

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΙΧΩΝ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ
ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΠΑΤΡΙΝΟΣ
ΕΠΟΠΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΕΙΡΗΝΗ ΒΓΕΝΟΠΟΥΛΟΥ

ΠΑΤΡΑ - 2010

Πρόλογος

Στην σημερινή εποχή, οι υπολογιστές είναι ταχύτεροι και ισχυρότεροι από ποτέ καθώς και πιο εύχρηστοι από κάθε άλλη φορά. Με την πάροδο των χρόνων και με την σημαντική εξέλιξη που επετεύχθη στην ανάπτυξη λογισμικού, μπορούν να καλύπτουν κάθε ανάγκη που παρουσιάζεται στους ανθρώπους. Ανάγκες συνήθως για την διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων με ακρίβεια των μαθηματικών πράξεων και την αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων σε σημαντικά λιγότερο χρόνο από τον παραδοσιακό τρόπο.

Στο αντικείμενο του πολιτικού μηχανικού, οι υπολογιστές επιτέλεσαν σημαντικό ρόλο, όχι μόνο στον τομέα του CAD (Computer Aided Design), αλλά περισσότερο στον υπολογισμό των κατασκευών. Οι μέθοδοι των συνοριακών στοιχείων καθώς και των πεπερασμένων στοιχείων έχουν εξελιχθεί αρκετά τις τελευταίες δεκαετίες έτσι ώστε να δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε σημαντικά σύντομο χρονικό διάστημα. Νέες προοπτικές κατασκευών δημιουργήθηκαν, νέοι τρόποι και μέθοδοι κατασκευών άρχισαν να χρησιμοποιούνται. Η μορφή που έχουν οι σημερινές πόλεις και γενικότερα οι κοινωνίες οφείλουν σε μεγάλο βαθμό την ύπαρξη τους στην χρήση Η/Υ στον κατασκευαστικό τομέα.

Ο υπολογισμός τοίχων αντιστήριξης απαιτεί μεγάλη εξοικείωση τόσο στην χρήση του Η/Υ όσο και την γνώση του θεωρητικού υποβάθρου. Είναι, πραγματικά, αξιοσημείωτη η έκταση του υποβάθρου για τον υπολογισμό των τοίχων αντιστήριξης. Γι' αυτό, απαιτούνται γνώσεις εδαφομηχανικής, οπλισμένου σκυροδέματος, δυναμικής των ταλαντώσεων, σεισμικής μηχανικής κλπ.

Περίληψη

Η πτυχιακή αυτή εργασία αποτελείται από 4 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο διαβάζουμε την εισαγωγή, στο δεύτερο κεφάλαιο βρίσκουμε κάποιες βασικές γνώσεις για τα σεισμικά φαινόμενα όπως τα είδη σεισμών, τους ορισμούς κάποιων βασικών εννοιών όπως «μέγεθος του σεισμού», «ένταση», κλπ, την δράση που έχουν οι σεισμοί πάνω στις κατασκευές όπως οι κατολισθήσεις, η ρευστοποίηση του εδάφους, στην συνέχεια παρουσιάζονται κάποια στοιχεία για τους σεισμούς που έχουν πλήξει τον ελληνικό χώρο και τέλος μια αναφορά σε φαινόμενα ρευστοποίησης, που οφείλονται σε σεισμικές δονήσεις.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στις τρεις κυριότερες μεθόδους υπολογισμού των ωθήσεων γαιών που δρουν στους τοίχους αντιστήριξης. Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία που ακολούθησα για την κατασκευή του υπολογιστικού φύλλου, τα διαγράμματα που προέκυψαν από αυτό, και τέλος, η πιο σημαντική ενότητα αυτής της εργασίας, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα διαγράμματα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ	2
2.1. ΓΕΝΙΚΑ.	2
2.2. ΕΙΔΗ ΣΕΙΣΜΩΝ, ΚΥΜΑΤΩΝ ΚΛΠ	2
2.2.1. <i>Τεκτονικοί σεισμοί.</i>	3
2.2.2. <i>Ηφαιστιογενείς σεισμοί.</i>	3
2.2.3. <i>Σεισμοί εγκατακρημνίσεως.</i>	3
2.3. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ (ΜΕΓΕΘΟΣ-ΕΝΤΑΣΗ-ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ)	6
2.3.1. <i>Μέγεθος.</i>	6
2.3.2. <i>Ένταση.</i>	8
2.3.3. <i>Εδαφικές κινήσεις.</i>	9
2.4. Η ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ ΕΠΑΝΩ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.	11
2.4.1. <i>Κατολισθήσεις.</i>	12
2.4.2. <i>Επιφανειακό ρήγμα.</i>	12
2.4.3. <i>Ρευστοποίηση εδάφους.</i>	12
2.4.4. <i>Συμπύκνωση εδάφους.</i>	13
2.5. ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΧΩΡΟΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΙ	14
2.6. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΕΣ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟΥΣ.	18
3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΩΘΗΣΕΩΝ ΓΑΙΩΝ (RANKINE- COULOMB- ΜΟΝΟΝΟΒΕ/ΟΚΑΒΕ)	20
3.1. RANKINE.	20
3.2. COULOMB	22
3.3. ΜΟΝΟΝΟΒΕ-ΟΚΑΒΕ	22
4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ SF	25
4.1. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ - ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΛΑΒΑ ΥΠΟΨΗ	25
4.2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	27
4.3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	58

1. Εισαγωγή

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας, είναι η μελέτη και σύγκριση των ενεργητικών και παθητικών ωθήσεων που επιδρούν σε έναν τοίχο αντιστήριξης με τις τρεις, κυριότερες, θεωρίες υπολογισμού των ενεργητικών και παθητικών ωθήσεων (Rankine, Coulomb, Mononobe-Okabe).

Κατασκευάστηκε μια ρουτίνα υπολογισμού σε υπολογιστικό φύλλο του MS Office Excel, η οποία, για διάφορες διαστάσεις του τοίχου αντιστήριξης, καθώς και για διάφορα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους, υπολογίζει τις ενεργητικές και παθητικές ωθήσεις, και κατά συνέπεια τον «Συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης». Στην συνέχεια, συλλέγει τις τιμές του «Συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης» και συναρτησει τόσο της κλίσης του πρανούς στα ανάντη όσο και της γωνίας εσωτερικής τριβής του εδάφους στα ανάντη, δημιουργεί διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά, χρησιμεύουν, στην καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους καθώς και της σεισμικότητας μιας περιοχής στον «συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης»

Θεώρησα αναγκαίο, μιας και το αντικείμενο της πτυχιακής ασχολείται κατά ένα μέρος με το φαινόμενο του σεισμού, να αναφέρω κάποια βασικά στοιχεία του φαινομένου αυτού. Τους ορισμούς «μέγεθος», «ένταση» κλπ, τα είδη των σεισμικών κυμάτων, τον τρόπο που μεταδίδονται αυτά, τις κλίμακες υπολογισμού του μεγέθους και της έντασης καθώς και την επίδραση που έχει ο σεισμός πάνω στις κατασκευές. Αναφέρθηκα επίσης σε κάποια ιστορικά γεγονότα τόσο από την Ελλάδα όσο και από το εξωτερικό και τέλος, ανέφερα την θεωρία των τριών μεθόδων υπολογισμού των ωθήσεων.

2. Βασικές γνώσεις για τους σεισμούς

2.1. Γενικά.

Η σεισμική δράση επάνω στις κατασκευές εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων που αποτελούν αντικείμενο πολλών περιοχών της επιστήμης. Οι παράγοντες αυτοί θα μπορούσαν να καταταγούν σε τρεις κατηγορίες: η πρώτη περιλαμβάνει τα καθαρά σεισμολογικά δεδομένα — μέγεθος σεισμού, εστία, μηχανισμός γένεσης, κλπ.— και αποτελεί αντικείμενο των Σεισμολόγων η δεύτερη περιλαμβάνει τα γεωλογικά, τα γεωτεκτονικά, τοπογραφικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του μέσου που διασχίζουν τα σεισμικά κύματα από την εστία μέχρι τις κατασκευές και αφορά τους Γεωλόγους και τους Εδαφομηχανικούς· η τρίτη, τέλος, κατηγορία αναφέρεται στη δομή και στη σεισμική απόκριση της ίδιας της κατασκευής και αποτελεί αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού των κατασκευών. Είναι φανερό ότι η έκταση και η ποικιλία των παραπάνω παραγόντων δίνουν στη σεισμική δράση έναν εντελώς ειδικό χαρακτήρα, που δεν απαντάται στα άλλα είδη εξωτερικών δράσεων. Η ιδιαιτερότητα εν προκειμένω δεν οφείλεται μόνον στην εμπλοκή πολλών επιστημονικών κλάδων, αλλά και στην ανάγκη εξοικειώσεως του Μηχανικού με ιδιαίζοντα προβλήματα που δεν θέτουν οι συνηθείς εξωτερικές δράσεις των κατασκευών, ακόμη και εκείνες που έχουν δυναμικό χαρακτήρα, όπως π.χ. η ανεμοπίεση.

2.2. Είδη σεισμών, κυμάτων κλπ

Είναι γνωστό από γεωφυσικές και γεωλογικές μελέτες ότι η Γη αποτελείται από τον πυρήνα, το μανδύα και τον εξωτερικό φλοιό. Ο φλοιός και το επάνω μέρος του μανδύα συντίθεται από σκληρά πετρώματα με συνολικό πάχος 80 km περίπου και αποτελεί τη λεγόμενη λιθόσφαιρα. Κάτω από την λιθόσφαιρα, βρίσκεται ένα παχύρρευστο στρώμα υλικού που αποτελεί την ασθενόσφαιρα. Η λιθόσφαιρα δεν είναι ενιαία, αλλά διαχωρίζεται σε μερικότερα τμήματα από δύο συστήματα ζωνών διαρρήξεως: το ηπειρωτικό σύστημα και το σύστημα των μεσοωκεάνιων ράχων. Τα τμήματα αυτά της λιθόσφαιρας λέγονται λιθοσφαιρικές πλάκες.

Με την θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών, που γίνεται σήμερα αποδεκτή από τους Σεισμολόγους, ερμηνεύεται πλήρως η γένεση των τεκτονικών σεισμών, οι οποίοι αποτελούν και το σύνολο σχεδόν των σεισμών. Ένας μικρός αριθμός άλλων σεισμών, οι λεγόμενοι ηφαιστειογενείς σεισμοί και οι σεισμοί εγκατακρημνίσεως, οφείλονται σε ειδικότερα αίτια.

2.2.1. Τεκτονικοί σεισμοί.

Η γένεση των σεισμών αποδίδεται στις σχετικές κινήσεις και συγκρούσεις των λιθοσφαιρικών πλακών. Οι κινήσεις αυτές οφείλονται σε εφαπτομενικές πιέσεις που ασκούν στους πυθμένες των πλακών τα ρεύματα μεταφοράς του υλικού του μανδύα, λόγω των ποικίλων φυσικών διεργασιών που γίνονται στο εσωτερικό του. Έτσι, ανάλογα με την κατεύθυνση των ρευμάτων, οι λιθοσφαιρικές πλάκες μπορεί να συγκλίνουν (στις ωκεάνιες τάφρους), να αποκλίνουν (στις μεσοωκεάνιες ράχεις), ή τέλος, να βυθίζεται πλάγια η μία κάτω από την άλλη και να φθάνει σε βάθος 700 km μέσα στο μανδύα, όπου τελικά διαλύεται.

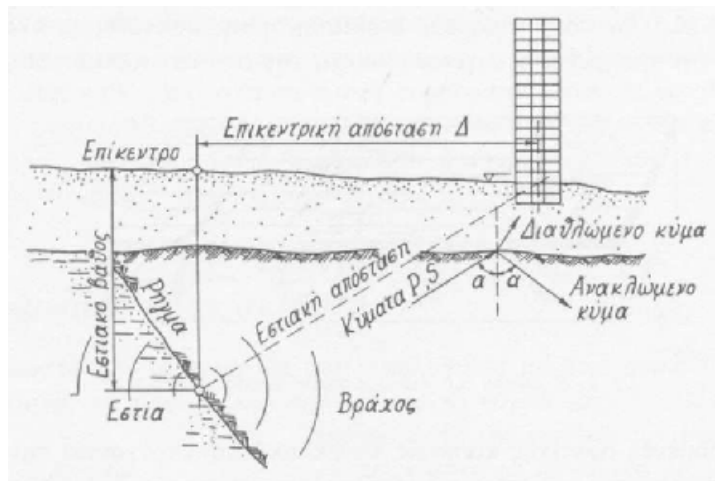
2.2.2. Ηφαιστιογενείς σεισμοί.

«Οι ηφαιστιογενείς σεισμοί, που αποτελούν το 10% των παγκόσμιων σεισμών σχετίζονται με ηφαιστειακή δραστηριότητα και συνήθως είναι λιγότερο ισχυροί από τους τεκτονικούς. Ακόμα και αυτοί πάντως, μπορεί να είναι ιδιαίτερα καταστροφικοί, προκαλώντας σχισμές στο έδαφος, παραμόρφωση του εδάφους, και ζημιές σε κατασκευές.»
(Γαλανόπουλος, *Σεισμολογία*, Αθήνα 1970)

2.2.3. Σεισμοί εγκατακρημνίσεως.

«Οι σεισμοί εγκατακρημνίσεως οφείλονται στην εγκατακρήμιση οροφών υπογείων κοιλωμάτων (π.χ. σπηλαίων) λόγω διάβρωσης. Είναι σεισμοί συνήθως μικρού μεγέθους και τοπικού χαρακτήρα.»
(Γαλανόπουλος, *Σεισμολογία*, Αθήνα 1970).

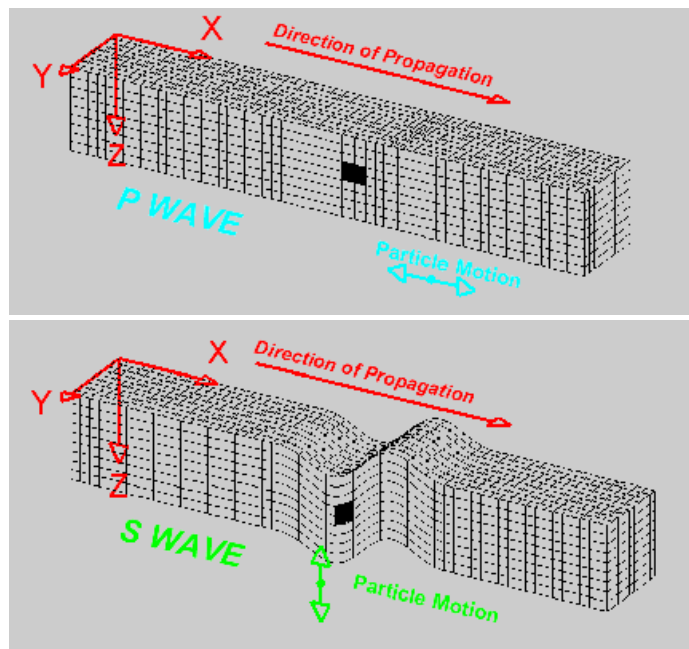
Η περιοχή ενάρξεως της ρήξεως - που στη συνέχεια επεκτείνεται - λέγεται «εστία του σεισμού» ή «υπόκεντρο», ενώ το μικροσεισμικό «επίκεντρο» βρίσκεται στην ίδια κατακόρυφο επάνω στην επιφάνεια της Γης (σχ. 1). Ανάλογα με το εστιακό βάθος h οι σεισμοί λέγονται *επιφανειακοί* ($h < 60$ km), *ενδιαμέσου βάθους* ($60 \leq h \leq 300$ km) και *σεισμοί βάθους* ($h > 300$ km), οι οποίοι δεν γίνονται αισθητοί στην επιφάνεια της Γης.



Σχ. 1 Γεωμετρικά στοιχεία σεισμού.

Οι επιφανειακοί σεισμοί εμφανίζονται συνήθως με τη μορφή μιας σεισμικής ακολουθίας, δηλαδή υπάρχουν μικρά σχετικά χρονικά διαστήματα με έντονη σεισμική δράση. Ο μεγαλύτερος σεισμός της ακολουθίας λέγεται *κύριος* σεισμός, οι προηγούμενοι από αυτόν σεισμοί λέγονται *προσεισμοί* και οι επόμενοι *μετασεισμοί*.

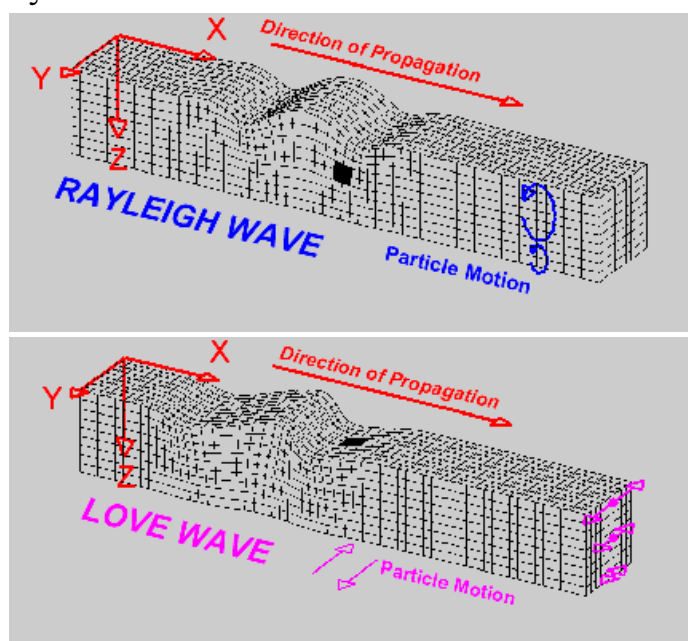
Με κέντρο την εστία η ταλάντωση διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις με τη μορφή κυμάτων χώρου (σχ. 2). Τα κύματα αυτά διακρίνονται στα επιμήκη Ρ, που διαδίδονται με ταχύτητα (7 - 8) km/s περίπου και στα εγκάρσια S, που διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα (4 - 5) km/s.



Σχ. 2 Τα κύματα χώρου

L. Braille, *Seismic Wave Demonstrations and Animations*, Purdue University

Τα πρώτα είναι κύματα πίεσεως-ελκυσμού, προκαλούν μεταβολή του όγκου και έχουν μικρή περίοδο και μικρό πλάτος ταλαντώσεως· τα δεύτερα είναι διατμητικά με πολύ μεγαλύτερη περίοδο και πλάτος ταλαντώσεως, προκαλούν μεταβολή του σχήματος και για το λόγο αυτό δεν διαδίδονται σε ρευστά μέσα. Στις περιοχές ασυνεχειών των εδαφικών στρωμάτων τα παραπάνω κύματα ανακλώνται και διαθλώνται και φθάνοντας στην επιφάνεια της Γης δημιουργούν τα επιφανειακά κύματα (L - κύματα) (σχ. 3). Αυτά διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα από τα χωρικά, έχουν μεγάλο πλάτος ταλαντώσεως και διακρίνονται σε κύματα Rayleigh (R - κύματα) και σε κύματα Love (Q - κύματα). Όπως φαίνεται στο σχ. 6 κατά τη διάδοση των κυμάτων Rayleigh τα υλικά σημεία διαγράφουν κατακόρυφες ελλείψεις, ενώ κατά τη διάδοση των κυμάτων Love (σε στρωματοποιημένο πάντοτε μέσο) τα υλικά σημεία κινούνται παράλληλα προς την επιφάνεια και κάθετα προς τη διεύθυνση διαδόσεως.



Σχ. 3 Τα επιφανειακά κύματα

L. Braille, *Seismic Wave Demonstrations and Animations*, Purdue University

Από τη σύνθεση όλων των προηγούμενων κυμάτων προκύπτει η τελική κίνηση στο τυχόν σημείο της επιφάνειας. Η υπόψη κίνηση μπορεί να αναλυθεί σε τρεις ανεξάρτητες συνιστώσες, δύο οριζόντιες και μία κατακόρυφη. Οι δύο οριζόντιες συνιστώσες είναι περίπου ισότιμες και σαφώς μεγαλύτερες από την κατακόρυφη, εκτός από την περιοχή του επικέντρου. Είναι, τέλος, αξιοσημείωτο ότι σε δεδομένη θέση δεν υπάρχει χαρακτηριστική διεύθυνση του σεισμού.

2.3. Αποτίμηση των σεισμών (μέγεθος-ένταση-εδαφικές κινήσεις)

Για τη «μέτρηση» των σεισμών και των επιπτώσεών τους στον άνθρωπο και τον περιβάλλοντα χώρο χρησιμοποιούνται δύο ποσότητες: το μέγεθος M και η ένταση I του σεισμού. Επίσης για τις εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού ιδιαίτερη σημασία έχουν οι καταγραφές με ειδικά όργανα (επιταχυνσιόμετρα) των εδαφικών κινήσεων στην επιφάνεια της Γης, λόγω ισχυρών σεισμικών δονήσεων (strong ground motion). Με τα όργανα αυτά, που αποτελούν ειδικό τύπο σεισμομέτρου, γίνεται απευθείας μέτρηση της επιταχύνσεως του εδάφους οριζόντια (π.χ. βορράς - νότος, ανατολή - δύση) και κατακόρυφα. Στη συνέχεια, με χρονική ολοκλήρωση, υπολογίζεται η ταχύτητα και η μετατόπιση του εδάφους στο θεωρούμενο σημείο.

2.3.1. Μέγεθος.

Η ποσοτική σύγκριση διάφορων σεισμών μεταξύ τους γίνεται με τη λεγόμενη κλίμακα μεγεθών του Richter. Ο Richter, έπειτα από συγκριτικές μελέτες πολλών σεισμών στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α., όρισε αρχικά (1935) το τοπικό μέγεθος M_L ενός σεισμού από τη σχέση [2]:

$$M_L = \text{Log} \frac{A(\Delta)}{A_0(\Delta)} = \text{Log} A(\Delta) - \text{Log} A_0(\Delta)$$

όπου Δ η επικεντρική απόσταση και A , A_0 τα μέγιστα πλάτη αναγραφής, σε σεισμόμετρο *Wood-Anderson*, του θεωρούμενου σεισμού και ενός πρότυπου σεισμού αντίστοιχα ως πρότυπος σεισμός ή σεισμός μηδενικού μεγέθους ορίστηκε ο σεισμός που γράφεται με πλάτος 1 μm σε απόσταση $\Delta = 100 \text{ km}$.

Στον προηγούμενο τύπο είναι $\Delta < 600 \text{ km}$ και το $A_0(\Delta)$ δίδεται από πίνακες που έχουν συνταχθεί. Η κλίμακα του τοπικού μεγέθους M_L στηρίζεται στη μέτρηση του μέγιστου πλάτους των εγκάρσιων κυμάτων S από τα σεισμόμετρα *Wood-Anderson* με ιδιοπερίοδο 0,8 sec και είναι κατάλληλη μόνο για κοντινούς σεισμούς. Έτσι, για τον υπολογισμό του μεγέθους σεισμών με διάφορα εστιακά βάθη και μεγάλες επικεντρικές αποστάσεις, με τη χρήση οποιουδήποτε σεισμομέτρου, επινοήθηκε αργότερα από τον Gutenberg (1945) η κλίμακα του επιφανειακού μεγέθους M_s και η κλίμακα του ενιαίου μεγέθους M_b (για εστιακά βάθη $> 60 \text{ km}$). Η πρώτη στηρίζεται σε μετρήσεις πλατών επιφανειακών κυμάτων και η δεύτερη χωρικών P- κυμάτων.

Όλα τα παραπάνω μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους με ορισμένες σχέσεις, ενώ με τον γενικό όρο μέγεθος M εννοούμε το επιφανειακό μέγεθος M_s . Αυτό για τον ελληνικό χώρο δίδεται από τον τύπο:

$$M = \text{Log} \alpha + 1,41 \text{Log} \Delta + 0,2$$

όπου a το ημιάθροισμα των μέγιστων πραγματικών πλατών των δύο οριζόντιων συνιστωσών της μέγιστης κινήσεως σε (m) και Δ η επικεντρική απόσταση σε (km).

Η κλίμακα του Richter περιέχει τα παρακάτω μεγέθη:

Πιν. 1 Η κλίμακα του Richter

Μέγεθος	Επίδραση	Συχνότητα εμφάνισης (παγκοσμίως)
<2,0	Μικροσεισμοί μη αισθητοί	8.000/ημέρα
2,0-2,9	Μη αισθητοί σεισμοί, μπορούν να καταγραφούν	1.000/ημέρα
3,0-3,9	Συχνά αισθητοί. Σπάνια προκαλούν ζημιές	49.000/έτος
4,0-4,9	Αισθητοί σε εσωτερικούς χώρους. Σπάνια προκαλούν σημαντικές ζημιές.	6.200/έτος
5,0-5,9	Προκαλούν σοβαρές ζημιές σε παλιά κτίσματα - μικρές ζημιές σε νεότερα.	800/έτος
6,0-6,9	Μπορούν να είναι καταστροφικοί σε περιοχές μέχρι 160 km μακριά	120/έτος
7,0-7,9	Μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές σε μεγαλύτερες περιοχές	18/έτος
8,0-8,9	Μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές σε περιοχές αρκετών εκατοντάδων χιλιομέτρων	1/έτος
9,0-9,9	Καταστροφικοί σε περιοχές χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά	1/20 χρόνια
>10,0	Δεν έχει καταγραφεί ποτέ	άγνωστο

Το μέγεθος ενός σεισμού, όπως προκύπτει από τον ορισμό του, αποτελεί ουσιαστικά ένα μέτρο *συγκρίσεως* μικρών και μεγάλων σεισμών και όχι έναν ποσοτικό δείκτη των φυσικών ιδιοτήτων της πηγής παραγωγής τους.

Εντούτοις, με διάφορες μελέτες που έγιναν, επιτεύχθηκε ο συσχετισμός του μεγέθους με ένα απόλυτο φυσικό μέγεθος, ήτοι με την *ενέργεια* που εκλύεται στην εστία ενός σεισμού. Έτσι, βρέθηκε ότι η παραπάνω ενέργεια (σε έργια) για $M > 5$ δίδεται από τη σχέση:

$$\text{Log } E = 12,24 + 1,44 M .$$

Η σχέση αυτή δηλώνει ότι αύξηση του μεγέθους κατά μία μονάδα συνεπάγεται αύξηση της ενέργειας κατά 28 φορές περίπου. Τα παραπάνω ισχύουν για μεγέθη μέχρι $M = 7$, πέρα από τα οποία το μέγεθος δεν αποτελεί κατάλληλο μέτρο της ενέργειας, λόγω του φαινομένου *κορεσμού* του μεγέθους.

2.3.2. Ένταση.

Με τον όρο μακροσεισμική *ένταση I* ενός σεισμού επιδιώκεται η θέσπιση ενός «μέτρου» των επιπτώσεων του υπόψη σεισμού στον άνθρωπο και στον περιβάλλοντα χώρο. Μία τέτοια όμως *αντικειμενική* μέτρηση θα μπορούσε θεωρητικά να γίνει με τη βοήθεια πολλών τυχαίων μεταβλητών και όχι με μία μόνη παράμετρο διότι το βλαπτικό δυναμικό ενός σεισμού εξαρτάται από τη συσχέτιση της σεισμικής κινήσεως (επιτάχυνση, συχνοτικό περιεχόμενο, κλπ.) με τα δυναμικά χαρακτηριστικά των κατασκευών (ιδιοπερίοδοι, αποσβέσεις, κλπ.). Έτσι π.χ. η ίδια σεισμική δόνηση είναι δυνατόν να είναι καταστροφική για τις δύσκαμπτες κατασκευές και ελάχιστα βλαπτική για τις εύκαμπτες ή αντίστροφα.

Εντούτοις, για την ποιοτική εκτίμηση των βλαβών δεδομένων σεισμών, έχουν επινοηθεί ορισμένες εμπειρικές κλίμακες μακροσεισμικών εντάσεων με καθορισμένη, υποκειμενικά άλλωστε, βαθμονόμηση. Οι βασικές κλίμακες που χρησιμοποιούνται είναι:

- Η δωδεκαβάθμια κλίμακα Mercalli.
- Η δωδεκαβάθμια κλίμακα Medvedev - Sponheuer - Karnik (MSK).
- Η επταβάθμια Ιαπωνική κλίμακα (JMA).

Η πρώτη από τις παραπάνω κλίμακες προδιαγράφει ως εξής τους βαθμούς εντάσεως:

Πιν. 2 Η κλίμακα του Mercalli

Βαθμός	Επίδραση
I	Δεν γίνεται αντιληπτός από τον άνθρωπο.
II - III	Γίνεται αντιληπτός από μικρό αριθμό ανθρώπων.
IV - V	Γίνεται αντιληπτός από μεγάλο αριθμό ανθρώπων.
VI	Γίνεται αντιληπτός από το σύνολο σχεδόν του πληθυσμού και οι καμπάνες των εκκλησιών χτυπούν .
VII	Ελαφρές ζημιές σε κτίσματα.
VIII - IX	Σοβαρές ζημιές σε κτίσματα και εμφάνιση ρωγμών στο έδαφος.

X	Γενική κατάρρευση οικοδομών.
XI - XII	Καταστροφή.

Η κλίμακα *M.S.K.* είναι ακριβέστερη από την προηγούμενη, γιατί λαμβάνει υπόψη το είδος και το ποσοστό των κτιρίων που έχουν υποστεί βλάβες. Περιέχει τους εξής βαθμούς:

Πιν. 3 Η κλίμακα *M.S.K.*

Βαθμός	Επίδραση
I	Δεν γίνεται αντιληπτός από τον άνθρωπο.
II	Ανεπαίσθητος
III	Αδύναμος
IV	Γίνεται αντιληπτός από μεγάλο αριθμό ανθρώπων.
V	Αρκετά Ισχυρός
VI	Ισχυρός
VII	Πολύ Ισχυρός
VIII	Επιζήμιος
IX	Καταστρεπτικός
X-XII	Πολύ Καταστρεπτικός

Και στις δύο παραπάνω κλίμακες χρησιμοποιήθηκαν λατινικοί αριθμοί για την βαθμονόμηση, ώστε να αποφεύγεται η χρήση δεκαδικών.

2.3.3. Εδαφικές κινήσεις.

Η εδαφική κίνηση στο τυχόν σημείο του εδάφους προσδιορίζεται με τη βοήθεια τριών *επιταχυνσιογραφήματων* που δίνουν τις επιταχύνσεις του σημείου συναρτήσει του χρόνου- τα δύο επιταχυνσιογραφήματα αναφέρονται στις δύο οριζόντιες (και κάθετες μεταξύ τους) συνιστώσες της κινήσεως και το τρίτο στην κατακόρυφη συνιστώσα. Η καταγραφή γίνεται πρώτα σε φιλμ, κατά τη διάρκεια του σεισμού από τα επιταχυνσιόμετρα και στη συνέχεια ψηφιοποιείται και «διορθώνεται» για να απαλλαγεί από ορισμένες παρασυτικές επιρροές. Με διαδοχική ολοκλήρωση των επιταχύνσεων υπολογίζονται οι ταχύτητες και οι μετατοπίσεις του σημείου.

Σε ένα επιταχυνσιογράφημα διακρίνουμε, γενικά, τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή, με τις πολύ μικρές τεταγμένες, αντιστοιχεί στα

ταχύτερα διαδιδόμενα επιμήκη P-κύματα, ενώ η δεύτερη αρχίζει με την άφιξη των εγκαρσίων S-κυμάτων που προκαλούν απότομη αύξηση των τεταγμένων από τη διαφορά των χρόνων αφίξεως των παραπάνω κυμάτων υπολογίζεται η απόσταση της εστίας από το σημείο καταγραφής. Η τρίτη περιοχή αρχίζει με την άφιξη και των επιφανειακών Z,-κυμάτων, εμφανίζει επίσης μεγάλες τεταγμένες και ο διαχωρισμός της από την προηγούμενη περιοχή δεν είναι σαφής.

Οι τρεις συνιστώσες των επιταχύνσεων ενός σημείου είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, αλλά οι δύο οριζόντιες εμφανίζουν, γενικά, πολλές ομοιότητες, τόσο ως προς τις συχνότητες όσο και ως προς τις μέγιστες επιταχύνσεις. Η κατακόρυφη συνιστώσα διαφέρει εμφανώς από τις δύο οριζόντιες- περιέχει κατά κανόνα υψηλές συχνότητες και η μέγιστη επιτάχυνσή της ισούται περίπου με τα 2/3 της μέγιστης οριζόντιας. Εντούτοις αυτό το τελευταίο δεν είναι απόλυτο, γιατί υπήρξαν και περιπτώσεις σεισμών όπου η μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση ήταν μεγαλύτερη από την οριζόντια (π.χ. σεισμός *El Centro* n° 6, Καλιφόρνια 1979, με μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση 1,75 g έναντι 0,5 g της οριζόντιας).

Ανεξάρτητα πάντως από τις παραπάνω δυσκολίες οι καταγραφές ισχυρών σεισμικών δονήσεων αποτελούν τα πιο χρήσιμα δεδομένα για τον Μηχανικό, διότι δίνουν τα παρακάτω ουσιώδη για τη μελέτη αντισεισμικών κατασκευών στοιχεία:

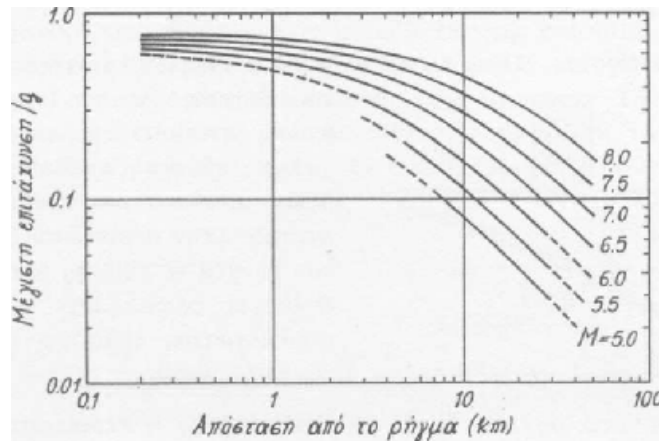
- Τη μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους, καθώς και τον αριθμό και την κατανομή των κορυφών (*peak*), που υπερβαίνουν μία καθορισμένη τιμή επιταχύνσεως.
- Τη διάρκεια του σεισμού, καθώς και την περιοχή συχνοτήτων της ταλαντώσεως (αριθμός διελεύσεων από το μηδέν).

Από τη σκοπιά του Πολιτικού Μηχανικού είναι προφανές ότι κατά την φάση μελέτης και κατασκευής ενός έργου ο αναμενόμενος σεισμός είναι πάντοτε άγνωστος. Τίθεται, επομένως, το πρόβλημα της εκτιμήσεως των χαρακτηριστικών του αναμενόμενου σεισμού με βάση τα προϋπάρχοντα σεισμολογικά, γεωτεκτονικά και εδαφολογικά στοιχεία. Έτσι π.χ. σε πρώτη προσέγγιση η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση μπορεί να εκτιμηθεί από εμπειρικές σχέσεις συναρτήσεως της εντάσεως / ή συναρτήσεως του μεγέθους M βάσει των λεγόμενων νόμων εξασθενήσεως. Μία τέτοια σχέση είναι η ακόλουθη:

$$\text{Log } a = \frac{I}{3} - \frac{1}{2}$$

όπου a η επιτάχυνση και I η ένταση στην κλίμακα *Mercalli*.

Επίσης στο σχ. 4 φαίνεται ο νόμος εξασθενήσεως του Cambell που ισχύει για κοντινούς σεισμούς .



Σχ. 4 Ο νόμος εξασθενήσεως του Cambell

2.4. Η σεισμική δράση επάνω στις κατασκευές.

Ανεξάρτητα από την γενική αποτίμηση, βασικό πρόβλημα για τον Μηχανικό αποτελεί ο *μηχανισμός δράσεως* των σεισμών επάνω στις κατασκευές. Έτσι, από υπολογιστική άποψη και κατ' αναλογία προς άλλες στατικές και δυναμικές φορτίσεις, η σεισμική δράση θα μπορούσε καταρχήν να θεωρηθεί σαν μία απότομη και με εναλλασσόμενη φορά κίνηση της θεμελιώσεως. Πρόκειται δηλαδή για δυναμικά *επιβαλλόμενη μετακίνηση*, λόγω της οποίας η κατασκευή εκτελεί εξαναγκασμένη ταλάντωση.

Εντούτοις η παραπάνω εικόνα του φαινομένου δεν είναι πλήρης. Διότι ανάμεσα στο μητρικό πέτρωμα - απαρχή της δονήσεως - και την θεμελίωση παρεμβάλλονται συνήθως επάλληλες εδαφικές στρώσεις, που δεν αποτελούν ένα «ουδέτερο» μέσο διαδόσεως της σεισμικής δράσεως. Στην πραγματικότητα η εξαναγκασμένη κίνηση της θεμελιώσεως αποτελεί τη σεισμική *απόκριση* των παραπάνω εδαφικών στρώσεων ή, ακριβέστερα, τη σεισμική απόκριση του συμπλέγματος «έδαφος + κατασκευή». Επομένως, η ποιοτική τουλάχιστον θεώρηση του συμπλέγματος αυτού είναι υποχρεωτική, έστω και αν ο υπολογισμός περιορίζεται συνήθως μόνο στην κατασκευή. Από την άποψη αυτή ιδιαίτερη σπουδαιότητα έχουν ορισμένες μεγάλες παραμορφώσεις του εδάφους με *αθροιστικό* χαρακτήρα, στις οποίες θα

αναφερθούμε περιληπτικά πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των μηχανισμών διεγέρσεως των κατασκευών.

2.4.1. Κατολισθήσεις.

Προκαλούνται από έντονες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους. Στην περίπτωση αυτή, αν δεν είναι δυνατή η πλήρης αποφυγή της, επιβάλλεται οπωσδήποτε η θεώρηση του συμπλέγματος εδάφους —ανωδομής κατά τον υπολογισμό.

2.4.2. Επιφανειακό ρήγμα.

Είναι μάλλον συνήθης η περίπτωση «ανόδου» του σεισμικού ρήγματος μέχρι την επιφάνεια του εδάφους σε επιφανειακούς σεισμούς. Αν το ρήγμα διασχίζει τη θεμελίωση μιας κατασκευής, η ανεπανόρθωτη βλάβη της τελευταίας —και της κατασκευής συνακόλουθα— είναι αναπότρεπτη.

2.4.3. Ρευστοποίηση εδάφους.

Εμφανίζεται σε κορεσμένα αμμώδη εδάφη με ορισμένη κοκκομετρική σύνθεση, λόγω προοδευτικής αυξήσεως της πίεσεως πόρων. Το έδαφος χάνει πλήρως τη διατμητική του αντοχή με αποτέλεσμα την καθίζηση, ανατροπή, κλπ, των υπερκείμενων κατασκευών. Επίσης, εάν το ρευστοποιημένο έδαφος βρίσκεται επάνω σε κεκλιμένο υπόστρωμα, προκαλείται «ροή» μεγάλων εδαφικών όγκων και πλήρης αλλοίωση της τοπογραφίας της περιοχής. Αν λάβει σημαντική έκταση, η ρευστοποίηση μπορεί να επιφέρει σημαντικές βλάβες σε κτίρια, επιχώματα, πρανή, αντιστηρίξεις, οδοστρώματα, δεξαμενές, δίκτυα υδρεύσεως, κ.λ.π. Για σημαντικές κατασκευές (όπως σχολεία, νοσοκομεία, πολυσύχναστα δημόσια οικήματα, γέφυρες, χωμάτινα φράγματα, εργοστάσια παραγωγής πυρηνικής ενέργειας, δεξαμενές υγροποιημένου αερίου), η δυνατότητα ρευστοποίησης πρέπει να αποκλεισθεί. Σε πολλές άλλες περιπτώσεις πάντως, η ρευστοποίηση ενδέχεται να προκαλέσει μικρές μόνον (κι άρα ανεκτές) μόνιμες παραμορφώσεις και μετατοπίσεις. προκαλείται μείωση των τάσεων μεταξύ των κόκκων και αύξηση των υδατικών πιέσεων. Έτσι, όταν η δόνηση είναι αρκετά μεγάλης έντασης και διάρκειας, λαμβάνει χώρα μια βαθμιαία συσσώρευση υδατικών υπερπιέσεων, και το εδαφικό υλικό προοδευτικά υφίσταται απώλεια αντοχής. Τελικώς, ενδέχεται να έχουμε πλήρη απώλεια αντοχής και δυστημής, με μεγάλες αιφνίδιες παραμορφώσεις. Αυτή μπορεί να πάρει ποικίλες μορφές, από καταστροφική "εδαφική ροή" έως μικρές παραμένουσες παραμορφώσεις.

2.4.4. Συμπύκνωση εδάφους.

Οι σεισμικές ταλαντώσεις προκαλούν συμπύκνωση των μη συνεκτικών εδαφών και συνακόλουθες καθιζήσεις. Ανάλογα με τη συνοχή του εδάφους οι παραπάνω καθιζήσεις μπορούν να φθάσουν το 1% ή και περισσότερο, με αποτέλεσμα την άμεση πρόκληση βλαβών στις κατασκευές.

Το γενικότερο φαινόμενο της *αλληλεπιδράσεως* εδάφους - κατασκευής, το οποίο όμως μπορεί να είναι άλλοτε δυσμενές και άλλοτε ευμενές για τις κατασκευές. Με τον όρο αυτό εννοούμε την *αλλοίωση* που υφίσταται η σεισμική κίνηση στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή η λεγόμενη κίνηση ελευθέρου πεδίου (*free field motion*), λόγω της παρουσίας εκεί μιας κατασκευής. Η υπόψη αλλοίωση είναι μεγάλη στην περίπτωση μαλακού εδάφους και βαριάς δύσκαμπτης κατασκευής και αμελητέα στην περίπτωση σκληρού εδάφους και εύκαμπτης κατασκευής. Έπειτα από την προηγούμενη υπόμνηση των ειδικών περιπτώσεων «παθολογίας» του εδάφους, που συνήθως οδηγούν σε *πρώιμη αστοχία* των κατασκευών, θεωρούμε τη γενική περίπτωση *ομαλής* μεταδόσεως της σεισμικής δράσεως από το έδαφος στις υπερκείμενες κατασκευές. Στο σχ. 11 φαίνονται ενδεικτικά δύο μορφές της παραμορφωμένης επιφάνειας του εδάφους κατά το σεισμό. Το τυχόν σημείο της επιφάνειας θα εμφανίζει γενικά μία μετατόπιση στο χώρο, τα δε σημεία μιας αρχικής ευθείας θα βρίσκονται, μετά την παραμόρφωση, επάνω σε μία *στρεβλή* καμπύλη του χώρου λόγω των άνισων μετατοπίσεων μεταξύ τους. Έτσι, η στρεβλή επιφάνεια του εδάφους θα εμφανίζει *καμπυλότητες*, τόσο σε οριζόντιο επίπεδο όσο και σε τυχόν κατακόρυφο. Η κίνηση του εδάφους θεμελιώσεως μιάς συνήθους κατασκευής (π.χ. κτίριο) είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι αποτελείται:

- από μία μεταφορική κίνηση *στερεού σώματος* με αμετάβλητες αποστάσεις των διαφόρων σημείων και με συνιστώσες u , v και w ως προς ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αναφοράς $Oxyz$,
- από *διαφορικές* μετατοπίσεις των διαφόρων σημείων λόγω παραμορφώσεως του εδάφους, μεταβλητές στην έκταση της θεμελιώσεως.

Η παραπάνω *μεταφορική* κίνηση του εδάφους εξομοιώνεται με την κίνηση που μας δίνουν τα επιταχυνσιογραφήματα, όπως αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η κίνηση αυτή εισάγεται αυτούσια στη θεμελίωση και αποτελεί το *πρωταρχικό* αίτιο προκλήσεως ταλαντώσεων στο σύνολο της κατασκευής (σχ. 12). Κατά την υπόψη ταλάντωση τα διάφορα στοιχεία της κατασκευής υποβάλλονται σε *κυκλικές* παραμορφώσεις μεγάλου πλάτους, ως επί το πλείστον στην *μετελαστική*

περιοχή συμπεριφοράς τους, με παράλληλη αλλοίωση της ακαμψίας και της αντοχής (ιδιαίτερα σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα). Ο μη γραμμικός χαρακτήρας της αποκρίσεως συνεπάγεται την ταυτόχρονη θεώρηση των τριών συνιστωσών της μεταφορικής διεγέρσεως· εντούτοις, εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις, κατά κανόνα περιοριζόμαστε στην ανεξάρτητη θεώρηση κάθε συνιστώσας, υποθέτοντας ελαστική συμπεριφορά της κατασκευής.

2.5. Ελληνικός χώρος και σεισμοί

Παρακάτω, παραθέεται ένας πίνακας με τους πιο μεγάλους σεισμούς που παρατηρήθηκαν στον Ελληνικό χώρο από τις αρχές του 20^ο αιώνα έως και το 2008.

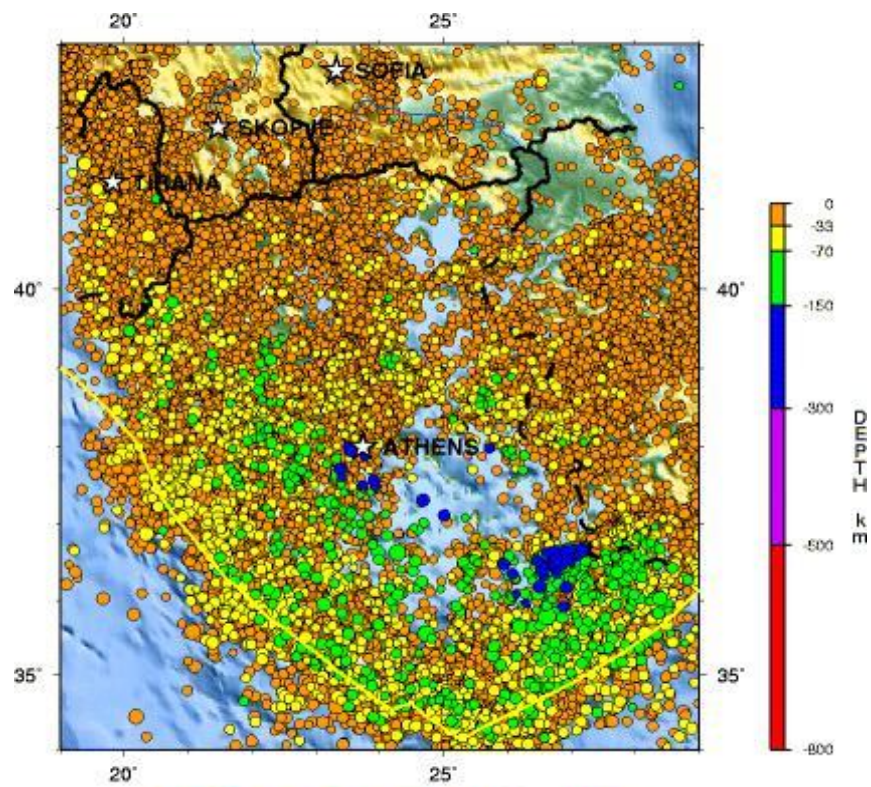
Ημ/νία	Τόπος	Μέγεθος	Θύματα
05-07-1902	Θεσσαλονίκη	6,6	5
11-08-1903	Κύθηρα	7,9	3
11-08-1904	Σάμος	6,2	4
08-11-1905	Χαλκιδική	7,5	?
18-02-1910	Χανιά	6,9	6
24-01-1912	Κεφαλονιά	6,8	8
07-08-1915	Ιθάκη	6,7	?
26-06-1926	Ρόδος	8,0	12
30-08-1926	Σπάρτη	7,2	?
26-09-1932	Χαλκιδική	7,0	161
25-02-1935	Λασιθί	7,0	8
06-10-1947	Μεσσηνία	7,0	3
23-08-1949	Χίος	6,7	3
12-08-1953	Κεφαλονιά	7,1	476
30-04-1954	Καρδίτσα	7,1	31
09-07-1956	Αμοργός	7,5	53
25-04-1957	Ρόδος	7,2	?
31-03-1965	Αγρίνιο	6,8	6
05-02-1966	Λίμνη Κρεμαστών	6,2	1

19-2-1968	Άγιος Ευστράτιος	7,1	20
20-06-1978	Θεσσαλονίκη	6,5	45
24-02-1981	Αλκυονίδες	6,7	20
13-09-1986	Καλαμάτα	6,0	20
15-06-1995	Αίγιο	6,1	29
07-09-1999	Αθήνα	6,1	143
14-08-2003	Πρέβεζα	6,3	0
24-08-2004	Εύβοια	4,3	0
08-01-2006	Κύθηρα	6,7	0
14-02-2008	Μεθώνη	6,9	0
08-06-2008	Αχαΐα	6,4	2
			Meteo.gr

Πιν. 4. Οι κυριότεροι σεισμοί στον Ελληνικό χώρο

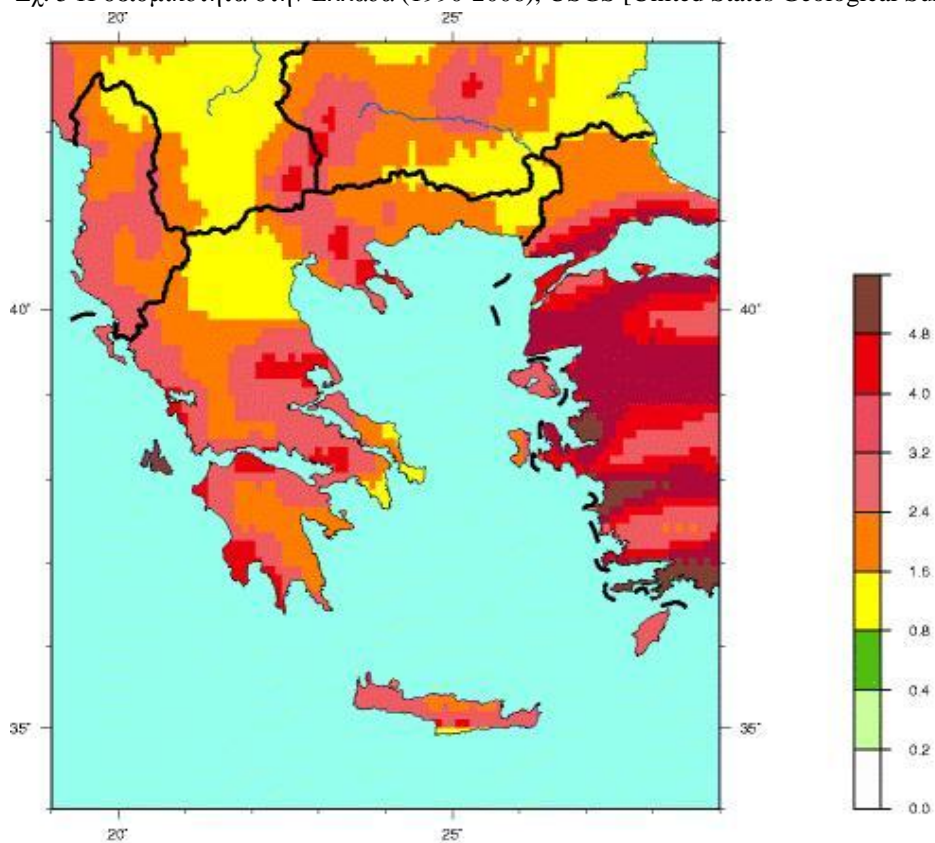
Αξίζει να σημειωθεί ότι ο σεισμός που συνέβη στην Ρόδο στις 26/06/1926 (M=8.0) ήταν ο ισχυρότερος σεισμός που έχει παρατηρηθεί στην Ελλάδα από την αρχή των καταγραφών. Ο σεισμός κατέστρεψε εντελώς τον Αρχάγγελο της Ρόδου ενώ πολύ ισχυρός ήταν στο Ηράκλειο, στη Μικρά Ασία, στην Αλεξάνδρεια, στο Κάιρο ενώ έγινε αισθητός στην Ανατολική Ιταλία, στα Σκόπια, στην Κωνσταντινούπολη, στην Κύπρο κ.α. Συνολικά κατέρρευσαν 3.200 σπίτια ενώ 550 έπαθαν ανεπανόρθωτες βλάβες. Ενώ το αρχαιολογικό μουσείο της Ρόδου έπαθε σημαντικές ζημιές.

Στα Κύθηρα το 1903, παρατηρήθηκε ο δεύτερος μεγαλύτερος σεισμός, κατά τον οποίο καταστράφηκαν εντελώς αρκετά χωριά στο νησί καθώς επίσης και στην Λακωνία.



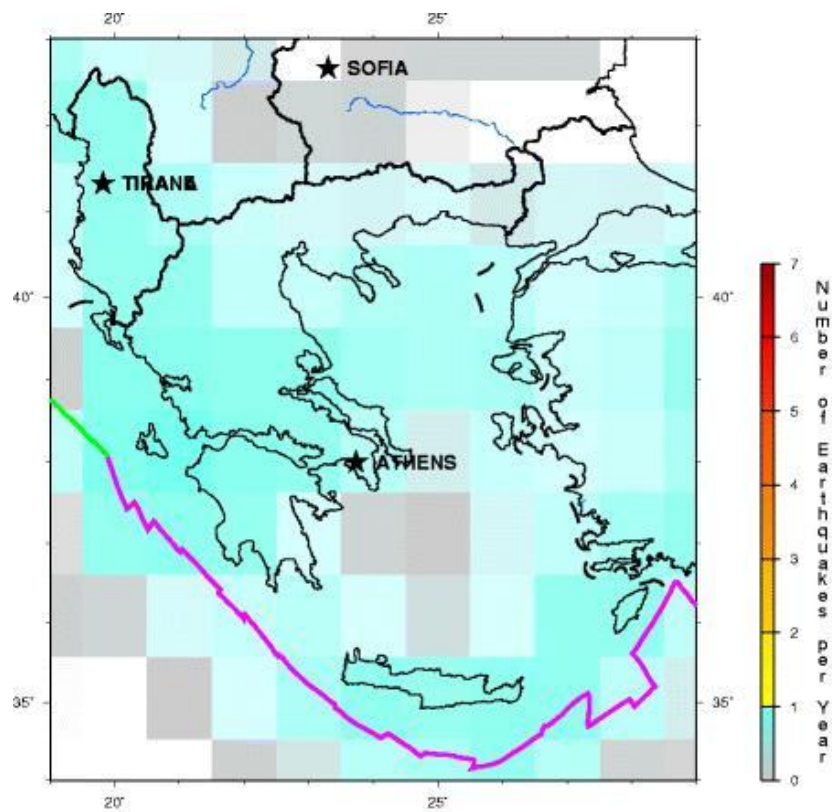
Seismicity of Greece, 1990 - 2006

Σχ. 5 Η σεισμικότητα στην Ελλάδα (1990-2006), USGS [United States Geological Survey]



Peak Ground Acceleration (m/s^2) with 10% Probability of Exceedance in 50 Years

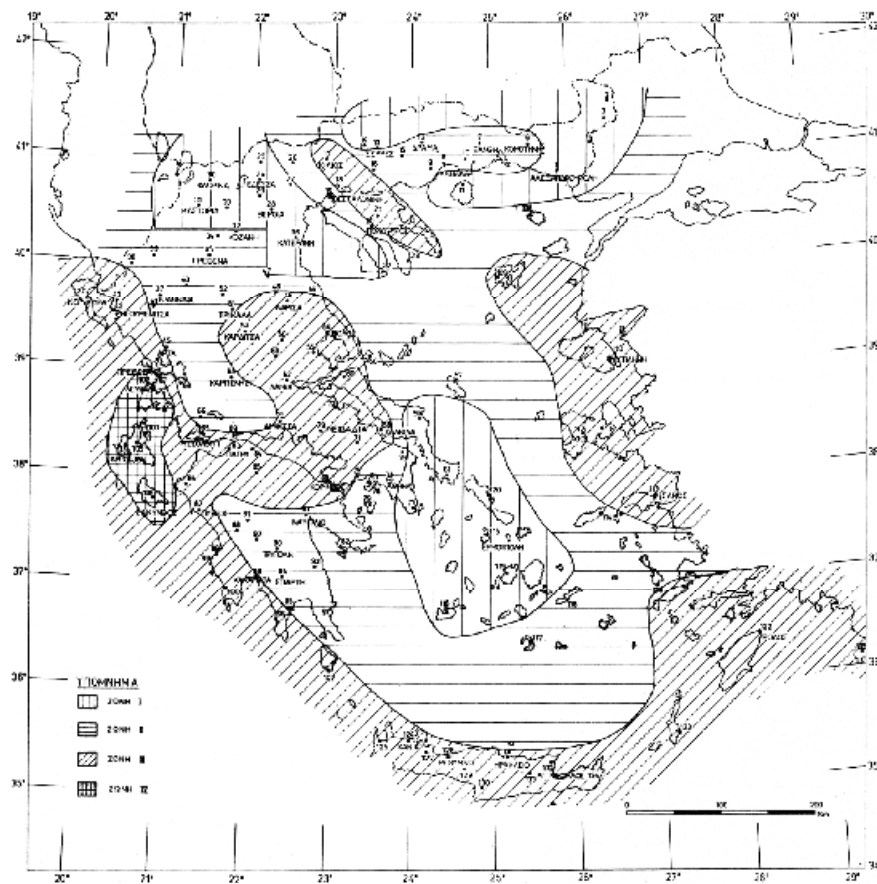
Σχ. 6 Μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους (m/s^2) με 10% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια, [USGS (United States Geological Survey)]



Number of Earthquakes per Year, Magnitude 5 and Greater, All Depths

Major Tectonic Boundaries: Subduction Zones -purple, Ridges -red and Transform Faults -green

Σχ. 6 Αριθμός σεισμών ανα έτος με μέγεθος $M > 5$, σε όλα τα βάθη, [USGS (United States Geological Survey)]



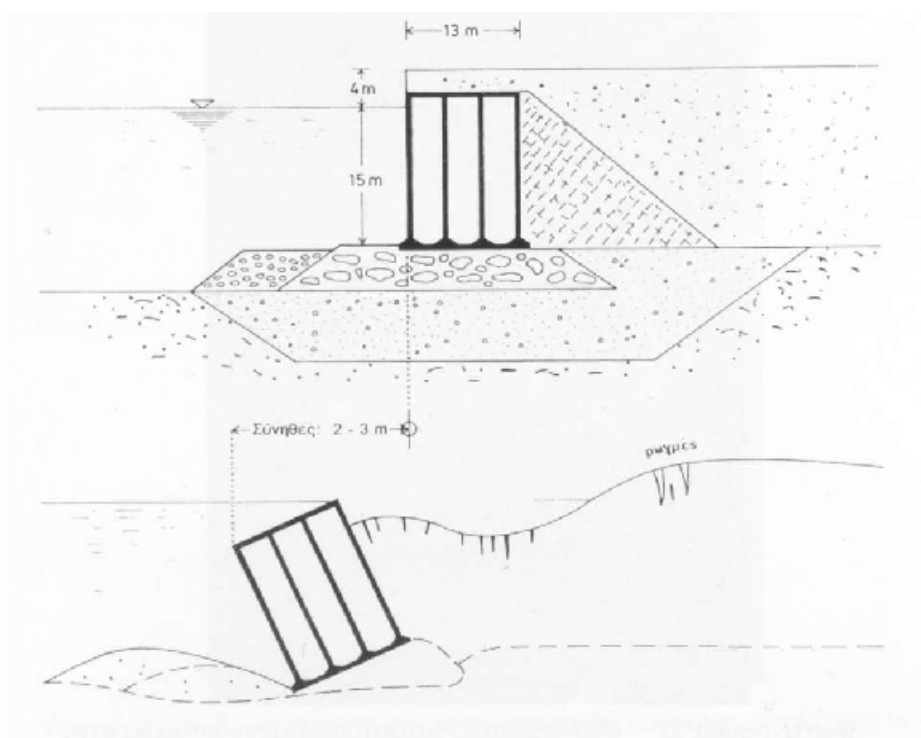
Σχ. 7 Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας, [ΕΑΚ 2000]

2.6. Ιστορική αναδρομή σε καταστροφές από σεισμούς.

kobe – κρηπιδότοιχοι του λιμανιού.

Οι αστοχίες στα λιμάνια οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στις ρευστοποιήσεις που σημειώθηκαν, κατά την διάρκεια του σεισμού, στην βάση και στο αντιστηριζόμενο υλικό των κρηπιδοτοιχίων. Πέραν τούτου, οι τεράστιες μετατοπίσεις των κρηπιδοτοιχίων και οι σοβαρότατες ζημιές σε όλα τα παράκτια έργα, ιδίως στα τεχνητά νησιά *Port* και *Rokko* (τα οποία ωστόσο ελάχιστες κτιριακές βλάβες υπέστησαν), ήταν πιθανώς και αποτέλεσμα ανεπαρκούς σχεδιασμού.

Ο υπολογισμός των έργων αυτών είχε γίνει (όπως άλλωστε γίνεται και στην Ελλάδα) με την ισοδύναμη ψευδοστατική μέθοδο *Mononobe-Okabe*, με "σεισμικό" συντελεστή ίσον με 0.15 - 0.20. Το γεγονός ότι οι επιταχύνσεις που αναπτύχθηκαν στις τεχνητές αυτές νήσους δεν πρέπει να ήταν και πολύ μεγαλύτερες από τις τιμές σχεδιασμού (πρέπει να ήταν της τάξεως του 0.40 g, αντίθετα με το 0.80 g στην πόλη), οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ισοδύναμη στατική μέθοδος *Mononobe-Okabe* δεν είναι από μόνη της σε θέση να συλλάβει το σεισμικό

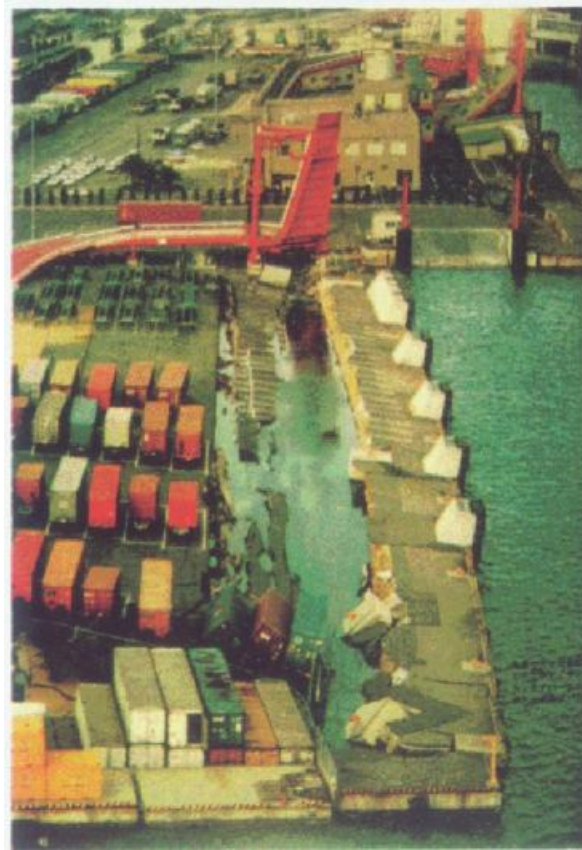


Σχ. 8 Ενδεικτικό σχήμα των ζημιών στους κρηπιδότοιχους, [Γκαζέτας, 1996]

πρόβλημα στην πραγματική του διάσταση (που φαίνεται να σχετίζεται με την ανάπτυξη υπερπίεσεων του ύδατος πόρων στην βάση θεμελιώσεως του κρηπιδότοιχου, και την ρευστοποίηση). Το θέμα όμως αυτό χρειάζεται

πληρέστερη διερεύνηση για την εξαγωγή αξιόπιστων ποσοτικών συμπερασμάτων. Οι τόσο εκτεταμένες καταστροφές που σημειώθηκαν στους λιμενικούς κρηπιδότοιχους, σε περιοχές μάλιστα όπου οι βλάβες στα κτίρια ήταν ασήμαντες, αποδεικνύουν την ανικανότητα των "σύγχρονων" μεθόδων αντισεισμικού υπολογισμού κρηπιδοτοιχίων (που βασίζονται στην ισοδύναμη στατική μέθοδο *Mononobe-Okabe*) να οδηγήσουν σε ασφαλή κατασκευή και υπαγορεύουν την ανάγκη για επινόηση και υιοθέτηση νέων, πιο αξιόπιστων μεθόδων. «Προσωρινή πάντως λύση θα μπορούσε να αποτελέσει αφενός μεν η αύξηση του "σεισμικού συντελεστή" για τα έργα αυτά», [Γκαζέτας, 1996] αφετέρου δε η υπολογιστική-κατασκευαστική αντιμετώπιση ρευστοποιήσιμων εδαφικών στρώσεων του υπεδάφους θεμελιώσεως (π.χ. με μηχανική βελτίωση του εδάφους και παράλληλη χρήση πασσάλων ή φρεατοπασσάλων θεμελιώσεως).





Εικ. 1-2-3, Ζημιές των κρηπιδότοιχων στο νησί Port. [Γκαζέτας, 1996]

3. Μέθοδοι υπολογισμού Ωθήσεων Γαιών (Rankine- Coulomb- Mononobe/Okabe)

3.1. Rankine.

Στην περίπτωση που ο τοίχος αντιστήριξης τείνει να μετακινηθεί κάτω από την πίεση του εδάφους, η γεωστατική κατάσταση τάσεων πάει να ισχύει. Μία θεωρία που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ωθήσεων των γαιών, είναι αυτή του Rankine. Η εφαρμογή της θεωρίας αυτής, ισχύει κάτω από την προϋπόθεση ότι ο τοίχος είναι λείος, δηλ. δεν υπάρχουν τριβές μεταξύ του τοίχου και του εδάφους.

- Αν ο τοίχος αντιστήριξης μετακινηθεί κατά τα κατάντη, μειώνεται η πλευρική στήριξη, ενώ η κατακόρυφη στήριξη μένει αμετάβλητη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να δημιουργούνται συνθήκες αστοχίας του εδάφους. Η οριακή αυτή κατάσταση που προκαλείται από την κίνηση του τοίχου κατά τα κατάντη λέγεται **ενεργητική κατάσταση**.

Το πρίσμα που βρίσκεται πίσω από τον τοίχο και ορίζεται από το επίπεδο ολίσθησης (αστοχίας) ασκεί ενεργητικές τάσεις πάνω στον τοίχο:

$$\sigma_h = K_a \sigma_v = K_a \gamma z$$

Η τιμή της P_α υπολογίζεται από το εμβαδόν του διαγράμματος των πλευρικών τάσεων:

$$P_\alpha = \int_0^H K_a \gamma z \, dz = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

$$\text{Όπου: } K_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

Οι παραπάνω σχέσεις εφαρμόζονται όταν το έδαφος είναι μη συνεκτικό ($c=0$) και η επιφάνεια του, είναι οριζόντια ($i=0$). Αν το έδαφος είναι συνεκτικό ή αν το έδαφος είναι κεκλιμένο, τότε οι παραπάνω τύποι διαφοροποιούνται ως εξής:

$$\begin{aligned} \sigma'_h &= K_a \gamma z - 2c\sqrt{K_a} \\ P'_\alpha &= \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 - 2\sqrt{K_a} c H + 2\frac{c^2}{\gamma} \end{aligned}$$

- Αντίθετα, αν ο τοίχος, εξαναγκαστεί σε κίνηση προς το εσωτερικό του εδάφους, τότε, θα ασκήσει στο έδαφος, πλευρική στήριξη μεγαλύτερη από αυτήν που ήδη δέχεται. Αυτή η οριακή κατάσταση ονομάζεται **παθητική κατάσταση**.

Το πρίσμα που βρίσκεται πίσω από τον τοίχο και ορίζεται από το επίπεδο ολίσθησης (αστοχίας) ασκει παθητικές τάσεις πάνω στον τοίχο:

$$\sigma_h = K_p \sigma_v = K_p \gamma z$$

Η τιμή της P_α υπολογίζεται από το εμβαδόν του διαγράμματος των πλευρικών τάσεων:

$$P_\alpha = \int_0^H K_p \gamma z \, dz = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2$$

$$\text{Όπου: } K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

Οι παραπάνω σχέσεις εφαρμόζονται όταν το έδαφος είναι μη συνεκτικό ($c=0$) και η επιφάνεια του, είναι οριζόντια ($i=0$). Αν το έδαφος είναι συνεκτικό ή αν το έδαφος είναι κεκλιμένο, τότε οι παραπάνω τύποι διαφοροποιούνται ως εξής:

$$\sigma'_h = K_p \gamma z - 2c\sqrt{K_p}$$

$$P'_a = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 - 2\sqrt{K_p} cH$$

3.2. Coulomb

Ο Coulomb, ήταν ο πρώτος που μελέτησε το πρόβλημα ωθήσεων γαιών σε τοίχους αντιστήριξης. Η θεωρία του Coulomb, κάνει την παραδοχή ότι η δύναμη που ασκείται από το αντιστηριζόμενο έδαφος, τόσο για την ενεργητική όσο και για την παθητική κατάσταση, είναι αποτέλεσμα του βάρους εδαφικής σφήνας πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια αστοχίας. Σε αντίθεση με την θεωρία Rankine, η θεωρία Coulomb, θεωρεί ότι υπάρχει τριβή μεταξύ του τοίχου αντιστήριξης και του εδάφους με γωνία εσωτερικής τριβής δ . Με βάση την ισορροπία των δυνάμεων για την παραδοχή της θεωρίας Coulomb παίρνουμε την συνολική δύναμη που ασκείται στον τοίχο αντιστήριξης από το έδαφος για την γενική περίπτωση που η επιφάνεια του αντιστηριζόμενου εδάφους, σχηματίζει γωνία β με την οριζόντιο, η γωνία εσωτερικής τριβής της διεπιφάνειας εδάφους – τοίχους είναι η δ και η εσωτερική πλευρά του τοίχου είναι κεκλιμένη με γωνία θ ως προς την κατακόρυφο.

Κατα την λύση αυτή, η ενεργητική ώθηση δίνεται από την σχέση:

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

$$\text{Όπου } K_a = \left(\frac{\frac{\sin(\beta - \varphi)}{\sin\beta}}{\sqrt{\sin(\beta + \delta) + \frac{\sin(\varphi + \delta)\sin(\varphi - i)}{\sin(\beta - i)}}} \right)^2$$

Η επιφάνεια αστοχίας σχηματίζει γωνία α_A ως προς την οριζόντιο:

$$\alpha_A = \varphi + \tan^{-1} \left[\frac{\tan(\varphi - \beta) + C_1}{C_2} \right]$$

$$\text{Όπου: } C_1 = \sqrt{\tan(\varphi - \beta) [\tan(\varphi - \beta) + \cot(\varphi - \theta)] [1 + \tan(\delta + \theta) \cot(\varphi - \theta)]}$$

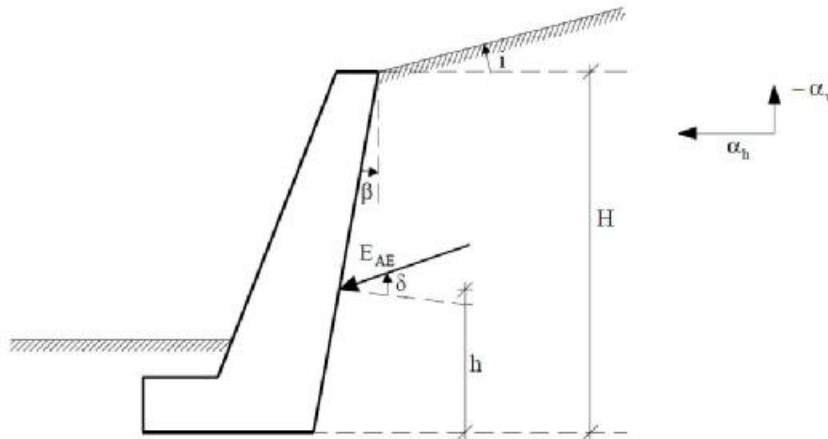
$$C_2 = 1 + \{\tan(\delta + \theta) [\tan(\varphi - \beta) + \cot(\varphi - \theta)]\}$$

3.3. Mononobe-Okabe

Ο Okabe και οι Mononobe – Matsuo ανέπτυξαν την βάση για την ψευδοστατική ανάλυση των ωθήσεων των γαιών που προκαλούνται από σεισμούς πάνω σε τοίχους αντιστήριξης. Η ανάλυση αυτή ονομάστηκε

«μέθοδος Mononobe-Okabe (M-O)». Η μέθοδος Mononobe-Okabe είναι επέκταση της στατικής μεθόδου του Coulomb σε ψευδοστατικές συνθήκες. Στην (M-O) ανάλυση, οι ψευδοστατικές επιταχύνσεις προσαρμόζονται στην (ενεργητική ή παθητική) «σφήνα» της μεθόδου Coulomb. Η ψευδοστατική ώθηση γαιών βρίσκεται από την ισορροπία δυνάμεων της σφήνας.

- **Ενεργητική κατάσταση.** Οι δυνάμεις που ενεργούν στην σφήνα σε συνθήκες ξηρού, μη συνεκτικού εδάφους φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 9 Τοίχος Αντιστήριξης, [EAK 2000]

Η σφήνα, επιδρά επίσης από οριζόντια και κάθετη ψευδοστατικές δυνάμεις, όπου τα σημεία εφαρμογής τους εξαρτώνται από την μάζα της σφήνας από τις ψευδοστατικές επιταχύνσεις $\alpha_h = k_h g$ και $\alpha_v = k_v g$. Η συνολική ενεργητική ώθηση μπορεί να εκφραστεί όπως η αντίστοιχη ώθηση που εμφανίζεται υπό στατικές συνθήκες:

$$P_{AE} = \frac{1}{2} K_{AE} \gamma H^2 (1 - k_v)$$

$$\text{Όπου: } K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi - \theta - \beta)}{\cos\theta \cos^2\beta \cos(\delta + \beta + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \theta - i)}{\cos(\delta + \beta + \theta) \cos(i - \beta)}} \right]^2}$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{\alpha_h}{1 - \alpha_v} \right)$$

§ γ : το ειδικό βάρος του εδάφους

§ α_h και α_v : είναι αντίστοιχα ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος σεισμικός συντελεστής όπου:

$$\alpha_h = \alpha / q_w \text{ όπου:}$$

α : είναι η ανηγμένη σεισμική επιτάχυνση του εδάφους

q_w : συντελεστής συμπεριφοράς ο οποίος έχει τις ακόλουθες τιμές:

Τύπος τοίχου	Συντελεστής q_w
Τοίχος με δυνατότητα ολισθήσεως 300α (σε mm)	2.00
Τοίχος με δυνατότητα ολισθήσεως 200α (σε mm)	1.50
Τοίχος με αγκυρώσεις ή εύκαμπτος τοίχος εδραζόμενος σε βράχο ή πασσάλους	1.20
Άκαμπτος τοίχος εδραζόμενος σε βράχο ή πασσάλους	1.00
Τοίχοι αντιστηριζόμενοι με αντηρίδες (θλιπτήρες)	0.70

§ Ο κατακόρυφος σεισμικός συντελεστής α_v λαμβάνεται ίσος με 0.30α. Στην τιμή αυτή συμπεριλαμβάνεται η επίδραση των συντελεστών χωρικής επαλληλίας $\lambda=\mu=0,30$

§ Οι σεισμικοί συντελεστές α_h και α_v θα εφαρμόζονται επίσης, τόσο στο βάρος του τοίχου όσο και στο βάρος της επίχωσης που φέρεται άμεσα από το θεμέλιο του (τοίχοι μορφής L).

§ Η γωνία τριβής τοίχου-εδάφους στην ωθούμενη επιφάνεια παρειά δεν πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερη από $(2/3)\varphi$, όπου φ η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους.

§ Όταν $\varphi < \theta + i$, το $\sin(\varphi - \theta - i)$ και το αντίστοιχο υπόρριζο γίνονται αρνητικά, επομένως η σχέση Mononobe-Okabe δεν δίνει πραγματική λύση. Το φυσικό νόημα αυτού του περιορισμού είναι ότι για σεισμό που προκαλεί $\varphi > \theta + i$ δεν είναι δυνατή η ισορροπία του πρανούς με κλίση $i > \varphi - \theta$

§ Αντί της παραπάνω μεθόδου οριακής ισορροπίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι βασισμένες στην γενική θεωρία παραμορφώσεων (ελαστική ή ελαστοπλαστική), με αναλυτική ή αριθμητική προσομοίωση του εδάφους. Η ανάλυση με τέτοιες μεθόδους πρέπει να ικανοποιεί τους πραγματικούς κινηματικούς περιορισμούς του τοίχου αντιστήριξης και να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στα χαρακτηριστικά του εδάφους θεμελιώσεως και του αντιστηριζόμενου υλικού.

• **Παθητική κατάσταση.** Η αντίστοιχη έκφραση για την παθητική ώθηση που αναπτύσσεται όταν ο τοίχος κινείται προς την επίχωση. Είναι η ακόλουθη:

$$K_{PE} = \frac{\cos^2(\varphi - \theta + \beta)}{\cos\theta \cos^2(\delta - \beta + \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \theta + i)}{\cos(\delta - \beta + \theta) \cos(i - \beta)}} \right]^2}$$

4. Κατασκευή Προγράμματος υπολογισμού SF

4.1. Κατασκευή - Παράμετροι που έλαβα υπόψη

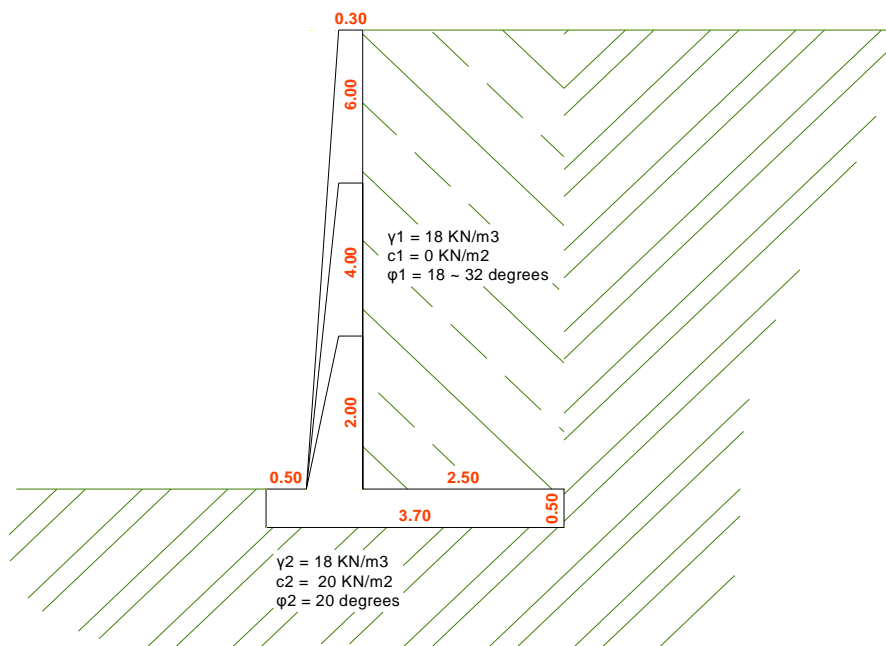
Το πρόγραμμα που κατασκευάστηκε, στην ουσία είναι ένα υπολογιστικό φύλλο του προγράμματος Excel - Microsoft Office 2007. Ανοίγοντας το υπολογιστικό φύλλο, βλέπουμε πως η οθόνη χωρίζεται στις εξής περιοχές:

1. Φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους (I). Στην περιοχή αυτή, εισάγονται τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους όπως: συνοχή c , ειδικό βάρος εδάφους γ , γωνία εσωτερικής τριβής ϕ , τόσο στα ανάντη, όσο και στα κατόντη.
2. Φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους (II). Στην περιοχή αυτή, εισάγονται το ειδικό βάρος γ του σκυροδέματος, την κλίση του πρανούς καθώς και τυχόν κινητό φορτίο στα ανάντη.
3. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τοίχου. Εκεί, εισάγονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τοίχου όπως το ύψος του προβόλου, οι διαστάσεις της θεμελίωσης καθώς και τυχούσες κεκλιμένες διαστάσεις.
4. Υπολογισμοί βαρών και μοχλοβραχιόνων. Στον πίνακα αυτό, υπολογίζεται το εμβαδόν μιας διατομής και συναρτήσει το ειδικού βάρους του σκυροδέματος και του εδάφους στα ανάντη, υπολογίζονται τα βάρη και οι μοχλοβραχίονες. Αυτοί χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης.
5. Περιοχή αποτελεσμάτων. Στην περιοχή αυτή, το υπολογιστικό φύλλο υπολογίζει και επιστρέφει τιμές του P_a, P_p για τις τρεις μεθόδους υπολογισμού ωθήσεων γαιών (Rankine, Coulomb, Mononobe-Okabe) χρησιμοποιώντας κατά περίπτωση, τον κατάλληλο τύπο υπολογισμού του K_{AE} . Επίσης, για να έχουμε καλύτερη εποπτεία των υπολογισμών και για την αποφυγή λαθών, υπολογίζεται η P_h και η P_v , η οριζόντια και η κατακόρυφη συνιστώσα αντίστοιχα. Στην στήλη για τον υπολογισμό των ωθήσεων κατά Mononobe-Okabe, εισάγεται η ανηγμένη σεισμική επιτάχυνση του εδάφους a καθώς επίσης και ο συντελεστής συμπεριφοράς q_w . Τέλος, στα τελευταία κελιά κάθε στήλης, υπολογίζεται ο «**Συντελεστής Ασφαλείας Έναντι Ολίσθησης**».

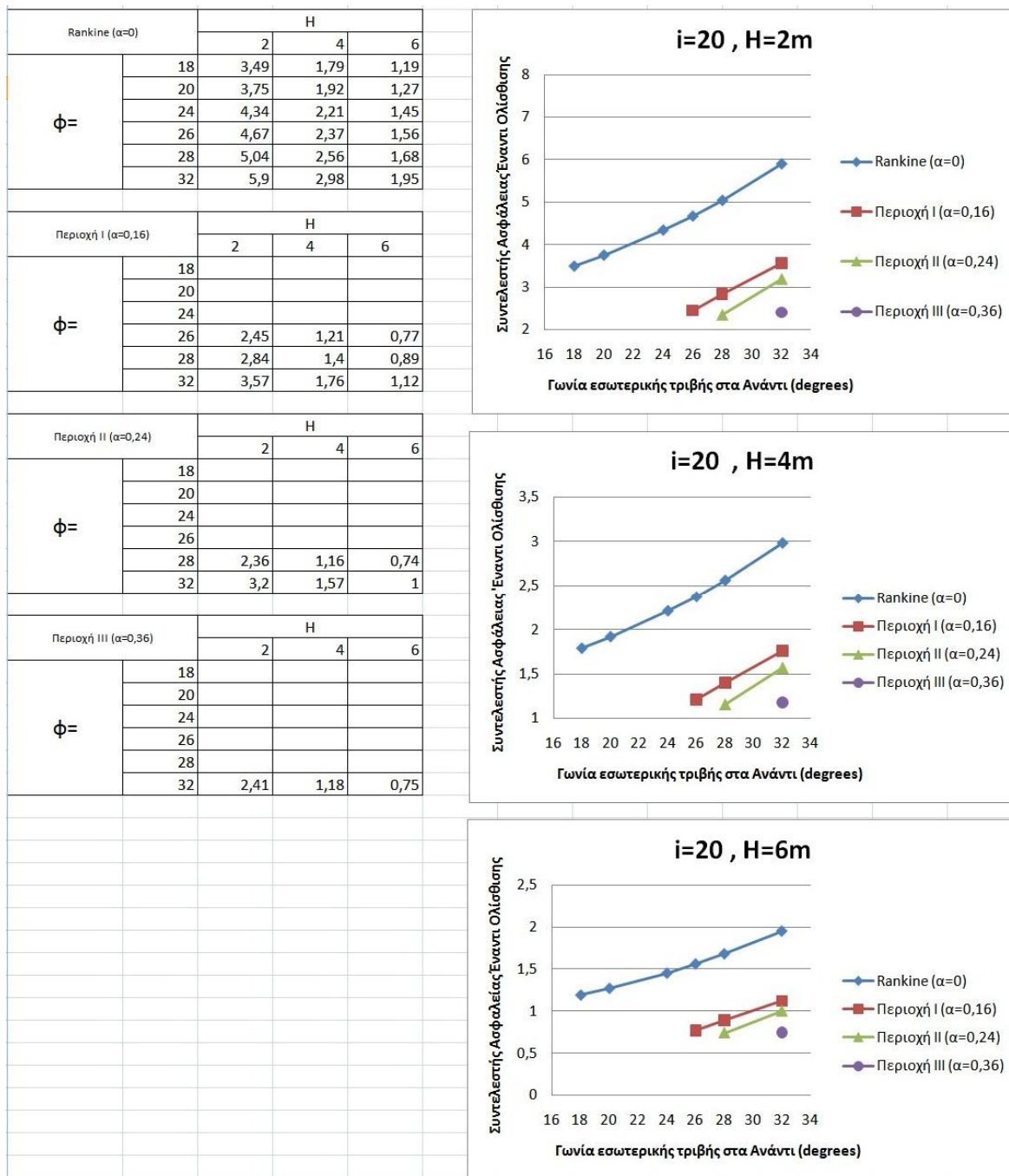
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Φυσικά χαρακτηριστικά εδάφους			Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τοίχου										
2	γ_1	18 kN/m ³		Υψος προβόλου	6	m				Τμήμα	Εμβαδόν	Έ βάρος	Μοχλοβρρ Ροπή	
3	ϕ_1	32 degrees		Πλάτος στέψης	0,3	m				1	1,2	31,2	0,77	23,92
4	c_1	0 kN/m ²		Εμπρός πέλιμα	0,5	m				2	1,8	46,8	1,05	49,14
5	γ_2	18 kN/m ³		Πίσω πέλιμα	2,5	m				3	1,85	48,1	1,85	88,99
6	ϕ_2	20 degrees		S1	3	0,4	m			4	1,137	20,47	2,87	58,69
7	c_2	20 kN/m ²		Ολικό πλάτος πέλιματ	3,7	m				5	15	270	2,45	661,5
8	β	90 degrees		υψος βάσης	0,5	m				4				
9	δ	0 degrees		Βάθος θεμελίωσης	0,5	m				Σύνολο		416,57	Σύνολο	882,24
10				x_2	0,91	m								
11				Ολικό ύψος τοίχου	7,41	m								
12	γ σκυροδέματος	26 kN/m ³												
13	κλίση πρανούς	20 degrees												
14	κινητό φορτίο α	0 kN/m												
15														
16	Θεωρία Rankine			Θεωρία Coulomb			Θεωρία Mononobe-Okabe							
17														
18	K_a	0,31		K_a	0,40		α	0,36	K_a	0,79				
19	P_a	151,84 kN/m		P_a	197,21		q_w	2	P_a	346,54				
20	P_v	51,93 kN/m		P_v	0,00		a_h	0,18	P_v	0,00				
21	P_h	142,68 kN/m		P_h	197,21		a_v	0,108	P_h	346,54				
22							θ	11,40872						
23	K_p	2,04		K_p	2,04				K_p	3,04				
24	P_p	33,15 kN/m		P_p	33,15				P_p	35,40				
25														
26	FSολίσθισις	1,95		FSολίσθισις	1,31				FSολίσθισις	0,75				
27	FSανατροπής	3,05		FSανατροπής	1,81				FSανατροπής	1,03				
28														

Εικ. 4 Το υπολογιστικό φύλλο που κατασκευάστηκε.

6. Περιοχή αποτελεσμάτων – διαγραμμάτων. Στην περιοχή αυτή, κατασκευάστηκαν αφενός πίνακες στους οποίους εισήγαγα τα αποτελέσματα που έλαβα για τις διάφορες εκτελέσεις του προγράμματος, αφετέρου, διαγράμματα για την καλύτερη απεικόνιση και κατανόηση της παραμετρικής μελέτης από τον αναγνώστη.



Σχ. 10 Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τοίχου – Τα φυσικά του εδάφους χαρακτηριστικά ανάτη & κατάντη

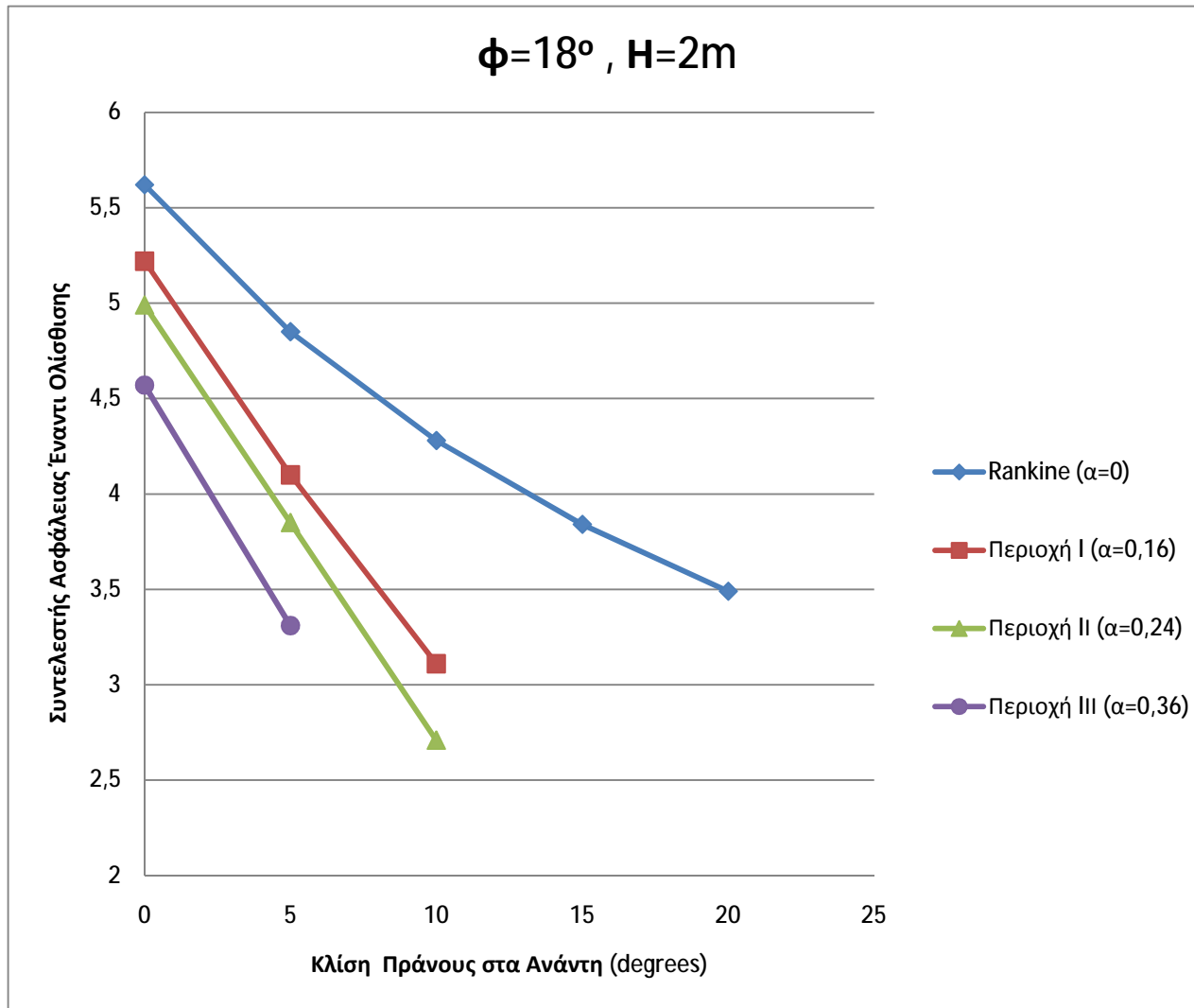


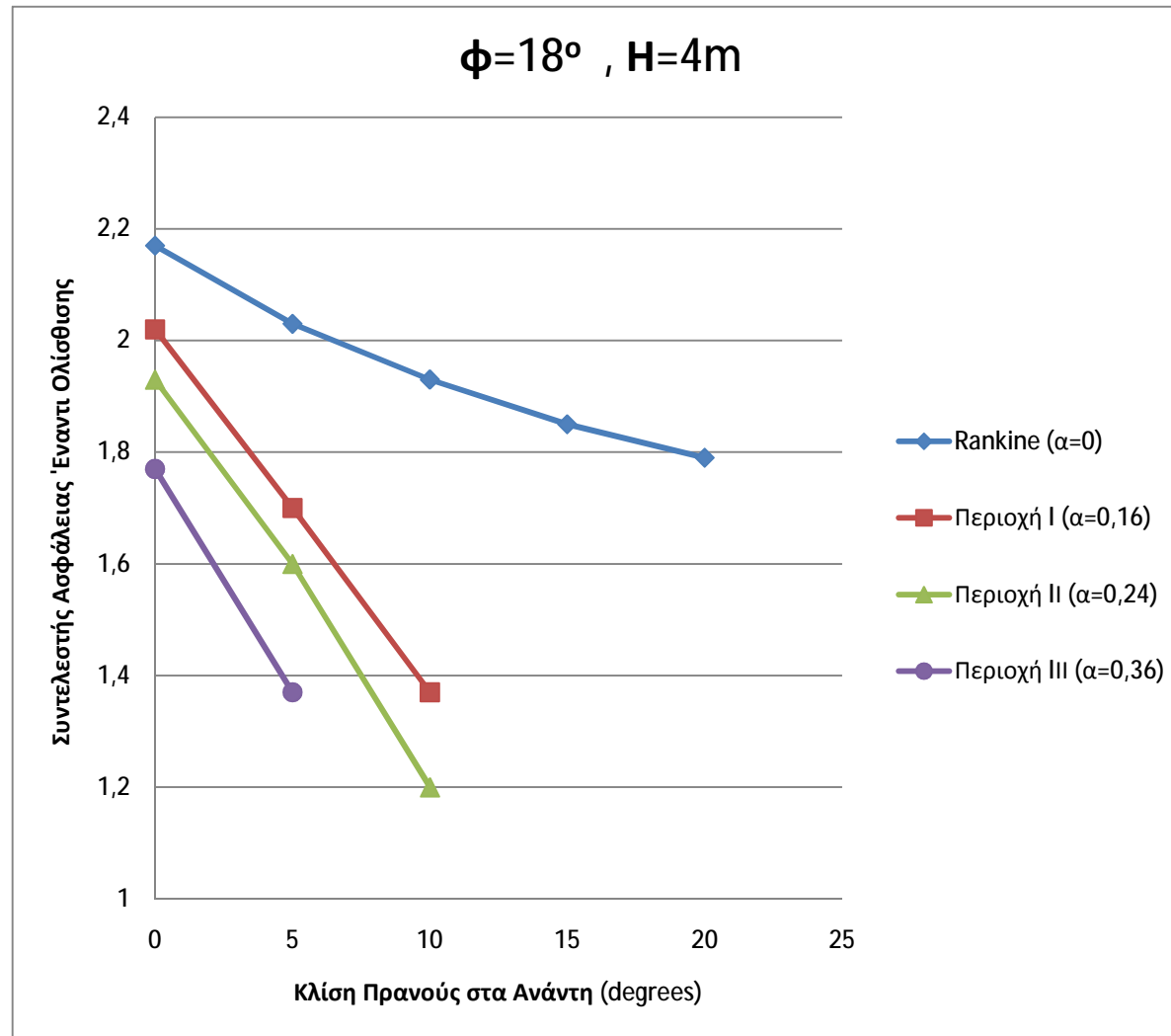
Εικ. 5. Η περιοχή αποτελεσμάτων στο υπολογιστικό φύλλο.

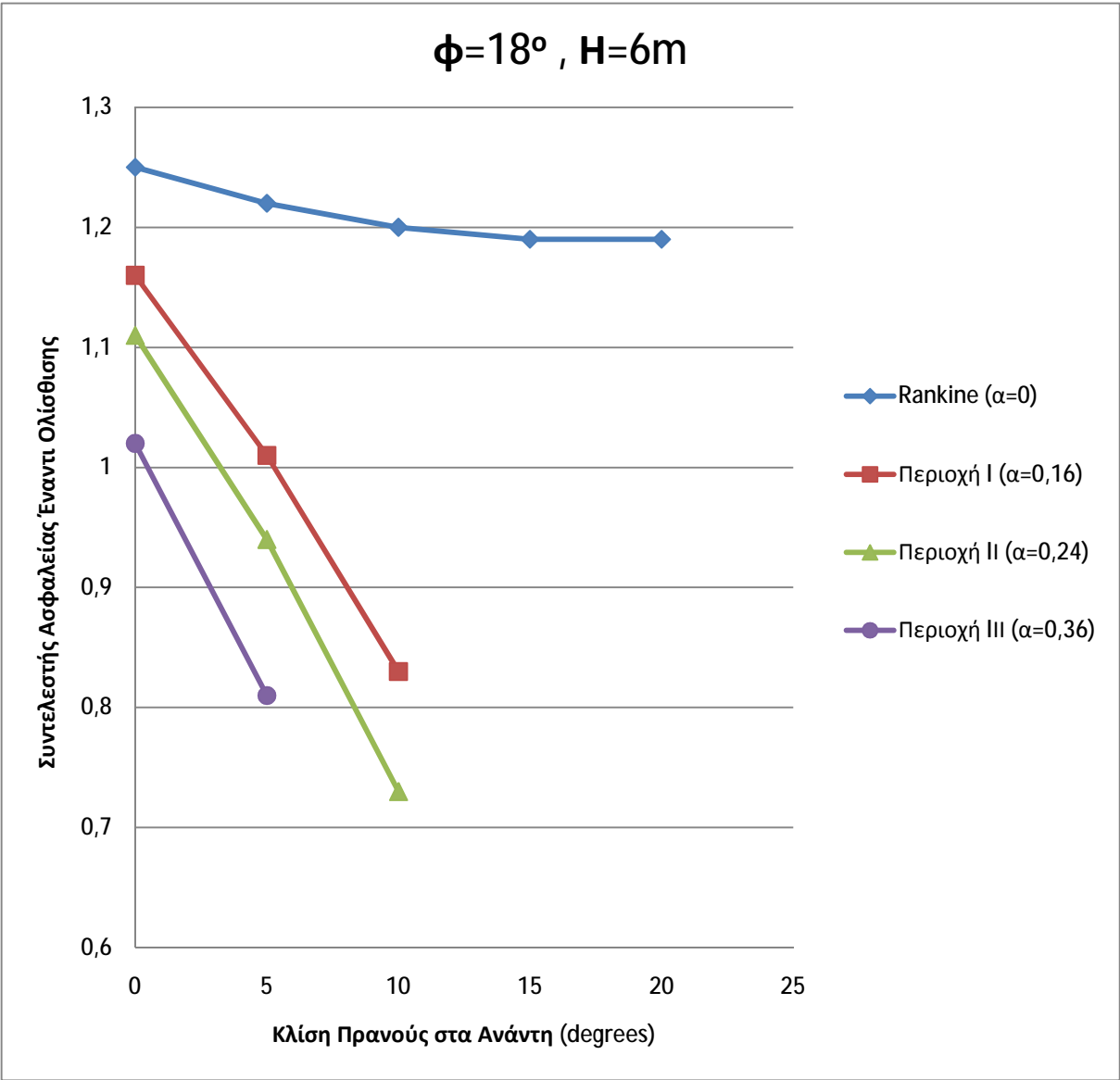
Η παραμετρική μελέτη, πραγματοποιήθηκε για τους συνδυασμούς τιμών:

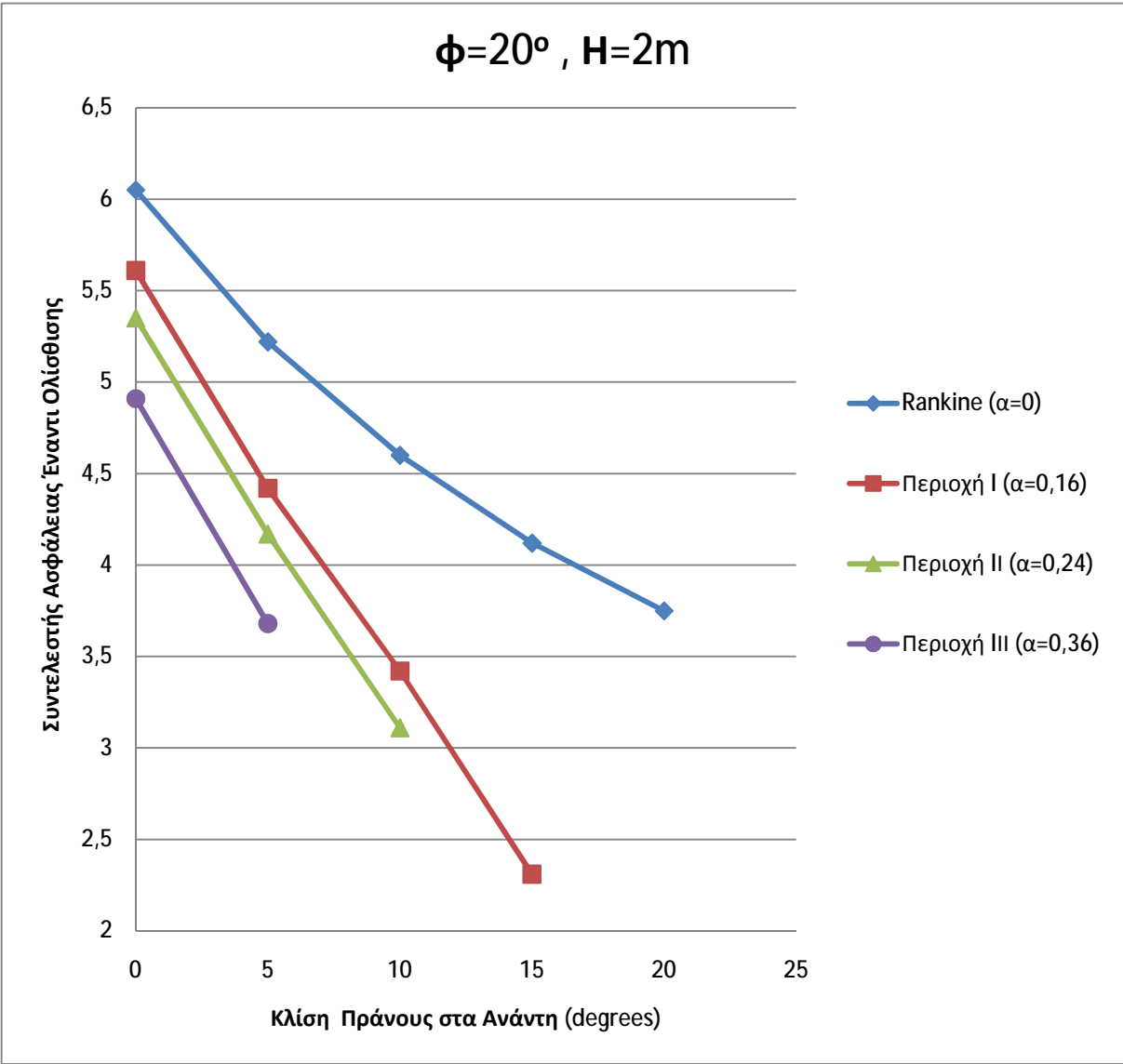
- Ø Γωνία εσωτερικής τριβής: $\phi= 18^\circ, 20^\circ, 24^\circ, 26^\circ, 28^\circ, 32^\circ$
- Ø Ύψος προβόλου: $H=2, 4, 6$ m
- Ø Κλίση πρανούς: $i= 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$
- Ø Ανοιγμένη σεισμική επιτάχυνση του εδάφους: $\alpha=0, 0,16, 0,24, 0,36$

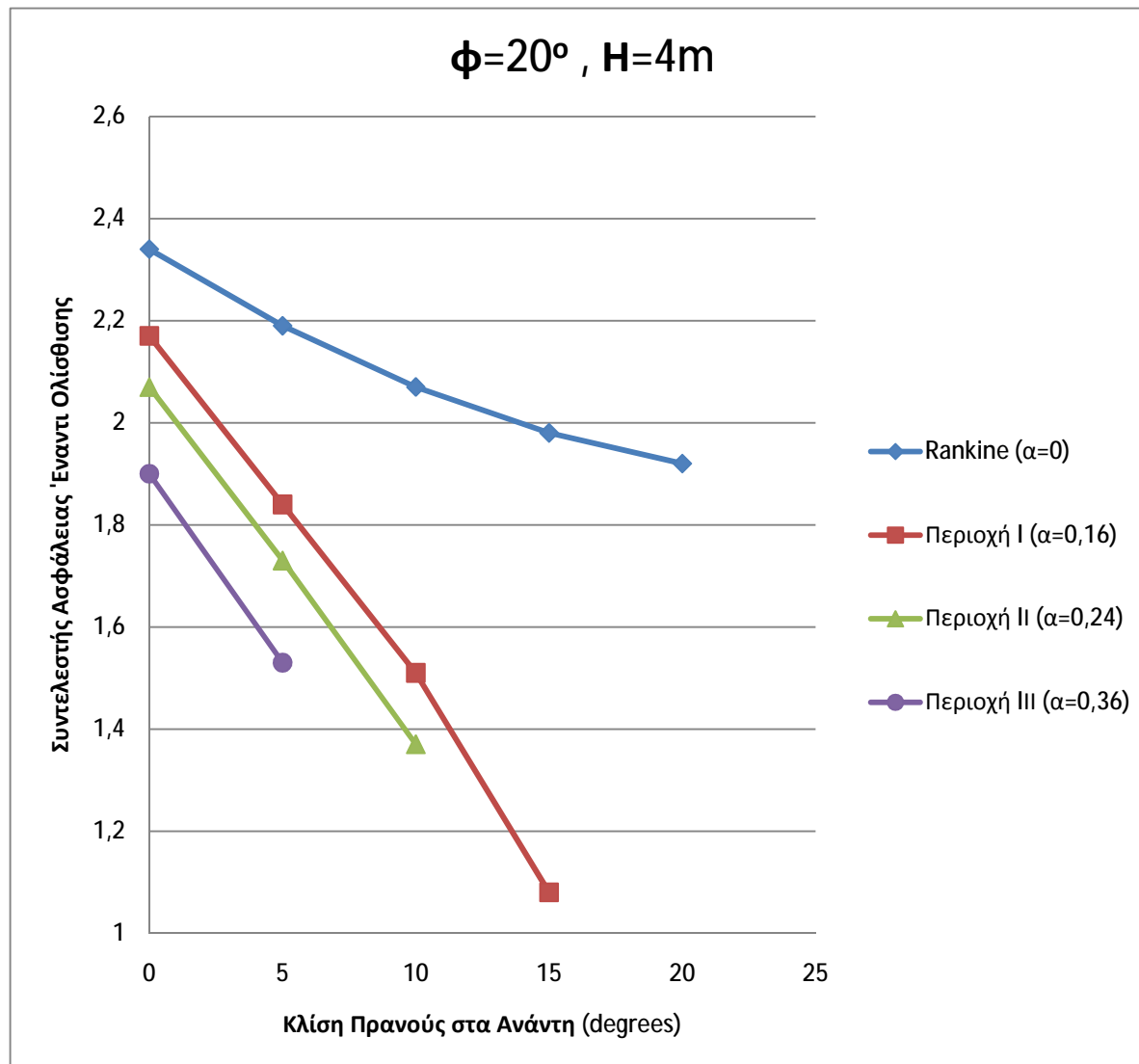
4.2. Διαγράμματα

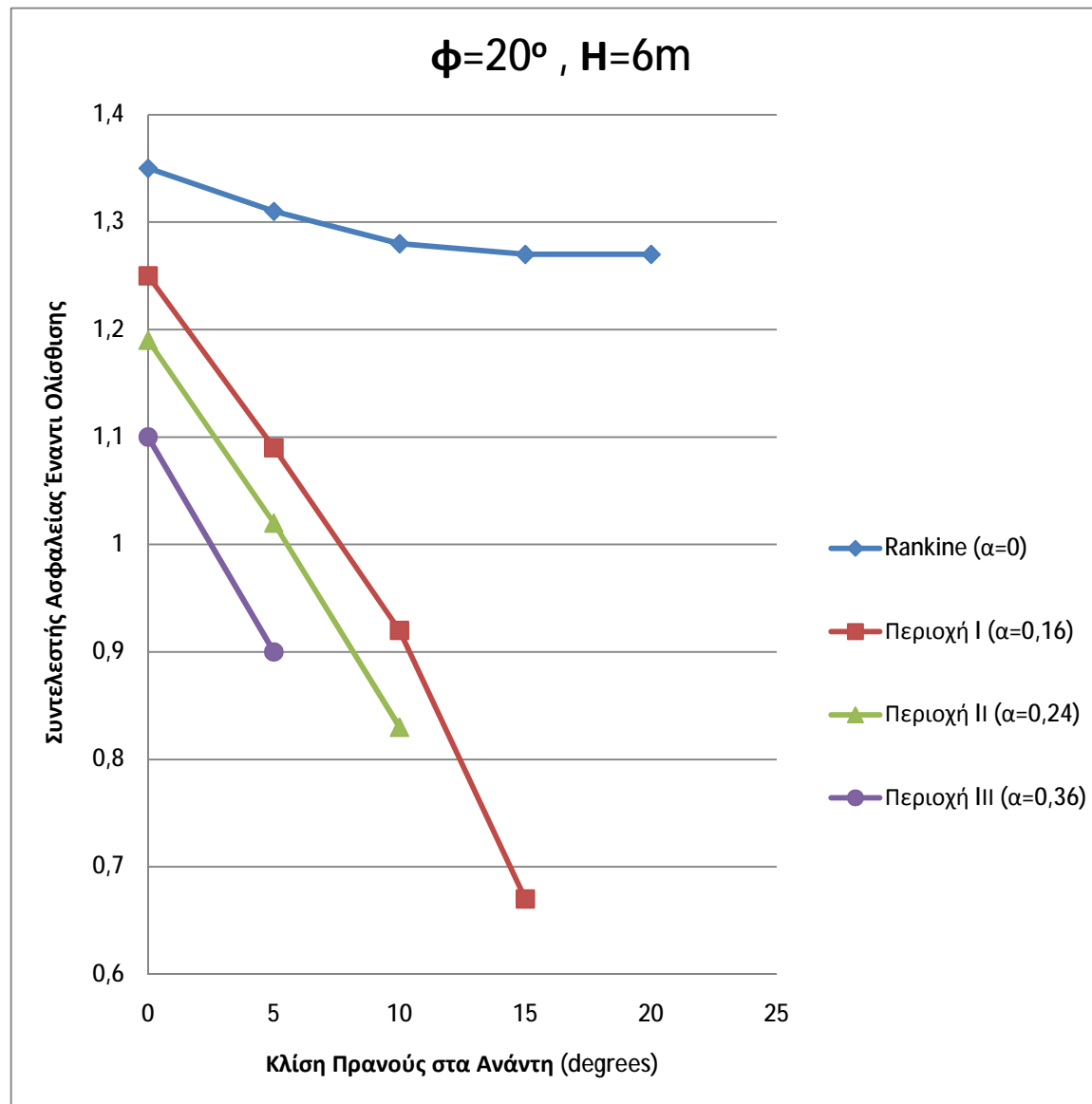


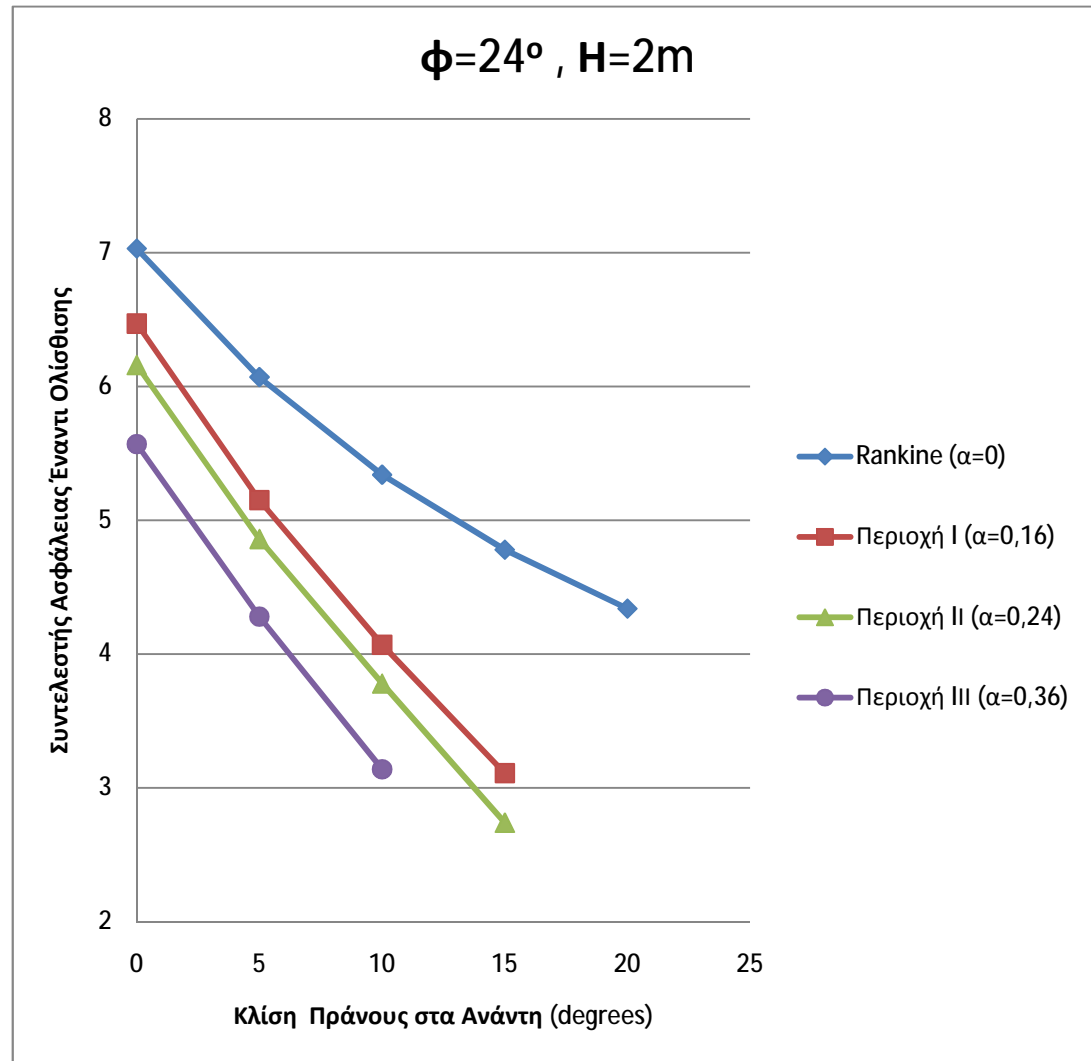


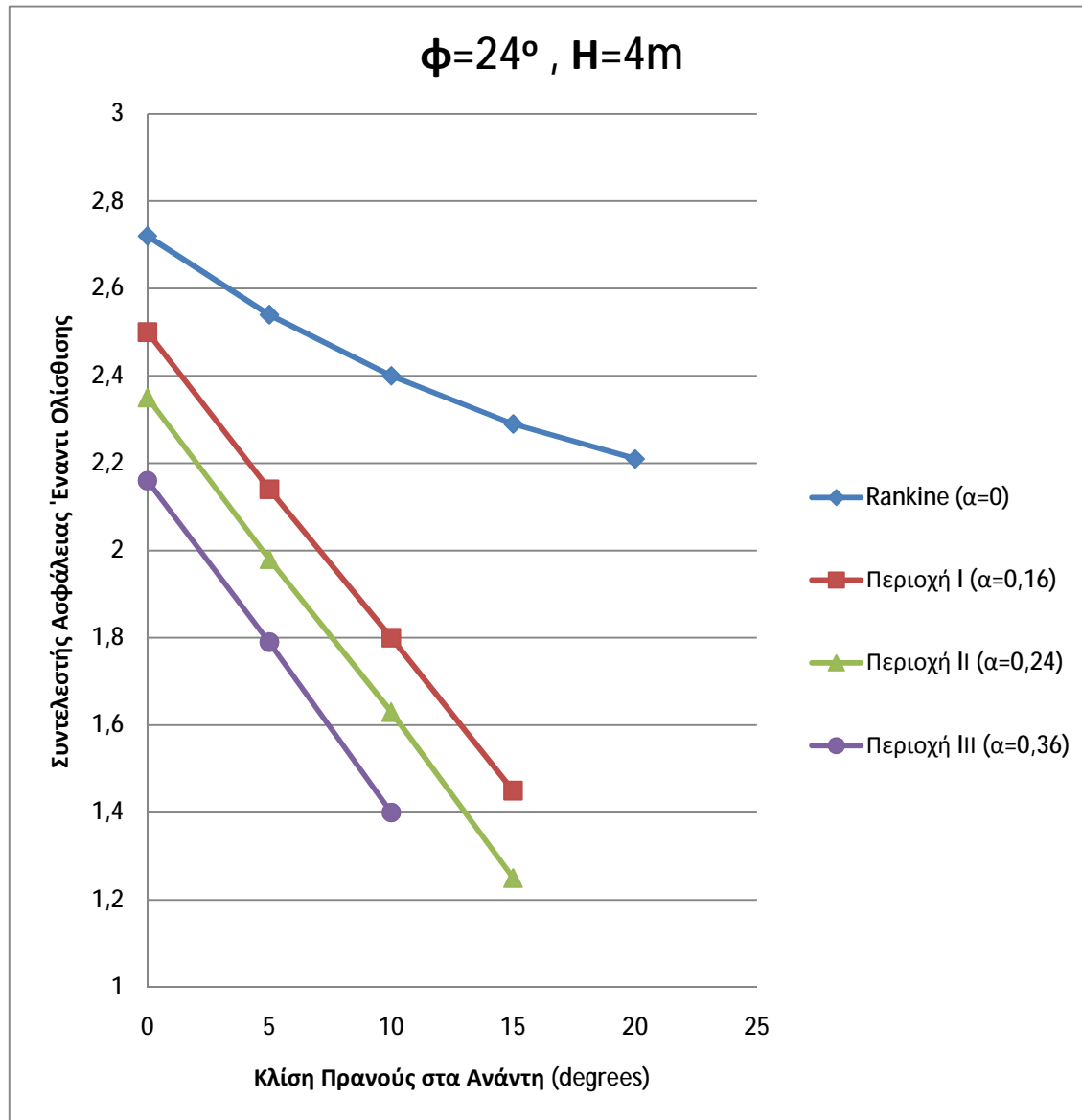


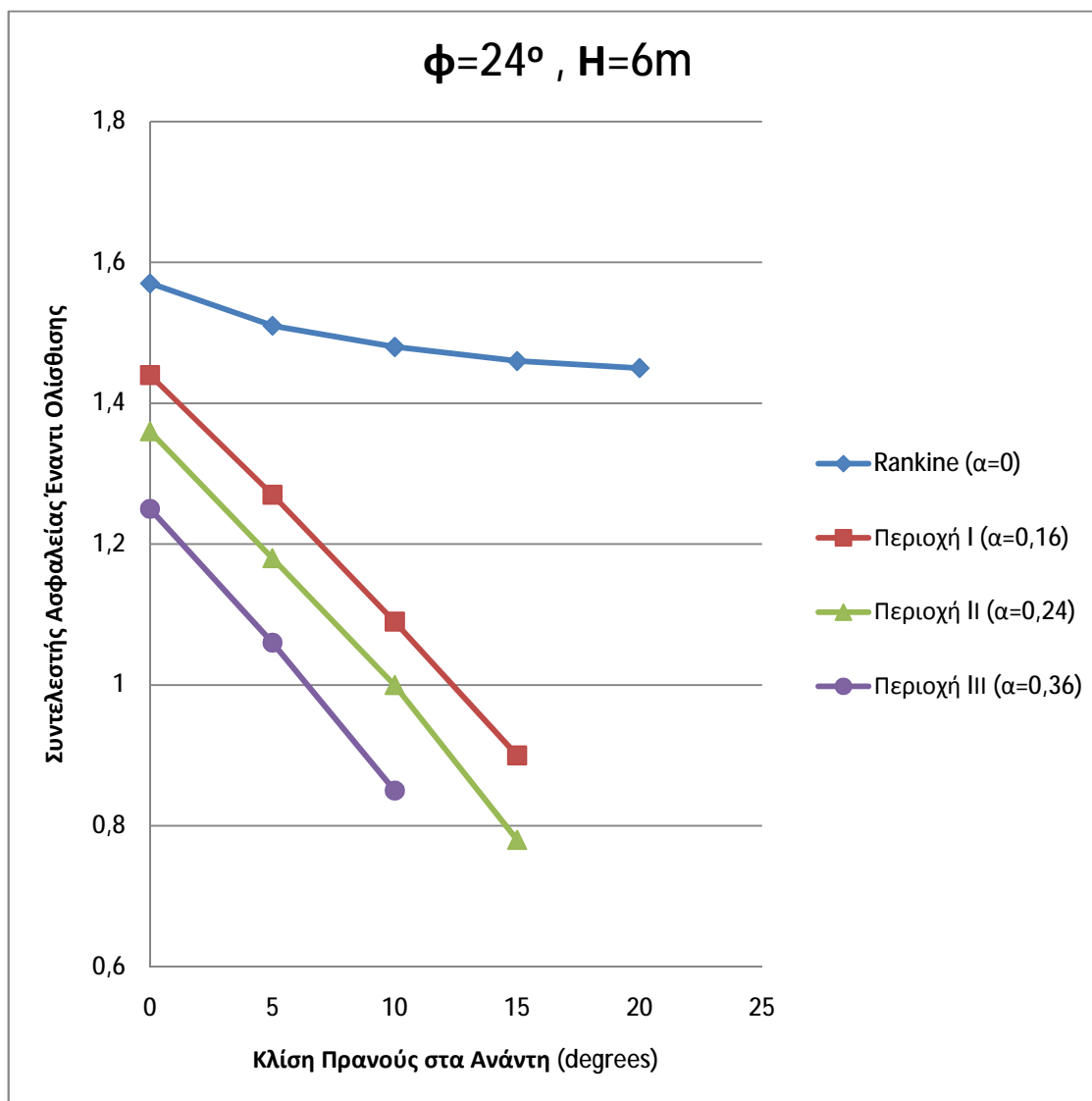


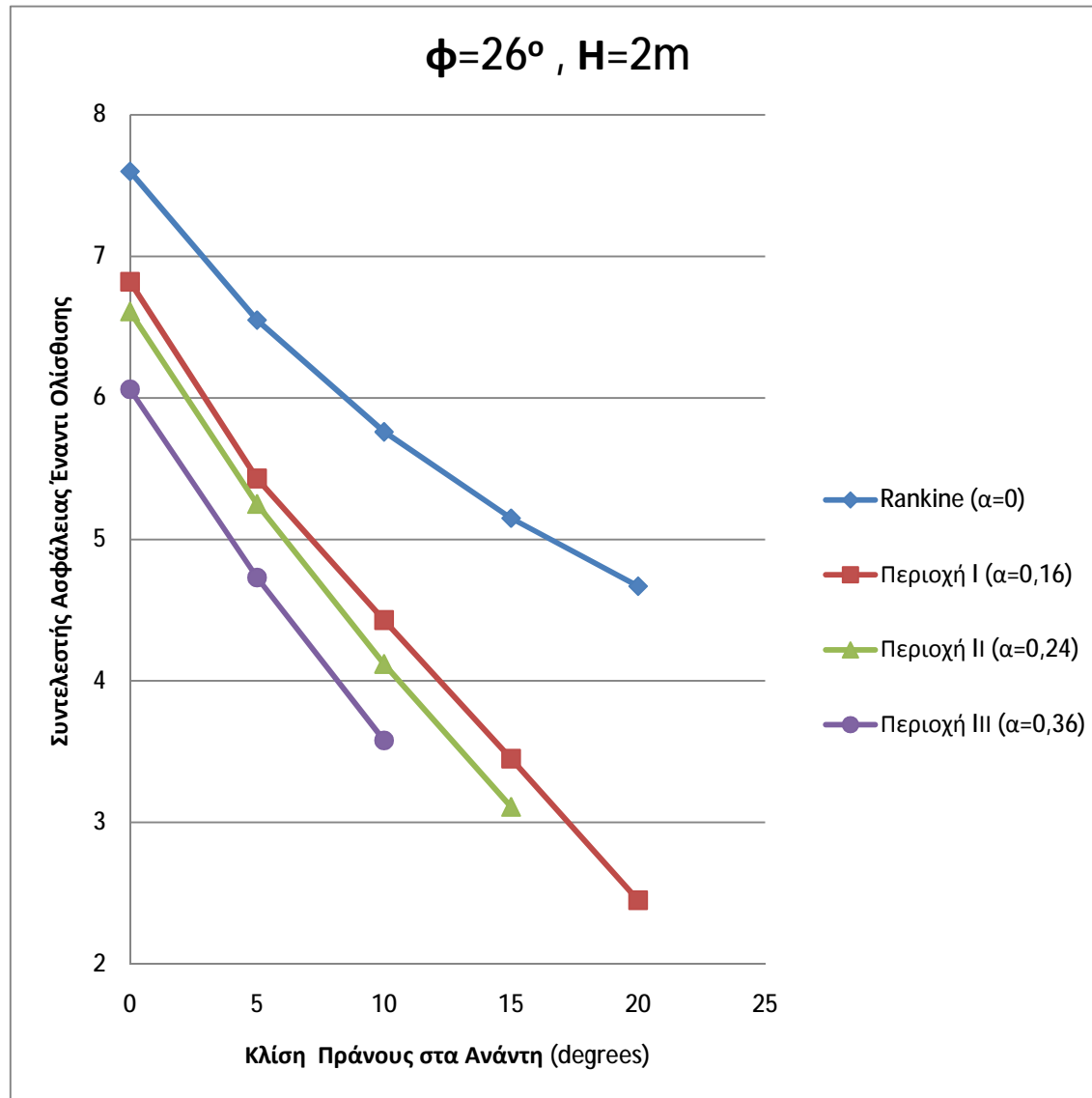


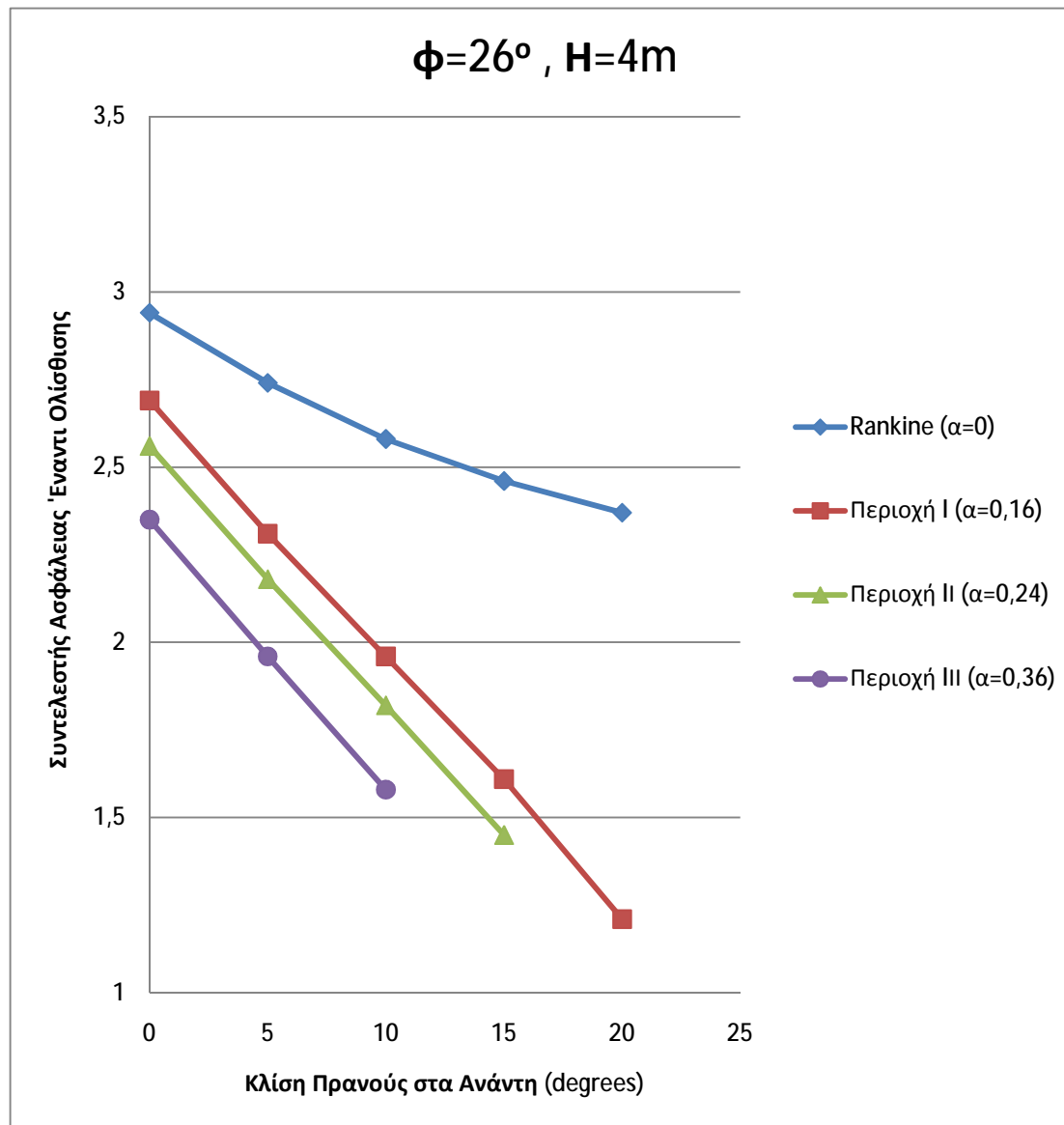


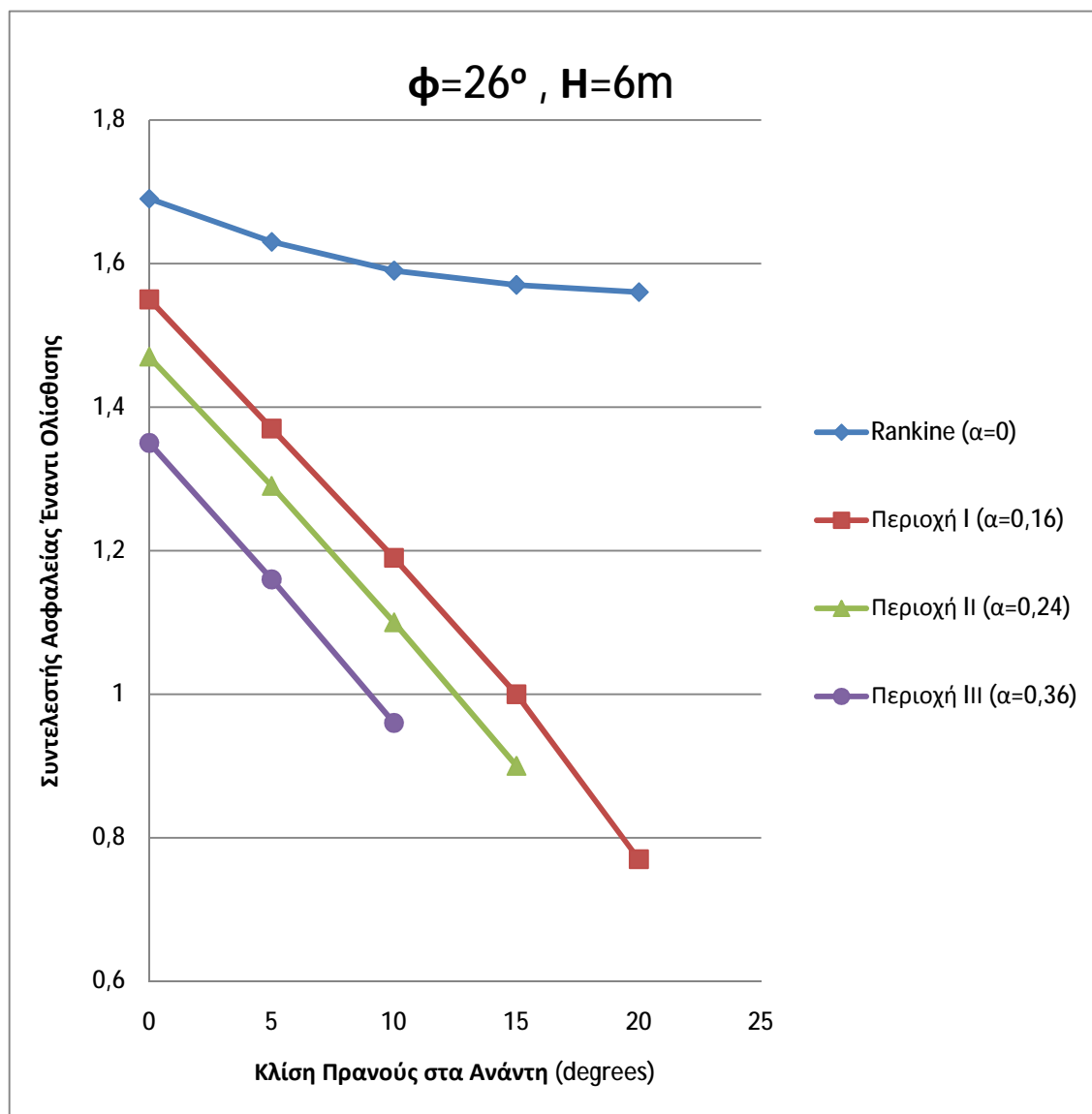


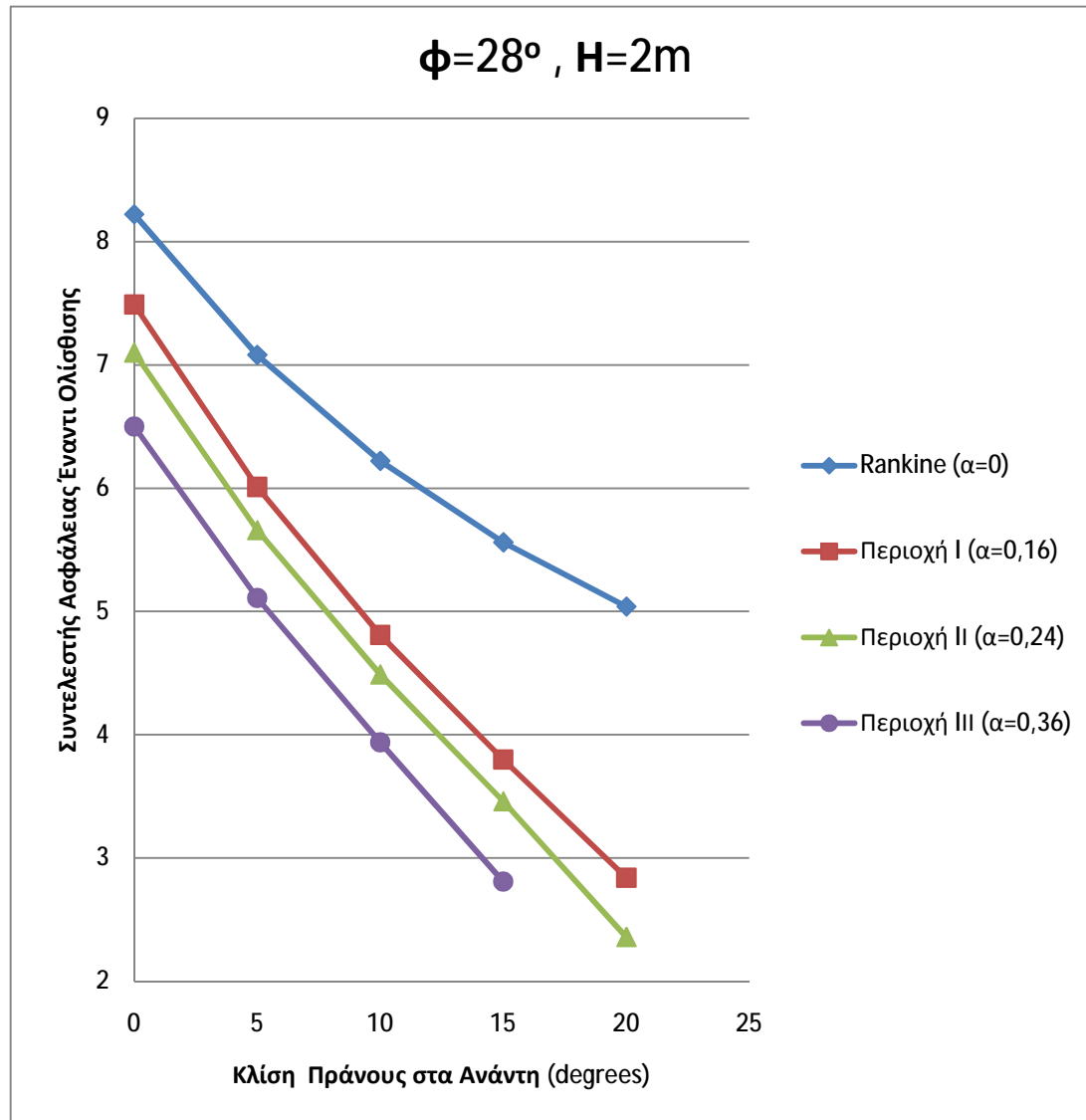


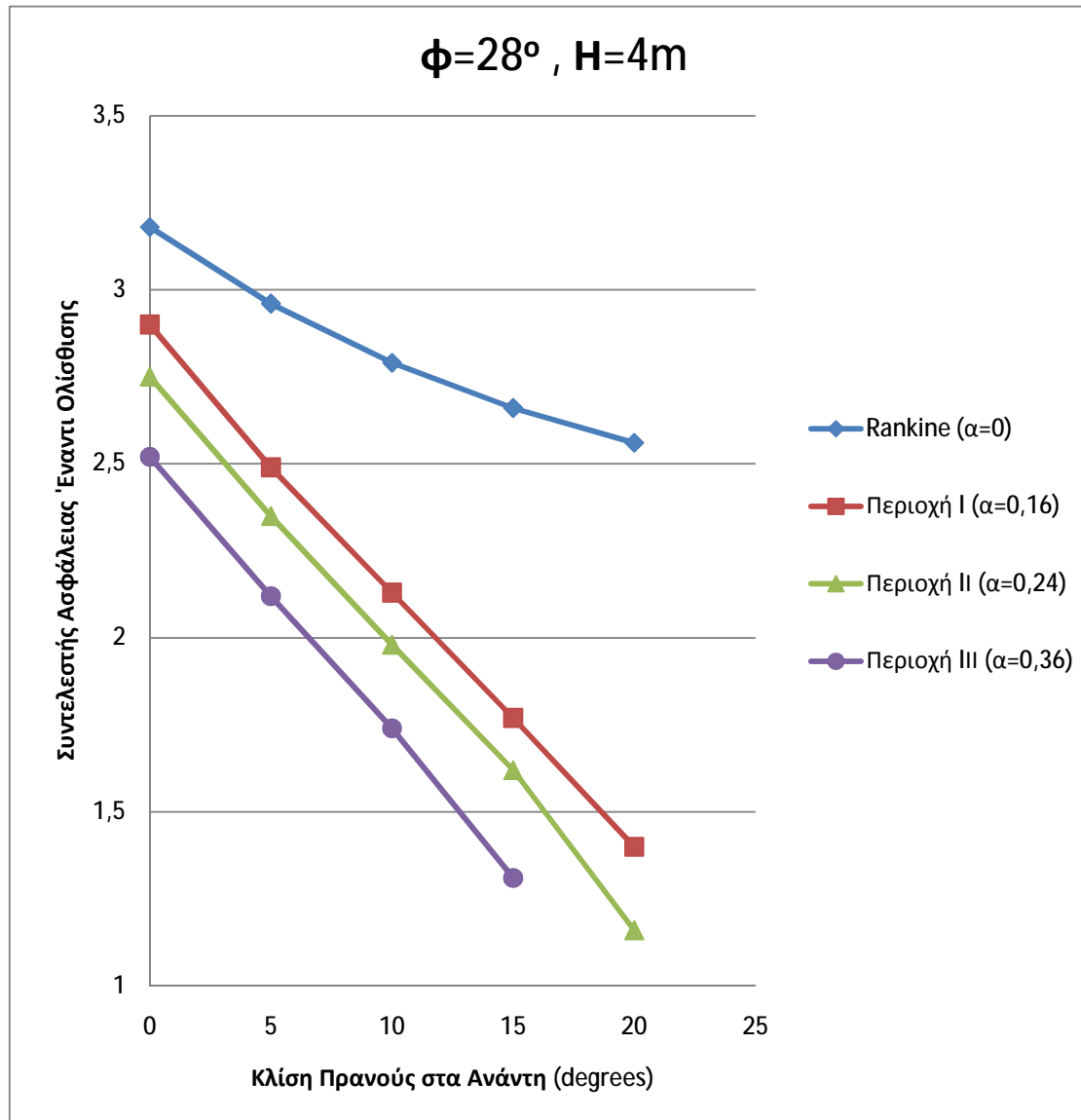


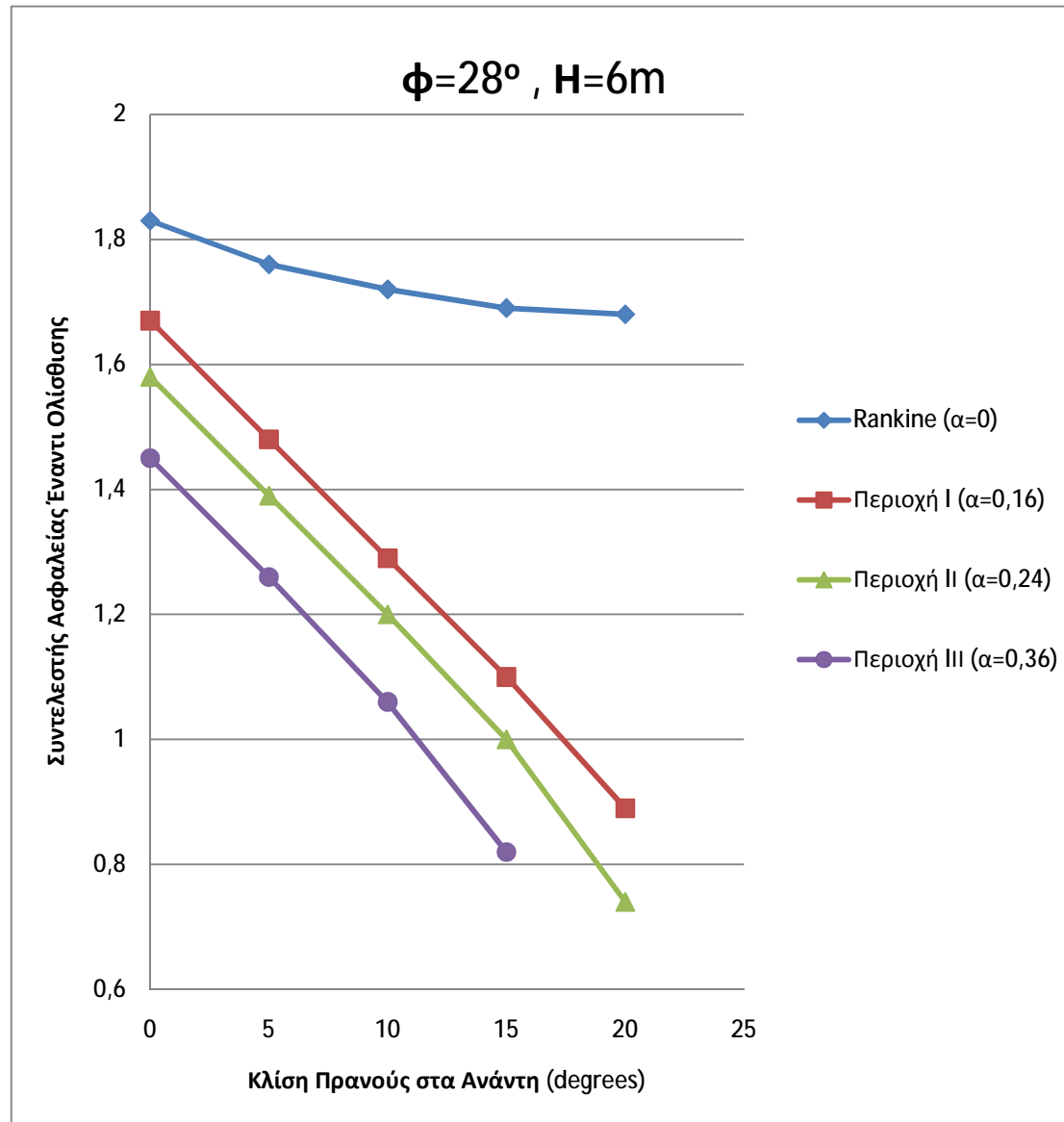


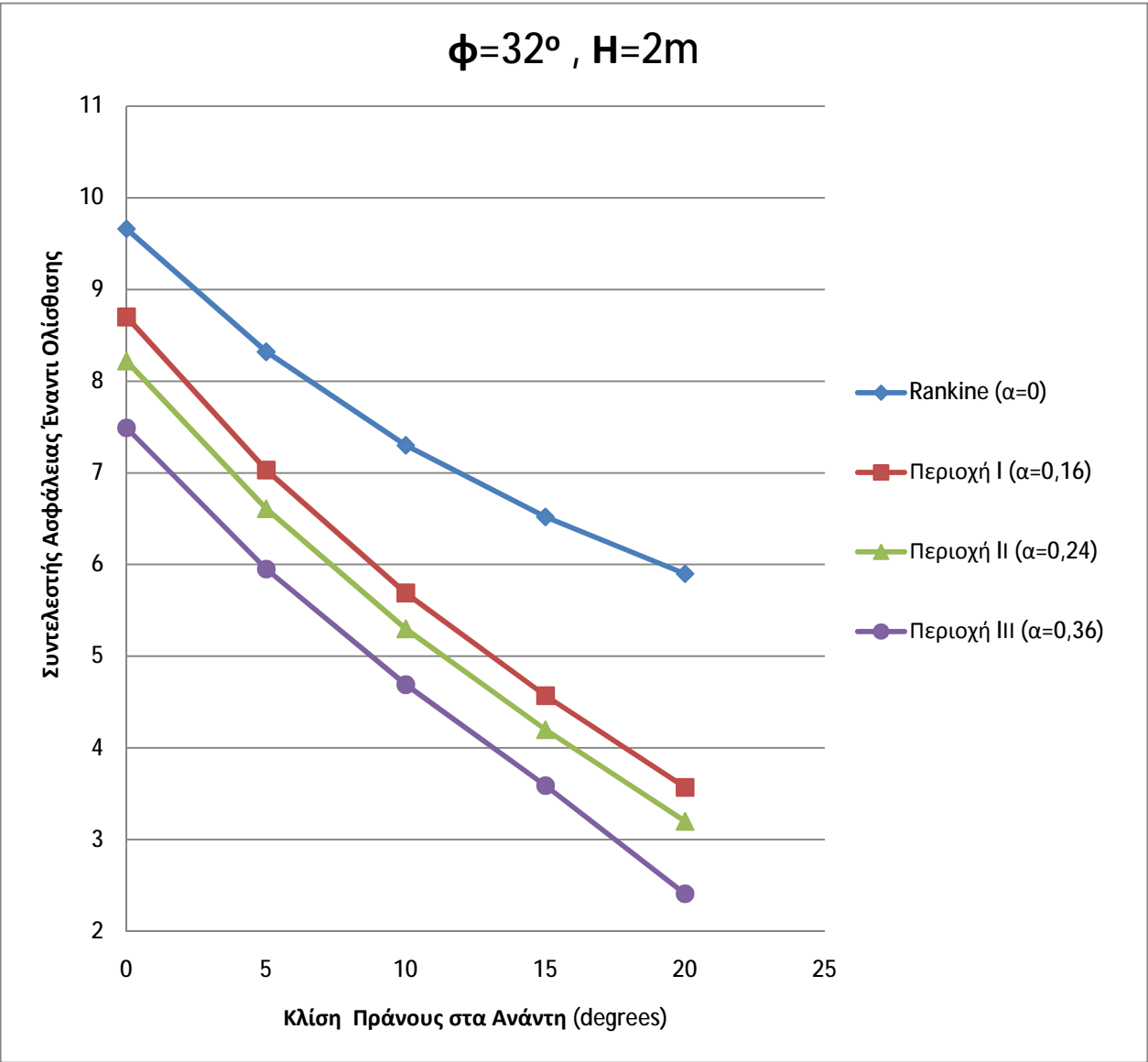


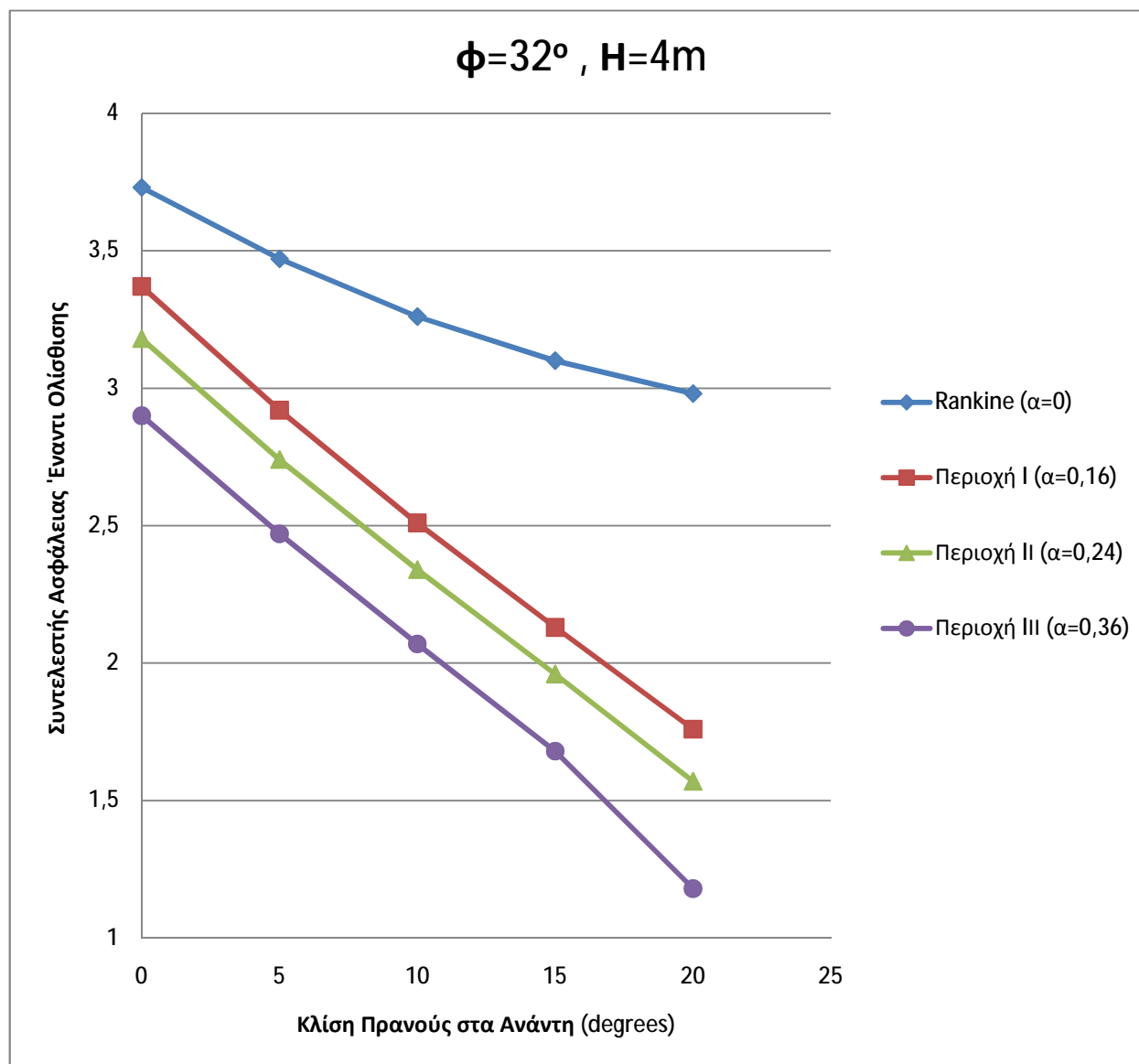


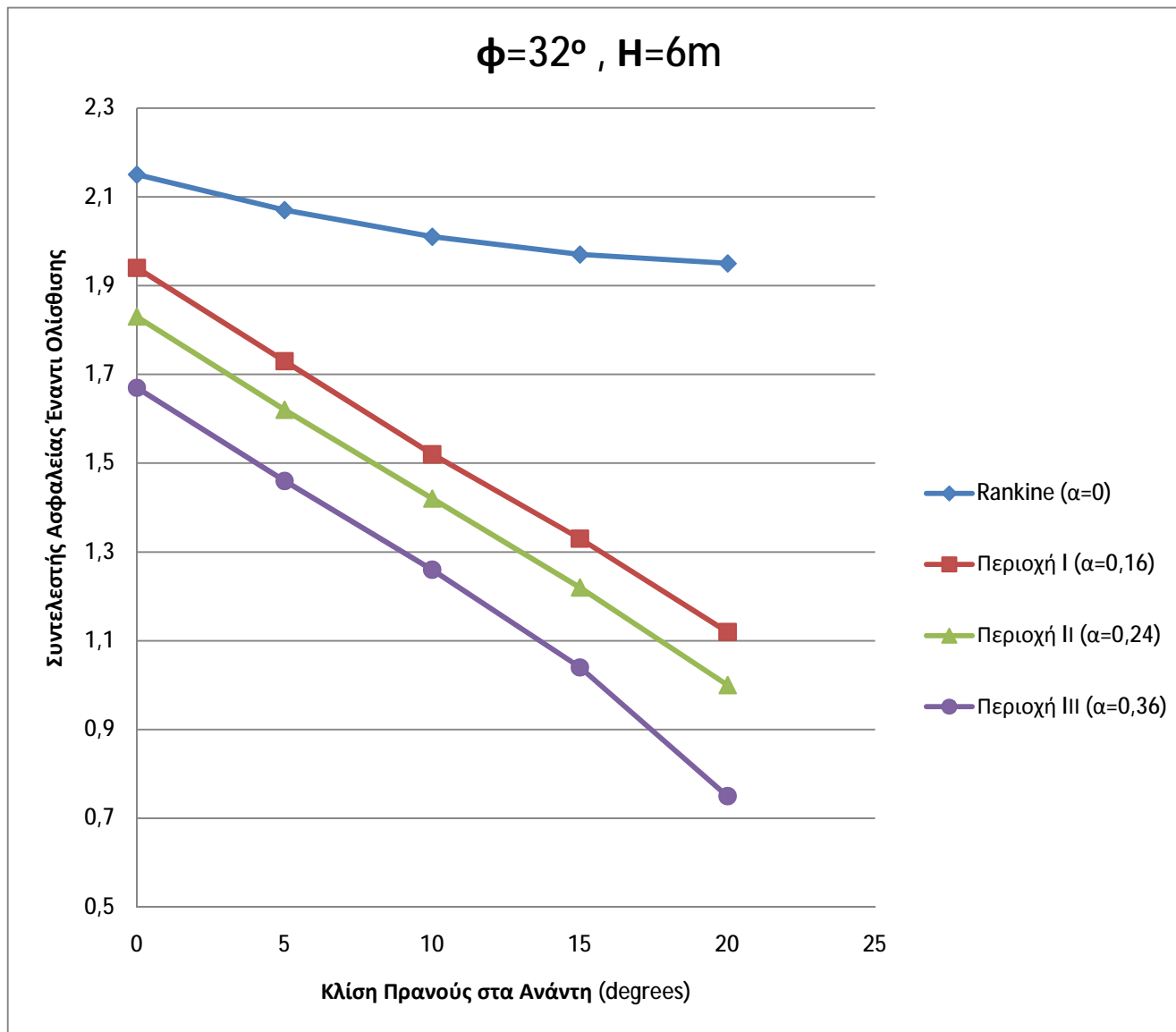


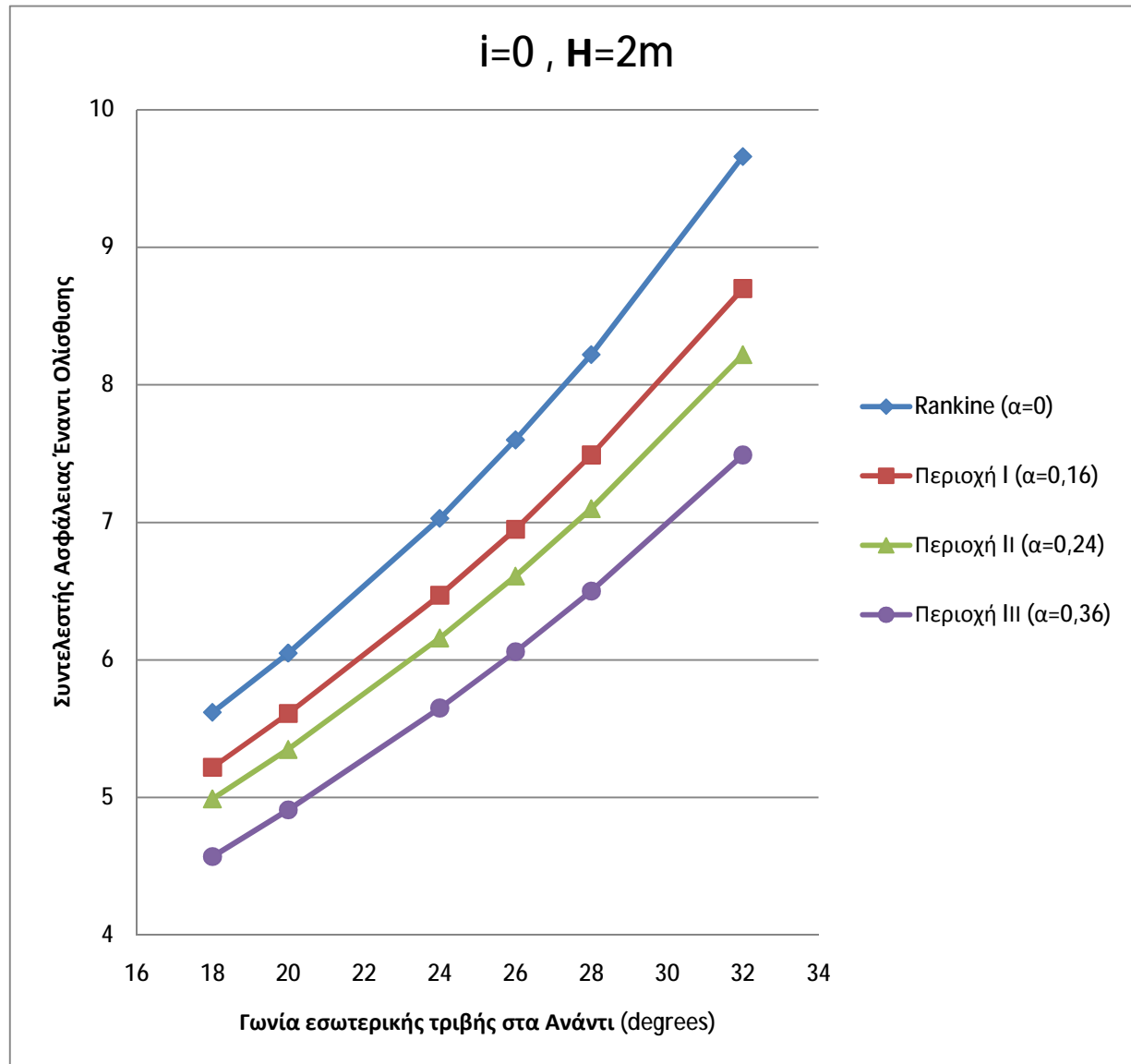


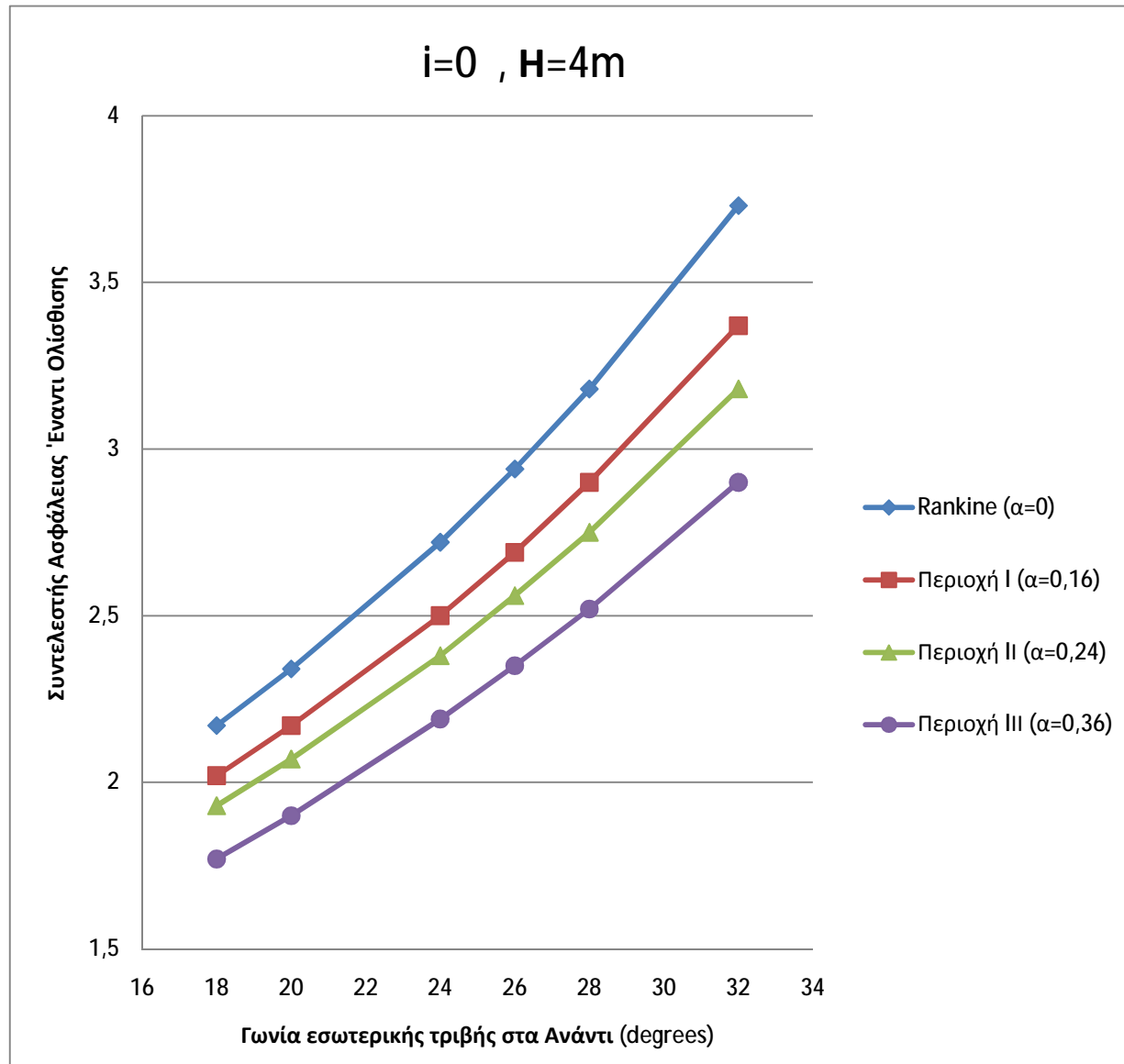


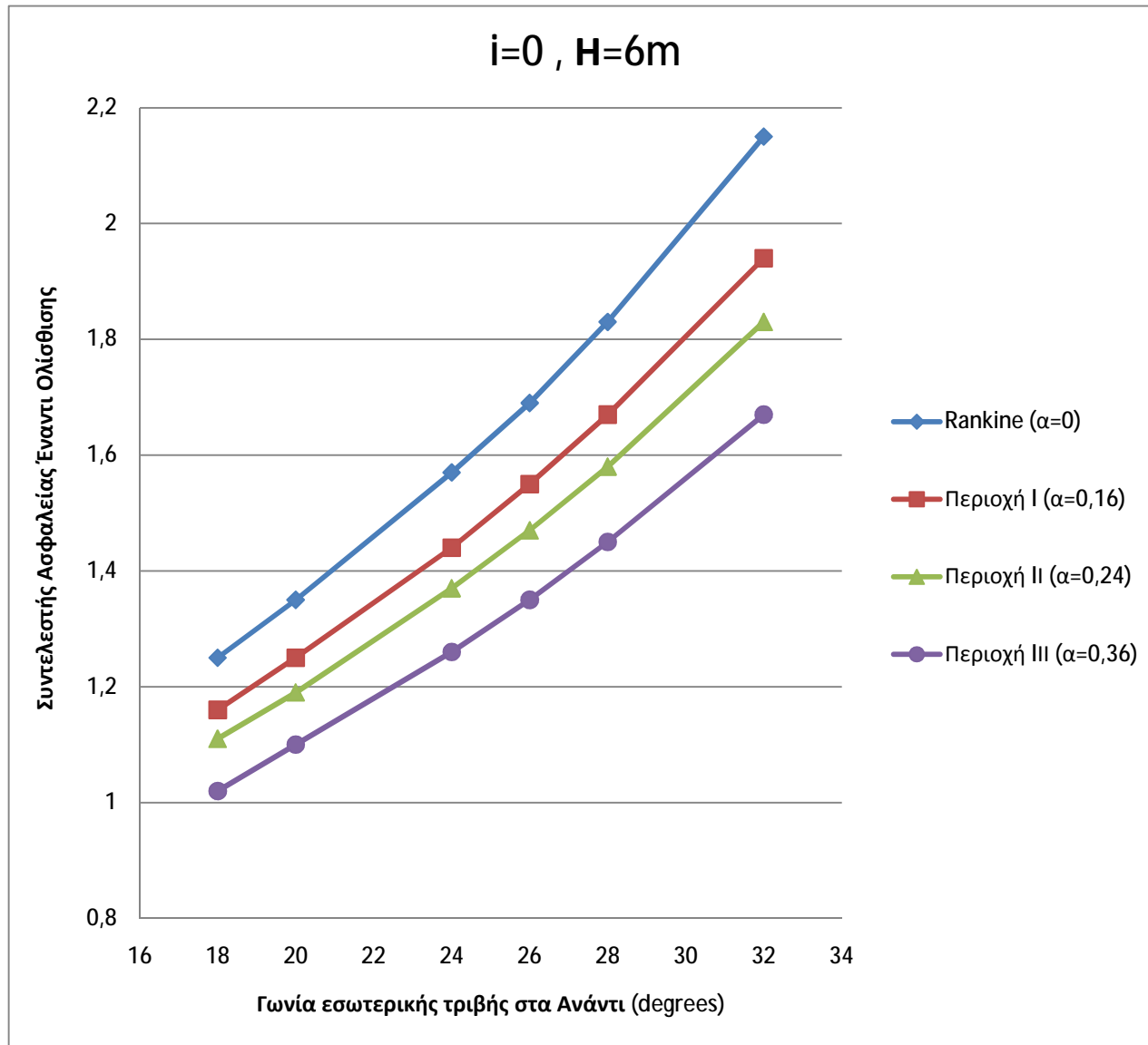


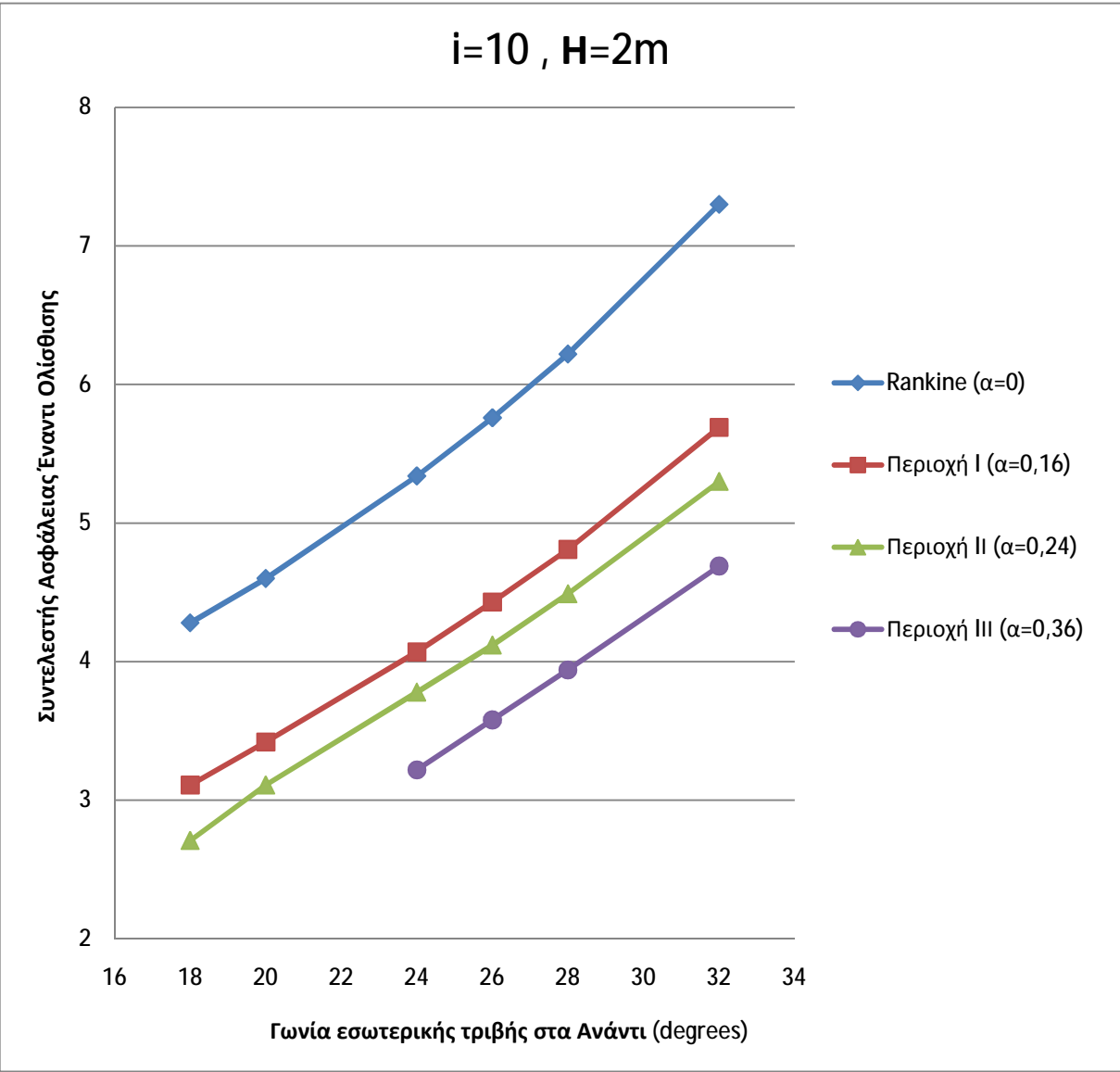


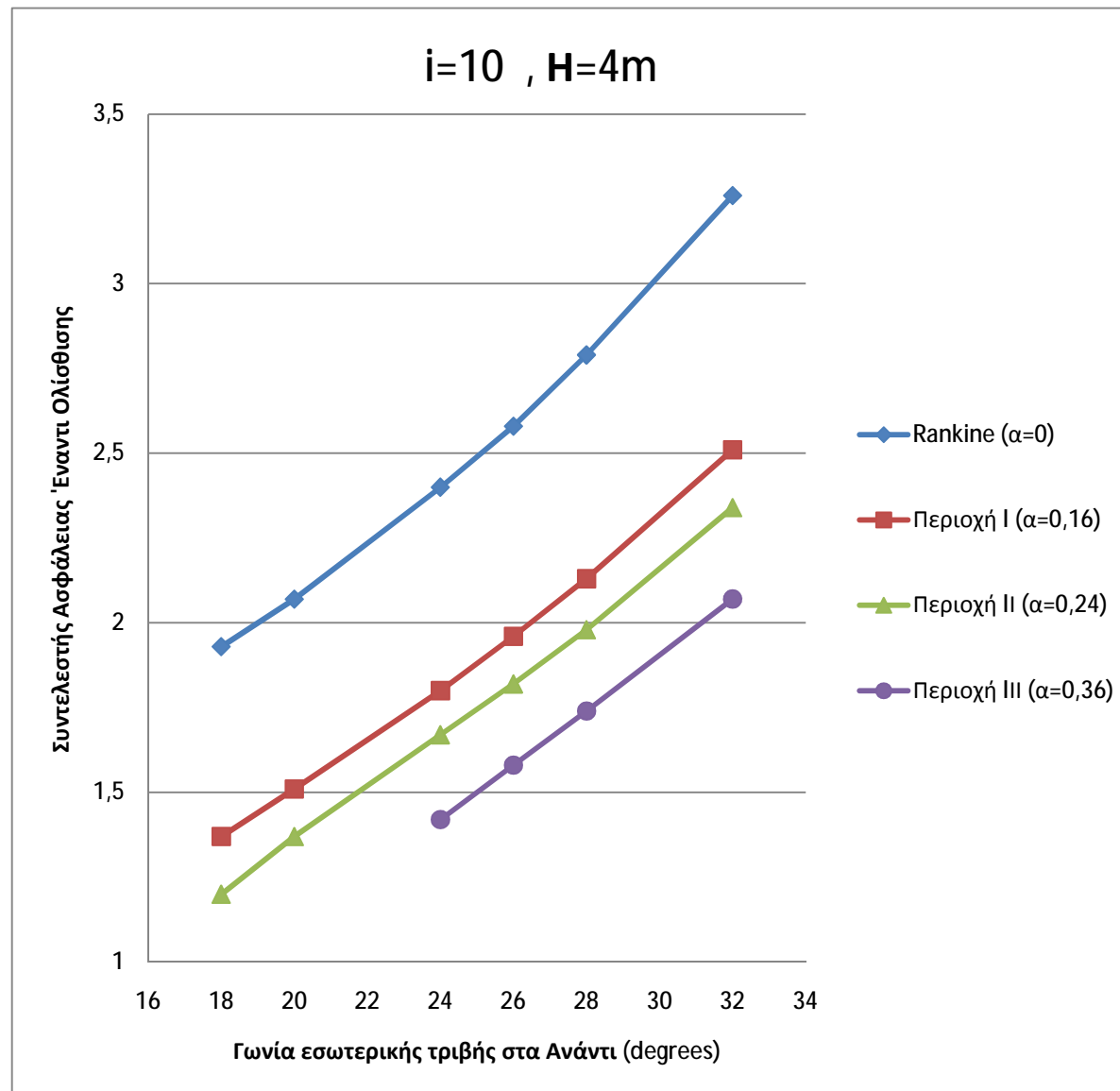


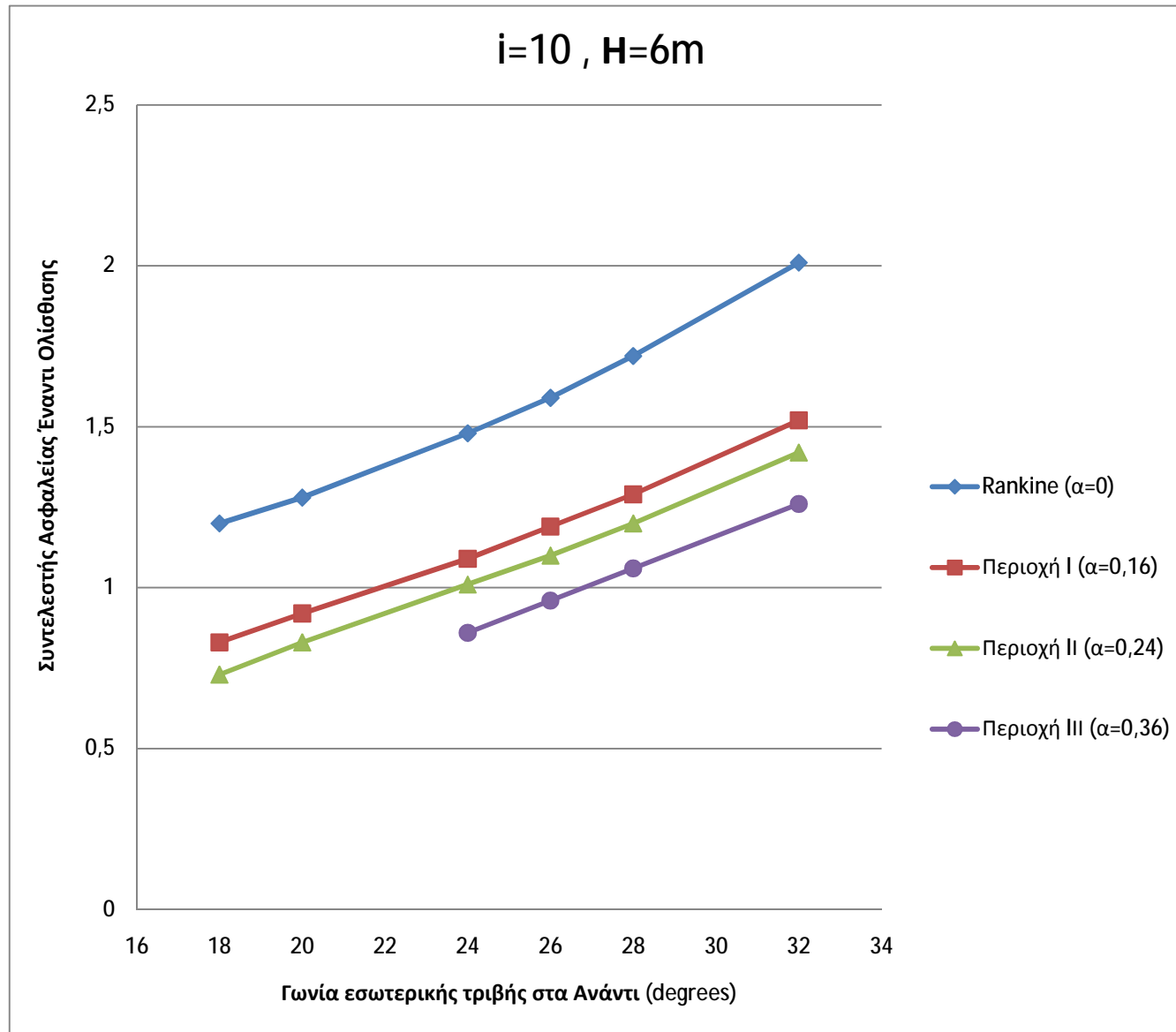


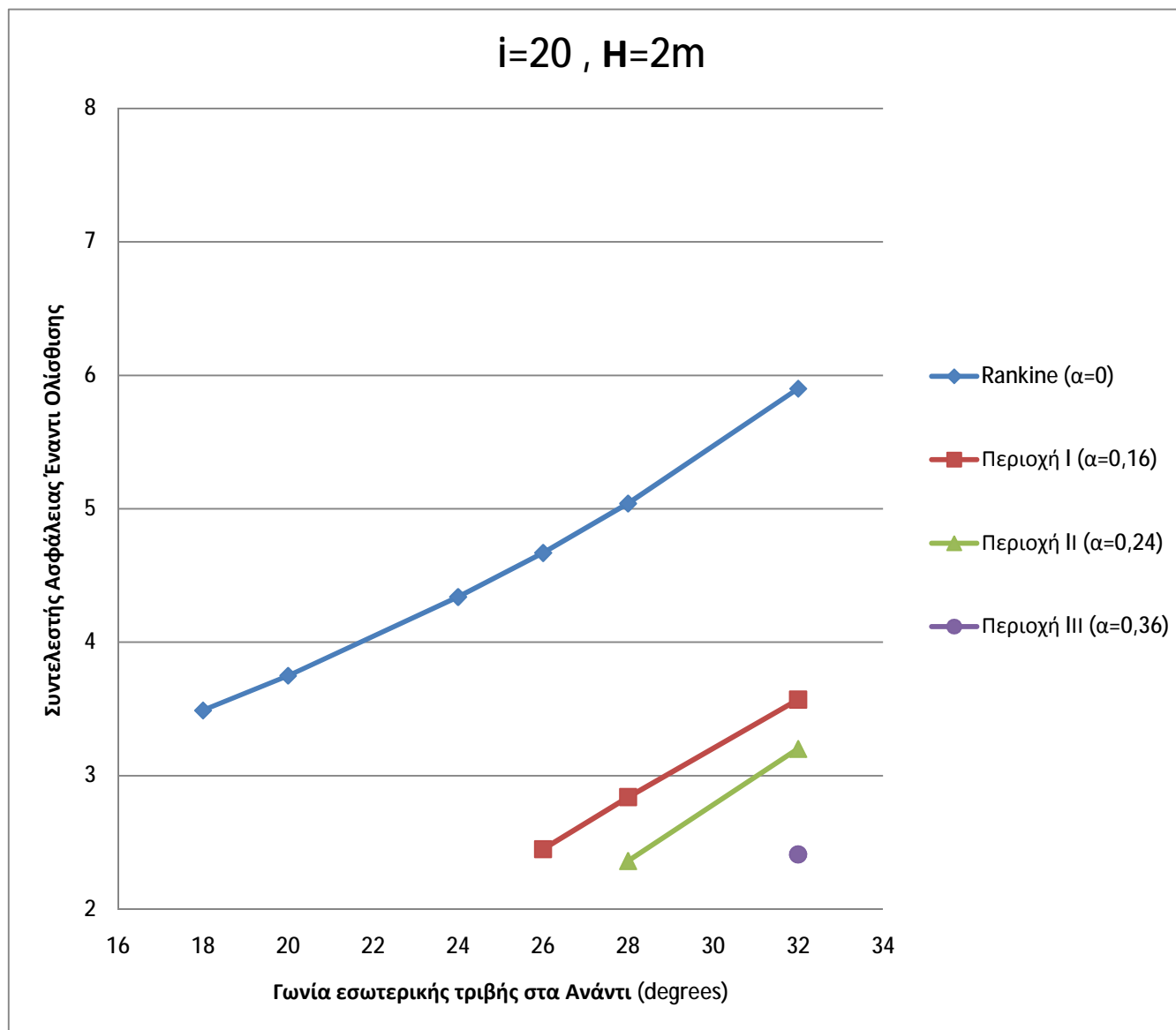


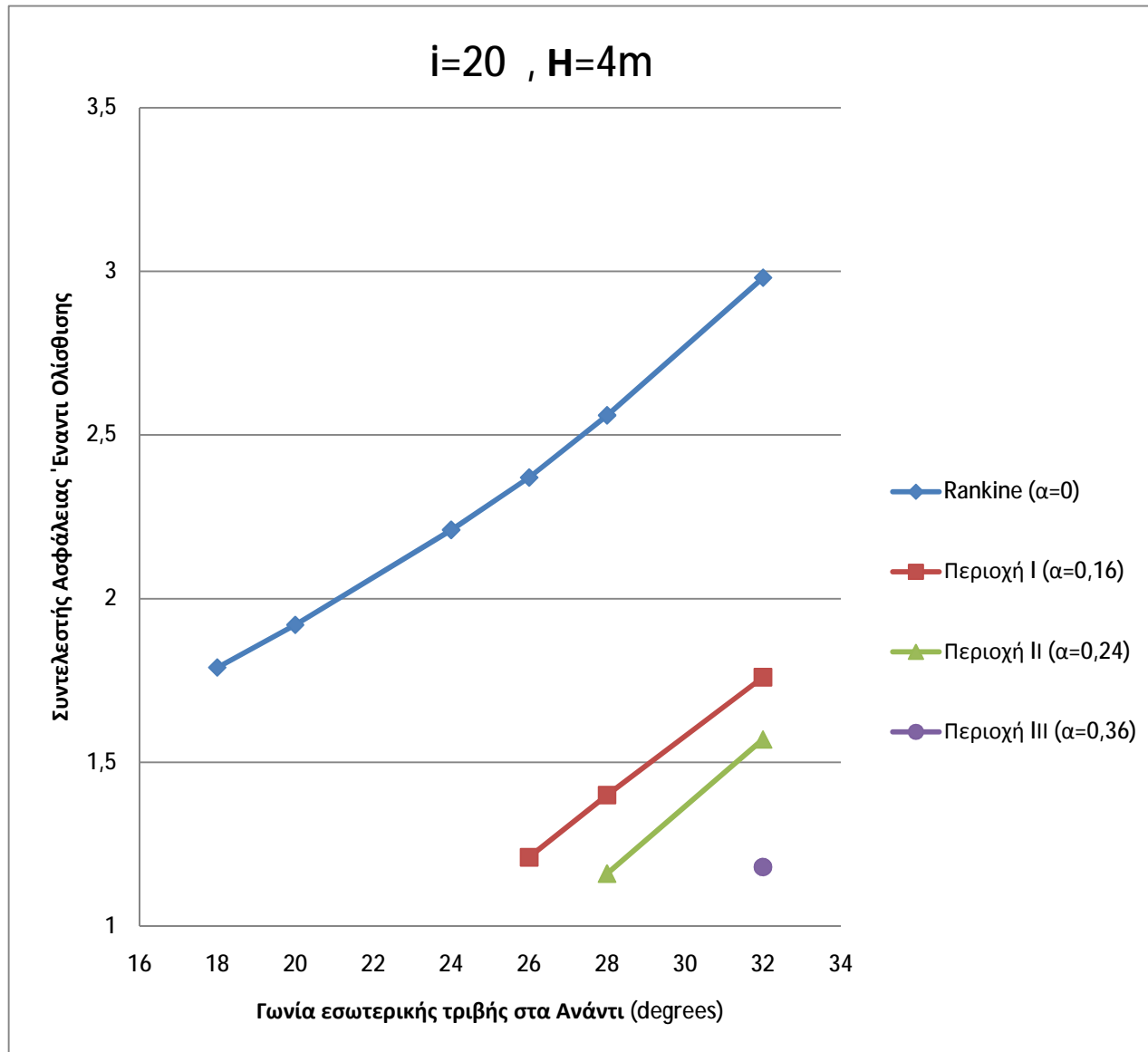


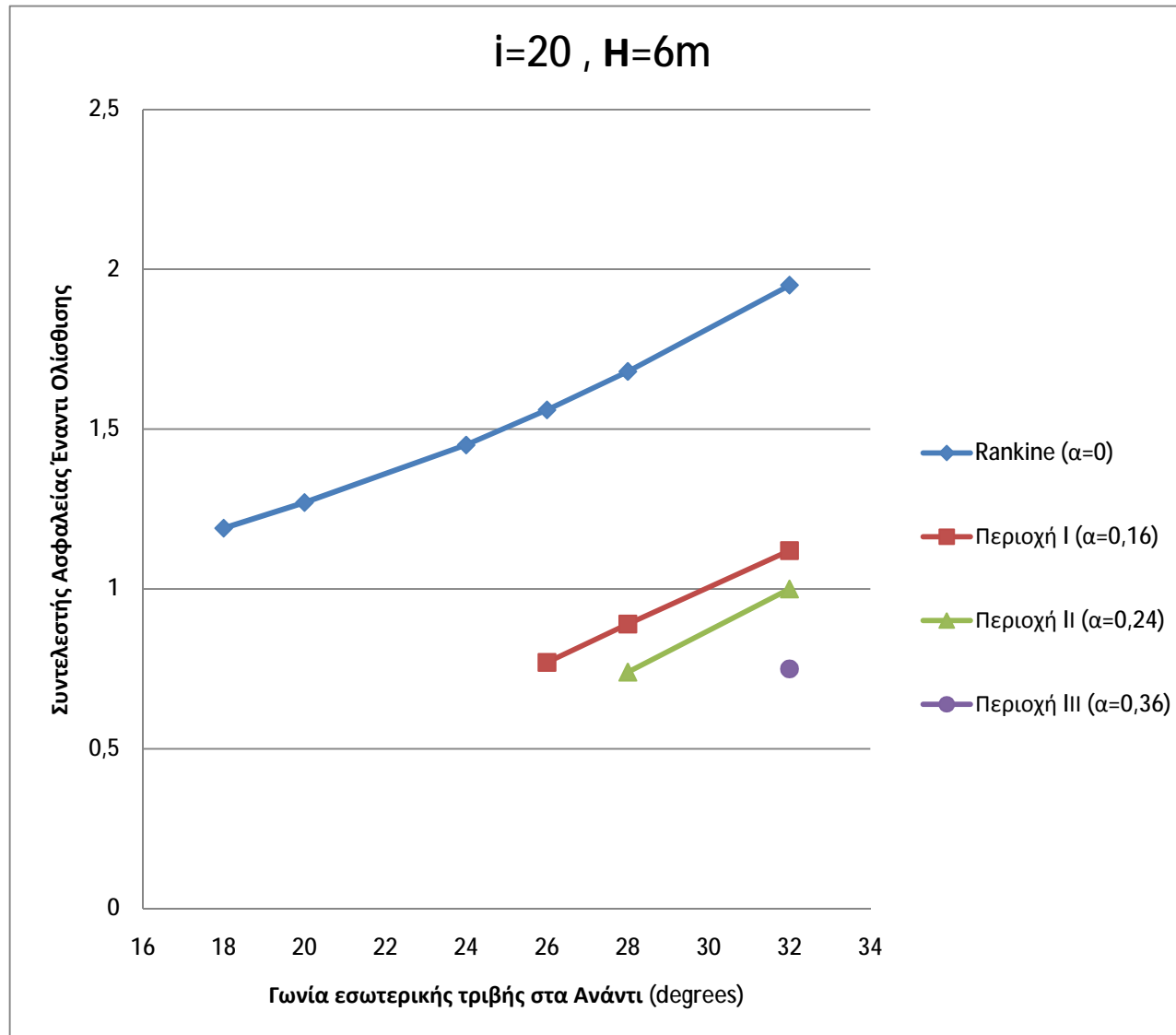












4.3. Συμπεράσματα

Η παραμετρική μελέτη, πραγματοποιήθηκε σε δύο μέρη.

- i) Έγιναν τα διαγράμματα της μεταβολής του **«συντελεστή ασφάλειας έναντι ολίσθησης»** συναρτήσει της **«κλίσης του πρανούς στα ανάντη»** για κάθε τιμή του «α» (ανηγμένη σεισμική επιτάχυνση του εδάφους). Τα διαγράμματα σχεδιάστηκαν για διάφορες τιμές της **«γωνίας εσωτερικής τριβής»** του πρανούς στα ανάντη, καθώς και του **«ύψους του προβόλου του τοίχου αντιστήριξης»**.
- ii) Έγιναν τα διαγράμματα της μεταβολής του **«συντελεστή ασφάλειας έναντι ολίσθησης»** συναρτήσει της **«γωνίας εσωτερικής τριβής του πρανούς στα ανάντη»** για κάθε τιμή του «α» (ανηγμένη σεισμική επιτάχυνση του εδάφους). Τα διαγράμματα σχεδιάστηκαν για διάφορες **«κλίσεις του πρανούς στα ανάντη»**, καθώς και του **«ύψους του προβόλου του τοίχου αντιστήριξης»**.

Αρχικά, μελετώντας τα διαγράμματα παρατηρείται ότι σε ορισμένα διαγράμματα δεν υπάρχουν όλες οι τιμές. Αυτό συμβαίνει γιατί όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, «Όταν $\varphi < \theta + i$, το $\sin(\varphi - \theta - i)$ και το αντίστοιχο υπόρριζο γίνονται αρνητικά, επομένως η σχέση Mononobe-Okabe δεν δίνει πραγματική λύση. Το φυσικό νόημα αυτού του περιορισμού είναι ότι για σεισμό που προκαλεί $\varphi > \theta + i$ δεν είναι δυνατή η ισορροπία του πρανούς με κλίση $i > \varphi - \theta$ ». Δηλαδή, στα παραπάνω διαγράμματα, όπου δεν υπάρχουν τιμές σημαίνει ότι για τις συγκεκριμένες τιμές των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους, το πρανές δεν ευσταθεί.

Για τον λόγο αυτό, δεν είναι πάντα εφικτή η σύγκριση των διαγραμμάτων μεταξύ τους.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα του πρώτου μέρους της παραμετρικής μελέτης εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης είναι αντιστρόφως ανάλογος της κλίσης του πρανούς στα ανάντη. Έτσι, πχ για $\varphi = 28^\circ$ & $H = 4\text{m}$ ο SF για την επίλυση κατά Rankine κυμαίνεται από το 3,18 έως το 2,56. Αυτό συμβαίνει σε όλο το εύρος των τιμών της γωνίας εσωτερικής τριβής. Είναι λογικό επειδή όσο αυξάνεται η κλίση του πρανούς, τότε αυτό γίνεται πιο επικίνδυνο για αστοχία.
- Όσο αυξάνεται ο λόγος του ύψους προς το πλάτος του πεδύλου, για σταθερή γωνία εσωτερικής τριβής, τόσο μειώνεται ο συντελεστής

ασφαλείας. Έτσι, πχ για $\phi=32^\circ$ & $i=10^\circ$ παρατηρούμε ότι για πρόβολο ύψους $H=2\text{m}$ και με πλάτος πεδίου $S=3,70\text{m}$ ο SF κυμαίνεται από το 7,3 για την επίλυση κατά Rankine έως το 4,70 για σεισμικό συντελεστή $\alpha=0,36$. Ενώ για πρόβολο ύψους $H=6\text{m}$ με το ίδιο πλάτος πεδίου ($S=3,70\text{m}$) ο SF κυμαίνεται από το 2,1 για την επίλυση κατά Rankine έως το 1,26 για σεισμικό συντελεστή $\alpha=0,36$. Αυτό είναι λογικό να συμβαίνει, καθώς στα πλαίσια της παραμετρική μελέτης, δεν αλλάζουν όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τοίχου παρά μόνο το ύψος του προβόλου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνονται οι ορθές τάσεις που τείνουν να «ολισθήσουν» τον τοίχο, ενώ οι διαστάσεις της θεμελίωσης (του πεδίου) μένουν σταθερές.

- Όσο αυξάνεται το ύψος του προβόλου και τα συνέπεια ο λόγος του ύψους του προβόλου προς το πλάτος του πεδίου, τόσο αυξάνεται η διαφορά μεταξύ των επιλύσεων. Αυτό συμβαίνει για κάθε τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής του εδάφους. Έτσι, πχ για $\phi=26^\circ$ & $i=10^\circ$ παρατηρείται ότι για πρόβολο ύψους $H=2\text{m}$ η επίλυση κατά Rankine δίνει SF= 5,76 ενώ η επίλυση κατά Mononobe-Okabe για $\alpha=0,16$ δίνει SF= 4,43. Αντίστοιχα, για πρόβολο ύψους $H=4\text{m}$ η επίλυση κατά Rankine δίνει SF= 2,58 ενώ η επίλυση κατά Mononobe-Okabe για $\alpha=0,16$ δίνει SF= 1,96. Έτσι, κατά την πρώτη επίλυση έχουμε διαφορά 23,09% ενώ στην δεύτερη περίπτωση έχουμε διαφορά 24,03%. Τέλος, για πρόβολο ύψους $H=6\text{m}$ η επίλυση κατά Rankine δίνει SF= 1,59 ενώ η επίλυση κατά Mononobe-Okabe για $\alpha=0,16$ δίνει SF= 1,19, μείωση, δηλαδή της τάξεως του 25,16%

- Όσο αυξάνεται η γωνία εσωτερικής τριβής, τόσο αυξάνεται ο συντελεστής ασφαλείας, για το ίδιο ύψος προβόλου. Έτσι, για $H=6\text{m}$ και $i=15^\circ$ ο SF για $\phi=18^\circ$ είναι 1,19 ενώ αυξάνεται και φτάνει το 1,97 για $\phi=32^\circ$. Αυτό είναι αποδεκτό διότι, η γωνία εσωτερικής τριβής εκφράζεται ως τ/σ του εδάφους. Δηλαδή, όσο αυξάνεται η γωνία εσωτερικής τριβής, τόσο μειώνεται η οριζόντια ώθηση, άρα και ο κίνδυνος ολίσθησης του τοίχου.

- Παρατηρείται, ότι, για $\alpha=0$ (επίλυση με την θεωρία Rankine) οι συντελεστές ασφαλείας είναι αρκετά μεγαλύτεροι απ' ότι με τον τύπο του Mononobe-Okabe. Όσο μεγαλώνει ο σεισμικός συντελεστής, τόσο μειώνεται ο συντελεστής ασφάλειας. Δηλαδή, για συγκεκριμένο ϕ , H , i παρατηρούμε ότι έχουμε μεγαλύτερο SF για $\alpha=0$, μικρότερο για $\alpha=0,16$ κ.ό.κ. Αυτό είναι αποδεκτό καθώς σε περιοχές με μικρό σεισμικό συντελεστή « α » επιδρούν μικρότερες σεισμικές ωθήσεις από το έδαφος στον τοίχο.

- Για μικρές γωνίες εσωτερικής τριβής και συνάμα μεγάλο ύψος προβόλου (μεγάλος λόγος ύψους/πλάτους πεδίου), παρατηρείται ότι οι τιμές του SF αποκλίνουν πολύ μεταξύ τους, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει σε τέτοιο

μέγεθος όσο μεγαλώνει η γωνία εσωτερικής τριβής. Για παράδειγμα, για $\varphi=18^\circ$, $H=6\text{m}$, $i=10^\circ$, η διαφορά ανάμεσα στην επίλυση κατά Rankine και σ' αυτή κατά Mononobe-Okabe για σεισμικό συντελεστή $\alpha=0,16$ είναι της τάξης του 30,83% ενώ για $\varphi=26^\circ$ η διαφορά μειώνεται στο 25,16% και τέλος, για $\varphi=32^\circ$ η διαφορά δεν αλλάζει αρκετά (24,38%). Το γεγονός αυτό, μας δείχνει για ακόμη μια φορά τον ρόλο που παίζει η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους στα ανάντη στην ευστάθεια του τοίχου αντιστήριξης.

Στο δεύτερο μέρος της παραμετρικής μελέτης, παρατηρούνται τα παρακάτω συμπληρωματικά συμπεράσματα:

- Η επίλυση κατά Rankine απέχει αρκετά από την επίλυση κατά Mononobe-Okabe ($\alpha=0,16$), ειδικότερα όσο μεγαλώνει η κλίση του πρανούς. Έτσι, παρατηρείται ότι για $i=0^\circ$, $H=2\text{m}$ και $\varphi=26^\circ$, η διαφορά ανάμεσα στις δυο επιλύσεις είναι 8,55% ενώ για $i=10^\circ$, $H=2\text{m}$ και $\varphi=26^\circ$ η διαφορά αυξάνεται στο 23,09% και, τέλος, για $i=20^\circ$, $H=2\text{m}$ και $\varphi=26^\circ$, φτάνει στο 47,53%. Ενισχύεται έτσι το επιχείρημα ότι η επίλυση κατά Rankine δίνει λιγότερο συντηρητικά αποτελέσματα, δεδομένου ότι δεν λαμβάνει υπόψη της τις ωθήσεις από την δράση του σεισμού.
- Όσο αυξάνεται το ύψος του προβόλου, τόσο μειώνεται το εύρος των τιμών του SF. Για παράδειγμα, για $i=10^\circ$, $H=2\text{m}$ και $\alpha=0,24$, το εύρος είναι 2,59, όταν για $i=10^\circ$, $H=4\text{m}$ και $\alpha=0,24$, το εύρος είναι 1,14 και τέλος για $i=10^\circ$, $H=6\text{m}$ και $\alpha=0,24$, το εύρος γίνεται 0,69. Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης, δηλαδή, δεν αλλάζει πολύ για μεγάλα ύψη προβόλου.

Βιβλιογραφία

- [1]: ΕΑΚ 2000, ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ, ΣΙΔΕΝΟΡ, Αθήνα 2006
- [2]: Εδαφοδυναμική και Σεισμική μηχανική, ιστορικά περιστατικά, Γ. Γκαζέτας, Εκδόσεις Συμμεών, 1996
- [3]: Πτυχιακή Εργασία, Έλεγχος του προγράμματος «Τοίχος αντιστήριξης» της LH Λογισμικής και παραμετρική μελέτη βάσει αυτού, Μ. Σταμποπούλου – Π. Λιβιεράτος, Α.Τ.Ε.Ι. Πάτρας, 2009
- [4]: Σημειώσεις Εδαφομηχανικής Ι,ΙΙ, Ε. Βγενοπούλου, Α.Τ.Ε.Ι. Πάτρας
- [5]: Retainig Structures, C.R.I Clayton, Thomas Telford Editions, London 1993
- [6]: Αντισεισμικές κατασκευές Ι, Κ. Αναστασιάδης, Θεσσαλονίκη 1993
- [7]: Εδαφομηχανική, Ασκήσεις και προβλήματα, Εκδοτικός Οίκος Αφών Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη 2002
- [8]: Geotechnical Earthquake Engineering, Steven L. Kramer, Prentice Hall Editions, New York 1996
- [9]: Greek Seismology, Christopher Liner, University of Tulsa, 1997
- [10]: A. Chopra : DYNAMICS OF STRUCTURES, Theory and Application to Earthquake Engineering, Prentice Hall, 1995
- [11]: R. Day : GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING HANDBOOK, McGraw Hill, 2001
- [12]: Τοίχοι αντιστήριξεως, Wilhelm Stigler, Εκδόσεις Γκιούρδας 1975
- [13]: Geotechnical Engineering Handbook, Ulrich Smoltczyk, Ernst & Sohn Editions, Boblingen 2002