



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**«ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ, ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ
ΠΡΑΝΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ
ΦΟΡΤΙΣΗΣ»**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΛΕΝΗΣ ΚΑΠΟΓΙΑΝΝΗ

Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Μ. ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**«Αναλυτική, Πειραματική και Υπολογιστική Διερεύνηση
Οπλισμένων Πρανών Έναντι Στατικής και Σεισμικής
Φόρτισης»**

**«Analytical, Experimental and Computational Investigation of
Reinforced Slopes due to Static and Seismic Loading»**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΛΕΝΗΣ ΚΑΠΟΓΙΑΝΝΗ

Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Καθηγητής Σ.Π.Μ. Πανεπιστημίου Πατρών)

ΑΤΜΑΤΖΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ (Καθηγητής Σ.Π.Μ. Πανεπιστημίου Πατρών)

ΓΚΑΖΕΤΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Καθηγητής Σ.Π.Μ. Ε.Μ.Π.)

ΚΑΛΟΓΕΡΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ (Δ/ντής Ερευνών Γεωδ. Ινστιτούτου– Μέλος Τριμελούς)

ΚΑΤΤΗΣ ΜΑΡΙΝΟΣ (Αν. Καθηγητής ΣΑΤΜ Ε.Μ.Π.)

ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ ΜΙΧΑΗΛ (Καθηγητής ΣΑΤΜ Ε.Μ.Π. -Επιβλέπων)

ΨΥΧΑΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ (Αν. Καθηγητής Σ.Π.Μ. Ε.Μ.Π - Μέλος Τριμελούς)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε κατά την διάρκεια της θητείας μου ως Υποψήφια Διδάκτωρ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου την χρονική περίοδο 2006-2013, υπό την επίβλεψη και συστηματική καθοδήγηση του Καθηγητή κ. Μ. Σακελλαρίου, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για τις πολύτιμες συμβουλές και κατευθύνσεις, που συνέβαλλαν ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για όλα όσα δεν εντάσσονται στα πλαίσια της έρευνας και αποκόμισα από τον ίδιο.

Η Διδακτορική Διατριβή αποτελείται από το Μέρος Α' και Β' και περιλαμβάνει την αναλυτική, πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση οπλισμένων πρανών με απλή και σύνθετη γεωμετρία.

Ειδικότερα, το Μέρος Α' αφορά την αναλυτική διερεύνηση των οπλισμένων πρανών με σύνθετη γεωμετρία και πραγματοποιήθηκε με την στήριξη του “Geosynthetic Institute-GSI”, Ινστιτούτου που εδρεύει στις Η.Π.Α., ενδιαφερόμενο για θέματα Γεωσυνθετικών, στα πλαίσια παγκόσμιας προκήρυξης-διαγωνισμού που πραγματοποιήθηκε για την ενίσχυση νέων ερευνητών που εκπονούν Διδακτορική Διατριβή σε θέματα γεωσυνθετικών (GSI-Award). Δύο υποτροφίες δόθηκαν παγκοσμίως σε νέους ερευνητές εκτός Η.Π.Α. και τρεις εντός Η.Π.Α. Η έρευνα υποστηρίχθηκε για τρία συνεχόμενα χρόνια (2008-2011), με ξεχωριστή υποβολή υποψηφιότητας και κρίση ανά έτος. Η συνέχιση της υποτροφίας για τρία συνεχόμενα χρόνια εγκρίθηκε σε δύο από τους πέντε υποψηφίους. Η υποστήριξη του “Geosynthetic Institute” ήταν πολύ σημαντική και θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον Dr. Robert M. Koerner (Emeritus Professor, Drexel University) για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Ευχαριστώ επίσης την Ελληνική Εταιρεία Γεωσυνθετικών (Hellenic Geosynthetics Society), η οποία κατά το έτος 2008 ενέκρινε την πρότασή μου ως την επίσημη Ελληνική στον διαγωνισμό.

Το Μέρος Β' αφορά την πειραματική διερεύνηση των οπλισμένων πρανών η οποία πραγματοποιήθηκε στον γεωτεχνικό φυγοκεντρικό του ETH Zürich της Ελβετίας, με την στήριξη (υποτροφία) της Ελβετικής Κυβέρνησης (Budesstipendium) κατά την χρονική περίοδο 2008-2009, με συμμετοχή μου ως «επισκέπτρια Υποψήφια Διδάκτωρ» στην Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του ETH Zürich. Κατά την χρονική περίοδο αυτή

επιβλέποντες Καθηγητές της Διδακτορικής Διατριβής ήταν οι Prof. Sarah M. Springman και ο Dr. Jan Laue, σε συνεργασία με τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Μ. Σακελλαρίου, τους οποίους και ευχαριστώ θερμά για την φιλοξενία, την καθοδήγηση, και την δυνατότητα που μου έδωσαν να συμμετέχω σε ένα άριστα οργανωμένο και σύγχρονο εργαστήριο. Η συνεργασία μαζί τους έως και σήμερα, συνεχίζει να μου προσφέρει πολλά. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του “Institut für Geotechnik” του ETH Zürich: Διδάκτορες, Ερευνητές και Τεχνικό Προσωπικό.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τα δύο μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής τους: κ. Ι. Ψυχάρη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ και Δρ. Ι. Καλογερά, Διευθυντή Ερευνών του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπίου Αθηνών, για τις πολύτιμες συμβουλές, την συνεργασία και το ενδιαφέρον τους, κατά την διάρκεια εκπόνησης της Διδακτορικής Διατριβής, καθώς και κατά την συγγραφή της. Ευχαριστώ επίσης τους συναδέλφους, Α. Καπόγιαννη (Πολιτικό Μηχανικό, ΕΜΠ), Ι. Στρατάκο (Δρ. Μηχανικό ΕΜΠ) και Ν. Καραλή (Υ.Δ. ΕΜΠ), τα μέλη του Εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής και Τεχνικών Έργων του ΕΜΠ για την βοήθειά τους σε διάφορους τομείς καθώς και τον Δρ. Μηχανικό Β. Αστρεϊνίδη για την πολύτιμη βοήθειά του με τις οπτικές ίνες. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον σύζυγό μου, τους γονείς και τα αδέρφια μου για την συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και τις δύο κόρες μου Έμμα και Αριάνα, στις οποίες και αφιερώνω την Διατριβή αυτή.

Στις κόρες μου,
Έμμα & Αριάνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής μελετήθηκε η συμπεριφορά οπλισμένων πρανών με απλή και σύνθετη γεωμετρία, έναντι στατικής και σεισμικής φόρτισης. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε αναλυτική, πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση οπλισμένων πρανών, καθώς και σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων, με στόχο να προκύψει μια ολοκληρωμένη εικόνα τόσο για τις υπό μελέτη κατασκευές, όσο και για τις ίδιες τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν.

Κατά την αναλυτική διερεύνηση (*Μέρος Α'*) αναπτύχθηκε νέα αναλυτική λύση, η οποία και ενσωματώθηκε σε ολοκληρωμένη μεθοδολογία, που δημιουργήθηκε για τον σχεδιασμό και την μελέτη ενιαίων οπλισμένων πρανών καθώς και πρανών με αναβαθμούς, έναντι στατικών και σεισμικών φορτίσεων. Βάσει της αναλυτικής λύσης και της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, δημιουργήθηκε λογισμικό, 5000 γραμμών, σε γλώσσα προγραμματισμού Embarcadero Delphi, με στόχο την ολοκληρωμένη μελέτη των πρανών έναντι στατικών και σεισμικών δράσεων. Τα αναλυτικά μοντέλα που μελετήθηκαν μέσω του λογισμικού που αναπτύχθηκε, συγκρίθηκαν με αντίστοιχα υπολογιστικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν με γεωτεχνικά προγράμματα του εμπορίου. Τα αποτελέσματα επισημαίνουν τα πλεονεκτήματα των βαθμιδωτών έναντι των ενιαίων οπλισμένων πρανών, καθώς και την αποτελεσματική και γρήγορη εφαρμογή της λύσης κλειστής μορφής (αναλυτική λύση) και του λογισμικού που δημιουργήθηκαν. Τέλος αναδεικνύεται η δυνατότητα παραμετρικών αναλύσεων, μεταβάλλοντας τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των βαθμιδωτών και ενιαίων οπλισμένων πρανών.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση (*Μέρος Β'*), όπου και κατασκευάστηκαν συνολικά 16 μοντέλα οπλισμένων πρανών υπό κλίμακα 1/n, τα οποία και τοποθετήθηκαν στον διαμέτρου 2.2 m γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETH Zurich. Στα μοντέλα ενσωματώθηκαν με επιτυχία αισθητήρες οπτικών ινών για πρώτη φορά (2008-2009), εισάγοντας μία νέα μετρητική διάταξη για την καταγραφή τροπών σε γεωτεχνικά μοντέλα τα οποία μελετώνται μέσω της τεχνολογίας των γεωτεχνικών φυγοκεντριστών. Επίσης, εφαρμόστηκε η οπτική μέθοδος παρακολούθησης Particle Image Velocimetry Analysis (PIV Analysis). Τέλος, πραγματοποιήθηκε υπολογιστική διερεύνηση οπλισμένων πρανών σε κλίμακα 1:1 και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα των φυσικών μοντέλων υπό κλίμακα 1:n. Τα

αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης σχετίζονται με την δημιουργία προτάσεων για την κατασκευή και διερεύνηση πειραματικών μοντέλων οπλισμένων πρανών σε γεωτεχνικό φυγοκεντριστή με την χρήση των ως άνω πειραματικών διατάξεων, ενώ επίσης προέκυψαν ποικίλα και χρήσιμα συμπεράσματα από γεωτεχνικής σκοπιάς, σχετικά με την συμπεριφορά του εδάφους και των στρώσεων οπλισμού των πρανών, σε διάφορες θέσεις των μοντέλων, κατά την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή. Τέλος σημαντική ήταν και η δυνατότητα διερεύνησης σε βάθος της αλληλεπίδρασης μεταξύ εδάφους και οπλισμού, συνδυάζοντας τα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα.

ABSTRACT

The purpose of the PhD Thesis is to investigate the behaviour of reinforced slopes with simple and composite geometry, due to static and seismic loading. In particular, analytical, experimental and computational methods were applied and a comparison of these methods was made, providing a comprehensive understating of reinforced slopes and methods itself.

Concerning the analytical investigation (*Part A*), a new analytical solution was developed and incorporated to a methodology that was created for the design and investigation of one step and multi step reinforces slopes due to static and seismic loading. A computer programme was created using IDE Embarcadero Delphi, based on the analytical solution and the methodology that were developed. The results of the analytical solution, the methodology and the software that were developed, were compared to correspondent results of computational models that were created with geotechnical professional software tools. The results point out the advantages of multi step over one step reinforced slopes and the effective implementation of the closed form solution (analytical solution) and of the software that were created. Finally, the possibility of parametric studies via the alteration of the mechanical and geometrical characteristics of the slope models was indicated.

Concerning the experimental analysis (*Part B*), 16 reinforced slope models were build in model scale $1/n$ and tested in the 2.2 m diameter drum geotechnical centrifuge of ETH Zurich. Optical fibre sensors were successfully incorporated inside the models for the first time, introducing a new measuring technique for recording strains inside geotechnical models that are investigated via the centrifuge technology. Additionally, Partical Image Velocimetry Analysis (PIV Analysis) was performed and the results were compared to the optical fibre measurements. Finally, computational models were created via a finite element stress analysis code, in scale 1:1 and the results were compared to correspondent experimental ones in model scale $1:n$. Suggestions that were made concerning the construction and investigation of experimental reinforced slope models inside the geotechnical centrifuge with the use of the above measuring techniques. Additionally, various useful results derived concerning the behaviour of soil and reinforcement during the increase of the g-level. Finally, a comprehensive investigation of the soil-

reinforcement interaction was successfully made, combining experimental and computational results.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
1.1 Εισαγωγή στην έννοια της οπλισμένης γης.....	3
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	5
1.3 Αρχή λειτουργίας οπλισμένης γης.....	8
1.4 Γεωσυνθετικά υλικά.....	11
1.5 Μέθοδοι διερεύνησης και σχεδιασμού οπλισμένων πρανών.....	18
1.6 Στόχος Διδακτορικής Διατριβής και περιληπτική περιγραφή κεφαλαίων.....	19
Μέρος Α΄	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	29
2.1 Εισαγωγή στην αναλυτική διερεύνηση οπλισμένων πρανών.....	31
2.2 Μέθοδοι αναλυτικής διερεύνησης οπλισμένων πρανών.....	32
2.3 Μέθοδοι σεισμικού ελέγχου.....	34
2.4 Μέθοδοι αναλυτικής διερεύνησης που εφαρμόζονται στην παρούσα έρευνα.....	37
2.4.1 Κινηματικό Θεώρημα Οριακής Ανάλυσης.....	37
2.4.2 Σχέσεις Απόσβεσης.....	38
2.4.3 Κατανομή Οπλισμού.....	40
2.4.4 Μηχανισμοί Αστοχίας.....	42
2.4.5 Εκτίμηση μόνιμης μετατόπισης.....	45
2.5 Ανασκόπηση Κεφαλαίου και συμπεράσματα.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	47
3.1 Προτεινόμενη νέα αναλυτική λύση για τον σχεδιασμό και τον έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.....	49
3.2 Παρουσίαση ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για τον σχεδιασμό και έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών.....	58
3.3 Σχεδιασμός και ανάπτυξη λογισμικού σε κώδικα Embarcadero Delphi.....	61
3.3.1 Σχεδιασμός λογισμικού και λειτουργίες.....	61
3.3.2 Παρουσίαση κώδικα λογισμικού.....	67
3.4 Σχόλια και συμπεράσματα.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	79
4.1 Περίληψη Κεφαλαίου.....	81
4.2 Παραδείγματα εκτίμησης μέγιστης ανηγμένης αναμενόμενης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης.....	81
4.3 Παραδείγματα αντισεισμικού σχεδιασμού οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.....	84

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

4.4	Παραδείγματα στατικής ανάλυσης οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.....	89
4.5	Παραδείγματα εύρεσης κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.....	92
4.6	Παραδείγματα υπολογισμού της σεισμικής τρωτότητας μέσω του υπολογισμού της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης.	94
4.7	Μέθοδοι ανάλυσης υπολογιστικών μοντέλων.....	96
4.7.1	Ανάλυση Σύμφωνα με την Μέθοδο των Λωρίδων.	97
4.7.2	Ανάλυση με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	105
4.8	Συμπεράσματα Κεφαλαίου και προτάσεις.	112
Μέρος Β'		
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 119		
5.1	Εισαγωγή στην πειραματική διερεύνηση γεωτεχνικών κατασκευών.....	121
5.2	Βασικές αρχές λειτουργίας των γεωτεχνικών φυγοκεντριστών	125
5.3	Νόμοι ομοιότητας μοντέλων.	129
5.3.1	Η αρχή της ομοιογένειας και το θεώρημα π του Buckingham	129
5.3.2	Νόμοι ομοιότητας σε γεωτεχνικούς φυγοκεντριστές.....	134
5.4	Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	139
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 141		
6.1	Εισαγωγή στις μετρητικές διατάξεις και μεθόδους.	143
6.2	Μετρητικές μέθοδοι παρούσας έρευνας.....	148
6.3	Υπολογισμός «γραμμικών» τροπών με τη χρήση αισθητήρων οπτικών ινών.	148
6.3.1	Λειτουργία και τύποι αισθητήρων	151
6.3.2	Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών σε τεχνικά έργα.	154
6.3.3	Εφαρμογή αισθητήρων οπτικών ινών σε οπλισμένα πρανά κατά την φόρτισή τους σε γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.....	164
6.4	Υπολογισμός διατμητικών τροπών με την εφαρμογή της μεθόδου Particle Imaging Velocimetry (PIV Analysis).	164
6.4.1	Βασικές αρχές μεθόδου PIV.	165
6.4.2	Αλγόριθμος GeoPIV.	169
6.5	Συμπεράσματα Κεφαλαίου και προτάσεις	180
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 183		
7.1	Κατασκευή μοντέλων οπλισμένων πρανών.	185
7.2	Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά εδάφους και οπλισμών.	192
7.3	Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	205
7.4	Εφαρμογή αισθητήρων οπτικών ινών σε οπλισμένα πρανά.....	211
7.5	Εφαρμογή μεθοδολογίας GeoPIV στα οπλισμένα πρανά.	218

7.6	Συμπεράσματα Κεφαλαίου και προτάσεις.	227
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8		229
8.1	Περιγραφή μεθοδολογίας υλοποίησης πειραμάτων και φάσεις φορτίσεων.	231
8.2	Περιγραφή πειραμάτων έναντι στατικής φόρτισης.	235
8.3	Αποτελέσματα μετρήσεων.....	246
8.3.1	Μετρήσεις με Αισθητήρες Οπτικών ινών.	247
8.3.2	Τροπές μετρούμενες με την μέθοδο PIV.	259
8.4	Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	277
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9		279
9.1	Σύγκριση και αξιολόγηση μετρήσεων οπτικών ινών.	281
9.2	Σύγκριση και αξιολόγηση με την μέθοδο GeoPIV.....	293
9.3	Θέσεις αισθητήρων οπτικών ινών σε σχήματα τροπών, δημιουργούμενα μέσω ανάλυσης PIV.	296
9.4	Αναγωγή πειραματικών μοντέλων σε μοντέλα υπό κλίμακα 1:1 και υπολογιστική διερεύνηση.....	300
9.4.1	Υπολογιστικά μοντέλα οπλισμένων πρανών- ανάλυση με το Slide.....	303
9.4.2	Υπολογιστικά μοντέλα οπλισμένων πρανών με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Phase ²).	307
9.4.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογιστικής διερεύνησης με αντίστοιχα αποτελέσματα πειραματικής διερεύνησης.	321
9.5	Επίλυση μοντέλων υπό κλίμακα 1:1 με νέα αναλυτική λύση.	326
9.6	Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	328
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10		331
10.1	Επίτευξη στόχου Διδακτορικής Διατριβής.....	333
10.2	Αναλυτική διερεύνηση & νέα αναλυτική λύση.....	334
10.3	Πειραματική διερεύνηση.....	338
10.4	Αξιολόγηση πειραματικών μετρήσεων.....	342
10.5	Αναγωγή πειραματικών μοντέλων σε αντίστοιχα μοντέλα πρωτότυπων κατασκευών και υπολογιστική διερεύνηση.....	346
10.6	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	350

Πίνακας Πινάκων:

Πίνακας 3.1. Διάγραμμα ροής λογισμικού για τον στατικό και αντισεισμικό σχεδιασμό και έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.....	60
Table 3.1. Flow chart of software for the static and seismic design and vulnerability check of reinforced slopes with berms.....	60
Πίνακας 3.2. Ορισμός μεταβλητών που εκφράζουν τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.....	66
Table 3.2. Definition of variables that express the geometrical and mechanical characteristics of multi-step reinforced slopes.....	66
Πίνακας 3.3. Ορισμός μεταβλητών που εκφράζουν τα αποτελέσματα των υπολογισμών.....	66
Table 3.3. Definition of variables that express the results of the calculations.....	66
Πίνακας 3.4. Κώδικας για εισαγωγή δεδομένων από χρήση.....	67
Table 3.4. Code for data input from user.....	67
Πίνακας 3.5. Βοηθητικές συναρτήσεις λογισμικού.....	67
Table 3.5. Additional functions of code.....	67
Πίνακας 3.6. Ανάλυση του αναβαθμού No. 3 για τοπική ευστάθεια.....	68
Table 3.6. Analysis of berm No. 3 for local stability.....	68
Πίνακας 3.7. Κατανομή της ποσότητας οπλισμού K, ανάλογα με το βάθος z_i της κάθε στρώσης οπλισμού.....	69
Table 3.7. Distribution of amount of reinforcement K, according to the depth z_i of every reinforcement layer.....	69
Πίνακας 3.8. Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων ανάλυσης αναβαθμού No. 3 για τοπική ευστάθεια.....	69
Table 3.8. Visualization of results from analysis berm No. 3 for local stability.....	69
Πίνακας 3.9. Ανάλυση για ολική ευστάθεια.....	69
Table 3.9. Analysis for global stability.....	69
Πίνακας 3.10. Κατανομή της ποσότητας οπλισμού K, ανάλογα με το βάθος z_i της κάθε στρώσης οπλισμού και μήκος όπλισης.....	71
Table 3.10. Distribution of amount of reinforcement K, according to the depth z_i of every reinforcement layer and reinforcement length.....	71
Πίνακας 3.11. Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων ανάλυσης για ολική ευστάθεια.....	72
Table 3.11. Visualization of results from global stability analysis.....	72
Πίνακας 3.12. Τελικά αποτελέσματα ολικής και τοπικής ευστάθειας.....	72
Table 3.12. Final results for local and global stability.....	72
Πίνακας 4.1. Σύγκριση τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας, σύμφωνα με την μέθοδο Bishop.....	95
Table 4.1 Comparison of Safety Factor values, according to Bishop method.....	95
Πίνακας 4.2. Σύγκριση τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας, σύμφωνα με την μέθοδο Janbu.....	96
Table 4.2 Comparison of Safety Factor values, according to Janbu method.....	96
Πίνακας 4.3. Υπολογισμός αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης για Bishop.....	98
Table 4.3. Calculation of the expected permanent displacement for Bishop.....	98
Πίνακας 4.4. Υπολογισμός αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης για Janbu.....	99
Table 4.4. Calculation of the expected permanent displacement for Janbu.....	99

Πίνακας Πινάκων:

Πίνακας 4.5. Υπολογισμός των τιμών του Συντελεστή Μείωσης της Αντοχής SRF με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	106
Table 4.5. Calculation of Strength Reduction Factor SRF, via Finite Element Analysis.	106
Πίνακας 5.1. Φυσικές ποσότητες και οι διαστάσεις τους (Bridgman, 1922).....	124
Table 2.1. Physical quantities and their dimensions (Bridgman, 1922).....	124
Πίνακας 5.2. Νόμοι ομοιότητας σύμφωνα με τον Schofield (1980), ακολουθώντας την γενική σχέση $\sigma_v = \rho_m (ng)_m (z/n)_m = \rho_p g_p z_p$	128
Table 5.2. Scaling laws according to Schofield (1980), following the principle $\sigma_v = \rho_m (ng)_m (z/n)_m = \rho_p g_p z_p$	128
Πίνακας 5.3. Νόμοι ομοιότητας σύμφωνα με Schofield (1980) για επιρροή χρόνου.....	128
Table 5.3. Scaling laws according to Schofield (1980) for time effects.	128
Πίνακας 5.4. Νόμοι ομοιότητας γεωσυνθετικών (Viswandadham & Mahajan, 2007).....	130
Table 5.4. Scaling laws for geosynthetics (Viswandadham & Mahajan, 2007).	130
Πίνακας 6.1. Διαστάσεις επιμέρους τμημάτων μιας τυπικής ίνας απλής πλέξης.....	140
Table 6.1. Diameter of subsections of a typical single mode fiber.	140
Πίνακας 7.1. Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά άμμου (Nater 2005).....	182
Table 7.1. Physical and mechanical characteristics of sand (Nater 2005).	182
Πίνακας 7.2. Λοιπά φυσικά χαρακτηριστικά άμμου (Nater 2005).....	182
Table 7.2. Other physical and mechanical characteristics of sand (Nater 2005).	182
Πίνακας 7.3. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά οπλισμών.....	185
Table 7.3. Geometrical features of reinforcement materials.....	185
Πίνακας 7.4. Αναγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών ‘Γεωπλέγματος’ για διάφορες τιμές του n.....	186
Table 7.4. Reduction of geometrical features of ‘Geogrid’ for various n values.....	186
Πίνακας 7.5. Αναγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών ‘Κουρτίνας Α’ για διάφορες τιμές του n.....	186
Table 7.5. Reduction of geometrical features of ‘Curtain A’ for various n values.....	186
Πίνακας 7.6. Αναγωγή γεωμετρικών χαρακτ. ‘Επίδεσμου’ για διάφορες τιμές του n.....	186
Table 7.6. Reduction of geometrical features of ‘Bandage’ for various n values.....	186
Πίνακας 7.7. Αναγωγή γεωμετρικών χαρακτ. ‘Κουρτίνας Β’ για διάφορες τιμές του n.....	187
Table 7.7. Reduction of geometrical features of ‘Curtain B’ for various n values.....	187
Πίνακας 7.8. Μέση τιμή μέγιστης εφελκ. αντοχής οπλισμών για διάφορες τιμές του n.....	190
Table 7.8. Mean of maximum tensile strength of reinf. materials for various n values.....	190
Πίνακας 7.9. Γεωμετρικά χαρακτ. μοντέλων με ‘Γεώπλεγμα’ για διάφορες τιμές του n.....	192
Table 7.9. Geometrical characteristics of models with ‘Geogrid’ for various n values.....	192
Πίνακας 7.10. Γεωμετρικά χαρακτ. μοντέλων με ‘Κουρτίνα Α’ για διάφορες τιμές του n.....	193
Table 7.10. Geometrical characteristics of models with ‘Curtain A’ for various n values.....	193
Πίνακας 7.11. Γεωμετρικά χαρακτ. μοντέλων με ‘Επίδεσμο’ για διάφορες τιμές του n.....	193
Table 7.11. Geometrical characteristics of models with ‘Bandage’ for various n values.....	193
Πίνακας 7.12. Γεωμετρικά χαρακτ. μοντέλων με ‘Κουρτίνα Β’ για διάφορες τιμές του n.....	194

Table 7.12. Geometrical characteristics of models with ‘Curtain B’ for various n values.....	194
Πίνακας 7.13. Παράδειγμα μέτρησης μήκους κύματος μέσω αισθητήρων οπτικών ινών.	204
Table 7.13.Example of wavelength measurements (in nm) via optical fibre sensors.	204
Πίνακας 7.14. Αποτελέσματα μέτρησης τροπών με αισθητήρες οπτικών ινών.	205
Table 7.14. Strain measurements results via optical fibre sensors.	205
Πίνακας 8.1. Πειράματα στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.	221
Table 8.1. Geotechnical centrifuge Tests.	221
Πίνακας 9.1. Χαρακτηριστικά μοντέλων οπλισμένων πρανών και πειραμάτων.	272
Table 9.1. Reinforced slope models and test characteristics.	272
Πίνακας 9.2. Τιμές διατμητικών τροπών μέσω GeoPIV, σε αντίστοιχες θέσεις ο. ι.....	286
Table 9.2. Values of shear strains via GeoPIV, for corespondent location of o. f..	286.
Πίνακας 9.3. Χαρακτηριστικά μοντέλων με ‘Γεώπλεγμα’ για διάφορες τιμές του n.	287
Table 9.3. Characteristics of models with ‘Geogrid’ for various n values.	287
Πίνακας 9.4. Χαρακτηριστικά μοντέλων με ‘Κουρτίνα Α’ για διάφορες τιμές του n.	287
Table 9.4. Characteristics of models with ‘Curtain A’ for various n values.	287
Πίνακας 9.5. Γεωμετρικά χαρακτ. μοντέλων με ‘Επίδεσμο’ για διάφορες τιμές του n.	288
Table 9.5. Geometrical charact.s of models with ‘Bandage’ for various n values.	288
Πίνακας 9.6. Γεωμετρικά χαρακτ.μοντέλων με ‘Κουρτίνα Β’ για διάφορες τιμές του n.....	288
Table 9.6. Geometrical charact. of models with ‘Curtain B’ for various n values.	288
Πίνακας 9.7. Τελική επιλογή μοντέλων οπλ. πρανών για υπολογιστική διερεύνηση.	289
Table 9.7. Final selection of reinf. slope models for numerical investigation.....	289
Πίνακας 9.8. Αποτελέσματα υπολογισμού Συντελεστή Ασφαλείας πειραματικών μοντέλων για διάφορα υλικά οπλισμού και εκτεταμένα όρια.....	293
Table 9.8. Results of calculation of Safety Factor of experimental models for various reinforcement materials and expanded boundaries.....	293
Πίνακας 9.9. Συντελεστής Μείωσης Αντοχής για διάφορα μοντέλα.	295
Table 9.9. Strength Reduction Factor for various models.	295
Πίνακας 9.10. Σύγκριση Συντελεστή Ασφαλείας για μοντέλα με εκτεταμένα όρια με Συντελεστή Μείωσης Αντοχής για περιορισμένα και εκτεταμένα όρια.	297
Table 9.10. Comparison of Safety Factor for models with expanded limits to Strength Reduction Factors for limited and expanded boundaries.....	297
Πίνακας 9.11. Σύγκριση «γραμμικών» τροπών πειραματικών και υπολογιστικών μοντέλων, για διάφορες τιμές του Shear Stiffness και για Normal Stiffness=20000 kPa.	311
Table 9.11. Comparison of ‘linear’ strain of experimental and computational models for various Shear Stiffness values and Normal Stiffness=20000 kPa.....	311
Πίνακας 9.12. Σύγκριση «γραμμικών» τροπών πειραματικών και υπολογιστικών μοντέλων, για διάφορες τιμές του Shear Stiffness και για Normal Stiffness=25000 kPa.	311
Table 9.12. Comparison of ‘linear’ strain of experimental and computational models for various Shear Stiffness values and Normal Stiffness=25000 kPa.....	311

Πίνακας Σχημάτων:

Σχήμα 1.1. Σχήμα δρόμου από κορμούς δέντρων (US F.S., 2005).	5
Figure 1.1. Sketch of a corduroy road. (US F. S., 2005).....	5
Σχήμα 1.2. Αναπαράσταση Ζιγκουράτ (Amiet et al., 1981).....	5
Figure 1.2. Reconstruction of Ziggurat (Amiet et al., 1981).....	5
Σχήμα 1.3. Μεταφορά τριβής ανάμεσα από το έδαφος και τον οπλισμό.	9
Figure 1.3. Frictional transfer between soil and reinforcement.	9
Σχήμα 1.4. Μεταβολή της εφελκυστικής δύναμης κατά μήκος της όπλισης.....	9
Figure 1.4. Variation of the tensile force along the reinforcement.	9
Σχήμα 1.5. Μεταφορά φορτίου μέσω παθητικής αντοχής του εδάφους.....	10
Figure 1.5. Load transfer by passive soil resistance.....	10
Σχήμα 1.6. Μικροφωτογραφίες από διάφορα υφάσματα που χρησιμοποιούνται ως γεωφάσματα (Koerner, 2005).....	12
Figure 1.6. Photomicrographs of various fabrics used as geotextiles (Koerner, 2005).	12
Σχήμα 2.1: Μηχανισμός λειτουργίας οπλισμένου πρανούς.....	27
Figure 2.1. Operating mechanism of reinforced slope.....	27
Σχήμα 2.2. Δυνάμεις που λαμβάνονται υπόψη στην ψευδοστατική ανάλυση.....	31
Figure 2.2. Forces taken into account on pseudo-static analysis.	31
Σχήμα 2.3. Δυνάμεις που λαμβάνονται υπόψη στην ψευδοστατική ανάλυση.....	31
Figure 2.3. Forces taken into account on pseudo-static analysis.	31
Σχήμα 2.4. Φάσμα Σχεδ. κατά ΕΑΚ με $R_d(T)/A \cdot \gamma_1$ και σχεδίαση για: $\eta \cdot \theta \cdot \beta_0 / q = 2.5/2$	32
Figure 2.4. Planning Range accord. to EAK, for $R_d(T)/A \cdot \gamma_1$ & design for: $\eta \cdot \theta \cdot \beta_0 / q = 2.5/2$	32
Σχήμα 2.5. Ανομοιόμορφη και ομοιόμορφη κατανομή των στρώσεων του οπλισμού.....	37
Figure 2.5. Non uniform and uniform distribution of reinforcement layers.	37
Σχήμα 2.6. Μηχανισμός Επίπεδης Ολίσθησης.	39
Figure 2.6. Plane Failure Mechanism.	39
Σχήμα 2.7. Μηχανισμός Λογαριθμικής σπείρας.....	39
Figure 2.7. Log-Spiral Mechanism.	39
Σχήμα 2.8. Μηχανισμός Άμεσης Ολίσθησης.....	39
Figure 2.8. Direct Sliding Mechanism.	39
Σχήμα 3.1. Οπλισμένο πρανές με αναβαθμούς (Karogianni & Sakellariou, 2008).	42
Figure 3.1. Multi-step reinforced slope (Karogianni & Sakellariou, 2008).	42
Σχήμα 3.2. Έλεγχος έναντι τοπικής ευστάθειας για τον αναβαθμό 3 (Karogianni & Sakellariou, 2008).	47
Figure 3.2. Local stability check for step 3 (Karogianni & Sakellariou, 2008).	47
Σχήμα 3.3. Έλεγχος έναντι τοπικής ευστάθειας για τον αναβαθμό 2 (Karogianni & Sakellariou, 2008).	47
Figure 3.3. Local stability check for step 2 (Karogianni & Sakellariou, 2008).	47
Σχήμα 3.4. Έλεγχος έναντι ολικής ευστάθειας (Karogianni & Sakellariou, 2008).....	48

Figure 3.4. Global stability check (Karogianni & Sakellariou, 2008).	48
Σχήμα 3.5. Μέθοδοι υπολογισμού της μέγιστης οριζόντιας αναμενόμενης σεισμικής επιτάχυνσης.	61
Figure 3.5. Methods of calculation of the horizontal peak ground acceleration.	61
Σχήμα 3.6. Παράδειγμα υπολογισμού μέγιστης οριζόντιας αναμενόμενης σεισμικής επιτάχυνσης.	61
Figure 3.6. Example of calculation of the horizontal peak ground acceleration.	61
Σχήμα 3.7. Παράδειγμα του σχεδιασμού οπλισμένου πρανού με αναβαθμούς, έναντι σεισμικής φόρτισης.	62
Figure 3.7. Example of design of multi step reinforced slope, due to seismic loading.	62
Σχήμα 3.8. Εκτίμηση της τρωτότητας υφιστάμενου πρανού για αναβάθμιση του σεισμικού κινδύνου.	62
Figure 3.8. Evaluation of the vulnerability of reinforced slope for increase on the seismic loading.	62
Σχήμα 3.9. Παράδειγμα σχεδιασμού οπλισμένου πρανού με αναβαθμούς, έναντι στατικής φόρτισης.	63
Figure 3.9. Example of design of multi step reinforced slope, due to static loading.	63
Σχήμα 4.1. Εκτίμηση k_h για κανονικά ρήγματα.	78
Figure 4.1. Evaluation of k_h for planar faults $F=1$.	78
Σχήμα 4.2. Εκτίμηση k_h για $S=1$ & $P=1$.	78
Figure 4.2. Evaluation of k_h for $S=1$ and $P=1$.	78
Σχήμα 4.3. Εκτίμηση k_h για σκληρά εδάφη, $P=0$ & $S=0.5$.	78
Figure 4.3. Evaluation of k_h for stiff soils, $P=0$ & $S=0.5$.	78
Σχήμα 4.4. Απαιτούμενη T_i για διάφορες τιμές k_h .	82
Figure 4.4. Required T_i for various levels of k_h .	82
Σχήμα 4.5. Διαφοροποίηση της T_i για διάφορες τιμές του φ ($k_h=0.12$).	82
Figure 4.5. Variation of T_i for various φ values ($k_h=0.12$).	82
Σχήμα 4.6. Διαφοροποίηση της T_i για διάφορες τιμές του φ ($k_h=0.24$).	82
Figure 4.6. Variation of T_i for various φ values ($k_h=0.24$).	82
Σχήμα 4.7. Διαφοροποίηση της T_i για διάφορες τιμές του φ ($k_h=0.36$).	82
Figure 4.7. Variation of T_i for various φ values ($k_h=0.36$).	82
Σχήμα 4.8. Διαφοροποίηση της T_i για διάφορα λ & $k_h=0.24$.	83
Figure 4.8. Variation of T_i for various λ & $k_h=0.24$.	83
Σχήμα 4.9. Διαφοροποίηση της T_i για διάφορα λ & $k_h=0.36$.	83
Figure 4.9. Variation of T_i for various λ & $k_h=0.36$.	83
Σχήμα 4.10. Απαιτούμενη T_i για διαφορετική κλίση αναβαθμών.	83
Figure 4.10. Required T_i for various berm inclination.	83
Σχήμα 4.11. Επιρροή λ για διαφορετική κλίση αναβαθμών & $k_h=0.24$.	83
Figure 4.11. Influence λ for various berm inclination & $k_h=0.24$.	83
Σχήμα 4.12. Μεταβολή της T_i για διάφορες τιμές του $\Sigma.A$ & κλίση 45° .	86
Figure 4.12. Variation of T_i , for various F.S. & slope inclination 45° .	86

Πίνακας Σχημάτων:

Σχήμα 4.13. Μεταβολή της T_i για διάφορες τιμές του $\Sigma.A$ & κλίση 70° .	86
Figure 4.13. Variation of T_i , for various F.S. & slope inclination 70° .	86
Σχήμα 4.14. Μεταβολή της T_i για διάφορες τιμές του $\Sigma.A$ & κλίση 56° .	86
Figure 4.14. Variation of T_i , for various F.S. & slope inclination 56° .	86
Σχήμα 4.15. Μεταβολή της T_i για διάφορες τιμές του β & $\Sigma.A=1.6$.	86
Figure 4.15. Variation of T_i , for various β values & F.S.=1.6 .	86
Σχήμα 4.16. Μεταβολή της k_{cr} για διάφορες τιμές του T_i .	88
Figure 4.16. Variation of k_{cr} for various T_i values .	88
Σχήμα 4.17. Μεταβολή της k_{cr} για διάφορες τιμές του ϕ .	88
Figure 4.17. Variation of k_{cr} for various ϕ values .	88
Σχήμα 4.18. Μεταβολή της k_{cr} για διάφορες τιμές του λ .	88
Figure 4.18. Variation of k_{cr} for various values λ .	88
Σχήμα 4.19. Αναμενόμενη μόνιμη μετατόπιση σε cm, για διάφορες τιμές των k_{cr} και k_h .	90
Figure 4.19. Expected permanent displacement in cm, for various k_{cr} and k_h values .	90
Σχήμα 4.20. Σύγκριση αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης, για διάφορες τιμές του λόγου: k_{cr}/k_h .	91
Figure 4.20. Comparison of expected permanent displacement, to k_{cr} / k_h ratio .	91
Σχήμα 4.21. Μοντέλο οπλισμένου πρανού με αναβαθμούς στο Slide .	94
Figure 4.21 Reinforced slope model with berms in Slide .	94
Σχήμα 4.22. Υπολογισμός $\Sigma. A$ σύμφωνα με Ανάλυση Bishop .	94
Figure 4.22. Calculation of S.F. for Bishop Analysis .	94
Σχήμα 4.23. Κρίσιμες επιφάνειες αστοχίας σύμφωνα με Ανάλυση Bishop .	94
Figure 4.23. Critical failure mechanisms for Bishop Analysis .	94
Σχήμα 4.24. Μεταβολή $\Sigma. A$ κατά μήκος του πρανού .	94
Figure 4.24. Variation of S. F. along the slope .	94
Σχήμα 4.25. Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας σύμφωνα με την μέθοδο Bishop .	96
Figure 4.25. Variation of the Safety Factor according to Bishop method .	96
Σχήμα 4.26. Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας σύμφωνα με την μέθοδο Janbu .	96
Figure 4.26. Variation of the Safety Factor according to Janbu method .	96
Σχήμα 4.27. Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας κατά μήκος του πρανού για $\lambda=1$ m .	97
Figure 4.27. variation of the Safety Factor along the slope for $\lambda=1$ m .	97
Σχήμα 4.28. Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας κατά μήκος του πρανού για $\lambda=2$ m .	97
Figure 4.28. variation of the Safety Factor along the slope for $\lambda=2$ m .	97
Σχήμα 4.29. Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας κατά μήκος του πρανού για $\lambda=3$ m .	97
Figure 4.29. variation of the Safety Factor along the slope for $\lambda=3$ m .	97
Σχήμα 4.30. Εκτίμηση της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης για την μέθοδο Bishop .	99
Figure 4.30. Evaluation of permanent displacement for Bishop method .	99
Σχήμα 4.31. Εκτίμηση της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης για την μέθοδο Janbu .	100
Figure 4.31. Evaluation of permanent displacement for Janbu method .	100

Σχήμα 4.32. Μοντέλο οπλισμένου πρανού με αναβαθμούς με ενσωματωμένο πλέγμα για ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	101
Figure 4.32. Reinforced slope model with berms, with incorporated mesh for finite element analysis.	101
Σχήμα 4.33. Μηχανικά χαρακτηριστικά μοντέλου οπλισμένου πρανού με αναβαθμούς.....	101
Figure 4.33. Mechanical characteristics of reinforced slope model with berms.	101
Σχήμα 4.34. Μηχανικά χαρακτηριστικά οπλισμών οπλισμένου πρανού με αναβαθμούς.	102
Figure 4.34. Reinforcement mechanical characteristics of reinf. slope model with berms.	102
Σχήμα 4.35. Αποτελέσματα ανάλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.	103
Figure 4.35. Results from analysis with finite element method.	103
Σχήμα 4.36. Διατμητική αντοχή και μηχανισμός αστοχίας χωρίς στρώσεις οπλισμού.....	103
Figure 4.36. Shear strain and failure mechanism without reinforcement layers.	103
Σχήμα 4.37. Διατμητική αντοχή και μηχανισμός αστοχίας χωρίς στρώσεις οπλισμού για $k_h=0.24$	104
Figure 4.37. Shear strain and failure mechanism without reinf. layers for $k_h=0.24$	104
Σχήμα 4.38. Διατμητική αντοχή και μηχανισμός αστοχίας χωρίς στρώσεις οπλισμού για $k_h=0.36$	105
Figure 4.38. Shear strain and failure mechanism without reinf. layers for $k_h=0.36$	105
Σχήμα 4.39. Μεταβολή του Συντελεστή Μείωσης της Αντοχής, SRF, για διάφορες τιμές του k_h	106
Figure 4.39. Variation of the Strength Reduction Factor, SRF, for various k_h	106
Σχήμα 5.1. Μελέτη του Leonardo da Vinci σε σχέσεις ομοιότητας (Hosssdorf, 1971).	114
Figure 5.1. Study of Leonardo da Vinci on similarity relationships (Hosssdorf, 1971).	114
Σχήμα 5.2. Σκαρίφημα του Leonardo da Vinci με στόχο να απεικονίσει την αρχή της ελαστικότητας (Hosssdorf, 1971).	115
Figure 5.2. Sketch from Leonardo da Vinci intended to illustrate the principle of elasticity (Hosssdorf, 1971).	115
Σχήμα 5.3. Αποτελέσματα πειραμάτων σε κλίμακα 1:6 του Fairbairn (Hosssdorf, 1971).	115
Figure 5.3. Results of tests performed on 1:6 scale models by Fairbairn (Hosssdorf, 1971).	115
Σχήμα 5.4. Απεικόνιση της μηχανικής λειτουργίας των δύο τύπων φυγοκεντριστών (Springman, 2001).	118
Figure 5.4. Sketch of the mechanics relating to the two types of centrifuges (Springman, 2001).	118
Σχήμα 5.5. Γεωτεχνικός φυγοκεντριστής με τύμπανο στη ETHZ (Springman et al 2001).	120
Figure 5.5. Drum geotechnical centrifuge at ETHZ (Springman et al 2001).	120
Σχήμα 5.6. Κατακόρυφες τάσεις πρωτότυπης κατασκευής (πάνω). Κατακόρυφες τάσεις (σ_v) μοντέλου υπό κλίμακα για 1g (κάτω αριστερά) και για ng (κάτω δεξιά) (Laue, 1996).	127
Figure 5.6. Vertical stresses in a soil model (m) comparing prototype (p) (top) with 1g small scale model (bottom left) and centrifuge model (bottom right) (Laue, 1996).	127
Σχήμα 5.7. Γεωμετρικός χαρακτηρισμός οπλισμών (Springman et al 1992).	130
Figure 5.7. Geometrical characterization of reinf. materials (Springman et al 1992).	130
Σχήμα 6.1. Τομή κυψέλης Stroud (Stroud, 1971).	134
Figure 6.1. Cross section through the Stroud cell (Stroud, 1971).	134

Πίνακας Σχημάτων:

Σχήμα 6.2. Διάταξη καμερών για την μέτρηση επιφανειακών παραμορφώσεων (Taylor et al. 1998).	136
Figure 6.2. Arrangement of cameras for surface deformation measurement (Taylor et al. 1998). 36	
Σχήμα 6.3. Επιφανειακές μετακινήσεις λόγω κατάρρευσης σήραγγας (Taylor et al. 1998).	136
Figure 6.3. Surface movements caused by tunnel heading collapse (Taylor et al. 1998).	136
Σχήμα 6.4. Σχήμα αισθητήρα PDCR81 (Taylor, 1995).	137
Figure 6.4. Sketch of PDCR81 Transducer (Taylor, 1995)	137
Σχήμα 6.5. Η δομή μιας τυπικής ίνας απλής πλέξης (Wikipedia, 2009).	140
Figure 6.5. The structure of a typical single-mode fiber (Wikipedia, 2009).....	140
Σχήμα 6.6. Η λειτουργία της συνθήκης Bragg σε οπτική ίνα (Wikipedia, 2008).....	140
Figure 6.6. Bragg's law, applied on an optical fibre sensor (Wikipedia, 2008).	140
Σχήμα 6.7. Σύδεση έργου με ηλεκτρονικό υπολογιστή και καταγραφέα δεδομένων.	143
Figure 6.7. Connection of project under investigation with computer data logger.....	143
Σχήμα 6.8. Αισθητήρας οπτικής ίνας στο εσωτερικό του καλωδίου.	145
Figure 6.8. Optical fibre sensor inside the stay cable.	145
Σχήμα 6.9. Θέση Αισθητήρα οπτικών ινών στο εσωτερικό του καλωδίου.	146
Figure 6.9: Location Fibre Optic Sensors within the Stay Cable.	146
Σχήμα 6.10. Οπλισμένο επίχωμα Αριφορίου Ακροπόλεως με ενσωματωμένη οπτική ίνα.	149
Figure 6.10. Reinforced embankment of Ariforio at Acropolis with integrated optical fibre sensor.	149
Σχήμα 6.11. Μεταβολή μήκους κύματος αισθητήρα οπτικής ίνας (CRD, 2007).	150
Figure 6.11. Wavelength change of optical fibre sensor (CRD, 2007).....	150
Σχήμα 6.12. Αποτελέσματα μετρήσεων στο βόρειο τείχος της Ακροπόλεως (CRD, 2007).....	152
Figure 6.12. Results from measurements on the north wall of Acropolis (CRD, 2007).....	152
Σχήμα. 6.13. Μεταβολή μήκους κύματος με αισθητήρα οπτικών ινών (CRD, 2007).....	154
Figure 6.13. Wavelength change via optical fibre sensor (CRD, 2007).	154
Σχήμα 6.14. Προσδιορισμός μέγιστης τιμής συνάρτησης αυτό-συσχέτισης (White et al. (2001).	157
Figure 6.14. Definition of the correlation peak (White et al. (2001).	157
Σχήμα 6.15. Προσδιορισμός νέας θέσης επιμέρους τμημάτων.	158
Figure 6.15. Definition of new position of patches.	158
Σχήμα 6.16. Διάγραμμα ροής ανάλυσης PIV.	159
Figure 6.16. Flow chart of PIV analysis.	159
Σχήμα 6.17. Ανάλυση των βημάτων GeoPIV μεθόδου σύμφωνα με τον Stamhuis (2006).	160
Figure 6.17. Analysis of the GeoPIV steps according to Stamhuis (2006).....	160
Σχήμα 6.18. Παράδειγμα οργάνωσης υπό ανάλυση πειραμάτων.	161
Figure 6.18. Example of project organization.....	161
Σχήμα 6.19 Δείγμα διαδικασίας δημιουργίας τμημάτων.	162
Figure 6.19. Example of patches creation.....	162
Σχήμα 6.20. Αντίστοιχο διάγραμμα ροής.	163

Figure 6.20. Correspondent flow vector.....	163
Σχήμα 6.21. Παράδειγμα δημιουργίας ‘launch file’	164
Figure 6.21. Launch file creation.....	164
Σχήμα 6.22. Περιοχή αναζήτησης των τμημάτων.....	165
Figure 6.22. Search zone of patches.....	165
Σχήμα 6.23. Μη συμβατά διανύσματα.....	166
Figure 6.23. Wild vectors.....	166
Σχήμα 6.24. Διαγραφή μη συμβατών διανυσμάτων.....	166
Figure 6.24. Elimination of wild vectors.....	166
Σχήματα 6.25. Προσδιορισμός θέσης σταθερών σημείων τυπωμένου κάναβου σε σχέση με τον φωτογραμμετρικό κάναβο.....	168
Figure 6.25. Definition of the position of printed grid compared to the photogrammetric target.....	168
Σχήμα 6.26. Παράδειγμα του πεδίου τροπών σε ‘pixel’ (image space) και σε συνήθεις μονάδες μέτρησης (object space).....	169
Figure 6.26. Example of image space str. in pixel an str. in common units-object space.....	169
Σχήμα 6.27. Θέση των τμημάτων (patches), σε ‘image space’ και ‘object space’ ανάλυση.....	169
Figure 6.27. Location of patches for image space and object space analysis.....	169
Σχήμα 7.1. Τομή οπλισμένου πρανούς.....	179
Figure 7.1. Cross section of reinforced slope.....	179
Σχήμα 7.2. Κοκκομετρική καμπύλη άμμου (Nater 2005).....	182
Figure 7.2. Grading curve of the sand (Nater 2005).....	182
Σχήμα 7.3. Διάγραμμα τάσεων-μετακινήσεων για ‘Γεώπλεγμα’.....	189
Figure 7.3. Stress-displacement chart for ‘Geogrid’.....	189
Σχήμα 7.4. Διάγραμμα τάσεων-μετακινήσεων για ‘Κουρτίνα Α’.....	189
Figure 7.4. Stress-displacement chart for ‘Curtain A’.....	189
Σχήμα 7.5. Διάγραμμα τάσεων-μετακινήσεων για ‘Επίδεσμο’.....	189
Figure 7.5. Stress-displacement chart for ‘Bandage’.....	189
Σχήμα 7.6. Διάγραμμα τάσεων-μετακινήσεων για ‘Κουρτίνα Β’.....	189
Figure 7.6. Stress-displacement chart for ‘Curtain B’.....	189
Σχήμα 7.7. Μέτρο Ελαστικότητας E για ‘Γεώπλεγμα’.....	191
Figure 7.7. Elasticity Modulus E for ‘Geogrid’.....	191
Σχήμα 7.8. Μέτρο Ελαστικότητας E για ‘Κουρτίνα Α’.....	191
Figure 7.8. Elasticity Modulus E for ‘Curtain A’.....	191
Σχήμα 7.9. Μέτρο Ελαστικότητας E για ‘Επίδεσμο’.....	191
Figure 7.9. Elasticity Modulus E for ‘Bandage’.....	191
Σχήμα 7.10. Μέτρο Ελαστικότητας E για ‘Κουρτίνα Β’.....	191
Figure 7.10. Elasticity Modulus E for ‘Curtain B’.....	191
Σχήμα 7.11. Θέσεις αισθητήρων οπτικών ινών.....	203
Figure 7.11. Location of optical fibre sensors.....	203

Πίνακας Σχημάτων:

Σχήμα 7.12. Αρχική μορφή των μετρήσεων μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών.....	207
Figure 7.12. Original form of measurements via optical fibre sensors.	207
Σχήμα 7. 13. Μη συμβατό διάνυσμα τροπών.....	212
Figure 7.13.Wild vector.	212
Σχήμα 7.14. Τροπές συμπεριλαμβανομένου μη συμβατού διανύσματος.	212
Figure 7.14. Strains including wild vector.	212
Σχήμα 7.15. Πιθανά μη συμβατά διανύσματα.	214
Figure 7.15.Potential wild vectors.	214
Σχήμα 7.16. Αντίστοιχες αναπτυσσόμενες τροπές.	214
Figure 7.16.Correspondent developing strains.	214
Σχήμα 7.17. Διαγραφή των πιθανών μη συμβατών διανυσμάτων.	215
Figure 7.17. Deleted potential wild vectors.	215
Σχήμα 7.18. Αντίστοιχες τροπές.	215
Figure 7.18. Corespondent strains.	215
Σχήμα 7.19. Τροπές προηγούμενης φάσης φόρτισης.	215
Figure 7.19. Strains of previous loading phase.	215
Σχήμα 7.20. Τροπές επόμενης φάσης φόρτισης.	215
Figure 7.20. Strains of next loading phase.	215
Σχήμα 8.1. Τροπές μετρούμενες με ο.ι. σε «Ανθρακούφασμα» (‘Κουρτίνα Α’).	234
Figure 8.1. Strains measured via o. f. on “Carbon-Fibre” (‘Curtain A’).	234
Σχήμα 8.2. Τροπές μετρούμενες με ο.ι. σε «Ανθρακούφασμα» (‘Κουρτίνα Β’).	235
Figure 8.2. Strains measured via o. f. on “Carbon-Fibre” (‘Curtain B’).	235
Σχήμα 8.3. Επαναλειτουργία ο.ι. μετά από αστοχία (50g & βραχύπτωση).	236
Figure 8.3. O. f. sensor restarting after failure (50g & rockfall).	236
Σχήμα 8.4. Τροπές στην στρώση οπλισμού No.1 (όψη).	238
Figure 8.4. Strains on reinforcement layer No. 1 (face).	238
Σχήμα 8.5. Τροπές στην στρώση οπλισμού No.4 (μέσο).	239
Figure 8.5. Strains on reinforcement layer No. 4 (middle).	239
Σχήμα 8.6. Τροπές στην στρώση οπλισμού No.4 (πλάι).	239
Figure 8.6. Strains on reinforcement layer No. 4 (side).	239
Σχήμα 8.7. Τροπές στην στρώση οπλισμού No.8 (όψη).	239
Figure 8.7. Strains on reinforcement layer No. 8 (face).	239
Figure 8.8. Strains on reinforcement layer No. 8 (middle).	239
Σχήμα 8.8 Τροπές στην στρώση οπλισμού No.8 (μέσο).	239
Σχήμα 8.9. Τροπές στην στρώση οπλισμού No.4.	241
Figure 8.9. Strains on reinforcement layer No. 4.	241
Figure 8.10. Strains on reinforcement layer No. 8.	241
Σχήμα 8.10. Τροπές στην στρώση οπλισμού No.8.	241

Σχήμα 8.11. Τροπές στην στρώση οπλισμού No.4.....	241
Figure 8.11. Strains on reinforcement layer No. 4.	241
Σχήμα 8.12. Τροπές στην στρώση οπλισμού No.8.....	241
Figure 8.12. Strains on reinforcement layer No. 8.	241
Σχήμα 8.13. Τροπές στην στρώση οπλισμού No.4 (πλάι).....	243
Figure 8.13. Strains on reinforcement layer No. 4 (side).	243
Figure 8.14. Strains on reinforcement layer No. 4 (edge).	243
Σχήμα 8.14. Τροπές στην στρώση οπλισμού No.4 (όψη).....	243
Σχήμα 8.15. Τροπές στην στρώση οπλισμού No.8.....	243
Figure 8.15. Strains on reinforcement layer No. 8.	243
Σχήμα 8.16. Σύγκριση τροπών σε διάφορες στρώσεις.....	243
Figure 8.16. Comparison of strains at various layers.	243
Σχήμα 8.17. Τροπές στην στρώση οπλισμού No.4 (μέσο).....	245
Figure 8.17. Strains on reinforcement layer No.4 (middle).....	245
Σχήμα 8.18. Τροπές στην στρώση οπλισμού No.8 (όψη).....	245
Figure 8.18. Strains on reinforcement layer No.4 (face).	245
Σχήμα 8.19. Μετρούμενες τροπές στην στρώση οπλισμού No.8.....	245
Figure 8.19. Strains measured on the reinforcement layer No.8.	245
Σχήμα 8.20. Μετρούμενες τροπές στην στρώση οπλισμού No.4.....	245
Figure 8.20. Strains measured on the reinforcement layer No.4	245
Σχήμα 8.21. Περιοχή ενδιαφέροντος για ανάλυση PIV.	247
Figure 8.21. Area of interest for PIV analysis.	247
Σχήμα 8.22. Διανύσματα ροής για 5g.	248
Figure 8.22. Flow vectors at 5g.	248
Σχήμα 8.23. Διανύσματα ροής για 10g.	248
Figure 8.23. Flow vectors at 10g.	248
Σχήμα 8.24. Διανύσματα ροής για 15g.	248
Figure 8.24. Flow vectors at 15g.	248
Σχήμα 8.25. Διανύσματα ροής για 20g.	248
Figure 8.25. Flow vectors at 20g.	248
Σχήμα 8.26. Διανύσματα ροής για 25g.	248
Figure 8.26. Flow vectors at 25g.	248
Σχήμα 8.27. Διανύσματα ροής για 30g.	248
Figure 8.27. Flow vectors at 30g.	248
Σχήμα 8.28. Διανύσματα ροής για 35g.	249
Figure 8.28. Flow vectors at 35g.	249
Σχήμα 8.29. Διανύσματα ροής για 40g.....	249
Figure 8.29. Flow vectors at 40g.	249

Πίνακας Σχημάτων:

Σχήμα 8.30. Διανύσματα ροής για 45g.....	249
Figure 8.30. Flow vectors at 45g.....	249
Σχήμα 8.31. Διανύσματα ροής για 50g.....	249
Figure 8.31. Flow vectors at 50g.....	249
Σχήμα 8.32. Διανύσματα ροής για 50g.....	249
Figure 8.32. Flow vectors at 50g.....	249
Σχήμα 8.33. Διανύσματα ροής για 50g.....	249
Figure 8.33. Flow vectors at 50.....	249
Σχήμα 8.34. Τροπές σε στάθμη 5g.....	250
Figure 8.34. Strains at 5g level.....	250
Σχήμα 8.35. Τροπές σε στάθμη 10g.....	250
Figure 8.35. Strains at 10g level.....	250
Σχήμα 8.36. Τροπές σε στάθμη 15g.....	250
Figure 8.36. Strains at 15g level.....	250
Σχήμα 8.37. Τροπές σε στάθμη 20g.....	250
Figure 8.37. Strains at 20g level.....	250
Σχήμα 8.38. Τροπές σε στάθμη 25g.....	250
Figure 8.38. Strains at 25g level.....	250
Σχήμα 8.39. Τροπές σε στάθμη 30g.....	250
Figure 8.39. Strains at 30g level.....	250
Σχήμα 8.40. Τροπές σε στάθμη 35g.....	251
Figure 8.40. Strains at 5g level.....	251
Σχήμα 8.41. Τροπές σε στάθμη 40g.....	251
Figure 8.41. Strains at 40g level.....	251
Σχήμα 8.42. Τροπές σε στάθμη 45g.....	251
Figure 8.42. Strains at 45g level.....	251
Σχήμα 8.43. Τροπές σε στάθμη 50g.....	251
Figure 8.43. Strains at 50g level.....	251
Σχήμα 8.44. Τροπές σε στάθμη 50g.....	251
Figure 8.44. Strains at 50g level.....	251
Σχήμα 8.45. Τροπές σε στάθμη 50g.....	251
Figure 8.45. Strains at 50g level.....	251
Σχήμα 8.46. Μεταβολή διανυσμάτων ροής από 1 σε 50g.....	252
Figure 8.46. Variation of flow vectors between 1 and 50g.....	252
Σχήμα 8.47. Περιοχή ενδιαφέροντος και δημιουργία τμημάτων (patches).....	253
Figure 8.47. Area on interest and patches creation.....	253
Σχήμα 8.48. Διανύσματα ροής για 10g.....	254
Figure 8.48. Flow vectors at 10g.....	254

Σχήμα 8.49. Διανύσματα ροής για 20g.	254
Figure 8.49. Flow vectors at 20g.	254
Σχήμα 8.50. Διανύσματα ροής για 30g.....	254
Figure 8.50. Flow vectors at 30g.	254
Σχήμα 8.51. Διανύσματα ροής για 40g.....	254
Figure 8.51. Flow vectors at 40g.	254
Σχήμα 8.52. Διανύσματα ροής για 50g.	254
Figure 8.52. Flow vectors at 50g.	254
Σχήμα 8.53. Διανύσματα ροής για 60g.....	254
Figure 8.53. Flow vectors at 50g.	254
Σχήμα 8.54. Διανύσματα ροής για 70g.....	255
Figure 8.54. Flow vectors at 70g.	255
Σχήμα 8.55. Διανύσματα ροής για 80g.	255
Figure 8.55. Flow vectors at 80g.	255
Σχήμα 8.56. Διανύσματα ροής για 90g.....	255
Figure 8.56. Flow vectors at 90g.	255
Σχήμα 8.57. Διανύσματα ροής για 100g.....	255
Figure 8.57. Flow vectors at 100g.	255
Σχήμα 8.58. Διανύσματα ροής για 100g.....	255
Figure 8.58. Flow vectors at 100g.	155
Σχήμα 8.59 Διανύσματα ροής για 100g.....	255
Figure 8.59. Flow vectors at 100g.	255
Σχήμα 8.60. Τροπές σε στάθμη 10g.	256
Figure 8.60. Strains at 10g level.	256
Σχήμα 8.61. Τροπές σε στάθμη 20g.	256
Figure 8.61. Strains at 20g level.	256
Σχήμα 8.62. Τροπές σε στάθμη 30g.	256
Figure 8.62. Strains at 30g level.	256
Σχήμα 8.63. Τροπές σε στάθμη 40g.	256
Figure 8.63. Strains at 40g level.	256
Σχήμα 8.64. Τροπές σε στάθμη 50g.	256
Figure 8.64. Strains at 50g level.	256
Σχήμα 8.65. Τροπές σε στάθμη 60g.	256
Figure 8.65. Strains at 60g level.	256
Σχήμα 8.66. Τροπές σε στάθμη 70g.	257
Figure 8.66. Strains at 70g level.	257
Σχήμα 8.67. Τροπές σε στάθμη 80g.	257
Figure 8.67. Strains at 80g level.	257

Πίνακας Σχημάτων:

Σχήμα 8.68. Τροπές σε στάθμη 90g.....	257
Figure 8.68. Strains at 90g level.	257
Σχήμα 8.69. Τροπές σε στάθμη 100g.....	257
Figure 8.69. Strains at 100g level.	257
Σχήμα 8.70. Τροπές σε στάθμη 100g.....	257
Figure 8.70. Strains at 100g level.	257
Σχήμα 8.71. Τροπές σε στάθμη 100g.....	257
Figure 8.71. Figures at 100g level.....	257
Σχήμα 8.72. Μεταβολή διανυσμάτων ροής από 1g σε 50g.	258
Figure 8.72. Variation of flow vectors between 1g and 50g.	258
Σχήμα 8.73. Περιοχή ενδιαφέροντος και δημιουργία τμημάτων (patches).	259
Figure 8.73. Area on interest and patches creation.	259
Σχήμα 8.74. Διανύσματα ροής για 5g.....	260
Figure 8.74. Flow vectors at 5g.....	260
Σχήμα 8.75. Διανύσματα ροής για 10g.....	260
Figure 8.75. Flow vectors at 10g.....	260
Σχήμα 8.76. Διανύσματα ροής για 15g.....	260
Figure 8.76. Flow vectors at 15g.....	260
Σχήμα 8.77. Διανύσματα ροής για 20g.....	260
Figure 8.77. Flow vectors at 20g.....	260
Σχήμα 8.78. Διανύσματα ροής για 25g.	260
Figure 8.78. Flow vectors at 25g.....	260
Σχήμα 8.79. Διανύσματα ροής για 30g.....	260
Figure 8.79. Flow vectors at 30g.....	260
Σχήμα 8.80. Διανύσματα ροής για 35g.....	261
Figure 8.80. Flow vectors at 35g.....	261
Σχήμα 8.81. Διανύσματα ροής για 40g.....	261
Figure 8.81. Flow vectors at 40g.....	261
Σχήμα 8.82. Διανύσματα ροής για 45g.....	261
Figure 8.82. Flow vectors at 45g.....	261
Σχήμα 8.83. Διανύσματα ροής για 50g.	261
Figure 8.83. Flow vectors at 50g.....	261
Σχήμα 8.84. Διανύσματα ροής για 50g.....	261
Figure 8.84. Flow vectors at 50g.....	261
Σχήμα 8.85. Διανύσματα ροής για 50g.....	261
Figure 8.85. Flow vectors at 50g.....	261
Σχήμα 8.86. Τροπές σε στάθμη 5g.....	262
Figure 8.86. Strains at 5g level.	262

Σχήμα 8.87. Τροπές σε στάθμη 10g.	262
Figure 8.87. Strains at 10g level.	262
Σχήμα 8.88. Τροπές σε στάθμη 15g.	262
Figure 8.88. Strains at 15g level.	262
Σχήμα 8.89. Τροπές σε στάθμη 20g.	262
Figure 8.89. Strains at 20g level.	262
Σχήμα 8.90. Τροπές σε στάθμη 25g.	262
Figure 8.90. Strains at 25g level.	262
Σχήμα 8.91. Τροπές σε στάθμη 30g.	262
Figure 8.91. Strains at 30g level.	262
Σχήμα 8.92. Τροπές σε στάθμη 35g.	263
Figure 8.92. Strains at 5g level.	263
Σχήμα 8.93. Τροπές σε στάθμη 40g.	263
Figure 8.93. Strains at 40g level.	263
Σχήμα 8.94. Τροπές σε στάθμη 45g.	263
Figure 8.94. Strains at 45g level.	263
Σχήμα 8.95. Τροπές σε στάθμη 50g.	263
Figure 8.95. Strains at 50g level.	263
Σχήμα 8.96. Τροπές σε στάθμη 50g.	263
Figure 8.96. Strains at 50g level.	263
Σχήμα 8.97. Τροπές σε στάθμη 50g.	263
Figure 8.97. Strains at 50g level.	263
Σχήμα 8.98. Μεταβολή διανυσμάτων ροής από 1g σε 50g.	264
Figure 8.98. Variation of flow vectors between 1g and 50g.	264
Σχήμα 9.1. Σύγκριση τροπών για τα Τεστ No. 4 & No. 8.	267
Figure 9.1. Comparison of strains for Test No. 4 and No. 8.	267
Σχήμα 9.2. Σύγκριση τροπών για τα Τεστ No. 9 σε διάφορες στρώσεις.	271
Figure 9.2. Comparison of strains for Test No. 9 on various layers.	271
Σχήμα 9.3. Σύγκριση τροπών στις στρώσεις οπλισμού No.4 & 8.	271
Figure 9.3. Comparison of strains on sensors No.4 & 8.	271
Σχήμα 9.4. Σύγκριση τροπών στο μέσο & την όψη του πρανούς.	271
Figure 9.4. Comparison of strains in the middle & face of the slope.	271
Σχήμα 9.5. Σύγκριση τροπών στο μέσο & το πλάι του πρανούς.	271
Figure 9.5. Comparison of strains in the middle & side of the slope.	271
Σχήμα 9.6. Μεταβολή για διάφορα πειράματα & Στρώση No. 4.	274
Figure 9.6. Strain variation for various tests & Layer No.4.	274
Σχήμα 9.7. Μεταβολή τροπών για 50g & Στρώση No.4.	274
Figure 9.7. Strain variation for 50g & Layer No.4.	274

Πίνακας Σχημάτων:

Σχήμα 9.8. Μεταβολή τροπών για πτώση βράχου & Στρώση No.4.	274
Figure 9.8. Strain variation for rockfall & Layer No.4.	274
Σχήμα 9.9. Μεταβολή τροπών για 100g & Στρώση No.4.	274
Figure 9.9. Strain variation for 100g & Layer No.4.....	274
Σχήμα 9.10. Μεταβολή για διάφορα πειράματα & Στρώση No. 8.	276
Figure 9.10. Strain variation for various tests & Layer No.8.	276
Σχήμα 9.11. Μεταβολή τροπών για στάθμη 50g & Στρώση No.8.....	276
Figure 9.11. Strain variation for 50g level & Layer No.8.....	276
Σχήμα 9.12. Μεταβολή τροπών για πτώση βράχου & Στρώση No.8.	276
Figure 9.12. Strain variation for rockfall & Layer No.8.	276
Σχήμα 9.13. Μεταβολή τροπών για στάθμη 100g & Στρώση No.4.....	276
Figure 9.13. Strain variation for 100g level & Layer No.4.....	276
Σχήμα 9.14. Μεταβολή τροπών στις Στρώσεις No.4 & 8.....	278
Figure 9.14. Strain variation on Layers No. 4 & 8.....	278
Σχήμα 9.15. Μεταβολή τροπών για στάθμη 50g στις Στρώσεις No.4 & 8.	278
Figure 9.15. Strain variation at 50g level, on Layers No. 4 & 8.	278
Σχήμα 9.16. Μεταβολή τροπών για 100g στις Στρώσεις No.4&8.....	278
Figure 9.16. Strain variation at 100g level, on Layers No. 4&8.....	278
Σχήμα 9.17. Λόγος μέγιστων τροπών για Στρώσεις No.4/No. 8.	278
Figure 9.17. Maximun strain ratio for Layers No. 4/ No. 8.	278
Σχήμα 9.18. Μέγιστη τροπή για διάφορες στάθμες του g (Τεστ No.6).	281
Figure 9.18. Maximum strain for various g-levels (Test No.6).	281
Σχήμα 9.19. Μέγιστη τροπή για διάφορες στάθμες του g (Τεστ No.14).	281
Figure 9.19. Maximum strain for various g-levels (Test No.14).	281
Σχήμα 9.20. Μέγιστη τροπή για διάφορες στάθμες g (Τεστ No.8).....	281
Figure 9.20. Maximum strain at various g-levels (Test No.8).	281
Σχήμα 9.21. Μέγιστη τροπή για διάφορες στάθμες g & διάφορα Τεστ.....	281
Figure 9.21. Maximum strain at various g-levels & various Tests.	281
Σχήμα 9.22. Θέσεις αισθητήρων οπτικών ινών για τις στρώσεις οπλισμού No.4 και No.8.	282
Figure 9.22. Location of optical fibre sensors for reinforcement layers No.4 and No.8.....	282
Σχήμα 9.23. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 5g (Τεστ No.6).	284
Figure 9.23. g-level equal to 5g, (Test No.6).....	284
Σχήμα 9.24. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 25g (Τεστ No.6).	284
Figure 9.24. g-level equal to 25g, (Test No.6).....	284
Σχήμα 9.25. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g (Τεστ No.6).	284
Figure 9.25. g-level equal to 50g, (Test No.6).....	284
Σχήμα 9.26. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 10g (Τεστ No.15).	284
Figure 9.26. g-level equal to 10g, (Test No.15).....	284
.....
Σχήμα 9.27. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g (Τεστ No.15).	285

Figure 9.27. g-level equal to 50g, (Test No.15).	285
Σχήμα 9.28. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 100g (Τεστ No.15).....	285
Figure 9.28. g-level equal to 100g, (Test No.15).	285
Σχήμα 9.29. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 10g (Τεστ No.8).....	285
Figure 9.29. g-level equal to 10g, (Test No.8).	285
Σχήμα 9.30. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 100g (Τεστ No.15).....	285
Figure 9.30. g-level equal to 100g, (Test No.15).	
Σχήμα 9.31. Μοντέλο οπλισμένου πρανούς και μηχανικά χαρακτηριστικά για υλικό όπλισης «Κουρτίνα Β».....	290
Σχήμα 9.31. Reinforced slope model and mechanical characteristics for reinforcement material “Curtain B”	290
Σχήμα 9.32. Αποτελέσματα σύμφωνα με την μέθοδο λωρίδων Bishop για n=50.	290
Figure 9.32. Results according to the method of lanes Bishop for n=50.....	290
Σχήμα 9.33. Αποτελέσματα σύμφωνα με την μέθοδο λωρίδων Bishop για n=100.....	290
Figure 9.33. Results according to the method of lanes Bishop for n=100.....	290
Σχήμα 9.34. Μοντέλο οπλισμένου πρανούς με εκτεταμένα όρια και μηχανικά χαρακτηριστικά για υλικό όπλισης «Κουρτίνα Β».....	290
Σχήμα 9.34. Reinforced slope model with expanded boundaries and mechanical characteristics for reinforcement material “Curtain B”	290
Σχήμα 9.35. Παράδειγμα μοντέλου οπλισμένου πρανούς και μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και του οπλισμού για n=50.	294
Figure 9.35. Example of reinforced slope model and mechanical characteristics of soil and reinforcement for n=50.....	294
Σχήμα 9.36. Παράδειγμα μοντέλου οπλισμένου πρανούς και μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και του οπλισμού για n=50.	294
Figure 9.36. Example of reinforced slope model and mechanical characteristics of soil and reinforcement for n=50.....	294
Σχήμα 9.37. Διατμητικές τροπές για n=50 και υλικό «Επίδεσμος».....	296
Figure 9.37. Shear strain for n=50 and material “Bandage”.....	296
Σχήμα 9.38. Διατμητικές τροπές για n=100 και υλικό «Επίδεσμος».....	296
Figure 9.38. Shear strain for n=100 and material “Bandage”.....	296
Σχήμα 9.39. Διατμητικές τροπές για n=50 και υλικό «Κουρτίνα Β».....	296
Figure 9.39. Shear strain for n=50 and material “Curtain B”.....	296
Σχήμα 9.40. Διατμητικές τροπές για n=100 και υλικό «Κουρτίνα Β».....	296
Figure 9.40. Shear strain for n=100 and material “Curtain B”.....	296
Σχήμα 9.41. Παράδειγμα μοντέλου οπλισμένου πρανούς και μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και του οπλισμού για n=50.	298
Figure 9.41. Example of reinforced slope model and mechanical characteristics of soil and reinforcement for n=50.....	298
Σχήμα 9.42. Διατμητικές τροπές για n=50 και υλικό «Επίδεσμος» με εκτεταμένα όρια.....	298
Figure 9.42. Shear strain for n=50 and material “Bandage” and expanded boundaries.	298
Σχήμα 9.43. Διατμητικές τροπές για n=100 και υλικό «Επίδεσμος» με εκτεταμένα όρια.....	299

Πίνακας Σχημάτων:

Figure 9.43. Shear strain for n=100 and material “Bandage” and expanded boundaries.....	299
Σχήμα 9.44. Διατμητικές τροπές για n=50 και υλικό «Κουρτίνα Β» με εκτεταμένα όρια.	299
Figure 9.44. Shear strain for n=50 and material “Curtain B” and expanded boundaries.....	299
Σχήμα 9.45. Διατμητικές τροπές για n=100 και υλικό «Κουρτίνα Β» με εκτεταμένα όρια.	300
Figure 9.45. Shear strain for n=100 and material “Curtain B” and expanded boundaries.....	300
Σχήμα 9.46. Διατμητικές τροπές για διάφορα SRF (Στρώση No. 4).....	301
Figure 9.46. Shear strain for various SRF (Layer No. 4).....	301
Σχήμα 9.47. Διατμητικές τροπές για διάφορα SRF (Στρώση No. 8).....	301
Figure 9.47. Shear strain for various SRF (Layer No. 8).....	301
Σχήμα 9.48. Διατμητικές τροπές για διάφορα SRF (Στρώση No. 4).....	302
Figure 9.48. Shear strain for various SRF (Layer No. 4).....	302
Σχήμα 9.49. Διατμητικές τροπές για διάφορα SRF (Στρώση No. 8).....	302
Figure 9.49. Shear strain for various SRF (Layer No. 8).....	302
Σχήμα 9.50. Διατμητικές τροπές για n=50, «Επίδεσμος» & SRF=1.	304
Figure 9.50. Shear strain for n=50, “Bandage” & SRF=1.	304
Σχήμα 9.51. Διατμητικές τροπές για n=100, «Επίδεσμος» & SRF=1.	304
Figure 9.51. Shear strain for n=100, “Bandage” & SRF=1.	304
Σχήμα 9.52. Διατμητικές τροπές για n=50, «Κουρτίνα Β» & SRF=1.	304
Figure 9.52. Shear strain for n=50, “Curtain B” & SRF=1.....	304
Σχήμα 9.53 Διατμητικές τροπές για n=100, «Κουρτίνα Β» & SRF=1.	304
Figure 9.53. Shear strain for n=100, “Curtain B” & SRF=1.....	304
Σχήμα 9.54. Διατμητικές τροπές για στρώσεις No. 4 & 8, n=50 (‘Επίδεσμος’)	305
Figure 9.54. Shear strain on Layers No. 4&8, n=50 (‘Bandage’).	305
Σχήμα 9.55. Διατμητικές τροπές για στρώσεις No. 4 & 8, n=50 (‘Κουρτίνα Β’).	305
Figure 9.55. Shear strain on Layers No. 4&8, n=50 (‘Curtain B’).	305
Σχήμα 9.56. Σύγκριση τροπών για διαφορετικά υλικά όπλισης (στρώση No. 4, n=50)	306
Figure 9.56. Comparison of strain for various reinf. materials (layer No. 4, n =50)	306
Σχήμα 9.57. Σύγκριση τροπών για διαφορετικά υλικά όπλισης (στρώση No. 8, n=50)	306
Figure 9.57. Comparison of strain for various reinf.t materials (layer No. 8, n =50)	306
Σχήμα 9.58. Διατμητικές τροπές για n=50, «Επίδεσμος» για σύγκριση με GeoPIV.....	308
Figure 9.58. Shear strain for n=50, “Bandage” for comparison with GeoPIV.	308
Σχήμα 9.59. Διατμητικές τροπές για n=50, «Κουρτίνα Β» για σύγκριση με GeoPIV.....	309
Figure 9.59. Shear strain for n=50, “Curtain B” for comparison with GeoPIV.....	309
Σχήμα 9.60. Υπολογιστικό μοντέλο αντίστοιχο με αναλυτικό.....	314
Figure 9.60. Numerical model, similar to analytical.....	314

Πίνακας Φωτογραφιών:

Φωτογραφία 1.1. Απόθεση άμμου χωρίς στρώσεις οπλισμού (Karogianni et al. 2010).	3
Photograph 1.1. Deposition of sand without reinforcement layers (Karogianni et al. 2010).....	3
Φωτογραφία 1.2. Άμμος ενισχυμένη με στρώσεις οπλισμού (Karogianni et al. 2010).....	3
Photograph 1.2. Deposition of sand with reinforcement layers (Karogianni et al. 2010).....	3
Φωτογραφία 1.3. Ανασκαφή δρόμου από κορμούς δέντρων, του 16 ^{ου} αιώνα.	5
Photograph 1.3. Excavation of a corduroy road from the 16th Century.....	5
Φωτογραφία 1.4. Η ανακατασκευασμένη όψη του Μέγα Ζιγκουράτ του Ουρ.....	5
Photograph 1.4. The reconstructed facade of the Great Ziggurat of Ur.	5
Φωτογραφία 1.5. Χρήση Οπλισμένου Τοίχου σε αυτοκινητόδρομο (Mitchell et al. 1987).....	6
Photograph 1.5. Highway use of Reinforced Earth wall (Mitchell et al. 1987).	6
Φωτογραφία 1.6. Πρώτος οπλισμένος τοίχος στις ΗΠΑ (Mitchell et al. 1987).....	7
Photograph 1.6. First reinforced wall in the United States (Mitchell et al. 1987).....	7
Φωτογραφία 1.7. Ιδανική κατάσταση οπλισμένης εδαφικής μάζας (Vidal, 1969).	8
Photograph 1.7. Idealized reinforced soil mass (Vidal, 1969).	8
Φωτογραφία 1.8. Τύπος Γεωφάσματος.	13
Photograph 1.8. Geotextile type.	13
Φωτογραφία 1.9. Τύπος Γεωφάσματος.	13
Photograph 1.9. Geotextile type.	13
Φωτογραφία 1.10. Εφαρμογή Γεωφάσματος και Γεωπλέγματος.	13
Photograph 1.10. Implementation of Geotextiles and Geogrids in technical constructions.....	13
Φωτογραφία 1.11. Εφαρμογές Γεωφασμάτων σε τεχνικά έργα.	14
Photograph 1.11. Implementation of Geotextiles in technical constructions.	14
Φωτογραφία 1.12. Τύπος Γεωπλέγματος.	15
Photograph 1.12. Geogrid type.	15
Φωτογραφία 1.13. Τύπος Γεωπλέγματος.	15
Photograph 1.13. Geogrid type.	15
Φωτογραφία 1.14. Εφαρμογές Γεωπλέγματος σε τεχνικά έργα.	15
Photograph 1.14. Implementation of Geogrid in technical constructions.	15
Φωτογραφία 1.15. Εφαρμογές Γεωπλέγματος σε τεχνικά έργα.	16
Photograph 1.15. Implementation of Geogrid in technical constructions.	16
Φωτογραφία 5.1. Γεωτεχνικός Φυγοκεντρικός με Τύμπανο στο ETH Zurich (Karogianni et al. 2010).....	120
Photograph 5.1. The ETH Zurich Drum Geot. Centrifuge (Karogianni et al. 2010).	120
Φωτογραφία 5.2. Γεωτεχνικός Φυγοκεντρικός με καλάθι περιστροφής του Bochum (Laue, 2002).....	121
Photograph 5.2. The Bochum Beam Geotechnical Centrifuge (Laue, 2002).	121
Φωτογραφία 6.1. Αισθητήρας πίεσης με λαβή (Laue, 2002).	134
Photograph 6.1. Pressure sensor with handle (Laue, 2002).....	134

Πίνακας Φωτογραφιών:

Φωτογραφία 6.2. Μέγεθος τυπικού λέιζερ αισθητήρα.	135
Photograph 6.2. Size of a typical laser transducer.	135
Φωτογραφία 6.3. Χαρακτηριστικό μέγεθος αισθητήρα PDCR81 (Taylor, 1995).	137
Photograph 6.3. Characteristic size of PDCR81 transducer (Taylor, 1995).	137
Φωτογραφία 6.4. Δεσμίδα οπτικών ινών (Wikipedia, 2004).	139
Photograph 6.4. A bundle of optical fibers (Wikipedia, 2004).	139
Φωτογραφία 6.5. Τομή αισθητήρα οπτικών ινών.	139
Photograph 6.5. Cross section of optical fibre sensor.	139
Φωτογραφία 6.6. Αισθητήρας μέτρησης τροπών και θερμοκρασιακής μεταβολής (FOS&S 2009).	142
Photograph 6.6. Strain and temperature measurement sensor (FOS&S, 2009).	142
Φωτογραφία 6.7. Ενσωματωμένος αισθητήρας μέτρησης τροπών (FOS&S, 2009).	142
Photograph 6.7. Embedded strain measurement sensor (FOS&S, 2009).	142
Φωτογραφία 6.8. Προσαρτήσιμος αισθητήρας μέτρησης τροπών, MS-03 (FOS&S, 2009).	142
Photograph 6.8. Mountable strain measurement sensor MS-03 (FOS&S, 2009).	142
Φωτογραφία 6.9. Ασύρματη τεχνολογία για μεταφορά δεδομένων σε μεγάλη εμβέλεια.	144
Photograph 6.8. Wireless technology for long range data communication.	144
Φωτογραφία 6.10. Αυτοδύναμο σύστημα μέτρησης με πολλαπλούς αισθητήρες.	144
Photograph 6.10. Stand-alone, multi-sensor measurement system.	144
Φωτογραφία 6.11. Καλωδιωτή γέφυρα Stonecutters στο Hong Kong.	145
Photograph 6.11. Stonecutters cable bridge in Hong Kong.	145
Φωτογραφία 6.12. Τοποθέτηση αισθητήρων οπτικών ινών στο εσωτερικό των καλωδίων.	146
Figure 6.12. Placement of optical fibre sensors inside the stay cables.	146
Φωτογραφία 6.13. Αισθητήρες οπτικών ινών προσαρτημένες σε 24 ελαστικούς προφυλακτήρες.	147
Figure 6.13. Strain sensors mounded on a series of 24 fenders.	147
Φωτογραφία 6.14. Σήραγγα Hsueh Wu.	148
Photograph 6.14. Hsueh Wu tunnel.	148
Φωτογραφία 6.15. Ζημιά στην σήραγγα Hsueh Wu.	148
Photograph 6.15. Damage in Hsueh Wu tunnel.	148
Φωτογραφία 6.16. Εγκατεστημένος αισθητήρας μετακίνησης.	149
Photograph 6.16. Installed displacement sensor.	149
Φωτογραφία 6.17. Ενοργάνωση Βορείου Τείχους Ακροπόλεως.	151
Photograph 6.17. Instrumentation on North Wall of Acropolis.	151
Φωτογραφία 6.18. Ενοργάνωση Βορείου Τείχους Ακροπόλεως.	151
Photograph 6.18. Instrumentation on North Wall of Acropolis.	151
Φωτογραφία 6.19. Γέφυρα Γ9 Εγνατίας Οδού.	152
Photograph 6.19. G9 Bridge of Egnatia Highway.	152
Φωτογραφία 6.20. Ενοργάνωση γεφυρών Γ9 και Τ3 της Εγνατίας Οδού.	153

Photograph 6.20. Instrumentation on G9 and T3 of Egnatia Highway.	153
Φωτογραφία 6.21. Ενοργάνωση και παρακολούθηση γέφυρας Γ9 Εγνατίας Οδού.....	153
Photograph 6.21. Instrumentation and monitoring on G9 bridge on Egnatia Highway.	153
Φωτογραφία 6.22. Διαδικασία δημιουργίας τμημάτων στις υπό εξέταση φωτογραφίες οπλισμένων πρανών.....	163
Photograph 6.22. Patches creation on the reinforced slope models images.	163
Φωτογραφία 6.23. Βαθμονόμηση τυπωμένου κάναβου με τη χρήση φωτογραμμετρικού κάναβου.	168
Photograph 6.23. Calibration of printed grid with the use of photogrammetric target.....	168
Φωτογραφία 7.1. Στοιβαρό κουτί με Plexiglas και ενσωματωμένο κάναβο.....	147
Photograph 7.1. Strong box with Plexiglas and incorporated grid.	147
Φωτογραφία 7.2. Παράδειγμα ξηρής απόθεσης άμμου.....	175
Photograph 7.2. Example of sand pluviation.....	175
Φωτογραφία 7.3. Τοποθέτηση στρώσεων οπλισμού.....	176
Photograph 7.3.Reinforcement layers placement.	176
Φωτογραφία 7.4. Τοποθέτηση στρώσεων οπλισμού.....	176
Photograph 7.4.Reinforcement layers placement.	176
Φωτογραφία 7.5. Οπλισμένο πρανές στη φάση κατασκευής του.....	176
Photograph 7.5.Reinforced slope during its construction.....	176
Φωτογραφία 7.6. Αποπερατωμένο οπλισμένο πρανές.....	176
Photograph 7.6.Reinforced slope after its construction.....	176
Φωτογραφία 7.7. Μόρφωση οπλισμού σε κλίση 2V:1H.....	177
Photograph 7.7. Formation of reinforcement sheets at inclination 2V:1H.....	177
Φωτογραφία 7.8. Μόρφωση οπλισμού σε κλίση 2V:1H.....	177
Photograph 7.8. Formation of reinforcement sheets at inclination 2V:1H.....	177
Φωτογραφία 7.9. Οπλισμένο πρανές με ενσωματωμένο κάναβο.....	179
Photograph 7.9.Reinforce slope with incorporated grid.....	179
Φωτογραφία 7.10. Οπλισμένο και άοπλο πρανές στην τελική μορφή.....	179
Photograph 7.10.Reinforced and unreinforced slope at final state.	179
Φωτογραφία 7.11. Όψη οπλισμένου πρανούς και αισθητήρα ο.ι.....	179
Photograph 7.11.View of reinforced slope and o.f. sensor.....	179
Φωτογραφία 7.12. Μεταφορά οπλισμένου πρανούς στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.....	180
Photograph 7.12. Reinforced slope transfer in the geotechnical centrifuge.	180
Φωτογραφία 7.13. Ενεργοποιητής του γεωτεχνικού φυγοκεντριστή ETHZ.....	180
Photograph 7.13.Actuator of the geotechnical centrifuge of ETHZ.....	180
Φωτογραφία 7.14. Αντίθεση χρωματισμένης και λευκής άμμου.	183
Photograph 7.14.Contrast of painted and white sand.	183
Φωτογραφία 7.15. Υλικό όπλισης: Γεώπλεγμα.....	184
Photograph 7.15. Reinforcement material: Geogrid.....	184

Πίνακας Φωτογραφιών:

Φωτογραφία 7.16. Υλικό όπλισης: Κουρτίνα Α.	184
Photograph 7.16.Reinforcement material: Courtain A.	184
Φωτογραφία 7.17. Υλικό όπλισης: Επίδεσμος.	184
Photograph 7.17. Reinforcement material: Bandage.	184
Φωτογραφία 7.18. Υλικό όπλισης: Κουρτίνα Β.	184
Photograph 7.18.Reinforcement material: Courtain B.....	184
Φωτογραφία 7.19. Στρώση οπλισμού από ανθρακούφασμα.	185
Photograph 7.19. Carbon reinforcement layer.	185
Φωτογραφία 7.20. Πείραμα εφελκυστικής αντοχής ‘Γεωπλέγματος’	188
Photograph 7.20.Tensile strength test of ‘Geogrid’	188
Φωτογραφία 7.21. Πείραμα εφελκυστικής αντοχής ‘Κουρτίνας Α’	188
Photograph 7.21. Tensile strength test of ‘Curtain A’	188
Φωτογραφία 7.22. Πείραμα εφελκυστικής αντοχής ‘Επίδεσμου’	188
Photograph 7.22.Tensile strength of ‘Geogrid’. Test.....	188
Φωτογραφία 7.23. Πείραμα εφελκυστικής αντοχής ‘Κουρτίνας Β’	188
Photograph 7.23. Tensile strength test of ‘Curtain B’	188
Φωτογραφία 7.24. Μοντέλα οπλισμένων πρανών στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.	195
Photograph 7.24.Reinforced slope models in the geotechnical centrifuge.	195
Φωτογραφία 7.25. Φορητό SE 600.....	196
Photograph 7.25. Mobile SE 600.....	196
Φωτογραφία 7.26. Άκαμπτο κουτί και καουτσούκ	196
Photograph 7.26. Strong box and rubber.	196
Φωτογραφία 7.27. Έλεγχος θέσης της ασπίδας προστασίας του φυγοκεντριστή.....	196
Phtograph 7.27. Centrifuge shield protection check.	196
Φωτογραφία 7.28. Οπλισμένο πρανές υποβαλλόμενο σε βραχώπτωση.....	197
Photograph 7.28. Reinforced slope subjected to rockfall.	197
Φωτογραφία 7.29. Δείγματα από μοντέλα «βράχων».	197
Photograph 7.29. Reinforced slope subjected to rockfall.	197
Φωτογραφία 7.30. Ρίψη μοντέλου «βράχου» στην κορυφή του οπλισμένου πρανούς (κάμερα λείζερ).	198
Photograph 7.30 Rock fall view on top of reinforced slope (laser camera).	198
Φωτογραφία 7.31. Αποτύπωμα μοντέλου «βράχου».....	199
Photograph 7.31. Model boulder print.	199
Φωτογραφία 7.32. Παρακολούθηση μοντέλου.....	199
Photograph 7.32.Model monitoring.	199
Φωτογραφία 7.33. Οθόνες παρακολούθησης μοντέλων.....	199
Photograph 7.33. Model observation monitors.	199
Φωτογραφία 7.34. Κοντινότερη παρακολούθηση μοντέλου	199
Photograph 7.34.Closer model observation monitor.....	199

Φωτογραφία 7.35. Στρώσεις οπλισμού με αισθητήρες ο.ι.	201
Photograph 7.35. Reinforcement materials with o. f. sensors.	201
Φωτογραφία 7.36. Στρώσεις οπλισμού με αισθητήρες ο.ι.	201
Photograph 7.36. Reinforcement materials with o. f. sensors.	201
Φωτογραφία 7.37. Λεπτομέρια συγκόλλησης αισθητήρα.....	201
Photograph 7.37. O.f. sensor detailed attachment.	201
Φωτογραφία 7.38. Συνένωση αισθητήρα.....	201
Photograph 7.38. O.f. sensor splicing.....	201
Φωτογραφία 7.39. Συσκευή συνένωσης αισθητήρων οπτικών ινών.....	202
Photograph 7.39. Splicer for the connection of optical fibre sensors.	202
Φωτογραφία 7.40. Λογισμικό SmartSoft της SmartFibres.....	202
Photograph 7.40. Smartsoft Software from Smart Fibres.....	202
Φωτογραφία 7.41. Φωτογραμμετικός κάναβος για την βαθμονόμηση του μοντέλου.	209
Photograph 7.41. Photogrammetric grid for model calibration.....	209
Φωτογραφία 7.42. Πιστοποιητικό ακριβείας φωτογραμμετικού κάναβου.....	210
Photograph 7.42. Photogrammetric grid certificate of accuracy.	210
Φωτογραφία 8.1. Άοπλο πρανές πριν από την μεταφορά του.....	223
Photograph 8.1. Unreinforced slope before it's transport.....	223
Φωτογραφία 8.2. Μεταφορά του μοντέλου στον φυγοκεντριστή.....	223
Photograph 8.2. Transportation of the model in the centrifuge.	223
Φωτογραφία 8.3. Τοποθέτηση μοντέλου στον φυγοκεντριστή.....	223
Photograph 8.3. Placement of the model in the centrifuge.....	223
Φωτογραφία 8.4. Στερεωμένα μοντέλα στον φυγοκεντριστή.....	223
Photograph 8.4. Fixed models inside the centrifuge.	223
Φωτογραφία 8.5. Άοπλο πρανές στον φυγοκεντριστή.....	224
Photograph 8.5. Unreinforced model in the centrifuge.	224
Φωτογραφία 8.6. Μοντέλα στον φυγοκεντριστή με ενεργοποιητή.....	224
Photograph 8.6. Models inside the centrifuge with actuator.	224
Φωτογραφία 8.7. Κορυφή άοπλου πρανούς σε στάθμη 25g.....	224
Photograph 8.7. Top of unreinforced slope at 25g level.....	224
Φωτογραφία 8.8. Άοπλο πρανές μετά το πέρας των φορτίσεων.....	224
Photograph 8.8. Unreinforced slope after loading.....	224
Φωτογραφία 8.9. Οπλισμένο πρανές πριν από την μεταφορά του στον φυγοκεντριστή.....	225
Photograph 8.9. Reinforced slope before the transport in the centrifuge.	225
Φωτογραφία 8.10. Κορυφή οπλισμένου πρανούς σε επιτάχυνση της βαρύτητας 25g.....	226
Photograph 8.10. Top of reinforced slope at 25g level.....	226
Φωτογραφία 8.11. Οπλισμένο πρανές μετά το πέρας των φορτίσεων.....	226
Photograph 8.11. Reinforced slope after loading.	226

Πίνακας Φωτογραφιών:

Φωτογραφία 8.12. Ψηφιακή φωτογραφία (1g).....	228
Photograph 8.12. Digital image at 1g level.....	228
.....	
Φωτογραφία 8.13. Ψηφιακή φωτογραφία (50g).....	228
Photograph 8.13. Digital image at 50g level.....	228
.....	
Φωτογραφία 8.14. Ο. π. σε στάθμη 1g.	231
Photograph 8.14. Reinforced slope at 1g level.	231
.....	
Φωτογραφία 8.15. Ο. π. σε στάθμη 50g.	231
Photograph 8.15. Reinforced slope at 50g level.	231

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγικά Στοιχεία, Βιβλιογραφική Ανασκόπηση και
Στόχος Διατριβής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Εισαγωγή στην έννοια της οπλισμένης γης

Το έδαφος είναι ένα φυσικό σώμα που βρίσκεται στα ανώτερα τμήματα του φλοιού της Γης και αποτελείται από στρώσεις σε διάφορες διατάξεις που έχουν στην σύνθεση τους οργανικά και ανόργανα συστατικά με διαφορετικές ιδιότητες όσον αφορά την υφή, την δομή, την συνέχεια, το χρώμα, τα βιολογικά και άλλα χαρακτηριστικά τους. Η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους πραγματοποιείται από το πεδίο της Γεωτεχνικής Μηχανικής, η οποία αποτελεί κλάδο της επιστήμης των Πολιτικών Μηχανικών και χωρίζεται σε τέσσερις υπο-κατηγορίες, την Εδαφομηχανική, την Βραχομηχανική, την Τεχνική Γεωλογία και την Τεχνική Σεισμολογία. Η Εδαφομηχανική εφαρμόζεται για την ανάλυση της συμπεριφοράς των εδαφών σε φυσικές ή τεχνητές από τον άνθρωπο κατασκευές, ο κλάδος της Βραχομηχανικής αφορά την μηχανική συμπεριφορά των βραχώδων μαζών και των αντίστοιχων πεδίων δυνάμεων που αναπτύσσονται στο φυσικό περιβάλλον, η Τεχνική Γεωλογία περιγράφει τους γεωλογικούς παράγοντες που επηρεάζουν τα τεχνικά έργα και η Τεχνική Σεισμολογία αφορά την μελέτη και ανάλυση των σεισμών καθώς και την διάδοσή τους στο φλοιό της Γης.

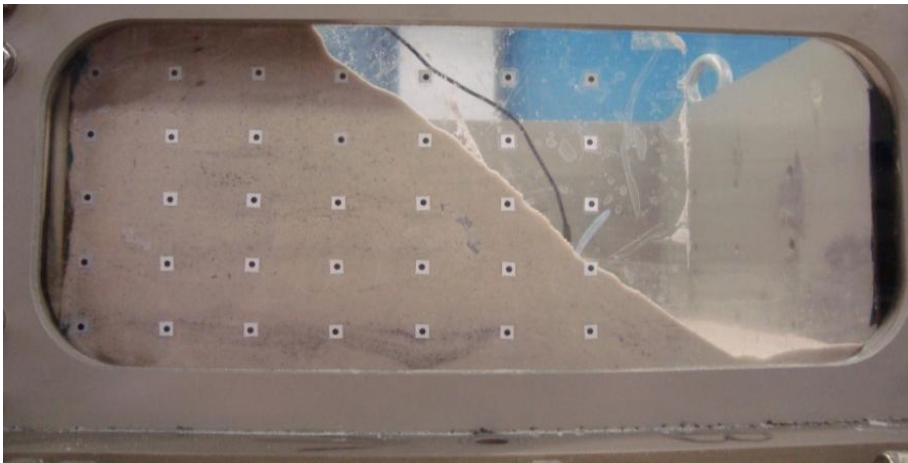
Το έδαφος χρησιμοποιείται ευρύτατα ως μέσο θεμελίωσης και ως δομικό υλικό κυρίως έργα οδοποιίας, υδραυλικά έργα και έργα σιδηροδρομικής. Βρίσκεται σε αφθονία στη φύση, διατίθεται ως προϊόν εκσκαφών, ενώ το κόστος όρυξης, διαλογής και διάστρωσης είναι σχετικά χαμηλό. Ορισμένες κατηγορίες εδαφών όταν έχουν την κατάλληλη πυκνότητα και περιεκτικότητα σε νερό μπορούν να είναι αρκετά ανθεκτικές και κατασκευαστικά χρήσιμες, καθώς παρουσιάζουν μεγάλη διατμητική αντοχή και μικρή συμπίεστικότητα. Από την άλλη πλευρά, η χρήση του παρουσιάζει περιορισμούς όταν επιχειρούνται διάφορες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα σε πρανή με σχετικά μεγάλη γωνία κλίσης ή σε πρανή με μεγάλα ύψη. Όπως και το σκυρόδεμα έτσι και το έδαφος μπορεί να ενισχυθεί με πρόσθετα υλικά – οπλισμούς που είναι ανθεκτικοί σε εφελκυσμό και να δημιουργηθεί ένα σύνθετο υλικό με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες συνδυασμένες από τα επιμέρους υλικά.

Το αποτέλεσμα του σύνθετου υλικού που προκύπτει από τον συνδυασμό του εδάφους και των στοιχείων όπλισης - ενίσχυσης, ονομάζεται οπλισμένη γη. Βασικό στοιχείο για την λειτουργία ενός συστήματος οπλισμένης γης είναι η συμβατότητα των επιμέρους υλικών ως προς τα επιφανειακά χαρακτηριστικά και την γεωμετρία τους, έτσι ώστε οι καταπονήσεις να μεταφέρονται από το ένα στο άλλο, όπως γίνεται και στο οπλισμένο

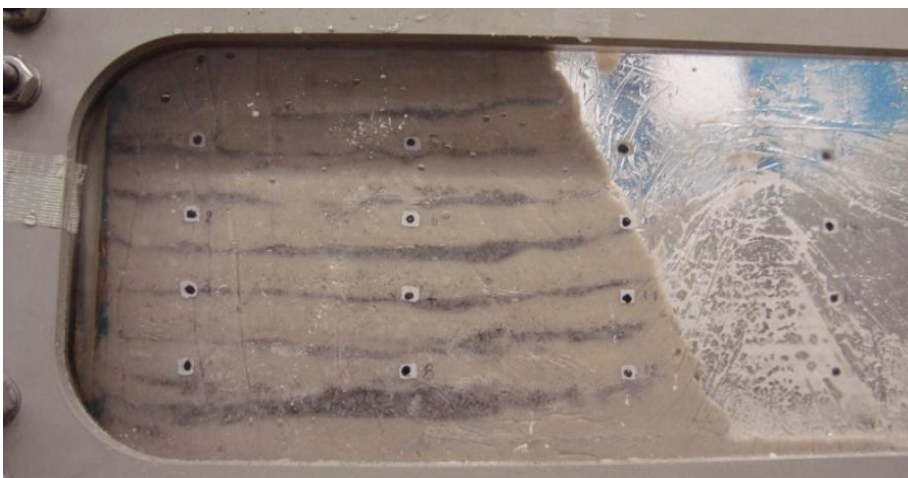
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

σκυρόδεμα, όπου δημιουργείται δεσμός - συνάφεια μεταξύ του σκυροδέματος και των μεταλλικών στοιχείων όπλισης. Η ανάγκη για ενίσχυση του εδάφους είναι αυξημένη σε περιοχές μεγάλης σεισμικότητας και σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, γεγονός που έχει προκαλέσει την εκτεταμένη χρήση αυτής της μεθόδου τα τελευταία, τουλάχιστον, 20 χρόνια.

Η επιρροή των οπλισμών στην ευστάθεια άμμου φαίνεται στις Φωτογραφίες 1.1 και 1.2 (Karogianni et al. 2010) όπου παρουσιάζεται η γωνία στην οποία μπορεί να διατηρηθεί η απόθεση της άμμου χωρίς και με στρώσεις οπλισμού αντίστοιχα. Στην Φωτογραφία 1.1, το εδαφικό υλικό δεν έχει ενισχυθεί και η γωνία απόθεσης είναι περίπου ίση με 32° , ενώ στην Φωτογραφία 1.2, έχει δημιουργηθεί κεκλιμένο πρανές με την χρήση λωρίδων οπλισμών, που έχουν αναδιπλωθεί στην όψη του πρανούς προκειμένου να αποφευχθούν επιφανειακές αστοχίες, επιτυγχάνοντας γωνία κλίσης περίπου ίση με 63° .



Φωτογραφία 1.1. Απόθεση άμμου χωρίς στρώσεις οπλισμού (Karogianni et al. 2010).
Photograph 1.1. Deposition of sand without reinforcement layers (Karogianni et al. 2010).



Φωτογραφία 1.2. Άμμος ενισχυμένη με στρώσεις οπλισμού (Karogianni et al. 2010).
Photograph 1.2. Deposition of sand with reinforcement layers (Karogianni et al. 2010).

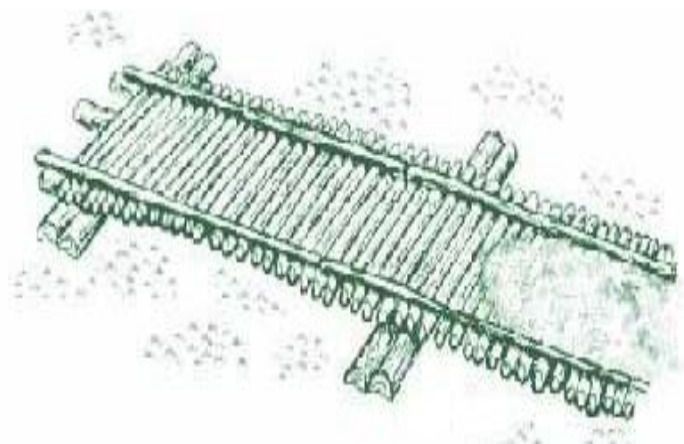
1.2 Ιστορική αναδρομή

Οι αρχικές προσπάθειες να οπλιστούν εδάφη ανάγονται, ενδεχομένως, σε προϊστορικούς χρόνους. Το να προστεθούν υλικά που θα ενίσχυαν την αντοχή του εδάφους έχει πιθανόν πραγματοποιηθεί αρκετά πριν από τις ιστορικές καταγραφές. Είναι λογικό να υποθεθεί ότι οι πρώτες προσπάθειες έγιναν για να σταθεροποιηθούν έλη και ελώδη εδάφη, χρησιμοποιώντας κορμούς δέντρων, θάμνους κλπ. Τέτοιες προσπάθειες για σταθεροποίηση πιθανόν να συνεχίστηκαν με την ανάπτυξη μιας πιο συστηματικής προσέγγισης όπου για παράδειγμα οι κορμοί των δέντρων ήταν σε ομοιόμορφο μέγεθος και μήκος και προσδένονταν μαζί προκειμένου να σχηματίσουν μια ενιαία επιφάνεια. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελούν οι δρόμοι που κατασκευάζονταν από κορμούς δέντρων (corduroy roads) οι οποίοι και εντοπίζονται κατά το 3000 π.Χ (Dewar, 1962). Στο Σχήμα 1.1 (US Forest Service, 2005) παρουσιάζεται ένα τέτοιο παράδειγμα και στην Φωτογραφία 1.3 (Wikipedia, 2007) ανασκαφή τέτοιου είδους κατασκευής, η οποία όμως πραγματοποιήθηκε σε αρκετά μεταγενέστερη χρονική περίοδο (16^{ος} αιώνας μ.Χ.).

Επιστρέφοντας στην αρχαιότητα, ένα άλλο παράδειγμα ενισχυμένων εδαφικών κατασκευών αποτελούσαν τα «Ζιγκουράτ» (“Ziggurat”) που εντοπίζονταν στην αρχαία Μεσοποταμία και κατασκευάζονταν για θρησκευτικούς λόγους από τους Σουμέριους, τους Βαβυλώνιους και τους Ασσύριους, από την 4^η χιλιετία έως και τον 6^ο αιώνα π.Χ. (Ratchet, 1983). Οι κατασκευές αυτές αποτελούνταν από τοίχους καλυμμένους με πήλινα τούβλα και στρώσεις από ψάθες κατασκευασμένες από καλάθια, οι οποίες και τοποθετούνταν στην λάσπη ανάμεσα από τα τούβλα σαν οριζόντιοι οπλισμοί. Επιπλέον ενίσχυση συμπεριλαμβάνονταν σε κάποια από τα Ζιγκουράτ με την μορφή σχοινιών, διαμέτρου περίπου 50 mm το κάθε ένα, τοποθετημένα κάθετα προς το τοίχο ανά ομοιόμορφα διαστήματα, κατά οριζόντιες και κατακόρυφες διευθύνσεις.

Στο Σχήμα 1.2 (Amiet, 1981) και στην Φωτογραφία 1.4 (Wikipedia, 2005) παρουσιάζεται η μορφή των κατασκευών αυτών οι οποίες σώζονται ακόμα και στις μέρες μας σε ορισμένες περιοχές της αρχαίας Μεσοποταμίας, δηλαδή στο σημερινό Ιράκ.

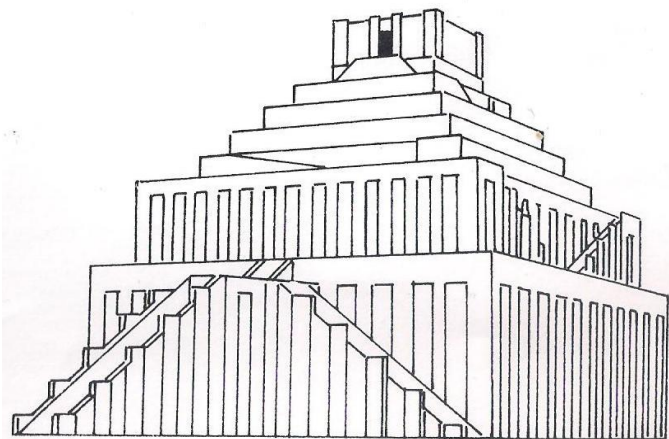
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1



Σχήμα 1.1. Σχήμα δρόμου από κορμούς δέντρων (US F.S., 2005).
Figure 1.1. Sketch of a corduroy road. (US F. S., 2005).



Φωτογραφία 1.3. Ανασκαφή δρόμου από κορμούς δέντρων, του 16^{ου} αιώνα.
Photograph 1.3. Excavation of a corduroy road from the 16th Century.



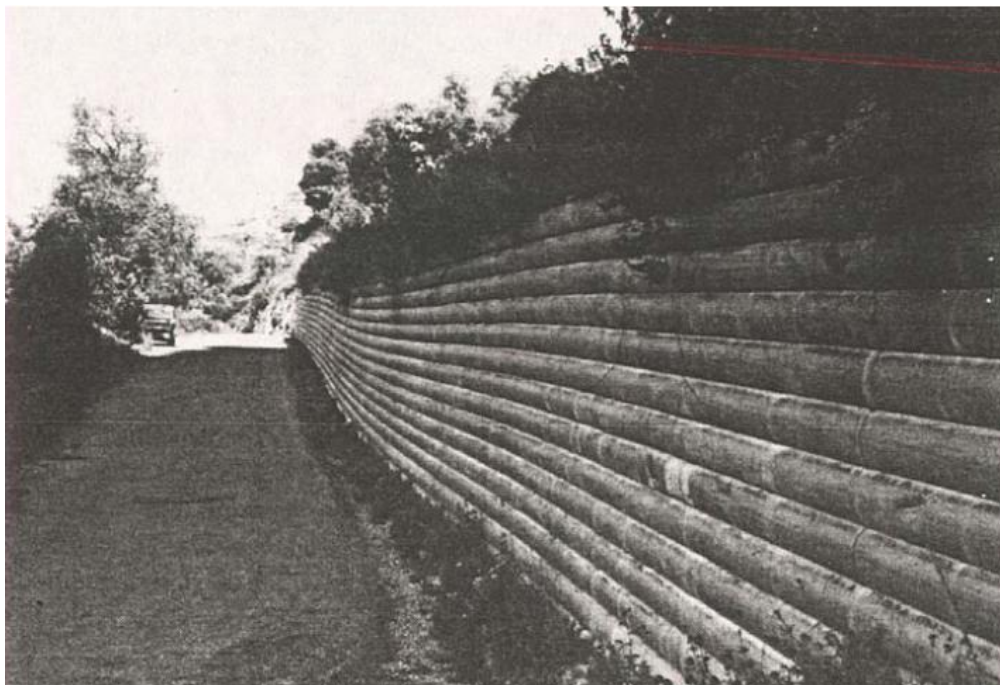
Σχήμα 1.2. Αναπαράσταση Ζιγκουράτ (Amiet et al., 1981).
Figure 1.2. Reconstruction of Ziggurat (Amiet et al., 1981).



Φωτογραφία 1.4. Η ανακατασκευασμένη όψη του Μέγα Ζιγκουράτ του Ουρ.
Photograph 1.4. The reconstructed facade of the Great Ziggurat of Ur.

Η προσπάθεια για ενίσχυση ασθενών εδαφών και η ανάγκη βελτίωσης των μηχανικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών τους σε έργα υψηλών απαιτήσεων συνεχίστηκε και στις μέρες μας με πρώτη τη χρήση ινών σε ενισχυμένους δρόμους στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, στο Τμήμα Αυτοκινητοδρόμων της Νότιας Καρολίνας (“South Carolina Highway Department”) το 1926 (Beckham et al. 1935). Στην περίπτωση αυτή τοποθετήθηκε ένα βαμβακερό ύφασμα στη βάση του εδάφους, στην συνέχεια εφαρμόστηκε ζεστή άσφαλτος πάνω στο ύφασμα και από πάνω τοποθετήθηκε μια λεπτή στρώση από άμμο. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής παρουσιάστηκαν το 1935 και περιγράφηκαν 8 διαφορετικά πειράματα στο πεδίο.

Επιπλέον, ο Γάλλος Αρχιτέκτονας και εφευρέτης Henri Vidal (Bertram, 1940) πρωτοπόρησε στην ανάπτυξη σύγχρονων τεχνικών οπλισμένης γης. Το σύστημα που ανέπτυξε ονομάστηκε: ‘Terre Armée’ και ο πρώτος αυτοκινητόδρομος κατασκευάστηκε κοντά στην Νίκαια της Γαλλίας, όπως φαίνεται στην Φωτογραφία 1.5 (Mitchell et al. 1987). Στην συνέχεια, τοίχοι οπλισμένης γης κατασκευάστηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής το 1972, παρέχοντας υποστήριξη στην Κρατική Εθνική Οδό 39 της Καλιφόρνια, κατά μήκος ενός απότομου πρανούς στα βουνά ‘San Gabriel’, νότια του Λος Άντζελες, όπως φαίνεται στην Φωτογραφία 1.6 (Mitchell et al. 1987).



Φωτογραφία 1.5. Χρήση Οπλισμένου Τοίχου σε αυτοκινητόδρομο (Mitchell et al. 1987).
Photograph 1.5. Highway use of Reinforced Earth wall (Mitchell et al. 1987).

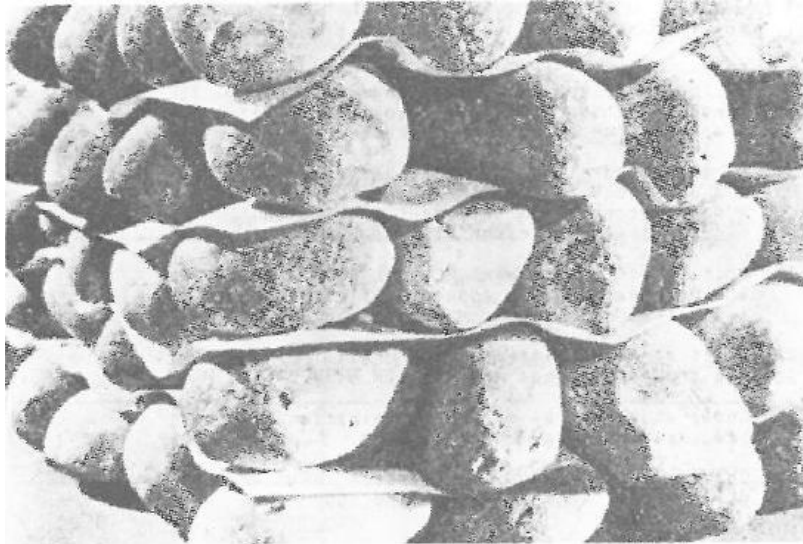


Φωτογραφία 1.6. Πρώτος οπλισμένος τοίχος στις ΗΠΑ (Mitchell et al. 1987).
Photograph 1.6. First reinforced wall in the United States (Mitchell et al. 1987).

1.3 Αρχή λειτουργίας οπλισμένης γης.

Η επιτυχία στην λειτουργία της οπλισμένης γης, έγκειται στον συνδυασμό του εδάφους και του οπλισμού με τέτοιο τρόπο ώστε το σύνθετο υλικό που δημιουργείται να συνδυάζει τα καλύτερα χαρακτηριστικά τους. Το χαμηλό σε κόστος έδαφος με μεγάλη αντοχή σε συμπίεση και διάτμηση αντιπροσωπεύει τον μεγαλύτερο όγκο του υλικού. Οι οπλισμοί, που έχουν σημαντικά μεγαλύτερο κόστος, συνεισφέρουν στην εφελκυστική αντοχή και μέσω της συνάφειάς τους με το περιβάλλον έδαφος, αναπτύσσεται ένα σύνθετο υλικό. Ένα απλό παράδειγμα της λειτουργίας παρουσιάζεται στην Φωτογραφία 1.7 (Vidal, 1969), όπου η τριβή μεταξύ των φύλλων χαρτιού και των κόκκων αποτρέπει την οριζόντια μετακίνηση του χαρτιού.

Το σύστημα αυτό είναι αυτόνομο και μπορεί να λειτουργήσει και για κατακόρυφα πρανή. Φυσικά σε μια πραγματική κατασκευή αυτό δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει καθώς θα ήταν αδύνατον κάθε ένας κόκκος να έχει απευθείας επαφή με μία στρώση οπλισμού. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητο να υπάρχει εσωτερική μεταφορά των τάσεων μεταξύ των κόκκων και επίσης θα πρέπει να υπάρχει και ένα κάλυμμα που να αποτρέπει τις διαφυγές του εδαφικού υλικού στην όψη.



Φωτογραφία 1.7. Ιδανική κατάσταση οπλισμένης εδαφικής μάζας (Vidal, 1969).
 Photograph 1.7. Idealized reinforced soil mass (Vidal, 1969).

Η παρουσία οπλισμών με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με το έδαφος, περιορίζει την παραμόρφωση του εδάφους σε διεύθυνση παράλληλη προς τους οπλισμούς. Έτσι, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι με τους οπλισμούς προσδίδουμε ανισότροπη μηχανική συμπεριφορά στο έδαφος, περιορίζοντας τις μηκύνσεις κατά την διεύθυνση των οπλισμών. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το σύστημα να διατηρεί την δυνατότητα να παραμορφώνεται χωρίς να αστοχεί, δημιουργώντας ένα σύνθετο υλικό που μπορεί να προσαρμοσθεί στις κινήσεις του περιβάλλοντος εδάφους.

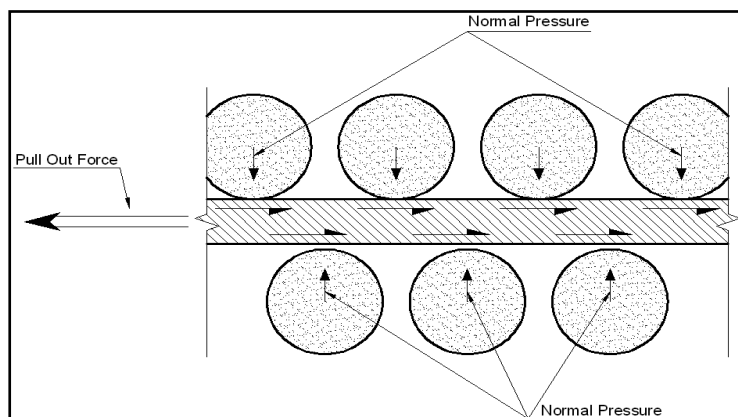
Η μεταφορά των αναπτυσσόμενων τάσεων μεταξύ εδάφους και οπλισμών περιλαμβάνει κυρίως δύο μηχανισμούς: τον *μηχανισμό τριβής* και τον *μηχανισμό παθητικής αντίστασης του εδάφους*. Σε πολλά συστήματα οπλισμένης γης και οι δύο μηχανισμοί είναι ενεργοί και μαζί καθορίζουν τον δεσμό που ελέγχει τον μέγιστο ρυθμό αλλαγής της αξονικής δύναμης κατά μήκος του οπλισμού.

➤ *Μηχανισμός Τριβής:*

Η μεταφορά τάσης μέσω της τριβής παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3. Το φορτίο που μεταφέρεται ανά μονάδα επιφάνειας του οπλισμού εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά αλληλεπίδρασης του εδάφους και του οπλισμού και από την ορθή τάση που αναπτύσσεται ανάμεσά τους. Η ορθή τάση εξαρτάται και από την σχέση τάσεων-τροπών του εδάφους. Αποτελέσματα από τεστ εξόλκευσης (pull out tests), δοκιμές άμεσης διάτμησης μεταξύ εδάφους και όπλισης (direct shear tests), καθώς και μοντέλα και

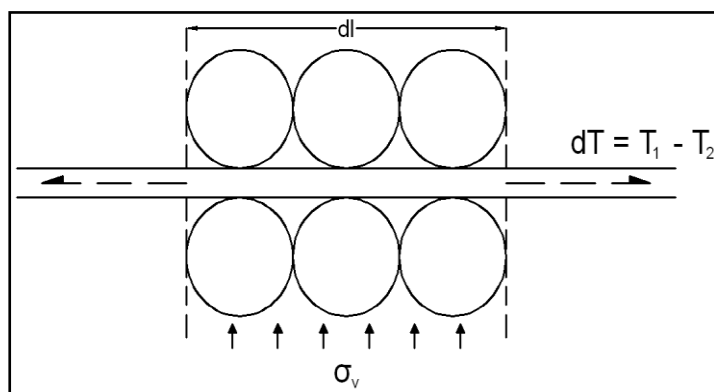
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

κατασκευές φυσικής κλίμακας χρησιμοποιούνται συχνά προκειμένου να προσδιορισθούν τα επιμέρους μηχανικά χαρακτηριστικά των οπλισμένων εδαφών.



Σχήμα 1.3. Μεταφορά τριβής ανάμεσα από το έδαφος και τον οπλισμό.
Figure 1.3. Frictional transfer between soil and reinforcement.

Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η ανάλυση τοπικής ισορροπίας για ένα τμήμα οπλισμού, όπου παρουσιάζεται ο τρόπος μεταφοράς της τάσης. Ο μηχανισμός αυτός διατυπώνεται μαθηματικά από την Εξίσωση 1.1.



Σχήμα 1.4. Μεταβολή της εφελκυστικής δύναμης κατά μήκος της όπλισης.
Figure 1.4. Variation of the tensile force along the reinforcement.

$$dT = T_2 - T_1 = 2b\tau(dl) \quad (1.1)$$

όπου b , το πλάτος όπλισης; l , το μήκος όπλισης; T η εφελκυστική δύναμη; και τ , η διατμητική τάση κατά μήκος της επιφάνειας αλληλεπίδρασης του εδάφους και του οπλισμού.

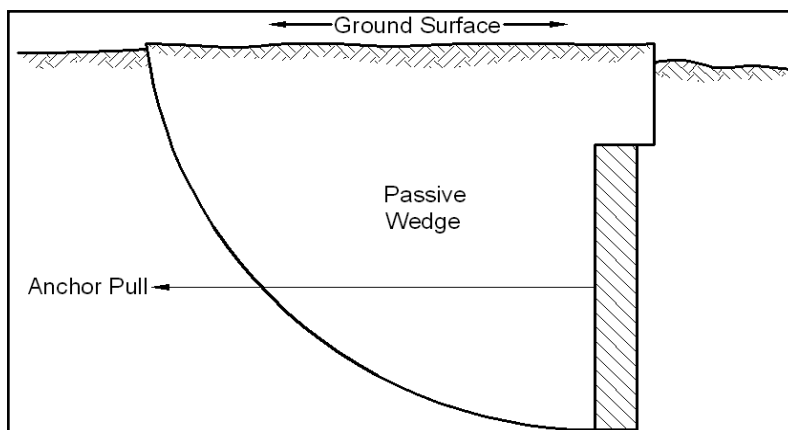
Εάν η διατμητική τάση τ δημιουργείται αποκλειστικά από τριβή αλληλεπίδρασης τότε ισχύει:

$$\tau = \mu\sigma_v \quad (1.2)$$

όπου σ_v η ορθή τάση που ασκείται στους οπλισμούς από το υπερκείμενο και υποκείμενο έδαφος, και μ ο συντελεστής τριβής μεταξύ εδάφους και οπλισμών.

➤ **Μηχανισμός παθητικής αντοχής εδάφους:**

Η μεταφορά του φορτίου μέσω της παθητικής αντοχής του εδάφους φαίνεται στο Σχήμα 1.5, όπου παρουσιάζεται ως κλασσικό ανάλογο παράδειγμα η άγκυρα “Deadman” (“Deadman Anchor”) η οποία χρησιμοποιείται από τους ορειβάτες. Στην περίπτωση αυτή, τοποθετείται μέσα στο έδαφος μια επιφάνεια σε κάθετη διεύθυνση προς την δύναμη εξόλκεσης η οποία ασκείται όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.5. Ωστόσο, το σύστημα αυτό δεν είναι ακριβώς ίδιο με αυτό της οπλισμένης γης. Σε ένα σύστημα οπλισμένης γης που βασίζεται εν μέρει ή εξ ολοκλήρου σε παθητική αντίσταση, υπάρχει ένας αριθμός από στοιχεία που προσανατολίζονται εγκάρσια της δύναμης εξόλκεσης, κάθε ένα από τα οποία αναπτύσσει παθητική αντίσταση κατά μήκος της όψης του. Ένα σύστημα οπλισμένης γης μπορεί να υποδιαιρεθεί σε επιμέρους τμήματα τα οποία έχουν χαρακτηριστικά όμοια με το σύνολο. Από την άλλη πλευρά, ένα σύστημα αγκύρωσης όμοιο με την άγκυρα “Deadman” δεν συμπεριφέρεται ως σύνθετο υλικό και επομένως δεν μπορεί να θεωρηθεί οπλισμένο έδαφος.



Σχήμα 1.5. Μεταφορά φορτίου μέσω παθητικής αντοχής του εδάφους.
Figure 1.5. Load transfer by passive soil resistance.

1.4 Γεωσυνθετικά υλικά.

Όλο και συχνότερα στις μέρες μας χρησιμοποιούνται γεωσυνθετικά υλικά και τα βασικότερα πλεονεκτήματά τους είναι τα εξής:

- Η ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται είναι ελεγχόμενη καθώς κατασκευάζονται σε εργοστασιακό περιβάλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

- Μπορούν να εγκατασταθούν σύντομα και σχετικά εύκολα.
- Αντικαθιστούν δύσκολες κατασκευές χρησιμοποιώντας φυσικά υλικά.
- Το κόστος τους είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με τα φυσικά εδάφη που αντικαθιστούν.
- Διατίθενται ευρέως στο εμπόριο.
- Απαιτούνται από τις προδιαγραφές και τους κανονισμούς σε ορισμένες περιπτώσεις.

Οι τομείς στους οποίους εφαρμόζονται τέτοιες τεχνικές είναι αυτοί της γεωτεχνικής μηχανικής, σε συγκοινωνιακά και περιβαλλοντικά έργα, τομείς δηλαδή που σχετίζονται με εδαφικές κατασκευές. Για τον λόγο αυτό έχει επιλεγεί η λέξη «γεω-συνθετικά», όπου συμπεριλαμβάνεται η έννοια «γη-γαία» ενώ ο όρος «συνθετικά» έχει επιλεγεί λόγω του ότι σχεδόν αποκλειστικά τα υλικά αυτά είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά.

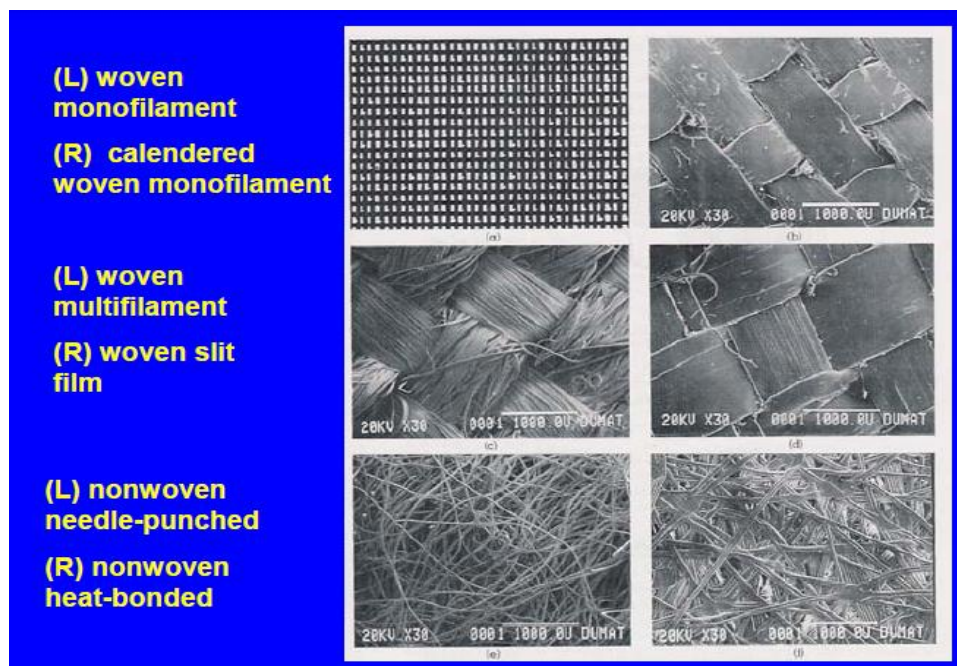
Ο όρος «γεωσυνθετικά», δίνεται από την «Αμερικάνικη Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών» (“ASTM”) στον κανονισμό D4439 (ASTM D4439, 2004) ως εξής:

«Ένα επίπεδο προϊόν, κατασκευασμένο από πολυμερή υλικά το οποίο χρησιμοποιείται με έδαφος, βράχο ή άλλα υλικά σχετικά με την γεωτεχνική μηχανική, ως ένα αναπόσπαστο μέρος ενός συστήματος ή κάποιας κατασκευής».

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή είναι συνήθως πολυμερή και από καουτσούκ, ενώ ορισμένες φορές χρησιμοποιούνται και φυσικά υλικά. Οι βασικές λειτουργίες του είναι ο διαχωρισμός των υλικών, η όπλιση-ενίσχυση εδαφών, ως φίλτρα και στραγγιστήρια καθώς και η δημιουργία φράγματος στην ροή ρευστών. Ο στόχος της εφαρμογής των γεωσυνθετικών είναι γενικά να βελτιωθεί η ποιότητα της κατασκευής με τον οικονομικότερο δυνατό τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη και την διάρκεια ζωής και συντήρησης. Οι βασικές κατηγορίες των γεωσυνθετικών είναι οι παρακάτω:

- Γεωφάσματα (Geotextiles)
- Γεωπλέγματα (Geogrids)
- Γεωδύχτια (Geonets)
- Γεωμεμβράνες (Geomembranes)
- Γεωσωλήνες (Geopipes)
- Γεωσύνθετα (Geocomposites)

Τα Γεωυφάσματα αποτελούν μια από τις μεγαλύτερες κατηγορίες γεωσυνθετικών και είναι στην πραγματικότητα υφάσματα με την κλασική έννοια, με την διαφορά ότι κατασκευάζονται από συνθετικές ίνες και όχι φυσικές όπως για παράδειγμα από μαλλί ή βαμβάκι, με αποτέλεσμα να μην πραγματοποιείται εύκολα βιοδιάσπαση. Αυτές οι συνθετικές ίνες συνενώνονται σε ένα ελαστικό και πορώδες ύφασμα όπου το νερό έχει την δυνατότητα να ρέει κατά το επίπεδό τους, καθώς επίσης και δια μέσω τους σε βαθμό που διαφέρει ανά περίπτωση. Υπάρχουν τουλάχιστον 80 διαφορετικές εφαρμογές για τα γεωυφάσματα, οι πιο βασικές ωστόσο είναι οι παρακάτω: διαχωρισμός, ενίσχυση-όπλιση, φιλτράρισμα, αποστράγγιση και δημιουργία υγρού φράγματος. Στο Σχήμα 1.6 (Koerner, 2005), παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διάφοροι τύποι γεωυφασμάτων σε μικροφωτογραφίες, στις Φωτογραφίες 1.8 και 1.9 ορισμένοι τύποι γεωυφασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα στο «Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων» του ΕΜΠ και στις Φωτογραφίες 1.10 και 1.11 εφαρμογές αυτών σε τεχνικά έργα.



Σχήμα 1.6. Μικροφωτογραφίες από διάφορα υφάσματα που χρησιμοποιούνται ως γεωυφάσματα (Koerner, 2005).

Figure 1.6. Photomicrographs of various fabrics used as geotextiles (Koerner, 2005).

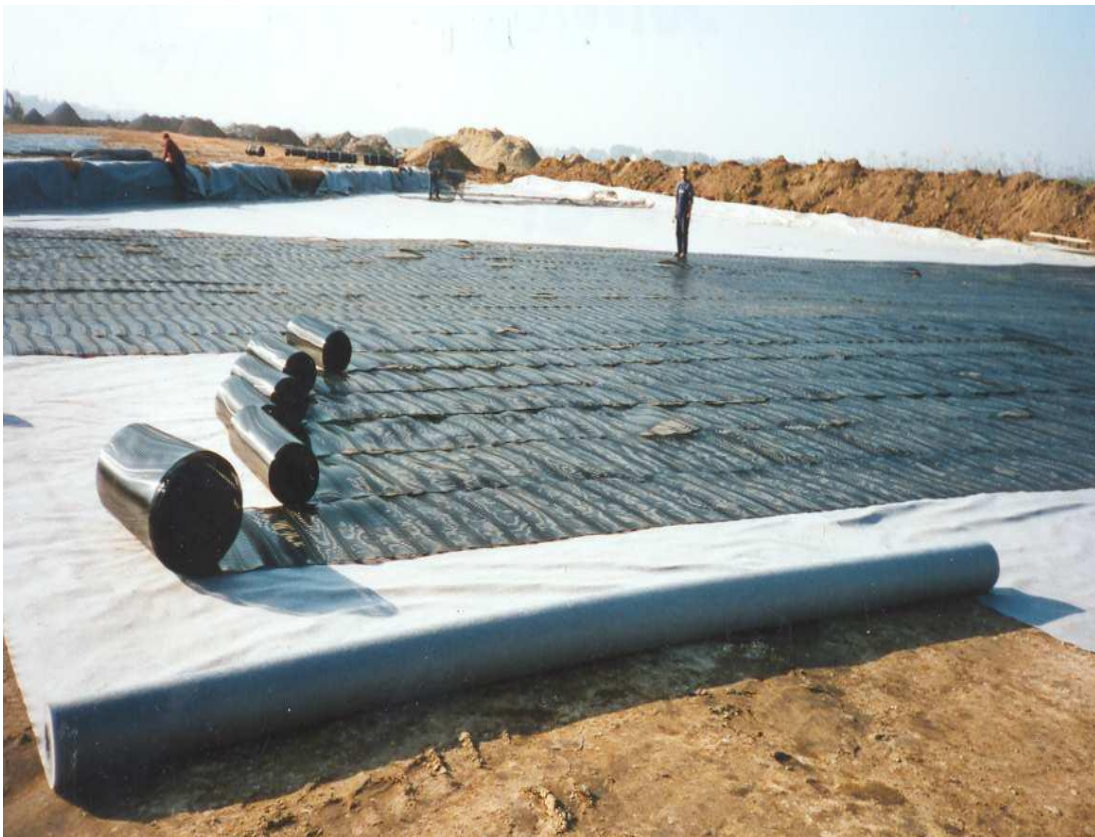
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1



Φωτογραφία 1.8. Τύπος Γεωφάσματος.
Photograph 1.8. Geotextile type.



Φωτογραφία 1.9. Τύπος Γεωφάσματος.
Photograph 1.9. Geotextile type.



Φωτογραφία 1.10. Εφαρμογή Γεωφάσματος και Γεωπλέγματος.
Photograph 1.10. Implementation of Geotextiles and Geogrids in technical constructions.

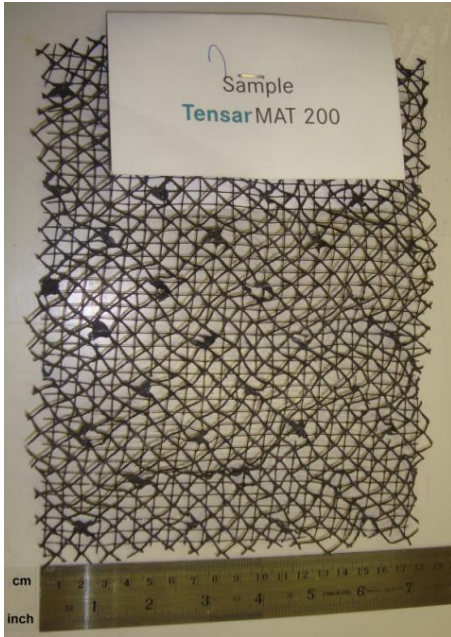


Φωτογραφία 1.11. Εφαρμογές Γεωφασμάτων σε τεχνικά έργα.
 Photograph 1.11. Implementation of Geotextiles in technical constructions.

Τα *Γεωπλέγματα* αποτελούν και αυτά ένα υλικό που χρησιμοποιείται όλο και πιο συχνά στον τομέα των Γεωσυνθετικών και αντίθετα από τα Γεωφάσματα τα οποία είναι σφιχτά πλέγματα από ίνες, εκείνα κατασκευάζονται από πλαστικό με μεγάλα σχετικά ανοίγματα-οπές. Τα Γεωπλέγματα είτε είναι προεντεταμένα για να έχουν βελτιωμένες φυσικές ιδιότητες είτε κατασκευάζονται εργοστασιακά με ειδικές μεθόδους και χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως υλικά ενίσχυσης-όπλισης.

Στις Φωτογραφίες 1.12 και 1.13 παρουσιάζονται δύο τύποι Γεωπλεγμάτων, ενώ στις Φωτογραφίες 1.14 και 1.15 εφαρμογές αυτών σε τεχνικά έργα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η πλέξη των Γεωπλεγμάτων είναι διαφορετική από αυτή την Γεωφασμάτων και συγκεκριμένα οι οπές αυτών έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις, οι οποίες ανάλογα και με τις ειδικότερες ανάγκες της κάθε κατασκευής και του υλικού πλήρωσης που χρησιμοποιείται ποικίλουν. Σε ορισμένες ωστόσο κατασκευές συνδυάζονται διαφορετικά υλικά, πχ Γεωφάσματα και Γεωπλέγματα, όπως φαίνεται και στην Φωτογραφία 1.10 που προηγήθηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1



Φωτογραφία 1.12. Τύπος Γεωπλέγματος.
Photograph 1.12. Geogrid type.



Φωτογραφία 1.13. Τύπος Γεωπλέγματος.
Photograph 1.13. Geogrid type.



Φωτογραφία 1.14. Εφαρμογές Γεωπλέγματος σε τεχνικά έργα.
Photograph 1.14. Implementation of Geogrid in technical constructions.



Φωτογραφία 1.15. Εφαρμογές Γεωπλέγματος σε τεχνικά έργα.
 Photograph 1.15. Implementation of Geogrid in technical constructions.

Τα *Γεωδύχτια* αποτελούν και αυτά έναν ξεχωριστό τομέα στον χώρο των γεωσυνθετικών και σχηματίζονται συνήθως από συνεχόμενα σείτ από πολυμερείς λωρίδες σε παράλληλη θέση μεταξύ τους, σχηματίζοντας οξείες γωνίες η μία με την άλλη. Τα *Γεωδύχτια* χρησιμοποιούνται κυρίως για αποστράγγιση και έχουν χρησιμοποιηθεί για την μεταβίβαση υγρών όλων των ειδών.

Οι *Γεωμεμβράνες* αποτελούν την άλλη μεγάλη κατηγορία Γεωσυνθετικών και αποτελούνται από αδιαπέρατα λεπτά φύλλα από πλαστικό ή καουτσούκ και χρησιμοποιούνται κυρίως για επενδύσεις και καλύμματα εγκαταστάσεων αποθήκευσης υγρών ή στερεών. Λόγω του ότι είναι αδιαπέρατα, χρησιμοποιούνται κυρίως για τον φραγμό υγρών και αέριων ουσιών.

Τέλος, χρησιμοποιούνται σε μικρότερη κλίμακα οι *Γεωσωλήνες* που αποτελούν ένα ακόμη είδος γεωσυνθετικών με μεγάλη αντοχή σε συμπίεση και τα *Γεωσύνθετα* υλικά που αποτελούνται από έναν συνδυασμό από Γεωφάσματα και Γεωδύχτια, είτε από Γεωπλέγματα και Γεωμεμβράνες, ή από τον συνδυασμό κάποιων εκ των τεσσάρων υλικών με κάποιο άλλο υλικό όπως για παράδειγμα διάφορα είδη εδάφους,

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

διαμορφωμένα πλαστικά φύλλα, μεταλλικά καλώδια ή αγκύρια κλπ. Οι βασικές εφαρμογές σχετίζονται με όλες τις λειτουργίες που αναφέρθηκαν στα παραπάνω και ειδικότερα με: διαχωρισμό, όπλιση-ενίσχυση, φιλτράρισμα, αποστράγγιση και δημιουργία υδρομόνωσης.

1.5 Μέθοδοι διερεύνησης και σχεδιασμού οπλισμένων πρανών.

Η ευστάθεια των οπλισμένων πρανών σχετίζεται με τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Το ύψος και η κλίση του πρανούς καθώς και οι στατικές και δυναμικές συνθήκες φόρτισης καθορίζουν την ποσότητα της φόρτισης που απαιτείται προκειμένου να αποφευχθεί η αστοχία. Οπλισμένα πρανά με χαμηλό ύψος και κλίση κοντά στην γωνία τριβής του εδάφους απαιτούν σχετικά μικρή ποσότητα οπλισμού. Από την άλλη πλευρά, απότομα πρανά με μεγάλο ύψος είναι τρωτά σε στατικά και σεισμικά φορτία και απαιτούν όπλιση μεγαλύτερης αντοχής και μήκους.

Προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά των οπλισμένων πρανών και οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας, εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι οι οποίες και χωρίζονται σε 3 βασικές κατηγορίες: αναλυτικές, υπολογιστικές και πειραματικές.

Η «Μέθοδος της Οριακής Ισορροπίας» και η «Μέθοδος Οριακής Ανάλυσης» εφαρμόζονται παραδοσιακά προκειμένου να προκύψουν *αναλυτικές λύσεις* (Chen, 1975). Επίσης, η «Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων» μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη *υπολογιστικών μοντέλων*, όπου μπορεί να ληφθεί υπόψη η διεπιφάνεια μεταξύ του εδάφους και της όπλισης και να προσδιοριστεί το πεδίο τάσεων και τροπών του μοντέλου, ενώ δίνεται και η δυνατότητα μη γραμμικής ανάλυσης. Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί καταστατικούς νόμους των εδαφικών υλικών και μοντελοποίηση των διεπιφανειών και της αλληλεπίδρασης των υλικών. Μια από τις μεθόδους που χρησιμοποιείται σε λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων είναι και η μέθοδος «Μείωσης του Συντελεστή Αντοχής» (“Strength Reduction Factor”).

Όλες οι μέθοδοι που περιλαμβάνουν αριθμητικούς υπολογισμούς (αναλυτικές και υπολογιστικές), θα πρέπει να συγκριθούν και να επιβεβαιωθούν με φυσικά δεδομένα (‘physical data’) σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Σχετικά με την *πειραματική ανάλυση*, πολλές είναι οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί σε μοντέλα φυσικών διαστάσεων καθώς και υπό κλίμακα, ενώ πολλές φορές έχει χρησιμοποιηθεί σεισμική τράπεζα όπου και δίνεται η

δυνατότητα να επιβληθεί ελεγχόμενη σεισμική διέγερση, να προσδιοριστούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και του οπλισμού και να μετρηθούν οι τροπές. Ωστόσο, τόσο οι εδαφικές συνθήκες φόρτισης όσο και η αναγωγή της σεισμικής συμπεριφοράς των προσομοιωμάτων αυτών σε κατασκευές φυσικών διαστάσεων δεν είναι πάντα ακριβείς, γεγονός που κάνει δύσκολη την επιτυχή προσομοίωσή τους.

Προκειμένου να προσδιορισθούν συνθήκες φόρτισης όμοιες με αυτές της πραγματικότητας, εφαρμόζεται η τεχνολογία των γεωτεχνικών φυγοκεντριστών, όπου μοντέλα υπό κλίμακα προσομοιώνουν την συμπεριφορά πρωτότυπων κατασκευών κάτω από την αυξημένη επιτάχυνση της βαρύτητας. Κατά την μελέτη κατασκευών σε γεωτεχνικούς φυγοκεντριστές οι πρωτότυπες κατασκευές μελετώνται σε ελεγχόμενο περιβάλλον και αναπαράγονται οι πρωτότυπες συνθήκες φόρτισης και οι αντίστοιχες τάσεις, ενώ οι κινηματικά αποδεκτοί μηχανισμοί αστοχίας μπορούν να προσδιορισθούν. Προκειμένου τα μοντέλα υπό κλίμακα να αναπαριστούν όσο το δυνατόν καλύτερα τις πρωτότυπες κατασκευές, τα υλικά και η γεωμετρία τους θα πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένους κανόνες κλίμακας, όπως για παράδειγμα εκείνους που έχουν εισαχθεί από τον Schofield (1980), ενώ επίσης η επιρροή των συνόρων θα πρέπει να ελαχιστοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο (Garnier et al 2007). Ωστόσο, οι περισσότεροι γεωτεχνικοί φυγοκεντριστές δεν συμπεριλαμβάνουν διάταξη προσομοίωσης της σεισμικής φόρτισης με αποτέλεσμα να μην μπορεί να πραγματοποιηθεί πλήρης μελέτη παρά μόνο για στατικές συνθήκες φόρτισης.

1.6 Στόχος Διδακτορικής Διατριβής και περιληπτική περιγραφή κεφαλαίων.

Η εφαρμογή των διαφορετικών μεθόδων διερεύνησης οπλισμένων πρανών μπορεί να προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά αυτών, ενώ η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων μπορεί να παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα τόσο για τις υπό μελέτη κατασκευές, όσο και για τις ίδιες τις μεθόδους που εφαρμόζονται. Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιείται αναλυτική, πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση οπλισμένων πρανών με απλή και σύνθετη γεωμετρία, έναντι στατικής και σεισμικής φόρτισης.

Κατά την *αναλυτική διερεύνηση* αναπτύχθηκε νέα αναλυτική λύση (Karogianni & Sakellariou, 2008), η οποία και ενσωματώθηκε σε ολοκληρωμένη μεθοδολογία, για τον

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

σχεδιασμό και την μελέτη ενιαίων οπλισμένων πρανών καθώς και πρανών με αναβαθμούς, έναντι στατικών και σεισμικών φορτίσεων. Βάσει της αναλυτικής λύσης και της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, δημιουργήθηκε λογισμικό, περίπου 5000 γραμμών, σε γλώσσα προγραμματισμού Embarcadero Delphi, (Embarcadero® Delphi® XE2, 2011) με στόχο την ολοκληρωμένη μελέτη ενιαίων οπλισμένων πρανών καθώς και πρανών με αναβαθμούς, έναντι στατικών και σεισμικών δράσεων. Τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης καθώς και της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, συγκρίνονται μέσω του λογισμικού που αναπτύχθηκε, με αντίστοιχα αποτελέσματα υπολογιστικών μοντέλων που δημιουργήθηκαν με γεωτεχνικά προγράμματα του εμπορίου (Karogianni & Sakellariou, 2008).

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε *πειραματική διερεύνηση* (Karogianni et al. 2010) όπου και κατασκευάστηκαν συνολικά 16 μοντέλα οπλισμένων πρανών και τοποθετήθηκαν στον διαμέτρου 2.2 m γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETH Zurich (Springman et al. 2001), ενσωματώνοντας αισθητήρες οπτικών ινών και λαμβάνοντας ψηφιακές φωτογραφίες προκειμένου να εφαρμοσθεί οπτική μέθοδος παρακολούθησης της συμπεριφοράς τους (“Particle Image Velocimetry Analysis”). Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των αντίστοιχων πρωτότυπων υπολογιστικών μοντέλων (Karogianni et al. 2012), με γνωστές αναλυτικές μεθόδους καθώς και με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραματικών, αναλυτικών και υπολογιστικών μεθόδων.

Συνολικά, στόχος της παρούσας έρευνας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των οπλισμένων πρανών με διάφορες μεθόδους προκειμένου να προκύψουν συμπεράσματα τόσο από γεωτεχνικής σκοπιάς όσο και από την σκοπιά των μεθόδων ανάλυσης. Στα παρακάτω αναφέρονται περιληπτικά όσα παρουσιάζονται στα Κεφάλαια της Διδακτορικής Διατριβής.

➤ *1^ο Κεφάλαιο: Εισαγωγικά Στοιχεία- Στόχος Διατριβής.*

- Εισαγωγή στην έννοια της οπλισμένης γης.
- Ιστορική αναδρομή.
- Αρχή λειτουργίας οπλισμένης γης.
- Γεωσυνθετικά υλικά.
- Μέθοδοι διερεύνησης και σχεδιασμού οπλισμένων πρανών.

- Στόχος Διδακτορικής Διατριβής και περιληπτική περιγραφή Κεφαλαίων.
- **2^ο Κεφάλαιο: Αναλυτική Διερεύνηση Οπλισμένων Πρανών.**
- Εισαγωγή στην αναλυτική διερεύνηση οπλισμένων πρανών.
- Μέθοδοι αναλυτικής διερεύνησης οπλισμένων πρανών.
- Μέθοδοι σεισμικού ελέγχου.
- Μέθοδοι αναλυτικής διερεύνησης που εφαρμόζονται στην παρούσα έρευνα.
 - Κινηματικό Θεώρημα Οριακής Ανάλυσης.
 - Σχέσεις Απόσβεσης
 - Κατανομή Οπλισμού.
 - Μηχανισμοί Αστοχίας.
 - Εκτίμηση Μόνιμης Μετατόπισης.
- Ανασκόπηση Κεφαλαίου και συμπεράσματα.
- **3^ο Κεφάλαιο: Νέα Αναλυτική Λύση και Προτεινόμενη Μεθοδολογία για τον Αντισεισμικό Σχεδιασμό και Έλεγχο Επάρκειας Οπλισμένων Πρανών με Αναβαθμούς.**
- Προτεινόμενη νέα αναλυτική λύση για τον αντισεισμικό σχεδιασμό και έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.
- Παρουσίαση ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για τον σχεδιασμό και έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών.
- Σχεδιασμός και ανάπτυξη λογισμικού σε κώδικα Embarcadero Delphi.
 - Σχεδιασμός λογισμικού και λειτουργίες.
 - Παρουσίαση κώδικα λογισμικού.
- Σχόλια και Συμπεράσματα.
- **4^ο Κεφάλαιο: Παραδείγματα Οπλισμένων Πρανών με Αναβαθμούς, Σύμφωνα με την Νέα Αναλυτική Λύση και Σύγκριση Αποτελεσμάτων με Υπολογιστικές Μεθόδους.**
- Περίληψη Κεφαλαίου.
- Παραδείγματα εκτίμησης μέγιστης αναμενόμενης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης.
- Παραδείγματα αντισεισμικού σχεδιασμού οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

- Παραδείγματα στατικής ανάλυσης οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.
- Παραδείγματα εύρεσης κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.
- Παραδείγματα υπολογισμού της σεισμικής τρωτότητας μέσω του υπολογισμού της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης.
- Μέθοδοι ανάλυσης υπολογιστικών μοντέλων.
 - Ανάλυση σύμφωνα με την μέθοδο των λωρίδων.
 - Ανάλυση σύμφωνα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.
- Συμπεράσματα Κεφαλαίου και προτάσεις.

➤ *5^ο Κεφάλαιο: Πειραματική Διερεύνηση Γεωτεχνικών Κατασκευών.*

- Εισαγωγή στην πειραματική διερεύνηση γεωτεχνικών κατασκευών.
- Βασικές αρχές λειτουργίας γεωτεχνικών φυγοκεντριστών.
- Νόμοι ομοιότητας μοντέλων.
 - Η αρχή της ομοιογένειας και το θεώρημα π του Buckingham.
 - Νόμοι ομοιότητας σε γεωτεχνικούς φυγοκεντριστές.
- Συμπεράσματα Κεφαλαίου

➤ *6^ο Κεφάλαιο: Ανασκόπηση Μετρητικών Διατάξεων και Μετρητικές Μέθοδοι Παρούσας Έρευνας.*

- Εισαγωγή στις μετρητικές διατάξεις και μεθόδους.
- Μετρητικές μέθοδοι παρούσας έρευνας.
- Υπολογισμός τροπών με τη χρήση αισθητήρων οπτικών ινών.
 - Λειτουργία και τύποι αισθητήρων.
 - Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών σε τεχνικά έργα.
 - Εφαρμογή αισθητήρων οπτικών ινών σε οπλισμένα πρανά κατά την φόρτισή τους σε γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.
- Υπολογισμός διατμητικών τροπών με την εφαρμογή της μεθόδου Particle Image Velocimetry (PIV).
 - Βασικές αρχές μεθόδου PIV.
 - Αλγόριθμος GeoPIV.

- Συμπεράσματα Κεφαλαίου και προτάσεις.
- **7^ο Κεφάλαιο: Κατασκευή Μοντέλων και Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης.**
 - Κατασκευή μοντέλων οπλισμένων πρανών.
 - Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά εδάφους και οπλισμών.
 - Περιγραφή πειραματικής διάταξης.
 - Εφαρμογή αισθητήρων οπτικών ινών σε μοντέλα οπλισμένων πρανών.
 - Εφαρμογή μεθοδολογίας GeoPIV σε μοντέλα οπλισμένων πρανών.
 - Συμπεράσματα Κεφαλαίου και προτάσεις.
- **8^ο Κεφάλαιο: Υλοποίηση Πειραμάτων, Μετρήσεις και Αποτελέσματα**
 - Περιγραφή μεθοδολογίας υλοποίησης πειραμάτων και φάσεις φορτίσεων
 - Περιγραφή πειραμάτων έναντι στατικής φόρτισης
 - Αποτελέσματα μετρήσεων
 - Μετρήσεις με αισθητήρες οπτικών ινών
 - Διατμητικές τροπές μετρούμενες με την μέθοδο GeoPIV.
 - Συμπεράσματα Κεφαλαίου.
- **9^ο Κεφάλαιο: Επεξεργασία και Αξιολόγηση Πειραματικών Μετρήσεων, Αναγωγή Πειραματικών Μοντέλων σε Μοντέλα υπό Κλίμακα 1:1 και Υπολογιστική Διερεύνηση.**
 - Σύγκριση και αξιολόγηση μετρήσεων οπτικών ινών.
 - Σύγκριση και αξιολόγηση με την μέθοδο GeoPIV.
 - Εντοπισμός θέσεων αισθητήρων οπτικών ινών, πάνω σε σχήματα διατμητικών τροπών, δημιουργούμενα μέσω ανάλυσης PIV.
 - Αναγωγή Πειραματικών Μοντέλων σε Αντίστοιχα Μοντέλα Πρωτότυπων Κατασκευών και Υπολογιστική Διερεύνηση.
 - Υπολογιστικά μοντέλα οπλισμένων πρανών-ανάλυση με το Slide
 - Υπολογιστικά μοντέλα οπλισμένων πρανών με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Phase²)
 - Συμπεράσματα Κεφαλαίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

➤ *10^ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα Έρευνας, Προτάσεις και Οδηγίες.*

- Επίτευξη στόχου Διδακτορικής Διατριβής.
- Αναλυτική διερεύνηση & νέα αναλυτική λύση.
- Πειραματική διερεύνηση.
- Αξιολόγηση πειραματικών μετρήσεων.
- Αναγωγή πειραματικών μοντέλων σε αντίστοιχα μοντέλα πρωτότυπων κατασκευών και υπολογιστική διερεύνηση.
- Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Μέρος Α'

Αναλυτική Διερεύνηση Οπλισμένων Πρανών με Σύνητη
Γεωμετρία, Νέα Αναλυτική Λύση και Λογισμικό.

Σύντομη Περίληψη Μέρους Α΄

Στο Α΄ Μέρος της Διδακτορικής Διατριβής, προτείνεται *νέα αναλυτική λύση* για τον αντισεισμικό σχεδιασμό οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς η οποία και βασίζεται στο «Κινηματικό Θεώρημα Οριακής Ανάλυσης» και στην «Απλοποιημένη Φασματική Ανάλυση» και αφορά ομογενή, μη συνεκτικά εδάφη που αναμένεται να παραμορφωθούν πλαστικά ακολουθώντας το κριτήριο αστοχίας Coulomb.

Σύμφωνα με τη νέα αναλυτική λύση, τα οπλισμένα πρανή με μεγάλο ύψος και απότομη κλίση χωρίζονται σε περισσότερα πρανή (αναβαθμούς) με μικρότερο ύψος και μεταβαλλόμενη κλίση. Η εφελκυστική αντοχή και το μήκος του οπλισμού υπολογίζεται ξεχωριστά για τον κάθε ένα αναβαθμό, ενώ επίσης υπάρχει οριζόντια απόσταση λ μεταξύ τους, η οποία και ορίζεται ανάλογα με τις ανάγκες της κατασκευής.

Η αναλυτική διερεύνηση των οπλισμένων πρανών με σύνθετη γεωμετρία πραγματοποιήθηκε με την στήριξη (υποτροφία) του “Geosynthetic Institute” (GSI), Ινστιτούτου που εδρεύει στις Η.Π.Α., ενδιαφερόμενο για θέματα Γεωσυνθετικών, στα πλαίσια παγκόσμιας προκήρυξης-διαγωνισμού που πραγματοποιήθηκε για την ενίσχυση νέων ερευνητών που εκπονούν Διδακτορική Διατριβή σε θέματα γεωσυνθετικών. Δύο υποτροφίες δόθηκαν παγκοσμίως σε νέους ερευνητές εκτός Η.Π.Α. και τρεις εντός Η.Π.Α. Η έρευνα υποστηρίχθηκε για 3 συνεχόμενα χρόνια (2008-2011), με ξεχωριστή υποβολή υποψηφιότητας και κρίση ανά έτος.

Σχετικές ανακοινώσεις:

- **Kapogianni, E., Sakellariou, M., Kalogeras, I.** “*Methodology for the design of reinforced soil slopes with simple and composite geometry under seismic loading and evaluation of their vulnerability*”. 3rd Panhellenic Conference on Earthquake Engineering and Engineering Seismology, November 2008, Athens, Greece (Paper 1893).
- **Kapogianni, E., Sakellariou, M.** “*Comparison of an analytical solution for multi-step reinforced soil slopes with conventional numerical methods*”. 4th European Geosynthetics Conference. September 2008, Edinburgh, Scotland (Paper 57).
- **Kapogianni, E., Sakellariou, M.** “*Analytical solution of multi step reinforced-soil slopes stability due to static and seismic loading*”. 1st International Conference on Transportation Geotechnics. August 2008, Nottingham, UK (pp. 445-451).
- **Kapogianni, E.** “*Seismic design of reinforced slopes with simple and composite geometry*”. The Scientific Work of Women Engineers in Greece, March 2008, Athens, Greece.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Αναλυτική Διερεύνηση Οπλισμένων Πραγμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Στο Σχήμα 2.1, παρουσιάζεται επίσης ένας πιθανός κυκλικός μηχανισμός αστοχίας με κέντρο κύκλου O και ακτίνα R , κινητό φορτίο στην στέψη του πρανούς q_i σε απόσταση e από το O , ύψος πρανούς H και βάρος εδαφικής μάζας W σε απόσταση x από το O .

Χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι αναλυτικής διερεύνησης προκειμένου να προσδιοριστεί η συμπεριφορά και η ευστάθεια των οπλισμένων πρανών που υπόκεινται σε στατική και σεισμική φόρτιση. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τις ειδικότερες ανάγκες της υπό μελέτη κατασκευής, ενώ πολλές φορές εφαρμόζονται παραπάνω από μία μέθοδοι προκειμένου να συγκριθούν μεταξύ τους τα αποτελέσματα που προκύπτουν και να διεξαχθούν ολοκληρωμένα συμπεράσματα για την συμπεριφορά της κατασκευής από διάφορες οπτικές γωνίες. Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται και αναλύονται οι πιο σημαντικές από αυτές.

2.2 Μέθοδοι αναλυτικής διερεύνησης οπλισμένων πρανών.

Η συμπεριφορά των εδαφικών κατασκευών με οπλισμό και ειδικά υπό την επίδραση σεισμικής φόρτισης δεν είναι πλήρως γνωστή. Αυτό συμβαίνει διότι δεν υπάρχει σαφές ιστορικό με καταγεγραμμένες αναφορές στις ιδιότητες του εδάφους και του οπλισμού, την αλληλεπίδραση αυτών των δύο, τα χαρακτηριστικά του σεισμού καθώς και την μέτρηση των τροπών λόγω του σεισμού. Όπως αναφέρθηκε και στο 1^ο Κεφάλαιο, οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για την διερεύνηση των οπλισμένων πρανών διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: πειραματικές, υπολογιστικές και αναλυτικές. Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται οι αναλυτικές μέθοδοι που εφαρμόζονται παραδοσιακά για την στατική και σεισμική διερεύνηση των οπλισμένων πρανών.

Ειδικότερα, η εφαρμογή κάποιας *αναλυτικής λύσης* μπορεί να προσφέρει την πλήρη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς της κατασκευής, αποτελεί μέτρο σύγκρισης των υπολογιστικών μεθόδων, απαιτεί συχνά μικρότερο υπολογιστικό κόστος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα γρήγορο εργαλείο για τον σχεδιασμό των εδαφικών κατασκευών. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αναλυτική διερεύνηση της σεισμικής ευστάθειας κατασκευών οπλισμένης γης ποικίλουν και παρουσιάζουν διάφορα πλεονεκτήματα.

Οι βασικότερες μέθοδοι που εφαρμόζονται κατά την αναλυτική διερεύνηση είναι η «Μέθοδος Οριακής Ανάλυσης» (“Limit Analysis Method”, Drucker et al. 1952, Chen,

1975) και η «Μέθοδος Οριακής Ισορροπίας» (“Limit Equilibrium Method, Fellenius”, 1926, Terzaghi, 1943) και αναλύονται στις παρακάτω παραγράφους.

Σύμφωνα με τη «Μέθοδο Οριακής Ανάλυσης», το έδαφος λαμβάνεται υπόψη ως ένα ιδεατό πλαστικό υλικό που ακολουθεί κάποιους καθορισμένους νόμους αστοχίας (flow rules). Μέσω αυτής της θεώρησης της συμπεριφοράς του εδάφους ως ιδεατό, μπορούν να θεμελιωθούν δύο θεωρήματα πλαστικότητας των εδαφών, «άνω και κάτω ορίων», τα οποία και περιγράφονται από τους Drucker et al. (1952) και τον Chen (1975).

Σύμφωνα με το θεώρημα «άνω ορίου», εάν μια σειρά εξωτερικών φορτίων δρουν στον πιθανό μηχανισμό αστοχίας και το έργο που παράγεται από αυτά ισούται με το έργο που καταναλώνεται από τις εσωτερικές τάσεις, τότε τα εξωτερικά φορτία είναι ίσα με τα πραγματικά φορτία αστοχίας. Επισημαίνεται ότι τα εξωτερικά φορτία δεν είναι απαραίτητα σε ισορροπία με τις εσωτερικές τάσεις και ότι ο μηχανισμός αστοχίας δεν είναι ο πραγματικός-κρίσιμος μηχανισμός. Εξετάζοντας διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας, μπορεί να ευρεθεί και ο κρίσιμος μηχανισμός που εκφράζεται από το θεώρημα του άνω ορίου.

Σύμφωνα με το θεώρημα του «κάτω ορίου», ισχύει ότι εάν μπορεί να βρεθεί μια κατανομή τάσεων που να εκφράζει την εδαφική μάζα και να ισορροπεί με μια σειρά από εξωτερικά φορτία, τότε τα εξωτερικά αυτά φορτία ισούνται με τα πραγματικά φορτία αστοχίας. Επισημαίνεται ότι στο θεώρημα «κάτω ορίου», οι τροπές και οι μετατοπίσεις δεν λαμβάνονται υπόψη και ότι και εδώ η κατάσταση των τάσεων δεν είναι απαραίτητα η κατάσταση των τάσεων κατά την αστοχία, αλλά εξετάζοντας διαφορετικές αποδεκτές εντατικές καταστάσεις και αντίστοιχοι μηχανισμοί αστοχίας, η κρισιμότερη που αντιστοιχεί

Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος *Οριακής Ισορροπίας*, εφαρμόζεται για την ανάλυση προβλημάτων ευστάθειας πρανών εδώ και πολλά χρόνια, θεωρώντας ότι το έδαφος κατά την αστοχία ακολουθεί το ιδεατό πλαστικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Fellenius, 1926, Terzaghi, 1943). Τα τελευταία 30 χρόνια, η ανάλυση των πρανών με την μέθοδο Οριακής Ισορροπίας έχει βελτιωθεί και εμπλουτιστεί με άλλες μεθόδους, όπως για παράδειγμα αυτή των λωρίδων από τους: Bishop (1955), Janbu (1954), Morgenstern & Price (1965) και Spencer (1967).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

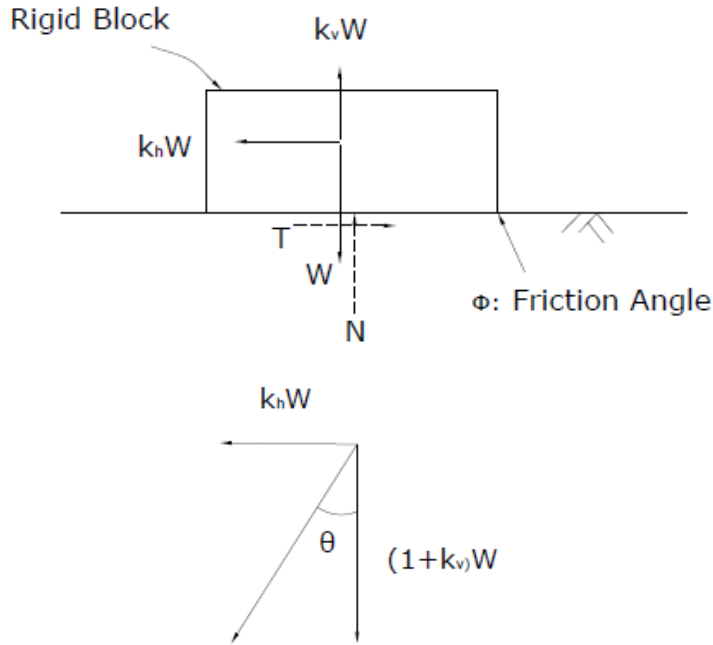
Όλες οι μέθοδοι Οριακής Ισορροπίας, διερευνούν την ισορροπία της εδαφικής μάζας που έχει την τάση να «γλιστρήσει» υπό την επιρροή της βαρύτητας ή/ και του σεισμού, μέσω της σύγκρισης δυνάμεων, τροπών ή τάσεων που αντιστέκονται στην αστάθεια και εκείνων που οδηγούν στην αστάθεια, ενώ θεωρείται ότι κατά μήκος της πιθανής επιφάνειας αστοχίας εφαρμόζεται ο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Επίσης συνήθως κατά την εφαρμογή των σύγχρονών μεθόδων Οριακής Ισορροπίας, προσδιορίζεται και ο Συντελεστής Αστοχίας των κατασκευών.

2.3 Μέθοδοι σεισμικού ελέγχου.

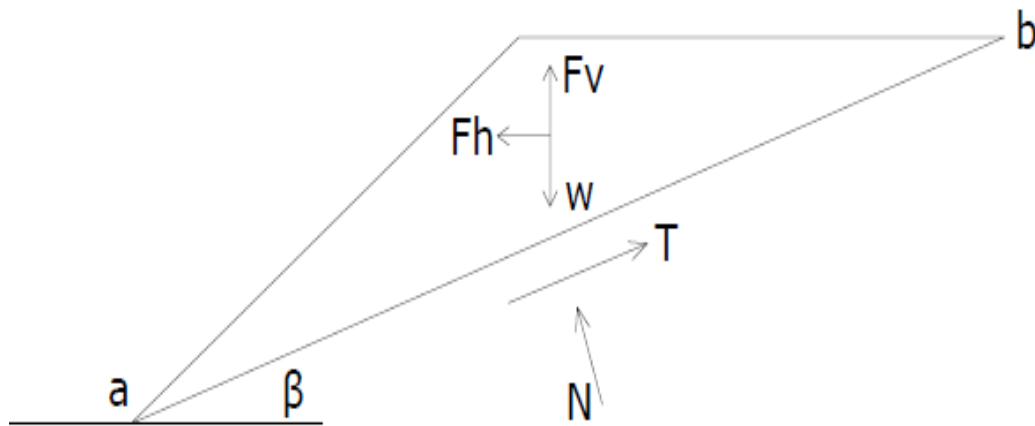
Η πλειονότητα των αναλυτικών μεθόδων που συνδυάζονται με σεισμικούς ελέγχους, βασίζονται σε μια *ψευδοστατική προσέγγιση* σύμφωνα με την οποία η σεισμική δράση σε μια εδαφική μάζα, που πιθανώς θα αστοχήσει, αντιπροσωπεύεται από μια στατική δύναμη που δρα κατά την οριζόντια διεύθυνση στο κέντρο βάρους της εδαφικής μάζας ως δύναμη αδρανείας, σύμφωνα με την αρχή “d’ Alembert”. Η αντικατάσταση όμως της δυναμικής φόρτισης του σεισμού με μια ψευδοστατική δύναμη, είναι προσεγγιστική μέθοδος. Αυτό γιατί δεν λαμβάνεται υπόψη η σεισμική ιστορία και οι μετατοπίσεις κατά τη διάρκεια του σεισμού. Παρόλα αυτά θεωρείται αποδεκτή τεχνική και χρησιμοποιείται και για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας.

Στην ψευδοστατική προσέγγιση που βασίζεται στην μέθοδο ολισθαίνουσας μάζας του Newmark (Newmark, 1965), θεωρείται ότι η εδαφική αστοχία και οι μετακινήσεις αρχίζουν να αναπτύσσονται εάν οι σεισμικές δυνάμεις που δρουν σε κάποια πιθανή ολισθαίνουσα μάζα είναι αρκετά μεγάλες έτσι ώστε να υπερνικήσουν την παραγόμενη αντίσταση. Κατά συνέπεια, με τον υπολογισμό της επιτάχυνσης μπορεί να αξιολογηθεί η τελική μετατόπιση της ολισθαίνουσας μάζας.

Ο υπολογισμός αυτός είναι βασισμένος στην υπόθεση ότι ολόκληρη η κινούμενη μάζα μετατοπίζεται ως ενιαίο άκαμπτο σώμα με την αντίσταση να παρουσιάζεται κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Όταν οι δυνάμεις αδρανείας και η παραγόμενη αντίσταση μπορούν να καθοριστούν, η μέθοδος δίνει χρήσιμα και ρεαλιστικά αποτελέσματα. Στα Σχήματα 2.2 και 2.3, παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση της μεθόδου και στις Εξισώσεις 2.1 και 2.2 οι τιμές των δυνάμεων που αναπτύσσονται.



Σχήμα 2.2. Δυνάμεις που λαμβάνονται υπόψη στην ψευδοστατική ανάλυση.
Figure 2.2. Forces taken into account on pseudo-static analysis.



Σχήμα 2.3. Δυνάμεις που λαμβάνονται υπόψη στην ψευδοστατική ανάλυση.
Figure 2.3. Forces taken into account on pseudo-static analysis.

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W \quad (2.1)$$

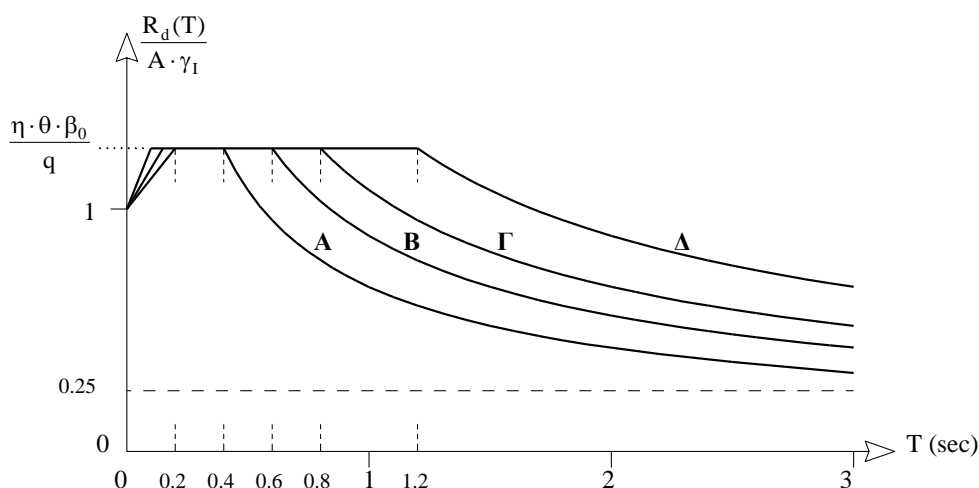
$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W \quad (2.2)$$

Όπου:

- a_h και a_v , η οριζόντια και η κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης αντίστοιχα.
- k_h και k_v , αδιάστατοι συντελεστές σεισμικής επιτάχυνσης.
- W , το βάρος της ολισθαίνουσας μάζας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ειδικότερα για τον Ελλαδικό χώρο, ο *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός* (ΕΑΚ, 2000) προδιαγράφει τις σεισμικές διεγέρσεις ως προς την διεύθυνση και στάθμη εφαρμογής καθώς και ως προς το μέγεθος τους. Ειδικότερα ορίζει ότι οι σεισμικές διεγέρσεις καθορίζονται με την βοήθεια φασμάτων απόκρισης επιτάχυνσης ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή. Τα φάσματα επιτάχυνσης για τις οριζόντιες συνιστώσες έχουν την μορφή του Σχήματος 2.4 και η επιτάχυνση σχεδιασμού προσδιορίζεται από τις παρακάτω Εξισώσεις 2.3 έως και 2.5:



Σχήμα 2.4. Φάσμα Σχεδιασμού κατά ΕΑΚ με $R_d(T)/A \cdot \gamma_I$ και σχεδίαση για: $\eta \cdot \theta \cdot \beta_0 / q = 2.5/2$.
Figure 2.4. Planning Range according to EAK, for $R_d(T)/A \cdot \gamma_I$ and design for: $\eta \cdot \theta \cdot \beta_0 / q = 2.5/2$.

$$0 \leq T < T_1: R_d(T) = \gamma_I \cdot A \cdot \left[1 + \frac{T}{T_1} \left(\frac{\eta \cdot \theta \cdot \beta_0}{q} - 1 \right) \right] \quad (2.3.a)$$

$$T_1 \leq T \leq T_2: R_d(T) = \gamma_I \cdot A \cdot \frac{\eta \cdot \theta \cdot \beta_0}{q} \quad (2.3.b)$$

$$T_2 < T: R_d(T) = \gamma_I \cdot A \cdot \frac{\eta \cdot \theta \cdot \beta_0}{q} \cdot \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} \quad (2.3.c)$$

όπου:

$A = \alpha \cdot g$, η μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση του εδάφους

g , η επιτάχυνση της βαρύτητας

γ_I , ο συντελεστής σπουδαιότητας του κτιρίου

q , ο συντελεστής συμπεριφοράς της κατασκευής

η , ο διορθωτικός συντελεστής για ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης $\neq 5\%$,

θ , ο συντελεστής επιρροής της θεμελίωσης

T_1 και T_2 οι χαρακτηριστικές περιόδους του φάσματος

$\beta_0 = 2.5$, ο συντελεστής φασματικής ενίσχυσης και τέλος

A, B, Γ, Δ, η κατηγορία εδάφους.

Ο διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης υπολογίζεται από τη Εξίσωση:

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\zeta}} \geq 0.7 \quad (2.4)$$

όπου οι τιμές της κρίσιμης απόσβεσης $\zeta(\%)$ δίδονται στον Πίνακα 2.8 του ΕΑΚ για κάθε είδος κατασκευής.

Αν δεν υπολογίζεται η ιδιοπερίοδος T, τότε το $R_d(T)$ θα λαμβάνεται από την Εξίσωση (2.3.β).

Σε κάθε περίπτωση απαιτείται:

$$\frac{R_d(T)}{A\gamma_i} \geq 0.25. \quad (2.5)$$

Σχετικά με την κατακόρυφη συνιστώσα, το φάσμα της καθορίζεται από τις ίδιες Εξισώσεις με τις εξής μεταβολές: αντί της οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης A χρησιμοποιείται η αντίστοιχη κατακόρυφη συνιστώσα $A_v=0.7 \cdot A$, αντί του συντελεστή συμπεριφοράς q χρησιμοποιείται ο συντελεστής $q_v=0.50$, $q \geq 1.00$ και τέλος η τιμή του συντελεστή θεμελίωσης θ λαμβάνεται πάντοτε ίση με 1.0.

2.4 Μέθοδοι αναλυτικής διερεύνησης που εφαρμόζονται στην παρούσα έρευνα.

2.4.1 Κινηματικό Θεώρημα Οριακής Ανάλυσης.

Το «Κινηματικό Θεώρημα Οριακής Ανάλυσης» βασίζεται στο θεώρημα του «Άνω Ορίου» και δηλώνει ότι «*Το πραινές θα καταρρεύσει αν ο ρυθμός του έργου που παράγεται από τις εξωτερικές φορτίσεις και το ίδιο βάρος του, υπερβεί το ρυθμό κατανάλωσης της ενέργειας, για κάθε ένα κινηματικά αποδεκτό μηχανισμό αστοχίας*» (Chen, 1975):

$$\int_V \sigma_{ij}^* \varepsilon_{ij}^* dV \geq \int_S T_i v_i dS + \int_V X_i v_i^* dV, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.6)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

όπου, ε_{ij}^* ο ρυθμός τροπών σε κάθε κινηματικά αποδεκτό πεδίο ταχυτήτων, σ_{ij}^* η αντίστοιχη συνιστώσα των τάσεων, ταχύτητα $v_i^*=v_i$ σε όριο S, X_i το διάνυσμα των δυνάμεων (ίδιο βάρος και αδρανειακή δύναμη λόγω σεισμού) και τέλος V ο όγκος.

Στην παρούσα ανάλυση εφαρμόζεται το «Κινηματικό Θεώρημα Οριακής Ανάλυσης» και πραγματοποιούνται και οι παρακάτω παραδοχές: η πίεση των πόρων του νερού και η πιθανή ρευστοποίηση δε λαμβάνονται υπόψη, ο ρυθμός παραγωγής εξωτερικού έργου προκύπτει από το άθροισμα του έργου λόγω του ιδίου βάρους της κατασκευής και της αδρανειακής δύναμης λόγω σεισμού, η κατανάλωση της ενέργειας οφείλεται αποκλειστικά στην όπλιση και τέλος, λαμβάνεται υπόψη μόνο η εφελκυστική αντοχή του οπλισμού ενώ η αντοχή του σε διάτμηση, κάμψη και θλίψη αγνοούνται.

2.4.2 Σχέσεις Απόσβεσης.

Οι σχέσεις απόσβεσης είναι ένα από τα βασικά εργαλεία στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Τέτοιες σχέσεις βασίζονται σε καταγραφές μέγιστων εδαφικών σεισμικών κινήσεων από ειδικά σειсмоγραφικά όργανα (επιταχυνσιογράφους), και εκφράζονται ως μαθηματικές συναρτήσεις που σχετίζουν τις παρατηρούμενες ποσότητες προς τις εστιακές παραμέτρους του σεισμού, τις παραμέτρους της διαδρομής διάδοσης και τις παραμέτρους των τοπικών εδαφικών συνθηκών. Μέχρι τώρα έχουν δημοσιευθεί τέτοιου τύπου σχέσεις που είτε αναφέρονται σε ευρύτερες περιοχές (Milne & Davenport, 1969; Campbell, 1985; Boore et al., 1993, Ambraseys, 1995, Ambraseys et al., 1996, Rinaldis et al., 1998) είτε σε μικρότερες (Chiaruttini & Siro, 1981; Papaioannou, 1986; Theodulidis, 1991).

Ιδιαίτερα για τον Ελληνικό χώρο, η γένεση ισχυρών σεισμών κοντά σε μεγάλα αστικά κέντρα, σε συνδυασμό με την αύξηση των εγκατεστημένων επιταχυνσιογράφων και των διαθέσιμων καταγραφών, αλλά και τη βελτίωση μεθόδων επεξεργασίας των δεδομένων (ακρίβεια στον υπολογισμό των σεισμικών παραμέτρων, αυτοματοποιημένη ψηφιοποίηση αναλογικών καταγραφών), επέφεραν νέες, περισσότερο αντιπροσωπευτικές σχέσεις απόσβεσης (Margaris et al., 2002; Skarlatoudis et al., 2003).

Οι σχέσεις που επιλέγονται για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης είναι οι πιο πρόσφατες σχέσεις που έχουν προταθεί (Skarlatoudis et al., 2003), οι οποίες προέκυψαν από ένα ομογενοποιημένο δείγμα από 1000 μέγιστες τιμές εδαφικής κίνησης που έχουν προέλθει από 225 σεισμούς κανονικών ρηγμάτων ή ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης. Το δείγμα

αυτό επιλέχθηκε από το σύνολο των διαθέσιμων καταγραφών του Ελληνικού χώρου (ΙΤΣΑΚ, www.itsak.gr και Γεωδυναμικό Ινστιτούτο ΕΑΑ, www.gein.noa.gr) για την περίοδο 1973 – 1999 και επεξεργάστηκε με ομογενοποιημένο τρόπο όσον αφορά τις εστιακές παραμέτρους των σεισμών και την επεξεργασία των καταγραφών ισχυρής δόνησης (Skarlatoudis et al., 2002; Skarlatoudis et al., 2003).

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στη στατιστική ανάλυση είναι της μορφής:

$$\log Y = c_0 + c_1 M_w + c_2 \log(R^2 + h^2)^{1/2} + c_3 F + c_5 S \quad (2.7)$$

$$\log Y = c_0 + c_1 M_w + c_2 \log(R + c_4) + c_3 F + c_5 S \quad (2.8)$$

όπου Y είναι η παράμετρος της ισχυρής εδαφικής κίνησης που πρέπει να εκτιμηθεί, M_w το μέγεθος ροπής, R η επικεντρική απόσταση σε km, h το εστιακό βάθος σε km, F η μεταβλητή που αφορά τον εστιακό μηχανισμό και S η μεταβλητή που αφορά τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Οι συντελεστές c_0 , c_1 , c_2 , c_3 , c_4 και c_5 , προσδιορίζονται από τη στατιστική ανάλυση. Ο συντελεστής c_4 της Εξίσωσης 2.8 αποτελεί διορθωτικό συντελεστή για την επίδραση στους υπολογισμούς του πολύ κοντινού πεδίου και είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί με ακρίβεια σε συνδυασμό με τον c_2 (όπως έχουν δείξει προηγούμενες μελέτες Papazachos & Papaioannou, 1997, 1998). Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται η τιμή $c_4 = 6$ km ως μέσο εστιακό βάθος των επιφανειακών σεισμών (Margaris et al., 2002).

Οι σχέσεις που προέκυψαν από τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων και χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας είναι οι παρακάτω:

$$\log PGA = 0.86 + 0.45 M_w - 1.27 \log(R^2 + h^2)^{1/2} + 0.1 F + 0.06 S \pm 0.286 \quad (2.9)$$

$$\log PGA = 1.07 + 0.45 M_w - 1.35 \log(R + 6) + 0.09 F + 0.06 S \pm 0.286 \quad (2.10)$$

όπου η μεταβλητή S παίρνει τις τιμές 0, 1 και 2 για κατηγορίες εδαφών B, C και D αντίστοιχα (σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση κατά NEHRP, 1994), και η μεταβλητή F παίρνει τις τιμές 0 και 1 για κανονικά ρήγματα και ανάστροφα/οριζόντιας μετατόπισης ρήγματα αντίστοιχα. Ο τελευταίος όρος στις Εξισώσεις 2.9 και 2.10 εκφράζει την τυπική απόκλιση της αναμενόμενης σεισμικής επιτάχυνσης ενώ επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι συγκεκριμένες σχέσεις αφορούν δείγμα με μέγιστο μέγεθος 6.5 και ως τέτοιες πρέπει να τίθενται στους υπολογισμούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Επιπλέον, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις που βασίζονται στις μελέτες των Theodoulidis & Papazachos (1992) και ειδικότερα σε στατιστική επεξεργασία καταγραφών στον Ελλαδικό χώρο αλλά και σε σεισμικά γεγονότα στην Ιαπωνία και την Αλάσκα.

$$\ln(a_h) = 3.88 + 1.12M_w - 1.65 \ln(R + 15) + 0.41S + 0.71P \quad (2.11)$$

Όπου a_h η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση του εδάφους (PGA), M_w το μέγεθος του σεισμού, R η επίκεντρη απόσταση, S η παράμετρος του εδάφους ($S=1$ για βραχώδη εδάφη και $S=0$ για μαλακά εδάφη), P η πιθανοτική παράμετρος ($P=0$ για 50% πιθανότητα υπέρβασης και $P=1$ για 16% πιθανότητα υπέρβασης).

Η παραπάνω σχέση υιοθετήθηκε από την ομάδα εργασίας του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (ΕΑΚ) για την χάραξη των ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της χώρας .

Ο Theodoulidis (1991) τροποποιεί την παραπάνω σχέση για τον υπολογισμό της PGA σε σκληρά εδάφη, θέτοντας $S=0.5$.

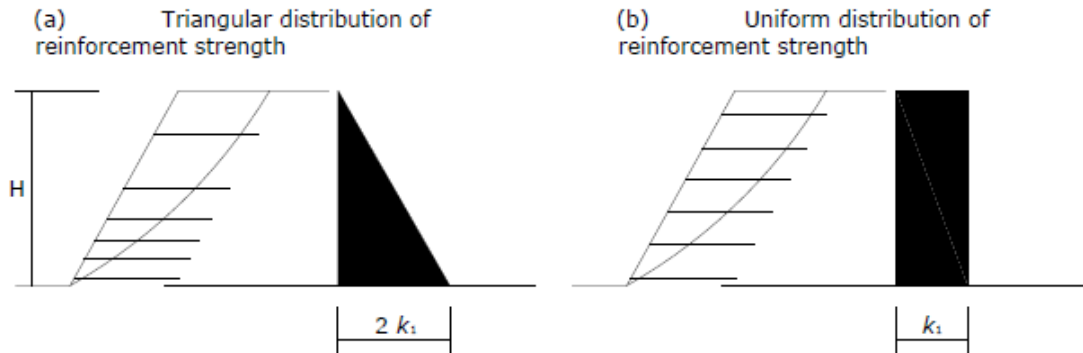
$$\ln(a_h) = 4.09 + 1.12M_w - 1.65 \ln(R + 15) \quad (2.12)$$

2.4.3 Κατανομή Οπλισμού.

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες ενότητες καθώς και στο 1^ο Κεφάλαιο, οι στρώσεις οπλισμού που τοποθετούνται στα πρηνή παρέχουν δυνάμεις που δρουν κατά την οριζόντια διεύθυνση τους και προσδιορίζονται από α) την αντοχή τους σε εξόλκευση και β) την αντοχή τους σε εφελκυστική καταπόνηση. Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, αγνοείται η αντοχή τους σε διάτμηση, κάμψη και θλίψη ενώ θεωρείται ότι η κατανάλωση της ενέργειας πραγματοποιείται αποκλειστικά από τις στρώσεις του οπλισμού.

Κατά την διαστασιολόγηση ενός οπλισμένου πρηνούς θα πρέπει να γίνεται επιλογή του οπλισμού ανάλογα με την απαιτούμενη αντοχή σε εφελκυσμό και σε εξόλκευση, ενώ επίσης θα πρέπει να καθορίζεται ο αριθμός των στρώσεων καθώς και το αν πρόκειται για ομοιόμορφη ή ανομοιόμορφη κατανομή. Συνήθως πρηνή ύψους μέχρι και 6 m σχεδιάζονται με ομοιόμορφη κατανομή της όπλισης ενώ γενικά απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη όπλισης και μεγαλύτερο μήκος αγκύρωσης όταν χρησιμοποιούμε ομοιόμορφες

στρώσεις οπλισμού. Στο Σχήμα 2.3, παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις για ανομοιόμορφη και ομοιόμορφη κατανομή των οπλισμών. Ειδικότερα, το Σχήμα 2.5 έχει βασιστεί σε αντίστοιχο Σχήμα του Michalowski (1998), ενώ οι Εξισώσεις 2.13 έως και 2.16, προκύπτουν επίσης από έρευνα του ίδιου.



Σχήμα 2.5. Ανομοιόμορφη και ομοιόμορφη κατανομή των στρώσεων του οπλισμού.
Figure 2.5. Non uniform and uniform distribution of reinforcement layers.

Συγκεκριμένα, για n αριθμό των στρώσεων του οπλισμού και για δεδομένο ύψος πρανούς, μπορούμε να υπολογίσουμε το βάθος z_i για κάθε μία στρώση του οπλισμού από την παρακάτω Εξίσωση:

$$z_i = \frac{2}{3} nH \left[\sqrt{\left(\frac{i}{n}\right)^3} - \sqrt{\left(\frac{i-n}{n}\right)^3} \right], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.13)$$

Ενώ στην περίπτωση που θέλουμε ομοιόμορφη κατανομή των n στρώσεων του οπλισμού, το βάθος z_i της κάθε στρώσης μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$z_i = (i - 0.5) \frac{H}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.14)$$

Επίσης, η μέση δύναμη του οπλισμού σε μια κατασκευή μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$k_t = \frac{nT_t}{H} \quad (2.15)$$

Και ως αδιάστατο μέγεθος :

$$\frac{k_t}{\gamma H} = \frac{nT_t}{\gamma H^2} \quad (2.16)$$

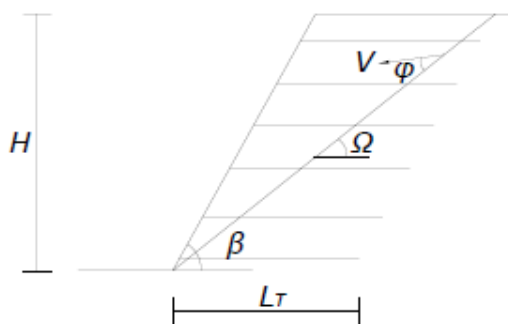
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Όπου T_t η εφελκυστική αντοχή του γεωπλέγματος και H το ύψος του πρανούς. Οι παραπάνω Εξισώσεις χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας και συγκεκριμένα για την δημιουργία μεθοδολογίας για τον σχεδιασμό οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.

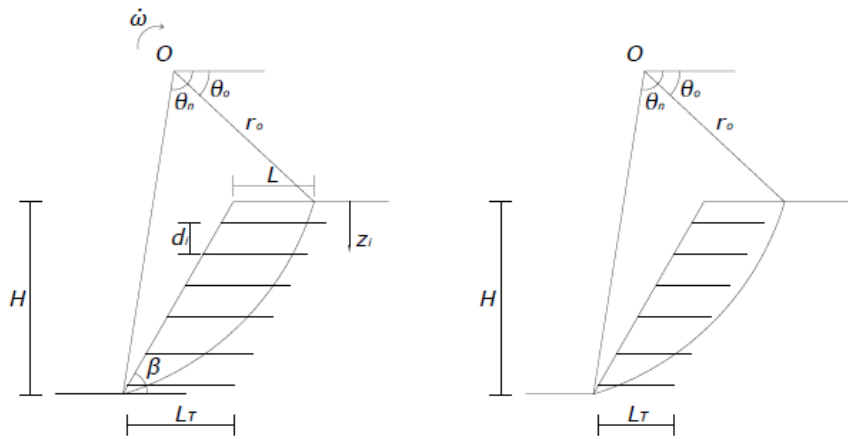
2.4.4 Μηχανισμοί Αστοχίας.

Προκειμένου να μελετηθεί η ευστάθεια ενός οπλισμένου πρανούς μπορούν να υποθεθούν διάφοροι μηχανισμοί αστοχίας. Χαρακτηριστικοί μηχανισμοί είναι ο «Μηχανισμός Επίπεδης Ολίσθησης» (Plane Failure Mechanism), ο «Μηχανισμός Λογαριθμικής Σπείρας» (Log-Spiral Mechanism), και ο «Μηχανισμός Άμεσης Ολίσθησης» (Direct Sliding Mechanism). Στα Σχήματα 2.6 έως και 2.8 παρατηρείται η μορφή των μηχανισμών αυτών. Ο κρίσιμος μηχανισμός αστοχίας είναι συνήθως διαφορετικός για κάθε κατασκευή και πολλές φορές χρειάζεται να εφαρμοσθούν διάφοροι πιθανοί μηχανισμοί και να συγκριθούν μεταξύ τους προκειμένου να προκύψουν συμπεράσματα για το ποιος είναι ο κρίσιμότερος που θα οδηγήσει τελικά το πρανές σε αστοχία.

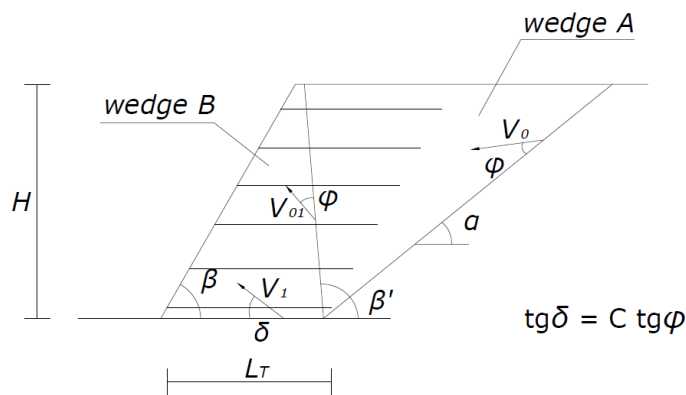
Στην παρούσα έρευνα εφαρμόζεται ο «Μηχανισμός Επίπεδης Ολίσθησης» όπου η μάζα του οπλισμένου σώματος συμπεριφέρεται ως ένα άκαμπτο σώμα με ταχύτητα V . Ο μηχανισμός αυτός ορίζεται γεωμετρικά από δύο μεταβλητές: το ύψος H του πρανούς και τη γωνία Ω που σχηματίζει η πιθανή επιφάνεια αστοχίας με το οριζόντιο επίπεδο (Ausilio et al. 2000). Οι Εξισώσεις 2.17 έως και 2.25 που ακολουθούν, περιγράφουν τον «Μηχανισμό Επίπεδης Ολίσθησης» και προκύπτουν από την έρευνα των Ausilio et al. (2000).



Σχήμα 2.6. Μηχανισμός Επίπεδης Ολίσθησης.
Figure 2.6. Plane Failure Mechanism.



Σχήμα 2.7. Μηχανισμός Λογαριθμικής σπείρας.
Figure 2.7. Log-Spiral Mechanism.



Σχήμα 2.8. Μηχανισμός Άμεσης Ολίσθησης.
Figure 2.8. Direct Sliding Mechanism.

Ειδικότερα, για τον «Μηχανισμό Επίπεδης Ολίσθησης», ο ρυθμός παραγωγής του έργου που προκύπτει από το ίδιο βάρος του σεισμού και την αδρανειακή του δύναμη υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{W} = GV \sin(\Omega - \phi) + k_n GV \cos(\Omega - \phi) \quad (2.17)$$

Όπου G το βάρος της εδαφικής σφήνας που υπολογίζεται από την παρακάτω Εξίσωση:

$$G = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\sin(\beta - \Omega)}{\sin \Omega \sin \beta} \quad (2.18)$$

Ενώ ο ρυθμός κατανάλωσης του έργου :

$$\dot{D} = V \cos(\Omega - \phi) \sum_{i=1}^n T_i \quad (2.19)$$

Αντικαθιστώντας :

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\left(\frac{1}{2} \gamma H^2\right)} \quad (2.20)$$

προκύπτει η κατανάλωση της ενέργειας:

$$\dot{D} = \frac{1}{2} V \cos(\Omega - \phi) K \gamma H^2 \quad (2.21)$$

Εξισώνοντας τον ρυθμό παραγωγής έργου με το ρυθμό κατανάλωσης προκύπτει η Εξίσωση που εκφράζει το αδιάστατο μέγεθος K της όπλισης που απαιτείται για να μην αστοχήσει το πρανές για διάφορες τιμές της γωνίας Ω :

$$K = \frac{\sin(\beta - \Omega)}{\sin \Omega \sin \beta} [tg(\Omega - \phi) + k_h] \quad (2.22)$$

Προκειμένου να βρεθεί ο κρίσιμος μηχανισμός αστοχίας θα πρέπει να βρεθεί η μέγιστη τιμή της συνάρτησης. Αυτό γίνεται για:

$$\frac{\partial K}{\partial \Omega} = 0 \quad (2.23)$$

Επομένως η τιμή του Ω είναι:

$$\Omega = tg^{-1} \left[\frac{-k_h tg \phi tg \beta + tg^2 \phi tg \beta + \sqrt{-tg \beta (tg^2 \phi + 1)(tg \phi tg \beta + 1)(k_h - tg \phi)}}{1 + tg^2 \phi + k_h tg^2 \phi tg \beta + tg \phi tg \beta} \right] \quad (2.24)$$

Επίσης η απόσταση μεταξύ της πιθανής επιφάνειας αστοχίας και του άκρου του πρανούς υπολογίζεται από την παρακάτω Εξίσωση:

$$\frac{L}{H} = \frac{\sin(\beta - \Omega)}{\sin \Omega \sin \beta} \quad (2.25)$$

Με την Εξίσωση αυτή μπορεί να επιλεγθεί και το κατάλληλο μήκος αγκύρωσης της όπλισης.

Στην περίπτωση που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε έλεγχο υφιστάμενης κατασκευής με γνωστό όπλισμό, ο οποίος εκφράζεται από τον αδιάστατο συντελεστή K , εφαρμόζοντας ξανά το κινηματικό θεώρημα μπορεί να βρεθεί η επιτάχυνση διαρροής της κατασκευής k_{cr} για τον συγκεκριμένο μηχανισμό αστοχίας. Η επιτάχυνση διαρροής είναι ένα

κατασκευαστικό χαρακτηριστικό του πρανούς από οπλισμένη γη και εκφράζει την τιμή της αναμενόμενης σεισμικής επιτάχυνσης k_h , που θα οδηγήσει το πρανές σε αστοχία.

$$k_{cr} = K \frac{\sin \Omega \sin \beta}{\sin(\beta - \Omega)} - \operatorname{tg}(\Omega - \varphi) \quad (2.26)$$

Προκειμένου να βρεθεί η ελάχιστη τιμή του k_{cr} για την οποία αστοχεί το πρανές, πρέπει να γίνει βελτιστοποίηση της συνάρτησης σε σχέση με τη γωνία Ω .

Συγκεκριμένα η γωνία αυτή εκφράζεται από την παρακάτω Εξίσωση:

$$\Omega = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{\operatorname{tg} \beta - K \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \phi - \operatorname{tg}^2 \phi - 1 + \sqrt{K(\operatorname{tg}^2 \phi + 1)(1 + \operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \beta)^2}}{K \operatorname{tg}^2 \beta \operatorname{tg}^2 \phi - \operatorname{tg}^2 \phi - \operatorname{tg}^2 \phi - 1} \right] \quad (2.27)$$

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι για κατακόρυφο πρανές θα πρέπει να επιλέγονται γωνίες β , με τιμές πολύ κοντά στις 90° μοίρες αλλά όχι ακριβώς $\beta=90^\circ$.

2.4.5 Εκτίμηση μόνιμης μετατόπισης.

Ο υπολογισμοί που προκύπτουν χρησιμοποιώντας την ψευδοστατική προσέγγιση δείχνουν ότι η δύναμη και το μήκος της όπλισης που απαιτείται αυξάνει σημαντικά όταν οι τιμές του σεισμικού συντελεστή επιτάχυνσης είναι υψηλές, γεγονός που επηρεάζει σημαντικά την οικονομικότητα της κατασκευής και την εφικτότητά της. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πιο λογικό να μειώσουμε την όπλιση και να δεχθούμε ότι η κατασκευή θα υποστεί μόνιμες μετατοπίσεις κατά την διάρκεια του σεισμού. Λόγω βέβαια της φύσης της κίνησης του εδάφους, το πρανές μπορεί να υποστεί μόνο περιορισμένη μετατόπιση πριν από της αστοχία.

Έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις προκειμένου να προβλεφθούν οι αναμενόμενες μόνιμες μετατοπίσεις κάτω από σεισμική φόρτιση. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιείται η Εξίσωση που έχει προταθεί από τους Ambraseys και Menu (1988) για την εκτίμηση της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης για έναν συγκεκριμένο βαθμό εμπιστοσύνης. Η Εξίσωση αυτή παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\log U = 0.9 + \log \left[\left(1 - \frac{k_{cr}}{k_h} \right)^{2.53} \left(\frac{k_{cr}}{k_h} \right)^{-1.09} \right] + 0.3t \quad (2.28)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Όπου U , η οριζόντια συνιστώσα της μόνιμης μετατόπισης σε cm και t , εκφράζει το επίπεδο εμπιστοσύνης το οποίο προκύπτει από κανονική κατανομή.

2.5 Ανασκόπηση Κεφαλαίου και συμπεράσματα.

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως για την αναλυτική διερεύνηση των οπλισμένων πρανών. Οι περισσότερες εφαρμόζουν την ψευδοστατική προσέγγιση που βασίζεται στην αρχή ολισθαίνουσας μάζας του Newmark, ενώ για την διαμόρφωση των μηχανισμών αστοχίας και των εξισώσεων που διέπουν την λειτουργία τους εφαρμόζονται η «Μέθοδος Οριακής Ισορροπίας» και η «Μέθοδος Οριακής Ανάλυσης».

Ειδικότερα, για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας εφαρμόστηκε το «Κινηματικό Θεώρημα Οριακής Ανάλυσης», καθώς και η «Απλοποιημένη Φασματική Ανάλυση» μέσω διαφόρων σχέσεων απόσβεσης με βάση τα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής. Επιπλέον, αναλύθηκε ο «Μηχανισμός Επίπεδης Ολίσθησης» και συγκεκριμένα οι εξισώσεις που προέκυψαν από την έρευνα των Ausilio et al. (2000). Τέλος, προκειμένου να υπολογισθεί η αναμενόμενη μόνιμη μετατόπιση εφαρμόστηκε η Εξίσωση που είχε προταθεί από τους Ambraseys & Menu (1988).

Συνδυάζοντας όλες τις παραπάνω μεθόδους ανάλυσης, δημιουργείται μια νέα αναλυτική λύση για τον αντισεισμικό σχεδιασμό οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς, η οποία και αναπτύσσεται στο 3^ο Κεφάλαιο που ακολουθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

**Νέα Αναλυτική Λύση και Προτεινόμενη Μεθοδολογία
για τον Αντισεισμικό Σχεδιασμό και Έλεγχο Επάρκειας
Οπλισμένων Πρανών με Αναβαθμούς.**

3.1 Προτεινόμενη νέα αναλυτική λύση για τον σχεδιασμό και τον έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.

Η ευστάθεια των οπλισμένων πρανών εξαρτάται από τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους καθώς και τη στατική και σεισμική φόρτιση στην οποία υπόκεινται. Πρανή με χαμηλό ύψος και ήπια κλίση απαιτούν όπλιση με σχετικά μικρή εφελκυστική αντοχή και μήκος ενώ αντίθετα πρανή με μεγάλο ύψος και απότομη κλίση είναι τρωτά σε σεισμό με αποτέλεσμα να απαιτείται οπλισμός μεγάλης αντοχής και μήκους. Επιπλέον, η διάβρωση της επιφάνειας των πρανών με μεγάλο ύψος και απότομη κλίση λόγω ροής του νερού με αυξημένη ταχύτητα επί της επιφάνειάς τους, είναι ένα ακόμα πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπισθεί.

Η κατασκευή οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς περιορίζει σημαντικά τα παραπάνω προβλήματα και η απαιτούμενη ποσότητα οπλισμού είναι μικρότερη καθώς η φόρτιση από το ίδιο βάρος του εδάφους και η αδρανειακή δύναμη λόγω σεισμού είναι μειωμένες. Επιπλέον, είναι δυνατόν να επιλέγονται διαφορετικές κλίσεις για κάθε ένα αναβαθμό και σε συνδυασμό με την οριζόντια απόσταση μεταξύ τους είναι δυνατή η βέλτιστη σχεδίασή τους από άποψη αντοχής, ενώ παράλληλα μπορεί να περιοριστεί σημαντικά η διάβρωση λόγω ροής του νερού καθώς αυτό συγκεντρώνεται και απορρέει τμηματικά.

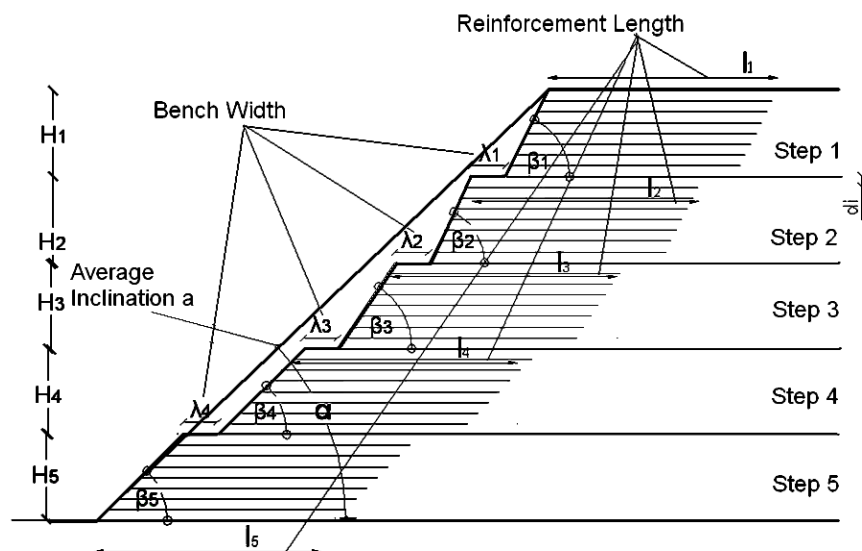
Στην παρούσα εργασία προτείνεται **νέα αναλυτική λύση** για τον αντισεισμικό σχεδιασμό οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς (Karogianni & Sakellariou, 2008) που βασίζεται στο «Κινηματικό Θεώρημα Οριακής Ανάλυσης» και στην «Απλοποιημένη Φασματική Ανάλυση» και αφορά ομογενή, μη συνεκτικά εδάφη που αναμένεται να παραμορφωθούν πλαστικά ακολουθώντας το κριτήριο αστοχίας Coulomb.

➤ ***Νέα αναλυτική λύση για τον αντισεισμικό σχεδιασμό οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς:***

Σύμφωνα με τη νέα αναλυτική λύση, τα οπλισμένα πρανή με μεγάλο ύψος και απότομη κλίση χωρίζονται σε περισσότερα πρανή (αναβαθμούς) με μικρότερο ύψος και μεταβαλλόμενη κλίση όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 (Karogianni & Sakellariou, 2008). Η εφελκυστική αντοχή και το μήκος του οπλισμού μπορεί να είναι διαφορετικά για τον κάθε ένα αναβαθμό, ενώ όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 3.1 υπάρχει οριζόντια απόσταση λ μεταξύ τους, η οποία ορίζεται ανάλογα με τις ανάγκες της κατασκευής. Για

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

παράδειγμα, ένα οπλισμένο πρανές με ύψος $H=50$ m και κλίση $\beta=3:2$ (κατακόρυφο : οριζόντιο), αντικαθίσταται από 5 πρανή με ύψος $H_1, H_2 \dots H_5 = 10$ m το κάθε ένα και κλιμακωτή κλίση, με βαθμιαία αύξηση της κλίσης από τον πόδα του πρανούς προς τη στέψη, διαμορφώνοντας έτσι μια κοίλη όψη με μεγαλύτερο Συντελεστή Ασφαλείας.

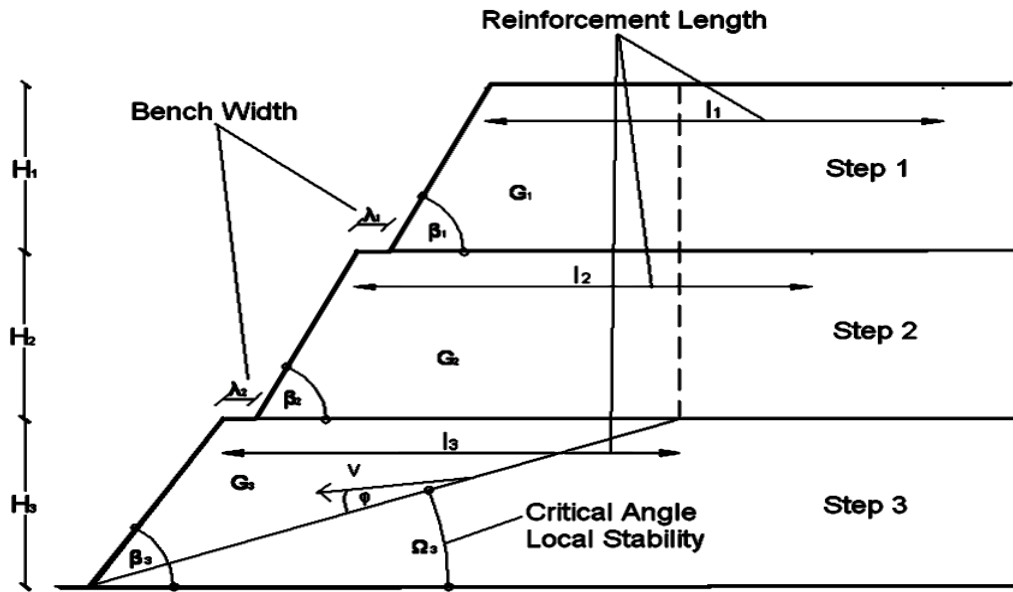


Σχήμα 3.1. Οπλισμένο πρανές με αναβαθμούς (Karogianni & Sakellariou, 2008).
Figure 3.1. Multi-step reinforced slope (Karogianni & Sakellariou, 2008).

Προκειμένου να υπολογισθεί η συνολική ποσότητα του οπλισμού που απαιτείται για να αποφευχθεί η αστοχία, εξετάζονται διάφοροι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας και οι πιο κρίσιμοι από αυτούς χρησιμοποιούνται για την τελική διαστασιολόγηση. Όπως αναφέρθηκε και στο 2ο Κεφάλαιο, ο μηχανισμός αστοχίας που εφαρμόζεται στην παρούσα έρευνα, είναι ο «Μηχανισμός Επίπεδης Αστοχίας» (“Plane Failure Mechanism”). Στα παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις που δημιουργήθηκαν για τον μηχανισμό αυτό, για τον σχεδιασμό και έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.

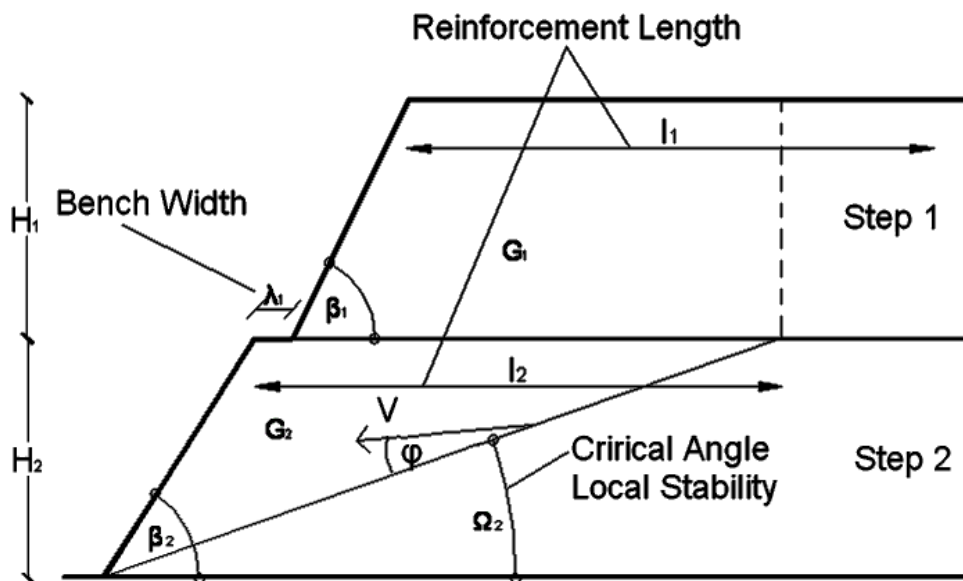
Σύμφωνα με την νέα αναλυτική λύση που προτείνεται, ο «Μηχανισμός Επίπεδης Αστοχίας» εφαρμόζεται δύο φορές. Αρχικά, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η εφελκυστική αντοχή και το μήκος του οπλισμού επαρκούν έναντι τοπικής ευστάθειας για τον κάθε ένα αναβαθμό ξεχωριστά, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.2 και 3.3 (Karogianni & Sakellariou, 2008) και στην συνέχεια έναντι ολικής ευστάθειας για ολόκληρο το πρανές όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5 (Karogianni & Sakellariou, 2008). Είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν και οι δύο μορφές του μηχανισμού, καθώς ο έλεγχος έναντι τοπικής ευστάθειας δίνει κρισιμότερα αποτελέσματα για τους ανώτερους αναβαθμούς,

ενώ ο έλεγχος έναντι ολικής ευστάθειας είναι κρισιμότερος για τους κατώτερους αναβαθμούς.



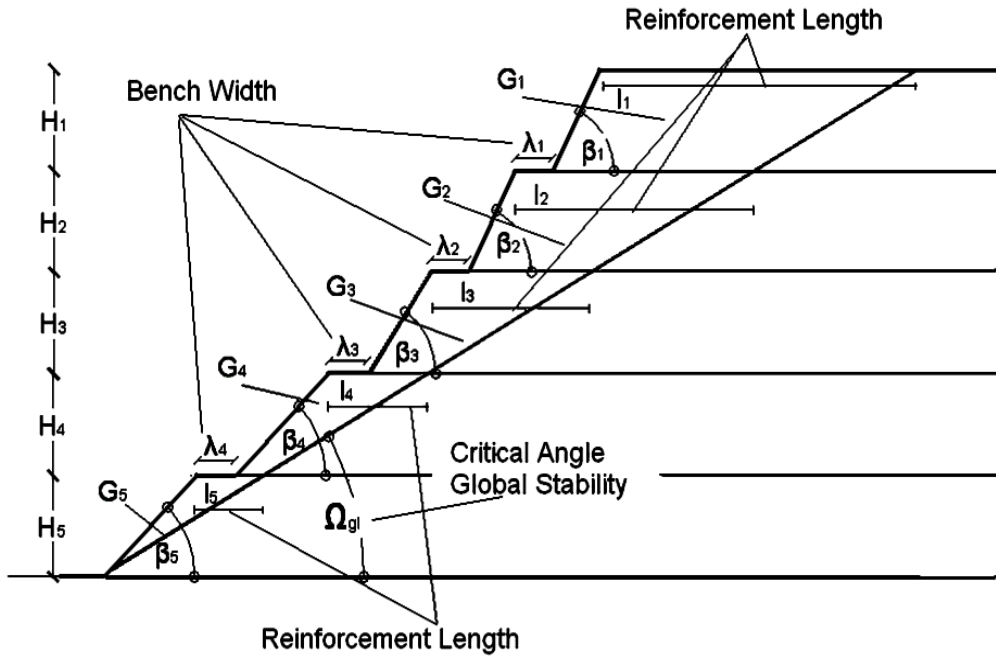
Σχήμα 3.2. Έλεγχος έναντι τοπικής ευστάθειας για τον αναβαθμό 3 (Καρογιάννη & Σακελλαρίου, 2008).

Figure 3.2. Local stability check for step 3 (Καρογιάννη & Σακελλαρίου, 2008).



Σχήμα 3.3. Έλεγχος έναντι τοπικής ευστάθειας για τον αναβαθμό 2 (Καρογιάννη & Σακελλαρίου, 2008).

Figure 3.3. Local stability check for step 2 (Καρογιάννη & Σακελλαρίου, 2008).



Σχήμα 3.4. Έλεγχος έναντι ολικής ευστάθειας (Karogianni & Sakellariou, 2008).
 Figure 3.4. Global stability check (Karogianni & Sakellariou, 2008).

Πιο αναλυτικά, ο ρυθμός παραγωγής εξωτερικού έργου λόγω ίδιου βάρους του πρανούς και αδρανειακής δύναμης λόγω σεισμού, δίνεται από την Εξίσωση:

$$\dot{W} = (G_1 + G_2 + \dots + G_i)V \sin(\Omega - \phi) + k_h (G_1 + G_2 + \dots + G_i)V \cos(\Omega - \phi) \quad (3.1)$$

όπου G_1, G_2, \dots, G_i , το βάρος της εδαφικής μάζας για το κάθε ένα πρανές ξεχωριστά με διαφορετικές εκφράσεις για τον έλεγχο έναντι τοπικής ευστάθειας και για τον έλεγχο ολικής ευστάθειας και k_h , η οριζόντια εδαφική επιτάχυνση ανηγμένη στην επιτάχυνση της βαρύτητας.

Σύμφωνα με τους Ausilio et al. (2000), η κατανάλωση της ενέργειας υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{D} = V \cos(\Omega - \phi) \sum_{i=1}^n T_i \quad (3.2)$$

Επιπλέον, σύμφωνα με τους Ling et al. (1997), η εφελκυστική αντοχή T_i , μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από την ακόλουθη Εξίσωση :

$$T_i = K \gamma z_i d_i \quad (3.3)$$

Όπου K η συνολική ποσότητα του οπλισμού σε κανονικοποιημένη μορφή, με την ακόλουθη έκφραση:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{(1/2)\gamma H^2} \quad (3.4)$$

Αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις 3.3 και 3.4 στην Εξίσωση 3.2, προκύπτει η ακόλουθη έκφραση για τον υπολογισμό του ρυθμού κατανάλωσης ενέργειας:

$$\dot{D} = \frac{1}{2} V \cos(\Omega - \varphi) K \gamma H^2 \quad (3.5)$$

Εξισώνοντας τον ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας όπως περιγράφεται στην Εξίσωση 3.1, με τον ρυθμό παραγωγής ενέργειας της Εξίσωσης 3.5, υπολογίζεται η συνολική ποσότητα του οπλισμού σε κανονικοποιημένη μορφή K για τοπική και ολική ευστάθεια.

➤ *Έλεγχος έναντι Τοπικής Ευστάθειας (Local Stability):*

Κατά τον έλεγχο έναντι τοπικής ευστάθειας, υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε αναβαθμό i, η συνολική ποσότητα του οπλισμού σε κανονικοποιημένη μορφή: K, σύμφωνα με την παρακάτω Εξίσωση:

$$K_i = \frac{2G_i \tan(\Omega_i - \varphi_i) + 2k_{hi} G_i}{\gamma_i H_i^2} \quad (3.6)$$

Η παραπάνω Εξίσωση λαμβάνει μέγιστη τιμή για $K_i/\partial(\Omega)=0$.

Όπου G_i υπολογίζεται από την παρακάτω Εξίσωση:

$$G_i = G_{i1} + G_{i2} + \dots G_{ij} + \dots + G_{ii} \quad (3.7)$$

Όπου j ο αριθμός των ανώτερων αναβαθμών που επηρεάζουν τον συγκεκριμένο τοπικό μηχανισμό ευστάθειας. Επιπλέον θα πρέπει να λαμβάνεται $j < i$.

Όπου G_{ii} είναι το βάρος του αναβαθμού που εξετάζεται για τοπική ευστάθεια και υπολογίζεται από την παρακάτω Εξίσωση:

$$G_{ii} = \frac{0.5\gamma_i H_i^2 \sin(\beta_i - \Omega_i)}{\sin \Omega_i \sin \beta_i} \quad (3.8)$$

Και G_{ij} το εδαφικό βάρος των ανώτερων αναβαθμών το οποίο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

$$G_{ij} = (2(l_i - \lambda_{i-1} - \lambda_{i-2} - \dots - \lambda_j - \frac{H_{i-1}}{\tan \beta_{i-1}} - \frac{H_{i-2}}{\tan \beta_{i-2}} - \dots - \frac{H_{j+1}}{\tan \beta_{j+1}}) - \frac{H_j}{\tan \beta_j}) \frac{H_j}{\tan \beta_j} \gamma_j \quad (3.9)$$

Στην περίπτωση που $i-1 > j+1$,

Ενώ για $i-1 < j+1$,

$$G_{ij} = (2(l_i - \lambda_j - \frac{H_j}{\tan \beta_j}) - \frac{H_j}{\tan \beta_j}) \frac{H_j}{\tan \beta_j} \gamma_j \quad (3.10)$$

- **Παράδειγμα εφαρμογής Αναλυτικής Λύσης για τοπική ευστάθεια:**

Ένα παράδειγμα της ως άνω μεθοδολογίας παρουσιάζεται παρακάτω. Πρόκειται για πρανές με 4 αναβαθμούς και το συνολικό εδαφικό βάρος που λαμβάνεται υπόψη για την τοπική ευστάθεια του 4^{ου} (κατώτερου) αναβαθμού δίνεται από την παρακάτω Εξίσωση:

$$G_4 = G_{41} + G_{42} + G_{43} + G_{44}$$

Όπου,

$$G_{41} = (2(l_4 - \lambda_3 - \lambda_2 - \lambda_1 - \frac{H_3}{\tan \beta_3} - \frac{H_2}{\tan \beta_2}) - \frac{H_1}{\tan \beta_1}) \frac{H_1}{\tan \beta_1} \gamma_1$$

$$G_{42} = (2(l_4 - \lambda_3 - \lambda_2 - \frac{H_3}{\tan \beta_3}) - \frac{H_2}{\tan \beta_2}) \frac{H_2}{\tan \beta_2} \gamma_2$$

$$G_{43} = (2(l_4 - \lambda_3) - \frac{H_3}{\tan \beta_3}) \frac{H_3}{\tan \beta_3} \gamma_3$$

$$G_{44} = \frac{0.5\gamma_4 H_4^2 \sin(\beta_4 - \Omega_4)}{\sin \Omega_4 \sin \beta_4}$$

Ενώ για το ίδιο πρανές το εδαφικό βάρος του 3^{ου} αναβαθμού δίνεται από την παρακάτω Εξίσωση:

$$G_3 = G_{31} + G_{32} + G_{33}$$

Όπου,

$$G_{31} = (2(l_3 - \lambda_2 - \lambda_1 - \frac{H_2}{\tan \beta_2}) - \frac{H_1}{\tan \beta_1}) \frac{H_1}{\tan \beta_1} \gamma_1$$

$$G_{32} = (2(l_3 - \lambda_2) - \frac{H_2}{\tan \beta_2}) \frac{H_2}{\tan \beta_2} \gamma_2$$

$$G_{33} = \frac{0.5\gamma_2 H_3^2 \sin(\beta_3 - \Omega_3)}{\sin \Omega_3 \sin \beta_3}$$

Αντικαθιστώντας τις μέγιστες τιμές του K_i στην Εξίσωση 3.6 υπολογίζεται η μέγιστη απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή T_i για κάθε αναβαθμό i .

Επιπλέον, η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας αστοχίας και της όψης του πρανούς είναι ίση με:

$$l_i = \frac{H_i \sin(\beta_i - \Omega_i)}{\sin(\beta_i) \sin(\Omega_i)} \quad (3.11)$$

Με την Εξίσωση αυτή μπορεί να υπολογισθεί το απαιτούμενο μήκος όπλισης για το εν λόγω αναβαθμό.

➤ *Έλεγχος έναντι Ολικής Ευστάθειας (Global Stability):*

Προκειμένου να προσδιορισθεί ο κρίσιμος μηχανισμός αστοχίας χρησιμοποιείται η παρακάτω Εξίσωση:

$$K_{gl} = \frac{2(G_1 + G_2 + \dots + G_n) \tan(\Omega_{gl} - \varphi_{gl}) + 2k_h (G_1 + G_2 + \dots + G_n)}{\gamma(H_1 + H_2 + \dots + H_n)^2} \quad (3.12)$$

Η οποία λαμβάνει μέγιστη τιμή για $\partial K_{gl}/d(\Omega) = 0$

Όπου φ_{gl} η μέση γωνία τριβής του πρανούς, k_{gl} η μέση αναμενόμενη εδαφική επιτάχυνση, n ο αριθμός των αναβαθμών του πρανούς και G_2, \dots, G_n το βάρος των αναβαθμών με τις παρακάτω εκφράσεις:

$$G_1 = \left[\frac{H_1 + 2H_2 + 2H_3 + \dots + 2H_n}{\tan \Omega_{gl}} - \frac{H_1}{\tan \beta_1} - \frac{2H_2}{\tan \beta_2} - \frac{2H_3}{\tan \beta_3} - \frac{2H_n}{\tan \beta_n} - 2\lambda_1 - 2\lambda_2 - \dots - 2\lambda_{n-1} \right] \gamma_1 \frac{H_1}{2} \quad (3.13)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

$$G_2 = \left[\frac{H_2 + 2H_3 + 2H_4 + \dots + 2H_n}{\tan \Omega_{gl}} - \frac{H_2}{\tan \beta_2} - \frac{2H_3}{\tan \beta_3} - \frac{2H_4}{\tan \beta_4} - \frac{2H_n}{\tan \beta_n} - 2\lambda_2 - 2\lambda_3 - \dots - 2\lambda_{n-1} \right] \gamma_2 \frac{H_2}{2} \quad (3.14)$$

⋮

$$G_i = \left[\frac{H_i + 2H_{i+1} + 2H_{i+2} + \dots + 2H_n}{\tan \Omega_{gl}} - \frac{H_i}{\tan \beta_i} - \frac{2H_{i+1}}{\tan \beta_{i+1}} - \frac{2H_{i+2}}{\tan \beta_{i+2}} - \frac{2H_n}{\tan \beta_n} - 2\lambda_i - 2\lambda_{i+1} - \dots - 2\lambda_{n-1} \right] \gamma_i \frac{H_i}{2} \quad (3.15)$$

⋮

$$G_n = \left[\frac{H_n}{\tan \Omega_{gl}} - \frac{H_n}{\tan \beta_n} \right] \gamma_n \frac{H_n}{2} \quad (3.16)$$

Η απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή των οπλισμών για την κάθε μία στρώση υπολογίζεται αντικαθιστώντας την μέγιστη τιμή του K_{gl} στην Εξίσωση (3.12)

Επιπλέον, η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας αστοχίας και της όψης του πρανούς είναι ίση με:

$$l_i = \frac{H_i + H_{i+1} + \dots + H_n}{\tan(\Omega_i)} - \frac{H_i}{\tan(\beta_i)} - \frac{H_{i+1}}{\tan(\beta_{i+1})} - \dots - \frac{H_n}{\tan(\beta_n)} - \lambda_i - \lambda_{i+1} - \dots - \lambda_{n-1} \quad (3.17)$$

Τέλος, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες, σύμφωνα με τις Βρετανικές Οδηγίες (Engineering guides BS 8006:1995), η τελική τιμή του απαιτούμενου μήκους όπλισης σχετίζεται με το ύψος του πρανούς και συγκεκριμένα θα πρέπει να επιλέγεται ως μεγαλύτερη ή ίση του $0.7 \cdot H$.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους μηχανισμούς τοπικής και ολικής ευστάθειας συγκρίνονται και για τον τελικό σχεδιασμό του πρανούς χρησιμοποιούνται οι μέγιστες τιμές για κάθε έναν αναβαθμό. Γενικά, οι μηχανισμοί τοπικής ευστάθειας δίνουν μεγαλύτερες τιμές για τους ανώτερους αναβαθμούς, ενώ οι μηχανισμοί ολικής ευστάθειας για τους κατώτερους. Εφαρμόζοντας και τις δύο αναλύσεις μπορεί να σχεδιαστεί ένα οπλισμένο πρανές με αναβαθμούς πιο ολοκληρωμένα, εφαρμόζοντας ταυτόχρονα τις οικονομικότερες πιθανές λύσεις.

➤ **Αναλυτική Λύση για υπολογισμό κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης k_{cr} :**

Επιπλέον, μπορεί να υπολογισθεί η τιμή της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης k_{cr} για υφιστάμενο πρανές εφαρμόζοντας τις παρακάτω Εξισώσεις, οι οποίες και προέκυψαν από

τις αντίστοιχες εξισώσεις του 2^ο Κεφαλαίου για ενιαία οπλισμένα πρανή (Εξ. 2.26, 2.27):

- Τοπική Ευστάθεια για κάθε ένα αναβαθμό ξεχωριστά:

$$k_{cri} = \frac{K_i \gamma_i H_i^2 - 2(G_1 + G_2 + \dots + G_i) \tan(\Omega_i - \varphi_i)}{2(G_1 + G_2 + \dots + G_i)} \quad (3.18)$$

- Ολική Ευστάθεια για ολόκληρο το πρανές

$$k_{crgl} = \frac{K_{gl} \gamma_i (H_i + H_{i+1} + \dots + H_n)^2 - 2(G_1 + G_2 + \dots + G_i) \tan(\Omega_{gl} - \varphi_i)}{2(G_1 + G_2 + \dots + G_i)} \quad (3.19)$$

Όπου k_{cri} και k_{crgl} , η κρίσιμη επιτάχυνση για τοπική και ολική αστοχία αντίστοιχα.

Η Εξισώσεις αυτές λαμβάνουν ελάχιστη τιμή όταν $\partial k_{cri} / \partial(\Omega) = 0$ και $\partial k_{crgl} / \partial(\Omega) = 0$ αντίστοιχα.

Οι τιμές του βάρους των αναβαθμών υπολογίζονται από τις Εξισώσεις 3.7 έως και 3.10 για τοπική ευστάθεια και 3.12 έως και 3.16 για ολική ευστάθεια, όμοιες δηλαδή με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν και για τον σχεδιασμό των πρανών, ομοίως και η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας αστοχίας και τη όψης του πρανούς και συγκεκριμένα από τις Εξισώσεις 3.11 και 3.17.

➤ *Αναλυτική Λύση για σχεδιασμό έναντι στατικής φόρτισης:*

Με παρόμοιο τρόπο προκύπτουν και αντίστοιχες Εξισώσεις για τον σχεδιασμό με Στατική Φόρτιση, με επιλογή του επιθυμητού Συντελεστή Ασφαλείας της κατασκευής.

- Τοπική Ευστάθεια για κάθε ένα αναβαθμό ξεχωριστά:

$$K_i = \frac{2(FS_i)(G_1 + G_2 + \dots + G_i) \tan(\Omega_i - \varphi_i)}{\gamma_i H_i^2} \quad (3.21)$$

- Ολική Ευστάθεια για ολόκληρο το πρανές:

$$K_{gl} = \frac{2(FS_{gl})(G_1 + G_2 + \dots + G_i) \tan(\Omega_{gl} - \varphi_{gl})}{\gamma_{gl} (H_1 + H_2 + \dots + H_i)^2} \quad (3.22)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Όπου F.S. είναι ο επιθυμητός Συντελεστής Ασφαλείας.

Και στις δυο περιπτώσεις, το K λαμβάνει μέγιστη τιμή για $\partial K_i / \partial (\Omega) = 0$.

Οι τιμές του βάρους των αναβαθμών υπολογίζονται από τις Εξισώσεις 3.7 έως και 3.10 για τοπική ευστάθεια και 3.12 έως και 3.17 για ολική ευστάθεια, όμοιες δηλαδή με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν και για τον σχεδιασμό των πρανών, ομοίως και η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας αστοχίας και τη όψης του πρανούς και συγκεκριμένα από τις Εξισώσεις 3.11 και 3.17.

3.2 Παρουσίαση ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για τον σχεδιασμό και έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών.

Η *νέα αναλυτική λύση* που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, καθώς και άλλες μέθοδοι για τον αντισεισμικό σχεδιασμό και τον έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών με απλή και σύνθετη γεωμετρία, ενσωματώνονται σε μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα και στην συνέχεια προγραμματίζεται με γλώσσα προγραμματισμού Embarcadero Delphi, (Embarcadero® Delphi® XE2, 2011) προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για την ανάλυση των οπλισμένων πρανών έναντι σεισμού.

Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, πριν από την διαστασιολόγηση ενός οπλισμένου πρανούς, πρέπει πρώτα να εκτιμηθεί η μέγιστη αναμενόμενη σεισμική επιτάχυνση. Αυτό πραγματοποιείται με την χρήση εμπειρικών εξισώσεων ή επιλέγοντας τιμές προδιαγραφών του κανονισμού. Η περίπτωση των εμπειρικών εξισώσεων περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2 στην Ενότητα 2.3.2. Υπενθυμίζεται ότι εφαρμόζονται οι μεθοδολογίες των Skarlatoudis et al. (2002) καθώς και οι εξισώσεις των Theodoulidis & Parazachos (1992) και Theodoulidis (1991) για σκληρά εδάφη.

Επιλέγονται αρχικά τα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής και εφαρμόζονται αυτά στις Εξισώσεις 2.6 έως και 2.9, προκειμένου να υπολογισθεί η μέγιστη αναμενόμενη σεισμική επιτάχυνση k_h . Συγκεκριμένα, στις Εξισώσεις 2.6 και 2.7 επιλέγεται M_w το μέγεθος ροπής, R η επίκεντρη απόσταση σε km, h το εστιακό βάθος σε km, F η μεταβλητή που αφορά τον εστιακό μηχανισμό και S η μεταβλητή που αφορά τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Η μεταβλητή S παίρνει τις τιμές 0, 1 και 2 για κατηγορίες εδαφών B, C και D αντίστοιχα (σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση κατά NEHRP, 1994),

και η μεταβλητή F παίρνει τις τιμές 0 και 1 για κανονικά ρήγματα και ανάστροφα/οριζόντιας μετατόπισης ρήγματα αντίστοιχα. Επιπλέον, στις Εξισώσεις 2.8 και 2.9 επιλέγεται M_s το μέγεθος ροπής, R η επίκεντρη απόσταση, S η παράμετρος του εδάφους ($S=1$ για βραχώδη εδάφη και $S=0$ για μαλακά εδάφη) και τέλος P η πιθανοτική παράμετρος ($P=0$ για 50% πιθανότητα υπέρβασης και $P=1$ για 16% πιθανότητα υπέρβασης).

Αφού πραγματοποιηθεί η εκτίμηση της μέγιστης αναμενόμενης σεισμικής επιτάχυνσης (“HPGA: Horizontal Peak Ground Acceleration”) καθορίζονται τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του οπλισμένου πρανούς, δηλαδή το ύψος H του πρανούς, το αν θα έχει αναβαθμούς ή όχι, ο αριθμός των αναβαθμών, η οριζόντια απόσταση λ μεταξύ τους, η κλίση τους β , ενώ στην συνέχεια επιλέγεται η γωνία τριβής φ του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για το οπλισμένο πρανές, το ειδικό βάρος γ . Τέλος, επιλέγονται κάποια στοιχεία που αφορούν την όπλιση και συγκεκριμένα n ο αριθμός των στρώσεων οπλισμού και επομένως και η απόσταση μεταξύ αυτών για δεδομένο ύψος d_i .

Ακολούθως, πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση προκειμένου να προσδιοριστεί η ποσότητα της μέγιστης απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής για διάφορους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας. Στην παρούσα έρευνα, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες, εφαρμόζεται ο «Μηχανισμός Επίπεδης Ολίσθησης» για τοπική και ολική ευστάθεια, δηλαδή για κάθε έναν αναβαθμό ξεχωριστά και για ολόκληρο το πρανές αντίστοιχα.

Οι τιμές που προκύπτουν για μηχανισμούς τοπικής και ολικής αστοχίας, πολλές φορές διαφέρουν και έτσι πραγματοποιείται σύγκριση αυτών και επιλογή των κρισιμότερων για τον τελικό σχεδιασμό των οπλισμένων πρανών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται η μέγιστη απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή των οπλισμών για κάθε ένα αναβαθμό και για το συνολικό πρανές.

Αναλυτικά, για τον «Μηχανισμό Επίπεδης Ολίσθησης» υπολογίζεται η γωνία που προσδιορίζει τον κρίσιμο μηχανισμό και συγκεκριμένα η γωνία Ω_i για κάθε ένα αναβαθμό και Ω_{gl} για ολόκληρο το πρανές. Στην συνέχεια και αφού προσδιοριστεί η γωνία αυτή, υπολογίζεται η μέγιστη συνολική ποσότητα της όπλισης, K_i για κάθε ένα αναβαθμό και K_{gl} για ολόκληρο το πρανές. Με την τιμή της συνολικής ποσότητας όπλισης υπολογίζεται η μέγιστη απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή σε κάθε μία στάθμη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

του πρानούς T_i και T_{gl} , ενώ η απόσταση του μηχανισμού αστοχίας στην κορυφή του πρानούς από την όψη του πρानούς, δίνει το απαιτούμενο μήκος όπλισης για τοπικούς και ολικούς μηχανισμούς αστοχίας, l_i και l_{gl} αντίστοιχα. Για την τελική επιλογή των συγκρίνονται οι μέγιστες τιμές που υπολογίσθηκαν από τους μηχανισμούς τοπικής και ολικής ευστάθειας και επιλέγονται οι μέγιστες αυτών για την τελική διαστασιολόγηση της κατασκευής.

Στην συνέχεια μπορεί να πραγματοποιηθεί εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας υφιστάμενου πρानούς με συγκεκριμένα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, σε περίπτωση αναβάθμισης του σεισμικού κινδύνου ή απλώς σε περίπτωση που πρέπει να μελετηθεί ένα πρानές που έχει ήδη κατασκευαστεί. Όπως και κατά τον σχεδιασμό των πρανών που περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα, εισάγονται όλα τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, ενώ επίσης εισάγεται και η τιμή της εφελκυστικής αντοχής και το μήκος του οπλισμού. Δεν εισάγεται τιμή για την αναμενόμενη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση ενώ υπολογίζεται η τιμή της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης, η οποία και αφορά την επιτάχυνση που κατά την οποία θα αστοχήσει το πρανές εάν εφαρμοσθεί.

Επιπλέον, μπορεί να πραγματοποιηθεί στατική ανάλυση οπλισμένων πρανών, με επιλογή του επιθυμητού Συντελεστή Ασφαλείας. Στην περίπτωση αυτή, επιλέγονται ξανά τα επιθυμητά γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του πρανούς, ενώ στην θέση της μέγιστης αναμενόμενης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης μπαίνει ο επιθυμητός συντελεστής ασφαλείας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τους διάφορους μηχανισμούς αστοχίας μπορεί να διαφέρουν και έτσι συγκρίνονται μεταξύ τους προκειμένου να επιλεγούν τα πιο κρίσιμα για τον τελικό σχεδιασμό του πρανούς.

Τέλος, σύμφωνα με την παρούσα μεθοδολογία και όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, μπορεί να πραγματοποιηθεί υπολογισμός της μόνιμης μετατόπισης χρησιμοποιώντας τη «Μέθοδο Ολισθαίνουσας Μάζας» (“Sliding Block Method”), που προτάθηκε από τον Newmark (1965). Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται η Εξίσωση 2.25 των Ambraseys & Menu (1988) όπου τοποθετείται η μέγιστη αναμενόμενη σεισμική επιτάχυνση καθώς και η κρίσιμη σεισμική επιτάχυνση του πρανούς και προκύπτει η τιμή της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες, η μεθοδολογία που περιγράφηκε στην παρούσα ενότητα προγραμματίζεται σε κώδικα Embarcadero Delphi (Embarcadero®

Delphi® XE2, 2011) και δημιουργείται ένα γρήγορο λογισμικό για τον σχεδιασμό και τον έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών με απλή και σύνθετη γεωμετρία. Στην ενότητα που ακολουθεί, παρουσιάζεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε καθώς και παραδείγματα για το πώς λειτουργεί.

3.3 Σχεδιασμός και ανάπτυξη λογισμικού σε κώδικα Embarcadero Delphi.

3.3.1 Σχεδιασμός λογισμικού και λειτουργίες.

Για την υλοποίηση της ως άνω μεθοδολογίας, έχει σχεδιαστεί λογισμικό και έχει υλοποιηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού Embarcadero Delphi με την ακόλουθη δομή και δυνατότητες:

- 1) Αρχική εκτίμηση της Μέγιστης Αναμενόμενης Σεισμικής Επιτάχυνσης μέσω εμπειρικών εξισώσεων ή με απευθείας επιλογή τιμών προδιαγραφών σύμφωνα με τους υπάρχοντες κανονισμούς.
- 2) Εισαγωγή των Μηχανικών Χαρακτηριστικών των εδαφών και συγκεκριμένα της γωνίας τριβής ϕ και του ειδικού βάρους γ , του ύψους H και της γωνίας κλίσης β για τον κάθε ένα αναβαθμό, της απόστασης λ μεταξύ τους, του πλήθους n των στρώσεων οπλισμού, ενώ υπολογίζεται αυτόματα η απόσταση μεταξύ των στρώσεων οπλισμού d_i (κοινή για ολόκληρο το πρανές). Επίσης, κάποια κατάλληλη τιμή της μέγιστης αναμενόμενης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης πρέπει να επιλεγεί, βάσει των υπολογισμών του βήματος “1”.
- 3) Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα Σεισμική Ανάλυση σύμφωνα με τον Μηχανισμό Επίπεδης Αστοχίας (Plane Failure Mechanism), αρχικά για Τοπική Ευστάθεια και κατόπιν για Ολική Ευστάθεια. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στην επιφάνεια εργασίας του προγράμματος και συγκεκριμένα: Η γωνία που προσδιορίζει τον κρίσιμο μηχανισμό Ω_i για κάθε ένα αναβαθμό και Ω_{gl} για ολόκληρο το πρανές, η μέγιστη συνολική ποσότητα της όπλισης K_i για κάθε ένα αναβαθμό και K_{gl} για ολόκληρο το πρανές, η μέγιστη απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή σε κάθε μία στάθμη του πρανούς T_i για κάθε αναβαθμό και T_{gl} για ολόκληρο το πρανές, το απαιτούμενο μήκος όπλισης l_i για κάθε αναβαθμό και l_{gl} για ολόκληρο το πρανές, και τέλος, το τελικό μήκος όπλισης, καθώς όπως έχει

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

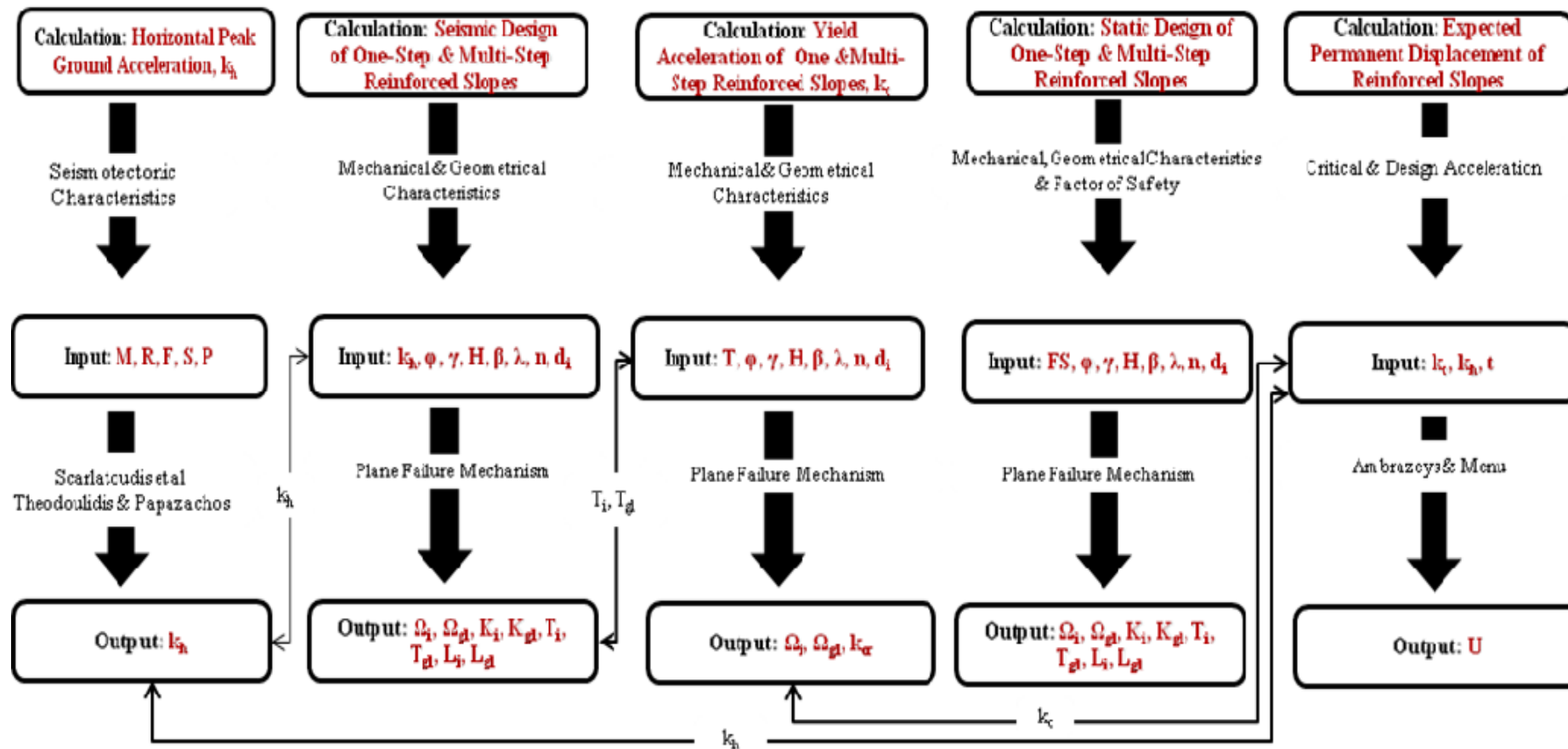
αναφερθεί το απαιτούμενο μήκος δεν μπορεί να είναι μικρότερο από $0.7 \cdot H$. Στην συνέχεια συγκρίνονται οι μέγιστες τιμές που υπολογίσθηκαν από τους μηχανισμούς Τοπικής και Ολικής Ευστάθειας και επιλέγονται οι μέγιστες αυτών για την τελική διαστασιολόγηση της κατασκευής.

- 4) Εκτίμηση της Κρίσιμης Σεισμικής Επιτάχυνσης υφιστάμενου πρανούς με συγκεκριμένα Γεωμετρικά και Μηχανικά Χαρακτηριστικά, σε περίπτωση αναβάθμισης του σεισμικού κινδύνου ή απλώς σε περίπτωση που πρέπει να μελετηθεί ένα πρανές που έχει ήδη κατασκευαστεί. Εισάγονται αρχικά τα Μηχανικά Χαρακτηριστικά των εδαφών γωνία τριβής ϕ , και ειδικό βάρος γ , το ύψος H και η γωνία κλίσης β για τον κάθε ένα αναβαθμό, η απόσταση λ μεταξύ τους, η υφιστάμενη εφελκυστική αντοχή των στρώσεων οπλισμού T , το πλήθος n των στρώσεων οπλισμού, ενώ υπολογίζεται αυτόματα απόσταση μεταξύ των στρώσεων οπλισμού d_i (κοινή για ολόκληρο το πρανές). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στην επιφάνεια εργασίας του προγράμματος και συγκεκριμένα η Κρίσιμη Σεισμική επιτάχυνση k_{cr} για κάθε ένα αναβαθμό τοπικά καθώς και για ολόκληρο το πρανές.
- 5) Μία ακόμη εφαρμογή του λογισμικού είναι και η Στατική Ανάλυση των ενιαίων οπλισμένων πρανών καθώς και πρανών με αναβαθμούς. Και στην περίπτωση αυτή εισάγονται τα Μηχανικά και Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά των αναβαθμών ενώ στην θέση της μέγιστης αναμενόμενης σεισμικής επιτάχυνσης τοποθετείται ο επιθυμητός Συντελεστής Ασφαλείας της κατασκευής. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην επιφάνεια εργασίας του λογισμικού και συγκεκριμένα η μέγιστες τιμές της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής καθώς και το απαιτούμενο μήκος των οπλισμών.
- 6) Τέλος, εφόσον έχουν πραγματοποιηθεί τα βήματα «1» και «4», μπορεί να εκτιμηθεί η Αναμενόμενη Μόνιμη Μετατόπιση. Συγκεκριμένα, εισάγεται η Αναμενόμενη Σεισμική Επιτάχυνση καθώς και η Κρίσιμη Σεισμική Επιτάχυνση του πρανούς καθώς και το επίπεδο εμπιστοσύνης “ t ” και υπολογίζεται και παρουσιάζεται στην επιφάνεια εργασίας η τιμή της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης σε cm. Με την τιμή της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης, εκτιμάται και η σεισμική τρωτότητα των οπλισμένων πρανών.

Στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του λογισμικού, ενώ στα Σχήματα 3.5 έως και 3.10, παρουσιάζονται παραδείγματα λειτουργίας του. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 3.5 και 3.6 φαίνεται ο τρόπος υπολογισμού της μέγιστης αναμενόμενης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης, στο Σχήμα 3.7 ένα παράδειγμα του σχεδιασμού οπλισμένου πρανούς με αναβαθμούς, έναντι σεισμικής φόρτισης, στην συνέχεια στο Σχήμα 3.8 η εκτίμηση της τρωτότητας υφιστάμενου πρανούς για αναβάθμιση του σεισμικού κινδύνου, στο Σχήμα 3.9 ο στατικός σχεδιασμός των πρανών και τέλος στο Σχήμα 3.10 ο υπολογισμός της αναμενόμενης μόνιμης οριζόντιας μετατόπισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πίνακας 3.1. Διάγραμμα ροής λογισμικού για τον στατικό και αντισεισμικό σχεδιασμό και έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.
 Table 3.1. Flow chart of software for the static and seismic design and vulnerability check of reinforced slopes with berms.



Form1

FILE CALCULATE

HPGA

	SKARLAT.(2003)	THEOD.-PAPAZ.	THEOD.-STIFF SOIL
Ms	6.5	6.5	6.5
R	40	40	40
ho	7		
F	0		
S	0	1	0.5
P		1.3	0

Σχήμα 3.5. Μέθοδοι υπολογισμού της μέγιστης οριζόντιας αναμενόμενης σεισμικής επιτάχυνσης.
 Figure 3.5. Methods of calculation of the horizontal peak ground acceleration.

Form1

FILE CALCULATE

HPGA

- HPGA
- DYNAMIC ANALYSIS
- STATIC ANALYSIS
- DISPLACEMENT
- VULNERABILITY

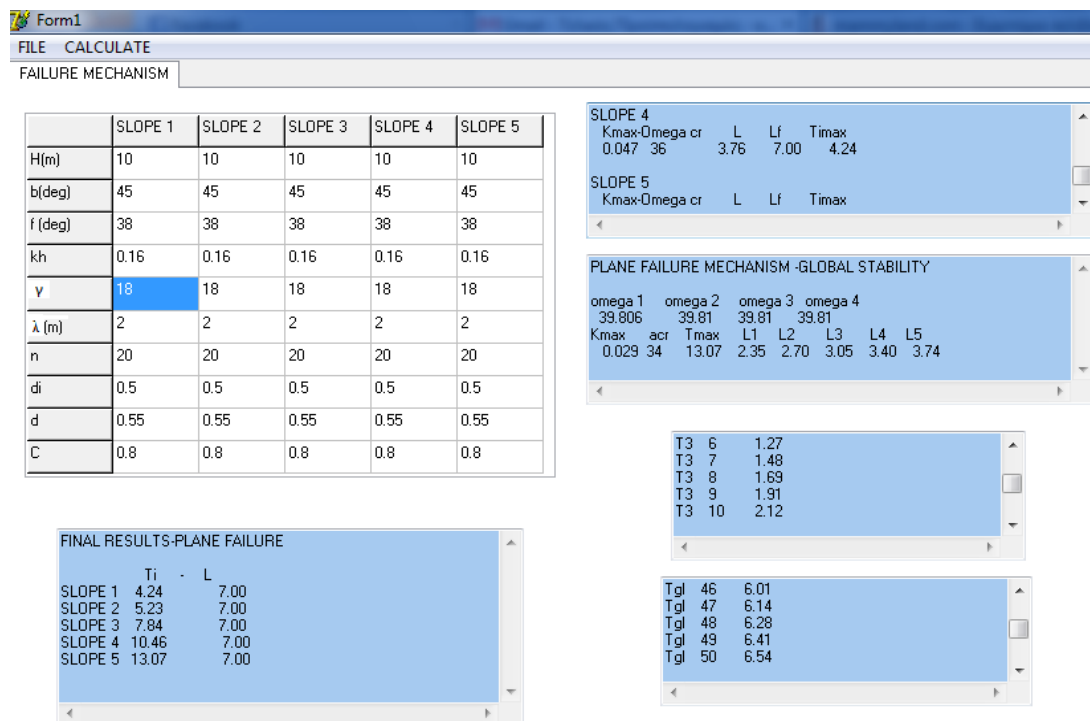
		D.-PAPAZ.	THEOD.-STIFF SOIL
R	40	40	40
ho	7		
F	0		
S	0	1	0.5
P		1.3	0

SKARLATOUDIS et al (2003)
 THEODOULIDIS PAPAAXOS
 THODOULIDIS STIFF SOIL

HPGA= 0.057
 HPGA= 0.37
 HPGA= 0.12

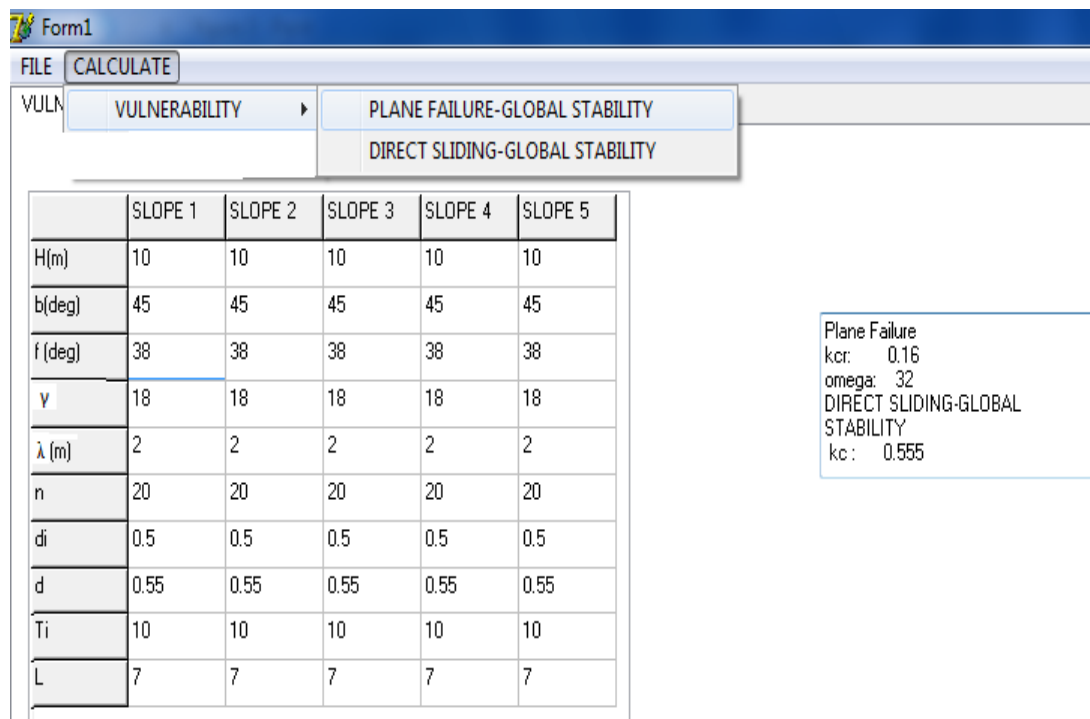
Σχήμα 3.6. Παράδειγμα υπολογισμού μέγιστης οριζόντιας αναμενόμενης σεισμικής επιτάχυνσης.
 Figure 3.6. Example of calculation of the horizontal peak ground acceleration.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3



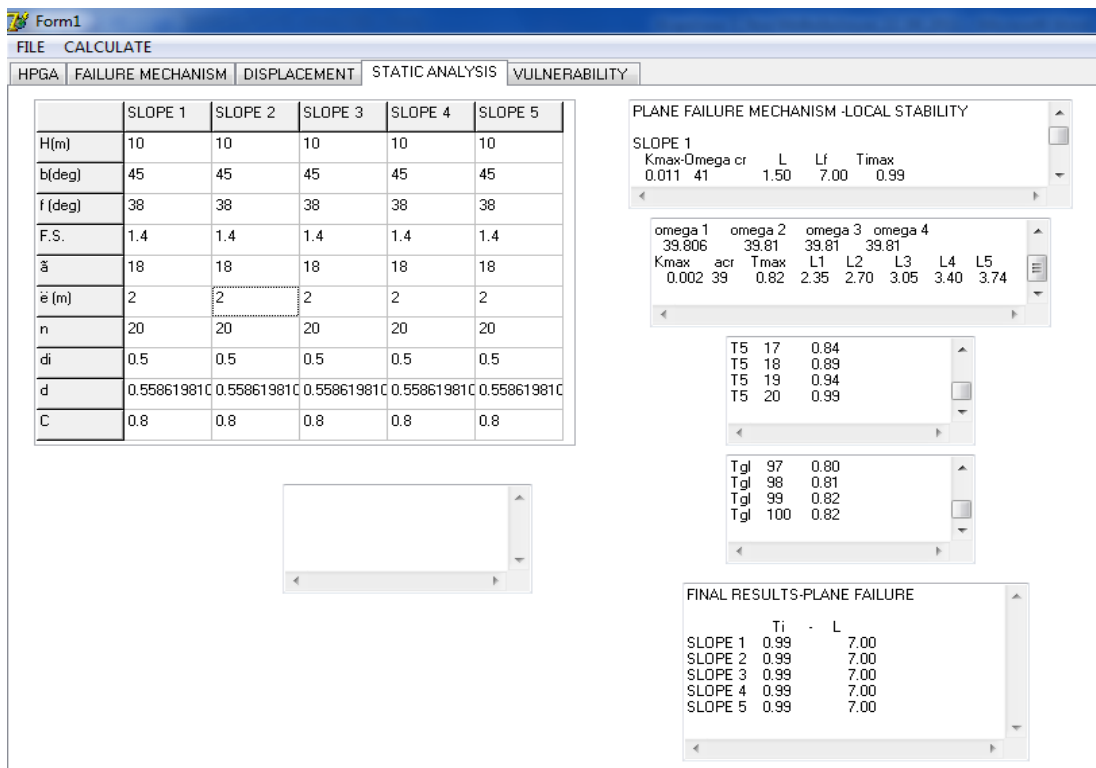
Σχήμα 3.7. Παράδειγμα του σχεδιασμού οπλισμένου πρανού με αναβαθμούς έναντι σεισμικής φόρτισης.

Figure 3.7. Example of design of multi step reinforced slope, due to seismic loading.



Σχήμα 3.8. Εκτίμηση της τρωτότητας υφιστάμενου πρανού για αναβάθμιση του σεισμικού κινδύνου.

Figure 3.8. Evaluation of the vulnerability of reinforced slope for increase on the seismic loading.



Σχήμα 3.9. Παράδειγμα σχεδιασμού οπλισμένου πρανού με αναβαθμούς, έναντι στατικής φόρτισης.
 Figure 3.9. Example of design of multi step reinforced slope, due to static loading.

3.3.2 Παρουσίαση κώδικα λογισμικού.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε και συγκεκριμένα ο τρόπος που έγινε η σύνθεσή του, καθώς και οι επιμέρους εξισώσεις και μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των υπολογισμών.

Ειδικότερα, ορίζονται αρχικά οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οπλισμένων πρανών. Συγκεκριμένα, επιλέγονται οι μεταβλητές που φαίνονται στον Πίνακα 3.2, ενώ στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι μεταβλητές που εκφράζουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους υπολογισμούς. Όλοι οι Πίνακες δείχνουν τον ακριβή κώδικα που έχει χρησιμοποιηθεί καθώς και τα σχόλια που έχουν προστεθεί για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του λογισμικού.

Ακολούθως ορίζονται οι βασικές λειτουργίες του προγράμματος όπως για παράδειγμα:
 OPEN1: TMenuItem; SAVEAS1: TMenuItem; PRINT1: TMenuItem; CALCULATIO1:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

TMenuItem;, και διαχωρίζονται οι μηχανισμοί τοπικής και ολικής ευστάθειας: LOCALSTABILITY1:TMenuItem; και GLOBALSTABILITY1: TMenuItem;. Επίσης ορίζονται οι διάφοροι πίνακες στους οποίους θα αναγράφονται τα δεδομένα που εισάγονται καθώς και οι θέσεις στις οποίες θα εμφανίζονται τα αποτελέσματα, για παράδειγμα ως: slope1: TStringGrid; και Memo1: TMemo; αντίστοιχα.

Στην συνέχεια δημιουργούνται οι πίνακες στους οποίους εισάγονται τα δεδομένα, η μορφή των οποίων φαίνεται στον Πίνακα 3.4. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 3.4 στην αριστερή στήλη, παρουσιάζεται ο τύπος των δεδομένων που εμφανίζονται στην αρχική φόρμα (ύψος H, γωνία τριβής φ, ειδικό βάρος γ κλπ), ενώ στην δεξιά στήλη παρουσιάζονται κάποιες αντίστοιχες ενδεικτικές τιμές οι οποίες και εμφανίζονται όταν τίθεται σε λειτουργία το πρόγραμμα. Έτσι, στο κελί [0,1] αντιστοιχεί το ύψος του πρανούς, στο κελί [1,1] τίθεται η ενδεικτική τιμή για το ύψος ίση με 10m, στο κελί [0,2] αντιστοιχεί η γωνία κλίσης του πρανούς β σε μοίρες ενώ στο κελί [1,2] η ενδεικτική τιμή των 70^0 για το εν λόγω πρανές κ.ο.κ. Για κάθε ένα αναβαθμό τίθενται και ξεχωριστά δεδομένα καθώς και ξεχωριστές αρχικές τιμές.

Κατόπιν, ορίζονται κάποιες προσωρινές τοπικές μεταβλητές, οι οποίες και χρησιμοποιούνται για τους επιμέρους υπολογισμούς και για τις οποίες έχει επιλεγεί να μην εμφανίζονται στα τελικά αποτελέσματα. Τέτοιες μεταβλητές είναι για παράδειγμα εκείνες που χρησιμοποιούνται για τους βρόγχους (loop) που έχουν δημιουργηθεί και παίζουν σημαντικό ρόλο για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, ορίζονται και κάποιες βοηθητικές συναρτήσεις για την μετατροπή των μονάδων των γωνιών από μοίρες σε rad, καθώς και για την εύρεση ελάχιστης ή μέγιστης τιμής συνάρτησης. Οι βοηθητικές συναρτήσεις φαίνονται στον Πίνακα 3.5 όπου παρουσιάζονται αρχικά οι συναρτήσεις για μετατροπή των γωνιών και ακολούθως ενδεικτικά ο βρόγχος που έχει δημιουργηθεί για την εύρεση της ελάχιστης τιμής συναρτήσεων. Κατά την διάρκεια των υπολογισμών του προγράμματος, καλούνται αυτές οι βοηθητικές συναρτήσεις και λαμβάνουν χώρα οι αντίστοιχοι υπολογισμοί.

Στην συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση σύμφωνα με τις Εξισώσεις που περιγράφονται στην Ενότητα 3.1, αρχικά για κάθε έναν αναβαθμό ξεχωριστά (τοπική ευστάθεια) και κατόπιν για ολόκληρο το πρανές (ολική ευστάθεια). Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζεται

ενδεικτικά η ανάλυση του αναβαθμού No. 3 για τοπική ευστάθεια. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, στους υπολογισμούς συμπεριλαμβάνονται και οι υπερκείμενοι αναβαθμοί και συγκεκριμένα για την περίπτωση του αναβαθμού No.3, συνυπολογίζεται και το βάρος των αναβαθμών No.1 και No.2. Με τον βρόγχο που έχει δημιουργηθεί και παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.6, υπολογίζεται η μέγιστη τιμή του K , σύμφωνα με τις Εξισώσεις 3.6 έως και 3.10. Στην συνέχεια και αφού έχει υπολογισθεί η συνολική απαιτούμενη ποσότητα όπλισης K , κατανέμεται αυτή ανάλογα με το βάθος z_i της κάθε στρώσης οπλισμού, σύμφωνα με την μεθοδολογία που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.7, ενώ στον Πίνακα 3.8 παρουσιάζεται η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων με την βοήθεια εργαλείων που ονομάζονται: Memos. Στο Memo που παρουσιάζεται πάνω δεξιά στο Σχήμα 3.7, μπορεί να παρατηρηθεί η συνολική ποσότητα οπλισμού K , η κρίσιμη γωνία Ω , το μήκος όπλισης L και L_f , και φυσικά η απαιτούμενη δύναμη όπλισης για κάθε έναν αναβαθμό, ενώ στο ίδιο Σχήμα και στο 3^ο Memo στην δεξιά πλευρά, παρουσιάζεται αναλυτικά η απαιτούμενη ποσότητα όπλισης για κάθε μία στρώση. Συνήθως βέβαια επιλέγεται για κάθε έναν αναβαθμό ομοιόμορφη αντοχή οπλισμών, ωστόσο, δίνεται η δυνατότητα να επιλεγεί και η ελάχιστη που υπολογίζεται μέσω του λογισμικού.

Ακολούθως, πραγματοποιείται ανάλυση σύμφωνα με τις Εξισώσεις 3.12 έως και 3.18 για ολική ευστάθεια του πρανούς. Ομοίως, όπως και για τοπική ευστάθεια, δημιουργείται ένας βρόγχος, ένα τμήμα του οποίου παρουσιάζεται ενδεικτικά στον Πίνακα 3.9 όπου και υπολογίζεται η μέγιστη συνολική απαιτούμενη ποσότητα οπλισμού K . Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.9 καθώς και στους άλλους Πίνακες, οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται για την εύρεση των κρίσιμων τοπικών και ολικών μηχανισμών αστοχίας είναι ιδιαίτερα σύνθετοι και δύσκολα θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν με άλλους τρόπους όπως για παράδειγμα με φύλλο Excel ή με το χέρι. Στην συνέχεια παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.10 η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής των οπλισμών, σύμφωνα με την θέση των στρώσεων και σύμφωνα με την τιμή του K , καθώς και το μήκος του κάθε οπλισμού. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων η οποία και πραγματοποιείται στο 2^ο και στο 4^ο Memo της δεξιάς στήλης του Σχήματος 3.7. Η οπτικοποίηση αυτή πραγματοποιείται με τον κώδικα που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.11. Τέλος, παρουσιάζεται η σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων μεταξύ της τοπικής και ολικής ευστάθειας και επιλέγονται οι κρισιμότερες τιμές για την τελική

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

διαστασιολόγηση του πρανούς. Τα αποτελέσματα αυτά εμφανίζονται στο Memo της κάτω δεξιάς πλευράς του Σχήματος 3.7, ενώ ο κώδικας που έχει δημιουργηθεί για την εμφάνιση αυτών των αποτελεσμάτων μπορεί να φανεί στον Πίνακα 3.12.

Πίνακας 3.2. Ορισμός μεταβλητών που εκφράζουν τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.

Table 3.2. Definition of variables that express the geometrical and mechanical characteristics of multi-step reinforced slopes.

```
// INPUT -PLANE FAILURE -DYNAMIC ANALYSIS
```

```
H:REAL; //HEIGHT
b,f:integer; // INCLINATION-FRICTION ANGLE
g:real; //UNIT WEIGHT
kh:real; //SEISMIC ACCELERATION
lamda:real; //BERM DISTANCE
n:integer; //NUMBER OF REINF. LAYERS
di:real; // REINFORCEMENT DISTANCE
o:real; //
```

Πίνακας 3.3. Ορισμός μεταβλητών που εκφράζουν τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

Table 3.3. Definition of variables that express the results of the calculations.

```
//RESULTS- PLANE FAILURE-DYNAMIC ANALYSIS
```

```
G1,G2,G3,G4,G5,Gg:real; //AREA FOR LOCAL AND GLOBAL STABILITY
omega:integer; // ANGLE OF FAILURE MECHANISM
k:real; // REINFORCEMENT K
l,lf:real; //LENGTH OF REINFORCEMENT & FINAL
LENGTH
Ti:real; //TENSILE STRENGTH OF REINFORC.
li:real; // ANCHORANCE LENGTH
i:integer;
zi:real;
tti:real;
lg:real;
```

Πίνακας 3.4. Κώδικας για εισαγωγή δεδομένων από χρήση.

Table 3.4. Code for data input from user.

```
// INPUT THAT ARE SHOWN IN THE ORIGINAL FORM
```

```
slope1.Cells[0,1]:='H(m)'; slope1.Cells[1,1]:='10';
slope1.Cells[0,2]:='b(deg)'; slope1.Cells[1,2]:='70';
slope1.Cells[0,3]:='f (deg)'; slope1.Cells[1,3]:='38';
```

slope1.Cells[0,4]='kh';	slope1.Cells[1,4]='0.16';
slope1.Cells[0,5]='γ';	slope1.Cells[1,5]='18';
slope1.Cells[0,6]='λ (m)';	slope1.Cells[1,6]='2';
slope1.Cells[0,7]='n';	slope1.Cells[1,7]='20';
slope1.Cells[0,8]='di';	slope1.Cells[1,8]='0.5';
slope1.Cells[0,9]='d';	slope1.Cells[1,9]='0.55';
slope1.Cells[1,0]='SLOPE 1';	slope1.Cells[2,1]='10';
slope1.Cells[2,0]='SLOPE 2';	slope1.Cells[2,2]='65';
slope1.Cells[3,0]='SLOPE 3';	slope1.Cells[2,3]='38';
slope1.Cells[4,0]='SLOPE 4';	slope1.Cells[2,4]='0.16';
slope1.Cells[5,0]='SLOPE 5';	slope1.Cells[2,5]='18';

Πίνακας 3.5. Βοηθητικές συναρτήσεις λογισμικού.
Table 3.5. Additional functions of code.

```
//additional functions for transformation from rad to deg, for min-max functions etc
```

```
function degtorad(deg:real):real;
  Begin
  result:= deg*pi /180;
  end;
function radtodeg(rad:real):real;
  begin
  result:= rad*180/pi ;
  end;
function minvalue(var1,var2,var3,var4:double)
:double;
  var
  temp:double;
  begin
  temp:=min(var1,var2);
  temp:=min(var3,temp);
  temp:=min(var4,temp);
  result:= temp;
  end;
```

Πίνακας 3.6. Ανάλυση του αναβαθμού No. 3 για τοπική ευστάθεια.
Table 3.6. Analysis of berm No. 3 for local stability.

```
//SLOPE3
```

```
For
i3:=1 to n3 do
```

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

```
Begin
r3.G3:= 0.5* s3.g*s3.H*s3.H*sin( degtorad(s3.b)-degtorad(i3))/
(sin(degtorad(i3))*sin(degtorad(s3.b)));
r3.G2:= s2.H*s3.g*(s3.H*sin(degtorad(s3.b)-degtorad(i3))/(sin(degtorad(s3.b))*sin(degtorad(i3)))-
s2.lamda -s2.H/(2*tan(degtorad(s2.b) ) ));
r3.G1:= s3.g*(2*(s3.H*sin(degtorad(s3.b)-degtorad(i3))/(sin(degtorad(s3.b))*sin(degtorad(i3)))-
s2.lamda-s1.lamda-s2.H/tan(degtorad(s2.b)))-s1.H/tan(degtorad(s1.b)))*s1.H/2;
if (r3.G1<0) then
Begin
r3.G1:=0;
end;
if (r3.G2<0) then
Begin
r3.G2:=0;
end;
if (r3.G3<0) then
Begin
r3.G3:=0;
end;
r3.k:=(2*(r3.G1+r3.G2+r3.G3)*tan(degtorad(i3)-degtorad(s3.f))+
2*s3.kh*(r3.G1+r3.G2+r3.G3))/(s3.g*s3.H*s3.H);
r3.l:=s3.H*sin(degtorad(s3.b)-degtorad(i3))/(sin(degtorad(s3.b))*sin(degtorad(i3)));
if ( r3.k>kk3)
Then
Begin
kk3:=r3.k;
it3:=i3;
l3:=r3.l;
end;
end;
```

Πίνακας 3.7. Κατανομή της ποσότητας οπλισμού K , ανάλογα με το βάθος z_i της κάθε στρώσης οπλισμού.

Table 3.7. Distribution of amount of reinforcement K , according to the depth z_i of every reinforcement layer.

```
//Reinforcement strength & length
```

```
r3.tti:=0;
```

```

for ic:=1 to q3 do
begin
  r3.zi:= ic*s3.H/s3.n;
  r3.Ti:= kk3*s3.g*r3.zi*s3.di;
memo3.Lines.Append('T3 '+inttostr(ic)+#09+format('%8.2f',[r3.Ti]));
  if (r3.Ti>r3.tti) then
  begin
    r3.tti:=r3.Ti;
  end;
end;
if(l3<0.7*s3.H) then
begin
  r3.lf:=0.7*s3.H;
end;
if(l3>0.7*s3.H) then
begin
  r3.lf:=l3;
end;

```

Πίνακας 3.8. Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων ανάλυσης αναβαθμού Νο. 3 για τοπική ευστάθεια.
Table 3.8. Visualization of results from analysis berm No. 3 for local stability.

```

//visualization of results
Memo1.Lines.Append(' ');
Memo1.Lines.Append('SLOPE 3 ');
Memo1.Lines.Append(' Kmax-Omega cr L Lf Timax');
Memo1.Lines.Append(format('%8.3f', [kk3])+' '+floattostr(it3)+' '+
format(' %8.2f,[l3]'+ ' '+format('%8.2f',[r3.lf])+' '+format('%8.2f',[r3.tti]));

```

Πίνακας 3.9. Ανάλυση για ολική ευστάθεια.
Table 3.9. Analysis for global stability.

```

//B)GLOBAL STABILITY
s1.o:= radtodeg(arctan( s5.H/(s4.lamda+s5.H/tan(degtorad(s5.b))));
s2.o:= radtodeg(arctan( (s4.H+s5.H)/(s3.lamda+s4.lamda+s5.H/tan(degtorad(s5.b))+ s4.H/tan(degtorad(s4.b))));
s3.o:= radtodeg(arctan((s3.H+s4.H+s5.H )/
(s2.lamda+s3.lamda+s4.lamda+s3.H/tan(degtorad(s3.b))+s4.H/tan(degtorad(s4.b))+s5.H/tan(degtorad(s5.b))));
s4.o:=radtodeg( arctan( (s2.H+s3.H+s4.H+s5.H)/(s1.lamda+s2.lamda+s3.lamda+s4.lamda+
s3.H/tan(degtorad(s3.b))+s2.H/tan(degtorad(s2.b))+s4.H/tan(degtorad(s4.b))+s5.H/tan(degtorad(s5.b)) ));
kkgl:=0;
iig:= s1.f +1;
ng:= trunc(minvalue(s1.o,s2.o,s3.o,s4.o));
for

```

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

```
ig:=1 to ng do
  begin
    x1:=s5.H/tan(degtorad(ig)) -s4.lamda-s5.H/tan(degtorad(s5.b));
    x2:=(s4.H+s5.H)/tan(degtorad(ig))-s3.lamda-s4.lamda-s5.H/tan(degtorad(s5.b))-s4.H/tan(degtorad(s4.b));
    x3:= (s3.H+s4.H+s5.H)/tan(degtorad(ig))-s2.lamda-s3.lamda-s4.lamda-
    s3.H/tan(degtorad(s3.b))-s4.H/tan(degtorad(s4.b))-s5.H/tan(degtorad(s5.b));
    x4:=(s2.H+s3.H+s4.H+s5.H)/ tan(degtorad(ig))- s1.lamda-s2.lamda-s3.lamda-s4.lamda -
    s2.H/tan(degtorad(s2.b)) -s3.H/tan(degtorad(s3.b))-s4.H/tan(degtorad(s4.b))-s5.H/tan(degtorad(s5.b));
    x5:= (s1.H+s2.H+s3.H+s4.H+s5.H)/tan(degtorad(ig)) -s1.H/tan(degtorad(s1.b))-s2.H/tan(degtorad(s2.b))-
    s3.H/tan(degtorad(s3.b))-s4.H/tan(degtorad(s4.b))-s5.H/tan(degtorad(s5.b))-s1.lamda-s2.lamda-s3.lamda-s4.lamda;
    if (x1<0) then
      begin
        x1:=0;
      end;
    if (x2<0) then
      begin
        x2:=0;
      end;
    if (x3<0) then
      begin
        x3:=0;
      end;
    if (x4<0) then
      begin
        x4:=0;
      end;
    if (x5<0) then
      begin
        x5:=0;
      end;
    r1.Gg:=(x5+x4)*s1.H/2 ;
    r2.Gg:=(x4+s1.lamda+x3)*s2.H/2;
    r3.Gg:=(x3+s2.lamda+x2)*s3.H/2;
    r4.Gg:=(s3.lamda+x2+x1)*s4.H/2;
    r5.Gg:=(s4.lamda+x1)*s5.H/2;
    kgl:=(2*( r1.Gg +r2.Gg + r3.Gg+ r4.Gg+ r5.Gg)*tan(degtorad(ig)-degtorad( s1.f))+2*s1.kh*(r1.Gg +r2.Gg +
    r3.Gg+ r4.Gg+ r5.Gg)) /((s1.H+s2.H+s3.H+s4.H+s5.H)* (s1.H+s2.H+s3.H+s4.H+s5.H));
    if ( kgl>kkgl) then
      begin
        kkgl:=kgl;
      end;
    igl:=ig ;
  end;
end;
```

Πίνακας 3.10. Κατανομή της ποσότητας οπλισμού K , ανάλογα με το βάθος z_i της κάθε στρώσης οπλισμού και μήκος όπλισης.

Table 3.10. Distribution of amount of reinforcement K , according to the depth z_i of every reinforcement layer and reinforcement length.

```
//Reinforcement strength & length for global stability
Tgl:=0;
q:= s1.n+s2.n+s3.n+s4.n+s5.n;
for it:=1 to q do
begin
zi:= it*(s1.H+s2.H+s3.H+s4.H+s5.H)/(s1.n+s2.n+s3.n+s4.n+s5.n);
Ti:= kkg1*s1.g*zi*s1.di;
memo4.Lines.Append('Tgl '+inttostr(it)+#09+format('%8.2f',[Ti]));
//memo4.Lines.Append('Tgl '+inttostr(ie)+#09+format('%8.2f',[r5.Ti]));
if (ti>tgl) then
begin
tgl:=ti;
end;
end;
T11:= kkg1*s1.g*s1.h *s1.di;
T22:= kkg1*s2.g*(s1.h+s2.h)*s2.di;
T33:= kkg1*s3.g*(s1.h+s2.h+s3.h)*s3.di;
T44:= kkg1*s4.g*(s1.h+s2.h+s3.h+s4.h)*s4.di;
T55:= kkg1*s5.g*(s1.h+s2.h+s3.h+s4.h+s5.h)*s5.di;
r1.lg:=x5;
r2.lg:=x4+s1.lamda;
r3.lg:=x3+s2.lamda;
r4.lg:=x2+s3.lamda;
r5.lg:=x1+s4.lamda;
T1:=max(r1.tti, T11);
T2:=max(r2.tti, T22);
T3:=max(r3.tti, T33);
T4:=max(r4.tti, T44);
T5:=max(r5.tti, T55);
if (r1.tti>T11) then
begin
L1:=r1.lf;
end
else
begin
L1:=r5.lg;
end;
end;
```

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

```
if (r2.tti>T22) then
begin
L2:=r2.lf;
end
else
begin
L2:=r4.lg;
end;
```

Πίνακας 3.11. Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων ανάλυσης για ολική ευστάθεια.

Table 3.11. Visualization of results from global stability analysis.

```
//GLOBAL STABILITY, RESULTS
Memo2.Lines.Append('PLANE FAILURE MECHANISM -GLOBAL STABILITY ');
Memo2.Lines.Append("");
Memo2.Lines.Append('omega 1   omega 2   omega 3   omega 4   ');
Memo2.Lines.Append(format('%8.3f, [s1.o]'+ ' '+format(' %8.2f,[s2.o]'+ ' '+format('%8.2f,[s3.o]'+ ' '+format('%8.2f,[s4.o]));
Memo2.Lines.Append('Kmax   '+ ' '+acr' + ' '+Tmax'+ ' '+L1'+ ' '+L2'+ ' '+L3'+ ' '+L4'+ ' '+L5');
Memo2.Lines.Append(format('%8.3f, [kkg]'+ ' '+floattostr(igl)+' '+format('%8.2f, [tgl] '+'+[r2.lg]'+format('%8.2f, [r1.lg]));
format('%8.2f, [r5.lg] '+'+format('%8.2f, [r4.lg]'+format('%8.2f, [r3.lg]'+format('%8.2f,
```

Πίνακας 3.12. Τελικά αποτελέσματα ολικής και τοπικής ευστάθειας.

Table 3.12. Final results for local and global stability.

```
// LOCAL & GLOBAL FINAL RESULTS
memo7.Lines.Append('FINAL RESULTS-PLANE FAILURE');
memo7.Lines.Append("");
memo7.Lines.Append('           Ti   -   L);
memo7.Lines.Append('SLOPE 1'+ format('%8.2f,[T1]'+ ' '+format('%8.2f,[L1]));
memo7.Lines.Append('SLOPE 2'+format('%8.2f,[T2]'+ ' '+format('%8.2f,[L2]));
memo7.Lines.Append('SLOPE 3'+format('%8.2f,[T3]'+ ' '+format('%8.2f,[L3]));
memo7.Lines.Append('SLOPE 4'+format('%8.2f,[T4]'+ ' '+format('%8.2f,[L4]));
memo7.Lines.Append('SLOPE 5'+format('%8.2f,[T5]'+ ' '+format('%8.2f,[L5]));
```

3.4 Σχόλια και συμπεράσματα.

Συμπερασματικά, οι Εξισώσεις που δημιουργήθηκαν για τον αντισεισμικό σχεδιασμό οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για όποιον αριθμό αναβαθμών επιθυμεί ο μελετητής, και για διάφορα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά

αυτών. Επίσης, η οριζόντια σεισμική επιτάχυνση μπορεί να εκτιμηθεί βάσει των σεισμοτεκτονικών χαρακτηριστικών της κάθε περιοχής.

Ο συνδυασμός των μηχανισμών τοπικής και ολικής ευστάθειας δίνει ολοκληρωμένα αποτελέσματα, καθώς όπως αναφέρθηκε και στις παραπάνω ενότητες, οι ανώτεροι αναβαθμοί διαστασιολογούνται συνήθως μέσω των μηχανισμών τοπικής ευστάθειας, ενώ οι κατώτεροι αναβαθμοί μέσω των μηχανισμών ολικής ευστάθειας.

Παρόμοιες Εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν πέραν του σχεδιασμού και για τον έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς, για την εύρεση του κρίσιμου σεισμικού συντελεστή του πρανούς, ο οποίος και αποτελεί χαρακτηριστική κατασκευαστική τιμή ενός υφιστάμενου πρανούς. Επιπλέον, μπορεί να πραγματοποιηθεί στατική ανάλυση οπλισμένων πρανών με την επιλογή κάποιου επιθυμητού Συντελεστή Ασφαλείας, ενώ τέλος μπορεί να υπολογισθεί και η τρωτότητα οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς, μέσω της αναμενόμενης μόνιμης οριζόντιας μετατόπισης.

Στην συνέχεια, βάσει των Εξισώσεων αυτών δημιουργήθηκε κώδικας περίπου 5000 γραμμών που ενσωματώνει την ολοκληρωμένη μεθοδολογία που περιγράφεται στις προηγούμενες Ενότητες του παρόντος Κεφαλαίου. Η δημιουργία του κώδικα ήταν ιδιαίτερα απαιτητική καθώς οι Εξισώσεις και η γεωμετρία των πρανών με αναβαθμούς ήταν ιδιαίτερα σύνθετη. Δημιουργήθηκαν βοηθητικές συναρτήσεις καθώς και βρόγχοι προκειμένου να καθορισθούν οι κρίσιμοι μηχανισμοί αστοχίας ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στην επιφάνεια του προγράμματος.

Με το λογισμικό που δημιουργήθηκε μπορεί ο χρήστης γρήγορα και πρακτικά να μελετήσει οπλισμένα πρανά με αναβαθμούς, σύμφωνα με τον Μηχανισμό Αστοχίας Επίπεδης Ολίσθησης. Παραδείγματα εφαρμογής της αναλυτικής λύσης και του λογισμικού παρουσιάζονται στο επόμενο Κεφάλαιο. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα να εφαρμοσθούν στο μέλλον και άλλοι μηχανισμοί αστοχίας, όπως για παράδειγμα ο Μηχανισμός Λογαριθμικής Σπείρας καθώς και ο Μηχανισμός Άμεσης Ολίσθησης.

Στο 4^ο Κεφάλαιο που ακολουθεί, παρουσιάζονται παραδείγματα ανάλυσης οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς, τα οποία και συγκρίνονται με αντίστοιχα ενιαία πρανά με στόχο την

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ανάδειξη των πλεονεκτημάτων των πρανών με αναβαθμούς. Επίσης, δημιουργούνται υπολογιστικά μοντέλα αντίστοιχα με εκείνα που αναλύονται με το λογισμικό με στόχο να πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων της νέας αναλυτικής λύσεις με άλλες μεθόδους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

**Παραδείγματα Οπλισμένων Πρανών με Αναβαθμούς και
Σύγκριση με Υπολογιστικές Μεθόδους.**

4.1 Περίληψη Κεφαλαίου.

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται *παραδείγματα* αντισεισμικού σχεδιασμού και ελέγχου επάρκειας οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς, σύμφωνα με την αναλυτική λύση και το λογισμικό που αναπτύχθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο. Αρχικά επιλέγονται περιπτώσεις υπολογισμού της μέγιστης αναμενόμενης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης, βάσει των σεισμοτεκτονικών χαρακτηριστικών της κάθε περιοχής για διάφορες κατηγορίες εδαφών. Στην συνέχεια σχεδιάζονται και αναλύονται ορισμένα οπλισμένα πρανή με αναβαθμούς, για διάφορα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τιμές της μέγιστης αναμενόμενης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης. Ακολούθως, σχεδιάζονται οπλισμένα πρανή με αναβαθμούς τα οποία και ελέγχονται έναντι στατικής φόρτισης με την επιλογή κάποιου επιθυμητού Συντελεστή Ασφαλείας. Κατόπιν, πραγματοποιούνται υπολογισμοί για την εύρεση της κρίσιμης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης των οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς και στην συνέχεια βάσει της επιτάχυνσης αυτής εκτιμάται η τρωτότητα των οπλισμένων πρανών σε περίπτωση αναβάθμισης του σεισμικού κινδύνου μέσω του υπολογισμού της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης. Τέλος, δημιουργούνται αντίστοιχα υπολογιστικά μοντέλα οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς με παρόμοια γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά και αναλύονται με δύο διαφορετικές συμβατικές μεθόδους με στόχο να πραγματοποιηθεί σύγκριση της νέας αναλυτικής λύσης και του λογισμικού που έχει αναπτυχθεί με αυτές.

4.2 Παραδείγματα εκτίμησης μέγιστης ανηγμένης αναμενόμενης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης.

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα υπολογισμού της μέγιστης αναμενόμενης οριζόντιας ανηγμένης *σεισμικής επιτάχυνσης* k_h με την εφαρμογή του λογισμικού που έχει δημιουργηθεί.

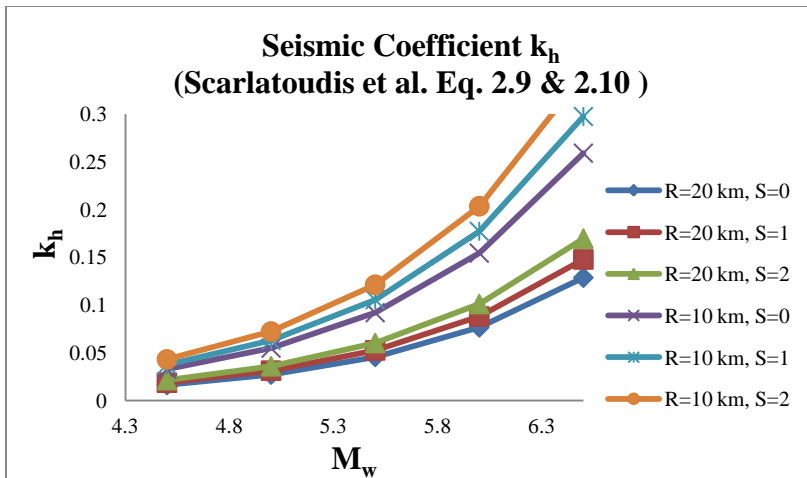
Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η μεταβολή του k_h για διάφορες τιμές του μεγέθους ροπής M_w , σύμφωνα με τις Εξισώσεις 2.9 και 2.10 (Skarlatoudis et al., 2003), για κατηγορίες εδαφών B,C και D, επίκεντρη απόσταση $R=10$ km και $R=20$ km και κανονικά ρήγματα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, για κανονικά ρήγματα δηλαδή για $F=1$, οι τιμές του

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

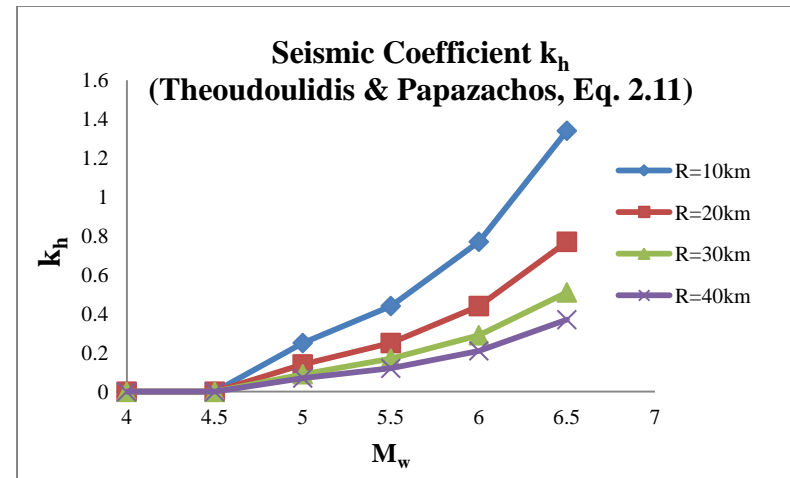
k_h αυξάνουν καθώς αυξάνει η τιμή του M_w , όπως άλλωστε ήταν και αναμενόμενο, ενώ επίσης για μεγαλύτερη τιμή της επίκεντρης απόστασης R , οι τιμές μειώνονται. Τέλος, για τις ίδιες τιμές της επίκεντρης απόστασης R , παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις για τις διάφορες κατηγορίες εδαφών και συγκεκριμένα οι τιμές της αναμενόμενης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης είναι μικρότερες για κατηγορίες εδαφών B και αυξάνουν για κατηγορίες εδαφών C και D (σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση κατά NEHRP, 1994), δηλαδή για S ίσο με 0, 1 και 2 αντίστοιχα.

Επίσης, στα Σχήματα 4.2 και 4.3 παρουσιάζονται οι τιμές του k_h σύμφωνα με τις Εξισώσεις 2.11 και 2.12 (Theoudoulidis & Papazachos, 1992), για κανονικά και σκληρά εδάφη αντίστοιχα και για διάφορες τιμές της επίκεντρης απόστασης R και του μεγέθους ροπής M_w . Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο, S είναι η παράμετρος του εδάφους ($S=1$ για βραχώδη εδάφη και $S=0$ για μαλακά εδάφη), P η πιθανοτική παράμετρος ($P=0$ για 50% πιθανότητα υπέρβασης και $P=1$ για 16% πιθανότητα υπέρβασης). Για τους υπολογισμούς του Σχήματος 4.2 έχει τεθεί $S=1$ και $P=1$, ενώ για τους υπολογισμούς του Σχήματος 4.3, έχει τεθεί για σκληρά εδάφη, $P=0$ και $S=0.5$. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, στο Σχήμα 4.2, για μαλακά εδάφη, οι τιμές του k_h , αυξάνουν καθώς αυξάνει η τιμή του μεγέθους ροπής M_w , όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ επίσης για μεγαλύτερη επίκεντρη απόσταση R , παρουσιάζονται μικρότερες τιμές της επιτάχυνσης. Ομοίως συμβαίνει και για σκληρά εδάφη, όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στο Σχήμα 4.3, με την τάξη μεγέθους του k_h , να μειώνεται για τις ίδιες τιμές των R και M_w .

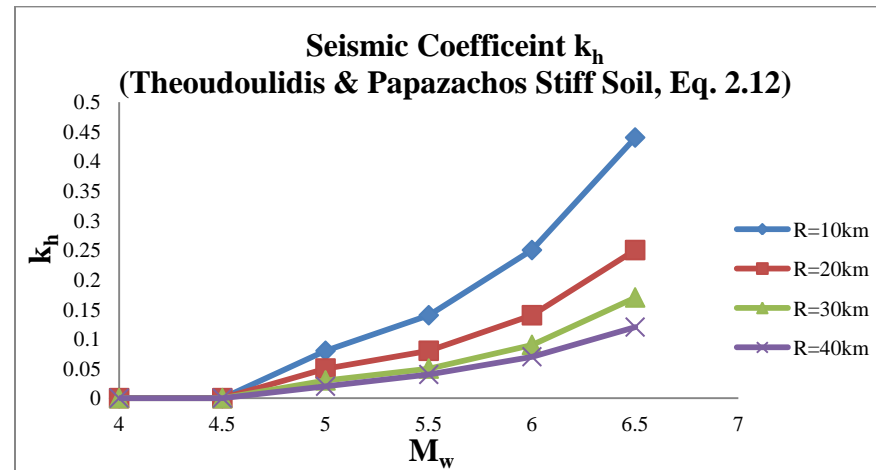
Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση των εξισώσεων στο λογισμικό που έχει αναπτυχθεί μπορεί να προσφέρει γρήγορη και ακριβή εκτίμηση της αναμενόμενης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης με διάφορες μεθόδους, προκειμένου στην συνέχεια να πραγματοποιηθεί σεισμική ανάλυση των εκάστοτε κατασκευών, ενώ επίσης υπάρχει η δυνατότητα στο μέλλον να συμπεριληφθούν και άλλες μέθοδοι-εξισώσεις για τον προσδιορισμό του k_h , ανάλογα με τα ειδικά σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής.



Σχήμα 4.1. Εκτίμηση k_h για κανονικά ρήγματα.
Figure 4.1. Evaluation of k_h for planar faults $F=1$.



Σχήμα 4.2. Εκτίμηση k_h για $S=1$ & $P=1$.
Figure 4.2. Evaluation of k_h for $S=1$ and $P=1$.



Σχήμα 4.3. Εκτίμηση k_h για σκληρά εδάφη, $P=0$ & $S=0.5$.
Figure 4.3. Evaluation of k_h for stiff soils, $P=0$ & $S=0.5$.

4.3 Παραδείγματα αντισεισμικού σχεδιασμού οπλισμένων πρηνών με αναβαθμούς.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται παραδείγματα αντισεισμικού σχεδιασμού οπλισμένων πρηνών με αναβαθμούς σύμφωνα με την μεθοδολογία και το λογισμικό που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα Κεφάλαια. Συγκεκριμένα, επιλέγεται αρχικά πρηνές με 5 αναβαθμούς ύψους 10 m ο κάθε ένας, κοινής κλίσης για τον κάθε αναβαθμό: $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ και $\beta_5=1:1$ (κατακόρυφο: οριζόντιο), ειδικού βάρους $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, γωνίας τριβής $\varphi=38^\circ$, απόσταση μεταξύ των οπλισμών ενιαία για ολόκληρο το πρηνές $d_i=0.5 \text{ m}$ και οριζόντια απόσταση μεταξύ των αναβαθμών $\lambda=2 \text{ m}$. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή T_i (kN/m) για κάθε ένα αναβαθμό και για διάφορες τιμές της αναμενόμενης σεισμικής επιτάχυνσης k_h . Για τον υπολογισμό των τιμών της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής που παρουσιάζεται στα παρακάτω Σχήματα, επιλέγονται αυθαίρετες τιμές του k_h και δεν χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που αναπτύσσεται για τον υπολογισμό της μέγιστης αναμενόμενης οριζόντιας ανηγμένης σεισμικής επιτάχυνσης βάσει των εμπειρικών εξισώσεων. Στα Σχήματα αυτά παρατηρείται αύξηση της τιμής του T_i καθώς αυξάνει η οριζόντια σεισμική επιτάχυνση k_h , όπως ήταν αναμενόμενο. Επιπλέον, παρατηρείται διαφοροποίηση του απαιτούμενου T_i για κάθε μία στρώση. Συγκεκριμένα, οι κατώτερες στρώσεις οπλισμού απαιτούν οπλισμούς μεγαλύτερης εφελκυστικής αντοχής από τις ανώτερες στρώσεις και η διαφορά αυτή διευρύνεται καθώς αυξάνει η τιμή του k_h . Επίσης παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα για συνεχόμενο πρηνές συνολικού ύψους 50 m και κλίσης $\beta=1:1$, για το οποίο και απαιτείται συνολικά μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η διαφοροποίηση της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής T_i (kN/m) για διάφορες τιμές της γωνίας τριβής φ ($^\circ$). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η τιμή του T_i (kN/m) μειώνεται γραμμικά καθώς αυξάνει η γωνία τριβής φ ($^\circ$). Στα Σχήματα 4.5 έως και 4.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για $k_h=0.12, 0.24$ και 0.36 αντίστοιχα. Παρατηρείται επίσης ότι για τον κατώτερο αναβαθμό “Slope 1”, για την γωνία τριβής $\varphi=37^\circ$, μειώνεται η απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή ενώ στην συνέχεια για $\varphi=38^\circ$, αυξάνει. Τέλος, παρατηρείται ότι και για το ενιαίο πρηνές με έναν αναβαθμό και ύψος 50 m, δηλαδή για το “50 m Slope” μειώνεται γραμμικά η απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή και όπως ήταν και

αναμενόμενο, ενώ συνολικά οι τιμές του T_i , είναι μεγαλύτερες για τις ίδιες τιμές της γωνίας τριβής φ .

Γενικά, τα αποτελέσματα που προκύπτουν και παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.5 έως και 4.7 είναι λογικά και αναμενόμενα και δείχνουν ότι η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε καθώς και το λογισμικό που δημιουργήθηκε για την ενσωμάτωσή της, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ένα γρήγορο και αποτελεσματικό εργαλείο για τον αντισεισμικό σχεδιασμό οπλισμένων πρηνών με αναβαθμούς, για διάφορα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Στα παρακάτω παρουσιάζονται και άλλα αποτελέσματα με μεταβολή διαφόρων μηχανικών χαρακτηριστικών των οπλισμένων πρηνών με αναβαθμούς.

Ακολούθως παρουσιάζονται αναλύσεις σε σχέση με την μεταβολή της απόστασης λ μεταξύ των αναβαθμών. Για το πρηνές με 5 αναβαθμούς ύψους 10 m ο κάθε ένας, κλίσης: $\beta=1:1$, ειδικού βάρους $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, γωνίας τριβής $\varphi=38^\circ$ και τέλος απόσταση μεταξύ των οπλισμών $d_i=0.5 \text{ m}$, η απόσταση λ μεταξύ των αναβαθμών παίζει σημαντικό ρόλο στην απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή των οπλισμών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται αποτελέσματα για $k_h=0.24$ και 0.36 για τους 5 αναβαθμούς και για $\lambda=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5$ και 4 m . Στα Σχήματα 4.8 και 4.9, παρατηρείται ότι για τους ανώτερους αναβαθμούς δεν υπάρχει καμία μεταβολή στην απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή του οπλισμού, καθώς δεν υπάρχει κάποιος υπερκείμενος αναβαθμός και επομένως οι διάφορες τιμές του λ δεν παίζουν κάποιο ρόλο στην γεωμετρία του, καθώς επίσης λόγω του ότι όπως αναφέρθηκε και στα παραπάνω η κρίσιμη τιμή της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής των ανώτερων αναβαθμών υπολογίζεται συνήθως από τους μηχανισμούς τοπικής ευστάθειας και όχι από τους μηχανισμούς ολικής ευστάθειας, για τους οποίους και παίζει ρόλο η τιμή του λ . Επιπλέον, παρατηρείται ότι η απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή για τους υπόλοιπους αναβαθμούς μειώνεται καθώς αυξάνει η απόσταση λ ενώ για μικρές τιμές αυτού, οι τιμές και ειδικότερα για τους κατώτερους αναβαθμούς πλησιάζουν τις αντίστοιχες τιμές του συνεχόμενου πρηνούς ύψους 50 m. Τέλος, παρατηρείται ότι καθώς η επιτάχυνση της βαρύτητας αυξάνει, οι αποκλίσεις στις τιμές των εφελκυστικών αντοχών αυξάνουν.

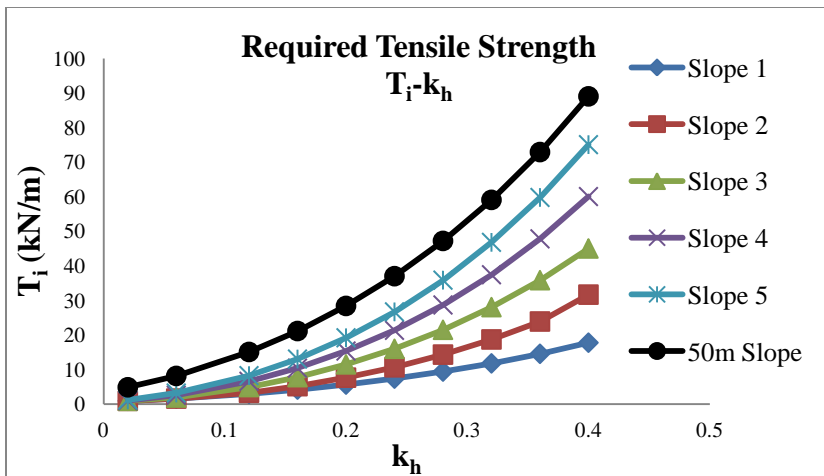
Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένα ακόμη παράδειγμα πρηνούς με 5 αναβαθμούς ύψους 10 m ο κάθε ένας, με διαφορετική κλίση ο κάθε ένας και συγκεκριμένα με: $\beta_1=2:1, \beta_2=2:1, \beta_3=3:2,$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

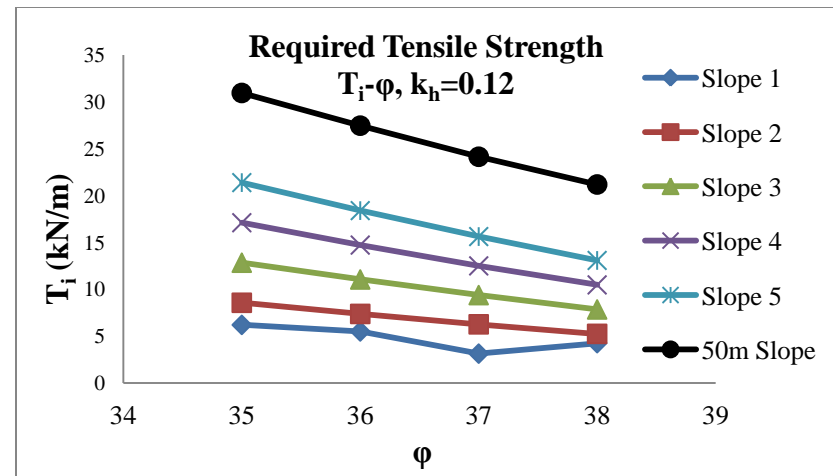
$\beta_4=1:1$ και $\beta_5=1:1$ (κατακόρυφο: οριζόντιο), ειδικού βάρους $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$, γωνίας τριβής $\varphi=35^\circ$ και τέλος απόσταση μεταξύ των οπλισμών ενιαία για ολόκληρο το πρηνές $d_i=0.5 \text{ m}$. Στο Σχήμα 4.10, παρουσιάζεται η απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή T_i για κάθε ένα αναβαθμό και για διάφορες τιμές της αναμενόμενης σεισμικής επιτάχυνσης k_h . Όπως είναι αναμενόμενο, η τιμή του T_i αυξάνει με την αύξηση του k_h . Επιπλέον, παρατηρείται διαφοροποίηση του απαιτούμενου T_i για κάθε μία στρώση. Συγκεκριμένα, ο δεύτερος αναβαθμός απαιτεί μεγαλύτερο T_i από τον τρίτο αναβαθμό και σχεδόν ίδιο με τον τέταρτο αναβαθμό λόγω μεγαλύτερης κλίσης. Ο κατώτερος αναβαθμός απαιτεί την μεγαλύτερη ποσότητα οπλισμού λόγω της μεγάλης επιρροής του υπερκείμενου εδάφους. Στο Σχήμα 4.10 μπορεί ακόμη να παρατηρηθεί η ιδιαίτερα αυξημένη απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή ενιαίου οπλισμένου πρηνούς με ύψος 50 m και μέση κλίση α , που σχετίζεται με τη γεωμετρία του πρηνούς με αναβαθμούς, σύμφωνα με την Εξίσωση 4.1 (Karogianni & Sakellariou, 2008):

$$\tan(\alpha) = \frac{(H_1 + H_2 + \dots + H_n)}{\frac{H_1}{\tan(\beta_1)} + \frac{H_2}{\tan(\beta_2)} + \dots + \frac{H_n}{\tan(\beta_n)} + \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{n-1}} \quad (4.1)$$

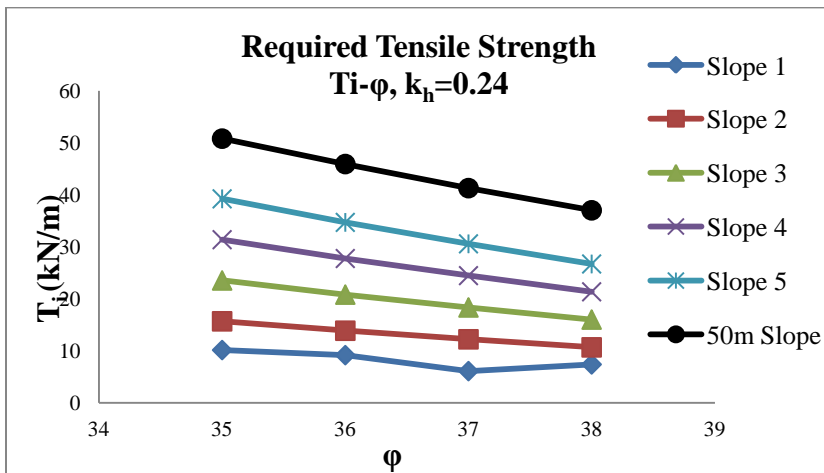
Στο Σχήμα 4.11, παρουσιάζεται η διαφοροποίηση του T_i για διάφορες τιμές της απόστασης λ μεταξύ των αναβαθμών. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η απαιτούμενη ποσότητα οπλισμού μειώνεται με την αύξηση της απόστασης λ και ιδιαίτερα για τα κατώτερα τμήματα του πρηνούς. Όπως ήταν αναμενόμενο, για τον ανώτερο αναβαθμό που δεν επηρεάζεται από την τιμή του λ καθώς δεν έχει κάποιο υπερκείμενο, η τιμές του T_i παραμένουν σταθερές.



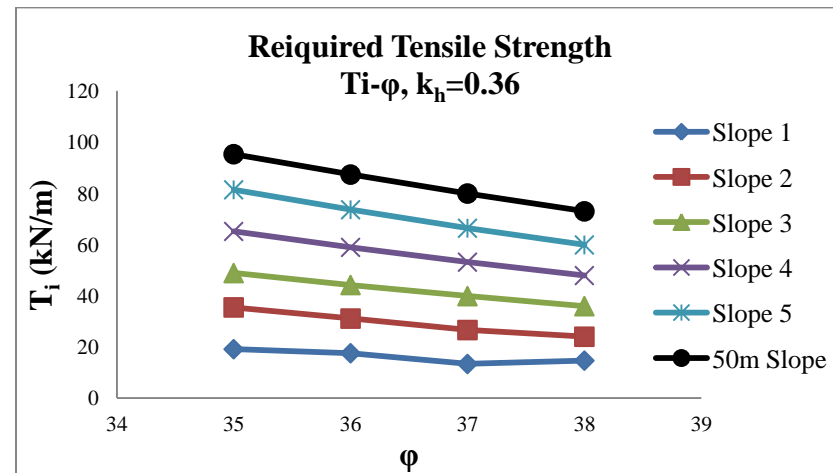
Σχήμα 4.4. Απαιτούμενη T_i για για διάφορες τιμές k_h .
Figure 4.4. Required T_i for various levels of k_h .



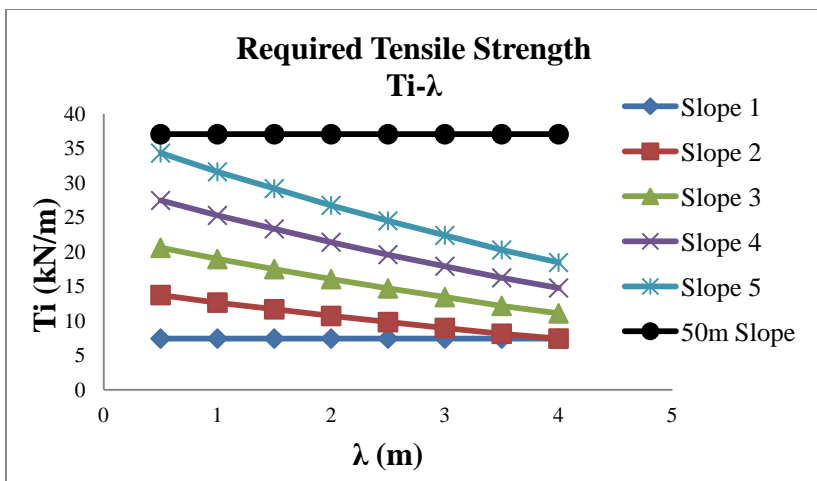
Σχήμα 4.5. Διαφοροποίηση της T_i για διάφορες τιμές του ϕ ($k_h=0.12$).
Figure 4.5. Variation of T_i for various ϕ values ($k_h=0.12$).



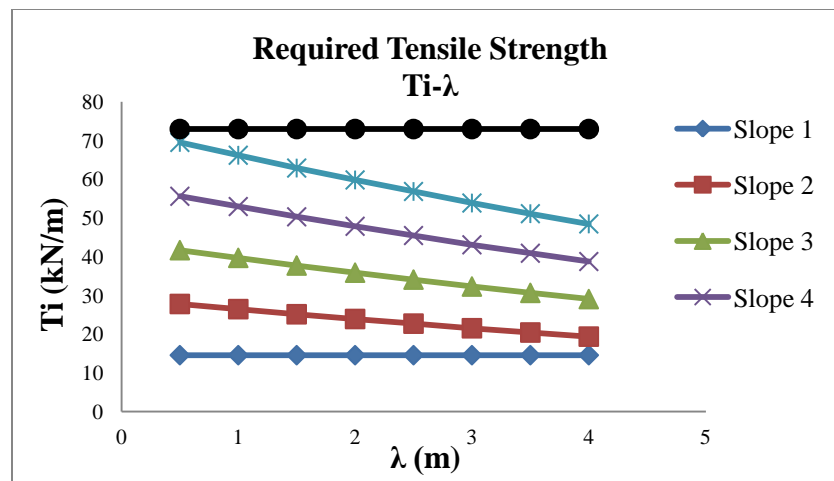
Σχήμα 4.6. Διαφοροποίηση της T_i για διάφορες τιμές του ϕ ($k_h=0.24$).
Figure 4.6. Variation of T_i for various ϕ values ($k_h=0.24$).



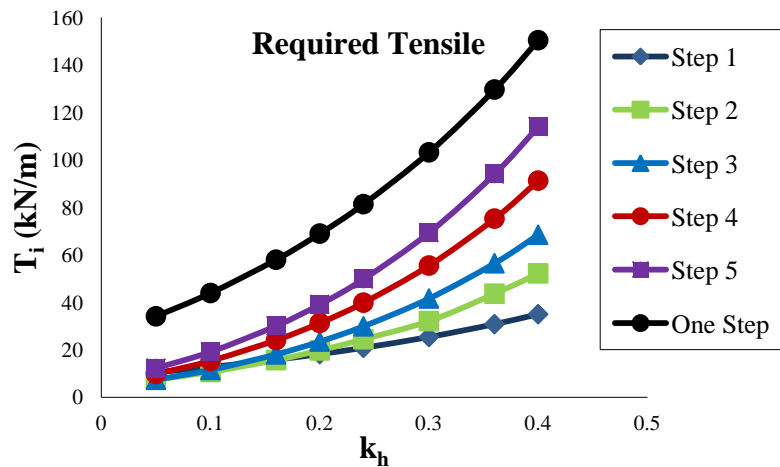
Σχήμα 4.7. Διαφοροποίηση της T_i για διάφορες τιμές του ϕ ($k_h=0.36$).
Figure 4.7. Variation of T_i for various ϕ values ($k_h=0.36$).



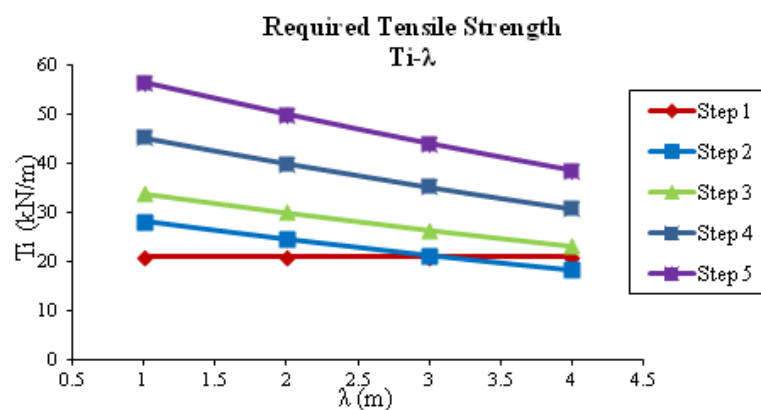
Σχήμα 4.8. Διαφοροποίηση της T_i για διάφορα λ & $k_h=0.24$.
Figure 4.8. Variation of T_i for various λ & $k_h=0.24$.



Σχήμα 4.9. Διαφοροποίηση της T_i για διάφορα λ & $k_h=0.36$.
Figure 4.9. Variation of T_i for various λ & $k_h=0.36$.



Σχήμα 4.10. Απαιτούμενη T_i για διαφορετική κλίση αναβαθμών
Figure 4.10. Required T_i for various berm inclination.



Σχήμα 4.11. Επιρροή λ για διαφορετική κλίση αναβαθμών & $k_h=0.24$.
Figure 4.11. Influence λ for various berm inclination & $k_h=0.24$.

4.4 Παραδείγματα στατικής ανάλυσης οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται παραδείγματα στατικής ανάλυσης οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς, σύμφωνα με την μεθοδολογία και το λογισμικό που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες Ενότητες. Συγκεκριμένα, επιλέγεται πρανές με 5 αναβαθμούς, ύψους 10 m ο κάθε ένας, κλίσης: $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ και $\beta_5=1:1$ (κατακόρυφο: οριζόντιο), ειδικού βάρους $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, γωνίας τριβής $\varphi=35^\circ$ και τέλος απόσταση μεταξύ των οπλισμών ενιαία για ολόκληρο το πρανές $d_i=0.5 \text{ m}$. Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή T_i για κάθε ένα αναβαθμό και για διάφορες τιμές του επιθυμητού Συντελεστή Ασφαλείας (Σ.Α., F.S.) της κατασκευής. Όπως είναι αναμενόμενο, η τιμή του T_i αυξάνει με την αύξηση του απαιτούμενου Συντελεστή Ασφαλείας, ενώ επίσης παρατηρείται διαφοροποίηση του απαιτούμενου T_i για κάθε μία στρώση. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι οι κατώτερες στρώσεις οπλισμού απαιτούν οπλισμούς μεγαλύτερης εφελκυστικής αντοχής από τις ανώτερες στρώσεις, ενώ επίσης παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα για συνεχόμενο πρανές συνολικού ύψους 50 m και κλίσης $\beta=1:1$, για το οποίο και απαιτείται συνολικά μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή. Επίσης, παρατηρείται ότι στην περίπτωση της στατικής ανάλυσης, η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής είναι γραμμική, ενώ η αντίστοιχη αύξηση κατά την σεισμική ανάλυση που παρουσιάστηκε στα Σχήματα 4.4 και 4.10 είναι εκθετική.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από το Σχήμα 4.12, οι τιμές της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής που προκύπτουν κατά την στατική ανάλυση είναι αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν κατά την σεισμική ανάλυση πρανών ίδιας γεωμετρίας και παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.3. Γενικά, οι ανάγκες για αντοχή ενός οπλισμένου πρανούς είναι σημαντικά μεγαλύτερες όταν εκείνο υπόκειται σε σεισμική φόρτιση από ότι σε συνθήκες στατικής φόρτισης.

Στην συνέχεια μελετάται οπλισμένο πρανές με αρκετά πιο απότομη κλίση και συγκεκριμένα κλίσης $\beta=70^\circ$ για κάθε ένα αναβαθμό. Τα υπόλοιπα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι ίδια με αυτά των προηγούμενων παραδειγμάτων. Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του εν λόγω πρανούς καθώς επίσης και ενός

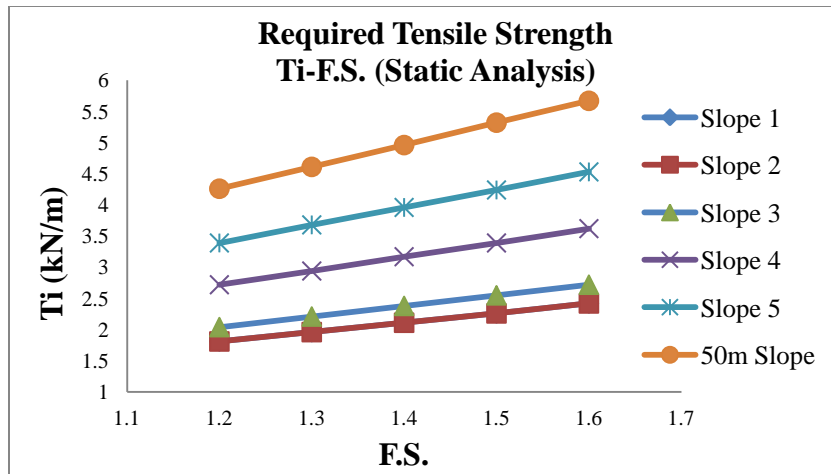
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ενιαίου πρανούς ύψους 50 m και κλίσης 70° , όπου και η απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή αυξάνει σημαντικά. Επιπλέον, στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για γωνία κλίσης 3:2 (κατακόρυφο : οριζόντιο), δηλαδή περίπου 56° , ενώ στην συνέχεια χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων για διάφορες τιμές της γωνίας κλίσης των αναβαθμών β .

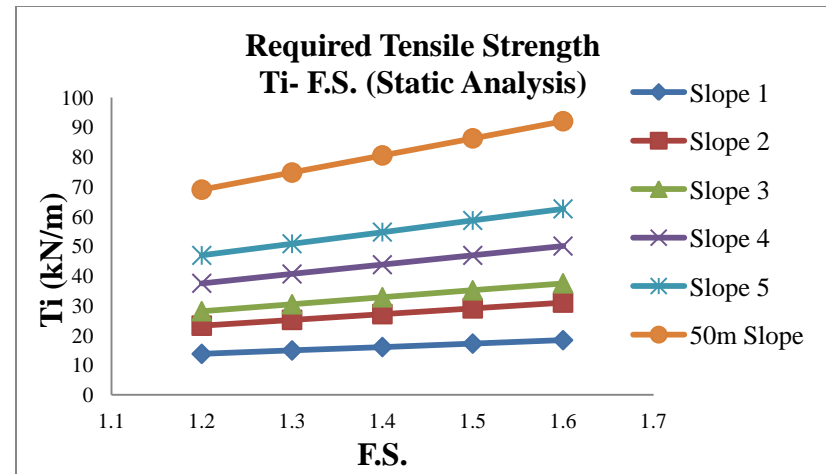
Στην συνέχεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.15 η μεταβολή της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής των αναβαθμών του οπλισμένου πρανούς καθώς και του ενιαίου πρανούς για διάφορες τιμές της κλίσης της γωνίας β και για Συντελεστή Ασφαλείας $\Sigma.A. = 1.6$.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 4.15, η απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή αυξάνει καθώς αυξάνει της κλίσης της γωνίας β , όπως ήταν αναμενόμενο. Επίσης για τους κατώτερους αναβαθμούς η τιμή του T_i είναι μεγαλύτερη, ενώ για το ενιαίο πρανές ύψους 50 m, η διαφορά είναι ακόμα μεγαλύτερη.

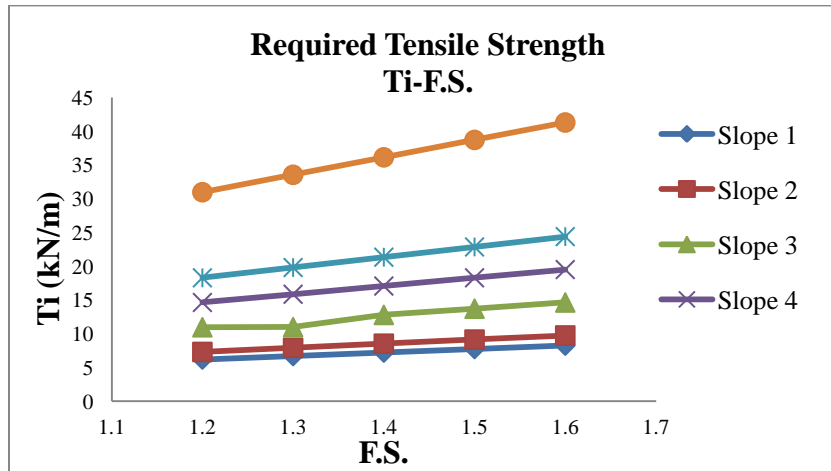
Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην παρούσα ενότητα είναι λογικά και αναμενόμενα και δείχνουν ότι με την μεθοδολογία και το λογισμικό που έχει αναπτυχθεί μπορεί να πραγματοποιηθεί στατική ανάλυση-σχεδιασμός οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς καθώς και παραμετρικές αναλύσεις χρήσιμες για την διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επιρροή των παραμέτρων στην ευστάθεια των πρανών.



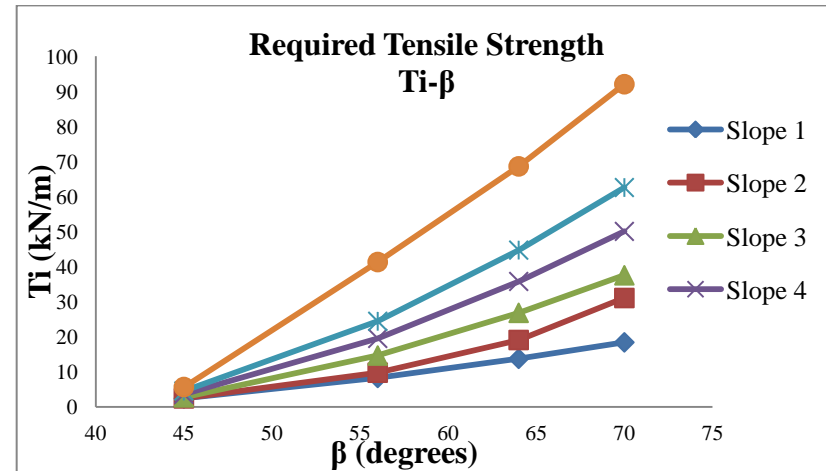
Σχήμα 4.12. Μεταβολή της T_i για διάφορες τιμές του Σ.Α & κλίση 45° .
Figure 4.12. Variation of T_i , for various F.S. & slope inclination 45° .



Σχήμα 4.13. Μεταβολή της T_i για διάφορες τιμές του Σ.Α & κλίση 70° .
Figure 4.13. Variation of T_i , for various F.S. & slope inclination 70° .



Σχήμα 4.14. Μεταβολή της T_i για διάφορες τιμές του Σ.Α & κλίση 56° .
Figure 4.14. Variation of T_i , for various F.S. & slope inclination 56° .



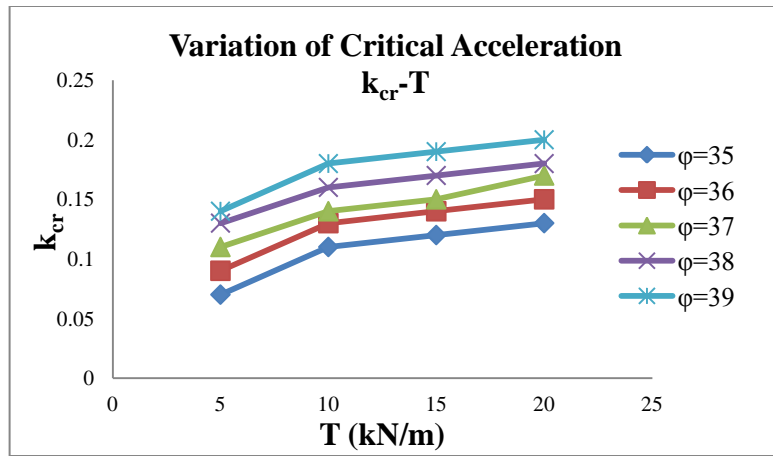
Σχήμα 4.15. Μεταβολή της T_i για διάφορες τιμές του β & Σ.Α.=1.6.
Figure 4.15. Variation of T_i , for various β values & F.S.=1.6.

4.5 Παραδείγματα εύρεσης κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς.

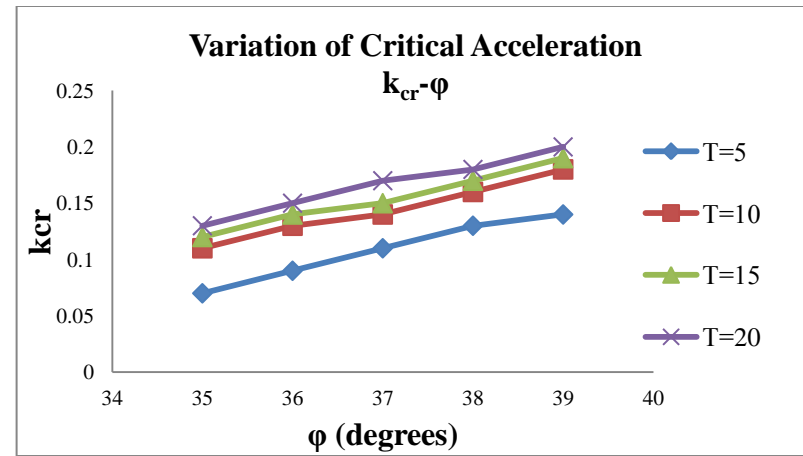
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται παραδείγματα εύρεσης της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης k_{cr} οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς, σύμφωνα με την μεθοδολογία και το λογισμικό που παρουσιάστηκε στο 3^ο Κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, επιλέγεται πρανές με 5 αναβαθμούς ύψους 10 m ο κάθε ένας, κλίσης: $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ και $\beta_5=1:1$ (κατακόρυφο: οριζόντιο), ειδικού βάρους $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$ και απόσταση μεταξύ των οπλισμών ενιαία για ολόκληρο το πρανές $d_i=0.5 \text{ m}$. Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η μεταβολή του k_{cr} για διάφορες τιμές της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής των πρανών T_i (kN/m) καθώς και για διάφορες τιμές της γωνίας τριβής φ . Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, το k_{cr} αυξάνει καθώς αυξάνει το T_i , όπως είναι αναμενόμενο, ενώ για μεγαλύτερες τιμές του T_i η μεταβολή είναι πιο ομαλή.. Επιπλέον, στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζεται η αντίστοιχη μεταβολή του k_{cr} για σταθερή τιμή της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής T_i και για διάφορες τιμές της γωνίας τριβής φ . Και στην περίπτωση αυτή, η αύξηση της γωνίας τριβής οδηγεί σε αύξηση της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης του πρανούς.

Στην συνέχεια, διερευνάται η μεταβολή της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης για διάφορες τιμές της οριζόντιας απόστασης μεταξύ των αναβαθμών λ (m), η οποία και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.18. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, για σταθερές τιμές του T_i και για διάφορες τιμές της γωνίας τριβής φ , το k_{cr} αυξάνει καθώς αυξάνει η τιμή του λ , ενώ επίσης παρατηρείται ότι από κάποια τιμή του λ και μετά η μεταβολή του k_{cr} μειώνεται καθώς πλέον οι αναβαθμοί έχουν ανεξαρτητοποιηθεί ο ένας από τον άλλο και λειτουργούν κυρίως ως αυτόνομα οπλισμένα πρανή.

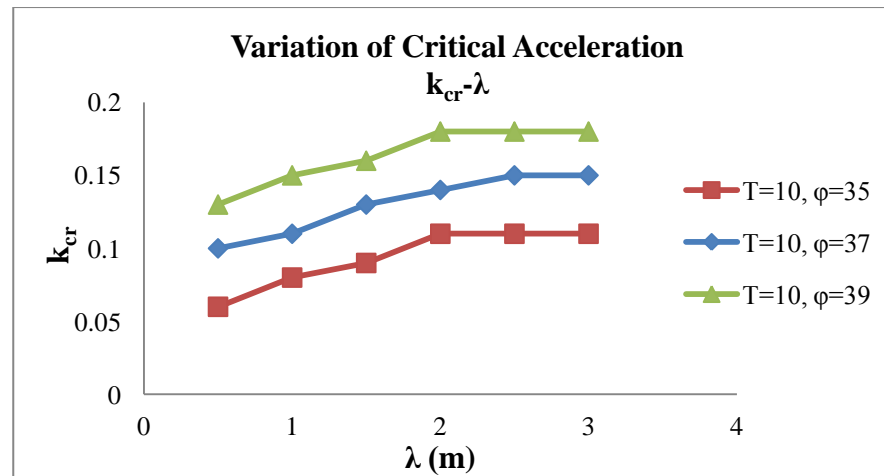
Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται με το λογισμικό που έχει αναπτυχθεί πραγματοποιείται εκτίμηση του k_{cr} για ολόκληρο το πρανές και όχι για κάθε ένα αναβαθμό ξεχωριστά. Ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα για αναβάθμιση του λογισμικού στο μέλλον για τον σκοπό αυτό.



Σχήμα 4.16. Μεταβολή της k_{cr} για διάφορες τιμές του T_i .
Figure 4.16. Variation of k_{cr} for various T_i values.



Σχήμα 4.17. Μεταβολή της k_{cr} για διάφορες τιμές του ϕ .
Figure 4.17. Variation of k_{cr} for various ϕ values.



Σχήμα 4.18. Μεταβολή της k_{cr} για διάφορες τιμές του λ .
Figure 4.18. Variation of k_{cr} for various values λ .

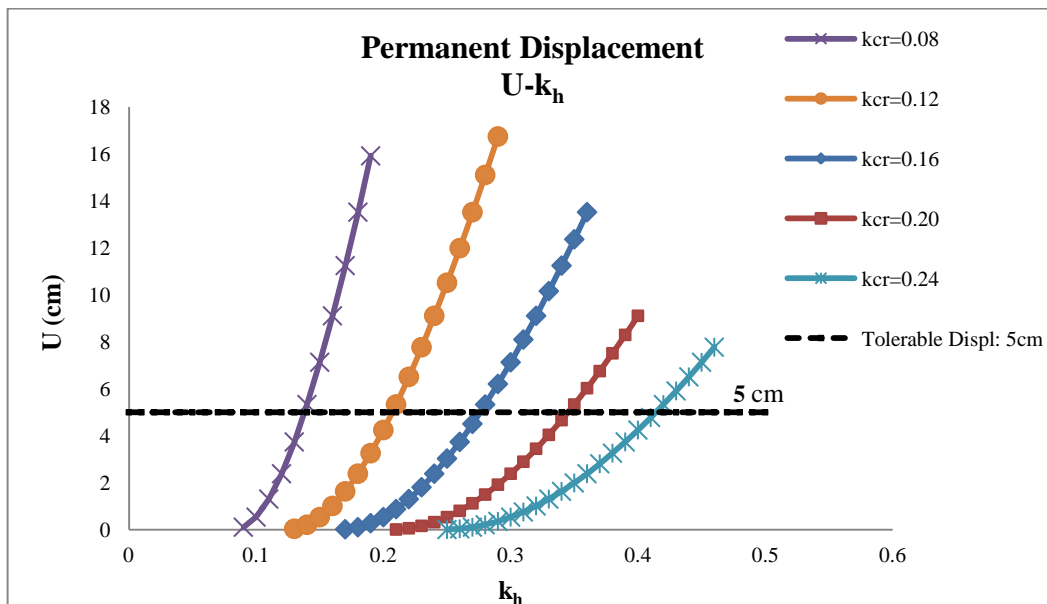
4.6 Παραδείγματα υπολογισμού της σεισμικής τρωτότητας μέσω του υπολογισμού της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης.

Στην παρούσα Ενότητα διερευνάται η σεισμική τρωτότητα οπλισμένων πρανών για αναβάθμιση του σεισμικού κινδύνου μέσω της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης σύμφωνα με τις εξισώσεις των Ambraseys και Menu (1988) που περιγράφηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο, για διάφορες τιμές της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης k_{cr} και της επιτάχυνσης σχεδιασμού k_h . Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η κρίσιμη σεισμική επιτάχυνση της εκάστοτε κατασκευής ενώ στην συνέχεια εκτιμάται κάποια μεγαλύτερη αναμενόμενη σεισμική επιτάχυνση k_h . Έτσι, με προεπιλεγμένες τις τιμές των k_{cr} και k_h , και για κάποιο σταθερό επίπεδο εμπιστοσύνης $t=95\%$, παρουσιάζονται οι καμπύλες μεταβολής της αναμενόμενης οριζόντιας μόνιμης μετατόπισης U (cm), στο Σχήμα 4.19. Σημειώνεται ότι η μεταβολή του k_h πραγματοποιείται με αύξηση κατά 0.1 της αρχικής τιμής του k_{cr} . Δηλαδή για παράδειγμα για τιμή της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης k_{cr} ίση με 0.12, η αμέσως επόμενη τιμή της επιτάχυνσης που επιλέγεται είναι 0.13, 0.14, 0.15 κ.ο.κ. Ενώ για τιμή της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης k_{cr} 0.24, η επόμενη τιμή της επιτάχυνσης k_h που επιλέγεται είναι ίση με 0.25, 0.26, κ.ο.κ. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, για σταθερές τιμές της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης k_{cr} , η αύξηση της επιτάχυνσης σχεδιασμού της περιοχής k_h , οδηγεί σε αύξηση της μόνιμης μετατόπισης, όπως ήταν αναμενόμενο.

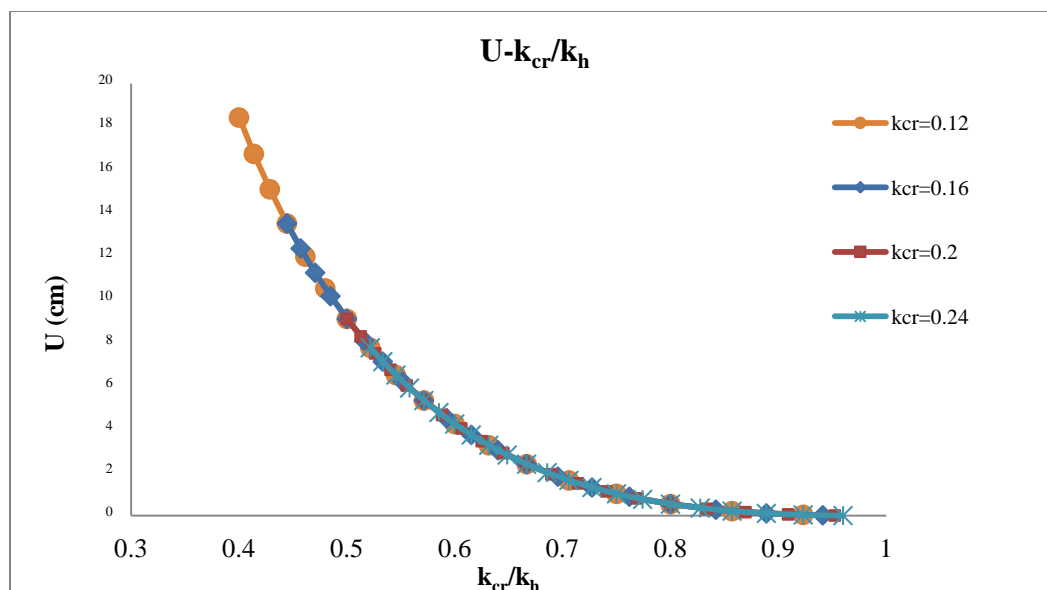
Παρατηρείται λοιπόν στο Σχήμα 4.19, ότι για μικρότερες τιμές της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης, όπως για παράδειγμα για $k_{cr}=0.08$ και για την ίδια μεταβολή της επιτάχυνσης k_h , η μετατόπιση λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές από ότι για μεγαλύτερη κρίσιμη σεισμική επιτάχυνση όπως για παράδειγμα για $k_{cr}=0.16$. Χαρακτηριστικά, αναφέρεται ότι οι τιμές της μετατόπισης είναι 2.4 cm για την περίπτωση του πρανούς με $k_{cr}=0.08$, έναντι 29.4 cm για την περίπτωση του πρανούς με $k_{cr}=0.16$. Η διαφορά είναι μεγάλη και αυτό αποτυπώνεται και στις καμπύλες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.19. Επιπλέον, σημειώνεται με μαύρη γραμμή, η μέγιστη ανεκτή παραμόρφωση για οπλισμένα πρανά η οποία και ανέρχεται στα 5 cm. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η υπέρβαση του 'ορίου' των 5 cm πραγματοποιείται γρηγορότερα για μικρότερες τιμές της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης k_{cr} .

Στην συνέχεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.20 η τιμή της αναμενόμενη μόνιμης μετατόπισης σε σχέση με τον λόγο k_{cr}/k_h , ο οποίος και εκφράζει το ποσοστό διαφοροποίησης της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης k_{cr} , σε σχέση με την επιτάχυνση σχεδιασμού k_h . Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 4.20, οι καμπύλες για διάφορες τα τιμές της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης k_{cr} , ταυτίζονται, ενώ για μικρότερες τιμές της k_{cr} , οι αναμενόμενες μόνιμες μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες, όπως ήταν αναμενόμενο.

Συμπερασματικά, η εφαρμογή των εξισώσεων των Ambraseys και Menu (1988) ενσωματώθηκαν στην μεθοδολογία και το λογισμικό που αναπτύχθηκε και σε συνδυασμό με τις μεθόδους υπολογισμού της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης του πρανούς k_{cr} , καθώς και της επιτάχυνσης σχεδιασμού k_h , μπορούν να δώσουν μια αξιόπιστη και γρήγορη εκτίμηση σχετικά με την σεισμική τρωτότητα οπλισμένων πρανών σε περίπτωση αναβάθμισης του σεισμικού κινδύνου.



Σχήμα 4.19. Αναμενόμενη μόνιμη μετατόπιση σε cm, για διάφορες τιμές των k_{cr} και k_h .
 Figure 4.19. Expected permanent displacement in cm, for various k_{cr} and k_h values.



Σχήμα 4.20. Σύγκριση αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης, για διάφορες τιμές του λόγου: k_{cr}/k_h .
 Figure 4.20. Comparison of expected permanent displacement, to k_{cr} / k_h ratio.

4.7 Μέθοδοι ανάλυσης υπολογιστικών μοντέλων.

Στην Ενότητα αυτή, δημιουργούνται υπολογιστικά μοντέλα οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς, αντίστοιχα με εκείνα που μελετήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, σύμφωνα με την νέα αναλυτική λύση που προτάθηκε και μέσω του λογισμικού που αναπτύχθηκε (Karogianni & Sakellariou, 2008). Τα υπολογιστικά αυτά μοντέλα αναλύονται με δύο μεθόδους, με στόχο να πραγματοποιηθεί σύγκριση της νέας αναλυτικής λύσης και του λογισμικού με άλλες μεθόδους ανάλυσης.

Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος Οριακής Ισορροπίας σύμφωνα με την οποία εξετάζονται διάφοροι μηχανισμοί αστοχίας και εφαρμόζεται μέσω του λογισμικού Slide 6.0 της Rocscience (<http://www.roccscience.com>), ενώ η δεύτερη μέθοδος σύγκρισης είναι αυτή των Πεπερασμένων Στοιχείων και εφαρμόζεται μέσω του λογισμικού Phase² της ίδιας εταιρείας. Το Slide είναι ένα δισδιάστατο πρόγραμμα ευστάθειας πρανών που έχει δημιουργηθεί για την εκτίμηση της κυκλικής ή μη κυκλικής επιφάνειας αστοχίας, χρησιμοποιώντας την μέθοδο των λωρίδων. Σύμφωνα με την μεθοδολογία του Slide, εφαρμόζονται για ένα δεδομένο πρανές μέθοδοι αναζήτησης διάφορων επιφανειών αστοχίας και τελικά επιλέγεται από τον χρήστη η πιο κρίσιμη από αυτές, ενώ επίσης υπολογίζεται και ο Συντελεστής Ασφαλείας της κατασκευής. Επίσης, το Phase² αποτελεί ένα πρόγραμμα

πεπερασμένων στοιχείων όπου μπορούν να αναλυθούν διάφορα γεωτεχνικά μοντέλα, όπως για παράδειγμα πρηνή και σήραγγες. Κατά την διερεύνηση των πρηνών με το Phase, εφαρμόζεται η Μέθοδος της Μείωσης της Δύναμης (Strength Reduction Method), όπου υπολογίζεται ο Συντελεστής Μείωσης της Δύναμης της κατασκευής, ενώ παράλληλα προσδιορίζονται και οι τάσεις και τροπές που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια των φορτίσεων.

4.7.1 Ανάλυση Σύμφωνα με την Μέθοδο των Λωρίδων.

Στην παρούσα υποενότητα δημιουργούνται ορισμένα μοντέλα οπλισμένων πρηνών με αναβαθμούς στο λογισμικό Slide, εισάγοντας τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά καθώς και την ποσότητα του οπλισμού των οπλισμένων πρηνών που έχει υπολογισθεί μέσω της αναλυτικής λύσης και του λογισμικού στην Delphi του προηγούμενου Κεφαλαίου. Στην συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση μέσω του Slide και υπολογίζεται ο Συντελεστής Ασφαλείας των κατασκευών, για διάφορους μηχανισμούς αστοχίας. Στο Σχήμα 4.21 παρουσιάζεται ένα μοντέλο οπλισμένου πρηνούς με αναβαθμούς που έχει δημιουργηθεί με τα ακόλουθα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά: οπλισμένα πρηνές με 5 αναβαθμούς ύψους 10 m ο κάθε ένας, κλίσης: $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ και $\beta_5=1:1$ (κατακόρυφο : οριζόντιο), ειδικού βάρους $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, γωνίας τριβής $\phi=38^\circ$, απόσταση μεταξύ των οπλισμών ενιαία για ολόκληρο το πρηνές $d_i=0.5\text{m}$, οριζόντια απόσταση μεταξύ των αναβαθμών $\lambda=3 \text{ m}$ και $k_h=0.16$. Οι τιμές της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής του κάθε αναβαθμού έχουν προκύψει από την αναλυτική λύση και για το παράδειγμα του Σχήματος 4.21 παίρνουν τις ακόλουθες τιμές: $T_1=10, T_2=8, T_3=6, T_4=5, T_5=5 \text{ kN/m}$.

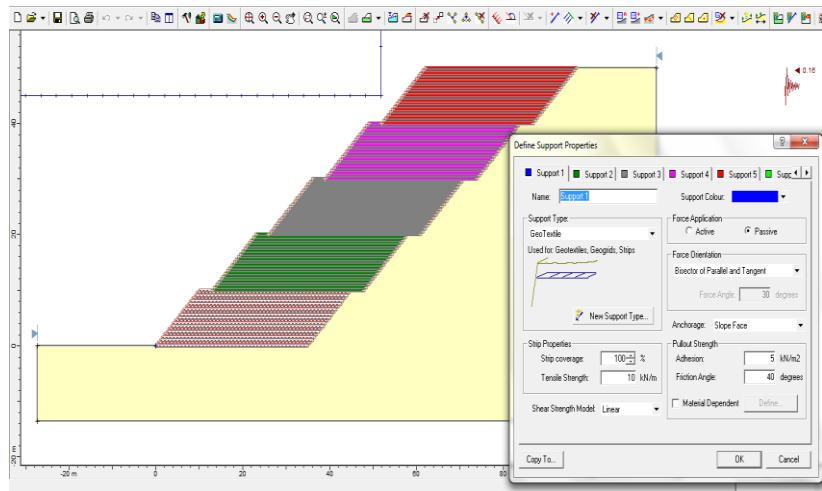
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι επιλέγονται και ενσωματώνονται στα μοντέλα οι ακριβείς τιμές της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής που έχουν υπολογισθεί σύμφωνα με το λογισμικό στην Delphi και όχι οι στρογγυλοποιημένες προς τα άνω τιμές. Ωστόσο, κατά τον σχεδιασμό και την διαστασιολόγηση των οπλισμένων πρηνών, συνήθως γίνεται στρογγυλοποίηση προς τα άνω προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι οπλισμοί με τις πλησιέστερες τιμές εφελκυστικής αντοχής που βρίσκονται στο εμπόριο. Έτσι, για παράδειγμα οι τιμές $T_2=8$ και $T_3=6 \text{ kN/m}$ που έχουν υπολογισθεί μέσω της αναλυτικής λύσης και του λογισμικού στην Delphi, αντικαθίστανται συνήθως κατά την κατασκευή με

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

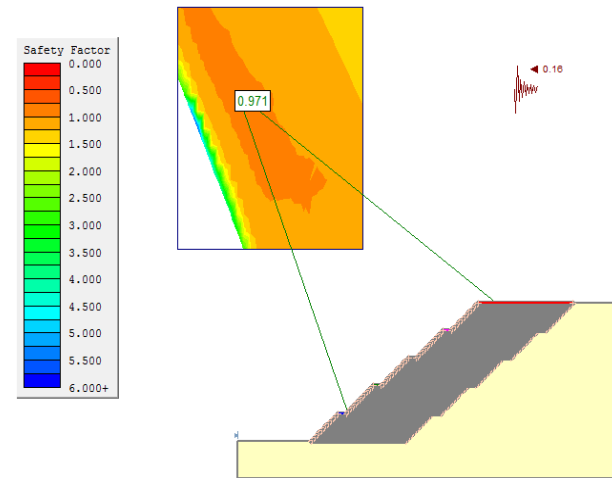
οπλισμούς με αντοχή 10 kN/m ή και παραπάνω, ανάλογα με το τι είναι διαθέσιμο στο εμπόριο. Ο λόγος που στην παρούσα διερεύνηση επιλέγονται οι μη στρογγυλοποιημένες τιμές είναι για να υπολογισθεί όσο το δυνατόν ακριβέστερα η τιμή του Συντελεστή Ασφαλείας της κατασκευής που προκύπτει από την αναλυτική λύση και όχι κάποιος Συντελεστής Ασφαλείας που θα έχει προκύψει με στρογγυλοποιημένες προς τα άνω τιμές αντοχής.

Στο Σχήμα 4.22 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού του Συντελεστή Ασφαλείας σύμφωνα με την μέθοδο Bishop, με τιμή λίγο κάτω από την μονάδα και συγκεκριμένα ίση με 0.971, ενώ στο Σχήμα 4.23 εμφανίζονται οι κρίσιμοι μηχανισμοί αστοχίας της κατασκευής και οι λωρίδες που έχουν δημιουργηθεί με την ίδια μέθοδο. Ειδικότερα, για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, εφαρμόζονται δύο μέθοδοι κατά την ανάλυση των μοντέλων στο λογισμικό Slide, η μέθοδος Bishop και η μέθοδος Janbu.

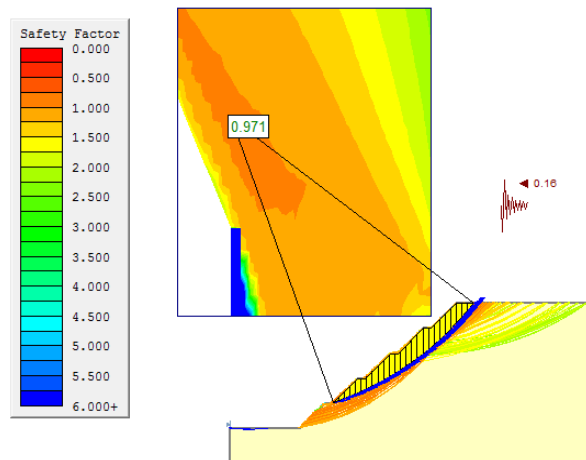
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στα παραδείγματα που παρατίθενται ακολούθως, οι υπολογισμοί μέσω της μεθόδου Bishop δίνουν μεγαλύτερους Συντελεστές Ασφαλείας από τους αντίστοιχους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται με την μέθοδο Janbu και γενικά, η σύγκλιση των αποτελεσμάτων της νέας αναλυτική λύσης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω του Slide, είναι μεγαλύτερη. Στο Σχήμα 4.23 έχουν αφαιρεθεί προσωρινά οι στρώσεις οπλισμού προκειμένου να φαίνεται καλύτερα η μορφή των μηχανισμών αστοχίας ενώ επίσης διακρίνονται και ορισμένοι μηχανισμοί προς το βάθος του πρανούς, μετά το πέρας της εδαφικής μάζας οι οποίοι όμως είναι λιγότερο κρίσιμοι από τους μηχανισμούς που βρίσκονται πιο κοντά στην όψη του πρανούς. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί και από το Σχήμα 4.24, όπου και παρουσιάζεται η μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας κατά μήκος του πρανούς και πράγματι οι τιμές αυτές είναι μεγαλύτερες από την μονάδα.



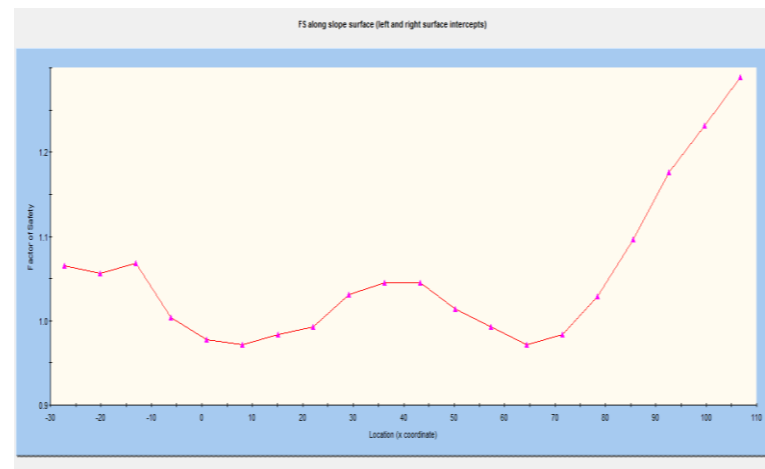
Σχήμα 4.21. Μοντέλο οπλισμένου πρανούς με αναβαθμούς στο Slide.
Figure 4.21 Reinforced slope model with berms in Slide.



Σχήμα 4.22. Υπολογισμός Σ. Α. σύμφωνα με Ανάλυση Bishop.
Figure 4.22. Calculation of S.F. for Bishop Analysis.



Σχήμα 4.23. Κρίσιμες επιφάνειες αστοχίας σύμφωνα με Ανάλυση Bishop.
Figure 4.23. Critical failure mechanisms for Bishop Analysis.



Σχήμα 4.24. Μεταβολή Σ.Α. κατά μήκος του πρανούς.
Figure 4.24. Variation of S. F. along the slope.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Στην συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα για διάφορα μοντέλα οπλισμένων πρανών για διάφορες τιμές του λ ($\lambda= 1, 2$ και 3 m) και για διάφορες τιμές της οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης $k_h= 0.16, 0.24$ και 0.36 . Στους Πίνακες 4.1 και 4.2, παρουσιάζονται οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας σύμφωνα με τις μεθόδους Bishop και Janbu αντίστοιχα, ενώ επίσης παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες τιμές των μέγιστων τιμών των εφελκυστικών αντοχών T_{max} .

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στον Πίνακα 4.1, οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας είναι αρκετά κοντά στην μονάδα ενώ επίσης είναι φανερό ότι όσο αυξάνει η οριζόντια απόσταση λ μεταξύ των αναβαθμών, μειώνεται και η απαίτηση σε εφελκυστική αντοχή των οπλισμών. Έτσι, για παράδειγμα, για οριζόντια σεισμική επιτάχυνση k_h ίση με 0.16 , η μέγιστη εφελκυστική αντοχή των οπλισμών του ενιαίου πρανούς είναι ίση με 22 kN/m, έναντι 10 kN/m για πρανές με αναβαθμούς και $\lambda=3$ m, δηλαδή 2.2 φορές μεγαλύτερη εκείνη του ενιαίου πρανούς. Οι αντίστοιχες τιμές για k_h ίση με 0.24 είναι 38 και 23 kN/m, δηλαδή 1.65 φορές μεγαλύτερη η αντοχή του ενιαίου, ενώ για k_h ίση με 0.36 , ίση με 73 και 54 kN/m, 1.35 φορές μεγαλύτερη η αντοχή του ενιαίου πρανούς.

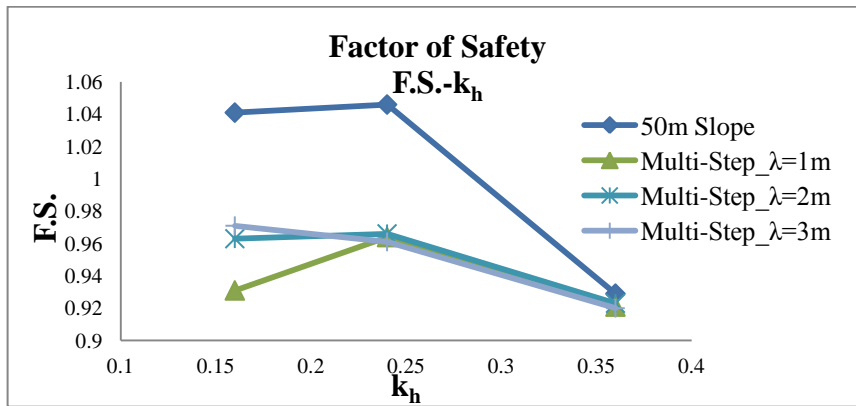
Στον Πίνακα 4.2, παρατηρούνται μειωμένες τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας, σύμφωνα με την μέθοδο Janbu, ωστόσο, ακόμη και με τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας μικρότερες της μονάδας, λόγω της φύσης του εδάφους, το πρανές υφίσταται κάποια μόνιμη μετατόπιση παρά πλήρη αστοχία. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται και στα Σχήματα 4.25 και 4.26 όπου μπορεί να παρατηρηθεί και η πορεία του Συντελεστή Ασφαλείας.

Πίνακας 4.1. Σύγκριση τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας, σύμφωνα με την μέθοδο Bishop.
Table 4.1 Comparison of Safety Factor values, according to Bishop method.

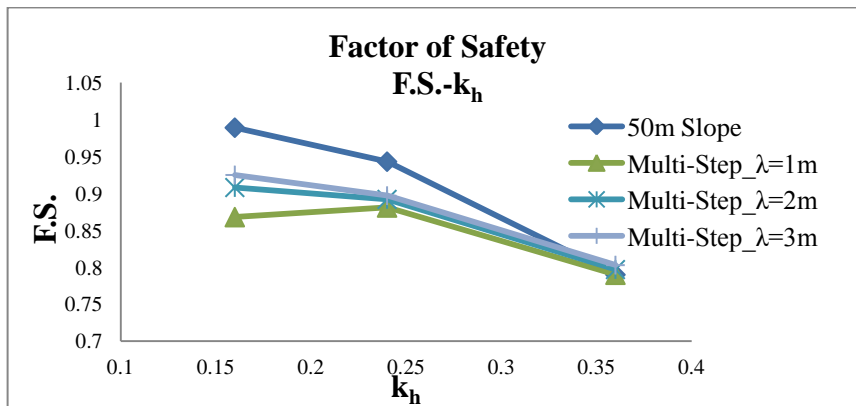
Horizontal Seismic Coefficient (k_h)	One-Step Reinforced Slope		Multi-Step Reinforced Slippe					
			$\lambda=1$ m		$\lambda=2$ m		$\lambda=3$ m	
	Tmax (kN/m) Analytical Solution	F.S. Bishop Analysis	Tmax (kN/m) Analytical Solution	F.S. Bishop Analysis	Tmax (kN/m) Analytical Solution	F.S. Bishop Analysis	Tmax (kN/m) Analytical Solution	F.S. Bishop Analysis
0.16	22	1.041	15	0.931	14	0.963	10	0.971
0.24	38	1.046	32	0.964	28	0.966	23	0.961
0.36	73	0.929	67	0.921	60	0.923	54	0.920

Πίνακας 4.2. Σύγκριση τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας, σύμφωνα με την μέθοδο Janbu.
Table 4.2 Comparison of Safety Factor values, according to Janbu method.

Horizontal Seismic Coefficient (k_h)	One-Step Reinforced Slope		Multi-Step Reinforced Slips					
	Tmax (kN/m) Analytical Solution	F.S. Janbu Analysis	$\lambda=1\text{ m}$				$\lambda=1\text{ m}$	
			Tmax (kN/m) Analytical Solution	F.S. Janbu Analysis	Tmax (kN/m) Analytical Solution	F.S. Janbu Analysis	Tmax (kN/m) Analytical Solution	F.S. Janbu Analysis
0.16	22	0.989	15	0.868	14	0.908	10	0.925
0.24	38	0.943	32	0.881	28	0.892	23	0.897
0.36	73	0.790	67	0.790	60	0.797	54	0.803



Σχήμα 4.25. Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας σύμφωνα με την μέθοδο Bishop.
Figure 4.25. Variation of the Safety Factor according to Bishop method.

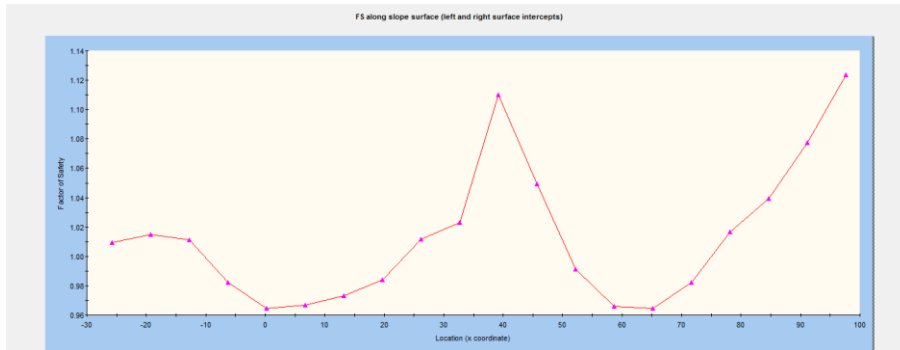


Σχήμα 4.26. Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας σύμφωνα με την μέθοδο Janbu.
Figure 4.26. Variation of the Safety Factor according to Janbu method.

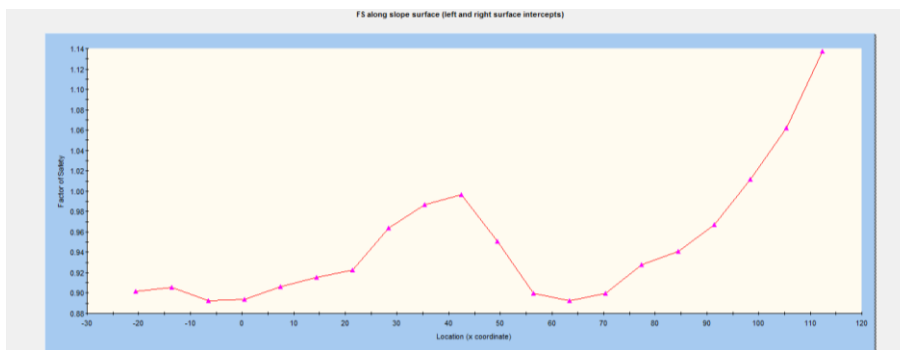
Στην συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές που λαμβάνει ο Συντελεστής Ασφαλείας κατά μήκος της κατασκευής, για $k_h=0.24$, για διάφορες τιμές του $\lambda=1, 2$ και 3 m . Στα Σχήματα 4.27 έως και 4.29 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι χαμηλότερες τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας προκύπτουν κοντά στον πόδα του πρανούς, σε μήκος 0-10 m, καθώς επίσης και μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας, σε μήκος 60-70 m, ενώ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

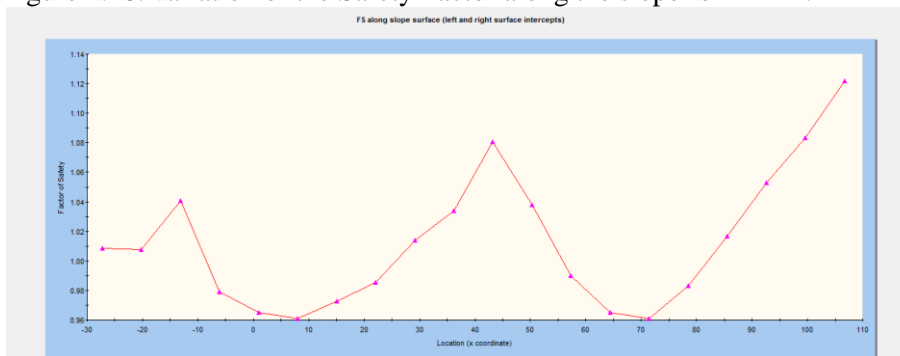
κοντά στο μέσο της οπλισμένης εδαφικής μάζας και στο βάθος του πρανούς οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας αυξάνουν. Τα παραδείγματα των οπλισμένων πρανών που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.27 έως και 4.29, είναι ενδεικτικά και παρουσιάζουν εποπτικά την διαμόρφωση των τιμών του Συντελεστή Ασφαλείας, ωστόσο, η κρίσιμη, δηλαδή η μικρότερη τιμή του είναι εκείνη που καθορίζει την συμπεριφορά του πρανούς και παρουσιάστηκαν στους Πίνακες 4.1 και 4.2.



Σχήμα 4.27. Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας κατά μήκος του πρανούς για $\lambda=1$ m.
Figure 4.27. variation of the Safety Factor along the slope for $\lambda=1$ m.



Σχήμα 4.28. Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας κατά μήκος του πρανούς για $\lambda=2$ m.
Figure 4.28. variation of the Safety Factor along the slope for $\lambda=2$ m.



Σχήμα 4.29. Μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας κατά μήκος του πρανούς για $\lambda=3$ m.
Figure 4.29. variation of the Safety Factor along the slope for $\lambda=3$ m.

Ακολουθώς υπολογίζεται η κρίσιμη σεισμική επιτάχυνση των οπλισμένων πρανών, σύμφωνα με τις Εξισώσεις Ambraseys & Menu (1988), υπολογίζεται η αναμενόμενη μόνιμη μετατόπιση για πιθανή αναβάθμιση του σεισμικού κινδύνου. Στον Πίνακα 4.3 οι τιμές της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης k_{cr} όπως έχουν υπολογισθεί από το λογισμικό Slide, για ενιαία οπλισμένα πρανή και για πρανή με αναβαθμούς. Στην συνέχεια επιχειρείται να υπολογισθεί η αναμενόμενη ανεκτή οριζόντια μόνιμη μετατόπιση για πιθανή αναβάθμιση του σεισμικού κινδύνου, δηλαδή για k_h μεγαλύτερο του k_{cr} . Όπως αναφέρθηκε και στα παραπάνω, λόγω της φύσης του εδάφους αυτή η αναβάθμιση του σεισμικού κινδύνου που οδηγεί σε τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας μικρότερες της μονάδας, δεν οδηγεί κατά ανάγκη σε αστοχία της κατασκευής αλλά σε κάποια μόνιμη μετατόπιση. Έτσι, εάν η μετατόπιση αυτή βρίσκεται μέσα σε ανεκτά, καθορισμένα όρια, τότε το οπλισμένο πρανές θα μπορεί να διατηρηθεί χωρίς να καταρρεύσει. Στον Πίνακα 4.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης λόγω αναβάθμισης σεισμικού κινδύνου για τα αντίστοιχα πρανή του Πίνακα 4.1, για την μέθοδο Bishop. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, για τις περιπτώσεις του ενιαίου πρανού που ο Συντελεστής Ασφαλείας είναι μεγαλύτερος της μονάδας, όπως αυτός υπολογίζεται και παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1, η αναμενόμενη μόνιμη μετατόπιση είναι ίση με το μηδέν, καθώς υπάρχει περιθώριο για περεταίρω φόρτιση. Αντίθετα, για όλες τις άλλες περιπτώσεις που ο Συντελεστής Ασφαλείας είναι μικρότερος της μονάδας, υπάρχει μια μόνιμη μετατόπιση, μέσα σε ανεκτά πλαίσια, δηλαδή κάτω των 5 cm. Επίσης, όπως ήταν και αναμενόμενο, όσο πιο μικρός είναι ο Συντελεστής Ασφαλείας που υπολογίστηκε στον Πίνακα 4.1, τόσο πιο μεγάλη είναι η πιθανή ανεκτή μόνιμη μετατόπιση.

Πίνακας 4.3. Υπολογισμός αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης για Bishop.
Table 4.3. Calculation of the expected permanent displacement for Bishop.

Seismic Coefficient	One-Step Reinforced Slope		Multi-Step Reinforced Slope					
			$\lambda=1m$		$\lambda=2m$		$\lambda=3m$	
	k_c	U (cm)	k_c	U (cm)	k_c	U (cm)	k_c	U (cm)
0.16	0.19	0.00	0.11	1.96	0.13	0.45	0.14	0.15
0.24	0.27	0.00	0.21	0.15	0.21	0.15	0.21	0.15
0.36	0.30	0.32	0.30	0.32	0.30	0.32	0.3	0.32

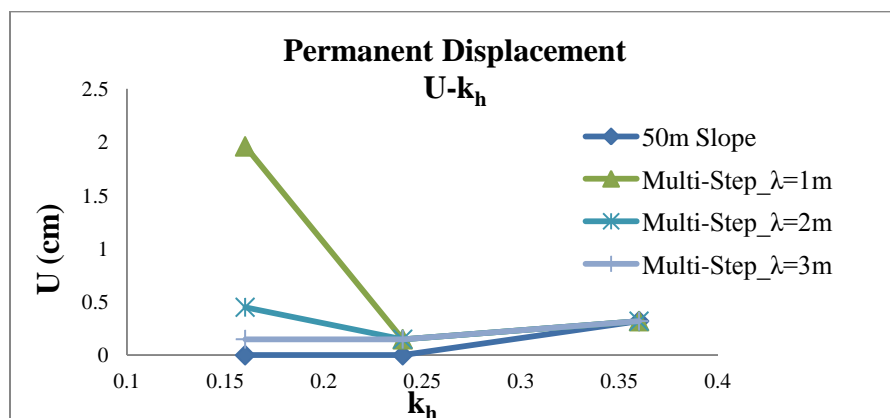
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την μέθοδο Janbu, όπου και η αναμενόμενη μόνιμη μετατόπιση είναι μεγαλύτερη. Στον Πίνακα 4.4 μπορεί να παρατηρηθεί ότι για όλες τις περιπτώσεις έχουμε αναμενόμενη μόνιμη μετατόπιση καθώς όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 4.2, οι Συντελεστές Ασφαλείας είναι μικρότεροι της μονάδας για όλες τις περιπτώσεις. Ωστόσο, οι τιμές της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης είναι ξανά σε ανεκτά πλαίσια, δηλαδή κάτω των 5 cm.

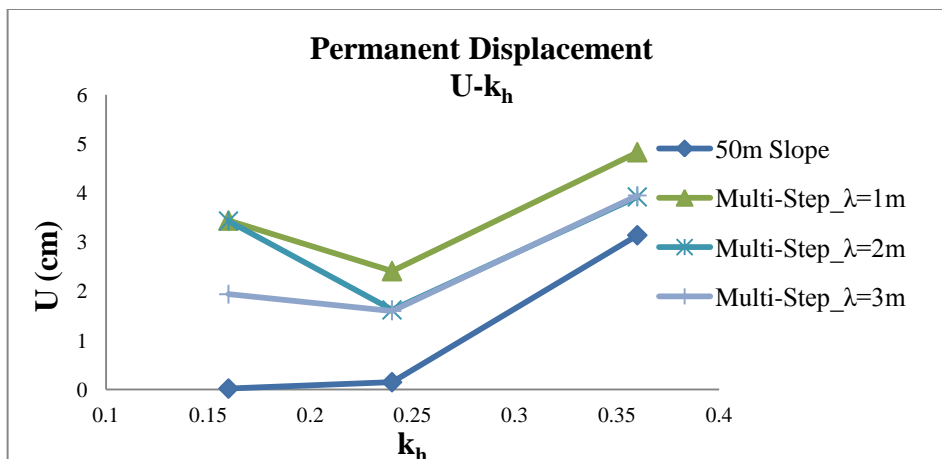
Ακολούθως παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα σύμφωνα με την μέθοδο Janbu, όπου και η αναμενόμενη μόνιμη μετατόπιση είναι μεγαλύτερη. Στον Πίνακα 4.4 μπορεί να παρατηρηθεί ότι για όλες τις περιπτώσεις έχουμε αναμενόμενη μόνιμη μετατόπιση καθώς όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 4.2, οι Συντελεστές Ασφαλείας είναι μικρότεροι της μονάδας για όλες τις περιπτώσεις. Ωστόσο, οι τιμές της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης είναι ξανά σε ανεκτά πλαίσια, δηλαδή κάτω των 5 cm. Τέλος, παρουσιάζονται και σχηματικά τα παραπάνω αποτελέσματα και συγκεκριμένα στα Σχήματα 4.30 και 4.31.

Πίνακας 4.4. Υπολογισμός αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης για Janbu.
Table 4.4. Calculation of the expected permanent displacement for Janbu.

Seismic Coefficient	One-Step Reinforced Slope		Multi-Step Reinforced Slope					
			$\lambda=1\text{m}$		$\lambda=2\text{m}$		$\lambda=3\text{m}$	
	k_c	U (cm)	k_c	U (cm)	k_c	U (cm)	k_c	U (cm)
0.16	0.15	0.02	0.10	3.44	0.10	3.43	0.11	1.94
0.24	0.21	0.15	0.16	2.41	0.17	1.62	0.17	1.60
0.36	0.23	3.14	0.21	4.83	0.22	3.92	0.22	3.95



Σχήμα 4.30. Εκτίμηση της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης για την μέθοδο Bishop.
Figure 4.30. Evaluation of permanent displacement for Bishop method.



Σχήμα 4.31. Εκτίμηση της αναμενόμενης μόνιμης μετατόπισης για την μέθοδο Janbu.
Figure 4.31. Evaluation of permanent displacement for Janbu method.

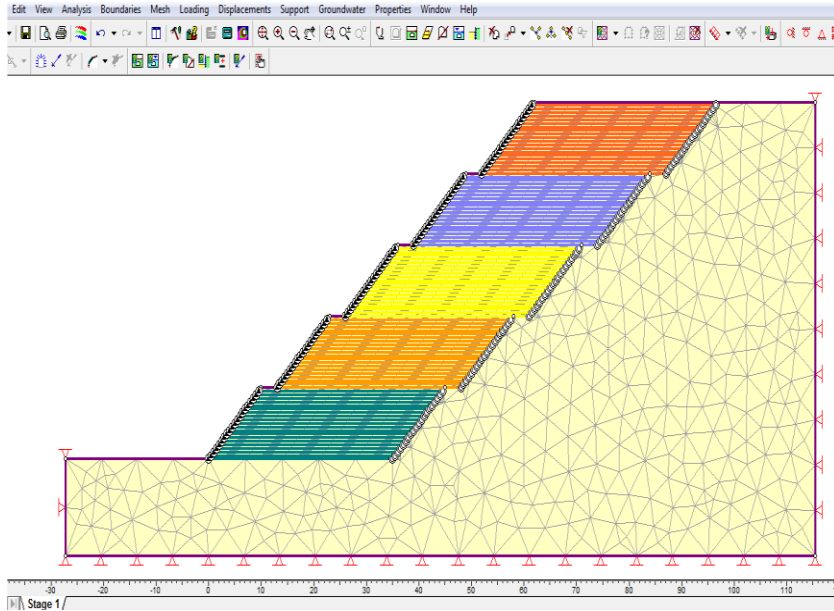
4.7.2 Ανάλυση με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Στην παρούσα ενότητα δημιουργούνται μοντέλα οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς στο λογισμικό Phase, εισάγοντας τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά καθώς και την ποσότητα του οπλισμού των πρανών που έχει υπολογισθεί μέσω της αναλυτικής λύσης και του λογισμικού στην Delphi του προηγούμενου Κεφαλαίου. Στην συνέχεια, πραγματοποιείται ανάλυση μέσω του Phase και υπολογίζεται ο Συντελεστής Μείωσης της Αντοχής, SRF (Strength Reduction Factor), ένας αντίστοιχος συντελεστής με τον Συντελεστή Ασφαλείας που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες Ενότητες.

Στο Σχήμα 4.32 παρουσιάζεται το μοντέλο οπλισμένου πρανού με αναβαθμούς που έχει δημιουργηθεί και μελετάται με τα ακόλουθα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά: οπλισμένο πρανές με 5 αναβαθμούς ύψους 10 m ο κάθε ένας, κλίσης: $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ και $\beta_5=1:1$ (κατακόρυφο: οριζόντιο), ειδικού βάρους $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, γωνίας τριβής $\phi=38^\circ$, απόσταση μεταξύ των οπλισμών ενιαία για ολόκληρο το πρανές $d_i=0.5 \text{ m}$, οριζόντια απόσταση μεταξύ των αναβαθμών $\lambda=3 \text{ m}$ και $k_h=0.16$. Οι τιμές της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής του κάθε αναβαθμού έχουν προκύψει από την αναλυτική λύση και για το παράδειγμα του Σχήματος 4.21 παίρνουν τις ακόλουθες τιμές από τα κατώτερα προς τα ανώτερα στρώματα: $T_1=10, T_2=8, T_3=6, T_4=5, T_5=5 \text{ kN/m}$. Στην συνέχεια στο Σχήμα 4.33 παρουσιάζεται το ίδιο μοντέλο με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, ενώ στο Σχήμα 4.34 τα αντίστοιχα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρώσεων οπλισμών (liner), οι οποίες και

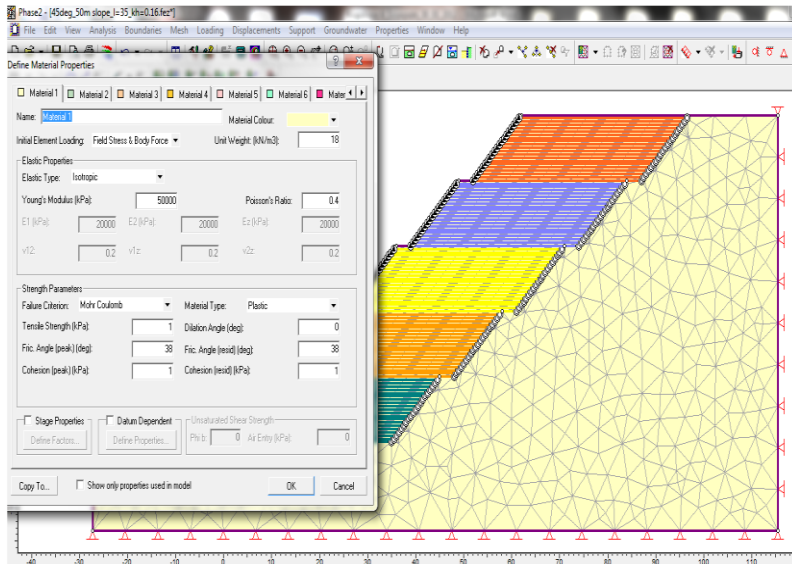
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

όπως φαίνεται λαμβάνονται υπόψη ως γεωπλέγματα, ενώ επίσης μοντελοποιούνται και με τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά και οι κορυφές τους (joint-positive side, joint-negative site).



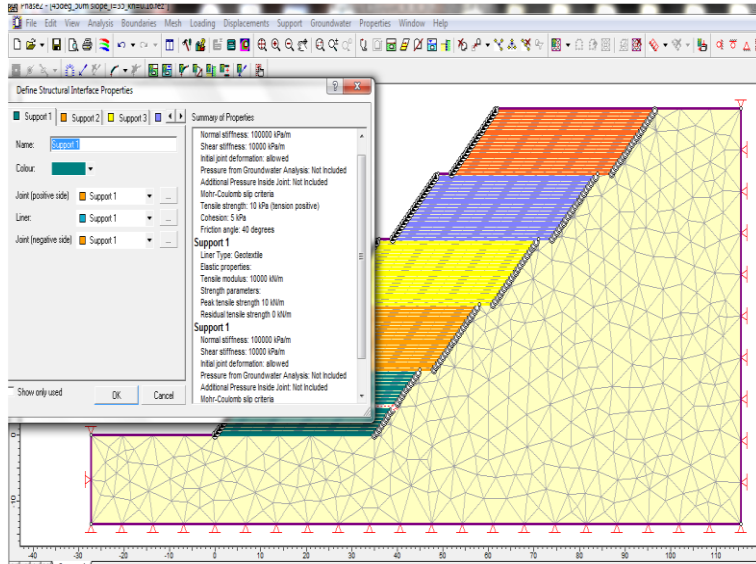
Σχήμα 4.32. Μοντέλο οπλισμένου πρανούς με αναβαθμούς με ενσωματωμένο πλέγμα για ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Figure 4.32. Reinforced slope model with berms, with incorporated mesh for finite element analysis.



Σχήμα 4.33. Μηχανικά χαρακτηριστικά μοντέλου οπλισμένου πρανούς με αναβαθμούς.

Figure 4.33. Mechanical characteristics of reinforced slope model with berms.



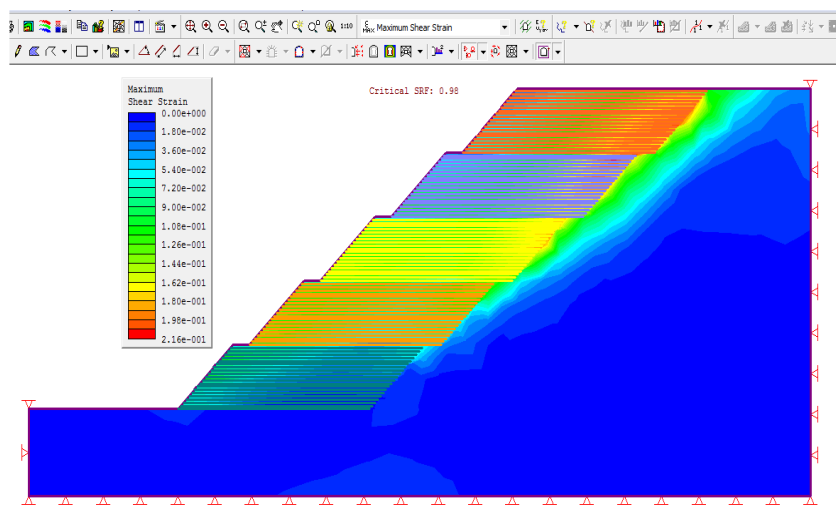
Σχήμα 4.34. Μηχανικά χαρακτηριστικά οπλισμών οπλισμένου πρανού με αναβαθμούς.
Figure 4.34. Reinforcement mechanical characteristics of reinforced slope model with berms.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι επιλέγονται και ενσωματώνονται στα μοντέλα οι ακριβείς τιμές της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής που έχουν υπολογισθεί σύμφωνα με το λογισμικό στην Delphi και όχι οι στρογγυλοποιημένες προς τα άνω τιμές. Ωστόσο, κατά τον σχεδιασμό και την διαστασιολόγηση των οπλισμένων πρανών, συνήθως γίνεται στρογγυλοποίηση προς τα άνω προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι οπλισμοί με τις πλησιέστερες τιμές εφελκυστικής αντοχής που βρίσκονται στο εμπόριο. Έτσι για παράδειγμα οι τιμές $T_2=8$ και $T_3=6$ kN/m που έχουν υπολογισθεί μέσω της αναλυτικής λύσης και του λογισμικού στην Delphi, αντικαθίστανται συνήθως κατά την κατασκευή με οπλισμούς με αντοχή 10 kN/m ή και παραπάνω, ανάλογα με το τι είναι διαθέσιμο στο εμπόριο. Ο λόγος που στην παρούσα διερεύνηση επιλέγονται οι μη στρογγυλοποιημένες προς τα άνω τιμές είναι για να υπολογισθεί όσο το δυνατόν ακριβέστερα η τιμή του SRF της κατασκευής που προκύπτει από την αναλυτική λύση και όχι κάποια τιμή του SRF που θα έχει προκύψει με στρογγυλοποιημένες προς τα άνω τιμές αντοχής.

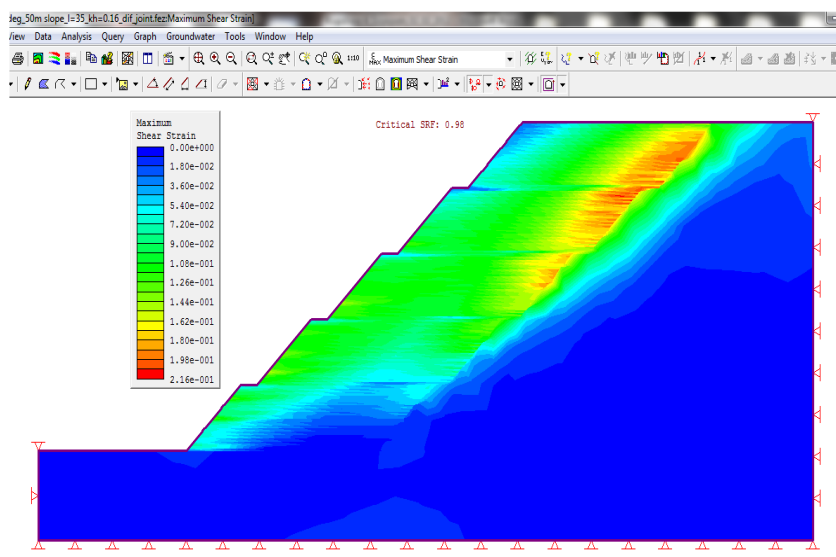
Στην συνέχεια παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.35, τα αποτελέσματα της διατμητικής τροπής από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για το συγκεκριμένο παράδειγμα καθώς και ο συντελεστής SRF, ο οποίος και υπολογίζεται ίσως με 0.98, κοντά δηλαδή στην μονάδα, δείχνοντας ότι οι τιμές των στρώσεων οπλισμού που υπολογίσθηκαν σύμφωνα με την αναλυτική λύση, δίνουν παρόμοια αποτελέσματα και με την ανάλυση με πεπερασμένα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

στοιχεία με το λογισμικό Phase. Στην συνέχεια, στο Σχήμα 4.36 αφαιρούνται οι στρώσεις οπλισμού προκειμένου να μπορεί να διακριθεί καλύτερα ο μηχανισμός αστοχίας. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, ο μηχανισμός εντοπίζεται κυρίως μετά το πέρας της εδαφικής μάζας και προς τους ανώτερους αναβαθμούς καθώς εκεί έχουν τοποθετηθεί και μικρότερες τιμές της εφελκυστικής αντοχής των στρώσεων οπλισμού.



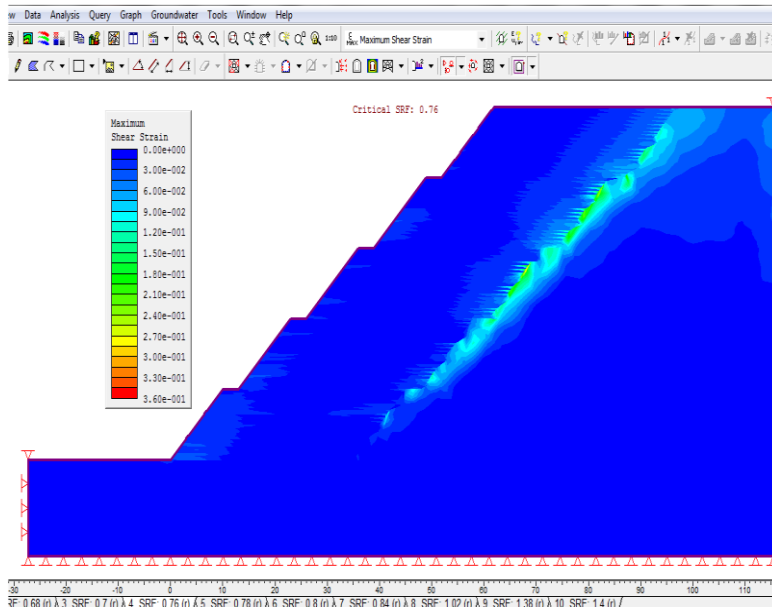
Σχήμα 4.35. Αποτελέσματα ανάλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.
Figure 4.35. Results from analysis with finite element method.



Σχήμα 4.36. Διατμητική αντοχή και μηχανισμός αστοχίας χωρίς στρώσεις οπλισμού.
Figure 4.36. Shear strain and failure mechanism without reinforcement layers.

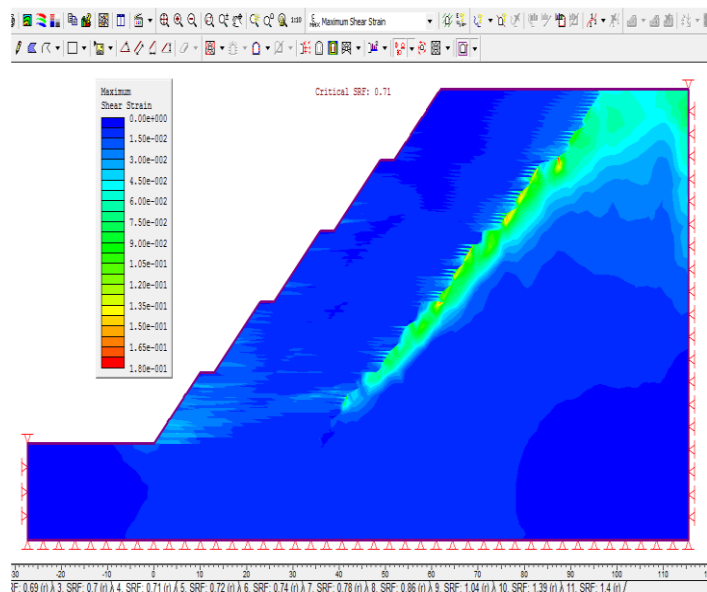
Ακολούθως αναλύονται δύο ακόμη μοντέλα με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά για μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή επιτάχυνσης σχεδιασμού k_h . Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.37 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για συντελεστή k_h ίσο με 0.24, ενώ στο Σχήμα 4.38 τα

αντίστοιχα αποτελέσματα με συντελεστή k_h ίσο με 0.36. Οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής των στρώσεων οπλισμών έχουν υπολογισθεί ξανά μέσω της νέας αναλυτικής λύσης και του λογισμικού που έχει αναπτυχθεί στην Delphi και είναι μεγαλύτερες από ότι οι αντίστοιχες του προηγούμενου παραδείγματος, όπως ήταν και αναμενόμενο. Συγκεκριμένα, για το μοντέλο που μελετάται με k_h ίσο με 0.24 οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής που επιλέγονται για τους αναβαθμούς είναι ίσες με, από τα κατώτερα προς τα ανώτερα στρώματα: $T_1=23$, $T_2=18$, $T_3=14$, $T_4=9$, $T_5=8$ kN/m ενώ για k_h ίσο με 0.36 ίσες με $T_1=54$, $T_2=44$, $T_3=33$, $T_4=22$, $T_5=15$ kN/m. Όπως και στην περίπτωση του παραδείγματος που παρουσιάστηκε αρχικά για k_h ίσο με 0.16, έτσι και στις περιπτώσεις αυτές, επιλέγονται και ενσωματώνονται στα μοντέλα οι ακριβείς τιμές της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής που έχουν υπολογισθεί σύμφωνα με το λογισμικό στην Delphi και όχι οι στρογγυλοποιημένες προς τα άνω τιμές, προκειμένου να υπολογισθεί όσο το δυνατόν ακριβέστερα η τιμή του SRF της κατασκευής που προκύπτει από την αναλυτική λύση και όχι κάποια τιμή του SRF που θα έχει προκύψει με στρογγυλοποιημένες προς τα άνω τιμές αντοχής.



Σχήμα 4.37. Διατμητική αντοχή και μηχανισμός αστοχίας χωρίς στρώσεις οπλισμού για $k_h=0.24$.
Figure 4.37. Shear strain and failure mechanism without reinforcement layers for $k_h=0.24$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4



Σχήμα 4.38. Διατμητική αντοχή και μηχανισμός αστοχίας χωρίς στρώσεις οπλισμού για $k_h=0.36$.
Figure 4.38. Shear strain and failure mechanism without reinforcement layers for $k_h=0.36$.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στα Σχήματα 4.37 και 4.38, οι τιμές του συντελεστή SRF είναι μικρότερες από την μονάδα γεγονός που δείχνει ότι η ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων δίνει κρισιμότερα αποτελέσματα από ότι η αναλυτική λύση και το λογισμικό που αναπτύχθηκε στην Delphi. Συγκεκριμένα για τα δύο παραδείγματα οι τιμές του SRF είναι 0.76 και 0.71 για k_h ίσα με 0.24 και 0.36 αντίστοιχα. Επίσης παρατηρείται ότι ο μηχανισμός αστοχίας εντοπίζεται κυρίως μετά το τέλος της οπλισμένης εδαφικής μάζας.

Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και για $\lambda=1$ και 2 m. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα υπολογισμού του SRF για διάφορα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μοντέλων. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί για τα οπλισμένα πρανή με αναβαθμούς, οι τιμές του συντελεστή SRF είναι μικρότερες της μονάδας και καθώς αυξάνει η τιμή του σεισμικού συντελεστή k_h μειώνονται ακόμα περισσότερο, ενώ για μεγαλύτερη οριζόντια απόσταση λ (m) μεταξύ των αναβαθμών οι τιμές του συντελεστή SRF είναι μεγαλύτερες. Όσο μειώνεται η τιμή του λ (m) και το πρανές με αναβαθμούς πλησιάζει σε γεωμετρία το ενιαίο, τόσο μειώνονται και οι τιμές του SRF. Έτσι και για το ενιαίο οπλισμένο πρανές αντίστοιχου ύψους και γεωμετρικών χαρακτηριστικών που δημιουργήθηκε και αναλύθηκε με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, οι τιμές του συντελεστή SRF είναι αρκετά μικρότερες από την μονάδα. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση των ανάλυση με το Slide, λόγω της φύσης του εδάφους, συντελεστές

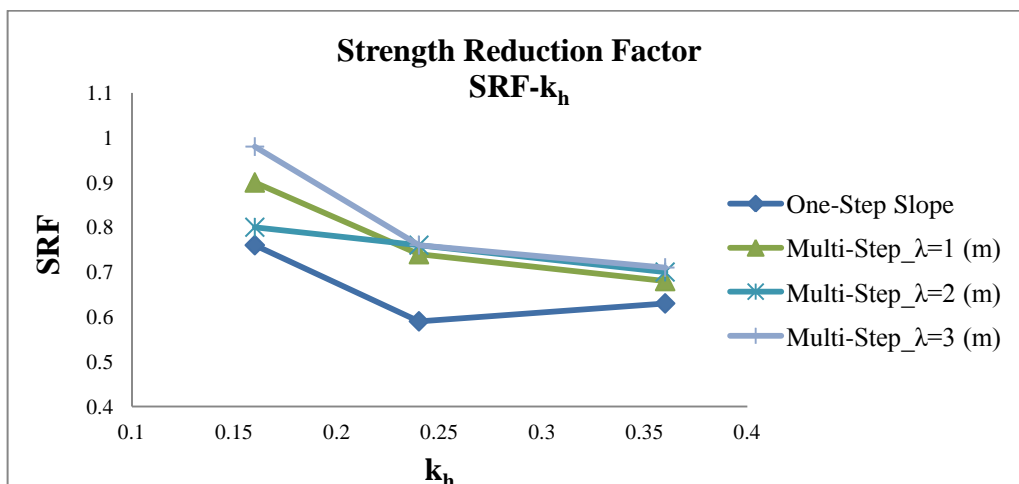
μικρότεροι της μονάδας δεν σημαίνουν απαραίτητα κατάρρευση των κατασκευών αλλά πεπερασμένη, ίσως ανεκτή μετατόπιση.

Πίνακας 4.5. Υπολογισμός των τιμών του Συντελεστή Μείωσης της Αντοχής SRF με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Table 4.5. Calculation of Strength Reduction Factor SRF, via Finite Element Analysis.

Seismic Coefficient (k _h)	One-Step Reinforced Slope		Multi-Step Reinforced Slope					
			λ=1m		λ=2m		λ=3m	
	Tmax (kN/m) Limit Analysis	SRF Finite Element	Tmax (kN/m) Limit Analysis	SRF Finite Element	Tmax (kN/m) Limit Analysis	SRF Finite Element	Tmax (kN/m) Limit Analysis	SRF Finite Element
0.16	22	0.76	17	0.90	14	0.80	10	0.98
0.24	38	0.59	32	0.74	28	0.76	23	0.76
0.36	73	0.63	67	0.68	60	0.70	54	0.71

Τέλος, στο Σχήμα 4.39 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή αυτή των συντελεστών SRF για διάφορες τιμές της οριζόντιας απόστασης λ (m). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί οι τιμές του Συντελεστή Μείωσης της Αντοχής SRF μειώνεται καθώς αυξάνει ο συντελεστής οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης k_h, ενώ για τιμές του k_h μεγαλύτερες από 0.25 αυξάνει ο συντελεστής για όλες τις περιπτώσεις οπλισμένων πρηνών με αναβαθμούς που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.39, καθώς και για το ενιαίο πρηνές.



Σχήμα 4.39. Μεταβολή του Συντελεστή Μείωσης της Αντοχής, SRF, για διάφορες τιμές του k_h.
Figure 4.39. Variation of the Strength Reduction Factor, SRF, for various k_h.

4.8 Συμπεράσματα Κεφαλαίου και προτάσεις.

Συμπερασματικά, μπορεί να παρατηρηθεί από τα παραδείγματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες Ενότητες του παρόντος Κεφαλαίου, ότι η μεθοδολογία και το λογισμικό που έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση για τον σχεδιασμό και τον έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών με σύνθετη γεωμετρία και συγκεκριμένα για πρανή με αναβαθμούς. Ο χρήστης του λογισμικού μπορεί εύκολα και γρήγορα να εισάγει τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των οπλισμένων αναβαθμών και να τα μελετήσει από διάφορες οπτικές γωνίες.

Ειδικότερα, μπορεί να εκτιμηθεί εύκολα και γρήγορα η αναμενόμενη μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση βάσει των σεισμοτεκτονικών χαρακτηριστικών της κάθε περιοχής και να χρησιμοποιηθεί αυτή για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς, όπως περιγράφεται στην Ενότητα 4.2.

Στην συνέχεια, ο μελετητής μπορεί να εισάγει τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των πρανών και των οπλισμών, καθώς και την απόσταση λ μεταξύ των αναβαθμών και να πραγματοποιήσει δυναμική ανάλυση για τον υπολογισμό της απαιτούμενη εφελκυστικής αντοχής και του μήκους των οπλισμών. Όπως φαίνεται και από τα παραδείγματα που αναλύθηκαν στην Ενότητα 4.3, η ποσότητα της δύναμης οπλισμού κατά τον σχεδιασμό των πρανών με αναβαθμούς είναι σημαντικά μικρότερη για κάθε αναβαθμό σε σχέση με την ποσότητα οπλισμού ενός αντίστοιχου ενιαίου πρανούς ίδιου ύψους και παρόμοιας κλίσης.

Επιπλέον, με την εφαρμογή του λογισμικού, μπορούν να πραγματοποιηθούν εύκολα και γρήγορα παραμετρικές αναλύσεις, διατηρώντας κάποια από τα χαρακτηριστικά των οπλισμένων πρανών σταθερά και μεταβάλλοντας κάποια άλλα. Έτσι, μπορεί να παρατηρηθεί στην Ενότητα 4.3 η μεταβολή της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής των πρανών σε σχέση με την γωνία τριβής ϕ , την απόσταση μεταξύ των αναβαθμών λ και την γωνία κλίσης των πρανών β . Ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν και κατά την στατική ανάλυση των οπλισμένων πρανών με την επιλογή του επιθυμητού Συντελεστή Ασφαλείας της κατασκευής, όπως φαίνεται και στην Ενότητα 4.4.

Μια άλλη σημαντική εφαρμογή του λογισμικού είναι η εύρεση της κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης υφιστάμενου πρανούς, όπου ο χρήστης εισάγει τα μηχανικά και γεωμετρικά

χαρακτηριστικά των αναβαθμών καθώς και τις τιμές της εφελκυστικής αντοχής των οπλισμών και το μήκος τους και στην συνέχεια υπολογίζεται η κρίσιμη σεισμική επιτάχυνση. Η τιμή αυτή είναι χαρακτηριστική για κάθε πρανές και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον υπολογισμό της σεισμικής τρωτότητας αυτών σε περίπτωση αναβάθμισης του σεισμικού κινδύνου, μέσω του υπολογισμού της αναμενόμενη μόνιμης μετατόπισης. Οι εφαρμογές αυτές παρουσιάζονται στις Ενότητες 4.5 και 4.6.

Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι η νέα αναλυτική λύση που προτείνεται μέσω των Εξισώσεων 3.1 έως και 3.22 οι οποίες και παρουσιάστηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο, μπορεί να επεκταθεί και να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό και έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών με λιγότερους ή και περισσότερους αναβαθμούς, καθώς επίσης και για πρανή με διαφορετικά υλικά, όπως για παράδειγμα για εδάφη με διαφορετικό ϕ και γ . Επίσης, μπορεί να μελετηθεί είναι πρανές με διαφορετική επιτάχυνση σχεδιασμού k_h σε κάθε αναβαθμό, το οποίο θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για πρανή με μεγάλο ύψος καθώς όπως είναι γνωστό υπάρχουν διαφορές μεταξύ της επιτάχυνσης που αναπτύσσεται στην βάση μιας κατασκευής και της επιτάχυνσης που αναπτύσσεται την κορυφή αυτής. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ, 2000), για άοπλα πρανή ισχύει ότι η επιτάχυνση στην κορυφή είναι έως και 2.5 φορές μεγαλύτερη από την επιτάχυνση στην βάση.

Στην Ενότητα 4.7 πραγματοποιήθηκε σύγκριση της εν λόγω μεθοδολογίας και λογισμικού με άλλες μεθόδους και συγκεκριμένα με την μέθοδο των λωρίδων Bishop και Janbu, καθώς και με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την ανάλυση αντίστοιχων μοντέλων δείχνουν ότι υπάρχει συμβατότητα μεταξύ των μεθόδων. Συγκεκριμένα με την μέθοδο των λωρίδων οι Συντελεστές Ασφαλείας υπολογίζονται κοντά στην μονάδα για την μέθοδο Bishop, ενώ για την μέθοδο Janbu μικρότεροι της μονάδας, καθώς πρόκειται για αυστηρότερη μέθοδο, ωστόσο και με τις τιμές αυτές το πρανές συνήθως υπόκειται πεπερασμένη μετατόπιση και όχι κατάρρευση. Με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων τα αποτελέσματα είναι δυσμενέστερα για ορισμένες περιπτώσεις, κυρίως για αυξημένες τιμές του συντελεστή οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης και οι μηχανισμοί αστοχίας εντοπίζονται μετά το πέρας της εδαφικής μάζας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Τέλος, οι εφαρμογές της μεθοδολογίας και του λογισμικού είναι πολλές και μπορούν να εμπλουτιστούν και με άλλες μεθόδους για την εύρεση της αναμενόμενης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης καθώς και για τον αντισεισμικό και στατικό σχεδιασμό οπλισμένων πρηνών με αναβαθμούς, όπως για παράδειγμα με την ενσωμάτωση άλλων πιθανών μηχανισμών αστοχίας πέραν του μηχανισμού Επίπεδης Ολίσθησης (Plane Failure Mechanism) που χρησιμοποιείται στην παρούσα έρευνα, όπως για παράδειγμα του μηχανισμού Λογαριθμικής Σπείρας (Log-Spiral Mechanism), του μηχανισμού Άμεσης Ολίσθησης (Direct Sliding) κ.α.

Μέρος Β'

Πειραματική Διερεύνηση Οπλισμένων Πρανών σε
Γεωτεχνικό Φυγοκεντριστή και Υπολογιστική Διερεύνηση.

Σύντομη Περίληψη Μέρους Β'

Στο Β' Μέρος της Διδακτορικής Διατριβής παρουσιάζεται η *πειραματική διερεύνηση* οπλισμένων πρανών έναντι στατικής φόρτισης και συγκεκριμένα η κατασκευή συνολικά 16 μοντέλων οπλισμένων πρανών τα οποία και τοποθετήθηκαν στον διαμέτρου 2.2 m *γεωτεχνικό φυγοκεντρική* του ETH Zurich, ενσωματώνοντας αισθητήρες *οπτικών ινών* και λαμβάνοντας ψηφιακές φωτογραφίες προκειμένου να εφαρμοσθεί οπτική μέθοδος παρακολούθησης της συμπεριφοράς τους *-Particle Image Velocimetry Analysis*. Επίσης, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των αντίστοιχων πρωτότυπων *υπολογιστικών μοντέλων* με γνωστές αναλυτικές μεθόδους καθώς και με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραματικών, αναλυτικών και υπολογιστικών μεθόδων.

*Η πειραματική διερεύνηση των οπλισμένων πρανών στον γεωτεχνικό φυγοκεντρική του ETH Zurich πραγματοποιήθηκε με την στήριξη- υποτροφία της **Ελβετικής Κυβέρνησης (Budesstipendium)** για την χρονική περίοδο 2008-2009, με συμμετοχή ως «επισκέπτρια Υποψήφια Διδάκτωρ του ETH Zurich». Κατά την χρονική περίοδο αυτή, επιβλέποντες Καθηγητές ήταν οι Prof. Sarah M. Springman και ο Dr. Jan Laue, σε συνεργασία με τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Μ. Σακελλαρίου.*

Σχετικές ανακοινώσεις:

- **Kapogianni, E.**, Laue, J. & Sakellariou, M., 2010. “Reinforced slope modelling in a geotechnical centrifuge”, *7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, 28 June-1 July, Zurich, Switzerland (pp.1125-1130).
- **Kapogianni, E.**, Laue, J. & Sakellariou, M., Springman, S.M., 2010. “The use of optical fibers in the centrifuge”, *7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, 28 June-1 July, Zurich, Switzerland (pp.343-238).
- **Kapogianni, E.**, Laue, J. & Sakellariou, M., 2010. “Investigation of the behaviour of reinforced slopes in a geotechnical centrifuge”, *6th Hellenic Conference on Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 29th September - 1st October, Volos, Greece (Paper 080302).
- **Kapogianni, E.**, Laue, J. & Sakellariou, M., 2010. “Measuring of deformations on reinforced slope models in a geotechnical centrifuge with the use of optical fibers and digital images with PIV analysis”, *6th Hellenic Conference on Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 29th September - 1st October, Volos, Greece (Paper 080303).
- **Kapogianni, E.**, Laue, J., Sakellariou, M. “Numerical Modelling of Centrifuge Tests on Reinforced Slopes”. *5th European Geosynthetics Conference*, 16th-19th September 2012, Valencia, Spain (Paper 119).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

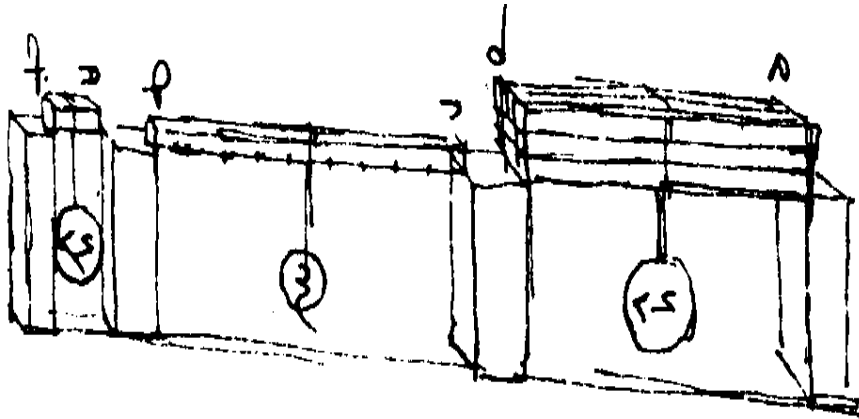
Πειραματική Διερεύνηση Γεωτεχνικών Κατασκευών

5.1 Εισαγωγή στην πειραματική διερεύνηση γεωτεχνικών κατασκευών

Η ιδέα της πειραματικής διερεύνησης είναι τόσο παλιά όσο και η επιθυμία και ανάγκη του ανθρώπου να κατανοήσει τα φυσικά φαινόμενα και να προστατευθεί από αυτά. Ακόμη και από φιλοσοφικής πλευράς το να λαμβάνονται κάποιες θεωρίες και θεμελιώδεις νόμοι της φύσης “a priori”, δηλαδή εκ των προτέρων ως δεδομένοι μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα. Έτσι, διάφορες θεωρίες φιλοσόφων του παρελθόντος που εφαρμόζαν δεδομένες για την εποχή βασικές αρχές χωρίς να επιχειρείται να διερευνηθούν αυτές με πειραματικές μεθόδους, οδήγησαν σε λανθασμένα συμπεράσματα με αποτέλεσμα σήμερα να μην είναι πλέον αποδεκτές. Η έλλειψη των κατάλληλων μέσων προσομοίωσης και μοντελοποίησης έπαιξε σημαντικό ρόλο σε αυτό, ενώ με την εξέλιξη της τεχνολογίας και των επιστημονικών μεθόδων η προσπάθεια για πιο εμπειριστατωμένη απόδειξη των διαφόρων θεωριών έγινε πιο έντονη.

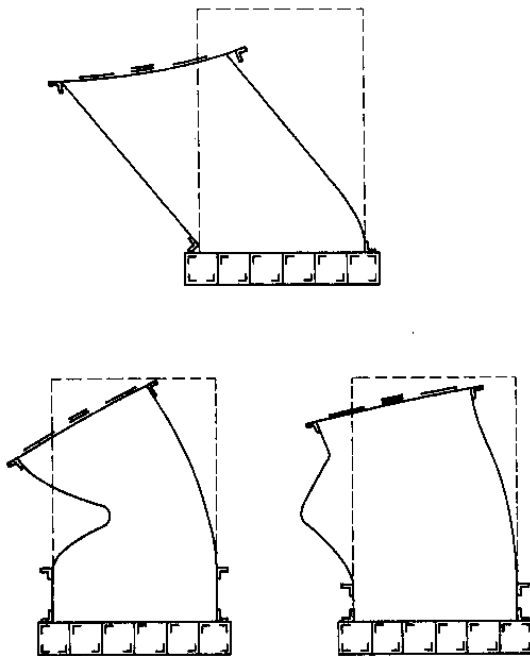
Διάφορα πειραματικά μοντέλα έχουν δημιουργηθεί στο παρελθόν ακόμη και σε πρώτη μορφή προκειμένου να καλυφθούν ποικίλα πεδία όπως και το πεδίο των κατασκευών. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του Ιταλού αρχιτέκτονα-εφευρέτη Leonardo da Vinci που έζησε στην περίοδο της Αναγέννησης και γνώριζε την ύπαρξη των νόμων μοντελοποίησης και των μαθηματικών σχέσεων για την συμπεριφορά των γεωμετρικά παρόμοιων κατασκευών (Hossdorf, 1971). Επίσης, είναι γνωστό ότι στην Ευρώπη κατά τον Μεσαίωνα χρησιμοποιούνταν μοντέλα για τη διερεύνηση της ευστάθειας των αψίδων των Γοτθικών καθεδρικών ναών και κατόπιν εφαρμόζονταν τα συμπεράσματα και η τεχνογνωσία στην κατασκευή τους σε φυσικές διαστάσεις. Ωστόσο, η πειραματική διερεύνηση έργων μηχανικού ξεκίνησε να εφαρμόζεται συστηματικά στο πρώτο τέταρτο του 20^{ου} αιώνα λόγω του ότι έως τότε οι αρχιτεκτονικές μορφές κατασκευάζονταν κυρίως σύμφωνα με την παράδοση και την εμπειρία προηγούμενων ετών, ενώ η μηχανολογική εξέλιξη που θα μπορούσε να προσφέρει δυνατότητες για νέες μεθόδους ήταν περιορισμένη.

Κατά τη διάρκεια του μεσοπολέμου και την περίοδο που το οπλισμένο σκυρόδεμα άρχισε να χρησιμοποιείται σαν δομικό υλικό, δόθηκε μεγαλύτερη ελευθερία στις δυνατότητες σχεδιασμού των κατασκευών και γεννήθηκε η ανάγκη να μελετηθούν νέες μορφές έργων μηχανικού. Έτσι η μοντελοποίηση πιο σύνθετων έργων μηχανικού γινόταν όλο και πιο



Σχήμα 5.2. Σκαρίφημα του Leonardo da Vinci με στόχο να απεικονίσει την αρχή της ελαστικότητας (Hossdorf, 1971).

Figure 5.2. Sketch from Leonardo da Vinci intended to illustrate the principle of elasticity (Hossdorf, 1971).



Σχήμα 5.3. Αποτελέσματα πειραμάτων σε κλίμακα 1:6 του Fairbairn (Hossdorf, 1971).

Figure 5.3. Results of tests performed on 1:6 scale models by Fairbairn (Hossdorf, 1971).

Η δημιουργία φυσικών μοντέλων και η χρήση τους για την διερεύνηση των κατασκευών έχει ως βασικό στόχο να παρέχει στον μελετητή επιστημονικές κατευθυντήριες οδηγίες που να αναλύουν την συμπεριφορά τους πέραν της θεωρητικής γνώσης και να δίνουν τη δυνατότητα να επεκταθούν οι μέθοδοι σχεδιασμού σε νέους τομείς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Ειδικότερα, για τις γεωτεχνικές κατασκευές, η πειραματική διερεύνηση εφαρμόζεται στις μέρες μας παγκοσμίως και καλύπτει σχεδόν όλο το πεδίο των γεωτεχνικών προβλημάτων. Τα αποτελέσματα των ερευνών που πραγματοποιούνται σε αυτό τον τομέα παρουσιάζονται σε συνέδρια σε όλο τον κόσμο με πιο αντιπροσωπευτικά και εξειδικευμένα εκείνα που διοργανώνονται κάθε 4 χρόνια από την «Τεχνική Επιτροπή 2: Φυσική Προσομοίωση στην Γεωτεχνική» (“Technical Committee 2: Physical Modelling in Geotechnics”) της «Διεθνούς Επιτροπής Εδαφομηχανικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής» (“International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering”), τα οποία ξεκίνησαν να διοργανώνονται το 1988 στο Παρίσι, με πιο πρόσφατο το «7^ο Συνέδριο Φυσικής Προσομοίωσης στην Γεωτεχνική» (“7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics”) που πραγματοποιήθηκε στην Ζυρίχη της Ελβετίας το καλοκαίρι του 2010 με διοργάνωση από το «Ομοσπονδιακό Πανεπιστήμιο της Ζυρίχης» (“Swiss Federal Institute of Technology”), ETH Zurich. Στο συνέδριο αυτό, παρουσιάστηκαν 228 άρθρα και 3 κεντρικές ομιλίες και η θεματολογία του παρουσιάζεται παρακάτω, δείχνοντας την πληθώρα των γεωτεχνικών προβλημάτων που μπορούν να διερευνηθούν με πειραματική ανάλυση. Ορισμένα από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας παρουσιάστηκαν σε 2 άρθρα στο εν λόγω συνέδριο.

- Έδαφος-Δομή-Αλληλεπίδραση
- Φυσικοί Κίνδυνοι
- Σεισμική Μηχανική
- Μηχανική Μαλακών Εδαφών
- Νέες Εγκαταστάσεις Μοντελοποίησης Γεωτεχνικών Κατασκευών
- Εξελιγμένες Πειραματικές Τεχνικές
- Σύγκριση Μεταξύ Πειραματικής και Υπολογιστικής Προσομοίωσης
- Βελτίωση Εδάφους και Θεμελιώσεις
- Σήραγγες- Εκσκαφές
- Πρανή - Φράγματα
- Μοντελοποίηση Περιβαλλοντικών Προβλημάτων

Η πειραματική διερεύνηση πραγματοποιείται συνήθως όταν δεν υπάρχει προηγούμενη γνώση για τη συμπεριφορά των κατασκευών, ή όταν η γνώση αυτή είναι περιορισμένη και απαιτείται να διερευνηθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία αυτών. Μέσω της πειραματικής μοντελοποίησης παρέχεται η δυνατότητα να

μελετηθούν οι μορφές αστοχίας, να υπολογιστούν οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις που παρουσιάζονται σε διάφορες φάσεις φορτίσεων και να δημιουργηθούν δεδομένα προκειμένου να συγκριθεί η συμπεριφορά των πειραματικών μοντέλων με αντίστοιχα υπολογιστικά και αναλυτικά. Ανεξαρτήτως από το ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί σε κάθε μελέτη, απαραίτητη είναι η δημιουργία του κατάλληλου περιβάλλοντος για τη διερεύνηση των γεωτεχνικών προβλημάτων. Η πειραματική διερεύνηση των γεωτεχνικών κατασκευών μπορεί να πραγματοποιηθεί με την κατασκευή και φόρτιση μοντέλων σε φυσική ή μικρότερη κλίμακα καθώς και με την εφαρμογή της τεχνολογίας των γεωτεχνικών φυγοκεντριστών.

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας μελετάται η συμπεριφορά γεωτεχνικών μοντέλων σε *μικρή κλίμακα* με την εφαρμογή της *τεχνολογίας των γεωτεχνικών φυγοκεντριστών*. Κατά τη διερεύνηση γεωτεχνικών μοντέλων σε φυγοκεντριστές οι πρωτότυπες κατασκευές μπορούν να μελετηθούν υπό κλίμακα σε ελεγχόμενο περιβάλλον και οι τάσεις που αναπτύσσονται λόγω της φυγόκεντρης δύναμης είναι αντίστοιχες με αυτές των πρωτότυπων μοντέλων. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώνεται με μεγάλη ακρίβεια η συμπεριφορά των κατασκευών και προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τις αντίστοιχες κατασκευές σε φυσική κλίμακα, όπως για παράδειγμα για τους μηχανισμούς αστοχίας και την αντοχή αυτών. Στην Ενότητα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των γεωτεχνικών φυγοκεντριστών.

5.2 Βασικές αρχές λειτουργίας των γεωτεχνικών φυγοκεντριστών

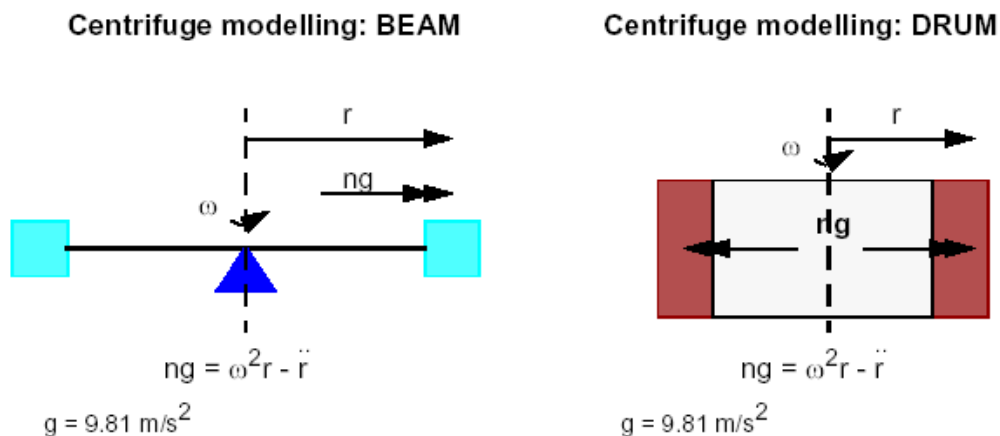
Οι κυριότερες δυνάμεις που ασκούνται στις γεωτεχνικές κατασκευές και καθορίζουν την συμπεριφορά της εδαφικής μάζας είναι αυτές του ίδιου βάρους. Κατά την μοντελοποίηση των κατασκευών αυτών υπό κλίμακα, το απλό πεδίο βαρύτητας είναι ανεπαρκές καθώς οι αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω του ίδιου βάρους είναι σημαντικά μικρότερες με αποτέλεσμα τα μοντέλα να συμπεριφέρονται διαφορετικά από τις πρωτότυπες κατασκευές.

Προκειμένου να αναπαραχθούν οι τάσεις λόγω της βαρύτητας μιας πρωτότυπης κατασκευής, σε μοντέλο υπό κλίμακα $1/n$, είναι απαραίτητο να μελετηθεί το μοντέλο σε ένα πεδίο βαρύτητας n φορές μεγαλύτερο από αυτό της πρωτότυπης κατασκευής. Μέσω των γεωτεχνικών φυγοκεντριστών, δημιουργείται πεδίο μεγάλης επιτάχυνσης το οποίο και

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

εφαρμόζεται στο υπό εξέταση μοντέλο. Η ιδέα των γεωτεχνικών φυγοκεντριστών εφαρμόστηκε αρχικά την δεκαετία του '30, από τον P.B. Bucky (1931) και τον G.I. Pokrovsky (1936). Από τότε πολλοί γεωτεχνικοί φυγοκεντριστές έχουν κατασκευαστεί σε ερευνητικά ινστιτούτα σε όλο τον κόσμο, καθιστώντας την τεχνολογία αυτή ως ένα ισχυρό εργαλείο για την πειραματική διερεύνηση των γεωτεχνικών κατασκευών.

Βασική αρχή της λειτουργίας των γεωτεχνικών φυγοκεντριστών είναι η εφαρμογή επιπρόσθετων φυγόκεντρων δυνάμεων στα υπό εξέταση μοντέλα μέσω της περιστροφής του φυγοκεντριστή, προκειμένου να αυξηθεί το ίδιο βάρος του εδάφους με στόχο τη δημιουργία κατανομής τάσεων όμοια με αυτή της πραγματικότητας. Η δράση αυτή φαίνεται στο Σχήμα 5.4 (Springman, 2001), όπου παρουσιάζονται δύο είδη φυγοκεντριστών: α) φυγοκεντριστής δοκού (beam centrifuge) με «καλάθι» περιστροφής, όπου το πεδίο της επιτάχυνσης δρα στους άξονες των μοντέλων και β) φυγοκεντριστής με τύμπανο (drum centrifuge) με ενσωματωμένο κανάλι. Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η διάταξη των δύο τύπων φυγοκεντριστών καθώς και οι Εξισώσεις που διέπουν την λειτουργία τους. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εκατέρωθεν είναι ποικίλα και η επιλογή του ενός ή του άλλου τύπου σχετίζεται και με το κόστος και τις δυνατότητες στις εγκαταστάσεις του κάθε εργαστηρίου.



Σχήμα 5.4. Απεικόνιση της μηχανικής λειτουργίας των δύο τύπων φυγοκεντριστών (Springman, 2001).

Figure 5.4. Sketch of the mechanics relating to the two types of centrifuges (Springman, 2001).

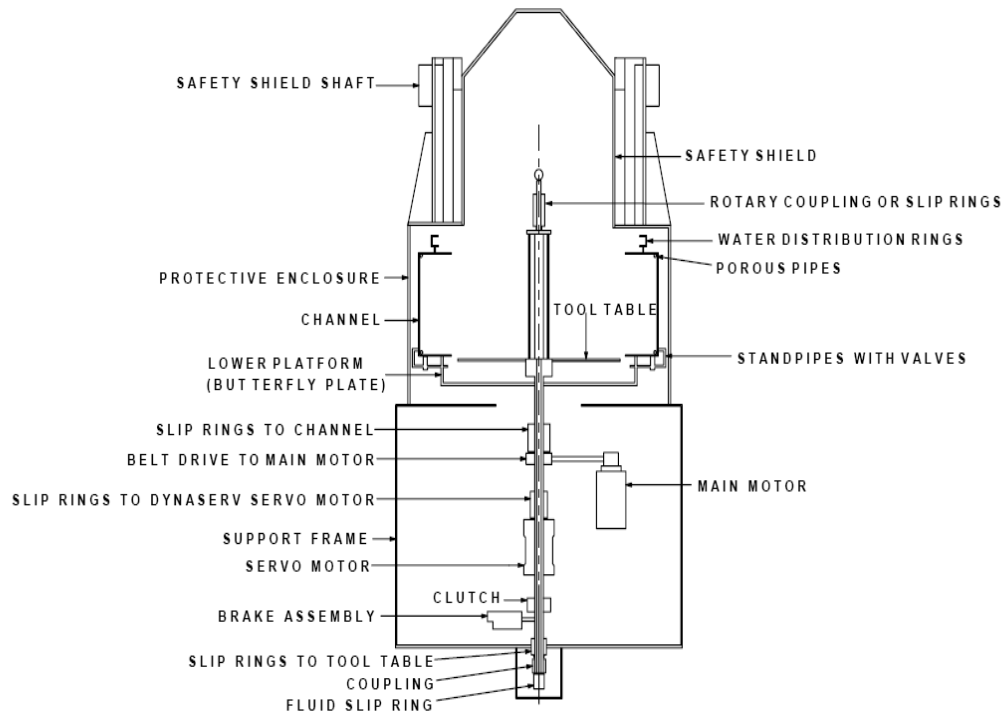
Οι περισσότεροι γεωτεχνικοί φυγοκεντριστές στον κόσμο είναι φυγοκεντριστές δοκού όπου το μοντέλο τοποθετείται στο «καλάθι» περιστροφής από τη μία πλευρά του βραχίονα και

ισορροπεί με κάποιο αντίβαρο από την άλλη πλευρά. Το μοντέλο περιστρέφεται όπως περιστρέφεται ο φυγοκεντριστής με τις δυνάμεις βαρύτητας να δρουν κατακόρυφα (gravitational forces) και τις φυγόκεντρες δυνάμεις οριζόντια (centripetal forces). Αυτή η κατάσταση δημιουργεί ένα τεχνητό πεδίο επιτάχυνσης (n_g field) πάνω στα μοντέλα και οδηγεί σε αύξηση της βαρύτητάς τους. Παγκοσμίως χρησιμοποιούνται λιγότεροι γεωτεχνικοί φυγοκεντριστές με τύμπανο, ωστόσο τα πλεονεκτήματά τους είναι πολλά.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματά τους είναι ότι παρέχουν δυνατότητα πρόσβασης των μοντέλων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χωρίς να διαταραχθεί το δείγμα. Για παράδειγμα, εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την επιβολή επιπλέον φορτίσεων καθώς και για άλλες δραστηριότητες, μπορούν να μετακινηθούν και να μετατραπούν χωρίς να διαταραχθεί το δείγμα, καθώς υπάρχει η δυνατότητα να σταματήσει η περιστροφή τους και να μετακινηθούν ανεξαρτήτως από το τύμπανο του φυγοκεντριστή. Η ευελιξία αυτή των φυγοκεντριστών με τύμπανο οδηγεί στη μείωση του αριθμού των κύκλων φορτίσεων στους οποίους τα μοντέλα πρέπει να εκτεθούν μεταξύ της $1g$ και n_g φόρτισης.

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται σκαρίφημα του γεωτεχνικού φυγοκεντριστή του ETH Zurich, όπου και πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα της παρούσας μελέτης. Στην Φωτογραφία 5.1 (Karogianni et al. 2010) παρουσιάζεται ο φυγοκεντριστής με τύμπανο του ETH Zurich, ενώ στην Φωτογραφία 5.2 παρουσιάζεται ο φυγοκεντριστής με καλάθι περιστροφής του Bochum (Laue, 2002).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5



Σχήμα 5.5. Γεωτεχνικός φυγοκεντριστής με τύμπανο στη ETHZ .
Figure 5.5. Drum geotechnical centrifuge at ETHZ.



Φωτογραφία 5.1. Γεωτεχνικός Φυγοκεντριστής με Τύμπανο στο ETH Zurich (Kapogianni et al. 2010).
Photograph 5.1. The ETH Zurich Drum Geotechnical Centrifuge (Kapogianni et al. 2010).



Φωτογραφία 5.2. Γεωτεχνικός Φυγοκεντριστής με καλάθι περιστροφής του Bochum (Laue, 2002)
 Photograph 5.2. The Bochum Beam Geotechnical Centrifuge (Laue, 2002).

Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας δημιουργήθηκαν μοντέλα οπλισμένων πρανών στο εργαστήριο και στην συνέχεια τοποθετήθηκαν στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETH Zurich που φαίνεται στην Φωτογραφία 5.1. Τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν κατά την χρονική περίοδο 2008-2009 στην Ζυρίχη της Ελβετίας, με χρηματοδότηση μέσω υποτροφίας από την Ελβετική Κυβέρνηση (Bundes-Stipendium), για την εκπόνηση της Διδακτορικής Διατριβής ως επισκέπτρια Υποψήφια Διδάκτωρ στο Ινστιτούτο Γεωτεχνικής Μηχανικής (Institut für Geotechnik, IGT) της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ETH Zurich.

5.3 Νόμοι ομοιότητας μοντέλων.

5.3.1 Η αρχή της ομοιογένειας και το θεώρημα π του Buckingham

Το θεώρημα π του Buckingham (1914, 1915) υποστηρίζει ότι αν έχουμε μία φυσικά αποδεκτή εξίσωση η οποία περιλαμβάνει έναν συγκεκριμένο αριθμό φυσικών μεταβλητών n και αυτές οι μεταβλητές εκφράζονται από q ανεξάρτητες θεμελιώδεις φυσικές μεταβλητές, τότε η αρχική έκφραση είναι αντίστοιχη με μια εξίσωση που περιλαμβάνει ένα σύνολο από

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

$m=n-q$ αδιάστατες μεταβλητές οι οποίες δημιουργούνται από συνδυασμό των αρχικών μεταβλητών. Αυτό το πόρισμα παρέχει μια μέθοδο υπολογισμού των αδιάστατων παραμέτρων από δεδομένες μεταβλητές, ακόμη και αν η μορφή των εξισώσεων είναι άγνωστη. Ωστόσο, η επιλογή των αδιάστατων παραμέτρων δεν είναι μοναδική και το θεώρημα από μόνο του δεν επιλέγει τις πιο φυσικά λογικές από αυτές, κάτι που πρέπει να πραγματοποιήσει ο μελετητής ανάλογα με τις ειδικότερες ανάγκες της έρευνας.

Πιο ειδικά, έστω ένα συγκεκριμένο φυσικό φαινόμενο το οποίο περιλαμβάνει n ποσότητες $x_1 \dots x_n$, κάθε μία από τις οποίες μπορεί να είναι μεταβλητή ή σταθερά, με διαστάσεις μη μηδενικές ή μηδενικές. Το φυσικό αυτό φαινόμενο μπορεί να εκφραστεί σε γενική μορφή από την ακόλουθη Εξίσωση:

$$f(x_1 \dots x_n) = 0 \quad (5.1)$$

Σύμφωνα με την αρχή της ομοιογένειας, δεδομένου ότι η f αποτελείται από πολλούς όρους, αυτοί θα πρέπει να έχουν τις ίδιες φυσικές διαστάσεις. Εάν αυτό δεν ισχύει, τότε μεταβάλλοντας τις μονάδες μέτρησης θα έχουμε ως αποτέλεσμα διάφοροι όροι να πολλαπλασιάζονται με διαφορετικούς συντελεστές και η Εξίσωση 5.1 να μην ικανοποιείται μοναδικά. Επιπλέον, δεδομένου ότι ορισμένοι όροι της Εξίσωσης 5.1 μπορεί να περιέχουν όρους με εκθετικές, λογαριθμικές ή τριγωνομετρικές εκφράσεις, προκύπτει η ανάγκη όλοι οι όροι της Εξίσωσης 5.1 να είναι αδιάστατοι.

Η Εξίσωση 5.1 μπορεί να γραφτεί και με την παρακάτω μορφή:

$$f(\pi_1 \dots \pi_m) = 0 \quad (5.2)$$

Όπου π_n οι αδιάστατες σχέσεις που αντιστοιχούν στις ποσότητες x_n .

Δεν είναι απαραίτητο όλες οι σχέσεις π_n να είναι ανεξάρτητες και μπορεί κάποιες από αυτές να μην εκφράζουν κάτι νέο αλλά να επαναλαμβάνουν κάτι που έχει εκφραστεί από άλλες σχέσεις. Στην περίπτωση αυτή, ο αριθμός των βασικών σχέσεων μειώνεται σε m , όπου $m < n$.

Σύμφωνα λοιπόν με το θεώρημα του Buckingham (1914, 1915) εάν υπάρχουν q θεμελιώδεις ποσότητες, τότε ο αριθμός m των ανεξάρτητων σχέσεων που δημιουργούνται από τις q

θεμελιώδεις ποσότητες, δίνεται από την εξίσωση : $m=n-q$ και επομένως στη θέση της Εξίσωσης 5.1 έχουμε:

$$F(\pi_1 \dots \pi_m) = 0 \quad (5.3)$$

Στην οποία περιλαμβάνονται μόνο οι ανεξάρτητες αδιάστατες σχέσεις. Κάποιες φορές λαμβάνεται υπόψη ξεχωριστά η περίπτωση που οι ποσότητες $x_1 \dots x_n$, είναι του ίδιου τύπου (για παράδειγμα δύο ή περισσότερα μήκη, δύο ή περισσότερες δυνάμεις κλπ). Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να ονομάσουμε τις ποσότητες του ίδιου τύπου χ_i . Αυτές οι ποσότητες μπορούν να συμπεριληφθούν στην Εξίσωση 5.2, εάν έχουν πραγματική επιρροή στα φαινόμενα. Μπορεί λοιπόν η Εξίσωση 5.2 να γραφτεί ξανά ως:

$$F(\pi_1 \dots \pi_m ; \chi_1, \chi_2 \dots) = 0 \quad (5.4)$$

Αυτή είναι η γενική μορφή του θεωρήματος του Buckingham και μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με το π_1 ως ακολούθως:

$$\pi_1 = \phi(\pi_2 \dots \pi_m ; \chi_1, \chi_2 \dots) \quad (5.5)$$

Γενικά, ως θεμελιώδεις ποσότητες λαμβάνονται συνήθως η μάζα (M), το μήκος (L) και ο χρόνος (T). Έτσι ο όγκος για παράδειγμα εκφράζεται ως L^3 , η ταχύτητα LT^{-1} , η επιτάχυνση LT^{-2} , η δύναμη ως το γινόμενο της μάζας και της επιτάχυνσης MLT^{-1} κλπ. Στη μηχανική συνήθως επιλέγονται ως θεμελιώδεις ποσότητες η δύναμη, το μήκος και ο χρόνος ενώ για στατικά προβλήματα μόνο η δύναμη και το μήκος.

Στον Πίνακα 5.1 (Bridgman, 1922) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διάφορες φυσικές ποσότητες που συναντώνται στη μηχανική, θεωρώντας ως θεμελιώδεις ποσότητες την μάζα, το μήκος και τον χρόνο ή τη δύναμη, το μήκος και τον χρόνο. Κάποιες από τις φυσικές ποσότητες όπως για παράδειγμα η παραμόρφωση, ο λόγος Poisson και οι γωνίες είναι αδιάστατες και για αυτές χρησιμοποιείται το σύμβολο 1. Η χρήση του συμβόλου 1 αντί του συμβόλου 0, για τις αδιάστατες φυσικές ποσότητες, επιτρέπει την αλγεβρική χρήση τους σε διάφορες εξισώσεις όπως για παράδειγμα κατά τον ορισμό της τροπής $\varepsilon = \Delta L / L$. Εάν και τα δύο μεγέθη ΔL και L εκφράζονται για παράδειγμα σε μέτρα (m), τότε το αποτέλεσμα της διαίρεσής τους που είναι η τροπή και αποτελεί αδιάστατο μέγεθος, δεν είναι το 0 αλλά το 1.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Πίνακας 5.1. Φυσικές ποσότητες και οι διαστάσεις τους (Bridgman, 1922).
Table 5.1. Physical quantities and their dimensions (Bridgman, 1922).

Quantity	Symbol	Dimensions for M, L, T	Dimensions for F, L, T
Length	l	L	L
Area	A	L ²	L ²
Volume	V	L ³	L ³
Time	t	T	T
Mass	m	M	FL ⁻¹ T ²
Velocity	u	LT ⁻¹	LT ⁻¹
Acceleration	a	LT ⁻²	LT ⁻²
Force, Load	F	MLT ⁻²	F
Mass density	ρ	ML ⁻³	FL ⁻⁴ T ²
Specific Weight or unit weight	γ or ρg	ML ⁻² T ⁻²	FL ³
Angle	θ, φ	1	1
Angular velocity	ω	T ⁻¹	T ⁻¹
Angular acceleration	d	T ⁻²	T ⁻²
Pressure or stress	p, σ, τ	ML ⁻¹ T ⁻²	FL ⁻²
Work or energy	T, W	ML ² T ⁻²	FL
Momentum	mu	MLT ⁻¹	FT
Power	P	ML ² T ⁻³	FLT ⁻¹
Moment of force	M	ML ² T ⁻²	FL
Moment of inertia of an area	I	L ⁴	L ⁴
Moment of inertia of a mass	I	ML ²	FLT ²
Modulus of elasticity	E	ML ⁻¹ T ⁻²	FL ⁻²
Strain	ε, γ	1	1
Poisson's ratio	ω	1	1
Modulus of rigidity	G	ML ⁻¹ T ⁻²	FL ⁻²
Bulk modulus	K	ML ⁻¹ T ⁻²	FL ⁻²

Οι πιο βασικές εφαρμογές της διαστασιακής ανάλυσης (dimensional analysis) στα έργα μηχανικού είναι: η μετατροπή εξισώσεων ή δεδομένων από ένα σύστημα μονάδων σε κάποιο άλλο, η δημιουργία σχέσεων ανάμεσα σε μεταβλητές, η συστηματοποίηση της συλλογής δεδομένων και η μείωση του αριθμού των μεταβλητών που πρέπει να μελετηθούν σε

πειραματικές αναλύσεις και τέλος η καθιέρωση αρχών κατά την μοντελοποίηση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των πειραμάτων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, κατά την μοντελοποίηση κατασκευών μηχανικού υπό κλίμακα και εφόσον έχουν ορισθεί οι θεμελιώδεις μεταβλητές, οι Εξισώσεις 5.3 έως 5.5 μπορούν να εφαρμοσθούν τόσο για τις πρωτότυπες κατασκευές όσο και για τις κατασκευές υπό κλίμακα. Ειδικότερα θα ισχύουν οι παρακάτω Εξισώσεις 5.6 και 5.7:

$$\pi_1 = \phi(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_i, \dots, \pi_\pi) \quad (5.6)$$

$$\pi_{1\mu} = \phi_\mu(\pi_{2\mu}, \pi_{3\mu}, \dots, \pi_{i\mu}, \dots, \pi_{\pi\mu}) \quad (5.7)$$

Όπου δείκτης π αναφέρεται στην πρωτότυπη κατασκευή και δείκτης μ στο μοντέλο.

Διαιρώντας τις Εξισώσεις 5.6 και 5.7 κατά μέλη προκύπτει:

$$\pi_1 / \pi_{1\mu} = \phi(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_i, \dots, \pi_\pi) / \phi_\mu(\pi_{2\mu}, \pi_{3\mu}, \dots, \pi_{i\mu}, \dots, \pi_{\pi\mu}) \quad (5.8)$$

Έτσι εάν το μοντέλο κατασκευαστεί και εξεταστεί σύμφωνα με τις Εξισώσεις 5.9:

$$\pi_2 = \pi_{2\mu}$$

$$\pi_3 = \pi_{3\mu}$$

.....

$$\pi_i = \pi_{i\mu} \quad (5.9)$$

.....

$$\pi_\pi = \pi_{\pi\mu}$$

Τότε προκύπτει ότι:

$$\phi(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_i, \dots, \pi_\pi) = \phi_\mu(\pi_{2\mu}, \pi_{3\mu}, \dots, \pi_{i\mu}, \dots, \pi_{\pi\mu}) \quad (5.10)$$

Και επομένως:

$$\pi_1 = \pi_{1\mu} \quad (5.11)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Οι Εξισώσεις 5.9, αποτελούν τις εξισώσεις σχεδιασμού. Εάν όλες αυτές ικανοποιούνται τότε το υπό εξέταση μοντέλο θα δώσει ακριβείς προβλέψεις σχετικά με τη συμπεριφορά της πρωτότυπης κατασκευής σύμφωνα με την Εξίσωση 5.11.

Επομένως, σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, μπορεί να προσομοιωθεί η συμπεριφορά πρωτότυπων κατασκευών με μοντέλα σε μικρότερη κλίμακα όπως και στην περίπτωση των γεωτεχνικών φυγοκεντριστών. Ειδικότερα για την περίπτωση της μοντελοποίησης γεωτεχνικών κατασκευών σε φυγοκεντριστές, έχει αναπτυχθεί πιο εξειδικευμένη μεθοδολογία και εξισώσεις, ανάλογα και με τις ειδικότερες ανάγκες του εκάστοτε μοντέλου. Στην Ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι νόμοι ομοιότητας που χρησιμοποιούνται γενικά σε φυγοκεντριστές, καθώς και ειδικότερα για οπλισμένα πρανή.

5.3.2 Νόμοι ομοιότητας σε γεωτεχνικούς φυγοκεντριστές.

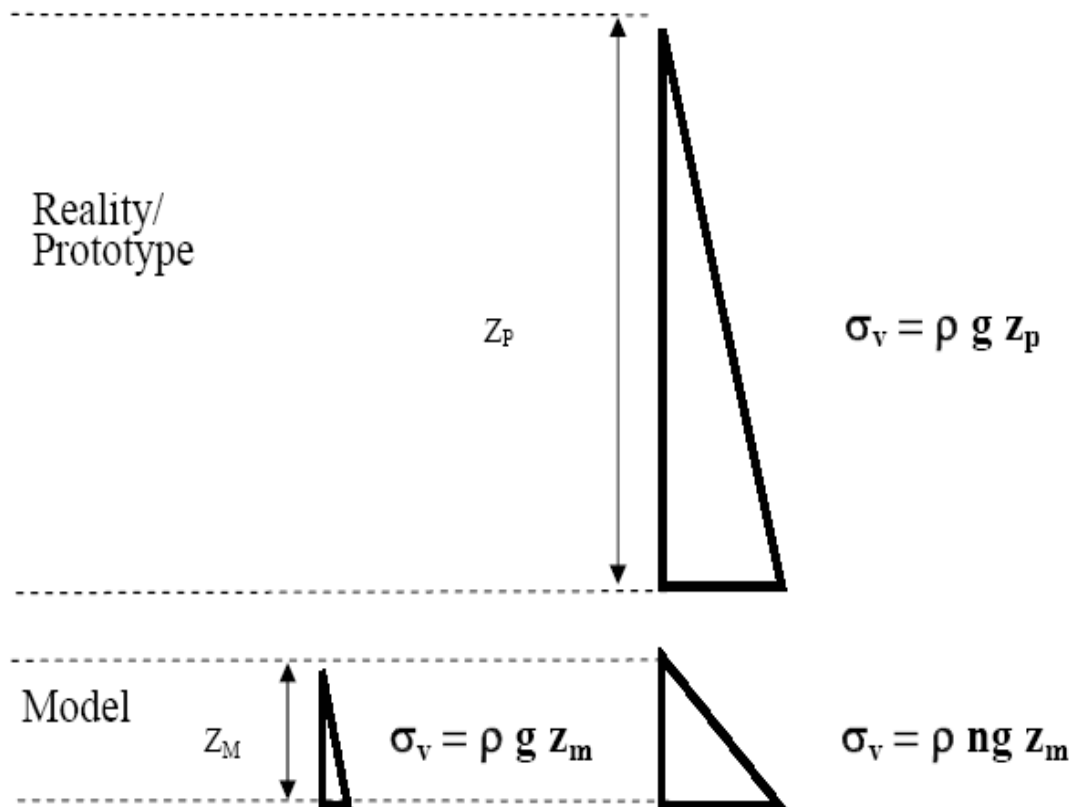
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες Ενότητες, προκειμένου να προσομοιωθούν οι πρωτότυπες κατασκευές σε μικρότερα μοντέλα, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένοι κανόνες κλίμακας. Σύμφωνα με τις αρχές της μοντελοποίησης σε φυγοκεντριστές, οι τάσεις που αναπτύσσονται στις πραγματικές γεωτεχνικές κατασκευές μπορούν να αναπαραχθούν σε μικρότερης κλίμακας μοντέλα $1/n$, αυξάνοντας το πεδίο της επιτάχυνσης της βαρύτητας σε ng όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6 (Laue, 1996).

Συγκεκριμένα, στο πάνω τμήμα του Σχήματος 5.6 παρουσιάζεται παράδειγμα της κατανομής των τάσεων πρωτότυπης κατασκευής ανάλογα με το βάθος για ύψος μοντέλου z_p για στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας $1g$, ενώ στο κάτω αριστερό τμήμα του ίδιου Σχήματος οι αντίστοιχες αναπτυσσόμενες τάσεις για ύψος z_M , ξανά χωρίς την εφαρμογή της τεχνολογίας του γεωτεχνικού φυγοκεντριστή. Στην συνέχεια στο δεξιό τμήμα του Σχήματος 5.6 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες αναπτυσσόμενες τάσεις σε γεωτεχνικό φυγοκεντριστή για ύψος $z_m = z_M$, οι οποίες όπως φαίνεται συμπίπτουν με αυτές της πρωτότυπης κατασκευής.

Στους Πίνακες 5.2 και 5.3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι νόμοι ομοιότητας που χρησιμοποιούνται σύμφωνα με τον Schofield (1980). Οι Πίνακες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργηθούν μοντέλα με γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά αντίστοιχα με αυτά των πρωτότυπων κατασκευών και όπως μπορεί να

παρατηρηθεί υπάρχει ποικιλία στους συντελεστές ανάλογα με το μέγεθος προς προσομοίωση.

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι γραμμικές διαστάσεις μοντελοποιούνται με συντελεστή $1/n$, η τροπή και η τάση με συντελεστή 1, η επιτάχυνση με συντελεστή n , η μάζα και ο όγκος με $1/n^3$, η δύναμη με $1/n^2$, το ειδικό βάρος με n , ενώ ο χρόνος για την στερεοποίηση με n^2 , ο χρόνος για δυναμικό με n και η συχνότητα επίσης με n .



Σχήμα 5.6. Κατακόρυφες τάσεις πρωτότυπης κατασκευής (πάνω). Κατακόρυφες τάσεις (σ_v) μοντέλου υπό κλίμακα για $1g$ (κάτω αριστερά) και για ng (κάτω δεξιά) (Laue, 1996).

Figure 5.6. Vertical stresses in a soil model (m) comparing prototype (p) (top) with $1g$ small scale model (bottom left) and centrifuge model (bottom right) (Laue, 1996).

Πίνακας 5.2. Νόμοι ομοιότητας σύμφωνα με τον Schofield (1980), ακολουθώντας με τη γενική σχέση $\sigma_v = \rho_m (ng)_m (z/n)_m = \rho_p g_p z_p$, όπου δείκτες m και p αναφέρονται στο μοντέλο και την πρωτότυπη κατασκευή αντίστοιχα.

Table 5.2. Scaling laws according to Schofield (1980), following the principle $\sigma_v = \rho_m (ng)_m (z/n)_m = \rho_p g_p z_p$, where m and p refer to the model and the prototype construction respectively.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Parameter	Unit	Scale (model/prototype)
Acceleration	m/s ²	n
Linear Dimention	m	1/n
Stress	kPa	1
Strain	-	1
Density	kg/m ³	1
Mass or Volume	kg ή m ³	1/n ³
Unit Weight	N/m ³	n
Force	N	1/n ²
Bending Moment	Nm	1/n ³
Bending Moment/Unit Width	Nm/m	1/n ²
Flexural Stiffness/Unit Width	Nm ² /m	1/n ³

Πίνακας 5.3. Νόμοι ομοιότητας σύμφωνα με Schofield (1980) για επιρροή χρόνου.
Table 5.3. Scaling laws according to Schofield (1980) for time effects.

Parameter	Unit	Scale (model/prototype)
Time: difusion	s	n ²
Time: dyanamic	s	n
Frequency	1/s	n

Προκειμένου να τίθενται σε εφαρμογή οι παραπάνω κανόνες, όλα τα υλικά που επιλέγονται για την κατασκευή των μοντέλων θα πρέπει να είναι υπό κλίμακα και η επιρροή των ορίων των κατασκευών στη συμπεριφορά τους θα πρέπει να ελαχιστοποιείται. Στα μοντέλα που εξετάστηκαν στην παρούσα έρευνα, τόσο η άμμος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των οπλισμένων πρανών όσο και οι στρώσεις των οπλισμών όφειλαν να τηρούν τους νόμους ομοιότητας.

Ειδικότερα, για την περίπτωση των κοκκωδών υλικών, λαμβάνοντας υπόψη ότι η γεωμετρική κλίμακα συνδέεται με συντελεστή n, ένας κόκκος με διάμετρο 2 mm, αντιστοιχεί

σε βράχο διαμέτρου 20 cm για n=100. Για τον λόγο αυτό, στις περισσότερες περιπτώσεις τα κοκκώδη εδάφη εξετάζονται χρησιμοποιώντας λεπτόκοκκα υλικά με μέγιστη διάμετρο κόκκου 0.3 mm.

Ωστόσο, κατά την μοντελοποίηση των γεωσυνθετικών παρουσιάζονται αρκετές δυσκολίες καθώς η προσομοίωση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με υλικά παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στις πρωτότυπες κατασκευές. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται υπό κλίμακα όπως για παράδειγμα τα γεωφάσματα ή γεωπλέγματα θα πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω απαιτήσεις: σωστή προσομοίωση της σχέσης (εφελκυστικών) τάσεων-τροπών καθώς και γεωμετρικές απαιτήσεις σύμφωνα με τους αντίστοιχους νόμους ομοιότητας. Η σχέση τάσεων-τροπών μπορεί να προσομοιωθεί εφαρμόζοντας τις Εξισώσεις 5.12, 5.13 και 5.14 (Viswanadham et al., 2006). Παρόμοιοι νόμοι ομοιότητας έχουν αναφερθεί στο παρελθόν από τον Zornberg et al. (1997).

$$(T_g)_m = \frac{(T_g)_p}{n} \quad (5.12)$$

$$(\varepsilon_g)_m = (\varepsilon_g)_p \quad (5.13)$$

$$(\phi_{sg})_m = (\phi_{sg})_p \quad (5.14)$$

όπου δείκτες p και m, αναφέρονται στην πρωτότυπη κατασκευή και στο μοντέλο αντίστοιχα; T_g , η εφελκυστική αντοχή των γεωσυνθετικών (kN/m); ε_g η τροπή των γεωσυνθετικών; ϕ_{sg} η γωνία τριβής μεταξύ του εδάφους και των γεωσυνθετικών; και τέλος n ο συντελεστής κλίμακας ή η στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας (g-level).

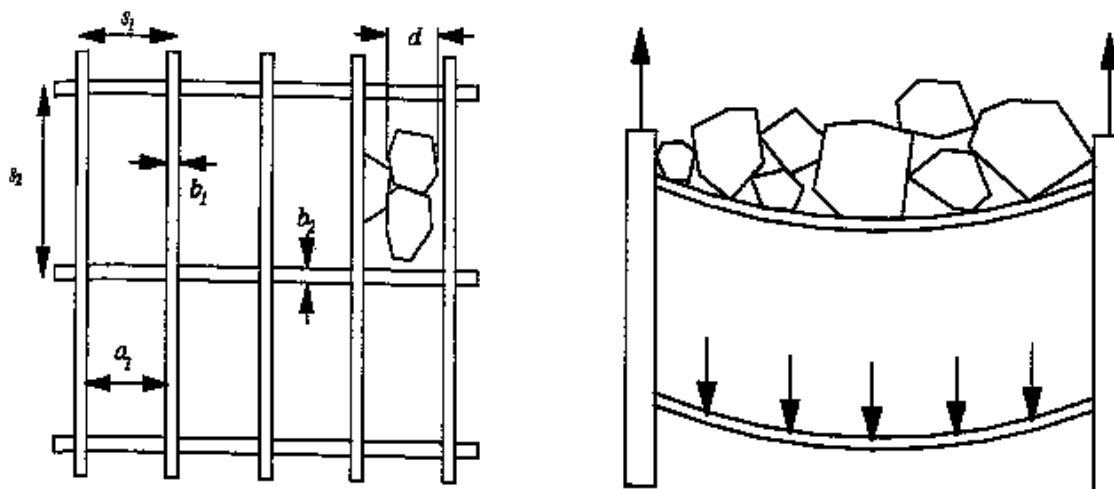
Οι Εξισώσεις 5.12 έως και 5.14 δείχνουν ότι για κλίμακα n, οι στρώσεις των οπλισμών που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των οπλισμένων πρανών θα πρέπει να έχουν 1/n φορές την αντίστοιχη εφελκυστική αντοχή των πρωτότυπων κατασκευών καθώς και παρόμοια γωνία τριβής μεταξύ του εδάφους και αυτών. Στον Πίνακα 5.4, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι νόμοι ομοιότητας για γεωσυνθετικά σύμφωνα με τους Viswandadham και Mahajan (2007).

Πίνακας 5.4. Νόμοι ομοιότητας γεωσυνθετικών (Viswandadham & Mahajan, 2007).
Table 5.4. Scaling laws for geosynthetics (Viswandadham & Mahajan, 2007).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Παράμετροι	Μονάδα	Κλίμακα (μοντέλο/πρωτότυπο)
Length	m	1/n
Tensile Strength	kN/m	1/n
Stiffness	kN/m	1/n
Stress-Strain	-	1
Shear Strength	-	1

Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται ο γεωμετρικός χαρακτηρισμός των γεωσυνθετικών σύμφωνα με την Springman et al. (1992). Συγκεκριμένα, για την διαμήκη συνιστώσα των γεωσυνθετικών χρησιμοποιείται το σύμβολο b_1 , για την πλευρική απόσταση s_1 , ενώ το άνοιγμα a_1 υπολογίζεται $a_1 = s_1 - 2b_1$. Τα σύμβολα b_2 , s_2 και a_2 χρησιμοποιούνται για τις αντίστοιχες πλευρικές διαστάσεις. Σύμφωνα με τους νόμους ομοιότητας, η αντοχή T ανά μονάδα μήκους θα πρέπει να μειωθεί κατά n , έτσι ώστε και να ικανοποιεί τους νόμους αυτούς.



Σχήμα 5.7. Γεωμετρικός χαρακτηρισμός οπλισμών (Springman et al 1992).

Figure 5.7. Geometrical characterization of reinforcement materials (Springman et al 1992).

Μεγάλη σημασία έχει και η γωνία τριβής μεταξύ εδάφους και οπλισμών. Συγκεκριμένα, ο δεσμός τριβής που θα αναπτυχθεί μεταξύ του εδάφους και των οπλισμών, εξαρτάται από το μέγεθος των διαμήκη ανοιγμάτων σε σχέση με τη διάμετρο των κόκκων του εδαφικού υλικού d . Ο λόγος s/d επηρεάζει σημαντικά τις σχετικές κινήσεις μεταξύ των οπλισμών και των κόκκων του εδάφους. Σύμφωνα με τους Springman et al, για $s/d < 5$, οι εδαφικοί κόκκοι

εγκλωβίζονται στα ανοίγματα των οπλισμών και έτσι αυτοί δρουν σαν γεωφάσματα ενώ για $s/d > 5$ δρουν ως γεωπλέγματα.

5.4 Συμπεράσματα Κεφαλαίου.

Η εφαρμογή της τεχνολογίας των γεωτεχνικών φυγοκεντριστών αποτελεί μια παγκοσμίως διαδεδομένη μέθοδο για την πειραματική προσομοίωση ακόμη και των πιο απαιτητικών μοντέλων, ωστόσο, η υλικοτεχνική υποδομή που απαιτείται για την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι αρκετά δαπανηρές και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις θα πρέπει να είναι ιδιαίτερες οργανωμένες με έμπειρο και εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό το οποίο να βρίσκεται σε άμεση επικοινωνία και συνεργασία με το ερευνητικό προσωπικό. Επίσης, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται και σε θέματα ασφαλείας καθώς θα πρέπει να τηρούνται αυστηρά συγκεκριμένοι κανόνες κυρίως όταν ο γεωτεχνικός φυγοκεντριστής βρίσκεται σε λειτουργία καθώς και κατά την έναρξη και παύση της περιστροφής του.

Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την πειραματική διερεύνηση των γεωτεχνικών κατασκευών σε φυγοκεντριστή εφαρμόζονται διάφορες μετρητικές μέθοδοι για την συλλογή πληροφοριών σχετικές με την απόκριση των κατασκευών κάτω από τις διάφορες συνθήκες φόρτισης. Οι μετρητικές μέθοδοι επιλέγονται ανάλογα με τον διαθέσιμο υλικοτεχνικό εξοπλισμό των εργαστηρίων, τις πληροφορίες που επιθυμούμε να συλλέξουμε καθώς επίσης και τις ειδικότερες κατασκευαστικές λεπτομέρειες των μοντέλων. Στο 6^ο Κεφάλαιο που ακολουθεί, περιγράφονται διάφορες μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται σε γεωτεχνικούς φυγοκεντριστές, καθώς επίσης και εκείνες που επιλέχθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας Έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

**Ανασκόπηση Μετρητικών Διατάξεων & Μετρητικές
Μέθοδοι Παρούσας Έρευνας**

6.1 Εισαγωγή στις μετρητικές διατάξεις και μεθόδους.

Κατά την πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς των γεωτεχνικών μοντέλων σε φυγοκεντριστές επιχειρείται να προσδιοριστούν οι μηχανισμοί αστοχίας των κατασκευών, οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις, τάσεις και μετακινήσεις, ενώ κάποιες φορές μελετώνται πιο εξειδικευμένα χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα η πίεση των πόρων του νερού, ο βαθμός κορεσμού του εδαφικού δείγματος και άλλα. Για τους σκοπούς αυτούς χρησιμοποιούνται διάφορες διαθέσιμες μετρητικές μέθοδοι καθώς και μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων ανάλογα με τα στοιχεία που επιδιώκουμε να μετρήσουμε.

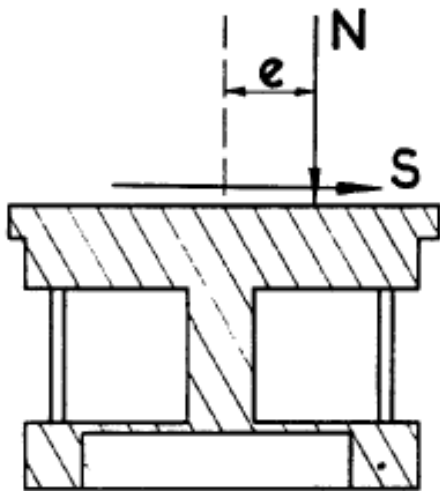
Εκτός από την επιλογή των κατάλληλων μετρητικών διατάξεων ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίδεται στον τρόπο που γίνεται η συλλογή των δεδομένων και η αποθήκευσή τους. Στο παρελθόν, λόγω έλλειψης χωρητικότητας στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, ήταν αρκετά δύσκολο να αποθηκευτούν στοιχεία κατά την περιστροφή των γεωτεχνικών φυγοκεντριστών και την διεξαγωγή των πειραμάτων, ωστόσο στις μέρες μας το πρόβλημα αυτό έχει λυθεί καθώς η χωρητικότητα των υπολογιστών είναι πλέον μεγάλη ενώ επίσης τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και σε κάποιο υπολογιστή ελέγχου εκτός του φυγοκεντριστή.

Επιπλέον, το μέγεθος και το βάρος των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να είναι μικρό και να μην επηρεάζει την συμπεριφορά των μοντέλων, ανάλογα και με την κλίμακα που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, καλώδια αισθητήρων με μεγάλο πάχος μπορεί να δράσουν στο έδαφος ως οπλισμός και να ενισχύσουν την συμπεριφορά του έναντι των φορτίσεων.

Σχετικά με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στις κατασκευές, αυτές μπορούν να μετρηθούν με δυναμοκυψέλες (load cells) όπως για παράδειγμα οι αισθητήρες HBM U2A (www.hbm.com, 2010) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε υψηλές στάθμες της επιτάχυνσης της βαρύτητας (g-level). Κατά την μέτρηση των τάσεων που αναπτύσσονται στο μοντέλο εγείρεται το ερώτημα εάν μπορούν πράγματι να μετρηθούν αυτές καθώς η τάση, αντίθετα με τις δυνάμεις και τις τροπές δεν αποτελεί μια φυσική οντότητα. Στο παρελθόν χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι αισθητήρες μέτρησης τάσεων όπως για παράδειγμα οι κυψέλες Stroud (1971) που κατασκευάστηκαν στο Cambridge University Engineering

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Department (CUED) προκειμένου να μετρηθεί το μέγεθος και η φορά διατμητικών, έκκεντρων και ορθών τάσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Μία άλλη προσέγγιση για την μέτρηση των εδαφικών τάσεων στο εσωτερικό των μοντέλων δόθηκε από τους Egan και Merrifield (1998), ενώ λίγο αργότερα οι Garnier et al. (1999) μελέτησαν την τοποθέτηση ενσωματωμένων κυψελών μέτρησης τάσης (embedded pressure cells). Μία ακόμη τεχνική εφαρμόστηκε από τους Paikowsky & Hajdul (1997) η διάταξη της οποίας φαίνεται στην Φωτογραφία 6.1 και εφαρμόστηκε στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETHZ από την Springman (Springman et al. 2002) και τον Laue (Laue, 2002).



Σχήμα 6.1. Τομή κυψέλης Stroud (Stroud, 1971).
Figure 6.1. Cross section through the Stroud cell (Stroud, 1971).



Φωτογραφία 6.1. Αισθητήρας πίεσης με λαβή (Laue, 2002).
Photograph 6.1. Pressure sensor with handle (Laue, 2002).

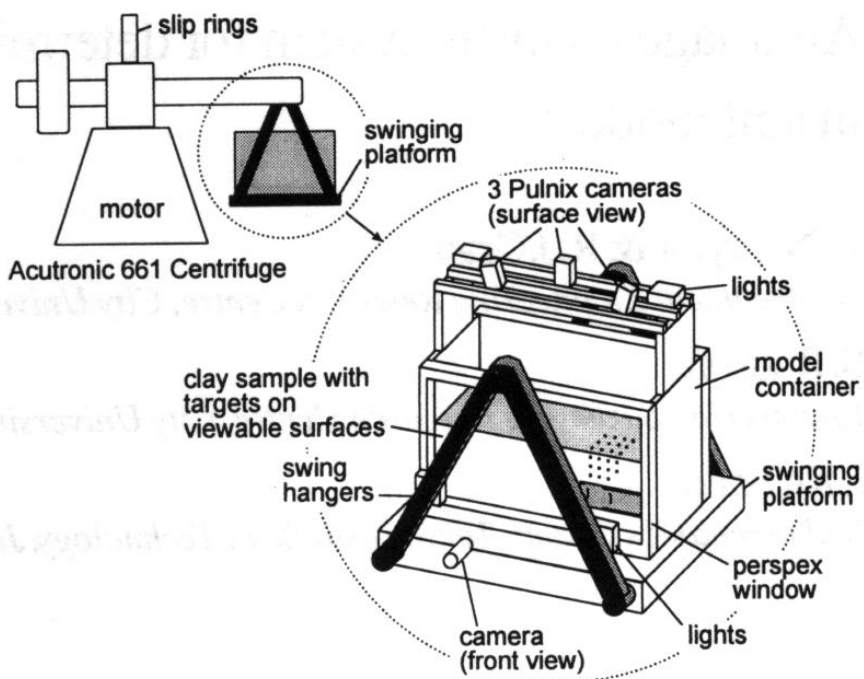
Μια κλασική μέθοδος μέτρησης γραμμικών τροπών στο εσωτερικό των μοντέλων, είναι η χρήση των LVDT (Linear Variable Differential Transformers). Τα LVDT τοποθετούνται συνήθως έξω από τα μοντέλα προκειμένου να πραγματοποιήσουν επιφανειακές μετρήσεις και η ακρίβειά τους εξαρτάται από το είδος των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται. Με την εισαγωγή των αισθητήρων λέιζερ είναι δυνατή η παρακολούθηση των ομοιωμάτων με αισθητήρες χωρίς να έρχονται σε επαφή με το μοντέλο. Ένα παράδειγμα τέτοιου αισθητήρα φαίνεται στην Φωτογραφία 6.2.



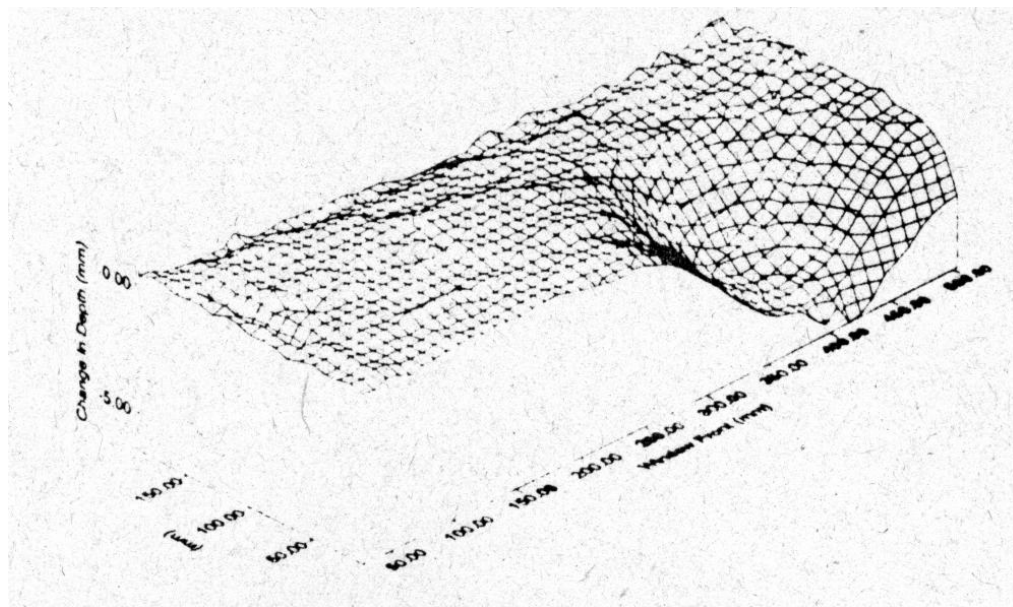
Φωτογραφία 6.2. Μέγεθος τυπικού αισθητήρα λέιζερ.
Photograph 6.2. Size of a typical laser transducer.

Επίσης, η διερεύνηση της επιφάνειας του εδάφους μπορεί επίσης να γίνει και με σύστημα τριών καμερών προκειμένου να υπάρχει καλύτερη εποπτεία της συμπεριφοράς του μοντέλου κάτω από τις εκάστοτε συνθήκες φόρτισης. Μια τέτοια μέθοδος έχει παρουσιαστεί από τους Taylor et al. (1998) και η διάταξή της φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Με την χρήση τριών καμερών δίνεται η δυνατότητα να δημιουργηθεί εικόνα διανυσμάτων επιφανειακών μετακινήσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3, όπου και παρουσιάζονται μετακινήσεις λόγω κατάρρευσης σήραγγας. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 6.3, τα αποτελέσματα είναι αρκετά παραστατικά και μπορούν να προκύψουν πολλές χρήσιμες πληροφορίες για διάφορες θέσεις στο πειραματικό μοντέλο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6



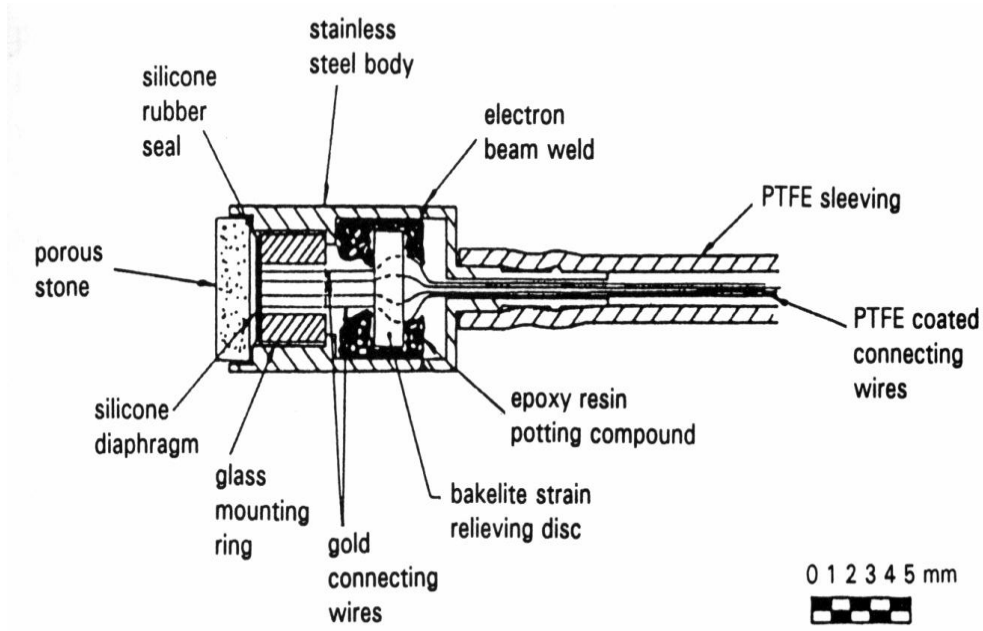
Σχήμα 6.2. Διάταξη καμερών για την μέτρηση επιφανειακών παραμορφώσεων (Taylor et al. 1998).
Figure 6.2. Arrangement of cameras for surface deformation measurement (Taylor et al. 1998).



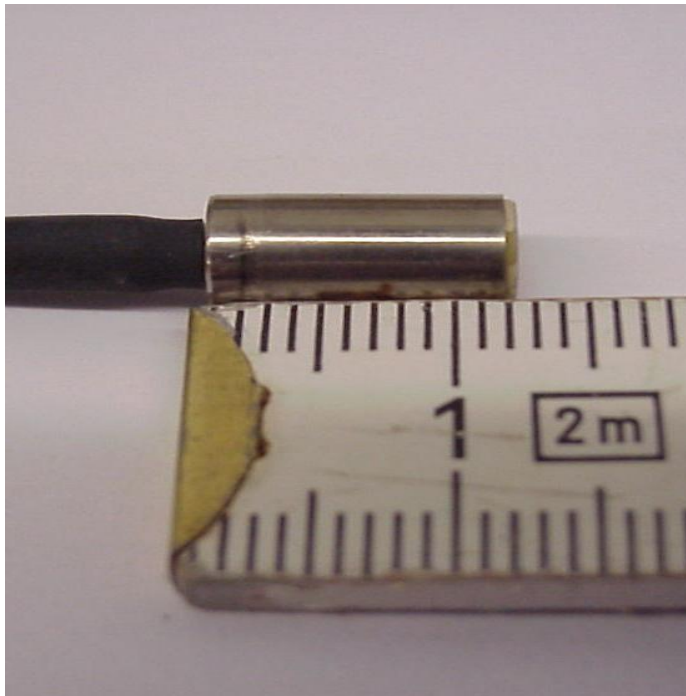
Σχήμα 6.3. Επιφανειακές μετακινήσεις λόγω κατάρρευσης σήραγγας (Taylor et al. 1998).
Figure 6.3. Surface movements caused by tunnel heading collapse (Taylor et al. 1998).

Για την μέτρηση της πίεσης των πόρων του νερού και του βαθμού κορεσμού, χρησιμοποιούνται ειδικοί αισθητήρες οι οποίοι και προσδιορίζουν τις διαφοροποιήσεις στις τιμές των στοιχείων αυτών. Συγκεκριμένα οι πιο διαδεδομένοι αισθητήρες μέτρησης πίεσης

πόρων νερού είναι οι DRUCK PDCR 81 και η διάταξή τους φαίνεται στο Σχήμα 6.4, ενώ το μέγεθός ενός τυπικού αισθητήρα φαίνεται στην Φωτογραφία 6.3.



Σχήμα 6.4. Σχήμα αισθητήρα PDCR81 (Taylor, 1995).
Figure 6.4. Sketch of PDCR81 Transducer (Taylor, 1995)



Φωτογραφία 6.3. Χαρακτηριστικό μέγεθος αισθητήρα PDCR81 (Taylor, 1995).
Photograph 6.3. Characteristic size of PDCR81 transducer (Taylor, 1995).

6.2 Μετρητικές μέθοδοι παρούσας έρευνας.

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι για την καταγραφή των τροπών των μοντέλων και τον προσδιορισμό των μηχανισμών αστοχίας. Για την πρώτη μέθοδο ενσωματώθηκαν *αισθητήρες οπτικών ινών* στην επιφάνεια των στρώσεων οπλισμού των πρανών σε διάφορες θέσεις, προκειμένου να καταγραφούν οι αναπτυσσόμενες γραμμικές τροπές κατά την αύξηση της επιτάχυνσης. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETHZ και η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται αναλυτικά στο 7^ο Κεφάλαιο που ακολουθεί. Η δεύτερη μέθοδος που εφαρμόστηκε ονομάζεται *ανάλυση Particle Image Velocimetry (PIV)* και αποτελεί οπτική μέθοδο σύμφωνα με την οποία χρησιμοποιούνται ψηφιακές φωτογραφίες για τον προσδιορισμό των μετακινήσεων, οι οποίες και λαμβάνονται κατά την διάρκεια των πειραμάτων σε διάφορες χρονικές στιγμές και φάσεις φορτίσεων. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε το λογισμικό GeoPIV το οποίο έχει δημιουργηθεί από τους White et al. (2001) και επιτρέπει ακρίβεια στις μετρήσεις της τάξης του 1/25 pixel. Οι διατμητικές τροπές προκύπτουν από αριθμητική παραγωγή των μετατοπίσεων. Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφεται η χρήση των οπτικών ινών καθώς και η μέθοδος PIV.

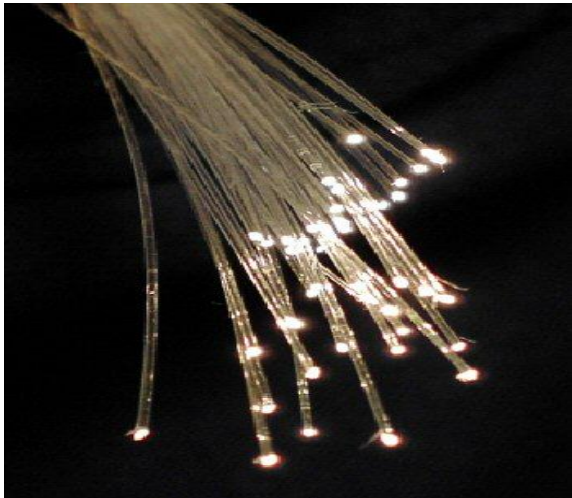
6.3 Υπολογισμός «γραμμικών» τροπών με τη χρήση αισθητήρων οπτικών ινών.

Η ενόργανη παρακολούθηση της Δομικής Ακεραιότητας των Τεχνικών Έργων (Instrumented Structural Health Monitoring) είναι ένας ταχύτατα αναπτυσσόμενος επιστημονικός τομέας και εφαρμόζεται σε κατασκευές με οικονομική σπουδαιότητα, ιστορική σημασία και μεγάλη επικινδυνότητα. Μία από τις σημαντικότερες μεθόδους ενόργανης παρακολούθησης είναι η εφαρμογή αισθητήρων οπτικών ινών FBG, Fiber Bragg Grating Sensors.

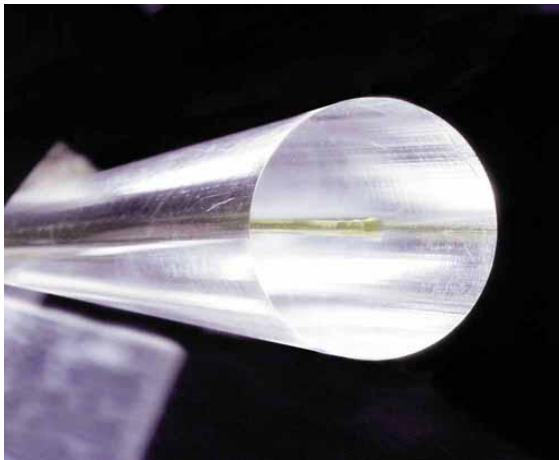
Ειδικότερα, την τελευταία δεκαετία παρατηρείται η σταδιακή αντικατάσταση των συμβατικών μεθόδων και οργάνων μέτρησης και παρατήρησης, με νέα συστήματα όπως αυτά των αισθητήρων οπτικών ινών. Οι αισθητήρες τύπου FBG (Guoyongetal. 2001), ικανοποιούν την συνθήκη του Bragg (1913) και συνδυάζουν ακρίβεια (μερικών με – δηλαδή

microstrain), εξαιρετική αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις, πολυπλεξία και σχετικά χαμηλό κόστος. Σημαντικό πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα, λόγω του μικρού μεγέθους τους, να τοποθετούνται σε διάφορες θέσεις σε οποιοδήποτε δόμημα και ειδικότερα σε κατασκευές μη συμβατικές καθώς και σε πειραματικά μοντέλα μικρής ή και μεγαλύτερης κλίμακας, προκειμένου να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την εντατική τους κατάσταση.

Στην Φωτογραφία 6.4 (Wikipedia, 2004) παρουσιάζεται μια δεσμίδα οπτικών ινών ενώ στην Φωτογραφία 6.5 η τομή ενός μεμονωμένου αισθητήρα. Επιπλέον, στο Σχήμα 6.5 (Wikipedia, 2009) παρουσιάζεται η δομή μιας τυπικής μονότροπης (single mode) ίνας και στον Πίνακα 6.1 αναλύονται τα επιμέρους τμήματα της ίνας.

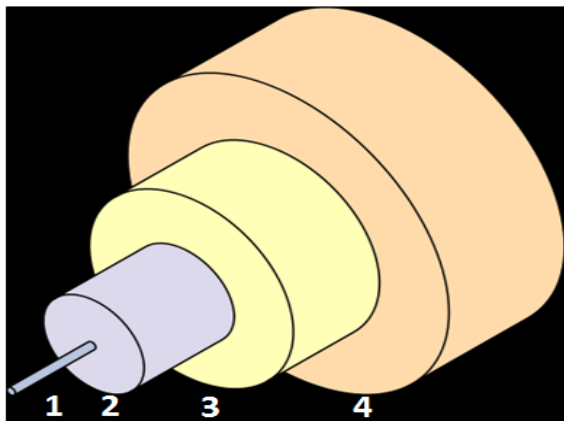


Φωτογραφία 6.4. Δεσμίδα οπτικών ινών (Wikipedia, 2004).
Photograph 6.4. A bundle of optical fibers (Wikipedia, 2004).



Φωτογραφία 6.5. Τομή αισθητήρα οπτικών ινών.
Photograph 6.5. Cross section of optical fibre sensor.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

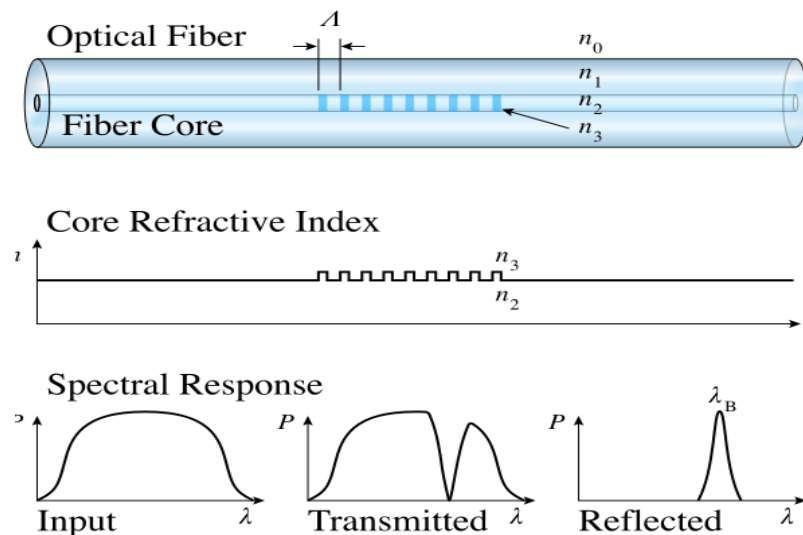


Σχήμα 6.5. Η δομή μιας τυπικής ίνας απλής πλέξης (Wikipedia, 2009).
Figure 6.5. The structure of a typical single-mode fiber (Wikipedia, 2009).

Πίνακας 6.1. Διαστάσεις επιμέρους τμημάτων μιας τυπικής ίνας απλής πλέξης
Table 6.1. Diameter of subsections of a typical single mode fiber.

No:	1	2	3	4
Subsection:	Core	Cover	Bumper	Jacket
Diameter (μm):	8	125	250	400

Στην συνέχεια παρουσιάζεται και περιγράφεται στο Σχήμα 6.6 το διάγραμμα της λειτουργίας του νόμου του Bragg (Wikipedia, 2008). Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6.6 φαίνεται η δομή μιας μονότροπης οπτικής ίνας και ο πυρήνας της, στην συνέχεια ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα κατά μήκος αυτού και τέλος η ανταπόκριση των φασμάτων.



Σχήμα 6.6. Η λειτουργία της συνθήκης Bragg σε οπτική ίνα (Wikipedia, 2008).
Figure 6.6. Bragg's law, applied on an optical fibre sensor (Wikipedia, 2008).
Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των οπτικών αισθητήρων είναι τα παρακάτω:

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

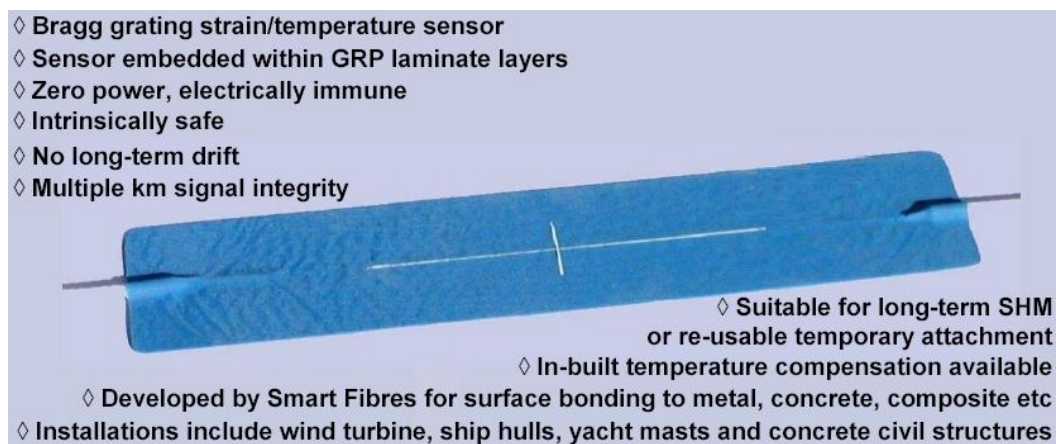
- Μεγάλη ελαστικότητα των αισθητήρων που επιτρέπει την κάλυψη και των πιο ασυνήθιστων κατασκευών
- Μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας
- Δυνατότητα τοποθέτησης σε σεισμογενείς περιοχές
- Φιλικό προς το περιβάλλον
- Δυνατότητα λήψης μετρήσεων, σε σημεία και διατάξεις που καθίσταται δύσκολο έως και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

6.3.1 Λειτουργία και τύποι αισθητήρων

Ο αισθητήρας Bragg είναι ένα ειδικά επεξεργασμένο τμήμα οπτικής ίνας (<1 cm) το οποίο έχει την ιδιότητα σε εισερχόμενη ακτινοβολία ευρέος φάσματος να λειτουργεί σαν οπτικό φίλτρο, αντανακλώντας μια ελάχιστη ποσότητα του ευρυζωνικού σήματος επιτρέποντας παράλληλα στο υπόλοιπο φως να συνεχίσει την πορεία του μέσα στην ίνα. Αυτή η τροποποιημένη περιοχή είναι ευαίσθητη στις τάσεις εφελκυσμού και θλίψης και στις μεταβολές θερμοκρασίας. Ο αισθητήρας τοποθετείται στις επιθυμητές θέσεις του δομικού υλικού και με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού δίνεται η δυνατότητα να καταγραφεί η μεταβολή του ανακλώμενου μήκους κύματος σε τακτά χρονικά διαστήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να μετρηθούν τροπές, μετακινήσεις και μεταβολές της θερμοκρασίας. Στις Φωτογραφίες 6.6 έως και 6.8 (FOS&S, 2009) παρουσιάζονται ορισμένοι από τους αισθητήρες αυτούς.



Φωτογραφία 6.6. Αισθητήρας μέτρησης τροπών και θερμοκρασιακής μεταβολής (FOS&S 2009).
Photograph 6.6. Strain and temperature measurement sensor (FOS&S, 2009).



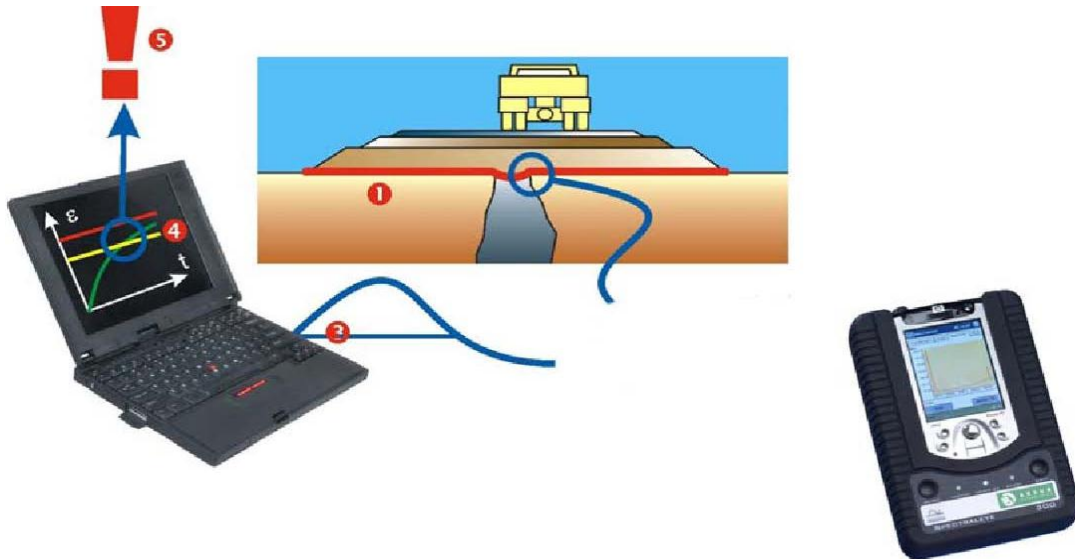
Φωτογραφία 6.7. Ενσωματωμένος αισθητήρας μέτρησης τροπών (FOS&S, 2009).
Photograph 6.7. Embedded strain measurement sensor (FOS&S, 2009).



Φωτογραφία 6.8. Προσαρτήσιμος αισθητήρας μέτρησης τροπών, MS-03 (FOS&S, 2009).
Photograph 6.8. Mountable strain measurement sensor MS-03 (FOS&S, 2009).

Ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε κατασκευής ή του πειραματικού μοντέλου, επιλέγεται και ο κατάλληλος τύπος αισθητήρα και εκτιμάται ο βέλτιστος τρόπος ενσωμάτωσής του σε αυτά καθώς και ο τρόπος σύνδεσης των αισθητήρων μεταξύ τους, ανάλογα με το πλήθος των μετρήσεων που απαιτείται να ληφθούν και τον αριθμό των καναλιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στην συνέχεια, συνδέονται ο αισθητήρες με έναν καταγραφέα δεδομένων και τα αποτελέσματα των μετρήσεων είτε διατηρούνται και αποθηκεύονται σε αυτόν, είτε

μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (PC ή Laptop). Η σύνδεση αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.7 , όπου μπορεί να παρατηρηθεί: στο αριστερό τμήμα ο ηλεκτρονικός υπολογιστής που χρησιμοποιείται προκειμένου να συγκεντρωθούν οι μετρήσεις, στο μεσαίο τμήμα το έργο που επιθυμούμε να παρακολουθηθεί και τέλος στο δεξιό τμήμα ένας φορητός καταγραφέας δεδομένων.



Σχήμα 6.7. Σύνδεση έργου με ηλεκτρονικό υπολογιστή και καταγραφέα δεδομένων.
Figure 6.7. Connection of project under investigation with computer data logger.

Υπάρχουν διάφοροι καταγραφείς δεδομένων (Data Loggers) και οι συχνότητες στις οποίες λειτουργούν ποικίλουν από υψηλές, έως και 1 Hz, ενώ οι διαστάσεις και το βάρος τους μπορεί να είναι από μεγάλο έως και μικρό. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να συλλεχθούν οι μετρήσεις μέσω ενσύρματης ή ασύρματης τεχνολογίας. Στις Φωτογραφίες 6.9 και 6.10 παρουσιάζονται δύο διαφορετικοί καταγραφείς δεδομένων. Ειδικότερα, στην Φωτογραφία 6.9, παρουσιάζεται καταγραφέας δεδομένων με ασύρματη τεχνολογία, ενώ στην Φωτογραφία 6.10 παρουσιάζεται αυτοδύναμο σύστημα ενσύρματης τεχνολογίας με δυνατότητα σύνδεσης με πολλαπλούς αισθητήρες. Σχετικά με την σύνδεση των αισθητήρων υπάρχει η δυνατότητα να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ειδικότερες ανάγκες κάθε κατασκευής και το πλήθος των διαθέσιμων εισόδων από κανάλια στον καταγραφέα δεδομένων. Έτσι, σε περίπτωση που υπάρχει καταγραφέας με πολλές υποδοχές για αισθητήρες οπτικών ινών, τότε αυτοί συνδέονται παράλληλα σε κάθε μία υποδοχή. Ωστόσο, ακόμα και με μία μόνο υποδοχή για έναν αισθητήρα υπάρχει η δυνατότητα να ληφθούν παραπάνω μετρήσεις, συνδέοντας τους αισθητήρες στην σειρά. Η

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

συνένωση των αισθητήρων στην σειρά θα πρέπει να γίνεται με ειδικό εξοπλισμό και ιδιαίτερη προσοχή, έτσι ώστε να αποφεύγονται πιθανές αστοχίες αυτής κατά την διάρκεια φόρτισης των μοντέλων και των κατασκευών. Τέλος, μπορεί να πραγματοποιηθεί συνδυασμός των δύο τύπων συνδέσεων σε περίπτωση που επιθυμείται να χρησιμοποιηθεί μεγάλος αριθμός αισθητήρων. Ωστόσο, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην περίπτωση κατασκευής πειραματικών μοντέλων υπό κλίμακα, έτσι ώστε να μην τοποθετείται υπερβολικός αριθμός αισθητήρων, καθώς υπάρχει η πιθανότητα οι αισθητήρες να λειτουργήσουν ως υλικό ενίσχυσης και να αλλοιωθεί η συμπεριφορά της υπό μελέτη κατασκευής.



Φωτογραφία 6.9. Ασύρματη τεχνολογία για μεταφορά δεδομένων σε μεγάλη εμβέλεια.
Photograph 6.8. Wireless technology for long range data communication.



Φωτογραφία 6.10. Αυτοδύναμο σύστημα μέτρησης με πολλαπλούς αισθητήρες.
Photograph 6.10. Stand-alone, multi-sensor measurement system.

6.3.2 Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών σε τεχνικά έργα.

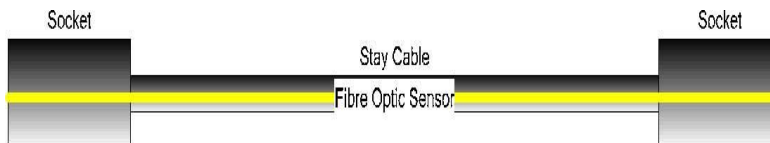
Ποικίλα είναι τα τεχνικά έργα στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία των οπτικών ινών, τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό. Στην παρούσα Ενότητα παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα από τα έργα αυτά και όπως μπορεί να παρατηρηθεί καλύπτουν ευρύ φάσμα στον τομέα των κατασκευών, ενώ επίσης οι επιμέρους τεχνολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί για την ενσωμάτωση των αισθητήρων δείχνουν την ευελιξία στις εφαρμογές των αισθητήρων ακόμα και σε δύσκολες περιπτώσεις.

Ενοργάνωση της Γέφυρας Stonecutters στο Hong Kong (2006-2008):

Πρόκειται για καλωδιωτή γέφυρα μήκους περίπου 1.5 km, με καθαρό άνοιγμα 1 km και αποτελεί το βασικό τμήμα της διαδρομής μεταξύ των περιοχών Tsing Yi και Cheung Sha Wan. Βασικός στόχος της τοποθέτησης αισθητήρων οπτικών ινών ήταν η παρακολούθηση της θερμοκρασίας και της τροπής στο εσωτερικό των καλωδίων της γέφυρας. Στην Φωτογραφία 6.11 παρουσιάζεται η εν λόγω γέφυρα, στα Σχήματα 6.8 και 6.9 η θέση των αισθητήρων οπτικών ινών ενώ στις Φωτογραφίες 6.12 η τοποθέτηση αυτών στο εσωτερικό των καλωδίων.

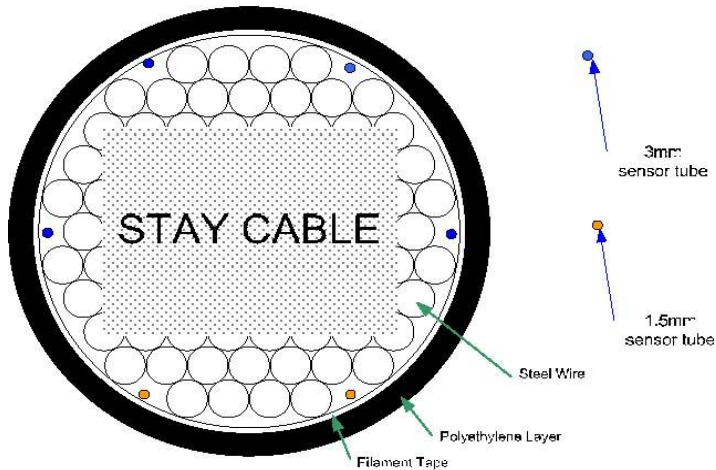


Φωτογραφία 6.11. Καλωδιωτή γέφυρα Stonecutters στο Hong Kong.
Photograph 6.11. Stonecutters cable bridge in Hong Kong.



Σχήμα 6.8. Αισθητήρας οπτικής ίνας στο εσωτερικό του καλωδίου.
Figure 6.8. Optical fibre sensor inside the stay cable.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6



Σχήμα 6.9. Θέση Αισθητήρα οπτικών ινών στο εσωτερικό του καλωδίου.
Figure 6.9: Location Fibre Optic Sensors within the Stay Cable.



Φωτογραφία 6.12. Τοποθέτηση αισθητήρων οπτικών ινών στο εσωτερικό των καλωδίων.
Figure 6.12. Placement of optical fibre sensors inside the stay cables.

Παρακολούθηση τροπής στους ελαστικούς προφυλακτήρες (port fenders) του λιμανιού Rotterdam Europort (2006-2007)

Για την παρακολούθηση των τροπών στους ελαστικούς προφυλακτήρες του λιμανιού Rotterdam Europort, τοποθετήθηκαν αισθητήρες οπτικών ινών σε 24 από αυτούς και

εγκαταστάθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης σε βάθος 10 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι θερμοκρασίες στην περιοχή αυτή ξεκινούσαν από 0⁰ C και έφταναν τους 50⁰ C ενώ το εύρος των τροπών ήταν της τάξης των 1000 με. Κάθε ελαστικός προφυλακτήρας είχε 2 κυλίνδρους στους οποίους και τοποθετήθηκαν από 4 αισθητήρες, 106 δηλαδή στο σύνολο προσαρτησιμοι (mountable) αισθητήρες. Στην Φωτογραφία 6.13, παρουσιάζεται ο κρηπιδότοιχος του λιμανιού με τους ελαστικούς προφυλακτήρες και οι θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες οπτικών ινών. Για την καταγραφή των μεταβολών του μήκους κύματος των οπτικών ινών, χρησιμοποιήθηκε καταγραφέας δεδομένων με 32 κανάλια, λόγω της πληθώρας των ταυτόχρονων μετρήσεων που ήταν απαραίτητο να ληφθούν.



Φωτογραφία 6.13. Αισθητήρες οπτικών ινών προσαρτημένες σε 24 ελαστικούς προφυλακτήρες.
Figure 6.13. Strain sensors mounded on a series of 24 fenders.

Μέτρηση μετακινήσεων στην σήραγγα Hsueh Wu (2005).

Πρόκειται για σήραγγα που βρίσκεται στο χωριό Fu Hsing στην Ταϊβάν που κατασκευάστηκε το 1994 και έχει μήκος 375 m, με 50 m εκτός του βουνού και 350 m εντός. Στη εν λόγω κατασκευή, το βάρος του βουνού ωθούσε την σήραγγα προς τα κάτω όπως φαίνεται στην Φωτογραφία 6.14. Επιπλέον, τα τμήματα της σήραγγας εκτός και εντός του βουνού είχαν διαφορετική κίνηση και δημιουργήθηκαν διάφορα προβλήματα. Η χειρότερη ζημιά προκλήθηκε από βαριά βροχόπτωση λόγω τυφώνα τον Αύγουστο του 2004, όπως φαίνεται στην Φωτογραφία 6.15. Για την παρακολούθηση των μετακινήσεων,

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

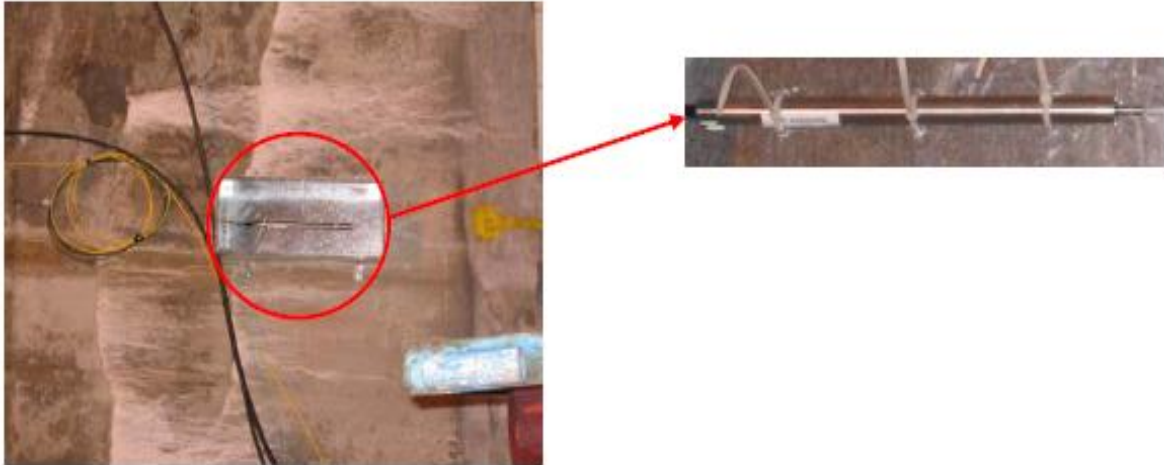
τοποθετήθηκαν 11 αισθητήρες οπτικών ινών στον τοίχο της σήραγγας και αγκυρώθηκαν όπως φαίνεται στην Φωτογραφία 6.16.



Φωτογραφία 6.14. Σήραγγα Hsueh Wu.
Photograph 6.14. Hsueh Wu tunnel.



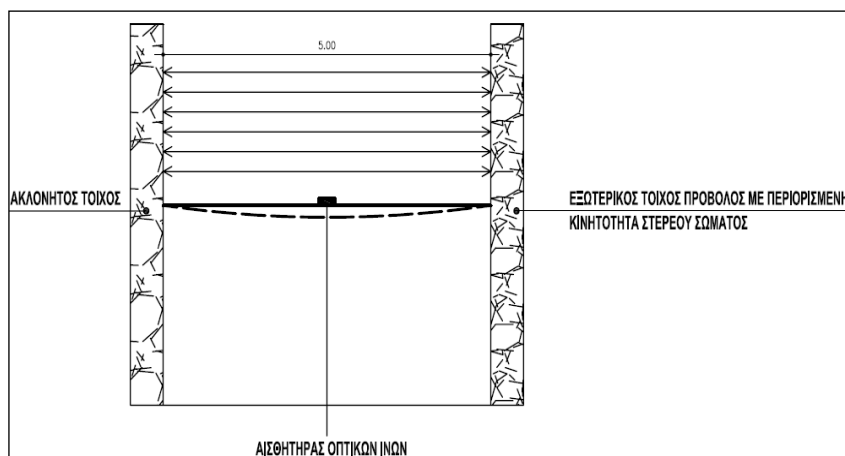
Φωτογραφία 6.15. Ζημιά στην σήραγγα Hsueh Wu.
Photograph 6.15. Damage in Hsueh Wu tunnel.



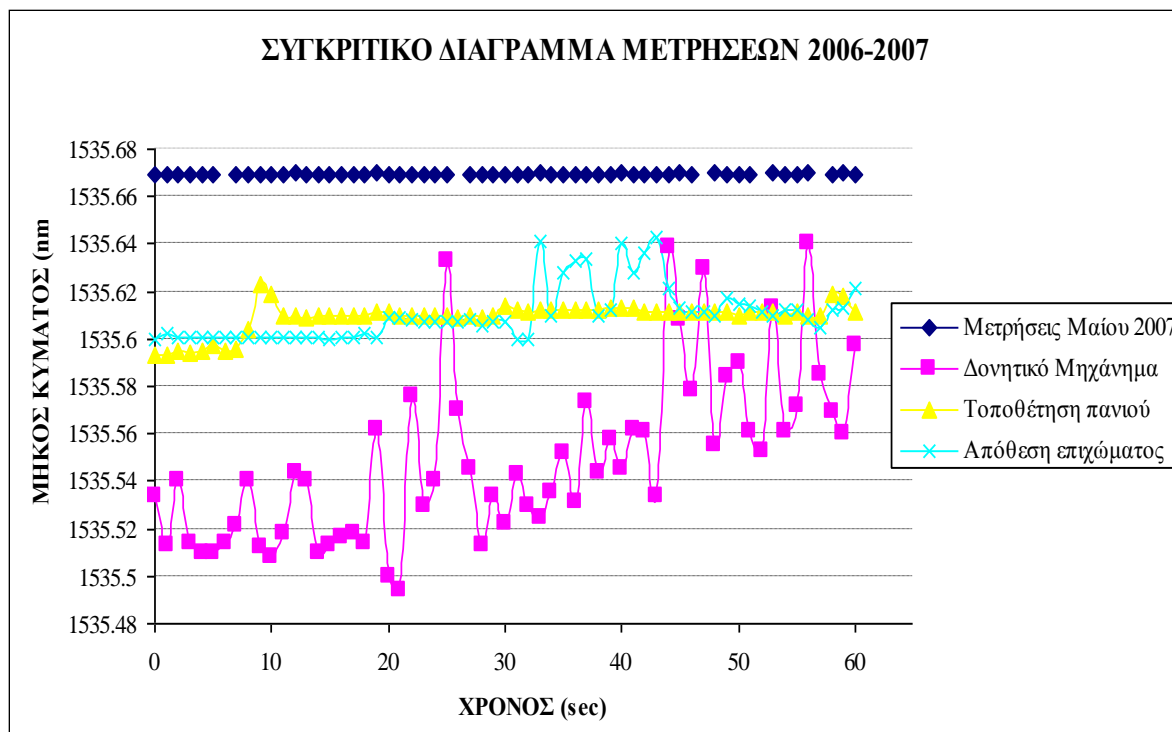
Φωτογραφία 6.16. Εγκατεστημένος αισθητήρας μετακίνησης.
Photograph 6.16. Installed displacement sensor.

Ενοργάνωση Επίχωσης στην περιοχή του Αριφορείου εντός των τειχών της Ακροπόλεως (2007)

Συγκεκριμένα, στην περιοχή του Αριφορείου εντός των τειχών της Ακροπόλεως Αθηνών έχει πραγματοποιηθεί επίχωση με την μέθοδο της οπλισμένης γης και τοποθετήθηκε αισθητήρας οπτικής ίνας τύπου FBG, μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων της οπλισμένης επίχωσης. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε λωρίδα ανθρακούφασματος και επί της λωρίδας αυτής και περί το μέσον της επικολλήθηκε αισθητήρας Bragg Grating. Η συσκευασία του αισθητήρα ήταν της τυποποιημένης μορφής Smartpatch. Στο Σχήμα 6.10 παρουσιάζεται η εφαρμογή αυτή, ενώ στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν (CRD, 2007).



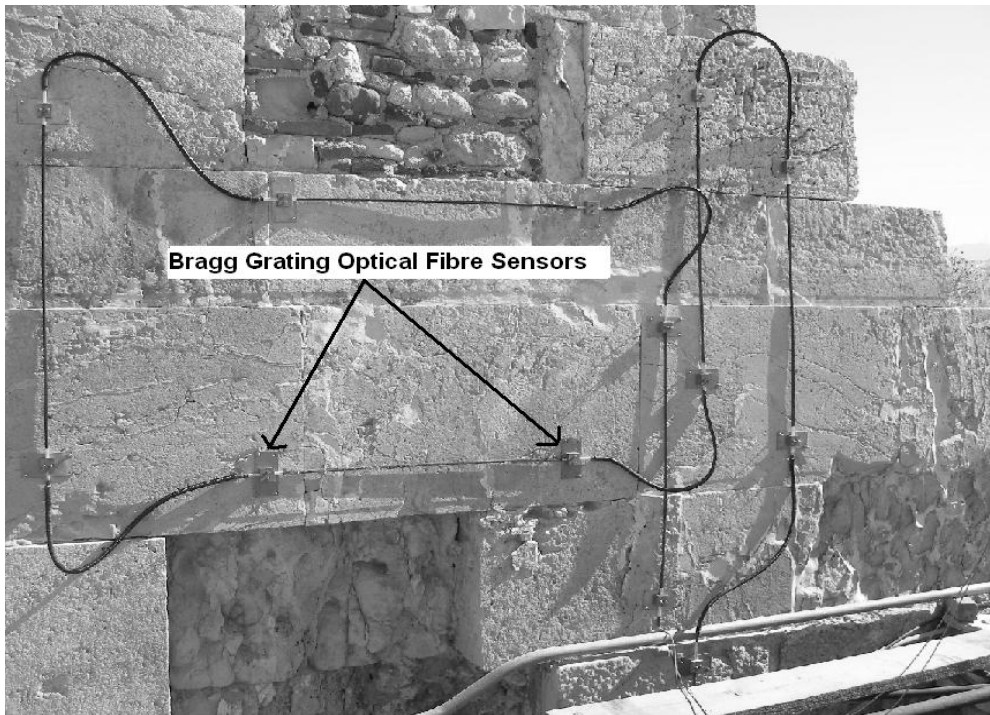
Σχήμα 6.10. Οπλισμένο επίχωμα Αριφορίου Ακροπόλεως με ενσωματωμένη οπτική ίνα.
Figure 6.10. Reinforced embankment of Ariforio at Acropolis with integrated optical fibre sensor.



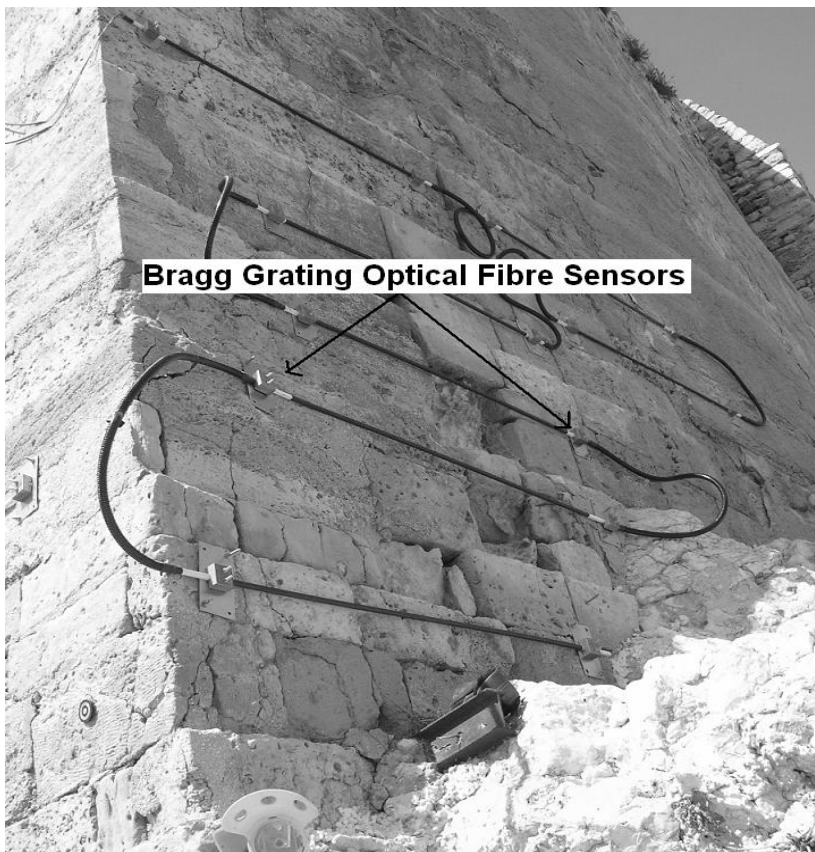
Σχήμα 6.11. Μεταβολή μήκους κύματος αισθητήρα οπτικής ίνας (CRD, 2007).
 Figure 6.11. Wavelength change of optical fibre sensor (CRD, 2007).

Ενοργάνωση βορείου και ανατολικού τείχους της Ακροπόλεως (2007).

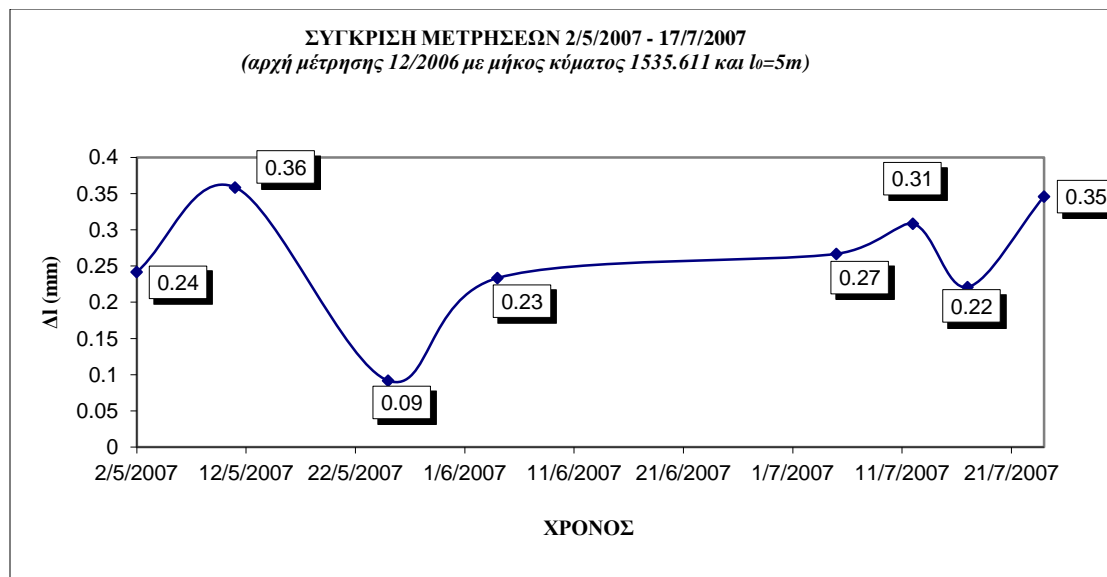
Επιπλέον, στο βόρειο και το ανατολικό τείχος της Ακροπόλεως τοποθετήθηκαν εμπορικού τύπου οπτικοί αισθητήρες BraggGratings οι οποίοι είχαν ενσωματωθεί σε ράβδους από σύνθετα υλικά (Smartrods®), της εταιρίας SmartFibers. Στις Φωτογραφίες 6.17 και 6.18 παρουσιάζεται η εφαρμογή αυτή. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ενόργανη παρακολούθηση είναι ικανοποιητικά και δείχνουν τις μετακινήσεις των τειχών ενώ λαμβάνουν υπόψη και την επιρροή της θερμοκρασίας στους αισθητήρες καθώς η περιοχή που λαμβάνονται οι μετρήσεις είναι εκτεθειμένη στον ήλιο κατά το μεγαλύτερο μέρος του έτους. Στο Σχήμα 6.12 (CRD, 2007), παρουσιάζονται κάποια από τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μετρητικής διάταξης ήταν ότι εύκολα μπορούσε ο μελετητής να λαμβάνει μετρήσεις ανά τακτά χρονικά διαστήματα και να επεξεργάζεται τα αποτελέσματα επιτόπου.



Φωτογραφία 6.17 Ενοργάνωση Βορείου Τείχους Ακροπόλεως.
Photograph 6.17. Instrumentation on North Wall of Acropolis.



Φωτογραφία 6.18. Ενοργάνωση Βορείου Τείχους Ακροπόλεως.
Photograph 6.18. Instrumentation on North Wall of Acropolis.



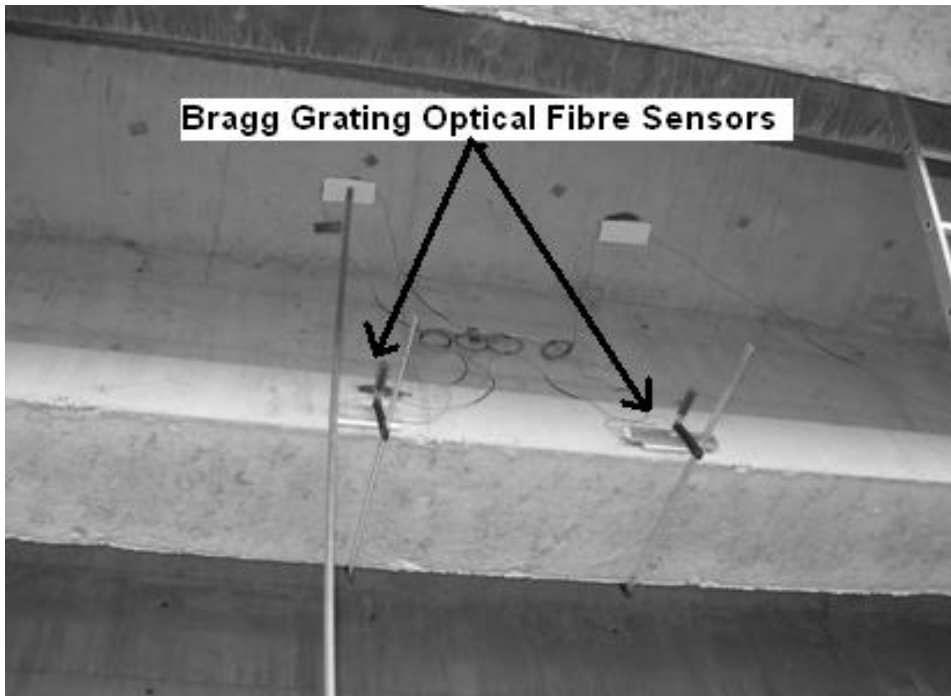
Σχήμα 6.12. Αποτελέσματα μετρήσεων στο βόρειο τείχος της Ακροπόλεως (CRD, 2007).
Figure 6.12. Results from measurements on the north wall of Acropolis (CRD, 2007).

Ενοργάνωση γεφυρών Γ9 και Τ3 Εγνατίας Οδού.

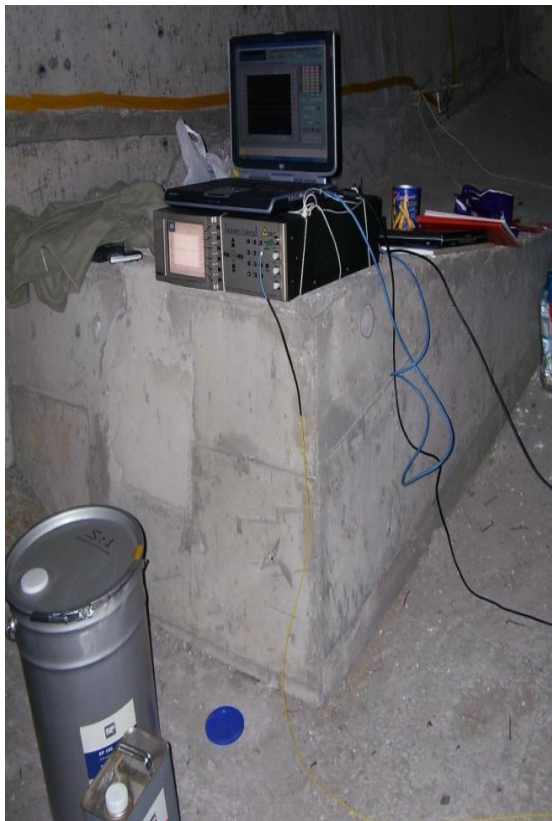
Τέλος, αισθητήρες οπτικών ινών επικολλήθηκαν στις γέφυρες Γ9 και Τ3 της Εγνατίας Οδού όπου και ακολουθήθηκε αντίστοιχη μέθοδος με αυτή της Ακροπόλεως. Στην Φωτογραφία 6.19 φαίνεται η γέφυρα Γ9, ενώ στις Φωτογραφίες 6.20 και 6.21, παρουσιάζεται ενδεικτικά η ενοργάνωση των γεφυρών. Στο Σχήμα 6.13 (CRD, 2007), παρουσιάζεται μια μέτρηση με έναν από τους αισθητήρες οπτικών ινών.



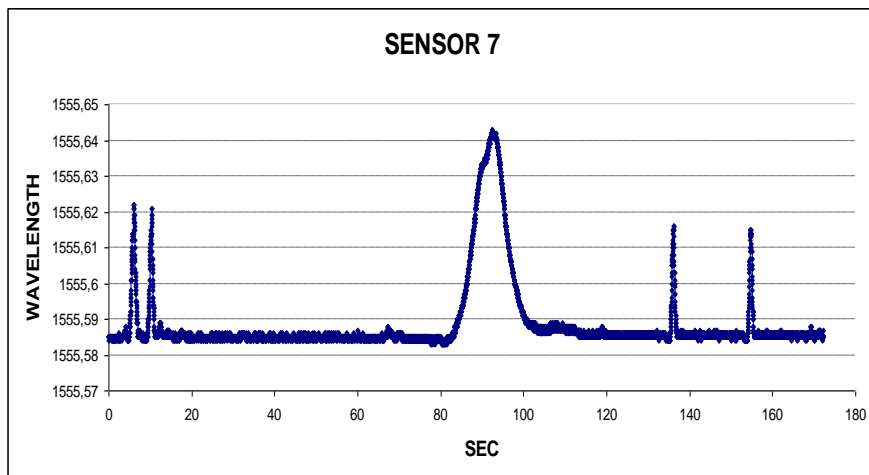
Φωτογραφία 6.19. Γέφυρα Γ9 Εγνατίας Οδού.
Photograph 6.19. G9 Bridge of Egnatia Highway.



Φωτογραφία 6.20. Ενοργάνωση γεφυρών Γ9 και Τ3 της Εγνατίας Οδού.
 Photograph 6.20. Instrumentation on G9 and T3 of Egnatia Highway.



Φωτογραφία 6.21. Ενοργάνωση και παρακολούθηση γέφυρας Γ9 Εγνατίας Οδού.
 Photograph 6.21. Instrumentation and monitoring on G9 bridge on Egnatia Highway.



Σχήμα. 6.13. Μεταβολή μήκους κύματος μέσω του αισθητήρα οπτικών ινών (CRD, 2007).
Figure 6.13. Wavelength change via optical fibre sensor (CRD, 2007).

6.3.3 Εφαρμογή αισθητήρων οπτικών ινών σε οπλισμένα πρανή κατά την φόρτισή τους σε γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, ενσωματώθηκαν αισθητήρες τύπου FGB στην επιφάνεια των στρώσεων οπλισμού των πρανών προκειμένου να καταγραφούν οι αναπτυσσόμενες τροπές κατά την φόρτιση των μοντέλων στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETHZ. Η εν λόγω μετρητική διάταξη χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε γεωτεχνικό φυγοκεντριστή και δημιουργήθηκε από την αρχή για τις ανάγκες της έρευνας. Ο τρόπος συγκόλλησης των αισθητήρων καθώς και η σύνθεση της πειραματικής διάταξης και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την καταγραφή και επεξεργασία των μετρήσεων παρουσιάζεται στο επόμενο, 7^ο Κεφάλαιο.

6.4 Υπολογισμός διατμητικών τροπών με την εφαρμογή της μεθόδου Particle Imaging Velocimetry (PIV Analysis).

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες, η εύρεση των τροπών κατά τη διάρκεια της αστοχίας παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα για την αντοχή και τη μορφή των μηχανισμών αστοχίας των κατασκευών ενώ με τη βοήθεια σύγχρονων μεθόδων η ακρίβεια των μετρήσεων έχει βελτιωθεί σημαντικά έως και <0.001% (Scholey et al. 1995).

Διάφορες τεχνικές βάσει της εικόνας (image based techniques) έχουν χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση διατμητικών τροπών κατά τη διάρκεια γεωτεχνικών πειραμάτων. Οι πρώτες

μετρήσεις σε εδαφικές μάζες πραγματοποιήθηκαν από τον Gerber (1929) με τη χρήση ακτίνων x. Στερεο-φωτογραμμετρικές μέθοδοι εφαρμόστηκαν στη συνέχεια από τον Butterfield et al. (1970) και Andrews & Butterfield (1973), καθώς και πιο σύγχρονες τεχνικές με τη χρήση υπολογιστών όπου η επεξεργασία των εικόνων πραγματοποιείται με αυτοματοποιημένες μεθόδους (Taylor et al., 1998; Raikowsky & Xi, 2000). Οι περισσότερες μέθοδοι βασίζονται στην παρουσία τεχνητών στόχων μέσα στην εδαφική μάζα οι οποίοι λειτουργούν ως σημεία αναφοράς τα οποία εντοπίζονται κατά την επεξεργασία των φωτογραφιών στις διάφορες φάσεις των πειραμάτων. Η αξιοπιστία των στόχων αναφοράς εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Για παράδειγμα, ένας πολύ πυκνός κánaβος στόχων αναφοράς μπορεί να καλύψει ορισμένες επιφάνειες των μοντέλων ενώ ένας πολύ αραιός κánaβος μπορεί να παρέχει ελλιπή δεδομένα.

Η σωστή λειτουργία του συστήματος μέτρησης τροπών εκτιμάται λαμβάνοντας υπόψη πιθανά λάθη που συσχετίζονται με την ακρίβεια των μετρήσεων, σε σχέση με την πραγματική συμπεριφορά των μοντέλων. Σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των μετρήσεων παίζει η μέθοδος που επιλέγεται για τον εντοπισμό των τεχνητών στόχων, καθώς και η διαδικασία που χρησιμοποιείται για να μετατραπούν οι μετρήσεις από την επιφάνεια των φωτογραφιών (image-space) σε αντίστοιχες μετρήσεις της επιφάνειας του μοντέλου (object - space). Η ακρίβεια των μετρήσεων εκφράζεται με τον όρο Οπτικό Πεδίο (Field of View-FOV) και με τη χρήση στερεο-φωτογραμμετρικών μεθόδων μπορεί να επιτευχθεί τιμή του FOV έως και 1/11000, ενώ σύμφωνα με τον Taylor et al. (1998) η αντίστοιχη τιμή του FOV είναι 1/5600.

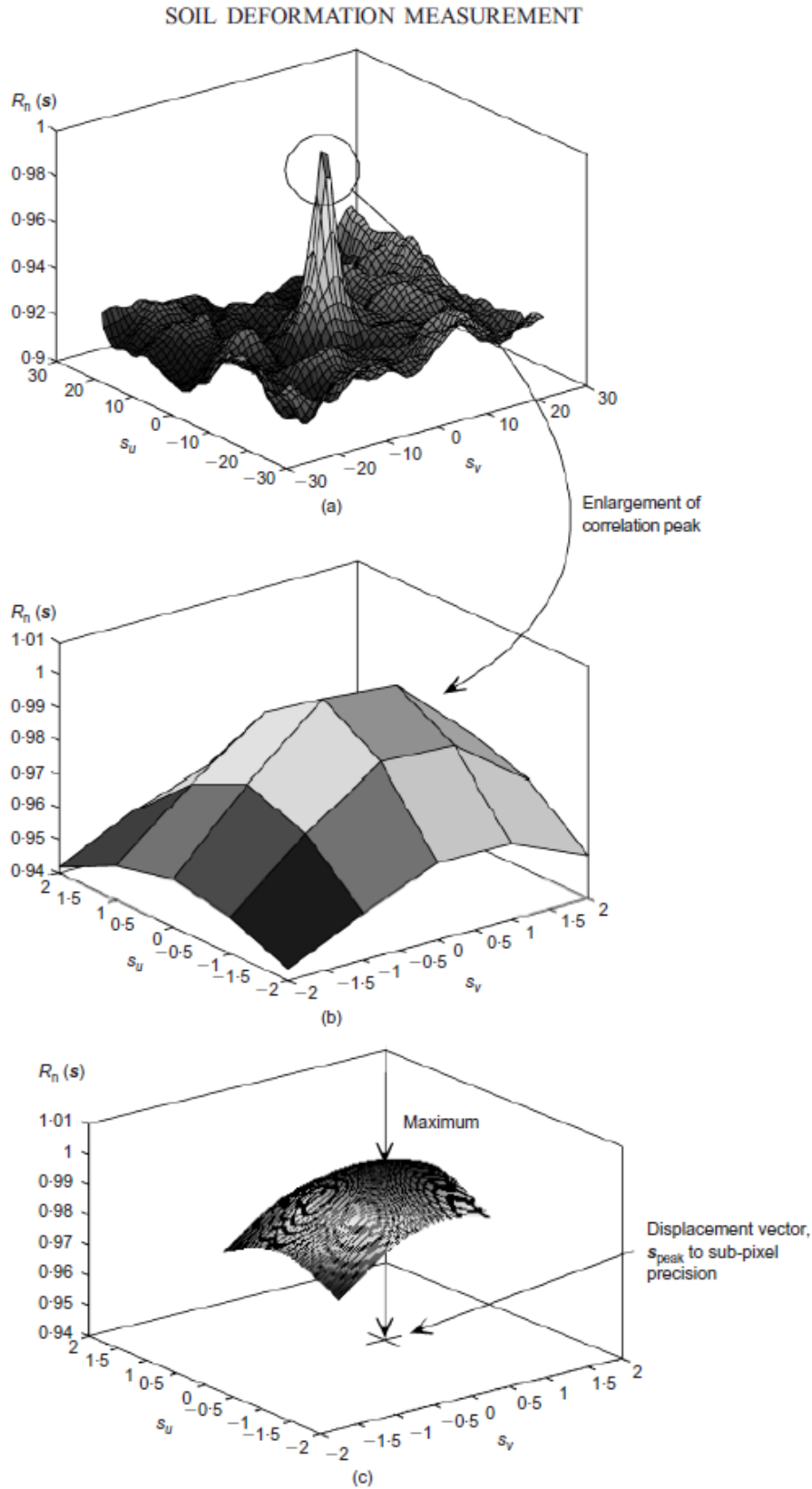
6.4.1 Βασικές αρχές μεθόδου PIV.

Κατά την πειραματική διερεύνηση οπλισμένων πρανών στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETH Zurich, χρησιμοποιήθηκε η οπτική μέθοδος Particle Imaging Velocimetry Analysis (PIV Analysis) προκειμένου να καταγραφούν οι μετατοπίσεις και να υπολογισθούν οι τροπές των γεωτεχνικών μοντέλων για τις διάφορες φάσεις των φορτίσεων. Η μέθοδος PIV λειτουργεί μέσω της επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων, οι οποίες λαμβάνονται με ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές και θεωρείται ότι παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με άλλες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

μεθόδους. Αποτελεί μια τεχνική μέτρησης της ταχύτητας που εφαρμόστηκε αρχικά στον τομέα της πειραματικής ρευστομηχανικής (Adrian, 1991). Ειδικότερα κατά την εφαρμογή της μεθόδου, η αρχική ψηφιακή φωτογραφία που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα (patches), ενώ στη συνέχεια μέσω της αναζήτησης της θέσης των τμημάτων αυτών στις μετέπειτα φωτογραφίες, προσδιορίζεται το διάνυσμα της μετατόπισης του κάθε τμήματος και κατ' επέκταση του συνόλου των ψηφιακών φωτογραφιών. Ο εντοπισμός του κάθε τμήματος στις φωτογραφίες που ακολουθούν πραγματοποιείται μέσω μιας συνάρτησης αυτό-συσχέτισης, το μέγιστο της οποίας προσδιορίζει τη νέα θέση του εκάστοτε τμήματος. Η μέγιστη τιμή της συνάρτησης αυτό-συσχέτισης αποτελεί και το διάνυσμα της μετατόπισης.

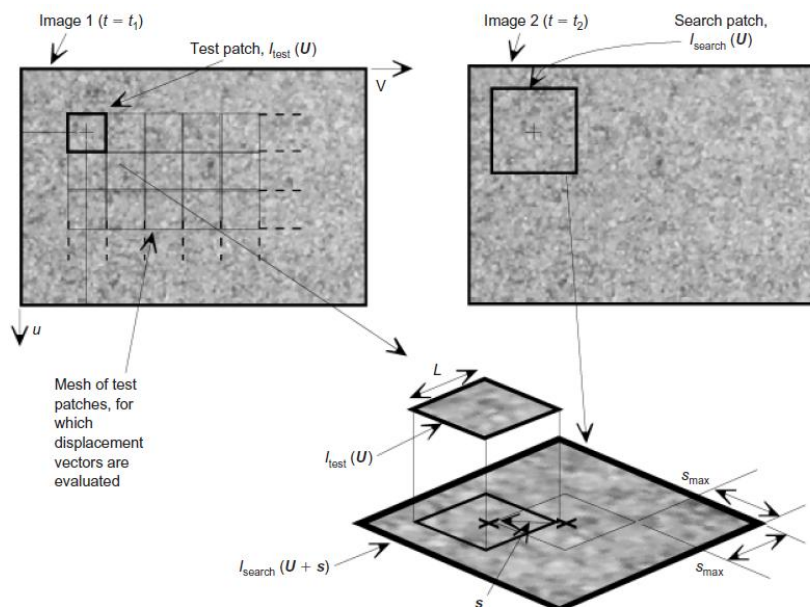
Μια τροποποιημένη προσέγγιση χρησιμοποιείται για την ενσωμάτωση της μεθόδου PIV σε πειραματικά γεωτεχνικά μοντέλα με την μέθοδο GeoPIV (White et al. 2001). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο ότι ο κάθε τύπος φυσικής άμμου έχει τη δική του δομή και οι γειτονικοί κόκκοι μπορεί να έχουν διαφορετικό χρώμα μεταξύ τους. Έτσι, μπορούν οι φωτογραφίες που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων να χωρισθούν σε επιμέρους τμήματα (patches) και για το κάθε ένα από αυτά να δημιουργηθεί ένα συγκεκριμένο μοτίβο βάσει του χρώματός του, το οποίο στη συνέχεια θα αναζητηθεί στις μετέπειτα φωτογραφίες. Είναι σημαντικό, τα επιμέρους τμήματα να έχουν οπτικές διαφορές μεταξύ τους προκειμένου να είναι όσο το δυνατόν πιο ξεκάθαρη η αυτό-συσχέτιση στις μετέπειτα φωτογραφίες και για το λόγο αυτό προστίθεται συχνά στα εδαφικά υλικά (άμμος ή άργιλος) μικρή ποσότητα χρωματισμένου υλικού προκειμένου να ενισχυθεί η αντίθεση μεταξύ των τμημάτων που δημιουργούνται. Η επεξεργασία των φωτογραφιών σύμφωνα με την GeoPIV ανάλυση παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.14 για ένα ζεύγος φωτογραφιών (White et al. (2001).



Σχήμα 6.14. Προσδιορισμός μέγιστης τιμής συνάρτησης αυτό-συσχέτισης (White et al. (2001)).
 Figure 6.14. Definition of the correlation peak (White et al. (2001)).

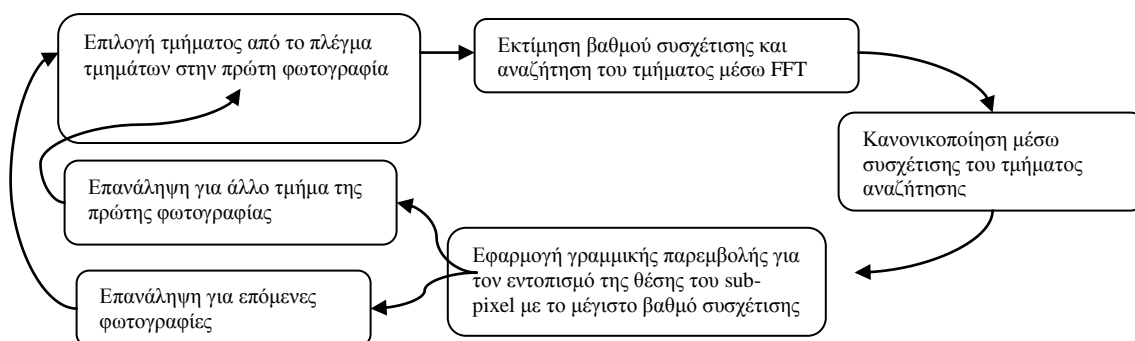
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Πιο ειδικά, η πρώτη φωτογραφία των μοντέλων χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα $I_{\text{test}}(U)$, το καθένα από τα οποία αποτελείται από ένα δείγμα του μητρώου εικόνας $I(U)$ μεγέθους $L \times L$ pixels. Προκειμένου να βρεθεί η μετατόπιση του κάθε τμήματος μεταξύ των υπό εξέταση φωτογραφιών 1 και 2, ένα τμήμα αναζήτησης $I_{\text{search}}(U+s)$ 'αποσπάται' από τη φωτογραφία 1. Αυτό το τμήμα αναζήτησης εκτείνεται πέρα από το αρχικό τμήμα $I_{\text{test}}(U)$ κατά απόσταση s_{max} στις κατευθύνσεις u και v προσδιορίζοντας την περιοχή στην οποία το τμήμα θα αναζητηθεί. Η πολλαπλή συσχέτιση των τμημάτων $I_{\text{test}}(U)$ και $I_{\text{search}}(U+s)$ εκτιμάται και κανονικοποιείται από την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των $I_{\text{search}}(U+s)$ στο εύρος τιμών του U που καλύπτεται από το τμήμα $I_{\text{test}}(U)$. Το αποτέλεσμα του επιπέδου συσχέτισης $R_n(s)$ δηλώνει τον βαθμό που επιτυγχάνεται το «ταίριασμα» (degree of match) μεταξύ των $I_{\text{test}}(U)$ και $I_{\text{search}}(U+s)$ τμημάτων στην απόσταση s όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.15 (White et al. 2001). Προκειμένου να μειωθούν οι υπολογιστικές απαιτήσεις λαμβάνεται μετατροπή Fast Fourier, για κάθε ένα τμήμα της φωτογραφίας και εφαρμόζεται το θεώρημα της συνέλιξης. Η μέγιστη τιμή του κανονικοποιημένου επιπέδου συσχέτισης $R_n(s)$ δηλώνει το διάνυσμα της μετατόπισης του τμήματος $I_{\text{test}}(U)$. Το επίπεδο της συσχέτισης εκτιμάται σε διάστημα του κάθε pixel. Εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή στην περιοχή της μέγιστης τιμής του επιπέδου συσχέτισης, το διάνυσμα της μετατόπισης εδραιώνεται στην ανάλυση του υπο-pixel (sub-pixel).



Σχήμα 6.15. Προσδιορισμός νέας θέσης επιμέρους τμημάτων.
Figure 6.15. Definition of new position of patches.

Το διάγραμμα ροής της ανάλυσης PIV για μια σειρά φωτογραφιών φαίνεται στο Σχήμα 6.16. Η διαδικασία που περιγράφεται για την εκτίμηση του διανύσματος μετατόπισης, επαναλαμβάνεται για κάθε ένα τμήμα των φωτογραφιών, δημιουργώντας ένα πεδίο μετατοπίσεων μεταξύ δύο φωτογραφιών. Η ανάλυση συνεχίζεται αντικαθιστώντας τη δεύτερη φωτογραφία ($t=t_2$) με την επόμενη φωτογραφία ($t=t_3$) όπου και πλέον συγκρίνεται η πρώτη με την τρίτη φωτογραφία. Καθώς η ανάλυση συνεχίζεται με τις μετέπειτα φωτογραφίες, υπάρχει η περίπτωση λόγω αλλαγών στο φως της κάθε φωτογραφίας ή λόγω της παραμόρφωσης του εδάφους, να μειωθεί η ευκρίνεια του μέγιστου επιπέδου συσχέτισης η οποία και προσδιορίζει την τοποθεσία της μετατόπισης για κάθε τμήμα της φωτογραφίας. Έτσι, υπάρχει η περίπτωση να προκύψουν μη συμβατά διανύσματα (wild vectors) τα οποία στη συνέχεια θα πρέπει να αφαιρεθούν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα εμφάνισης μη συμβατών διανυσμάτων καλό είναι να αναβαθμίζεται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης η αρχική φωτογραφία.



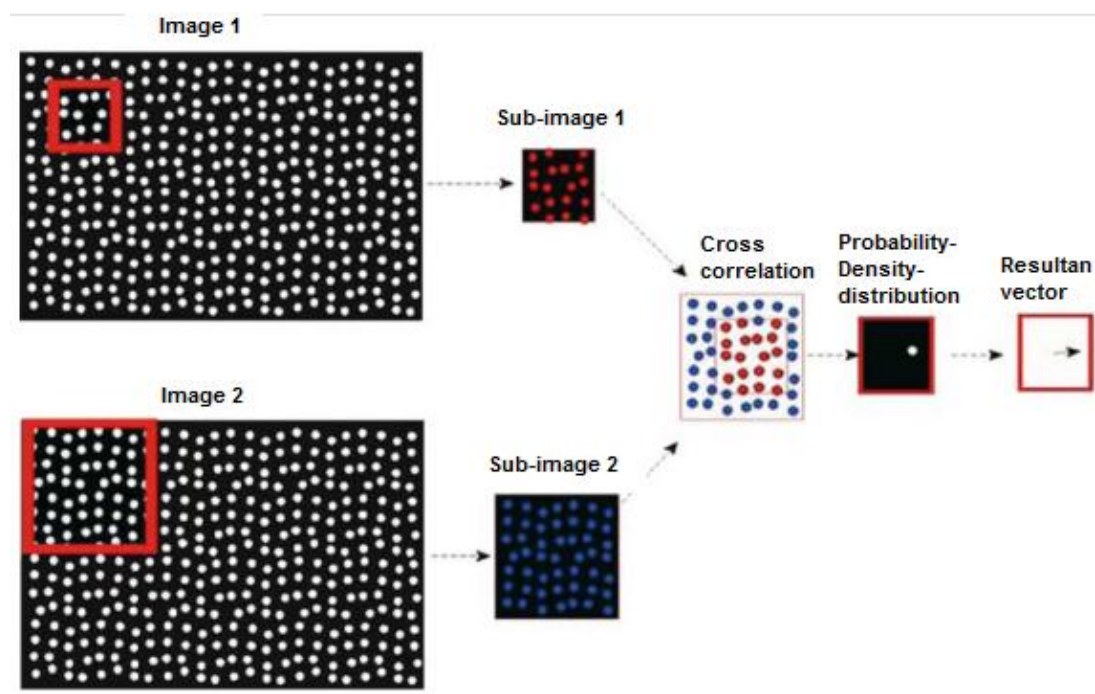
Σχήμα 6.16. Διάγραμμα ροής ανάλυσης PIV.
Figure 6.16. Flow chart of PIV analysis.

6.4.2 Αλγόριθμος GeoPIV.

Ο αλγόριθμος GeoPIV βασίζεται στις αρχές της ανάλυσης PIV και δημιουργήθηκε από τους Take, A., White, D. και Bolton, M. (2001) στο Πανεπιστήμιο του Cambridge, με στόχο να προσδιορισθεί το πεδίο διατμητικών τροπών που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια πειραμάτων σε γεωτεχνικούς φυγοκεντριστές, βάσει των φωτογραφιών που λαμβάνονται με συμβατικές φωτογραφικές μηχανές στο πεδίο ενδιαφέροντος των γεωτεχνικών μοντέλων. Οι τροπές που αναπτύσσονται στις γεωτεχνικές κατασκευές θεωρείται ότι αποτελούν διαδικασίες ροής χαμηλής ταχύτητας και έτσι μπορούν να συγκριθούν με τη ροή των υγρών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

στα οποία εφαρμόστηκε αρχικά η μέθοδος PIV. Στο Σχήμα 6.17 παρουσιάζεται η ανάλυση των βημάτων σύμφωνα με τον Stamhuis (2006). Συγκεκριμένα, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 6.17, επιλέγεται αρχικά ένα τμήμα (Sub-image 1) της αρχικής φωτογραφίας (Image 1) και δημιουργείται ένα μοτίβο βάσει του χρώματός του, το οποίο και αποθηκεύεται στο πρόγραμμα, ενώ στη συνέχεια επιλέγεται ένα μεγαλύτερο τμήμα (Sub-image 2) της δεύτερης φωτογραφίας (Image 2) κοντά στην περιοχή του αρχικού τμήματος. Στο επόμενο βήμα πραγματοποιείται πολλαπλή συσχέτιση των τμημάτων αυτών (Sub-image 1&2), με στόχο τον υπολογισμό του διανύσματος μετατόπισης του αρχικού τμήματος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλα τα τμήματα της αρχικής φωτογραφίας και στο τέλος της διαδικασίας συνθέτεται το πεδίο διατμητικών τροπών ολόκληρης της φωτογραφίας.



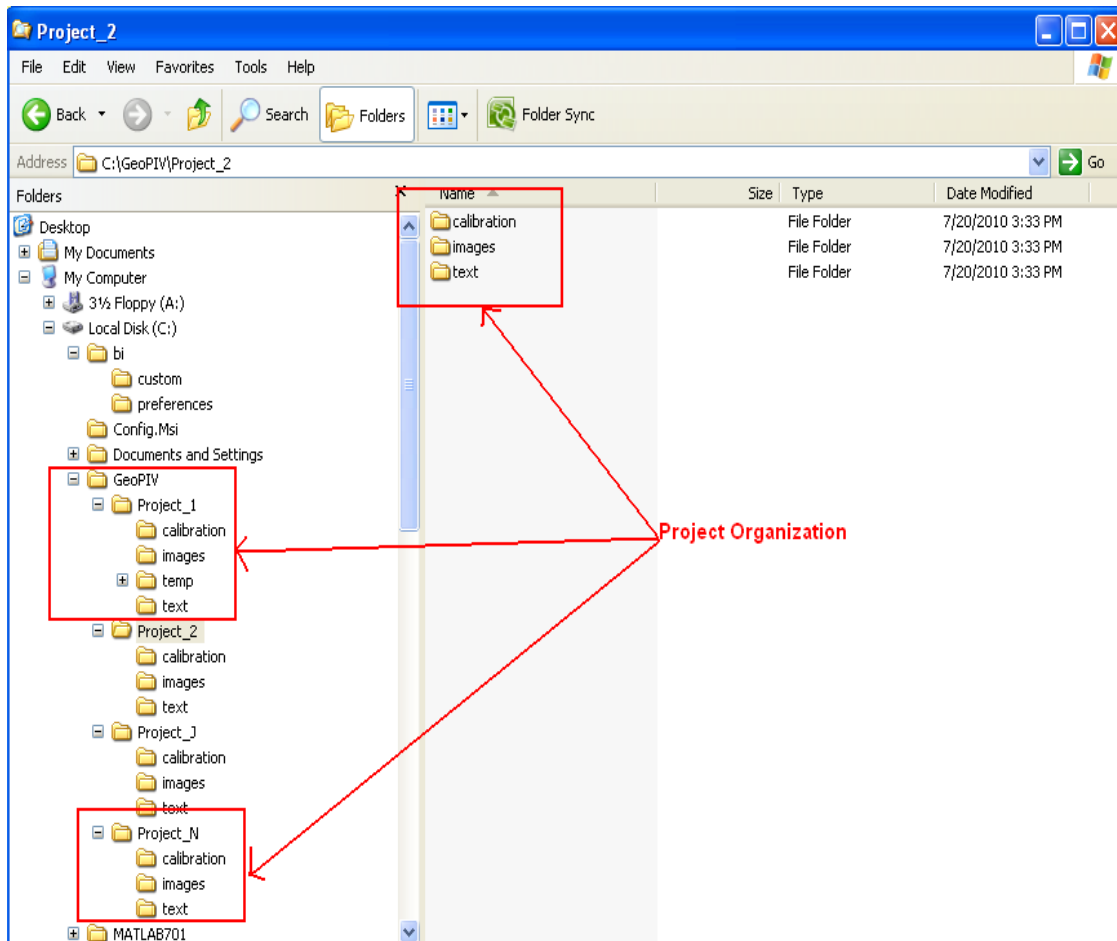
Σχήμα 6.17 Ανάλυση των βημάτων GeoPIV μεθόδου σύμφωνα με τον Stamhuis (2006).

Figure 6.17. Analysis of the GeoPIV steps according to Stamhuis (2006).

Η μεθοδολογία σύμφωνα με την οποία υπολογίζονται οι διατμητικές τροπές των πειραματικών μοντέλων με την εφαρμογή του λογισμικού GeoPIV μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις βασικές υποκατηγορίες: Προ-επεξεργασία, Υπολογισμοί PIV, Βαθμονόμηση (Calibration) και Μετά-επεξεργασία.

➤ *Προ-επεξεργασία:*

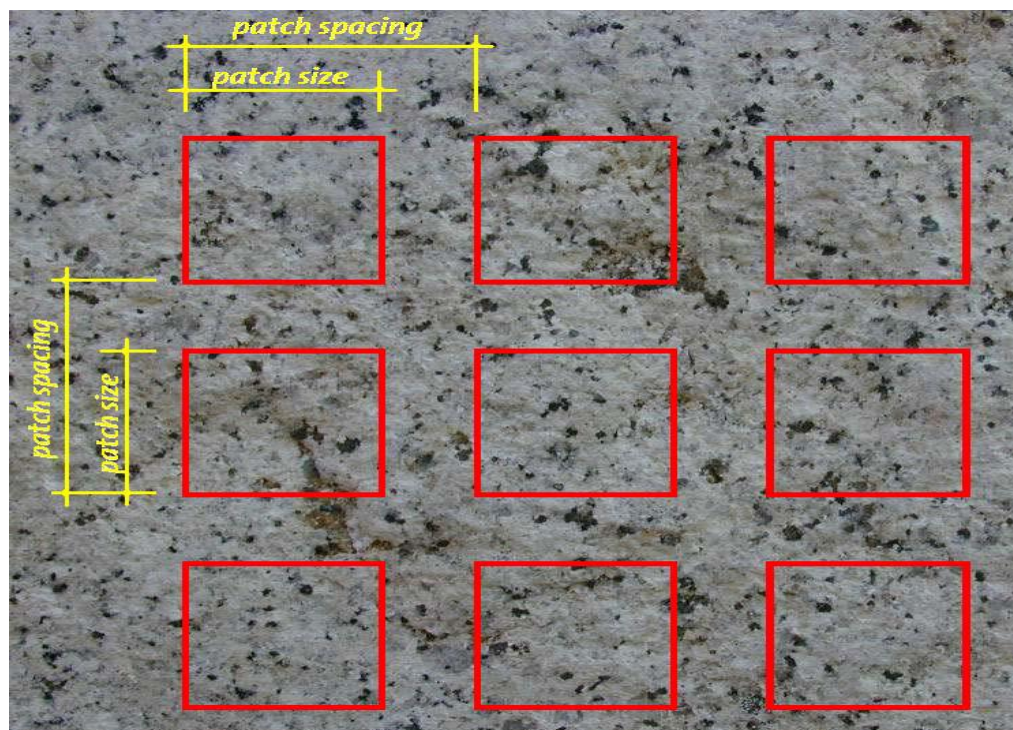
Στην πρώτη φάση της ανάλυσης αρχειοθετούνται τα δεδομένα του υπό ανάλυση πειράματος σε τρεις φακέλους με όνομα: images, text και calibration. Στον φάκελο images τοποθετούνται οι υπό εξέταση φωτογραφίες που λαμβάνονται στις διάφορες φάσεις του πειράματος, στον φάκελο text αποθηκεύονται σε μορφή ‘txt’ τα αρχικά αποτελέσματα των αναλύσεων και τέλος στον φάκελο calibration βρίσκονται τα αρχεία που απαιτούνται για τη βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων. Στο Σχήμα 6.18 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα οργάνωσης των υπό ανάλυση πειραμάτων (project_1, project_2 κλπ). Στη συνέχεια προστίθενται στο πρόγραμμα Matlab τα αρχεία που απαιτούνται για να λειτουργήσει ο αλγόριθμος GeoPIV.



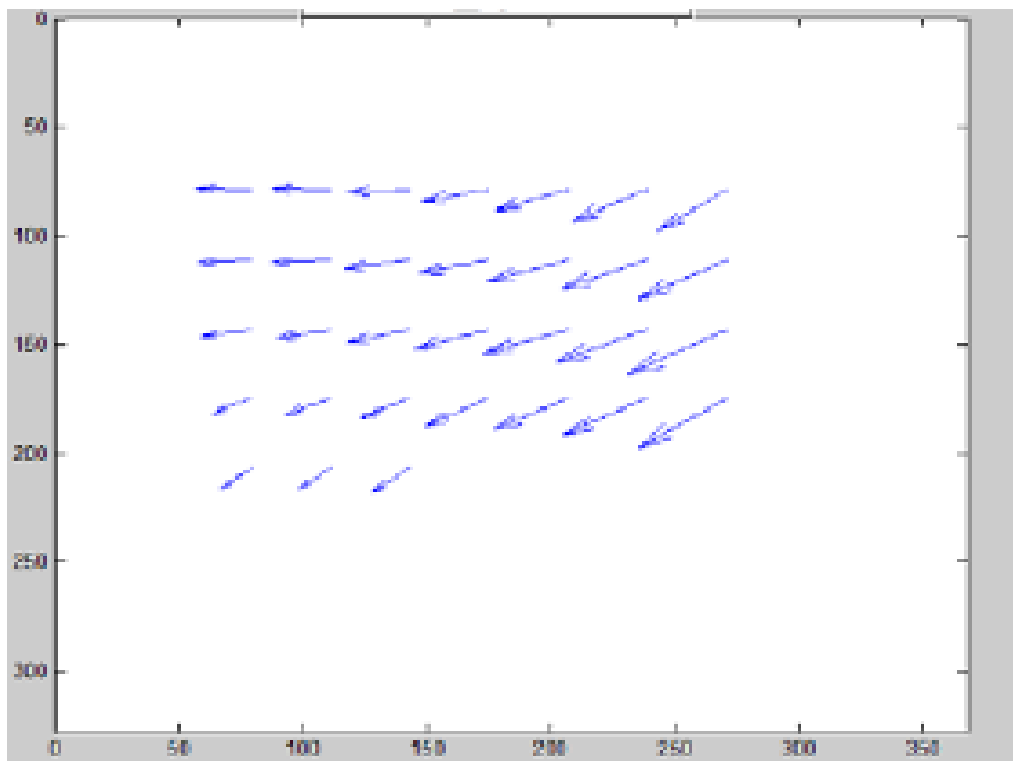
Σχήμα 6.18. Παράδειγμα οργάνωσης υπό ανάλυση πειραμάτων.
Figure 6.18. Example of project organization.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

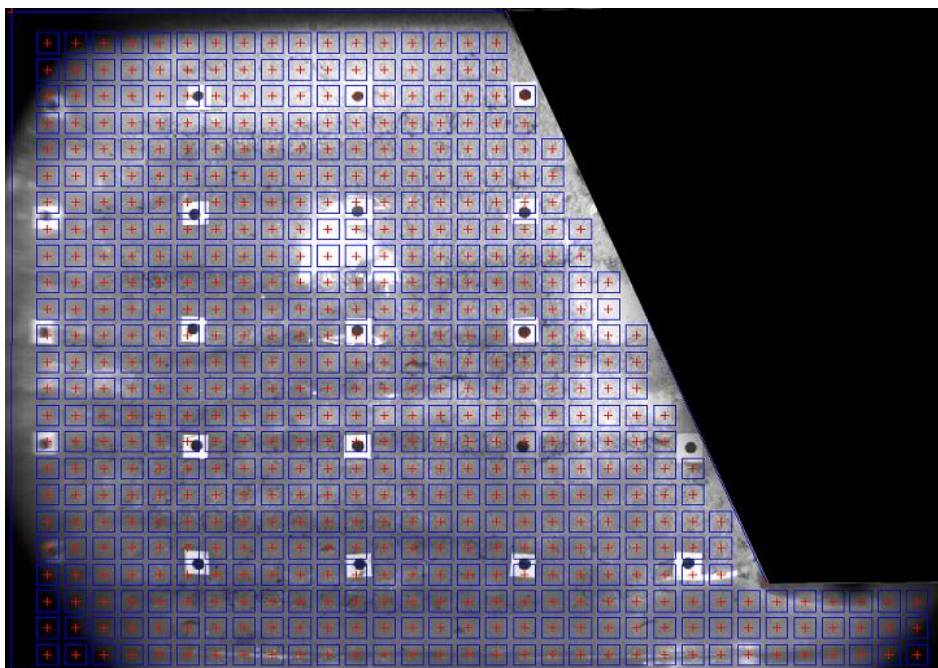
Στο επόμενο βήμα επιλέγονται οι φωτογραφίες που έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια του πειράματος σύμφωνα με τις διάφορες φάσεις των φορτίσεων και δημιουργείται ένα πλέγμα από τμήματα (patches) στην επιφάνεια των φωτογραφιών. Το μέγεθος και η πυκνότητα των τμημάτων αυτών επιλέγεται ανάλογα με το είδος του μοντέλου και την υπό εξέταση περιοχή. Συγκεκριμένα, ορίζεται από τον χρήστη του προγράμματος το μέγεθος του κάθε τμήματος (patch size) και η απόσταση μεταξύ αυτών (patch spacing). Τα τμήματα αυτά θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλα έτσι ώστε να περιλαμβάνουν χαρακτηριστικές περιοχές της εδαφικής επιφάνειας, ενώ ταυτόχρονα αρκετά μικρά για να μπορεί να καλυφθεί ικανοποιητικά με τη δημιουργία των διανυσμάτων ροής η υπό εξέταση περιοχή. Οι συντεταγμένες των τμημάτων αποθηκεύονται ταυτόχρονα σε ένα αρχείο μορφής txt με όνομα Mesh_example.txt. Τα εν λόγω τμήματα αναζητούνται στη συνέχεια στις επόμενες φωτογραφίες προκειμένου να υπολογισθεί η μετακίνησή τους. Στο Σχήμα 6.19 παρουσιάζεται ένα δείγμα της διαδικασίας δημιουργίας των τμημάτων αυτών και στο Σχήμα 6.20 ένα ενδεικτικό διάγραμμα ροής. Στην Φωτογραφία 6.22 παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας των τμημάτων στις υπό εξέταση φωτογραφίες των πειραμάτων της παρούσας έρευνας στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETHZ.



Σχήμα 6.19 Δείγμα διαδικασίας δημιουργίας τμημάτων.
Figure 6.19. Example of patches creation.



Σχήμα 6.20. Αντίστοιχο διάγραμμα ροής.
Figure 6.20. Correspondent flow vector.



Φωτογραφία 6.22. Διαδικασία δημιουργίας τμημάτων στις υπό εξέταση φωτογραφίες οπλισμένων πρανών.
Photograph 6.22. Patches creation on the reinforced slope models images.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Κατά τη φάση της προ-επεξεργασίας, δημιουργείται από τον μελετητή ένα αρχείο μορφής ‘txt’, όπου ορίζονται οι παράμετροι σύμφωνα με τις οποίες θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση στη συνέχεια. Το αρχείο αυτό ονομάζεται ‘launch file’ και είναι διαφορετικό για το κάθε υπό μελέτη πείραμα. Στο Σχήμα 6.21 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα παράδειγμα τέτοιου αρχείου.

```
%GeoPIV8 LAUNCHFILE, April 2002, Dave White & Andy Take
%project:
%task:
%[MESH TO LOAD]
MESH_test14_50g.txt 0          %filename of initial mesh

%[PIV ANALYSIS]
searchzonepixels 10          %PIV search zone, smax. (>max disp).
show_mesh 1                  %Show PIV mesh during analysis (boolean).
show_patch 1                 %Show each PIV patch during analysis (boolean).
show_quiver 1                %Show quiver plot during analysis (boolean).
show_vector 0                %Print vector magnitude during analysis (boolean).

spare_A 0                    %Spare. For future use.
spare_B 0                    %Spare. For future use.
spare_C 0                    %Spare. For future use.
spare_D 0                    %Spare. For future use.
spare_E 0                    %Spare. For future use.

C:\MATLAB\examples\Test14_50g\images 0  %Location of image files [no spaces]

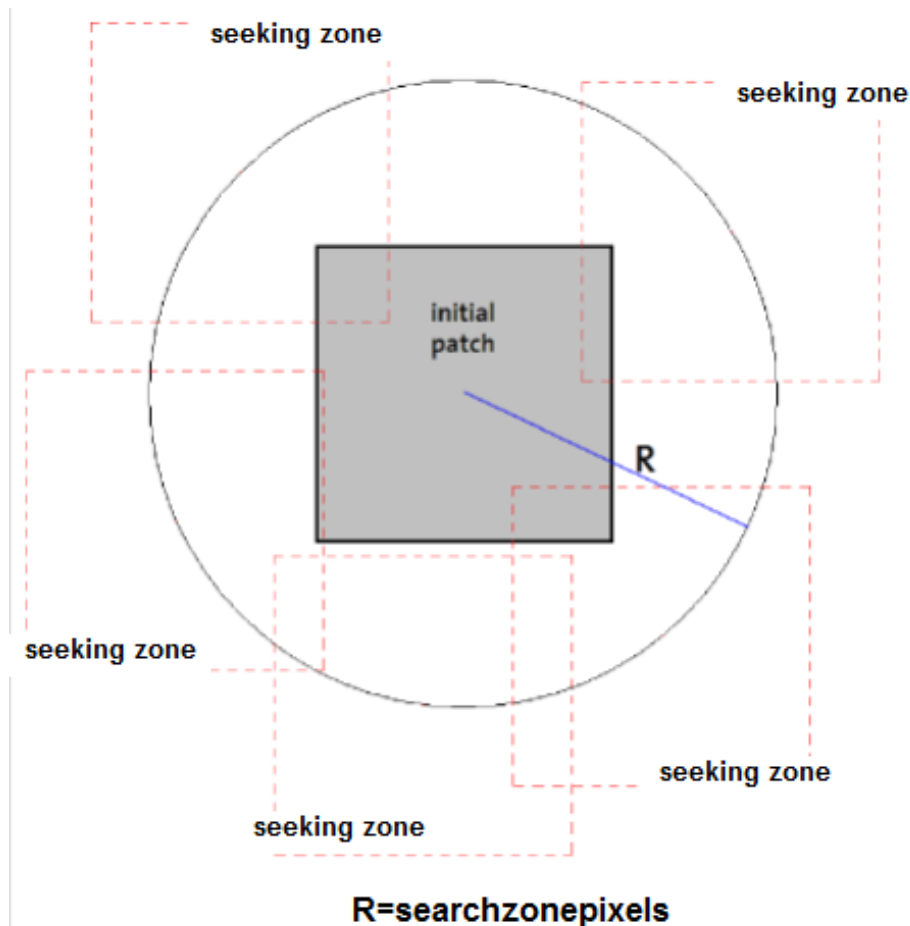
leapfrog 1                   %Leapfrog flag

subpixelmeth 1               %FFT on/off boolean
%[IMAGES]
0g.jpg
50g.jpg
```

Σχήμα 6.21. Παράδειγμα δημιουργίας ‘launch file’.
Figure 6.21. Launch file creation.

Οι σειρές με το σύμβολο ‘%’ αποτελούν σχόλια των δημιουργών του λογισμικού, ενώ σε όλες τις άλλες σειρές μπορεί ο χρήστης να παρέμβει και να τις προσαρμόσει στα υπό εξέταση πειράματα. Ειδικότερα, ‘MESH_test14_50g.txt’ αναφέρεται ως το ‘Mesh_example.txt’ στο οποίο αποθηκεύτηκαν οι συντεταγμένες των τμημάτων που δημιουργήθηκαν κατά την προ-επεξεργασία των φωτογραφιών, ‘searchzonepixels’ αποτελεί την περιοχή αναζήτησης των τμημάτων (Σχήμα 6.22), ‘show’ είναι οι παράμετροι

οπτικοποίησης (0='off' 1='on'), 'sparse' παράμετροι για μελλοντικές βελτιώσεις του κώδικα, στη σειρά '%Location of image files' ορίζεται η τοποθεσία των υπό εξέταση φωτογραφιών, 'leafrog' είναι ακέραιος αριθμός που δηλώνει πόσο συχνά αναβαθμίζεται η εικόνα 1 (ειδικότερα για leafrog=1, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των φωτογραφιών 1 και 2, στη συνέχεια 2 και 3, 3 και 4 κλπ ενώ για leafrog=3, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των φωτογραφιών 1 και 2, 1 και 3, 1 και 4 κλπ), subpixelmeth σύμφωνα με τους δημιουργούς του λογισμικού λαμβάνει πάντα την τιμή 1 και τέλος κάτω από τη σειρά %[IMAGES] αναφέρεται το πλήρες όνομα των υπό εξέταση φωτογραφιών συμπεριλαμβανομένης της κατάληξης του αρχείου (π.χ. JPG, BMP κλπ).



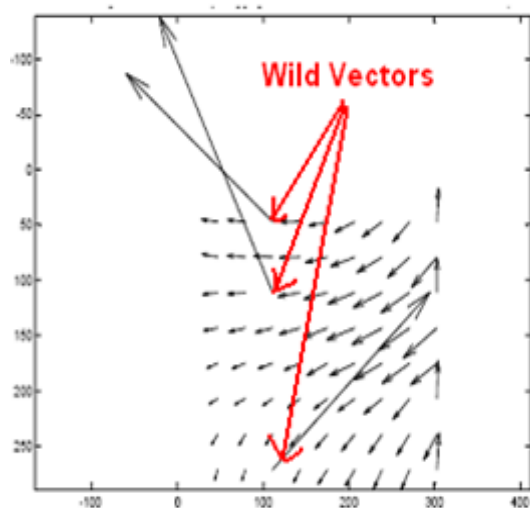
Σχήμα 6.22. Περιοχή αναζήτησης των τμημάτων.
Figure 6.22. Search zone of patches.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

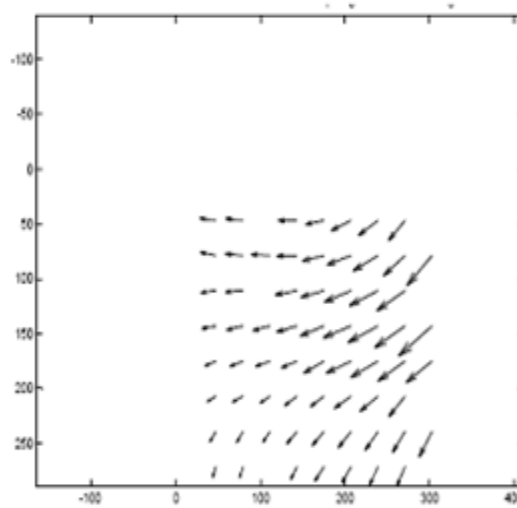
➤ Υπολογισμοί PIV

Μόλις ολοκληρωθεί η προ-επεξεργασία μπορεί να ξεκινήσει η ανάλυση PIV. Στη φάση αυτή, πραγματοποιείται ανάλυση με τον αλγόριθμο GeoPIV, με χρονικό διάστημα των υπολογισμών εξαρτώμενο από το πλήθος των φωτογραφιών που λαμβάνονται υπόψη και το μέγεθος και την απόσταση των τμημάτων που επιλέχθηκαν στο προηγούμενο βήμα.

Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών και ειδικότερα στη φάση της πολλαπλής συσχέτισης των τμημάτων, υπάρχει το ενδεχόμενο να δημιουργηθούν κάποια διανύσματα μετακινήσεων που δεν συνάδουν με τα αναμενόμενα αποτελέσματα (wild vectors). Αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους όπως για παράδειγμα λόγω του ότι δύο ή και περισσότερα τμήματα έχουν παρόμοια οπτικά χαρακτηριστικά και κατά τη λειτουργία του αλγορίθμου δεν αναγνωρίστηκαν ως διαφορετικά. Ένα παράδειγμα τέτοιων διανυσμάτων φαίνεται στο Σχήμα 6.23. Ωστόσο, δίδεται η δυνατότητα κατά τη διάρκεια των υπολογισμών να αφαιρεθούν τα διανύσματα αυτά και να μην συμπεριληφθούν στη συνέχεια της ανάλυσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.24. Έτσι, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εποπτεύει την ανάλυση πριν αυτή ολοκληρωθεί και να επεμβαίνει στα αποτελέσματα.



Σχήμα 6.23. Μη συμβατά διανύσματα.
Figure 6.23. Wild vectors.



Σχήμα 6.24. Διαγραφή μη συμβατών διανυσμάτων.
Figure 6.24. Elimination of wild vectors.

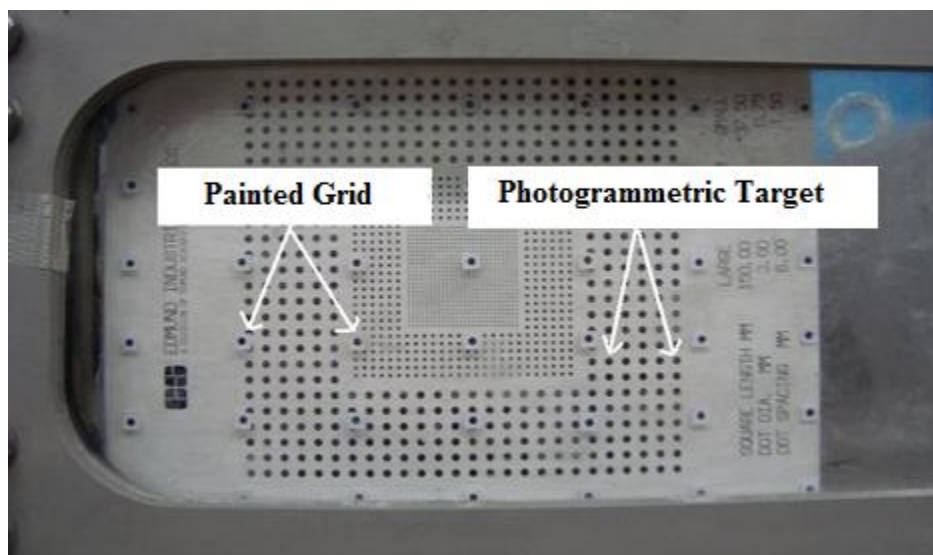
➤ *Βαθμονόμηση (Calibration)*

Στους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στα προηγούμενα βήματα, ελήφθησαν υπόψη ‘pixels’ φωτογραφιών και όχι συνήθεις μονάδες μέτρησης, όπως για παράδειγμα είναι τα mm ή cm. Η ορολογία που χρησιμοποιείται στην ανάλυση PIV όταν χρησιμοποιούνται pixels είναι ‘image space’, ενώ όταν αυτά μετατρέπονται σε συνήθεις μονάδες μέτρησης αναφέρονται ως ‘object space’. Προκειμένου να γίνει αναγωγή, θα πρέπει να προσδιοριστεί στη φάση της βαθμονόμησης, ποιος αριθμός των ‘pixels’ των φωτογραφιών αντιστοιχεί σε κάποια μονάδα μέτρησης (mm, cm κλπ). Αυτό πραγματοποιείται προσδιορίζοντας εκ νέου τις διατμητικές τροπές μετρούμενες σε ‘pixels’, (object space τροπές), σε σχέση με κάποια σταθερά σημεία τα οποία ονομάζονται ‘target points’, για τα οποία είναι εκ των προτέρων γνωστές οι συντεταγμένες. Τα σταθερά αυτά σημεία, τοποθετούνται στη περιοχή παρατήρησης που ενδιαφέρει, δηλαδή για παράδειγμα στην περίπτωση των υπό εξέταση οπλισμένων πρανών στον φυγοκεντριστή, στην πλευρά του Plexiglas, σε απευθείας επαφή με το έδαφος. Θα πρέπει να είναι κυκλικά και μαύρα με λευκό τετραγωνικό περίβλημα όπως φαίνεται στην Φωτογραφία 6.23 (κάναβος) και το μέγεθός τους εξαρτάται από την ανάλυση των φωτογραφιών και το μέγεθος του μοντέλου. Η απόσταση των σημείων εξαρτάται από το μέγεθος του γεωτεχνικού μοντέλου ενώ απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερα σημεία. Ωστόσο, η ακρίβεια του κάναβου που δημιουργείται στην επιφάνεια του μοντέλου δεν μπορεί να ελεγχθεί με απλές τεχνικές μέτρησης, όπως για παράδειγμα με χάρακα. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιείται επίσης φωτογραμμετρικός κάναβος, βάσει του οποίου βαθμονομείται ο κάναβος του μοντέλου.

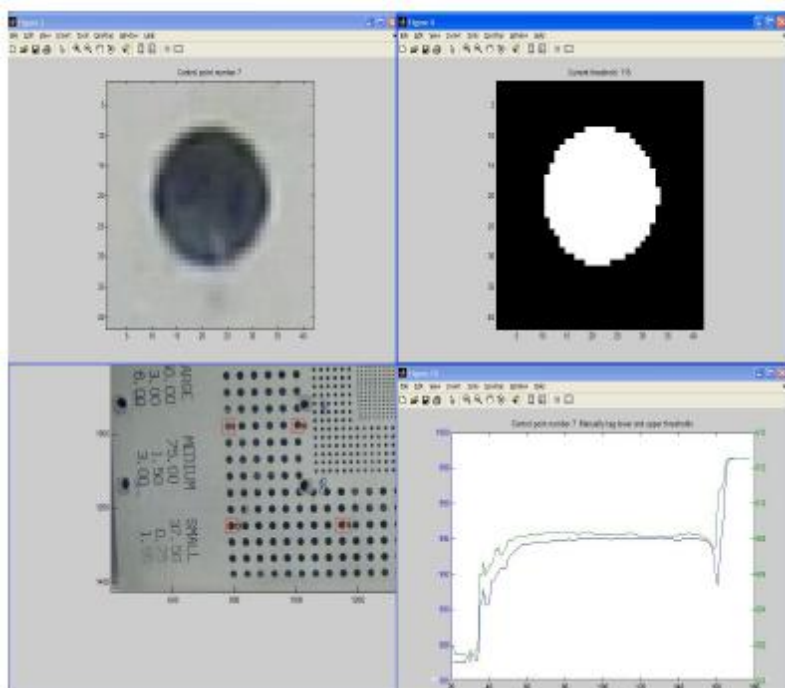
Στην Φωτογραφία 6.23 παρουσιάζεται ο τυπωμένος κάναβος που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, με ενσωματωμένο φωτογραμμετρικό κάναβο για βαθμονόμηση. Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, χρησιμοποιείται μια φωτογραφία αντίστοιχη της Φωτογραφίας 6.23, όπου ο φωτογραμμετρικός κάναβος είναι τοποθετημένος στο άδειο κουτί, στο οποίο θα τοποθετηθεί στη συνέχεια το μοντέλο και περιλαμβάνει ταυτόχρονα τα τυπωμένα σταθερά σημεία και τα σημεία του φωτογραμμετρικού κάναβου. Με κάποια συγκεκριμένη αλληλουχία επιλογών στο περιβάλλον του GeoPIV-Matlab, προσδιορίζονται και αποθηκεύονται οι συντεταγμένες των σταθερών σημείων. Συγκεκριμένα, προσδιορίζεται η θέση του κέντρου των σημείων του τυπωμένου κάναβου, σε

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

σχέση με τη θέση του κέντρου των σημείων του φωτογραμμετρικού κάναβου. Στο Σχήμα 6.25 παρουσιάζεται ένα τέτοιο παράδειγμα προσδιορισμού της θέσης των σταθερών σημείων του τυπωμένου κάναβου.



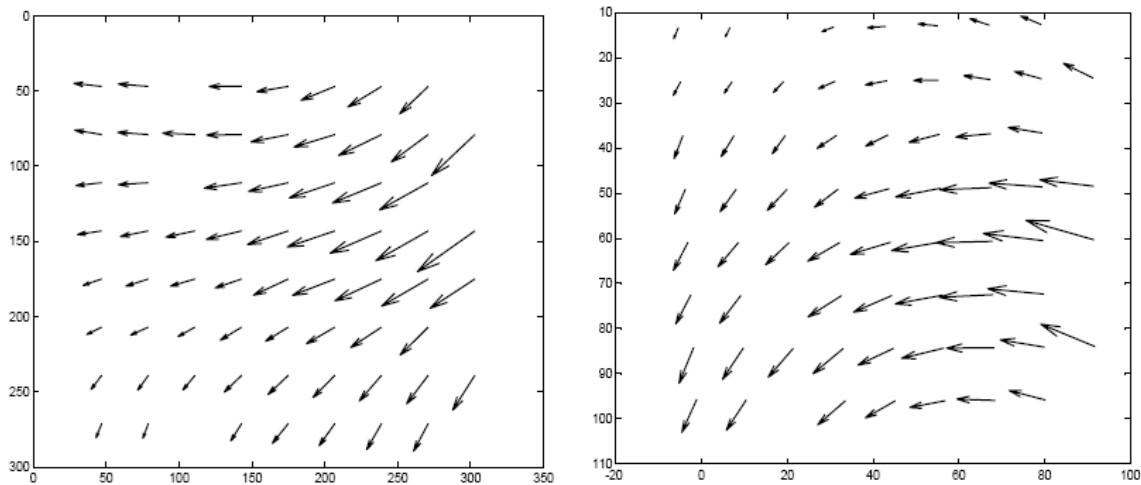
Φωτογραφία 6.23. Βαθμονόμηση τυπωμένου κάναβου με τη χρήση φωτογραμμετρικού κάναβου.
Photograph 6.23. Calibration of printed grid with the use of photogrammetric target.



Σχήμα 6.25. Προσδιορισμός θέσης σταθερών σημείων τυπωμένου κάναβου σε σχέση με τον φωτογραμμετρικό κάναβο.
Figure 6.25. Definition of the position of printed grid compared to the photogrammetric target.

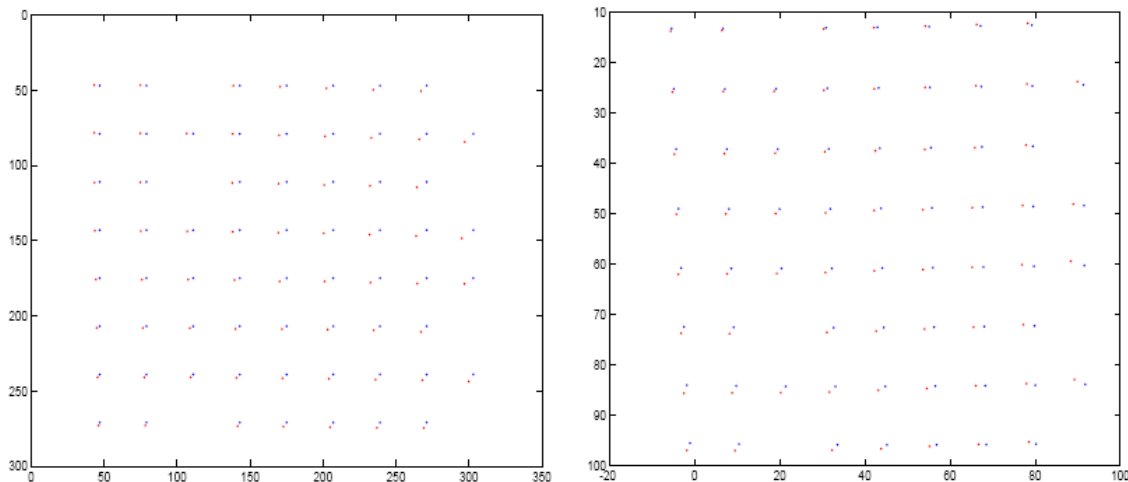
➤ *Μετά-επεξεργασία*

Στη φάση της μετά-επεξεργασίας, υπολογίζεται το πεδίο των μετακινήσεων και των διαμηθικών τροπών μεταξύ των υπό ανάλυση εικόνων σε συνήθεις μονάδες μέτρησης (mm, cm κλπ). Στο Σχήμα 6.26 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του πεδίου μετατοπίσεων σε ‘pixel’ (image space) και σε συνήθεις μονάδες μέτρησης (object space). Τέλος, στο Σχήμα 6.27 παρουσιάζεται η θέση των τμημάτων στα οποία χωρίστηκε αρχικά η φωτογραφία του μοντέλου (patches), σε ανάλυση ‘image space’ και ‘object space’.



Σχήμα 6.26. Παράδειγμα του πεδίου τροπών σε ‘pixel’ (image space) και σε συνήθεις μονάδες μέτρησης (object space).

Figure 6.26. Example of image space strains in pixel and strains in common units-object space.



Σχήμα 6.27. Θέση των τμημάτων (patches), σε ‘image space’ και ‘object space’ ανάλυση.

Figure 6.27. Location of patches for image space and object space analysis.

6.5 Συμπεράσματα Κεφαλαίου και προτάσεις .

Με την εφαρμογή δύο διαφορετικών μεθόδων παρακολούθησης των τροπών ταυτόχρονα και με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μπορούν να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για την εφαρμογή των μεθόδων καθώς και για τις ίδιες τις μετρήσεις. Ανακεφαλαιώνοντας, οι μετρήσεις που ελήφθησαν με τους αισθητήρες οπτικών ινών πραγματοποιήθηκαν πάνω στις στρώσεις των οπλισμών, σε διάφορες θέσεις στο εσωτερικό των οπλισμένων πρανών, ενώ οι μετρήσεις με τη μέθοδο PIV, με τη χρήση ψηφιακών φωτογραφιών αφορούσαν την πλάγια όψη του πρανούς. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων μπορεί να δώσει μια ολοκληρωμένη εικόνα για την συμπεριφορά των μοντέλων, τόσο στο εσωτερικό τους μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών, πράγμα δύσκολο για οπτικές μεθόδους, όσο και στην πλάγια όψη του πρανούς όπου είναι αδύνατο να τοποθετηθούν αισθητήρες καθ' όλη την επιφάνεια του.

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην επιλογή του τύπου των αισθητήρων οπτικών ινών ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υπό εξέταση μοντέλων. Όπως αναφέρθηκε και στα παραπάνω, υπάρχει πληθώρα αισθητήρων κατάλληλων για διάφορα είδη κατασκευών υπό κλίμακα ή σε φυσικές διαστάσεις. Για την περίπτωση των γεωτεχνικών μοντέλων υπό κλίμακα, η καλύτερη λύση μπορεί να δοθεί με την χρήση αισθητήρων οπτικών ινών χωρίς καθόλου επικάλυψη προκειμένου να ελαχιστοποιείται η επιρροή αυτών στα μοντέλα. Οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλα είδη γεωτεχνικών (και μη) μοντέλων αρκεί να βρεθεί ο κατάλληλος τρόπος συγκράτησής τους στα σημεία που επιθυμείται να ληφθούν οι μετρήσεις. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να επιλέγεται το κατάλληλο υλικό συγκόλλησης των αισθητήρων στην υπό εξέταση επιφάνεια και η επιρροή του να συνυπολογίζεται στα αποτελέσματα που προκύπτουν. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου μέτρησης γραμμικών τροπών μέσω αισθητήρων οπτικών ινών στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή, είναι ότι μπορούν να ληφθούν πολλές ταυτόχρονες μετρήσεις σε διάφορες θέσεις στο εσωτερικό των γεωτεχνικών μοντέλων και τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αξιόπιστα και συγκρίσιμα. Αντίθετα, βασική αδυναμία στην εφαρμογή τους είναι ότι ο υπάρχων σχετικός εξοπλισμός και τεχνολογία δεν έχει σχεδιαστεί για να αντέχει σε τόσο μεγάλες ταχύτητες που αναπτύσσονται στους γεωτεχνικούς φυγοκεντριστές κατά την αύξηση της φυγόκεντρης επιτάχυνσης με αποτέλεσμα συχνά το οπτικό σήμα να ασθενεί και να υπάρχει κενό στα αποτελέσματα και να

πρέπει να επαναληφθούν αυτά. Μία ακόμη αδυναμία της μεθόδου προκύπτει κατά την εφαρμογή της σε μοντέλα υπό κλίμακα και ειδικά γεωτεχνικά μοντέλα, καθώς είναι ιδιαίτερα δύσκολο να βρεθεί και να επιλεγεί ο κατάλληλος τρόπος συνένωσης των αισθητήρων στις υπό εξέταση περιοχές. Στην περίπτωση των οπλισμένων πρανών που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη, υπήρχε η δυνατότητα να τοποθετηθούν οι αισθητήρες στις στρώσεις που προσομοίωναν τον οπλισμό, ωστόσο δυσκολίες παρουσιάστηκαν κατά την επιλογή της κόλλας που χρησιμοποιήθηκε.

Σχετικά με την μέθοδο PIV, προσοχή θα πρέπει να δίνεται κατά την δημιουργία του κানাβου στο μοντέλο, για την ποσοτικοποίηση των τροπών, και συγκεκριμένα ο κানাβος θα πρέπει να μην είναι πολύ πυκνός ούτε πολύ αραιός καθώς στην πρώτη περίπτωση υπάρχει το ενδεχόμενο να αποκρυφτούν οπτικές πληροφορίες από τις εικόνες προς επεξεργασία ενώ στην δεύτερη περίπτωση μπορεί να μην επαρκούν τα σημεία του κানাβου για την βαθμονόμηση αυτού με φωτογραμμετρικό κানাβο. Επιπλέον, το έδαφος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των μοντέλων θα πρέπει να έχει οπτικές χρωματικές αντιθέσεις έτσι ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν και να διαχωρισθούν με ευκολία τα τμήματα (patches) που δημιουργούνται κατά την προ-επεξεργασία των φωτογραφιών. Τέλος, κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και ειδικότερα στην φάση που προκύπτουν τα μη συμβατά διανύσματα (wild vectors), ο ερευνητής θα πρέπει να είναι σε θέση να κρίνει σωστά, σχετικά με το ποιά από αυτά εκφράζουν πραγματικά μη συμβατές μετακινήσεις και ποια εκφράζουν πραγματικές μεγάλες μετακινήσεις. Σε περίπτωση που διατηρηθεί λανθασμένα ένα μη συμβατό διάνυσμα τότε τα αποτελέσματα θα διαφοροποιηθούν σημαντικά και λανθασμένα. Τέτοια προβλήματα παρουσιάζονται συνήθως όταν οι φορτίσεις είναι πολύ μεγάλες, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των σεισμικών φορτίσεων ή όταν ο φωτισμός στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή δεν είναι επαρκής με αποτέλεσμα να μην διαχωρίζονται ικανοποιητικά τα τμήματα των φωτογραφιών (patches).

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η ταυτόχρονη εφαρμογή των δύο μεθόδων στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή είναι ιδιαίτερα απαιτητική και προκύπτουν συχνά απρόβλεπτες ατέλειες στην εφαρμογή της μεθοδολογίας των πειραμάτων, τις οποίες συχνά ο ερευνητής καλείται να επιλύσει σε μικρό χρονικό διάστημα με όσα μέσα διαθέτει στην προκειμένη στιγμή.. Στην παρούσα μελέτη, προέκυψαν τέτοιες ατέλειες κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, με

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

αποτέλεσμα να χρειαστεί να επαναληφθούν κάποια από αυτά, προκειμένου να ληφθούν συμπληρωματικές μετρήσεις. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων, η αναγωγή τους σε αντίστοιχες τροπές πρωτότυπων κατασκευών και η σύγκρισή τους πραγματοποιείται στα επόμενα Κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

**Κατασκευή Μοντέλων και Περιγραφή Πειραματικής
Διάταξης.**

7.1 Κατασκευή μοντέλων οπλισμένων πρανών.

Για την παρούσα έρευνα,, κατασκευάστηκαν 16 οπλισμένα πρανά από το ίδιο υλικό, με την ίδια γεωμετρία, σε δύο όμοια στοιβαρά κουτά (strong boxes) με εσωτερικές διαστάσεις 40x40 cm κατά το μήκος και το πλάτος και 20 cm κατά το ύψος (Karogianni et al. 2010). Στην μία από τις κατακόρυφες πλευρές των κουτιών τοποθετήθηκε διαφανής πλάκα από 'Plexiglas', προκειμένου να καταστεί δυνατή η παρατήρηση της συμπεριφοράς των πρανών κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας των πειραμάτων. Στην πλάκα από 'Plexiglas', τυπώθηκε κάναβος προκειμένου να παρακολουθούνται οι μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στα μοντέλα, με τη χρήση ψηφιακών φωτογραφιών και να πραγματοποιηθεί ανάλυση PIV. Επιπλέον, τοποθετήθηκε διαφανής μεμβράνη με επικάλυψη σιλικόνης στην πλάκα από 'Plexiglas', προκειμένου να μειωθεί η επιρροή του συνόρου στα μοντέλα. Στην Φωτογραφία 7.1 παρουσιάζεται το στιβαρό κουτί με τυπωμένο κάναβο στην μία πλευρά του.

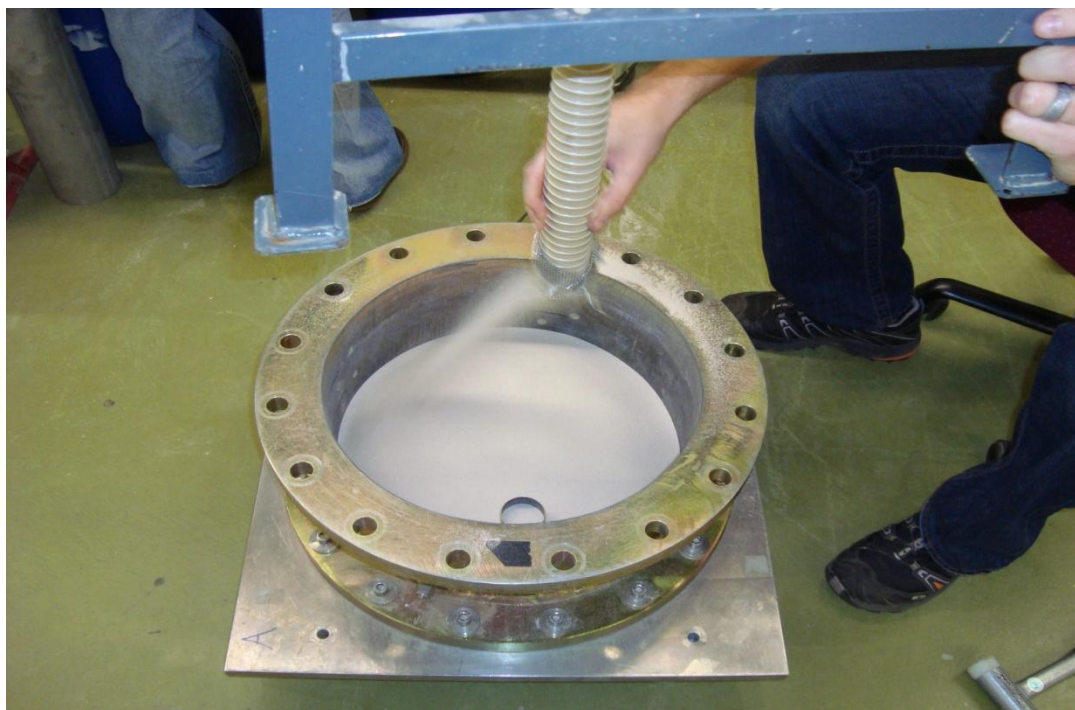


Φωτογραφία 7.1. Στιβαρό κουτί με Plexiglas και ενσωματωμένο κάναβο.
Photograph 7.1. Strong box with Plexiglas and incorporated grid.

Το συνολικό ύψος των οπλισμένων πρανών που κατασκευάστηκαν ήταν 20 cm, συμπεριλαμβανομένης μιας στρώσης θεμελίωσης από το ίδιο υλικό ύψους 2 cm. Η άμμος

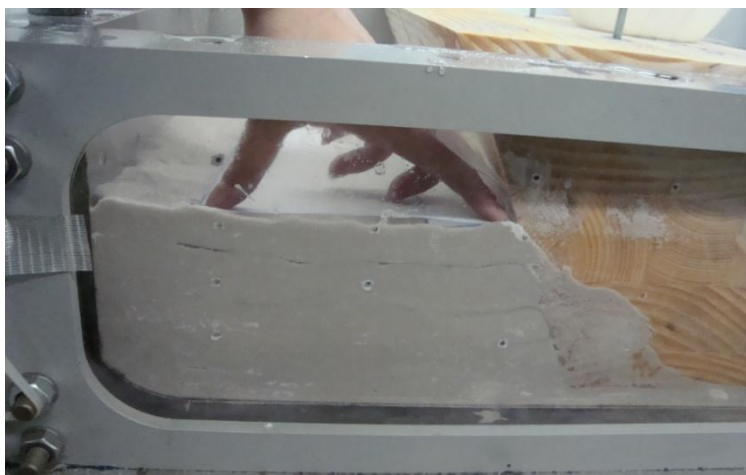
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

τοποθετήθηκε στα μοντέλα εφαρμόζοντας την μέθοδο ξηρής απόθεσης (pluviation), σε σταθερή απόσταση 10-15 cm από την επιφάνεια του μοντέλου, προκειμένου να επιτευχθεί ίδια πυκνότητα σε ολόκληρο το μοντέλο. Ένα παράδειγμα της ξηρής απόθεσης άμμου για την κατασκευή πειραματικού μοντέλου θεμελίου στο ETH Zurich παρουσιάζεται στην Φωτογραφία 7.2.

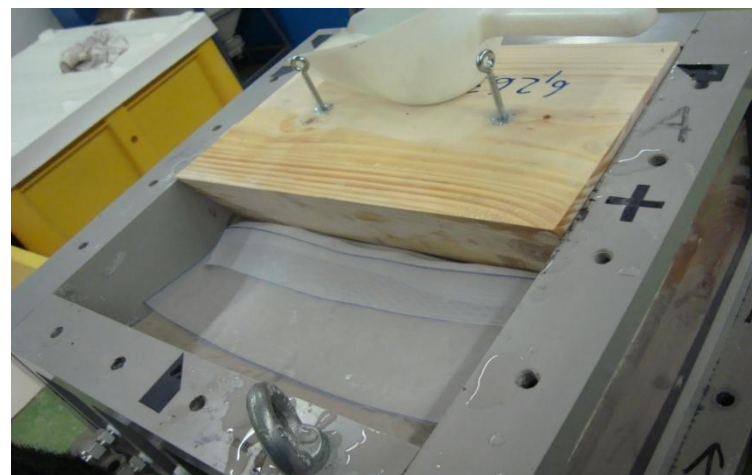


Φωτογραφία 7.2. Παράδειγμα ξηρής απόθεσης άμμου.
Photograph 7.2. Example of sand pluviation.

Η κλίση των πρανών ήταν 2V:1H (κατακόρυφη: οριζόντια) και επιτεύχθηκε με τη χρήση ξύλινου καλουπιού κατά τη διάρκεια της κατασκευής των μοντέλων. Στις Φωτογραφίες 7.3 έως και 7.6 παρουσιάζονται διάφορες φάσεις κατασκευής των μοντέλων. Ειδικότερα, στις Φωτογραφίες 7.3. και 7.4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα τοποθέτησης των στρώσεων οπλισμού, στην Φωτογραφία 7.5 μια ενδιάμεση φάση κατασκευής του μοντέλου ενώ στην Φωτογραφία 7.6 αποπερατωμένο πλέον το μοντέλο οπλισμένου πρανούς πριν την αφαίρεση του ξύλινου καλουπιού.



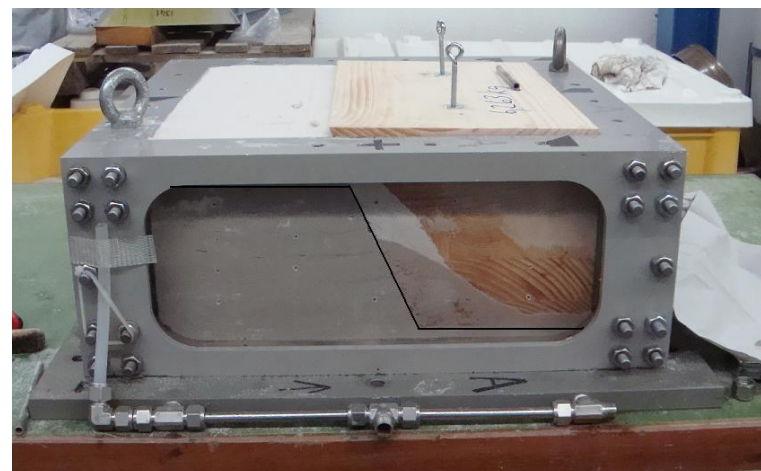
Φωτογραφία 7.3. Τοποθέτηση στρώσεων οπλισμού.
Photograph 7.3.Reinforcement layers placement.



Φωτογραφία 7.4. Τοποθέτηση στρώσεων οπλισμού.
Photograph 7.4.Reinforcement layers placement.



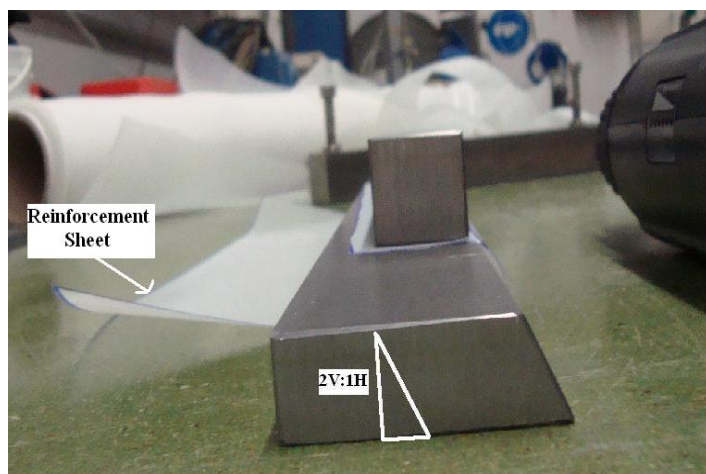
Φωτογραφία 7.5. Οπλισμένο πρανές στη φάση κατασκευής του.
Photograph 7.5.Reinforced slope during its construction.



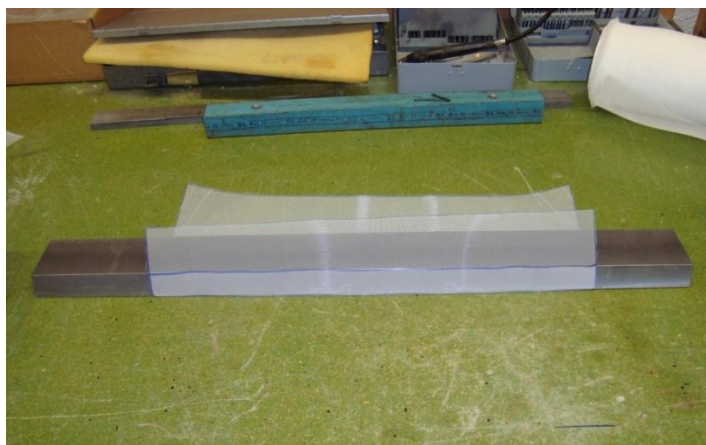
Φωτογραφία 7.6. Αποπερατωμένο οπλισμένο πρανές.
Photograph 7.6.Reinforced slope after its construction.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συνολικά τοποθετήθηκαν 9 στρώσεις οπλισμών, μήκους 11-19 cm (μία στρώση ανά 2 cm) και αναδιπλώθηκαν στην όψη των πρανών (εφαρμογή “wrap-around” τεχνικής), προκειμένου να εξασφαλισθεί η ευστάθεια της όψης και να αποφευχθούν τυχόν διαφυγές του εδαφικού υλικού. Βασικός στόχος κατά την τοποθέτηση των στρώσεων οπλισμών ήταν να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στις αποστάσεις και τις κλίσεις των στρώσεων και έτσι επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί μορφοποίηση αυτών σε κλίση όμοια με αυτή του πρανούς (2V:1H), πριν την τοποθέτησή τους στο μοντέλο. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την μορφοποίηση φαίνεται στις Φωτογραφίες 7.7 και 7.8, όπου παρουσιάζεται το μεταλλικό καλούπι με κλίση 2V:1H, γύρω από το οποίο τυλίχθηκαν και συγκρατήθηκαν για κάποιο χρονικό διάστημα οι στρώσεις οπλισμού.



Φωτογραφία 7.7. Μόρφωση οπλισμού σε κλίση 2V:1H.
Photograph 7.7. Formation of reinforcement sheets at inclination 2V:1H.



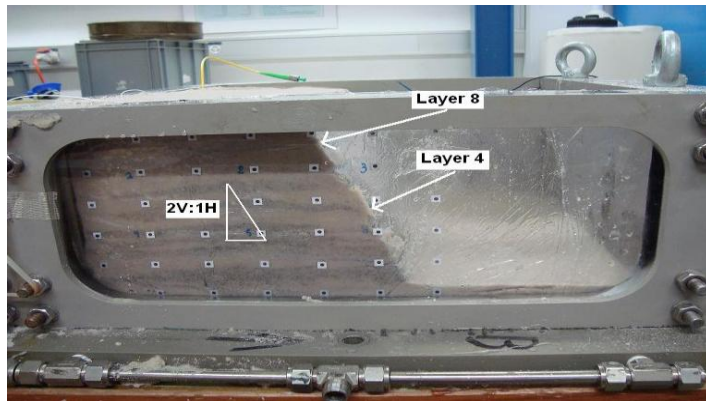
Φωτογραφία 7.8. Μόρφωση οπλισμού σε κλίση 2V:1H.
Photograph 7.8. Formation of reinforcement sheets at inclination 2V:1H.

Για την σταθεροποίηση κατά την μεταφορά και την τοποθέτηση των μοντέλων στον φυγοκεντριστή προστέθηκε προκαθορισμένη μικρή ποσότητα νερού κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους. Στην Φωτογραφία 7.9, παρουσιάζεται το τελικό μοντέλο όπως κατασκευάστηκε με ενσωματωμένο κানাβο για την ποσοτικοποίηση των διατμητικών τροπών με το PIV, στο Σχήμα 7.1 η πλάγια όψη του πρανούς σε τομή, στην Φωτογραφία 7.10 παρουσιάζεται ένα οπλισμένο και ένα άοπλο πρανές στην τελική τους μορφή και στην Φωτογραφία 7.11 το οπλισμένο πρανές από μια άλλη όψη, με ενσωματωμένο έναν αισθητήρα οπτικής ίνας, περίπου στο μέσο του. Στην Φωτογραφία 7.11 διακρίνεται και το καλώδιο που συνδέει τον αισθητήρα οπτικής ίνας με το σύστημα λήψης και καταγραφής των τροπών (Interrogator S600).

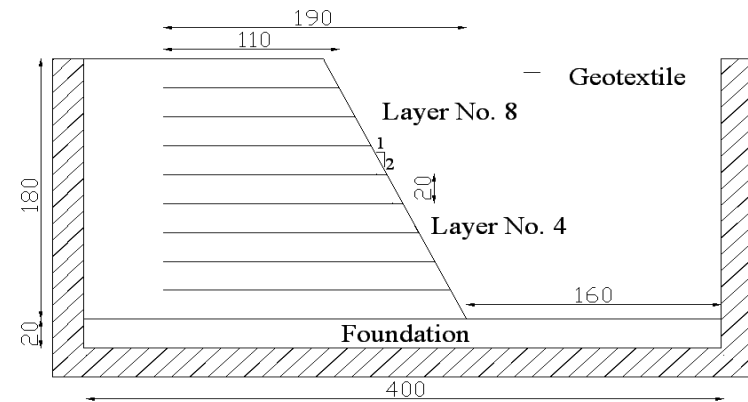
Στην συνέχεια, στην Φωτογραφία 7.12 παρουσιάζεται η διαδικασία μεταφοράς των μοντέλων στον φυγοκεντριστή, ενώ στην Φωτογραφία 7.13 ο ενεργοποιητής (actuator) του γεωτεχνικού φυγοκεντριστή του ETHZ, έξω από το τύμπανο, με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα της παρούσας έρευνας. Ειδικότερα, στην Φωτογραφία 7.12, διακρίνεται και το ξύλινο καλούπι το οποίο τοποθετήθηκε για την κατασκευή και μεταφορά των μοντέλων στον φυγοκεντριστή. Λόγω του μεγάλου βάρους των μοντέλων, χρησιμοποιήθηκε γερανός, ο οποίος έλεγχε σε μεγάλο βαθμό την μετακίνηση των μοντέλων και με την βοήθεια του τεχνικού προσωπικού του εργαστηρίου του ETH Zurich, εξασφαλιζόταν όσο το δυνατόν καλύτερα η ασφαλής μεταφορά τους.

Τέλος, στην Φωτογραφία 7.13 όπου και παρουσιάζεται ο ενεργοποιητής του γεωτεχνικού φυγοκεντριστή, μπορεί να διακριθεί το σύστημα καταγραφής τροπών μέσω αισθητήρων οπτικών ινών (Interrogator S600), η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την ρίψη των μοντέλων «βράχου» (model boulder) καθώς και η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των ψηφιακών φωτογραφιών προκειμένου να πραγματοποιηθεί ανάλυση μέσω του GeoPIV.

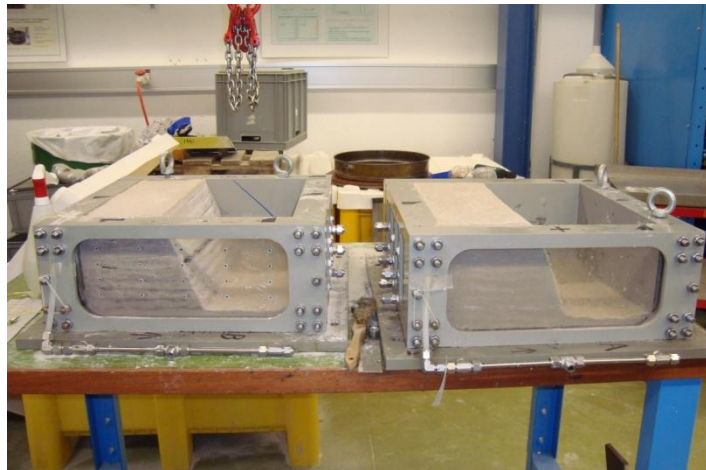
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7



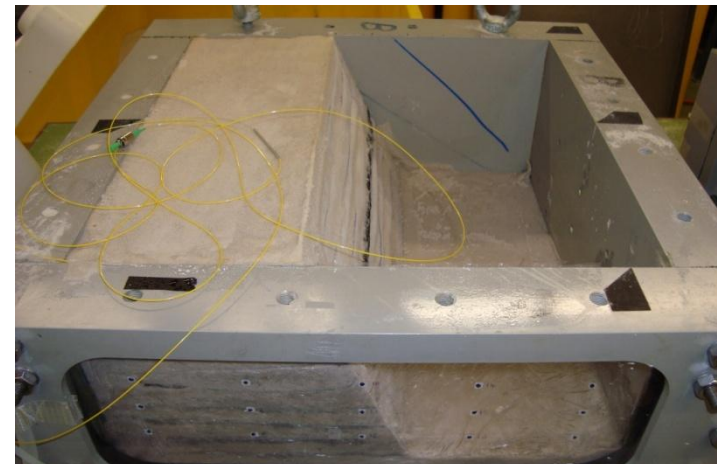
Φωτογραφία 7.9. Οπλισμένο πρανές με ενσωματωμένο κάναβο.
Photograph 7.9. Reinforce slope with incorporated grid.



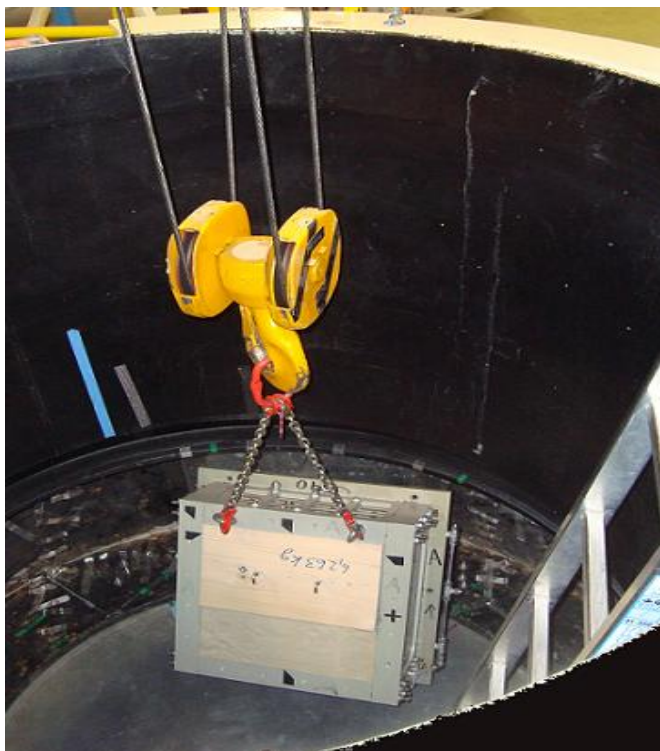
Σχήμα 7.1. Τομή οπλισμένου πρανούς.
Figure 7.1. Cross section of reinforced slope.



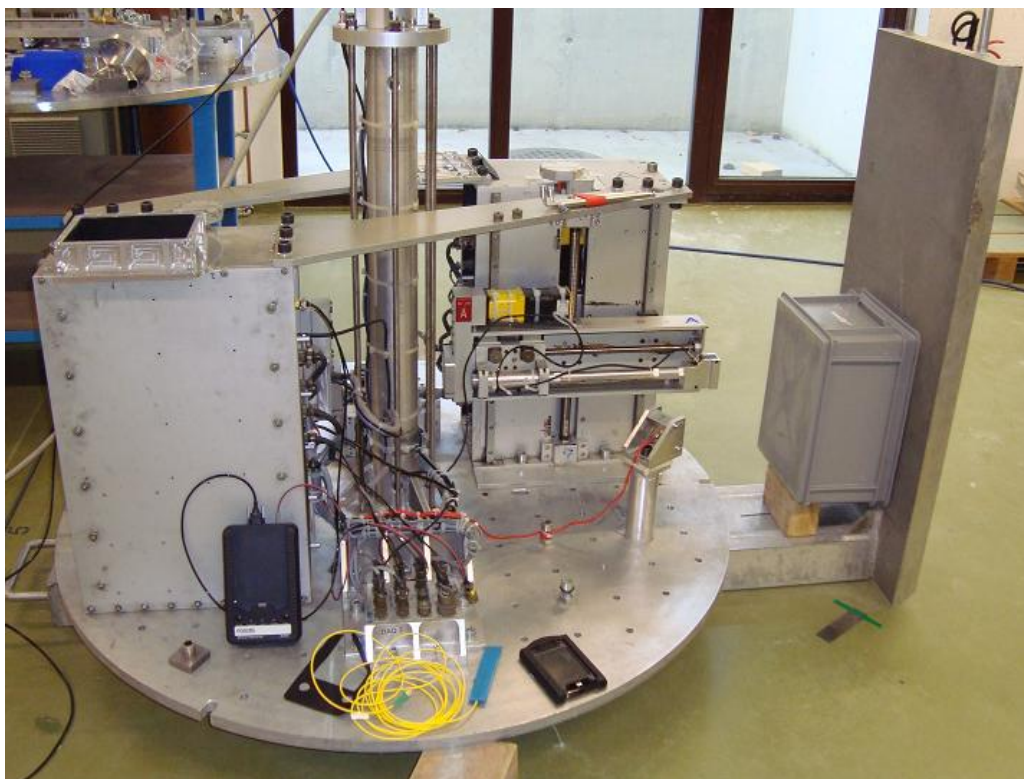
Φωτογραφία 7.10. Οπλισμένο και άοπλο πρανές στην τελική μορφή.
Photograph 7.10. Reinforced and unreinforced slope at final state.



Φωτογραφία 7.11. Όψη οπλισμένου πρανούς και αισθητήρα ο.ι.
Photograph 7.11. View of reinforced slope and o.f. sensor.



Φωτογραφία 7.12. Μεταφορά οπλισμένου πρανούς στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή
Photograph 7.12. Reinforced slope transfer in the geotechnical centrifuge.



Φωτογραφία 7.13. Ενεργοποιητής του γεωτεχνικού φυγοκεντριστή ETHZ.
Photograph 7.13. Actuator of the geotechnical centrifuge of ETHZ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

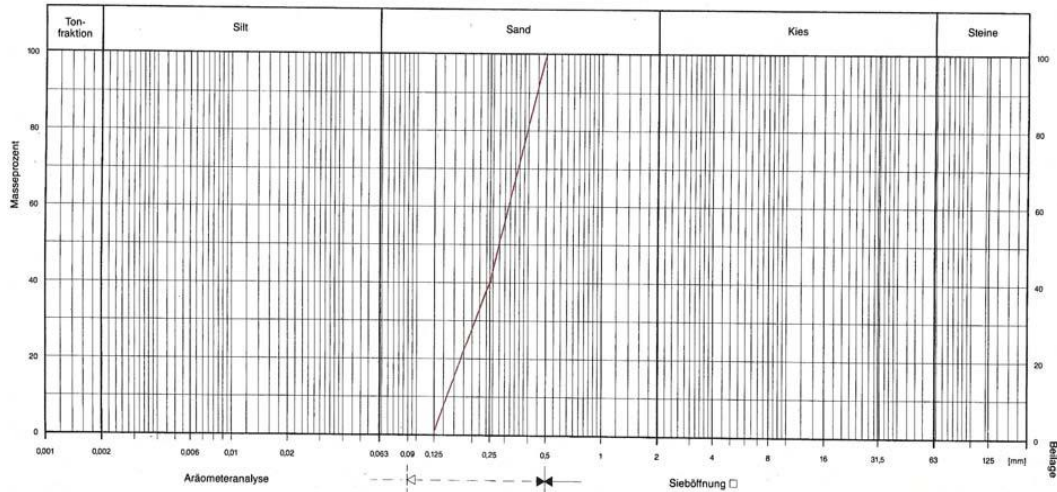
Στην Ενότητα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των μοντέλων που κατασκευάστηκαν. Σε γενικές γραμμές, βάσει της γεωμετρίας τους και σε συνδυασμό με τους λόγους ομοιότητας που παρουσιάστηκαν στο 5^ο Κεφάλαιο, τα αντίστοιχα πρωτότυπα μοντέλα που προκύπτουν είναι ενδεικτικά ύψους: 1.8 m για n=10, 3.6 m για n=20, 9 m για n=50 και 18 m για n=100, ενώ η κλίση των αντίστοιχων πρωτότυπων κατασκευών παραμένει σταθερή 2V:1H. Υπενθυμίζεται ότι το ύψος του μοντέλου που κατασκευάστηκε υπό κλίμακα ήταν 18 cm ενώ επίσης υπήρχε μια βάση 2 cm στην θεμελίωση της κατασκευής.

7.2 Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά εδάφους και οπλισμών.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των μοντέλων επιλέχθηκαν από ήδη υπάρχουσες πρώτες ύλες που βρίσκονταν στο εργαστήριο “Institute for Geotechnics” του ETH Zurich. Στις Ενότητες που ακολουθούν περιγράφονται λεπτομερώς και πραγματοποιείται αναγωγή τους σύμφωνα με τους νόμους ομοιότητας του 5^{ου} Κεφαλαίου.

7.2.1 Εδαφικό Υλικό

Το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των μοντέλων οπλισμένων πρανών ήταν άμμος από το Πέρθ της δυτικής ακτής της Αυστραλίας. Πρόκειται για λευκή, λεπτόκκοκη άμμο με χαλαρή συνοχή και στρογγυλεμένους κόκκους. Η γωνία χαλαρής απόθεσης της άμμου σε ξηρή κατάσταση κυμαίνεται μεταξύ 31^ο και 33^ο. Η κρίσιμη εσωτερική γωνία τριβής είναι $\phi' = 33^{\circ}$. Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη της άμμου και στους Πίνακες 7.1 και 7.2 τα υπόλοιπα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά όπως διερευνήθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Philippe Nater (2005). Σύμφωνα με την κοκκομετρική καμπύλη της άμμου, η διάμετρος των κόκκων είναι μεταξύ 0.125-0.5 mm. Επίσης, παρατηρείται ότι $C_{ud} = D_{60}/D_{10} = 2.2$ και επομένως το έδαφος κατατάσσεται στην κατηγορία της ομοιόμορφης άμμου.



Σχήμα 7.2. Κοκκομετρική καμπύλη άμμου (Nater 2005).
Figure 7.2. Grading curve of the sand (Nater 2005).

Πίνακας 7.1. Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά άμμου (Nater 2005).
Table 7.1. Physical and mechanical characteristics of sand (Nater 2005).

Characteristic	α	φ'	D_d	ρ_s	ρ_{max}	ρ_{min}	ρ_d	e	n
	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	(%)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	-	-
Value	31-33	33	62	2.65	1.801	1.515	1.68	0.61	0.38

Όπου D_d η σχετική πυκνότητα σύμφωνα με την Εξίσωση 7.1, ρ_s η πυκνότητα των στερεών κόκκων και ρ_d η πυκνότητα του δείγματος.

$$D_d = \frac{\rho_{d,max}(\rho_d - \rho_{d,min})}{\rho_d(\rho_{d,max} - \rho_{d,min})} 100 \tag{7.1}$$

Πίνακας 7.2. Λοιπά φυσικά χαρακτηριστικά άμμου (Nater 2005).
Table 7.2. Other physical and mechanical characteristics of sand (Nater 2005).

Characteristic	d_{max}	d_{50}	d_{10}	d_{30}	d_{60}	C_{cd}	C_{ud}
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	-	-
Value	<0.5	0.28	0.14	0.21	0.31	1.0	2.2

Τέλος, ένα μικρό τμήμα της άμμου που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των μοντέλων χρωματίστηκε με μαύρη μπογιά και αναμίχθηκε με την λευκή άμμο προκειμένου να υπάρχει χρωματική αντίθεση (contrast) στο μοντέλο και να είναι πιο ευδιάκριτες οι μετατοπίσεις

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

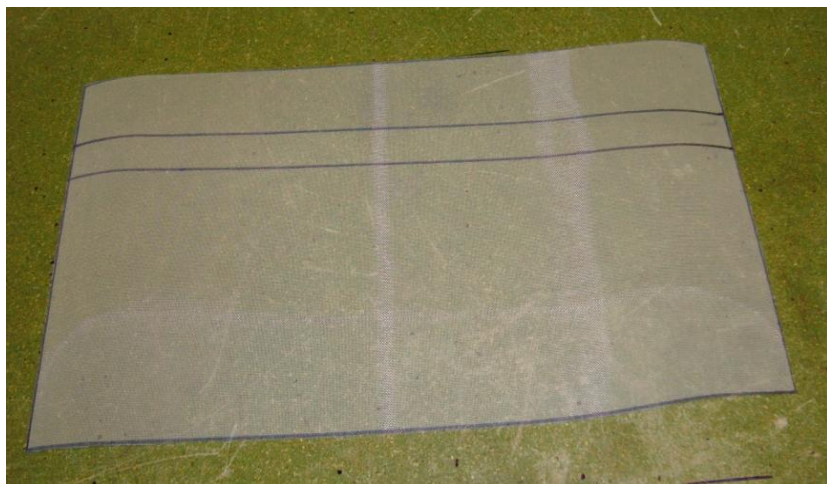
των κόκκων στις ψηφιακές φωτογραφίες που ελήφθησαν με σκοπό την πραγματοποίηση ανάλυσης PIV. Στην Φωτογραφία 7.14 φαίνεται η αντίθεση αυτή.



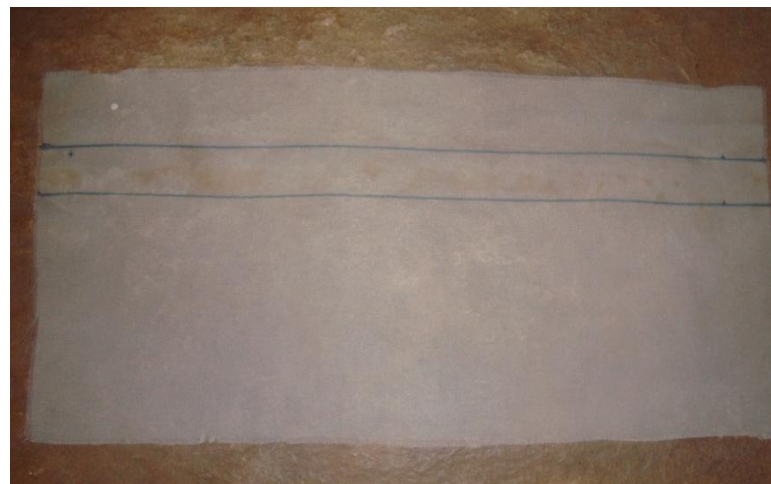
Φωτογραφία 7.14. Αντίθεση χρωματισμένης και λευκής άμμου.
Photograph 7.14. Contrast of painted and white sand.

7.2.2 Υλικά οπλισμών

Καθώς ήταν ιδιαίτερα δύσκολο, δαπανηρό και χρονοβόρο να κατασκευασθούν πραγματικά γεωσυνθετικά υπό μεγάλη κλίμακα από την αρχή, χρησιμοποιήθηκαν υλικά με διαφορετικές αρχικές χρήσεις που προσομοίωναν όσο το δυνατόν καλύτερα την συμπεριφορά των πρωτότυπων γεωσυνθετικών. Στα υλικά αυτά δόθηκαν ονόματα ανάλογα με την αρχική-κανονική χρήση τους και συγκεκριμένα: «Γεώπλεγμα», «Κουρτίνα Α», «Επίδεσμος» και «Κουρτίνα Β». Αντίστοιχες μελέτες με υλικά που έχουν διαφορετικές αρχικές χρήσεις και χρησιμοποιήθηκαν ως γεωσυνθετικά, έχουν πραγματοποιηθεί και στο Πανεπιστήμιο του Cambridge στα πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής με τίτλο ‘Modelling of Geosynthetic Reinforced Soil Walls’ (Balachandram, 1996). Από τα υλικά αυτά, κατασκευάστηκαν 9 στρώσεις οπλισμών για κάθε ένα μοντέλο, με μήκος από 11 έως 19 cm και πλάτος 40 cm, όσο δηλαδή το πλάτος των στιβαρών κουτιών. Οι εσωτερικές διαστάσεις των υλικών και η απόσταση μεταξύ τους όφειλαν να τηρούν τους κανόνες κλίμακας. Στις Φωτογραφίες 7.15 έως και 7.18 παρουσιάζονται τα 4 υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των μοντέλων, ενώ στην Φωτογραφία 7.19 στρώση από «ανθρακούφασμα», πάνω στην οποία επικολλήθηκε δοκιμαστικά ο αισθητήρας οπτικής ίνας.



Φωτογραφία 7.15. Υλικό όπλισης: Γεώπλεγμα.
Photograph 7.15. Reinforcement material: Geogrid.



Φωτογραφία 7.16. Υλικό όπλισης: Κουρτίνα Α.
Photograph 7.16. Reinforcement material: Curtain A.

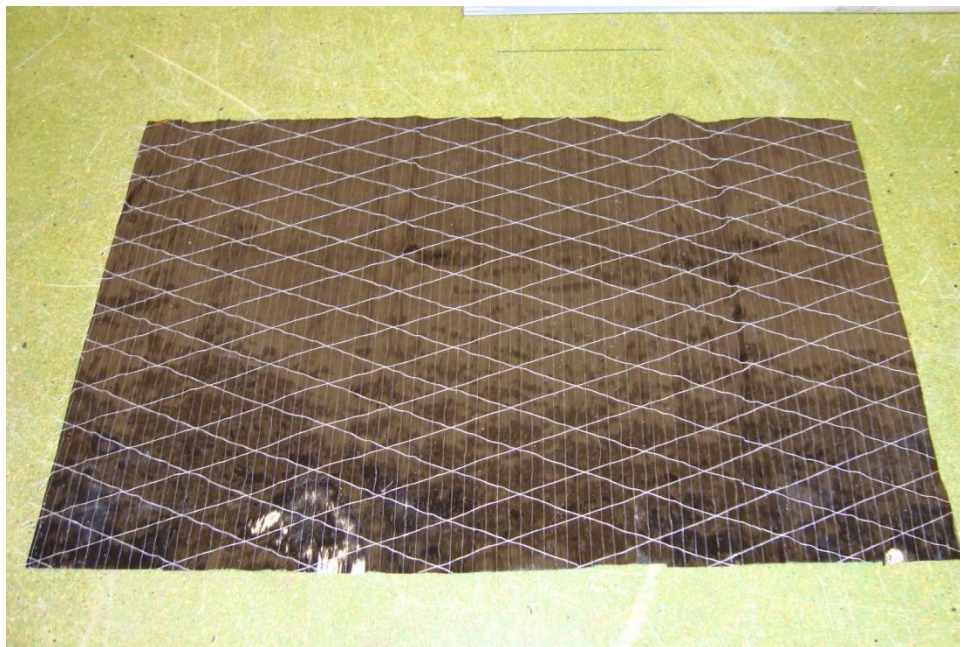


Φωτογραφία 7.17. Υλικό όπλισης: Επίδεσμος.
Photograph 7.17. Reinforcement material: Bandage.



Φωτογραφία 7.18. Υλικό όπλισης: Κουρτίνα Β.
Photograph 7.18. Reinforcement material: Curtain B.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7



Φωτογραφία 7.19. Στρώση οπλισμού από ανθρακούφασμα.
Photograph 7.19. Carbon reinforcement layer.

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 7.3 παρουσιάζονται τα 4 υλικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Ειδικότερα αναφέρεται ότι οι διαστάσεις s_1 , s_2 , b_1 και b_2 αφορούν τις διαμήκεις και τις πλευρικές αποστάσεις των οπλισμών, σύμφωνα με τον γεωμετρικό χαρακτηρισμό κατά Springman et. al. (1992) που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 5.3.2 και το Σχήμα 5.7 του 5^{ου} Κεφαλαίου. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, για όλα τα υλικά οπλισμού ισχύει $s/D_{50} < 5$ για τις διαμήκης και πλευρικές αποστάσεις και επομένως, τα υλικά οπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των εν λόγω μοντέλων, δρουν ως γεωφάσματα και όχι ως γεωπλέγματα. Στους Πίνακες 7.4, έως και 7.7 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι διαστάσεις των στρώσεων οπλισμού για $n=10, 20 \dots$ και 100.

Πίνακας 7.3. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά οπλισμών.
Table 7.3. Geometrical features of reinforcement materials.

No.	Material Type	Linear (cm)	Lateral (cm)	s_1 (mm)	s_2 (mm)	b_1 (mm)	b_2 (mm)
1	'Geogrid'	11 έως 19	40	1.0	1.0	0.5	0.5
2	'Curtain A'	11 έως 19	40	0.3	0.3	0.2	0.2
3	'Bandage'	11 έως 19	40	0.5	0.5	0.3	0.3
4	'Curtain B'	11 έως 19	40	1.0	1.0	0.5	0.5

Πίνακας 7.4. Αναγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών ‘Γεωπλέγματος’ για διάφορες τιμές του n.
Table 7.4. Reduction of geometrical features of ‘Geogrid’ for various n values.

n	Linear (cm)	Lateral (cm)	s₁ (mm)	s₂ (mm)	b₁ (mm)	b₂ (mm)
10	110-190	400	10	10	5	5
20	220-280	800	20	20	10	10
30	330-570	1200	30	30	15	15
40	440-760	1600	40	40	20	20
50	550-950	2000	50	50	25	25
60	660-1140	2400	60	60	30	30
70	770-1330	2800	70	70	35	35
80	880-1520	3200	80	80	40	40
90	990-1710	3600	90	90	45	45
100	1100-1900	4000	100	100	50	50

Πίνακας 7.5. Αναγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών ‘Κουρτίνας Α’ για διάφορες τιμές του n.
Table 7.5. Reduction of geometrical features of ‘Curtain A’ for various n values.

n	Linear (cm)	Lateral (cm)	s₁ (mm)	s₂ (mm)	b₁ (mm)	b₂ (mm)
10	110-190	400	3	3	2	2
20	220-280	800	6	6	4	4
30	330-570	1200	9	9	6	6
40	440-760	1600	12	12	8	8
50	550-950	2000	15	15	10	10
60	660-1140	2400	18	18	12	12
70	770-1330	2800	21	21	14	14
80	880-1520	3200	24	24	16	16
90	990-1710	3600	27	27	18	18
100	1100-1900	4000	30	30	20	20

Πίνακας 7.6. Αναγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών ‘Επιδέσμου’ για διάφορες τιμές του n.
Table 7.6. Reduction of geometrical features of ‘Bandage’ for various n values.

n	Linear (cm)	Lateral (cm)	s₁ (mm)	s₂ (mm)	b₁ (mm)	b₂ (mm)
10	110-190	400	5	5	3	3
20	220-280	800	10	10	6	6
30	330-570	1200	15	15	9	9
40	440-760	1600	20	20	12	12
50	550-950	2000	25	25	15	15
60	660-1140	2400	30	30	18	18
70	770-1330	2800	35	35	21	21
80	880-1520	3200	40	40	24	24
90	990-1710	3600	45	45	27	27
100	1100-1900	4000	50	50	30	30

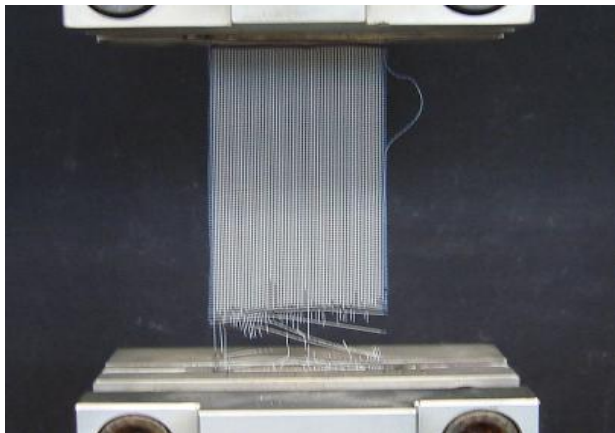
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Πίνακας 7.7. Αναγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών ‘Κουρτίνας Β’ για διάφορες τιμές του n.
Table 7.7. Reduction of geometrical features of ‘Curtain B’ for various n values.

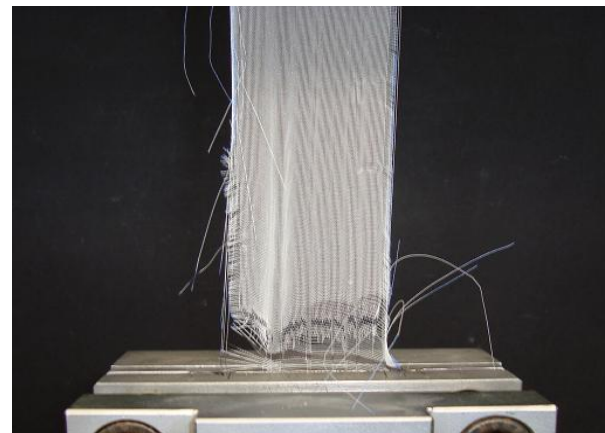
n	Linear (cm)	Lateral (cm)	s₁ (mm)	s₂ (mm)	b₁ (mm)	b₂ (mm)
10	110-190	400	10	10	5	5
20	220-280	800	20	20	10	10
30	330-570	1200	30	30	15	15
40	440-760	1600	40	40	20	20
50	550-950	2000	50	50	25	25
60	660-1140	2400	60	60	30	30
70	770-1330	2800	70	70	35	35
80	880-1520	3200	80	80	40	40
90	990-1710	3600	90	90	45	45
100	1100-1900	4000	100	100	50	50

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής των οπλισμών χωρίς να ληφθεί υπόψη η επιρροή του εδάφους (‘in air’). Το μέγεθος των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν 10 cm καθ’ ύψος, 5 cm κατά πλάτος και 0.1 cm κατά το πάχος. Η συμπεριφορά των υλικών σε εφελκυσμό καθώς και οι διάφορες μορφές αστοχίας τους παρουσιάζονται στις Φωτογραφίες 7.20 έως και 7.23. Στις Φωτογραφίες αυτές μπορεί επίσης να παρατηρηθεί η μορφή και η πλέξη των υλικών οπλισμού.

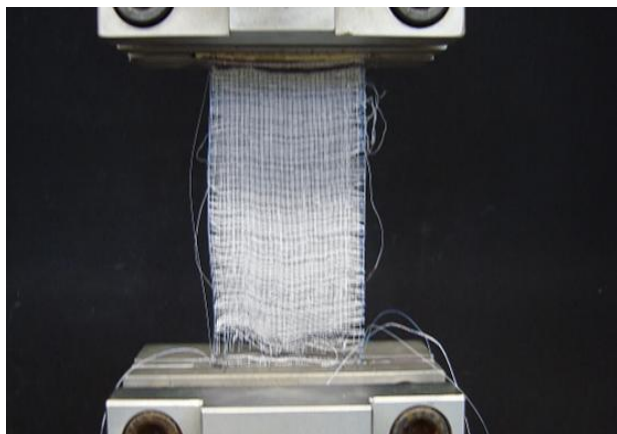
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.3 έως και 7.6, όπου στον κατακόρυφο άξονα αναφέρονται οι τιμές των επιβαλλόμενων φορτίων σε kN, ενώ στον οριζόντιο άξονα οι τιμές των μηκύνσεων σε m. Στην συνέχεια, βάσει των αποτελεσμάτων αυτών, πραγματοποιείται μετατροπή σε kN/m και τα αποτελέσματα της μέγιστης τιμής, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.8, για τις 4 στρώσεις οπλισμού και για διάφορες τιμές του συντελεστή προσομοίωσης n. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στα Σχήματα 7.3 έως και 7.6 και στον Πίνακα 7.8, το υλικό «Γεώπλεγμα», άντεξε τη μεγαλύτερη εφελκυστική φόρτιση ίση με 9.3 kN/m για n=1, ενώ το υλικό «Κουρτίνα Β» τη μικρότερη, ίση με 2.5 kN/m για n=1.



Φωτογραφία 7.20. Πείραμα εφελκυστικής αντοχής 'Γεωπλέγματος'.
 Photograph 7.20. Tensile strength test of 'Geogrid'.



Φωτογραφία 7.21. Πείραμα εφελκυστικής αντοχής 'Κουρτίνας Α'.
 Photograph 7.21. Tensile strength test of 'Curtain A'.

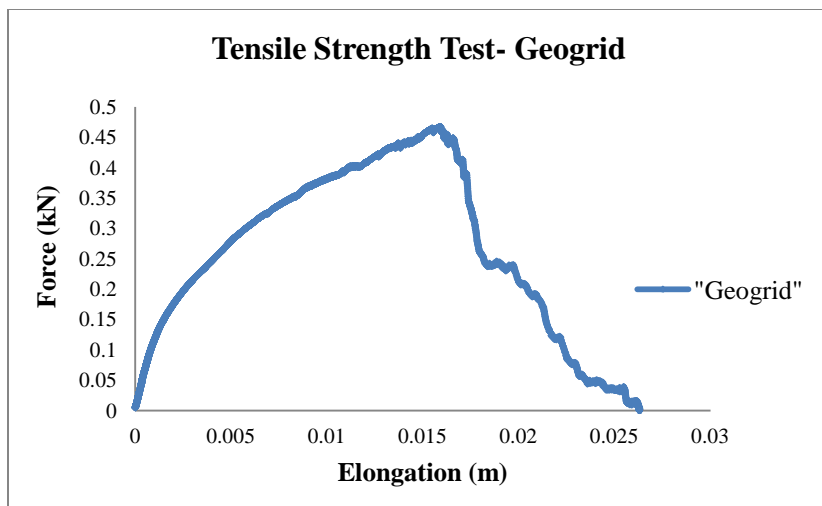


Φωτογραφία 7.22. Πείραμα εφελκυστικής αντοχής 'Επιδέσμου'.
 Photograph 7.22. Tensile strength of 'Bandage'.

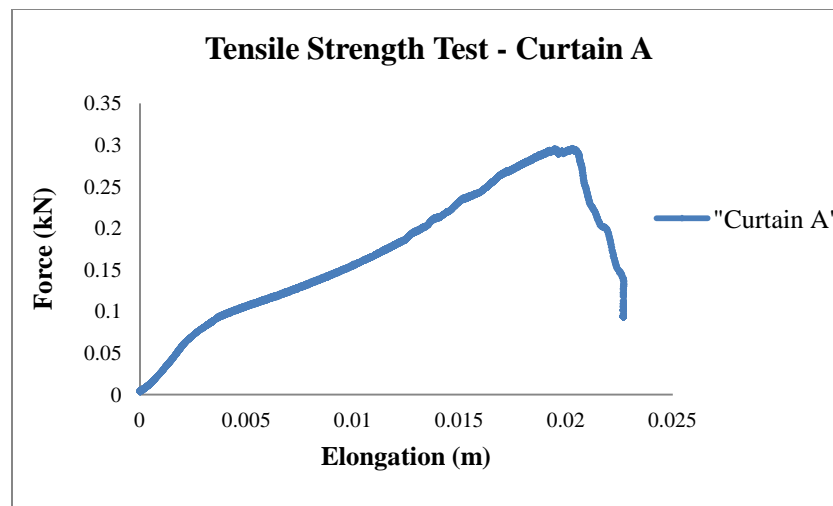


Φωτογραφία 7.23. Πείραμα εφελκυστικής αντοχής 'Κουρτίνας Β'.
 Photograph 7.23. Tensile strength test of 'Curtain B'.

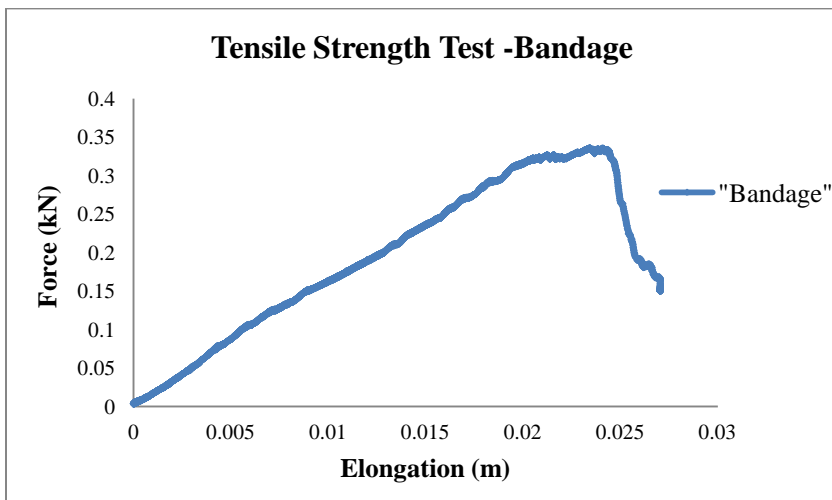
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7



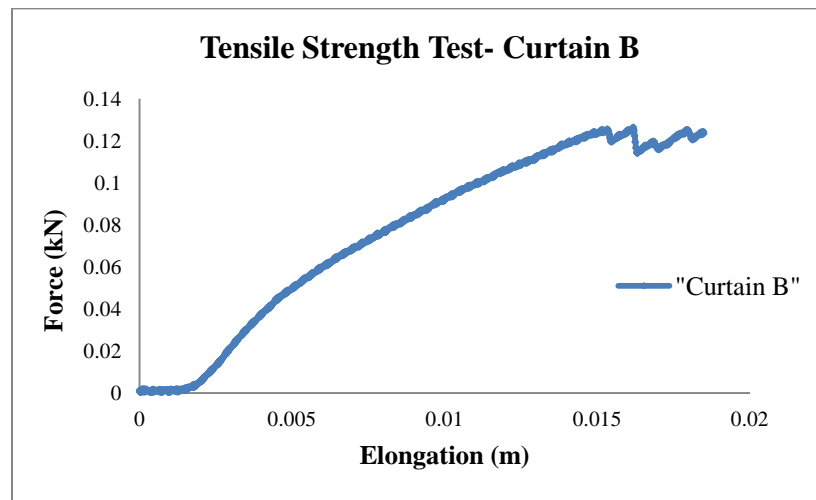
Σχήμα 7.3. Διάγραμμα δύναμης-επιμήκυνσης για 'Γεόπλεγμα'.
Figure 7.3. Force-elongation chart for 'Geogrid'.



Σχήμα 7.4. Διάγραμμα δύναμης-επιμήκυνσης για 'Κουρτίνα Α'.
Figure 7.4. Force-elongation chart for 'Curtain A'.



Σχήμα 7.5. Διάγραμμα δύναμης-επιμήκυνσης για 'Επίδεσμο'.
Figure 7.5. Force-elongation chart for 'Bandage'.



Σχήμα 7.6. Διάγραμμα δύναμης-επιμήκυνσης για 'Κουρτίνα Β'.
Figure 7.6 Force-elongation chart for 'Curtain B'.

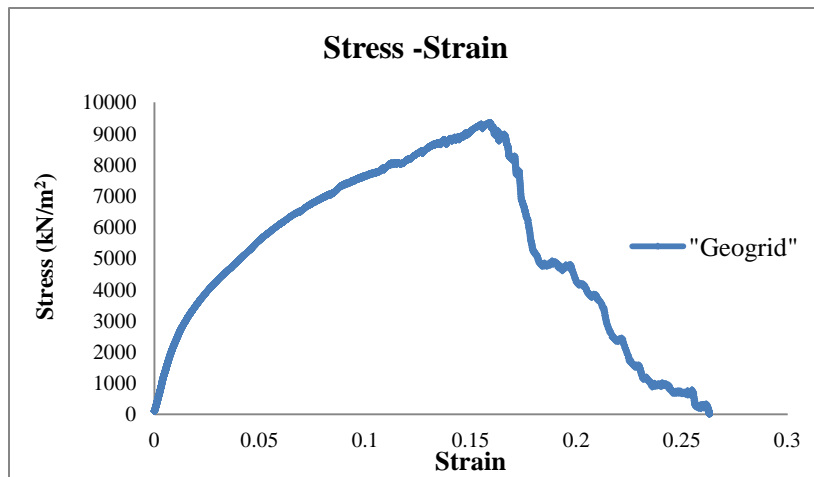
Πίνακας 7.8. Μέση τιμή μέγιστης εφελκυστικής αντοχής οπλισμών για διάφορες τιμές του n.
Table 7.8. Mean of maximum tensile strength of reinforcement materials for various n values.

n	Material Type			
	‘Geogrid’	‘Curtain A’	‘Bandage’	‘Curtain B’
	Maximum Tensile Strength (kN/m)			
1.00	9.3	5.9	6.7	2.5
10.00	93	59	67	25
20.00	186	118	134	50
30.00	279	177	201	75
40.00	372	236	268	100
50.00	465	295	335	125
60.00	558	354	402	150
70.00	651	413	469	175
80.00	744	472	536	200
90.00	837	531	603	225
100.00	930	590	670	250

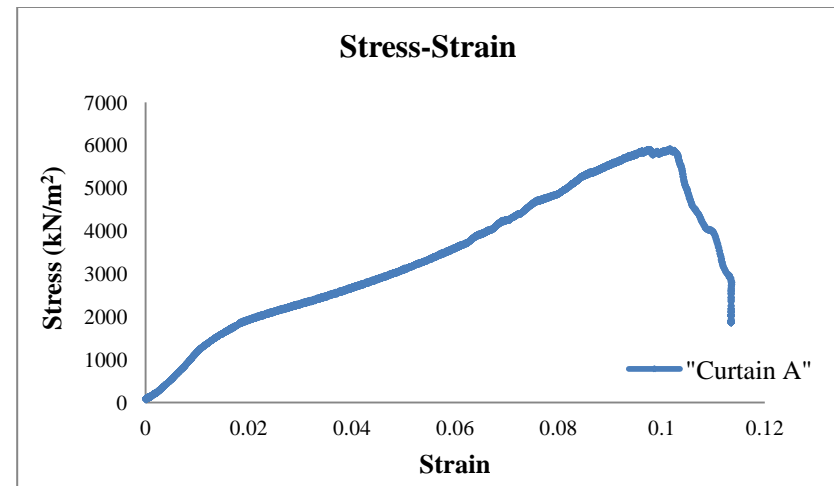
Στην συνέχεια παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.7 έως και 7.10, τα διαγράμματα τάσεων-τροπών για τα 4 υλικά όπλισης με στόχο να υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας E για το κάθε ένα από αυτά. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις σ υπολογίσθηκαν διαιρώντας τις τιμές της δύναμης που εφαρμόσθηκε κατά την εφελκυστική φόρτιση των δειγμάτων όπλισης, με την επιφάνεια αυτών ίση με $A=0.001 \cdot 0.05=0.00005 \text{ m}^2$, ενώ οι αναπτυσσόμενες τροπές ϵ , υπολογίσθηκαν διαιρώντας την μήκυνση που μετρήθηκε κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων εφελκυστικής φόρτισης με το συνολικό μήκος των υπό εξέταση δειγμάτων, δηλαδή με 0.1 m.

Για τον προσδιορισμό της κλίσης του διαγράμματος τάσεων-τροπών και τον υπολογισμό του E, επιλέγεται η περιοχή των τροπών (άξονας x) που αντιστοιχεί στις μετρούμενες τροπές με τους αισθητήρες οπτικών ινών. Ειδικότερα επιλέγονται τιμές του άξονα x από 0 έως και 0.03, όπως μετρήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών. Έτσι, προκύπτει για το υλικό όπλισης «Γεώπλεγμα» $E=120000 \text{ kN/m}^2$, για το υλικό όπλισης «Κουρτίνα Α», $E=70000 \text{ kN/m}^2$, για το υλικό όπλισης «Επίδεσμος», $E=32000 \text{ kN/m}^2$ και για το υλικό όπλισης «Κουρτίνα Β», $E=16000 \text{ kN/m}^2$.

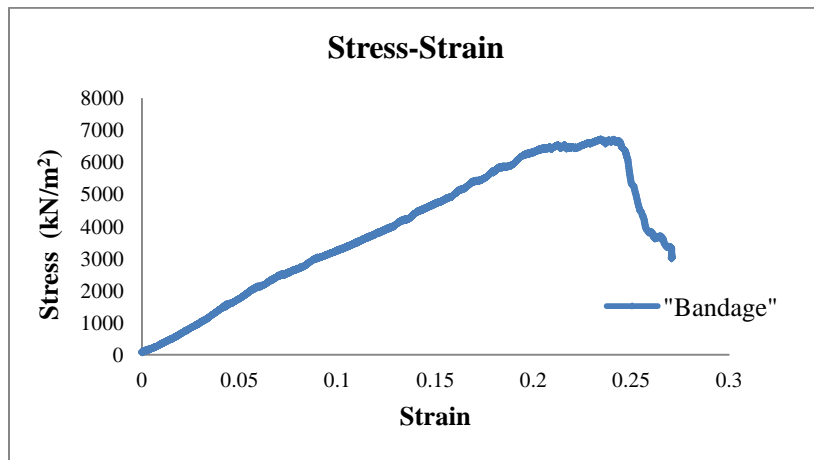
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7



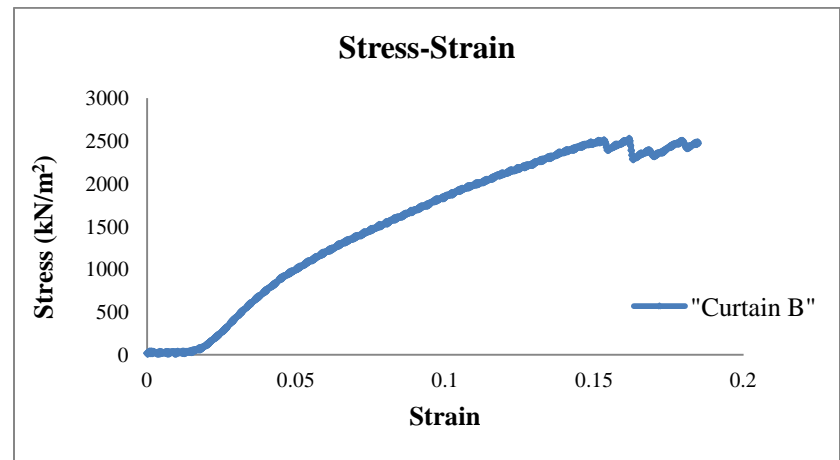
Σχήμα 7.7. Διάγραμμα τάσεων-τροπών για 'Γεόπλεγμα'.
Figure 7.7. Stress-strain diagram for 'Geogrid'.



Σχήμα 7.8. Διάγραμμα τάσεων-τροπών για 'Κουρτίνα Α'.
Figure 7.8. . Stress-strain diagram for 'Curtain A'.



Σχήμα 7.9. Διάγραμμα τάσεων-τροπών για 'Επίδεσμο'.
Figure 7.9. Stress-strain diagram for 'Bandage'.



Σχήμα 7.10. Διάγραμμα τάσεων-τροπών για 'Κουρτίνα Β'.
Figure 7.10. . Stress-strain diagram for 'Curtain B'.

Στους Πίνακες 7.9 έως και 7.12 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των οπλισμένων πρανών για διάφορες τιμές του συντελεστή μοντελοποίησης: $n=1, 10, 20, \dots, 50, \dots$ και 100. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στις διάφορες στάθμες της επιτάχυνσης της βαρύτητας κάτω από τις οποίες φορτίστηκαν τα μοντέλα στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.

Οι πίνακες αυτοί χρησιμοποιούνται στην συνέχεια για την δημιουργία των υπολογιστικών μοντέλων, προκειμένου να γίνει σύγκριση των πειραματικών υπό κλίμακα μοντέλων (scaling models) με αντίστοιχα μοντέλα σε πρωτότυπες διαστάσεις (prototype models). Στην 1^η στήλη του κάθε πίνακα αναφέρεται ο συντελεστής κλίμακας n , στην 2^η και 3^η στήλη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρανούς ενώ στις υπόλοιπες στήλες τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των στρώσεων οπλισμού.

Πίνακας 7.9. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλων με ‘Γεώπλεγμα’ για διάφορες τιμές του n .
Table 7.9. Geometrical characteristics of models with ‘Geogrid’ for various n values.

n	Slope Height (m)	Slope Width (m)	Reinf. Length (m)	Tensile Strength (kN/m)	Width (m)	s₁ (mm)	s₂ (mm)	b₁ (mm)	b₂ (mm)
1	0.18	0.40	0.11-0.19	9.3	0.40	1.00	1.00	0.50	0.50
10	1.80	4.00	1.10-1.90	93	4.00	10.00	10.00	5.00	5.00
20	3.60	8.00	2.20-3.80	186	8.00	20.00	20.00	10.00	10.00
30	5.40	12.00	3.30-5.70	279	12.00	30.00	30.00	15.00	15.00
40	7.20	16.00	4.40-7.60	372	16.00	40.00	40.00	20.00	20.00
50	9.00	20.00	5.50-9.50	465	20.00	50.00	50.00	25.00	25.00
60	10.80	24.00	6.60-11.40	558	24.00	60.00	60.00	30.00	30.00
70	12.60	28.00	7.70-13.30	651	28.00	70.00	70.00	35.00	35.00
80	14.40	32.00	8.80-15.20	744	32.00	80.00	80.00	40.00	40.00
90	16.20	36.00	9.90-17.10	837	36.00	90.00	90.00	45.00	45.00
100	18.00	40.00	11.00-19.00	930	40.00	100.00	100.00	50.00	50.00

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Πίνακας 7.10. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλων με ‘Κουρτίνα Α’ για διάφορες τιμές του n.
Table 7.10. Geometrical characteristics of models with ‘Curtain A’ for various n values.

n	Slope Height (m)	Slope Width (m)	Reinf. Length (m)	Tensile Strength (kN/m)	Width (m)	s₁ (mm)	s₂ (mm)	b₁ (mm)	b₂ (mm)
1	0.18	0.40	0.11-0.19	5.9	0.40	0.3	0.3	0.2	0.2
10	1.80	4.00	1.10-1.90	59	4.00	3.00	3.00	2.00	2.00
20	3.60	8.00	2.20-3.80	118	8.00	6.00	6.00	4.00	4.00
30	5.40	12.00	3.30-5.70	177	12.00	9.00	9.00	6.00	6.00
40	7.20	16.00	4.40-7.60	236	16.00	12.00	12.00	8.00	8.00
50	9.00	20.00	5.50-9.50	295	20.00	15.00	15.00	10.00	10.00
60	10.80	24.00	6.60-11.40	354	24.00	18.00	18.00	12.00	12.00
70	12.60	28.00	7.70-13.30	413	28.00	21.00	21.00	14.00	14.00
80	14.40	32.00	8.80-15.20	472	32.00	24.00	24.00	16.00	16.00
90	16.20	36.00	9.90-17.10	531	36.00	27.00	27.00	18.00	18.00
100	18.00	40.00	11.00-19.00	590	40.00	30.00	30.00	20.00	20.00

Πίνακας 7.11. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλων με ‘Επίδεσμο’ για διάφορες τιμές του n.
Table 7.11. Geometrical characteristics of models with ‘Bandage’ for various n values.

n	Slope Height (m)	Slope Width (m)	Reinf. Length (m)	Tensile Strength (kN/m)	Width (m)	s₁ (mm)	s₂ (mm)	b₁ (mm)	b₂ (mm)
1	0.18	0.40	0.11-0.19	6.7	0.40	0.5	0.5	0.3	0.3
10	1.80	4.00	1.10-1.90	67	4.00	5.00	5.00	3.00	3.00
20	3.60	8.00	2.20-3.80	134	8.00	10.00	10.00	6.00	6.00
30	5.40	12.00	3.30-5.70	201	12.00	15.00	15.00	9.00	9.00
40	7.20	16.00	4.40-7.60	268	16.00	20.00	20.00	12.00	12.00
50	9.00	20.00	5.50-9.50	335	20.00	25.00	25.00	15.00	15.00
60	10.80	24.00	6.60-11.40	402	24.00	30.00	30.00	18.00	18.00
70	12.60	28.00	7.70-13.30	469	28.00	35.00	35.00	21.00	21.00
80	14.40	32.00	8.80-15.20	536	32.00	40.00	40.00	24.00	24.00
90	16.20	36.00	9.90-17.10	603	36.00	45.00	45.00	27.00	27.00
100	18.00	40.00	11.00-19.00	670	40.00	50.00	50.00	30.00	30.00

Πίνακας 7.12. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλων με ‘Κουρτίνα Β’ για διάφορες τιμές του n.
Table 7.12. Geometrical characteristics of models with ‘Curtain B’ for various n values.

n	Slope Height (m)	Slope Width (m)	Reinf. Length (m)	Tensile Strength (kN/m)	Width (m)	s ₁ (mm)	s ₂ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)
1	0.18	0.40	0.11-0.19	2.5	0.40	1	1	0.5	0.5
10	1.80	4.00	1.10-1.90	25	4.00	10.00	10.00	5.00	5.00
20	3.60	8.00	2.20-3.80	50	8.00	20.00	20.00	10.00	10.00
30	5.40	12.00	3.30-5.70	75	12.00	30.00	30.00	15.00	15.00
40	7.20	16.00	4.40-7.60	100	16.00	40.00	40.00	20.00	20.00
50	9.00	20.00	5.50-9.50	125	20.00	50.00	50.00	25.00	25.00
60	10.80	24.00	6.60-11.40	150	24.00	60.00	60.00	30.00	30.00
70	12.60	28.00	7.70-13.30	175	28.00	70.00	70.00	35.00	35.00
80	14.40	32.00	8.80-15.20	200	32.00	80.00	80.00	40.00	40.00
90	16.20	36.00	9.90-17.10	225	36.00	90.00	90.00	45.00	45.00
100	18.00	40.00	11.00-19.00	250	40.00	100.00	100.00	50.00	50.00

7.3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης.

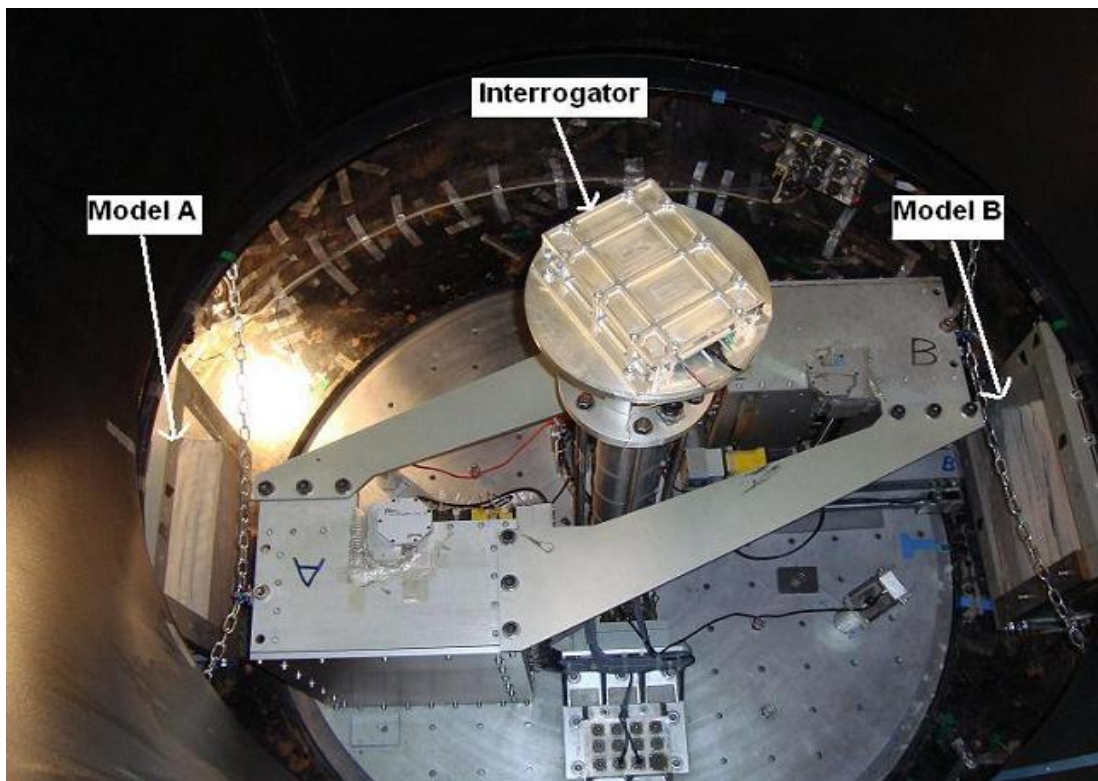
Τα μοντέλα των οπλισμένων πρανών τοποθετήθηκαν στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή όπως φαίνεται στην Φωτογραφία 7.24, εστιάζοντας στην όσο το δυνατόν καλύτερη στερέωσή τους προκειμένου να αποφευχθούν οι μετακινήσεις τους κατά την αύξηση της επιτάχυνσης. Σε κάθε πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 2 ζεύγη μοντέλων, όπου το πρώτο ήταν το υπό εξέταση μοντέλο από το οποίο λαμβάνονταν οι μετρήσεις ενώ το δεύτερο λειτουργούσε ως αντίβαρο.

Βασικός στόχος των πειραμάτων ήταν να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για πρώτη φορά στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ΕΤΗΖ η μετρητική διάταξη των οπτικών ινών, προκειμένου να καταγραφούν οι αναπτυσσόμενες τροπές στους οπλισμούς που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των μοντέλων. Για να ληφθούν ταυτόχρονες μετρήσεις κατά τη διάρκεια φόρτισης των μοντέλων, χρησιμοποιήθηκε το φορητό SE 600 Interrogator από τη FOS&S το οποίο φαίνεται στην Φωτογραφία 7.25 και τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του φυγοκεντριστή, μέσα σε ένα στιβαρό κουτί προκειμένου να αποφευχθούν οι μετακινήσεις του κατά την αύξηση του «πεδίου της βαρύτητας».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Στο εσωτερικό του κουτιού τοποθετήθηκε επιπλέον ένα υλικό από καουτσούκ προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ακόμη περισσότερο η πιθανότητα μετακινήσεων του κατά την περιστροφή του φυγοκεντριστή, όπως φαίνεται στην Φωτογραφία 7.26. Τέλος, πριν από την έναρξη των πειραμάτων έπρεπε να διασφαλιστεί ότι η «ασπίδα προστασίας» του γεωτεχνικού φυγοκεντριστή θα ήταν κλειστή, προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι δεν θα προκληθεί κάποιο ατύχημα λόγω των μεγάλων ταχυτήτων που αναπτύσσονται κατά την περιστροφή του φυγοκεντριστή. Ο έλεγχος της θέσης της «ασπίδας προστασίας» παρουσιάζεται στην Φωτογραφία 7.27.

Λεπτομέρειες για την χρήση των οπτικών ινών και την τοποθέτησή τους στα μοντέλα παρουσιάζεται στην Ενότητα 7.4 ενώ τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο επόμενο, 8^ο Κεφάλαιο.



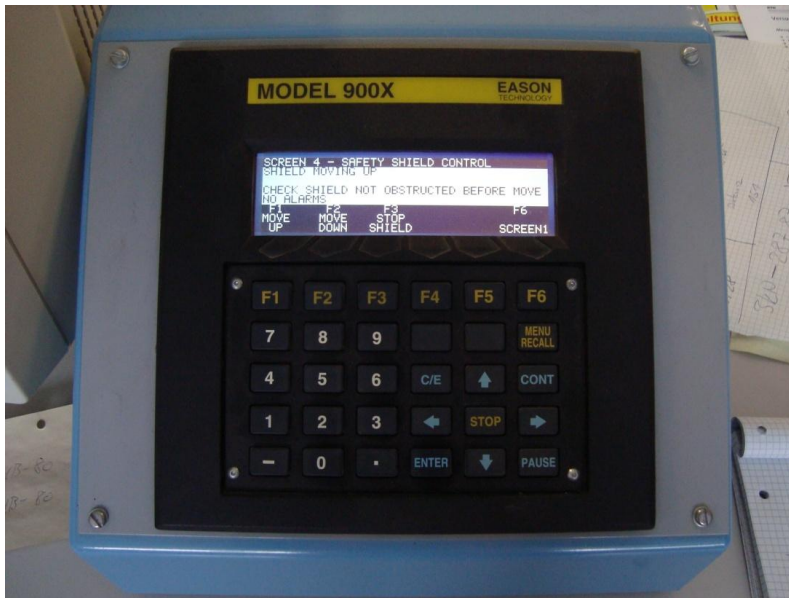
Φωτογραφία 7.24. Μοντέλα οπλισμένων πρανών στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.
Photograph 7.24.Reinforced slope models in the geotechnical centrifuge.



Φωτογραφία 7.25. Φορητό SE 600.
Photograph 7.25. Mobile SE 600.



Φωτογραφία 7.26. Άκαμπο κουτί και καουτσούκ.
Photograph 7.26. Strong box and rubber.



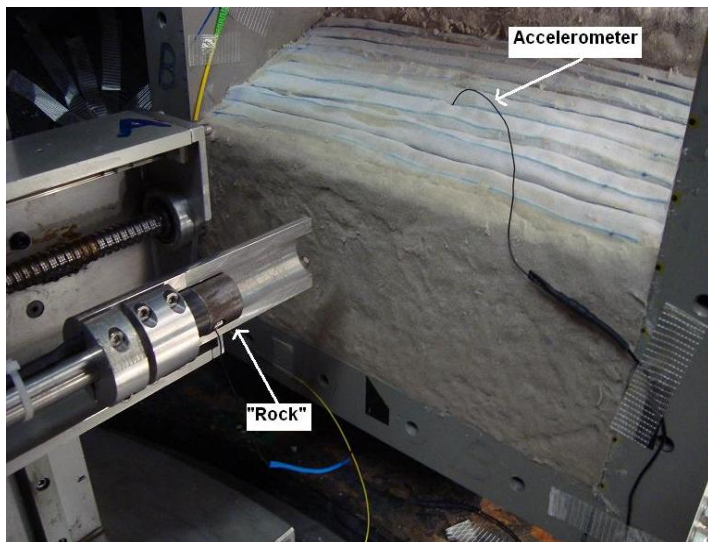
Φωτογραφία 7.27. Έλεγχος θέσης της ασπίδας προστασίας του φυγοκεντριστή.
Photograph 7.27. Centrifuge shield protection check.

Για την προσομοίωση των βραχοπτώσεων στα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώματα «βράχου» υπό κλίμακα, κατασκευασμένα από ατσάλι και τοποθετήθηκαν σε μια πλατφόρμα με ενσωματωμένο ηλεκτρομαγνήτη. Η πλατφόρμα περιστρεφόταν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ταυτοχρόνως με το τύμπανο του φυγοκεντριστή και ο ηλεκτρομαγνήτης συγκρατούσε τα μοντέλα «βράχου» κατά τη διάρκεια του πειράματος, τα οποία και

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

απελευθερώθηκαν την κατάλληλη στιγμή. Ένας σωλήνας χρησιμοποιήθηκε για να καθορισθεί με ακρίβεια η τροχιά που θα ακολουθούσε το μοντέλο «βράχου», εξασφαλίζοντας ορθογώνια επαφή μεταξύ αυτού και της επιφάνειας του πρανούς, καθώς και προκειμένου να διατηρηθεί το μοντέλο «βράχου» σε πεδίο «βαρύτητας» ng . Συγκεκριμένα, σε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, τα μοντέλα «βράχου» απελευθερώθηκαν μόλις το πρανές φορτίστηκε σε στάθμη της επιτάχυνσης ίσης προς $50g$.

Στην Φωτογραφία 7.28 παρουσιάζεται ένα από τα μοντέλα οπλισμένων πρανών, μέσα στο φυγοκεντριστή με τη διάταξη της ρίψης βράχων και στην Φωτογραφία 7.29 παρουσιάζονται μερικά δείγματα από μοντέλα «βράχων» υπό κλίμακα.



Φωτογραφία 7.28. Οπλισμένο πρανές υποβαλλόμενο σε βραχύπτωση.
Photograph 7.28. Reinforced slope subjected to rockfall.



Φωτογραφία 7.29. Δείγματα από μοντέλα «βράχων».
Photograph 7.29. Reinforced slope subjected to rockfall.

Η πειραματική διάταξη ολοκληρώθηκε με την τοποθέτηση φωτογραφικής μηχανής υψηλής ταχύτητας της Mikrotрон κοντά στα μοντέλα προκειμένου να καταγραφεί η συμπεριφορά τους στις διάφορες φάσεις των φορτίσεων. Οι ψηφιακές φωτογραφίες που ελήφθησαν χρησιμοποιήθηκαν για ανάλυση σύμφωνα με την μέθοδο Particle Imaging Velocimetry (PIV). Η περιγραφή της μεθοδολογίας PIV παρουσιάστηκε στο 6^ο Κεφάλαιο, ενώ τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο επόμενο, 8^ο Κεφάλαιο. Τέλος, τοποθετήθηκε μια κάμερα με λέιζερ κοντά στην κορυφή των μοντέλων προκειμένου να παρατηρείται η συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων. Στην Φωτογραφία 7.30 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από την παρακολούθηση των μοντέλων μέσω της κάμερας με λέιζερ, όπου διακρίνεται το μοντέλο «βράχου» που απελευθερώθηκε στην κορυφή του πρανούς. Οι εικόνες που ελήφθησαν με την φωτογραφική μηχανή Mikrotрон μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για τις τροπές που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, ενώ τα βίντεο και οι εικόνες που ελήφθησαν με τη κάμερα λέιζερ χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για γενική εποπτεία κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων και μετά το πέρας αυτών. Στην Φωτογραφία 7.31 παρουσιάζεται το αποτύπωμα του μοντέλου «βράχου» στην επιφάνεια του πρανούς, ενώ στις Φωτογραφίες 7.32, 7.33 και 7.34 οι οθόνες παρακολούθησης κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων.



Φωτογραφία 7.30. Ρίψη μοντέλου «βράχου» στην κορυφή του οπλισμένου πρανούς (κάμερα λέιζερ).
Photograph 7.30 Rock fall view on top of reinforced slope (laser camera).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7



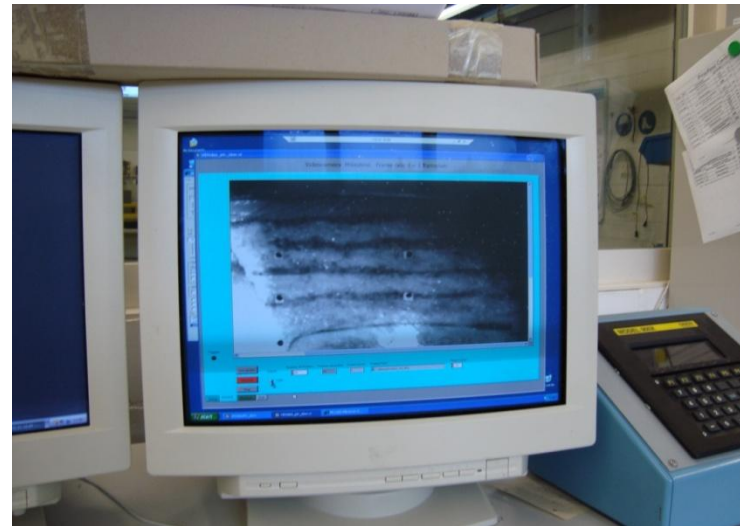
Φωτογραφία 7.31. Αποτύπωμα μοντέλου «βράχου».
Photograph 7.31. Model boulder print.



Φωτογραφία 7.32. Παρακολούθηση μοντέλου
Photograph 7.32. Model monitoring.



Φωτογραφία 7.33. Οθόνες παρακολούθησης μοντέλων.
Photograph 7.33. Model observation monitors.



Φωτογραφία 7.34. Κοντινότερη παρακολούθηση μοντέλου.
Photograph 7.34. Closer model observation monitor.

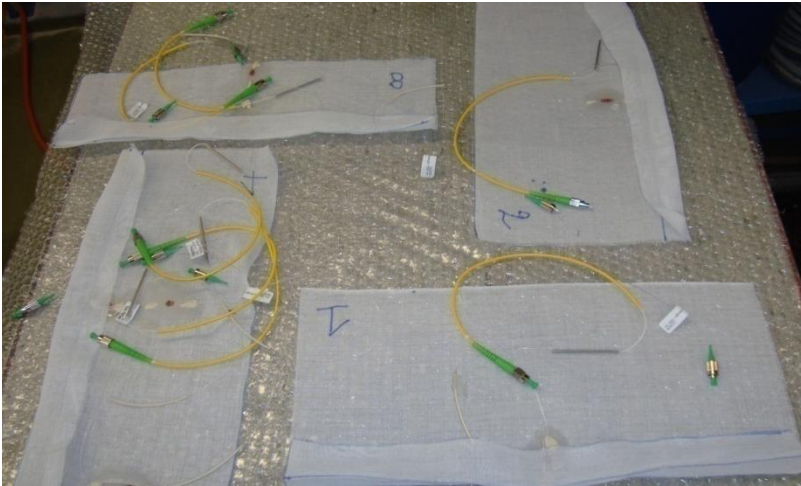
7.4 Εφαρμογή αισθητήρων οπτικών ινών σε οπλισμένα πρανή.

Όπως αναφέρθηκε και στα παραπάνω, για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, ενσωματώθηκαν αισθητήρες οπτικών ινών χωρίς επικάλυψη σε δύο από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για να προσομοιώσουν τις στρώσεις των οπλισμών. Συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν αισθητήρες στα δύο πιο ασθενή υλικά: τον «Επίδεσμο» και στην «Κουρτίνα Β». Ο λόγος που επιλέχθηκαν τα δύο αυτά υλικά ήταν γιατί οι αναμενόμενες αναπτυσσόμενες τροπές θα ήταν πιο μεγάλες και επομένως το φαινόμενο θα μπορούσε να καταγραφεί πιο παραστατικά.

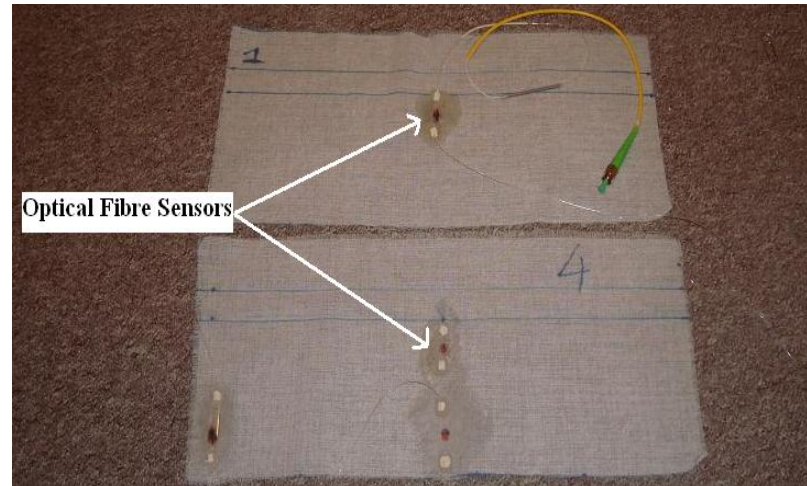
Το μήκος των αισθητήρων ήταν περίπου 2 cm ενώ η διάμετρός τους 0.5 mm και επικολλήθηκαν με κόλλα NOA61 (UV κόλλα), σε διάφορες θέσεις προκειμένου να μετρηθούν ταυτόχρονα οι διατμητικές τροπές που αναπτύχθηκαν κατά τα διάφορες φάσεις των φορτίσεων. Επιπλέον, για την στερέωση της αρχής και του τέλους των αισθητήρων χρησιμοποιήθηκε ένα πρόσθετο μείγμα κόλλας κατασκευασμένο από ένα μέρος κόλλας σε μορφή πούδρας τύπου X 60 και ένα μέρος υγρής κόλλας τύπου X 60. Η κόλλα αυτή χρησιμοποιήθηκε για να εξασφαλισθεί η απόλυτη συνεργασία των αισθητήρων με τους οπλισμούς χωρίς απώλεια επαφής και χωρίς ολίσθηση κατά τη διάρκεια κατασκευής των μοντέλων και κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Στις Φωτογραφίες 7.35 και 7.36, παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένες στρώσεις οπλισμού με ενσωματωμένους αισθητήρες, ενώ στην Φωτογραφία 7.37 λεπτομέρεια της συγκόλλησης ενός αισθητήρα.

Όλοι οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν συνδεδεμένοι σε σειρά και κάθε ένας από αυτούς είχε διαφορετικό μήκος κύματος προκειμένου να καταγράφονται ταυτόχρονα οι μετακινήσεις με το φορητό Spectral Eye Interrogator - SE 600 της FOS&S που τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του φυγοκεντριστή. Η συνένωση των αισθητήρων πραγματοποιήθηκε με ειδική συσκευή συνένωσης (splicer) η οποία παρουσιάζεται στις Φωτογραφίες 7.38 και 7.39 και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το SmartSoft σε περιβάλλον LabView, από την εταιρεία SmartFibres και παρουσιάζεται στην Φωτογραφία 7.40.

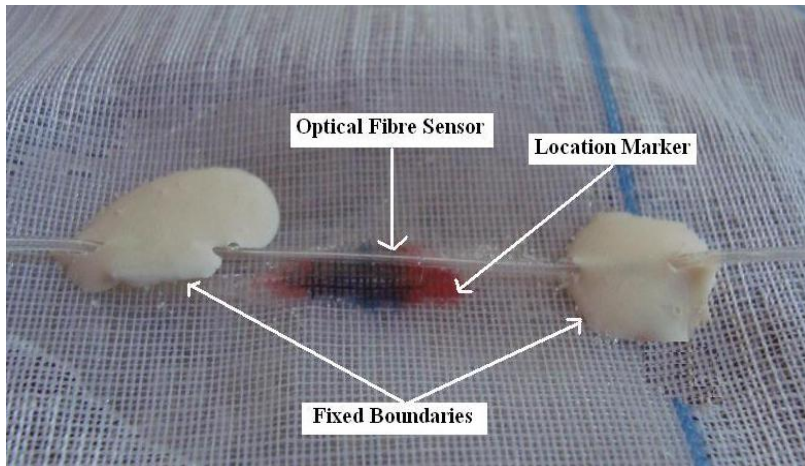
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7



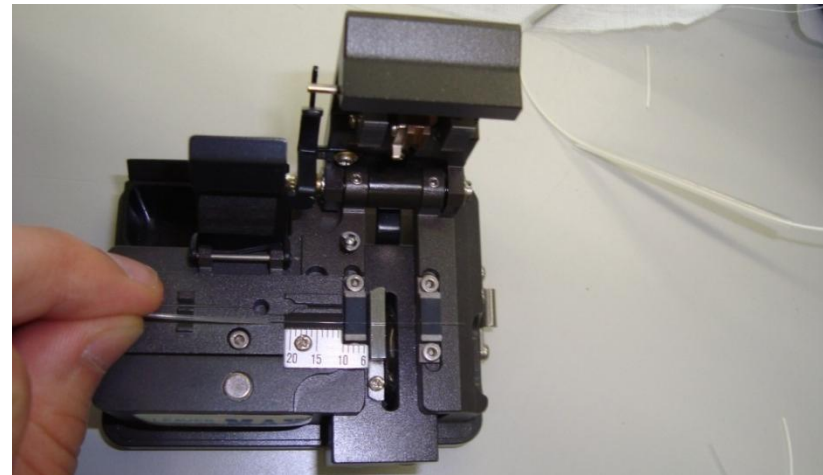
Φωτογραφία 7.35. Στρώσεις σπλισμού με αισθητήρες ο.ι.
Photograph 7.35. Reinforcement materials with o. f. sensors.



Φωτογραφία 7.36. Στρώσεις σπλισμού με αισθητήρες ο.ι.
Photograph 7.36. Reinforcement materials with o. f. sensors.



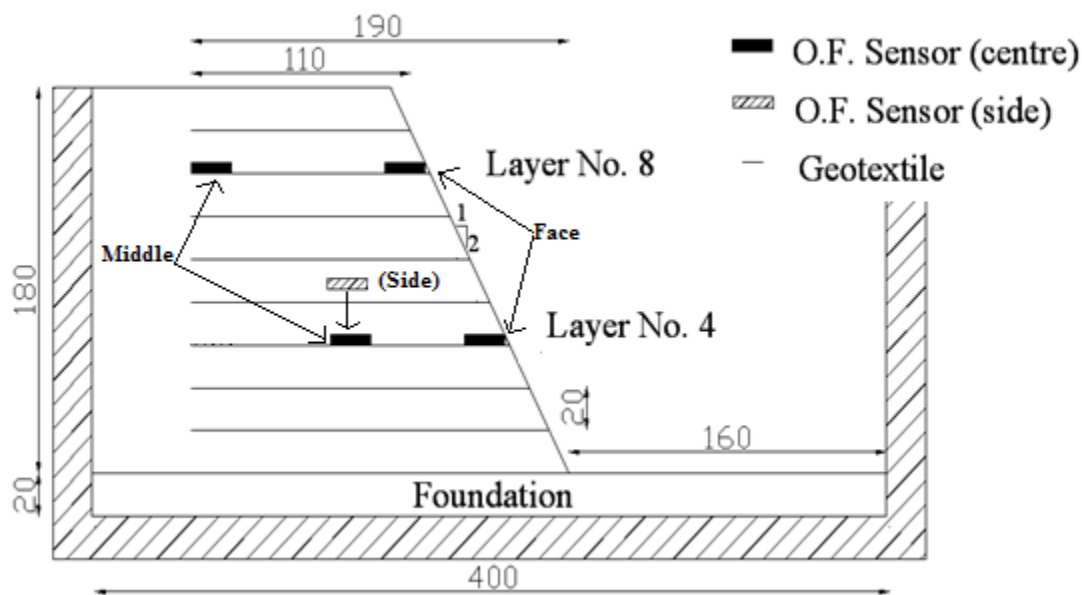
Φωτογραφία 7.37. Λεπτομέρεια συγκόλλησης αισθητήρα.
Photograph 7.37. O.f. sensor detailed attachment.



Φωτογραφία 7.38. Συνένωση αισθητήρα.
Photograph 7.38. O.f. sensor splicing.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Η συνένωση των αισθητήρων οπτικών ινών με διαφορετικό μήκος κύματος στη σειρά έδωσε τη δυνατότητα να ληφθούν ταυτόχρονες μετρήσεις ανά 1 sec κατά τη διάρκεια της αύξησης της επιτάχυνσης της βαρύτητας και την απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου». Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε διάφορες θέσεις στις στρώσεις των οπλισμών οι οποίες και φαίνονται στο Σχήμα 7.11. Ειδικότερα τοποθετήθηκαν: α) δύο αισθητήρες σε απόσταση 2 cm από την όψη του πρανούς στις στρώσεις οπλισμού 4 και 8, σε *ενδιάμεση τομή* του πρανούς και σε κατακόρυφη απόσταση 12 και 4 cm από την κορυφή των πρανών αντίστοιχα, β) ένας αισθητήρας στην στρώση οπλισμού 4 σε απόσταση 8 cm από την όψη του πρανούς, στην ίδια *ενδιάμεση τομή* του πρανούς, γ) ένας αισθητήρας στην στρώση 8 σε απόσταση 12 cm από την όψη του πρανούς, στην ίδια *ενδιάμεση τομή* του πρανούς και τέλος δ) ένας αισθητήρας στην στρώση οπλισμού 4 σε απόσταση 12 cm από την όψη του πρανούς, στην *ακραία τομή του πρανούς*, κοντά στην πλευρά του Plexiglas



Σχήμα 7.11. Θέσεις αισθητήρων οπτικών ινών.
Figure 7.11. Location of optical fibre sensors.

Οι μεταβολές του μήκους κύματος των αισθητήρων που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μετατράπηκαν με την εφαρμογή της Εξίσωσης 7.2 σε τροπές.

$$\Delta \varepsilon = (\Delta \lambda - K \tau * \Delta \tau) / K \varepsilon \quad (7.2)$$

όπου Δ_ϵ [%] είναι η μετρούμενη τροπή; Δ_λ η μεταβολή του μήκους κύματος; K_ϵ συντελεστής που εκφράζει την σχέση τροπής – τάσης και είναι ίσος με 1.2 picometer (pm)/μstrain για τον τύπο αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα και τέλος η σχέση $K_\tau \cdot \Delta_\tau$ ενσωματώνει τις μεταβολές των τροπών λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας (μηδέν στα πειράματα της παρούσας έρευνας καθώς δεν υπήρχε μεταβολή στη θερμοκρασία).

Στον Πίνακα 7.13 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια ενός πειράματος στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή. Συγκεκριμένα, στην πρώτη στήλη αναφέρεται η χρονική στιγμή που λαμβάνεται η μέτρηση του μήκους κύματος, στη δεύτερη στήλη ο αριθμός των ενεργών αισθητήρων τη δεδομένη χρονική στιγμή και στις επόμενες στήλες οι τιμές του μήκους κύματος. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ελήφθησαν μετρήσεις από 3 αισθητήρες σε διάφορες θέσεις στο πειραματικό μοντέλο.

Στον Πίνακα 7.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταβολής της τροπής σύμφωνα με τις μετρήσεις του Πίνακα 7.13 και με την εφαρμογή της Εξίσωσης 7.2, για το χρονικό διάστημα των 36 sec κατά το οποίο ελήφθησαν οι μετρήσεις. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η ακρίβεια των μετρήσεων είναι μεγάλη ενώ επίσης η τροπή των αισθητήρων 1 και 3 λαμβάνει σχεδόν την ίδια τιμή, λόγω του ότι οι δύο αυτοί αισθητήρες βρίσκονται στην ίδια στρώση οπλισμού του μοντέλου, κοντά στο μέσο του ενώ ο αισθητήρας 2 σε διαφορετική θέση κοντά στα ανώτερα τμήματα του μοντέλου με αποτέλεσμα να υφίσταται μικρότερη τροπή.

Πίνακας 7.13. Παράδειγμα μέτρησης μήκους κύματος (σε nm) μέσω αισθητήρων οπτικών ινών.
Table 7.13. Example of wavelength measurements (in nm) via optical fibre sensors.

Time	Numer of Active Sensors	Wavelength	Wavelength	Wavelength
		Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
31:37.0	3	1533.455	1545.452	1553.531
31:38.0	3	1533.461	1545.454	1553.538
31:39.0	3	1533.468	1545.454	1553.544
31:40.0	3	1533.476	1545.456	1553.550
31:41.0	3	1533.481	1545.458	1553.555
31:42.0	3	1533.488	1545.459	1553.560

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

31:43.0	3	1533.496	1545.462	1553.566
31:44.0	3	1533.503	1545.463	1553.571
31:45.0	3	1533.509	1545.466	1553.575
31:46.0	3	1533.514	1545.467	1553.580
31:47.0	3	1533.520	1545.47	1553.586
31:48.0	3	1533.527	1545.471	1553.592
31:49.0	3	1533.534	1545.473	1553.598
31:50.0	3	1533.540	1545.474	1553.605
31:51.0	3	1533.546	1545.477	1553.612
31:52.0	3	1533.553	1545.478	1553.618
31:53.0	3	1533.557	1545.481	1553.623
31:54.0	3	1533.561	1545.482	1553.630
31:55.0	3	1533.569	1545.487	1553.637
31:56.0	3	1533.572	1545.486	1553.643
31:57.0	3	1533.579	1545.488	1553.650
31:58.0	3	1533.582	1545.490	1553.657
31:59.0	3	1533.590	1545.493	1553.663
32:00.0	3	1533.595	1545.495	1553.669
32:01.0	3	1533.600	1545.498	1553.675

Πίνακας 7.14. Αποτελέσματα μέτρησης τροπών με αισθητήρες οπτικών ινών;
Table 7.14. Strain measurements results via optical fibre sensors.

Sensor Number	Δt (sec)	λ_1 (nm)	λ_2 (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	$\Delta\epsilon$ (μstrain)
1	36	1533.455	1533.600	0.145	120.8
2	36	1545.452	1545.498	0.046	38.3
3	36	1553.531	1553.675	0.144	120.0

Επιπλέον μπορεί να παρατηρηθεί ότι πραγματοποιούνται ταυτόχρονες μετρήσεις σε διάφορες θέσεις με αισθητήρες οπτικών ινών με μεγάλη συχνότητα, ανά 1 sec και η μετατροπή των μεταβολών του μήκους κύματος σε τροπή πραγματοποιείται με την εφαρμογή της Εξίσωσης 7.2. Κατά την επιλογή των αισθητήρων θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον τύπο τους, ο οποίος και θα πρέπει να προσαρμόζεται στις

ειδικότερες ανάγκες των πειραμάτων ή των κατασκευών. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην περίπτωση των οπλισμένων πρανών υπό κλίμακα που εξετάστηκαν, επιλέχθηκαν αισθητήρες χωρίς επικάλυψη προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επιρροή τους στα μοντέλα, με διάμετρο ίση με 0.5 mm, όση δηλαδή ήταν και η ελάχιστη διάσταση των ινών των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των οπλισμών.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να επισημανθεί, ότι οι μετρήσεις που λαμβάνονται δεν έχουν πάντα απευθείας την μορφή του Πίνακα 7.14, αλλά μια πιο σύνθετη μορφή η οποία και πρέπει να μελετηθεί και να ξεκαθαριστεί προκειμένου να προκύψει ένα αποτέλεσμα ανάλογο με αυτό του Πίνακα 7.14. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι συχνά παρατηρείται το φαινόμενο όπου κάποιοι αισθητήρες σταματούν να λειτουργούν για κάποιο μικρό ή και μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και για το διάστημα αυτό δεν καταγράφονται μετρήσεις από αυτούς. Τις χρονικές στιγμές λοιπόν που οι αισθητήρες παραμένουν ανενεργοί, οι στήλες στις οποίες αντιστοιχούν συμπληρώνονται με στοιχεία από άλλους-επόμενους αισθητήρες με αποτέλεσμα να διακόπτεται η συνέχεια των μετρήσεων ανά στήλη. Αυτό, σε συνδυασμό με το ότι οι μετρήσεις πραγματοποιούνται ανά 1 sec, οδηγεί πολλές φορές σε μεγάλο όγκο αποτελεσμάτων που να μην είναι απαραίτητος για την λεπτομερή μελέτη των μοντέλων, αλλά από την άλλη πλευρά οδηγεί σε χρονοβόρα διαδικασία για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Έτσι, ενώ κάποια παύση ενός αισθητήρα για 20 sec μπορεί να μην παίζει μεγάλο ρόλο στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, μπορεί να οδηγήσει σε ανακατάταξη των μετρήσεων καθώς μετατίθενται όλοι οι αισθητήρες προς τα αριστερά.

Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 7.12, όπου παρουσιάζεται η αρχική μορφή των μετρήσεων που λαμβάνονται μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών και το Spectral Eye Interrogator SE-600. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.12, στην 1^η στήλη καταγράφεται η ημερομηνία και στην 2^η στήλη η ώρα που λαμβάνονται οι μετρήσεις. Στην 3^η στήλη καταγράφεται η θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται οι αισθητήρες, στην 4^η στήλη ο αριθμός των ενεργών αισθητήρων, ενώ από την 5^η στήλη και μετά πραγματοποιούνται οι καταγραφές των μεταβολών του μήκους κύματος των αισθητήρων.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο μέσο περίπου του Σχήματος 7.12, ένας από τους 3 αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για το εν λόγω πείραμα έχει αστοχήσει και έχει

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

σταματήσει να καταγράφει μετρήσεις για ένα χρονικό διάστημα. Πρόκειται για τον αισθητήρα με αρχικό μήκος κύματος 1546, ο οποίος βρίσκεται στην 6^η θέση του πίνακα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, λόγω της παύσης της λειτουργίας του αισθητήρα, πραγματοποιείται μια αυτόματη μετάθεση των αποτελεσμάτων των άλλων αισθητήρων προς τα αριστερά. Έτσι, ο αισθητήρας με αρχικό μήκος κύματος 1555 που βρισκόταν στην 7^η θέση του πίνακα, μετατίθεται στην 6^η θέση. Στην συνέχεια, ο αισθητήρας με αρχικό μήκος κύματος 1546 επανέρχεται σε λειτουργία και συνεχίζει να καταγράφει μετρήσεις, οπότε και πραγματοποιείται μετάθεση των αισθητήρων προς τα δεξιά, στην αρχική δηλαδή θέση τους. Προκειμένου να προκύψουν τα τελικά αποτελέσματα θα πρέπει να δημιουργηθεί ένας νέος πίνακας στον οποίο και θα έχουν συμπεριληφθεί οι αλλαγές αυτές.

12/03/2009	11:35:15.004	30	3	1534.765	1546.190	1555.018	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:16.006	30	3	1534.764	1546.189	1555.018	-56.2	-54.5	-59.4
12/03/2009	11:35:17.007	30	3	1534.764	1546.190	1555.020	-56.2	-54.5	-59.6
12/03/2009	11:35:18.008	30	3	1534.763	1546.191	1555.020	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:19.009	30	3	1534.763	1546.188	1555.020	-56.2	-54.5	-59.4
12/03/2009	11:35:20.002	30	3	1534.762	1546.189	1555.020	-56.2	-54.5	-59.4
12/03/2009	11:35:21.003	30	3	1534.763	1546.190	1555.020	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:22.006	30	3	1534.763	1546.187	1555.020	-56.2	-54.5	-59.4
12/03/2009	11:35:23.000	30	3	1534.763	1546.187	1555.020	-56.3	-54.5	-59.4
12/03/2009	11:35:24.000	30	3	1534.763	1546.187	1555.022	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:25.000	30	3	1534.761	1546.187	1555.022	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:26.001	30	3	1534.760	1546.188	1555.023	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:27.002	30	3	1534.760	1546.187	1555.023	-56.2	-54.5	-59.4
12/03/2009	11:35:28.004	30	3	1534.761	1546.189	1555.023	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:29.006	30	3	1534.760	1546.188	1555.024	-56.2	-54.4	-59.5
12/03/2009	11:35:30.007	30	3	1534.761	1546.186	1555.024	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:31.008	30	3	1534.762	1546.187	1555.024	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:32.000	30	3	1534.761	1546.186	1555.024	-56.2	-54.5	-59.4
12/03/2009	11:35:33.001	30	3	1534.761	1546.187	1555.024	-56.2	-54.5	-59.4
12/03/2009	11:35:34.003	30	3	1534.761	1546.187	1555.024	-56.3	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:35.004	30	3	1534.761	1546.187	1555.026	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:36.006	30	3	1534.761	1546.187	1555.026	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:37.007	30	3	1534.761	1546.190	1555.026	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:38.000	30	3	1534.761	1546.187	1555.026	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:39.000	30	3	1534.760	1546.187	1555.027	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:40.002	30	3	1534.762	1546.187	1555.027	-56.3	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:41.003	30	3	1534.760	1546.187	1555.026	-56.3	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:42.006	30	3	1534.761	1546.190	1555.027	-56.2	-54.5	-59.4
12/03/2009	11:35:43.006	30	3	1534.761	1546.194	1555.030	-56.2	-54.5	-59.6
12/03/2009	11:35:44.008	30	3	1534.760	1546.188	1555.026	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:45.000	30	3	1534.760	1546.190	1555.030	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:46.001	30	3	1534.761	1546.216	1555.036	-56.2	-54.8	-59.6
12/03/2009	11:35:47.002	30	3	1534.761	1546.189	1555.030	-56.2	-54.5	-59.5
12/03/2009	11:35:48.003	30	3	1535.058	1555.046	1555.030	-57.2	-59.0	-59.0
12/03/2009	11:35:49.006	30	2	1535.051	1555.050	1555.030	-57.2	-59.0	-59.0
12/03/2009	11:35:50.007	30	2	1535.047	1555.052	1555.032	-57.2	-59.0	-59.0
12/03/2009	11:35:51.000	30	2	1535.042	1555.054	1555.034	-57.2	-59.1	-59.1
12/03/2009	11:35:52.000	30	2	1535.042	1555.056	1555.036	-57.1	-59.0	-59.0
12/03/2009	11:35:53.002	30	2	1535.040	1555.058	1555.038	-57.2	-59.0	-59.0
12/03/2009	11:35:54.003	30	2	1535.038	1555.058	1555.038	-57.2	-59.0	-59.0
12/03/2009	11:35:55.006	30	2	1535.037	1555.060	1555.040	-57.2	-59.0	-59.0
12/03/2009	11:35:56.006	30	2	1535.037	1555.064	1555.044	-57.1	-59.1	-59.1
12/03/2009	11:35:57.008	30	2	1535.035	1555.062	1555.042	-57.1	-58.9	-58.9

Σχήμα 7.12. Αρχική μορφή των μετρήσεων μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών.
Figure 7.12. Original form of measurements via optical fibre sensors.

7.5 Εφαρμογή μεθοδολογίας GeoPIV στα οπλισμένα πρανή.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες Ενότητες, παράλληλα με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τους αισθητήρες οπτικών ινών, εφαρμόστηκε και η μέθοδος PIV προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά των οπλισμένων πρανών. Για την εφαρμογή της

μεθόδου έπρεπε να ληφθούν ψηφιακές φωτογραφίες στην πλάγια όψη του πρανούς και συγκεκριμένα στην πλευρά του 'Plexiglas' από όπου μπορούσε να παρατηρηθεί το μοντέλο.

Η συχνότητα των φωτογραφιών που λαμβάνονταν ήταν η εξής: 1 φωτογραφία κάθε 1sec, ενώ για πειράματα με πιο γρήγορη ή αργή φόρτιση ή εξέλιξη η συχνότητα αυτή θα μπορούσε να μεταβληθεί. Συγκεντρώθηκε πληθώρα ψηφιακών φωτογραφιών για διάφορες φάσεις φορτίσεων από 1g έως και 100g, την μέγιστη δηλαδή στάθμη της επιτάχυνσης υπό την οποία θα μπορούσε η συγκεκριμένη φωτογραφική μηχανή να λειτουργήσει. Από όλες αυτές τις φωτογραφίες επιλέχθηκαν ορισμένες, οι οποίες και αντιστοιχούσαν σε χαρακτηριστικές στάθμες τις επιτάχυνσης της «βαρύτητας» και συγκεκριμένα στις στάθμες: 1g, 5g, ... 50g ..., 95g και 100g.

Καθώς στο εσωτερικό του τύμπανου του φυγοκεντριστή υπήρχε απουσία φυσικού φωτός, τοποθετήθηκε ειδική λάμπα η οποία και φώτιζε την επιφάνεια των μοντέλων. Λόγω της μεγάλης ταχύτητας περιστροφής του φυγοκεντριστή και παρ' όλες τις προφυλάξεις που ελήφθησαν, η ειδική λάμπα μετακινήθηκε εκτός θέσης σε ορισμένα από τα πειράματα ενώ σε κάποια άλλα αναστάλθηκε τελείως η λειτουργία της, με αποτέλεσμα να πέσει επιπλέον ή και λιγότερο φως στην επιφάνεια των μοντέλων οδηγώντας σε χαμηλή ποιότητα ψηφιακών φωτογραφιών και μη ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ωστόσο, τα πειράματα αυτά αναλύθηκαν κανονικά με το λογισμικό GeoPIV προκειμένου να προκύψουν κάποια αποτελέσματα έστω και μη απολύτως ικανοποιητικά.

Ο κánaβος που σχεδιάστηκε πάνω στην Plexiglass επιφάνεια του άκαμπτου κουτιού μέσα στο οποίο κατασκευάστηκαν τα μοντέλα, αποτελούταν από σημεία με ένα λευκό τετραγωνικό περίβλημα πλευράς μήκους 3 mm με μια μαύρη κουκίδα στο μέσο τους διαμέτρου 1.5 mm, όπως φαίνεται στην Φωτογραφία 7.1 ενώ επίσης χρησιμοποιήθηκε φωτογραμμετρικός κánaβος για βαθμονόμηση (calibration) κατά την ανάλυση με το GeoPIV.

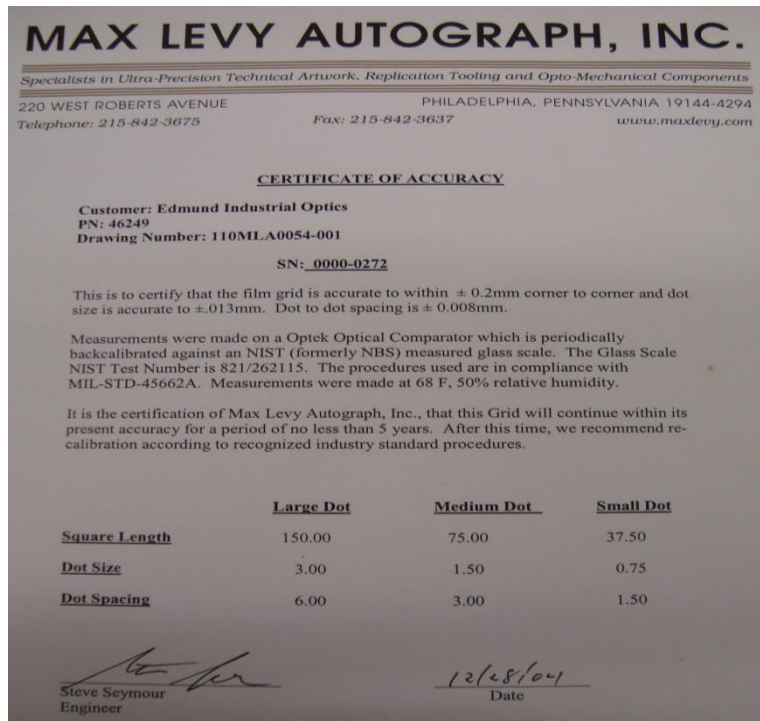
Ο φωτογραμμετρικός κánaβος που τοποθετήθηκε μέσα στο στοιβαρό κουτί κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης παρουσιάζεται στην Φωτογραφία 7.41, ενώ στην Φωτογραφία 7.42 παρουσιάζεται το πιστοποιητικό ακριβείας του. Καθώς η πυκνότητα των σημείων εξαρτάται συνήθως από το μέγεθος του δείγματος - για μοντέλα δηλαδή με μεγάλη επιφάνεια

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

απαιτούνται περισσότερα σημεία ενώ για μοντέλα με μικρότερες επιφάνειες λιγότερα σημεία - επιλέχθηκε για τις ανάγκες των παρόντων πειραμάτων κάναβος 5x4, όπως παρουσιάστηκε στην Φωτογραφία 7.1.



Φωτογραφία 7.41. Φωτογραμμικός κάναβος για την βαθμονόμηση του μοντέλου.
Photograph 7.41. Photogrammetric grid for model calibration.



Φωτογραφία 7.42. Πιστοποιητικό ακριβείας φωτογραμμικού κάναβου.
Photograph 7.42. Photogrammetric grid certificate of accuracy.

Επιλέγοντας την συγκεκριμένη πυκνότητα σημείων, καλύφθηκε ολόκληρη η επιφάνεια στην πλάγια όψη του μοντέλου, ενώ ταυτόχρονα οι πληροφορίες στην εδαφική επιφάνεια των μοντέλων δεν αποκρύφτηκαν, όπως θα γινόταν στην περίπτωση που θα υπήρχαν παραπάνω από τα απαιτούμενα σημεία.

Στην συνέχεια επισημαίνονται κάποιες από τις δυσκολίες και ιδιαιτερότητες που παρουσιάστηκαν κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των ψηφιακών φωτογραφιών με την εφαρμογή του λογισμικού GeoPIV.

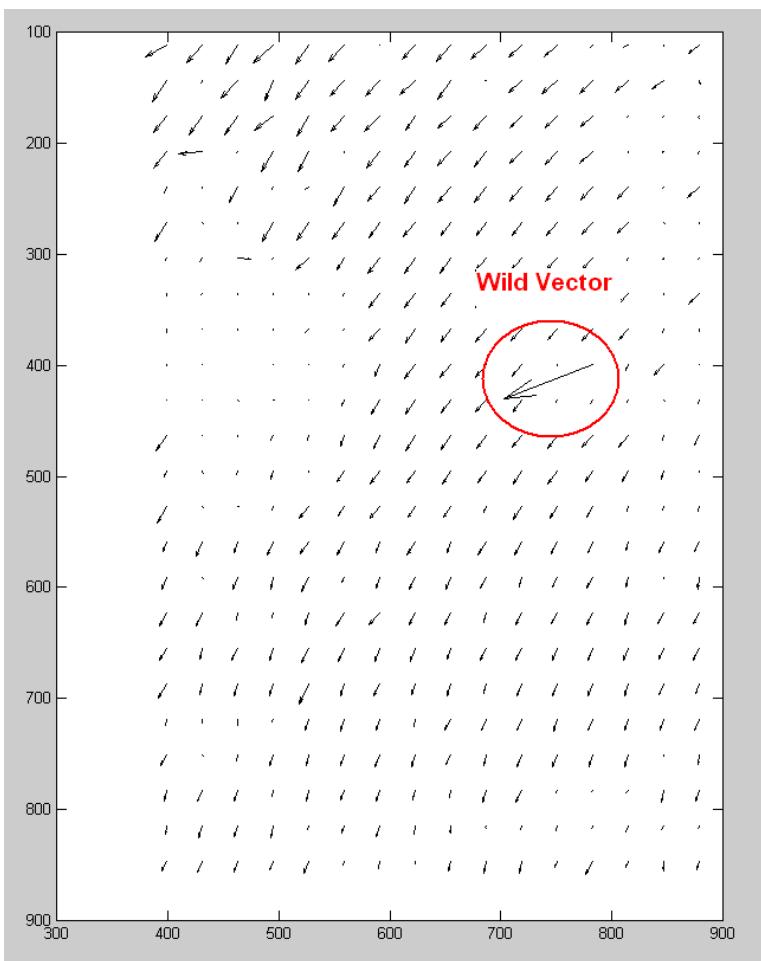
Ειδικότερα, κατά την επεξεργασία των μετρήσεων και σύμφωνα με τις διαδικασίες που ακολουθούνται με την εφαρμογή του αλγόριθμου GeoPIV και ειδικότερα στη φάση της διαγραφής των μη συμβατών διανυσμάτων (wild vectors) η παρέμβαση του χρήστη του προγράμματος είναι σημαντική και πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή προκειμένου να αποφευχθούν πιθανά λάθη. Για παράδειγμα, μπορεί κάποια από τα διανύσματα ροής να θεωρηθούν λανθασμένα ως wild vectors και να διαγραφούν με αποτέλεσμα να χαθούν πληροφορίες ενώ αντίθετα κάποια από τα διανύσματα που είναι πράγματι wild vectors να μη διαγραφούν με αποτέλεσμα να προκύψουν υπερβολικά μεγάλες τροπές.

Ένα παράδειγμα μη διαγραφής μη συμβατών διανυσμάτων φαίνεται στα Σχήματα 7.13 και 7.14 όπου παρουσιάζονται τα διανύσματα ροής και οι αναπτυσσόμενες τροπές αντίστοιχα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στα Σχήματα αυτά, ακόμη και ένα μόνο μη συμβατό διάνυσμα που δεν έχει διαγραφεί επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα των αναπτυσσόμενων τροπών. Ειδικότερα, μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 7.14 ότι η τιμή των αναπτυσσόμενων τροπών στην περιοχή του μη συμβατού διανύσματος είναι πολύ μεγαλύτερη από τις τιμές των υπόλοιπων διανυσμάτων ενώ παρουσιάζεται δυσκολία στο να διακριθούν οι τροπές στην επιφάνεια του πρανούς που έχουν μικρότερη τιμή.

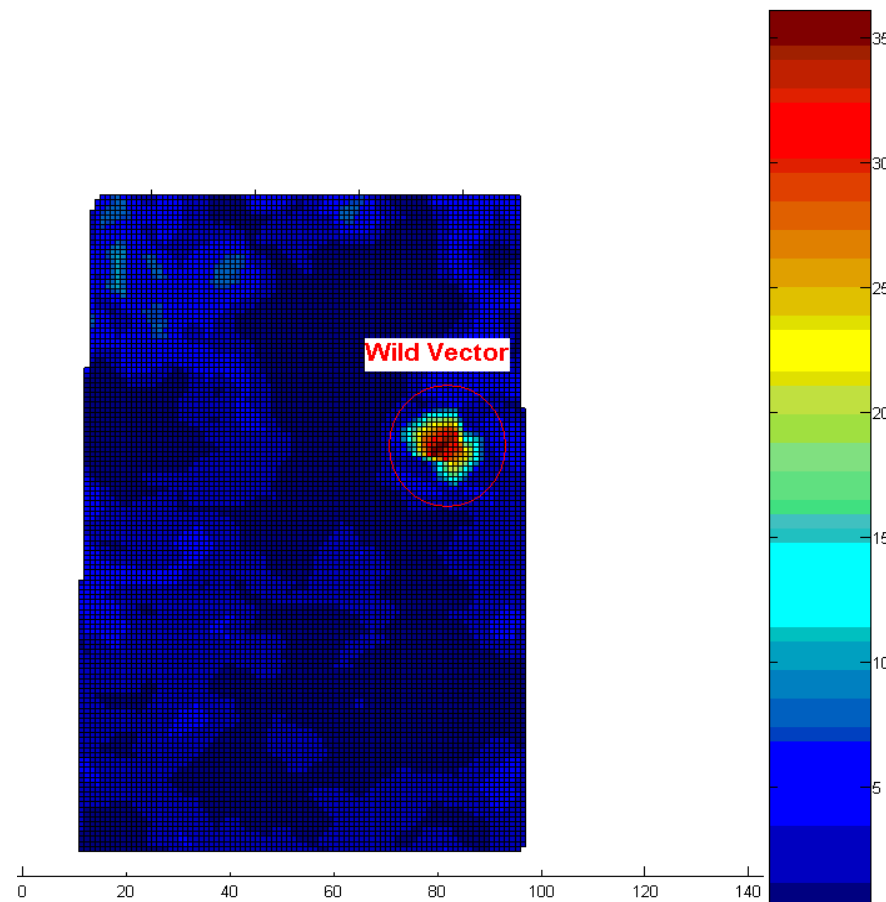
Ωστόσο, προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην περίπτωση που ορισμένα διανύσματα αρχικά φαίνονται ως μη συμβατά, στην πραγματικότητα όμως αντιπροσωπεύουν μεγάλες μετακινήσεις κόκκων σε διάφορες θέσεις του πρανούς όπως για παράδειγμα στην επιφάνεια του, λόγω διαφυγής υλικού και δεν αντιπροσωπεύουν ευρύτερο πεδίο τροπών σε αυτό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Επίσης, τέτοιες μετακινήσεις μπορεί να πραγματοποιηθούν και κατά την σεισμική φόρτιση ενός μοντέλου ή κατά την βραχύπτωση. Στην περίπτωση αυτή, πριν ληφθεί η απόφαση για το αν θα διαγραφούν ή όχι, θα πρέπει να συνυπολογίζεται το βασικό μέλημα της έρευνας και συγκεκριμένα στην περίπτωση που επιθυμείται να γίνει ο προσδιορισμός του πεδίου τροπών στο ευρύτερο πρηνές κρίνεται σκόπιμη η διαγραφή τους, ενώ αντίθετα σε περίπτωση που επιδιώκεται ο λεπτομερής προσδιορισμός της κίνησης των κόκκων του εδάφους, κρίνεται σκόπιμο να διατηρούνται και να συμπεριλαμβάνονται στις μετέπειτα αναλύσεις με το GeoPIV.



Σχήμα 7. 13. Μη συμβατό διάνυσμα ροής .
Figure 7.13.Wild vector.



Σχήμα 7.14. Τροπές συμπεριλαμβανομένου μη συμβατού διανύσματος.
Figure 7.14. Strains including wild vector.

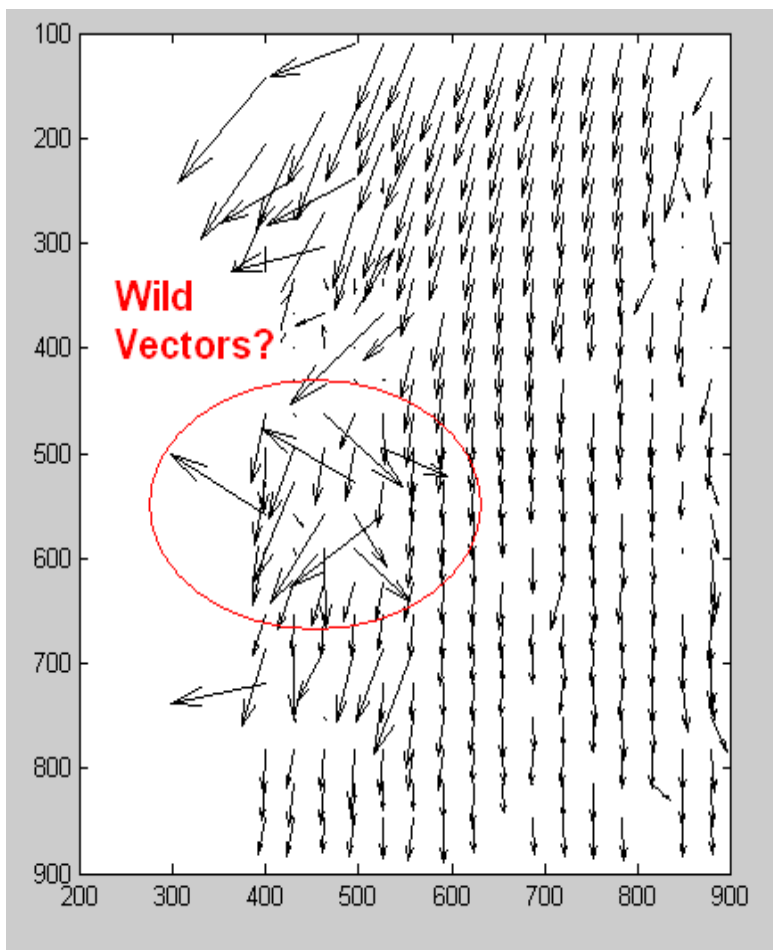
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Πολλές φορές όμως δεν είναι εύκολο να αποφασιστεί με οπτική παρακολούθηση των αποτελεσμάτων εάν κάποια από τα διανύσματα πρέπει να διαγραφούν ή όχι. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στα Σχήματα 7.15 και 7.16 όπου δεν έχουν διαγραφεί τα διανύσματα για τα οποία υπάρχει αμφιβολία και η μέγιστη αναπτυσσόμενη τροπή στην περιοχή των πιθανών μη συμβατών διανυσμάτων φθάνει στο 80.

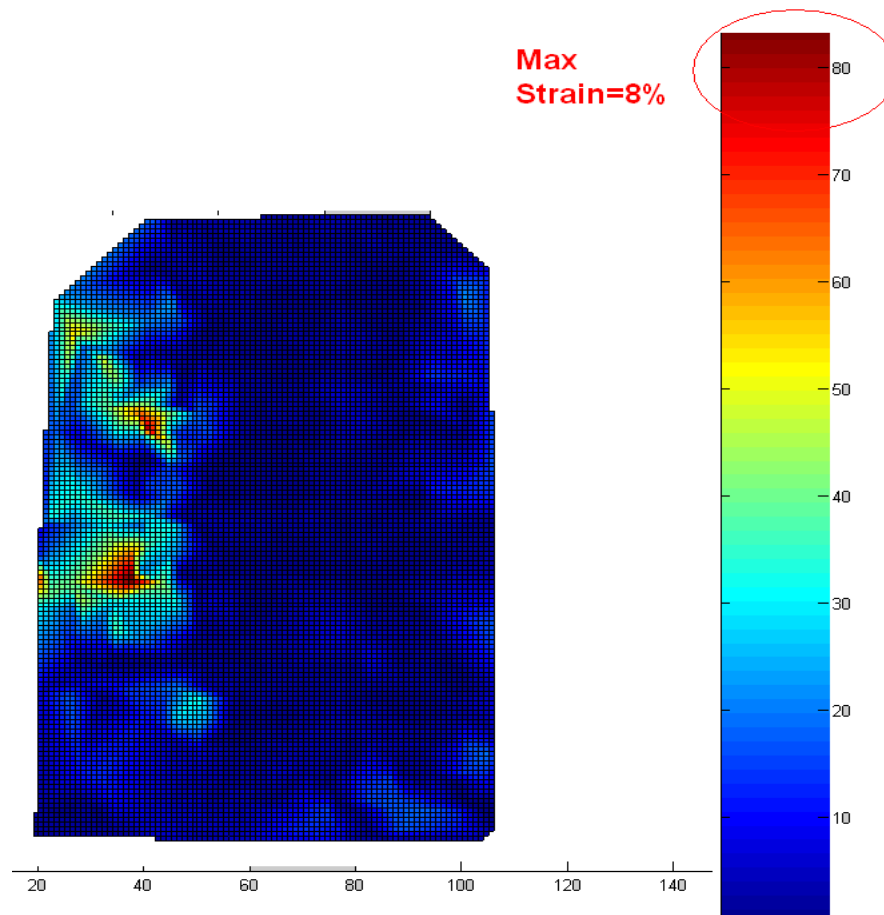
Στα Σχήματα 7.17 και 7.18, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα με διαγραφή των αποτελεσμάτων υπό αμφιβολία και η μέγιστη αναπτυσσόμενη τροπή είναι 45. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τα αποτελέσματα του Σχήματος 7.18 είναι αρκετά διαφορετικά με αυτά του Σχήματος 7.16 και για τον λόγο αυτό παρατίθενται και τα αποτελέσματα της αμέσως προηγούμενης και επόμενης φόρτισης προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύγκριση και να αποφασισθεί ποιο από τα δύο σχήματα - Σχήμα 7.19 και Σχήμα 7.20- είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα.

Το συμπέρασμα λοιπόν για το αν πρόκειται για συμβατά ή μη συμβατά διανύσματα μπορεί να προκύψει από την σύγκριση των αναπτυσσόμενων τροπών με αποτελέσματα από προηγούμενες και επόμενες φάσεις φορτίσεων. Έτσι για παράδειγμα, στην περίπτωση των Σχημάτων 7.15 και 7.16, παρατηρείται ότι οι αναπτυσσόμενες τροπές είναι σημαντικά μεγαλύτερες για αυτή τη φάση φορτίσεων σε σχέση με τις προηγούμενες και τις επόμενες φάσεις και επομένως τα διανύσματα αυτά είναι μη συμβατά. Αντίθετα, τα αποτελέσματα των Σχημάτων 7.17 και 7.18, είναι συμβατά και είναι αυτά που τελικά επιλέγονται ως ορθά.

Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι χρονοβόρα και αποτελεί ένα από τα μειονεκτήματα του αλγόριθμου GeoPIV. Αμφίβολα αποτελέσματα προκύπτουν συνήθως όταν υπάρχουν ατέλειες στις φωτογραφίες που λαμβάνονται το οποίο και μπορεί να οφείλεται στο ότι ο φωτισμός σε ορισμένα σημεία δεν είναι επαρκής ενώ σε άλλα είναι υπερβολικός καθώς και σε πολύ γρήγορες φορτίσεις όπως για παράδειγμα σε σεισμικές φορτίσεις.

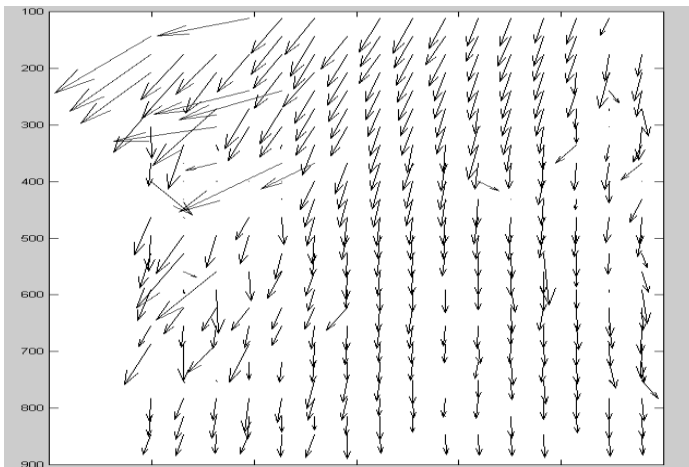


Σχήμα 7.15. Πιθανά μη συμβατά διανύσματα.
Figure 7.15.Potential wild vectors.

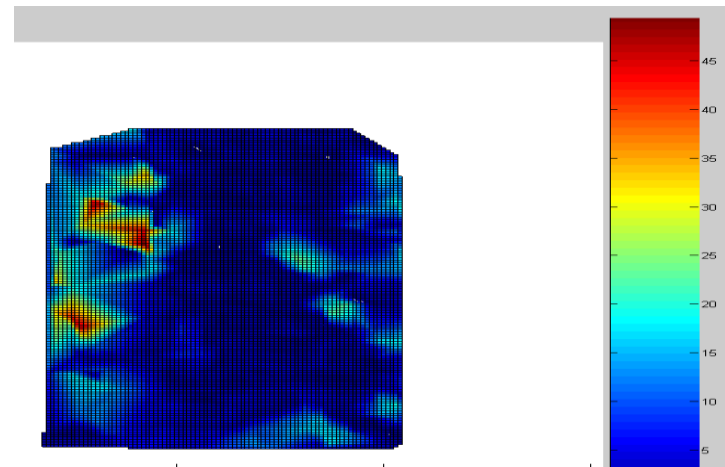


Σχήμα 7.16. Αντίστοιχες αναπτυσσόμενες τροπές.
Figure 7.16.Correspondent developing strains.

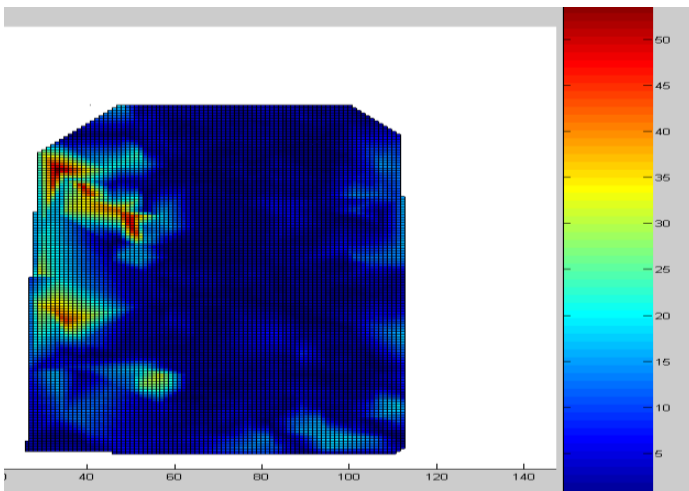
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7



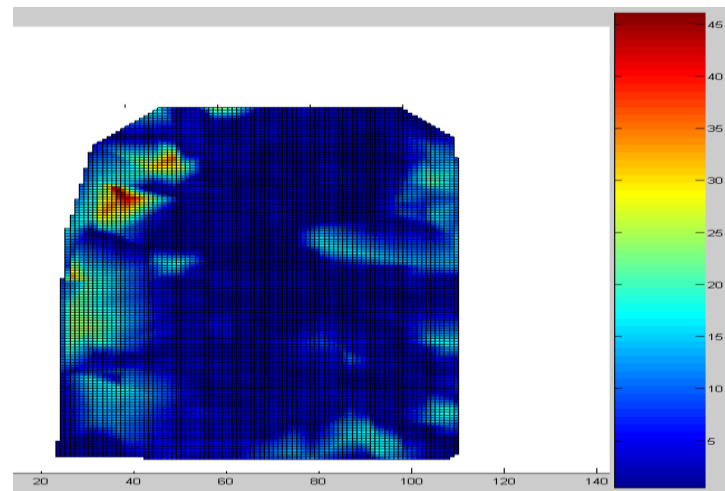
Σχήμα 7.17. Διαγραφή των πιθανών μη συμβατών διανυσμάτων.
Figure 7.17. Deleted potential wild vectors.



Σχήμα 7.18. Αντίστοιχες τροπές.
Figure 7.18. Correspondent strains.



Σχήμα 7.19. Τροπές προηγούμενης φάσης φόρτισης.
Figure 7.19. Strains of previous loading phase.



Σχήμα 7.20. Τροπές επόμενης φάσης φόρτισης.
Figure 7.20. Strains of next loading phase.

7.6 Συμπεράσματα Κεφαλαίου και προτάσεις.

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκε η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την κατασκευή των μοντέλων οπλισμένων πρανών υπό κλίμακα, καθώς και η διαδικασία μεταφοράς και στερέωσης αυτών στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ΕΤΗ Zurich. Στην συνέχεια έγινε περιγραφή των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους και των στρώσεων οπλισμού που επιλέχθηκαν, παρουσιάστηκαν φωτογραφίες αυτών και έγινε αναγωγή της γεωμετρίας τους και της αντοχής τους για διάφορες τιμές του συντελεστή μοντελοποίησης n , που αντιστοιχεί σε διάφορες στάθμες της επιτάχυνσης της βαρύτητας.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε περιγραφή της πειραματικής διάταξης καθώς και οι καινοτομίες που εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της παρούσας έρευνας και ειδικότερα η εφαρμογή των αισθητήρων οπτικών ινών στον φυγοκεντριστή με στόχο την καταγραφή των αναπτυσσόμενων τροπών στις στρώσεις οπλισμού των πρανών. Η εν λόγω πειραματική διάταξη δεν είχε χρησιμοποιηθεί ξανά στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ΕΤΗ Zurich και εφαρμόστηκε με επιτυχία κατά την διάρκεια των πειραμάτων στα πλαίσια της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής. Η μέθοδος συγκόλλησης των αισθητήρων στις στρώσεις οπλισμού, η διάταξη τους και ο τρόπος συλλογής των μετρήσεων παρουσιάστηκε με λεπτομέρεια, ενώ επίσης επισημάνθηκαν δυσκολίες και σημεία στα οποία θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή.

Περιγράφηκε επίσης και η εφαρμογή του λογισμικού GeoPIV, στα πλαίσια των μετρητικών διατάξεων, έτσι όπως χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα και επισημάνθηκαν σημεία προσοχής, τόσο κατά την προετοιμασία των μοντέλων, όσο και για την μετέπειτα επεξεργασία των μετρήσεων με στόχο τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Υλοποίηση Πειραμάτων, Μετρήσεις και Αποτελέσματα.

8.1 Περιγραφή μεθοδολογίας υλοποίησης πειραμάτων και φάσεις φορτίσεων.

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETH Zurich. Αρχικά περιγράφονται τα χαρακτηριστικά του κάθε μοντέλου, οι μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε σε κάθε πείραμα, ενώ στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν μέσω αισθητήρων οπτικών ινών, καθώς και η επεξεργασία των ψηφιακών φωτογραφιών με το GeoPIV. Το αρχικό πείραμα ήταν αρκετά απλό και σε κάθε επόμενο συμπεριλαμβάνονταν και κάτι καινούριο, μέχρι να ολοκληρωθεί η πειραματική διάταξη.

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα Κεφάλαια, κατασκευάστηκαν συνολικά 15 μοντέλα οπλισμένων πρανών και 1 άοπλο μοντέλο και πραγματοποιήθηκαν φορτίσεις στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETH Zurich, με μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση της βαρύτητας 50g, 100g και 150g. Στα αρχικά πειράματα εξετάστηκαν όλες οι τεχνικές λεπτομέρειες και έγιναν οι απαραίτητες βελτιώσεις σε διάφορες ατέλειες της πειραματικής διάταξης. Επιπλέον, μελετήθηκε η συμπεριφορά των 5 διαφορετικών υλικών που επιλέχθηκαν προκειμένου να προσομοιώσουν υπό κλίμακα τις στρώσεις του οπλισμού. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν αισθητήρες οπτικών ινών στα πιο κατάλληλα από τα υλικά για τη διεξαγωγή των υπόλοιπων πειραμάτων.

Δύο βασικές μεθοδολογίες εφαρμόστηκαν για τις φάσεις φορτίσεων και συγκεκριμένα: α) φόρτιση των μοντέλων από 1g σε 50g, με αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας ανά 5g, στην συνέχεια διατήρηση του πεδίου βαρύτητας σε 50g για μικρό χρονικό διάστημα, κατόπιν απελευθέρωση μοντέλου «βράχου» στην στέψη του πρανούς, εκ νέου φόρτιση των μοντέλων από 50g σε 100g (ή 150g) με αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας ανά 5g, διατήρηση του πεδίου βαρύτητας σε 100g (ή 150g) για μικρό χρονικό διάστημα και τέλος, απευθείας αποφόρτιση από 100g (ή 150g) σε 1g και β) απευθείας φόρτιση των μοντέλων από 1g σε 50g, στη συνέχεια διατήρηση του πεδίου βαρύτητας σε 50g για μικρό χρονικό διάστημα, κατόπιν απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου», απευθείας αύξηση του πεδίου βαρύτητας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

από 50g σε 100g, διατήρηση του πεδίου βαρύτητας σε 100g για μικρό χρονικό διάστημα και τέλος, απευθείας αποφόρτιση από 100g σε 1g.

Ειδικότερα αναφέρονται επιγραμματικά τα Τεστ όπως πραγματοποιήθηκαν:

- **Τεστ Νο.1:** «Δοκιμαστική τοποθέτηση άοπλου πρανούς στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή, με φόρτιση σε βήματα 5g ανά 2 min».
- **Τεστ Νο.2:** «Φόρτιση οπλισμένου πρανούς (ο.π.) με βήματα 5g ανά 2 min για διερεύνηση καταλληλότητας υλικού 'Γεώπλεγμα'».
- **Τεστ Νο.3:** «Φόρτιση ο.π. με βήματα 5g ανά 2 min για διερεύνηση καταλληλότητας υλικού 'Κουρτίνα Α'».
- **Τεστ Νο.4:** «Τοποθέτηση αισθητήρα οπτικών ινών (ο.ι.) σε «Ανθρακοϋφασμα», στο εσωτερικό ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Α' και φόρτιση σε βήματα 5g ανά 2 min».
- **Τεστ Νο.5:** «Φόρτιση ο.π. με βήματα 5g ανά 2 min για διερεύνηση καταλληλότητας υλικού 'Κουρτίνα Β'» .
- **Τεστ Νο.6:** «Φόρτιση ο.π. με σταθερό μήκος οπλισμών, με βήματα 5g ανά 2 min και χρήση κάμερας για ανάλυση PIV».
- **Τεστ Νο.7:** «Φόρτιση ο.π. με βήματα 5g ανά 2 min, για διερεύνηση καταλληλότητας υλικού 'Επίδεσμος'».
- **Τεστ Νο.8:** Τοποθέτηση αισθητήρα ο.ι. ινών σε 'Ανθρακοϋφασμα', σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', φόρτιση με βήματα 5g ανά 2 min, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου'.
- **Τεστ Νο.9:** «Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε πλήρη διάταξη σε ο.π. από υλικό 'Επίδεσμος', με φόρτιση 5g ανά 2 min, αποφόρτιση, εκ νέου απευθείας φόρτιση σε 50g και ρίψη μοντέλου 'βράχου' και ανάλυση PIV».
- **Τεστ Νο.10:** «Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Επίδεσμος', με απευθείας φόρτιση σε στάθμη 50g και 100g, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου'» .
- **Τεστ Νο.11:** «Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Επίδεσμος', με σταθερό μήκος οπλισμών, απευθείας φόρτιση σε στάθμη 50g και 100g και ρίψη μοντέλου 'βράχου'».

- **Τεστ Νο.12:** «Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', με απευθείας φόρτιση σε στάθμη 50g και 100g και ρίψη μοντέλου 'βράχου'» .
- **Τεστ Νο.13:** «Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', με απευθείας φόρτιση σε στάθμη 50g και 100g, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου'»
- **Τεστ Νο.14:** «Τοποθέτηση αισθητήρα ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', με απευθείας φόρτιση σε στάθμη 50g και 100g ρίψη μοντέλου 'βράχου' για έλεγχο της ανώτερης στρώσης (No. 8).
- **Τεστ Νο.15:** «Τοποθέτηση αισθητήρα ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', με απευθείας φόρτιση σε στάθμη 50g και 100g, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου' για έλεγχο της μεσαίας στρώσης (No. 4)».
- **Τεστ Νο.16:** Άοπλο πρανές με φόρτιση σε βήματα των 5g ανά 2 min, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου' για έλεγχο της μεσαίας στρώσης (No. 4).

Στον Πίνακα 8.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πειράματα (Τεστ Νο. 1 έως και 16) που υλοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσης έρευνας και ακολούθως πραγματοποιείται λεπτομερής περιγραφή τους.

Ειδικότερα, στην 1^η στήλη του Πίνακα 8.1 αναφέρεται ο αύξων αριθμός του πειράματος, στην 2^η στήλη το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των στρώσεων οπλισμού, στην 3^η στήλη το ύψος του πρανούς, στην 4^η, στην 5^η στήλη ο αριθμός των στρώσεων και το μήκος των οπλισμών, στην 6^η, 7^η και 8^η οι συνθήκες φόρτισης του εκάστοτε πειράματος και συγκεκριμένα η μέγιστη στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας, η μεταβολή της επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά την διάρκεια των πειραμάτων και τέλος η απελευθέρωση ή μη μοντέλου «βράχου» στην κορυφή του πρανούς. Στην συνέχεια, στις στήλες 9, 10 και 11 του Πίνακα 8.1, περιγράφονται οι μέθοδοι παρακολούθησης των μοντέλων και συγκεκριμένα στην 9^η στήλη περιγράφεται εάν ελήφθησαν ψηφιακές φωτογραφίες στην πλάγια όψη του πρανούς με στόχο την εφαρμογή της ανάλυσης PIV, στην 10^η στήλη αναφέρεται ο αριθμός των αισθητήρων οπτικών ινών που χρησιμοποιήθηκε, ενώ στην 11^η στήλη περιγράφεται η θέση των αισθητήρων στις στρώσεις οπλισμού του πρανούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Πίνακας 8.1. Πειράματα στον γεωτεχνικό φυγοκεντρική.
Table 8.1. Geotechnical centrifuge Tests.

A/A	Υλικό Οπλισμού	Ύψος Πρανούς	Στρώσεις Οπίσμου	Μήκος Οπλισμών	Μέγιστη Στάθμη g	Μεταβολή του g	Ρύψη 'Βράχου'	Κάμερα PIV	Αριθμός O.I.	Θέση O.I. (Στρώση)
1	Άοπλο	18 cm	-	-	150	5g κάθε 2 min	Όχι	Όχι	-	-
2	Γεώπλεγμα	18 cm	9	11-19 cm	150	5g κάθε 2 min	Όχι	Όχι	-	-
3	Κουρτίνα Α	18 cm	9	11-19 cm	50	5g κάθε 2 min	Όχι	Όχι	-	-
4	Κουρτίνα Α + ανθρακούφ.	18 cm	9	11-19 cm	50	5g κάθε 2 min	Όχι	Όχι	1	No. 4
5	Κουρτίνα Β	18 cm	9	11-19 cm	50	5g κάθε 2 min	Όχι	Όχι	-	-
6	Κουρτίνα Α	18 cm	9	11 cm	50	5g κάθε 2 min	Όχι	Ναι	-	-
7	Επίδεσμος	18 cm	9	11-19 cm	100	5g κάθε 2 min	Όχι	Όχι	-	-
8	Κουρτίνα Β +ανθρακούφ.	18 cm	9	11-19 cm	100	5g κάθε 2 min	Ναι	Όχι	1	No. 4
9	Επίδεσμος	18 cm	9	11-19 cm	50	5g κάθε 2min & 50g	Ναι (σε 50g)	Ναι	5	No.1,4,8
10	Επίδεσμος	18 cm	9	11-19 cm	100	απευθείας σε 50g & 100g	Ναι (σε 50g)	Όχι	2	No.4,8
11	Επίδεσμος	18 cm	9	11 cm	100	απευθείας σε 50g & 100g	Ναι (σε 50g)	Όχι	2	No.4,8
12	Κουρτίνα Β	18 cm	9	11-19 cm	100	απευθείας σε 50g & 100g	Ναι (σε 50g)	Όχι	2	No.4,8
13	Κουρτίνα Β	18 cm	9	11-19 cm	100	απευθείας σε 50g & 100g	Ναι (σε 50g)	Όχι	2	No.4,8
14	Κουρτίνα Β	18 cm	9	11-19 cm	100	απευθείας σε 50g & 100g	Ναι (σε 50g)	Ναι	2	No.8
15	Άοπλο + Κουρτίνα Β	18 cm	1	15 cm	100	5g κάθε 2min & 50g	Ναι (σε 50g)	Όχι	1	No.4

8.2 Περιγραφή πειραμάτων έναντι στατικής φόρτισης.

- **Τεστ Νο.1:** «Δοκιμαστική τοποθέτηση όπλου πρανούς στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή, με φόρτιση σε βήματα 5g ανά 2 min».

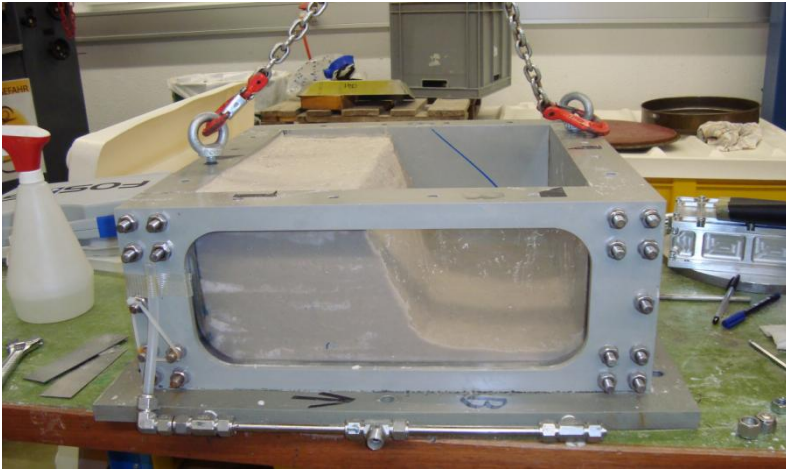
Κατά το Τεστ Νο. 1 τοποθετήθηκε όπλο πρανές ύψους 18 cm, κλίσης 2V:1H και μάζας 27.52 kgf στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETH Zurich. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που εφαρμόστηκε στο μοντέλο ήταν 150g, με αύξηση σε βήματα των 5g ανά 2 min. Το πείραμα αυτό ήταν αναγνωριστικό και στόχος του ήταν να μελετηθεί ο τρόπος κατασκευής του μοντέλου, η μεταφορά του στον φυγοκεντριστή και η στερέωσή του στο τύμπανο. Η αστοχία του πρανούς ξεκίνησε σε στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 7g και παρακολούθηθηκε με κάμερα λέιζερ που τοποθετήθηκε στην κορυφή του πρανούς.

Στην Φωτογραφία, 8.1, παρουσιάζεται το όπλο πρανές πριν την μεταφορά του στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή, όπως έχει κατασκευασθεί στο κουτί που έχει επιλεγεί. Η μέθοδος κατασκευής του μοντέλου παρουσιάστηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο.

Επίσης, στις Φωτογραφίες 8.2 και 8.3 παρουσιάζεται η διαδικασία μεταφοράς και τοποθέτησης του όπλου πρανούς στο εσωτερικό του τυμπάνου του φυγοκεντριστή, με την βοήθεια ενός ξύλινου καλουπιού το οποίο και κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, προκειμένου να αποφευχθεί η αστοχία των πρανών κατά την μεταφορά.

Στις Φωτογραφίες 8.4 έως και 8.6 παρουσιάζεται το όπλο μοντέλο στερεωμένο στο τύμπανο του φυγοκεντριστή, λίγο πριν από την έναρξη της περιστροφής του. Τέλος, στην Φωτογραφία 8.7 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από την κάμερα λέιζερ σε στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 25g, ενώ η τελική μορφή του πρανούς φαίνεται στην Φωτογραφία 8.8, όπου και μετρήθηκε γωνία κλίσης 32.4° , ίση περίπου με 2V:3H.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8



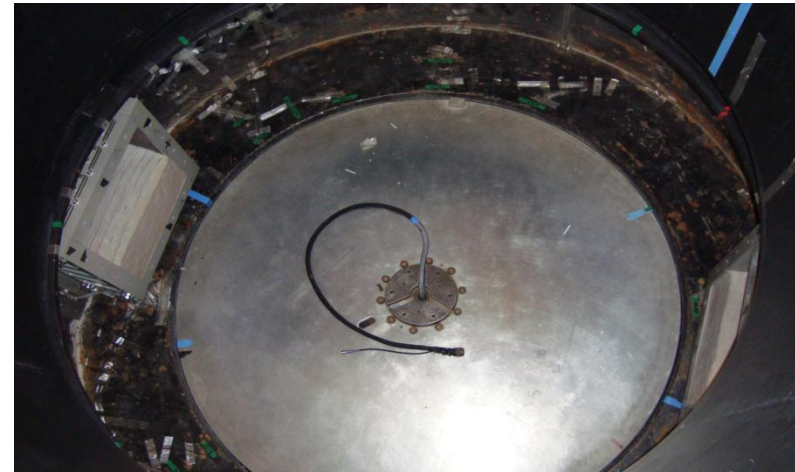
Φωτογραφία 8.1. Άοπλο πρανές πριν από την μεταφορά του.
Photograph 8.1. Unreinforced slope before the transport.



Φωτογραφία 8.2. Μεταφορά του μοντέλου στον φυγοκεντριστή.
Photograph 8.2. Transportation of the model in the centrifuge.



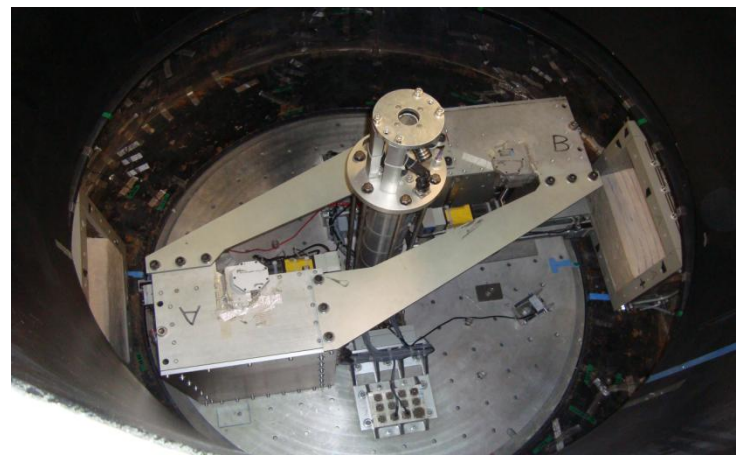
Φωτογραφία 8.3. Τοποθέτηση μοντέλου στον φυγοκεντριστή.
Photograph 8.3. Placement of the model in the centrifuge.



Φωτογραφία 8.4. Στερεωμένα μοντέλα στον φυγοκεντριστή.
Photograph 8.4. Fixed models inside the centrifuge.



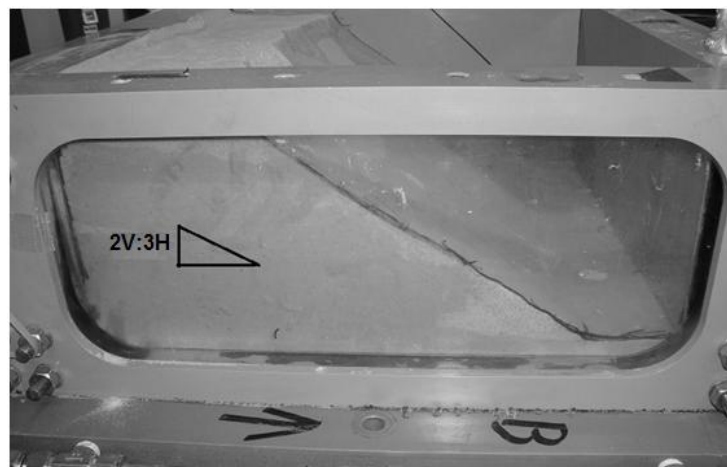
Φωτογραφία 8.5. Άοπλο πρανές στον φυγοκεντριστή.
 Photograph 8.5. Unreinforced model in the centrifuge.



Φωτογραφία 8.6. Μοντέλα στον φυγοκεντριστή με ενεργοποιητή .
 Photograph 8.6. Models inside the centrifuge with actuator .



Φωτογραφία 8.7. Κορυφή άοπλου πρανούς σε στάθμη 25g.
 Photograph 8.7. Top of unreinforced slope at 25g level.



Φωτογραφία 8.8. Άοπλο πρανές μετά το πέρας των φορτίσεων.
 Photograph 8.8. Unreinforced slope after loading.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

- **Τεστ Νο.2:** «Φόρτιση οπλισμένου πρανούς (ο.π.) με βήματα 5g ανά 2 min για διερεύνηση καταλληλότητας υλικού: 'Γεώπλεγμα'».

Κατά το Τεστ Νο.2, τοποθετήθηκε οπλισμένο πρανές ύψους 18 cm, κλίσης 2V:1H και βάρους 27.99 kg στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή. Ως υλικό οπλισμού χρησιμοποιήθηκε το «Γεώπλεγμα» και συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν 9 στρώσεις οπλισμού μήκους 11-19 cm καθ' όλο το ύψος του πρανούς, δηλαδή μία στρώση οπλισμού ανά 2 cm. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που εφαρμόσθηκε στο μοντέλο ήταν 150g, με αύξηση σε βήματα των 5g ανά 2 min. Η μετακίνηση του πρανούς ξεκίνησε να γίνεται αισθητή σε στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας ίση με 45g και παρακολούθηθηκε με κάμερα λείζερ που τοποθετήθηκε στην κορυφή του πρανούς.

Στην Φωτογραφία 8.9 παρουσιάζεται το οπλισμένο πρανές πριν από την τοποθέτησή του στον φυγοκεντριστή και στην Φωτογραφία 8.10 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από την κάμερα λείζερ σε στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 25g. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, για την ίδια στάθμη της βαρύτητας (25g), ενώ το άοπλο πρανές είχε αστοχήσει σημαντικά (Φωτ. 8.7), το οπλισμένο δεν παρουσιάζει αστοχία. Η τελική μορφή του πρανούς φαίνεται στην Φωτογραφία 8.11, όπου και μετρήθηκε γωνία κλίσης 63.5° , όμοια δηλαδή με την αρχική γωνία κατασκευής του πρανούς.



Φωτογραφία 8.9. Οπλισμένο πρανές πριν από την μεταφορά του στον φυγοκεντριστή.
Photograph 8.9. Reinforced slope before the transport in the centrifuge.



Φωτογραφία 8.10. Κορυφή οπλισμένου πρανούς σε επιτάχυνση της βαρύτητας 25g.
 Photograph 8.10. Top of reinforced slope at 25g level.



Φωτογραφία 8.11. Οπλισμένο πρανές μετά το πέρας των φορτίσεων.
 Photograph 8.11. Reinforced slope after loading.

- **Τεστ Νο.3:** «Φόρτιση ο.π. με βήματα 5g ανά 2 min για διερεύνηση καταλληλότητας υλικού: 'Κουρτίνα Α'».

Κατά το Τεστ Νο.3, κατασκευάστηκε μοντέλο οπλισμένου πρανούς ύψους 18 cm, κλίσης 2V:1H και βάρους 25.83 kg. Ως υλικό οπλισμού χρησιμοποιήθηκε η «Κουρτίνα Α» και συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν αρχικά 9 στρώσεις οπλισμού μήκους 11-19 cm καθ' όλο το

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ύψος του πρανούς, δηλαδή μία στρώση οπλισμού ανά 2 cm. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που εφαρμόστηκε στο μοντέλο ήταν 50g, με αύξηση σε βήματα των 5g ανά 2 min. Κατά το πείραμα αυτό, η μία στρώση οπλισμού αστόχησε κατά την μεταφορά του μοντέλου στον φυγοκεντριστή, πριν την έναρξη της περιστροφής με αποτέλεσμα να παραμείνουν 8 στρώσεις οπλισμού. Επιπλέον, λόγω της απουσίας της ανώτερης στρώσης, το βάρος του μοντέλου ήταν μικρότερο από ότι των υπόλοιπων μοντέλων. Βασικός στόχος του πειράματος αυτού ήταν να δοκιμασθεί το υλικό «Κουρτίνα Α» για την κατασκευή των στρώσεων οπλισμού. Κατά το πείραμα αυτό δεν ελήφθησαν μετρήσεις.

➤ **Τεστ Νο.4:** *«Τοποθέτηση αισθητήρα οπτικών ινών (ο.ι.) σε 'Ανθρακοϋφασμα', στο εσωτερικό ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Α' και φόρτιση σε βήματα 5g ανά 2 min».*

Κατά το Τεστ Νο.4 κατασκευάστηκε μοντέλο οπλισμένου πρανούς ύψους 18 cm, κλίσης 2V:1H και βάρους 28.28 kgf. Ως υλικό οπλισμού χρησιμοποιήθηκε η «Κουρτίνα Α», από όπου και κατασκευάστηκαν 8 στρώσεις οπλισμού 11-19 cm καθ' όλο το ύψος του πρανούς. Επιπλέον, τοποθετήθηκε και μία στρώση οπλισμού από «Ανθρακοϋφασμα», στο ύψος της στρώση Νο.4, στην οποία επικολλήθηκε ένας αισθητήρας οπτικών ινών. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που εφαρμόστηκε στο μοντέλο ήταν 50g, με αύξηση σε βήματα των 5g ανά 2 min. Στο πείραμα αυτό, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ο αισθητήρας οπτικών ινών και δοκιμάστηκε η νέα πειραματική διάταξη που σχεδιάστηκε για την εφαρμογή των αισθητήρων οπτικών ινών με επιτυχία. Ωστόσο, λόγω της φύσης της «Κουρτίνας Α», η τριβή μεταξύ του υλικού και του εδάφους ήταν μειωμένη και για τον λόγο αυτό το υλικό κρίθηκε ως ακατάλληλο.

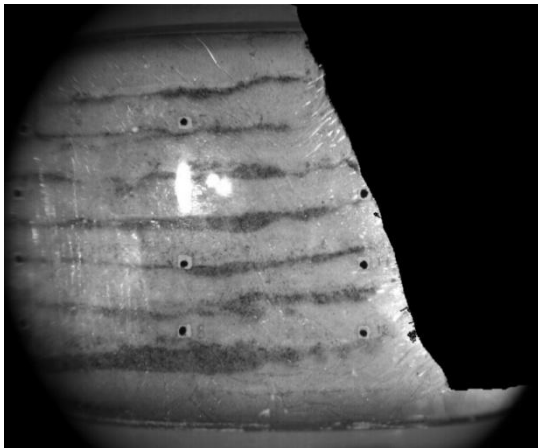
➤ **Τεστ Νο.5:** *«Φόρτιση ο.π. με βήματα 5g ανά 2 min για διερεύνηση καταλληλότητας υλικού: 'Κουρτίνα Β' » .*

Κατά το Τεστ Νο.5, κατασκευάστηκε μοντέλο οπλισμένου πρανούς ύψους 18 cm, κλίσης 2V:1H και βάρους 27.56 kgf. Ως υλικό οπλισμού χρησιμοποιήθηκε η «Κουρτίνα Β», από όπου και κατασκευάστηκαν 9 στρώσεις οπλισμού μήκους 11-19 cm και τοποθετήθηκαν καθ' όλο το ύψος του πρανούς σε κατακόρυφη απόσταση 2 cm. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που εφαρμόστηκε στο μοντέλο ήταν 50g, με αύξηση σε βήματα των 5g ανά 2 min. Στόχος του πειράματος ήταν να μελετηθεί η συμπεριφορά του υλικού «Κουρτίνα Β» το

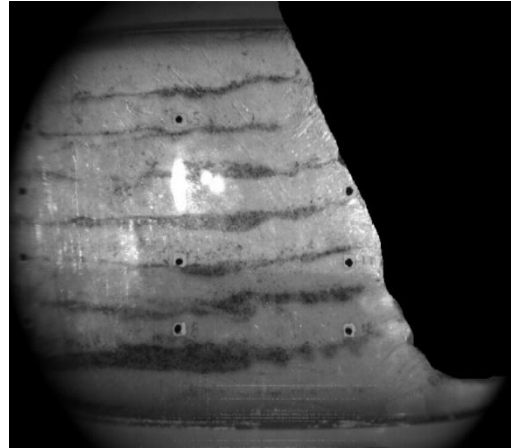
οποίο και κρίθηκε ως ικανό να προσομοιώσει τις στρώσεις οπλισμού οπλισμένου πρανούς. Στο εν λόγω υλικό επικολλήθηκαν αισθητήρες οπτικών ινών για την μέτρηση των τροπών σε ακόλουθα πειράματα.

➤ **Τεστ Νο.6:** «Φόρτιση ο.π. με σταθερό μήκος οπλισμών, με βήματα 5g ανά 2 min και χρήση κάμερας για ανάλυση PIV».

Κατά το Τεστ Νο.6 κατασκευάστηκε μοντέλο οπλισμένου πρανούς ύψους 18 cm, κλίσης 2V:1H και βάρους 29.04 kgf. Ως υλικό οπλισμού χρησιμοποιήθηκε η «Κουρτίνα Α», από όπου και κατασκευάστηκαν 9 στρώσεις οπλισμού μήκους 11 cm και τοποθετήθηκαν σε κατακόρυφη απόσταση 2 cm η μία από την άλλη καθ' όλο το ύψος του πρανούς. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που εφαρμόστηκε στο μοντέλο ήταν 50g, με αύξηση σε βήματα των 5g ανά 2 min. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ψηφιακή φωτογραφική μηχανή για τη λήψη φωτογραφιών προκειμένου να πραγματοποιηθεί στη συνέχεια ανάλυση PIV για τον υπολογισμό των διατμητικών τροπών στην πλάγια όψη του πρανούς. Στόχος του πειράματος ήταν να ενσωματωθεί η μεθοδολογία της ανάλυσης PIV στην πειραματική μελέτη των οπλισμένων πρανών. Στις Φωτογραφίες 8.12 και 8.13 παρουσιάζεται η πρώτη και η τελευταία ψηφιακή φωτογραφία οι οποίες και ελήφθησαν κατά τη διάρκεια της φόρτισης από 1g σε 50g. Οι αναπτυσσόμενες τροπές είναι μικρές, μπορούν ωστόσο να ποσοτικοποιηθούν μέσω ανάλυσης PIV.



Φωτογραφία 8.12. Ψηφιακή φωτογραφία (1g).
Photograph 8.12. Digital image at 1g level.



Φωτογραφία 8.13. Ψηφιακή φωτογραφία (50g).
Photograph 8.13. Digital image at 50g level.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

- **Τεστ Νο.7:** «Φόρτιση ο.π. με βήματα 5g ανά 2 min, για διερεύνηση καταλληλότητας υλικού: 'Επίδεσμος'».

Κατά το Τεστ Νο.7 κατασκευάστηκε μοντέλο οπλισμένου πρανούς ύψους 18 cm, κλίσης 2V:1H και βάρους 27.78 kg. Ως υλικό οπλισμού χρησιμοποιήθηκε ο «Επίδεσμος», από όπου και κατασκευάστηκαν 9 στρώσεις οπλισμού μήκους 11-19 cm και τοποθετήθηκαν καθ' όλο το ύψος του πρανούς σε κατακόρυφη απόσταση 2 cm. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που εφαρμόστηκε στο μοντέλο ήταν 100g, με αύξηση σε βήματα των 5g ανά 2 min. Στόχος του πειράματος ήταν να μελετηθεί η συμπεριφορά του υλικού «Επίδεσμος» το οποίο και κρίθηκε ως ικανό να προσομοιώσει τις στρώσεις ολισμού του πρανούς. Στο εν λόγω υλικό επικολλήθηκαν αισθητήρες οπτικών ινών για την μέτρηση των τροπών σε ακόλουθα πειράματα.

- **Τεστ Νο.8:** Τοποθέτηση αισθητήρα ο.ι. ινών σε 'Ανθρακοϋφασμα', σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', φόρτιση με βήματα 5g ανά 2 min, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου'.

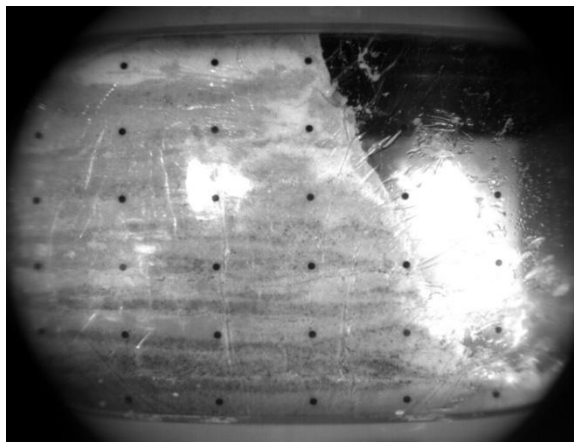
Κατά το Τεστ Νο.8 κατασκευάστηκε μοντέλο οπλισμένου πρανούς ύψους 18 cm, κλίσης 2V:1H και βάρους 28.44 kg. Ως υλικό οπλισμού χρησιμοποιήθηκε η «Κουρτίνα Β», από όπου και κατασκευάστηκαν 8 στρώσεις οπλισμού μήκους 11-19 cm και τοποθετήθηκαν καθ' όλο το ύψος του πρανούς σε κατακόρυφη απόσταση 2 cm. Επιπλέον, τοποθετήθηκε μία στρώση οπλισμού από «Ανθρακοϋφασμα», στο ύψος της στρώση Νο.4, στην οποία επικολλήθηκε αισθητήρας οπτικών ινών. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που εφαρμόστηκε στο μοντέλο ήταν 100g, με αύξηση σε βήματα των 5g ανά 2 min, ενώ στην στάθμη 50g απελευθερώθηκε μοντέλο «βράχου» με στόχο να προσομοιωθεί το φαινόμενο της βραχόπτωσης. Στόχος του πειράματος ήταν να μελετηθεί η συμπεριφορά του υλικού «Κουρτίνα Β'» σε φόρτιση έως και 100g και να χρησιμοποιηθεί για πρώτη φορά η πειραματική διάταξη που προσομοιώνει το φαινόμενο της βραχόπτωσης). Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκαν όλες οι φορτίσεις, δηλαδή η εφαρμογή μέγιστης επιτάχυνσης της βαρύτητας και ρίψη μοντέλου «βράχου» και το φαινόμενο καταγράφηκε από αισθητήρα οπτικών ινών.

- **Τεστ Νο.9:** «*Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε πλήρη διάταξη σε ο.π. από υλικό 'Επίδεσμος', με φόρτιση 5g ανά 2 min, αποφόρτιση, εκ νέου απευθείας φόρτιση σε 50g και ρίψη μοντέλου 'βράχου' & ανάλυση PIV*».

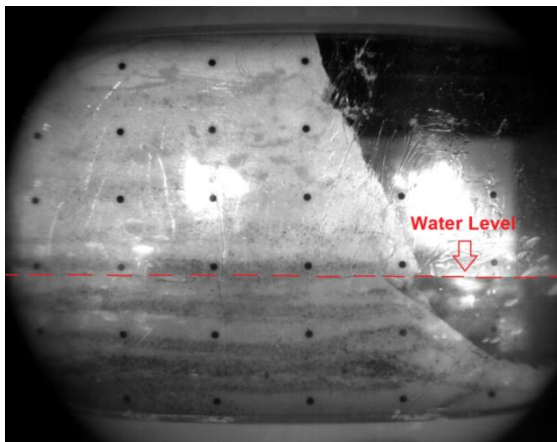
Κατά το Τεστ Νο.9 κατασκευάστηκε μοντέλο οπλισμένου πρανούς ύψους 18 cm, κλίσης 2V:1H και βάρους 27.48 kgr. Ως υλικό οπλισμού χρησιμοποιήθηκε ο «Επίδεσμος», από όπου και κατασκευάστηκαν 9 στρώσεις οπλισμού μήκους 11-19 cm και τοποθετήθηκαν καθ' όλο το ύψος του πρανούς σε κατακόρυφη απόσταση 2 cm. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν 4 αισθητήρες οπτικών ινών στις στρώσεις οπλισμού 4 και 8. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που εφαρμόστηκε στο μοντέλο ήταν 50g, με αύξηση σε βήματα των 5g ανά 2 min, ενώ στην στάθμη 50g απελευθερώθηκε το μοντέλο «βράχου». Στόχος του πειράματος ήταν να χρησιμοποιηθούν οι αισθητήρες οπτικών ινών στο υλικό «Επίδεσμος» και να μετρηθούν οι αναπτυσσόμενες γραμμικές τροπές. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου αριθμού αισθητήρων που τοποθετήθηκαν και συνενώθηκαν σε σειρά, παρουσιάστηκε αδυναμία στο οπτικό σήμα με αποτέλεσμα κάποιοι από τους αισθητήρες να σταματήσουν να λαμβάνουν μετρήσεις για κάποιο χρονικό διάστημα. Για τον λόγο αυτό, σταμάτησε η λειτουργία του γεωτεχνικού φυγοκεντριστή μόλις η στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας έφτασε τα 50g, πριν την απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου», προκειμένου να αποκατασταθεί η λειτουργία και στη συνέχεια επιβλήθηκε εκ νέου φόρτιση απευθείας έως και 50g όπου και απελευθερώθηκε το μοντέλο «βράχου». Η μεθοδολογία του συγκεκριμένου πειράματος αποτυπώνεται παρακάτω, στα Σχήματα όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με αισθητήρες οπτικών ινών.

Μία άλλη ιδιαιτερότητα του Τεστ Νο. 9 ήταν ότι η ποσότητα του νερού που τοποθετήθηκε για την συγκράτηση κατά την μεταφορά των μοντέλων στον φυγοκεντριστή, διατηρήθηκε καθ' όλη την διεξαγωγή του πειράματος καθώς δεν ανοίχθηκαν οι σωλήνες διαφυγής του νερού. Το αποτέλεσμα ήταν κατά την περιστροφή του μοντέλου να μεταφερθεί το νερό από τα ανώτερα στα κατώτερα στρώματα αυτού και να το καταστήσει κορεσμένο στην περιοχή αυτή. Η μετακίνηση αυτή του νερού φαίνεται στις Φωτογραφίες 8.14 και 8.15. Επιπλέον, για το πείραμα αυτό, ελήφθησαν ψηφιακές φωτογραφίες για να πραγματοποιηθεί ανάλυση PIV, έως στάθμη της βαρύτητας 50g.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8



Φωτογραφία 8.14. Ο. π. σε στάθμη 1g.
Photograph 8.14. Reinforced slope at 1g level.



Φωτογραφία 8.15. Ο. π. σε στάθμη 50g.
Photograph 8.15. Reinforced slope at 50g level.

- **Τεστ Νο.10:** «Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Επίδεσμος', με απευθείας φόρτιση σε 50g και 100g, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου'».

Κατά το Τεστ Νο.10, κατασκευάστηκε μοντέλο οπλισμένου πρανούς ύψους 18 cm, κλίσης 2V:1H και βάρους 28.34 kgf. Ως υλικό οπλισμού χρησιμοποιήθηκε ο «Επίδεσμος», από όπου και κατασκευάστηκαν 9 στρώσεις οπλισμού μήκους 11-19 cm και τοποθετήθηκαν καθ' όλο το ύψος του πρανούς σε κατακόρυφη απόσταση 2 cm. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν 2 οπτικές ίνες στις στρώσεις οπλισμού 4 και 8. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που εφαρμόστηκε στο μοντέλο ήταν 100g, με απευθείας αύξηση από 1g έως 50g, όπου και απελευθερώθηκε το μοντέλο «βράχου» με στόχο να προσομοιωθεί το φαινόμενο της βραχόπτωσης και στην συνέχεια με νέα απευθείας αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας από 50g σε 100g.

Στόχος του πειράματος ήταν μετρηθούν οι αναπτυσσόμενες γραμμικές τροπές μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών για απευθείας αύξηση της βαρύτητας σε 50g και 100g και να συγκριθούν με τις αντίστοιχες τροπές του Τεστ Νο.9. Επιπλέον, ελήφθησαν ψηφιακές φωτογραφίες για να πραγματοποιηθεί ανάλυση PIV έως στάθμη της βαρύτητας 100g.

- **Τεστ Νο.11:** «Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Επίδεσμος', με σταθερό μήκος οπλισμών, απευθείας φόρτιση σε 50g & 100g και ρίψη μοντέλου 'βράχου'».

Κατά το Τεστ Νο.11, κατασκευάστηκε μοντέλο οπλισμένου πρανούς ύψους 18 cm, κλίσης 2V:1H και βάρους 28.28 kg. Ως υλικό οπλισμού χρησιμοποιήθηκε ο «Επίδεσμος», από όπου και κατασκευάστηκαν 9 στρώσεις οπλισμού μήκους 11-19 cm και τοποθετήθηκαν καθ' όλο το ύψος του πρανούς σε κατακόρυφη απόσταση 2 cm. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν 2 οπτικές ίνες στις στρώσεις οπλισμού Νο.4 και Νο.8. Οι οπτικές ίνες που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα αυτό, ήταν οι ίδιες που χρησιμοποιήθηκαν στα 2 προηγούμενα πειράματα (Τεστ Νο.9 & 10) με στόχο να εξετασθεί η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης αυτών σε διάφορα μοντέλα. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που εφαρμόστηκε στο μοντέλο ήταν 100g, με απευθείας αύξηση από 1g έως 50g όπου και απελευθερώθηκε το μοντέλο «βράχου» με στόχο να προσομοιωθεί το φαινόμενο της βραχύπτωσης και στην συνέχεια με νέα απευθείας αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας από 50g σε 100g.

- **Τεστ Νο.12:** *«Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', με απευθείας φόρτιση σε 50g και 100g και ρίψη μοντέλου 'βράχου'».*

Κατά το Τεστ Νο.12, κατασκευάστηκε μοντέλο οπλισμένου πρανούς ύψους 18 cm, κλίσης 2V:1H και βάρους 29.14 kg. Ως υλικό οπλισμού χρησιμοποιήθηκε η «Κουρτίνα Β», από όπου και κατασκευάστηκαν 9 στρώσεις οπλισμού μήκους 11-19 cm και τοποθετήθηκαν καθ' όλο το ύψος του πρανούς σε κατακόρυφη απόσταση 2 cm. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν 3 οπτικές ίνες, οι δύο στην στρώση οπλισμού Νο.4 και η τρίτη στην στρώση Νο.8. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας που εφαρμόστηκε στο μοντέλο ήταν 100g, με απευθείας αύξηση από 1g έως 50g όπου και απελευθερώθηκε το μοντέλο «βράχου», με στόχο να προσομοιωθεί το φαινόμενο της βραχύπτωσης και στην συνέχεια με νέα απευθείας αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας από 50g σε 100g.

- **Τεστ Νο.13:** *«Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', με απευθείας φόρτιση σε 50g & 100g, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου'».*

Κατά το Τεστ Νο.13, κατασκευάζεται μοντέλο όμοιο με του Τεστ Νο.12 και ακολουθείται ακριβώς η ίδια μεθοδολογία προκειμένου να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα των πειραμάτων και των μετρήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

- **Τεστ Νο.14:** «Τοποθέτηση αισθητήρα ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', με απευθείας φόρτιση σε στάθμη 50g και 100g, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου' για έλεγχο της ανώτερης στρώσης (Νο. 8)».

Κατά το Τεστ Νο.14, κατασκευάζεται μοντέλο όμοιο με αυτό των Τεστ Νο.12 και 13 και ακολουθείται ακριβώς η ίδια μεθοδολογία προκειμένου μετρηθούν οι τροπές στον αισθητήρα που βρισκόταν στην στρώση οπλισμού Νο.8 με απευθείας αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g και 100g.

- **Τεστ Νο.15:** Άοπλο πρανές με φόρτιση σε βήματα των 5g ανά 2 min, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου' (αισθητήρας στην μεσαία στρώσης, Νο. 4).

Τέλος, κατά το Τεστ Νο.15, κατασκευάζεται άοπλο πρανές ύψους 18 cm, κλίσης 2V:1H και βάρους 28.54 kgf προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του. Στο εσωτερικό του άοπλου πρανούς και περίπου στην αντίστοιχη στρώση Νο. 4 των οπλισμένων πρανών τοποθετήθηκε μία μόνο στρώση οπλισμού με έναν αισθητήρα επικολλημένο, προκειμένου να μελετηθούν οι διαφορές με τα προηγούμενα πειράματα. Στόχος ήταν να επιχειρηθεί να μετρηθούν οι αναπτυσσόμενες τροπές

8.3 Αποτελέσματα μετρήσεων.

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε ένα πείραμα που πραγματοποιήθηκε. Αρχικά περιγράφονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών οι οποίοι και επικολλήθηκαν στις στρώσεις οπλισμών των πειραματικών μοντέλων και στην συνέχεια τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω της ανάλυσης PIV από ψηφιακές φωτογραφίες που ελήφθησαν στην πλάγια όψη των μοντέλων.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι μετρήσεις που ελήφθησαν μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών και έχουν πραγματοποιηθεί πάνω στις στρώσεις οπλισμών και αφορούν γραμμικές τροπές αναπτυσσόμενες κατά την διεύθυνση αυτών, ενώ τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου PIV, αφορούν διατμητικές τροπές που ακολουθούν την διεύθυνση των διανυσμάτων ροής όπως αυτά φαίνονται στα Σχήματα που ακολουθούν.

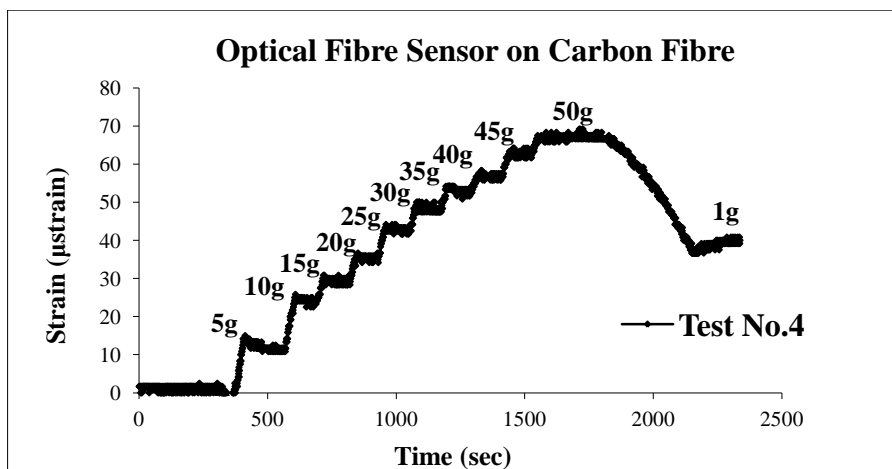
8.3.1 Μετρήσεις με Αισθητήρες Οπτικών ινών.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 8.1, τα μοντέλα στα οποία τοποθετήθηκαν οπτικές ίνες, είναι εκείνα που αντιστοιχούν στα Τεστ Νο. 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 και 15.

Ειδικότερα:

- **Τεστ Νο.4:** «Τοποθέτηση αισθητήρα οπτικών ινών (ο.ι.) σε ‘Ανθρακούφασμα’, στο εσωτερικό ο.π. από υλικό ‘Κουρτίνα Α’ και φόρτιση σε βήματα 5g ανά 2 min».

Στο Σχήμα 8.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το Τεστ Νο.4. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι μετρούμενες τροπές αυξάνουν με την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας και σταθεροποιούνται όταν η επιτάχυνση παραμένει σταθερή. Συγκεκριμένα, από τη χρονική στιγμή $t=375$ sec, ξεκινάει η αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας με βήματα των 5g ανά 2 min, έως και 50g και παρατηρείται αρχικά μεγαλύτερη αύξηση των τροπών και στη συνέχεια μικρότερη, με μέγιστη τροπή ίση με 68 μ strain. Στη συνέχεια η επιτάχυνση της βαρύτητας μειώνεται και οι τροπές ακολουθούν. Η παραμένουσα τροπή είναι κοντά στα 40 μ strain. Η μετρούμενες τιμές της τροπής είναι μικρές, όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς το «Ανθρακούφασμα» πάνω στο οποίο επικολλήθηκε ο αισθητήρας είχε πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας. Ωστόσο, με το πείραμα αυτό επιβεβαιώνεται ότι η μετρητική διάταξη με τους αισθητήρες οπτικών ινών μπορεί να εφαρμοσθεί στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.



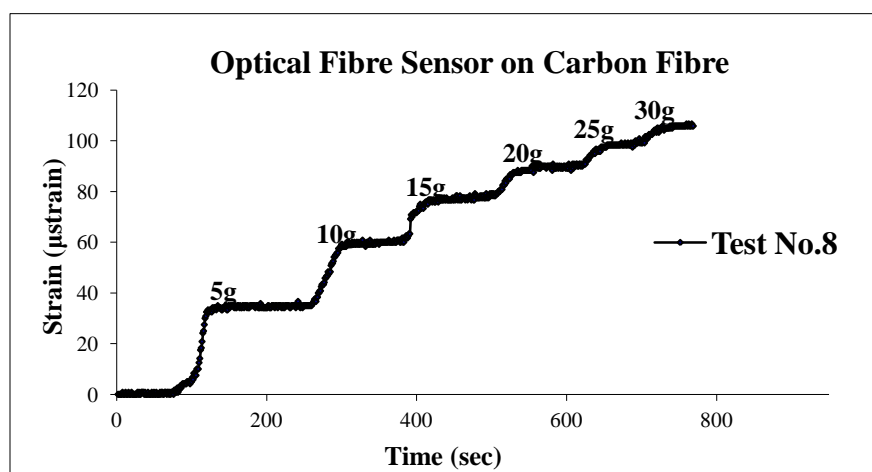
Σχήμα 8.1. Τροπές μετρούμενες με ο.ι. σε «Ανθρακούφασμα» (Υλικό μοντέλου: ‘Κουρτίνα Α’).
Figure 8.1. Strains measured via o. f. on “Carbon-Fibre” (Reinf. Model material: ‘Curtain A’).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

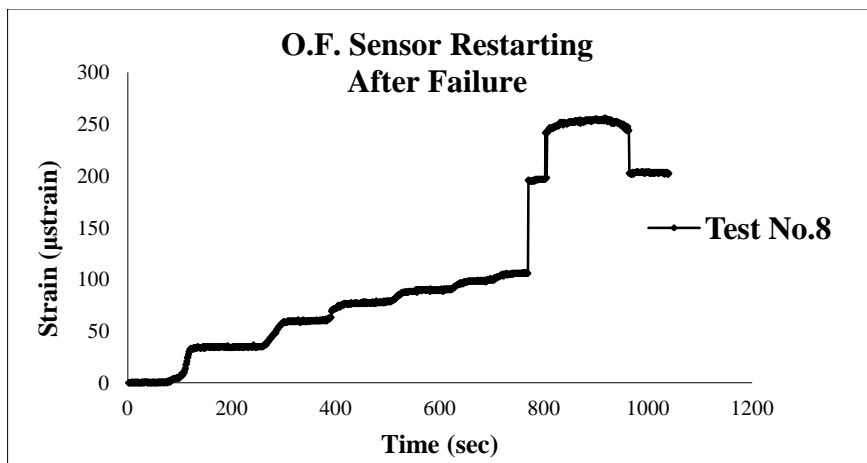
➤ **Τεστ Νο.8:** Τοποθέτηση αισθητήρα ο.ι. ινών σε 'Ανθρακούφασμα', σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', φόρτιση με βήματα 5g/ 2 min, ρίψη μοντέλου 'βράχου'.

Στο Σχήμα 8.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το Τεστ Νο.8. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι μετρούμενες τροπές αυξάνουν με την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας και σταθεροποιούνται όταν η επιτάχυνση παραμένει σταθερή. Μετά την στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας των 30g, όπου το μοντέλο αντιστοιχούσε σε πρωτότυπο πρανές ύψους 5.4 m, ο αισθητήρας οπτικών ινών αστόχησε και σταμάτησε να λειτουργεί για κάποιο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα κενό στις μετρήσεις, επανήλθε ωστόσο σε στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g, λίγο πριν την απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου». Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.3 και η επιρροή του μοντέλου «βράχου» στο πρανές καταγράφεται από τον αισθητήρα.

Με το πείραμα αυτό επιβεβαιώθηκε το γεγονός ότι σε περίπτωση που κάποιος αισθητήρας για οποιοδήποτε λόγο σταματήσει να λειτουργεί για κάποιο χρονικό διάστημα, κατά την επαναφορά του σε λειτουργία, οι μετρήσεις που καταγράφονται αποτελούν συνέχεια των αρχικών και βρίσκονται σε ακολουθία με τις μετρήσεις προ αστοχίας του αισθητήρα. Έτσι, μπορούν να αξιοποιηθούν και οι μετέπειτα μετρήσεις, καθώς ο αισθητήρας υπόκειται σε παραμόρφωση και κατά την διάρκεια που δεν λαμβάνονται μετρήσεις.



Σχήμα 8.2. Τροπές μετρούμενες με ο.ι. σε «Ανθρακούφασμα» (Υλικό μοντέλου: 'Κουρτίνα Β').
Figure 8.2. Strains measured via o. f. on "Carbon-Fibre" (Reinf. Model material: 'Curtain B').



Σχήμα 8.3. Επαναλειτουργία ο.ι. μετά από αστοχία (50g & βραχύπτωση).
Figure 8.3. O. f. sensor restarting after failure (50g & rockfall).

- **Τεστ Νο.9:** «Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε πλήρη διάταξη σε ο.π. από υλικό 'Επίδεσμος', με φόρτιση 5g ανά 2 min, αποφόρτιση, εκ νέου απευθείας φόρτιση σε 50g και ρίψη μοντέλου 'βράχου' & ανάλυση PIV».

Στα Σχήματα 8.4 έως και 8.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις με αισθητήρες οπτικών ινών σε διάφορες θέσεις στο εσωτερικό του οπλισμένου πρανούς, κατά το Τεστ Νο.9.

Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 8.4 παρατηρείται η μεταβολή των τροπών για αισθητήρα τοποθετημένο στην στρώση Νο. 1, δηλαδή στην κατώτερη στρώση του μοντέλου. Υπενθυμίζεται ότι το μοντέλο στην περιοχή αυτή είναι κορεσμένο με νερό και όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι τροπές είναι σημαντικά μειωμένες. Ωστόσο, η αύξησή τους ακολουθεί ανάλογη πορεία με τους υπόλοιπους αισθητήρες που παρουσιάζονται στην συνέχεια.

Στο Σχήμα 8.5, παρουσιάζεται η μεταβολή των μετρούμενων τροπών στο μέσο της στρώσης οπλισμού Νο. 4, η οποία και βρίσκεται σε μεσαία στάθμη του πρανούς. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, κατά την δεύτερη φόρτιση του μοντέλου οι τροπές είναι σημαντικά μικρότερες από τις αρχικές για την ίδια στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας (50g). Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της τροπής στην πρώτη περίπτωση ισούται με: 2842 μstrain, ενώ στην δεύτερη περίπτωση με: 1730 μstrain.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Στην συνέχεια, στο Σχήμα 8.6, παρουσιάζεται η μεταβολή μετρούμενων τροπών στο μέσο της στρώσης οπλισμού No. 4, αλλά αυτή τη φορά κοντά στην πλάγια όψη του πρανούς. Στην περίπτωση αυτή ο αισθητήρας αστόχησε σε στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας μόλις 20g με αποτέλεσμα να χαθούν αρκετές πληροφορίες για την περιοχή αυτή.

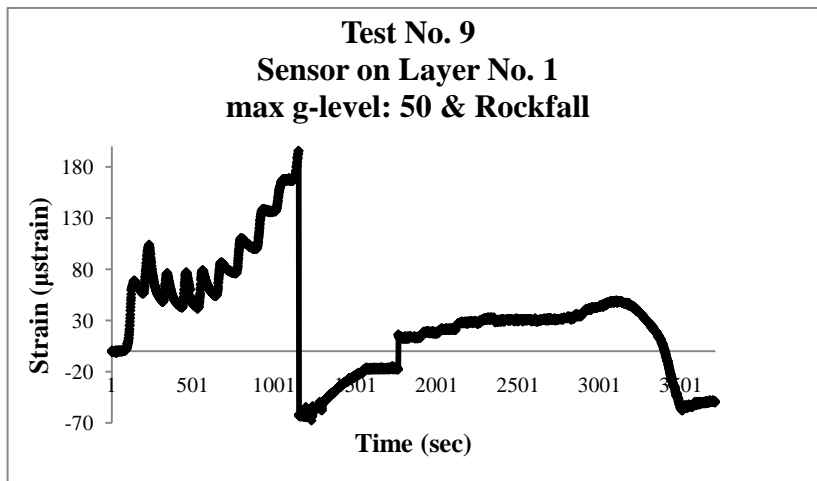
Ακολούθως, παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.7 οι μετρήσεις που ελήφθησαν στην στρώση No.8, προς το ανώτερο δηλαδή τμήμα του μοντέλου και όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η διαδικασία φόρτισης αποτυπώνεται καθαρά και για αυτή την περίπτωση και συγκεκριμένα: για τις χρονικές περιόδους 0 έως 1147 sec, η στάθμη της επιτάχυνσης αυξάνει σταδιακά με βήματα των 5g ανά 2 min και φθάνει στα 50g ($t=1147$ sec) όπου και παρατηρείται και η μέγιστη τιμή της τροπής, ίση με 503 μ strain. Στην συνέχεια η στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας επανέρχεται σε 1g και αυξάνει εκ νέου απευθείας έως 50g, όπου και απελευθερώνεται το μοντέλο «βράχου», την επιρροή του οποίου κατέγραψε ο αισθητήρας ($t=1750$ sec). Από την απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου» η αύξηση της τροπής φθάνει από το 117 στο 440 μ strain ($\Delta\epsilon=323$ μ strain).

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί κατά την δεύτερη φόρτιση του μοντέλου οι αναπτυσσόμενες τροπές είναι σημαντικά μικρότερες από τις αρχικές καθ' όλη την φόρτιση του μοντέλου, καθώς και για την ίδια στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας (50g). Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της τροπής στην πρώτη περίπτωση λαμβάνει την τιμή: 503 μ strain, ενώ στην δεύτερη περίπτωση ισούται με: 117 μ strain. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την πρώτη φόρτιση το οπλισμένο πρανές έλαβε κάποιες αρχικές παραμορφώσεις, οι οποίες και διατηρήθηκαν στην δεύτερη φάση φόρτισης.

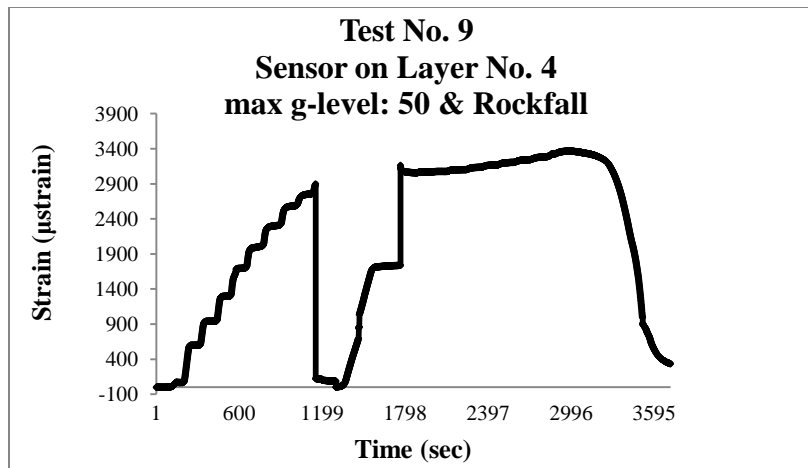
Τέλος, στο Σχήμα 8.8, παρουσιάζεται η μεταβολή των μετρούμενων τροπών αισθητήρα ευρισκόμενου στην στρώση οπλισμού No.8, κοντά στην όψη του πρανούς. Στην περίπτωση αυτή, οι μετρήσεις ελήφθησαν έως την στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g, με ένα μικρό κενό μεταξύ 30g-35g, λόγω αδυναμίας του οπτικού σήματος. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η αύξηση των τροπών είναι ανάλογη με την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του Σχήματος 8.8 με τις τιμές του Σχήματος 8.7, μπορεί να παρατηρηθεί ότι παρότι οι αισθητήρες βρίσκονται στην ίδια στρώση οπλισμού, οι τιμές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.7 είναι μικρότερες. Αυτό οφείλεται στο

γεγονός ο αισθητήρας που παρουσιάζεται στον Σχήμα 8.8, βρίσκεται στο μέσο της στρώσης Νο.8 ενώ ο αισθητήρας που παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.7, κοντά στην όψη του πρανούς, με αποτέλεσμα το υπερκείμενο έδαφος να είναι μικρότερο και επομένως να υπόκεινται σε μικρότερη φόρτιση.

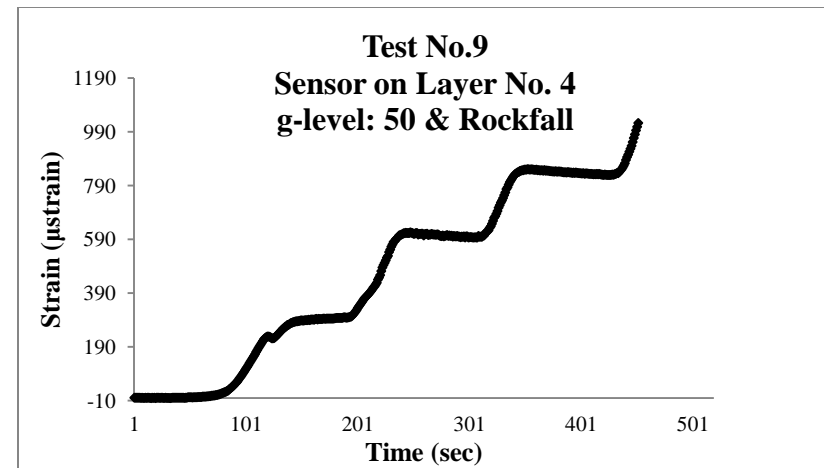
Συνολικά, για όλες τις μετρήσεις που παρουσιάζονται στα Σχήματα 8.4 έως και 8.8 που ακολουθούν, μπορεί να παρατηρηθεί ότι αποτυπώνεται πλήρως η διαδικασία φόρτισης κατά την περιστροφή του γεωτεχνικού φυγοκεντριστή. Ειδικότερα, κατά την πρώτη φόρτιση από 1g σε 50g, παρατηρείται αύξηση των τροπών ανάλογα με την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας, ενώ κατά την αποφόρτιση και εκ νέου φόρτιση το ίδιο. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι αναπτυσσόμενες τροπές διατηρούνται σταθερές όσο η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι σταθερή καθώς επίσης και ότι κατά τον δεύτερο κύκλο φόρτισης οι τιμές των τροπών είναι σημαντικά μειωμένες. Τέλος, η διαφοροποίηση στις μετρήσεις για την ίδια στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας για τις διάφορες θέσεις καθ' ύψος του πρανούς, είναι αισθητή.



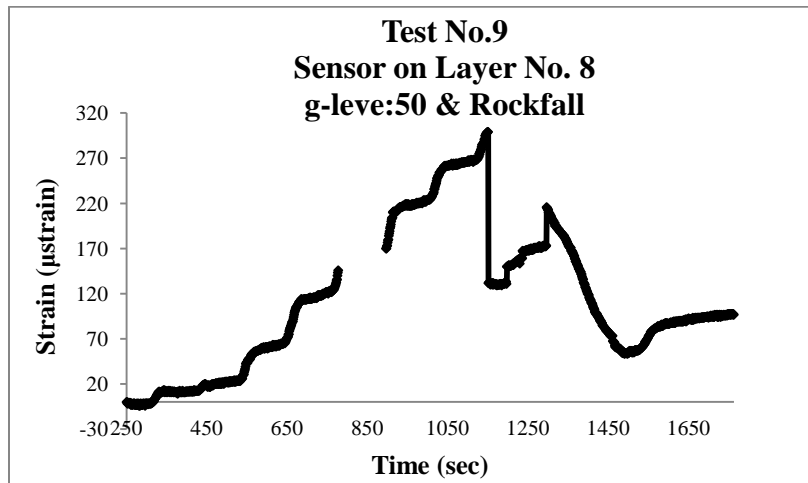
Σχήμα 8.4. Τροπές στην στρώση σπλισμού Νο.1 (όψη).
Figure 8.4. Strains on reinforcement layer No. 1 (face).



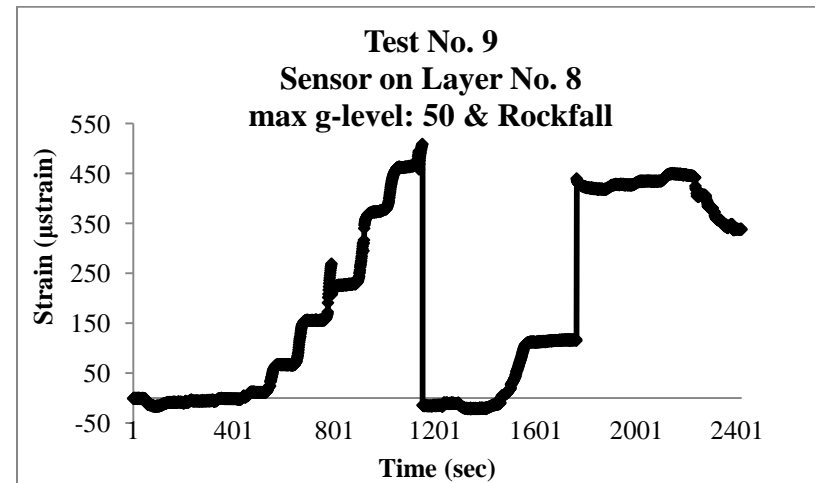
Σχήμα 8.5. Τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.4 (μέσο).
Figure 8.5. Strains on reinforcement layer No. 4 (middle).



Σχήμα 8.6. Τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.4 (πλάι).
Figure 8.6. Strains on reinforcement layer No. 4 (side).



Σχήμα 8.7. Τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.8 (όψη).
Figure 8.7. Strains on reinforcement layer No. 8 (face).



Σχήμα 8.8. Τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.8 (μέσο).
Figure 8.8. Strains on reinforcement layer No. 8 (middle).

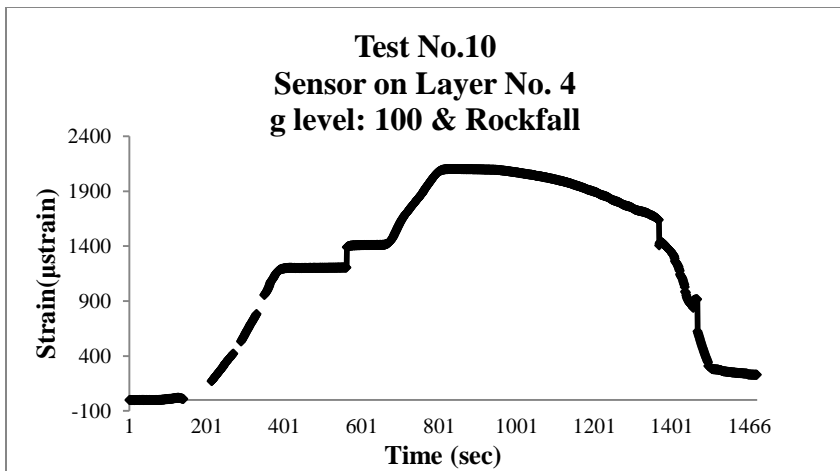
- **Τεστ Νο.10:** «Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Επίδεσμος', με απευθείας φόρτιση σε στάθμη 50g & 100g, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου'»

Στα Σχήματα 8.9 και 8.10, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις με αισθητήρες οπτικών ινών για το Τεστ Νο.10. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι τροπές αυξάνουν καθώς αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας και παραμένουν σταθερές όταν η επιτάχυνση διατηρείται σταθερή. Επιπλέον μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι τροπές είναι σημαντικά μεγαλύτερες στην στρώση οπλισμού Νο.4 σε σχέση με την στρώση οπλισμού Νο.8, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω του μεγαλύτερου υπερκείμενου εδαφικού υλικού. Ωστόσο παρατηρείται ότι η αύξηση της τροπής της στρώσης Νο.8 έως και τη απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου» είναι μικρότερη από την αντίστοιχη σε προηγούμενα πειράματα με αισθητήρες στην ίδια θέση, πιθανώς λόγω ασθενούς λειτουργίας του αισθητήρα την χρονική περίοδο αυτή. Τέλος, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι μετρούμενες τροπές είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του πειράματος Νο.9, λόγω διαφορετικού τρόπου φόρτισης. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του πειράματος Νο.10 η φόρτιση έγινε απευθείας σε 50g, ενώ στο πείραμα Νο.9 με βήματα των 5g ανά 2 min.

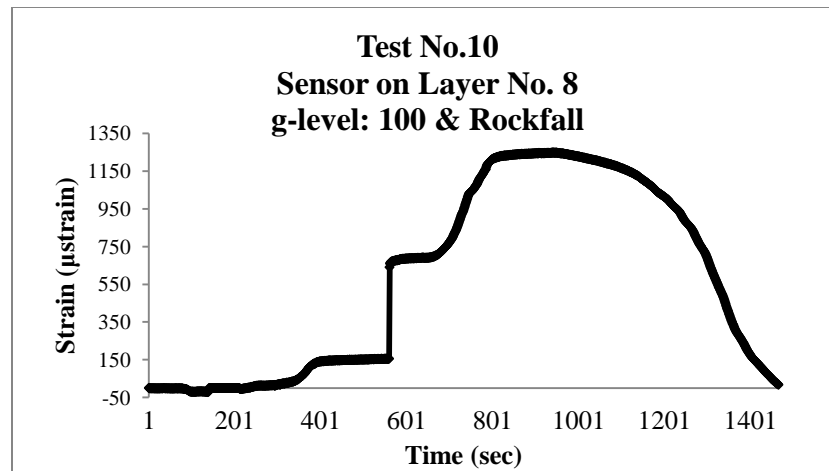
- **Τεστ Νο.11:** «Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Επίδεσμος', με σταθερό μήκος οπλισμών, απευθείας φόρτιση σε 50g & 100g & ρίψη μοντέλου 'βράχου' (επαναχρησιμοποίηση αισθητήρων)».

Στα Σχήματα 8.11 και 8.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το Τεστ Νο.11 και τις στρώσεις οπλισμού Νο.4 και 8, με αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν και σε προηγούμενα πειράματα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η αύξηση των τροπών είναι ανάλογη με την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας, ωστόσο οι τιμές των τροπών είναι πολύ μικρές με αποτέλεσμα να θεωρηθούν ως λανθασμένες και να μην ληφθούν υπόψη σε περαιτέρω υπολογισμούς και συγκρίσεις. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για κάποιο λόγο οι αισθητήρες δεν λειτούργησαν. Από το πείραμα αυτό προέκυψε το συμπέρασμα ότι θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο εάν οι αισθητήρες που επαναχρησιμοποιούνται θα δίνουν σωστά αποτελέσματα ή όχι.

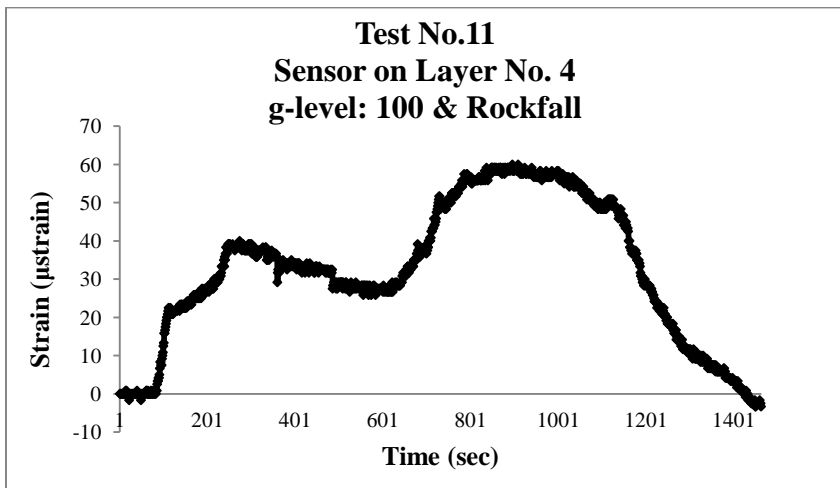
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8



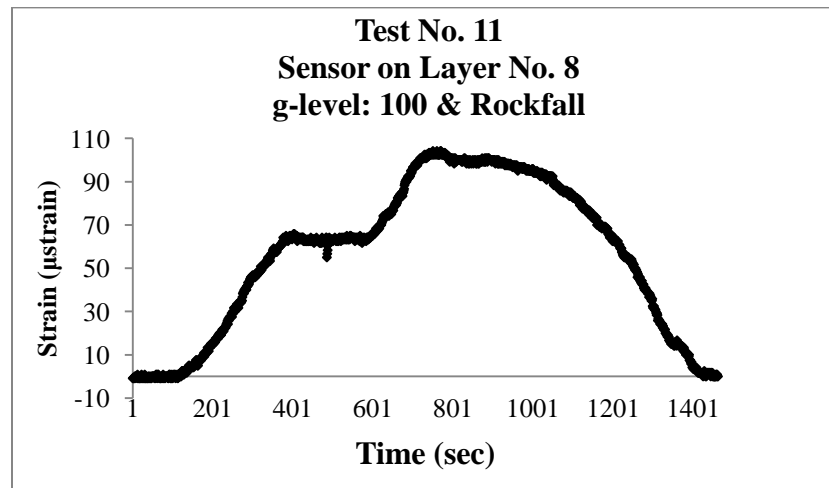
Σχήμα 8.9. Τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.4.
 Figure 8.9. Strains on reinforcement layer No. 4.



Σχήμα 8.10. Τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.8.
 Figure 8.10. Strains on reinforcement layer No. 8.



Σχήμα 8.11. Τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.4.
 Figure 8.11. Strains on reinforcement layer No. 4.



Σχήμα 8.12. Τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.8.
 Figure 8.12. Strains on reinforcement layer No. 8.

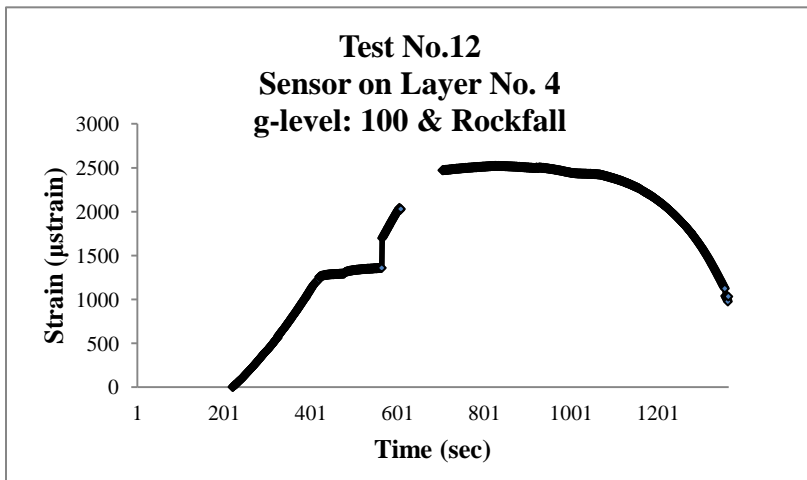
- **Τεστ Νο.12:** «Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', με απευθείας φόρτιση σε στάθμη 50g και 100g και ρίψη μοντέλου 'βράχου'» .

Στα Σχήματα 8.13 έως και 8.15, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από μετρήσεις με οπτικές ίνες για το Τεστ Νο.12. Στα Σχήματα 8.13 και 8.14 που αναφέρονται στην στρώση οπλισμού Νο.4, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι μετρούμενες τροπές αυξάνουν αναλογικά με την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας και παραμένουν σταθερές όταν αυτή διατηρείται σταθερή. Επίσης, το φαινόμενο της απελευθέρωσης του μοντέλου «βράχου» γίνεται αντιληπτό και καταγράφεται από τους αισθητήρες. Σημειώνεται ακόμη ότι οι δύο αισθητήρες της στρώσης αυτής βρίσκονται σε διαφορετική θέση στο εσωτερικό του πρανούς και συγκεκριμένα κοντά στο πλάι (Σχ. 8.13) και κοντά στην όψη του πρανούς (Σχ. 8.14) με στόχο να διερευνηθεί η διαφοροποίηση των τροπών στις θέσεις αυτές.

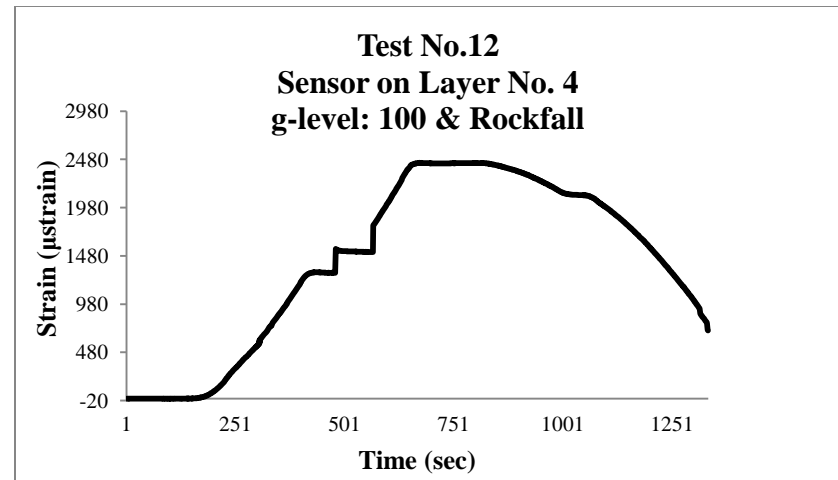
Στην συνέχεια παρουσιάζεται η μεταβολή των τροπών στην στρώση οπλισμού Νο.8 (Σχ. 8.15), όπου λόγω του ότι ο αισθητήρας βρίσκεται πολύ κοντά στην στέψη του πρανούς, δηλαδή κοντά στην περιοχή που απελευθερώνεται το μοντέλο «βράχου», πραγματοποιείται αστοχία αυτού και αδυναμία λήψης μετρήσεων.

Τέλος, στο Σχήμα 8.16, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για το Τεστ Νο. 12. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, δύο διαφορετικοί αισθητήρες τοποθετημένοι στην ίδια στρώση οπλισμού αλλά σε διαφορετικές θέσεις, δίνουν πανομοιότυπα αποτελέσματα με μικρές αναμενόμενες διαφορές. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι στον αισθητήρα που βρίσκεται στην πλάγια όψη του πρανούς δεν γίνεται ιδιαίτερα «αντιληπτή» η απελευθέρωση του βράχου, σε αντίθεση με τον αισθητήρα κοντά στην όψη του πρανούς.

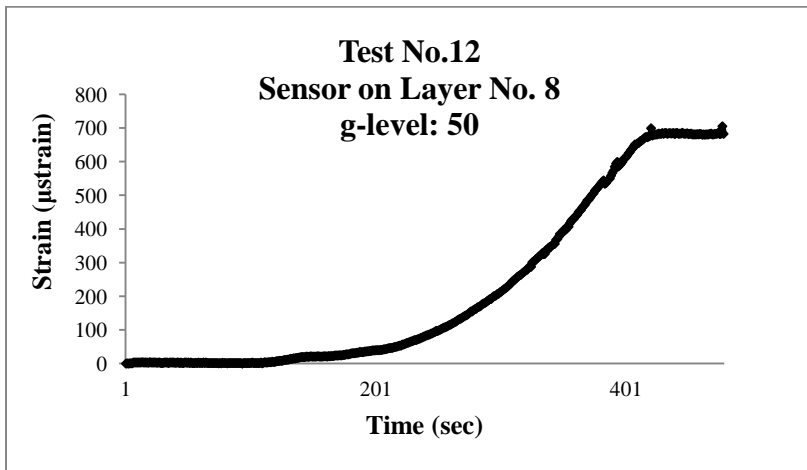
Στο επόμενο, 9^ο Κεφάλαιο πραγματοποιείται λεπτομερής σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών.



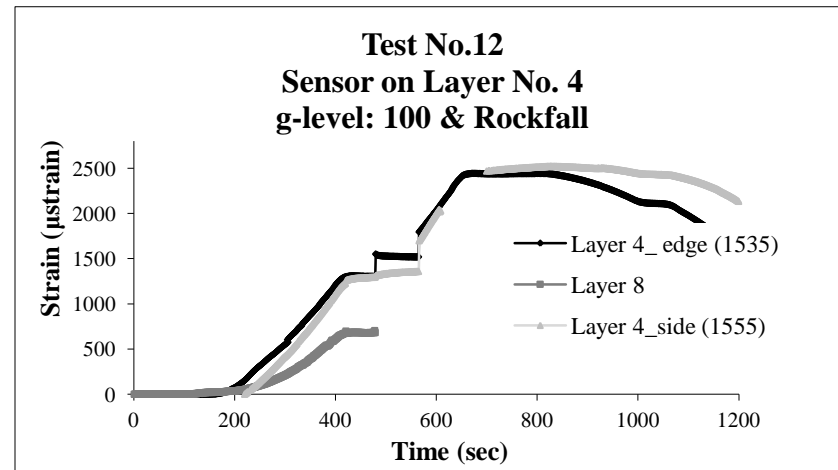
Σχήμα 8.13. Τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.4 (πλάι).
 Figure 8.13. Strains on reinforcement layer No. 4 (side).



Σχήμα 8.14. Τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.4 (όψη).
 Figure 8.14. Strains on reinforcement layer No. 4 (edge).



Σχήμα 8.15. Τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.8.
 Figure 8.15. Strains on reinforcement layer No. 8.



Σχήμα 8.16. Σύγκριση τροπών σε διάφορες στρώσεις.
 Figure 8.16. Comparison of strains at various layers.

- **Τεστ Νο.13:** «Τοποθέτηση αισθητήρων ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', με απευθείας φόρτιση σε στάθμη 50g και 100g, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου'»

Στα Σχήματα 8.17 και 8.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων στις στρώσεις οπλισμού Νο.4 και 8 για το Τεστ Νο.13. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι αναπτυσσόμενες τροπές είναι συμβατές με τις φάσεις φορτίσεων, ωστόσο παρατηρείται εκ νέου αδυναμία του αισθητήρα να καταγράψει την επιρροή του βράχου που απελευθερώθηκε στην κορυφή του πρανούς.

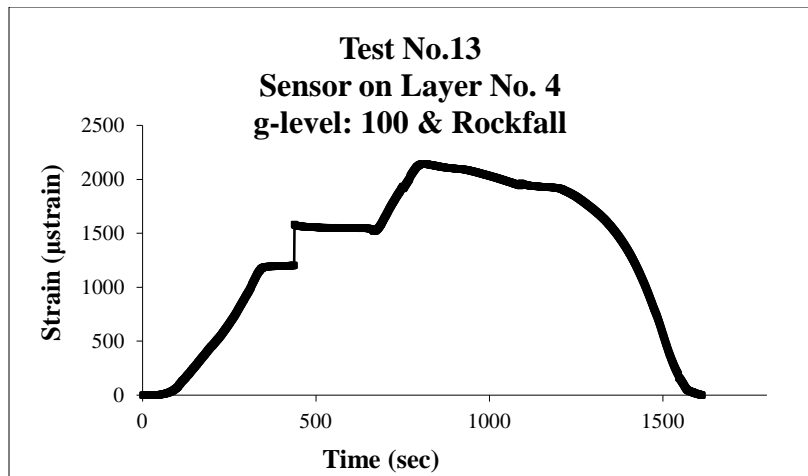
- **Τεστ Νο.15:** «Τοποθέτηση αισθητήρα ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', με απευθείας φόρτιση σε στάθμη 50g και 100g, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου' για έλεγχο της ανώτερης στρώσης (Νο. 8)».

Στο Σχήμα 8.19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην στρώση οπλισμού Νο.8 για το Τεστ Νο.15. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι μετρούμενες τροπές είναι συμβατές με τις φάσεις φορτίσεων και η επιρροή του βράχου που απελευθερώθηκε στην στέψη του πρανούς γίνεται αισθητή στην στρώση Νο.8 για πρώτη φορά.

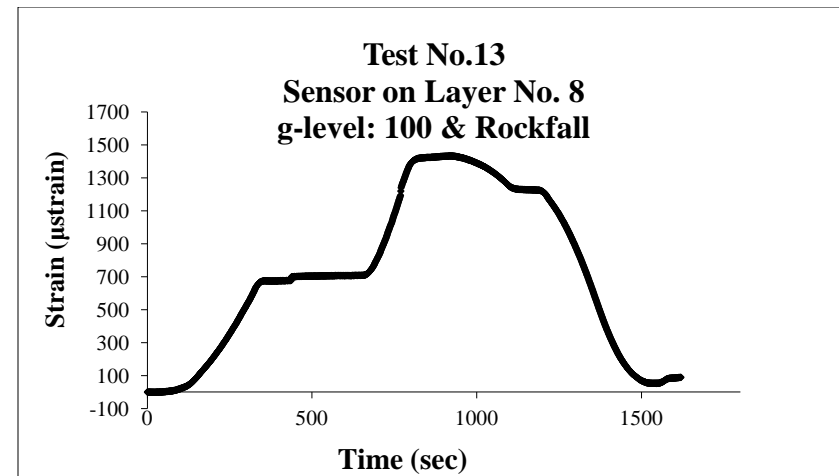
- **Τεστ Νο.16:** Άοπλο πρανές με φόρτιση σε βήματα των 5g ανά 2 min, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου' (αισθητήρας στην μεσαία στρώση Νο. 4).

Στο Σχήμα 8.20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το τεστ Νο.16 στην στρώση Νο.4 και όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι τιμές των τροπών είναι συμβατές με τις φάσεις φορτίσεων και η επιρροή του μοντέλου «βράχου» που απελευθερώθηκε στην κορυφή του πρανούς γίνεται αισθητή.

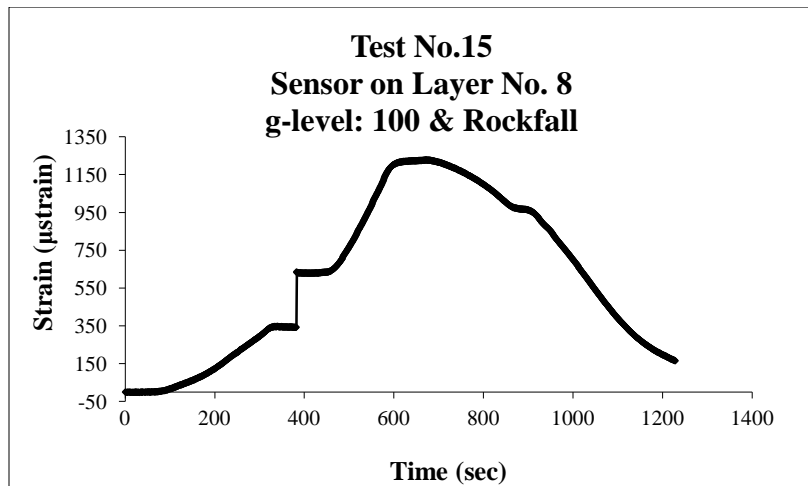
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8



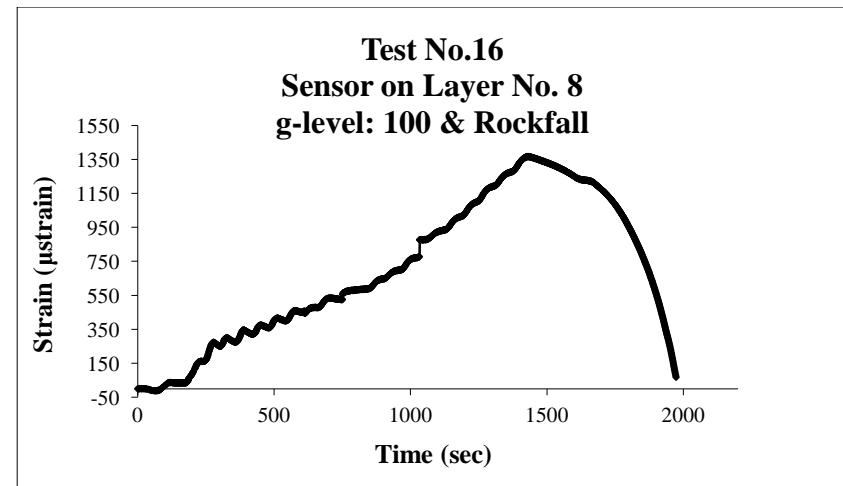
Σχήμα 8.17. Τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.4 (μέσο).
 Figure 8.17. Strains on reinforcement layer No.4 (middle).



Σχήμα 8.18. Τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.8 (όψη).
 Figure 8.18. Strains on reinforcement layer No.4 (face).



Σχήμα 8.19. Μετρούμενες τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.8.
 Figure 8.19. Strains measured on the reinforcement layer No.8.



Σχήμα 8.20. Μετρούμενες τροπές στην στρώση οπλισμού Νο.4.
 Figure 8.20. Strains measured on the reinforcement layer No.4.

8.3.2 Τροπές μετρούμενες με την μέθοδο PIV.

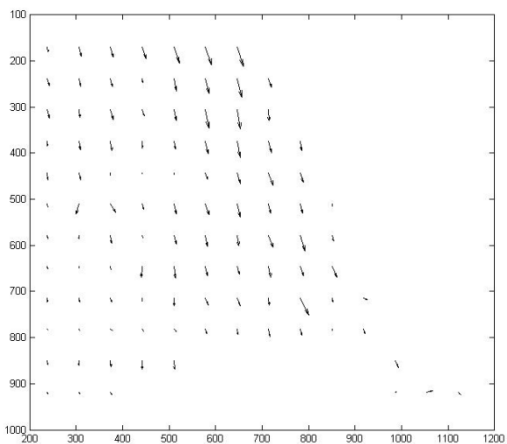
Επιλέχθηκαν προς ανάλυση με την μέθοδο PIV οι ψηφιακές φωτογραφίες που ελήφθησαν κατά την διάρκεια των Τεστ Νο. 6, 9 και 14. Στα παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το κάθε πείραμα.

- **Τεστ Νο.6:** «Φόρτιση ο.π. με σταθερό μήκος οπλισμών, με βήματα 5g ανά 2 min και χρήση κάμερας για ανάλυση PIV».

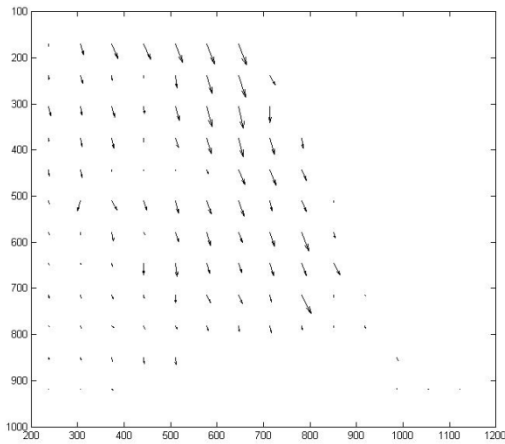
Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των ψηφιακών φωτογραφιών μέσω ανάλυσης PIV, για το Τεστ Νο.6 το οποίο και κατασκευάστηκε με υλικό όπλισης την «Κουρτίνα Α». Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 8.21, παρουσιάζεται η περιοχή ενδιαφέροντος όπως έχει προσδιορισθεί για την ανάλυση με το πρόγραμμα GeoPIV, ενώ στα Σχήματα 8.22 έως και 8.33 παρουσιάζονται τα διανύσματα των μετατοπίσεων για τις φάσεις φορτίσεων μεταξύ 1g και 50g. Στην συνέχεια, Σχήματα 8.34 έως και 8.45 ποσοτικοποιούνται οι τροπές για τις ίδιες φάσεις φορτίσεων.

Λόγω της μορφής της πειραματικής διάταξης, έπρεπε να ορισθεί εκ των προτέρων ο αριθμός των ψηφιακών φωτογραφιών που θα λαμβάνονταν, με αποτέλεσμα να ληφθούν αρκετά περισσότερες από τις απαραίτητες για ανάλυση φωτογραφίες, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να καθορισθεί επακριβώς ποιά αντιστοιχούσε σε κάθε στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Έτσι, επιλέχθηκαν ενδεικτικά κάποιες αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες προκειμένου να παρουσιασθεί η κατάσταση του μοντέλου για αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας περίπου ανά 5g, καθώς επίσης και κάποιες φωτογραφίες προς το τέλος του πειράματος όπου η φόρτιση διατηρούνταν σταθερή. Συνολικά παρουσιάζονται αποτελέσματα από 12 ψηφιακές φωτογραφίες, από τις οποίες οι 9 πρώτες αντιστοιχούν σε φορτίσεις από 1g έως και 50g ενώ οι υπόλοιπες 2 αντιστοιχούν σε σταθερή επιτάχυνση της βαρύτητας 50g.

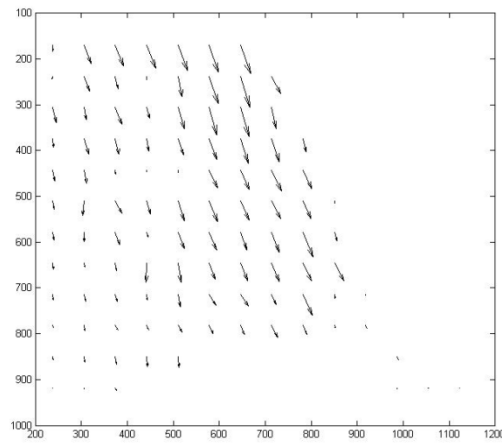
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στα Σχήματα 8.22 έως και 8.33, τα διανύσματα ροής μεγαλώνουν και πυκνώνουν καθώς αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας και διατηρούνται σταθερά σε σταθερή επιτάχυνση 50g. Αντίστοιχα, στα Σχήματα 8.34 έως και 8.45 όπου και παρουσιάζονται οι ποσοτικοποιημένες πλέον τροπές και μπορεί επίσης να παρατηρηθεί η



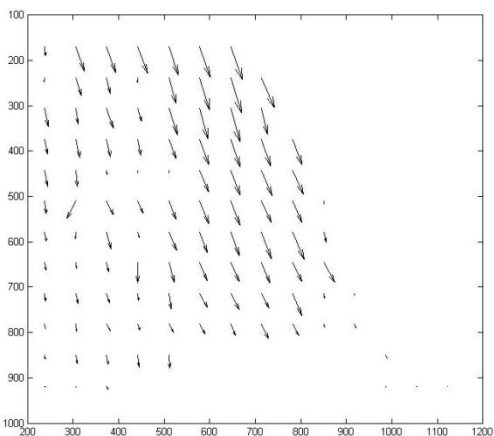
Σχήμα 8.22. Διανύσματα ροής για 5g.
Figure 8.22. Flow vectors at 5g.



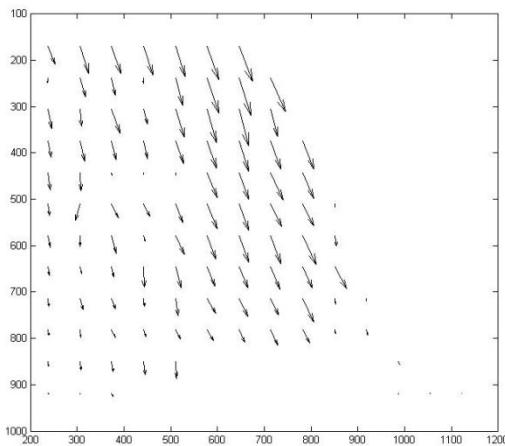
Σχήμα 8.23. Διανύσματα ροής για 10g.
Figure 8.23. Flow vectors at 10g.



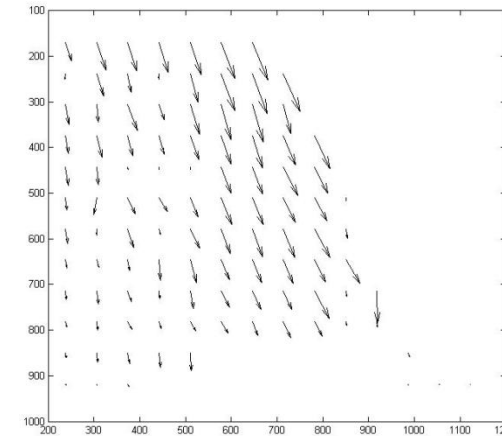
Σχήμα 8.24. Διανύσματα ροής για 15g.
Figure 8.24. Flow vectors at 15g.



Σχήμα 8.25. Διανύσματα ροής για 20g.
Figure 8.25. Flow vectors at 20g.

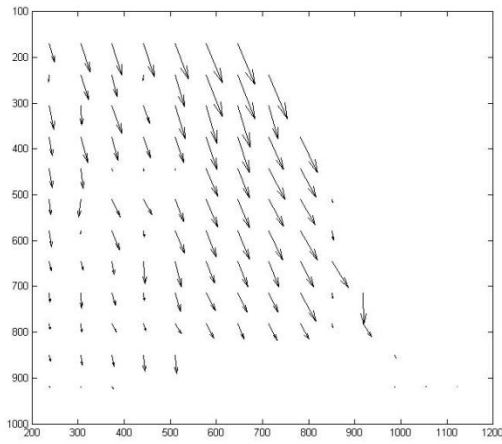


Σχήμα 8.26. Διανύσματα ροής για 25g.
Figure 8.26. Flow vectors at 25g.

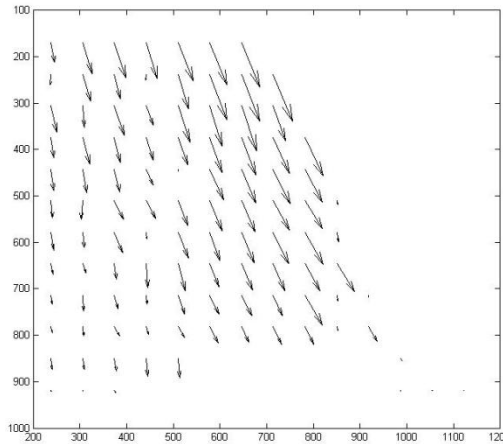


Σχήμα 8.27. Διανύσματα ροής για 30g.
Figure 8.27. Flow vectors at 30g.

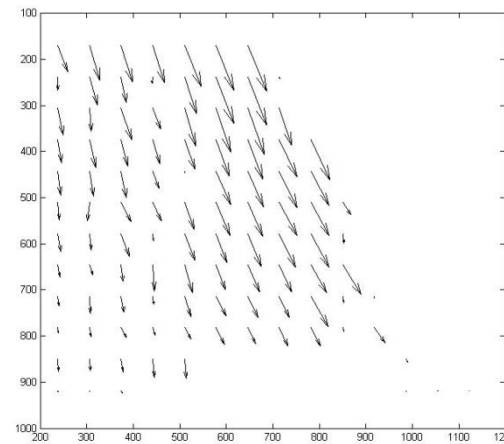
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8



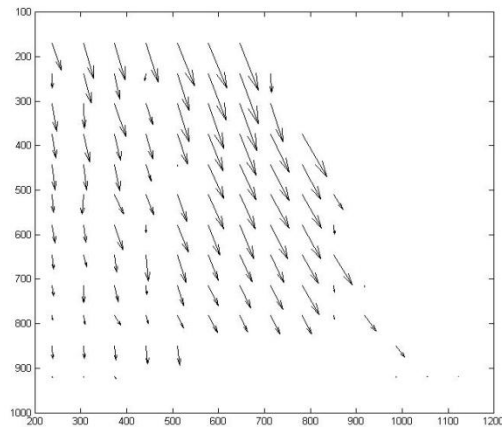
Σχήμα 8.28. Διανύσματα ροής για 35g.
Figure 8.28. Flow vectors at 35g.



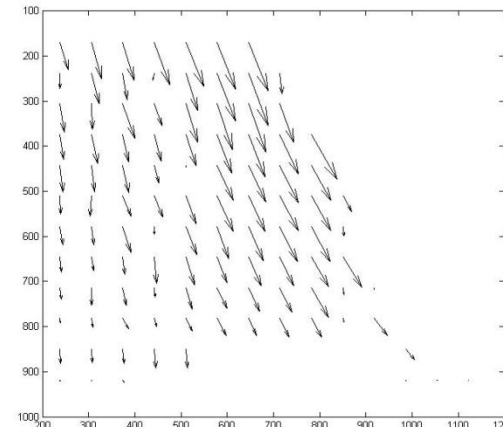
Σχήμα 8.29. Διανύσματα ροής για 40g.
Figure 8.29. Flow vectors at 40g.



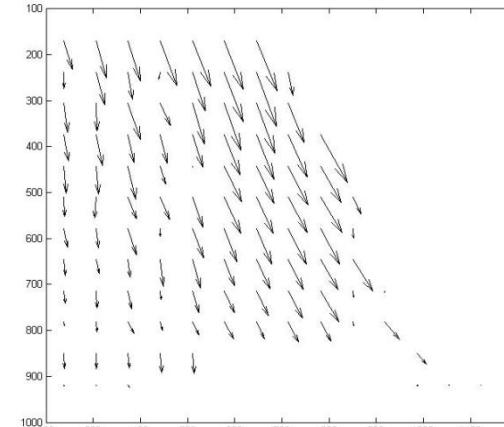
Σχήμα 8.30. Διανύσματα ροής για 45g.
Figure 8.30. Flow vectors at 45g.



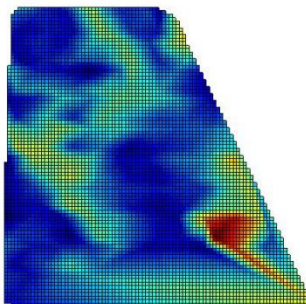
Σχήμα 8.31. Διανύσματα ροής για 50g.
Figure 8.31. Flow vectors at 50g.



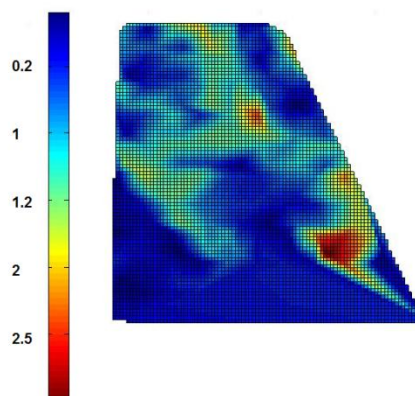
Σχήμα 8.32. Διανύσματα ροής για 50g.
Figure 8.32. Flow vectors at 50g.



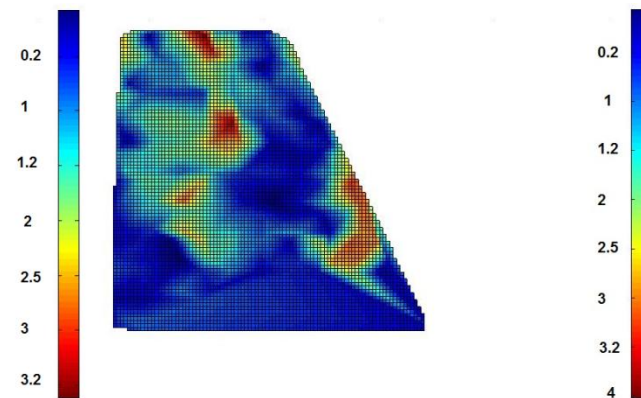
Σχήμα 8.33. Διανύσματα ροής για 50g.
Figure 8.33. Flow vectors at 50g.



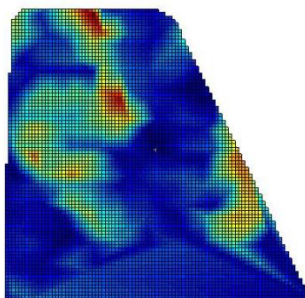
Σχήμα 8.34. Τροπές σε στάθμη 5g.
Figure 8.34. Strains at 5g level.



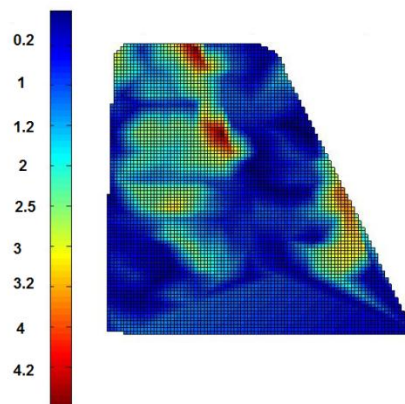
Σχήμα 8.35. Τροπές σε στάθμη 10g.
Figure 8.35. Strains at 10g level.



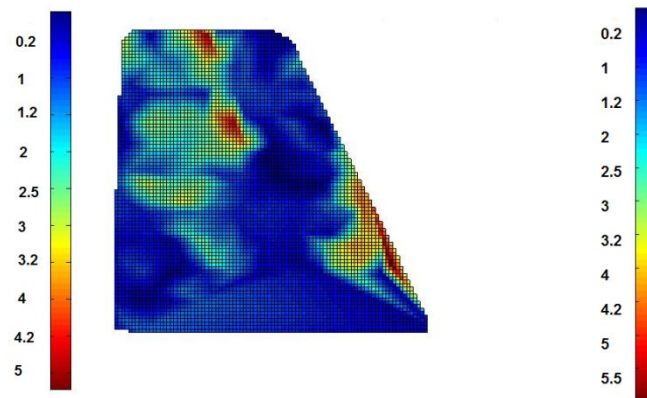
Σχήμα 8.36. Τροπές σε στάθμη 15g.
Figure 8.36. Strains at 15g level.



Σχήμα 8.37. Τροπές σε στάθμη 20g.
Figure 8.37. Strains at 20g level.

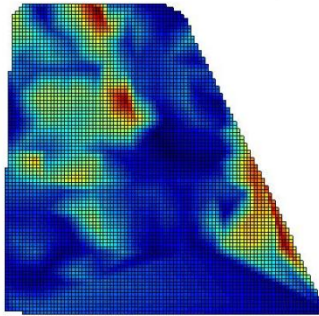


Σχήμα 8.38. Τροπές σε στάθμη 25g.
Figure 8.38. Strains at 25g level.

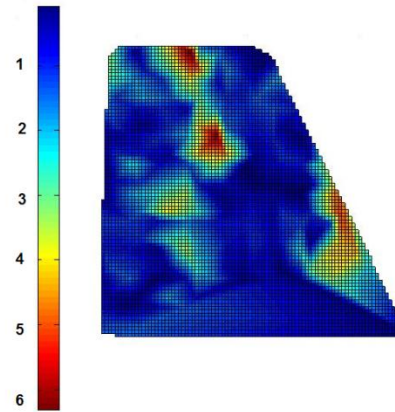


Σχήμα 8.39. Τροπές σε στάθμη 30g.
Figure 8.39. Strains at 30g level.

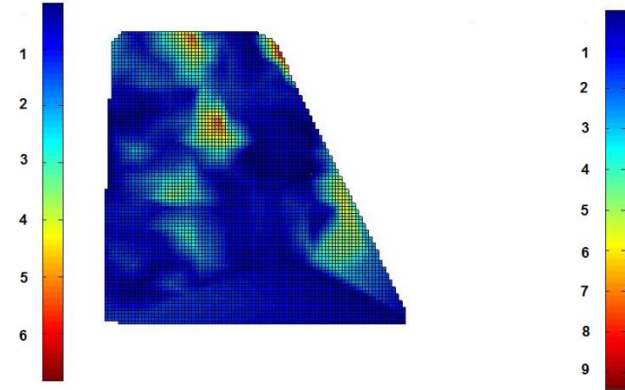
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8



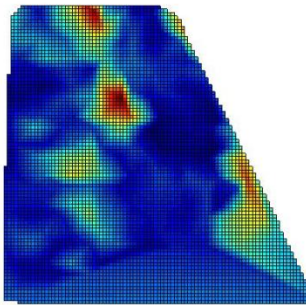
Σχήμα 8.40. Τροπές σε στάθμη 35g.
Figure 8.40. Strains at 5g level.



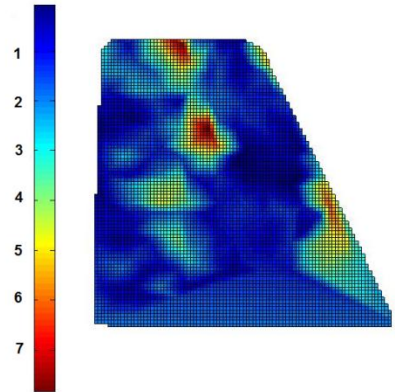
Σχήμα 8.41. Τροπές σε στάθμη 40g.
Figure 8.41. Strains at 40g level.



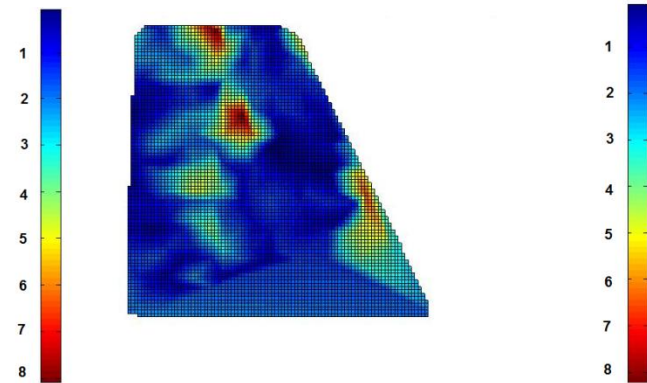
Σχήμα 8.42. Τροπές σε στάθμη 45g.
Figure 8.42. Strains at 45g level.



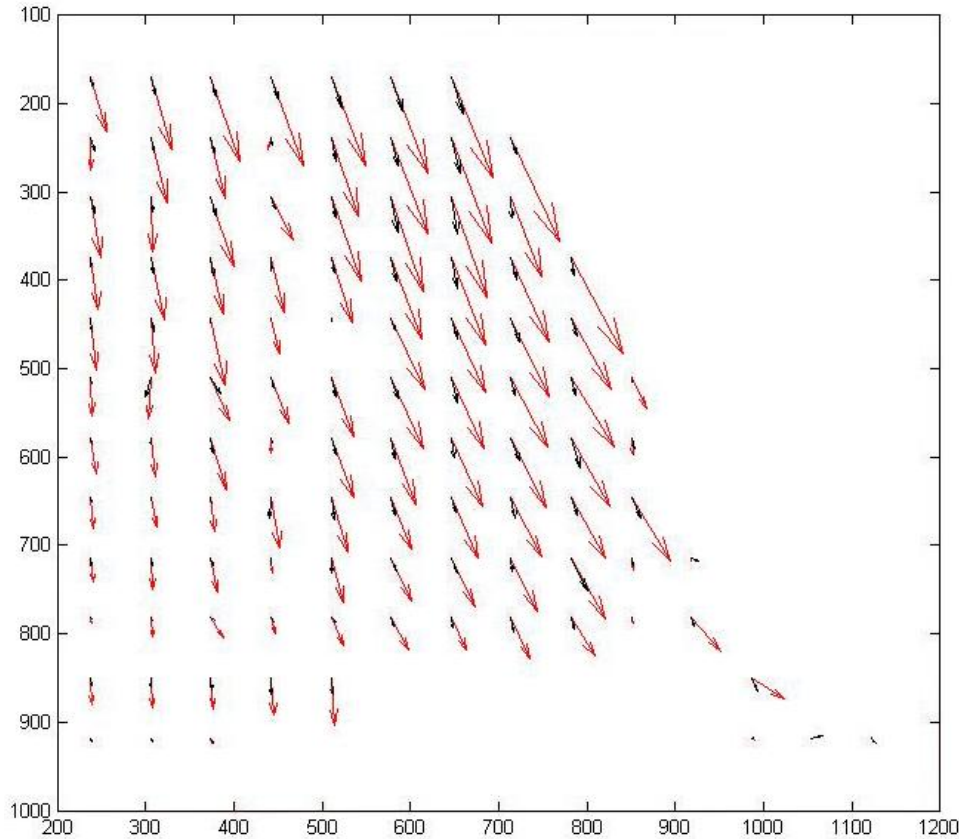
Σχήμα 8.43. Τροπές σε στάθμη 50g.
Figure 8.43. Strains at 50g level.



Σχήμα 8.44. Τροπές σε στάθμη 50g.
Figure 8.44. Strains at 50g level.



Σχήμα 8.45. Τροπές σε στάθμη 50g.
Figure 8.45. Strains at 50g level.



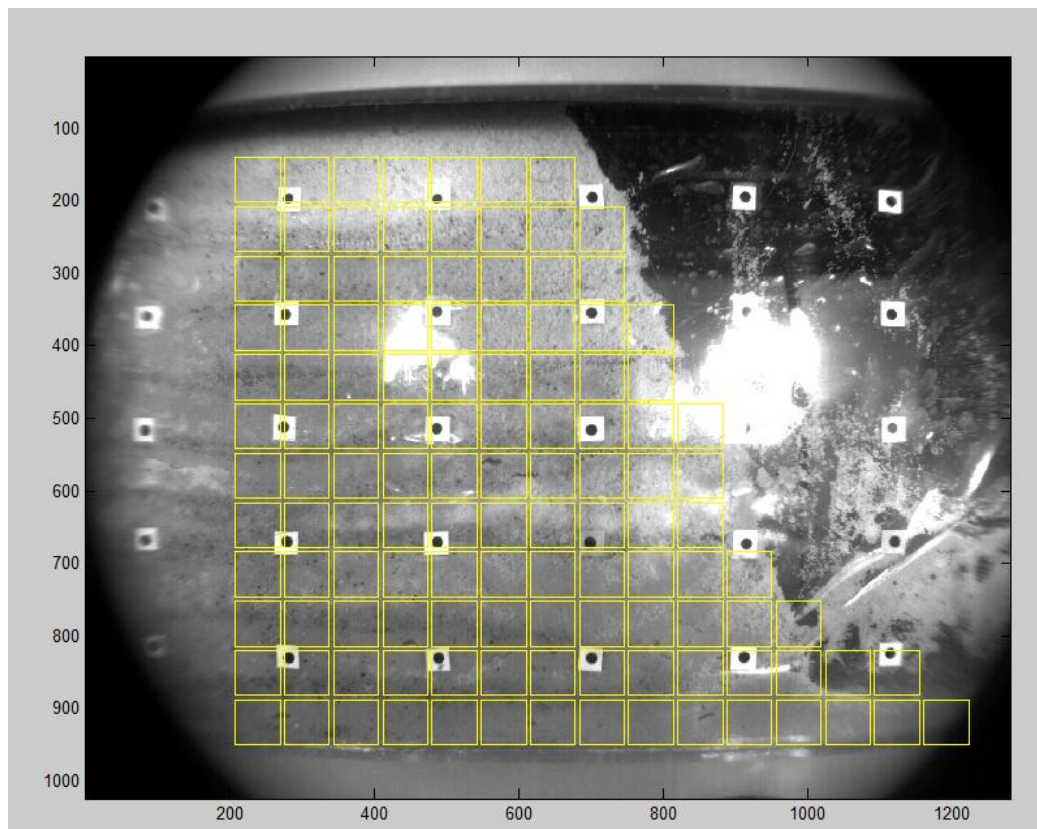
Σχήμα 8.46. Μεταβολή διανυσμάτων ροής από 1 σε 50g.
Figure 8.46. Variation of flow vectors between 1 and 50g.

- **Τεστ Νο.14:** «Τοποθέτηση αισθητήρα ο.ι. σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', με απευθείας φόρτιση σε στάθμη 50g και 100g, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου' για έλεγχο της ανώτερης στρώσης (No. 8)».

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των ψηφιακών φωτογραφιών που ελήφθησαν κατά την διάρκεια του Τεστ Νο. 14. Για το πείραμα αυτό, η φωτογραφική μηχανή τοποθετήθηκε στην ίδια θέση με αυτή του Τεστ Νο. 6, προκειμένου να καταγραφεί η συμπεριφορά ολόκληρου του μοντέλου. Στο Σχήμα 8.47 παρουσιάζεται η περιοχή ενδιαφέροντος και το πλέγμα που δημιουργήθηκε για την επεξεργασία των φωτογραφιών. Υπενθυμίζεται ότι η αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας πραγματοποιήθηκε με απευθείας φόρτιση σε στάθμη 50g και στην συνέχεια σε 100g και όχι με βήματα 5g ανά 2 min όπως στην περίπτωση του Τεστ Νο.6. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι έχει επιλεγεί για διερεύνηση και ένα τμήμα των φωτογραφιών το οποίο

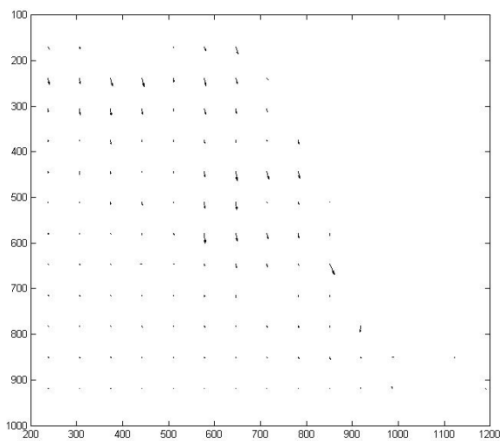
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

βρίσκεται εκτός της αρχικής θέσης του πρανούς προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου στην περιοχή αυτή.

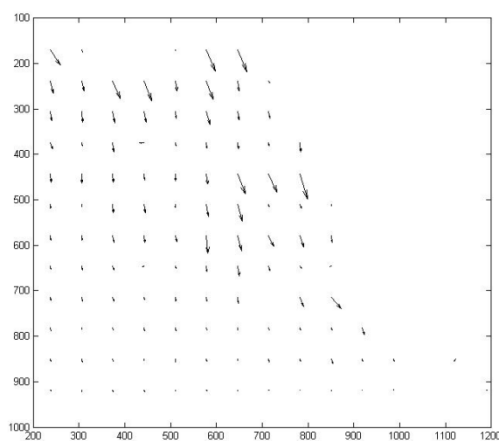


Σχήμα 8.47. Περιοχή ενδιαφέροντος και δημιουργία τμημάτων (patches).
Figure 8.47. Area on interest and patches creation.

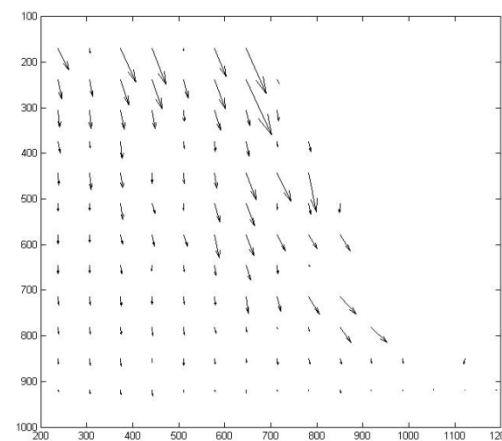
Στα Σχήματα 8.48 έως και 8.59 παρουσιάζονται τα διανύσματα ροής για επιτάχυνση της βαρύτητας από 1g έως και 100g, λαμβάνοντας υπόψη για λόγους συντομίας τις φωτογραφίες που αντιστοιχούν σε μεταβολή της στάθμης της επιτάχυνσης της βαρύτητας ανά 10g και όχι ανά 5g όπως πραγματοποιήθηκε στο Τεστ Νο.6. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και σε αυτή την περίπτωση τα διανύσματα τροπών αυξάνουν με την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας, όπως ήταν αναμενόμενο. Στην συνέχεια, στα Σχήματα 8.60 έως και 8.71 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τροπές οι οποίες αυξάνουν με την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Επίσης, στην περίπτωση αυτή ο μηχανισμός αστοχίας εντοπίζεται κυρίως προς την όψη του πρανούς, πιθανώς λόγω διαφυγής υλικού. Τέλος, στο Σχήμα 8.72 παρουσιάζεται η αρχική και τελική κατάσταση των διανυσμάτων.



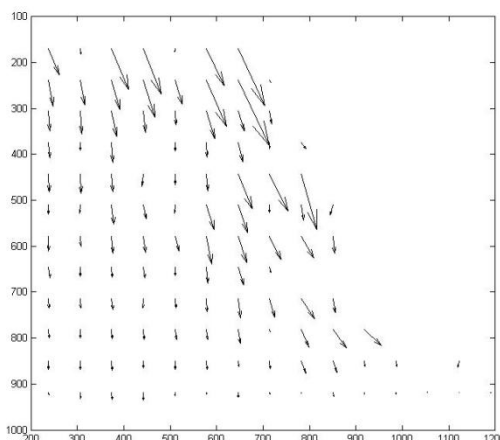
Σχήμα 8.48. Διανύσματα ροής για 10g.
Figure 8.48. Flow vectors at 10g.



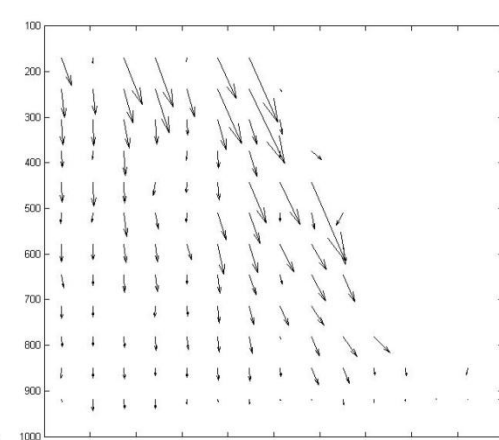
Σχήμα 8.49. Διανύσματα ροής για 20g.
Figure 8.49. Flow vectors at 20g.



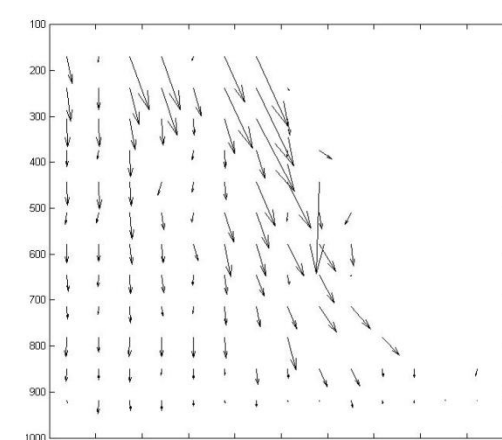
Σχήμα 8.50. Διανύσματα ροής για 30g.
Figure 8.50. Flow vectors at 30g.



Σχήμα 8.51. Διανύσματα ροής για 40g.
Figure 8.51. Flow vectors at 40g.

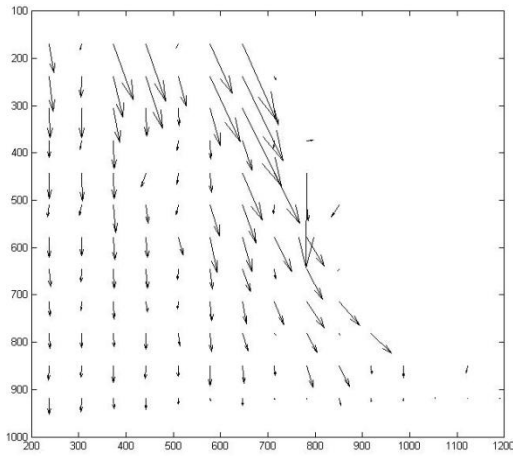


Σχήμα 8.52. Διανύσματα ροής για 50g.
Figure 8.52. Flow vectors at 50g.

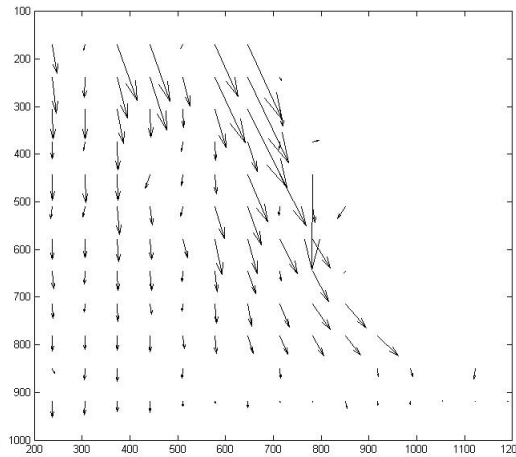


Σχήμα 8.53. Διανύσματα ροής για 60g.
Figure 8.53. Flow vectors at 60g.

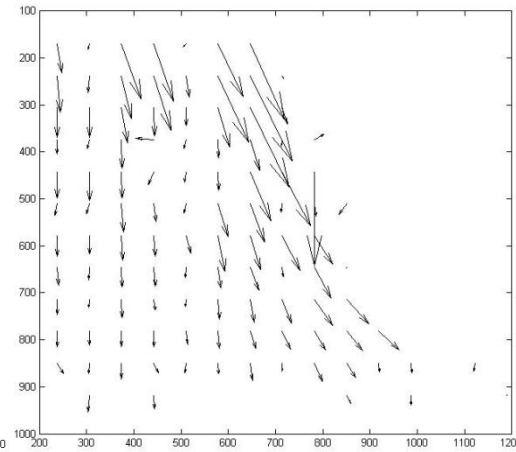
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8



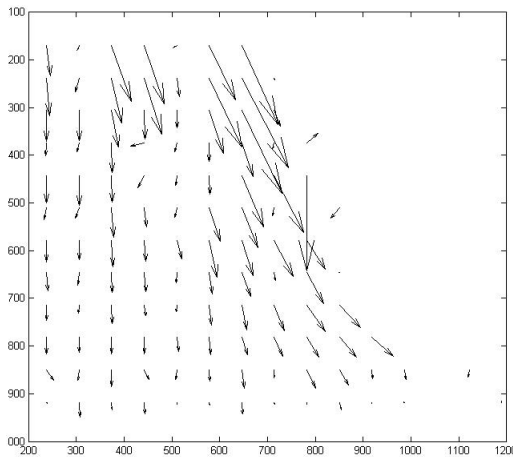
Σχήμα 8.54. Διανύσματα ροής για 70g.
Figure 8.54. Flow vectors at 70g.



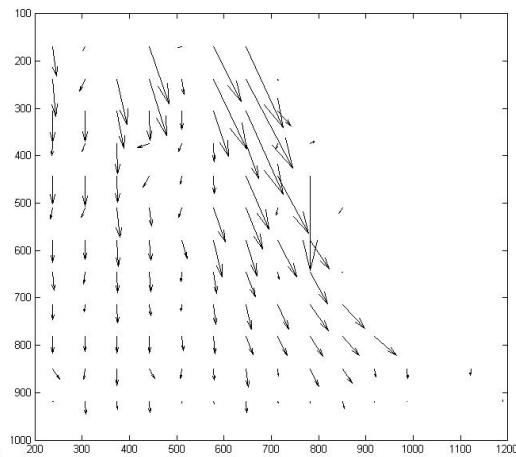
Σχήμα 8.55. Διανύσματα ροής για 80g.
Figure 8.55. Flow vectors at 80g.



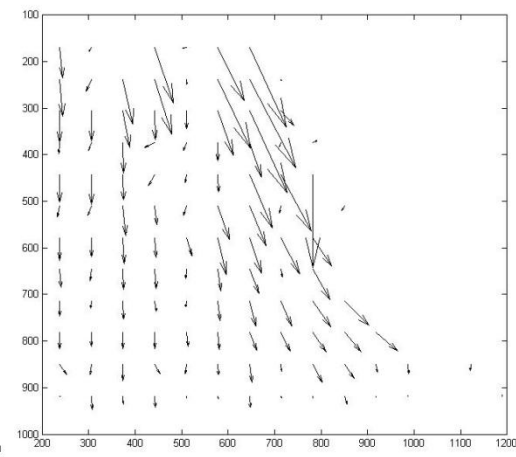
Σχήμα 8.56. Διανύσματα ροής για 90g.
Figure 8.56. Flow vectors at 90g.



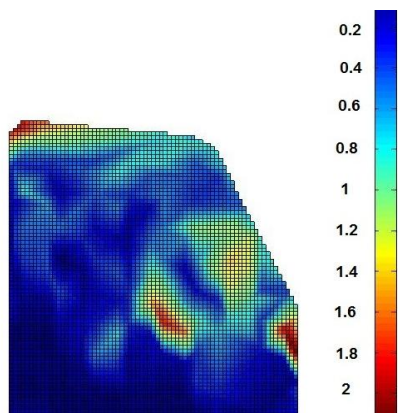
Σχήμα 8.57. Διανύσματα ροής για 100g.
Figure 8.57. Flow vectors at 100g.



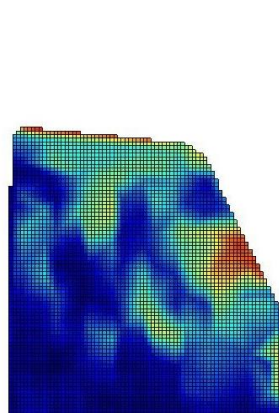
Σχήμα 8.58. Διανύσματα ροής για 100g.
Figure 8.58. Flow vectors at 100g.



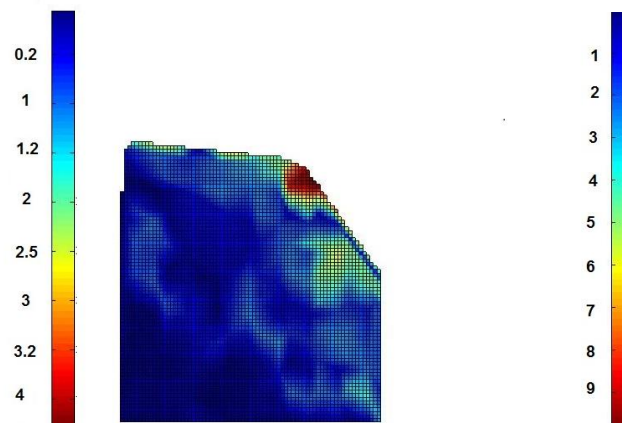
Σχήμα 8.59. Διανύσματα ροής για 100g.
Figure 8.59. Flow vectors at 100g.



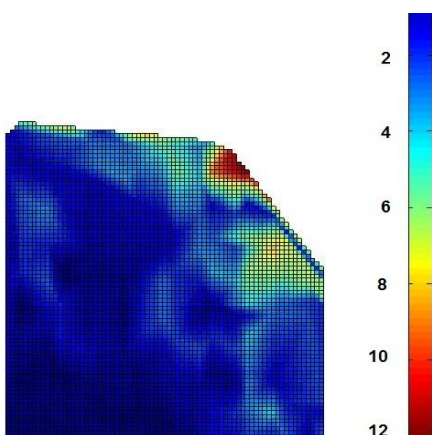
Σχήμα 8.60. Τροπές σε στάθμη 10g.
Figure 8.60. Strains at 10g level.



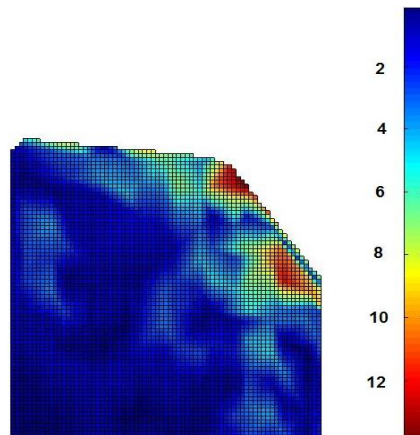
Σχήμα 8.61. Τροπές σε στάθμη 20g.
Figure 8.61. Strains at 20g level.



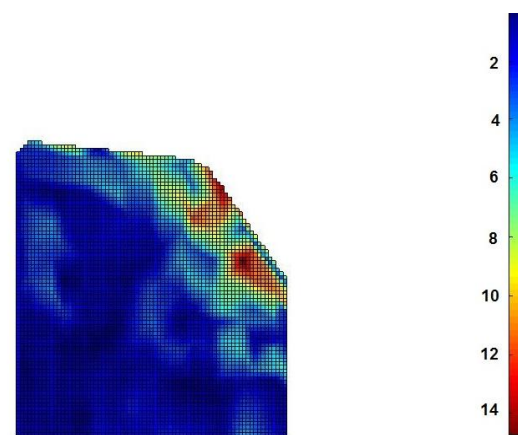
Σχήμα 8.62. Τροπές σε στάθμη 30g.
Figure 8.62. Strains at 30g level.



Σχήμα 8.63. Τροπές σε στάθμη 40g.
Figure 8.63. Strains at 40g level.

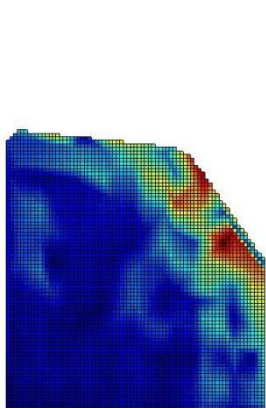


Σχήμα 8.64. Τροπές σε στάθμη 50g.
Figure 8.64. Strains at 50g level.

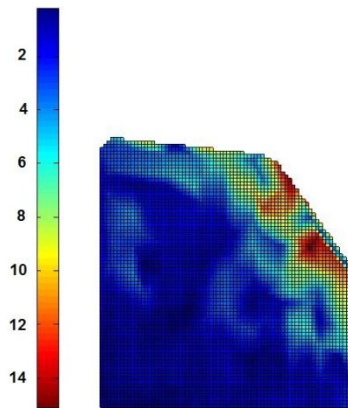


Σχήμα 8.65. Τροπές σε στάθμη 60g.
Figure 8.65. Strains at 60g level.

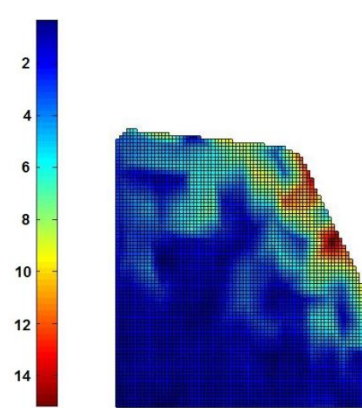
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8



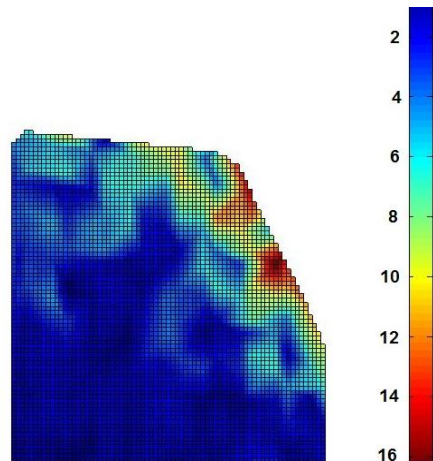
Σχήμα 8.66. Τροπές σε στάθμη 70g.
Figure 8.66. Strains at 70g level.



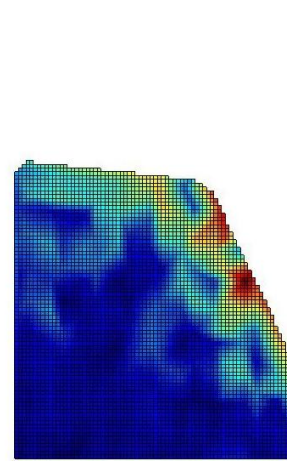
Σχήμα 8.67. Τροπές σε στάθμη 80g.
Figure 8.67. Strains at 80g level.



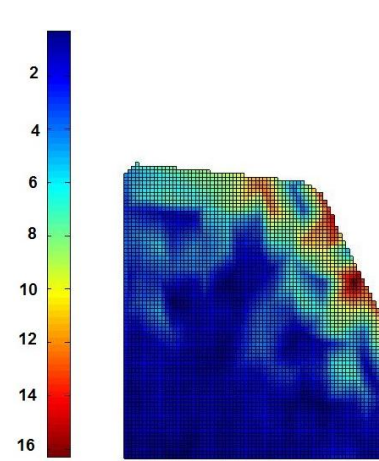
Σχήμα 8.68. Τροπές σε στάθμη 90g.
Figure 8.68. Strains at 90g level.



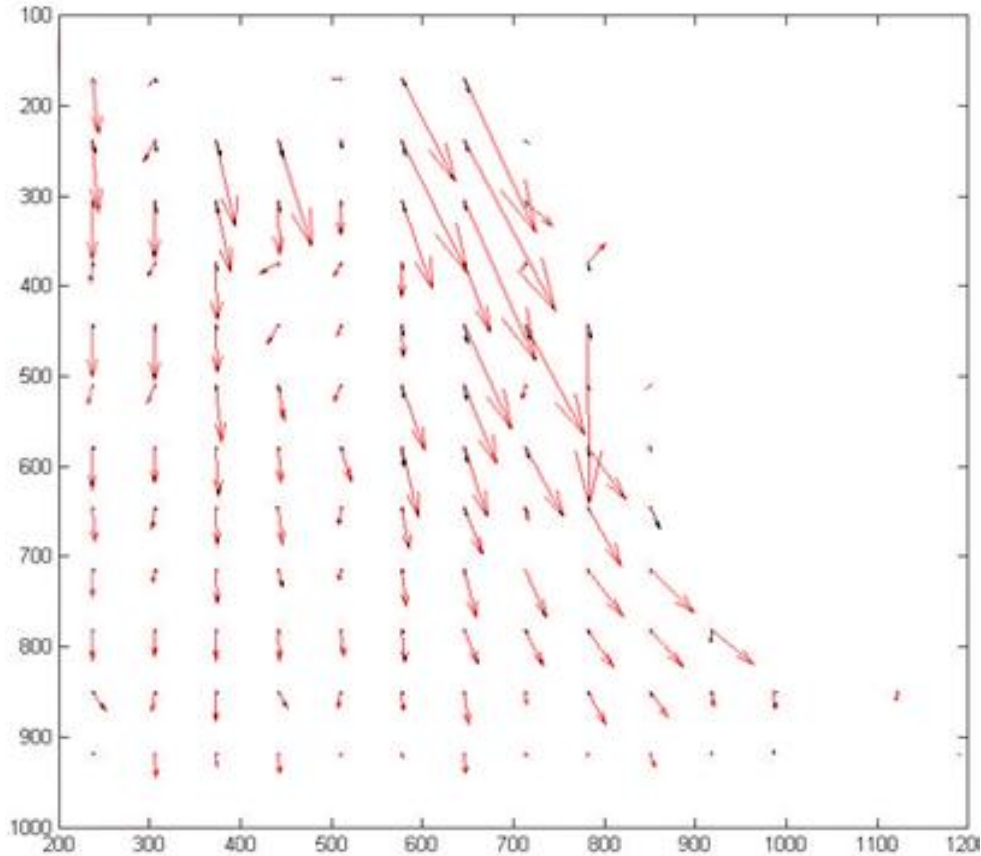
Σχήμα 8.69. Τροπές σε στάθμη 100g.
Figure 8.69. Strains at 100g level.



Σχήμα 8.70. Τροπές σε στάθμη 100g.
Figure 8.70. Strains at 100g level.



Σχήμα 8.71. Τροπές σε στάθμη 100g.
Figure 8.71. Figures at 100g level.



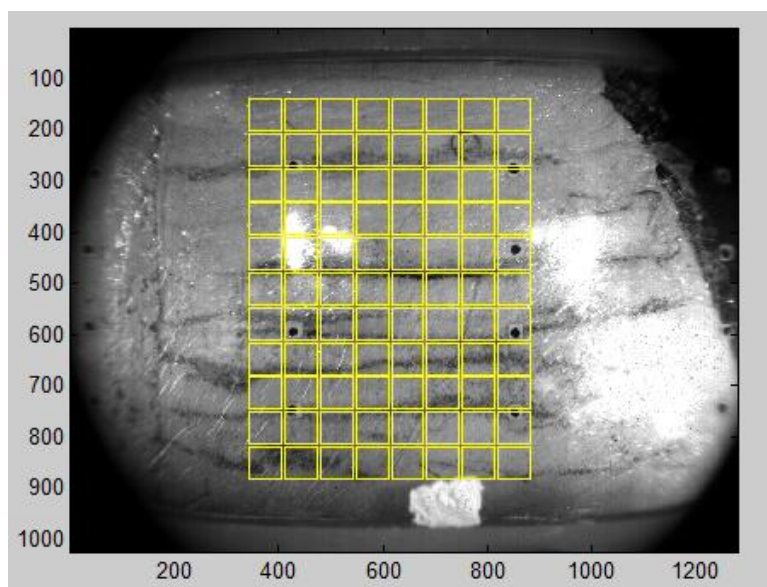
Σχήμα 8.72. Μεταβολή διανυσμάτων ροής από 1g σε 50g.
Figure 8.72. Variation of flow vectors between 1g and 50g.

- **Τεστ Νο.9:** Τοποθέτηση αισθητήρα ο.ι. ινών σε 'Ανθρακοϋφασμα', σε ο.π. από υλικό 'Κουρτίνα Β', φόρτιση με βήματα 5g ανά 2 min, σε συνδυασμό με ρίψη μοντέλου 'βράχου' και ανάλυση PIV.

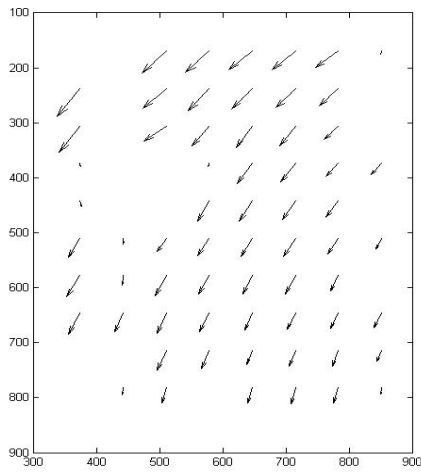
Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των ψηφιακών φωτογραφιών που ελήφθησαν κατά την διάρκεια του Τεστ Νο. 9. Για το πείραμα αυτό, η φωτογραφική μηχανή τοποθετήθηκε κοντά στο μέσο της εδαφικής μάζας με στόχο να καταγραφεί η συμπεριφορά του μοντέλου στην περιοχή αυτή. Στο Σχήμα 8.73 παρουσιάζεται η περιοχή ενδιαφέροντος και το πλέγμα που δημιουργήθηκε για την επεξεργασία των φωτογραφιών. Λόγω αδυναμίας παρέμβασης στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, η τοποθέτηση των μετρητικών διατάξεων πραγματοποιήθηκε για όλα τα πειράματα πριν την έναρξη της περιστροφής του φυγοκεντριστή, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται διάφορες ατέλειες στην χρήση αυτών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

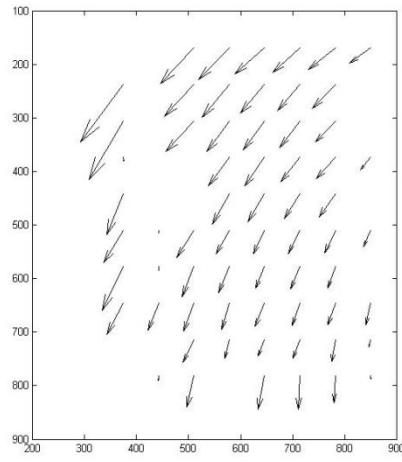
κατά την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Έτσι, στην περίπτωση του τεστ Νο.9, ο φωτισμός που ήταν απαραίτητος για την λήψη των φωτογραφιών ήταν ιδιαίτερα έντονος κοντά στην όψη του πρανούς με αποτέλεσμα να μην καταγραφούν οι μετακινήσεις στην περιοχή αυτή. Ωστόσο, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το συγκεκριμένο πείραμα δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για τον μηχανισμό αστοχίας κοντά μέσο της εδαφικής μάζας και ειδικότερα κοντά στην περιοχή μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας. Στα Σχήματα 8.74 έως και 8.85 παρουσιάζονται τα διανύσματα ροής για επιτάχυνση της βαρύτητας από 1g έως και 50g. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τα διανύσματα των τροπών έχουν φορά προς τα κάτω και προς τα πίσω, ενώ καθώς αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας πλησιάζουν όλο και περισσότερο στην κατακόρυφη διεύθυνση. Στα Σχήματα 8.86 έως και 8.97 παρουσιάζονται οι ποσοτικοποιημένες οι αντίστοιχες τροπές, όπου ο μηχανισμός αστοχίας εντοπίζεται προς το πέρας της εδαφικής μάζας. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν προκύψει και κατά την υπολογιστική ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζονται στο 9^ο Κεφάλαιο που ακολουθεί. Τέλος, στο Σχήμα 8.98 παρουσιάζεται η αρχική και τελική κατάσταση των διανυσμάτων.



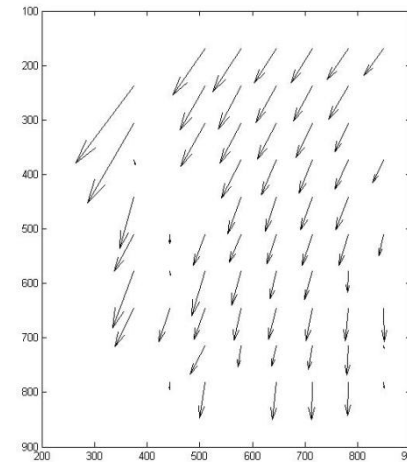
Σχήμα 8.73. Περιοχή ενδιαφέροντος και δημιουργία τμημάτων (patches).
Figure 8.73. Area on interest and patches creation.



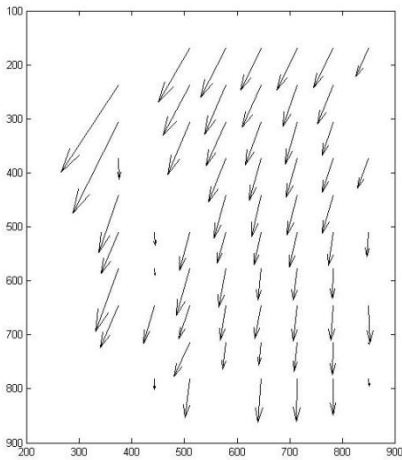
Σχήμα 8.74. Διανύσματα ροής για 5g.
Figure 8.74. Flow vectors at 5g.



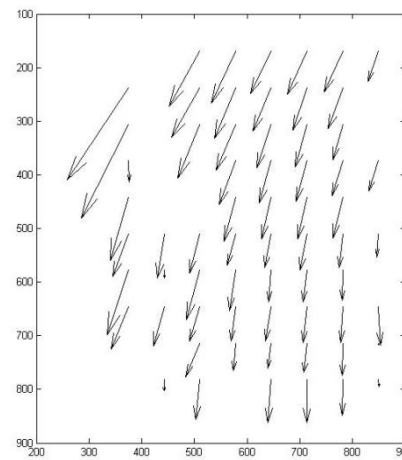
Σχήμα 8.75. Διανύσματα ροής για 10g.
Figure 8.75. Flow vectors at 10g.



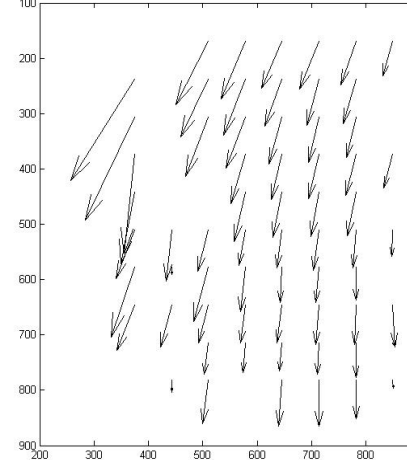
Σχήμα 8.76. Διανύσματα ροής για 15g.
Figure 8.76. Flow vectors at 15g.



Σχήμα 8.77. Διανύσματα ροής για 20g.
Figure 8.77. Flow vectors at 20g.

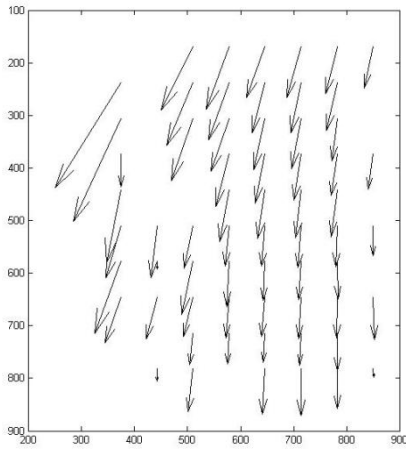


Σχήμα 8.78. Διανύσματα ροής για 25g.
Figure 8.78. Flow vectors at 25g.

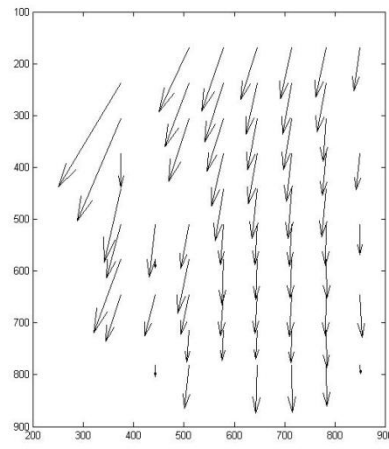


Σχήμα 8.79. Διανύσματα ροής για 30g.
Figure 8.79. Flow vectors at 30g.

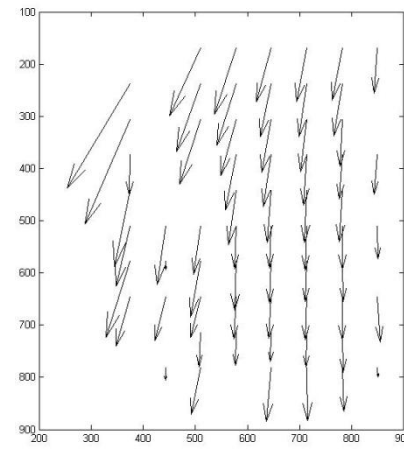
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8



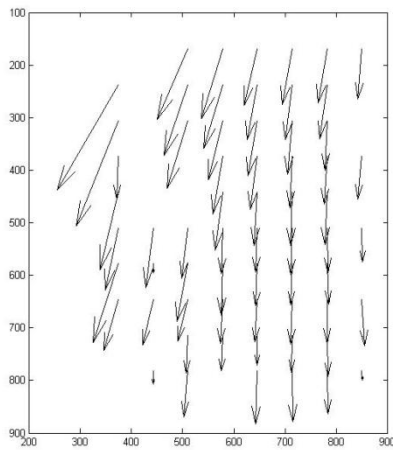
Σχήμα 8.80. Διανύσματα ροής για 35g.
Figure 8.80. Flow vectors at 35g.



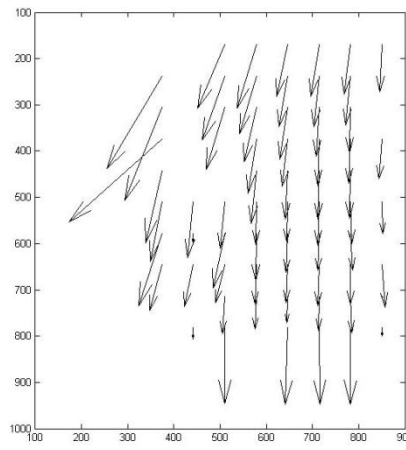
Σχήμα 8.81. Διανύσματα ροής για 40g.
Figure 8.81. Flow vectors at 40g.



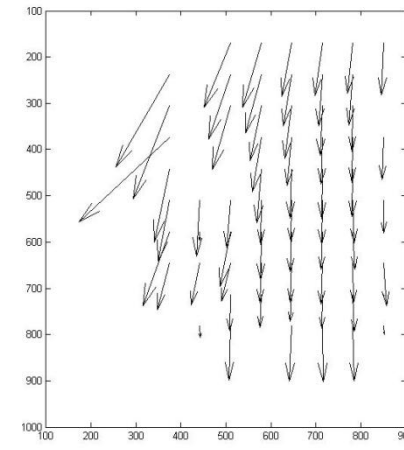
Σχήμα 8.82. Διανύσματα ροής για 45g.
Figure 8.82. Flow vectors at 45g.



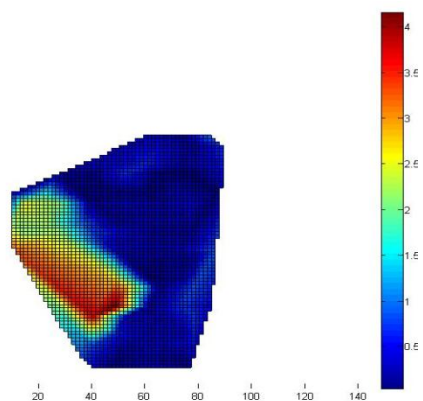
Σχήμα 8.83. Διανύσματα ροής για 50g.
Figure 8.83. Flow vectors at 50g.



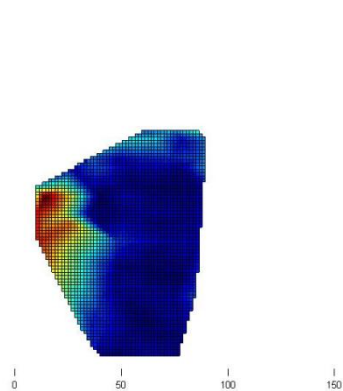
Σχήμα 8.84. Διανύσματα ροής για 50g.
Figure 8.84. Flow vectors at 50g.



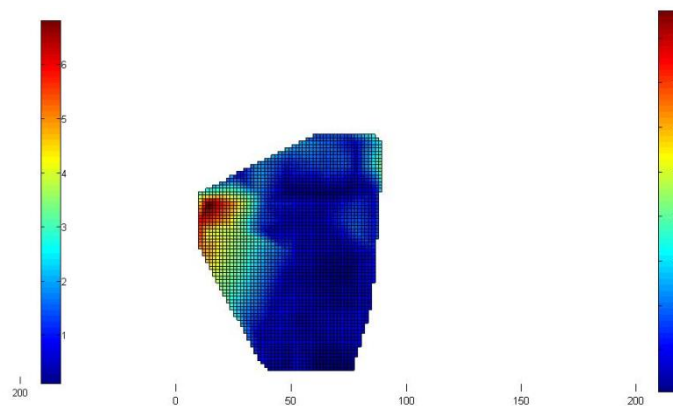
Σχήμα 8.85. Διανύσματα ροής για 50g.
Figure 8.85. Flow vectors at 50g.



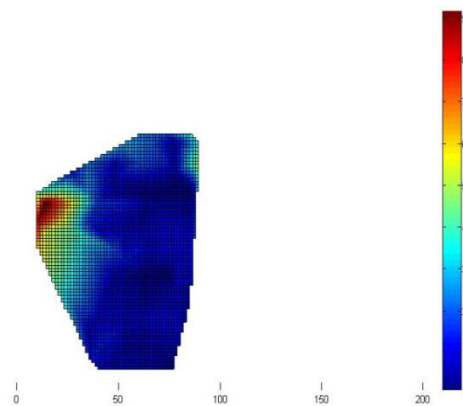
Σχήμα 8.86. Τροπές σε στάθμη 5g.
Figure 8.86. Strains at 5g level.



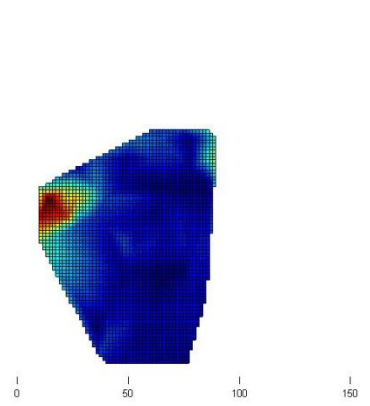
Σχήμα 8.87. Τροπές σε στάθμη 10g.
Figure 8.87. Strains at 10g level.



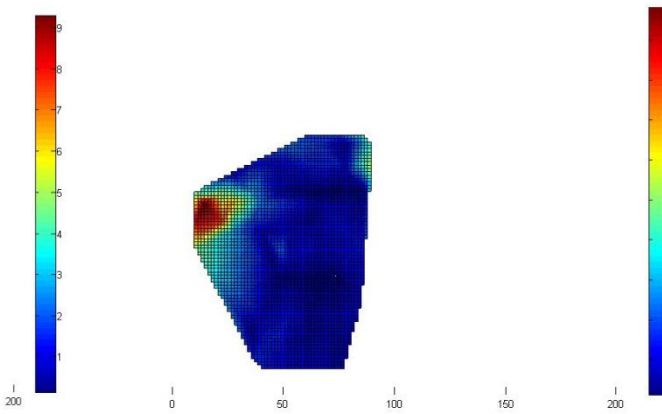
Σχήμα 8.88. Τροπές σε στάθμη 15g.
Figure 8.88. Strains at 15g level.



Σχήμα 8.89. Τροπές σε στάθμη 20g.
Figure 8.89. Strains at 20g level.

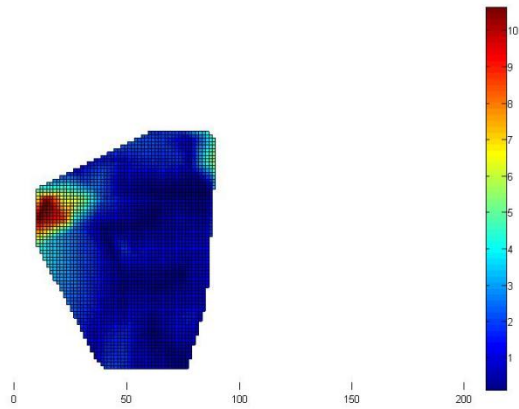


Σχήμα 8.90. Τροπές σε στάθμη 25g.
Figure 8.90. Strains at 25g level.

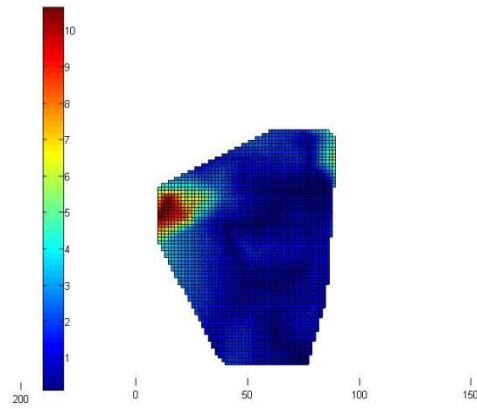


Σχήμα 8.91. Τροπές σε στάθμη 30g.
Figure 8.91. Strains at 30g level.

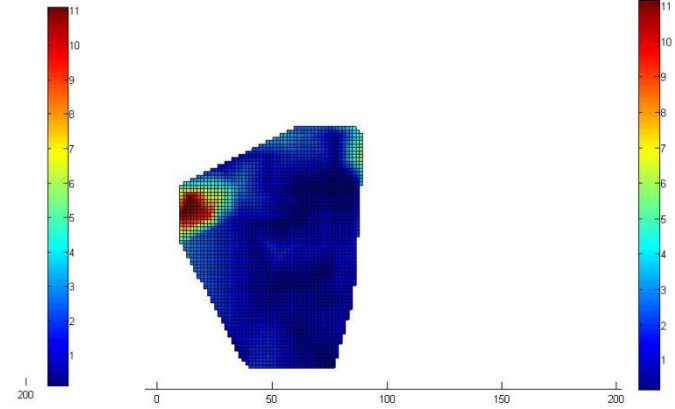
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8



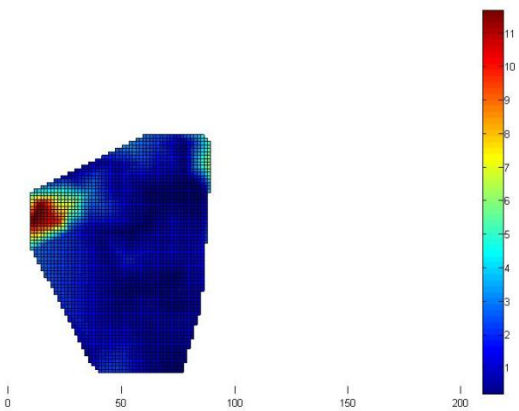
Σχήμα 8.92. Τροπές σε στάθμη 35g.
Figure 8.92. Strains at 5g level.



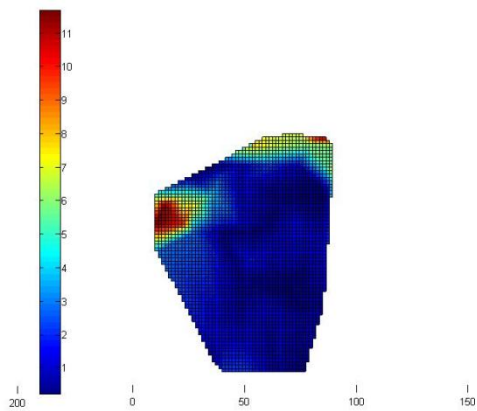
Σχήμα 8.93. Τροπές σε στάθμη 40g.
Figure 8.93. Strains at 40g level.



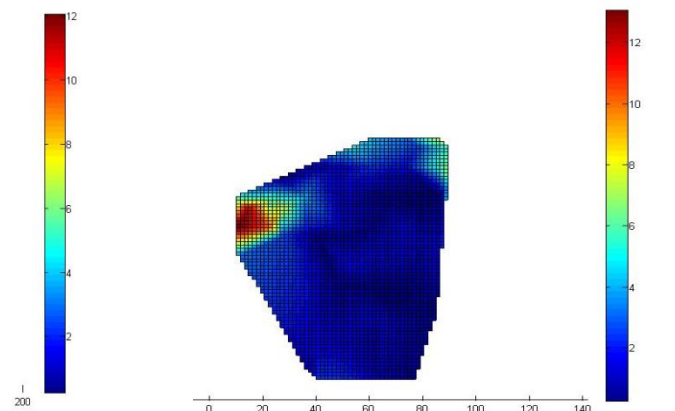
Σχήμα 8.94. Τροπές σε στάθμη 45g.
Figure 8.94. Strains at 45g level.



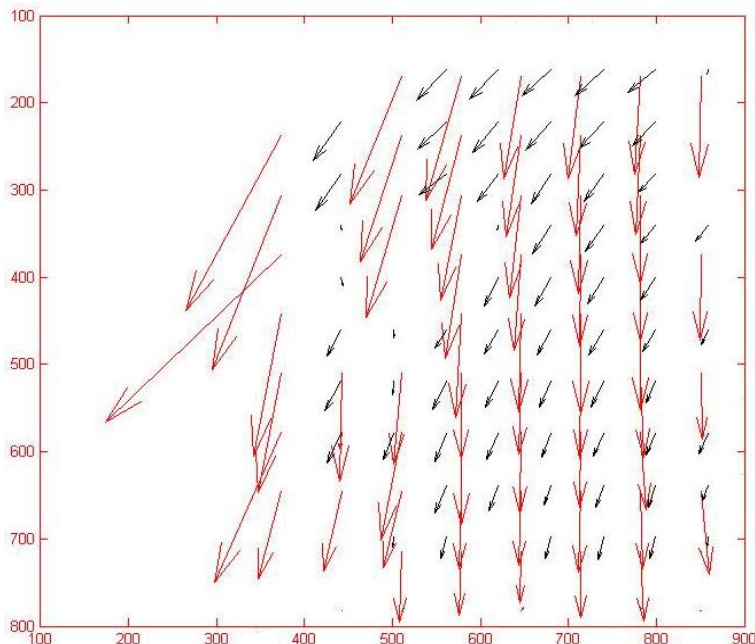
Σχήμα 8.95. Τροπές σε στάθμη 50g.
Figure 8.95. Strains at 50g level.



Σχήμα 8.96. Τροπές σε στάθμη 50g.
Figure 8.96. Strains at 50g level.



Σχήμα 8.97. Τροπές σε στάθμη 50g.
Figure 8.97. Strains at 50g level.



Σχήμα 8.98. Μεταβολή διανυσμάτων ροής από 1g σε 50g.
Figure 8.98. Variation of flow vectors between 1g and 50g.

8.4 Συμπεράσματα Κεφαλαίου.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα παραπάνω Σχήματα, οι μεταβολές στις αναπτυσσόμενες τροπές είναι ανάλογες με τις μεταβολές της στάθμης της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Επίσης, στην διαμόρφωση του μεγέθους τροπής σημαντικό ρόλο παίζει και το υλικό πάνω στο οποίο είναι επικολλημένοι οι αισθητήρες καθώς και ο τρόπος που αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας, δηλαδή σε βήματα των 5g ή απευθείας σε 50g και 100g. Συγκεκριμένα, στα οπλισμένα πρανή με στρώσεις οπλισμού με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας, όπως για παράδειγμα στο Τεστ No.4 και No.8 όπου οι αισθητήρες οπτικών ινών έχουν επικολληθεί σε «Ανθρακούφασμα», οι τροπές που μετρώνται είναι αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές των άλλων πειραμάτων όπως για παράδειγμα των Τεστ No. 9 και No. 10. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η θέση των αισθητήρων μέσα στο πρανές επηρεάζει άμεσα τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ενώ επίσης το φαινόμενο της απελευθέρωσης των μοντέλων «βράχων» γίνεται αντιληπτό από τους αισθητήρες κοντά στα μεσαία στρώματα του πρανούς, παρά την μεγάλη ταχύτητα του φαινομένου. Ωστόσο παρατηρείται αδυναμία καταγραφής μετρήσεων κοντά στην στέψη του πρανούς, λόγω της μικρής απόστασης από την περιοχή στην οποία προσγειώνεται το μοντέλο «βράχου».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Σχετικά με την ανάλυση των πειραματικών μοντέλων μέσω του Geo PIV, τα αποτελέσματα προκύπτουν σε δύο μορφές, μία μου δείχνει την κίνηση που πραγματοποιεί το πρηνές κατά την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας με τα διανύσματα ροής (flow vectors) και μία ακόμη που παρουσιάζει ποσοτικοποιημένες τις τροπές (strain vectors) για διάφορες στάθμες της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Και στα τρία πειράματα μπορεί να παρατηρηθεί η πολύ παραστατική μετακίνηση του πρηνούς προς τα κάτω λόγω της αύξησης της επιτάχυνσης της βαρύτητας, η οποία και αποτυπώνεται στα διανύσματα ροής. Αντίστοιχα, στα Σχήματα που παρουσιάζονται ποσοτικοποιημένες οι τροπές, παρατηρείται η αύξηση των τιμών αυτών, καθώς αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Στο 9^ο Κεφάλαιο που ακολουθεί, επεξεργάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο παρόν Κεφάλαιο, διεξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την μοντελοποίηση των οπλισμένων πρηνών και δημιουργούνται υπολογιστικά μοντέλα με στόχο την σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα πειραματικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

**Επεξεργασία και Αξιολόγηση Πειραματικών Μετρήσεων,
Αναγωγή Πειραματικών Μοντέλων σε Μοντέλα υπό
κλίμακα 1:1 και Υπολογιστική Διερεύνηση.**

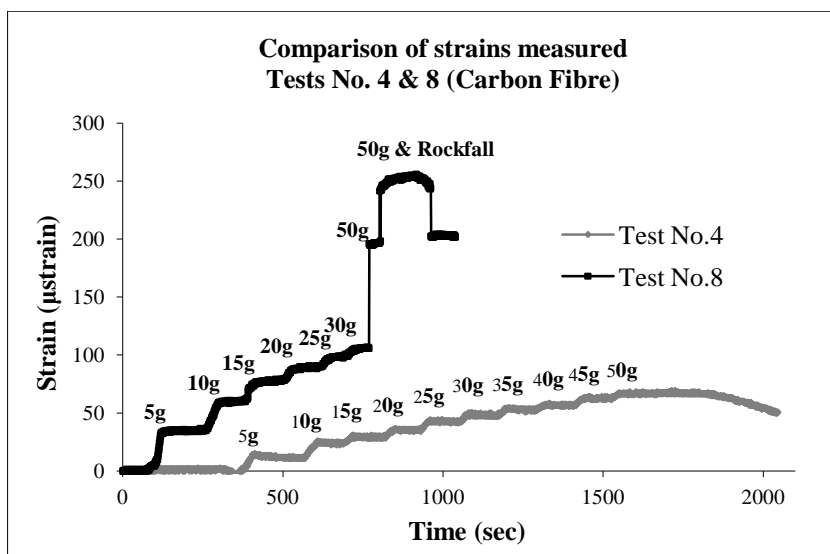
9.1 Σύγκριση και αξιολόγηση μετρήσεων οπτικών ινών.

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται επεξεργασία, σύγκριση και αξιολόγηση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με αισθητήρες οπτικών ινών και παρουσιάστηκαν στο 8^ο Κεφάλαιο, για τα διάφορα μοντέλα, σε συνδυασμό με τα υλικά όπλισης, τις μεθόδους φόρτισης, την στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας και τις θέσεις των αισθητήρων πάνω στις στρώσεις των οπλισμών.

Ειδικότερα:

- *Σύγκριση τροπών σε ‘Ανθρακοϋφασμα’ για μοντέλα με υλικό όπλισης ‘Κουρτίνα Α’ και ‘Κουρτίνα Β’ (Τεστ No.4 & Τεστ No.8).*

Στο Σχήμα 9.1 παρουσιάζονται οι μέγιστες μετρούμενες τροπές στα μοντέλα των Τεστ_No.4 & 8, για στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας έως και 50g. Υπενθυμίζεται ότι τοποθετήθηκε από ένας αισθητήρας οπτικών ινών στην στρώση οπλισμού No.4, πάνω σε ένα φύλλο «Ανθρακοϋφάσματος», προκειμένου να μελετηθεί η πειραματική διάταξη και να ληφθούν κάποιες αρχικές, αναγνωριστικές μετρήσεις.



Σχήμα 9.1. Σύγκριση τροπών για τα Τεστ No. 4 & No. 8.
Figure 9.1. Comparison of strains for Test No. & and No. 8.

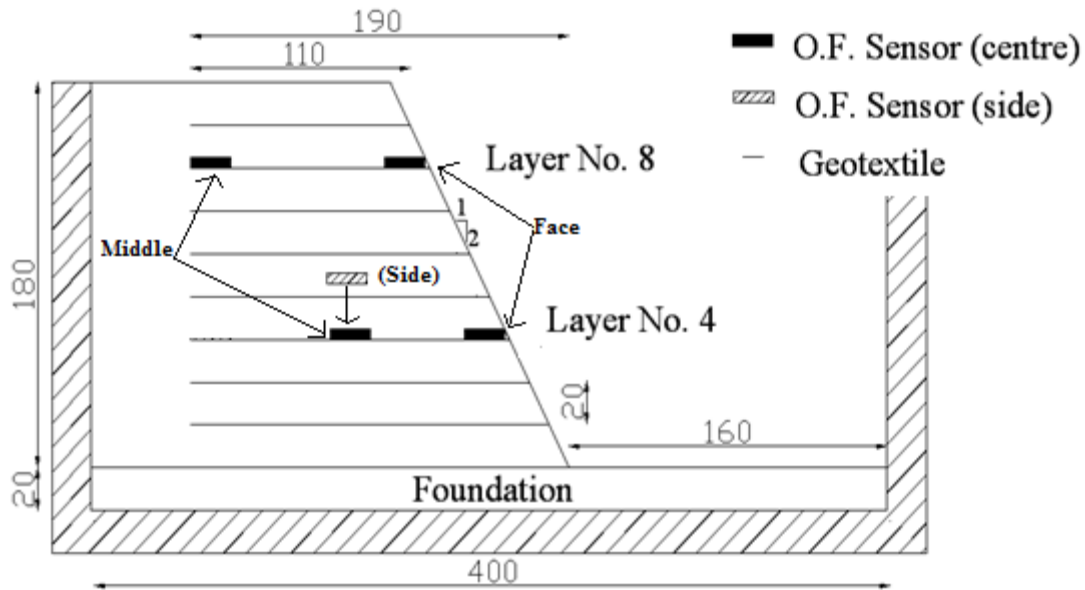
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι αναπτυσσόμενες τροπές είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση του τεστ No.8, για τις ίδιες στάθμες της επιτάχυνσης της βαρύτητας και αυξάνουν ακόμη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

περισσότερο όταν απελευθερώνεται το μοντέλο «βράχου». Η διαφοροποίηση στις τροπές οφείλεται στο γεγονός ότι παρότι ο αισθητήρας επικολλήθηκε στο ίδιο υλικό («Ανθρακούφασμα») και στην ίδια στάθμη στο πρανός, το υπόλοιπο μοντέλο του πειράματος Νο.4 κατασκευάστηκε με το υλικό οπλισμού «Κουρτίνα Α», ενώ το αντίστοιχο μοντέλο του πειράματος Νο.8 με το υλικό οπλισμού «Κουρτίνα Β». Υπενθυμίζεται ότι όπως παρουσιάστηκε και στον Πίνακα 7.8 του 7^{ου} Κεφαλαίου, το υλικό «Κουρτίνα Α» είναι ανθεκτικότερο από το υλικό «Κουρτίνα Β», με αποτέλεσμα οι συνολικές αναπτυσσόμενες τροπές να είναι μικρότερες για το Τεστ Νο. 4. Και στα δυο πειράματα επιβεβαιώνεται ότι η μετρητική διάταξη που υιοθετήθηκε με αισθητήρες οπτικών ινών στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή, μπορεί να δώσει λογικά αποτελέσματα. Επίσης στα δύο αυτά Τεστ επιβεβαιώνεται ότι οι συνθήκες φόρτισης καθώς και η διαφοροποίηση των υλικών όπλισης αποτυπώνονται στις μετρήσεις μέσω των αισθητήρων.

➤ *Σύγκριση τροπών σε διάφορες στάθμες κατά το ύψος και το πλάτος του ιδίου μοντέλου, με υλικό όπλισης 'Επίδεσμος' (Τεστ Νο.9).*

Στην συνέχεια παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά το Τεστ Νο. 9, το μοντέλο του οποίου κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας το υλικό όπλισης «Επίδεσμος». Για το εν λόγω Τεστ οι αισθητήρες οπτικών ινών τοποθετήθηκαν: α) στις στρώσεις οπλισμού Νο.4 & 8, δηλαδή κοντά στο μέσο -κατά το ύψος- και κοντά στην στέψη του πρανούς, β) σε δύο διαφορετικές θέσεις της ίδιας στρώσης οπλισμού και ειδικότερα κοντά στην όψη (face) και κοντά στο μέσο (middle) του οπλισμού, (σε ενδιάμεση τομή του πρανούς) και τέλος γ) στην πλάγια όψη (side) του πρανούς, σε ακραία δηλαδή τομή του πρανούς, στην στρώση Νο.4. Σημειώνεται ότι ο αισθητήρας που τοποθετήθηκε στην πλάγια όψη του πρανούς, βρίσκεται επίσης και κοντά στο μέσο (middle) της στρώσης οπλισμού. Για καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, επαναλαμβάνεται το Σχήμα 7.11 του 7^{ου} Κεφαλαίου, όπου και παρουσιάζονται οι θέσεις των αισθητήρων οπτικών ινών στο εσωτερικό του μοντέλου.



Σχήμα 7.11. Θέσεις αισθητήρων οπτικών ινών.
Figure 7.11. Location of optical fibre sensors.

Στο Σχήμα 9.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μετρήσεις που ελήφθησαν για τις ακόλουθες φορτίσεις: σταδιακή αύξηση της στάθμης της επιτάχυνσης της βαρύτητας από 1g έως και 50g με βήματα των 5g, στην συνέχεια απευθείας αποφόρτιση σε 1g, κατόπιν εκ νέου απευθείας φόρτιση έως και 50g και τέλος απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου» σε στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι τροπές αυξάνουν με την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας ενώ παραμένουν σταθερές όταν αυτή δεν μεταβάλλεται. Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί ότι για την στρώση οπλισμού No.4 και κατά την εκ νέου απευθείας φόρτιση του μοντέλου σε 50g, η τελική μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης τροπής ίση με 1715 μstrain , μικρότερη από την τελική μέγιστη τροπή της αρχικής φόρτισης που είναι ίση 2851 μstrain . Επίσης παρουσιάζονται συνολικά μικρότερες τροπές στις αντίστοιχες στάθμες της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Το ίδιο ισχύει και για την στρώση οπλισμού No.8 με αντίστοιχες τιμές 481 και 103 μstrain .

Από τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η διαδικασία της φόρτισης παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των τροπών του μοντέλου και τονίζεται ότι προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα, ακόμη και αν το μέγεθος του φορτίου είναι το ίδιο. Επίσης, το γεγονός ότι πρόκειται για δεύτερο κύκλο φόρτισης – από 1g σε 50g, ξανά σε 1g και πάλι σε 50g - παίζει επίσης ρόλο στην μειωμένη τιμή των τροπών.

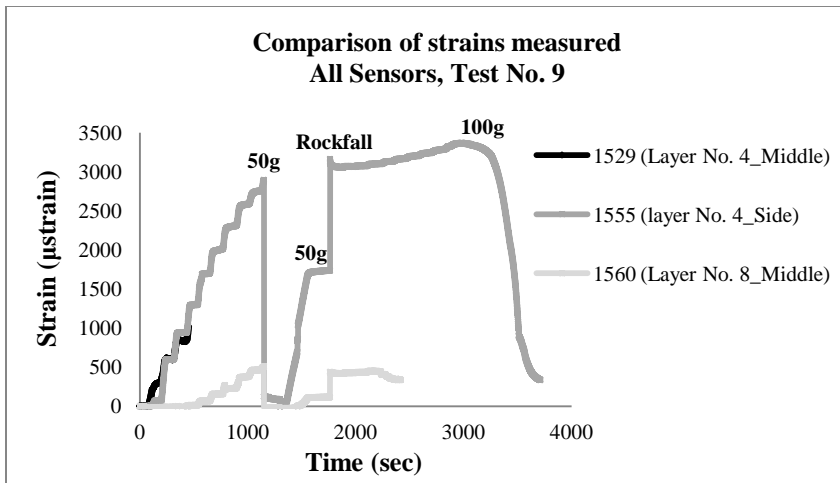
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Επιπλέον παρατηρείται ότι οι τιμές των τροπών για την ίδια στρώση οπλισμού No.4 παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένες τιμές για τις ίδιες φάσεις φορτίσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του Σχήματος 9.1. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό όπλισης «Επίδεσμος» είναι κατά μεγάλο βαθμό ασθενέστερο από το υλικό «Ανθρακούφασμα» που χρησιμοποιήθηκε για την επικόλληση του αισθητήρα των Τεστ No.4 και 8. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της τροπής για στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g, είναι 2851 μ strain για την περίπτωση του Τεστ No.9, ενώ η αντίστοιχη τιμή των Τεστ No.4 και 8 είναι 68 και 195 μ strain αντίστοιχα.

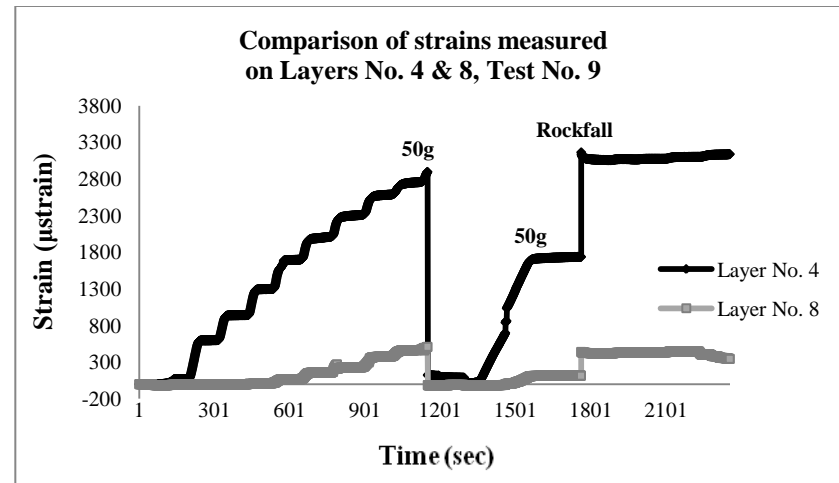
Στα Σχήματα 9.3 έως και 9.5, συγκρίνονται πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 9.2. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 9.3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μεταξύ των αισθητήρων που βρίσκονται στην στρώση No.8 -κοντά στην στέψη του πρανούς- και στην στρώση No.4 -κοντά στην μεσαία στάθμη του πρανούς. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι αναπτυσσόμενες τροπές είναι σημαντικά μεγαλύτερες κοντά στην στρώση No.4 σε σχέση με την στρώση No.8 ενώ και στις δύο περιπτώσεις ακολουθούν παρόμοια πορεία.

Στο Σχήμα 9.4, παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ δύο αισθητήρων τοποθετημένων στην ίδια στρώση οπλισμού και συγκεκριμένα στην στρώση No.8, για επιτάχυνση της βαρύτητας έως και 50g. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι μετρούμενες τροπές είναι λίγο μεγαλύτερες κοντά στο εσωτερικό (middle) του πρανούς, ειδικά όσο αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας. Ωστόσο, και τα δύο διαγράμματα ακολουθούν παρόμοια πορεία.

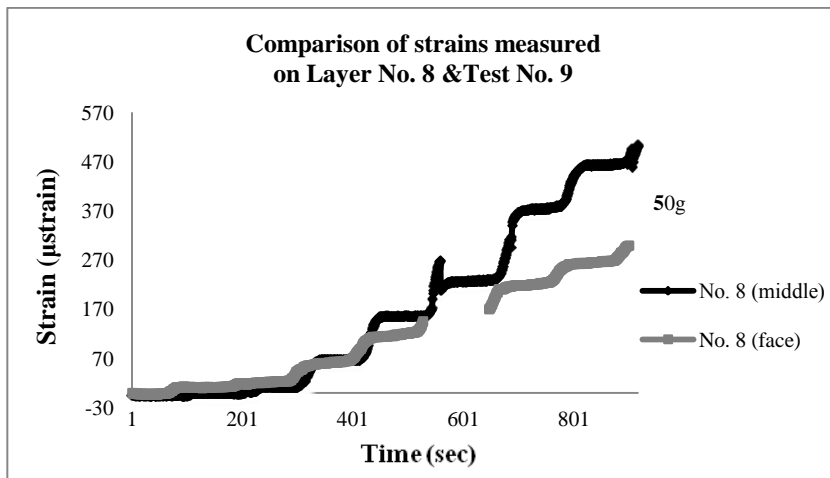
Στο Σχήμα 9.5, παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ δύο αισθητήρων τοποθετημένων στην ίδια στρώση οπλισμού και συγκεκριμένα στην στρώση No.4 για επιτάχυνση της βαρύτητας έως και 20g. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι μετρούμενες τροπές είναι και σε αυτή την περίπτωση, λίγο μεγαλύτερες κοντά στο εσωτερικό του πρανούς (middle), ωστόσο, και τα δύο διαγράμματα ακολουθούν παρόμοια πορεία.



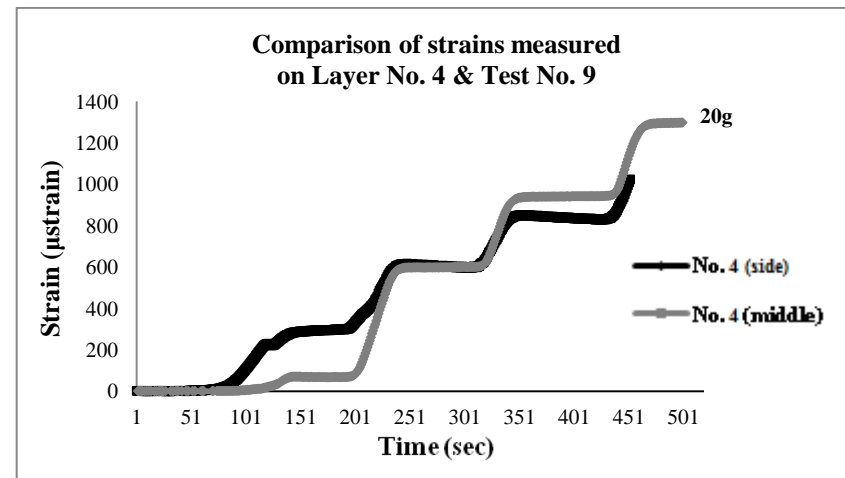
Σχήμα 9.2. Σύγκριση τροπών για τα Τεστ No. 9 σε διάφορες στρώσεις.
Figure 9.2. Comparison of strains for Test No. 9 on various layers.



Σχήμα 9.3. Σύγκριση τροπών στις στρώσεις οπλισμού No.4 & 8.
Figure 9.3. Comparison of strains on sensors No.4 & 8.



Σχήμα 9.4. Σύγκριση τροπών στο μέσο & την όψη του πρανούς.
Figure 9.4. Comparison of strains in the middle & face of the slope.



Σχήμα 9.5. Σύγκριση τροπών στο μέσο & το πλάι του πρανούς.
Figure 9.5. Comparison of strains in the middle & side of the slope.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

- *Σύγκριση τροπών για διαφορετικά Τεστ στις στρώσεις οπλισμού No.4 & 8 (Τεστ No.10, 12, 13 & 14).*

Στην συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα μετρήσεων για τις στρώσεις No.4 και No.8 οι οποίες και βρίσκονται κοντά στο μέσο και την στέψη του πρανούς αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από μετρήσεις κατά την διάρκεια των Τεστ No.10, 12, 13 και 14. Στον Πίνακα 9.1, υπενθυμίζονται τα επιμέρους χαρακτηριστικά του κάθε μοντέλου και πειράματος.

Πίνακας 9.1. Χαρακτηριστικά μοντέλων οπλισμένων πρανών και πειραμάτων.
Table 9.1. Reinforced slope models and test characteristics.

a/a Test	Reinf. Material	Sensors Location	Loading Conditions	“Rockfall”
10	‘Bandage’	Layer No. 4 &8	Directly at 50g &100g	Yes
12	‘Curtain B’	Layer No. 4 &8	Directly at 50g &100g	Yes
13	‘Curtain B’	Layer No. 4 &8	Directly at 50g &100g	Yes
14	‘Curtain B’	Layer No. 8	Directly at 50g &100g	Yes

Στα Σχήματα 9.6 έως και 9.13 μπορεί να παρατηρηθεί η μεταβολή των τροπών για τις διάφορες στάθμες της επιτάχυνσης της βαρύτητας συμπεριλαμβανομένης της απελευθέρωσης του μοντέλου «βράχου».

Ειδικότερα, στο Σχήμα 9.6 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα που αφορούν την στρώση οπλισμού No.4 για τα διάφορα πειράματα και μπορεί να παρατηρηθεί ότι για τις αντίστοιχες στάθμες της επιτάχυνσης της βαρύτητας και για τις ίδιες φάσεις φορτίσεων οι τιμές των τροπών λαμβάνουν παρόμοιες τιμές. Για το Τεστ No.12, υπάρχουν 2 μετρήσεις στην ίδια στάθμη και όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στο Σχήμα 9.7, για την στάθμη της επιτάχυνσης 50g, οι τιμές αυτές είναι 1280.83 και 1270.83 μ strain ενώ για τα υπόλοιπα δύο πειράματα, Τεστ No.10 και 13, οι τιμές είναι 1171.67 και 1183.83 αντίστοιχα.

Κατά την απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου» παρατηρείται στιγμιαία αύξηση της τροπής, όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στο Σχήμα 9.9. Ειδικότερα, μετρούνται 3 απότομες μεταβολές: $\Delta\epsilon_{10}=199$, $\Delta\epsilon_{12}=243$ και $\Delta\epsilon_{13}=381$ μ strain, ενώ ένας από τους δύο αισθητήρες του

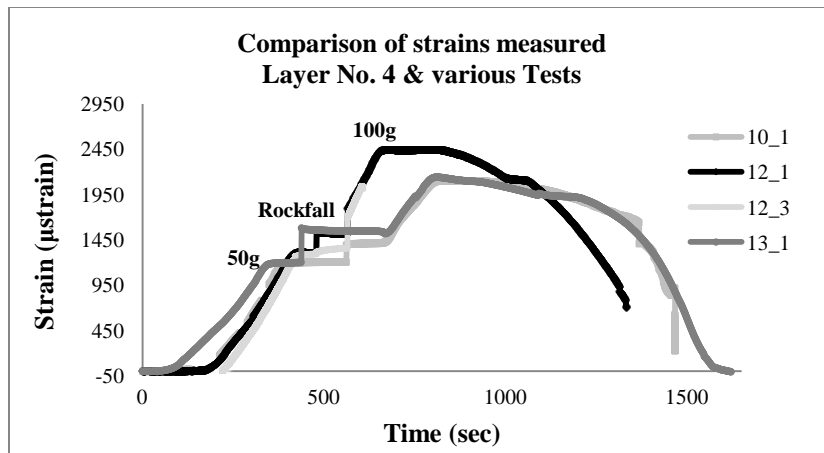
Τεστ No.12, δεν καταγράφει μεταβολή. Πρόκειται για τον αισθητήρα που βρίσκεται στο πλάι της στρώσης οπλισμού No.4 και πιθανότατα λόγω της απόστασης από το σημείο της απελευθέρωσης του βράχου, δεν καταγράφηκε το φαινόμενο αυτό.

Στο Σχήμα 9.9 παρουσιάζεται η τελευταία φάση φόρτισης των πειραμάτων όπου πραγματοποιείται απευθείας φόρτιση έως και 100g, με τελικές τιμές των αναπτυσσόμενων τροπών 2093.33, 2391.67 και 2131.67 μ strain. Για αυτή την φάση φόρτισης δεν ελήφθησαν τιμές από τον ένα από τους δύο αισθητήρες του Τεστ No.12, λόγω αστοχίας της οπτικής ίνας. Τέλος, παρουσιάζεται η αποφόρτιση των μοντέλων από 100 σε 1g, όπου και παρατηρείται μείωση των αναπτυσσόμενων τροπών με παρόμοιο ρυθμό.

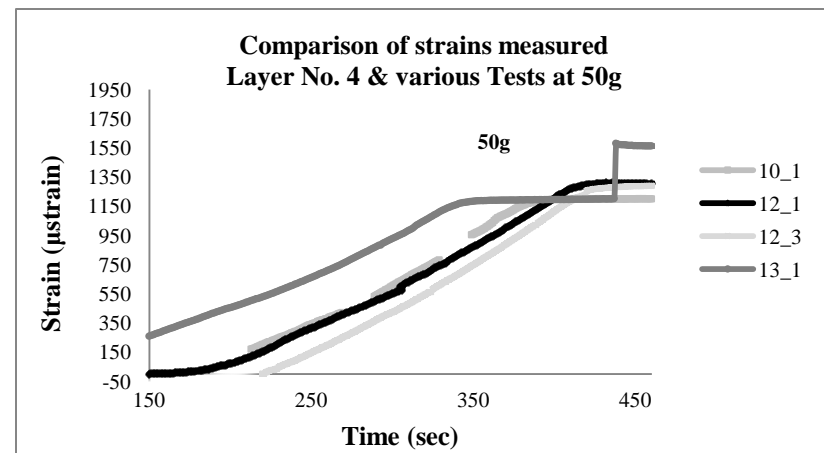
Από την σύγκριση των μετρήσεων που ελήφθησαν για διάφορα πειράματα μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών για την στρώση οπλισμού No.4, προκύπτει ότι τα αποτελέσματα είναι λογικά και αναμενόμενα, τόσο από πλευράς μορφής όσο και από πλευράς τάξης μεγέθους. Ειδικότερα, επιβεβαιώνεται ότι οι αισθητήρες λαμβάνουν παραμορφώσεις ανάλογες με την μεταβολή της επιτάχυνσης της βαρύτητας, ενώ παραμένουν αδρανείς σε σταθερές τιμές του g. Επίσης, το γεγονός ότι για διαφορετικά πειράματα προκύπτουν παρόμοια αποτελέσματα σχεδόν για όλες τις φάσεις φορτίσεων, δείχνει ότι η μετρητική μέθοδος που εφαρμόστηκε για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας είναι επιτυχής και μπορεί να δώσει χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά του μοντέλου κατά την φόρτισή του στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.

Ωστόσο, παρατηρήθηκαν και κάποιες ασυνέχειες και διαφοροποιήσεις, οι οποίες οφείλονται σε γενικές γραμμές στο γεγονός ότι η μετρητική διάταξη των αισθητήρων οπτικών ινών δεν έχει δημιουργηθεί εξ' αρχής για την διερεύνηση κατασκευών στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή αλλά πρόκειται για μια προσαρμοσμένη μέθοδο η οποία και συνδυάστηκε με άλλα ήδη υπάρχοντα διαθέσιμα μέσα του εργαστηρίου του ETH Zurich.

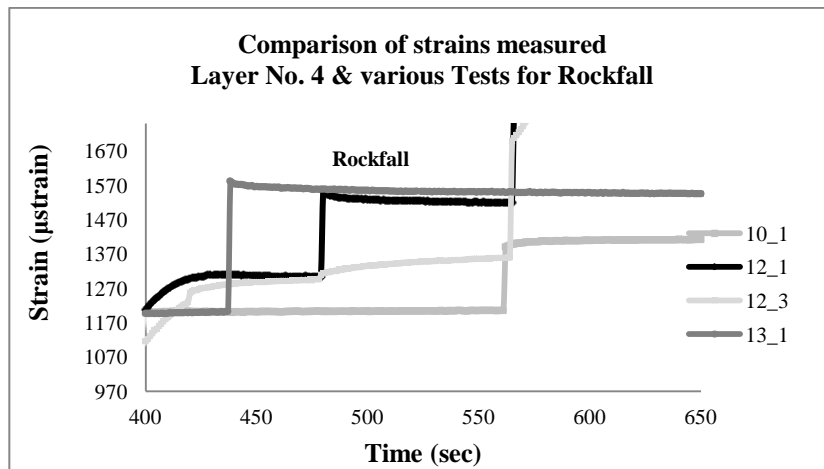
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9



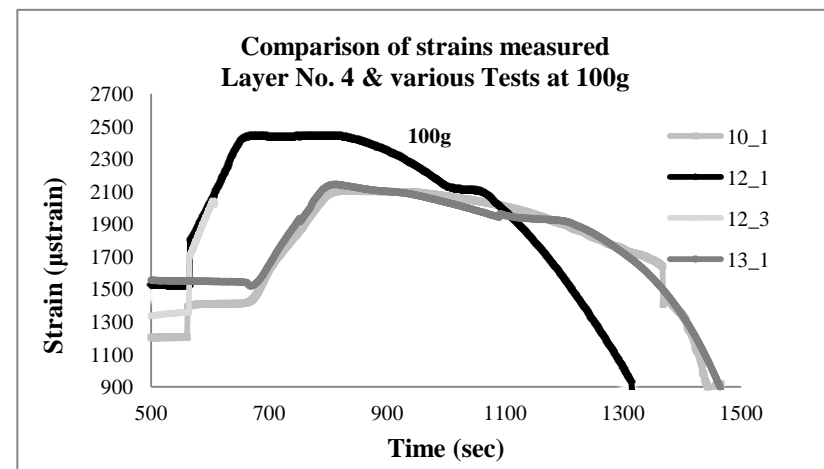
Σχήμα 9.6. Μεταβολή για διάφορα πειράματα & Στρώση No. 4.
Figure 9.6. Strain variation for various tests & Layer No.4.



Σχήμα 9.7. Μεταβολή τροπών για 50g & Στρώση No.4.
Figure 9.7. Strain variation for 50g & Layer No.4.



Σχήμα 9.8. Μεταβολή τροπών για πτώση βράχου & Στρώση No.4.
Figure 9.8. Strain variation for rockfall & Layer No.4.



Σχήμα 9.9. Μεταβολή τροπών για 100g & Στρώση No.4.
Figure 9.9. Strain variation for 100g & Layer No.4.

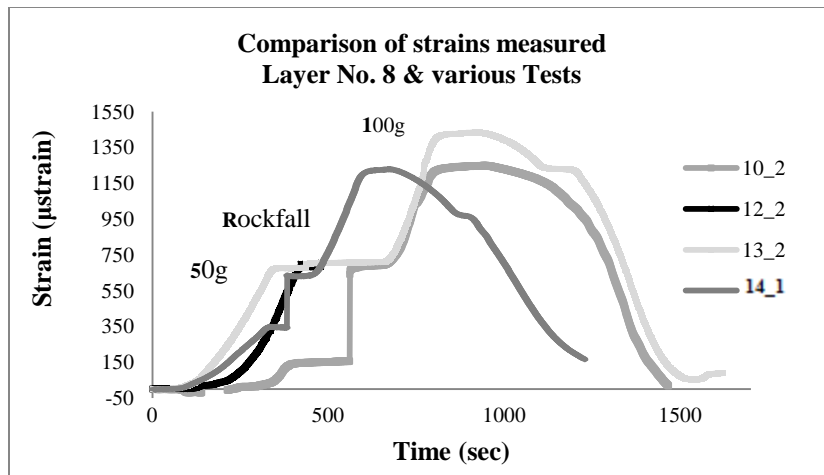
Στην συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα που προέκυψαν από μετρήσεις αισθητήρων τοποθετημένων στην στρώση οπλισμού Νο.8. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 9.10 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για: α) φόρτιση από 1g έως και 50g, β) απελευθέρωση μοντέλου «βράχου» (από 2 αισθητήρες) γ) απευθείας φόρτιση σε στάθμη 100g και τέλος δ) αποφόρτιση των μοντέλων.

Στο Σήμα 9.11, παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή των τροπών για στάθμη 50g, για τα Τεστ Νο.10, 12, 13 και 14. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, για τα Τεστ Νο.12 και 13 οι τιμές των τροπών είναι παρόμοιες και συγκεκριμένα 671.67 και 699.17 μ strain. Ωστόσο, παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις στις τιμές των τροπών για τα Τεστ Νο.10 και 14, όπου οι αντίστοιχες τιμές είναι 141.67 και 346.67 μ strain αντίστοιχα.

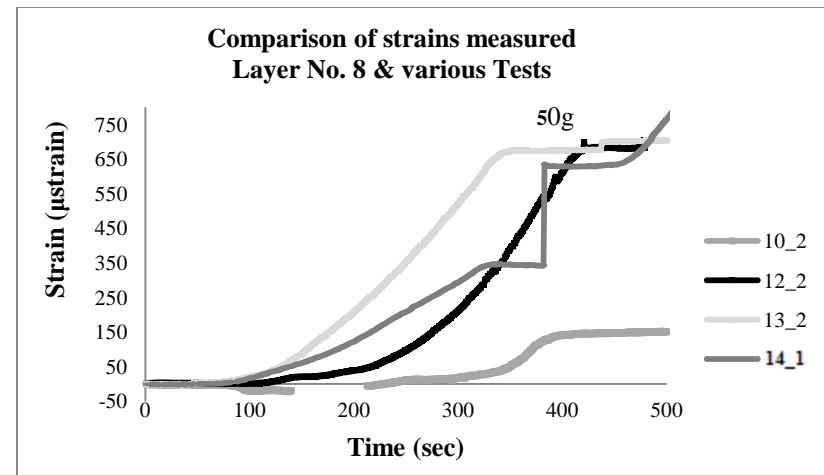
Στο Σχήμα 9.12 παρουσιάζεται η μεταβολή των τροπών κατά την απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου». Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, έχουν καταγραφεί μετρήσεις μόνο για τα Τεστ Νο.10 και 13, με απότομη μεταβολή των τροπών: $\Delta\epsilon_{10}=505$ μ strain και $\Delta\epsilon_{15}=293$ μ strain. Ωστόσο, ο αισθητήρας του Τεστ Νο.12 έχει αστοχήσει την στιγμή της επαφής του μοντέλου «βράχου» με το εδαφικό υλικό, λόγω της μεγάλης ορμής αυτού, ενώ για το Τεστ Νο.14, δεν έχει καταγραφεί καμία μεταβολή, πιθανότατα λόγω της μεγάλης ταχύτητας με την οποία πραγματοποιήθηκε το φαινόμενο καθώς και λόγω της αδυναμίας του συγκεκριμένου αισθητήρα να το παρακολουθήσει. Γενικά, οι μετρήσεις κατά την απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου» στην στρώση οπλισμού Νο.8 κρίνονται ως μη ικανοποιητικές, καθώς οι αισθητήρες που ήταν τοποθετημένοι κοντά στην κορυφή του πρανούς βρίσκονταν πολύ κοντά στο σημείο επαφής του «βράχου» με το έδαφος με αποτέλεσμα λόγω της μεγάλης ορμής και ταχύτητας αυτού να αστοχούν ή να αδυνατούν να λειτουργήσουν σωστά.

Στο Σχήμα 9.13 παρουσιάζεται η τελική φάση φόρτισης των μοντέλων σε στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 100g. Οι τελικές τιμές των τροπών είναι: 1215.83, 1429.17 και 1237.50 μ strain, για τα Τεστ Νο.10, 13 και 14 αντίστοιχα, ωστόσο τα αποτελέσματα αυτά δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα καθώς όπως αναφέρθηκε και στα παραπάνω υπήρχαν διάφορες αστοχίες και αδυναμίες μέτρησης των αισθητήρων κατά την απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου».

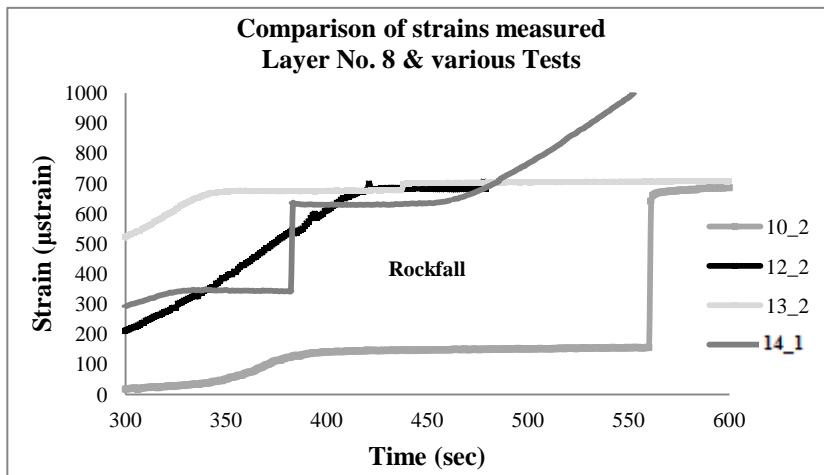
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9



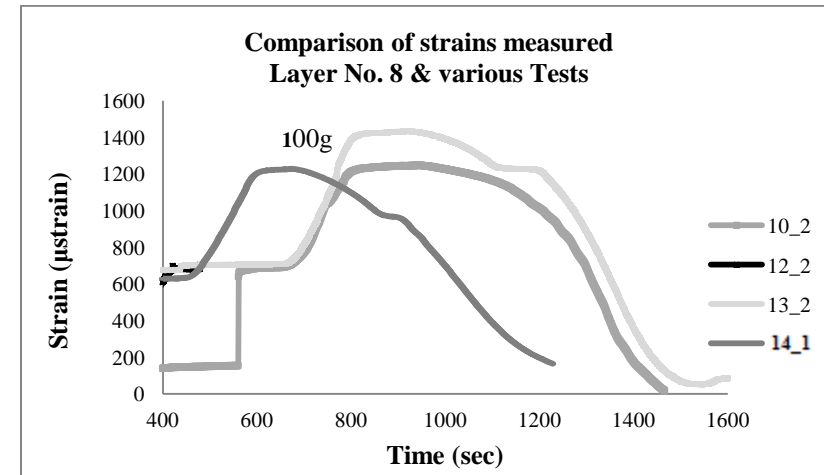
Σχήμα 9.10. Μεταβολή για διάφορα πειράματα & Στρώση No. 8.
Figure 9.10. Strain variation for various tests & Layer No.8.



Σχήμα 9.11. Μεταβολή τροπών για στάθμη 50g & Στρώση No.8.
Figure 9.11. Strain variation for 50g level & Layer No.8.



Σχήμα 9.12. Μεταβολή τροπών για πτώση βράχου & Στρώση No.8.
Figure 9.12. Strain variation for rockfall & Layer No.8.



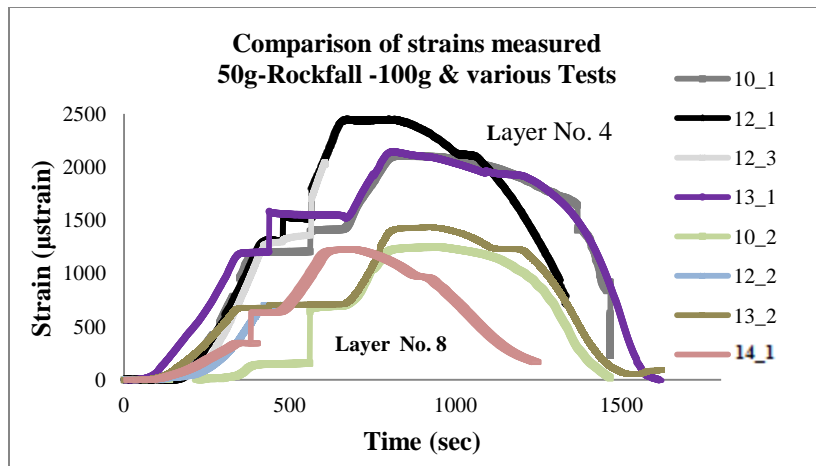
Σχήμα 9.13. Μεταβολή τροπών για στάθμη 100g & Στρώση No.4.
Figure 9.13. Strain variation for 100g level & Layer No.4.

Ακολούθως, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μετρήσεις που ελήφθησαν στις στρώσεις οπλισμού No.4 και No.8 για την ακόλουθη διαδικασία φόρτισης: απευθείας αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας από 1g έως και 50g, στην συνέχεια απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου», κατόπιν απευθείας φόρτιση έως και 100g και τέλος πλήρης αποφόρτιση. Στο Σχήμα 9.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα Τεστ No.10, 12, 13 και 14. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, ο ρυθμός μεταβολής των τροπών είναι ανάλογος της αύξησης της επιτάχυνσης της βαρύτητας και οι μετρήσεις με τους αισθητήρες στην στρώση οπλισμού No.8 είναι μειωμένες, ωστόσο σε αναλογία με τις αντίστοιχες μετρήσεις της στρώσης οπλισμού No.4.

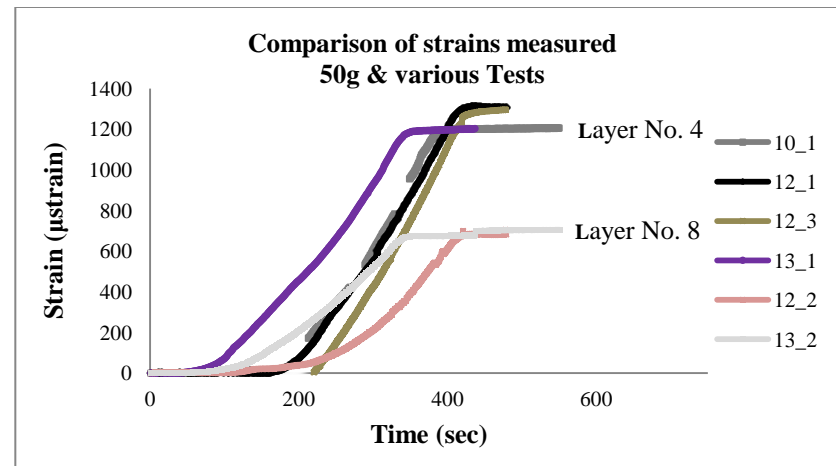
Στην συνέχεια, στο Σχήμα 9.15 παρουσιάζεται πιο αναλυτικά η μεταβολή αυτή για μέγιστη στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, υπάρχει κάποια αναλογία μεταξύ των μετρήσεων και συγκεκριμένα προκύπτει ότι στην στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g, οι αναπτυσσόμενες τροπές είναι από 1.74 έως και 1.96 φορές μεγαλύτερες στην στρώση οπλισμού No.4 από τις αντίστοιχες τροπές στην στρώση οπλισμού No.8.

Κατόπιν παρουσιάζονται πιο αναλυτικά τα αντίστοιχα αποτελέσματα για μέγιστη στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 100g. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 9.16, υπάρχει αναλογία μεταξύ των μετρήσεων και για την μέγιστη στάθμη 100g οι αναπτυσσόμενες τροπές είναι από 1.48 έως και 2 φορές μεγαλύτερες στην στρώση οπλισμού No.4 από τις αντίστοιχες τροπές στην στρώση οπλισμού No.8.

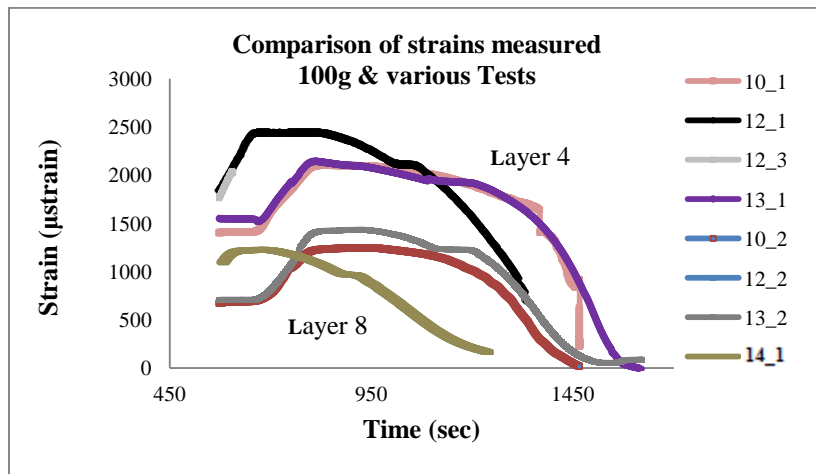
Τέλος, στο Σχήμα 9.17 παρουσιάζεται η αναλογία των μέγιστων τροπών για τις στρώσεις οπλισμού No.4 & 8, σε στάθμη επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g και 100g. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, καθώς αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας οι διαφορές στις αναπτυσσόμενες τροπές μεγαλώνουν ενώ στην περίπτωση της στάθμης 100g, τηρείται λιγότερο ακριβής αναλογία.



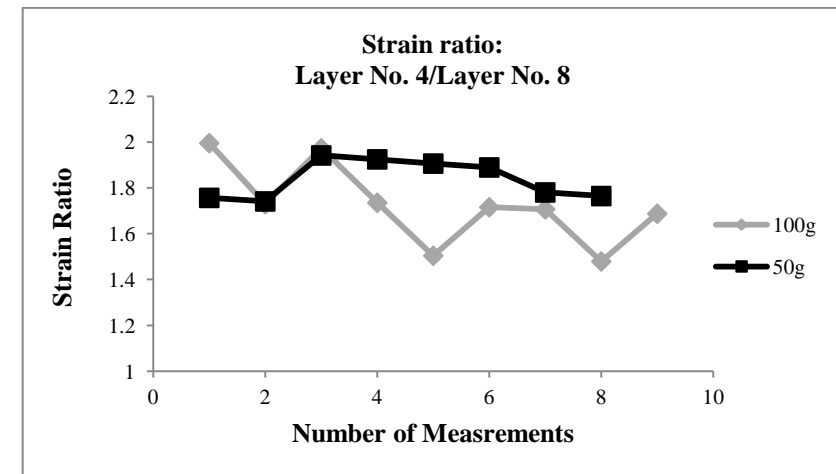
Σχήμα 9.14. Μεταβολή τροπών στις Στρώσεις No.4 & 8.
Figure 9.14. Strain variation on Layers No. 4 & 8.



Σχήμα 9.15. Μεταβολή τροπών για στάθμη 50g στις Στρώσεις No.4 & 8.
Figure 9.15. Strain variation at 50g level, on Layers No. 4 & 8.



Σχήμα 9.16. Μεταβολή τροπών για 100g στις Στρώσεις No.4&8.
Figure 9.16. Strain variation at 100g level, on Layers No. 4&8.



Σχήμα 9.17. Λόγος μέγιστων τροπών για Στρώσεις No.4/No. 8.
Figure 9.17. Maximum strain ratio for Layers No. 4/ No. 8.

9.2 Σύγκριση και αξιολόγηση με την μέθοδο GeoPIV.

Στην παρούσα Ενότητα πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την λήψη ψηφιακών φωτογραφιών και ανάλυση PIV. Συγκεκριμένα, αναλύονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την επεξεργασία των τριών πειραμάτων που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 8, ενώ συγκρίνονται μεταξύ τους και εντοπίζονται οι διαφοροποιήσεις αυτών σε σχέση και με τις διαφορές των μοντέλων και του τρόπου διεξαγωγής των πειραμάτων.

Για το Τεστ Νο.6, υπενθυμίζεται ότι το μοντέλο κατασκευάστηκε με υλικό οπλισμού την «Κουρτίνα Α», μήκος στρώσεων οπλισμού 11 cm και μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g. Η επιτάχυνση αυτή εφαρμόστηκε στο μοντέλο με αύξηση σε βήματα των 5g ανά 2 min. Στα Σχήματα 8.34 έως και 8.45 του προηγούμενου Κεφαλαίου, παρουσιάστηκαν οι τιμές των αναπτυσσόμενων τροπών για διάφορες τιμές της στάθμης της επιτάχυνσης της βαρύτητας έως και 50g. Στα Σχήματα αυτά παρατηρήθηκε ότι οι αναπτυσσόμενες τροπές αυξάνουν καθώς αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ επίσης διαγράφηκε και η μορφή του μηχανισμού κοντά στο μέσο του πρανούς, στη περιοχή δηλαδή που τελειώνει η οπλισμένη εδαφική μάζα. Επίσης, αυξημένη αστοχία παρατηρήθηκε κοντά στον πόδα και την όψη του πρανούς, λόγω του ότι εκεί συγκεντρώθηκε η μικρή ποσότητα νερού που είχε τοποθετηθεί στο μοντέλο για την μεταφορά του στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.

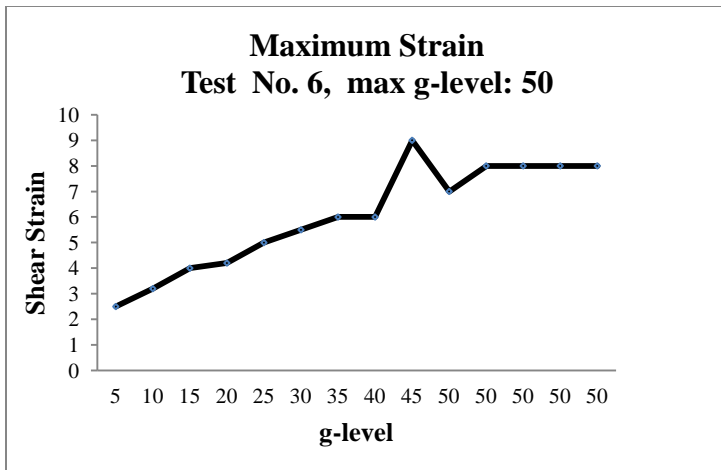
Οι μέγιστες τιμές των αναπτυσσόμενων τροπών για τις διάφορες στάθμες της επιτάχυνσης της βαρύτητας παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.18, όπου μπορεί να παρατηρηθεί μια σχεδόν αναλογική αύξηση της μέγιστης τροπής κατά την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας περίπου έως και 50g, στην συνέχεια μια απότομη αύξηση της τροπής σε στάθμη 50g και τέλος σταθεροποίηση της τιμής των τροπών για σταθερή τιμή 50g. Η απότομη αύξηση της τροπής μπορεί θεωρηθεί ότι οφείλεται στην απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου» στην κορυφή του πρανούς, η οποία και πραγματοποιήθηκε εκείνη την χρονική περίοδο, ενώ στην συνέχεια η σταθεροποίηση των τροπών οφείλεται στο γεγονός ότι εκείνη την χρονική περίοδο η επιτάχυνση διατηρείται σταθερή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

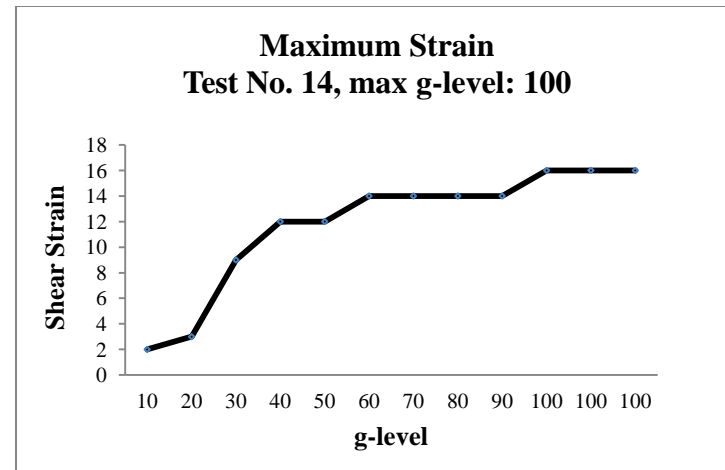
Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν κατά την ανάλυση του Τεστ Νο.14 με την μέθοδο PIV. Το μοντέλο του Τεστ αυτού κατασκευάστηκε με υλικό όπλισης «Κουρτίνα Β» και τοποθετήθηκαν 9 στρώσεις οπλισμού μήκους 11-19 cm. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν 3 οπτικές ίνες, οι δύο στην στρώση οπλισμού 4 και η τρίτη στην στρώση Νο.8. Στα Σχήματα 8.60 έως και 8.71 του προηγούμενου Κεφαλαίου παρουσιάστηκαν οι μεταβολές των αναπτυσσόμενων τροπών για στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας έως και 100g, όπου και παρατηρείται ότι η κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας εντοπίζεται αυτή τη φορά κοντά στην όψη του πρανούς. Στο Σχήμα 9.19 παρουσιάζονται οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τροπές για διάφορες στάθμες της επιτάχυνσης της βαρύτητας έως και 100g. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στην περίπτωση αυτή, οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τροπές αυξάνουν καθώς αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας ενώ ξανά, κατά την απελευθέρωση του βράχου σε στάθμη 50g, παρουσιάζεται μια απότομη αύξηση της μέγιστη τροπής.

Στην συνέχεια σχολιάζεται το Τεστ Νο.9, για το οποίο και κατασκευάστηκε μοντέλο οπλισμένου πρανούς με υλικό οπλισμού την «Κουρτίνα Β» 9, από όπου και κατασκευάστηκαν 8 στρώσεις οπλισμού μήκους 11-19 cm και τοποθετήθηκαν καθ' όλο το ύψος του πρανούς σε κατακόρυφη απόσταση 2 cm. Επιπλέον, τοποθετήθηκε και μία στρώση οπλισμού από «Ανθρακοϋφασμα» (στο ύψος της στρώση Νο.4) στην οποία επικολλήθηκε ένας αισθητήρας οπτικών ινών. Η αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας έγινε σε βήματα των 5g ανά 2 min, ενώ στην στάθμη 50g απελευθερώθηκε ο «βράχος» με στόχο να προσομοιωθεί το φαινόμενο της βραχύπτωσης. Στα Σχήματα 8.85 έως και 8.96 του προηγούμενου 8^{ου} Κεφαλαίου παρουσιάστηκαν οι τιμές των αναπτυσσόμενων τροπών για διάφορες τιμές της στάθμης της επιτάχυνσης της βαρύτητας έως και 50g. Στα Σχήματα αυτά παρατηρήθηκε ότι οι αναπτυσσόμενες τροπές αυξάνουν καθώς αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ αυξημένη αστοχία εντοπίστηκε κοντά στην περιοχή που τελειώνει η οπλισμένη εδαφική μάζα.

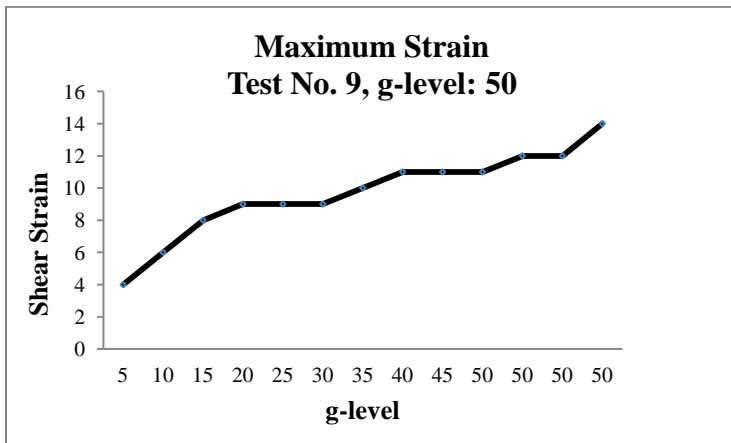
Τέλος, στο Σχήμα 9.21 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μέγιστων αναπτυσσόμενων τροπών για τα τρία Τεστ Νο.6, Νο.9 & Νο. 14, για στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας έως και 50g.



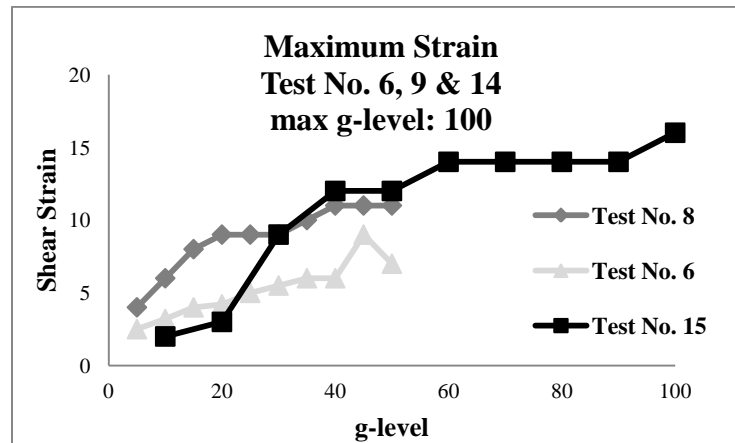
Σχήμα 9.18. Μέγιστη τροπή για διάφορες στάθμες του g (Τεστ Νο.6).
 Figure 9.18. Maximum strain for various g-levels (Test No.6).



Σχήμα 9.19. Μέγιστη τροπή για διάφορες στάθμες του g (Τεστ Νο.14).
 Figure 9.19. Maximum strain for various g-levels (Test No.14).



Σχήμα 9.20. Μέγιστη τροπή για διάφορες στάθμες g (Τεστ Νο.9).
 Figure 9.20. Maximum strain at various g-levels (Test No.9).



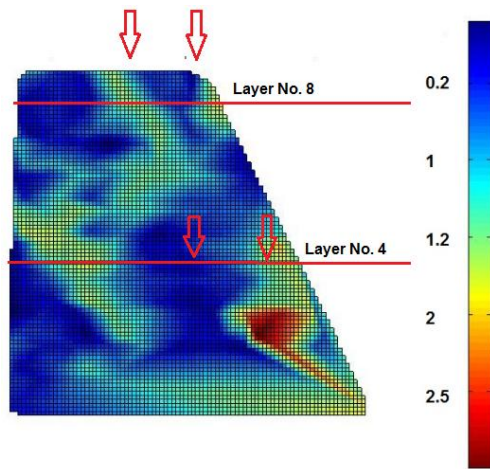
Σχήμα 9.21. Μέγιστη τροπή για διάφορες στάθμες g & διάφορα Τεστ.
 Figure 9.21. Maximum strain at various g-levels & various Tests.

που επιλέχθηκε και φαίνεται στο Σχήμα 8.72, δεν περιλαμβάνει ολόκληρο το πρανές, προκειμένου να υπάρχει καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων και των θέσεων των αισθητήρων, σημειώνεται με κόκκινο το περίγραμμα ολόκληρου του πρανούς. Έτσι, όπως μπορεί να παρατηρηθεί ορισμένοι από τους αισθητήρες οπτικών ινών βρίσκονται εκτός της περιοχής ενδιαφέροντος, ωστόσο, το Τεστ Νο. 9 είναι ιδιαίτερα χρήσιμο κατά την σύγκριση του μηχανισμού αστοχίας με τον αντίστοιχο μηχανισμό που προκύπτει μετέπειτα, κατά την υπολογιστική διερεύνηση.

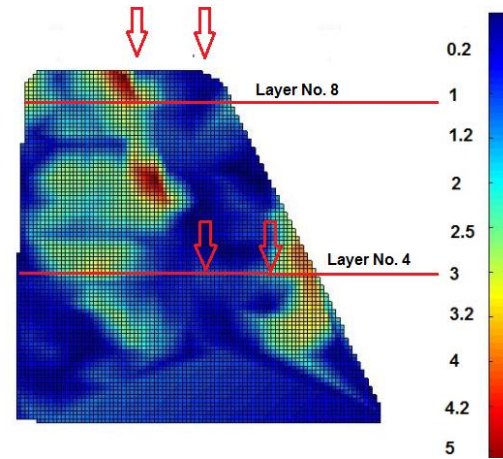
Στην συνέχεια παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.2 συγκεντρωτικά οι τιμές αυτές, για τα Τεστ Νο. 6 και Νο. 14. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι αναπτυσσόμενες τροπές αυξάνουν καθώς αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο και η θέση των αισθητήρων οπτικών ινών παίζει σημαντικό ρόλο, ακόμη και για αισθητήρες τοποθετημένους στην ίδια στρώση οπλισμού, αλλά σε διαφορετική θέση όπως για παράδειγμα κοντά στην όψη ή κοντά στο μέσο του πρανούς. Παρατηρείται λοιπόν, ότι υψηλότερες τιμές των αναπτυσσόμενων τροπών προκύπτουν σε θέσεις κοντά στην κατώτερη στρώση Νο.4 του πρανούς, σε σχέση με την ανώτερη στρώση Νο.8, ενώ επίσης, στις περισσότερες των περιπτώσεων, μεγαλύτερες τιμές προκύπτουν κοντά στο μέσο του πρανούς, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές κοντά στην όψη αυτού.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι μετρήσεις που ελήφθησαν μέσω αισθητήρων οπτικών ινών αφορούν τροπή μετρούμενη κατά μήκος των οπλισμών (linear strain), ενώ οι υπολογισμοί που προέκυψαν κατά την ανάλυση με την μέθοδο GeoPIV, αφορούν διατμητική τροπή (shear strain). Έτσι, είναι προφανές, ότι με τα υπάρχοντα αποτελέσματα, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί απευθείας σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων μέσω οπτικών ινών και των υπολογισμών μέσω της ανάλυσης PIV. Ωστόσο μπορεί να πραγματοποιηθεί κάποιος συσχετισμός των θέσεων που τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες οπτικών ινών με τον μηχανισμό αστοχίας. Ειδικότερα παρατηρείται ότι ο μηχανισμός αστοχίας εντοπίζεται μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας, επιβεβαιώνοντας την επιτυχή λειτουργία των οπλισμών καθώς οδήγησαν την αστοχία μετά το πέρας αυτών. Από την άλλη πλευρά, οι αισθητήρες οπτικών ινών βρίσκονται στο εσωτερικό της οπλισμένης εδαφικής μάζας και δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την συμπεριφορά των μοντέλων στην περιοχή αυτή.

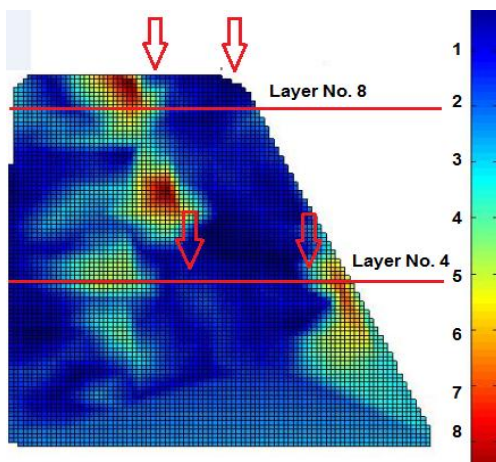
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9



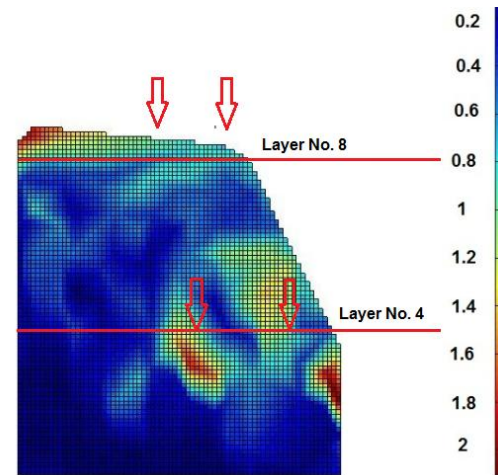
Σχήμα 9.23. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 5g (Τεστ No.6).
Figure 9.23. g-level equal to 5g, (Test No.6).



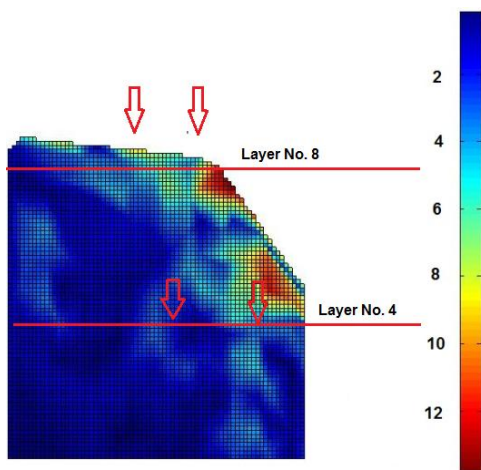
Σχήμα 9.24. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 25g (Τεστ No.6).
Figure 9.24. g-level equal to 25g, (Test No.6).



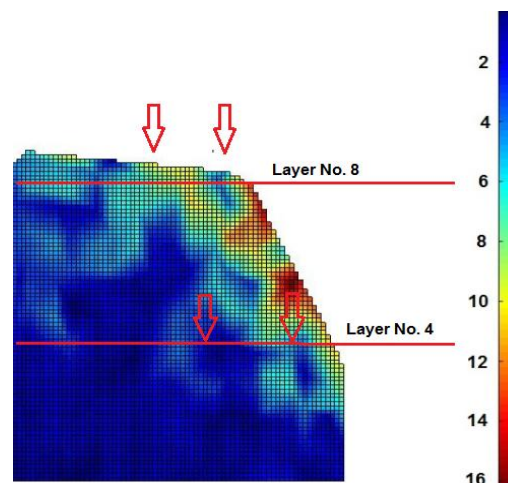
Σχήμα 9.25. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g (Τεστ No.6).
Figure 9.25. g-level equal to 50g, (Test No.6).



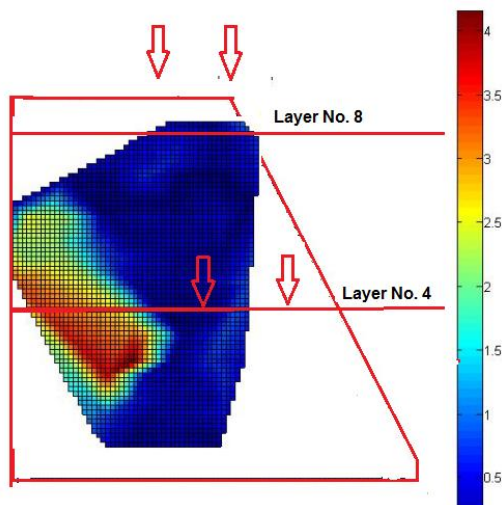
Σχήμα 9.26. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 10g (Τεστ No.14).
Figure 9.26. g-level equal to 10g, (Test No.14).



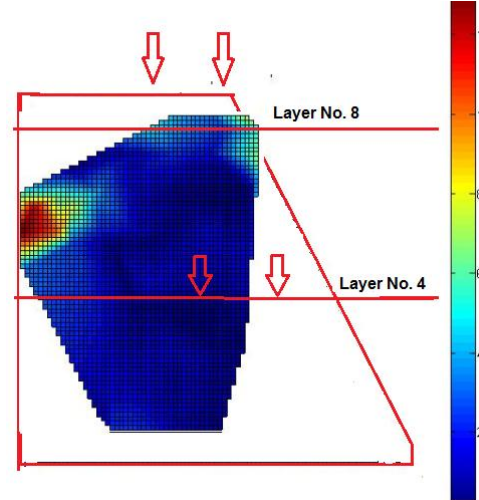
Σχήμα 9.27. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g (Τεστ No.14).
Figure 9.27. g-level equal to 50g, (Test No.14).



Σχήμα 9.28. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 100g (Τεστ No.14).
Figure 9.28. g-level equal to 100g, (Test No.14).



Σχήμα 9.29. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 10g (Τεστ No.9).
Figure 9.29. g-level equal to 10g, (Test No.9).



Σχήμα 9.30. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 100g (Τεστ No.9).
Figure 9.30. g-level equal to 100g, (Test No.9).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Πίνακας 9.2. Τιμές διατμητικών τροπών μέσω GeoPIV, σε αντίστοιχες θέσεις οπτικών ινών.
Table 9.2. Values of shear strains via GeoPIV, for correspondent location of optical fibre sensors.

Test No. 6	g-level	Correspondent Sensor Location			
		Layer No. 8		Layer No. 4	
		Middle	Edge	Middle	Edge
	5	1.2-2.0	1.1-2.1	0.7-1.0	1.5-2.3
	25	3.0-4.0	1.2-2.5	1.0-1.2	3.2-3.5
	50	5.0-5.2	5.5-6.0	4.0-4.2	5.0-6.5

Test No. 14	g-level	Correspondent Sensor Location			
		Layer No. 8		Layer No. 4	
		Middle	Edge	Middle	Edge
	10	1.0-1.2	1.0-1.1	1.8-2.0	1.4-1.6
	50	4.5-5.0	4.8-5.0	3.5-3.9	5.7-5.9
	100	6.8-7.0	6.0-6.2	5.0-5.3	9.0-9.5

Θα πρέπει ακόμη να τονισθεί, ότι ο προσδιορισμός των θέσεων των αισθητήρων οπτικών ινών καθώς και των τιμών των διατμητικών τροπών μέσω της μεθόδου GeoPIV πραγματοποιείται κατά προσέγγιση και οι τιμές αυτές δεν είναι απολύτως ακριβείς, όπως συμβαίνει με την περίπτωση των αντίστοιχων μετρήσεων μέσω αισθητήρων οπτικών ινών, όπου υπάρχουν καθαρές καταγραφές. Επίσης, στις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.2 για διαφορετικά πειράματα και για την ίδια στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας, μπορεί να παρατηρηθεί ότι δεν συγκλίνουν απόλυτα για όλες τις περιπτώσεις. Η χρήση λοιπόν του GeoPIV στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας παρέχει πληροφορίες κυρίως για τους αναπτυσσόμενους μηχανισμούς αστοχίας του πρανούς κατά τις διάφορες φάσεις φορτίσεων.

9.4 Αναγωγή πειραματικών μοντέλων σε μοντέλα υπό κλίμακα 1:1 και υπολογιστική διερεύνηση.

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται αναγωγή των πειραματικών μοντέλων σε αντίστοιχα μοντέλα πρωτότυπων κατασκευών σύμφωνα με τις κλίμακες που παρουσιάστηκαν στο 7^ο Κεφάλαιο. Στους Πίνακες 9.3 έως και 9.6 που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλων για τα υλικά όπλισης που χρησιμοποιήθηκαν και για διάφορες τιμές του n . Για την αναγωγή των πειραματικών μοντέλων σε αντίστοιχα μοντέλα πρωτότυπων κατασκευών, επιλέγονται οι

τιμές του n 50 και 100. Επιλέγονται τελικά δύο μοντέλα οπλισμένων πρανών ως προς την γεωμετρική κλίμακα, οπλισμένα, διαδοχικά, με τέσσερα διαφορετικά υλικά, των οποίων τα συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.7.

Πίνακας 9.3. Χαρακτηριστικά μοντέλων με ‘Γεώπλεγμα’ για διάφορες τιμές του n.
Table 9.3. Characteristics of models with ‘Geogrid’ for various n values.

n	Slope Height (m)	Slope Width (m)	Reinf. Length (m)	Tensile Strength (kN/m)	Reinf. Width (m)
1	0.18	0.40	0.11-0.19	9.3	0.40
10	1.80	4.00	1.10-1.90	93	4.00
20	3.60	8.00	2.20-3.80	186	8.00
30	5.40	12.00	3.30-5.70	279	12.00
40	7.20	16.00	4.40-7.60	372	16.00
50	9.00	20.00	5.50-9.50	465	20.00
60	10.80	24.00	6.60-11.40	558	24.00
70	12.60	28.00	7.70-13.30	651	28.00
80	14.40	32.00	8.80-15.20	744	32.00
90	16.20	36.00	9.90-17.10	837	36.00
100	18.00	40.00	11.00-19.00	930	40.00

Πίνακας 9.4. Χαρακτηριστικά μοντέλων με ‘Κουρτίνα Α’ για διάφορες τιμές του n.
Table 9.4. Characteristics of models with ‘Curtain A’ for various n values.

n	Slope Height (m)	Slope Width (m)	Reinf. Length (m)	Tensile Strength (kN/m)	Reinf. Width (m)
1	0.18	0.40	0.11-0.19	5.9	0.40
10	1.80	4.00	1.10-1.90	59	4.00
20	3.60	8.00	2.20-3.80	118	8.00
30	5.40	12.00	3.30-5.70	177	12.00
40	7.20	16.00	4.40-7.60	236	16.00
50	9.00	20.00	5.50-9.50	295	20.00
60	10.80	24.00	6.60-11.40	354	24.00
70	12.60	28.00	7.70-13.30	413	28.00
80	14.40	32.00	8.80-15.20	472	32.00
90	16.20	36.00	9.90-17.10	531	36.00

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

100 18.00 40.00 11.00-19.00 590 40.00

Πίνακας 9.5. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλων με ‘Επίδεσμο’ για διάφορες τιμές του n.
Table 9.5. Geometrical characteristics of models with ‘Bandage’ for various n values.

n	Slope Height (m)	Slope Width (m)	Reinf. Length (m)	Tensile Strength (kN/m)	Reinf. Width (m)
1	0.18	0.40	0.11-0.19	6.7	0.40
10	1.80	4.00	1.10-1.90	67	4.00
20	3.60	8.00	2.20-3.80	134	8.00
30	5.40	12.00	3.30-5.70	201	12.00
40	7.20	16.00	4.40-7.60	268	16.00
50	9.00	20.00	5.50-9.50	335	20.00
60	10.80	24.00	6.60-11.40	402	24.00
70	12.60	28.00	7.70-13.30	469	28.00
80	14.40	32.00	8.80-15.20	536	32.00
90	16.20	36.00	9.90-17.10	603	36.00
100	18.00	40.00	11.00-19.00	670	40.00

Πίνακας 9.6. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλων με ‘Κουρτίνα Β’ για διάφορες τιμές του n.
Table 9.6. Geometrical characteristics of models with ‘Curtain B’ for various n values.

n	Slope Height (m)	Slope Width (m)	Reinf. Length (m)	Tensile Strength (kN/m)	Reinf. Width (m)
1	0.18	0.40	0.11-0.19	2.5	0.40
10	1.80	4.00	1.10-1.90	25	4.00
20	3.60	8.00	2.20-3.80	50	8.00
30	5.40	12.00	3.30-5.70	75	12.00
40	7.20	16.00	4.40-7.60	100	16.00
50	9.00	20.00	5.50-9.50	125	20.00
60	10.80	24.00	6.60-11.40	150	24.00
70	12.60	28.00	7.70-13.30	175	28.00
80	14.40	32.00	8.80-15.20	200	32.00
90	16.20	36.00	9.90-17.10	225	36.00
100	18.00	40.00	11.00-19.00	250	40.00

Πίνακας 9.7. Τελική επιλογή μοντέλων οπλισμένων πρανών για υπολογιστική διερεύνηση.
Table 9.7. Final selection of reinforced slope models for numerical investigation.

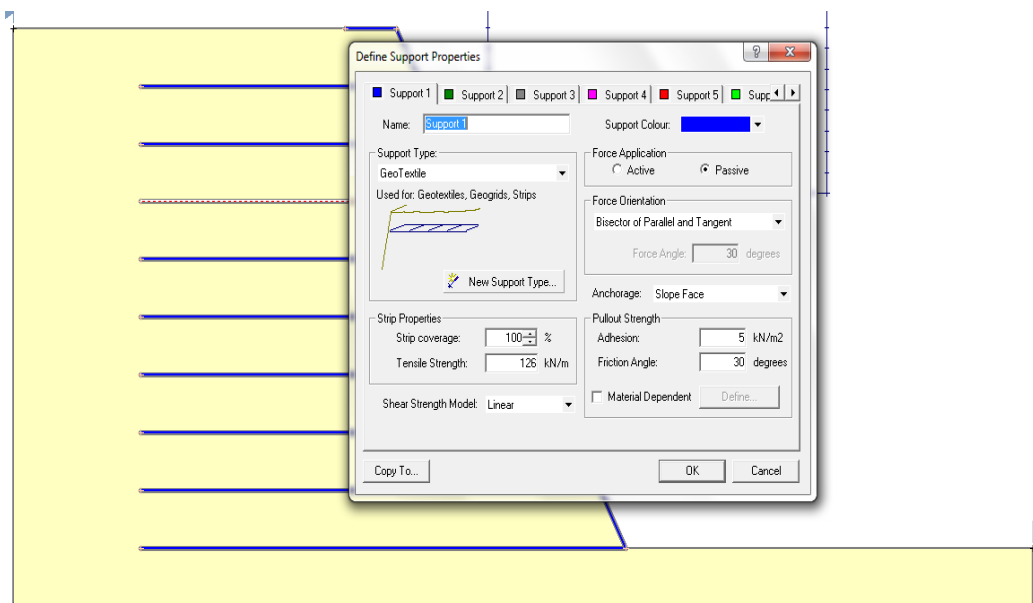
Material	n	Slope	Slope	Reinforcement	Tensile	Reinforcement
		Height (m)	Width (m)	Length (m)	Strength (kN/m)	Width (m)
Geogrid	50	9	20	5.50-9.50	465	20
	100	18	40	11.00-19.00	930	40
Curtain A	50	9	20	5.50-9.50	295	20
	100	18	40	11.00-19.00	590	40
Bandage	50	9	20	5.50-9.50	335	20
	100	18	40	11.00-19.00	670	40
Curtain B	50	9	20	5.50-9.50	125	20
	100	18	40	11.00-19.00	250	40

9.4.1 Υπολογιστικά μοντέλα οπλισμένων πρανών- ανάλυση με το Slide.

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα υπολογιστικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν σύμφωνα με τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά που περιγράφονται στον Πίνακα 9.7, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Slide της Rocscience. Ειδικότερα, κατασκευάστηκαν 8 διαφορετικά μοντέλα με τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 9.7 και αναλύθηκαν σύμφωνα με τις μεθόδους Bishop και Janbu.

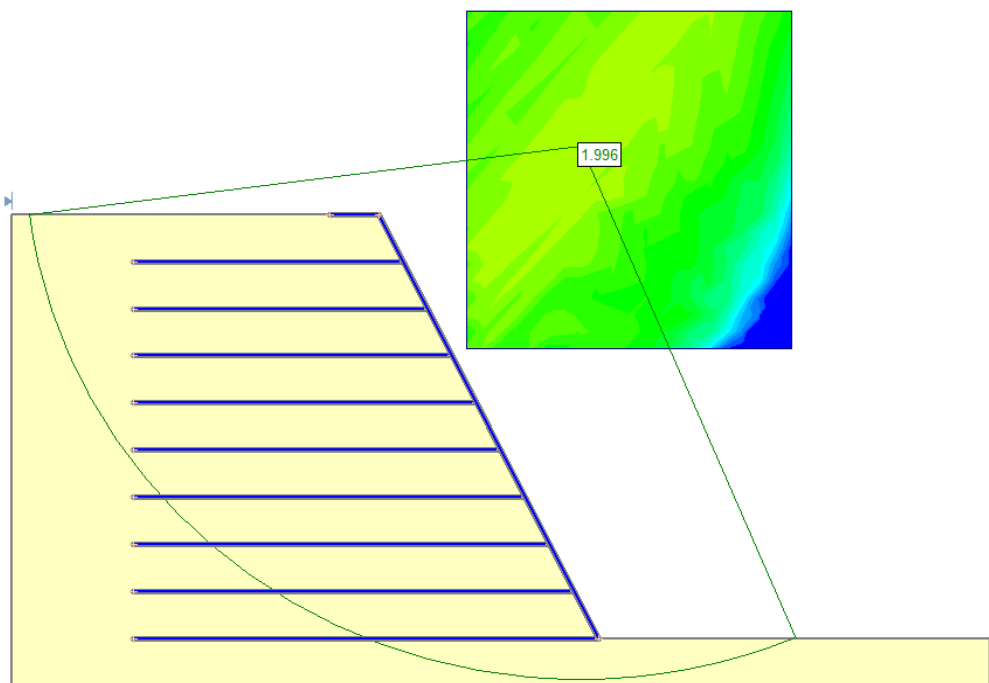
Η επιλογή της γεωμετρίας του υπολογιστικού μοντέλου έγινε αρχικά με βασικό στόχο την όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση του αντίστοιχου πειραματικού μοντέλου που φορτίστηκε στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETHZ. Έτσι, τα όρια στην αριστερή (εσωτερική) πλευρά του μοντέλου βρίσκονταν σκοπίμως κοντά στην οπλισμένη εδαφική μάζα, προκειμένου να εκφράσουν την πραγματική κατάσταση του πειραματικού μοντέλου, όπως φαίνεται στα Σχήματα 9.31 έως και 9.33 που ακολουθούν. Στο Σχήμα 9.31 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα μοντέλο οπλισμένου πρανού, κατασκευασμένο από το υλικό όπλισης «Κουρτίνα Β», για συντελεστή κλίμακας $n=50$, ενώ στα Σχήματα 9.32 και 9.33 τα αποτελέσματα που προέκυψαν σύμφωνα με την μέθοδο λωρίδων Bishop για $n=50$ και 100.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

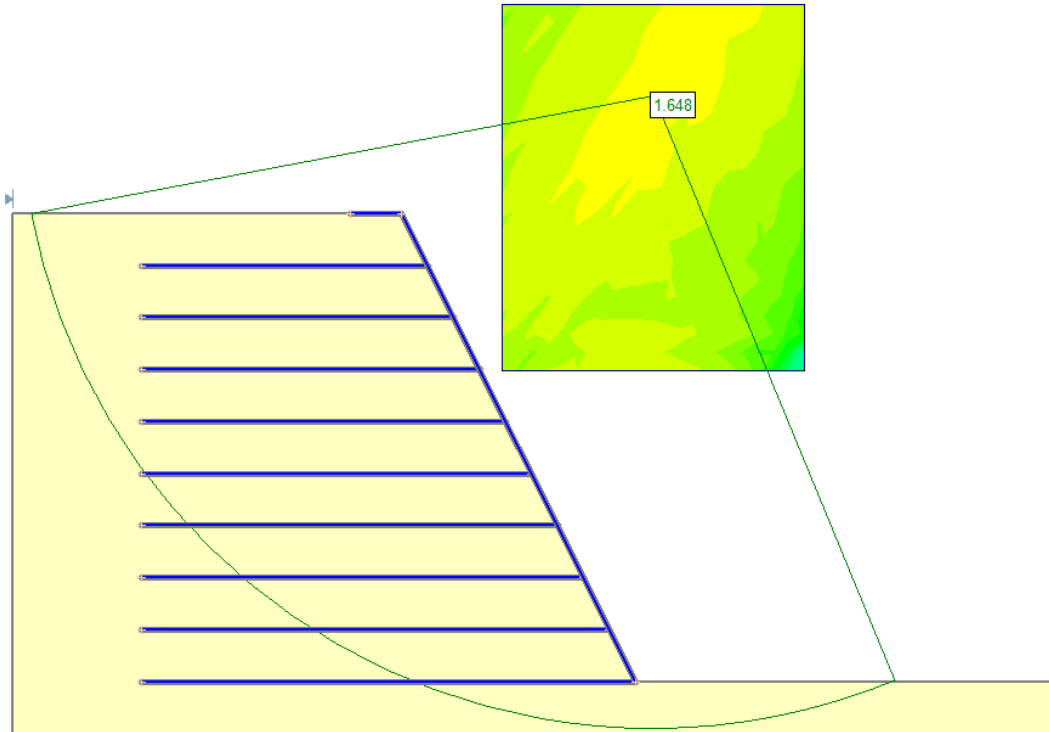


Σχήμα 9.31. Μοντέλο οπλισμένου πρανούς και μηχανικά χαρακτηριστικά για υλικό όπλισης «Κουρτίνα Β».

Σχήμα 9.31. Reinforced slope model and mechanical characteristics for reinforcement material “Curtain B”.



Σχήμα 9.32. Αποτελέσματα σύμφωνα με την μέθοδο λωρίδων Bishop για $n=50$.
Figure 9.32. Results according to the method of lanes Bishop for $n=50$.



Σχήμα 9.33. Αποτελέσματα σύμφωνα με την μέθοδο λωρίδων Bishop για $n=100$.
Figure 9.33. Results according to the method of lanes Bishop for $n=100$.

➤ **Διερεύνηση της επιρροής του συνόρου κατά την εφαρμογή των μεθόδων Bishop και Janbu:**

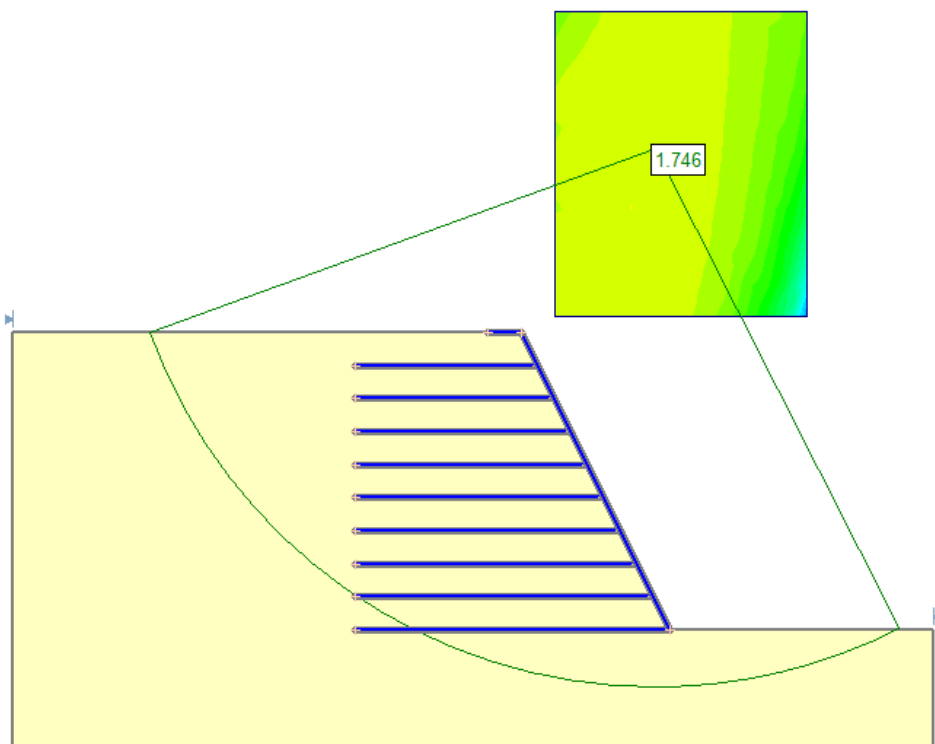
Σε πολλές από τις περιπτώσεις των μοντέλων που μελετήθηκαν με τις μεθόδους Bishop και Janbu, προέκυψαν αποτελέσματα μη ικανοποιητικά λόγω του περιορισμένου ορίου μετά το τέλος της σπλισμένης εδαφικής μάζας (επιρροή συνόρων). Ειδικότερα, παρατηρήθηκε ότι ο κρίσιμος μηχανισμός αστοχίας δεν ήταν αποδεκτός και έτσι δημιουργήθηκαν νέα μοντέλα με αυξημένα όρια μετά το πέρας της σπλισμένης εδαφικής μάζας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 9.34. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κρίθηκαν ικανοποιητικά και οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.8.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας που προέκυψαν κατά την ανάλυση των μοντέλων με εκτεταμένα όρια, είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές των μοντέλων που προσομοίωναν με ακρίβεια την γεωμετρία των πειραματικών μοντέλων. Επίσης, όλοι σχεδόν οι μηχανισμοί αστοχίας που προέκυψαν κατά την ανάλυση με εκτεταμένα όρια, βρισκόνταν μετά το πέρας της σπλισμένης εδαφικής μάζας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

με αποτέλεσμα οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας να είναι παρόμοιες για μοντέλα ίδιου ύψους. Υπενθυμίζεται ότι επιλέχθηκαν κοινά χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού και διαφορετικοί οπλισμοί, οι οποίοι όμως δεν έπαιζαν σημαντικό ρόλο, λόγω εντοπισμού του κρίσιμου μηχανισμού μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας. Επίσης, το γεγονός ότι οι μηχανισμοί αστοχίας εντοπίστηκαν μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας, δείχνει την επιτυχή ενίσχυση-όπλιση των πρανών για τα πειραματικά και υπολογιστικά μοντέλα.

Ειδικότερα, μπορεί να παρατηρηθεί στον Πίνακα 9.8, ότι οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας είναι μεγαλύτεροι της μονάδας για όλα τα υπολογιστικά μοντέλα, ενώ οι τιμές μειώνονται καθώς αυξάνει ο συντελεστής κλίμακας n και επομένως και το ύψος του πρανού. Επίσης παρατηρείται ότι η μέθοδος Janbu δίνει δυσμενέστερα αποτελέσματα από την μέθοδο Bishop.



Σχήμα 9.34. Μοντέλο οπλισμένου πρανού με εκτεταμένα όρια και μηχανικά χαρακτηριστικά για υλικό όπλισης «Κουρτίνα Β».

Σχήμα 9.34. Reinforced slope model with expanded boundaries and mechanical characteristics for reinforcement material “Curtain B”.

Πίνακας 9.8. Αποτελέσματα υπολογισμού Συντελεστή Ασφαλείας πειραματικών μοντέλων για διάφορα υλικά οπλισμού και εκτεταμένα όρια

Table 9.8. Results of calculation of Safety Factor of experimental models for various reinforcement materials and expanded boundaries.

Material	n	Slope Height (m)	Tensile Strength of Reinforcement (kN/m)	FS	
				Bishop	Janbu
Geogrid	50	9	467	1.75	1.48
	100	18	930	1.74	1.48
Curtain A	50	9	295	1.77	1.49
	100	18	591	1.74	1.49
Bandage	50	9	335	1.78	1.49
	100	18	671	1.48	1.35
Curtain B	50	9	126	1.75	1.49
	100	18	253	1.62	1.45

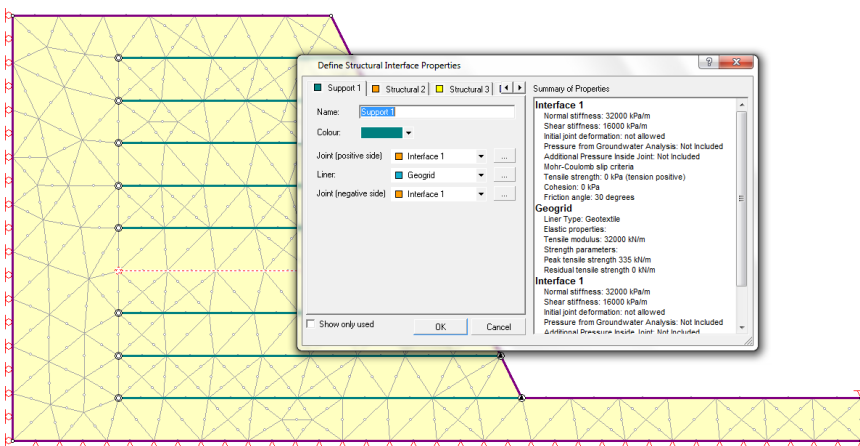
9.4.2 Υπολογιστικά μοντέλα οπλισμένων πρανών με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Phase²).

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα υπολογιστικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν σύμφωνα με τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά που περιγράφονται στον Πίνακα 9.6, καθώς και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και το λογισμικό Phase² της Rocscience.

Συγκεκριμένα, έχουν επιλεγεί προς ανάλυση 4 διαφορετικά μοντέλα με τα 2 διαφορετικά υλικά όπλισης «Επίδεσμος» και «Κουρτίνα Β», για συντελεστή $n=50$ και 100 , δηλαδή για ύψος 9 m και 18 m αντίστοιχα. Στα Σχήματα 9.35 και 9.36 που ακολουθούν παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα μοντέλο οπλισμένου πρανού κατασκευασμένο από το υλικό όπλισης «Επίδεσμος», καθώς και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και του οπλισμού για συντελεστή κλίμακας $n=50$.

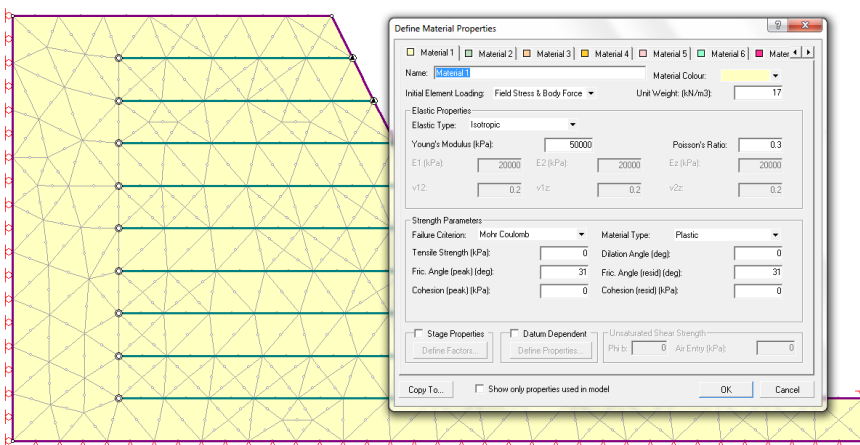
Και στην περίπτωση αυτή μελετώνται αρχικά μοντέλα με όρια αντίστοιχα με αυτά των πειραματικών μοντέλων και στην συνέχεια διερευνάται η επιρροή του ορίου σε αυτά. Επίσης, στόχος είναι να συγκριθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ανάλυσης με τις μεθόδους Bishop και Janbu, καθώς και με τα αντίστοιχα πειραματικά και αναλυτικά μοντέλα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9



Σχήμα 9.35. Παράδειγμα μοντέλου οπλισμένου πρανούς και μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και του οπλισμού για $n=50$.

Figure 9.35. Example of reinforced slope model and mechanical characteristics of soil and reinforcement for $n=50$.



Σχήμα 9.36. Παράδειγμα μοντέλου οπλισμένου πρανούς και μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και του οπλισμού για $n=50$.

Figure 9.36. Example of reinforced slope model and mechanical characteristics of soil and reinforcement for $n=50$.

➤ Μέθοδος Μείωσης της Αντοχής (Strength Reduction Method) και υπολογισμός Συντελεστή Μείωσης Αντοχής (Strength Reduction Factor-SRF):

Στην συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με την χρήση του λογισμικού Phase², όπου και εφαρμόζεται η Μέθοδος Μείωσης της Αντοχής (Strength Reduction Method) και υπολογίζεται ο Συντελεστής Μείωσης της Αντοχής (Strength Reduction Factor-SRF). Ο συντελεστής SRF, είναι αντίστοιχος του Συντελεστή Ασφαλείας (SF) και εκφράζει το πόσο επιπλέον αντοχή διαθέτει η κατασκευή. Έτσι, για

παράδειγμα για συντελεστή SRF ίσο με 1.5, προκύπτει ότι υπάρχει πλεόνασμα 50% της αντοχής ενώ για SRF ίσο με 1, η αντοχή επαρκεί οριακά.

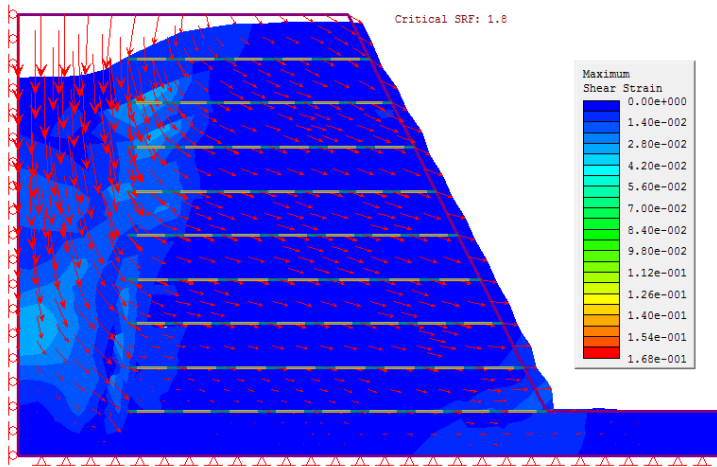
Στον Πίνακα 9.9 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές του SRF για τα 2 υλικά «Επίδεσμος» και «Κουρτίνα Β», για συντελεστή $n=50$ και 100. Για την ανάλυση αυτή δημιουργήθηκαν μοντέλα με γεωμετρία όμοια με αυτή των αντίστοιχων πειραματικών μοντέλων, δηλαδή με μικρή απόσταση του ορίου αυτών από την οπλισμένη εδαφική μάζα. Ακολούθως μελετάται η επιρροή του συνόρου μετά το τέλος της οπλισμένης εδαφικής μάζας και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από την διερεύνηση με τις μεθόδους Bishop και Janbu.

Στα Σχήματα 9.37 και 9.38, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν ύστερα από ανάλυση των μοντέλων με υλικό όπλισης αντίστοιχο με αυτό του «Επίδεσμου» και στα Σχήματα 9.39 και 9.40 για υλικό όπλισης αντίστοιχο με αυτό της «Κουρτίνας Β». Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, για το ασθενέστερο υλικό «Κουρτίνα Β» οι τιμές του SRF είναι μικρότερες. Στα Σχήματα αυτά, παρουσιάζονται οι διατμητικές τροπές που προκύπτουν για φορτίσεις ιδίου βάρους καθώς και ο αντίστοιχος μηχανισμός αστοχίας. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι τιμές των αναπτυσσόμενων διατμητικών τροπών ποικίλουν για διάφορα μοντέλα και ότι η χρωματική κλίμακα έχει επιλεγεί να είναι η ίδια, για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι για το ισχυρότερο υλικό «Επίδεσμος» οι τροπές είναι μικρότερες σε σχέση με το ασθενέστερο υλικό «Κουρτίνα Β», για τον ίδιο συντελεστή μοντελοποίησης n , ενώ για μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή μοντελοποίησης n , οι τροπές αυξάνουν.

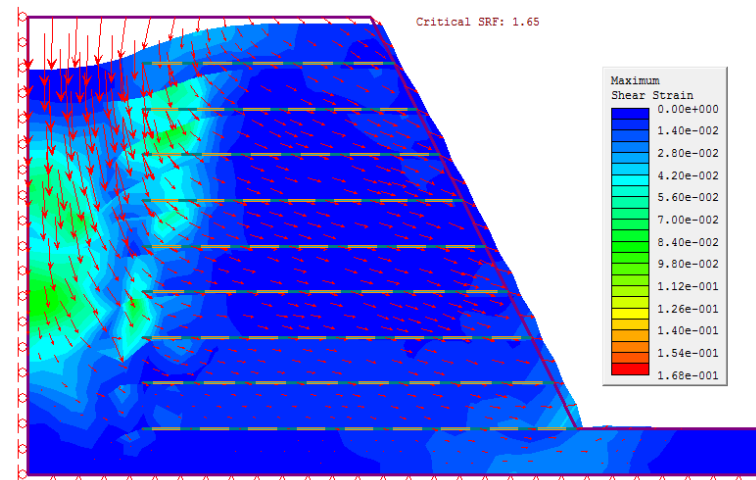
Πίνακας 9.9. Συντελεστής Μείωσης Αντοχής για διάφορα μοντέλα.
Table 9.9. Strength Reduction Factor for various models.

Material Type	n	Slope Height (m)	SRF
Bandage	50	9	1.80
Bandage	100	18	1.65
Curtain B	50	9	1.70
Curtain B	100	18	1.40

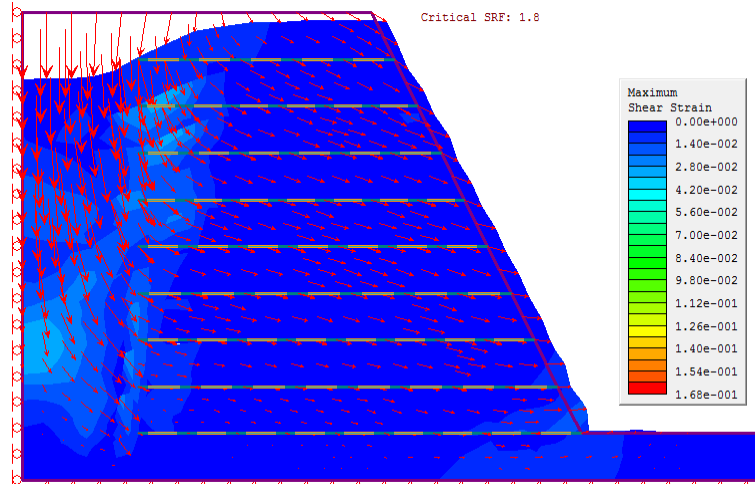
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9



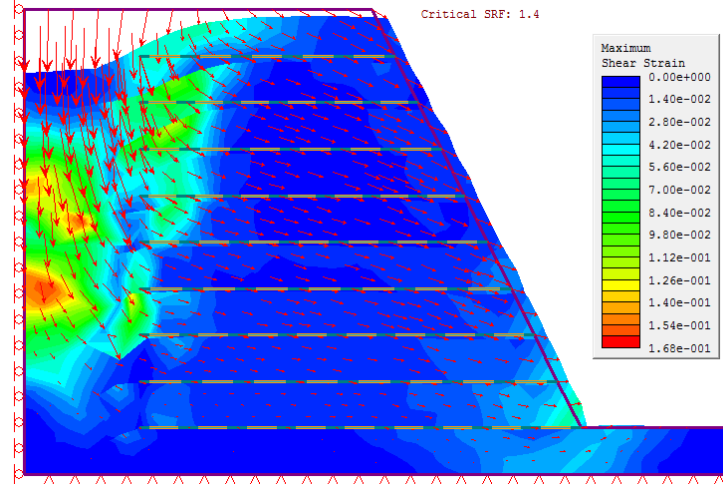
Σχήμα 9.37. Διατμητικές τροπές για n=50 και υλικό «Επίδεσμος».
Figure 9.37. Shear strain for n=50 and material “Bandage”.



Σχήμα 9.38. Διατμητικές τροπές για n=100 και υλικό «Επίδεσμος».
Figure 9.38. Shear strain for n=100 and material “Bandage”.



Σχήμα 9.39. Διατμητικές τροπές για n=50 και υλικό «Κουρτίνα Β».
Figure 9.39. Shear strain for n=50 and material “Curtain B”.



Σχήμα 9.40. Διατμητικές τροπές για n=100 και υλικό «Κουρτίνα Β».
Figure 9.40. Shear strain for n=100 and material “Curtain B”.

➤ *Διερεύνηση της επιρροής του συνόρου κατά την εφαρμογή της μεθόδου Μείωσης της Αντοχής.*

Στην συνέχεια δημιουργούνται και αναλύονται υπολογιστικά μοντέλα με αυξημένα όρια μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας, παράδειγμα του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 9.41. Και σε αυτή την περίπτωση αναλύονται 4 υπολογιστικά μοντέλα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ειδικότερα υπολογίζονται οι τιμές των συντελεστών μείωσης της αντοχής, SRF και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές των αρχικών μοντέλων.. Στον Πίνακα 9.10 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας όπως προέκυψαν κατά την ανάλυση με επεκταμένα όρια μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας, έχουν ελαφρώς αυξημένες τιμές του συντελεστή SRF, όπως φαίνεται στον Πίνακα 9.10. Στον Πίνακα αυτό παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή Ασφαλείας όπως προέκυψαν κατά την ανάλυση με τις μεθόδους Bishop και Janbu.

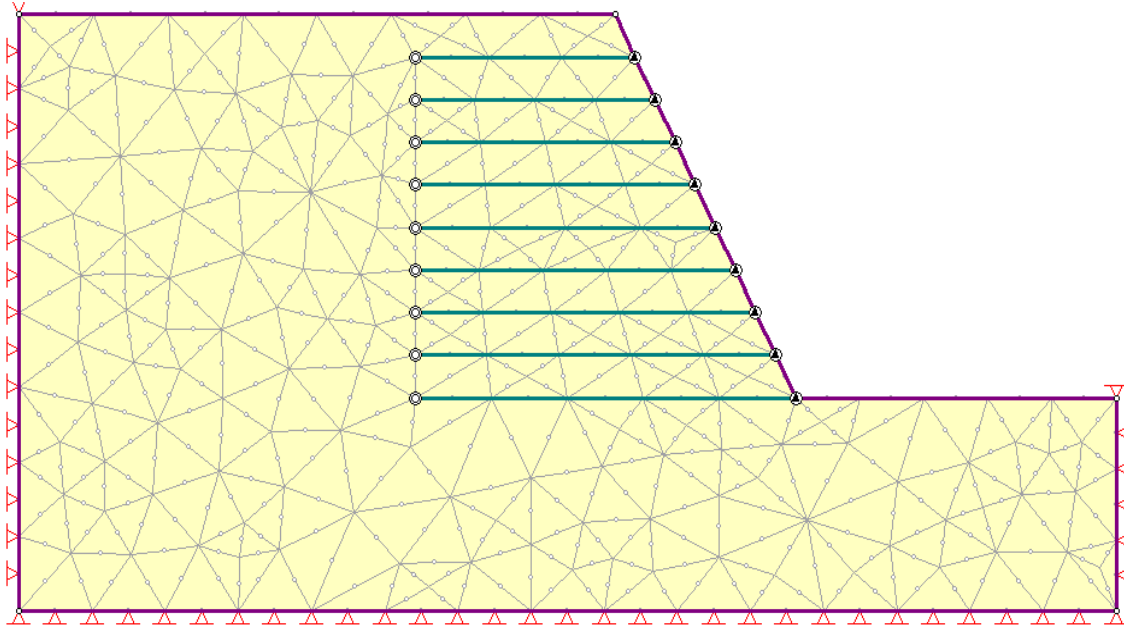
Στα Σχήματα 9.42 έως και 9.45 παρουσιάζονται οι τιμές των αναπτυσσόμενων τροπών για τα μοντέλα με εκτεταμένα όρια όπως περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους της παρούσας ενότητας. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι μηχανισμοί αστοχίας εντοπίζονται μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας ενώ οι τιμές των αναπτυσσόμενων τροπών είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των μοντέλων που αναλύθηκαν με περιορισμένα όρια.

Πίνακας 9.10. Σύγκριση Συντελεστή Ασφαλείας για μοντέλα με εκτεταμένα όρια με Συντελεστή Μείωσης Αντοχής για περιορισμένα και εκτεταμένα όρια.

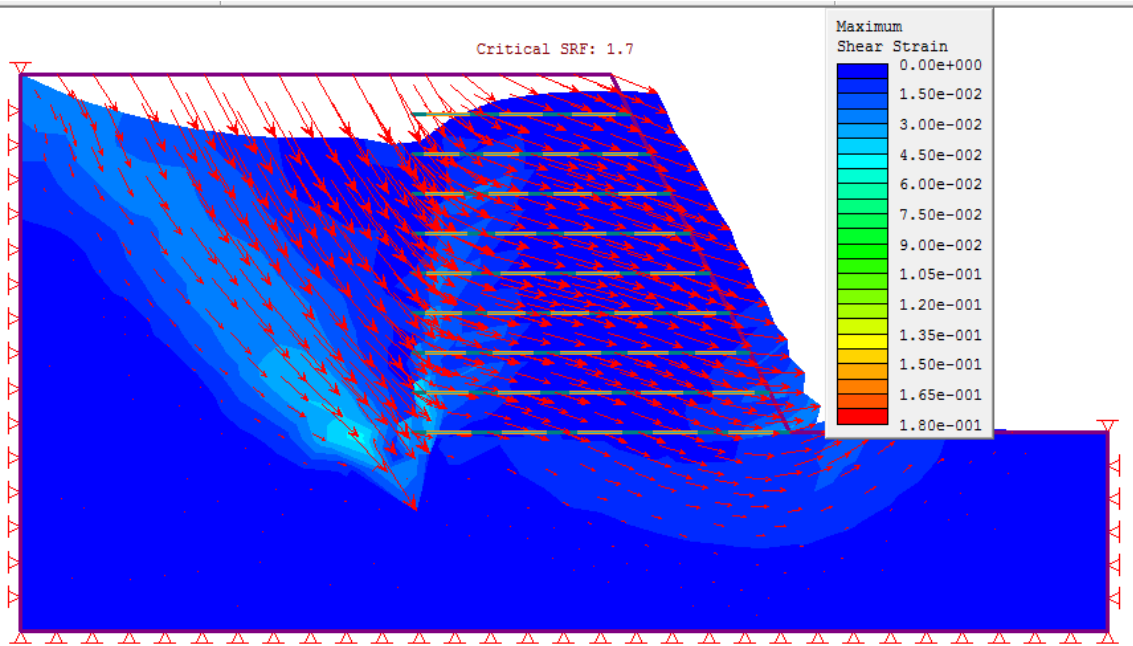
Table 9.10. Comparison of Safety Factor for models with expanded limits to Strength Reduction Factors for limited and expanded boundaries.

Material	n	Tensile Strength of Reinforcement (kN/m)	FS (Exp. Boundaries)		SRF	
			Bishop	Janbu	Expanded Boundaries	Limited Boundaries
Bandage	50	335	1.78	1.49	1.70	1.80
	100	671	1.48	1.35	1.48	1.65
Curtain B	50	126	1.75	1.49	1.50	1.70
	100	253	1.62	1.45	1.48	1.40

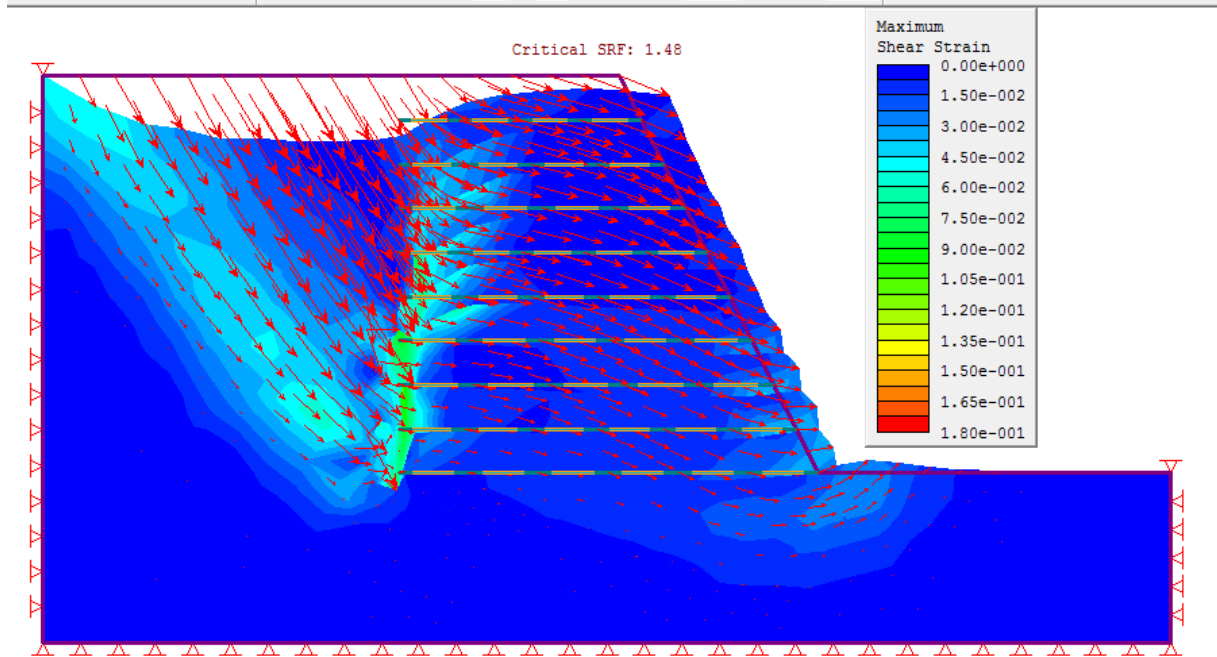
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9



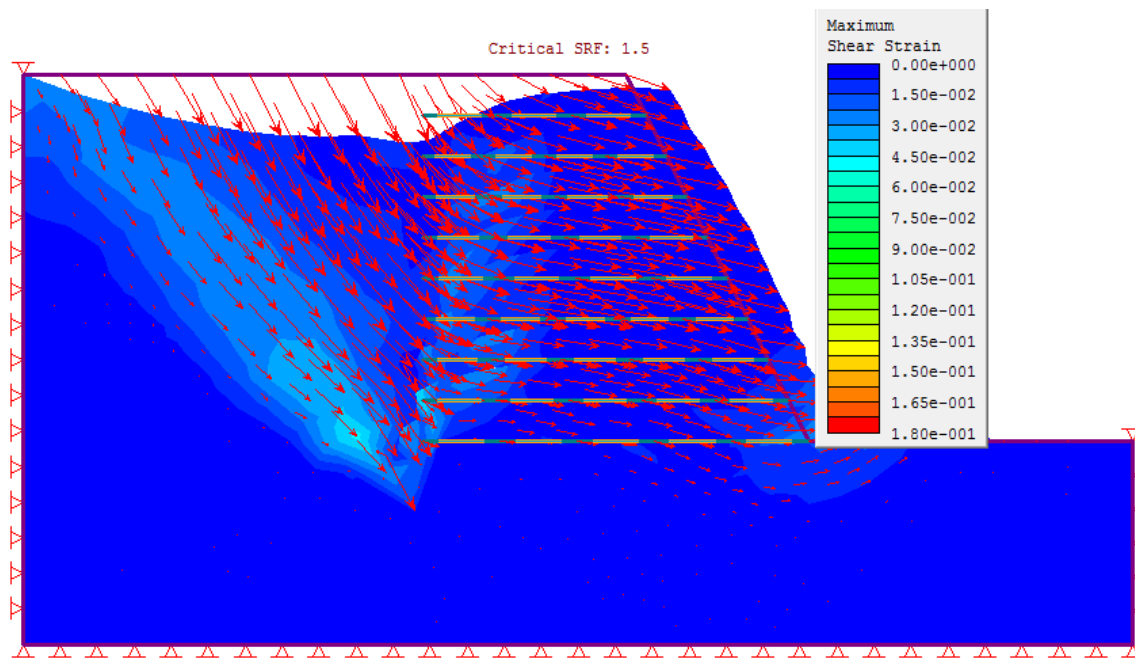
Σχήμα 9.41. Παράδειγμα μοντέλου οπλισμένου πρανούς και μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και του οπλισμού για $n=50$.
Figure 9.41. Example of reinforced slope model and mechanical characteristics of soil and reinforcement for $n=50$.



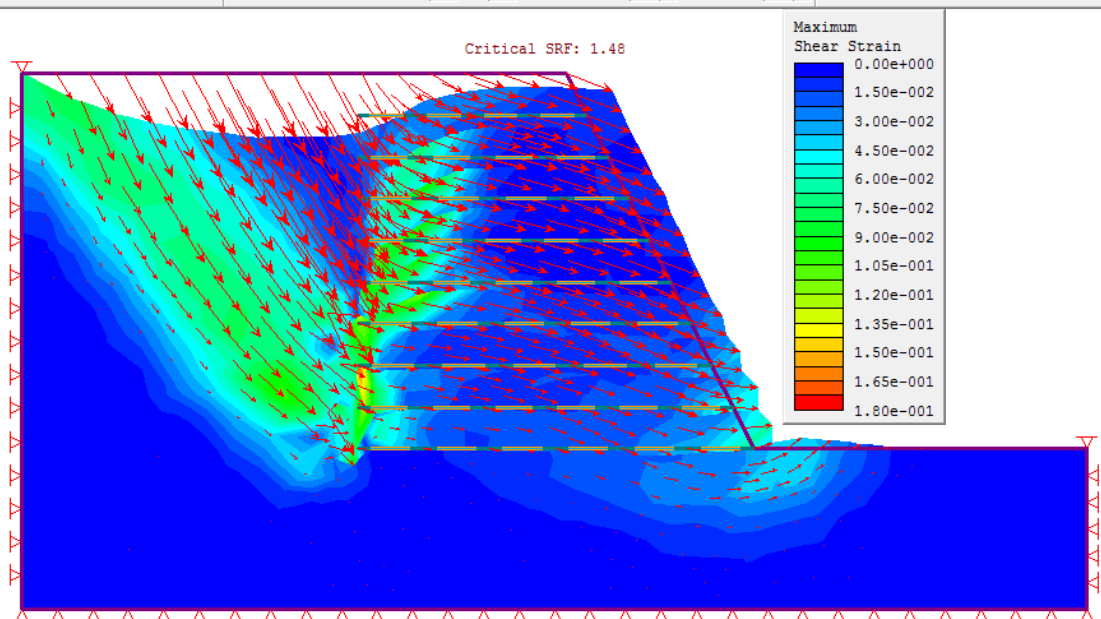
Σχήμα 9.42. Διατμητικές τροπές για $n=50$ και υλικό «Επίδεσμος» με εκτεταμένα όρια.
Figure 9.42. Shear strain for $n=50$ and material “Bandage” and expanded boundaries.



Σχήμα 9.43. Διατμητικές τροπές για n=100 και υλικό «Επίδεσμος» με εκτεταμένα όρια.
 Figure 9.43. Shear strain for n=100 and material “Bandage” and expanded boundaries.



Σχήμα 9.44. Διατμητικές τροπές για n=50 και υλικό «Κουρτίνα Β» με εκτεταμένα όρια.
 Figure 9.44. Shear strain for n=50 and material “Curtain B” and expanded boundaries.



Σχήμα 9.45. Διατμητικές τροπές για n=100 και υλικό «Κουρτίνα Β» με εκτεταμένα όρια.
 Figure 9.45. Shear strain for n=100 and material “Curtain B” and expanded boundaries.

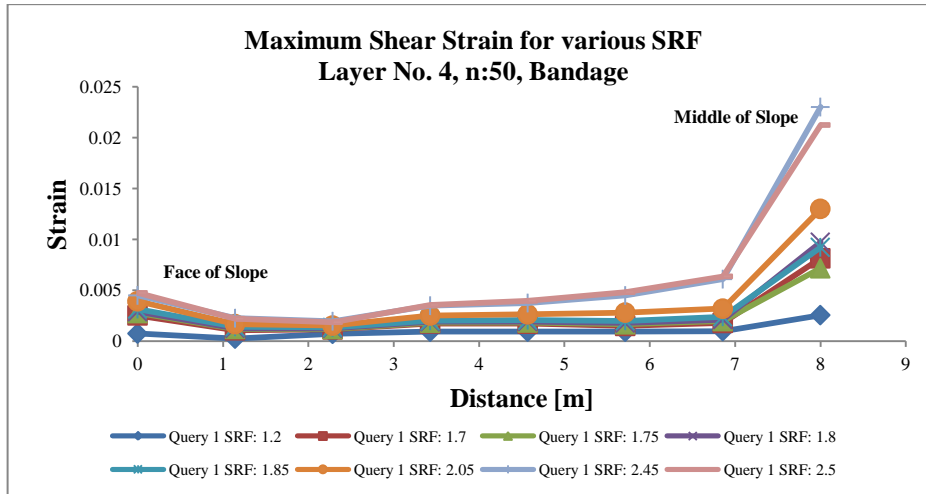
Για περαιτέρω διερεύνηση των υπολογιστικών μοντέλων επιλέγονται τα υπολογιστικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν με περιορισμένα όρια καθώς αντιπροσωπεύουν καλύτερα την συμπεριφορά των πειραματικών μοντέλων.

➤ **Μέγιστες τιμές διατμητικών τροπών για διάφορες τιμές του Συντελεστή Μείωσης της Αντοχής SRF:**

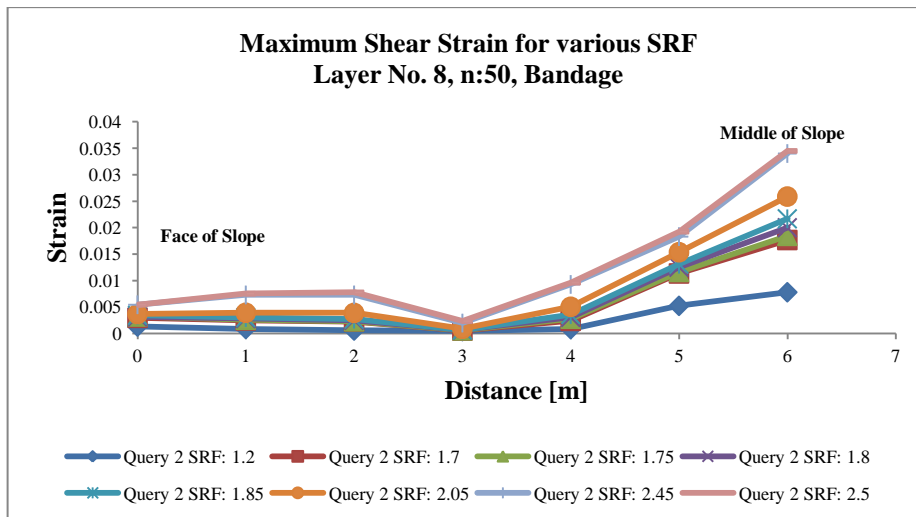
Ακολούθως παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των διατμητικών τροπών για διάφορες τιμές του Συντελεστή SRF, σε ορισμένες από τις στρώσεις οπλισμού για το μοντέλο που κατασκευάστηκε με το υλικό όπλισης «Επίδεσμος». Συγκεκριμένα επιλέγονται οι στρώσεις οπλισμού No. 8 και 4 οι οποίες βρίσκονται κοντά στην στέψη και κοντά στο μέσο του πρανούς. Οι στρώσεις αυτές έχουν επιλεγεί αφενός μεν προκειμένου να διερευνηθεί η ανώτερη και κατώτερη κατάσταση του πρανούς, αφετέρου δε προκειμένου στην συνέχεια να πραγματοποιηθεί σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών στις αντίστοιχες θέσεις.

Στα Σχήματα 9.46 και 9.47 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των διατμητικών τροπών στις στρώσεις οπλισμού που έχουν επιλεγεί για περαιτέρω διερεύνηση, για διάφορες τιμές του

Συντελεστή SRF για το υλικό «Επίδεσμος» και συντελεστή κλίμακας $n=50$, δηλαδή για πρανές ύψους 9 m. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, καθώς επιλέγεται μεγαλύτερη τιμή του Συντελεστή SRF, οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τροπές είναι μεγαλύτερες, ενώ για SRF κοντά στην μονάδα οι τιμές μειώνονται και αντιπροσωπεύουν την πραγματική κατάσταση. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και για μοντέλα κατασκευασμένα από το υλικό όπλισης «Κουρτίνα Β»



Σχήμα 9.46. Διατμητικές τροπές για διάφορα SRF (Στρώση Νο. 4).
Figure 9.46. Shear strain for various SRF (Layer No. 4).

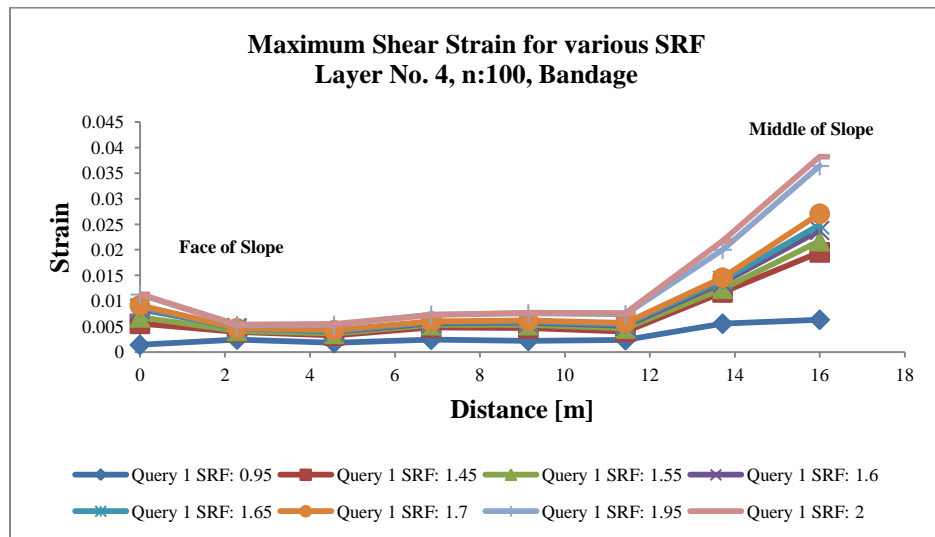


Σχήμα 9.47. Διατμητικές τροπές για διάφορα SRF (Στρώση Νο. 8).
Figure 9.47. Shear strain for various SRF (Layer No. 8).

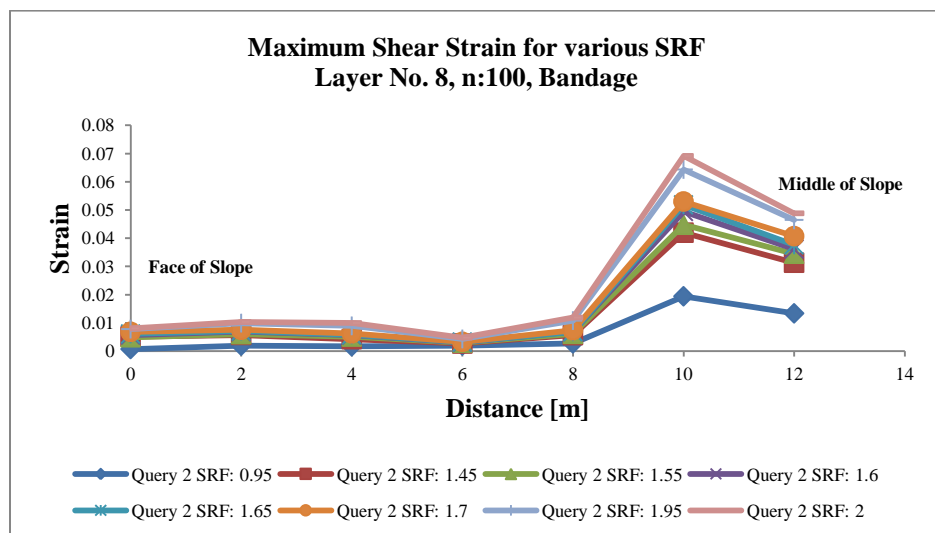
Επίσης, στα Σχήματα 9.48 και 9.49, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για συντελεστή κλίμακας $n=100$, δηλαδή για πρανές ύψους 18 m. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί,

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

και σε αυτή την περίπτωση για μεγαλύτερες τιμές του SRF οι διατμητικές τροπές είναι μεγαλύτερες, ενώ καθώς πλησιάζουμε προς την πραγματική κατάσταση, για SRF δηλαδή ίσο με την μονάδα, οι τιμές μειώνονται.



Σχήμα 9.48. Διατμητικές τροπές για διάφορα SRF (Στρώση No. 4).
Figure 9.48. Shear strain for various SRF (Layer No. 4).



Σχήμα 9.49. Διατμητικές τροπές για διάφορα SRF (Στρώση No. 8).
Figure 9.49. Shear strain for various SRF (Layer No. 8).

➤ *Υπολογισμός διατμητικών τροπών μοντέλων για $SRF=1$.*

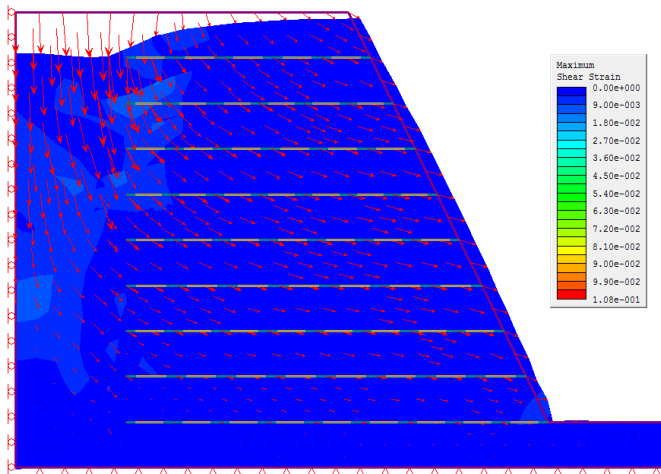
Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τροπές για φορτίσεις ιδίου βάρους δηλαδή για $SRF=1$. Ειδικότερα, επιλέγονται τα 4 μοντέλα που δημιουργήθηκαν και αναλύθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα και στα Σχήματα 9.50 και 9.51 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για μοντέλα κατασκευασμένα με το υλικό όπλισης «Επίδεσμος», για $n=50$ και 100 αντίστοιχα, ενώ στα Σχήματα 9.52 και 9.53 για το υλικό όπλισης «Κουρτίνα Β».

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, μοντέλα από το ίδιο υλικό παρουσιάζονται μεγαλύτερες τιμές τροπών για $n=100$, έναντι $n=50$, όπως ήταν αναμενόμενο. Ομοίως και για τα μοντέλα με το ασθενέστερο υλικό («Κουρτίνα Β»), μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι τιμές των τροπών είναι αυξημένες, για τις ίδιες τιμές του συντελεστή μοντελοποίησης n .

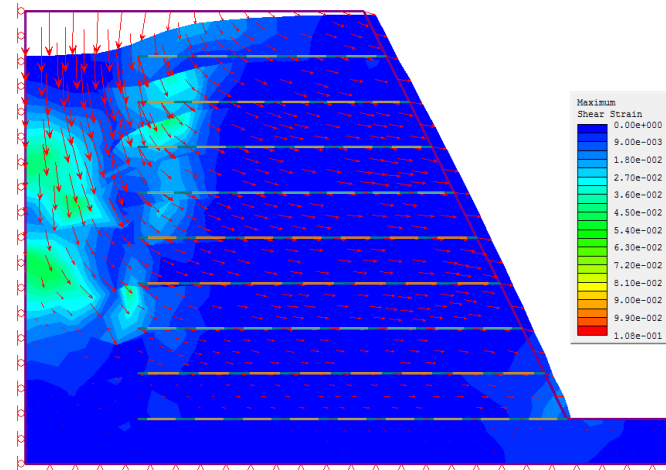
Στην συνέχεια παρουσιάζονται στα Σχήματα 9.54 και 9.55 οι διατμητικές τροπές για τις στρώσεις οπλισμού Νο. 4 και Νο. 8, για μοντέλα κατασκευασμένα με τα υλικά όπλισης «Επίδεσμος» και «Κουρτίνα Β» και $n=50$. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι τιμές των αναπτυσσόμενων τροπών αυξάνουν προς το μέσον των οπλισμένων πρανών, δηλαδή κοντά στο τέλος της οπλισμένης εδαφικής μάζας, ενώ κοντά στην όψη των πρανών υπάρχει διαφοροποίηση των τροπών για τις διάφορες στρώσεις οπλισμών, με αυξημένες τις τροπές στις στρώσεις οπλισμού Νο. 8, έναντι των τροπών στις στρώσεις οπλισμού Νο. 4.

Ακολούθως συγκρίνονται στα Σχήματα 9.56 και 9.57 οι τιμές των διατμητικών τροπών για τις στρώσεις οπλισμού Νο. 4 και Νο. 8 για τα δύο διαφορετικά υλικά και $n=50$. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, για συντελεστή μοντελοποίησης $n=50$, οι αναπτυσσόμενες τροπές είναι αυξημένες για το ασθενέστερο υλικό «Κουρτίνα Β, και για τις δύο στρώσεις οπλισμού, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο.

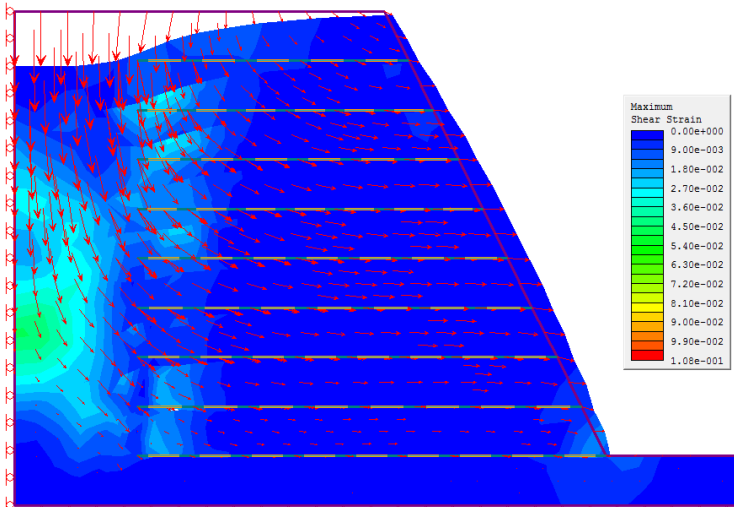
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9



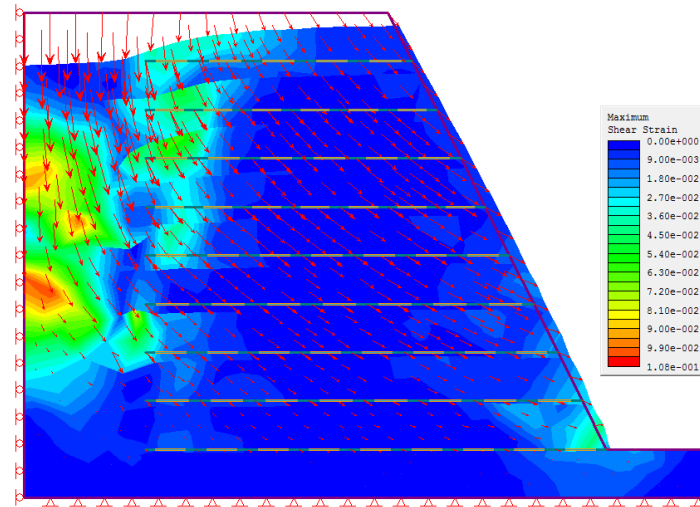
Σχήμα 9.50. Διατμητικές τροπές για n=50, «Επίδεσμος».
Figure 9.50. Shear strain for n=50, “Bandage”.



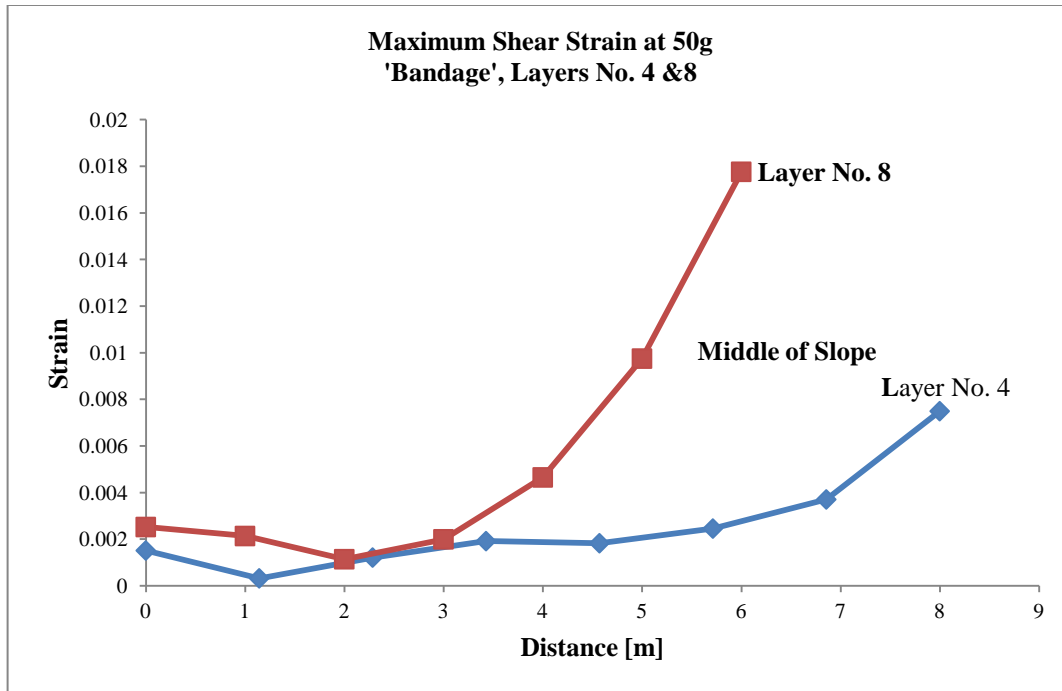
Σχήμα 9.51. Διατμητικές τροπές για n=100, «Επίδεσμος».
Figure 9.51. Shear strain for n=100, “Bandage”.



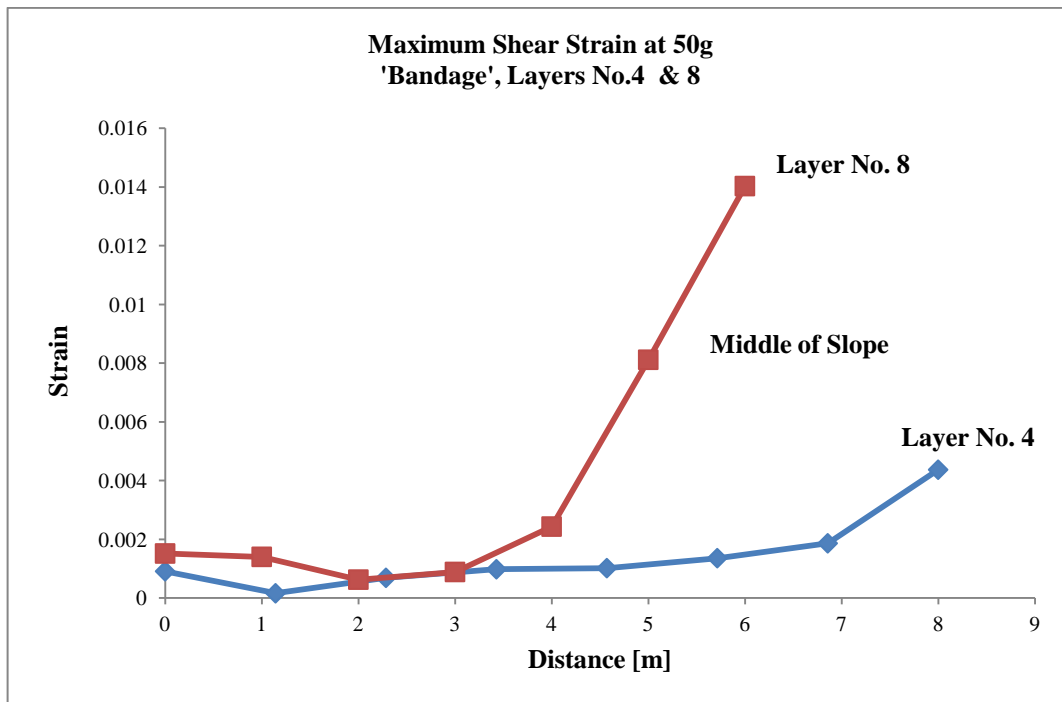
Σχήμα 9.52. Διατμητικές τροπές για n=50, «Κουρτίνα Β» & SRF=1.
Figure 9.52. Shear strain for n=50, “Curtain B” & SRF=1.



Σχήμα 9.53 Διατμητικές τροπές για n=100, «Κουρτίνα Β» & SRF=1.
Figure 9.53. Shear strain for n=100, “Curtain B” & SRF=1.

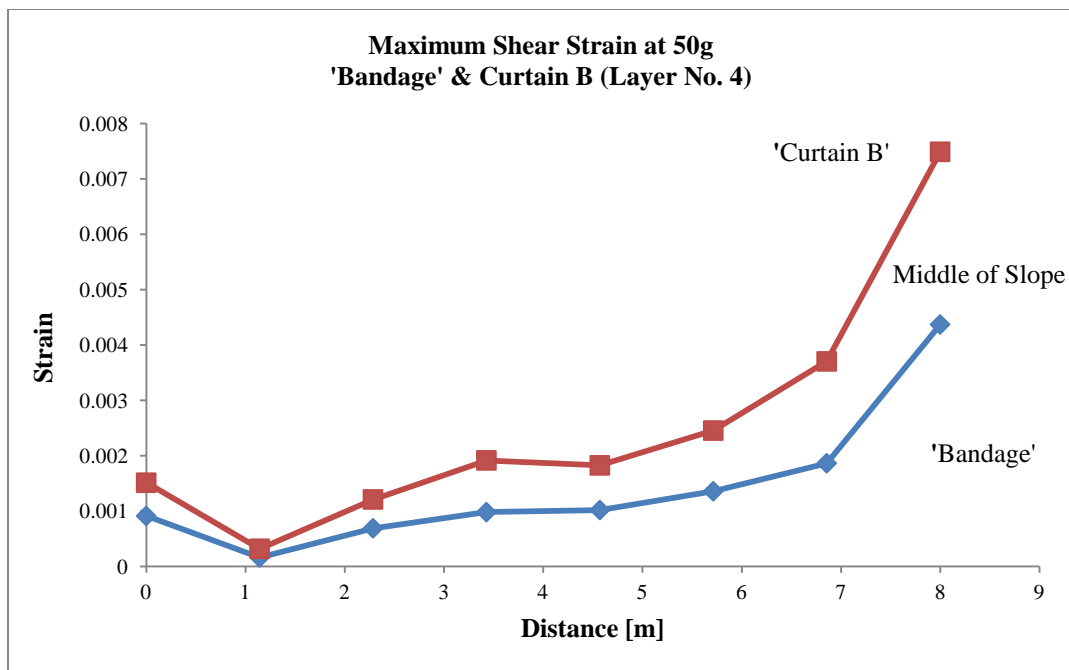


Σχήμα 9.54. Διατμητικές τροπές για στρώσεις No. 4 & 8, n=50 ('Επίδεσμος').
 Figure 9.54. Shear strain on Layers No. 4&8, n=50 ('Bandage').

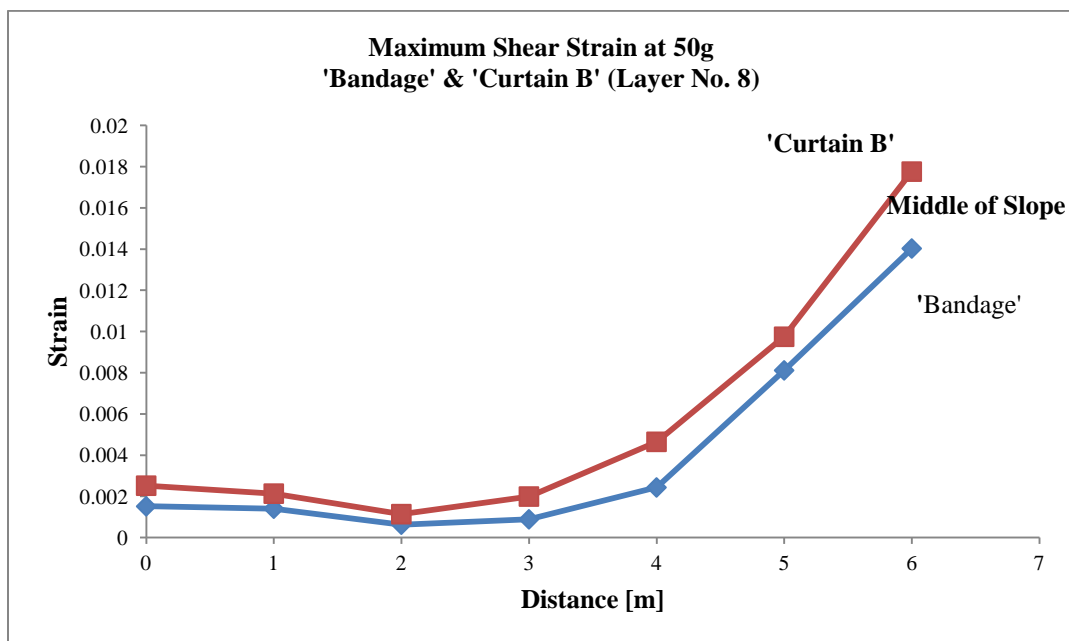


Σχήμα 9.55. Διατμητικές τροπές για στρώσεις No. 4 & 8, n=50 ('Κουρτίνα Β').
 Figure 9.55. Shear strain on Layers No. 4&8, n=50 ('Curtain B').

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9



Σχήμα 9.56. Σύγκριση τροπών για διαφορετικά υλικά όπλισης (στρώση No. 4, n=50)
Figure 9.56. Comparison of strain for various reinforcement materials (layer No. 4, n =50).



Σχήμα 9.57. Σύγκριση τροπών για διαφορετικά υλικά όπλισης (στρώση No. 8, n=50)
Figure 9.57. Comparison of strain for various reinforcement materials (layer No. 8, n =50).

9.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογιστικής διερεύνησης με αντίστοιχα αποτελέσματα πειραματικής διερεύνησης.

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά την πειραματική διερεύνηση των μοντέλων υπο κλίμακα στον φυγοκεντριστή, με αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την υπολογιστική διερεύνηση των αντίστοιχων πρωτότυπων μοντέλων. Ειδικότερα, πραγματοποιείται σύγκριση των τροπών που υπολογίσθηκαν μέσω των ψηφιακών φωτογραφιών που ελήφθησαν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων και το λογισμικό GeoPIV, καθώς επίσης σύγκριση των «γραμμικών» τροπών που προέκυψαν κατά μήκος των στρώσεων οπλισμών με τις μετρήσεις μέσω των οπτικών ινών, με αντίστοιχες «γραμμικές» τροπές που προέκυψαν κατά την ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

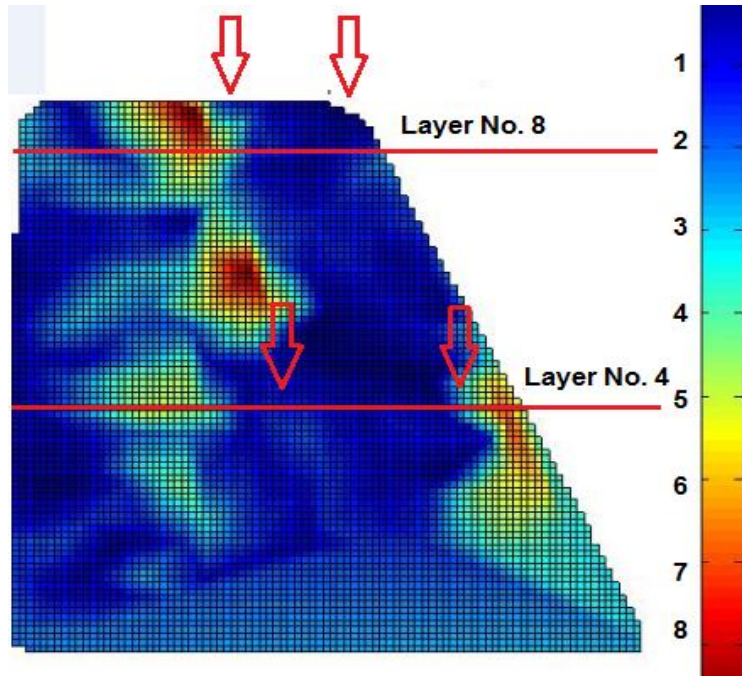
➤ *Σύγκριση υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων (GeoPIV) :*

Στα παρακάτω επαναλαμβάνεται το Σχήμα 9.25 που προέκυψε ύστερα από ανάλυση μέσω του GeoPIV, σε στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g, για το Τεστ Νο. 6 το μοντέλο του οποίου κατασκευάστηκε με το υλικό όπλισης «Κουρτίνα Α». Επίσης, στα Σχήματα 9.58 και 9.59 παρουσιάζονται οι διατμητικές τροπές των μοντέλων για $n=50$, δηλαδή για πρηνή ύψους 9 m, για υλικά όπλισης «Επίδεσμος» και «Κουρτίνα Β» αντίστοιχα, με τάξη μεγέθους των διατμητικών τροπών αντίστοιχη με αυτή που προέκυψε από την ανάλυση με το GeoPIV (8%).

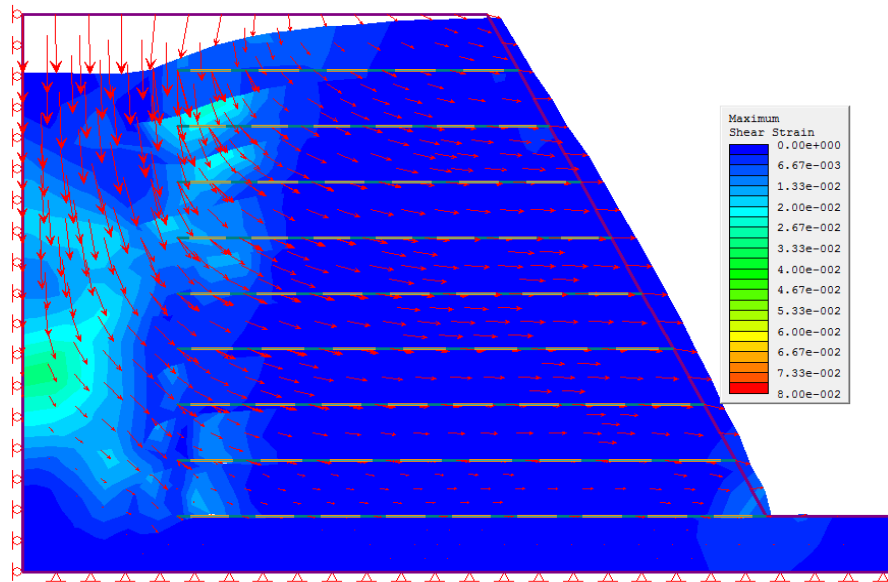
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, κατά την ανάλυση με το GeoPIV, ο μηχανισμός αστοχίας εντοπίζεται κοντά στα ανώτερα τμήματα του μοντέλου και μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας, ομοίως προκύπτει και κατά την ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης προκύπτει ότι για το ασθενέστερο υλικό, «Κουρτίνα Β» (Σχήμα 9.59), τα αποτελέσματα είναι πιο συμβατά με αυτά του GeoPIV, από ότι τα αντίστοιχα αποτελέσματα με του υλικού «Επίδεσμος» (Σχήμα 9.58). Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι αυξημένες τιμές των διατμητικών τροπών στα κατώτερα και κοντά στην όψη τμήματα του πρηνούς που προκύπτουν κατά την ανάλυση με το GeoPIV, δεν συμβαδίζουν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της υπολογιστικής διερεύνησης καθώς προκύπτουν από την προκαθορισμένη ποσότητα νερού που είχε τοποθετηθεί στα πειραματικά μοντέλα για την μεταφορά αυτών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

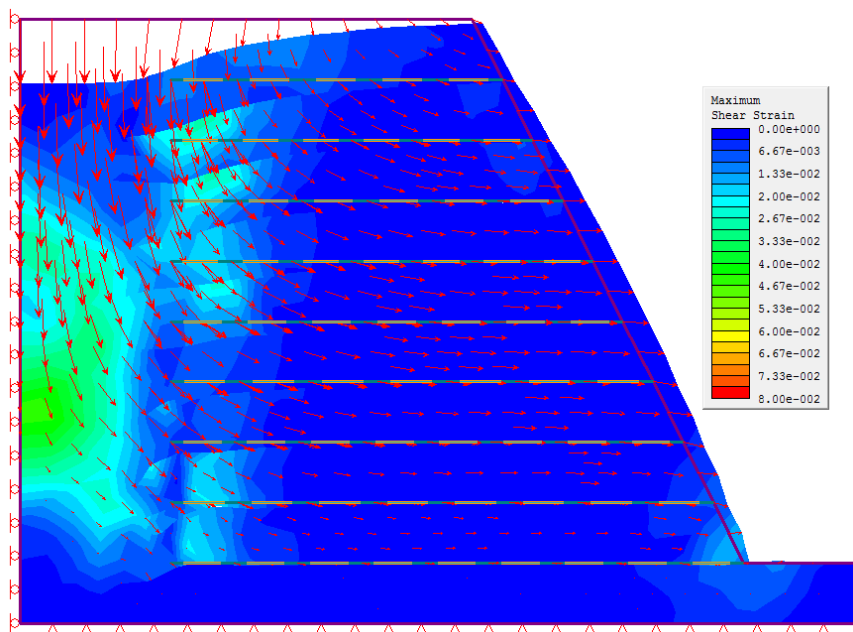
στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή. Κατά την έναρξη της περιστροφής του φυγοκεντριστή το νερό συγκεντρώθηκε στα κατώτερα τμήματα του πρανούς και στην συνέχεια διέφυγε μέσω σωλήνων που είχαν τοποθετηθεί στο κουτί του μοντέλου για τον σκοπό αυτό.



Σχήμα 9.25. Στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g (Τεστ No.6).
Figure 9.25. Level equal to 50g, (Test No.6).



Σχήμα 9. 58. Διατμητικές τροπές για n=50, «Επίδεσμος» για σύγκριση με GeoPIV .
Figure 9.58. Shear strain for n=50, “Bandage” for comparison with GeoPIV .



Σχήμα 9.59. Διατμητικές τροπές για n=50, «Κουρτίνα Β» για σύγκριση με GeoPIV .
Figure 9.59. Shear strain for n=50, “Curtain B” for comparison with GeoPIV.

➤ **Σύγκριση υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων (Οπτικές Ίνες) και διερεύνηση αλληλεπίδρασης εδάφους και οπλισμού:**

Στην ενότητα αυτή συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την πειραματική διερεύνηση και τις μετρήσεις μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών («γραμμικές» τροπές) με αντίστοιχες «γραμμικές» τροπές που προέκυψαν κατά την ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι τροπές που προέκυψαν κατά την υπολογιστική διερεύνηση, προκύπτουν από την διαίρεση της οριζόντιας επιμήκυνσης dl στις στρώσεις οπλισμών, με το αντίστοιχο μήκος l ($\epsilon=dl/l$). Η επιμήκυνση αυτή προκύπτει από την ανάλυση των υπολογιστικών μοντέλων με το λογισμικό των πεπερασμένων στοιχείων και αφορά την περιοχή ανάμεσα στους κόμβους των στρώσεων, όπως αυτοί έχουν ορισθεί κατά την δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, η τροπή προκύπτει από την διαίρεση της οριζόντιας επιμήκυνσης dl μεταξύ των κόμβων στις αντίστοιχες θέσεις των αισθητήρων οπτικών ινών που τοποθετήθηκαν στα πειραματικά μοντέλα, με την αρχική απόσταση (μήκος) l μεταξύ των κόμβων. Ειδικότερα, έχουν επιλεγεί 2 στρώσεις οπλισμών, η στρώση Νο. 4 κοντά στο μέσο του πρανούς και η στρώση Νο. 8 κοντά στα ανώτερα τμήματα αυτού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Πραγματοποιείται επίσης διερεύνηση της διεπιφάνειας μεταξύ εδάφους και οπλισμού, μέσω των τιμών της Ορθής και Διατμητικής Στιβαρότητας (Normal και Shear Stiffness) των υπολογιστικών μοντέλων. Ειδικότερα, κατά την δημιουργία των υπολογιστικών μοντέλων, επιλέγονται διάφορες τιμές των αυτών, με στόχο να βρεθούν εκείνες για τις οποίες τα υπολογιστικά αποτελέσματα συμπίπτουν με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Αρχικά τίθενται δύο περιορισμοί για τον καθορισμό των τιμών της Ορθής και Διατμητικής Στιβαρότητας και συγκεκριμένα α) οι τιμές της Ορθής Στιβαρότητας να είναι μικρότερες από το μέτρο ελαστικότητας του εδαφικού υλικού και β) οι τιμές της Διατμητικής Στιβαρότητας να είναι μικρότερες από τις τιμές της Ορθής Στιβαρότητας. Στην συνέχεια μεταβάλλονται οι τιμές τους με στόχο να προσδιορισθούν εκείνες που δίνουν αποτελέσματα «γραμμικών» τροπών αντίστοιχα με αυτά των αισθητήρων οπτικών ινών. Στους Πίνακες 9.11 και 9.12, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά για τις στρώσεις οπλισμού Νο.4 και Νο. 8 και για 2 θέσεις, κοντά στο μέσο και κοντά στην όψη των πρανών, για το υλικό όπλισης «Επίδεσμος».

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στον Πίνακα 9.11, οι τιμές των υπολογιστικών τροπών για την στρώση Νο. 4, ταυτίζονται με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για τιμή της Ορθής Στιβαρότητας ίση με 20000 kPa και για τιμή της Διατμητικής Στιβαρότητας ίση με 5000 kPa. Η ταύτιση αυτή ισχύει για το μέσο των στρώσεων οπλισμού, ενώ κοντά στην όψη των πρανών παρατηρείται ότι δεν υπάρχει ταύτιση λόγω των διαφορετικών συνθηκών προσομοίωσης. Υπενθυμίζεται ότι κατά την κατασκευή των πειραματικών μοντέλων αναδιπλώθηκαν οι στρώσεις οπλισμού στην όψη των πρανών προκειμένου να αποφευχθεί διαφυγή του αμμώδους εδαφικού υλικού και η αναδίπλωση αυτή δεν ήταν εύκολο να προσομοιωθεί κατά την δημιουργία των υπολογιστικών μοντέλων.

Για την στρώση οπλισμού Νο. 8, παρατηρείται ότι οι τιμές των υπολογιστικών τροπών ταυτίζονται με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για τιμή της Ορθής Στιβαρότητας ίση με 20000 kPa και για τιμή της Διατμητικής Στιβαρότητας ίση με 15000 kPa. Και σε αυτή την περίπτωση η ταύτιση παρατηρείται για τις τιμές κοντά στο μέσο των στρώσεων οπλισμού, ενώ κοντά στην όψη υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση λόγω αδυναμίας σωστής μοντελοποίησης στην περιοχή αυτή. Στην συνέχεια στον Πίνακα 9.12, παρουσιάζονται αντίστοιχα αποτελέσματα για τιμή της Ορθής Στιβαρότητας ίση με 25000 kPa. Και για την περίπτωση αυτή οι τιμές των «γραμμικών» υπολογιστικών τροπών ταυτίζονται με τις

αντίστοιχες πειραματικές για Διατμητική Στιβαρότητα ίση με 5000 kPa για την στρώση οπλισμού No.4 ενώ για την στρώση οπλισμού No. 8 η τιμή της Διατμητικής Στιβαρότητας είναι ίση με 15000 kPa. Επισημαίνεται επίσης, ότι η στρώση οπλισμού No.4 έχει μεγαλύτερο μήκος από την στρώση οπλισμού No. 8.

Προκύπτει λοιπόν ότι στις κατώτερες στρώσεις οπλισμού, ενεργοποιείται μικρότερη τιμή της Διατμητικής Στιβαρότητας και οι τροπές είναι μεγαλύτερες, ενώ για τις ανώτερες στρώσεις ενεργοποιείται μεγαλύτερη τιμή της Διατμητικής Στιβαρότητας και οι τροπές είναι μικρότερες. Επίσης, προκύπτει ότι με την εφαρμογή αισθητήρων οπτικών ινών στο εσωτερικό των πειραματικών μοντέλων και στην συνέχεια με την υπολογιστική διερεύνησή τους, μπορούν να προσδιορισθούν ορισμένα χαρακτηριστικά των μοντέλων με ακριβέστερο τρόπο. Έτσι, με τον συνδυασμό των μετρήσεων μέσω αισθητήρων οπτικών ινών και των υπολογιστικών μοντέλων, προσδιορίστηκαν οι τιμές της Ορθής και Διατμητικής Στιβαρότητας και στην συνέχεια με τις τιμές αυτές αναλύονται ξανά τα υπολογιστικά μοντέλα.

Πίνακας 9.11. Σύγκριση «γραμμικών» τροπών πειραματικών και υπολογιστικών μοντέλων, για διάφορες τιμές της Διατμητικής Στιβαρότητας και για Ορθή Στιβαρότητα=20000 kPa.
Table 9.11. Comparison of ‘linear’ strain of experimental and computational models for various Shear Stiffness values and Normal Stiffness=20000 kPa.

Bandage
Normal Stiffness 20000 kPa

Shear Stiffness	Optical Fibre-50g level	Numerical Modelling-n=50	
Layer No.4			
	0.0013	Middle	Edge
5000		0.001313	-1.8E-06
10000		0.00114	0.000214
15000		0.001071	0.000318
20000		0.001033	0.000376
Layer No. 8			
	0.0007		
5000		0.001351	0.000502
10000		0.000870	0.000288
15000		0.000707	0.000259
20000		0.000608	0.000222

Πίνακας 9.12. Σύγκριση «γραμμικών» τροπών πειραματικών και υπολογιστικών μοντέλων, για διάφορες τιμές της Διατμητικής Στιβαρότητας και για Ορθή Στιβαρότητα 25000 kPa.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Table 9.12. Comparison of 'linear' strain of experimental and computational models for various Shear Stiffness values and Normal Stiffness=25000 kPa.

<u>Bandage</u>		
<u>Normal Stiffness 25000</u>		
Shear Stiffness	Optical Fibre-50g level	Numerical Modelling-n=50
Layer No.4		
	0.0013	Middle
5000		0.001300
10000		0.001150
15000		0.001069
20000		0.001034
Layer No. 8		
	0.0007	
5000		
10000		0.000914
15000		0.000726
20000		

9.5 Επίλυση μοντέλων υπό κλίμακα 1:1 με νέα αναλυτική λύση.

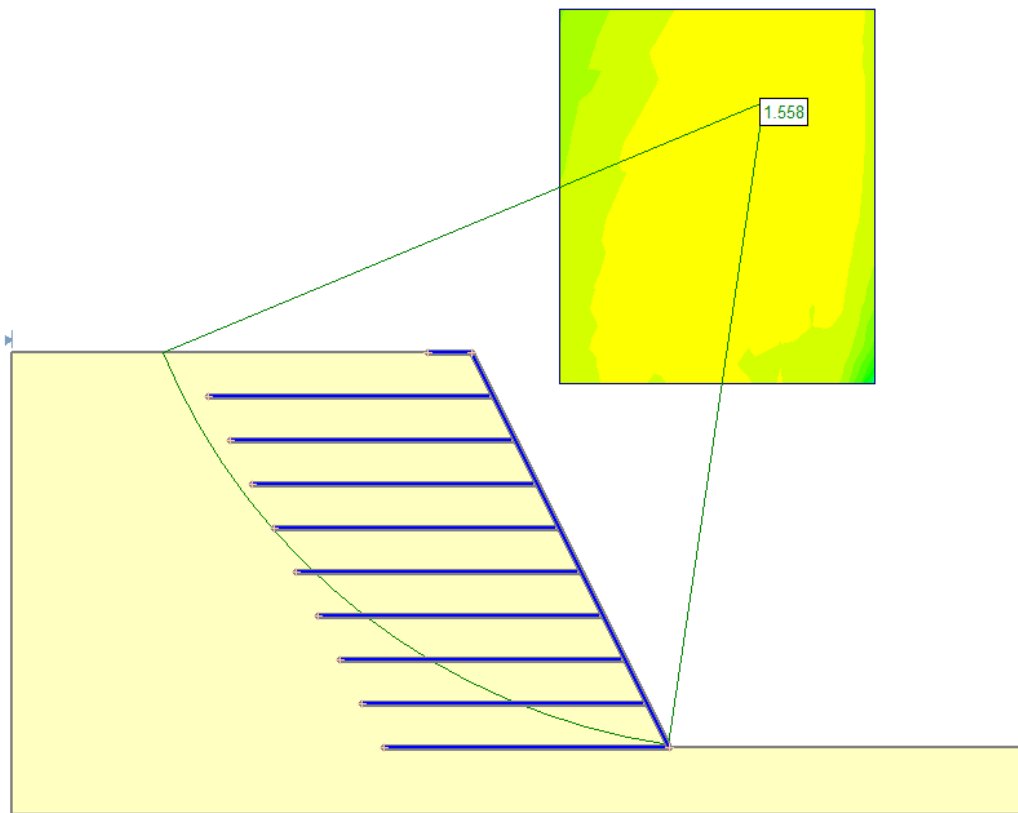
Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται επίλυση αναλυτικών και υπολογιστικών μοντέλων σε κλίμακα 1:1, αντίστοιχων με τα πειραματικά μοντέλα που μελετήθηκαν στον γεωτεχνικό φυγοκεντρική σε κλίμακα 1:n, μέσω της λύσης κλειστής μορφής που δημιουργήθηκε και παρουσιάστηκε στα αρχικά Κεφάλαια της παρούσας έρευνας, έναντι στατικής φόρτισης.

Ειδικότερα, προσδιορίζεται αρχικά η απαιτούμενη αντοχή και το μήκος του οπλισμού για πρηνή ύψους 9 m, έναντι στατικής φόρτισης, σύμφωνα με το λογισμικό που αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Delphi, για τιμές του στατικού Συντελεστή Ασφαλείας όμοιες με αυτές που υπολογίσθηκαν κατά την ανάλυση των υπολογιστικών μοντέλων με κοινά γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Ειδικότερα επιλέγονται οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας: 1.49 και 1.78, οι οποίες και αντιστοιχούν στα μοντέλα με υλικά όπλισης «Επίδεσμος» και «Κουρτίνα Β» αντίστοιχα. Στην συνέχεια, για τις τιμές αυτές δημιουργούνται υπολογιστικά μοντέλα και αναλύονται ξανά με το λογισμικό Slide.

Κατά την επίλυση των μοντέλων με την αναλυτική λύση, προκύπτει ότι οι τιμές της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες που

επιλέχθηκαν για την κατασκευή των πειραματικών μοντέλων, ενώ το μήκος των οπλισμών είναι ομοιόμορφο, σε αντίθεση με το μήκος των οπλισμών που είχε επιλεγεί για τα πειραματικά μοντέλα. Έτσι, για την δημιουργία των υπολογιστικών μοντέλων, επιλέγονται οι τιμές της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής όπως υπολογίσθηκαν από την αναλυτική λύση, καθώς και για το μήκος των οπλισμών, το οποίο και αντιστοιχεί στην μέση τιμή του μήκους των οπλισμών των πειραματικών μοντέλων.

Στο Σχήμα 9.60 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του υπολογιστικού μοντέλου που δημιουργήθηκε και αναλύθηκε, ενώ στον Πίνακα 9.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον συνδυασμό της αναλυτικής και υπολογιστική λύσης. Ειδικότερα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι τιμές των Συντελεστών Ασφαλείας που προκύπτουν κατά την υπολογιστική διερεύνηση είναι πολύ κοντά με τις αντίστοιχες τιμές των Συντελεστών Ασφαλείας που επιλέχθηκαν για την αναλυτική διερεύνηση, οι οποίες και αντιστοιχούν στα πειραματικά μοντέλα που μελετήθηκαν στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.



Σχήμα 9.60. Υπολογιστικό μοντέλο αντίστοιχο με αναλυτικό .
Figure 9.60. Numerical model, similar to analytical.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Πίνακας 9.13. Στατικός σχεδιασμός ο.π. με Αναλυτική Λύση, για διάφορες τιμές του Σ.Α.
Table 9.13. Static design of r.s. via Analytical Solution, for various S.F. values.

H (m)	FS (Analytical Solution)	Tmax (kN/m)	L (m)	FS (Bishop)	FS (Janbu)
9	1.49	30	6.5	1.56	1.43
9	1.78	40	6.5	1.64	1.46

Τέλος μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι μηχανισμοί αστοχίας που προέκυψαν κατά την παρούσα υπολογιστική διερεύνηση, βρίσκονται πιο κοντά στην οπλισμένη εδαφική μάζα, σε αντίθεση με τα υπολογιστικά μοντέλα που μελετήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες του παρόντος Κεφαλαίου, όπου οι μηχανισμοί αστοχίας εντοπίστηκαν μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα υπολογιστικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν με τα ίδια μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οπλισμών των πειραματικών μοντέλων, είχαν σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή καθώς και μεγαλύτερο μήκος οπλισμών, με αποτέλεσμα να μετατοπίζονται οι μηχανισμοί αστοχίας προς το πίσω μέρος των πρανών.

9.6 Συμπεράσματα Κεφαλαίου.

Στο παρόν Κεφάλαιο προέκυψαν συμπεράσματα σχετικά με:

- Την σύγκριση και αξιολόγηση μεταξύ των μετρήσεων που ελήφθησαν μέσω *αισθητήρων οπτικών ινών*.
- Την σύγκριση και αξιολόγηση μεταξύ των μετρήσεων και αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο PIV και το λογισμικό *GeoPIV*.
- Τον εντοπισμό θέσεων *αισθητήρων οπτικών ινών* πάνω σε σχήματα *διατμητικών τροπών*, δημιουργούμενα μέσω ανάλυσης με το λογισμικό *GeoPIV*.
- Την *αναγωγή* των πειραματικών μοντέλων σε αντίστοιχα μοντέλα *πρωτότυπων* κατασκευών και την *υπολογιστική* διερεύνηση αυτών.
- Την σύγκριση των «*γραμμικών*» *τροπών* των *αισθητήρων οπτικών ινών* και των αντίστοιχων θέσεων στα υπολογιστικά μοντέλα.

Τα συμπεράσματα αυτά παρουσιάσθηκαν αναλυτικά στις επιμέρους ενότητες του παρόντος Κεφαλαίου. Επίσης, στο 10^ο Κεφάλαιο που ακολουθεί, παρουσιάζονται και σχολιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα αυτά καθώς και τα αντίστοιχα των υπολοίπων Κεφαλαίων, σε συνδυασμό με προτάσεις και οδηγίες για την χρήση των μεθόδων που εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της παρούσας έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

Συμπεράσματα Έρευνας, Προτάσεις και Οδηγίες

10.1 Επίτευξη στόχου Διδακτορικής Διατριβής.

Όπως αναφέρθηκε και στο 1^ο Κεφάλαιο της Διδακτορικής Διατριβής, η εφαρμογή των *διάφορων μεθόδων διερεύνησης* οπλισμένων πρανών μπορεί να προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά αυτών, ενώ η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων μπορεί να παρέχει μια πιο *ολοκληρωμένη* εικόνα τόσο για τις υπό μελέτη κατασκευές, όσο και για τις ίδιες τις μεθόδους που εφαρμόζονται. Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε *αναλυτική, πειραματική και υπολογιστική* διερεύνηση οπλισμένων πρανών με *απλή και σύνθετη* γεωμετρία, έναντι *στατικής και σεισμικής* φόρτισης.

Κατά την *αναλυτική διερεύνηση* αναπτύχθηκε *νέα αναλυτική λύση*, η οποία και ενσωματώθηκε σε *ολοκληρωμένη μεθοδολογία*, που δημιουργήθηκε για τον σχεδιασμό και την μελέτη *εναιαίων* οπλισμένων πρανών καθώς και πρανών με *αναβαθμούς*, έναντι *στατικών και σεισμικών* φορτίσεων. Βάσει της αναλυτικής λύσης και της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, δημιουργήθηκε *λογισμικό*, περίπου 5000 γραμμών, σε γλώσσα προγραμματισμού Embarcadero Delphi, με στόχο την ολοκληρωμένη μελέτη και οπλισμένων πρανών έναντι *στατικών και σεισμικών* δράσεων. Τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης καθώς και της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε, συγκρίνονται μέσω του λογισμικού που δημιουργήθηκε, με αντίστοιχα αποτελέσματα *υπολογιστικών μοντέλων* μέσω *γεωτεχνικών προγραμμάτων* του εμπορίου.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε *πειραματική διερεύνηση* όπου και κατασκευάστηκαν συνολικά 16 μοντέλα οπλισμένων πρανών και τοποθετήθηκαν στον διαμέτρου 2.2 m *γεωτεχνικό φυγοκεντριστή* του ETH Zurich, ενσωματώνοντας *αισθητήρες οπτικών ινών* και λαμβάνοντας ψηφιακές φωτογραφίες προκειμένου να εφαρμοσθεί η οπτική μέθοδος παρακολούθησης της συμπεριφοράς τους *Particle Image Velocimetry Analysis*. Ακολούθως πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των αντίστοιχων πρωτότυπων *υπολογιστικών μοντέλων* με γνωστές αναλυτικές μεθόδους καθώς και με την μέθοδο των *πεπερασμένων στοιχείων* και σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραματικών, αναλυτικών και υπολογιστικών μεθόδων.

Συνολικά, στόχος της παρούσας έρευνας ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς των οπλισμένων πρανών με *διάφορες μεθόδους* προκειμένου να προκύψουν συμπεράσματα τόσο από

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

γεωτεχνικής σκοπιάς όσο και από την σκοπιά των μεθόδων ανάλυσης. Ο στόχος αυτός επιτεύχθηκε με την δημιουργία των *αναλυτικών, πειραματικών και υπολογιστικών μοντέλων*.

10.2 Αναλυτική διερεύνηση & νέα αναλυτική λύση.

- *Υπάρχουσες μέθοδοι αναλυτικής διερεύνησης οπλισμένων πρανών με απλή γεωμετρία.*

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως για την αναλυτική διερεύνηση των οπλισμένων πρανών με τις περισσότερες να εφαρμόζουν την ψευδοστατική προσέγγιση που βασίζεται στην αρχή *ολισθαίνουσας μάζας* του Newmark. Για την διαμόρφωση των μηχανισμών αστοχίας και των εξισώσεων που διέπουν την λειτουργία τους παρουσιάστηκαν η Μέθοδος Οριακής Ισορροπίας και η Μέθοδος Οριακής Ανάλυσης, οι οποίες και εφαρμόζονται συνήθως.

Αναλύθηκε το Κινηματικό Θεώρημα Οριακής Ανάλυσης το οποίο και χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, καθώς και η Απλοποιημένη Φασματική Ανάλυση μέσω διαφόρων *σχέσεων απόσβεσης* με βάση τα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής. Επιπλέον, αναλύθηκε ο *Μηχανισμός Επίπεδης Ολίσθησης* και τέλος, προκειμένου να υπολογισθεί η αναμενόμενη *μόνιμη μετατόπιση* εφαρμόστηκε εξίσωση που είχε προταθεί από τους Ambraseys & Menu.

Συνδυάζοντας όλες τις παραπάνω μεθόδους ανάλυσης, δημιουργήθηκε μια *νέα αναλυτική λύση* για τον αντισεισμικό σχεδιασμό πρανών με αναβαθμούς.

- *Μεθοδολογία νέα αναλυτικής λύσης και λογισμικό για την διερεύνηση οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς:*

Σχετικά με την *αναλυτική λύση* που παρουσιάστηκε στο 3^ο Κεφάλαιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, οι εξισώσεις που δημιουργήθηκαν για τον αντισεισμικό σχεδιασμό οπλισμένων πρανών με *αναβαθμούς*, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για όποιον αριθμό αναβαθμών επιθυμεί ο μελετητής, καθώς επίσης και για διάφορα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά αυτών. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τον κάθε αναβαθμό, καθώς και διαφορετικές τιμές της

αναμενόμενης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης. Ακόμη, η οριζόντια σεισμική επιτάχυνση μπορεί να εκτιμηθεί βάσει των σεισμοτεκτονικών χαρακτηριστικών της κάθε περιοχής.

Ο συνδυασμός των μηχανισμών *τοπικής* και *ολικής ευστάθειας* δίνει ολοκληρωμένα αποτελέσματα, καθώς οι ανώτεροι αναβαθμοί διαστασιολογούνται ασφαλέστερα μέσω των μηχανισμών τοπικής ευστάθειας, ενώ οι κατώτεροι αναβαθμοί μέσω των μηχανισμών ολικής ευστάθειας.

Επίσης, παρόμοιες εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την εύρεση του *κρίσιμου σεισμικού συντελεστή* k_{cr} , ο οποίος και αποτελεί χαρακτηριστική κατασκευαστική τιμή ενός υφιστάμενου πρανούς. Επιπλέον, μπορεί να πραγματοποιηθεί *στατική ανάλυση* οπλισμένων πρανών με την επιλογή κάποιου επιθυμητού Συντελεστή Ασφαλείας, ενώ τέλος μπορεί να υπολογισθεί και η *τρωτότητα* οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς, μέσω της αναμενόμενης μόνιμης οριζόντιας μετατόπισης.

Στην συνέχεια, βάσει των εξισώσεων αυτών δημιουργήθηκε κώδικας περίπου 5000 γραμμών που ενσωματώνει την *νέα αναλυτική λύση*. Η δημιουργία του κώδικα ήταν ιδιαίτερα απαιτητική καθώς οι εξισώσεις και η γεωμετρία των πρανών με αναβαθμούς ήταν ιδιαίτερα σύνθετη. Δημιουργήθηκαν *βοηθητικές συναρτήσεις* καθώς και *βρόγχοι* προκειμένου να καθορισθούν οι *κρίσιμοι μηχανισμοί αστοχίας* ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στην επιφάνεια του προγράμματος.

Με το λογισμικό που δημιουργήθηκε μπορεί ο χρήστης γρήγορα και πρακτικά να μελετήσει οπλισμένα πρανή με *αναβαθμούς*, σύμφωνα με τον *Μηχανισμό Αστοχίας Επίπεδης Ολίσθησης*. Παραδείγματα εφαρμογής της αναλυτικής λύσης και του λογισμικού παρουσιάστηκαν στο **4^ο Κεφάλαιο**. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα να εφαρμοσθούν στο *μέλλον* και άλλοι μηχανισμοί αστοχίας, όπως για παράδειγμα ο Μηχανισμός Λογαριθμικής Σπείρας καθώς και ο Μηχανισμός Άμεσης Ολίσθησης.

➤ ***Εφαρμογή λογισμικού και παραδείγματα οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς:***

Στο **4^ο Κεφάλαιο** παρουσιάστηκαν παραδείγματα ανάλυσης οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς τα οποία και συγκρίθηκαν με *αντίστοιχα ενιαία* πρανή με στόχο την ανάδειξη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

των *πλεονεκτημάτων* των πρανών με αναβαθμούς. Επίσης, δημιουργήθηκαν αντίστοιχα *υπολογιστικά μοντέλα* με στόχο να πραγματοποιηθεί *σύγκριση* των αποτελεσμάτων της νέας αναλυτικής λύσεις με *άλλες μεθόδους*.

Συμπερασματικά, μπορεί να παρατηρηθεί από τα παραδείγματα που παρουσιάστηκαν ότι η *μεθοδολογία* και το *λογισμικό* αποτελούν μια *ολοκληρωμένη λύση* για τον *σχεδιασμό* και τον *έλεγχο επάρκειας* οπλισμένων πρανών με *σύνθετη γεωμετρία* και συγκεκριμένα για πρανή με αναβαθμούς. Ο χρήστης του λογισμικού μπορεί *εύκολα* και *γρήγορα* να εισάγει τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των οπλισμένων αναβαθμών και να τα μελετά από διάφορες οπτικές γωνίες.

Ειδικότερα, μπορεί να εκτιμηθεί εύκολα και γρήγορα η *αναμενόμενη μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση* βάσει των σεισμοτεκτονικών χαρακτηριστικών της κάθε περιοχής και να χρησιμοποιηθεί αυτή για τον *αντισεισμικό σχεδιασμό* των οπλισμένων πρανών με *αναβαθμούς*. Στην συνέχεια ο μελετητής μπορεί να εισαγάγει τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των πρανών και των οπλισμών, καθώς και το πλάτος λ των βαθμίδων και στην συνέχεια να πραγματοποιήσει *δυναμική ανάλυση* για τον υπολογισμό της απαιτούμενης *εφελκυστικής αντοχής* και του *μήκους* των οπλισμών. Όπως φαίνεται και από τα παραδείγματα που αναλύθηκαν, η συνολική ποσότητα της *δύναμης οπλισμού* κατά τον σχεδιασμό των πρανών με *αναβαθμούς*, είναι *σημαντικά μικρότερη* για κάθε αναβαθμό σε σχέση με την ποσότητα οπλισμού ενός αντίστοιχου *ενιαίου πρανούς* ίδιου ύψους και παρόμοιας κλίσης.

Επιπλέον, με την εφαρμογή του λογισμικού, μπορούν να πραγματοποιηθούν εύκολα και γρήγορα διάφορες *παραμετρικές αναλύσεις*, διατηρώντας κάποια από τα χαρακτηριστικά των οπλισμένων πρανών σταθερά και μεταβάλλοντας κάποια άλλα. Όπως για παράδειγμα με την μεταβολή της απαιτούμενης *εφελκυστικής αντοχής* των πρανών σε σχέση με την γωνία τριβής φ , την απόσταση μεταξύ των αναβαθμών λ και την γωνία κλίσης των πρανών β . Ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν και κατά την *στατική ανάλυση* των οπλισμένων πρανών με την επιλογή του επιθυμητού *Συντελεστή Ασφαλείας* της κατασκευής.

Μια άλλη σημαντική εφαρμογή του λογισμικού είναι η εύρεση της *κρίσιμης σεισμικής επιτάχυνσης* υφιστάμενου πρανούς, όπου ο χρήστης εισάγει τα μηχανικά και γεωμετρικά

χαρακτηριστικά των αναβαθμών καθώς και τις τιμές της εφελκυστικής αντοχής των οπλισμών και το μήκος τους και στην συνέχεια υπολογίζεται η κρίσιμη σεισμική επιτάχυνση. Η τιμή αυτή είναι *χαρακτηριστική* για κάθε πρανές και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον υπολογισμό της *σεισμικής τρωτότητας* αυτών σε περίπτωση *αναβάθμισης* του *σεισμικού κινδύνου*, μέσω του υπολογισμού της αναμενόμενη μόνιμης μετατόπισης.

Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι η *νέα αναλυτική λύση* που προτάθηκε, μπορεί να *επεκταθεί* και να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό και έλεγχο επάρκειας οπλισμένων πρανών με *λιγότερους* ή και *περισσότερους* αναβαθμούς, καθώς επίσης και για πρανή με *διαφορετικά υλικά*, όπως για παράδειγμα για εδάφη με διαφορετικό ϕ και γ . Επίσης, μπορεί να μελετηθεί ένα πρανές με διαφορετική επιτάχυνση σχεδιασμού k_h σε κάθε αναβαθμό, το οποίο θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για πρανή με *μεγάλο ύψος* καθώς όπως είναι γνωστό υπάρχουν *διαφορές* μεταξύ της επιτάχυνσης που *αναπτύσσεται στην βάση* μιας κατασκευής και της επιτάχυνσης που *αναπτύσσεται στην κορυφή* αυτής καθώς ενισχύεται όπως φαίνεται και στην απλοποιημένη φασματική ανάλυση κατά ΕΑΚ.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε *σύγκριση* της εν λόγω μεθοδολογίας και λογισμικού με άλλες μεθόδους και συγκεκριμένα με την μέθοδο των *λωρίδων Bishop και Janbu*, καθώς και με την μέθοδο των *Πεπερασμένων Στοιχείων*. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την ανάλυση αντίστοιχων μοντέλων δείχνουν ότι *υπάρχει συμβατότητα* μεταξύ των μεθόδων. Συγκεκριμένα με την μέθοδο των *λωρίδων οι Συντελεστές Ασφαλείας* υπολογίζονται κοντά στην *μονάδα* για την μέθοδο *Bishop*, ενώ για την μέθοδο *Janbu* λίγο *μικρότεροι της μονάδας*, καθώς πρόκειται για συντηρητικότερη μέθοδο, ωστόσο και με τις τιμές αυτές το πρανές συνήθως υπόκειται σε *πεπερασμένη μετατόπιση* και όχι *κατάρρευση*. Με την μέθοδο των *Πεπερασμένων Στοιχείων* τα αποτελέσματα είναι *δυσμενέστερα* για ορισμένες περιπτώσεις, κυρίως για *αυξημένες τιμές* του συντελεστή οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης k_h και οι μηχανισμοί *αστοχίας* εντοπίζονται μετά το πέρας της εδαφικής μάζας.

Τέλος, οι εφαρμογές της μεθοδολογίας και του λογισμικού είναι πολλές και μπορούν να *εμπλουτιστούν* και με άλλες μεθόδους για την εύρεση της αναμενόμενης οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης καθώς και για τον αντισεισμικό και στατικό σχεδιασμό οπλισμένων πρανών με αναβαθμούς, όπως για παράδειγμα με την ενσωμάτωση άλλων *πιθανών*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

μηχανισμών αστοχίας πέραν του μηχανισμού Επίπεδης Ολίσθησης (Plane Failure Mechanism) που χρησιμοποιείται στην παρούσα έρευνα, όπως για παράδειγμα του μηχανισμού Λογαριθμικής Σπείρας (Log-Spiral Mechanism), του μηχανισμού Άμεσης Ολίσθησης (Direct Sliding) κ.α.

10.3 Πειραματική διερεύνηση.

➤ *Μετρητικές μέθοδοι:*

Όπως αναφέρθηκε στο **5^ο Κεφάλαιο** της Διδακτορικής Διατριβής, η εφαρμογή της τεχνολογίας των *γεωτεχνικών φυγοκεντριστών* αποτελεί μια παγκοσμίως διαδεδομένη μέθοδο για την πειραματική προσομοίωση ακόμη και των πιο απαιτητικών μοντέλων, ωστόσο, η *υλικοτεχνική υποδομή* που απαιτείται για την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι αρκετά *δαπανηρά* και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις θα πρέπει να είναι ιδιαίτερος οργανωμένες με *έμπειρο* και *εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό*, το οποίο να βρίσκεται σε άμεση επικοινωνία και συνεργασία με το ερευνητικό προσωπικό. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίδεται και σε θέματα *ασφαλείας* καθώς θα πρέπει να τηρούνται αυστηρά συγκεκριμένοι κανόνες κυρίως όταν ο γεωτεχνικός φυγοκεντριστής βρίσκεται σε λειτουργία καθώς και κατά την έναρξη και παύση της περιστροφής του.

Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την πειραματική διερεύνηση των γεωτεχνικών κατασκευών σε φυγοκεντριστή εφαρμόζονται διάφορες *μετρητικές μέθοδοι* για την συλλογή πληροφοριών σχετικές με την απόκριση των κατασκευών κάτω από τις διάφορες συνθήκες φόρτισης. Οι μετρητικές μέθοδοι επιλέγονται ανάλογα με τον διαθέσιμο υλικοτεχνικό εξοπλισμό των εργαστηρίων, τις πληροφορίες που επιθυμούμε να συλλέξουμε καθώς επίσης και τις ειδικότερες κατασκευαστικές λεπτομέρειες των μοντέλων.

Οι *μετρητικές μέθοδοι* που εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της έρευνας και παρουσιάστηκαν στον **6^ο Κεφάλαιο**, είχαν σαν στόχο την ταυτόχρονη παρακολούθηση των *τροπών* και την σύγκριση των αποτελεσμάτων με στόχο να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για την *εφαρμογή των μεθόδων* καθώς και για τις *ίδιες τις μετρήσεις*. Ειδικότερα, οι μετρήσεις με τους αισθητήρες *οπτικών ινών* πραγματοποιήθηκαν πάνω στις στρώσεις των οπλισμών σε *διάφορες θέσεις* στο εσωτερικό των οπλισμένων πρανών, ενώ οι μετρήσεις με τη μέθοδο *PIV*

με τη χρήση ψηφιακών φωτογραφιών αφορούσαν την *πλάγια όψη* του πρανούς. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων είχε σαν στόχο να δώσει μια *ολοκληρωμένη εικόνα* για την συμπεριφορά των μοντέλων τόσο στο *εσωτερικό* τους μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών, πράγμα δύσκολο για οπτικές μεθόδους, όσο και στην *πλάγια όψη* του πρανούς όπου είναι αδύνατο να τοποθετηθούν αισθητήρες καθ' όλη την επιφάνεια του.

Σχετικά με την εφαρμογή των μεθόδων στα υπό εξέταση μοντέλα, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην επιλογή του *τύπου* των αισθητήρων οπτικών ινών ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υπό εξέταση μοντέλων. Όπως αναφέρθηκε και στα παραπάνω, υπάρχει *πληθώρα* αισθητήρων κατάλληλων για διάφορα είδη κατασκευών υπό κλίμακα ή και σε φυσικές διαστάσεις. Για την περίπτωση των γεωτεχνικών μοντέλων υπό κλίμακα, η καλύτερη λύση μπορεί να δοθεί με την χρήση αισθητήρων οπτικών ινών *χωρίς επικάλυψη* προκειμένου να *ελαχιστοποιείται* η *επιρροή* αυτών στα μοντέλα. Οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε *άλλα* είδη γεωτεχνικών (και μη) μοντέλων αρκεί να βρεθεί ο κατάλληλος τρόπος συγκράτησής τους στα σημεία που επιθυμείται να ληφθούν οι μετρήσεις. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να επιλέγεται το κατάλληλο υλικό συγκόλλησης των αισθητήρων στην υπό εξέταση επιφάνεια και η επιρροή του να συνυπολογίζεται στα αποτελέσματα που προκύπτουν. Βασικό *πλεονέκτημα* της μεθόδου μέτρησης τροπών μέσω αισθητήρων οπτικών ινών στο γεωτεχνικό φυγοκεντριστή είναι ότι μπορούν να ληφθούν *πολλές ταυτόχρονες μετρήσεις* σε διάφορες θέσεις στο *εσωτερικό* των γεωτεχνικών μοντέλων και τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι *αξιόπιστα και συγκρίσιμα*. Αντίθετα, βασική αδυναμία στην εφαρμογή τους είναι ότι ο υπάρχον εξοπλισμός και τεχνολογία *δεν έχει σχεδιαστεί* για να αντέχει σε τόσο *μεγάλες ταχύτητες* που αναπτύσσονται στους γεωτεχνικούς φυγοκεντριστές κατά την *αύξηση της επιτάχυνση της βαρύτητας* με αποτέλεσμα συχνά το *οπτικό σήμα* να *ασθενεί* και να υπάρχει κενό στα αποτελέσματα και να πρέπει να επαναληφθούν αυτά. Μία ακόμη αδυναμία της μεθόδου προκύπτει κατά την εφαρμογή της σε μοντέλα υπό κλίμακα και ειδικά γεωτεχνικά μοντέλα καθώς είναι ιδιαίτερα δύσκολο να βρεθεί και να επιλεγεί ο κατάλληλος τρόπος *συνένωσης* των αισθητήρων στις υπό εξέταση περιοχές. Στην παρούσα έρευνα κατά την διερεύνηση των οπλισμένων πρανών, οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν *πάνω* στις στρώσεις οπλισμού, ωστόσο δυσκολίες παρουσιάστηκαν κατά την επιλογή της *κόλας* και την επιρροή της στα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

Σχετικά με την μετρητική μέθοδο *PIV*, προσοχή θα πρέπει να δίνεται κατά την δημιουργία του *κάναβου* στο μοντέλο για την *ποσοτικοποίηση των τροπών*. Συγκεκριμένα, ο *κάναβος* θα πρέπει να *μην* είναι *πολύ πυκνός* ούτε *πολύ αραιός*, καθώς στην πρώτη περίπτωση υπάρχει το ενδεχόμενο να *αποκρυφτούν* οπτικές πληροφορίες από τις εικόνες προς επεξεργασία ενώ στην δεύτερη περίπτωση μπορεί να *μην επαρκούν* τα σημεία του *κάναβου* για την *βαθμονόμηση* αυτού με φωτογραμμετρικό *κάναβο*. Επιπλέον, το *έδαφος* που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των μοντέλων θα πρέπει να *έχει οπτικές χρωματικές αντιθέσεις* έτσι ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν και να διαχωριστούν με ευκολία τα *τμήματα* (patches) που δημιουργούνται κατά την προ-επεξεργασία των φωτογραφιών. Τέλος, κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και ειδικότερα στην φάση που προκύπτουν τα *μη συμβατά διάνυσματα* (wild vectors), ο ερευνητής θα πρέπει να κρίνει σωστά για το *ποια από αυτά εκφράζουν* πραγματικά *μη συμβατές μετακινήσεις* και *ποια εκφράζουν πραγματικές μεγάλες μετακινήσεις*. Σε περίπτωση που *διατηρηθεί λανθασμένα ένα μη συμβατό διάνυσμα* τότε τα αποτελέσματα θα *διαφοροποιηθούν σημαντικά και λανθασμένα*. Τέτοια προβλήματα παρουσιάζονται συνήθως όταν οι *φορτίσεις* είναι *πολύ μεγάλες* όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των *σεισμικών φορτίσεων* ή όταν ο *φωτισμός* στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή δεν είναι επαρκής με αποτέλεσμα να *μην διαχωρίζονται* ικανοποιητικά τα *τμήματα* των φωτογραφιών (patches).

Θα πρέπει να τονισθεί ότι η *ταυτόχρονη* εφαρμογή των δύο μεθόδων στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή είναι ιδιαίτερα *απαιτητική* και προκύπτουν συχνά *διάφορες απρόβλεπτες ατέλειες* στην εφαρμογή της μεθοδολογίας των πειραμάτων τις οποίες συχνά ο ερευνητής καλείτε να *επιλύσει* σε μικρό χρονικό διάστημα με όσα μέσα διαθέτει την προκειμένη στιγμή. Στην παρούσα μελέτη προέκυψαν *ατέλειες και απρόοπτα* κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων με αποτέλεσμα να *χρειαστεί να επαναληφθούν* κάποια από αυτά προκειμένου να *ληφθούν συμπληρωματικές μετρήσεις*.

➤ *Κατασκευή μοντέλων, υλοποίηση πειραματικής διάταξης και μετρήσεις:*

Στο 7^ο **Κεφάλαιο** παρουσιάστηκε η μέθοδος που *εφαρμόστηκε* και *προτείνεται* για την *κατασκευή* των μοντέλων *οπλισμένων πρανών* υπό κλίμακα καθώς και η *διαδικασία μεταφοράς* και *στερέωσης* αυτών στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETH Zurich. Στην

συνέχεια έγινε περιγραφή των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους και των στρώσεων οπλισμού που επιλέχθηκαν, παρουσιάστηκαν φωτογραφίες αυτών και έγινε αναγωγή της γεωμετρίας και της αντοχής τους για διάφορες τιμές του συντελεστή μοντελοποίησης n , που αντιστοιχεί σε διάφορες στάθμες της επιτάχυνσης της βαρύτητας.

Ειδικότερα, περιγράφηκε η πειραματική διάταξη και οι μετρητικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν ενώ επίσης πραγματοποιήθηκαν προτάσεις οδηγιών για την επιτυχή διεξαγωγή πειραμάτων σε οπλισμένη γη καθώς και για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η εφαρμογή των αισθητήρων οπτικών ινών στον φυγοκεντριστή με στόχο την καταγραφή των αναπτυσσόμενων «γραμμικών» τροπών στις στρώσεις οπλισμού των πρανών χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά (2009) στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETH Zurich και εφαρμόστηκε με επιτυχία κατά την διάρκεια των πειραμάτων στα πλαίσια της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής. Η μέθοδος συγκόλλησης των αισθητήρων στις στρώσεις οπλισμού, η διάταξη τους και ο τρόπος συλλογής των μετρήσεων παρουσιάστηκε με λεπτομέρεια, ενώ επίσης επισημάνθηκαν δυσκολίες και σημεία στα οποία θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή.

Περιγράφηκε επίσης και η εφαρμογή του λογισμικού GeoPIV, στα πλαίσια των μετρητικών διατάξεων έτσι όπως χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα και επισημαίνονται σημεία προσοχής τόσο κατά την προετοιμασία των μοντέλων, όσο και για την μετέπειτα επεξεργασία των μετρήσεων με στόχο τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Στο 8^ο Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις μέσω αισθητήρων οπτικών ινών όπου και παρατηρήθηκε ότι οι μεταβολή των τροπών είναι ανάλογη με τις μεταβολή της στάθμης της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Επίσης, στην διαμόρφωση του μεγέθους τροπής σημαντικό ρόλο παίζει και το υλικό πάνω στο οποίο είναι επικολλημένοι οι αισθητήρες καθώς και ο τρόπος που αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας, δηλαδή σε βήματα των 5g ή απευθείας σε 50g και 100g. Συγκεκριμένα όπως ήταν αναμενόμενο, στα οπλισμένα πρανή με στρώσεις οπλισμού με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας, όπως για παράδειγμα στο **Τεστ Νο.4** και **Τεστ Νο.8**, οι τροπές που μετρώνται είναι αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές των άλλων πειραμάτων όπως για παράδειγμα των **Τεστ Νο.9** και **Τεστ Νο.10**. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η θέση των

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

αισθητήρων στο εσωτερικό του πρανούς, επηρεάζει άμεσα τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ενώ επίσης το φαινόμενο της απελευθέρωσης των μοντέλων «βράχων» γίνεται αντιληπτό από τους αισθητήρες κοντά στα μεσαία στρώματα του πρανούς, παρά την μεγάλη ταχύτητα του φαινομένου. Ωστόσο παρατηρείται αδυναμία καταγραφής μετρήσεων κοντά στην στέψη του πρανούς, λόγω της μικρής απόστασης από την περιοχή στην οποία προσγειώνεται το μοντέλο «βράχου».

Σχετικά με την ανάλυση των πειραματικών μοντέλων μέσω του *GeoPIV*, τα αποτελέσματα προκύπτουν σε δύο μορφές, μία που δείχνει την κίνηση που πραγματοποιεί το πρανές κατά την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας με τα διανύσματα ροής (*flow vectors*) και μία ακόμη που παρουσιάζει ποσοτικοποιημένες τις τροπές (*strain vectors*) για διάφορες στάθμες της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Και στα τρία πειράματα που αναλύθηκαν, μπορεί να παρατηρηθεί η πολύ παραστατική μετακίνηση του πρανούς προς τα κάτω, λόγω της αύξησης της επιτάχυνσης της βαρύτητας, η οποία και αποτυπώνεται στα διανύσματα ροής. Αντίστοιχα και στα σχήματα που παρουσιάζονται ποσοτικοποιημένες οι τροπές, παρατηρείται η αύξηση των τιμών αυτών, καθώς αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας.

10.4 Αξιολόγηση πειραματικών μετρήσεων.

➤ *Μετρήσεις μέσω αισθητήρων οπτικών ινών:*

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα αποτελέσματα που προέκυψαν και παρουσιάστηκαν στα Σχήματα του 9^{ου} Κεφαλαίου, οι τιμές των αναπτυσσόμενων τροπών μεταβάλλονται αναλογικά με την αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας, διατηρούνται σταθερές καθώς η στάθμη παραμένει σταθερή, ενώ γίνεται αισθητό και το φαινόμενο της «βραχόπτωσης», κατά την απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου» στην στέψη του πρανούς.

Η διαφοροποίηση στις τιμές των τροπών για τα **Τεστ Νο. 4** και **Τεστ Νο. 8**, οφείλεται στο γεγονός ότι, παρότι ο αισθητήρας οπτικών ινών επικολλήθηκε στο ίδιο υλικό («Ανθρακοϋφασμα») και στην ίδια στάθμη στο πρανές, το υπόλοιπο μοντέλο του πειράματος **Νο.4** κατασκευάστηκε από υλικό οπλισμού με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από ότι το αντίστοιχο μοντέλο του πειράματος **Νο.8**, με αποτέλεσμα οι συνολικές αναπτυσσόμενες τροπές να είναι μικρότερες για το **Τεστ Νο. 4**.

Από το **Τεστ Νο.9**, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η διαδικασία φόρτισης-αποφόρτισης- εκ νέου φόρτισης, παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των τροπών και τονίζεται ότι προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα, με μειωμένες τιμές για τις αναπτυσσόμενες τροπές, για το ίδιο μέγεθος του φορτίου κατά τον δεύτερο κύκλο φόρτισης – από 1g σε 50g, ξανά σε 1g και πάλι σε 50g

Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι αναπτυσσόμενες τροπές είναι σημαντικά μεγαλύτερες κοντά στην στρώση **Νο.4** που βρίσκεται στην μεσαία στάθμη του πρανούς, σε σχέση με την στρώση **Νο.8** που βρίσκεται κοντά στην στέψη του πρανούς, ενώ και στις δύο περιπτώσεις ακολουθούν παρόμοια πορεία.

Σχετικά με την σύγκριση δύο αισθητήρων τοποθετημένων στην ίδια στρώση οπλισμού, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι μετρούμενες τροπές είναι κατάντι μεγαλύτερες κοντά στο εσωτερικό του πρανούς, κυρίως όσο αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Κατά την σύγκριση των αναπτυσσόμενων τροπών για διαφορετικά **Τεστ Νο. 10, 12, 13** και **14**, παρατηρείται ότι για τις αντίστοιχες στάθμες της επιτάχυνσης της βαρύτητας και για τις ίδιες φάσεις φορτίσεων, οι αναπτυσσόμενες τροπές λαμβάνουν παρόμοιες τιμές.

Κατά την απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου» παρατηρείται στιγμιαία αύξηση της τροπής, ενώ ορισμένοι από τους αισθητήρες δεν καταγράφουν μεταβολή. Πρόκειται κυρίως για τους αισθητήρες που βρίσκονται κοντά στην πλάγια όψη των πρανών και αυτό οφείλεται πιθανότατα στην σχετικά μεγάλη απόσταση από το σημείο της απελευθέρωσης του μοντέλου «βράχου». Επίσης, αδυναμία στην λήψη μετρήσεων κατά την απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου», παρουσιάζεται και στους αισθητήρες που βρίσκονται κοντά στην στέψη των πρανών, πιθανότατα λόγω της μεγάλης ορμής του μοντέλου «βράχου», που οδήγησε σε αστοχία αυτών.

Γενικά, από την σύγκριση των μετρήσεων που ελήφθησαν για διάφορα πειράματα μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών προκύπτει ότι τα αποτελέσματα είναι λογικά και αναμενόμενα, τόσο από πλευράς μορφής των διαγραμμάτων, όσο και από πλευράς τάξης μεγέθους. Ειδικότερα, επιβεβαιώνεται ότι οι αισθητήρες λαμβάνουν τροπές ανάλογες με την μεταβολή της επιτάχυνσης της βαρύτητας, ενώ παραμένουν αδρανείς σε σταθερές τιμές του g. Επίσης,

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

το γεγονός ότι για διαφορετικά πειράματα προκύπτουν παρόμοια αποτελέσματα σχεδόν για όλες τις φάσεις φορτίσεων, δείχνει ότι η *μετρητική μέθοδος* που εφαρμόστηκε για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας είναι *επιτυχής* και μπορεί να δώσει *χρήσιμα συμπεράσματα* για την συμπεριφορά του μοντέλου κατά την φόρτισή του στον *γεωτεχνικό φυγοκεντριστή*.

Ωστόσο, παρατηρήθηκαν και κάποιες *ασυνέχειες* και *διαφοροποιήσεις*, οι οποίες οφείλονται σε γενικές γραμμές στο γεγονός ότι η μετρητική διάταξη των αισθητήρων οπτικών ινών *δεν έχει δημιουργηθεί εξ' αρχής* για την διερεύνηση κατασκευών στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή αλλά πρόκειται για *μια προσαρμοσμένη μέθοδο* η οποία και συνδυάστηκε με άλλα ήδη υπάρχοντα διαθέσιμα μέσα του εργαστηρίου του ETH Zurich.

Τέλος, μπορεί να παρατηρηθεί, υπάρχει κάποια *αναλογία* μεταξύ των μετρήσεων για τις *διάφορες στάθμες* της επιτάχυνσης της βαρύτητας και συγκεκριμένα προκύπτει ότι στην στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 50g, οι αναπτυσσόμενες τροπές είναι από 1.74 έως και 1.96 φορές μεγαλύτερες στην στρώση οπλισμού No.4 (*μεσαία στρώση*) από τις αντίστοιχες τροπές στην στρώση οπλισμού No.8 (*ανώτερη στρώση*). Ομοίως και για μέγιστη στάθμη της επιτάχυνσης της βαρύτητας 100g, η αναλογία αυτή κυμαίνεται μεταξύ του 1.48 έως και 2.

➤ *Μετρήσεις με την μέθοδο PIV:*

Οι ψηφιακές φωτογραφίες που ελήφθησαν στην *πλάγια όψη* των οπλισμένων πρανών κατά την περιστροφή του γεωτεχνικού φυγοκεντριστή και η επεξεργασία αυτών με το λογισμικό *GeoPIV*, δείχνουν καθαρά ότι *τροπές αυξάνουν* καθώς *αυξάνει* η επιτάχυνση της βαρύτητας όπως ήταν αναμενόμενο. Με την εφαρμογή της μεθόδου δόθηκε η δυνατότητα να προσδιοριστούν και οι *μηχανισμοί αστοχίας* των πρανών, οι οποίοι και εντοπίστηκαν κοντά στο *μέσο του πρανούς*, μετά το *πέρας της οπλισμένης εδαφική μάζας*. Επίσης, αυξημένη αστοχία παρατηρήθηκε κοντά στον *πόδα* και την *όψη* του πρανούς, λόγω του ότι εκεί συγκεντρώνεται η *μικρή ποσότητα νερού* που είχε τοποθετηθεί στο μοντέλο για την μεταφορά του στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.

Οι *μέγιστες τιμές* των αναπτυσσόμενων *τροπών* παρουσίασαν σχεδόν *αναλογική αύξηση* με την αντίστοιχη αύξηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας, για στάθμη περίπου έως και 50g, στην συνέχεια μια *απότομη αύξηση* της τροπής σε στάθμη 50g και τέλος *σταθεροποίηση* της

τιμής των τροπών για σταθερή τιμή 50g. Η απότομη αύξηση της τροπής μπορεί θεωρηθεί ότι οφείλεται στην *απελευθέρωση του μοντέλου «βράχου»*, στην κορυφή του πρανούς, η οποία και πραγματοποιήθηκε εκείνη την χρονική περίοδο, ενώ στην συνέχεια η *σταθεροποίηση* των τροπών οφείλεται στο γεγονός ότι εκείνη την χρονική περίοδο η επιτάχυνση διατηρείται σταθερή.

Κατά τον εντοπισμό των αντίστοιχων θέσεων των αισθητήρων οπτικών ινών πάνω σε ορισμένα από τα σχήματα τροπών που προέκυψαν κατά την ανάλυση με το λογισμικό GeoPIV, παρατηρείται ότι οι θέσεις αυτές δεν είναι πάντα οι *κρισιμότερες* από άποψη μεγέθους των αναπτυσσόμενων τροπών, ενώ επίσης, ο *ακριβής εντοπισμός* της θέσης αυτής δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί. Έτσι, προσδιορίζονται κατά προσέγγιση οι περιοχές στις οποίες αντιστοιχούν οι αισθητήρες οπτικών ινών. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τον συσχετισμό αυτό, οι αναπτυσσόμενες τροπές αυξάνουν καθώς αυξάνει η επιτάχυνση της βαρύτητας όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο και η θέση των αισθητήρων οπτικών ινών παίζει σημαντικό ρόλο, ακόμη και για αισθητήρες τοποθετημένους στην ίδια στρώση οπλισμού, αλλά σε διαφορετική θέση όπως για παράδειγμα κοντά στην όψη ή κοντά στο μέσο του πρανούς.

Θα πρέπει να επισημανθεί εκ νέου ότι οι μετρήσεις που ελήφθησαν μέσω αισθητήρων οπτικών ινών αφορούν τροπή μετρούμενη κατά μήκος των οπλισμών, ενώ οι υπολογισμοί που προέκυψαν κατά την ανάλυση με την μέθοδο GeoPIV, αφορούν *διατμητική τροπή* (shear strain). Έτσι, είναι προφανές, ότι με τα υπάρχοντα αποτελέσματα, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί απευθείας σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων μέσω οπτικών ινών και των υπολογισμών μέσω της ανάλυσης PIV.

Τέλος, θα πρέπει να επαναληφθεί, ότι ο *προσδιορισμός* των θέσεων των αισθητήρων οπτικών ινών καθώς και των τιμών των διατμητικών τροπών μέσω της μεθόδου GeoPIV, πραγματοποιείται κατά προσέγγιση και οι τιμές αυτές δεν είναι απολύτως ακριβείς, όπως συμβαίνει με την περίπτωση των αντίστοιχων μετρήσεων μέσω αισθητήρων οπτικών ινών, όπου υπάρχουν καθαρές καταγραφές. Η χρήση λοιπόν του GeoPIV στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας παρέχει πληροφορίες κυρίως για τους αναπτυσσόμενους μηχανισμούς αστοχίας του πρανούς κατά τις διάφορες φάσεις φορτίσεων.

Συμπερασματικά επισημαίνεται ότι οι μετρήσεις που ελήφθησαν μέσω αισθητήρων οπτικών ινών αφορούν τροπή μετρούμενη κατά μήκος των οπλισμών (*linear strain*), ενώ οι υπολογισμοί που προέκυψαν κατά την ανάλυση με την μέθοδο *GeoPIV*, αφορούν διατμητική τροπή (*shear strain*). Έτσι, είναι προφανές, ότι με τα υπάρχοντα αποτελέσματα, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί απευθείας σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων μέσω οπτικών ινών και των υπολογισμών μέσω της ανάλυσης *PIV*. Ωστόσο μπορεί να πραγματοποιηθεί κάποιος συσχετισμός των θέσεων που τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες οπτικών ινών με τον μηχανισμό αστοχίας. Ειδικότερα παρατηρείται ότι ο μηχανισμός αστοχίας εντοπίζεται μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας, επιβεβαιώνοντας την επιτυχή λειτουργία των οπλισμών καθώς οδήγησαν την αστοχία μετά το πέρας αυτών. Από την άλλη πλευρά, οι αισθητήρες οπτικών ινών βρίσκονται στο εσωτερικό της οπλισμένης εδαφικής μάζας και δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την συμπεριφορά των μοντέλων στην περιοχή αυτή.

10.5 Αναγωγή πειραματικών μοντέλων σε αντίστοιχα μοντέλα πρωτότυπων κατασκευών και υπολογιστική διερεύνηση.

➤ *Ανάλυση με τα λογισμικά Slide και Phase:*

Κατά την αναγωγή των πειραματικών μοντέλων σε αντίστοιχα μοντέλα πρωτότυπων κατασκευών και την ανάλυσή τους με το λογισμικό *Slide*, προέκυψε ότι οι *Συντελεστές Ασφαλείας* (*Σ.Α.*) των μοντέλων είναι μεγαλύτεροι της μονάδας για όλες τις περιπτώσεις, ενώ οι τιμές τους μειώνονται καθώς αυξάνει ο συντελεστής κλίμακας n και επομένως και το ύψος του πρηνούς, όπως ήταν αναμενόμενο. Επίσης οι τιμές των *Σ.Α.* που προέκυψαν κατά την ανάλυση με την μέθοδο *Bishop* είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που προέκυψαν με την μέθοδο *Janbu*.

Πραγματοποιήθηκε επίσης διερεύνηση της επιρροής του συνόρου των υπολογιστικών μοντέλων, τα οποία και δημιουργήθηκαν αρχικά με γεωμετρία όμοια με αυτή των πειραματικών μοντέλων, με περιορισμένα δηλαδή όρια πολύ κοντά στο τέλος της οπλισμένης εδαφικής μάζας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα πολλές φορές να μην μπορεί να προσδιορισθεί ο πραγματικός *Σ.Α.* με τις μεθόδους *Bishop* και *Janbu*. Έτσι, πραγματοποιήθηκε εκ νέου ανάλυση με τις δύο αυτές μεθόδους, με μοντέλα με εκτεταμένα

όρια και προέκυψε ότι σχεδόν όλοι οι μηχανισμοί αστοχίας βρίσκονταν μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας με αποτέλεσμα οι τιμές του Σ.Α. να είναι παρόμοιες για μοντέλα ίδιου ύψους. Υπενθυμίζεται ότι επιλέχθηκαν κοινά χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού και διαφορετικοί οπλισμοί, οι οποίοι όμως δεν έπαιζαν σημαντικό ρόλο, λόγω εντοπισμού του κρίσιμου μηχανισμού σε περιοχή εκτός των οπλισμών. Επίσης, το γεγονός αυτό δείχνει την *επιτυχή* ενίσχυση-όπλιση των πρανών για τα πειραματικά και υπολογιστικά μοντέλα.

Η αυξημένη τιμή των Σ.Α. των μοντέλων δείχνει ότι τα αποτελέσματα της υπολογιστικής διερεύνησης με το Slide, *ταυτίζονται* με τα πειραματικά αποτελέσματα, για όλα τα μοντέλα που φορτίστηκαν στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή του ETH Zurich, καθώς σε όλα παρουσιάστηκαν *πεπερασμένες μετακινήσεις* και όχι *πλήρης αστοχία*.

Στην συνέχεια υπολογίσθηκαν μέσω του λογισμικού Phase και την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, οι τιμές του *Συντελεστή Μείωσης της Αντοχής* (SRF) οι οποίες και είναι *χαρακτηριστικές* για το κάθε μοντέλο και εκφράζουν την *αντοχή* του. Και σε αυτή την περίπτωση οι τιμές του SRF *μειώνονται* με την *αύξηση* του συντελεστή n , λόγω του ότι μεγαλύτερος συντελεστής σημαίνει υψηλότερο και επομένως και ασθενέστερο πρανές. Επίσης πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της *επιρροής του συνόρου* και διαπιστώθηκε ότι για την μέθοδο αυτή δεν παίζουν σημαντικό ρόλο τα εκτεταμένα ή περιορισμένα όρια. Ωστόσο, επιλέχθηκαν για περεταίρω ανάλυση μοντέλα με *περιορισμένα όρια* που αντιπροσώπευαν καλύτερα τα πειραματικά μοντέλα. Επιβεβαιώθηκε επίσης και η *συμβατότητα* των δύο υπολογιστικών μεθόδων για τα εν λόγω μοντέλα, καθώς οι τιμές του SRF που υπολογίσθηκαν ήταν *πολύ κοντά* με τις αντίστοιχες τιμές των Σ.Α.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε *σύγκριση* των μέγιστων τιμών των διατμητικών τροπών για *διάφορες τιμές* του *Συντελεστή SRF*, σε ορισμένες από τις στρώσεις οπλισμού για τα τέσσερα διαφορετικά μοντέλα. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι στρώσεις οπλισμού Νο. 4 και 8 οι οποίες βρίσκονται κοντά στο μέσο και στην στέψη των πρανών αντίστοιχα.

Κατά την ανάλυση των επιμέρους στρώσεων προέκυψε ότι για *μεγαλύτερες* τιμές του *Συντελεστή SRF*, οι αναπτυσσόμενες διατμητικές *τροπές* είναι *μεγαλύτερες*, ενώ για *SRF* κοντά στην *μονάδα* οι τιμές μειώνονται και αντιπροσωπεύουν την *πραγματική κατάσταση*. Οι μεγαλύτερες τιμές των διατμητικών τροπών εμφανίζονται κοντά στα *ανώτερα τμήματα* του

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

πρανούς και προς το μέσον της οπλισμένης εδαφικής μάζας. Η συμπεριφορά αυτή του μοντέλου αποτυπώνεται και κατά την πειραματική ανάλυση με την μέθοδο *GeoPIV*.

Ακολούθως, υπολογίσθηκαν με την μέθοδο αυτή οι *διατμητικές τροπές* για συντελεστή $SRF=1$, καθώς και ο αντίστοιχος *μηχανισμός αστοχίας*. Σε όλα τα υπολογιστικά μοντέλα, ο μηχανισμός αστοχίας εντοπίστηκε κυρίως μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας και κοντά στα ανώτερα τμήματα των πρανών. Για την περίπτωση αυτή οι τιμές των αναπτυσσόμενων τροπών ήταν μικρότερες από τις αντίστοιχες που υπολογίσθηκαν για διάφορες τιμές του συντελεστή SRF μεγαλύτερες του 1, όπως ήταν αναμενόμενο.

➤ *Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογιστικής διερεύνησης με αντίστοιχα αποτελέσματα πειραματικής διερεύνησης*

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε *σύγκριση* των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά την πειραματική διερεύνηση των μοντέλων υπο κλίμακα στον φυγοκεντριστή, με αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την υπολογιστική διερεύνηση των αντίστοιχων πρωτότυπων μοντέλων. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των τροπών που υπολογίσθηκαν μέσω των ψηφιακών φωτογραφιών που ελήφθησαν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων και το λογισμικό *GeoPIV*, καθώς επίσης σύγκριση των «*γραμμικών*» τροπών που προέκυψαν κατά μήκος των στρώσεων οπλισμών με τις μετρήσεις μέσω των *οπτικών ινών*, με αντίστοιχες «*γραμμικές*» τροπές που προέκυψαν κατά την ανάλυση με την μέθοδο των *πεπερασμένων στοιχείων*.

Κατά την ανάλυση με το *GeoPIV*, ο μηχανισμός αστοχίας εντοπίστηκε κοντά στα ανώτερα τμήματα του μοντέλου και μετά το πέρας της οπλισμένης εδαφικής μάζας και παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν κατά την ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης προέκυψε ότι για το ασθενέστερο υλικό, «*Κουρτίνα Β*» τα αποτελέσματα ήταν πιο *συμβατά* με αυτά του *GeoPIV*, από ότι τα αντίστοιχα αποτελέσματα με του υλικού «*Επίδεσμος*». Επίσης παρατηρήθηκε ότι οι *αυξημένες* τιμές των διατμητικών τροπών στα κατώτερα και κοντά στην *όψη* τμήματα του πρανούς που προέκυψαν κατά την ανάλυση με το *GeoPIV*, *δεν συμβαδίζουν* με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της υπολογιστικής διερεύνησης καθώς προκύπτουν από την προκαθορισμένη ποσότητα νερού που είχε τοποθετηθεί στα πειραματικά μοντέλα για την μεταφορά αυτών στον γεωτεχνικό φυγοκεντριστή.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά την πειραματική διερεύνηση και τις μετρήσεις μέσω των *αισθητήρων οπτικών ινών-«γραμμικές» τροπές*- με αντίστοιχες *«γραμμικές» τροπές* που προέκυψαν κατά την ανάλυση με την μέθοδο των *πεπερασμένων στοιχείων*. Οι τροπές που προέκυψαν κατά την υπολογιστική διερεύνηση, προκύπτουν από την διαίρεση της *οριζόντιας επιμήκυνσης* dl στις στρώσεις οπλισμών, με το αντίστοιχο μήκος l ($\epsilon=dl/l$). Επιλέχθηκαν 2 στρώσεις οπλισμών, η στρώση Νο. 4 κοντά στο μέσο του πρανούς και η στρώση Νο. 8 κοντά στα ανώτερα τμήματα αυτού.

Πραγματοποιήθηκε επίσης διερεύνηση της *διεπιφάνειας* μεταξύ εδάφους και οπλισμού, μέσω της *Ορθής και Διατμητικής Στιβαρότητας* (*Normal και Shear Stiffness*) των υπολογιστικών μοντέλων. Ειδικότερα, κατά την δημιουργία των υπολογιστικών μοντέλων, επιλέχθηκαν διάφορες τιμές των αυτών, με στόχο να βρεθούν εκείνες για τις οποίες *τα υπολογιστικά αποτελέσματα συμπίπτουν με τα αντίστοιχα πειραματικά*.

Παρατηρήθηκε ότι οι τιμές των υπολογιστικών τροπών για την στρώση Νο. 4, *ταυτίζονται* με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για τιμή της *Ορθής Στιβαρότητας* ίση με *20000 kPa* και για τιμή της *Διατμητικής Στιβαρότητας* ίση με *5000 kPa*. Η ταύτιση αυτή ισχύει για το μέσο των στρώσεων οπλισμού, ενώ κοντά στην όψη των πρανών παρατηρείται ότι *δεν υπάρχει ταύτιση* λόγω των διαφορετικών συνθηκών προσομοίωσης.

Για την στρώση οπλισμού Νο. 8, παρατηρήθηκε ότι οι τιμές των υπολογιστικών τροπών ταυτίζονται με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για τιμή της *Ορθής Στιβαρότητας* ίση με *20000 kPa* και για τιμή της *Διατμητικής Στιβαρότητας* ίση με *15000 kPa*. Και σε αυτή την περίπτωση η ταύτιση παρατηρείται για τις τιμές κοντά στο μέσο των στρώσεων οπλισμού, ενώ κοντά στην όψη υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση λόγω αδυναμίας σωστής μοντελοποίησης στην περιοχή αυτή.

Προκύπτει λοιπόν ότι στις *κατώτερες* στρώσεις οπλισμού, ενεργοποιείται *μικρότερη τιμή* της *Διατμητικής Στιβαρότητας* και οι *τροπές* είναι *μεγαλύτερες*, ενώ για τις *ανώτερες* στρώσεις ενεργοποιείται *μεγαλύτερη τιμή* της *Διατμητικής Στιβαρότητας* και οι *τροπές* είναι *μικρότερες*. Επίσης, προκύπτει ότι με την εφαρμογή αισθητήρων οπτικών ινών στο *εσωτερικό* των πειραματικών μοντέλων και στην συνέχεια με την *υπολογιστική* διερεύνησή τους, μπορούν

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

να προσδιορισθούν ορισμένα *χαρακτηριστικά* των μοντέλων με ακριβέστερο τρόπο. Έτσι, με τον συνδυασμό των μετρήσεων μέσω αισθητήρων οπτικών ινών και των υπολογιστικών μοντέλων, προσδιορίστηκαν οι τιμές της *Ορθής και Διατμητικής Στιβαρότητας* και στην συνέχεια με τις τιμές αυτές μπορούν να αναλυθούν ξανά τα υπολογιστικά μοντέλα.

10.6 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Σχετικά με *περαιτέρω έρευνα* που μπορεί να πραγματοποιηθεί για την διερεύνηση των οπλισμένων πρανών με απλή και σύνθετη γεωμετρία, έναντι στατικής και σεισμικής φόρτισης, με αναλυτικές, πειραματικές και υπολογιστικές μεθόδους, προτείνονται τα εξής:

- **Επέκταση** της αναλυτικής λύσης με ενσωμάτωση επιπλέον μηχανισμών αστοχίας (Direct Sliding, Log-Spiral κλπ) και δημιουργία εξισώσεων για πρανή με σύνθετη γεωμετρία (αναβαθμούς).
- **Επέκταση** του λογισμικού στην Delphi με ενσωμάτωση των εξισώσεων των επιπλέον μηχανισμών αστοχίας, για πρανή με σύνθετη γεωμετρία (αναβαθμούς).
- **Τυποποίηση** μεθόδων ενσωμάτωσης αισθητήρων οπτικών ινών σε γεωσυνθετικά υπό κλίμακα.
- **Διερεύνηση** υλικών συγκόλλησης αισθητήρων και δημιουργία σταθερότερης συνένωσης αυτών σε σειρά.
- **Βελτίωση** μετρητικής διάταξης για την χρήση αισθητήρων οπτικών ινών στον γεωτεχνικό φυγοκεντρική.
- **Βελτίωση** μετρητικής διάταξης για την λήψη ψηφιακών φωτογραφιών και ανάλυσης PIV στον γεωτεχνικό φυγοκεντρική.
- **Αυτοματοποίηση** λογισμικού GeoPIV.
- **Σεισμική φόρτιση** οπλισμένων πρανών στον γεωτεχνικό φυγοκεντρική σε συνδυασμό με τις παραπάνω μεθόδους (οπτικές ίνες και GeoPIV).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Ambraseys, N.N. & Menu J.M., 1988. "Earthquake-induced ground displacements". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, pp. 985-1006.
- Ambraseys, N.N., 1995. "The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, pp. 467-490.
- Ambraseys, N.N., Simpson K.A. & Bommer J.J., 1996. "Prediction of horizontal response spectra in Europe". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 371-400.
- Amiet, P., 1981. "La grammaire des forms et des styles", *Antiquité*.
- ASTM D4439 – 04, Standard Terminology for Geosynthetics.
- Ausilio, E., Conte E. & Dente G., 2000. "Seismic stability analysis of reinforced slopes". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, pp. 159-172.
- Balachandran, S., 1996. "Modelling of Geosynthetic Reinforced Soil Walls", *PhD Thesis*, Cambridge University.
- Beckam, W. K., & Mills, W. H., 1935. "Cotton Fabric Reinforced Roads", *Engineering News Record*, pp. 453-455.
- Betram, G. E., 1940. "An Experimental Investigation of Protective Filters", *Graduate School of Engineering*, Harvard University, Publ. 267.
- Bishop, A. W. 1955. "The use of the slip circle in the stability of slopes". *Geotechnique*, London, U.K., 5,7-17.
- Boore, D.M., Joyner W.B., & Fumal T.E., 1993. "Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes: an interim report". *U.S. Geological Survey*, Open-File Rept. 93-509, 72 pp.
- Bridgman, P.W., 1922. "Dimensional Analysis". Publ. *New Haven, Yale University Press*.
- Buckingham, E., 1914. "On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations". *Physical Review* 4, 345-376.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

Buckingham, E., 1915. “Model experiments and the forms of empirical equations”. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers* 37, 263-296.

Buckingham, E., 1915. “The principle of similitude”. *Nature* 96, 396-397.

Bucky, P.B., 1931. “The use of models for the study of mining problems”. *Technical Publication* 425, New York: American Institute of Mining and Metallurgical Engineering.

Campbell, K.W., 1985. “Strong motion attenuation relations: a ten year perspective”. *Earthquake Spectra*, 1, 759–804.

Chen, W.F., 1975. “Limit analysis and soil plasticity”. *Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier Science Publishers, BV, Amsterdam, The Netherlands.

Chiaruttini, C., & Siro L., 1981. “The correlation of peak ground horizontal acceleration with magnitude, distance, and seismic intensity for Friuli and Ancona, Italy and the Alpid belt”. *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, 71, 1993–2009.

Coulomb, C.A., 1776. “Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture”, *Mem. Acad. Roy. Div. Sav.*, vol. 7, pp. 343–387.

Dewar, S., 1962. “The Oldest Roads in Britain”, *The Countryman*, Vol. 59, No. 3, pp. 547-555.

Drucker D.C. & Prager, W. 1952. “Soil Mechanics and plastic analysis on limit design”. *Quarterly of Applied Mathematics*, 10, No. 2, 157-172.

Engineering guides BS 8006:1995.

Fellenius, W.O., 1926. “Mechanics of Soils”. Statika Gruntov, Gosstrollzdat.

Garnier, J. Gaudin, C., Springman, S.M., Culligan, P.J., Goodings, D., Konig, D., Kutter, B., Philips, R., Randolph, M.F. & Thorel, L., 2007. “Catalogue of Scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modeling”, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*. 7(3):1-23.

Hossdorf, H., 1971. “Model Analysis of Structures”. Bauverlag GmbH, Wiesbaden & Berlin.

Janbu, N., 1954. “Stability analysis of slopes with dimensionless parameters”. *Harvard soil mechanics series*, No. 46.

- Kapogianni, E. & Sakellariou, M., 2008. “Analytical solution of multi step reinforced-soil slopes stability due to static and seismic loading”. *1st International Conference on Transportation Geotechnics*, Nottingham, UK.
- Kapogianni, E. Sakellariou, M. “Comparison of an analytical solution for multi-step reinforced soil slopes with conventional numerical methods”. *4th European Geosynthetics Conference*, 2008, Edinburgh, Scotland.
- Kapogianni, E., Skaellariou, M., Kalogeras, I. “Methodology for the design of reinforced soil slopes with simple and composite geometry under seismic loading and evaluation of their vulnerability”. *3rd Panhellenic Conference on Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, November 2008, Athens, Greece.
- Kapogianni, E., Laue, J. & Sakellariou, M., 2010. “Reinforced slope modelling in a geotechnical centrifuge”, *7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, 28 June-1 July, Zurich, Switzerland.
- Kapogianni, E., Laue, J. & Sakellariou, M., Springman, S.M., 2010. “The use of optical fibers in the centrifuge”, *7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, 28 June-1 July, Zurich, Switzerland.
- Kapogianni, E., Laue, J. & Sakellariou, M., 2010. “Investigation of the behaviour of reinforced slopes in a geotechnical centrifuge”, *6th Hellenic Conference on Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 29th September - 1st October, Volos, Greece.
- Kapogianni, E., Laue, J. & Sakellariou, M., 2010. “Measuring of deformations on reinforced slope models in a geotechnical centrifuge with the use of optical fibers and digital images with PIV analysis”, *6th Hellenic Conference on Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 29th September - 1st October, Volos, Greece.
- Kapogianni, E., Laue, J., Sakellariou, M. “Numerical Modelling of Centrifuge Tests on Reinforced Slopes”. *5th European Geosynthetics Conference*, 16th-19th September 2012, Valencia, Spain.
- Koerner, R. M., 2012. *Designing with Geosynthetics*, 6th Edition Xlibris Publishing Co. Indianapolis, Indiana, 960 pgs.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

- Laue, J. 1996. “Zur Setzung von Flachfundamenten auf Sand unter wiederholten Lastereignissen”. *Schriftenreihe des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum*, Heft 25, Bochum, Germany.
- Laue, J. 2002. “Centrifuge Technology”. In Springman, S.M. (ed.). *Constitutive and Centrifuge Modelling: Two Extremes*. 75-112. Balkema.
- Ling, H.I., Leshchinsky, D. & Perry, E.B., 1997. “Seismic design and performance of geosynthetic-reinforced soil structures”, *Geotechnique* 47, 5, pp. 933–52.
- Margaris, B.N., Papazachos C.B., Papaioanou Ch., Theodoulidis N.P., Kalogeras I., & Skarlatoudis A.A., 2002. “Empirical attenuation relations for the horizontal strong ground motion parameters of shallow earthquakes in Greece”. *12th European Conference on Earthquake Engineering*, 9–13 September, London, UK.
- Michalowski, R.L., 1998. “Soil reinforcement for seismic design of geotechnical structures”. *Computers and Geotechnics*, 23. pp. 1-17.
- Milne W.G., & Davenport A.G., 1969. “Distribution of earthquake risk in Canada”. *Bulleting Seismic Society American* 59, 729–754.
- Mitchell, J. K. & Villet, W. C. B., 1987. *Reinforcement of Earth Slopes and Embankments*.
- Newmark, N.M., 1965. “Effects of earthquakes on dams and embankments”. *Geotechnique*, 15(2), pp. 139-159.
- Papaioannou, Ch.A., 1986. “Seismic hazard assessment and long term earthquake prediction in Southern Balkan region”. *2nd International Seminar on Earthquake Prognostics*, A. Vogel and Brandes K. (Editors), 14–27 June, Berlin, Germany.
- Papazachos, C.B., & Papaioannou Ch., 1997. “The macroseismic field of the Balkan area”, *Journal of Seismology* 1, 181–201.
- Papazachos, C. B., & Papaioannou Ch., 1998. “Further information on the macroseismic field in the Balkan area”. (reply on the comment of M. D. Trifunac on the paper “The macroseismic field of the Balkan area”), *Journal of Seismology*. 2, 363–375.

- Pokrovsky, I. S. & Fedorov, 1936. “Studies of soil pressures and soil deformations by means of a centrifuge”. *Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, UK.
- Ratchet, G., 1983. *Dictionnaire L' Archéologie*, Ed. Robert Laffont, S.A., Paris, France.
- Rinaldis, D., Berardi R., Theodulidis N.P., & Margaris B.N., 1998. “Empirical predictive models based on a joint Italian and Greek strong motion database: I, peak ground acceleration and velocity”. *11th ECEE (CD-ROM)* 6–11 September, Paris, France.
- Schofield, A. N., 1980. “Cambridge geotechnical centrifuge operations”, *Geotechnique* 30 (3): 227-268.
- Skarlatoudis, A.A., Papazachos C.B., & Margaris V.N., 2002. “Spectral noise determination from strong motion recordings in Greece”. *12th European Conf. on Earthquake Engineering and Engineering Seismology (CD-ROM)*, 9–13 September, London, UK.
- Skarlatoudis, A.A., Papazachos C.B., Margaris V.N., Theodulidis N.P., Papaioannou Ch., Kalogeras, I., Scordilis E.M., & Karakostas V., 2003. “Empirical Peak Ground-Motion Predictive Relations for Shallow Earthquakes in Greece”. *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, 93, 2591–2603.
- Spencer, E., 1967. “A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces”. *Geotechnique*, London, U.K., 17, 11-26.
- Springman, S.M., Bolton, M.D., Sharma, J. & Balachandran, S., 1992. “Modelling and Instrumentation of a geotextile in the geotechnical centrifuge”. *Proceedings of the International Conference on Earth Reinforcement Practice*, Kyushu, Japan, Balkema, Rotterdam, 167-172.
- Springman, S.M. 2001. “Lecture Notes for Modelling in Geotechnics”. ETH Zurich, Switzerland.
- Springman, S.M., Laue, J., Boyle, R., White, J. & Zweidler, A., 2001. “The ETH Zurich geotechnical drum centrifuge”, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnical Engineering*. 1(1):59-70.
- Theodulidis, N.P., 1991. “Contribution to strong ground motion study in Greece”. *Ph.D. Thesis* (in Greek), 500 pp.
- Terzaghi, K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

Vidal, H., ‘La Terre Armée’, 1969. *Annales de L Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics*, No. 259-260, pp. 1-59.

Viswanadham, B.V.S., Konig, D. & Triantafyllidis, T., 2006. “Centrifuge model tests on geotextile reinforced slope subjected to differential settlements”. In Ng et al. (eds.), *Physical Modelling in Geotechnics-6th ICPMG*. Taylor and Francis Group. London, UK.

Viswanadham, B.V.S. & Mahajan, R.R., 2007. “Centrifuge model tests on geotextile-reinforced slopes”. *Geosynthetics International* 14-6: 365-379.

Zornberg, J.G., Mitchell, J.K., & Sitar, N., 1997. “Testing of Reinforced Soil Slopes in a Geotechnical Centrifuge.” *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 20, No. 4, December, pp. 470-480.

ΟΑΣΠ & ΣΠΜΕ, 2000. «Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός» (ΕΑΚ 2000).

<http://www.embarcadero.com>

<http://www.fs.fed.us>

<http://www.rocscience.com>

<http://www.wikipedia.org>

<http://www.rocscience.com>