



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

**ΠΕΔΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΡΙΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΜΠΑΙΡΑΚΤΑΡΗ Ι.ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΣ

Επιβλέπων: Καθηγητής Ε.Μ.Π

κ.Μιχάλης Σακελλαρίου

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΠΕΔΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ PIV

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΜΠΑΪΡΑΚΤΑΡΗ Ι.ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΣ

Επιβλέπων: Καθηγητής Ε.Μ.Π

κ.Μιχάλης Σακελλαρίου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31^η Οκτωβρίου 2011.

(Υπογραφή)

.....

Μιχάλης Σακελλαρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

(Υπογραφή)

.....

Ιωάννης Ναλμπάντης

Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

(Υπογραφή)

.....

Καττής Μαρίνος

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

(Υπογραφή)

.....

ΜΠΑΙΡΑΚΤΑΡΗ Ι.ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ

σους
Γιάννη, Κάλλια & Δημήτρη

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί τον καρπό μίας γενικότερης αναζήτησης «εναλλακτικών» τοπογραφικών εφαρμογών. Ευχαριστώ από καρδιάς τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. Μιχάλη Σακελλαρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα τόσο δημιουργικό αλλά και ταυτόχρονα τόσο πρακτικό. Κατά τη διάρκεια της διπλωματικής, η βοήθεια και η καθοδήγηση του κ. Σακελλαρίου ήταν απαραίτητες όχι μόνο για την ολοκλήρωση της εργασίας αλλά και για τη βαθύτερη κατανόηση και πρακτική εφαρμογή των όσων είχα διδαχθεί.

Ένα θερμό ευχαριστώ επίσης ανήκει και στον Υποψήφιο Διδάκτορα Βασίλη Ματζιάρη, στην Υποψήφια Διδάκτορα Έλενα Καπόγιαννη, στην τοπογράφο μηχανικό Όλγα Καββαδά και στον Κωνσταντίνο Μητσόπουλο τόσο για τη βοήθεια και τη συμβολή τους στην εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας όσο και για το διαρκές ενδιαφέρον τους για την πορεία της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας, είναι η εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης Particle Imaging Velocimetry (PIV) για την καταγραφή και την ερμηνεία διαφόρων φυσικών φαινομένων και μηχανισμών. Συγκεκριμένα, η ακόλουθη εργασία επικεντρώθηκε κυρίως στη μελέτη του φαινομένου της κατολίσθησης και του μηχανισμού της διάβρωσης του εδάφους λόγω της επαφής του με το νερό. Πρόκειται για μία σειρά πειραμάτων που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σε φυσικά μοντέλα πρανών ύψους 10 cm. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μέσω της μεθόδου ανάλυσης PIV καθώς και οι μηχανισμοί αστοχίας που αναπτύχθηκαν στις διάφορες φάσεις των πειραμάτων παρουσιάζονται και αναλύονται εκτενέστατα.

ABSTRACT

The object of this diploma thesis is the application of the analysis method “Particle Imaging Velocimetry (PIV)”, as a tool of recording and interpreting natural phenomena and mechanisms. The thesis focuses particularly on the study of the phenomenon of landslide, as well as on the mechanism of soil erosion due to its contact with water. A series of experiments on 10 centimeters high physical slope models were held at the Laboratory of Geotechnical Engineering department of Rural and Survey Engineering School of National and Technical University of Athens, The results, after the measurements carried out through PIV analysis method, and the failure mechanisms, developed in various phases of the experiments, are presented below extensively.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : ΜΕΘΟΔΟΣ P.I.V.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ	15
2.1 Ευστάθεια πρανών	15
2.2 Ο ρόλος του νερού	16
2.3 Ευστάθεια πρανών έναντι στατικών φορτίων	17
2.4 Ευστάθεια πρανών έναντι σεισμικών φορτίων.....	18
2.5 Μέθοδος Newmark	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	21
3.1 Σύνθεση πειραμάτων.....	21
3.2 Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων.....	23
3.3 Συσκευές συστήματος.....	25
3.4 Πειράματα με σεισμική φόρτιση	29
3.4.1 Πείραμα 1: Σεισμική φόρτιση – Ελεύθερο πρανές	29
3.4.1.1 Περιγραφή πειράματος	29
3.4.1.2: Αποτελέσματα πειράματος 1.....	34
3.4.2 Πείραμα 2: Σεισμική φόρτιση με προσθήκη νερού – ελεύθερο πρανές.....	48
3.4.2.1 Περιγραφή πειράματος	48
3.4.2.2: Αποτελέσματα πειράματος 2.....	53
3.4.3 Πείραμα 3: Σεισμική φόρτιση με προσθήκη νερού – ελεύθερο πρανές.....	67
3.4.3.1 Περιγραφή πειράματος	67
3.4.3.2: Αποτελέσματα πειράματος 3.....	70
3.4.4 Πείραμα 4: Σεισμική φόρτιση με προσθήκη νερού – ελεύθερο πρανές.....	83
3.4.4.1 Περιγραφή πειράματος	83
3.4.4.2: Αποτελέσματα πειράματος 4.....	86
3.4.5 Πείραμα 5: Σεισμική φόρτιση με προσθήκη νερού – ελεύθερο πρανές.....	100

3.4.5.1 Περιγραφή πειράματος	100
3.4.5.2: Αποτελέσματα πειράματος 5 – 1 ^η επεξεργασία	103
3.4.5.3: Αποτελέσματα πειράματος 5 – 2 ^η επεξεργασία	116
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	125
4.1 Συμπεράσματα	125
4.2 Προβλήματα	126
<i>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</i>	128

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αστοχία μίας εδαφικής μάζας, η οποία βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια ενός πρανούς ονομάζεται κατολίσθηση. Σύμφωνα με τον Cruden (1991) η κατολίσθηση ορίζεται ως μία κίνηση προς τα έξω και προς τα κάτω μίας μάζας βράχους, κορημάτων ή γαιών ενός πρανούς.

Η εκδήλωση των φαινομένων κατολίσθησης αποτελεί απόρροια ελλιπούς ευστάθειας φυσικών ή και τεχνητών πρανών έναντι στατικών και σεισμικών φορτίων. Το φαινόμενο της κατολίσθησης αποτελεί ένα από τα πιο καταστροφικά γεωλογικά φαινόμενα διεθνώς, και επομένως η ανάπτυξη εργαλείων και μεθόδων ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών κρίνεται ως αναπόφευκτη.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται ανάδειξη της μεθόδου ανάλυσης PIV για τη μελέτη και την καταγραφή τέτοιων φαινομένων μέσω μίας σειράς πειραμάτων που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η μέθοδος Particle Image Velocimetry διερευνά τα πεδία παραμορφώσεων ξηρών και υγρών εδαφικών πρανών υπό σεισμικές φορτίσεις.

Συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία αποτελείται από 4 βασικά κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της λειτουργίας της μεθόδου PIV (Particle Image Velocimetry). Η μέθοδος PIV, όπως έχει προαναφερθεί, είναι μία μέθοδος μέτρησης μετακινήσεων βασισμένη στην ανάλυση της κίνησης συγκεκριμένων σωματιδίων με τη βοήθεια της φωτογραμμετρίας και επιτυγχάνει αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας στις μετρήσεις των μετακινήσεων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, παραθέτονται θεωρητικά στοιχεία τόσο για την ευστάθεια των πρανών, όσο και για το ρόλο του νερού σε αυτήν. Συγκεκριμένα αναλύονται όλες οι σχέσεις που αφορούν την ευστάθεια των πρανών υπό στατικές και σεισμικές φορτίσεις.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή των πειραμάτων που διεξήχθησαν υπό σεισμική φόρτιση και παρατίθενται τα αποτελέσματά τους, όπως προέκυψαν ύστερα από την επεξεργασία τους με τη μέθοδο PIV.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική και υπολογιστική διαδικασία καθώς επίσης και τα προβλήματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια του πειραματικού μέρους. Επίσης διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για ανάλογες μελλοντικές εφαρμογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^Ο: ΜΕΘΟΔΟΣ P.I.V.

Η μέθοδος PIV (Particle Image Velocimetry) είναι μία μέθοδος υπολογισμού μετακινήσεων με τη βοήθεια της φωτογραμμετρίας (close range photogrammetry). Η μέθοδος αυτή, αναπτύχθηκε στις αρχές του 1980 στον τομέα της υδραυλικής μηχανικής, με σκοπό τη μέτρηση της ταχύτητας ροής πειραματικών μοντέλων μέσω ψηφιακών εικόνων. Στη συνέχεια, εξελίχθηκε και διευρύνθηκε προκειμένου σήμερα να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των μετακινήσεων και των παραμορφώσεων των υλικών σε διάφορα πειράματα στον τομέα της εδαφομηχανικής.

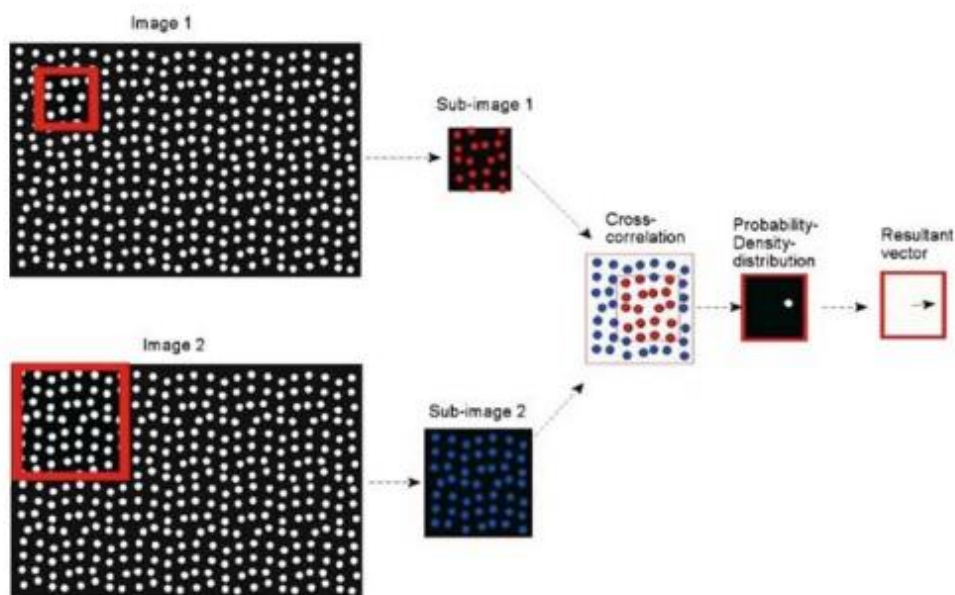
Η μέθοδος PIV έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει τη μετατόπιση ενός σωματιδίου του υπό εξέταση αντικειμένου, διαιρώντας μία αρχική εικόνα σε μικρότερα ανεξάρτητα τμήματα τα οποία ονομάζονται patches. Στη συνέχεια, για κάθε τμήμα που δημιουργείται, ο αλγόριθμος PIV καθορίζει ένα πρότυπο μοντέλο βασισμένο στις τονικές αντιθέσεις των σωματιδίων του, το οποίο στη συνέχεια προσπαθεί να εντοπίσει στις ακόλουθες εικόνες. Έτσι δημιουργούνται τα διανύσματα μετατόπισης (flow vectors) για κάθε σωματίδιο. Στο σχήμα 1.1 απεικονίζεται η διαδικασία που ακολουθεί η μέθοδος PIV σε γενικές γραμμές.

Η ακρίβεια των PIV μετρήσεων εξαρτάται τόσο από τον ίδιο τον αλγόριθμο PIV, όσο και από την ποιότητα των εικόνων και τους εκάστοτε παραμέτρους επεξεργασίας. Το μέγεθος των τμημάτων (patches) που δημιουργούνται καθώς και ο βαθμός αντίθεσης των τόνων της εικόνας, είναι οι κύριοι παράμετροι που επηρεάζουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία της PIV ανάλυσης. Αναλυτικότερα, όσο μεγαλύτερα είναι τα τμήματα αυτά που δημιουργούνται, τόσο μικραίνει η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, διότι είναι πολύ πιθανόν η μετατόπιση να συμβαίνει εντός του ίδιου προτύπου με αποτέλεσμα να μη δημιουργούνται διανύσματα μετατόπισης. Αντίθετα, αν τα τμήματα που δημιουργούνται είναι πολύ μικρά, υπάρχει πιθανότητα τα πρότυπα που δημιουργούνται να μην είναι αληθή, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται αρκετά διανύσματα μετατόπισης που δεν υφίστανται στην πραγματικότητα. Επιπλέον αν οι τονικές αντιθέσεις του δείγματος δεν επαρκούν, υπάρχει πιθανότητα τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να μην είναι συμβατά με την πραγματικότητα και να δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο μία λάθος αντίληψη για τα αποτελέσματα του πειράματος.

Επομένως η ακρίβεια των PIV μετρήσεων είναι ένας συνδυασμός από σφάλματα που γίνονται είτε κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, είτε κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των πειραμάτων και συγκεκριμένα στο στάδιο της βαθμονόμησης της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής, με την οποία ελήφθησαν οι φωτογραφίες των πειραμάτων. Σύμφωνα με τους White et al (2003), η σχέση που συνδέει την ακρίβεια των PIV μετρήσεων με το μέγεθος των τμημάτων (patches) είναι η ακόλουθη:

$$\rho_{pixel} = \frac{0.6}{L} + \frac{150000}{L^8} \quad (\text{εξ.1.1})$$

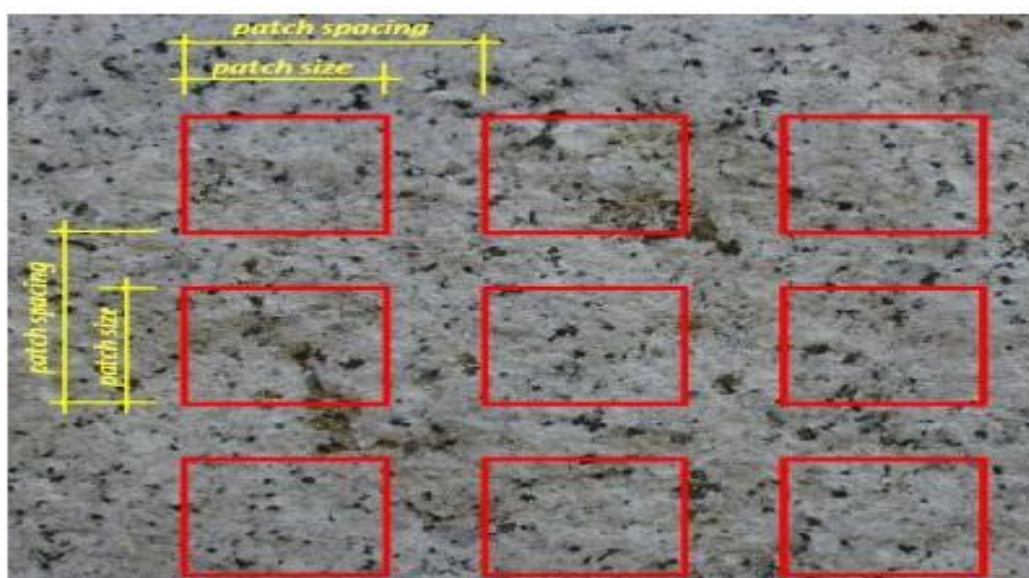
Επίσης σύμφωνα με τους White et al (2001), έχει αποδειχτεί ότι η ακρίβεια των μετρήσεων PIV μπορεί να προκύψει της τάξεως του $1/15$ του pixel ή ακόμη και της τάξεως του $1/40$ του pixel.



Σχ. 1.1 : Βήματα της ανάλυσης PIV

Το GeoPIV, είναι ένα λογισμικό του Matlab, το οποίο αναπτύχθηκε από τους A.Take και D.White στο πανεπιστήμιο του Cambridge, και εφαρμόζει τις τεχνικές της PIV μεθόδου για την ανάλυση των ανηγμένων παραμορφώσεων από ψηφιακές εικόνες. Αρχικά ο αλγόριθμος αυτός δημιουργήθηκε με σκοπό να προσδιορισθούν τα πεδία μετατοπίσεων και τροπών που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων σε γεωτεχνικούς φυγοκεντριστές μέσω ψηφιακών εικόνων. Η μέθοδος PIV με τη χρήση του λογισμικού GeoPIV μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: την προ-επεξεργασία, τους PIV υπολογισμούς, τη βαθμονόμηση (Calibration) και τη Μετα-επεξεργασία.

Στο στάδιο της προ-επεξεργασίας, γίνεται η οργάνωση των δεδομένων του πειράματος. Αρχικά επιλέγονται οι κατάλληλες φωτογραφίες που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, ώστε να το περιγράψουν όσον το δυνατόν πιστότερα και στη συνέχεια δημιουργείται ένα πλέγμα από τμήματα (patches) στην επιφάνεια της πρώτης φωτογραφίας, το οποίο κατά τη διάρκεια της ανάλυσης θα αποτελέσει τη βάση για την επεξεργασία των εικόνων. Το μέγεθος καθώς και η απόσταση των τμημάτων αυτών επιλέγεται ανάλογα με την περιοχή μελέτης. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα δείγμα της διαδικασίας δημιουργίας των τμημάτων αυτών.

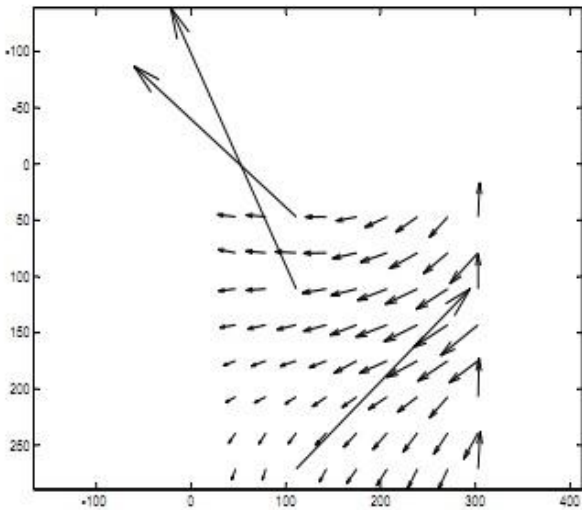


Σχ.1.2 : Δημιουργία τμημάτων (patches)

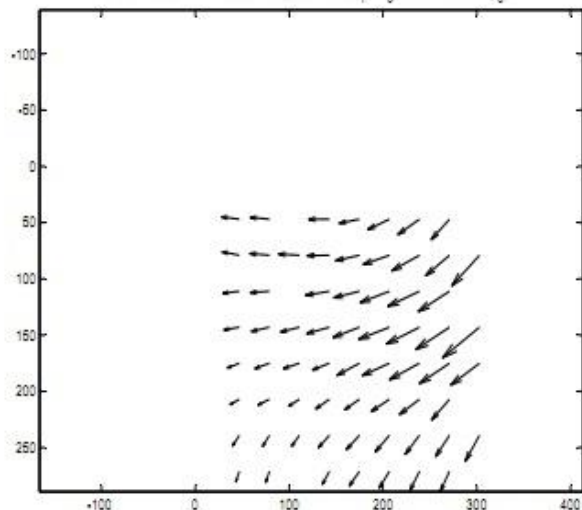
Στη συνέχεια γίνονται οι υπολογισμοί της P.I.V. μεθόδου, με σκοπό να προκύψουν τα διανύσματα μετατόπισης που παράγονται από την επεξεργασία των εικόνων μέσω των τμημάτων (patches) που έχουν ήδη δημιουργηθεί. Το χρονικό διάστημα των υπολογισμών εξαρτάται τόσο από το πλήθος και την ανάλυση των φωτογραφιών που έχουν επιλεχθεί για επεξεργασία, όσο και από τον αριθμό των τμημάτων (patches) που δημιουργήθηκαν προηγουμένως.

Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών και συγκεκριμένα στη φάση της πολλαπλής συσχέτισης των τμημάτων, υπάρχει το ενδεχόμενο να δημιουργηθούν κάποια διανύσματα μετατοπίσεων που δε συνάδουν με τα αναμενόμενα αποτελέσματα (wild vectors). Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχ.1.3) απεικονίζεται μία τέτοια περίπτωση μη συμβατών διανυσμάτων. Τα “wild vectors” είναι διανύσματα μετατόπισης τα οποία έχουν προέλθει από λανθασμένη ερμηνεία των προτύπων υφής και δε συμβαδίζουν με την πραγματικότητα. Αυτό συμβαίνει όταν δύο ή και περισσότερα πρότυπα υφής μοιάζουν μεταξύ τους με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος PIV να μην μπορεί να τα ξεχωρίσει. Επίσης, η εμφάνιση των “wild vectors” μπορεί να οφείλεται και σε άλλους παράγοντες όπως: όταν οι παραμορφώσεις είναι πολύ μεγάλες, όταν η ζώνη αναζήτησης (search zone) έχει μεγάλο εύρος, όταν οι τονικές αντιθέσεις μεταξύ των προτύπων δεν επαρκούν ή όταν τα τμήματα που δημιουργούνται (patches) είναι πολύ μικρά με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αρκετά όμοια χρωματικά πρότυπα.

Το λογισμικό όμως δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αφαιρέσει τα διανύσματα αυτά, προκειμένου να μην επηρεάσουν τα τελικά αποτελέσματα του πειράματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης μπορεί με κριτική σκέψη και σωστή ανάλυση των αποτελεσμάτων να παρεμβαίνει στα τελικά αποτελέσματα του πειράματος πριν ακόμη ολοκληρωθεί η διαδικασία.

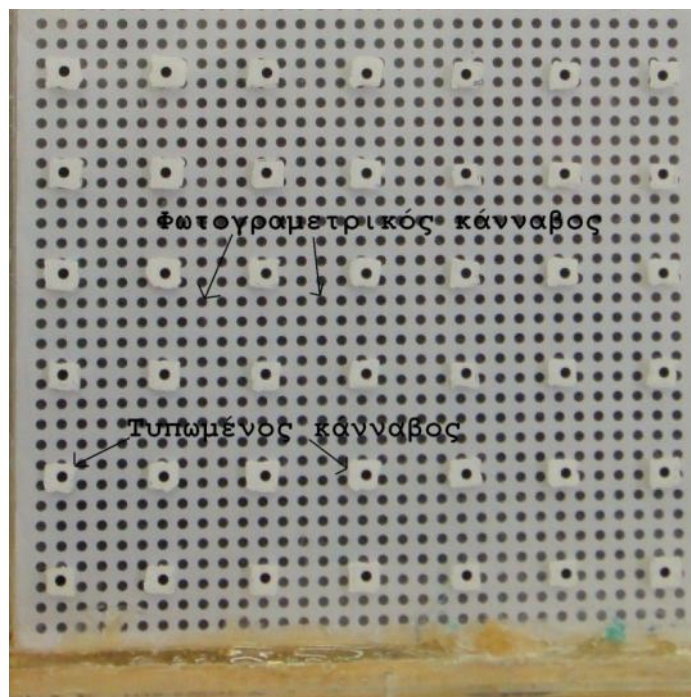


Σχ.1.3 : Παράδειγμα μη συμβατών διανυσμάτων μετατόπισης



Σχ.1.4 : Διαγραφή μη συμβατών διανυσμάτων μετατόπισης

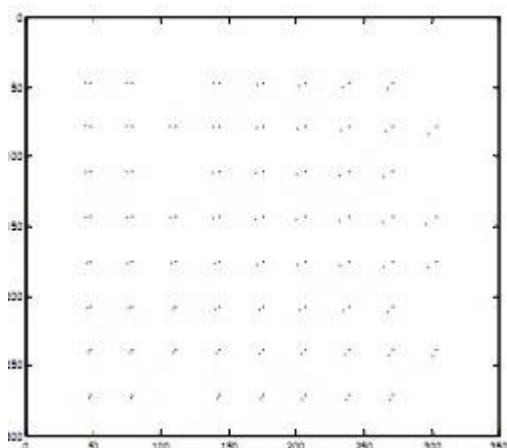
Τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει μέχρι στιγμής είναι σε μονάδες pixel και πρέπει να τροποποιηθούν προκειμένου να αναφέρονται στις συνηθισμένες μονάδες μέτρησης όπως είναι τα χιλιοστά του μέτρου (mm). Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει να δημιουργηθεί ένας κάρναβος στην επιφάνεια του υπό μελέτη μοντέλου, του οποίου η ακρίβεια δεν αρκεί να ελεγχθεί με απλές τεχνικές μέτρησης, όπως για παράδειγμα με τη χρήση χάρακα. Για το λόγο αυτόν, χρησιμοποιείται φωτογραμμετρικός κάρναβος, βάσει του οποίου γίνεται η βαθμονόμηση του τυπωμένου κάρναβου του μοντέλου. Στην εικόνα 1.1 που ακολουθεί φαίνεται η διαδικασία βαθμονόμησης του τυπωμένου κάρναβου.



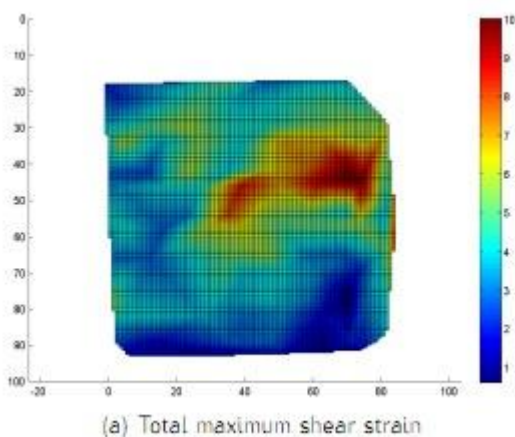
Εικ. 1.1: Φωτογραμμετρικός και τυπωμένος κάρναβος

Τέλος, στο τελευταίο στάδιο της P.I.V. μεθόδου εμφανίζονται οι μετατοπίσεις μεταξύ δύο εικόνων που κάθε φορά ο χρήστης ορίζει, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5. Επίσης το λογισμικό

εμφανίζει τη δυνατότητα παραγωγής των μετατοπίσεων, με αποτέλεσμα να υπολογίζει τις ανηγμένες παραμορφώσεις ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$) στις εικόνες που ο χρήστης έχει επιλέξει. Επιπλέον οι ανηγμένες αυτές παραμορφώσεις, εμφανίζονται με μία οπτική μέθοδο εναλλαγής χρωμάτων ανάλογα με την υπολογισμένη τιμή στη συγκεκριμένη θέση (σχ.1.6).



Σχ. 1.5: Οπτικό αποτέλεσμα μετατόπισης τμημάτων (patches)



Σχ. 1.6: Οπτικό αποτέλεσμα ανηγμένων παραμορφώσεων

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να υπολογίσει οποιοδήποτε είδος παραμόρφωσης επιθυμεί να μελετήσει, καθώς όπως φαίνεται και στο πίνακα που ακολουθεί μπορεί να υπολογίσει:

1. Τη συνολική μέγιστη διατμητική τάση που δέχεται το υπό εξέταση πρανές
2. Τη συνολική ογκομετρική παραμόρφωση που αυτό υφίσταται
3. Τη σταδιακή μέγιστη διατμητική τάση που αναπτύσσεται μεταξύ των διαδοχικών φωτογραφιών του πειράματος.

quantity	Strain
1	Total maximum shear strain
2	Total volumetric strain
3	Incremental maximum shear

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Ως *πρανή* καλούνται οι κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί του εδάφους. Σε κάθε πρανές η διαφορά στάθμης και οι κλίσεις που το χαρακτηρίζουν δημιουργούν δυνάμεις βαρύτητας, οι οποίες σε συνδυασμό με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του εδάφους από την πιθανή παρουσία νερού, δημιουργούν διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό του πρανούς. Στις διατμητικές αυτές τάσεις, οι οποίες τείνουν να μετακινήσουν τη μάζα του πρανούς προκειμένου να εξομαλυνθεί το έδαφος, αντιτίθεται η διατμητική αντοχή του εδάφους, και στην περίπτωση που αυτές την υπερβούν, τότε οδηγούν σε θραύση του πρανούς και σε κατολίσθηση (κατάσταση αστοχίας). (Turner & Schuster, 1996).

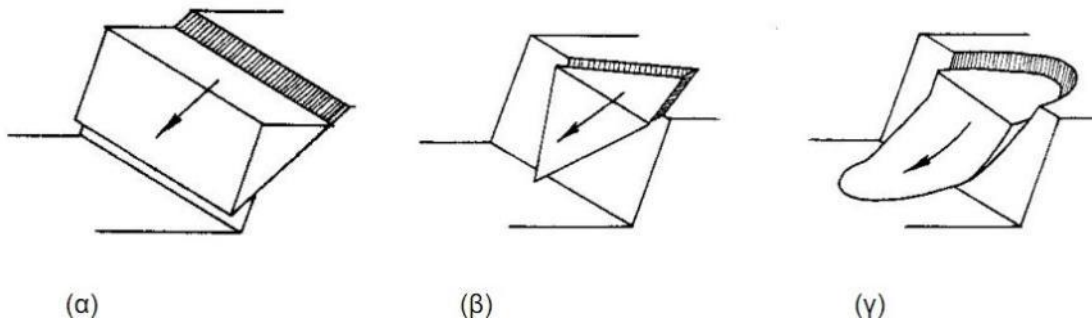
Με τον όρο *Αστοχία του πρανούς* περιγράφεται η κατάρρευση της μάζας της επιφανείας του. Η αστοχία αφενός μπορεί να προκληθεί λόγω επέμβασης του ανθρώπου στη φύση με την κατασκευή τεχνικών έργων (εκσκαφές ορυγμάτων, υποσκαφές, κ.α), τα οποία εκ των πραγμάτων διαταράσσουν την υφιστάμενη ισορροπία στο έδαφος και αφετέρου από την επίδραση γεωλογικών, γεωτεκτονικών ή φυσικών παραγόντων όπως το φαινόμενο της αποσάθρωσης, της διάβρωσης, του παγετού, της μεταβολής του υδροφόρου ορίζοντα και των σεισμών.

2.1 Ευστάθεια πρανών

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια ενός φυσικού ή τεχνητού πρανούς είναι:

- Η βαρύτητα, η οποία δρα ως παράγοντας αστάθειας του πρανούς, καθώς τείνει να παρασύρει προς τα κάτω και προς τα έξω ορισμένη μάζα εδάφους.
- Η συνοχή και η εσωτερική τριβή, που τείνουν να διατηρήσουν ενωμένα τα υλικά που συνθέτουν το πρανές με αποτέλεσμα να αντιστέκονται σε οποιαδήποτε μετακίνηση.
- Μερικοί άλλοι παράγοντες όπως η στρώση και ο κερματισμός του σχηματισμού, η παρουσία και η κίνηση του νερού σε συνδυασμό με τις συνθήκες αποστράγγισης του πρανούς, η επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών και οι χρονικές μεταβολές των τάσεων και των παραμορφώσεων.

Οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών βασίζονται στην παραδοχή κάποιας μορφής αστοχίας. Στην περίπτωση που το υλικό μελέτης είναι βράχος τότε οι μορφές αστοχίας που παρατηρούνται είναι η επίπεδη ολίσθηση, η σφηνοειδής ολίσθηση, η ανατροπή και η κυκλική ή περιστροφική ολίσθηση. Η τελευταία παρατηρείται σε εδαφικά πρανή ή έντονα διαταραγμένους βράχους.



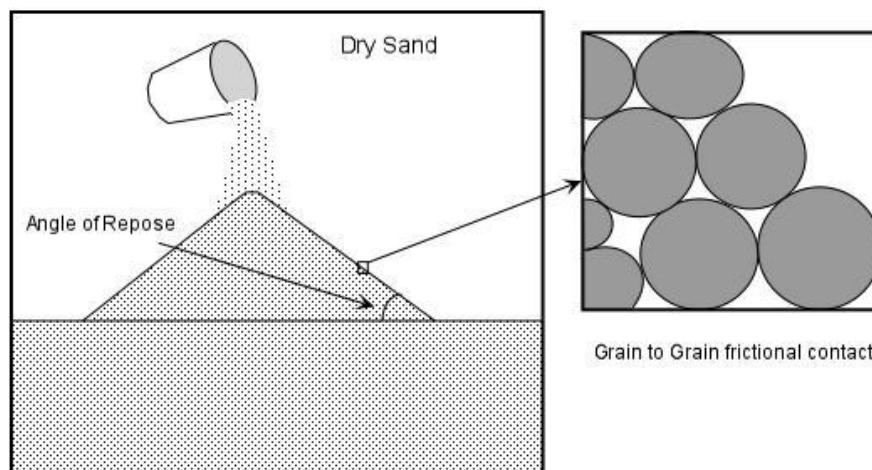
Εικ. 3.2: (α) Επίπεδη ολίσθηση, (β) Σφηνοειδής ολίσθηση, (γ) Κυκλική ολίσθηση

2.2 Ο ρόλος του νερού

Η παρουσία του νερού συμβάλλει σημαντικά στην ευστάθεια των πρανών. Αρχικά τόσο στα φυσικά όσο και στα τεχνητά πρανή, η προσθήκη του νερού στις πλαγιές τους, είτε από τις βροχοπτώσεις είτε από το λιώσιμο του πάγου, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βάρους σε αυτές. Η παρουσία υψηλής στάθμης υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα ή και επιφανειακού νερού στο πρανές ασκεί υδροστατικές πιέσεις σε αυτό, οι οποίες μειώνουν την ευστάθεια του. Επιπλέον η εναλλαγή των φάσεων του νερού (νερό, παγετός κλπ) έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται το εύρος των ασυνεχειών και να ασκεί πιέσεις ενώ παράλληλα να διευκολύνει την κυκλοφορία του νερού σε βαθύτερα σημεία του πρανούς καθώς αντικαθιστά τον αέρα στις θέσεις αυτές. Επίσης θα πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί και η ιδιότητα του νερού να λειτουργεί ως «λιπαντικό» όταν κινείται μεταξύ περατού και λιγότερο περατού στρώματος με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η αστοχία του πρανούς.

Επίσης η προσθήκη του νερού σε ένα πρανές επηρεάζει και τη γωνία κλίσης του.

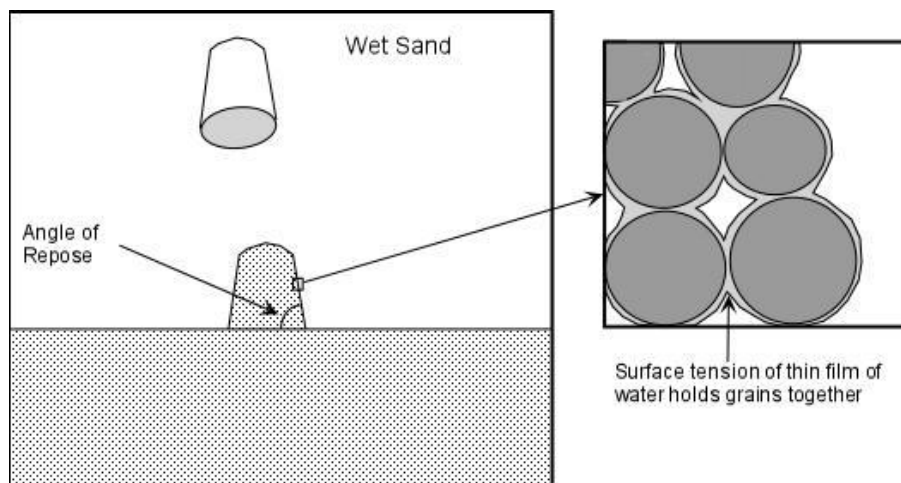
- Πρέπει να αναφερθεί ότι στη περίπτωση των ξερών υλικών (υλικά χωρίς προσθήκη νερού) το μέγεθος των κόκκων του εδάφους επηρεάζει κι αυτό τη γωνία κλίσης του πρανούς. Συνήθως οι τιμές της γωνίας κλίσης σε αυτή την περίπτωση κυμαίνονται από 30°-45° (σχ. 2.1).



Σχ. 2.1 : Η γωνία κλίσης στα ξερά υλικά

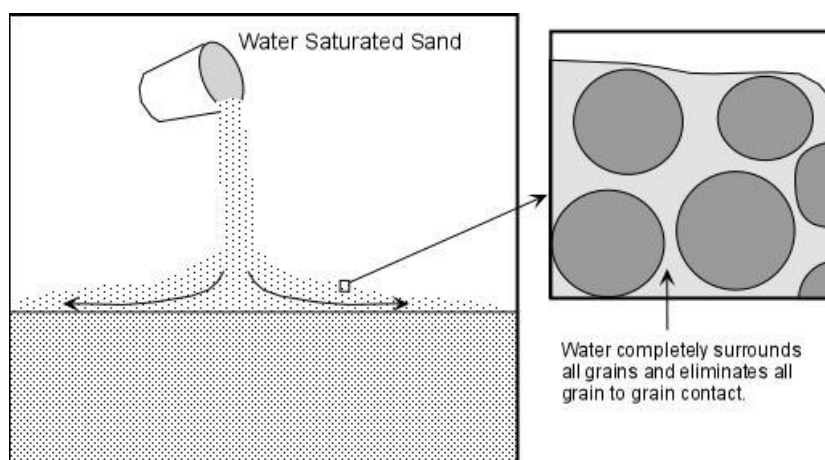
- Στην περίπτωση που το πρανές αποτελείται από υλικά που είναι ελαφρώς νοτισμένα με νερό, η τιμή της γωνίας κλίσης του πρανούς αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει διότι η

επιφανειακή τάση μεταξύ του νερού και των κόκκων του εδάφους τείνει να συγκρατεί τους κόκκους (σχ. 2.2).



Σχ. 2.2: Η γωνία κλίσης στα υγρά υλικά

- Στην περίπτωση που το πρανές αποτελείται από υλικά τα οποία είναι κορεσμένα από νερό, τότε η γωνία κλίσης του παίρνει πολύ μικρές τιμές και το πρανές έχει την τάση να ρέει όπως ένα ρευστό σώμα. Το φαινόμενο αυτό, οφείλεται στο γεγονός ότι το νερό διεισδύει στο εσωτερικό του εδάφους με αποτέλεσμα να μειώνει στο ελάχιστο τις δυνάμεις συνοχής που αναπτύσσονται μεταξύ των κόκκων του πρανούς (σχ. 2.3).



Σχ.2.3: Η γωνία κλίσης σε κορεσμένα από νερό υλικά

2.3 Ευστάθεια πρανών έναντι στατικών φορτίων

Αφού γίνει η παραδοχή της μορφής αστοχίας, ακολουθεί ανάλυση με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας. Από την ανάλυση αυτή, προκύπτει ένας συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος καλείται «Στατικός Συντελεστής Ασφαλείας» και συμβολίζεται με FS. Ο Συντελεστής Ασφαλείας ορίζεται ως ο λόγος του συνόλου των δυνάμεων που αντιστέκονται στην ολίσθηση και που οφείλονται στη διατμητική αντοχή του εδάφους, προς τις αντίστοιχες δυνάμεις που συνεισφέρουν στην αστάθεια του πρανούς, προκαλώντας την ολίσθηση του (Εξ. 2.1).

$$FS = \frac{\text{Δυνάμεις Αντιδρώσες}}{\text{Δυνάμεις Δρώσες}} \quad (\text{εξ.2.1})$$

Κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας αρχικά απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας και της αντίστοιχης ελάχιστης τιμής του συντελεστή ασφαλείας για την οποία το υπό εξέταση πρανές δε θα αστοχήσει. Αν η τιμή του συντελεστή ασφαλείας προκύψει ίση με τη μονάδα, τότε το υπό εξέταση πρανές βρίσκεται στην οριακή κατάσταση ισορροπίας – ευστάθειας. Αν η τιμή του συντελεστή προκύψει μικρότερη από τη μονάδα, τότε το πρανές είναι ασταθές και παρουσιάζεται η πιθανότητα εκδήλωσης κάποιας κατολίσθησης. Κατά το σχεδιασμό πρανών υπό κλίμακα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μία ελάχιστη τιμή του συντελεστή ασφαλείας, εναρμονισμένη με τους ισχύοντες κανονισμούς.

Ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να υπολογισθεί με διάφορες μεθόδους όπως με τη μέθοδο του κύκλου τριβής (Taylor) ή με τα νομογραφήματα Hoek και Bray.

2.4 Ευστάθεια πρανών έναντι σεισμικών φορτίων

Η εκδήλωση ενός σεισμού μπορεί να επιφέρει σημαντικές παραμορφώσεις και μετατοπίσεις στα φυσικά ή στα τεχνητά πρανή (Ambraseys N., Srbulov M., 1995). Εάν και κατά πόσο ένας σεισμός θα επιφέρει μόνιμες παραμορφώσεις σε ένα πρανές, είναι συνιστώσα πολλών παραγόντων όπως είναι η αντοχή του υλικού, η σύσταση του εδάφους και η εδαφική κίνηση.

Η εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου των πρανών βάσει μόνο του συντελεστή ασφαλείας FS κρίνεται ως ανεπαρκής. Συνεπώς η επιδεκτικότητα των πρανών σε διάφορες μορφές αστοχίας κατά την εκδήλωση του σεισμού, βασίζεται στον υπολογισμό μίας άλλης παραμέτρου, η οποία ονομάζεται *κρίσιμη επιτάχυνση* και συμβολίζεται ως K_C . Με τον όρο *κρίσιμη επιτάχυνση* εννοούμε την τιμή της επιτάχυνσης που θα φέρει το πρανές σε κατάσταση οριακής ισορροπίας. Η τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης εξαρτάται τόσο από τη γεωμετρία του πρανούς, όσο και από τις εδαφικές ιδιότητες του (Ambraseys N., Menu J., 1998). Επιπλέον κατά τον υπολογισμό της κρίσιμης επιτάχυνσης, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι συνθήκες αποστράγγισης και οι πιέσεις των υδατικών πόρων. Οι Sarma και Bhave (1975) συγκεντρώνοντας στοιχεία από τη μελέτη αρκετών φραγμάτων, παρατήρησαν πως υπάρχει μία γραμμική σχέση μεταξύ της κρίσιμης επιτάχυνσης K_C και του στατικού συντελεστή ασφαλείας FS (Εξ.2.2).

$$FS = 1.0 + b \cdot K_C \quad (\text{εξ.2.2})$$

όπου b: μία παράμετρος

Η τιμή του συντελεστή b δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από τη γεωμετρία του εδάφους. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής b σχετίζεται γραμμικά με τη συνάρτηση $\frac{1}{\tan\beta}$ όπου β: η κλίση του πρανούς. Επομένως, όσο πιο απότομο είναι το πρανές, τόσο μικρότερη θα είναι η τιμή του b και κατ' επέκταση και η τιμή του στατικού συντελεστή FS.

Ακολουθεί ο υπολογισμός του συντελεστή b από την ακόλουθη εξίσωση (Εξ.2.3)

$$b = 1.18 + \frac{0.66}{\tan\beta} \quad (\text{εξ.2.3})$$

Από το συνδυασμό των εξισώσεων 3.2 και 3.3 προκύπτει ότι:

$$K_C = \frac{FS-1.0}{b} \quad (\text{εξ.2.4})$$

Επιπλέον από το συνδυασμό των εξισώσεων 2.3 και 2.4 προκύπτει η τελική σχέση που μας δίνει την κρίσιμη επιτάχυνση σε συνάρτηση του συντελεστή ασφαλείας FS και της γωνίας κλίσης του πρανούς (Εξ. 2.5).

$$K_C = \frac{FS-1.0}{1.18 + \frac{0.66}{\tan\beta}} \quad (\text{εξ.2.5})$$

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να γίνει αναφορά για τον τρόπο που υπολογίζονται οι μόνιμες μεταμορφώσεις-μετατοπίσεις που προκλήθηκαν στο έδαφος λόγω των κυμάτων της επιτάχυνσης κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης του πρανούς. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναφερθούν οι εξισώσεις των Ambraseys N. και Menu J. όπου στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν για να ελεγχθεί αν η μετατόπιση του πρανούς θεωρείται κατάρρευση ή απλώς μόνιμη μετατόπιση.

$$\log u = 1.31 + \log \left[\left(1 - \frac{k_{cr}}{k_m} \right)^{2.96} \right] + 0.36 * t \quad (\text{εξ.2.6})$$

Όπου k_{cr} είναι η κρίσιμη επιτάχυνση και υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης 2.5

και k_m είναι η κρίσιμη επιτάχυνση σχεδιασμού του πρανούς.

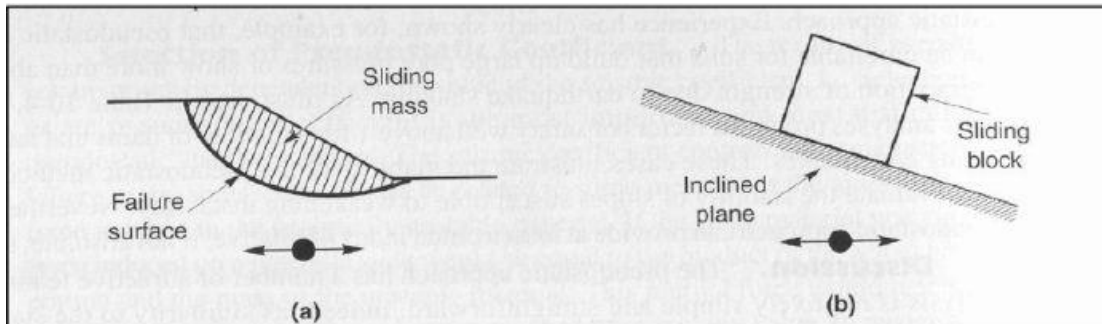
2.5 Μέθοδος Newmark

Όπως έχει προαναφερθεί όταν ένα πρανές υπόκεινται σε σεισμική φόρτιση αρκετές φορές η εκτίμηση των μετατοπίσεων και των παραμορφώσεων του βάσει μόνο του συντελεστή ασφαλείας FS κρίνονται ως ανεπαρκείς. Εάν οι αρχικές δυνάμεις που επιδρούν σε μία μάζα εδάφους, που είναι πιθανόν να αστοχήσει, γίνουν αρκετά μεγάλες ώστε οι ολικές δυνάμεις που τείνουν να προκαλέσουν την αστοχία ξεπεράσουν σε τιμή τις δυνάμεις που αντιστέκονται της αστοχίας, τότε ο συντελεστής ασφαλείας θα πάρει την τιμή της μονάδας. Ο Newmark(1965) μελέτησε τη συμπεριφορά των πρανών υπό αυτές τις συνθήκες και πρότεινε τη θεωρία της κυλιόμενης μάζας (sliding block theory).

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, το έδαφος θεωρείται άκαμπτο υλικό με πλαστική συμπεριφορά όταν αστοχήσει και η κατολίσθηση δημιουργείται κατά μήκος μίας επίπεδης επιφάνειας αστοχίας. Οι αδρανειακές δυνάμεις λόγω της σεισμικής δραστηριότητας θεωρούνται ψευδοστατικές και εκφράζονται με ένα συντελεστή σεισμικότητας που είναι συνάρτηση του βάρους της μάζας του εδάφους που είναι πιθανόν να αστοχήσει. Η κρίσιμη επιτάχυνση του πρανούς, όπως έχει προαναφερθεί, ορίζεται στην οριακή κατάσταση όπου ο συντελεστής ασφαλείας θα είναι ίσος με τη μονάδα. Επομένως η κατολίσθηση θα πραγματοποιηθεί όταν κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης η τιμή αυτή της κρίσιμης επιτάχυνσης ξεπερνιέται. Ο Newmark πρότεινε ότι οι μετακινήσεις λόγω της αντίστροφης επιτάχυνσης θα πρέπει να αμεληθούν εφόσον η κρίσιμη τιμή για την αντίθετη κατεύθυνση είναι συνήθως πολύ μεγάλη. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζονται οι μόνιμες παραμορφώσεις που προκαλούνται σε πρανή υπό σεισμική φόρτιση.

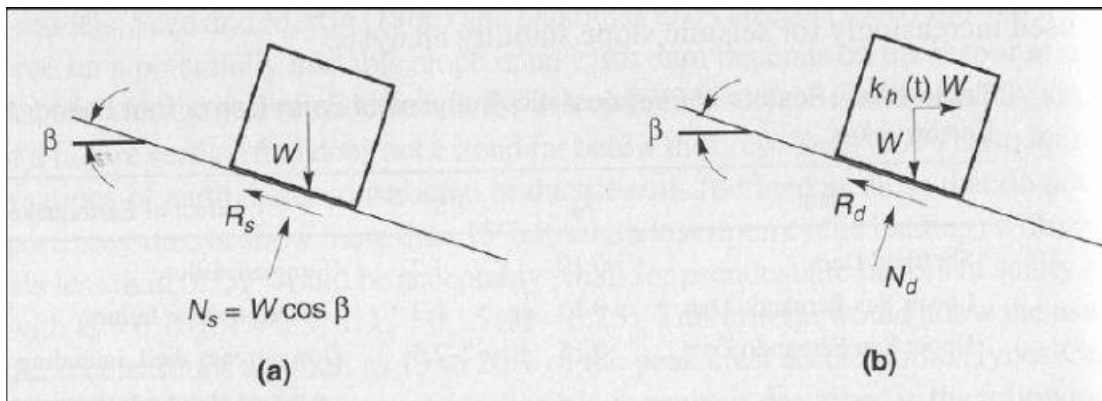
Στο σημείο αυτό, θα προσεγγιστεί το υπολογιστικό τμήμα της θεωρίας αυτής. Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση όπου δεν υπάρχει πρανές. Όταν ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με τη μονάδα,

τότε η μάζα του πρανούς βρίσκεται σε οριακή ισορροπία και τότε ορίζεται η κρίσιμη επιτάχυνση. Όταν ο συντελεστής ασφαλείας πάρει τιμές διάφορες της μονάδας, τότε η μάζα του εδάφους θα τείνει να κινηθεί προς την κατεύθυνση των δυνάμεων που τείνουν να προκαλέσουν την αστοχία. Η κατάσταση είναι ανάλογη με αυτή της μάζας που αντιστέκεται στην κίνηση σε κεκλιμένο επίπεδο, σχήμα 2.4 (Kramer, 1996).



Σχ. 2.4: Αναλογία μεταξύ a) πιθανής κατολίσθησης και b) μάζα που αντιστέκεται στην κίνηση (Kramer, 1996)

Ο Newmark βασίστηκε στην αναλογία αυτή για να αναπτύξει τη θεωρία της πρόβλεψης των μόνιμων παραμορφώσεων ενός πρανού υπό οποιαδήποτε εδαφική κίνηση. Θεωρώντας ότι η μάζα στο σχήμα 2.5(b) βρίσκεται σε στατική ισορροπία πάνω στο κεκλιμένο επίπεδο, προκύπτει το συμπέρασμα ότι κάτω από στατικές συνθήκες η δύναμη που αντιστέκεται στην κίνηση R_s πρέπει να είναι μεγαλύτερη της στατικής δύναμης που τείνει να προκαλέσει την κίνηση D_s .



Σχ. 2.5: Δυνάμεις που ασκούνται σε μάζα σε κεκλιμένο επίπεδο υπό a) στατικές συνθήκες και b) δυναμικές συνθήκες (Kramer, 1996).

Θεωρώντας ότι υπάρχει μόνο η αντίσταση τριβής που αντιστέκεται στην κίνηση της μάζας και φ η γωνία τριβής μεταξύ του επιπέδου ολίσθησης και της μάζας προκύπτει η εξίσωση 3.7 από την οποία προκύπτει ο στατικός συντελεστής ασφαλείας.

$$FS = \frac{R_s}{D_s} = \frac{W \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi}{W \cdot \sin \beta} = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \quad (\text{εξ.2.7})$$

Ακολουθεί η εκτίμηση ότι η επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων που μεταδίδονται στη μάζα από την οριζόντια ταλάντωση του επιπέδου, έχουν επιτάχυνση ίση με $a_h(t) = k_h(t) \cdot g$ και οι κάθετες επιταχύνσεις θεωρούνται αμελητέες. Σε δεδομένη χρονική στιγμή η οριζόντια επιτάχυνση θα προκαλέσει οριζόντια αδρανειακή δύναμη ίση με Wk_h . Όταν η δύναμη αυτή δρα

με κατεύθυνση προς τα κάτω τότε η ανάλυση των δυνάμεων ως προς το επίπεδο δίνουν την εξίσωση 2.8, η οποία μας δίνει το δυναμικό συντελεστή ασφαλείας.

$$FS_d(t) = \frac{R_d(t)}{D_d(t)} = \frac{[\cos\beta - k_h(t) \cdot \sin\beta] \cdot \tan\varphi}{\sin\beta + K_h(t) \cdot \cos\beta} \quad (\text{εξ.2.8})$$

Όπως είναι αναμενόμενο ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται, όσο το k_h αυξάνεται και θα υπάρξει κάποια τιμή του k_h όπου ο συντελεστής θα είναι ίσος με τη μονάδα, για την αρχικά στατικά ευσταθή μάζα. Έτσι, αντικαθιστώντας όπου $FS_d(t) = 1$ και λύνοντας ως προς k_h προκύπτει η εξίσωση 2.9, η οποία δίνει το κρίσιμο συντελεστή k_c που αντιστοιχεί στην κρίσιμη επιτάχυνση $a_c = k_c \cdot g$, η οποία προκαλεί την κατολίσθηση.

$$k_c = \frac{\tan\varphi - \tan\beta}{1 + \tan\varphi \cdot \tan\beta} \quad (\text{εξ.2.9})$$

Εξετάζοντας στη συνέχεια την περίπτωση που υπάρχει νερό, η εξίσωση 2.8 μετασχηματίζεται στην ακόλουθη:

$$FS_d(t) = \frac{R_d(t)}{D_d(t)} = \frac{W' \cdot \cos\beta \cdot \tan\varphi - k_h(t) \cdot W \cdot \sin\beta \cdot \tan\varphi}{W' \sin\beta + K_h(t) \cdot W \cdot \cos\beta} \quad (\text{εξ. 2.10})$$

όπου W' είναι το υπό άνωση βάρος της μάζας του πρανούς.

Ομοίως η εξίσωση 2.9 μετατρέπεται στην ακόλουθη:

$$k_c = \left[\frac{\tan\varphi - \tan\beta}{1 + \tan\varphi \cdot \tan\beta} \right] \cdot \frac{W'}{W} \quad (\text{εξ.2.11})$$

Ο λόγος $\frac{W'}{W}$ συνήθως έχει τιμές κοντά στο 0.5. Οπότε η εξίσωση 2.11 μετατρέπεται στην ακόλουθη:

$$k_c = 0.5 \left[\frac{\tan\varphi - \tan\beta}{1 + \tan\varphi \cdot \tan\beta} \right] \quad (\text{εξ.2.12})$$

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι όλες οι σχέσεις που αναπτύχθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια στο εργαστήριο για την κατασκευή της πειραματικής διάταξης και κατ' επέκταση για τη δημιουργία των κατάλληλων επιταχύνσεων που θα προκαλέσουν την κατολίσθηση του υπό μελέτη πρανούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

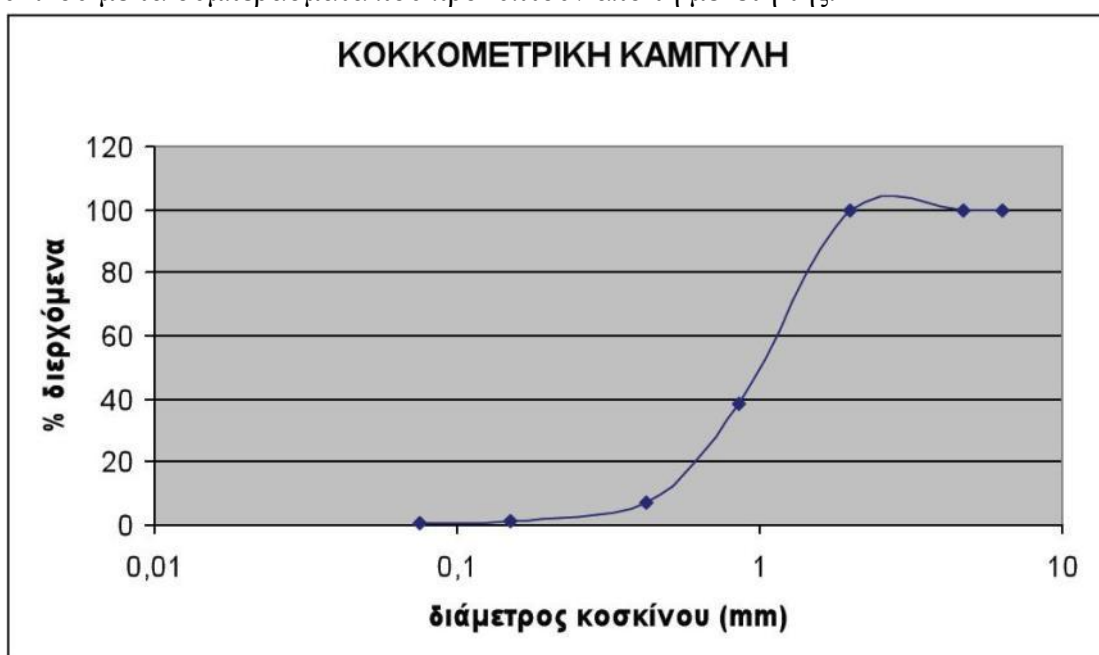
3.1 Σύνθεση πειραμάτων

Το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας, περιελάμβανε έναν αριθμό πειραμάτων τα οποία έλαβαν χώρα στο εργαστήριο μηχανικής με στόχο τον υπολογισμό των μετακινήσεων και των παραμορφώσεων του εδάφους με τη μέθοδο P.I.V. (Particle Image Velocimetry). Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- 1) Ελεύθερο πρανές το οποίο υπόκειται σε σεισμική φόρτιση.
- 2) Ελεύθερο πρανές το οποίο υπόκειται σε σεισμική φόρτιση μετά την προσθήκη νερού.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην επιλογή του εδαφικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, προκειμένου αυτό να πλησιάζει όσον το δυνατόν περισσότερο τις ιδιότητες του πρανούς. Για το λόγο αυτό, ως εδαφικό υλικό χρησιμοποιήθηκε άμμος, η οποία χαρακτηρίζεται ως ένα ασυνεχές μέσο και διευκολύνει τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Ναι μεν η άμμος προσομοιάζει όσο το δυνατόν πιστότερα τις συνθήκες του εργαστηρίου με τις συνθήκες που επικρατούν στο φυσικό περιβάλλον, αλλά επιπλέον δίνει τη δυνατότητα να διεξαχθούν πειράματα χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η κλίμακα του μοντέλου (δηλαδή το ύψος H του πρανούς).

Επειδή όπως προαναφέρθηκε ως εδαφικό υλικό χρησιμοποιήθηκε άμμος, αρχικό στάδιο για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ήταν η κοκκομετρική της ανάλυση. Στα πειράματα που διεξήχθησαν, χρησιμοποιήθηκε εδαφικό υλικό, το οποίο είχε προηγουμένως χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχη διπλωματική εργασία (Καββαδά,Ο. 2010) και για το λόγο αυτό δε χρειαζόταν να γίνει εκ νέου η κοκκομετρική του ανάλυση. Ακολουθεί η κοκκομετρική καμπύλη του εδαφικού υλικού με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη της.



Εικ. 3.1: Κοκκομετρική καμπύλη

Από την καμπύλη της εικόνας 3.1 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η διάμετρος D_{10} ονομάζεται ενεργός διάμετρος και η τιμή της είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς συνδέεται με τη δυνατότητα ροής του νερού μέσα στο έδαφος. Όταν η τιμή της ενεργούς διαμέτρου είναι μικρή, τότε το έδαφος περιέχει μεγάλο ποσοστό από λεπτόκοκκο υλικό.
Συγκεκριμένα, $D_{10}=0,45$ mm.
- Ο συντελεστής ομοιομορφίας C_u ορίζεται ως το πηλίκο της διαμέτρου από την οποία διέρχεται το 60% του δείγματος προς τη διάμετρο από την οποία διέρχεται το 10%.
Δηλαδή, $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$. Εάν η τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας είναι μεγάλη, τότε το δείγμα αποτελείται από καλά διαβαθμισμένα μεγέθη κόκκων, δηλαδή οι κόκκοι διαβαθμίζονται από τους μικρότερους στους μεγαλύτερους. Ένα καλό διαβαθμισμένο έδαφος θεωρείται εκείνο όπου ο συντελεστής ομοιομορφίας $C_u > 5$, ενώ εάν $C_u < 5$ θεωρείται σχετικά

ομοιόμορφο και εάν $C_u=1$ το έδαφος θεωρείται ότι αποτελείται από κόκκους ίδιας διαμέτρου.

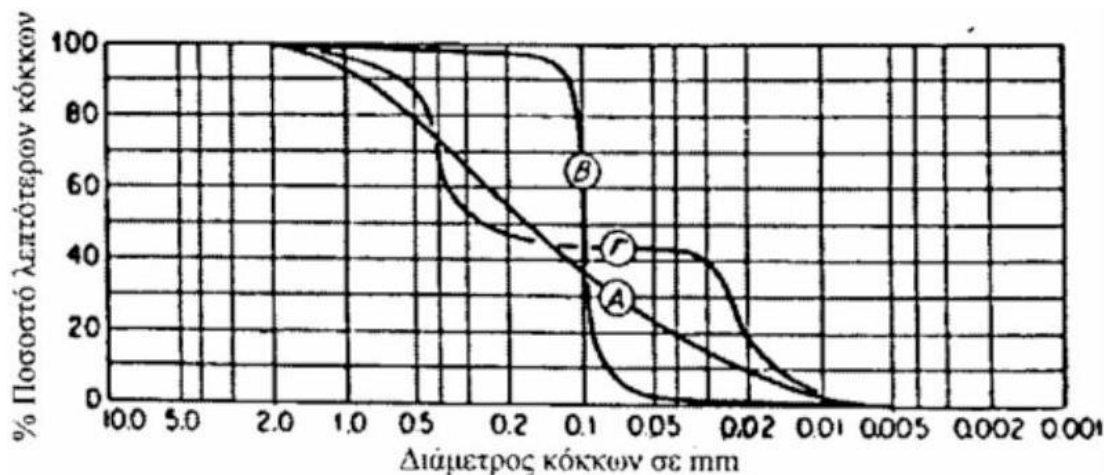
Συγκεκριμένα, $C_u=3.33$, επομένως αναφερόμαστε σε σχετικά ομοιόμορφο έδαφος.

- Ο συντελεστής καμπυλότητας C_c , ορίζεται ως το πηλίκο:

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60})$$

Συγκεκριμένα, $C_c=0.76$

Στην εικόνα 3.2 που ακολουθεί, απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές κοκκομετρικές καμπύλες των εδαφών.



Εικ. 3.2:

Χαρακτηριστικές κοκκομετρικές καμπύλες των εδαφών.

Συγκεκριμένα στην εικόνα 3.2 απεικονίζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες τριών διαφορετικών τύπων εδαφών. Το έδαφος με την καμπύλη Α θεωρείται *καλά διαβαθμισμένο*. Με τον όρο αυτόν, εννοείται ότι οι λεπτοί κόκκοι του εδάφους, εισχωρούν στα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων, με αποτέλεσμα το έδαφος να παρουσιάζει αντοχή στη διάβρωση και να παραμορφώνεται ελάχιστα. Το έδαφος με την καμπύλη Β, θεωρείται *κακώς διαβαθμισμένο* έδαφος, καθώς επικρατεί κυρίως ένα μέγεθος διαμέτρου κόκκων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται μεγάλα κενά. Επομένως το έδαφος αυτό, παρουσιάζει μικρή αντοχή στη διάβρωση και μπορεί να παραμορφωθεί. Τέλος, το έδαφος με την καμπύλη Γ, θεωρείται έδαφος κακής διαβάθμισης, καθώς οι κόκκοι του δεν καλύπτουν μεγάλο εύρος διαμέτρων.

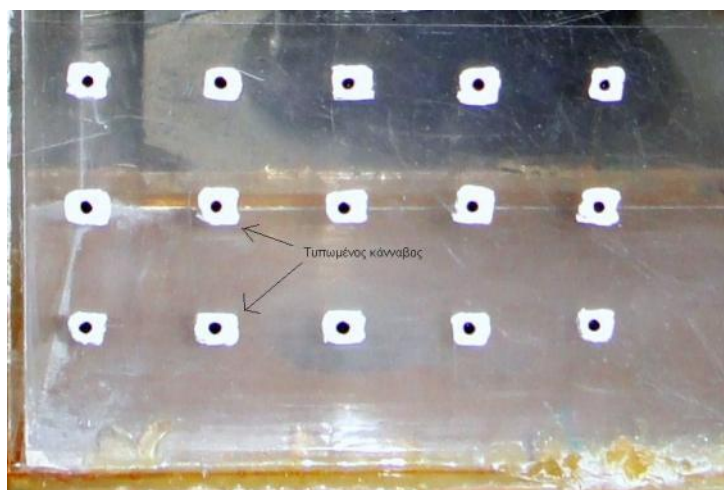
Επομένως, σύμφωνα με τις κοκκομετρικές καμπύλες των εδαφών (εικ.3.2) και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της ενεργού διαμέτρου D_{10} , του συντελεστή ομοιομορφίας C_u και του συντελεστή καμπυλότητας C_c , συμπεραίνεται πως το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα είναι έδαφος κατηγορίας Β και πιο συγκεκριμένα πρόκειται για άμμο κακής διαβάθμισης με χαλίκια.

Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, δόθηκε και στις συνθήκες φωτισμού αλλά και στη θέση της φωτογραφικής μηχανής για τη βέλτιστη λήψη των φωτογραφιών.

3.2 Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων

Στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκε ένα δοκίμιο από άμμο, το οποίο τοποθετήθηκε μέσα σε ένα δύσκαμπτο, διάφανο κουτί από Plexiglas διαστάσεων 350*150 mm κατά μήκος και πλάτος

και 150 mm κατά το ύψος του. Το κουτί ήταν κατασκευασμένο από Plexiglas προκειμένου να παρατηρηθεί και να μελετηθεί η συμπεριφορά του πρανούς κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας των πειραμάτων. Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στα ακόλουθα πειράματα, αποτελούνταν από χρωματισμένη άμμο και είχε εσωτερικές διαστάσεις 200*150 mm κατά μήκος και πλάτος και 95 mm κατά ύψος. Αρχικά στη μία άκρη του διαφανές κουτιού τοποθετήθηκε κάρναβος, προκειμένου να παρακολουθούνται οι μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στα μοντέλα με τη χρήση ψηφιακών φωτογραφιών και της μεθόδου ανάλυσης PIV. Ο κάρναβος αυτός σε συνδυασμό με ένα φωτογραμμετρικό κάρναβο ακριβείας (κουκίδες διαμέτρου 3 mm με μεταξύ τους απόσταση 6 mm) χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι απαραίτητη προϋπόθεση για την επίλυση της βαθμονόμησης είναι τόσο η ευρεία κατανομή των σημείων του κάρναβου στην περιοχή μελέτης (κατ' ελάχιστον 4 σημεία), όσο και η κατασκευή των δύο προαναφερθέντων κάρναβων σε ίσες διαστάσεις. Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα τυπωμένου κάρναβου τοποθετημένο πάνω στο διάφανο κουτί από Plexiglas ενώ στην εικόνα 3.4 φαίνεται ο ίδιος τυπωμένος κάρναβος, με ενσωματωμένο ένα φωτογραμμετρικό κάρναβο προκειμένου να επιτευχθεί το στάδιο της βαθμονόμησης.



Εικ. 3.3: Τυπωμένος κάρναβος.



Εικ. 3.4: Τυπωμένος και Φωτογραμμετρικός κάρναβος

Επειδή δεν υπήρχε πρόσβαση σε κάποιον φωτογραμμετρικό κάρναβο, αυτός που φαίνεται στην εικόνα 3.4 σχεδιάστηκε σε περιβάλλον AutoCAD, σύμφωνα πάντα με το πρότυπο του φωτογραμμετρικού καννάβου κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Επίσης και ο τυπωμένος κάρναβος σχεδιάστηκε σε περιβάλλον AutoCAD πάνω σε διαφανές χαρτί και στη συνέχεια τοποθετήθηκε σταθερά πάνω στη μία μεριά του Plexiglas καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων.

Η πειραματική διάταξη ολοκληρώθηκε με την τοποθέτηση μίας ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής πάνω στη σεισμική τράπεζα για την καταγραφή της συμπεριφοράς του δοκιμίου καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Επίσης τοποθετήθηκε μαύρο φόντο πίσω από τη διάταξη προκειμένου να αποφευχθεί η λανθασμένη ερμηνεία των προτύπων υφής, ώστε να μην παραχθούν διανύσματα μετατόπισης λόγω αντανάκλασης ή άλλων παραγόντων ανεξάρτητων από το πείραμα (wild vectors). Οι ψηφιακές φωτογραφίες που ελήφθησαν, χρησιμοποιήθηκαν για τη μέθοδο P.I.V. και κάποια από τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

3.3 Συσκευές συστήματος

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η παρατήρηση της σεισμικής συμπεριφοράς άοπλων πρανών καθώς και η μελέτη των επιφανειών αστοχίας τους. Για το σκοπό αυτό θεωρήθηκε απαραίτητη η διεξαγωγή πειραμάτων στο εργαστήριο μηχανικής, προκειμένου να γίνει χρήση των κατάλληλων διατάξεων και συσκευών που ήταν απαραίτητα για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Για την επιτυχή διεξαγωγή των πειραμάτων και την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο μονάδων – συσκευών και μετρητικών διατάξεων υπό κατάλληλη συνδεσμολογία. Η συνδεσμολογία αυτή, περιελάμβανε: μία σεισμική τράπεζα (εικόνα 3.5), μία γεννήτρια συχνοτήτων (εικόνα 3.6), έναν ενισχυτή σήματος (εικόνα 3.7), έναν επιταχυνσιογράφο (εικόνα 3.8) και μία κάρτα συλλογής δεδομένων (εικόνα 3.9). Στη συνέχεια ακολουθεί μία εκτενέστερη αναφορά στις μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και στον τρόπο λειτουργίας τους.

- **Σεισμική τράπεζα**

Η σεισμική τράπεζα που χρησιμοποιήθηκε στα ακόλουθα πειράματα είναι η σεισμική τράπεζα APS 400 ELECTRO-SEIS (εικόνα 4.3). Η ηλεκτρονική αυτή διάταξη λαμβάνει στην είσοδο της έναν ηλεκτρικό παλμό που στη συνέχεια τον μετατρέπει σε μηχανικό και με αυτόν τον τρόπο αναγκάζει το κινούμενο τμήμα της σε ταλάντωση με συχνότητα τη συχνότητα του παλμού που εμείς έχουμε εισάγει.



Εικ. 3.5: Σεισμική τράπεζα

- **Γεννήτρια συχνοτήτων**

Η γεννήτρια συχνοτήτων που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο GFG-8015G (Function Generator) και έχει την ικανότητα να παράγει τετραγωνικές, τριγωνικές, ημιτονοειδείς, κλίσεις και παλμικές κυματομορφές σε ένα εύρος συχνοτήτων από 0.2Hz-2MHz. Ο ηλεκτρονικός παλμός που δημιουργείται, στη συνέχεια μετατρέπεται σε μηχανικό και προκαλεί την επιθυμητή ταλάντωση της σεισμικής τράπεζας.



Εικ.3.6: Γεννήτρια συχνοτήτων

- **Ενισχυτής σήματος**

Ο ενισχυτής σήματος που χρησιμοποιήθηκε είναι Model 124-EP Dual-Mode Power Amplifier και είναι μία ειδικά σχεδιασμένη συσκευή για να παρέχει κίνηση σε σεισμικές τράπεζες. Το σήμα από την πηγή (γεννήτρια συναρτήσεων / ηλεκτρονικός υπολογιστής) μεταφέρεται μέσω καλωδίου στην είσοδο του ενισχυτή, τον οποίο ρυθμίζουμε καταλλήλως για την ενίσχυση ή εξασθένιση του πλάτους του σήματος αυτού. Στο πίσω μέρος του ενισχυτή υπάρχει έξοδος από όπου είναι δυνατή η παρατήρηση του πλάτους και της φάσης του σήματος κάθε χρονική στιγμή.



Εικ.3.7: Ενισχυτής σήματος

- **Επιταχυνσιογράφος**

Το επιταχυνσιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Quake Data Recorder(QDR) της εταιρείας Kinemetrics. Είναι ένα εύχρηστο, αξιόπιστο και χαμηλού κόστους όργανο καταγραφής της επιτάχυνσης που εφαρμόζεται στο σύστημα. Με την έναρξη της σεισμικής διέγερσης ο επιταχυνσιογράφος καταγράφει το σύνολο των επιταχύνσεων που μεταφέρονται στο κιβώτιο και στο πέρας του πειράματος αυτά ανακτώνται από τη μνήμη της συσκευής με τη βοήθεια του προγράμματος QDRTalk. Τα αρχεία αυτά περιέχουν τις τιμές των επιταχύνσεων στις τρεις ορθογώνιες συνιστώσες(επιτάχυνση κατά x , κατά y και κατά z), καθώς και τη χρονική στιγμή που σημειώθηκαν.



Εικ.3.8: Επιταχυνσιογράφος

- **Κάρτα συλλογής δεδομένων**

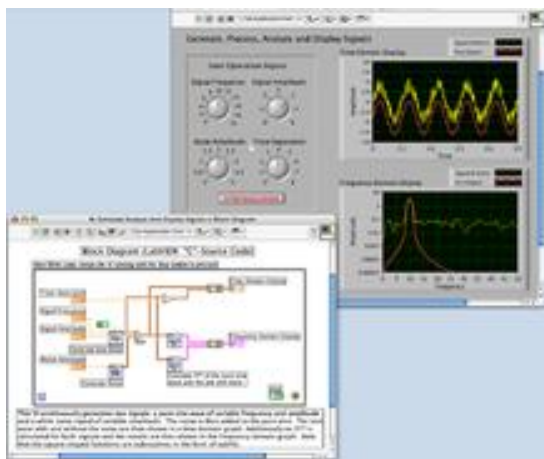
Τέλος για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, απαραίτητη ήταν η χρήση μιας ειδικής κάρτας συλλογής δεδομένων .Η ειδική αυτή κάρτα συλλογής δεδομένων συνδέεται με τον υπολογιστή με σκοπό να μπορεί ο χρήστης να ελέγχει τη σεισμική τράπεζα μέσω του προγράμματος LabView.



Εικ.3.9: Ειδική κάρτα συλλογής δεδομένων

- **Το λογισμικό LabView**

Το λογισμικό LabView είναι μία γραφική γλώσσα προγραμματισμού που αντί για γραμμές κειμένου σαν οποιαδήποτε άλλη γλώσσα προγραμματισμού, χρησιμοποιεί εικονίδια για τις εφαρμογές του. Τα προγράμματα LabView ονομάζονται virtual instruments ή αλλιώς Vis επειδή η εμφάνιση και η λειτουργία τους μιμούνται τα φυσικά όργανα. Ένα VI περιέχει τρεις συνιστώσες: Το Block diagram, το Front Panel και το Connector Panel. Το *Block diagram* περιέχει το γραφικό χαρακτήρα που ορίζει τη λειτουργικότητα του VI και δημιουργείται από γραφικές αναπαραστάσεις συναρτήσεων. Το *Front Panel* παίζει το ρόλο της διεπαφής χειρισμού (user interface) και δημιουργείται από ένα σετ εργαλείων και αντικειμένων και τέλος το *Connector Panel* χρησιμοποιείται για να εκπροσωπήσει ένα VI στα Block diagrams άλλων Vis.



Σχ.3.1 : Μέρος του LabView προγράμματος

Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές όπως είναι: οι δοκιμές και οι διάφορες μετρήσεις, η απόκτηση δεδομένων, ο έλεγχος οργάνων, η καταγραφή δεδομένων, η ανάλυση μετρήσεων και οι εφαρμογές παραγωγής εκθέσεων.

- **Συνδεσμολογία συσκευών**

Σε έναν υπολογιστή είναι εγκαταστημένα τα προγράμματα LabView και QDRTalk. Μέσω του πρώτου λογισμικού (LabView) γίνεται η παραγωγή του σήματος γνωστής συχνότητας και του εύρους ταλάντωσης, ενώ μέσω του δεύτερου (QDRTalk) γίνεται η μεταφορά των καταγεγραμμένων δεδομένων από τον επιταχυνσιογράφο στον υπολογιστή. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει παραπάνω, η παραγωγή του σήματος μπορεί να γίνει και μέσω της γεννήτριας συχνοτήτων, χωρίς όμως ακριβή καταγραφή του σεισμικού παλμού, αφού αυτός καθορίζεται χειροκίνητα από ένα μοχλό. Στη συνέχεια, το σήμα αυτό μεταφέρεται μέσω της κάρτας εισόδου-εξόδου αναλογικών και ψηφιακών δεδομένων, που είναι συνδεδεμένη με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή στον ενισχυτή και έτσι ενισχύεται κατά πάρα πολλές φορές. Ακολουθεί η μεταφορά του στη σεισμική τράπεζα όπου γίνεται η μετατροπή από ηλεκτρικό σήμα σε σεισμικό κύμα. Τέλος μέσω των επιταχυνσιομέτρων γίνεται η καταγραφή του σεισμικού αποτελέσματος.

3.4 Πειράματα με σεισμική φόρτιση

3.4.1 Πείραμα 1: Σεισμική φόρτιση – Ελεύθερο πρανές

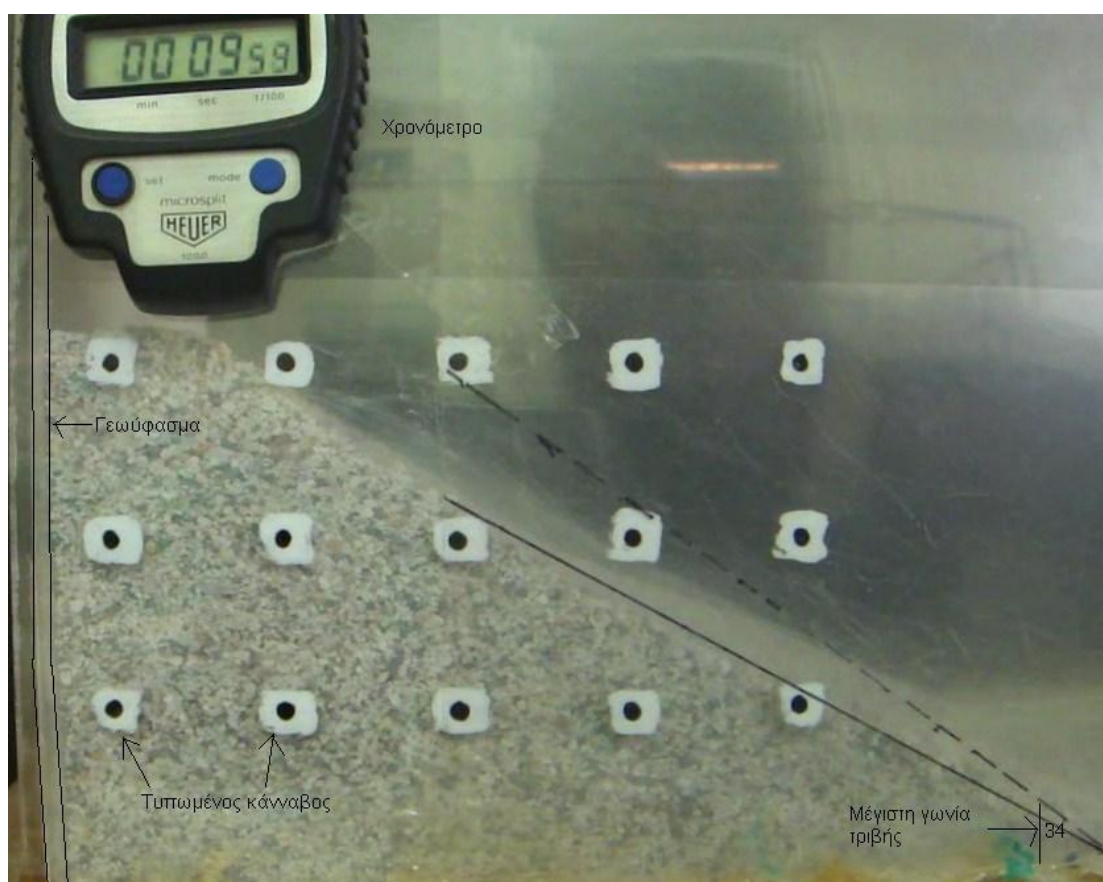
3.4.1.1 Περιγραφή πειράματος

Το πείραμα αυτό περιελάμβανε ένα πρανές διαστάσεων 200*150 mm κατά μήκος και πλάτος και 95 mm κατά ύψος μέσα στο άκαμπτο κουτί από Plexiglas που περιγράφηκε προηγουμένως. Το δοκίμιο στεκόταν μέσα στο κουτί με γωνία $\beta=28^\circ$. Η τιμή της γωνίας αυτής προέκυψε από την εξίσωση 2.7, όπου η μέγιστη γωνία τριβής υπολογίστηκε εργαστηριακά ίση με 35° ($\varphi=35^\circ$) και ο συντελεστής στατικής ισορροπίας FS θεωρήθηκε ίσος με 1.3, δηλαδή τιμή που αντιστοιχεί στα επιχώματα της Ζώνης 1 για την Ελλάδα. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε το κουτί από Plexiglas πολύ σταθερά πάνω στη σεισμική τράπεζα με τέτοιο τρόπο ώστε να μένει ακίνητο καθ' όλη τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης.

Κατά τη διαδικασία κατασκευής της πειραματικής διάταξης, τοποθετήθηκε ένας τυπωμένος κάρναβος, πάνω στο διάφανο κουτί, ο οποίος αποτελούνταν από κουκίδες διαμέτρου 3 mm σχεδιασμένος σε διάφανο φόντο (Εικόνα 3.3). Πρέπει να αναφερθεί ότι, πριν ξεκινήσει το πείραμα, είχε τοποθετηθεί μέσα στο κουτί, ένας φωτογραμμετρικός κάρναβος και η φωτογραφία που λήφθηκε μαζί με τον τυπωμένο κάρναβο, χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για τη βαθμονόμηση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής (Εικόνα 3.4). Ακολούθησε η τοποθέτηση ενός γεωφάσματος καθ' ύψος του πρανούς, προκειμένου οι συνθήκες του εργαστηρίου να ταυτιστούν όσον το δυνατόν καλύτερα με τις φυσικές. Παρατηρήθηκε σε προηγούμενα πειράματα ότι πριν την τοποθέτηση του γεωφάσματος το υπό εξέταση πρανές κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης παρουσίαζε μετατόπιση αρχικά στο κέντρο και στη συνέχεια στο πλάι, σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο το σχήμα της τάφρου. Αυτό οφειλόταν στο γεγονός ότι η επιφάνεια του κουτιού που ήταν τοποθετημένο μέσα το πρανές ήταν λεία, με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσεται τριβή μεταξύ των κόκκων της άμμου και του κουτιού, και να προκαλείται η αστοχία του πρανούς. Στη συνέχεια της προετοιμασίας του πειράματος τοποθετήθηκε ένα χρονόμετρο πάνω στο κουτί από Plexiglas, προκειμένου να καταγραφεί το πείραμα με χρονική ακρίβεια. Με αυτόν τον τρόπο μας είναι γνωστό ακριβώς η χρονική στιγμή που το υπό εξέταση πρανές αστόχησε και κατ' επέκταση η ταχύτητα με την οποία πραγματοποιήθηκε το φαινόμενο αυτό, μέσω του προγράμματος QDRTalk. Τέλος στερεώθηκε η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή πάνω στη σεισμική τράπεζα, η οποία θα κατέγραφε τη διαδικασία της φόρτισης με χρήση της

λειτουργίας video, το οποίο στη συνέχεια θα μετατρέποταν σε frames (διαδοχικές εικόνες) για ανάλυση. Η διαδικασία μετατροπής του video σε διαδοχικές εικόνες (frames) έγινε μέσω του προγράμματος IrfanView.

Η καταγραφή της σεισμικής φόρτισης έγινε με τη χρήση της λειτουργίας video αντί διαδοχικών φωτογραφιών ανά τακτά χρονικά διαστήματα διότι η κίνηση ήταν σαφώς πολύ γρήγορη και δε θα μπορούσε να καλυφθεί το γεγονός εξολοκλήρου με τη λήψη διαδοχικών φωτογραφιών ανά 1 sec. Στη συνέχεια, όπως προαναφέρθηκε, έγινε η μετατροπή του video σε frames μέσω του προγράμματος IrfanView. Η μετατροπή αυτή του video σε διαδοχικές εικόνες είχε ως αποτέλεσμα να ελαττωθεί αρκετά η ποιότητα των φωτογραφιών και με αυτό τον τρόπο να χαθεί ένα μέρος της ακρίβειας και της αποτελεσματικότητας της μεθόδου PIV. Στην εικόνα 3.10 που ακολουθεί, φαίνεται εξολοκλήρου η πειραματική διάταξη πριν από την έναρξη των πειραμάτων.

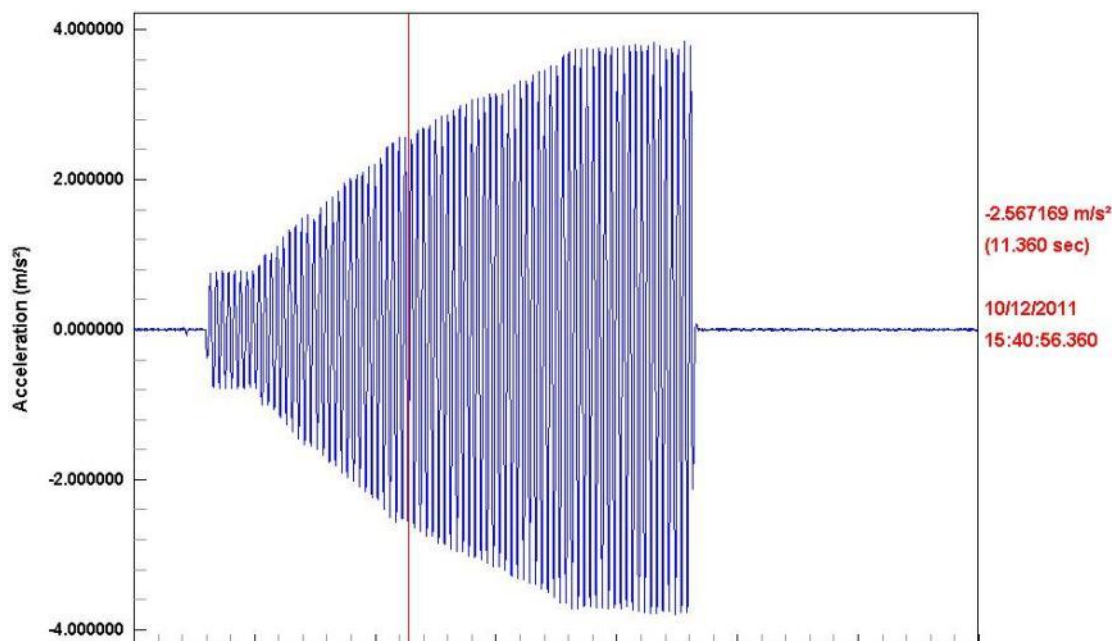


Εικ. 3.10: Πειραματική διάταξη

Η διακεκομμένη γραμμή ορίζει τη μέγιστη γωνία τριβής $\phi=35^\circ$, ενώ η άλλη ορίζει τη γωνία $\beta=28^\circ$ με την οποία στέκεται το πρανές μέσα στο διάφανο κουτί από Plexiglas.

Η πρώτη φάση του πειράματος περιελάμβανε τη φόρτιση του πρανούς με επιταχύνσεις διαφόρων τιμών. Αρχικά, υπολογίστηκε η τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης του πρανούς, βάσει της εξίσωσης 2.5 και στη συνέχεια το πρανές υπέστη σεισμική φόρτιση. Η ένταση της σεισμικής φόρτισης δεν ήταν σταθερή, αλλά αυξανόταν σταδιακά χειροκίνητα από τον ενισχυτή σήματος, αρχικά μέχρι τη στιγμή αστοχίας του πρανούς και στη συνέχεια μέχρι τη στιγμή κατάρρευσης του. Επίσης θα πρέπει στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι οι παλμοί που εισάγαμε, ήταν ημιτονοειδούς μορφής, σταθερής συχνότητας.

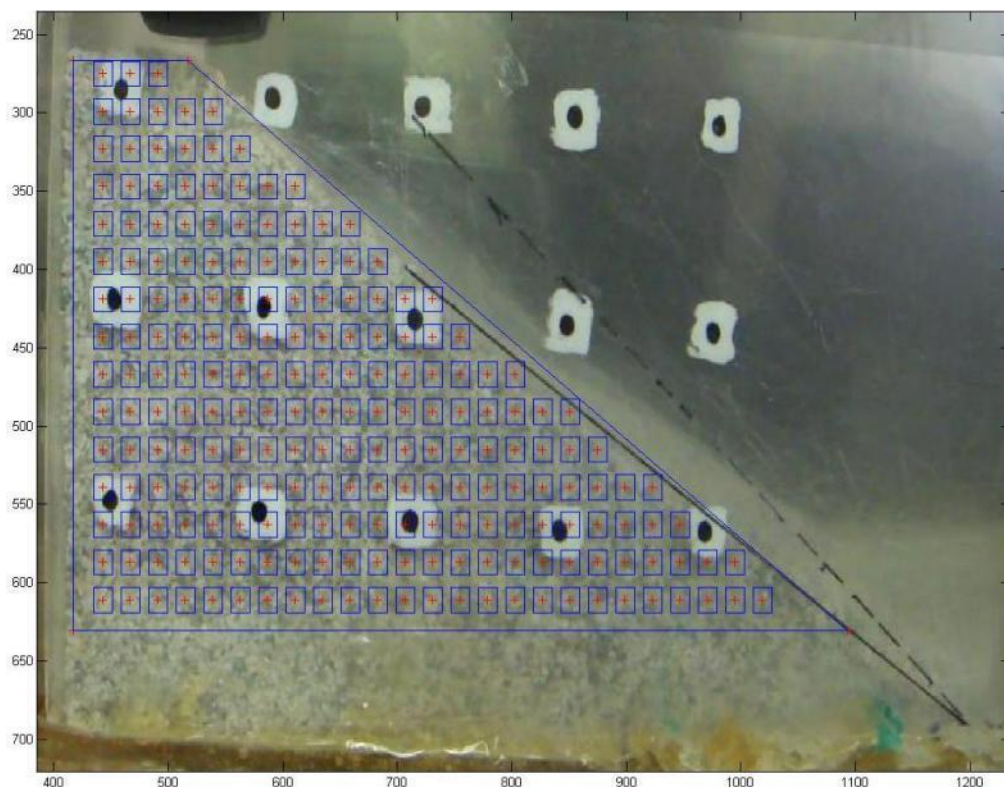
Όπως προαναφέρθηκε, η τιμή της κρίσιμης γωνίας του πρανούς προέκυψε από την εξίσωση 2.5 ίση με 28° , και επομένως η τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης βάσει της εξίσωσης 2.7 προέκυψε ίση με $0.12g$. Στη συνέχεια ακολουθεί το σειсмоγράφημα της συγκεκριμένης φόρτισης, όπου φαίνεται ειδικότερα η επιτάχυνση που είχε το πρανές τη στιγμή αστοχίας του. Αναλυτικότερα, το πρανές παρουσίασε αστοχία στο 11.360 δευτερόλεπτο της σεισμικής φόρτισης και με επιτάχυνση ίση με $0.26g$.



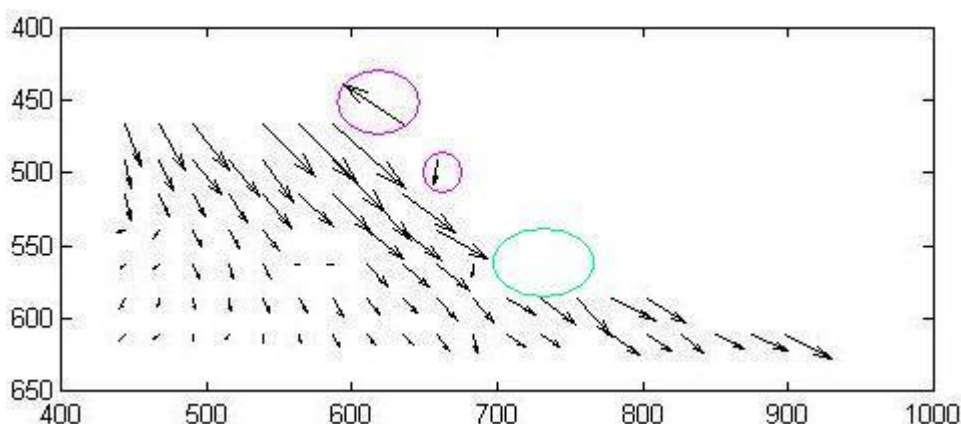
Εικ. 3.11 : Το σεισογράφημα της σεισμικής φόρτισης

Στο σημείο αυτό, παρατηρείται μία απόκλιση στην τιμή της επιτάχυνσης αστοχίας του πρανούς, από την τιμή της αναμενόμενης (τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης του). Ενώ βάσει υπολογισμών είχε προκύψει ότι $k_c=0.12g$, πειραματικά παρατηρείται ότι η επιτάχυνση με την οποία το πρανές αστόχησε ήταν ίση με $k_m=0.26g$. Η διαφορά αυτή στην τιμή των επιταχύνσεων δε σημαίνει ότι για τιμή $k_c=0.12g$ δεν υπάρχει μετατόπιση. Μπορεί στη συγκεκριμένη τιμή, να μην παρουσιάζεται αστοχία του πρανούς, αλλά εσωτερικά μπορεί να σημειώνονται μετατοπίσεις. Επίσης μπορεί να οφείλεται και στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης υπάρχει διαφορά στη τιμή της μετρούμενης επιτάχυνσης στη βάση και στην οροφή του πρανούς (Πατακιά, 2006).

Μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ακολούθησε η διαδικασία επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο PIV σε περιβάλλον Matlab. Αρχικό στάδιο της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων ήταν ο τεμαχισμός της αρχικής εικόνας σε μικρότερα τμήματα (patches). Στην εικόνα 3.12 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας patches στην αρχική φωτογραφία του μοντέλου με μέγεθος $16*16$ pixel και μεταξύ τους απόσταση ίση με 24 pixel. Επίσης στην εικόνα 3.13 παρουσιάζεται ένα τυπικό αποτέλεσμα μετατόπισης κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης.



Εικ. 3.11: Δημιουργία τμημάτων (patches) στο πρανές



Εικ. 3.12: Τυπική μετατόπιση

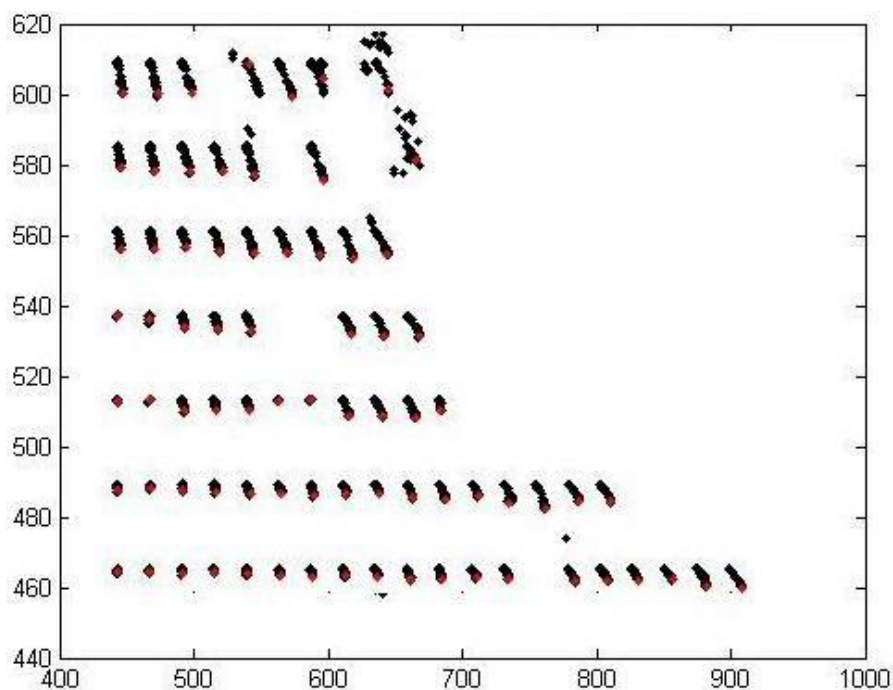
Σύμφωνα με το τυπικό αποτέλεσμα μετατόπισης της εικόνας 3.12, παρατηρείται ότι η μετατόπιση του πρανούς δεν είναι επιφανειακή αλλά καλύπτει ένα μεγάλο τμήμα αυτού. Επίσης στην ίδια εικόνα, φαίνεται η δημιουργία 2 μη συμβατών διανυσμάτων ροής (wild vectors) που σχηματίστηκαν κατά τη διαδικασία επεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Η δημιουργία αυτών των διανυσμάτων μπορεί να οφείλεται είτε στο ξεκίνημα της σεισμικής φόρτισης, καθώς το μοντέλο από την κατάσταση αδράνειας, σε ελάχιστο χρονικό διάστημα υφίστατο σεισμική ταλάντωση, είτε στο γεγονός ότι αρκετοί κόκκοι άμμου κολλούσαν στο κουτί από Plexiglas, με αποτέλεσμα να μην ακολουθούν την αναμενόμενη πορεία. Επιπλέον στα σημεία του διαγράμματος που φαίνονται ότι δεν έχουμε καμία πληροφορία (πράσινος κύκλος), στην πραγματικότητα στις θέσεις αυτές, οι κόκκοι της άμμου παρέμεναν σταθεροί, με αποτέλεσμα να μην παράγονται τα αντίστοιχα διανύσματα μετατόπισης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αρχική και η τελική κατάσταση του πρανούς στη δεδομένη φόρτιση.



Εικ. 3.13 : Αρχική κατάσταση πρανούς

Τελική κατάσταση πρανούς με φόρτιση

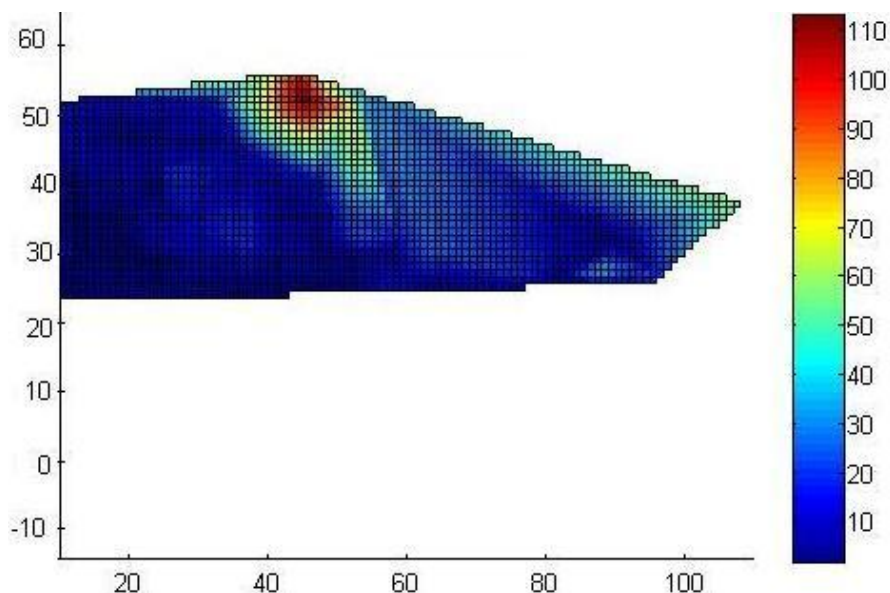
Στην εικόνα 3.14 που ακολουθεί, φαίνονται οι αρχικές και οι τελικές θέσεις των διαφόρων τμημάτων της εικόνας (patches) του πειράματος που αναπαριστούν την κίνηση των κόκκων της άμμου του δοκιμίου καθώς εξελίσσεται το πείραμα. Επίσης φαίνεται η πορεία των τμημάτων αυτών στις διάφορες φάσεις του πειράματος στις οποίες πάρθηκαν οι φωτογραφίες.



Εικ.3.14: Συνολικές μετατοπίσεις των κόκκων της άμμου

Συγκεκριμένα φαίνεται ότι οι μετακινήσεις των κόκκων της άμμου παρουσιάζονται σε μεγάλο μέρος της επιφάνειας του πρανούς και προκαλούν επιφανειακή αστοχία.

Επίσης η μέθοδος PIV παρέχει τη δυνατότητα της γραφικής αναπαράστασης των ανηγμένων παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία δημιουργίας της επιφανειακής αστοχίας. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζονται με χρωματική διαφοροποίηση οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στις διάφορες θέσεις του μοντέλου και αντιστοιχούν στα διανύσματα ροής της εικόνας 3.12.

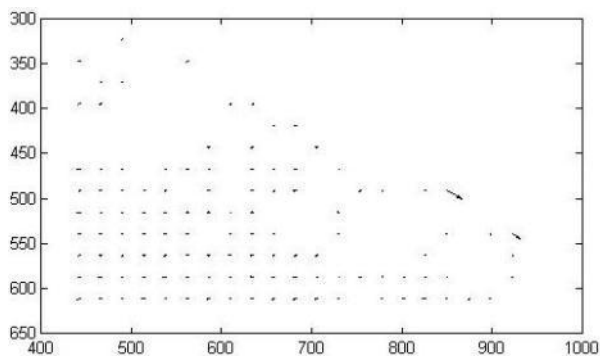


Εικ.3.15: Γραφική αναπαράσταση ανηγμένων παραμορφώσεων

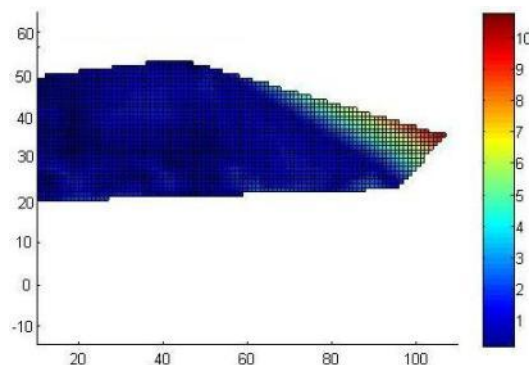
Τα συνολικά αποτελέσματα των διανυσμάτων μετατόπισης και των ανηγμένων παραμορφώσεων παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

3.4.1.2: Αποτελέσματα πειράματος 1

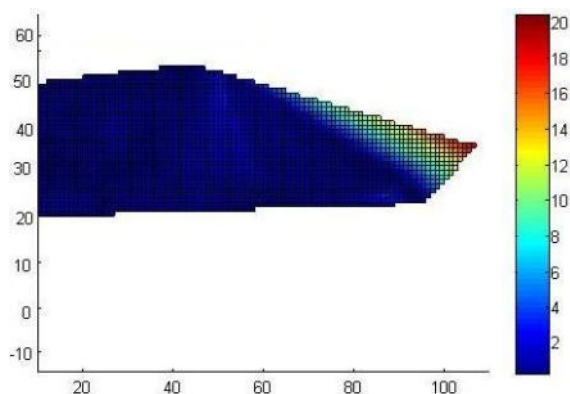
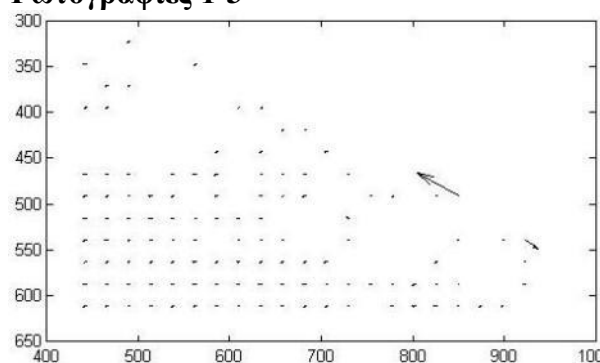
Διανύσματα μετατόπισης Φωτογραφίες 1-2



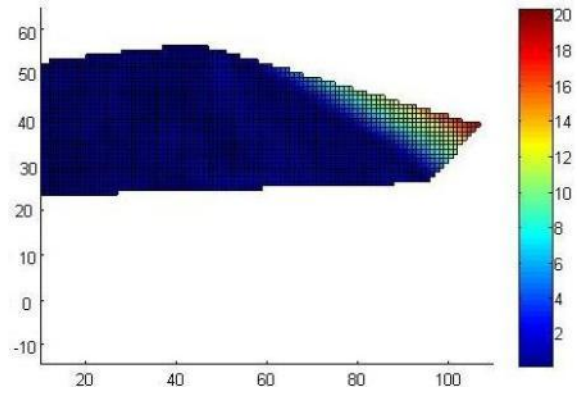
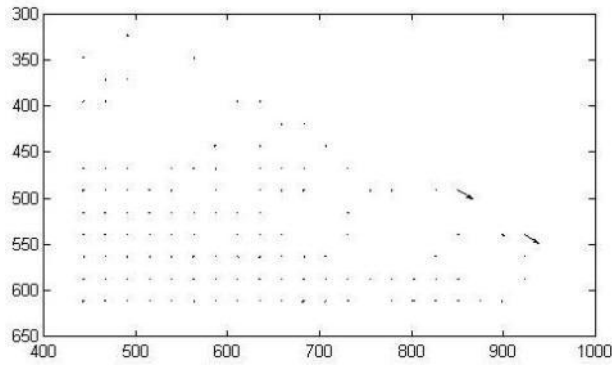
Ανηγμένες παραμορφώσεις



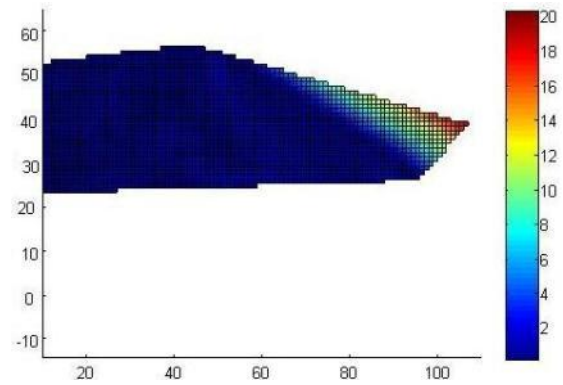
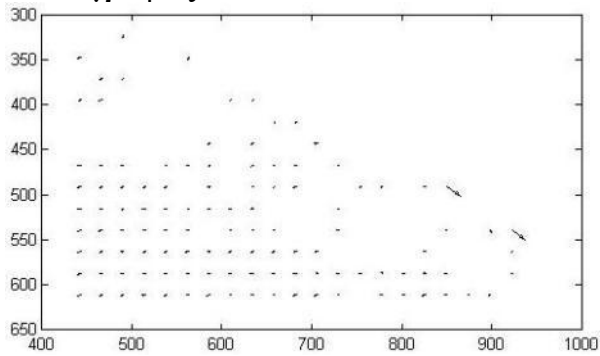
Φωτογραφίες 1-3



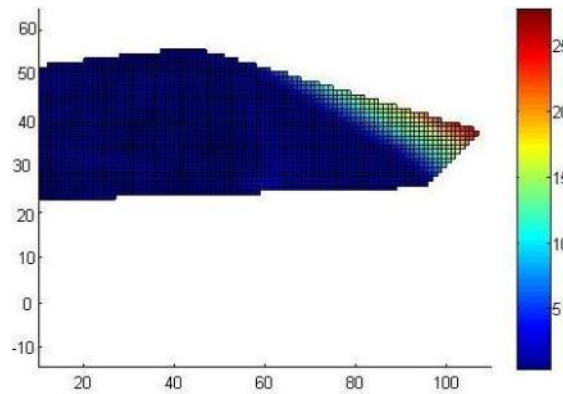
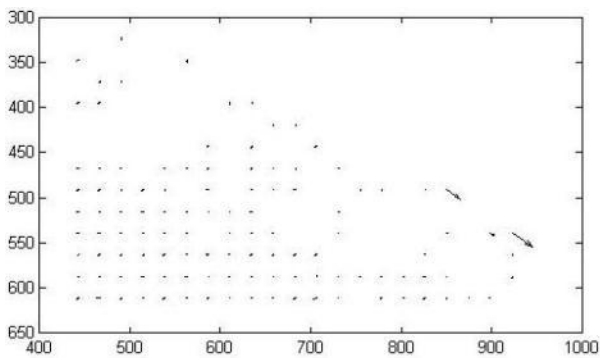
Φωτογραφίες 1-4



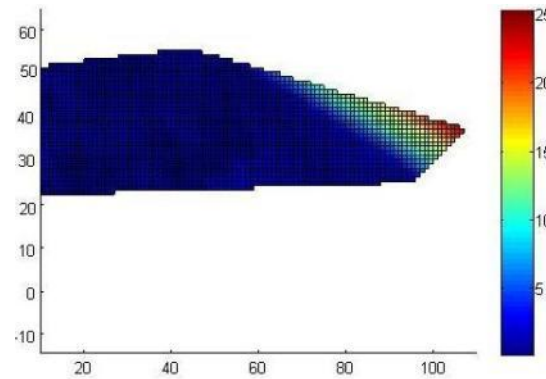
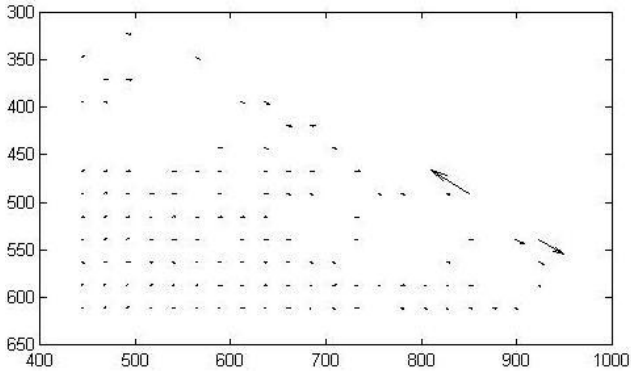
Φωτογραφίες 1-5



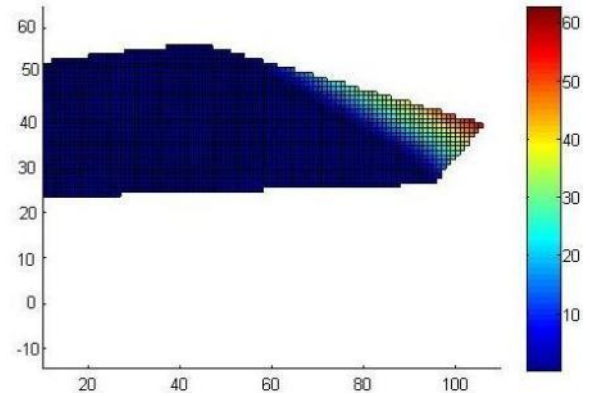
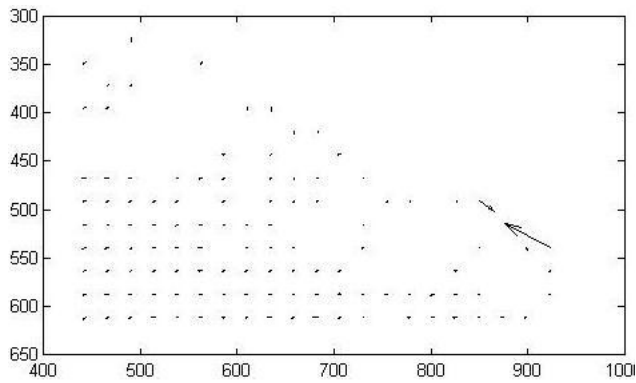
Φωτογραφίες 1-6



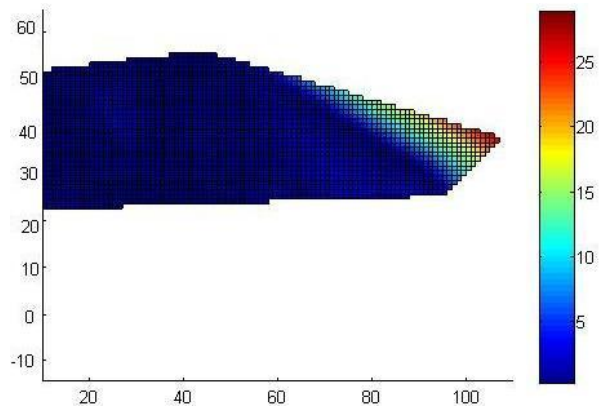
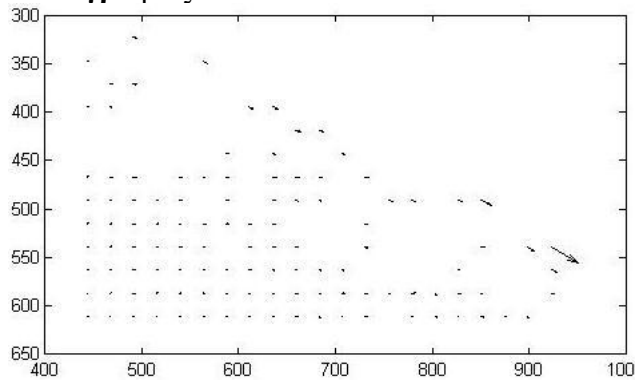
Φωτογραφίες 1-7



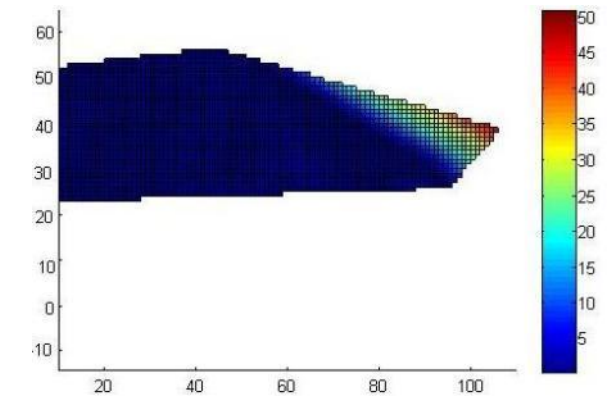
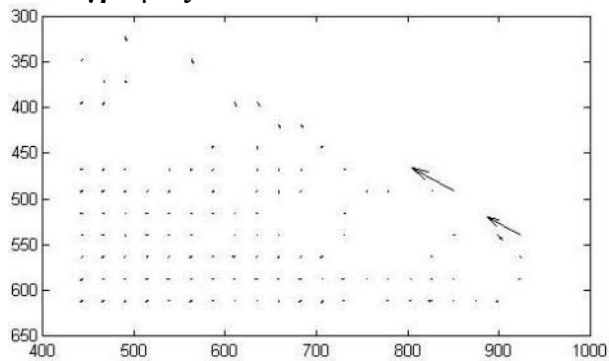
Φωτογραφίες 1-8



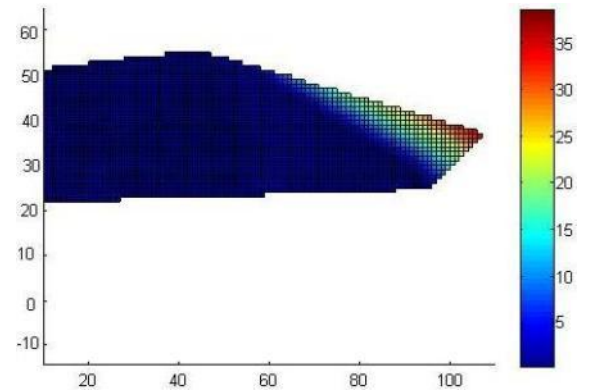
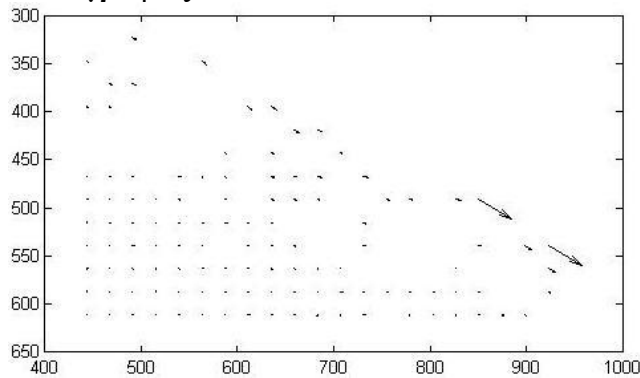
Φωτογραφίες 1-9



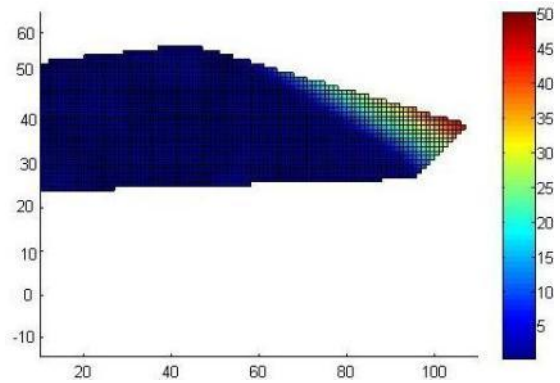
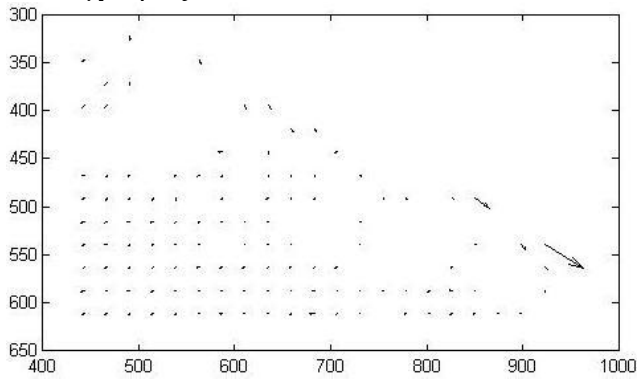
Φωτογραφίες 1-10



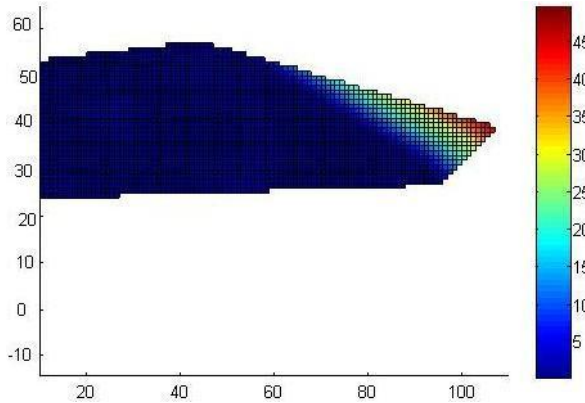
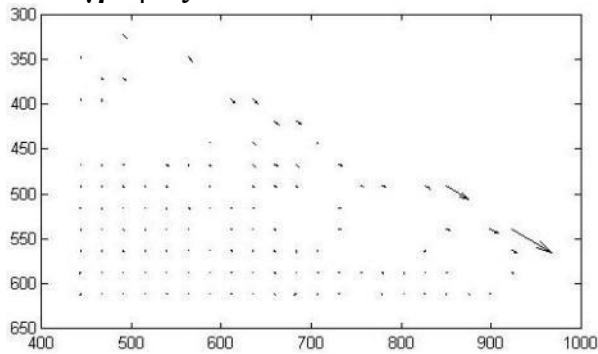
Φωτογραφίες 1-11



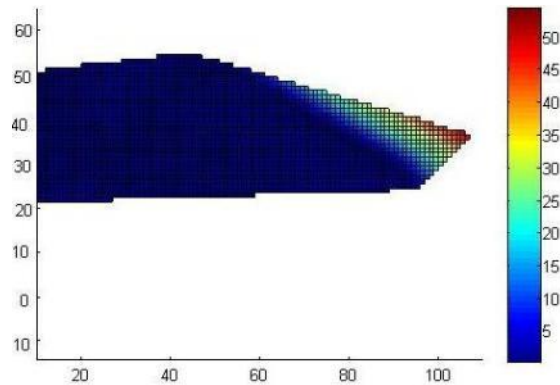
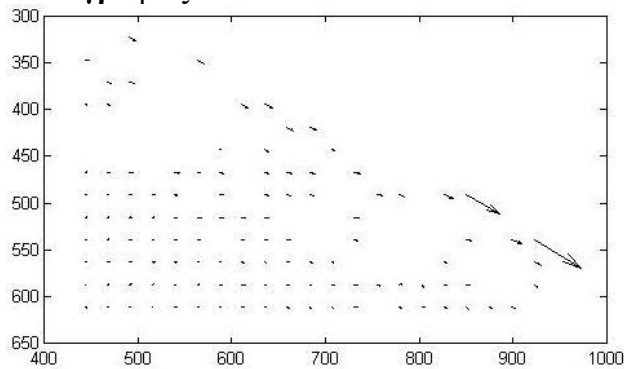
Φωτογραφίες 1-12



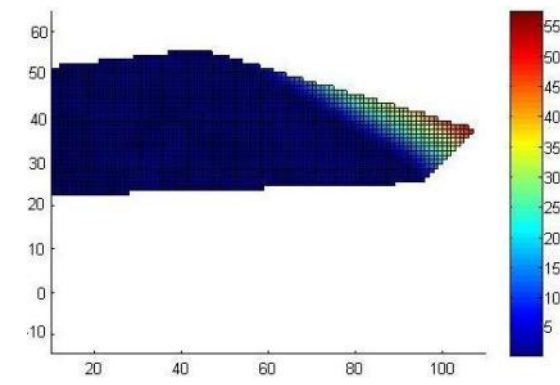
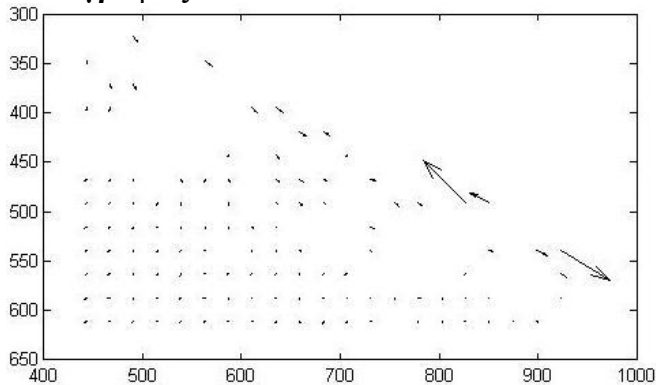
Φωτογραφίες 1-13



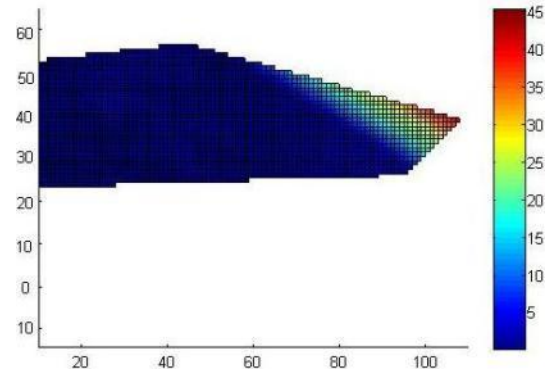
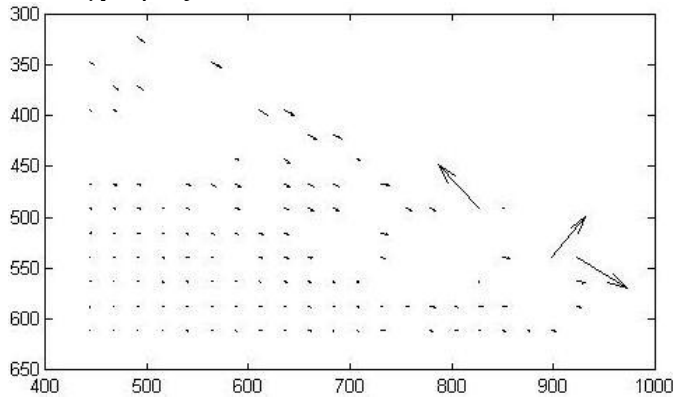
Φωτογραφίες 1-14



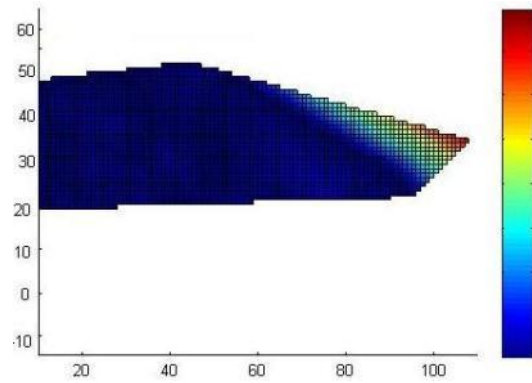
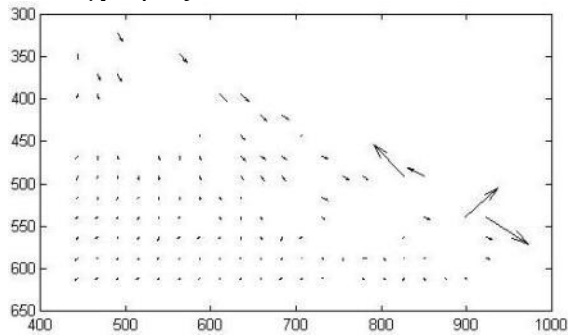
Φωτογραφίες 1-15



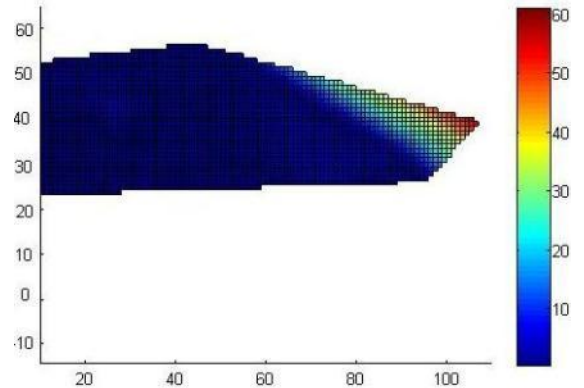
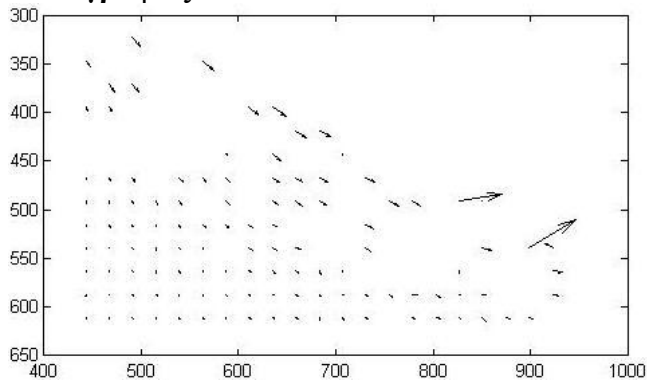
Φωτογραφίες 1-16



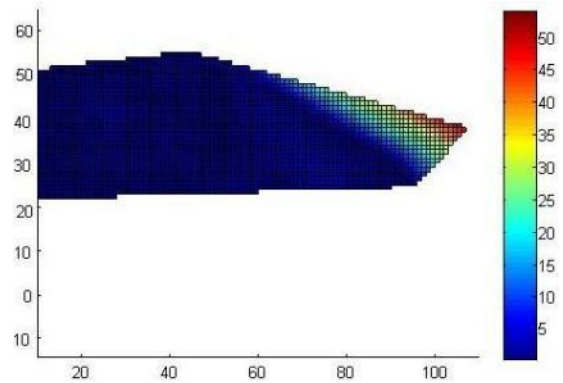
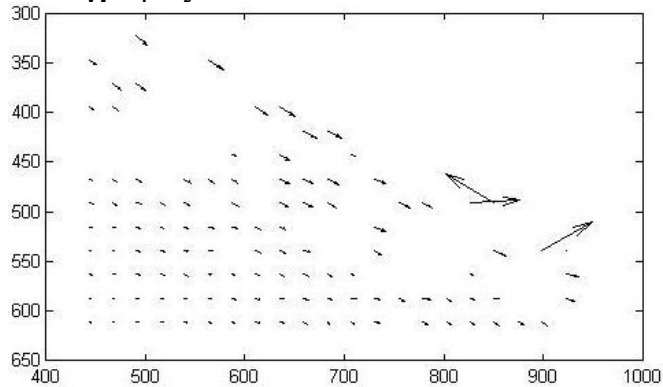
Φωτογραφίες 1-17



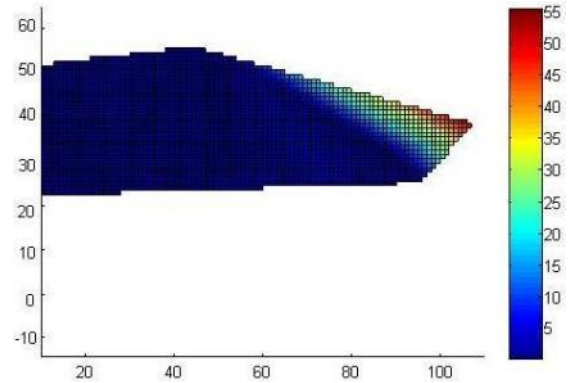
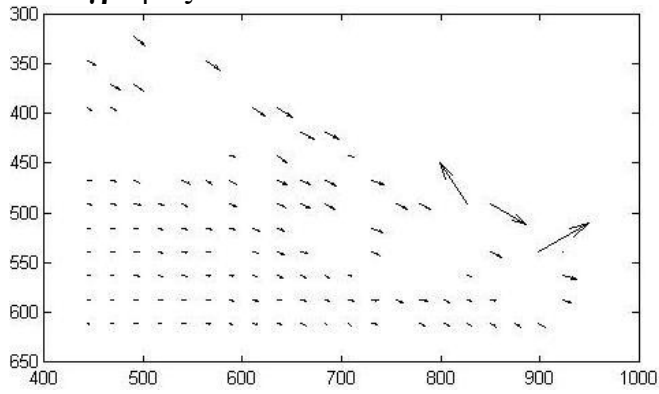
Φωτογραφίες 1-18



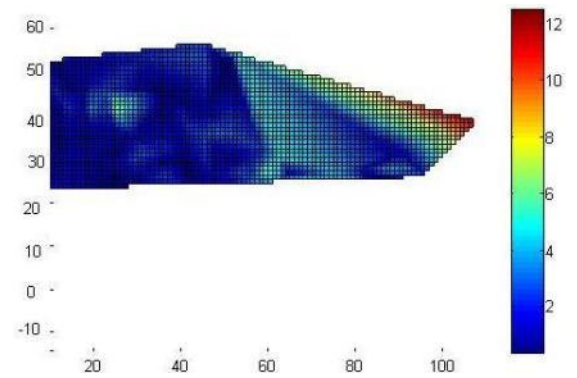
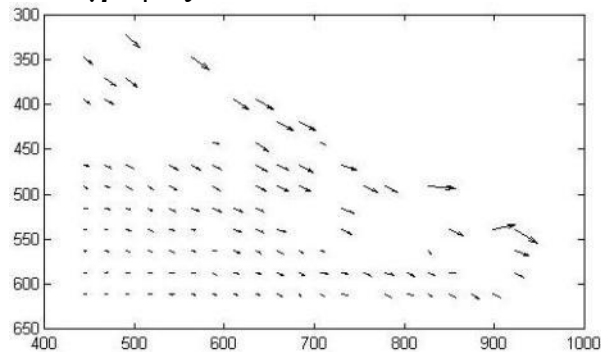
Φωτογραφίες 1-19



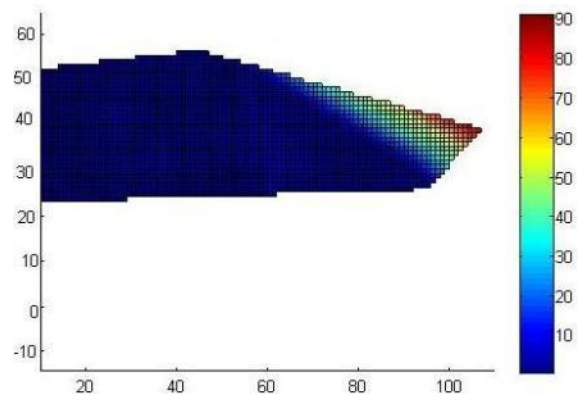
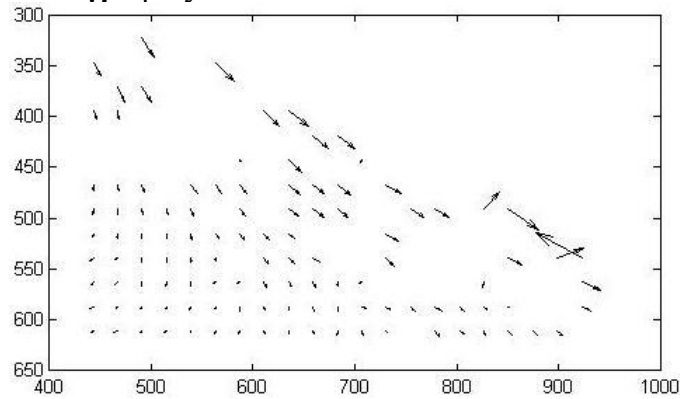
Φωτογραφίες 1-20



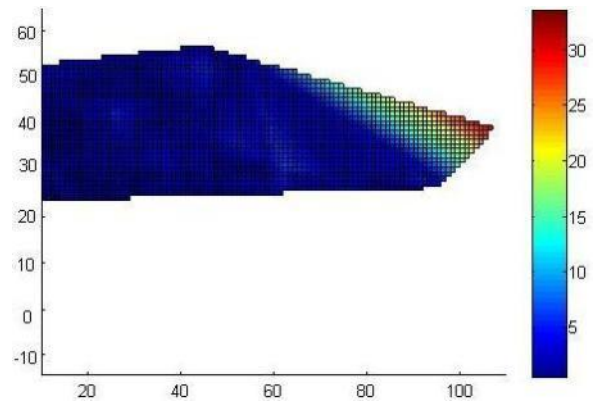
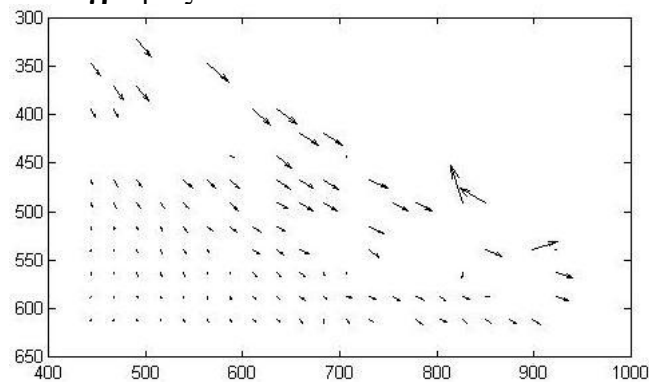
Φωτογραφίες 1-21



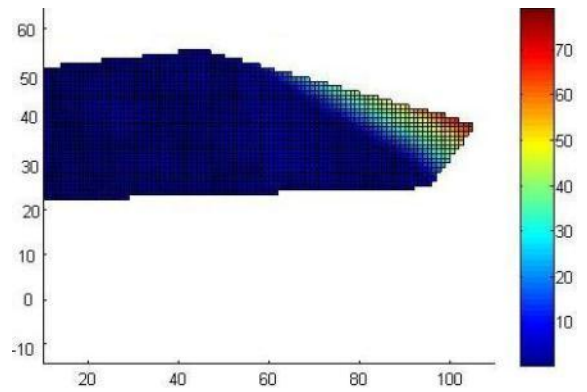
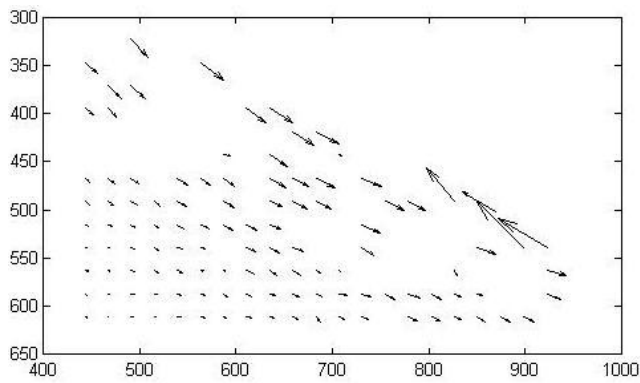
Φωτογραφίες 1-22



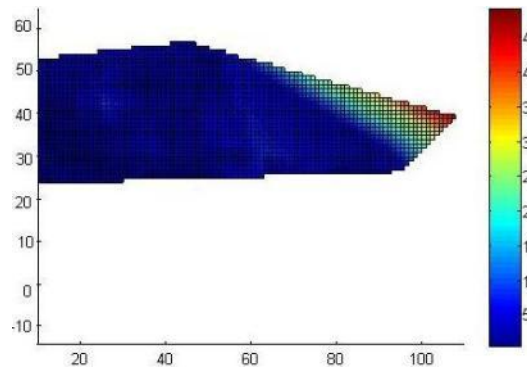
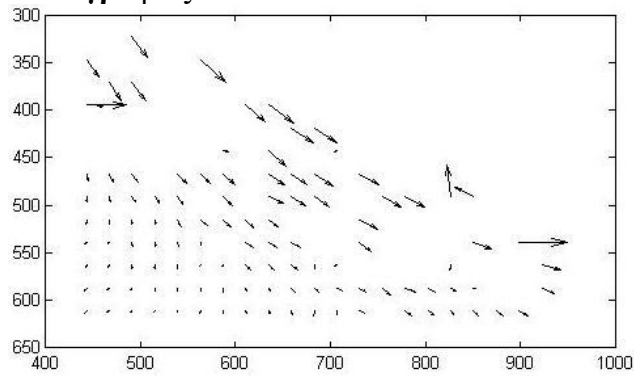
Φωτογραφίες 1-23



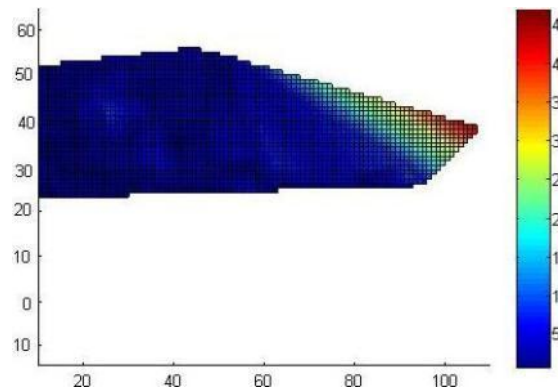
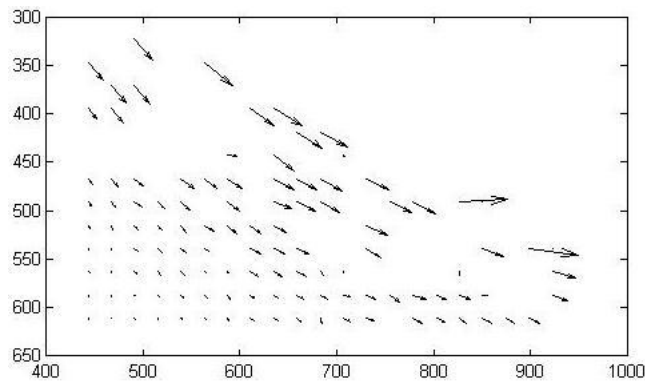
Φωτογραφίες 1-24



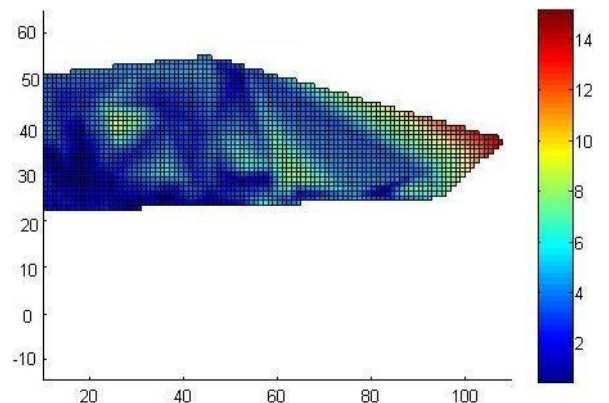
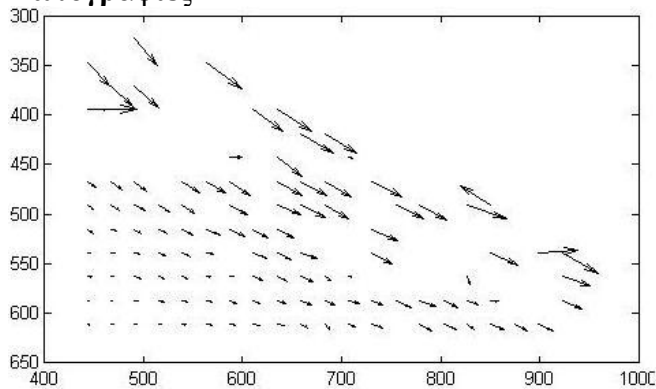
Φωτογραφίες 1-25



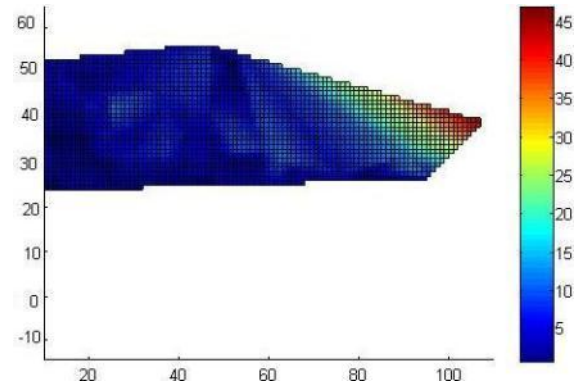
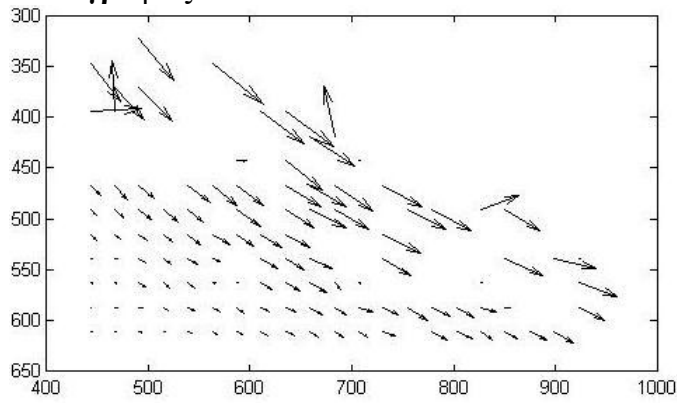
Φωτογραφίες 1-26



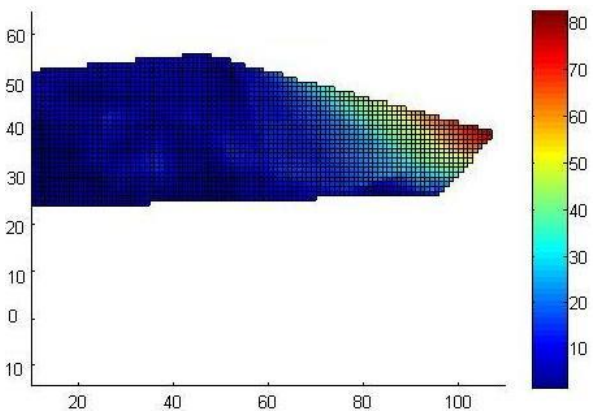
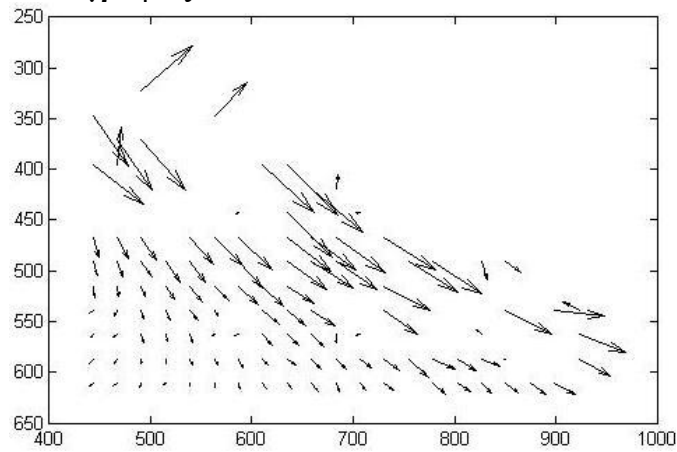
Φωτογραφίες 1-27



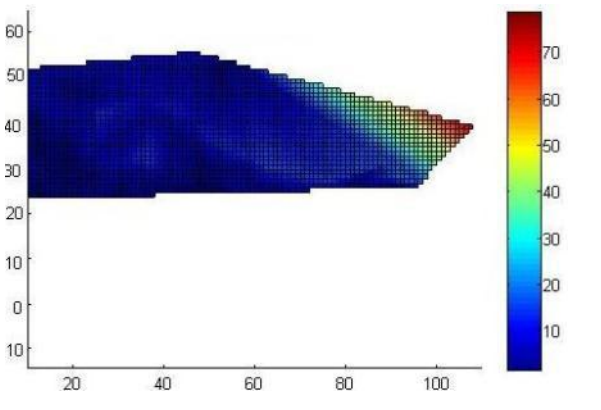
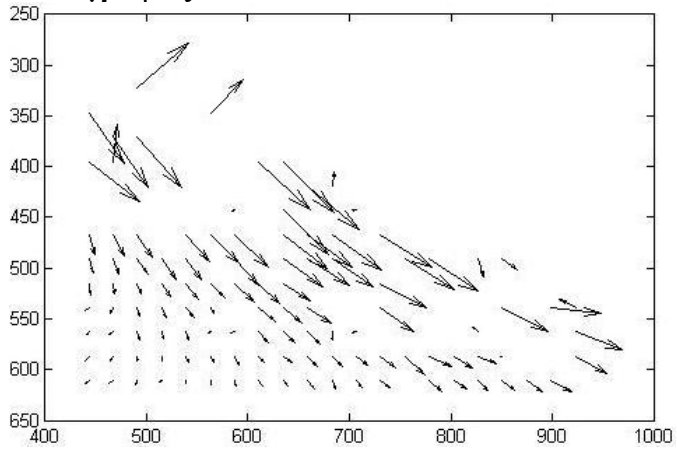
Φωτογραφίες 1-28



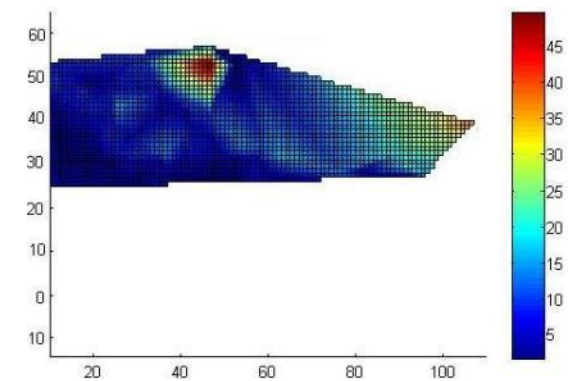
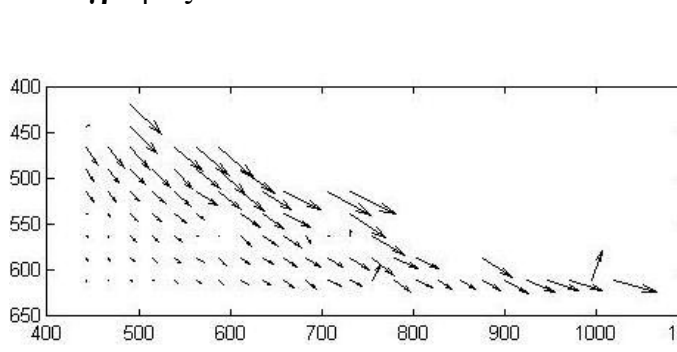
Φωτογραφίες 1-29



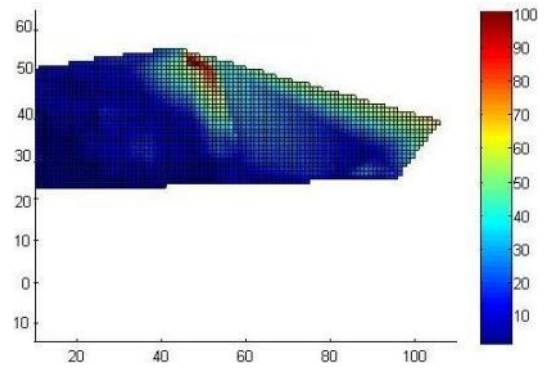
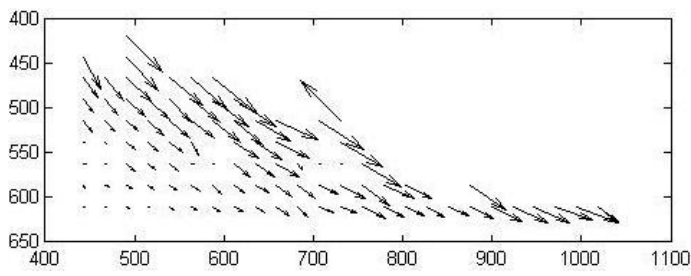
Φωτογραφίες 1-30



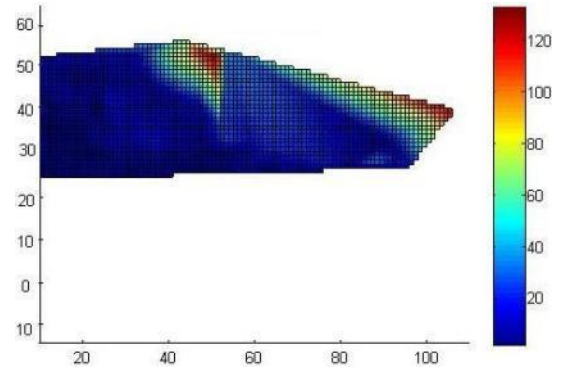
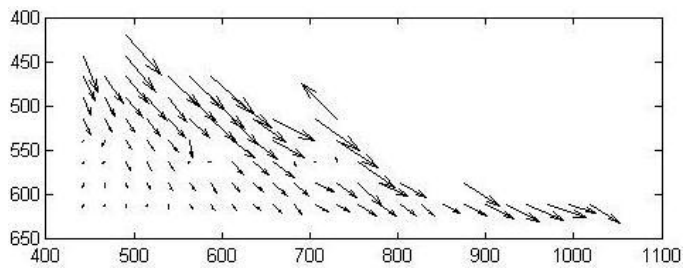
Φωτογραφίες 1-31



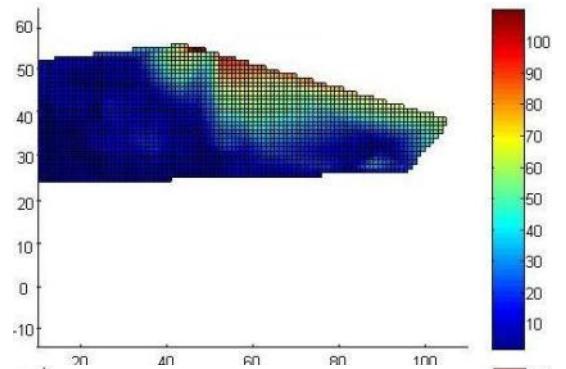
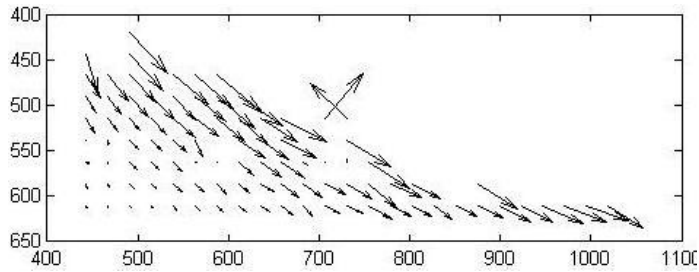
Φωτογραφίες 1-32



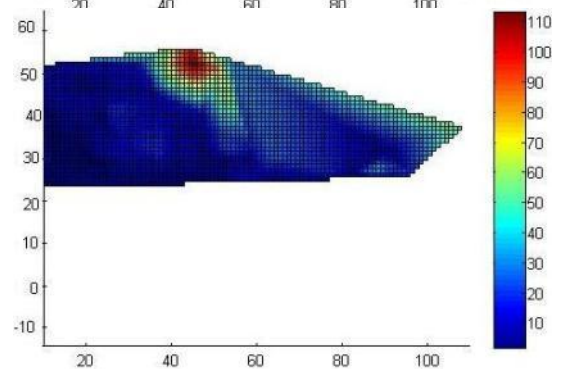
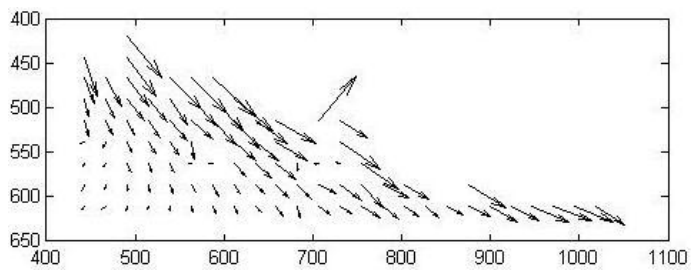
Φωτογραφίες 1-33



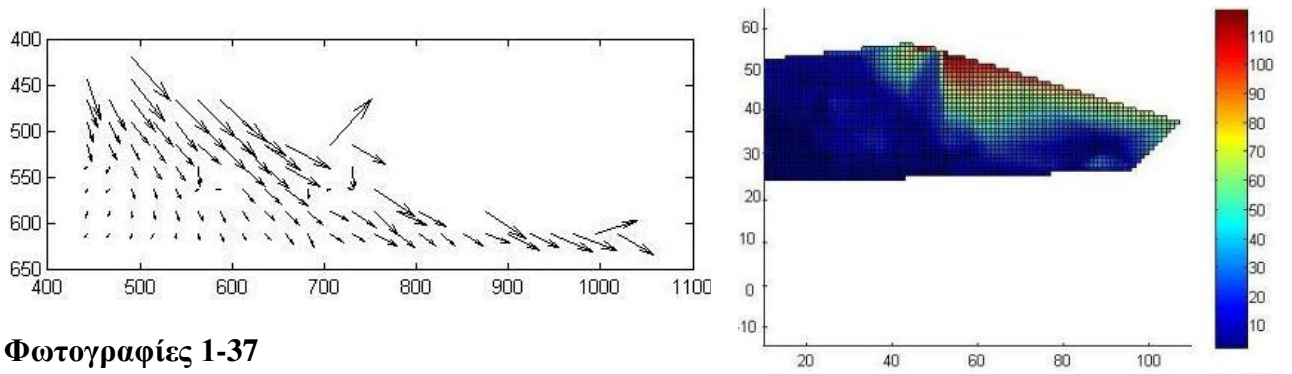
Φωτογραφίες 1-34



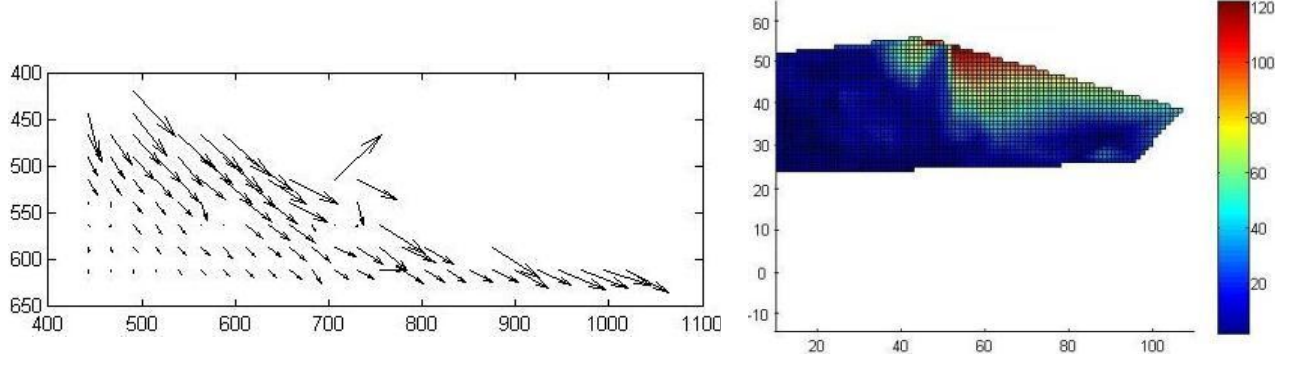
Φωτογραφίες 1-35



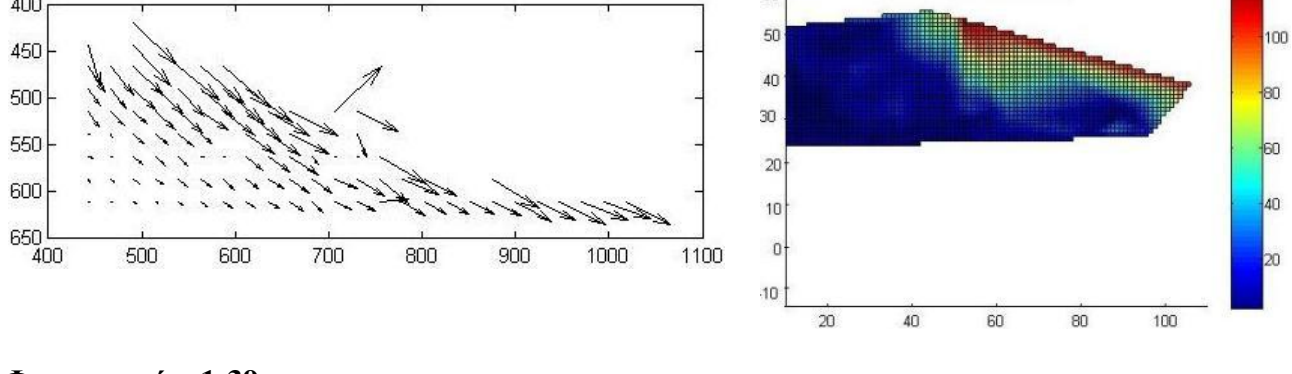
Φωτογραφίες 1-36



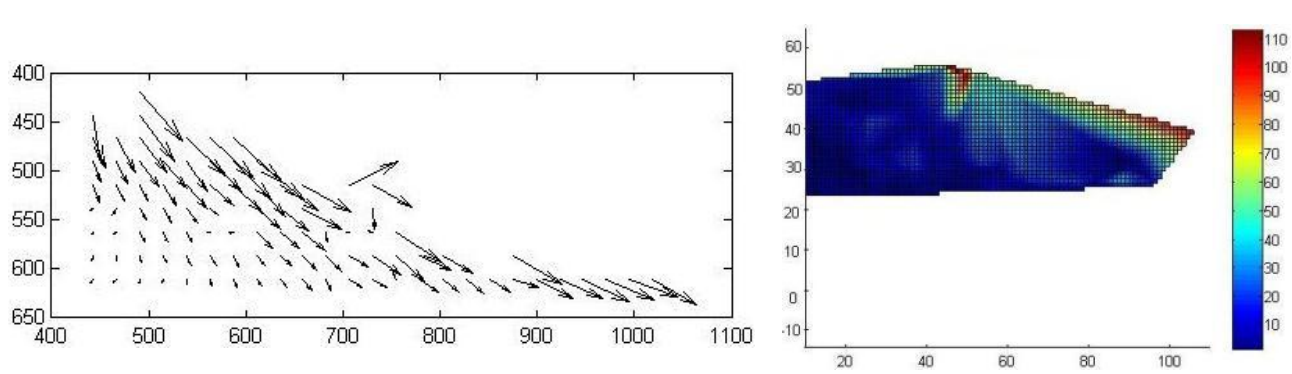
Φωτογραφίες 1-37



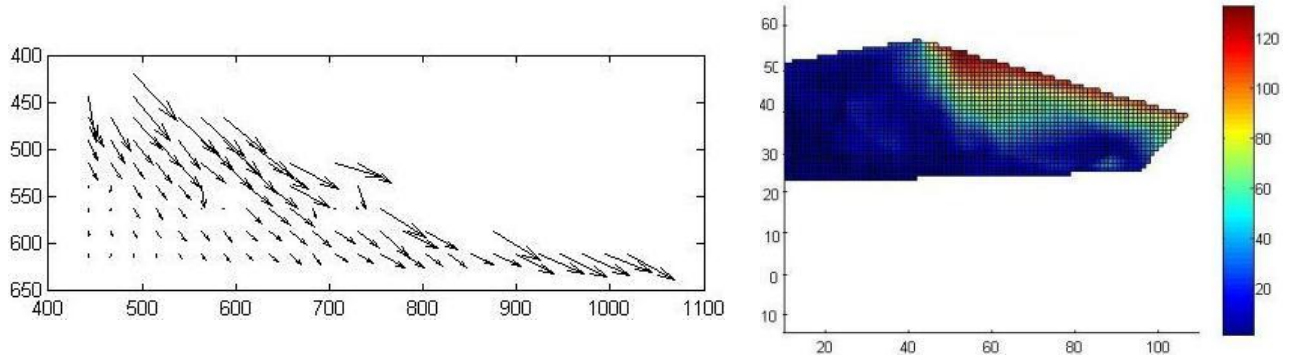
Φωτογραφίες 1-38



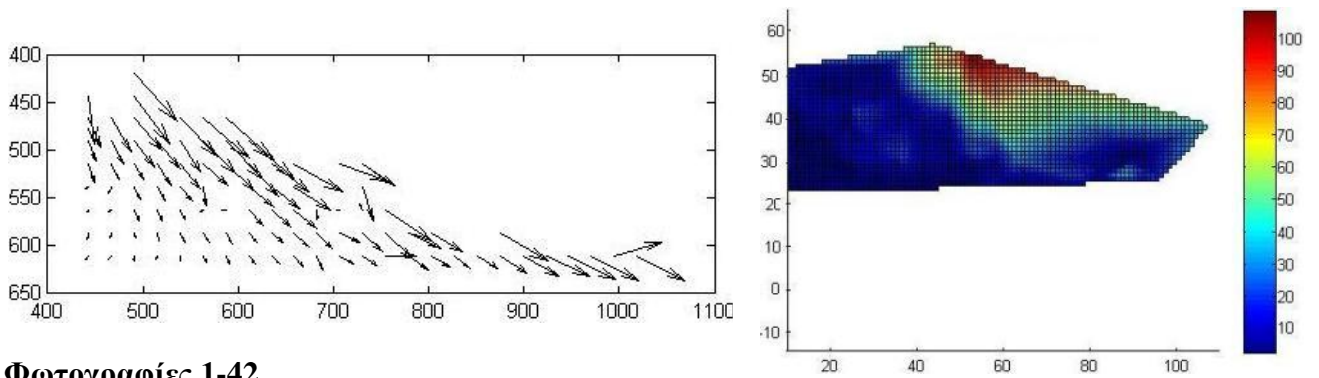
Φωτογραφίες 1-39



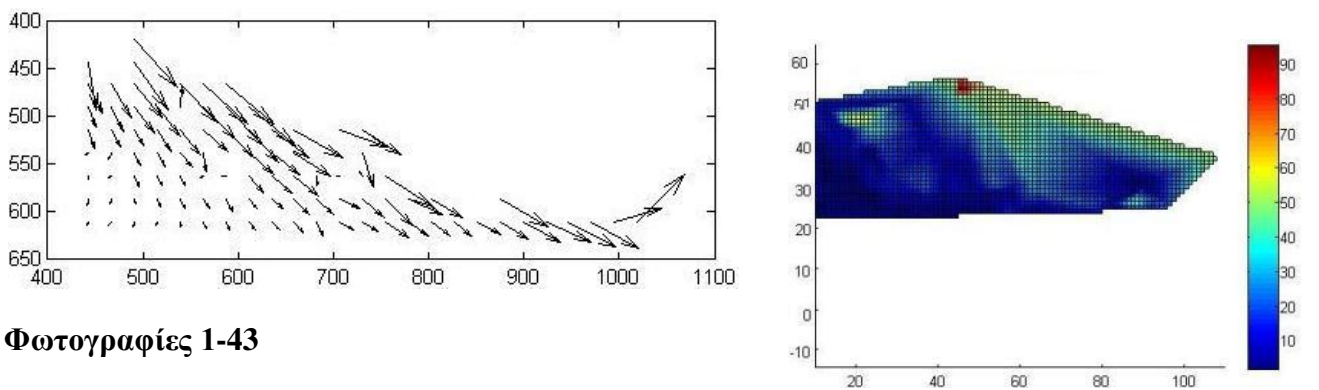
Φωτογραφίες 1-40



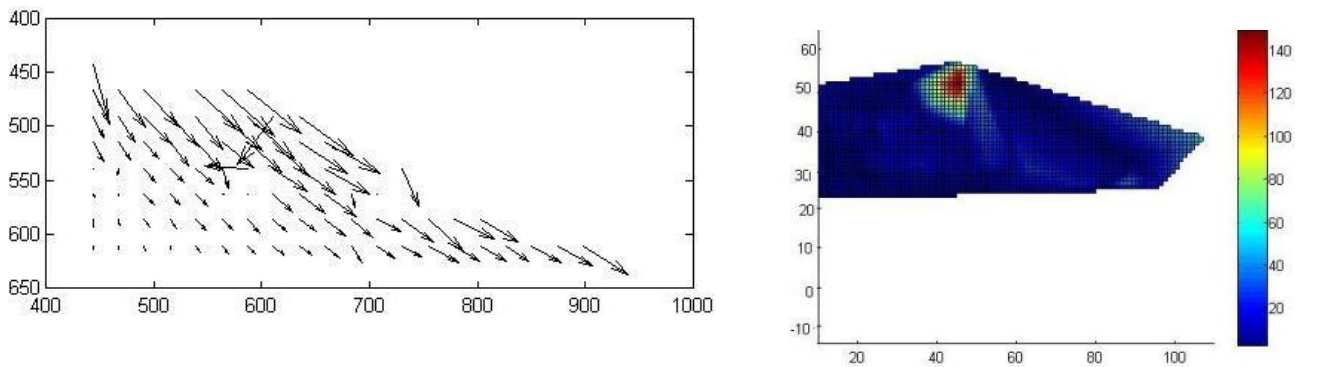
Φωτογραφίες 1-41



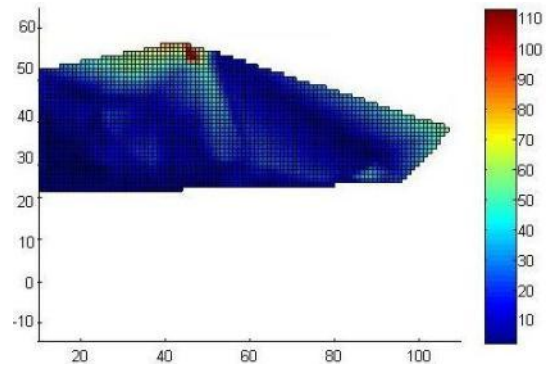
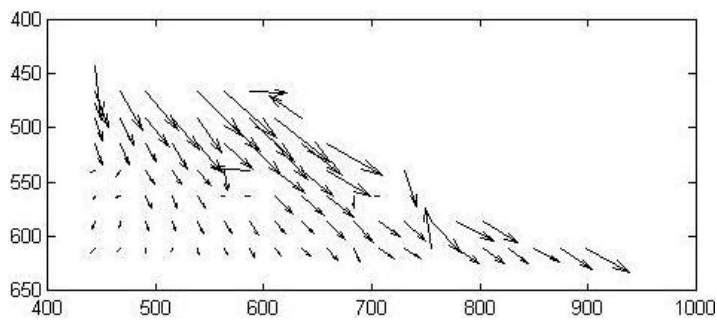
Φωτογραφίες 1-42



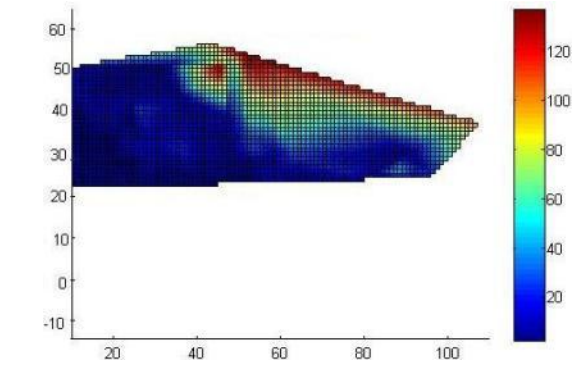
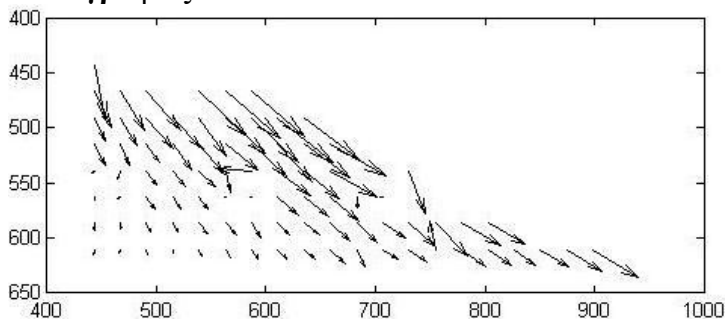
Φωτογραφίες 1-43



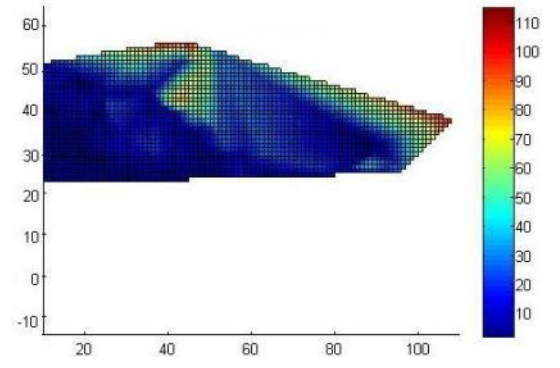
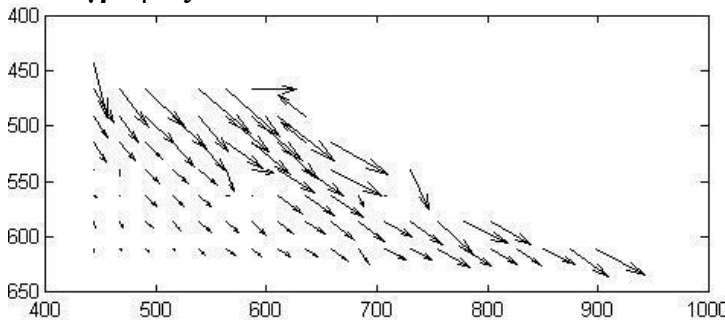
Φωτογραφίες 1-44



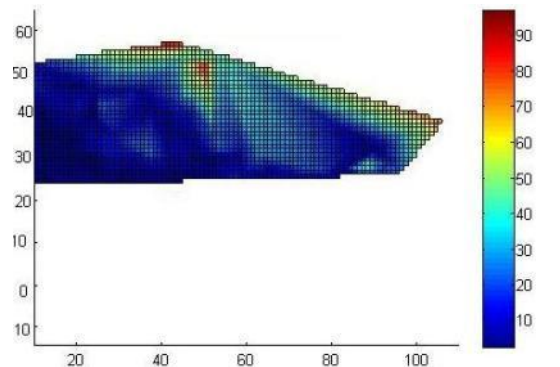
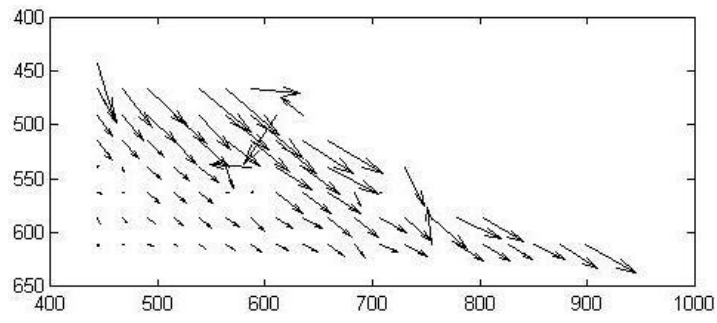
Φωτογραφίες 1-45



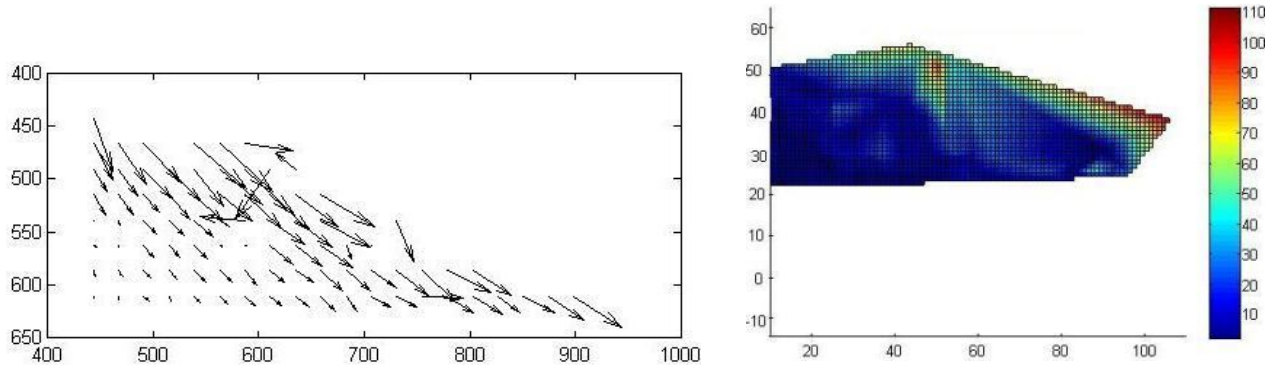
Φωτογραφίες 1-46



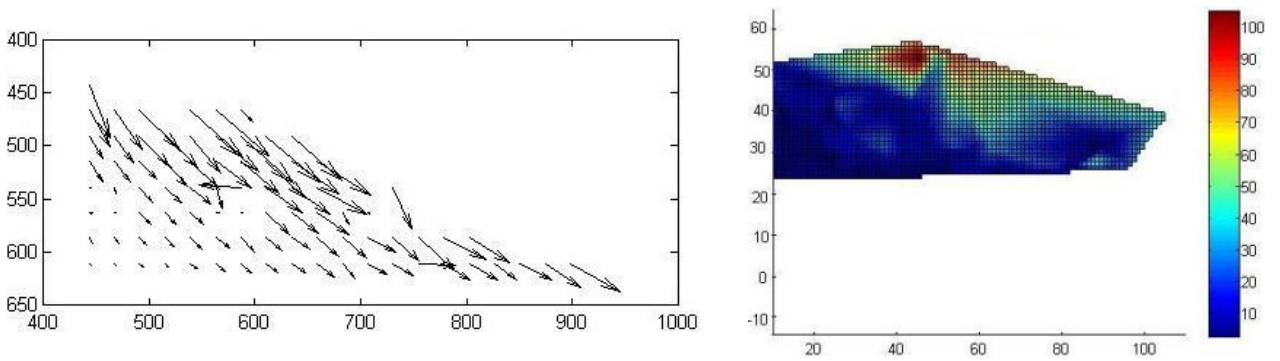
Φωτογραφίες 1-47



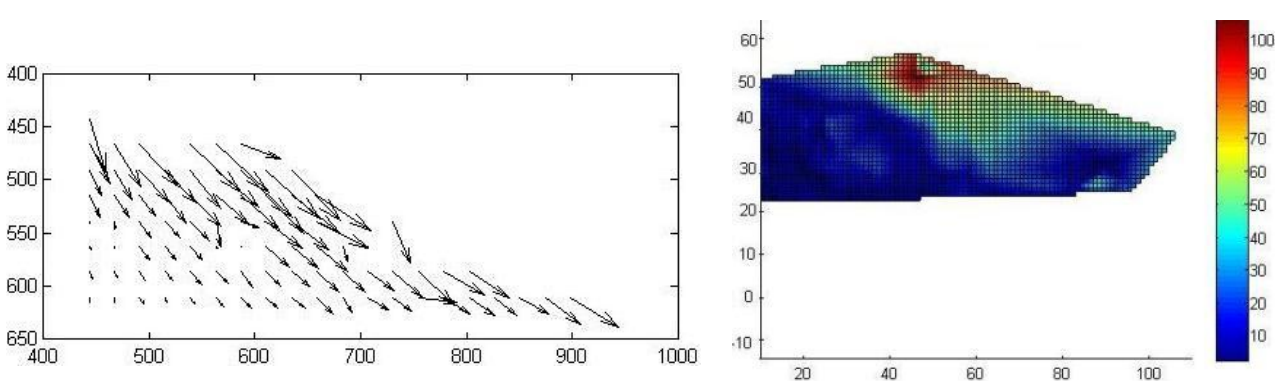
Φωτογραφίες 1-48



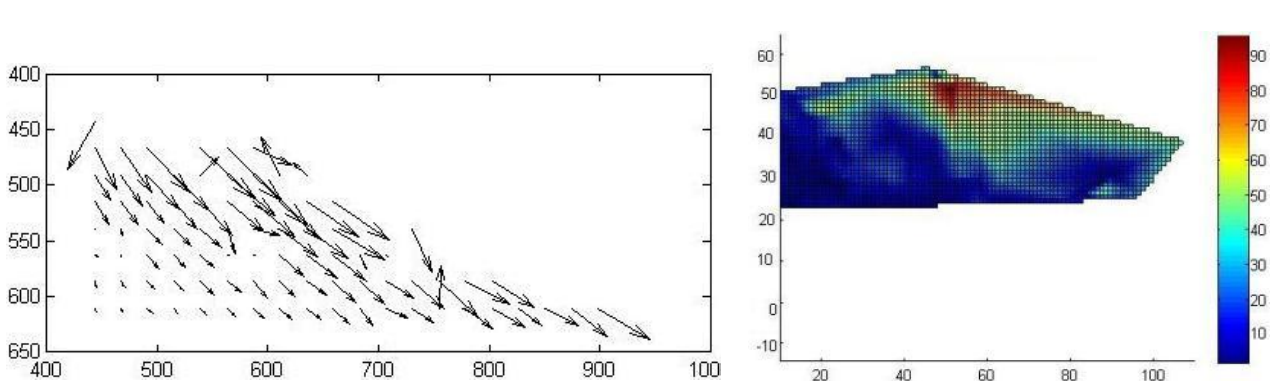
Φωτογραφίες 1-49



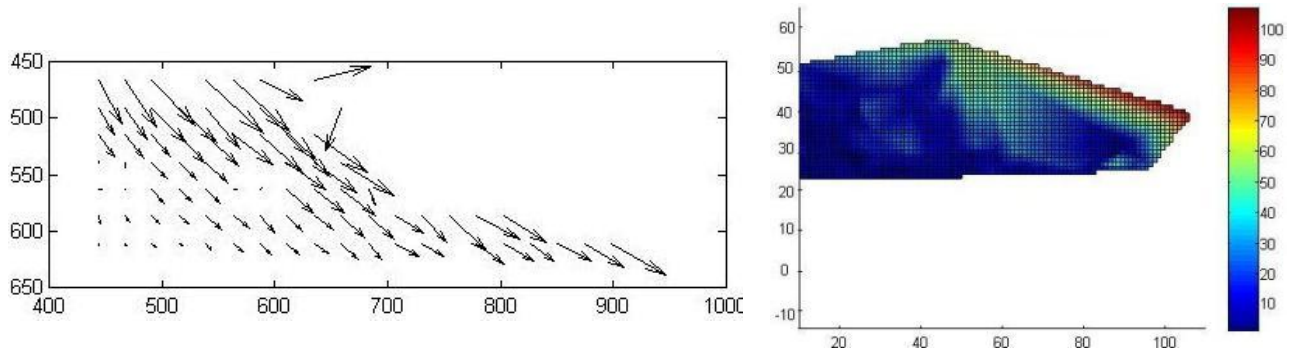
Φωτογραφίες 1-50



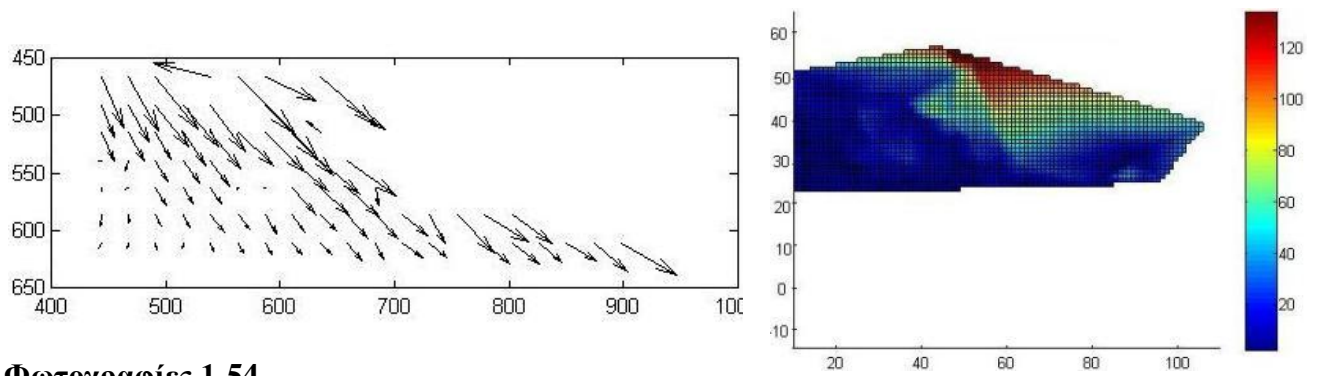
Φωτογραφίες 1-51



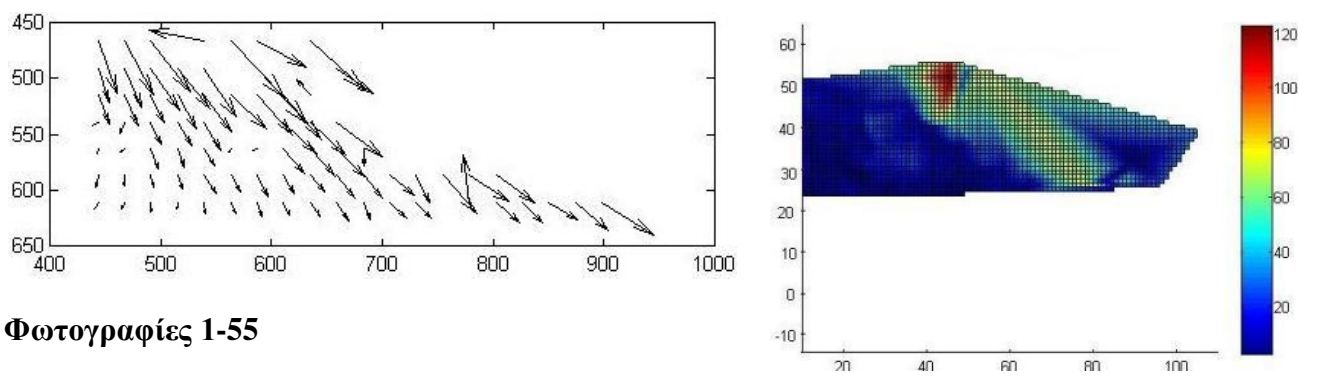
Φωτογραφίες 1-52



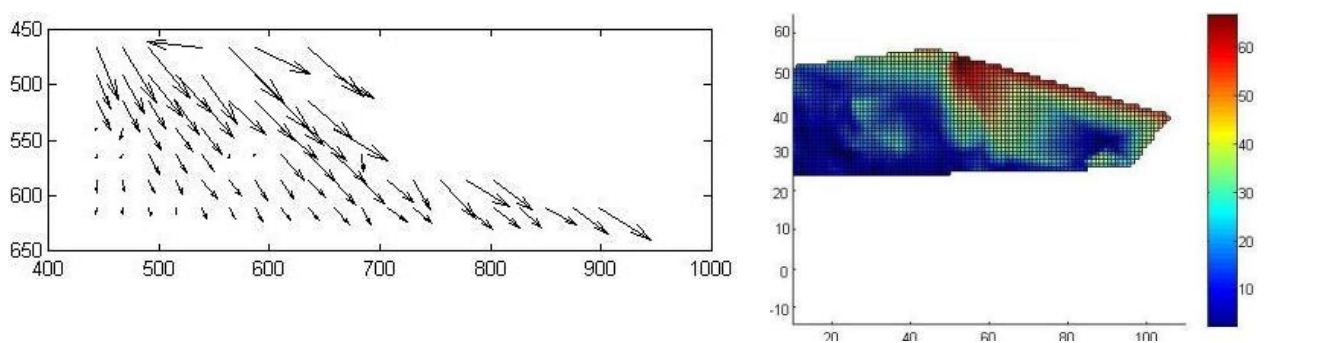
Φωτογραφίες 1-53



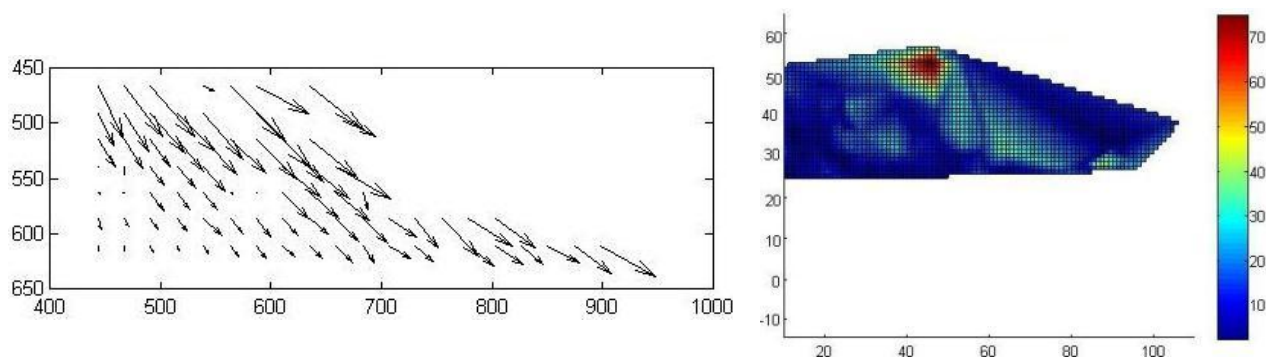
Φωτογραφίες 1-54



Φωτογραφίες 1-55



Φωτογραφίες 1-56

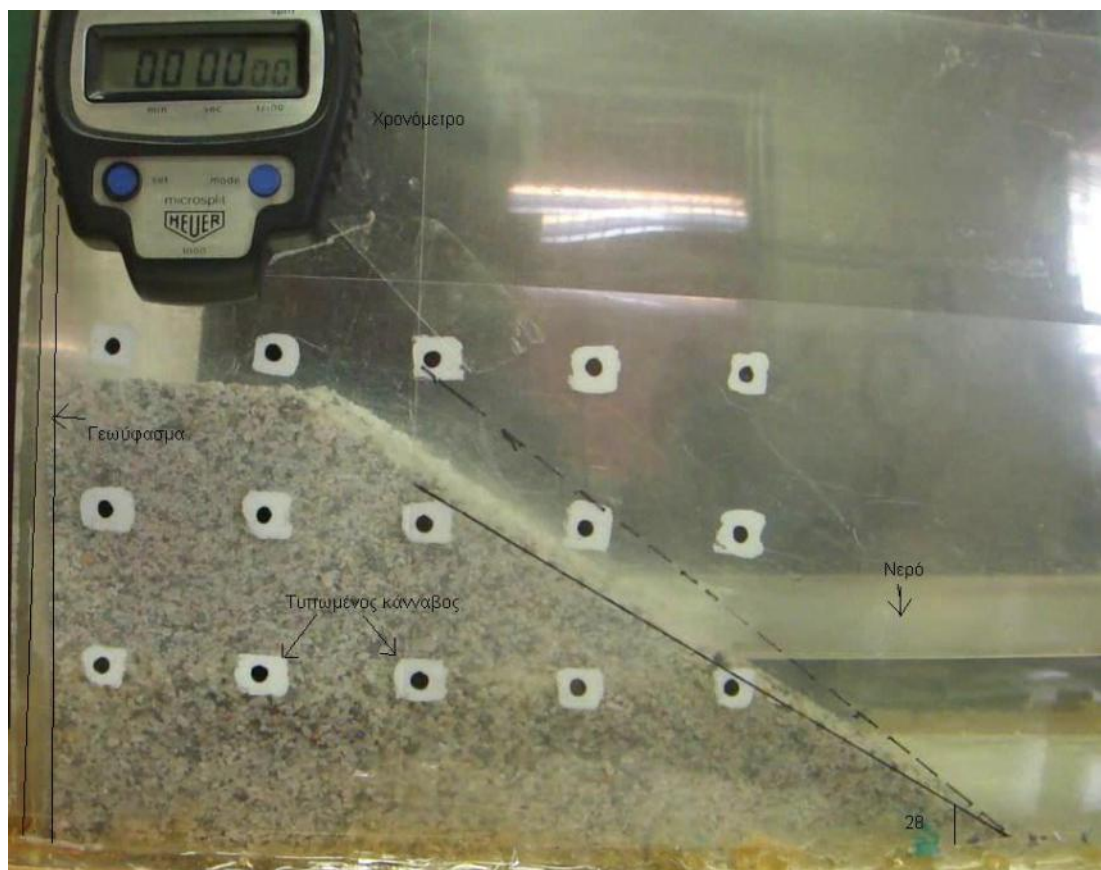


3.4.2 Πείραμα 2: Σεισμική φόρτιση με προσθήκη νερού – ελεύθερο πρανές

3.4.2.1 Περιγραφή πειράματος

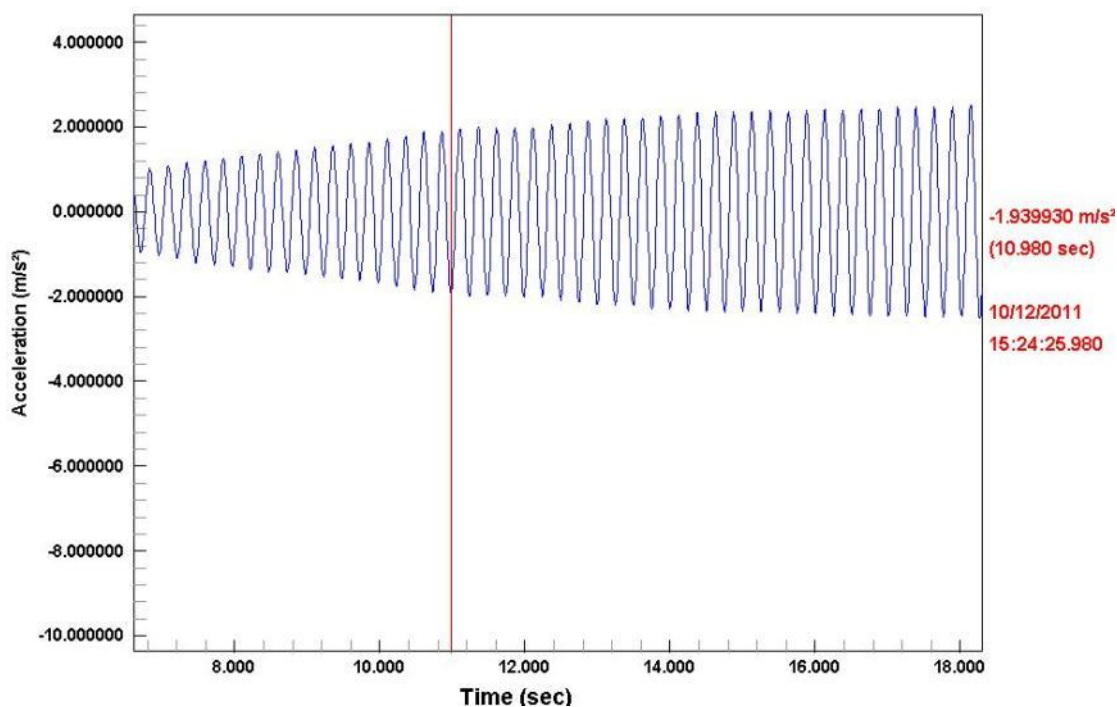
Το πείραμα αυτό περιελάμβανε την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως στο πείραμα 1 (Εικόνα 3.10). Συγκεκριμένα περιελάμβανε ένα πρανές διαστάσεων 200*150 mm κατά μήκος και πλάτος και 95 mm κατά ύψος μέσα στο άκαμπτο κουτί από Plexiglas. Επίσης το δοκίμιο στεκόταν μέσα στο κουτί με γωνία $\beta=28^\circ$ και στη μία πλευρά του είχε τοποθετηθεί ένα γεωύφασμα, προκειμένου να προσομοιαστούν όσον το δυνατόν πιστότερα οι συνθήκες του εργαστηρίου με τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε ένας τυπωμένος κάρναβος, πάνω στο διάφανο κουτί, ο οποίος αποτελούνταν από κουκίδες διαμέτρου 3 mm σχεδιασμένος σε διάφανο φόντο (Εικόνα 3.3). Όπως έχει προαναφερθεί, πριν ξεκινήσει το πείραμα, μέσα στο κουτί από Plexiglas τοποθετήθηκε ένας φωτογραμμετρικός κάρναβος και η φωτογραφία που λήφθηκε μαζί με τον τυπωμένο κάρναβο, χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για τη βαθμονόμηση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής (Εικόνα 3.4). Τέλος στερεώθηκε η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή πάνω στη σεισμική τράπεζα, η οποία θα κατέγραφε τη διαδικασία της φόρτισης με χρήση της λειτουργίας video, το οποίο στη συνέχεια θα μετατρέποταν σε frames (διαδοχικές εικόνες) για ανάλυση.

Όταν η πειραματική διάταξη ετοιμάστηκε, άρχισε η προσθήκη του νερού σταδιακά μέσα στο διάφανο κουτί, μέχρι τα μισά του ύψους του πρανούς ($H/2$). Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικ.3.16) φαίνεται η διάταξη του πειράματος.



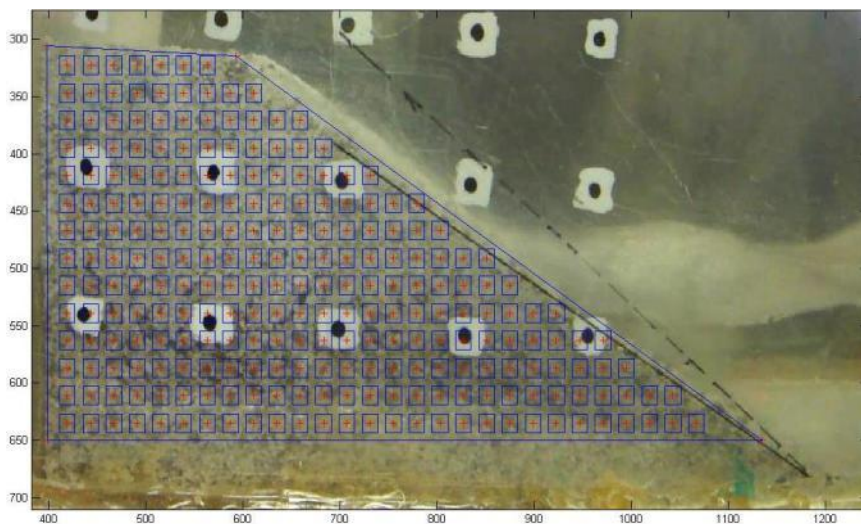
Εικ. 3.16: Πειραματική διάταξη

Ομοίως με το πείραμα 1, η πρώτη φάση του πειράματος περιελάμβανε τη φόρτιση του πρανούς με επιταχύνσεις διαφόρων τιμών. Η ένταση της σεισμικής φόρτισης και σε αυτό το πείραμα, δεν ήταν σταθερή, αλλά αυξανόταν σταδιακά χειροκίνητα από τον ενισχυτή σήματος, μέχρι τη στιγμή αστοχίας του πρανούς. Οι παλμοί που εισάγαμε, ήταν επίσης ημιτονοειδούς μορφής, σταθερής συχνότητας και επιπλέον οι τιμές της κρίσιμης γωνίας και επιτάχυνσης του πρανούς παρέμειναν σταθερές. Οπότε έχουμε ότι $\beta=28^\circ$ και $k_c=0.12g$. Στη συνέχεια ακολουθεί το σειсмоγράφημα της συγκεκριμένης φόρτισης, όπου φαίνεται ειδικότερα η επιτάχυνση που είχε το πρανές τη στιγμή της αστοχίας του. Αναλυτικότερα, το πρανές παρουσίασε αστοχία στο 11ο δευτερόλεπτο της σεισμικής φόρτισης και με επιτάχυνση ίση με $0.19g$.

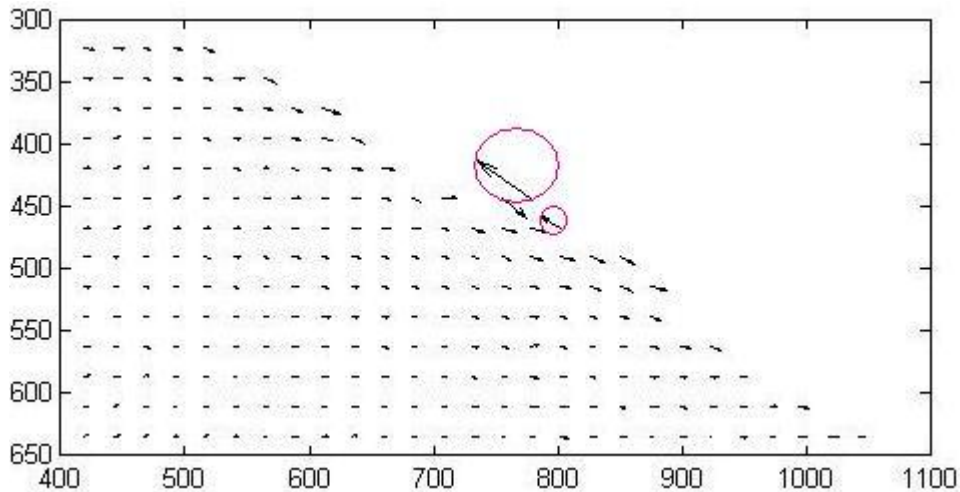


Εικ. 3.17 : Το σειсмоγράφημα της σεισμικής φόρτισης

Μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ακολούθησε η διαδικασία επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο PIV σε περιβάλλον Matlab. Αρχικό στάδιο της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων ήταν ο τεμαχισμός της αρχικής εικόνας σε μικρότερα τμήματα (patches). Στην εικόνα 3.18 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας patches στην αρχική φωτογραφία του μοντέλου με μέγεθος 16*16 pixel και μεταξύ τους απόσταση ίση με 24 pixel. Επίσης στην εικόνα 3.19 παρουσιάζεται ένα τυπικό αποτέλεσμα μετατόπισης κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης.

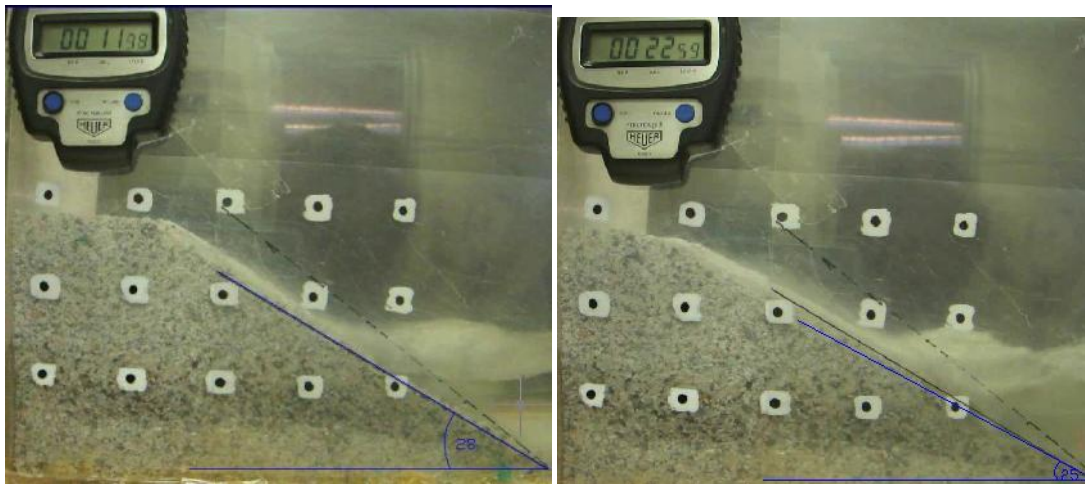


Εικ. 3.18: Δημιουργία τμημάτων (patches) στο πρανές



Εικ. 3.19: Τυπική μετατόπιση

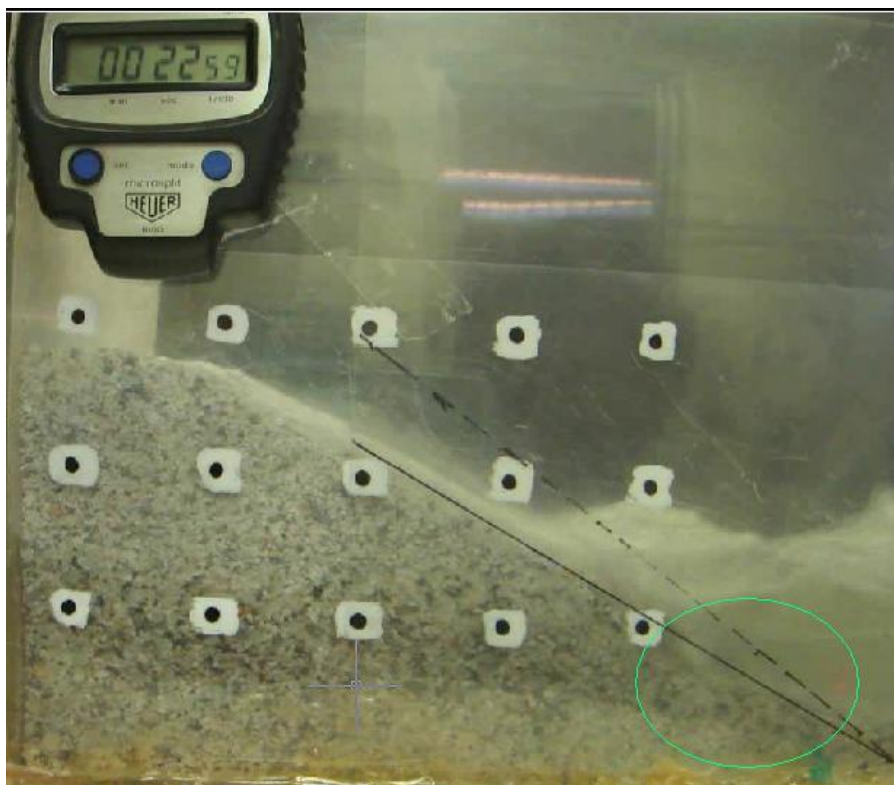
Σύμφωνα με το τυπικό αποτέλεσμα μετατόπισης της εικόνας 3.19, παρατηρείται ότι η αστοχία του πρανούς είναι περισσότερο επιφανειακή, καθώς φαίνεται μία ελάχιστη μετατόπιση στην επιφάνεια του. Επίσης στην ίδια εικόνα (Εικ.3.19) φαίνεται η δημιουργία 2 μη συμβατών διανυσμάτων ροής (wild vectors) που σχηματίστηκαν κατά τη διαδικασία επεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Τα διανύσματα αυτά, έχουν φορά αντίθετη της αναμενόμενης και πολύ πιθανόν να οφείλονται στον κυματισμό που προκαλείται από το νερό, κατά την έναρξη της σεισμικής φόρτισης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αρχική και η τελική κατάσταση του πρανούς στη δεδομένη φόρτιση.



Εικ. 3.20 :Αρχική κατάσταση πρανούς

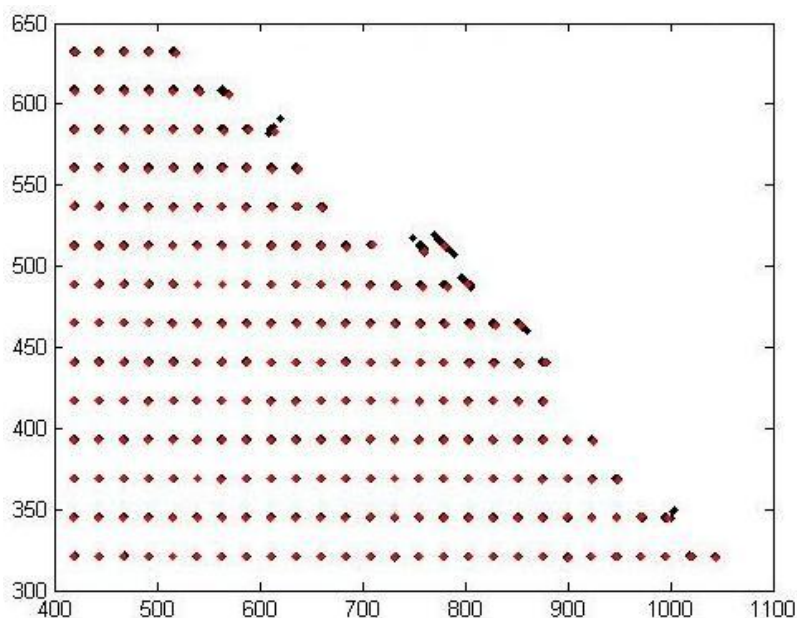
Τελική κατάσταση πρανούς με φόρτιση

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι στο τέλος της σεισμικής φόρτισης, η κλίση της επιφάνειας του υπό μελέτη πρανούς δεν είναι ευθεία, αλλά κάνει μία καμπύλη. Η καμπύλη αυτή είναι αποτέλεσμα της δράσης του νερού και φαίνεται καλύτερα στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικ. 3.21: Αποτέλεσμα του κυματισμού

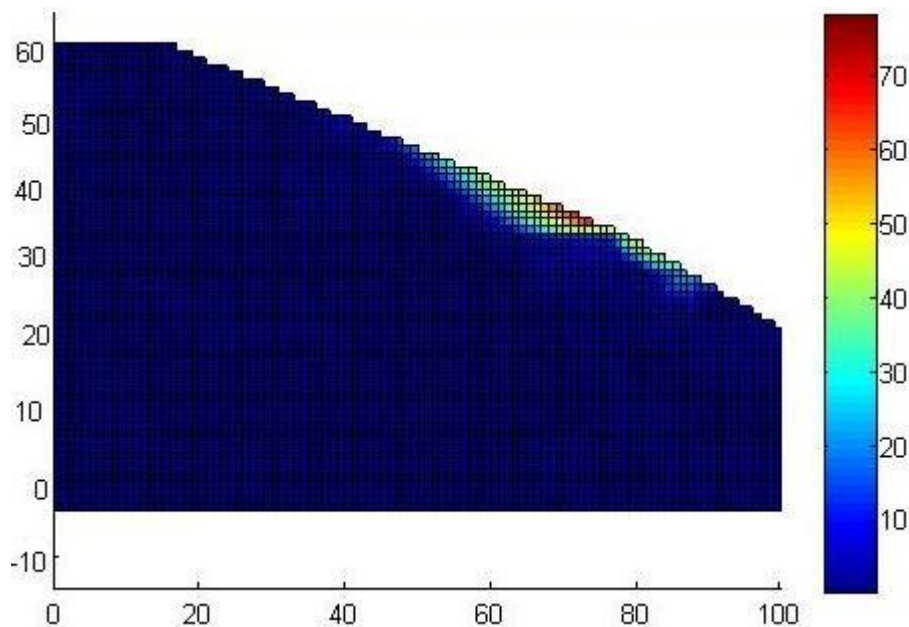
Στην εικόνα 3.22 που ακολουθεί, φαίνονται οι αρχικές και οι τελικές θέσεις των διαφόρων τμημάτων της εικόνας (patches) του πειράματος που αναπαριστούν την κίνηση των κόκκων της άμμου του δοκιμίου καθώς εξελίσσεται τα πείραμα. Επίσης φαίνεται η πορεία των τμημάτων αυτών στις διάφορες φάσεις του πειράματος στις οποίες πάρθηκαν οι φωτογραφίες.



Εικ.3.22 : Συνολικές μετατοπίσεις των κόκκων της άμμου

Συγκεκριμένα φαίνεται ότι οι μετακινήσεις των κόκκων της άμμου είναι ελάχιστες και κυρίως παρουσιάζονται στην επιφάνεια του πρανούς, με αποτέλεσμα να προκαλείται επιφανειακή αστοχία.

Όπως έχει προαναφερθεί η μέθοδος PIV παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα της γραφικής αναπαράστασης των ανηγμένων παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία δημιουργίας της επιφάνειας αστοχίας. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζονται με χρωματική διαφοροποίηση οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στις διάφορες θέσεις του μοντέλου και αντιστοιχούν στα διανύσματα ροής της εικόνας 3.19.



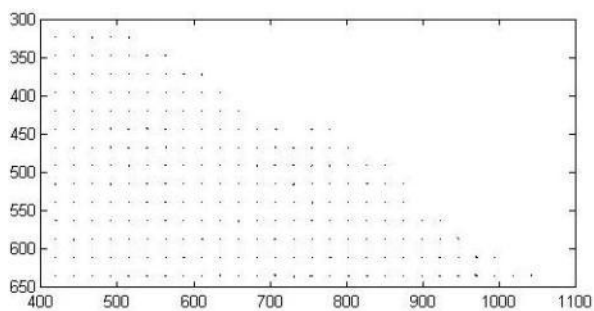
Εικ.3.23: Γραφική αναπαράσταση ανηγμένων παραμορφώσεων

Τα συνολικά αποτελέσματα των διανυσμάτων μετατόπισης και των ανηγμένων παραμορφώσεων παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

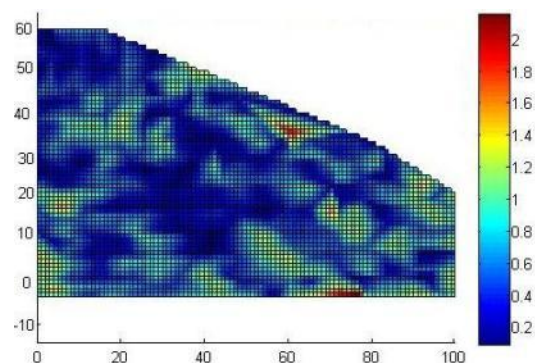
3.4.2.2: Αποτελέσματα πειράματος 2

Διανύσματα μετατόπισης

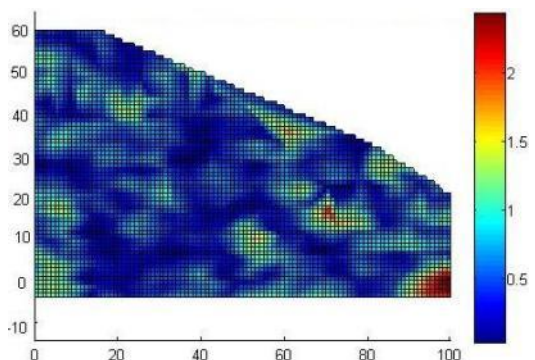
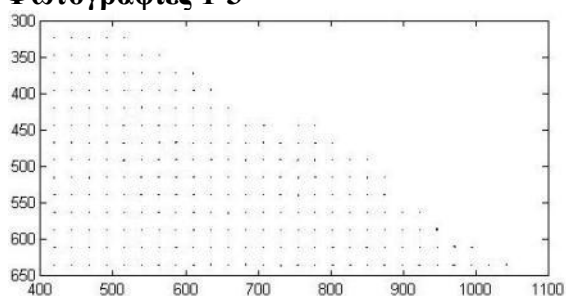
Φωτογραφίες 1-2



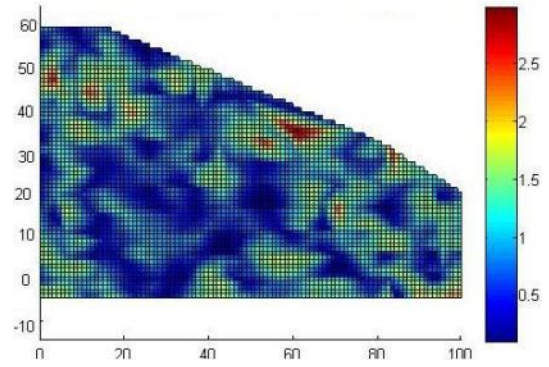
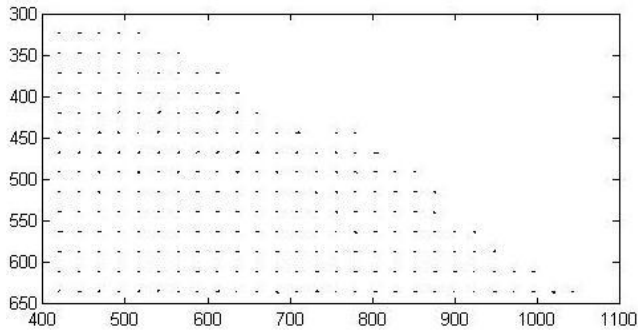
Ανηγμένες παραμορφώσεις



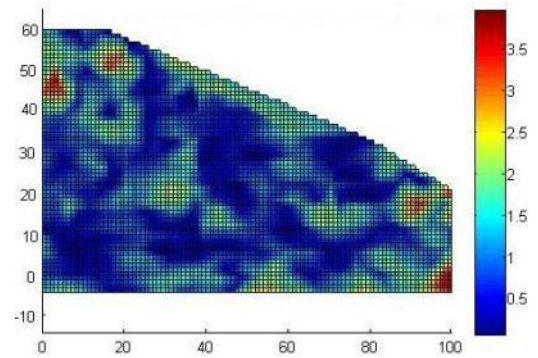
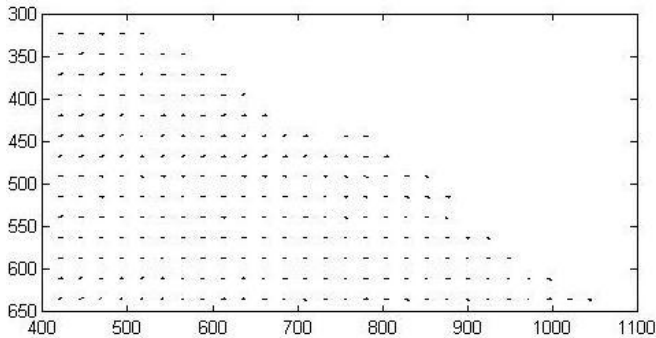
Φωτογραφίες 1-3



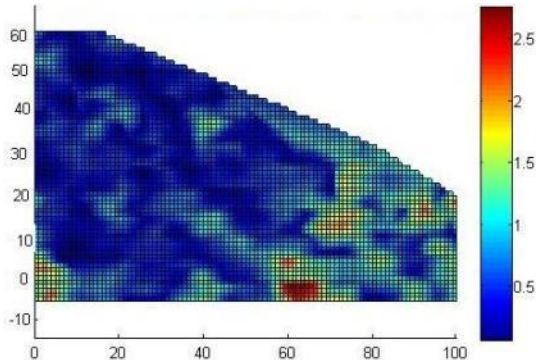
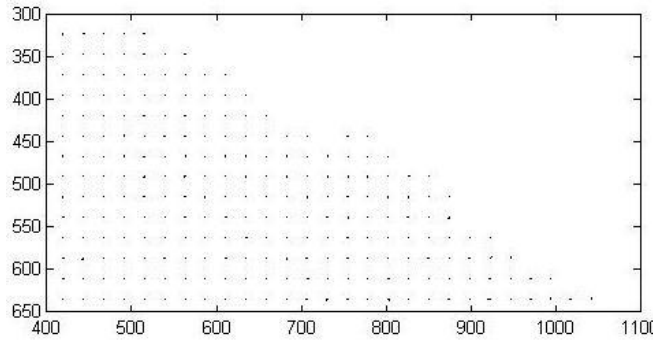
Φωτογραφίες 1-4



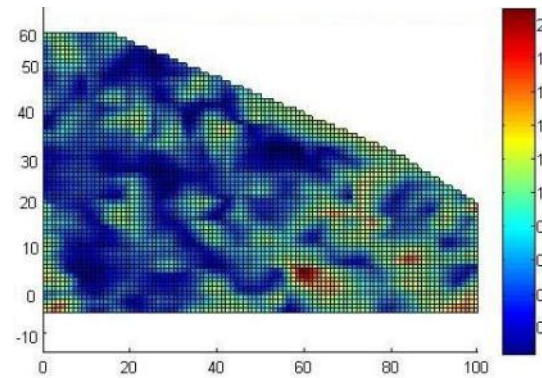
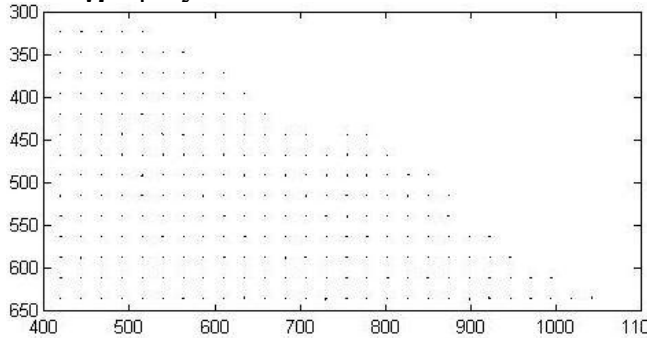
Φωτογραφίες 1-5



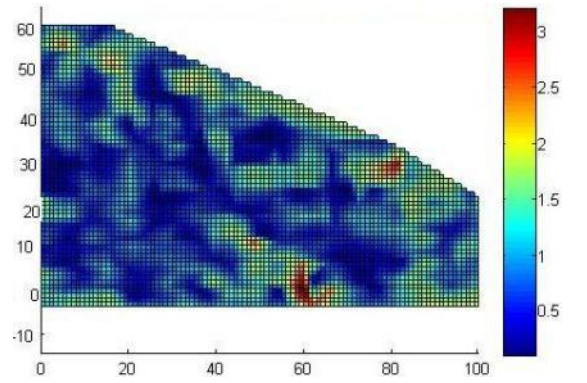
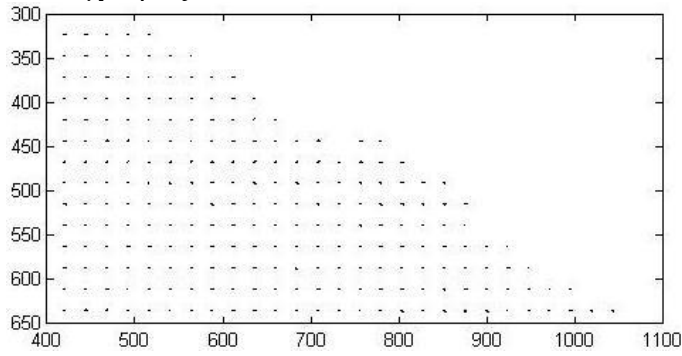
Φωτογραφίες 1-6



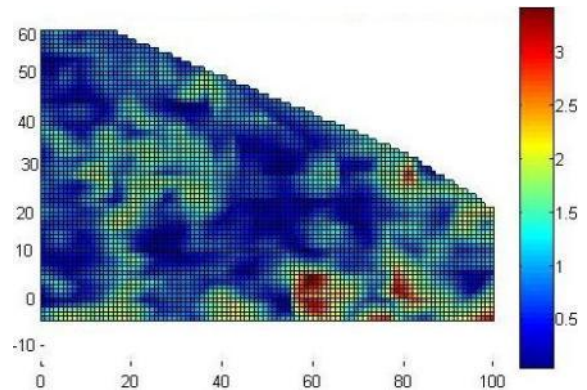
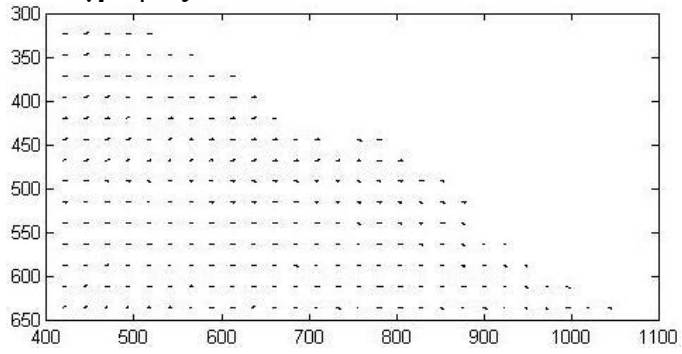
Φωτογραφίες 1-7



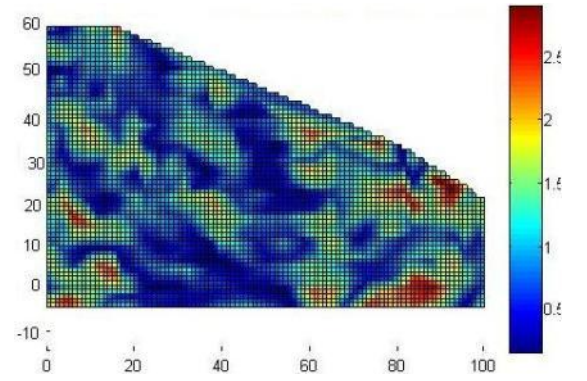
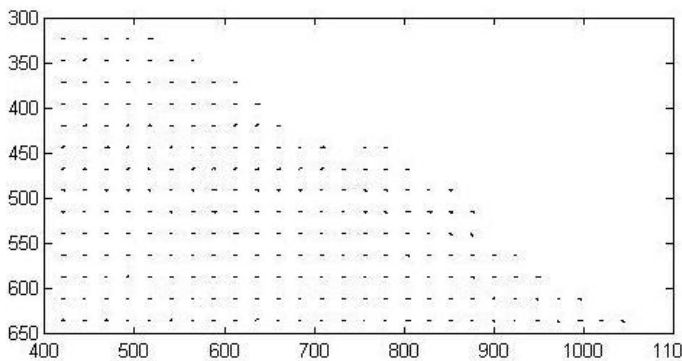
Φωτογραφίες 1-8



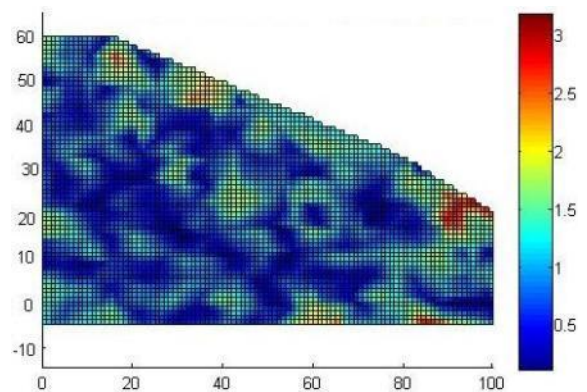
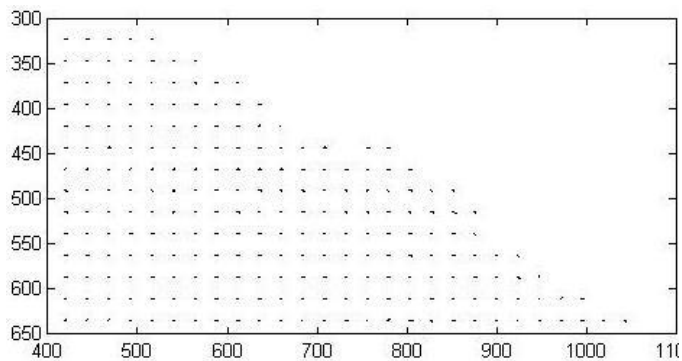
Φωτογραφίες 1-9



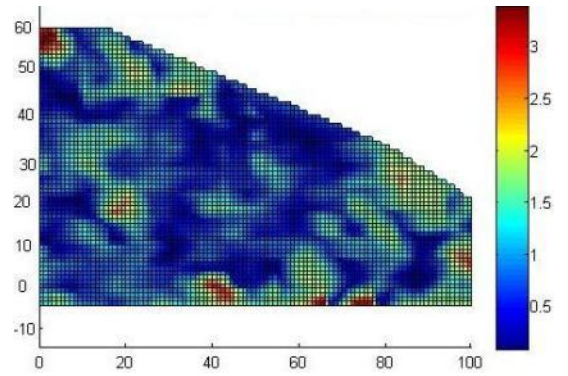
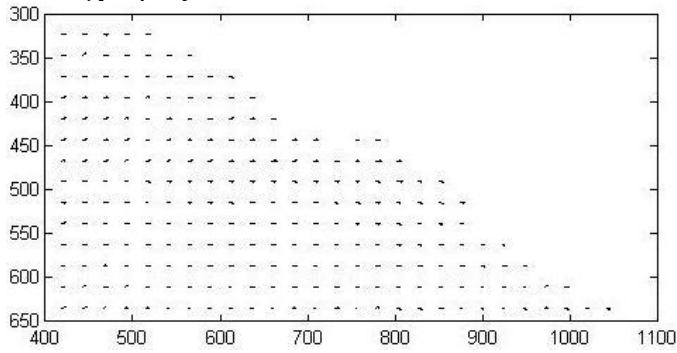
Φωτογραφίες 1-10



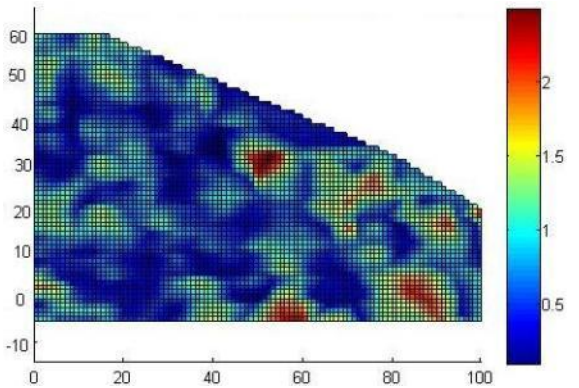
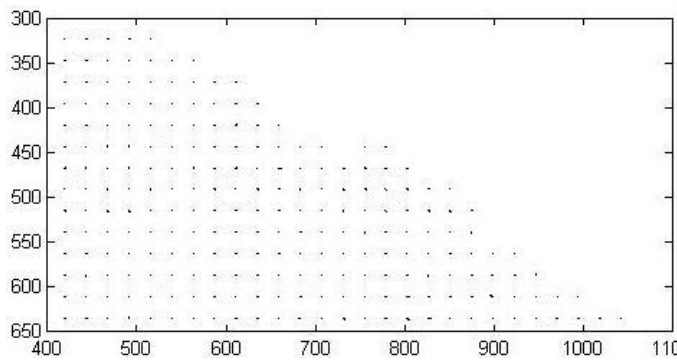
Φωτογραφίες 1-11



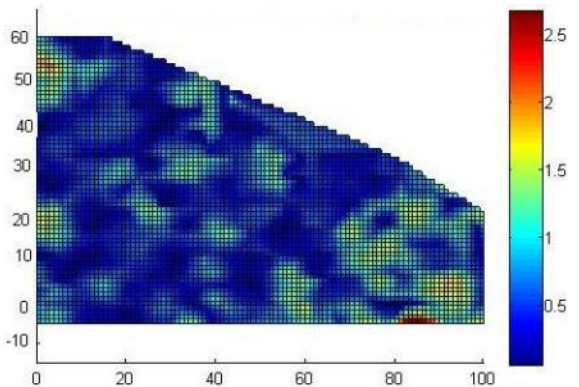
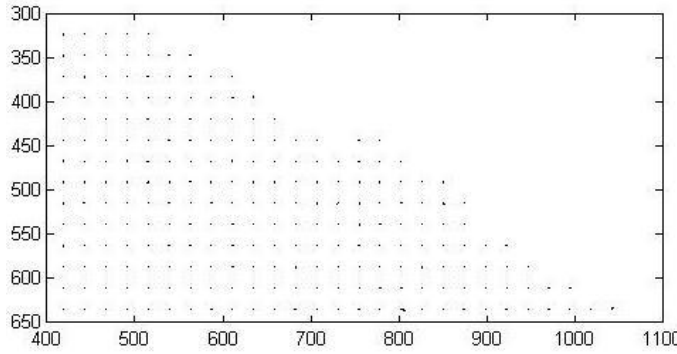
Φωτογραφίες 1-12



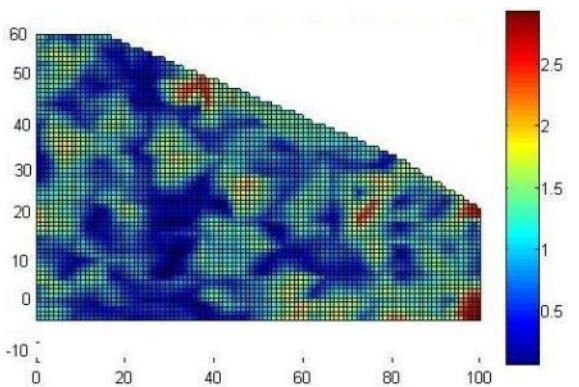
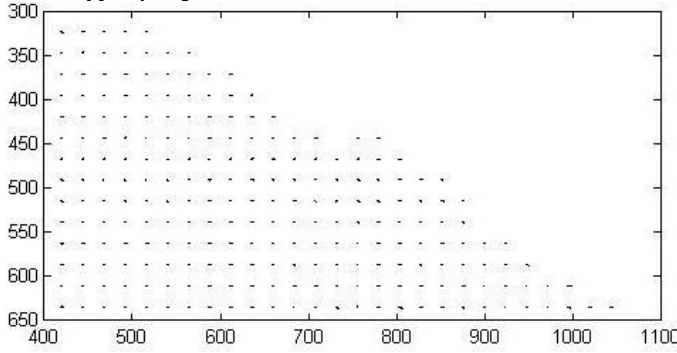
Φωτογραφίες 1-13



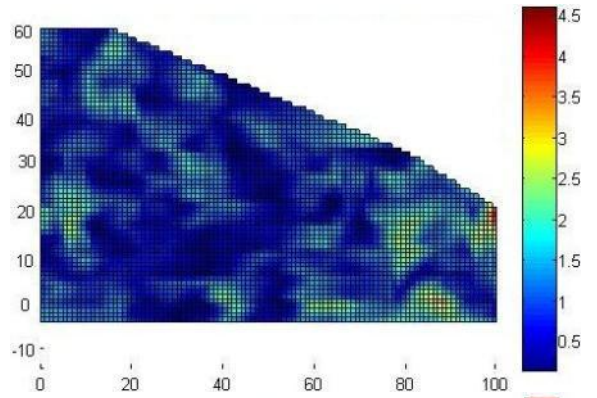
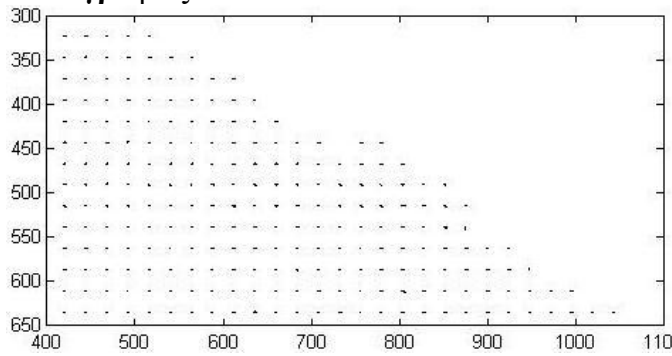
Φωτογραφίες 1-14



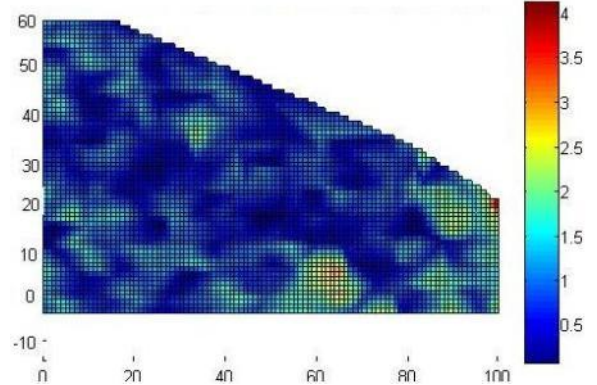
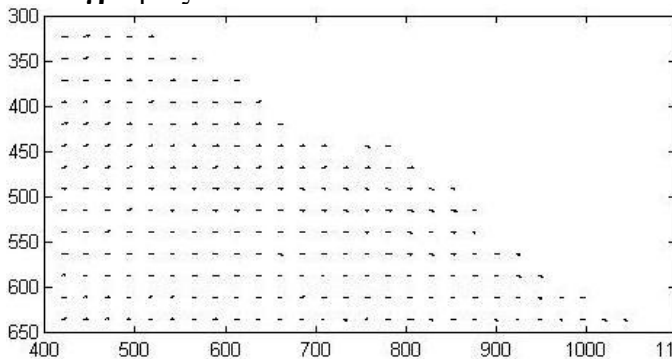
Φωτογραφίες 1-15



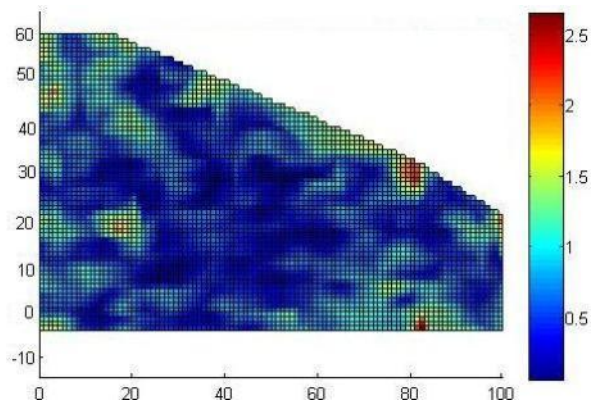
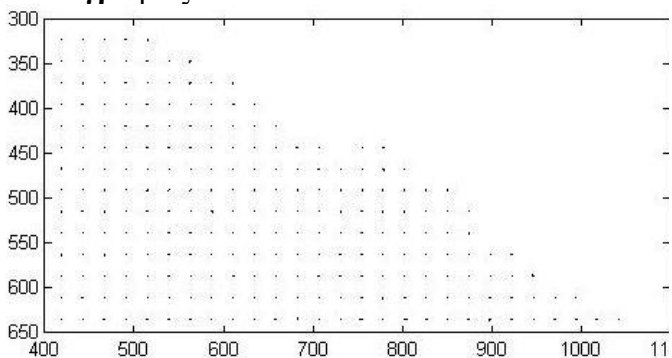
Φωτογραφίες 1-16



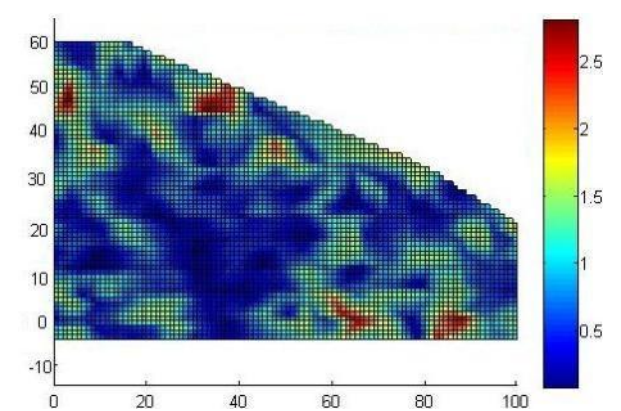
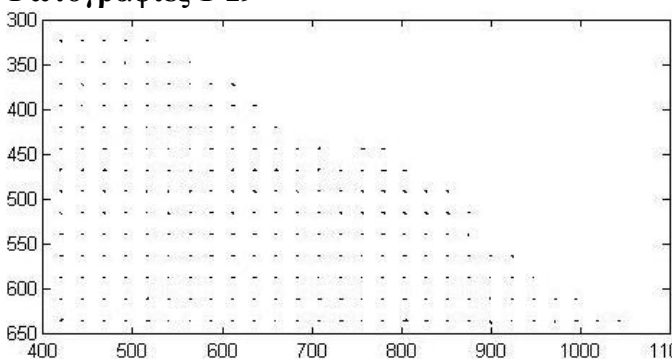
Φωτογραφίες 1-17



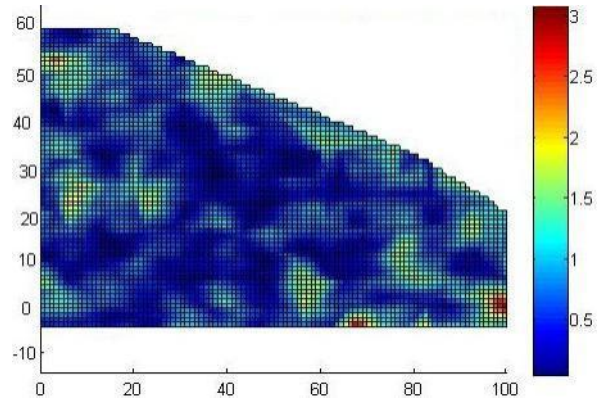
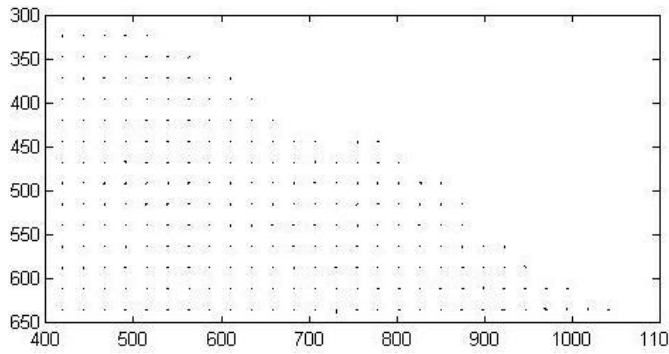
Φωτογραφίες 1-18



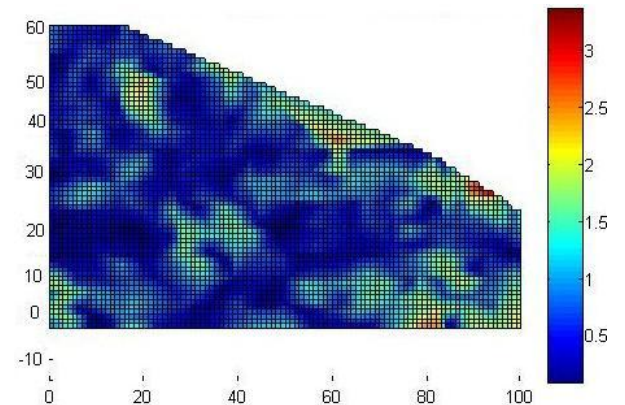
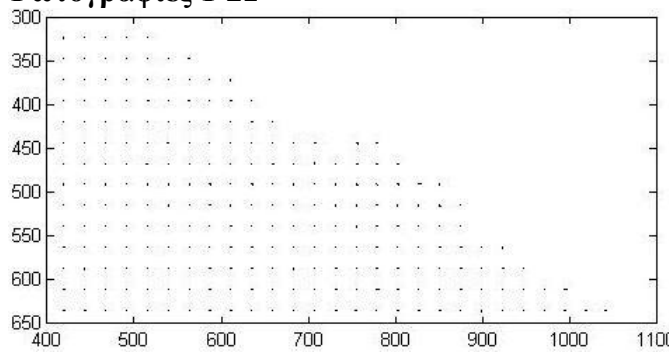
Φωτογραφίες 1-19



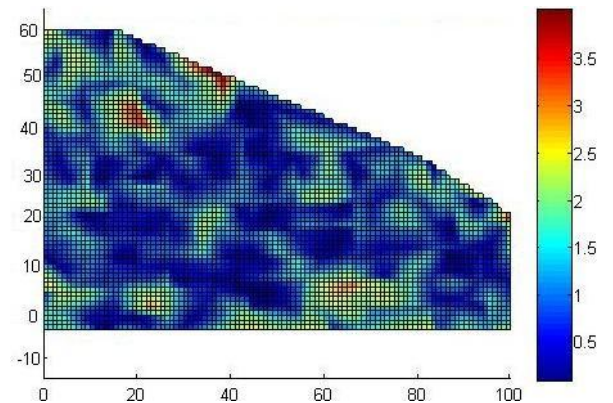
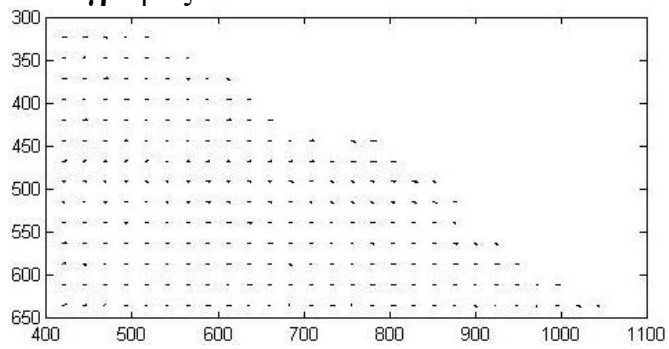
Φωτογραφίες 1-20



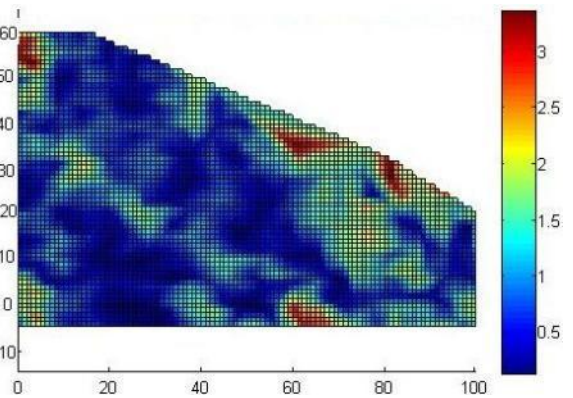
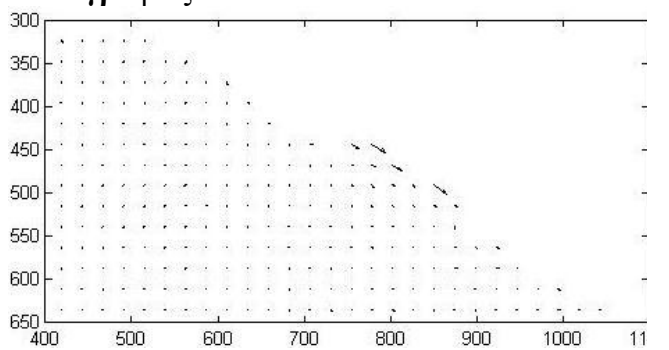
Φωτογραφίες 1-21



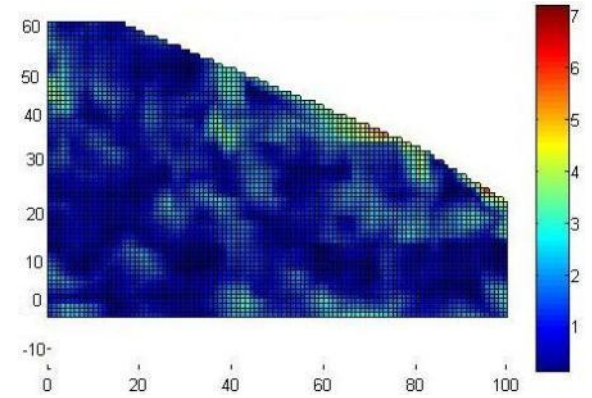
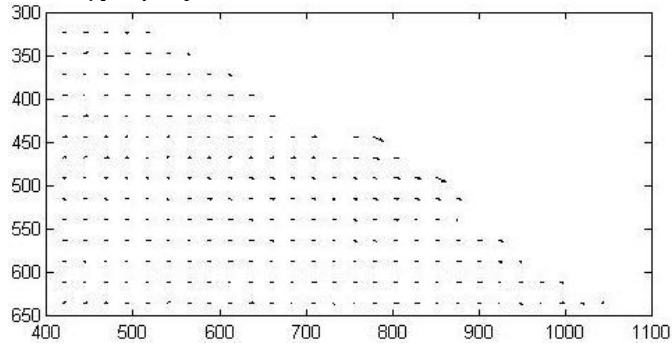
Φωτογραφίες 1-22



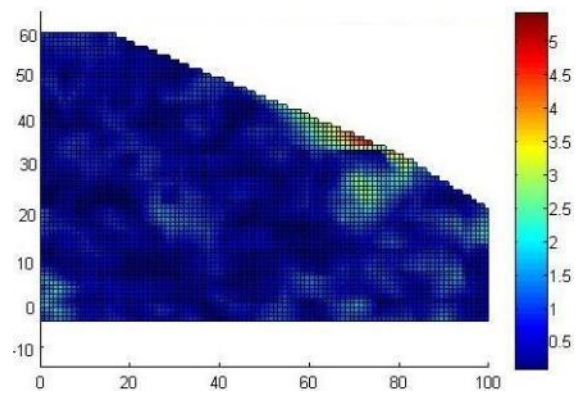
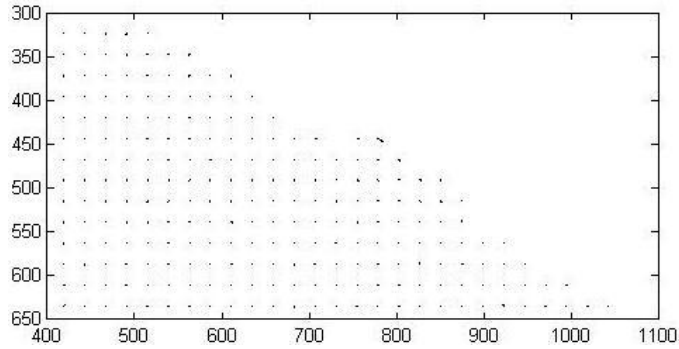
Φωτογραφίες 1-23



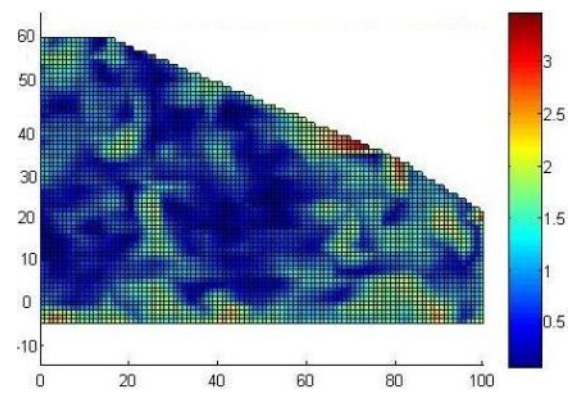
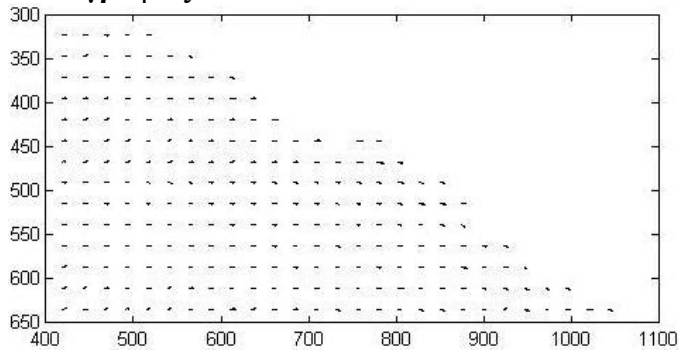
Φωτογραφίες 1-24



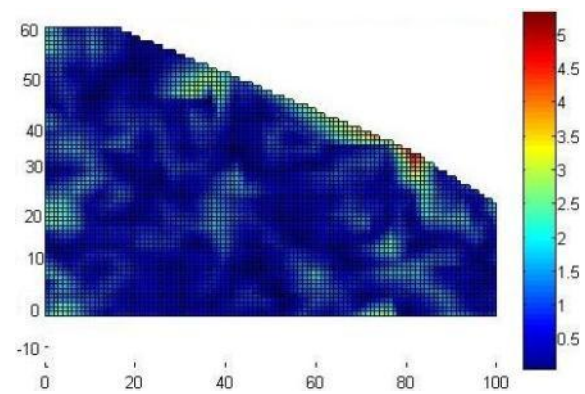
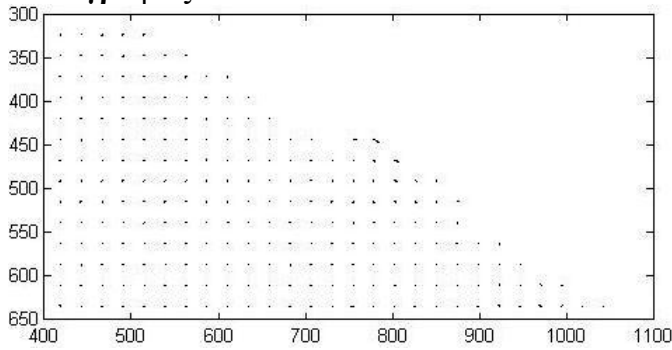
Φωτογραφίες 1-25



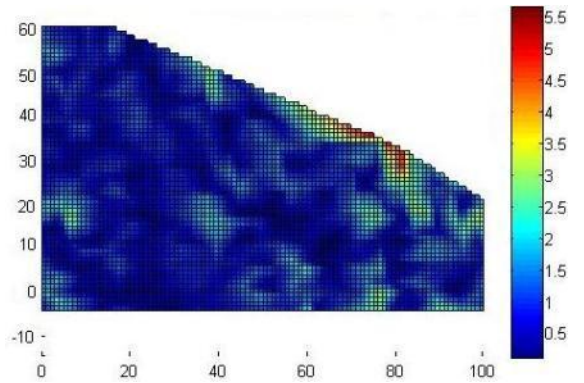
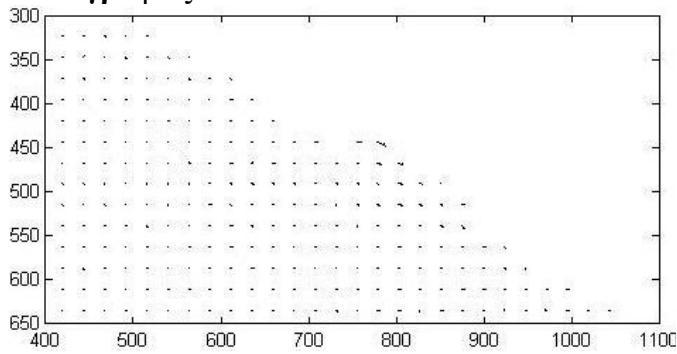
Φωτογραφίες 1-26



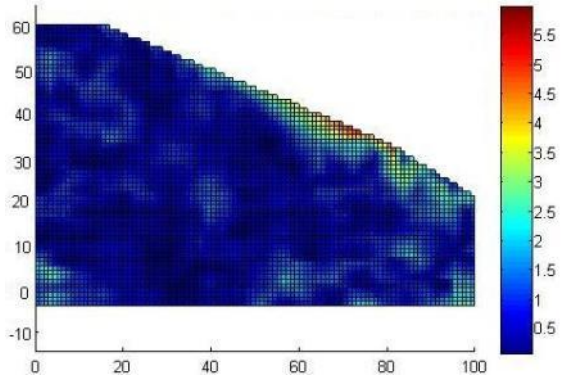
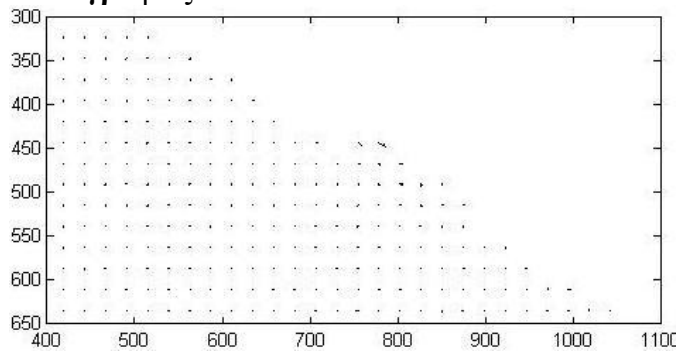
Φωτογραφίες 1-27



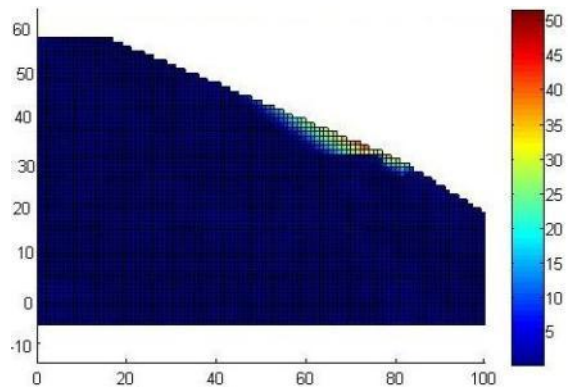
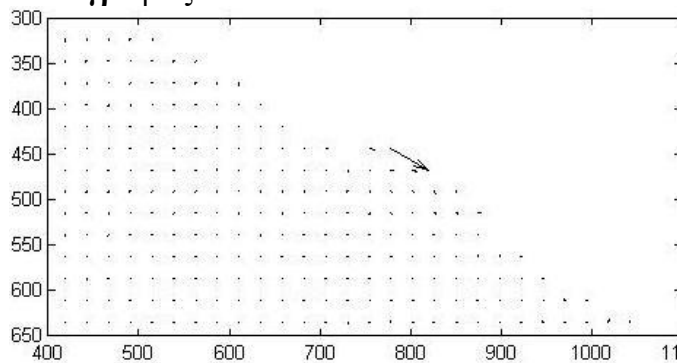
Φωτογραφίες 1-28



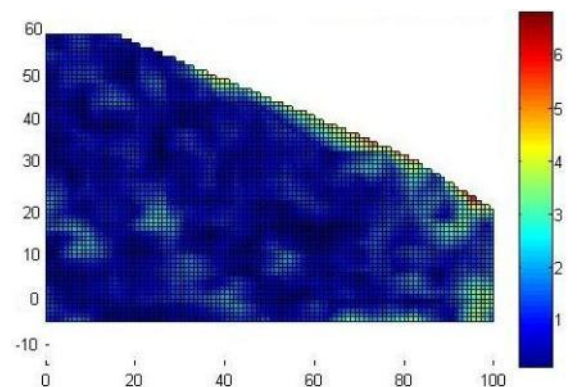
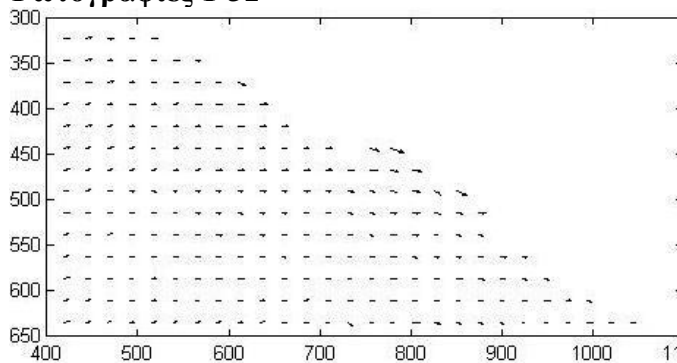
Φωτογραφίες 1-29



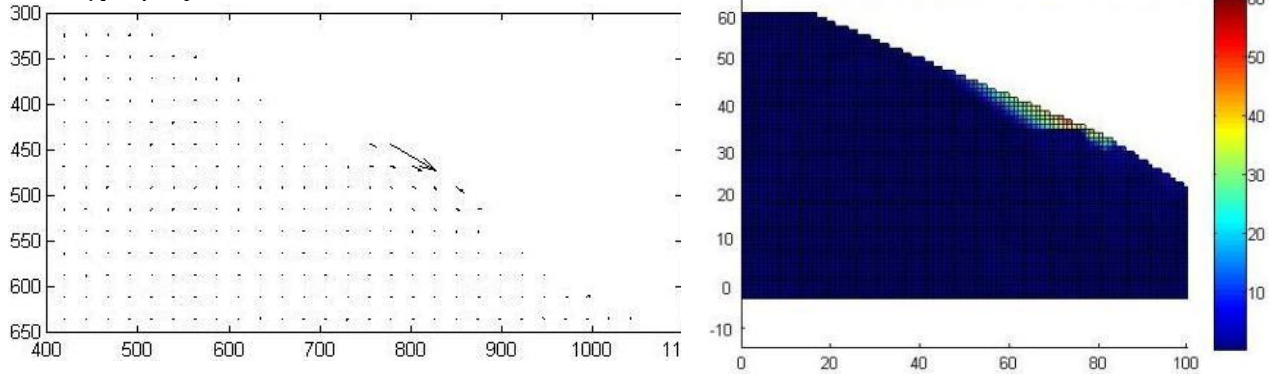
Φωτογραφίες 1-30



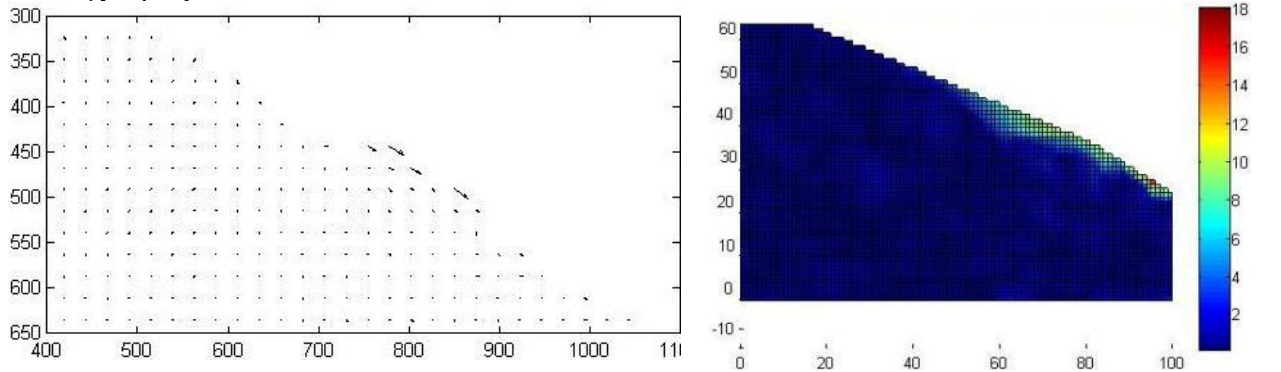
Φωτογραφίες 1-31



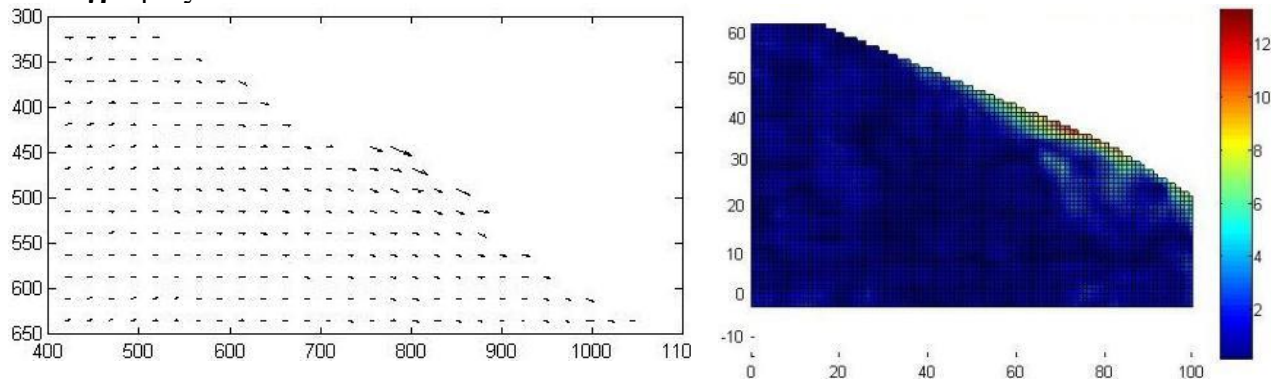
Φωτογραφίες 1-32



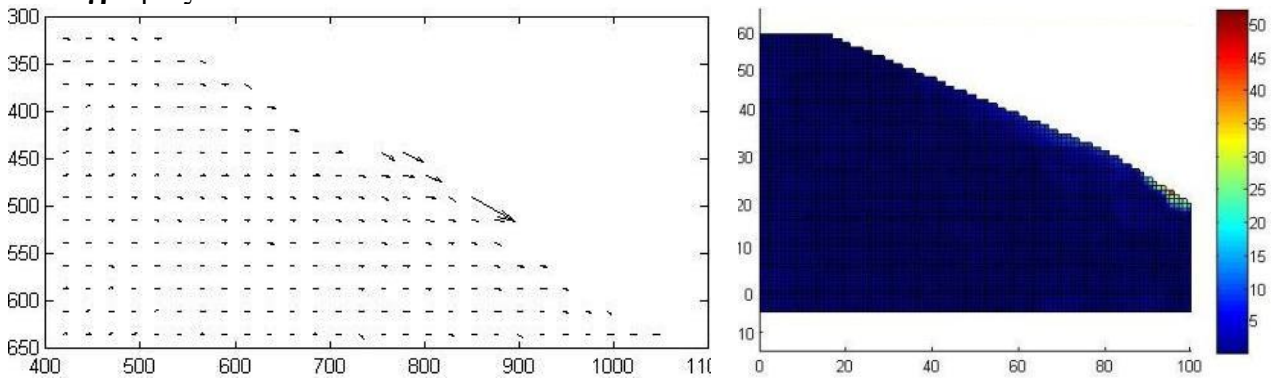
Φωτογραφίες 1-33



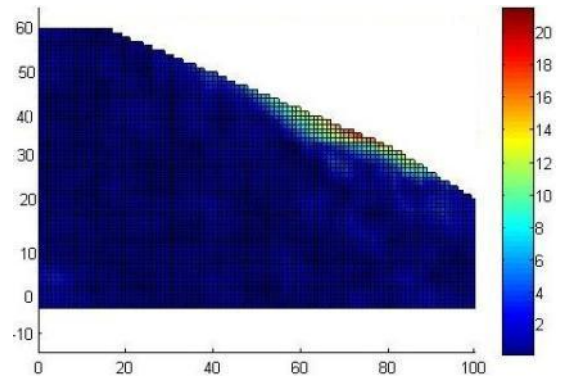
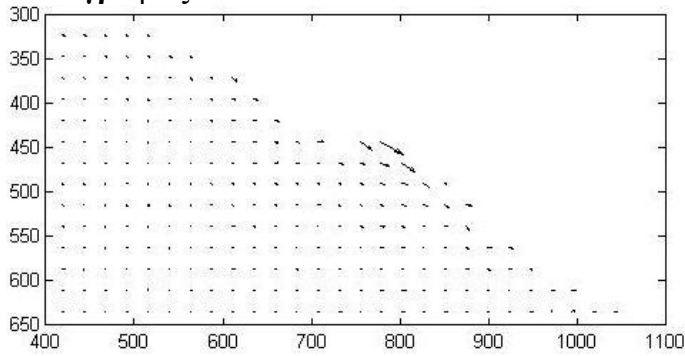
Φωτογραφίες 1-34



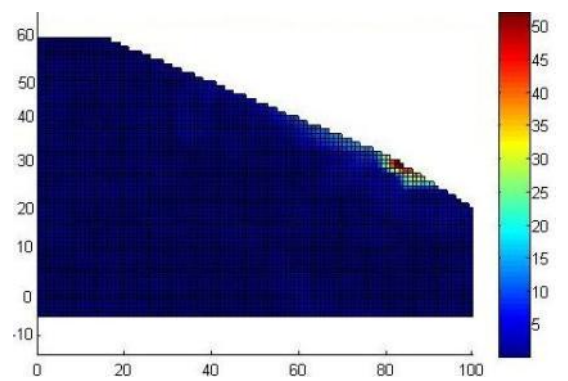
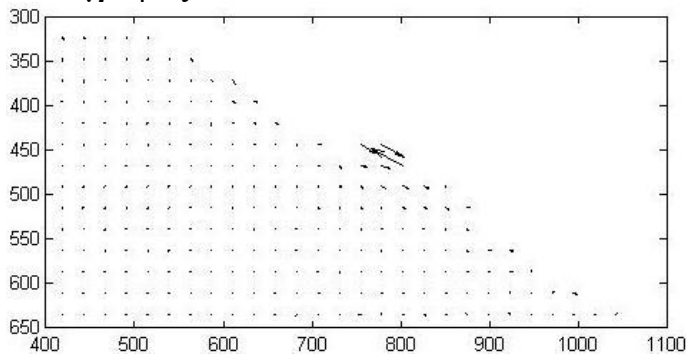
Φωτογραφίες 1-35



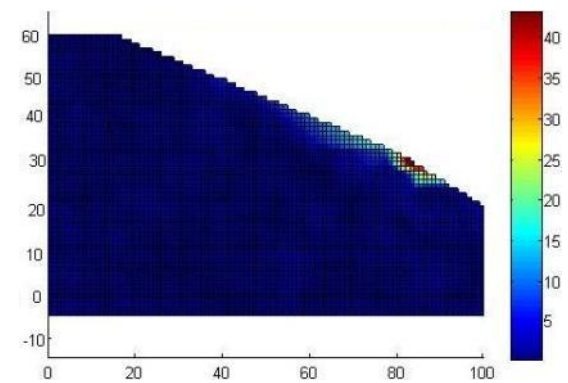
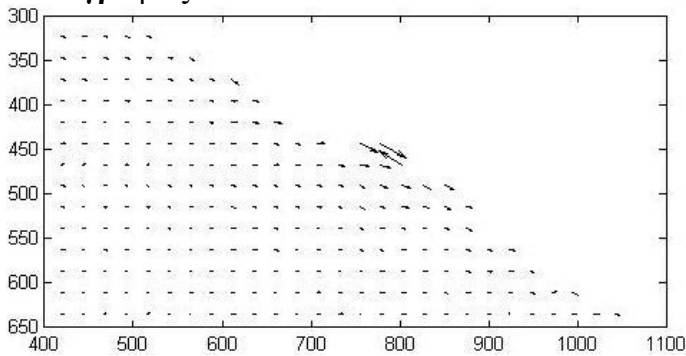
Φωτογραφίες 1-36



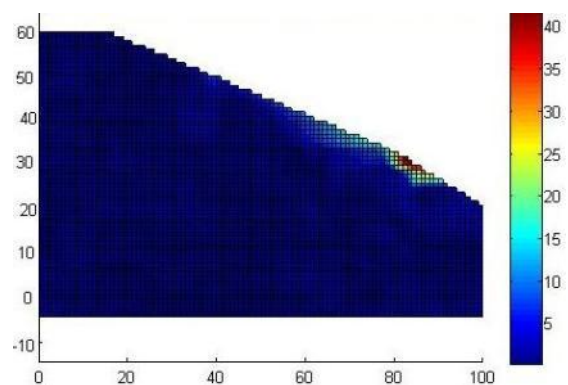
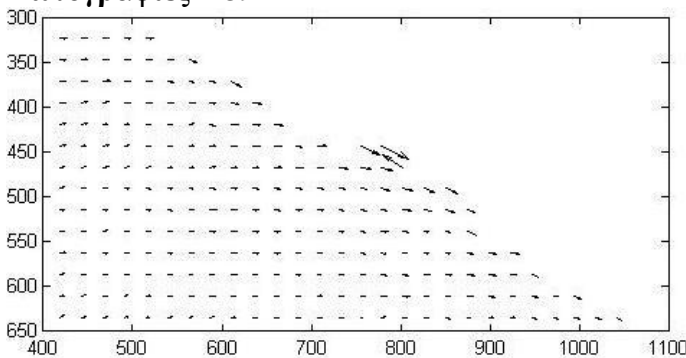
Φωτογραφίες 1-37



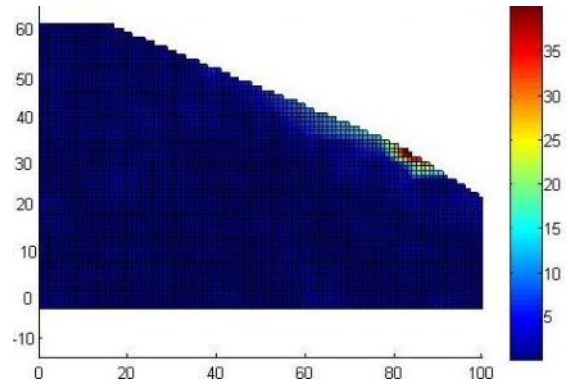
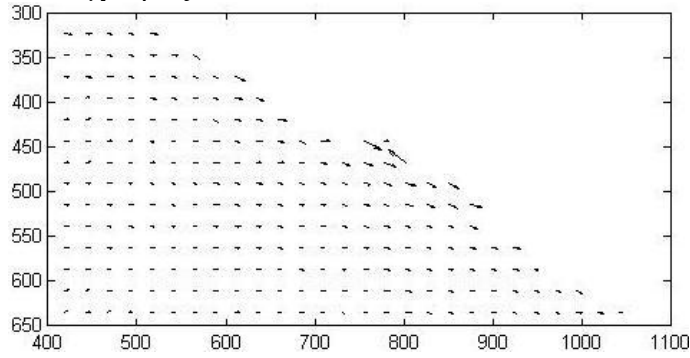
Φωτογραφίες 1-38



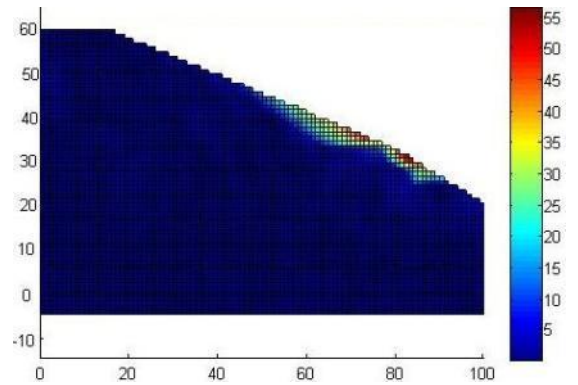
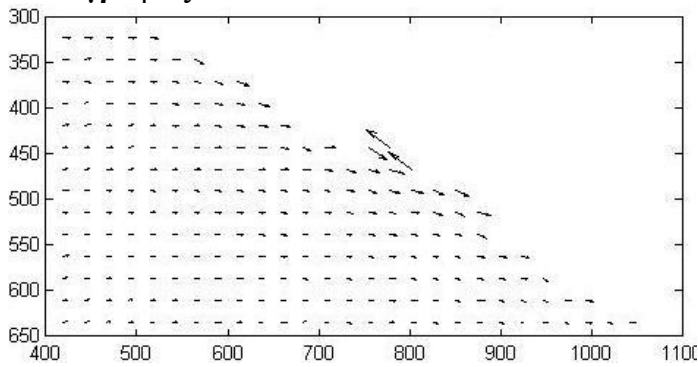
Φωτογραφίες 1-39



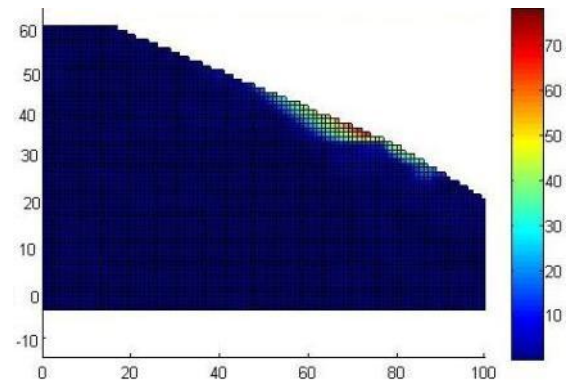
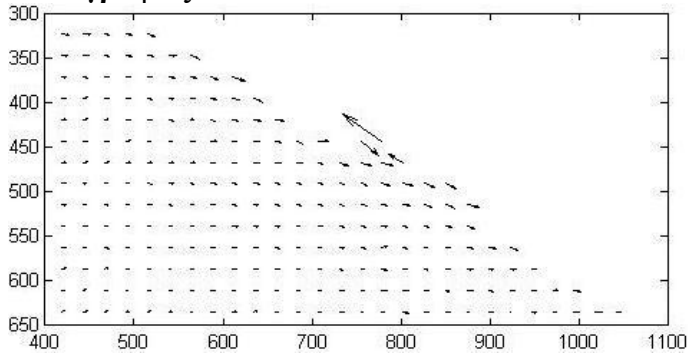
Φωτογραφίες 1-40



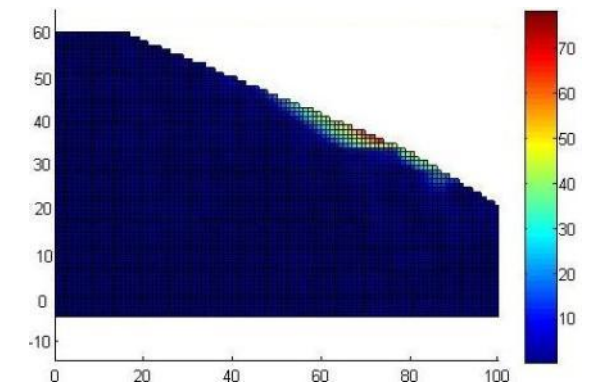
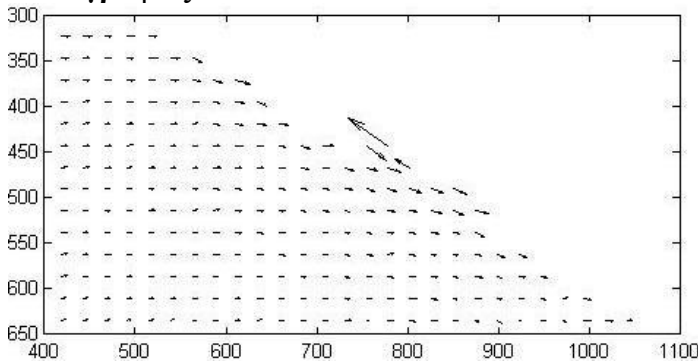
Φωτογραφίες 1-41



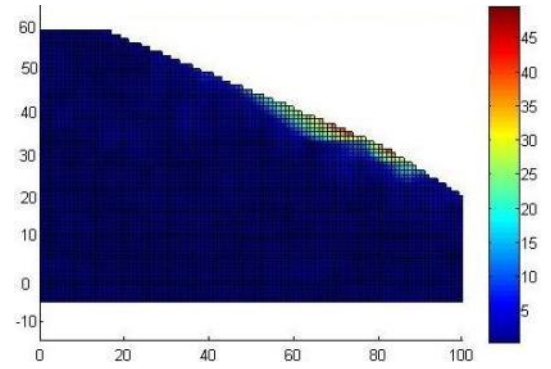
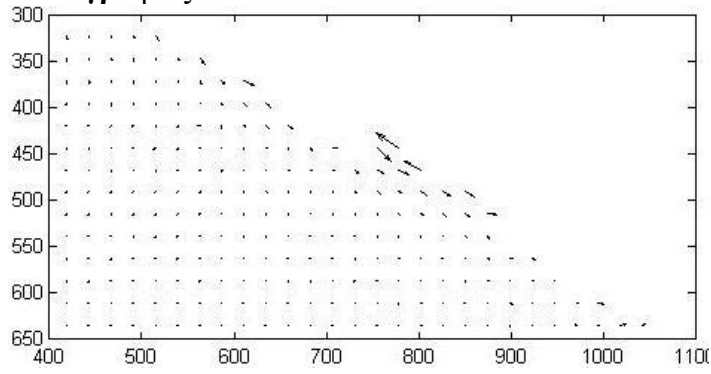
Φωτογραφίες 1-42



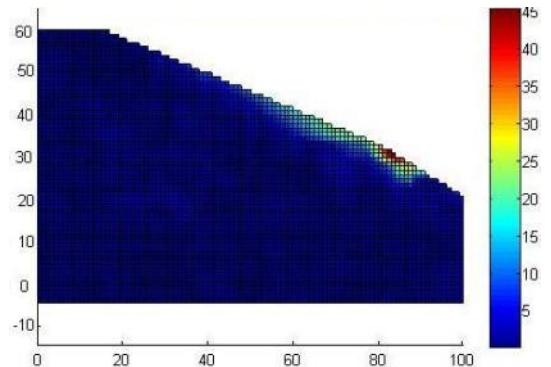
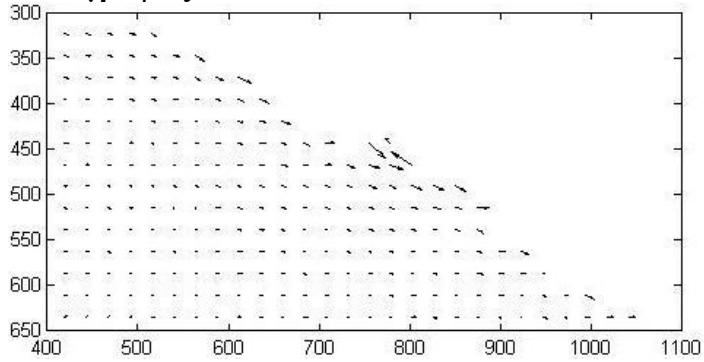
Φωτογραφίες 1-43



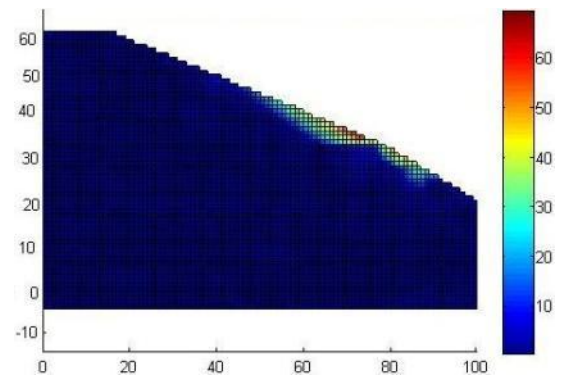
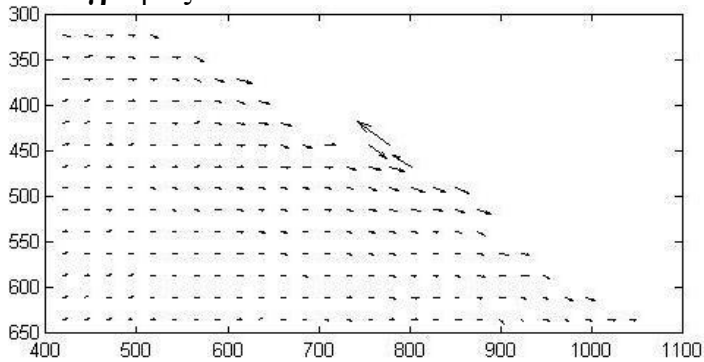
Φωτογραφίες 1-44



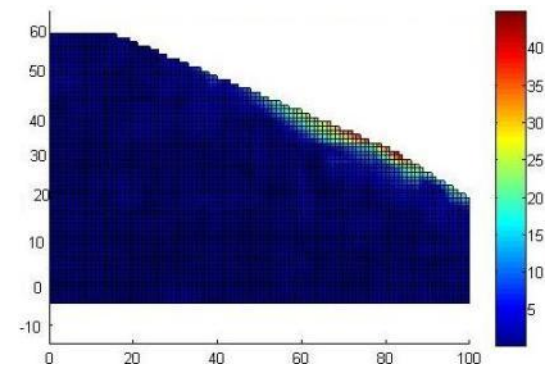
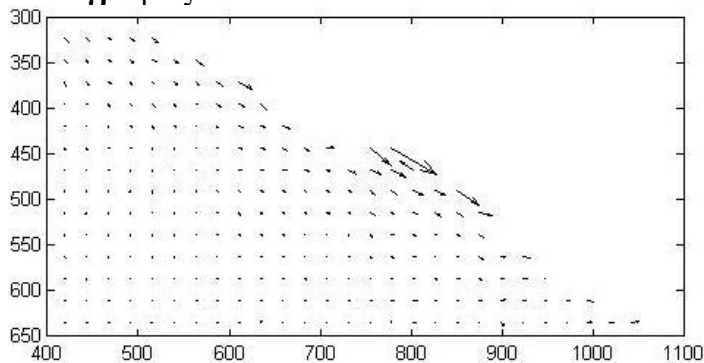
Φωτογραφίες 1-45



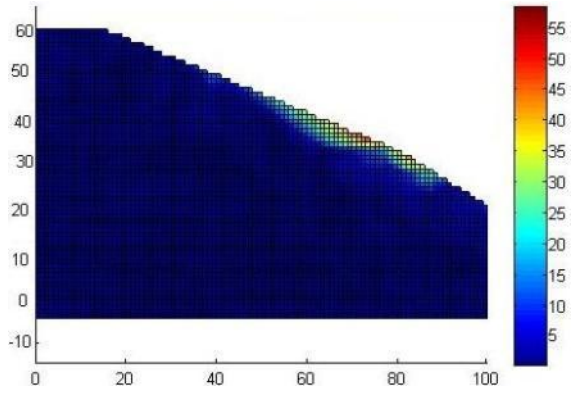
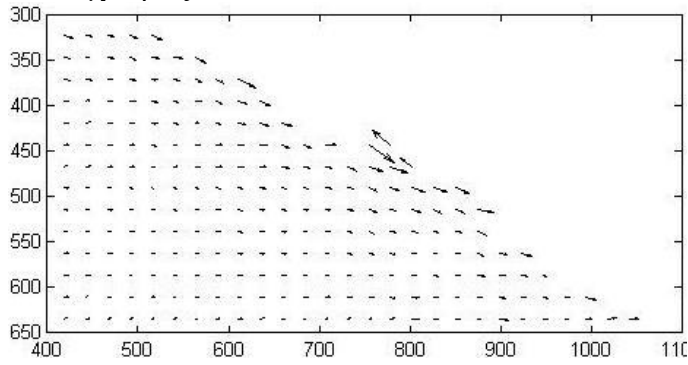
Φωτογραφίες 1-46



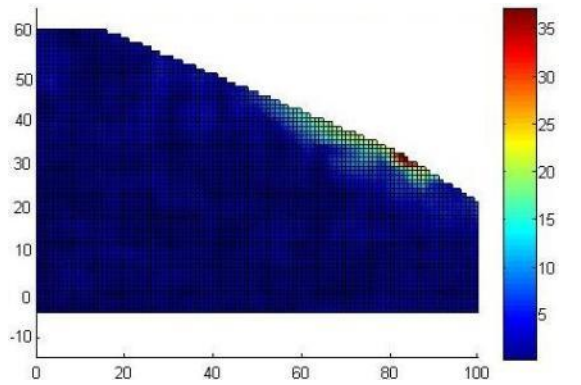
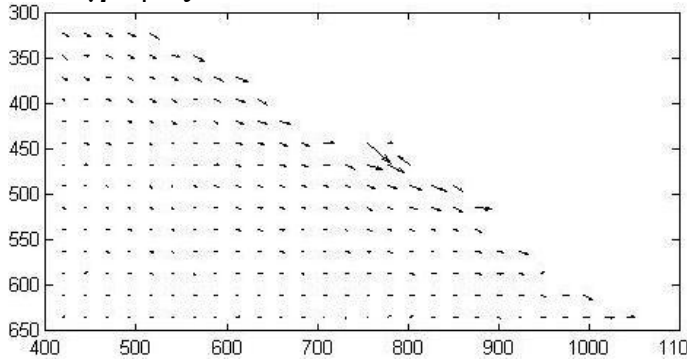
Φωτογραφίες 1-47



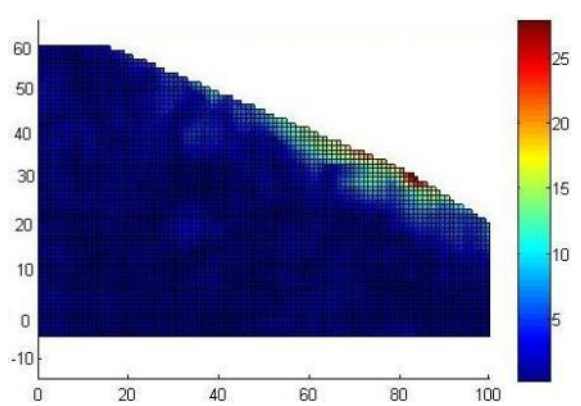
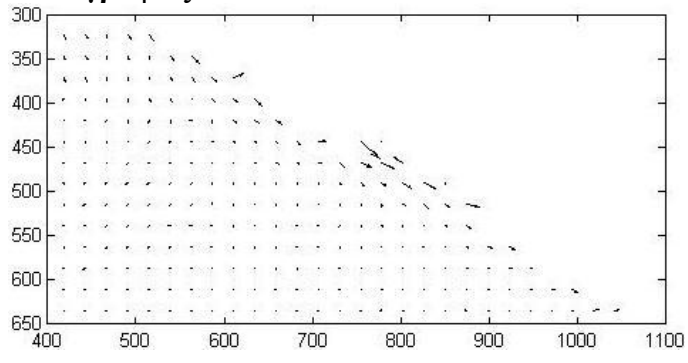
Φωτογραφίες 1-48



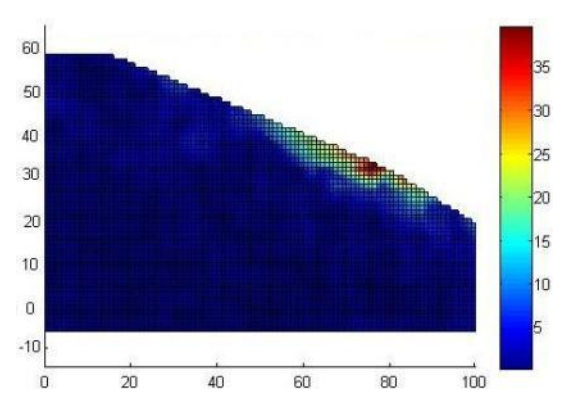
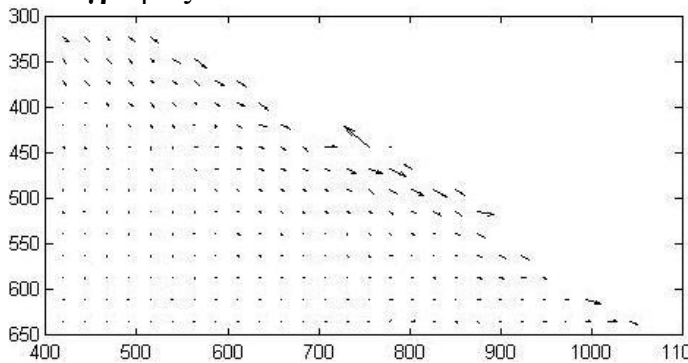
Φωτογραφίες 1-49



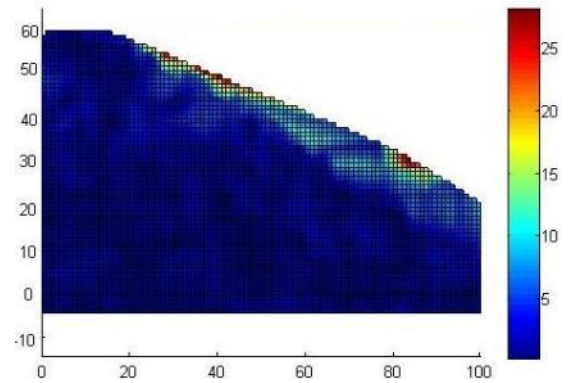
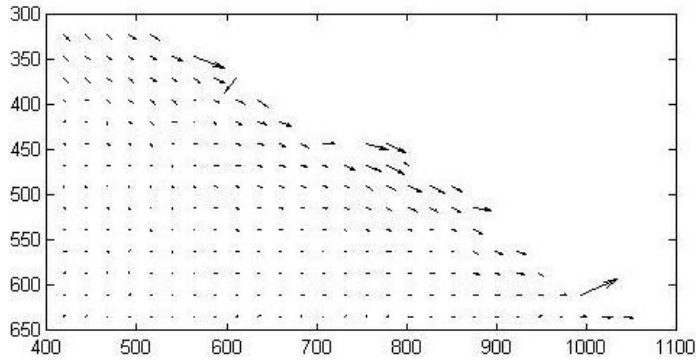
Φωτογραφίες 1-50



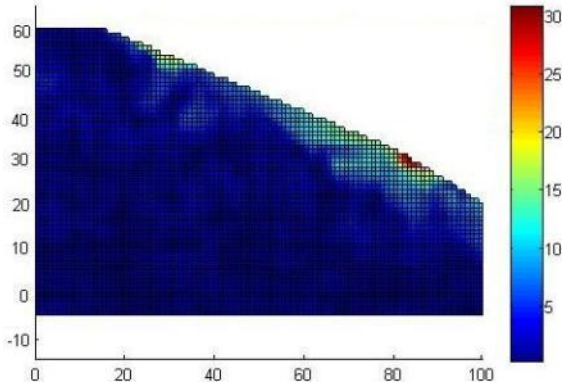
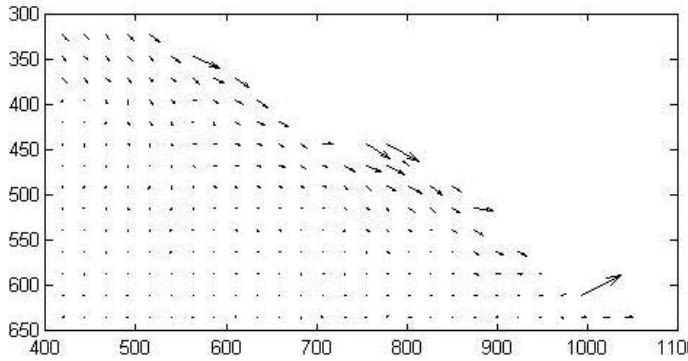
Φωτογραφίες 1-51



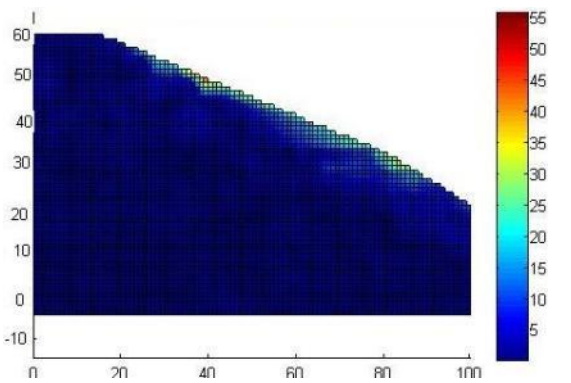
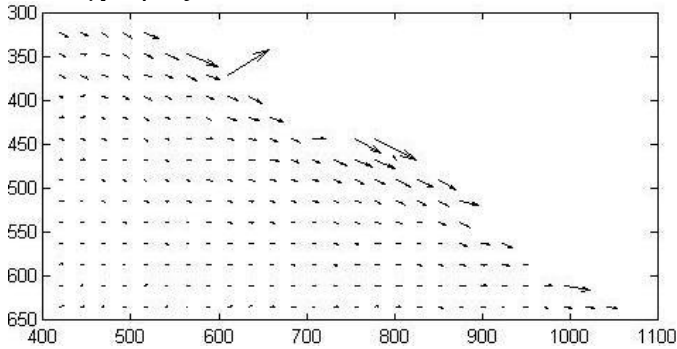
Φωτογραφίες 1-52



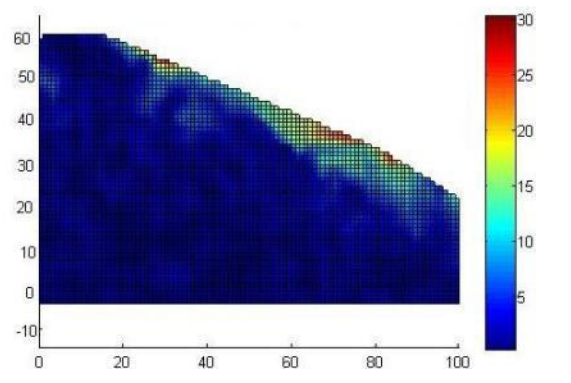
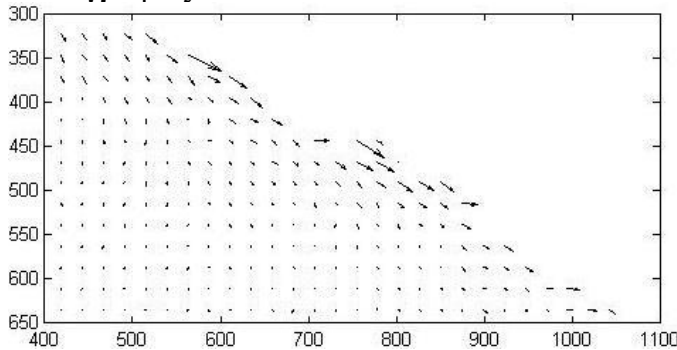
Φωτογραφίες 1-53



Φωτογραφίες 1-54



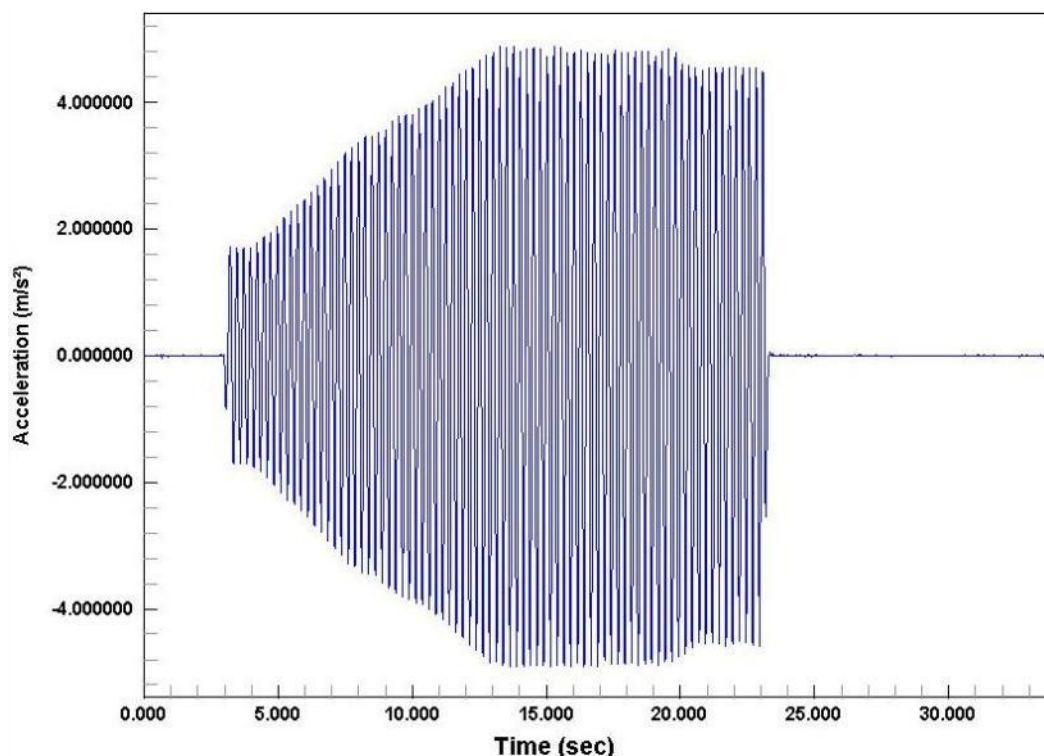
Φωτογραφίες 1-55



3.4.3 Πείραμα 3: Σεισμική φόρτιση με προσθήκη νερού – ελεύθερο πρανές

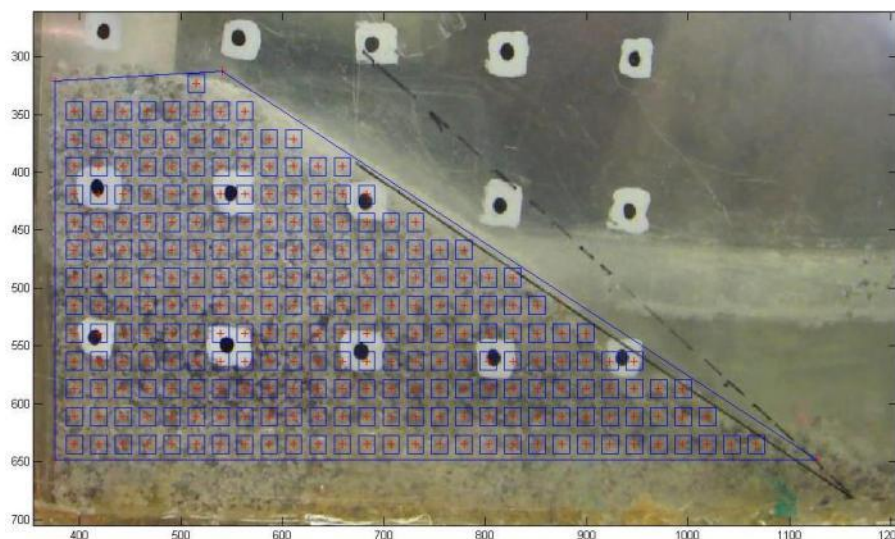
3.4.3.1 Περιγραφή πειράματος

Το πείραμα αυτό περιελάμβανε την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στα προηγούμενα δύο πειράματα. Επίσης το ακόλουθο πείραμα θεωρείται συνέχεια του πειράματος 2, και η αρχική του κατάσταση θεωρείται η τελική εικόνα του πειράματος 2 (εικόνα 3.20). Οι παλμοί που εισάγαμε, ομοίως ήταν ημιτονοειδούς μορφής, σταθερής συχνότητας και επιπλέον οι τιμές της κρίσιμης γωνίας και επιτάχυνσης του πρανούς παρέμειναν σταθερές. Οπότε έχουμε ότι $\beta=28^\circ$ και $k_c=0.12g$. Στη συνέχεια ακολουθεί το συνολικό σειсмоγράφημα της συγκεκριμένης φόρτισης.

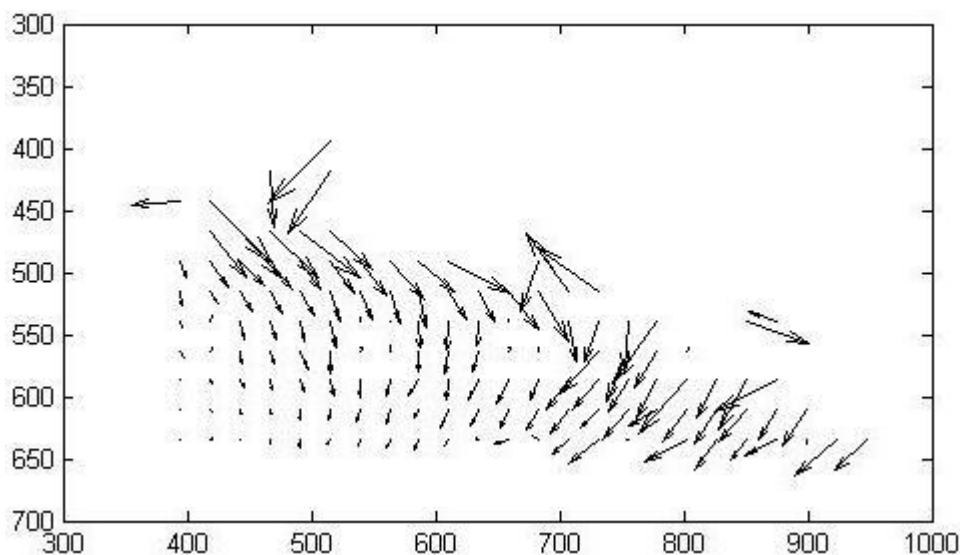


Εικ. 3.24: Το σεισογράφημα της σεισμικής φόρτισης

Ομοίως με τα προηγούμενα δύο πειράματα, μετά το εργαστήριο, ακολουθεί η διαδικασία της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο PIV σε περιβάλλον Matlab. Όπως έχει προαναφερθεί, αρχικό στάδιο της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι ο τεμαχισμός της αρχικής εικόνας σε μικρότερα τμήματα (patches). Στην εικόνα 3.25 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας patches στην αρχική φωτογραφία του μοντέλου με μέγεθος 16×16 pixel και μεταξύ τους απόσταση ίση με 24 pixel. Επίσης στην εικόνα 3.26 παρουσιάζεται ένα τυπικό αποτέλεσμα μετατόπισης κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης.

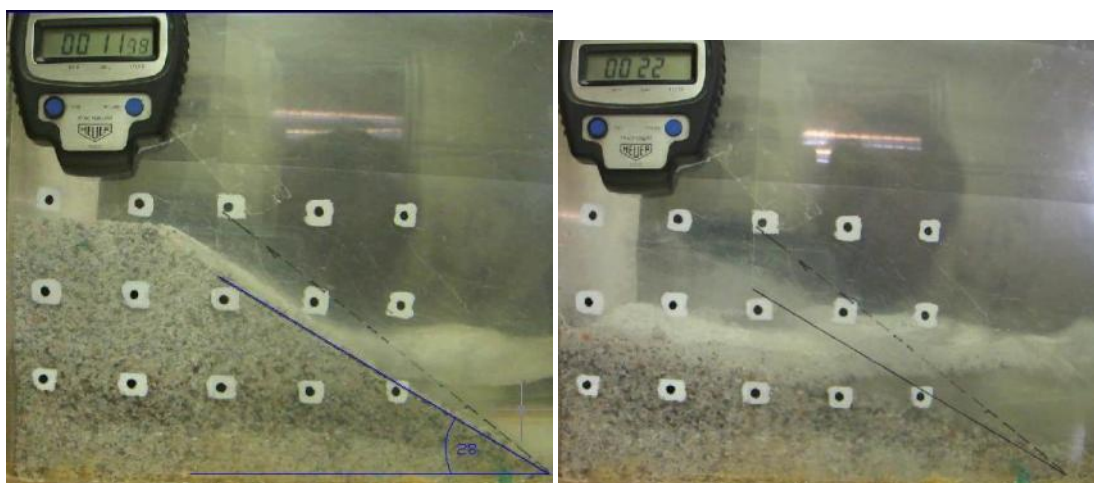


Εικ. 3.25: Δημιουργία τμημάτων (patches) στο πρανός



Εικ. 3.26: Τυπική μετατόπιση

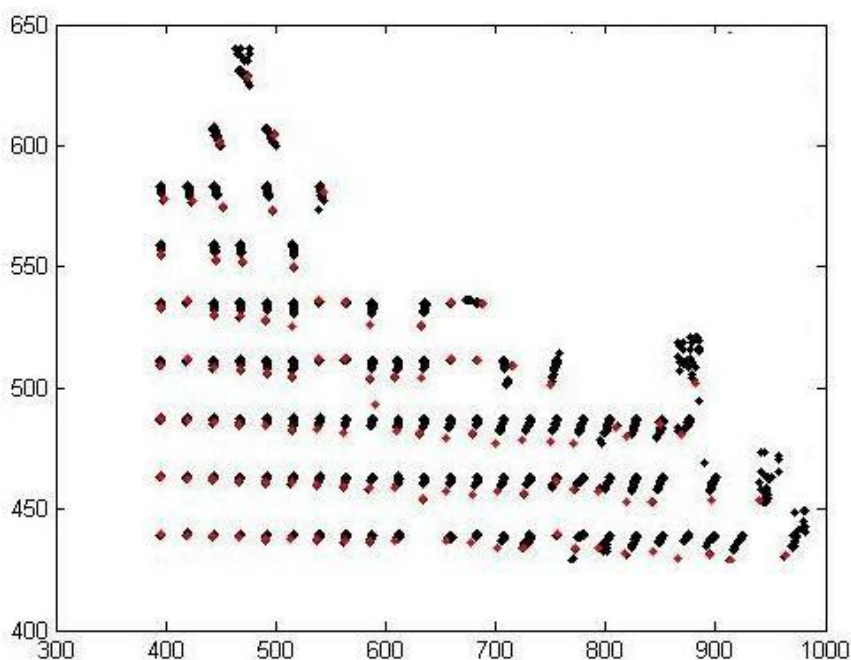
Σύμφωνα με το τυπικό αποτέλεσμα μετατόπισης της εικόνας 3.26, παρατηρείται ότι η αστοχία του πρανούς δεν είναι μόνο επιφανειακή, όπως στο πείραμα 2 αλλά φαίνεται ότι καλύπτει μεγάλο τμήμα του πρανούς. Επίσης στην ίδια εικόνα (Εικ.3.26) φαίνεται η δημιουργία αρκετών μη συμβατών διανυσμάτων ροής (wild vectors) που σχηματίστηκαν κατά τη διαδικασία επεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Τα διανύσματα αυτά, έχουν φορά αντίθετη της αναμενόμενης και πολύ πιθανόν να οφείλονται είτε στον κυματισμό που προκαλείται από το νερό, κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης, είτε στη διάχυση του εδαφικού υλικού στο νερό. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αρχική και η τελική κατάσταση του πρανούς στη δεδομένη φόρτιση.



Εικ. 3.27 : Αρχική κατάσταση πρανούς

Τελική κατάσταση πρανούς με φόρτιση

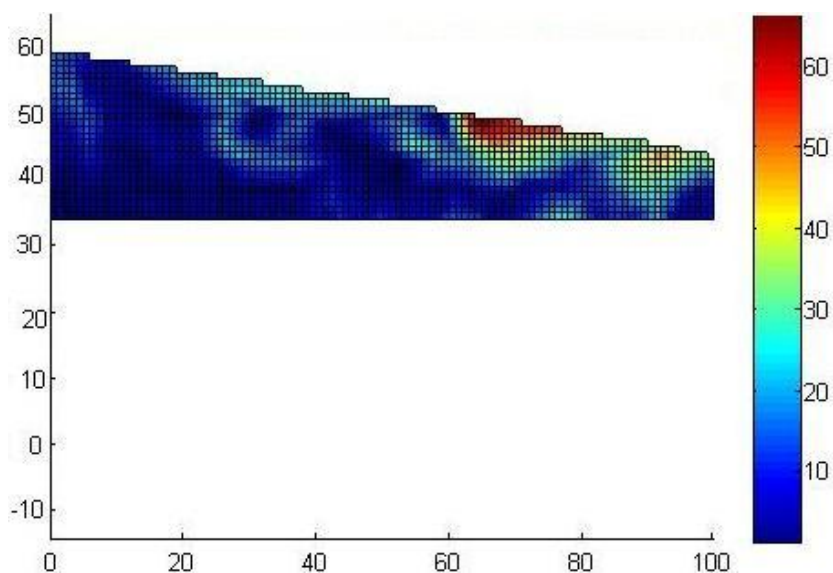
Στην εικόνα 3.28 που ακολουθεί, φαίνονται οι αρχικές και οι τελικές θέσεις των διαφόρων τμημάτων της εικόνας (patches) του πειράματος που αναπαριστούν την κίνηση των κόκκων της άμμου του δοκιμίου καθώς εξελίσσεται τα πείραμα. Επίσης φαίνεται η πορεία των τμημάτων αυτών στις διάφορες φάσεις του πειράματος στις οποίες πάρθηκαν οι φωτογραφίες.



Εικ.3.28 : Συνολικές μετατοπίσεις των κόκκων της άμμου

Συγκεκριμένα φαίνεται ότι οι μετακινήσεις των κόκκων της άμμου είναι έντονες σε όλο το τμήμα του πρανούς και ειδικότερα στο τμήμα που έρχεται απευθείας σε επαφή με το νερό.

Ακολουθεί το διάγραμμα των ανηγμένων παραμορφώσεων που αντιστοιχούν στα διανύσματα ροής της εικόνας 3.26.



Εικ.3,29: Γραφική αναπαράσταση ανηγμένων παραμορφώσεων

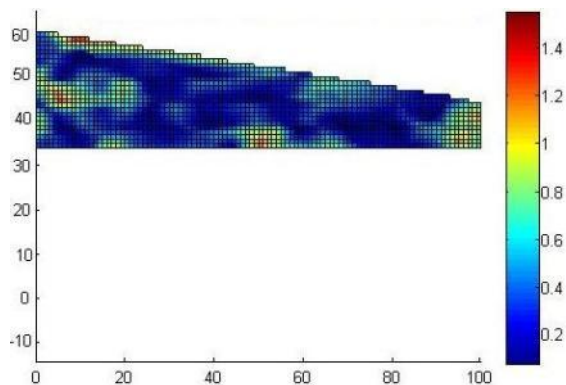
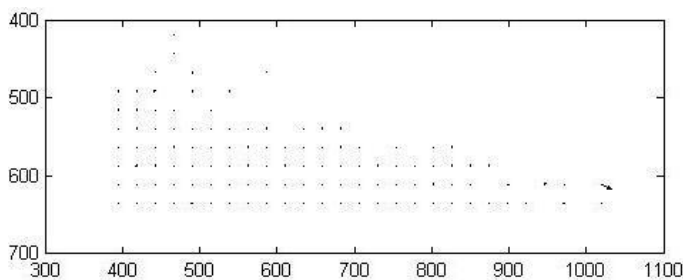
Τα συνολικά αποτελέσματα των διανυσμάτων μετατόπισης και των ανηγμένων παραμορφώσεων παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

3.4.3.2: Αποτελέσματα πειράματος 3

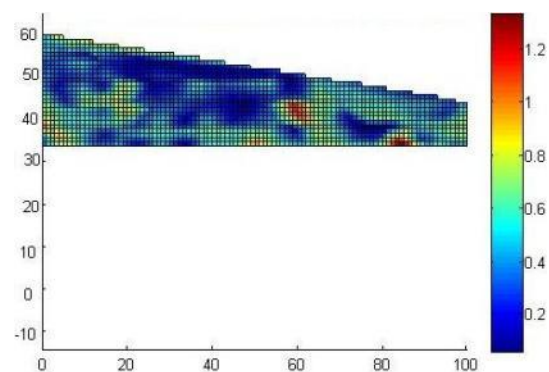
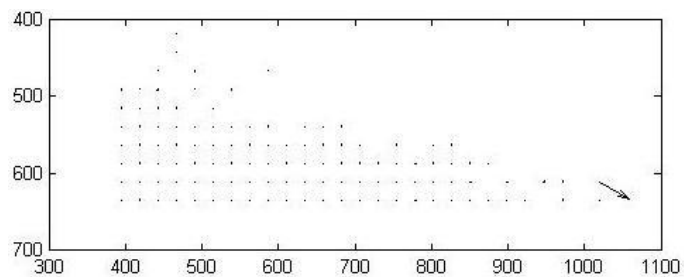
Διανύσματα μετατόπισης

Ανηγμένες παραμορφώσεις

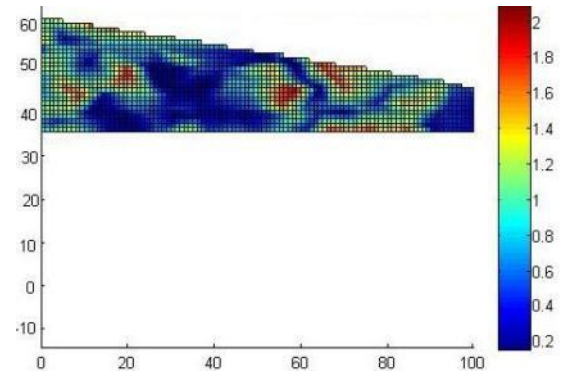
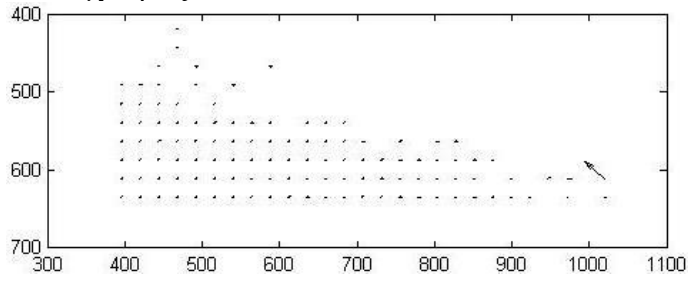
Φωτογραφίες 1-2



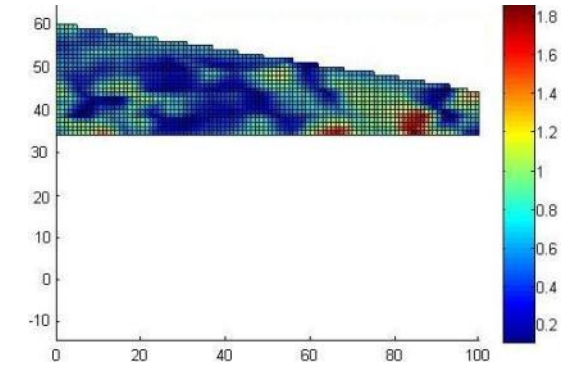
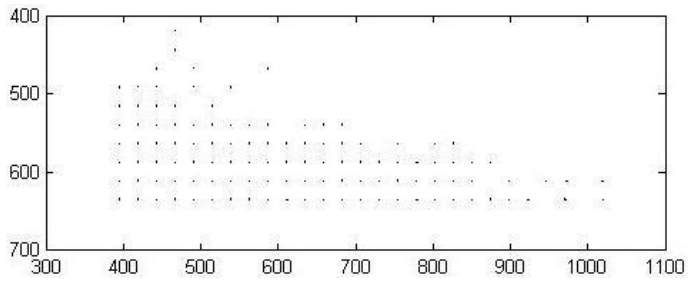
Φωτογραφίες 1-3



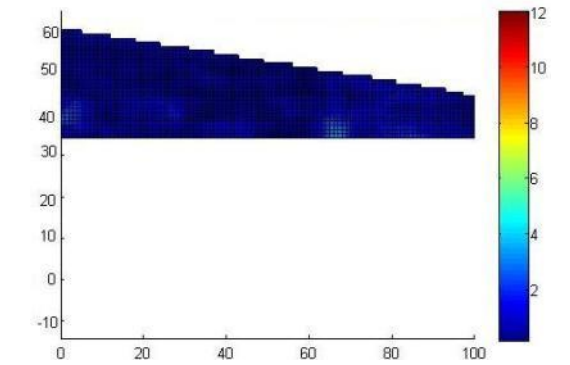
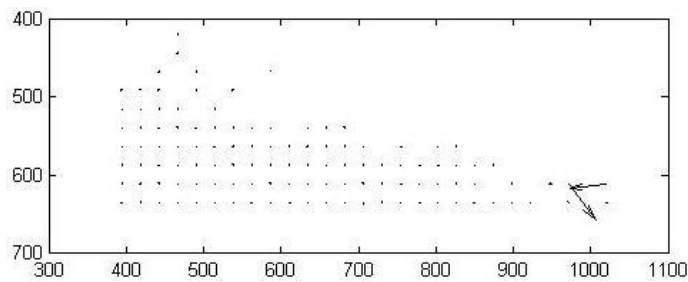
Φωτογραφίες 1-4



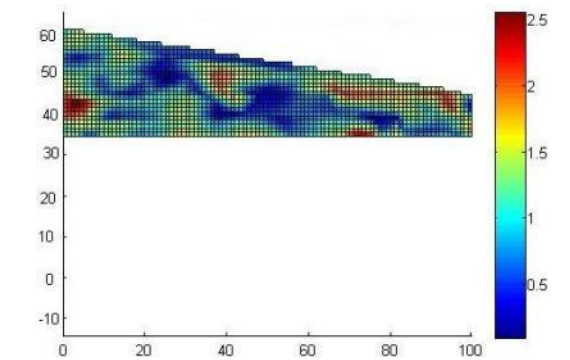
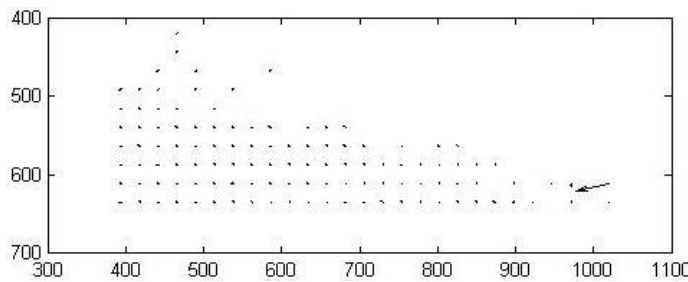
Φωτογραφίες 1-5



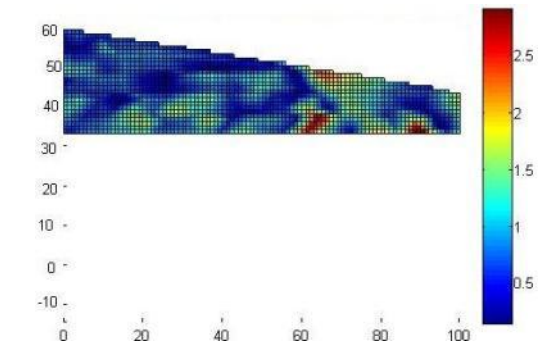
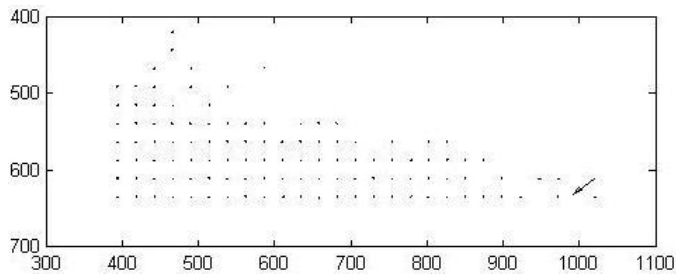
Φωτογραφίες 1-6



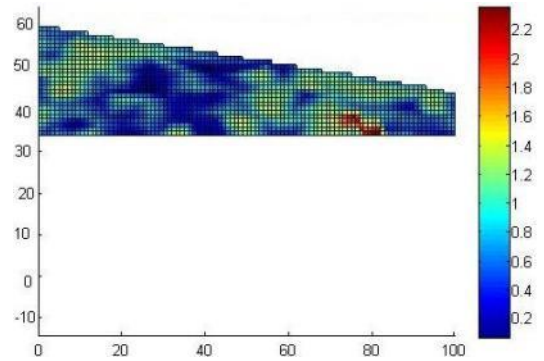
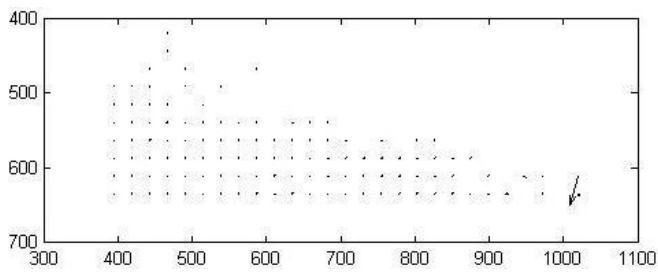
Φωτογραφίες 1-7



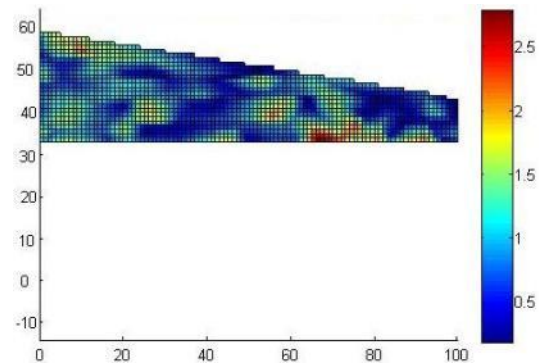
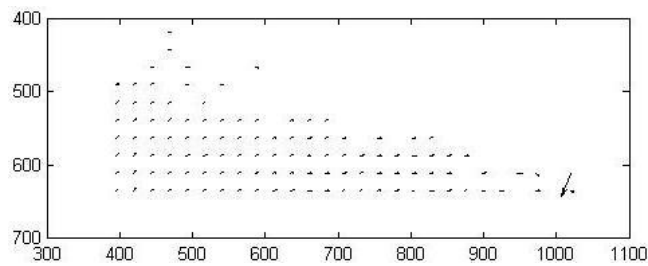
Φωτογραφίες 1-8



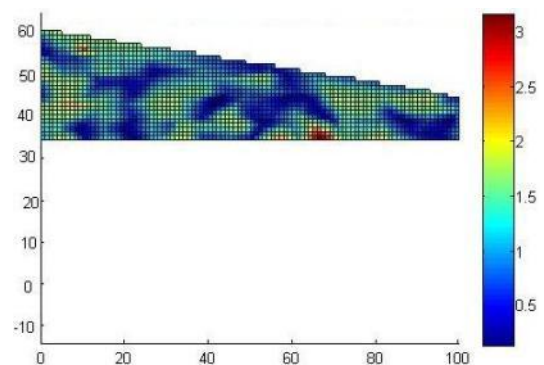
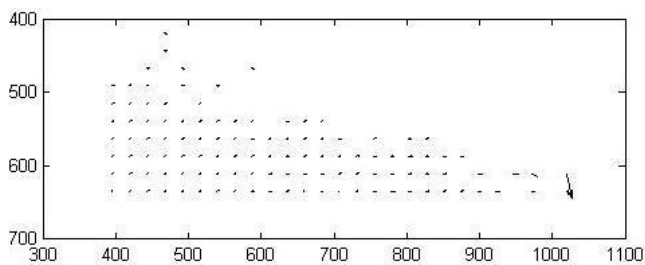
Φωτογραφίες 1-9



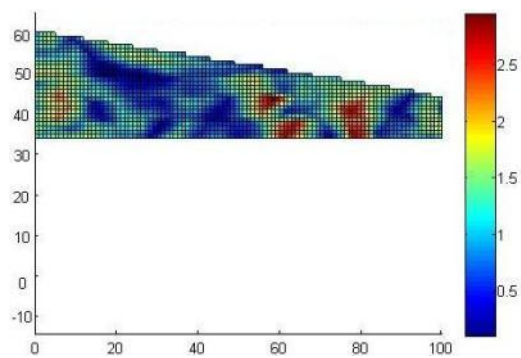
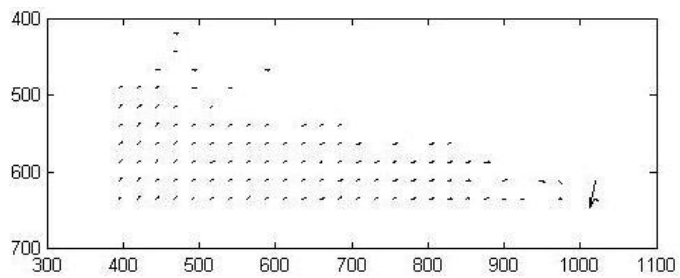
Φωτογραφίες 1-10



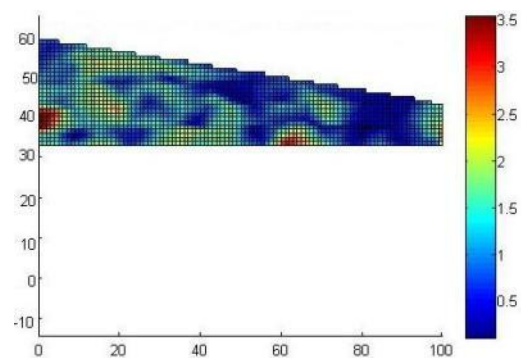
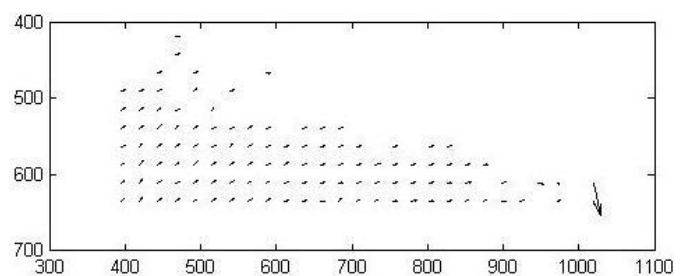
Φωτογραφίες 1-11



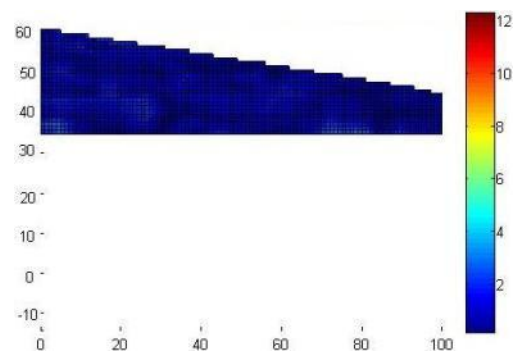
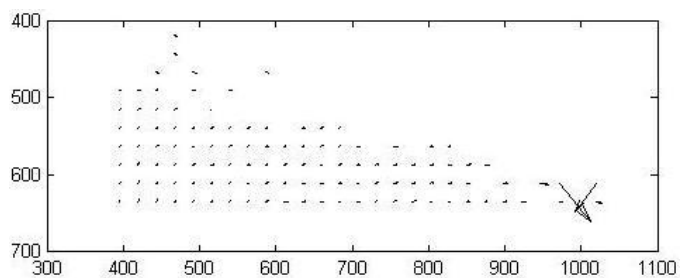
Φωτογραφίες 1-12



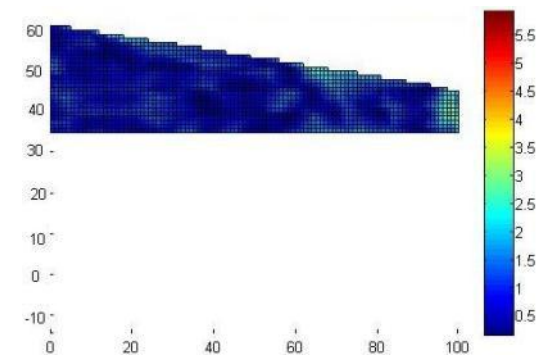
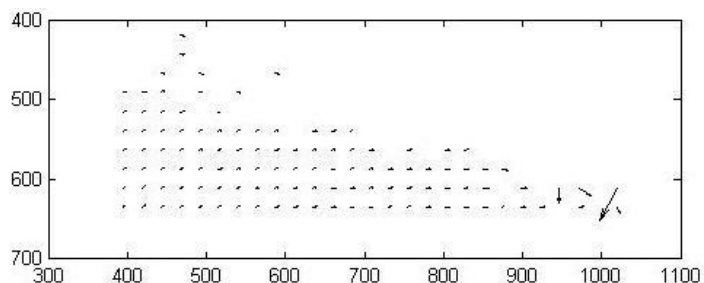
Φωτογραφίες 1-13



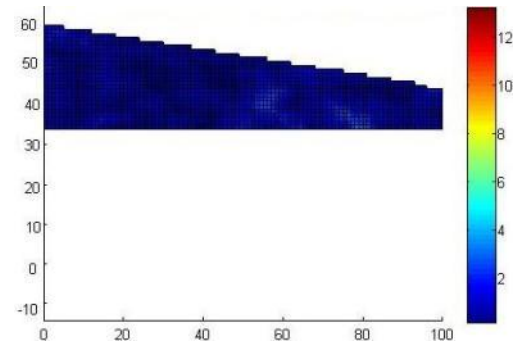
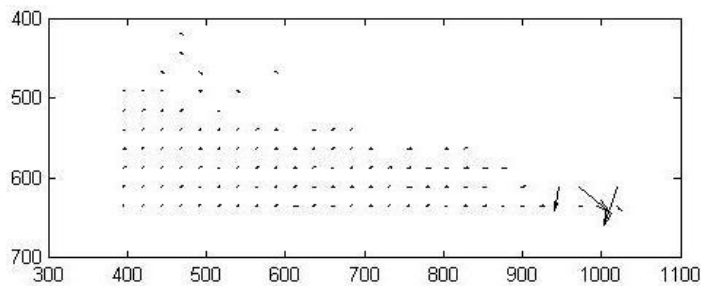
Φωτογραφίες 1-14



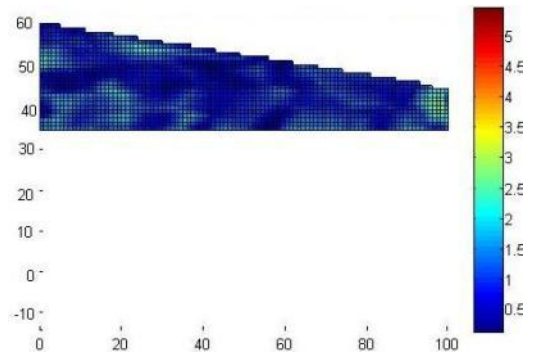
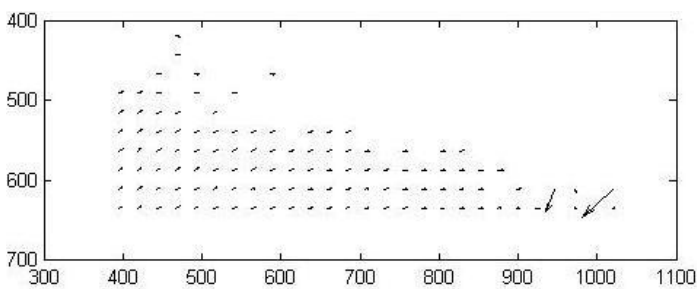
Φωτογραφίες 1-15



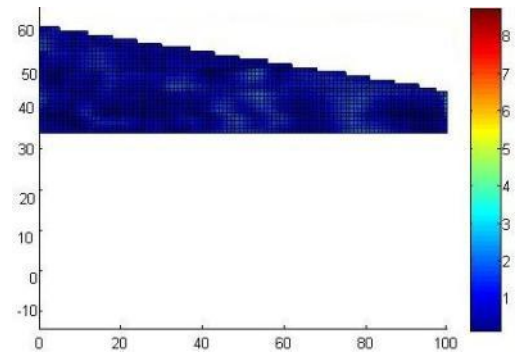
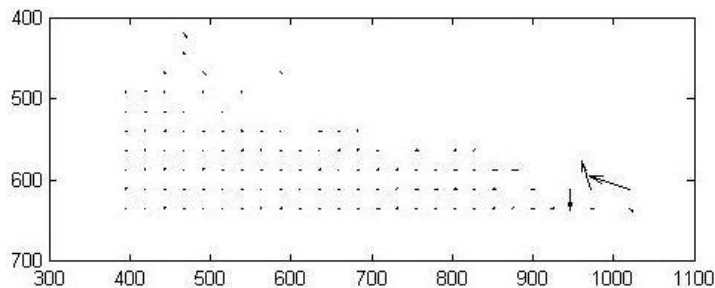
Φωτογραφίες 1-16



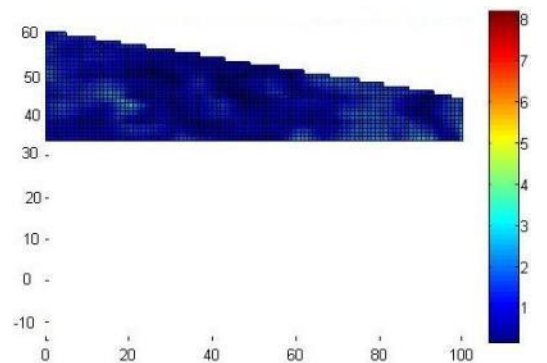
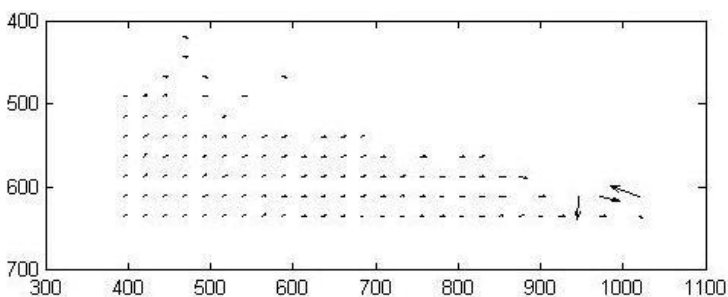
Φωτογραφίες 1-17



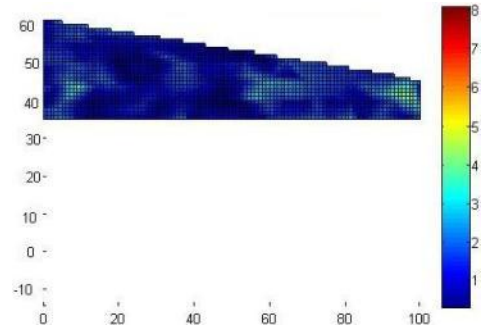
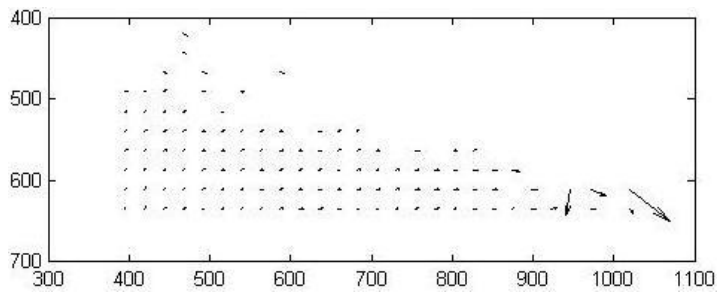
Φωτογραφίες 1-18



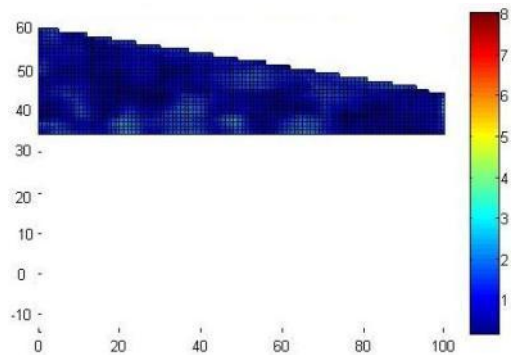
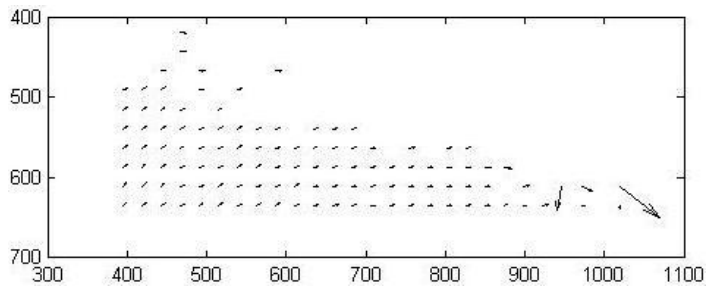
Φωτογραφίες 1-19



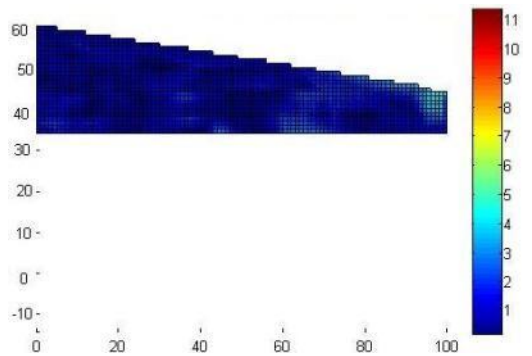
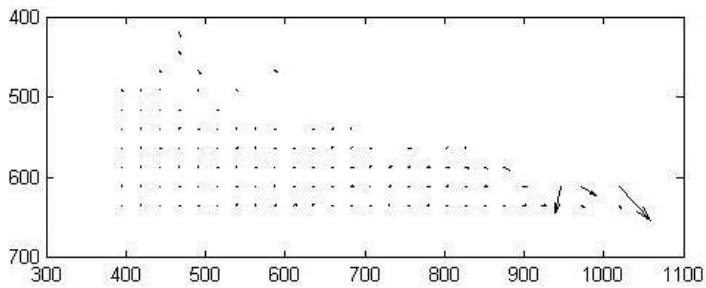
Φωτογραφίες 1-20



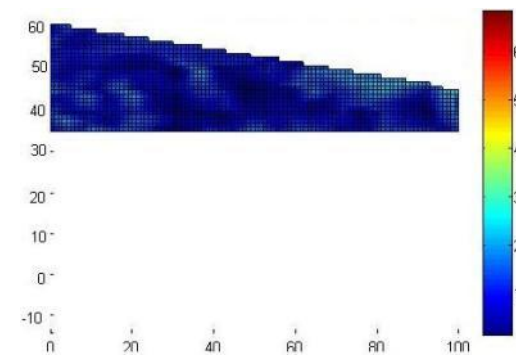
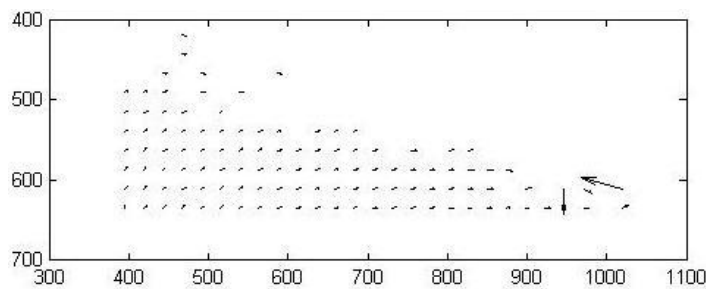
Φωτογραφίες 1-21



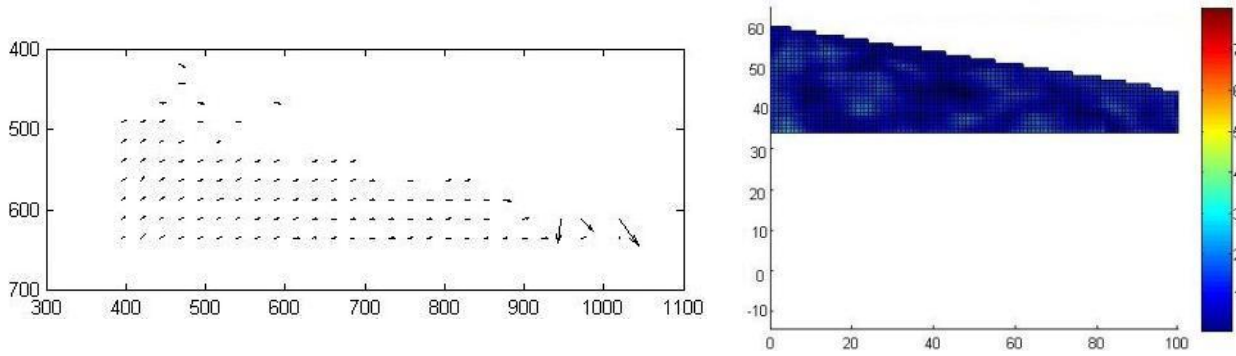
Φωτογραφίες 1-22



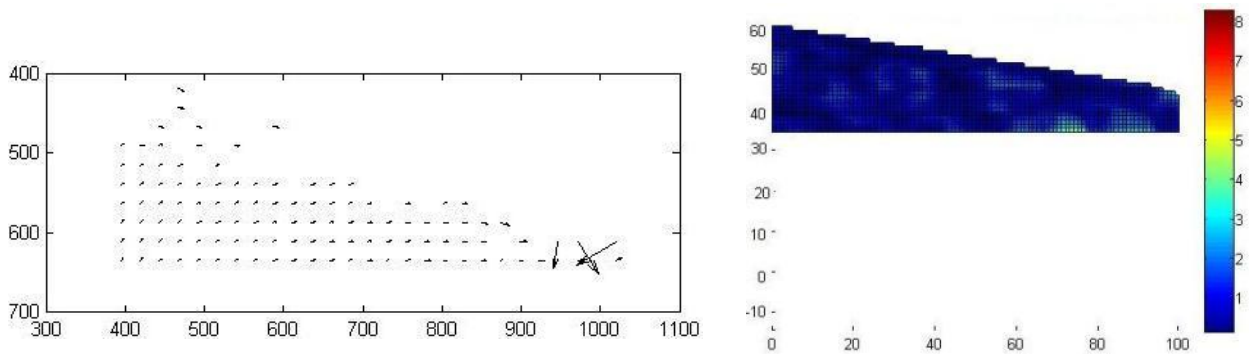
Φωτογραφίες 1-23



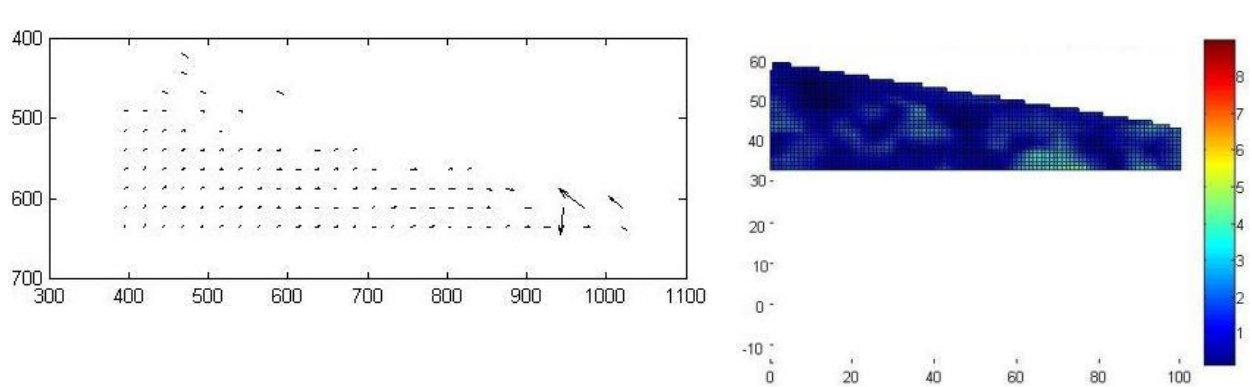
Φωτογραφίες 1-24



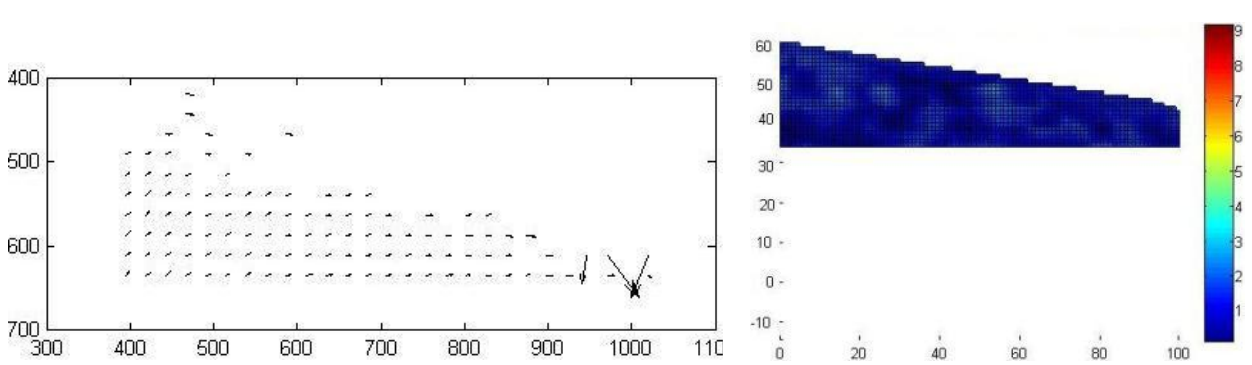
Φωτογραφίες 1-25



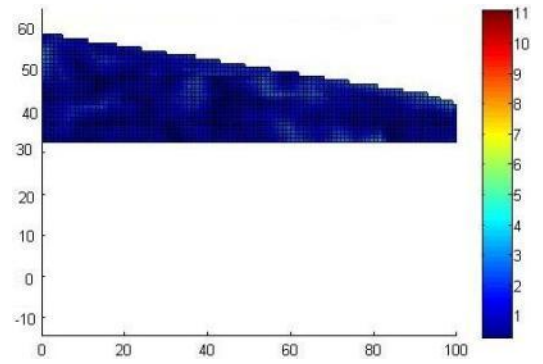
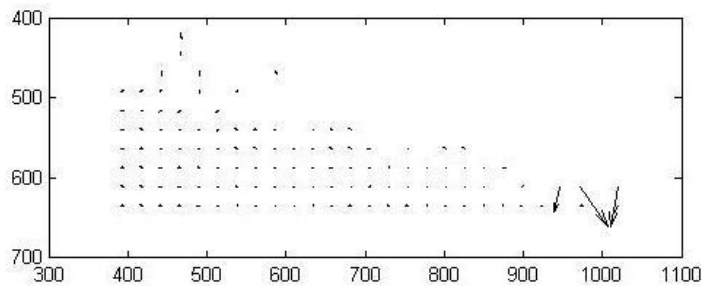
Φωτογραφίες 1-26



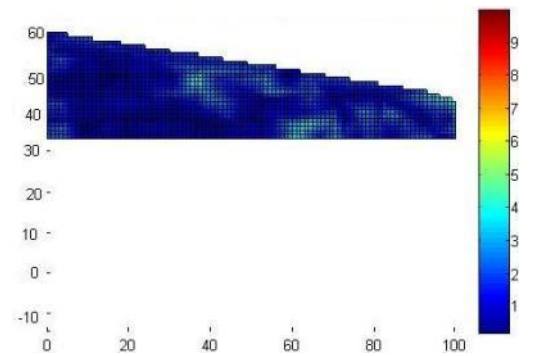
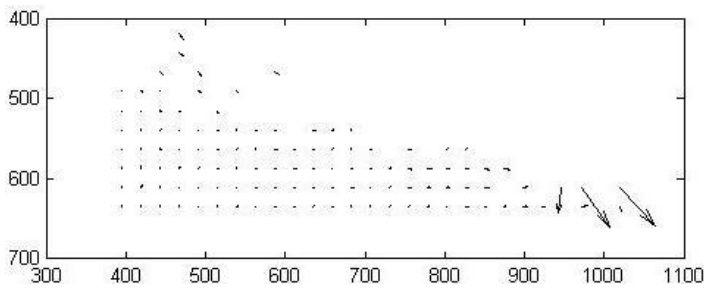
Φωτογραφίες 1-27



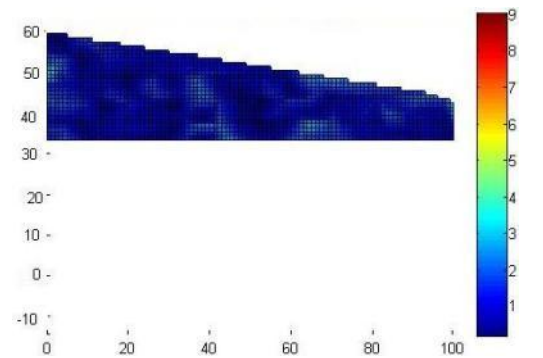
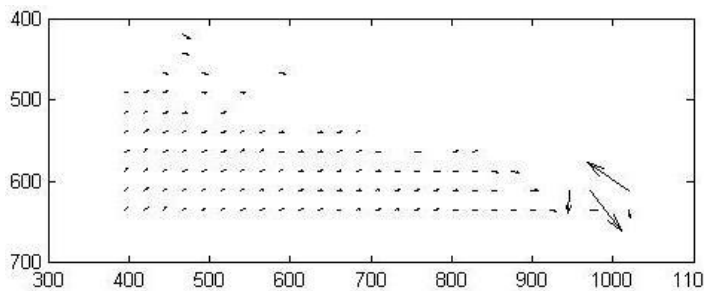
Φωτογραφίες 1-28



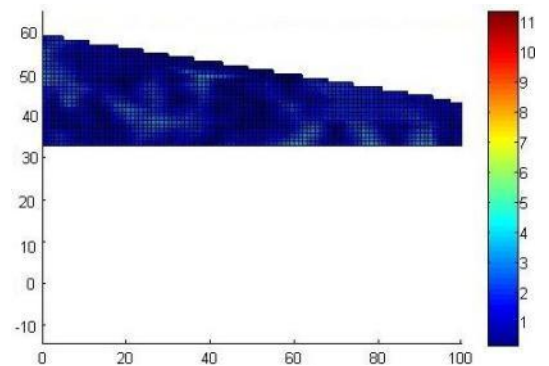
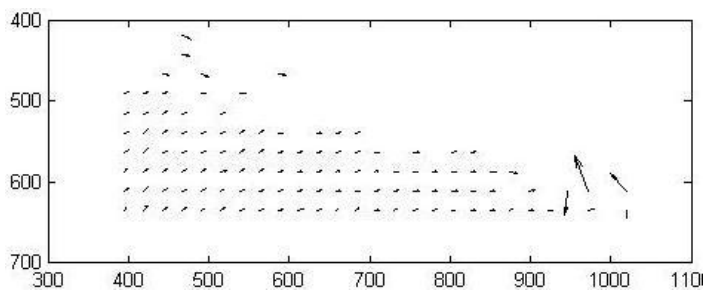
Φωτογραφίες 1-29



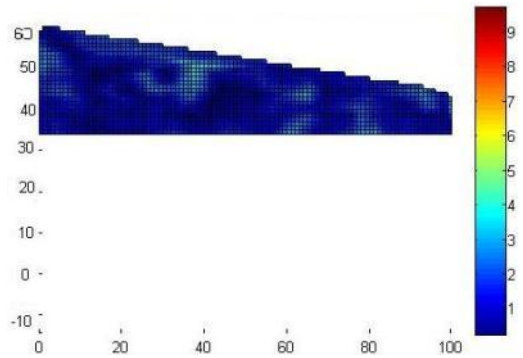
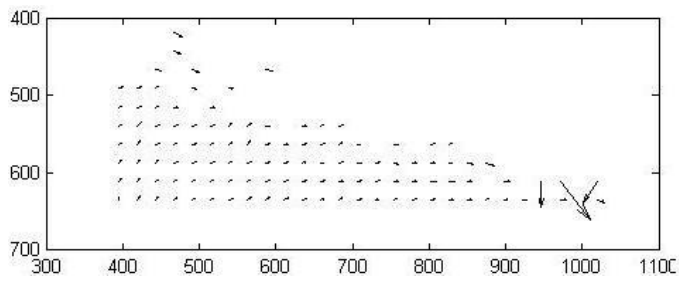
Φωτογραφίες 1-30



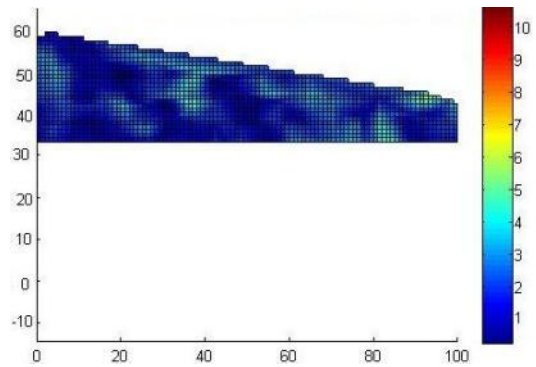
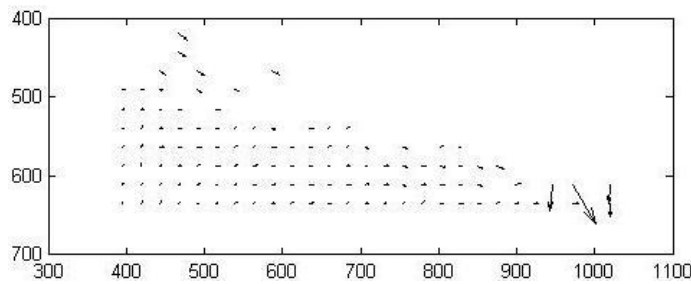
Φωτογραφίες 1-31



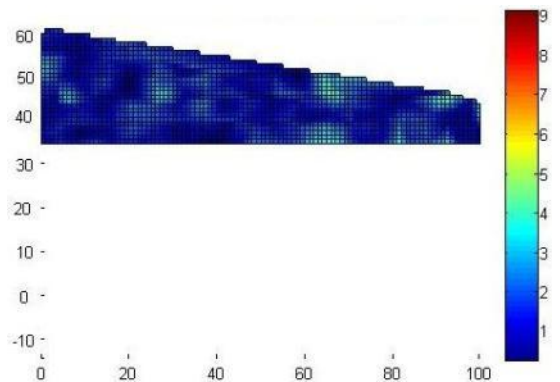
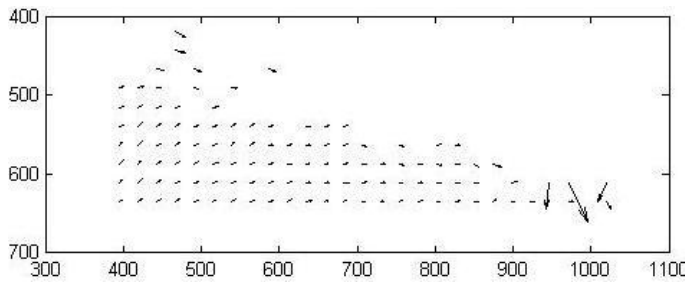
Φωτογραφίες 1-32



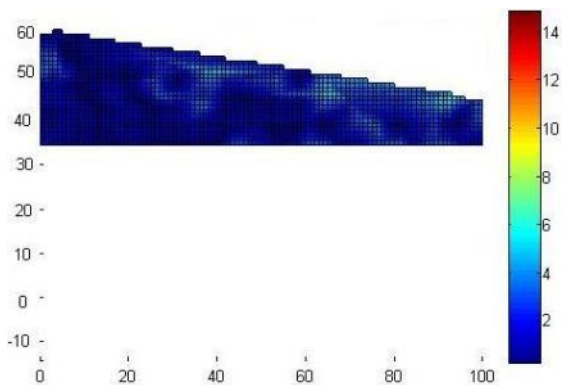
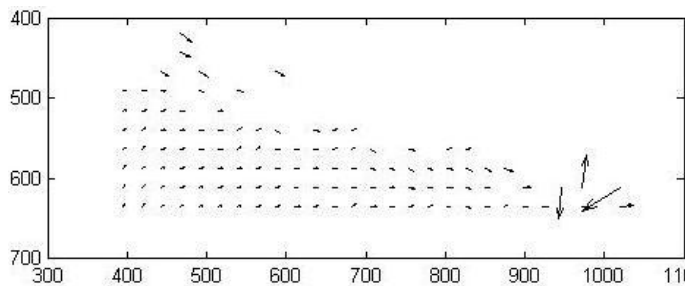
Φωτογραφίες 1-33



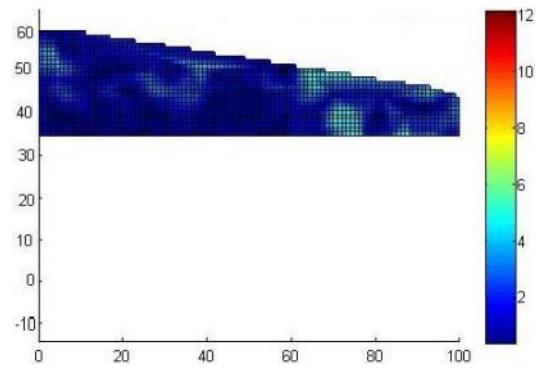
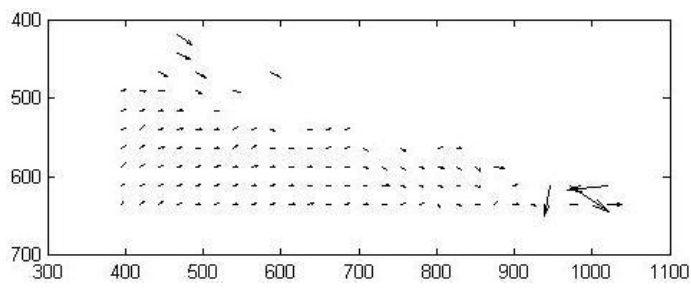
Φωτογραφίες 1-34



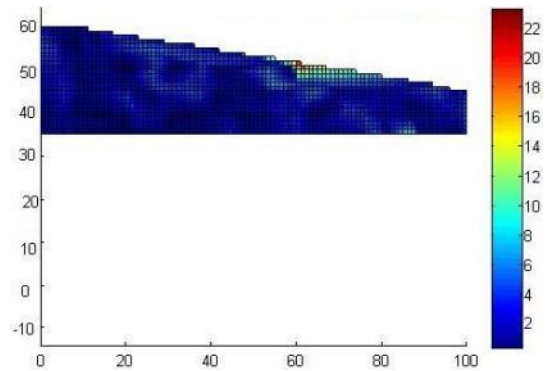
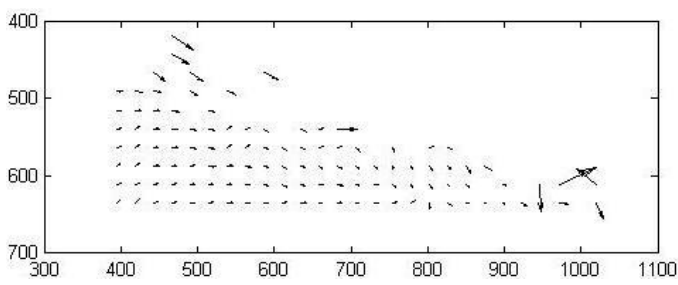
Φωτογραφίες 1-35



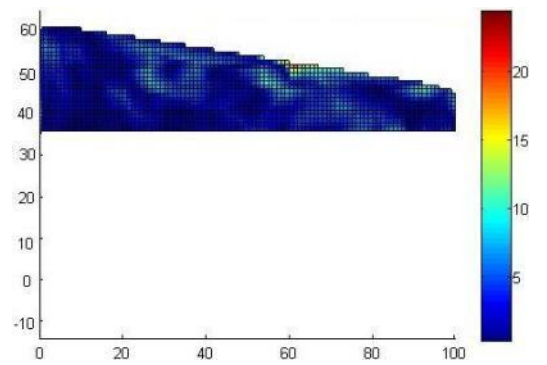
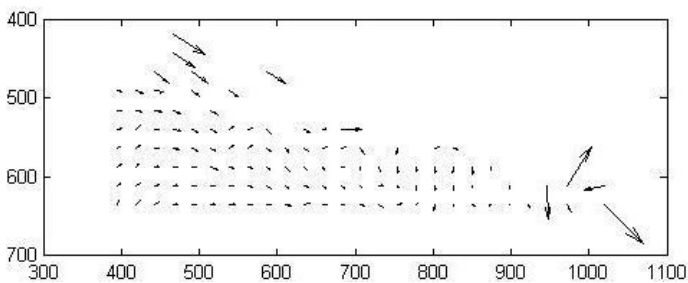
Φωτογραφίες 1-36



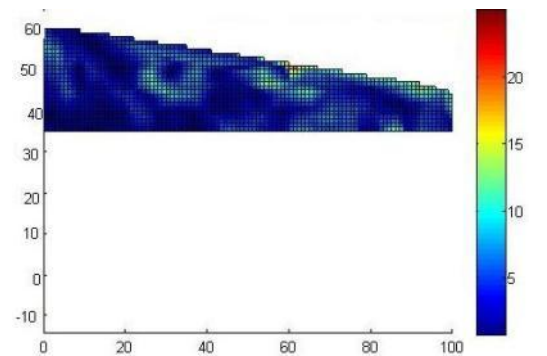
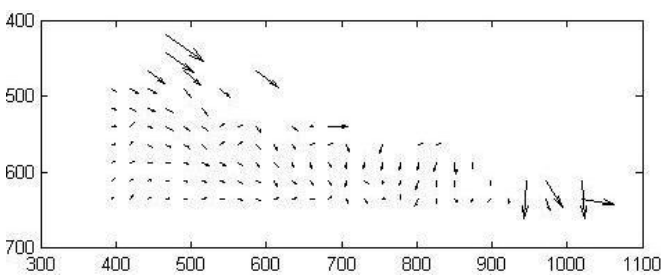
Φωτογραφίες 1-37



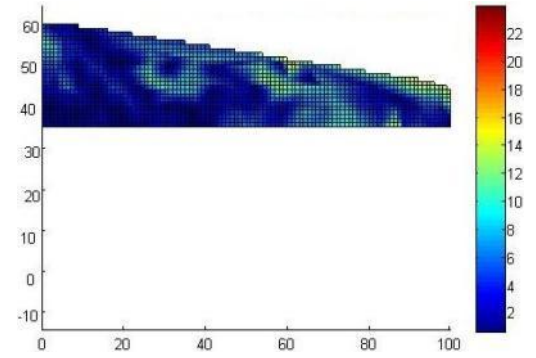
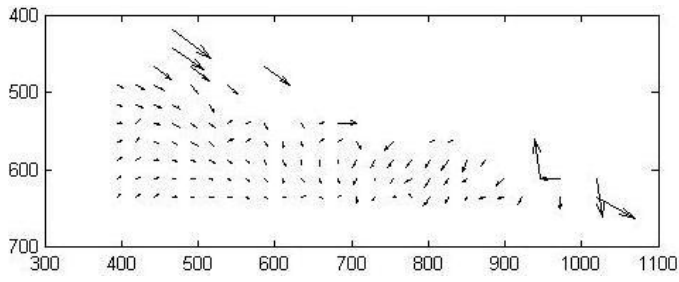
Φωτογραφίες 1-38



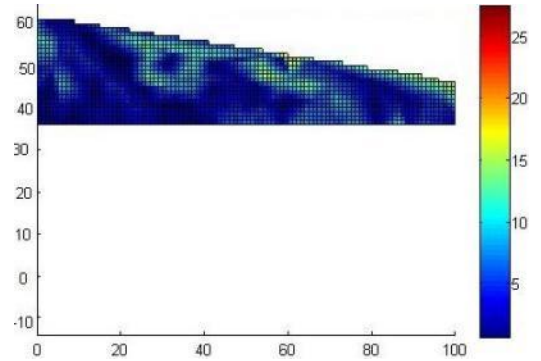
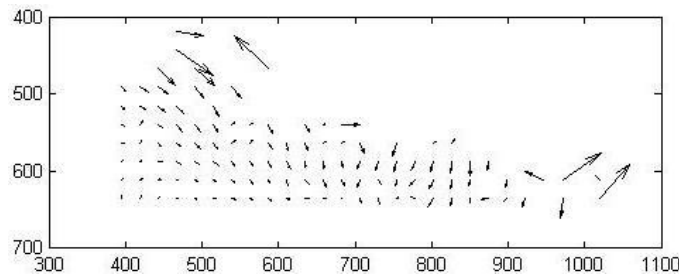
Φωτογραφίες 1-39



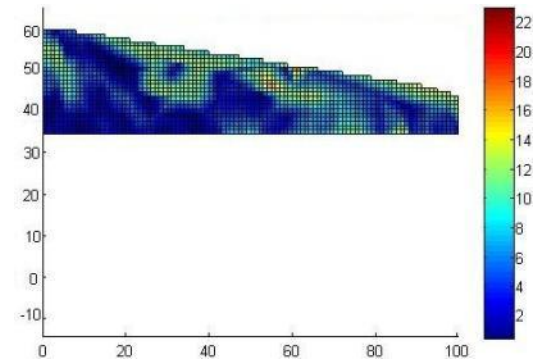
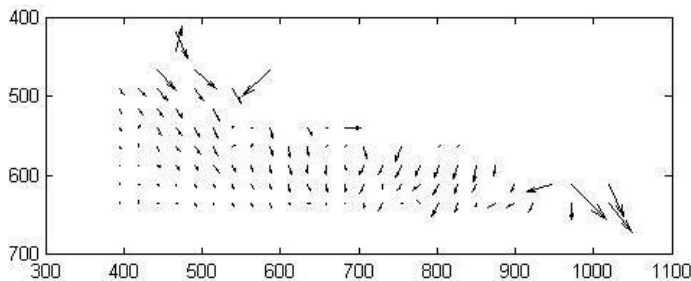
Φωτογραφίες 1-40



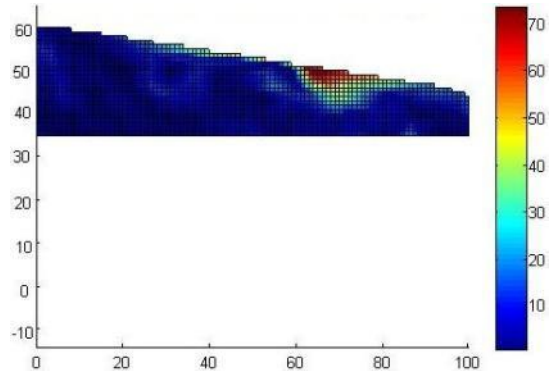
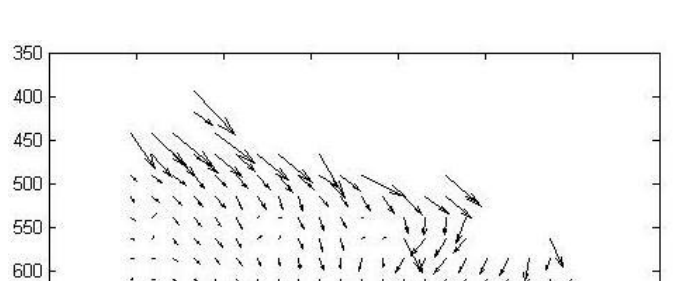
Φωτογραφίες 1-41



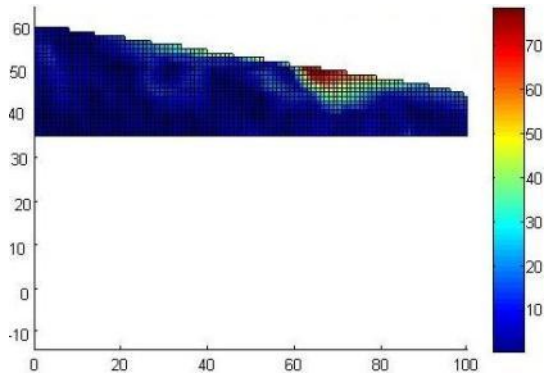
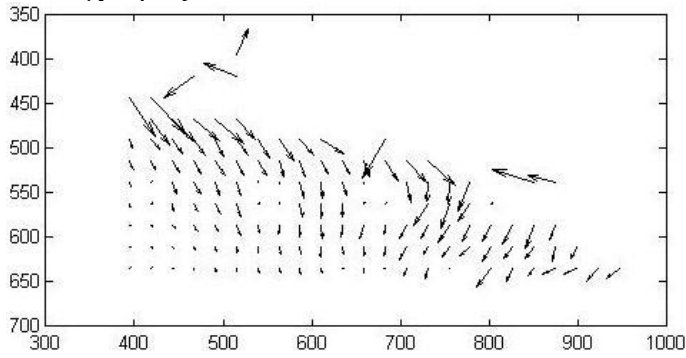
Φωτογραφίες 1-42



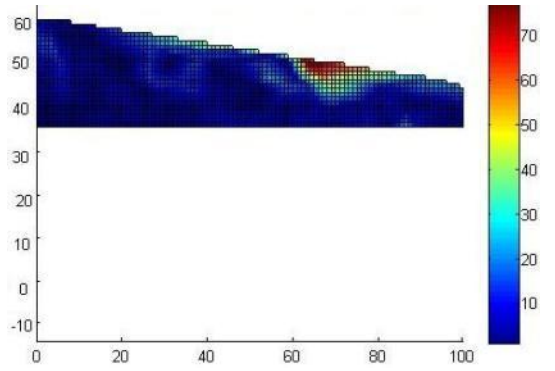
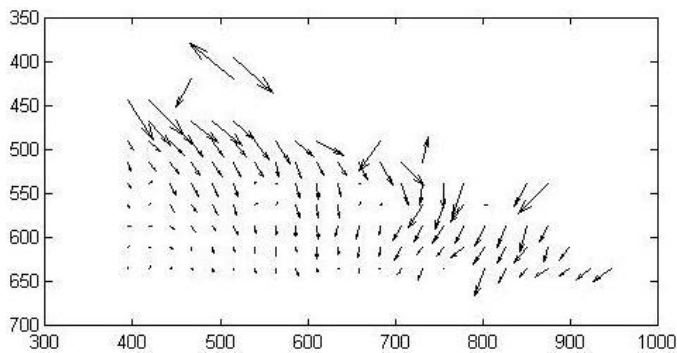
Φωτογραφίες 1-43



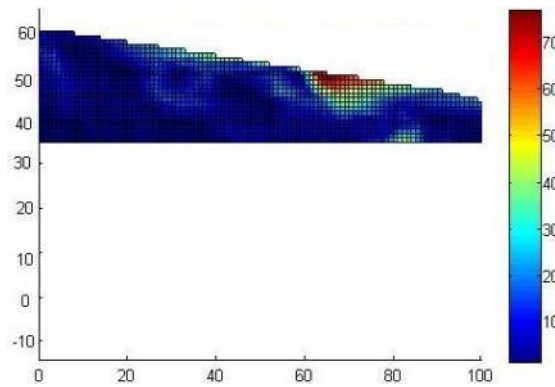
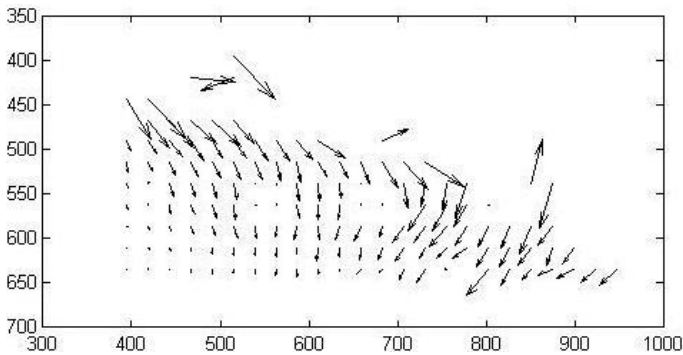
Φωτογραφίες 1-44



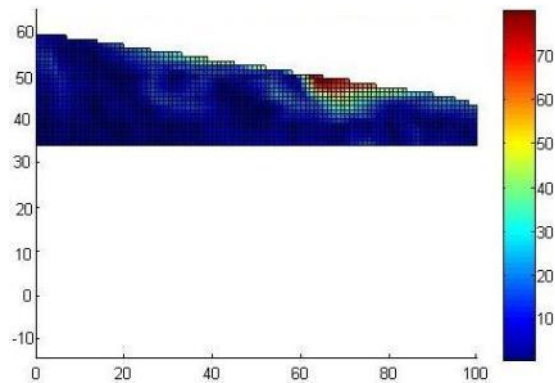
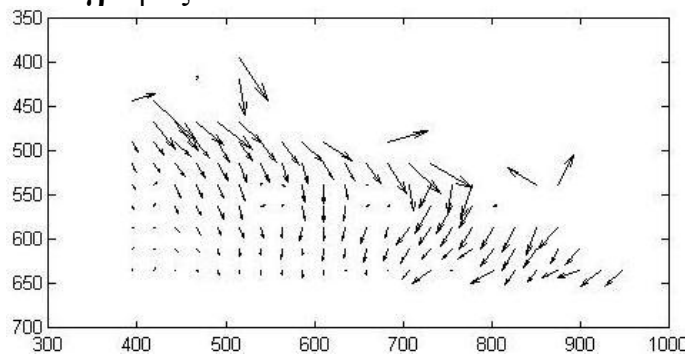
Φωτογραφίες 1-45



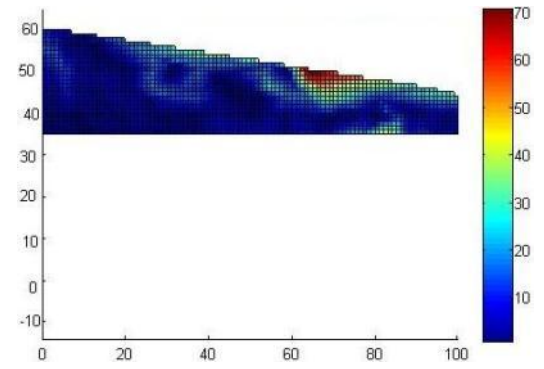
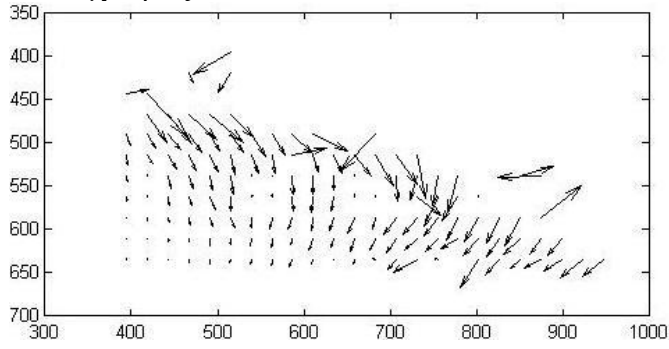
Φωτογραφίες 1-46



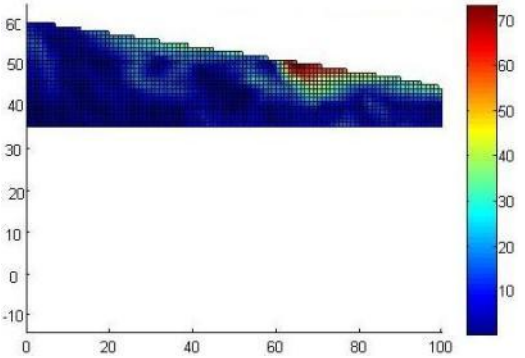
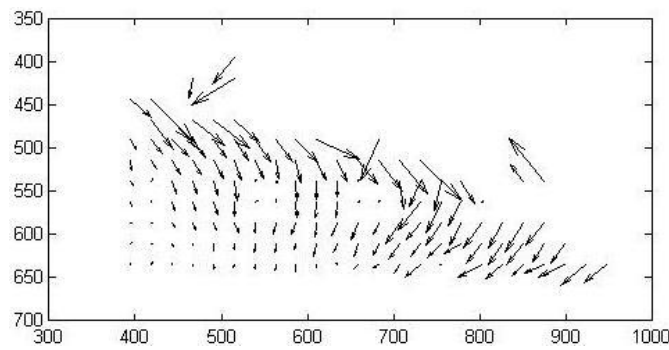
Φωτογραφίες 1-47



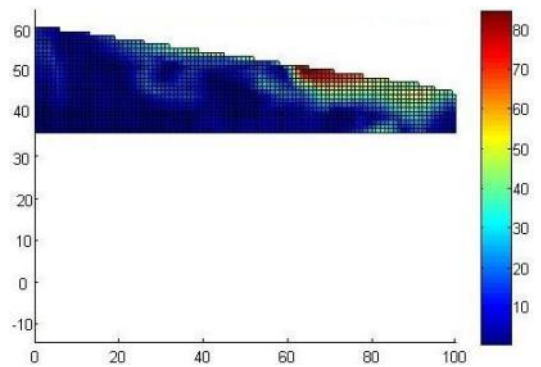
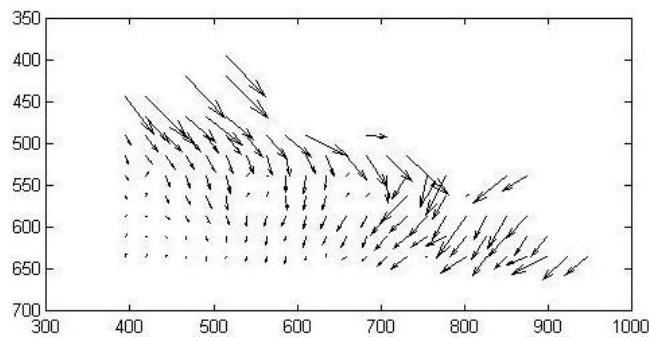
Φωτογραφίες 1-48



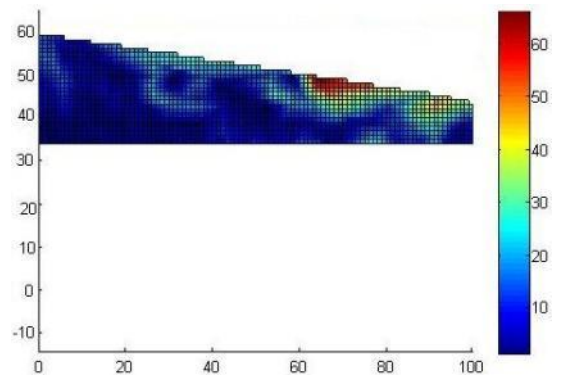
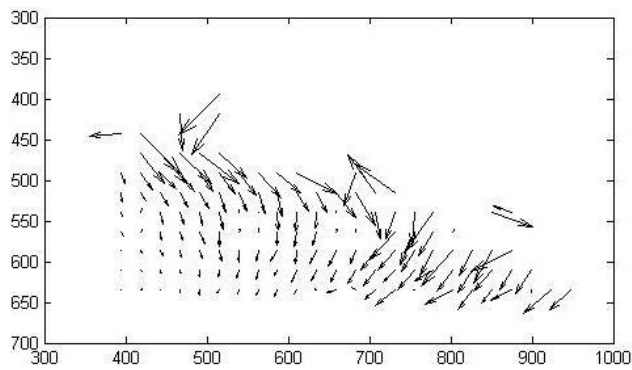
Φωτογραφίες 1-49



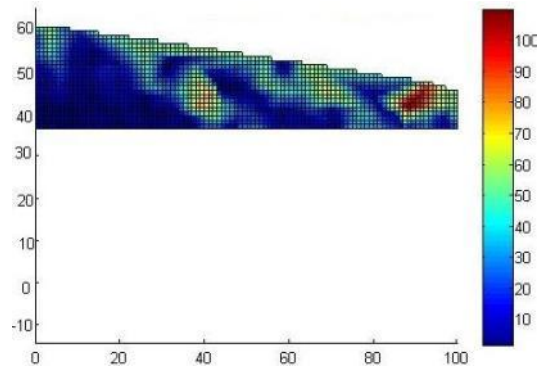
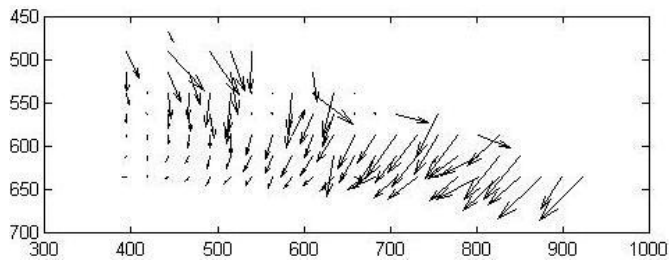
Φωτογραφίες 1-50



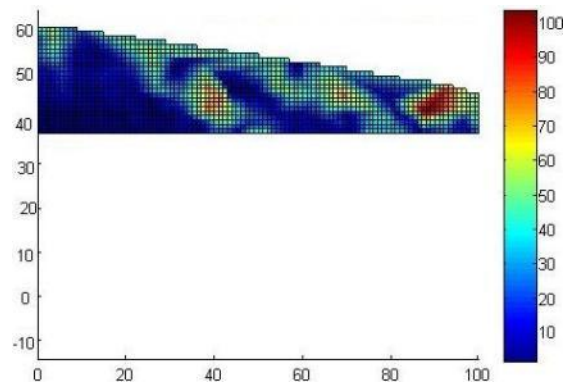
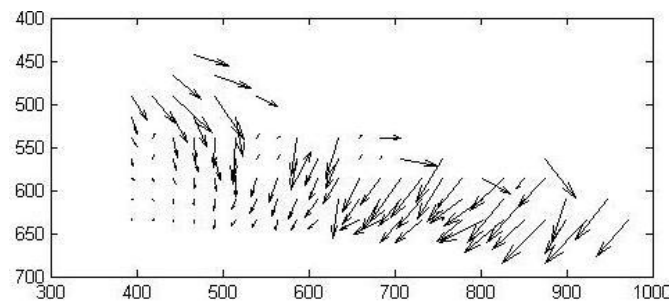
Φωτογραφίες 1-51



Φωτογραφίες 1-52



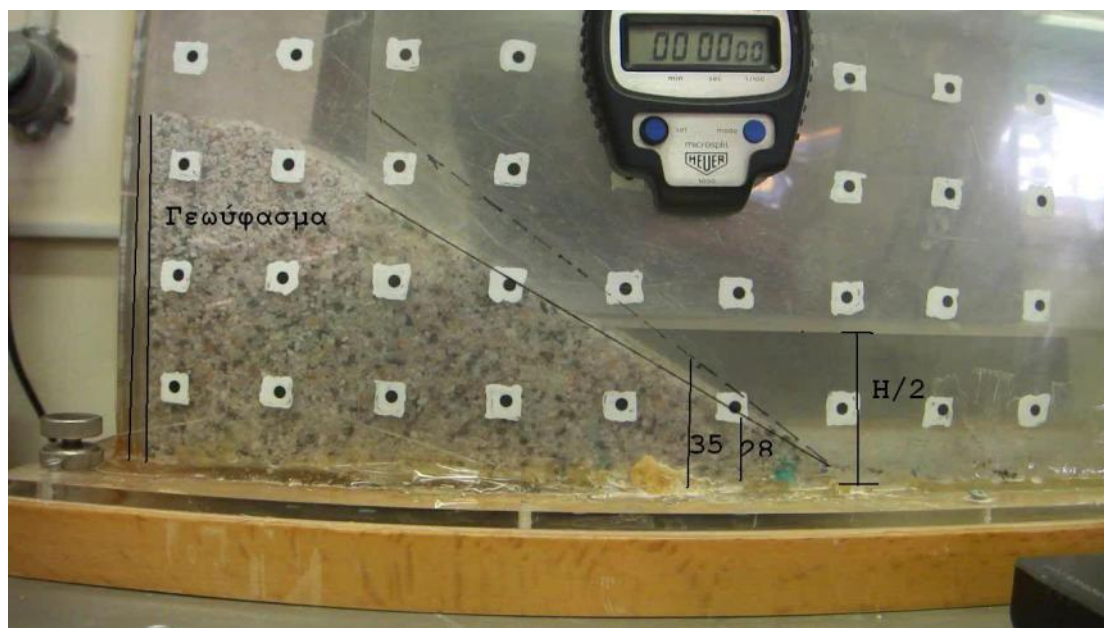
Φωτογραφίες 1-53



3.4.4 Πείραμα 4: Σεισμική φόρτιση με προσθήκη νερού – ελεύθερο πρανές

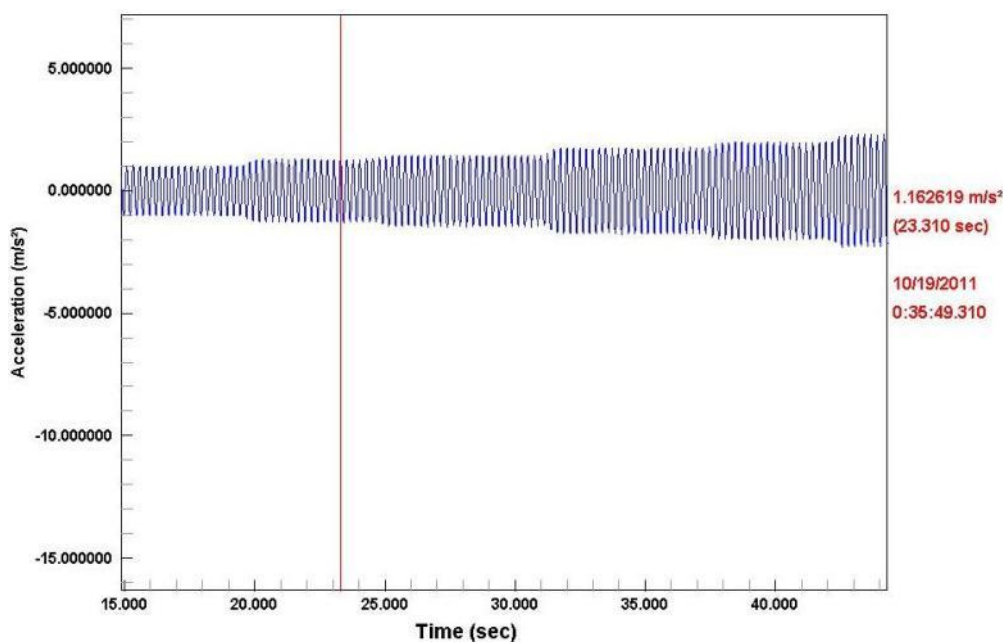
3.4.4.1 Περιγραφή πειράματος

Το πείραμα 4, όπως και όλα τα προηγούμενα πειράματα, περιλάμβανε ένα πρανές διαστάσεων 195*150 mm κατά μήκος και πλάτος και 95 mm κατά ύψος μέσα στο άκαμπτο κουτί από Plexiglas. Επίσης το δοκίμιο στεκόταν μέσα στο κουτί με γωνία $\beta=28^\circ$ και στη μία πλευρά του, όπως έχει προαναφερθεί, είχε τοποθετηθεί ένα γεωύφασμα. Όταν η πειραματική διάταξη ετοιμάστηκε, άρχισε η προσθήκη του νερού σταδιακά μέσα στο διάφανο κουτί, μέχρι τα μισά του ύψους του πρανούς ($H/2$). Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικ.3.30) φαίνεται αναλυτικά η διάταξη του πειράματος.



Εικ. 3.30: Διάταξη πειράματος 4

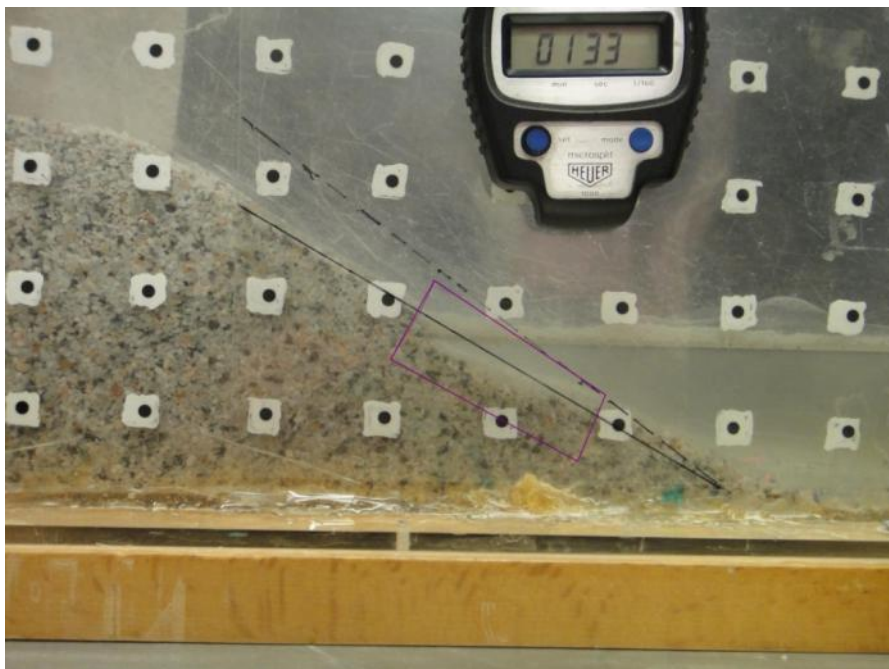
Οι παλμοί που εισάγαμε, ομοίως με προηγουμένως ήταν ημιτονοειδούς μορφής, σταθερής συχνότητας και επιπλέον οι τιμές της κρίσιμης γωνίας και επιτάχυνσης του πρανούς παρέμειναν σταθερές. Οπότε έχουμε ότι $\beta=28^\circ$ και $k_c=0.12g$. Στη συνέχεια ακολουθεί το συνολικό σειсмоγράφημα της συγκεκριμένης φόρτισης και παρατηρούμε ότι η αστοχία παρουσιάζεται στο 23^ο δευτερόλεπτο της σεισμικής φόρτισης με επιτάχυνση ίση με 0.16g.



Εικ. 3.31: Το σεισογράφημα της σεισμικής φόρτισης του πειράματος 4

Η διαφορά αυτή στις τιμές των επιταχύνσεων οφείλεται στο γεγονός ότι η υγρασία είχε διεισδύσει αρκετά μέσα στο πρανές με αποτέλεσμα να αυξηθεί η φαινόμενη συνοχή στο κοκκώδες εδαφικό υλικό. Μετά το πέρας του πειράματος αυτού, παρατηρήθηκε ότι η κλίση του πρανούς δεν ήταν επίπεδη αλλά όπως και προηγουμένως παρουσίαζε μία καμπύλη όπως φαίνεται ξεκάθαρα στην εικόνα 3.32 (μωβ ορθογώνιο). Η καμπύλη αυτή αποδεικνύει ότι παρουσιάστηκε αστοχία κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα και οφείλεται στον κυματισμό του

νερού, σε συνδυασμό με την αυξημένη συνοχή του πρανούς. Επίσης ο σχηματισμός αυτός μπορεί να οφείλεται στην ανάπτυξη μιας πιθανής φαινόμενης συνοχής. Η διαφορά με το πείραμα 2 είναι ότι σε αυτό το πείραμα το μέτωπο του νερού έχει ανέβει πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, ενώ προηγουμένως το μέτωπο εμφανιζόταν μέσα στον υδροφόρο ορίζοντα (εικόνα 3.33).



Εικ. 3.32: Αστοχία του πρανούς



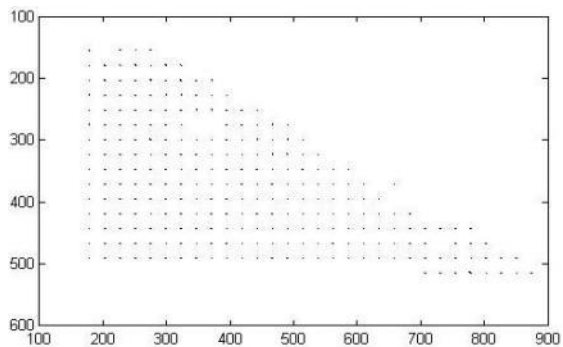
Εικ. 3.33 : Μέτωπο του νερού

Αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων όπως προέκυψαν από την επεξεργασία με τη μέθοδο PIV παρουσιάζονται στη συνέχεια.

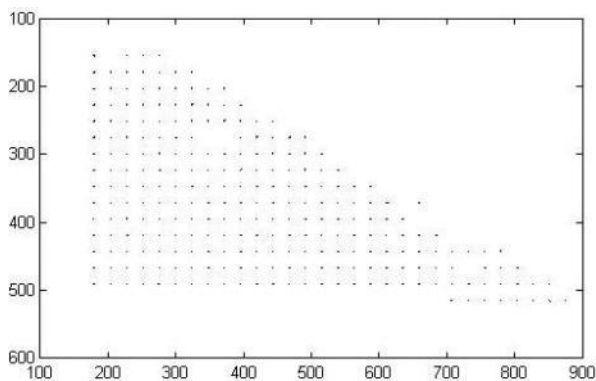
4.4.4.2: Αποτελέσματα πειράματος 4

Διανύσματα μετατόπισης

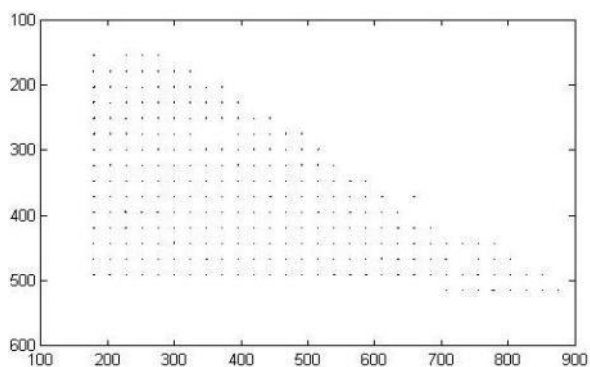
Φωτογραφίες 1-2



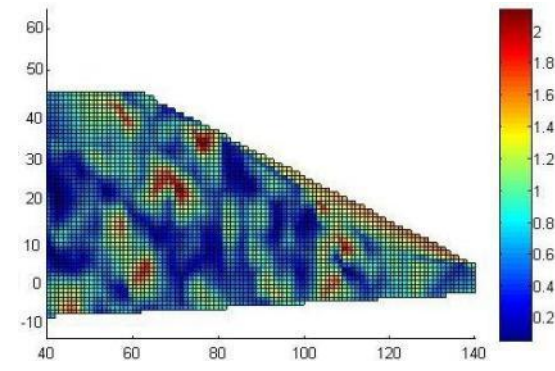
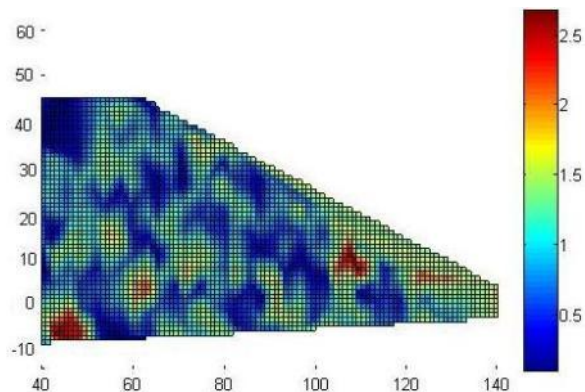
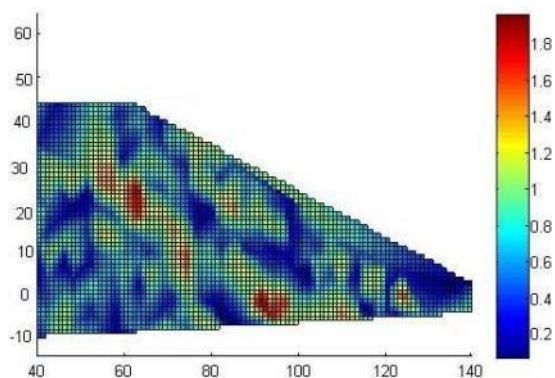
Φωτογραφίες 1-3



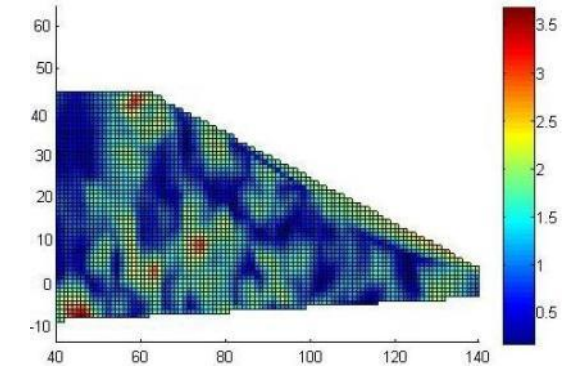
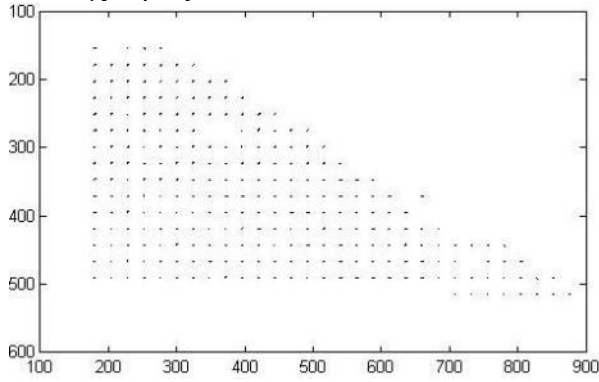
Φωτογραφίες 1-4



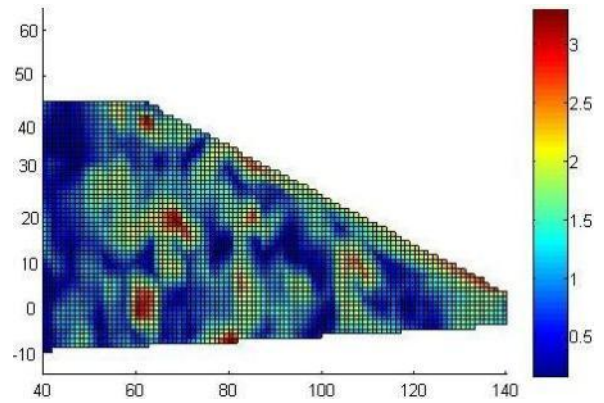
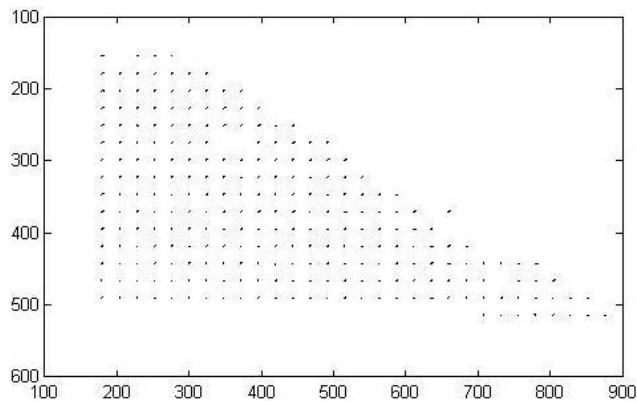
Ανηγμένες παραμορφώσεις



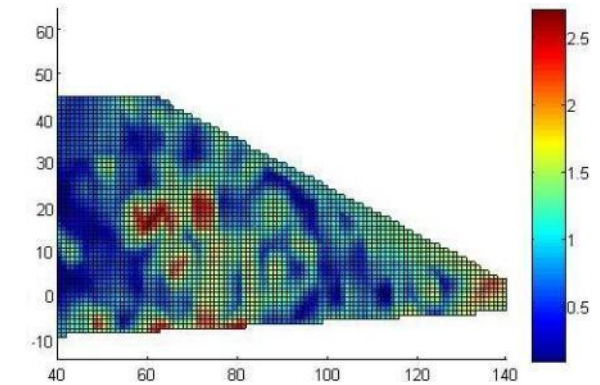
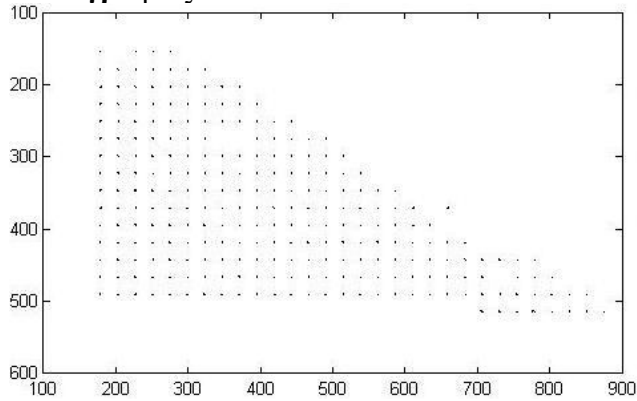
Φωτογραφίες 1-5



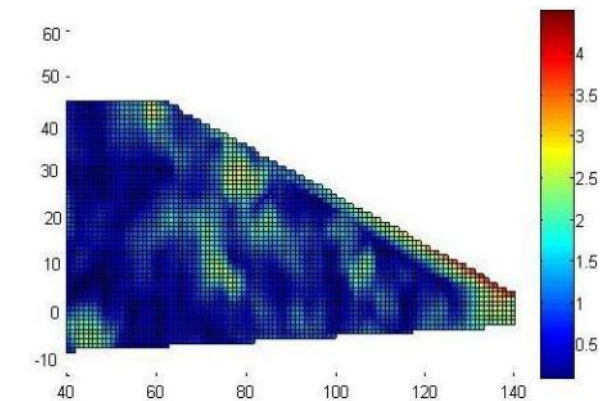
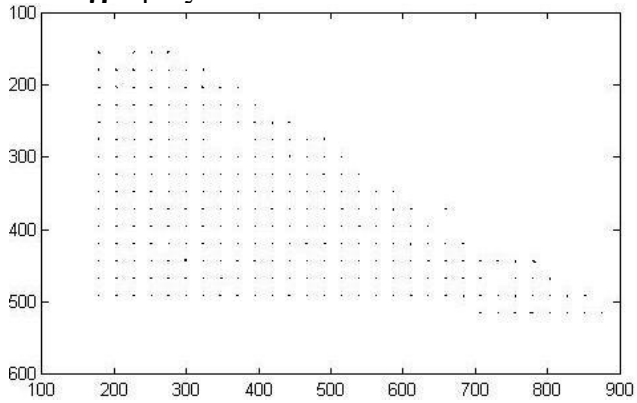
Φωτογραφίες 1-6



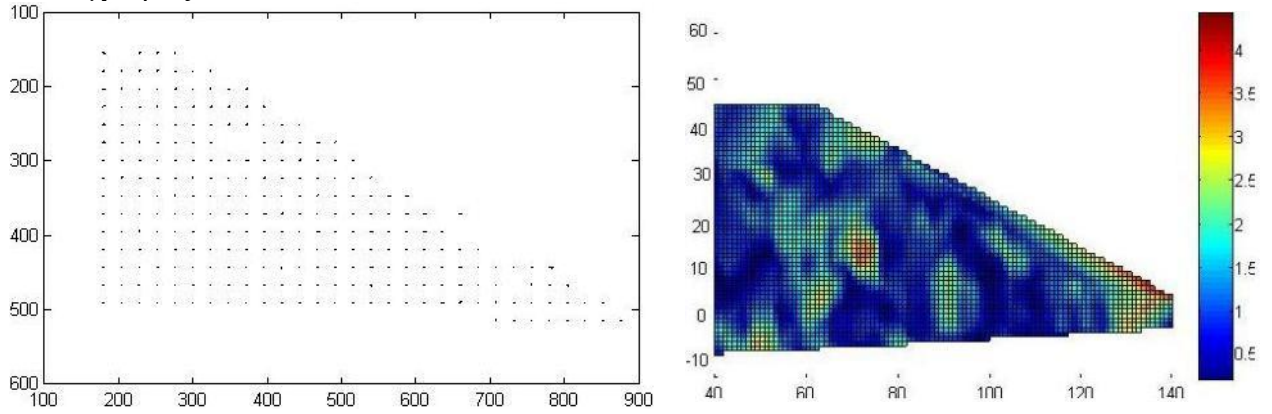
Φωτογραφίες 1-7



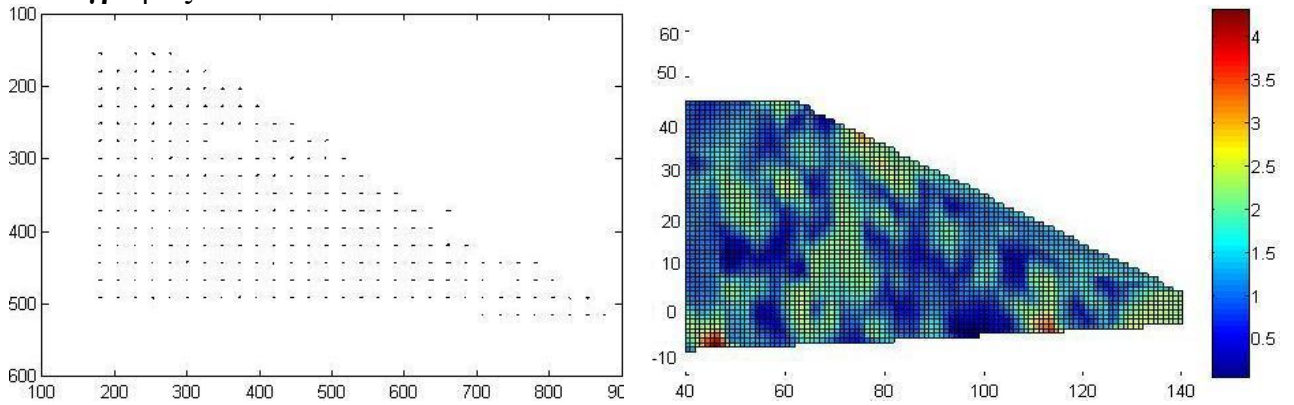
Φωτογραφίες 1-8



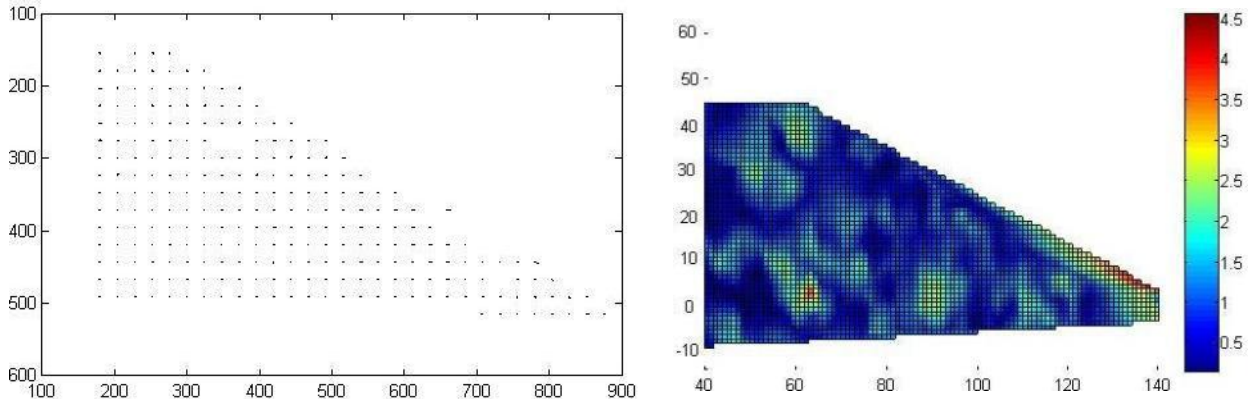
Φωτογραφίες 1-9



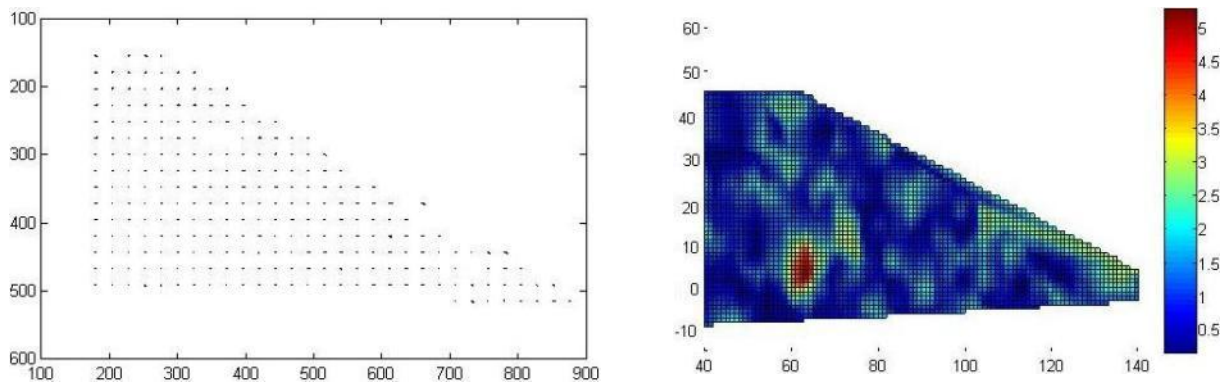
Φωτογραφίες 1-10



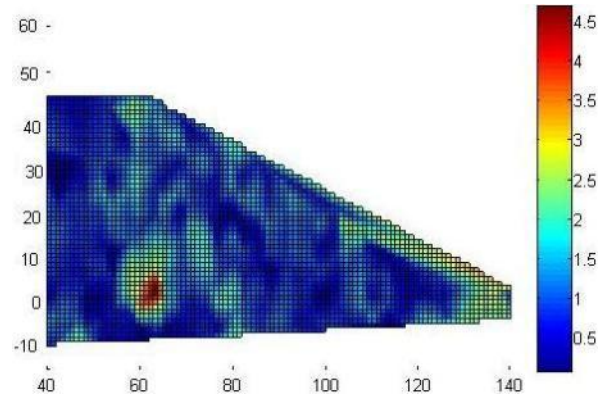
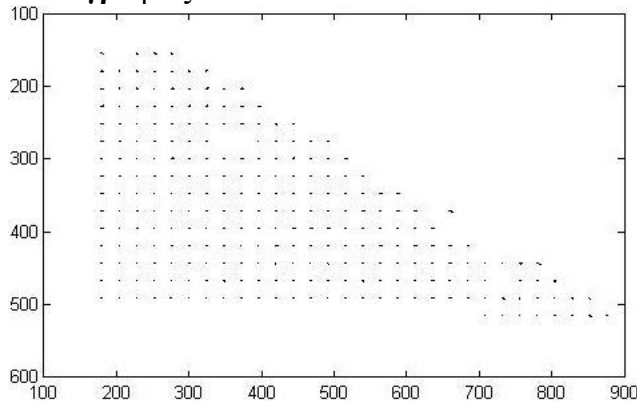
Φωτογραφίες 1-11



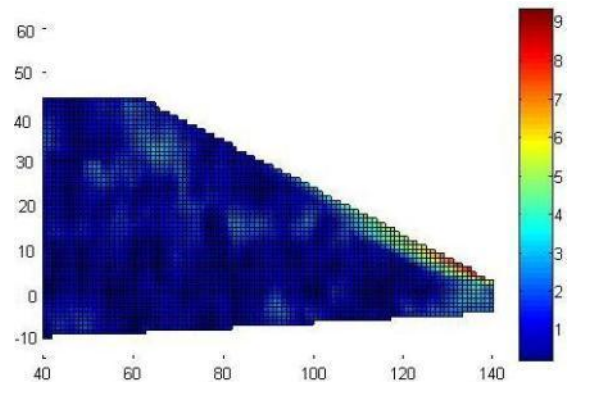
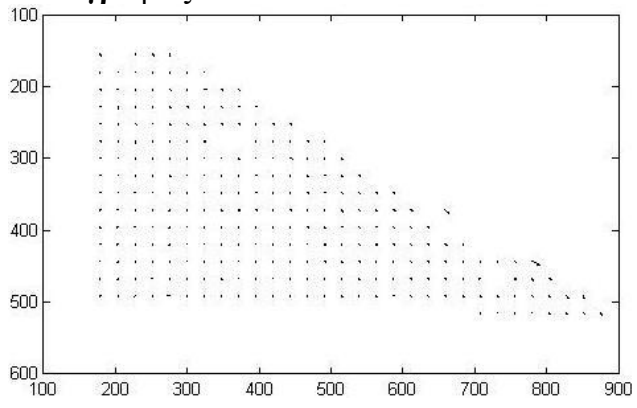
Φωτογραφίες 1-12



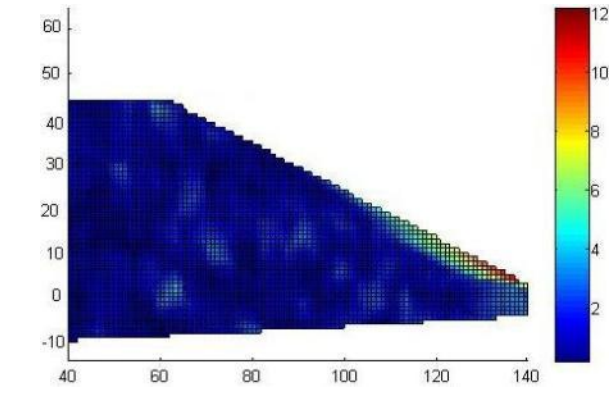
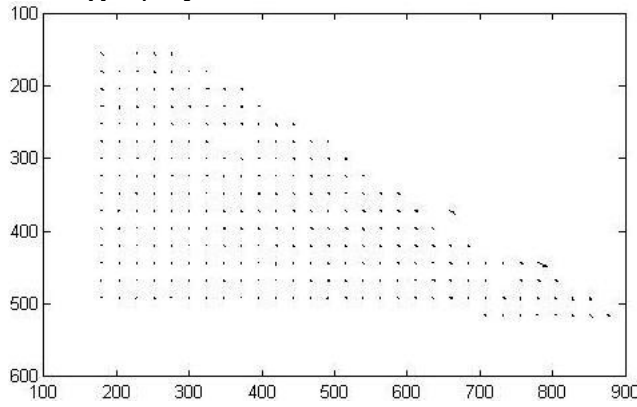
Φωτογραφίες 1-13



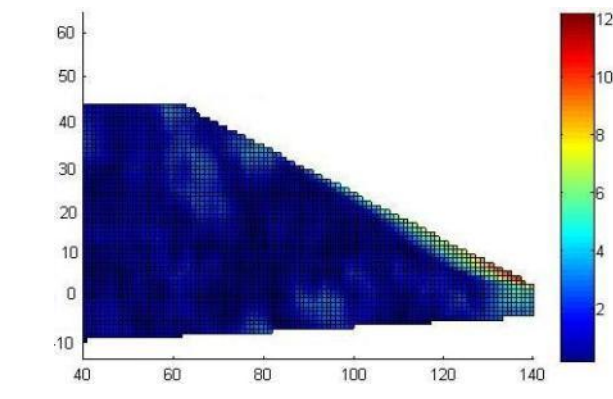
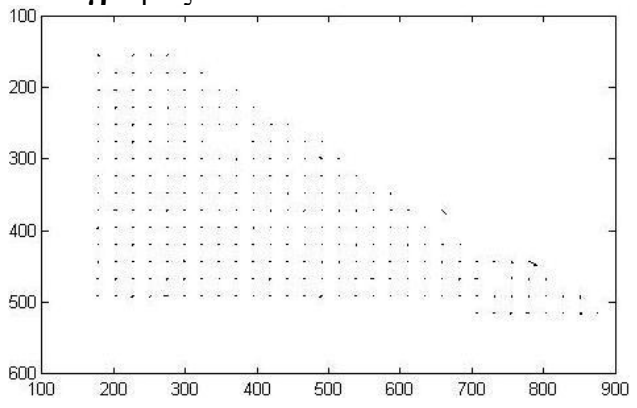
Φωτογραφίες 1-14



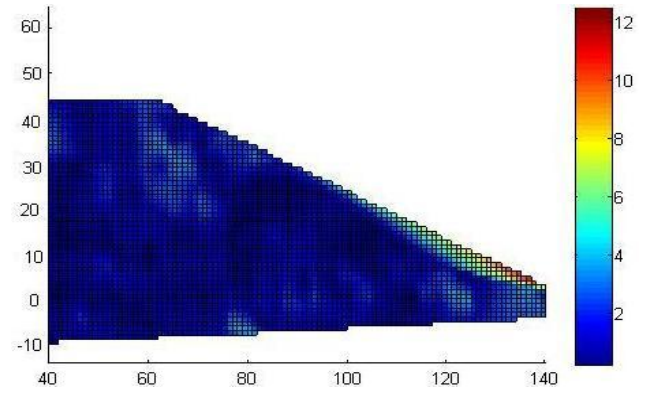
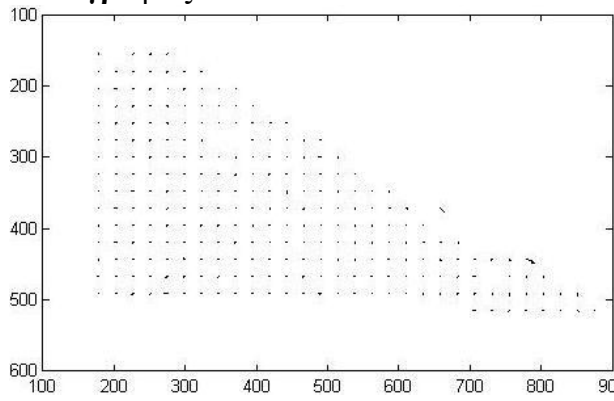
Φωτογραφίες 1-15



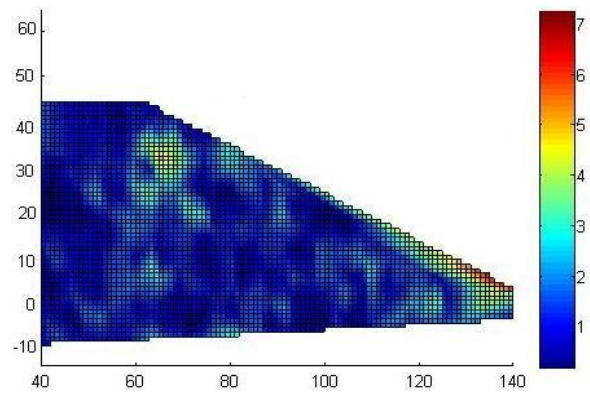
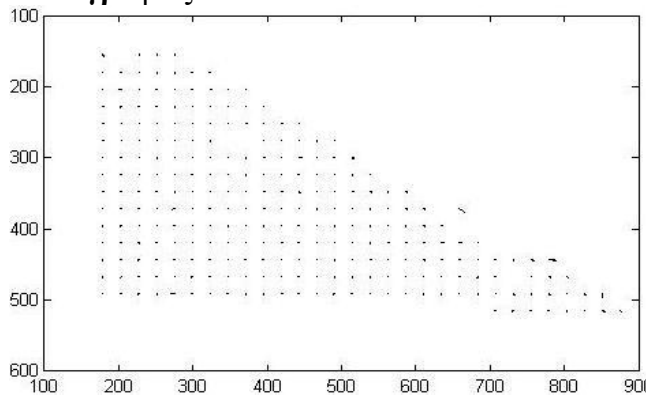
Φωτογραφίες 1-16



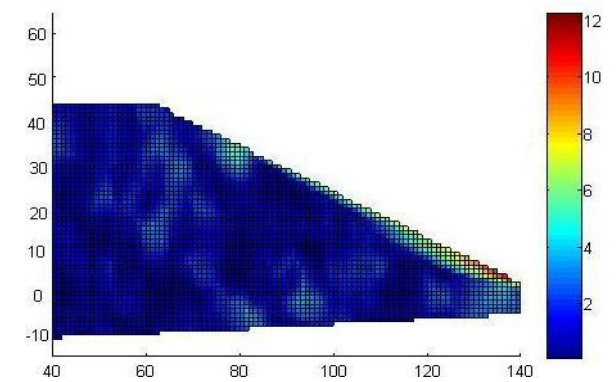
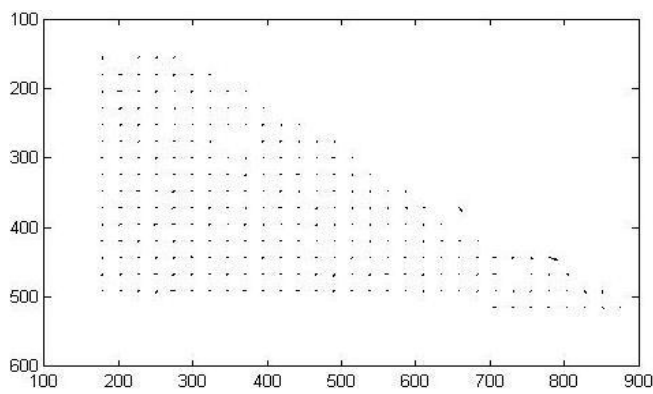
Φωτογραφίες 1-17



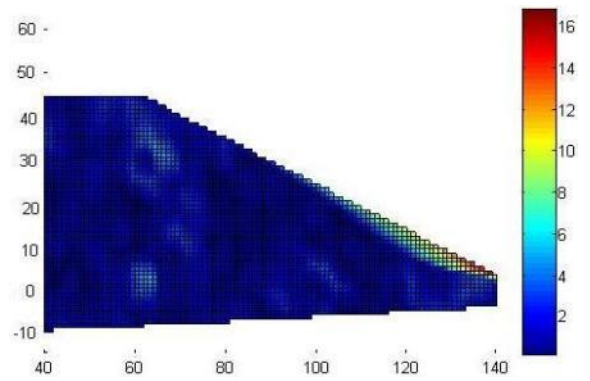
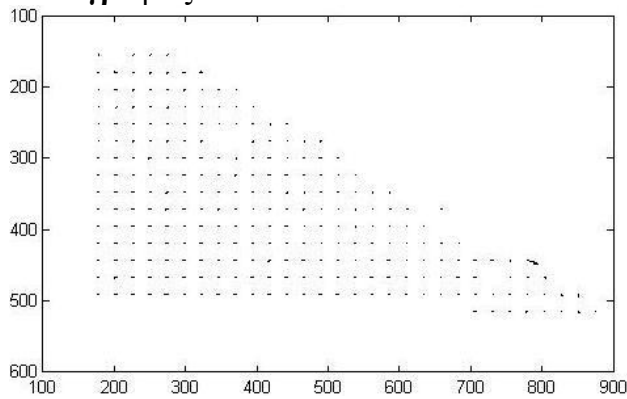
Φωτογραφίες 1-18



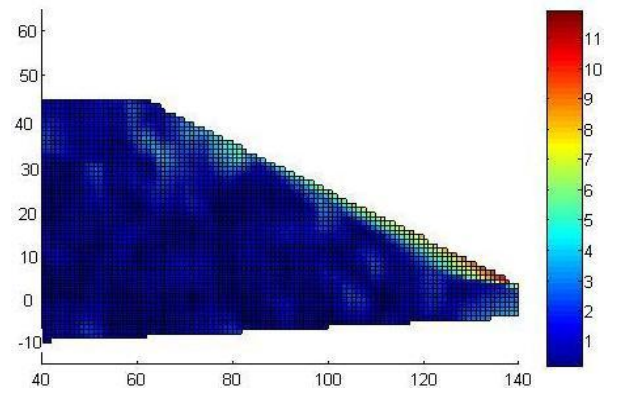
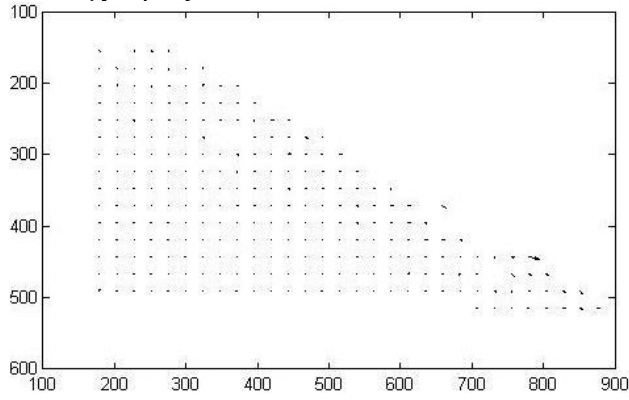
Φωτογραφίες 1-19



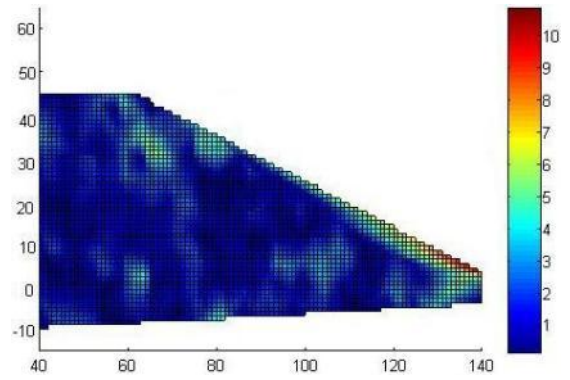
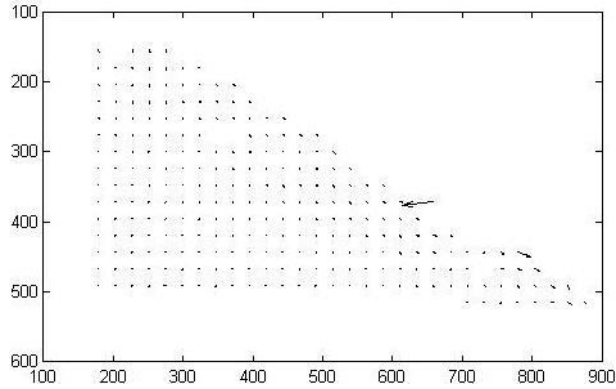
Φωτογραφίες 1-20



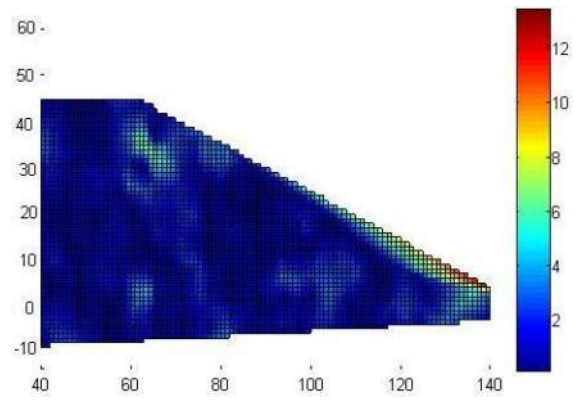
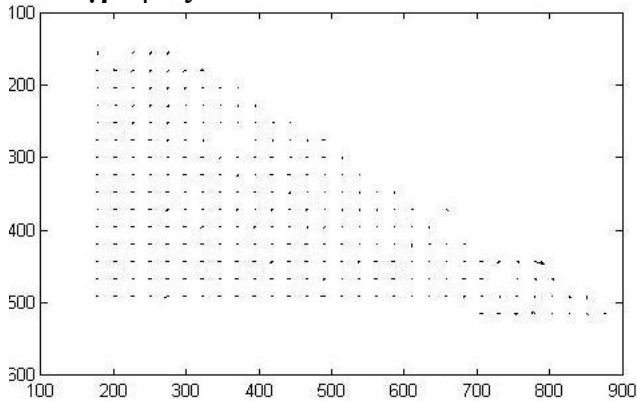
Φωτογραφίες 1-21



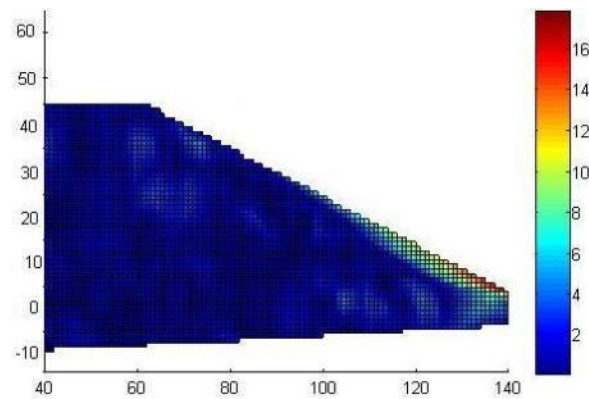
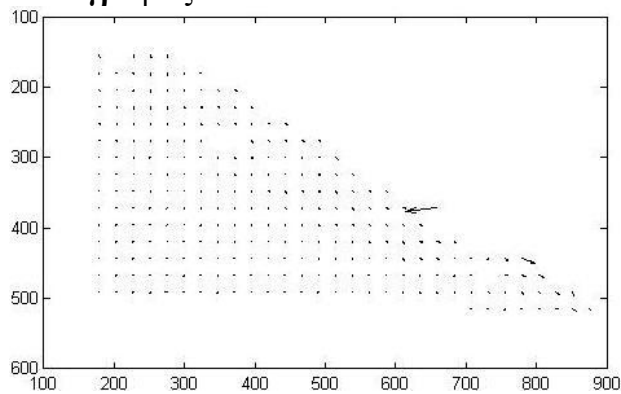
Φωτογραφίες 1-22



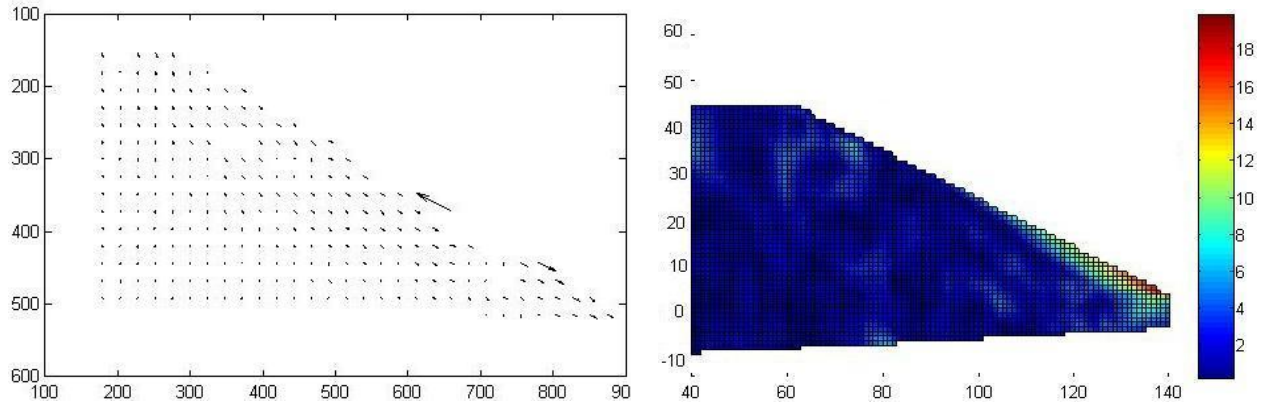
Φωτογραφίες 1-23



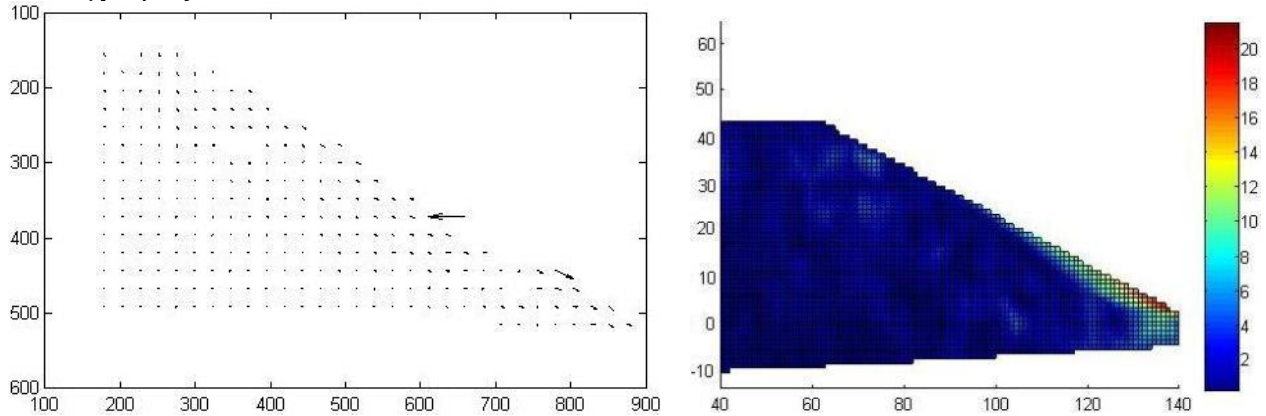
Φωτογραφίες 1-24



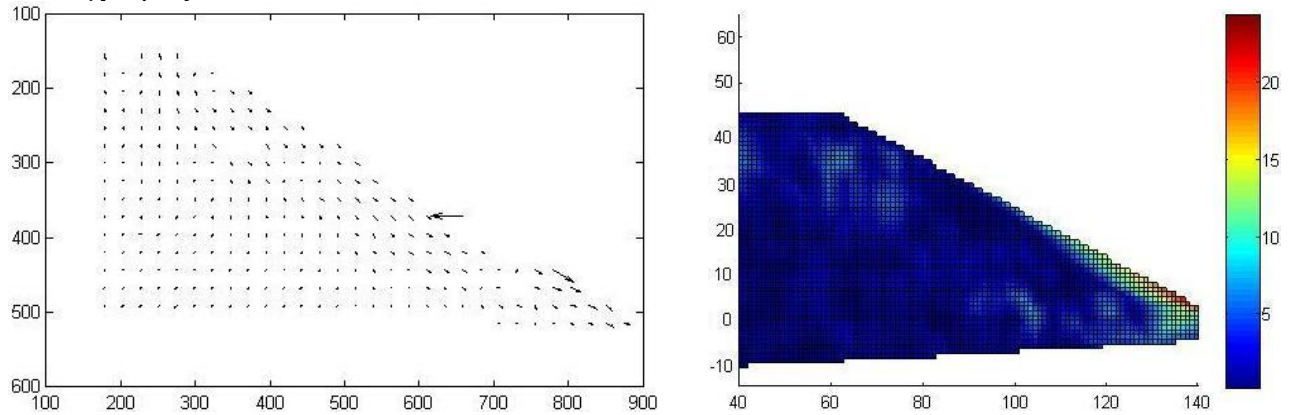
Φωτογραφίες 1-25



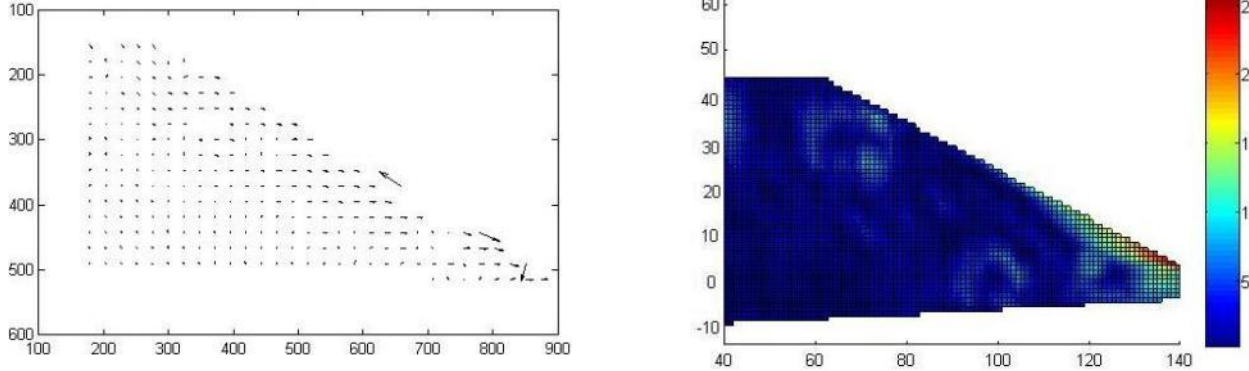
Φωτογραφίες 1-26



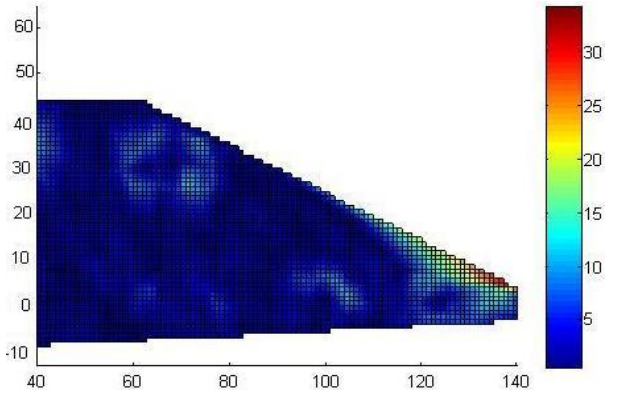
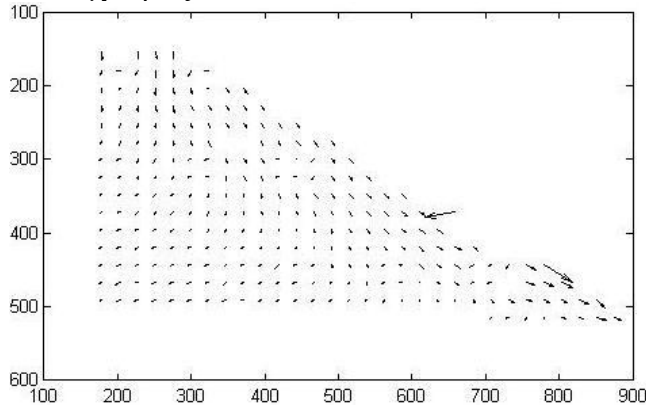
Φωτογραφίες 1-27



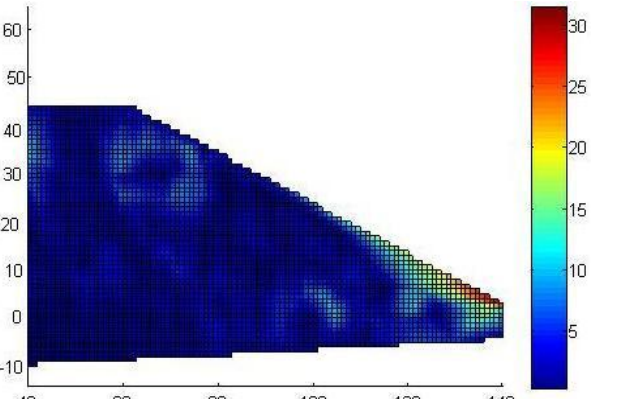
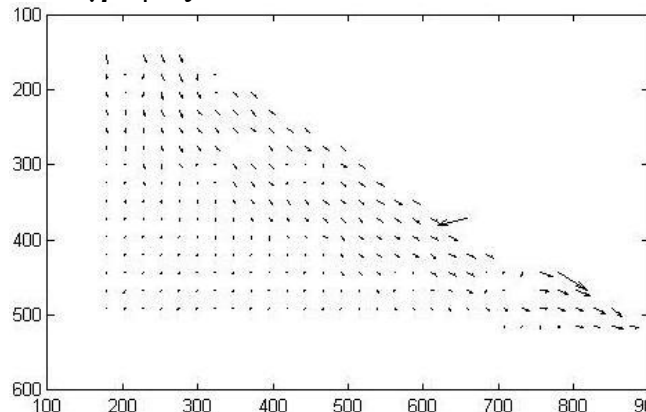
Φωτογραφίες 1-28



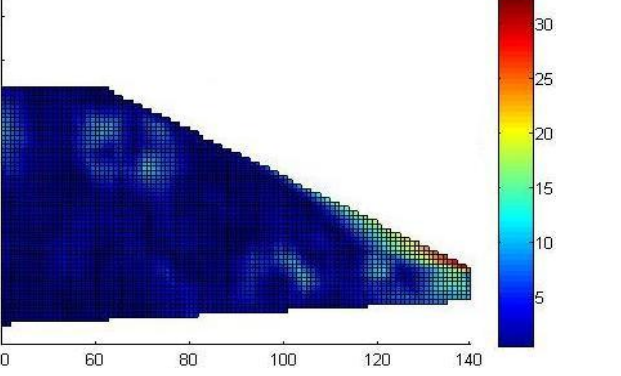
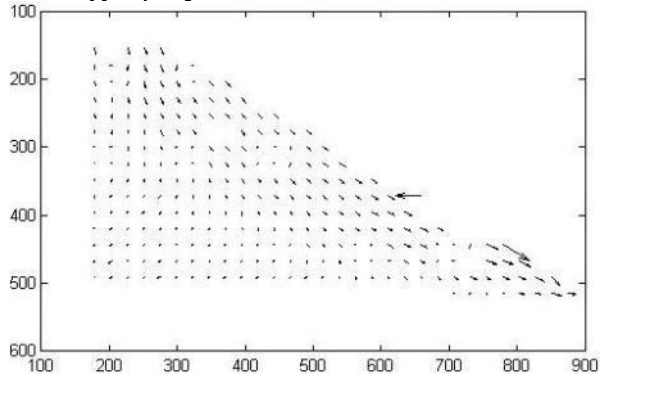
Φωτογραφίες 1-29



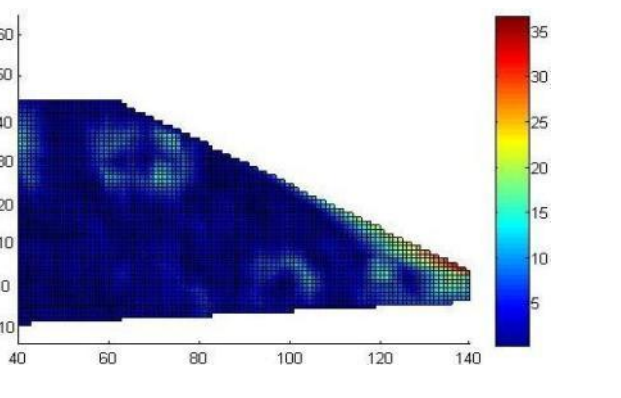
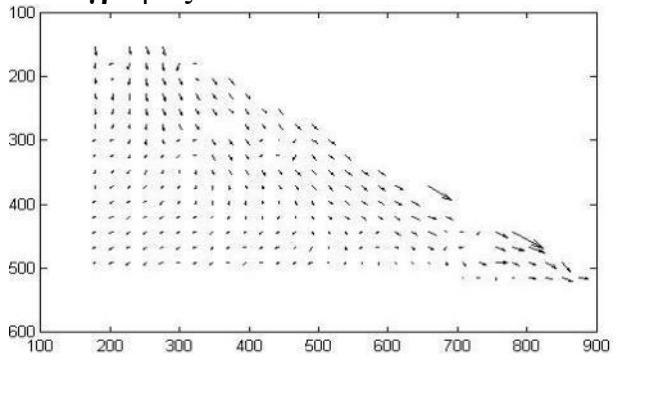
Φωτογραφίες 1-30



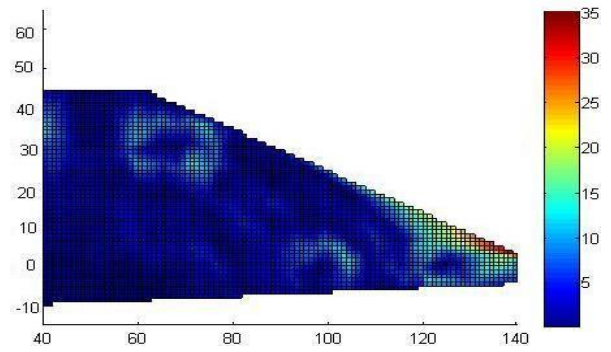
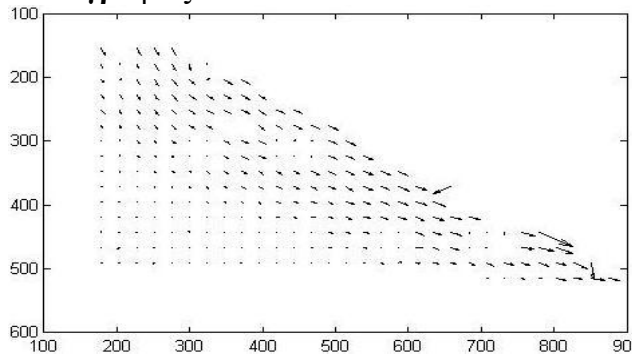
Φωτογραφίες 1-31



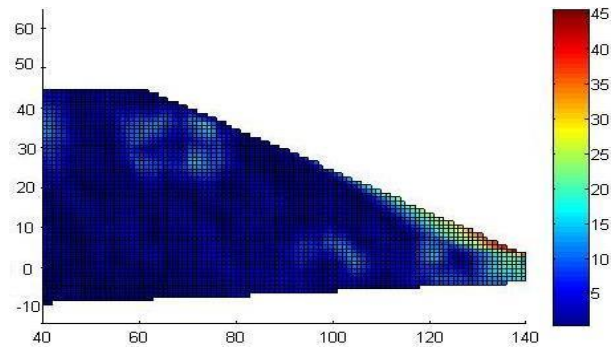
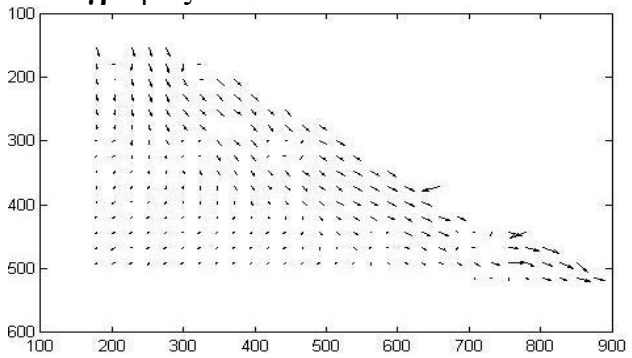
Φωτογραφίες 1-32



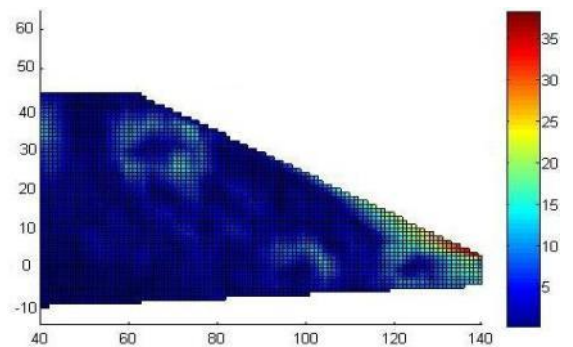
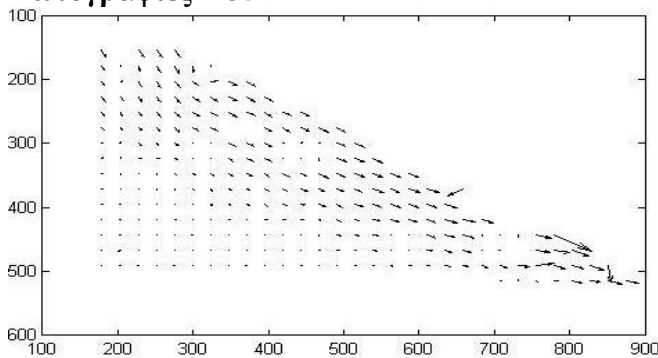
Φωτογραφίες 1-33



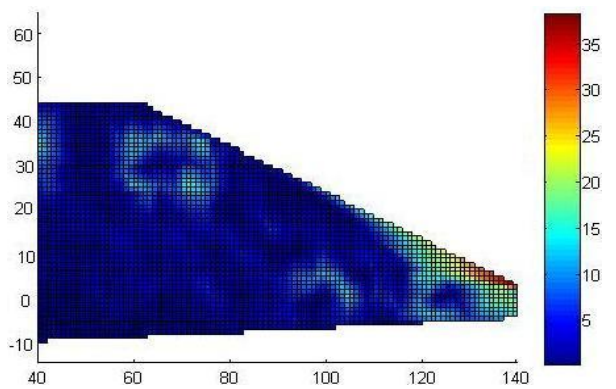
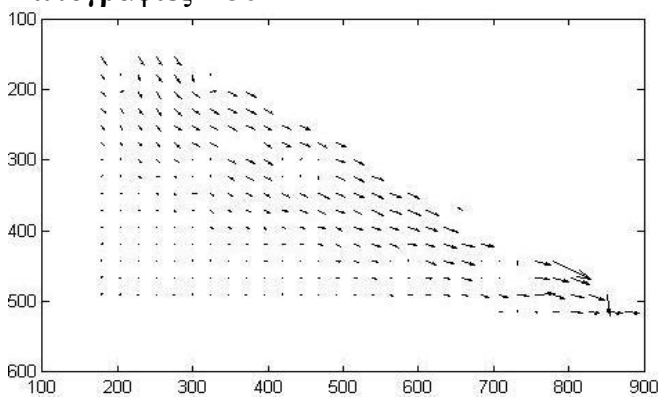
Φωτογραφίες 1-34



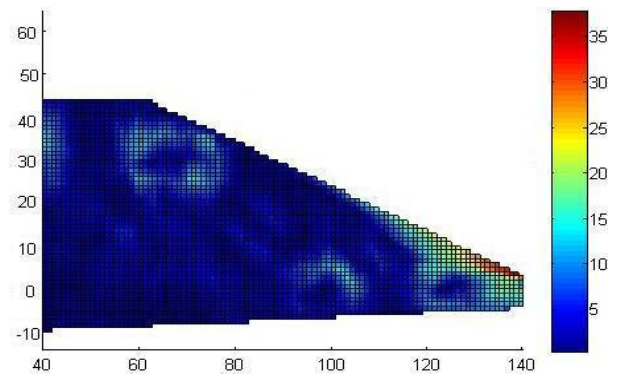
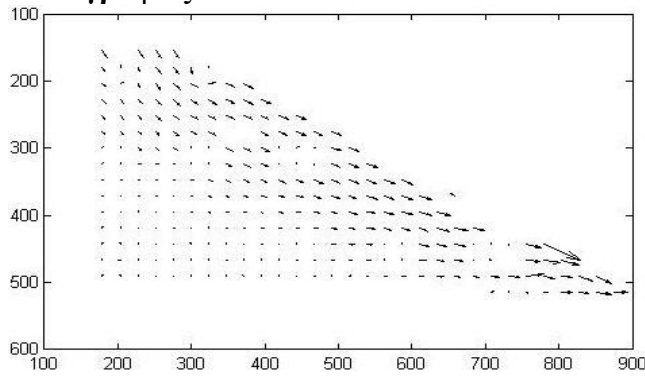
Φωτογραφίες 1-35



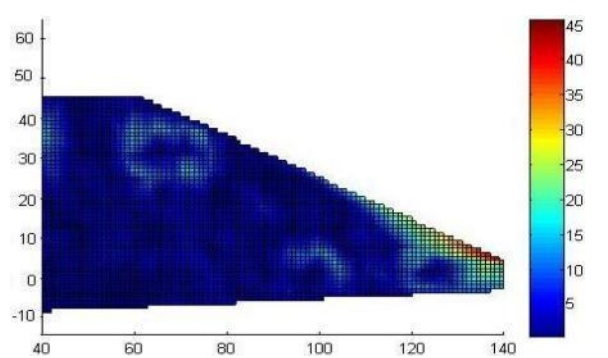
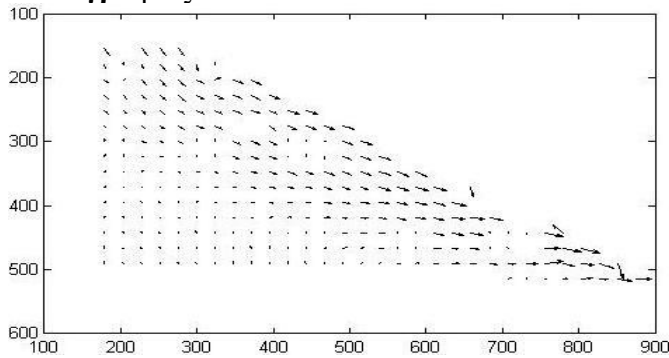
Φωτογραφίες 1-36



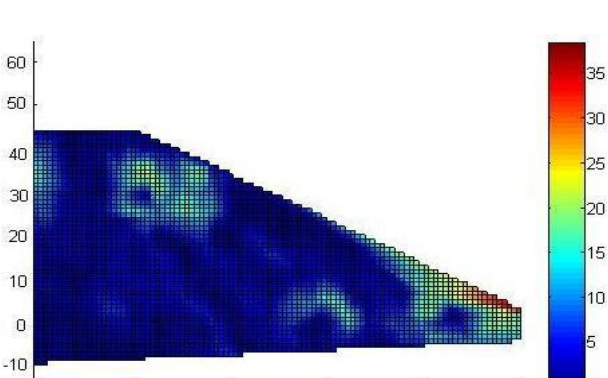
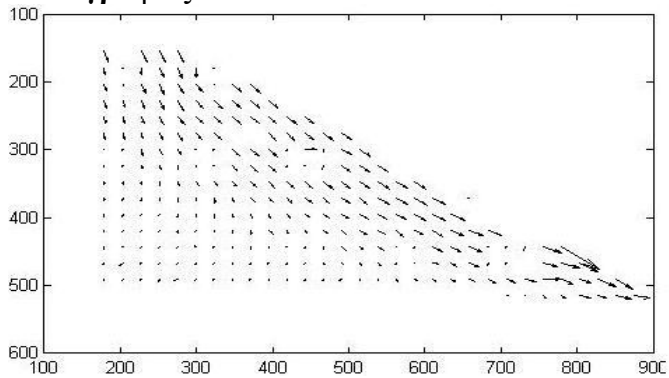
Φωτογραφίες 1-37



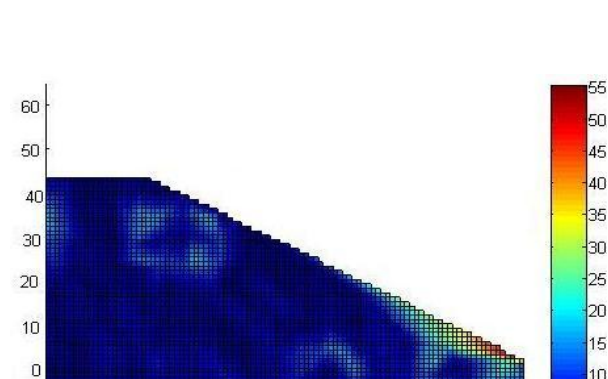
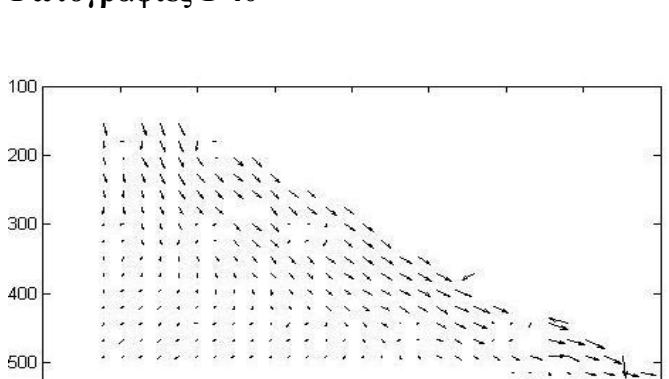
Φωτογραφίες 1-38



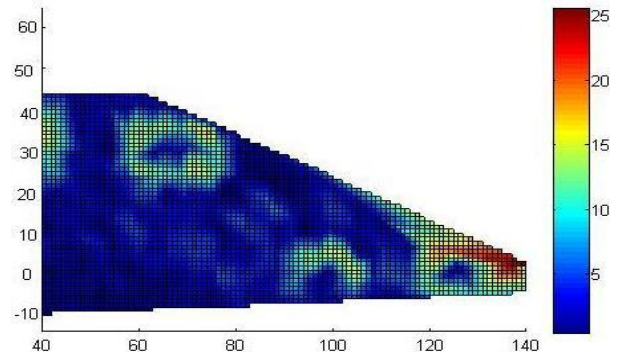
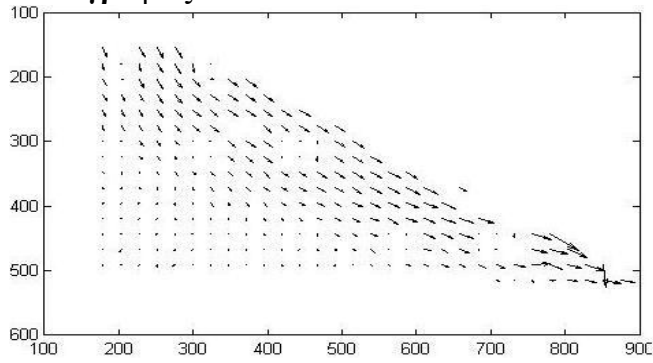
Φωτογραφίες 1-39



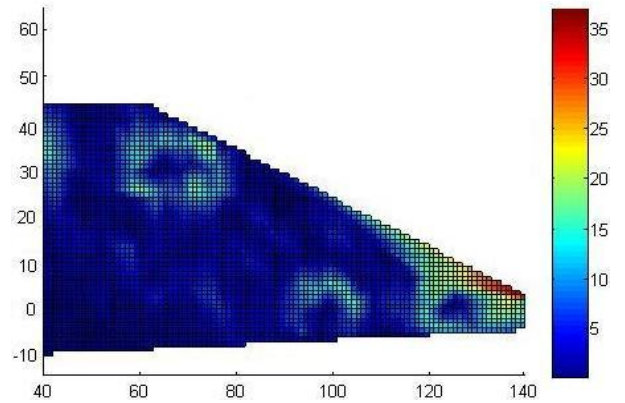
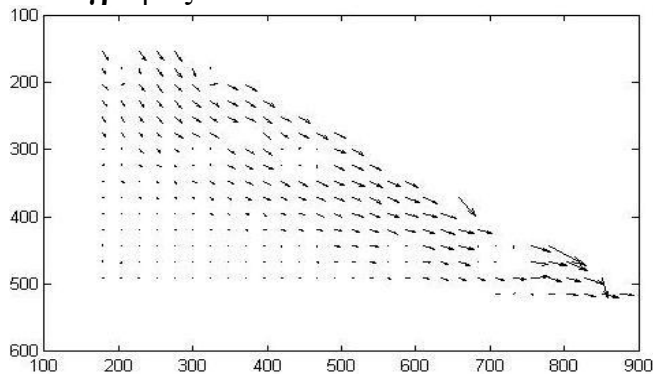
Φωτογραφίες 1-40



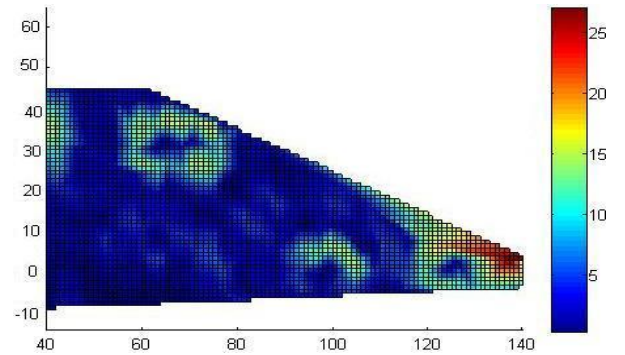
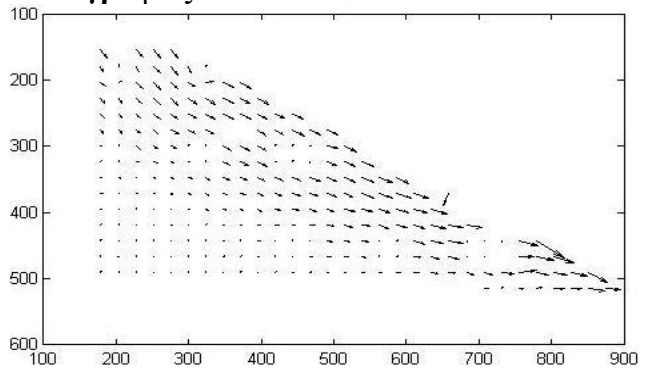
Φωτογραφίες 1-41



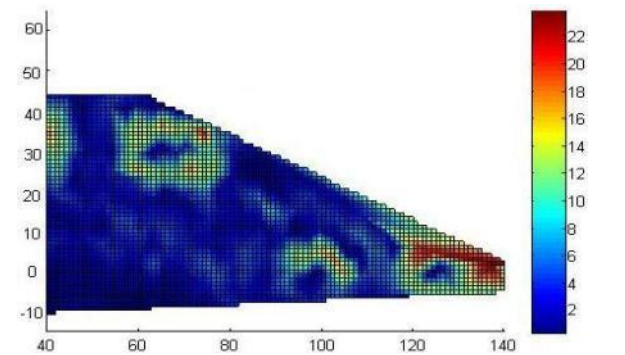
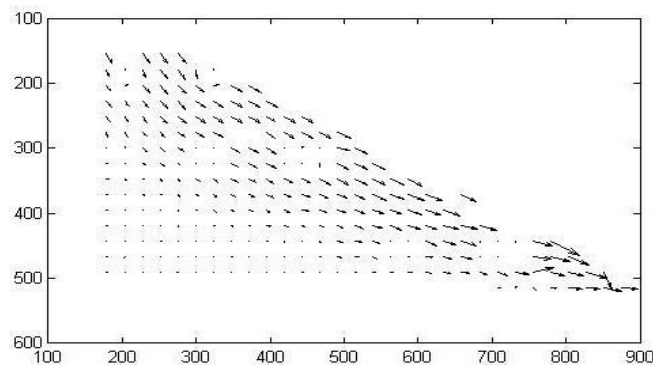
Φωτογραφίες 1-42



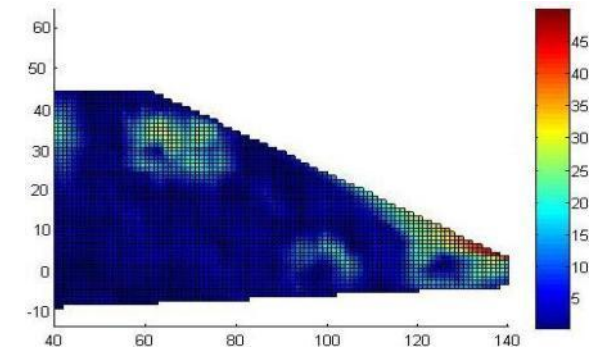
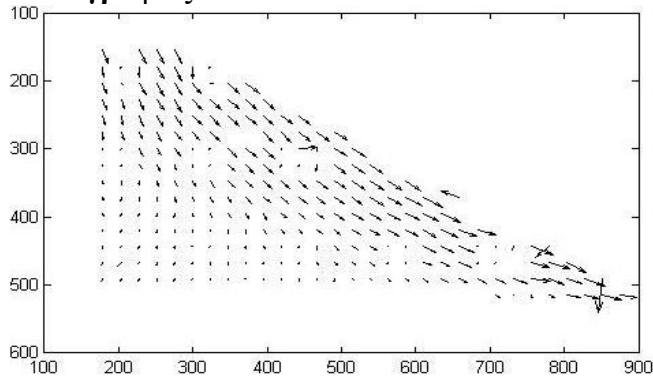
Φωτογραφίες 1-43



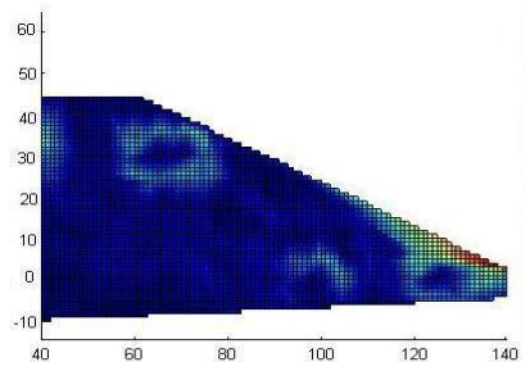
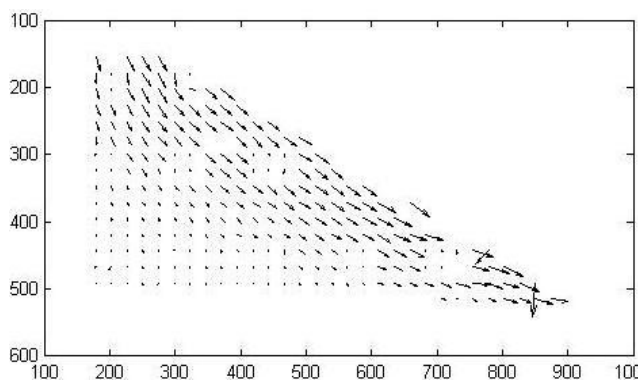
Φωτογραφίες 1-44



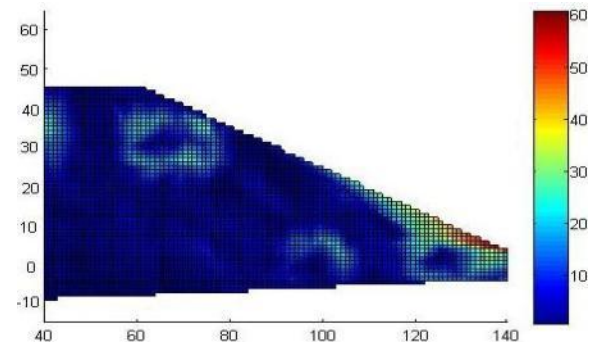
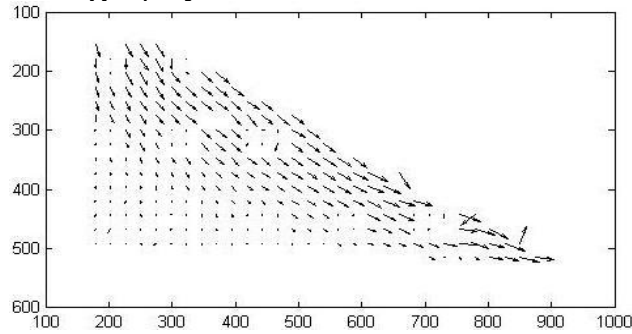
Φωτογραφίες 1-45



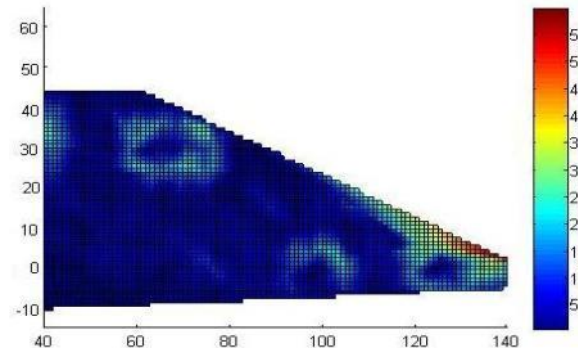
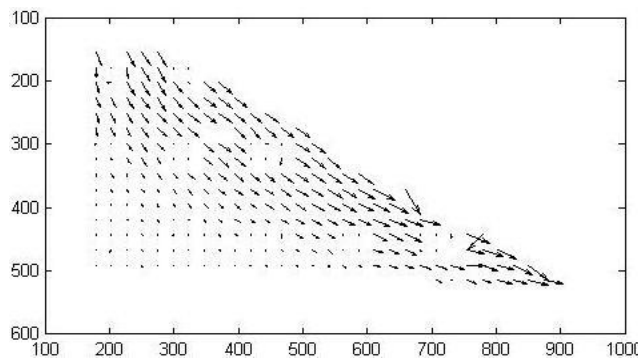
Φωτογραφίες 1-46



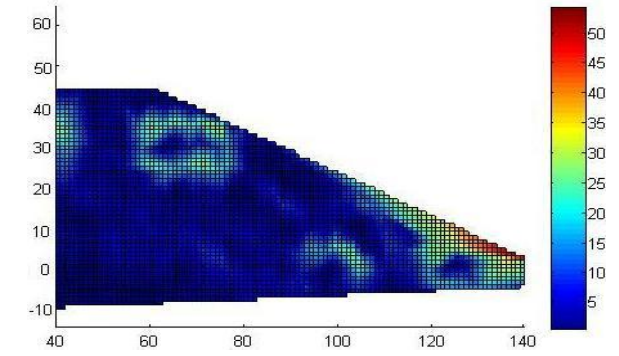
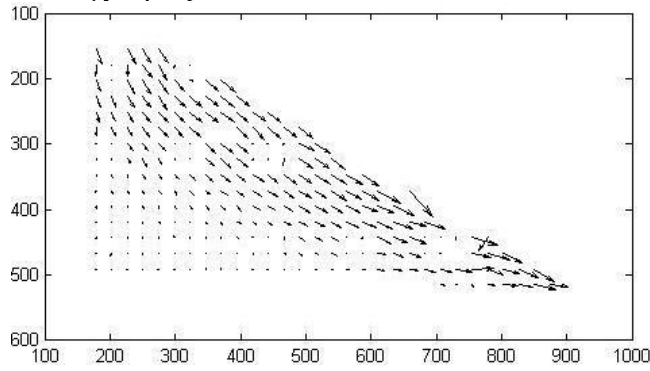
Φωτογραφίες 1-47



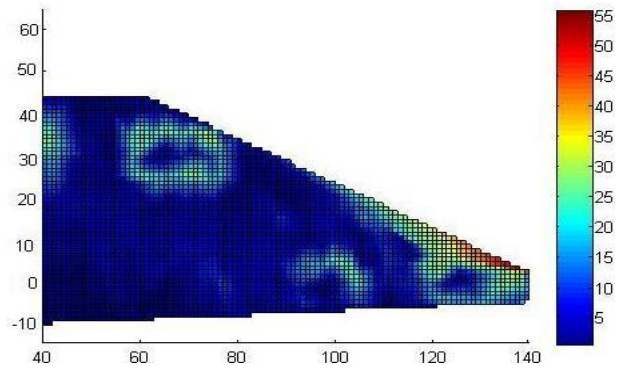
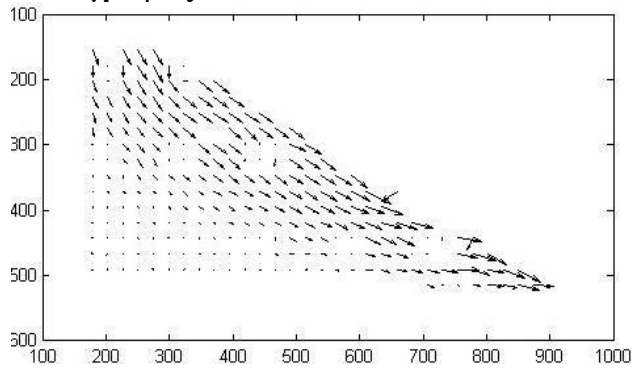
Φωτογραφίες 1-48



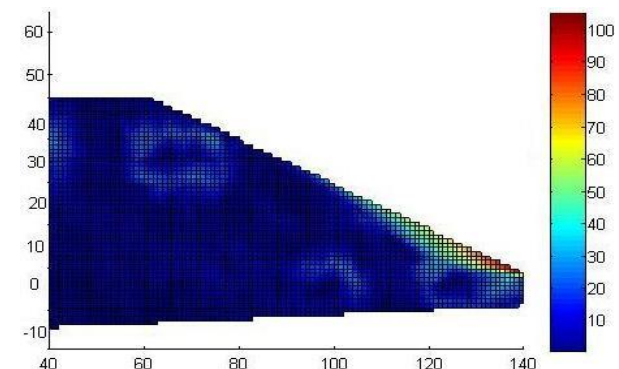
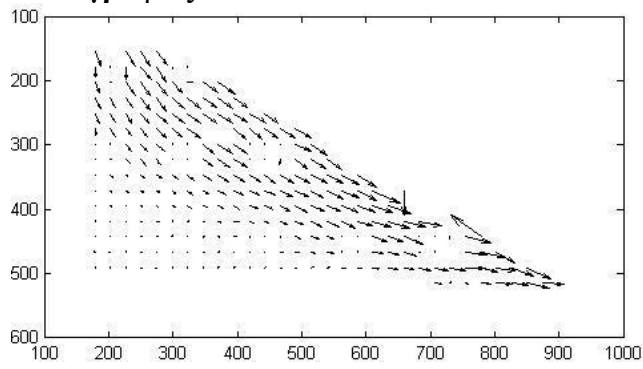
Φωτογραφίες 1-49



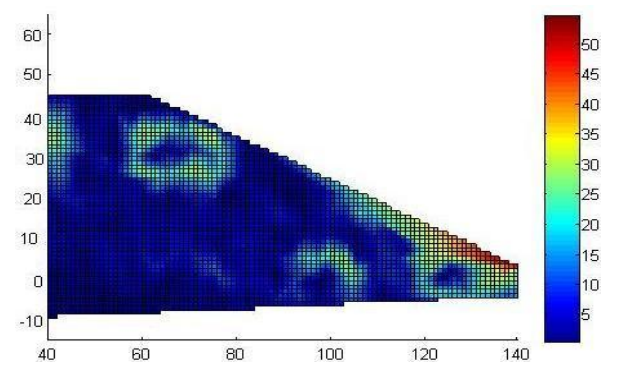
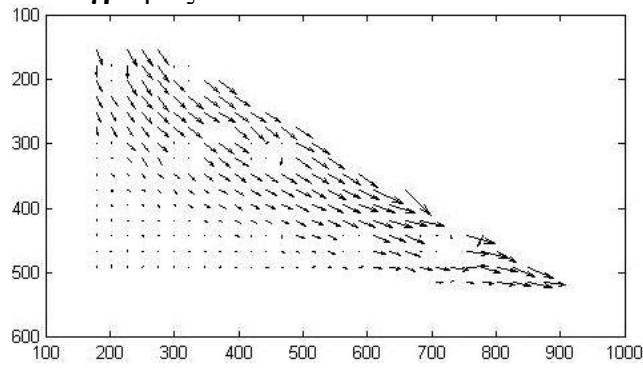
Φωτογραφίες 1-50



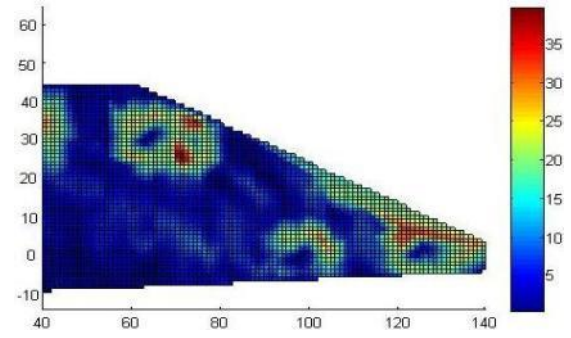
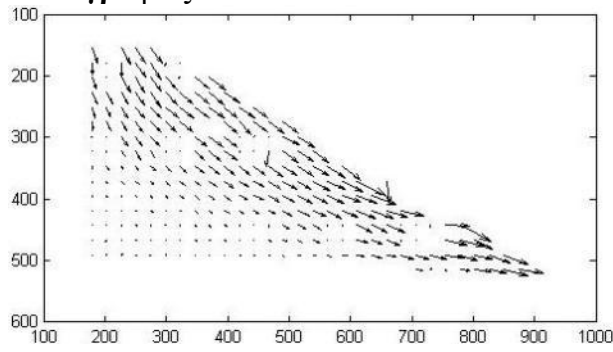
Φωτογραφίες 1-51



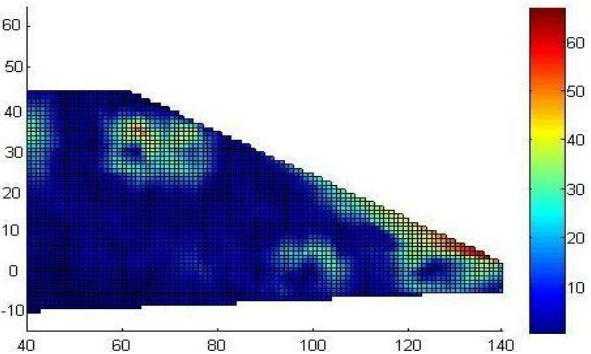
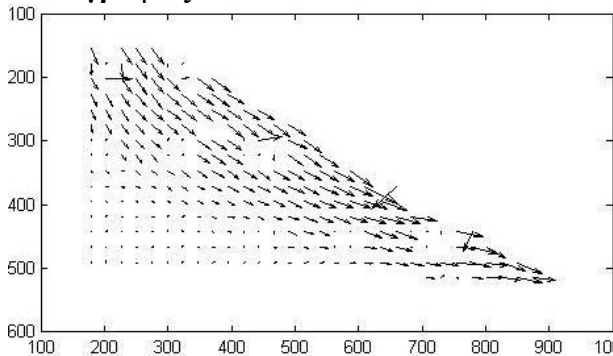
Φωτογραφίες 1-52



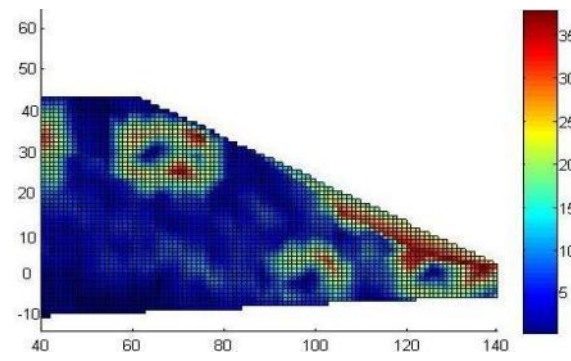
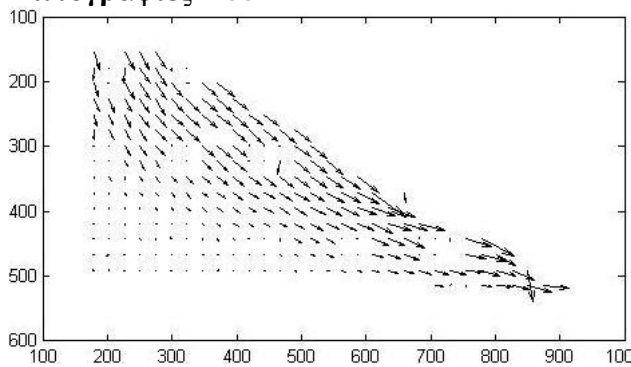
Φωτογραφίες 1-53



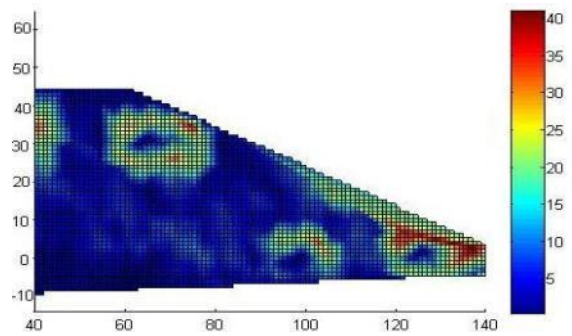
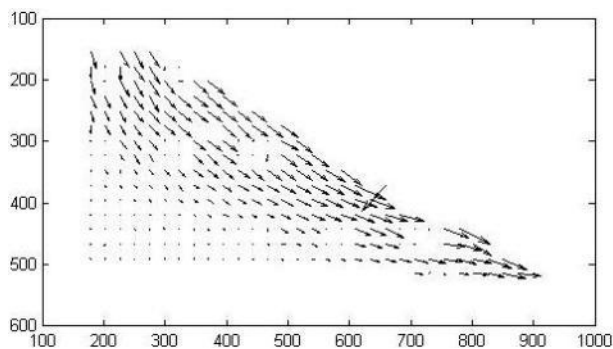
Φωτογραφίες 1-54



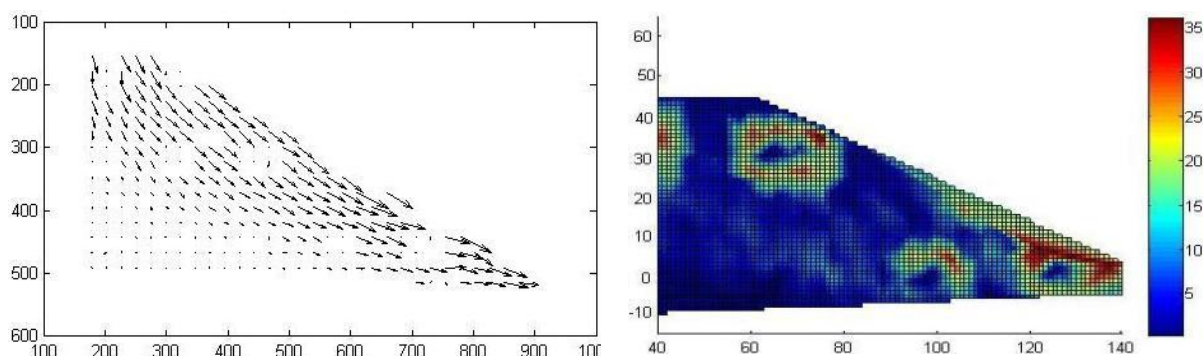
Φωτογραφίες 1-55



Φωτογραφίες 1-56



Φωτογραφίες 1-57

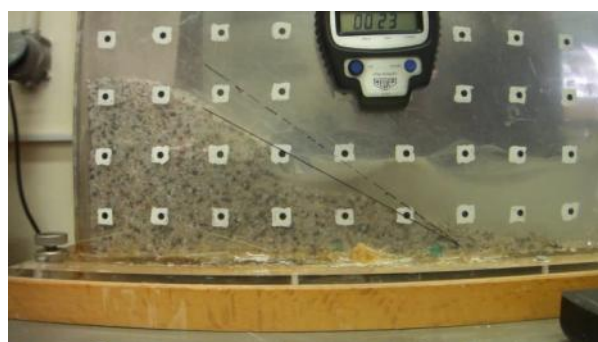
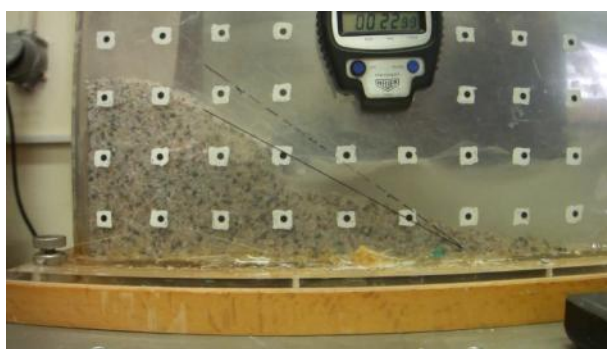


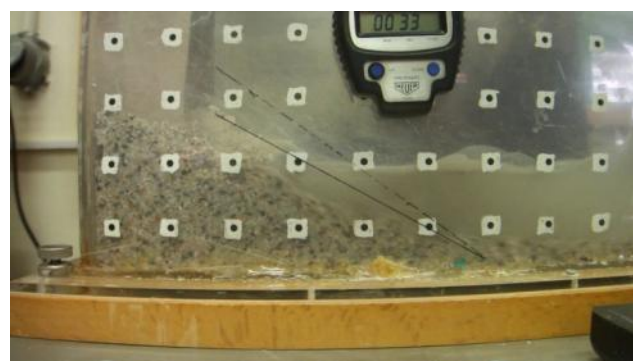
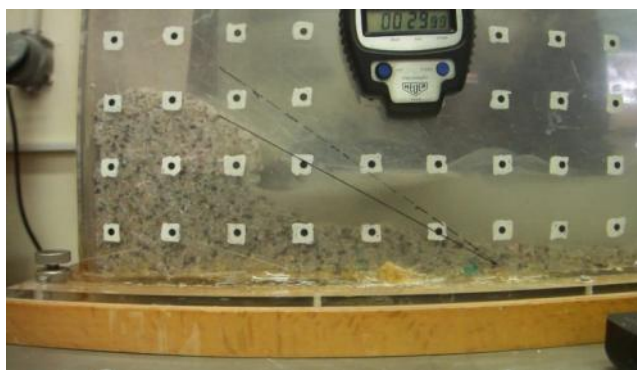
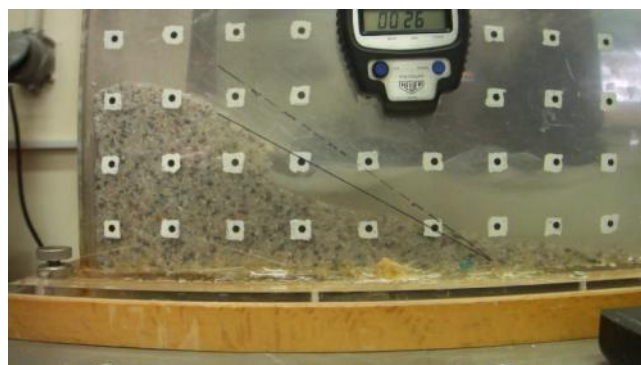
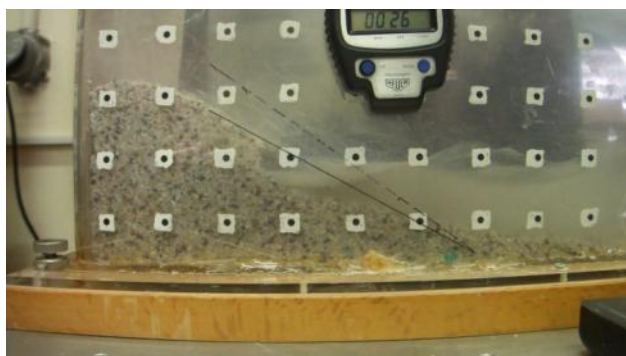
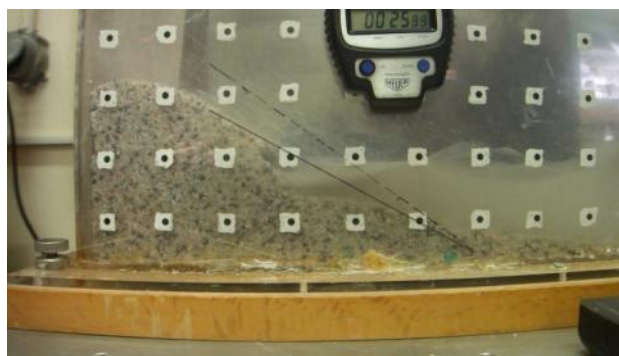
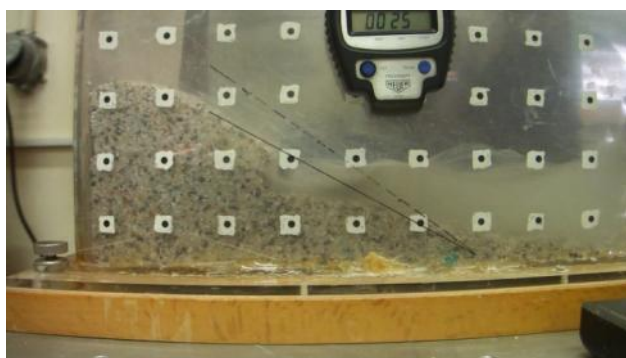
3.4.5 Πείραμα 5: Σεισμική φόρτιση με προσθήκη νερού – ελεύθερο πρανές

3.4.5.1 Περιγραφή πειράματος

Το ακόλουθο πείραμα θεωρείται συνέχεια του πειράματος 4, και το πρανές υφίσταται σεισμική φόρτιση μέχρι τη στιγμή κατάρρευσης του. Οι παλμοί που εισάγαμε, ομοίως με προηγουμένως, ήταν ημιτονοειδούς μορφής, σταθερής συχνότητας και επιπλέον οι τιμές της κρίσιμης γωνίας και επιτάχυνσης του πρανούς παρέμειναν σταθερές. Οπότε έχουμε ότι $\beta=28^\circ$ και $k_c=0.12g$. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι πριν τη διεξαγωγή του 5^{ου} πειράματος το πρανές παρέμεινε μέσα στο νερό για περίπου μία ώρα από το πέρας του πειράματος 4.

Στην ανάλυση του πειράματος αυτού, χρήσιμο θα ήταν να επισυναφτούν κάποιες εικόνες που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια του πειράματος και χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για την επεξεργασία του, και στις οποίες φαίνεται το φαινόμενο της διάβρωσης. Παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης ο κυματισμός του νερού προκάλεσε την αστοχία αρχικά της άμμου που βρισκόταν στο πόδι του πρανούς, στη συνέχεια δημιουργήθηκε μία νέα επιφάνεια αστοχίας πιο χαμηλά από προηγουμένως (εικ.3.32) και τέλος ακολούθησε η κατάρρευση του.





Στη συνέχεια ακολουθεί το επιταχυνσιογράφημα της συγκεκριμένης φόρτισης, στο οποίο φαίνεται και η τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης του πρανούς. Συγκεκριμένα η επιτάχυνση τους πρανούς στο 26 ο δευτερόλεπτο της σεισμικής φόρτισης είχε τιμή ίση με 0.56g.

Επειδή όπως έχει προαναφερθεί, το μέτωπο του νερού βρισκόταν πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η συνολική συνοχή του πρανους. Το φαινόμενο αυτό μαθηματικά μπορεί να ερμηνευτεί με τους ακόλουθους τύπους.

Ο K.Terzaghi (1920) διατύπωσε τη σχέση υπολογισμού της ενεργού τάσης που αναπτύσσεται σε ένα ασυνεχές μέσο, όπως είναι το έδαφος. Η σχέση αυτή αποτέλεσε τη βάση για την εξέλιξη της μοντέρνας Εδαφομηχανικής και είναι η εξής:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (\text{εξ. 3.1})$$

όπου σ : ορίζεται η ολική τάση του εδάφους

σ' : ορίζεται η ενεργός τάση του εδάφους, η οποία εκφράζει την ορθή δύναμη που μεταφέρεται μεταξύ των κόκκων με την επαφή και

u : ορίζεται η πίεση του νερού και υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$u = -h_w * \gamma_w \quad (\text{εξ.3.2})$$

όπου με γ_w ορίζεται το ειδικό βάρος του νερού και

με h_w ορίζεται το ύψος που βρίσκεται το μέτωπο του νερού πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Όπως είναι λογικό η πίεση του νερού στην επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα είναι ίση με μηδέν.

Από το συνδυασμό των εξισώσεων 3.1 και 3.2 προκύπτει ότι:

$$\sigma' = \sigma - u = \sigma - (-h_w * \gamma_w) = \sigma + h_w * \gamma_w$$

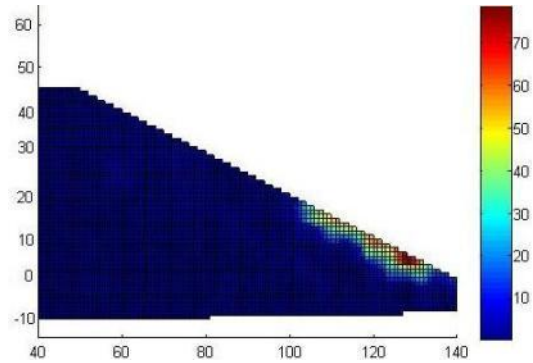
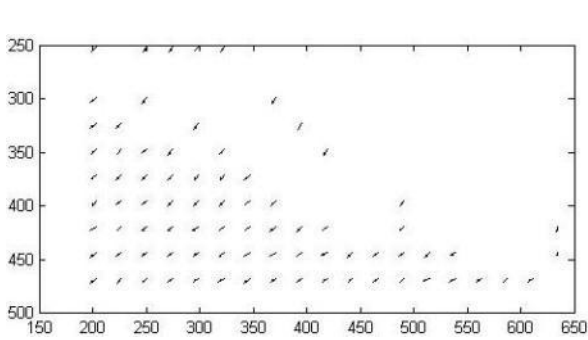
Επομένως, αφού στο πείραμα 5 το μέτωπο του νερού είναι πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, προκύπτει ότι $u < 0$ με αποτέλεσμα η τιμή της ενεργού τάσης να αυξάνεται και κατ' επέκταση να παρουσιάζεται ανάπτυξη της φαινόμενης συνοχής στο κοκκώδες εδαφικό υλικό λόγω της υγρασίας.

Το παρόν πείραμα πραγματοποιήθηκε δύο φορές με τη μέθοδο ανάλυσης PIV. Αρχικά όπως και στα προηγούμενα πειράματα που διεξήχθησαν, υπολογίστηκαν οι μετατοπίσεις και οι ανηγμένες παραμορφώσεις του πρανούς σύμφωνα με την αρχική του κατάσταση (την κατάσταση στην οποία βρισκόταν το πρανός πριν την έναρξη της σεισμικής φόρτισης). Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι μετατοπίσεις και οι ανηγμένες παραμορφώσεις του πρανούς μεταξύ διαδοχικών φωτογραφιών στο στάδιο όπου εμφανίστηκε ο μηχανισμός της διάβρωσης. Συγκεκριμένα ως πρώτη εικόνα στη δεύτερη αυτή ανάλυση, θεωρήθηκε η 20^η φωτογραφία της πρώτης επεξεργασίας στην οποία παρατηρήθηκε έντονα η κυκλική αστοχία του πρανούς λόγω του κυματισμού. Στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι μεγάλος αριθμός από τα μη συμβατά διανύσματα ροής που δημιουργούνται ναι μεν οφείλονται στον κυματισμό του νερού, αλλά επιπλέον οφείλονται και στη διάχυση του εδαφικού υλικού μέσα στο νερό. Τα αποτελέσματα και των 2 επεξεργασιών ακολουθούν στη συνέχεια.

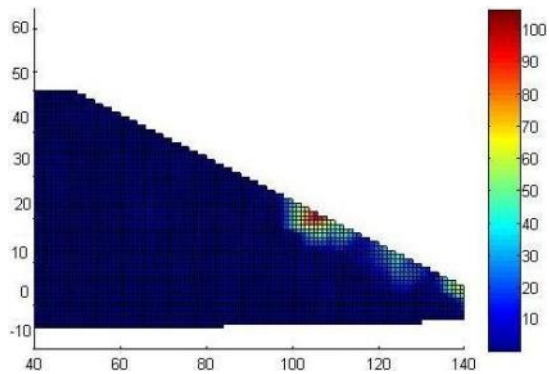
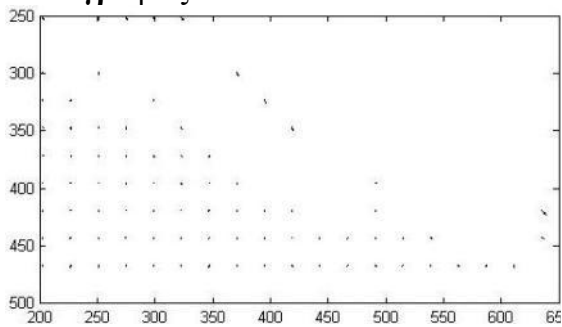
3.4.5.2: Αποτελέσματα πειράματος 5 – 1^η επεξεργασία

Διανύσματα μετατόπισης
Φωτογραφίες 1-2

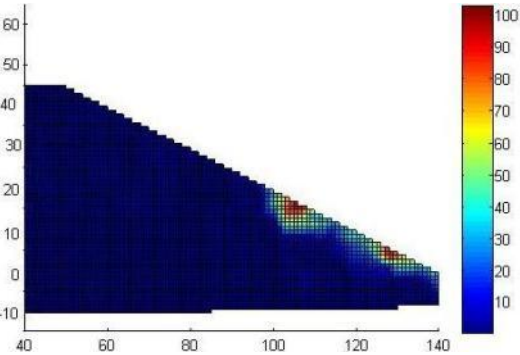
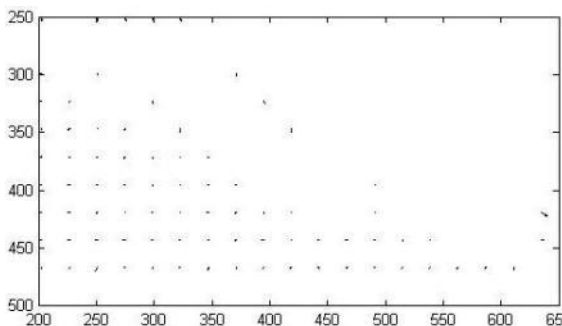
Ανηγμένες παραμορφώσεις



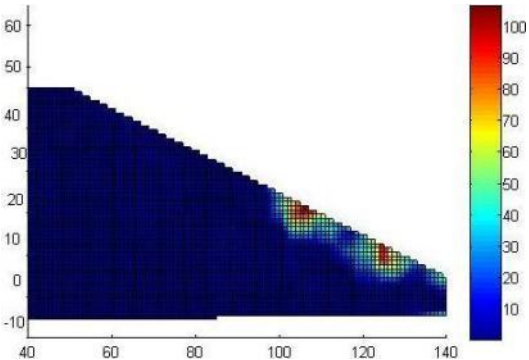
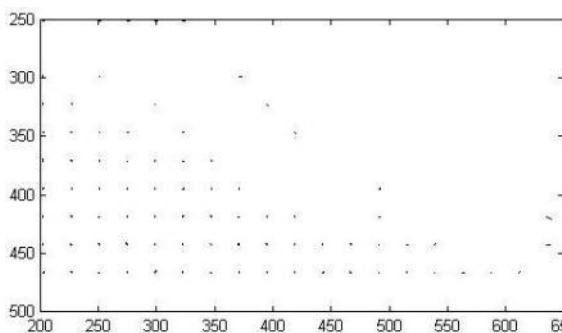
Φωτογραφίες 1-3



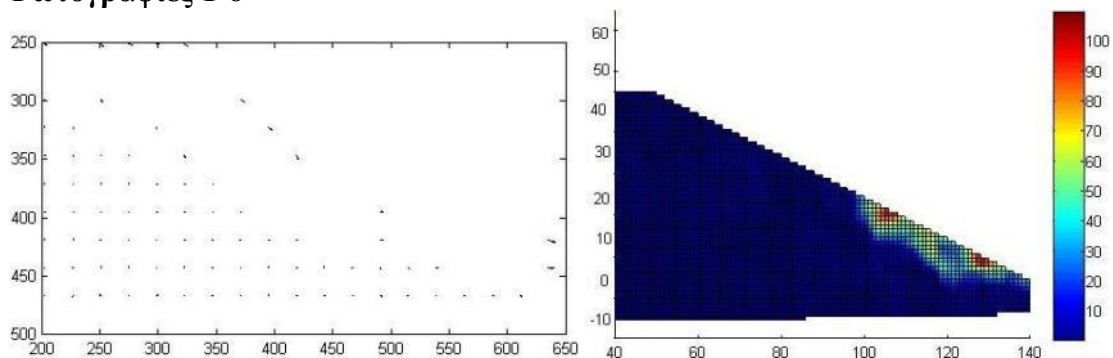
Φωτογραφίες 1-4



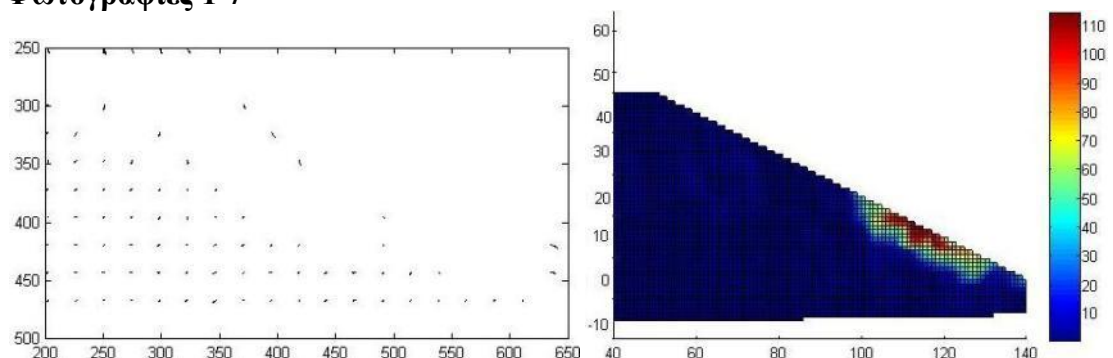
Φωτογραφίες 1-5



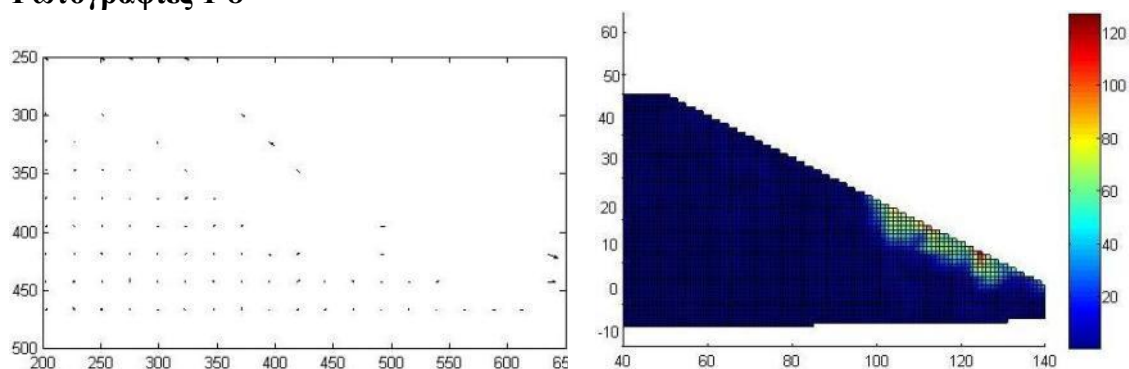
Φωτογραφίες 1-6



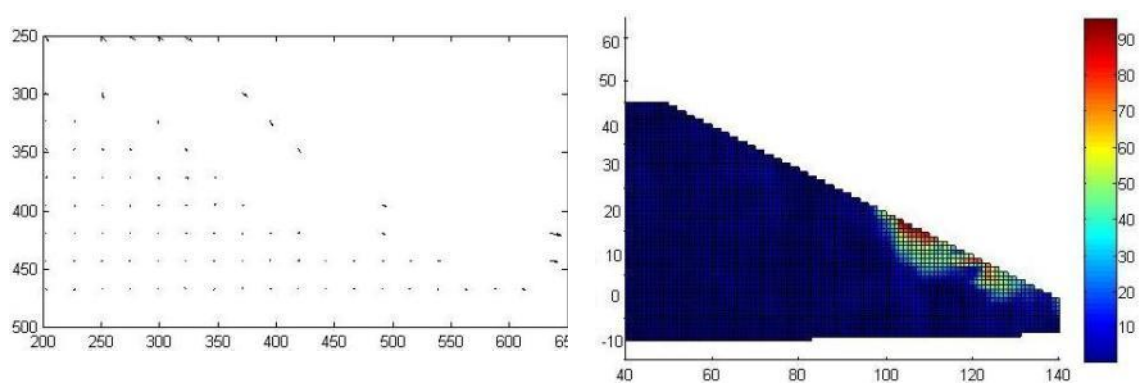
Φωτογραφίες 1-7



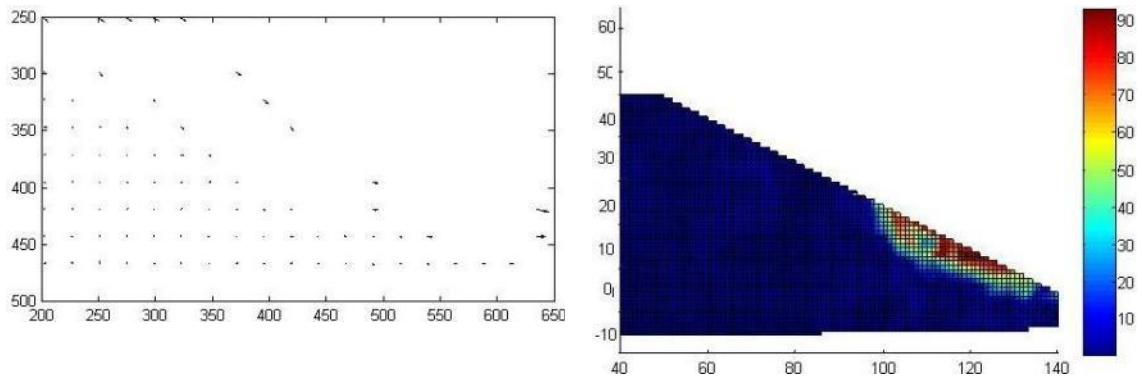
Φωτογραφίες 1-8



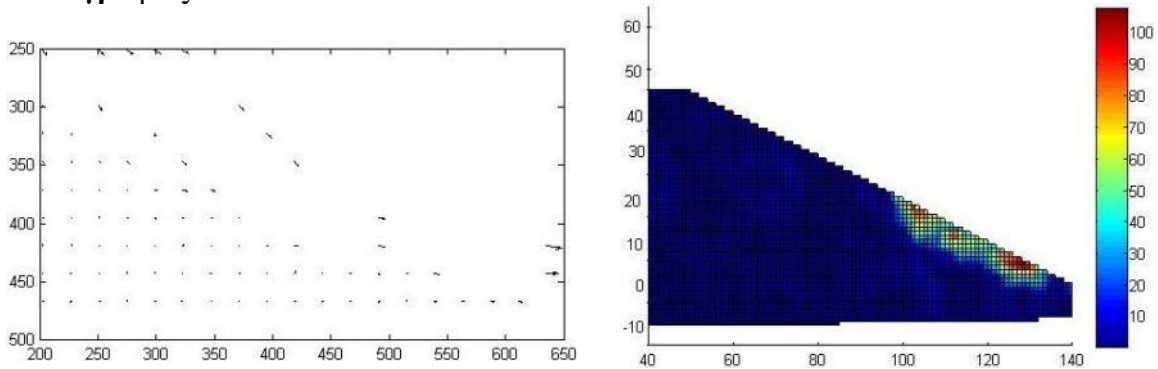
Φωτογραφίες 1-9



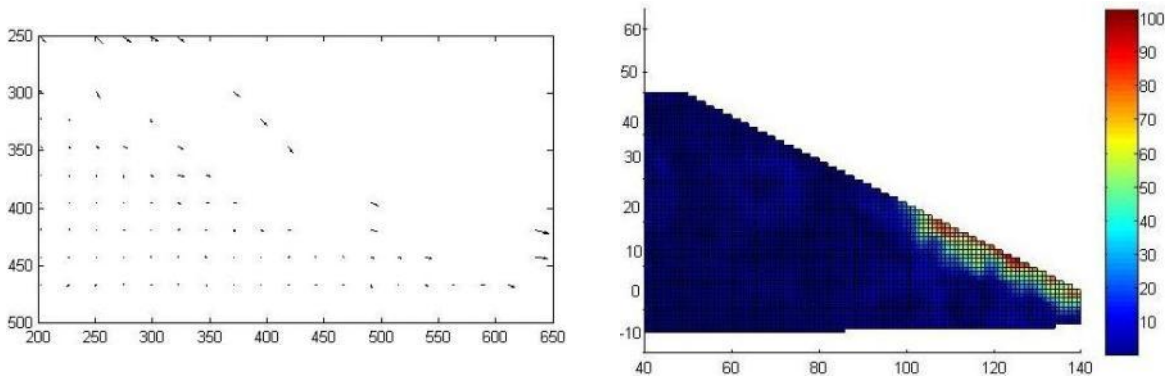
Φωτογραφίες 1-10



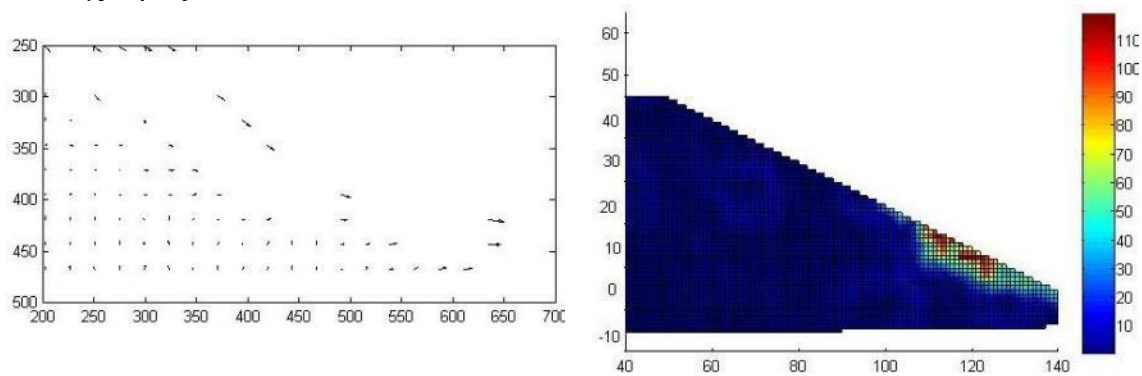
Φωτογραφίες 1-11



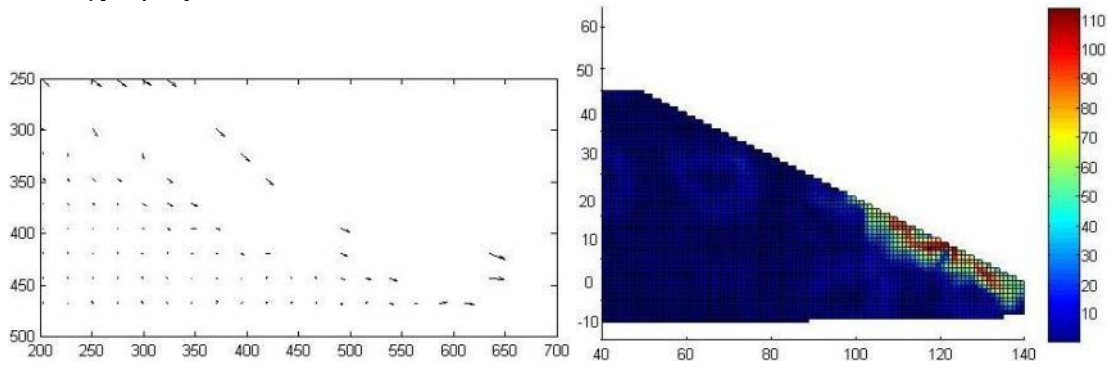
Φωτογραφίες 1-12



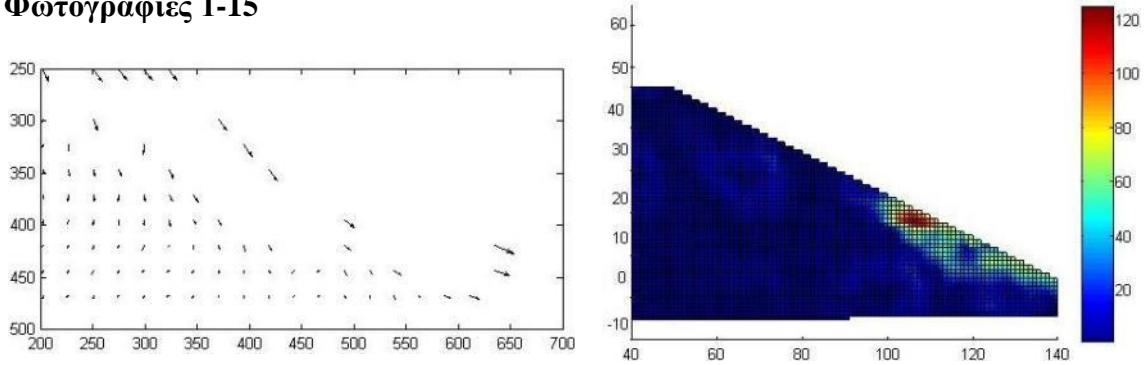
Φωτογραφίες 1-13



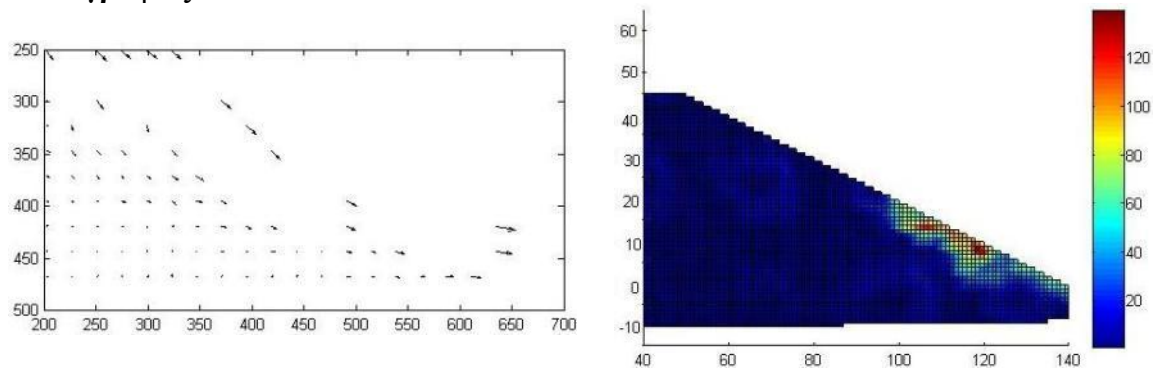
Φωτογραφίες 1-14



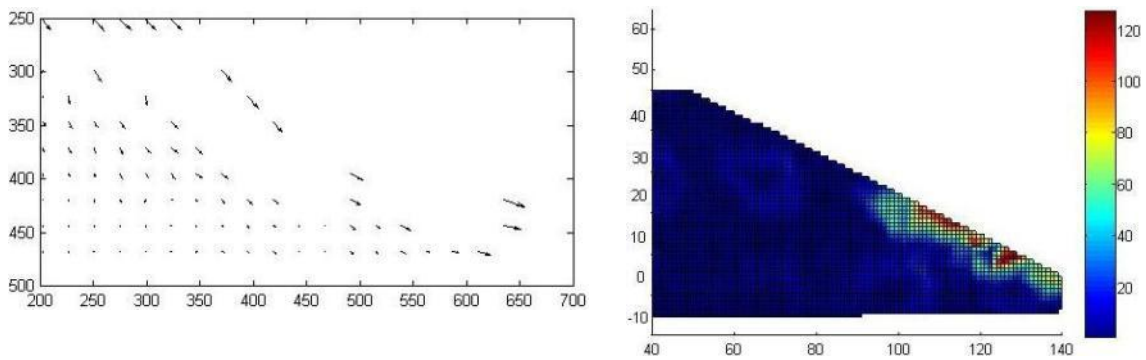
Φωτογραφίες 1-15



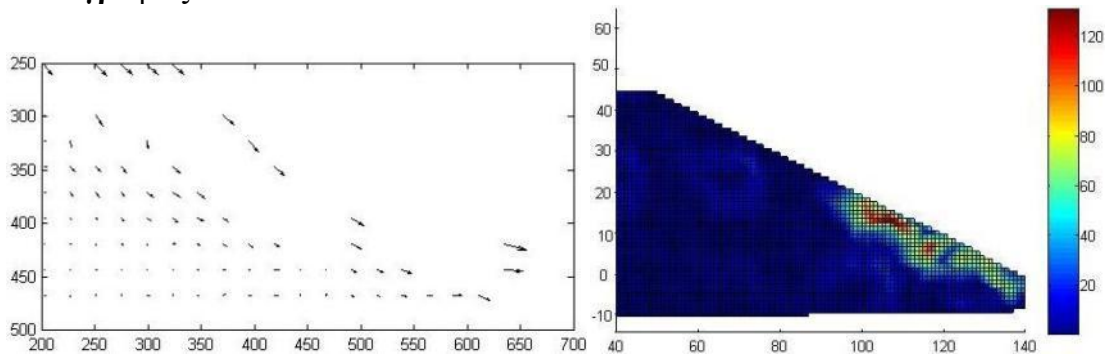
Φωτογραφίες 1-16



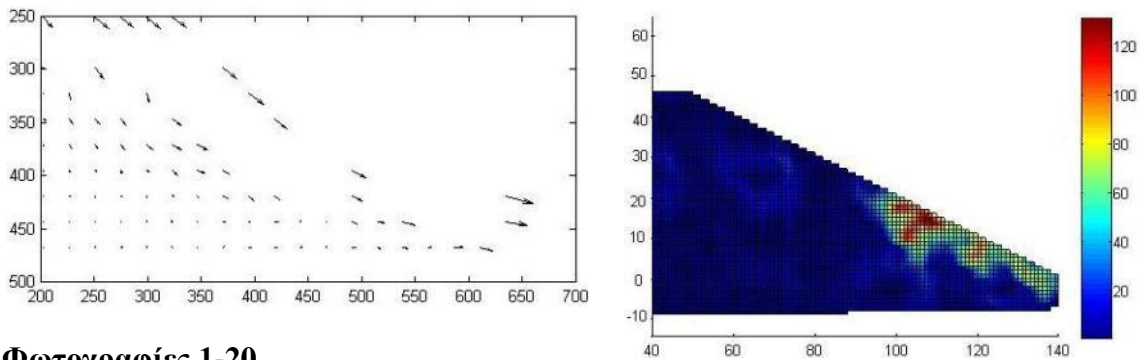
Φωτογραφίες 1-17



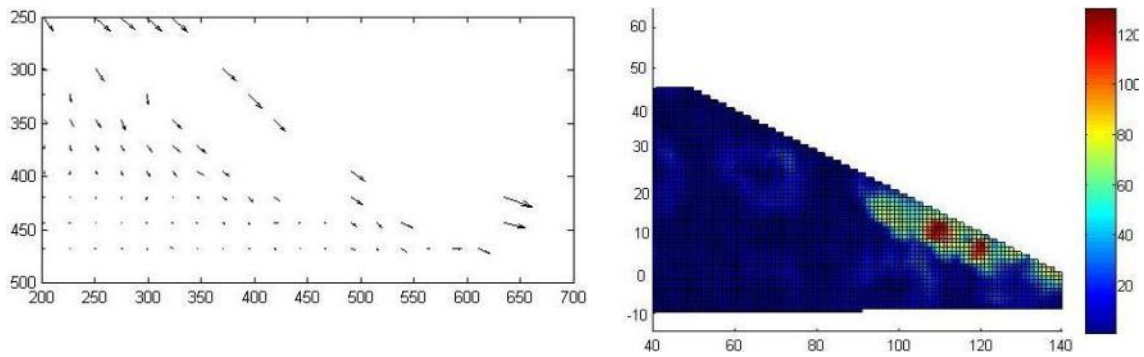
Φωτογραφίες 1-18



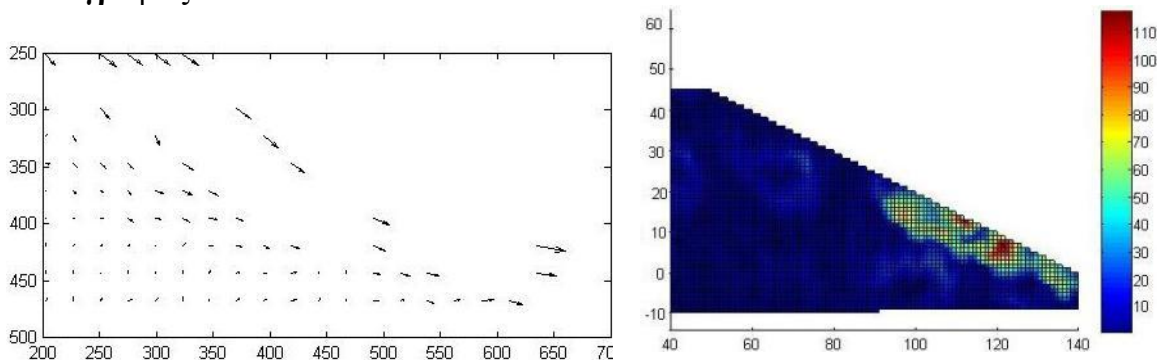
Φωτογραφίες 1-19



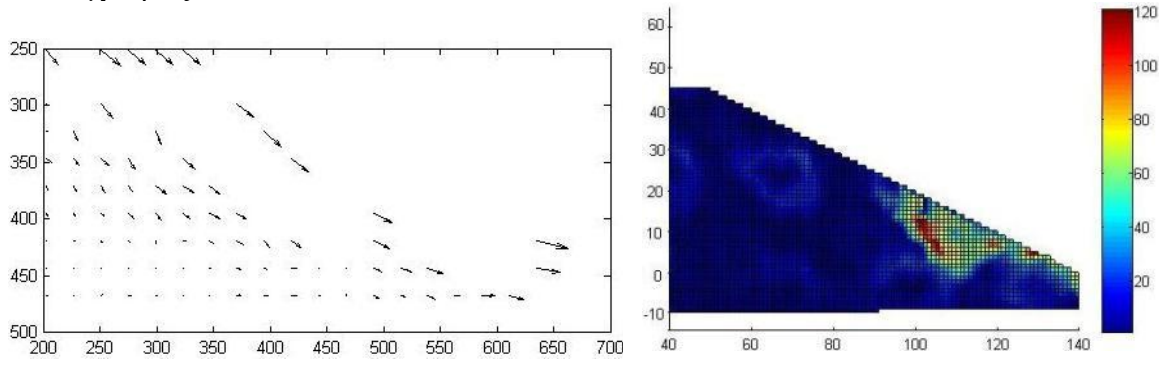
Φωτογραφίες 1-20



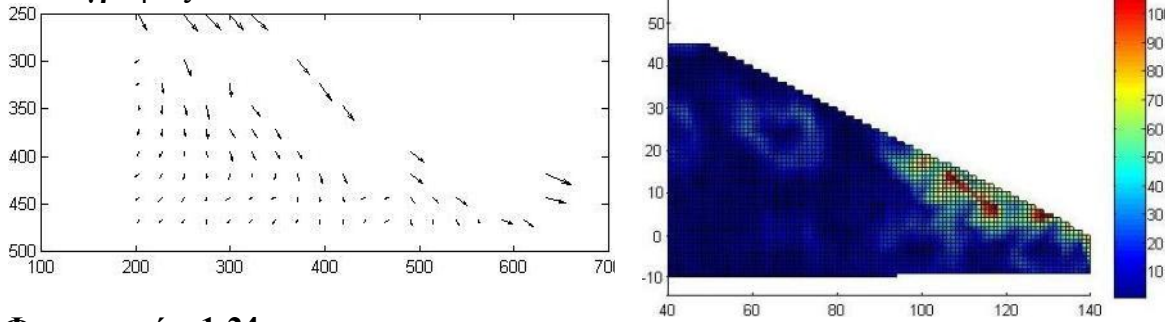
Φωτογραφίες 1-21



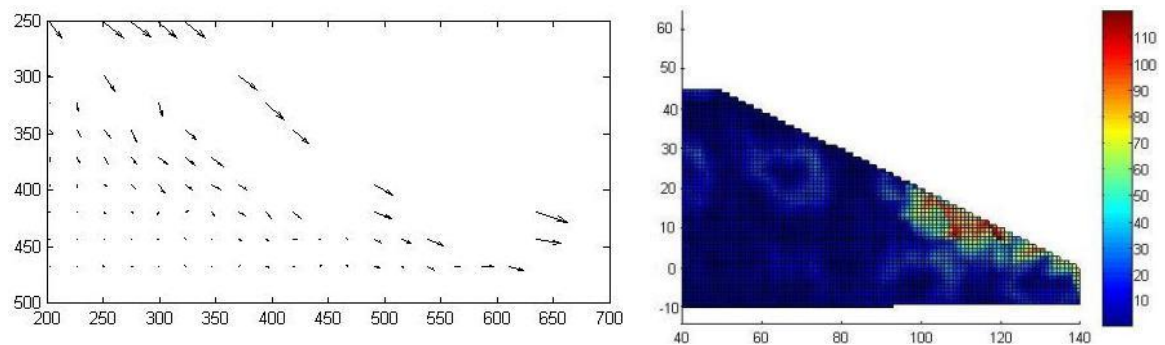
Φωτογραφίες 1-22



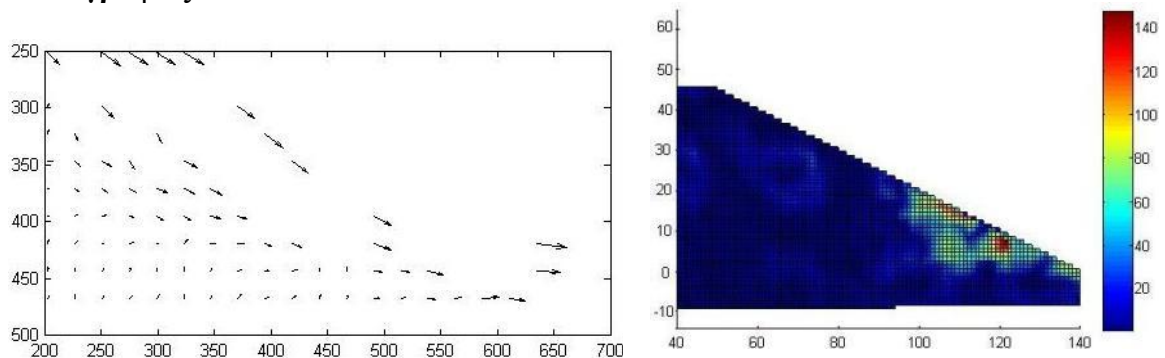
Φωτογραφίες 1-23



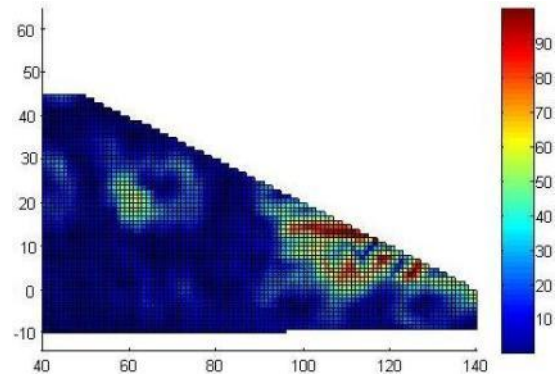
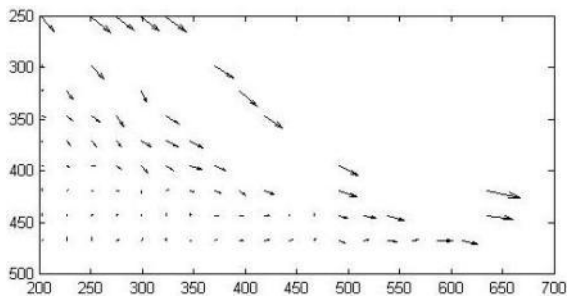
Φωτογραφίες 1-24



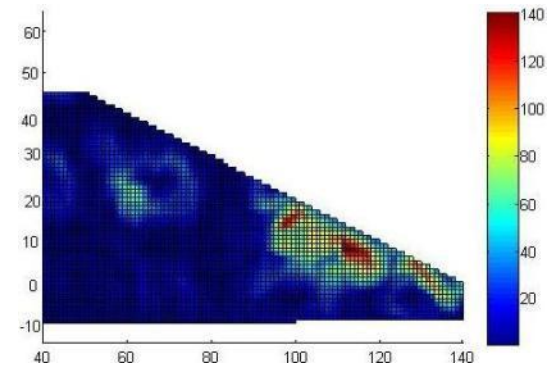
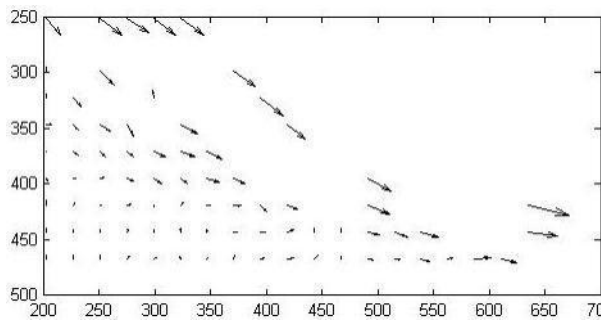
Φωτογραφίες 1-25



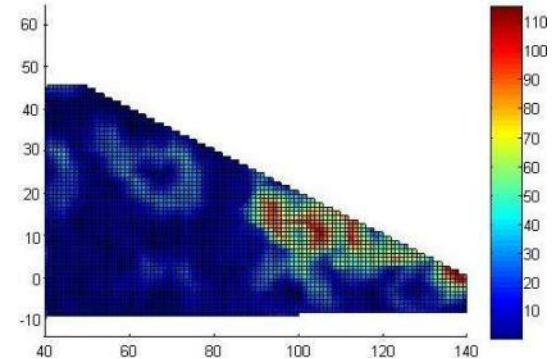
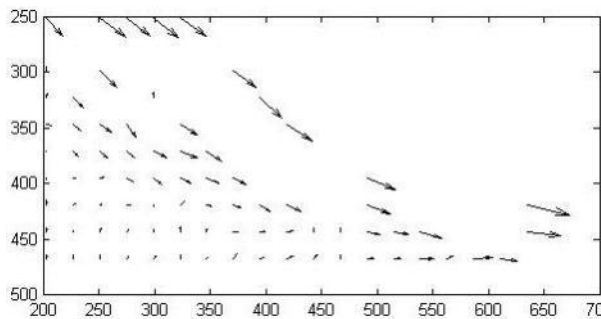
Φωτογραφίες 1-26



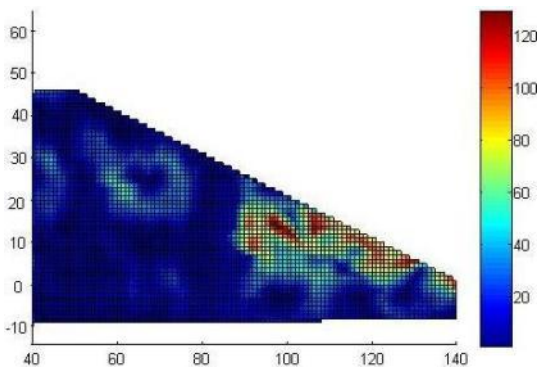
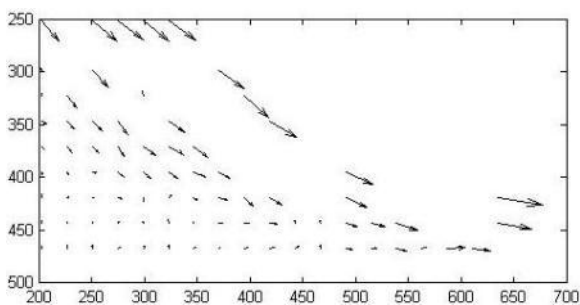
Φωτογραφίες 1-27



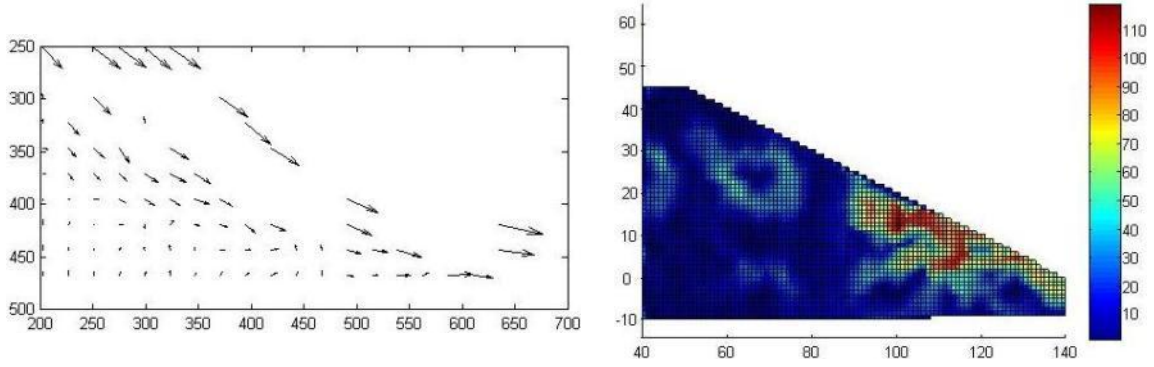
Φωτογραφίες 1-28



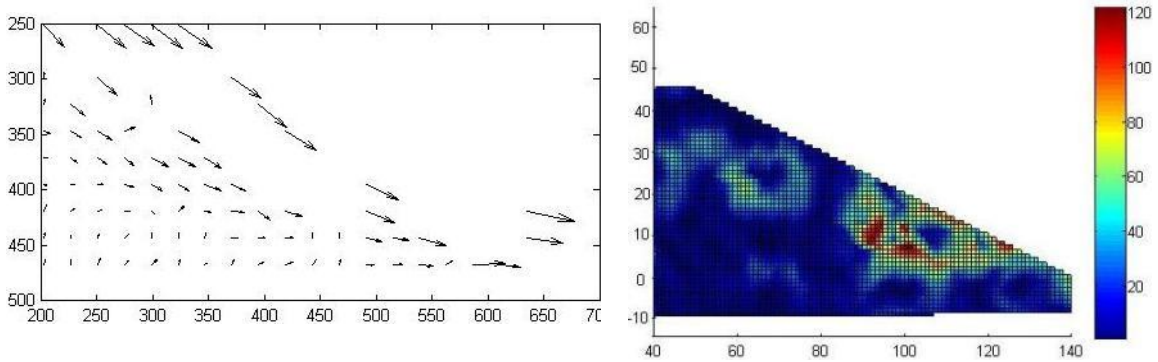
Φωτογραφίες 1-29



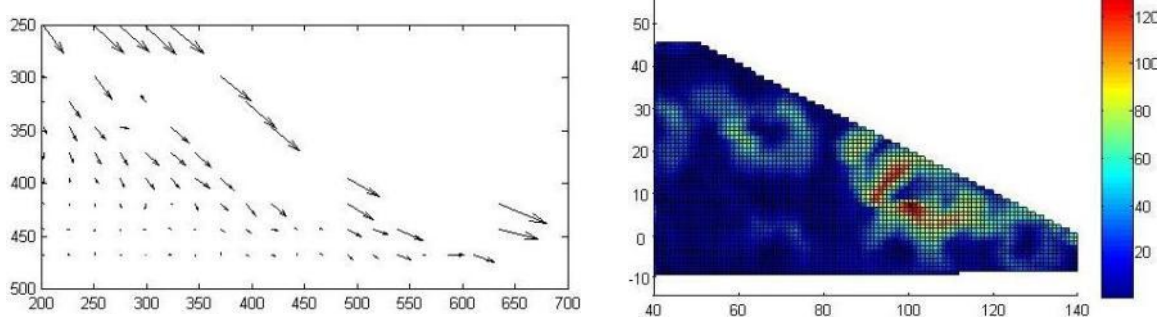
Φωτογραφίες 1-30



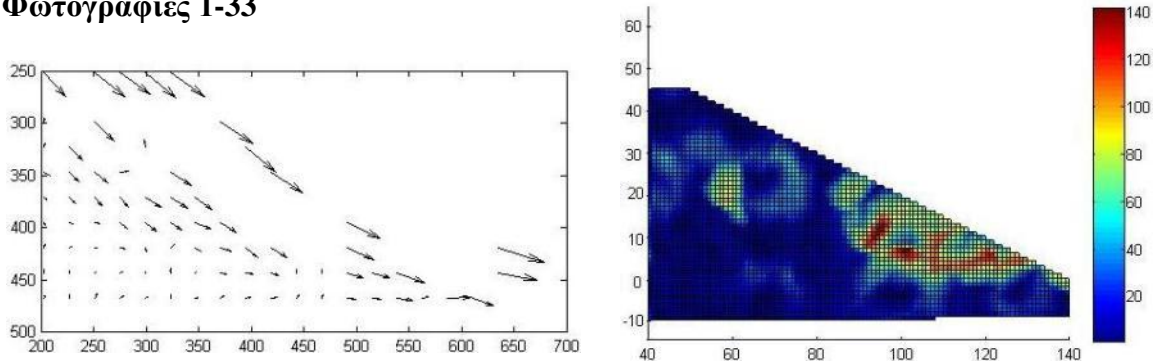
Φωτογραφίες 1-31



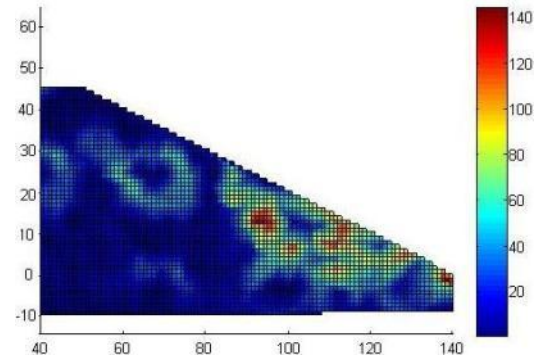
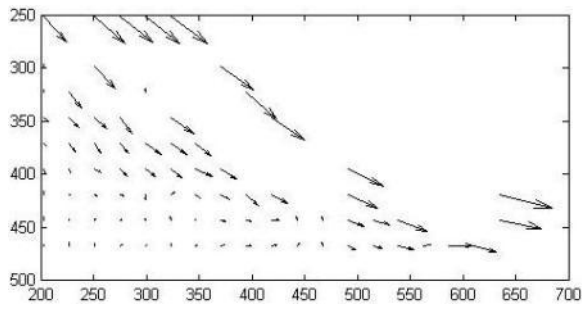
Φωτογραφίες 1-32



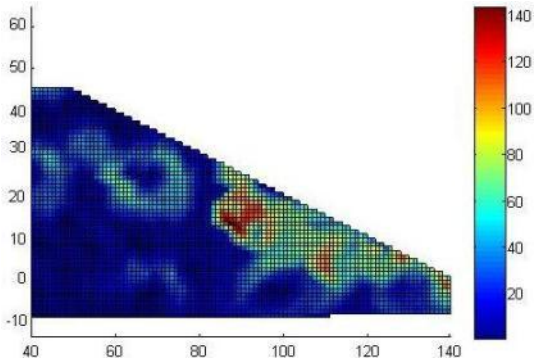
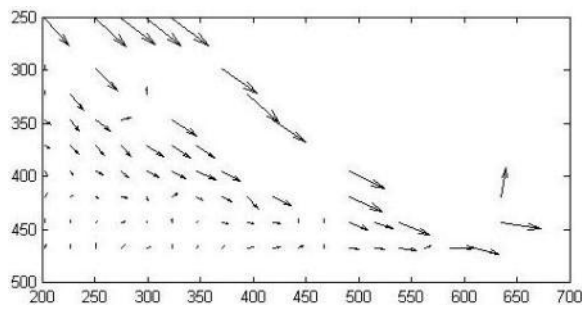
Φωτογραφίες 1-33



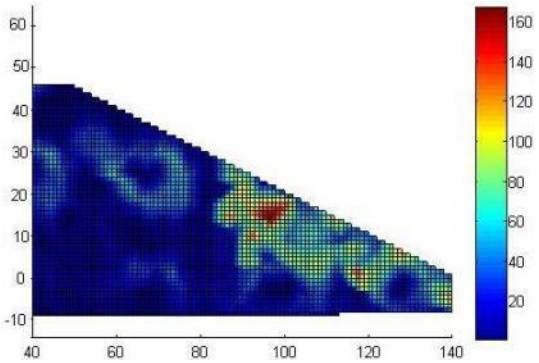
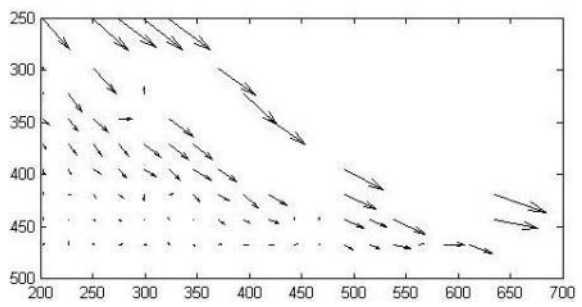
Φωτογραφίες 1-34



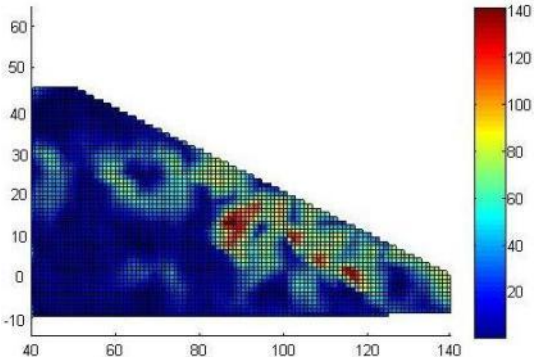
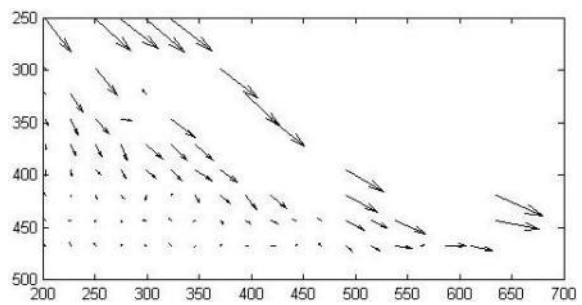
Φωτογραφίες 1-35



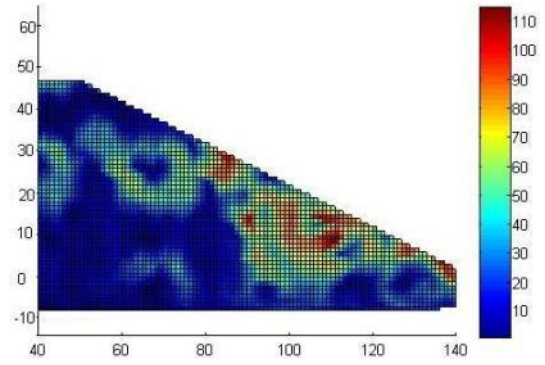
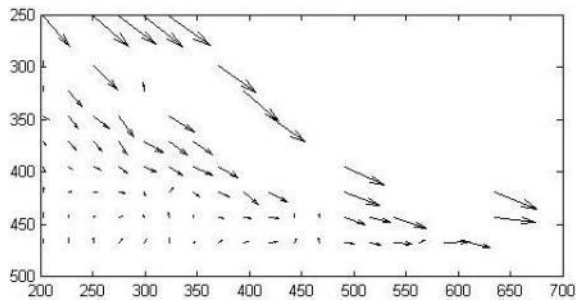
Φωτογραφίες 1-36



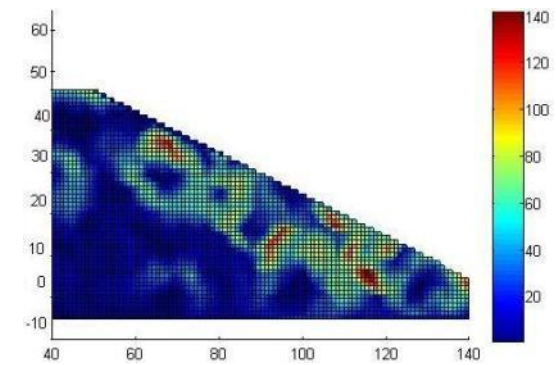
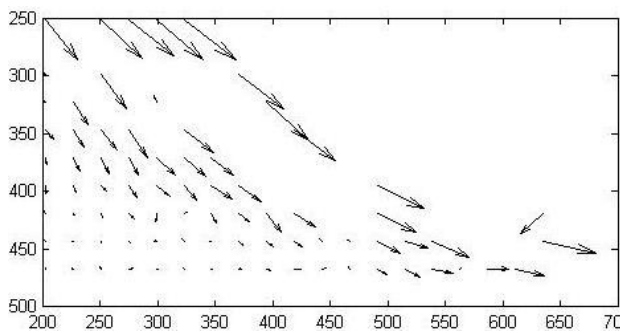
Φωτογραφίες 1-37



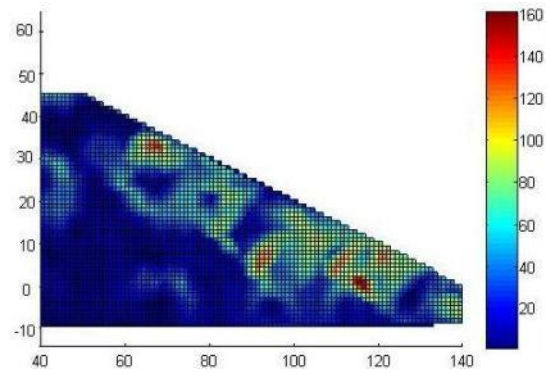
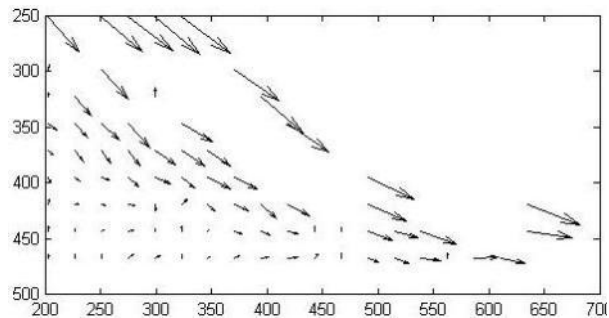
Φωτογραφίες 1-38



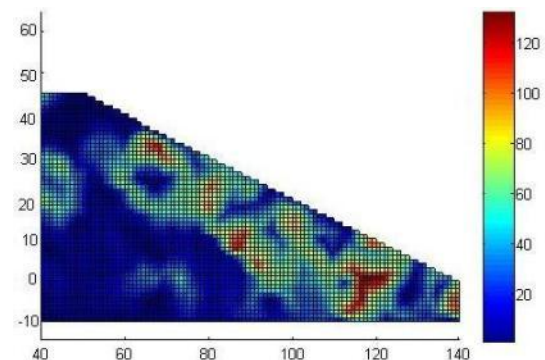
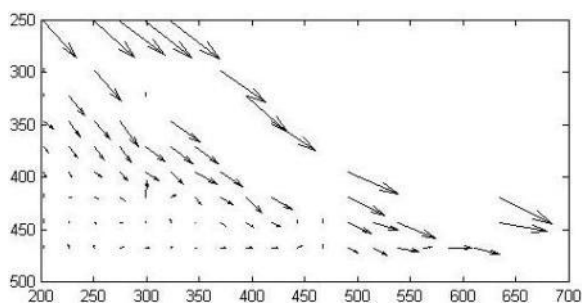
Φωτογραφίες 1-39



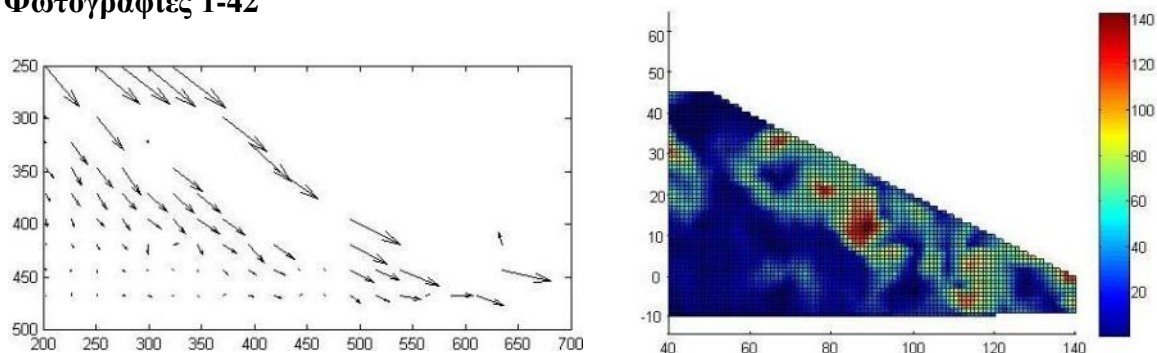
Φωτογραφίες 1-40



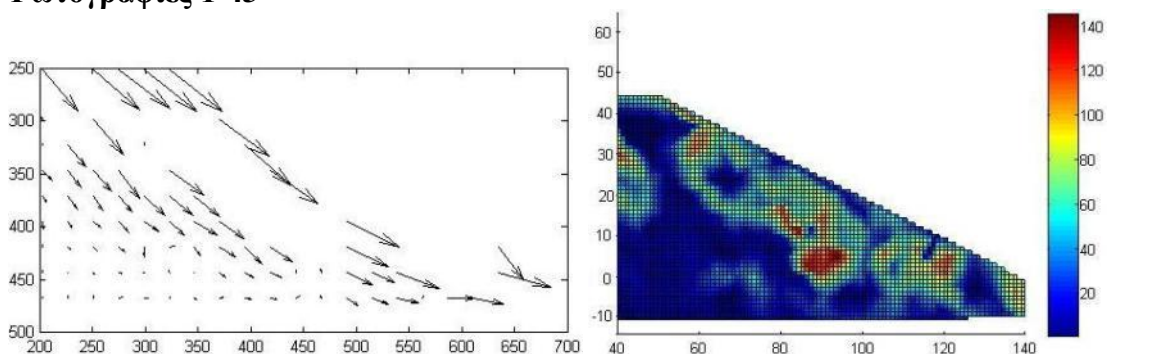
Φωτογραφίες 1-41



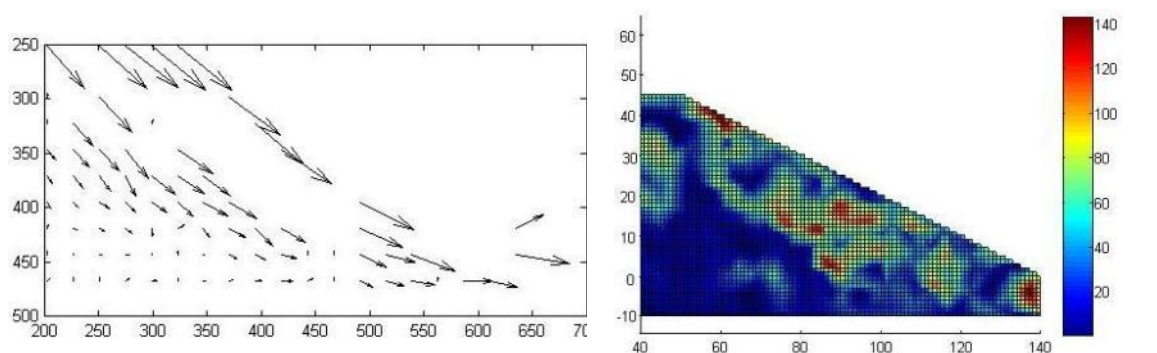
Φωτογραφίες 1-42



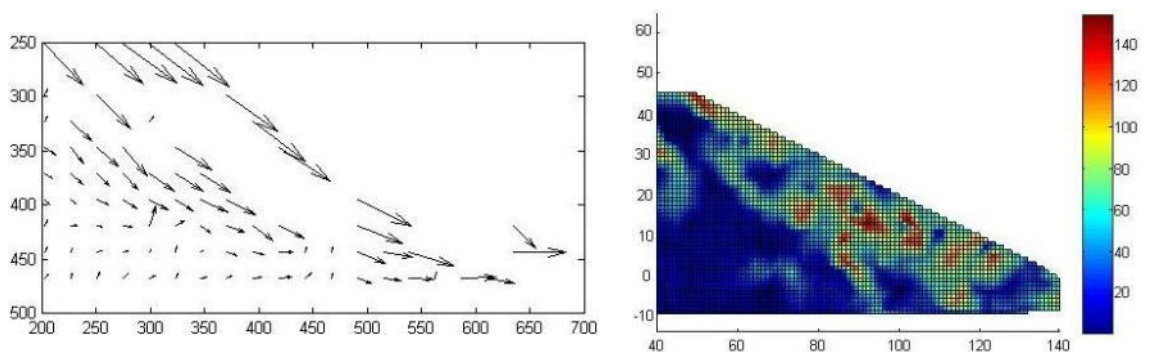
Φωτογραφίες 1-43



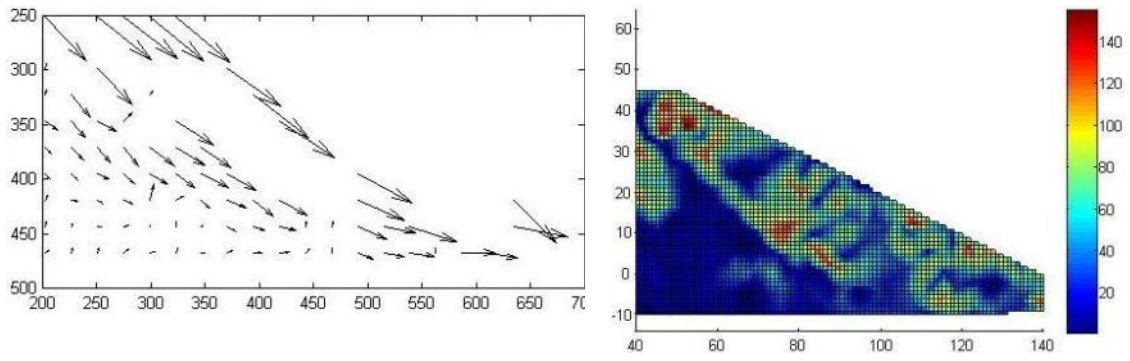
Φωτογραφίες 1-44



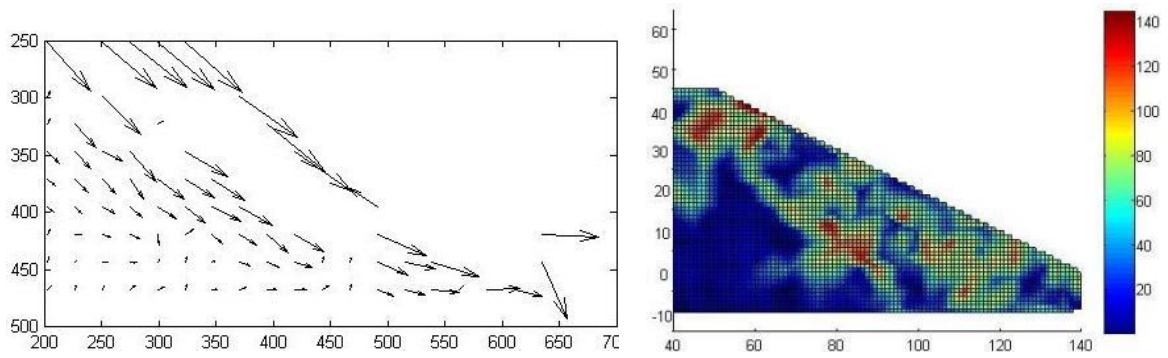
Φωτογραφίες 1-45



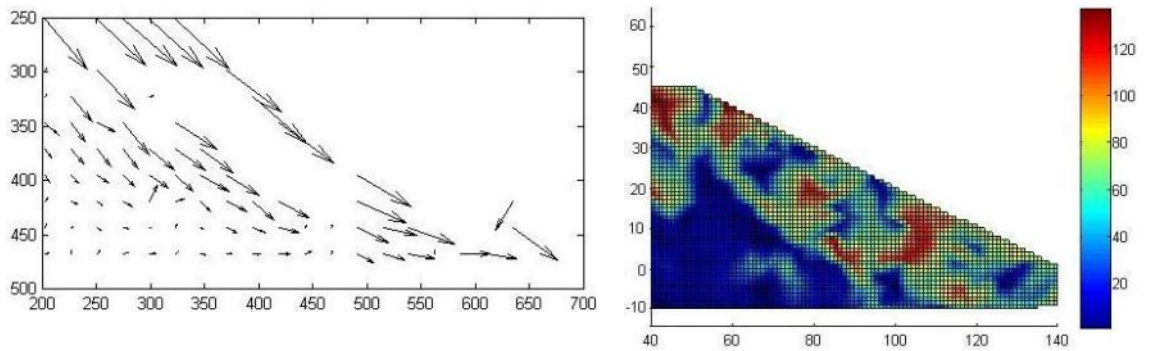
Φωτογραφίες 1-46



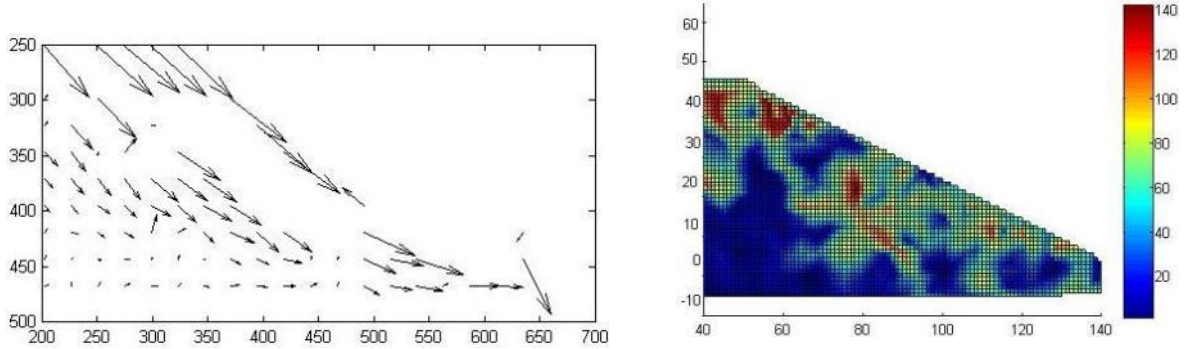
Φωτογραφίες 1-47



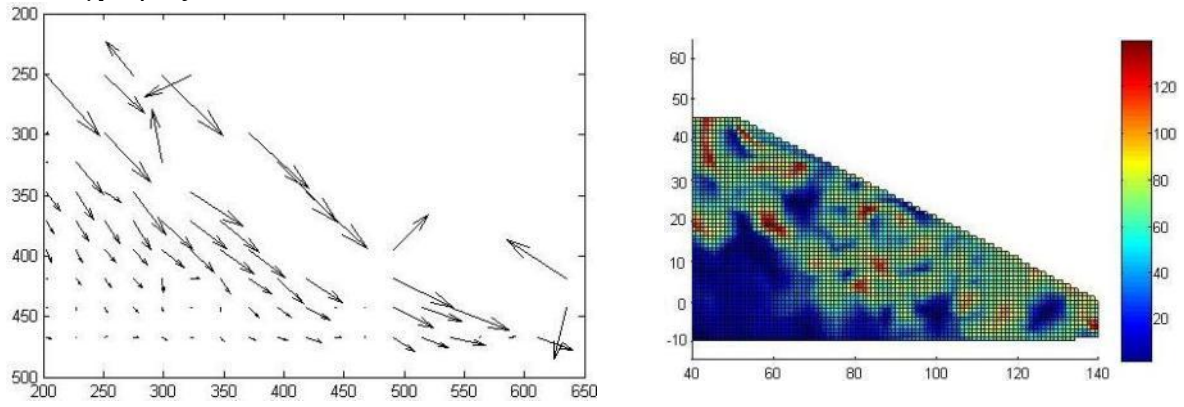
Φωτογραφίες 1-48



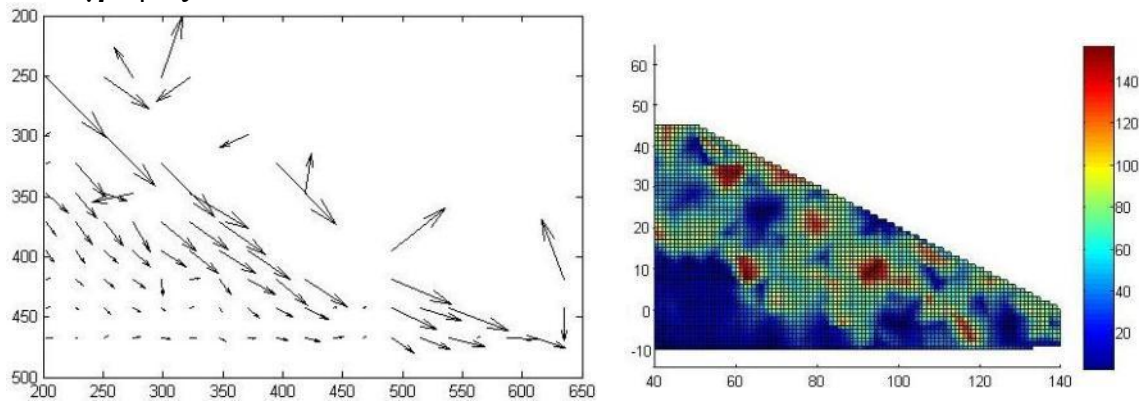
Φωτογραφίες 1-49



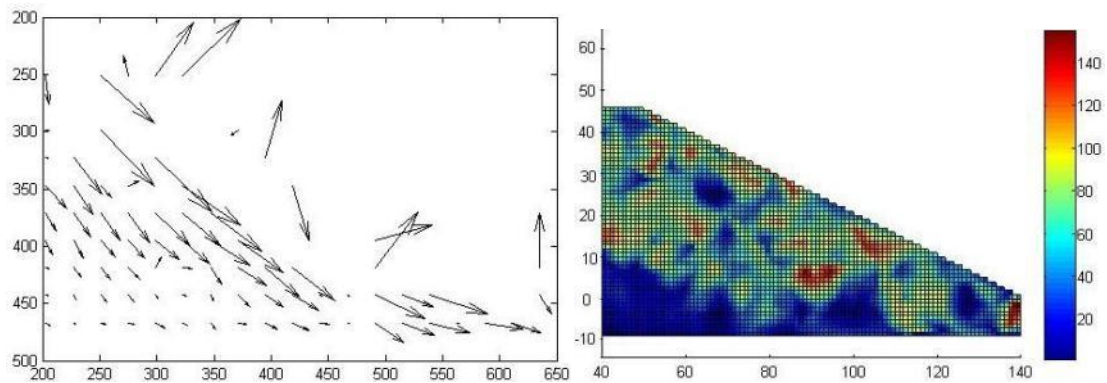
Φωτογραφίες 1-50



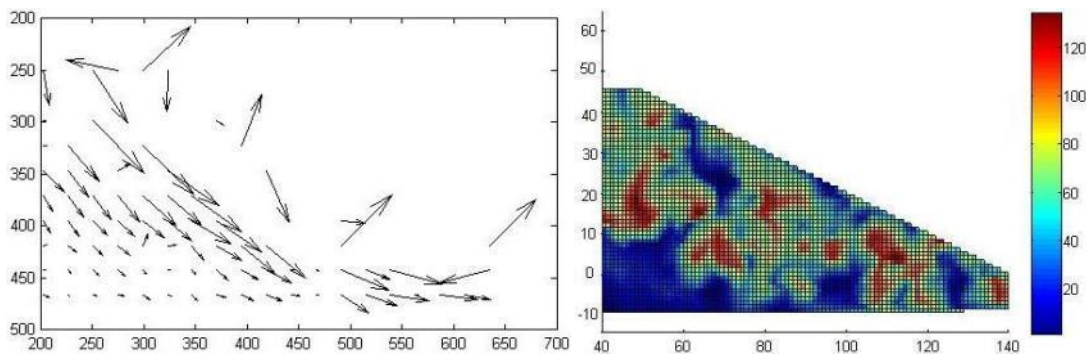
Φωτογραφίες 1-51



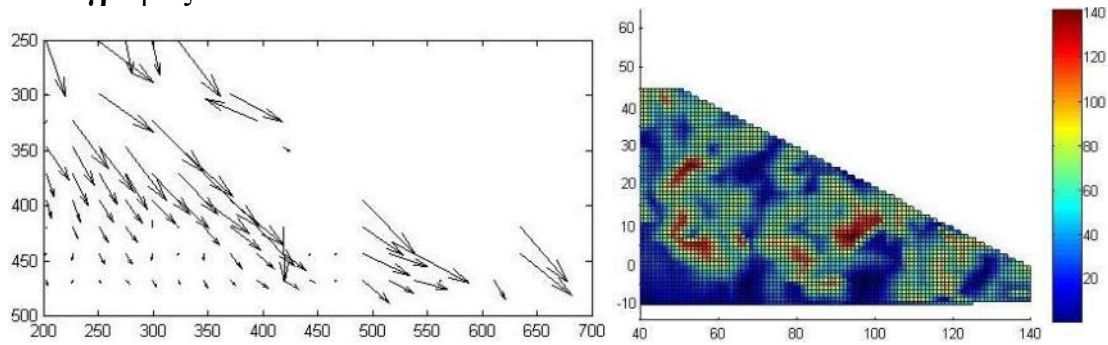
Φωτογραφίες 1-52



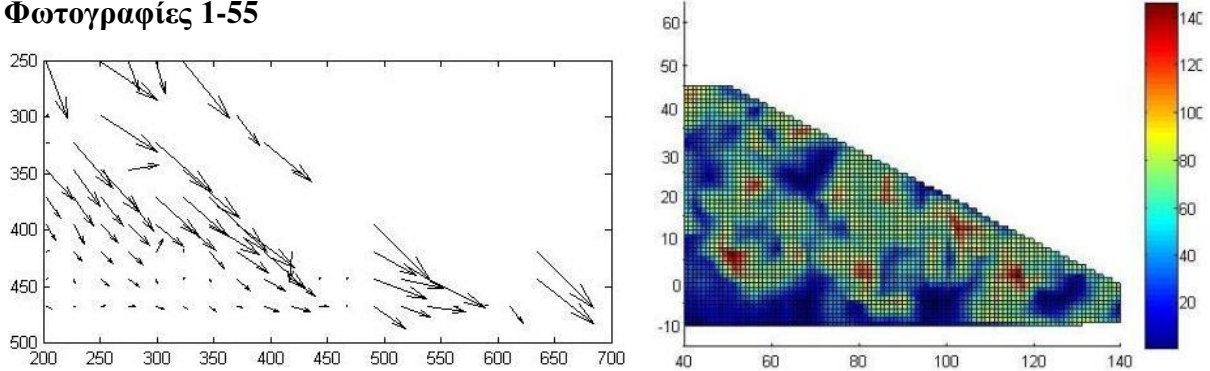
Φωτογραφίες 1-53



Φωτογραφίες 1-54



Φωτογραφίες 1-55

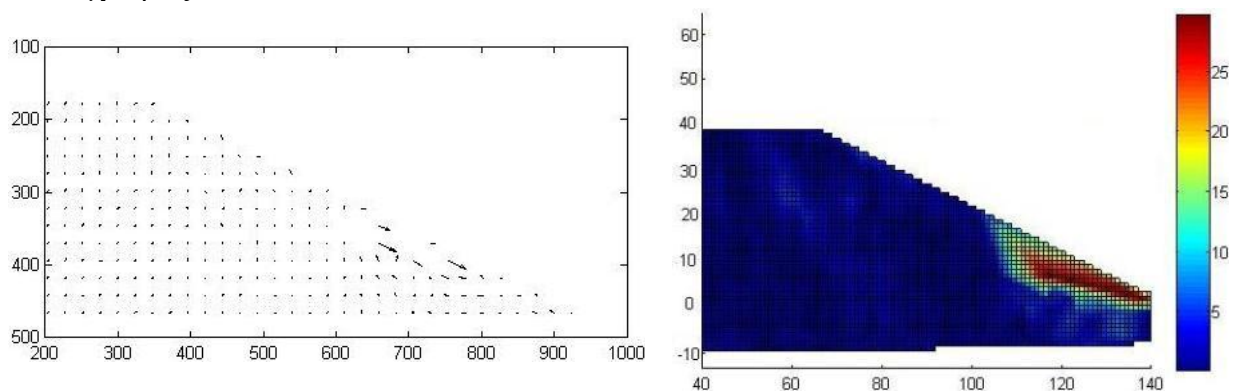


3.4.5.3: Αποτελέσματα πειράματος 5 – 2^η επεξεργασία

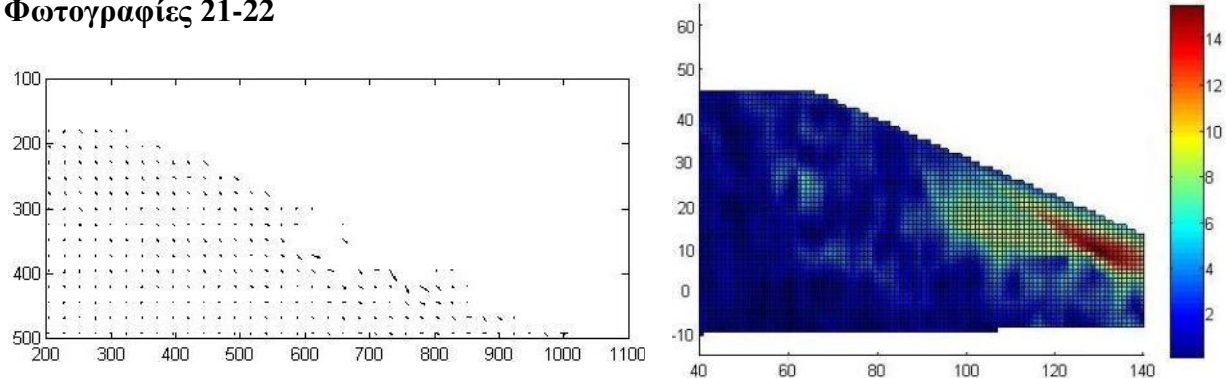
Διανύσματα μετατόπισης

Ανηγμένες παραμορφώσεις

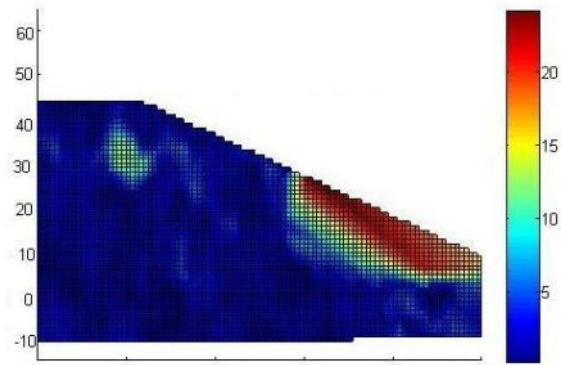
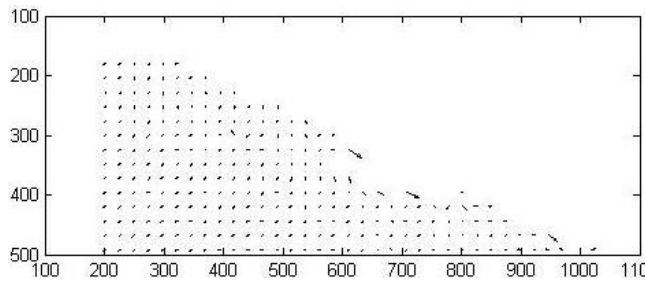
Φωτογραφίες 20-21



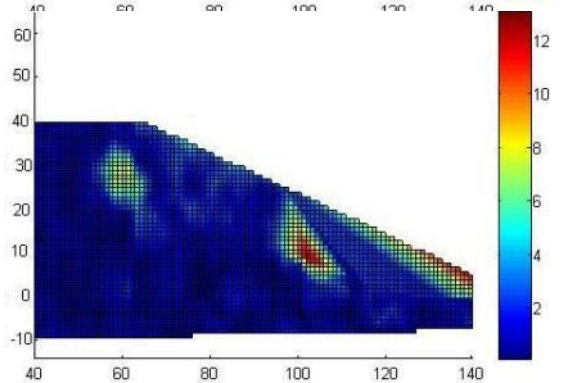
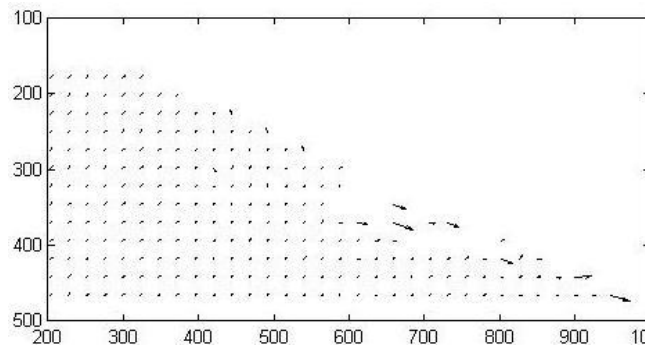
Φωτογραφίες 21-22



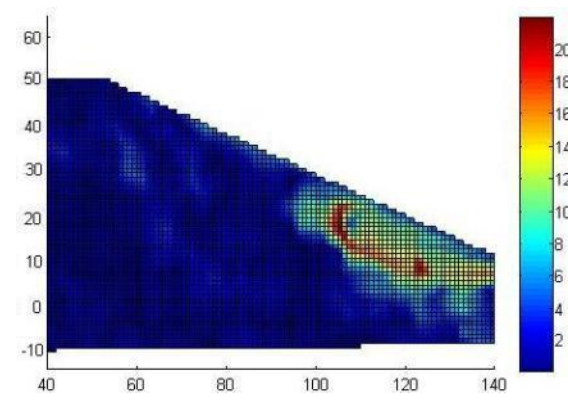
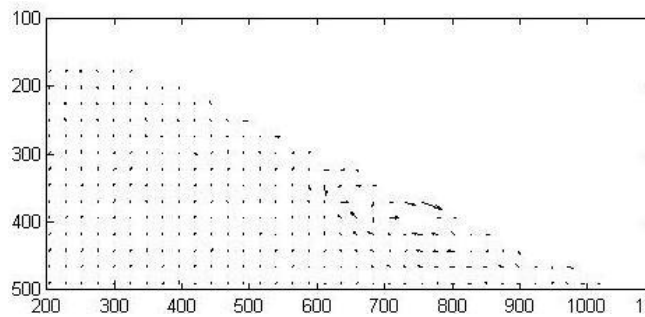
Φωτογραφίες 22-23



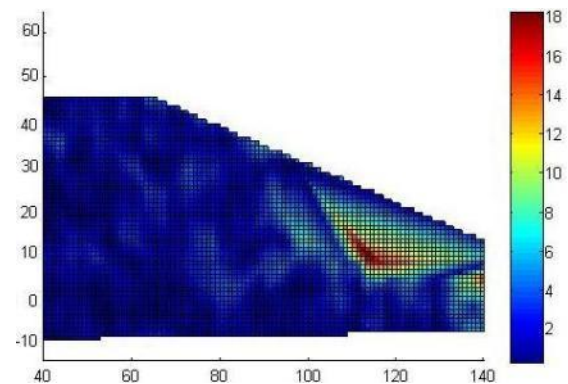
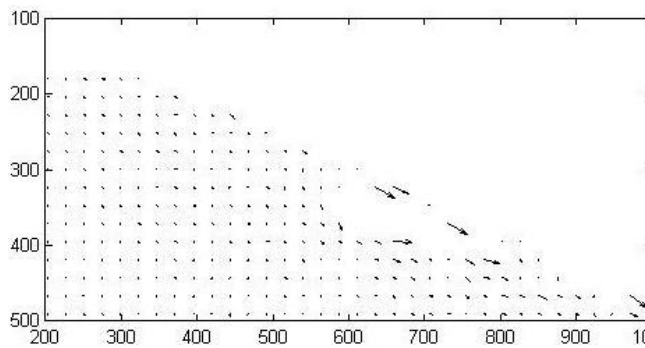
Φωτογραφίες 23-24



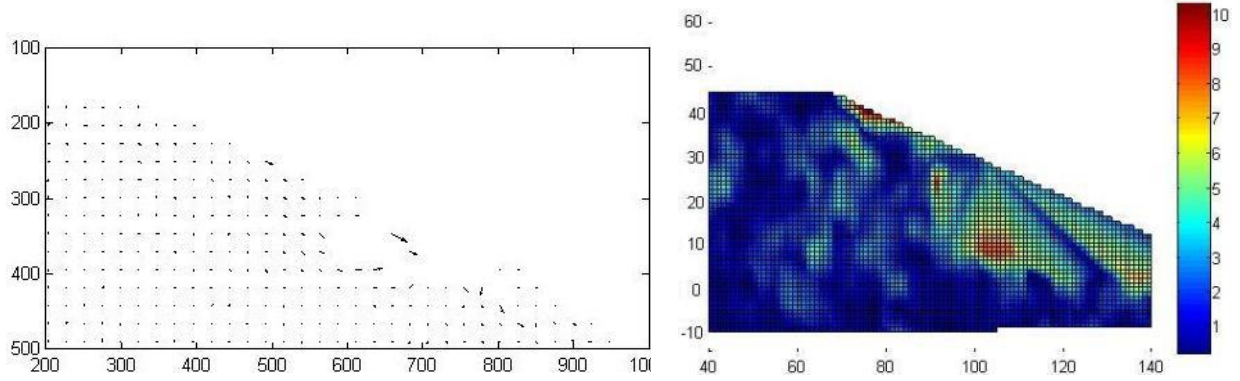
Φωτογραφίες 24-25



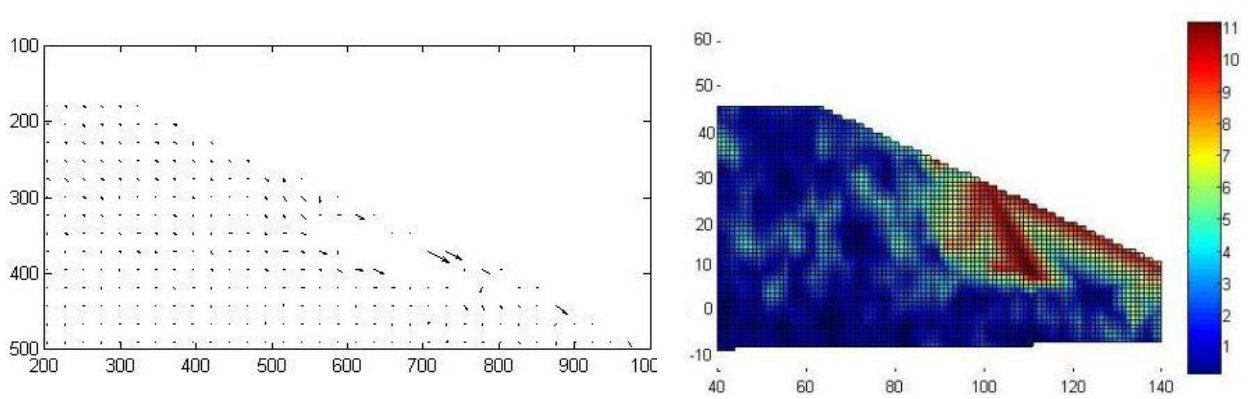
Φωτογραφίες 25-26



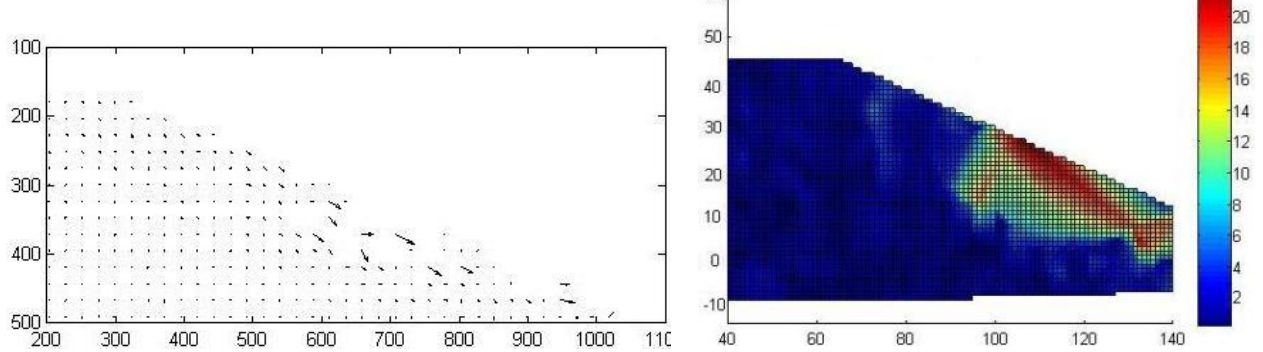
Φωτογραφίες 26-27



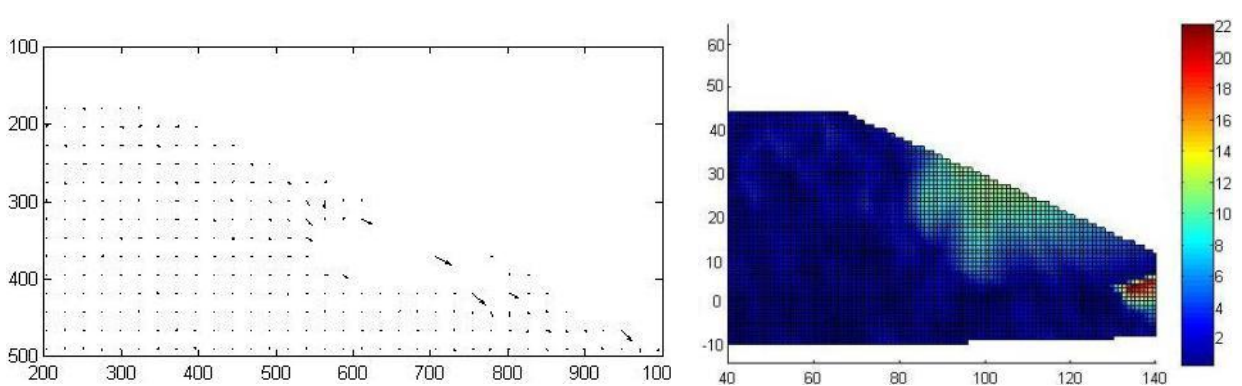
Φωτογραφίες 27-28



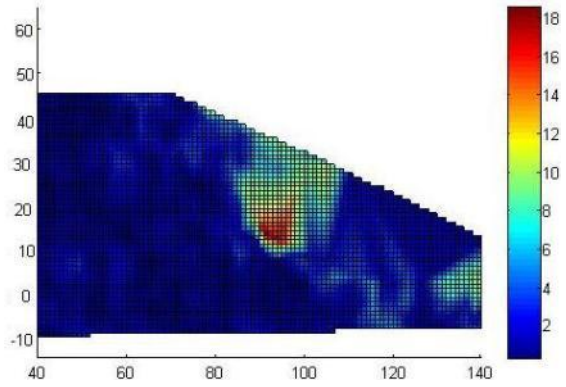
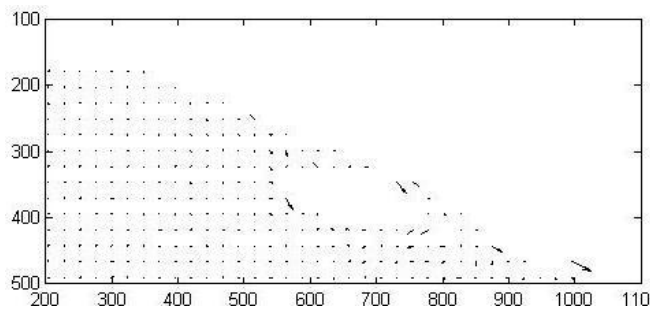
Φωτογραφίες 28-29



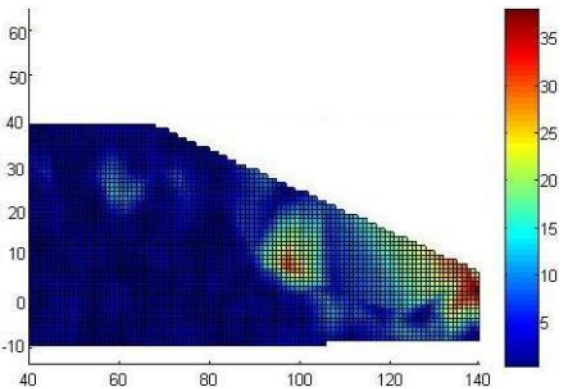
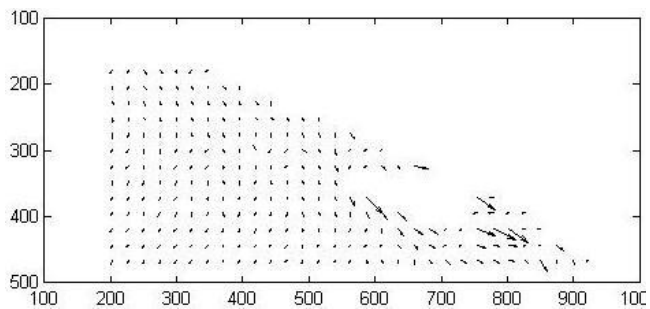
Φωτογραφίες 29-30



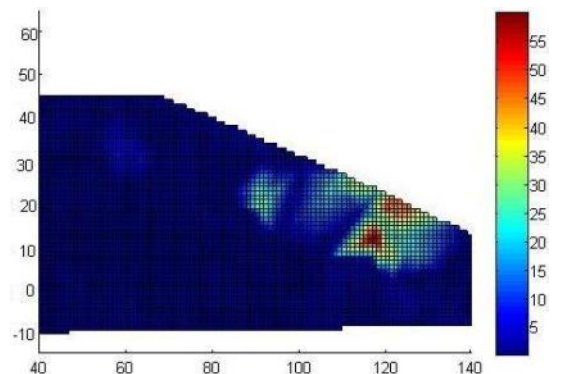
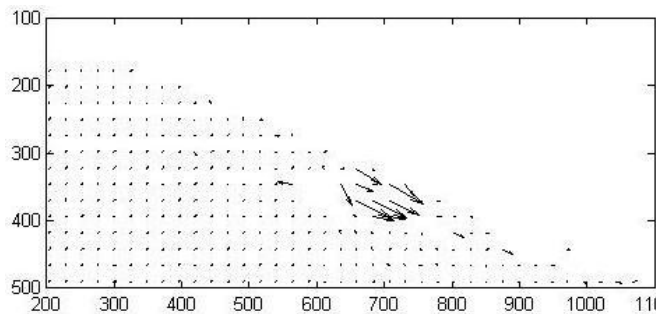
Φωτογραφίες 30-31



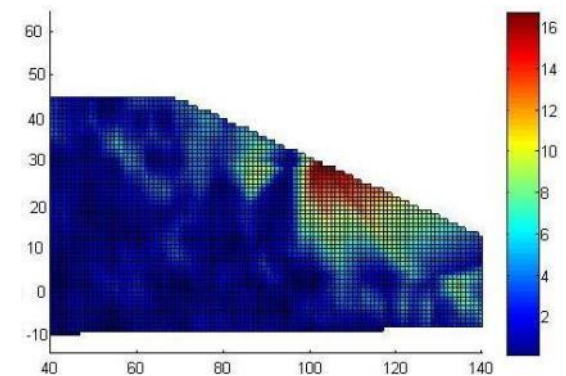
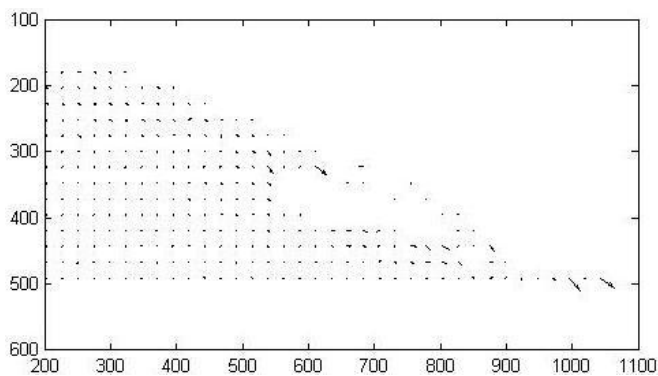
Φωτογραφίες 31-32



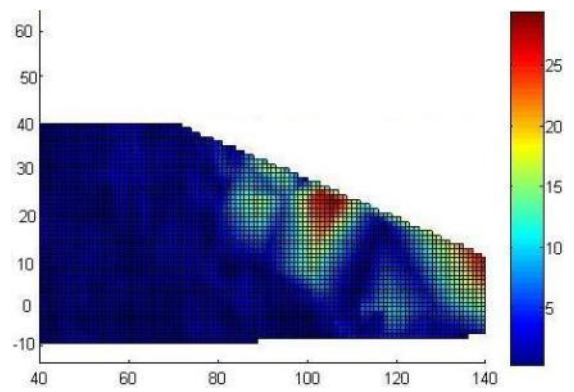
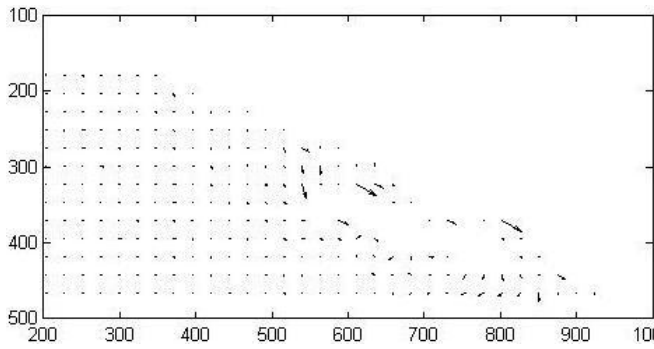
Φωτογραφίες 32-33



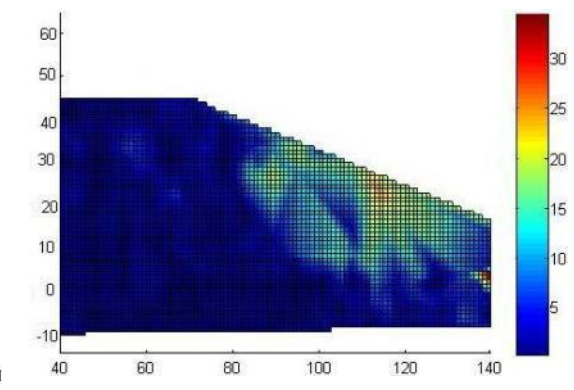
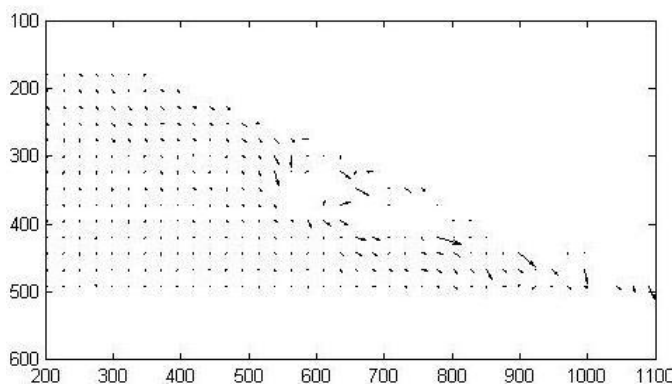
Φωτογραφίες 33-34



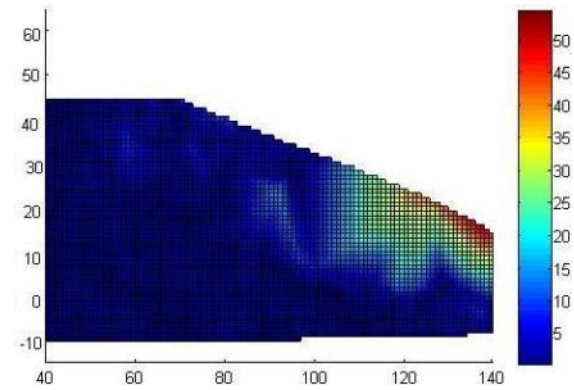
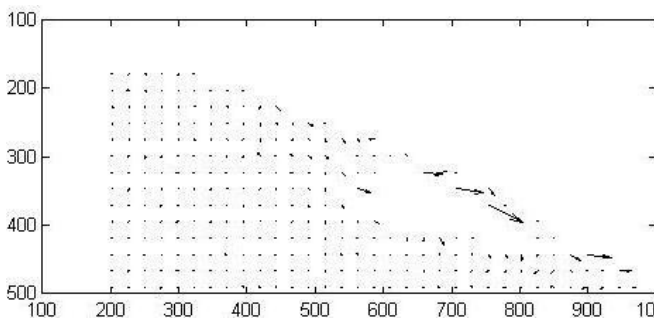
Φωτογραφίες 34-35



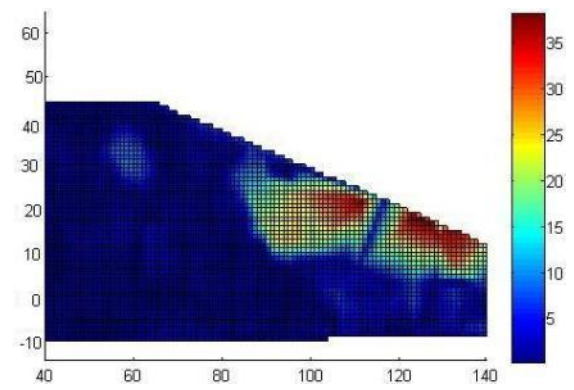
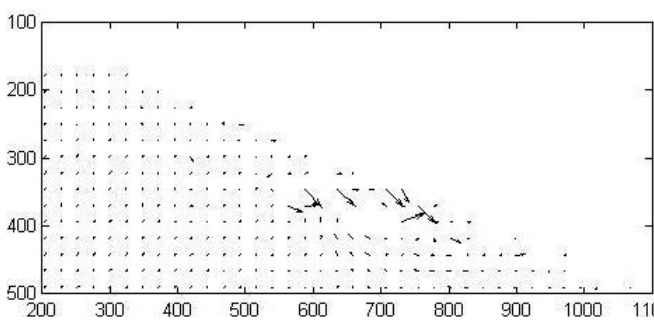
Φωτογραφίες 35-36



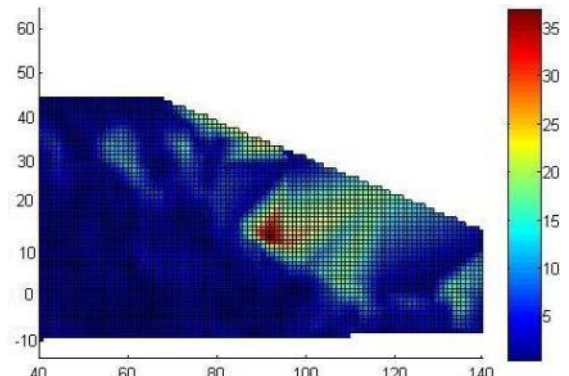
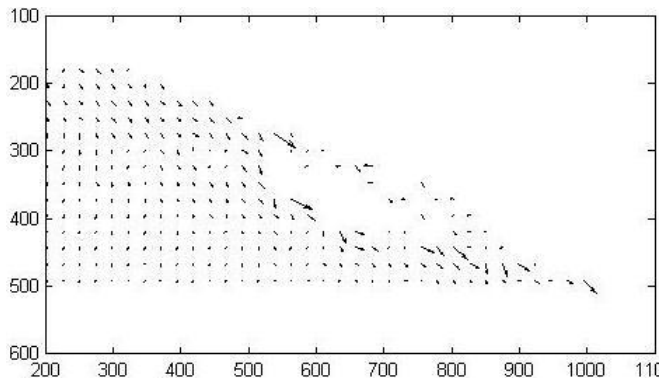
Φωτογραφίες 36-37



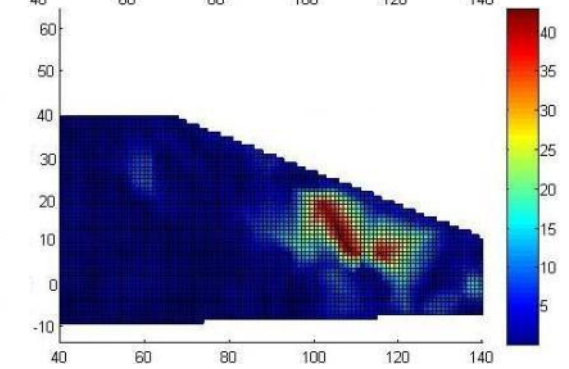
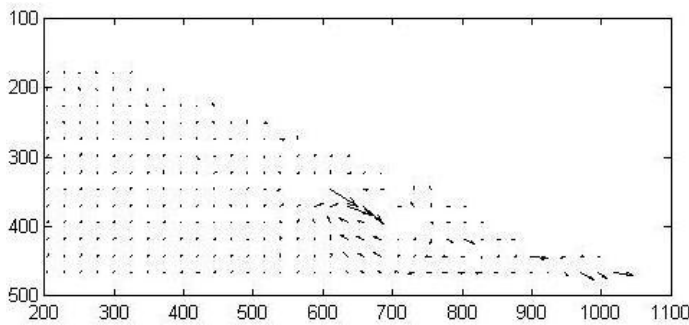
Φωτογραφίες 37-38



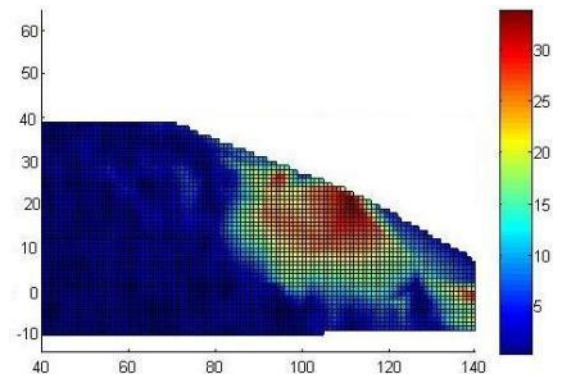
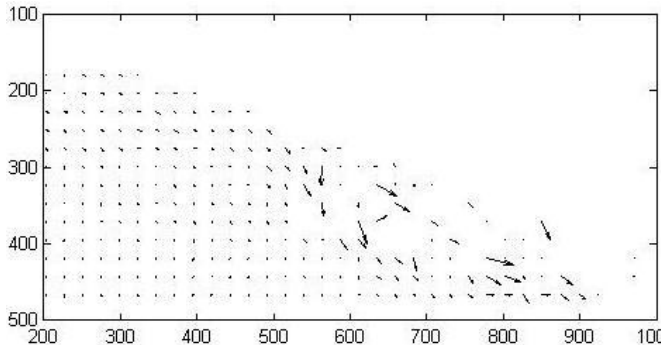
Φωτογραφίες 38-39



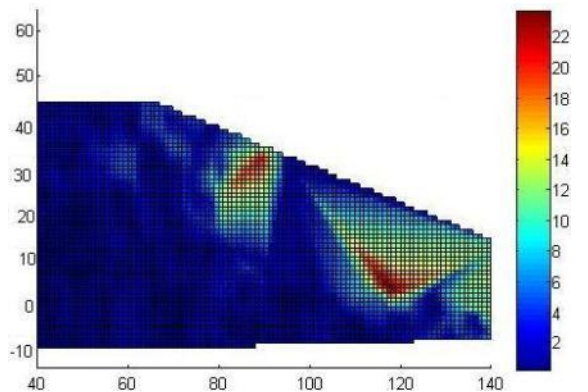
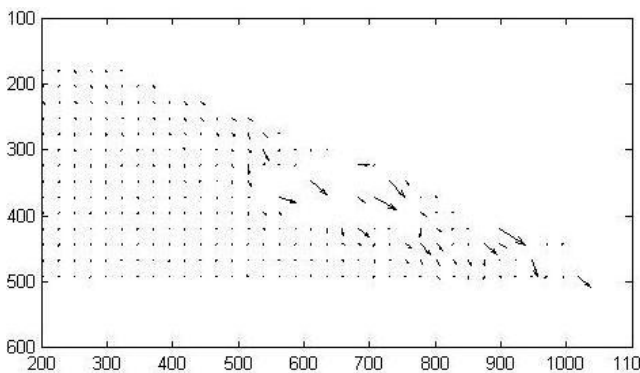
Φωτογραφίες 39-40



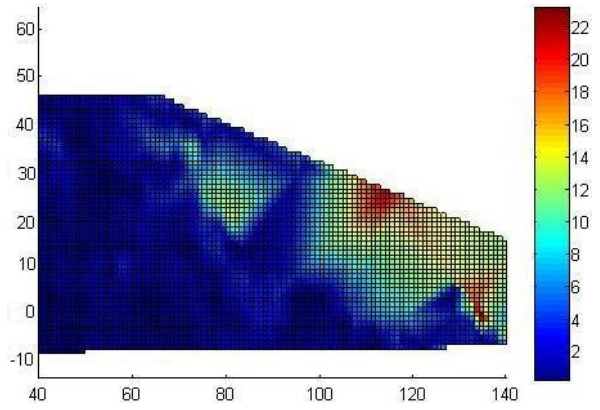
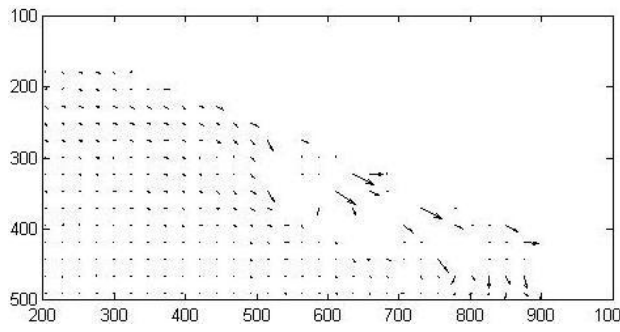
Φωτογραφίες 40-41



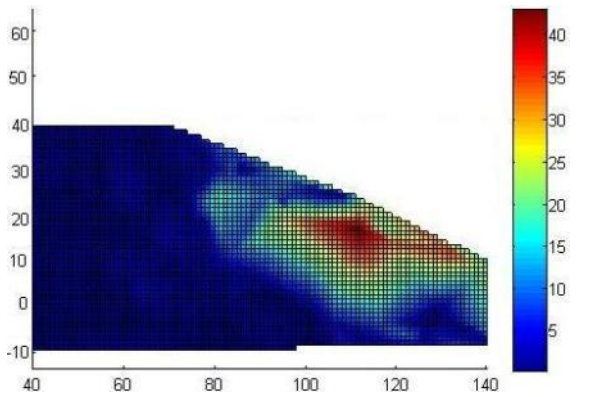
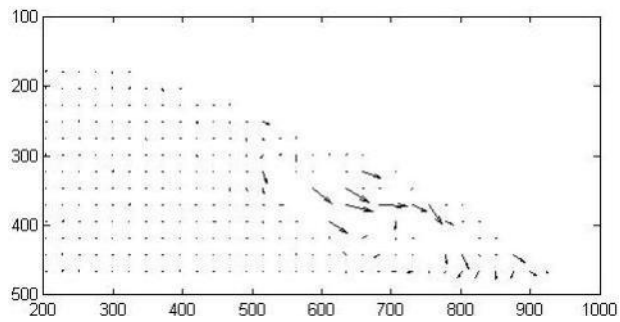
Φωτογραφίες 41-42



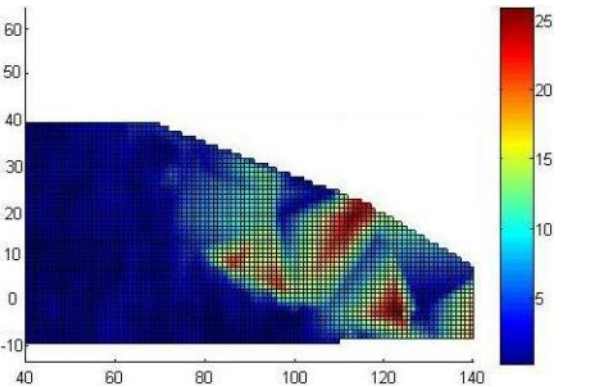
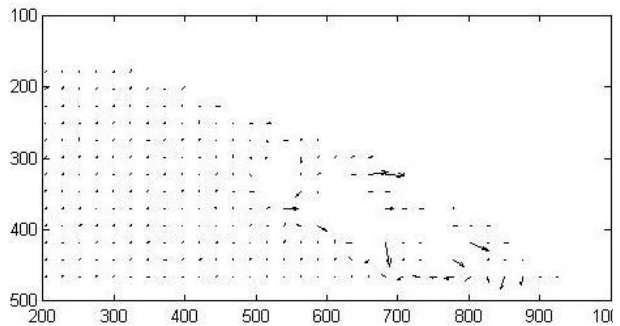
Φωτογραφίες 42-43



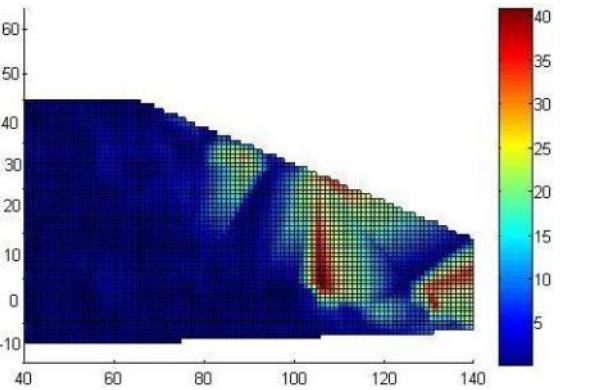
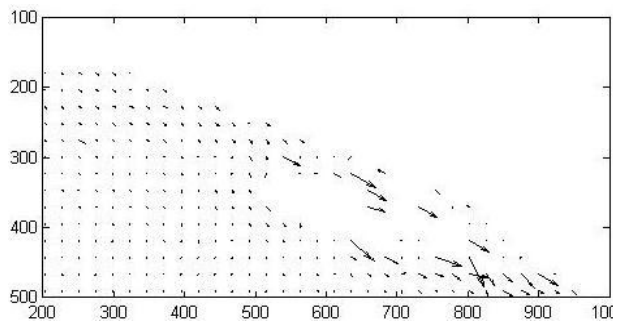
Φωτογραφίες 43-44



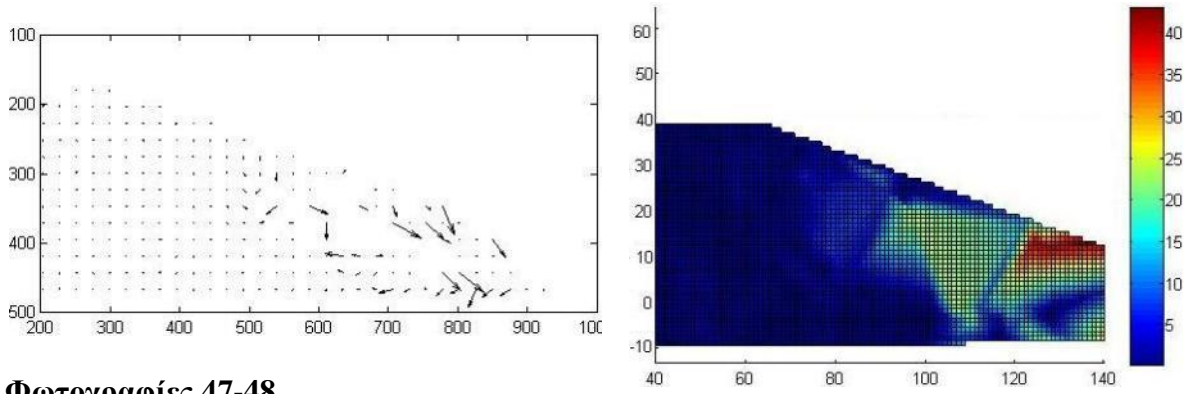
Φωτογραφίες 44-45



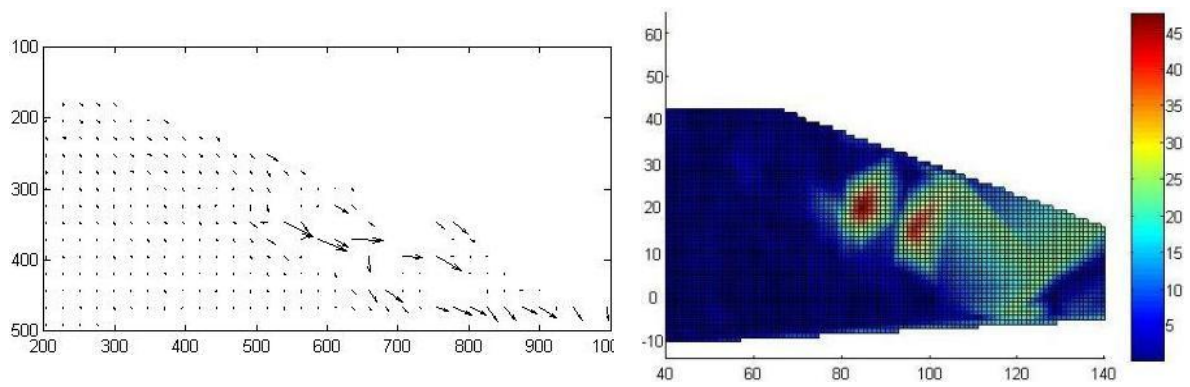
Φωτογραφίες 45-46



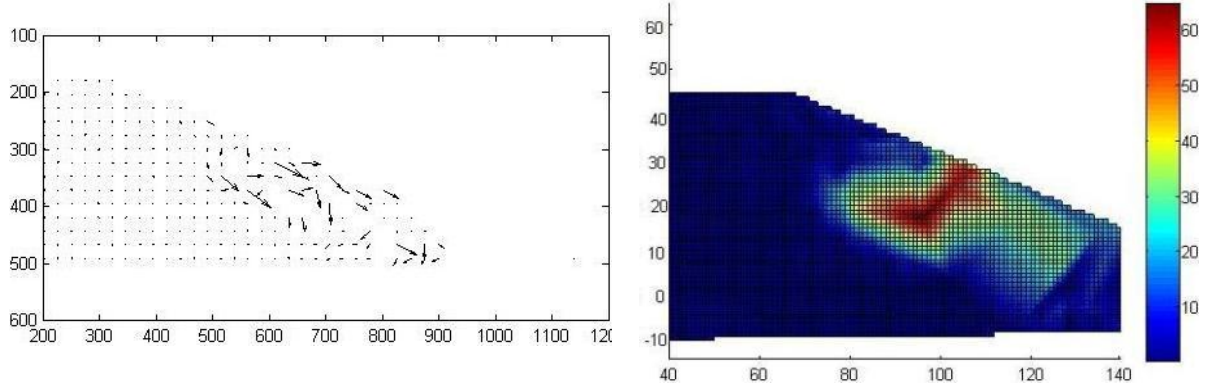
Φωτογραφίες 46-47



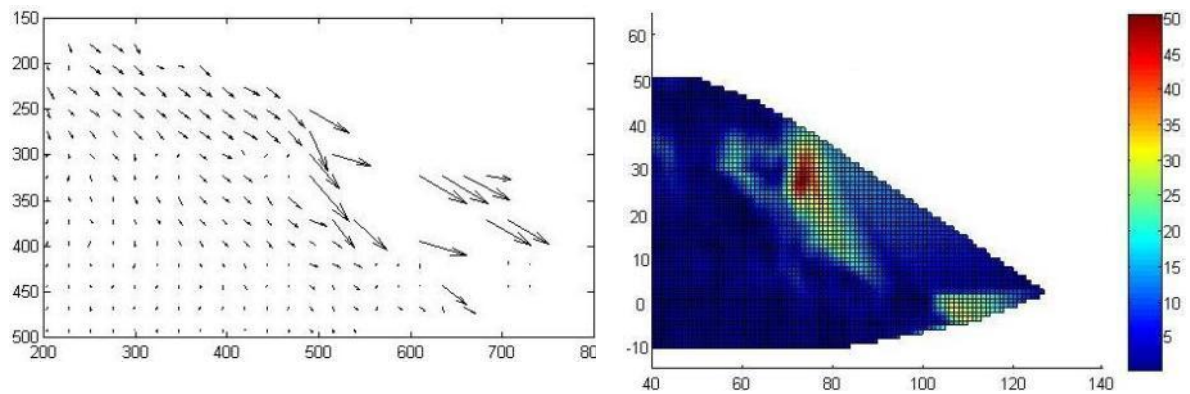
Φωτογραφίες 47-48



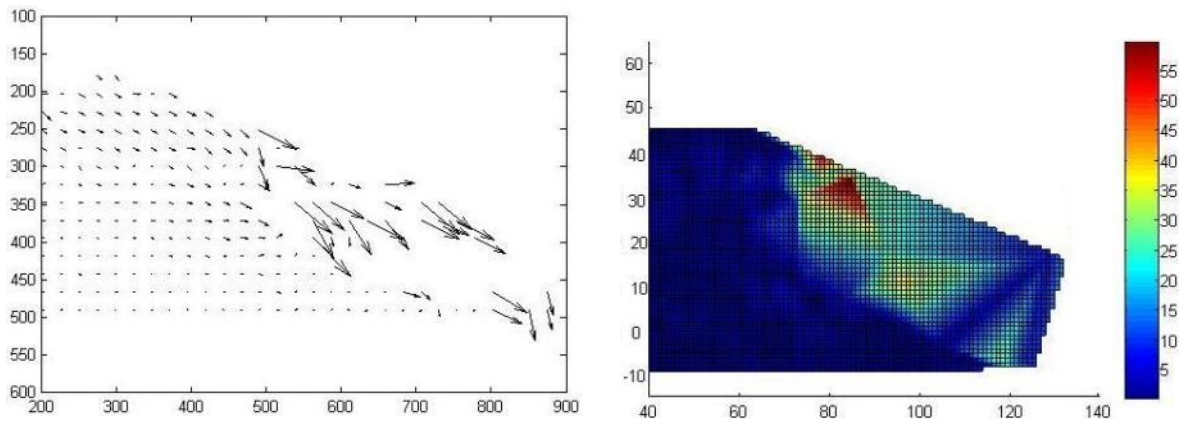
Φωτογραφίες 48-49



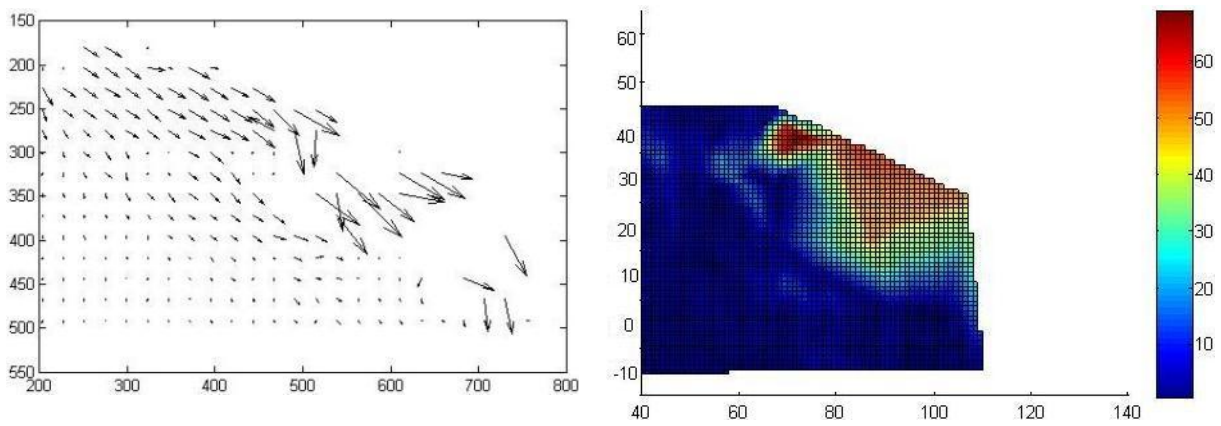
Φωτογραφίες 49-50



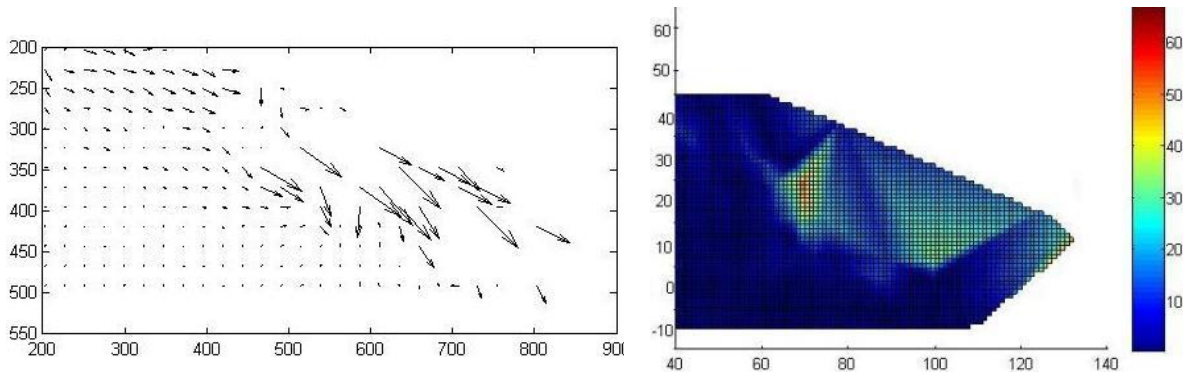
Φωτογραφίες 50-51



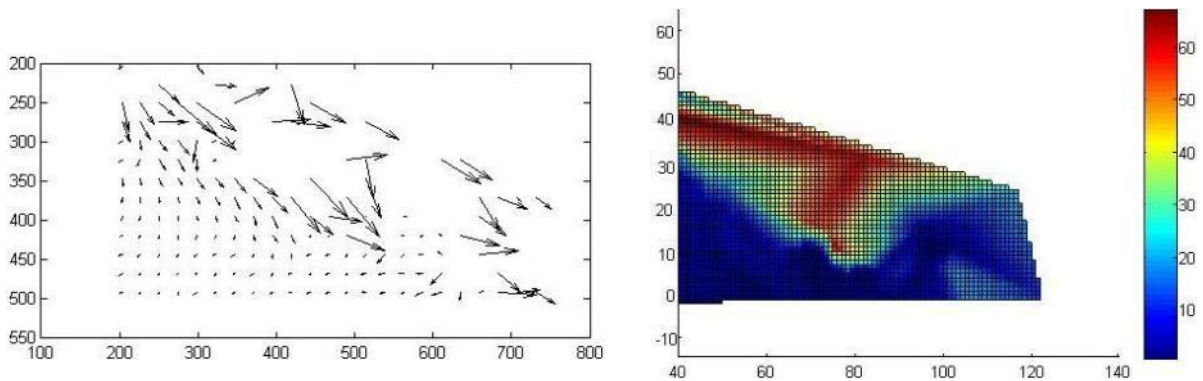
Φωτογραφίες 51-52

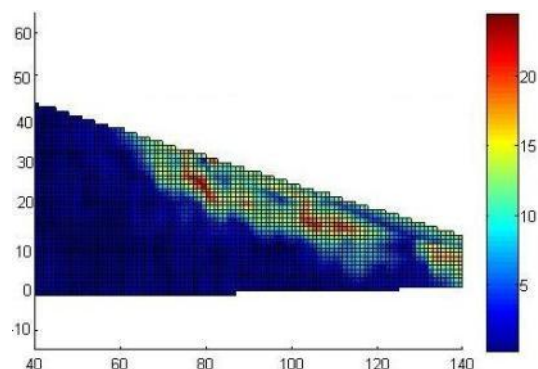
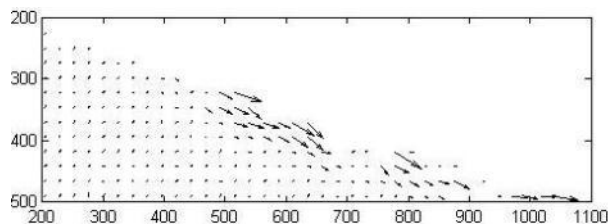


Φωτογραφίες 52-53



Φωτογραφίες 53-54



Φωτογραφίες 54-55

Όπως παρατηρείται από τη μελέτη των αποτελεσμάτων, η μέγιστη αναπτυσσόμενη τροπή στη σύγκριση των διαδοχικών φωτογραφιών μπορεί να φθάσει στο 6%, ενώ στην 2^η επεξεργασία, η μέγιστη αναπτυσσόμενη τροπή μπορεί να φθάσει στο 16%. Τα ποσοστά αυτά αναφέρονται σε ποσοστά μετακίνησης της εδαφικής μάζας, με αποτέλεσμα ο χρήστης να αντιλαμβάνεται εν μέρει και το μέγεθος της συνοχής του εδάφους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**4.1 Συμπεράσματα**

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος ανάλυσης Particle Image Velocimetry (PIV) προκειμένου να προσδιοριστούν οι παραμορφώσεις, καθώς και οι μηχανισμοί αστοχίας που αναπτύχθηκαν σε φυσικά μοντέλα πρανών κατά τη φόρτιση τους μαζί με την παρουσία νερού με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης δίνει στο χρήστη αρκετές ποιοτικές πληροφορίες προκειμένου να αντιληφθεί τους μηχανισμούς δράσης αρκετών φυσικών φαινομένων (σεισμός, διάβρωση κλπ), ενώ ταυτόχρονα ο χρήστης μπορεί να αντλήσει και ποσοτικές πληροφορίες, μέσω των φωτογραφιών που χρησιμοποίησε για την επεξεργασία των πειραμάτων, όπως είναι η κλίμακα του μοντέλου, η γωνία με την οποία στέκεται το πρανές κλπ.

Ύστερα από τη μελέτη των πειραμάτων, προκύπτει ότι η ευστάθεια των πρανών να μην εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού που χρησιμοποιείται, αλλά επιπλέον εξαρτάται και από το ποσοστό της υγρασίας με το οποίο είναι αυτό νοτισμένο. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει εύλογα από τη σύγκριση του 4^{ου} και του 5^{ου} πειράματος. Τα δύο αυτά πειράματα διεξήχθησαν υπό τις ίδιες εργαστηριακές συνθήκες (ίδιο εδαφικό υλικό, σταθερή γωνία κλίσης, εισαγωγή της ίδιας ποσότητας νερού) αλλά παρατηρείται ότι στο πείραμα 4 η μέγιστη αναπτυσσόμενη τροπή φθάνει το 10% στο στάδιο της κατάρρευσης του πρανούς, ενώ στο πείραμα 5 η τιμή της αντίστοιχης τροπής φθάνει το 16%. Αυτό λογικά οφείλεται στο γεγονός ότι πριν την έναρξη του πειράματος 5, στο πρανές είχε ασκηθεί μία επιφανειακή πίεση προκειμένου να γίνει η κλίση του επίπεδη. Η ενέργεια αυτή είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η φαινόμενη συνοχή του εδαφικού υλικού λόγω της υγρασίας, με αποτέλεσμα όταν τελειώσει η εισαγωγή του νερού στο κουτί από Plexiglas, το μέτωπο της υγρασίας να ανέβει πολύ ψηλά στην οροφή του πρανούς. Το υψηλό μέτωπο της υγρασίας προκάλεσε την αύξηση της σεισμικής έντασης προκειμένου να παρατηρηθεί αστοχία του πρανούς.

Ένα άλλο συμπέρασμα που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία ήταν πως η έλλειψη τριβής μεταξύ του εδαφικού υλικού και του Plexiglas συνέβαλλε αρνητικά στα αποτελέσματα

των πειραμάτων καθώς η αστοχία της εδαφικής μάζας αρχικά εμφανιζόταν στο μέσο του πρανούς και στη συνέχεια στα τοιχώματα του, με αποτέλεσμα η αρχική αυτή μετατόπιση να μην εντοπίζεται με τη μέθοδο PIV. Για το λόγο αυτό, τοποθετήθηκε ένα κομμάτι γεωφάσματος κατά το ύψος του πρανούς, προκειμένου να αυξηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η τριβή αυτή και να προσομοιαστούν όσο δυνατόν πιστότερα οι εργαστηριακές συνθήκες με τις συνθήκες περιβάλλοντος.

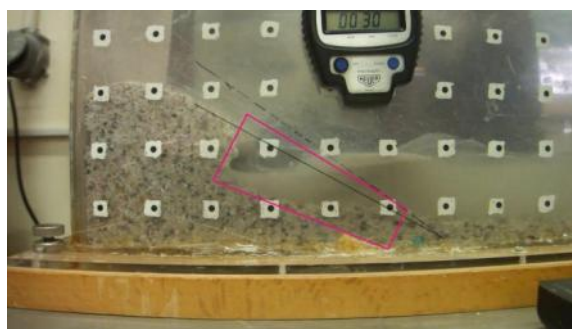
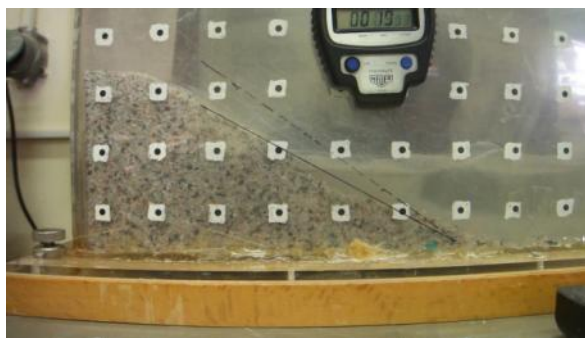
Επίσης ένα ακόμη βασικό συμπέρασμα που προέκυψε κατά την πειραματική διαδικασία αλλά και κατά το στάδιο της επεξεργασίας των πειραμάτων είναι η κατασκευή των καννάβων. Για να γίνει σωστή βαθμονόμηση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής βασική προϋπόθεση είναι οι δύο κάρναβοι που δημιουργούνται (Εικ.3.4) να αποτελούνται από κουκίδες ίσων διαστάσεων. Επιπλέον απαραίτητη προϋπόθεση για την επίλυση της βαθμονόμησης είναι η ευρεία κατανομή των σημείων του καννάβου στην περιοχή μελέτης (κατ' ελάχιστον 4 σημεία). Το συμπέρασμα αυτό προέκυψε από δοκιμές που γίνονταν στο εργαστήριο πριν τη διεξαγωγή των τελικών πειραμάτων. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα στα οποία ο τυπωμένος κάρναβος δεν κάλυπτε ευρέως το υπό μελέτη πρανός, με αποτέλεσμα να προκύπτουν μεγάλα και μη αναμενόμενα διανύσματα μετατόπισης στο στάδιο της επεξεργασία τους. Επομένως τα αποτελέσματα αυτά δεν ήταν αντιπροσωπευτικά. Με τη σύμπτυξη του τυπωμένου καννάβου, παρατηρήθηκε μία πιο ομοιόμορφη κατανομή τόσο των διανυσμάτων ροής, όσο και ολόκληρου του μοντέλου.

Τέλος, μέσω της διαδικασίας ανάλυσης των αποτελεσμάτων προέκυψε αρχικά το συμπέρασμα ότι μεγαλύτερες ανηγμένες παραμορφώσεις παρουσιάζονται κοντά στην επιφάνεια αστοχίας απ' ότι στην υπόλοιπη μετακινούμενη μάζα. Επίσης το μέγεθος των διανυσμάτων μετατόπισης που δημιουργούνται, δεν είναι απαραίτητο να συνάδουν με το μέγεθος των παραμορφώσεων που δημιουργούνται. Τα διανύσματα μετατόπισης αφορούν τις μετατοπίσεις που πραγματοποιούνται από τη μία φωτογραφία στην επόμενη, ενώ οι ανηγμένες παραμορφώσεις εκφράζουν το ποσοστό της συνολικής μετακίνησης είτε από την αρχική κατάσταση του δείγματος, είτε στα ενδιάμεσα στάδια του πειράματος.

4.2 Προβλήματα

Τα βασικά στοιχεία τα οποία καθορίζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης μεθόδου είναι αρχικά η ανάλυση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής με την οποία γίνεται η καταγραφή των πειραμάτων και στη συνέχεια ο φωτισμός κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής τους. Η φωτογραφική μηχανή και ο φωτισμός καθορίζουν την ποιότητα των φωτογραφιών και κατά συνέπεια τη διαχωριστική ικανότητα της μεθόδου. Επίσης η καταγραφή του φαινομένου πρέπει να γίνεται με τη χρήση φωτογραφιών που να μην παρουσιάζουν μεγάλα κενά μεταξύ τους, προκειμένου να μη χάνεται πληροφορία. Το αρνητικό στοιχείο του συγκεκριμένου σταδίου είναι πως οι φωτογραφίες που θα χρησιμοποιηθούν, πρέπει να επιλεγθούν από ένα τεράστιο πλήθος φωτογραφιών που προκύπτουν μετά τη μετατροπή του video σε διαδοχικές εικόνες (frames) μέσω του προγράμματος IrfanView. Επίσης πρέπει στο σημείο αυτό να αναφερθεί πως το πλήθος των φωτογραφιών είναι αντιστρόφως ανάλογο της ταχύτητας επεξεργασίας των μετρήσεων. Συνεπώς, η βέλτιστη λύση για τη μέθοδο PIV είναι εκείνη που το γεγονός μπορεί να καταγραφεί εξ' ολοκλήρου με τις λιγότερες δυνατές φωτογραφίες.

Επίσης όπως έχει προαναφερθεί, τα λανθασμένα διανύσματα μετατόπισης μπορούν να προκύψουν είτε από την επίδραση διαφόρων εξωτερικών παραγόντων (αντανάκλαση, τριβή με το κουτί από Plexiglas, κλπ), είτε από την εφαρμογή της ίδιας της μεθόδου. Για παράδειγμα στις φωτογραφίες 53-54 του πειράματος 5 παρουσιάζονται αρκετά μη συμβατά διανύσματα ροής. Η εμφάνιση αυτή, οφείλεται στο γεγονός ότι αρχικά η μέθοδος PIV δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει την περιοχή μελέτης του υπό εξέταση πρανούς. Κατά τη διάρκεια όμως της σεισμικής φόρτισης, το πρανές υποχωρεί με αποτέλεσμα τη θέση του να την καταλάβει το νερό. Επομένως όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες που ακολουθούν, μεγάλο μέρος των wild vectors οφείλονται στη διάχυση του εδάφους μέσα στο νερό.



Επιπλέον ένα άλλο πρόβλημα που προκαλεί η μέθοδος PIV είναι ότι κατά την επεξεργασία των εικόνων, ζητείται από το χρήστη να ορίσει το μέγεθος και την μεταξύ απόσταση των τμημάτων (patches) βάσει των οποίων θα γίνει ο τεμαχισμός της αρχικής εικόνας. Αρκετές φορές τυχαίνει τα τμήματα αυτά που δημιουργούνται να μη συμπίπτουν ακριβώς με τα όρια της περιοχής που έχει επιλεγεί, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κενά στην περιοχή μελέτης του πρανούς, στα οποία να μην υπάρχει καμία πληροφορία.

Επίσης η χειροκίνητη αφαίρεση των διανυσμάτων μετατόπισης που δε συμπίπτουν με την πραγματικότητα μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στα αποτελέσματα, καθώς μπορεί να αφαιρεθούν όλα τα wild vectors ή μπορεί να αφαιρεθούν κατά λάθος διανύσματα που είναι απαραίτητα για την εύρεση των τελικών αποτελεσμάτων.

Τέλος, η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την καταγραφή και τη μελέτη φυσικών φαινομένων σε φυσικά μοντέλα πρανών. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αποδεικνύουν πως η μέθοδος P.I.V μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια και αξιοπιστία για την εύρεση των πεδίων παραμορφώσεων σε γεωτεχνικά προβλήματα καθώς και σε άλλες εφαρμογές.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής βιβλιογραφία

GeoP.I.V.: Particle Image Velocimetry (P.I.V) software for use in geotechnical testing, D.J.White, W.A.Take, Cambridge University Engineering Department, 2002

Soil deformation measurement using particle image Velocimetry (P.I.V) and photogrammetry, D.J.White, W.A.Take, M.D.Bolton, 2003

Measuring soil deformation in geotechnical models using digital images and P.I.V analysis, D.J.White, W.A.Take, M.D.Bolton, Schofield Centrifuge Centre, Cambridge University Engineering Department.

Discussion on 'Application of particle image Velocimetry (P.I.V) in centrifuge testing of uniform clay', D.J.White and W.A.Take, 2005

An image- Based Deformation measurement system for the geotechnical Centrifuge, D.J.White, Mark Randolph and Bart Thompson, 2005

GeoPIV guide- version 7, Wilmer Ferney Morales Pennela, 2005

A deformation measurement system for geotechnical testing based on digital imaging, close-range photogrammetry, and PIV image analysis, D.J.White, W.A.Take, M.D.Bolton & S.E.Munachen, University of Cambridge

Ελληνική βιβλιογραφία

Πειραματικός προσδιορισμός ευστάθειας πρανών, Αθανασόπουλος Π., Μαργαρίτης Γ, Ε.Μ.Π.2004

Υπολογισμός παραμορφώσεων μοντέλων οπλισμένων πρανών σε φυγοκεντριστή μέσω ψηφιακών φωτογραφιών και P.I.V ανάλυση, Καπογιάννη Ε, Laue J, Σακελλαρίου Μ. 2005

Παρακολούθηση Δυναμικής Συμπεριφοράς Στοιχείων Κατασκευών με Οπτικές και Ηλεκτρονικές Διατάξεις, Πατακιά, Στρατάκου, Καπογιάννη, Σακελλαρίου.

Στατικά και σεισμικά πεδία παραμορφώσεων σε φυσικά πρανή με τη μέθοδο P.I.V, Καββαδά Όλγα, Ε.Μ.Π, 2010

