



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

***Εξέλιξη Ρευστοποίησης λόγω Σεισμού σε
Αποθέσεις Άμμου με Ένθετη «Ασθενή» Στρώση***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Σ. Σπανέα

Επιβλέπων: **Γεώργιος Δ. Μπουκοβάλας**, Καθηγητής ΕΜΠ

***Evolution of Earthquake-induced Liquefaction on
Sand Deposits with Intermediate “Weak” Layer***

DIPLOMA THESIS

Maria S. Spanea

Supervisor: **George D. Bouckovalas**, Professor NTUA

Αθήνα, Ιούλιος 2019 / Athens, July 2019

Ευχαριστίες

Για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας οφείλω ένα μεγάλο «ευχαριστώ» στους ανθρώπους που συνετέλεσαν σε αυτήν. Οι ευχαριστίες μου εκφράζονται μεν με συντομία αλλά δεν παύουν να είναι ειλικρινείς.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κ. Γιώργο Δ. Μπουκοβάλα, ο οποίος αποτελεί για μένα πρότυπο δασκάλου και ανθρώπου τόσο σε επιστημονικό όσο και σε ηθικό επίπεδο. Η εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί την πρώτη μου ουσιαστική συνεργασία την οποία θα θυμάμαι εκ των υστέρων με τις καλύτερες αναμνήσεις. Ο δάσκαλός μου κ. Γιώργος Δ. Μπουκοβάλας βρισκόταν σε διαρκή επικοινωνία μαζί μου, με κατηύθυνε και με εκπαίδευσε ώστε να μπορέσω να λάβω πρωτοβουλίες σχετικά με τα ερευνητικά ζητήματα που θίγει η παρούσα Διπλωματική.

Ένα εξίσου μεγάλο «ευχαριστώ» οφείλω και στον μεταδιδάκτορα κ. Γιάννη Τσιάπα, ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να βοηθήσει και να με συμβουλευσει με ανιδιοτέλεια για οποιοδήποτε ζήτημα προέκυπτε.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους γονείς μου, οι οποίοι στηρίζουν με εμπιστοσύνη τις επιλογές μου και μου δίδαξαν να αποδίδω στη διαδικασία της μάθησης την ιδιαίτερη βαρύτητα που της αναλογεί.

Σπανέα Μαρία

Περιγραφή του Τεχνικού Προβλήματος

Είναι ευρέως γνωστό ότι εδαφικοί σχηματισμοί αποτελούμενοι από κορεσμένες, μη-συνεκτικές εδαφικές στρώσεις είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι στην ανάπτυξη υδατικών υπερπιέσεων υπό σεισμική διέγερση, η οποία οδηγεί βαθμιαία στην ρευστοποίησή τους με ιδιαίτερα καταστροφικά αποτελέσματα στα έργα Πολιτικού Μηχανικού. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι, υπό κατάλληλες συνθήκες, η ρευστοποίηση ενός εδαφικού στρώματος εμποδίζει τη διάδοση σεισμικών κυμάτων και προκαλεί ραγδαία μείωση των σεισμικών δράσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Οι Bouckonas et al. (2016) απέδειξαν ότι ένα ομοιόμορφο, ρευστοποιήσιμο στρώμα μπορεί πράγματι να λειτουργήσει ως ένα σύστημα «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» για τα υπερκείμενα στρώματα. Η ιδέα της «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» θα μπορούσε να γενικευτεί και για τα ανομοιόμορφα ρευστοποιήσιμα στρώματα, τα οποία περιλαμβάνουν μια «ενδιάμεση ασθενή στρώση», σημαντικά υποβαθμισμένης αντοχής σε ρευστοποίηση. Στην περίπτωση τέτοιων εδαφικών προφίλ, η ενδιάμεση «ασθενής» στρώση θα ρευστοποιηθεί πρώτη και θα επιφέρει μείωση των σεισμικών επιταχύνσεων από την οποία θα επωφεληθεί το υπερκείμενο πιο στιβαρό αμμώδες στρώμα. Έτσι, θα λειτουργήσει ως ένα σύστημα «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης», εμποδίζοντας τη ρευστοποίηση να φτάσει ως την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Με άλλα λόγια, το ρευστοποιήσιμο έδαφος που βρίσκεται πάνω από το «ασθενές» στρώμα δεν θα ρευστοποιηθεί και ενδεχομένως να λειτουργήσει ως υγιής εδαφική κρούστα θεμελίωσης.

Σκοπός και Περιεχόμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας απετέλεσε η διερεύνηση της σεισμική απόκρισης και της ρευστοποίησης ανομοιόμορφων αποθέσεων άμμου, με σκοπό τη

ποιοτική και ποσοτική αποτίμηση του φαινομένου της «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» λόγω ένθετης «ασθενούς» εδαφικής στρώσης.

Στο πλαίσιο αυτό εξετάσθηκε αρχικά η συμπεριφορά των ομοιόμορφων αποθέσεων άμμου ώστε να αποτυπωθεί η σεισμική απόκριση αναφοράς, τα αποτελέσματα της οποίας θα συγκριθούν εκ των υστέρων με εκείνα των αναλύσεων για «ασθενή» εδαφική στρώση (Κεφάλαιο 3). Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 4 έγινε παραμετρική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης των ανομοιόμορφων αποθέσεων άμμου. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 98 αριθμητικές αναλύσεις εδαφικής στήλης στον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC με τις οποίες εξετάσθηκαν οι διαφορετικοί παράγοντες που επιδρούν στην απόκριση ρευστοποιήσιμων εδαφών με ένθετη «ασθενή» στρώση. Τελικώς, στο Κεφάλαιο 5 αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων και αναπτύχθηκαν αναλυτικές σχέσεις για την αποτίμηση της επίδρασης της «ασθενούς» στρώσης στην σεισμική απόκριση της υπερκείμενης στιβαρής στρώσης.

Επιμέρους Ερευνητικά Ερωτήματα

Κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας διευκρινίσθηκαν τα ακόλουθα επιμέρους ερευνητικά ερωτήματα:

- (i) Πώς υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L σε ομοιόμορφα εδαφικά προφίλ μέσω αριθμητικών αναλύσεων; Υπάρχει συμφωνία ανάμεσα στις τιμές του FS_L που υπολογίζονται βάσει των αριθμητικών αναλύσεων με τις αντίστοιχες που προβλέπουν οι γνωστές αναλυτικές μεθοδολογίες;
- (ii) Ισχύει πράγματι η συλλογιστική περί «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» σε ανομοιόμορφα εδαφικά προφίλ με ένθετη «ασθενή» στρώση και αν ισχύει, πόσο ευνοϊκή μπορεί να είναι η επίδρασή της;
- (iii) Ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» σε ανομοιόμορφα εδαφικά προφίλ;
- (iv) Είναι δυνατή η ανάπτυξη μιας αναλυτικής μεθοδολογίας για την ποσοτική πρόβλεψη του φαινομένου;
- (v) Μπορεί να εκτιμηθεί ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης του υπερκείμενου, σεισμικά μονωμένου, αμμώδους στρώματος;

Κύρια Συμπεράσματα

(α) Στα ρευστοποιήσιμα στρώματα περιορισμένου πάχους, τόσο οι τάσεις λόγω σεισμού (λόγος σεισμικών δράσεων CSR) όσο και η αντίσταση σε ρευστοποίηση, παραμένουν πρακτικά σταθερές με το βάθος και η εκδήλωση της ρευστοποίησης συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλο το στρώμα. Σε αυτή την περίπτωση, η εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L από επιτόπου δοκιμές, όπως με τη γνωστή μεθοδολογία των Boulangier & Idriss (2014), είναι ακριβής.

(β) Αντίθετα, στα ομοιόμορφα ρευστοποιήσιμα στρώματα μεγάλου πάχους, ο συντελεστής σεισμικής δράσης CSR μεταβάλλεται αναπόφευκτα με το βάθος και επομένως η ρευστοποίηση των διάφορων εδαφικών στρώσεων δεν συμβαίνει ταυτόχρονα. Για το λόγο αυτό στα ρευστοποιήσιμα στρώματα μεγάλου πάχους, οι εμπειρικές μεθοδολογίες υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας FS_L που βασίζονται σε επιτόπου παρατηρήσεις και μετρήσεις (π.χ. Boulangier & Idriss 2014) ισχύουν με ικανοποιητική ακρίβεια μόνο για τα βάθη στα οποία αντιστοιχεί ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης $FS_{L,min}$.

(γ) Στις ανομοιόμορφες αποθέσεις ρευστοποιήσιμης άμμου, το «ασθενές» στρώμα ρευστοποιείται πολύ νωρίτερα από τα στιβαρότερα στρώματα και λειτουργεί πράγματι ως ένα σύστημα «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» για τα υπερκείμενα στιβαρότερα στρώματα, τα οποία δεν ρευστοποιούνται και διατηρούν χαμηλές τιμές του λόγου υπερπίεσης πόρων της τάξης του $r_u = 0.40-0.70$. Η επίδραση της «ασθενούς» στρώσης στην σεισμική απόκριση του υποκείμενου ρευστοποιήσιμου στρώματος είναι επίσης ευεργετική, αλλά όχι τόσο σημαντική και συστηματική όσο για το υπερκείμενο στρώμα.

(δ) Οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι οι μέσες τιμές του λόγου υπερπίεσης πόρων που αναπτύσσονται στα σημεία του ανώτερου αμμώδους στρώματος ($r_{u,avg}^{cr}$) επηρεάζονται από τους εξής παράγοντες: το πάχος «ασθενούς» στρώσης H_{weak} [η αύξηση του οποίου οδηγεί σε μείωση των τιμών $r_{u,avg}^{cr}$ μέχρι μια ελάχιστη τιμή $0 < \min(r_{u,avg}^{cr}) < 1.0$], την περίοδο διέγερσης T_{exc} [η οποία επηρεάζει μόνο το ρυθμό μείωσης του $r_{u,avg}^{cr}$ με την αύξηση του H_{weak} , χωρίς ωστόσο να επιδρά στην τιμή του $\min(r_{u,avg}^{cr})$] και τέλος τη σχετική πυκνότητα D_{r0} των στιβαρότερων στρωμάτων [η αύξηση της οποίας οδηγεί σε μείωση των τιμών του $\min(r_{u,avg}^{cr})$]. Διευκρινίζεται ότι το βάθος στο οποίο συναντάται η «ασθενής» εδαφική στρώση ($z = H_{crust}$) δεν επιδρά ουσιαστικά στο φαινόμενο.

(ε) Η μέση τιμή του λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,avg}^{cr}$ στην εδαφική κρούστα, για «ασθενή» στρώση με $D_r = 30\%$, μπορεί να υπολογισθεί προσεγγιστικά από την αναλυτική σχέση:

$$r_{u,avg}^{cr} = \min(r_{u,avg}^{cr}) + \frac{\max(r_{u,avg}^{cr}) - \min(r_{u,avg}^{cr})}{1 + 1.30(H_{weak}/H_{L,iso})^2}$$

όπου η μέγιστη τιμή εκτιμάται ίση με $\max(r_{u,avg}^{cr}) \approx 1.00$ και η παράμετρος $H_{L,iso}$ δίνεται από την εξίσωση: $H_{L,iso} = 0.40(V_{s,L} T_{exc})^{1.54} / (H_{crust})^{0.54}$ των Bouckovalas et al. (2016).

(στ) Η ελάχιστη τιμή $\min(r_{u,avg}^{cr})$, που υπεισέρχεται στη ανωτέρω αναλυτική σχέση υπολογισμού του $r_{u,avg}^{cr}$, μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της καμπύλης προσαρμογής στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση $\min(r_{u,avg}^{cr}) = 16 / D_{r0}(\%)^{0.85}$. Εναλλακτικά, η τιμή $\min(r_{u,avg}^{cr})$ μπορεί να υπολογισθεί βάσει των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_L που προκύπτει συμβατικά (π.χ. κατά Boulanger & Idriss, 2014) για την «ασθενή» και για την υπερκείμενη «στιβαρή» στρώση ρευστοποίησης άμμου, σύμφωνα με την γενική μεθοδολογία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5 (Ενότητα 5.5).

(ζ) Σύμφωνα με την συμβατική μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014) το στιβαρό στρώμα άμμου πάνω από την «ασθενή» στρώση ρευστοποιείται με τιμές του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης $(FS_{L,crust})^{B\&I} \approx 0.20 - 0.50$. Όπως προέκυψε όμως από τις αριθμητικές αναλύσεις και τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του $r_{u,avg}^{cr}$, το ανώτερο αμμώδες στρώμα δεν ρευστοποιείται και οι συντελεστές ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης που αντιστοιχούν σε αυτό κυμαίνονται είναι επίπεδα αρκετά υψηλότερα της μονάδας, δηλαδή $(FS_{L,crust})^{NUM} = 1.00 - 3.00$.

(η) Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης της εδαφικής κρούστας πάνω από την «ασθενή» στρώση $FS_{L,crust}$ μπορεί να επανα-υπολογιστεί με ακρίβεια από την ακόλουθη σχέση, χρησιμοποιώντας την αριθμητική μεθοδολογία ή/και τις αναλυτικές μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία για την πρόβλεψη του $r_{u,avg}^{cr}$:

$$FS_{L,crust} = \left[\sin\left(\frac{\pi}{2} r_{u,avg}^{cr}\right) \right]^{-2 \cdot A \cdot \beta}$$

όπου οι τιμές των εκθετών A και β αποτελούν ιδιότητες της άμμου (π.χ. $A = 1.60$ και $\beta = 0.41-0.57$ για Nevada Sand με $D_r = 60\%$).

Extended Abstract

Description of the Technical Problem

It is widely known that soil formations consisting of saturated, cohesionless soil layer are highly susceptible to earthquake induced excess pore pressure accumulation, which leads gradually to liquefaction with significantly devastating results for infrastructures. However, it has been showed that, under certain circumstances, the liquefaction of a soil layer prevents the seismic wave propagation and leads to the drastic attenuation of seismic actions on the ground surface. Bouckovalas et al. (2016) showed that a uniform liquefiable layer can indeed act as a “Natural Seismic Isolation” system for the overlying layers. The concept of “Natural Seismic Isolation” can be generalized for nonuniform liquefiable layers too which include an intermediate “weak” layer, with significantly degraded liquefaction resistance. In these soil profiles, the intermediate “weak” layer will liquefy first and will cause the attenuation of seismic accelerations, an effect which may prove beneficial for the overlying and stiffer sand layer. Hence, it will act as a “Natural Seismic Isolation” system, preventing the onset of liquefaction up to the ground surface. In other words, the liquefiable ground above the “weak layer” will not liquefy and it may act as a foundation bearing soil crust.

Scope and Content of Diploma Thesis

The scope of this Diploma Thesis is to investigate the seismic response and the liquefaction of nonuniform sand deposits, aiming to the qualitative as well as the quantitative evaluation of the “Natural Seismic Isolation” effect due to a “weak” soil layer embedded within the soil profile.

Within this context, the response of uniform sand deposits was initially examined in order to simulate the reference seismic response, the results of which will be compared, in the sequel, with the respective results that include a “weak” sand layer (Chapter 3). In Chapter 4, a parametric investigation was conducted focusing on the seismic response of nonuniform

sand deposits. In total, 98 nonlinear one-dimensional numerical analyses were conducted in the Finite Difference code FLAC in order to examine the effect of various parameters on the seismic response of liquefiable ground with intermediate “weak” layer. Finally, in Chapter 5 the results of the parametric analyses were evaluated and analytical equation were developed for the evaluation of the “weak” layer effect on the seismic response of the overlying “stiff” layer.

Objectives of Diploma Thesis

During the present Diploma Thesis, the following questions of practical interest were examined:

- (i) How the factor of safety against liquefaction FS_L of uniform soil profiles can be estimated based on numerical analysis results? Is there compatibility between the FS_L values estimated based on the numerical analysis results and the respective values estimated by the well-known analytical methodologies?
- (ii) Does the concept of “Natural Seismic Isolation” apply on nonuniform soil profiles with intermediate “weak” layer and if it applies, how beneficial its effect could be?
- (iii) Which are the affecting parameters on the “Natural Seismic Isolation” of nonuniform soil profiles?
- (iv) Is it possible to develop an analytical methodology for the quantitative prediction of this effect?
- (v) Is it possible to estimate the factor of safety against liquefaction of the overlying, seismically isolated, sand layer?

Main Conclusions

(a) In thin liquefiable layers, the earthquake induced shear stresses (cyclic stress ratio CSR) as well as the liquefaction resistance, remain practically constant with depth and the onset of liquefaction occurs at the same time within the entire layer. In that case, the estimation of the factor of safety against liquefaction FS_L from insitu test results, following for example the well-known Boulanger & Idriss (2014) methodology, is accurate.

(b) On the other hand, in thick uniform liquefiable layers, the cyclic stress CSR varies inevitably with depth and thus the onset of liquefaction on the soil layers does not occur at the same time. For this reason, in thick liquefiable layers, the empirical methodologies for the estimation of FS_L based on insitu test results and measurements (e.g. Boulanger & Idriss

2014) can be applied with satisfactory accuracy only for the depths corresponding to the minimum factor of safety against liquefaction $FS_{L,min}$.

(c) In nonuniform liquefiable sand deposits, the “weak” layer liquefies earlier than the stiffer layers and works indeed as a “Natural Seismic Isolation” system for the stiffer overlying layers, which do not liquefy and maintain low excess pore pressure ratio values, in the order of $r_u = 0.40-0.70$. The “weak” layer effect on the seismic response of the underlying liquefiable layer is also beneficial, but not as important and consistent as for the overlying layer.

(d) The conducted parametric study revealed that the average values of the excess pore pressure ratio that develop on the overlying sand layer ($r_{u,avg}^{cr}$) depend on the following parameters: the thickness of the “weak” layer H_{weak} [the increase of which leads to a reduction of $r_{u,avg}^{cr}$ values until a minimum value: $0 < \min(r_{u,avg}^{cr}) < 1.0$], the excitation period T_{exc} [which affects only the reduction rate of $r_{u,avg}^{cr}$ with the increase of H_{weak} , without however affecting the $\min(r_{u,avg}^{cr})$ value] and, finally, the relative density D_{r0} of the stiffer layers [the increase of which leads to a reduction of $\min(r_{u,avg}^{cr})$ values]. It is clarified that the depth of the “weak” layer surface ($z = H_{crust}$) has no substantial effect on the results.

(e) The average value of the excess pore pressure ratio on the soil crust $r_{u,avg}^{cr}$, for “weak” layer with $D_r = 30\%$, can be approximately estimated using the following analytical equation:

$$r_{u,avg}^{cr} = \min(r_{u,avg}^{cr}) + \frac{\max(r_{u,avg}^{cr}) - \min(r_{u,avg}^{cr})}{1 + 1.30(H_{weak}/H_{L,iso})^2}$$

where the maximum value is regarded equal to $\max(r_{u,avg}^{cr}) \approx 1.00$ and the parameter $H_{L,iso}$ can be calculated using the equation: $H_{L,iso} = 0.40(V_{S,L} T_{exc})^{1.54} / (H_{crust})^{0.54}$ of Bouckovalas et al. (2016).

(f) The minimum value $\min(r_{u,avg}^{cr})$, which is an input parameter of the aforementioned analytical equation for the computation of $r_{u,avg}^{cr}$, can be estimated based on the fitting curve of numerical analyses results, described by the equation: $\min(r_{u,avg}^{cr}) = 16 / D_{r0}(\%)^{0.85}$. Alternatively, the $\min(r_{u,avg}^{cr})$ value can be estimated using the FS_L values, as calculated conventionally (e.g. according to Boulanger & Idriss, 2014) for the “weak” and the overlying “stiff” liquefiable soil layers, based on the general methodology described in Chapter 5 (Section 5.5).

(g) Based on the conventional methodology of Boulanger & Idriss (2014), the stiff sand layer over the “weak” layer” would liquefy, as the computed factor of safety against liquefaction is

$(FS_{L,crust})^{B\&I} \approx 0.20 - 0.50$. However, based on the numerical analyses results as well as the analytical equations for the calculation of $r_{u,avg}^{cr}$, the upper sand layer does not liquefy and the factors of safety against liquefaction corresponding to that layer vary in values significant higher than unity, namely: $(FS_{L,crust})^{NUM} = 1.00 - 3.00$.

(h) The factor of safety against liquefaction of the soil crust above the “weak” layer $FS_{L,crust}$ can be re-calculated accurately using the following equation, using the numerical methodology or/and the analytical methodologies which were developed in the present Diploma Thesis for the prediction of $r_{u,avg}^{cr}$:

$$FS_{L,crust} = \left[\sin\left(\frac{\pi}{2} r_{u,avg}^{cr}\right) \right]^{-2 \cdot A \cdot \beta}$$

where the values of exponents A and β are properties of the liquefiable sand (e.g. $A = 1.60$ and $\beta = 0.41-0.57$ for Nevada Sand with $D_r = 60\%$).

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Εκτενής Περίληψη	iii
Extended Abstract.....	vii
1. Εισαγωγή	1
1.1 Περιγραφή Τεχνικού Προβλήματος	1
1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας.....	3
1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας	4
2. Βιβλιογραφική Αναδρομή	5
2.1 Γενικά.....	5
2.2 Steedman & Sharp (2001)	5
2.3 Gonzalez et al. (2002)	10
2.4 Tohumcu Özener et al. (2009).....	12
2.5 Taiebat et al. (2010).....	14
2.6 Συμπεράσματα	20
3. Ρευστοποίηση ομοιόμορφης απόθεσης άμμου.....	23
3.1 Γενικά.....	23
3.2 Έλεγχος κινδύνου ρευστοποίησης	24
3.3 Ρευστοποίηση ομοιόμορφης στρώσης μικρού πάχους.....	33
3.3.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων των δύο αριθμητικών αναλύσεων.....	36
3.3.2 Εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L	53
3.4 Ρευστοποίηση ομοιόμορφης στρώσης μεγάλου πάχους.....	56

3.5	Συμπεράσματα	76
4.	Παραμετρική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης ρευστοποιήσιμης απόθεσης άμμου με ενδιάμεση «ασθενή» στρώση	78
4.1	Γενικά.....	78
4.2	Επίδραση του πάχους H_{weak} της «ασθενούς» στρώσης.....	80
4.2.1	Αποτελέσματα Βασικής Ανάλυσης.....	80
4.2.2	Ορισμός δεικτών συμπεριφοράς r_u^{cf}, r_u^b	87
4.2.3	Επίδραση του πάχους H_{weak} στους δείκτες συμπεριφοράς	87
4.3	Επίδραση του πάχους της εδαφικής κρούστας H_{crust}	92
4.4	Επίδραση της περιόδου διέγερσης T_{exc}	98
4.5	Επίδραση της σχετικής πυκνότητας D_{ro}	102
4.6	Συμπεράσματα	110
5.	Αναλυτική μεθοδολογία εκτίμησης του FS_L στην εδαφική κρούστα	112
5.1	Γενικά.....	112
5.2	Πρόβλεψη του $r_{u^{cf},avg}$ μέσω αριθμητικών αναλύσεων	112
5.3	Αναλυτική σχέση υπολογισμού του $\min(r_{u^{cf},avg})$	118
5.4	Πρόβλεψη του $r_{u^{cf},avg}$ και του FS_L στην εδαφική κρούστα.....	119
5.5	Αναλυτική πρόβλεψη του $\min(r_{u^{cf}})$ βάσει των $FS_{L,weak}$ και $FS_{L,crust}$	124
5.5.1	Πρόβλεψη του $\min(r_{u^{cf}})$ με αναλυτικές σχέσεις.....	124
5.5.2	Σύγκριση της αναλυτικής πρόβλεψης με τις αριθμητικές αναλύσεις	126
5.6	Συμπεράσματα	128
6.	Τελικά Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	132
6.1	Τελικά Συμπεράσματα	132
6.2	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	135
	Βιβλιογραφία	138
A.	Μεθοδολογία Αριθμητικής Προσομοίωσης.....	142
A.1	Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC.....	142
A.2	Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC.....	142
A.3	Καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand.....	144
B.	Αποτελέσματα Παραμετρικών Αναλύσεων	148

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

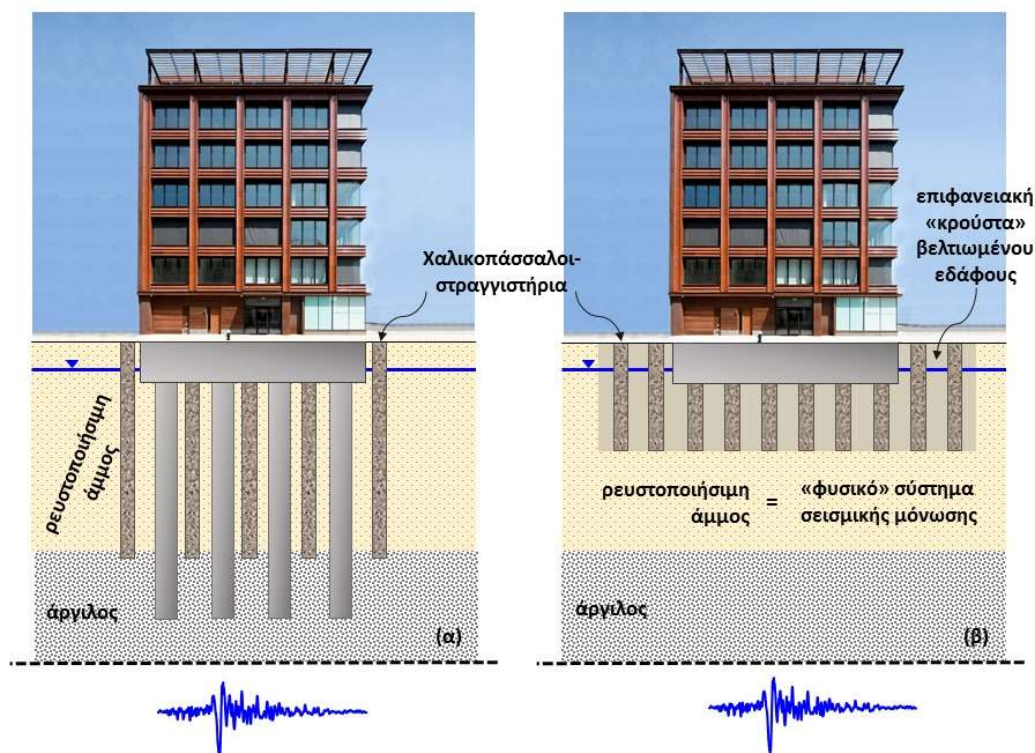
1.1 Περιγραφή Τεχνικού Προβλήματος

Είναι ευρέως γνωστό ότι εδαφικοί σχηματισμοί αποτελούμενοι από κορεσμένες, χαλαρές και μη-συνεκτικές εδαφικές στρώσεις (άμμοι, αμμοχάλικα, ιλυώδεις άμμοι, αμμώδεις ιλύες) είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι στην ανάπτυξη υδατικών υπερπιέσεων υπό σεισμική διέγερση. Η σταδιακή αύξηση των εν λόγω υπερπιέσεων, έως και την εξίσωσή τους τελικά με τις ενεργές κατακόρυφες τάσεις, οδηγεί βαθμιαία σε απώλεια της διατμητικής αντοχής του εδάφους και στην επακόλουθη ρευστοποίησή του (ήτοι, απλοποιητικά τουλάχιστον, την εξομοίωση της συμπεριφοράς του με αυτή των ρευστών).

Τεχνικά έργα εδραζόμενα απευθείας σε εδάφη με υψηλό κίνδυνο εκδήλωσης ρευστοποίησης είναι δυνατό να υποστούν σημαντικές βλάβες. Συγκεκριμένα, η βαθμιαία συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων και στροφών μπορεί να υπερβεί τα επιτρεπόμενα όρια και να προκαλέσει έτσι λειτουργικές και δομικές βλάβες στην ανωδομή. Επιπλέον, εξαιτίας της συσσώρευσης υδατικών υπερπιέσεων και της επακόλουθης απώλειας της διατμητικής αντοχής του εδάφους, η φέρουσα ικανότητα επιφανειακών θεμελιώσεων απομειώνεται σημαντικά, έως και την εκδήλωση πλήρους αστοχίας. Παραδείγματα σχετικών αστοχιών έχουν καταγραφεί σε πρόσφατους αλλά και σε παλαιότερους καταστροφικούς σεισμούς (π.χ. Niigata 1968, Λουτράκι 1981, Kobe 1995, Αίγιο 1995, Kocaeli 1999, Chile 2010, Christchurch 2011, Mexico, 2017).

Ως εκ τούτου, οι σύγχρονοι Κανονισμοί Αντισεισμικού Σχεδιασμού (ΕΑΚ 2003, EC-8, κλπ) χαρακτηρίζουν τα ρευστοποιήσιμα εδάφη ως ειδικές περιοχές, όπου η δόμηση απαγορεύεται εκτός και εάν προηγηθούν ειδικές έρευνες και μελέτες, ενώ η συνήθης φιλοσοφία σχεδιασμού των θεμελιώσεων απαιτεί τη χρήση πασσάλων, προκειμένου να παρακαμφθεί το ρευστοποιήσιμο υλικό και τα φορτία της ανωδομής να μεταφερθούν σε βαθύτερες, μη-ρευστοποιήσιμες εδαφικές στρώσεις. Παράλληλα, για την απομείωση των

επιβαλλόμενων καμπτικών ροπών και τεμνουσών δυνάμεων στους πασσάλους, το περιβάλλον έδαφος συχνά βελτιώνεται έναντι ρευστοποίησης με μία από τις γνωστές μεθόδους (π.χ. βαθιά δονητική συμπύκνωση, χρήση χαλικοπασσάλων/στραγγιστηρίων), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.1α**.



Σχήμα 1.1: (α) Συμβατικός και (β) καινοτόμος σχεδιασμός θεμελίωσης σε ρευστοποιήσιμο έδαφος.

Υπάρχουν όμως αξιόπιστες παρατηρήσεις από πρόσφατους μεγάλους σεισμούς, καθώς και πρόσφατα αποτελέσματα από πειραματικές και θεωρητικές μελέτες (π.χ. Liu & Dobry 1997, Cascone & Bouckovalas 1998, Naesgaard et al. 1998, Acacio et al. 2001, Adalier et al. 2003, Dashti et al. 2010, Sitar & Hausler 2012, Dashti & Bray 2013, Karamitros 2010, Dimitriadi 2014), που δείχνουν ότι η χρήση πασσάλων δεν είναι πάντοτε απαραίτητη, αλλά μπορεί να αντικατασταθεί από ένα σύστημα επιφανειακής θεμελίωσης. Βασική προϋπόθεση γι' αυτό αποτελεί η ύπαρξη μιας μη-ρευστοποιήσιμης στρώσης («κρούστα») ικανών διαστάσεων και αντοχής, η οποία να παρεμβάλλεται μεταξύ της θεμελίωσης και της ρευστοποιήσιμης άμμου. Σε αυτή την περίπτωση, η ύπαρξη της επιφανειακής κρούστας είναι ικανή: (α) να περιορίσει δραστικά τη συσσώρευση σεισμικών καθιζήσεων, σε σχέση με την περίπτωση της απευθείας έδρασης του θεμελίου στο ρευστοποιήσιμο έδαφος και (β) να αποτρέψει τη μετα-σεισμική αστοχία της θεμελίωσης λόγω απώλειας φέρουσας ικανότητας. Επιπλέον, η ρευστοποίηση του εδάφους υπό την επιφανειακή «κρούστα» (γ) θα λειτουργήσει ως «φυσικό» σύστημα σεισμικής μόνωσης και θα επιφέρει δραστική μείωση των αδρανειακών

δυνάμεων που ασκούνται στην ανωδομή (Bouckovalas et al. 2016, Tsiapas 2017). Διευκρινίζεται ότι η εν λόγω επιφανειακή «κρούστα» εδάφους μπορεί να είναι φυσική (π.χ. στρώση αργίλου ή πυκνού αμμοχάλικου, χαμηλός υδροφόρος ορίζοντας) ή τεχνητά κατασκευασμένη με μερική βελτίωση του ρευστοποιήσιμου εδάφους (**Σχήμα 1.1β**).

Μέχρι στιγμής, οι προοπτικές για την ανάπτυξη μιας νέας μεθοδολογίας, η οποία θα αντικαταστήσει τους πασσάλους με επιφανειακές θεμελιώσεις σε μια φυσική ή τεχνητή εδαφική κρούστα, εκμεταλλευόμενη τη ρευστοποίηση του υπεδάφους για τη σεισμική μόνωση της ανωδομής, βρίσκεται ακόμα σε προκαταρκτικό στάδιο, αλλά με ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι από πιλοτική εφαρμογή (Bouckovalas et al. 2017) σε βάθρα τριών τυπικών οδικών γεφυρών, συνολικού ανοίγματος περί τα 84m, με διαφορετικό υλικό κατασκευής και δομικό σύστημα, προέκυψε ότι για ισοστατικούς φορείς οι καμπτικές ροπές και οι τέμνουσες βάσης του πυλώνα μειώθηκαν κατά 9-15% και 27-31% αντίστοιχα, ενώ το συνολικό κόστος της θεμελίωσης μειώθηκε κατά 63-67%. Οι αντίστοιχες μειώσεις για τον υπερστατικό φορέα κυμάνθηκαν στο 9.1% για τις καμπτικές ροπές, 6.5% για τις τέμνουσες βάσης και 43.3% για το κόστος θεμελίωσης.

1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Παρά τα ενθαρρυντικά αυτά ευρήματα, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένα κενά στις τρέχουσες γνώσεις που θα πρέπει να καλυφθούν πριν από την καθιέρωση μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για τον αντισεισμικό Σχεδιασμό Επιτελεστικότητας (Performance Based seismic Design ή PBD) επιφανειακών θεμελιώσεων σε περιοχές ρευστοποίησης. Ένα από αυτά τα κενά, το οποίο αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η σεισμική απόκριση μιας ανομοιόμορφης ρευστοποιήσιμης στρώσης εδάφους, η οποία περιλαμβάνει μια «ενδιάμεση ασθενή στρώση», με σημαντικά υποβαθμισμένη αντοχή σε ρευστοποίηση.

Πιο συγκεκριμένα, όλα τα πειράματα και οι αριθμητικές αναλύσεις αναφέρονται πρακτικά σε ομοιόμορφο με το βάθος (σε όρους σχετικής πυκνότητας), ρευστοποιήσιμο εδαφικό στρώμα. Σε αυτήν την περίπτωση, η ρευστοποίηση «διαδίδεται» γρήγορα από τη βάση προς την επιφάνεια του ρευστοποιήσιμου στρώματος με αποτέλεσμα αυτό να ρευστοποιείται πλήρως. Ο μηχανισμός αυτός ενδέχεται να αλλάζει δραστικά κάτω από πραγματικές συνθήκες πεδίου, όπου το ρευστοποιήσιμο στρώμα δεν είναι ομοιόμορφο με το βάθος, αλλά περιλαμβάνει μια «ασθενή» (δηλαδή χαμηλής σχετικής πυκνότητας) στρώση εγκιβωτισμένη στο εδαφικό προφίλ. Σε αυτήν την περίπτωση, το «ασθενές» στρώμα θα ρευστοποιηθεί πολύ νωρίτερα από τα στιβαρότερα στρώματα που βρίσκονται

πάνω και κάτω από αυτό. Έτσι, θα λειτουργήσει ως ένα σύστημα Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης [Natural Seismic Isolation (NSI)] για τα υπερκείμενα στιβαρότερα στρώματα, εμποδίζοντας τη ρευστοποίηση να φτάσει ως την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Με άλλα λόγια, το ρευστοποιήσιμο έδαφος που βρίσκεται πάνω από το «ασθενές» στρώμα δεν θα ρευστοποιηθεί και ενδεχομένως να λειτουργήσει ως υγιής εδαφική κρούστα θεμελίωσης (περιορίζοντας έτσι την ανάγκη για βελτίωση του εδάφους).

1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Συνοπτικά, τα περιεχόμενα της διπλωματικής εργασίας έχουν ως ακολούθως:

Στο **Κεφάλαιο 2** πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική έρευνα, με σκοπό την εύρεση πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αναλύσεων που σχετίζονται με την επίδραση της «ασθενούς» στρώσης σε ρευστοποιήσιμο έδαφος.

Στο **Κεφάλαιο 3** εξετάσθηκε η σεισμική απόκριση ομοιόμορφων αποθέσεων ρευστοποιήσιμης άμμου. Πραγματοποιήθηκαν δύο ομάδες αριθμητικών αναλύσεων. Στην πρώτη ομάδα αναλύσεων, το ρευστοποιήσιμο στρώμα της άμμου είχε περιορισμένο πάχος και ομοιόμορφη σχετική πυκνότητα, ενώ στη δεύτερη ομάδα αναλύσεων, το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης έγινε πολλαπλάσιο.

Στο **Κεφάλαιο 4** έγινε παραμετρική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης και της ρευστοποίησης ανομοιόμορφων αμμωδών προφίλ, τα οποία περιλαμβάνουν μια ενδιάμεση «ασθενή» στρώση χαμηλής σχετικής πυκνότητας. Αντικείμενο του Κεφαλαίου ήταν η επαλήθευση, η ποσοτική αποτίμηση της ευεργετικής επίδρασης και η διερεύνηση των συνθηκών που επιδρούν στο φαινόμενο της «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» σε ανομοιόμορφα εδαφικά προφίλ.

Στο **Κεφάλαιο 5** αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων και αναπτύχθηκαν αναλυτικές εξισώσεις υπολογισμού τόσο του λόγου υπερπίεσης πόρων όσο και του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης στο ανώτερο αμμώδες στρώμα.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη παρούσα Διπλωματική Εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Αναδρομή

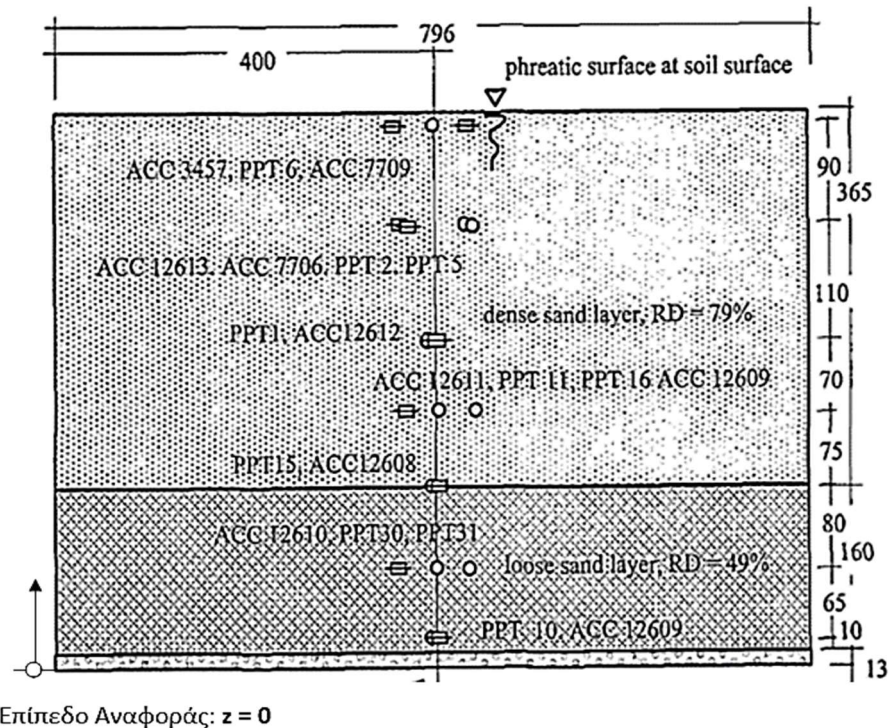
2.1 Γενικά

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική έρευνα, με σκοπό την εύρεση πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών αναλύσεων που σχετίζονται με την επίδραση της «ασθενούς» στρώσης σε ρευστοποιήσιμο έδαφος. Κύριος στόχος ήταν η εύρεση ενδείξεων ότι μια «ασθενής» ρευστοποιήσιμη στρώση, εγκιβωτισμένη στο εδαφικό προφίλ, μπορεί όχι μόνο να απομειώσει τις επιταχύνσεις των υπερκείμενων στρώσεων (Φυσική Σεισμική Μόνωση), αλλά και να αποτρέψει τη ρευστοποίησή τους διατηρώντας το λόγο υπερπίεσης πόρων r_u σε χαμηλά επίπεδα. Μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση διαπιστώθηκε ότι δεν έχει γίνει ολοκληρωμένη και στοχευμένη έρευνα προς αυτήν την κατεύθυνση. Παρόλα αυτά, εντοπίστηκαν και παρουσιάζονται ακολούθως κάποια αποτελέσματα πειραμάτων και αριθμητικών αναλύσεων που αναφέρονται στη ρευστοποίηση ανομοιόμορφων εδαφικών προφίλ και παρέχουν αξιόλογες πληροφορίες για το πρόβλημα που εξετάζεται.

2.2 Steedman & Sharp (2001)

Οι Steedman & Sharp (2001) μελέτησαν τη συμπεριφορά των ρευστοποιήσιμων εδαφών υπό την επίδραση υψηλών κατακόρυφων, ενεργών τάσεων. Στο πλαίσιο της έρευνάς τους πραγματοποίησαν συνολικά 26 πειράματα φυγοκεντριστή στα 50g, εκ των οποίων τα 7 αφορούν ομοιόμορφα εδαφικά προφίλ και τα υπόλοιπα 19 ανομοιόμορφα. Από τα πειράματα αυτά, αναλυτικά αποτελέσματα παρουσιάστηκαν μόνο για ένα ανομοιόμορφο εδαφικό προφίλ (με κωδικό μοντέλου No. 3c), το οποίο φαίνεται στο **Σχήμα 2.1**. Πρόκειται για ρευστοποιήσιμη στρώση άμμου Nevada μέσης σχετικής πυκνότητας $D_r = 49\%$ και πάχους περίπου 8m, η οποία υπόκειται πυκνής, αμμώδους στρώσης Nevada με σχετική πυκνότητα $D_r = 79\%$ και πάχος περίπου 18m. Το εδαφικό προφίλ διαμορφώθηκε

κατάλληλα, ώστε στο μέσο του χαλαρού στρώματος, η κατακόρυφη ενεργός τάση να είναι ίση με 200 kPa.

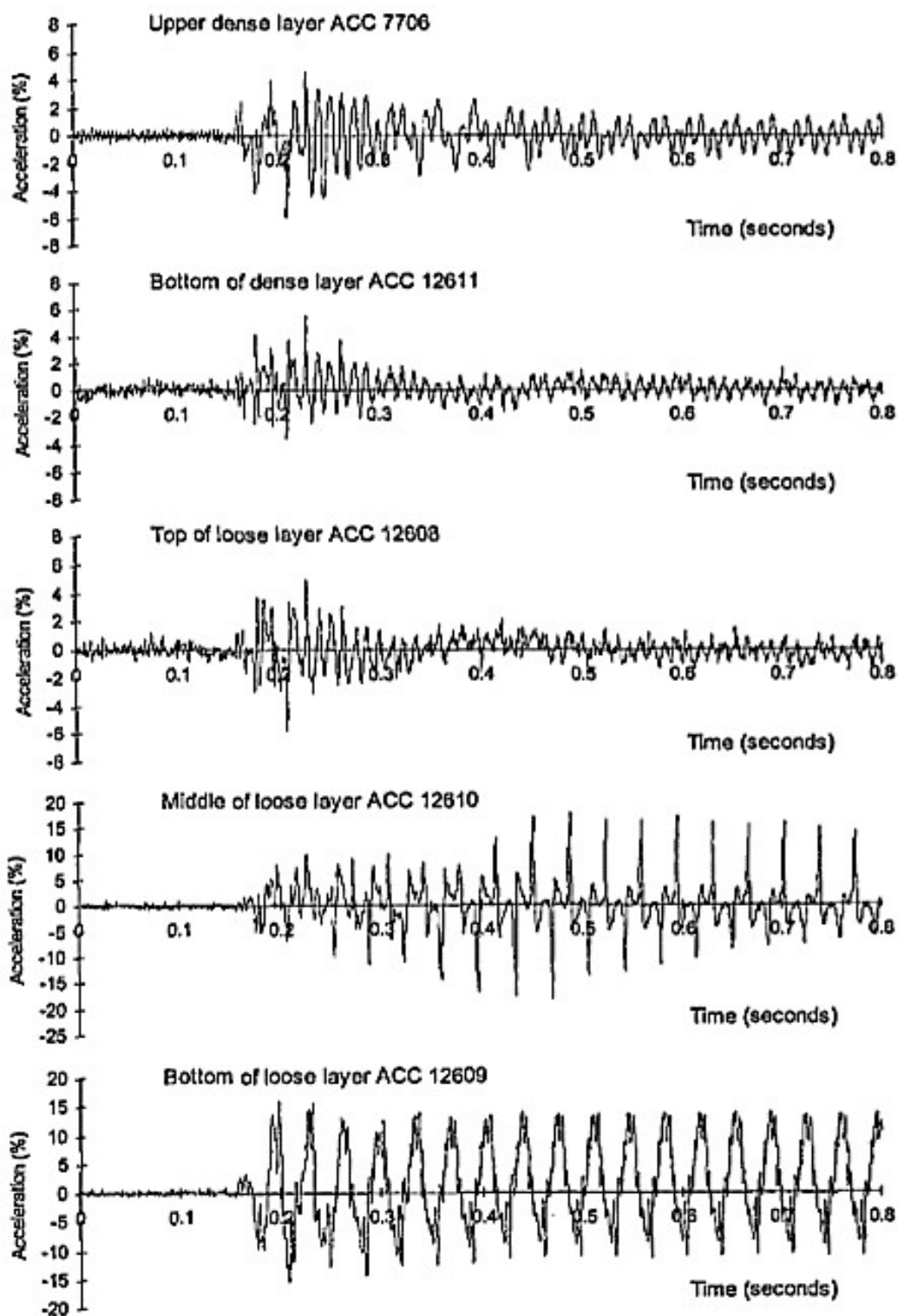


Σχήμα 2.1: Διάταξη του πειράματος φυγοκεντρίστη No. 3c των Steedman & Sharp (2001). Δίδονται οι διαστάσεις του μοντέλου (όχι του πρωτοτύπου) σε mm.

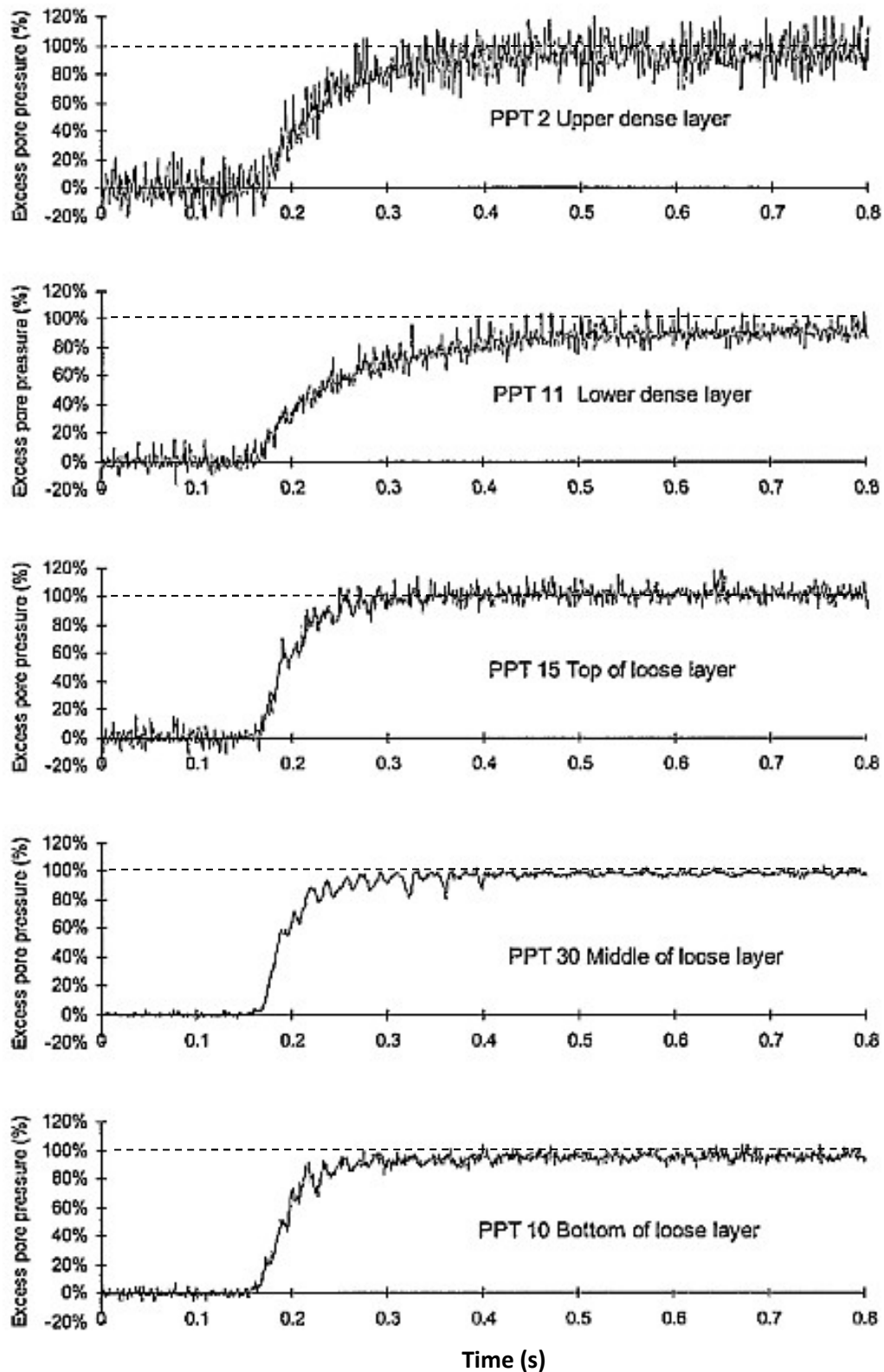
Η δόνηση επιβάλλεται στη βάση της διάταξης και αντιστοιχεί σε 18 κύκλους αρμονικής φόρτισης με μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.15g$ και περίοδο $T_{exc} = 0.04sec$, σύμφωνα με την καταγραφή της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης στη βάση του μοντέλου (**Σχήμα 2.2**), χωρίς ωστόσο να διευκρινίζεται αν η χρονοϊστορία αυτή αναφέρεται στην κλίμακα του μοντέλου ή σε πραγματική κλίμακα πεδίου. Στο **Σχήμα 2.2** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων στη βάση, στο μέσον και στην κορυφή του χαλαρότερου στρώματος, αλλά και στη βάση και στην κορυφή του πυκνού στρώματος. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.2**, η επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους είναι σημαντικά μειωμένη σε σχέση με την επιτάχυνση στη βάση του, και σχεδόν μηδενίζεται μετά από τους πρώτους 4-5 κύκλους. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στη ρευστοποίηση της χαλαρής άμμου, η οποία εμπόδισε τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων και μόνωσε σεισμικά το υπερκείμενο, πυκνό στρώμα.

Στο **Σχήμα 2.3** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των υπερπιέσεων πόρων στη βάση, στο μέσον και στην κορυφή του χαλαρότερου στρώματος, αλλά και στη βάση και στην κορυφή του πυκνού στρώματος. Παρατηρείται ότι στο χαλαρότερο στρώμα αναπτύχθηκαν γρήγορα υψηλές υπερπιέσεις πόρων και είχαμε ρευστοποίηση ($r_u = \Delta u / \sigma'_{vo} > 0.90$) μετά από 1-2 κύκλους φόρτισης, σε αντίθεση με το πιο πυκνό στρώμα στο οποίο η ανάπτυξη υπερπίεσης

πόρων ήταν πιο αργή και η ρευστοποίηση επήλθε μετά από 8 κύκλους στο μέσον του στρώματος και μετά από 4-5 πλησίον της κορυφής.



Σχήμα 2.2: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σε διάφορα βάθη για το πείραμα φυγοκεντρική No.3c των Steedman & Sharp (2001).



Σχήμα 2.3: Χρονοιστορίες υπερπλίσεων πόρων σε διάφορα βάθη για το πείραμα φυγοκεντριστή No. 3c των Steedman & Sharp (2001).

Η πιο αργή ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων στο ανώτερο πυκνό στρώμα της άμμου ήταν αναμενόμενη δεδομένου ότι το στρώμα αυτό έχει μεγαλύτερη πυκνότητα, και επομένως μεγαλύτερη αντίσταση σε ρευστοποίηση, αλλά και λόγω της δραστηκής απομείωσης της σεισμικής επιτάχυνσης που επισημάνθηκε προηγουμένως. Εντύπωση όμως προκαλεί ότι οι υπερπίεσεις πόρων στο στρώμα αυτό δεν σταθεροποιήθηκαν σε τιμές $r_u < 1.0$ μετά την ρευστοποίηση του ασθενούς υποκείμενου στρώματος και την δραστηκή απομείωση της σεισμικής επιτάχυνσης, αλλά συνέχισαν να αυξάνονται έως την ρευστοποίηση και αυτού του στρώματος. Δύο είναι οι πιθανές εξηγήσεις για το φαινόμενο αυτό: (α) το γεγονός ότι οι επιταχύνσεις στο πυκνό στρώμα δεν μηδενίσθηκαν εντελώς και (β) στην ροή νερού από το κατώτερο ρευστοποιημένο στρώμα προς την ελεύθερη επιφάνεια της άμμου, μέσω του υπερκείμενου στρώματος πυκνής άμμου. Το γεγονός μάλιστα ότι η ρευστοποίηση πλησίον της κορυφής του πυκνού στρώματος επήλθε 3-4 κύκλους ταχύτερα από ότι στο μέσον του στρώματος ενισχύει το δεύτερο από τους ανωτέρω μηχανισμούς.

Ο μηχανισμός της προς τα άνω ροής του νερού των πόρων μπορεί να διερευνηθεί περαιτέρω με απλούς υπολογισμούς, σε όρους διαφοράς υδραυλικού ύψους ανάμεσα στα σημεία που βρίσκονται στον μέσον του χαλαρότερου στρώματος και σε αυτά που βρίσκονται στην επιφάνεια του πυκνού στρώματος. Στο μέσον του χαλαρότερου στρώματος, η υπερπίεση πόρων τη στιγμή της ρευστοποίησης ισούται με την αρχική κατακόρυφη ενεργό τάση, δηλαδή $u_{(χαλαρού)} = \sigma'_{vo} = 200 \text{ kPa}$. Θεωρώντας ότι επίπεδο αναφοράς ($z = 0$) βρίσκεται στη βάση του χαλαρότερου στρώματος, το ολικό υδραυλικό ύψος τη στιγμή της ρευστοποίησης στο μέσον του χαλαρότερου στρώματος, είναι ίσο με:

$$h_{(χαλαρού)} = z_{(χαλαρού)} + \frac{u_{o(χαλαρού)} + \Delta u_{(χαλαρού)}}{\gamma_w} = 4 + \frac{185 + 200}{10} = 42.5 \text{ m}$$

ενώ το υδραυλικό ύψος στην επιφάνεια του πυκνού στρώματος παραμένει ίσο με:

$$h_{(πυκνού)} = z_{(πυκνού)} + \frac{u_{o(πυκνού)} + \Delta u_{(πυκνού)}}{\gamma_w} = 22.5 + \frac{0}{10} = 22.5 \text{ m}$$

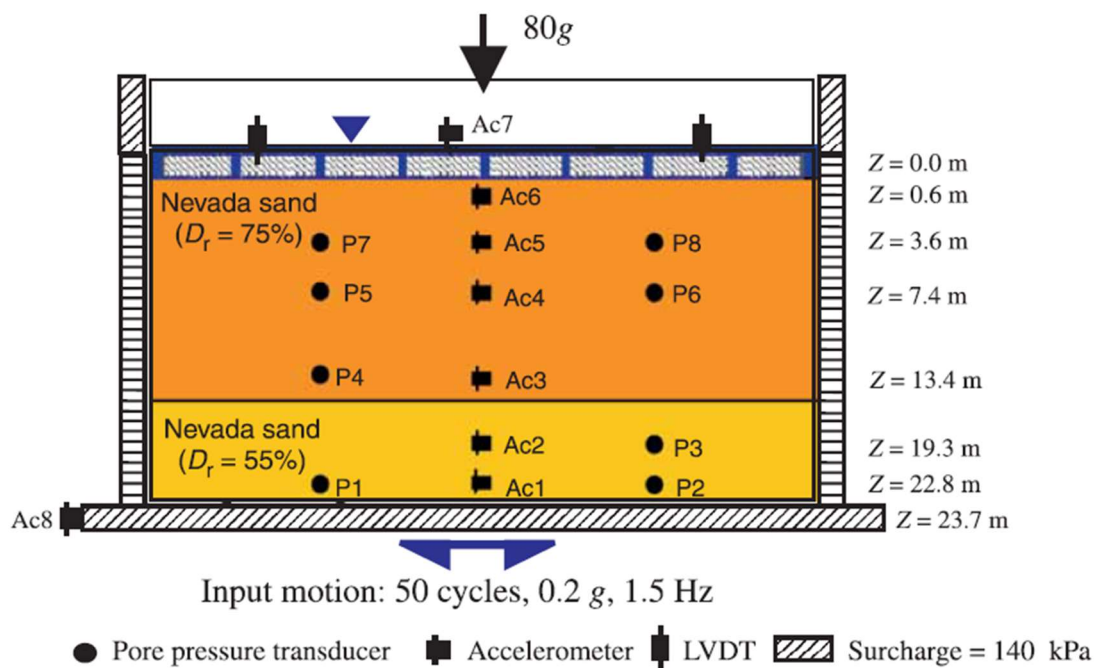
Λόγω αυτής της διαφοράς, δημιουργείται υδραυλική κλίση ίση με:

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{(42.5 - 22.5)}{18.5} = 1.081(!)$$

η οποία δικαιολογεί την ροή νερού προς τα πάνω. Κατά πόσον όμως αναπτύχθηκε πράγματι αυτή η ροή στο σύντομο χρονικό διάστημα που προκύπτει από τις χρονοϊστορίες εξέλιξης των υδατικών υπερπίεσεων στο **Σχήμα 2.3** απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση λαμβάνοντας συστηματικά υπόψη την διαπερατότητα και τα πάχη των στρώσεων της άμμου.

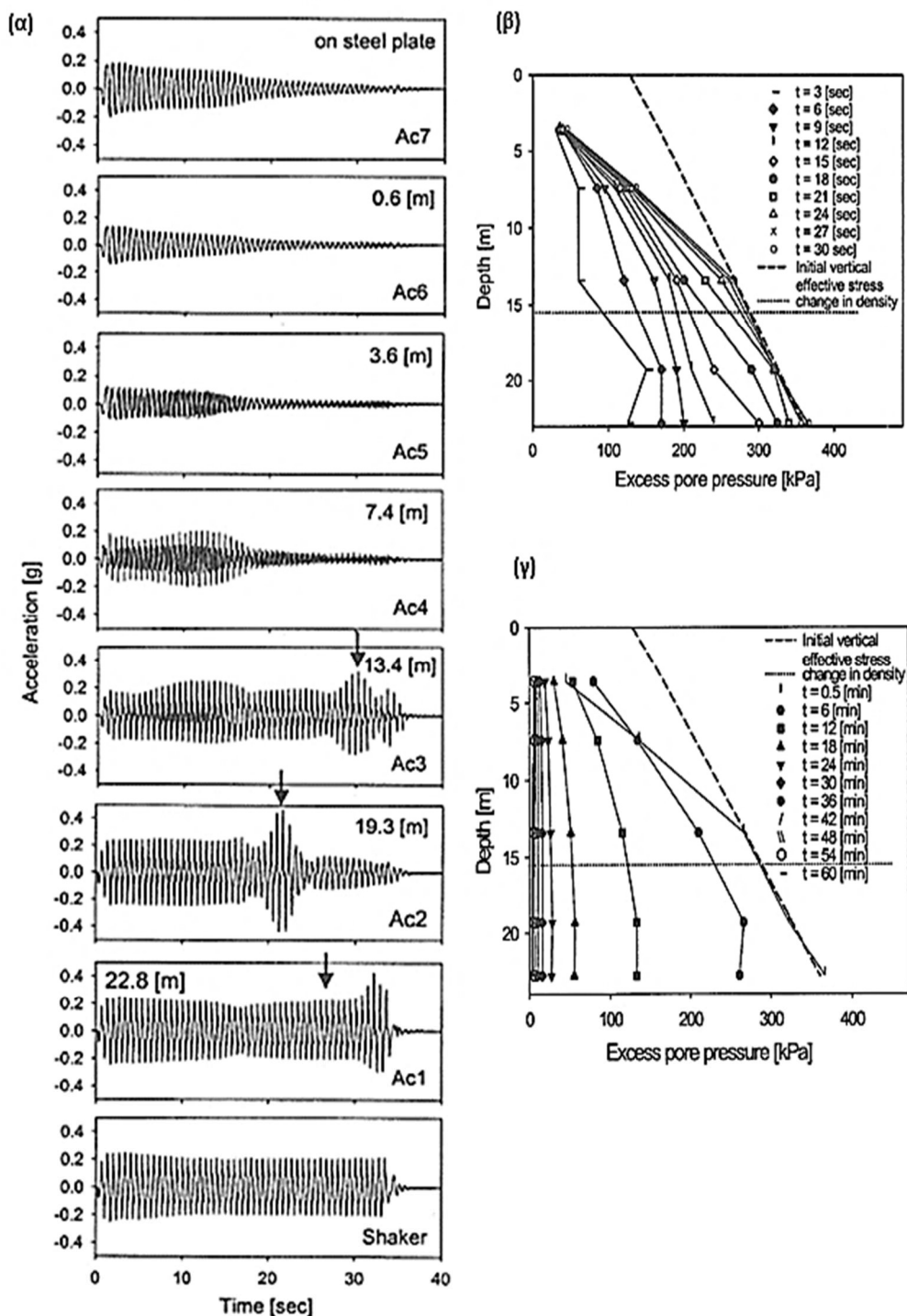
2.3 Gonzalez et al. (2002)

Οι Gonzalez et al. (2002) μελέτησαν την επίδραση των υψηλών κατακόρυφων, ενεργών τάσεων κάνοντας πειράματα φυγοκεντριστή και θεωρώντας τρεις διαφορετικές διατάξεις για τα πειράματά τους. Από αυτές, οι δύο πρώτες αφορούν ομοιόμορφα εδαφικά προφίλ, ενώ η διάταξη No. 3 αφορά ανομοιόμορφο εδαφικό προφίλ. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.4**, η διάταξη No. 3 των πειραμάτων φυγοκεντριστή, προσομοιώνει έδαφος συνολικού πάχους 24 m. Στην επιφάνεια του εδάφους εφαρμόζεται, μέσω μιας διάτρητης μεταλλικής πλάκας, ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο ίσο με 140kPa έτσι ώστε στη βάση του εδαφικού στρώματος η κατακόρυφη ενεργός τάση ισούται με 380kPa. Σε πρωτότυπη κλίμακα, το εν λόγω πείραμα φυγοκεντριστή προσομοιώνει 16m πυκνής άμμου Nevada σχετικής πυκνότητας $D_r = 75\%$, η οποία βρίσκεται πάνω από 8 m πιο χαλαρής άμμου Nevada με σχετική πυκνότητα $D_r = 55\%$.



Σχήμα 2.4: Διάταξη του πειράματος φυγοκεντριστή No. 3 των Gonzalez et al. (2002).

Η διέγερση εφαρμόστηκε στη βάση της διάταξης και αντιστοιχεί σε πενήντα κύκλους αρμονικής φόρτισης ($N_s = 50$) με περίοδο διέγερσης $T_{exc} = 0.67\text{sec}$ και μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.2g$. Στο **Σχήμα 2.5α** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης σε διάφορα βάθη για το πείραμα φυγοκεντριστή No.3, ενώ στο **Σχήμα 2.5β** παρουσιάζεται η κατανομή των υπερπίεσεων πόρων με το βάθος σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της δόνησης. Τέλος, το **Σχήμα 2.5γ** αναπαριστά την κατανομή των υπερπίεσεων πόρων με το βάθος μετά το τέλος της δόνησης και δείχνει ουσιαστικά την εξέλιξη της αποτόνωσής τους.



Σχήμα 2.5: Αποτελέσματα πειράματος φυγοκεντρίστη No. 3 των Gonzalez et al. (2002): χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σε διάφορα βάθη (α) κατανομή υπερπίεσεων πόρων με το βάθος κατά τη διάρκεια της δόνησης (β) και μετά το τέλος της δόνησης (γ).

Από τα **Σχήματα 2.5α** και **2.5β** παρατηρείται ότι, και σε αυτή την περίπτωση, το στρώμα της χαλαρής άμμου ρευστοποιήθηκε και παρεμπόδισε τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων, εξασφαλίζοντας έτσι σεισμική μόνωση στο υπερκείμενο πυκνό στρώμα. Είναι αξιοσημείωτο ότι η δραστική απομείωση της σεισμικής δράσης στο μέσον του πυκνότερου στρώματος

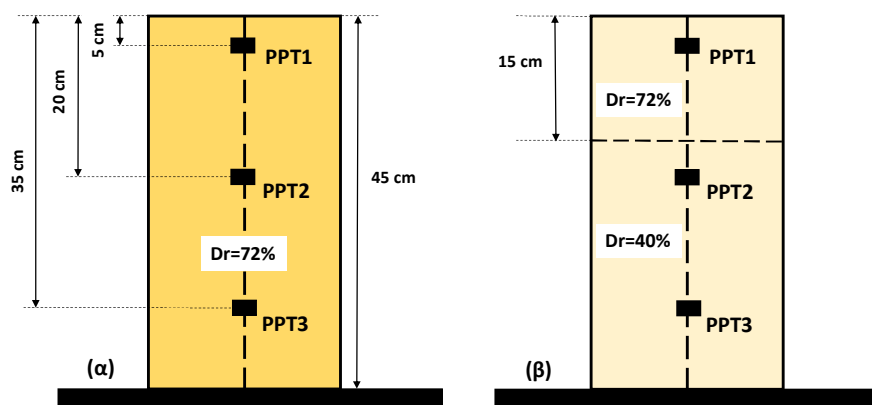
εκδηλώνεται 7sec (10-11 κύκλοι) περίπου νωρίτερα από την δραστική απομείωση των επιταχύνσεων στην μέση του χαλαρού στρώματος ($z = 19.3\text{m}$), όταν η αντίστοιχη τιμή του λόγω υπερπίεσης των πόρων είναι ακόμη $r_u = 0.83$.

Επιπλέον, από το **Σχήμα 2.5β** παρατηρείται ότι οι υπερπίεσεις πόρων στο χαλαρότερο στρώμα (βάθος από 16-24m) αυξάνονται κατά τη διάρκεια της δόνησης μέχρι τη χρονική στιγμή $t = 24\text{sec}$, στην οποία το στρώμα αυτό ρευστοποιείται και η υπερπίεση πόρων εξισώνεται με την αρχική ενεργό, κατακόρυφη τάση σ'_{vo} ($r_u = 1.0$). Αντίθετα, στο πυκνό στρώμα άμμου (βάθος από 0-16m) οι υπερπίεσεις πόρων σταθεροποιήθηκαν μετά την πλήρη ρευστοποίηση του χαλαρού στρώματος, περί το 24^ο δευτερόλεπτο της δόνησης, και ο λόγος υπερπίεσης πόρων στο μέσον του παρέμεινε σταθερά ίσος με $r_u=0.62$ σε όλη την υπόλοιπη διάρκεια της δόνησης. Δηλαδή τελικά, το πυκνό στρώμα δεν ρευστοποιήθηκε, όπως άλλωστε προβλεπόταν από τους συγγραφείς.

Η καθυστέρηση στην ανάπτυξη υδατικών υπερπίεσεων στην υπερκείμενη πυκνή στρώση άμμου δικαιολογείται από την μεγαλύτερη αντίσταση σε ρευστοποίηση αυτού του στρώματος έναντι του υποκείμενου χαλαρού. Η σταθεροποίηση όμως της τιμής του r_u στο στρώμα αυτό, πριν από το τέλος της δόνησης, θα πρέπει να αποδοθεί αποκλειστικά στην ευεργετική επίδραση του υποκείμενου χαλαρού στρώματος και στην δραστική απομείωση των αντίστοιχων σεισμικών επιταχύνσεων που σχολιάσθηκε προηγουμένως.

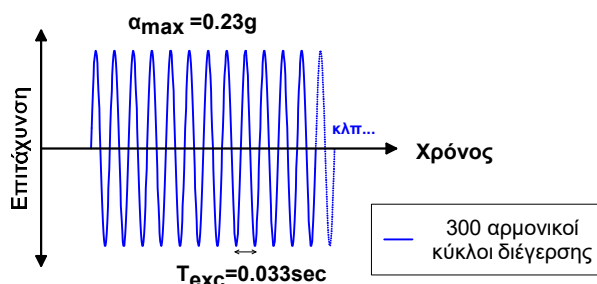
2.4 Tohumcu Özener et al. (2009)

Οι Tohumcu Özener et al. (2009) πραγματοποίησαν συνολικά 48 πειράματα σεισμικής τράπεζας θεωρώντας τόσο ομοιόμορφο, σε όρους σχετικής πυκνότητας, όσο και ανομοιόμορφο εδαφικό προφίλ. Η παρούσα βιβλιογραφική έρευνα εστίασε στα πειράματα που αφορούν ομοιόμορφο, πυκνό, ρευστοποιήσιμο έδαφος με σχετική πυκνότητα $D_r=60\%$ και 72% αλλά και σε αυτά που αφορούν δίστρωτο έδαφος με πυκνή ρευστοποιήσιμη άμμο σχετικής πυκνότητας $D_r=60\%$ και 72% στην επιφάνεια έναντι χαλαρής ρευστοποιήσιμης άμμου στη βάση με σχετική πυκνότητα $D_r=40\%$. Στο **Σχήμα 2.6** παρουσιάζονται οι διατάξεις των πειραμάτων σεισμικής τράπεζας για την περίπτωση **(α)** του ομοιόμορφου και **(β)** του ανομοιόμορφου εδαφικού προφίλ, με κωδικούς πειραμάτων U1 και L1 αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.6**, καθ' ύψος των διατάξεων είναι τοποθετημένοι μετρητές πίεσης πόρων (PPT), οι οποίοι καταγράφουν την εξέλιξη της πίεσης πόρων με το χρόνο.



Σχήμα 2.6: Διάταξη πειραμάτων σεισμικής τράπεζας για (α) ομοιόμορφο έδαφος και (β) ανομοιόμορφο έδαφος των Tohumcu Özener (et al. 2009).

Οι τρεις διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις που εφαρμόζονται στη βάση των διατάξεων αποτελούνται από 300 κύκλους αρμονικής φόρτισης με συχνότητες 20, 25 και 30 Hz, οι οποίες αναφέρονται σε μέγιστες επιταχύνσεις $a_{max} = 0.23, 0.3$ και $0.4g$ αντίστοιχα. Στο **Σχήμα 2.7** παρουσιάζεται γραφικά η διεύγερση με συχνότητα 30 Hz (περίοδο 0.033sec) και μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.23g$.



Σχήμα 2.7: Διεύγερση στη βάση της διάταξης με συχνότητα 30 Hz και μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.23g$ για τα πειράματα σεισμικής τράπεζας των Tohumcu Özener et al. (2009).

Κατά τη διάρκεια της δόνησης καταγράφηκε η εξέλιξη της υπερπίεσης των πόρων σε τρία διαφορετικά βάθη: PP1 πάνω και PP2 & PP3 κάτω από την (ιδεατή ή πραγματική) στάθμη διαχωρισμού της πυκνής από την χαλαρή στρώση. Στον **Πίνακα 2.1** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μέγιστες τιμές του λόγου υπερπίεσης πόρων $(r_u)_{max}$, για όλα τα εξεταζόμενα πειράματα. Όσον αφορά τα ομοιόμορφα εδαφικά προφίλ με σχετικές πυκνότητες $D_r = 60\%$ και 72% , παρατηρείται ότι ρευστοποίηση συνέβη μόνο για τις περιπτώσεις δόνησης με μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.30g$ και $0.40g$ και όχι για τη δόνηση με μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.23g$. Όσον αφορά τα ανομοιόμορφα εδαφικά προφίλ, ήταν αναμενόμενο η ύπαρξη της χαλαρής άμμου στη βάση να αναστείλει τη ρευστοποίηση του πυκνού στρώματος για τις περιπτώσεις δόνησης με μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.30g$ και $0.40g$. Ωστόσο, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 2.1**, αυτό δεν συνέβη και επιπλέον σε όλα

πρακτικά τα βάθη, πάνω και κάτω από την δι-επιφάνεια μεταξύ πυκνής και χαλαρής άμμου, είχαμε αύξηση του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων $(r_u)_{max}$.

Πίνακας 2.1: Μέγιστοι λόγοι υπερπίεσης πόρων για τα πειράματα των Tohumcu Özener et al. (2009).

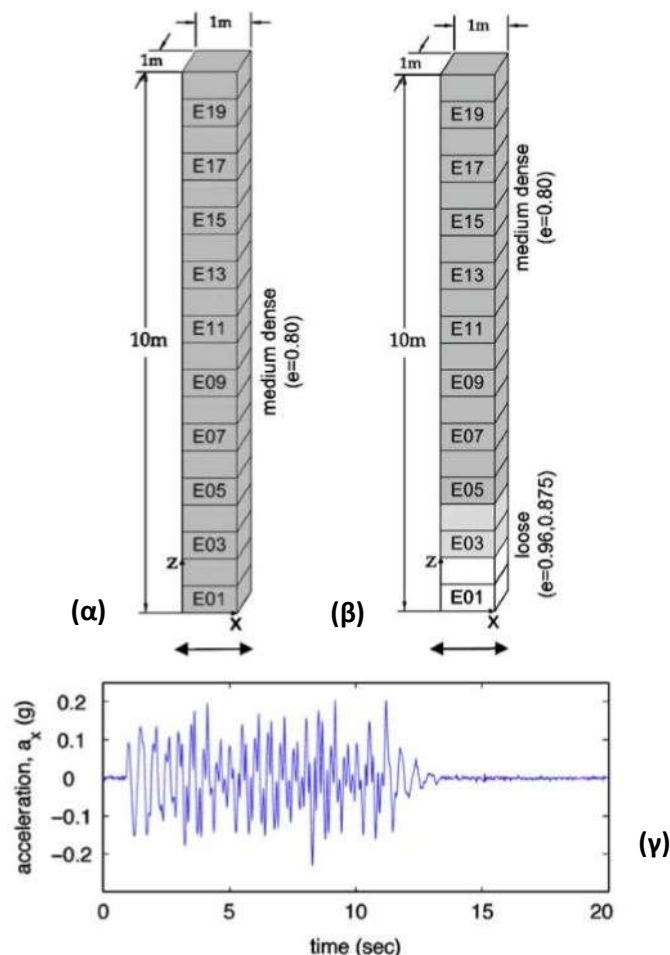
ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	a_{max} (g)	Μέγιστος λόγος υπερπίεσης πόρων $(r_u)_{max}$			ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
		(PPT1)	(PPT2)	(PPT3)	
Ομοιόμορφο 60%	0.23	0.79	0.74	0.45	Δεν ρευστοποιήθηκε
	0.3	1.03	0.91	0.81	Ρευστοποιήθηκε
	0.4	1.1	0.87	0.84	Ρευστοποιήθηκε
Ομοιόμορφο 72%	0.23	0.52	0.12	0.09	Δεν ρευστοποιήθηκε
	0.3	0.89	0.69	0.82	Ρευστοποιήθηκε
	0.4	0.98	0.85	0.80	Ρευστοποιήθηκε
Ανομοιόμορφο 60-40%	0.3	0.94	0.92	0.88	Ρευστοποιήθηκε
	0.4	1.00	1.20	0.88	Ρευστοποιήθηκε
Ανομοιόμορφο 72-40%	0.3	0.91	0.93	0.88	Ρευστοποιήθηκε
	0.4	1.16	0.99	0.88	Ρευστοποιήθηκε

Οι ανωτέρω παρατηρήσεις είναι αντιφατικές ως προς την επίδραση του χαλαρού στρώματος και δεν συνάδουν με τις σχετικές παρατηρήσεις από τα πειράματα φυγοκεντριστή των Steedman and Sharp (2000) και Gonzalez et al. (2002) που παρουσιάστηκαν προηγουμένως αλλά ούτε και με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων των Taiebat et al. (2010) που παρουσιάζονται ακολούθως. Επιπλέον, είναι αξιοσημείωτο ότι σε τρεις από τις αναφερόμενες μετρήσεις έχουμε $(r_u)_{max} > 1.00$, γεγονός που υποδεικνύει ότι συγκεκριμένοι μετρητές μετατοπίστηκαν σε μεγαλύτερα από τα προβλεπόμενα βάθη κατά την διάρκεια της δόνησης. Πέρα από το ενδεχόμενο πειραματικών λαθών, όπως το ανωτέρω, εκτιμάται ότι το ιδιαίτερα μικρό μέγεθος του μοντέλου στην σεισμική τράπεζα (ύψος μόνο 45cm) σε συνδυασμό με την ιδιαίτερα μεγάλη διάρκεια της δόνησης (300 κύκλοι περιόδου 0.033 έως 0.050 sec) δεν επιτρέπουν την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων σχετικά με το εξεταζόμενο πρόβλημα δεδομένου ότι έχουν δρομολογήσει μηχανισμούς που δεν σχετίζονται με την πραγματική σεισμική συμπεριφορά και την ρευστοποίηση των εδαφικών αποθέσεων στην φύση.

2.5 Taiebat et al. (2010)

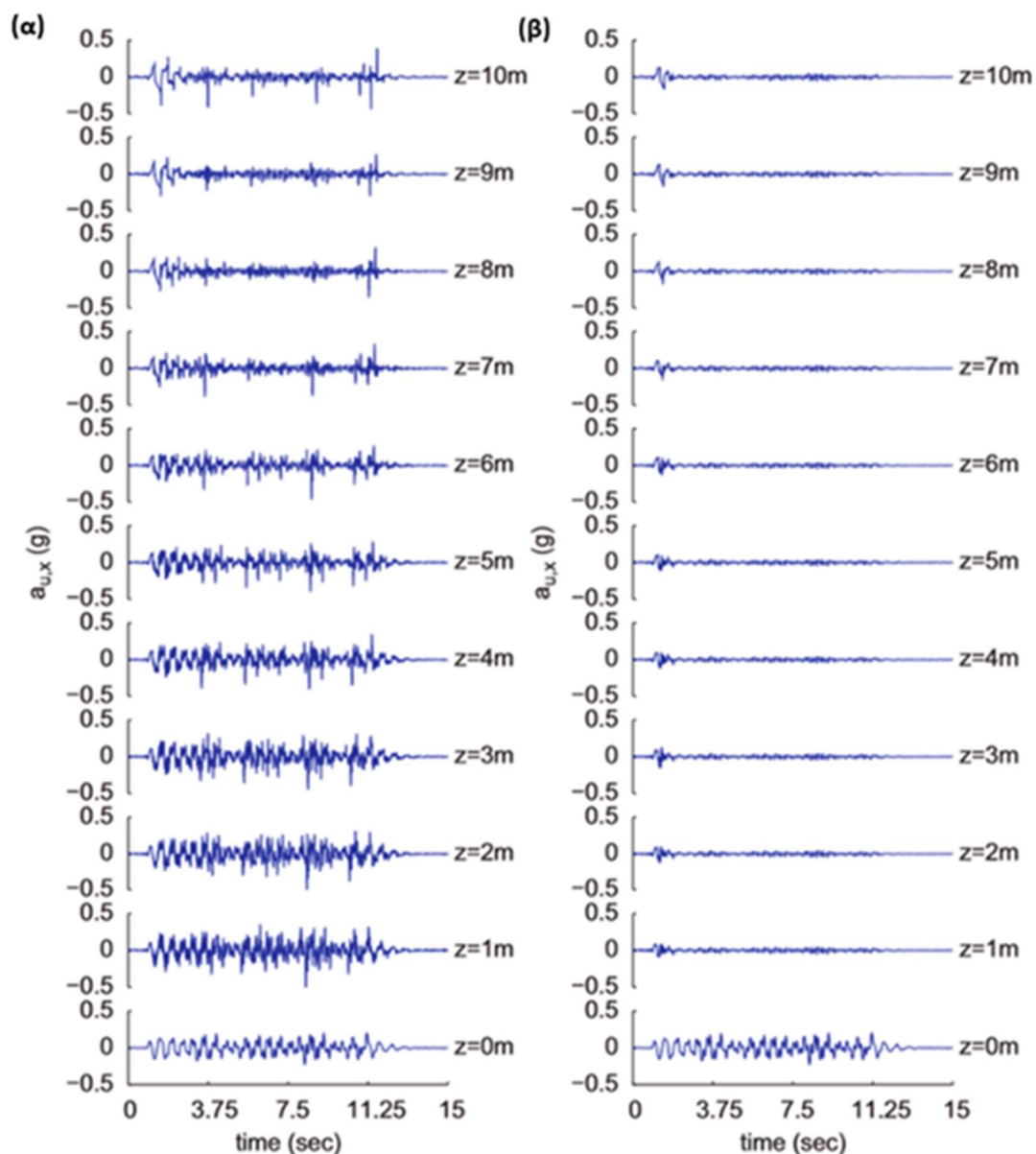
Οι Taiebat et al. (2010) έκαναν τρισδιάστατες, αριθμητικές αναλύσεις εδαφικής στήλης με τον κώδικα Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ) OpenSees, χρησιμοποιώντας το καταστατικό προσομοίωμα SANISAND. Στην 1^η σειρά αναλύσεων, εξέτασαν τη σεισμική απόκριση μιας κατακόρυφης, ομοιόμορφης εδαφικής στήλης άμμου τύπου Toyoura με συνολικό ύψος

10m και σχετική πυκνότητα $D_r = 50\%$. Στη συνέχεια επανέλαβαν τις αναλύσεις παρεμβάλλοντας, στην ομοιόμορφη εδαφική στήλη, μία χαλαρή ζώνη σχετικής πυκνότητας $D_r = 31\%$ σε βάθος 8-9 m και μία πολύ χαλαρή ζώνη σχετικής πυκνότητας $D_r = 10\%$ σε βάθος 9-10m. Η διαπερατότητα της άμμου ελήφθη ίση με $k = 5 \times 10^{-4}$ m/s.



Σχήμα 2.8: Κάνναβος 1^{ης} σειράς αναλύσεων των Taiebat et al. (2010) με (α) ομοιόμορφο και (β) ανομοιόμορφο έδαφος καθώς και (γ) επιβαλλόμενη διέγερση.

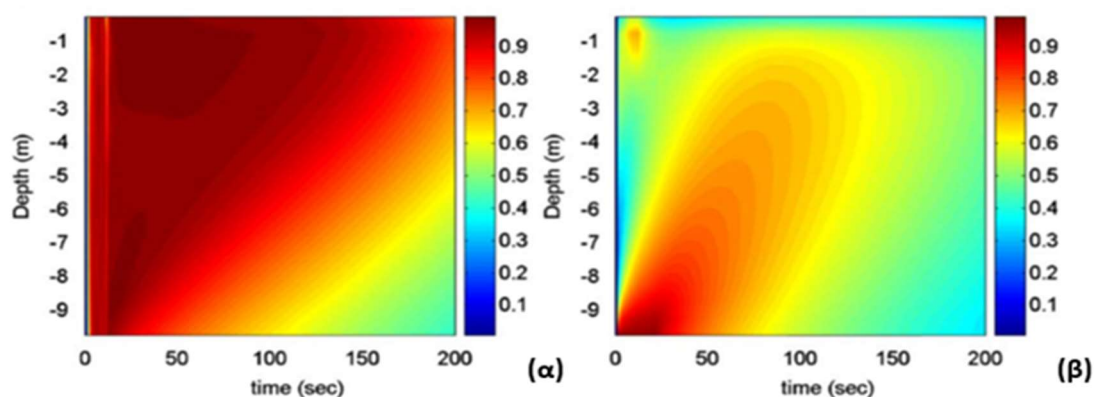
Στα **Σχήματα 2.8α,β** φαίνεται ο κάνναβος της ανάλυσης ΠΣ για ομοιόμορφο και ανομοιόμορφο έδαφος αντίστοιχα. Στο **Σχήμα 2.8γ** παρουσιάζεται η διέγερση που επιβλήθηκε στη βάση της εδαφικής στήλης, η οποία έχει μέγιστη επιτάχυνση $a_{max} = 0.2g$. Επιπλέον, στο **Σχήμα 2.9** παρουσιάζονται οι ιστορίες επιταχύνσεων που προέκυψαν από την ανάλυση τόσο της ομοιόμορφης όσο και της ανομοιόμορφης εδαφικής στήλης. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.9β**, που αφορά την περίπτωση της ανομοιόμορφης στήλης, είναι φανερό ότι η ρευστοποίηση της «ασθενούς» στρώσης στην βάση του καννάβου παρεμπόδισε τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων και μόνωσε σεισμικά το υπερκείμενο, πυκνότερο έδαφος.



Σχήμα 2.9: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων (α) ομοιόμορφου και (β) ανομοιόμορφου εδάφους για τις αριθμητικές αναλύσεις των Taiebat et al. (2010).

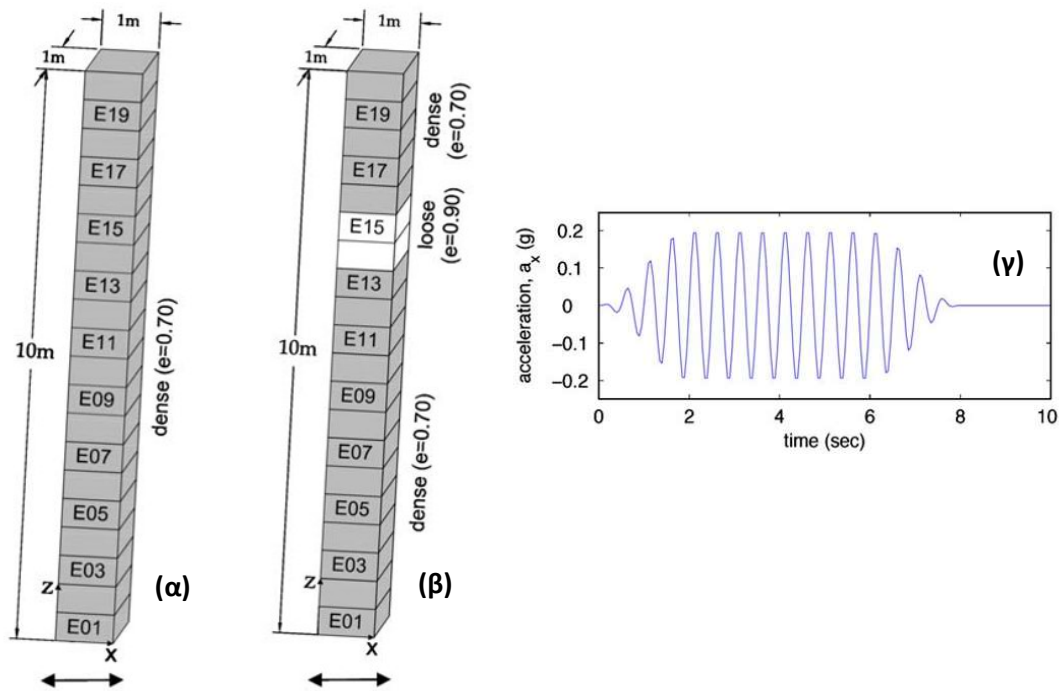
Στο **Σχήμα 2.10** παρουσιάζονται χρωματικά τα περιγράμματα μεταβολής του λόγου υπερπίεσης πόρων με το βάθος και με τον χρόνο. Όπως φαίνεται από τα περιγράμματα του **Σχήματος 2.10α**, η ομοιόμορφη εδαφική στήλη ρευστοποιήθηκε αρχικά πλήρως, κατά τη διάρκεια της δόνησης, και ακολούθησε η σταδιακή εκτόνωση των υπερπίεσεων πόρων λόγω κατακόρυφης ροής προς την ελεύθερη επιφάνεια. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τα ανώτερα 3m εδάφους να παραμείνουν υπό καθεστώς ρευστοποίησης για 40sec περίπου μετά το πέρας της δόνησης. Αντίθετα, σύμφωνα με το **Σχήμα 2.10β** για την ανομοιόμορφη εδαφική στήλη, ρευστοποίηση κατά την διάρκεια της δόνησης έλαβε χώρα μόνο στις χαλαρότερες ζώνες σε βάθος από 9-10m, ενώ στις υπερκείμενες στρώσεις ο λόγος

υπερπίεσης πόρων παρέμεινε αισθητά μικρότερος της μονάδας ($r_u = 0.2-0.6$). Μετά το τέλος της δόνησης, ο λόγος υπερπίεσης πόρων μειώθηκε σταθερά στις χαλαρές στρώσεις της άμμου και αυξήθηκε παροδικά στις υπερκείμενες πιο πυκνές στρώσεις λόγω κατακόρυφης ροής προς την ελεύθερη επιφάνεια. Ωστόσο, η παροδική αυτή αύξηση του λόγου υπερπίεσης πόρων δεν ήταν ικανή να ρευστοποιήσει το υπερκείμενο πυκνό στρώμα άμμου. Ενδεικτικά, στο μέσον του πυκνού στρώματος (δηλ. σε βάθος περί τα 4m) ο λόγος υπερπίεσης πόρων έφτασε την τιμή $r_u \approx 0.40$ κατά τη διάρκεια της δόνησης και στη συνέχεια αυξήθηκε έως $r_u \approx 0.65$ πριν τελικώς μηδενισθεί.

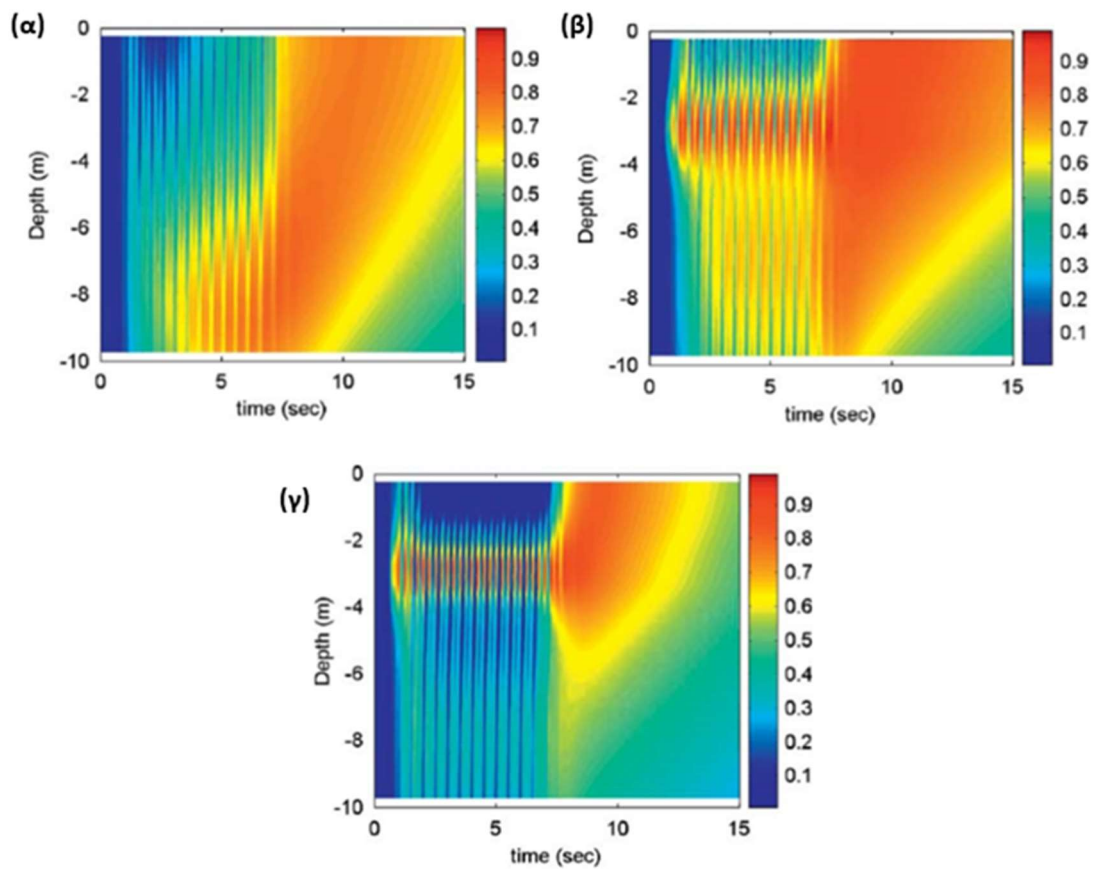


Σχήμα 2.10: Μεταβολή του λόγου υπερπίεσης πόρων στην ανάλυση (α) ομοιόμορφου και (β) ανομοιόμορφου εδάφους των Taiebat et al. (2010).

Η 2^η σειρά αριθμητικών αναλύσεων των Taiebat et al. (2010) αφορά στη σεισμική απόκριση μιας κεκλιμένης ομοιόμορφης εδαφικής στήλης άμμου τύπου Toyoura με συνολικό ύψος 10m, κλίση ίση με 1.5° και σχετική πυκνότητα ίση με $D_r = 75\%$. Στη συνέχεια, οι αναλύσεις επαναλήφθηκαν με την παρεμβολή στην ομοιόμορφη εδαφική στήλη μιας «ασθενούς» στρώσης σχετικής πυκνότητας $D_r = 25\%$ σε βάθος 2.5-3.5m (1m πάχος). Ο κάνναβος της ανάλυσης για ομοιόμορφο και ανομοιόμορφο κεκλιμένο έδαφος φαίνεται στα **Σχήματα 2.10α και β** αντίστοιχα, ενώ στο **Σχήμα 2.10γ** παρουσιάζεται η αρμονική διέγερση που επιβλήθηκε στη βάση της εδαφικής στήλης. Συνολικά έγιναν τρεις αναλύσεις σεισμικής απόκρισης, οι οποίες αφορούν: (α) ομοιόμορφη εδαφική στήλη και διέγερση με $a_{max} = 0.20g$, (β) ανομοιόμορφη εδαφική στήλη και διέγερση με $a_{max} = 0.20g$ και (γ) ανομοιόμορφη εδαφική στήλη και διέγερση με $a_{max} = 0.40g$. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων όσον αφορά τη μεταβολή του λόγου υπερπίεσης πόρων με το βάθος και τον χρόνο παρουσιάζονται υπό την μορφή χρωματικών περιγραμμάτων στο **Σχήμα 2.11**. Η διαπερατότητα της άμμου ελήφθη ίση με $k = 10^{-3}$ m/s.



Σχήμα 2.11: Κάνναβος 2^{ης} σειράς αναλύσεων των Taiebat et al. (2010) για (α) ομοιόμορφο και (β) ανομοιόμορφο έδαφος και (γ) η επιβαλλόμενη διέγερση στη βάση της στήλης.



Σχήμα 2.12: Μεταβολή του λόγου υπερπίεσης πόρων για τις αναλύσεις των Taiebat et al. (2010) με (α) ομοιόμορφη εδαφική στήλη, $a_{max} = 0.2g$, (β) ανομοιόμορφη εδαφική, $a_{max} = 0.2g$ και (γ) ανομοιόμορφη εδαφική στήλη, $a_{max} = 0.4g$.

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.11α**, στην περίπτωση της ομοιόμορφης εδαφικής στήλης με μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.20g$, η ρευστοποίηση ξεκινά από τα μεγάλα βάθη και διαχέεται σταδιακά προς τα άνω. Περί το τέλος της δόνησης για $t \approx 7.5\text{sec}$, ολόκληρο το εδαφικό στρώμα έχει ρευστοποιηθεί. Στο **Σχήμα 2.11β**, παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου υπερπίεσης πόρων για την ίδια μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max} = 0.2g$, στην περίπτωση όμως της ανομοιόμορφης εδαφικής στήλης. Στην περίπτωση αυτή, κατά την διάρκεια της δόνησης, η «ασθενής» στρώση σε βάθος από 2.5-3.5m ρευστοποιείται γρήγορα και ανακόπτει την αύξηση του λόγου υπερπίεσης πόρων στο υπερκείμενο πυκνό στρώμα ενώ επιφέρει παράλληλα μικρή μείωση των υπερπίεσεων στο υποκείμενο πυκνό στρώμα. Μετά το τέλος της δόνησης, γίνεται αποτόνωση των υπερπίεσεων πόρων μέσω της ροής νερού προς τα ανώτερα και κατώτερα αμμώδη στρώματα. Έτσι, το ανώτερο στρώμα από 0-2.5m με σχετική πυκνότητα $D_r=75\%$ αναπτύσσει πολύ χαμηλό λόγο υπερπίεσης πόρων της τάξης του $r_u = 0.30$ κατά τη διάρκεια της δόνησης, αλλά ακολούθως ρευστοποιείται ($r_u = 0.90-1.00$) λόγω της προς τα άνω ροής νερού. Αντίστοιχα, στο μέσον του υποκείμενου στρώματος ο λόγος υπερπίεσης πόρων αυξάνει από $r_u = 0.60$ κατά την διάρκεια της δόνησης σε $r_u = 0.70-0.80$ μετά το πέρας αυτής, πριν τελικώς μηδενισθεί.

Στο **Σχήμα 2.11γ** παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου υπερπίεσης πόρων στην περίπτωση της ανομοιόμορφης εδαφικής στήλης με μέγιστη επιτάχυνση $a_{\max}=0.40g$. Τα αποτελέσματα για την περίπτωση αυτή είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτα. Όπως και προηγουμένως, η ρευστοποίηση του χαλαρού στρώματος, εμποδίζει τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο ανώτερο στρώμα το οποίο όχι μόνο δεν ρευστοποιείται όπως στο **Σχήμα 2.11α**, αλλά διατηρεί και πολύ χαμηλό λόγο υπερπίεσης πόρων της τάξης του $r_u \approx 0.10$. Ωστόσο, μετά το τέλος της δόνησης, ο λόγος υπερπίεσης πόρων αυξάνεται, λόγω της ροής νερού προς τα άνω και οδηγεί παροδικά σε ρευστοποίηση, για μερικά δευτερόλεπτα μέχρι την πλήρη εκτόνωση των υπερπίεσεων πόρων.

Επιπλέον, η επίδραση της ρευστοποίησης του «ασθενούς» στρώματος είναι τώρα έντονα ευνοϊκή για το κατώτερο πυκνό στρώμα, το οποίο επίσης δεν ρευστοποιείται όπως θα αναμενόταν (βλ. **Σχήμα 2.11α**), αλλά διατηρεί χαμηλό λόγο υπερπίεσης πόρων της τάξης του $r_u \approx 0.40$. Αυτό ενδεχομένως να συμβαίνει λόγω της δραστηκής απομείωσης της επιτάχυνσης a_{\max} στα ανώτερα στρώματα (σεισμική μόνωση) και της επακόλουθης μείωσης της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης στο έδαφος. Και σε αυτό το στρώμα ο λόγος υπερπίεσης πόρων αυξάνεται παροδικά μετά το τέλος της δόνησης, λόγω ροής νερού προς τα κάτω, χωρίς όμως να προκαλείται ρευστοποίηση.

2.6 Συμπεράσματα

Τα ευρήματα της βιβλιογραφικής αναδρομής επιβεβαίωσαν την αρχική ιδέα για την επίδραση μιας «ασθενούς» στρώσης σε ρευστοποιήσιμο έδαφος, που διατυπώθηκε στην Εισαγωγή, και επιπλέον οδήγησαν σε ορισμένα ουσιαστικά συμπεράσματα και ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις που δεν είχαν γίνει αντιληπτές εξαρχής. Συγκεκριμένα:

- Σύμφωνα με τα πειράματα φυγοκεντριστή των Steedman & Sharp (2001) και των Gonzalez et al. (2002), αλλά και τις αριθμητικές αναλύσεις των Taiebat et al. (2010), η ύπαρξη μιας χαλαρής στρώσης άμμου εγκιβωτισμένης στο εδαφικό προφίλ, μπορεί να οδηγήσει σε απομείωση των επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Ο λόγος για αυτό είναι ότι η χαλαρή στρώση άμμου ρευστοποιείται πιο γρήγορα από τις πυκνές στρώσεις στις οποίες έχει εγκιβωτισθεί και εμποδίζει έτσι τα σεισμικά κύματα να διαδοθούν προς τα ανώτερα στρώματα, επιτυγχάνει δηλαδή τη Φυσική Σεισμική τους Μόνωση.
- Αξιοσημείωτη είναι επίσης η παρατήρηση, από τις αριθμητικές αναλύσεις των Taiebat et al. (2010), ότι για επιβολή διέγερσης με μεγάλη μέγιστη επιτάχυνση $a_{max}=0.40g$, η «ασθενής» στρώση ρευστοποιείται σχεδόν ακαριαία και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα ο λόγος της υπερπίεσης πόρων στο υπερκείμενο στρώμα αν μην ξεπεράσει το $r_u \approx 0.10$ (έναντι $r_u \approx 0.30$ για $a_{max}=0.20g$).
- Επιπλέον, από τις αριθμητικές αναλύσεις των Taiebat et al. (2010), προκύπτει ότι η ύπαρξη «ασθενούς» στρώσης μπορεί να ανακόψει την αύξηση του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u όχι μόνο στα υπερκείμενα αλλά και στα υποκείμενα πυκνότερα στρώματα και να αποτρέψει τη ρευστοποίησή τους κατά τη διάρκεια της δόνησης. Η εν λόγω επίδραση δικαιολογείται από τη δραστική απομείωση της επιτάχυνσης a_{max} στα ανώτερα στρώματα (σεισμική μόνωση) και την επακόλουθη μείωση της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης στο έδαφος κάτω από την «ασθενή» στρώση.
- Τέλος, από τις αριθμητικές αναλύσεις των Taiebat et al. (2010), διαπιστώθηκε ότι υπάρχει ένα κρίσιμο χρονικό διάστημα, μετά το τέλος της δόνησης, κατά το οποίο η αποτόνωση των υπερπίεσεων πόρων στην ρευστοποιημένη περιοχή, δημιουργεί ροή νερού προς τα ανώτερα και κατώτερα στρώματα και δύναται να τα ρευστοποιήσει παροδικά, πριν από την τελική εκτόνωση των υδατικών υπερπίεσεων. Επί του παρόντος δεν είναι σαφές κατά πόσο το πρόβλημα αυτό είναι υπαρκτό ή οφείλεται στην μεγάλη τιμή του συντελεστή διαπερατότητας ($k=10^{-3}m/s$ έναντι του πραγματικού $k=10^{-5}-10^{-6}m/s$) που υιοθετήθηκε στη δεύτερη

ομάδα αριθμητικών αναλύσεων, γεννά όμως ερωτήματα ως προς το αν το επιφανειακό, πυκνό στρώμα μπορεί πράγματι να λειτουργήσει ως μια υγιής, εδαφική κρούστα θεμελίωσης. Επισημαίνεται ότι, σε μικρότερη έκταση, ενδείξεις για την δυσμενή επίδραση της ροής στη σεισμική απόκριση του πυκνότερου, επιφανειακού στρώματος παρατηρήθηκε επίσης και στα πειράματα φυγοκεντριστή των Steedman & Sharp (2001).

Όλες οι προαναφερθείσες, ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις θα εξετασθούν στα επόμενα κεφάλαια, στα οποία θα γίνει διεξοδική, παραμετρική διερεύνηση για την επίδραση της «ασθενούς» στρώσης στη σεισμική απόκριση των ρευστοποιήσιμων εδαφών.

Κεφάλαιο 3

Ρευστοποίηση ομοιόμορφης απόθεσης άμμου

3.1 Γενικά

Πριν την παραμετρική, αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης και της ρευστοποίησης ενός ανομοιόμορφου στρώματος άμμου, το οποίο περιλαμβάνει μία «ασθενή» στρώση μικρής σχετικής πυκνότητας, είναι σκόπιμο να εξετασθεί η αντίστοιχη συμπεριφορά του ομοιόμορφου στρώματος, χωρίς, δηλαδή, την «ασθενή» στρώση. Η σκοπιμότητα αυτή έγκειται στους δύο παρακάτω λόγους: ο πρώτος λόγος είναι η αποτύπωση της σεισμικής απόκρισης αναφοράς, η οποία θα συγκριθεί εκ των υστέρων με τα αποτελέσματα των αναλύσεων για «ασθενή» εδαφική στρώση, ενώ ο δεύτερος λόγος είναι η κατανόηση των μηχανισμών, οι οποίοι διέπουν τη ρευστοποίηση σε πραγματικές στρώσεις ρευστοποιήσιμου εδάφους με ικανό πάχος.

Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν δύο ομάδες αριθμητικών αναλύσεων, οι οποίες αφορούν σε μία εδαφική στήλη υπό τον υδροφόρο ορίζοντα. Στην πρώτη ομάδα αναλύσεων (Ενότητα 3.3), το ρευστοποιήσιμο στρώμα της άμμου έχει περιορισμένο πάχος ($H_L = 2\text{m}$) και ομοιόμορφη σχετική πυκνότητα. Έτσι, τόσο οι τάσεις λόγου σεισμού όσο και η αντίσταση σε ρευστοποίηση στο στρώμα αυτό της άμμου, παραμένουν πρακτικά σταθερές με το βάθος και η εκδήλωση της ρευστοποίησης συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλο το στρώμα. Στη δεύτερη ομάδα αναλύσεων (Ενότητα 3.4), το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης έγινε πολλαπλάσιο ($H_L = 14\text{m}$), έτσι ώστε οι επιβαλλόμενες διατμητικές τάσεις λόγω σεισμού να μεταβάλλονται αναπόφευκτα με το βάθος και επομένως η ρευστοποίηση των διάφορων εδαφικών στρώσεων να μη συμβαίνει ταυτόχρονα.

Και στις δύο ομάδες αναλύσεων, η σχετική πυκνότητα ήταν ομοιόμορφη με το βάθος, ενώ η σεισμική διέγερση ήταν αρμονική, με σταθερό εύρος επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Οι αριθμητικές αναλύσεις έγιναν με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC (Itasca 2011) σε συνδυασμό με το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο

Εργαστήριο Θεμελιώσεων του ΕΜΠ για την προσομοίωση της ανακυκλικής φόρτισης στοιχείων άμμου (Andrianopoulos et al. 2010; Karamitros 2010). Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την αριθμητική μεθοδολογία παρέχονται στο Παράρτημα Α, καθώς και στις Ενότητες 3.3 και 3.4. Επιπλέον, στην Ενότητα 3.2 συνοψίζονται οι βασικές αρχές για την ποσοτική αποτίμηση του κινδύνου ρευστοποίησης, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την ερμηνεία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων.

3.2 Έλεγχος κινδύνου ρευστοποίησης

Η αποτίμηση του κινδύνου ρευστοποίησης βασίζεται στον υπολογισμό ενός συντελεστή ασφαλείας FS_L , ο οποίος υπολογίζεται ως ο λόγος του συντελεστή αντίστασης σε ρευστοποίηση (CRR) προς το συντελεστή σεισμικών δράσεων (CSR), σύμφωνα με τη σχέση:

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR} \quad (3.1)$$

Συντελεστής σεισμικών δράσεων CSR.- Ορίζεται ως ο λόγος του εύρους της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης τ_d προς την κατακόρυφη ενεργό τάση σ'_{vo} , δηλαδή:

$$CSR = \frac{\tau_d}{\sigma'_{vo}} \quad (3.2)$$

Στην πράξη, ο υπολογισμός της διατμητικής τάσης τ_d γίνεται με δύο εναλλακτικούς τρόπους. Κατά τον πρώτο τρόπο, η επιβαλλόμενη διατμητική τάση εκτιμάται ίση με ποσοστό της μέγιστης διατμητικής τάσης που έχει προκύψει από αριθμητικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ενδεχόμενη ρευστοποίηση του εδάφους, ως εξής:

$$\tau_d = \frac{M_w - 1}{10} \cdot \tau_{max} \quad (M_w \text{ είναι το μέγεθος του σεισμού}) \quad (3.3)$$

ενώ κατά τον δεύτερο τρόπο, η τιμή της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης υπολογίζεται προσεγγιστικά από την μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης a_{max} στην επιφάνεια του εδάφους:

$$\tau_d = \frac{M_w - 1}{10} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \sigma_{vo} \cdot r_d \quad (3.4)$$

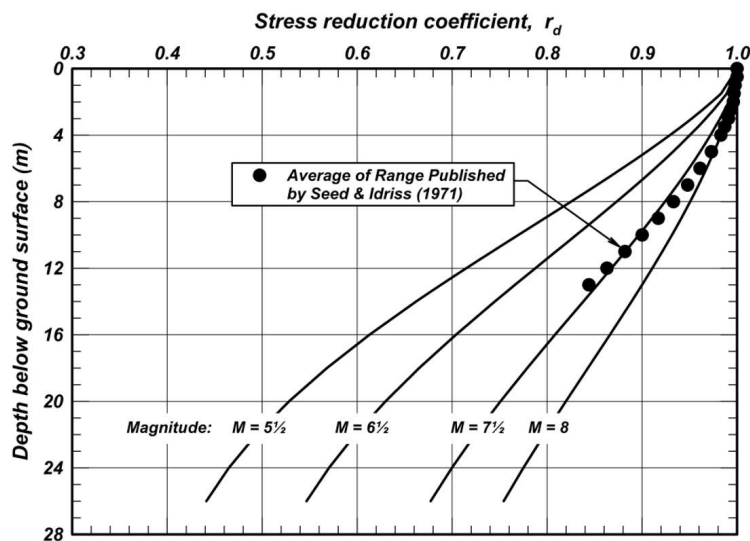
όπου σ_{vo} είναι η κατακόρυφη ολική τάση στο βάθος των υπολογισμών και η τιμή του μειωτικού συντελεστή r_d λαμβάνεται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις (Boulangier & Idriss 2014):

$$r_d(z) = \exp[a(z) + b(z) \cdot M_w] \quad (3.5)$$

$$a(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (3.6)$$

$$b(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (3.7)$$

όπου z είναι το βάθος σε μέτρα (m) από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ οι όροι των ημιτόνων αναφέρονται σε ακτίνια (rad). Στο **Σχήμα 3.1** παρουσιάζεται η μεταβολή του r_d με το βάθος για διάφορα μεγέθη σεισμών.



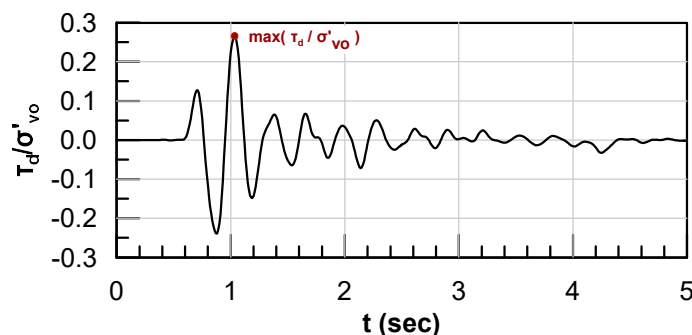
Σχήμα 3.1: Μεταβολή του μειωτικού συντελεστή r_d με το βάθος για διάφορα μεγέθη σεισμού M_w (Boulanger & Idriss 2014).

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού του συντελεστή σεισμικής δράσης βασίζεται στον προσδιορισμό του CSR στην επιφάνεια του εδάφους ($z=0$). Η τιμή του CSR στην επιφάνεια του εδάφους εκτιμάται έμμεσα από τη μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης a_{max} στην επιφάνεια. Στα μεγαλύτερα βάθη ο υπολογισμός του CSR γίνεται με τη βοήθεια του μειωτικού συντελεστή r_d , του οποίου η κατανομή με το βάθος παρουσιάστηκε στο **Σχήμα 3.1**. Όπως φαίνεται, ο μειωτικός συντελεστής r_d είναι πάντα ίσος με τη μονάδα στην επιφάνεια του εδάφους και μειώνεται σταδιακά με το βάθος z .

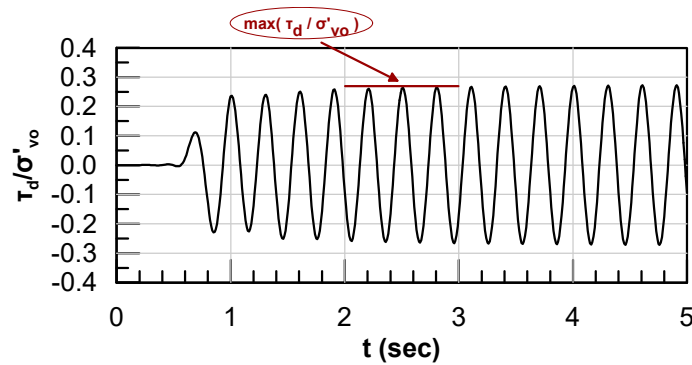
Η δεύτερη μέθοδος για τον προσδιορισμό του CSR είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη και περιέχει δύο σιωπηρές παραδοχές. Η πρώτη παραδοχή αφορά στην απομείωση της σεισμικής δράσης με το βάθος, η οποία συμβαίνει πράγματι στα μη-ρευστοποιήσιμα εδαφικά προφίλ με διαφοροποιήσεις κατά περίπτωση. Η δεύτερη παραδοχή αφορά στη θεώρηση ότι το r_d (και επομένως ο συντελεστής σεισμικής δράσης CSR) σε κάθε βάθος παραμένει σταθερό με το χρόνο. Οι δύο παραπάνω παραδοχές σχετικά με τη χωρική και χρονική κατανομή της σεισμικής δράσης εξετάζονται αναλυτικά στις Ενότητες 3.3 και 3.4,

όπου γίνονται ακριβείς υπολογισμοί για το μειωτικό συντελεστή r_d και το συντελεστή σεισμικής δράσης CSR.

Όσον αφορά τις αριθμητικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης στην παρούσα Διπλωματική εργασία, που πραγματοποιούνται για αρμονική σεισμική διέγερση με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC, η τιμή του συντελεστή σεισμικής δράσης CSR μπορεί να εκτιμηθεί με άμεσο τρόπο. Συγκεκριμένα, από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων υπολογίζονται οι χρονοϊστορίες τ_d/σ'_{vo} για διάφορα βάθη, διαιρώντας τη χρονοϊστορία ανάπτυξης διατμητικών τάσεων για κάθε βάθος με την αντίστοιχη κατακόρυφη ενεργό γεωστατική τάση σ'_{vo} . Ο συντελεστής σεισμικής δράσης CSR στην περίπτωση της αρμονικής φόρτισης με σταθερή μέγιστη επιτάχυνση a_{max} εκτιμάται ίσος με τη μέγιστη τιμή του λόγου τ_d/σ'_{vo} , όπως προβλέπεται από τις Εξισώσεις (3.2), (3.3). Σε αυτό το σημείο, επισημαίνεται ότι η ρευστοποίηση μεταβάλλει δραστικά την σεισμική απόκριση του συστήματος και μειώνει αντίστοιχα την τιμή της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης. Για το λόγο αυτό, η εκτίμηση μιας αντιπροσωπευτικής τιμής για το συντελεστή σεισμικής δράσης CSR συνίσταται να γίνεται από τους πρώτους κύκλους φόρτισης, δηλαδή πριν εκδηλωθούν τα φαινόμενα ρευστοποίησης. Εναλλακτικά, η μέγιστη τιμή του τ_{max}/σ'_{vo} μπορεί να λαμβάνεται από αντίστοιχες αριθμητικές αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση. Στο **Σχήμα 3.2** παρουσιάζεται μία τυπική χρονοϊστορία του λόγου τ_d/σ'_{vo} και η επιλογή της μέγιστης τιμής του τ_{max}/σ'_{vo} για το συγκεκριμένο βάθος, από αριθμητική ανάλυση με ρευστοποίηση. Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 3.3** παρουσιάζεται μία τυπική χρονοϊστορία του λόγου τ_d/σ'_{vo} και η επιλογή της μέγιστης τιμής του τ_{max}/σ'_{vo} για το συγκεκριμένο βάθος, από αριθμητική ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση. Αξιοσημείωτη είναι η παρατήρηση ότι στην ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση, σε αντίθεση με την ανάλυση με ρευστοποίηση, η μέγιστη τιμή του λόγου τ_d/σ'_{vo} παραμένει πρακτικά σταθερή με το χρόνο.



Σχήμα 3.2: Τυπική χρονοϊστορία του λόγου τ_d/σ'_{vo} και επιλεγθείσα μέγιστη τιμή από αριθμητική ανάλυση με ρευστοποίηση.



Σχήμα 3.3: Τυπική χρονοϊστορία του λόγου και επιλεγθείσα μέγιστη τιμή από αριθμητική ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση.

Τέλος, μια ακόμη εναλλακτική εκτίμηση για το συντελεστή σεισμικών δράσεων CSR σε κάθε βάθος μπορεί να γίνει με προσεγγιστικό τρόπο, πολλαπλασιάζοντας το συντελεστή σεισμικών δράσεων που αντιστοιχεί στην επιφάνεια του εδάφους $CSR_{(z=0)}$ με τον μειωτικό συντελεστή r_d , σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

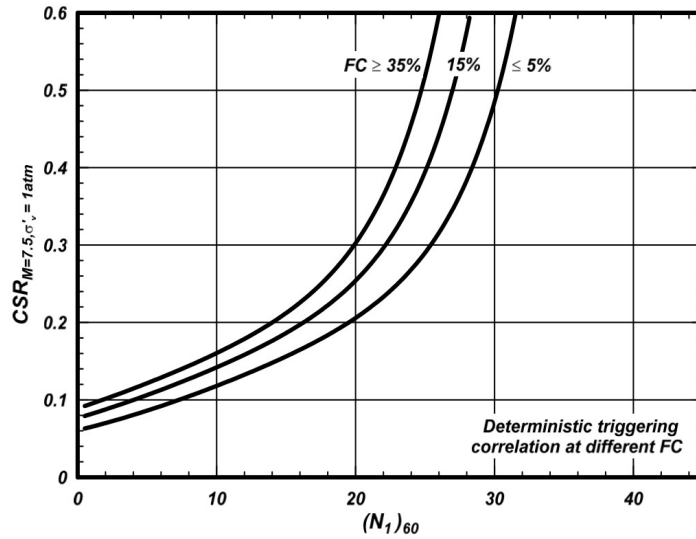
$$CSR_{(z)} = CSR_{(z=0)} \cdot r_d(z) \quad (3.8)$$

Ο συντελεστής σεισμικών δράσεων $CSR_{(z=0)}$ στην επιφάνεια του εδάφους εκτιμάται από τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων με τη διαδικασία που περιεγράφηκε παραπάνω, ενώ ο μειωτικός συντελεστής r_d δίνεται από τις Εξισώσεις (3.5), (3.6) και (3.7).

Συντελεστής αντίστασης έναντι ρευστοποίησης CRR.- Ωστόσο, για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L δεν αρκεί μόνο η εκτίμηση του συντελεστή δράσης CSR, αλλά απαιτείται και ο υπολογισμός του συντελεστή αντίστασης έναντι ρευστοποίησης CRR. Η τιμή του CRR εκφράζει ουσιαστικά την αντίσταση ενός συγκεκριμένου στρώματος άμμου σε ένα συγκεκριμένο σεισμό με δεδομένο μέγεθος ή με δεδομένο αριθμό (ισοδύναμων) ομοιόμορφων κύκλων φόρτισης N_{EQ} .

Υπάρχουν δύο βασικές μεθοδολογίες υπολογισμού της αντίστασης σε ρευστοποίηση στην πράξη. Η πρώτη και συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία, συσχετίζει την τιμή του CRR για δεδομένο μέγεθος σεισμού με τον διορθωμένο αριθμό κρούσεων SPT για καθαρή άμμο, $(N_1)_{60,CS}$ ή αντίστοιχα την διορθωμένη τιμή της αντίστασης αιχμής κώνου CPT, q_{c1N} . Η συσχέτιση CRR - $(N_1)_{60,CS}$ για μέγεθος σεισμού $M_w = 7.5$ εκφράζεται αναλυτικά από τους Boulanger & Idriss (2014) μέσω της εξίσωσης (3.9), ενώ στο **Σχήμα 3.4** παρουσιάζεται γραφικά η αντίστοιχη εμπειρική καμπύλη συσχέτισης CRR - $(N_1)_{60,CS}$ για μέγεθος σεισμού $M_w = 7.5$.

$$CRR_{M_w=7.5, \sigma'_v=1atm} = \exp \left[\frac{(N_1)_{60CS}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right] \quad (3.9)$$



Σχήμα 3.4: Εμπειρικό διάγραμμα για την εκτίμηση της αντίστασης έναντι ρευστοποίησης (CRR) για σεισμό μεγέθους $M_w = 7.5$ βασισμένο σε δεδομένα SPT (Boulanger & Idriss 2014 (Youd et al. 2001)).

Η δεύτερη μεθοδολογία υπολογισμού του CRR βασίζεται σε πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία συσχετίζουν την τιμή του συντελεστή αντίστασης έναντι ρευστοποίησης με τον αντίστοιχο αριθμό ομοιόμορφων, ως προς την επιβαλλόμενη διατμητική τάση, κύκλων φόρτισης N , για δεδομένη κατακόρυφη ενεργό τάση σ'_{vo} . Ενδεικτικά, στο **Σχήμα 3.4** παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα σεισμικής τράπεζας των DeAlba et al. (1976), υπό τη μορφή επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης CSR συναρτήσει του αριθμού κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για ρευστοποίηση N_L , για σχετικές πυκνότητες $D_r = 54\%$, 68% και 82% και κατακόρυφη ενεργό τάση $\sigma'_{vo} \approx 55$ kPa. Τα ζεύγη τιμών CSR - N_L , τα οποία ονομάζονται και καμπύλες ρευστοποίησης, μπορούν να περιγραφούν αναλυτικά από εξισώσεις δύναμης της μορφής:

$$CSR = a \cdot K_\sigma \cdot N_L^{-\beta} \quad (3.10)$$

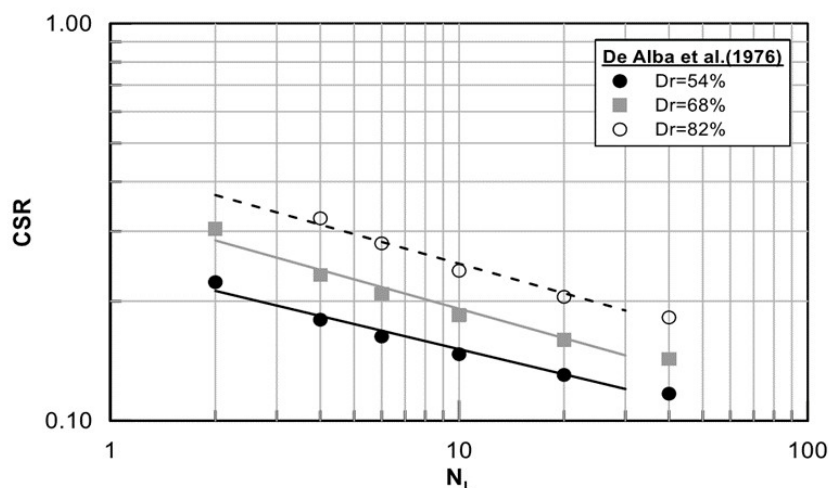
όπου:

$$K_\sigma = 1 - 0.266 \ln \left(\frac{\sigma'_{vo}}{p_\alpha} \right) \quad (3.11)$$

$p_\alpha =$ ατμοσφαιρική πίεση (100 kPa)

όπου a και β εμπειρικοί συντελεστές, οι τιμές των οποίων εξαρτώνται κυρίως από τη σχετική πυκνότητα της άμμου αλλά και το είδος της εργαστηριακής δοκιμής

ρευστοποίησης. Ο συντελεστής K_σ λαμβάνει υπόψη την ιδιαίτερα σημαντική επιρροή της κατακόρυφης ενεργού τάσης σ'_{vo} και κανονικοποιεί τις καμπύλες ρευστοποίησης για $\sigma'_{vo} = 100\text{kPa}$. Στο **Σχήμα 3.5**, παρουσιάζεται η αντίστοιχη προσαρμογή των πειραματικών αποτελεσμάτων των DeAlba et al. (1976) με την Εξίσωση (3.10).



Σχήμα 3.5: Καμπύλες ρευστοποίησης από τα πειραματικά αποτελέσματα σεισμικής τράπεζας των DeAlba et al. (1976).

Για δεδομένη τιμή του λόγου επιβαλλόμενων διατμητικών τάσεων CSR, η παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ελάχιστου αριθμού κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για να προκληθεί ρευστοποίηση, N_L . Αντίστοιχα, με δεδομένο τον αριθμό ομοιόμορφων επιβαλλόμενων κύκλων φόρτισης, N , μπορεί να εκτιμηθεί η ελάχιστη τιμή της ανηγμένης διατμητικής αντοχής σε ρευστοποίηση CRR συγκεκριμένου εδαφικού υλικού που θα το οδηγήσει σε ρευστοποίηση:

$$CRR = a \cdot K_\sigma \cdot N^{-\beta} \quad (3.12)$$

Επομένως, για εδαφικό υλικό με δεδομένη καμπύλη ρευστοποίησης, ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση του λόγου N_L/N και της παραμέτρου β :

$$FS_L = \frac{CSR}{CRR} = \left(\frac{N_L}{N} \right)^\beta \quad (3.13)$$

Οι Kalogeraki & Zontanou (2014) ανέλυσαν μια σειρά από πειραματικά αποτελέσματα και τα προσάρμοσαν στην Εξίσωση (3.10) με σκοπό να εκτιμήσουν τις τιμές των παραμέτρων α και β . Στους **Πίνακες 3.1** και **3.2** που ακολουθούν δίνονται οι τιμές των παραμέτρων α και β για συνθήκες απλής διάτμησης, σύμφωνα με την επεξεργασία των Kalogeraki & Zontanou

(2014), και για τα πειράματα σεισμικής τράπεζας των DeAlba et al. (1976)(DeAlba et al. 1976)(DeAlba et al. 1976).

Πίνακας 3.1: Εύρη τιμών των παραμέτρων α και β από πειράματα απλής διάτμησης Kalogeraki & Zontanou (2014).

D_r	α	β
30 - 50%	0.30 ± 0.10	0.15 ± 0.05
55 - 70%	0.50 ± 0.20	0.20 ± 0.10

Πίνακας 3.2: Τιμές των παραμέτρων α και β για τα πειράματα σεισμικής τράπεζας των DeAlba et al. (1976) για κατακόρυφη ενεργό τάση $\sigma'_{vo} \approx 55$ kPa.

D_r	α	β
54%	0.246	0.210
68%	0.337	0.246
82%	0.439	0.247
90%	0.498	0.237

Για την περίπτωση των αριθμητικών αναλύσεων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης μπορεί να γίνει με αντίστοιχο τρόπο με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τα πειραματικά αποτελέσματα, δηλαδή βάσει της Εξίσωσης (3.13). Συγκεκριμένα, όταν η επιβαλλόμενη σεισμική διέγερση στις αριθμητικές αναλύσεις είναι αρμονική, τότε ο αριθμός ομοιόμορφων, ως προς τη διατμητική τάση, κύκλων φόρτισης N είναι δεδομένος, ενώ ο αριθμός των κύκλων που απαιτούνται για ρευστοποίηση N_L θεωρείται εκείνος ο αριθμός κύκλων για τον οποίο ο λόγος υπερπίεσης πόρων r_u λαμβάνει για πρώτη φορά την τιμές μεγαλύτερες από 0.95, (δηλαδή $r_u \geq 0.95 - 1.00$). Σε αυτή την περίπτωση όμως θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι τιμές της παραμέτρου β που έχουν προκύψει από αριθμητικές αναλύσεις εδαφικής στήλης που έγιναν με το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND, το οποίο έχει βαθμονομηθεί για άμμο τύπου Nevada (Kalogeraki & Zontanou 2014). Οι τιμές αυτές της παραμέτρου β διαφέρουν ανάλογα με τη σχετική πυκνότητα $D_r(\%)$ της άμμου και παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.3** που ακολουθεί:

Πίνακας 3.3: Τιμές παραμέτρου β των Kalogeraki & Zontanou (2014) βάσει αριθμητικών αναλύσεων εδαφικής στήλης για διάφορες τιμές σχετικής πυκνότητας.

D_r	β
50%	0.41
60%	0.42
75%	0.57

Σε περιπτώσεις που δεν έχει εκδηλωθεί ρευστοποίηση κατά τη διάρκεια της δόνησης, αλλά έχει αναπτυχθεί σημαντική υπερπίεση πόρων ($0 < r_{u,max} < 0.95$), ο απαιτούμενος αριθμός κύκλων για ρευστοποίηση N_L δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί απ' ευθείας, όπως περιγράφεται παραπάνω. Σε αυτή την περίπτωση, για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, χρησιμοποιείται η μεθοδολογία των Tokimatsu & Yoshimi (1983), η οποία συσχετίζει τον FS_L με τη μέγιστη αναπτυχθείσα τιμή της υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στην εμπειρική σχέση των Seed et al. (1976):

$$r_{u,max} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[\left(\frac{N}{N_L} \right)^{1/(2 \cdot A)} \right] \quad (3.14\alpha)$$

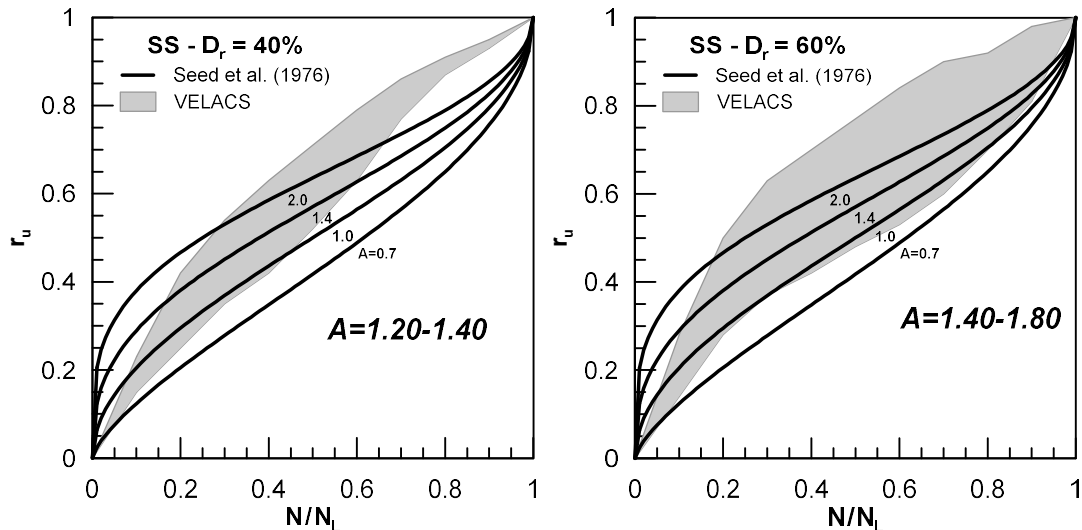
όπου A είναι ένας εμπειρικός εκθέτης. Από την σχέση αυτή προκύπτει ότι:

$$\frac{N}{N_L} = \left[\sin \left(\frac{\pi}{2} r_{u,max} \right) \right]^{-2A} \quad (3.14\beta)$$

Με αντικατάσταση της Εξίσωσης (3.14β) στην Εξίσωση (3.13), προσδιορίζεται ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης συναρτήσει του εμπειρικού εκθέτη A , της παραμέτρου β και της $r_{u,max}$:

$$FS_L = \left[\sin \left(\frac{\pi}{2} r_{u,max} \right) \right]^{-2 \cdot A \cdot \beta} \quad (3.15)$$

Η τιμή του εκθέτη A εκτιμήθηκε από τους Bouckovalas et al. (2011), οι οποίοι επεξεργάστηκαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων σε άμμο τύπου Nevada των Arulmoli et al. (1992) στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος VELACS (**Σχήμα 3.6**). Συγκεκριμένα, ο εμπειρικός εκθέτης A για συνθήκες απλής διάτμησης εκτιμήθηκε ίσος με $A = 1.20 - 1.40$ για σχετική πυκνότητα $D_r = 40\%$ και $A = 1.40 - 1.80$ για σχετική πυκνότητα $D_r = 60\%$ (**Σχήμα 3.6**).



Σχήμα 3.6: Βέλτιστα εύρη τιμών του εμπειρικού εκθέτη A για άμμου τύπου Nevada, συνθήκες απλής διάτμησης και σχετικές πυκνότητες $D_r = 40\%$ και 60% (Bouckovalas et al. 2011).

Οι δύο ανωτέρω μεθοδολογίες υπολογισμού του συντελεστή αντίστασης έναντι ρευστοποίησης CRR , και επομένως του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L , δεν συνδέονται άμεσα μεταξύ τους δεδομένου ότι έχουν αναπτυχθεί ανεξάρτητα, με διαφορετικό σκεπτικό και δεδομένα. Μπορεί όμως να γίνει μια έμμεση συσχέτιση με τις ακόλουθες παραδοχές. Το μέγεθος του σεισμού M_w που απαιτείται για την εφαρμογή της πρώτης μεθοδολογίας μπορεί να συσχετισθεί μέσω του **Πίνακα 3.4** με τον αριθμό των ισοδύναμων, ομοιόμορφων κύκλων φόρτισης N_{EQ} . Η αντιστοιχία μεταξύ M_w και N_{EQ} δεν είναι μονοσήμαντη και θεωρητικά τεκμηριωμένη, αλλά είθισται να χρησιμοποιείται διεθνώς η προσεγγιστική συσχέτιση των Seed & Idriss (1982), που παρουσιάζεται στον **Πίνακα 3.4**.

Πίνακας 3.4: Αντιστοιχία μεγέθους σεισμού M_w με αριθμό ισοδύναμων ομοιόμορφων κύκλων φόρτισης N_{EQ} (Seed & Idriss 1982).

M_w	5.25	6.00	6.75	7.50	8.50
N_{EQ}	2 - 3	5 - 6	10	15	26

Επιπλέον, ο διορθωμένος αριθμός χτύπων δοκιμής SPT $(N_1)_{60,CS}$, που χρειάζεται για την εφαρμογή της πρώτης μεθοδολογίας, μπορεί να συσχετιστεί με τη σχετική πυκνότητα, η οποία είναι απαραίτητη παράμετρος για την εφαρμογή της δεύτερης μεθοδολογίας. Σύμφωνα με τους Idriss & Boulanger (2008), η συσχέτιση των δύο αυτών παραμέτρων μπορεί να γίνει ως εξής:

$$(N_1)_{60,CS} = 46 \cdot (D_r)^2 \quad (3.16)$$

Κλείνοντας αυτή τη συνοπτική αναδρομή στις μεθόδους ποσοτικής αποτίμησης του κινδύνου ρευστοποίησης, επισημαίνεται ότι και οι δύο μεθοδολογίες που προαναφέρθηκαν για τον υπολογισμό του CRR, και κατ' επέκταση του FS_L , αναφέρονται σε μεμονωμένες στρώσεις μικρού πάχους ή σε δοκίμια εδάφους όπου οι τιμές του CRR και του CSR είναι ενιαίες με το βάθος και επομένως η ρευστοποίηση επέρχεται ταυτόχρονα σε όλα τα βάθη. Με άλλα λόγια, είναι αμφίβολη η ακρίβεια τους για ρευστοποιήσιμες στρώσεις μεγάλου πάχους, όπου η κατανομή των CSR και CRR με το βάθος δεν είναι ομοιόμορφη. Αυτό συμβαίνει διότι στις ρευστοποιήσιμες στρώσεις μεγάλου πάχους ρευστοποιείται ταχύτερα η πιο ασθενής στρώση, δηλαδή με την μικρότερη τιμή του FS_L , η οποία αλλάζει δραστικά την σεισμική απόκριση των υπερκείμενων και υποκείμενων εδαφικών στρώσεων. Επομένως, παύουν να ισχύουν για αυτές τις εδαφικές στρώσεις οι παραδοχές των δύο εμπειρικών μεθόδων που παρουσιάστηκαν και η τιμή του CSR για το ίδιο βάθος υπολογισμού δεν είναι πλέον σταθερή αλλά χρονικά μεταβαλλόμενη.

Επιπλέον, η συσχέτιση $CRR - N_{SPT}$ ισχύει για συνθήκες σταθερού λόγου διατμητικών τάσεων, όπως σε ανακυκλικές δοκιμές ελεγχόμενης τάσης. Η συνθήκη αυτή δεν ισχύει πάντοτε στο ελεύθερο πεδίο, όπου η σεισμική διέγερση επιβάλλεται υπό μορφή μετατόπισης και επομένως η επιβαλλόμενη διατμητική τάση μειώνεται όταν η τιμή του λόγου υπερπίεσης πόρων γίνει μεγαλύτερη από $r_u > 0.6-0.8$ και πρακτικά μηδενίζεται όταν $r_u \approx 1$. Εξάιρεση μπορεί να αποτελούν τα πειράματα σεισμικής τράπεζας ή καλύτερα τα πειράματα φυγοκεντριστή που προσομοιάζουν πιο ρεαλιστικά τις συνθήκες σεισμικής δόνησης στο ελεύθερο πεδίο.

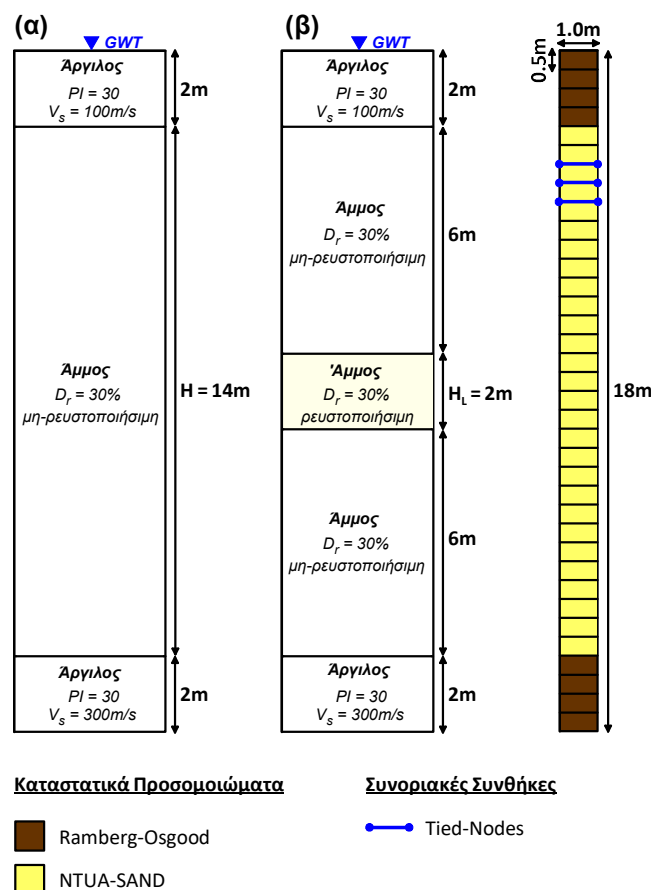
3.3 Ρευστοποίηση ομοιόμορφης στρώσης μικρού πάχους

Όπως επισημάνθηκε στην Ενότητα 3.1, είναι ιδιαίτερα σημαντική η αποτύπωση της σεισμικής απόκρισης ενός ομοιόμορφου ρευστοποιήσιμου αμμώδους στρώματος. Ωστόσο, για να εξετασθεί λεπτομερώς η ρευστοποίηση σε ομοιόμορφα εδαφικά προφίλ κρίθηκε απαραίτητος ο διαχωρισμός τους με βάση το πάχος H_L της ρευστοποιήσιμης ζώνης, καθώς αυτό αποδείχθηκε καθοριστικό για την σεισμική τους απόκριση. Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η περίπτωση ενός εδαφικού προφίλ, στο οποίο βρίσκεται εγκιβωτισμένη μια ρευστοποιήσιμη στρώση καθαρής άμμου με μικρό πάχος $H_L=2m$ και μικρή σχετική πυκνότητα $D_r=30\%$.

Πιο συγκεκριμένα, η εδαφική τομή που επιλέχθηκε για να διερευνηθεί αποτελεί μια ιδεατή τομή πέντε στρώσεων υπό τον υδροφόρο ορίζοντα. Το συνολικό ύψος της εδαφικής στήλης είναι 18m, με τα ανώτερα και τα κατώτερα 2m να αποτελούνται από αργιλικό έδαφος, ενώ

τα υπόλοιπα 14m αποτελούνται από αμμώδες έδαφος με σχετική πυκνότητα $D_r=30\%$. Προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή του ρευστοποιήσιμου στρώματος στη σεισμική απόκριση της εδαφικής στήλης και να ερμηνευθούν καλύτερα τα αποτελέσματα της ανάλυσης, εξετάσθηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση το στρώμα της άμμο ήταν εξολοκλήρου μη-ρευστοποιήσιμο, ενώ στη δεύτερη περίπτωση επιτρέπεται στην άμμο να ρευστοποιηθεί μόνο στα βάθη $z=8-10m$. Οι δύο αυτές περιπτώσεις εδαφικών προφίλ παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.7** μαζί με τον κάρναβο Πεπερασμένων Διαφορών.

Η αριθμητική προσομοίωση της άμμου επιλέχθηκε να γίνει με το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND, ενώ της αργίλου με το καταστατικό προσομοίωμα Ramberg-Osgood (1943). Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND δίνονται στο Παράρτημα Α. Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στα πλευρικά όρια είναι τύπου «συζευγμένων κόμβων» (Tied-Nodes), οι οποίες επιβάλλουν στους ακραίους κόμβους της ίδιας στάθμης, τις ίδιες κατακόρυφες και οριζόντιες μετατοπίσεις.



Σχήμα 3.7: Εδαφική τομή (α) για την αριθμητική προσομοίωση του μη-ρευστοποιήσιμου εδαφικού προφίλ (β) για την αριθμητική προσομοίωση του εδαφικού προφίλ με ρευστοποιήσιμο στρώμα πάχους $H_1=2m$ και και κάρναβος Πεπερασμένων Διαφορών.

Για τα δύο αργιλικά στρώματα θεωρούνται ίδια φυσικά χαρακτηριστικά, αποτελούμενα από την ξηρή (ρ_s) και κορεσμένη πυκνότητα ($\rho_{κορ}$), το λόγο Poisson (ν) και το συντελεστή ουδέτερων ωθήσεων (K_0). Διαφοροποιήσεις υιοθετούνται ως προς τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, με μεγαλύτερες τιμές του μέτρου ελαστικότητας (E) για την υποκείμενη στρώση προκειμένου να αποδοθεί η αύξηση της δυσμησίας συναρτήσει του βάθους. Εξαίρεση αποτελεί η αστράγγιστη διατμητική αντοχή για την οποία ορίζεται μια μεγάλη κοινή τιμή και για τα δύο αργιλικά στρώματα, αγνοώντας την επίδραση του βάθους. Η μεγάλη αυτή τιμή του C_u αποκλείει ουσιαστικά το ενδεχόμενο αστοχίας των αργιλικών στρώσεων, καθώς στις αναλύσεις που πραγματοποιούνται το ενδιαφέρον εστιάζεται στην συμπεριφορά της ρευστοποιήσιμης άμμου.

Συγκεκριμένα για τις δύο αργιλικές στρώσεις λαμβάνονται:

- $\rho_s = 1.6 \text{ Mgr/m}^3$, $\rho_{κορ} = 2 \text{ Mgr/m}^3$, πορώδες $n = 0.40$
- εξαιρετικά μικρός συντελεστής διαπερατότητας k (αστράγγιστη φόρτιση) και δείκτης πλαστιμότητας $PI = 30\%$
- $\nu = 0.33$ και $K_0 = 0.5$

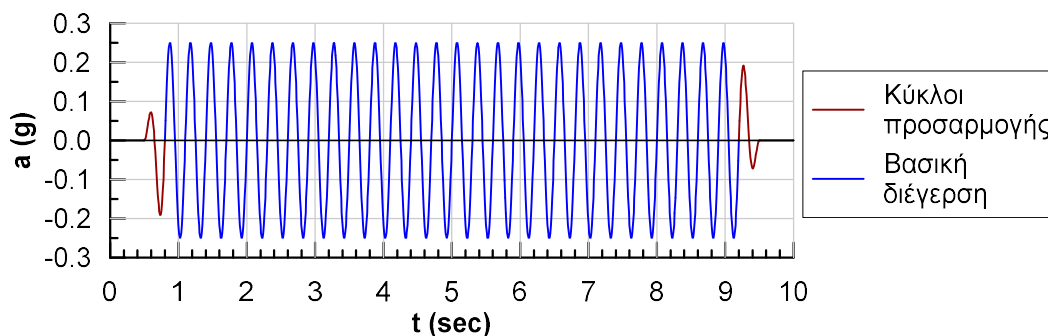
Τέλος, για την επιφανειακή αργιλική στρώση θεωρείται $\nu = 0.33$ και $G_{\max} = 20 \text{ MPa}$, που αντιστοιχεί σε $V_s = 100 \text{ m/s}$, ενώ για την υποκείμενη αργιλική στρώση θεωρείται $\nu = 0.33$ και $G_{\max} = 180 \text{ MPa}$ που αντιστοιχεί σε $V_s = 300 \text{ m/s}$.

Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά της άμμου, θεωρούνται:

- $\rho_s = 1.6 \text{ Mgr/m}^3$, $\rho_{κορ} = 2 \text{ Mgr/m}^3$, πορώδες $n = 0.40$
- εξαιρετικά μικρός συντελεστής διαπερατότητας k (αστράγγιστη φόρτιση)
- $\nu = 0.33$ και $K_0 = 0.5$
- ελάχιστος και μέγιστος δείκτης κενών αυτός της άμμου Nevada, ήτοι $e_{\min} = 0.511$ και $e_{\max} = 0.877$ για τον προσδιορισμό της σχετικής πυκνότητας η οποία στις συγκεκριμένες αναλύσεις λαμβάνεται ίση με $D_r = 30\%$.

Για την προσομοίωση της μη-ρευστοποιήσιμης άμμου όλες οι παραπάνω παράμετροι παραμένουν ίδιες, με τη μόνη διαφορά ότι το μέτρο ισότροπης συμπίεσης του νερού στα μη-ρευστοποιήσιμα στρώματα λαμβάνει πολύ μικρή τιμή $K_w=1 \text{ kPa}$. Με αυτόν τον τρόπο οι ιδιότητες της εδαφικής στήλης παραμένουν πανομοιότυπες στις δύο περιπτώσεις, αλλά στα μη-ρευστοποιήσιμα στρώματα το νερό δεν μπορεί να παραλάβει τάση και επομένως δεν αναπτύσσονται υπερπιέσεις πόρων.

Το **Σχήμα 3.8** παρουσιάζει τη διέγερση που επιβλήθηκε στη βάση των δύο εδαφικών στηλών, ως χρονοϊστορία επιβαλλόμενης επιτάχυνσης. Πρόκειται για σταθερή ημιτονοειδή διέγερση 30 κύκλων περιόδου $T=0.3$ sec, εκ των οποίων ο πρώτος και ο τελευταίος είναι κύκλοι προσαρμογής, με σκοπό τη σταδιακή αύξηση του πλάτους έως την προδιαγεγραμμένη τιμή $a_{max}=0.25g$ και τον σταδιακό μηδενισμό του αντιστοίχως. Επιπρόσθετα, για λόγους αριθμητικής ευστάθειας προηγείται ένα «ήσυχο» χρονικό διάστημα 0.5 δευτερολέπτων πριν την έναρξη της διέγερσης.

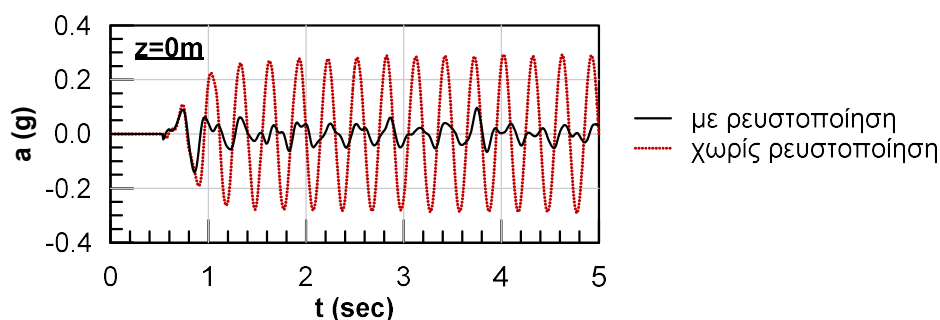


Σχήμα 3.8: Αρμονική διέγερση στη βάση της εδαφικής στήλης με μέγιστη επιβαλλόμενη επιτάχυνση $a_{max}=0.25g$.

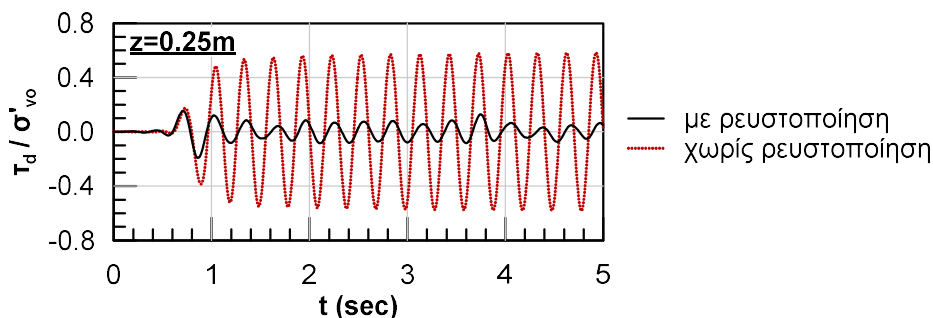
Διευκρινίζεται ότι, παρότι η διέγερση αποτελείται από 30 κύκλους φόρτισης, τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται μόνο για τους πρώτους 15 κύκλους, στους οποίους εστιάζεται και η ερμηνεία της σεισμικής απόκρισης. Σύμφωνα με τον **Πίνακα 3.4**, οι 15 κύκλοι φόρτισης αντιστοιχούν σε μέγεθος σεισμού $M_w=7.5$.

3.3.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων των δύο αριθμητικών αναλύσεων

Τα αποτελέσματα των δύο αριθμητικών αναλύσεων παρουσιάζονται σε μορφή χρονοϊστοριών διάφορων παραμέτρων της σεισμικής απόκρισης του εδάφους, σε διάφορα βάθη της αμμώδους στρώσης ($z=2-15m$) αλλά και στην επιφάνεια του εδάφους ($z=0m$). Στα **Σχήματα 3.9** και **3.10** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης και του λόγου $CSR=\tau_d/\sigma'_{vo}$ στην επιφάνεια του εδάφους, για την περίπτωση της εδαφικής στήλης με ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L=2m$ και της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης.



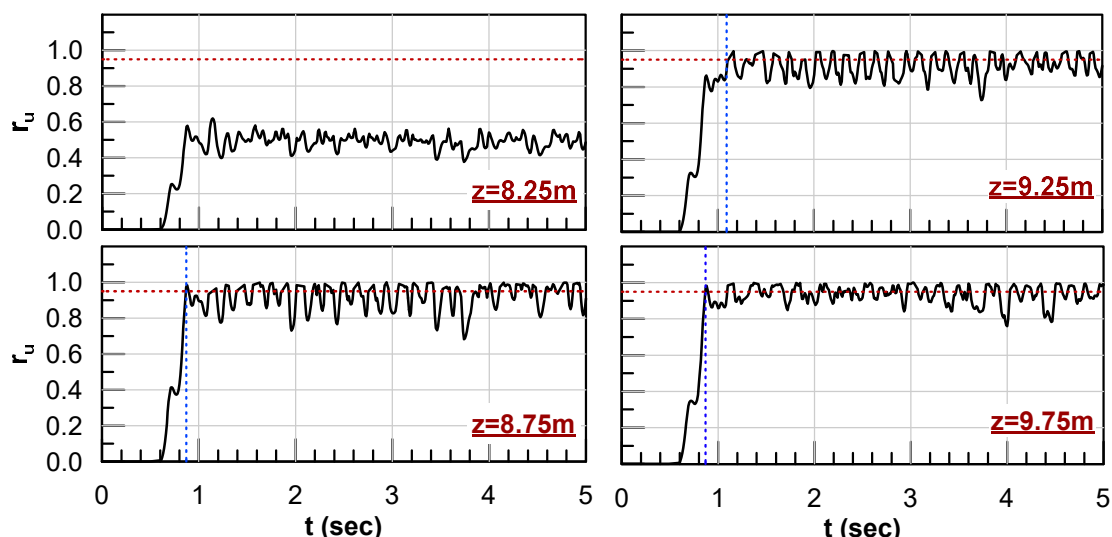
Σχήμα 3.9: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης στην επιφάνεια της εδαφικής στήλης με ρευστοποιήσιμη ζώνη πάχους $H_L=2m$ αλλά και της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης.



Σχήμα 3.10: Χρονοϊστορία λόγου τ_d/σ'_{vo} στην επιφάνεια της εδαφικής στήλης με ρευστοποιήσιμη ζώνη πάχους $H_L=2m$ αλλά και της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης.

Όπως φαίνεται στα **Σχήματα 3.9** και **3.10**, η μέγιστη τιμή τόσο της επιτάχυνσης όσο και του συντελεστή σεισμικής δράσης CSR στην επιφάνεια της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης είναι σαφώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές στην επιφάνεια της εδαφικής στήλης με ρευστοποιήσιμη ζώνη πάχους $H_L=2m$. Παρατηρείται ότι οι χρονοϊστορίες CSR στην επιφάνεια της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης έχουν διατηρηθεί αρμονικές με σταθερό εύρος και σταθερή περίοδο $T=0.3sec$. Αντίθετα, στην περίπτωση του εδαφικού προφίλ με τη ρευστοποιήσιμη στρώση μικρού πάχους $H_L=2m$, το εύρος μειώθηκε αισθητά μετά τη χρονική στιγμή $t=1sec$ περίπου και η περίοδος αυξήθηκε σε τιμές $T>0.3 sec$. Αυτή η διαφοροποίηση ανάμεσα στις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις μπορεί να ερμηνευθεί από τις χρονοϊστορίες ανάπτυξης υπερπίεσεων πόρων στην ρευστοποιήσιμη ζώνη που βρίσκεται σε βάθος από 8 έως 10 m από την επιφάνεια του εδάφους, όπως εξηγείται ακολούθως.

Στο **Σχήμα 3.11** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσεων πόρων για τα βάθη $z=8.25m$, $8.75m$, $9.25m$ και $9.75m$, τα οποία αντιστοιχούν στο μέσο ύψος κάθε ζώνης (zone) του καννάβου Πεπερασμένων Διαφορών εντός της ρευστοποιήσιμης στρώσης (από 8.0 έως 10m βάθος). Με κόκκινη, οριζόντια διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η ελάχιστη τιμή του λόγου υπερπίεσης πόρων $r_u=0.95$, για την οποία θεωρείται ότι συμβαίνει ρευστοποίηση και αντίστοιχα με μπλε, κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η χρονική στιγμή έναρξης της ρευστοποίησης t_r , δηλαδή η χρονική στιγμή για την οποία ο λόγος υπερπίεσης πόρων έλαβε για πρώτη φορά τιμή μεγαλύτερη ή ίση του 0.95. Οι χρονικές στιγμές t_r μετρούνται από την έναρξη της δόνησης, δηλαδή μετά την παρέλευση του «ήσυχου» χρονικού διαστήματος των 0.5 sec.



Σχήμα 3.11: Χρονοϊστορίες ανάπτυξης του λόγου υπερπίεσης πόρων σε διάφορα βάθη του ρευστοποιήσιμου στρώματος με πάχος $H_L=2m$.

Στον **Πίνακα 3.5** παρουσιάζονται οι χρονικές στιγμές έναρξης της ρευστοποίησης t_L και οι αντίστοιχοι κύκλοι φόρτισης N_L που απαιτούνται για ρευστοποίηση σε διάφορα βάθη. Παρατηρείται ότι η ρευστοποίηση του στρώματος στα βάθη $z=8.75m$, $9.25m$ και $9.75m$ συνέβη πρακτικά ταυτόχρονα περί την χρονική στιγμή $t_L=0.5$ sec μετά την έναρξη της δόνησης. Η χρονική αυτή στιγμή είναι απόλυτα συμβατή με την χρονική στιγμή της δραστηκής απομείωσης στην σεισμική επιτάχυνση και στην τιμή του λόγου CSR στην επιφάνεια του εδάφους, για τις αναλύσεις με ρευστοποίηση (**Σχήματα 3.9** και **3.10**). Είναι αξιοσημείωτο ότι το ανώτατο στοιχείο ($z=8.25m$) δεν ρευστοποιείται, με τη μέγιστη τιμή του λόγου υπερπίεσης πόρων να είναι $r_{u,max} \approx 0.6$, ενδεχομένως διότι βρίσκεται σε επαφή με την άργιλο και περιορίζεται κινηματικά από αυτή.

Πίνακας 3.5: Χρονικές στιγμές ρευστοποίησης t_L και αντίστοιχοι κύκλοι φόρτισης N_L για διάφορα βάθη του ρευστοποιήσιμου στρώματος με πάχος $H_L=2m$.

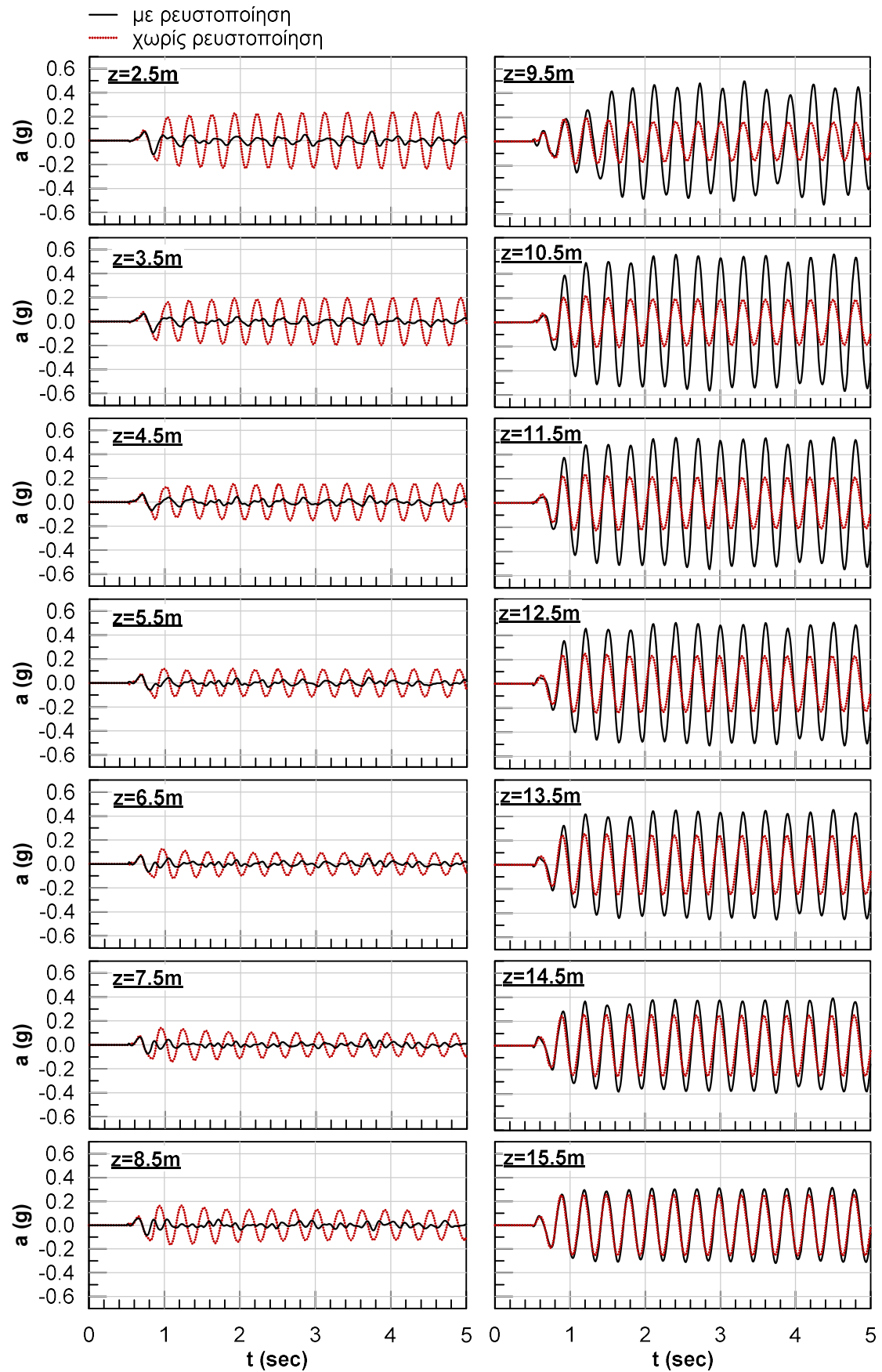
$z(m)$	$t^{(1)} (sec)$	$t_L^{(2)} (sec)$	N_L
8.75	0.87	0.37	1.23
9.25	1.09	0.59	1.97
9.75	0.87	0.37	1.23

⁽¹⁾Χρονική στιγμή που παρατηρείται η ρευστοποίηση, σύμφωνα με τον οριζόντιο άξονα των διαγραμμάτων του **Σχήματος 3.11**.

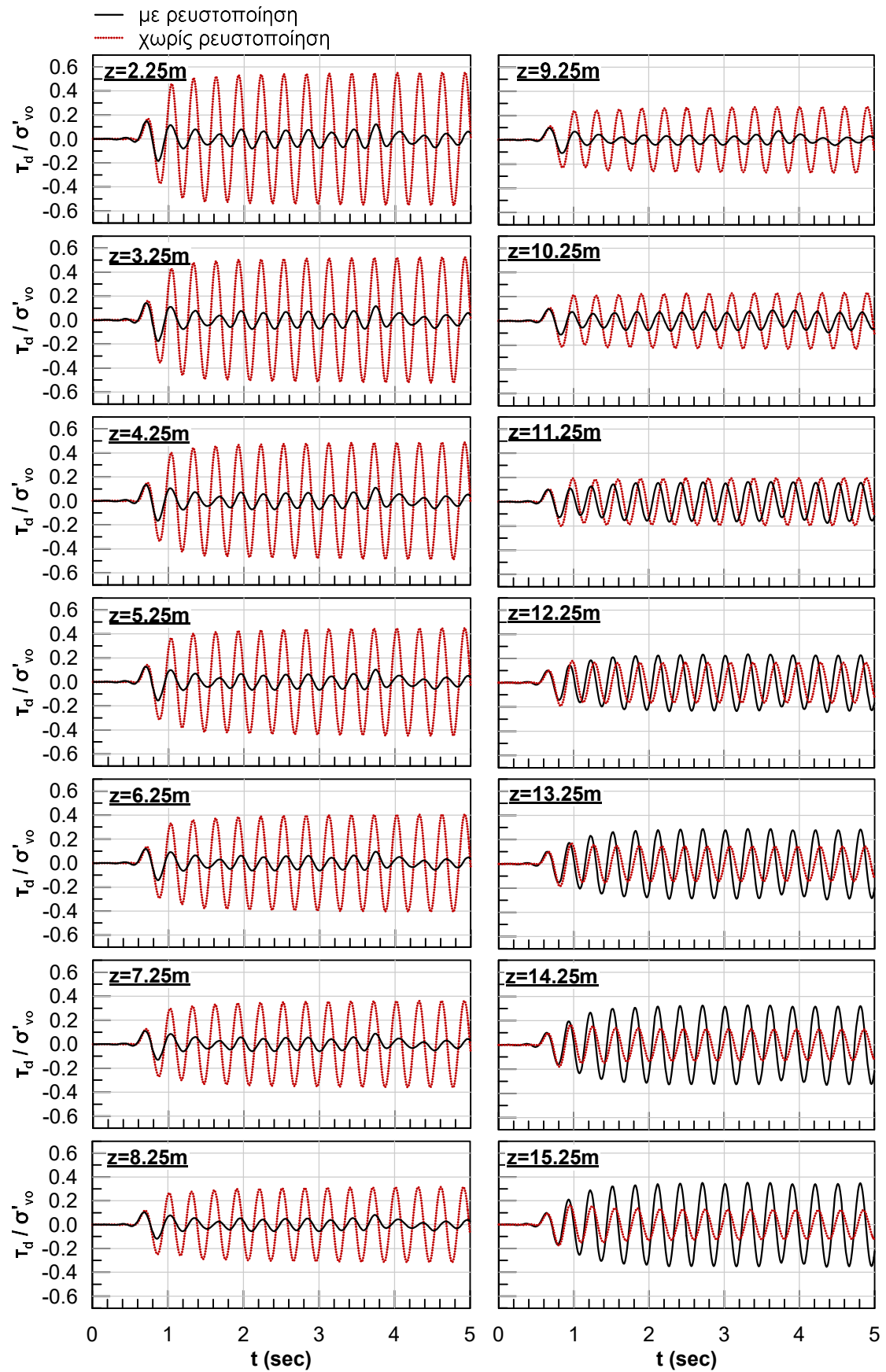
⁽²⁾Οι χρονικές στιγμές t_L μετρούνται από την έναρξη της δόνησης, δηλαδή μετά την παρέλευση του «ήσυχου» χρονικού διαστήματος 0.5 sec.

Για πληρέστερη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αναλύσεων, αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και για τις δύο αριθμητικές αναλύσεις στα **Σχήματα 3.12** και **3.13**. Πιο συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 3.12** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης σε διάφορα βάθη για την περίπτωση της εδαφικής στήλης τόσο με όσο και χωρίς τη

ρευστοποιήσιμη στρώση. Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 3.13** απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες του λόγου $CSR=\tau_d/\sigma'_{vo}$ σε διάφορα βάθη για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις.



Σχήμα 3.12: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης σε διάφορα βάθη του αμμώδους στρώματος για την περίπτωση της εδαφικής στήλης τόσο με όσο και χωρίς ρευστοποιήσιμη στρώση.



Σχήμα 3.13: Χρονοιστορίες λόγου τ_d/σ'_{vo} σε διάφορα βάθη του αμμώδους στρώματος για την περίπτωση εδαφικής στήλης τόσο με όσο και χωρίς ρευστοποιήσιμη στρώση.

Όπως φαίνεται στα **Σχήματα 3.12** και **3.13**, το εύρος τόσο της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης όσο και του συντελεστή σεισμικής δράσης CSR παραμένει σταθερό με το χρόνο στην περίπτωση της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης. Ωστόσο, για την περίπτωση της εδαφικής στήλης με ρευστοποιήσιμη ζώνη πάχους $H_L=2\text{m}$, φαίνεται ότι οι μεταβολές στα χαρακτηριστικά του συστήματος λόγω της ρευστοποίησης επηρεάζουν σημαντικά την ένταση της επιβαλλόμενης σεισμικής δράσης. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται από το **Σχήμα 3.12**, η ρευστοποίηση του ενδιάμεσου αμμώδους στρώματος που βρίσκεται σε βάθος από 8 έως 10m, οδήγησε σε δραστική απομείωση των επιταχύνσεων στα υπερκείμενα στρώματα (με $z < 8\text{ m}$), ενώ ενίσχυσε τις επιταχύνσεις στα υποκείμενα στρώματα (με $z > 10\text{ m}$) σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης. Η επιρροή της ρευστοποίησης στις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων έγινε αισθητή μετά τη χρονική στιγμή της ρευστοποίησης $t \approx 1\text{ sec}$ (περιλαμβάνονται τα 0.5s ηρεμίας), αλλά είχε αρχίσει ήδη να λαμβάνει χώρα από τη χρονική στιγμή $t=0.8\text{ sec}$, κατά την οποία είχαν αναπτυχθεί υψηλοί λόγοι υπερπίεσης πόρων στο ρευστοποιήσιμο στρώμα (**Σχήμα 3.11**).

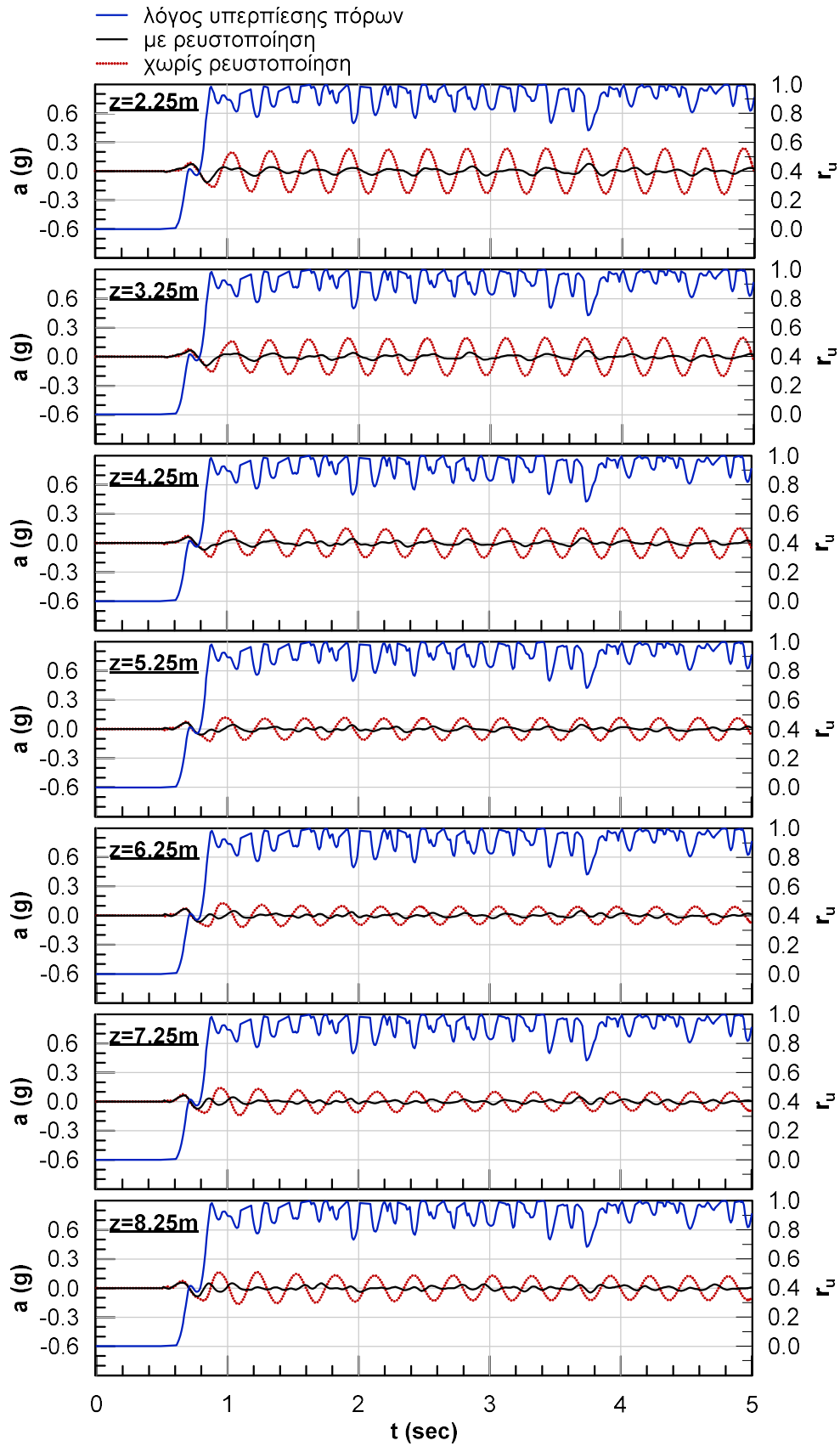
Όσον αφορά τις χρονοϊστορίες του λόγου $CSR = \tau_d / \sigma'_{vo}$ που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.13**, φαίνεται ότι η ρευστοποίηση του ενδιάμεσου αμμώδους στρώματος τις επηρέασε επίσης σημαντικά. Με μια αρχική παρατήρηση των χρονοϊστοριών στα διάφορα βάθη, γίνεται φανερό ότι στα στρώματα που υπόκεινται του ρευστοποιήσιμου (με $z > 12\text{ m}$) ο λόγος τ_d / σ'_{vo} ενισχύεται, ενώ στα υπερκείμενα αλλά και στο ίδιο το ρευστοποιήσιμο στρώμα ο λόγος τ_d / σ'_{vo} απομειώνεται. Αυτές οι μεταβολές παρατηρούνται ήδη από τη χρονική στιγμή $t=0.8\text{ sec}$, για την οποία όπως προαναφέρθηκε έχουν αναπτυχθεί υψηλοί λόγοι υπερπίεσης πόρων στο ρευστοποιήσιμο στρώμα. Αναμενόμενη είναι και η αύξηση της περιόδου στις χρονοϊστορίες του λόγου $CSR = \tau_d / \sigma'_{vo}$ σε τιμές $T > 0.3\text{ sec}$, η οποία παρατηρείται αμέσως μετά τη στιγμή της ρευστοποίησης.

Τόσο από τις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων όσο και από τις χρονοϊστορίες του λόγου τ_d / σ'_{vo} γίνεται φανερό ότι η ρευστοποίηση επηρεάζει δραστικά τη σεισμική απόκριση του συστήματος. Η ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων στη ρευστοποιήσιμη ζώνη μειώνει τη ταχύτητα διάδοσής τους στο ρευστοποιήσιμο στρώμα ($V_{sl} < V_{so}$). Έτσι, η εκδήλωση ρευστοποίησης στη ζώνη αυτή, την καθιστά πιο εύκαμπτη (όπως ένα είδος «φυσικής» σεισμικής μόνωσης) επηρεάζοντας επομένως την ταλάντωση ολόκληρης της εδαφικής στήλης, τόσο επάνω όσο και κάτω από την ρευστοποιήσιμη στρώση. Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι τα χαρακτηριστικά του ταλαντούμενου συστήματος μεταβάλλονται σημαντικά με το χρόνο, καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Το γεγονός αυτό καθιστά ιδιαίτερα

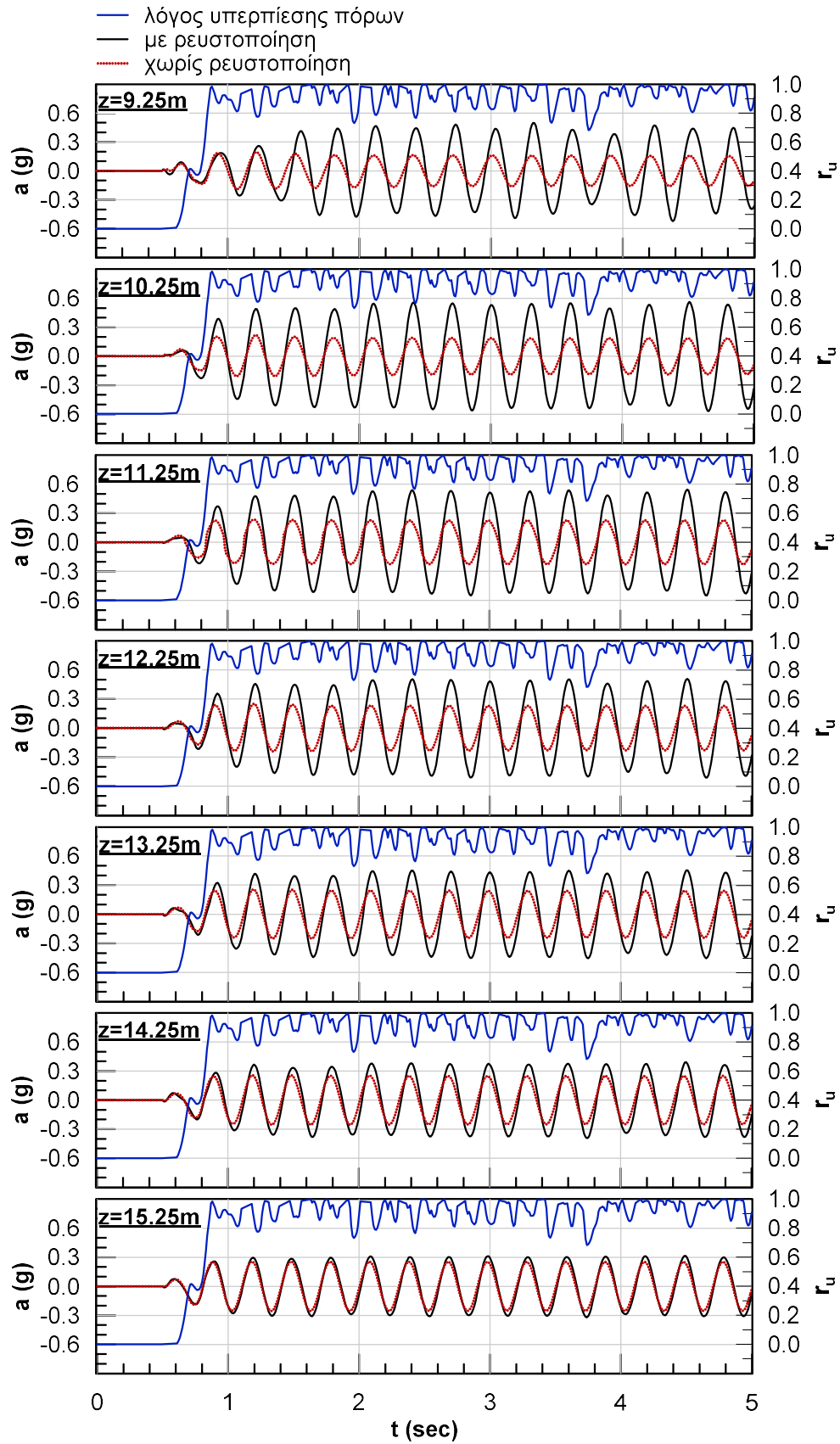
δύσκολη την λεπτομερή ερμηνεία και την απλοποιημένη προσομοίωση (με αναλυτικές μεθόδους) της παρατηρούμενης σεισμικής απόκρισης της εδαφικής στήλης.

Παρ' όλα αυτά, κρίθηκε αναγκαία η προσπάθεια για μια πληρέστερη αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων. Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα των **Σχημάτων 3.14 - 3.17** ώστε να δειχθεί με πιο άμεσο τρόπο η επιρροή της ρευστοποίησης στη σεισμική απόκριση του συστήματος. Συγκεκριμένα, στα **Σχήματα 3.14 και 3.15** παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων (για τις περιπτώσεις με και χωρίς ρευστοποίηση) και του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u σε διάφορα βάθη του αμμώδους στρώματος, ενώ στα **Σχήματα 3.16 και 3.17** παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες του λόγου $CSR = \tau_d / \sigma'_{vo}$ και του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u . Με αυτόν τον τρόπο συσχετίζονται οι μεταβολές που συμβαίνουν στην επιτάχυνση και τη διατμητική τάση (σε διάφορα βάθη της εδαφικής στήλης) με την εξέλιξη της υπερπίεσης πόρων στο ρευστοποιήσιμο στρώμα. Διευκρινίζεται ότι για όλα βάθη του αμμώδους στρώματος, χρησιμοποιήθηκε ως αντιπροσωπευτική η χρονοϊστορία r_u του βάθους $z=8.75\text{m}$.

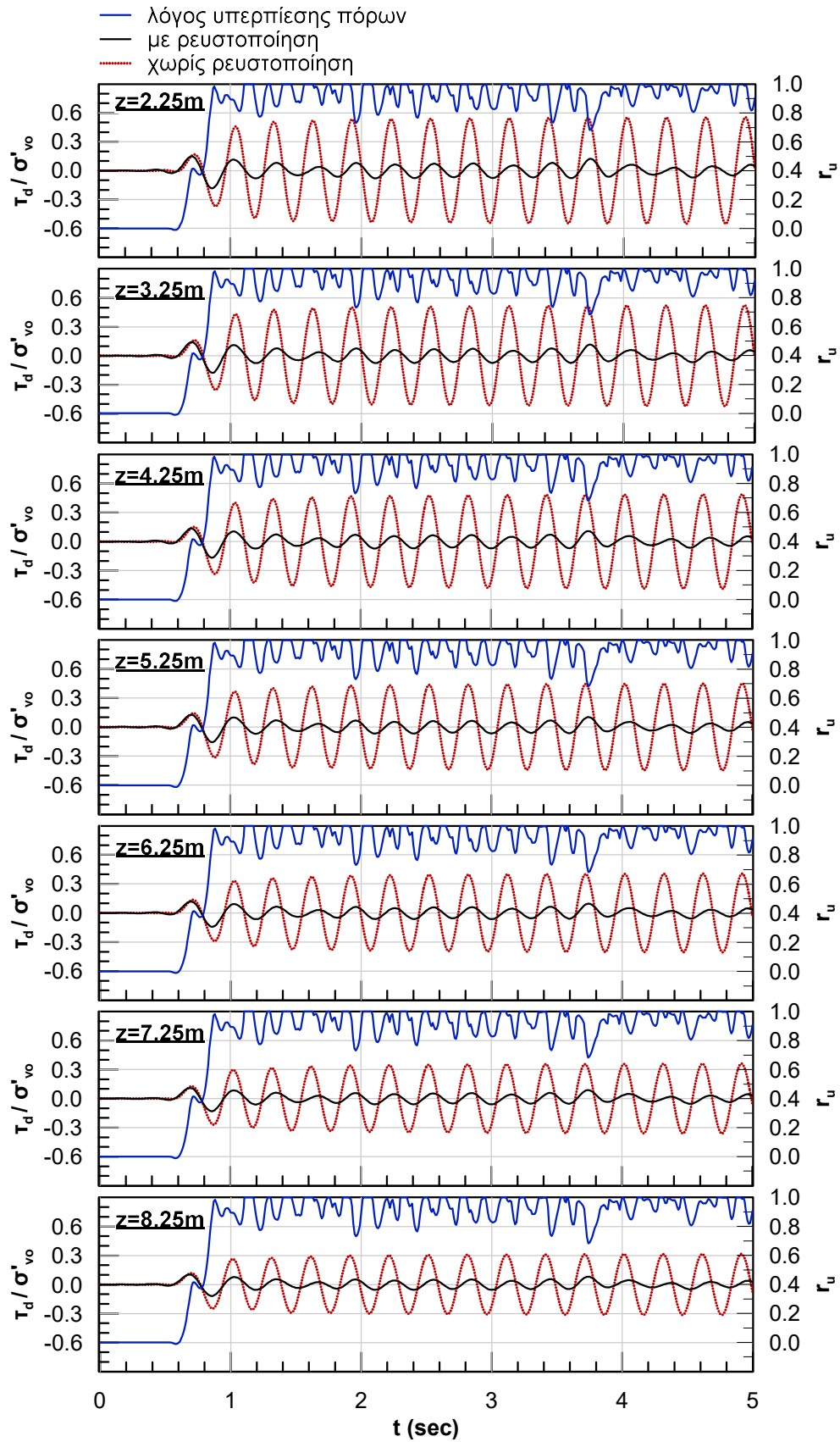
Από τα αποτελέσματα των δύο αριθμητικών αναλύσεων φαίνεται ότι το εύρος του λόγου τ_d / σ'_{vo} , και επομένως ο συντελεστής σεισμικής δράσης CSR, παραμένει σταθερός με το χρόνο στην περίπτωση της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης και μεταβάλλεται με το χρόνο στην περίπτωση της εδαφικής στήλης με ρευστοποίηση. Με πιο απλά λόγια, παρατηρείται ότι η κατανομή του CSR με το βάθος μεταβάλλεται με το χρόνο μόνο για το εδαφικό προφίλ, στο οποίο παρεμβάλλεται το ρευστοποιήσιμο στρώμα. Η διαφοροποίηση αυτή μπορεί να δειχθεί πιο άμεσα αν κατασκευαστούν οι χρονοϊστορίες του μειωτικού συντελεστή r_d σε διάφορα βάθη του αμμώδους στρώματος, διαιρώντας τις χρονοϊστορίες του λόγου τ_d / σ'_{vo} με την τιμή του $CSR_{(z=0)}$ στην επιφάνεια του εδάφους, σύμφωνα με την Εξίσωση (3.3) της Ενότητας 3.2. Στα **Σχήματα 3.18 και 3.19** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες του μειωτικού συντελεστή r_d για τα βάθη $z = 2.25-8.25\text{ m}$ και $z = 9.25-15.25\text{ m}$ αντίστοιχα, των δύο εξεταζόμενων περιπτώσεων εδαφικής στήλης με και χωρίς ρευστοποίηση. Οι χρονοϊστορίες του r_d για τη μη-ρευστοποιήσιμη εδαφική στήλη προκύπτουν από τη διαίρεση των χρονοϊστοριών του λόγου τ_d / σ'_{vo} με την τιμή $CSR_{(z=0)} = 0.571$ (**Σχήμα 3.10**), ενώ οι χρονοϊστορίες του r_d για την εδαφική στήλη με τη ρευστοποιήσιμη ζώνη προκύπτουν από διαίρεση των αντίστοιχων χρονοϊστοριών με την τιμή $CSR_{(z=0)} = 0.192$ (**Σχήμα 3.10**).



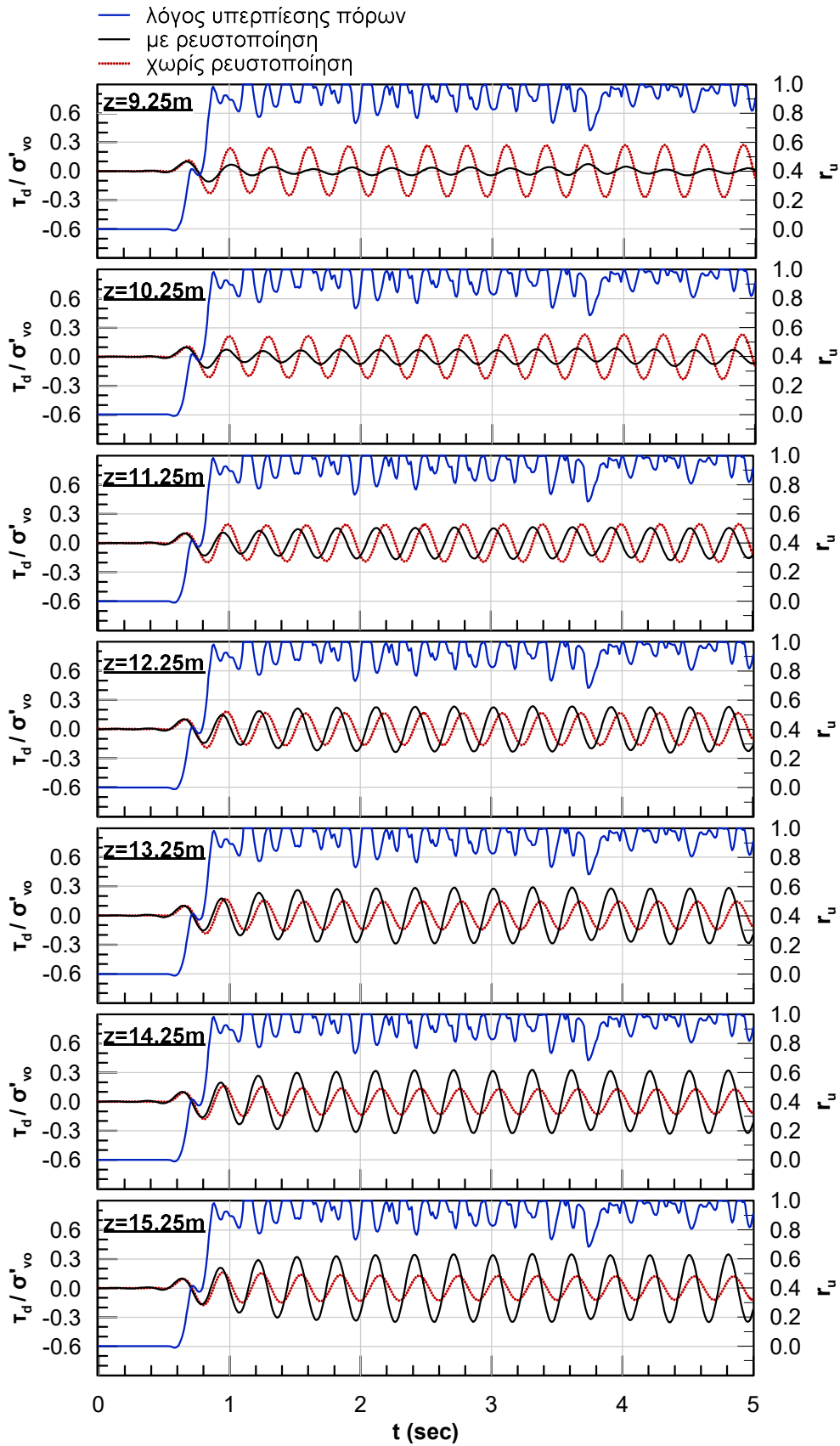
Σχήμα 3.14: Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης και του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u για τα βάθη $z=2.25-8.25$ m του αμμώδους στρώματος.



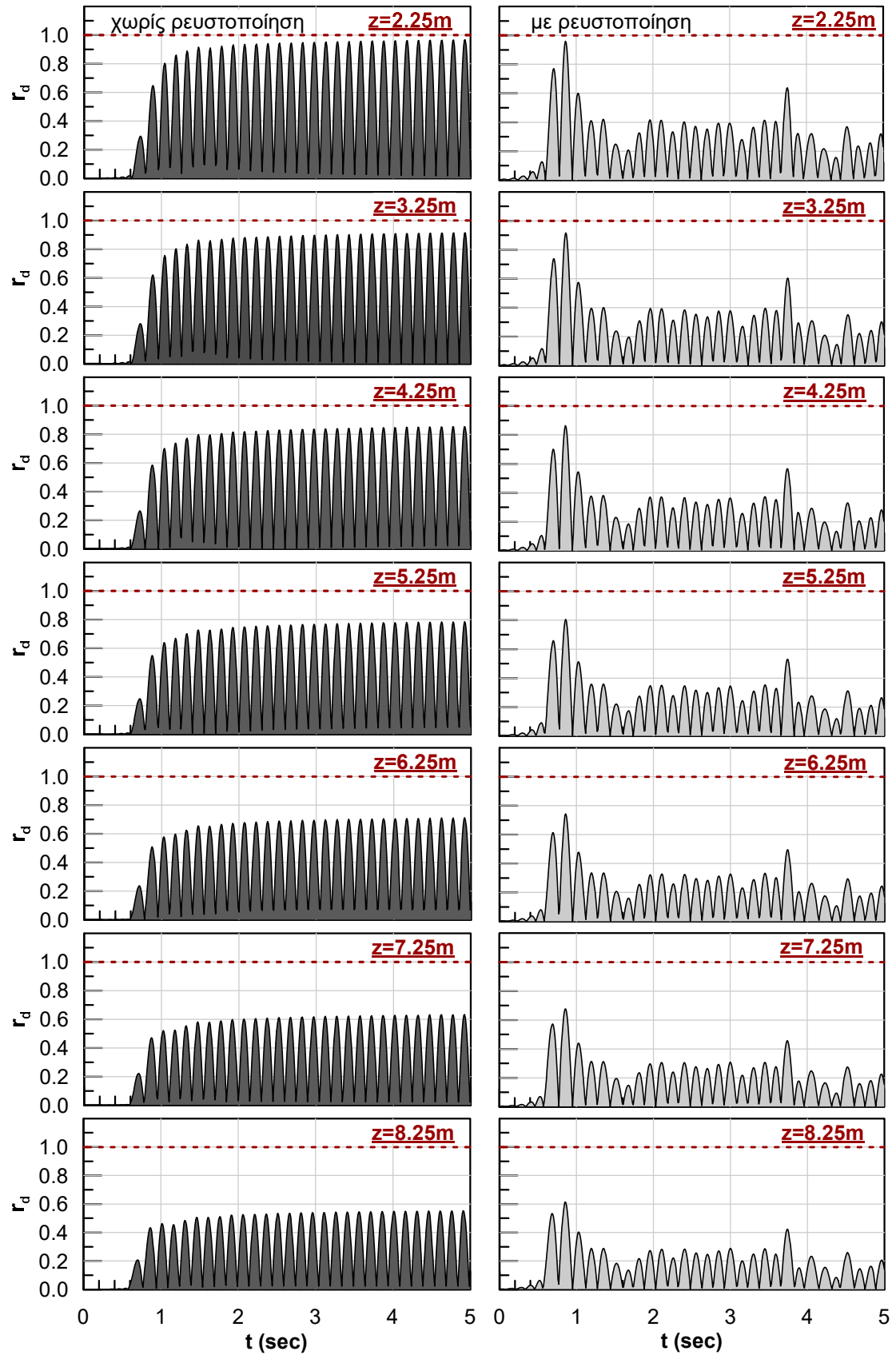
Σχήμα 3.15: Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης και του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u για τα βάθη $z=9.25-15.25\text{m}$ του αμώδους στρώματος.



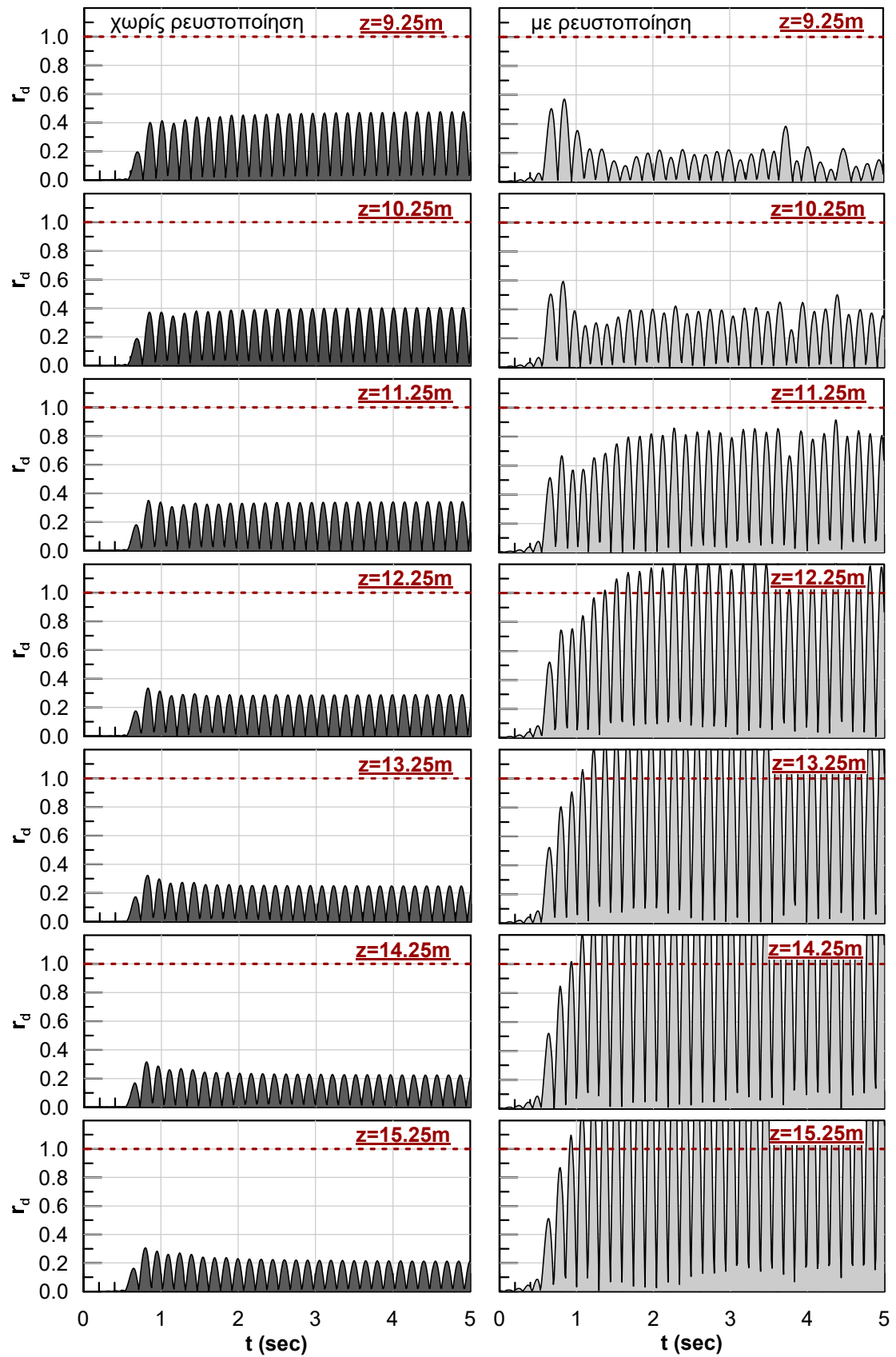
Σχήμα 3.16: Χρονοϊστορίες του λόγου τ_d/σ'_{vo} και του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u για τα βάθη $z=2.25-8.25\text{m}$ του αμμώδους στρώματος.



Σχήμα 3.17: Χρονοϊστορίες του λόγου τ_d/σ'_{vo} και του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u για τα βάθη $z=9.25-15.25\text{m}$ του αμώδους στρώματος.



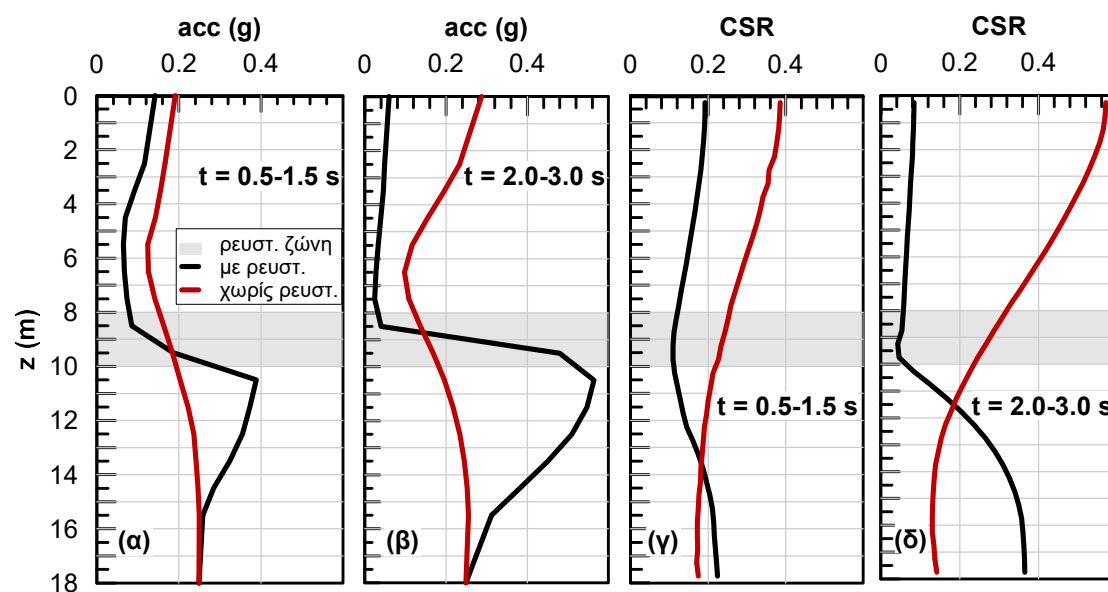
Σχήμα 3.18: Χρονοϊστορίες του μειωτικού συντελεστή r_d στα ανώτερα βάθη ($z=2.25-8.25\text{m}$) του αμμώδους στρώματος για την περίπτωση εδαφικής στήλης με ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L=2\text{m}$ και της εδαφικής στήλης χωρίς ρευστοποιήσιμη ζώνη.



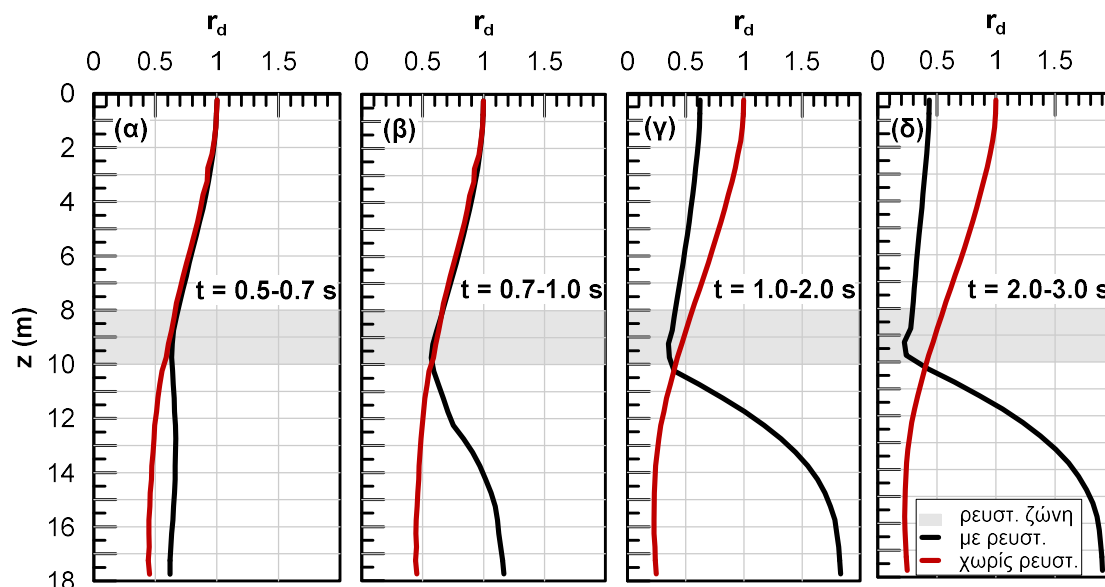
Σχήμα 3.19: Χρονοϊστορίες του μειωτικού συντελεστή r_d στα κατώτερα βάθη ($z=9.25-15.25\text{m}$) του αμμώδους στρώματος για την περίπτωση εδαφικής στήλης με ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L=2\text{m}$ και της εδαφικής στήλης χωρίς ρευστοποιήσιμη ζώνη.

Στα **Σχήματα 3.18** και **3.19** διαπιστώνεται ότι ο μειωτικός συντελεστής r_d στην περίπτωση της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης παραμένει πρακτικά σταθερός με το χρόνο και μειώνεται συστηματικά με το βάθος όπως ήταν αναμενόμενο. Αντίθετα, στην περίπτωση της εδαφικής στήλης στην οποία παρεμβάλλεται η ρευστοποιήσιμη ζώνη πάχους $H_L=2\text{m}$, οι τιμές του r_d δεν μεταβάλλονται συστηματικά με το βάθος και δεν παραμένουν σταθερές με το χρόνο. Με μια πιο προσεκτική ματιά στις χρονοϊστορίες του r_d για την εδαφική στήλη με το ρευστοποιήσιμο στρώμα, διαπιστώνεται ότι οι τιμές του μεταβάλλονται σημαντικά στο χρονικό διάστημα $t = 0.5-1.5 \text{ sec}$ κατά τη διάρκεια του οποίου συμβαίνει η ρευστοποίηση, ενώ σταθεροποιούνται στο χρονικό διάστημα $t = 2-3 \text{ sec}$. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε η περαιτέρω ερμηνεία των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων να εστιασθεί σε επιμέρους χρονικά διαστήματα. Σε όλες τις περιπτώσεις παρουσιάζονται αποτελέσματα από τις αναλύσεις της εδαφικής στήλης με και χωρίς ρευστοποιήσιμη ζώνη.

Συγκεκριμένα, εξετάζονται ακολούθως οι μεταβολές στις μέγιστες τιμές της επιτάχυνσης (**Σχήματα 3.20α** και **3.20β**), του συντελεστή σεισμικής δράσης CSR (**Σχήματα 3.20γ** και **3.20δ**) με το βάθος για τα χρονικά διαστήματα $t = 0.5-1.5 \text{ sec}$ και $t = 2-3 \text{ sec}$. Τέλος, τα διαγράμματα μεταβολής του μειωτικού συντελεστή r_d με το βάθος (**Σχήματα 3.21, 3.22**) παρουσιάζονται για περισσότερα χρονικά διαστήματα ($t = 0.5-0.7 \text{ s}$, $t = 0.7-1.0 \text{ s}$, $t = 1.0-2.0 \text{ s}$ και $t = 2.0-3.0 \text{ s}$). Η μελέτη της εξέλιξης του r_d κρίθηκε αναγκαίο να γίνει σε συντομότερα χρονικά διαστήματα, ώστε να δειχθεί με πιο παραστατικό τρόπο η επιρροή της ρευστοποίησης στην χρονική μεταβολή της σεισμικής δράσης.



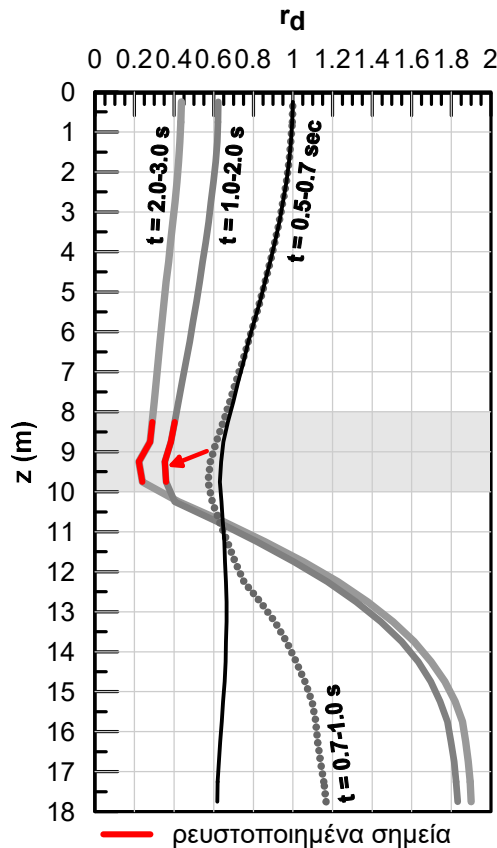
Σχήμα 3.20: Μεταβολή με το βάθος (α) της μέγιστης επιτάχυνσης στο χρονικό διάστημα $t = 0.5-1.5 \text{ sec}$, (β) της μέγιστης επιτάχυνσης στο χρονικό διάστημα $t = 2-3 \text{ sec}$, (γ) του CSR στο χρονικό διάστημα $t = 0.5-1.5 \text{ sec}$, (δ) του CSR στο χρονικό διάστημα $t = 2-3 \text{ sec}$.



Σχήμα 3.21: Μεταβολή με το βάθος του r_d στο χρονικό διάστημα (α) $t = 0.5-0.7$ sec, (β) $t = 0.7-1.0$ s, (γ) $t = 1.0-2.0$ s και (δ) $t = 2.0-3.0$ sec.

Μεταξύ των διαγραμμάτων μεταβολής της επιτάχυνσης, του συντελεστή σεισμικής δράσης CSR και του μειωτικού συντελεστή r_d (Σχήματα 3.20 και 3.21) παρατηρείται συμβατότητα. Από το Σχήμα 3.20α διαπιστώνεται ότι η μεταβολή της επιτάχυνσης με το βάθος διαφοροποιείται για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις (εδαφική στήλη με και χωρίς ρευστοποιήσιμη ζώνη). Μάλιστα, το μέσον του ρευστοποιήσιμου στρώματος ($z \approx 9$ m) αποτελεί ένα καθοριστικό σημείο για αυτή τη διαφοροποίηση στη μεταβολή της επιτάχυνσης. Συγκεκριμένα, πάνω από το μέσον του ρευστοποιήσιμου στρώματος, δηλαδή για $z < 9$ m, οι επιταχύνσεις απομειώνονται, ενώ κάτω από αυτό, δηλαδή για $z > 9$ m, οι επιταχύνσεις ενισχύονται. Καθώς εξελίσσεται η δόνηση από το χρονικό διάστημα $t = 0.5 - 1.5$ sec στο $t = 2 - 3$ sec (Σχήμα 3.20β), φαίνεται ότι αυτή η διαφοροποίηση εντείνεται, με την μαύρη καμπύλη μεταβολής της επιτάχυνσης (που αντιστοιχεί στην εδαφική στήλη με ρευστοποιήσιμη ζώνη) να απομακρύνεται περισσότερο από την κόκκινη καμπύλη αναφοράς (που αντιστοιχεί στην εδαφική στήλη χωρίς ρευστοποιήσιμη ζώνη). Ανάλογη τάση με αυτήν που περιεγράφηκε για την επιτάχυνση, ακολουθούν και οι καμπύλες μεταβολής του CSR με το βάθος (Σχήμα 3.20γ,δ). Όπως φαίνεται, οι τιμές του CSR απομειώνονται στα σημεία που βρίσκονται πάνω από το μέσον του ρευστοποιήσιμου στρώματος, δηλαδή για $z < 9$ m, ενώ ενισχύονται για τα σημεία που βρίσκονται κάτω από αυτό, δηλαδή για $z > 9$ m. Αντίστοιχα και το r_d , φαίνεται ότι μεταβάλλεται με το χρόνο, λαμβάνοντας τιμές μικρότερες από τις αντίστοιχες της ανάλυσης χωρίς ρευστοποίηση για $z < 10$ m και μεγαλύτερες για $z > 10$ m. Συγκεκριμένα, η χρονική εξέλιξη του μειωτικού συντελεστή r_d , φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από την ανάπτυξη υψηλού λόγου

υπερπίεσης πόρων και την επακόλουθη ρευστοποίηση στο αμμώδες, ρευστοποιήσιμο στρώμα. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο **Σχήμα 3.22**, μετά τη ρευστοποίηση του ενδιάμεσου στρώματος περί τη χρονική στιγμή $t = 1 \text{ sec}$, η κατανομή της σεισμικής δράσης άλλαξε σε μεγάλο βαθμό. Το κόκκινο βέλος δείχνει τη δραστική μείωση του r_d στο ρευστοποιήσιμο στρώμα μετά την εκδήλωση φαινομένων ρευστοποίησης στα συγκεκριμένα βάθη.



Σχήμα 3.22: Χρονική εξέλιξη της κατανομής του r_d με το βάθος στα χρονικά διαστήματα $t = 0.5-0.7 \text{ s}$, $t = 0.7-1.0 \text{ s}$, $t = 1.0-2.0 \text{ s}$, $t = 2.0-3.0 \text{ s}$ και απεικόνιση των ρευστοποιημένων σημείων στο διάγραμμα.

Όσον αφορά την απομείωση του r_d (της επιτάχυνσης και του CSR) στα ανώτερα στρώματα, αυτή οφείλεται στην ανάπτυξη υψηλής υπερπίεσης πόρων και στη ρευστοποίηση του ενδιάμεσου στρώματος πάχους $H_L = 2 \text{ m}$. Η ρευστοποίηση του ενδιάμεσου στρώματος λειτούργησε δηλαδή σαν «φυσική» σεισμική μόνωση και παρεμπόδισε τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στα ανώτερα στρώματα, μειώνοντας έτσι την επιβαλλόμενη σεισμική δράση σε αυτά. Όσον αφορά την ενίσχυση των επιταχύνσεων, του CSR και ακολούθως και του r_d , στα στρώματα που υπόκεινται του ρευστοποιήσιμου, ενδεχομένως να οφείλεται στη μείωση της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο ρευστοποιημένο στρώμα $V_{sL} < V_s$. Καθώς τα σεισμικά κύματα προσπίπτουν από το μη-ρευστοποιήσιμο (V_s) στο

ρευστοποιημένο αμμώδες στρώμα ($V_{sL} < V_s$), ανακλώνται και ενισχύουν την επιβαλλόμενη επιτάχυνση. Μια εναλλακτική εξήγηση για την ενίσχυση της σεισμικής δράσης στα κατώτερα στρώματα μπορεί να δοθεί αν ληφθεί υπόψη η αύξηση της ιδιοπεριόδου της εδαφικής στήλης λόγω της ρευστοποίησης. Η αυξημένη ιδιοπερίοδος του συστήματος πιθανώς να έλαβε κάποια τιμή πλησιέστερη στο $T = 0.30 \text{ sec}$, δηλαδή στην περίοδο της διέγερσης. Έτσι, για το ταλαντούμενο σύστημα προκύπτει $T/T_{exc} \rightarrow 1$ και οδηγείται στο συντονισμό. Βέβαια, οι δύο ανωτέρω ερμηνείες για την ενίσχυση της σεισμικής δράσης κάτω από το ρευστοποιημένο στρώμα δεν είναι πλήρως τεκμηριωμένες. Εξάλλου, το σύστημα αποτελεί έναν πολυβάθμιο ταλαντωτή με χρονικά μεταβαλλόμενες ιδιότητες και είναι ιδιαίτερα δύσκολη η ακριβής ερμηνεία της σεισμικής του απόκρισης.

3.3.2 Εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L

Πέρα από την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης με ρευστοποίηση, εξ' ίσου ουσιαστικό βήμα για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι η εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L . Για να εκτιμηθεί ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L , είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του CRR, αλλά και του CSR.

Ο υπολογισμός του **συντελεστή αντίστασης έναντι ρευστοποίησης CRR** μπορεί να γίνει, με χρήση της εμπειρικής Εξίσωσης (3.12) για την εκτίμηση του αριθμού χτύπων SPT, ήτοι:

$$(N_1)_{60CS} = 46 \cdot D_r^2 = 46 \cdot (0.30)^2 = 4.14$$

και στη συνέχεια από το εμπειρικό διάγραμμα του **Σχήματος 3.3** από όπου προκύπτει ότι $CRR=0.081$.

Όσον αφορά τον υπολογισμό του **συντελεστή σεισμικής δράσης CSR**, αυτός μπορεί να γίνει με διαφορετικούς τρόπους. Οι εναλλακτικοί τρόποι υπολογισμού του CSR, και επομένως και του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης, είναι οι εξής:

i. Boulangier & Idriss (2014)

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Boulangier & Idriss (2014), το CSR μπορεί να εκτιμηθεί από την τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης α_{max} στην επιφάνεια του εδάφους, μέσω των

$$\text{εξισώσεων } CSR = \frac{\tau_d}{\sigma'_{vo}} \text{ και } \tau_d = \frac{M_w - 1}{10} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \sigma_{vo} \cdot r_d \text{ (για } M_w=7.5) \text{ που παρουσιάστηκαν}$$

στην Ενότητα 3.2. Η μέγιστη επιτάχυνση α_{max} στην επιφάνεια του εδάφους λαμβάνεται από την ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση, ενώ η τιμή του μειωτικού συντελεστή r_d που

χρησιμοποιείται είναι αυτή που προτείνεται στη μεθοδολογία των (Boulangier & Idriss 2014) και για $z = 9\text{m}$ (μέσον του ρευστοποιήσιμου στρώματος) και ισούται με $r_d = 0.90$.

Ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση. Διευκρινίζεται ότι για την ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση δεν χρειάζεται η απομείωση με το συντελεστή $(M_w - 1)/10$, διότι η χρονοϊστορία της επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους έχει πρακτικά σταθερό εύρος $\alpha_{\max} = 0.303g$. Έτσι, ο συντελεστής σεισμικής δράσης προκύπτει ίσος με $CSR = 0.545$ και ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης προκύπτει ίσος με $FS_L \approx 0.15$.

ii. *Boulangier & Idriss (2014) με r_d από αριθμητικές αναλύσεις FLAC*

Η παραπάνω μεθοδολογία των Boulangier & Idriss (2014) προτείνει την μεταβολή του μειωτικού συντελεστή r_d με το βάθος η οποία παρουσιάστηκε στο **Σχήμα 3.1** της Ενότητας 3.2. Ωστόσο, η κατανομή του r_d με το βάθος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το εξεταζόμενο εδαφικό προφίλ. Για το λόγο αυτό, μπορεί να γίνει μια επανεκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L , χρησιμοποιώντας τις τιμές του r_d που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης χωρίς ρευστοποίηση. Η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους λαμβάνεται από την ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση, $\alpha_{\max} = 0.303g$.

Μειωτικός συντελεστής r_d από ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση. Από την ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση προκύπτει ότι η τιμή του μειωτικού συντελεστή στο βάθος $z = 9.25\text{m}$ και για το χρονικό διάστημα $t = 2-3 \text{ sec}$ ισούται με $r_d \approx 0.485$. Έτσι, ο συντελεστής σεισμικής δράσης παίρνει την τιμή $CSR = 0.294$, ενώ ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης γίνεται ίσος με $FS_L = 0.28$.

iii. *Boulangier & Idriss (2014) με CSR από αριθμητικές αναλύσεις FLAC*

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Boulangier & Idriss (2014), το CSR μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από τις αριθμητικές αναλύσεις, όπως περιεγράφηκε αναλυτικά στην Ενότητα 3.2. Ο υπολογισμός του CSR μπορεί να γίνεται είτε από την αριθμητική ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση και επισημαίνεται ότι αυτός ο τρόπος υπολογισμού του FS_L είναι ισοδύναμος με εκείνον (ii. *Boulangier & Idriss (2014) με r_d από αριθμητικές αναλύσεις FLAC*) που αναφέρθηκε προηγουμένως.

CSR από ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση. Από την ανάλυση της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης προκύπτει ότι ο συντελεστής σεισμικής είναι ίσος με $CSR = 0.277$ στο χρονικό διάστημα $t = 2-3 \text{ sec}$ και επομένως ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης προκύπτει ίσος με $FS_L \approx 0.29$.

iv. Υπολογισμός FS_L από N_L

Μια εναλλακτική προσέγγιση για την εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης μπορεί να γίνει μέσω των αριθμητικών αναλύσεων που προσομοιώνουν φαινόμενα ρευστοποίησης, όπως περιεγράφηκε στην Ενότητα 3.2 και

σύμφωνα με την εξίσωση: $FS_L = \frac{CSR}{CRR} = \left(\frac{N_L}{N} \right)^\beta$. Η τιμή της παραμέτρου $\beta=0.41-0.57$

μπορεί να ληφθεί ενδεικτικά από τις Kalogeraki & Zontanou (2014) με βάση τις αριθμητικές αναλύσεις τους για άμμο Nevada σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%-70\%$ (Πίνακας 3.3). Επιπλέον, οι κύκλοι φόρτισης N_L που απαιτούνται για ρευστοποίηση μπορούν να ληφθούν ως η ελάχιστη τιμή των κύκλων N_L που προέκυψαν για τα διάφορα βάθη του ρευστοποιήσιμου στρώματος (Πίνακας 3.5). Με βάση αυτήν την εκτίμηση ισχύει ότι $N_L=1.23$, ενώ ο αριθμός των πλήρων κύκλων φόρτισης είναι ίσος με $N=15$. Έτσι, ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης ισούται με $FS_L=0.24-0.36$.

Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης σύμφωνα με τα παραπάνω κυμαίνεται στο εύρος: $FS_L= 0.15-0.36$. Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι συντελεστές ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης που προέκυψαν από όλους τους τρόπους υπολογισμού.

Πίνακας 3.6: Εκτιμήσεις του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L .

Μέθοδοι Υπολογισμού	Επιλογή παραμέτρων	CSR	FS_L
i. <u>B & I</u>	α_{max} από ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση	0.545	0.15
ii. <u>B & I με r_d από FLAC</u>	α_{max} , r_d από ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση	0.294	0.28
iii. <u>B & I με CSR από FLAC</u>	CSR από ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση	0.277	0.29
iv. <u>Υπολογισμός του FS_L από το N_L</u>	-	-	0.24-0.36

Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας έναντι FS_L με τη μέθοδο των Boulanger & Idriss (2014) είναι γενικώς συμβατός με τον υπολογισμό του FS_L από τις αριθμητικές αναλύσεις υπό την έννοια ότι και οι δύο προσεγγίσεις προβλέπουν ότι η ρευστοποιήσιμη στρώση με σχετική πυκνότητα $D_r=30\%$ θα ρευστοποιηθεί για φόρτιση $N=15$ κύκλων με μέγιστη επιτάχυνση $\alpha_{max}=0.25g$. Παρόλα αυτά, όλες οι μέθοδοι εκτίμησης του FS_L έχουν ορισμένες αδυναμίες. Η μέθοδος εκτίμησης του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης μέσω του N_L από τις αριθμητικές αναλύσεις FLAC (Itasca 2011) είναι αρκετά ευαίσθητη στις τιμές της εμπειρικής παραμέτρου β . Όσον αφορά τις εκτιμήσεις του FS_L κατά (Boulanger & Idriss 2014), αυτές είναι πολύ ευαίσθητες στις παραδοχές για τον υπολογισμό του CSR, και συγκεκριμένα στην τιμή αναφοράς του α_{max} στην επιφάνεια του εδάφους ($z=0$), στην

μέγιστη επιβαλλόμενη διατμητική τάση τ_{max} καθώς και στην τιμή του $r_d(z)$. Επιπλέον, η κατανομή του μειωτικού συντελεστή r_d που προτείνεται στη μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014) αποδείχθηκε δραστικά διαφορετική από αυτή που υπολογίστηκε με τη βοήθεια των αριθμητικών αναλύσεων με όλους τους τρόπους που προσδιορίστηκε.

Έτσι, από τους διάφορους παραπάνω υπολογισμούς προτείνεται τελικά ο υπολογισμός του FS_L με βάση τα αποτελέσματα του FLAC να γίνεται ενδεικτικά με την εξίσωση

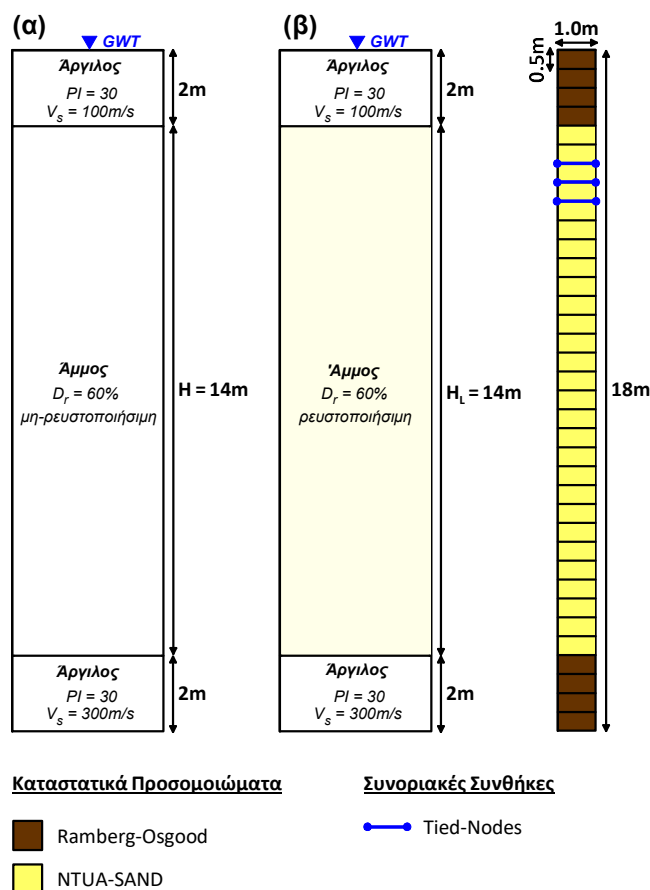
$$FS_L = \frac{CSR}{CRR} = \left(\frac{N_L}{N} \right)^\beta, \text{ για } \beta=0.41-0.57 \text{ και } N=15. \text{ Η εκτίμηση του } FS_L \text{ με την παραπάνω}$$

θεώρηση είναι ενδεικτική, καθώς δεν υπάρχει μονοσήμαντη αντιστοίχιση του FS_L^{FLAC} που προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις με το FS_L^{NSPT} που προκύπτει από την εμπειρική μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014) μέσω του αριθμού χτύπων N_{SPT} .

3.4 Ρευστοποίηση ομοιόμορφης στρώσης μεγάλου πάχους

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η περίπτωση ενός εδαφικού προφίλ, το οποίο περιλαμβάνει μια ρευστοποιήσιμη ομοιόμορφη στρώση καθαρής άμμου με μεγάλο πάχος $H_L=14m$ και σχετική πυκνότητα $D_r=60\%$. Πιο συγκεκριμένα, η εδαφική τομή που επιλέχθηκε αποτελεί μια ιδεατή τομή τριών στρώσεων υπό τον υδροφόρο ορίζοντα. Το συνολικό ύψος της εδαφικής στήλης είναι 18m, με τα δύο ανώτερα και τα δύο κατώτερα μέτρα να αποτελούνται από αργιλικό έδαφος, ενώ τα υπόλοιπα 14m αποτελούνται από αμμώδες ρευστοποιήσιμο έδαφος με σχετική πυκνότητα $D_r=60\%$. Προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή της ρευστοποίησης στη σεισμική απόκριση της εδαφικής στήλης και να ερμηνευθούν καλύτερα τα αποτελέσματα της ανάλυσης, εξετάστηκε και ένα δεύτερο εδαφικό προφίλ, όμοιο με το πρώτο ως προς την σύσταση του εδάφους, αλλά με μη-ρευστοποιήσιμη άμμο. Τα δύο αυτά εδαφικά προφίλ και ο κάρναβος Πεπερασμένων Διαφορών παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.23**.

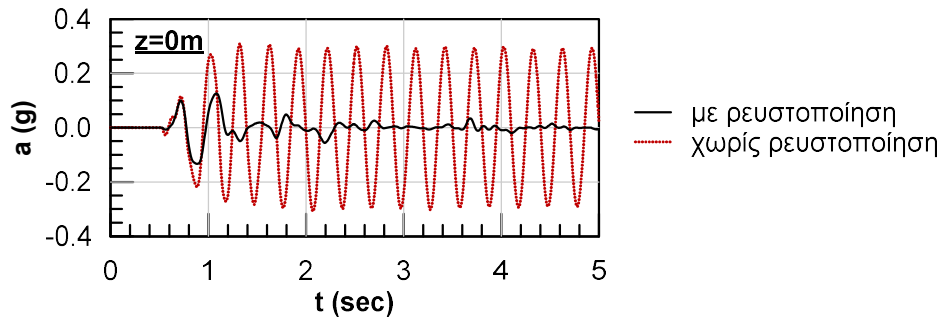
Οι τιμές των παραμέτρων που έχουν ληφθεί για τις διάφορες εδαφικές στρώσεις είναι αυτές που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3.3, με τη μόνη διαφοροποίηση ότι η σχετική πυκνότητα της άμμου για αυτές τις αναλύσεις λαμβάνει την τιμή $D_r = 60\%$. Στο Παράρτημα Α γίνεται λεπτομερής αναφορά στο αριθμητικό προσομοίωμα και την αριθμητική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις.



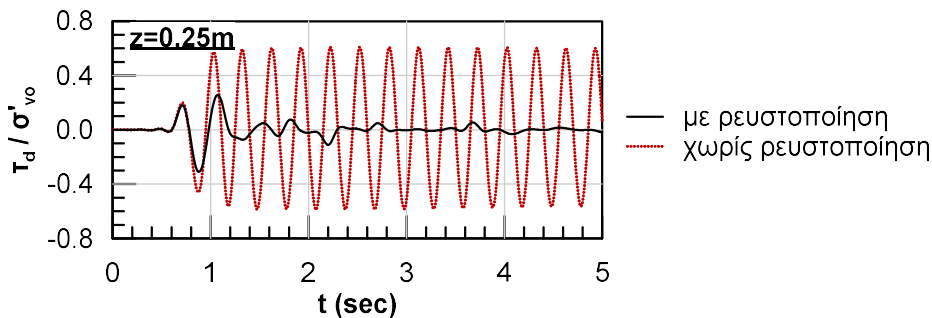
Σχήμα 3.23: Εδαφική τομή (α) για την αριθμητική προσομοίωση του μη-ρευστοποιήσιμου εδαφικού προφίλ (β) για την αριθμητική προσομοίωση του εδαφικού προφίλ με ρευστοποιήσιμο στρώμα πάχους $H_L=14\text{m}$ και και κάνναβος Πεπερασμένων Διαφορών.

Η διέγερση εισάγεται ως χρονοϊστορία επιβαλλόμενης επιτάχυνσης (Σχήμα 3.8, Ενότητα 3.3) στη βάση της εδαφικής στήλης. Πρόκειται για σταθερή ημιτονοειδή διέγερση 30 κύκλων περιόδου $T=0.30\text{ sec}$ και μέγιστης επιτάχυνσης $a_{\max}=0.25g$, εκ των οποίων ο πρώτος και ο τελευταίος είναι κύκλοι προσαρμογής. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων γίνεται μόνο για τους πρώτους 15 κύκλους της δόνησης, οι οποίοι αντιστοιχούν σε μέγεθος σεισμού $M_w=7.5$.

Τα αποτελέσματα των δύο αριθμητικών αναλύσεων παρουσιάζονται σε μορφή χρονοϊστοριών σε διάφορα βάθη της αμμώδους στρώσης ($z=2-15\text{m}$) αλλά και στην επιφάνεια του εδάφους ($z=0\text{m}$). Στα Σχήματα 3.24 και 3.25 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της επιτάχυνσης και του λόγου $CSR=\tau_d/\sigma'_{vo}$ στην επιφάνεια του εδάφους, για την περίπτωση της εδαφικής στήλης με ρευστοποιήσιμο στρώμα πάχους $H_L=14\text{m}$ και της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης αντίστοιχα.



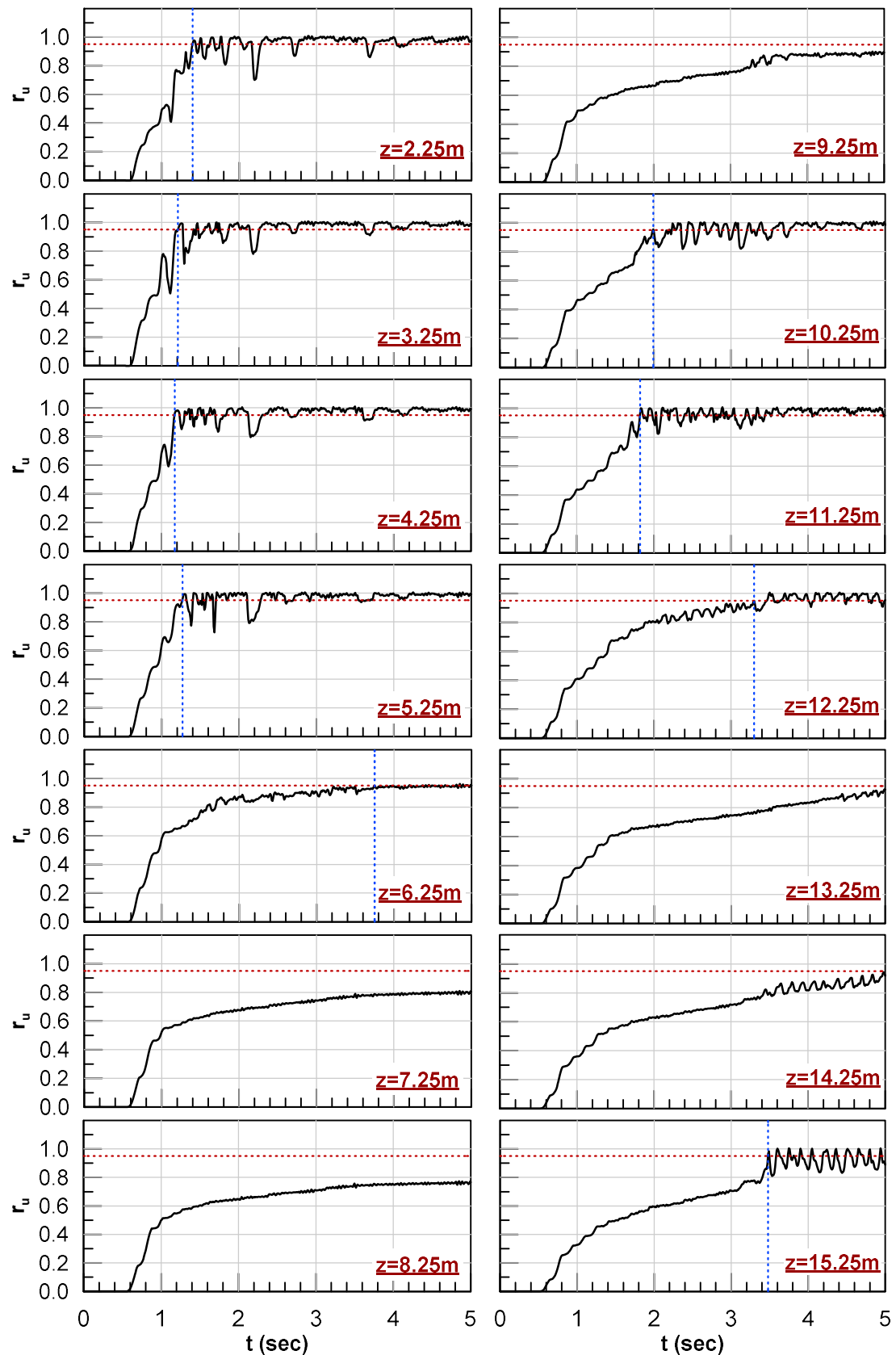
Σχήμα 3.24: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης στην επιφάνεια της εδαφικής στήλης με ρευστοποιήσιμο στρώμα πάχους $H_i=14\text{m}$ και της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης.



Σχήμα 3.25: Χρονοϊστορία λόγου τ_d/σ'_{vo} στην επιφάνεια της εδαφικής στήλης με ρευστοποιήσιμο στρώμα πάχους $H_i=14\text{m}$ της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης.

Όπως φαίνεται από τα **Σχήματα 3.24** και **3.25** η μέγιστη τιμή τόσο της επιτάχυνσης όσο και του συντελεστή σεισμικής δράσης CSR στην επιφάνεια της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης είναι σαφώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές στην επιφάνεια της εδαφικής στήλης με το ρευστοποιήσιμο στρώμα. Μάλιστα, παρατηρείται ότι οι χρονοϊστορίες του λόγου $\text{CSR}=\tau_d/\sigma'_{vo}$ στην επιφάνεια της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης έχουν διατηρηθεί αρμονικές με σταθερό εύρος και σταθερή περίοδο $T=0.30\text{sec}$. Αντίθετα, στην περίπτωση του εδαφικού προφίλ με το ρευστοποιήσιμο στρώμα μεγάλου πάχους, το εύρος μειώθηκε αισθητά μετά τη χρονική στιγμή $t=1.20\text{ sec}$. Η ερμηνεία γι' αυτήν τη διαφοροποίηση μπορεί να δοθεί με αναδρομή στις χρονοϊστορίες ανάπτυξης υπερπλίσεων πόρων στο ρευστοποιήσιμο στρώμα που βρίσκεται σε βάθος από 2 έως 16 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Για τον σκοπό αυτό, στο **Σχήμα 3.26** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες του λόγου υπερπλίσεων πόρων για τα βάθη $z = 2.25-15.25\text{ m}$. Με κόκκινη, οριζόντια διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η ελάχιστη τιμή του λόγου υπερπίεσης πόρων $r_u=0.95$, για την οποία θεωρείται ότι συμβαίνει ρευστοποίηση και αντίστοιχα με μπλε, κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η στιγμή έναρξης της ρευστοποίησης t_L , δηλαδή η χρονική στιγμή για την οποία ο λόγος υπερπίεσης πόρων έλαβε για πρώτη φορά τιμή μεγαλύτερη ή ίση του 0.95.



Σχήμα 3.26: Χρονοιστορίες ανάπτυξης του λόγου υπερπίεσης πόρων σε διάφορα βάθη του ρευστοποιήσιμου στρώματος με πάχος $H_i=14m$.

Όπως φαίνεται από τις χρονοϊστορίες ανάπτυξης του λόγου υπερπίεσης πόρων, η ρευστοποίηση δεν συνέβη ταυτόχρονα σε όλα τα βάθη. Επιπλέον, δεν συνέβη ρευστοποίηση σε όλα τα βάθη του στρώματος, καθώς στα βάθη $z=7.25\text{m}$, 8.25m , 9.25m , 13.25m και 14.25m ο λόγος υπερπίεσης πόρων που αναπτύχθηκε δεν έφτασε την τιμή $r_u=0.95$. Στον **Πίνακα 3.7** παρουσιάζονται οι χρονικές στιγμές της ρευστοποίησης t_L από την έναρξη της δόνησης, οι αντίστοιχοι κύκλοι φόρτισης N_L που απαιτούνται για ρευστοποίηση καθώς και οι μέγιστοι λόγοι υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$ που αναπτύχθηκαν στα διάφορα βάθη του αμμώδους στρώματος. Για τα μη-ρευστοποιημένα σημεία του αμμώδους στρώματος οι κύκλοι N_L υπολογίστηκαν με χρήση της Εξίσωσης (3.14β) για τις τιμές του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$ που φαίνονται στον **Πίνακα 3.7**.

Πίνακας 3.7: Χρόνος ρευστοποίησης t_L , αντίστοιχοι κύκλοι φόρτισης N_L και μέγιστος λόγος υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$ για διάφορα βάθη του ρευστοποιήσιμου στρώματος με $H_L=14\text{m}$.

$z(\text{m})$	$t^{(1)}(\text{sec})$	$t_L^{(2)}(\text{sec})$	N_L	$r_{u,max}$
2.25	1.40	0.90	3.0	1.00
3.25	1.21	0.71	2.4	1.00
4.25	1.17	0.67	2.2	1.00
5.25	1.27	0.77	2.6	1.00
6.25	3.75	3.25	10.9	0.96
7.25	-	-	(17.3) ⁽³⁾	0.81
8.25	-	-	(18.4) ⁽³⁾	0.77
9.25	-	-	(15.6) ⁽³⁾	0.90
10.25	1.99	1.49	5.0	1.00
11.25	1.82	1.32	4.4	1.00
12.25	3.30	2.80	9.3	1.00
13.25	-	-	(15.3) ⁽³⁾	0.93
14.25	-	-	(15.2) ⁽³⁾	0.94
15.25	3.48	2.98	9.9	1.00

⁽¹⁾Χρονική στιγμή που παρατηρείται η ρευστοποίηση, σύμφωνα με τον οριζόντιο άξονα των διαγραμμάτων του **Σχήματος 3.26**.

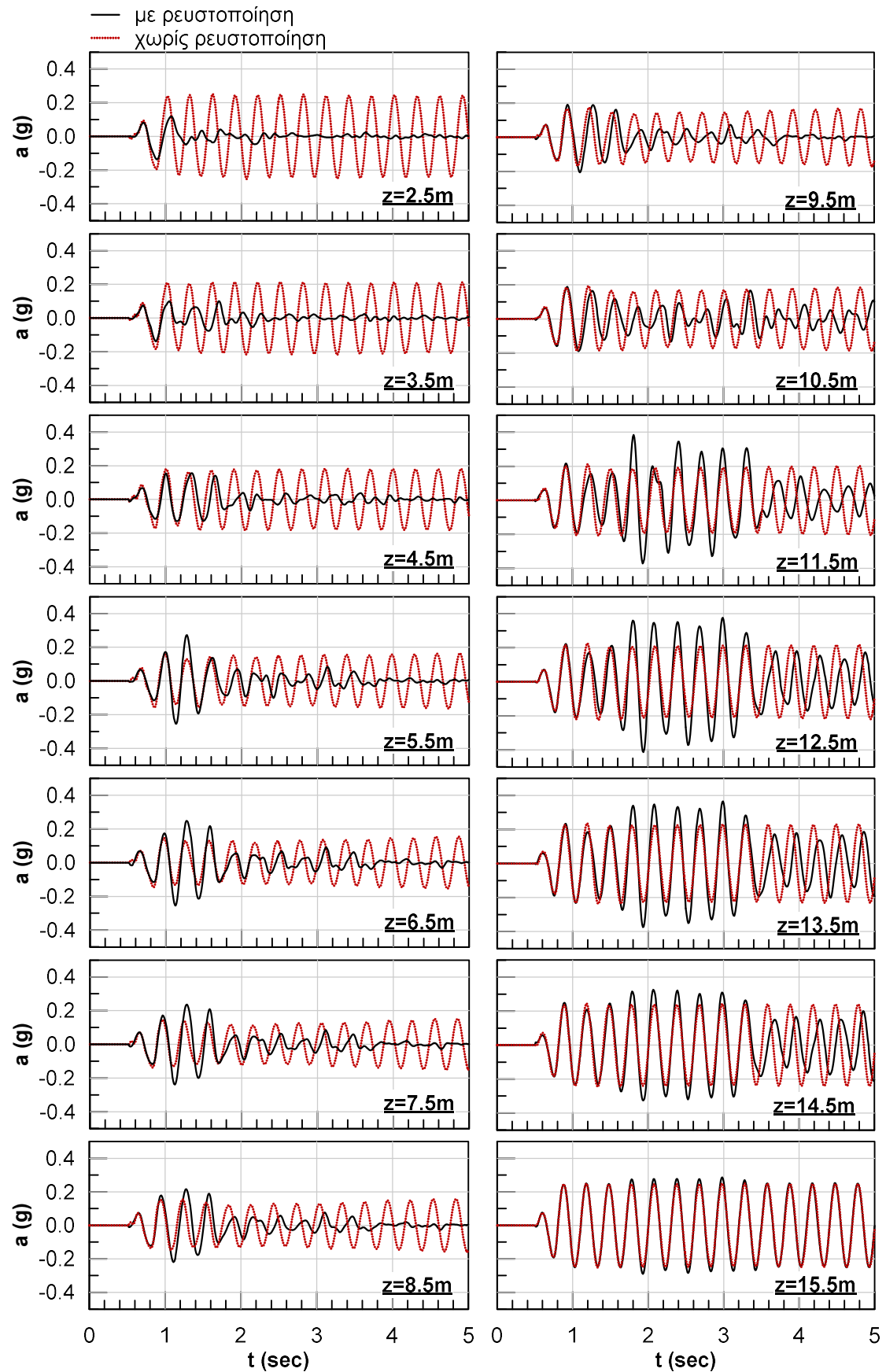
⁽²⁾Οι χρονικές στιγμές t_L μετρούνται από την έναρξη της δόνησης, δηλαδή μετά την παρέλευση του «ήσυχου» χρονικού διαστήματος 0.5 sec.

⁽³⁾Οι τιμές των N_L για τα σημεία που δε ρευστοποιήθηκαν έχουν προκύψει από την Εξίσωση (3.14β) που παρουσιάστηκε στην Ενότητα (3.2).

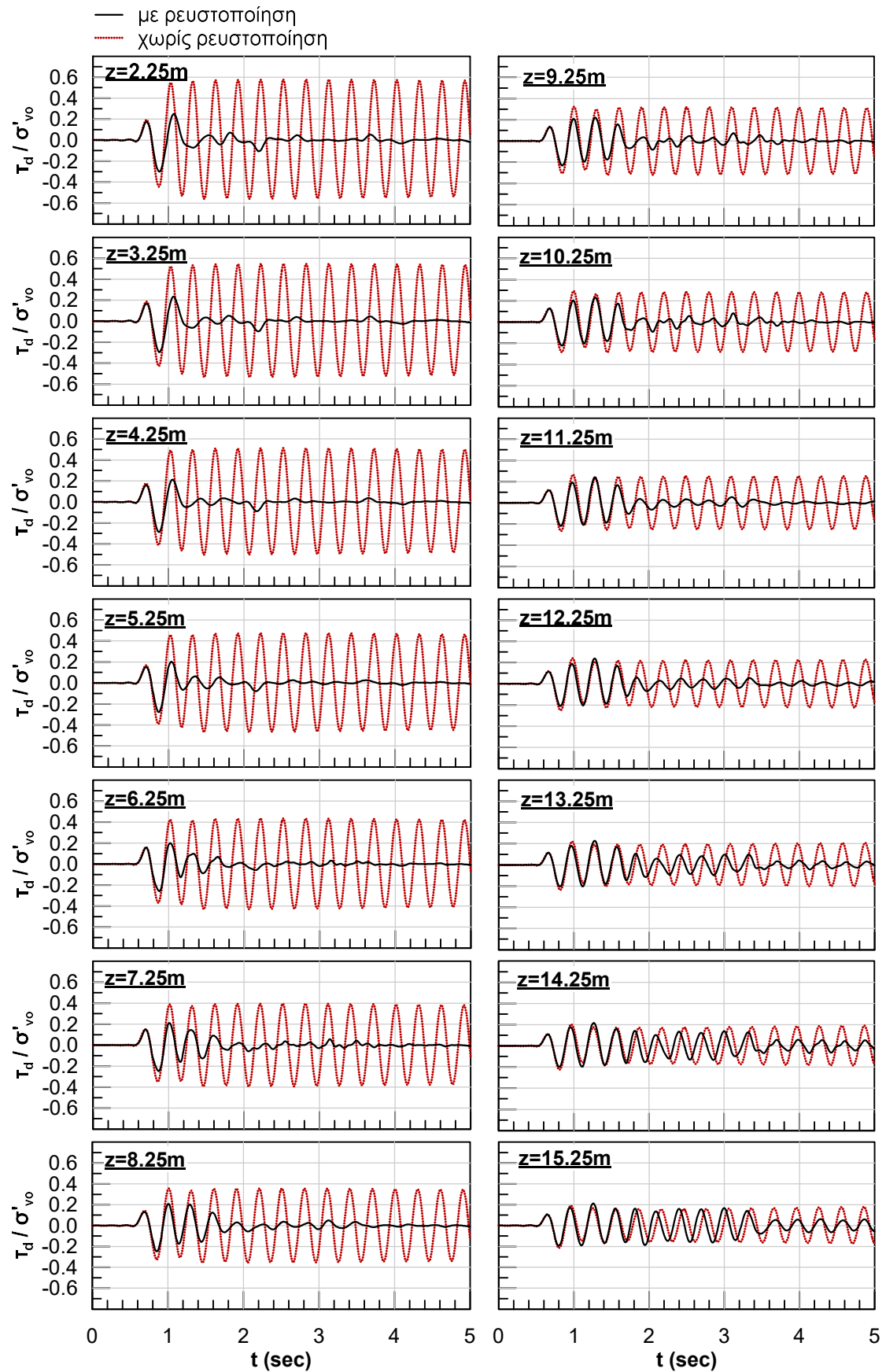
Μία σημαντική, για την έρευνα μας, παρατήρηση από τον **Πίνακα 3.7** είναι ότι πρώτα ρευστοποιήθηκαν οι επιφανειακές στρώσεις της άμμου ($N_L=2.2-3.0$ για βάθη $z=2.25-5.25\text{m}$) και ακολούθησε με αρκετή καθυστέρηση η ρευστοποίηση σε μεγαλύτερα βάθη ($N_L=4.4-9.9$ για $z=10.25-15.25\text{m}$). Όπως θα συζητηθεί σε επόμενες παραγράφους, η έναρξη της ρευστοποίησης από μικρά βάθη είναι φυσιολογική για τις παραδοχές των αναλύσεων μας (σταθερή σχετική πυκνότητα D_r και CRR με το βάθος), αλλά δεν δικαιολογείται με την

συμβατική θεώρηση η μεγάλη καθυστέρηση εκδήλωσης της ρευστοποίησης σε μεγαλύτερα βάθη. Το ίδιο ισχύει και για την έλλειψη ρευστοποίησης σε ενδιάμεσα βάθη ($N_L \geq 15$ για $z=7.25-9.25m$). Οι εν λόγω αποκλίσεις θα πρέπει επομένως να αποδοθούν στην σταδιακή αλλαγή της σεισμικής απόκρισης της στήλης εδάφους λόγω ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων, ειδικά στα επιφανειακά στρώματα που ρευστοποιούνται πρώτα.

Για την πληρέστερη σύγκριση των δύο αναλύσεων, με και χωρίς ρευστοποίηση της άμμου, τα αποτελέσματα τους παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στα **Σχήματα 3.27** και **3.28**. Πιο συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 3.29** φαίνονται οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης σε διάφορα βάθη για την περίπτωση της εδαφικής στήλης τόσο με το ρευστοποιήσιμο όσο και με το μη-ρευστοποιήσιμο στρώμα άμμου. Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 3.30** απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες του λόγου τ_d/σ'_{vo} σε διάφορα βάθη για την περίπτωση της ρευστοποιήσιμης και της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης.



Σχήμα 3.27: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης σε διάφορα βάθη του αμμώδους στρώματος για την περίπτωση της εδαφικής στήλης τόσο με όσο και χωρίς ρευστοποίηση.

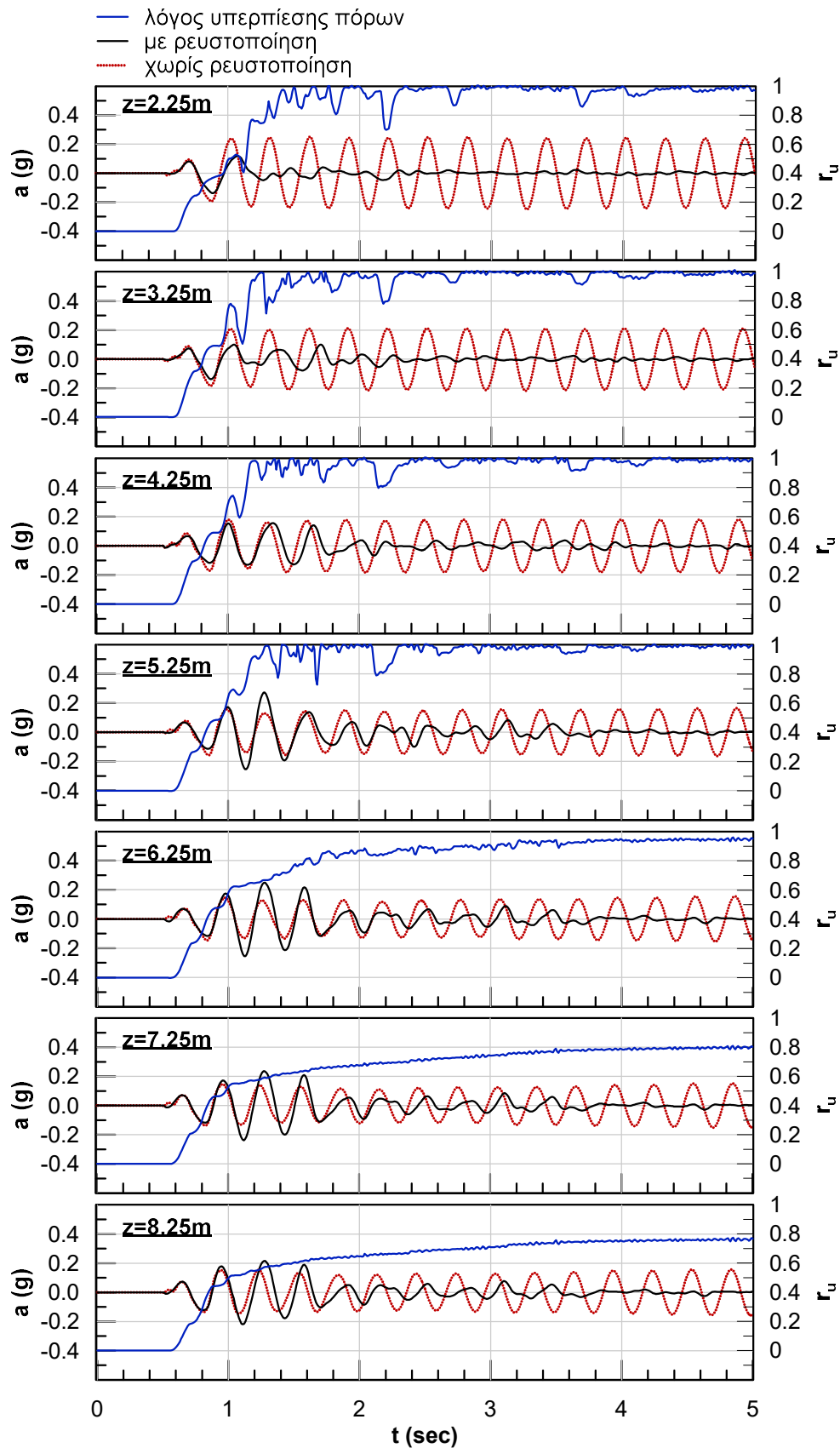


Σχήμα 3.28: Χρονοιστορίες λόγου τ_d/σ'_{vo} σε διάφορα βάθη του αμμώδους στρώματος για την περίπτωση εδαφικής στήλης τόσο με όσο και χωρίς ρευστοποίηση.

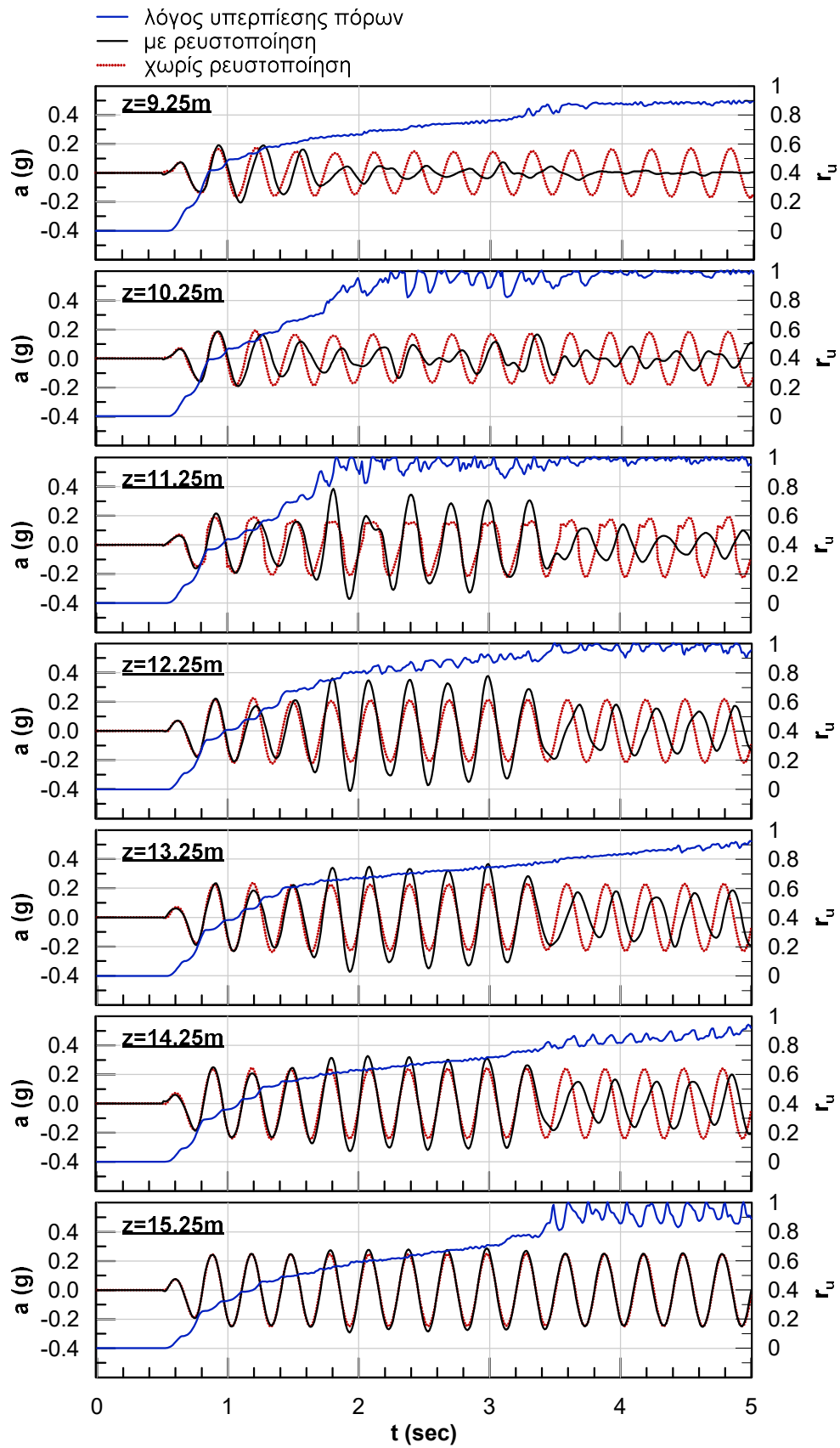
Όπως φαίνεται από τα **Σχήματα 3.27** και **3.28**, το εύρος τόσο της επιτάχυνσης όσο και του συντελεστή σεισμικής δράσης CSR παραμένει σταθερό με το χρόνο στην περίπτωση της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης. Ωστόσο, για την περίπτωση της εδαφικής στήλης με το ρευστοποιήσιμο στρώμα πάχους $H_L=14\text{m}$, φαίνεται ότι οι μεταβολές στα χαρακτηριστικά του συστήματος λόγω της ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων και της ρευστοποίησης επηρεάζουν σημαντικά την ένταση της επιβαλλόμενης σεισμικής δράσης. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται από το **Σχήμα 3.27**, η ρευστοποίηση του αμμώδους στρώματος οδήγησε σε δραστική απομείωση των επιταχύνσεων στα βάθη με $z < 9.5\text{ m}$, ενώ ενίσχυσε τις επιταχύνσεις στο χρονικό διάστημα $t \approx 1.8\text{-}2.4\text{ sec}$ στα βάθη με $z > 11.5\text{ m}$ σε σχέση με τις αντίστοιχες της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης.

Η επίδραση της ρευστοποίησης είναι επίσης σημαντική όσον αφορά τις χρονοϊστορίες του λόγου $CSR=\tau_d/\sigma'_{vo}$ που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.28**. Με μια αρχική παρατήρηση των χρονοϊστοριών στα διάφορα βάθη, γίνεται φανερό ότι ο συντελεστής σεισμικής δράσης CSR απομειώθηκε λόγω της ρευστοποίησης σε όλο το ύψος του αμμώδους στρώματος πάχους $H_L=14\text{m}$. Η απομείωση της σεισμικής δράσης φαίνεται να έλαβε χώρα αρχικά στα μικρότερα βάθη, από τα οποία άλλωστε ξεκίνησε η ρευστοποίηση (**Σχήμα 3.26** και **Πίνακας 3.7**), και συνεχίστηκε προς τα μεγαλύτερα βάθη. Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι ιδιαίτερα δύσκολο να ερμηνευθούν επακριβώς, καθώς μετά την εκδήλωση της πρώτης ρευστοποίησης σε κάποιο σημείο του αμμώδους στρώματος, μεταβάλλονται δραστικά οι ιδιότητες της ταλαντούμενης στήλης εδάφους.

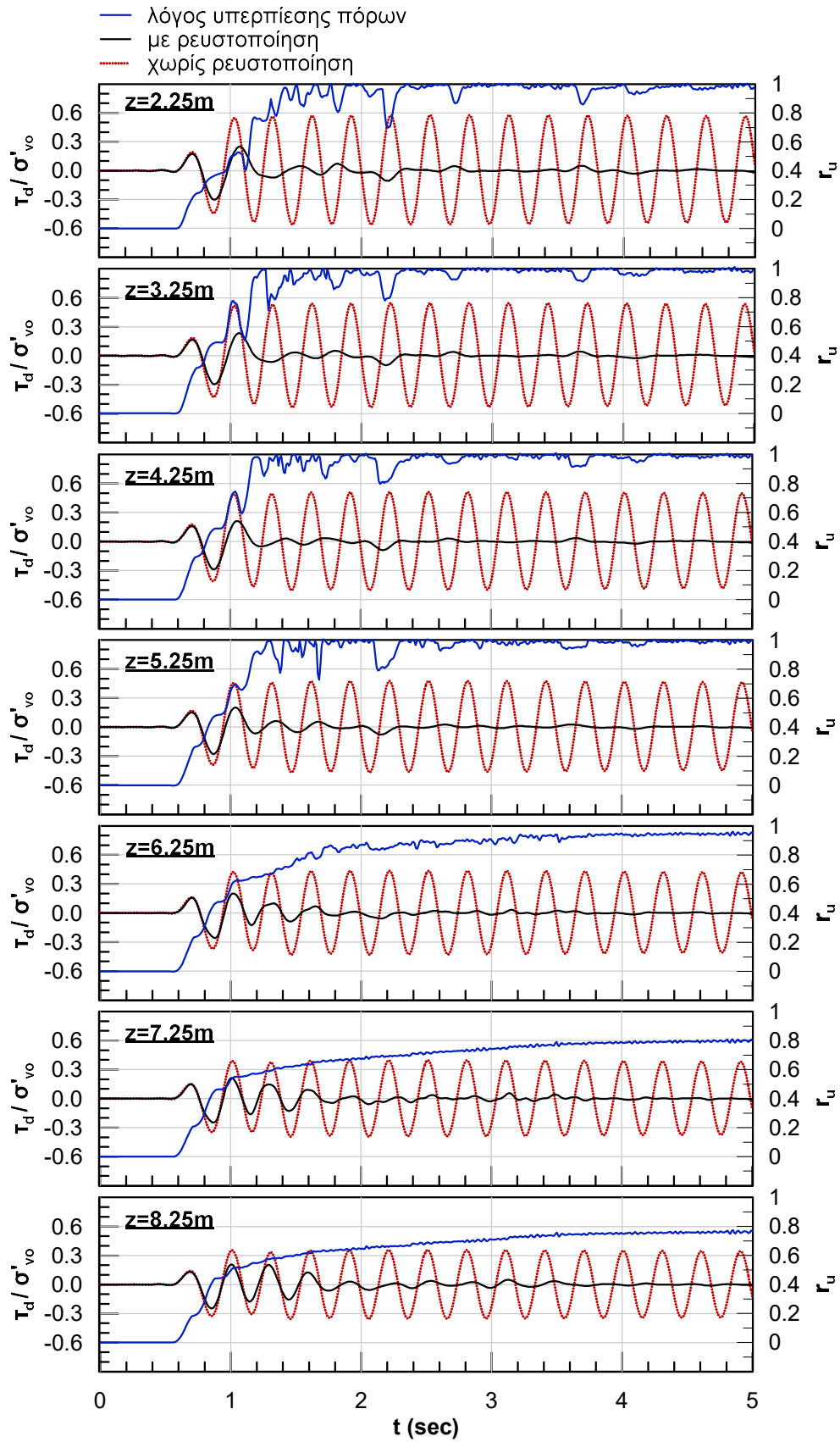
Παρά ταύτα, κρίθηκε αναγκαία η προσπάθεια για μια καλύτερη αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων. Στα πλαίσια αυτής κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα των **Σχημάτων 3.29 - 3.32**, ώστε να δειχθεί με πιο άμεσο τρόπο η συσχέτιση της ανάπτυξης υδατικών υπερπίεσεων με την μεταβολή της σεισμικής απόκρισης της στήλης εδάφους. Στα **Σχήματα 3.29** και **3.30** απεικονίζονται μαζί οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης για τις δύο εξεταζόμενες αναλύσεις και του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u για τα βάθη $z = 2.25\text{-}8.25\text{ m}$ και $z = 9.25\text{-}15.25\text{ m}$ του ρευστοποιήσιμου στρώματος. Αντίστοιχα, στα **Σχήματα 3.29** και **3.30** απεικονίζονται μαζί οι χρονοϊστορίες του λόγου $CSR=\tau_d/\sigma'_{vo}$ και του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u για τα βάθη $z = 2.25\text{-}8.25\text{ m}$ και $z = 9.25\text{-}15.25\text{ m}$ αντίστοιχα.



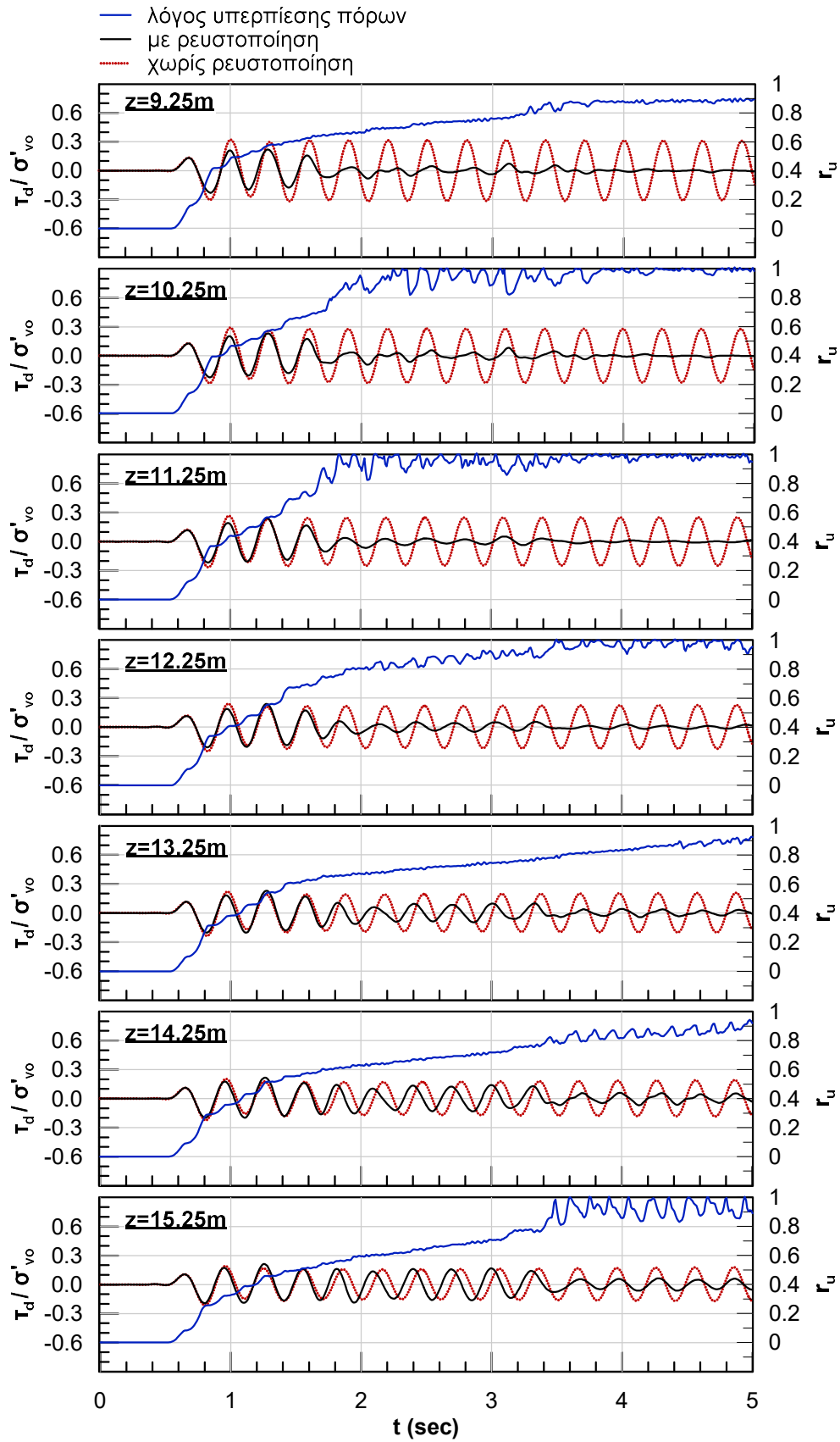
Σχήμα 3.29: Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης για τις αναλύσεις με και χωρίς ρευστοποίηση και του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u για τα βάθη $z=2.25-8.25$ m του αμμώδους στρώματος.



Σχήμα 3.30: Χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης για τις αναλύσεις με και χωρίς ρευστοποίηση και του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u για τα βάθη $z=9.25-15.25\text{m}$ του αμμώδους στρώματος.



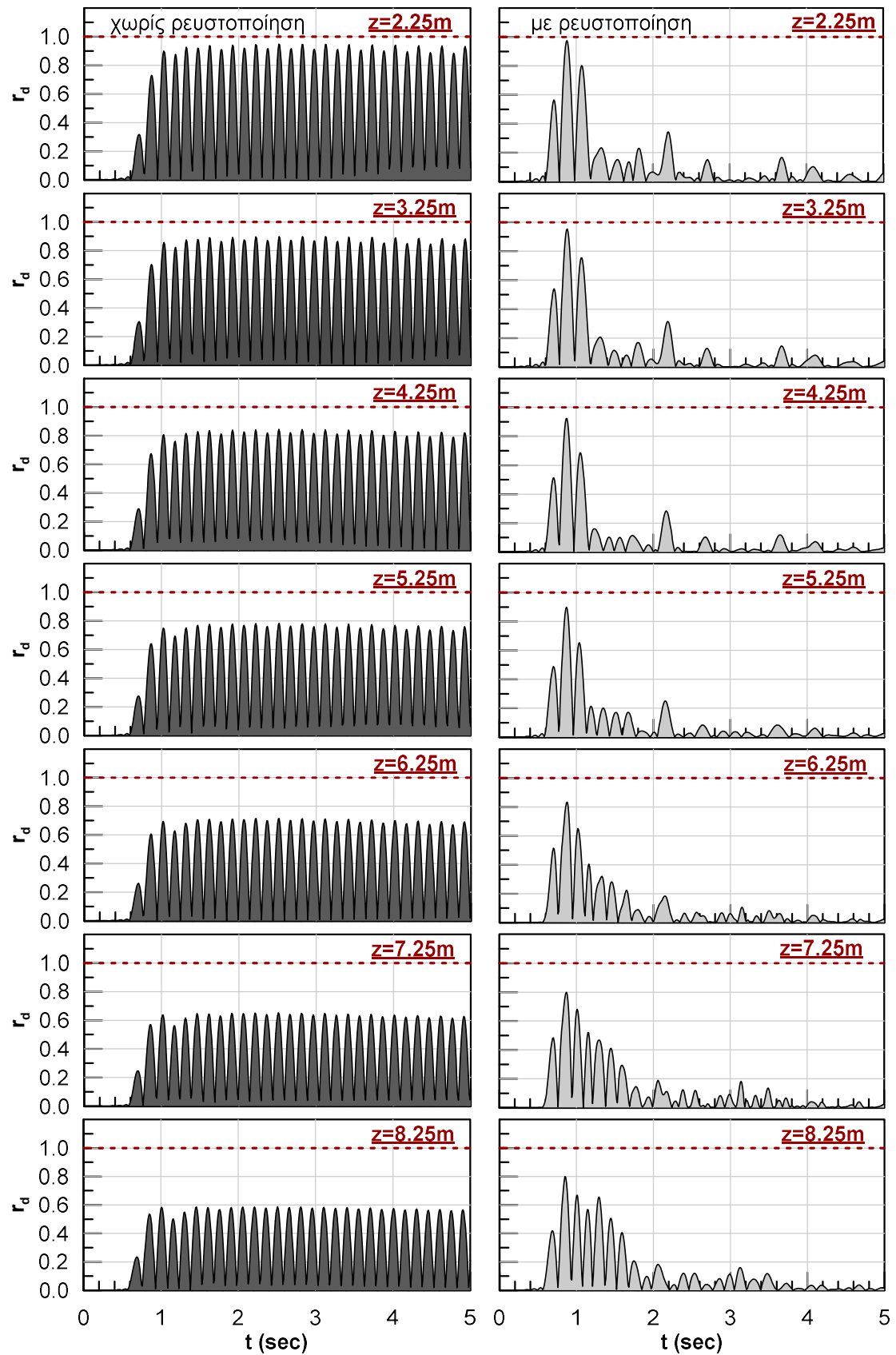
Σχήμα 3.31: Χρονοϊστορίες του λόγου τ_d/σ'_{vo} για τις αναλύσεις με και χωρίς ρευστοποίηση και του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u για τα βάθη $z=2.25-8.25m$ του αμμώδους στρώματος.



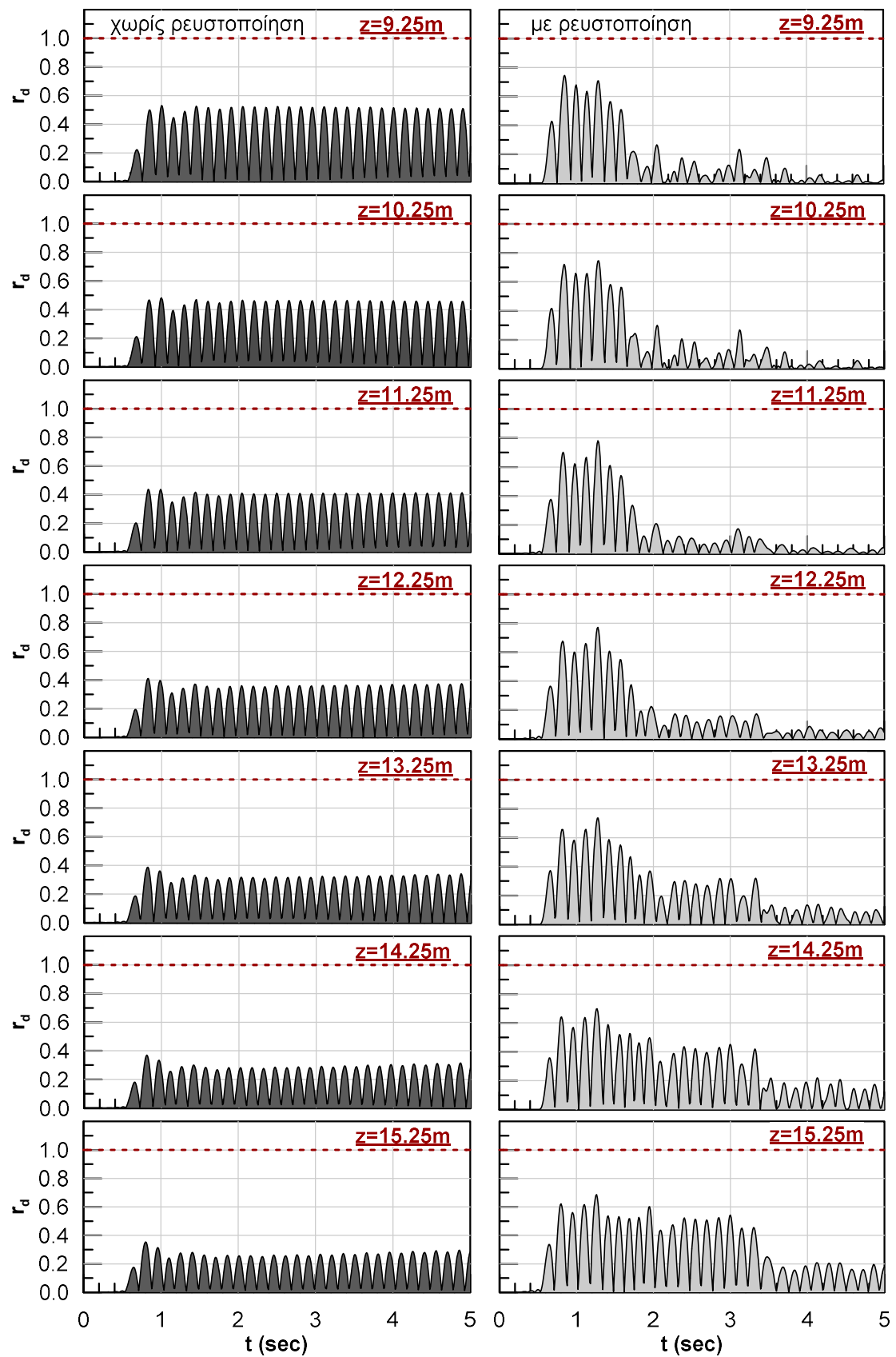
Σχήμα 3.32: Χρονοϊστορίες του λόγου τ_d/σ'_{vo} για τις αναλύσεις με και χωρίς ρευστοποίηση και του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u για τα βάθη $z=9.25-15.25\text{m}$ του αμμώδους στρώματος.

Από τα αποτελέσματα των δύο αριθμητικών αναλύσεων φαίνεται ότι το εύρος του λόγου $CSR = \tau_d / \sigma'_{vo}$, παραμένει σταθερό με το χρόνο στην περίπτωση της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης και μεταβάλλεται με το χρόνο στην περίπτωση της εδαφικής στήλης με ρευστοποίηση. Με πιο απλά λόγια, παρατηρείται ότι η κατανομή του CSR με το βάθος μεταβάλλεται με το χρόνο μόνο για το εδαφικό προφίλ, το οποίο περιλαμβάνει το ρευστοποιήσιμο στρώμα πάχους $H_L = 14\text{m}$. Η διαφοροποίηση αυτή μπορεί να δειχθεί πιο άμεσα αν κατασκευαστούν οι χρονοϊστορίες του μειωτικού συντελεστή r_d σε διάφορα βάθη του αμμώδους στρώματος, διαιρώντας τις χρονοϊστορίες του λόγου τ_d / σ'_{vo} με την τιμή του $CSR_{(z=0)}$ στην επιφάνεια του εδάφους, σύμφωνα με την Εξίσωση $CSR_{(z)} = CSR_{(z=0)} \cdot r_d(z)$ της Ενότητας 3.2. Έτσι, με την κατανόηση της χρονικής μεταβολής του CSR στα διάφορα σημεία του ρευστοποιήσιμου στρώματος θα είναι πιο εύκολο να ερμηνευθεί και η εξέλιξη της ρευστοποίησης.

Στα **Σχήματα 3.33** και **3.34** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες του μειωτικού συντελεστή r_d για τα βάθη $z = 2.25\text{-}8.25\text{m}$ και $z = 9.25\text{-}15.25\text{m}$ αντίστοιχα, των δύο εξεταζόμενων περιπτώσεων εδαφικής στήλης με και χωρίς ρευστοποίηση. Οι χρονοϊστορίες του r_d για τη μη-ρευστοποιήσιμη εδαφική στήλη προκύπτουν από τη διαίρεση των χρονοϊστοριών του λόγου τ_d / σ'_{vo} με την τιμή $CSR_{(z=0)} = 0.608$ (**Σχήμα 3.25**), ενώ οι χρονοϊστορίες του r_d για την εδαφική στήλη με τη ρευστοποιήσιμη ζώνη προκύπτουν από την αντίστοιχη διαίρεση των χρονοϊστοριών του με την τιμή $CSR_{(z=0)} = 0.310$ (**Σχήμα 3.25**).

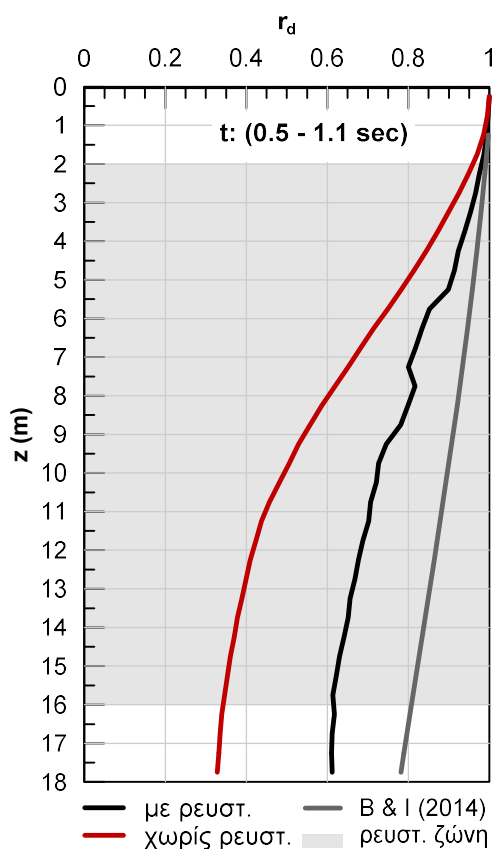


Σχήμα 3.33: Χρονοϊστορίες του μειωτικού συντελεστή r_d για τα βάθη $z=2.25-8.25\text{m}$ του αμμώδους στρώματος για την περίπτωση της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης και της εδαφικής στήλης με ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_f=14\text{m}$.



Σχήμα 3.34: Χρονοϊστορίες του μειωτικού συντελεστή r_d για τα βάθη $z=9.25-15.25\text{m}$ του αμμώδους στρώματος για την περίπτωση της μη ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης και της εδαφικής στήλης με ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $H_L=14\text{m}$.

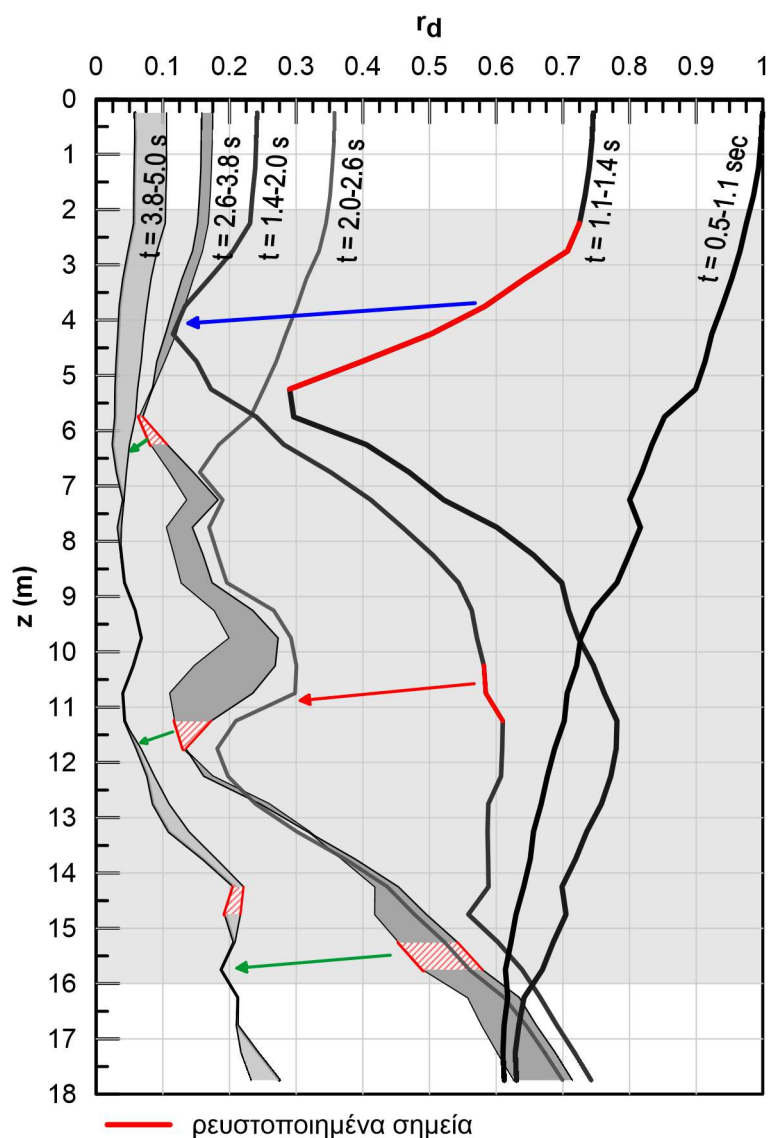
Βάσει των **Σχημάτων 3.33** και **3.34**, φαίνεται ότι ο μειωτικός συντελεστής r_d παραμένει πρακτικά σταθερός κατά τη διάρκεια της δόνησης της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής στήλης, ενώ μεταβάλλεται κατά τη δόνηση της εδαφικής στήλης με το ρευστοποιήσιμο στρώμα πάχους $H_L=14\text{m}$. Μια επιπρόσθετη διαπίστωση που προκύπτει είναι ότι οι τιμές του r_d για τις δύο εξεταζόμενες αναλύσεις δεν συμπίπτουν ούτε για το χρονικό διάστημα $t = 0.5-1.1 \text{ sec}$ κατά το οποίο δεν είναι ακόμα έντονο το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Στο **Σχήμα 3.35** που ακολουθεί, φαίνονται οι κατανομές του r_d με το βάθος για την ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση, την ανάλυση με ρευστοποίηση για το χρονικό διάστημα $t = 0.5-1.1 \text{ sec}$, όπως επίσης και για την κατανομή που προτείνεται στη μεθοδολογία των (Boulanger and Idriss 2014). Από το **Σχήμα 3.35** γίνεται σαφές ότι κατανομές του r_d με το βάθος έχουν την ίδια μορφή, αλλά διαφέρουν αισθητά μεταξύ τους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, άλλωστε, οι τιμές του r_d με το βάθος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το εξεταζόμενο εδαφικό προφίλ.



Σχήμα 3.35: Κατανομές του r_d με το βάθος από την ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση, την ανάλυση με ρευστοποίηση για το χρονικό διάστημα $t = 0.5-1.1 \text{ sec}$ και η προτεινόμενη κατανομή των (Boulanger & Idriss 2014).

Η χρονική μεταβολή της κατανομής του r_d με το βάθος για την ανάλυση με ρευστοποίηση εξετάζεται περαιτέρω μέσω του **Σχήματος 3.36**, στο οποίο παρουσιάζεται η μεταβολή του r_d με το βάθος κατά τα χρονικά διαστήματα $t = 0.5-1.1 \text{ sec}$, $t = 1.1-1.4 \text{ sec}$, $t = 1.4-2.0 \text{ sec}$, $t =$

2.0-2.6 sec, $t = 2.6-3.8$ sec και $t = 3.8-5.0$ sec. Συγκεκριμένα στο **Σχήμα 3.36** απεικονίζονται οι κατανομές του r_d για τα προαναφερθέντα χρονικά διαστήματα και επιπλέον τα σημεία που ρευστοποιήθηκαν στη διάρκεια αυτών των χρονικών διαστημάτων. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ερμηνευθεί η χρονική εξέλιξη της ρευστοποίησης με το βάθος, αλλά και ο μηχανισμός μέσω του οποίου η ρευστοποίηση στα διάφορα βάθη του αμμώδους στρώματος επηρεάζει την εξέλιξη της σεισμικής απόκρισης του συστήματος.

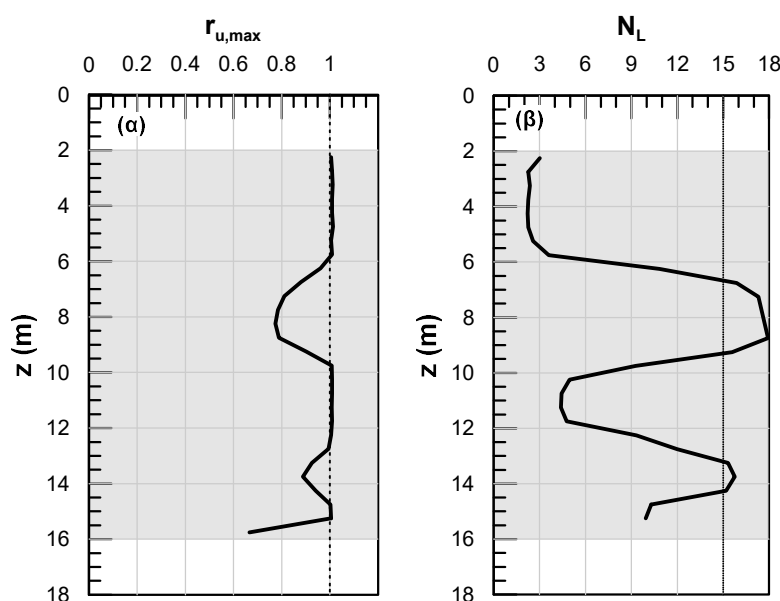


Σχήμα 3.36: Χρονική εξέλιξη της κατανομής του r_d με το βάθος και απεικόνιση των ρευστοποιημένων σημείων στο διάγραμμα.

Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 3.36** οι τιμές του r_d μεταβάλλονται με το χρόνο για όλα τα βάθη της εδαφικής στήλης. Μάλιστα, παρατηρείται ότι η ρευστοποίηση παίζει καθοριστικό ρόλο για τη μείωση του r_d και επομένως της σεισμικής δράσης. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η πρώτη ρευστοποίηση που συνέβη στα βάθη $z = 2.25-5.25$ m κατά το

χρονικό διάστημα $t = 1.1-1.4$ sec οδήγησε σε δραστική μείωση της σεισμικής δράσης στα ανώτερα στρώματα της εδαφικής στήλης (βλέπε **μπλέ** βέλος). Ανάλογη τάση για μείωση του r_d παρατηρήθηκε στα βάθη $z = 10.25-11.25$ m και $z = 15.25$ m που ρευστοποιήθηκαν κατά τα χρονικά διαστήματα $t = 1.4-2.0$ sec και $t = 2.6-3.8$ sec αντίστοιχα (βλέπε **κόκκινα** και **πράσινα** βέλη). Πρέπει να τονισθεί ότι η πρώτη ρευστοποίηση που συνέβη στα ανώτερα σημεία του αμμώδους στρώματος μείωσε τη σεισμική δράση σε ένα αρκετά μεγάλο πάχος του αμμώδους στρώματος. Αυτός ενδεχομένως να είναι και ο λόγος που δεν ρευστοποιήθηκαν ή ρευστοποιήθηκαν με μεγάλη καθυστέρηση τα υπόλοιπα βάθη του αμμώδους στρώματος πάχους $H_L=14$ m.

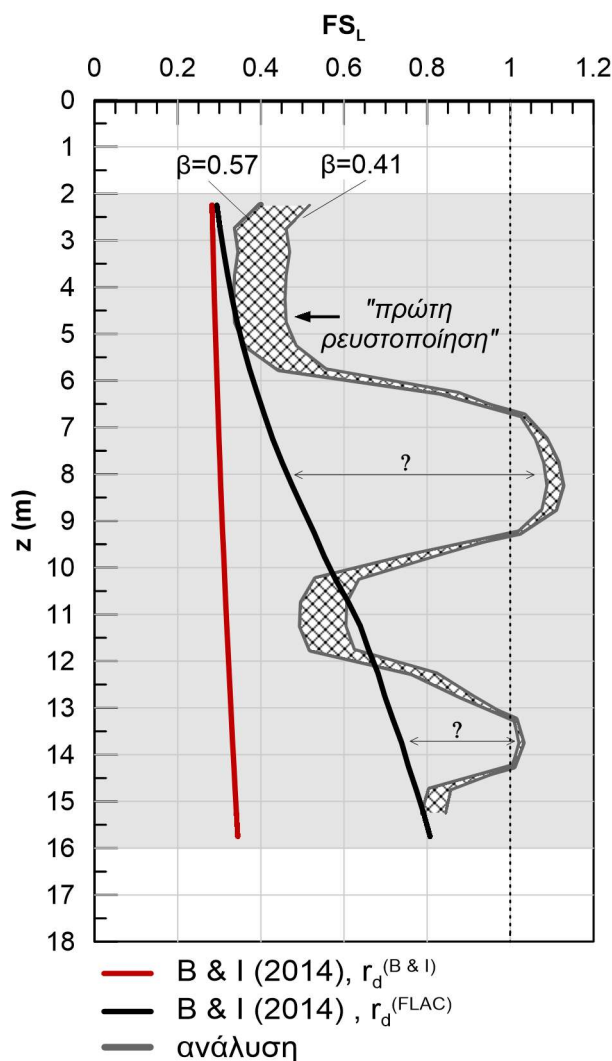
Για να διερευνηθεί περαιτέρω η παραπάνω εκτίμηση, στο **Σχήμα 3.37** απεικονίζονται ο μέγιστος λόγος υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$ και οι κύκλοι φόρτισης N_L που απαιτούνται για ρευστοποίηση συναρτήσει του βάθους. Οι κύκλοι φόρτισης N_L που απαιτούνται για ρευστοποίηση είναι αυτοί που παρουσιάστηκαν στον **Πίνακα 3.7**. Για τα μη ρευστοποιημένα σημεία του αμμώδους στρώματος οι κύκλοι N_L υπολογίστηκαν με χρήση της Εξίσωσης (3.14β) για τις τιμές του FS_L που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση (**Πίνακας 3.7**).



Σχήμα 3.37: Κατανομή με το βάθος (α) του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$ και (β) των κύκλων φόρτισης N_L που απαιτούνται για ρευστοποίηση.

Επιπλέον, στο **Σχήμα 3.38** παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L συναρτήσει του βάθους. Οι συντελεστές ασφαλείας FS_L για τα διάφορα βάθη του ρευστοποιήσιμου στρώματος κατά Boulanger & Idriss (2014) έχουν προκύψει βάσει των τρόπων υπολογισμού (i.) και (ii.) όπως παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3.3.2. Η

τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης α_{max} προκύπτει από την ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση, ενώ ο μειωτικός συντελεστής r_d λαμβάνεται από τη μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014) και από την αριθμητική ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση για τους τρόπους υπολογισμού (i.) και (ii.) αντίστοιχα. Όσον αφορά τις τιμές του FS_L που υπολογίστηκαν βάσει της ανάλυσης με ρευστοποίηση, αυτές προέκυψαν από την Εξίσωση (3.13) και για το εύρος τιμών της παραμέτρου $\beta=0.41-0.57$ που προτείνουν οι Kalogeraki & Zontanou (2014) (Πίνακας 3.3). Για τα βάρη που δεν ρευστοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της δόνησης, οι συντελεστές ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L υπολογίστηκαν προσεγγιστικά μέσω της εμπειρικής Εξίσωσης (3.15), για μια ενδεικτική τιμή του εκθέτη $A=1.60$.



Σχήμα 3.38: Κατανομή με το βάθος του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L κατά Boulanger & Idriss (2014) και βάσει της αριθμητικής ανάλυσης με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC.

Από το Σχήμα 3.38 φαίνεται ότι ανάμεσα στις μεθόδους υπολογισμού του FS_L και την αριθμητική ανάλυση (FLAC) υπάρχει σχετική συμβατότητα μόνο αν χρησιμοποιηθούν οι

τιμές του r_d που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση για το εξεταζόμενο εδαφικό προφίλ. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται ότι η μαύρη καμπύλη των Boulanger & Idriss (2014) παρουσιάζει συμβατότητα με την γκρι καμπύλη της αριθμητικής ανάλυσης (και συγκεκριμένα αποτελεί μία κάτω περιβάλλουσα γι' αυτήν) μόνο για τα ανώτερα σημεία του αμμώδους στρώματος, από τα οποία ξεκίνησε η ρευστοποίηση. Αυτό συμβαίνει, διότι μετά την πρώτη ρευστοποίηση σε κάποιο σημείο του αμμώδους στρώματος μεταβάλλονται δραστικά τόσο τα χαρακτηριστικά του συστήματος όσο και η σεισμική δράση. Έτσι, μετά την πρώτη εκδήλωση της ρευστοποίησης σε ένα στρώμα ικανού πάχους, ο συντελεστής σεισμικής δράσης CSR τείνει να μειωθεί, γεγονός που δρα ευνοϊκά για τα υπόλοιπα σημεία του αμμώδους στρώματος, τα οποία δεν έχουν προλάβει ακόμα να ρευστοποιηθούν. Καθώς μειώνεται η επιβαλλόμενη σεισμική δράση στα σημεία αυτά, ο συντελεστής ασφαλείας τους έναντι ρευστοποίησης «εκτινάσσεται» ακόμη και σε τιμές μεγαλύτερες της μονάδας και τελικά τα σημεία αυτά δεν ρευστοποιούνται. Σε γενικές γραμμές, η συμπεριφορά αυτή ενός ρευστοποιήσιμου στρώματος μεγάλου πάχους μετά την πρώτη ρευστοποίηση είναι δύσκολο να ερμηνευθεί, πόσο μάλλον να προβλεφθεί με μια απλοποιημένη μεθοδολογία υπολογισμού.

3.5 Συμπεράσματα

Οι αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη μελέτη της ρευστοποίησης στρώσεων μικρού και μεγάλου πάχους (Ενότητες 3.3 και 3.4 αντίστοιχα) οδήγησαν στα ακόλουθα συμπεράσματα πρακτικού ενδιαφέροντος για την παρούσα διπλωματική εργασία:

- i. Η εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L με τη μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014) είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην τιμή του r_d που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί, καθώς επίσης και στις τιμές αναφοράς α_{max} και τ_{max} στην επιφάνεια του εδάφους.
- ii. Ο μειωτικός συντελεστής r_d στις αναλύσεις με ρευστοποίηση μεταβάλλεται με το χρόνο, λόγω της μεταβολής των χαρακτηριστικών της στήλης εδάφους κατά την ανάπτυξη υδατικών υπερπιάσεων. Η μεταβολή είναι ιδιαίτερα αισθητή μετά την «πρώτη» ρευστοποίηση σε μία εδαφική στρώση ικανού πάχους.
- iii. Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας των Boulanger & Idriss (2014) προτιμάται οι τιμές αναφοράς, α_{max} ή τ_{max} στην επιφάνεια του εδάφους και τ_{max} στο μέσον του ρευστοποιήσιμου στρώματος, να λαμβάνονται από αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση ώστε να μην «αλλοιώνεται» η τιμή του συντελεστή σεισμικής δράσης CSR λόγω της ανάπτυξης

υπερπίεσης πόρων. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από τις υποδείξεις των Dobry & Abdoun (2015) σχετικά με τη χρήση της μεθοδολογίας των Boulanger & Idriss (2014) για τον υπολογισμό του FS_L .

- iv. Η εκτίμηση του FS_L μέσω αριθμητικών αναλύσεων σύμφωνα με την Εξίσωση

$$FS_L = \frac{CSR}{CRR} = \left(\frac{N_L}{N} \right)^\beta$$

είναι ευαίσθητη στην επιλογή της παραμέτρου β . Ωστόσο,

αποφασίστηκε ο υπολογισμός του FS_L στις αριθμητικές αναλύσεις των παρακάτω Κεφαλαίων να γίνεται ενδεικτικά με αυτόν τον τρόπο. Οι τιμές της παραμέτρου β που θα χρησιμοποιηθούν θα βρίσκονται στο εύρος $\beta=0.41-0.57$ για άμμο οποιασδήποτε σχετικής πυκνότητας $D_r=30\%-75\%$.

- v. Η μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014) για τον υπολογισμό του FS_L ισχύει μόνο για ρευστοποιήσιμες στρώσεις μικρού πάχους, στις οποίες τόσο οι τάσεις λόγου σεισμού όσο και η αντίσταση σε ρευστοποίηση της άμμου, παραμένουν πρακτικά σταθερές με το βάθος και η εκδήλωση της ρευστοποίησης συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλο το στρώμα.
- vi. Η μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014) για τον υπολογισμό του FS_L σε ρευστοποιήσιμες στρώσεις μεγάλου πάχους ισχύει για τα σημεία που ρευστοποιούνται πρώτα, ενώ αποδεικνύεται υπερσυντηρητική για τον υπολογισμό του FS_L στα υπόλοιπα σημεία του στρώματος. Και τούτο διότι, με την εκδήλωση της ρευστοποίησης σε κάποιο σημείο του ρευστοποιήσιμου στρώματος, η σεισμική δράση απομειώνεται δραστικά και ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L «εκτινάσσεται» σε τιμές ακόμη και μεγαλύτερες της μονάδας.
- vii. Δεν υπάρχει αυστηρά μονοσήμαντη αντιστοίχιση του FS_L^{FLAC} που προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις με το FS_L^{NSPT} που προκύπτει από την εμπειρική μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014), δεδομένου ότι οι δύο μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί ανεξάρτητα, με διαφορετικό σκεπτικό και δεδομένα. Διαπιστώθηκε όμως ότι, υπό τις ανωτέρω προϋποθέσεις εφαρμογής της εμπειρικής μεθοδολογίας των Boulanger & Idriss (2014), μπορεί να εξασφαλισθεί μια αδρή συμβατότητα μεταξύ των δύο μεθόδων μετά από κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων που υπεισέρχονται σε αυτές.

Τέλος, διευκρινίζεται ότι τα συμπεράσματα που αφορούν στην εμπειρική μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014) ισχύουν κατ' επέκταση και για όλες τις άλλες αντίστοιχες εμπειρικές μεθοδολογίες που εφαρμόζονται στην πράξη και προτείνονται σε διεθνείς αντισεισμικούς κανονισμούς.

Κεφάλαιο 4

Παραμετρική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης ρευστοποιήσιμης απόθεσης άμμου με ενδιάμεση «ασθενή» στρώση

4.1 Γενικά

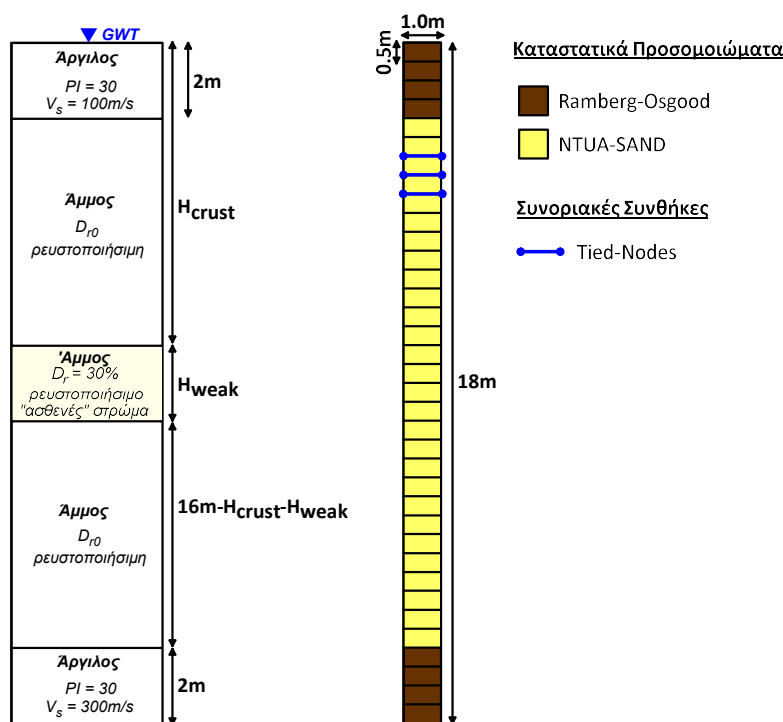
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, ο κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης και της ρευστοποίησης ανομοιομόρφων αμμωδών προφίλ, τα οποία περιλαμβάνουν μια «ασθενή» ενδιάμεση στρώση, χαμηλής σχετικής πυκνότητας. Σε αυτά τα εδαφικά προφίλ, το «ασθενές» στρώμα θα ρευστοποιηθεί πολύ νωρίτερα από τα στιβαρότερα ρευστοποιήσιμα στρώματα που βρίσκονται πάνω και κάτω από αυτό και έτσι θα λειτουργήσει ως ένα σύστημα «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης», εμποδίζοντας τη ρευστοποίηση να φτάσει ως την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Αντικείμενο, επομένως, του Κεφαλαίου 4 αποτελεί η επαλήθευση του εν λόγω μηχανισμού και η ποσοτική αποτίμηση της ευεργετικής του επίδρασης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις συνθήκες υπό τις οποίες το ανομοιομόρφο αμμώδες στρώμα μπορεί πράγματι να λειτουργήσει ως ένα σύστημα «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης».

Προκειμένου να εξετασθούν οι συνθήκες που επιδρούν στο φαινόμενο, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 98 παραμετρικές μη-γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC (Itasca 2011). Οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εστιάζουν στην επίδραση των εξής παραγόντων: (α) του πάχους της «ασθενούς» στρώσης H_{weak} , (β) του πάχους όλου του υπερκείμενου εδαφικού υλικού H_{crust} , το οποίο στο εξής θα αναφέρεται ως εδαφική κρούστα, (γ) της περιόδου της σεισμικής διέγερσης T_{exc} και τέλος (δ) της σχετικής πυκνότητας D_{r0} των πυκνότερων στρώσεων της άμμου.

Η εδαφική τομή που επιλέχθηκε για τις παραμετρικές αναλύσεις αποτελεί μια ιδεατή τομή πέντε στρώσεων υπό τον υδροφόρο ορίζοντα, η οποία απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.1**. Έχει συνολικό ύψος 18m, με τα ανώτερα και τα κατώτερα δύο μέτρα να αποτελούνται από

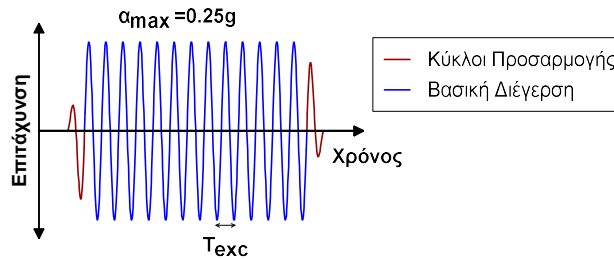
αργιλικό μη-ρευστοποιήσιμο έδαφος με δείκτη πλαστιμότητας $PI = 30$ και ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s = 100$ και 300m/s αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα 14m αποτελούνται από ρευστοποιήσιμη άμμο σχετικής πυκνότητας D_{r0} , στην οποία παρεμβάλλεται ένα «ασθενές» στρώμα με σχετική πυκνότητα $D_r=30\%$. Για την προσομοίωση συνθηκών «ελεύθερου πεδίου», επιβάλλονται συνοριακές συνθήκες «συζευγμένων κόμβων» (Tied Nodes), οι οποίες εξασφαλίζουν την ίδια μετακίνηση στους ακραίους κόμβους της ίδιας στάθμης, τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα.

Για τις αργιλικές στρώσεις χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα των Ramberg & Osgood (1943), βαθμονομημένο ως προς τις πειραματικές καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης και αύξησης του λόγου υστερητικής απόσβεσης των Vucetic & Dobry (1991). Αντίστοιχα, για τη ρευστοποιήσιμη άμμο χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα NTUA-SAND, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του ΕΜΠ (Andrianopoulos et al. 2010; Karamitros 2010) και έχει βαθμονομηθεί έναντι μονοτονικών και ανακυκλικών εργαστηριακών δοκιμών σε άμμο Nevada (Arulmoli et al. 1992).



Σχήμα 4.1: Εδαφική τομή και κάρναβος Πεπερασμένων Διαφορών για την αριθμητική προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης.

Η δόνηση που εφαρμόστηκε στη βάση της εδαφικής στήλης, είναι σταθερή ημιτονοειδής διέγερση 15 κύκλων, εκ των οποίων ο πρώτος και ο τελευταίος είναι κύκλοι προσαρμογής με στόχο τη σταδιακή αύξηση, και μηδενισμό αντίστοιχα, του πλάτους έως την προδιαγεγραμμένη τιμή $\alpha_{max}=0.25g$ (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Χρονοϊστορία επιβαλλόμενης διέγερσης στη βάση της εδαφικής στήλης.

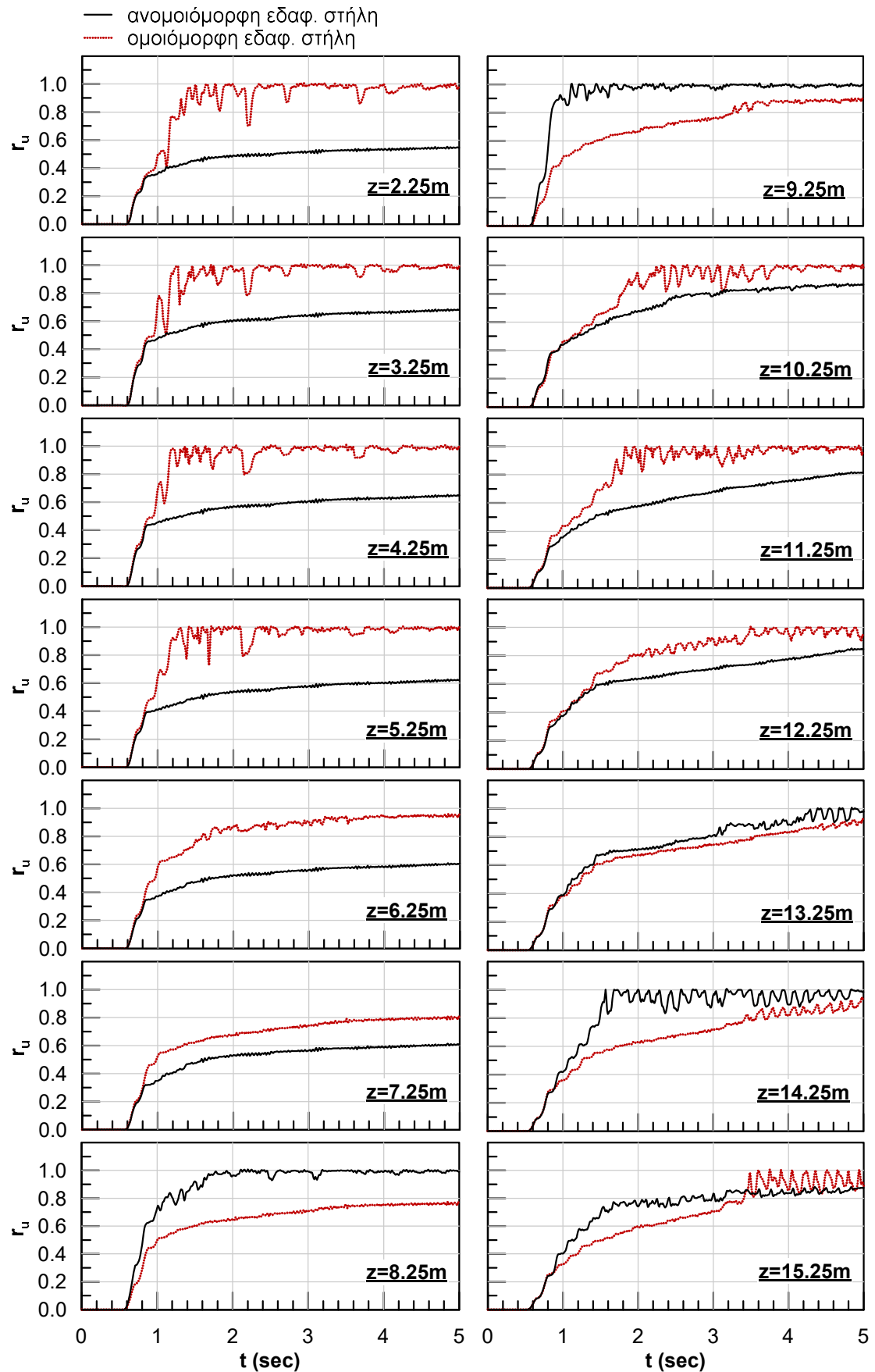
Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC και το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND δίνονται στο Παράρτημα Α.

4.2 Επίδραση του πάχους H_{weak} της «ασθενούς» στρώσης

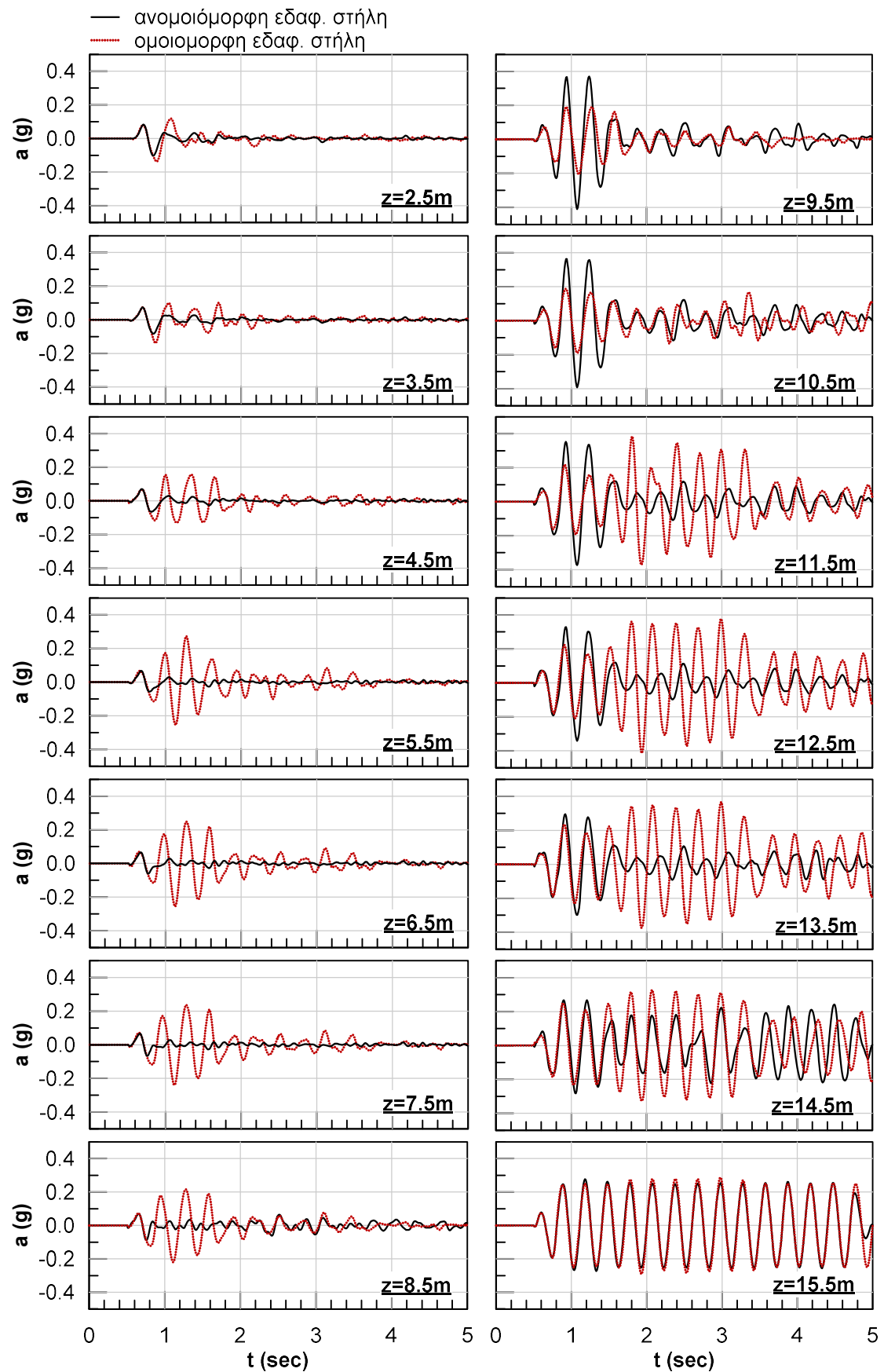
4.2.1 Αποτελέσματα Βασικής Ανάλυσης

Πριν εξετασθεί η επιρροή του πάχους H_{weak} του «ασθενούς» στρώματος στην σεισμική απόκριση της ανομοιόμορφης απόθεσης άμμου θα παρουσιασθούν και θα συζητηθούν με λεπτομέρεια τα αποτελέσματα μιας από τις παραμετρικές αναλύσεις. Στην Ενότητα 3.4 εξετάστηκε η σεισμική απόκριση ενός ρευστοποιήσιμου αμμώδους στρώματος μεγάλου πάχους $H_L=14\text{m}$ με σχετική πυκνότητα $D_{r0}=60\%$. Στην παραμετρική ανάλυση που θα παρουσιαστεί με λεπτομέρεια εξετάζεται η παρεμβολή ενός «ασθενούς» ρευστοποιήσιμου στρώματος πάχους $H_{weak}=2\text{m}$ με σχετική πυκνότητα $D_r=30\%$ σε βάθος 8-10m από την επιφάνεια. Επομένως, σε αυτήν την αριθμητική ανάλυση το πάχος της εδαφικής κρούστας λαμβάνεται ίσο με $H_{crust}=8\text{m}$. Η περίοδος της διέγερσης λαμβάνεται ίση με $T_{exc}=0.3\text{ sec}$.

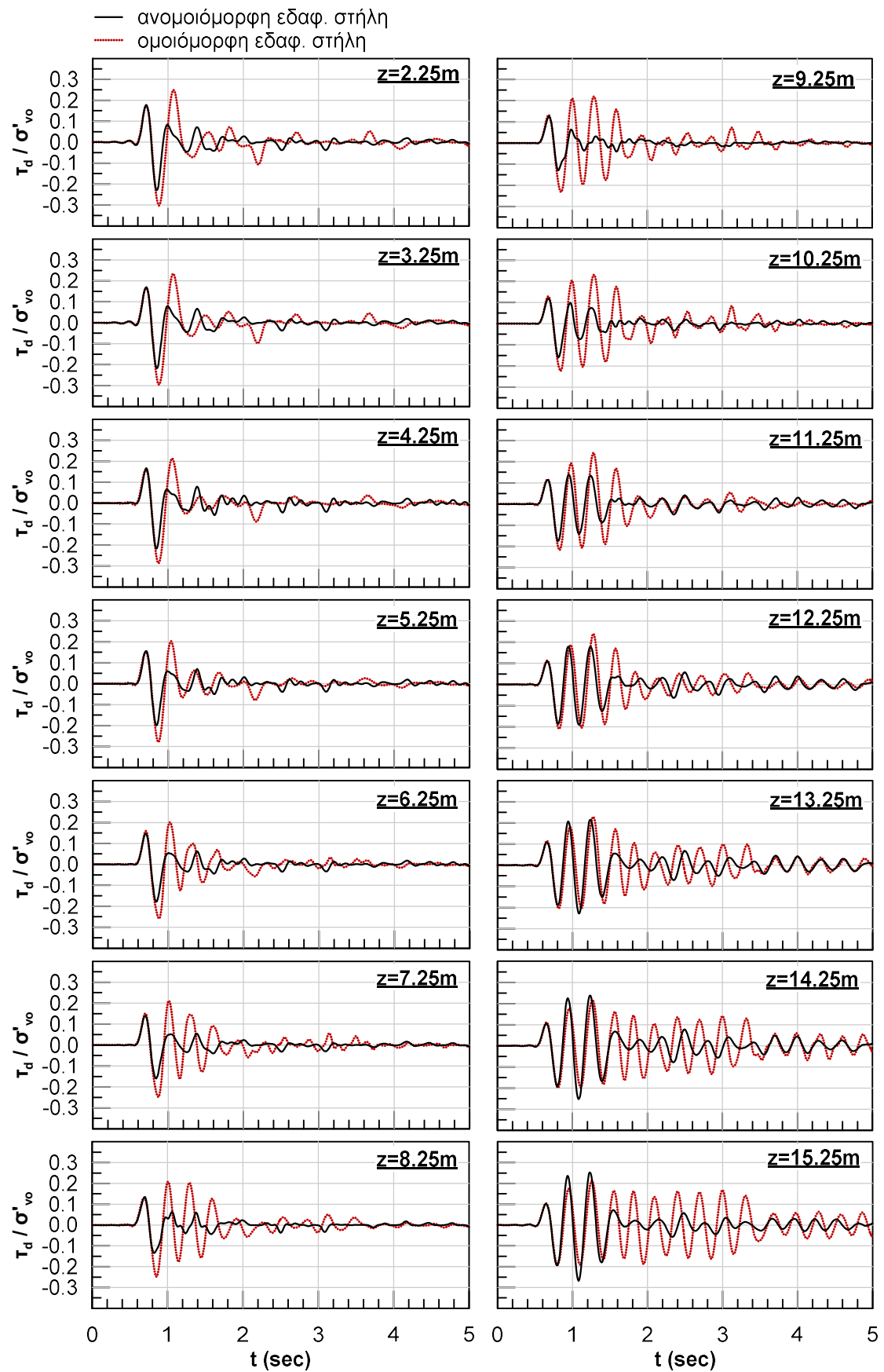
Για να εξεταστεί η επίδραση της «ασθενούς» στρώσης στη σεισμική απόκριση, τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης παρουσιάζονται συγκριτικά με τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ομοιόμορφης εδαφικής στήλης σχετικής πυκνότητας $D_{r0}=60\%$ (Ενότητα 3.4). Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.3** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της υπερπίεσης πόρων σε διάφορα βάρη για την περίπτωση τόσο της ομοιόμορφης (με κόκκινο χρώμα) όσο και της ανομοιόμορφης (με μαύρο χρώμα) εδαφικής στήλης. Αντίστοιχα, στα **Σχήματα 4.4** και **4.5** απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης και του λόγου $CSR=\tau_d/\sigma'_{vo}$ σε διάφορα βάρη για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις.



Σχήμα 4.3: Χρονοϊστορίες υπερπίεσης πόρων σε διάφορα βάθη του αμμώδους στρώματος για την περίπτωση τόσο της ομοιόμορφης όσο και της ανομοιόμορφης εδαφικής στήλης.



Σχήμα 4.4: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης σε διάφορα βάθη του αμμώδους στρώματος για την περίπτωση τόσο της ομοιόμορφης όσο και της ανομοιόμορφης εδαφικής στήλης.

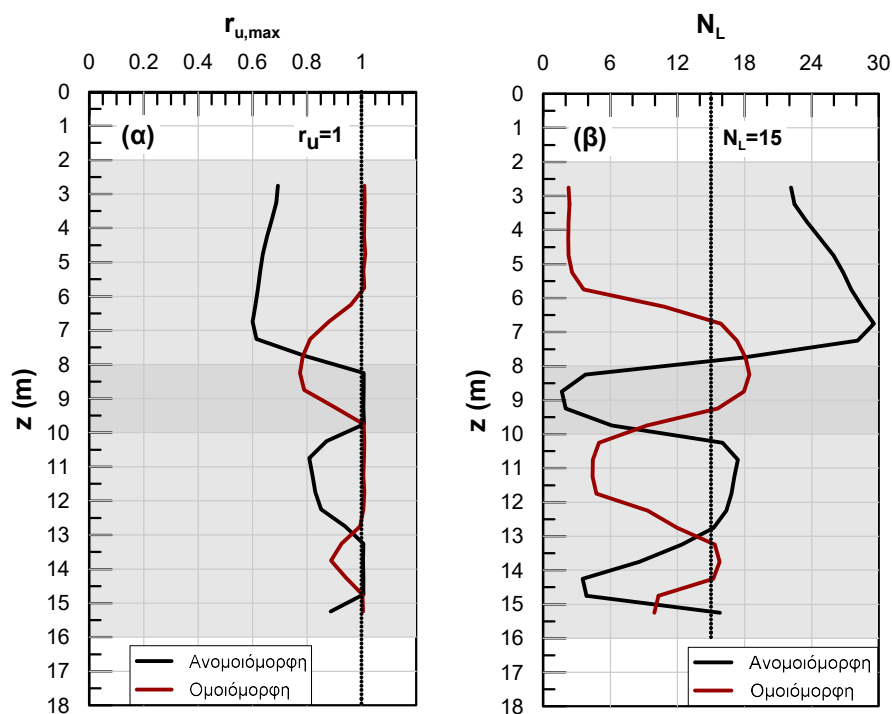


Σχήμα 4.5: Χρονοϊστορίες λόγου τ_d/σ'_{vo} σε διάφορα βάθη του αμμώδους στρώματος για την περίπτωση τόσο της ομοιόμορφης όσο και της ανομοιόμορφης εδαφικής στήλης.

Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 4.3** που απεικονίζει τις χρονοϊστορίες υπερπίεσης πόρων, η ρευστοποίηση συμβαίνει πράγματι πρώτα στα βάθη 8-10m, όπου βρίσκεται το «ασθενές» στρώμα, γεγονός που επηρεάζει σημαντικά την εξέλιξη της υπερπίεσης πόρων στα υπόλοιπα σημεία του αμμώδους στρώματος. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι αμέσως μετά τη χρονική στιγμή $t=0.8$ sec, στο «ασθενές» στρώμα αναπτύσσεται μεγάλος λόγος υπερπίεσης πόρων ($r_u \approx 0.8$). Λόγω αυτής της ραγδαίας αύξησης του r_u στο αμμώδες στρώμα μικρής σχετικής πυκνότητας $D_r=30\%$, φαίνεται να ανακόπτεται η ανάπτυξη του r_u στο υπερκείμενο στρώμα σχετικής πυκνότητας $D_{r0}=60\%$ και να αποτρέπεται τελικά η ρευστοποίησή του. Η ύπαρξη της «ασθενούς» στρώσης παρατηρείται ότι ευνοεί και το υποκείμενο στρώμα για τα βάθη 10-13m, τα οποία φαίνεται ότι δεν ρευστοποιούνται πλέον.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης και του λόγου τ_d/σ'_{vo} , (**Σχήματα 4.4 και 4.5**). Με βάση αυτές τις χρονοϊστορίες γίνεται σαφές ότι περί τη χρονική στιγμή $t=0.8$ sec το πλάτος της επιτάχυνσης και του λόγου τ_d/σ'_{vo} μειώνεται αισθητά για τα ανώτερα βάθη 2-8m. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τους χαμηλούς λόγους υπερπίεσης πόρων στα βάθη αυτά οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ρευστοποίηση του «ασθενούς» στρώματος λειτούργησε ως «Φυσική Σεισμική Μόνωση» για το ανώτερο αμμώδες στρώμα. Όσον αφορά στο στρώμα της άμμου που βρίσκεται κάτω από το «ασθενές», η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης είναι αρκετά πιο σύνθετη. Πάντως, σε γενικές γραμμές, η ύπαρξη της στρώσης με μικρή σχετική πυκνότητα $D_r=30\%$ φαίνεται να επιδρά λιγότερο ευνοϊκά για το κατώτερο παρά για το ανώτερο αμμώδες στρώμα.

Προκειμένου να γίνει ακόμα πιο σαφής η σεισμική απόκριση και η ρευστοποίηση του συγκεκριμένου ανομοιόμορφου εδαφικού προφίλ, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.6** η κατανομή με το βάθος του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$ και των κύκλων φόρτισης N_L που απαιτούνται για ρευστοποίηση. Οι κύκλοι φόρτισης N_L που απαιτούνται για ρευστοποίηση προκύπτουν από τις χρονοϊστορίες της υπερπίεσης πόρων στα διάφορα βάθη για $r_u \geq 0.95$. Για τα μη-ρευστοποιημένα σημεία του αμμώδους στρώματος, ήτοι $r_{u,max} < 0.95$, οι κύκλοι N_L υπολογίστηκαν ενδεικτικά με χρήση της Εξίσωσης (3.14β) της Ενότητας 3.2. για την τιμή του εμπειρικού εκθέτη $A=1.60$ που αντιστοιχεί σε σχετική πυκνότητα $D_r=60\%$.

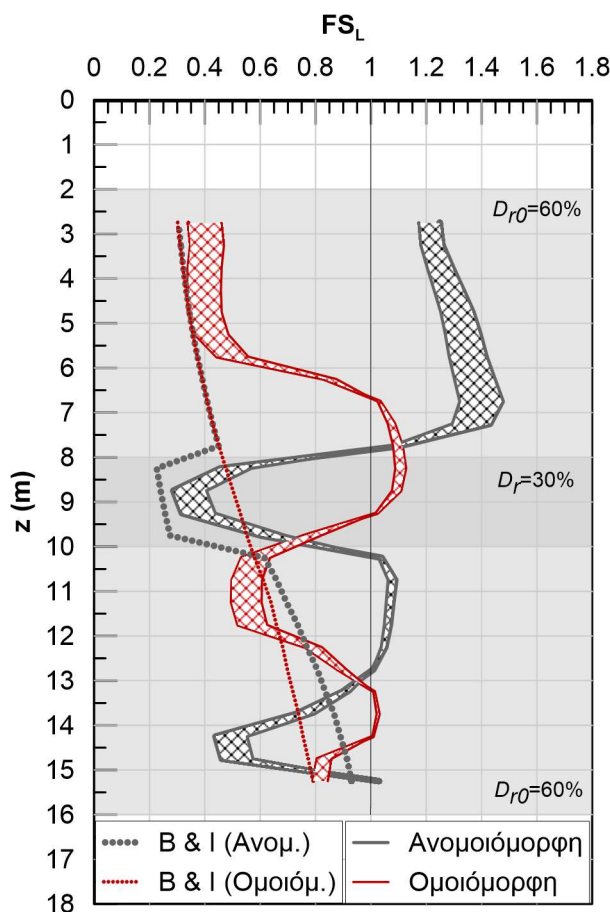


Σχήμα 4.6: Κατανομή με το βάθος (α) του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$ και (β) των κύκλων φόρτισης N_L που απαιτούνται για ρευστοποίηση.

Από το **Σχήμα 4.6** παρατηρείται ότι ο λόγος υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα κυμαίνεται σε τιμές $r_u \approx 0.6-0.7$ και οι κύκλοι φόρτισης που απαιτούνται για ρευστοποίηση κυμαίνονται από $N_L=22$ έως $N_L=30$ ($\gg 15$). Διευκρινίζεται ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι τιμές για τα στοιχεία που βρίσκονται στα βάθη $z=2.25\text{m}$ και 15.75m , διότι τα στοιχεία αυτά είναι σε επαφή με τις αργιλικές στρώσεις και περιορίζονται κινηματικά από αυτές.

Στο **Σχήμα 4.7** παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L συναρτήσει του βάθους για την ομοιόμορφη και την ανομοιόμορφη εδαφική στήλη. Η μεταβολή του FS_L με το βάθος υπολογίστηκε με δύο τρόπους: με τη μέθοδο Boulanger & Idriss (2014) (διακεκομμένες γραμμές του **Σχήματος 4.7**) και μέσω των αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης με ρευστοποίηση (εύρος ανάμεσα σε συνεχείς γραμμές του **Σχήματος 4.7**). Οι συντελεστές ασφαλείας FS_L για τα διάφορα βάθη του ρευστοποιήσιμου στρώματος που προέκυψαν κατά Boulanger & Idriss (2014) λαμβάνουν την τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης a_{max} αλλά και του μειωτικού συντελεστή r_d από την αριθμητική ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση (βλ. τρόπος υπολογισμού (ii.) στην Ενότητα 3.3.2). Όσον αφορά τις τιμές του FS_L που υπολογίστηκαν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης με ρευστοποίηση, χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση (3.13) για το εύρος τιμών της παραμέτρου $\beta=0.41-0.57$ που προτείνουν οι Kalogeraki & Zontanou (2014) (**Πίνακας 3.3**). Για τα βάθη που δεν ρευστοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της δόνησης, οι συντελεστές

ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L υπολογίστηκαν προσεγγιστικά μέσω της εμπειρικής Εξίσωσης (3.15), για μια ενδεικτική τιμή του εκθέτη $A=1.60$ που αντιστοιχεί σε σχετική πυκνότητα $D_r=60\%$.

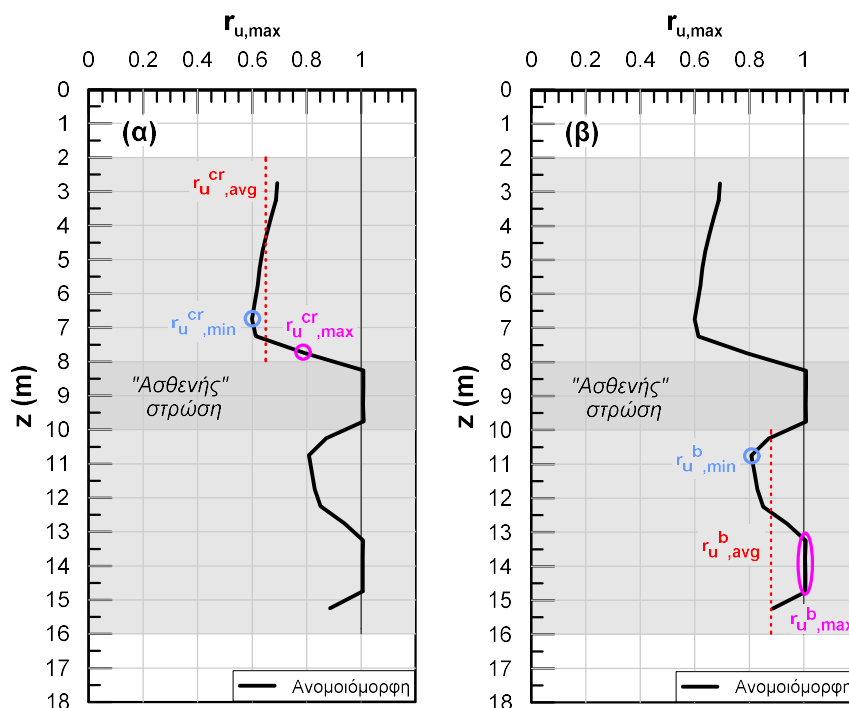


Σχήμα 4.7: Κατανομή με το βάθος του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L κατά Boulanger & Idriss (2014) και βάσει της αριθμητικής ανάλυσης με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC για την ομοιόμορφη και την ανομοιόμορφη εδαφική στήλη.

Βάσει του **Σχήματος 4.7**, ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης στην εδαφική κρούστα, όπως προέκυψε από την αριθμητική ανάλυση με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $FS_L=1.15-1.45$. Αντίθετα, ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης για την «ασθενή» ζώνη υπολογίζεται περίπου ίσος με $FS_L=0.30-0.45$. Γίνεται, λοιπόν, σαφές ότι λόγω της πρώτης ρευστοποίησης η οποία συμβαίνει στο «ασθενές» στρώμα, ο συντελεστής σεισμικής δράσης CSR μειώνεται, γεγονός που δρα ευνοϊκά για τα σημεία του ανώτερου αμμώδους στρώματος, τα οποία δεν έχουν προλάβει ακόμα να ρευστοποιηθούν. Καθώς μειώνεται η επιβαλλόμενη σεισμική δράση στα σημεία αυτά, ο συντελεστής ασφαλείας τους έναντι ρευστοποίησης «εκτινάσσεται» σε τιμές μεγαλύτερες της μονάδας και τελικά τα σημεία αυτά δεν ρευστοποιούνται.

4.2.2 Ορισμός δεικτών συμπεριφοράς r_u^{cr} , r_u^b

Η επίδραση της «ασθενούς» στρώσης στη ρευστοποίηση μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με τον ορισμό των κατάλληλων «δεικτών συμπεριφοράς» σε όρους αναπτυσσόμενης υπερπίεσης πόρων r_u . Οι βασικοί δείκτες συμπεριφοράς διακρίνονται σε αυτούς που αφορούν το άνω (r_u^{cr}) και αυτούς που αφορούν το κάτω (r_u^b) ρευστοποιήσιμο στρώμα. Η ελάχιστη, η μέγιστη και η μέση τιμή του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων που αναπτύσσεται στα ρευστοποιήσιμα σημεία του ανώτερου στρώματος (εδαφική κρούστα) συμβολίζεται ως $r_{u,cr,min}^{cr}$, $r_{u,cr,max}^{cr}$ και $r_{u,cr,avg}^{cr}$ αντίστοιχα. Για τα ρευστοποιήσιμα σημεία του κατώτερου αμμώδους στρώματος η αντίστοιχη ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή συμβολίζεται ως $r_{u,b,min}^b$, $r_{u,b,max}^b$ και $r_{u,b,avg}^b$. Στο **Σχήμα 4.8** παρουσιάζεται η κατανομή με το βάθος του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων για την βασική ανάλυση, στην οποία απεικονίζονται και οι δείκτες συμπεριφοράς του άνω και κάτω αμμώδους στρώματος.



Σχήμα 4.8: Κατανομή με το βάθος του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$ για την ανομοιόμορφη εδαφική στήλη και δείκτες συμπεριφοράς (α) για το ανώτερο και (β) για το κατώτερο αμμώδες στρώμα.

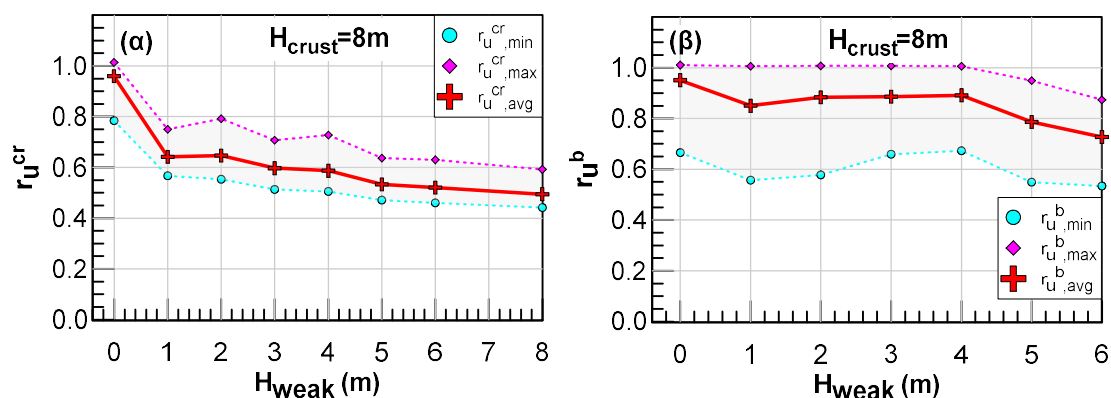
4.2.3 Επίδραση του πάχους H_{weak} στους δείκτες συμπεριφοράς

Η κατανόηση της επίδρασης του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} στη ρευστοποίηση ενός ανομοιόμορφου εδαφικού προφίλ γίνεται με τη βοήθεια των δεικτών συμπεριφοράς που ορίστηκαν προηγουμένως. Για τη διερεύνηση αυτής της επίδρασης πραγματοποιήθηκαν συνολικά 8 αριθμητικές αναλύσεις. Στις αναλύσεις αυτές οι

παράμετροι $H_{crust}=8m$, $T_{exc}=0.3sec$, $D_{r0}=60\%$ παραμένουν σταθερές και μεταβάλλεται μόνο το πάχος του «ασθενούς» στρώματος που λαμβάνει τις τιμές $H_{weak}= 1m, 2m, 3m, 4m, 6m$ και $8m$. Ο Πίνακας 4.1 περιλαμβάνει τις τιμές των δεικτών συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ και $r_{u^b,avg}$ όπως προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις για μεταβλητό πάχος H_{weak} . Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής των δεικτών συμπεριφοράς $r_{u^{cr}}$ και r_{u^b} συναρτήσει του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} .

Πίνακας 4.1: Τιμές των δεικτών συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ και $r_{u^b,avg}$ για μεταβλητό πάχος H_{weak} .

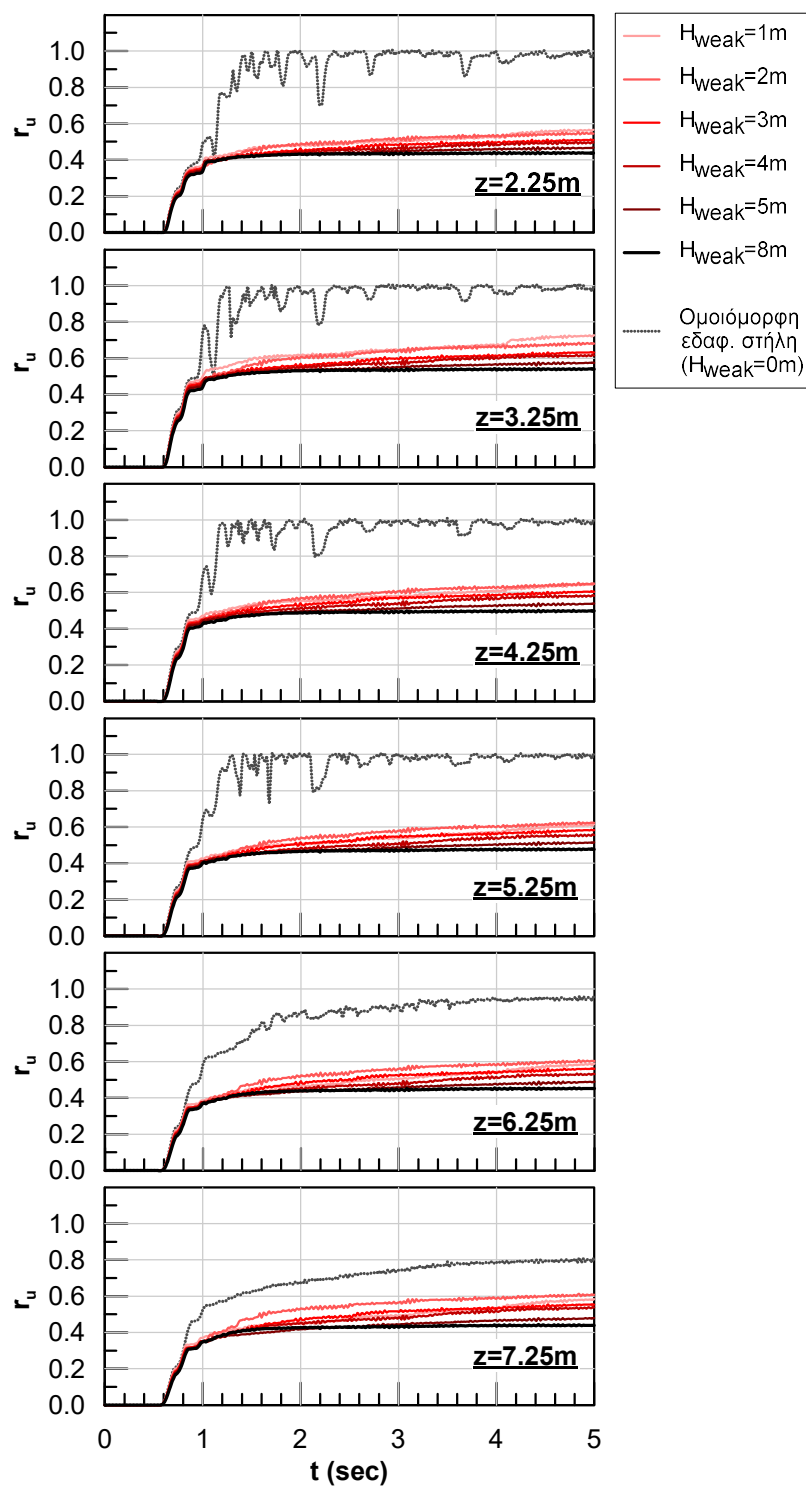
H_{weak} (m)	$r_{u^{cr},avg}$	$r_{u^b,avg}$
1	0.64	0.85
2	0.65	0.88
3	0.60	0.89
4	0.59	0.89
5	0.53	0.79
6	0.52	0.73
8	0.49	-



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα μεταβολής των δεικτών συμπεριφοράς (α) $r_{u^{cr}}$ και (β) r_{u^b} συναρτήσει του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} .

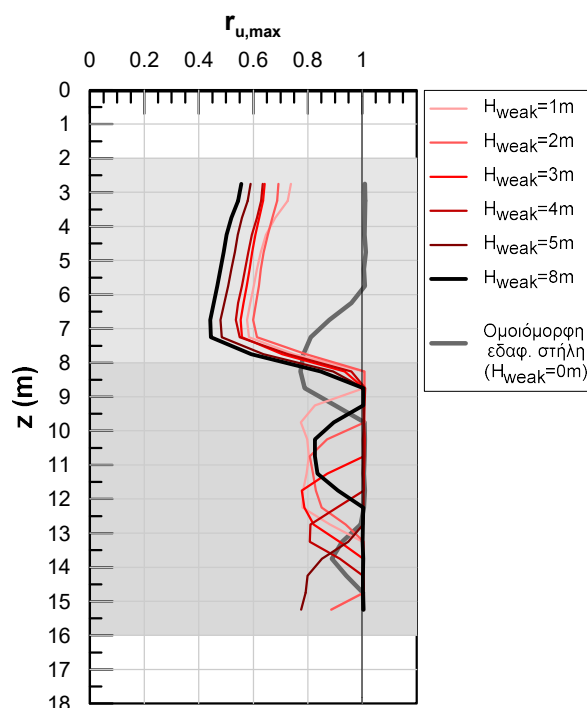
Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.9, το πάχος του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} αποτελεί ιδιαίτερα βασική παράμετρο καθώς επηρεάζει σημαντικά τις τιμές των δεικτών συμπεριφοράς $r_{u^{cr}}$ και r_{u^b} . Παρατηρείται ότι η αύξηση του πάχους της «ασθενούς» στρώσης οδηγεί σε σημαντική μείωση του $r_{u^{cr}}$ έως την ελάχιστη τιμή $\min(r_{u^{cr},avg})=0.49$, η οποία αντιστοιχεί στην αριθμητική ανάλυση με πάχος $H_{weak}=8m$. Η μείωση του αντίστοιχου δείκτη συμπεριφοράς για το κατώτερο στρώμα φαίνεται πως δεν είναι εξίσου ραγδαία αλλά ούτε και συστηματική όσον αφορά στην επίδραση του H_{weak} . Η ελάχιστη τιμή του r_{u^b} είναι $\min(r_{u^b,avg})=0.73$ για την ανάλυση με πάχος $H_{weak}=6m$, χωρίς όμως να δείχνει κάποια τάση για σταθεροποίηση.

Για την περαιτέρω κατανόηση της επιρροής του πάχους H_{weak} στη ρευστοποίηση της ανομοιόμορφης εδαφικής στήλης, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι χρονοϊστορίες ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων στα ρευστοποιήσιμα σημεία της εδαφικής κρούστας για τις αριθμητικές αναλύσεις με $H_{weak}=1m, 2m, 3m, 4m, 5m$ και $8m$ (Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10: Χρονοϊστορίες ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων στα ρευστοποιήσιμα σημεία της εδαφικής κρούστας για τις αριθμητικές αναλύσεις με $H_{weak}=1m, 2m, 3m, 4m, 5m$ και $8m$ και για την ομοιόμορφη εδαφική στήλη.

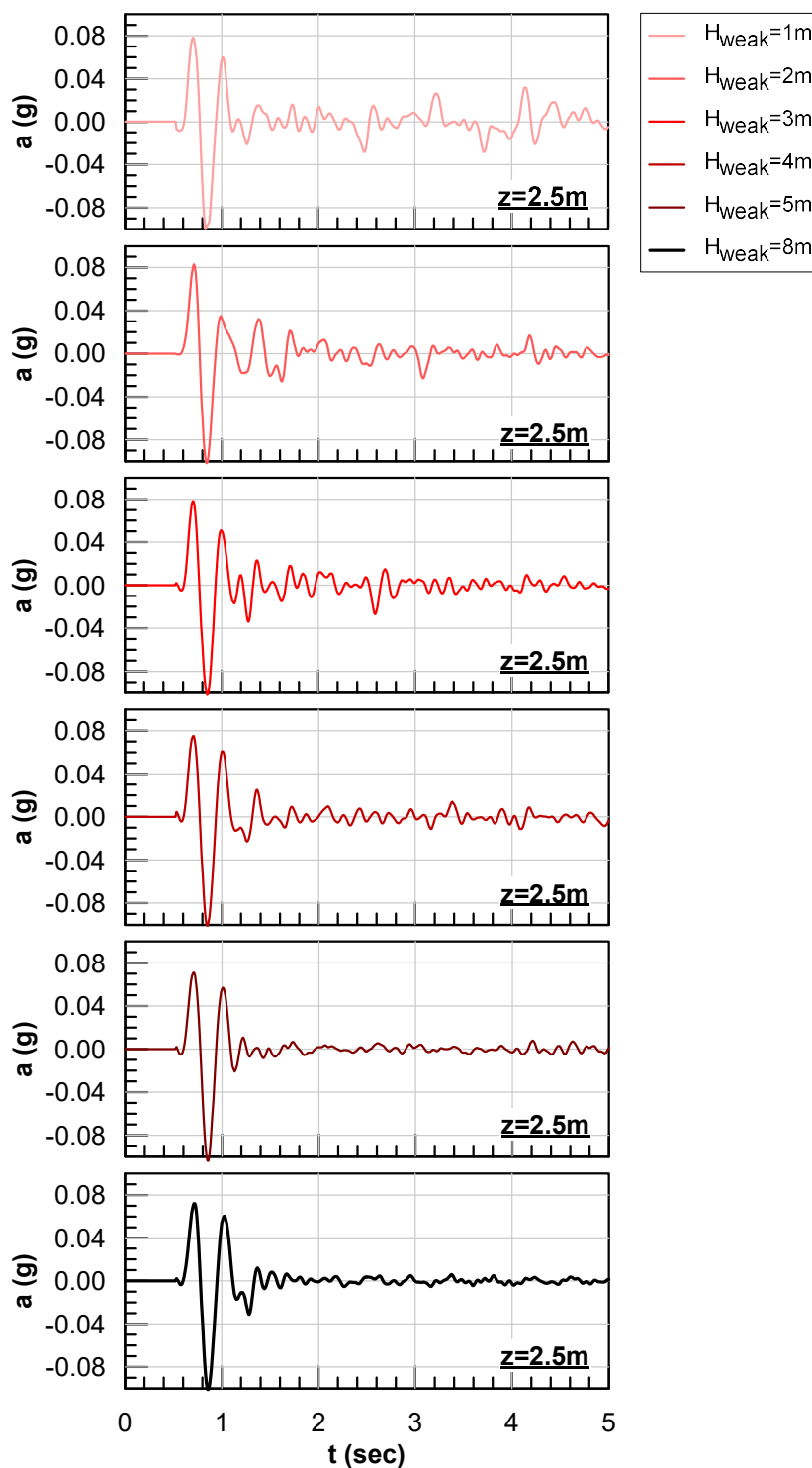
Από το **Σχήμα 4.10** παρατηρείται ότι σε όλες τις αριθμητικές αναλύσεις που αφορούν στο ίδιο βάθος ο λόγος υπερπίεσης πόρων αυξάνεται μονοσήμαντα μέχρι τη χρονική στιγμή $t=0.8$ sec. Αμέσως μετά από αυτή τη χρονική στιγμή, κατά την οποία στο «ασθενές» στρώμα αναπτύσσεται μεγάλος λόγος υπερπίεσης πόρων ($r_u \approx 0.80$), η συμπεριφορά των σημείων της εδαφικής κρούστας διαφοροποιείται, και συγκεκριμένα ο ρυθμός αύξησης του r_u ανακόπτεται. Μάλιστα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το πάχος H_{weak} τόσο μειώνεται η κλίση της καμπύλης του r_u . Κατά το τέλος της δόνησης οι χρονοϊστορίες υπερπίεσης πόρων που αντιστοιχούν στις αναλύσεις με μεγαλύτερο πάχος H_{weak} καταλήγουν σε μικρότερες τιμές του r_u . Στο **Σχήμα 4.11** παρουσιάζεται η κατανομή με το βάθος του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$ για τις αναλύσεις με $H_{weak}=1m, 2m, 3m, 4m, 5m$ και $8m$.



Σχήμα 4.11: Κατανομή με το βάθος του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$ για τις αριθμητικές αναλύσεις με $H_{weak} = 1m, 2m, 3m, 4m, 5m$ και $8m$ και για την ομοιόμορφη εδαφική στήλη.

Στο **Σχήμα 4.11** δείχνεται χαρακτηριστικά ότι οι μέγιστες τιμές του λόγου υπερπίεσης πόρων στα διάφορα ρευστοποιήσιμα σημεία της εδαφικής κρούστας μειώνονται καθώς αυξάνεται το πάχος H_{weak} . Η παρατήρηση αυτή είναι απόλυτα συμβατή με το **Σχήμα 4.9**, στο οποίο φαίνεται ότι η ελάχιστη τιμή $\min(r_{u^{cr},avg}) = 0.49$ του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων στα ρευστοποιήσιμα σημεία της εδαφικής κρούστας αντιστοιχεί στην αριθμητική ανάλυση με πάχος $H_{weak} = 8m$.

Η ερμηνεία για την επίδραση του H_{weak} δίνεται από την εξέταση των χρονοϊστοριών επιτάχυνσης στα ρευστοποιήσιμα σημεία της εδαφικής κρούστας για τις αριθμητικές αναλύσεις με $H_{weak} = 1m, 2m, 3m, 4m, 5m$ και $8m$. Ενδεικτικά, στο **Σχήμα 4.12** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης για το σημείο της κρούστας με $z=2.5m$.



Σχήμα 4.12: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης στα ρευστοποιήσιμα σημεία της εδαφικής κρούστας για τις αριθμητικές αναλύσεις με $H_{weak} = 1m, 2m, 3m, 4m, 5m$ και $8m$.

Από το **Σχήμα 4.12** διαπιστώνεται ότι οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων πρακτικά διαφοροποιούνται μετά τη χρονική στιγμή $t=0.8$ sec κατά την οποία στο «ασθενές» στρώμα αναπτύσσεται μεγάλος λόγος υπερπίεσης πόρων ($r_u \approx 0.8$). Μετά τη ρευστοποίηση της «ασθενούς» στρώσης οι επιταχύνσεις στα σημεία της εδαφικής κρούστας μειώνονται ραγδαία, χωρίς ωστόσο να μηδενίζονται. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος H_{weak} τόσο μεγαλύτερη είναι και η μείωση των επιταχύνσεων που συμβαίνει μετά τη ρευστοποίηση της «ασθενούς» στρώσης. Το γεγονός αυτό εξηγεί και τους αντίστοιχα μειωμένους λόγους υπερπίεσης πόρων. Με απλά λόγια, όσο μεγαλώνει το πάχος της «ασθενούς» στρώσης τόσο ευνοϊκότερα είναι τα αποτελέσματα της «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» που επιτυγχάνεται.

Στις επόμενες παραγράφους εξετάζεται η επίδραση στους δείκτες συμπεριφοράς των υπόλοιπων παραμέτρων του προβλήματος. Εφόσον αποδείχθηκε ότι η επίδραση του H_{weak} είναι ιδιαίτερα καθοριστική για τη φυσική σεισμική μόνωση του υπερκείμενου αμμώδους στρώματος, η επίδραση των υπολοίπων παραμέτρων εξετάζεται μέσω των καμπυλών μεταβολής των δεικτών συμπεριφοράς συναρτήσει του H_{weak} .

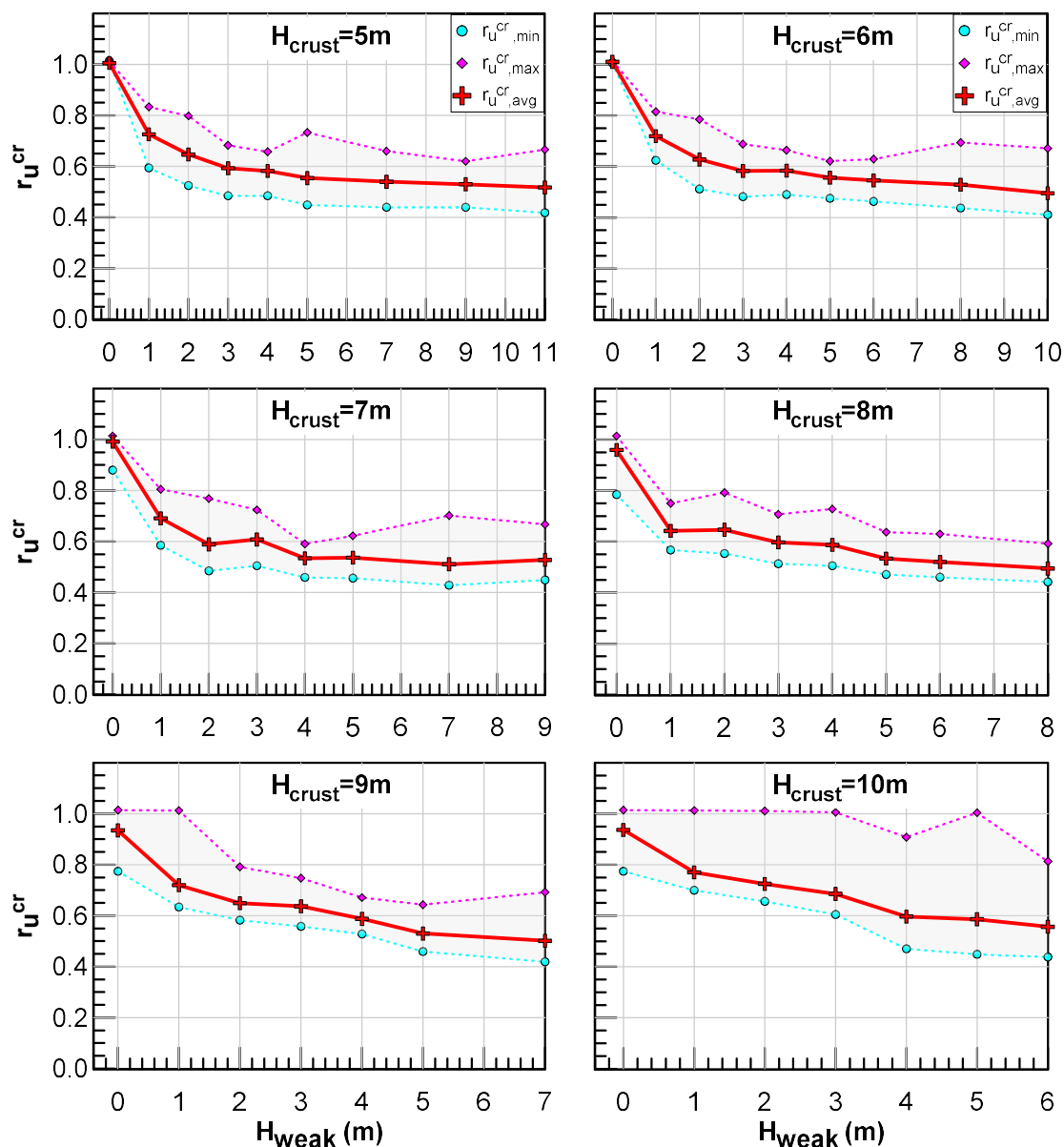
4.3 Επίδραση του πάχους της εδαφικής κρούστας H_{crust}

Ο επόμενος παράγοντας, η επίδραση του οποίου θα διερευνηθεί, είναι το πάχος H_{crust} της εδαφικής κρούστας. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν 42 αριθμητικές αναλύσεις με μεταβλητά πάχη εδαφικής κρούστας $H_{crust}=5-10$ m (με βήμα 1m) και μεταβλητά πάχη «ασθενούς» στρώσης H_{weak} από 1m έως το μέγιστο δυνατό πάχος (ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση H_{crust}) για το οποίο το «ασθενές» στρώμα βρίσκεται σε επαφή με το κάτω στρώμα της αργίλου. Σε αυτήν την ομάδα αριθμητικών αναλύσεων η σχετική πυκνότητα των πυκνότερων στρώσεων άμμου παρέμεινε ίση με $D_{r0}=60\%$ και η περίοδος της διέγερσης ίση με $T_{exc}=0.30$ sec.

Ο **Πίνακας 4.2** περιλαμβάνει τις τιμές των δεικτών συμπεριφοράς $r_u^{cr,avg}$ και r_u^b,avg όπως προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις για διαφορετικά H_{crust} και μεταβλητό πάχος H_{weak} . Στο **Σχήμα 4.13** παρουσιάζονται αντίστοιχα τα διαγράμματα μεταβολής των δεικτών συμπεριφοράς r_u^{cr} συναρτήσει του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} για διαφορετικά πάχη εδαφικής κρούστας $H_{crust}=5-10$ m.

Πίνακας 4.2: Τιμές των δεικτών συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ και $r_{u^b,avg}$ από τις αριθμητικές αναλύσεις για διάφορα παχη κρούστας H_{crust} και μεταβλητό πάχος H_{weak} .

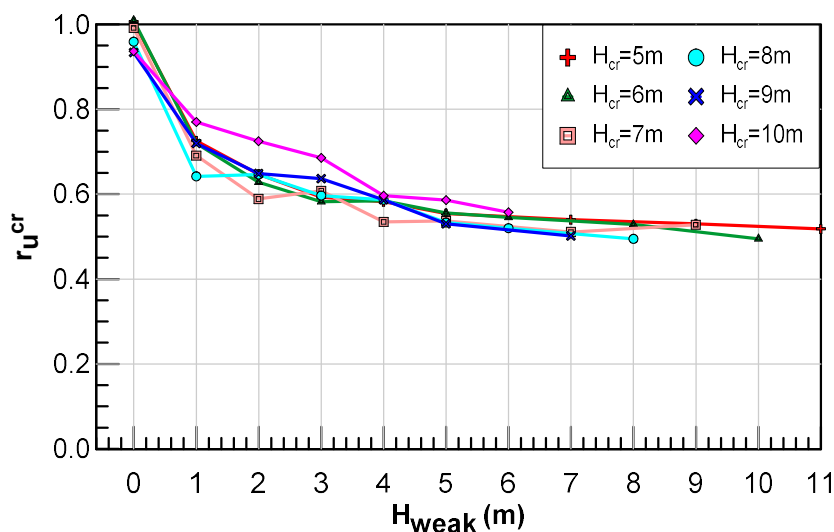
H_{crust} (m)	H_{weak} (m)	$r_{u^{cr},avg}$	$r_{u^b,avg}$
5	1	0.73	0.91
5	2	0.65	0.87
5	3	0.59	0.85
5	4	0.58	0.85
5	5	0.55	0.87
5	7	0.54	0.92
5	9	0.53	0.74
5	11	0.52	-
6	1	0.72	0.86
6	2	0.63	0.85
6	3	0.58	0.85
6	4	0.58	0.87
6	5	0.56	0.90
6	6	0.55	0.91
6	8	0.53	0.79
6	10	0.50	-
7	1	0.69	0.83
7	2	0.59	0.86
7	3	0.61	0.87
7	4	0.53	0.88
7	5	0.54	0.91
7	7	0.51	0.94
7	9	0.53	-
8	1	0.64	0.85
8	2	0.65	0.88
8	3	0.60	0.89
8	4	0.59	0.89
8	5	0.53	0.79
8	6	0.52	0.73
8	8	0.49	-
9	1	0.72	0.87
9	2	0.65	0.89
9	3	0.64	0.91
9	4	0.59	0.79
9	5	0.53	0.72
9	7	0.50	-
10	1	0.77	0.88
10	2	0.72	0.92
10	3	0.69	0.73
10	4	0.60	0.74
10	5	0.59	-
10	6	0.56	-



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα μεταβολής των δεικτών συμπεριφοράς r_u^{cr} συναρτήσει του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} για διαφορετικά πάχη εδαφικής κρούστας H_{crust} .

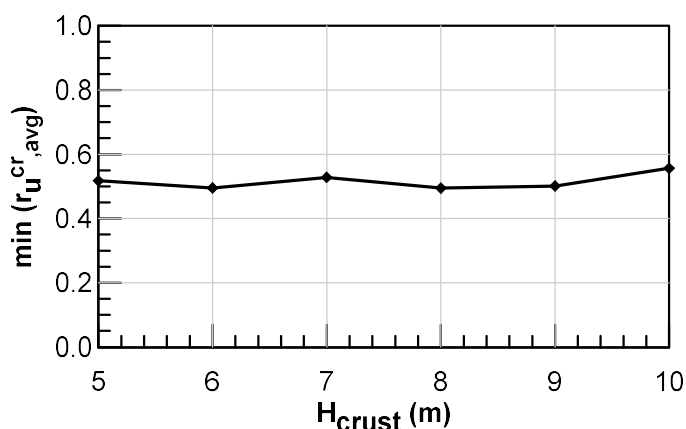
Από το **Σχήμα 4.13** παρατηρείται ότι η μορφή των διαγραμμάτων είναι παρόμοια για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις με διαφορετικά πάχη εδαφικής κρούστας H_{crust} . Καθώς αυξάνεται το πάχος της «ασθενούς» στρώσης H_{weak} ο λόγος υπερπίεσης πόρων που αναπτύσσεται στα ρευστοποιήσιμα σημεία της εδαφικής κρούστας λαμβάνει χαμηλότερες τιμές. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ακόμα και μία ρευστοποιήσιμη στρώση μικρού πάχους $H_{weak} = 1\text{m}$ μπορεί να αποτρέψει τη ρευστοποίηση στο ανώτερο αμμώδες στρώμα. Επιπλέον, παρατηρείται ότι για τα μεγαλύτερα πάχη H_{weak} οι καμπύλες μεταβολής του $r_u^{cr,avg}$ πρακτικά σταθεροποιούνται γύρω από μια ελάχιστη τιμή $\min(r_u^{cr,avg})$. Για την καλύτερη εποπτεία της

επίδρασης του H_{crust} στο **Σχήμα 4.14** απεικονίζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ συναρτήσει του H_{weak} για διάφορα πάχη κρούστας H_{crust} .



Σχήμα 4.14: Συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ συναρτήσει του H_{weak} για διαφορετικά πάχη εδαφικής κρούστας H_{crust} .

Από το **Σχήμα 4.14** φαίνεται ότι οι καμπύλες μεταβολής του $r_{u^{cr},avg}$ για τις αναλύσεις με διαφορετικά πάχη εδαφικής κρούστας H_{crust} συγκλίνουν μεταξύ τους. Εξαιρέση αποτελεί η καμπύλη που αντιστοιχεί σε $H_{crust}=10m$, η οποία διαφοροποιείται ελαφρώς από τις υπόλοιπες για τα πάχη «ασθενούς» στρώσης που βρίσκονται στο εύρος $H_{weak}=1-3m$. Στο **Σχήμα 4.15** παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u^{cr},avg})$ του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων συναρτήσει του H_{crust} .

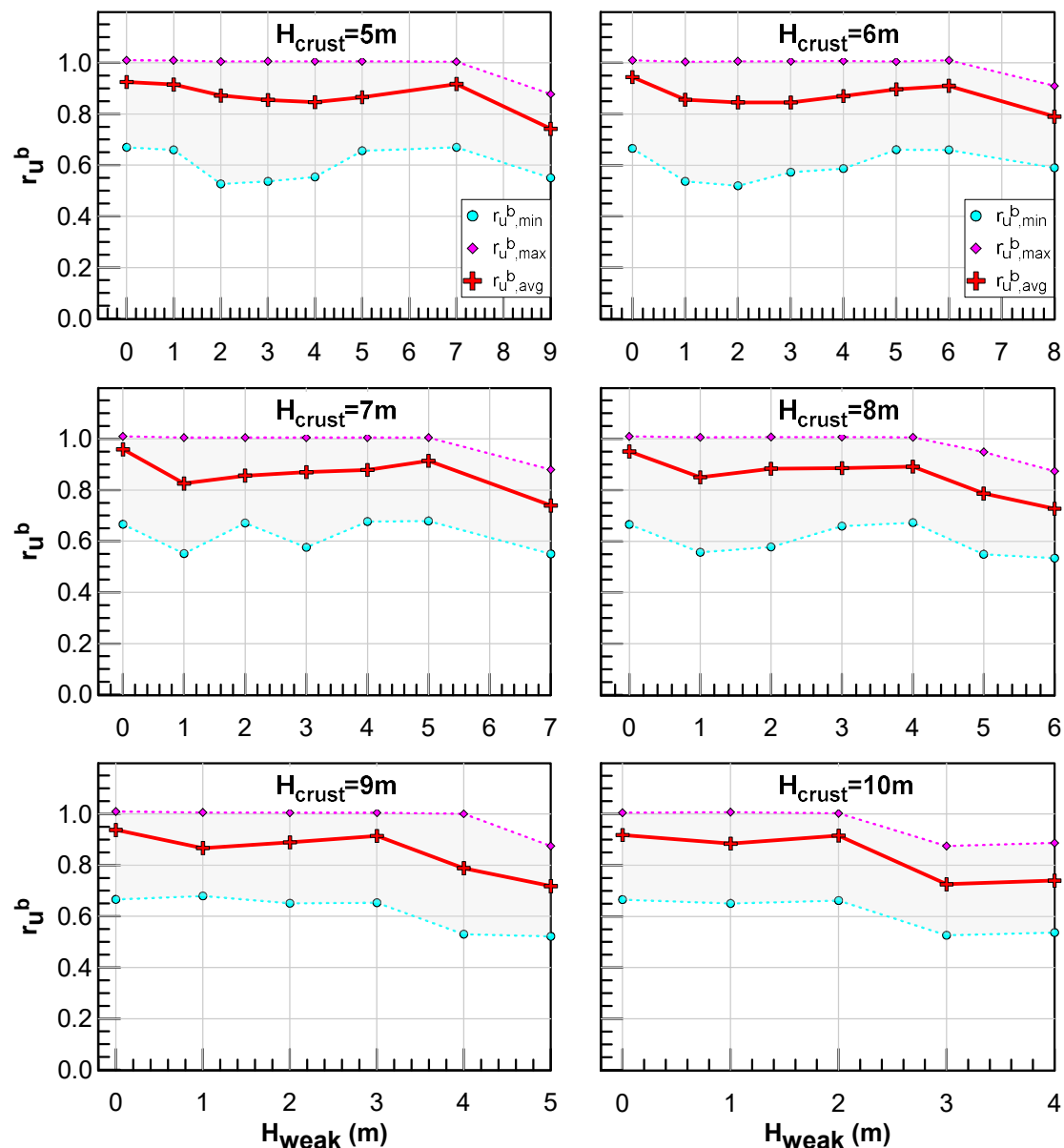


Σχήμα 4.15: Διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u^{cr},avg})$ του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων συναρτήσει του H_{crust} .

Από το **Σχήμα 4.15** διαπιστώνεται ότι η ελάχιστη τιμή $\min(r_{u^{cr},avg})$ του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων στα ρευστοποιήσιμα σημεία της εδαφικής κρούστας δεν επηρεάζεται πρακτικά από το πάχος της H_{crust} . Συγκεκριμένα, εκτιμάται ότι η ελάχιστη τιμή λαμβάνει

τιμές περί το $\min(r_{u^{cr},avg}) \approx 0.55$ για όλες τις αναλύσεις με διαφορετικά H_{crust} , $D_{r0}=60\%$ και $D_r=30\%$ και $T_{exc}=0.3\text{sec}$.

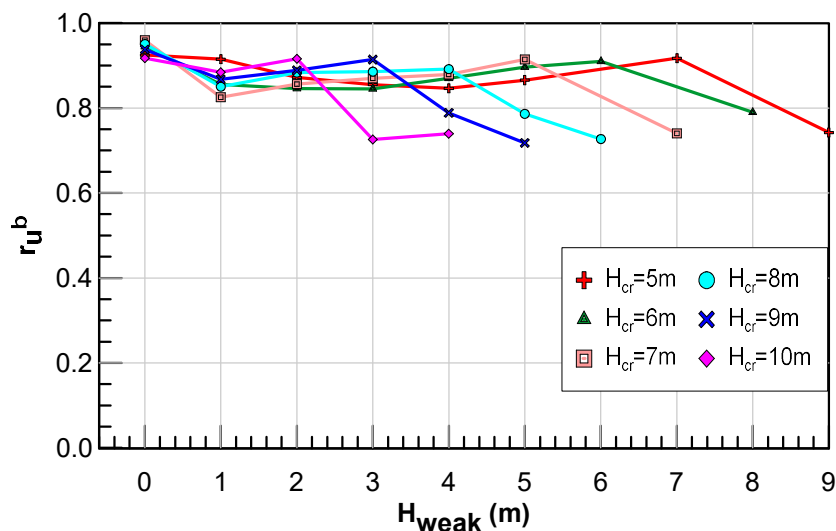
Η επίδραση του H_{crust} στους δείκτες συμπεριφοράς του υποκείμενου αμμώδους στρώματος παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.16** μέσω διαγραμμάτων μεταβολής των δεικτών συμπεριφοράς r_{u^b} συναρτήσει του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} για διαφορετικά πάχη εδαφικής κρούστας H_{crust} .



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς r_{u^b} συναρτήσει του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} για διαφορετικά πάχη εδαφικής κρούστας H_{crust} .

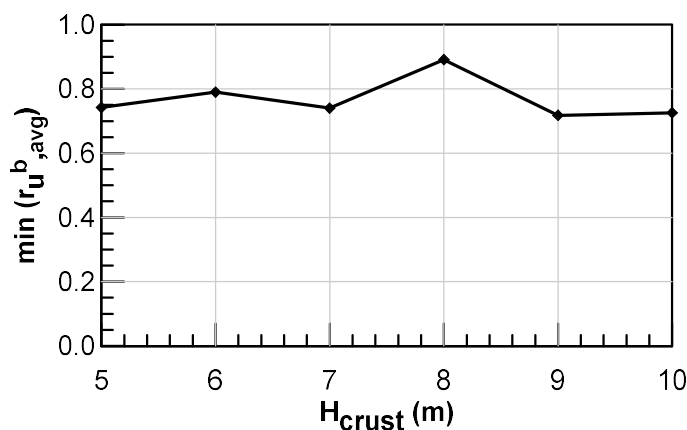
Η γενική παρατήρηση που προκύπτει από το **Σχήμα 4.16** για όλες τις περιπτώσεις είναι ότι ο μέσος λόγος υπερπίεσης πόρων στο κατώτερο αμμώδες στρώμα είναι ελαφρώς μικρότερος της μονάδας. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι η επίδραση της «ασθενούς»

στρώσης είναι ευνοϊκή όχι μόνο για το άνω αλλά και για το κάτω ρευστοποιήσιμο στρώμα. Επιπλέον, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το H_{weak} τόσο μικραίνει το πάχος του κατώτερου αμμώδους στρώματος, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη μείωση των δεικτών συμπεριφοράς r_u^b σε αυτό. Στο **Σχήμα 4.17** απεικονίζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u,avg}^b$ συναρτήσει του H_{weak} για διάφορα πάχη κρούστας H_{crust} . Δεν παρατηρείται κάποια εμφανής τάση στη μορφή των καμπυλών μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u,avg}^b$ για τις αναλύσεις με διαφορετικά πάχη εδαφικής κρούστας H_{crust} .



Σχήμα 4.17: Συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u,avg}^b$ συναρτήσει του H_{weak} για διαφορετικά πάχη εδαφικής κρούστας H_{crust} .

Παρακάτω, στο **Σχήμα 4.18** παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u,avg}^b)$ του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων συναρτήσει του H_{crust} , από το οποίο διαπιστώνεται ότι η ελάχιστη τιμή του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u,avg}^b$ κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $\min(r_{u,avg}^b)=0.72-0.85$ χωρίς κάποια συστηματική τάση για αύξηση ή μείωση συναρτήσει του H_{crust} .



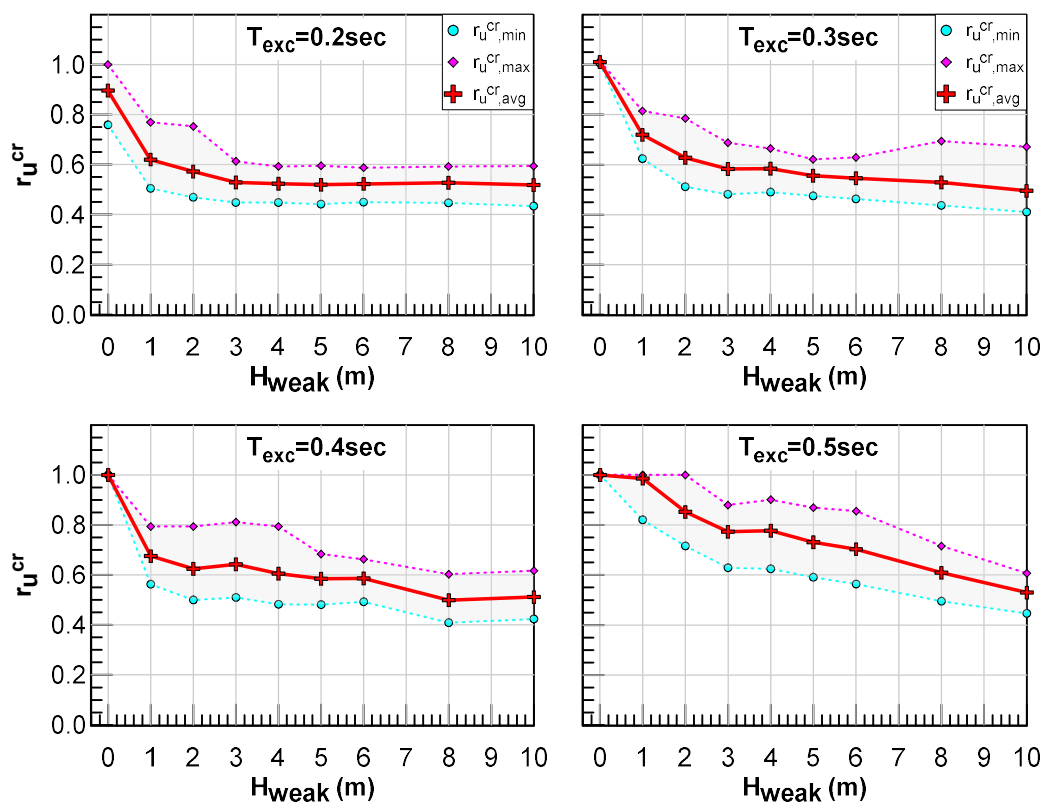
Σχήμα 4.18: Διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u,avg}^b)$ του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων συναρτήσει του H_{crust} .

4.4 Επίδραση της περιόδου διέγερσης T_{exc}

Η επόμενη παράμετρος, για την οποία εξετάζεται η επίδραση στη σεισμική απόκριση της ρευστοποιήσιμης ανομοιόμορφης εδαφικής στήλης, είναι η περίοδος της διέγερσης T_{exc} . Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν 32 αριθμητικές αναλύσεις με μεταβλητή περίοδο διέγερσης $T_{exc}=0.2\text{sec}$, 0.3sec , 0.4sec και 0.5sec και μεταβλητά πάχη «ασθενούς» στρώσης $H_{weak}=1\text{m}$, 2m , 3m , 4m , 5m , 6m , 8m και 10m . Σε αυτήν την ομάδα αριθμητικών αναλύσεων, η σχετική πυκνότητα των πυκνότερων στρώσεων άμμου παρέμεινε ίση με $D_{r0}=60\%$ και το πάχος της εδαφικής κρούστας ίσο με $H_{crust}=6\text{m}$. Ο Πίνακας 4.3 περιλαμβάνει τις τιμές των δεικτών συμπεριφοράς $r_u^{cr,avg}$ και r_u^b,avg όπως προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις για διαφορετικές περιόδους T_{exc} και μεταβλητό πάχος H_{weak} .

Πίνακας 4.3: Τιμές των $r_u^{cr,avg}$ και r_u^b,avg για διάφορους συνδυασμούς T_{exc} και H_{weak} .

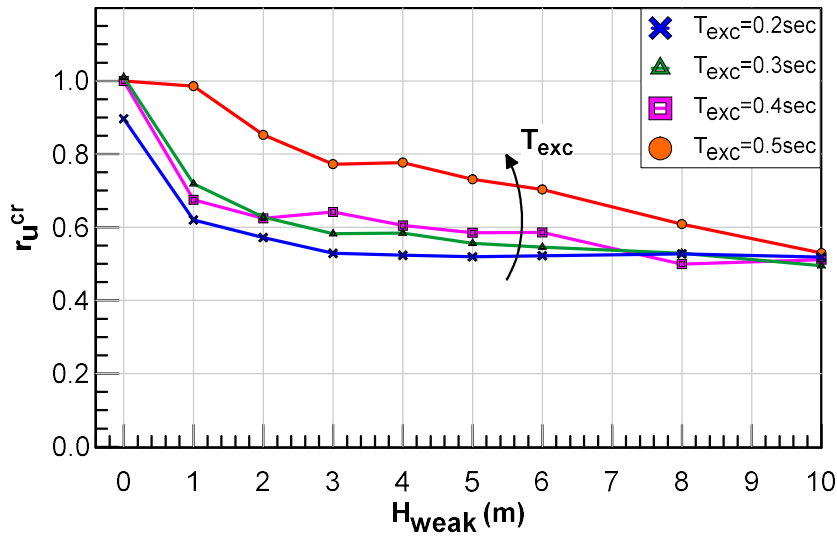
T_{exc} (sec)	H_{weak} (m)	$r_u^{cr,avg}$	r_u^b,avg
0.2	1	0.62	0.83
0.2	2	0.57	0.84
0.2	3	0.53	0.79
0.2	4	0.52	0.79
0.2	5	0.52	0.79
0.2	6	0.52	0.80
0.2	8	0.53	0.68
0.2	10	0.52	-
0.3	1	0.72	0.86
0.3	2	0.63	0.85
0.3	3	0.58	0.85
0.3	4	0.58	0.87
0.3	5	0.56	0.90
0.3	6	0.55	0.91
0.3	8	0.53	0.79
0.3	10	0.50	-
0.4	1	0.68	0.85
0.4	2	0.62	0.97
0.4	3	0.64	0.96
0.4	4	0.60	0.98
0.4	5	0.58	0.97
0.4	6	0.59	0.97
0.4	8	0.50	0.93
0.4	10	0.51	-
0.5	1	0.99	0.99
0.5	2	0.85	0.99
0.5	3	0.77	0.99
0.5	4	0.78	0.98
0.5	5	0.73	0.98
0.5	6	0.70	0.97
0.5	8	0.61	0.95
0.5	10	0.53	-



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα μεταβολής των δεικτών συμπεριφοράς r_u^{cr} συναρτήσει του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} για διαφορετικές περιόδους T_{exc} .

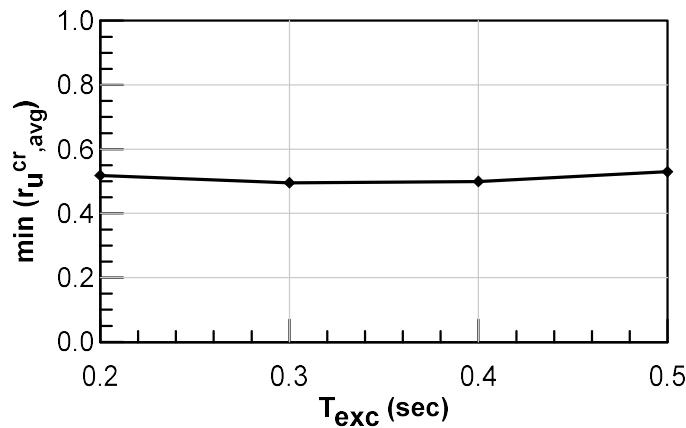
Στο **Σχήμα 4.19** παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς r_u^{cr} συναρτήσει του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} για διαφορετικές περιόδους T_{exc} . Παρατηρείται έτσι ότι η μορφή της καμπύλης διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με την περίοδο της διέγερσης που εφαρμόζεται στις αριθμητικές αναλύσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται μια πτωτική τάση στις καμπύλες των δεικτών συμπεριφοράς r_u^{cr} συναρτήσει του H_{weak} . Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές της περιόδου T_{exc} ο ρυθμός αυτής της πτώσης μειώνεται.

Το **Σχήμα 4.20** απεικονίζει ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ συναρτήσει του H_{weak} για διαφορετικές περιόδους T_{exc} . Διαπιστώνεται ότι, όπως ήδη αναφέρθηκε, η μορφή των καμπυλών διαφοροποιείται ανάλογα με την περίοδο διέγερσης T_{exc} αλλά καταλήγει ουσιαστικά στην ίδια ελάχιστη τιμή του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων $\min(r_{u^{cr},avg})$.



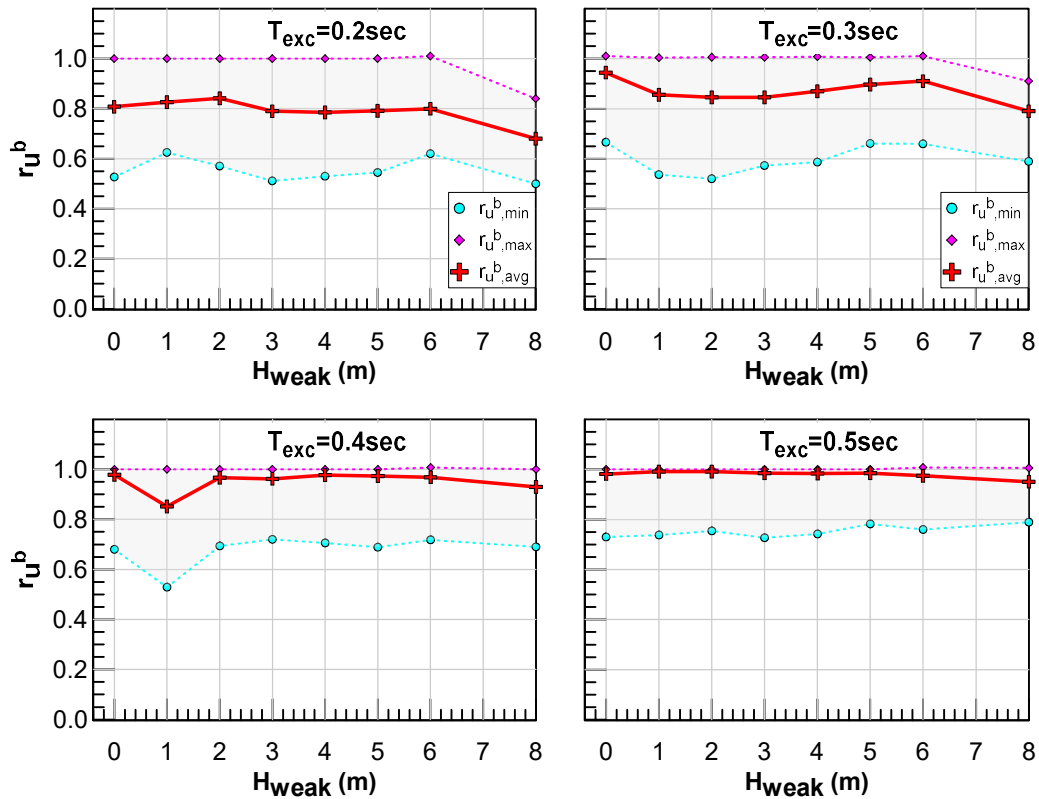
Σχήμα 4.20: Συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ συναρτήσει του H_{weak} για διαφορετικές περιόδους T_{exc} .

Η ίδια διαπίστωση προκύπτει και από το **Σχήμα 4.21** όπου παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u^{cr},avg})$ συναρτήσει της περιόδου T_{exc} . Πράγματι, η ελάχιστη τιμή του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ εκτιμάται ίση με $\min(r_{u^{cr},avg}) \approx 0.52$ ανεξάρτητα από την περίοδο της επιβαλλόμενης διέγερσης T_{exc} .



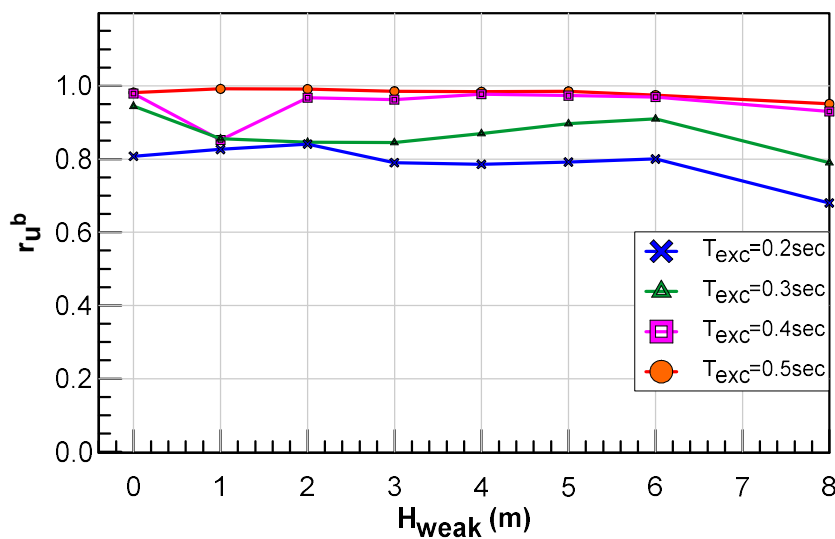
Σχήμα 4.21: Διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u^{cr},avg})$ του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων συναρτήσει του T_{exc} .

Για την εξέταση της απόκρισης του κάτω ρευστοποιήσιμου στρώματος, μελετάται η μεταβολή των δεικτών συμπεριφοράς r_u^b . Στο **Σχήμα 4.22** παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής των δεικτών συμπεριφοράς r_u^b συναρτήσει του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} για διαφορετικές περιόδους διέγερσης T_{exc} .



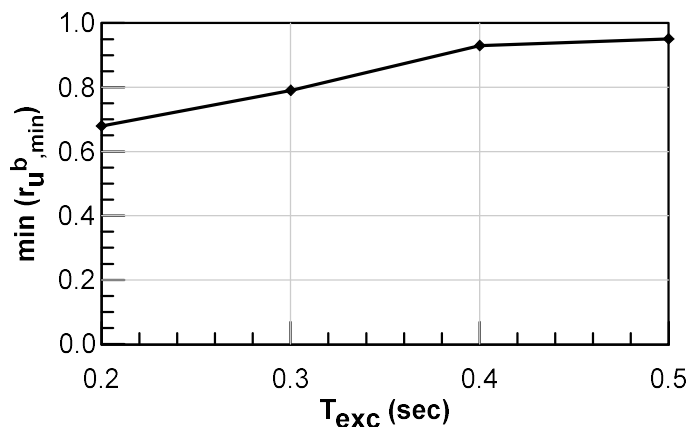
Σχήμα 4.22: Διάγραμμα μεταβολής των δεικτών συμπεριφοράς r_u^b συναρτήσεως του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} για διαφορετικές περιόδους T_{exc} .

Από το **Σχήμα 4.22** για όλες τις περιπτώσεις φαίνεται ότι ο μέσος λόγος υπερπίεσης πόρων στο κατώτερο αμμώδες στρώμα λαμβάνει μικρότερες τιμές για μικρότερες τιμές της περιόδου T_{exc} . Στο **Σχήμα 4.23** παρουσιάζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς r_u^b, avg συναρτήσεως του H_{weak} για διαφορετικές περιόδους T_{exc} .



Σχήμα 4.23: Συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς r_u^b, avg συναρτήσεως του H_{weak} για διαφορετικές περιόδους T_{exc} .

Παρατηρείται ότι οι καμπύλες μεταβολής του $r_{u^b,avg}$ για τις αναλύσεις με διαφορετικές περιόδους T_{exc} δεν συγκλίνουν μεταξύ τους και επομένως δεν εξάγεται κάποιο άμεσο συμπέρασμα. Φαίνεται ωστόσο ότι καθώς μειώνεται η περίοδος T_{exc} , ο δείκτης συμπεριφοράς $r_{u^b,avg}$ διατηρεί χαμηλότερες τιμές.



Σχήμα 4.24: Διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u^b,avg})$ του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων συναρτήσει του T_{exc} .

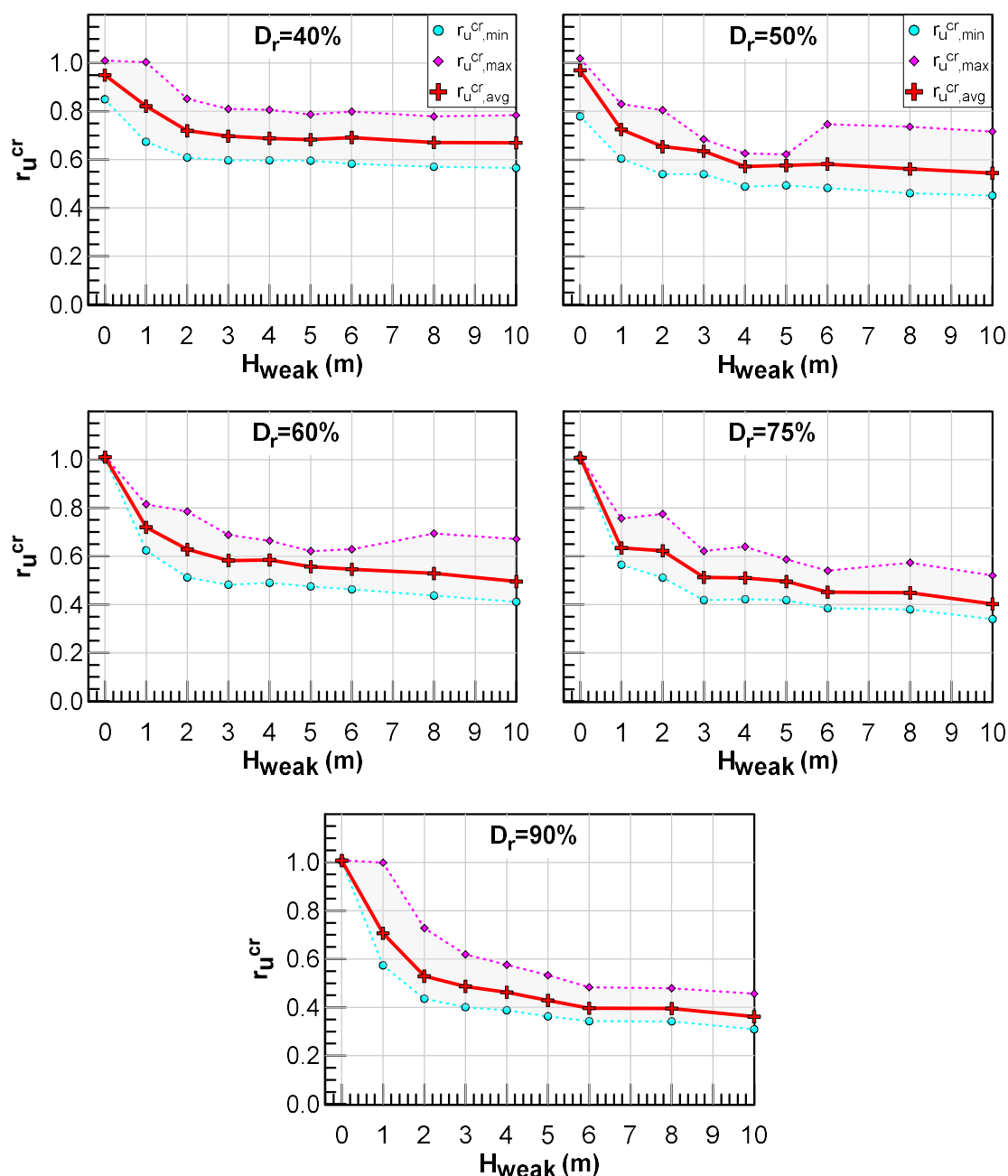
Στο **Σχήμα 4.24** παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u^b,avg})$ του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων συναρτήσει του T_{exc} . Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η ελάχιστη τιμή του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u^b,avg}$ είναι περίπου ίση με $\min(r_{u^b,avg}) \approx 0.68$ για περίοδο της επιβαλλόμενης διέγερσης ίση με $T_{exc}=0.20\text{sec}$ και αυξάνεται σταδιακά έως την τιμή $\min(r_{u^b,avg}) \approx 0.95$ για περίοδο της επιβαλλόμενης διέγερσης ίση με $T_{exc}=0.50\text{sec}$.

4.5 Επίδραση της σχετικής πυκνότητας D_{r0}

Η τελευταία παράμετρος η οποία διερευνάται είναι η σχετική πυκνότητα D_{r0} των πυκνότερων στρωμάτων της άμμου. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν 40 αριθμητικές αναλύσεις με διαφορετική σχετική πυκνότητα $D_{r0}=40\%$, 50% , 60% , 75% και 90% και μεταβλητά πάχη «ασθενούς» στρώσης $H_{weak}=1\text{m}$, 2m , 3m , 4m , 5m , 6m , 8m και 10m . Σε αυτήν την ομάδα αριθμητικών αναλύσεων το πάχος της εδαφικής κρούστας παρέμεινε ίσο με $H_{crust}=6\text{m}$ και η περίοδος της διέγερσης ίση με $T_{exc}=0.3\text{ sec}$.

Ο **Πίνακας 4.4** περιλαμβάνει τις τιμές των δεικτών συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ και $r_{u^b,avg}$ όπως προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις για διαφορετική σχετική πυκνότητα D_{r0} και μεταβλητό πάχος H_{weak} . Επιπλέον, στο **Σχήμα 4.25** παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u^{cr}}$ συναρτήσει του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} για διαφορετική σχετική πυκνότητα $D_{r0}=40\%$, 50% , 60% , 75% και 90% . Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η μορφή της καμπύλης είναι παρόμοια για όλες τις αναλύσεις

με διαφορετικές σχετικές πυκνότητες D_{r0} . Σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει μια πτωτική τάση στις καμπύλες των δεικτών συμπεριφοράς r_u^{cr} συναρτήσει του H_{weak} . Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές της σχετικής πυκνότητας D_{r0} επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μείωση στο r_u^{cr} . Ιδιαίτερα αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι ακόμη και για σχετική πυκνότητα $D_{r0}=40\%$, κοντινή σε αυτήν της «ασθενούς» στρώσης $D_r=30\%$, παρατηρείται μείωση στον δείκτη συμπεριφοράς $r_{u^{cr,avg}}$, η οποία μαρτυρά την ισχυρή επίδραση της «ασθενούς» στρώσης ως προς την δημιουργία συνθηκών «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης».

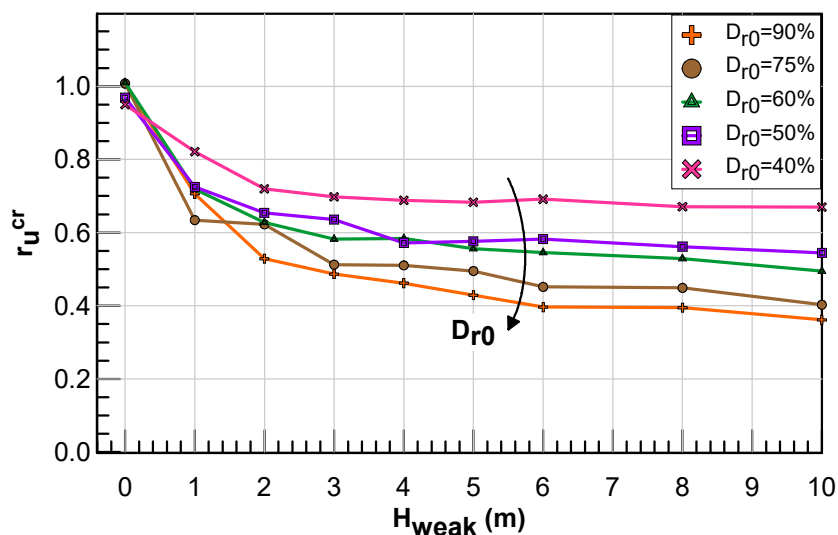


Σχήμα 4.25: Διάγραμμα μεταβολής των δεικτών συμπεριφοράς r_u^{cr} συναρτήσει του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} για διαφορετικές σχετικές πυκνότητες D_{r0} .

Πίνακας 4.4: Τιμές των δεικτών συμπεριφοράς $r_{u,avg}^{cr}$ και $r_{u,avg}^b$ για διάφορους συνδυασμούς D_{r0} και H_{weak} .

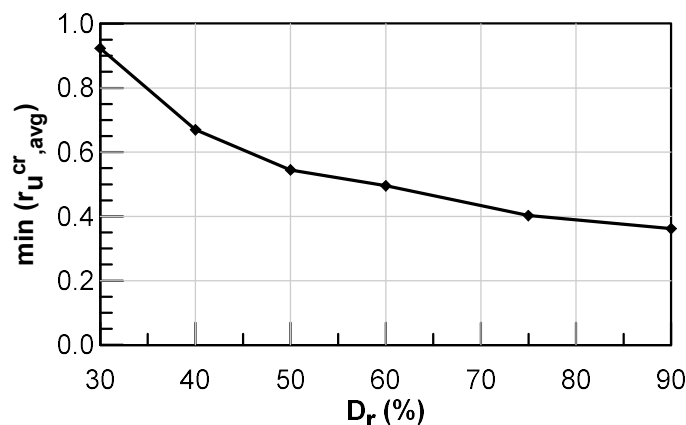
D_{r0} (m)	H_{weak} (m)	$r_{u,avg}^{cr}$	$r_{u,avg}^b$
40	1	0.82	0.94
40	2	0.72	0.91
40	3	0.70	0.94
40	4	0.69	0.95
40	5	0.68	0.96
40	6	0.69	0.97
40	8	0.67	0.93
40	10	0.67	-
50	1	0.73	0.90
50	2	0.65	0.92
50	3	0.64	0.91
50	4	0.57	0.86
50	5	0.58	0.92
50	6	0.58	0.95
50	8	0.56	0.88
50	10	0.54	-
60	1	0.72	0.86
60	2	0.63	0.85
60	3	0.58	0.85
60	4	0.58	0.87
60	5	0.56	0.90
60	6	0.55	0.91
60	8	0.53	0.79
60	10	0.50	-
75	1	0.63	0.83
75	2	0.62	0.84
75	3	0.51	0.84
75	4	0.51	0.85
75	5	0.50	0.88
75	6	0.45	0.69
75	8	0.45	0.66
75	10	0.40	-
90	1	0.71	0.84
90	2	0.53	0.88
90	3	0.49	0.90
90	4	0.46	0.87
90	5	0.43	0.83
90	6	0.40	0.59
90	8	0.39	0.59
90	10	0.36	-

Το **Σχήμα 4.26** που ακολουθεί, απεικονίζει ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u,avg}^{cr}$ συναρτήσει του H_{weak} για διαφορετικές σχετικές πυκνότητες D_{r0} . Διαπιστώνεται έτσι ότι η σχετική πυκνότητα των πυκνότερων στρωμάτων άμμου αποτελεί έναν ιδιαίτερα κρίσιμο παράγοντα ο οποίος επιδρά στον δείκτη συμπεριφοράς $r_{u,avg}^{cr}$. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι για μεγαλύτερες τιμές της σχετικής πυκνότητας D_{r0} επιτυγχάνεται μεγαλύτερη τελική μείωση στο δείκτη συμπεριφοράς $r_{u,avg}^{cr}$.



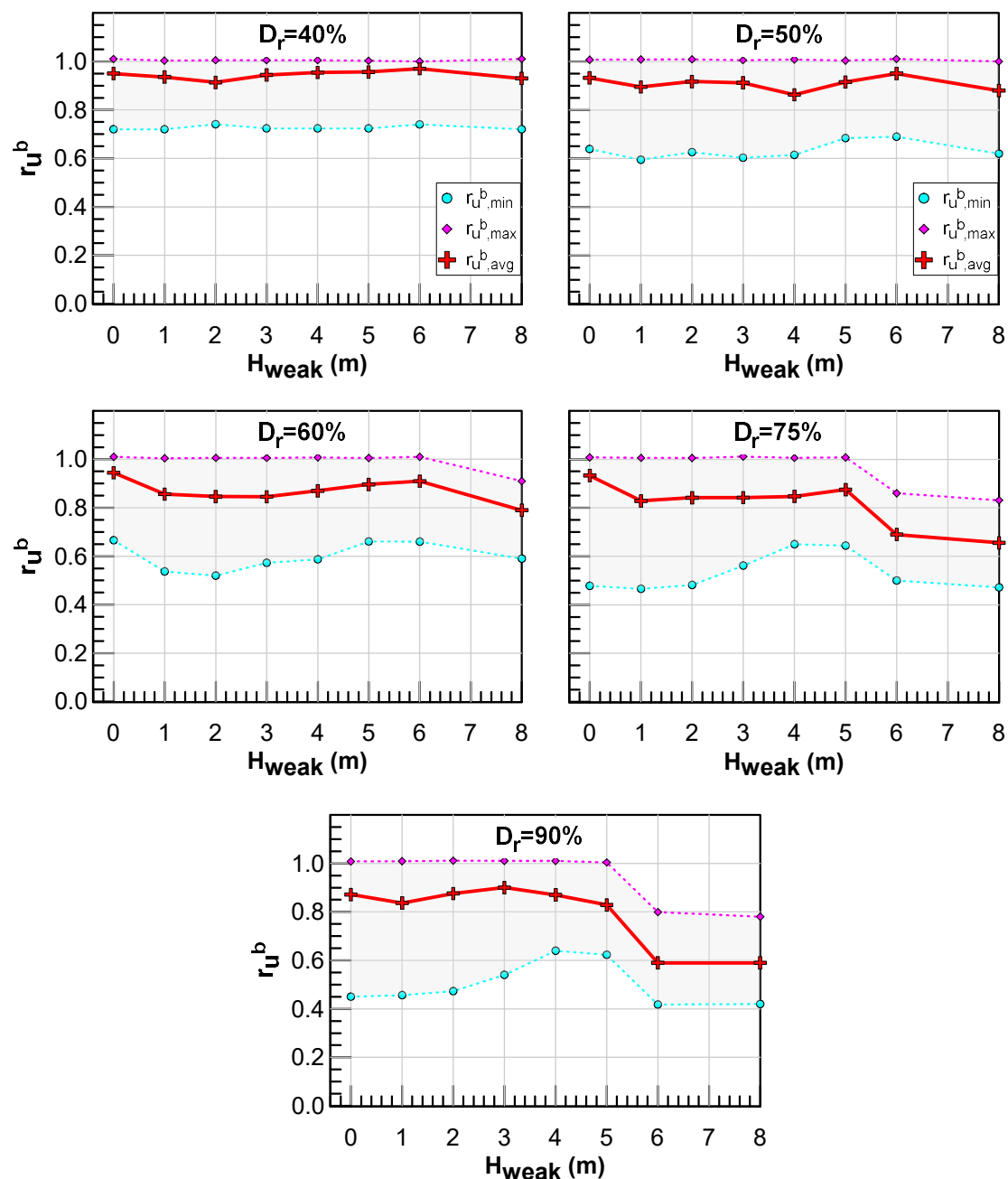
Σχήμα 4.26: Συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u,avg}^{cr}$ συναρτήσει του H_{weak} για διαφορετικές σχετικές πυκνότητες D_{r0} .

Στο **Σχήμα 4.27** παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u,avg}^{cr})$ συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας D_{r0} . Παρατηρείται ότι η ελάχιστη τιμή του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u,avg}^{cr}$ μεταβάλλεται από $\min(r_{u,avg}^{cr}) \approx 0.67$ για σχετική πυκνότητα των στιβαρότερων στρωμάτων άμμου ίση με $D_{r0}=40\%$ σε $\min(r_{u,avg}^{cr}) \approx 0.36$ για σχετική πυκνότητα ίση με $D_{r0}=90\%$.



Σχήμα 4.27: Διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u,avg}^{cr})$ του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων συναρτήσει του D_{r0} .

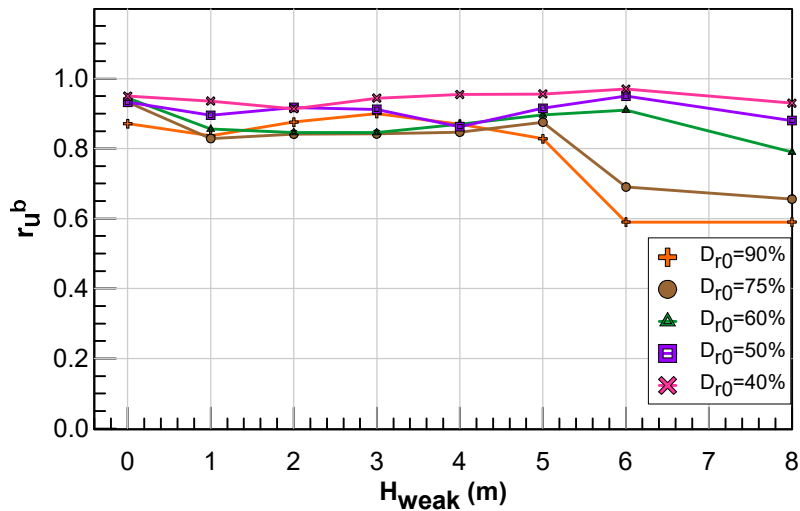
Η επίδραση της σχετικής πυκνότητας D_{r0} στους δείκτες συμπεριφοράς του υποκείμενου στρώματος άμμου αναλύεται στα επόμενα **Σχήματα 4.28 - 4.32**. Στο **Σχήμα 4.28** που ακολουθεί παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς r_u^b συναρτήσει του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} για διαφορετικές σχετικές πυκνότητες D_{r0} .



Σχήμα 4.28: Διάγραμμα μεταβολής των δεικτών συμπεριφοράς r_u^b συναρτήσει του πάχους του «ασθενούς» στρώματος H_{weak} για διαφορετική σχετική πυκνότητα D_{r0} .

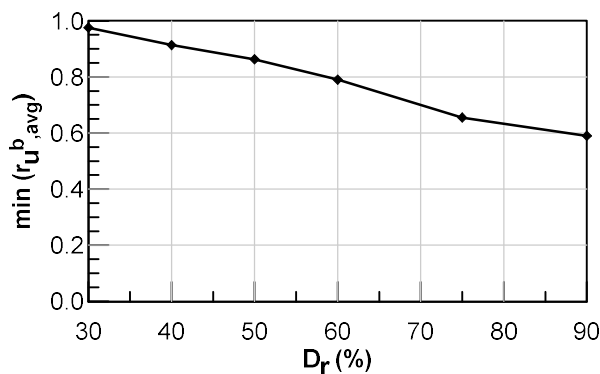
Και εδώ παρατηρείται ότι, για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ο μέσος λόγος υπερπίεσης πόρων στο κατώτερο αμμώδες στρώμα είναι μικρότερος από τη μονάδα. Το

γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι η επίδραση της «ασθενούς» στρώσης είναι ευνοϊκή και για το κάτω ρευστοποιήσιμο στρώμα. Επιπλέον, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το H_{weak} τόσο μικραίνει το πάχος του κατώτερου αμμώδους στρώματος, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη μείωση των δεικτών συμπεριφοράς r_u^b . Στο **Σχήμα 4.29** απεικονίζεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς r_u^b συναρτήσει του H_{weak} για διαφορετική σχετική πυκνότητα D_{r0} . Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για μεγαλύτερες τιμές της σχετικής πυκνότητας D_{r0} επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μείωση στους δείκτες συμπεριφοράς r_u^b .



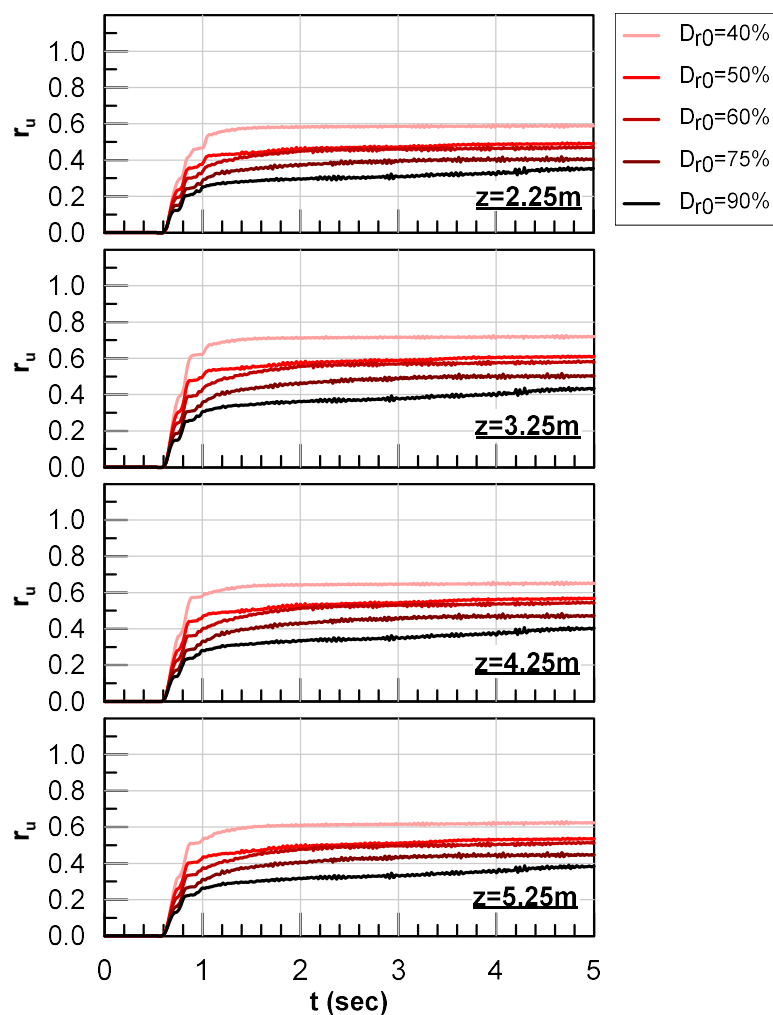
Σχήμα 4.29: Συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς r_u^b συναρτήσει του H_{weak} για διαφορετικές σχετικές πυκνότητες D_{r0} .

Για την ποσοτική αποτίμηση αυτής της τάσης, στο **Σχήμα 4.30** παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_u^b)$ συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας D_{r0} . Παρατηρείται έτσι ότι η ελάχιστη τιμή του δείκτη συμπεριφοράς r_u^b μεταβάλλεται από $\min(r_u^b) \approx 0.91$ για σχετική πυκνότητα των στιβαρότερων στρωμάτων άμμου ίση με $D_{r0}=40\%$ έως την τιμή $\min(r_u^b) \approx 0.59$ για σχετική πυκνότητα ίση με $D_{r0}=90\%$.



Σχήμα 4.30: Διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_u^b)$ του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων συναρτήσει του D_{r0} .

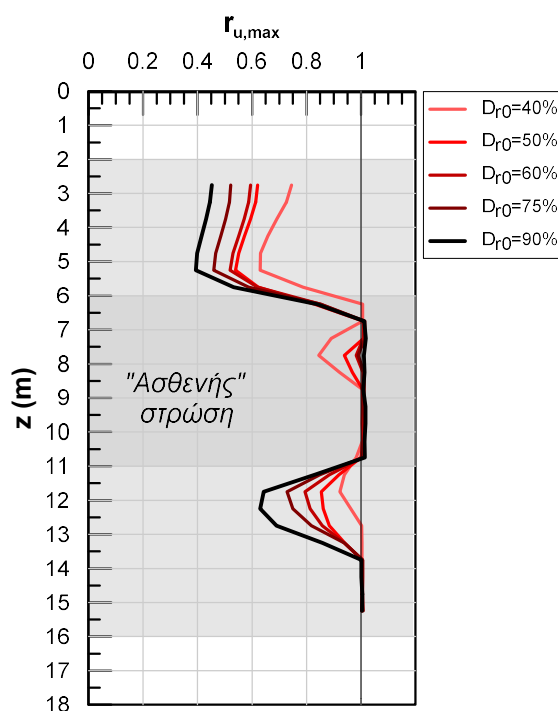
Για την περαιτέρω κατανόηση της επιρροής της σχετικής πυκνότητας D_{r0} στη ρευστοποίηση της ανομοιόμορφης εδαφικής στήλης, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι χρονοϊστορίες ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων στα στρώματα της εδαφικής κρούστας για τις αριθμητικές αναλύσεις με $D_{r0}=40\%$, 50% , 60% , 75% και 90% (Σχήμα 4.31). Οι χρονοϊστορίες όλων των αναλύσεων που παρουσιάζονται αντιστοιχούν σε πάχος «ασθενούς» στρώσης $H_{weak}=5m$, για το οποίο οι δείκτες συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ προσεγγίζουν την ελάχιστη τιμή τους $\min(r_{u^{cr},avg})$, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.26.



Σχήμα 4.31: Χρονοϊστορίες ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων στα ρευστοποιήσιμα σημεία της εδαφικής κρούστας για τις αριθμητικές αναλύσεις με $D_{r0}=40\%$, 50% , 60% , 75% και 90% .

Από το Σχήμα 4.31 παρατηρείται ότι στις αριθμητικές αναλύσεις με μικρότερη σχετική πυκνότητα D_{r0} ο λόγος υπερπίεσης πόρων αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό έως τη χρονική στιγμή $t=0.8-0.9$ sec. Όμως, αμέσως μετά από τη χρονική στιγμή $t=0.8-0.9$ sec, κατά την οποία στο «ασθενές» στρώμα αναπτύσσεται μεγάλος λόγος υπερπίεσης πόρων ($r_u \approx 0.8$) και πρακτικά ρευστοποιείται, η συμπεριφορά των σημείων της εδαφικής κρούστας αλλάζει δραστικά. Πιο συγκεκριμένα, μετά την ρευστοποίηση της «ασθενούς» στρώσης ο ρυθμός

αύξησης του r_u ανακόπτεται αισθητά. Μετά τη χρονική στιγμή $t=0.8-0.9$ sec ο λόγος r_u στα διάφορα σημεία της εδαφικής κρούστας αυξάνεται ελάχιστα έως ότου λάβει τη μέγιστη τιμή του $r_{u,max}$ κατά το τέλος της δόνησης. Στο **Σχήμα 4.32** παρουσιάζεται η κατανομή με το βάθος του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$, κατά το τέλος της δόνησης, για τις αριθμητικές αναλύσεις με $D_{r0} = 40\%$, 50% , 60% , 75% και 90% , οι οποίες αντιστοιχούν σε πάχος «ασθενούς» στρώσης $H_{weak}=5m$.



Σχήμα 4.32: Κατανομή με το βάθος του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$ για τις αριθμητικές αναλύσεις με $D_{r0} = 40\%$, 50% , 60% , 75% και 90% .

Στο **Σχήμα 4.32** δείχνεται χαρακτηριστικά ότι οι μέγιστες τιμές του λόγου υπερπίεσης πόρων στα διάφορα ρευστοποιήσιμα σημεία της εδαφικής κρούστας μειώνονται καθώς αυξάνεται η σχετική πυκνότητα D_{r0} . Η παρατήρηση αυτή είναι απόλυτα συμβατή με το **Σχήμα 4.27**, στο οποίο φαίνεται ότι η ελάχιστη τιμή $\min(r_{u^{cr},avg}) = 0.36$ του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων στα ρευστοποιήσιμα σημεία της εδαφικής κρούστας αντιστοιχεί στην αριθμητική ανάλυση με $D_{r0} = 90\%$. Μάλιστα, παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές της σχετικής πυκνότητας D_{r0} τόσο περισσότερο ευνοείται όχι μόνο το ανώτερο αλλά και το κατώτερο αμμώδες στρώμα.

4.6 Συμπεράσματα

Οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την ποιοτική διερεύνηση της ρευστοποίησης της ανομοιόμορφης απόθεσης άμμου, με ένθετη «ασθενή στρώση», μειωμένης αντοχής σε ρευστοποίηση, οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα πρακτικού ενδιαφέροντος:

- i. Το πάχος της «ασθενούς» στρώσης H_{weak} επηρεάζει ιδιαίτερα τη σεισμική απόκριση του ρευστοποιήσιμου στρώματος το οποίο υπέρκειται της «ασθενούς» στρώσης. Συγκεκριμένα, καθώς αυξάνεται το H_{weak} μειώνονται οι επιταχύνσεις στα σημεία υπεράνω της «ασθενούς» στρώσης με αποτέλεσμα οι λόγοι υπερ-πίεσης πόρων σε αυτά να διατηρούνται σε τιμές όλο και χαμηλότερες της μονάδας. Προκαλείται δηλαδή ένα φαινόμενο «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» και η δημιουργία μιας μη-ρευστοποιήσιμης «κρούστας» πάνω από την «ασθενή» στρώση.
- ii. Το φαινόμενο της «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» παρατηρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις ανομοιόμορφων εδαφικών προφίλ, ανεξάρτητα από τις εκάστοτε συνθήκες εδάφους και σεισμικής δόνησης. Καθώς αυξάνεται το πάχος H_{weak} της «ασθενούς» στρώσης, ο μέσος λόγος υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα $r_{u^{cr},avg}$ μειώνεται σταδιακά και τείνει ασυμπτωτικά σε μια ελάχιστη τιμή $\min(r_{u^{cr},avg})$. Ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες (το πάχος της εδαφικής κρούστας H_{crust} , την περίοδο της επιβαλλόμενης διέγερσης T_{exc} και κυρίως τη σχετική πυκνότητα D_{r0} των στιβαρότερων στρωμάτων άμμου) αυτή η ελάχιστη τιμή κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $\min(r_{u^{cr},avg}) \approx 0.67-0.36$. Επιπλέον, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες διαφέρει το απαιτούμενο πάχος H_{weak} πέρα από το οποίο η τιμή του $r_{u^{cr},avg}$ σταματά να μειώνεται, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 3-10m περίπου.
- iii. Το πάχος της εδαφικής κρούστας H_{crust} δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη μέση τιμή του λόγου υπερπίεσης πόρων στο ανώτερο αμμώδες στρώμα. Τόσο η μορφή της καμπύλης $r_{u^{cr},avg} - H_{weak}$ όσο και οι ελάχιστες τιμές του δείκτη συμπεριφοράς $\min(r_{u^{cr},avg})$ είναι πρακτικά ανεξάρτητες από το H_{crust} .
- iv. Αντίθετα, έχει σημαντική επίδραση η περίοδος διέγερσης T_{exc} . Συγκεκριμένα, η περίοδος διέγερσης επηρεάζει το ρυθμό μείωσης του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ χωρίς ωστόσο να επηρεάζει την ελάχιστη τιμή του $\min(r_{u^{cr},avg})$. Αυτό σημαίνει ότι για μεγαλύτερες περιόδους T_{exc} το πάχος H_{weak} που απαιτείται προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή μείωση στο μέσο λόγο υπερπίεσης πόρων της εδαφικής κρούστας γίνεται μεγαλύτερο.

- v. Μετά το πάχος της «ασθενούς» στρώσης H_{weak} , η σχετική πυκνότητα D_{r0} των στιβαρότερων στρωμάτων άμμου αναδεικνύεται ως ο πιο σημαντικός παράγοντας που επιδρά την τελική τιμή του δείκτη συμπεριφοράς $\min(r_{u^{cr},avg})$. Η αύξηση της σχετικής πυκνότητας D_{r0} συνεπάγεται μείωση της μέσης τιμής του λόγου υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα, από $\min(r_{u^r,avg}) \approx 0.67$ για σχετική πυκνότητα των στιβαρότερων στρωμάτων άμμου ίση με $D_{r0}=40\%$ έως $\min(r_{u^r,avg}) \approx 0.36$ για σχετική πυκνότητα ίση με $D_{r0}=90\%$.
- vi. Η επίδραση της «ασθενούς» στρώσης ρευστοποίησης στην σεισμική απόκριση του υποκείμενου ρευστοποιήσιμου στρώματος είναι επίσης ευεργετική, αλλά όχι τόσο σημαντική και συστηματική όσο για το υπερκείμενο στρώμα. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβολή του πάχους της κρούστας H_{crust} φαίνεται δεν προκαλεί κάποια συστηματική τάση για αύξηση ή μείωση του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u^b,avg}$. Αντιθέτως, η περίοδος διέγερσης T_{exc} και η σχετική πυκνότητα D_{r0} φαίνεται να επιδρούν στις τιμές του $r_{u^b,avg}$. Συγκεκριμένα, όσο μειώνεται η περίοδος T_{exc} και όσο αυξάνεται η πυκνότητα D_{r0} τόσο ευμενέστερα γίνονται τα αποτελέσματα της «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» για το κατώτερο αμμώδες στρώμα.

Κεφάλαιο 5

Αναλυτική μεθοδολογία εκτίμησης του FS_L στην εδαφική κρούστα

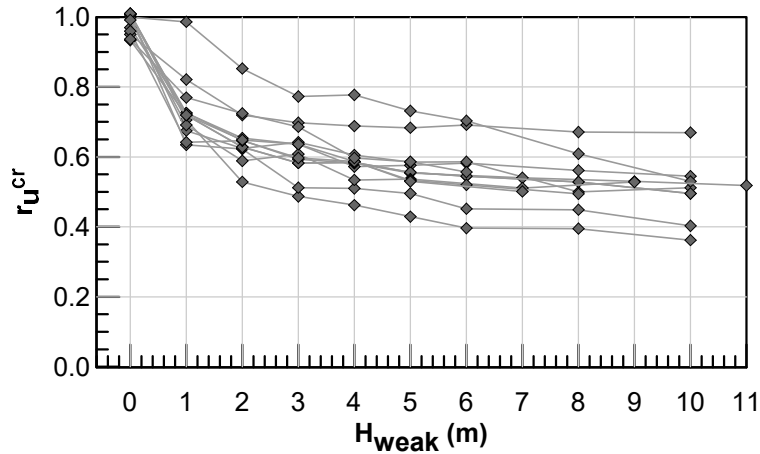
5.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο 4 έγινε σαφές ότι μια ενδιάμεση «ασθενής», σε όρους σχετικής πυκνότητας, στρώση μπορεί να λειτουργήσει ως «Φυσική Σεισμική Μόνωση» για το ανώτερο αμμώδες στρώμα, αποτρέποντας έτσι τη ρευστοποίησή του και διατηρώντας το μέσο λόγο υπερπίεσης πόρων σε αυτό σε χαμηλά επίπεδα της τάξης του $r_{u,avg}^{cr} = 0.40-0.70$. Επιπλέον, οι παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αποτύπωσαν τους παράγοντες που επιδρούν στο φαινόμενο.

Υπολείπεται, ωστόσο, η ανάπτυξη μιας αναλυτικής μεθοδολογίας μέσω της οποίας θα εκτιμάται ποσοτικά η ευμενής επίδραση της «ασθενούς» στρώσης. Η μελέτη του φαινομένου εστιάζεται στην εδαφική «κρούστα», στην οποία εδράζονται τα τεχνικά έργα και για την οποία θα αναπτυχθεί το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού. Αντικείμενο, λοιπόν, του Κεφαλαίου 5 αποτελεί η διατύπωση μαθηματικών σχέσεων για την εκτίμηση του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,avg}^{cr}$ στην εδαφική κρούστα. Μέσω της εκτίμησης του $r_{u,avg}^{cr}$ είναι δυνατός ο υπολογισμός του διορθωμένου μέσου συντελεστή ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης FS_L στην εδαφική κρούστα, ο οποίος προκύπτει σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο που προβλέπει η μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014). Η αξιοπιστία αυτής της νέας μεθοδολογίας εκτίμησης του FS_L στην εδαφική κρούστα ελέγχεται μέσω των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων.

5.2 Πρόβλεψη του $r_{u,avg}^{cr}$ μέσω αριθμητικών αναλύσεων

Στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάστηκαν σε διαγράμματα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u,avg}^{cr}$ συναρτήσει του πάχους της «ασθενούς» στρώσης H_{weak} . Στο **Σχήμα 5.1** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των αριθμητικών αναλύσεων σε μορφή διαγραμμάτων $r_{u,avg}^{cr} - H_{weak}$.



Σχήμα 5.1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα $r_{u^{cr,avg}}$ συναρτήσει του H_{weak} βάσει των αποτελεσμάτων όλων των αριθμητικών αναλύσεων.

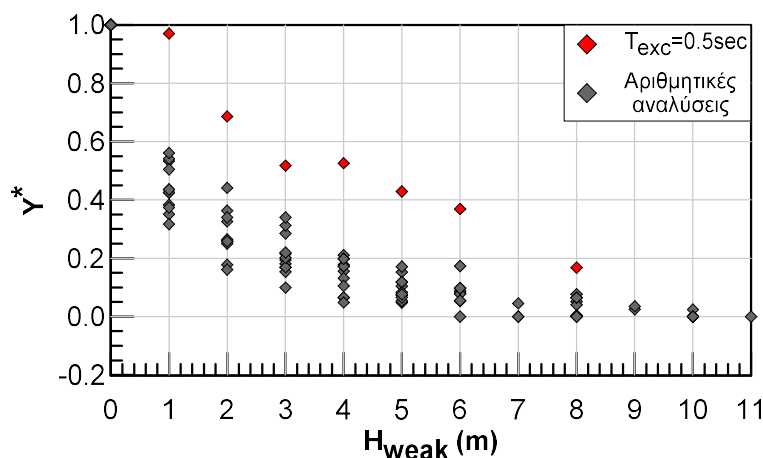
Παρατηρείται ότι, παρά την διασπορά των αριθμητικών προβλέψεων, εμφανίζεται συστηματικά μια ενιαία μορφή καμπύλης που συνδέει το μέσο λόγο υπερπίεσης πόρων στην κρούστα $r_{u^{cr,avg}}$ και το πάχος της «ασθενούς» στρώσης H_{weak} . Η καμπύλη αυτή περιορίζεται ανάμεσα σε μία μέγιστη $\max(r_{u^{cr,avg}})$ και μία ελάχιστη $\min(r_{u^{cr,avg}})$ τιμή. Η μέγιστη τιμή $\max(r_{u^{cr,avg}})$ είναι περίπου ίση με τη μονάδα, και αντιστοιχεί στην περίπτωση της ομοιόμορφης εδαφικής στήλης με μηδενικό πάχος «ασθενούς» στρώσης ($H_{weak} = 0m$). Στην περίπτωση αυτή ισχύει $\max(r_{u^{cr,avg}}) \approx 1.00$, διότι απουσιάζει το «ασθενές» στρώμα χάρις το οποίο παρέχεται «Φυσική Σεισμική Μόνωση» στο ανώτερο στρώμα. Αντίθετα, η τιμή $\min(r_{u^{cr,avg}})$ δηλώνει τη μέγιστη δυνατή μείωση των υπερπίεσεων πόρων στην κρούστα ή απλούστερα τη βέλτιστη «Φυσική Σεισμική Μόνωση», η οποία επιτυγχάνεται για κάποιο πάχος H_{weak} . Σε κάθε ομάδα αριθμητικών αναλύσεων με σταθερές παραμέτρους H_{crust} , T_{exc} , D_{r0} και μεταβλητό H_{weak} η τιμή $\min(r_{u^{cr,avg}})$ υπολογίζεται ως η ελάχιστη από τις τιμές $r_{u^{cr,avg}}$ που προκύπτουν για διάφορα πάχη H_{weak} .

Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, από το **Σχήμα 5.1** διαπιστώνεται ότι η διασπορά ανάμεσα στα σημεία των αριθμητικών αναλύσεων είναι αρκετά μεγάλη, γεγονός που δυσκολεύει την ανάδειξη μιας ακριβούς αναλυτικής εξίσωσης για την πρόβλεψη του $r_{u^{cr,avg}}$. Απαιτείται, λοιπόν, μια προσπάθεια για μείωση αυτής της διασποράς, με την «εξάλειψη» της παραμέτρου $\min(r_{u^{cr,avg}})$. Η παράμετρος $\min(r_{u^{cr,avg}})$ διαφοροποιείται σε κάθε ανάλυση και επηρεάζεται σημαντικά από τη σχετική πυκνότητα D_{r0} που έχει επιλεγεί για τα στιβαρότερα στρώματα άμμου. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η κανονικοποίηση του κατακόρυφου άξονα Y στην ακόλουθη μορφή:

$$Y^* = \frac{r_{u^{cr,avg}} - \min(r_{u^{cr,avg}})}{\max(r_{u^{cr,avg}}) - \min(r_{u^{cr,avg}})} \quad (5.1)$$

Η μεταβλητή Y^* μηδενίζεται ($Y^* = 0$) όταν ο μέσος λόγος υπερπίεσης πόρων λάβει την ελάχιστη τιμή $\min(r_{u,avg}^{cr})$ [δηλαδή: $r_{u,avg}^{cr} = \min(r_{u,avg}^{cr})$] και γίνεται ίση με την μονάδα ($Y^* = 1$) όταν ο μέσος λόγος υπερπίεσης πόρων λάβει την μέγιστη τιμή $\max(r_{u,avg}^{cr})$ [δηλαδή: $r_{u,avg}^{cr} = \max(r_{u,avg}^{cr})$]. Το φυσικό νόημα αυτής της μεταβλητής είναι ότι για $Y^* = 1$ δεν παρέχεται σεισμική μόνωση στο σύστημα, ενώ για $Y^* = 0$ επιτυγχάνεται η βέλτιστη «Φυσική Σεισμική Μόνωση».

Στο **Σχήμα 5.2** παρουσιάζεται το διάγραμμα της κανονικοποιημένης μεταβλητής Y^* συναρτήσει του H_{weak} για όλα τα σημεία που προκύπτουν από τις διάφορες αριθμητικές αναλύσεις. Παρατηρείται ότι η διασπορά μεταξύ των διάφορων σημείων μειώθηκε αισθητά. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα σημεία (με κόκκινο χρώμα) τα οποία διαφοροποιούνται από τα υπόλοιπα και αναδεικνύουν την ανάγκη για κανονικοποίηση επιπλέον του οριζόντιου άξονα X , ώστε να μειωθεί περαιτέρω η διασπορά των σημείων. Τα κόκκινα σημεία αντιστοιχούν στην ομάδα αριθμητικών αναλύσεων με περίοδο διέγερσης ίση με $T_{exc} = 0.5\text{sec}$.



Σχήμα 5.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα κανονικοποιημένης μεταβλητής Y^* συναρτήσει του H_{weak} βάσει των αποτελεσμάτων όλων των αριθμητικών αναλύσεων.

Ο λόγος για τον οποίο αποκλίνουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης με $T_{exc} = 0.5\text{sec}$ είναι ότι το πάχος «ασθενούς» στρώσης που απαιτείται για την ελαχιστοποίηση του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u,avg}^{cr}$ [δηλαδή για $r_{u,avg}^{cr} = \min(r_{u,avg}^{cr})$], είναι αρκετά μεγαλύτερο σε αυτήν την περίπτωση. Οι Bouckovalas et al. (2016) συσχέτισαν το φαινόμενο της «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» με το μήκος κύματος και κατέληξαν σε μια αναλυτική εξίσωση που προβλέπει το απαιτούμενο πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος $H_{L,iso}$ ώστε ο

συντελεστής απομείωσης της επιτάχυνσης εντός του στρώματος αυτού να βρίσκεται στο εύρος τιμών $|F| = 0.20-0.30$. Σύμφωνα με τους Bouckovalas et al. (2016) το $H_{L,iso}$ ισούται με:

$$H_{L,iso} = 0.40(V_{S,L} T_{exc})^{1.54} / (H_{crust})^{0.54} \quad (5.2)$$

Η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο ρευστοποιημένο στρώμα $V_{S,L}$, που απαιτείται για τη χρήση της Εξίσωσης (5.2), υπολογίζεται ως ποσοστό της αρχικής ταχύτητας διάδοσης $V_{S,o}$ στο μη-ρευστοποιημένο έδαφος. Έτσι, βάσει των εκτιμήσεων πεδίου των Miwa & Ikeda (2006) αλλά και των αριθμητικών αναλύσεων των Bouckovalas et al. (2016) η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο ρευστοποιημένο έδαφος κυμαίνεται στο εύρος $V_{S,L}/V_{S,o} = 0.06-0.20$. Στο εξής, για τον υπολογισμό του $H_{L,iso}$ επιλέγεται λόγος απομείωσης της αρχικής ταχύτητας διάδοσης $V_{S,L}/V_{S,o} = 0.12$ ως μια μέση τιμή από το προτεινόμενο εύρος των Bouckovalas et al. (2016). Οι τιμές της αρχικής ταχύτητας διάδοσης $V_{S,o}$ πριν την εκδήλωση φαινομένων ρευστοποίησης στις παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις υπολογίζονται μέσω της τιμής του μέτρου διάτμησης G_o και της φαινόμενης πυκνότητας του εδάφους ρ_{kop} . Για τον υπολογισμό των τιμών του αρχικού μέτρου διάτμησης G_o χρησιμοποιήθηκε η σχέση του Hardin (1978), και η οποία υιοθετείται στο καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand (Παράρτημα Α). Η ατμοσφαιρική πίεση είναι ίση με $p_a=100\text{kPa}$, ο δείκτης πόρων e υπολογίζεται σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην Ενότητα 3.3, ενώ η μέση ενεργός γεωστατική τάση ισούται με $\sigma'_m = [(1+2K_o)/3]\sigma'_{v,o}$:

$$G_o = 600p_a \frac{1}{0.3 + 0.7e^2} \sqrt{\frac{\sigma'_m}{p_a}} \quad (5.3)$$

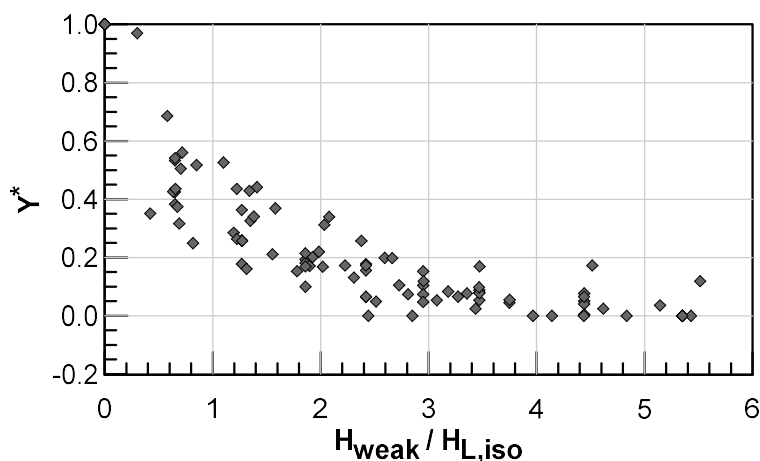
Σημειώνεται τέλος ότι οι τιμές που προκύπτουν αναλυτικά θα πρέπει να απομειωθούν κατά 25% (Tsiaras 2017) έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand έχει μηδενική επιφάνεια διαρροής, δηλαδή τελικώς:

$$V_{S,o} = 0.75 \sqrt{\frac{G_o}{\rho_{kop}}} \quad (5.4)$$

Σημειώνεται ότι η τιμή του εν λόγω μειωτικού συντελεστή επιβεβαιώθηκε μέσω απευθείας μέτρησης της τιμής του $V_{S,o}$ σε ορισμένες από τις αριθμητικές αναλύσεις.

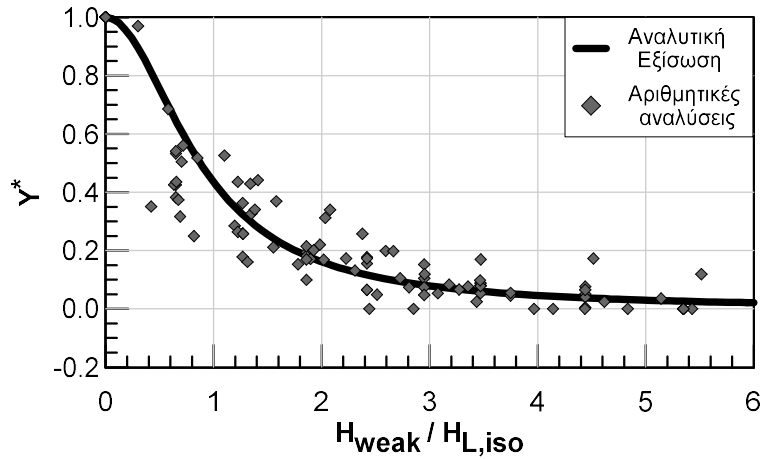
Η τιμή του $H_{L,iso}$, η οποία είναι συνάρτηση του πάχους της κρούστας H_{crust} και του μήκους κύματος στο ρευστοποιημένο στρώμα $\lambda_L = V_{S,L} \cdot T_{exc}$, θα χρησιμοποιηθεί για την κανονικοποίηση του οριζόντιου άξονα X στο συγκεντρωτικό διάγραμμα και την περαιτέρω μείωση της διασποράς μεταξύ των σημείων. Έτσι, η νέα μεταβλητή X^* ορίζεται ως ο λόγος $H_{weak}/H_{L,iso}$. Εφαρμόζοντας όλα τα παραπάνω, στο **Σχήμα 5.3** παρουσιάζεται το διάγραμμα

της κανονικοποιημένης μεταβλητής γ^* συναρτήσει του κανονικοποιημένου πάχους της ασθενούς στρώσης $H_{weak} / H_{L,iso}$ για όλα τα αποτελέσματα των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων. Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 5.3**, η κανονικοποίηση των μεταβλητών του αρχικού **Σχήματος 5.1** οδήγησε σε μείωση της διασποράς μεταξύ των σημείων του διαγράμματος. Επιπλέον, τα σημεία που αντιστοιχούν στις αναλύσεις με $T_{exc} = 0.5\text{sec}$ βρίσκονται πλέον εντός του εύρους διασποράς των υπολοίπων αναλύσεων.



Σχήμα 5.3: Συγκεντρωτικό διάγραμμα κανονικοποιημένης μεταβλητής γ^* συναρτήσει του $H_{weak}/H_{L,iso}$ βάσει των αποτελεσμάτων όλων των αριθμητικών αναλύσεων.

Η μείωση της διασποράς ανάμεσα στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων καθιστά δυνατή την προσαρμογή μιας αναλυτικής εξίσωσης στα αποτελέσματα των αναλύσεων. Στο **Σχήμα 5.4** που ακολουθεί, παρουσιάζεται το διάγραμμα της κανονικοποιημένης μεταβλητής γ^* συναρτήσει του $H_{weak}/H_{L,iso}$ για όλα τα σημεία που προκύπτουν από τις αριθμητικές αναλύσεις, όπως επίσης και η προσαρμοσμένη στα αποτελέσματα καμπύλη. Με βάση το **Σχήμα 5.4** συμπεραίνεται ότι η βέλτιστη «Φυσική Σεισμική Μόνωση» που αντιστοιχεί στην τιμή του $\gamma^* = 0$ επιτυγχάνεται για τιμές του λόγου $H_{weak}/H_{L,iso} \approx 3.00$. Αυτό σημαίνει ότι όταν το πάχος της «ασθενούς» στρώση γίνει τριπλάσιο από το $H_{L,iso}$ τότε οι τιμές του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ συγκλίνουν προς την ελάχιστη τιμή $\min(r_{u^{cr},avg})$. Διαπιστώνεται λοιπόν ότι η μεθοδολογία εκτίμησης του $H_{L,iso}$ που αναπτύχθηκε από τους Bouckovalas et al. (2016) αντιστοιχεί σε ικανοποιητική αλλά όχι στη βέλτιστη «Φυσική Σεισμική Μόνωση».

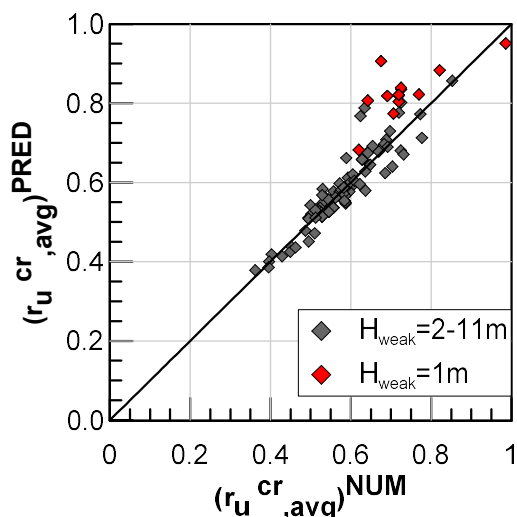


Σχήμα 5.4: Συγκεντρωτικό διάγραμμα κανονικοποιημένης μεταβλητής Y^* συναρτήσει του $H_{weak}/H_{L,iso}$ βάσει των αποτελεσμάτων όλων των αριθμητικών αναλύσεων και καμπύλη προσαρμογής.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι, όταν το πάχος της «ασθενούς» στρώση είναι ίσο με το $H_{L,iso}$, η μεταβλητή Y^* λαμβάνει την τιμή $Y^* \approx 0.4$ και ο μέσος λόγος υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα είναι ίσος με $r_{u,avg}^{cr} = \min(r_{u,avg}^{cr}) + 0.4 [\max(r_{u,avg}^{cr}) - \min(r_{u,avg}^{cr})]$. Η αναλυτική εξίσωση του **Σχήματος 5.4** που προσαρμόστηκε στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων γράφεται ως εξής:

$$r_{u,avg}^{cr} = \min(r_{u,avg}^{cr}) + \frac{\max(r_{u,avg}^{cr}) - \min(r_{u,avg}^{cr})}{1 + 1.30(H_{weak}/H_{L,iso})^2} \quad (5.5)$$

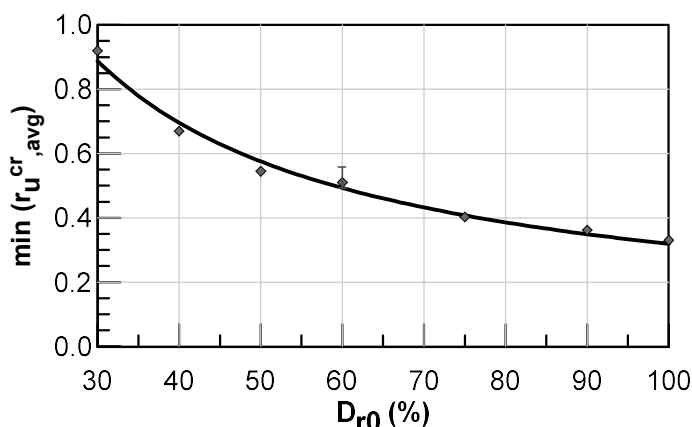
Από την Εξίσωση (5.5) μπορούν να προβλεφθούν αναλυτικά οι τιμές του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα $(r_{u,avg}^{cr})^{PRED}$. Οι τιμές $(r_{u,avg}^{cr})^{PRED}$ συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές $(r_{u,avg}^{cr})^{NUM}$ που μετρούνται απευθείας από τις αριθμητικές αναλύσεις. Για την χρήση της Εξίσωσης (5.5) θεωρείται ότι η μέγιστη τιμή είναι $\max(r_{u,avg}^{cr}) \approx 1$, ενώ η ελάχιστη τιμή $\min(r_{u,avg}^{cr})$ λαμβάνεται απευθείας από τις αριθμητικές αναλύσεις. Στο **Σχήμα 5.5** παρουσιάζεται το συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου [Εξίσωση (5.5)] μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα $(r_{u,avg}^{cr})^{PRED}$ και του προβλεπόμενου από τις αριθμητικές αναλύσεις λόγου $(r_{u,avg}^{cr})^{NUM}$. Παρατηρείται ότι η αναλυτική πρόβλεψη του $r_{u,avg}^{cr}$ είναι ικανοποιητικά ακριβής και δίνει συναφή αποτελέσματα με αυτά των αριθμητικών αναλύσεων. Ωστόσο, στο **Σχήμα 5.5** φαίνεται ότι υπάρχουν κάποια σημεία (με κόκκινο χρώμα) τα οποία αποκλίνουν περισσότερο από τις ακριβείς μετρημένες τιμές $(r_{u,avg}^{cr})^{NUM}$. Τα σημεία αυτά αντιστοιχούν στις αριθμητικές αναλύσεις με $H_{weak} = 1m$. Επομένως, για τις περιπτώσεις με $H_{weak} = 1m$ διαπιστώνεται ότι η Εξίσωση (5.4) τείνει να υπερεκτιμά τις τιμές του $r_{u,avg}^{cr}$, γεγονός όμως που δρα υπέρ της ασφαλείας.



Σχήμα 5.5: Σύγκριση του εκτιμώμενου [Εξ. (5.5)] μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα $(r_{u,avg}^{cr})^{PRED}$ και του μετρημένου από αριθμητικές αναλύσεις λόγου $(r_{u,avg}^{cr})^{NUM}$.

5.3 Αναλυτική σχέση υπολογισμού του $\min(r_{u,avg}^{cr})$

Στην προηγούμενη ενότητα διατυπώθηκε μία αναλυτική σχέση υπολογισμού του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u,avg}^{cr}$. Ωστόσο, για την ανάπτυξη μιας πλήρους μεθοδολογίας είναι απαραίτητη και η εκτίμηση της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u,avg}^{cr})$ ώστε αυτή να μην λαμβάνεται απευθείας από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων. Για το σκοπό αυτό στο **Σχήμα 5.6** παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u,avg}^{cr})$ που προέκυψε από όλες τις ομάδες αριθμητικών αναλύσεων συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας D_{r0} .



Σχήμα 5.6: Μεταβολή της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u,avg}^{cr})$ συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας D_{r0} βάσει των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων και καμπύλη προσαρμογής.

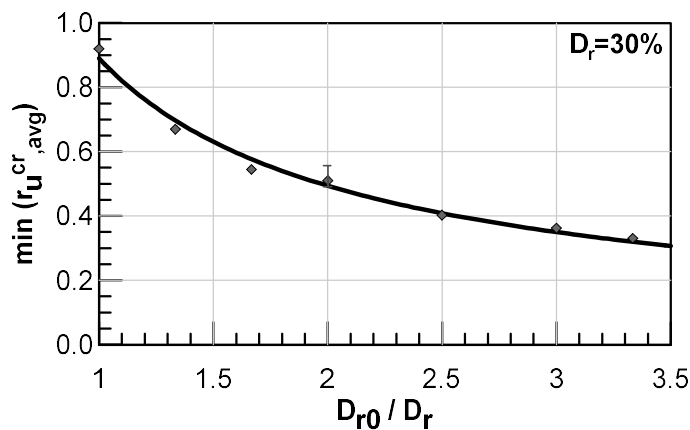
Από τα διακριτά σημεία του διαγράμματος, τα οποία αντιστοιχούν στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, προκύπτει η ακόλουθη αναλυτική σχέση υπολογισμού του $\min(r_{u,avg}^{cr})$:

$$\min(r_{u^{cr},avg}) = \frac{16}{D_{r0}(\%)^{0.85}} \quad (5.6)$$

Η εξίσωση υπολογισμού της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u^{cr},avg})$ του δείκτη συμπεριφοράς βασίζεται στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων με μεταβλητή σχετική πυκνότητα $D_{r0}=40-90\%$ και σταθερή σχετική πυκνότητα «ασθενούς» στρώσης $D_r = 30\%$. Η Εξίσωση (5.6) θα μπορούσε να κανονικοποιηθεί και ο οριζόντιος άξονας του διαγράμματος (Σχήμα 5.6) να μετατραπεί στη μορφή D_{r0}/D_r . Για να μπορεί όμως μια τέτοια σχέση να είναι αξιόπιστη και να χρησιμοποιηθεί στην πράξη θα πρέπει να πραγματοποιηθούν επιπλέον αριθμητικές αναλύσεις με μεταβλητή σχετική πυκνότητα «ασθενούς» στρώσης D_r . Παρόλα αυτά προτείνεται «εν δυνάμει» η παρακάτω κανονικοποιημένη εξίσωση υπολογισμού του $\min(r_{u^{cr},avg})$:

$$\min(r_{u^{cr},avg}) = \frac{0.89}{(D_{r0}/D_r)^{0.85}} \quad (5.7)$$

Η Εξίσωση (5.7) μεταπίπτει στην Εξίσωση (5.6) θέτοντας τη σχετική πυκνότητα της «ασθενούς» στρώσης ίση με $D_r = 30\%$. Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u^{cr},avg})$ συναρτήσεως του λόγου D_{r0}/D_r βάσει τόσο των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων όσο και της καμπύλης προσαρμογής.



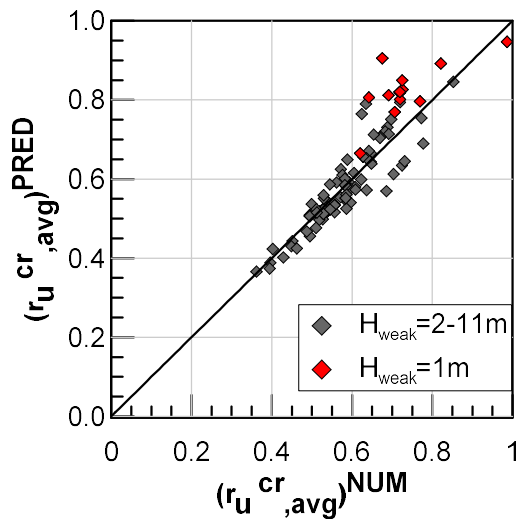
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα μεταβολής της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u^{cr},avg})$ συναρτήσεως του λόγου D_{r0}/D_r βάσει των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων και καμπύλη προσαρμογής.

5.4 Πρόβλεψη του $r_{u^{cr},avg}$ και του FS_L στην εδαφική κρούστα

Για την πρόβλεψη του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ χρησιμοποιούνται οι Εξισώσεις (5.5) και (5.6) από τις οποίες προκύπτει η παρακάτω συνδυαστική εξίσωση:

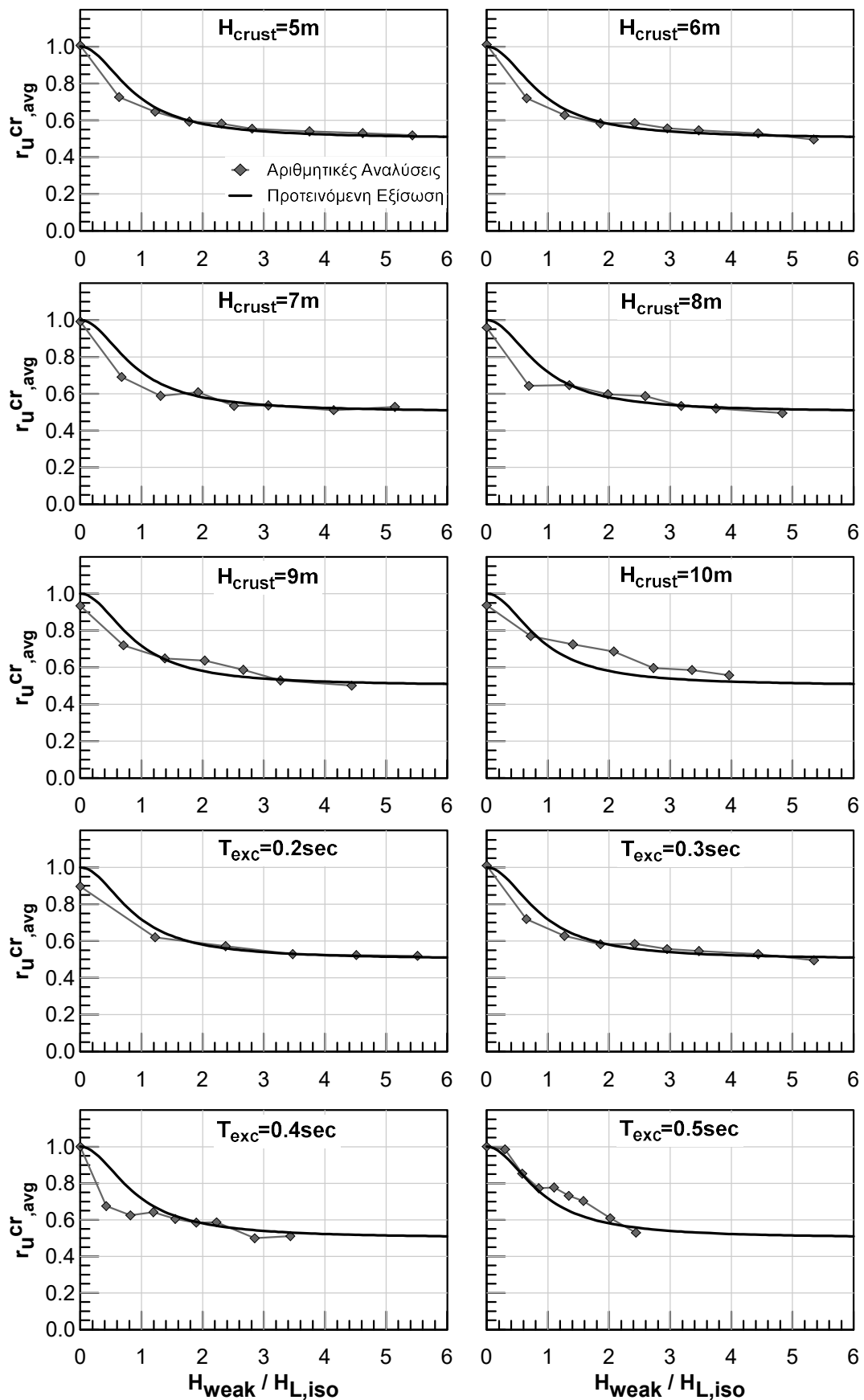
$$r_{u^{cr},avg} = \frac{16}{D_{r0}(\%)^{0.85}} + \frac{1 - 16/D_{r0}(\%)^{0.85}}{1 + 1.30(H_{weak}/H_{L,iso})^2} \quad (5.8)$$

Οι τιμές του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα $(r_{u,avg}^{cr})^{PRED}$ που εκτιμώνται μέσω της Εξίσωσης (5.8) συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές $(r_{u,avg}^{cr})^{NUM}$ που μετρούνται απευθείας από τις αριθμητικές αναλύσεις. Στο **Σχήμα 5.8** παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων και διαπιστώνεται η αξιοπιστία της τελικής αναλυτικής σχέσης (5.8). Τα κόκκινα σημεία που αποκλίνουν περισσότερο από τις ακριβείς μετρημένες τιμές $(r_{u,avg}^{cr})^{NUM}$ αντιστοιχούν στις αριθμητικές αναλύσεις με πάχος «ασθενούς» στρώσης $H_{weak}=1m$. Για τις περιπτώσεις με $H_{weak}=1m$ οι τιμές του $r_{u,avg}^{cr}$ υπερεκτιμώνται, γεγονός όμως που δρα υπέρ της ασφαλείας.

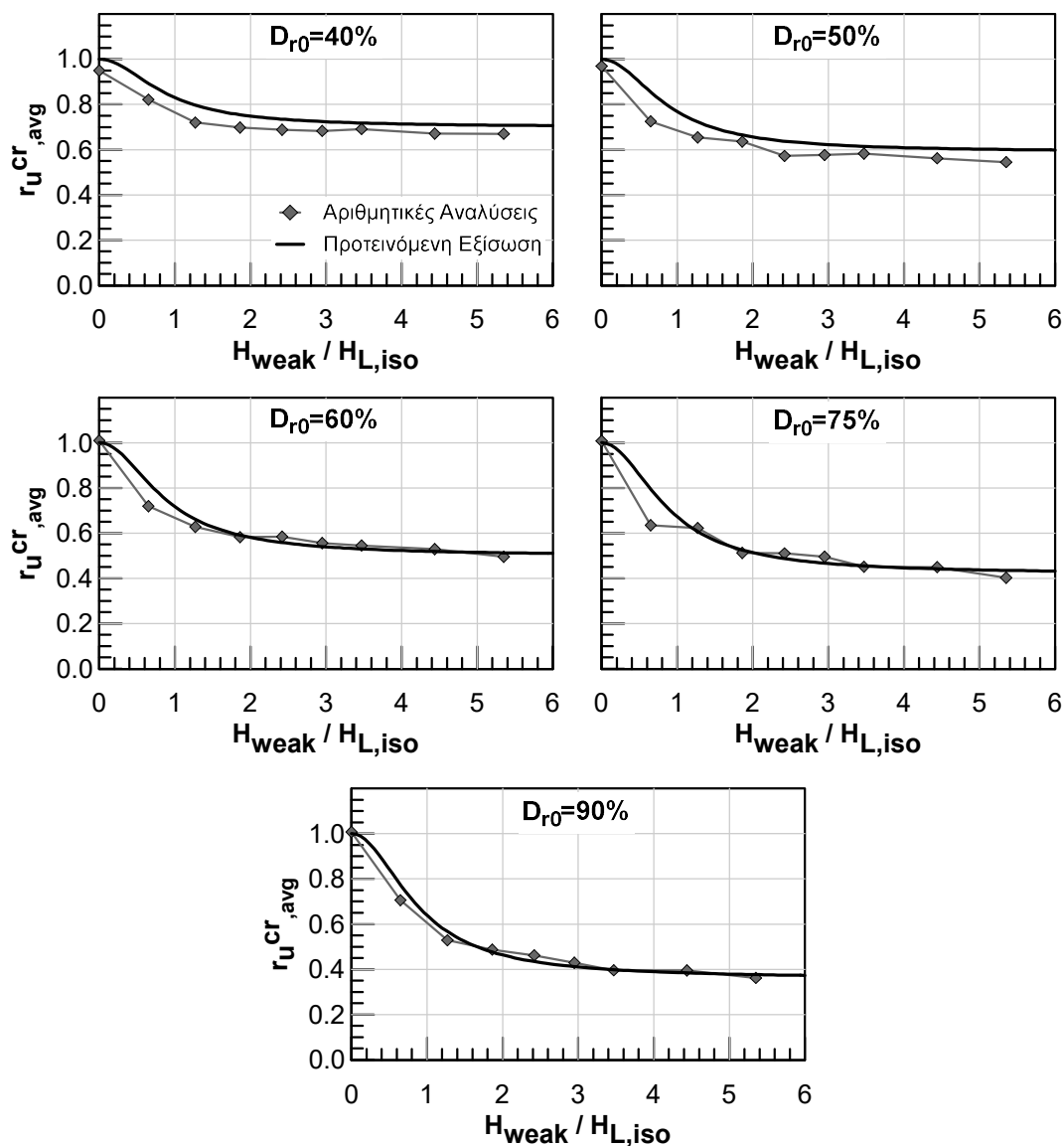


Σχήμα 5.8: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω της Εξίσωσης (5.6) μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα $(r_{u,avg}^{cr})^{PRED}$ και του μετρημένου από αριθμητικές αναλύσεις λόγου $(r_{u,avg}^{cr})^{NUM}$.

Η εφαρμογή της τελικώς διαμορφωμένης Εξίσωσης (5.8) για όλες τις ομάδες αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν πρέπει να οδηγεί σε καμπύλες μεταβολής του $r_{u,avg}^{cr}$ συναρτήσει του $H_{weak}/H_{L,iso}$ παρεμφερείς με εκείνες που προκύπτουν από τις αριθμητικές αναλύσεις. Στα **Σχήματα 5.9** και **5.10** παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του $r_{u,avg}^{cr}$ συναρτήσει του $H_{weak}/H_{L,iso}$ για τις ομάδες αριθμητικών αναλύσεων με μεταβλητό πάχος εδαφικής κρούστας H_{crust} , μεταβλητή περίοδο διέγερσης T_{exc} αλλά και μεταβλητή σχετική πυκνότητα D_{r0} των στιβαρότερων στρώσεων αντίστοιχα. Από τα **Σχήματα 5.9** και **5.10** φαίνεται ότι υπάρχει καλή συμφωνία ανάμεσα στις προβλεπόμενες καμπύλες και σε εκείνες των αριθμητικών αναλύσεων, με εξαίρεση την περίπτωση με πάχος εδαφικής κρούστας $H_{crust}=10m$. Επιπλέον, διαπιστώνεται πράγματι ότι για $H_{weak}=1m$ η Εξίσωση (5.6) υπερεκτιμά τις τιμές του $r_{u,avg}^{cr}$. Για σχετικές πυκνότητες $D_{r0}=40$ και 50% φαίνεται ότι οι τιμές της παραμέτρου $\min(r_{u,avg}^{cr})$ υπερεκτιμώνται με αποτέλεσμα οι προβλεπόμενες τιμές του $(r_{u,avg}^{cr})^{PRED}$ να είναι συστηματικά ελαφρώς μεγαλύτερες από τις τιμές $(r_{u,avg}^{cr})^{NUM}$.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς $r_{U}^{CR,avg}$ συναρτήσει του $H_{weak}/H_{L,iso}$ βάσει των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων μεταβλητού H_{crust} και μεταβλητού T_{exc} και βάσει της αναλυτικής μεθόδου υπολογισμού.



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ συναρτήσει του $H_{weak}/H_{L,iso}$ βάσει των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων μεταβλητού D_{r0} και βάσει της αναλυτικής μεθόδου υπολογισμού.

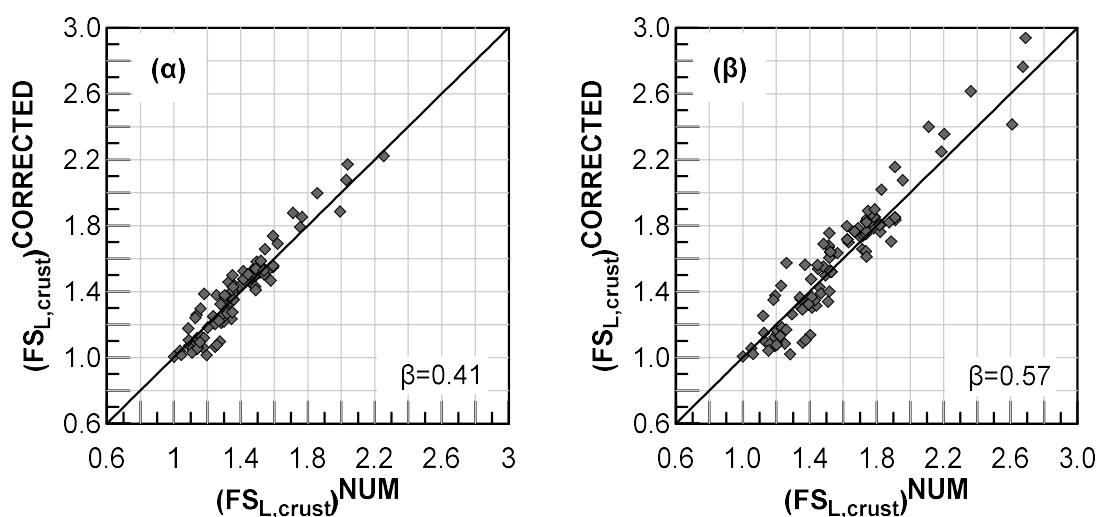
Έχοντας διατυπώσει την Εξίσωση (5.8) η οποία προβλέπει με ακρίβεια το μέσο λόγο υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα, είναι δυνατό να επαναπροσδιοριστεί και ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης $(FS_{L,crust})^{CORRECTED}$ στην εδαφική κρούστα, ο οποίος σε κάθε περίπτωση είναι μεγαλύτερος από εκείνον που προβλέπει η μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014). Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό του $(FS_{L,crust})^{CORRECTED}$ χρησιμοποιείται η Εξίσωση (5.8), η οποία έχει περιγραφεί αναλυτικά στην Ενότητα 3.2.

$$(FS_{L,crust})^{CORRECTED} = \left[\sin\left(\frac{\pi}{2} r_{u^{cr},avg}^{cr}\right) \right]^{-2 \cdot A \cdot \beta} \quad (5.9)$$

Από τις Εξισώσεις (5.8) και (5.9) προκύπτει τελικά:

$$(FS_{L,crust})^{CORRECTED} = \left\{ \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{16}{D_{r0}(\%)^{0.85}} + \frac{1 - 16/D_{r0}(\%)^{0.85}}{1 + 1.30(H_{weak}/H_{L,iso})^2} \right) \right] \right\}^{-2 \cdot A \cdot \beta} \quad (5.10)$$

Οι τιμές του συντελεστή β έχουν προκύψει από αριθμητικές αναλύσεις εδαφικής στήλης που έγιναν με το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand, το οποίο έχει βαθμονομηθεί για άμμο τύπου Nevada (Kalogeraki & Zontanou 2014). Οι τιμές του επανεκτιμημένου συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης $(FS_{L,crust})^{CORRECTED}$ που προκύπτουν μέσω της Εξίσωσης (5.10) για τις ακραίες τιμές της παραμέτρου $\beta=0.41$ και $\beta=0.57$ (οι τιμές $\beta=0.41-0.57$ αποφασίστηκε στο Κεφάλαιο 3 ότι θα χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς) συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές $(FS_{L,crust})^{NUM}$ που προκύπτουν χρησιμοποιώντας στην Εξίσωση (5.9) την τιμή του $r_{u,avg}^{cr}$ που μετρείται απευθείας από τις αριθμητικές αναλύσεις. Στο **Σχήμα 5.11** παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων και διαπιστώνεται η αξιοπιστία της αναλυτικής σχέσης που αναπτύχθηκε προηγουμένως.



Σχήμα 5.11: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω της Εξίσωσης (5.9) συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης στην εδαφική κρούστα $(FS_{L,crust})^{CORRECTED}$ με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις λόγω $(FS_{L,crust})^{NUM}$ για (α) $\beta = 0.41$ και (β) $\beta = 0.57$.

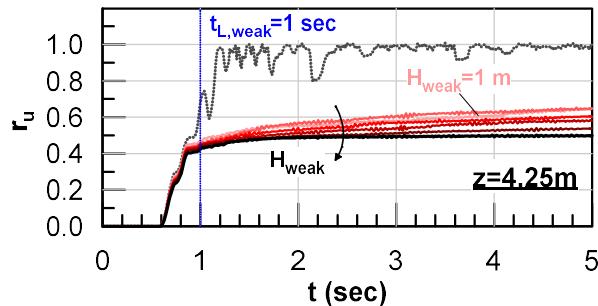
Από τα διαγράμματα του **Σχήματος 5.11** φαίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης της εδαφικής κρούστας $FS_{L,crust}$ είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα, δηλαδή η εδαφική κρούστα δεν ρευστοποιείται σε καμία περίπτωση. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι τιμές του $(FS_{L,crust})^{CORRECTED}$ που προκύπτουν από την αναλυτική Εξίσωση (5.10) είναι σε συστηματικά καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες των αριθμητικών αναλύσεων. Με χρήση της παραμέτρου $\beta=0.41$ στην Εξίσωση (5.9) οι τιμές του $FS_{L,crust}$ είναι γενικά μικρότερες από εκείνες που υπολογίζονται με χρήση της παραμέτρου

$\beta=0.57$. Επιπρόσθετα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.11β** οι τιμές του $(FS_{L,crust})^{CORRECTED}$ για $\beta=0.57$ παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση από τις μετρημένες τιμές του $(FS_{L,crust})^{NUM}$.

5.5 Αναλυτική πρόβλεψη του $\min(r_u^{cr})$ βάσει των $FS_{L,weak}$ και $FS_{L,crust}$

5.5.1 Πρόβλεψη του $\min(r_u^{cr})$ με αναλυτικές σχέσεις

Η διαδικασία υπολογισμού του ελάχιστου λόγου υπερπίεσης πόρων στα ρευστοποιήσιμα σημεία της εδαφικής κρούστας μπορεί να γίνει και προσεγγιστικά με ένα δεύτερο τρόπο υπολογισμού. Στο **Σχήμα 5.12** παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες ανάπτυξης του λόγου υπερπίεσης πόρων στο μέσον της εδαφικής κρούστας για τις αριθμητικές αναλύσεις με μεταβλητό H_{weak} και για την ομοιόμορφη εδαφική στήλη. Στις αναλύσεις έχει ληφθεί πάχος κρούστας ίσο με $H_{crust} = 8m$, περίοδος διέγερσης $T_{exc} = 0.3sec$ και πυκνότητα $D_{r0}=60\%$. Στο **Σχήμα 5.12** παρατηρείται ότι σε όλες τις αριθμητικές αναλύσεις ο λόγος υπερπίεσης πόρων αυξάνεται μονοσήμαντα μέχρι τη χρονική στιγμή $t \approx 0.80sec$. Αμέσως μετά από αυτή τη χρονική στιγμή, κατά την οποία στο «ασθενές» στρώμα αναπτύσσεται μεγάλος λόγος υπερπίεσης πόρων ($r_u \approx 0.80$), η συμπεριφορά των σημείων της εδαφικής κρούστας διαφοροποιείται, και συγκεκριμένα ο ρυθμός αύξησης του r_u ανακόπτεται. Μάλιστα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το πάχος H_{weak} τόσο μειώνεται η κλίση της καμπύλης του r_u . Κατά το τέλος της δόνησης οι χρονοϊστορίες υπερπίεσης πόρων που αντιστοιχούν στις αναλύσεις με μεγαλύτερο πάχος H_{weak} καταλήγουν σε μικρότερες τιμές του r_u .



Σχήμα 5.12: Χρονοϊστορίες ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων στο μέσον της εδαφικής κρούστας για τις αριθμητικές αναλύσεις με μεταβλητό H_{weak} και για την ομοιόμορφη εδαφική στήλη.

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού του ελάχιστου λόγου $\min(r_u^{cr,avg})$ εστιάζει στη χρήση αναλυτικών σχέσεων ώστε να προβλεφθεί η ελάχιστη τιμή του r_u στο μέσον της εδαφικής κρούστας κατά τη χρονική στιγμή $t_L = 1sec$, για την οποία συμβαίνει η πρώτη ρευστοποίηση στο «ασθενές» στρώμα, η οποία, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.12**, προσεγγίζει τις τιμές του $r_u^{cr,avg}$ των αναλύσεων με μεγάλα πάχη H_{weak} . Με αυτόν τον τρόπο, δίνεται μια πρώτη εκτίμηση της τιμής του δείκτη συμπεριφοράς $r_u^{cr,avg}$, η οποία βέβαια αναμένεται ελαφρώς μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή που υπολογίζεται μέσω των αριθμητικών αναλύσεων.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τους υπολογισμούς αγνοείται η μικρή αύξηση του r_u η οποία λαμβάνει χώρα μετά τη ρευστοποίηση της «ασθενούς» στρώσης.

Η παραπάνω προσεγγιστική εκτίμηση του $r_{u,avg}^{cr}$ μπορεί να γίνει μέσω των συντελεστών ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης που προβλέπει η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη στην πράξη μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014). Συγκεκριμένα, μέσω της μεθοδολογίας των Boulanger & Idriss (2014) εκτιμάται ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης στο «ασθενές» στρώμα $FS_{L,weak}$ αλλά και ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης στο μέσον του ανώτερου αμμώδους στρώματος $FS_{L,crust}$. Από τους συντελεστές ασφαλείας $FS_{L,weak}$ και $FS_{L,crust}$ υπολογίζονται οι κύκλοι φόρτισης $N_{L,weak}$ και $N_{L,crust}$ που απαιτούνται για τη ρευστοποίηση του «ασθενούς» και του υπερκείμενου στρώματος αντίστοιχα. Για τους υπολογισμούς αυτούς χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις:

$$N_{L,weak} = (FS_{L,weak})^{1/\beta} \cdot N \quad (5.11)$$

$$N_{L,crust} = (FS_{L,crust})^{1/\beta} \cdot N \quad (5.12)$$

Οι τιμές του συντελεστή β για το NTUA-Sand βρίσκονται μεταξύ του εύρους $\beta=0.41-0.57$ και έχουν προκύψει από αριθμητικές αναλύσεις εδαφικής στήλης (Kalogeraki & Zontanou 2014), ενώ οι κύκλοι φόρτισης που επιβάλλονται κατά τη διέγερση της εδαφικής στήλης είναι $N = 15$.

Με τον τρόπο αυτό εκτιμώνται οι απαιτούμενοι κύκλοι για ρευστοποίηση της «ασθενούς» στρώσης και της ρευστοποιήσιμης εδαφικής κρούστας. Ωστόσο, οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν ανεξάρτητα χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση δύο στρώσεων, λόγω της οποίας αποτρέπεται τελικά η ρευστοποίηση της εδαφικής κρούστας. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του Κεφαλαίου 4, μετά την πρώτη ρευστοποίηση της «ασθενούς» στρώσης, ανακόπτεται η αύξηση των λόγων υπερπίεσης πόρων r_u στα σημεία της κρούστας (Σχήμα 5.12). Για εκείνη τη χρονική στιγμή $t_{L,weak}$, μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά η αναπτυγμένη ελάχιστη δυνατή υπερπίεση πόρων στην κρούστα ως εξής:

$$\min(r_{u,avg}^{cr}) = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[\left(\frac{N_{L,weak}}{N_{L,crust}} \right)^{1/(2-A)} \right] \quad (5.13)$$

Έτσι, υπολογίζεται ο δείκτης συμπεριφοράς $\min(r_{u,avg}^{cr})$ προσεγγιστικά, με γνωστές αναλυτικές σχέσεις χωρίς τη βοήθεια των εμπειρικών σχέσεων που προέκυψαν έμμεσα από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων. Βέβαια, κατά τους υπολογισμούς δεν λαμβάνεται υπόψη η μικρή αύξηση του r_u στα σημεία της εδαφικής κρούστας, η οποία

συμβαίνει μετά τη ρευστοποίηση της «ασθενούς» στρώσης και μπορεί να οδηγήσει σε απόκλιση από τις πραγματικές τιμές του r_u .

5.5.2 Σύγκριση της αναλυτικής πρόβλεψης με τις αριθμητικές αναλύσεις

Για να γίνει πιο άμεσα κατανοητή η παραπάνω μέθοδος υπολογισμού και να ελεγχθεί η ακρίβειά της, εφαρμόζεται για την αριθμητική ανάλυση, η οποία αφορά σε «ασθενές» ρευστοποιήσιμο στρώμα μεγάλου πάχους $H_{weak} = 10m$ με σχετική πυκνότητα $D_r = 30\%$ που βρίσκεται σε βάθος 6-16m από την επιφάνεια και περίοδο διέγερσης $T_{exc} = 0.30sec$. Οι συντελεστές ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης $FS_{L,weak}$ και $FS_{L,crust}$ υπολογίζονται για το «ασθενές» στρώμα και το μέσον του ανώτερου αμμώδους στρώματος αντίστοιχα μέσω των εξισώσεων:

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR} \quad (5.14)$$

$$(N_1)_{60,CS} = 46 \cdot (D_r)^2 \quad (5.15)$$

$$CRR_{M_w=7.5, \sigma'_v=1atm} = \exp \left[\frac{(N_1)_{60CS}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right] \quad (5.16)$$

Η μέγιστη τιμή του συντελεστή σεισμικής δράσης στο «ασθενούς» στρώματος, η οποία αντιστοιχεί στον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας $FS_{L,weak}$ είναι ίση με $CSR_{(z=6.25m)} = 0.435$. Για το μέσον του υπερκείμενου στρώματος ο συντελεστής CSR υπολογίστηκε ίσος με $CSR_{(z=4m)} = 0.520$. Διευκρινίζεται ότι οι συντελεστές σεισμικής δράσης CSR λαμβάνονται απευθείας από την ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση. Ο διορθωμένος αριθμός κρούσεων SPT για καθαρή άμμο σχετικής πυκνότητας $D_r = 30\%$ και 60% είναι $(N_1)_{60,CS} = 4.14$ και $(N_1)_{60,CS} = 16.56$ αντίστοιχα. Επομένως, ο συντελεστής αντίστασης έναντι ρευστοποίησης για το χαλαρό στρώμα είναι ίσος με $CRR = 0.081$, ενώ για το πυκνότερο στρώμα ίσος με $CRR = 0.170$. Αποδεικνύεται, λοιπόν, ότι οι συντελεστές ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης $FS_{L,weak}$ και $FS_{L,crust}$ κατά Boulanger & Idriss (2014) είναι ίσοι με:

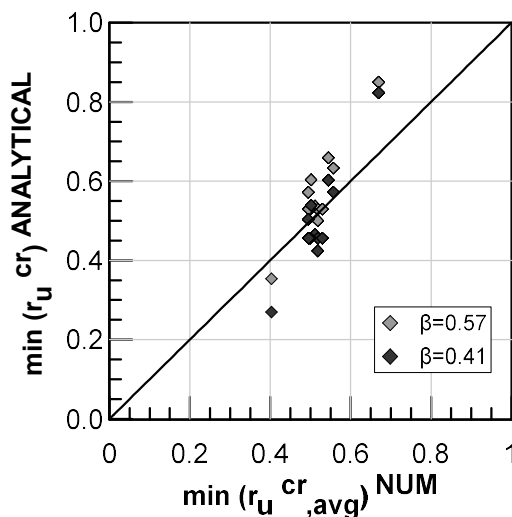
$$FS_{L,weak} = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0.081}{0.435} = 0.19 \quad (5.17)$$

$$FS_{L,crust} = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0.170}{0.520} = 0.33 \quad (5.18)$$

Στη συνέχεια, με χρήση των Εξισώσεων (5.11) και (5.12) για το εύρος τιμών της παραμέτρου $\beta=0.41-0.57$, προκύπτουν οι απαιτούμενοι κύκλοι φόρτισης $N_{L,weak} = 0.26-0.81$ και $N_{L,crust} = 1.00-2.15$. Τέλος, εφαρμόζεται η Εξίσωση (5.13) για τον εμπειρικό εκθέτη $A = 1.60$ που

εκτιμήθηκε από τους Bouckonas et al. (2011) και αντιστοιχεί σε άμμο τύπου Nevada των Arulmoli et al. (1992) με σχετική πυκνότητα $D_r = 60\%$. Η τελική τιμή του δείκτη συμπεριφοράς $r_u^{cr,avg}$ βρίσκεται μεταξύ του εύρους τιμών $r_u^{cr,avg} = 0.46-0.53$, ενώ η ακριβής τιμή του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων στην κρούστα με βάση τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων είναι ίση με $r_u^{cr,avg} = 0.50$.

Ο ανωτέρω αναλυτικός τρόπος υπολογισμού του $r_u^{cr,avg}$ κάνει ευκολότερα αντιληπτό το φαινόμενο της «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης», διότι χρησιμοποιεί γνωστές αναλυτικές σχέσεις και εξηγεί με αμεσότητα τη φυσική του προβλήματος. Στο **Σχήμα 5.13** παρουσιάζεται το συγκριτικό διάγραμμα του αναλυτικά υπολογισμένου ελάχιστου λόγου υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα $\min(r_u^{cr,avg})^{ANALYTICAL}$ και του μετρημένου από τις αριθμητικές αναλύσεις ελάχιστου λόγου $\min(r_u^{cr,avg})^{NUM}$. Διαπιστώνεται ότι η αναλυτική μέθοδος υπολογισμού δίνει αποτελέσματα, τα οποία αποκλίνουν ελαφρώς από αυτά των αντίστοιχων αριθμητικών αναλύσεων, αλλά έχουν ικανοποιητική ακρίβεια.



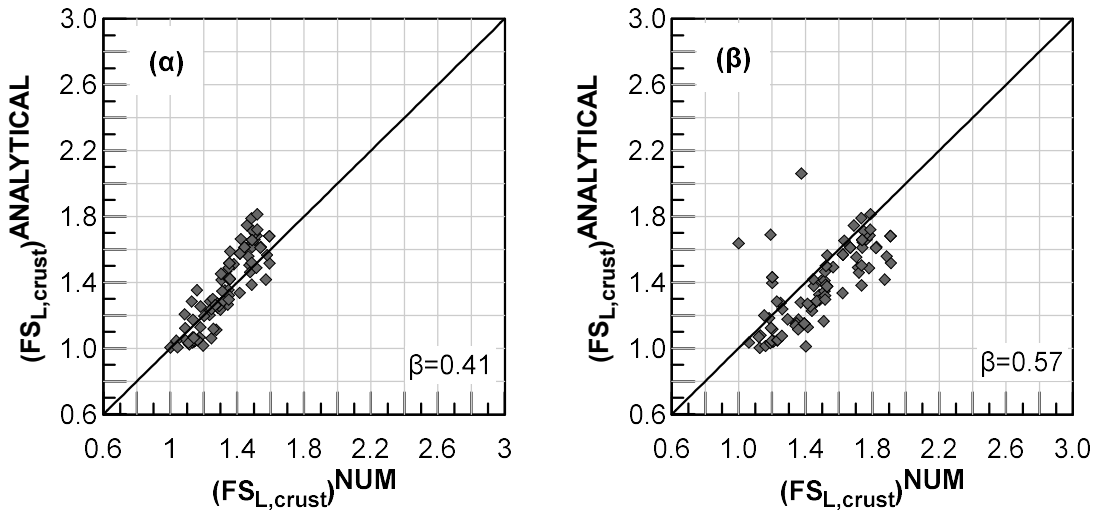
Σχήμα 5.13: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου ελάχιστου λόγου υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα $(r_u^{cr,avg})^{ANALYTICAL}$ και του μετρημένου από αριθμητικές αναλύσεις λόγου $(r_u^{cr,avg})^{NUM}$ για την τιμή της παραμέτρου $\beta=0.41$ και $\beta=0.57$.

Αντίστοιχα, μπορεί να εκτιμηθεί και ο συντελεστής ασφαλείας $(FS_{L,crust})^{ANALYTICAL}$ στην εδαφική κρούστα, που προκύπτει με βάση το αναλυτικά υπολογισμένο $\min(r_u^{cr,avg})^{ANALYTICAL}$. Η εξίσωση υπολογισμού του $(FS_{L,crust})^{ANALYTICAL}$ γράφεται ως εξής:

$$(FS_{L,crust})^{ANALYTICAL} = \left[\sin\left(\frac{\pi}{2} r_u^{cr,avg}\right) \right]^{-2 \cdot A \cdot \beta} \quad (5.19)$$

Οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης $(FS_{L,crust})^{ANALYTICAL}$ που υπολογίζονται μέσω της της αναλυτικής πρόβλεψης του $\min(r_u^{cr,avg})$ και της Εξίσωσης (5.5)

συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές $(FS_{L,crust})^{NUM}$ που προκύπτουν απευθείας από τις αριθμητικές αναλύσεις. Στο **Σχήμα 5.14** παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων. Από το **Σχήμα 5.14** συμπεραίνεται ότι οι συντελεστές ασφάλειας στην εδαφική κρούστα $(FS_{L,crust})^{ANALYTICAL}$ βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τους αντίστοιχους $(FS_{L,crust})^{NUM}$ και ιδιαίτερα για το συντελεστή $\beta = 0.41$ (**Σχήμα 5.13**).



Σχήμα 5.14: Συγκριτικό διάγραμμα του αναλυτικά υπολογισμένου συντελεστή ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης στην εδαφική κρούστα $(FS_{L,crust})^{ANALYTICAL}$ με τον αντίστοιχο που προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις $(FS_{L,crust})^{NUM}$ για την τιμή της παραμέτρου **(α)** $\beta=0.41$ και **(β)** $\beta=0.57$.

5.6 Συμπεράσματα

Οι αναλυτικές μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν για την ποσοτική εκτίμηση της ευμενούς επίδρασης ενδιάμεσης ρευστοποιήσιμης «ασθενούς» στρώσης, οδήγησαν στα ακόλουθα συμπεράσματα πρακτικού ενδιαφέροντος:

- i. Οι τιμές του δείκτη συμπεριφοράς $r_{u,avg}^{cr}$, δηλαδή της μέσης τιμής του λόγου υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα, μπορούν να προβλεφθούν χρησιμοποιώντας την αναλυτική εξίσωση (5.5):

$$r_{u,avg}^{cr} = \min(r_{u,avg}^{cr}) + \frac{\max(r_{u,avg}^{cr}) - \min(r_{u,avg}^{cr})}{1 + 1.30(H_{weak}/H_{L,iso})^2}$$

η οποία έχει προκύψει ως η βέλτιστη καμπύλη προσαρμογής στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του Κεφαλαίου 4. Οι τιμές του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα $(r_{u,avg}^{cr})^{PRED}$ που εκτιμώνται μέσω της αναλυτικής εξίσωσης διαπιστώνεται ότι βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις ακριβείς μετρημένες τιμές $(r_{u,avg}^{cr})^{NUM}$ των αριθμητικών αναλύσεων.

Ωστόσο, για τις περιπτώσεις με πάχος «ασθενούς» στρώσης $H_{weak} = 1\text{m}$ οι τιμές του $r_{u,avg}^{cr}$ υπερεκτιμώνται, γεγονός όμως που δρα υπέρ της ασφαλείας.

- ii. Για την εκτίμηση της ελάχιστης τιμής του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων στην εδαφική κρούστα $\min(r_{u,avg}^{cr})$ που χρειάζεται για την εφαρμογή της Εξίσωσης (5.5) προτείνεται η αναλυτική Εξίσωση (5.6):

$$\min(r_{u,avg}^{cr}) = \frac{16}{D_{r0}(\%)^{0.85}}$$

σύμφωνα με την οποία η ελάχιστη τιμή $\min(r_{u,avg}^{cr})$ είναι αποκλειστική συνάρτηση της σχετικής πυκνότητας D_{r0} των στιβαρότερων στρωμάτων άμμου. Επισημαίνεται ότι η παραπάνω αναλυτική εξίσωση ισχύει αυστηρά για τις περιπτώσεις με σχετικής πυκνότητα «ασθενούς» στρώσης $D_r = 30\%$. Η Εξίσωση (5.6) δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα παρεμφερή με αυτά των αριθμητικών αναλύσεων, υπερτιμώντας ωστόσο ελαφρώς τις τιμές που αντιστοιχούν σε σχετικές πυκνότητες $D_{r0} = 40\text{-}50\%$.

- iii. Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (5.5) και (5.6) προκύπτει η ολοκληρωμένη εξίσωση (5.8):

$$r_{u,avg}^{cr} = \frac{16}{D_{r0}(\%)^{0.85}} + \frac{1 - 16/D_{r0}(\%)^{0.85}}{1 + 1.30(H_{weak}/H_{L,iso})^2}$$

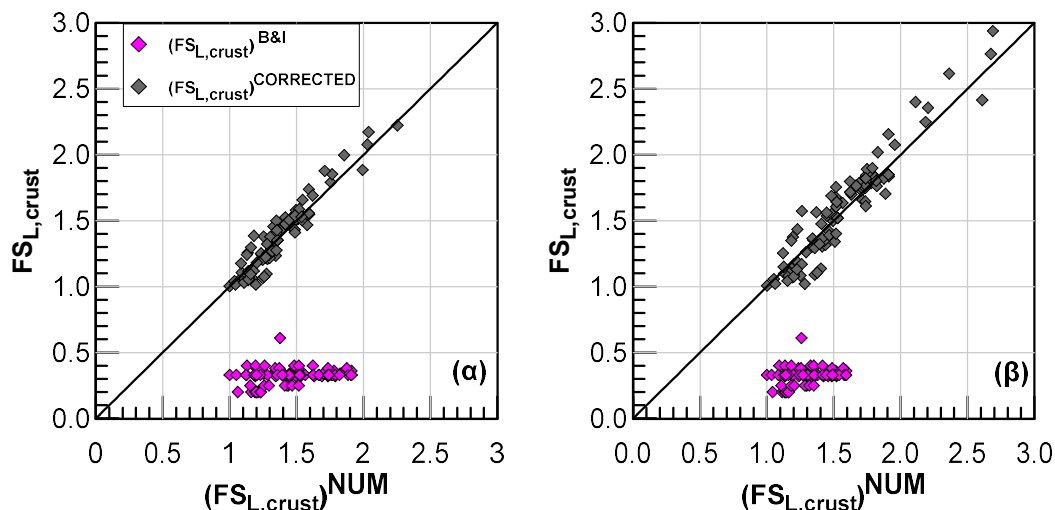
Χρησιμοποιώντας την προβλεπόμενη τιμή του $r_{u,avg}^{cr}$ μπορεί απευθείας να υπολογιστεί ο διορθωμένος συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης της εδαφικής κρούστας $(FS_{L,crust})^{CORRECTED}$, σύμφωνα με την εξίσωση (5.9):

$$(FS_{L,crust})^{CORRECTED} = \left[\sin\left(\frac{\pi}{2} r_{u,avg}^{cr}\right) \right]^{-2 \cdot A \cdot \beta}$$

Τα αποτελέσματα της αναλυτικής πρόβλεψης τόσο σε επίπεδο δεικτών συμπεριφοράς $r_{u,avg}^{cr}$ όσο και σε επίπεδο συντελεστών ασφαλείας $(FS_{L,crust})^{CORRECTED}$ είναι ιδιαίτερα ακριβή.

- iv. Η ακρίβεια των αναλυτικών Εξισώσεων (5.8) και (5.9) αλλά και η αναγκαιότητα της χρήσης τους αποκαλύπτεται στο **Σχήμα 5.15**. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 5.15** παρουσιάζεται ένα συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών ασφαλείας $(FS_{L,crust})^{B\&I}$ στο μέσον της εδαφικής κρούστας κατά Boulanger & Idriss (2014) και των διορθωμένων με αναλυτικές σχέσεις συντελεστών ασφαλείας $(FS_{L,crust})^{CORRECTED}$ με γνώμονα πάντα τις μετρημένες τιμές $(FS_{L,crust})^{NUM}$ από τις αριθμητικές αναλύσεις. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.15**, η μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014) προβλέπει ρευστοποίηση του

υπερκείμενου στρώματος άμμου με τιμές των $(FS_{L,crust})^{B\&I} \approx 0.20-0.50$. Στην πραγματικότητα, οι τιμές του $FS_{L,crust}$ κυμαίνονται μεταξύ των τιμών $FS_{L,crust} \approx 1.00-3.00$ και μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια από την αναλυτική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε.



Σχήμα 5.15: Συγκριτικό διάγραμμα του συντελεστή ασφαλείας $(FS_{L,crust})^{B\&I}$ κατά Boulanger & Idriss (2014) και του διορθωμένου συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης στην εδαφική κρούστα $(FS_{L,crust})^{CORRECTED}$ με τον αντίστοιχο που προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις $(FS_{L,crust})^{NUM}$ για **(α)** $\beta=0.41$ και **(β)** $\beta=0.57$.

- v. Ο υπολογισμός της ελάχιστης τιμής $\min(r_{u^{cr},avg})$ μπορεί να γίνει και με γνωστές αναλυτικές σχέσεις μέσω των συντελεστών ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης κατά Boulanger & Idriss (2014). Με τη μέθοδο αυτή εκτιμάται το $\min(r_{u^{cr},avg})$ τη χρονική στιγμή $t_{L,weak}$ που συμβαίνει η πρώτη ρευστοποίηση στην «ασθενή» στρώση. Αυτός ο τρόπος υπολογισμού φαίνεται να μην είναι απόλυτα ακριβής διότι αγνοεί την περαιτέρω αύξησή του μετά τη χρονική στιγμή $t_{L,weak}$. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος υπολογισμού κάνει εύκολα κατανοητό το φαινόμενο της «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης».

Κεφάλαιο 6

Τελικά Συμπεράσματα - Προτάσεις

6.1 Τελικά Συμπεράσματα

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία διερευνήθηκε η σεισμική απόκριση ανομοιομόρφων αποθέσεων ρευστοποιήσιμης άμμου, οι οποίες περιλαμβάνουν μια ενδιάμεση «ασθενή» στρώση μικρής σχετικής πυκνότητας. Αρχικά, εξετάσθηκε η συμπεριφορά των αντίστοιχων ομοιομόρφων εδαφικών προφίλ ώστε να αποτυπωθεί η σεισμική απόκριση αναφοράς, τα αποτελέσματα της οποίας θα συγκρίνονταν εκ των υστέρων με αυτά για «ασθενή» εδαφική στρώση. Ακολούθως, έγινε παραμετρική διερεύνηση στα πλαίσια της οποίας πραγματοποιήθηκαν 98 αριθμητικές αναλύσεις και εξετάσθηκαν οι διαφορετικοί παράγοντες που επιδρούν στη σεισμική απόκριση των ρευστοποιήσιμων εδαφών με ένθετη «ασθενή» στρώση. Τελικώς, αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων και αναπτύχθηκαν αναλυτικές σχέσεις για την αποτίμηση της επίδρασης της «ασθενούς» στρώσης στην σεισμική απόκριση και την ρευστοποίηση της υπερκείμενης στιβαρής στρώσης. Τα κύρια συμπεράσματα που εξάγονται παρατίθενται ακολούθως ανάλογα με τα επιμέρους ερωτήματα που διερευνήθηκαν.

I. Εξέλιξη της ρευστοποίησης σε ομοιομόρφες αποθέσεις άμμου

(α) Στα ρευστοποιήσιμα στρώματα περιορισμένου πάχους (π.χ. $H_L = 2\text{m}$), τόσο οι τάσεις λόγω σεισμού (ο λόγος σεισμικών δράσεων CSR) όσο και η αντίσταση σε ρευστοποίηση, παραμένουν πρακτικά σταθερές με το βάθος και η εκδήλωση της ρευστοποίησης συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλο το στρώμα. Σε αυτή την περίπτωση, η εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L από επιτόπου δοκιμές, όπως με τη γνωστή μεθοδολογία των Boulangier & Idriss (2014), είναι ακριβής.

(β) Στα ομοιομόρφα ρευστοποιήσιμα στρώματα μεγάλου πάχους (π.χ. $H_L = 14\text{m}$), ο συντελεστής σεισμικής δράσης CSR μεταβάλλεται αναπόφευκτα με το βάθος και επομένως

η ρευστοποίηση των διάφορων εδαφικών στρώσεων δεν συμβαίνει ταυτόχρονα. Έτσι, μετά την πρώτη εκδήλωση της ρευστοποίησης σε κάποιο βάθος, ο συντελεστής σεισμικής δράσης CSR πάνω από αυτό μειώνεται δραστικά, γεγονός που δρα ευνοϊκά για τα υπόλοιπα σημεία του αμμώδους στρώματος, τα οποία δεν έχουν προλάβει ακόμα να ρευστοποιηθούν. Μάλιστα, ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης «εκτινάσσεται» ακόμη και σε τιμές μεγαλύτερες της μονάδας καθώς ο συντελεστής υπερπίεσης πόρων r_u σταθεροποιείται σε τιμές μικρότερες από 1.00 με αποτέλεσμα τα σημεία αυτά να μην ρευστοποιούνται.

(γ) Έτσι, στα ρευστοποιήσιμα στρώματα μεγάλου πάχους, οι εμπειρικές μεθοδολογίες υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας FS_L που βασίζονται σε επιτόπου παρατηρήσεις και μετρήσεις (π.χ. Boulanger & Idriss, 2014) ισχύουν με ικανοποιητική ακρίβεια μόνο για τα βάθη στα οποία αντιστοιχεί ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L , ενώ υποεκτιμούν σημαντικά την πραγματική τιμή του FS_L για μικρότερα κυρίως βάθη.

(δ) Υπό τις ανωτέρω συνθήκες, διαπιστώθηκε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των τιμών του ελάχιστου συντελεστή ασφάλειας FS_L που προκύπτει από τις εμπειρικές μεθοδολογίες (π.χ. Boulanger & Idriss, 2014) και από τις αριθμητικές αναλύσεις συναρτήσει της μέγιστης τιμής του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u .

II. Επίδραση της ενδιάμεσης «ασθενούς» στρώσης στην εκδήλωση της ρευστοποίησης

(ε) Στις ανομοιόμορφες αποθέσεις ρευστοποιήσιμης άμμου, το «ασθενές» στρώμα ρευστοποιείται πολύ νωρίτερα από τα στιβαρότερα στρώματα που βρίσκονται πάνω και κάτω από αυτό. Έτσι, λειτουργεί ως ένα σύστημα «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» για τα υπερκείμενα στιβαρότερα στρώματα, εμποδίζοντας τη ρευστοποίηση να φτάσει ως την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Με άλλα λόγια, το ρευστοποιήσιμο έδαφος που βρίσκεται πάνω από το «ασθενές» στρώμα δεν ρευστοποιείται και διατηρεί χαμηλές τιμές του λόγου υπερπίεσης πόρων της τάξης του $r_u = 0.40-0.70$.

(στ) Η επίδραση της «ασθενούς» στρώσης στην σεισμική απόκριση του υποκείμενου ρευστοποιήσιμου στρώματος είναι επίσης ευεργετική, αλλά όχι τόσο σημαντική και συστηματική όσο για το υπερκείμενο στρώμα.

(ζ) Οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι οι μέσες τιμές του λόγου υπερπίεσης πόρων που αναπτύσσονται στα σημεία του ανώτερου αμμώδους στρώματος ($r_{u,avg}$) επηρεάζονται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Το πάχος «ασθενούς» στρώσης H_{weak} : Η αύξησή του οδηγεί σε μείωση των τιμών $r_{u,avg}^{cr}$ μέχρι μια ελάχιστη τιμή $0 < \min(r_{u,avg}^{cr}) < 1.0$
- Η περίοδος της διέγερσης T_{exc} : Επηρεάζει μόνο το ρυθμό μείωσης του $r_{u,avg}^{cr}$ με την αύξηση του H_{weak} , χωρίς ωστόσο να επιδρά στην τιμή του $\min(r_{u,avg}^{cr})$.
- Η σχετική πυκνότητα D_{r0} των στιβαρότερων στρωμάτων: Η αύξηση της οδηγεί σε μείωση των τιμών του $\min(r_{u,avg}^{cr})$.

Το βάθος στο οποίο συναντάται η «ασθενής» εδαφική στρώση (H_{crust}) δεν επιδρά ουσιαστικά στο φαινόμενο.

III. Αναλυτική πρόβλεψη του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,avg}^{cr}$ στην «εδαφική κρούστα», πάνω από την «ασθενή» στρώση

(η) Η μέση τιμή του λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,avg}^{cr}$ στην εδαφική κρούστα, για «ασθενή» στρώσης με $D_r=30\%$, μπορεί να υπολογισθεί προσεγγιστικά από την σχέση:

$$r_{u,avg}^{cr} = \min(r_{u,avg}^{cr}) + \frac{\max(r_{u,avg}^{cr}) - \min(r_{u,avg}^{cr})}{1 + 1.30 \times (H_{weak} / H_{L,iso})^2}$$

όπου η μέγιστη τιμή εκτιμάται ίση με $\max(r_{u,avg}^{cr}) \approx 1.00$ και η παράμετρος $H_{L,iso}$ δίνεται από την εξίσωση (Bouckovalas et al., 2016):

$$H_{L,iso} = 0.40(V_{S,L} T_{exc})^{1.54} / (H_{crust})^{0.54}$$

(θ) Η ελάχιστη τιμή $\min(r_{u,avg}^{cr})$ που υπεισέρχεται στη ανωτέρω αναλυτική σχέση υπολογισμού του $r_{u,avg}^{cr}$ μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της καμπύλης προσαρμογής στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που ισχύει για τις παραμέτρους του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-Sand και σχετική πυκνότητα «ασθενούς» στρώσης $D_r=30\%$ και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\min(r_{u,avg}^{cr}) = \frac{16}{D_{r0}(\%)^{0.85}}$$

(ι) Εναλλακτικά, η ελάχιστη τιμή $\min(r_{u,avg}^{cr})$ μπορεί να υπολογισθεί βάσει των τιμών του συντελεστή ασφαλείας FS_L που προκύπτει συμβατικά (π.χ. κατά Boulanger & Idriss, 2014) για την «ασθενή» και για την υπερκείμενη «στιβαρή» στρώση ρευστοποιήσιμης άμμου, σύμφωνα με την γενική μεθοδολογία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5 (Ενότητα 5.5) Περιληπτικά, η μέθοδος αυτή εκτιμά τον ελάχιστο λόγο υπερπίεσης πόρων $\min(r_{u,avg}^{cr})$ στο

μέσον του υπερκείμενου στρώματος κατά τη χρονική στιγμή $t_{L,weak}$ που συμβαίνει η πρώτη ρευστοποίηση στην «ασθενή» στρώση.

IV. Ο συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης $FS_{L,crust}$ στην «εδαφική κρούστα», πάνω από την «ασθενή» στρώση

(κ) Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης της εδαφικής κρούστας πάνω από την «ασθενή» στρώση $FS_{L,crust}$ μπορεί να υπολογισθεί από την ακόλουθη σχέση, χρησιμοποιώντας την αριθμητική μεθοδολογία ή/και τις αναλυτικές μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία για την πρόβλεψη του $r_{u,avg}^{cr}$:

$$FS_{L,crust} = \left[\sin \left(\frac{\pi}{2} r_{u,avg}^{cr} \right) \right]^{-2 \cdot A \cdot \beta}$$

Όπου οι τιμές του εκθέτη A και β αποτελούν ιδιότητες της άμμου (A=1.60 και β=0.41-0.57 για Nevada Sand με Dr=60%)

(λ) Σύμφωνα με την συμβατική μεθοδολογία των Boulanger & Idriss (2014) το στιβαρό στρώμα άμμου πάνω από την «ασθενή» στρώση ρευστοποιείται με τιμές του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης $(FS_{L,crust})^{B\&I} \approx 0.20-0.50$. Όπως προέκυψε όμως από τις αριθμητικές αναλύσεις και τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του $r_{u,avg}^{cr}$, το ανώτερο αμμώδες στρώμα δεν ρευστοποιείται και οι συντελεστές ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης που αντιστοιχούν σε αυτό κυμαίνονται είναι επίπεδα αρκετά υψηλότερα της μονάδας, δηλαδή $(FS_{L,crust})^{NUM} = 1.00-3.00$ και $(FS_{L,crust})^{ANALYTICAL} = 1.00-3.00$.

6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα περιλαμβάνουν:

(α) Την επιρροή της διαπερατότητας της άμμου στο φαινόμενο της «Φυσικής Σεισμικής Μόνωσης» και στην επίδραση της «ασθενούς» ρευστοποιήσιμης στρώσης. Στις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής θεωρήθηκαν αστράγγιστες συνθήκες και δεν εξετάσθηκε η συμπεριφορά του συστήματος μετά το τέλος της δόνησης. Οι υψηλές υπερπίεσεις πόρων που αναπτύσσονται στο «ασθενές» στρώμα εκτονώνονται μερικώς κατά την διάρκεια και πλήρως μετά το τέλος της δόνησης με τη ροή νερού προς το άνω και το κάτω αμμώδες στρώμα. Η επίδραση της εν λόγω ροής μπορεί να επιφέρει ποσοτική επίδραση στα ευρήματα της παρούσας έρευνας και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

(β) Την επίδραση της σχετικής πυκνότητας της «ασθενούς» στρώσης. Στις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης και της ρευστοποίησης των ανομοιόμορφων αμμωδών προφίλ θεωρήθηκε σταθερή η σχετική πυκνότητα της «ασθενούς» στρώσης και ίση με $D_r=30\%$. Προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια της αναλυτικής μεθοδολογίας για την πρόβλεψη του μέσου λόγου υπερπίεσης πόρων $r_u^{cr,avg}$ και του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης $(FS_{L,crust})^{CORRECTED}$ στην εδαφική κρούστα θα πρέπει να γίνουν επιπλέον αριθμητικές αναλύσεις για τουλάχιστον άλλη μία τιμή της σχετικής πυκνότητας «ασθενούς» στρώσης (π.χ. $D_r=45\%$).

(γ) Την επίδραση της «ασθενούς» εδαφικής στρώσης στην καθίζηση θεμελιώσεων που εδράζονται στην εδαφική κρούστα ανομοιόμορφων αποθέσεων άμμου. Η εν λόγω διερεύνηση θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μέσω τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων για ανομοιόμορφα εδαφικά προφίλ και να γίνει σύγκριση με αντίστοιχα αποτελέσματά για ομοιόμορφα εδαφικά προφίλ.

Βιβλιογραφία

- Acacio, A., Kobayashi, Y., Towhata, I., Bautista, R., and Ishihara, K. (2001). "Subsidence of building foundation resting upon liquefied subsoil case studies and assessment." *Soils and Foundations*, 41(6), 111–128.
- Adalier, K., Elgamal, A., Meneses, J., and Baez, J. . (2003). "Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(7), 571–584.
- Andrianopoulos, K. I., Papadimitriou, A. G., and Bouckovalas, G. D. (2010). "Explicit integration of bounding surface model for the analysis of earthquake soil liquefaction." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34(15), 1586–1614.
- Andrianopoulos, K. I., Papadimitriou, A. G., and Bouckovalas, G. D. (2010). "Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geostructures." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10), 895–911.
- Arulmoli, K., Muraleetharan, K. K., Hossain, M. M., and Fruth, L. S. (1992). "VELACS: verification of liquefaction analyses by centrifuge studies; Laboratory Testing Program – Soil Data Report." *Research Report, The Earth. Technology Corporation*.
- Bouckovalas, G. D., Dimitriadi, V., Tsiapas, Y., and Tsioulou, A. (2011). "Numerical simulation of drain performance in liquefiable soils." *Proceedings of the 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Santiago, Chile; 10-13 January.
- Bouckovalas, G. D., Psycharis, I., Gantes, C., Sextos, A., Kappos, A., and Mylonakis, G. (2017). "Performance-based design of bridge piers in liquefiable sites with shallow foundation and limited ground improvement." *3rd International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, Vancouver, Canada, July 16-19 (invited lecture).
- Bouckovalas, G. D., Tsiapas, Y. Z., Theocharis, A. I., and Chaloulos, Y. K. (2016). "Ground response at liquefied sites: seismic isolation or amplification?" *Soil Dynamics and*

- Earthquake Engineering*, 91, 329–339.
- Boulanger, R. W., and Idriss, I. M. (2014). *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Report No. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, University of California, Davis.*
- Cascone, E., and Bouckovalas, G. D. (1998). “Seismic bearing capacity of footings on saturated sand with a clay cap.” *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, September 6-11.
- CEN (European Committee for Standardization). (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1: 2004). European Committee for Standardization, Brussels, Brussels, Belgium.*
- Dashti, S., and Bray, J. D. (2013). “Numerical Simulation of Building Response on Liquefiable Sand.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(8), 1235–1249.
- Dashti, S., Bray, J. D., Pestana, J. M., Riemer, M., and Wilson, D. (2010). “Centrifuge Testing to Evaluate and Mitigate Liquefaction-Induced Building Settlement Mechanisms.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(7), 918–929.
- DeAlba, P., Seed, H. B., and Chan, C. K. (1976). “Sand Liquefaction in Large-Scale Simple Shear Tests.” *ASCE J Geotech Eng Div*, 102(9), 909–927.
- Dimitriadi, V. (2014). “Performance Based Design and Soil Improvement Methods of Shallow Foundations on Liquefiable Soils.” PhD Thesis, Dept of Civil Engineering, NTUA, Athens.
- Dobry, R., and Abdoun, T. (2015). “3rd Ishihara Lecture: An investigation into why liquefaction charts work: A necessary step toward integrating the states of art and practice.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 68, 40–56.
- EAK. (2003). *Greek Seismic Code*. Edited by the National Organization for Seismic Protection (O.A.Σ.Π.), Athens, Greece.
- Gonzalez, L., Abdoun, T., and Sharp, M. K. (2002). “Modeling of seismically induced liquefaction under high confining stress.” *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics*, 2(3), 1–15.
- Hardin, B. O. (1978). *Nature of stress-strain behavior for soils*. ASCE, 3–90.
- Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2008). *Soil Liquefaction During Earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, USA.
- Itasca. (2011). “FLAC version 7.0.” *Itasca Consulting Group Inc.*
- Kalogeraki, C., and Zontanou, V. (2014). “Re-evaluation of factor of safety against seismic liquefaction.” Diploma Thesis, NTUA, Athens.

- Karamitros, D. K. (2010). "Development of a Numerical Algorithm for The Dynamic Elastoplastic Analysis of Geotechnical Structures in Two and Three Dimensions." PhD Thesis, Dept of Civil Engineering, NTUA, Athens.
- Liu, L., and Dobry, R. (1997). "Seismic response of shallow foundation on liquefiable sand." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(6), 557–566.
- Miwa, S., and Ikeda, T. (2006). "Shear modulus and strain of liquefied ground and their application to evaluation of the response of foundation structures." *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, 23(1), 167–179.
- Naesgaard, E., Byrne, P. M., and Ven Huizen, G. (1998). "Behaviour of light structures founded on soil 'crust' over liquefied ground." *Geotechnical Special Publication*, 75, 422–433.
- Papadimitriou, A. G., and Bouckovalas, G. D. (2002). "Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: A multiaxial formulation." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, National Technical University of Athens, 42 Patission Street, 10682 Athens, Greece, 22(3), 191–204.
- Ramberg, W., and Osgood, W. R. (1943). *Description of stress-strain curve by three parameters*. Technical note 902, National Advisory Committee for Aeronautics.
- Seed, H. B., and Idriss, I. M. (1982). "Ground motions and soil liquefaction during earthquakes." *Earthquake Engineering Research Institute Monograph*, Oakland, Calif.
- Seed, H. B., Martin, P. P., and Lysmer, J. (1976). *Pore-water pressure changes during soil liquefaction*. *ASCE J Geotech Eng Div*, 323–346.
- Sitar, N., and Hausler, E. A. (2012). "Influence of Ground Improvement on Liquefaction Induced Settlements: Observations from Case Histories and Centrifuge Experiments." *Invited Lecture presented to the Korean Geotechnical Society*, Seoul, Korea, March 22.
- Steedman, R. S., and Sharp, M. (2001). "Liquefaction of deep saturated sands under high effective confining stress." *Proceedings of 4th International Conference Recent Advances in Geotech Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, (August), 441–446.
- Taiebat, M., Jeremić, B., Dafalias, Y. F., Kaynia, A. M., and Cheng, Z. (2010). "Propagation of seismic waves through liquefied soils." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(4), 236–257.
- Tohumcu Özener, P., Özyaydin, K., and Berilgen, M. M. (2009). "Investigation of liquefaction and pore water pressure development in layered sands." *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(1), 199–219.
- Tokimatsu, K., and Yoshimi, Y. (1983). "Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content." *Soils and Foundations*, 23(4), 56–74.

Tsiapas, Y. Z. (2017). "Seismic Response Analysis of Liquefiable Ground with Computational Methods." PhD Thesis, Dept of Civil Engineering, NTUA, Athens.

Vucetic, M., and Dobry, R. (1991). "Effect of soil plasticity on cyclic response." *Journal of geotechnical engineering*, 117(1), 89–107.

Youd, T., Idriss, I., Andrus, R., Arango, I., Castro, G., Christian, J., Dobry, R., Finn, W., Harder, L., Hynes, M., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson, W., Martin, G., Mitchell, J., Moriwaki, Y., Power, M., Robertson, P., Seed, R., and Stokoe, K. (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, 127(10), 817–833.

Παράρτημα **A**

Μεθοδολογία Αριθμητικής Προσομοίωσης

A.1 Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC

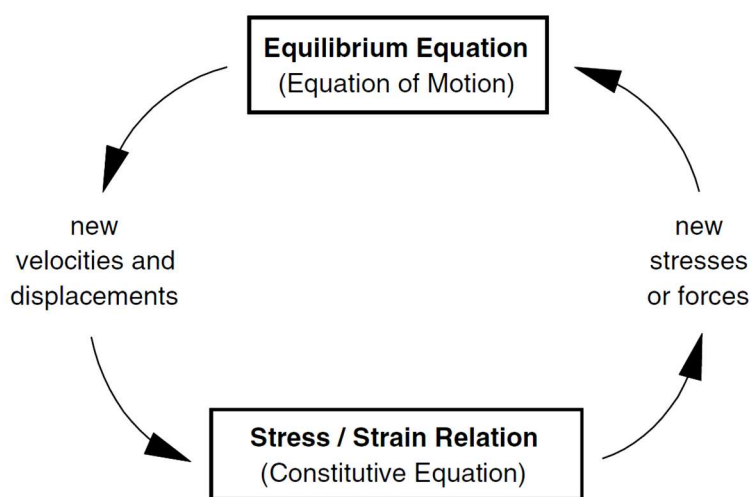
Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφεται η αριθμητική μεθοδολογία με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι αριθμητικές αναλύσεις της σεισμικής απόκρισης του ρευστοποιήσιμου εδάφους στα Κεφάλαια 3 και 4 της Διπλωματικής Εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, στις επόμενες Ενότητες περιγράφονται αναλυτικά τα βασικά στοιχεία του κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών (Ενότητα A.2) και του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-Sand (Ενότητα A.3), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό σε όλες τις αριθμητικές αναλύσεις.

A.2 Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC

Το λογισμικό FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) είναι ένα πρόγραμμα Πεπερασμένων Διαφορών μη-πεπλεγμένης μορφής (Explicit Finite Difference Method) με εφαρμογή σε υπολογιστικά προβλήματα γεωτεχνικής φύσης (Itasca 2011). Παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων που σχετίζονται κυρίως με συνεχή μέσα σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Το συνεχές μέσο διακριτοποιείται σε τμήματα πεπερασμένων διαστάσεων, τα οποία στο FLAC ονομάζονται ζώνες (zones), ενώ οι εξισώσεις ισορροπίας επιλύονται στα σημεία που ορίζουν το δίκτυο των ζωνών, δηλαδή στους κόμβους (gridpoints). Κάθε ζώνη ακολουθεί κάποιο γραμμικό ή μη-γραμμικό καταστατικό νόμο συμπεριφοράς, ο οποίος είτε είναι ενσωματωμένος στο πρόγραμμα (π.χ. Mohr-Coulomb) είτε εισάγεται εξολοκλήρου από το χρήστη (π.χ. NTUA-Sand) σύμφωνα με τον οποίο υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις κάτω από τις επιβαλλόμενες δυνάμεις/μετατοπίσεις και συνοριακές συνθήκες.

Στη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών κάθε παράγωγος της διαφορικής εξίσωσης κίνησης αντικαθίσταται από μια αλγεβρική έκφραση με όρους τις μεταβλητές του προβλήματος (τάσεις, παραμορφώσεις) σε διακεκριμένα σημεία στο χώρο, χωρίς να απαιτείται ο καθορισμός ενός νόμου μεταβολής για αυτές στο εσωτερικό των στοιχείων - ζωνών. Στο

Σχήμα Α.1 φαίνεται ένας τυπικός κύκλος υπολογισμών του FLAC (timestep). Συγκεκριμένα, ξεκινώντας από μία δεδομένη παραμορφωσιακή κατάσταση (μετακινήσεις κόμβων) υπολογίζονται οι επαυξητικές παραμορφώσεις για μία δεδομένη αρχική ταχύτητα. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι τάσεις που αναπτύσσονται σε κάθε ζώνη σύμφωνα με το χρησιμοποιούμενο κάθε φορά καταστατικό προσομοίωμα και μέσω των τάσεων υπολογίζονται οι δυνάμεις στους κόμβους. Αν οι δυνάμεις αυτές τείνουν να μηδενιστούν, θεωρούμε ότι το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία υπό σταθερή ταχύτητα. Σε αντίθετη περίπτωση, οι μη ισορροπούσες δυνάμεις των κόμβων (unbalanced force) δημιουργούν κομβικές επιταχύνσεις, ξεκινάει νέος κύκλος υπολογισμών και η διαδικασία συνεχίζεται επαναληπτικά έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση.



Σχήμα Α.1: Μη πεπλεγμένη διαδικασία υπολογισμού που χρησιμοποιείται στον κώδικα FLAC.

Η ειδοποιός διαφορά της μη-πεπλεγμένης μεθόδου που χρησιμοποιείται στο εν λόγω πρόγραμμα σε σχέση με τις πεπλεγμένες μεθόδους που χρησιμοποιούνται συνήθως στα προγράμματα Πεπερασμένων Στοιχείων (Implicit Finite Element Method) είναι ότι κατά τη διάρκεια ενός υπολογιστικού βήματος οι τιμές των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις παραμένουν σταθερές. Κάτι τέτοιο καθίσταται δυνατό με την υιοθέτηση επαρκώς μικρού βήματος ολοκλήρωσης (Δt_{crit}) ώστε η ταχύτητα μετάδοσης του «φυσικού μετώπου» να είναι μικρότερη από την «υπολογιστική ταχύτητα». Αντίθετα στις πεπλεγμένες μεθόδους κάθε στοιχείο αλληλεπιδρά με τα γειτονικά του κατά τη διάρκεια ενός υπολογιστικού βήματος και απαιτούνται αρκετές επαναλήψεις έως ότου επιτευχθεί ισορροπία. Μεγάλο πλεονέκτημα των μεθόδων Πεπερασμένων Διαφορών αποτελεί το γεγονός ότι οι εξισώσεις του προβλήματος μορφώνονται και επιλύονται σε κάθε υπολογιστικό βήμα χωρίς να

απαιτείται η μόρφωση και στη συνέχεια η αντιστροφή ενός συνολικού μητρώου δυσκαμψίας του συστήματος, όπως συμβαίνει με τα Πεπερασμένα Στοιχεία.

A.3 Καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand

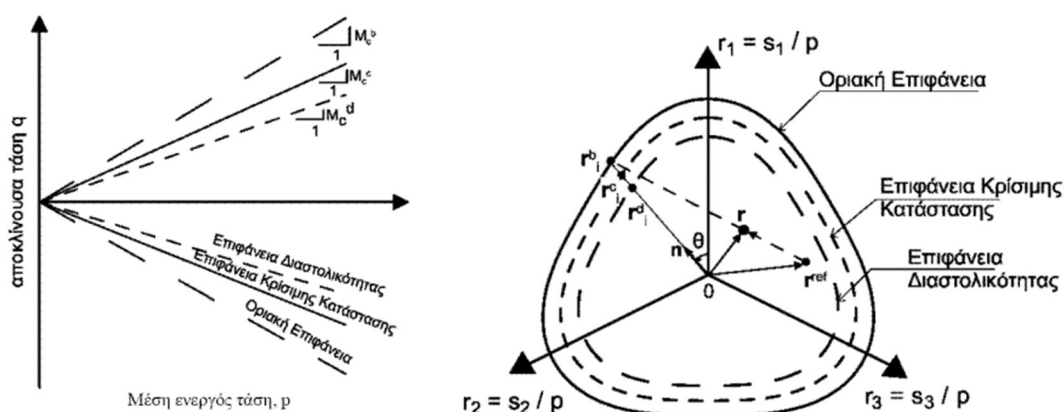
Η απόκριση της ρευστοποιήσιμης άμμου προσομοιώνεται με το εξελιγμένο καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand, το οποίο αναπτύχθηκε και ενσωματώθηκε στον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Paradimitriou & Bouckovalas 2002; Andrianopoulos et al. 2010; Karamitros 2010). Πρόκειται για ένα καταστατικό προσομοίωμα βασισμένο στη θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης και της Πλαστικότητας που αναπτύχθηκε με σκοπό να προσομοιώσει ικανοποιητικά την απόκριση μη-συνεκτικών εδαφών υπό ανακυκλική διάτμηση σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες παραμορφώσεις καθώς και σε συνθήκες ρευστοποίησης. Επισημαίνεται ότι προσομοιώνει αποτελεσματικά τόσο μονοτονικές όσο και ανακυκλικές φορτίσεις ενσωματώνοντας τα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά:

- Περιλαμβάνει τρεις επιφάνειες στο χώρο των τάσεων: την επιφάνεια Διαστολικότητας, Κρίσιμης Κατάστασης και την Οριακή, που αντιστοιχούν στην Γραμμή Αλλαγής Φάσης, Κρίσιμης Κατάστασης και Οριακής Αντοχής, φάσεις από τις οποίες διέρχεται το υλικό κατά τη διάρκεια της διατμητικής του φόρτισης. Στο **Σχήμα A.2** φαίνονται οι μορφές των επιφανειών του προσομοιώματος για τριαξονική εντατική κατάσταση καθώς και οι προβολές των επιφανειών στο επίπεδο π (αποκλίνον επίπεδο) σε συνδυασμό με το νόμο προβολής του προσομοιώματος.
- Οι κλίσεις της επιφάνειας Διαστολικότητας και της Οριακής επιφάνειας, M_c^d και M_c^b αντίστοιχα, ορίζονται μέσω της παραμέτρου κατάστασης $\psi = e - e_{cs}$ (όπου e ο δείκτης πόρων και e_{cs} ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για την ίδια ενεργό τάση p') μέσω της οποίας λαμβάνεται υπόψη τόσο η επίδραση της σχετικής πυκνότητας όσο και της αρχικής ενεργού τάσης με ένα μοναδικό σετ παραμέτρων. Η κλίση M_c^c εισάγεται ως παράμετρος του προσομοιώματος.
- Η θεώρηση σημειακής επιφάνειας διαρροής και η επακόλουθη απουσία ελαστικής περιοχής, τροποποίηση που εισήχθη από τους Andrianopoulos et al. (2010). Αποτέλεσμα αυτού είναι η ελαστοπλαστική απόκριση του υλικού σε κάθε υπολογιστικό βήμα και η ομαλή μετάβαση σε μεγάλες παραμορφώσεις αποκομίζοντας οφέλη αριθμητικής ευστάθειας και εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου.

- Η χρήση καταστατικού προσομοιώματος τύπου Ramberg-Osgood για την «ελαστική» απόκριση άμμων σε μικρές παραμορφώσεις, λαμβάνοντας υπόψη την μείωση του μέτρου διάτμησης και την επακόλουθη υστερητική απόσβεση.
- Η χρήση ενός εμπειρικού δείκτη που εκφράζει μακροσκοπικά την επίδραση της αλλαγής της δομής στο μέτρο πλαστικών παραμορφώσεων προβλέποντας με ακρίβεια την ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων και την εκδήλωση της ρευστοποίησης.

Ο **Πίνακας Α.1** συνοψίζει το σύνολο των εξισώσεων του καταστατικού προσομοιώματος και τις βασικές παραμέτρους που το ορίζουν. Παρατηρείται ότι το προσομοίωμα απαιτεί τη βαθμονόμηση 13 συνολικά αδιάστατων και θετικών παραμέτρων από τις οποίες οι 11 αναφέρονται σε μονοτονική φόρτιση και οι λοιπές 2 σε ανακυκλική. Όσον αφορά στη διαδικασία βαθμονόμησης, οι τιμές των παραμέτρων προκύπτουν από επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές για τις 10 από τις 13 παραμέτρους και από δοκιμαστικές αναλύσεις (trial-and-error) που προσομοιώνουν πειραματικά αποτελέσματα για τις υπόλοιπες 3. Ο **Πίνακας Α.2** συνοψίζει τις τιμές των παραμέτρων μαζί με μια επιγραμματική περιγραφή της φυσικής τους σημασίας.

Η βαθμονόμηση του προσομοιώματος έχει πραγματοποιηθεί από τους Andrianopoulos et al. (2010), για άμμο τύπου Nevada. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος VELACS (Arulmoli et al. 1992), και συγκεκριμένα: δοκιμές συντονισμού στήλης εδάφους με $p_0' = 40 - 320$ kPa και ανακυκλικές δοκιμές ρευστοποίησης (απλής διάτμησης και τριαξονικές) με $p_0' = 40 - 160$ kPa και σχετικές πυκνότητες $D_r = 40$ και 60 %. Η ακρίβεια της εν λόγω βαθμονόμησης έχει επαληθευτεί μέσω της επιτυχούς σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων και αριθμητικών αναλύσεων τόσο σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου, όσο και σε μεγάλης κλίμακας πειράματα φυγοκεντριστή που έχουν πραγματοποιηθεί με άμμο Nevada.



Σχήμα Α.2: Επιφάνειες του προσομοιώματος στο χώρο $p - q$ και η προβολή τους στο επίπεδο π .

Πίνακας Α.1: Εξισώσεις προσομοιώματος NTUA-Sand.

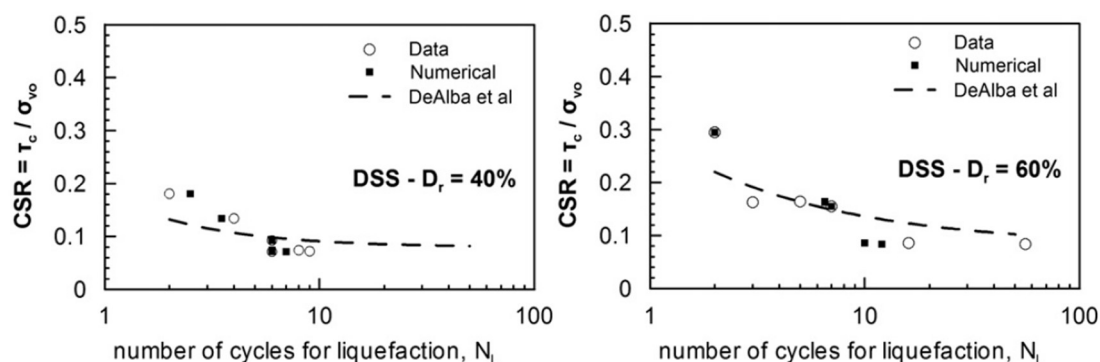
Περιγραφή	Εξίσωση	Σταθερές
Κλίση της Οριακής Επιφάνειας για τριαξονική θλίψη (TC)	$M_c^b = M_c^c + K_c^b \langle -\psi \rangle$ (A.1)	M_c^c, K_c^b
Κλίση της Επιφάνειας Διαστολικότητας για TC	$M_c^d = M_c^c + K_c^d \psi$ (A.2)	K_c^d
Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης	$\psi = e - e_{cs} = e - \Gamma_{cs} + \lambda \ln(p)$ (A.3)	Γ_{cs}, λ
Γενίκευση των επιφανειών στον χώρο των τάσεων	$M_{\theta}^{c,b,d} = g(\theta, c^c) M_c^{c,b,d}$ (A.4)	$c = M_c^c / M_c^c$
Σχήμα των επιφανειών του προσομοιώματος στο επίπεδο π	$g(\theta, c) = \frac{4c}{(1+c) - (1-c)\cos(3\theta)} - \left[\frac{(1+c) - (1-c)\cos(3\theta)}{2} \right]$ (A.5)	
Γωνία Lode θ	$\cos(3\theta) = (3/2)\sqrt{3}(r_{ij}r_{ij}r_{ij}) / (0.5r_{ij}r_{ij})^{3/2}$ (A.6)	
Μοναδιαίο διάνυσμα για τη διεύθυνση φόρτισης	$n_{ij} = r_{ij}^{IP} / \sqrt{r_{kl}^{IP}r_{kl}^{IP}}$ (A.7)	
Συζυγές σημείο στις επιφάνειες του προσομοιώματος	$r_{ij}^{IP,c,b,d} = \sqrt{2/3} M_{\theta}^{c,b,d} n_{ij}$ (A.8)	
Απόσταση συζυγούς σημείου από την τρέχουσα κατάσταση	$d^{c,b,d} = (r_{ij}^{IP,c,b,d} - r_{ij}) n_{ij}$ (A.9)	
Απόσταση αναφοράς	$d_{ref}^{b,d} = \sqrt{2/3} (M_{\theta}^{b,d} + M_{\theta+\pi}^{b,d})$ (A.10)	
Αρχικό μέτρο διάτμησης	$G_{max} = B p_a \sqrt{p/p_a} / (0.3 + 0.7e)$ (A.11)	B
Εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης	$G_t = G_{max} / T$ (A.12)	a_1, γ_1
	$T = 1 + \left(\frac{1}{a_1} - 1 \right) \left(\frac{\sqrt{0.5(r_{ij} - r_{ij}^{ref})(r_{ij} - r_{ij}^{ref})}}{a_1 (G_{max}^{LR} / p^{LR}) \gamma_1} \right)$ (A.13)	
Εφαπτομενικό μέτρο ισότροπης συμπίεσης	$K_t = (2/3) G_t (1 + \nu) / (1 - 2\nu)$ (A.14)	ν
Επαύξηση "ελαστικών" παραμορφώσεων	$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \dot{\epsilon}_{ij}^e + (\dot{\epsilon}_{vol}^c / 3) \delta_{ij} = (\dot{s}_{ij} / 2G_t) + (\dot{p} / K_t) \delta_{ij}$ (A.15)	
Επαύξηση πλαστικών παραμορφώσεων	$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij}^p + (\dot{\epsilon}_{vol}^p / 3) \delta_{ij} = \langle \Lambda \rangle R_{ij}$ (A.16)	
Διεύθυνση φόρτισης	$L_{ij} = n_{ij} - (V/3) \delta_{ij} = n_{ij} - (n_{kl} r_{kl} / 3) \delta_{ij}$ (A.17)	
Διεύθυνση επαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης	$R_{ij} = n_{ij} + (D/3) \delta_{ij}$ (A.18)	
Επαύξηση της ενεργού τάσης	$\dot{\sigma}_{ij} = 2G_t \dot{\epsilon}_{ij} + K_t \dot{\epsilon}_{vol} \delta_{ij} - \langle \Lambda \rangle (2G_t n_{ij} + K_t D \delta_{ij})$ (A.19)	
Δείκτης φόρτισης	$\Lambda = \frac{2G_t n_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - V K_t \dot{\epsilon}_{vol}}{K_p + 2G_t - V K_t D}$ (A.20)	
Συντελεστής διαστολικότητας	$D = A_o d^d \left(2 - \sqrt{\langle d^d \rangle / d_{ref}^d} \right)$ (A.21)	A_o
Πλαστικό μέτρο κράτυνσης	$K_p = p h_b h_f d^b$ (A.22)	
Εξίσωση νόμου παρεμβολής	$h_b = h_o d^b ^3 / \langle d_{ref}^b - d^b \rangle$ (A.23)	h_o
Επίδραση της αλλαγής της δομής	$h_f = \left(1 + \langle f_p \rangle^2 \right) / \left(1 + \langle f_{ij} n_{ij} \rangle \right)$ (A.24)	N_o
	$\dot{f}_p = N \dot{\epsilon}_{vol}^p$ (A.25)	
	$\dot{f}_{ij} = -N \langle -\dot{\epsilon}_{vol}^p \rangle \left[\left(4 \max f_p ^2 \right) n_{ij} + f_{ij} \right]$ (A.26)	
	$N = N_o (\sigma_{1,o} / p_a) \langle -\psi_o \rangle$ (A.27)	

Πίνακας Α.2: Παράμετροι προσομοιώματος NTUA-Sand: φυσική σημασία και τιμές.

#	Φυσική Σημασία	Τιμή
M_c^c	Κλίση της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης για τριαξονική θλίψη (TC)	1.25
c	Λόγος της κλίση της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης για τριαξονικό εφελκισμό (TE) προς την αντίστοιχη κλίση για τριαξονική θλίψη (TC)	0.72
Γ_{cs}	Δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για $p=1\text{kPa}$	0.910
λ	Κλίση της γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης στο επίπεδο $[e-\ln p]$	0.022
B	Σταθερά του ελαστικού μέτρου διάτμησης	600*
ν	Λόγος Poisson	0.33
k_c^b	Επίδραση του ψ στην κλίση της Οριακής Επιφάνειας για TC	1.45
k_c^d	Επίδραση του ψ στην κλίση της Επιφάνειας Διαστολικότητας για TC	0.30
γ_1	Χαρακτηριστική διατμητική παραμόρφωση	0.025%
α_1	Ρυθμός απομείωσης του ελαστικού μέτρου διάτμησης	0.6*
A_o	Σταθερά του συντελεστή διαστολικότητας	0.8
N_o	Σταθερά της επίδρασης της αλλαγής της δομής	40000
h_o	Σταθερά του πλαστικού μέτρου κράτυνσης	15000

* για μονοτονική φόρτιση: $B = 180$, $\alpha_1 = 1.0$

Τέλος, στις καμπύλες ρευστοποίησης του **Σχήματος Α.3**, δηλαδή στα διαγράμματα μεταβολής της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης CSR με τον αριθμό κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για ρευστοποίηση N_L , συγκρίνονται πειραματικά αποτελέσματα από ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης των Arulmoli et al. (1992) για $\sigma'_{v0} = 160\text{kPa}$ και $D_r = 40$ και 60% με τις αντίστοιχες αριθμητικές προβλέψεις, και από όπου επαληθεύεται η ακρίβεια του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-Sand.



Σχήμα Α.3: Σύγκριση καμπυλών ρευστοποίησης αριθμητικής προσομοίωσης (Numerical) του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-Sand με τα ακριβή πειραματικά δεδομένα (Data) των Arulmoli et al. (1992) για $\sigma'_{v0} = 160\text{ kPa}$ και $D_r = 40$ και 60%.

Παράρτημα **B**

Αποτελέσματα Παραμετρικών Αναλύσεων

Στον **Πίνακα B.1** παρουσιάζονται οι τιμές των δεικτών συμπεριφοράς $r_{u,avg}^{cf}$ και $r_{u,avg}^b$ για όλες τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με μεταβλητό πάχος «ασθενούς» στρώσης, μεταβλητό πάχος εδαφικής κρούστας, μεταβλητή περίοδο και τέλος μεταβλητή σχετική πυκνότητα των στιβαρότερων στρωμάτων άμμου. Στα **Σχήματα B.1-B.98** που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι κατανομές με το βάθος του συντελεστή ασφαλείας FS_L έναντι ρευστοποίησης και του μέγιστου λόγου υπερπίεσης πόρων $r_{u,max}$ για την εδαφική στήλη της εξεταζόμενης αριθμητικής ανάλυσης (γκρίζο χρώμα). Οι κατανομές με το βάθος του FS_L και του $r_{u,max}$ συγκρίνονται με τις κατανομές της αντίστοιχης ομοιόμορφης εδαφικής στήλης (μαύρο χρώμα). Διευκρινίζεται ότι οι διακεκομμένες οριζόντιες γραμμές «οριοθετούν» τη ρευστοποιήσιμη άμμο από τα αργιλικά στρώματα, ενώ η γκριζα ζώνη δηλώνει την ύπαρξη της «ασθενούς» ρευστοποιήσιμης άμμου με σχετική πυκνότητα $D_r=30\%$. Όσον αφορά τις τιμές του FS_L που υπολογίστηκαν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης με ρευστοποίηση, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση $FS_L = CRR / CSR = (N_L / N)^{\beta}$ για το εύρος τιμών της παραμέτρου $\beta=0.41-0.57$ που προτείνουν οι Kalogeraki & Zontanou (2014) (**Πίνακας 3.3**). Για τα βάθη που δεν ρευστοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της δόνησης, οι συντελεστές ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L υπολογίστηκαν προσεγγιστικά μέσω της εμπειρικής εξίσωσης:

$$FS_L = \left[\sin \left(\frac{\pi}{2} r_{u,max} \right) \right]^{-2 \cdot A \cdot \beta}$$

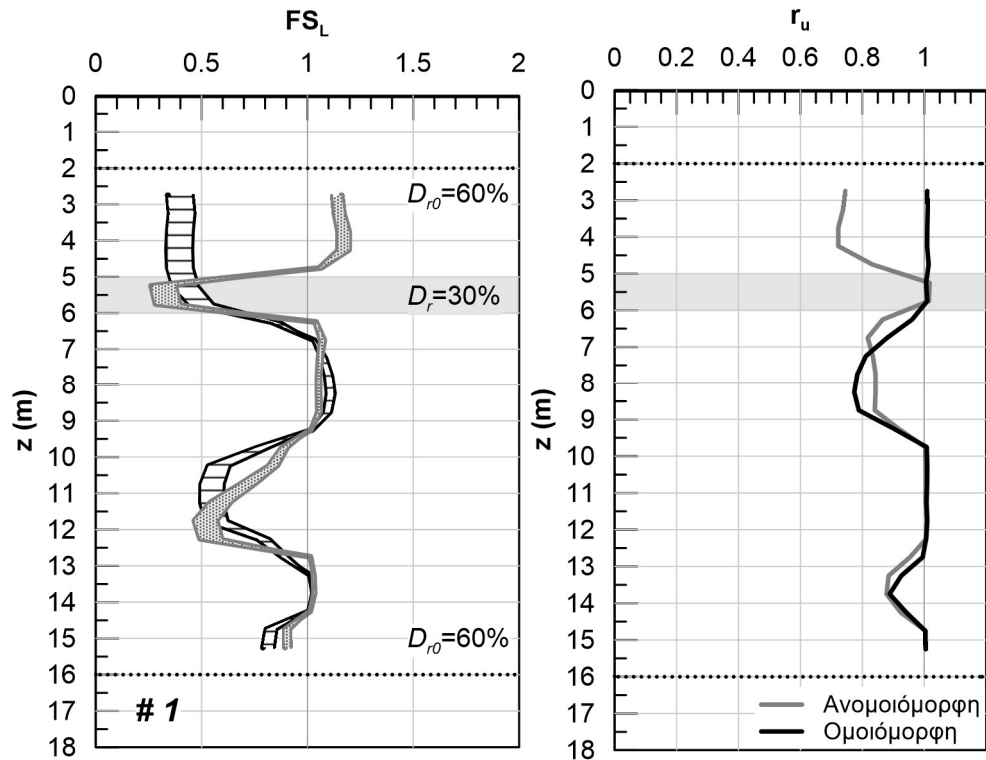
Η τιμή του εκθέτη A εκτιμήθηκε από τους Bouckovalas et al. (2011), οι οποίοι επεξεργάστηκαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων σε άμμο τύπου Nevada των Arulmoli et al. (1992) στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος VELACS. Βάσει αυτής της εκτίμησης, οι τιμές του εκθέτη A που χρησιμοποιήθηκαν για σχετικές πυκνότητες $D_r= 30 - 50\%$ και $D_r=60 - 90\%$ είναι $A= 1.20$ και 1.60 αντίστοιχα.

Πίνακας Β.1: Τιμές των δεικτών συμπεριφοράς $r_{u^{cr},avg}$ και $r_{u^b,avg}$ για τις όλες παραμετρικές αναλύσεις

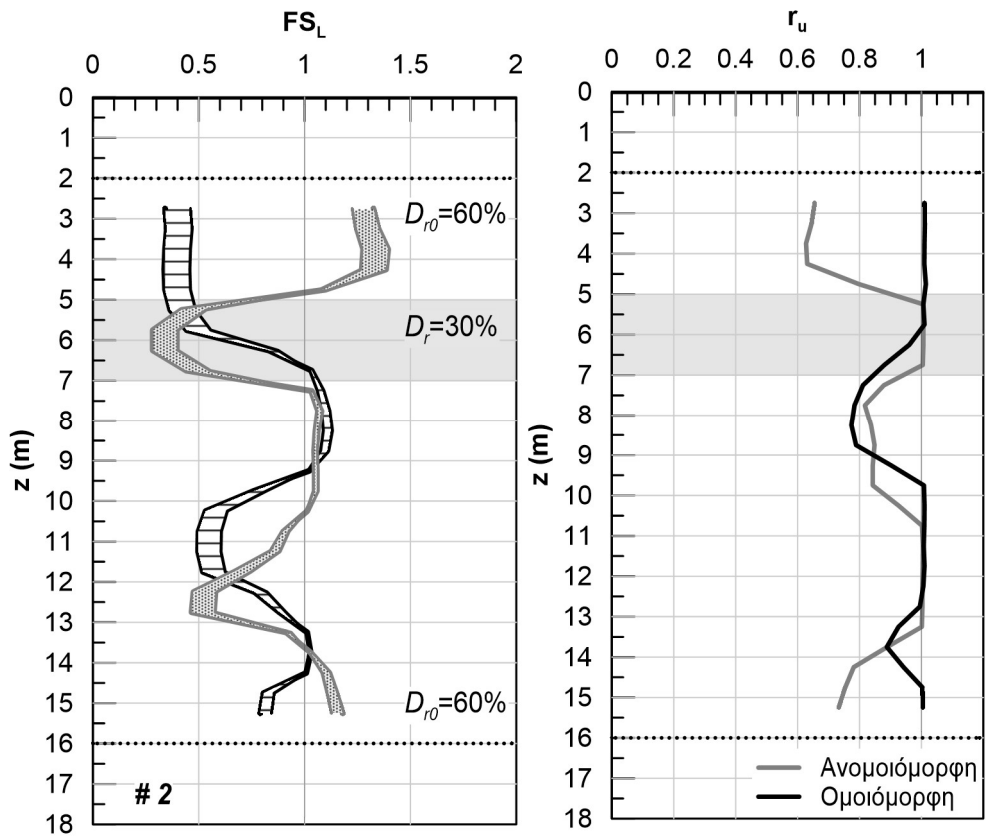
#	H_{crust} (m)	T_{exc} (sec)	D_{r0} (%)	H_{weak} (m)	$r_{u^{cr},avg}$	$r_{u^b,avg}$
1	5	0.3	60	1	0.73	0.91
2	5	0.3	60	2	0.65	0.87
3	5	0.3	60	3	0.59	0.85
4	5	0.3	60	4	0.58	0.85
5	5	0.3	60	5	0.55	0.87
6	5	0.3	60	7	0.54	0.92
7	5	0.3	60	9	0.53	0.74
8	5	0.3	60	11	0.52	-
9	6	0.3	60	1	0.72	0.86
10	6	0.3	60	2	0.63	0.85
11	6	0.3	60	3	0.58	0.85
12	6	0.3	60	4	0.58	0.87
13	6	0.3	60	5	0.56	0.90
14	6	0.3	60	6	0.55	0.91
15	6	0.3	60	8	0.53	0.79
16	6	0.3	60	10	0.50	-
17	7	0.3	60	1	0.69	0.83
18	7	0.3	60	2	0.59	0.86
19	7	0.3	60	3	0.61	0.87
20	7	0.3	60	4	0.53	0.88
21	7	0.3	60	5	0.54	0.91
22	7	0.3	60	7	0.51	0.94
23	7	0.3	60	9	0.53	-
24	8	0.3	60	1	0.64	0.85
25	8	0.3	60	2	0.65	0.88
26	8	0.3	60	3	0.60	0.89
27	8	0.3	60	4	0.59	0.89
28	8	0.3	60	5	0.53	0.79
29	8	0.3	60	6	0.52	0.73
30	8	0.3	60	8	0.49	-
31	9	0.3	60	1	0.72	0.87
32	9	0.3	60	2	0.65	0.89
33	9	0.3	60	3	0.64	0.91
34	9	0.3	60	4	0.59	0.79
35	9	0.3	60	5	0.53	0.72
36	9	0.3	60	7	0.50	-
37	10	0.3	60	1	0.77	0.88
38	10	0.3	60	2	0.72	0.92
39	10	0.3	60	3	0.69	0.73
40	10	0.3	60	4	0.60	0.74
41	10	0.3	60	5	0.59	-
42	10	0.3	60	6	0.56	-
43	6	0.2	60	1	0.62	0.83
44	6	0.2	60	2	0.57	0.84

Πίνακας Β.1 (συνέχεια)						
#	H_{crust} (m)	T_{exc} (sec)	D_{r0} (%)	H_{weak} (m)	$r_{u^{cr},avg}$	$r_{u^b,avg}$
45	6	0.2	60	3	0.53	0.79
46	6	0.2	60	4	0.52	0.79
47	6	0.2	60	5	0.52	0.79
48	6	0.2	60	6	0.52	0.80
49	6	0.2	60	8	0.53	0.68
50	6	0.2	60	10	0.52	-
51 ≡ 9	6	0.3	60	1	0.72	0.86
52 ≡ 10	6	0.3	60	2	0.63	0.85
53 ≡ 11	6	0.3	60	3	0.58	0.85
54 ≡ 12	6	0.3	60	4	0.58	0.87
55 ≡ 13	6	0.3	60	5	0.56	0.90
56 ≡ 14	6	0.3	60	6	0.55	0.91
57 ≡ 15	6	0.3	60	8	0.53	0.79
58 ≡ 16	6	0.3	60	10	0.50	-
59	6	0.4	60	1	0.68	0.85
60	6	0.4	60	2	0.62	0.97
61	6	0.4	60	3	0.64	0.96
62	6	0.4	60	4	0.60	0.98
63	6	0.4	60	5	0.58	0.97
64	6	0.4	60	6	0.59	0.97
65	6	0.4	60	8	0.50	0.93
66	6	0.4	60	10	0.51	-
67	6	0.5	60	1	0.99	0.99
68	6	0.5	60	2	0.85	0.99
69	6	0.5	60	3	0.77	0.99
70	6	0.5	60	4	0.78	0.98
71	6	0.5	60	5	0.73	0.98
72	6	0.5	60	6	0.70	0.97
73	6	0.5	60	8	0.61	0.95
74	6	0.5	60	10	0.53	-
75	6	0.3	40	1	0.82	0.94
76	6	0.3	40	2	0.72	0.91
77	6	0.3	40	3	0.70	0.94
78	6	0.3	40	4	0.69	0.95
79	6	0.3	40	5	0.68	0.96
80	6	0.3	40	6	0.69	0.97
81	6	0.3	40	8	0.67	0.93
82	6	0.3	40	10	0.67	-
83	6	0.3	50	1	0.73	0.90
84	6	0.3	50	2	0.65	0.92
85	6	0.3	50	3	0.64	0.91
86	6	0.3	50	4	0.57	0.86
87	6	0.3	50	5	0.58	0.92
88	6	0.3	50	6	0.58	0.95
89	6	0.3	50	8	0.56	0.88

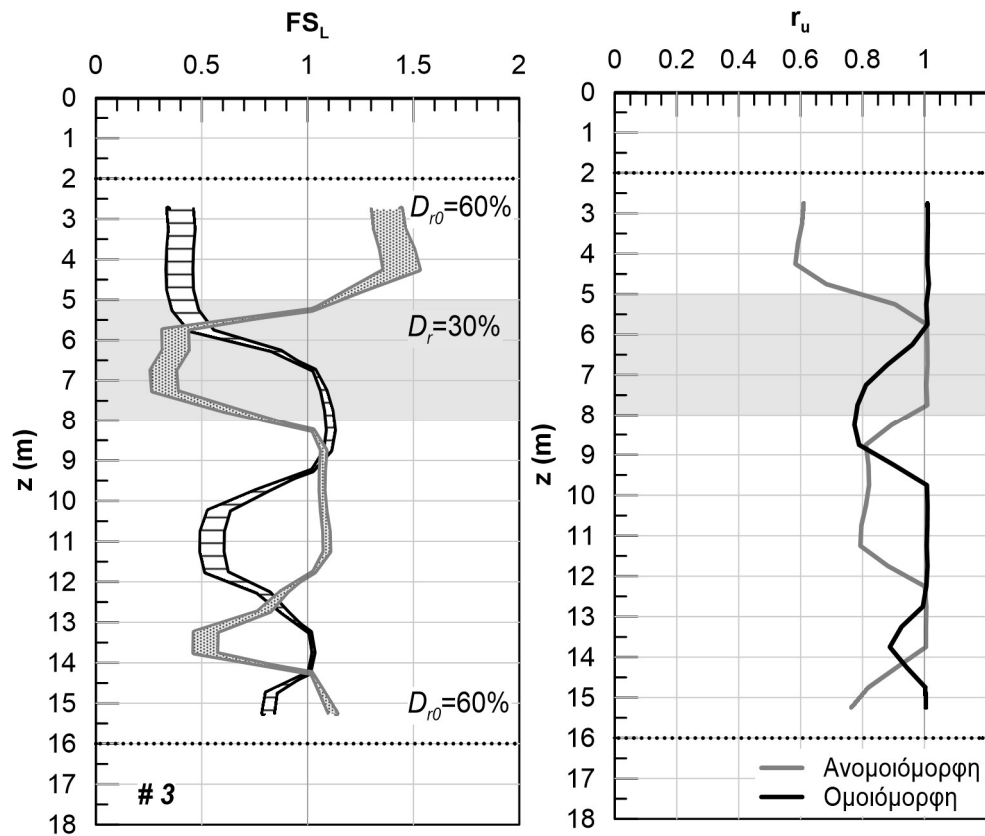
Πίνακας Β.1 (συνέχεια)						
#	H_{crust} (m)	T_{exc} (sec)	D_{r0} (%)	H_{weak} (m)	$r_{u^{cr},avg}$	$r_{u^b,avg}$
90	6	0.3	50	10	0.54	-
91 ≡ 9	6	0.3	60	1	0.72	0.86
92 ≡ 10	6	0.3	60	2	0.63	0.85
93 ≡ 11	6	0.3	60	3	0.58	0.85
94 ≡ 12	6	0.3	60	4	0.58	0.87
95 ≡ 13	6	0.3	60	5	0.56	0.90
96 ≡ 14	6	0.3	60	6	0.55	0.9
97 ≡ 15	6	0.3	60	8	0.53	0.79
98 ≡ 16	6	0.3	60	10	0.50	-
99	6	0.3	75	1	0.63	0.83
100	6	0.3	75	2	0.62	0.84
101	6	0.3	75	3	0.51	0.84
102	6	0.3	75	4	0.51	0.85
103	6	0.3	75	5	0.50	0.88
104	6	0.3	75	6	0.45	0.69
105	6	0.3	75	8	0.45	0.66
106	6	0.3	75	10	0.40	-
107	6	0.3	90	1	0.71	0.84
108	6	0.3	90	2	0.53	0.88
109	6	0.3	90	3	0.49	0.90
110	6	0.3	60	4	0.46	0.87
111	6	0.3	90	5	0.43	0.83
112	6	0.3	90	6	0.40	0.59
113	6	0.3	90	8	0.39	0.59
114	6	0.3	90	10	0.36	-



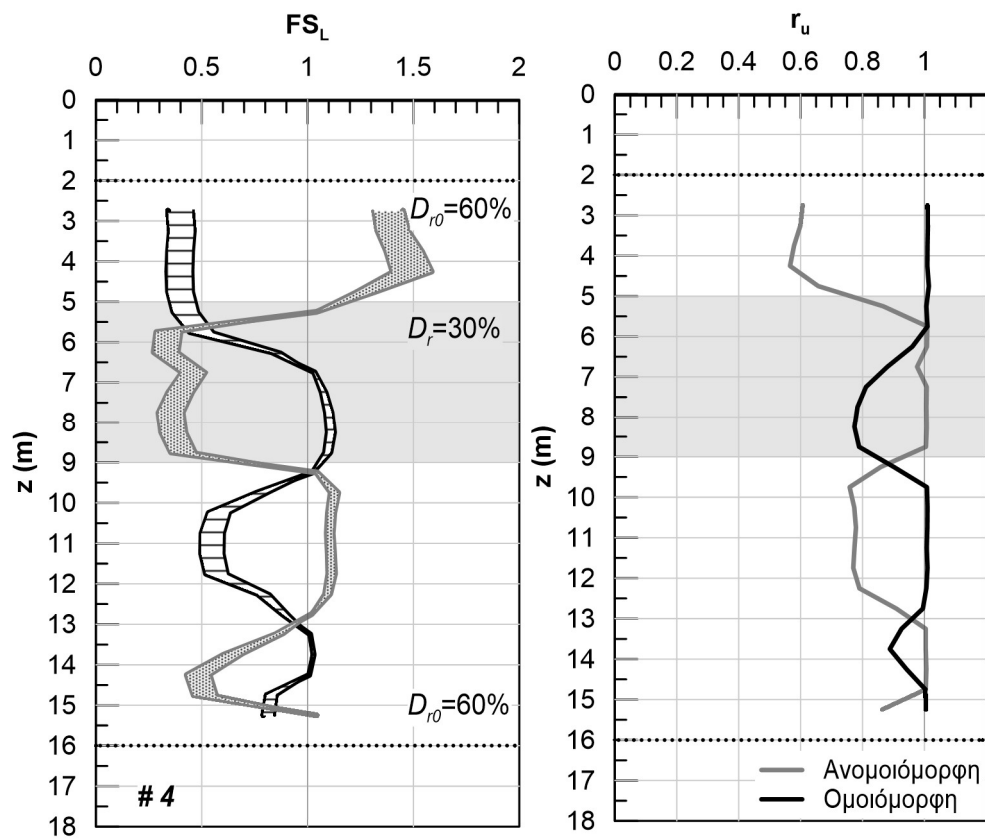
Σχήμα Β.1: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #1.



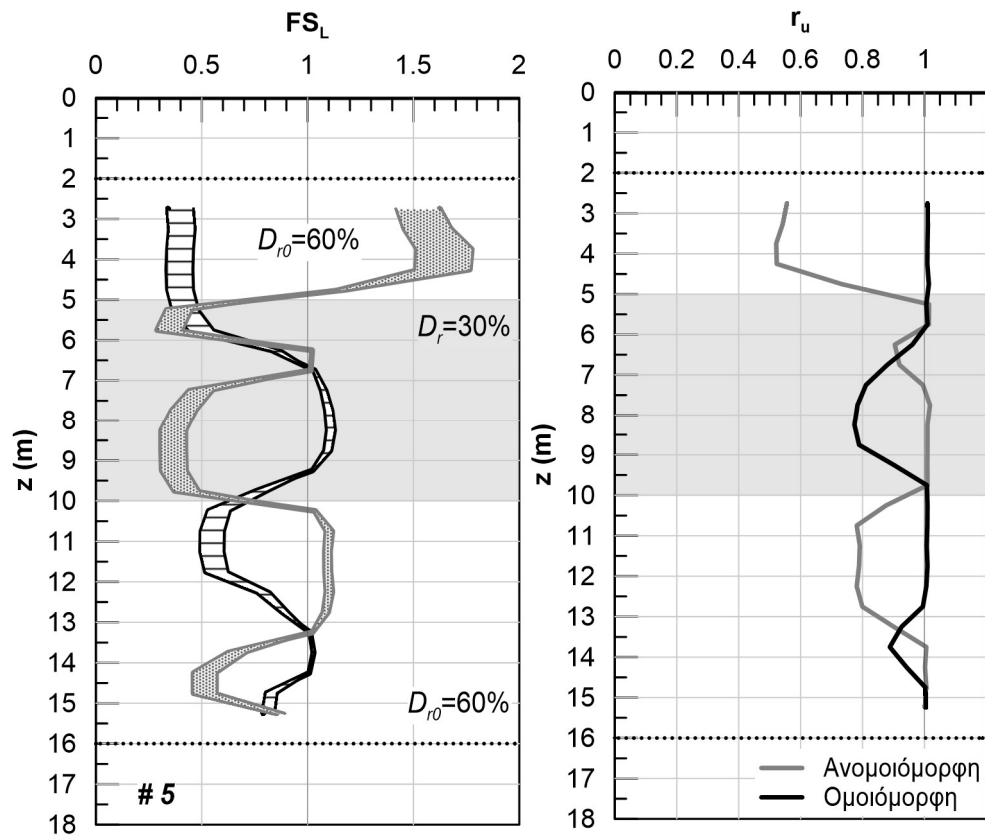
Σχήμα Β.2: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #2.



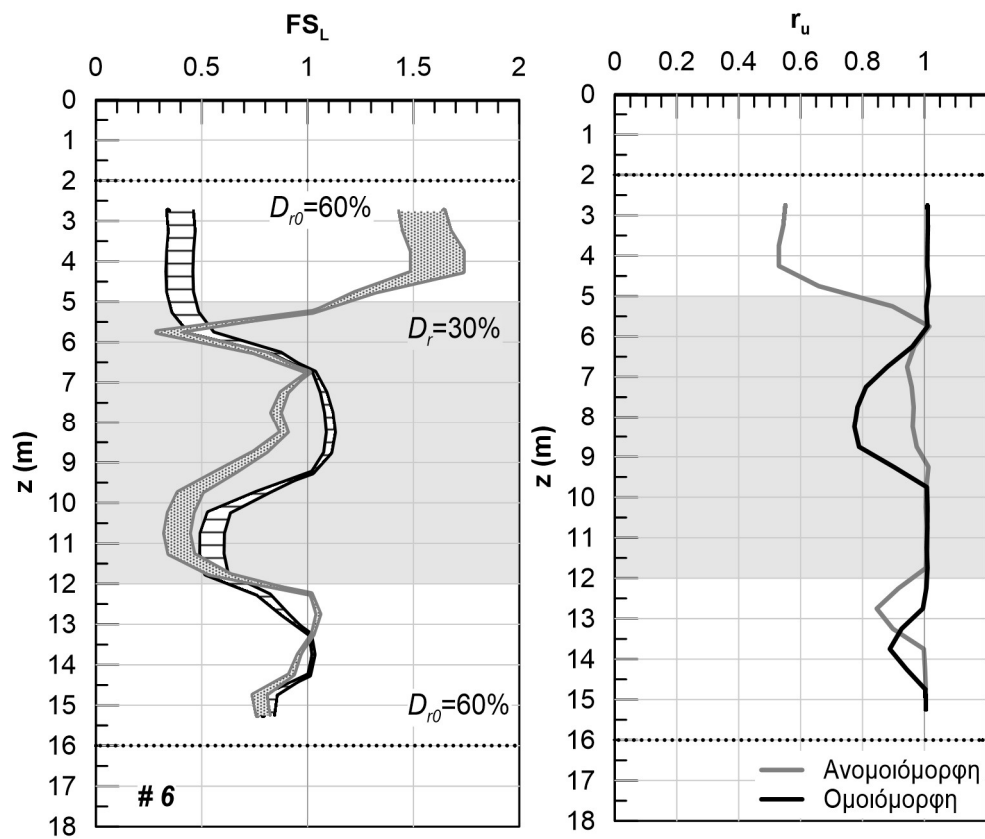
Σχήμα Β.3: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #3.



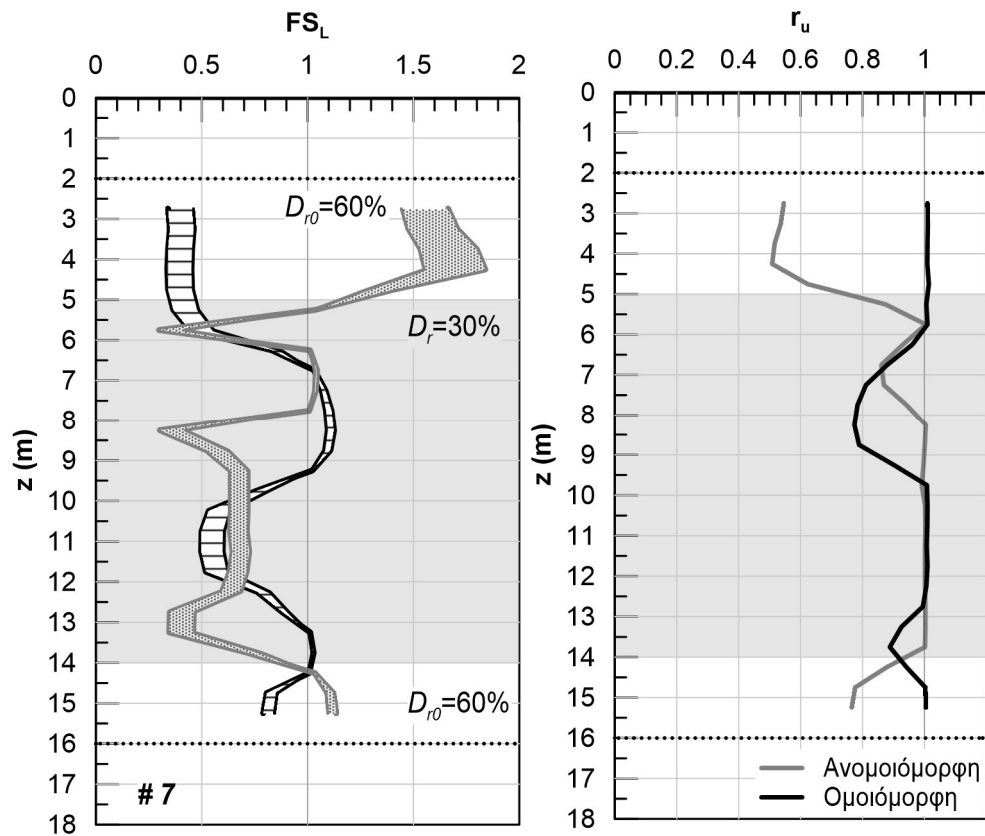
Σχήμα Β.4: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #4.



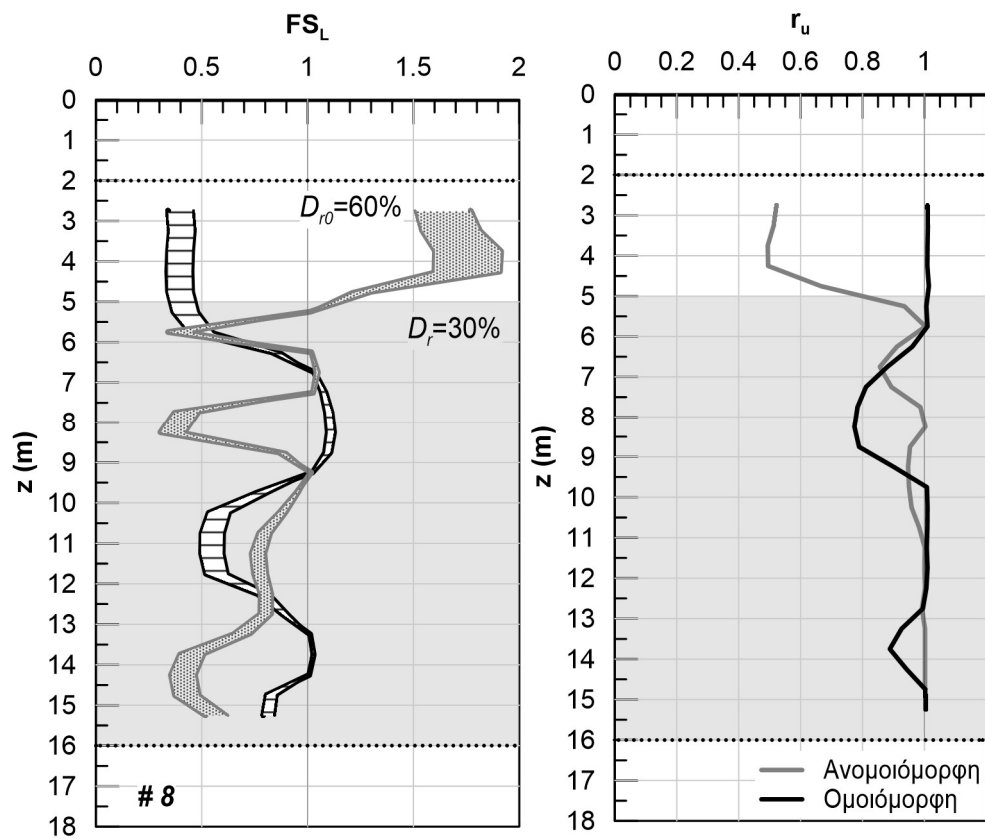
Σχήμα Β.5: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #5.



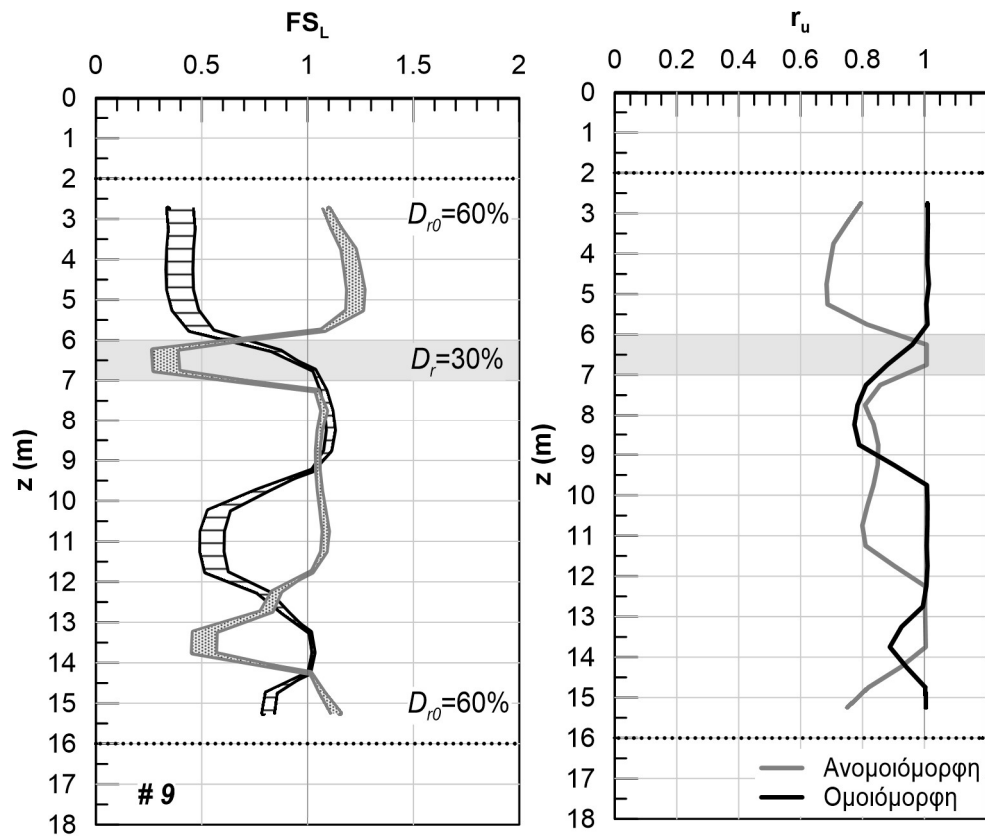
Σχήμα Β.6: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #6.



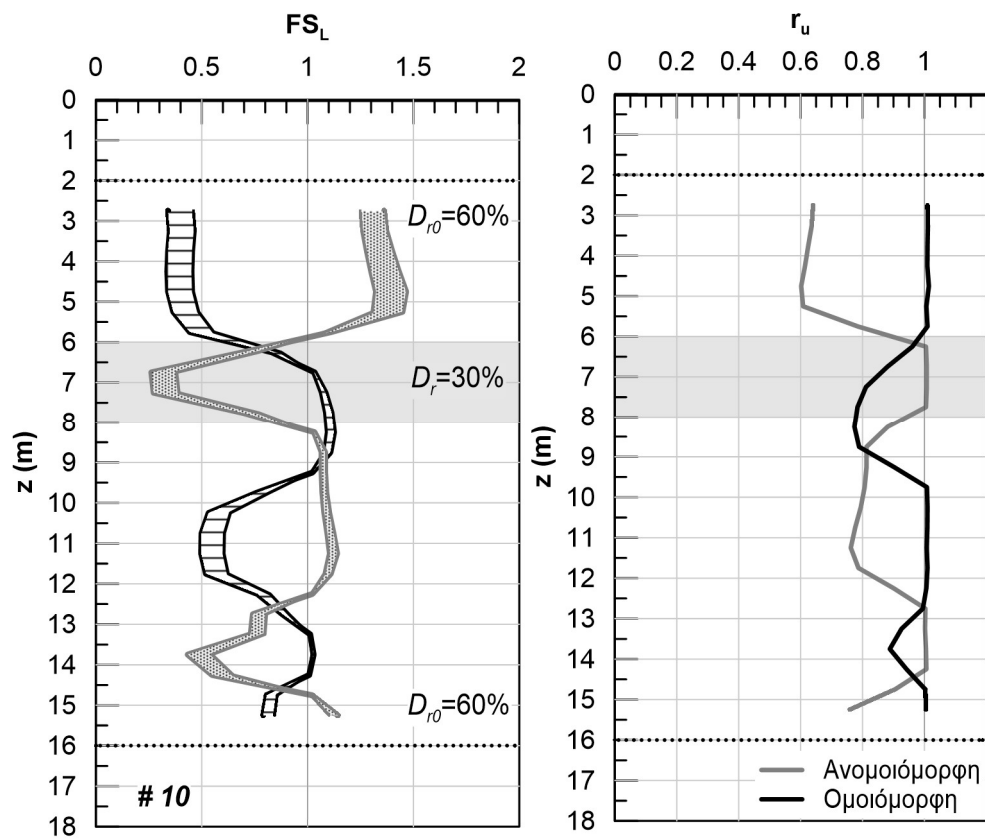
Σχήμα Β.7: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #7.



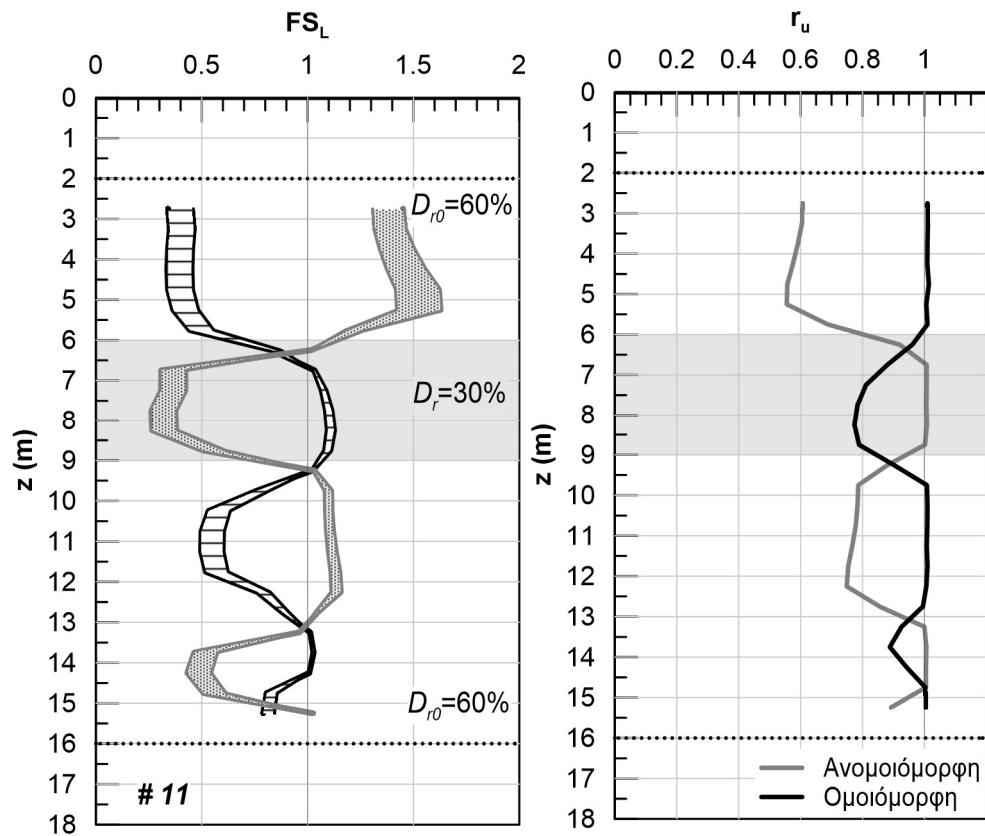
Σχήμα Β.8: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #8.



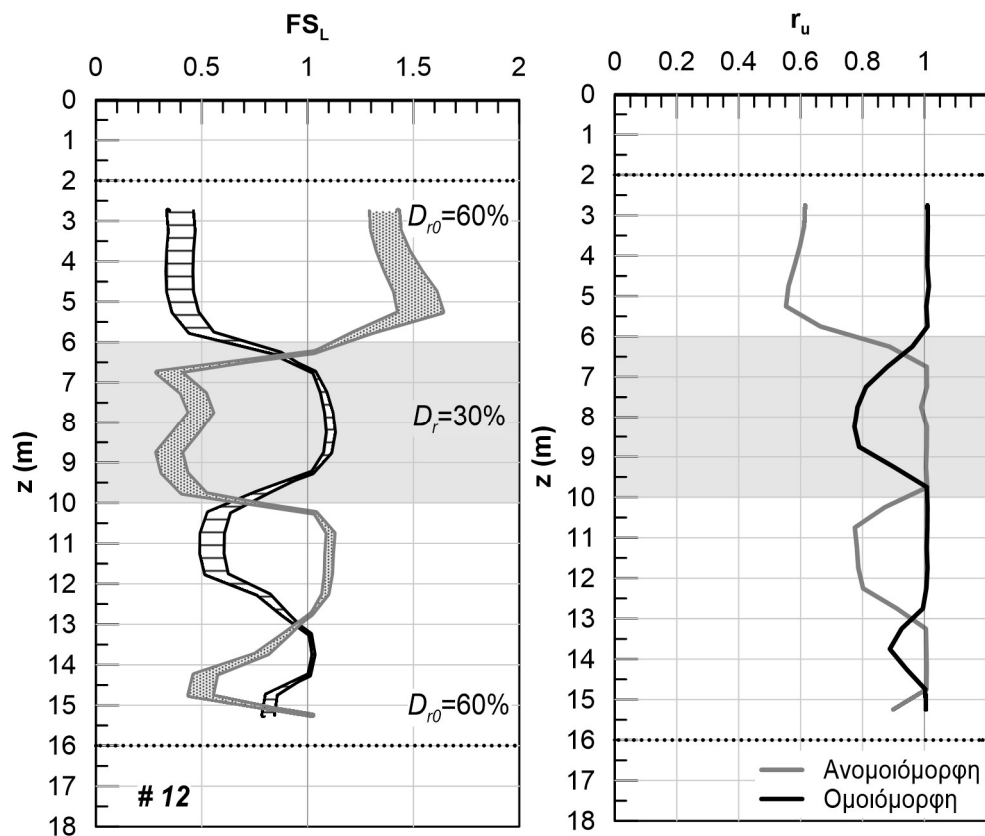
Σχήμα Β.9: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #9.



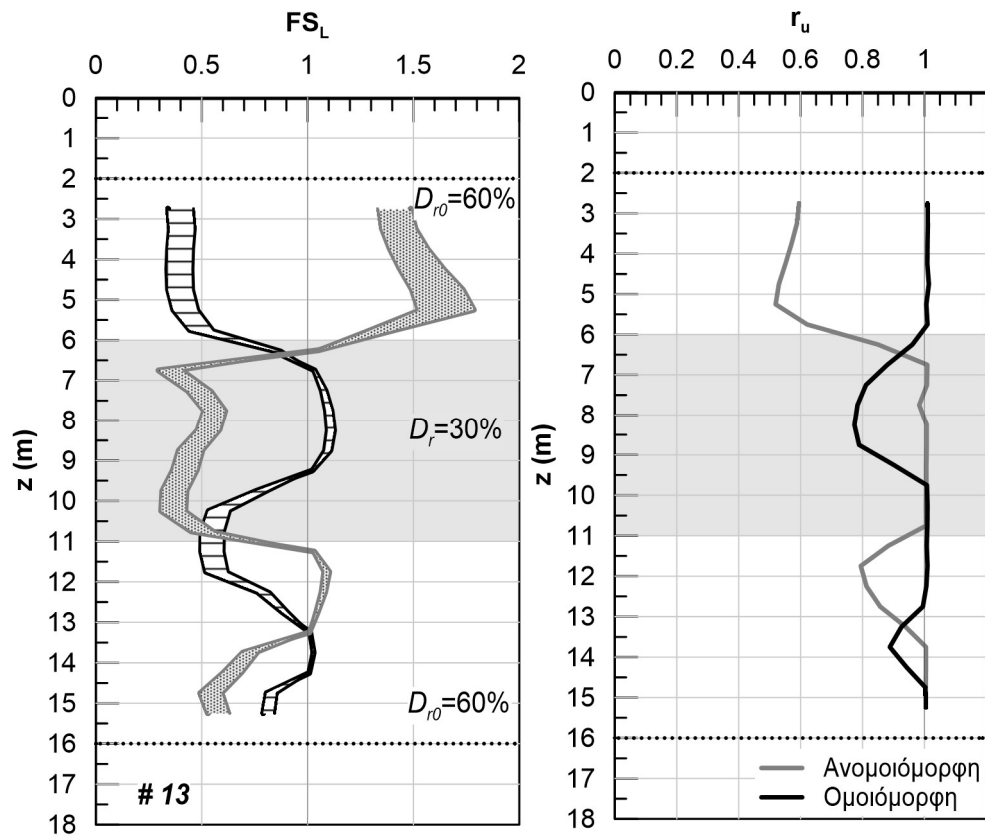
Σχήμα Β.10: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #10.



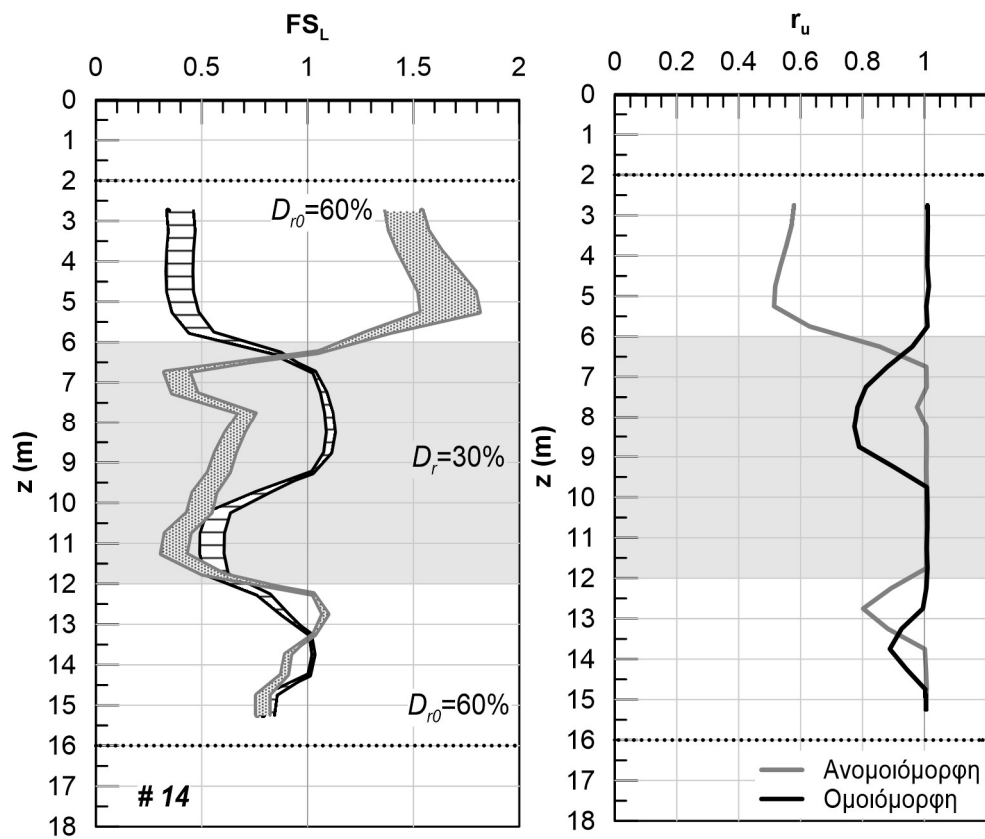
Σχήμα Β.11: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #11.



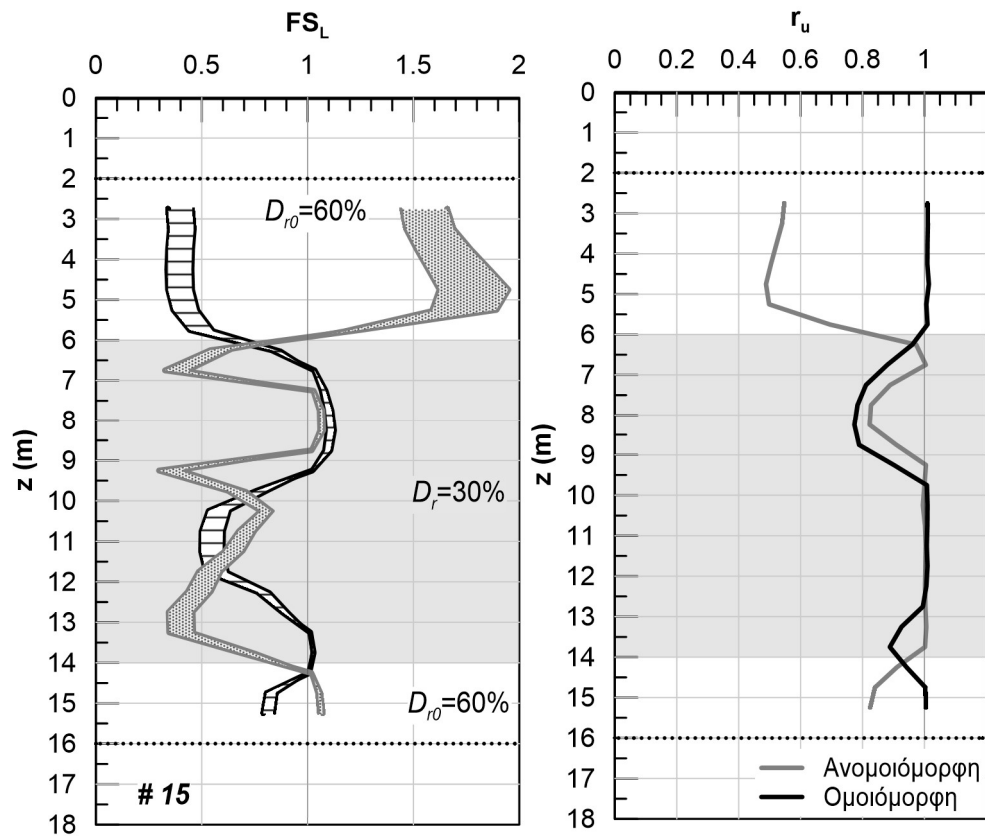
Σχήμα Β.12: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #12.



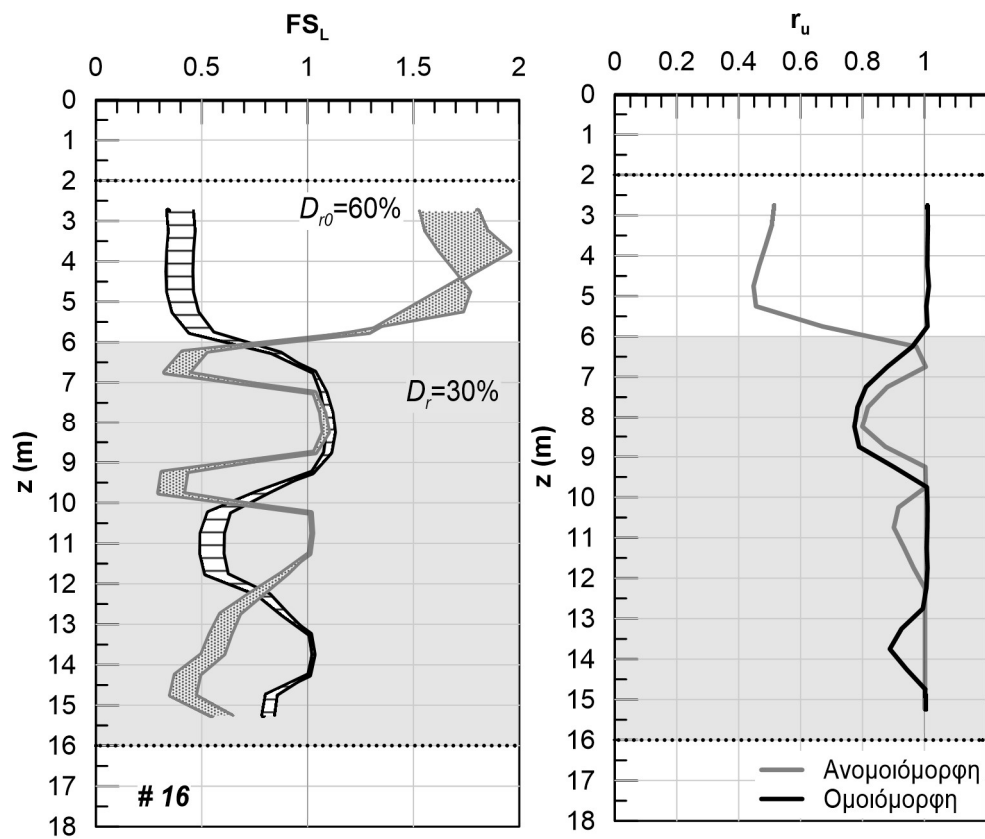
Σχήμα Β.13: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #13.



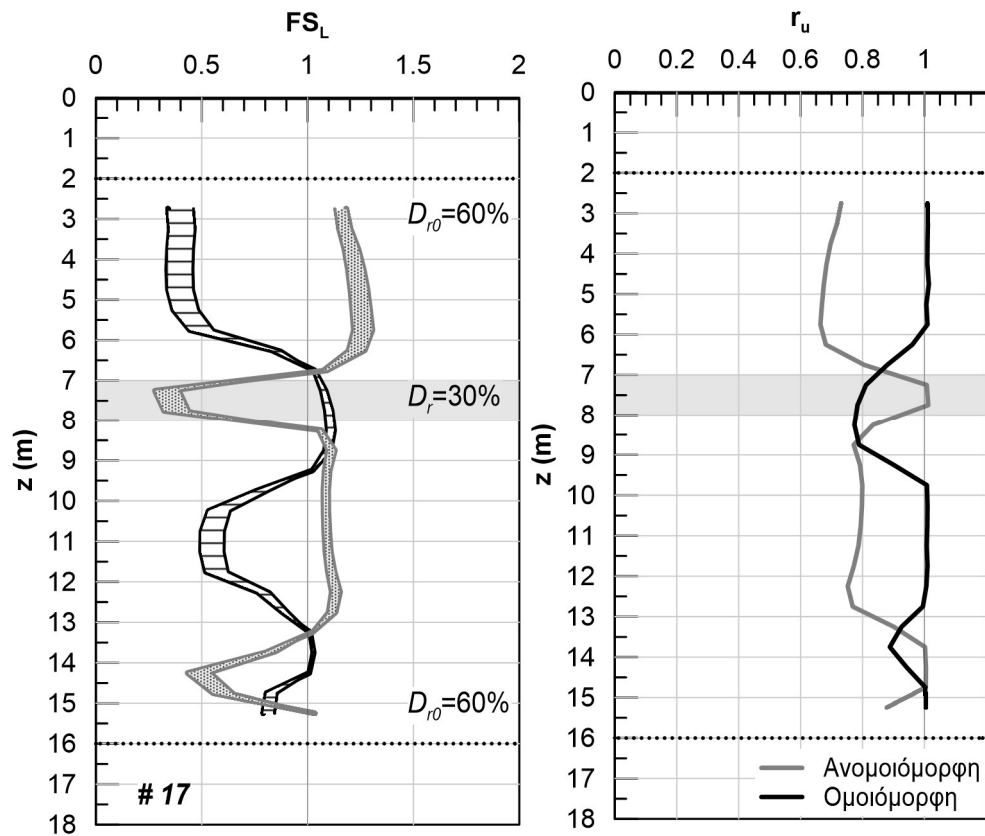
Σχήμα Β.14: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #14.



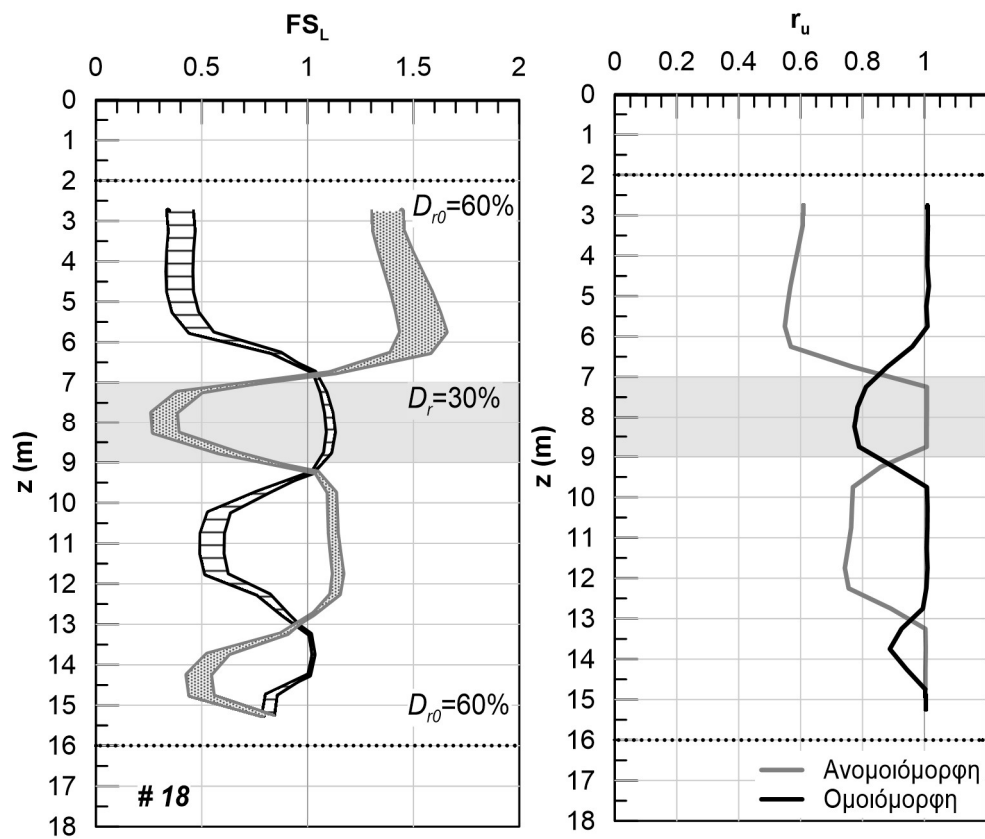
Σχήμα Β.15: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #15.



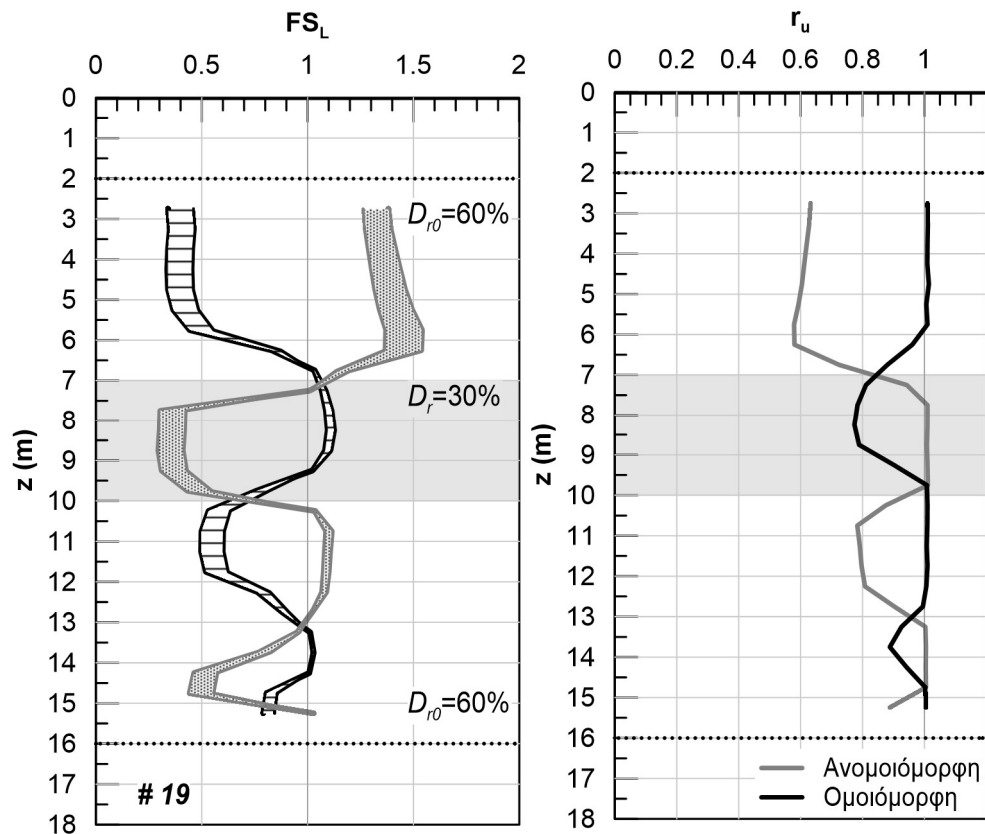
Σχήμα Β.16: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #16.



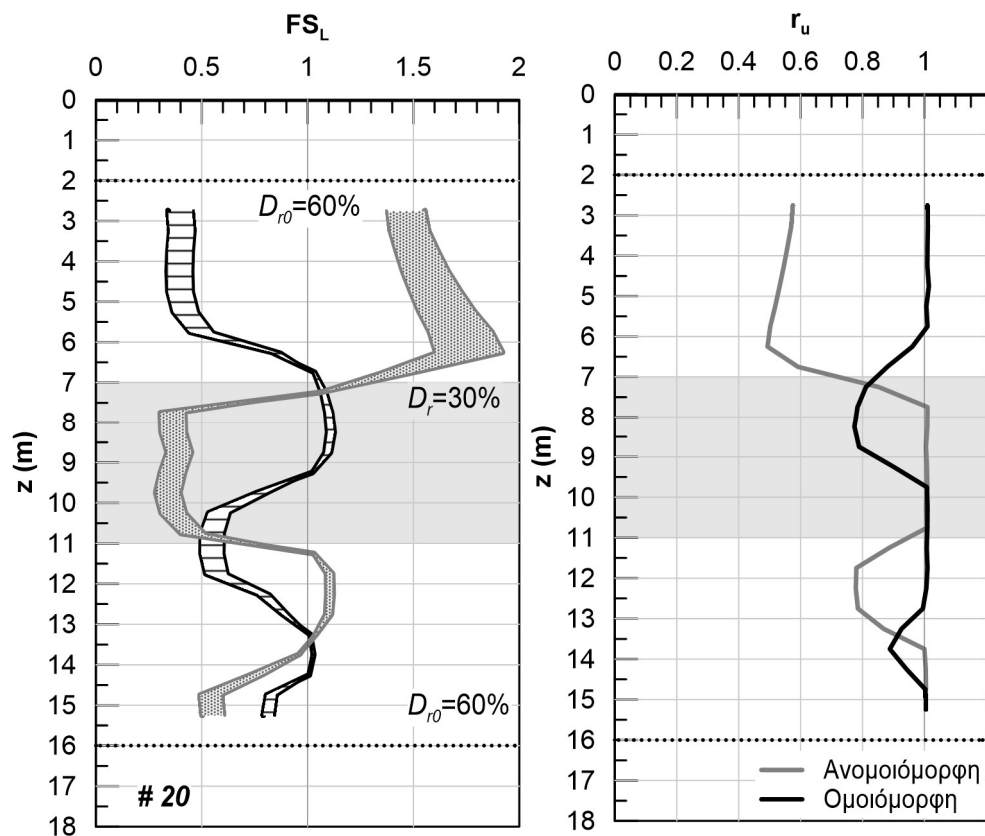
Σχήμα Β.17: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #17.



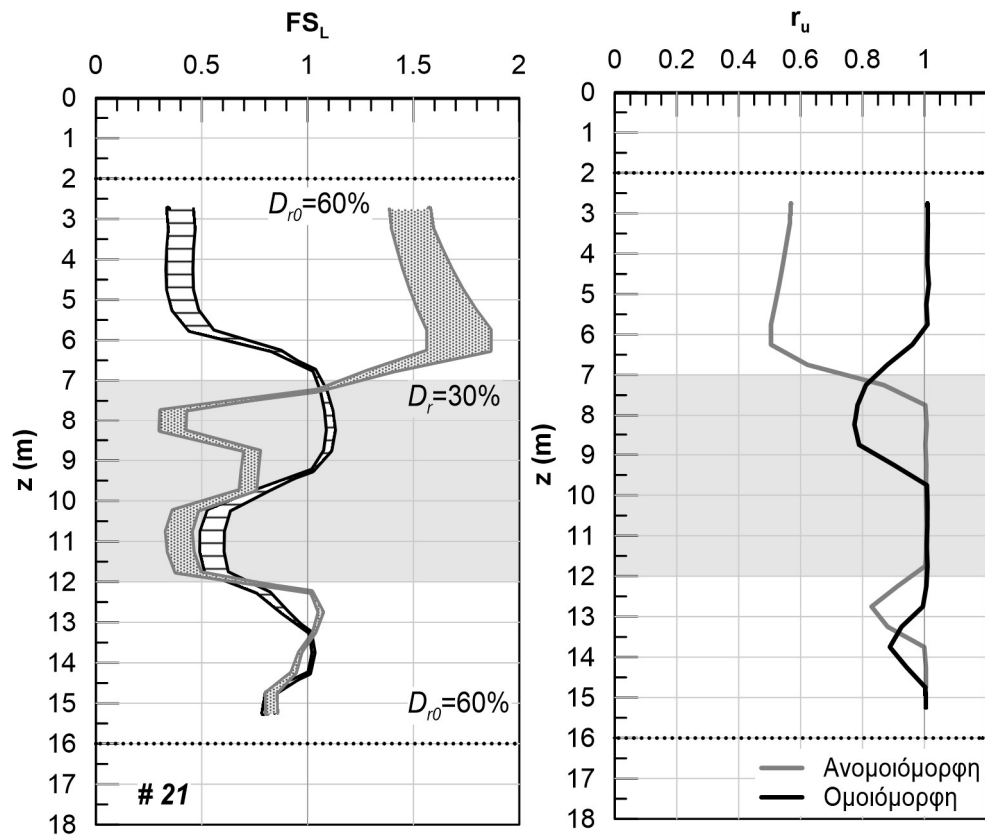
Σχήμα Β.18: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #18.



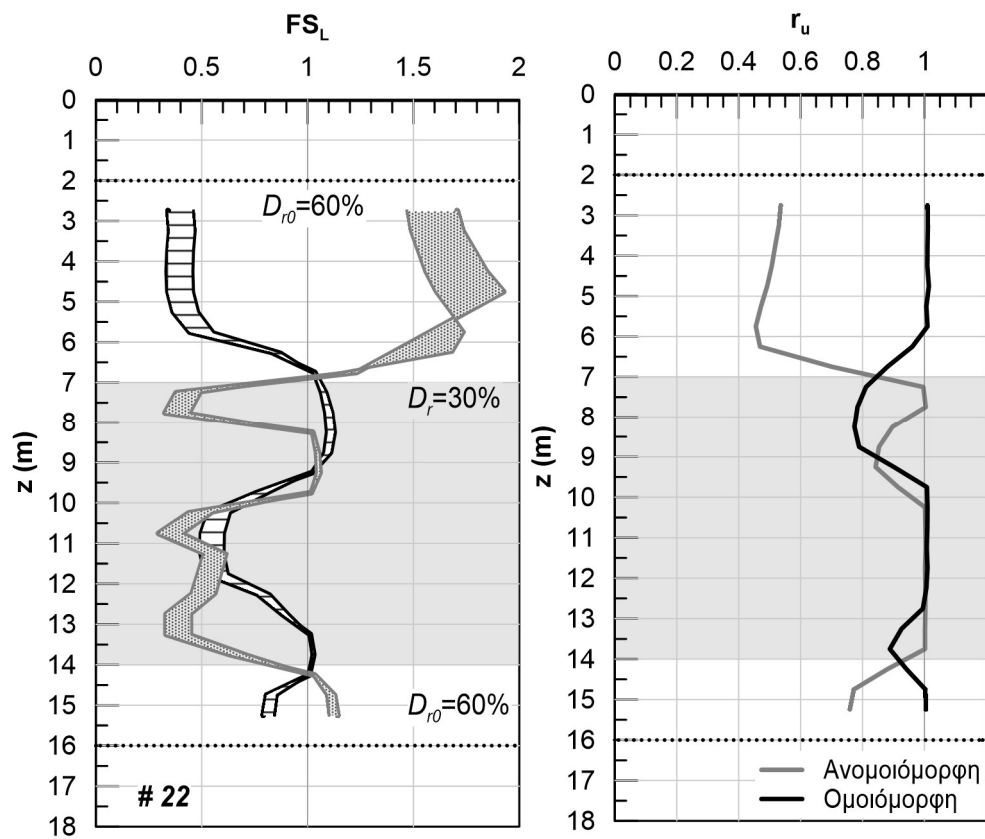
Σχήμα Β.19: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #19.



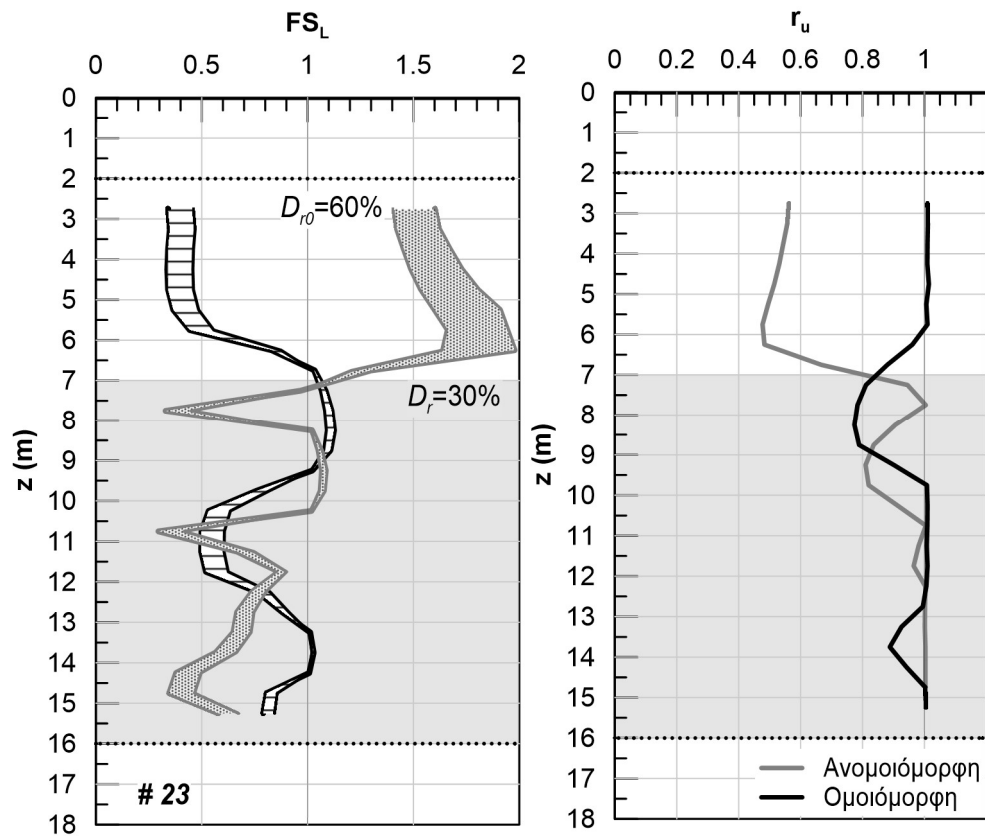
Σχήμα Β.20: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #20.



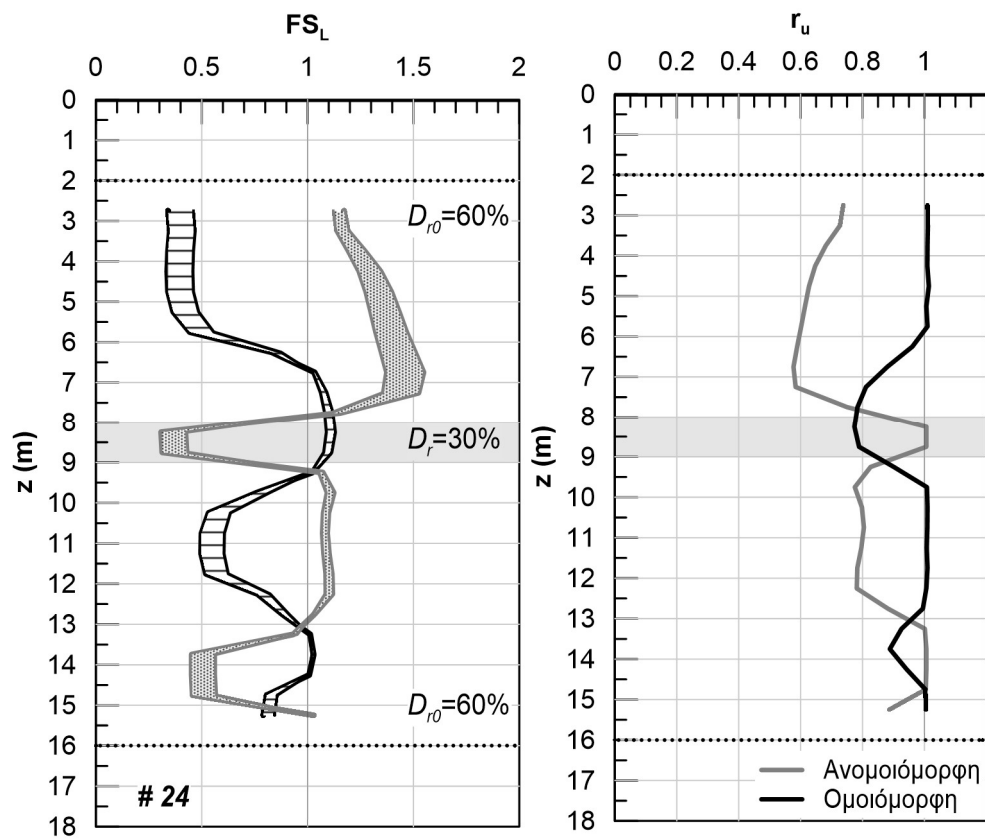
Σχήμα Β.21: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #21.



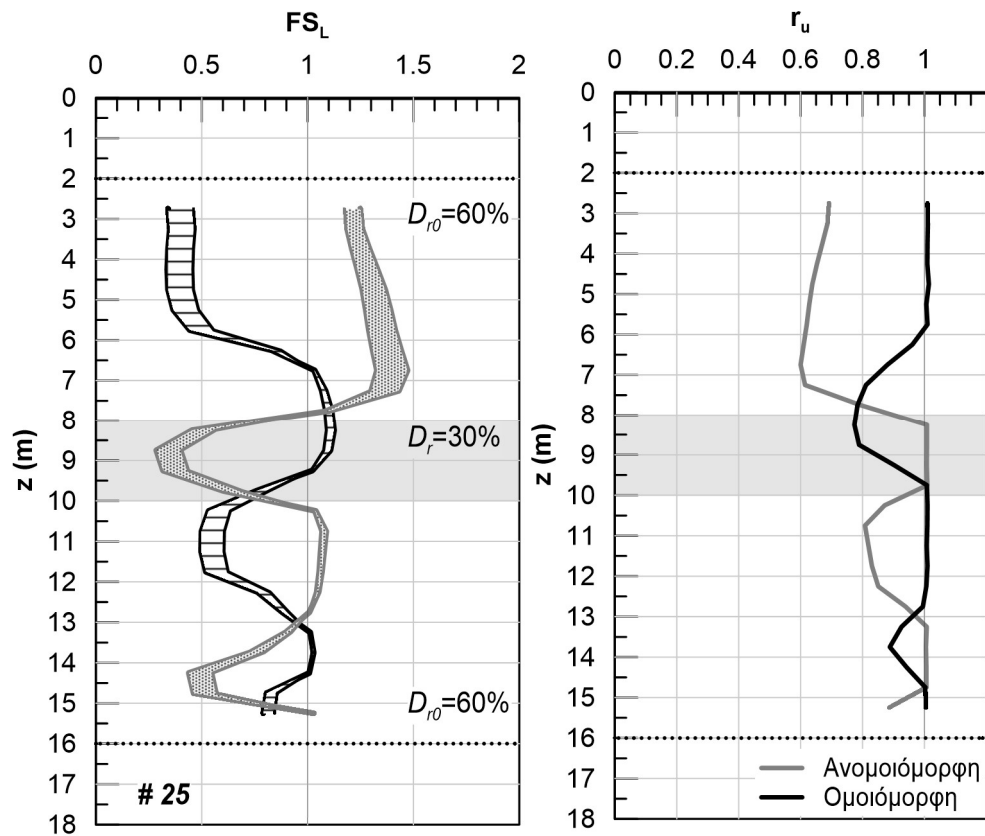
Σχήμα Β.22: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #22.



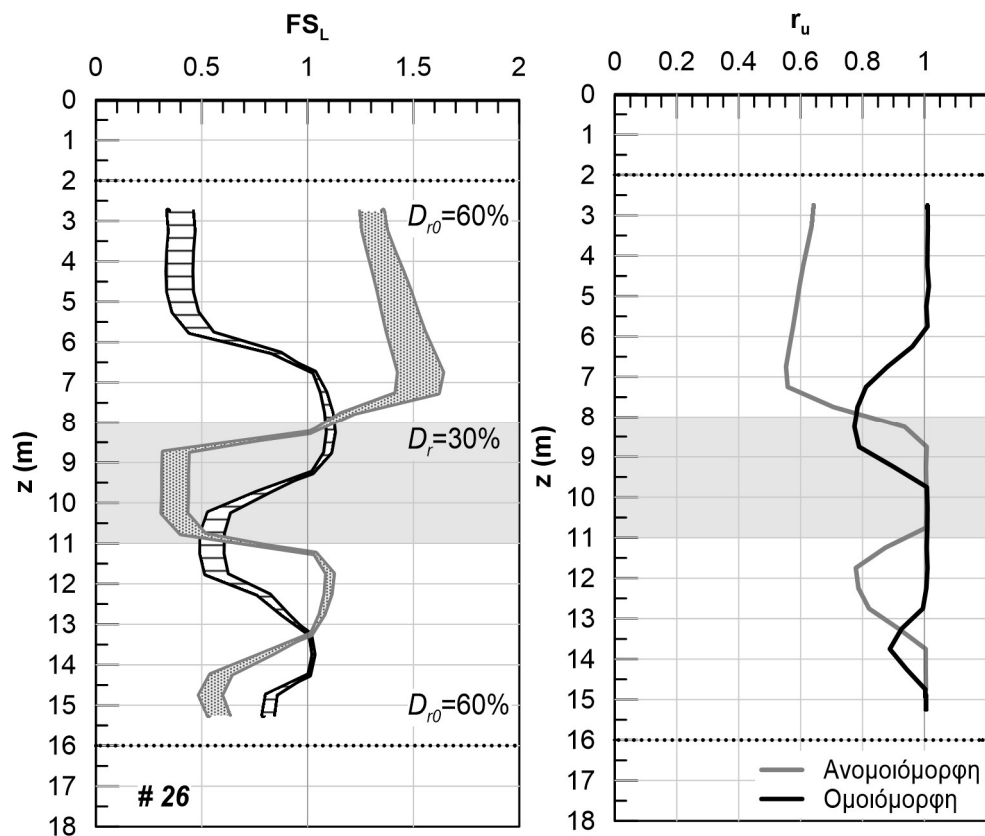
Σχήμα Β.23: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #23.



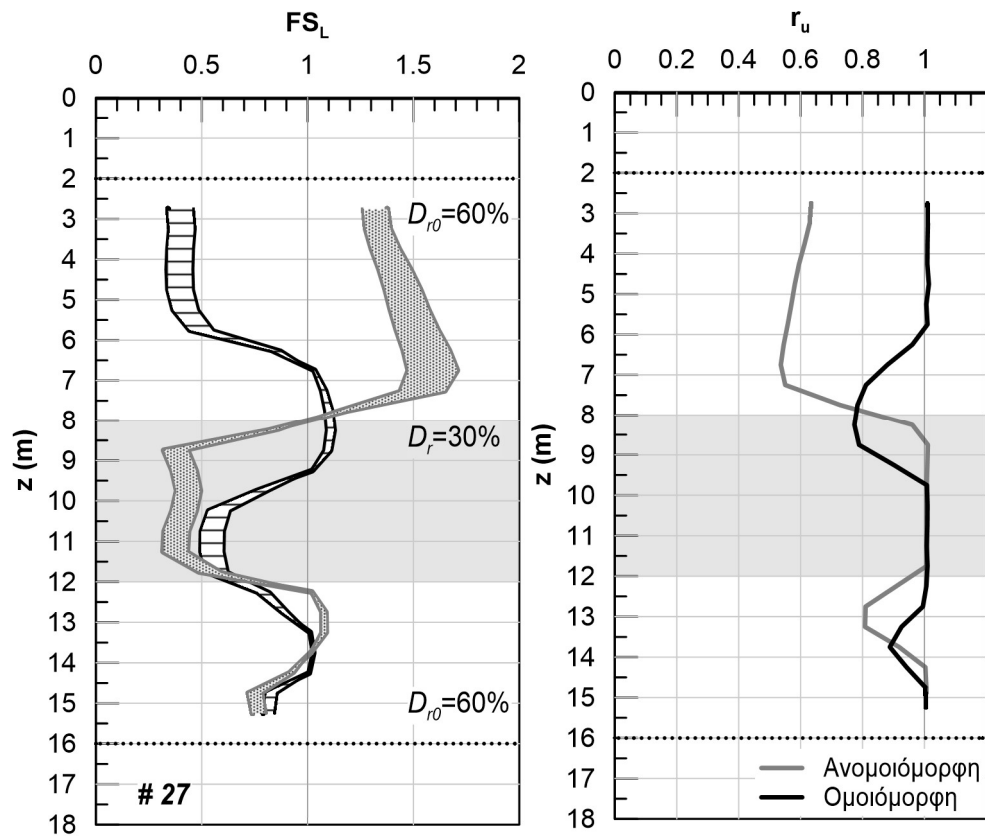
Σχήμα Β.24: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #24.



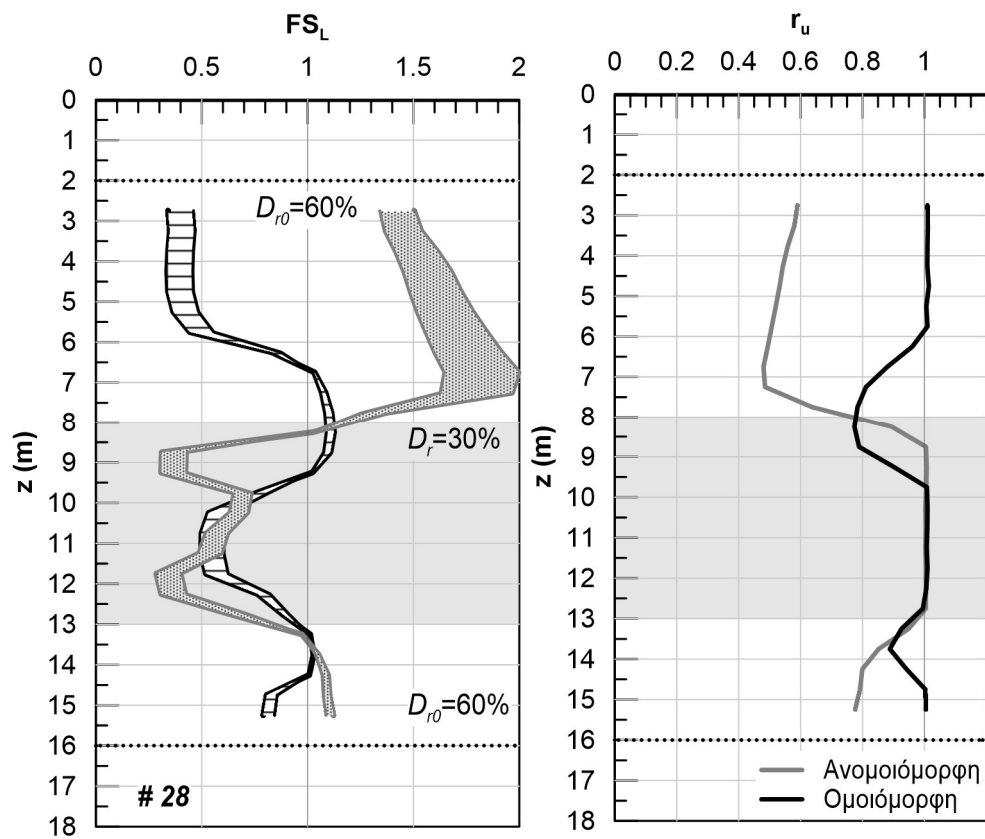
Σχήμα Β.25: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #25.



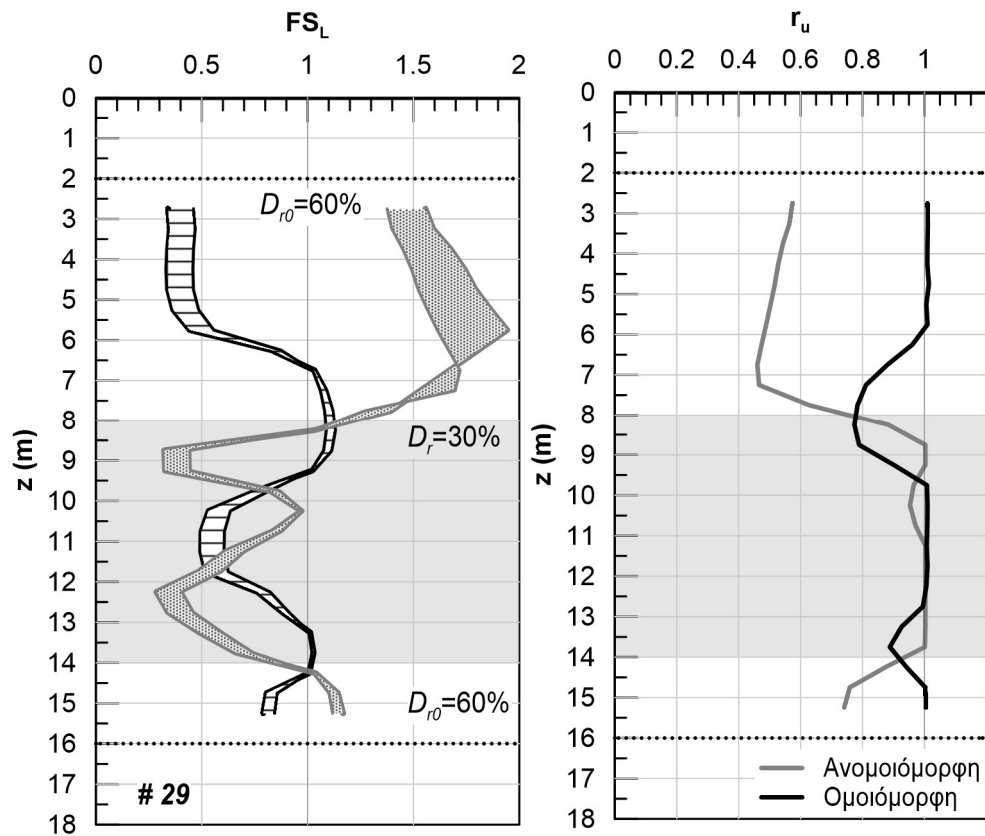
Σχήμα Β.26: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #26.



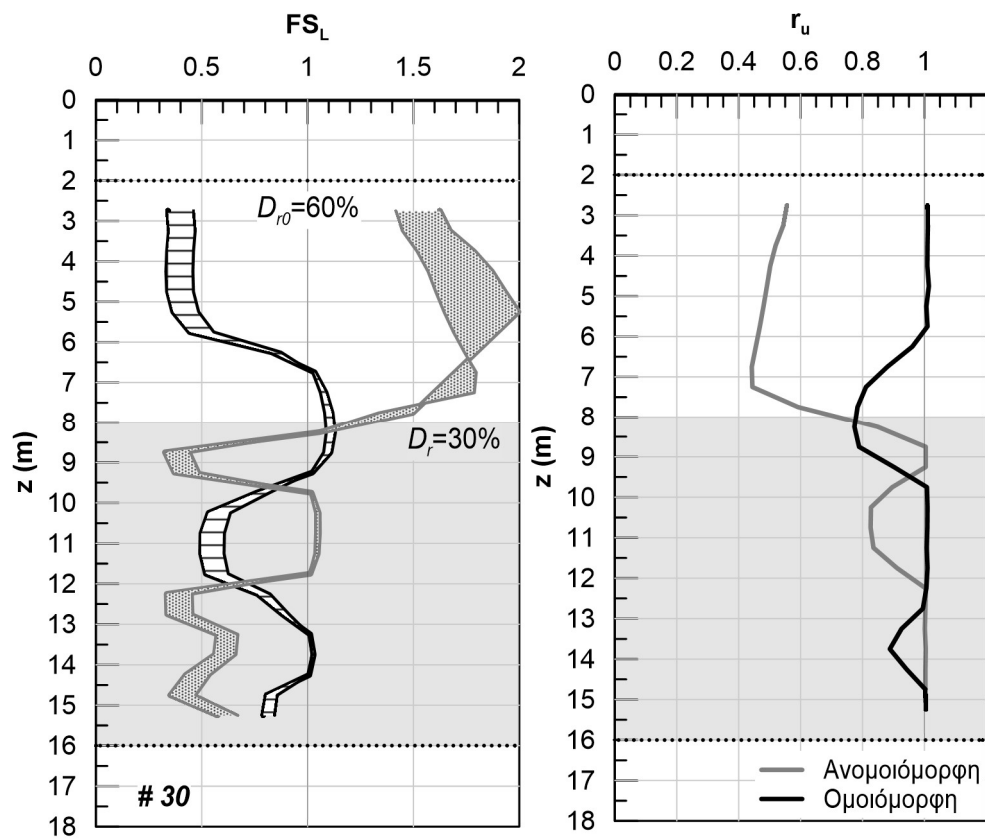
Σχήμα Β.27: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #27.



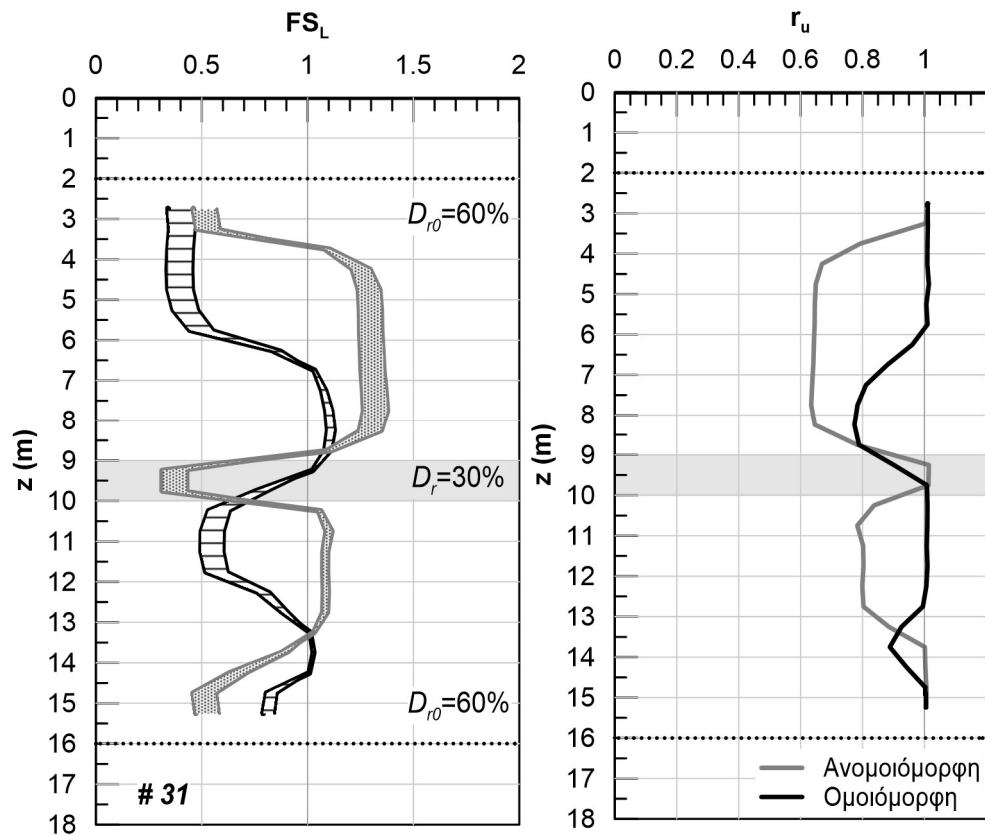
Σχήμα Β.28: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #28.



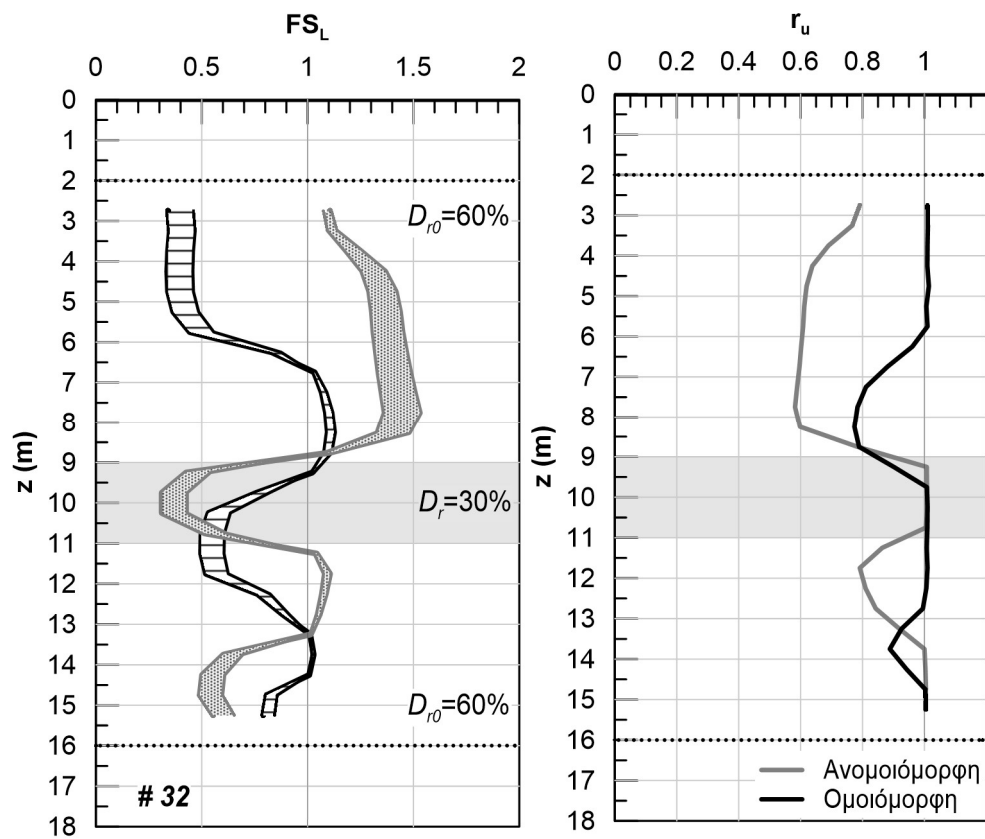
Σχήμα Β.29: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #29.



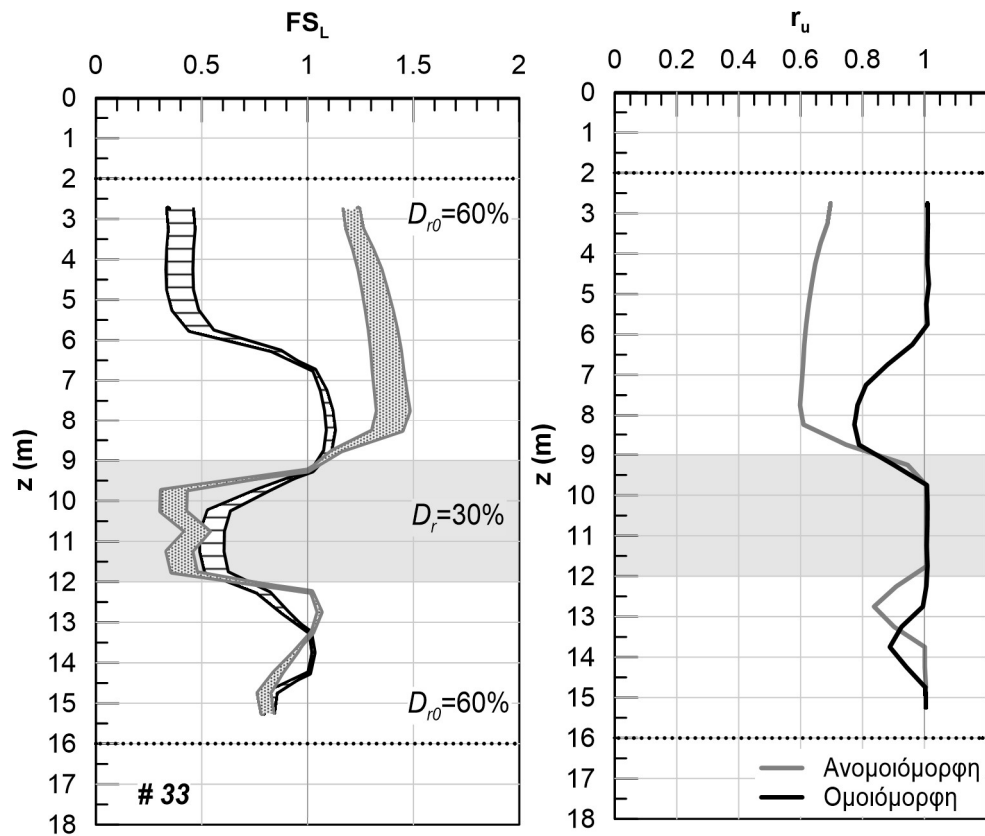
Σχήμα Β.30: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #30.



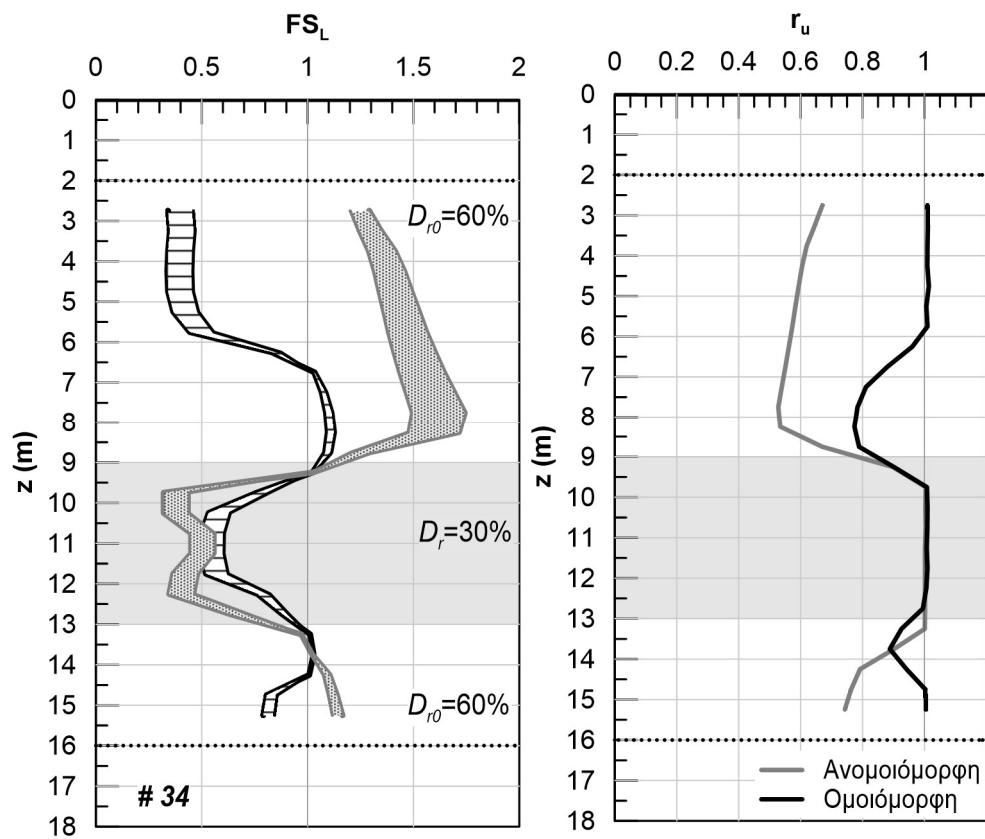
Σχήμα Β.31: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #31.



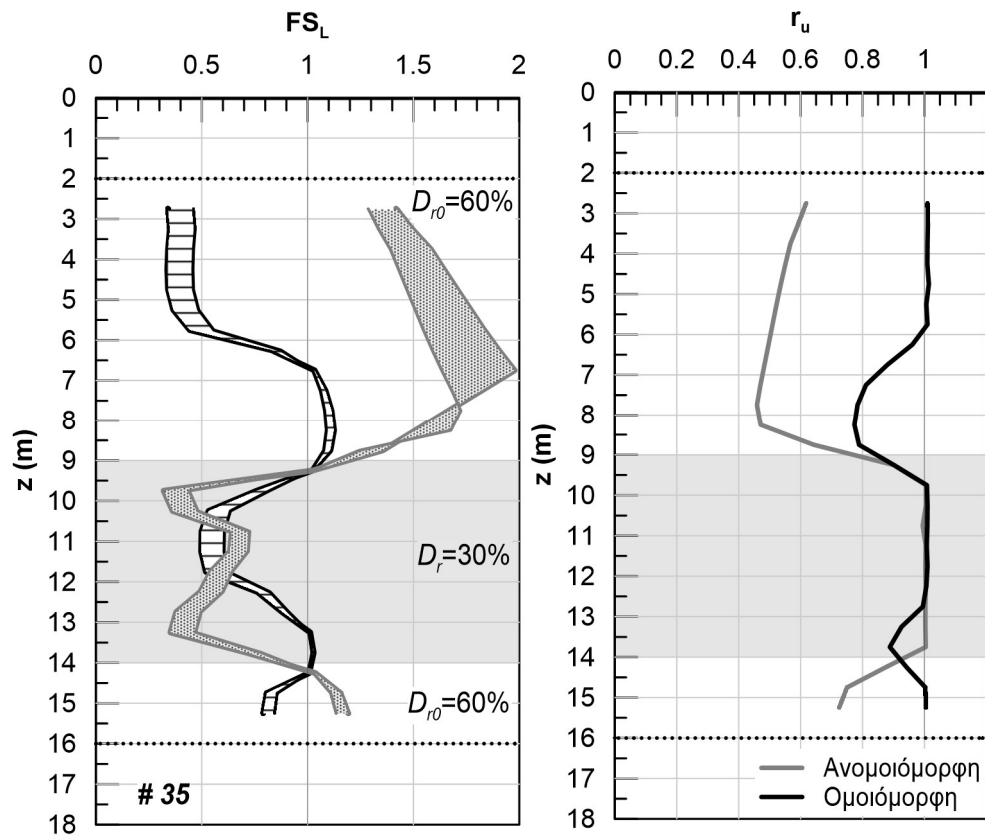
Σχήμα Β.32: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #32.



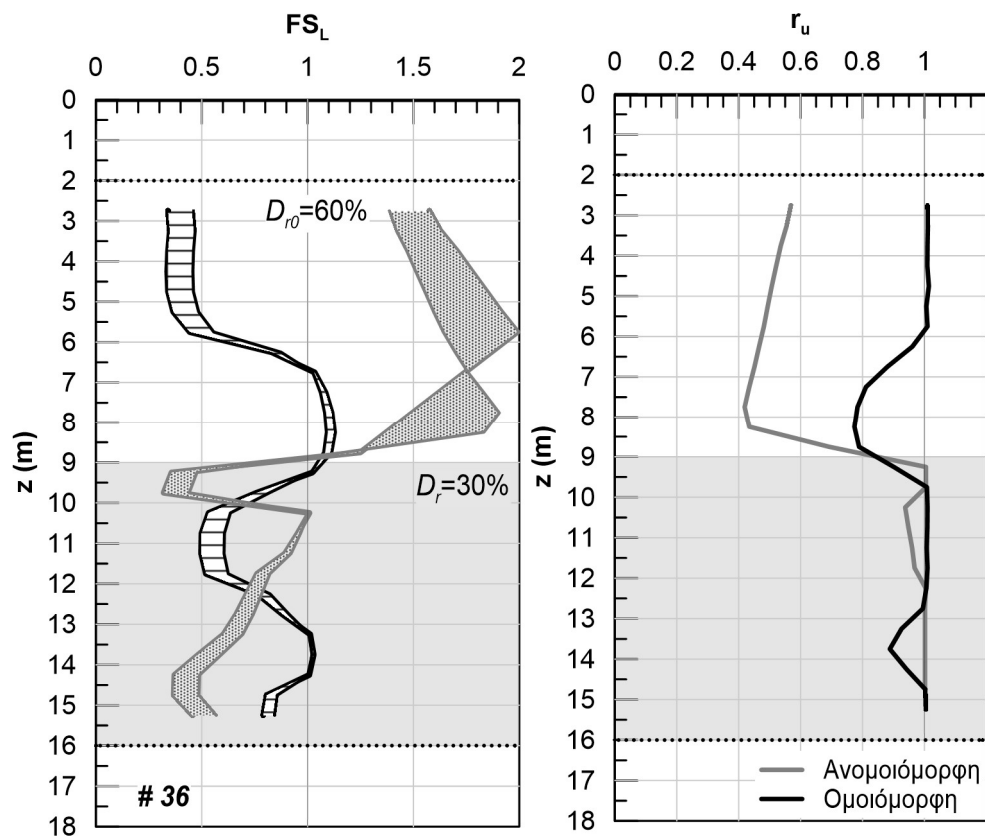
Σχήμα Β.33: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #33.



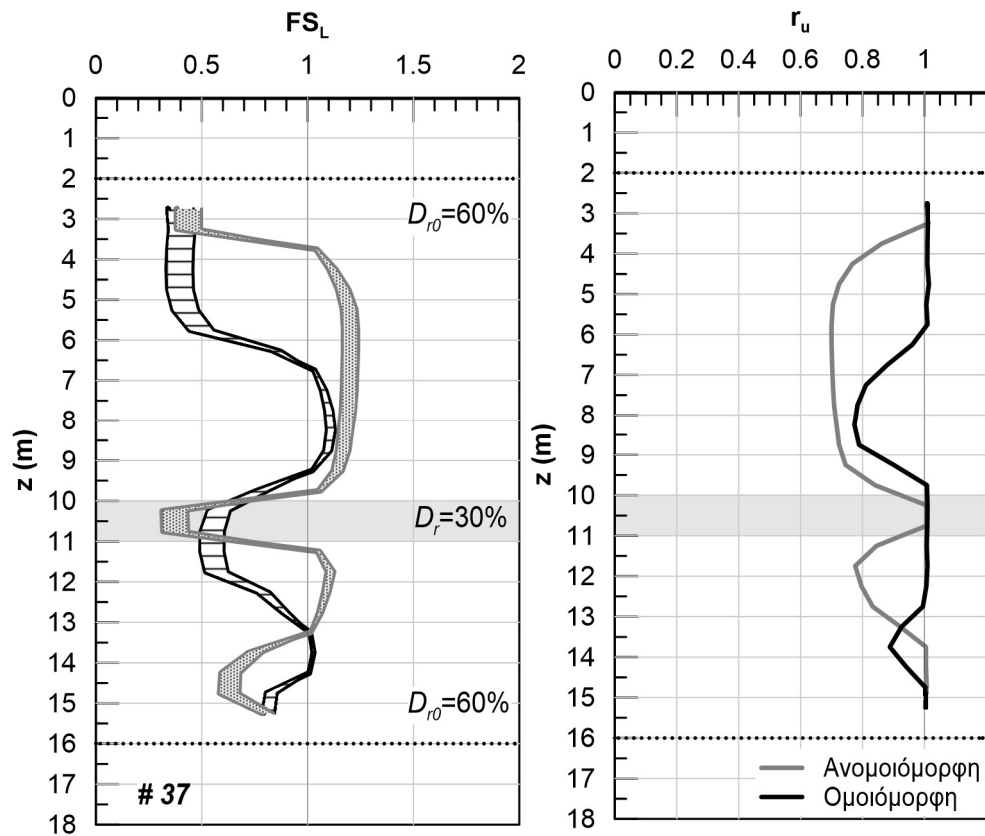
Σχήμα Β.34: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #34.



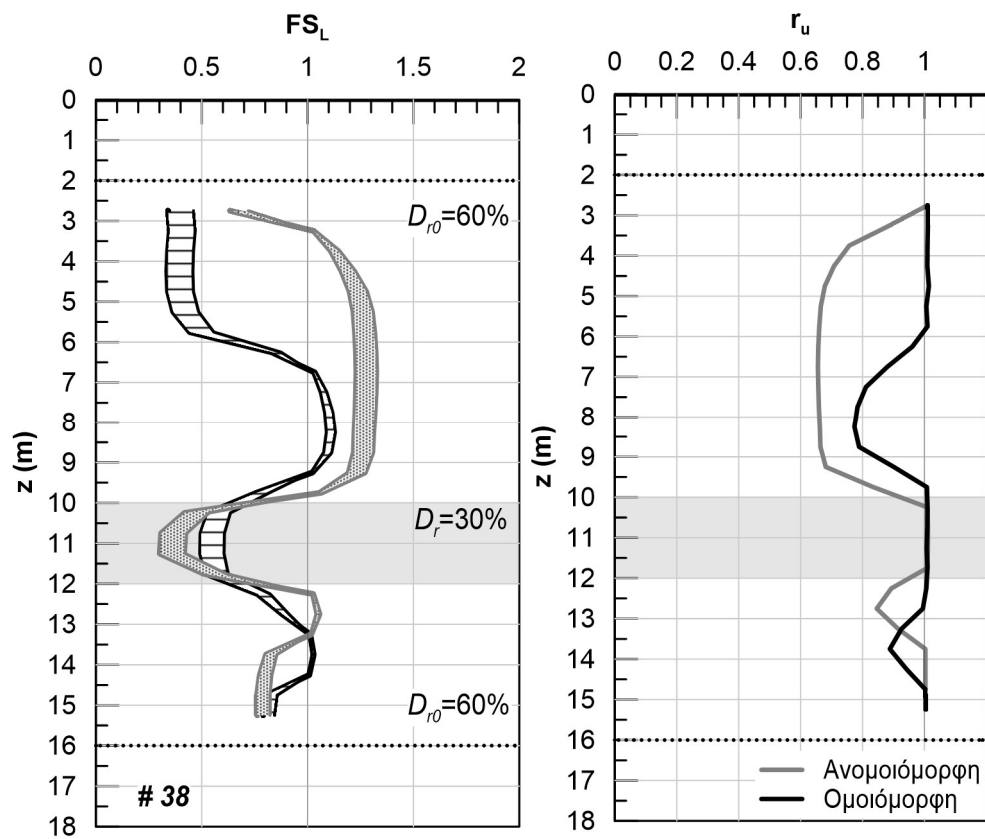
Σχήμα Β.35: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #35.



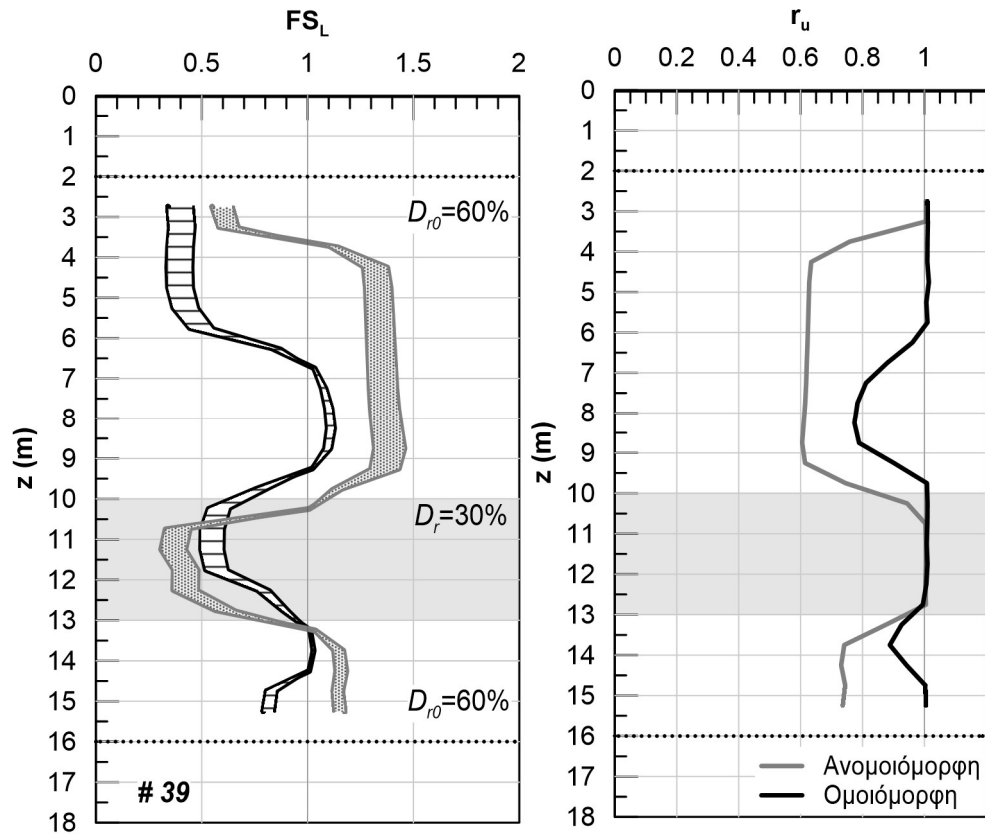
Σχήμα Β.36: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #36.



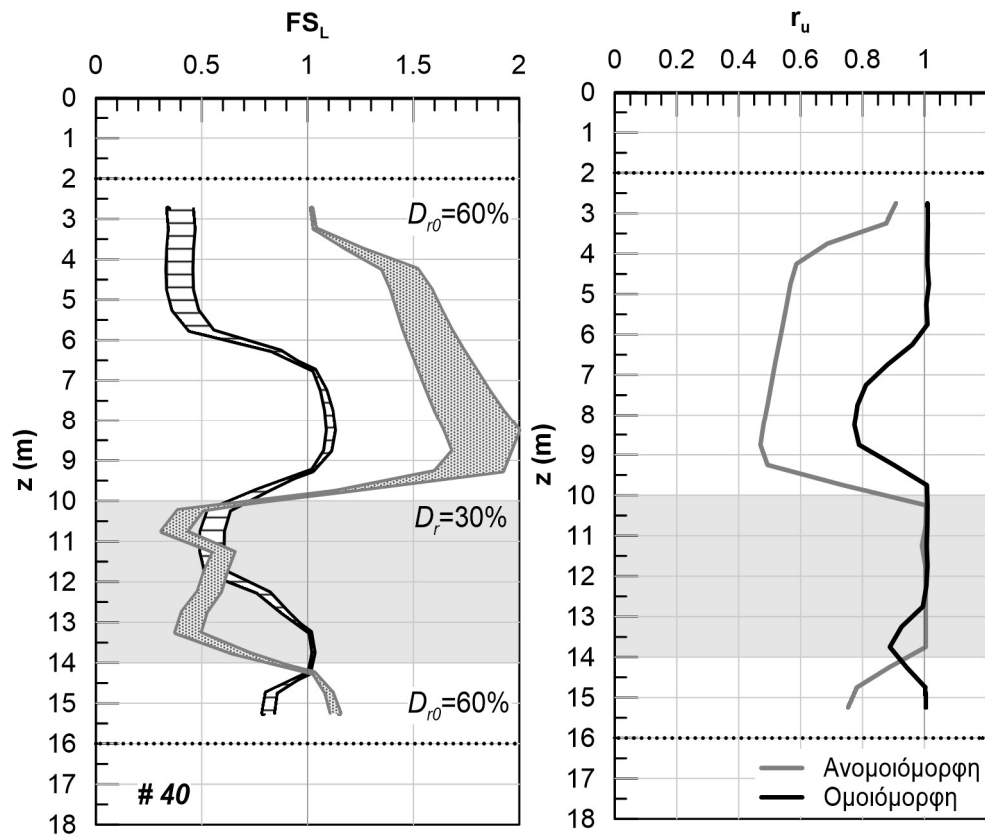
Σχήμα Β.37: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #37.



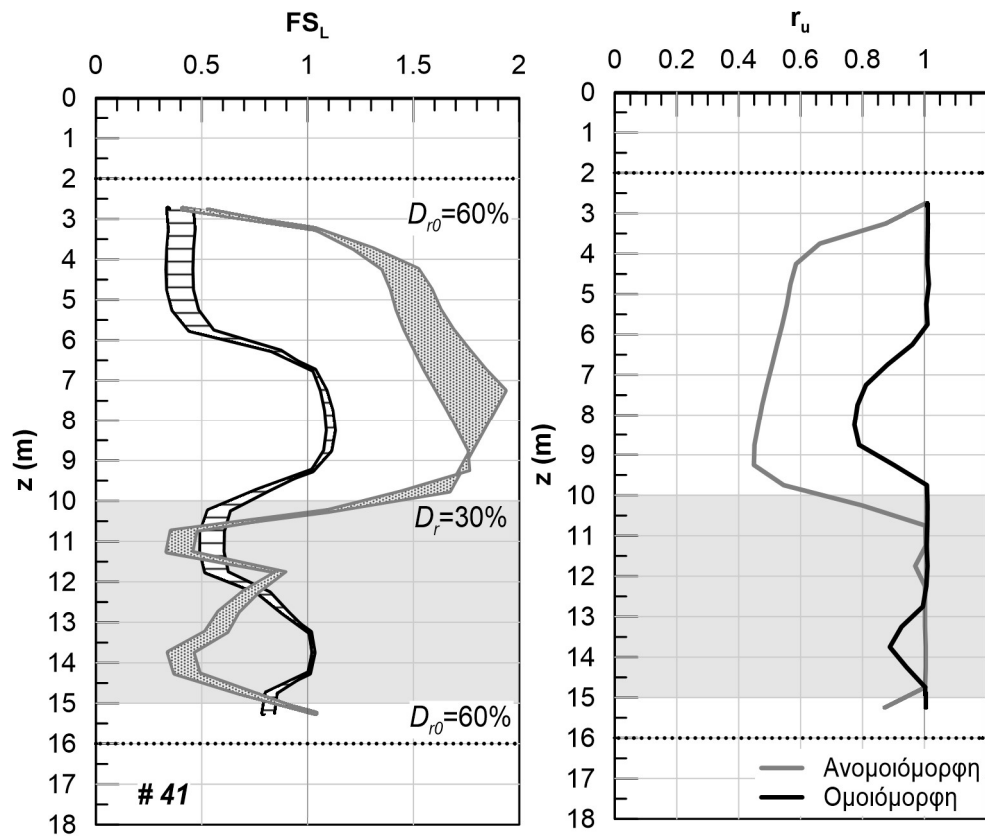
Σχήμα Β.38: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #38.



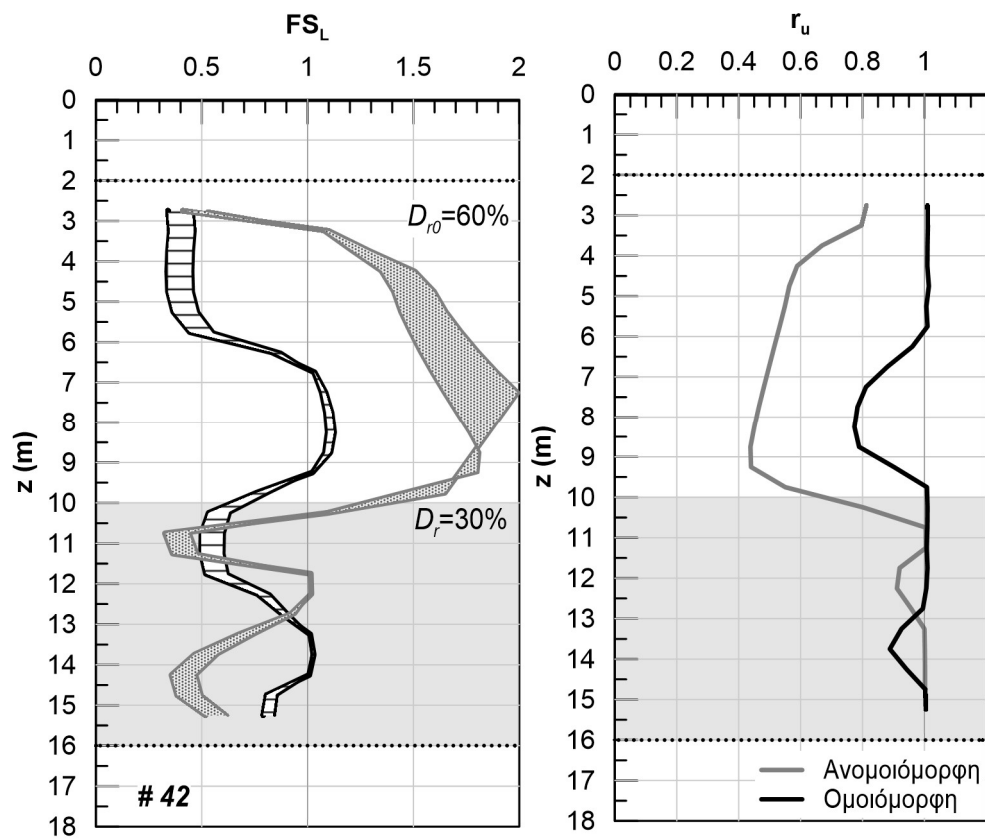
Σχήμα Β.39: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #39.



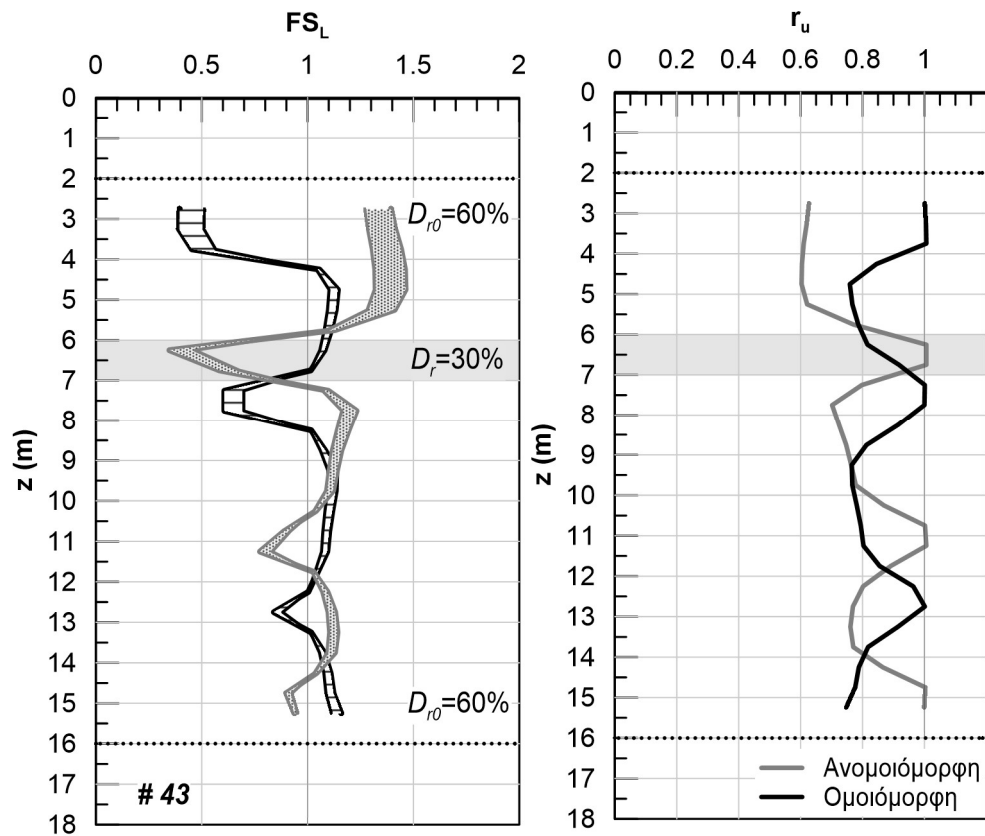
Σχήμα Β.40: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #40.



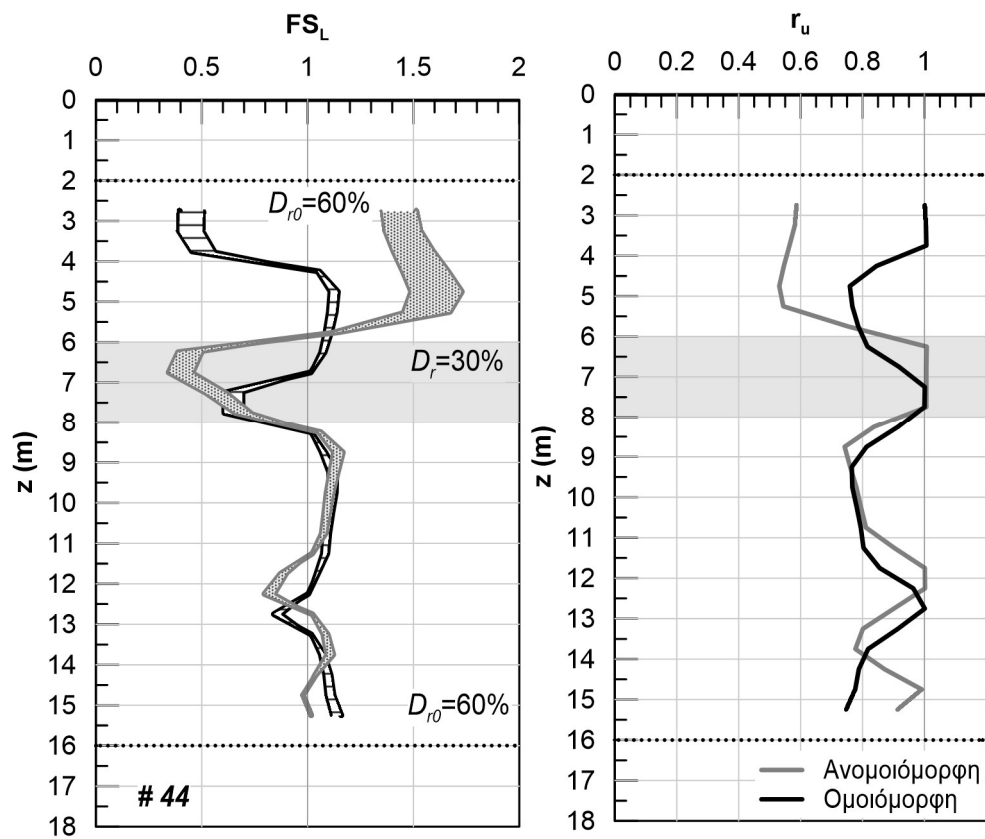
Σχήμα Β.41: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #41.



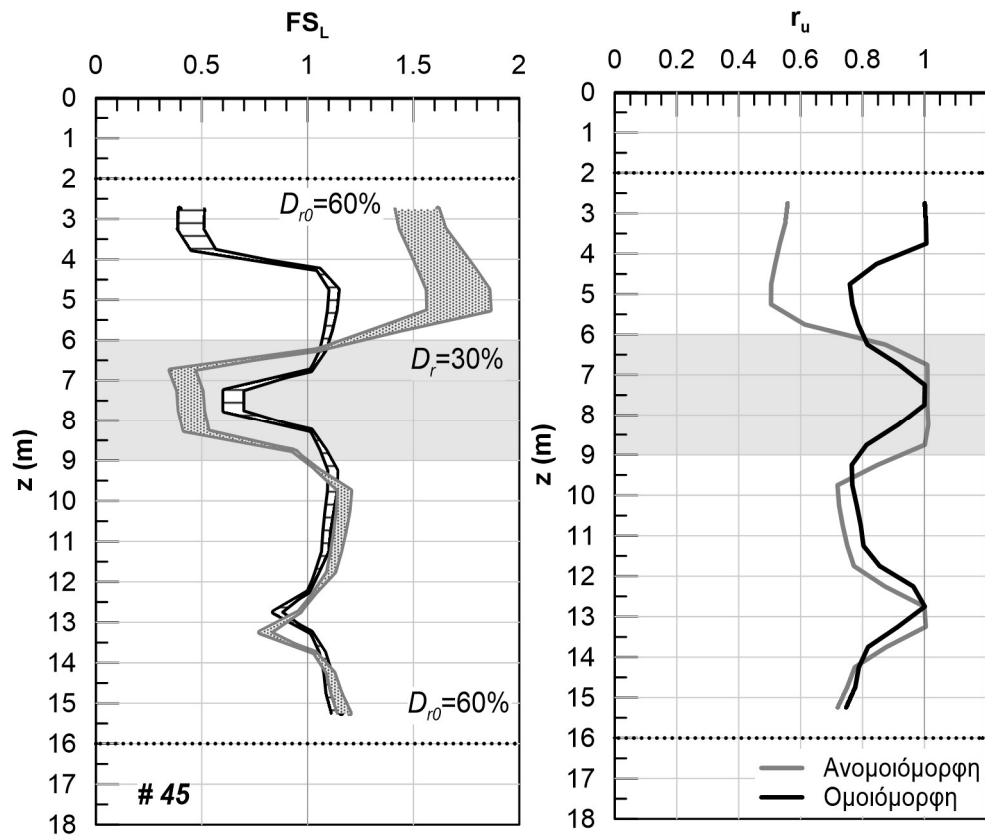
Σχήμα Β.42: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #42.



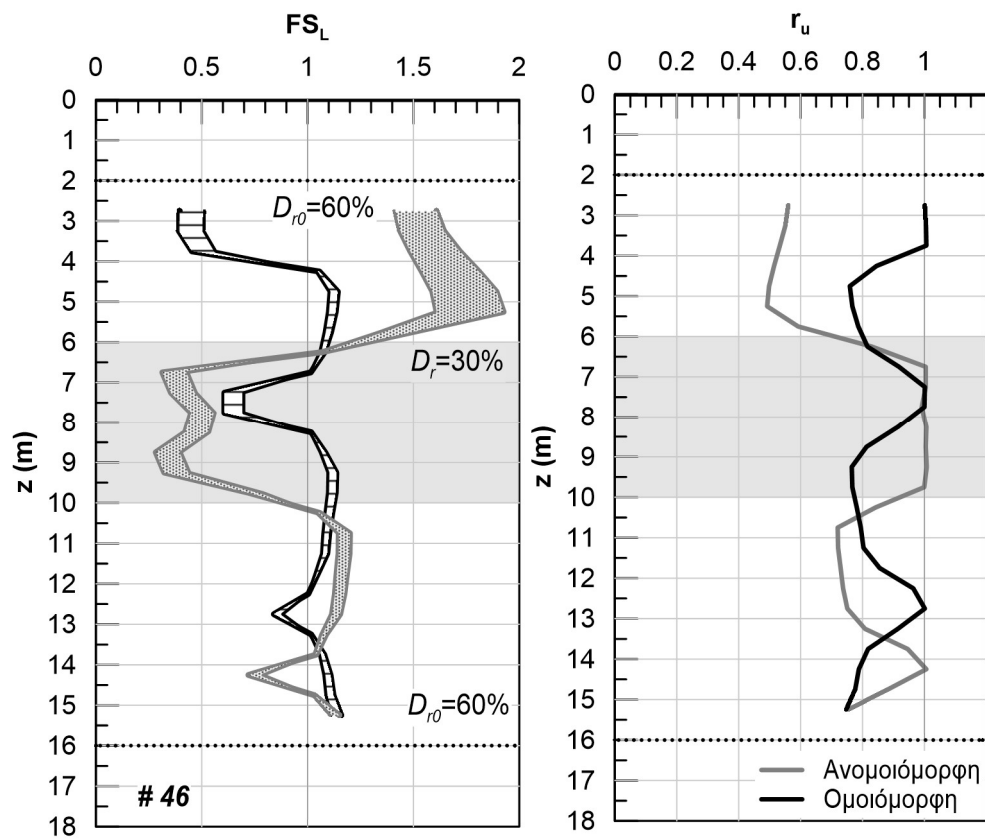
Σχήμα Β.43: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #43.



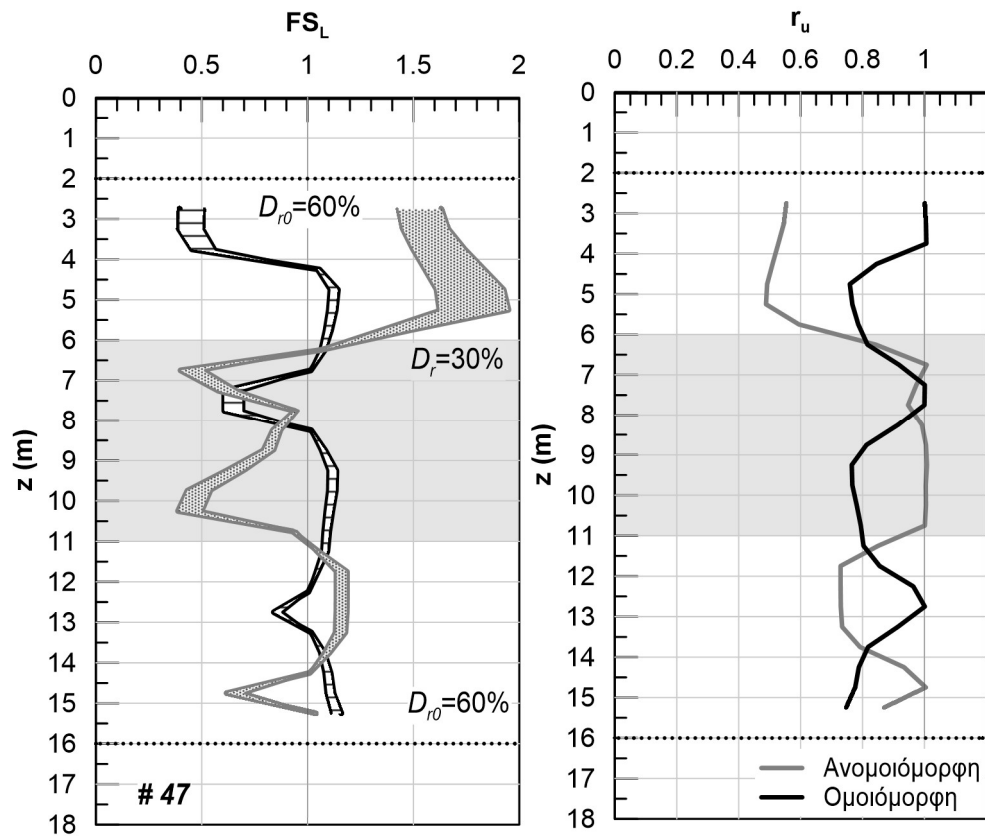
Σχήμα Β.44: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #44.



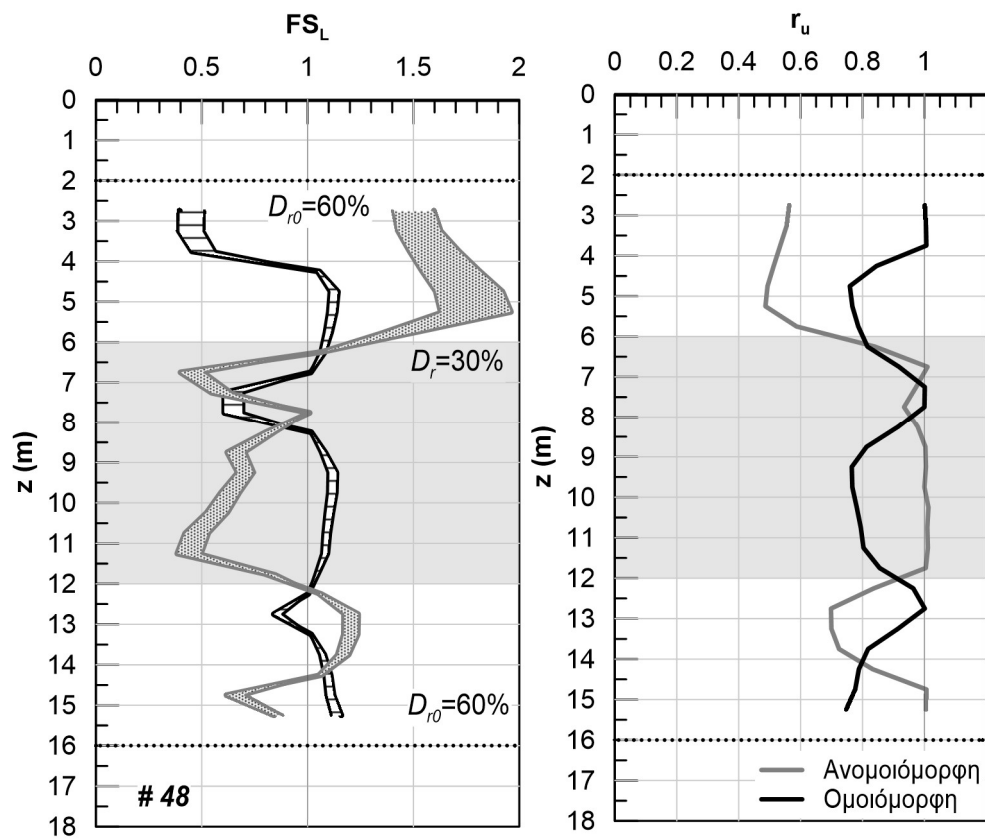
Σχήμα Β.45: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #45.



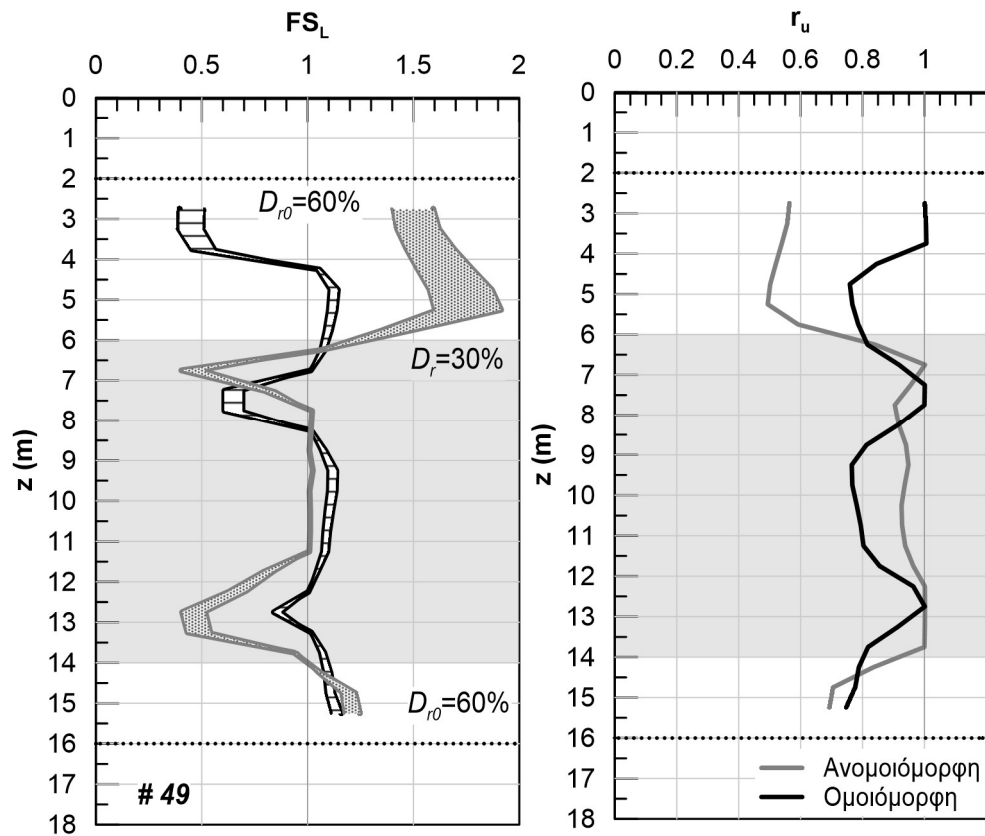
Σχήμα Β.46: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #46.



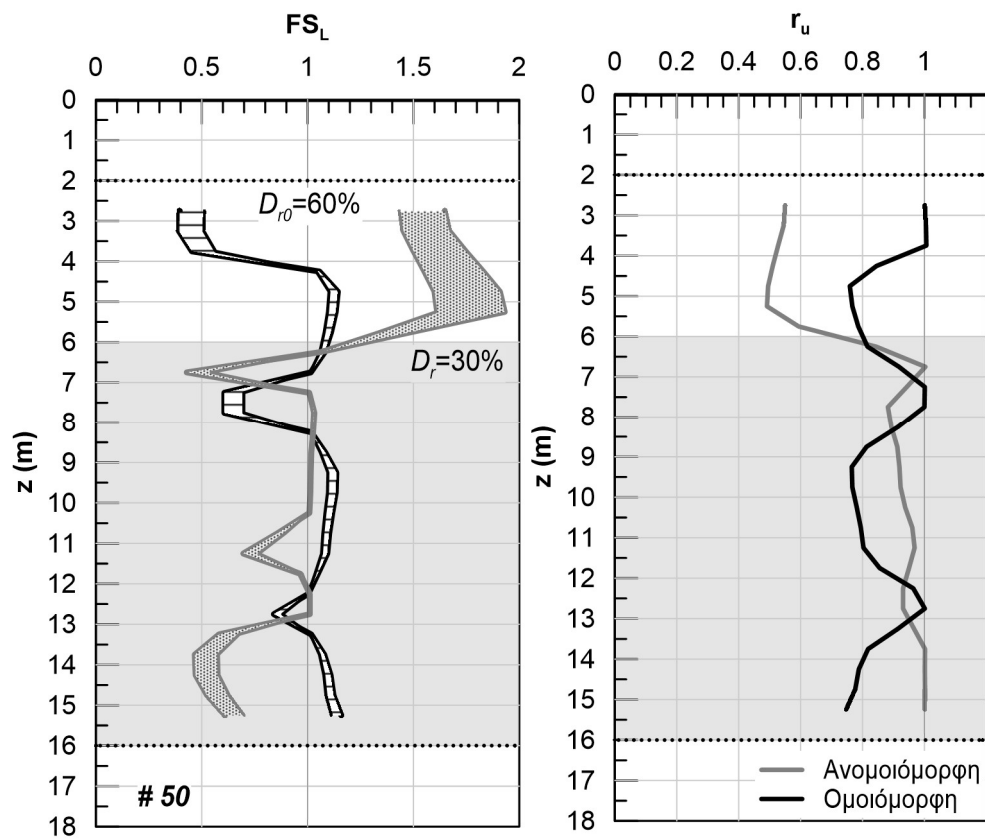
Σχήμα Β.47: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #47.



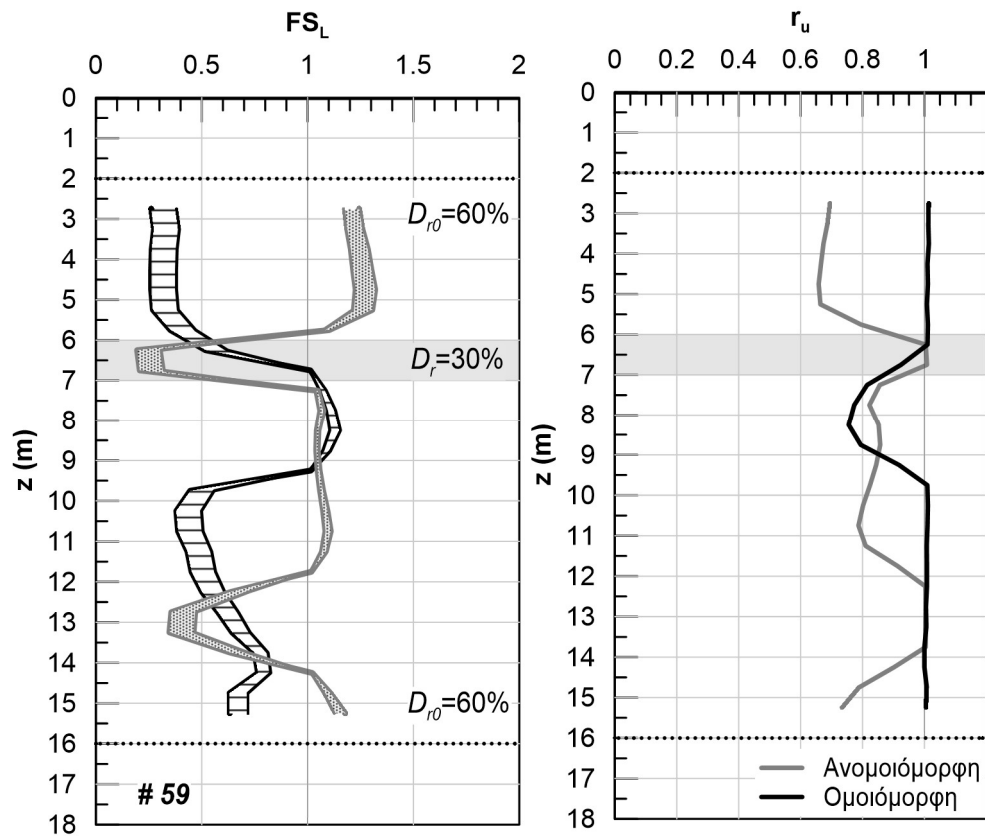
Σχήμα Β.48: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #48.



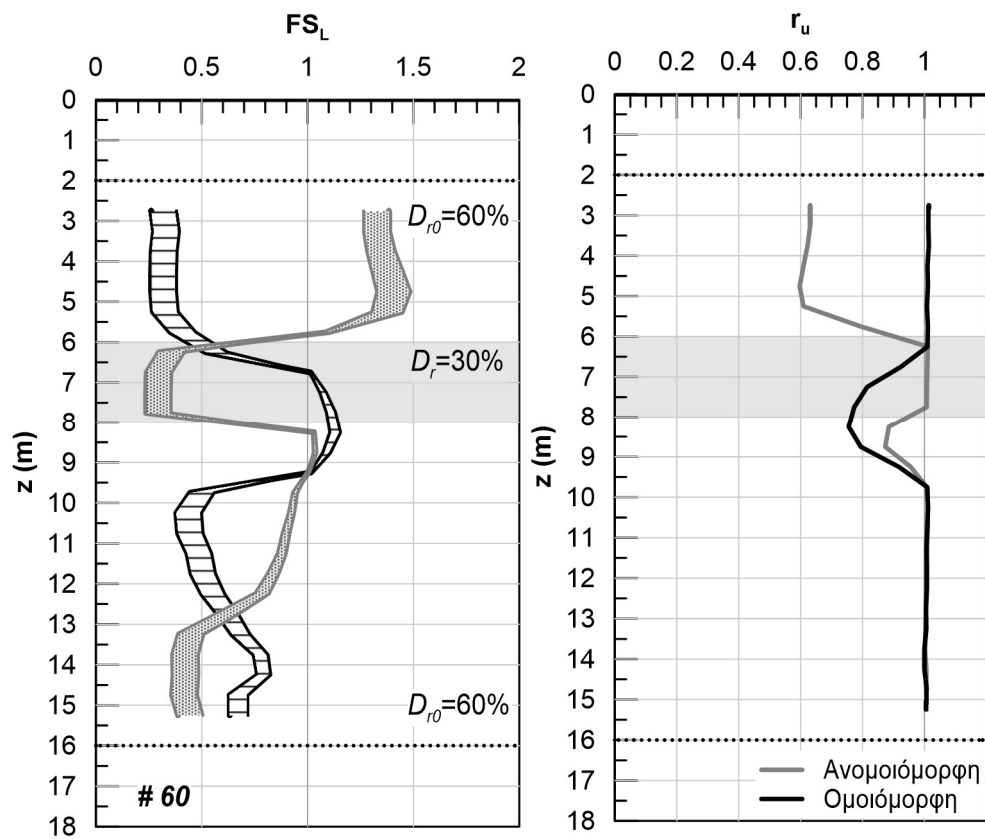
Σχήμα Β.49: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #49.



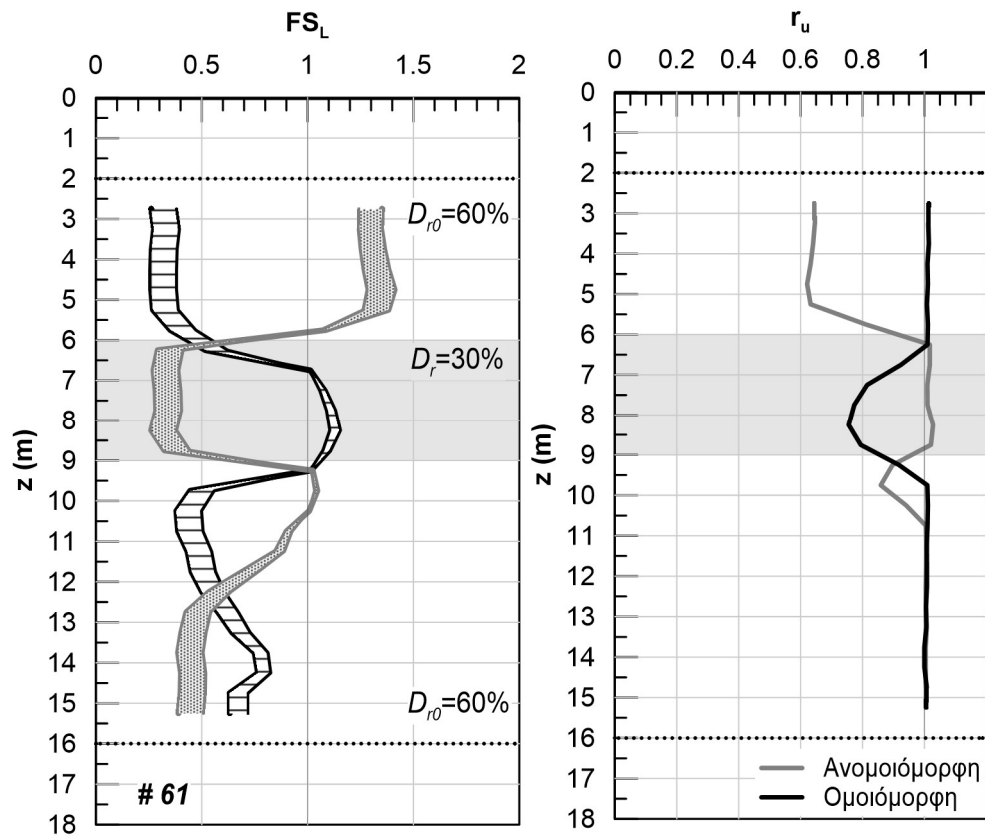
Σχήμα Β.50: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #50.



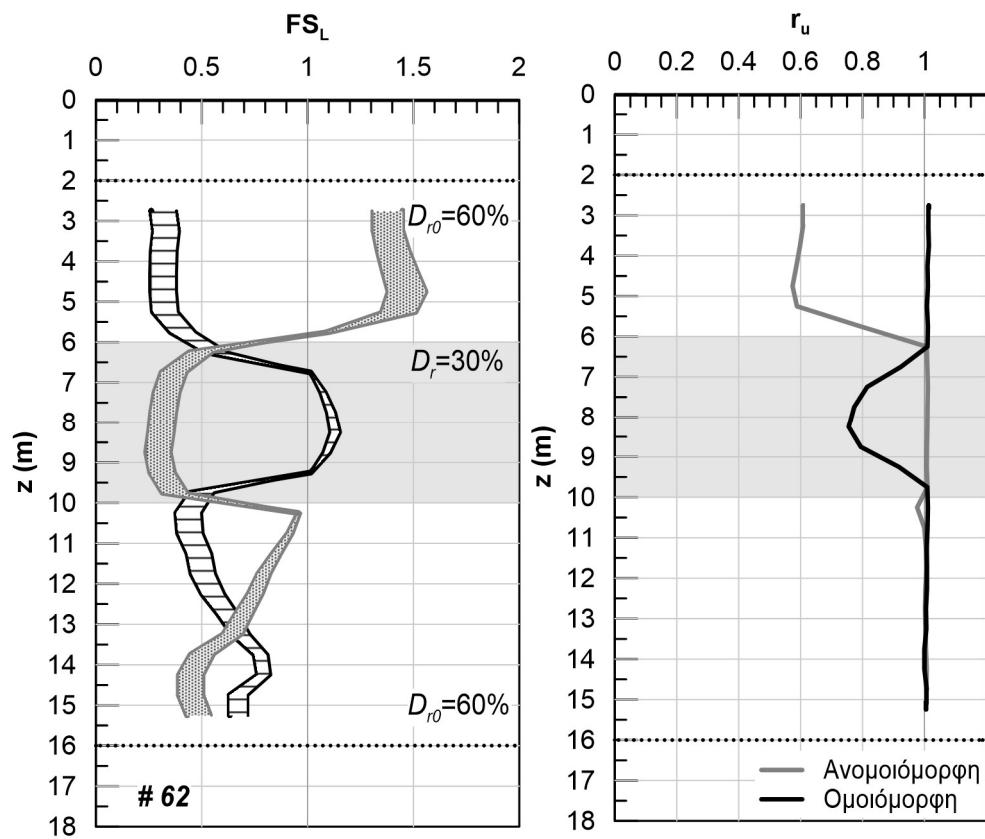
Σχήμα Β.51: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #59.



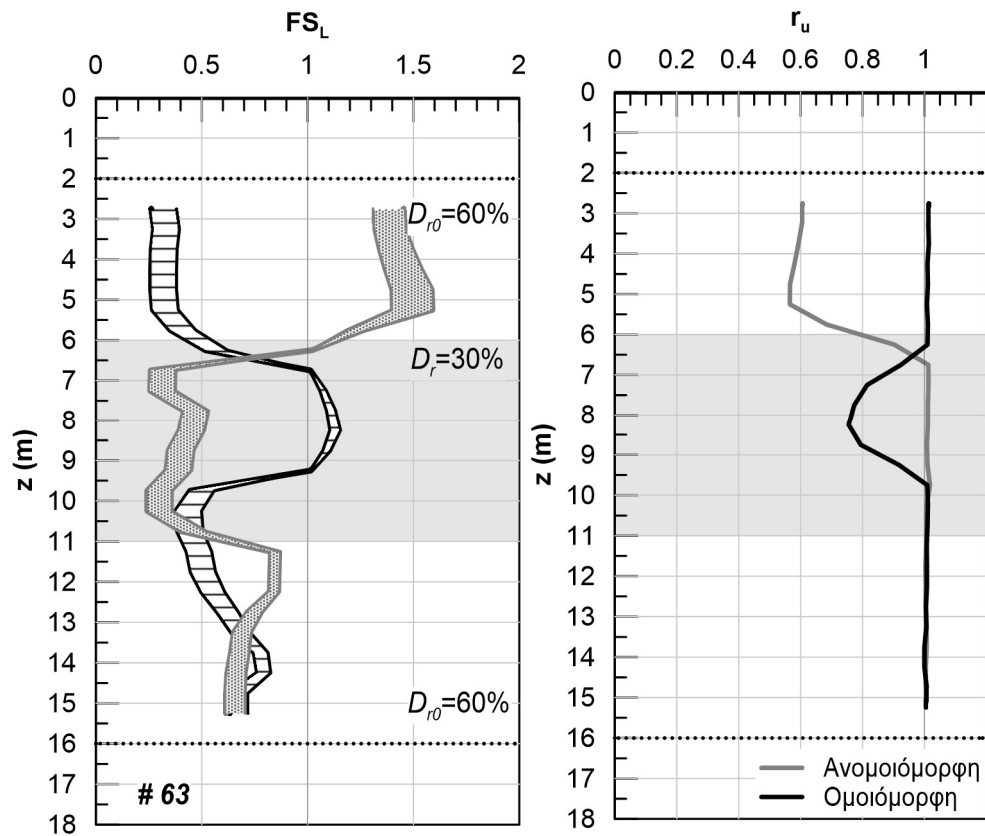
Σχήμα Β.52: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #60.



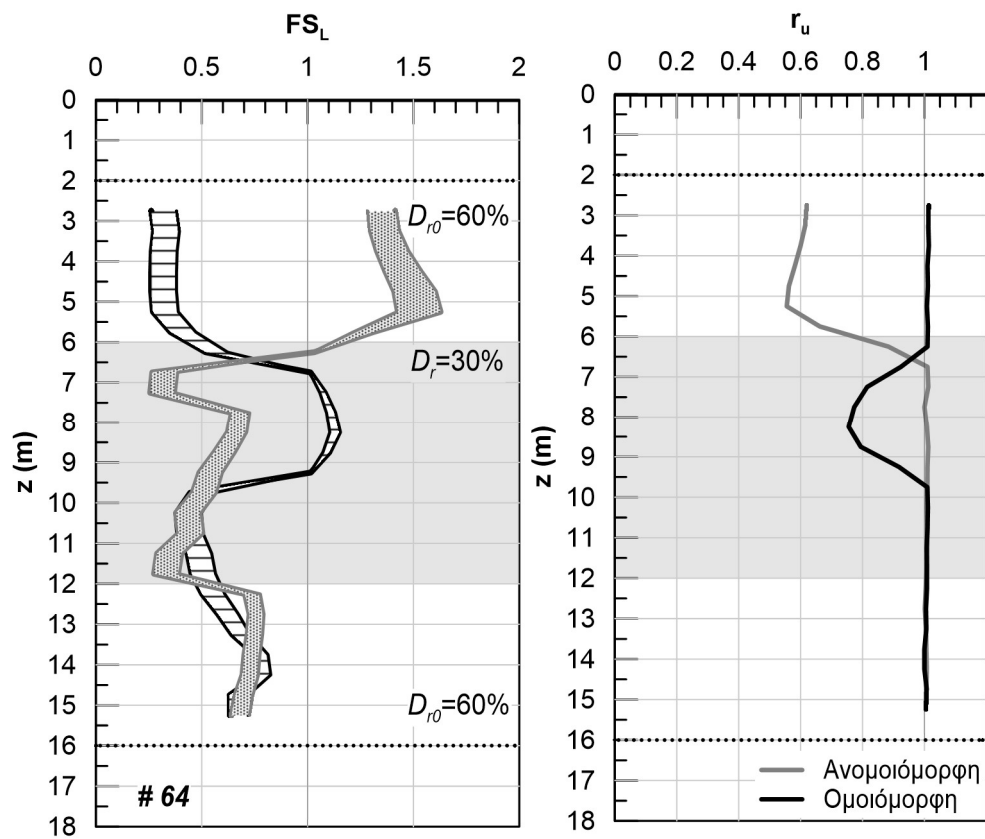
Σχήμα Β.53: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #61.



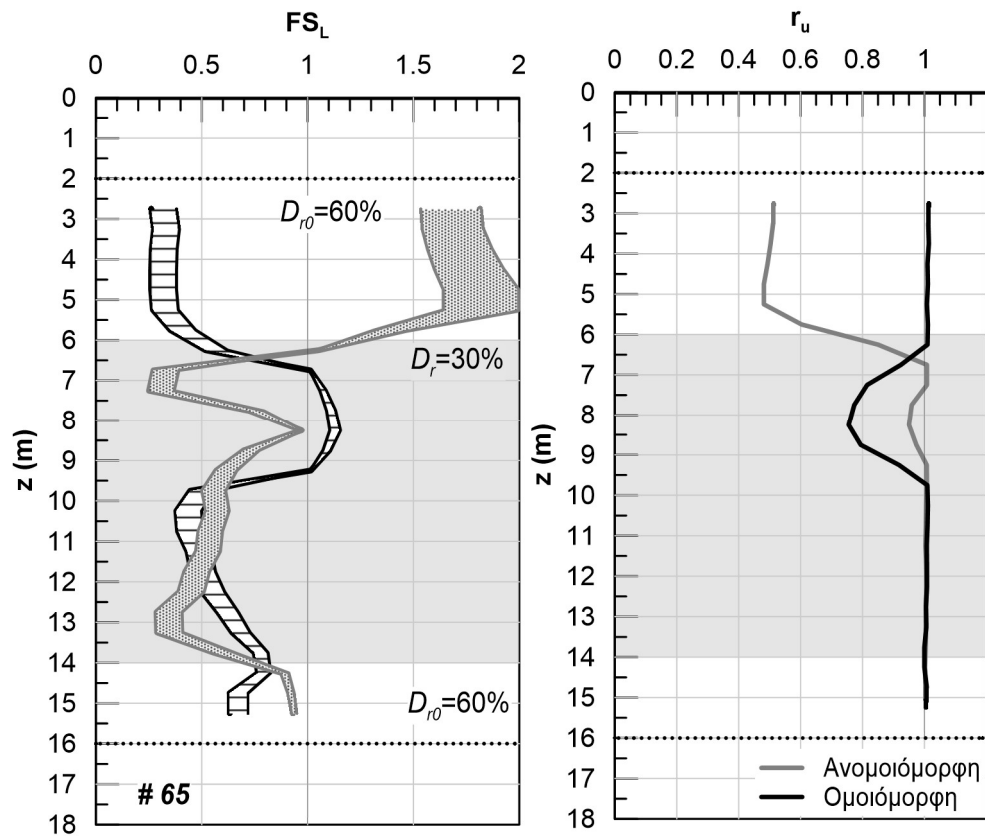
Σχήμα Β.54: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #62.



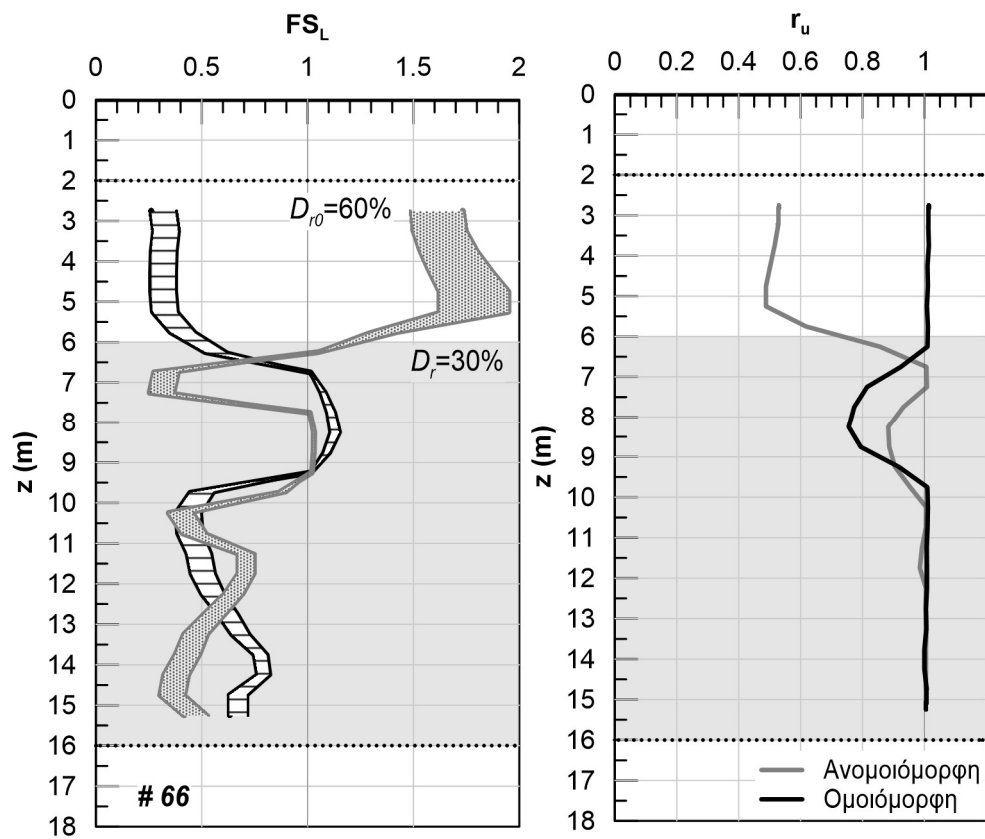
Σχήμα Β.55: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #63.



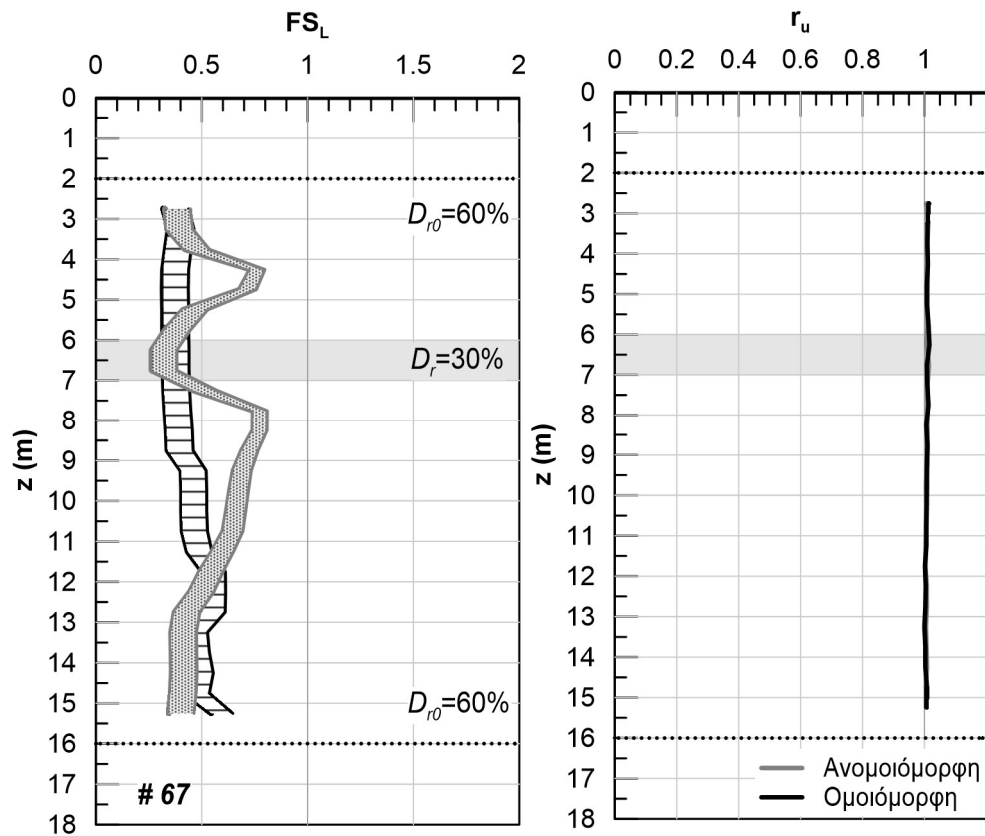
Σχήμα Β.56: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #64.



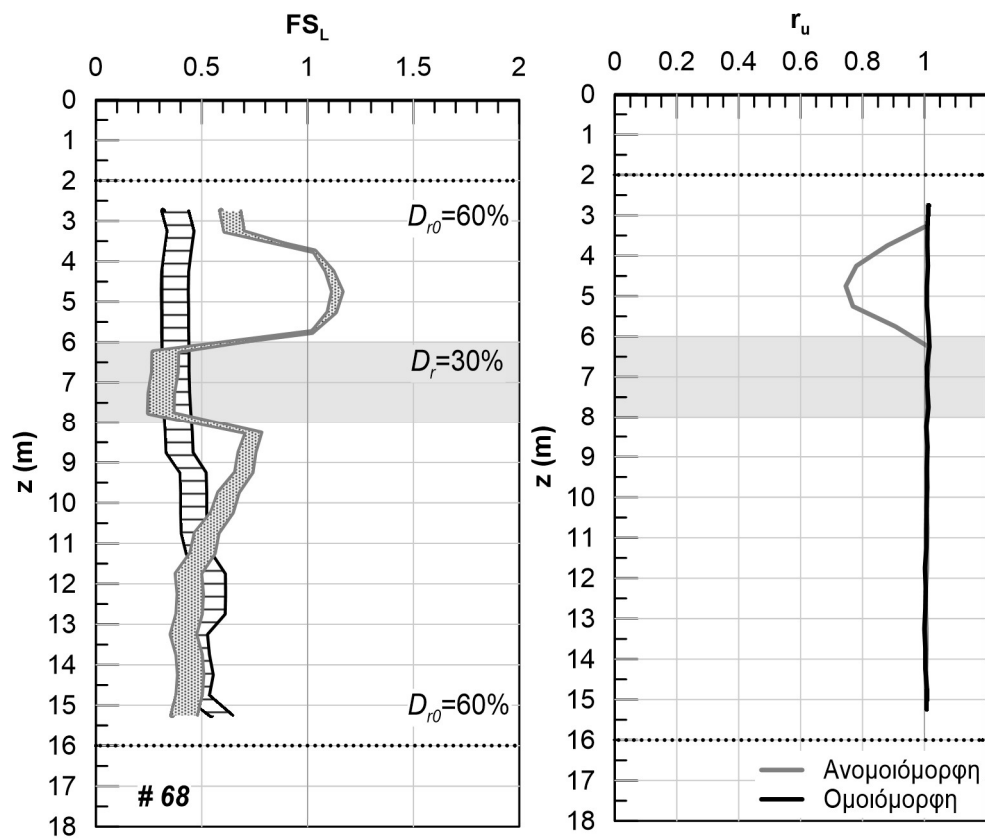
Σχήμα Β.57: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #65.



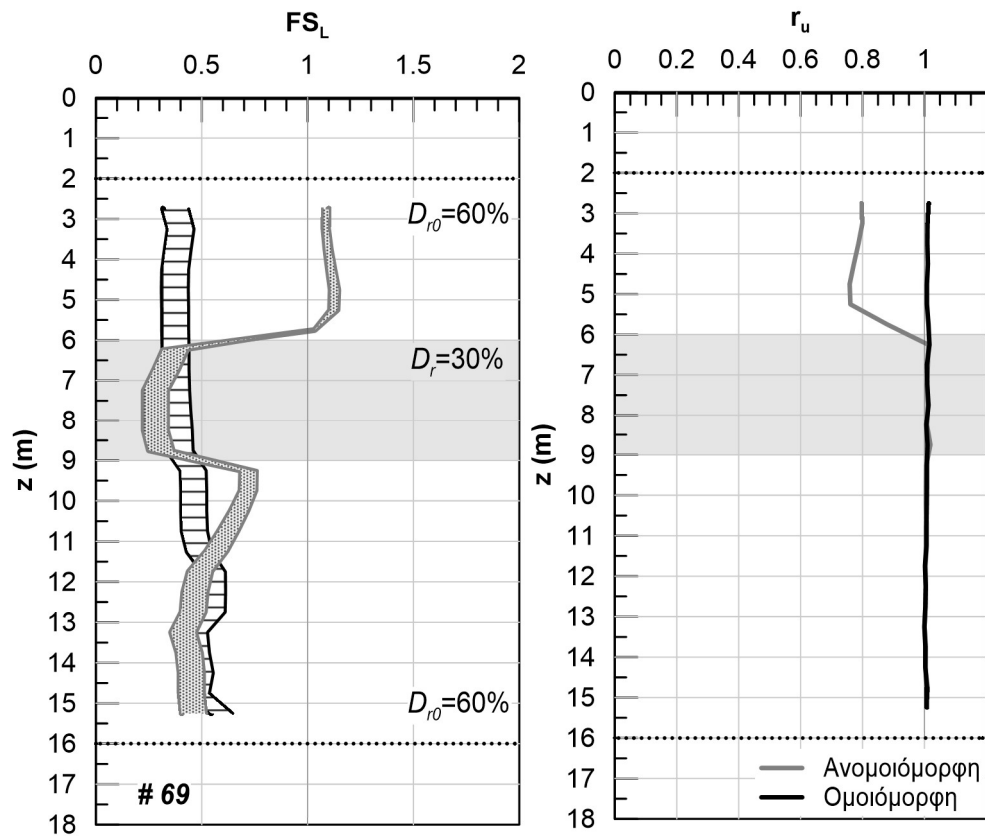
Σχήμα Β.58: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #66.



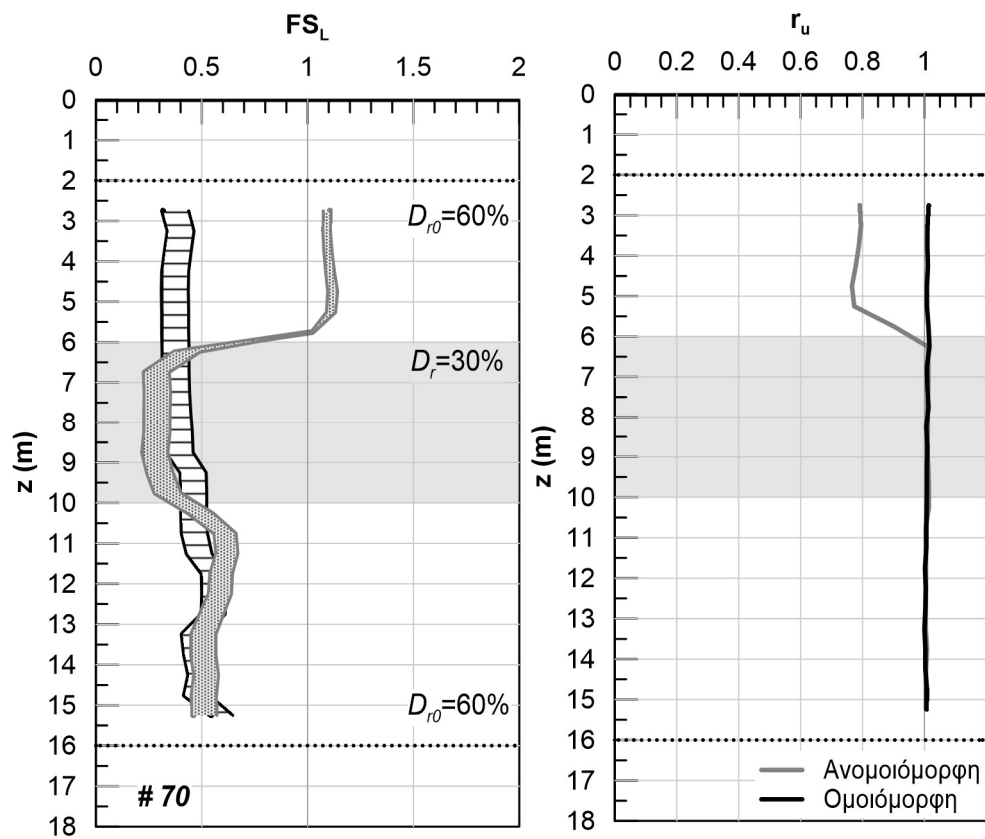
Σχήμα Β.59: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #67.



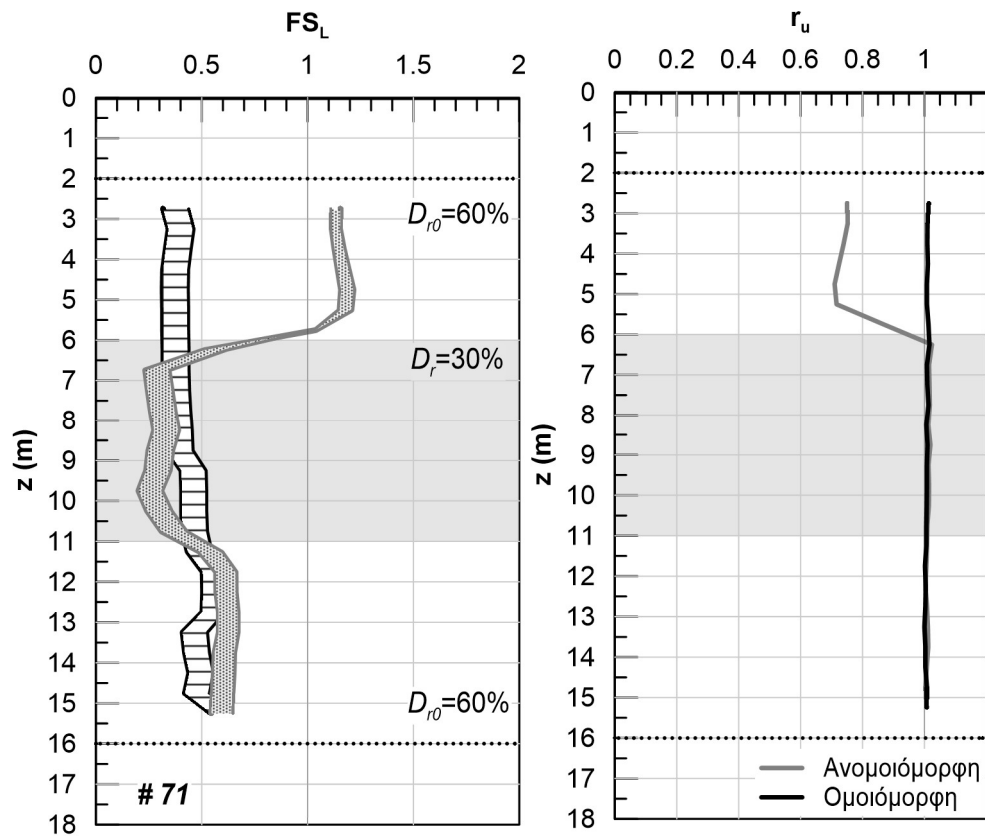
Σχήμα Β.60: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #68.



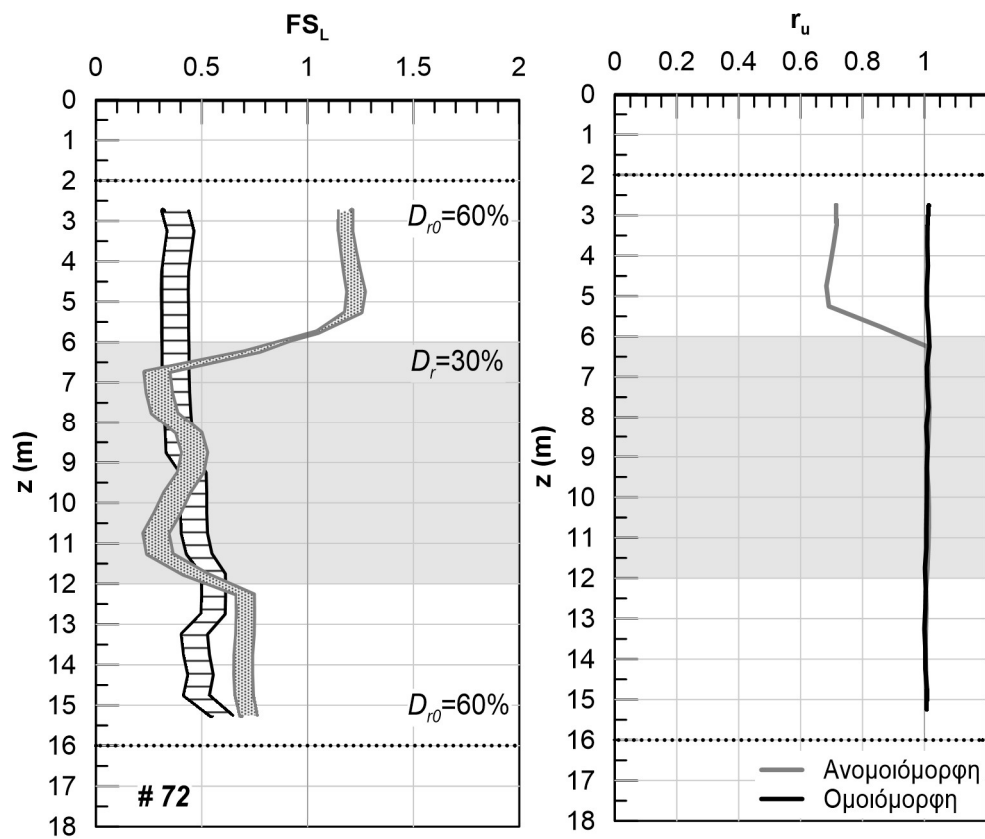
Σχήμα Β.61: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #69.



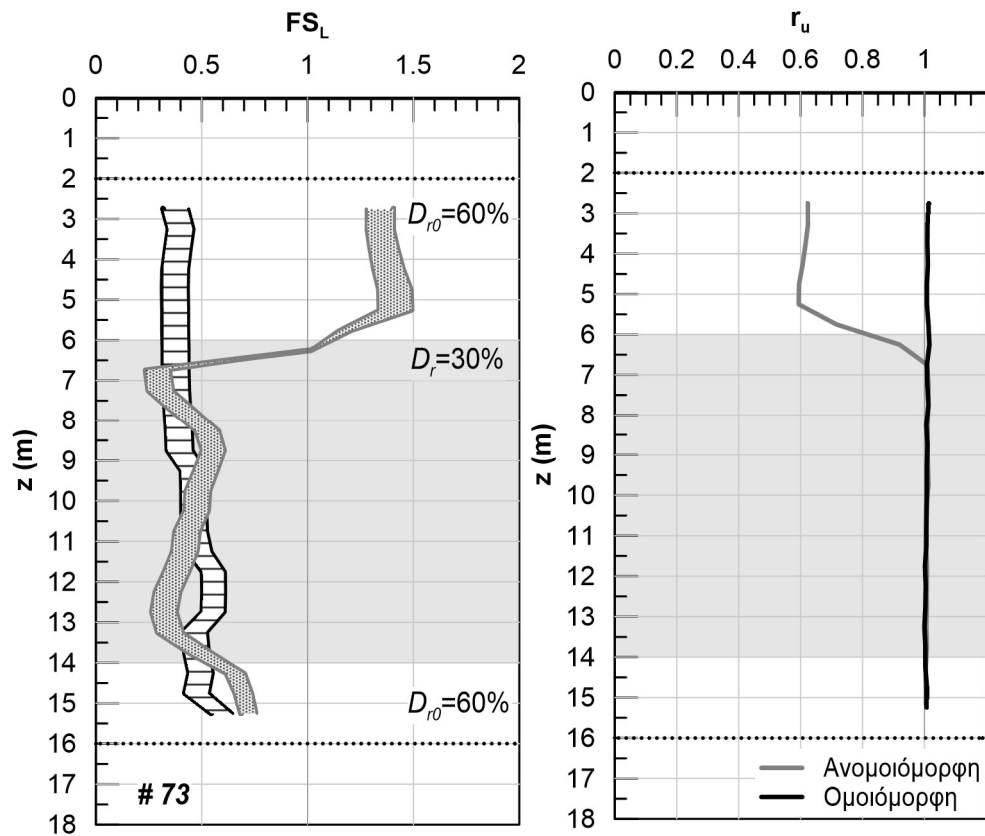
Σχήμα Β.62: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #70.



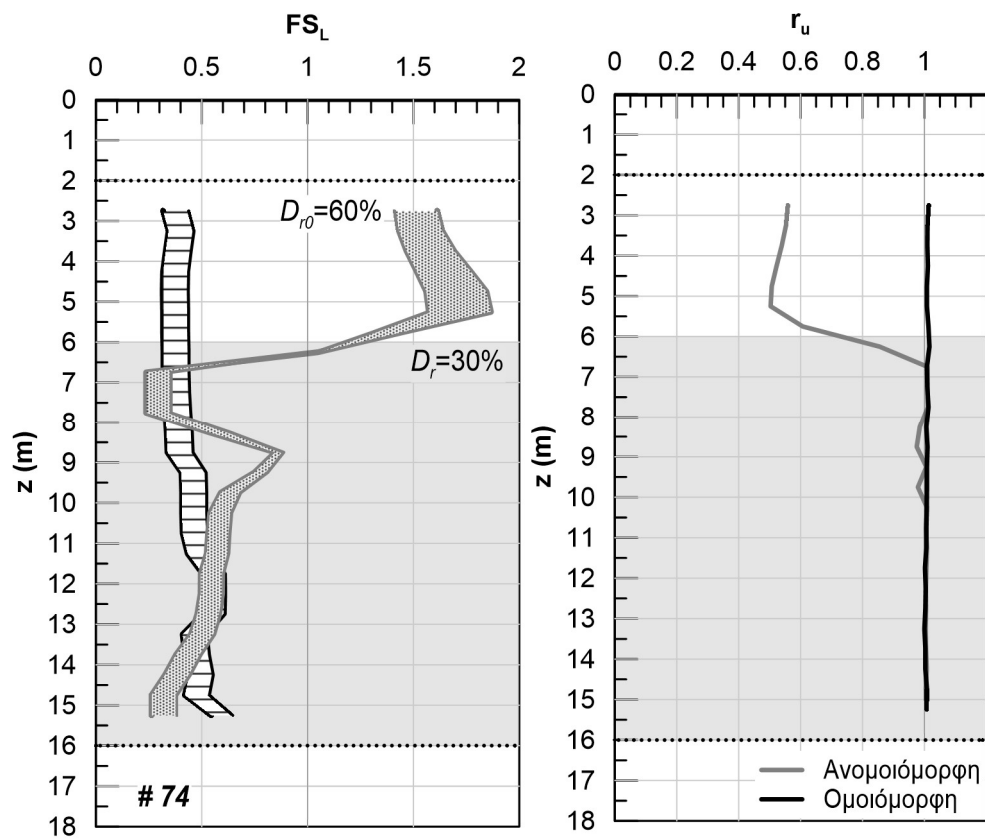
Σχήμα Β.63: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #71.



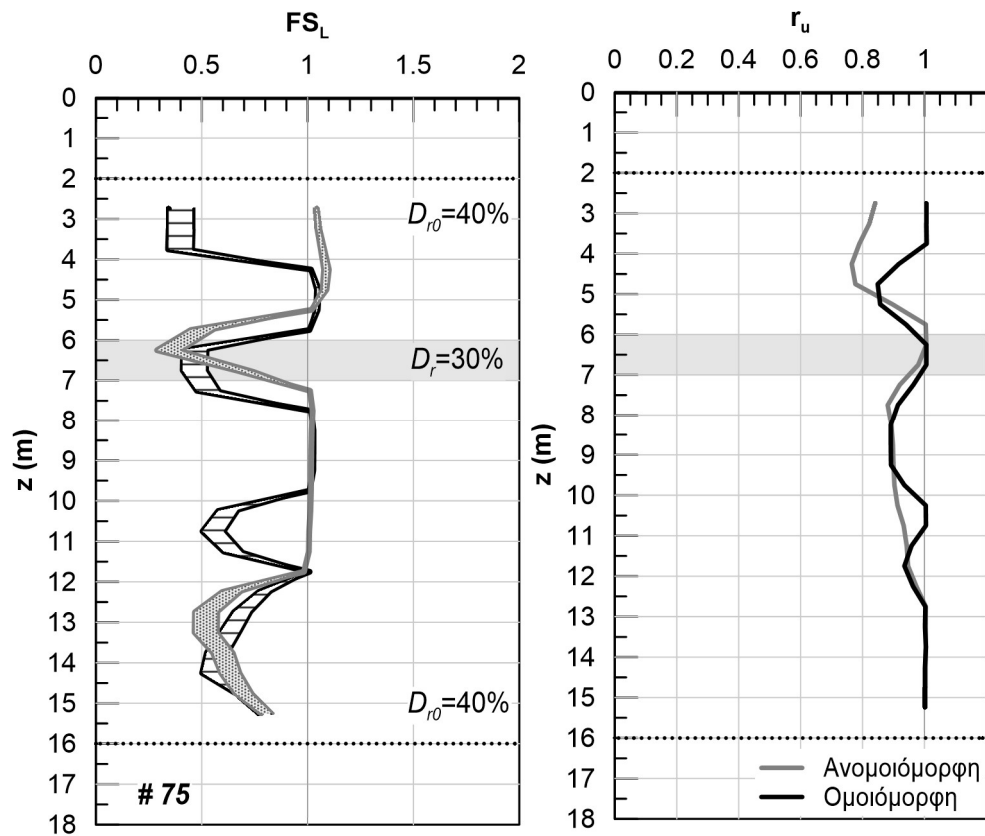
Σχήμα Β.64: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #72.



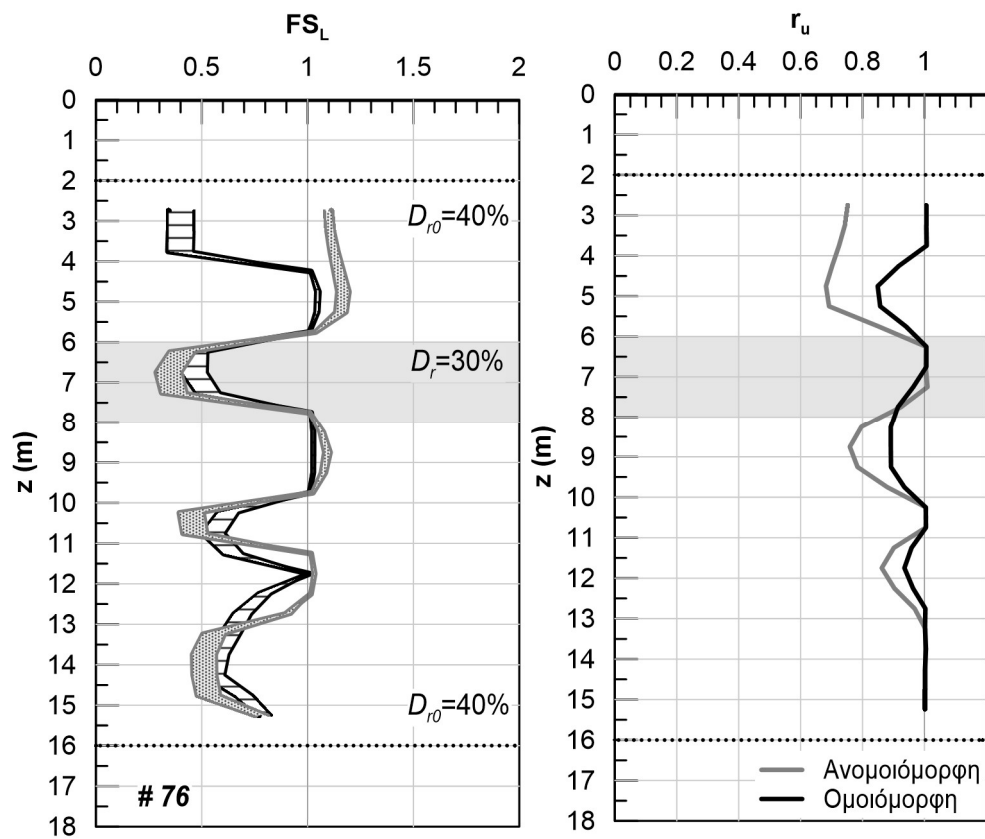
Σχήμα Β.65: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #73.



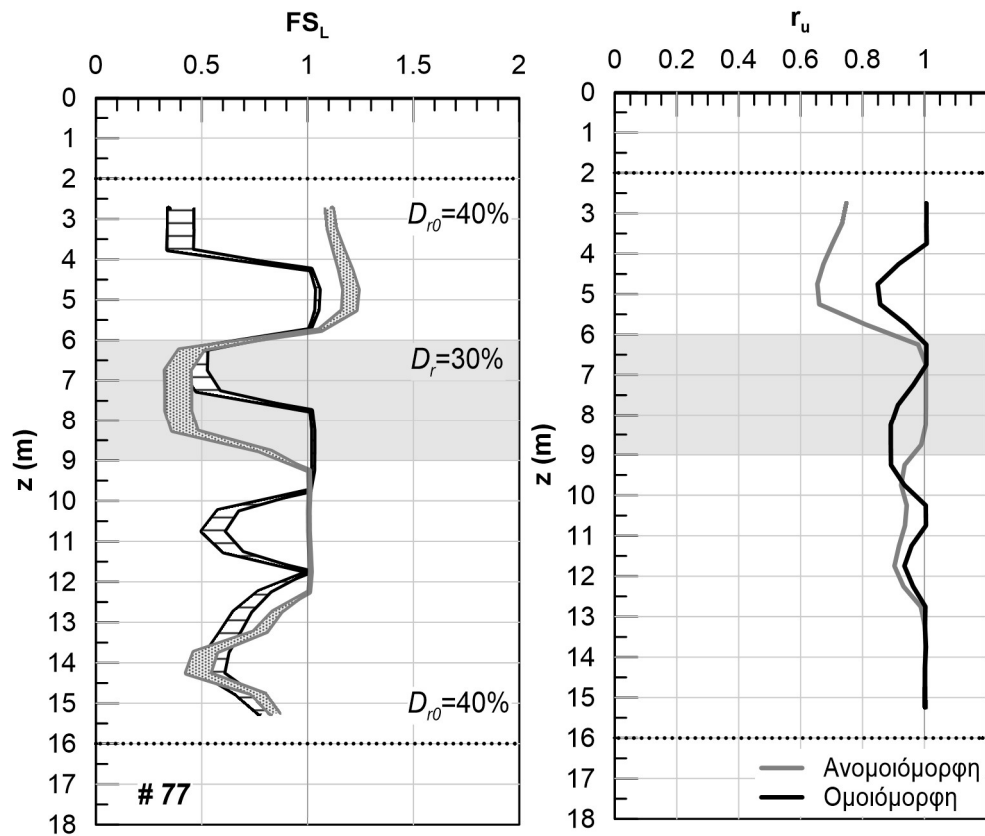
Σχήμα Β.66: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #74.



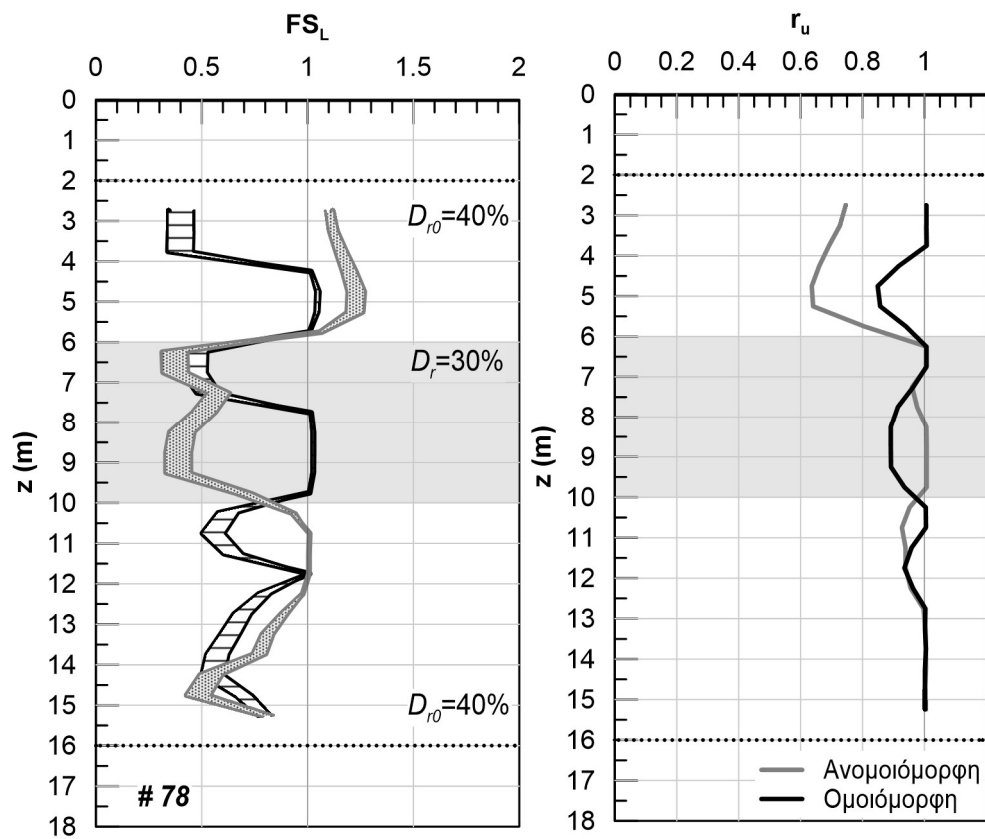
Σχήμα Β.67: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #75.



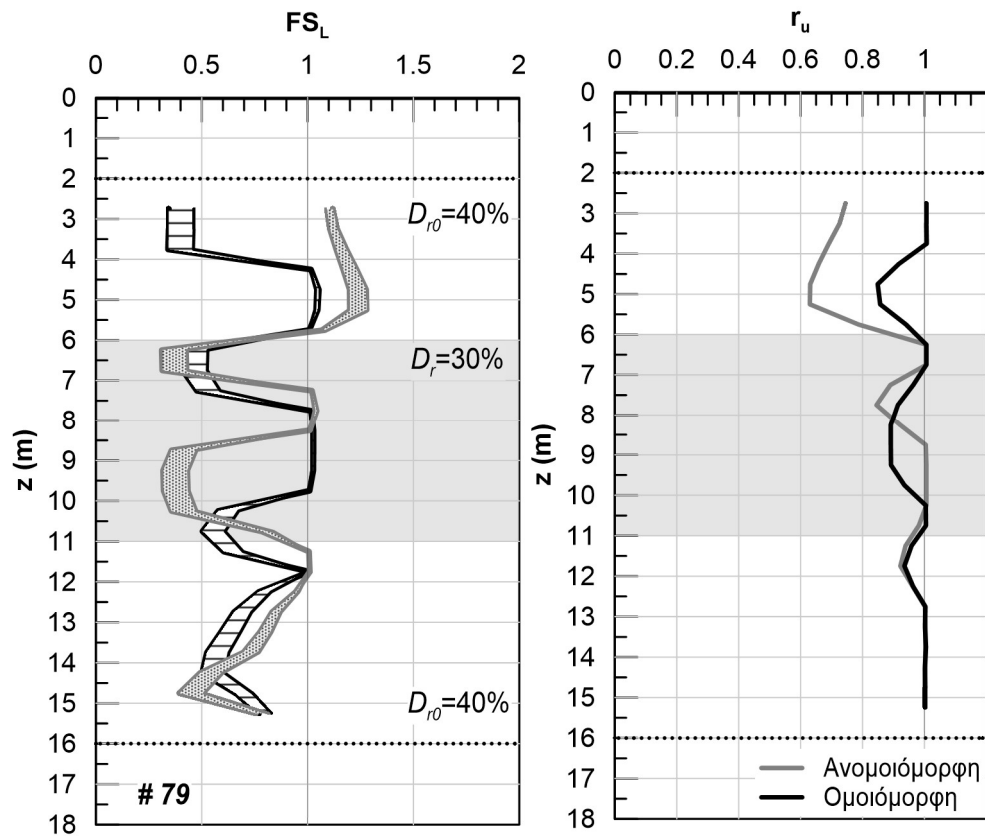
Σχήμα Β.68: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #76.



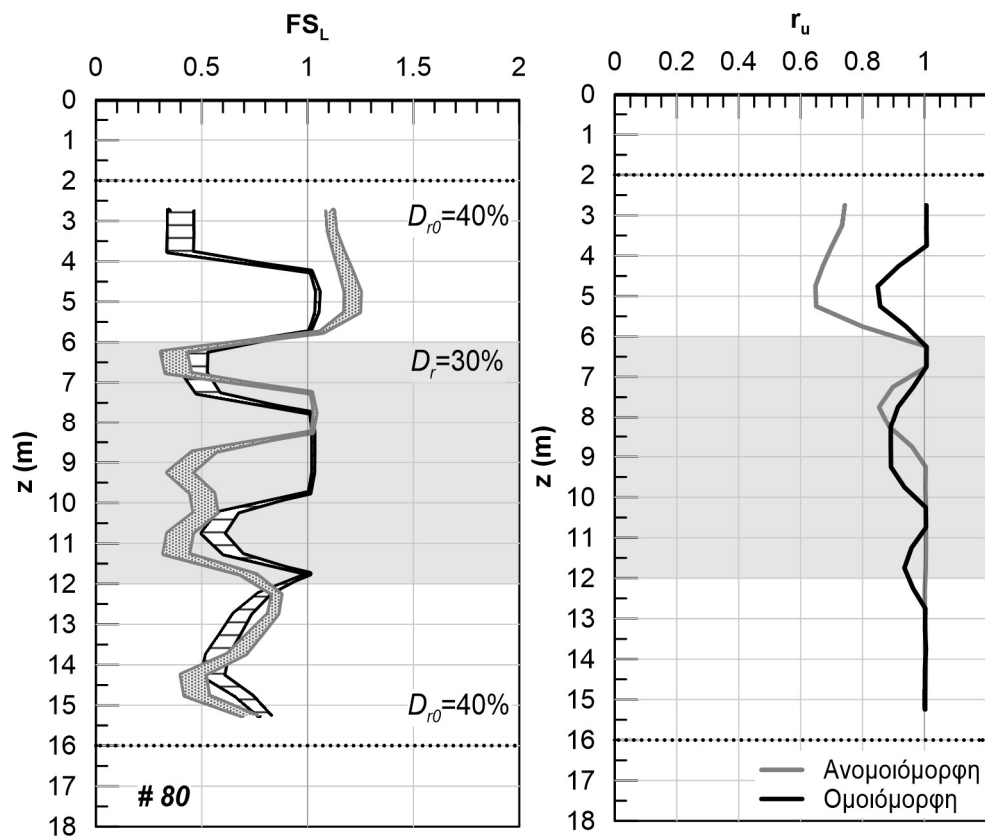
Σχήμα Β.69: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #77.



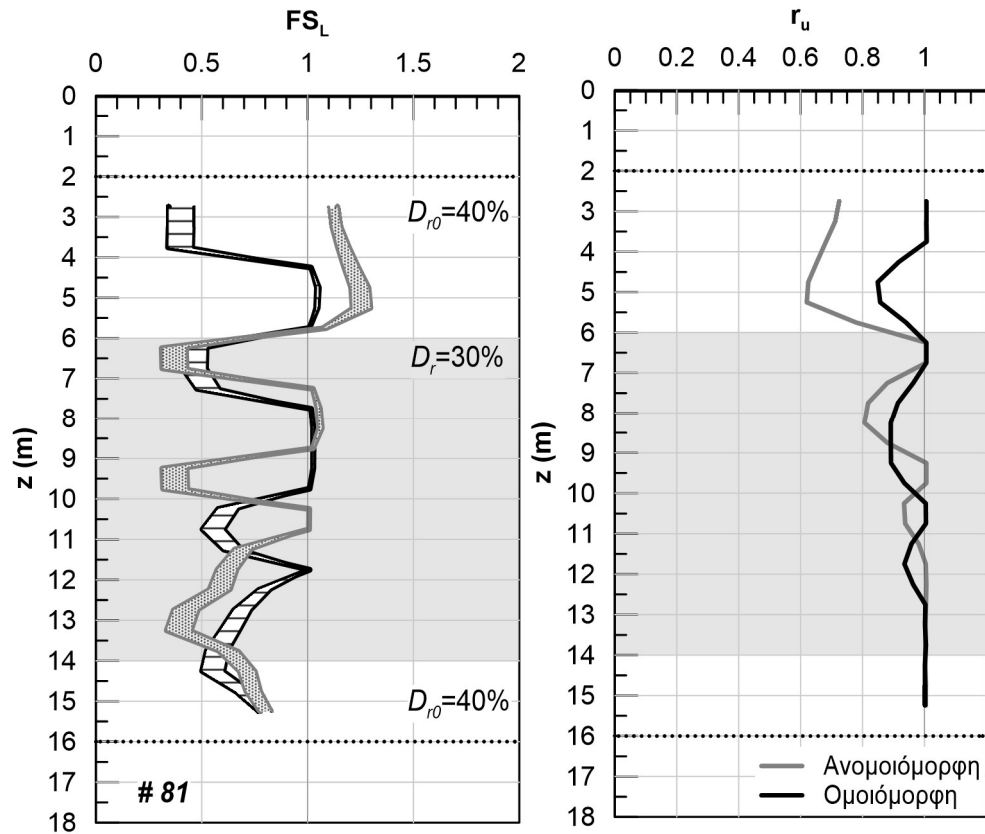
Σχήμα Β.70: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #78.



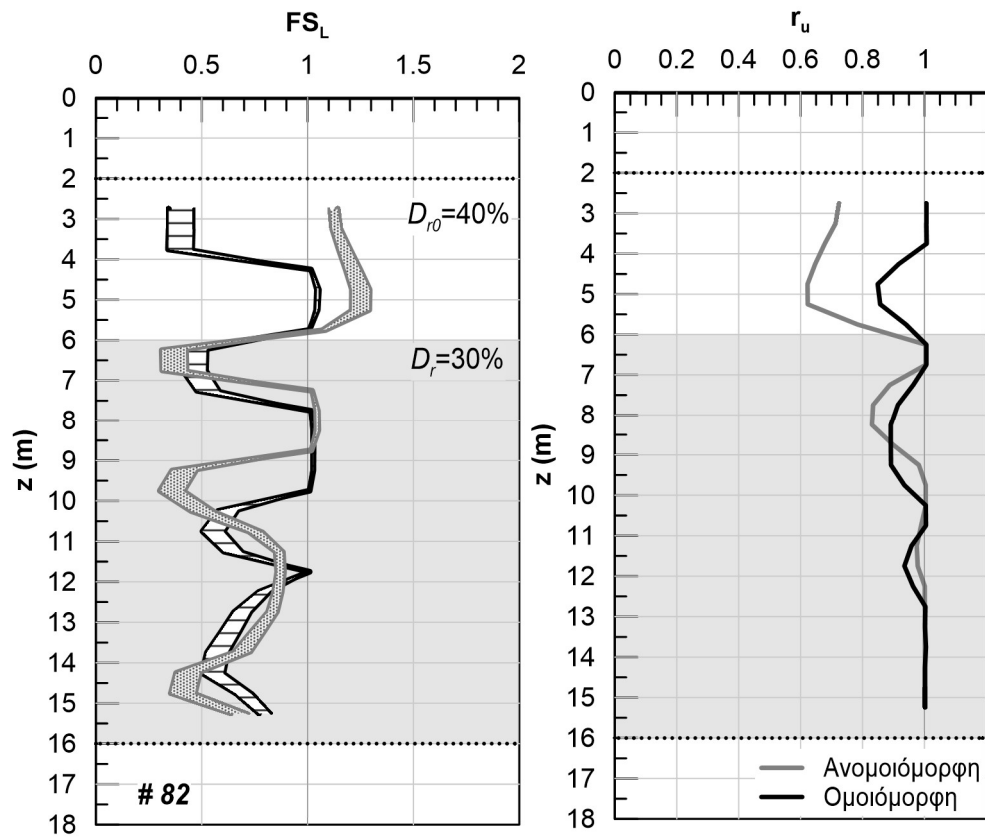
Σχήμα Β.71: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #79.



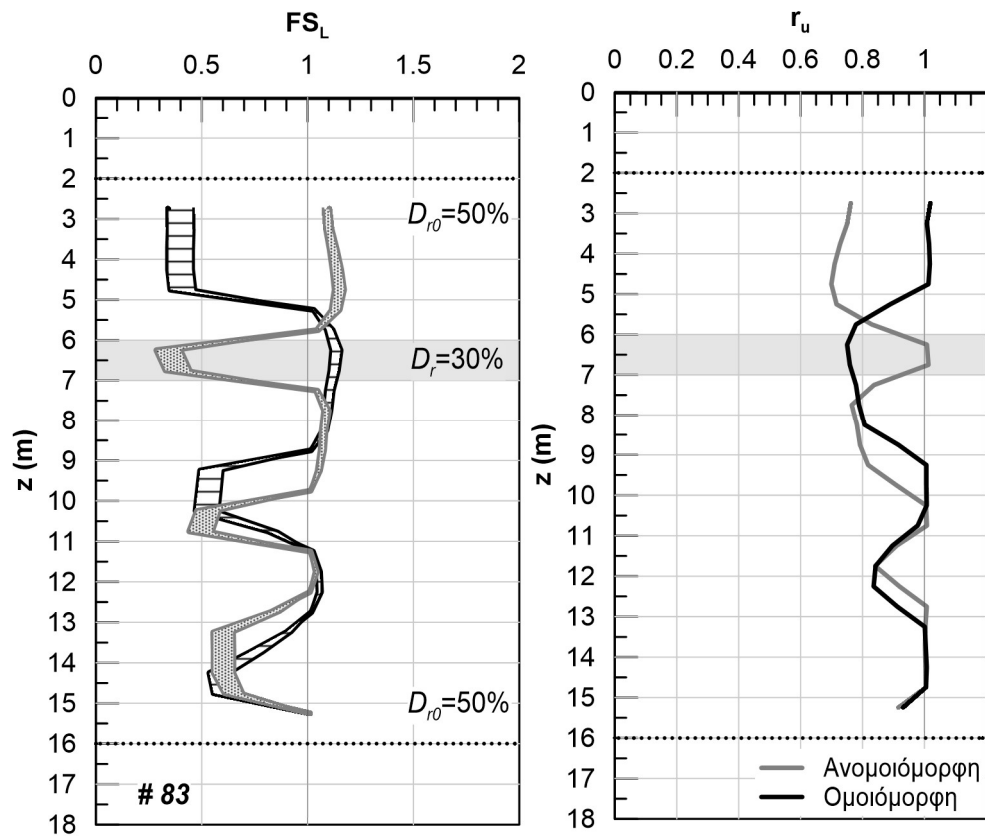
Σχήμα Β.72: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #80.



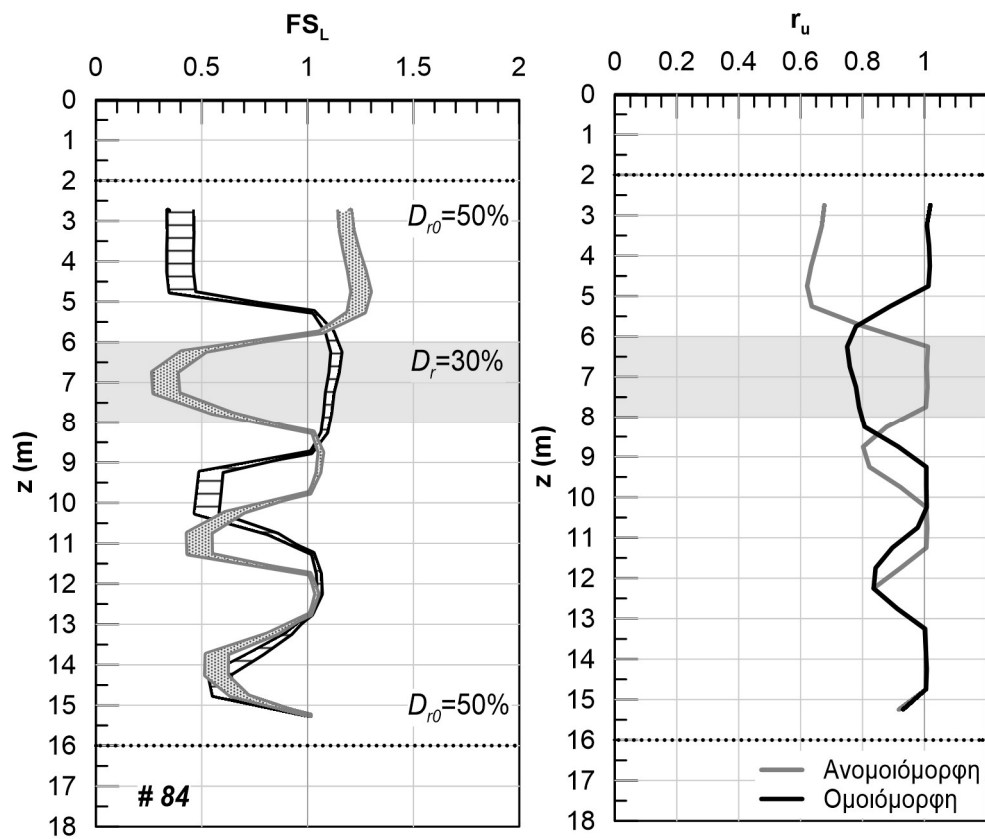
Σχήμα Β.73: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #81.



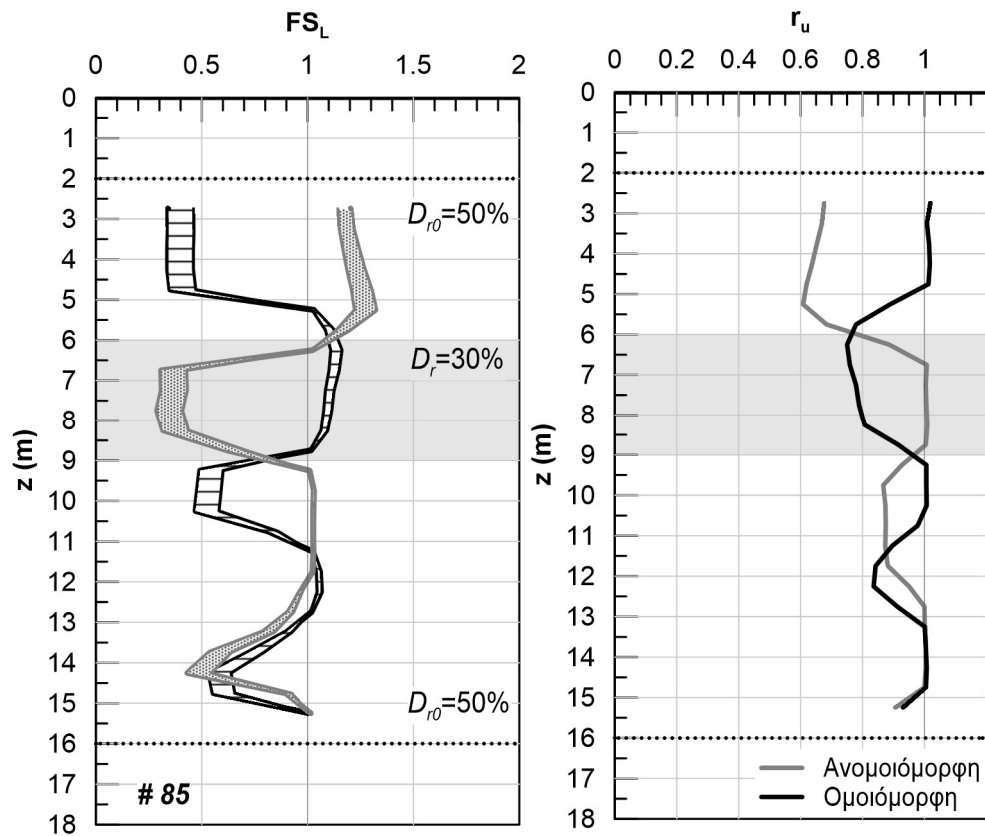
Σχήμα Β.74: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #82.



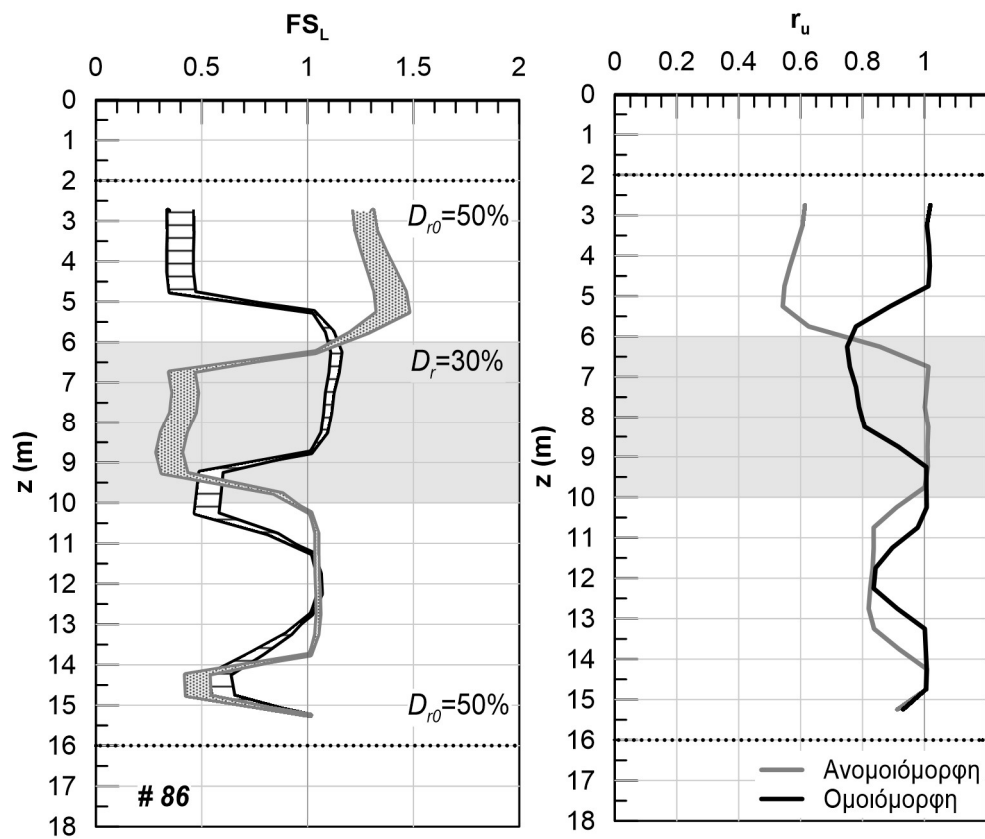
Σχήμα Β.75: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #83.



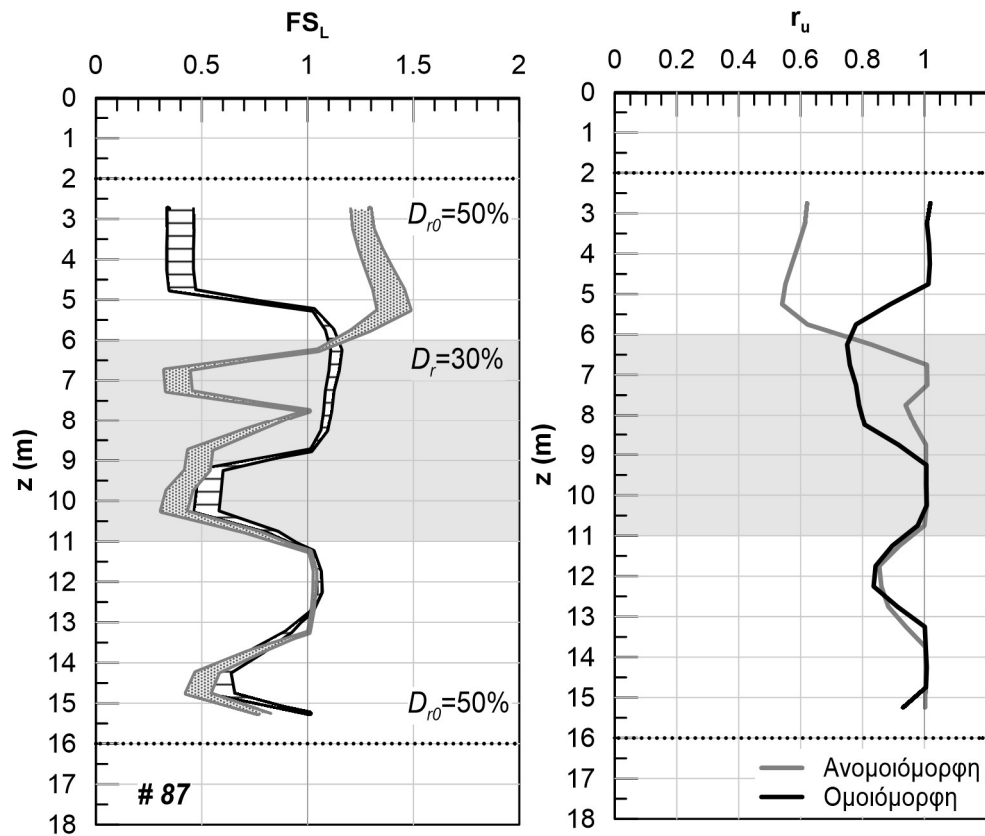
Σχήμα Β.76: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #84.



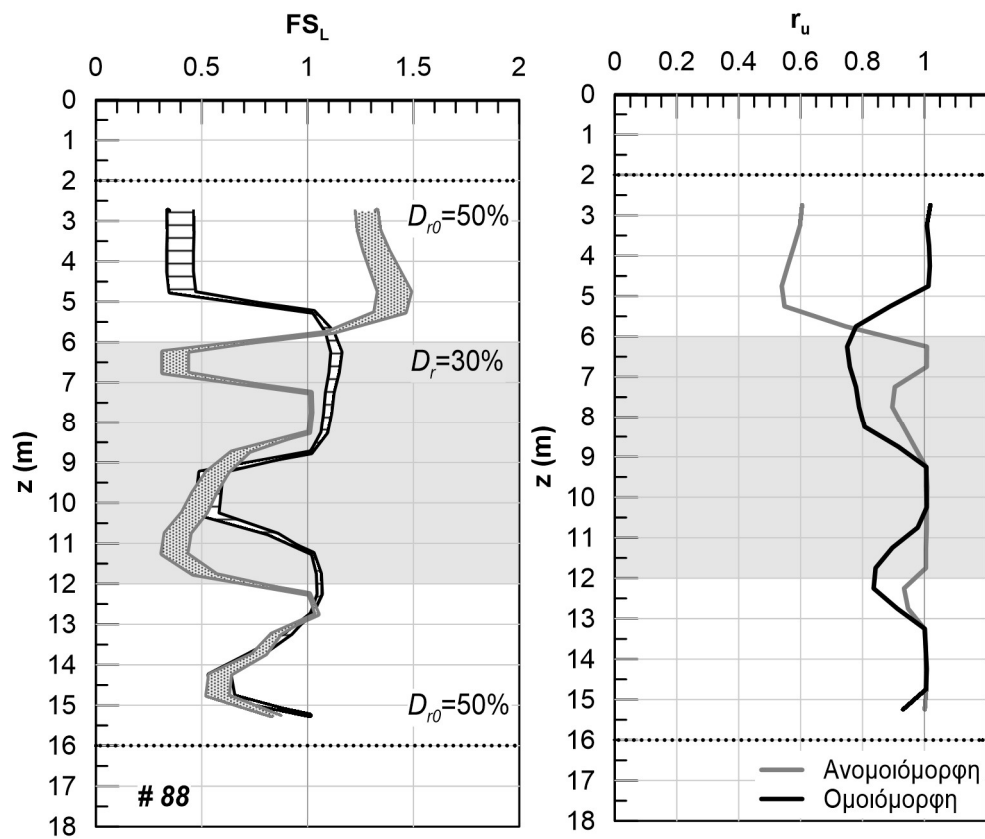
Σχήμα Β.77: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #85.



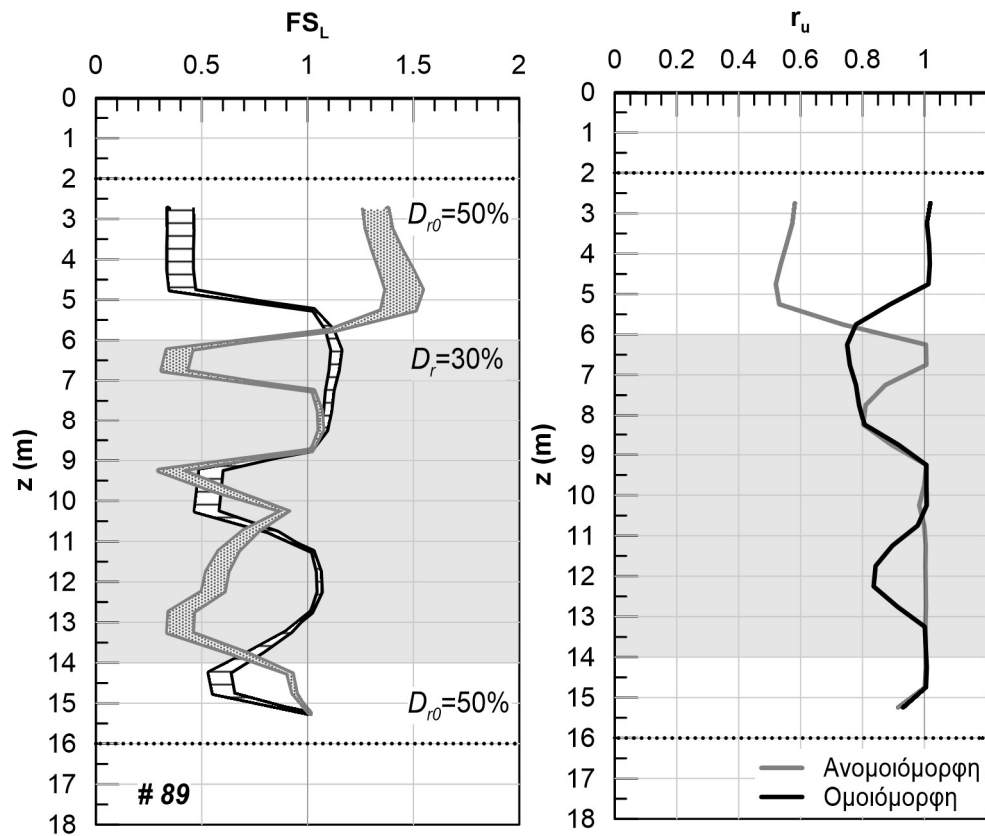
Σχήμα Β.78: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #86.



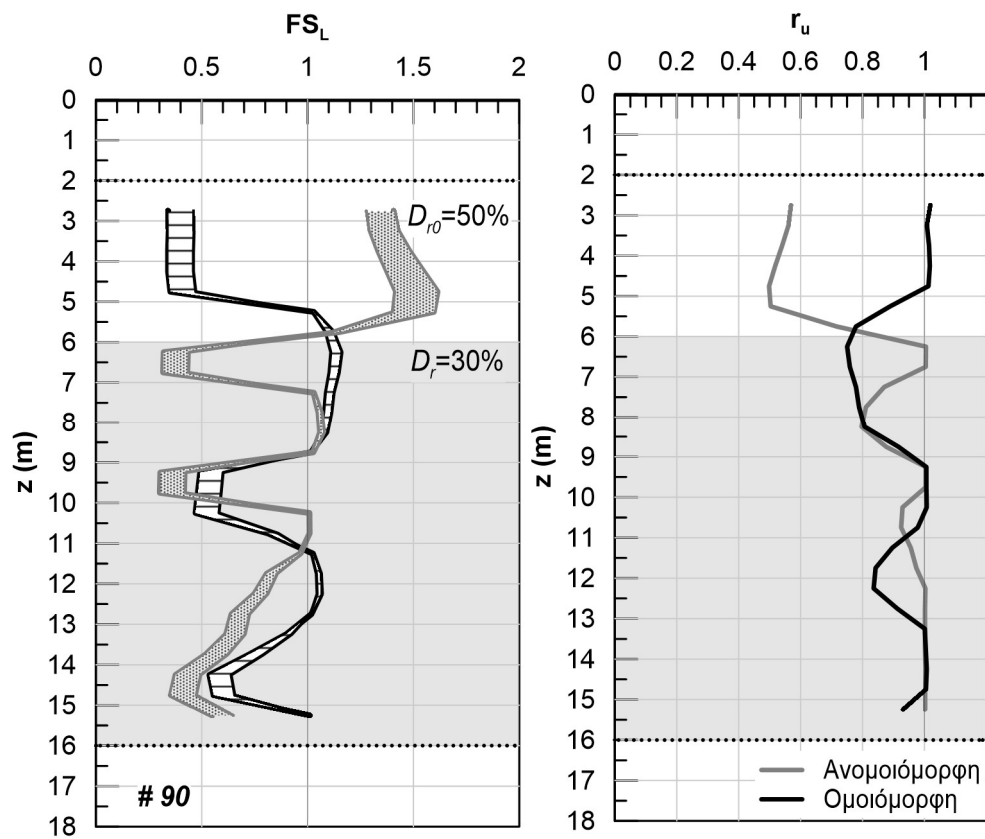
Σχήμα Β.79: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #87.



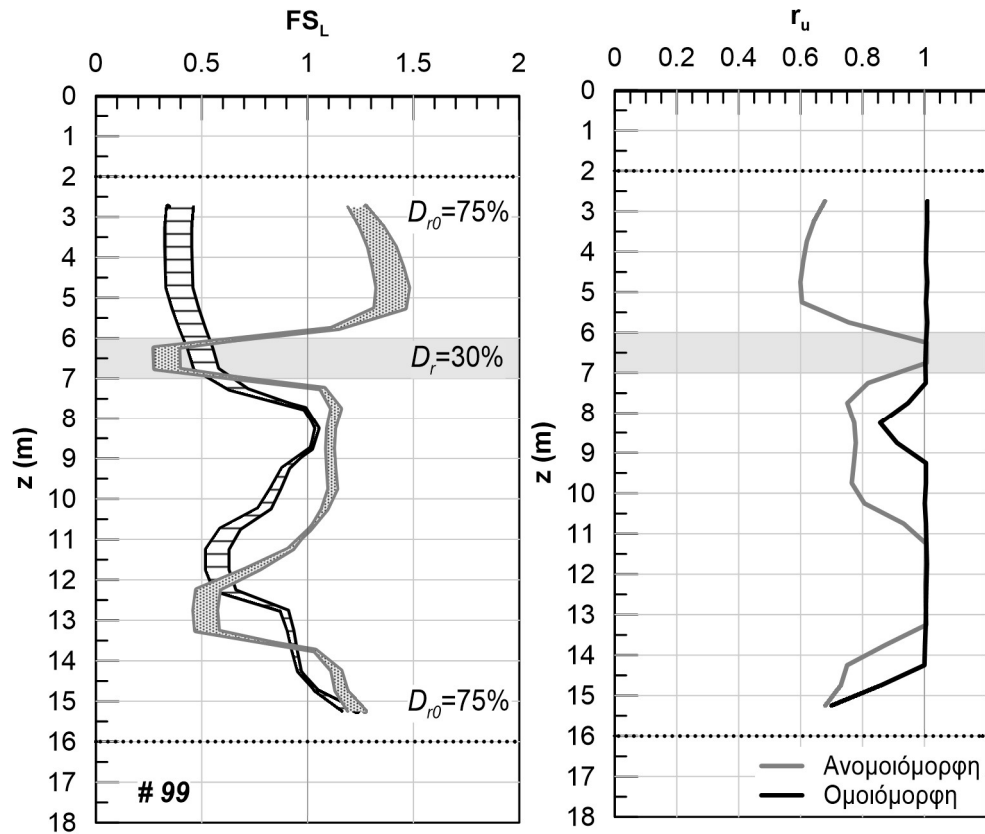
Σχήμα Β.80: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #88.



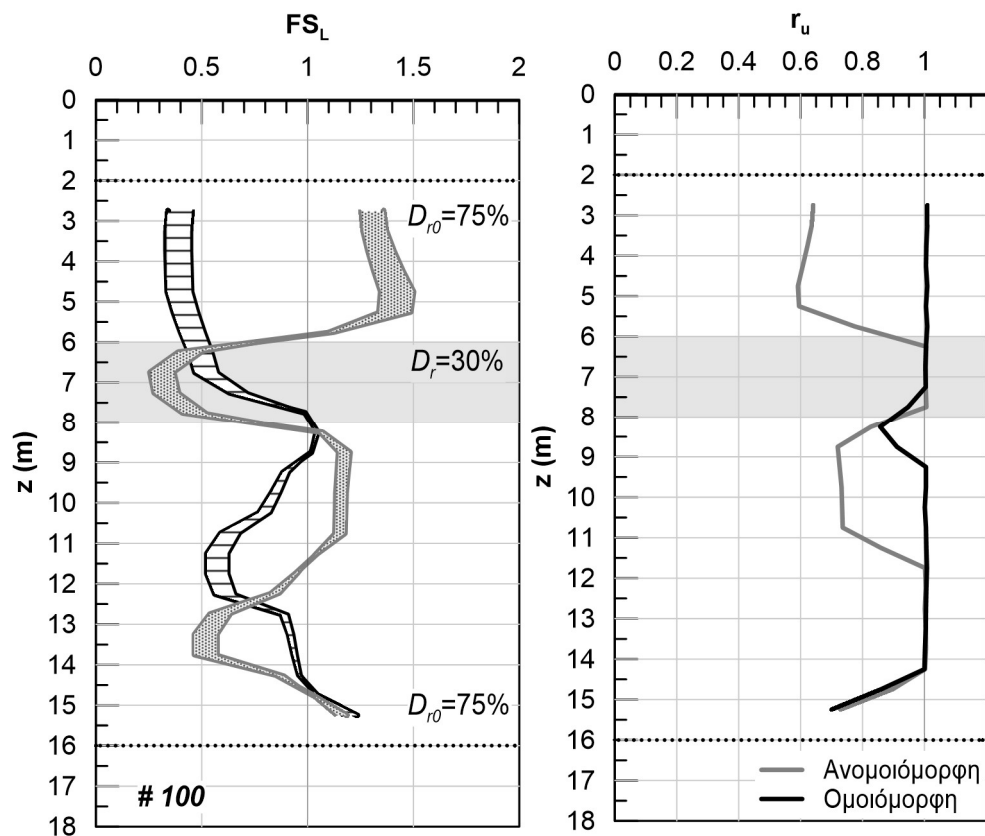
Σχήμα Β.81: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #89.



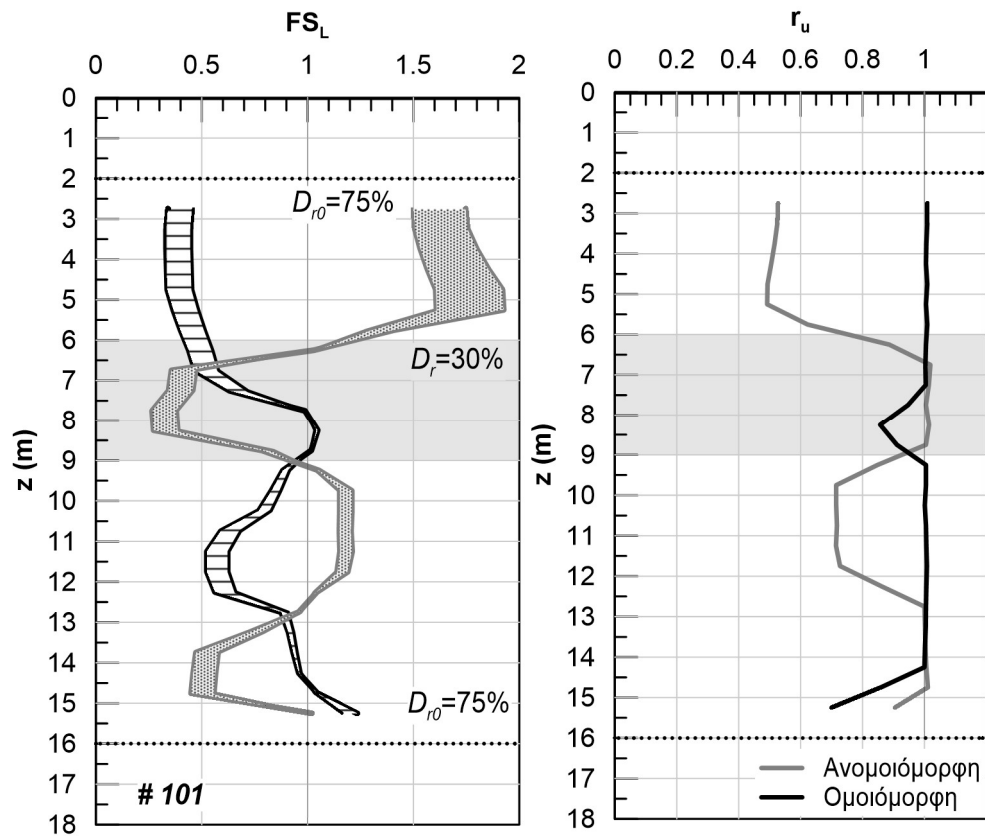
Σχήμα Β.82: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #90.



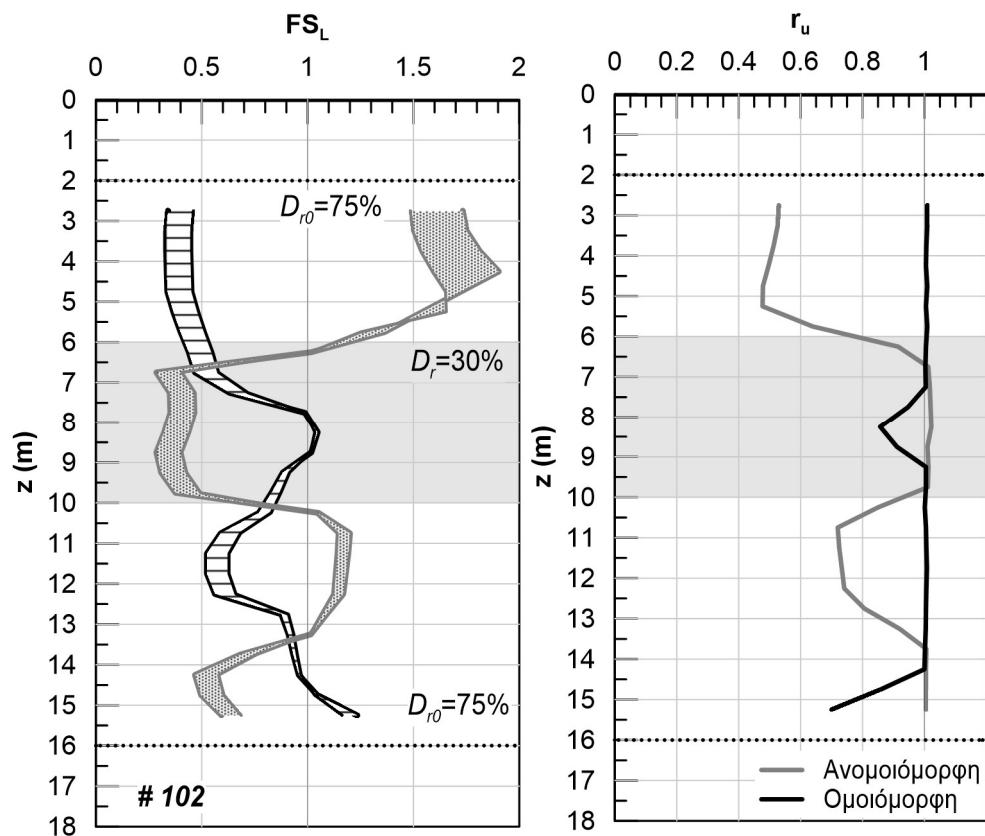
Σχήμα Β.83: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #99.



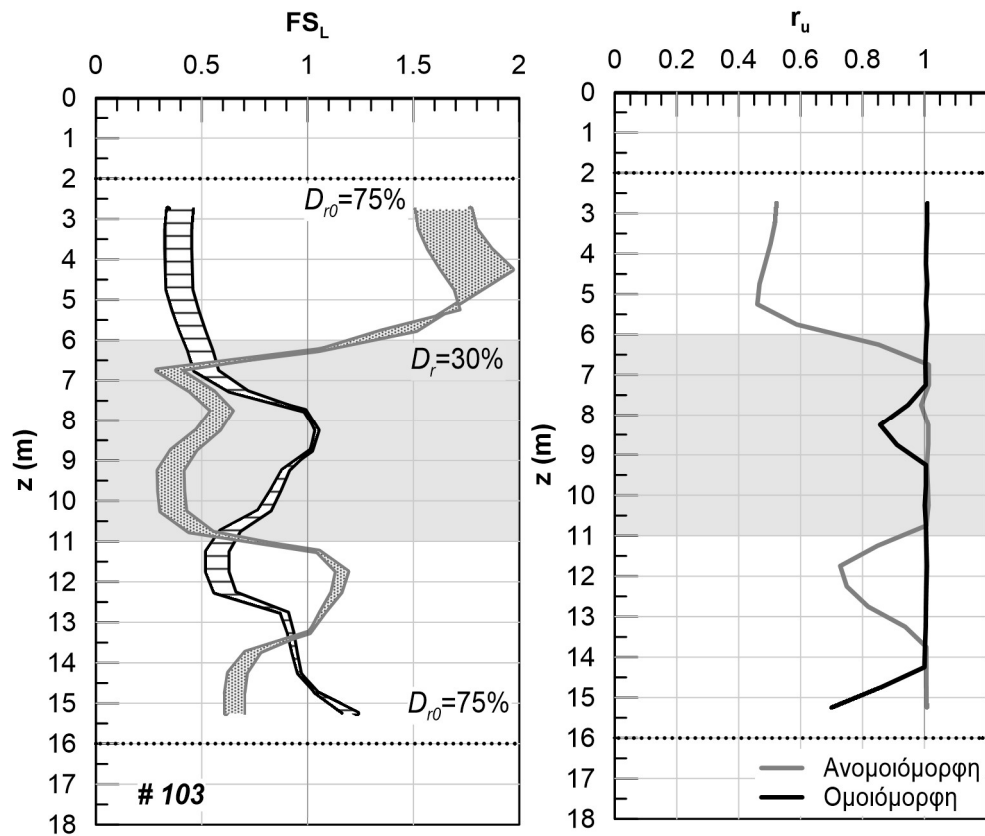
Σχήμα Β.84: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #100.



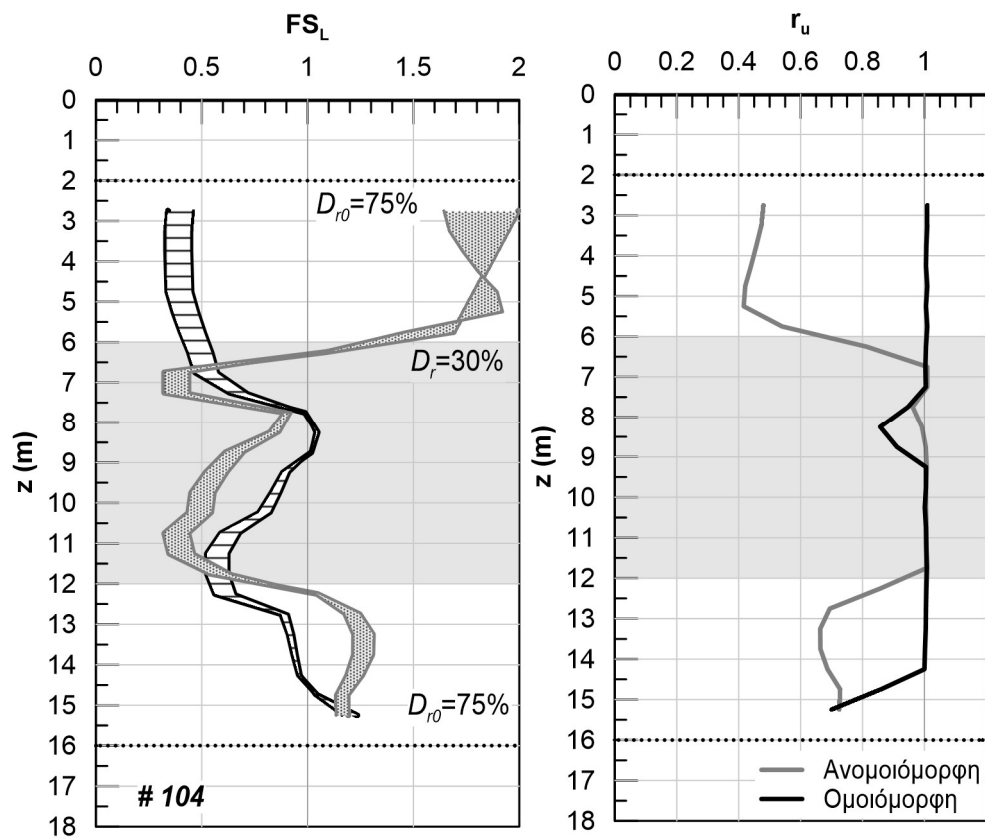
Σχήμα Β.85: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #101.



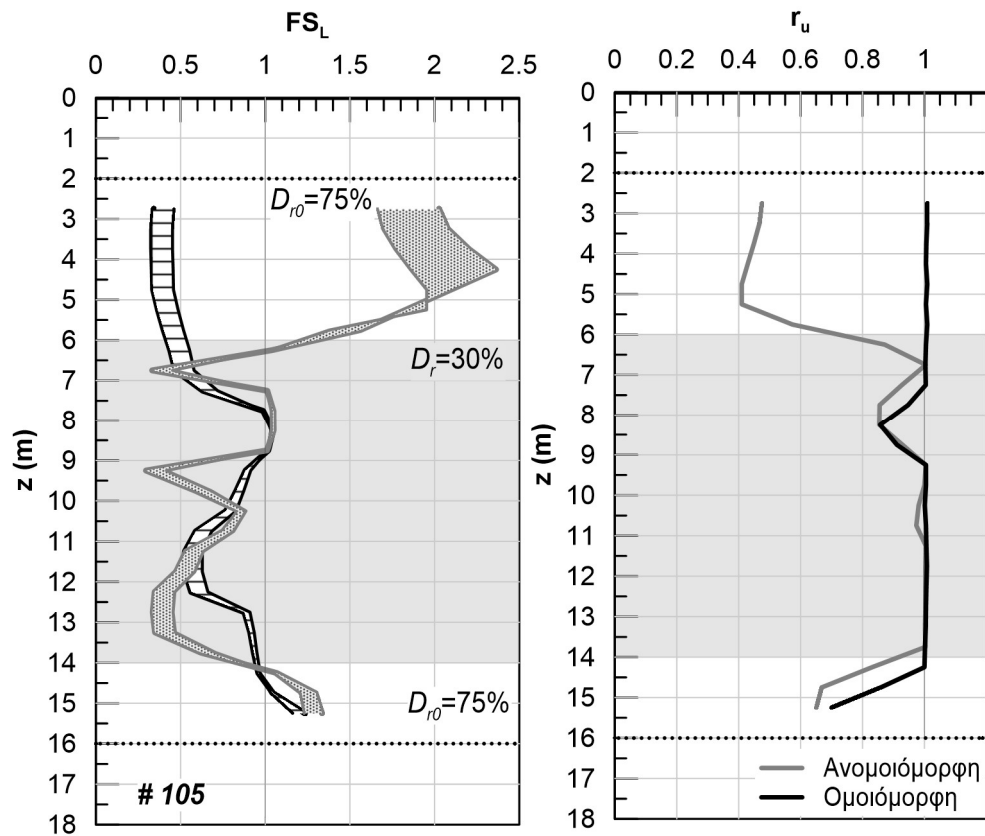
Σχήμα Β.86: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #102.



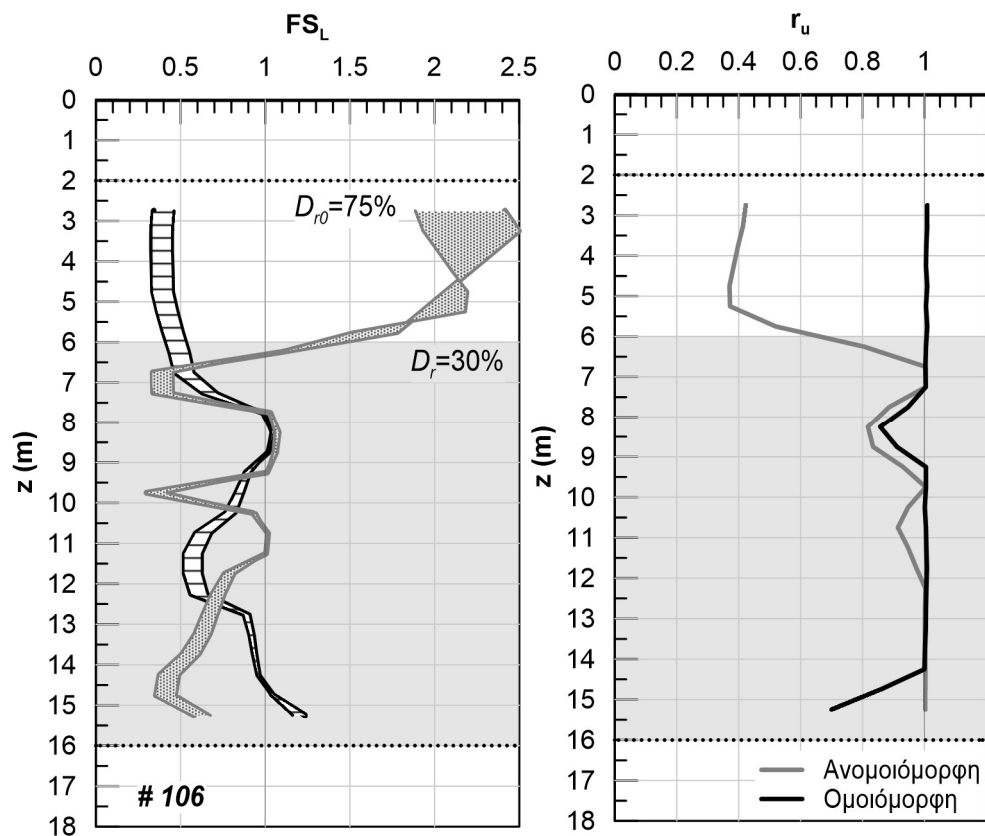
Σχήμα Β.87: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #103.



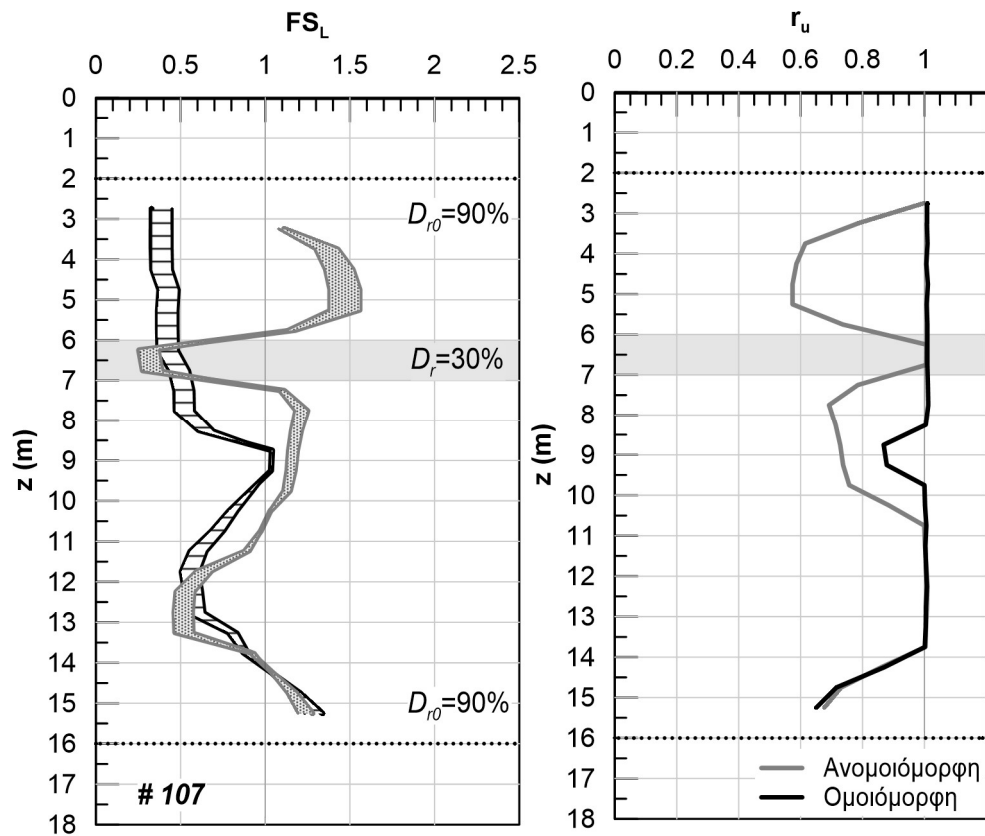
Σχήμα Β.88: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #104.



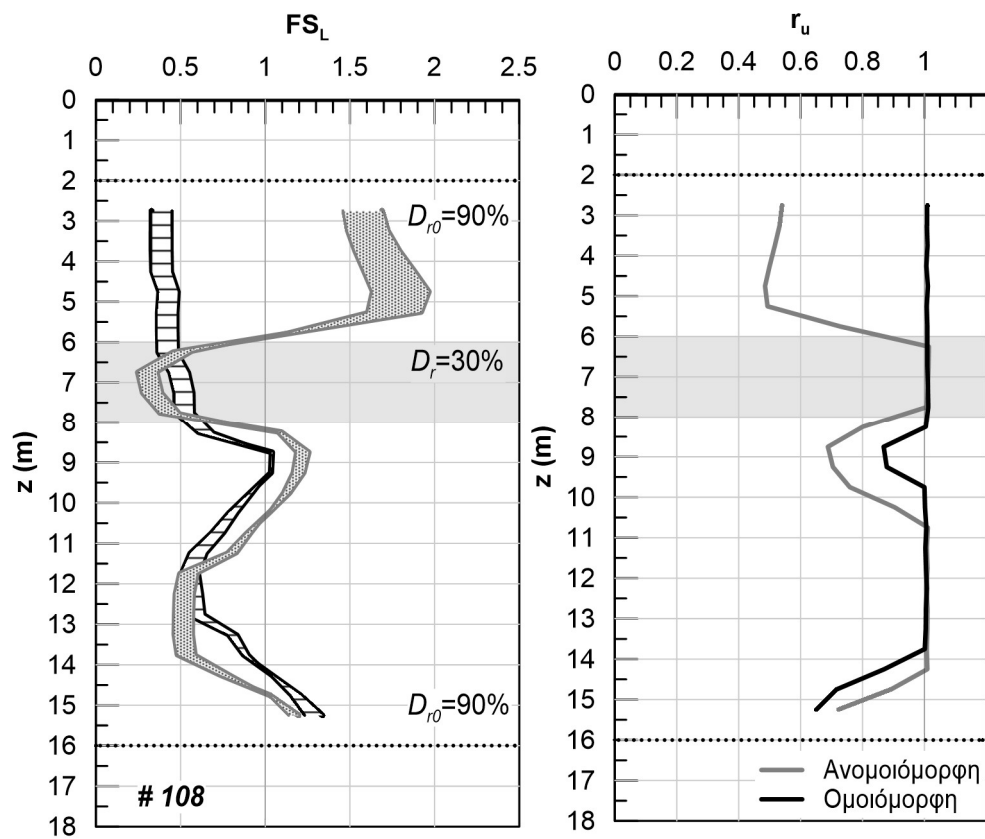
Σχήμα Β.89: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #105.



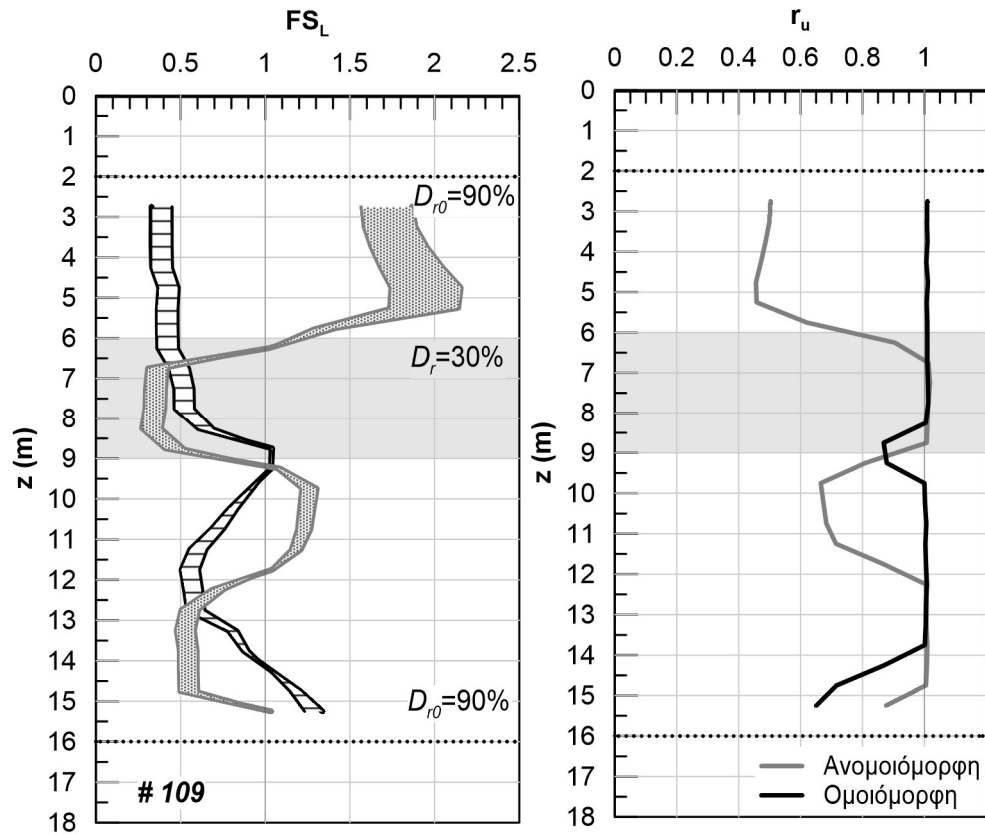
Σχήμα Β.90: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #106.



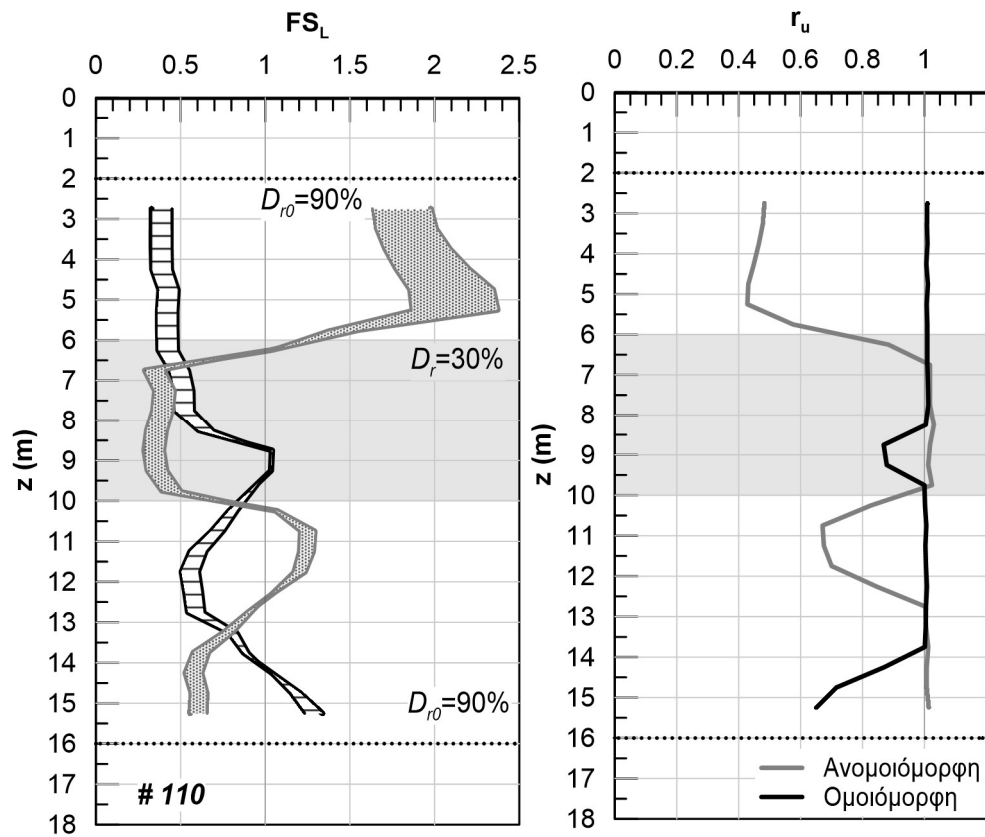
Σχήμα Β.91: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #107.



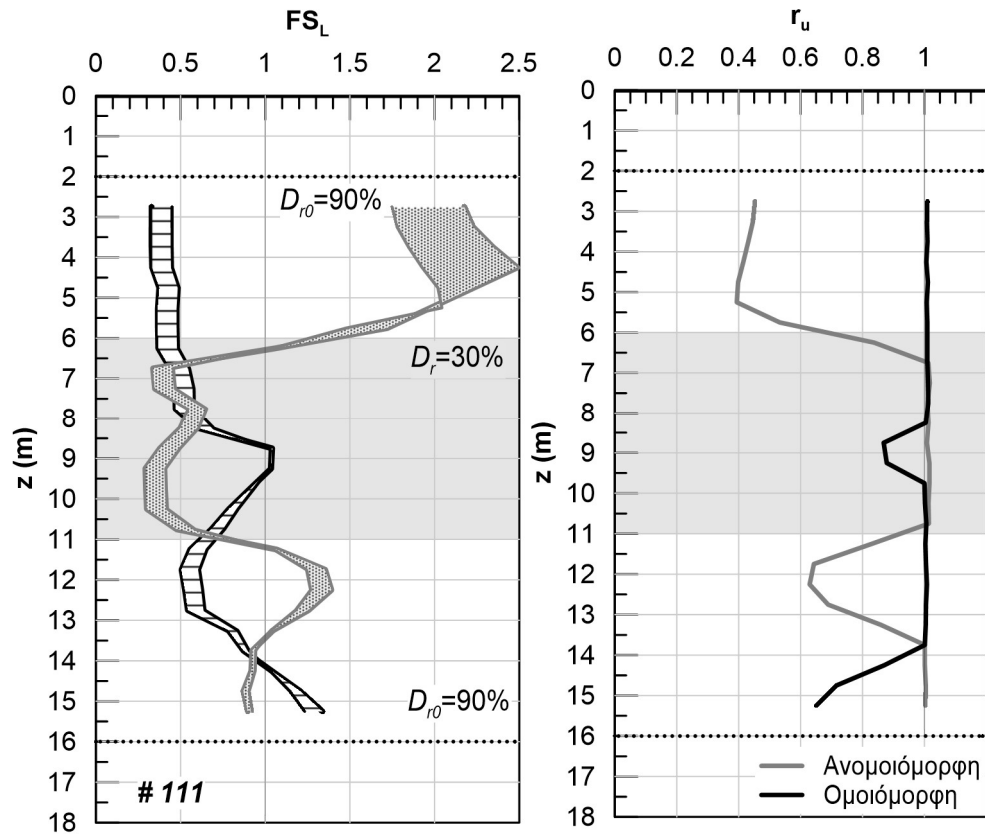
Σχήμα Β.92: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #108.



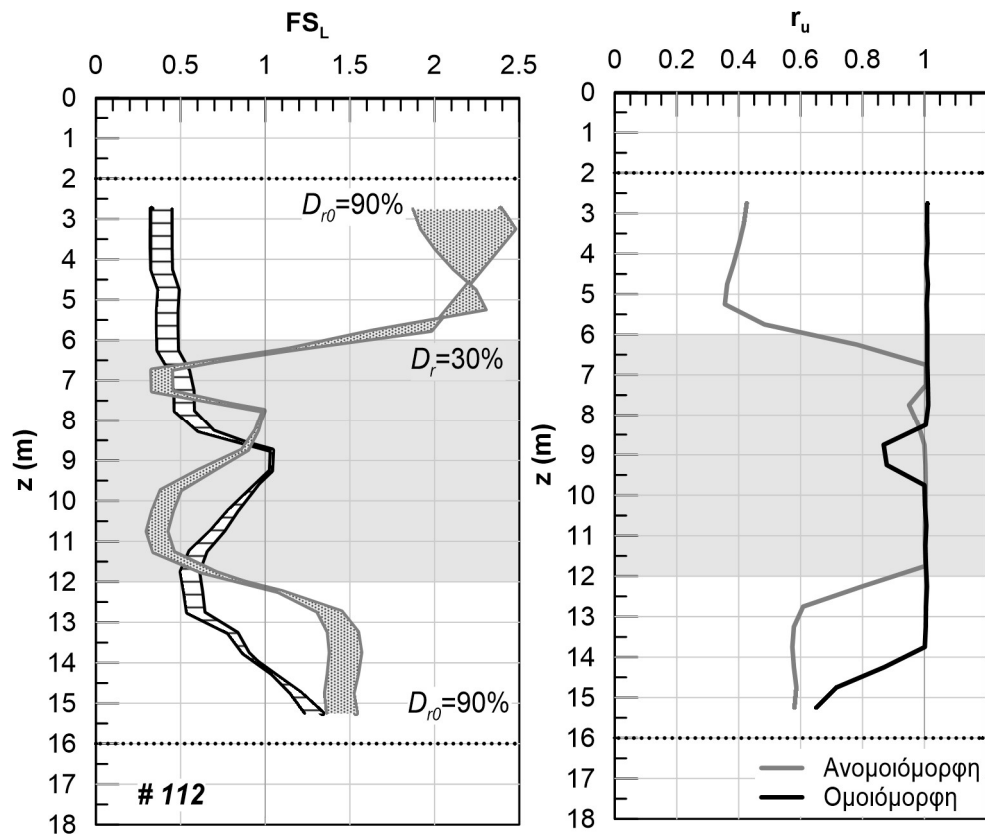
Σχήμα Β.93: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #109.



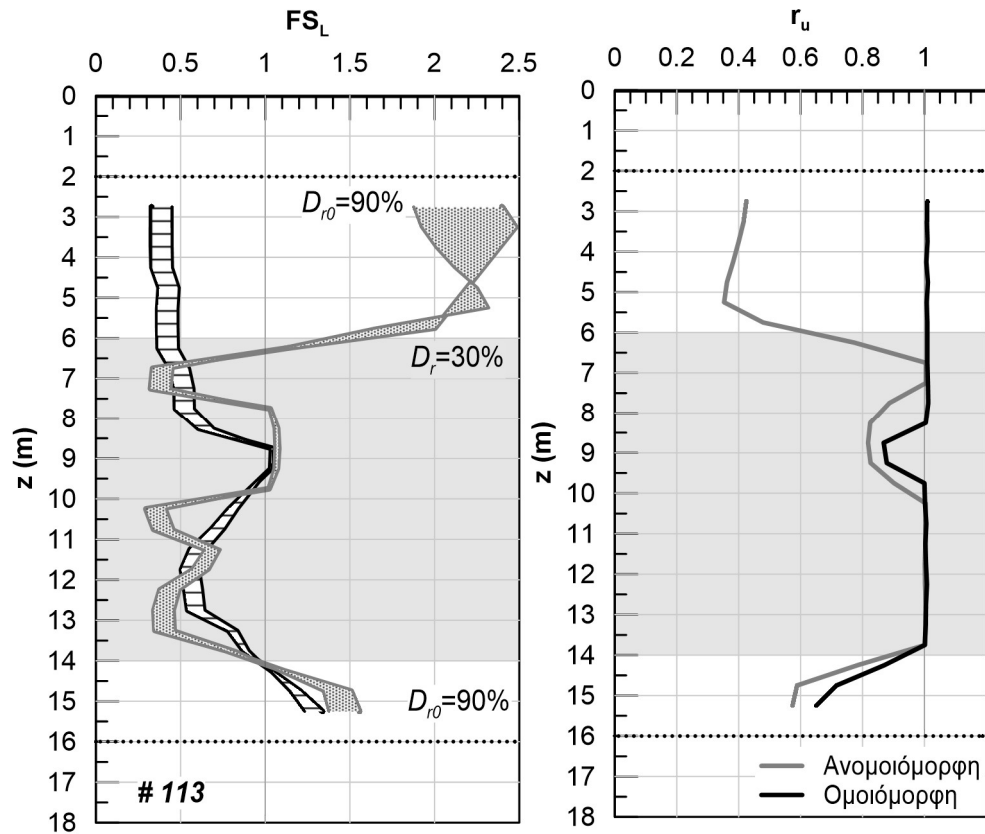
Σχήμα Β.94: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #110.



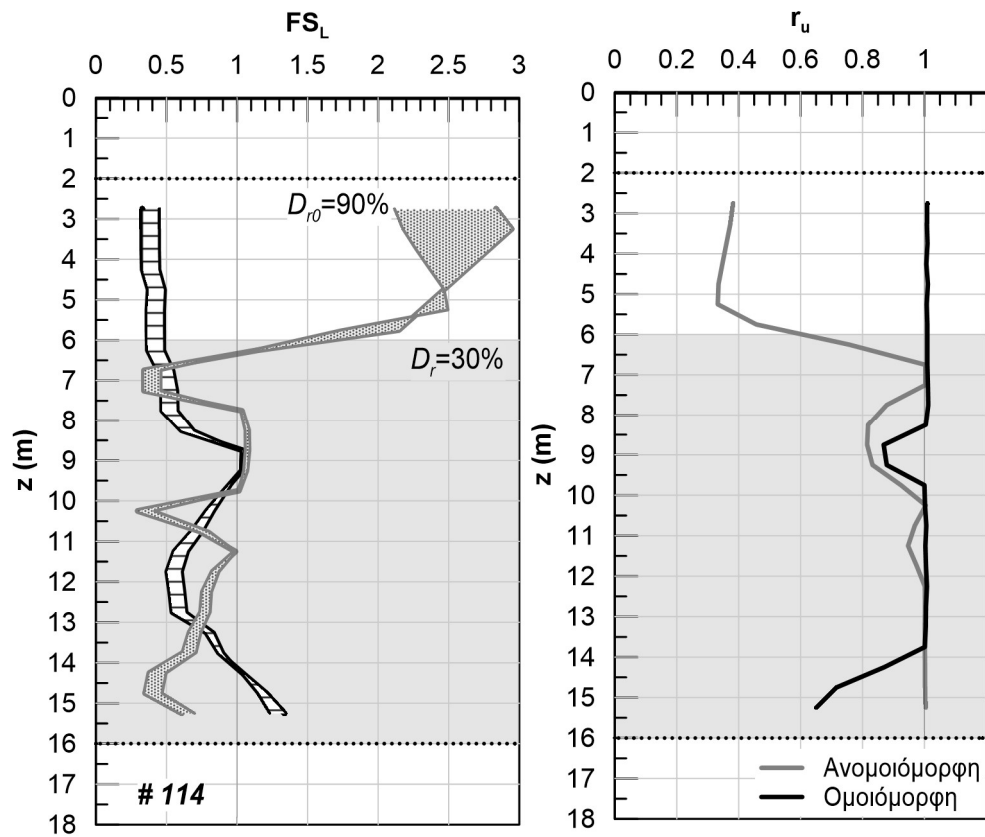
Σχήμα Β.95: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #111.



Σχήμα Β.96: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #112.



Σχήμα Β.97: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #113.



Σχήμα Β.98: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης με αύξοντα αριθμό #114.