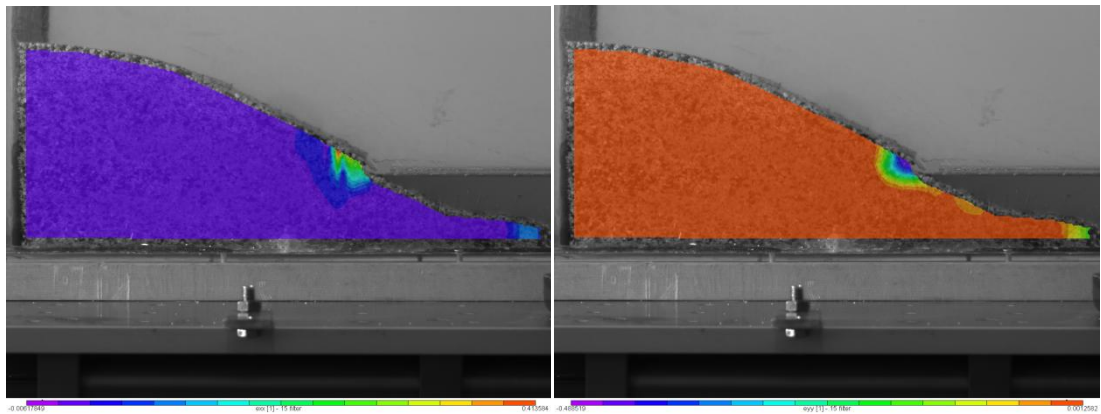
$e_{xy}$

Εικόνες 3-4



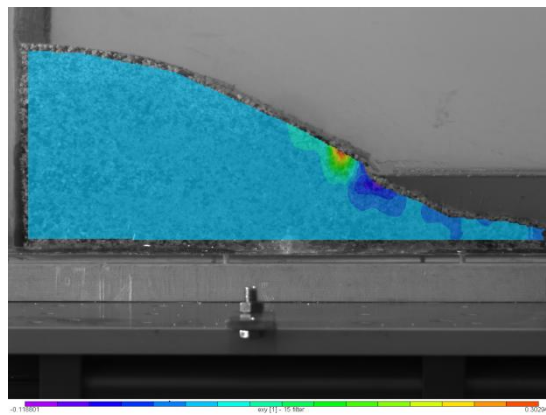
$U$ (mm)

$V$ (mm)



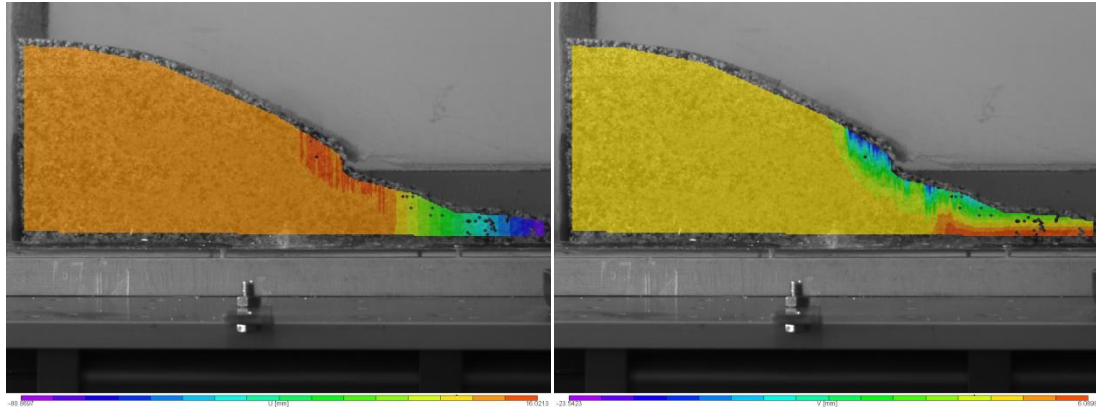
$e_{xx}$

$e_{yy}$



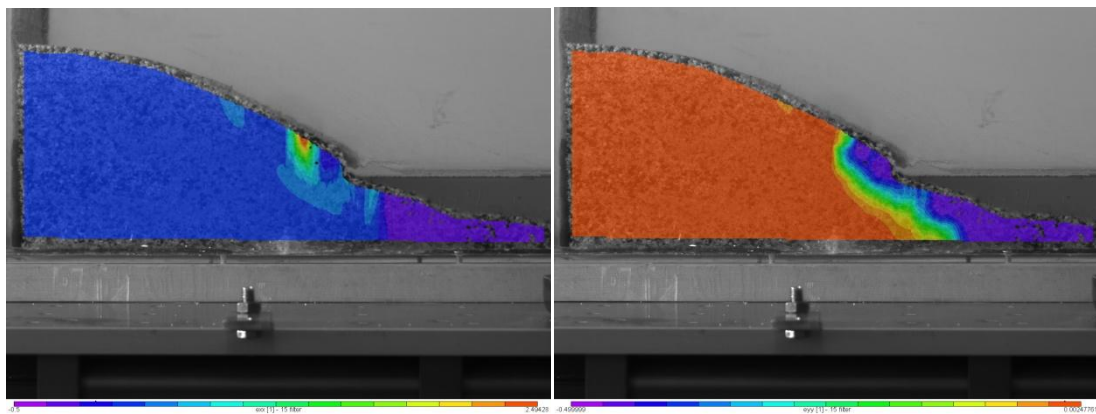
$e_{xy}$

Εικόνες 4-5



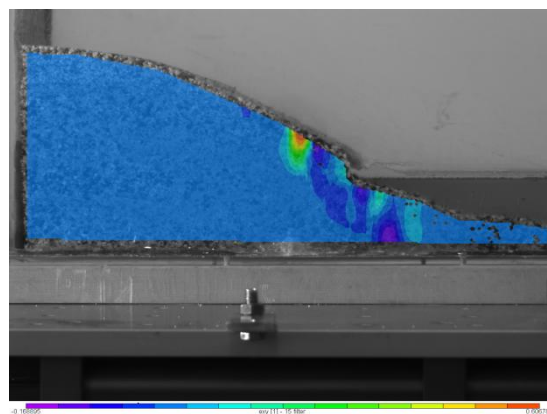
$U$ (mm)

$V$ (mm)



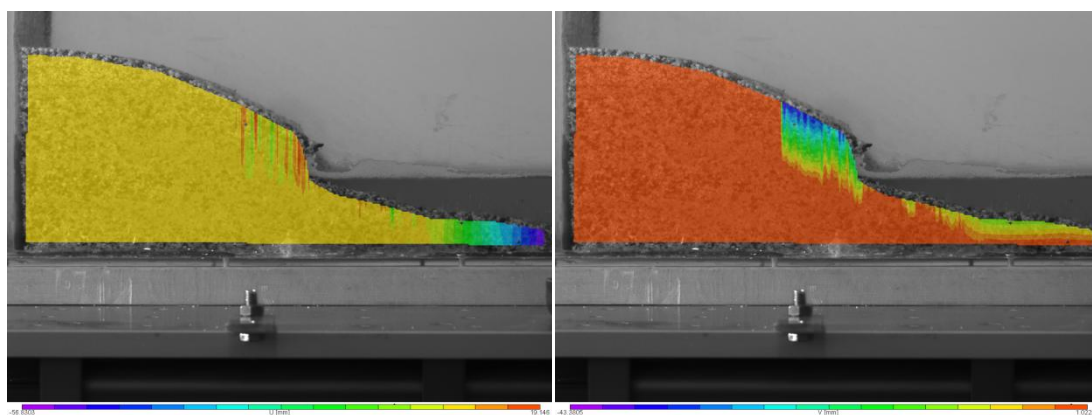
$\epsilon_{xx}$

$\epsilon_{yy}$



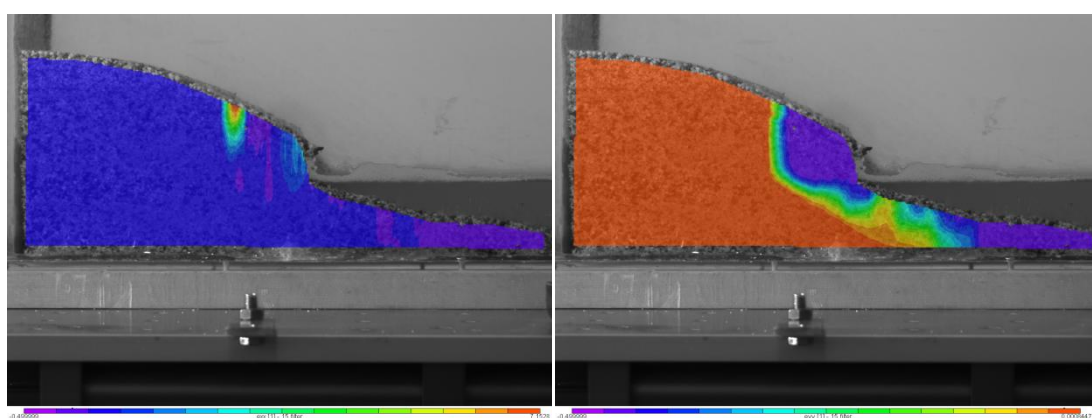
$\epsilon_{xy}$

### Εικόνες 5-6



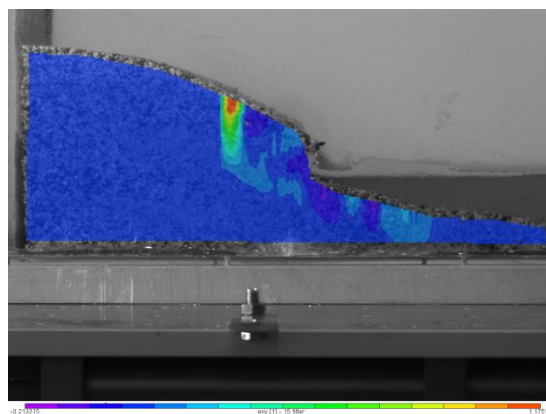
$U$ (mm)

$V$ (mm)



$e_{xx}$

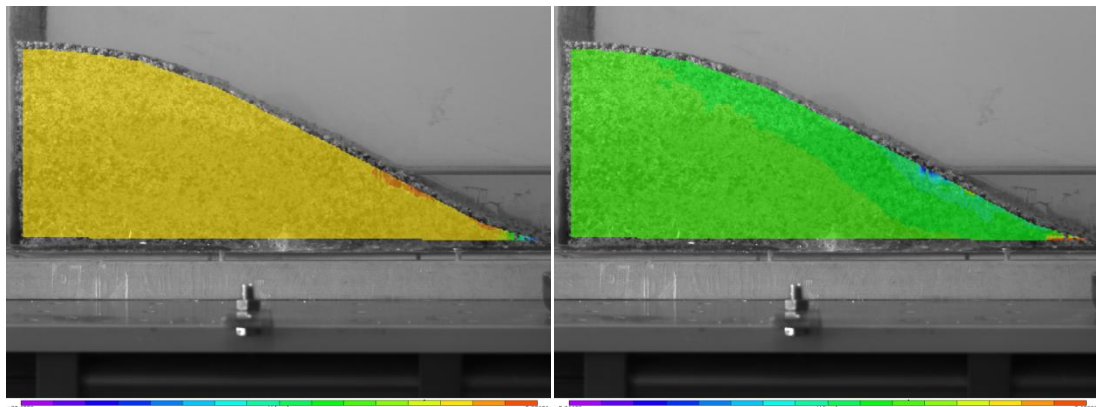
$e_{yy}$



$e_{xy}$

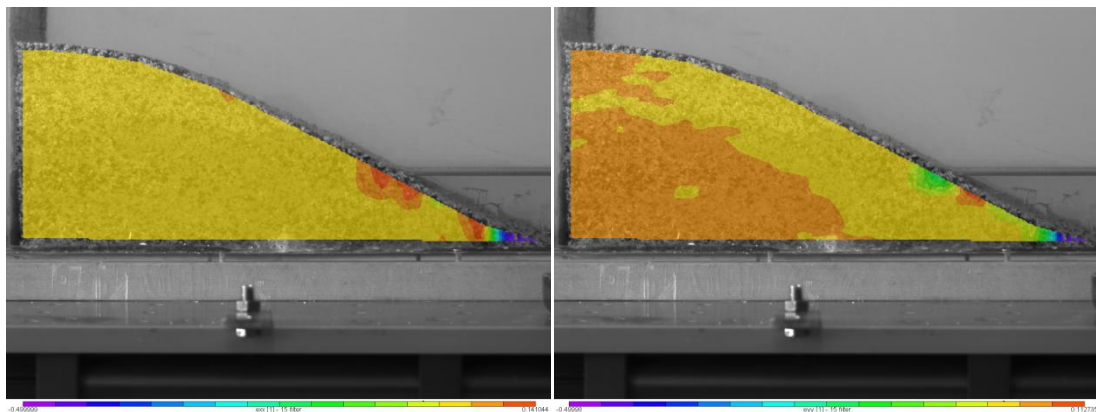
## 2<sup>η</sup> Ανάλυση με το Vic-2D

### Εικόνες 1-2



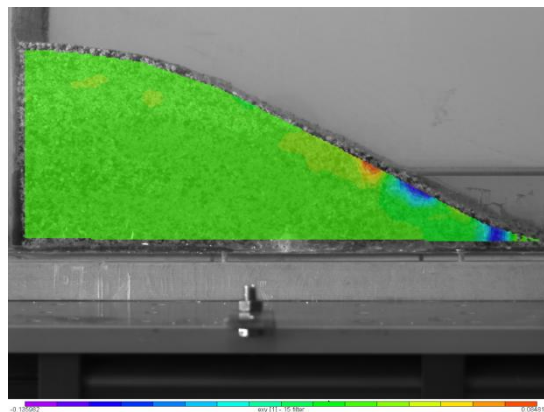
$U(mm)$

$V(mm)$



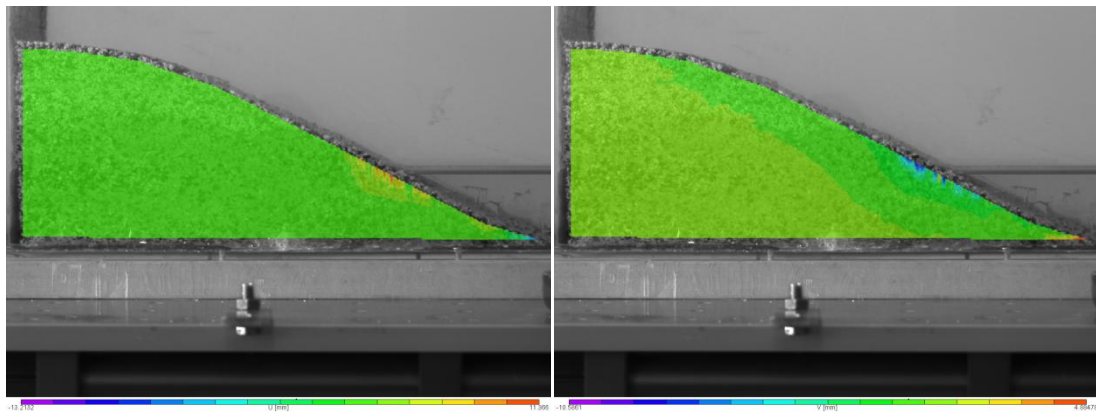
$\epsilon_{xx}$

$\epsilon_{yy}$



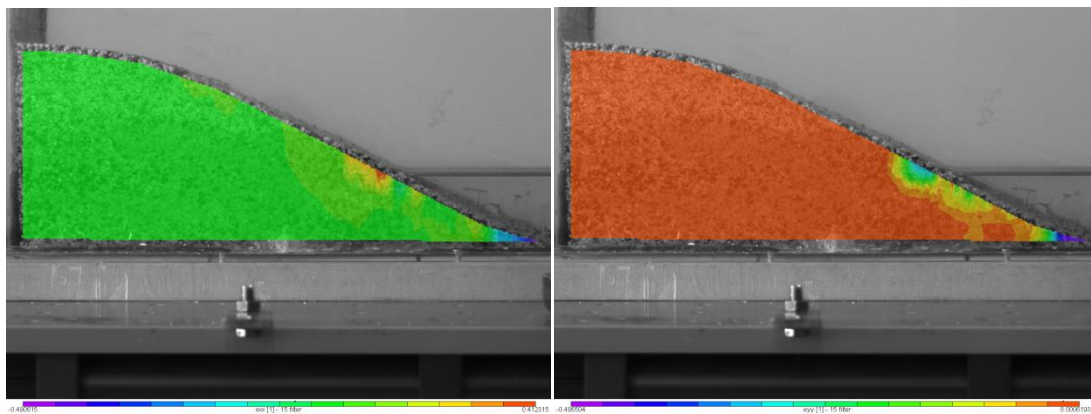
$\epsilon_{xy}$

**Εικόνες 1-3**



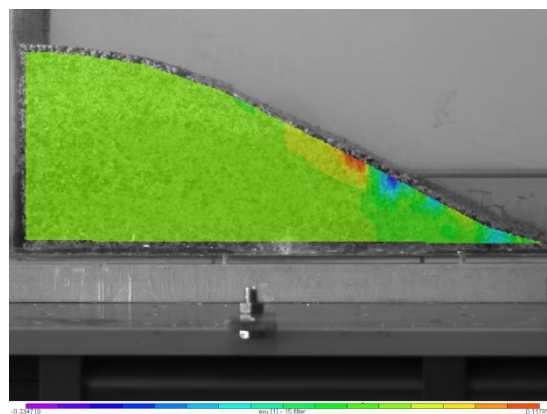
$U$ (mm)

$V$ (mm)



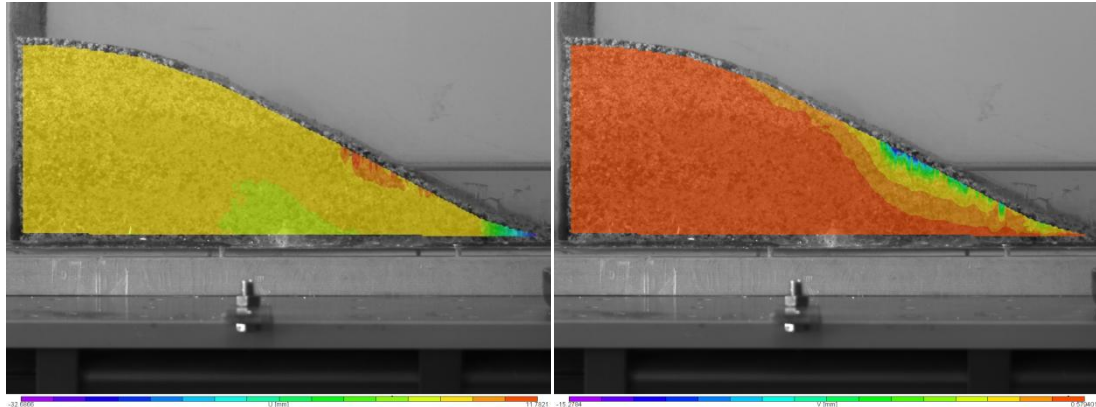
$e_{xx}$

$e_{yy}$



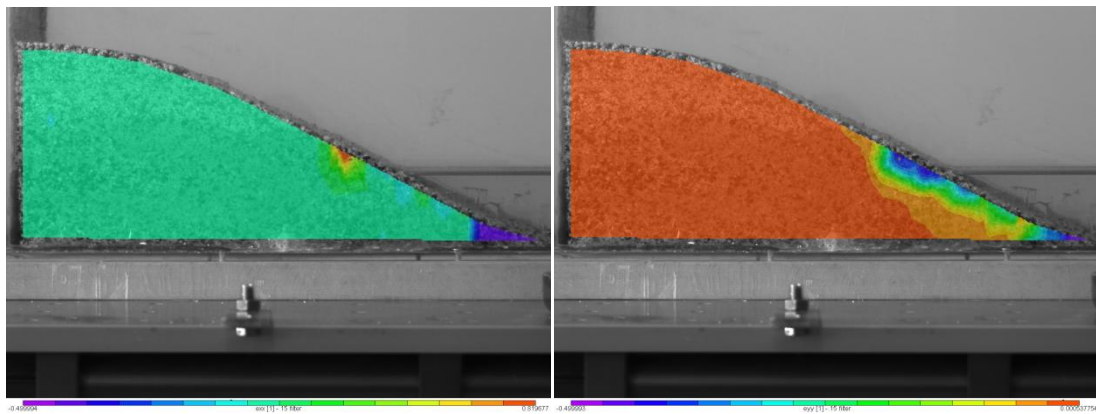
$e_{xy}$

Εικόνες 1-4



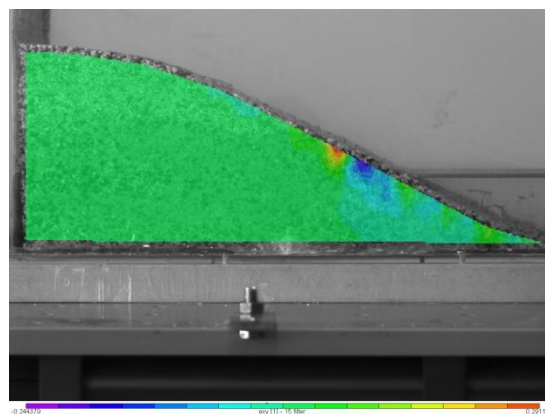
$U$ (mm)

$V$ (mm)



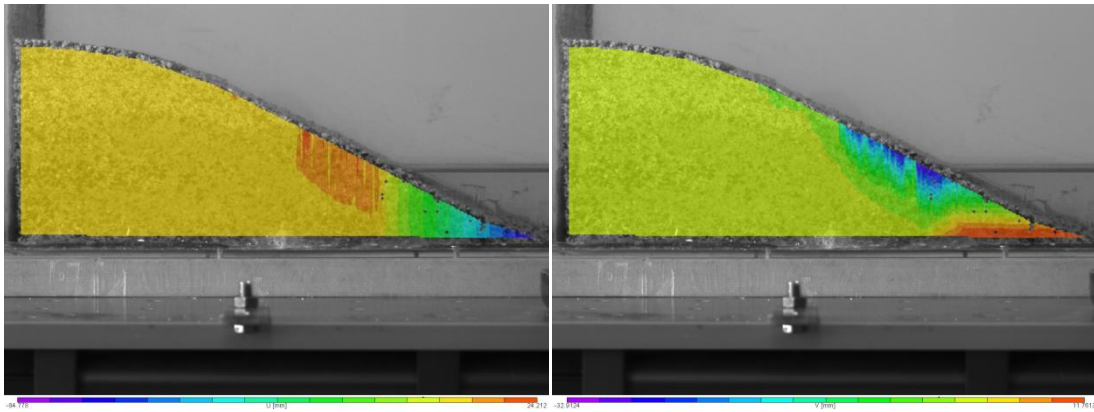
$e_{xx}$

$e_{yy}$



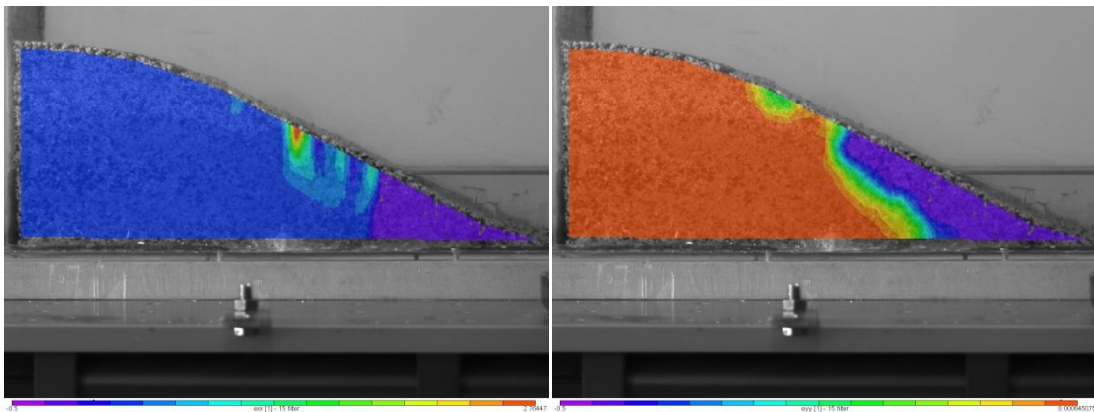
$e_{xy}$

Εικόνες 1-5



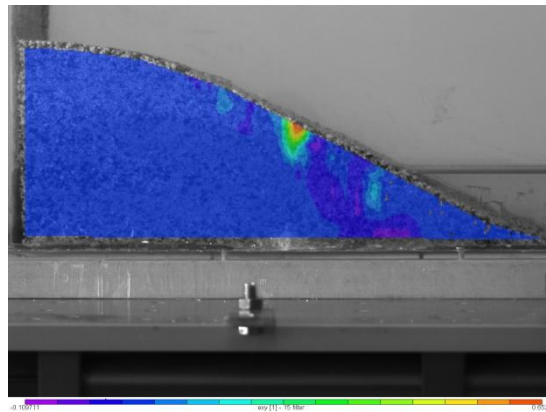
$U$ (mm)

$V$ (mm)



$e_{xx}$

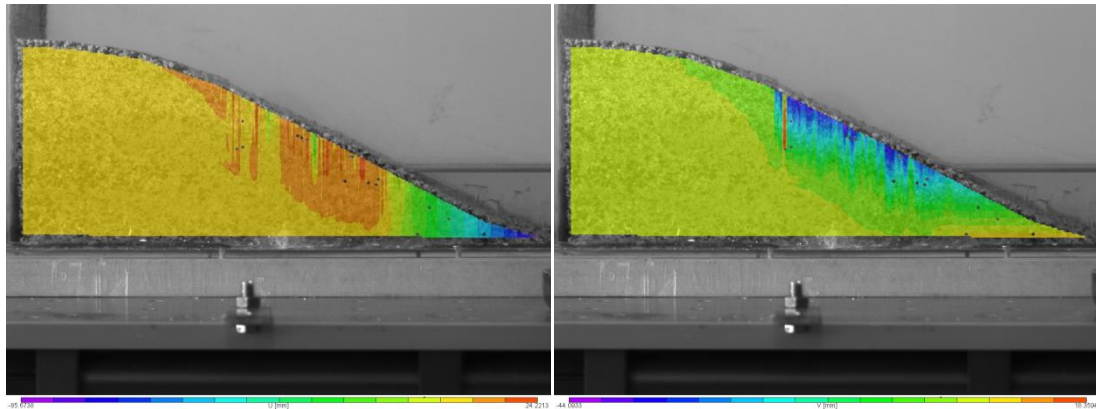
$e_{yy}$



$e_{xy}$

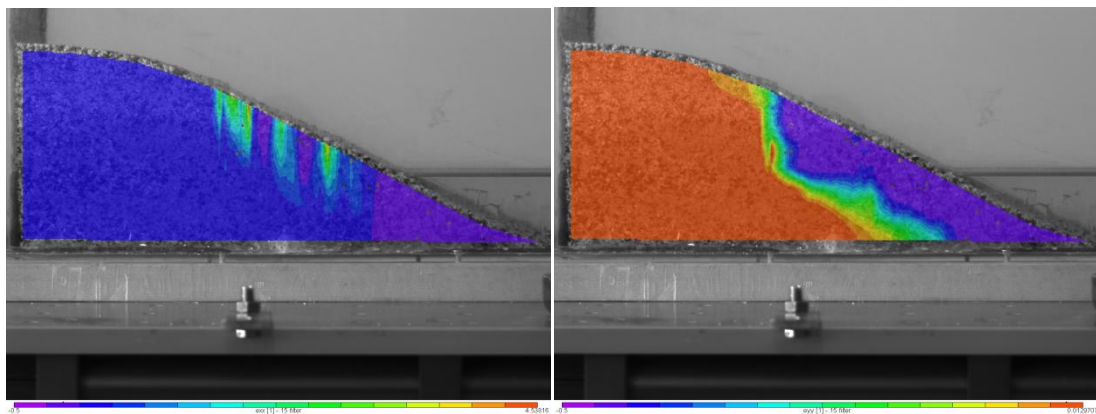


Εικόνες 1-6



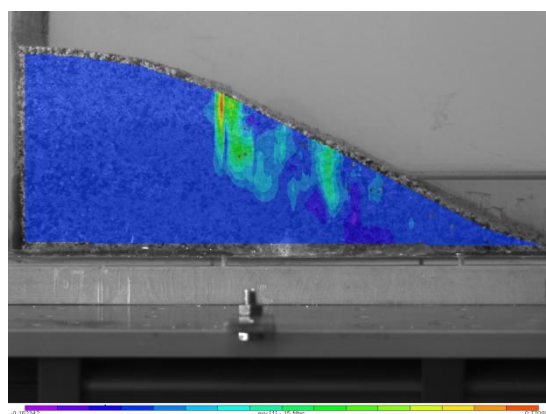
$U(mm)$

$V(mm)$



$e_{xx}$

$e_{yy}$

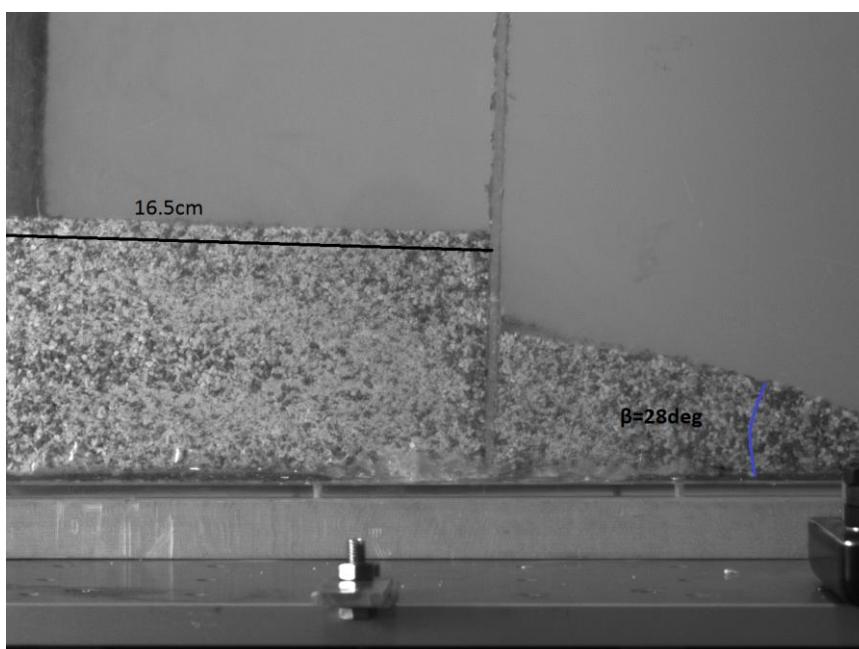


$e_{xy}$

Από τις δύο παραπάνω αναλύσεις με το λογισμικό Vic-2D, συμπεραίνουμε ότι όταν συγκρίνουμε διαδοχικά τις φάσεις της αστοχίας, μπορούμε να δούμε καλύτερα την εξέλιξη της αστοχίας, ενώ στην περίπτωση της σύγκρισης της πρώτης εικόνας με όλες τις υπόλοιπες, λόγω των μεγάλων μετατοπίσεων των κόκκων του εδάφους, υπάρχει περίπτωση να μη γίνει τόσο καλά η συσχέτιση των εικόνων. Για το λόγο αυτό σε κάποιους χάρτες contour της δεύτερης ανάλυσης, που δείχνουν τις μετατοπίσεις κατά x και y, εμφανίζονται κάποιες γραμμές κατακόρυφες που δείχνουν ότι δεν έχει γίνει καλή συσχέτιση.

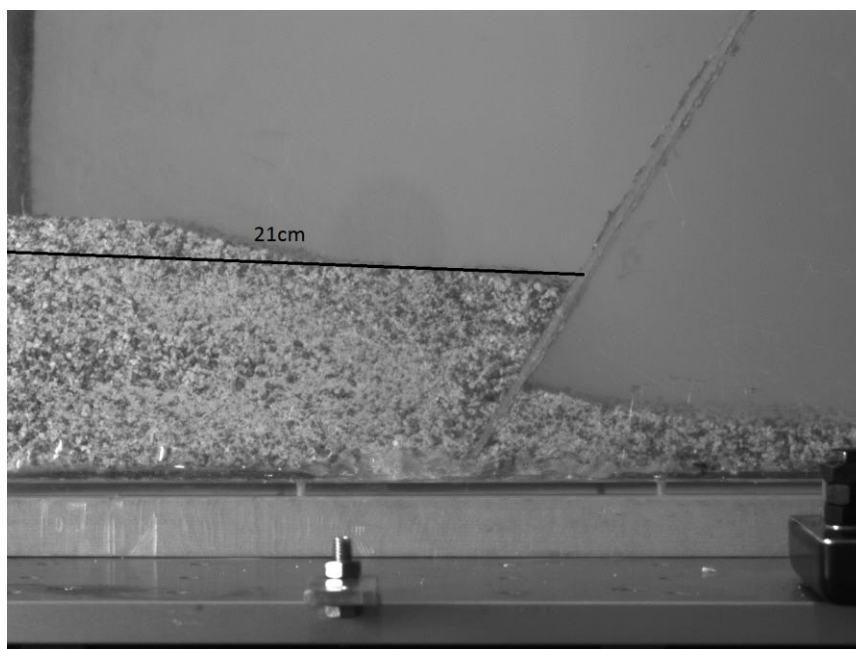
### 3.5. Πείραμα 3<sup>ο</sup> : Έλεγχος της συμπεριφοράς διαφράγματος σε σεισμική φόρτιση, σε ξηρό έδαφος

Στο επόμενο πείραμα, εξετάστηκε η συμπεριφορά διαφράγματος, που παίζει το ρόλο τοίχου αντιστήριξης για την στήριξη μιας μάζας ξηρού εδάφους. Όπως και στα προηγούμενα, πειράματα το έδαφος τοποθετήθηκε σε κουτί από Plexiglass. Το διάφραγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι και αυτό από plexiglass και έχει πάχος 3mm. Το διάφραγμα τοποθετήθηκε σε απόσταση 16.5cm από την αριστερή πλευρά του δοχείου. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε:



Εικόνα 3.20: Αρχική κατάσταση διαφράγματος

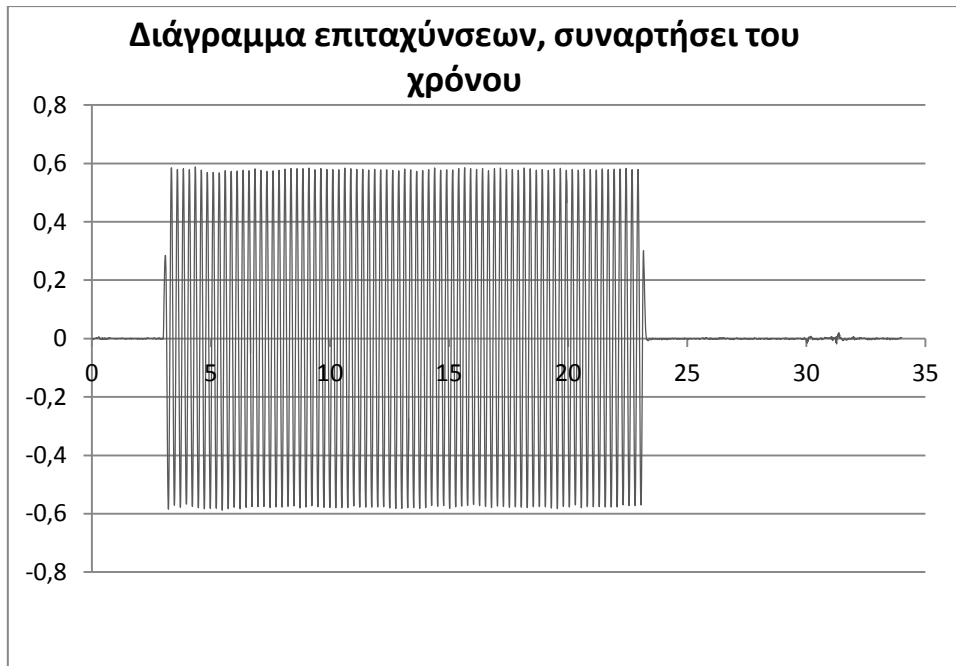
Αφού τοποθετήθηκε το μοντέλο στη σεισμική τράπεζα, το πείραμα. Το δοκίμιο φορτίστηκε για 20sec και η τελική κατάσταση του διαφράγματος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.21: Τελική κατάσταση διαφράγματος

Παρατηρούμε ότι το έδαφος αριστερά, συμπεριφέρεται ενεργητικά έναντι του τοίχου, δηλαδή, αναπτύσσονται ενεργητικές ωθήσεις γαιών, ενώ το έδαφος δεξιά υφίσταται παθητικές ωθήσεις. Η γωνία κατά την οποία έχει στραφεί το διάφραγμα μετρήθηκε ίση με  $29^\circ$ .

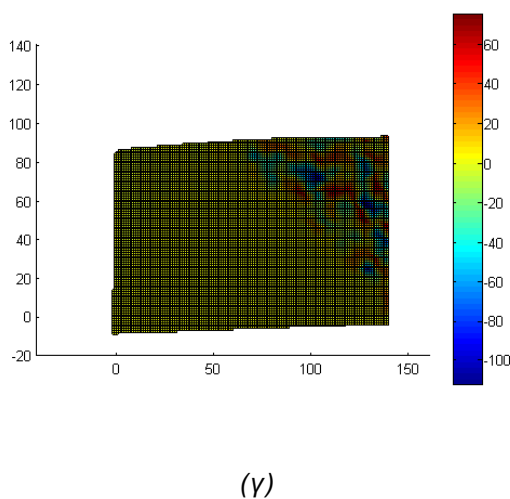
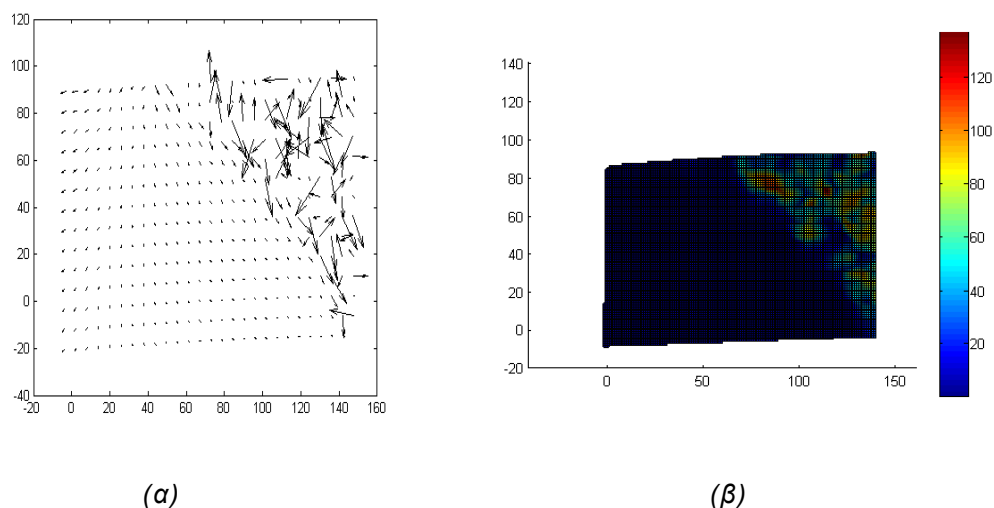
Η μέγιστη επιτάχυνση που αναπτύχθηκε είναι  $a_{\max}=4,6\text{m/s}^2=0.47\text{g}$ . Το διάγραμμα που προκύπτει από τις καταγραφές του επιταχυνσιογράφου παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 3.5: Διάγραμμα επιταχύνσεων συναρτήσει του χρόνου, στην περίπτωση του διαφράγματος σε ξηρό έδαφος

Οι δύο παραπάνω εικόνες αναλύθηκαν με τα δύο λογισμικά, το geoPIV και το Vic-2D. Στην ανάλυση με το geoPIV, μελετήθηκε η περιοχή αριστερά του διαφράγματος διότι επιλέγοντας ολόκληρη την περιοχή, αριστερά και δεξιά του διαφράγματος, η ανάλυση δεν έδινε αξιόπιστα αποτελέσματα λόγω των μεγάλων μετατοπίσεων των κόκκων. Αντίθετα, στο Vic-2D δεν αντιμετωπίστηκε αυτό το πρόβλημα. Ως εκ τούτου, εξετάστηκε ολόκληρη η περιοχή αριστερά και δεξιά του διαφράγματος. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται παρακάτω:

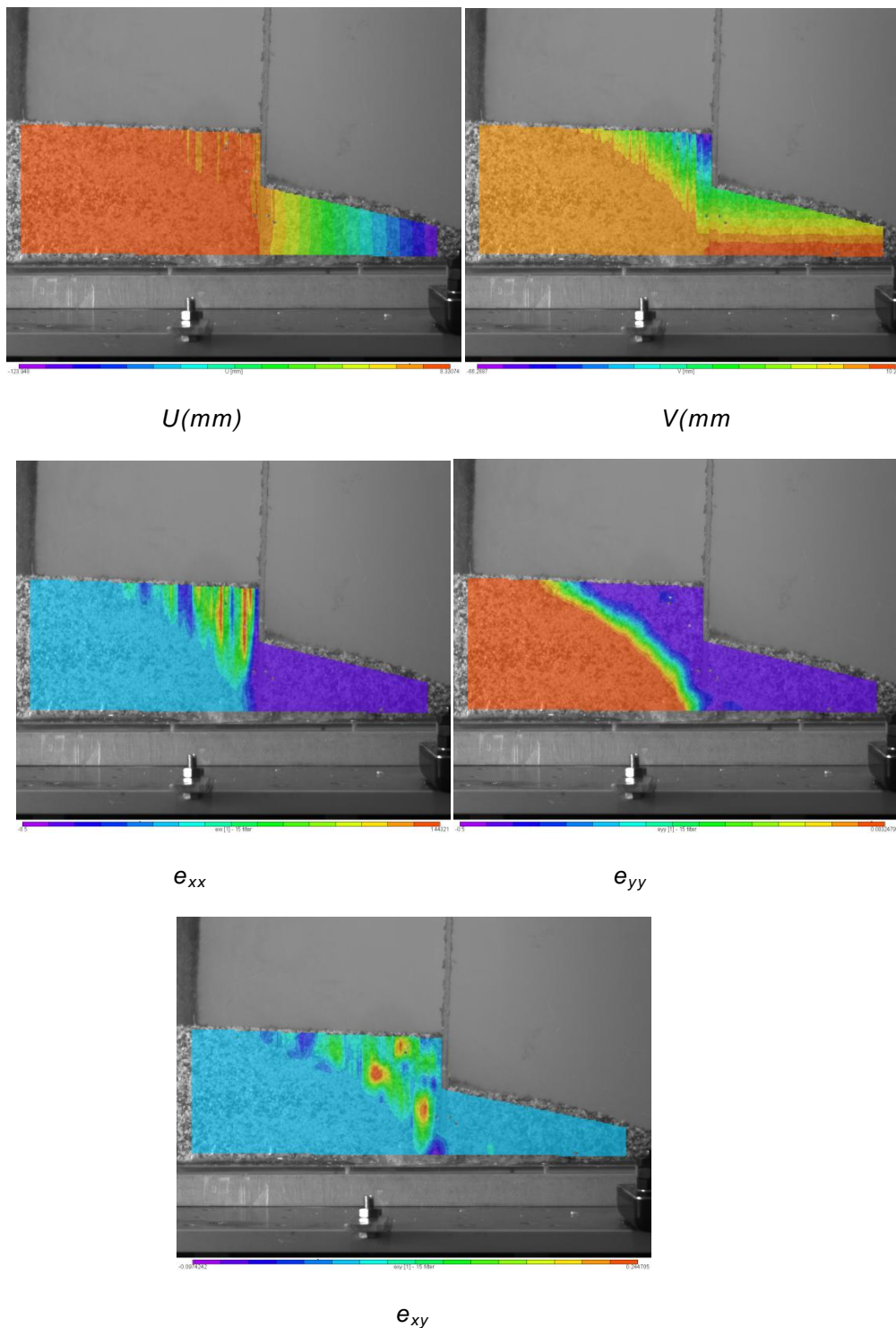
## Ανάλυση με το geoPIV



Εικόνα 3.21: (α) Πεδίο μετατοπίσεων, (β) Ανηγμένες διαμητικές παραμορφώσεις, (γ) Ογκομετρικές παραμορφώσεις

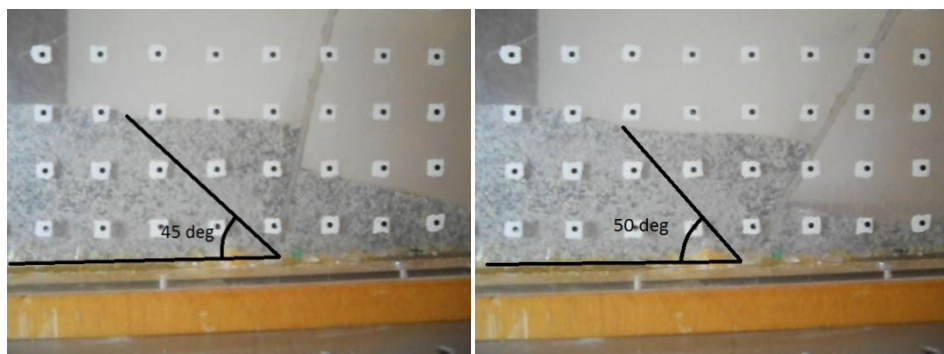
Από τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρούμε ξεκάθαρα την περιοχή της αστοχίας του εδάφους αριστερά του διαφράγματος. Πολύ ενδιαφέρον παρουσιάζει το διάγραμμα ογκομετρικής παραμόρφωσης, στο οποίο παρατηρούμε ότι στις μπλε περιοχές φαίνεται συρρίκνωση του εδάφους, το οποίο ισχύει αφού στις περιοχές αυτές ο όγκος έχει μειωθεί.

### Ανάλυση με το Vic-2D



Εικόνα 3.22: Μετατοπίσεις κατά  $x$  ( $U$ ), Μετατοπίσεις κατά  $y$  ( $V$ ), Ανηγμένες παραμορφώσεις κατά  $x$  ( $e_{xx}$ ), (δ)Ανηγμένες παραμορφώσεις κατά  $y$  ( $e_{yy}$ ), Ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις ( $e_{xy}$ )

Από την παραπάνω ανάλυση διακρίνεται η σφήνα που δημιουργείται στη βάση του τοίχου, ο οποίος έχει στραφεί, και διακρίνεται καθαρά στις παρακάτω δύο εικόνες που δείχνουν το διάφραγμα σε μια ενδιάμεση θέση (α) και στην τελική θέση (β). Η σφήνα είναι η συμπληρωματική των  $45^\circ$  και  $50^\circ$ , αντίστοιχα:



(α)

(β)

Από τις παραπάνω εικόνες φαίνεται ότι το έδαφος δείχνει να συμπεριφέρεται ενεργητικά έναντι του διαφράγματος, σύμφωνα με την θεωρία Rankine, αφού η γωνία των  $50^\circ$  πλησιάζει πιο πολύ στην ποσότητα  $(45+\phi/2) = 62,5^\circ$ .

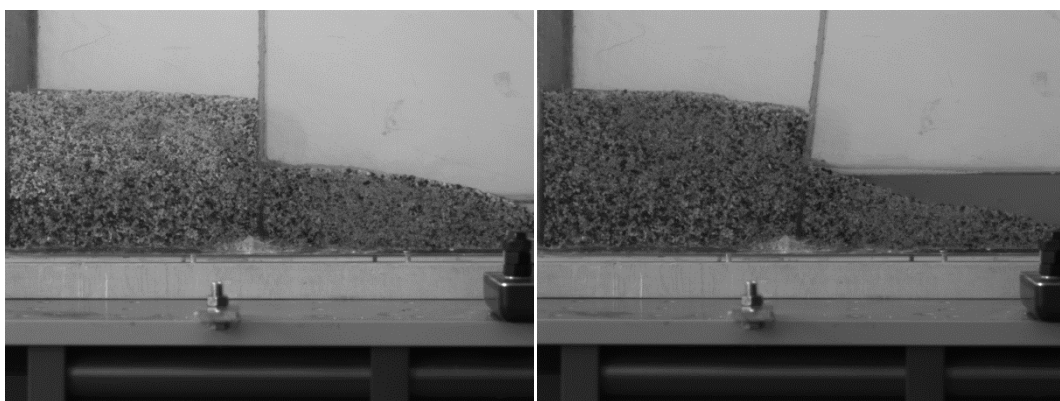
### 3.6. Πείραμα $4^\circ$ : Έλεγχος της συμπεριφοράς διαφράγματος σε σεισμική φόρτιση, παρουσία νερού

Στο παρόν πείραμα, εξετάζεται η συμπεριφορά του διαφράγματος, το οποίο συμπεριφέρεται ως τοίχος αντιστήριξης για την προστασία μιας παράκτιας περιοχής, για παράδειγμα. Το διάφραγμα είναι από plexiglass και έχει πάχος 3mm. Όπως και στα προηγούμενα πειράματα, το υλικό το οποίο είναι λεπτόκοκκη άμμος με γωνία τριβής  $\phi=35^\circ$ , τοποθετήθηκε σε κουτί plexiglass διαστάσεων 15cm×50cm, ύψους 23cm και πάχους 4mm. Το διάφραγμα τοποθετήθηκε σε απόσταση 14,25cm από την αριστερή πλευρά του διαφράγματος. Αριστερά και δεξιά του διαφράγματος υπάρχει έδαφος. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η αρχική κατάσταση του διαφράγματος και η τελική μετά τις διαδοχικές φορτίσεις. Το ύψος του νερού αρχικά ήταν περίπου στο  $1/3$  του ύψους του όπισθεν κομματιού του εδάφους. Μετά την πρώτη φόρτιση προστέθηκε επιπλέον ποσότητα νερού περίπου στο  $1/2$  του ύψους του εδάφους. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην αριστερή εικόνα που δείχνει την αρχική κατάσταση, το έδαφος έχει ποτίσει και αριστερά του διαφράγματος σχεδόν σε όλη την επιφάνεια του πριν αρχίσει η σεισμική φόρτιση. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ο αριθμός των φορτίσεων, η χρονική διάρκεια καθεμιάς από αυτές και η μέγιστη επιτάχυνση που αναπτύχθηκε:

“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”

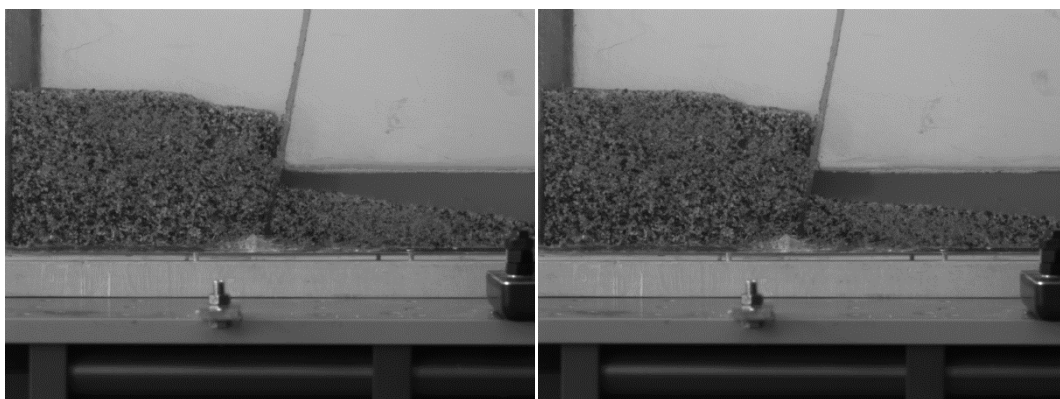
Σεισμική Φόρτιση	Χρονική διάρκεια (sec)	Μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}$
1 <sup>η</sup>	20	0.30*g
2 <sup>η</sup>	20+20=40	0.364*g
3 <sup>η</sup>	20	0.362*g
4 <sup>η</sup>	20	0.424*g
5 <sup>η</sup>	20	0.424*g
6 <sup>η</sup>	20	0.424*g

Πίνακας 3.4.2: Σεισμικές φορτίσεις και επιταχύνσεις



(α)

(β)

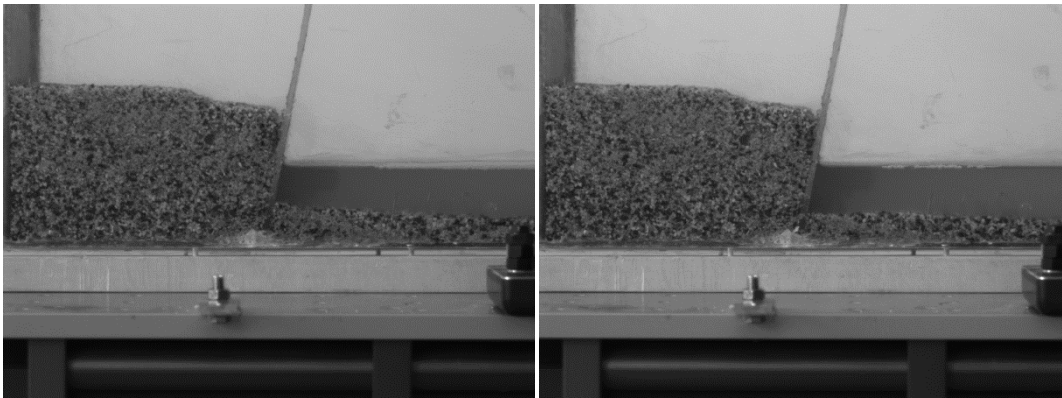


(γ)

(δ)

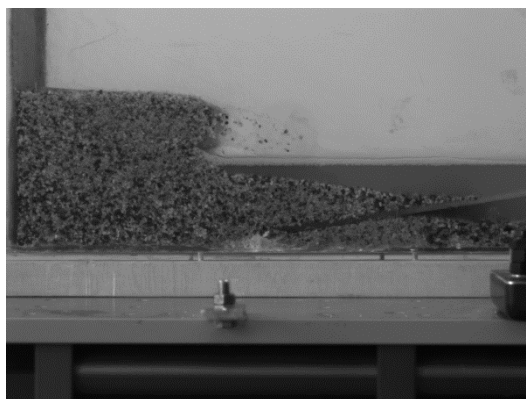


“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρηνών κοκκώδους εδάφους”



(ε)

(στ)



(ζ)

Εικόνες 3.23(α),(β),(γ),(δ),(ε),(στ),(ζ): Διαδοχικές φάσεις αστοχίας του διαφράγματος

Η γωνία κατά την οποία έχει στραφεί το διάγραμμα πριν ανατραπεί μετρήθηκε ίση με  $10^\circ$ . Το διάγραμμα που παρουσιάζει τις επιταχύνσεις συναρτήσει του χρόνου φαίνεται παρακάτω:



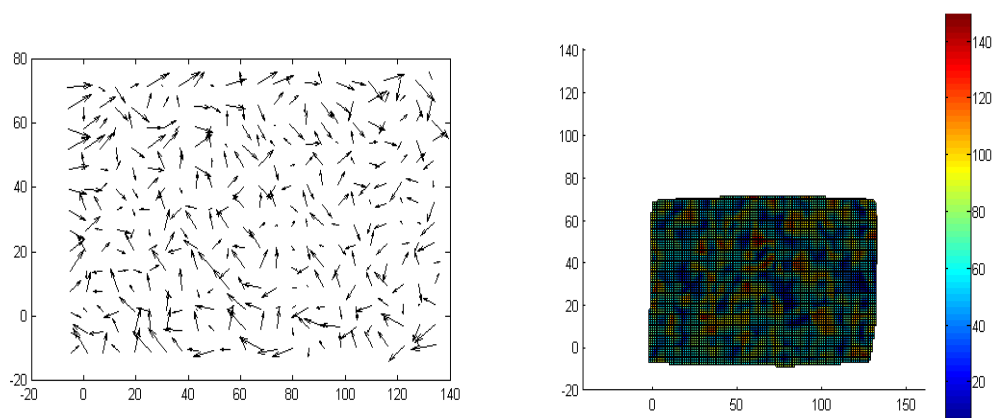
Διάγραμμα 3.6: Διάγραμμα επιταχύνσεων συναρτήσει του χρόνου, στην περίπτωση του διαφράγματος παρουσία νερού

Όπως και στα προηγούμενα, πρόκειται για ένα ημιτονοειδές σήμα με περίοδο 0,25sec.

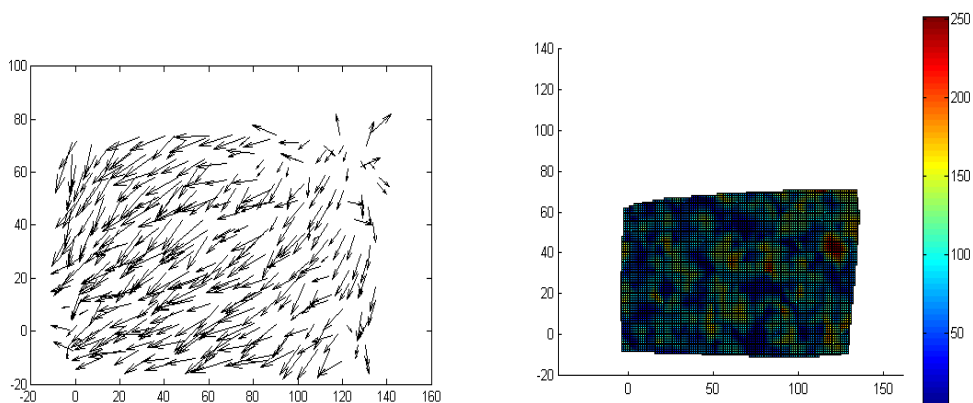
Αφού διεξήχθη το πείραμα και κατεγράφησαν οι εικόνες και τα βίντεο, ακολουθεί η επεξεργασία με τις δύο μεθόδους (PIV & DIC). Και οι δύο μέθοδοι δίνουν τη δυνατότητα συσχέτισης είτε όλων των εικόνων με την αρχική ή διαδοχικά τη μία με την άλλη. Η καθεμιά επεξεργασία δίνει διαφορετική πληροφορία, αλλά στην πρώτη περίπτωση όπου οι παραμορφώσεις είναι πολύ μεγάλες υπάρχει ο κίνδυνος μη καλής συσχέτισης (ιδιαίτερα στο Vic-2D) των εικόνων. Γι' αυτό προτιμάται η σύγκριση διαδοχικών εικόνων. Παρακάτω φαίνονται και οι δύο τρόποι για κάθε μέθοδο.

## Μέθοδος PIV – 1<sup>η</sup> Ανάλυση

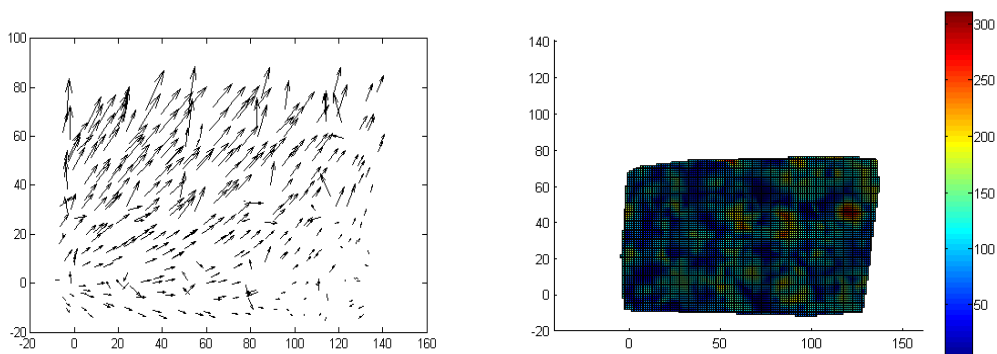
### Εικόνες 1-2



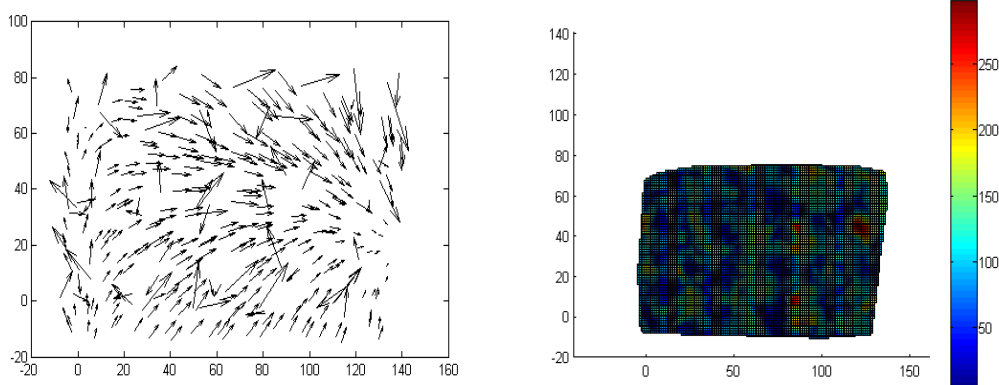
### Εικόνες 2-3



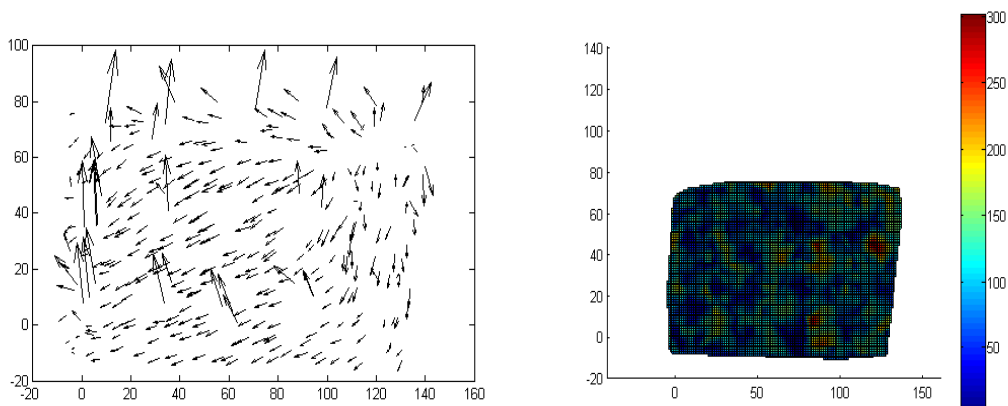
### Εικόνες 3-4



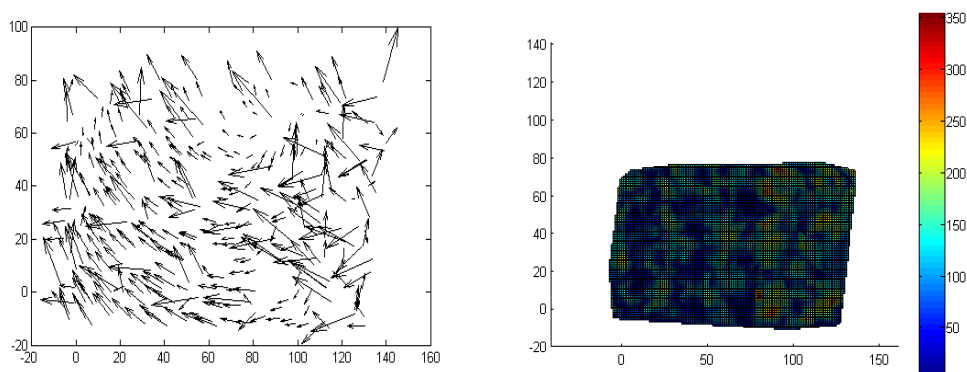
### Εικόνες 4-5



### Εικόνες 5-6



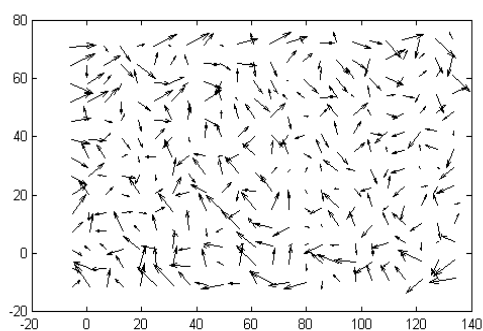
### Εικόνες 6-7



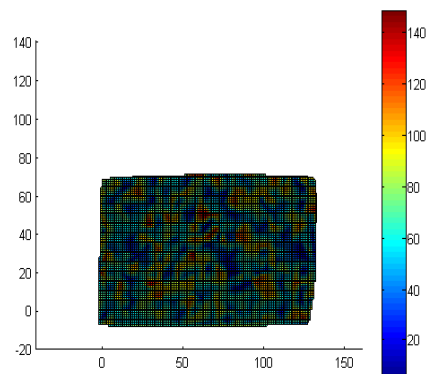
## Μέθοδος PIV- Ανάλυση 2<sup>η</sup>

### Εικόνες 1-2

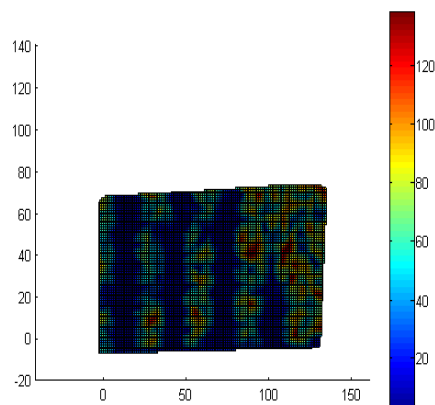
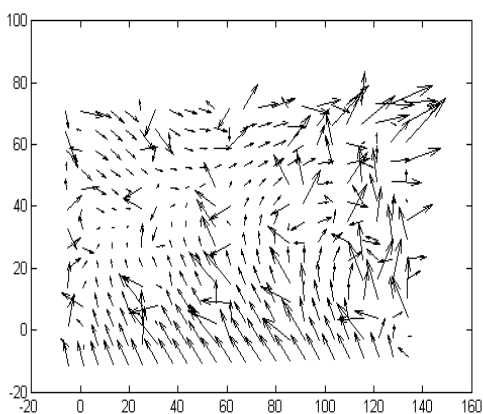
#### Μετατοπίσεις



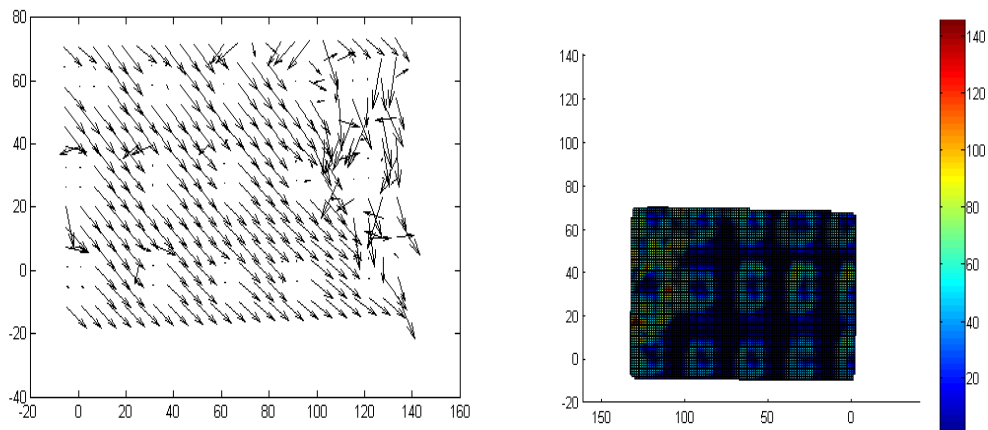
#### Διατμητικές παραμορφώσεις



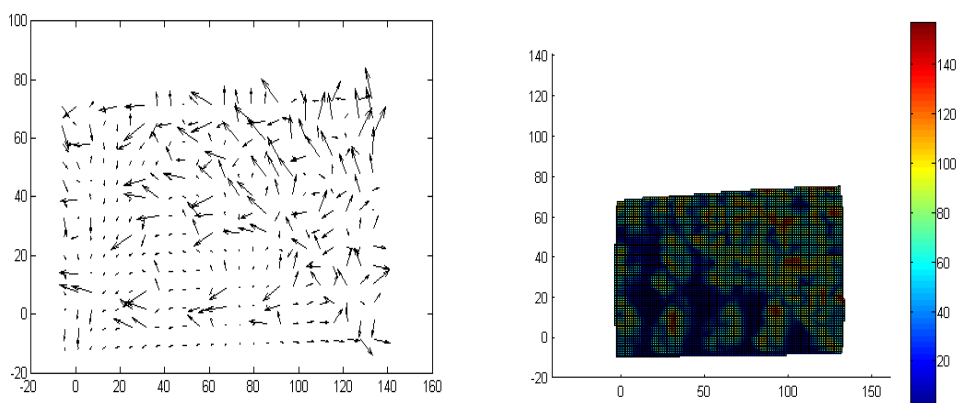
### Εικόνες 1-3



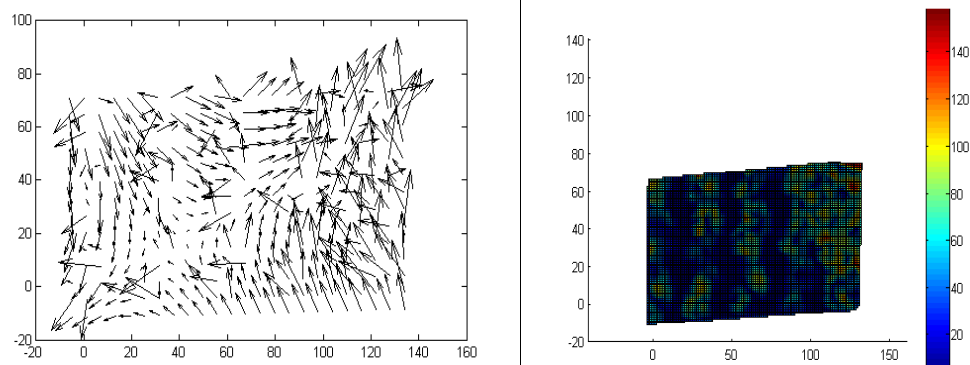
### Εικόνες 1-4



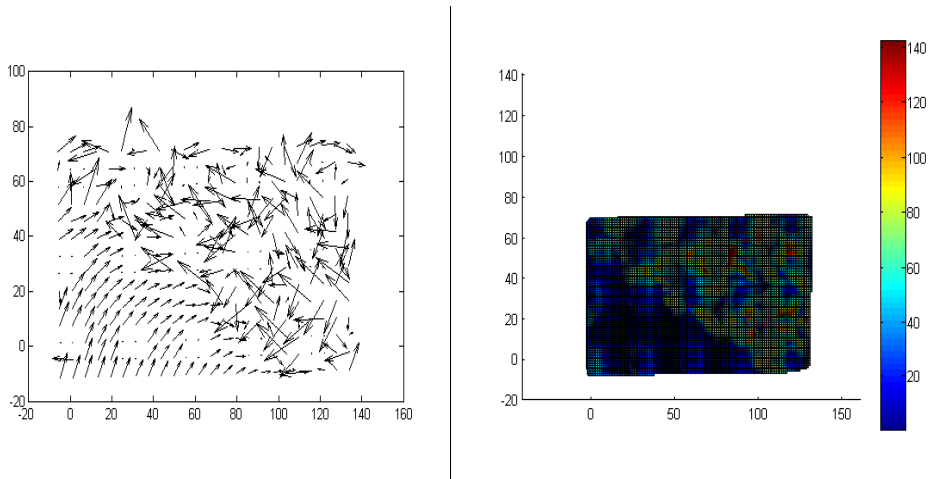
### Εικόνες 1-5



### Εικόνες 1-6

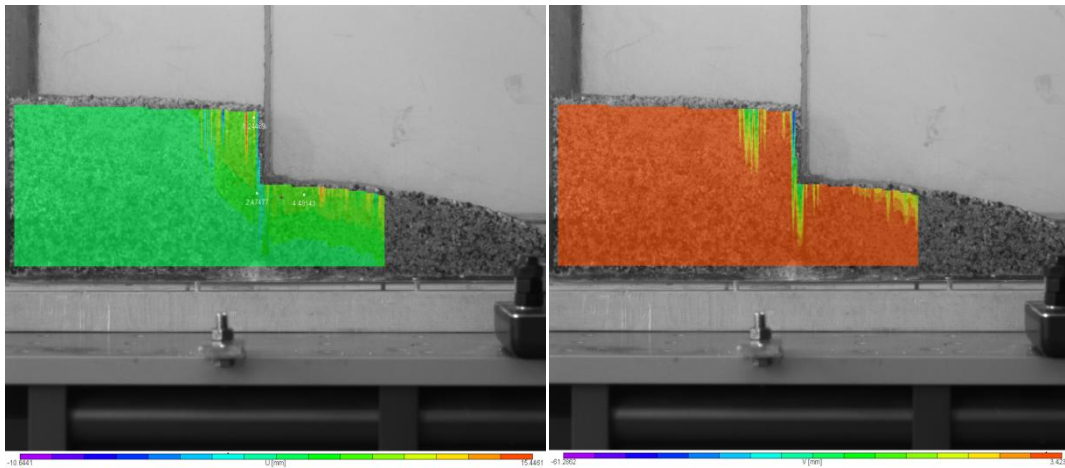


## Εικόνες 1-7



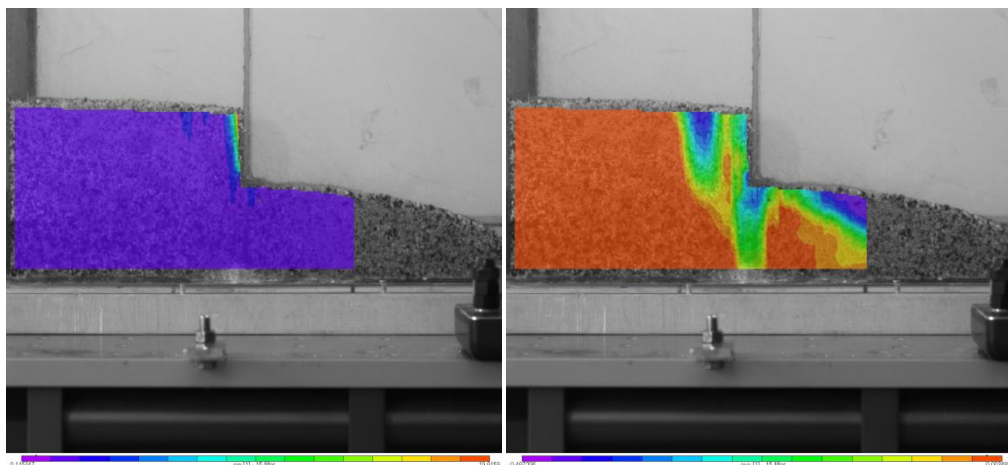
## Μέθοδος DIC (Vic-2D) – Ανάλυση 1<sup>η</sup>

### Εικόνες 1-2



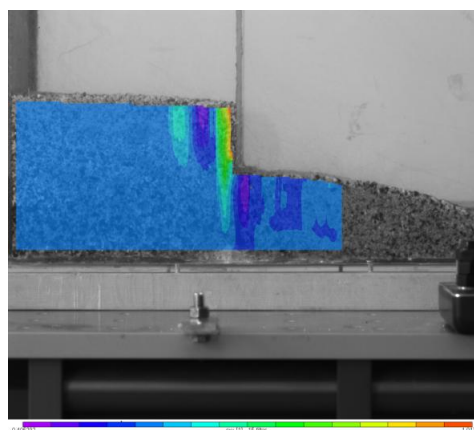
(U)

(V)



( $\epsilon_{xx}$ )

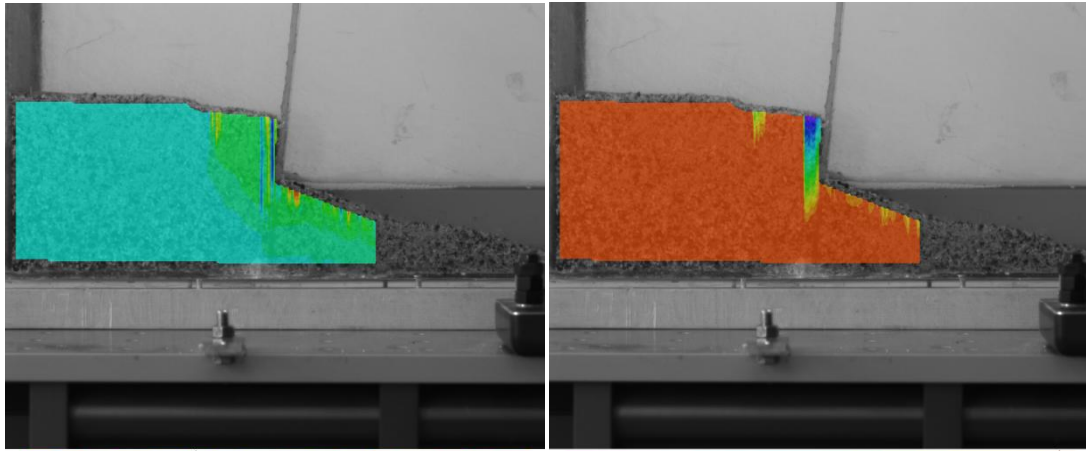
( $\epsilon_{yy}$ )



( $\epsilon_{xy}$ )

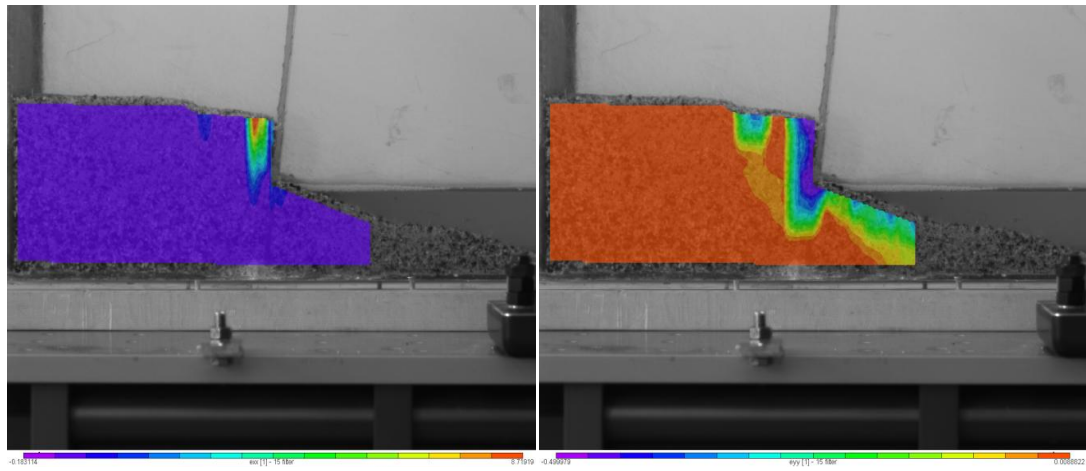


Εικόνες 2-3



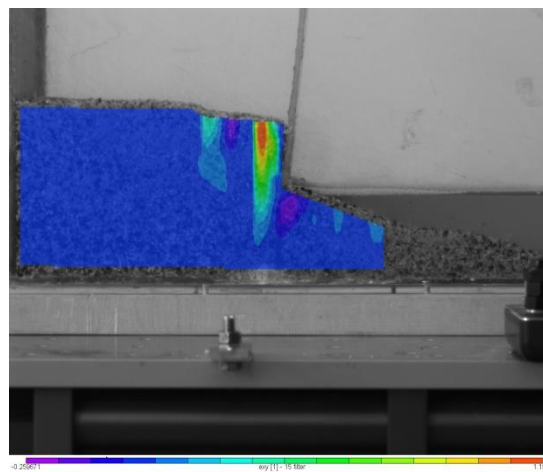
(U)

(V)



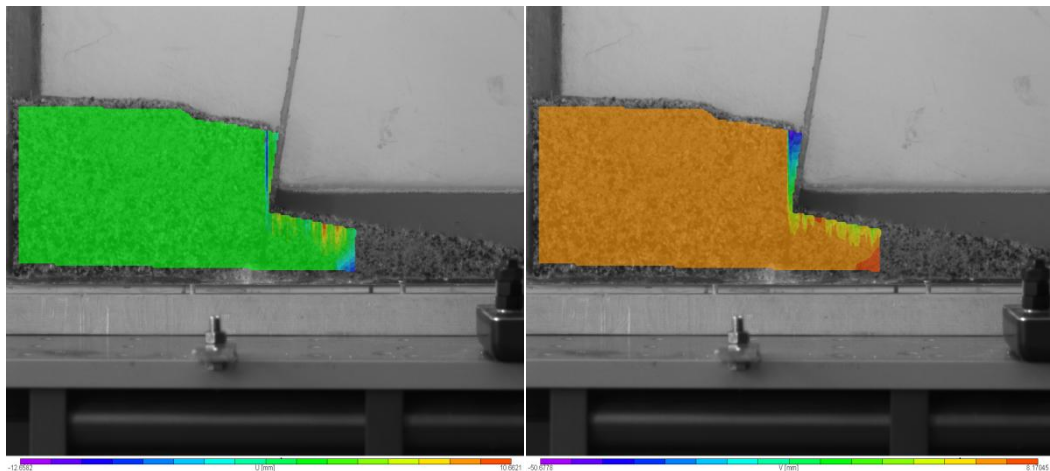
( $e_{xx}$ )

( $e_{yy}$ )



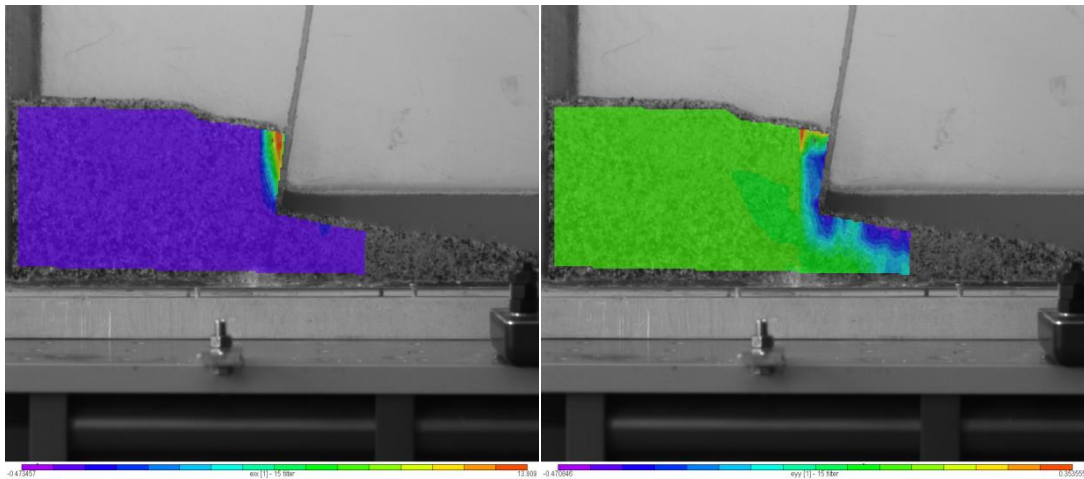
( $e_{xy}$ )

Εικόνες 3-4



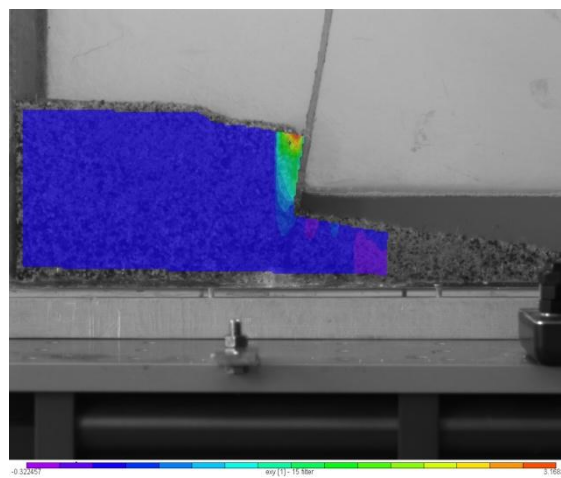
(U)

(V)



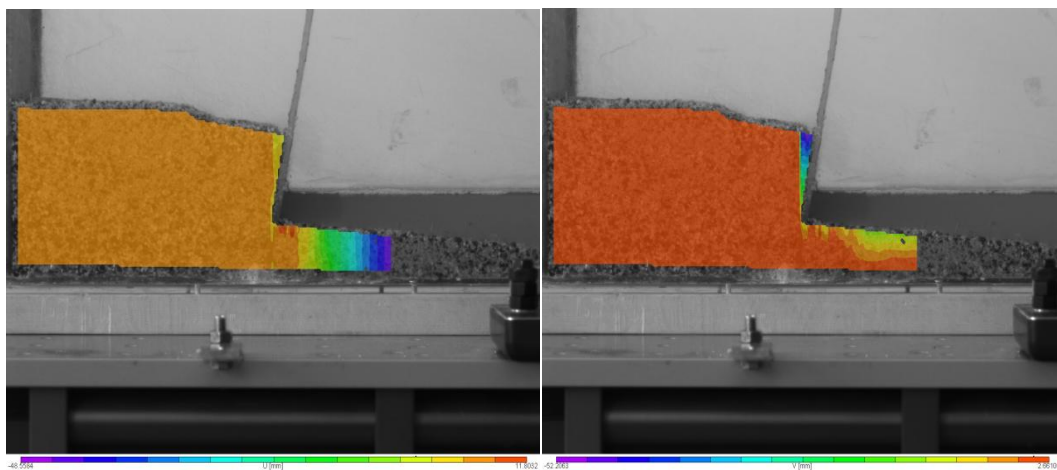
( $\epsilon_{xx}$ )

( $\epsilon_{yy}$ )



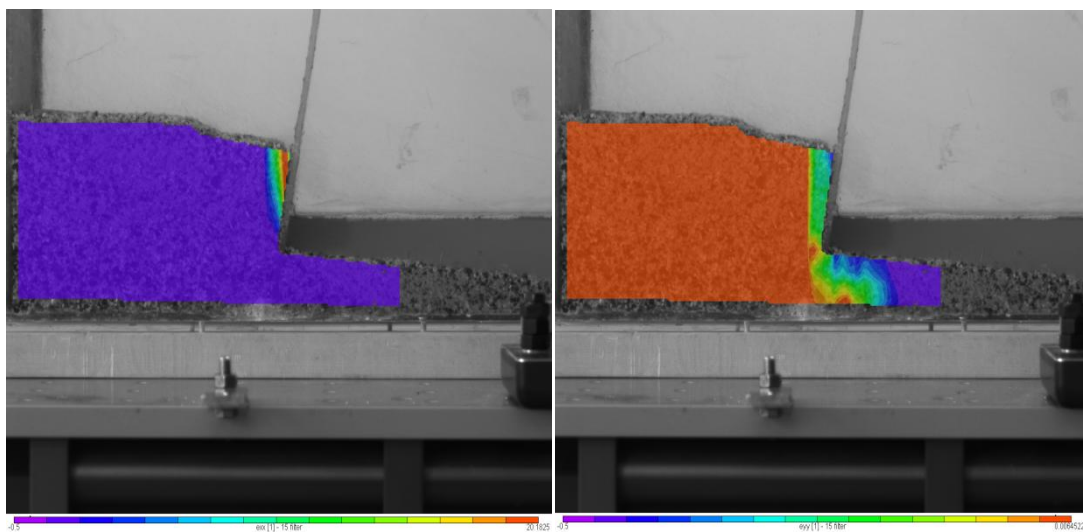
( $\epsilon_{xy}$ )

Εικόνες 4-5



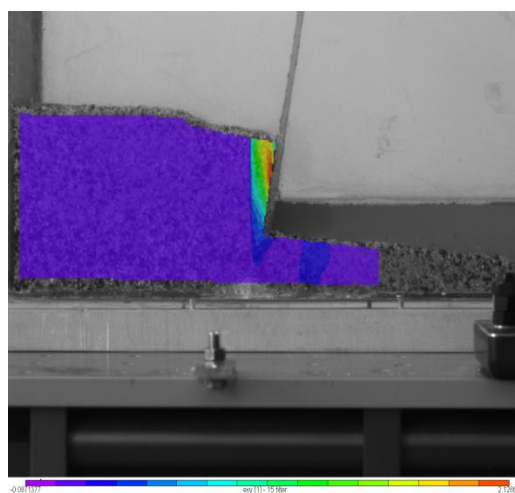
(U)

(V)



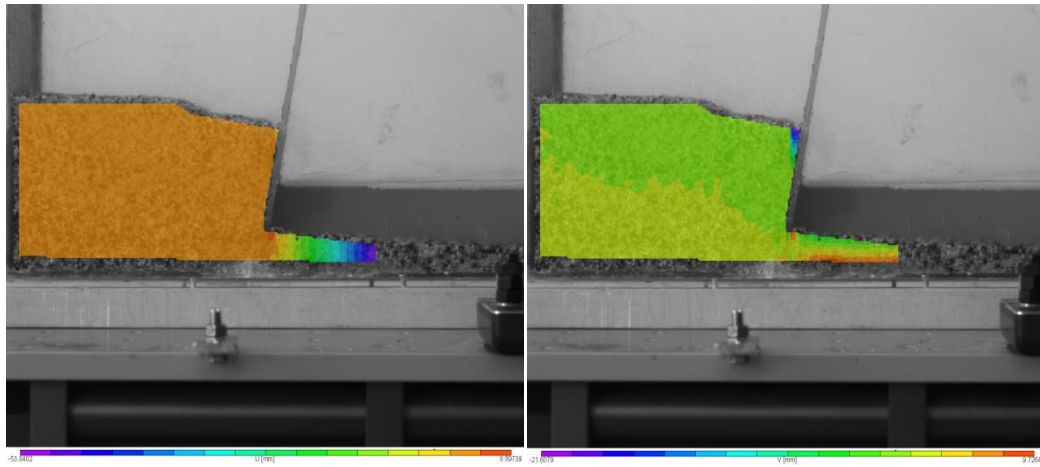
( $e_{xx}$ )

( $e_{yy}$ )



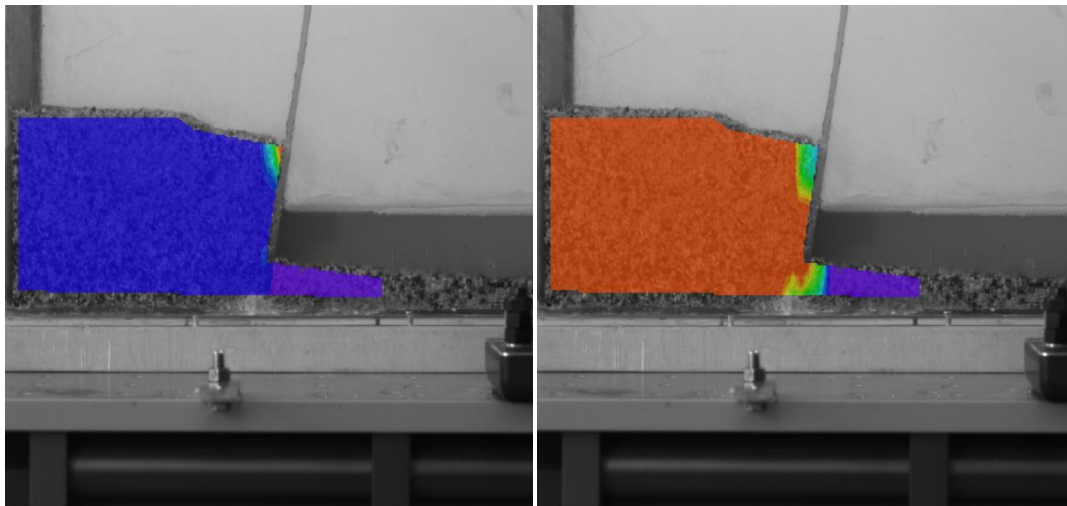
( $e_{xy}$ )

Εικόνες 5-6



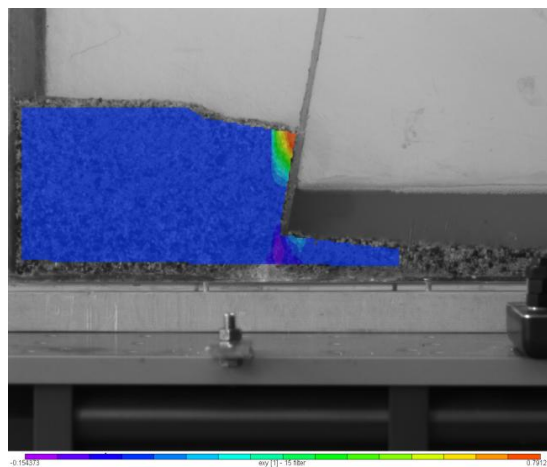
(U)

(V)



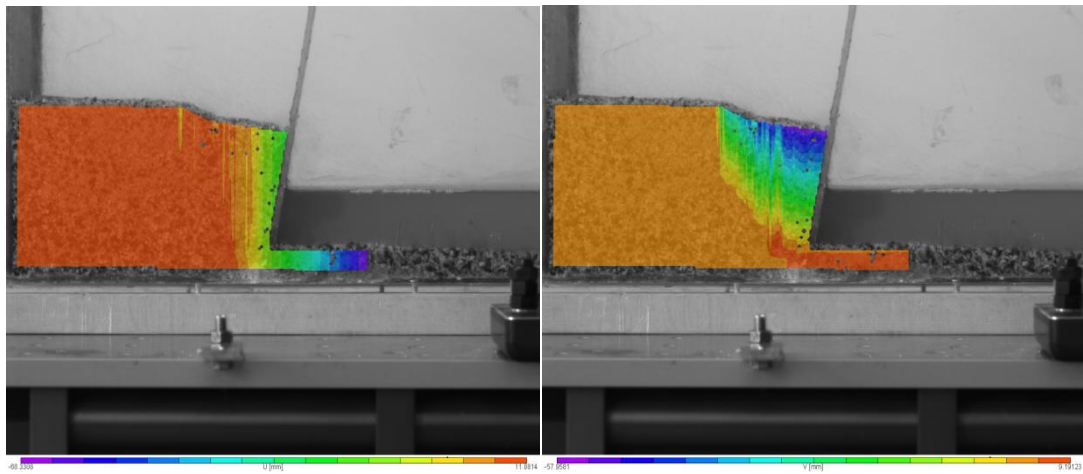
( $e_{xx}$ )

( $e_{yy}$ )



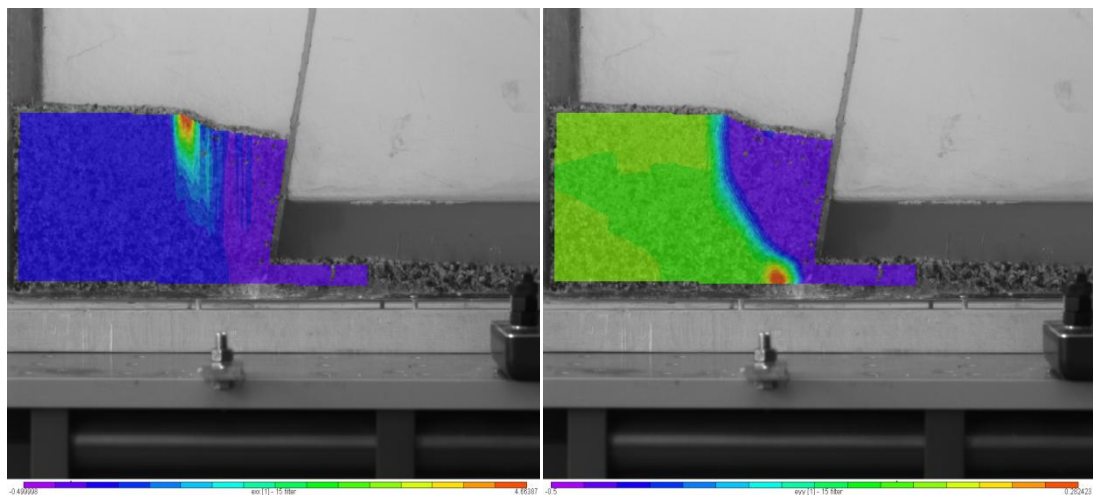
( $e_{xy}$ )

Εικόνες 6-7



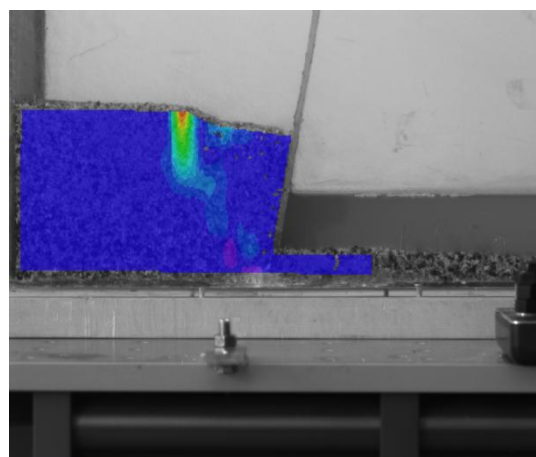
(U)

(V)



( $e_{xx}$ )

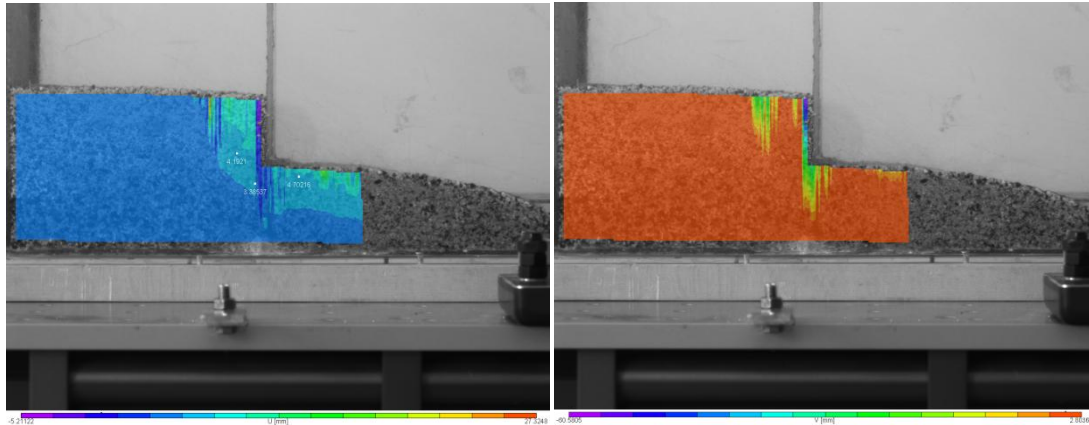
( $e_{yy}$ )



( $e_{xy}$ )

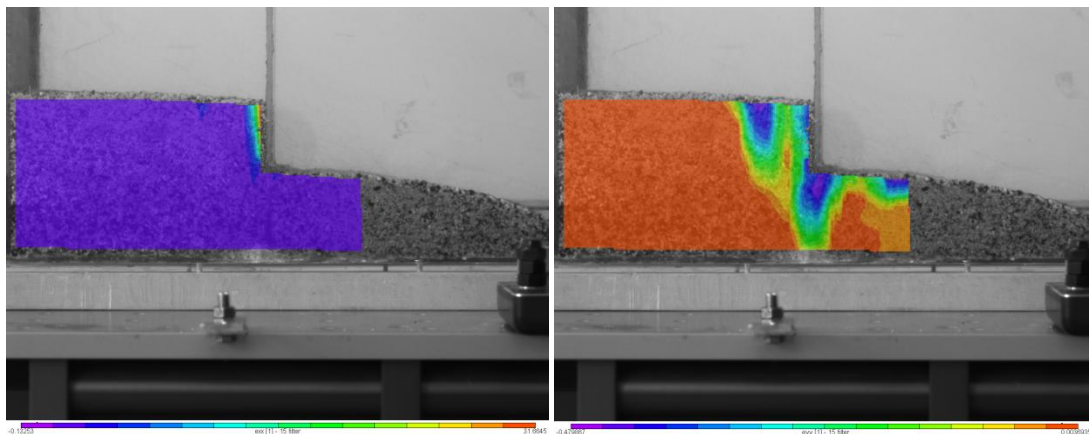
**Μέθοδος DIC (Vic-2D) – Ανάλυση 2<sup>η</sup>**

**Εικόνες 1-2**



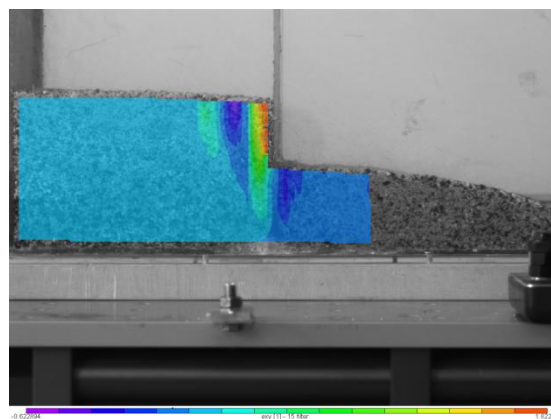
(U)

(V)



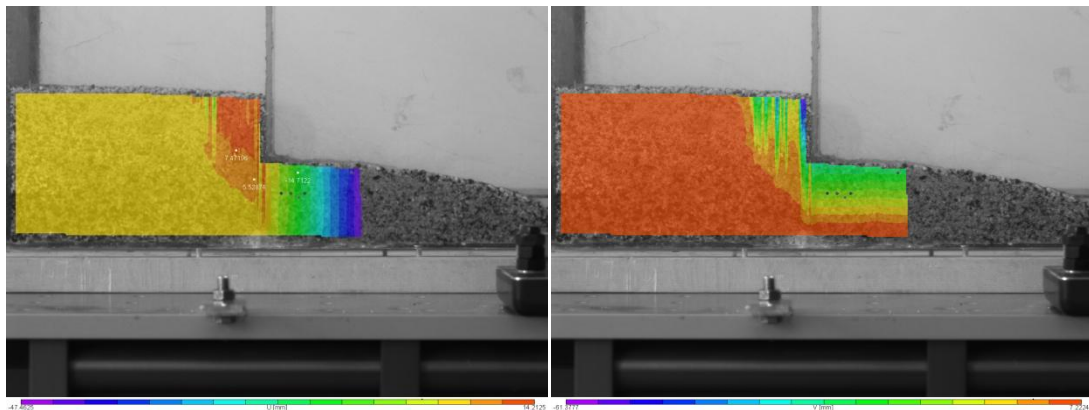
( $e_{xx}$ )

( $e_{yy}$ )



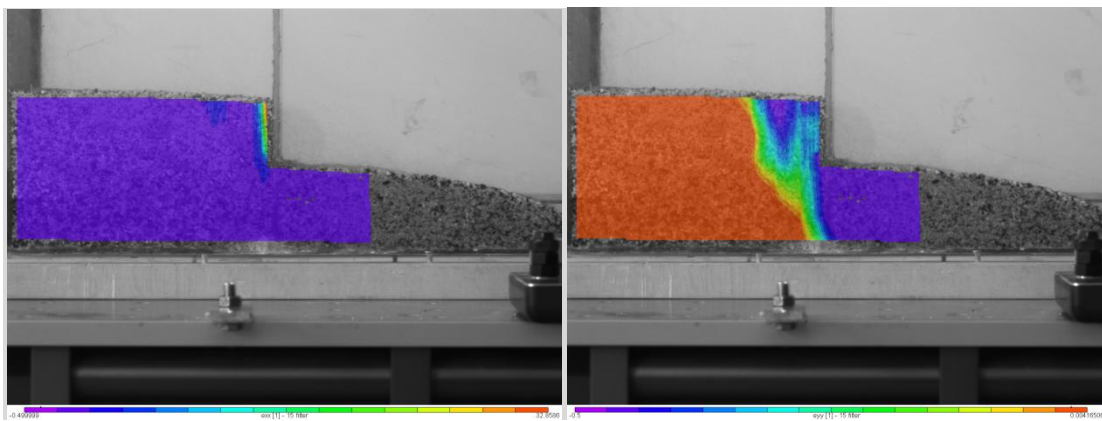
$e_{xy}$

Εικόνες 1-3



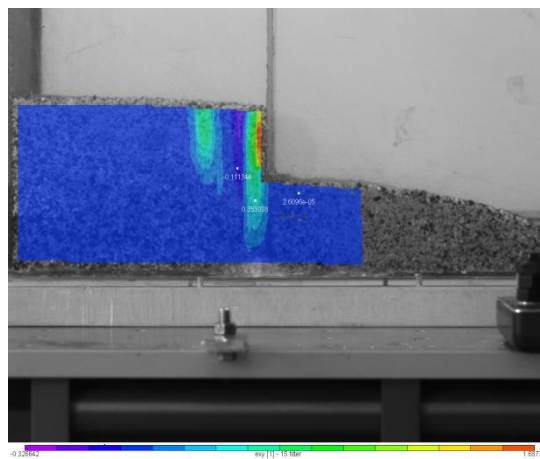
(U)

(V)



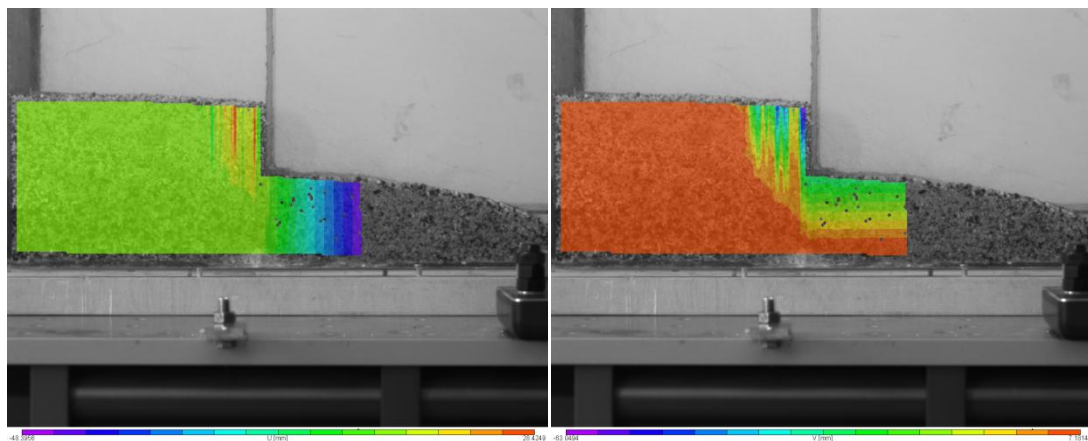
( $\epsilon_{xx}$ )

( $\epsilon_{yy}$ )



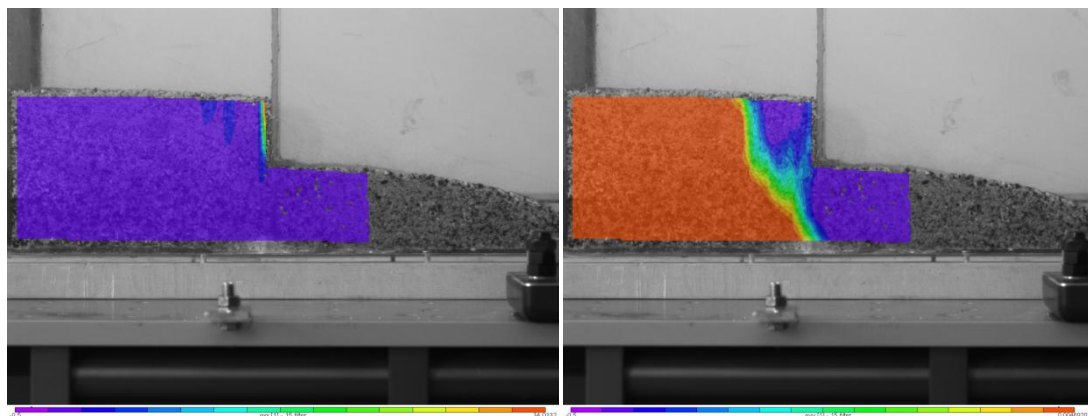
$\epsilon_{xy}$

Εικόνες 1-4



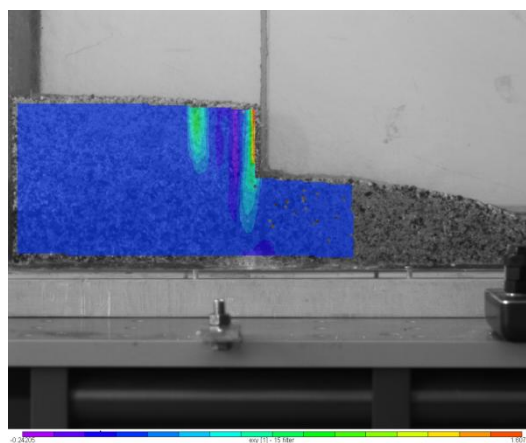
(U)

(V)



( $e_{xx}$ )

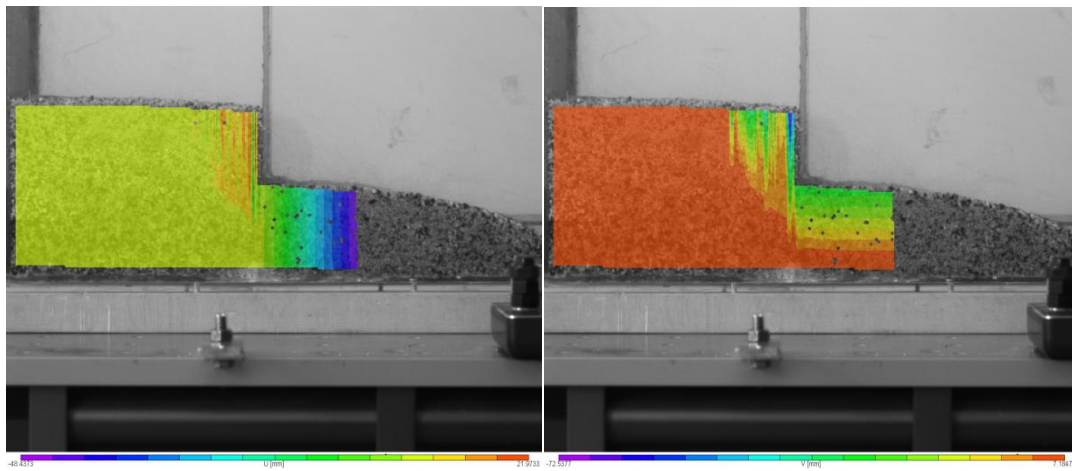
( $e_{yy}$ )



$e_{xy}$

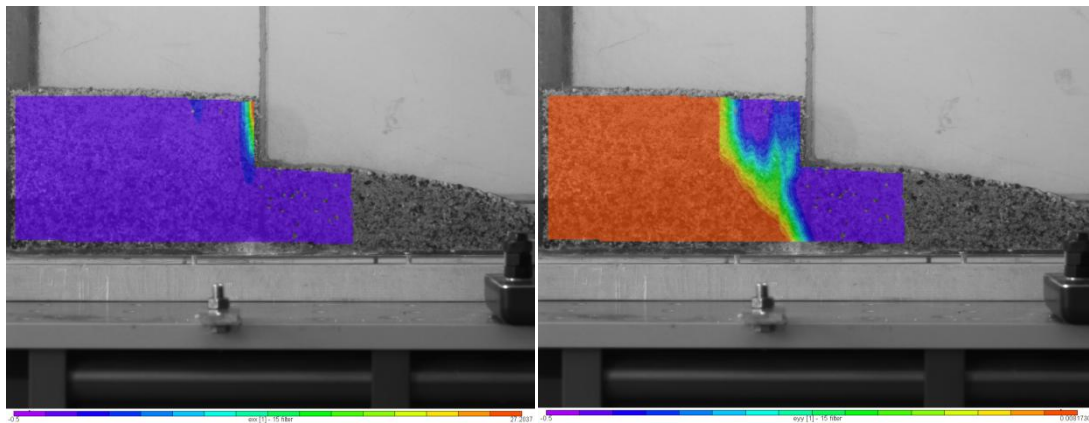


Εικόνες 1-5



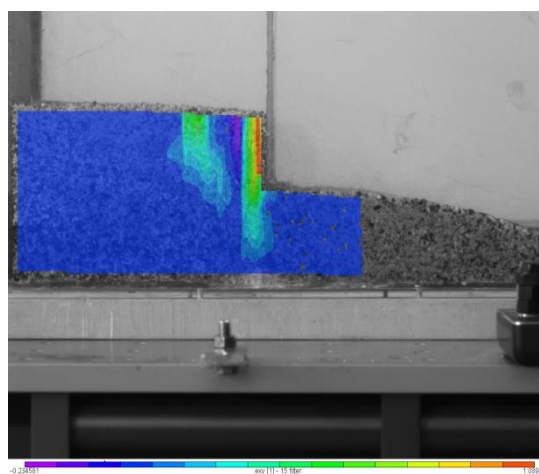
(U)

(V)



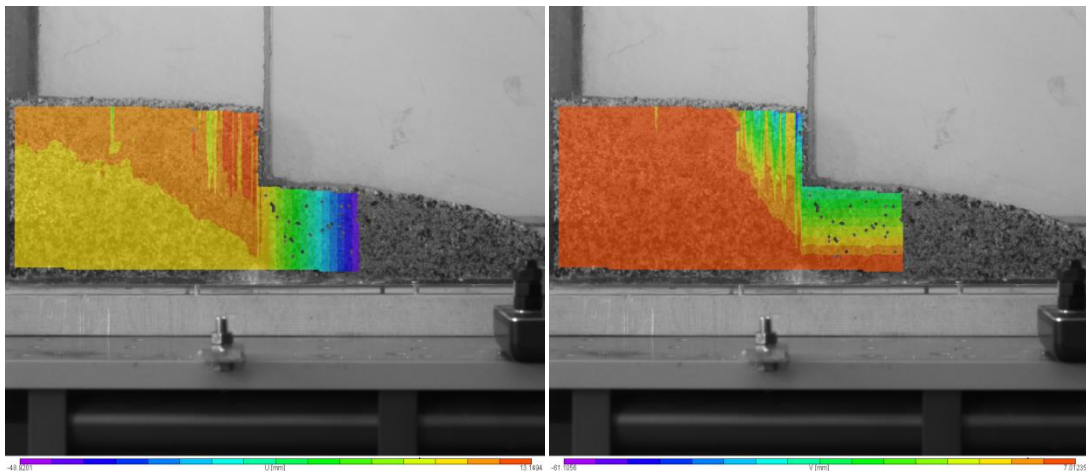
( $e_{xx}$ )

( $e_{yy}$ )



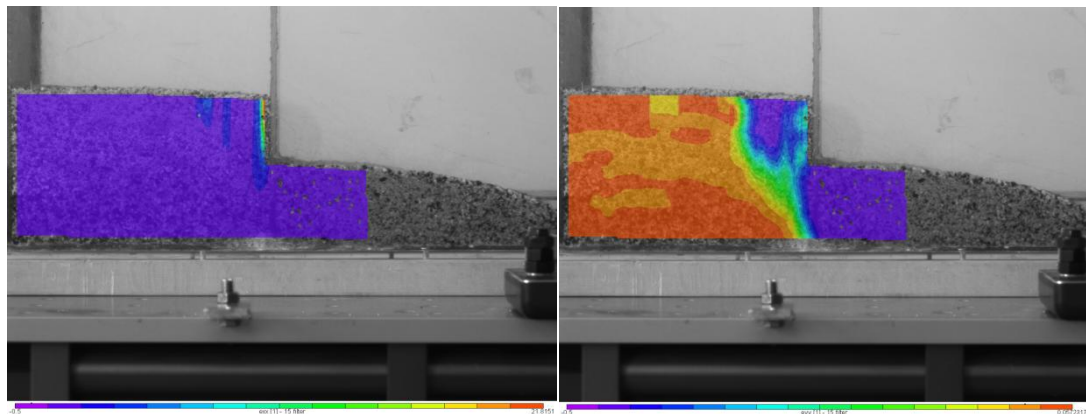
$e_{xy}$

Εικόνες 1-6



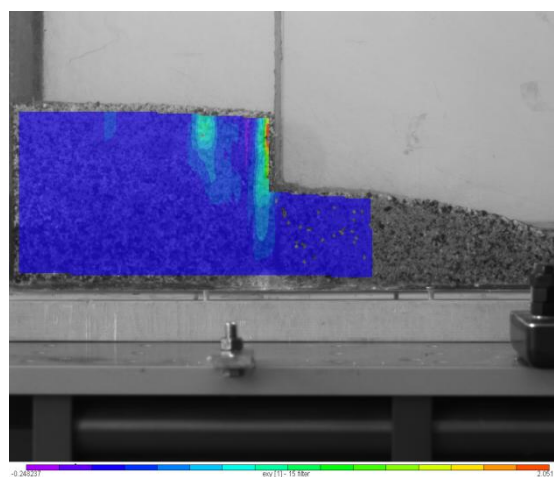
(U)

(V)



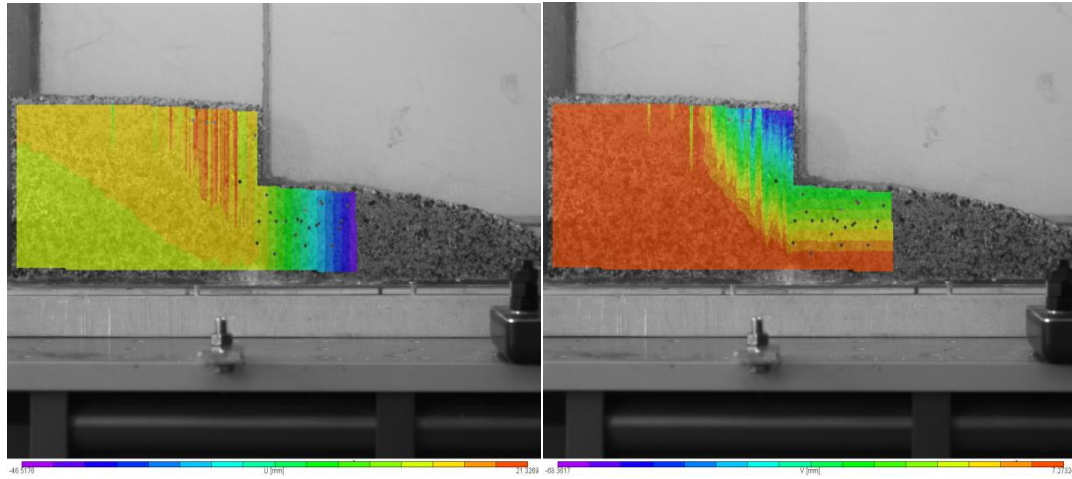
( $e_{xx}$ )

( $e_{yy}$ )



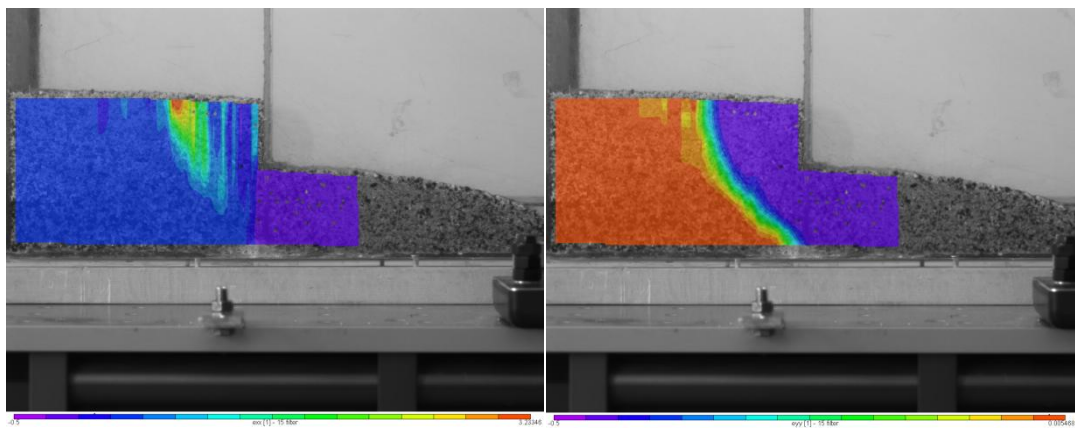
$e_{xy}$

Εικόνες 1-7



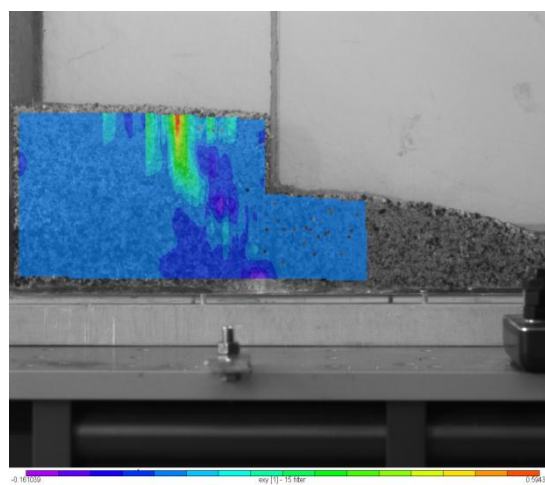
$(U)$

$(V)$



$(e_{xx})$

$(e_{yy})$



$e_{xy}$

Από τις παραπάνω αναλύσεις συμπεραίνουμε ότι η κάθε μέθοδος μπορεί να δώσει αξιολογες πληροφορίες για το πώς αστοχεί το διάφραγμα, ουσιαστικά δηλαδή, συμπληρώνει κατά κάποιο τρόπο η μία την άλλη. Στο PIV μπορούμε να έχουμε μια καθαρή εικόνα για το πώς κινούνται οι κόκκοι του εδάφους καθώς έχουμε τα διαγράμματα με τα διανύσματα των μετατοπίσεων. Από την άλλη μεριά στο Vic-2D , όπου οι μετατοπίσεις δίνονται σε μορφή εικόνων contour έχουμε τη δυνατότητα να έχουμε μια εικόνα για το πόσο έχουν μετακινηθεί οι κόκκοι ανάλογα με την χρωματική περιοχή που βρίσκονται. Για παράδειγμα, μετά την 4<sup>η</sup> φόρτιση μετρήθηκε η μετακίνηση του διαφράγματος σε σχέση με την αρχική του θέση και βρέθηκε 2,55cm. Από το διάγραμμα μετατοπίσεων του Vic-2D προκύπτει ότι η μετακίνηση είναι περίπου 2,2cm.

Στην περίπτωση των ανηγμένων διατμητικών παραμορφώσεων, το Vic-2D δείχνει πιο καθαρά την περιοχή αστοχίας γύρω από το διάφραγμα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται πως έχει αστοχήσει το έδαφος πριν ακόμα πέσει το διάφραγμα. Η αστοχία αυτή φαίνεται στο διαγράμματα διατμητικών παραμορφώσεων.



*Εικόνα 3.24: Αστοχία του εδάφους αριστερά του διαφράγματος πριν πέσει το διάφραγμα*

## 4. Έλεγχος ακρίβειας των δύο μεθόδων ανάλυσης

Μια πολύ σημαντική παράμετρος που θα ήταν ενδιαφέρον να διερευνηθεί στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι η ακρίβεια που η καθεμιά μέθοδος προσδιορίζει τις μετατοπίσεις των κόκκων του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα για τη μέθοδο PIV, θα διερευνηθεί η ακρίβεια υπολογισμού των νέων θέσεων των *patches*, αφού όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η ανάλυση με το *geoPIV*, προϋποθέτει την διαμέριση της εικόνας σε μικρότερα τμήματα και τον υπολογισμό των μετατοπίσεων των τμημάτων αυτών. Από την άλλη, το *Vic-2D*, υπολογίζει την μετατόπιση των κόκκων βάσει της αντίθεσης της εικόνας.

Η ακρίβεια ενός συστήματος εξαρτάται από την μέθοδο η οποία χρησιμοποιείται για την δημιουργία του πεδίου των μετατοπίσεων. Τα σφάλματα που μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια ενός συστήματος, μπορεί να είναι τυχαία ή συστηματικά. Τα τυχαία σφάλματα σχετίζονται με τη ακρίβεια και περιλαμβάνουν τα σφάλματα που προέρχονται από τον ανθρώπινο παράγοντα (καταγραφή των βίντεο) και σφάλματα που προκαλούνται από αλλαγές στον φωτισμό. Τα συστηματικά σφάλματα που σχετίζονται με την ορθότητα των μεθόδων που βασίζονται σε ανάλυση εικόνων, εμφανίζονται αν δεν λάβουμε υπ’ όψιν την χωρική μεταβολή της εικόνας σε *pixels* σε σχέση με την εικόνα σε συνήθεις μονάδες μέτρησης (mm).

### 4.1. Έλεγχος ακρίβειας της μεθόδου PIV

Η ακρίβεια υπολογισμού των μετατοπίσεων αλλά και η ορθότητα των αποτελεσμάτων, από τη μέθοδο PIV, εξαρτώνται μεταξύ άλλων από το μέγεθος του *patch* (*L*) και από την αντίθεση των εικόνων. Μεγαλύτερο ρόλο παίζει η παράμετρος *L*. Ο παρακάτω εμπειρικός τύπος δίνει το σφάλμα μέτρησης της μεθόδου συναρτήσει του *L*:

$$\rho_{\text{pixel}} = \frac{0,6}{L} + \frac{150000}{L^8} \quad (4.1)$$

Αυτό που ζητάμε ουσιαστικά είναι η ακρίβεια με την οποία υπολογίζεται το διάνυσμα μετατόπισης για κάθε patch, δηλαδή, ζητάμε  $\sigma_x$  και  $\sigma_y$ . Κατά την διεξαγωγή των αναλύσεων μέσω του λογισμικού geoPIV, και κατά την διαδικασία μετατροπής των συντεταγμένων της εικόνας από pixels σε mm, γίνεται κάποιος γεωμετρικός μετασχηματισμός. Δεδομένου ότι, για την βαθμονόμηση χρειαζόμαστε τουλάχιστον τέσσερα σημεία συμπεράναμε ότι πιθανόν, ο μετασχηματισμός που πραγματοποιείται είναι ο ομοπαράλληλος ή αφινικός μετασχηματισμός.

Ο ομοπαράλληλος μετασχηματισμός είναι ένας πλήρης γραμμικός μετασχηματισμός. Ο ομοπαράλληλος μετασχηματισμός διατηρεί τα πέρατα του χώρου στον οποίο εφαρμόζεται, έχει ευρεία εφαρμογή και επιφέρει ομογενείς παραμορφώσεις στα γραφικά αντικείμενα που εφαρμόζεται. Παρακάτω ακολουθεί η μαθηματική περιγραφή του αφινικού μετασχηματισμού.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \theta_x & \sin \theta_y \\ -\sin \theta_x & \cos \theta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Ο μετασχηματισμός αυτός χαρακτηρίζεται από μετάθεση ( $T_x, T_y$ ), κλίμακα ( $S_x, S_y$ ) και στροφή ( $\theta_x, \theta_y$ ).

Μετά το πέρας την βαθμονόμησης, το geoPIV, δίνει τιμές για τους παραπάνω συντελεστές. Για τον υπολογισμό των  $\sigma_x$  και  $\sigma_y$ , χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση πινάκων:

$$\mathbf{V}_x = \mathbf{R} \mathbf{V}_0 \mathbf{R}^T \quad (4.3)$$

Όπου, R: πίνακας στροφής

$\mathbf{R}^T$ : ανάστροφος του πίνακα στροφής

$$\mathbf{V}_0 = \begin{pmatrix} \rho_{pixel}^2 & 0 \\ 0 & \rho_{pixel}^2 \end{pmatrix}$$

Υπολογίστηκαν τα  $\sigma_x$  και  $\sigma_y$ , για δύο τιμές του μεγέθους του patch L:

- L=20

$$\sigma_x = \sigma_y = 0,02976 \text{ pixels} \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ pixels}$$

$$\sigma_{\Delta s} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \approx 4,2 \cdot 10^{-2} \text{ pixels}$$

- L=24

$$\sigma_x = \sigma_y = 0,0249 \text{ pixels} \approx 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ pixels}$$

$$\sigma_{\Delta s} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \approx 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ pixels}$$

Παρατηρούμε ότι η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης του διανύσματος μετατόπισης είναι της τάξης του εκατοστού του pixel. Επίσης, όσο μεγαλύτερο είναι το L επιτυγχάνουμε καλύτερη ακρίβεια.

#### 4.2. Έλεγχος ακρίβειας του Vic-2D

Για το σύστημα Vic-2D, δεν έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε ακρίβεια, μιας και οι πληροφορίες που έχουμε δεν είναι αρκετές. Το μόνο που μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι ότι αφού εξάγει τα αποτελέσματα σε διαγράμματα contour, δημιουργεί ισ αριθμικές καμπύλες και πιθανότατα χρησιμοποιεί κάποια συνάρτηση παρεμβολής για την εξομάλυνση των καμπυλών. Από την διαδικασία, αυτή ενδεχομένως να χάνεται μετρητική πληροφορία.

## Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που μπορούμε να βγάλουμε από την παρούσα εργασία αφορούν τόσο τα φυσικά προβλήματα που μελετήθηκαν όσο και τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση.

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. Επειδή, έγιναν αρκετές δοκιμές σε ξηρό πρανές παρατηρήσαμε ότι και σε επιταχύνσεις της τάξης του 0.20g, η ολίσθηση των κόκκων ήταν σχεδόν μηδαμινή, κάτι που δεν συνέβη στο ημιβυθισμένο 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.

Στην περίπτωση του διαφράγματος τόσο σε ξηρό έδαφος όσο και σε υγρό η συμπεριφορά είναι περίπου η ίδια: Αριστερά του διαφράγματος, αναπτύσσονται ενεργητικές ωθήσεις και δεξιά του παθητικές ωθήσεις γαιών. Στην περίπτωση του ξηρού εδάφους, που υπάρχει έδαφος δεξιά να το συγκρατεί το διάφραγμα δεν ανατρέπεται, ενώ στην περίπτωση του νερού που το έδαφος δεξιά του τοίχου έχει παρασυρθεί ο τοίχος ανατρέπεται.

Σχετικά με τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήσαμε, ουσιαστικά αυτό που συμπεραίνουμε είναι ότι κατά κάποιο τρόπο η μία συμπληρώνει την άλλη. Μπορεί και οι δύο να μας δίνουν πληροφορίες για τις μετατοπίσεις των κόκκων του εδάφους και τις ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις, παρόλα αυτά το διάγραμμα με το πεδίο μετατοπίσεων που δίνει το PIV, με τα διανύσματα μας δίνει μια πολύ καθαρή εικόνα για την κίνηση του εδάφους. Από την άλλη μεριά, το Vic-2D με τα διαγράμματα ανηγμένων παραμορφώσεων contour δείχνει καθαρά την αστοχία.



## Προτάσεις

Θα ήταν πολύ ενδιαφέρουσα μια πειραματική δοκιμή η οποία να θίγει το πρόβλημα του καταβιβασμού της στάθμης του νερού. Δηλαδή, να τοποθετηθεί το έδαφος και το νερό στο plexiglass και στη συνέχεια να αφαιρεθεί το νερό με κάποιο τρόπο, αφού έχει ποτίσει το πρανές και να επιβληθεί σε αυτό σεισμική φόρτιση και να μελετηθεί η συμπεριφορά του.

Επίσης, ενδιαφέρουσα θα ήταν η σύγκριση με υπολογιστικά μοντέλα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

G.J.C.M. Hoffmans and H.J. Verheij, “**Scour Manual**”, (1997), A.A. BALKEMA/ROTTERDAM/BROOKFIELD

Richard Whitehouse, “**Scour at marine structures**”, (1998), Thomas Telford Ltd, London

E. Kapogianni, J. Laue, M.G. Sakellariou, “**Reinforced slope modeling using optical fibre sensors**”, Physical Modelling in Geotechnics – Springman, Laue and Seward (2010)

D.J. WHITE, W.A. TAKE and M.D. BOLTON (2003), “**Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry**”, Geotechnique 53, No.7, 619-631

White D.J.,& Take W.A, “**GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing**”, (2002), Cambridge University Engineering Department

Wilmer Ferney Morales Penuela, “**geoPIV guide – version 0.7**”, (September 2009)

Rommel Cintrón, “**VIC-2D Manual**”, (2008), University of Colorado

Μιχαήλ Γ. Σακελλαρίου, “**ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ-ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ**”, (2003), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μιχαήλ Γ. Σακελλαρίου, “**ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ**”, (2005), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΒΥΡΩΝΑΣ ΝΑΚΟΣ, “**ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΑ**”, (2006), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

### **Πηγες από το Διαδίκτυο**

[www.civ.uth.gr/.../53%5CParaktiaStereometaforaMorfologiaAktwn.p](http://www.civ.uth.gr/.../53%5CParaktiaStereometaforaMorfologiaAktwn.p)

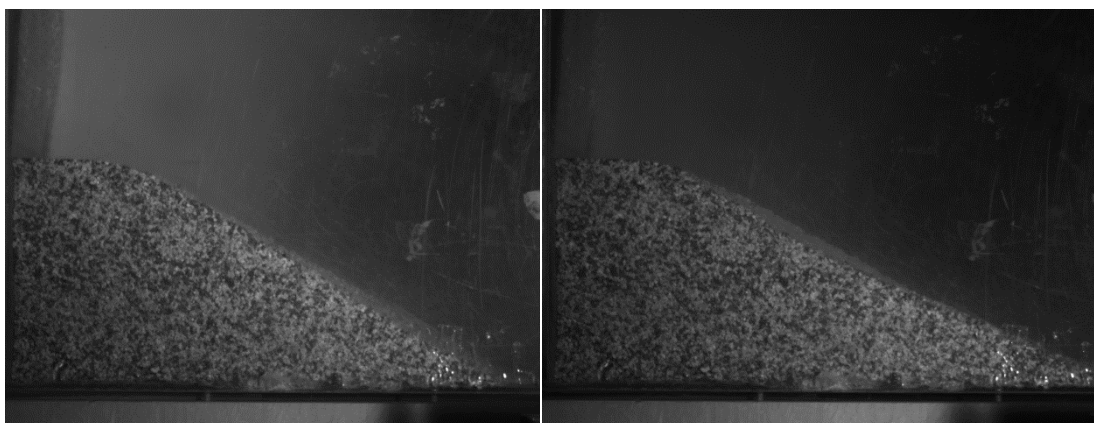
“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων  
πρανών κοκκώδους εδάφους”

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: Αποτελέσματα δοκιμής σε ξηρό πρανές για μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0,30 \cdot g$

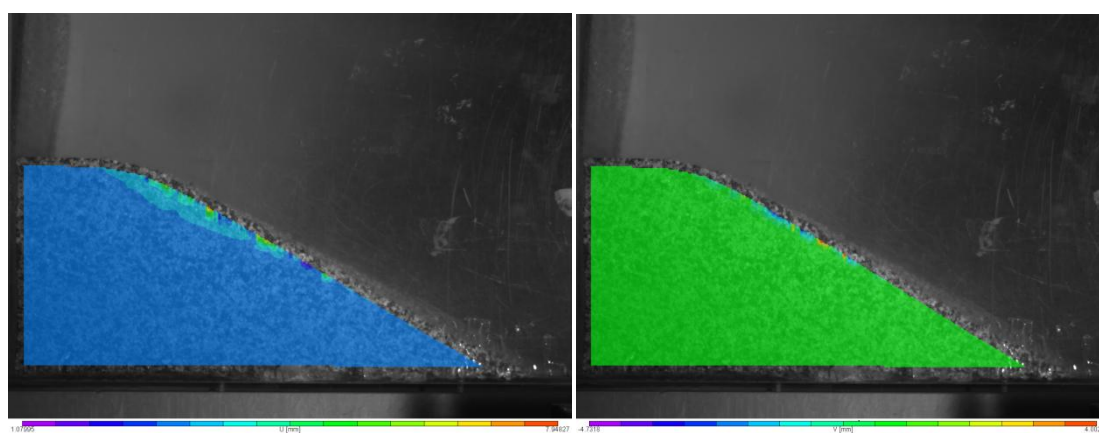
Στην ανάλυση του πειράματος με το geoPIV, για τη μέθοδο PIV, χρησιμοποιήθηκαν οι εικόνες οι οποίες εξήχθησαν από το βίντεο που καταγράφηκε από την ψηφιακή φωτογραφική μηχανή.

- **Vic-2D**



Αρχική και τελική κατάσταση, όπως καταγράφηκε από την ψηφιακή κάμερα του συστήματος Vic-2D

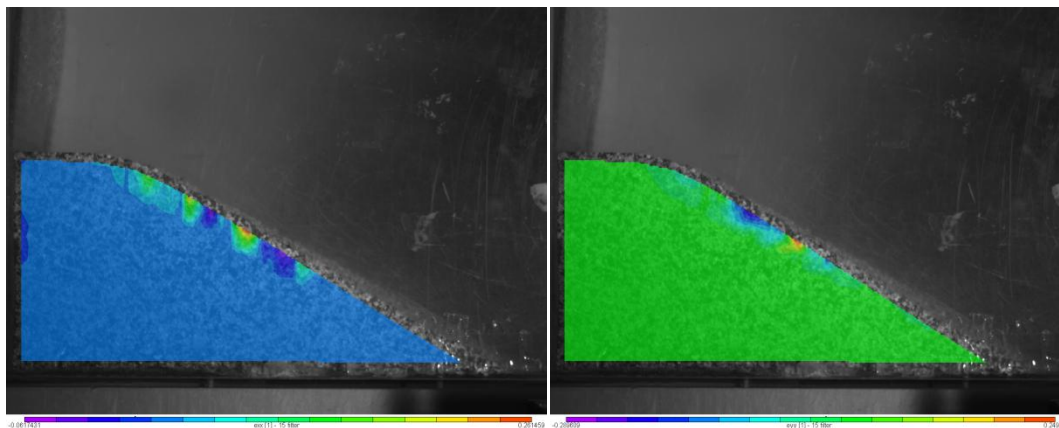
### Συσχέτιση με το Vic-2D



(U)

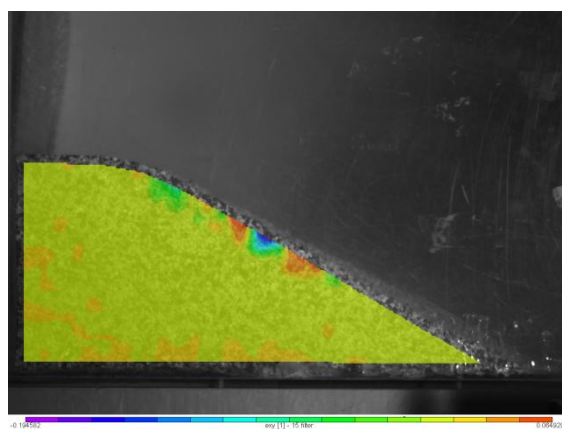
(V)

“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων πρανών κοκκώδους εδάφους”



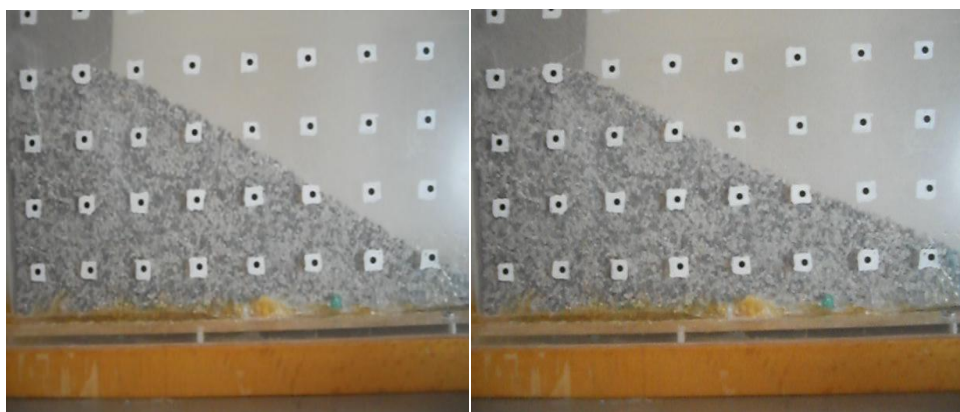
$(e_{xx})$

$(e_{yy})$



$(e_{xy})$

- **PIV**



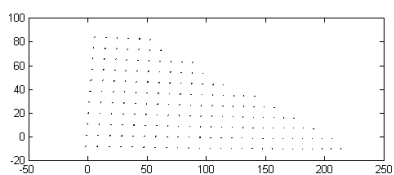
*Εικόνες που δείχνουν την αρχική και τελική κατάσταση του πρανούς, όπως εξήχθησαν από το βίντεο της δοκιμής με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή*

## Συσχέτιση με το geoPIV

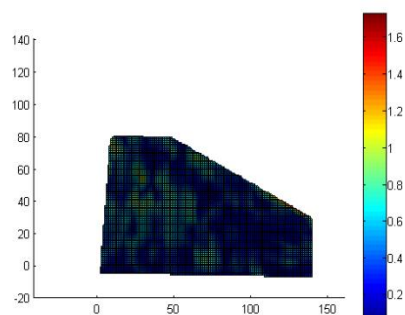
Από το βίντεο εξήχθησαν 20 φωτογραφίες οι οποίες αναλύθηκαν:

### Εικόνες 1-2

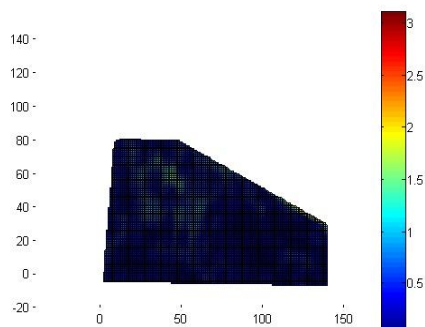
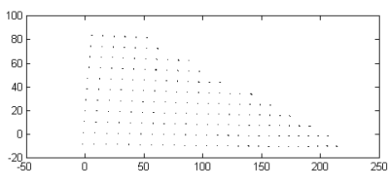
Μετατοπίσεις



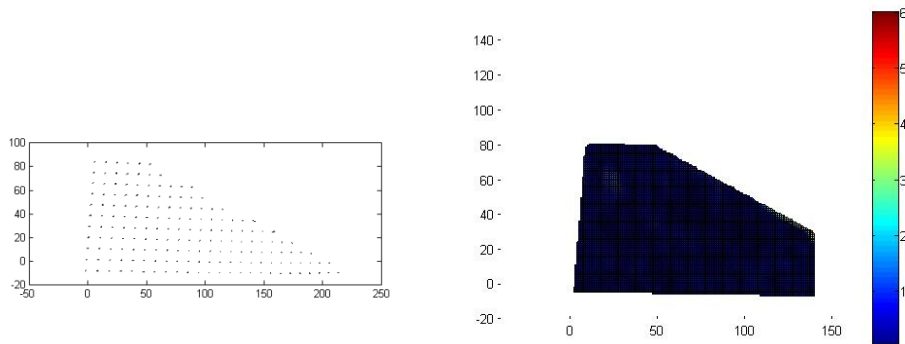
Ανηγμένες διατμητικές παραμορφώσεις



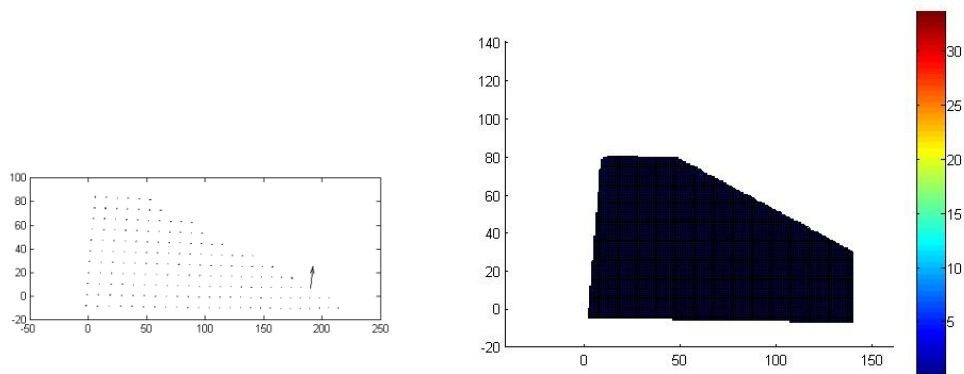
### Εικόνες 1-3



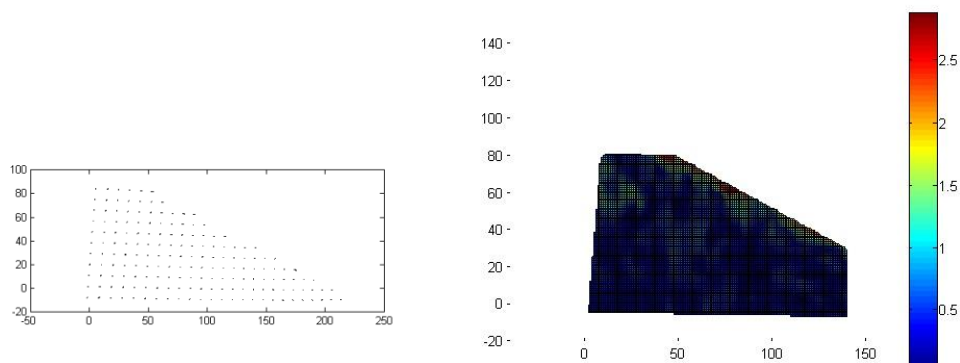
**Εικόνες 1-4**



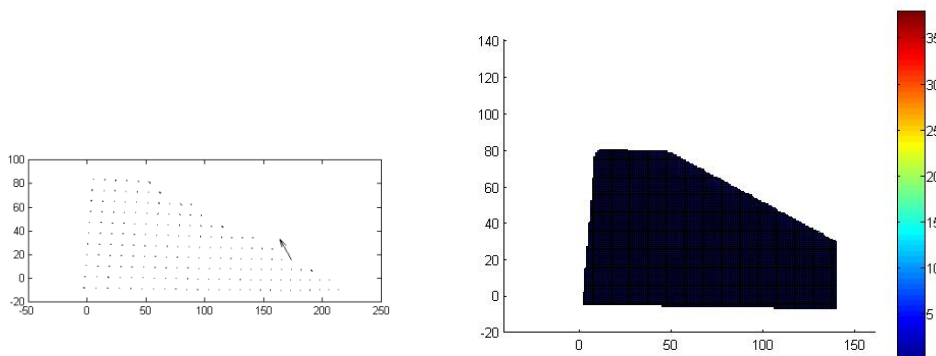
**Εικόνες 1-5**



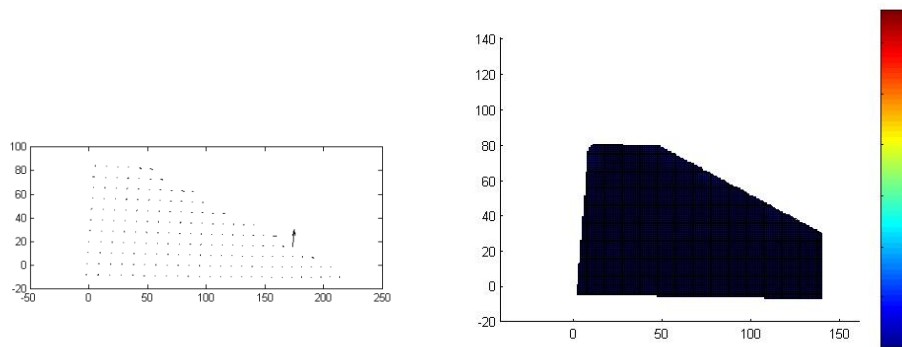
**Εικόνες 1-6**



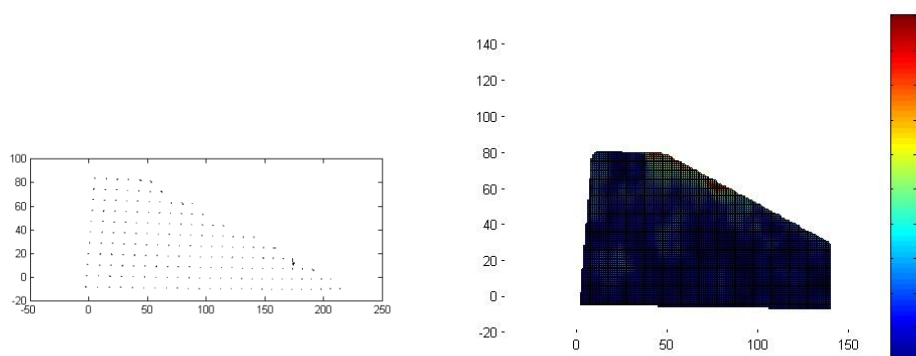
**Εικόνες 1-7**



**Εικόνες 1-8**

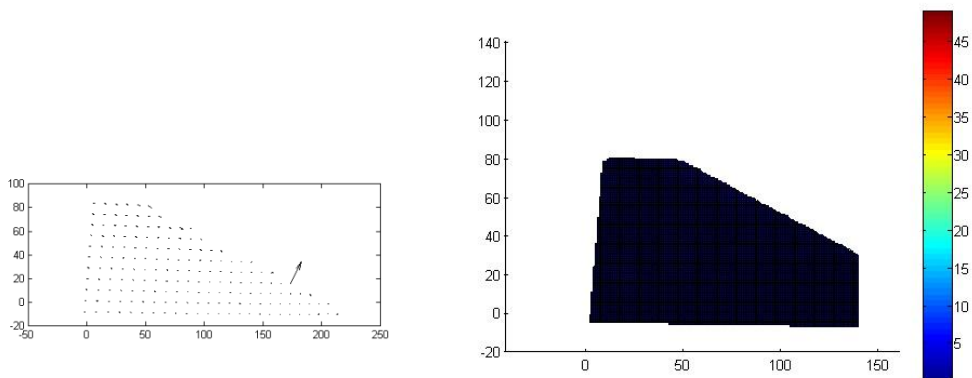


**Εικόνες 1-9**

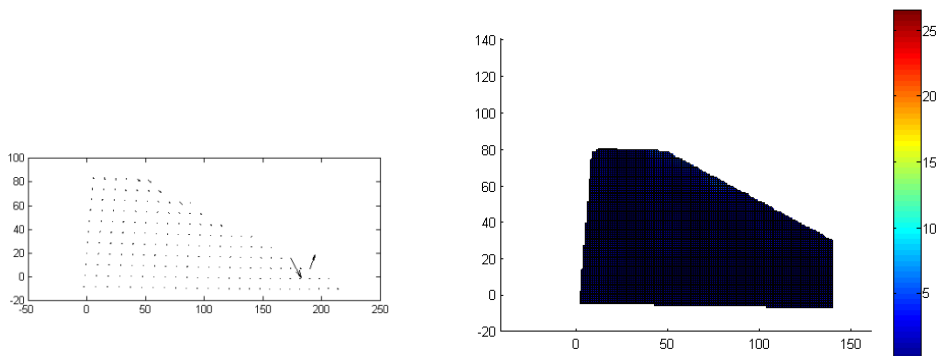




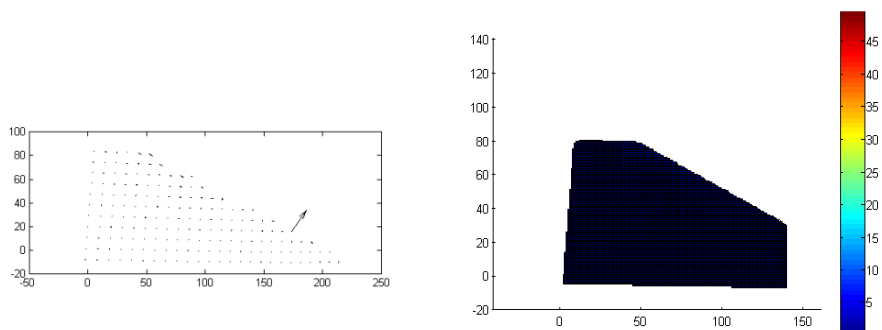
**Εικόνες 1-10**



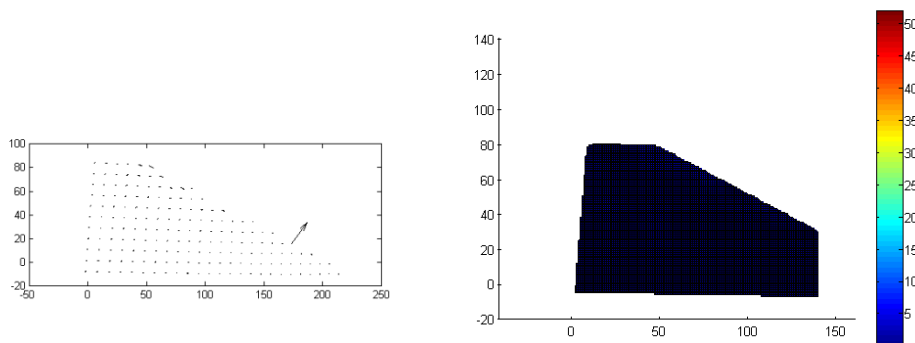
**Εικόνες 1-11**



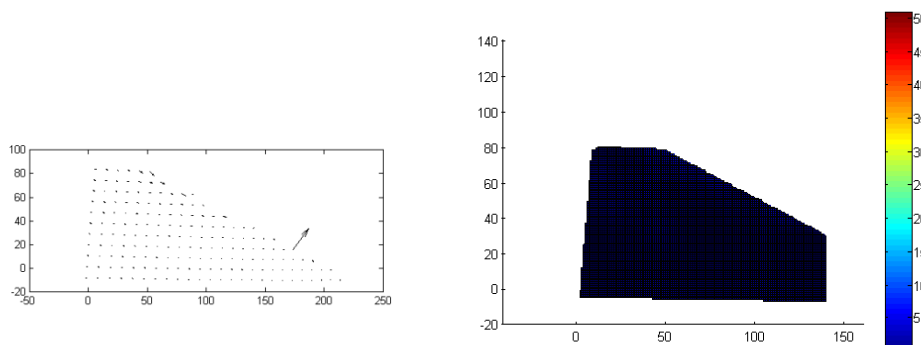
**Εικόνες 1-12**



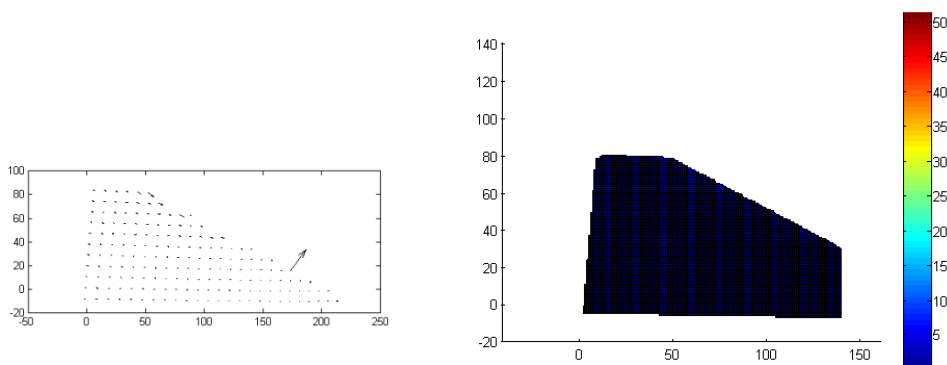
**Εικόνες 1-13**



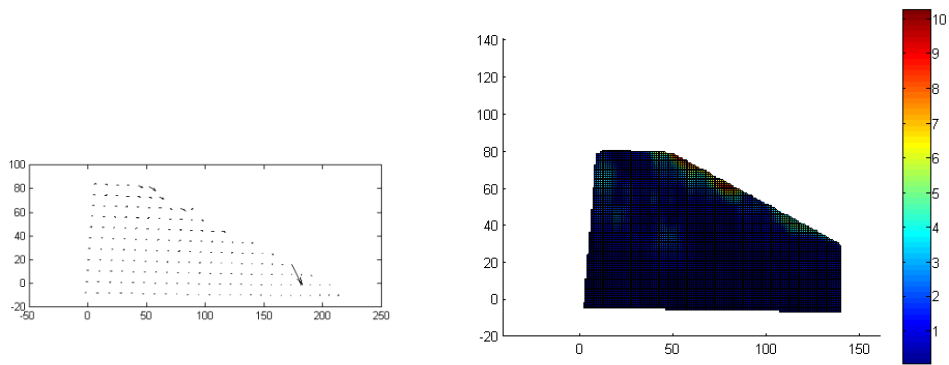
**Εικόνες 1-14**



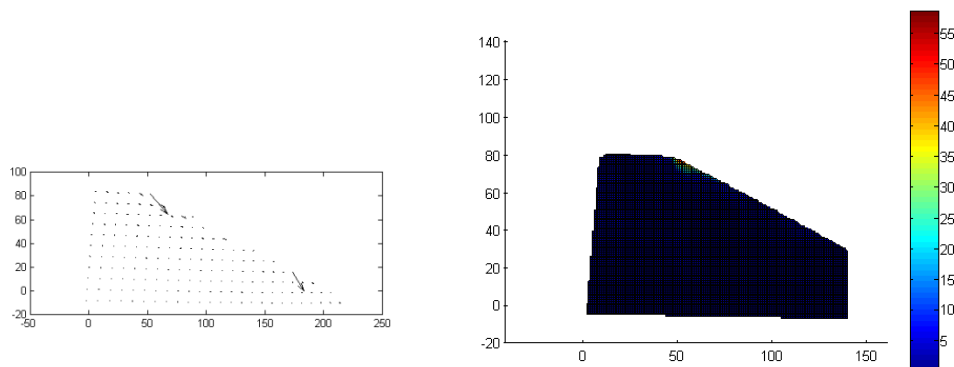
**Εικόνες 1-15**



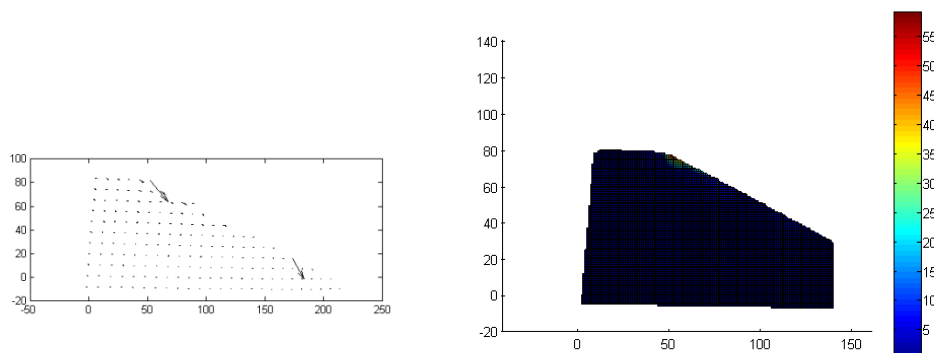
**Εικόνες 1-16**



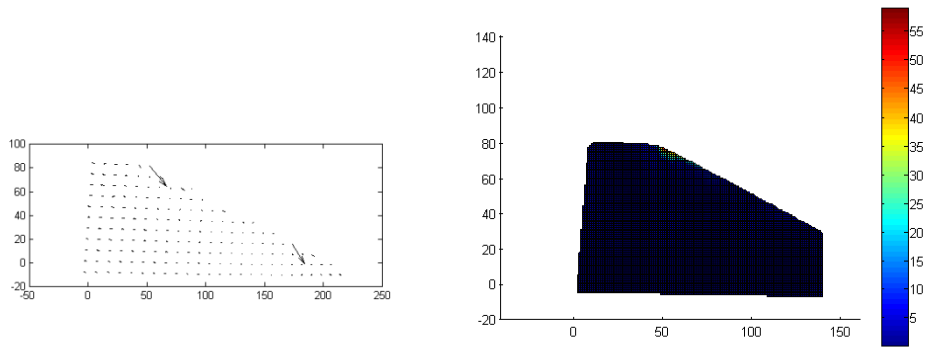
**Εικόνες 1-17**



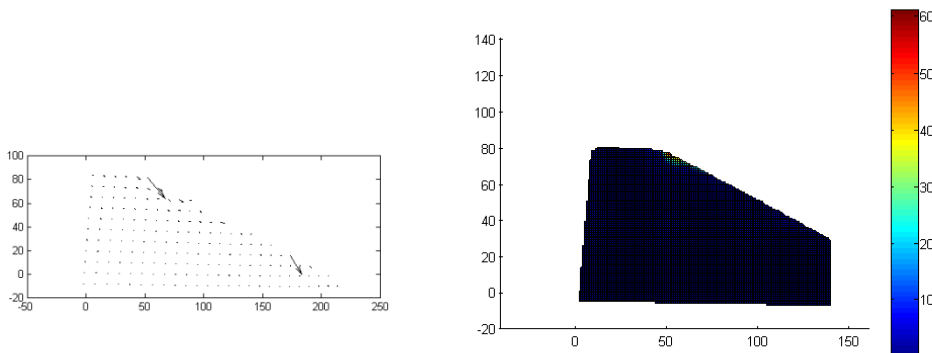
**Εικόνες 1-18**



**Εικόνες 1-19**

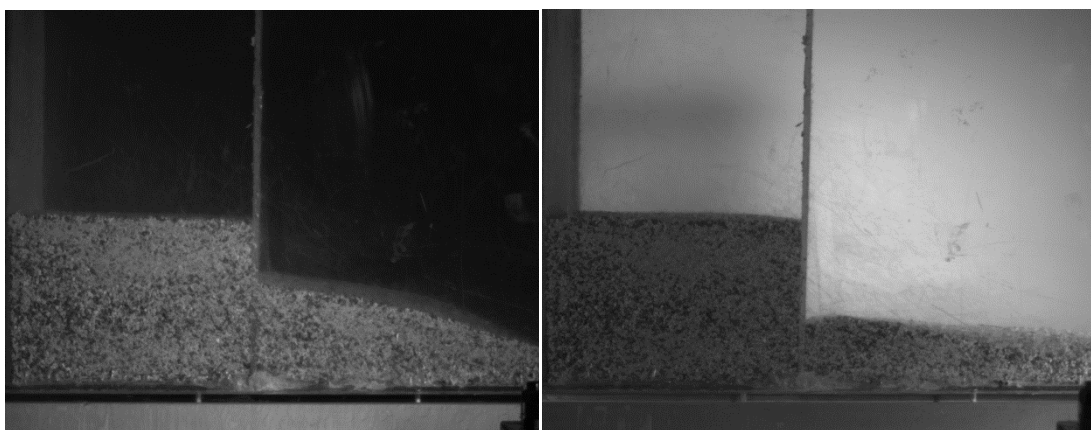


**Εικόνες 1-20**



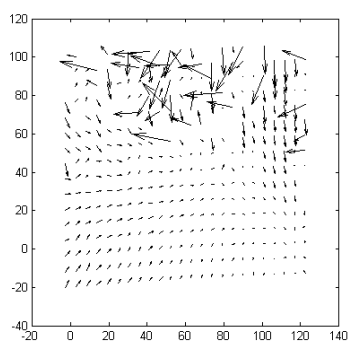
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Αποτελέσματα δοκιμής με διάφραγμα σε ξηρό έδαφος

Στην δοκιμή αυτή ο φωτισμός των εικόνων δεν ήταν ο ίδιος στην αρχική και στην τελική κατάσταση. Το μοντέλο φορτίστηκε δύο φορές. Μετά την πρώτη φόρτιση ο τοίχος δεν μετακινήθηκε, ενώ μετά τη δεύτερη φόρτιση ο τοίχος μετακινήθηκε 3mm.

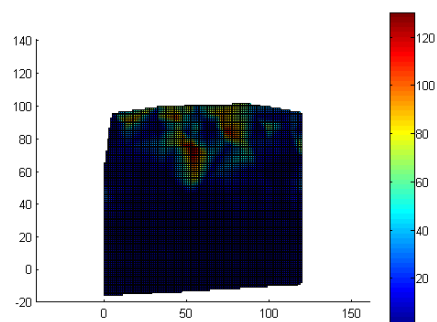


Στην ανάλυση με το geoPIV, εξετάστηκε η περιοχή αριστερά του διαφράγματος γιατί όπως αναφέρθηκε και στα παραπάνω, λόγω των μεγάλων μετακινήσεων των κόκκων, δεξιά του διαφράγματος τα αποτελέσματα δεν είναι τόσο ορθά.

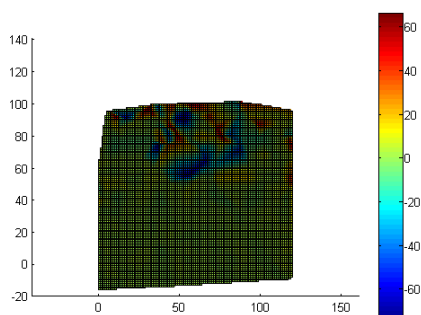
### Ανάλυση με το geoPIV



*Μετατοπίσεις*

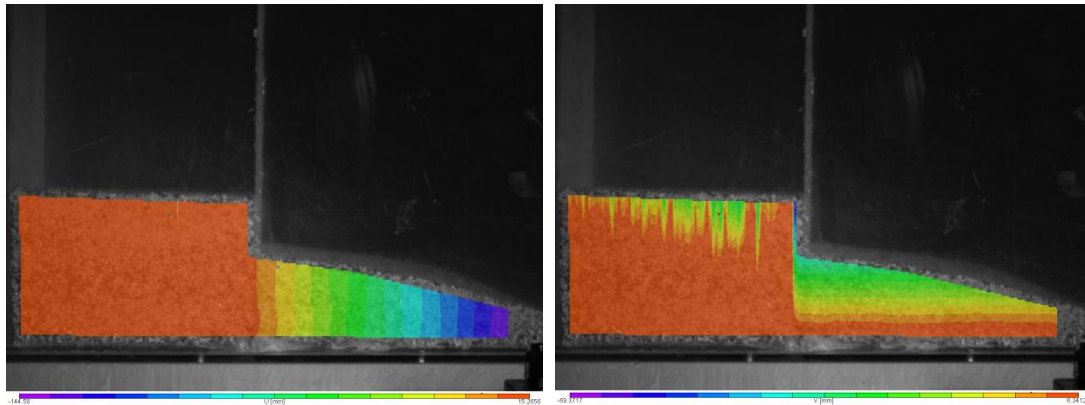


*Ανηγμένες παραμορφώσεις*



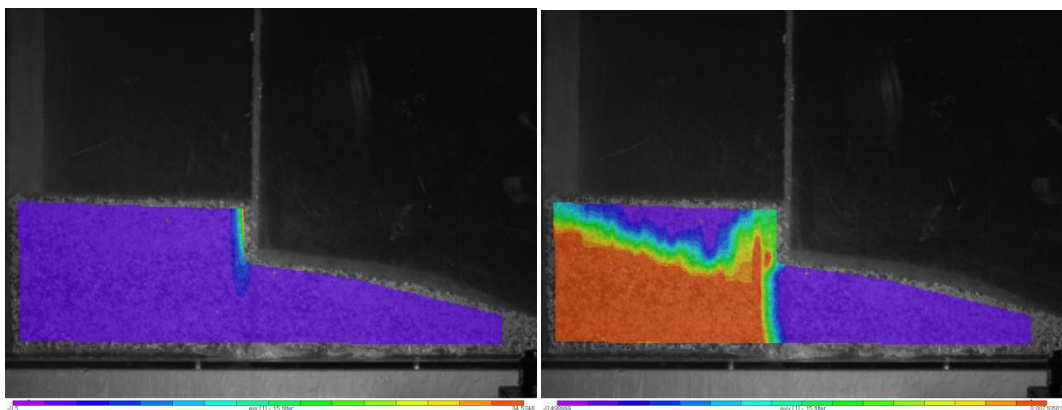
*Ογκομετρικές παραμορφώσεις*

**Ανάλυση με το Vic-2D**



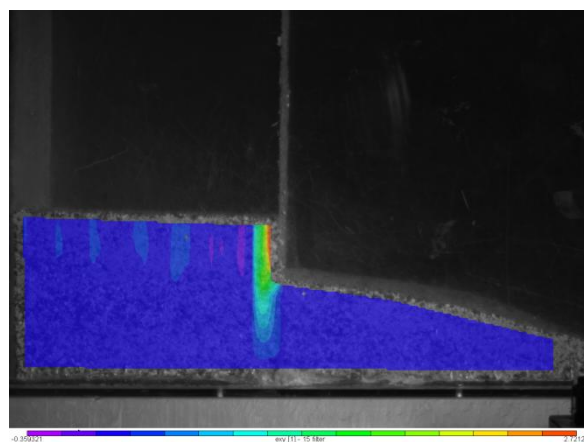
(U)

(V)



( $e_{xx}$ )

( $e_{yy}$ )



( $e_{xy}$ )

“Πειραματική μελέτη, επί φυσικών ομοιωμάτων, σεισμικής απόκρισης ημιβυθισμένων  
πρανών κοκκώδους εδάφους”

Παρόλο που όπως φαίνεται και στις εικόνες , ο φωτισμός δεν είναι ο ίδιος, τα  
αποτελέσματα που δίνουν και οι δύο μέθοδοι είναι ορθά.