ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΥΠΟ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ

Ρευστοποιημένη Στρώση Μεταβλητού Πάχους

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Ι. ΘΕΟΧΑΡΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: **ΓΕΩΡΓΙΟΣ Δ. ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ**

Καθηγητής ΕΜΠ



DIPLOMA THESIS

NUMERICAL ANALYSIS OF LIQUEFIED GROUND RESPONSE UNDER HARMONIC SEISMIC EXCITATION

Variable Thickness of Liquefied Layer

ALEXANDROS I. THEOCHARIS

Supervisor: **GEORGE D. BOUCKOVALAS**

Professor N.T.U.A.

Νοέμβριος/November 2011

Ευχαριστίες

Κατ'αρχάς, επιθυμώ να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τα αδέρφια μου, τη γιαγιά μου και την ευρύτερη οικογένεια μου για τη συνολική στήριξη τους στις σπουδές μου αλλά και στη ζωή μου γενικότερα. Επίσης, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους φίλους και στις φίλες μου αλλά και σε όσους με στήριξαν την περίοδο της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους με τους οποίους συνεργάστηκα και με υποστήριξαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας και των οποίων η συμβολή και η παρουσία ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της.

Καθοριστικότερη ήταν η συμβολή του επιβλέποντος καθηγητή κ. Γεωργίου Μπουκοβάλα. Η πολύτιμη καθοδήγηση του βοήθησε στην οργάνωση και συγγραφή της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Με τις γνώσεις του, την ερευνητική του και την διδακτική του εμπειρία διαδραμάτισε καταλυτικό ρόλο στην ολοκλήρωση της εργασίας. Η συνεργασία μαζί του ήταν, θεωρώ, εξαιρετική.

Επίσης, επιθυμώ να ευχαριστήσω εγκαρδίως τον υποψήφιο διδάκτορα Γιάννη Χαλούλο για τη γενικότερη συμβολή του και την αμέριστη βοήθεια του, τον Δημήτρη Καραμήτρο και την Βασιλική Δημητριάδη για την σημαντική, συνολική συμμετοχή τους στην Διπλωματική Εργασία.

Περιεχόμενα i
Table of contents v
Περίληψη ix
Summary xi

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
1.1 Εισαγωγή 1
1.2 Δομή Διπωματικής Εργασίας 3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ 6
2.1 Γενικά 6
2.2 Βασική Ανάλυση 6
2.2.1 Διακριτοποίηση 6
2.2.2 Καταστατικά Προσομοιώματα Εδάφους 7
2.2.3 Σεισμική Διέγερση 10
2.2.4 Υστερητική Απόσβεση Ενέργειας 11
2.2.5 Συνοριακές Συνθήκες 11
2.2.6 Τυπικά Αποτελέσματα 12
2.3 Βελτιστοποίηση των Αριθμητικών Αναλύσεων 18
2.3.1 Βελτιστοποίηση Καννάβου 18
2.3.2 Βελτιστοποίηση ως προς το Προσομοίωμα της Αργίλου 23
2.3.3 Βελτιστοποίηση ως προς την Ιξωδοελαστική Απόσβεση της Άμμου 28
2.4 Δείκτες Ποσοτικής Περιγραφής του Προβλήματος 31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ 27
3.1 Γενικά 27
3.2 Επίδραση Ταχύτητας Διατμητικού Κύματος (V_{so}) της Αργίλου Βάσης 29

3.3 Επίδραση Πάχους της Αργιλικής Επικάλυψης 33

3.4 Επίδραση του Δείκτη Πόρων του Στρώματος της Άμμου 37

3.5 Επίδραση Διαπερατότητας του Στρώματος της Άμμου 41

3.6 Επίδραση Περιόδου Διέγερσης 45

3.7 Επίδραση Μέγιστης Επιτάχυνσης Διέγερσης 49

3.8 Συμπεράσματα 53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΕΔΑΦΟΣ 54

4.1 Γενικά 54

4.2 Μεθοδολογία Υπολογισμού Μέσης Ταχύτητας Μετάδοσης Σεισμικού Κύματος 54

4.3 Σύγκριση με την Απόκριση Ισοδύναμου Ελαστικού Μέσου 56

4.4 Παράμετροι που Επιδρούν στην Ταχύτητα Μετάδοσης Σεισμικού Κύματος σε Ρευστοποιημένο Έδαφος 64

Επίδραση Vs της Αργίλου Βάσης 65

Επίδραση Πάχους της Αργιλικής Επικάλυψης 66

Επιδραση Σχετικής Πυκνότητας της Άμμου 67

Επίδραση Διαπερατότητας της Άμμου 68

Επίδραση Περιόδου Διέγερσης 70

Επίδραση Μέγιστης Επιτάχυνσης Διέγερσης 71

Συμπεράσματα 72

4.5 Στατιστική Επεξεργασία 72

Vs της Αργίλου Βάσης 72

Πάχος της Αργιλικής Επικάλυψης 73

Δείκτης Πόρων της Άμμου 74

Διαπερατότητα της Άμμου 75

Περιόδος Διέγερσης 76

Μέγιστη Επιτάχυνση Διέγερσης 77

Συμπεράσματα 78

4.6 Σύνοψη 79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΚΡΙΣΙΜΟ ΠΑΧΟΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ 83

5.1 Γενικά 83

5.2 Ορισμός Κρίσιμου Πάχους 83

5.3 Παράμετροι που Επιδρούν στο Κρίσιμο Πάχος της Άμμου 87

Επίδραση Vs της Αργίλου Βάσης 87

Επίδραση Πάχους της Αργιλικής Επικάλυψης 89

Επιδραση Σχετικής Πυκνότητας της Άμμου 90

Επίδραση Διαπερατότητας της Άμμου 92

Επίδραση Περιόδου Διέγερσης 93

Επίδραση Μέγιστης Επιτάχυνσης Διέγερσης 95

Συμπεράσματα 96

5.4 Συσχέτιση Κρίσιμου Πάχους Άμμου με το Μήκος Κύματος του Ρευστοποιημένου Εδάφους 96

Γενικά 96

Υπολογισμός Μήκους Κύματος Ρευστοποιημένου Εδάφους 96

Συσχέτιση Κρίσιμου Πάχους Άμμου και Μήκους Κύματος Ρευστοποιημένου Εδάφους 97

5.5 Συμπεράσματα 100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ 102

6.1 Γενικά 102

6.2 Προσομοίωμα Αναλυτικής Μεθόδου και Βασικές Εξισώσεις Επίλυσης 103

6.3 Παραμετρική Ανάλυση του Λόγου Ενίσχυσης 106

Λόγος Υστερητικής Απόσβεσης 107

Φαινόμενη Πυκνότητα 108

Ταχύτητα Διατμητικού Κύματος της Αργιλικής Επικάλυψης 109

Ταχύτητα Διατμητικού Κύματος της Ρευστοποιημένης Άμμου 111

Πάχος της Αργιλικής Επικάλυψης 112

Περίοδος Διέγερσης 113

6.4 Σύγκριση Αναλυτικής και Αριθμητικής Επίλυσης 114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 117

7.1 Συμπεράσματα 117

7.2 Σχόλια – Προτάσεις 119

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 121

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α A1

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β B1

Table of contents v
Summary xi

CHAPTER 1: INTRODUCTION 1
1.3 Introduction 1
1.4 Structure of Thesis 3

CHAPTER 2: NUMERICAL METHOD 6
2.1 Introduction 6
2.2 Basic Analysis 6
2.2.1 Discretization 6
2.2.2 Soil Models 7
2.2.3 Seismic Excitation 10
2.2.4 Hysteretic Damping Energy 11
2.2.5 Boundary Conditions 11
2.2.6 Typical Results 12
2.3 Optimization of Numerical Analysis 18
2.3.1 Mesh Optimization 18
2.3.2 Optimization of Clay Model 23
2.3.3 Optimization of Sand's Viscous-elastic Damping 28
2.4 Indicators of Problem's Quantitative Description 31

CHAPTER 3: IMPORTANT PARAMETERS 27
3.1 Introduction 27
3.2 Effect of Shear Velocity (V_{so}) of Base Clay 29
3.3 Effect of Thickness of Clay Crust 33
3.4 Effect of Void Ratio of Sand 37

3.5 Effect of Permeability of Sand 41

3.6 Effect of Period of Seismic Excitation 45

3.7 Effect of Maximum Acceleration of Seismic Excitation 49

3.8 Conclusions 53

CHAPTER 4: SEISMIC'S WAVE PROPAGATION VELOCITY IN LIQUEFIED SOIL 54

4.1 Introduction 54

4.2 Computational Method of Seismic's Wave Propagation Velocity 54

4.3 Comparison with the Response of Equivalent Elastic Model 56

4.4 Parameters which Effect Seismic's Wave Propagation Velocity in liquefied soil 64

Effect of Vs of Base Clay 65

Effect of Thickness of Clay Crust 66

Effect of Relative Density of Sand 67

Effect of Permeability of Sand 68

Effect of Period of Seismic Excitation 70

Effect of Maximum Acceleration of Seismic Excitation 71

Conclusions 72

4.5 Statistical Analysis 72

Vs of Base Clay 72

Thickness of Clay Crust 73

Relative Density of Sand 74

Permeability of Sand 75

Period of Seismic Excitation 76

Maximum Acceleration of Seismic Excitation 77

Conclusions 78

4.6 Synopsis 79

CHAPTER 5: SAND'S CRITICAL THICKNESS FOR COMPLETE SOIL LIQUEFACTION 83

5.1 Introduction 83

5.2 Definition of Critical Thickness 83

5.3 Parameters Effecting Sand's Critical Thickness 87

Effect of Vs of Base Clay 87

Effect of Thickness of Clay Crust 89

Effect of Relative Density of Sand 90

Effect of Sand's Permeability 92

Effect of Period of Seismic Excitation 93

Effect of Seismic Maximum Acceleration of Seismic Excitation 95

Conclusions 96

5.4 Correlation of Sand's Critical Thickness with the Wave Length of the Liquefied Soil 96

General 96

Computation of Liquefied Soil's Wave Length 96

Correlation of Sand's Critical Thickness with the Wave Length of the Liquefied Soil 97

5.5 Conclusions 100

CHAPTER 6: ANALYTICAL INVESTIGATION OF SEISMIC RESPONSE OF LIQUEFIED SOIL 102

6.1 General 102

6.2 Analytical Model and Basic Equations 103

6.3 Parametric Investigation of Amplification Ratio 106

Hysteretic Damping Ratio 107

Bulk Density 108

Clay's Crust Shear Velocity (V_{so}) 109

Liquefied Sand's Shear Velocity (V_{so}) 111

Clay's Crust Thickness 112

Seismic Excitation's Period 113

6.4 Comparison between Analytical and Numerical Analysis 114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: CONCLUSIONS - SUGGESTIONS 117

7.1 Conclusions 117

7.2 Comments – Suggestions 119

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: REFERENCES 121

APPENDIX A A1

APPENDIX B B1

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αφορά το φαινόμενο της ρευστοποίησης κορεσμένων, μη συνεκτικών εδαφών λόγω ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων κατά τη διάρκεια σεισμικής διέγερσης. Πιο συγκεκριμένα, διερευνάται το φαινόμενο της επίδρασης του πάχους του ρευστοποιήσιμου στρώματος στην απόκριση του εδάφους και ειδικότερα στην απόσβεση της σεισμικής κίνησης στην επιφάνεια του εδάφους λόγω του ρευστοποιημένου στρώματος.

Το σύνολο σχεδόν της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Αφού οριστικοποιήθηκε η μεθοδολογία επίλυσης (κεφάλαιο 2), έγιναν παραμετρικές αναλύσεις ώστε να προσδιορισθούν ποιοτικά και ποσοτικά οι υπόλοιπες παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο. Στο τέλος πραγματοποιήθηκε και αναλυτική επίλυση, βασισμένη στην θεωρία 1-Δ διάδοσης σεισμικών κυμάτων στο εδαφος, ώστε να συγκριθεί με τα αριθμητικά αποτελέσματα.

Τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από την εργασία είναι τα εξής:

(α) Με γνώμονα το πάχος της ρευστοποιήσιμης άμμου προκύπτουν τρεις περιοχές:

- Για μικρά πάχη άμμου, η επιτάχυνση δεν απομειώνεται καθόλου στην επιφάνεια και παρατηρείται έντονη διαστολικότητα στην άμμο,
- Για μεγάλα πάχη άμμου, η ρευστοποίηση γίνεται αντιληπτή με τα συνήθη χαρακτηριστικά της, και
- Για μεσαία πάχη άμμου όπου εμφανίζεται μια μεταβατική περιοχή από τη μια κατάσταση στην άλλη.

(β) Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν, ποσοτικά κυρίως, το φαινόμενο είναι η διαπερατότητα και ο αρχικός δείκτης πόρων της άμμου και η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης.

(γ) Είναι εφικτό να υπολογιστεί μια μέση τιμή της ταχύτητας του διατμητικού κύματος στην ρευστοποιημένη άμμο. Η εν λόγω ταχύτητα αποδείχτηκε ίση περίπου με το 1/3 της αρχικής ταχύτητας διατμητικού κύματος στο στρώμα αυτό ($V_s/V_{so} \approx 0.25$-0.40).

(δ) Με βάση τέσσερεις δείκτες που περιγράφουν το λόγο της κίνησης στη κορυφή προς τη βάση της άμμου και την ανάπτυξη των υπερπιέσεων πόρων

στην άμμο, προκύπτει ότι η περιοχή πλήρους ρευστοποίησης και ουσιατικής απόσβεσης της σεισμικής κίνησης στην επιφάνεια, βρίσκεται εκεί όπου ισχύει: $I_{arias}<0.2$ ή $I_{abs}<0.4$ ή $I_{rms}<0.4$ ή τέλος $r_{uav}>0.8$

(ε) Αντίστοιχα, με βάση εκ τις των προτέρων γνωστές εδαφικές συνθήκες και τα φασματικά χαρακτηριστικά της σεισμικής δόνησης, προκύπτει ότι το ελάχιστο (κρίσιμο) πάχος που απαιτείται προκειμένου να έχουμε απόσβεση της σεισμικής κίνησης στην απιφάνεια του εδάφους ισούται με 0.25-0.45 του μήκους κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος ($H_{cr} / \lambda_{liq} =0.25-0.45$).

(στ) Η αναλυτική θεώρηση του φαινομένου, με χρήση της θεωρίας κυματικής διάδοσης σε συνεχές μέσο, προσεγγίζει με ικανοποιητική ποιοτική ακρίβεια τα αποτελέσματα της αριθμητικής διερεύνησης, αλλά οδηγεί σε συστηματικά μεγαλύτερες τιμές του κρίσιμου πάχους του ρευστοποιημένου στρώματος.

(ζ) Η διερεύνηση του φαινομένου θα πρέπει να συνεχισθεί, με κύριους άξονες την επιβεβαίωση των θεωρητικών προβλέψεων με βάση σεισμικές καταγραφές από πραγματικούς σεισμούς, την επέκταση των συμπερασμάτων για πραγματικές (μη αρμονικές) δονήσεις, την συστηματική διερεύνηση της απόκρισης του εδάφους για τις περιπτώσεις πολύ μικρού και μεσαίου πάχους ρευστοποιήσιμου στρώματος, καθώς και την επίδραση του πάχους του ρευστοποιημένου στρώματος στις υπόλοιπες πτυχές του φαινομένου της ρευστοποίησης, όπως η καθίζηση του εδάφους και η «οριζόντια εξάπλωση» (lateral spreading).

SUMMARY

The present Diploma Thesis is concerning liquefaction of saturated, cohesionless soils due to the build-up of excess pore water pressure during dynamic loading. More specifically, we investigate the Effect of the thickness of the sand layer on the response of the ground soil and particularly on the decrease of the seismic motion through the liquefied layer.

Almost the whole analysis has been carried out by using the finite differences method (numerical analysis). After finalizing the numerical method (chapter 2), we have done some parametric analysis in order to determine qualitatively and quantitatively the other parameters that affect the phenomenon. Finally, an analytical approach was made, based on the theory of wave propagation through soil layers, so that the results would be compared with the numerical ones.

The basic conclusions from this project are:

(a) Based on the thickness of the liquefiable layer, we identify three different areas :

- For small thickness of sand the acceleration is not decreased at all on the ground surface and there is pretty intense dilation in the sand
- For large thickness of sand, liquefaction is observed having it's usual characteristics
- For medium thickness a transitional area, between the two previous, is presented

(b) Other parameters which affect, mainly quantitatively, this phenomenon are the permeability and the void ratio of the sand and the dominant period of the seismic motion

(c) It is possible to estimate an average value for the velocity of the shear wave into the liquefied sand. This velocity has been proven about equal to the 1/3 of the initial shear wave's velocity of this layer ($V_s/V_{so} \approx 0.25\text{-}0.40$).

(d) Based on four indicators which describe the ratio of the motion above and below the sand layer and the build-up of the excess pore pressure in the sand, we resulted that the area where complete liquefaction and substantial decrease of the seismic motion is observed, is described as below:

I_{arias}<0.2 or I_{abs}<0.4 or I_{rms}<0.4 or finally r_{uav}>0.8

(e) Respectively, knowing beforehand the ground conditions and the spectral characteristics of the seismic motion, the minimum (critical) thickness in order to have substantial decrease of the seismic motion on the ground surface equals 0.25-0.45 of the wave length in the liquefied sand (H_{cr} / λ_{liq} =0.25-0.45).
(f) The analytical approach of this phenomenon, realized using the wave propagation continuum theory, give out satisfying qualitative results in agreement with the numerical ones, but leads systematically to larger values of the critical thickness of the liquefied layer
(g) The investigation of this phenomenon should be continued, basically by confirming the theoretical predictions with real ground recordings of real seismic motions, by extending the conclusions for real (non harmonic) motions and by systematically investigating the ground response for medium and small thickness of sand. Last but not least, the investigation should include the Effect of the thickness of the sand on the rest of the aspects of liquefaction such as sedimentation and lateral spreading.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

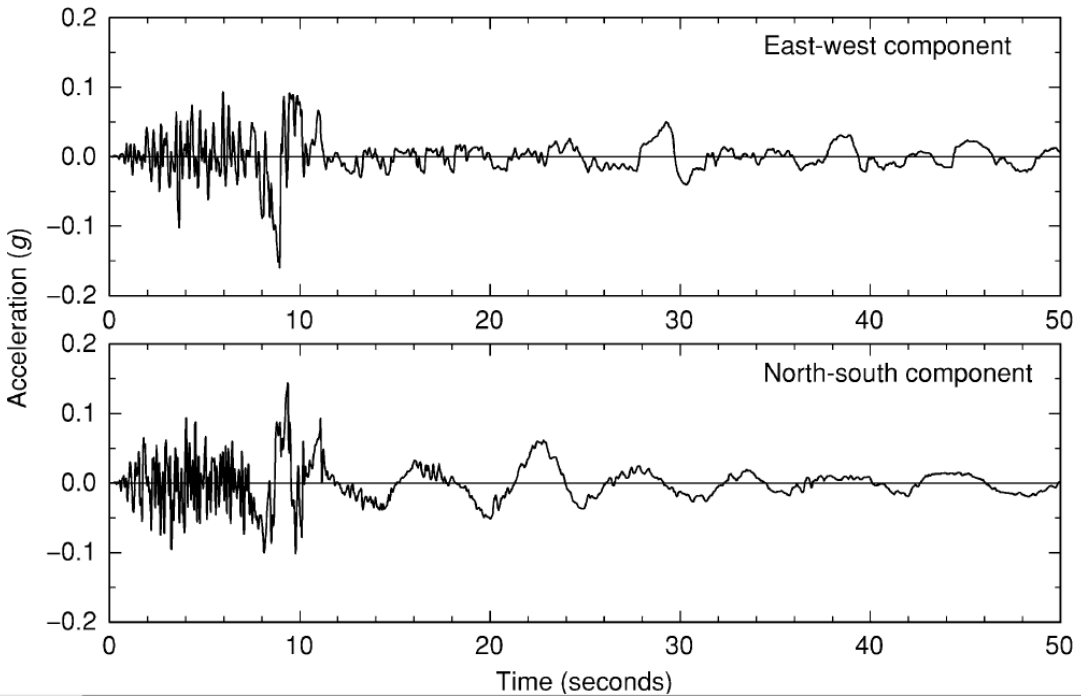
1.1 Εισαγωγή

Ως γνωστόν κατά την σεισμική δόνηση μη συνεκτικών εδαφών (άμμων με ή χωρίς μικρά ποσοστά ιλύος και αργίλου) υπό τον υδροφόρο ορίζοντα είναι δυνατόν να επέλθει «ρευστοποίηση». Με τον όρο αυτόν αναφερόμαστε σε μία κατάσταση κατά την οποία οι ενεργές τάσεις έχουν σχεδόν μηδενιστεί στην άμμο, λόγω ανάπτυξης υπερπιέσεων πόρων κατά τη σεισμική φόρτιση. Αυτό έχει τις ακόλουθες βασικές συνέπειες επί της μηχανικής συμπεριφοράς της ρευστοποιημένης εδαφικής στρώσης , αλλά και της συνολικής στρωματογραφίας στην οποία περιλαμβάνεται η στρώση αυτή:

1. Η διατμητική αντοχή της στρώσης μειώνεται δραματικά. Υπενθυμίζεται ότι για στραγγιζόμενες συνθήκες φόρτισης, η διατμητική αντοχή, η διατμητική αντοχή μη συνεκτικών εδαφών εκφράζεται ως :

   $$\tau_\alpha = \sigma_v' \tan\varphi = (\sigma_{vo}' - \Delta u) \tan\varphi$$

   και όταν η υπερπίεση των πόρων Δu προσεγγίζει την αρχική κατακόρυφη τάση στερεοποίησης σ_{vo}', η διατμητική αντοχή τ_α τείνει να μηδενιστεί.
2. Το ανώτερω έχει ως συνέπεια την αστοχία θεμελιώσεων και πρανών επιχωμάτων που εδράζονται στην ελεύθερη επιφάνεια της εδαφικής στρωματογραφίας, ακόμη και όταν ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας χωρίς ρευστοποίηση είναι πολύ πιο μεγάλος από 1.00
3. Μετά το πέρας της σεισμικής δόνησης, η σταδιακή εκτόνωση των υδατικών υπερπιέσεων οδηγεί σε συσσώρευση καθίζησης.
4. Η μείωση της ενεργού τάσης από σ_{vo}' σε σ_{vo}' - Δu έχει επιπλέον ως συνέπεια τη μείωση της δυστμησίας του ρευστοποιημένου στρώματος, δεδομένου ότι το ελαστικό μέτρο διάτμησης G_o είναι ανάλογο προς την τετραγωνική ρίζα του σ_v'. Ως εκ τούτου, το ρευστοποιημένο στρώμα λειτουργεί ως «φυσική σεισμική μόνωση» και απομειώνει δραστικά τις σεισμικές επιταχύνσεις στην επιφάνεια του εδάφους (βλ. Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 : Καταγραφές οριζόντιας συνιστώσας επιτάχυνσης στη Niigata της Ιαπωνίας στο σεισμό του 1964. Η περιοχή γύρω από το σταθμό έπαθε μεγάλες βλάβες λόγω ρευστοποίησης. (Bird, Boulanger & idriss, 2005)

Το εύλογο ερώτημα που μας δημιουργήθηκε και αποτέλεσε το έναυσμα για την παρούσα διπλωματική εργασία είναι κατά πόσο η ανώτερη μηχανική συμπεριφορά και τα αποτελέσματα της ρευστοποίησης εμφανίζονται ανεξάρτητα του πάχους της ρευστοποιημένης στρώσης. Για παράδειγμα η απομείωση των σεισμικών επιταχύνσεων του εδάφους θα προκύψει ανεξάρτητα εαν η ρευστοποιημένη στρώση έχει πάχος 10cm, 1m ή 10m; Επιπλέον, υπάρχει και ποιο είναι το κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου πάνω από το οποίο τα αποτελέσματα της ρευστοποίησης γίνονται εμφανή στην επιφάνεια του εδάφους;

Αρχικά ανατρέξαμε στη διεθνή βιβλιογραφία προς αναζήτηση θεωρητικών ή και πειραματικών απαντήσεων στα παραπάνω ερωτήματα. Δυστυχώς, τα ευρύματα μας ήταν ελάχιστα χρήσιμα. Πιο συγκεκριμένα οι Youd & Carter, το 2003 σε αναφορά τους ασχολήθηκαν με την επίδραση της ρευστοποίησης στα φάσματα απόκρισης που χρησιμοοποιούνται για το σχεδιασμό των γεφυρών. Εκεί γίνεται ανάλυση περασμένων περιστατικών ρευστοποίησης όπου αναφέρεται το πάχος της ρευστοποιήσιμης άμμου, αλλά δεν

περαγματοποιείται περαιτέρω συσχέτιση του πάχους αυτού με το φαινόμενο της ρευστοποίησης.

Επίσης, οι Taiebat et al, 2010 ασχολήθηκαν με την διάδοση κύματος σε ρευστοποιημένη άμμο μέσω της χρήσης αριθμητικής προσομοίωσης. Για τους σκοπούς της διερεύνησης τους χρησιμοποιήθηκε πάχος επαρκές ώστε να ρευστοποιείται πλήρως η άμμος, αλλά μέσα από την παρουσίαση των επιταχύνσεων καθ'ύψος του ρευστοποιημένου στρώματος φαίνεται ότι για μικρότερο πάχος η κατάσταση θα ήταν διαφορετική.

Τέλος, σε ένα άρθρο τους οι X.Lu & P.Kui διερεύνησαν το φαινόμενο της ρευστοποίησης εδάφους λόγω «ταλάντωσης» της πίεσης πόρων, διαφορετικό εν γένει από τη ρευστοποίηση λόγω σεισμικών κυμάτων. Παρόλαυτα, στην παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιούν λαμβάνουν υπ'όψιν τους το πάχος του ρευστοποιήσιμου εδάφους και εκεί γίνεται εμφανής η επίδραση του πάχους στη ρευστοποίηση. Παρότι δεν πρόκειται για το ίδιο φαινόμενο τα αποτελέσματα προκύπτουν παρεμφερή με αυτά στα οποία καταλήξαμε.

Ελλείψη λοιπόν ικανοποιητικών απαντήσεων, αποφασίσαμε να διερευνήσουμε το θέμα, με τη βοήθεια αριθμητικών αναλύσεων με εξιδικευμένο λογισμικό που έχει αναπτυχθεί για ανάλογες εφαρμογές στο εργαστήριο θεμελιώσεων του ΕΜΠ. Εξυπακούεται, ότι αυτό αποτελεί ένα πρώτο βήμα της έρευνας στο χώρο αυτό και τα οποιαδήποτε ευρήματα και συμπεράσματα θα πρέπει να επιβεβαιωθούν από πραγματικές σεισμικές καταγραφές ελεύθερου πεδίο, σε θέσεις με γνωστή γεωτεχνική σύνθεση, ή από ανάλογα πειράματα φυγοκεντριστή ή μεγάλης σεισμικής τράπεζας.

1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας

Τα βήματα που ακολουθήσαμε για την επίτευξη του στόχου της διπλωματικής εργασίας είναι τα ακόλουθα:

Βήμα 1: Βαθμονόμηση και έλεγχος της αριθμητικής μεθοδολογίας (κεφάλαιο 2)

Επελέγη το εδαφικό προφίλ των αναλύσεων καθώς και η προσομοίωση με τη μέθοδο της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης πεπερασμένων διαφορών. Οι

παραμετρικές αναλύσεις που έγιναν στο βήμα αυτό είχαν σκοπό να ελέγξουν την διακριτοποίηση των εδαφικών στρώσεων σε ζώνες, καθώς και τις παραδοχές σχετικά με την αριθμητική προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των εδαφικών στρώσεων, έτσι ώστε τα αποτελέσματα των αναλύσεων να είναι αξιόπιστα.

Βήμα 2: Αναγνώριση των βασικών παραμέτρων του προβλήματος (κεφάλαιο 3)

Προκειμένου να προχωρήσουμε στην πλήρη παραμετρική διερεύνηση του προβλήματος, θεωρήθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί ποιές από τις παραμέτρους του εδάφους (πυκνότητα και διαπερατότητα ρευστοποιήσιμης στρώσης, δυστμησία των υπερκείμενων και υποκείμενων αργιλικών στρώσεων) και της σεισμικής διέγερσης (δεσπόζουσα περίοδος, μέγιστη επιτάχυνση) έχουν εμφανή επίδραση στο εξεταζόμενο πρόβλημα.

Βήμα 3: Επίδραση ρευστοποίησης στην ταχύτητα μετάδοσης σεισμικών κυμάτων (κεφάλαιο 4)

Από τα βήματα που ακολουθούν αναδεικνύεται η σημασία της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών -διατμητικών- κυμάτων εντός του ρευστοποιημένου εδάφους, δεδομένου του ότι η παράμετρος αυτή καθορίζει εν πολλοίς το αντίστοιχο μήκος του σεισμικού κύματος. Έτσι, στο βήμα αυτό υπολογίζεται η τιμή της εν λόγω ταχύτητας καθώς και η συσχέτιση της με εκ των προτέρων γνωστές γεωτεχνικές και σεισμικές παραμέτρους.

Βήμα 4: Επίδραση πάχους ρευστοποιημένης στρώσης στη σεισμική απόκριση της επιφάνειας του εδάφους (κεφάλαιο 5)

Το κεφάλαιο αυτό αφιερώνεται στη σεισμική απόκριση της επιφάνειας του εδάφους, σε σχέσει με το πάχος της ρευστοποιημένης ζώνης, καθώς και στους παράγοντες που επιδρούν στη συσχέτιση αυτή. Απώτερος σκοπός της διερεύνησης αυτής αποτελεί η διατύπωση κριτηρίων για την πρόβλεψη της αναμενόμενης σεισμικής απόκρισης με βάση εκ των προτέρων γνωστών γεωτεχνικών και σεισμικών παραμέτρων.

Βήμα 5: Επίλυση του προβλήματος με αναλυτικές μεθόδους και σύγκριση με τα προηγούμενα αποτελέσματα (κεφάλαιο 6)

Για την επιβεβαίωση, όσο το δυνατόν, του φαινομένου που περιγράφηκε στα κεφάλαια 1 έως 5 χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικές μέθοδοι ώστε να επιλυθεί το πρόβλημα που εξετάζεται. Σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιείται η μέθοδος

διάδοσης κυμάτων και καταλήγουμε σε μια αναλυτική σχέση που να περιγράφει το εν λόγο φαινόμενο, η οποία και συγκρίνεται ως προς τα αποτελέσματα με την αριθμητική λύση του φαινομένου.

Στο κεφάλαιο 7, συνοψίζονται τελικώς τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διπλωματική εργασία, καθώς και οι προτεινόμενες κατευθύνσεις για συνέχιση της έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

2.1 Γενικά

Για τη διερεύνηση του προβλήματος έγιναν αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών, χρησιμοποιώντας ως βασική παράμετρο το πάχος του ρευστοποιήσιμου εδάφους. Εν αρχή, επιλέχθηκε μια τυπική περίπτωση προκειμένου να προσδιορισθεί σε ποιοτική προσέγγιση το φαινόμενο της επίδρασης του πάχους. Κατόπιν, διεξήχθησαν προκαταρκτικές παραμετρικές αναλύσεις ώστε να βελτιστοποιηθεί το αριθμητικό προσομοίωμα και να επιλεγούν οι βασικοί δείκτες ποσοτικοποίησης του προβλήματος

2.2 Βασική ανάλυση

2.2.1 Διακριτοποίηση

Θεωρήθηκε κάναβος που να προσομοιώνει στήλη εδάφους με πλάτος 3m. Το ύψος του κανάβου ορίζεται κυρίως από το μέγιστο πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης, το οποίο αποτελεί τη βασική παράμετρο της ανάλυσης. Το πάχος αυτό αποφασίστηκε να μεταβάλλεται από 0m έως και 12m. Όπως θα φανεί και από τα αποτελέσματα που ακολουθούν, με αυτό το εύρος διακύμανσης του πάχους λαμβάνονται όλοι οι διαφορετικοί τύποι συμπεριφοράς του εδάφους, δηλαδή από την αρχική κατάσταση όπου η ρευστοποίηση δε γίνεται αισθητή στην επιφάνεια του εδάφους, έως την κατάσταση όπου πλέον η ρευστοποίηση είναι προφανής.

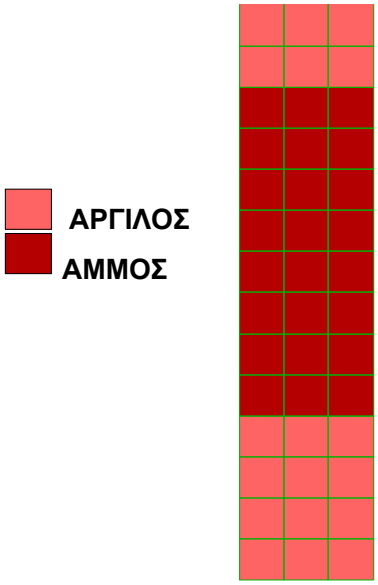
Επιπλέον, τοποθετήθηκε άργιλος πάχους 2m πάνω από τη ρευστοποιήσιμη άμμο, καθώς και άργιλος κάτω από αυτή, ώστε να προσομοιώνεται στρώση άμμου που ρευστοποιείται ανάμεσα από άλλα δύο μη ρευστοποιήσιμα στρώματα.

Συνεπώς, το συνολικό ύψος της στήλης εδάφους είναι ίσο προς 14m, με τα δύο ανώτερα μέτρα να αποτελούνται από αργιλικό έδαφος και τα υπόλοιπα 12m να αποτελούνται από ρευστοποιήσιμη άμμο μεταβλητού πάχους επί μίας

βασικής στρώσης αργίλου (**Σχήμα 2.1**). Στην αρχική περίπτωση επιλέχθηκε η διακριτοποίηση του κανάβου να γίνει με στοιχεία (ζώνες) διαστάσεων 1m x 1m και κατόπιν διενεργήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις ώστε να βελτιστοποιηθεί η εν λόγω διακριτοποίηση του κανάβου.

2.2.2 Καταστατικά προσομοιώματα εδάφους

Για την άμμο χρησιμοποιήθηκε ένα νέο καταστατικό προσομοίωμα ενσωματωμένο στο λογισμικό Πεπερασμένων Διαφορών FLAC (version 5.00), το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ. Σε πρώτη φάση, το εν λόγω προσομοίωμα καταστρώθηκε από τους Α.Παπαδημητρίου και



Σχήμα 2.1 : Κάνναβος αναλύσεων για 8m ρευστοποιήσιμης άμμου και 4m αργίλου βάσης

Γ.Μπουκοβάλας (2002) και πήρε την οριστική του μορφή στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Κ. Ανδριανόπουλου (Ανδριανόπουλος, 2000). Το καταστατικό αυτό προσομοίωμα αναφέρεται σε μη-συνεκτικά εδαφικά υλικά (άμμος με ή χωρίς ιλύ) και βασίζεται στις θεωρίες της πλαστικότητας και της κρίσιμης κατάστασης για να αναπαράγει υπολογιστικά την απόκριση των εδαφικών στοιχείων στις καταστάσεις :

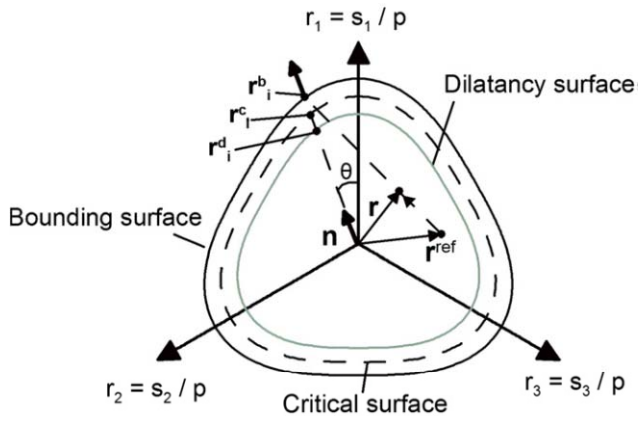
- Μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης
- Στραγγιζόμενων και αστράγγιστων συνθηκών φόρτισης,
- Μικρών, μεσαίων και μεγάλων ανακυκλικών παραμορφώσεων,

- Διαφορετικών πυκνοτήτων όγκου, και
- Διαφορετικών αρχικών τάσεων στερεοποίησης.

Βασικό χαρακτηριστικά του προσομοιώματος είναι η επαρκής προσομοίωση της διαστολικότητας του εδάφους, της χαλάρωσης και αλλαγής της δομής του σε μεγάλες παραμορφώσεις, της ανάπτυξης υδατικών υπερπιέσεων, καθώς και της συσσώρευσης μόνιμων παραμορφώσεων κατά την ανακυκλική φόρτιση. Συνδυάζονται με επιτυχία η απόκριση του υλικού με την παράμετρο κατάστασης ψ (Been and Jefferies, 1985), η οποία ενοποιεί την επίδραση τόσο των ενεργών τάσεων όσο και της σχετικής πυκνότητας σε μια μόνο παράμετρο.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του προσομοιώματος είναι η θεώρηση σημειακής επιφάνειας διαρροής (**Σχήμα 2.2**) με επακόλουθο την ελαστοπλαστική απόκριση του υλικού σε κάθε υπολογιστικό βήμα. Αυτό σημαίνει ότι η μετάβαση από μικρές σε μεγάλες παραμορφώσεις διεξάγεται ομαλά, γεγονός που προσδίδει αριθμητική ευστάθεια στο προσομοίωμα. Παράλληλα, επιτυγχάνεται μείωση του υπολογιστικού χρόνου, εφόσον απλοποιείται η αριθμητική ολοκλήρωση της σχέσης τάσεων – παραμορφώσεων.

Η ενσωμάτωση του καταστατικού προσομοιώματος στο λογισμικό πραγματοποιείται μέσω μιας εξωτερικής υπορουτίνας, η οποία ενεργοποιείται σε κάθε υπολογιστικό βήμα (User Defined Model ή UDM). Με γνωστή, σε κάθε βήμα, την επαύξηση των παραμορφώσεων υπολογίζεται η επαύξηση των τάσεων με την ολοκλήρωση των ανάλογων καταστατικών εξισώσεων.



Σχήμα 2.2 : Επιφάνειες διαρροής του καταστατικού προσομοιώματος (Andrianopoulos et al, 2010)

Η βαθμονόμηση του καταστατικού προσομοιώματος έχει γίνει σε σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα για λεπτόκοκκη άμμο (Nevada sand). Ως βάση για την προσαρμογή χρησιμοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές που έγιναν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος VELACS (Arulmoli et al, 1999) .

Επισημαίνεται ότι στο παρελθόν έχει γίνει εκτεταμένη χρήση του προσομοιώματος αυτού με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, τόσο σε παλαιότερες Διπλωματικές εργασίες (Θεοδώρου Αθηνά & Ιωσήφ Κωνσταντίνα, 2007), (Δημητριάδη Βασιλική, 2008) όσο και σε διδακτορικές διατριβές, (Ανδριανόπουλος Κ., 2000), (Καραμήτρος Δ., 2010), (Βαλσαμής Αλ., 2010).

Στην προκειμένη περίπτωση, η άμμος θεωρείται πλήρως κορεσμένη με ξηρή πυκνότητα 1.6 Mg/m^3 και δείκτη πόρων e=0.61, έτσι ώστε η τελική κορεσμένη πυκνότητα να προκύπτει 2 Mg/m^3. Ο εν λόγω δείκτης πόρων αντιστοιχεί σε μια σχετική πυκνότητα 70%-80%. Η άμμος θεωρείται ότι κατά την ανάλυση παραμορφώνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες. Ο συντελεστής ουδέτερης ώθησης γαιών ισούται με K_o=0.5 και ισχύει για τις αρχικές ενεργές τάσεις, οπότε και ο αρχικός Λόγος Poisson που προκύπτει από τη θεωρία ελαστικότητας είναι ν=0.33.

Για τις αργίλους αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί το καταστατικό προσομοίωμα Ramberg-Osgood (1943), το οποίο προσομοιώνει τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους, συνδυασμένο με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb στις μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Για την παρούσα εφαρμογή, οι παράμετροι του προσομοιώματος επελέγησαν χρησιμοποιώντας τις πειραματικές καμπύλες G-γ και ξ-γ για αργιλικά εδάφη, με διαφορετικό δείκτη πλασιμότητας. Όπως προαναφέρθηκε, το καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιούμε είναι επιπλεόν εφοδιασμένο με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Έτσι επιλέγονται οι παράμετροι αντοχής για την εκάστοτε άργιλο ανάλογα με τον τύπο της ανάλυσης που θα διενεργηθεί (στραγγιζόμενες ή αστράγγιστες συνθήκες).

Και τα δύο αργιλικά στρώματα λαμβάνονται ως κορεσμένα με ξηρή πυκνότητα 1.6 Mg/m^3 και πορώδες 0.4, έτσι ώστε η τελική κορεσμένη πυκνότητα που προκύπτει να ισούται με 2 Mg/m^3. Ο δείκτης πλασιμότητας επιλέγεται να είναι

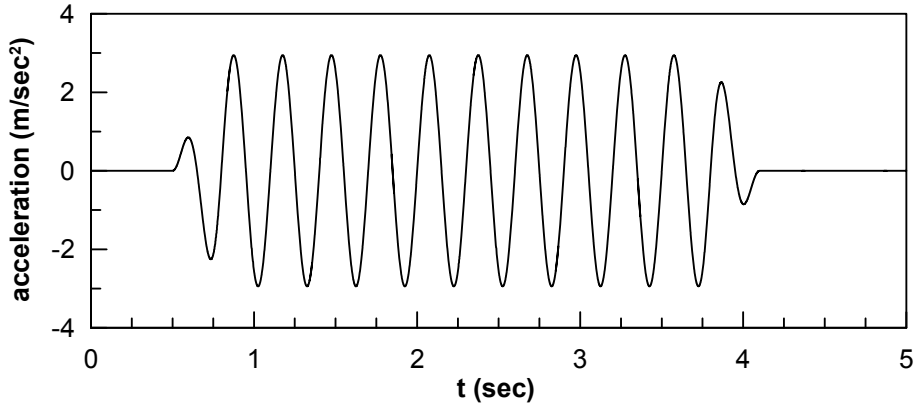
PI=30%. Για τις ελαστικές σταθερές του προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκε η σχέση G_o=1500c_u, για το αρχικό μέτρο διάτμησης, όπου c_u είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου. Και οι δύο άργιλοι θεωρείται ότι παραμορφώνονται υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Για το στρώμα της αργιλικής επικάλυψης, ορίστηκε c_u=15kPa, ώστε η άργιλος να μην αστοχεί εύκολα, οπότε και G_o=22500KPa. Ο συντελεστής οριζόντιας ουδέτερης ώθησης γαιών ορίστηκε σε K_o=0.5. Με τις σχέσεις της θεωρίας ελαστικότητας προκύπτουν και οι υπόλοιπες αρχικές, ελαστικές σταθερές· ο Λόγος Poison v=0.33, το μέτρο ελαστικότητας E=59850KPa και το μέτρο ισότροπης συμπίεσης K=59850KPa. Τα παραπάνω αντιστοιχούν σε μία ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_{so} = \sqrt{\frac{G_o}{\rho}}$ =106m/s.

Για το στρώμα της αργίλου βάσης, επιλέγεται μια αρκετά μεγαλύτερη τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, c_u=120kPa και έτσι προκύπτει και G_o=180000KPa. Ο συντελεστής οριζόντιας ουδέτερης ώθησης γαιών ορίστηκε ίδιος με την άργιλο της κορυφής, σε K_o=0.5. Και πάλι από τη θεωρία ελαστικότητας προκύπτουν ο Λόγος Poisson v=0.33, το μέτρο ελαστικότητας E=478800kPa και το μέτρο ισότροπης συμπίεσης K=478800kPa. Η ταχύτητα διατμητικού κύματος που προκύπτει για την άργιλο της βάσης είναι V_{so} =300m/s.

2.2.3 Σεισμική Διέγερση

Η βασική διέγερση επιλέχτηκε να έχει 10 ομοιόμορφους κύκλους, οι οποίοι αντιστοιχούν περίπου σε μέγεθος σεισμού M=6$\frac{3}{4}$, ώστε να εξασφαλίζεται η ρευστοποποίηση της άμμου. Επίσης, ορίστηκε περίοδος ίση προς 0.3sec, έτσι ώστε η συνολική διέγερση να διαρκεί περίπου 3sec, και επιλάχθηκε μέγιστη επιτάχυνση ίση προς 0.3g, που οδηγεί σε ρευστοποίηση της άμμο. Η εν λόγω διέγερση φαίνεται στο **Σχήμα 2.3**.



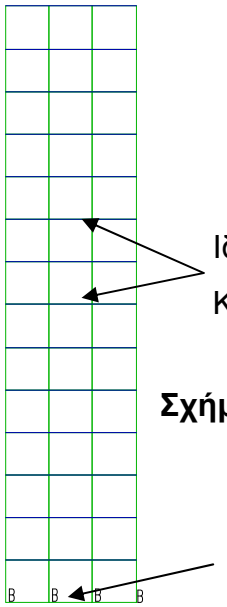
Σχήμα 2.3 : Βασική διέγερση στη βάση του προσομοιώματος

2.2.4 Υστερητική Απόσβεση Ενέργειας

Για τις αναλύσεις επιλέγεται μία απόσβεση τύπου «local damping» που να αντιστοιχεί σε αρχικό λόγο υστερητικής απόσβεσης ξ=2%. Η απόσβεση αυτή απαιτείται διότι τα αριθμητικά προσομοιώματα της αργίλου και της άμμου προβλέπουν μηδενική απόσβεση (λόγος ξ=0) για πολύ μικρές τιμές της διατμητικής παραμόρφωσης ($\gamma<10^{-5}$).

2.2.5 Συνοριακές συνθήκες

Στη βάση του κανάβου επιβάλλεται δέσμευση της οριζόντιας και της κατακόρυφης μετακίνησης, δεδομένου ότι στα σημεία αυτά ασκείται η σεισμική διέγερση οπότε δεν είναι εφικτή η χρήση άλλου τύπου συνόρων.



Σχήμα 2.4 : Δέσμευση στη βάση και δέσμευση στα αντικριστά σημεία με τα -μπλέ- καλώδια, των μετακινήσεων και στους δύο άξονες

Όσον αφορά τα σύνορα καθ'ύψος του καννάβου, θεωρούνται συνοριακές συνθήκες τέτοιες ώστε να προσομοιώνεται μια κατάσταση όπως στα laminar box των πειραματικών διατάξεων φυγοκεντριστή και σεισμικής τράπεζας. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ιδεατά «καλώδια» τα οποία δεσμεύουν τους απέναντι κόμβους ώστε αυτοί να έχουν την ίδια οριζόντια και την ίδια κατακόρυφη μετακίνηση. Τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων με τέτοιες συνοριακές συνθήκες (**Σχήμα 2.4**) συγκρίνονται άμεσα με πειραματικά αποτελέσματα από φυγοκεντριστή και προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια την πραγματικότητα.

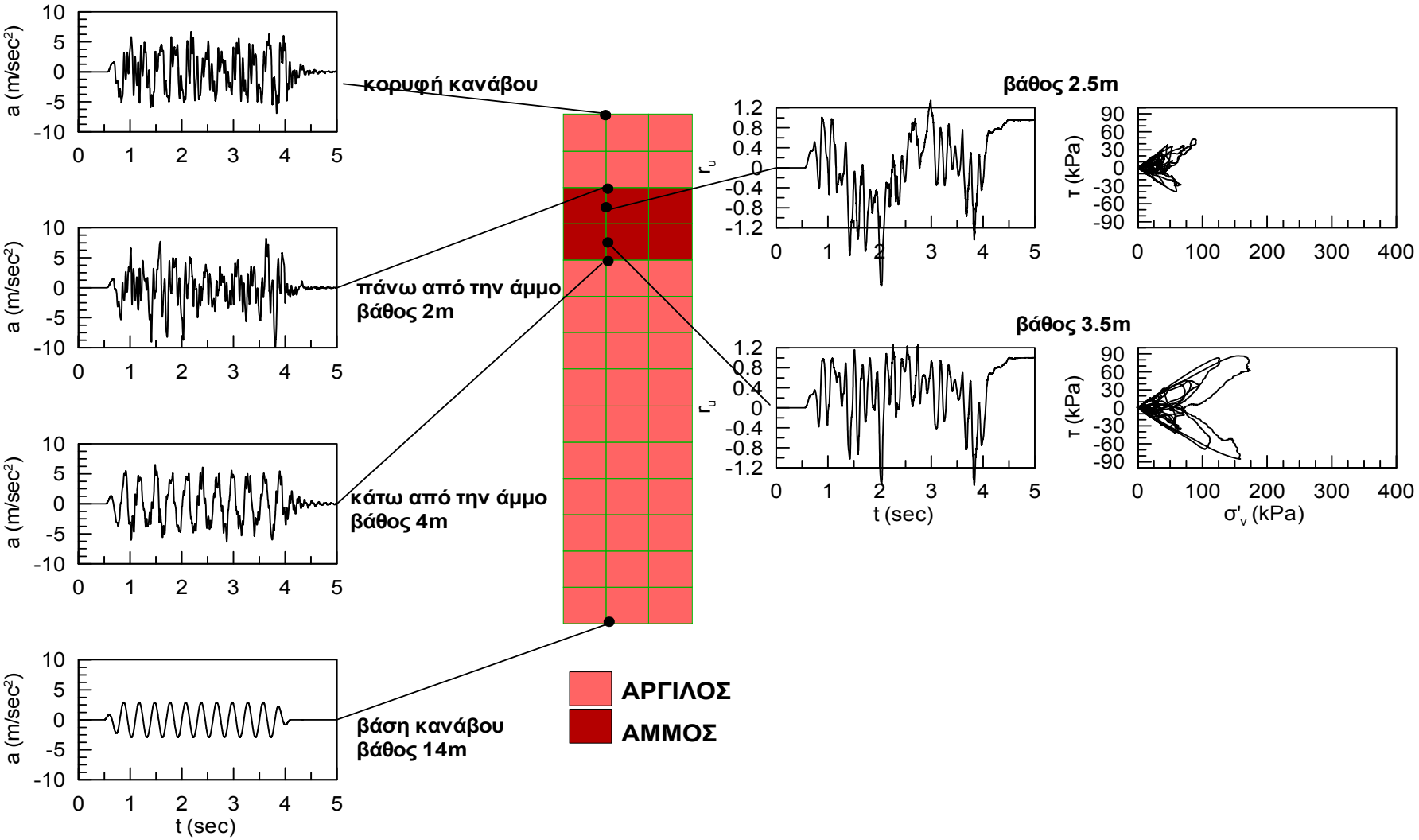
2.2.6 Τυπικά αποτελέσματα

Για την παραπάνω βασική ανάλυση έγιναν προκαταρκτικές παραμετρικές αναλύσεις για πάχος άμμου 1m εως 12m. Ενδεικτικώς, στα **Σχήματα 2.5 και 2.6** φαίνονται τα αποτελέσματα για 2m και 8m πάχος άμμου. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σε τέσσερα βασικά σημεία καθύψος της στήλης: στη βάση του κανάβου, κάτω από το στρώμα της άμμου, πάνω από το στρώμα της άμμου και στην κορυφή του κανάβου. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες του λόγου υπερπίεσης πόρων $r_u=\Delta u/\sigma'_{vo}$ σε χαρακτηριστικά σημεία της άμμου: στο κορυφαίο σημείο ακριβώς κάτω από το στρώμα της αργίλου, στη μέση του στρώματος και στο κατώτατο σημείο του στρώματος της άμμου. Τέλος, στα σημεία όπου λαμβάνονται οι υπερπιέσεις πόρων παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες διαδρομές τάσεων σε όρους τ-σ'_v .

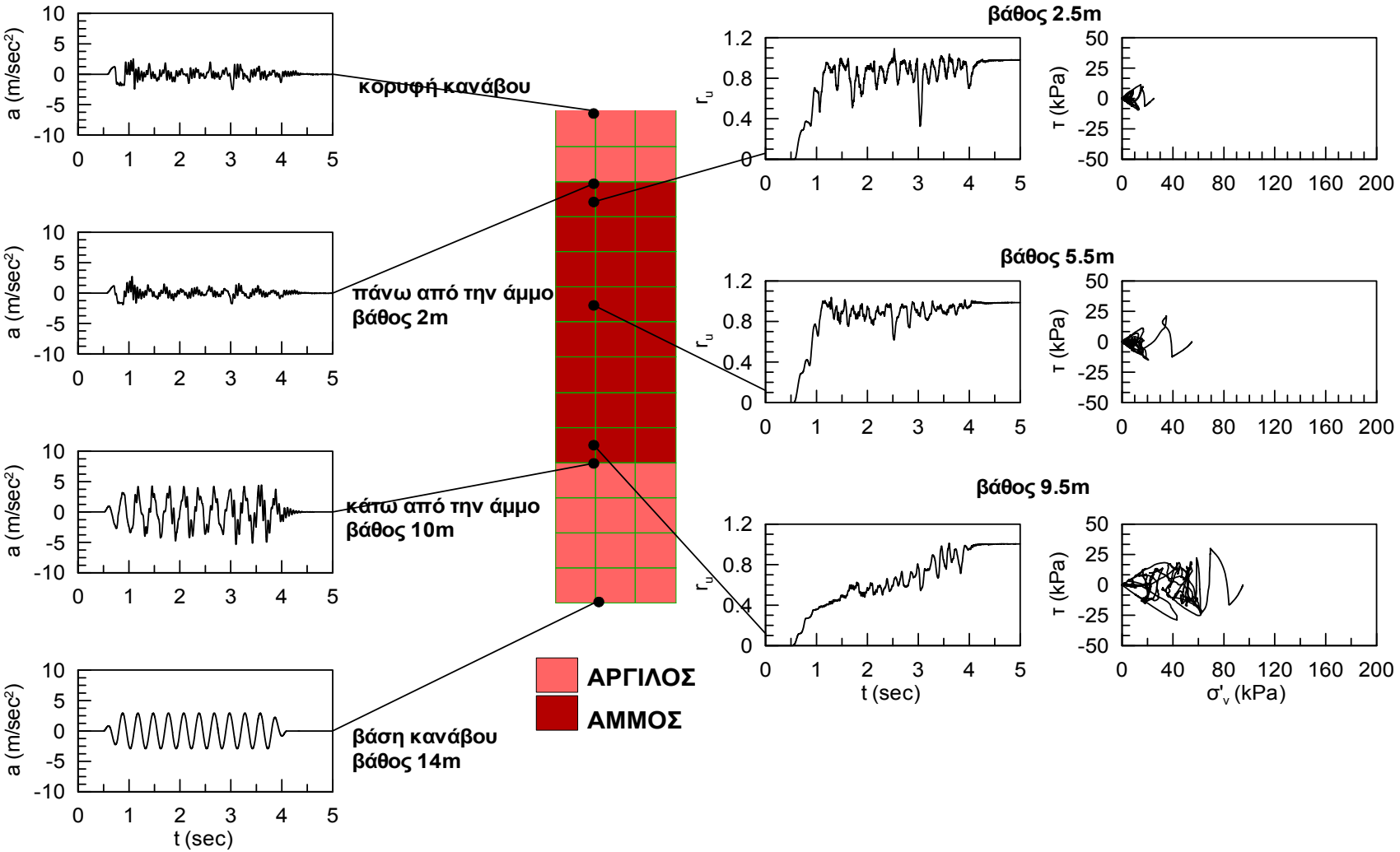
Εξ'αρχής γίνεται εμφανής η διαφορετική απόκριση στη σεισμική διέγερση για τα δύο διαφορετικά πάχη της άμμου. Για δύο μέτρα πάχος άμμου η διέγερση όχι μόνο δεν απορροφάται από τη «ρευστοποιημένη» άμμο αλλά ενισχύεται. Επιπλέον, οι διαδρομές τάσεων και οι χρονοϊστορίες των υπερπιέσεων πόρων προδίδουν έντονη διαστολικότητα. Αντίθετα για 8m άμμου, η ρευστοποίηση εμφανίζεται με όλα τα χαρακτηριστικά της: είναι έντονη η μείωση της επιτάχυνσης όταν διέρχεται μέσω του ρευστοποιημένου στρώματος, ενώ και οι υπερπιέσεις πόρων τείνουν να εξισωθούν με την αρχική ενεργό τάση ($r_u=\Delta u/\sigma'_{vo}\approx 1$).

Από τις πρώτες αυτές αναλύσεις αποφασίστηκαν τα κρίσιμα σημεία αναφοράς εντός της εδαφικής τομής και οι σημαντικές, για το φαινόμενο που εξετάζουμε, χρονοϊστορίες. Όσον αφορά τις υπερπιέσεις πόρων, πιο αντιπροσωπευτική καταγραφή για το πρόβλημα φαίνεται να είναι αυτή που λαμβάνεται από το μεσαίο σημείο της ρευστοποιημένης στρώσης άμμου. Αυτό συμβαίνει διότι το κορυφαίο στοιχείο, όπως και το κατώτατο στοιχείο, του στρώματος της άμμου επηρεάζονται αριθμητικά από τα γειτονικά τους, τα οποία δεν είναι ρευστοποιημένα μια και αφορούν στο αργιλικό στρώμα. Συνεπώς οι υπερπιέσεις πόρων θεωρούνται ως αντιπροσωπευτικές στη μέση της άμμου, και ειδικότερα στη μέση της ζώνης που βρίσκεται πάνω από το μέσο βάθος της άμμου.

Οι επιταχύνσεις που ενδιαφέρουν στην προκειμένη περίπτωση, και που χαρακτηρίζουν για την ανάλυση αυτή τη ρευστοποίηση, είναι η επιτάχυνση στη βάση και στην κορυφή του στρώματος της άμμου. Και τούτο διότι, αυτό το οποίο κυρίως μας ενδιαφέρει είναι το στρώμα της άμμου ενώ προσπαθούμε να μειωθεί όσο το δυνατόν η επιρροή της αργίλου. Τέλος χαρακτηριστικές για την κάθε ανάλυση είναι οι διαδρομές των τάσεων στο μέσον του στρώματος της άμμου, δηλαδή στο ίδιο ακριβώς σημείο υπολογισμού των υπερπιέσεων πόρων έτσι ώστε να υπάρχει πλήρη αντιστοιχία μεταξύ τους.



Σχήμα 2.5 : Αποτελέσματα ανάλυσης για πάχος άμμου 2m



Σχήμα 2.6 : Αποτελέσματα ανάλυσης για πάχος άμμου 8m

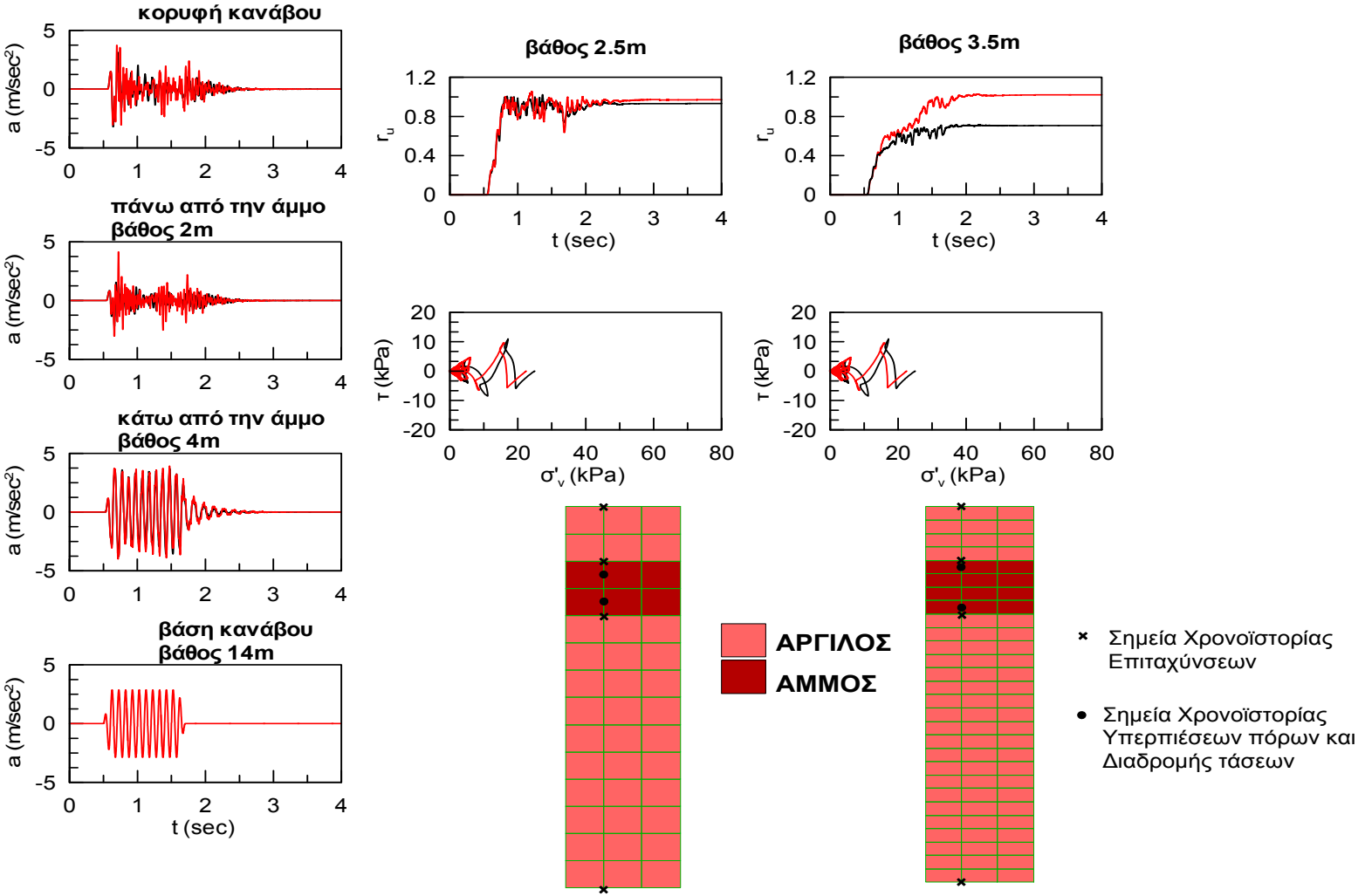
2.3 Βελτιστοποίηση των αριθμητικών αναλύσεων

2.3.1 Βελτιστοποίηση καννάβου

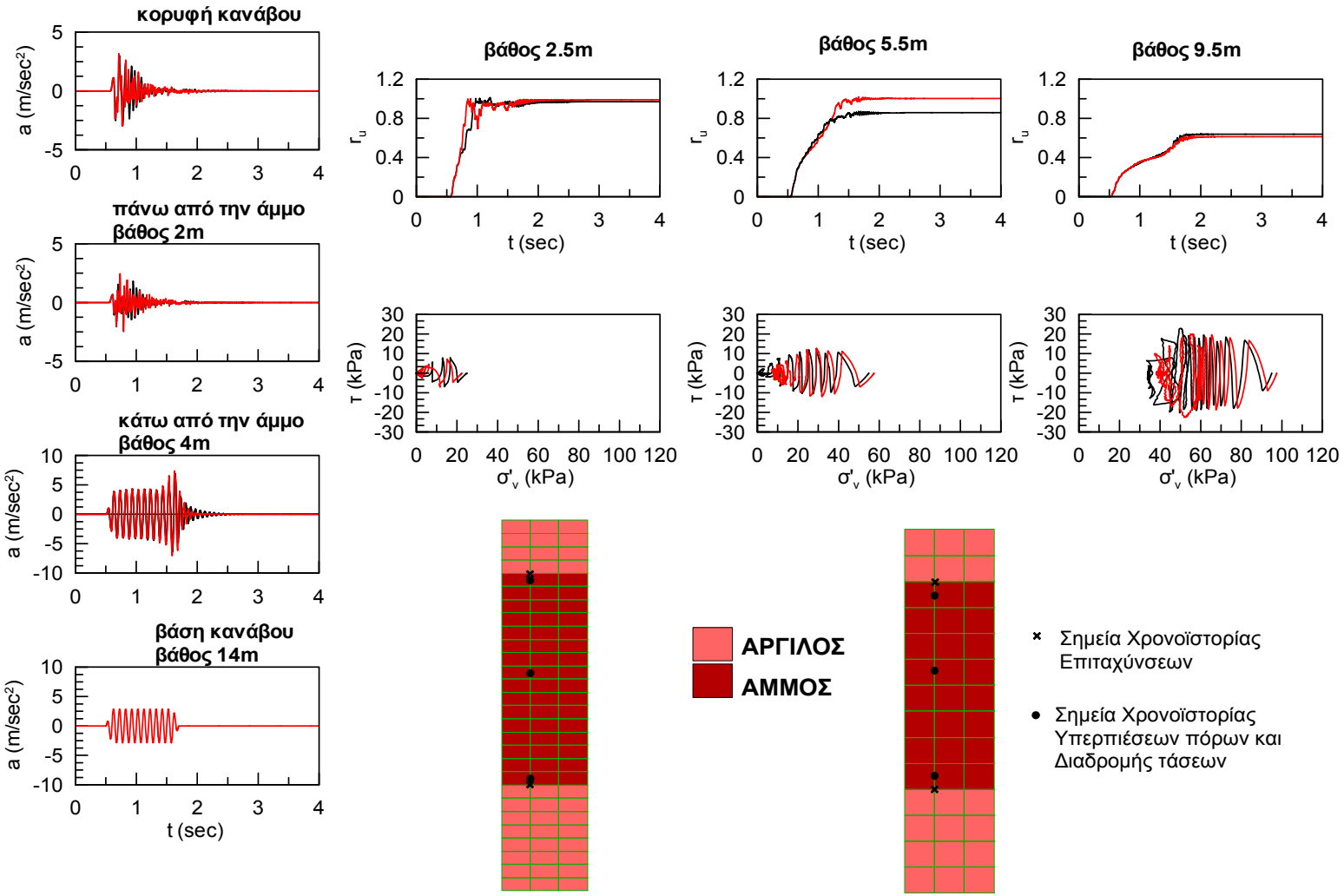
Προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση της καθύψους διακριτοποίησης της εδαφικής στήλης στα αποτελέσματα των υπολογισμών, η βασική ανάλυση επαναλήφθηκε για στοιχεία (ζώνες) ύψους 0.5m αντί του 1m που είχε επιλεχθεί αρχικά. Για τον ίδιο σκοπό οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με διέγερση περιόδου 0.1sec το οποίο είναι και το κάτω όριο του εύρους των περιόδων που θα χρησιμοποιηθούν στην παραμετρική ανάλυση. Για την περίοδο αυτή, το μήκος κύματος θα είναι επίσης το κάτω όριο των αναλύσεων, οπότε θα φανεί κατά πόσο η αρχική διακριτοποίηση είναι επαρκής ή θα χρειαστεί πιο πυκνός κάνναβος.

Στα **Σχήματα 2.7 και 2.8** φαίνονται τα αποτελέσματα της βασικής ανάλυσης για περίοδο 0.1sec με πιο πυκνή διακριτοποίηση από την αρχική (0.5m x 1m) σε σύγκριση με τα αρχικά απότελέσματα (1m x 1m) για πάχος άμμου 2m και 8m αντίστοιχα. Παρότι στις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων δεν παρατηρείται ουσιαστική διαφορά, οι υπερπιέσεις πόρων για πιο πυκνό κάνναβο είναι αισθητά διαφορετικές. Επιπλέον η κατανομή της υπερπίεσης των πόρων εμφανίζεται πιο ομοιόμορφη με το βάθος. Οι διαδρομές τάσεων, επίσης, είναι παρεμφερείς˙ η διαφορά στην αρχική τάση οφείλεται στο ότι με πιο πυκνή διακριτοποίηση το σημείο στο οποίο λαμβάνεται η καταγραφή απέχει κατά 0.25m από την αρχική ανάλυση.

Κατόπιν των ανωτέρω, επιλέγεται για τις παραμετρικές αναλύσεις που θα ακολουθήσουν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία με ύψος 0.5m καθώς η απόκριση τους φαίνεται αισθητά βελτιωμένη. Ένας ακόμη λόγος επιλογής αυτής της διακριτοποίησης θα φανεί στο Κεφάλαιο 4˙ εκεί υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος στο ρευστοποιημένο στρώμα σε 50m/s - 60m/s. Με αυτή την ταχύτητα για την περίοδο 0.1sec, που είναι η μικρότερη περίοδος που χρησιμοποιείται, προκύπτει ελάχιστο μήκος κύματος 5m. Κατά την κοινώς αποδεκτή πρακτική, η διακριτοποίηση του καννάβου θεωρείται επαρκής όταν στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος τοποθετούνται στοιχεία με διάσταση μικρότερη ή ίση από λ/10, ή 0.5m για την προκειμένη περίπτωση εδάφους και διέγερσης.



Σχήμα 2.7 : Επίδραση διακριτοποίησης στη σεισμική απόκριση του εδάφους για πάχος ρευστοποιήσιμης άμμου 2m και περίοδο διέγερσης 0.1sec. Με κόκκινο η απόκριση για διακριτοποίηση 0.5mx1m και με μαύρο για 1mx1m

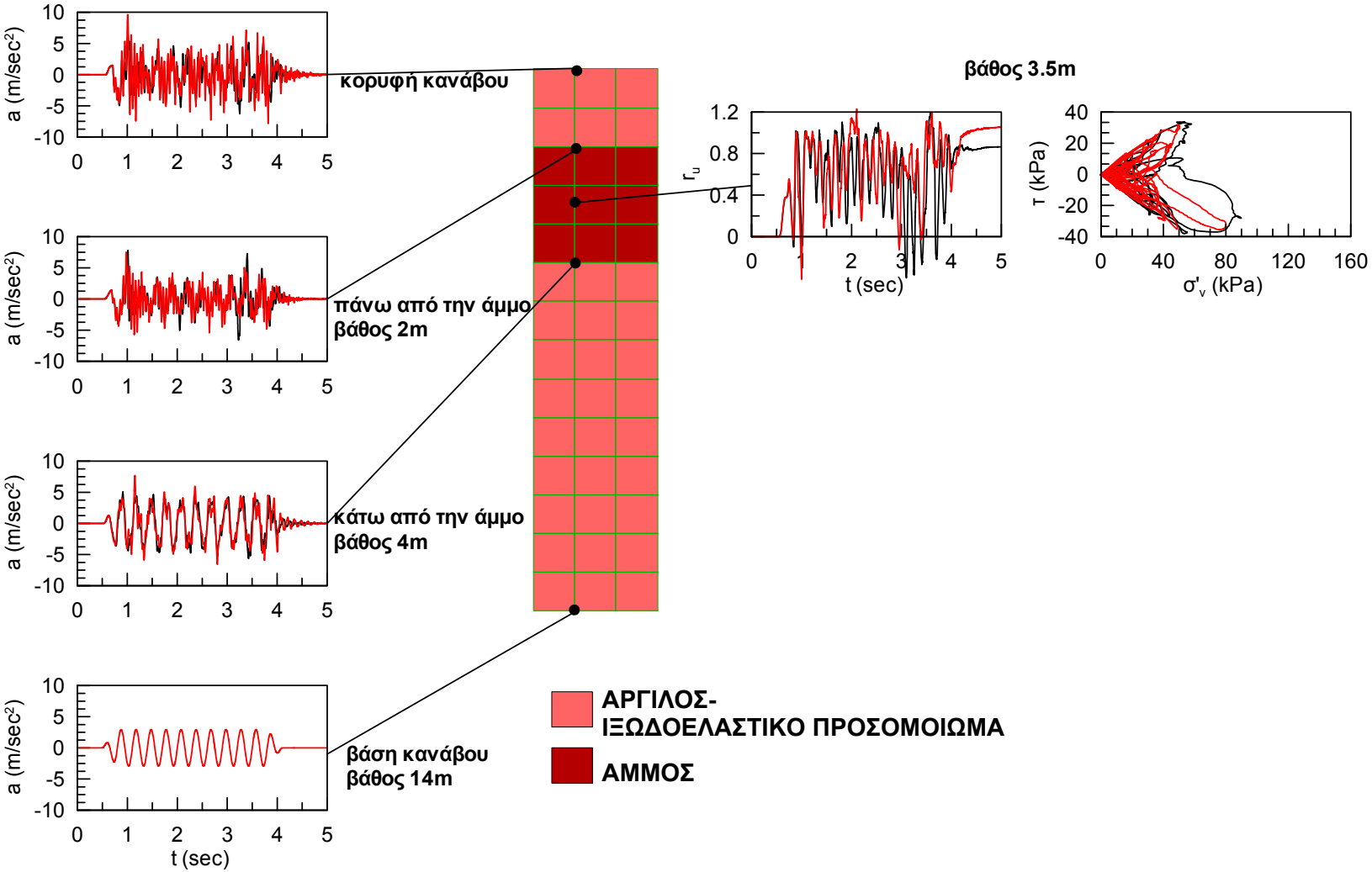


Σχήμα 2.8 : Επίδραση διακριτοποίησης στη σεισμική απόκριση του εδάφους για πάχος ρευστοποιήσιμης άμμου 8m και περίοδο διέγερσης 0.1sec. Με κόκκινο η απόκριση για διακριτοποίηση 0.5mx1m και με μαύρο για 1mx1m

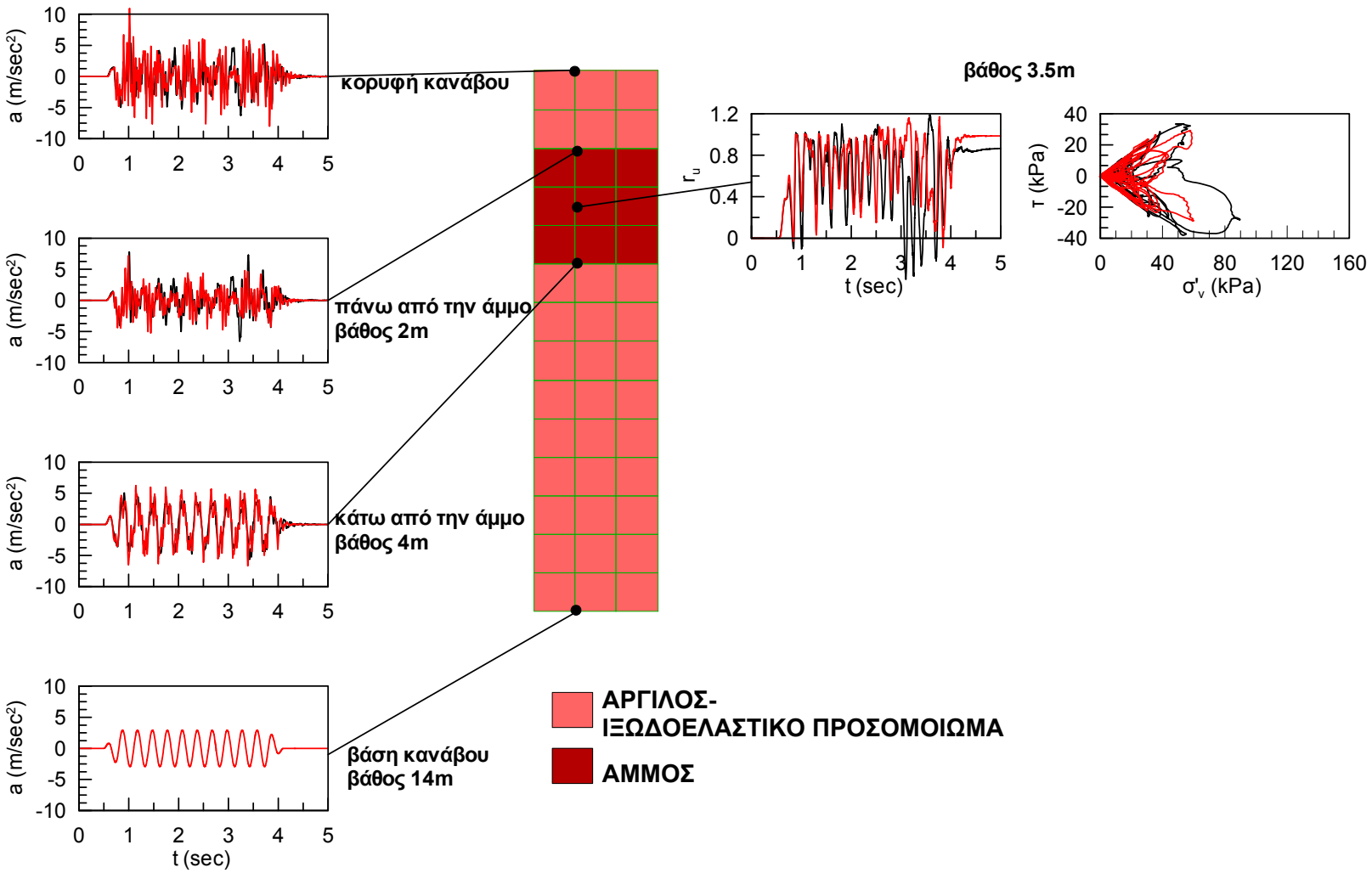
2.3.2 Βελτιστοποίηση ως προς το προσομοιώμα της αργίλου

Κατόπιν, δοκιμάστηκε η αλλαγή του καταστατικού προσομοιώματος της αργίλου από Ramberg-Osgood με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb σε ιξωδοελαστικό. Ο κύριος λόγος για αυτή την αλλαγή ήταν να εξεταστεί αν μειώνεται ο αριθμητικός θόρυβος που προκύπτει στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων. Για το ιξωδοελαστικό προσομοίωμα ορίστηκε μια μέση απόσβεση κοινή για τις δύο αργίλους˙ έγιναν δύο αναλύσεις μια με λόγο απόσβεσης 5% και μια με 10%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε σύγκριση με την βασική ανάλυση για πάχος άμμου 3m στα **Σχήματα 2.9 και 2.10** για ισοδύναμη απόσβεση 5% και 10% στο ιξωδοελαστικό προσομοίωμα αντίστοιχα.

Στα αποτελέσματα φαίνονται οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων καθύψος της στήλης καθώς και οι υπερπιέσεις πόρων και η διαδρομή των τάσεων στο μέσον της άμμου. Είναι εμφανές ότι η κατάσταση δεν βελτιώθηκε όσον αφορά τον αριθμητικό θόρυβο, ο οποίος φαίνεται να προέρχεται κατά κύριο λόγο από το στρώμα της άμμου καθώς η επιτάχυνση στη βάση του είναι αρκετά «καθαρή» σε σύγκριση με την επιτάχυνση στην κορυφή. Τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν γενικά από την αρχική κατάσταση, που σημαίνει ότι τα δύο προσομοιώματα δίνουν παρεμφερή απόκριση εδάφους. Έτσι, για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε τελικώς το προσομοίωμα Ramberg-Osgood με αστοχία Mohr-Coulomb, καθότι γνωρίζουμε ότι δίνει καλύτερα αποτελέσματα από γεωτεχνικής άποψης και δεν συντρέχει ουσιαστικός λόγος αλλαγής του.



Σχήμα 2.9 : Επίδραση προσομοιώματος αργίλου στην απόκριση της εδαφικής στήλης˙ σύγκριση βασικής ανάλυσης 3m, με μαύρο, με ανάλυση για ιξωδοελαστικό προσομοίωμα αργίλου με απόσβεση 5%, με κόκκινο

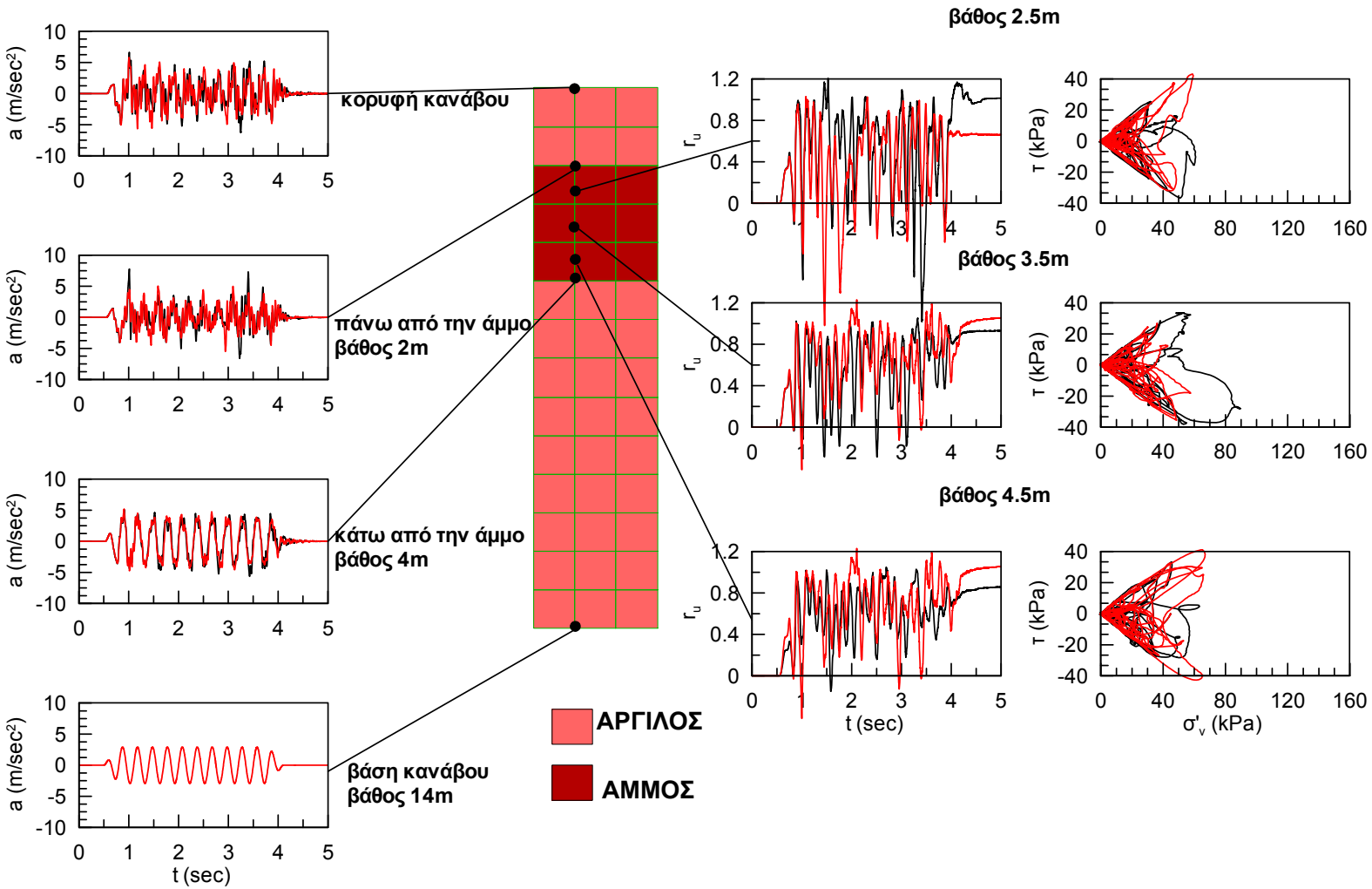


Σχήμα 2.10 : Επίδραση προσομοιώματος αργίλου στην απόκριση της εδαφικής στήλης˙ σύγκριση βασικής ανάλυσης 3m, με μαύρο, με ανάλυση για ιξωδοελαστικό προσομοίωμα αργίλου με απόσβεση 10%, με κόκκινο

2.3.3 Βελτιστοποίηση ως προς την ιξωδοελαστική απόσβεση της άμμου

Η τελευταία προσπάθεια βελτίωσης της βασικής ανάλυσης αφορα την αλλαγή του τύπου της απόσβεσης της άμμου. Καθώς ο αριθμητικός θόρυβος παράγεται κατά κύριο λόγο εντός της άμμου, θεωρήθηκε σκόπιμη μια προσπάθεια αλλαγής της απόσβεσης από τύπου local damping σε Rayleigh damping. Για το καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιείται δεν θεωρείται εφικτή η κατασκευή ενός αξιόπιστου μητρώου δυσκαμψίας, και συνεπώς ορίζεται απόσβεση Rayleigh με βάση το μητρώο μάζας. Η απόσβεση τύπου Rayleigh εξαρτάται από τη συχνότητα˙ για το εν λόγω πρόβλημα λαμβάνουμε μια μέση συχνότητα 10Hz όπου ο λόγος υστερητικής απόσβεση προκύπτει περίπου σταθερός 5%.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στο **Σχήμα 2.11** και αποτελούνται από τις επιταχύνσεις στα τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία και τις υπερπιέσεις πόρων και τις διαδρομές τάσεων εντός της άμμου στο κορυφαίο στοιχείο του στρώματος, το κατώτερο και το μεσαίο. Τα αποτελέσματα δεν είναι βελτιωμένα όσον αφορά τον αριθμητικό θόρυβο, κάτι που γίνεται εμφανές στις καταγραφές των επιταχύνσεων. Η απόκριση είναι ελαφρώς διαφοροποιημένη, αλλά δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές ώστε να αλλάξει η βασική ανάλυση και τελικώς διατηρείται, για τις επόμενες αναλύσεις, απόσβεση τύπου local damping με τιμή του λόγου υστερητικής αποσβέσεως 2%.



Σχήμα 2.11 : Επίδραση τύπου απόσβεσης στην απόκριση της εδαφικής στήλης˙ σύγκριση βασικής ανάλυσης 3m, με μαύρο, με ανάλυση για απόσβεση τύπου Rayleigh, με κόκκινο

2.4 Δείκτες ποσοτικής περιγραφής του προβλήματος

Από τις πρώτες αναλύσεις που παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.5 έως και 2.8 φαίνεται η επίδραση του πάχους στη ρευστοποίηση του αμμώδους στρώματος. Όμως, η μέχρι τώρα παρουσίαση αφορά τον ποιοτικό προσδιορισμό του προβλήματος, ενώ τόσο για τις παραπάνω αναλύσεις, όσο και για τα επόμενα κεφάλαια όπου προσπαθούμε με συστηματικό τρόπο να περιγράψουμε το πρόβλημα, χρειάζεται ένας ποσοτικός προσδιορισμός του φαινομένου. Συνεπώς, για να είναι η ανάλυση του εν λόγω προβλήματος πιο συστηματική, αναζητήθηκε ένας ποσοτικός δείκτης για να το περιγράψει.

Καταρχάς, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερεις ποσοτικοί δείκτες ώστε να καταλήξουμε ποιος ταιριάζει καλύτερα στο πρόβλημα μας. Οι δείκτες αυτοί περιγράφονται στον **Πίνακα 2.1**, και στις ακόλουθες εξισώσεις 2.1 έως 2.4.

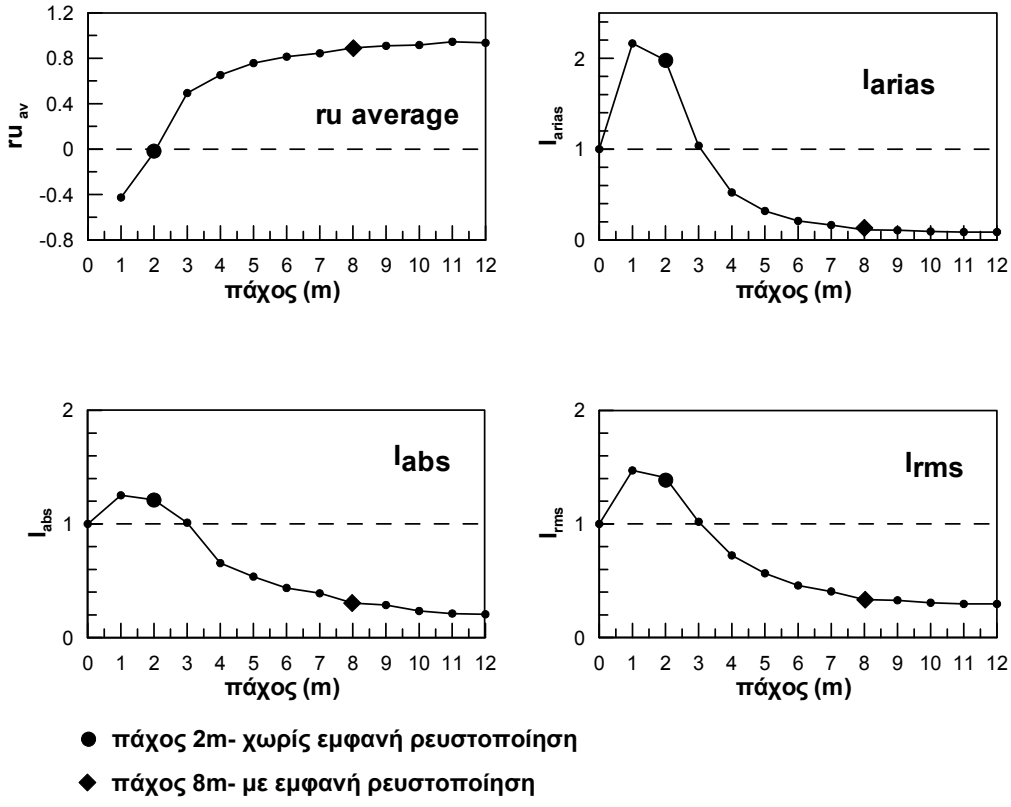
Συμβολισμός Δείκτη	Περιγραφή
r_{uav}	Η μέση τιμή της υπερπίεση πόρων από την πρώτη χρονική στιγμή που συμβαίνει $r_u=\Delta u/\sigma'_{vo}=0.8$ στο μεσαίο στοιχείο του στρώματος της άμμου, μέχρι το τέλος των 10 κύκλων
I_{arias}	Ο λόγος του δείκτη Arias intensity στην κορυφή προς τον δείκτη στη βάση του στρώματος της άμμου
I_{abs}	Ο λόγος του ολοκληρώματος της απόλυτης τιμής της επιτάχυνσης στην κορυφή προς το ολοκλήρωμα στη βάση του στρώματος της άμμου
I_{rms}	Ο λόγος του δείκτη rms acceleration στην κορυφή προς τον δείτκη στη βάση του στρώματος της άμμου

Πίνακας 2.1 : Δείκτες που δοκιμάστηκαν για την ποσοτικοποίηση του φαινομένου

- Μέση τιμή της υπερπίεσης πόρων : $r_{uav} = \int_{t_1}^{t_2} r_u \, dt$ (2.1)
- Δείκτης Arias intensity : $I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 \, dt$ (2.2)
- Δείκτης rms acceleration : $a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{Td} \int_0^{Td} [a(t)]^2 \, dt}$ (2.3)
- Ολοκλήρωμα απόλυτης τιμής επιτάχυνσης: $a = \int_0^{Td} |\alpha(t)| \, dt$ (2.4)

Όπου $r_u = \Delta u/\sigma'_{vo}$, είναι ο λόγος υπερπίεσης πορων για το μεσαίο στοιχείο της άμμου, t_1 η πρώτη χρονική στιγμή όπου r_u=0.8 και t_2 η χρονική στιγμή όπου τελειώνου οι δέκα κύκλοι της διέγερσης. Επίσης, α(t) είναι η σεισμική επιτάχυνση συναρτήσει του χρόνου και T_d η συνολική διάρκεια των δέκα κύκλων της διέγερσης.

Για την αξιολόγηση των εν λόγω δεικτών χρησιμοποιήθηκε η βασική ανάλυση, όπως περιγράφεται παραπάνω, και προέκυψαν τα αποτελέσματα του **Σχήματος 2.12**.



Σχήμα 2.12 : Διαγράμματα πάχους άμμου και δεικτών ανάλυσης για την αξιολόγηση των δεικτών

Στο σχήμα 2.12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα όπου συσχετίζεται το πάχος της ρευστοποιήσιμης άμμου με τους διάφορους ποσοτικούς δείκτες. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται το πάχος της ρευστοποιήσιμης άμμου και στον κατακόρυφο οι διάφοροι δείκτες˙ επίσης με έντονο σημάδι εμφανίζονται δύο χαρακτηριστικά σημεία τα οποία αντιστοιχούν στις αναλύσεις για πάχος άμμου 2m (χωρίς εμφανή ρευστοποίηση) και 8m (με εμφανή ρευστοποίηση) οι χρονοϊστορίες σεισμικής απόκρισης των οποίων έχουν παρουσιαστεί στα

Σχήματα 2.7 και 2.8. Όλα τα διαγράμματα, με τη μορφή τους, ποιοτικά προσεγγίζουν επαρκώς το φαινόμενο που εξετάζεται.

Το r_{uav} δηλώνει τη μέση υπερπίεση πόρων αλλά δεν είναι αντικειμενικός ως δείκτης, με τον τρόπο που ορίστηκε, γιατί εξαρτάται άμεσα από τη διέγερση και δεν ορίζεται σε περίπτωση μη αρμονικής διέγερσης. Συνεπώς, αν και δίνει μια αποδεκτή εικόνα του φαινομένου δεν θεωρείται αρκετά αξιόπιστος για την ποσοτική περιγραφή του.

Οι τρεις λόγοι I_{arias}, I_{abs} και I_{rms} εμφανίζουν παρεμφερή αποτελέσματα για την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε. Το πλεονέκτημα των παραμέτρων αυτών οφείλεται στο ότι με τη χρήση τους, ουσιαστικά καταγράφεται μόνο η απόκριση της άμμου και δεν υπεισέρχεται η επίδραση των άλλων εδαφικών στρωμάτων.

Από αυτούς τους δείκτες, την πιο ομαλή μεταβολή με το πάχος δίνει η παράμετρος I_{abs}˙ το σχετικό διάγραμμα περιγράφει καθαρά και επαρκώς τις μεταβολές όσον αφορά την εδαφική απόκριση, αλλά επιπλέον δεν παρουσιάζει απότομες αλλαγές. Επίσης, το διάγραμμα του λόγου I_{arias} , αν και δεν είναι πολύ ομαλό στα μικρά πάχη, προδίδει εμφανώς τις διαφορετικές συμπεριφορές της άμμου. Τέλος, ο δείκτης I_{rms} φαίνεται να δίνει παρεμφερή αποτελέσματα με το δείκτη I_{abs} με μικρές διαφοροποιήσεις.

Συνεπώς, για την ποσοτική περιγραφή του προβλήματος διατηρήθηκαν και οι τέσσερεις δείκτες καθώς δεν μπορούμε με βεβαιότητα να αποφασίσουμε για τα πλεονεκτήματα καποιου έναντι των άλλων. Έτσι, τα αποτελέσματα των αναλύσεων που ακολουθούν θα παρουσιάζονται με την ίδια μορφή, όπως το Σχήμα 2.12 και θα απαρτίζονται και από τους τέσσερεις δείκτες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

3.1 Γενικά

Κατόπιν της οριστικοποίησης της αριθμητικής μεθοδολογίας (Κεφάλαιο 2), πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις ώστε να διαπιστωθεί ποιοι παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά το πρόβλημα και ποιοι όχι. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν χωρίζονται σε αυτές που αφορούν τα στρώματα της αργίλου, αυτές που αφορούν το ρευστοποιήσιμο στρώμα της άμμου και στις παραμέτρους της διέγερσης.

Έτσι λοιπόν, σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η επιρροή της ταχύτητας του διατμητικού κύματος της αργίλου που βρίσκεται στη βάση της άμμου, του πάχους της αργίλου που βρίσκεται στην κορυφή της άμμου, της διαπερατότητας και του δείκτη πόρων του στρώματος της άμμου, καθώς και της περιόδου και της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης. Θεωρήθηκε ότι οι έξι αυτοί παράμετροι είναι οι βασικοί παράμετροι που πρέπει να εξετασθούν και οι πιθανότεροι παράμετροι για να επιδρούν σημαντικά στο φαινόμενο.

Για κάθε παράμετρική διερεύνηση διατηρείται η βασική μεθοδολογία όπως περιγράφηκε προηγουμένως (Κεφάλαιο 2) και διαφοροποιείται η εκάστοτε παράμετρος. Ως βασική μεταβλητή παραμένει το πάχος της ρευστοποιήσιμης άμμου το οποίο μεταβάλλεται από 1m έως 12m, ανα 1m, για κάθε παραμετρική ανάλυση. Συνεπώς κάθε ομάδα παραμετρικών αναλύσεων αποτελείται ουσιαστικά από δώδεκα αναλύσεις, μια για κάθε διαφορετικό πάχος άμμου.

Υπενθυμίζεται ότι η βασική σειρά αναλύσεων έγινε με τα εξής δεδομένα: 14m ύψος στήλης εδάφους, 2m αργιλικής επικάλυψης και 12m αποτελούμενα από άμμο και άργιλο βάσης, 3m πλάτος και διακριτοποίηση καννάβου σε ζώνες 0.5m καθύψος και 1m κατά πλάτος. Επίσης, τα αργιλικά στρώματα είναι και τα δύο κορεσμένα με πυκνότητα $2Mg/m^3$ και δείκτη πλαστιμότητας PI=30%. Η άργιλος κορυφής διαθέτει αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u=15kPa, αρχικό μέτρο διάτμησης G_o=22500kPa, συντελεστή ουδέτερης ώθησης γαιών K_o=0.5 και ταχύτητα διατμητικού κύματος V_{so}=106m/s. Η άργιλος βάσης διαθέτει

αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u=120kPa, αρχικό μέτρο διάτμησης G_o=180000kPa συντελεστή ουδέτερης ώθησης γαιών K_o=0.5 και ταχύτητα διατμητικού κύματος V_{so}=300m/s. Τέλος η άμμος είναι κορεσμένη με πυκνότητα 2Mg/m^3, δείκτη πόρων e_o=0.61 και συντελεστή ουδέτερης ώθησης γαιών K_o=0.5. Η σεισμική φόρτιση επιβάλλεται υπό αστράγγιστες συνθήκες και η διέγερση αποτελείται από 10 ομοιόμορφους ημιτονικούς κύκλους, περιόδου 0.3sec και μέγιστης επιτάχυνσης 0.3g.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται με βάση τους τέσσερεις δείκτες (I_{arias}, $I_{abs,}$ I_{rms} και r_{uav}) που αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν για την ποσοτικοποίηση του φαινομένου στο Κεφάλαιο 2. Έτσι, για κάθε παράμετρο που διερευνήθηκε, εξετάζεται μέσα από τα διαγράμματα των δεικτών αυτών αν προκύπτουν διαφορές σχετικά προς τη βασική ανάλυση. Επιπλέον, στα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιούμε δύο σύμβολα που χαρακτηρίζουν τις περιοχές του φαινομένου : το σύμβολο ○ για την περιοχή όπου δεν υπάρχει εμφανής ρευστοποίηση και το σύμβολο ● για τα σημεία όπου αρχίζει η περιοχή εμφανής ρευστοποίησης. Δεδομένης της μη αντικειμενικής τοποθέτησης των συμβόλων αυτών, καθώς δεν είναι πάντα σαφές για ποιο ακριβός πάχος αρχίζει η ρευστοποίηση, σε κάποια διαγράμματα χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία φορές, για να δηλώσουν ενδεικτικά το εύρος αυτής της αβεβαιότητας.

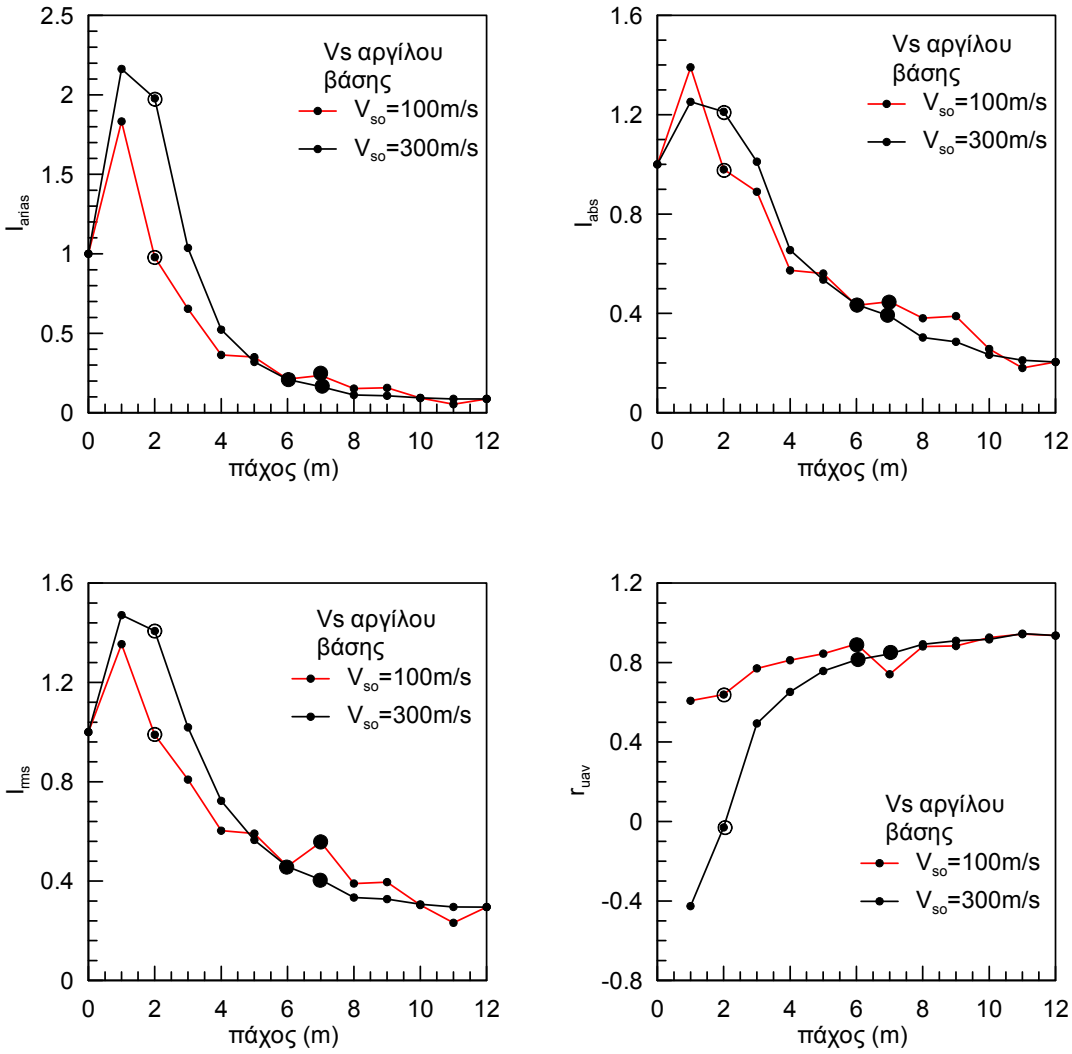
Επίσης, για κάθε ανάλυση λαμβάνονται οι σημαντικές χρονοϊστορίες που, όπως έχει αποφασιστεί (Κεφάλαιο 2), αποτελούνται από τις χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης στην κορυφή και στη βάση του στρώματος της άμμου, τη χρονοϊστορία των υπερπιέσεων πόρων στο μέσον του στρώματος της άμμου και τη διαδρομή των τάσεων σε μορφή τ-σ'$_v$ στο μέσον του στρώματος της άμμου. Τονίζεται ότι στο διάγραμμα της διαδρομής των τάσεων περιλαμβάνονται δύο καμπύλες, μια γκρι και μια μαύρη. Η γκρι καμπύλη είναι η διαδρομή τάσεων όπως προκύπτει από την αρχή μέχρι το τέλος της ανάλυσης, ενώ η μαύρη καμπύλη αφορά του πρώτους κύκλους της διέγερσης, μέχρι να ρευστοποιηθεί το στρώμα της άμμου. Οι χρονοϊστορίες αυτές περιλαμβάνονται στο Παράρτημα της Διπλωματικής Εργασία και επίλεκτικά κάποιες παρουσιάζονται και στο παρόν κεφάλαιο.

3.2 Επίδραση Ταχύτητας Διατμητικού Κύματος (V_{so}) της Αργίλου Βάσης

Στη βασική ανάλυση η ταχύτητα διατμητικού κύματος στην άργιλο βάσης έχει οριστεί ίση με V_{so}=300m/s. Για να εξεταστεί η επιρροή αυτής της ταχύτητας, οι βασικές αναλύσεις επαναλήφθηκαν για V_{so}=100m/s. Η αλλαγή της τιμής της ταχύτητας του διατμητικού κύματος γίνεται μέσω της αλλαγής του αρχικού μέτρου διάτμησης G_o, καθώς $V_{so} = \sqrt{Go/\rho}$. Επιλέχθηκε να μην αλλάξει η τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργίλου c_u, ώστε και σε αυτή την περίπτωση να μην αστοχεί η άργιλος. Η τιμή της νέας V_{so} είναι αρκετα μικρότερη της αρχικής, ώστε να προκύπτουν εμφανείς διαφορές σε περίπτωση που η παράμετρος αυτή έχει σημαντική επιρροή στα αποτελέσματα.

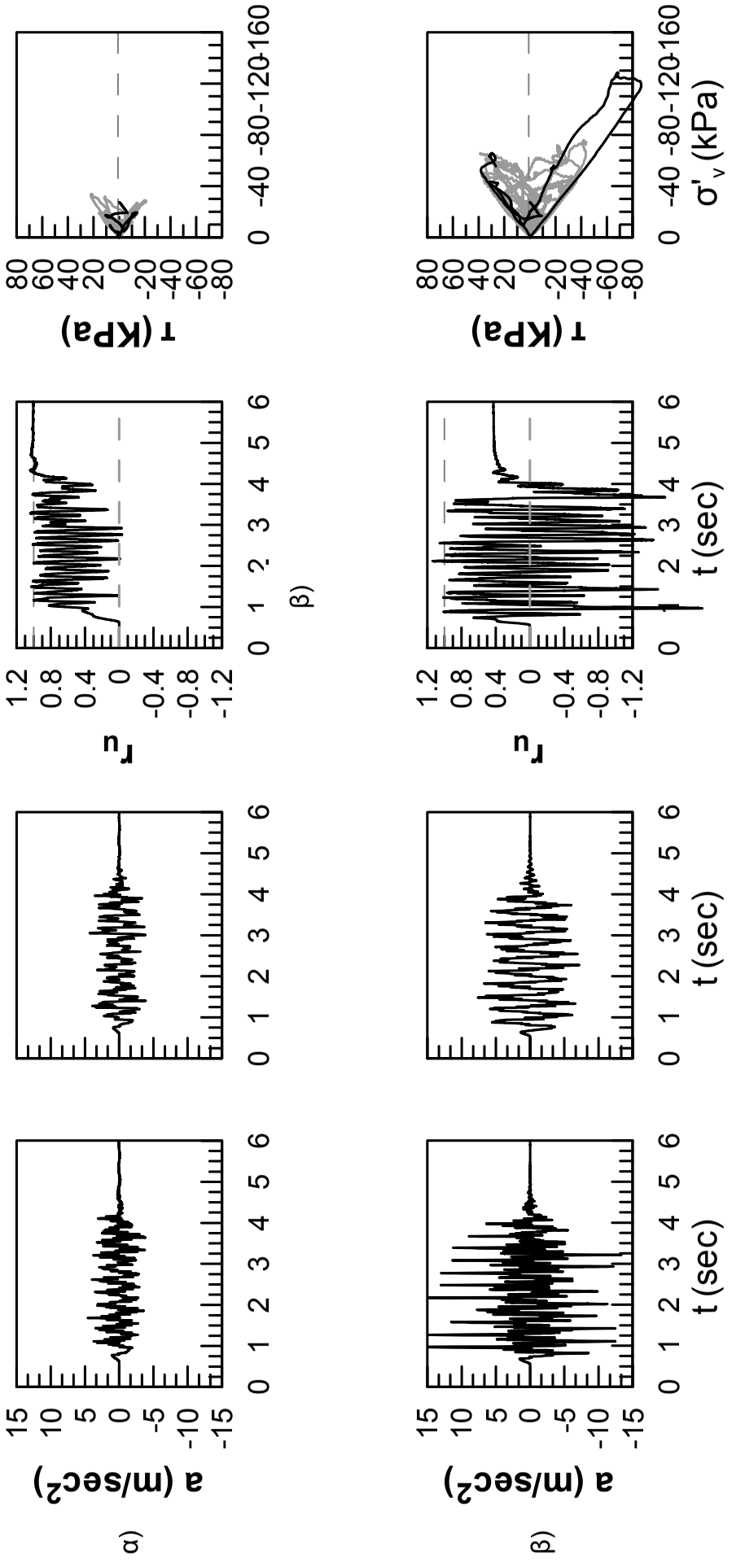
Τα αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης ως προς τους δείκτες ρευστοποιημένης συμπεριφοράς, φαίνονται στο **Σχήμα 3.1**. Δε φαίνεται να υπάρχει έντονη επιρροή της παραμέτρου στο φαινόμενο που εξετάζουμε. Αυτό φαίνεται πιο καθαρά στο διάγραμμα I_{abs}, όπου οι διαφορές είναι ακόμη πιο μικρές. Τα διαγράμματα διατηρούν την ίδια μορφή με τη βασική ανάλυση με μικρές διαφορές στις τιμές, που πιθανότατα οφείλεται σε διαφορετικό αριθμητικό θόρυβο για τις δύο αναλύσεις.

Η βασική διαφορά στις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων αφορά τη διαφορετική ενίσχυση που πραγματοποιείται στην κάτω άργιλο –μικρότερη για V_{so}=100m/s- αλλά ο λόγος τως επιταχύνσεων που λαμβάνεται μέσω των I_{arias} I_{abs} και I_{rms} (Σχήμα 3.1) δε διαφοροποιείται ουσιαστικά, δηλαδή η συμπεριφορά της άμμου δεν αλλάζει ως προς την εκδήλωση της ρευστοποίησης. Η διαφορά στην ενίσχυση γίνεται εμφανής και από τις διαδρομές των τάσεων καθώς στη βασική ανάλυση, όπου η ενίσχυση είναι μεγαλύτερη, προκαλείται και πιο έντονη διαστολικότητα (**Σχήμα 3.2**). Επιπλέον, η ρευστοποίηση πλησιάζει τη συνήθη μορφή της, δηλαδή σημαντική μείωση των επιταχύνσεων και αύξηση των υπερπιέσεων πόρων με $r_u \approx 1$ και στις δύο περιπτώσεις περίπου για πάχος άμμου 5m-6m (**Σχήμα 3.3**).

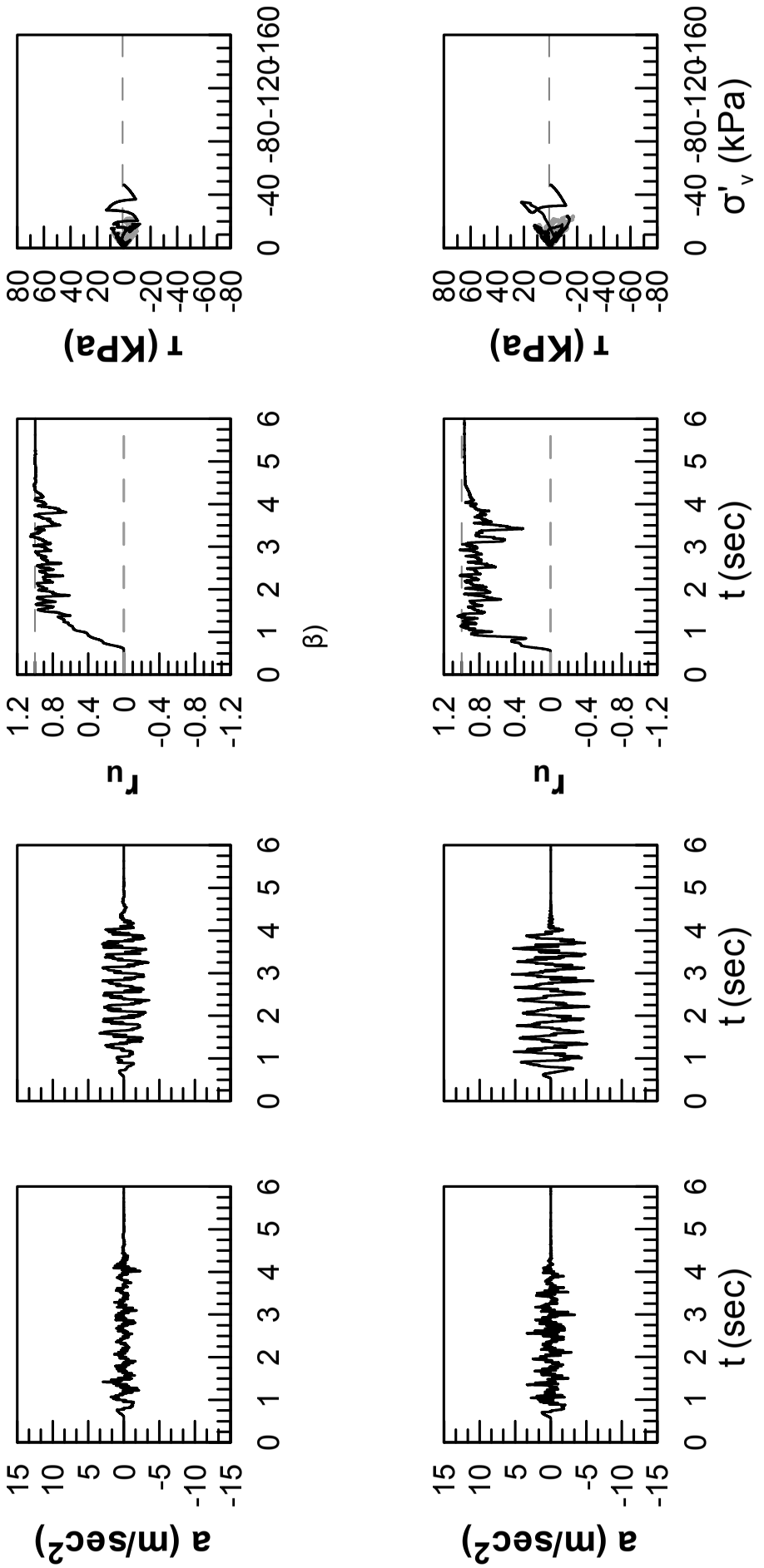


Σχήμα 3.1 : Σύγκριση βασικής ανάλυσης με παραμετρική ανάλυση όπου για την άργιλο στη βάση ισχύει V_{so}=100m/s

Τελικώς, συμπεραίνεται ότι η συμπεριφορά της ρευστοποιημένης άμμου και η απόκριση της δεν φαίνεται να αλλάζει αισθητά με τη διαφοροποίηση της ταχύτητας της κάτω αργίλου και έτσι συνεπάγεται ότι η παράμετρος αυτή δεν διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο πρόβλημα.



Σχήμα 3.2 : Χρονοϊστοριές για πάχος άμμου 2m και ταχύτητα διατμητικού κύματος αργίλου κορυφής α) V_{so}=100m/s και β) V_{so}=300m/s

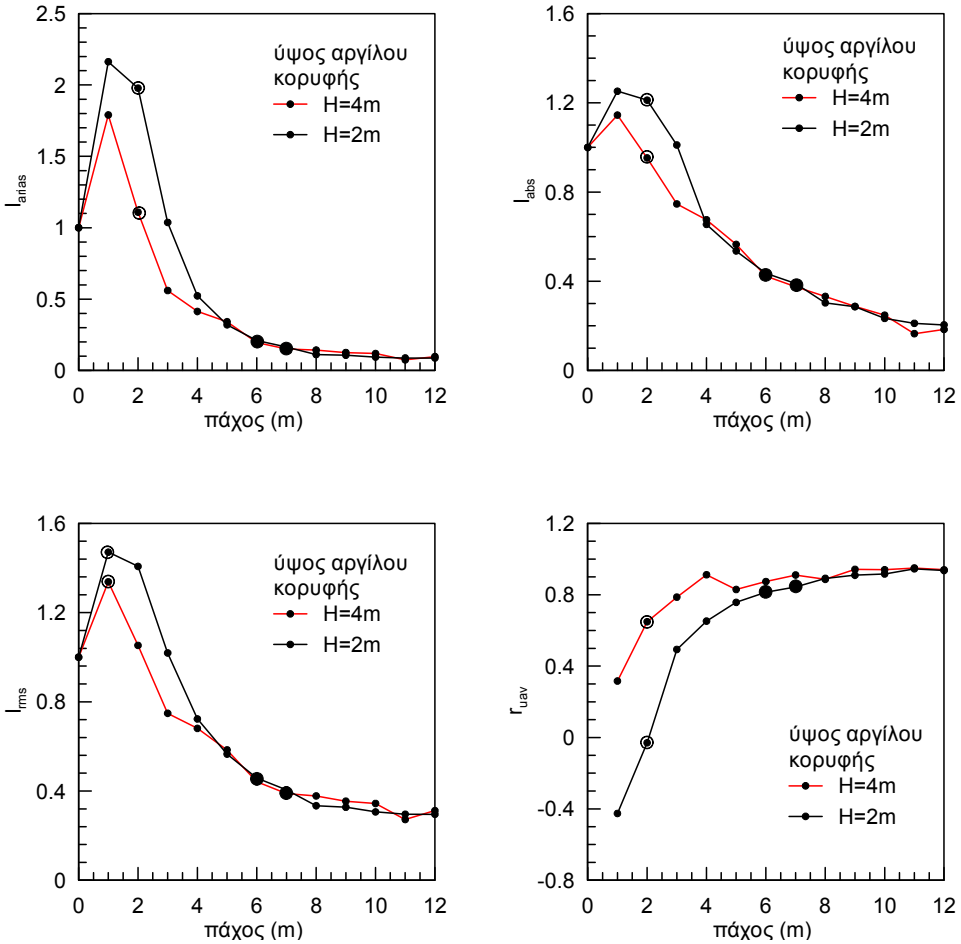


Σχήμα 3.3 : Χρονοϊστορίες για πάχος άμμου 6m και ταχύτητα διατμητικού κύματος αργίλου κορυφής α) V_{so}=100m/s και β) V_{so}=300m/s

3.3 Επίδραση Πάχους της Αργιλικής Επικάλυψης

Επάνω από το στρώμα της άμμου έχει τοποθετηθεί μία στρώση αργίλου ώστε να προσομοιώνεται ρευστοποιήσιμο στρώμα άμμου ανάμεσα σε δύο μη ρευστοποιήσιμα στρώματα αργίλου. Το πάχος της αργίλου της κορυφής έχει αρχικά θεωρηθεί 2m. Έτσι, εξετάζονται εδώ οι διαφορές σε περίπτωση που το πάχος αυτό είναι 4m.

Τα αποτελέσματα με τη μορφή των ποσοτικών δεικτών φαίνονται στο **Σχήμα 3.4**. Και πάλι η διαφοροποίηση από τα αρχικά αποτελέσματα είναι πολύ μικρή.



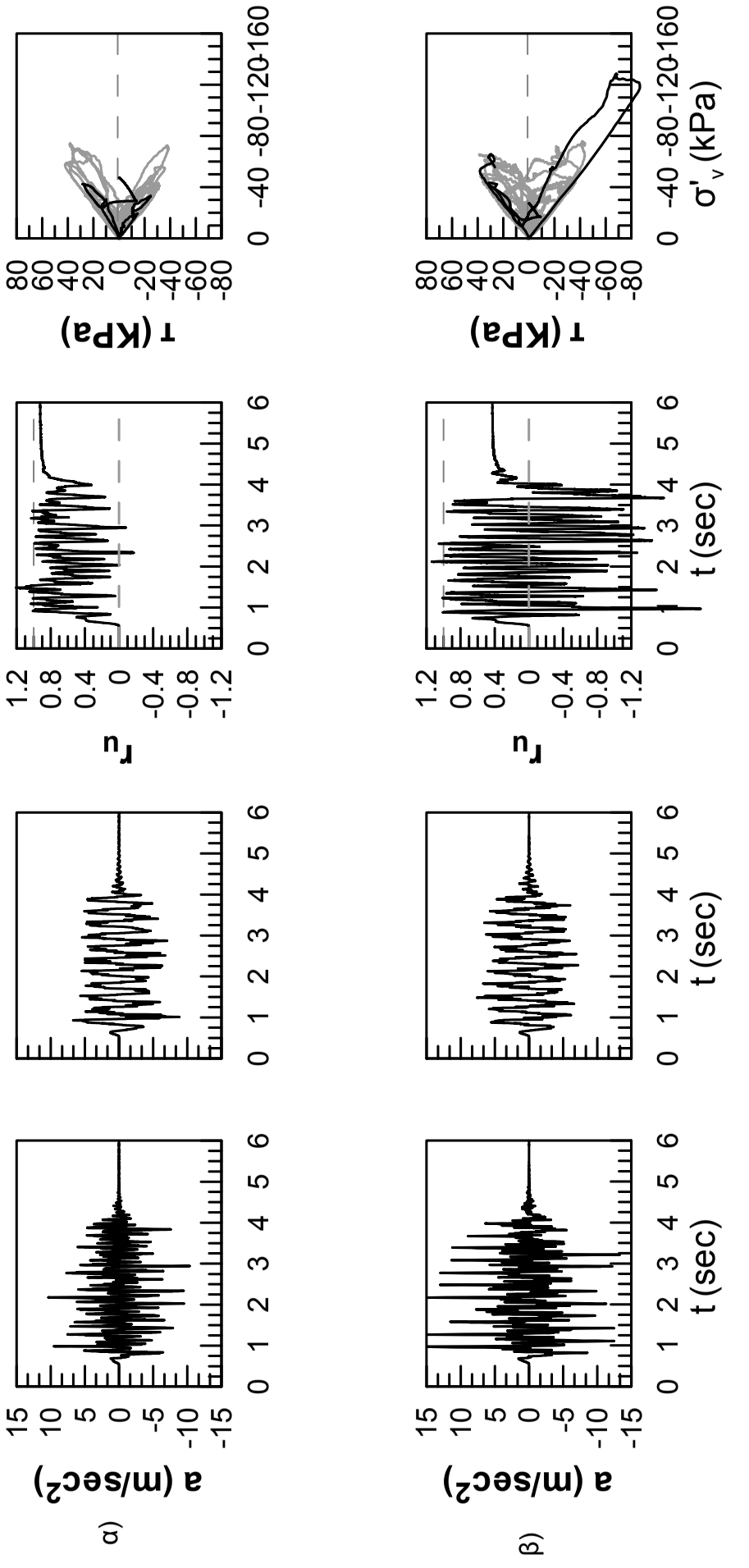
Σχήμα 3.4 : Σύγκριση βασικής ανάλυσης με παραμετρική ανάλυση όπου για το ύψος της αργίλου στην κορυφή ισχύει H=4m

Δεν παρουσιάζεται διαφορά παρά μόνο στα πρώτα 0m-4m πάχος άμμου, η οποία οφείλεται τόσο σε αριθμητικό θόρυβό όσο και στο γεγονός ότι λόγω του μεγαλύτερου πάχους της αργίλου, είναι μεγαλύτερη η διατμητική τάση που ασκείται εξαιτίας της διέγερσης, συμφωνα με τον τύπο $\tau=\alpha_m*\sigma'_v/g$, όπου

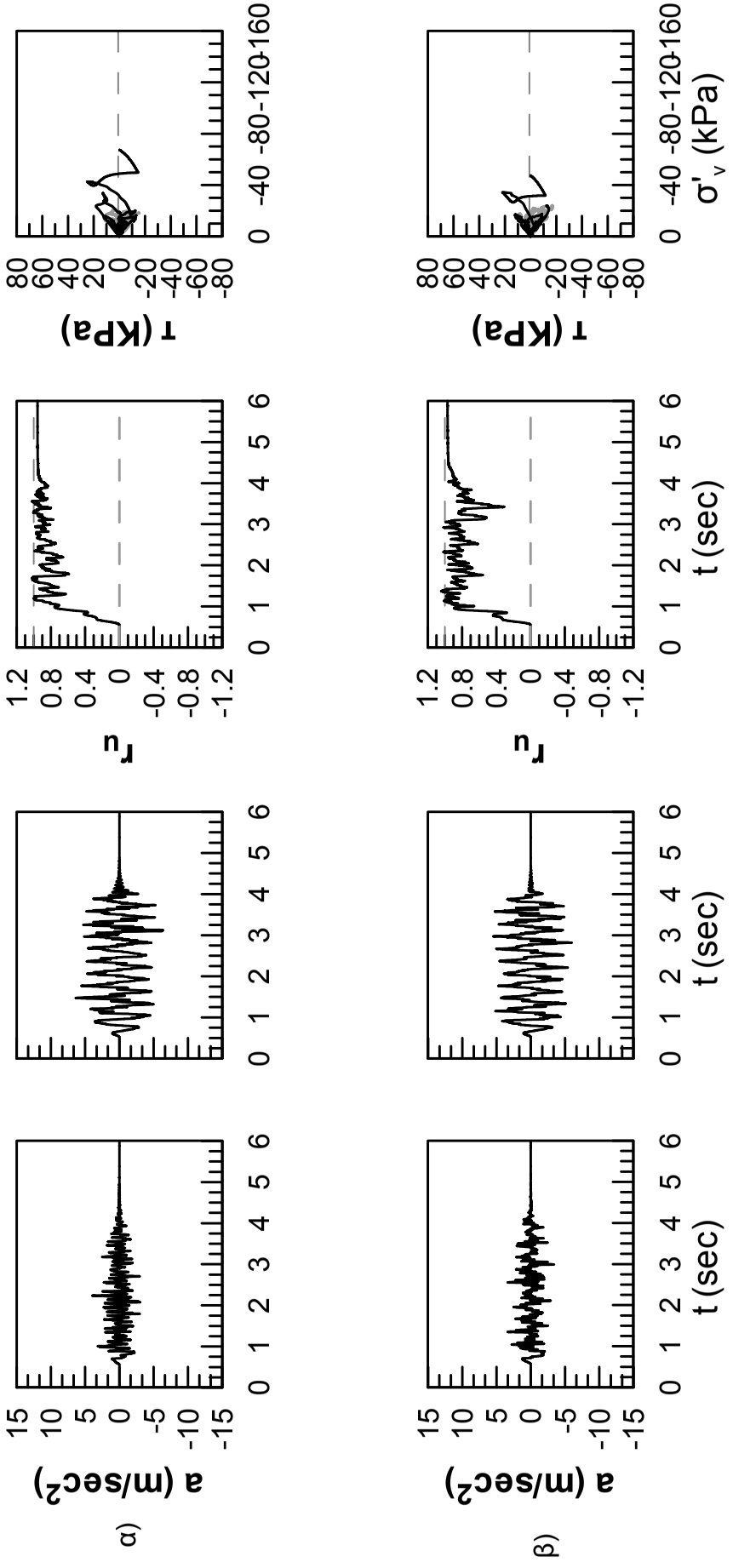
α_m η μέση επιτάχυνση στην άμμο, σ'_v η ενεργός κατακόρυφη τάση και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Συνεπώς η ενίσχυση που προκαλείται από το στρώμα της άμμου είναι μικρότερη καθώς είναι πιο κοντά στη ρευστοποίηση, λόγω μεγαλύτερης διατμητικής τάσης (**Σχήμα 3.5**). Παρόλ'αυτά, η επιρροή αυτού του φαινομένου φαίνεται να έχει πολύ μικρή σημασία στα συνολικά αποτελέσματα.

Επισημαίνεται ότι για τα μεγάλα πάχη της άμμου (10m-12m) οι δέκα κύκλοι της βασική διέγερσης δεν οδηγούν σε ρευστοποίηση. Γι'αυτό το λόγο αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν επιπλέον δέκα κύκλοι, σύνολο είκοσι, διότι αυτό που μας ενδιαφέρει για αυτά τα πάχη άμμου είναι η άμμος να οδηγηθεί σε ρευστοποίηση οπότε και η απόκριση της να είναι συγκρίσιμη με αυτή των υπολοίπων αναλύσεων.

Μόλαταυτα, δεν υπάρχει ουσιαστική επιρροή της παραμέτρου στο φαινόμενο κάτι που είναι αρκετά εμφανές τόσο στα διαγράμματα του Σχήματος 3.2 όσο και στις αντίστοιχες χρονοϊστορίες (**Σχήμα 3.6**)



Σχήμα 3.5 : Χρονοϊστορίες για πάχος άμμου 2m και πάχος αργιλικής επικάλυψης α) H=4m και β) H=2m



Σχήμα 3.6 : Χρονοϊστορίες για πάχος άμμου 6m και πάχος αργιλικής επικάλυψης α) H=4m και β) H=2m

3.4 Επίδραση του Δείκτη Πόρων του Στρώματος της Άμμου

Μια σημαντική παράμετρος για το στρώμα της άμμου είναι ο δείκτης πόρων, δεδομένου ότι συνδέεται άμεσα με τη σχετική πυκνότητα με τη σχέση :

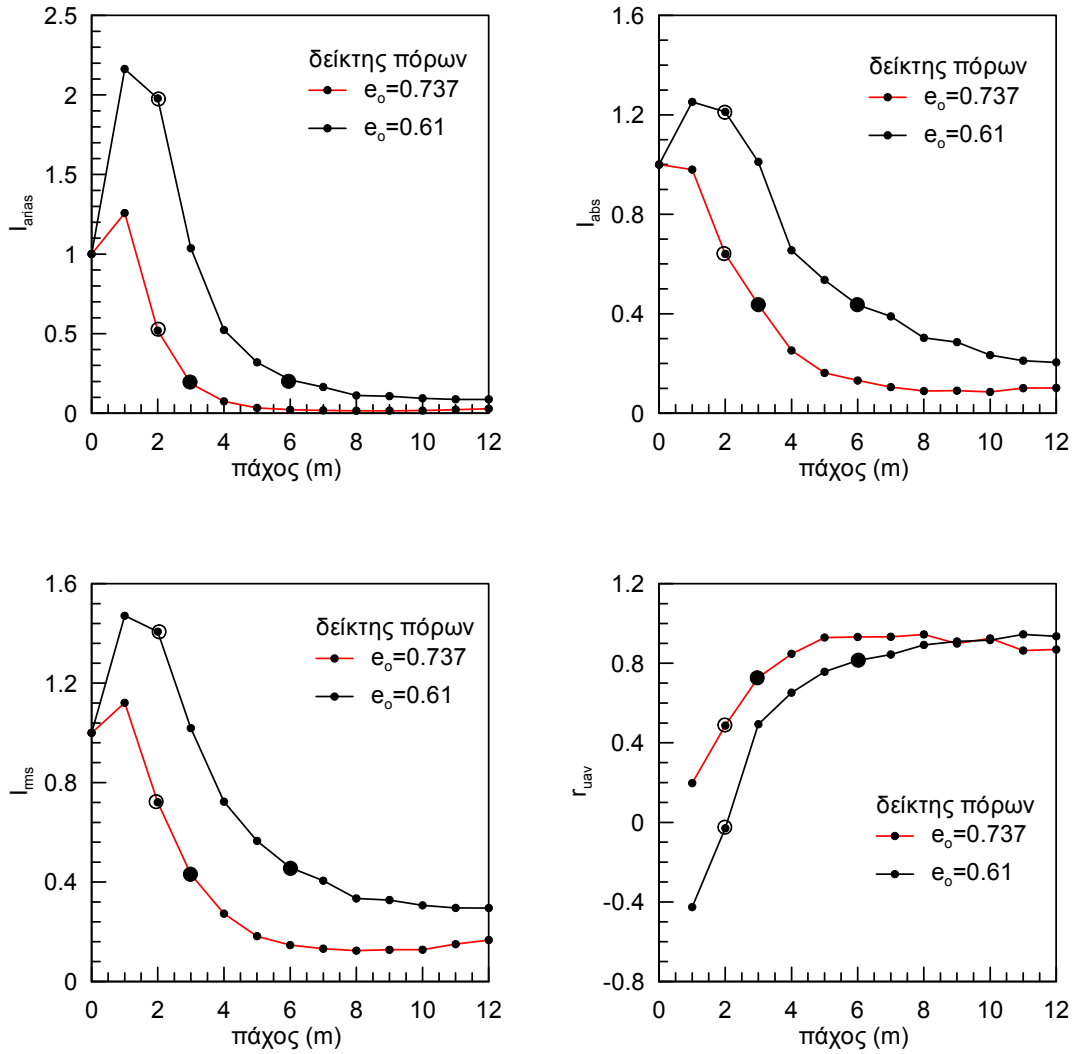
$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} * 100\% \qquad (3.1)$$

Όπου

- e : ο πραγματικός δείκτης πόρων του στρώματος
- e_{max} : ο δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στην ελάχιστη συμβατική πυκνότητα (μέγιστη τιμή του δείκτη πόρων)
- e_{min} : ο δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στη μέγιστη συμβατική πυκνότητα (ελάχιστη τιμή του δείκτη πόρων)

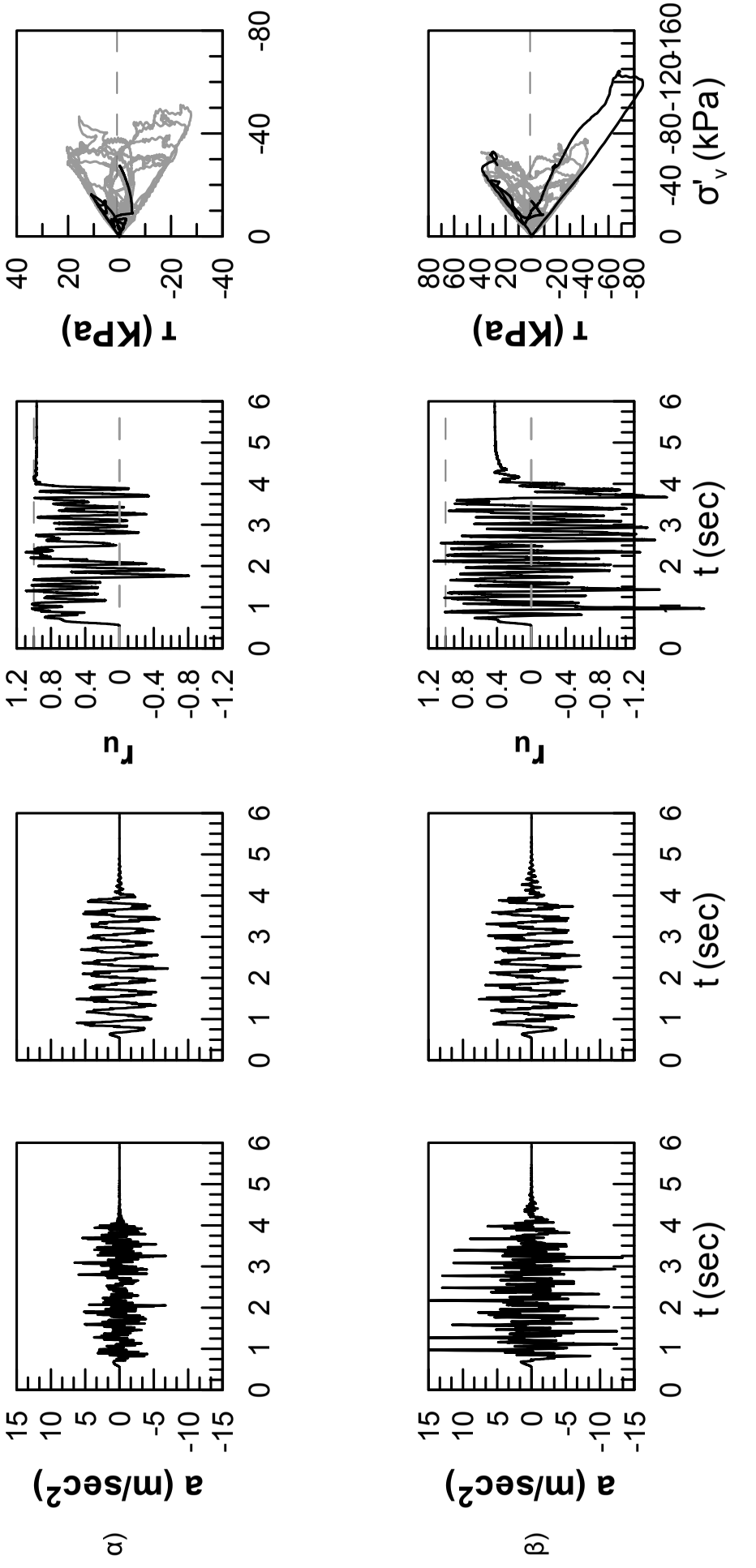
Το καταστατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιείται έχει βαθμονομηθεί για Nevada sand με e_{max} = 0.887 και e_{min} =0.511 (Α.Παπαδημητρίου, 1999). Για τη βασική ανάλυση χρησιμοποιείται η τιμή του δείκτη πόρων e_o=0.610, οπότε από τη σχέση (3.1) προκύπτει D_r ≈75%. Επιλέχτηκε να γίνει επιπλέον παραμετρική ανάλυση για σχετική πυκνότητα D_r = 40% οπότε προκύπτει από τη σχέση (3.1) ο αρχικός πραγματικός δείκτης πόρων e_o=0.737.

Από τα αποτελέσματα του **Σχήματος 3.7** είναι εμφανής η σημαντική και συστηματική επιρροή του δείκτη πόρων στην εκδήλωση της ρευστοποίησης στην άμμο. Εξαρχής φαίνεται η διαφορετική συμπεριφορά της άμμου καθώς είναι διαφορετικό το πάχος για το οποίο αρχίζει η πλήρης ρευστοποίηση. Για μικρότερη σχετική πυκνότητα (μεγαλύτερος δείκτης πόρων) η στήλη εδάφους εμφανίζει πολύ πιο γρήγορά τα συμπτώματα της ρευστοποίησης, ουσιαστικά από πάχος 2m-4m αντί για 5m-7m στη βασική ανάλυση. Και στην περίπτωση αυτή όμως, η γενική μορφή της καμπύλης παραμένει ουσιαστικά ίδια.

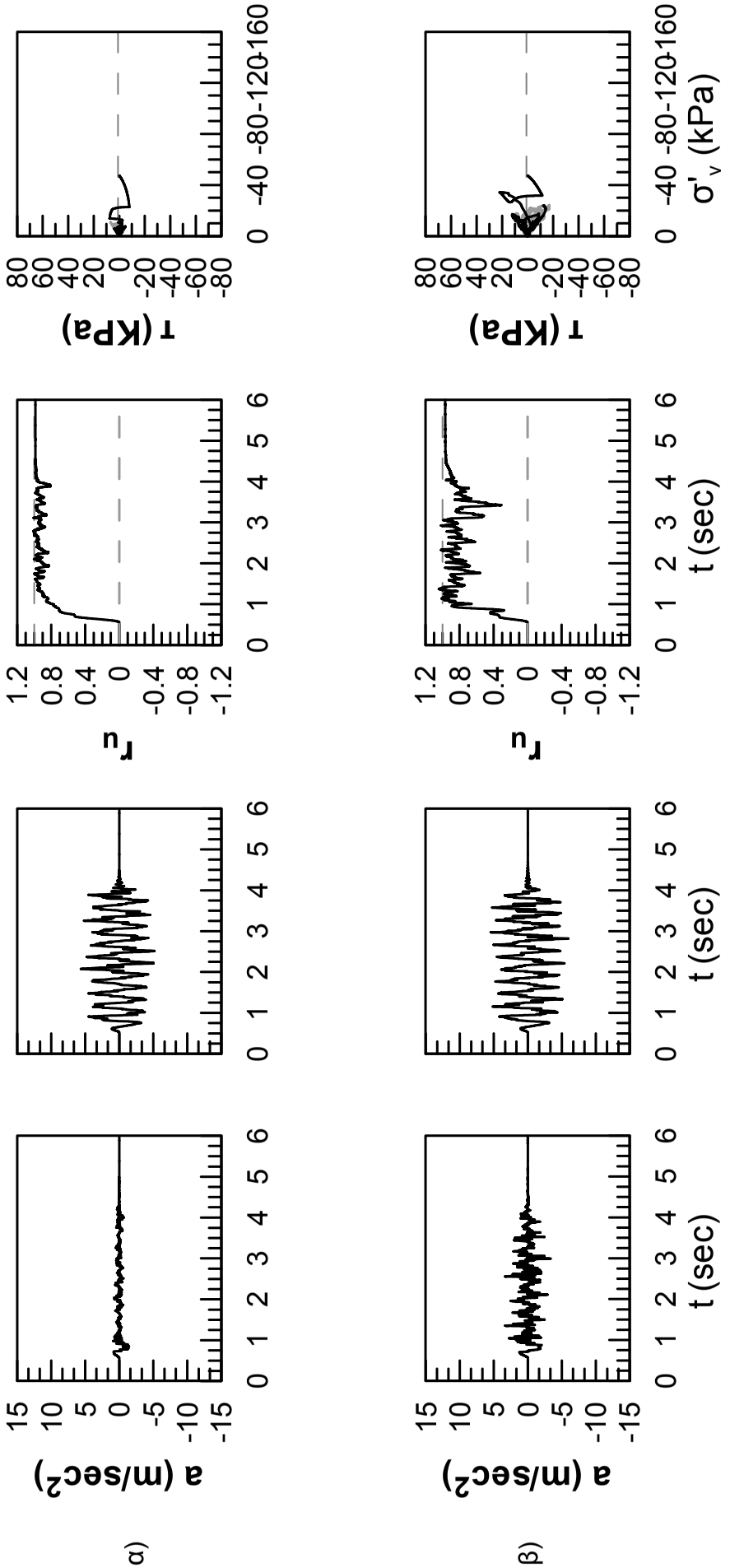


Σχήμα 3.7 : Σύγκριση βασικής ανάλυσης με παραμετρική ανάλυση όπου για το στρώμα της άμμου ισχύει e_o=0.737

Το ίδιο συμπέρασμα, όσον αφορά την έντονη επίδραση της εν λόγου παραμέτρου, εξάγεται και από τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες (**Σχήμα 3.8** και **Σχήμα 3.9**) τόσο των επιταχύνσεων όσο και των υπερπιέσεων πόρων, όπου η ρευστοποίηση είναι από νωρίς έκδηλη για μικρή σχετική πυκνότητα. Συνεπώς, ο δείκτης πόρων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το πρόβλημα που εξετάζεται και θα διερευνηθεί περεταίρω.



Σχήμα 3.8 : Χρονοϊστορίες για πάχος άμμου 2m και δείκτη πόρων α) e=0.737 και β) e=0.61



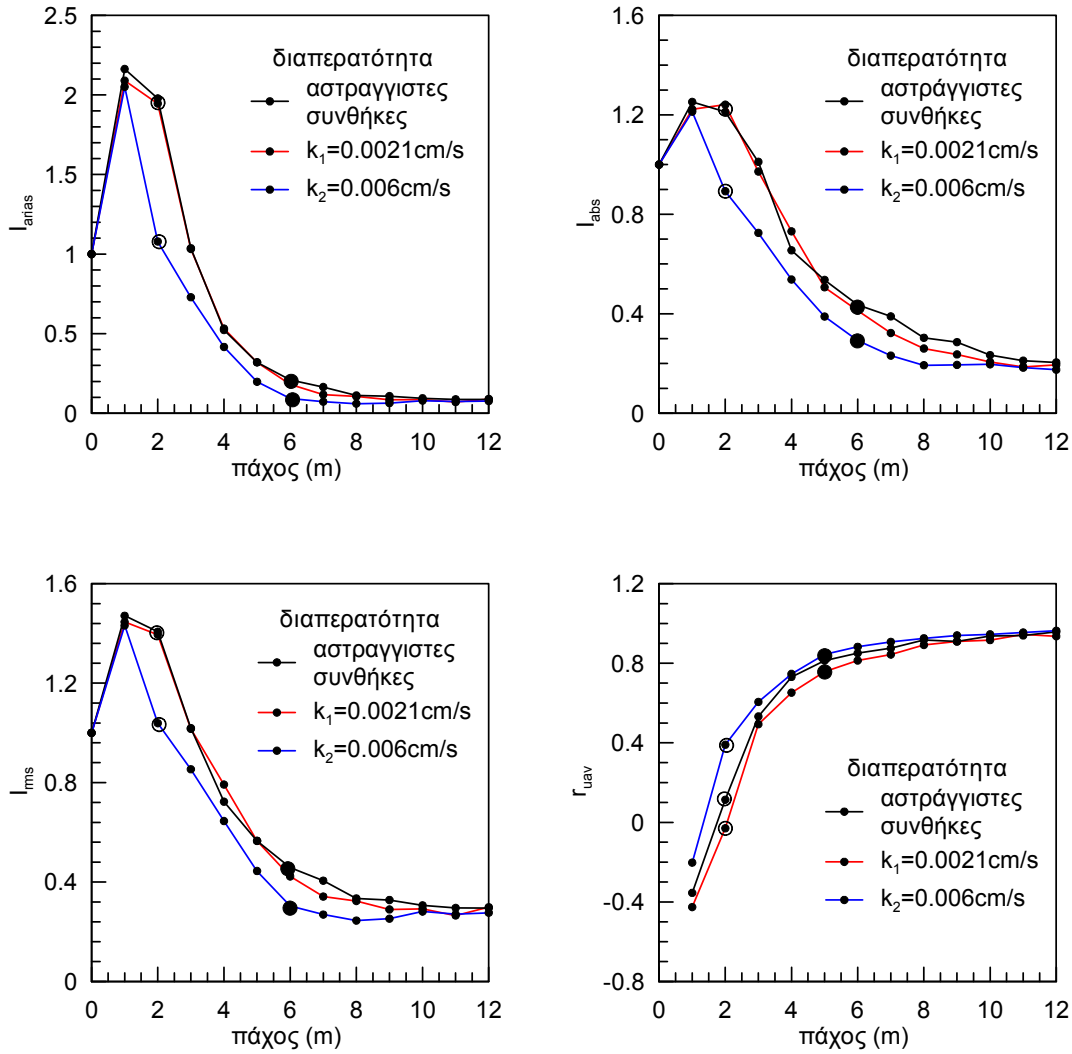
Σχήμα 3.9 : Χρονοϊστορίες για πάχος άμμου 6m και δείκτη πόρων α) e=0.737 και β) e=0.61

3.5 Επίδραση Διαπερατότητας του Στρώματος της Άμμου

Μια δεύτερη σημαντική παράμετρος που αφορά το στρώμα της άμμου είναι ο συντελεστής διαπερατότητας. Στην αρχική ανάλυση επιλέχθηκαν αστράγγιστες συνθήκες παραμόρφωσης για το στρώμα της άμμου. Αντίθετα στην παρούσα πραμετρική διερεύνηση θεωρήθηκε ότι η άμμος είναι διαπερατή.

Πιο συγκεκριμένα, από την εργασία των Arulmoli et al (1992) έχουν προκύψει τρείς τιμές για το συντελεστή διαπερατότητας της λεπτόκοκκης άμμου (Nevada Sand), με βάση την οποία έχει βαθμονομηθεί το καταστατικό προσομοίωμα. Έτσι, διεξήχθησαν παραμετρικές αναλύσεις υπό μερικώς στραγγιζόμενες συνθήκες, χρησιμοποιώντας τις δύο ακραίες τιμές k_1=0.0021cm/s και k_2=0.006cm/s, οι οποίες αφορούν την αρχική κατάσταση της άμμου και αντιστοιχούν σε σχετική πυκνότητα D_r=91% και D_r=40%. Επισημαίνεται ότι για τις στρώσεις της αργίλου πάνω και κάτω από την άμμο θεωρήθηκε μία πολύ πιο μικρή τιμή για το συντελεστή διαπερατότητας $k=5*10^{-7}$ cm/s.

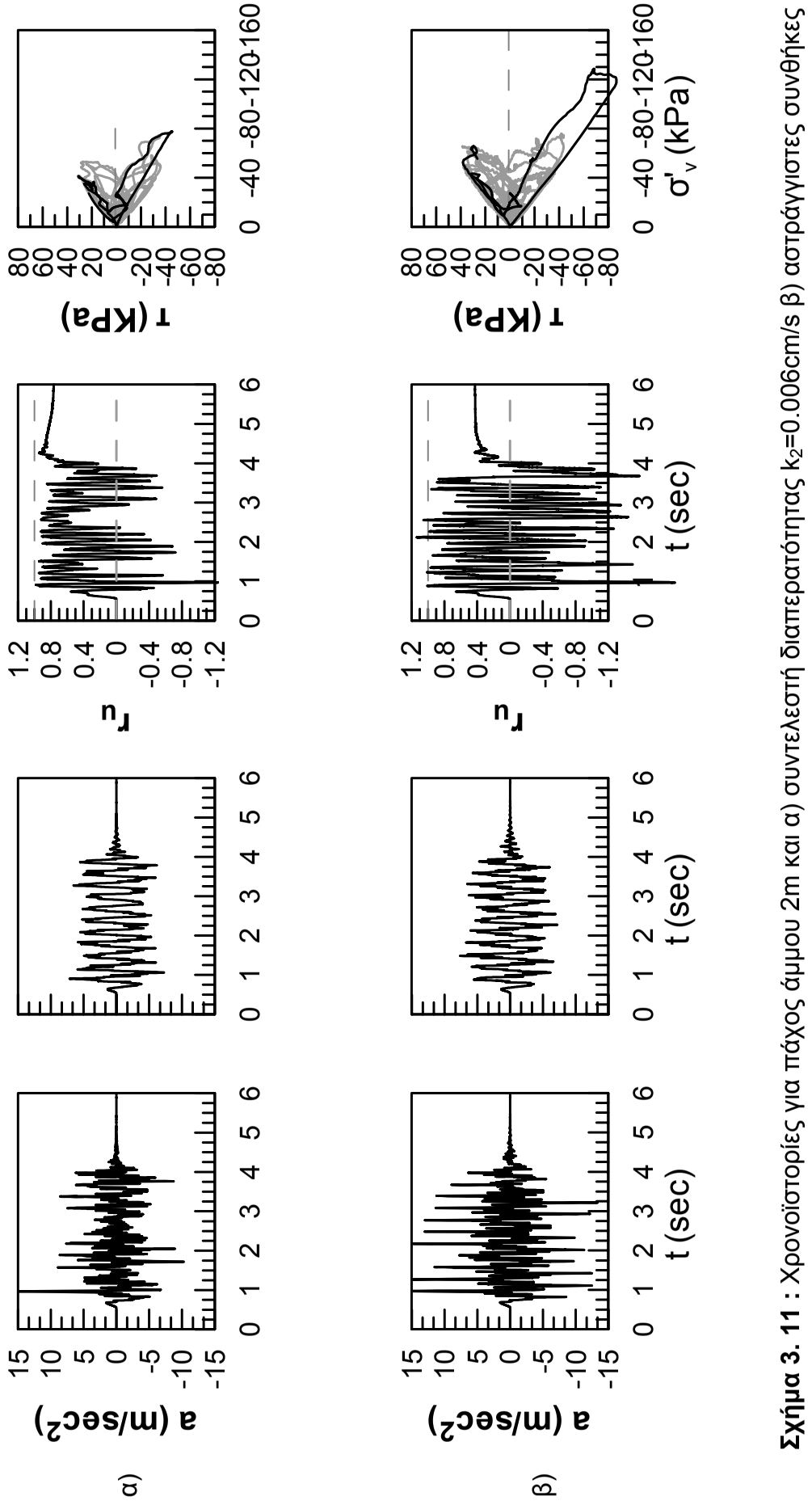
Οι δείκτες ρευστοποιήσιμης συμπεριφοράς παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.10**. Για την τιμή k_1=0.0021cm/s οι καμπύλες ταυτίζονται με αυτές για αστράγγιστες συνθήκες, που σημαίνει ότι για αυτή την τιμή του συντελεστή διαπερατότητας η παραμόρφωση του εδάφους όντως πραγματοποιείται υπό αστράγγιστες συνθήκες. Για την μεγαλύτερη τιμή k_2=0.0060cm/s όμως οι καμπύλες μετατοπίζονται προς μικρότερα πάχη. Υπάρχει επομένως κάποια συστηματική επίδραση, όχι όμως τόσο σημαντική όσο η επίδραση της σχετικής πυκνότητας που είδαμε προηγουμένως.



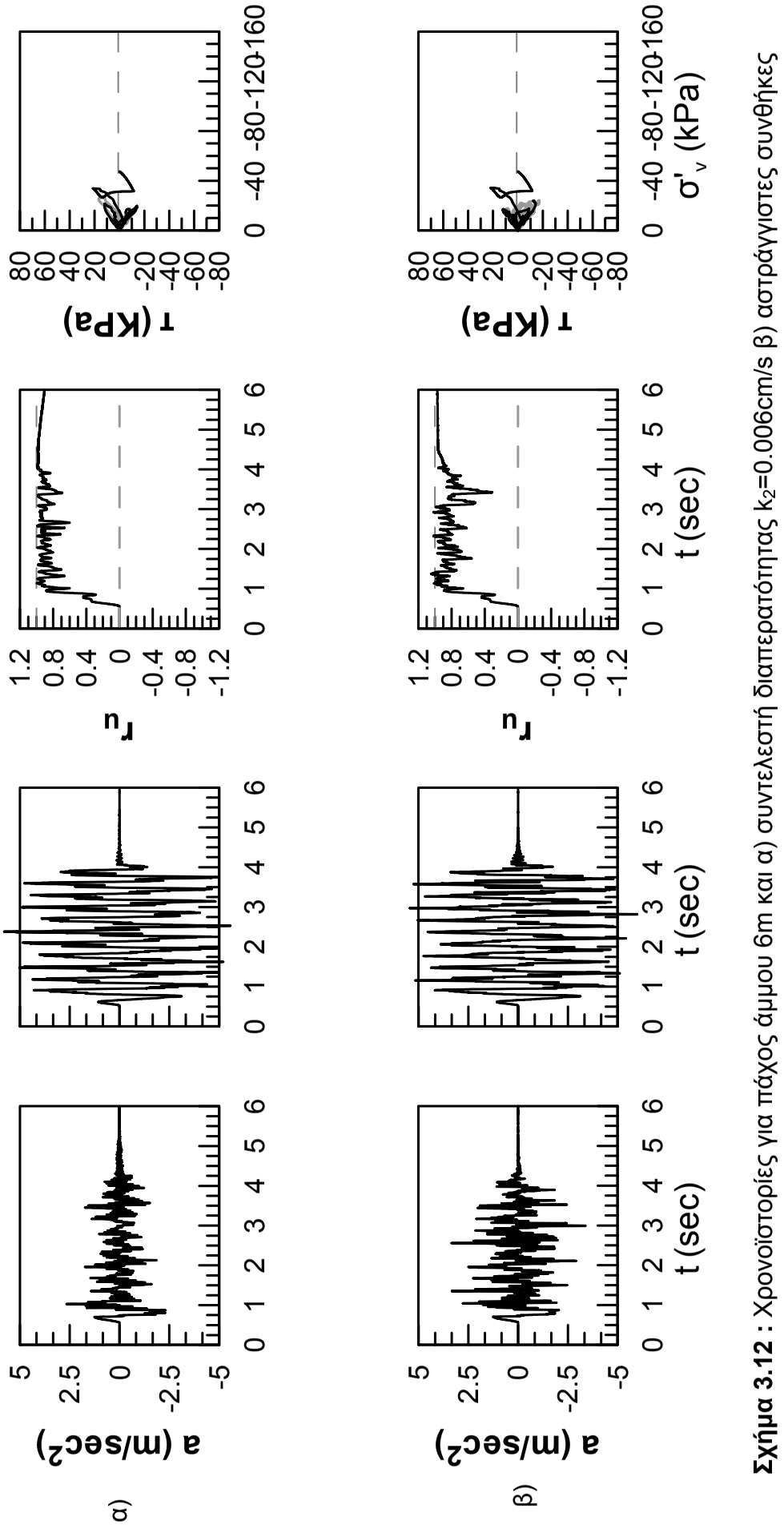
Σχήμα 3.10 : Σύγκριση βασικής ανάλυσης με παραμετρική ανάλυση όπου για το στρώμα της άμμου λαμβάνονται στραγγιζόμενες συνθήκες με συντελεστή διαπερατότητας k=0.0021cm/s και k=0.006cm/s

Η ίδια εικόνα παρουσιάζεται και στις χρονοϊστορίες που λαμβάνονται, καθώς εμφανίζονται διαφορές μόνο για την μεγάλη τιμή του συντελεστή διαπερατότητας k_2=0.006cm/s (**Σχήμα 3.11** και **Σχήμα 3.12**). Η εικόνα της απόκρισης της άμμου πλησιάζει πιο γρήγορα τη ρευστοποίηση για συντελεστή διαπερατότητας 0.006cm/s, κάτι που απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.10 με τη μετατόπιση της καμπύλης προς τα αριστερά. Τονίζεται ότι και σε αυτή την περίπτωση η μορφή της καμπύλης παραμένει ίδια.

Συνεπώς η μεταβολή της παραμέτρου αυτής, στο εύρος που εξετάστηκε και αφορά το προσομοίωμα μας, μεταβάλλει την απόκριση του εδαφικού προφίλ και η επίδραση της στο φαινόμενο αξίζει να διερευνηθεί περαιτέρω.



Σχήμα 3. 11 : Χρονοϊστορίες για πάχος άμμου 2m και α) συντελεστή διαπερατότητας k_2=0.006cm/s β) αστράγγιστες συνθήκες

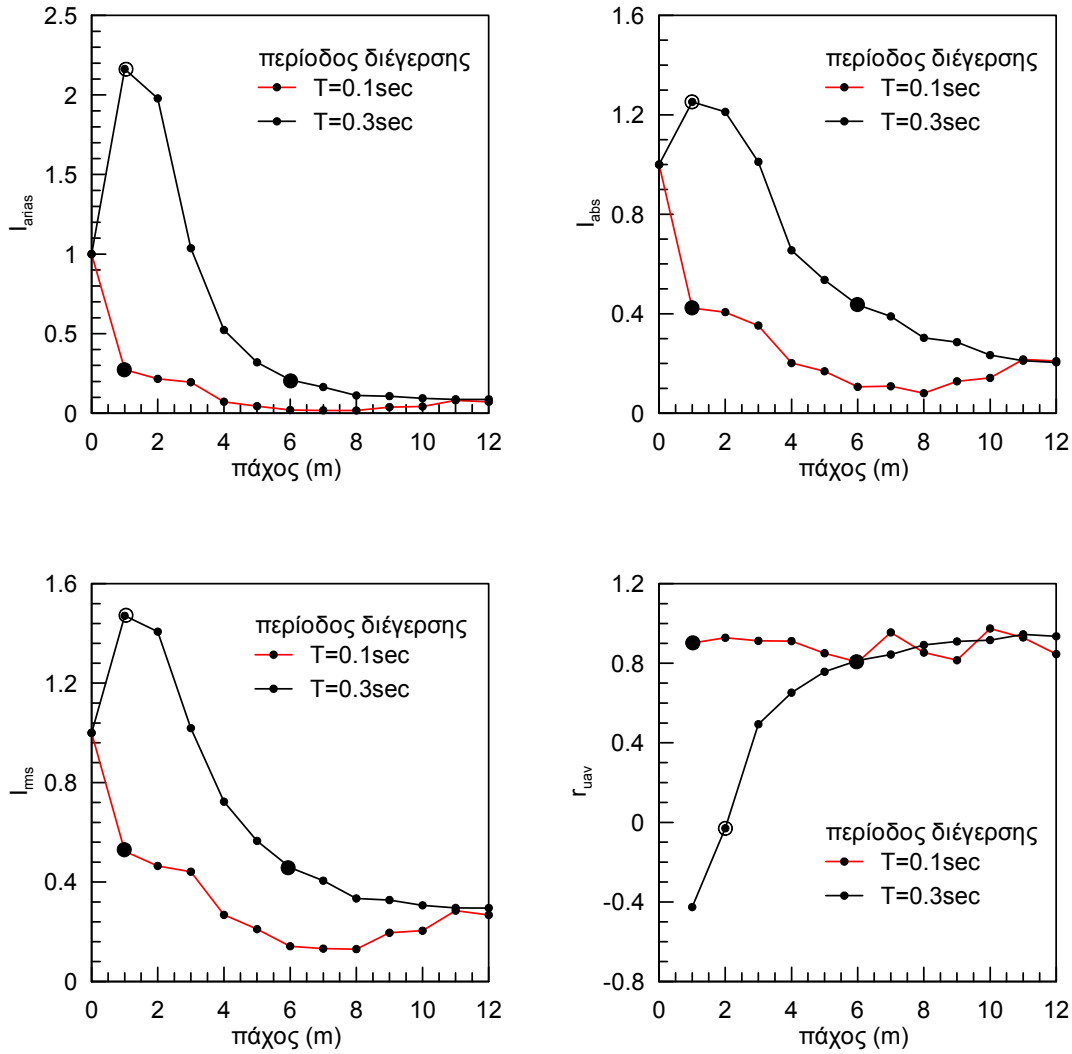


Σχήμα 3.12 : Χρονοϊστορίες για πάχος άμμου 6m και α) συντελεστή διαπερατότητας k_2=0.006cm/s β) αστράγγιστες συνθήκες

3.6 Επίδραση Περιόδου Διέγερσης

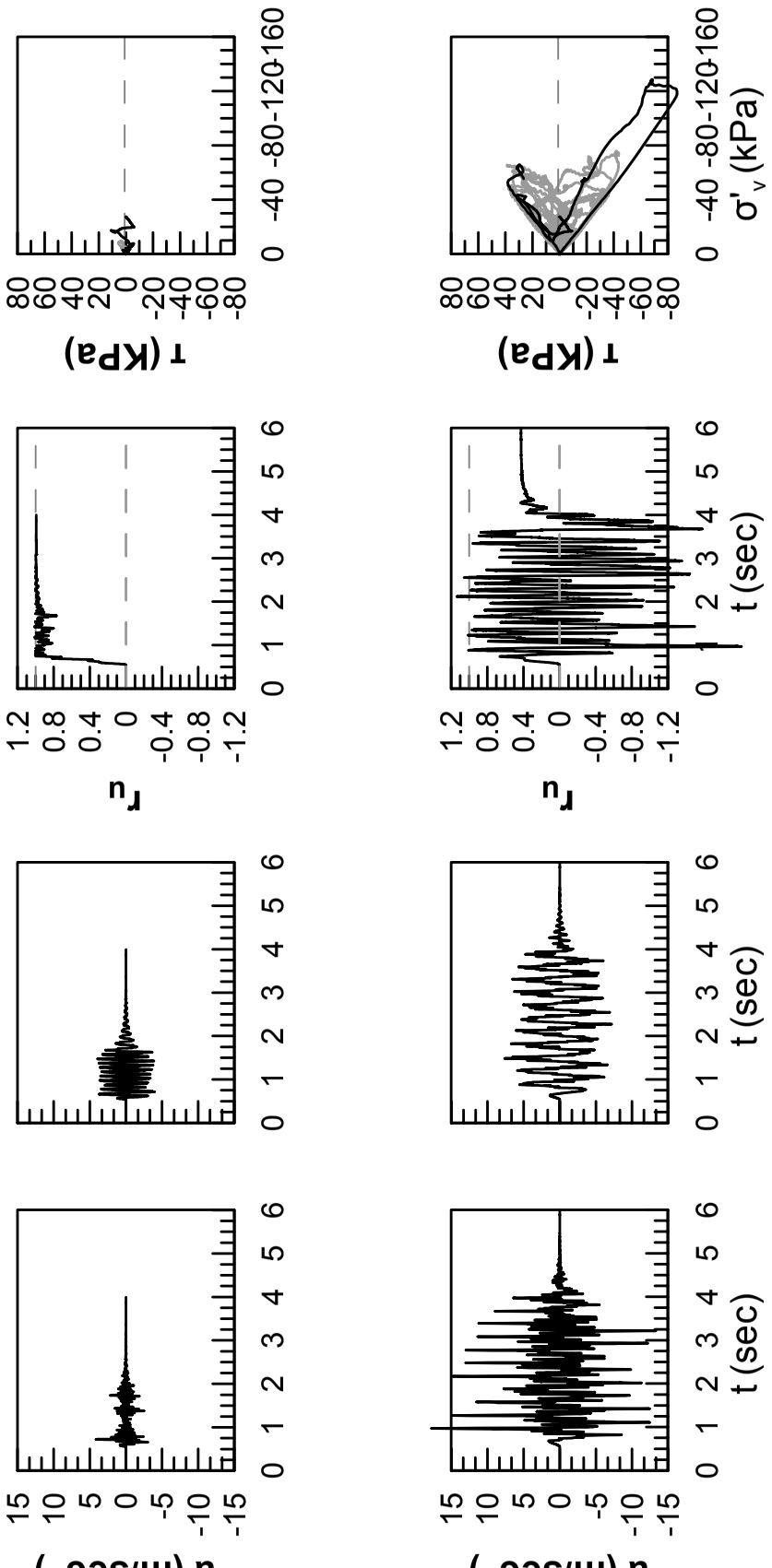
Από τις πιο βασικές παραμέτρους όσον αφορά τη διέγερση, είναι η δεσπόζουσα περίοδος της. Στην προκειμένη περίπτωση έχει αποφασιστεί, για τη βασική ανάλυση, η διέγερση να έχει 10 ομοιόμορφους ημιτονικούς κύκλους, μέγιστη επιτάχυνση 0.3g και βασική περίοδο 0.3sec όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Για την παρούσα παραμετρική ανάλυση η περίοδος της διέγερσης μεταβάλλεται από 0.3sec σε 0.1sec, ώστε να ελεγχθεί η επιρροή που έχει στο πρόβλημα μας.

Οι δείκτες συμπεριφοράς ρευστοποίησης I παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.13** ενώ αντιπροσωπευτικές χρονοϊστορίες επιταχύνσεων, πιέσεων πόρων καθώς και διαδρομές ενεργών τάσεων παρουσιάζονται στα **Σχήματα 3.14** και **3.15**. Από το Σχήμα 3.13**,** όπου εμφανίζονται οι δείκτες συμπεριφοράς, προκύπτει ότι η περίοδος της διέγερσης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στο υπο εξέταση φαινόμενο. Για περίοδο 0.1sec, η έντονη απομείωση των ταχυτήτων που οφείλεται στη ρευστοποίηση ξεκινάει από πάχος άμμου 1m-3m (βλεπε και Σχήμα 3.14) . Εύκολα, λοιπόν προκύπτει η μεγάλη σημασία της περιόδου στη συμπεριφορά της άμμου και είναι προφανές ότι αλλαγές στην περίοδο προκαλούν σημαντικές αλλαγές στην απόκριση του εδάφους του προβλήματος.

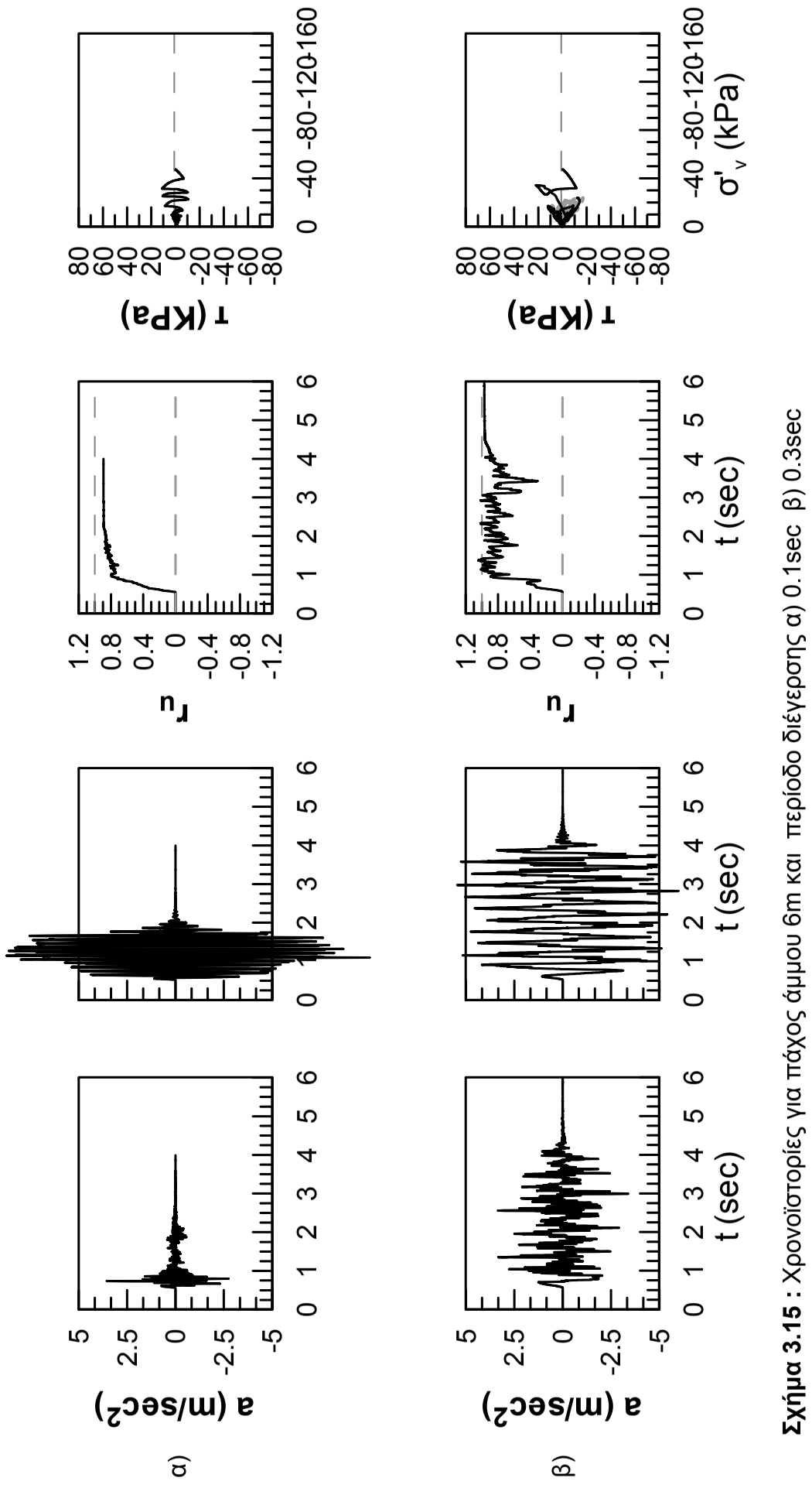


Σχήμα 3.13 : Σύγκριση βασικής ανάλυσης με παραμετρική ανάλυση όπου η περίοδος της διέγερσης ισούται με 0.1sec

Επισημαίνεται ότι και σε αυτή την παραμετρική ανάλυση, όπως και για την επίδραση του πάχους της αργ'ιλου κορυφής, για περίοδο διέγερσης 0.1sec, για πάχος άμμου από 8m έως και 12m οι δέκα κύκλοι δεν επαρκούν να ρευστοποιήσουν το στρώμα της άμμου. Συνεπώς, χρησιμοποιήθηκαν είκοσι ημιτονικοί κύκλοι ώστε η συμπεριφορά της άμμου να είναι συγκρίσιμη με την αντίστοιχη απόκριση για τα υπόλοιπα πάχη της άμμου.



Σχήμα 3.14 : Χρονοϊστορίες για πάχος άμμου 2m και περίοδο διέγερσης α) 0.1sec β) 0.3sec



Σχήμα 3.15 : Χρονοϊστορίες για πάχος άμμου 6m και περίοδο διέγερσης α) 0.1sec β) 0.3sec

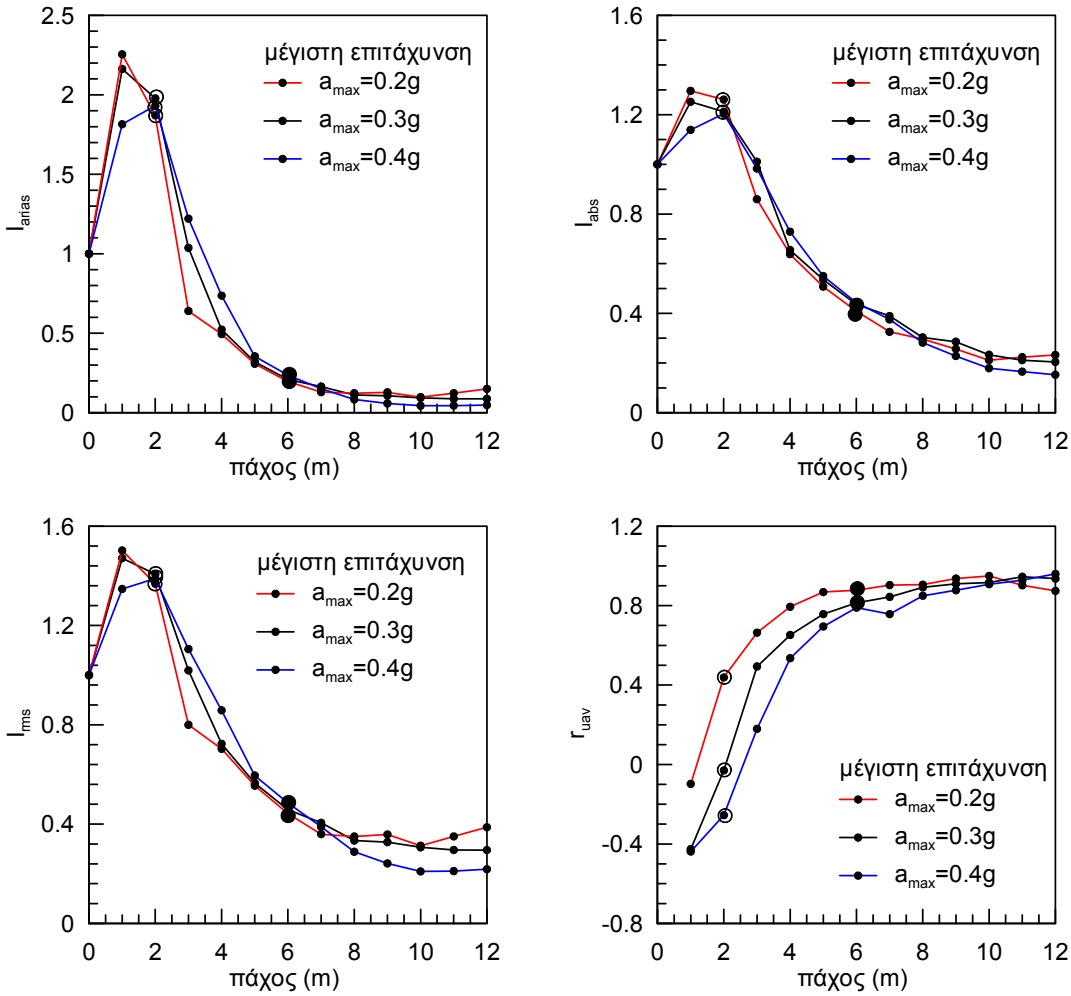
3.7 Επίδραση Μέγιστης Επιτάχυνσης Διέγερσης

Η δεύτερη παράμετρος που χαρακτηρίζει τη διέγερση στη βάση της στήλης εδάφους, είναι η μέγιστη επιτάχυνση. Από 0.3g που αρχικά ορίστηκε, επιλέγεται να γίνει ανάλυση με 0.2g και 0.4g ώστε να εξεταστεί ενδελεχώς η επίδραση και της εν λόγω παραμέτρου.

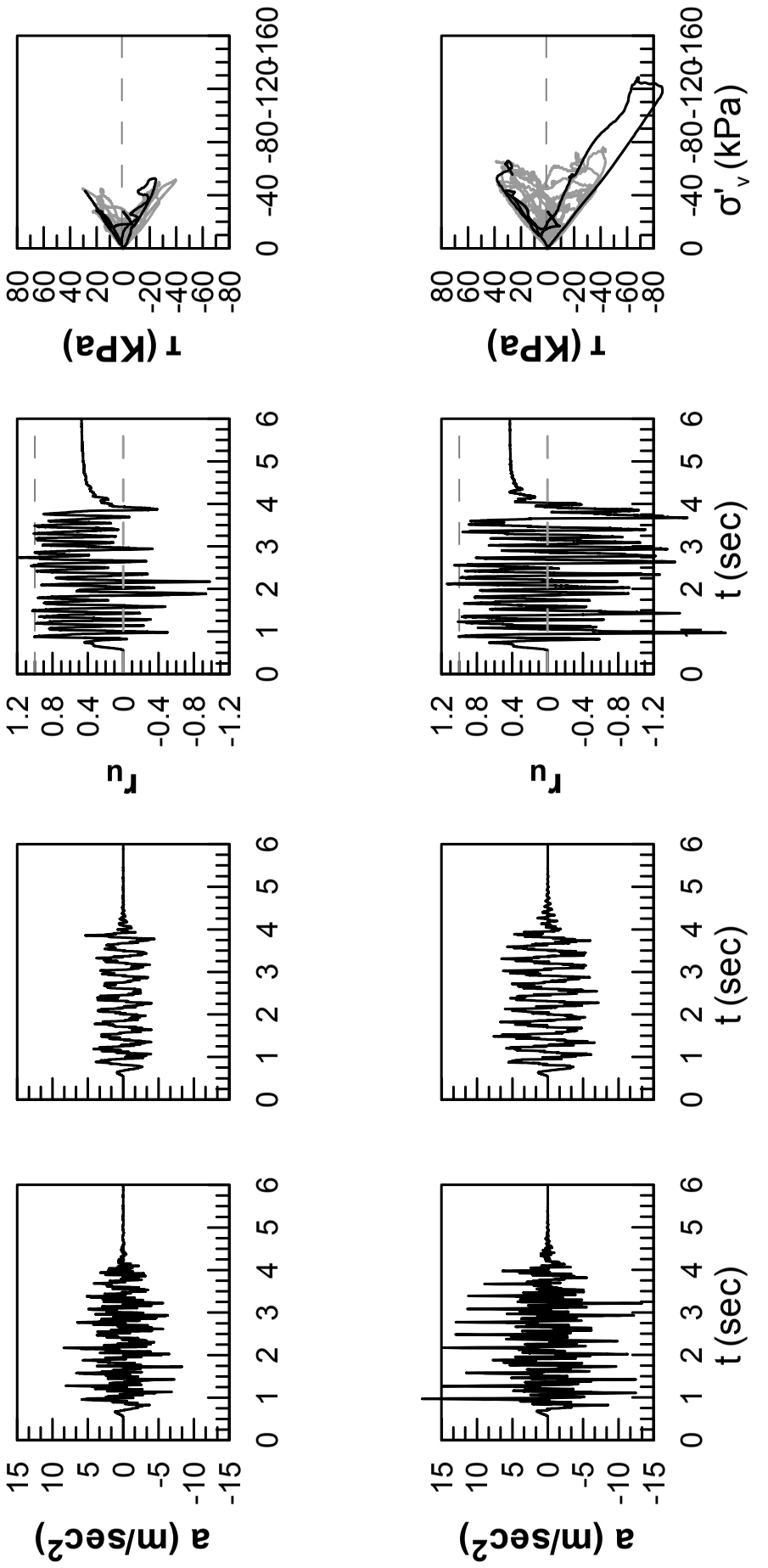
Στο **Σχήμα 3.16** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με τη μορφή των δεικτών ρευστοποιήσιμης συμπεριφοράς. Τα αποτελέσματα προδίδουν μικρή επίδραση της παραμέτρου στα αποτελέσματα του προβλήματος. Η εμφανής ρευστοποίηση αρχίζει περίπου στα 6m-8m και στη γενική συμπεριφορά εμφανίζονται μόνο μικρές διαφορές. Η απόκριση της άμμου ουσιαστικά δεν ματαβάλλλεται καθόλου με την αλλαγή της μέγιστης επιτάχυνσης.

Υπογραμμίζεται ότι για πάχη άμμου 10m-12m έγινε χρήση είκοσι κύκλων στη διέγερση καθώς, όπως προαναφέρθηκε σε δύο ακόμη περιπτώσεις, οι δέκα κύκλοι δεν επαρκούσαν για τη ρευστοποίηση της άμμου.

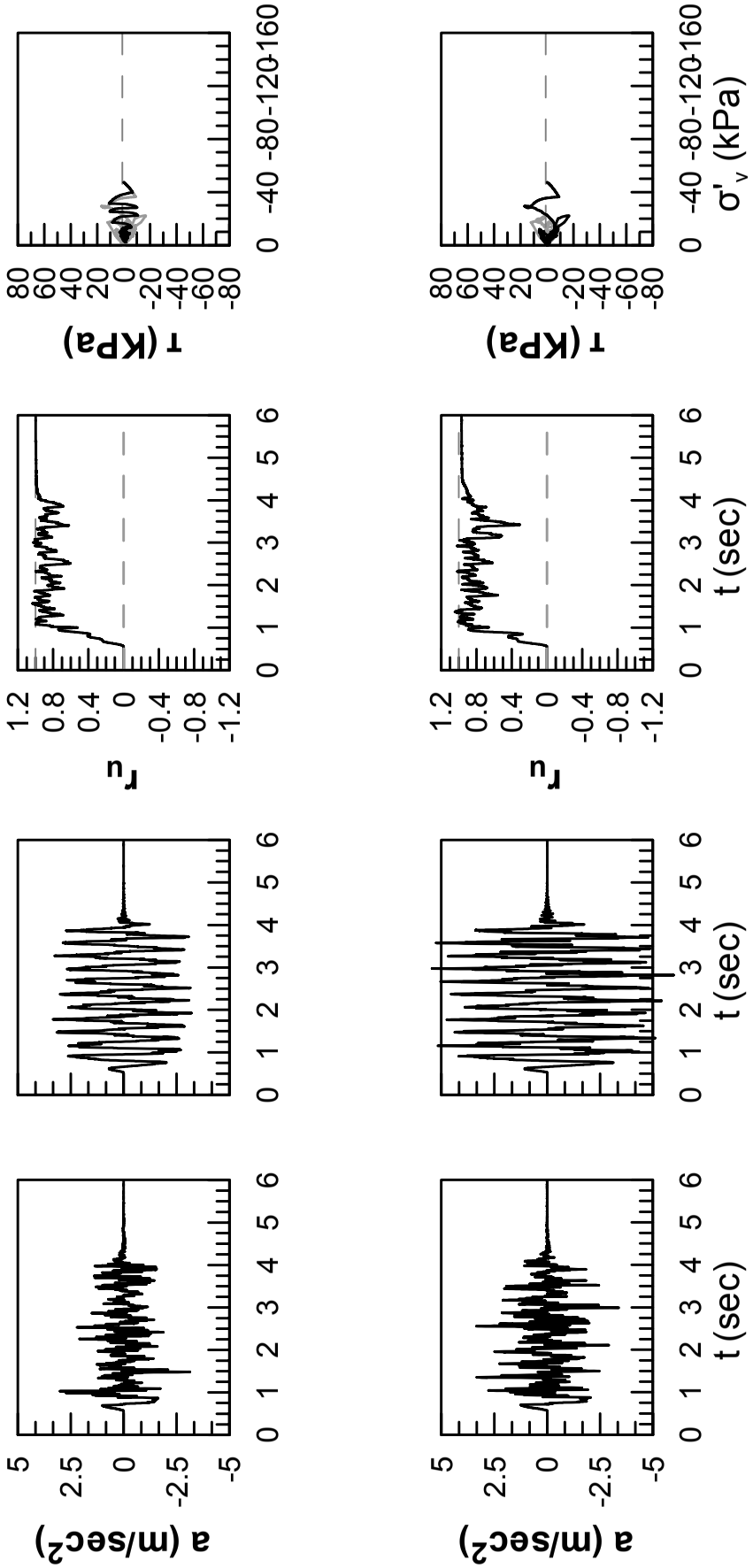
Παρόλαυτά, η γενική εικόνα δεν διαφοροποιείται επί της ουσίας από την αρχική ανάλυση. Το κρίσιμο πάχος άμμου, όπου η ρευστοποίηση λαμβάνει την τελική συνήθη μορφή της δεν αλλάζει και η συνολική συμπεριφορά του εδαφικού προφίλ με τη μεταβολή του πάχους της άμμου, παραμένει παρεμφερής, με μικρές διαφοροποιήσεις. Έτσι, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης δεν ανήκει στους παράγοντες με έντονη επίδραση στο φαινόμενο και δεν θα διερευνηθεί περεταίρω (βλ. Και **Σχήματα 3.17** και **3.18**).



Σχήμα 3.16 : Σύγκριση βασικής ανάλυσης με παραμετρική ανάλυση όπου η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης λαμβάνεται ίση με 0.2g και 0.4g



Σχήμα 3. 17 : Χρονοϊστορίες για πάχος άμμου 2m και μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης α) 0.2g β) 0.3g



Σχήμα 3.18 : Χρονοϊστορίες για πάχος άμμου 6m και μέγιστη επιτάχυνση διέγερσης α) 0.2g β) 0.3g

3.8 Συμπεράσματα

Από τις παραπάνω αναλύσεις προέκυψε ότι οι δύο παράμετροι που αφορούν τα αργιλικά στρώματα, ταχύτητα διατμητικού κύματος της αργίλου στη βάση και πάχος αργίλου στην κορυφή, δεν διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο υπό εξέταση φαινόμενο. Επίσης, η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης δεν είναι σημαντική ως παράμετρος για την απόκριση της άμμου. Αντιθέτως, οι παράμετροι που αφορούν το στρώμα της άμμου, δηλαδή ο αρχικός δείκτης πόρων και ο συντελεστής διαπερατότητας, καθώς και η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης αποτελούν σημαντικές παραμέτρους και θα αποτελέσουν αντικείμενο πιο συστηματικής διερεύνησης στα επόμενα κεφάλαια.

Στον **Πίνακα 3.1** φαίνονται συνοπτικά οι παραμετρικές αναλύσεις που θα διεξαχθούν για την πιο συστηματική περιγραφή του φαινομένου με βάση τις παραμέτρους οι οποίες, με βάση την παραπάνω διερεύνηση, έχουν επίδραση στο πρόβλημα. Επισημαίνεται ότι θεωρήσαμε αστράγγιστες συνθήκες παραμόρφωσης, παραδοχή η οποία είναι σύμφωνη με την κοινή πρακτική. Επιπλέον, είδαμε από τα προηγούμενα ότι η επίδραση της διαπερατότητας είναι αρκετά μικρότερη από την επιρροή που ασκούν στο φαινόμενο οι παράμετροι της περιόδου και του δείκτη πόρων της άμμου, οπότε και η διαπερατότητα δεν μεταβάλλεται στις αναλύσεις που ακολουθούν. Σε κάθε περίπτωση το σύνολο αυτών των αναλύσεων μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για την περεταίρω διαρεύνηση του ρόλου της διαπερατότητας.

		T (sec)				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Dr (%)	40	×	×	×	×	×
	60	×	×	×	×	×
	75	×	×	×	×	×
Αστράγγιστες συνθήκες (συντελεστής διαπερατότητας k=0)						

Πίνακας 3.1 : Σύνοψη των παραμετρικών αναλύσεων που ακολουθούν για την περιγραφή του φαινομένου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΕΔΑΦΟΣ

4.1 Γενικά

Παράλληλα με τις πρωτογενείς γεωτεχνικές και σεισμολογικές παραμέτρους του προβλήματος, που εξετάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, σημαντική επίδραση στη σεισμική απόκριση του ρευστοποιημένου εδάφους ενδέχεται να έχει και η ταχύτητα μετάδοσης των σεισμικών κυμάτων, V_s, εντός της ρευστοποιημένης στρώσης. Η παράμετρος αυτή συνδέεται άμεσα με το μήκος κύματος του σεισμικού κραδασμού ($\lambda=V_s*T$, T: περίοδος κραδασμού), και έχει ελάχιστα διερευνηθεί διεθνώς.

Κατ'επέκταση των ανωτέρω, το παρόν κεφάλαιο θα αφιερωθεί αποκλειστικά στη διερεύνηση της παραμέτρου αυτής, με σκοπό να εντοπισθούν οι παράγοντες και οι μηχανισμοί που επιδρούν στο μέγεθος της και τελικώς να διατυπωθούν σχέσεις και κριτήρια για την ποσοτική εκτίμηση της στην πράξη. Η διερεύνηση βασίζεται στις παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, τα αποτελέσματα των οποίων συνοψίζονται στο Παράρτημα.

Η μεθοδολογία υπολογισμού της ταχύτητας V_s και η στατιστική επεξεργασία των παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάζεται στις ακόλουθες παραγράφους.

4.2 Μεθοδολογία Υπολογισμού Μέσης Ταχύτητας Μετάδοσης Σεισμικού Κύματος

Η μέθοδος που χρησιμοποιούμε για την εύρεση της ταχύτητας του σεισμικού κύματος μέσα στο ρευστοποιημένο στρώμα της άμμου έχει ως εξής : μετά το τέλος της σεισμικής διέγερσης (διάρκειας δέκα κύκλων εν γένει), αφήνουμε μια περίοδο ηρεμίας (χωρίς δονήσεις) μέχρι ο κάνναβος να ηρεμήσει. Ο χρόνος που χρειάζεται για να ηρεμήσει ο κάνναβος προκύπτει από τις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων οι οποίες μετά από κάποιο χρόνο ουσιαστικά μηδενίζονται

(πρακτικά έχουν έναν αριθμητικό θόρυβο της τάξης του 10^{-5}). Για την παρούσα εφαρμογή ο χρόνο αυτός προέκυψε απο 2.9sec έως και 3.7sec.

Αφού ηρεμήσει ο κάνναβος και σταματήσουν οι ταλαντώσεις, ασκούμε στη βάση της εδαφικής στήλης έναν παλμό ο οποίος αποτελείται από έναν ημιτονικό κύκλο ίδιας περιόδου και ίδιας μέγιστης επιτάχυνσης με την κύρια διέγερση που είχε ασκηθεί στην αρχή. Υπογραμμίζεται ότι όταν ασκείται ο ημιτονικός παλμός, το στρώμα της άμμου είναι ήδη ρευστοποιημένο από την αρχική διέγερση και γενικά έχει αναπτύξει υπερπιέσεις πόρων τέτοιες ώστε ο λόγος υπερπιέσεων πόρων $r_u=\Delta u/\sigma'v_o$ να είναι ίσος με 0.8 έως 1.0.

Λαμβάνονται οι χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων στη βάση και στην κορυφή του στρώματος της άμμου, μέσω των οποίων λαμβάνεται η χρονική καθυστέρηση λόγω διάδοσης του παλμού μέσα στο στρώμα της άμμου.

Πιο συγκεκριμένα, για την εύρεση της ταχύτητας του διατμητικού κύματος χρησιμοποιούμε τις χρονοϊστορίες αυτές ώστε να μετρήσουμε τη διάρκεια που χρειάζεται για να φτάσει ο ημιτονικός παλμός από τη βάση του στρώματος της άμμου στην κορυφή. Κατόπιν διαιρώντας το πάχος του στρώματος της άμμου με το χρόνο που υπολογίστηκε καταλήγουμε στην ταχύτητα διάδοσης στο στρώμα της ρεσυτοποιημένης άμμου.

Πρακτικώς, η μέτρηση της διάρκειας διάδοσης του παλμού εντός του στρώματος της άμμου γίνεται χρησιμοποιώντας τους χρόνους πρώτης άφιξης της επιτάχυνσης με τιμή $0.1m/s^2$ στη βάση και στην κορυφή του στρώματος. Η τιμή αυτή επιλέχτηκε (μετά από δοκιμές), προκειμένου να είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις ταλαντώσεις που δημιουργούνται από αριθμητικό θόρυβο κατά την περίοδο ηρεμίας, και είναι της τάξης μεγέθους $0.01m/s^s$. Αποφασίστηκε δηλαδή ότι για να είναι αξιόπιστη η εύρεση του χρόνου πρώτης άφιξης, θα πρέπει η αντίστοιχη τιμή να είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη.

Επίσης, οι τιμές των χρονοϊστοριών των επιταχύνσεων λαμβάνονται από το λογισμικό με ακρίβεια επτά δεκαδικών ψηφίων. Κατά τους υπολογισμούς, διατηρούνται και τα επτά δεκαδικά ψηφία διότι θεωρήθηκε ότι αυτή η μέθοδος είναι η πλέον ακριβής και δεν μεταβάλλει τα αποτελέσματα με τεχνητό τρόπο, όπως θα γινότανε αν χρησιμοποιούνταν λιγότερα ψηφία.

Τέλος, καθώς οι τιμές της επιτάχυνσης που λαμβάνονται κατά την «πρώτη άφιξη» των σεισμικών κυμάτων δεν αντιστοιχούν ακριβώς στην τιμή 0.1m/s^2 πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή μεταξύ των κατάλληλων τιμών, ώστε για όλες τις αναλύσεις τα αποτελέσματα να αντιστοιχούν σε επιτάχυνση ακριβώς ίση προς 0.1m/s^2.

Εκτός της ταχύτητας του διατμητικού κύματος του ρευστοποιημένου εδάφους , με την ίδια μέθοδο υπολογίζεται και η αρχική ταχύτητα του στρώματος της άμμου, η οποία θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως αρχική τιμή αναφοράς. Δηλαδή, λαμβάνοντας τη διάρκεια του χρόνου που χρειάζεται ο πρώτος κύκλος της αρχικής διέγερσης για να φτάσει από τη βάση του στρώματος στην κορυφή και διαρώντας το πάχος με αυτή τη διάρκεια, προκύπτει η αρχική ταχύτητα διατμητικού κύματος στην άμμο V_{so}.

4.3 Σύγκριση με την Απόκριση Ισοδύναμου Ελαστικού Μέσου

Όπως διαδίδεται το σεισμικό κύμα προς την επιφάνεια και με την πάροδο του χρόνου, στο στρώμα της ρευστοποιήσιμης άμμου αναπτύσσονται υπερπιέσεις πόρων Δu. Η ανάπτυξη αυτών των υπερπιέσεων προκαλεί μείωση των ενεργών τάσεων καθώς $\sigma'_v = \sigma'_{vo} - \Delta u$. Σταδιακά οι υπερπιέσεις πόρων είναι πιθανο, όταν πληρούνται οι προϋποθέσεις για πλήρη ρευστοποίηση του εδάφους, να προσεγγίσουν την τιμή της αρχικής ενεργού τάσης σ'_{vo} οπότε και η ενεργός τάση τείνει στο μηδέν, όπως επίσης και ο λόγος υπερπιέσεων πόρων $r_u = \Delta u / \sigma'_{vo}$ τείνει στη μονάδα.

Επιπλέον, η εν λόγω μεταβολή της ενεργού τάσης προκαλεί τη μείωση της δυσκαμψίας του εδαφικού στρώματος διότι το μέτρο δυσκαμψίας G είναι ανάλογο της $\sqrt{\sigma'_v} = \sqrt{\sigma'_{vo} - \Delta u}$ και, υπό σταθερή διατμητική τάση, επίσης προκαλεί την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης γ .

Άμεσο επακόλουθο της μεταβολής της δυσκαμψίας του στρώματος της ρευστοποιήσιμης άμμου είναι η μεταβολή της ταχύτητας του σεισμικού κύματος V_s διότι εξ'ορισμού $V_s = \sqrt{\frac{G_o}{\rho}}$, όπου G το μέτρο διάτμησης της άμμου. Συνεπώς γίνεται αντιληπτό ότι με την άσκηση του ημιτονικού παλμού,

όπως περιγράφεται στα προηγούμενα, δεν προκύπτει μια σταθερή ταχύτητα για το στρώμα της ρευστοποιημένης άμμου, αλλά μια ταχύτητα σεισμικού κύματος η οποία εξαρτάται από την μεταβολή των υπερπιέσεων πόρων και του λόγου r_u κατά τη διέλευση του ημιτονικού παλμού.

Παρόλ'αυτά, θεωρούμε ότι η ταχύτητα που μετράμε με την μεθοδολογία του ημιτονικού παλμού είναι μια μέση ταχύτητα, αντιπροσωπευτική για το ρευστοποιημένο στρώμα της άμμου. Για να επαληθευτεί αυτή τη θεώρηση έγιναν αναλύσεις, με χαρακτηριστικά ίδια με αυτά των αναλύσεων της μεθόδου του ημιτονικού παλμού, όπου στη θέση του ρευστοποιήσιμου στρώματος της άμμου τοποθετήθηκε ιξωδοελαστικό έδαφος.

Διατηρούμε το συνολικό προσομοίωμα ως ακριβώς έχει και το μόνο που αλλάζει είναι το στρώμα της άμμου. Για το στρώμα αυτό η κορεσμένη πυκνότητα είναι 2Mg/m^3 όπως και πριν, ώστε να μην αλλάζει το πρόβλημα. Επαναλαμβάνουμε τις αναλύσεις σεισμικής απόκρισης μεταβάλοντας συνεχώς την ταχύτητα μετάδοσης του σεισμικού κύματος στο ελαστικό μέσο, με σκοπό να λάβουμε την ίδια απόκριση όπως στη ρευστοποιημένη άμμο.

Επειδή το προσομοίωμα που χρησιμοποιείται είναι ιξωδοελαστικό, διαθέτει υστερητική απόσβεση η οποία δεν μεταβάλλεται με την παραμόρφωση. Αποφασίστηκε αυτή η απόσβεση να υπολογίζεται με βάση την αρχική ταχύτητα που θεωρητικά έχει το στρώμα της άμμου και την ταχύτητα που λαμβάνεται για το ελαστικό προσομοίωμα. Η θεωρητικά αρχική ταχύτητα του στρώματος υπολογίζεται από τον τύπο :

$$V_s = \sqrt{\frac{G_o}{\rho}} \qquad (4.1)$$

όπου G_o είναι το αρχικό μέτρο διάτμησης και ρ η κορεσμένη πυκνότητα της άμμου. Για το G_o ισχύει, από το προσομοίωμα που χρησιμοποιείται για την άμμο (Andrianopoulos et al, 2010) :

$$G_o = \frac{\beta * Pa}{(0.3+0.7*e^2)} \sqrt{\frac{p}{P_\alpha}} \qquad (4.2)$$

Στη σχέση (4.2), p είναι η μέση ενεργός τάση που ασκείται στο μέσον του στρώματος, P_α=98.1kPa είναι η ατμοσφαιρική πίεση, e ο δείκτης πόρων της

άμμου και β είναι σταθερά του προσομοιώματος η οποία ισούται με 600 για δυναμικά προβλήματα.

Κατόπιν, για τον λόγο υστερητικής αποσβέσεως χρησιμοποιείται η σχέση :

$$\xi \approx 0.20 * \left[\left(1 - \frac{Vs^2}{Vso^2}\right) + 0.10\right] \quad (4.3)$$

όπου V_s η απομειωμένη ταχύτητα διατμητικού κύματος της ρευστοποιημένης άμμου και V_{so} η αρχική ταχύτητα του στρώματος της άμμου.

Η σχέση αυτή δίνει για $V_s=V_{so}$, ξ=2% ο αρχικός λόγος απόσβεσης που χρησιμοποιήθηκε στη βασική ανάλυση για πολύ μικρές παραμορφώσεις και για $V_s=0$, ξ=22% όταν η άμμος είναι πλήρως ρευστοποιημένη.

Ζητούμενο είναι η συμπεριφορά του ελαστικού μέσου που έχει γνωστή σταθερή ταχύτητα διατμητικού κύματος, να ταιριάζει με την πραγματική συμπεριφορά του ρευστοποιημένου στρώματος με την μεταβλητή ταχύτητα διατμητικού κύματος. Έτσι, μπορούμε να αιτιολογήσουμε τη χρήση μιας σταθερής ταχύτητας που να αντιπροσωπεύει τη ρευστοποιημένη άμμο.

Πρακτικά, ίδια απόκριση για το στρώμα της άμμου και το ελαστικό στρώμα θεωρούμε όταν είναι ίδια η απόκριση σε όρους επιταχύνσεων, δηλαδή οι χρονοϊστορίες που βασικά συγκρίνουμε είναι αυτές των επιταχύνσεων. Επιπλέον, για να ποσοτικοποιηθεί η ομοιότητα ή η διαφορά στη συμπεριφορά της άμμου, χρησιμοποιούνται οι δύο από τους ποσοτικούς δείκτες που διαθέτουμε (Κεφάλαιο 2) τα I_{arias} και I_{abs}.

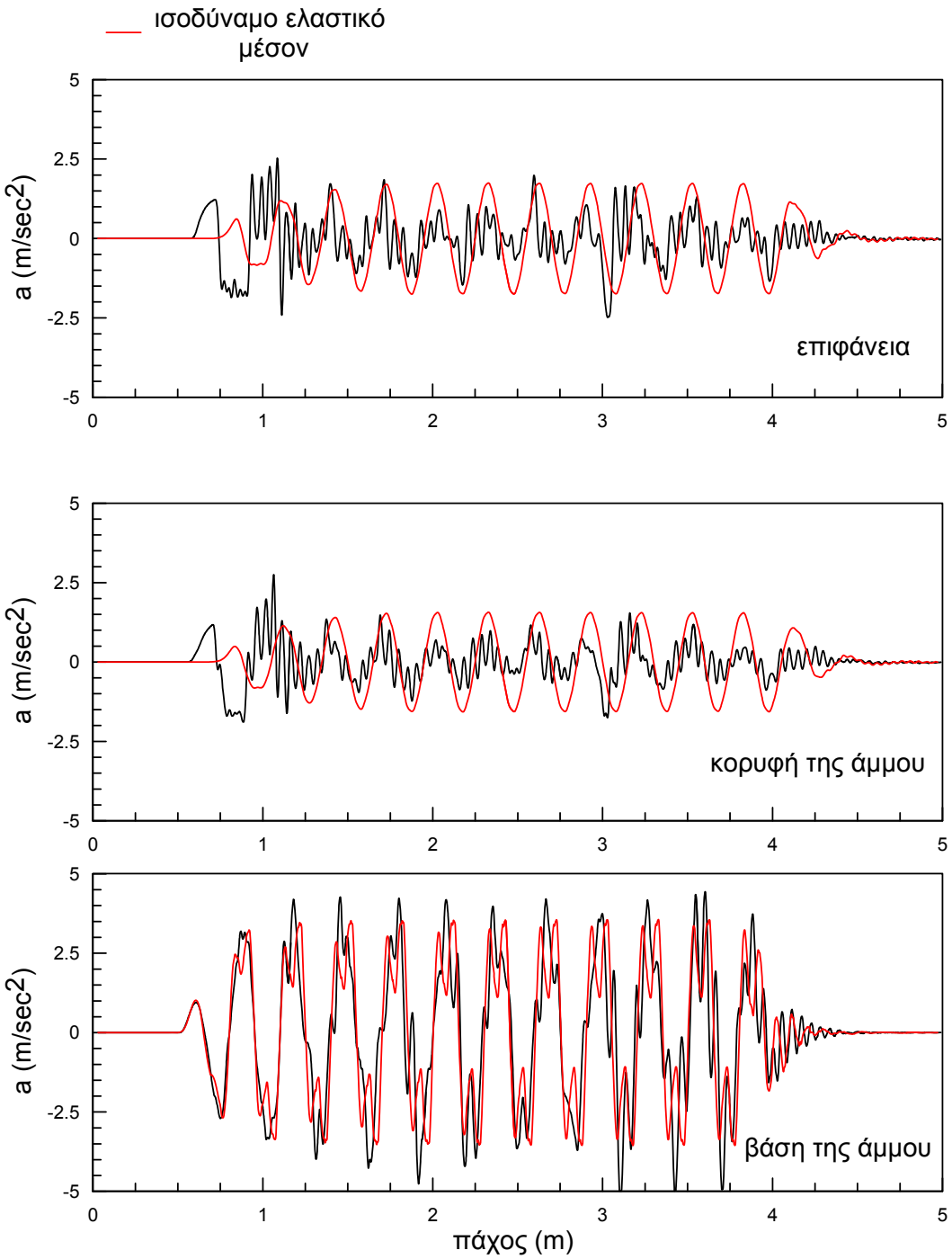
Λαμβάνουμε τις τιμές των δεικτών για διάφορες τιμές του V_s στο ελαστικό μέσον και κατόπιν με γραμμική παρεμβολή βρίσκουμε την τιμή του V_s για την οποία οι δείκτες είναι ίσοι με τις αρχικές τιμές τους. Καθότι, όπως φαίνεται και παρακάτω στα Σχήματα 4.2, 4.3 και 4.4, οι διαφορές που προκύπτουν για τους δύο αυτούς δείκτες είναι αρκετά μικρές, ειδικά και σε σχέση και με την αβεβαιότητα της μεθόδου, δε θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν οι υπόλοιπο ποσοτικοί δείκτες που διαθέτουμε.

Έτσι, μεταβάλλουμε σιγά σιγά την ταχύτητα διατμητικού κύματος του ελαστικού στρώματος, ανά 10m/s, μέχρις ότου οι δείκτες I_{arias} και I_{abs} που προκύπτουν για το προσομοίωμα της ρευστοποιήσιμης άμμου, να βρισκονται

ανάμεσα σε δύο τιμές και κατόπιν με γραμμική παρεμβολή βρίσκουμε την ακριβή τιμή της ταχύτητας του ελαστικού μέσου. Επιπλέον, λαμβάνονται οι χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στη βάση και στην κορυφή του στρώματος της άμμου ώστε να συγκρίνονται και οπτικά με τις προηγούμενες αναλύσεις που αφορούν στρώμα άμμου μη ελαστικό.

Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις στις οποίες οι παράμετροι του προβλήματος έχουν τις ίδιες τιμές που έχουν επιλεγει για την βασική ανάλυση και μεταβάλλεται μόνο η περίοδος της διέγερσης, η οποία λαμβάνει τις τιμές 0.1sec, 0.3sec και 0.5sec. Όπως προαναφέρθηκε, για κάθε ανάλυση μεταβάλλεται η ταχύτητα του διατμητικού κύματος του ελαστικού στρώματος έως ότου οι δείκτες I_{arias} και I_{abs} λάβουν τις κατάλληλες τιμές, γνωστές από τις αναλύσεις με ρευστοποιημένη άμμο. Αυτή η μέθοδος ακολουθείται για πάχος άμμου 1m , 2m, 4m, 6m, 8m και 10m.

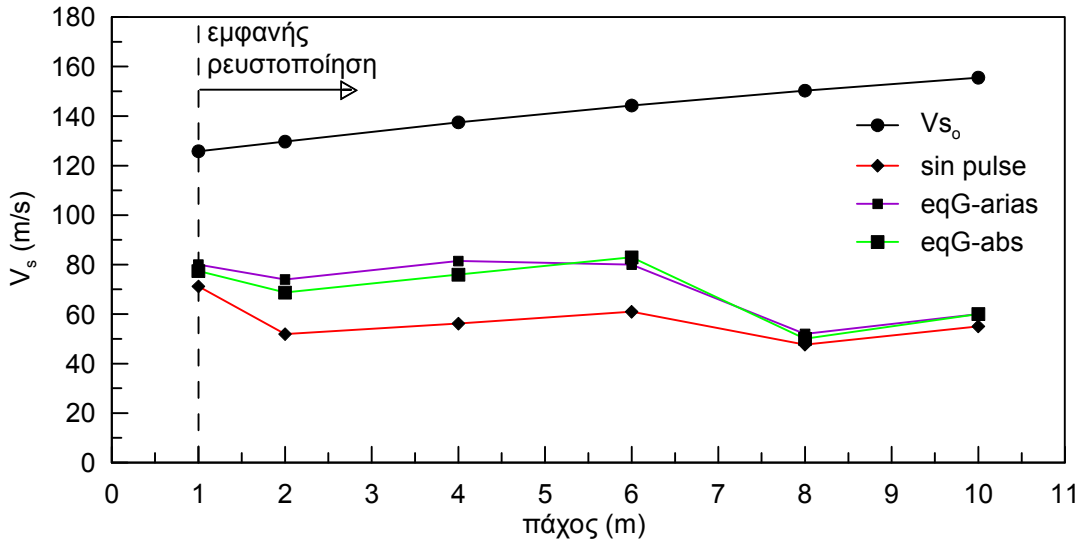
Ενδεικτικώς, φαίνεται και οπτικά η σύγκριση της απόκρισης του αρχικού προσομοιώματος με το ισοδύναμο ελαστικό στο **Σχήμα 4.1** για πάχος 6m και περίοδο 0.3sec. Στη σύγκριση αυτή περιλαμβάνονται οι επιταχύνσεις στη βάση του στρώματος της άμμου, στην κορυφή του στρώματος και στην επιφάνεια της στήλης του εδάφους. Για την περίπτωση του Σχήματος 4.1 η τελική ταχύτητα V_s που αντιστοιχεί στις τιμές των I_{arias} και I_{abs} είναι 42m/s και 41m/s αντίστοιχα και προέκυψε μετά από γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στην εν λόγω ανάλυση του Σχήματος 4.1 και στην ανάλυση για Vs=50m/s. Το Σχήμα 4.1 αφορά τη σύγκριση της αρχικής απόκρισης για ρευστοποιήσιμη άμμο με ελαστικό στρώμα το οποίο έχει τέτοιες ιδιότητες ώστε η ταχύτητα Vs=40m/s.



Σχήμα 4.1 : Σύγκριση απόκρισης της εδαφικής στήλης για περίοδο διέγερσης 0.3sec, 6m ρευστοποιήσιμης άμμου (με μαύρο) και για ελαστικό προσομοίωμα στην άμμο με ταχύτητα διατμητικού κύματος 40m/s (με κόκκινο)

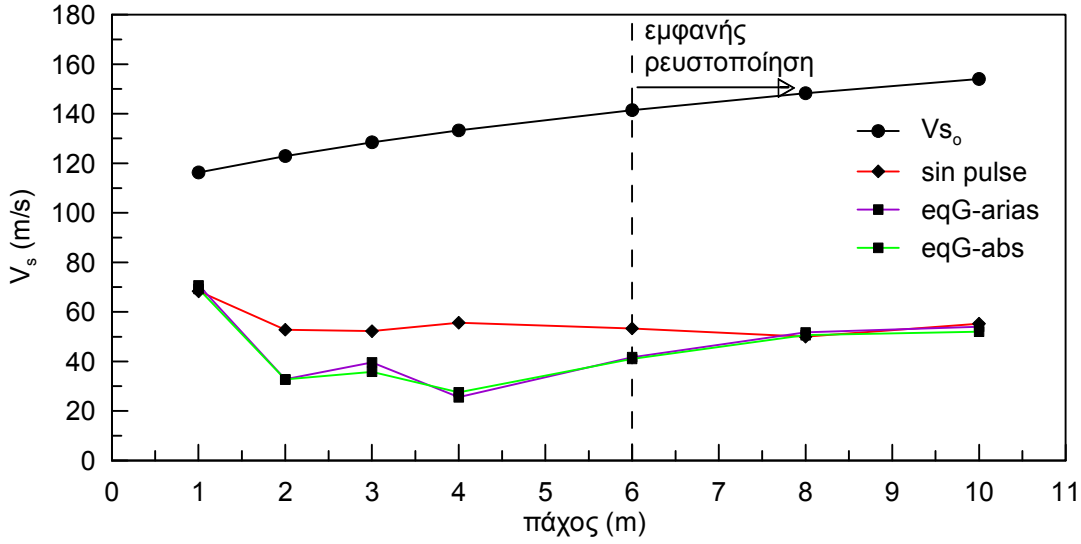
Στο **Σχήμα 4.2** παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων για την εύρεση της ταχύτητας σεισμικού κύματος για περίοδο διέγερσης 0.1sec. Έτσι, παρουσιάζεται η αρχική ταχύτητα διατμητικού κύματος του στρώματος της άμμου V_{so}, συγκρτιτικά με το πάχος της άμμου και επίσης τα

αποτελέσματα των μεθοδολογιών του ημιτονικού παλμού (sin pulse) και του ισοδύναμου ελαστικού μέσου για τις περιπτώσεις όπου τα αποτελέσματα προσαρμόζονται στο I_{arias} (eqG-arias) ή στο I_{abs} (eqG-abs). Επίσης, τοποθετείται μία διακεκομένη γραμμή η οποία δηλώνει το κρίσιμο πάχος της άμμου από το οποίο και έπειτα πραγματοποιείται εμφανής ρευστοποίηση.

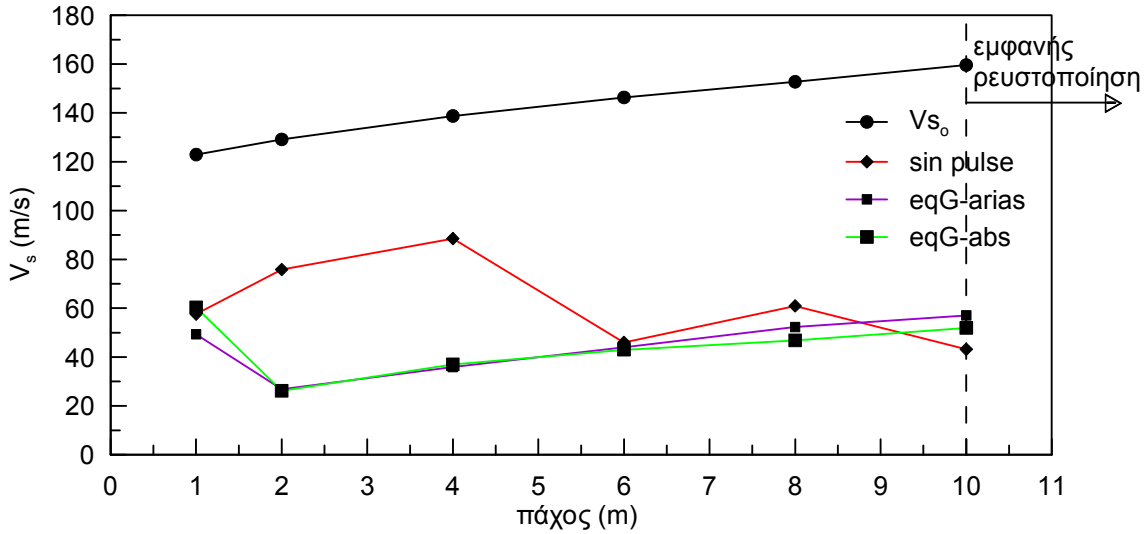


Σχήμα 4.2 : Διάγραμμα ταχύτητας σεισμικού κύματος με το πάχος της άμμου για περίοδο 0.1sec και για τις μεθόδους με ημιτονικό παλμό και με ισοδύναμο ελαστικό μέσο

Με τον ίδιο τρόπο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και για περιόδους 0.3sec και 0.5sec στα **Σχήματα 4.3** και **4.4** αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3 : Διάγραμμα ταχύτητας σεισμικού κύματος με το πάχος της άμμου για περίοδο 0.3sec και για τις μεθόδους με ημιτονικό παλμό και με ισοδύναμο ελαστικό μέσο

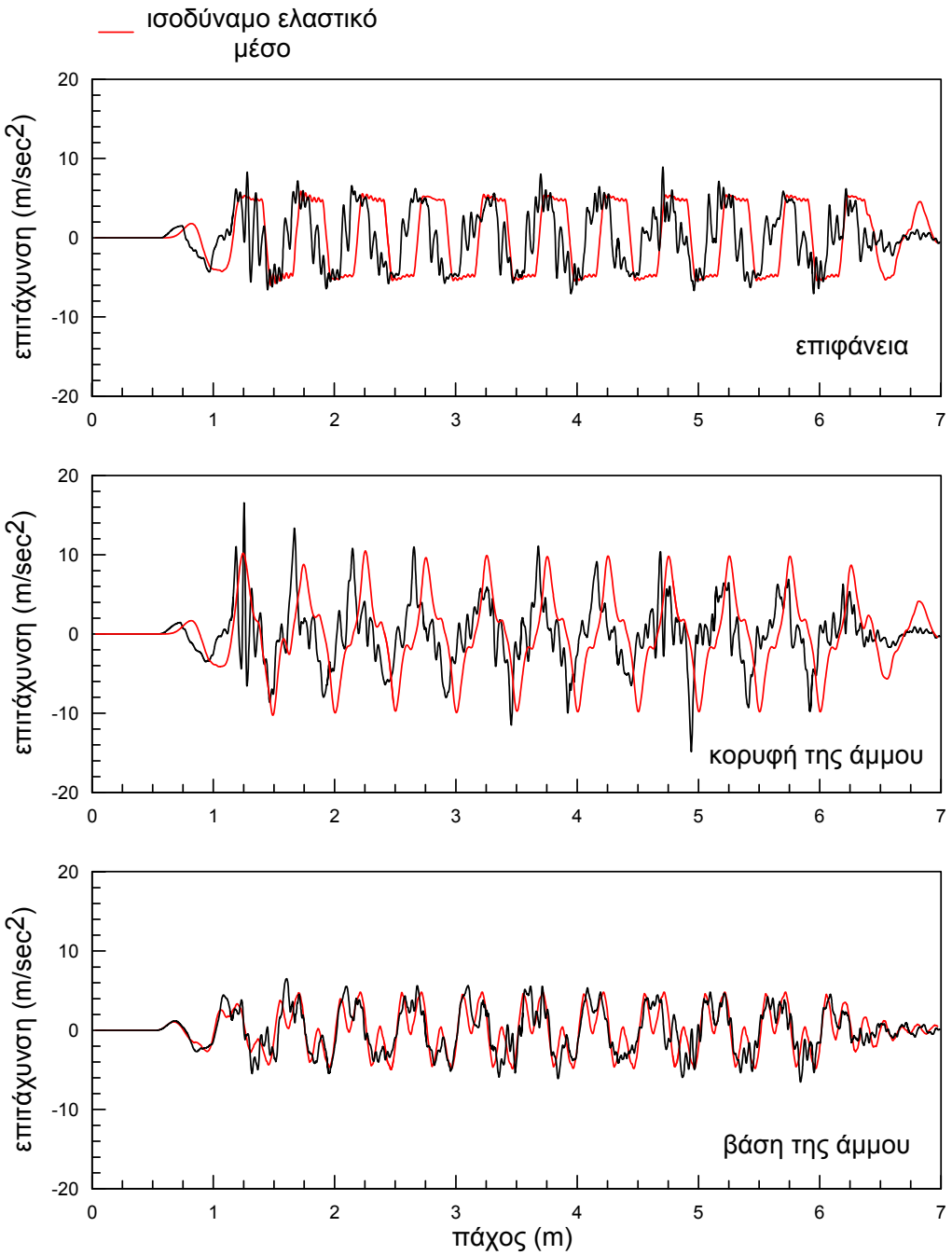


Σχήμα 4.4 : Διάγραμμα ταχύτητας σεισμικού κύματος με το πάχος της άμμου για περίοδο 0.5sec και για τις μεθόδους με ημιτονικό παλμό και με ισοδύναμο ελαστικό μέσο

Από τα παραπάνω Σχήματα 4.2, 4.3 και 4.4 είναι εμφανές ότι οι δύο μέθοδοι συγκλίνουν εξαιρετικά για πάχη άμμου μεγαλύτερα από 5m. Όμως για πάχος άμμου μικρότερο από 5m υπάρχει αρκετή απόκλιση, η οποία φαίνεται να είναι ακόμη πιο σημαντική όσο μεγαλώνει η περίοδος.

Καταρχάς, η απόκλιση αυτή προκύπτει λόγω του ότι για μικρότερα πάχη άμμου η ρευστοποίηση δεν είναι εντονή ή δεν είναι καθόλου εμφανής για τις μεγαλύτερες περιόδους. Έτσι, για περίοδο 0.5sec η ρευστοποίηση γίνεται εμφανής μετά από πάχος άμμου 10m, για περίοδο 0.3sec μετά από πάχος άμμου 6m και για 0.1sec για πάχος άμμου 1m. Συνεπώς παρατηρούμε ότι μετά την εμφανή ρευστοποίηση του στρώματος της άμμου οι δύο μέθοδοι συγκλίνουν αρκετά καλά έως εξαιρετικά. Αντίθετα, αρκετή απόκλιση εμφανίζεται στις δυο μεθόδου όταν η άμμος δεν είναι πλήρως ρευστοποιημένη.

Επίσης, για μικρά πάχη το ισοδύναμο ελαστικό πρισομοίωμα δε φαίνεται να μπορεί να παρακολουθήσει πλήρως το φαινόμενο που εξετάζεται. Στο **Σχήμα 4.5** παρουσιάζεται η σύγκριση της απόκρισης της άμμου για τις δύο μεθόδους για περίοδο διέγερσης 0.5sec και πάχος άμμου 2m. Σε αυτή την περίπτωση ουσιαστικά παρατηρείται και η μεγαλύτερη απόκλιση των δύο μεθόδων.



Σχήμα 4.5 : Σύγκριση απόκρισης της εδαφικής στήλης για περίοδο διέγερσης 0.5sec, 2m ρευστοποιήσιμη άμμο (με μαύρο) και για ελαστικό προσομοίωμα στην άμμο με ταχύτητα διατμητικού κύματος 40m/s (με κόκκινο)

Τελικώς, η θεώρηση μιας σταθερής ταχύτητας διατμητικού κύματος για τη ρευστοποιημένη άμμο φαίνεται να μπορεί να αντιπροσωπεύσει με επάρκεια τη συμπεριφορά της άμμου. Έτσι προκύπτει από τα παραπάνω Σχήματα 4.1 έως και 4.5, τα οποία δείχνουν ότι είναι δυνατόν να περιγραφεί η απόκριση

της ρευστοποιημένης άμμου από ένα ισοδύναμο ελαστικό μέσον με σταθερή ταχύτητα σεισμικού κύματος.

Συνεπώς, θεωρούμε αξιόπιστη τη μέθοδο του ημιτονικού παλμού και θα τη χρησιμοποιήσουμε στις επόμενες αναλύσεις ώστε πλέον να εξεταστεί ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα διάδοσης του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο στρώμα της άμμου. Ο λόγος που προτιμάται η εν λόγω μέθοδος από αυτή του ισοδύναμου ελαστικού μέσου είναι ότι τα αποτελέσματα, επί της ουσίας και ειδικά μετά την εμφανή εκδήλωση της ρευστοποίησης, δεν διαφέρουν. Επίσης, η μέθοδος του ισοδύναμου ελαστικού μέσου είναι αρκετά χρονοβόρα για να εφαρμοσθεί για όλες τις αναλύσεις ενώ δεν προσθέτει σε ακρίβεια αποτελεσμάτων.

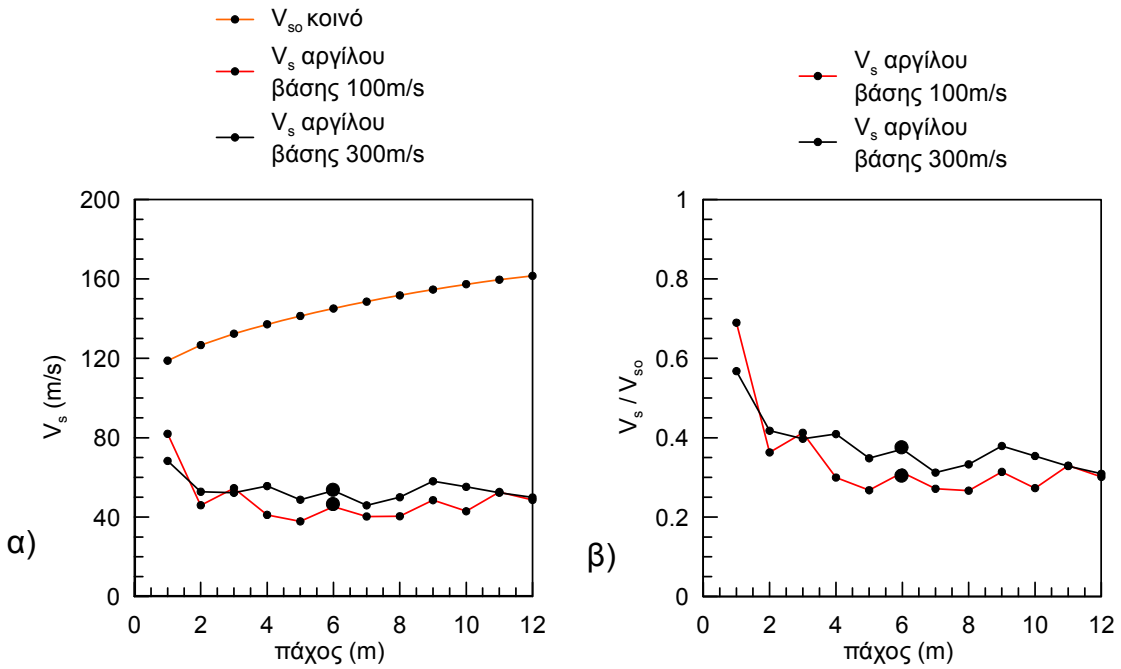
4.4 Παράμετροι που Επιδρούν στην Ταχύτητα Μετάδοσης Σεισμικού Κύματος σε Ρευστοποιημένο Έδαφος

Θα εξεταστούν οι ίδιοι παράμετροι που εξετάστηκαν και στο Κεφάλαιο 3 καθώς αυτοί είναι οι βασικές παράμετροι του προβλήματος και είναι πιθανό να επηρεάζουν και την ταχύτητα μετάδοσης του σεισμικού κύματος στο στρώμα της άμμου. Χρησιμοποιείται η μέθοδος του ημιτονικού παλμού όπως περιγράφηκε παραπάνω. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα οι τιμές της ταχύτητας V_s που προκύπτουν για τα διάφορα πάχη της άμμου από τη βασική ανάλυση και από τη διαφοροποιημένη προς αυτή παραμετρική ανάλυση. Κάθε ομάδα αναλύσεων αποτελείται από 12 επιμέρους αναλύσεις οι οποίες γίνονται για διαφορετικό πάχος άμμου, 1m έως 12m. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι τιμές της ταχύτητας του σεισμικού κύματος κανονικοποιημένες ως προς την αρχική ταχύτητα του στρώματος της άμμου.

Συνεπώς στις παρακάτω αναλύσεις εξετάζεται η επίδραση των εξής παραμέτρων : της ταχύτητα του διατμητικού κύματος της αργίλου βάσης, του πάχους της αργιλικής επικάλυψης, του δείκτη πόρων και της διαπερατότητα της άμμου και της περιόδου και της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης που ασκείται στη βάση. Η βασική παράμετρος του προβλήματος που εξετάζεται αν επιδρά στην ταχύτητα σεισμικού κύματος της ρευστοποιημένης άμμου είναι το

πάχος του στρώματος της άμμου. Έτσι, σε κάθε επιμέρους παραμετρική ανάλυση θα εξετάζεται και η επίδραση του πάχους στα αποτελέσματα. Η έντονη βούλα [●] στα διαγράμματα δείχνει το πάχος της άμμου πέρα απότ ο οποίο πραγματοποιείται εμφανής ρευστοποίηση.

Επίδραση Vs της Αργίλου Βάσης. Στο **Σχήμα 4.6** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ταχύτητας του σεισμικού κύματος στην βασική ανάλυση και σε παραμετρική ανάλυση όπου μεταβλήθηκε η ταχύτητα διατμητικού κύματος της αργίλου βάσης από 300m/s σε 100m/s.



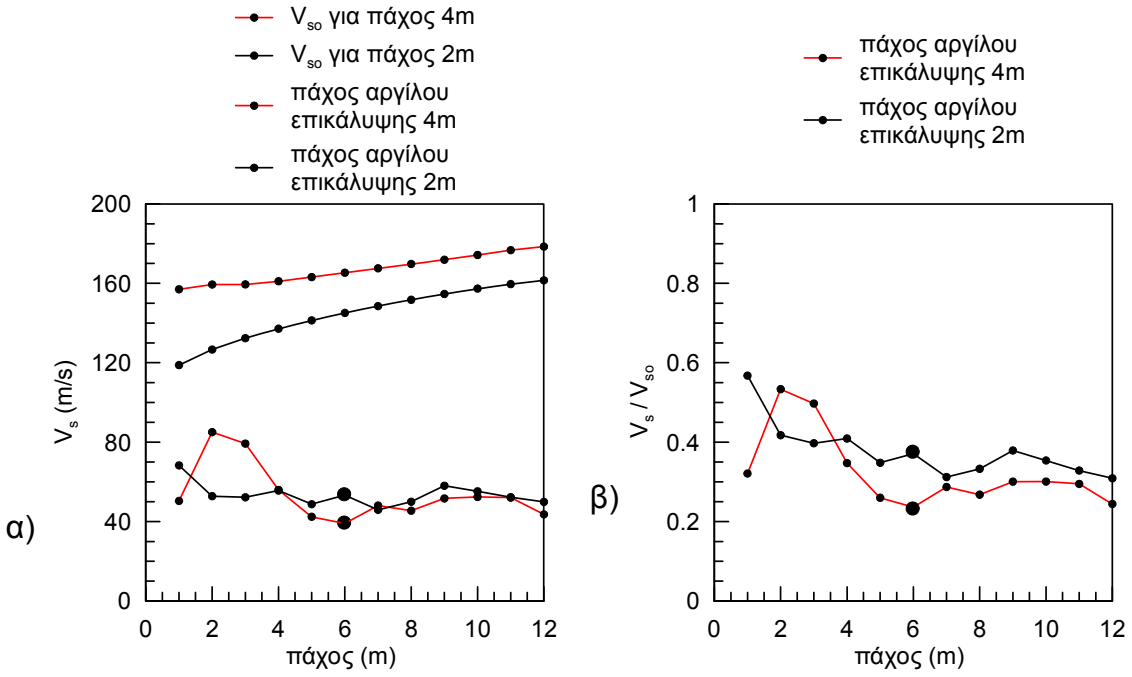
Σχήμα 4.6 : α) Ταχύτητα σεισμικού κύματος σε σχέση με το πάχος της άμμου και την ταχύτητα διατμητικού κύματος της αργίλου βάσης και β) κανονικοποιημένη ταχύτητα ως προς την αρχική

Καταρχάς το πάχος της άμμου δεν φαίνεται να διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα σεισμικού κύματος. Και οι δύο καμπύλες δεν μεταβάλλονται σημαντικά με τη μεταβολή του πάχους της άμμου. Για τα αρχικά μικρά πάχη όπου δεν πραγματοποιείται εμφανής ρευστοποίηση τα αποτελέσματα δεν είναι αντιπροσωπευτικά της συμπεριφοράς. Ουσιαστικά μας ενδιαφέρει η ταχύτητα που προκύπτει για πάχος άμμου όπου η ρευστοποίηση είναι εμφανής, δηλαδή περίπου πάχος άμμου 6m και

μεγαλύτερο. Συνεπώς, παρατηρείται ότι το πάχος δεν έχει ουσιαστική συμβολή στην ταχύτητα που μετράμε.

Από την άλλη η αλλαγή της ταχύτητας του διατμητικού κύματος της αργίλου βάσης, μεταβάλλει την ταχύτητα του σεισμικού κύματος κατα περίπου 10m/s για πάχος άμμου 6m έως 10m. Η ταχύτητα που προκύπτει για μικρότερο Vs της αργίλου βάσης είναι συστηματικά 10m/s μικρότερη εκτός από την ταχύτητα για πάχη 11m και 12m. Η κανονικοποίηση ως προς την αρχική ταχύτητα δεν αλλάζει ουσιαστικά την εικόνα (Σχήμα 4.6 β) και είναι αναμενόμενο καθώς η αρχική ταχύτητα της αργίλου στη βάση δεν επηρεάζει την αρχική κατάσταση της άμμου, δηλαδή η αρχική ταχύτητα διατμητικών κυμάτων για το στρώμα της άμμου στις δύο περιπτώσεις είναι ίδια.

Επίδραση Πάχους της Αργιλικής Επικάλυψης. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης για διαφορετικό πάχος της αργιλικής επικάλυψης, από 2m σε 4m, φαίνονται στο **Σχήμα 4.7.**



Σχήμα 4.7 : α) Ταχύτητα σεισμικού κύματος σε σχέση με το πάχος της άμμου και το πάχος της αργιλικής επικάλυψης και β) κανονικοποιημένη ταχύτητα ως προς την αρχική

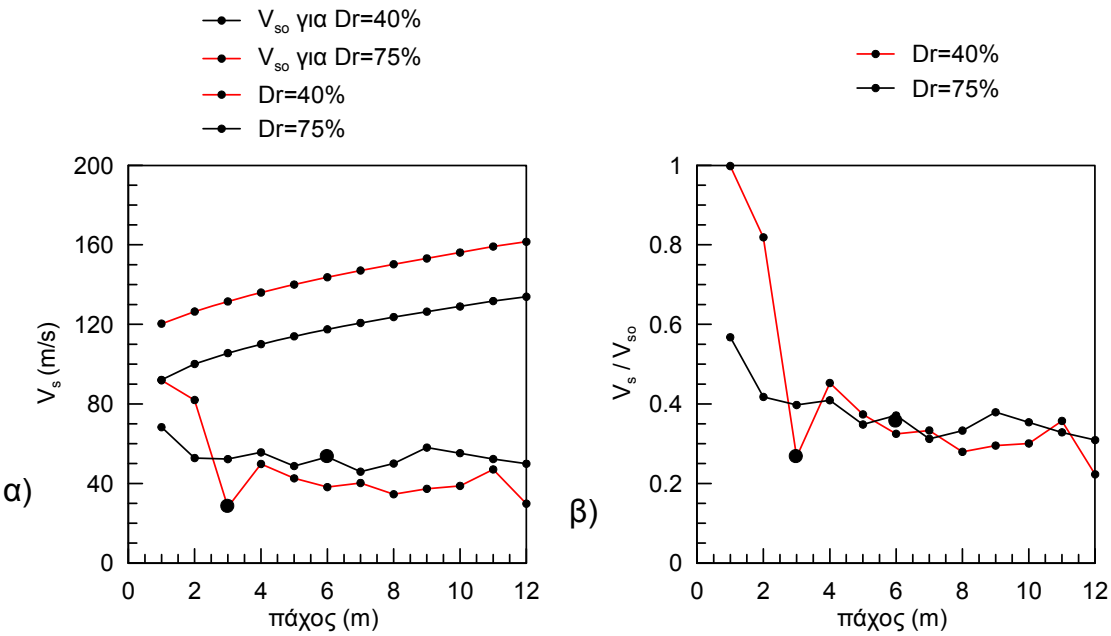
Από το Σχήμα 4.7 είναι εμφανές ότι το πάχος της αργιλικής επικάλυψης δεν επηρεάζει έντονα την ταχύτητα σεισμικού κύματος στη ρευστοποιημένη άμμο. Μετά το κρίσιμο πάχος ρευστοποίησης της αμμου παρατηρούνται μόνο μικρές αποκλίσεις χωρίς να υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση από βασική κατάσταση. Διαφορές βασικά, παρουσιάζονται για μικρά πάχη άμμου, όπως 2m και 3m, οι οποίες οφείλονται κατά κύριο λόγο στο ότι η μέθοδος του ημιτονικού παλμού και της μέσης ταχύτητας του ρευστοποιημένου εδάφους που χρησιμοποιούμε, φαίνεται να μην δίνει καλά αποτελέσματα για τις περιοχές όπου δεν υπάρχει εμφανής ρευστοποίηση. Επίσης, πιθανότατα στη διαφορετική ταχύτητα που προκύπτει για τα μικρά πάχη άμμου, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η διαφορετική ενίσχυση των δύο αναλύσεων (Σχήμα 3.4)

Σε κάθε περίπτωση, το πάχος της αργιλικής επικάλυψης δε φαίνεται να επηρεάζει την ταχύτητα σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος.

Επίδραση Σχετικής Πυκνότητας της Άμμου. Μια σημαντική παράμετρος για το στρώμα της άμμου είναι ο δείκτης πόρων, ο οποίος έχουμε ήδη παρατηρήσει ότι επηρεάζει έντονα το φαινόμενο που εξετάζεται. Η επιρροή του της σχετικής πυκνότητας και εμμέσως του δείκτη πόρων, στην ταχύτητα σεισμικού κύματος στην άμμο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.8**.

Από το **Σχήμα 4.8α** γίνεται εμφανής η επίδραση της σχετικής πυκνότητας, στην ταχύτητα του σεισμικού κύματος. Ακόμη και μετά το κρίσιμο πάχος και την εμφάνιση πλήρης ρευστοποίησης, παρουσιάζονται διαφορές μέχρι και 20m/s, για πάχος άμμου 9m. Συνεπώς, η σχετική πυκνότητα επηρεάζει αρκετά την εν λόγω ταχύτητα.

Όμως, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.8β** ο λόγος της ταχύτητας προς την αρχική ταχύτητα δεν επηρεάζεται από την αλλαγή της σχετικής πυκνότητας. Αυτό σημαίνει ότι αν και η μείωση της σχετικής πυκνότητας της άμμου προκαλεί μείωση της ταχύτητας διατμητικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος, αντίστοιχη μείωση προκαλεί και στην αρχική ταχύτητα του στρώματος. Δηλαδή, γίνεται εμφανές ότι με το λόγο V_s/V_{so} η επίδραση της σχετικής πυκνότητας στην ταχύτητα του σεισμικού κύματος απαλοίφεται.



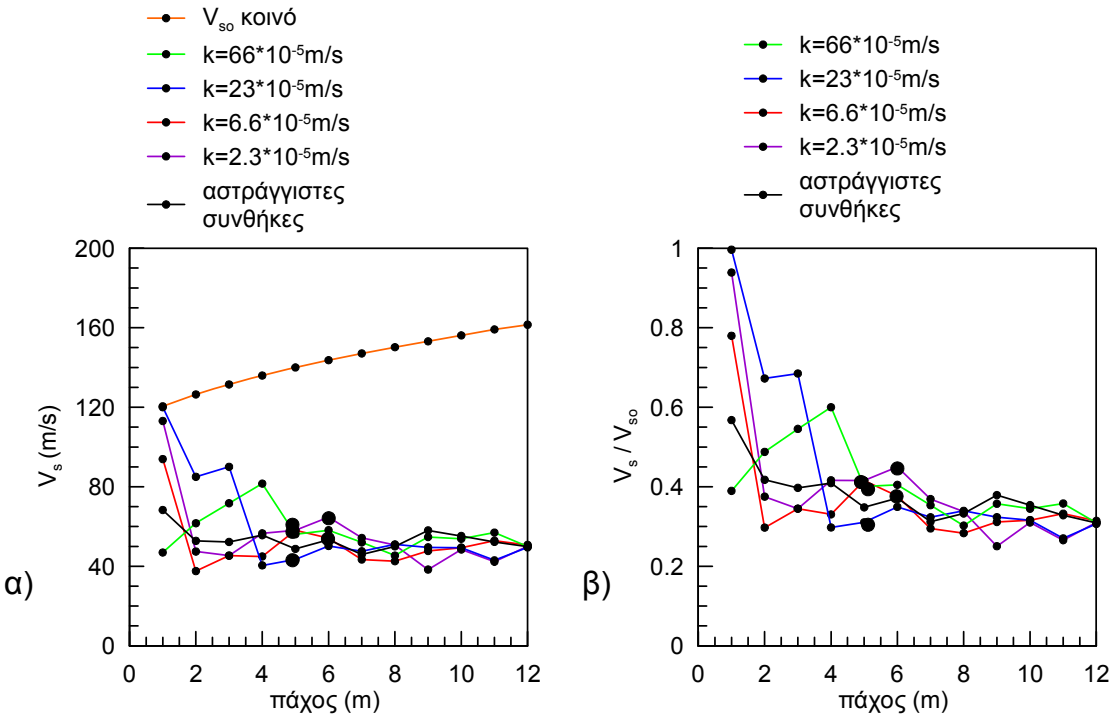
Σχήμα 4.8 : α) Ταχύτητα σεισμικού κύματος σε σχέση με το πάχος της άμμου και τη σχετική πυκνότητα της άμμου και β) κανονικοποιημένη ταχύτητα ως προς την αρχική

Επίδραση Διαπερατότητας της Άμμου. Η διαπερατότητα της άμμου, είδαμε στο Κεφάλαιο 3 ότι έχει κάποια επίδραση στο υπό εξέταση φαινόμενο αλλά όχι πολύ έντονη. Παρόλ'αυτά είναι ένας παράγοντας σημαντικός για την άμμο και για το πρόβλημα μας. Για την ταχύτητα του σεισμικού κύματος στη ρευστοποιημένη άμμο τα αποτελέσματα του **Σχήματος 4.9,** εμφανίζουν τη διαπερατότητα της άμμου να μην μεταβάλλει τα αποτελέσματα.

Για την ανάλυση αυτή ελήφθησαν τέσσερεις τιμές για το συντελεστή διαπερατότητας λόγω της σημασίας που φαίνεται ότι έχει. Η αρχική τιμή του συντελεστή που επιλέχτηκε για παραμόρφωση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες είναι $6.6*10^{-5}$m/s η οποία αντιστοιχεί σε αρχικές συνθήκες της άμμου και σχετική πυκνότητα 40% (Arulmoli et al, 1992). Κατόπιν, στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι λόγω της δυναμικής φύσης του σεισμού, η αρχική διαπερατότητα μπορεί να μειωθεί εως και στο 1/3 της αρχικής, συνεπώς λαμβάνεται η τιμή $2.3*10^{-5}$m/s.

Επιπλέον, νεότερες έρευνες (Yang Z & Elgamal A.,2002, Taiebat et al,2011) δείχνουν ότι η διαπερατότητα αυξάνεται κατά τη διάρκεια της ρεσυτοποίησης του εδάφους από 6 έως και 20 φορές. Για την προκειμένη περίπτωση

επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν ακόμα δύο συντελεστές διαπερατότητας 10 φορές μεγαλύτεροι των προηγούμενων ($6.6*10^{-5}$m/s και $2.1*10^{-5}$m/s) δηλαδή $66*10^{-5}$m/s και $23*10^{-5}$m/s.



Σχήμα 4.9 : α) Ταχύτητα σεισμικού κύματος σε σχέση με το πάχος της άμμου και τη διαπερατότητα της άμμου και β) κανονικοποιημένη ταχύτητα ως προς την αρχική

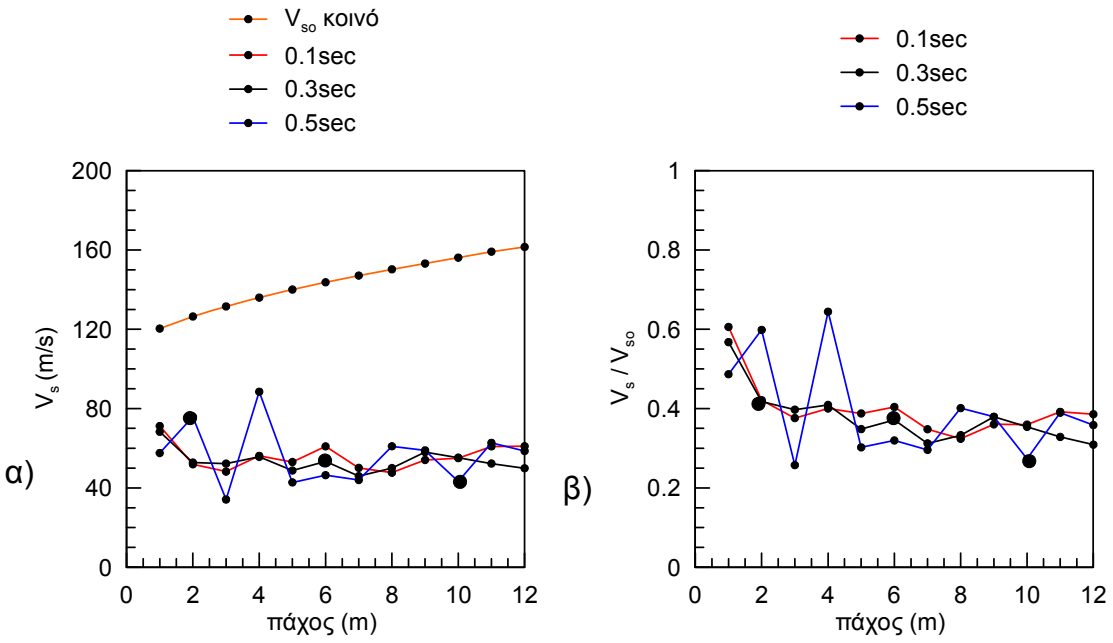
Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έγιναν για παραμόρφωση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Όμως μετά το πέρας της διέγερσης και μέχρι να ασκηθεί ο ημιτονικός παλμός, η παραμόρφωση αποφασίστηκε να πραγματοποιείται υπό αστράγγιστες συνθήκες. Αυτό συμβαίνει διότι μετά το τέλος της αρχικής διέγερσης δεν επιθυμούμε στράγγιση του εδάφους, αλλά διατήρηση της κατάστασης στην οποία βρίσκεται, ώστε σε αυτή να ασκηθεί ο παλμός και να υπολογιστεί η ταχύτητα. Σε περίπτωση που επιτραπεί η ροή του νερού των πόρων, πραγματοποιείται ανακατανομή των υπερπιέσεων και μείωση του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u οπότε η ταχύτητα που υπολογίζεται σε αυτή την περίπτωση δεν αντιστοιχεί στο ρευστοποιημένο εδάφους.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.9 δεν υπάρχει επιρροή της διαπερατότητας στην ταχύτητα του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος.

Επίδραση Περιόδου Διέγερσης. Η περίοδος της διέγερσης είναι μια αρκετά σημαντική παράμετρος για το πρόβλημα μας και γι'αυτό λαμβάνονται τρεις περίοδοι, 0.1sec, 0.3sec και 0.5sec, ώστε να διερευνηθεί εις βάθος η επίδραση της στην ταχύτητα του σεισμικού κύματος σε ρευστοποιημένο έδαφος.

Οι τιμές της ταχύτητας που προκύπτουν για διαφορετικές τιμές της περιόδου εμφανίζονται στο **Σχήμα 4.10**. Προκύπτει το συμπέρασμα ότι η περίοδος δεν επηρεάζει την ταχύτητα του σεισμικού κύματος στην ρευστοπιημένη άμμος, διότι οι καμπύλες των τριών περιόδων είναι παρεμφερείς και παρουσιάζονται μικρές διαφορές.

Είναι εμφανές ότι, ειδικά μετά την πλήρη εμφάνιση της ρευστοποίησης δεν υπάρχουν διαφορές για τις τρεις περιόδους. Μεταβολές εμφανίζονται μόνο πριν την εμφάνιση της ρευστοποίησης, όπως για πάχος άμμου 2m και περίοδο 0.5sec, σε αυτή την περιοχή όμως δεν θεωρείται ότι η άμμος είναι ρευστοποιημένη και τα αποτελέσματα δε λαμβάνονται υπόψιν ως απότελέσματα για ρευστοποιημένο έδαφος.

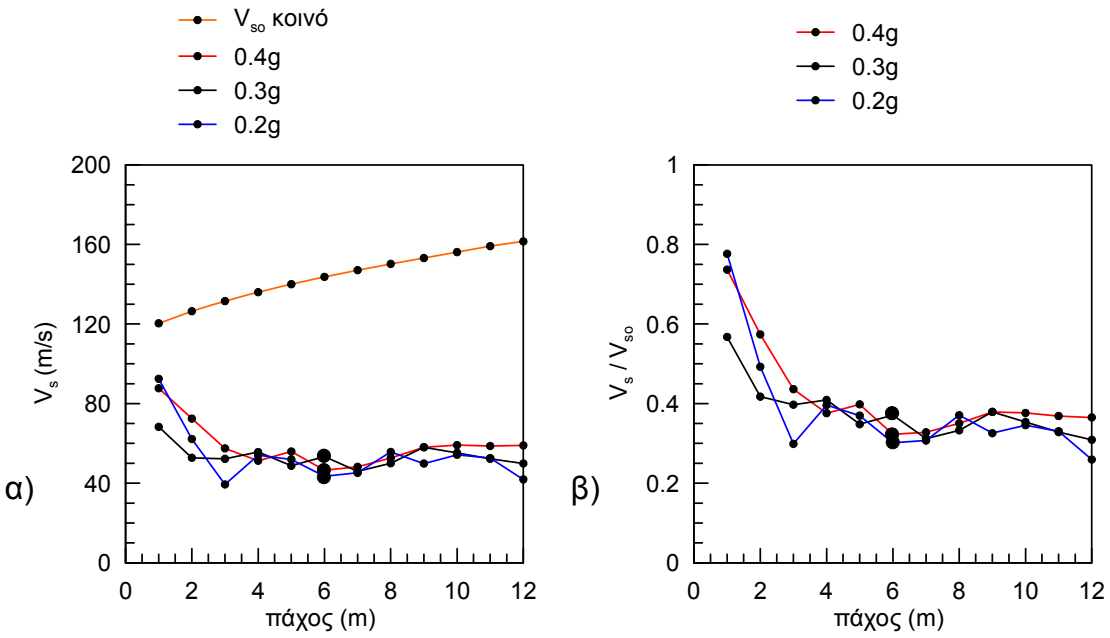


Σχήμα 4.10 : α) Ταχύτητα σεισμικού κύματος σε σχέση με το πάχος της άμμου και την περίοδο της διέγερσης και β) κανονικοποιημένη ταχύτητα ως προς την αρχική

Επιπλέον, είναι εύλογο να παρατηρήσουμε ότι το πάχος δεν επηρεάζει τις τιμές της ταχύτητας, αλλά η ταχύτητα του σεισμικού κύματος παραμένει, λίγο εως πολύ, σταθερή με τη μεταβολή του πάχους.

Επίδραση Μέγιστης Επιτάχυνσης Διέγερσης. Η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης δε επιδρά στο φαινόμενο που εξετάζουμε όπως δε φαίνεται να επιδρά και στην ταχύτητα σεισμικού κύματος του ρεσυτοποιημένου εδάφους, σύμφωνα με το **Σχήμα 4.11**. Οι καμπύλες που λαμβάνουμε για την ταχύτητα του διατμητικού κύματος δεν μεταβάλλονται με την αλλαγή της μέγιστης επιτάχυνσης της διέγερσης. Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ότι η επιτάχυνση, στα όρια που εξετάστηκαν, δεν επηρεάζει ούτε την ταχύτητα του διατμητικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος.

Επισημαίνεται ότι και σε αυτή τη περίπτωση, το πάχος της άμμου δεν επηρεάζει την τιμή της ταχύτητας που υπολογίζεται και έται η μέση ταχύτητα του σεισμικού κύματος είναι ανεξάρτητη του πάχους του ρευστοποιήσιμου στρώματος.



Σχήμα 4.11 : α) Ταχύτητα σεισμικού κύματος σε σχέση με το πάχος της άμμου και τη μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης και β) κανονικοποιημένη ταχύτητα ως προς την αρχική

Συμπεράσματα. Από τις έξι παραμέτρους που εξετάστηκαν για την ταχύτητα του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος, η μόνη που επηρεάζει την εν λόγω ταχύτητα είναι ο δείκτης πόρων της άμμου. Αντιθέτως, δεν επηρεάζουν την ταχύτητα αυτή οι παράμετροι της διέγερσης, οι παράμετροι των αργιλικών στρωμάτων, αλλά ούτε και η διαπερατότητα της άμμου. Επίσης, τονίζεται ότι η επίδραση του δείκτη πόρων της άμμου απαλοίφεται με τη χρήση και της αρχικής ταχύτητας, δηλαδή η επίδραση της εν λόγου παραμέτρου ισχύει τόσο για την ταχύτητα στο ρευστοποιημένο έδαφος όσο και στην αρχική κατάσταση του εδάφους.

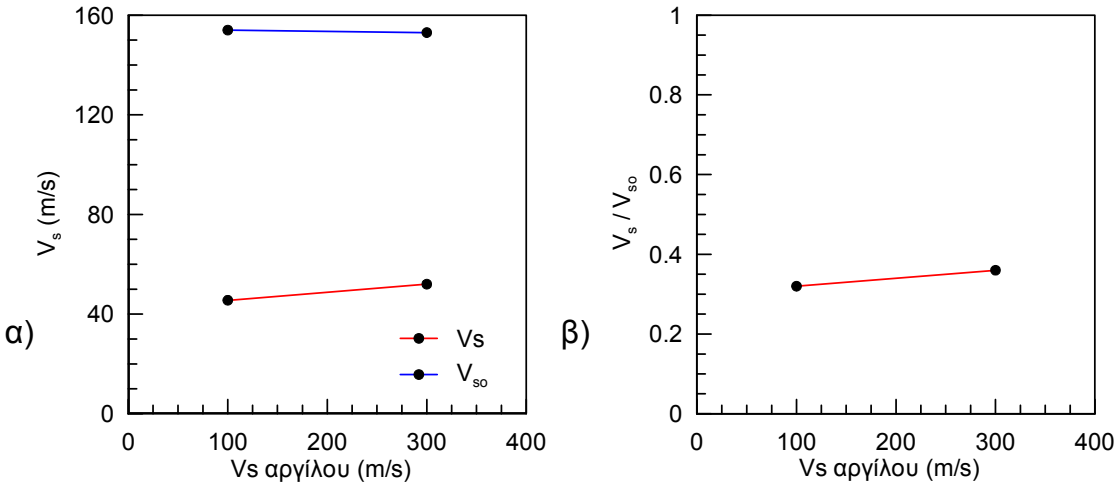
4.5 Στατιστική Επεξεργασία

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω η ταχύτητα μετάδοσης του σεισμικού κύματος όπως υπολογίζεται, παραμένει περίπου σταθερή με το πάχος του στρώματος της άμμου, ιδιαίτερα μετά το κρίσιμο πάχος του στρώματος. Συνεπώς, λαμβάνουμε έναν μέσον όρο των τιμών αυτών, για πάχος μεγαλύτερο από το κρίσιμο πάχος, ώστε να υπολογίσουμε μια αντιπροσωπευτική τιμή αυτής της ταχύτητας. Μας ενδιαφέρει η σχέση αυτής της μέσης τιμής με τους παράγοντες που εξετάζονται και που επηρεάζουν την εν λόγω ταχύτητα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται σε διαγράμματα τα αποτελέσματα που περιλαμβάνουν τον μέσο όρο της ταχύτητας του σεισμικού κύματος για τις παραμετρικές αναλύσεις. Επίσης, λαμβάνεται η μέση τιμή του λόγου της ταχύτητας σε ρευστοποιημένο έδαφος προς την αρχική ταχύτητα της άμμου, καθώς για κάποιες παραμέτρους, όπως η σχετική πυκνότητα, η επίδραση τους απαλοίφεται με τον λόγο αυτών των ταχυτήτων.

Vs της Αργίλου Βάσης. Η ταχύτητα του διατμητικού κύματος της αργίλου βάσης φαίνεται να επηρεάζει την ταχύτητα της ρευστοποιημένης άμμου (Σχήμα 4.6). Στο **Σχήμα 4.12** παρουσιάζονται ο μέσος όρος των τιμών που προέκυψαν για την ταχύτητα του διατμητικού κύματος για πάχος άμμου μεγαλύτερο από 6m, το κρίσιμο πάχος, για τις δύο τιμές της ταχύτητας του διατμητικού κύματος της αργίλου βάσης, 100m/s και 300m/s.

Η μέση τιμή της ταχύτητας ισούται με 46m/s και 52m/s για 100m/s και 300m/s της ταχύτητας της αργίλου βάσης. Επίσης, η μέση τιμή του λόγου της ταχύτητας του ρευστοποιημένου εδάφους και της αρχικής ταχύτητας κυμαίνεται από 0.32 εως 0.36. Γενικά, οι διαφορές αυτές είναι μικρές για την μεθοδολογία την οποία χρησιμοποιούμε και για το μέγεθος της μέσης τιμής της ταχύτητας που χρησιμοποιούμε. Οπότε, τελικώς μπορούμε να θεωρήσουμε μικρή επιρροή της ταχύτητας του διατμητικού κύματος της αργίλου βάσης στη μέση τιμή της ταχύτητας του ρευστοποιημένου εδάφους.

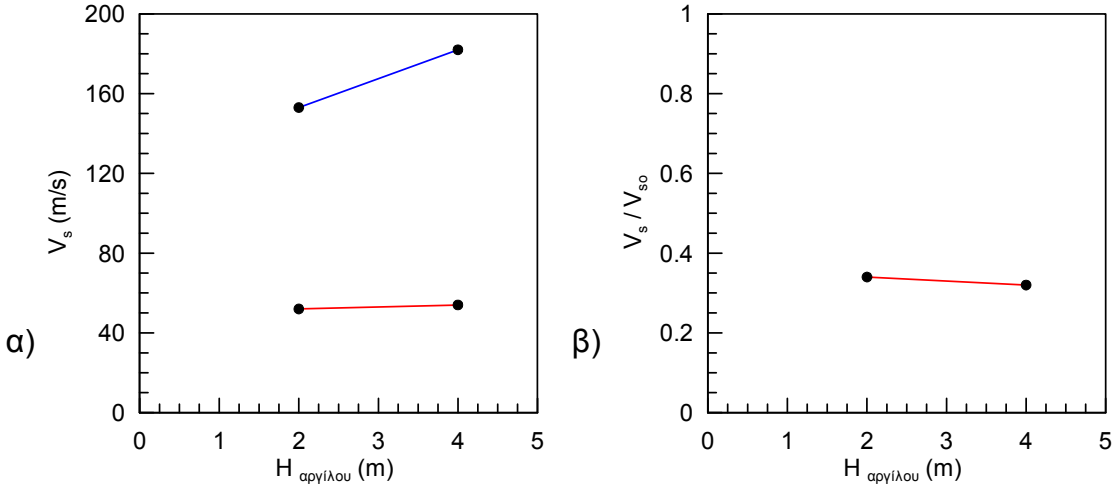


Σχήμα 4.12 : α) Μέση αρχική ταχύτητα και μέση ταχύτητα διατμητικού κύματος σε ρευστοποιημένη άμμο και β) μέση τιμή του λόγου αρχικής ταχύτητας και ταχύτητας διατμητικού κύματος σε ρευστοποιημένη άμμο, για ταχύτητα διατμητικού κύματος αργίλου βάσης 100m/s και 300m/s

Πάχος της Αργιλικής Επικάλυψης. Το πάχος της αργιλικής επικάλυψης φαίνεται να μην επηρεάζει την ταχύτητα στη ρευστοποιημένη άμμο (Σχήμα 4.7). Από το μέσο όρο της τιμής της ταχύτητας (**Σχήμα 4.13**) εξάγεται το ίδιο αποτέλεσμα, δηλαδή η μεταβολή της μέσης τιμής της ταχύτητας είναι αμελητέα, 52m/s και 54m/s για 2m και 4m πάχος αργιλική επικάλυψης αντίστοιχα. Επιπλέον, η μέση τιμή του λόγου της ταχύτητας του ρευστοποιημένου εδάφους και της αρχικής ταχύτητας κυμαίνεται από 0.32 εως 0.34.

Συμπεραίνουμε ότι δεν παρουσιάζεται ουσιατική μεταβολή στην τιμή της ταχύτητας ούτε στο λόγο V_s/V_{so} και το πάχος της αργιλικής επικάλυψης δεν

επηρεάζει, όπως αναμενόταν, την ταχύτητα του σεισμικού κύματος στη ρευστοποιημένη άμμο.

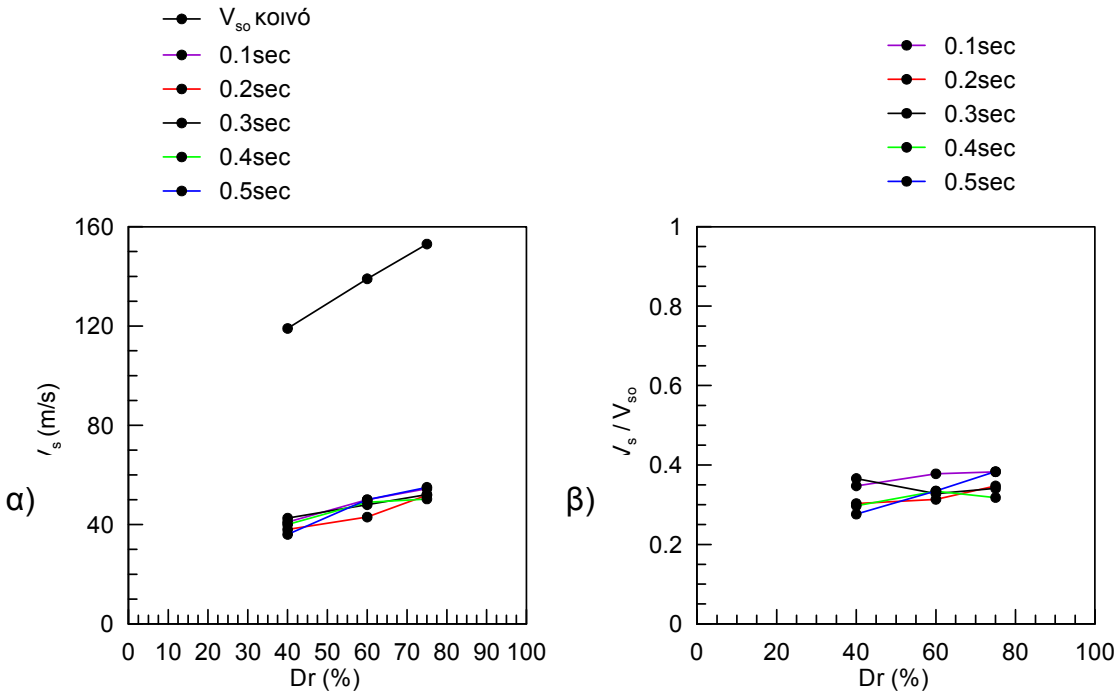


Σχήμα 4.13 : α) Μέση αρχική ταχύτητα και μέση ταχύτητα διατμητικού κύματος σε ρευστοποιημένη άμμο και β) μέση τιμή του λόγου αρχικής ταχύτητας και ταχύτητας διατμητικού κύματος σε ρευστοποιημένη άμμο, για πάχος αργιλικής επιτάχυνσης 2m και 4m

Δείκτης Πόρων της Άμμου. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις τιμές για τον δείκτη πόρων και αντίστοιχα για τη σχετική πυκνότητα του στρώματος της άμμου, 40%, 60% και 75%, καθότι η σχετική πυκνότητα είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για το φαινόμενο που εξετάζεται. Για τις τρεις αυτές τιμές υπολογίστηκε η μέση τιμή της ταχύτητας του διατμητικού κύματος και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.14.** Για κάθε σχετική πυκνότητα έγιναν αναλύσεις με πέντε τιμές περιόδου 0.1sec, 0.2sec, 0.3sec, 0.4sec και 0.5sec. Οι αναλύσεις αυτές πραγμτοποιήθηκαν με σκοπό την περιγραφή του φαινομένου, λόγω του ότι η περίοδος και η σχετική πυκνότητα είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το υπό εξέταση πρόβλημα (βλ. Κεφάλαιο 3.8).

Η ταχύτητα αυξάνεται ελαφρώς με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας. Όμως η αύξηση αυτή παρουσιάζεται και στη μεση αρχική ταχύτητα της άμμου και τελικώς η μέση τιμή του λόγου της ταχύτητας του ρευστοποιημένου εδάφους και της αρχικής ταχύτητας μεταβάλλεται μεταξύ 0.33 και 0.37. Συνεπώς η επιρροή της σχετικής πυκνότητας απαλοίφεται όταν η ταχύτητα του ρευστοποιημένου στρώματος συσχετίζεται με την αρχική ταχύτητα.

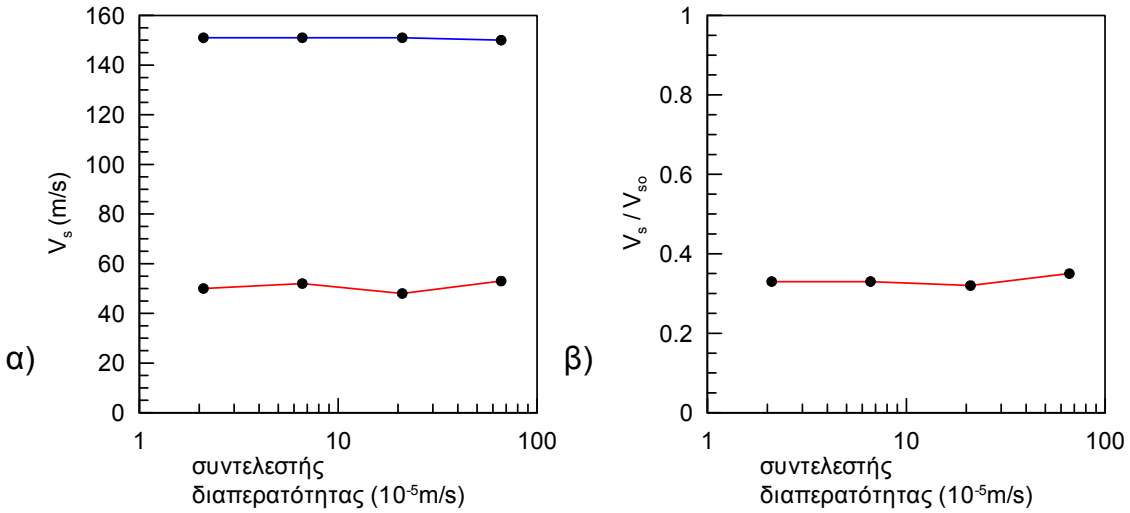
Η σχετική πυκνότητα λοιπόν, επιδρά στην ταχύτητα της ρευστοποιημένης άμμου αλλά η επίδραση της απαλοίφεται με το λόγο V_s/V_{so}.



Σχήμα 4.14 : α) Μέση αρχική ταχύτητα και μέση ταχύτητα διατμητικού κύματος σε ρευστοποιημένη άμμο και β) μέση τιμή του λόγου αρχικής ταχύτητας και ταχύτητας διατμητικού κύματος σε ρευστοποιημένη άμμο, για σχετική πυκνότητα 40%, 60% και 75%

Διαπερατότητας της Άμμου. Η διαπερατότητα της άμμου δε φαίνεται να επηρεάζει την ταχύτητα σεισμικού κύματος. Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.15**.

Για παραμόρφωση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες η μέση ταχύτητα του σεισμικού κύματος κυμαίνεται περί της τιμής 52m/s, για συντελεστή διαπερατότητας $2.3*10^{-5}$, $6.6*10^{-5,}$ $23*10^{-5}$ και $66*10^{-5}$. Συνεπώς, για στραγγιζόμενες συνθήκες η συμπεριφορά της ρευστοποιημένης άμμου δεν αλλάζει, όσον αφορά την ταχύτητα του διατμητικού κύματος του ρευστοποιημένου στρώματος. Επίσης και ο λόγος V_s/V_{so} δεν μεταβάλλεται αλλά παραμένει περίπου σταθερός από 0.33 έως και 0.35.



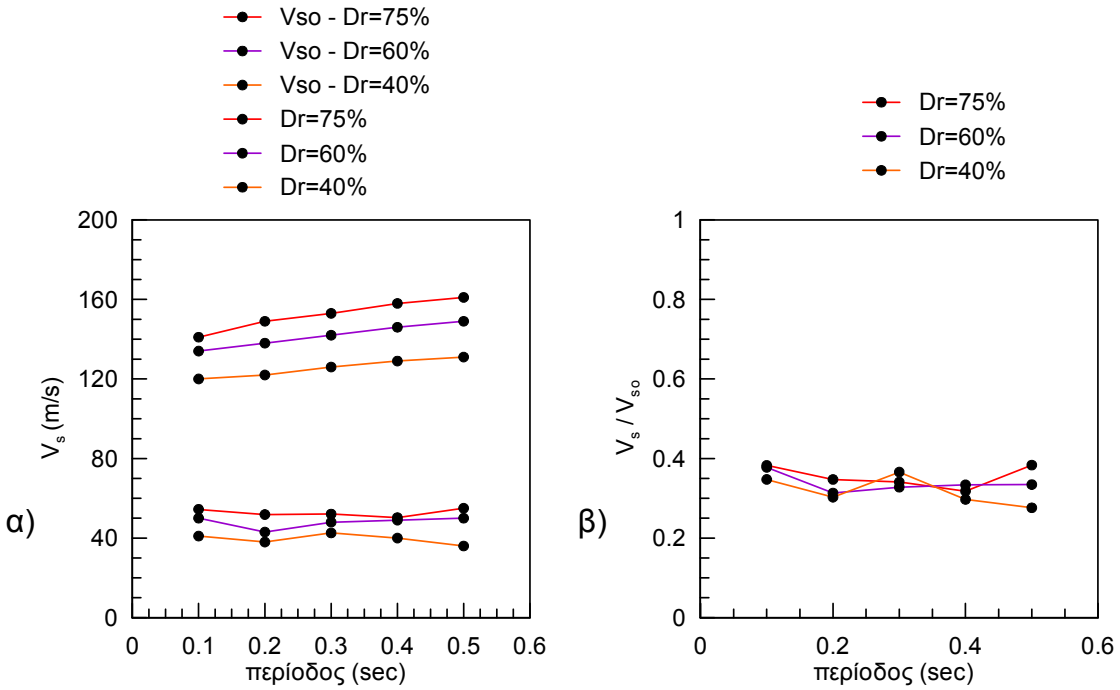
Σχήμα 4.15 : α) Μέση αρχική ταχύτητα και μέση ταχύτητα διατμητικού κύματος σε ρευστοποιημένη άμμο και β) μέση τιμή του λόγου αρχικής ταχύτητας και ταχύτητας διατμητικού κύματος σε ρευστοποιημένη άμμο, για αστράγγιστες συνθήκες και για στραγγιζόμενες συνθήκες με συντελεστή διαπερατόττητας 0.006cm/s

Περιόδος Διέγερσης. Η παράμετρος που διαδραματίζει τον σημαντικότερο ρόλο στο πρόβλημα μας είναι η περίοδος της διέγερσης. Γι'αυτο το λόγο χρησιμοποιήθηκαν πέντε τιμές της περιόδου ώστε να υπολογιστεί η μέση ταχύτητα του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος : 0.1sec, 0.2sec, 0.3sec, 0.4sec και 0.5sec. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.16.** Οι τιμές αυτές της περιόδου συνδυάζονται με τρεις τιμές για τη σχετική πυκνότητα της άμμου, καθώς όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, οι δύο αυτοί παράμετροι είναι οι πιο σημαντικοί για το πρόβλημα.

Από τα αποτελέσματα αυτά είναι αρκετα καθαρό το ότι η περίοδος δεν επηρεάζει σημαντικά την τιμή της μέσης ταχύτητας που υπολογίζουμε. Επιπλέον, η μέση τιμή του λόγου της ταχύτητας του ρευστοποιημένου εδάφους και της αρχικής ταχύτητας κυμαίνεται και για τις πέντε περιόδους από 0.32 έως 0.38.

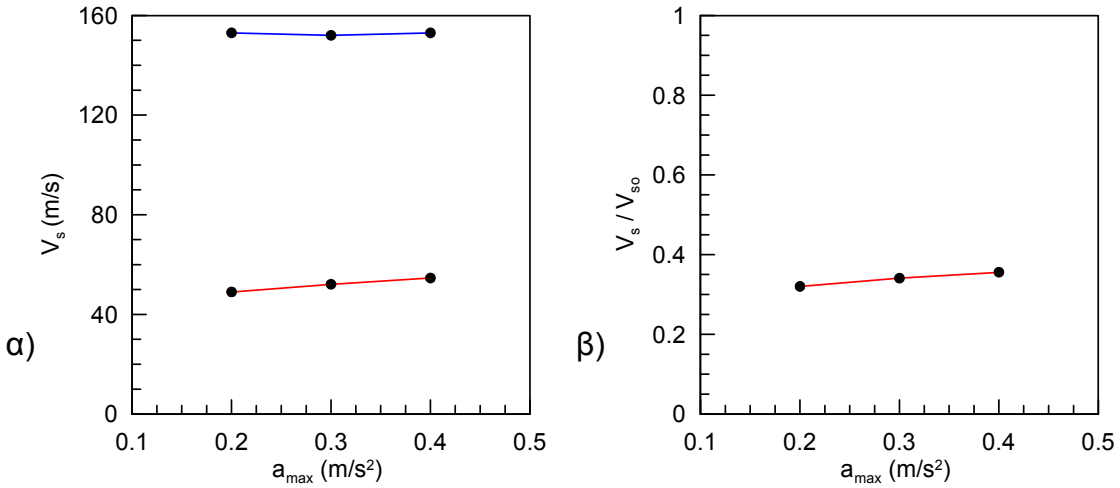
Συνεπώς, από τα αποτελέσματα αυτά συνεπάγεται ότι η περίοδος δεν έχει επιρροή στην ταχύτητα σεισμικού κύματος. Η διακύμανση του λόγου V_s/V_{so}

δεν είναι μεγάλη και βρίσκεται μέσα στα όρια της αβεβαιότητας των αποτελέσμάτων της διαδικασίας που χρησιμοποιείται.



Σχήμα 4.16 : α) Μέση αρχική ταχύτητα και μέση ταχύτητα διατμητικού κύματος σε ρευστοποιημένη άμμο και β) μέση τιμή του λόγου αρχικής ταχύτητας και ταχύτητας διατμητικού κύματος σε ρευστοποιημένη άμμο, για σχετική πυκνότητα 40%, 60% και 75%

Μέγιστη Επιτάχυνση Διέγερσης. Η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης δεν έχει επίδραση στο φαινόμενο και όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.17** δεν έχει επίδραση, στα όρια που εξετάστηκαν, ούτε και στην ταχύτητα του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος. Η ταχύτητα μεταβάλλεται λίγο, από 54m/s σε 59 m/s, ενώ και η μέση τιμή του λόγου της ταχύτητας του ρευστοποιημένου εδάφους και της αρχικής ταχύτητας κυμαίνεται από 0.32 έως 0.36. Έτσι, συνεπάγεται ότι η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης δεν μεταβάλλει την ταχύτητα του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος.



Σχήμα 4.17 : α) Μέση αρχική ταχύτητα και μέση ταχύτητα διατμητικού κύματος σε ρευστοποιημένη άμμο και β) μέση τιμή του λόγου αρχικής ταχύτητας και ταχύτητας διατμητικού κύματος σε ρευστοποιημένη άμμο, για σχετική πυκνότητα 40%, 60% και 75%

Συμπεράσματα. Για παραμόρφωση η οποία πραγματοποιείται υπό αστράγγιστες συνθήκες, η ταχύτητα του σεισμικού κύματος για το ρευστοποιημένο έδαφος κυμαίνεται από 40m/s έως 60m/s, ενώ το εύρος αυτό της ταχύτητας είναι ανεξάρτητο πάχους. Ο υπολογισμός της εν λόγω ταχύτητας γίνεται για πάχη άμμου όπου η ρευστοποίηση είναι εμφανής, δηλαδή για πάχη μεγαλύτερα από το κρίσιμο πάχος της άμμου, όπως αυτό προκύπτει για κάθε περίπτωση.

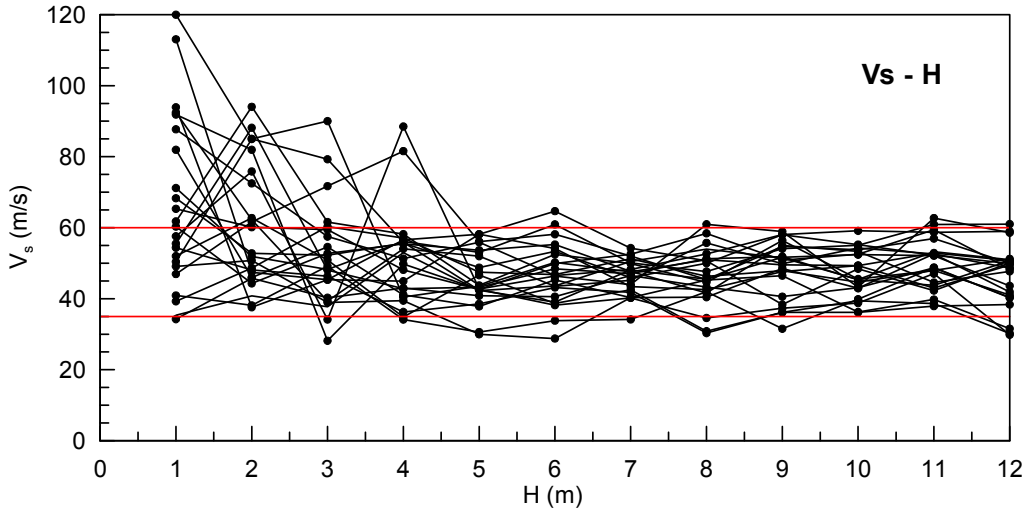
Επιπλέον, η ταχύτητα κυμαίνεται στο 32%-38% της τιμής της αρχικής ταχύτητας της άμμου , πριν τη ρευστοποίηση. Ο λόγος αυτός εμφανίζεται να απαλοίφει και την επίδραση πολλών παραγόντων που αυξάνουν το εύρος της τιμής της ταχύτητας του σεισμικού κύματος, όπως η σχετική πυκνότητα του στρώματος. Συνεπώς, για αστράγγιστες συνθήκες διαθέτουμε ένα ικανοποιητικό και σχετικά μικρό εύρος της ταχύτητας μετάδοσης του σεισμικού κύματος.

Όταν όμως η παραμόρφωση γίνεται υπό μερικώς στραγγιζόμενες συνθήκες, τότε η ταχύτητα του σεισμικού κύματος μεταβάλλεται με το πάχος του ρευστοποιήσιμου εδάφους και η συμπεριφορά της άμμου διαφοροποιείται. Για το εύρος του συντελεστή διαπερατότητας που ελήφθει υπόψιν, προκύπτει ταχύτητα σεισμικού κύματος η οποία κυμαίνεται από 120m/s έως και 40m/s,

εύρος αρκετά μεγάλο ενώ ο λόγος V_s/V_{so} κυμαίνεται από 30% έως και 90% (Σχήμα 4.9). Και για τη μέση τιμή της ταχύτητας και του λόγου V_s/V_{so} το εύρος είναι αρκετά μεγάλο, δηλαδή 52m/s έως 110m/s για την μέση τιμή της ταχύτητας και 34% έως 72% για το λόγο V_s/V_{so}. Συνεπώς, η περίπτωση παραμόρφωσης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες θα πρέπει να εξεταστεί ξεχωριστά.

4.6 Σύνοψη

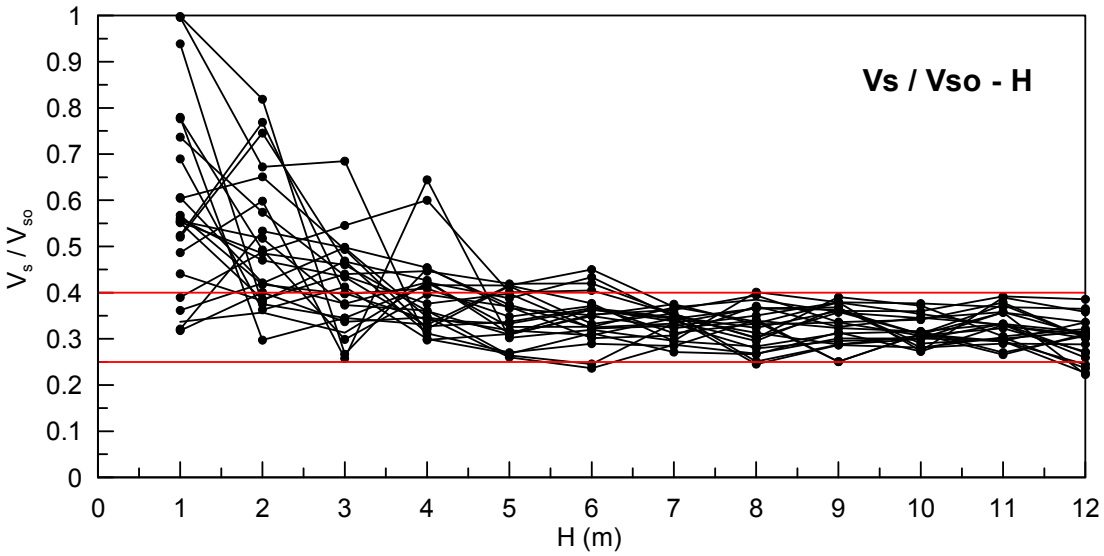
Στο **Σχήμα 4.18** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από όλες τις αναλύσεις με την μορφή της ταχύτητας του ρευστοποιημένου εδάφους ως προς το απόλυτο πάχος του στρώματος της ρευστοποιήσιμης άμμου. Η εν λόγω ταχύτητα κυμαίνεται για το σύνολο των αναλύσεων, περίπου από 35m/s έως και 60m/s, ένα εύρος από το οποίο λαμβάνεται μια καλή προσέγγιση της περιοχής όπου κινείται η τιμή της ταχύτητας.



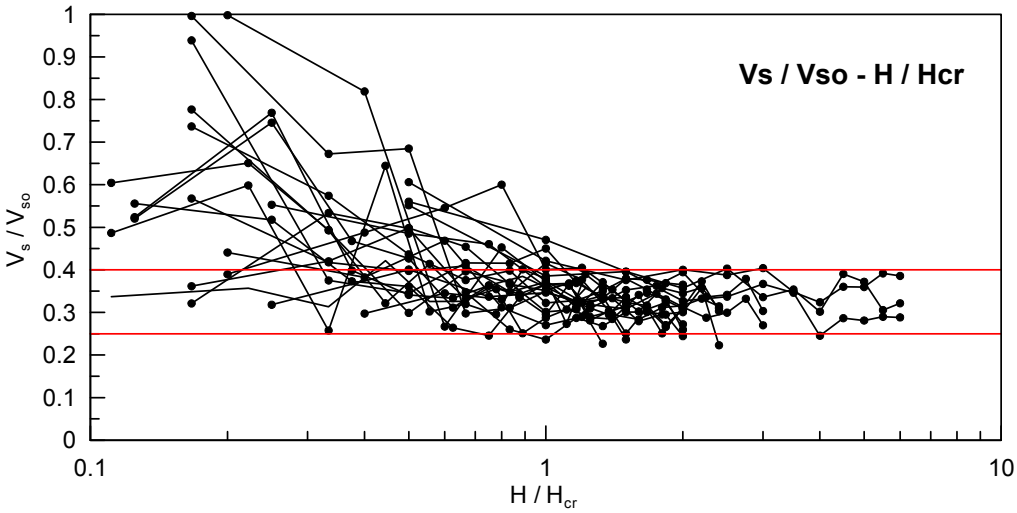
Σχήμα 4.18 : Σύνοψη των αποτελεσμάτων όλων των αναλύσεων για τον λόγο V_s/V_{so} με το πάχος της άμμου

Επιπλέον, στα **Σχήματα 4.19 και 4.20** παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα αλλά αντί για την ταχύτητα χρησιμοποιείται ο λόγος της μέσης τιμής του λόγου της ταχύτητας του ρευστοποιημένου εδάφους και της αρχικής ταχύτητας V_s/V_{so} και στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται στο Σχήμα 4.19 το πάχος της άμμου στο Σχήμα 4.20 το πάχος της άμμου κανονικοποιημένο ως προς το κρίσιμο πάχος από το οποίο η ρευστοποίηση της άμμου γίνεται εμφανής. Για τον

οριζόντιο άξονα χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα, καθώς βασικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή γύρω από το $\frac{H}{H_{cr}} = 1,$ αλλά διαθέτουμε και άλλες τιμές μακρυά από την κρίσιμη αυτή περιοχή.



Σχήμα 4.19 : Σύνοψη των αποτελεσμάτων όλων των αναλύσεων για τον λόγο V_s/V_{so} με το πάχος της άμμου



Σχήμα 4.20 : Σύνοψη των αποτελεσμάτων όλων των αναλύσεων για τον λόγο V_s/V_{so} με το πάχος της άμμου προς το κρίσιμο πάχος

Εξαρχής είναι αισθητή η μείωση του εύρους στο οποίο κυμαίνεται ο λόγος V_s/V_{so} εν σχέση με την τιμή της ταχύτητας του ρευστοποιημένου εδάφους. Η χρήση της αρχικής ταχύτητας του ρευστοποιήσιμου εδάφους απαλοίφει την επίδραση κάποιων παραγόντων, όπως η σχετική πυκνότητα της άμμου και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται να διαθέτουν μικρότερη διασπορά. Γι'αυτό το

λόγο και στη συνέχεια θα αναλύθούν τα αποτελέσματα που αφορούν το λόγο V_s/V_{so}.

Καταρχάς, και από τα δύο διαγράμματα (4.19 και 4.20) είναι εμφανές ότι η ταχύτητα μετάδοσης του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος, κυμαίνεται εντός των ορίων 25%-40% της αρχικής ταχύτητας της άμμου. Από το Σχήμα 4.20, φαίνεται η ύπαρξη του κρίσιμου πάχους καθώς και η εύλογη επιλογή του για κάθε ανάλυση, διότι για $\frac{H}{H_{cr}} > 1$ ο λόγος V_s/V_{so} «μαζεύεται» στο εύρος 25%-40%.

Επιπλέον, ο λόγος V_s/V_{so} συνδέεται με το λόγο υπερπίεσης πόρων r_u. Καθώς το μέτρο δυσκαμψίας είναι ανάλογο της της $\sqrt{\sigma'_v} = \sqrt{\sigma'_{vo} - \Delta u}$, προκύπτει ότι

$$\frac{G}{G_o} = \sqrt{1 - r_u} \qquad (4.4)$$

Συνεπώς για το λόγο V_s/V_{so} ισχύει, τουλάχιστον στην ελαστικότητα,

$$\frac{V_s}{V_{so}} = \sqrt[4]{1 - r_u} \qquad (4.5)$$

Ως εκ τούτου, για το εύρος το οποίο λαμβάνουμε και είναι από 0.25 έως 0.40, από τη Σχέση 4.5 προκύπτει ένα εύρος για το λόγο υπερπίεσης πόρων από 0.996 έως 0.974. Παρατηρούμε ότι οι τιμές του r_u είναι λογικές τιμές διότι αφορούν ρευστοποιημένο έδαφος και άρα είναι κοντά στη μονάδα. Επίσης, επισημαίνεται ότι το εύρος αυτό για το λόγο r_u είναι αρκετά μικρό και δεν υπολογίζονται εύκολα υπερπιέσεις πόρων τέτοιες ώστε να δίδεται τόση ακρίβεια.

Τελικώς, οι παράμετροι που εξετάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο και αποτελούν τις βασικότερες παραμέτρους του προβλήματος, δεν επηρεάζουν την ταχύτητα μετάδοσης του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος και πιο συγκεκριμένα δεν επηρεάζουν τον λόγο της συγκεκριμένης ταχύτητας προς την αρχική ταχύτητα του στρώματος. Η ταχύτητα μετάδοσης του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος κυμαίνεται σε ένα μικρό εύρος, 25%-40%. Για τους υπολογισμούς του επόμενου κεφαλαίου θα

χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του εύρους αυτού, δηλαδή θα θεωρηθεί $V_s/V_{so} \approx 0.32$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΚΡΙΣΙΜΟ ΠΑΧΟΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

5.1 Γενικά

Το πιο καθοριστικό στοιχείο του προβλήματος είναι το κρίσιμο πάχος του ρευστοποιήσιμου εδάφους, δηλαδή το πάχος της άμμου από το οποίο και έπειτα η ρευστοποίηση της άμμου είναι εμφανής. Σε όλες τις αναλύσεις παρατηρείται ένα πάχος άμμου το οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί ως κρίσιμο και το οποίο σηματοδοτεί την έναρξη της εμφανούς ρευστοποίησης.

Εν αρχή, το κρίσιμο πάχος μπορεί να προσδιοριστεί από τις χρονοϊστορίες που διαθέτουμε καθώς από κάποιο πάχος και έπειτα είναι εμφανές ότι η επιτάχυνση μειώνεται, οπτικά, στο μισό σε σχέση με την αρχική, ο λόγος υπερπιέσεων πόρων ομαλοποιείται και ισούται περίπου με 1 και η διαδρομή των τάσεων παρουσιάζει μικρή διασταλτικότητα. Έτσι προκύπτει μια πρώτη προσέγγιση για το κρίσιμο πάχος.

Στη συνέχεια προσπαθούμε να ποσοτικοποιήσουμε το κρίσιμο αυτό πάχος όπως προκύπτει μέσω των δεικτών που λαμβάνουμε από την ανάλυση και ύστερα και μέσω των αρχικών, γνωστών, συνθηκών του εδαφικού προφίλ.

Τέλος, στην προσπάθεια αυτή αναδεικνύεται και η μεγάλη σημασία του μήκους κύματος στον προσδιορισμό του κρίσιμου πάχους και κατ'επέκταση η ταχύτητα μετάδοσης του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο στρώμα η οποία υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 4.

5.2 Ορισμός Κρίσιμου Πάχους

Για να ορισθεί με ποσοτικό και όσο δυνατόν αντικειμενικό τρόπο το κρίσιμο πάχος, το πάχος από το οποίο και έπειτα η ρευστοποίηση του στρώματος της άμμου είναι εμφανής και παρουσιάζονται όλα τα γνωστά χαρακτηριστικά της, χρησιμοποιούνται οι ποσοτικοί δείκτες οι οποίοι έχουν οριστεί στο Κεφάλαιο 2.

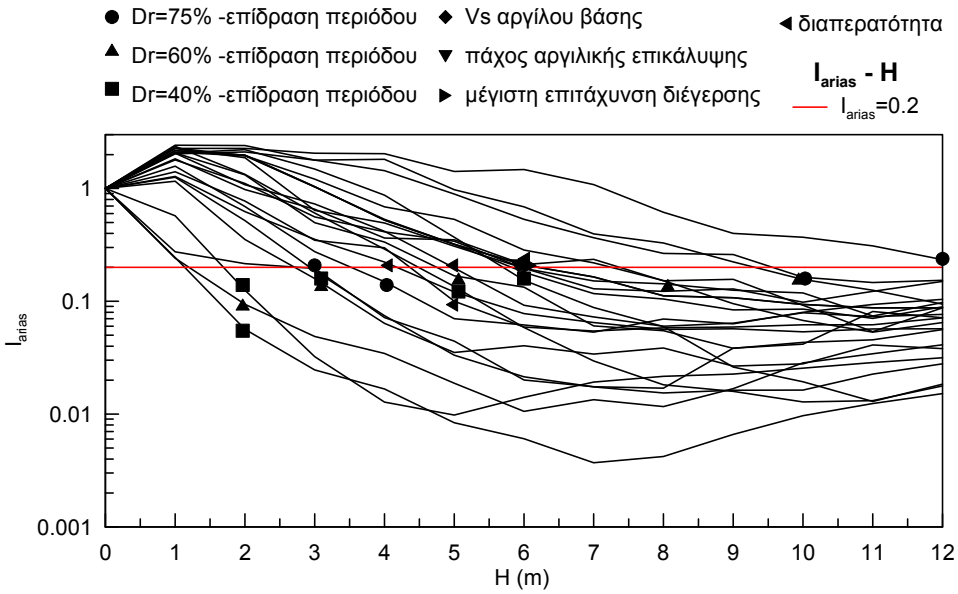
Καταρχάς, οι παραμετρικές αναλύσεις έχουν γίνει όλες για μεταβλητό πάχος άμμου από 1m έως και 12m, ανά 1m. Από αυτές τις αναλύσεις προκύπτει

οπτικά, και εν μέρει υποκειμένικά, ένα χαρακτηριστικό πάχος άμμου από το οποίο και έπειτα η ρευστοποίηση είναι εμφανής. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό του πάχους αυτού σε κάθε ανάλυση βρίσκονται στο Παράρτημα στο τέλος της Διπλωματικής.

Συνεπώς για κάθε παραμετρική ανάλυση διαθέτουμε ένα πάχος άμμου, το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στο 1m και στα 12m, το οποίο αποτελεί το κρίσιμο πάχος για την ανάλυση. Τοποθετούμε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε διαγράμματα ως προς τους ποσοτικούς δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν και επιπλέον, τοποθετούμε τα σημεία κρίσιμου πάχους άμμου στα αντίστοιχα πάχη.

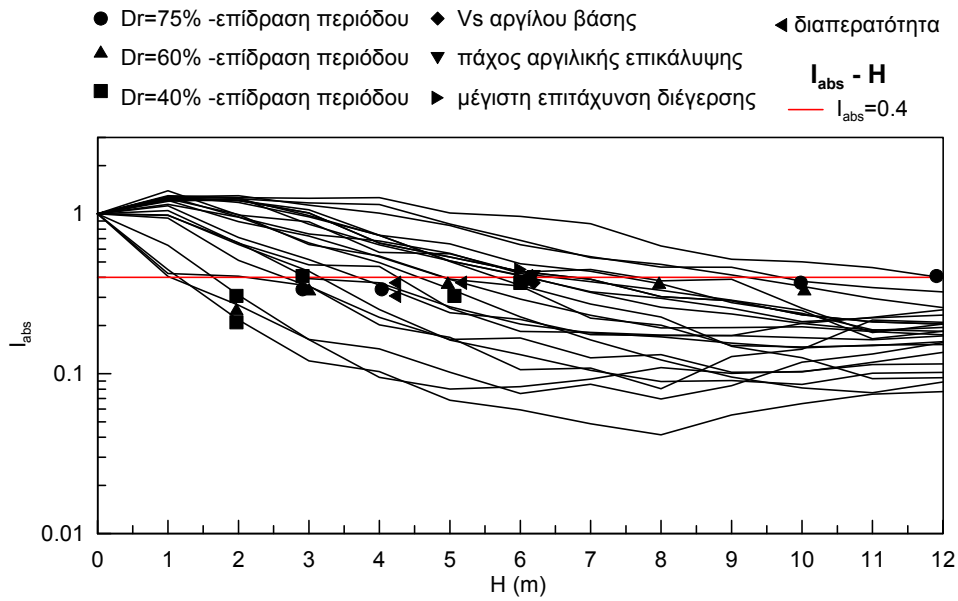
Τα διαγράμματα παρουσιάζονται στα **Σχήματα 5.1** έως και **5.4** όπου ο άξονας των I_{arias}, I_{abs} και I_{rms} παρουσιάζεται σε λογαριθμική μορφή, καθώς οι καμπύλες που προκύπτουν περιορίζονται σε μία στενή λωρίδα, και με αυτόν τον τρόπο παρουσιάζονται καλύτερα τα αποτελέσματα.

Από τα Σχήματα 5.1 έως 5.4 και λαμβάνοντας υπόψιν τα σημεία που έχουν τοποθετηθεί με διάφορα σύμβολα και σηματοδοτούν το κρίσιμο πάχος της άμμου, προκύπτει εύλογα ως κρίσιμο όριο για τον εκάστοτε δείκτη η κόκκκινη γραμμή που έχει τοποθετηθεί. Για την ποσοτικοποίηση του κρίσιμου πάχους θα χρησιμοποιηθούν ως κριτήριο οι οριακές τιμές που προκύπτουν για τους τέσσερεις ποσοτικούς μας δείκτες.



Σχήμα 5.1 : Αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων ως προς τον δείκτη I_{arias}

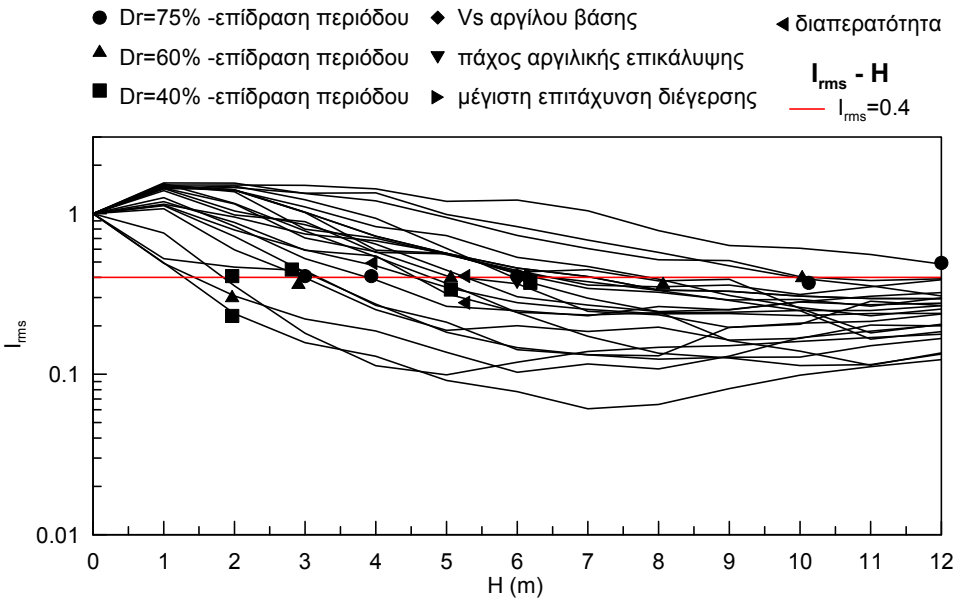
Από το Σχήμα 5.1 προκύπτει ότι για τον δείκτη I_{arias} η τιμή που χαρακτηρίζει το κρίσιμο πάχος είναι το $I_{arias}\approx 0.2$. Η συσχέτιση μεταξύ των σημείων που χαρακτηρίζουν το κρίσιμο πάχος και της τιμής του δείκτη, οπτικά, είναι πολύ καλή. Γενικά, ρευστοποίηση παρουσιάζεται όταν $I_{arias}<0.2$



Σχήμα 5.2 : Αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων ως προς τον δείκτη I_{abs}

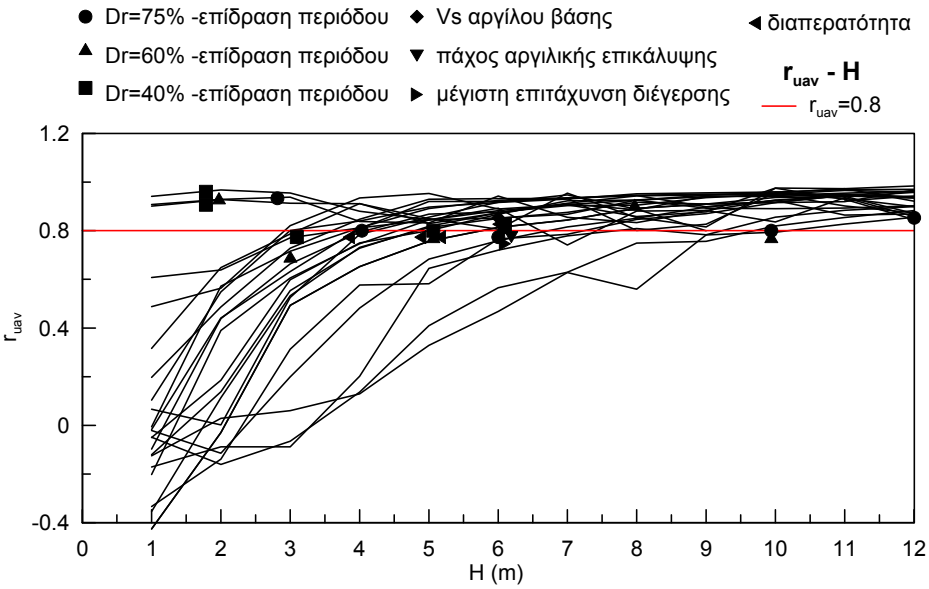
Από το Σχήμα 5.2 προκύπτει ότι για τον δείκτη I_{abs} η τιμή που χαρακτηρίζει το κρίσιμο πάχος είναι το $I_{abs}\approx 0.4$. Η συσχέτιση της τιμής του δείκτη και των

σημείων που έχουν επιλεγεί για κάθε ανάλυση είναι όπως και προηγούμένως πολύ καλή. Γενικά για τη ρευστοποίηση ισχύει I_{abs}<0.4



Σχήμα 5.3 : Αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων ως προς τον δείκτη I_{rms}

Από το Σχήμα 5.3 προκύπτει ότι για τον δείκτη I_{rms} η τιμή που χαρακτηρίζει το κρίσιμο πάχος είναι το I_{rms}≈0.4. Η συσχέτιση της τιμής του δείκτη και των σημείων που έχουν επιλεγεί για κάθε ανάλυση είναι όπως και προηγούμένως πολύ καλή. Γενικά ρευστοποίηση παρουσιάζεται όταν I_{rms}<0.4



Σχήμα 5.4 : Αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων ως προς τον δείκτη r_{uav}

Από το Σχήμα 5.4 προκύπτει ότι για τον δείκτη r_{uav} η τιμή που χαρακτηρίζει το κρίσιμο πάχος είναι το $r_{uav}\approx0.8$. Ο δείκτης αυτός δεν φαίνεται τόσο καλός όσο οι προηγούμενοι. Καταρχάς, εμφανίζονται σημεία που για πάχος άμμου ακόμη και μικρότερο από το κρίσιμο της ανάλυσης λαμβάνουν τιμές μεγαλύτερες του 0.8. Επίσης, εμφανίζονται σημεία, λίγα φυσικά, τα οποία παρουσιάζουν ρευστοποίηση για τιμές μικρότερες του 0.8. Μολαταύτα, για την ακρίβεια που διαθέτουμε, θεωρείται ότι γενικά για τη ρευστοποίηση ισχύει $r_{uav}>0.8$.

Συνεπώς από τα παραπάνω προκύπτουν τέσσερα κριτήρια που ορίζουν την περιοχή της εμφανούς ρευστοποίησης με βάση τους τέσσερεις ποσοτικούς δείκτες, δηλαδή

- $I_{arias}<0.2$
- $I_{abs}<0.4$
- $I_{rms}<0.4$
- $r_{uav}>0.8$

Από τα κριτήρια αυτά προκύπτει και το «αντικειμενικό» κρίσιμο πάχος του ρευστοποιημένου εδάφους, το οποίο εν γένει δεν διαφέρει πολύ από το αρχικώς θεωρούμενο ως κρίσιμο πάχος, από την τομή των καμπυλών του διαγράμματος των τεσσάρων δεικτών με το αντίστοιχο όριο.

5.3 Παράμετροι που Επιδρούν στο Κρίσιμο Πάχος της Άμμου

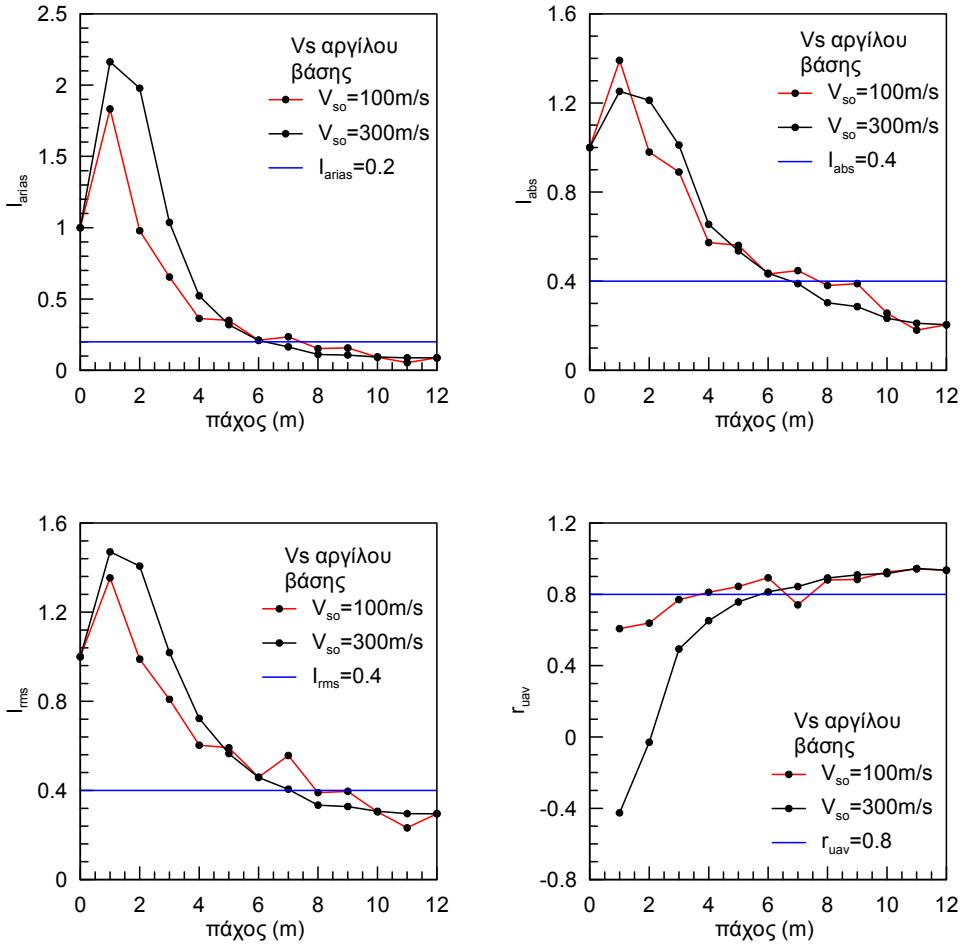
Η περίοδος της διέγερσης, η σχετική πυκνότητα και η διαπερατότητα του στρώματος της άμμου είναι οι παράμετροι που, όπως έχουμε δείξει στο Κεφάλαιο 3, κυρίως επηρεάζουν το κρίσιμο πάχος της άμμου. Αντίθετα, δεν επιδρούν στο κρίσιμο πάχος τα χαρακτηριστικά των στρωμάτων των αργίλων και η μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης.

Παρόλ’αυτα θα εξεταστούν και οι έξι παράμετροι του προβλήματος υπό το πρίσμα των ποσοτικών κριτηρίων τα οποία τέθηκαν παραπάνω. Επειδή η μέση τιμή του λόγου υπερπίεσης πόρων προκύπτει ότι δεν είναι τόσο καλός

ως δείκτης, για την εύρεση του μέσου κρίσιμου ύψους θα χρησιμοποιήσουμε τις τιμές που προκύπτουν από τους άλλους τρείς δείκτες.

Επίδραση Vs της Αργίλου Βάσης. Η ταχύτητα διατμητικού κύματος της αργίλου βάσης δεν επηρεάζει το φαινόμενο ούτε και το κρίσιμο πάχος της άμμου. Από το **Σχήμα 5.5** προκύπτει το κρίσιμο πάχος της άμμου για τα κριτήρια που τέθηκαν παραπάνω**.** Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον **Πίνακα 5.1**.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται η μικρή διαφορά για το κρίσιμο πάχος για τις δύο αναλύσεις, δηλαδή δεν μεταβάλλεται ουσιαστικά η κατάσταση με την μεταβολή του Vs της αργίλου βάσης. Ο μέσος όρος του κρίσιμου πάχους προκύπτει 6.4m για τη βασική ανάλυση και 7.0m για την παραμετρική ανάλυση με διαφορετική ταχύτητα διατμητικού κύματος αργίλου βάσης.

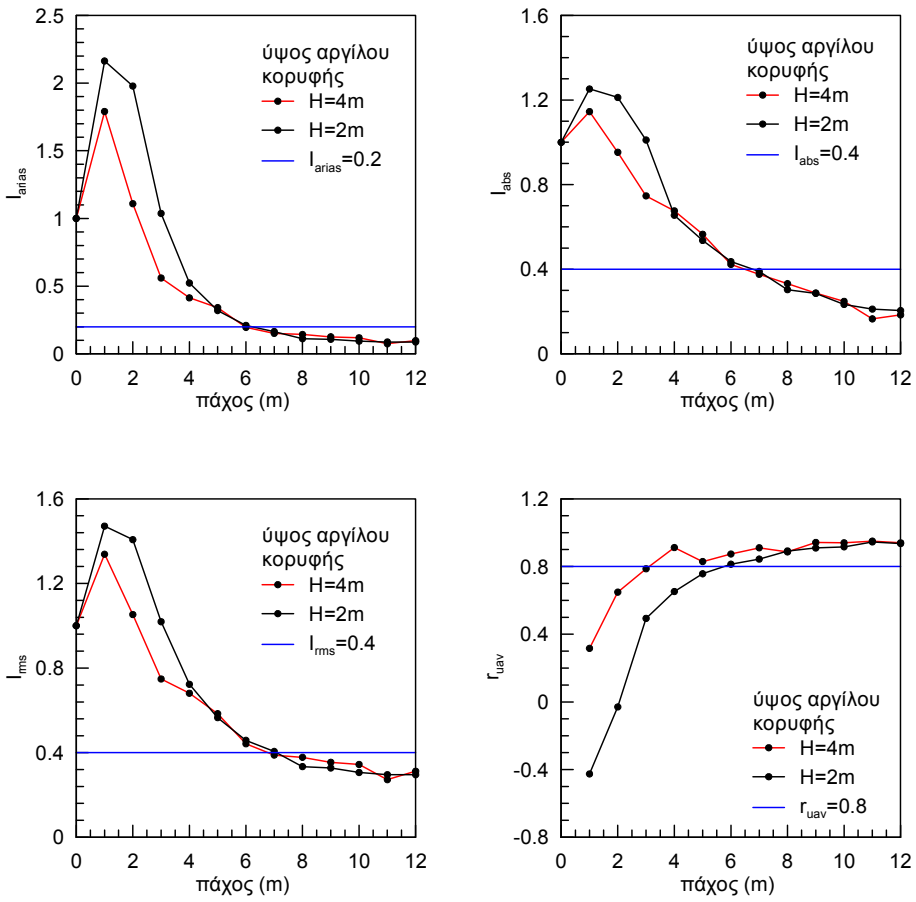


Σχήμα 5.5 : Επίδραση του Vs της αργίλου βάσης στους δείκτες σεισμικής απόκρισης και στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.

Πίνακας 5.1 : Επίδραση του Vs της αργίλου βάσης στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.

Δείκτης για την εύρεση του κρίσιμου πάχους	Κρίσιμο Πάχος Άμμου (m)	
	Βασική Ανάλυση όπου για την άργιλο βάση V_{so}=300m/s	Ανάλυση όπου για την άργιλο βάση V_{so}=100m/s
I_{arias}=0.20	6.0	6.0
I_{abs}=0.40	6.8	7.6
I_{rms}=0.40	7.0	7.7
Μέσος όρος	6.6	7.0

Επίδραση Πάχους της Αργιλικής Επικάλυψης. Το πάχος της αργιλικής επικάλυψης έχουμε δείξει ότι δεν επηρεάζει το κρίσιμο πάχος της άμμου (Κεφάλαιο 3). Στο **Σχήμα 5.6** και στον **Πίνακα 5.2** προσδιορίζεται το κρίσιμο πάχος της άμμου.



Σχήμα 5.6 : Επίδραση του πάχους της αργιλικής επικάλυψης στους δείκτες σεισμικής απόκρισης και στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.

Ο μέσος όρος προκύπτει κοινός 6.4m και το κρίσιμο πάχος δεν μεταβάλλεται ουσιαστικά για την παραμετρική ανάλυση. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται αρκετά εμφανές ότι ο δείκτης της μέσης τιμής του λόγου υπερπίεσης πόρων δεν δίνει πάντα λογικά αποτελέσματα καθώς προκύπτει κρίσιμο πάχος περίπου 3m, κάτι το οποίο σίγουρα δεν είναι ορθό όπως φαίνεται από τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες (βλ. Παράρτημα).

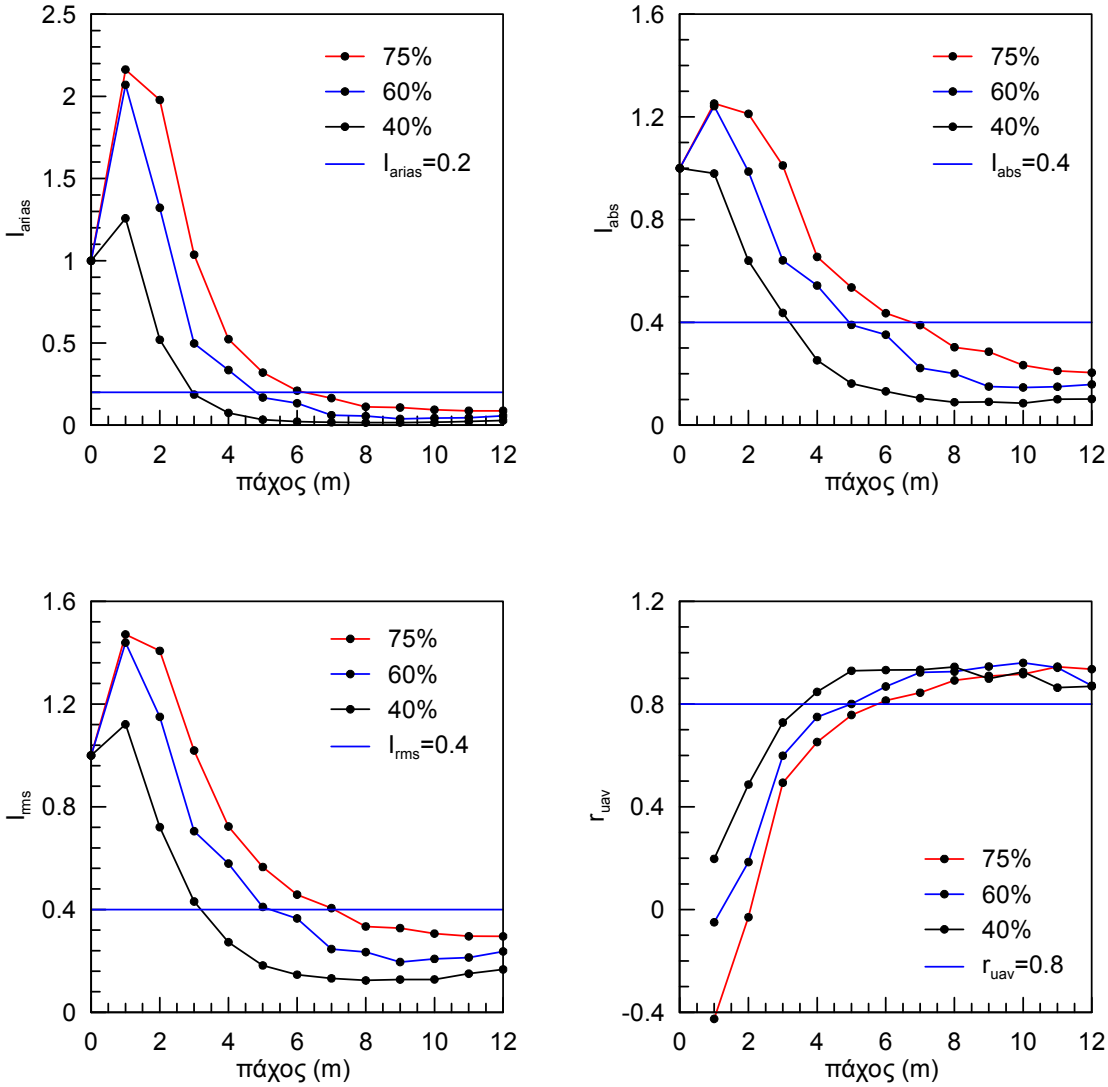
Πίνακας 5.2 : Επίδραση του πάχους της αργιλικής επικάλυψης στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.

Δείκτης για την εύρεση του κρίσιμου πάχους	Κρίσιμο Πάχος Άμμου (m)	
	Βασική Ανάλυση όπου για το ύψος της αργίλου κορυφής H=2m	Ανάλυση όπου για το ύψος της αργίλου κορυφής H=4m
I_{arias}=0.20	6.0	6.0
I_{abs}=0.40	6.8	6.5
I_{rms}=0.40	7.0	6.8
Μέσος όρος	6.4	6.4

Επίδραση Σχετικής Πυκνότητας της Άμμου. Η σχετική πυκνότητα της άμμου έχει αρκετά σημαντική επίδραση στο φαινόμενο που εξετάζεται αλλά και στο κρίσιμο πάχος της άμμου. Συνεπώς, στο **Σχήμα 5.7** παρουσιάζεται για περίοδο 0.3sec, την μέση περίοδο από αυτές που εξετάστηκαν, η επίδραση της σχετικής πυκνότητας, η οποία μεταβάλλεται από 40% σε 60% και 75%. Η περίοδος των 0.3sec επιλέχτηκε διότι είναι αρκετά εμφανής και σημαντική η επίδραση της σχετικής πυκνότητας.

Από το Σχήμα 5.7 προκύπτει άμεσα η μεγάλη επίδραση της σχετικής πυκνότητατας στο κρίσιμο πάχος. Στον **Πίνακα 5.3** συνοψίζονται τα αποτελέσματα για το κρίσιμο πάχος. Και από τα αποτελέσματα στον Πίνακα 5.3 είναι προφανής η επίδραση της σχετικής πυκνότητας.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι αύξηση της σχετικής πυκνότητας οδηγεί σε αύξηση του κρίσιμου πάχους, δηλαδή για πιο πυκνά ρευστοποιήσιμα εδάφη απαιτείται μεγαλύτερο πάχος για τη ρευστοποίηση τους. Έτσι από τον Πίνακα 5.3 λαμβάνουμε για σχετική πυκνότητα 75% κρίσιμο πάχος 6.0m, για Dr=60% 4.9m και για Dr=40% πάχος 2.9m, δηλαδή από σχετική πυκνότητα 75% σε σχετική πυκνότητα 40% το κρίσιμο πάχος υποδιπλασιάζεται από 6m σε 3m.

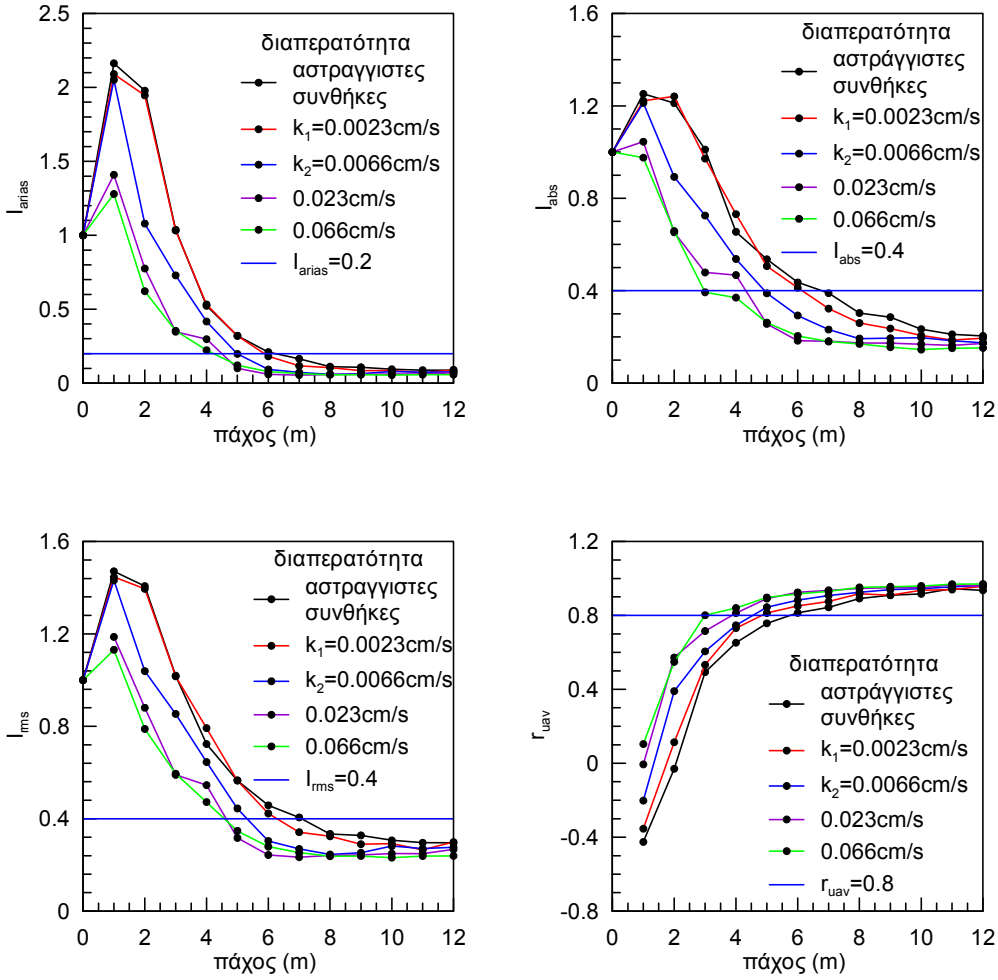


Σχήμα 5.7 : Επίδραση της σχετικής πυκνότητας της άμμου στους δείκτες σεισμικής απόκρισης και στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου για περίοδο διέγερσης 0.3sec.

Πίνακας 5.3 : Επίδραση του της σχετικής πυκνότητας της άμμου στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.

Δείκτης για την εύρεση του κρίσιμου πάχους	Κρίσιμο Πάχος (m) – T=0.3sec		
	Dr = 75%	Dr = 60%	Dr = 40%
I_{arias}=0.20	6.0	4.8	2.9
I_{abs}=0.40	6.8	4.9	3.2
I_{rms}=0.40	7.0	5.2	3.2
Μέσος όρος	6.4	5.0	3.1

Επίδραση Διαπερατότητας της Άμμου. Η διαπερατότητα έχει αρκετά σημαντική επίδραση στο κρίσιμο πάχος της άμμου. Όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 5.8** το κρίσιμο πάχος κυμαίνεται από περίπου 6.5m για αστράγγιστες συνθήκες έως και 4.0m για παραμόρφωση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες.



Σχήμα 5.8 : Επίδραση της διαπερατότητας της άμμου στους δείκτες σεισμικής απόκρισης και στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.

Πίνακας 5.4 : Επίδραση της διαπερατότητας της άμμου στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.

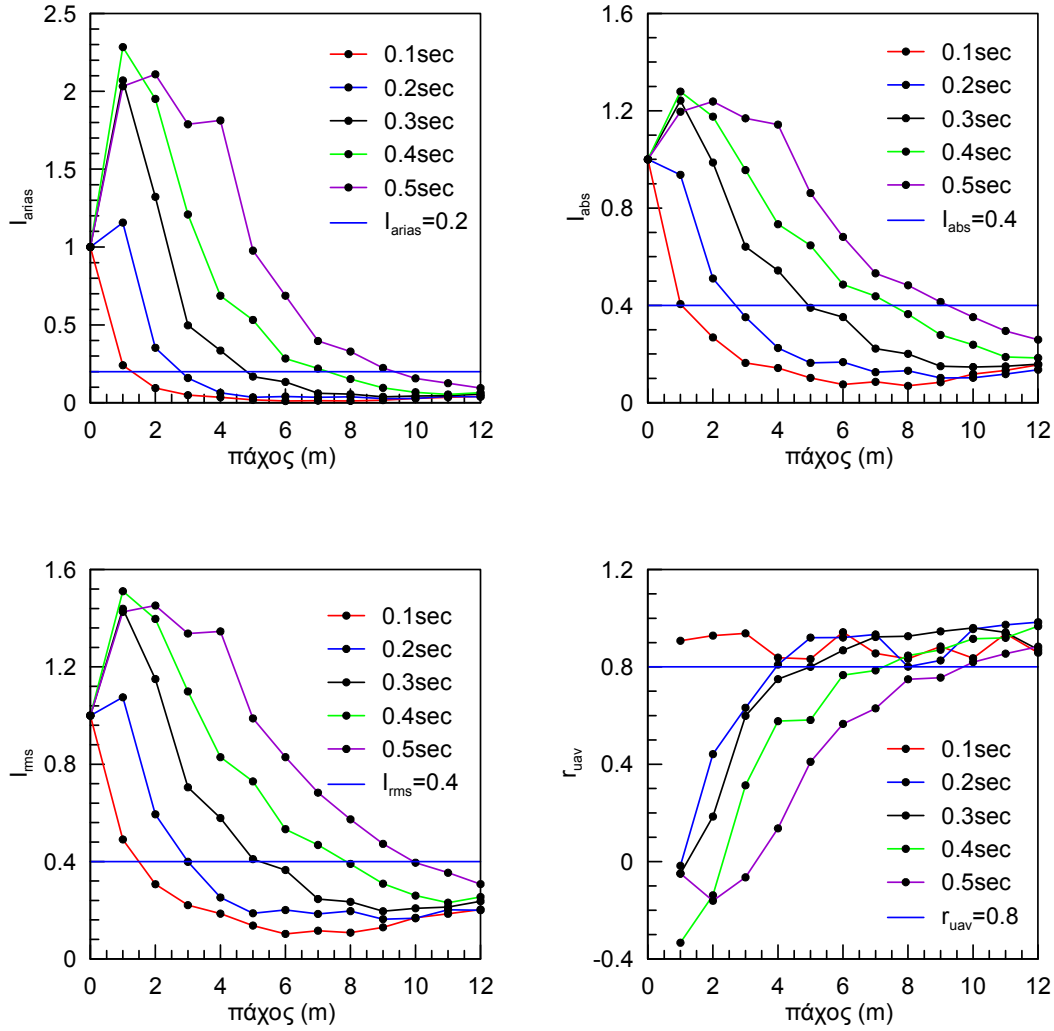
Δείκτης για την εύρεση του κρίσιμου πάχους	Κρίσιμο Πάχος (m)				
	Αστράγγιστες	$k=2.3*10^{-5}$	$k=6.6*10^{-5}$	$k=23*10$	$k=66*10^{-5}$
$I_{arias}=0.20$	6.0	6.0	5.0	4.5	4.2
$I_{abs}=0.40$	6.8	6.0	4.9	4.3	3.0
$I_{rms}=0.40$	7.0	6.2	5.3	4.6	4.6
Μέσος όρος	6.4	6.1	5.1	4.5	3.9

Συνεπώς η διαπερατότητα διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο και μεταβάλλει μέχρι και 2.5m το κρίσιμο πάχος της άμμο, δηλαδή μεταβάλλει ουσιαστικά την απόκριση του ρευστοποιήσιμου εδάφους. Όταν το στρώμα της άμμου γίνεται πιο περατό, μεγαλύτερος συντελεστής διαπερατότητας, παρατηρείται και μείωση του κρίσιμου πάχους της άμμου.

Για παραμόρφωση υπό αστράγγιστες συνθήκες το φαινόμενο λαμβάνει ελαφρώς υπερβολική μορφή, καθώς όταν το ρευστοποιήσιμο στρώμα παραμορφώνεται υπό στραγγιζόμενες συνθήκες η διασταλτικότητα που προκαλείται είναι μικρότερη και η επίδραση του φαινομένου αμβλύνεται. Μόλαταυτα, επισημαίνεται ότι ακόμη και υπό στραγγιζόμενες συνθήκες και για την σχετικά μεγάλη διαπερατότητα που χρησιμοποιήθηκε, συντελεστής διαπερατότητας $66*10^{-5}$ δηλαδή δέκα φορές μεγαλύτερος του αρχικού, το φαινόμενο παρουσιάζεται και πάλι και το κρίσιμο πάχος είναι 4m.

Επίδραση Περιόδου Διέγερσης. Η περίοδος της διέγερσης είναι ίσως η πιο καθοριστική παράμετρος του φαινομένου που εξετάζεται. Όπως προαναφέρθηκε μεταβαλλεται σε σχέση και με τη σχετική πυκνότητα καθώς οι δύο αυτές παράμετροι είναι οι πλεόν καθοριστικές για το πρόβλημα, ενώ έχει γίνει και θεώρηση αστράγγιστων συνθηκών. Στο **Σχήμα 5.9** παρουσιάζεται η επίδραση της περιόδου σχετική πυκνότητα ίση με 60%, την μέση σχετική πυκνότητα που εξετάσαμε. Επιπλέον, στον **Πίνακα 5.5** παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για το κρίσιμο πάχος της άμμου με βάση τα τρία κριτήρια που χρησιμοποιούμε.

Είναι εμφανές ότι η περίοδος μεταβάλλει αρκετά το κρίσιμο πάχος της άμμου. Αύξηση της περιόδου προκαλεί και αύξηση του κρίσιμου πάχους, δηλαδή για μεγαλύτερη περίοδο απαιτείται και μεγαλύτερο πάχος άμμου ώστε να πραγματοποιηθεί πλήρης ρευστοποίηση. Έτσι, μεγάλες περιόδους όπως το 0.5sec δεν προκαλούν ρευστοποίηση σε ρευστοποιήσιμα εδάφη τα οποία έχουν μικρό σχετικά πάχος

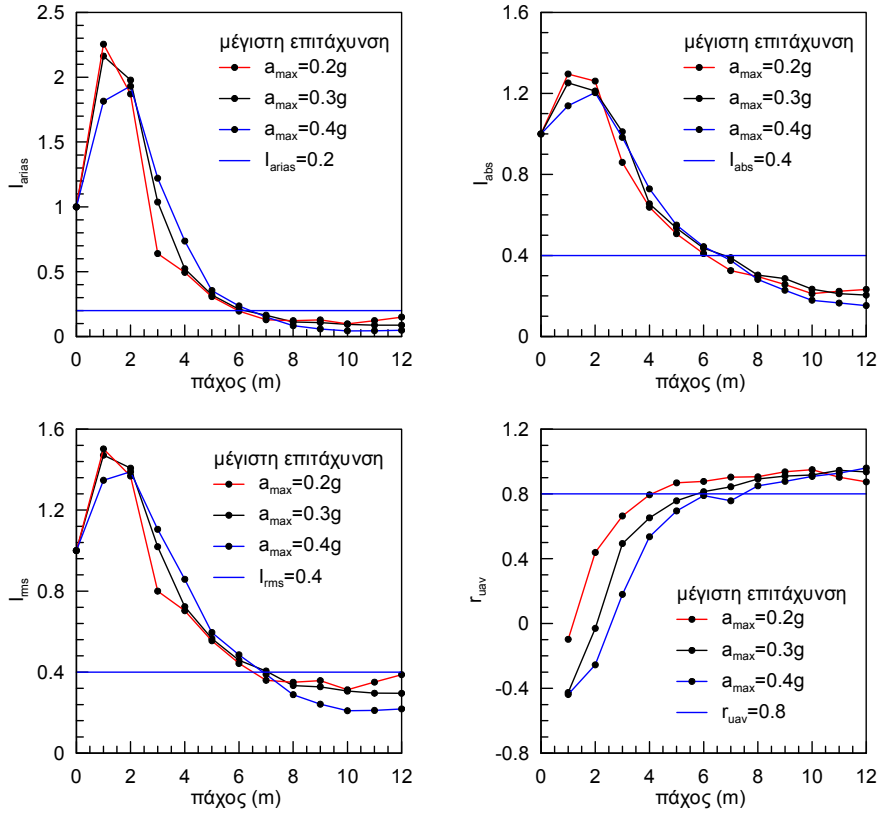


Σχήμα 5.9 : Επίδραση της περιόδου της διέγερσης στους δείκτες σεισμικής απόκρισης και στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου για σχετική πυκνότητα 60%.

Πίνακας 5.5 : Επίδραση της περιόδου της διέγερσης στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου για σχετική πυκνότητα 60%.

Δείκτης για την εύρεση του κρίσιμου πάχους	Κρίσιμο πάχος (m) – Dr=60%				
	T=0.1sec	T=0.2sec	T=0.3sec	T=0.4sec	T=0.5sec
I_{arias}=0.20	1.2	2.8	4.8	7.3	9.4
I_{abs}=0.40	1.2	2.7	4.9	7.6	9.2
I_{rms}=0.40	1.4	3.0	5.2	7.9	9.9
Μέσος όρος	1.3	2.7	5.0	7.6	9.5

Επίδραση Μέγιστης Επιτάχυνσης Διέγερσης. Η μέγιστη επιτάχυνση είναι από τις παραμέτρους που δεν επιδρούν στο φαινόμενο που εξετάζεται. Το ίδιο προκύπτει και για το κρίσιμο πάχος τόσο από το **Σχήμα 5.10** αλλά και από τον **Πίνακα 5.6**, καθώς αυτό δεν μεταβάλλεται ουσιαστικά καθόλου με το εύρος των επιταχύνσεων που χρησιμοποιούνται.



Σχήμα 5.10 : Επίδραση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στους δείκτες σεισμικής απόκρισης και στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.

Πίνακας 5.6 : Επίδραση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.

Δείκτης για την εύρεση του κρίσιμου πάχους	Κρίσιμο Πάχος (m) – T=0.1sec		
	Βασική ανάλυση a_{max}=0.3g	a_{max}=0.4g	a_{max}=0.2g
I_{arias}=0.20	6.0	6.4	6.0
I_{abs}=0.40	6.8	6.8	6.1
I_{rms}=0.40	7.0	7.0	6.6
Μέσος όρος	6.6	6.7	6.2

Συμπεράσματα. Το κρίσιμο πάχος της άμμου επηρεάζεται από τις ίδιες τρεις παραμέτρους που επηρεάζουν το υπό εξέταση φαινόμενο, δηλαδή τις ιδιότητες της άμμου, σχετική πυκνότητα και διαπερατότητα και την περίοδο της διέγερσης. Είδαμε ότι καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η περίοδος αλλά καο η σχετική πυκνότητα ενώ μικρότερο ρόλο φαίνεται να διαδραματίζει η διαπερατότητα. Για τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν το κρίσιμο πάχος βλέπουμε ότι κυμαίνεται από περίπου 4m έως και12m.

5.4 Συσχέτιση Κρίσιμου Πάχους Άμμου με το Μήκος Κύματος του Ρευστοποιημένου Εδάφους

Γενικά

Το κρίσιμο πάχος της άμμου, όπως δείξαμε και παραπάνω, επηρεάζεται από την περίοδο της διέγερσης, τη σχετική πυκνότητα και την διαπερατότητα της άμμου. Με τη χρήση του μήκους κύματος του ρευστοποιημένου εδάφους προσπαθούμε να απαλοιφθεί η επίδραση αυτών των παραγόντων, καθώς το εν λόγω μήκος κύματος φαίνεται να επηρεάζει άμεσα το φαινόμενο που εξετάζουμε.

Επιπλέον, το μήκος κύματος του ρευστοποιημένο εδάφους εξαρτάται μόνο από την διέγερση και από την ταχύτητα στο ρευστοποιημένο έδαφος, η οποία όμως όπως είδαμε είναι συνάρτηση της αρχικής ταχύτητας του στρώματος της άμμου. Ως εκ τούτου προκύπτει ότι μέσω της χρήσης του μήκους κύματος μπορεί να δημιουργηθεί ένα κριτήριο για το κρίσιμο πάχος και την πλήρη ρευστοποίηση του εδάφους, το οποίο να εξαρτάται μόνο από την δεσπόζουσα

περίοδο της διέγερσης και τις αρχικές συνθήκες του εδαφικού προφίλ οι οποίες θεωρούνται εκ των προτέρων γνωστές.

Υπολογισμός Μήκους Κύματος Ρευστοποιημένου Εδάφους

Στο Κεφάλαιο 4 ασχοληθήκαμε με την ταχύτητα μετάδοσης του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος. Καταλήξαμε ότι μια μέση τιμή της ταχύτητας αυτής δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από καμία παράμετρο του προβλήματος. Από την ταχύτητα αυτή είναι δυνατόν να υπολογιστεί για κάθε διέγερση το μήκος κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος χρησιμοποιώντας τον τύπο :

$$\lambda = \frac{V}{f} = V * T \tag{5.1}$$

όπου λ το μήκος κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος, V η ταχύτητα στο ρευστοποιημένο έδαφος, f η δεσπόζουσα συχνότητα της διέγερσης και T δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης.

Συνεπώς με γνωστή την ταχύτητα μετάδοσης σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος και την δεσπόζουσα περίοδο της διέγερσης, υπολογίζεται το μήκος κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος. Στη σχέση 5.1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέση ταχύτητα μετάδοσης σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος όπως αυτή ορίζεται στο Κεφάλαιο 4. Για τον υπολογισμό της εν λόγω ταχύτητας με εκ των προτέρων γνωστές εδαφικές συνθήκες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 4 :

$$Vs \approx 0.33 Vso \tag{5.2}$$

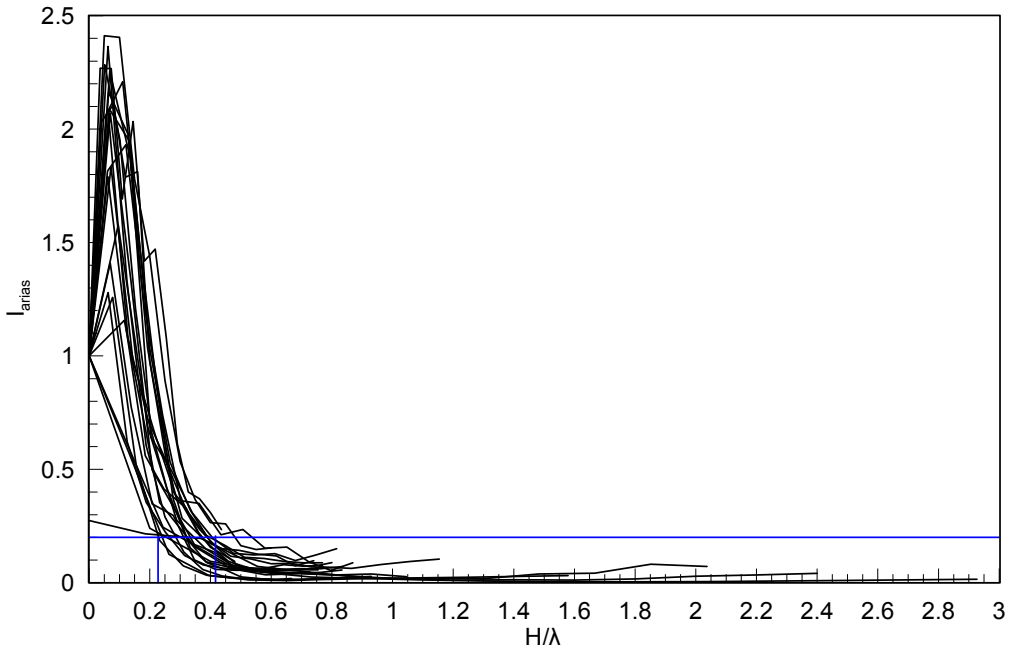
όπου Vso η αρχική ταχύτητα του ρεσυτοποιήσιμου στρώματος.

Για την παρούσα Διπλωματική Εργασία η μέση αυτή ταχύτητα έχει υπολογιστεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια με τη μέθοδο του ημιτονικού παλμού (βλ. Κεφάλαιο 4) και στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές όπως έχουν προκύψει από την μέθοδο αυτή για κάθε ανάλυση.

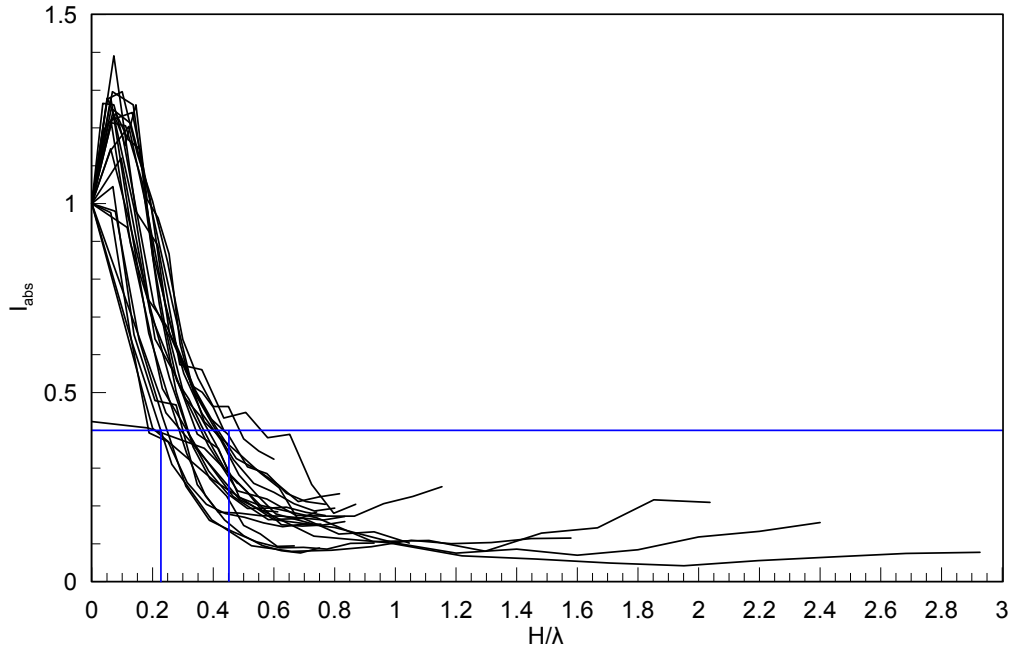
Συσχέτιση Κρίσιμου Πάχους Άμμου και Μήκους Κύματος Ρευστοποιημένου Εδάφους

Για κάθε ανάλυση έχει υπολογιστεί η μέση τιμή της ταχύτητας του ρευστοποιημένου εδάφους. Από τη Σχέση 5.1 και με γνωστές αυτή την ταχύτητα και την περίοδο της διέγερσης προκύπτει το μήκος κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος. Κατόπιν, διαιρούμε το πάχος της άμμου με το μήκος κύματος το οποίο έχει προκύψει για την κάθε ανάλυση.

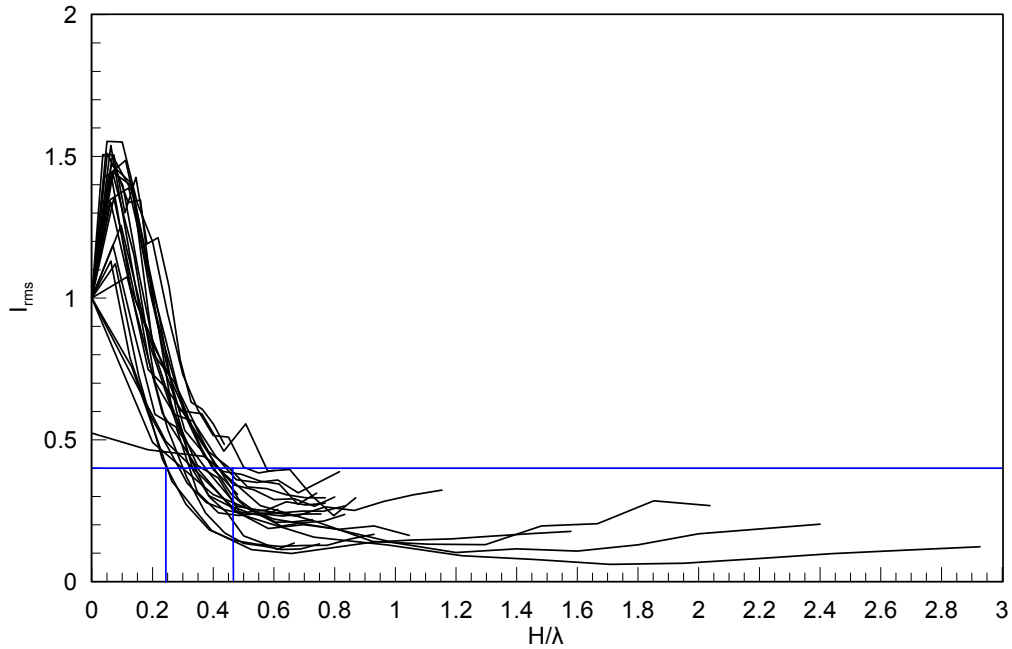
Στα **Σχήματα 5.11 έως και 5.14** παρουσιάζονται όλες οι αναλύσεις που έγιναν με βάση του τέσσερεις ποσοτικούς δείκτες και το πάχος της άμμου κανονικοποιημένο ως προς το μήκος κύματος του ρευστοποιημένου εδάφους.



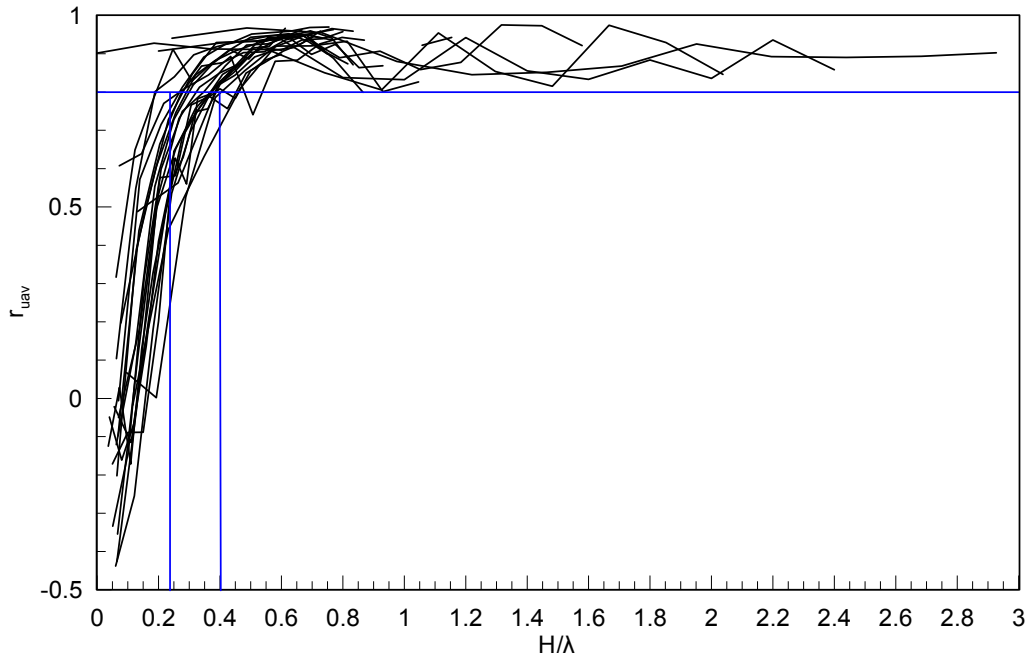
Σχήμα 5.11 : Επίδραση του μήκους κύματος της άμμου στον δείκτη σεισμικής απόκρισης I_{arias} και στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.



Σχήμα 5.12 : Επίδραση του μήκους κύματος της άμμου στον δείκτη σεισμικής απόκρισης I_{abs} και στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.



Σχήμα 5.13 : Επίδραση του μήκους κύματος της άμμου στον δείκτη σεισμικής απόκρισης I_{rms} και στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.



Σχήμα 5.14 : Επίδραση του μήκους κύματος της άμμου στον δείκτη σεισμικής απόκρισης r_{uav} και στο κρίσιμο πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.

Από τα Σχήματα 5.11 έως 5.14 προκύπτει εμφανώς ότι, με την κανονικοποίηση του πάχους της άμμου με το μήκος κύματος του ρευστοποιημένου εδάφους, οι καμπύλες των αναλύσεων σχετικά με τους ποσοτικούς δείκτες «μαζεύονται» και το εύρος στο οπίο κυμαίνετια το κρίσιμο πάχος είναι αρκετά μικρό, σε σχέση και με την ακρίβεια των υπολογισμών. Για τα τέσσερα κριτήρια που έχουν οριστεί για τη ρευστοποίηση και συνεπώς για τον κάθε δείκτη, προκύπτει ένα ελαφρώς διαφορετικό εύρος για το κρίσιμου πάχους, και τα αποτελέσματα φαίνονται στον **Πίνακα 5.7**.

Δείκτης για την εύρεση του κρίσιμου πάχους	Οριακή τιμή	H_{cr} / λ
I_{arias}=0.20	0.2	0.23-0.45
I_{abs}=0.40	0.4	0.23-0.42
I_{rms}=0.40	0.4	0.25-0.47
r_{uav}=0.80	0.8	0.23-0.40

Πίνακας 5.7 : Επίδραση του μήκους κύματος της ρευστοποιημένης άμμου στο κρίσιμο πάχος της άμμου.

Από τον Πίνακα 5.13 προκύπτει ότι το κρίσιμο πάχος είναι περίπου 20% με 50% του μήκους κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος. Συνεπώς για γνωστές αρχικές συνθήκες προκύπτει το μήκος κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος και έτσι το εύρος του κρίσιμου πάχους.

5.5 Συμπεράσματα

Καταρχάς, ορίστηκε ένα κριτήριο για το κρίσιμο πάχος της άμμου το οποίο βασίζεται στους ποσοτικούς δείκτες τους οποίους χρησιμοποιήσαμε I_{arias}, I_{abs}, I_{rms}, r_{uav}. Προέκυψε ότι τα όρια για τους δείκτες αυτούς είναι 0.2, 0.4, 0.4 και 0.8 αντίστοιχα. Το κριτήριο αυτό έχει επαρκή ακρίβεια αλλά βασίζεται σε δείκτες οι οποίοι υπολογίζονται μετά το πέρας της ανάλυσης. Συνεπώς, για την εύρεση του κρίσιμου πάχους χρειάζεται πρώτα να γίνουν οι αναλύσεις και να επεξεργαστούν τα αποτελέσματα.

Με βάση αυτό το κριτήριο επαληθεύεται η αρχικώς ποιοτική προσέγγιση που είχε γίνει στο Κεφάλαιο 3 για τις παραμέτρους οι οποίες επιδρούν στο κρίσιμο πάχος του ρευστοποιήσιμου εδάφους. Έτσι προκύπτει ότι στη μεταβολή του κρίσιμου πάχους επιδρούν η σχετική πυκνότητα, η διαπερατότητα της άμμου και η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης. Κρισιμότερη παράμετρος είναι η περίοδος της διέγερσης και μικρότερη επίδραση έχει η σχετική πυκνότητα της άμμου ενώ η διαπερατότητα φαίνεται είναι σημαντική αλλά η παράμετρος αυτή χρειάζεται και περαιτέρω ανάλυση.

Τέλος, καταλήγουμε σε ένα κριτήριο προσδιορισμού του κρίσιμου πάχους το οποίο να προκύπτει από γνωστές αρχικές συνθήκες. Μέσως της χρήσης του μήκους κύματος του ρευστοποιημένου εδάφους, όπως αυτό προκύπτει με τη χρήση της ταχύτητα μετάδοσης του σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος (Κεφάλαιο 4), οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι το κρίσιμο πάχος είναι περίπου 25%-45% του εν λόγου μήκους κύματος. Η κανονικοποίηση του πάχους της ρευστοποιήσιμης άμμου σε σχέση με το μήκος κύματος αυτό, περιορίζει αισθητά το αρχικό εύρος του κρίσιμου πάχους και η προσέγγιση που επετεύχθει θεωρείται ότι διαθέτει επαρκή ακρίβεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

6.1 Γενικά

Στα κεφάλαια που προηγήθηκαν, το πρόβλημα της σεισμικής απόκρισης ενός εδάφους που περιλαμβάνει μια ρευστοποιημένη στρώση διερευνήθηκε με την βοήθεια παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων. Κατ' αυτό τον τρόπο προέκυψε ότι βασική προϋπόθεση για να έχω δραστική απομείωση της σεισμικής κίνησης στην επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή να απομονωθεί ουσιαστικά η επιφάνεια του εδάφους και τα αντίστοιχα δομήματα από το σεισμικό υπόβαθρο, είναι το πάχος του ρευστοποιημένης στρώσης να είναι μεγαλύτερο από μια ελάχιστη τιμή. Για αρμονική διέγερση στο σεισμικό υπόβαθρο υπολογίσθηκε ότι το εν λόγω ελάχιστο πάχος είναι ίσο προς το 1/3 περίπου του μήκους κύματος της σεισμικής διέγερσης εντός της στρώσης αυτής μετά την ρευστοποίηση, ή προς το 1/9 του μήκους πριν από την ρευστοποίηση.

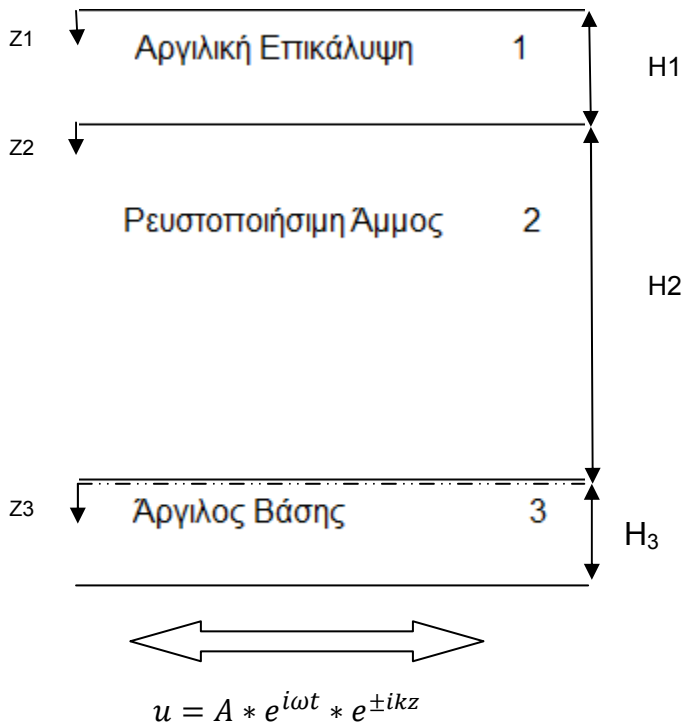
Το ανωτέρω συμπέρασμα, σε περίπτωση που επεκταθεί και σε μη αρμονικές σεισμικές διεγέρσεις και επιβεβαιωθεί από επιτόπου σεισμικές καταγραφές, έχει σαφή πρακτική χρησιμότητα δεδομένου ότι επιτρέπει την εκ των προτέρων διαπίστωση εάν ένα ρευστοποιήσιμο στρώμα θα λειτουργήσει ως φυσική σεισμική μόνωση ή όχι. Το φυσικό νόημα όμως αυτής της συμπεριφοράς δεν έχει ακόμη κατανοηθεί. Με άλλα λόγια, δεν είναι σαφές ποιοι είναι οι μηχανισμοί που άλλοτε οδηγούν σε ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού και άλλοτε σε δραστική απομείωση, παρά το γεγονός ότι και στις δύο περιπτώσεις το μια στρώση του φυσικού εδάφους έχει ρευστοποιηθεί και έχει ουσιαστικά απωλέσει την διατμητική της δυστμησία και, κατ' επέκταση, την ικανότητα της να μεταφέρει διατμητικές τάσεις.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί διερευνάται το ενδεχόμενο η συμπεριφορά του ρεσυτοποιημένου εδάφους να είναι ένα απλό επακόλουθο της αλληλεπίδρασης μεταξύ ρευστοποιημένων και μη ρευστοποιημένων εδαφικών στρώσεων κατά την 1-Δ μετάδοση σεισμικών κυμάτων εντός πολύστρωτου

εδαφικού σχηματισμού. Για τον σκοπό αυτό, θα επιδιωχθεί αναλυτικός υπολογισμός της σεισμικής απόκρισης στην επιφάνεια του εδάφους για αρμονική διέγερση του σεισμικού υποβάθρου, και ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά των εδαφικών στρώσεων. Οι ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων θα επιλεγούν κατάλληλα, με βάση τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που προηγήθηκαν, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της ρευστοποίησης στην διατμητική δυστμησία και την υστερητική απόσβεση της ρευστοποιήσιμης στρώσης εδάφους.

6.2 Προσομοίωμα αναλυτικής μεθόδου και βασικές εξισώσεις επίλυσης

Θεωρούμε, όπως και στο αριθμητικό προσομοίωμα, τρεις στρώσεις εδάφους: μια στρώση αργίλου βάσης, μια ενδιάμεση στρώση ρευστοποιήσιμης άμμου και μία στρώση αργιλικής επικάλυψης (**Σχήμα 6.1**). Έτσι, προσομοιώνεται στήλη εδάφους στην οποία ένα ρευστοποιήσιμο στρώμα άμμου βρίσκεται ανάμεσα σε δύο αργιλικά στρώματα. Εν αρχή, ορίζουμε τα ύψη των τριών στρωμάτων H1, H2 και H3 όπως φαίνονται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Προσομοίωμα στήλης εδάφους για την αναλυτική επίλυση

Επιπλέον, θεωρείται ιξωδοελατικό προσομοίωμα και για τα τρία στρώματα. Για τα δύο αργιλικά στρώματα έχουμε ήδη δείξει (κεφάλαιο 2.3.2) ότι το ιξωδοελαστικό προσομοίωμα λειτουργεί επαρκώς και ορίζεται για λόγο απόσβεσης ξ≈5%.

Για το στρώμα της ρευστοποιήσιμης άμμου κάνουμε την παραδοχή ότι βρίσκεται σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης υπό καθεστώς ρευστοποίησης, οπότε η απόσβεσή του είναι σχετικά μεγάλη (με λόγο απόσβεσης της τάξης του ξ≈25%) και η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων έχει μειωθεί αισθητά από την αρχική κατάσταση. Βάση αυτής της παραδοχής αποτελούν τα συμπεράσματα του κεφαλαίου 4, στο οποίο χαρακτηρίσαμε τη ρευστοποιημένη άμμο με μία απομειωμένη από την αρχική αλλά σταθερή ταχύτητα διατμητικών κυμάτων. Συνεπώς και για την άμμο, για την αναλυτική αυτή επίλυση, θεωρείται επαρκής η παραδοχή ιξωδοελαστικού προσομοιώματος με λόγο απόσβεσης ξ≈25%.

Τέλος η διέγερση ασκείται στη βάση της αργίλου που βρίσκεται κάτω από την άμμο και είναι αρμονική μορφής, δηλαδή η επιβαλλόμενη μετατόπιση είναι της μορφής:

$$u = A * e^{i\omega t} * e^{\pm ikx} \quad (6.1)$$

όπου u η επιβαλλόμενη μετατόπιση, A το μέγιστο πλάτος, t ο χρόνος, x η απόσταση, ω η συχνότητα και k ο κυματικός αριθμός ($k = \frac{2*\pi}{\lambda}$, λ μήκος κύματος).

Η επίλυση του προβλήματος γίνεται από τα άνω στρώματα προς τα κάτω, καθώς για το στρώμα 1, στο όριο με την ελεύθερη επιφάνεια ισχύει

- τ(1)=0 (6.2)

όπου τ(1) η διατμητική τάση, σε κάθε χρονικό διάστημα, του στρώματος 1 στην ελεύθερη επιφάνεια. Επίσης, για κάθε διεπιφάνεια μεταξύ δύο διαφορετικών στρωμάτων i και j ισχύει:

- τ(i,j)=τ(j,i) (6.3)
- u(i,j)=u(j,i) (6.4)

όπου τ(i,j) η διατμητική τάση σε κάθε χρονικό διάστημα του στρώματος i στο όριο με το στρώμα j και u(i,j) η διατμητική παραμόρφωση σε κάθε χρονικό διάστημα του στρώματος i στο όριο με το στρώμα j.

Με βάση τη γενική εξίσωση αρμονικού κύματος (6.1) και τις συνοριακές συνθήκες (6.2)-(6.4) προκύπτει ο λόγος της διατμητικής παραμόρφωσης στην κορυφή προς τη βάση του στρώματος της άμμου (βλέπε Παράρτημα Β)

$$F = \frac{u(z_2=0)}{u(z_2=H_2)} = \frac{\cos(k_1^* * H_1)}{\cos(k_1^* * H_1) * \cos(k_2^* * H_2) - \frac{V_{S1}^* * \rho_1}{V_{S2}^* * \rho_2} * \sin(k_1^* * H_1) * \sin(k_2^* * H_2)} \quad (6.5)$$

Στην εξίσωση (6.5) H_1,H_2 είναι τα πάχη των στρωμάτων 1 και 2 αντίστοιχα, k_1^* και k_2^* είναι οι κυματικοί αριθμοί που αντιστοιχούν στα στρώματα 1 και 2 αντίστοιχα και συμπεριλαμβάνουν την απόσβεση, δηλαδή :

$$k_1^* = k_1 * (1 - i * \xi_1) = \frac{2*\pi}{\lambda_1} * (1 - i * \xi_1) \quad \text{και} \quad (6.6)$$

$$k_2^* = k_2 * (1 - i * \xi_2) = \frac{2*\pi}{\lambda_2} * (1 - i * \xi_2) \quad (6.7)$$

όπου λ το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στο κάθε στρώμα και ξ ο λόγος υστερητικής απόσβεσης του κάθε στρώματος.

Επίσης, V_{s1}^* και V_{s2}^* είναι οι ταχύτητες διατμητικού κύματος του κάθε στρώματος και περιλαμβάνουν την απόσβεση, δηλαδή

$$V_{s1}^* = V_{s1} * (1 + 2 * i * \xi_1) \quad \text{και} \quad (6.8)$$

$$V_{s2}^* = V_{s2} * (1 + 2 * i * \xi_2) \quad (6.9)$$

Τέλος, ρ_1 και ρ_2 είναι οι φαινόμενες πυκνότητες για τα στρώματα 1 και 2 αντίστοιχα.

Η εξίσωση (6.5) είναι και η βασική εξίσωση που περιγράφει την ενίσχυση (ή απομείωση) της διατμητικής παραμόρφωσης από τη βάση στην κορυφή της ρευστοποιημένης άμμου. Ο λόγος F είναι μιγαδικός αριθμός και έτσι αυτό που κυρίως μας ενδιαφέρει είναι το μέτρο του. Επίσης, για να αντιστοιχίσουμε το μέτρο του λόγου F με τους ποσοτικούς δείκτες τους οποίους χρησιμοποιούμε έως τώρα για την περιγραφή του φαινομένου και πιο συγκεκριμένα τον δείκτη I_{arias}, λαμβάνουμε το : $F^2 = \left|\frac{u(z_2=0)}{u(z_2=H_2)}\right|^2 \approx \frac{\int_0^\infty [a(t)]^2 dt \ (z_2=0)}{\int_0^\infty [a(t)]^2 dt \ (z_2=H_2)} = I_{arias}$

6.3 Παραμετρική ανάλυση του λόγου ενίσχυσης

Από την εξίσωση (6.5) μπορούν να εξαχθούν κάποια αρχικά συμπεράσματα ως προς τις παραμέτρους που επιδρούν στην τιμή του λόγου ενίσχυσης F. Καταρχάς, παρατηρούμε ότι στο λόγο της ενίσχυσης διαδραματίζουν ρόλο τα δύο ανώτερα στρώματα και δεν εμφανίζεται πουθενά το υπόστρωμα (υπόβαθρο), το οποίο συνεπώς δεν επηρεάζει σε τίποτα την ενίσχυση. Στο ίδιο συμπέρασμα είχαμε φθάσει και κατά την αριθμητική διερεύνηση του προβλήματος, στα προηγούμενα κεφάλαια.

Επιπλέον, φαίνεται να διαδραματίζει κάποιο ρόλο το στρώμα 1, η αργιλική επικάλυψη, τόσο λόγω της εμφάνισης στη σχέση (6.5) του ύψους H_1 όσο και της ύπαρξης της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων στο στρώμα μέσω του μήκους κύματος λ_1, το οποίο εκφράζεται στον κυματικό αριθμό k_1. Επισημαίνεται ότι το στρώμα αυτό δεν εμφανίστηκε να διαδραματίζει κάποιο σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων (κεφάλαια 3, 4 & 5).

Τέλος, παρατηρείται ότι οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα είναι τέσσερεις αδιάστατοι λόγοι οι οποίοι αφορούν τα στρώματα 1 και 2 και είναι οι εξής: H_1/λ_1, H_2/λ_2, ρ_1/ρ_2 ($\approx$1.0) και V_{s1}/V_{s2} . Επιπλέον, την ενίσχυση επηρεάζουν οι λόγοι απόσβεσης των δύο στρωμάτων ξ_1 και ξ_2.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τη σημασία αυτών των παραγόντων στην τιμή του λόγου εδαφικής ενίσχυση F. Καθώς η βασική παράμετρος του προβλήματος παραμένει το πάχος του στρώματος της άμμου, η επιρροή των παραμέτρων θα εξετάζεται με βάση τις αλλαγές που προκαλεί στην καμπύλη μεταβολής του F^2 ως προς το ανηγμένο πάχος της άμμου (H_2/λ_2).

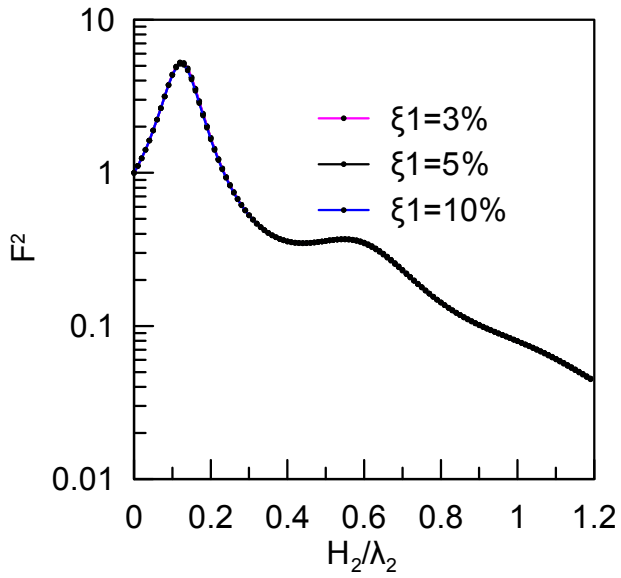
Προκειμένου να είναι δυνατή η άμεση αξιολόγηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων, η απόκλιση των αναλυτικών προβλέψεων συγκρίνεται με την αντίστοιχη διασπορά των αριθμητικών αναλύσεων για την μέση χαρακτηριστική τιμή του H_2/λ_2 = 1/3. Συγκεκριμένα, από το Σχήμα 5.11, στο οποίο συνοψίζονται όλες οι αριθμητικές προβλέψεις του λόγου I_{arias} συναρτήσει του H_2/λ_2, προκύπτει ότι για H_2/λ_2=1/3 I_{arias}=0.25 ± 0.15. Έτσι, στην παραμετρική διερεύνηση που ακολουθεί, η επίδραση της κάθε

παραμέτρου θα αξιολογείται επίσης με την διασπορά της τιμής του F^2 για $H_2/\lambda_2 = 1/3$.

Επίσης, επειδή η περιοχή που μας ενδιαφέρει είναι γύρω από το F^2=0.2 χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα για τον ψ άξονα, ώστε να είναι εμφανείς οι διαφοροποιήσεις που προκύπτουν και να μειώνεται η απόσταση στη διαφορά στη μέγιστη τιμή της καμπύλης η οποία δεν είναι τόσο σημαντική.

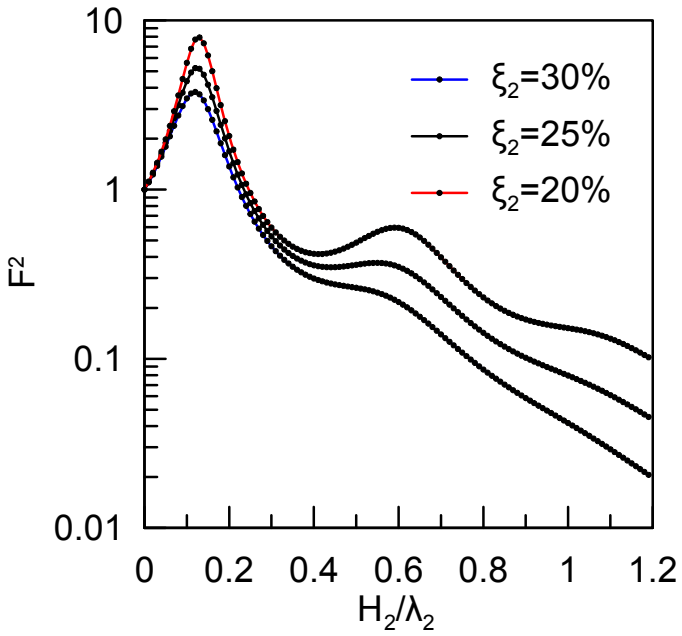
Λόγος Υστερητικής Απόσβεσης. - Οι λόγοι υστερητικής απόσβεσης των στρωμάτων της άμμου και της αργίλου εμφανίζονται πολλές φορές στην εξίσωση (6.5) μέσω των παραμέτρων k_1^*, k_2^*, V_{s1}^* και V_{s2}^* παρ'αυτά για τα όρια στα οποία κυμαίνονται δεν επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα.

Ο λόγος απόσβεσης της αργίλου είναι της τάξης του 5%, καθώς η άργιλος λαμβάνει μικρές παραμορφώσεις λόγω του μεγάλου μέτρου διάτμησης που διαθέτει. Επίσης, για τη ρευστοποιημένη άμμο προκύπτει λόγος απόσβεσης $\xi = [0.25 - 0.35] * \left(1 - \frac{G}{G_o}\right)$. Στην περίπτωση μας $\frac{G}{G_o} = \frac{V_S^2}{V_{so}^2} \approx \frac{1}{9}$, οπότε ξ= [0.22-0.31] και λαμβάνοντας μια μέση τιμή θεωρούμε ξ≈25%.



Σχήμα 6.2: Επιρροή του λόγου απόσβεσης του στρώματος της αργίλου στην ενίσχυση της κίνησης ως προς το πάχος της άμμου

Η επίδραση του λόγου απόσβεσης της αργίλου φαίνεται στο **Σχήμα 6.2** απ'όπου φαίνεται να μην προκύπτει καμία ουσιαστική επιρροή. Για H_2/λ_2 = 1/3 προκύπτει μια ουσιαστικά σταθερή τιμή του F^2=0.40.



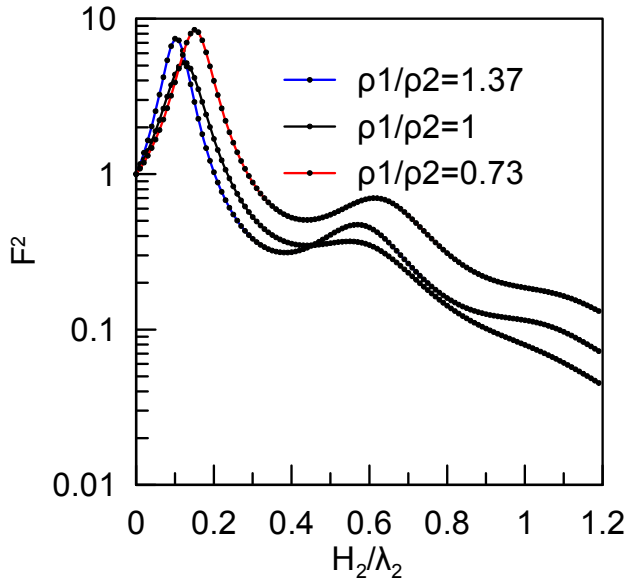
Σχήμα 6.3: Επιρροή του λόγου απόσβεσης του στρώματος της άμμου στην ενίσχυση της κίνησης ως προς το πάχος της άμμου

Η επίδραση του λόγου απόσβεσης της άμμου παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.3**. Παρατηρείται ότι η τιμή του λόγου απόσβεσης της άμμου, έχει επίδραση στην τιμή του F^2, αλλά αυτή η επίδραση αφορά στην ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού, στην περί τον συντονισμό περιοχή. Η επίδραση στην περιοχή των μεγάλων απομειώσεων (δηλ. $F^2 < 1.0$) είναι επίσης πρακτικά ανύπαρκτη. Σε αυτη την περίπτωση για H_2/λ_2 = 1/3 προκύπτει F^2=0.35-0.50 .Έτσι, για τις επόμενες διερευνήσεις θα θεωρούμε λόγους απόσβεσης ξ_1=5% και ξ_2=25%.

Φαινόμενη Πυκνότητα. - Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει το αποτέλεσμα της σχέσης (6.5), θεωρητικά τουλάχιστον, είναι ο λόγος της φαινόμενης πυκνότητας του στρώματος της αργίλου προς τη φαινόμενη πυκνότητα της άμμου (ρ_1/ρ_2). Στο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία η πυκνότητα των δύο στρωμάτων παρέμεινε

σταθερή και μάλιστα έχει οριστεί ως $\rho_1 = \rho_2 = 2\frac{Mg}{m^3}$, καθώς θεωρείται γνωστή παράμετρος του εδάφους.

Γενικώς η φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους κυμαίνεται από $1.6\frac{Mg}{m^3} - 2.2\frac{Mg}{m^3}$ και ως εκ τούτου ο λόγος $\frac{\rho_1}{\rho_2}$ κυμαίνεται από 0.73 έως 1.37. Ακόμη και για αυτό το εύρος η επιρροή της εν λόγου παραμέτρου στο συνολικό αποτέλεσμα είναι μικρή, όπως παρουσιάζεται και στο **Σχήμα 6.4**.



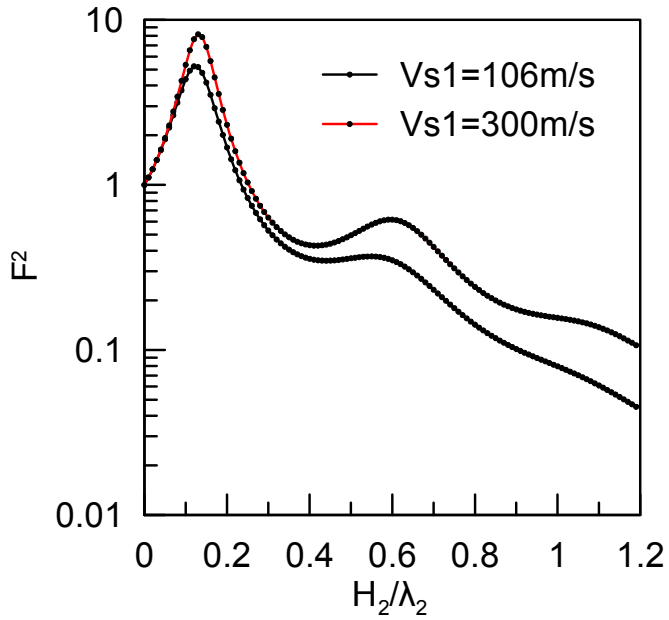
Σχήμα 6.4: Επιρροή του λόγου της φαινόμενης πυκνότητας του στρώματος της αργίλου προς τη φαινόμενη πυκνότητα του στρώματος της άμμου, στην ενίσχυση της κίνησης ως προς το πάχος της άμμου

Για αυτή την περίπτωση για H_2/λ_2 = 1/3 προκύπτει F^2=0.30-0.55 Σε κάθε περίπτωση ,στις επόμενες αναλύσεις ο λόγος $\frac{\rho_1}{\rho_2}$ ισούται με 1 ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.

Ταχύτητα διατμητικού κύματος της αργιλικής επικάλυψης. - Άλλη μια παράμετρος που εμφανίζεται στην αναλυτική λύση είναι η ταχύτητα του διατμητικού κύματος του στρώματος της αργιλικής επικάλυψης. Στις αριθμητικές αναλύσεις δεν θεωρήσαμε την παράμετρο αυτή σημαντική και δεν εξετάστηκε καθόλου η επιρροή της, καθώς θεωρήθηκε ότι είναι αμελητέα.

Στην εξίσωση (6.5) η ταχύτητα του διατμητικού κύματος στην άργιλο εμφανίζεται τόσο στο λόγο V_{s1}/V_{s2} αλλά και στο λόγο H_1/λ_1 μέσω του μήκους κύματος λ_1 (καθώς $\lambda_1 = V_{s1}*T$).

Παρ'αυτά το τελικό αποτέλεσμα όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.5**, για τιμές της V_{s1} 106m/s-βασική ανάλυση- και 300m/s δείχνει ότι η παράμετρος αυτή ελάχιστη επιρροή έχει στο τελικό αποτέλεσμα. Επίδραση της παραμέτρου εμφανίζεται να υπάρχει στην περιοχή περί τον συντονισμό όπου η μεταβολή της εν λόγου ταχύτητας διαφοροποιεί την ενίσχυση, αλλά δεν υπάρχει πρακτικά καθόλου επιρροή για τις τιμές που βρίσκονται κάτω από $F^2 \approx 0.4$ και βασικά μας ενδιαφέρουν. Για αυτή την περίπτωση για $H_2/\lambda_2 = 1/3$ προκύπτει $F^2=0.40\text{-}0.50$



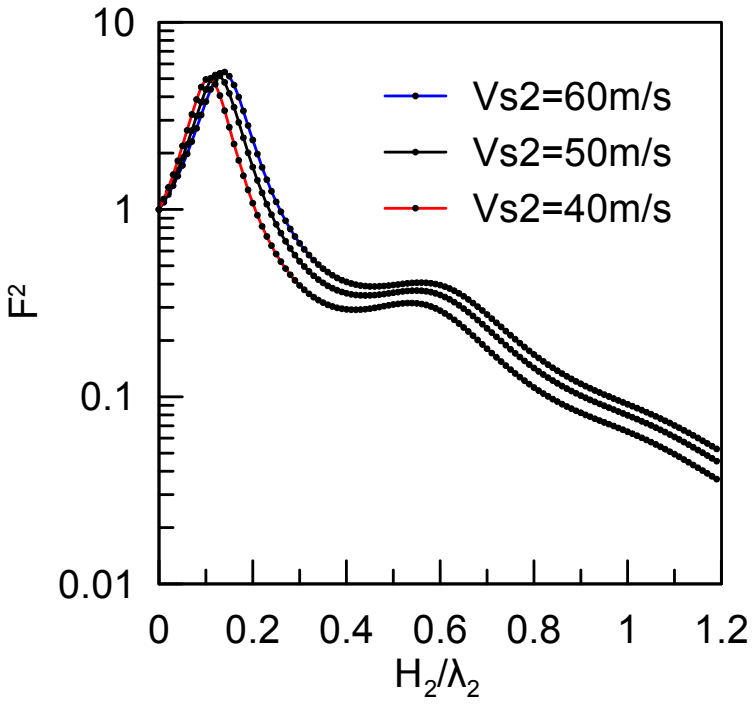
Σχήμα 6.5 : Επιρροή της ταχύτητας του διατμητικού κύματος της αργιλικής επικάλυψης στην ενίσχυση της κίνησης ως προς το πάχος της άμμου

Συνεπώς, ορθώς η παράμετρος αυτή θεωρείται χωρίς ουσιαστική επίδραση στο φαινόμενο που εξετάζεται. Παρότι εμφανίζεται ως παράμετρος στην εξίσωση (6.5), δεν επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα.

Ταχύτητα διατμητικού κύματος της ρευστοποιημένης άμμου. - Όπως η ταχύτητα του διατμητικού κύματος της αργίλου, έτσι και η ταχύτητα του διατμητικού κύματος της άμμου εμφανίζεται στη σχέση (6.5) στο λόγο V_{s1}/V_{s2}

αλλά και στο λόγο H_2/λ_2, μέσω του μήκους κύματος λ_2. Για την ταχύτητα του στρώματος της ρευστοποιημένης άμμου γίνεται εκτενής αναφορά στο κεφάλαιο 4.

Έχουμε καταλήξει ότι προσεγγιστικά η μέση ταχύτητα διατμητικού κύματος που χαρακτηρίζει τη ρευστοποιημένη άμμο είναι περίπου το 1/3 της αρχικής ταχύτητας διατμητικού κύματος, δηλαδή $V_s/V_{so} \approx 1/3$. Στη συσχέτιση αυτή ουσιαστικά συμπεριλαμβάνονται και οι ιδιότητες του στρώματος της άμμου οι οποίοι δεν εμφανίζονται στη σχέση (6.5) αλλά επηρεάζουν την απόκριση της άμμου όπως έχουμε δει (κεφάλαιο 2,3,4), δηλαδή ουσιαστικά η σχετική πυκνότητα και η διαπερατότητα του στρώματος.

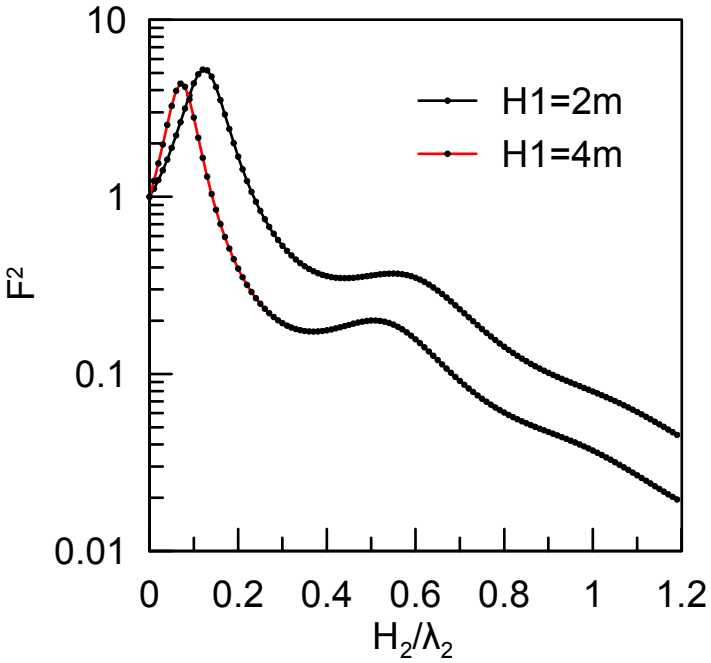


Σχήμα 6.6: Επιρροή της ταχύτητας του διατμητικού κύματος της ρευστοποιημένης άμμου στην ενίσχυση της κίνησης ως προς το πάχος της άμμου

Στα πλαίσια του δικού μας προβλήματος μας η ταχύτητα της ρευστοποιημένης άμμου προκύπτει 40m/s-60m/s (κεφάλαιο 4.6). Από το **Σχήμα 6.6** εξάγεται το συμπέρασμα ότι για αυτό το εύρος η απόκριση δεν αλλάζει ουσιαστικά. Για H_2/λ_2=1/3 η διασπορά του F^2 είναι 0.35-0.50 Συνεπώς ούτε και η ταχύτητα της ρευστοποιημένης άμμου μεταβάλλει πρακτικά τα αποτελέσματα της ενίσχυσης της κίνησης.

Πάχος της αργιλικής επικάλυψης. - Το πάχος του στρώματος της αργίλου κορυφής φαίνεται να έχει σημαντικό ρόλο στην εξίσωση (6.5). Υπάρχει τόσο στον αριθμητή όσο και στο παρανομαστή όμως εμφανίζεται με τη μορφή του κανονικοποιημένου λόγου H_1/λ_1, δηλαδή συσχετίζεται με την ταχύτητα του διατμητικού κύματος στην άργιλο και την περίοδο της διέγερσης. Για την παρούσα ανάλυση έχουμε θεωρήσει τη βασική ανάλυση (κεφάλαιο 2) οπότε η περίοδος T=0.3sec και η ταχύτητα του διατμητικού κύματος της αργίλου V_{s1}=106m/s.

Λαμβάνονται δύο τιμές για το πάχος της αργιλικής στρώσης 2m και 4m. Για τις δύο αυτές τιμές προκύπτουν στο **Σχήμα 6.7** οι καμπύλες ως προς το πάχος της άμμου, οι οποίες φανερώνουν αρκετή επιρροή του πάχους της αργίλου στο συνολικό αποτέλεσμα.



Σχήμα 6.7: Επιρροή του πάχους της αργιλικής επικάλυψης στην ενίσχυση της κίνησης ως προς το πάχος της άμμου

Η αύξηση του πάχους της αργίλου μετατοπίζει την καμπύλη προς τα κάτω, διότι η αύξηση του πάχους αυτού οδηγεί την άμμο πιο κοντά στη ρευστοποίηση. Το ίδιο φαινόμενο είχε παρατηρηθεί και στις αριθμητικές αναλύσεις (κεφάλαιο 3.3).

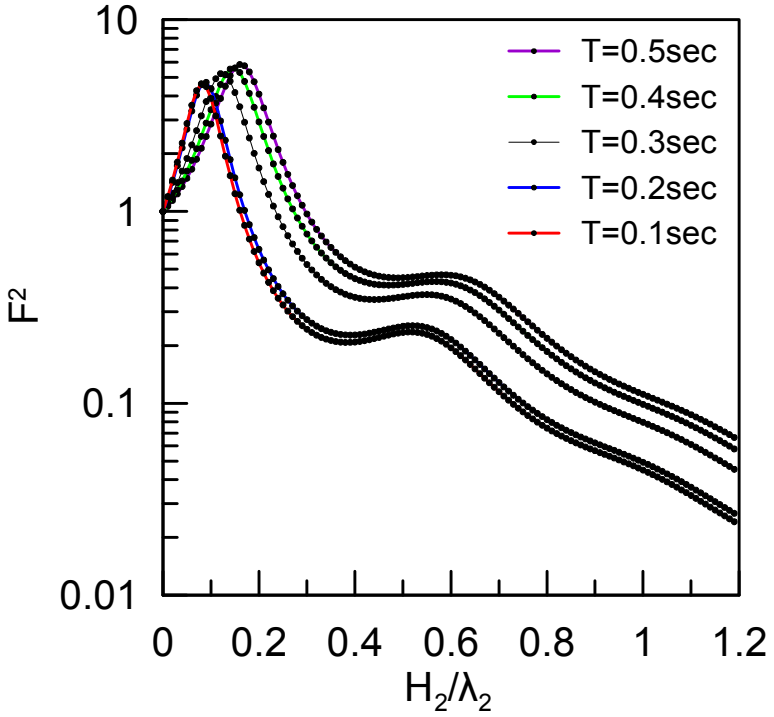
Επειδή ο λόγος ενίσχυσης που χρησιμοποιείται ισούται με τον δείκτη I_{arias}, η πλήρης ρευστοποίηση θεωρούμε ότι εμφανίζεται στο $F^2 \approx I_{arias}=0.2$, διότι αυτό είναι και το κριτήριο που δόθηκε για τη ρευστοποίηση στο κεφάλαιο 6. Στην περιοχή αυτή - $F^2 \geq 0.2$ - η επίδραση του πάχους της αργίλου στη συνολική απόκριση είναι αιθητά μειωμένη. Τελικώς, το πάχος της εν λόγου αργιλικής στρώσης δεν επηρεάζει πολύ έντονα το κρίσιμο πάχος της άμμου από το οποίο και έπειτα γίνεται εμφανής η ρευστοποίηση. Για $H_2/\lambda_2 = 1/3$, F^2=0.18-0.38.

Συνεπώς το πάχος της αργιλικής επικάλυψης επηρεάζει την ενίσχυση της κίνησης μέσω της ρευστοποιημένης άμμου, αλλά κυρίως στην περιοχή όπου δεν εμφανίζεται ρευστοποίηση. Αντίθετα, δεν επιδρά ουσιαστικά στο φαινόμενο όταν η ρευστοποίηση γίνεται πλήρης και εμφανής. Στο ίδιο συμπέρασμα είχαμε καταλήξει και με τη χρήση των αριθμητικών αναλύσεων (κεφάλαιο 3.3).

Περίοδος Διέγερσης. - Η περίοδος της διέγερσης, όπως είδαμε από τα αριθμητικά αποτελέσματα, είναι η σημαντικότερη παράμετρος του προβλήματος. Παρόλαυτα, όταν χρησιμοποιείται το πάχος της άμμου κανονικοποιημένο ως προς το μήκος κύματος του ρευστοποιημένου εδάφους (H_2/λ_2), η επίδραση που προκύπτει είναι σχετκά μικρή.

Στην εξίσωση (6.5) η περίοδος της διέγερσης υπάρχει στου λόγους H_1/λ_1, και H_2/λ_2, μέσω των μηκών κύματος λ. Πραγματοποιήθηκε παραμετρική διερεύνηση στην εξίσωση (6.5) ως προς την περίοδο T, με βασική παράμετρο το H_2/λ_2, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.8**.

Από το Σχήμα 6.8 φαίνεται ότι για για $H_2/\lambda_2 = 1/3$ προκύπτει ένα εύρος F^2=0.20-0.60. Το εύρος αυτό είναι αρκετά μεγάλο και δείχνει ότι η περίοδος μεταβάλλει αισθητά τα αποτελέσματα.



Σχήμα 6.8: Επιρροή της περιόδου της διέγερσης στην ενίσχυση της κίνησης ως προς το πάχος της άμμου

6.4 Σύγκριση Αναλυτικής και Αριθμητικής Επίλυσης

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συνοπτικά και συγκρίνονται τα βασικά αποτελέσματα των αναλυτικών και των αριθμητικών λύσεων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη βασική αριθμητική ανάλυση και τα αποτελέσματα της αναλυτικής επίλυσης, τόσο την βασική λύση αλλά για και τις παραμετρικές αναλύσεις που διεξήχθησαν παραπάνω. Ο πίνακας 1 περιλαμβάνει για τις περιπτώσεις αυτές, τη μέση τιμή του F^2, την τυπική απόκλιση και τον συντελεστή μεταβλητότητας, για H_2/λ_2=1/3. Η τιμή του H_2/λ_2 επιλέγεται ίση με 1/3, καθώς αυτή είναι η μέση τιμή του εύρους μέσα στο οποίο καταλήξαμε ότι βρίσκεται το κρίσιμο πάχος της άμμου.

Από τον Πίνακα αυτό συμπεραίνεται ότι, η διασπορά που παρουσιάζεται στις παραμετρικές αναλύσεις σε αυτό το κεφάλαιο (Συντελεστής Μεταβλητότητας, ΣΜ=0 έως 0.50) είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τη διασπορά που προκύπτει από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων (ΣΜ=0.60). Δηλαδή, από τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει ουσιαστική επίδραση των παραμέτρων που εξετάστηκαν στο κεφάλαιο 6.3 στην τελική καμπύλη μεταβολής του F^2

συναρτήσει του λόγου H_2/λ_2. Στο ίδιο συμπέρασμα είχαμε καταλήξει και από την αριθμητική διερεύνηση του προβλήματος.

Παράμετρος	**$(F^2)^*$**	**Τυπική Απόκλιση**	**Συντελεστής Μεταβλητότητας**
Αριθμητική Ανάλυση	0.25	0.15	0.60
ξ1=3%-10%	0.40	0.00	0.00
ξ2=20%-30%	0.42	0.08	0.18
ρ1/ρ2=0.73-1.37	0.42	0.12	0.28
V_{s1}=106m/s-300m/s	0.45	0.05	0.11
V_{s2}=40/s-60m/s	0.42	0.08	0.18
H_1=2m-4m	0.28	0.10	0.38
T=0.1sec-0.5sec	0.40	0.20	0.50

-$(F^2)^*$: Η μέση τιμή του F^2 για H_2/λ_2=1/3

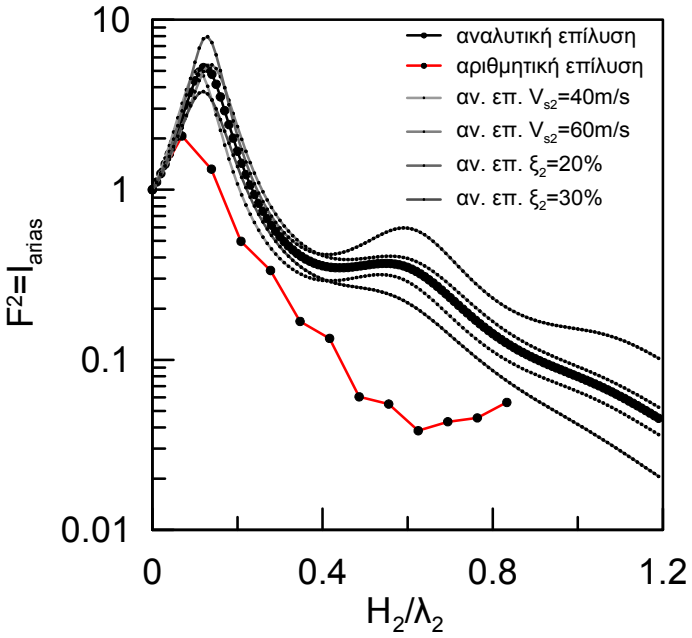
-Συντ.Μετ. = $\frac{max-min}{max+min}$, όπου max και min η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή αντίστοιχα του εύρους διακύμανσης της F^2

Πίνακας 1 : Σύνοψη και σύγκριση αποτελεσμάτων της διασποράς του F^2 για την τιμή H_2/λ_2=1/3, για τις παραμετρικές αναλύσεις αυτού του κεφαλαίου και το σύνολο των αριθμητικών προβλέψεων

Όμως, εμφανίζεται σταθερά μια απόκλιση στη μέση τιμή για την αναλυτική επίλυση, καθώς για τη μέση χαρακτηριστική τιμή H_2/λ_2 =1/3, από I_{arias}=0.25 στο οποίο καταλήξαμε από την αριθμητική ανάλυση, προκύπτει $I_{arias}\approx$0.40 από την αναλυτική λύση. Αυτή η διαφορά σημαίνει ότι για να επιτευχθεί η περιοχή «πλήρους ρευστοποίησης» χρειάζεται μεγαλύτερο πάχος άμμου.

Αυτό φαίνεται και στο **Σχήμα 6.9**, όπου παρουσιάζεται η βασική ανάλυση της αριθμητικής επίλυσης σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου. Επιπροσθέτως, εμφανίζονται και οι καμπύλες αναλυτικής επίλυσης για το εύρος των παραμέτρων ξ_2 (λόγος απόσβεσης άμμου) και V_{s2} (ταχύτητα διατμητικών κυμάτων άμμου), καθώς για τις δύο αυτές παραμέτρους δεν γνωρίζουμε -στη βασική ανάλυση- τις ακριβείς τιμές τους.

Από το Σχήμα αυτό συμπεραίνουμε ότι η μορφή της καμπύλης απόκρισης είναι παρόμοια με αυτή που προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις. Η καμπύλη ξεκινάει εξ'ορισμού από το F^2=1 και κατόπιν παρατηρείται μια πρώτη περιοχή όπου κύριο λόγο παίζει η ενίσχυση, δηλαδή η επιτάχυνση στην κορυφή της άμμου όχι μόνο δεν είναι μικρότερη από τη βαση λόγω ρευστοποίησης, αλλά είναι και ενισχυμένη οπότε F^2>1. Σε αυτή την περιοχή η αναλυτική λύση εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη τιμή καθώς το προσομοίωμα που επιλύσαμε προσομοιώνει κυρίως την περιοχή της «πλήρους ρευστοποίησης» και έτσι δεν προσομοιώνεται επαρκώς η αρχική περιοχή. Έπειτα, για μεγαλύτερα πάχη άμμου, η ενίσχυση μειώνεται συνέχεια στρέφοντας και η καμπύλη στρέφει τα κοίλα άνω, έως ότου πέσει σε πολύ μικρές τιμές όπου η ρευστοποίηση είναι πλέον εμφανής.



Σχήμα 6.9: Αποτελέσματα βασικής ανάλυσης για την αναλυτική και την αριθμητική επίλυση

Συνοπτικά, με τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης επιβεβαιώνεται η ποιοτική περιγραφή του φαινομένου όπως έχει παρουσιαστεί και στα προηγούμενα κεφάλαια. Όμως, ποσοτικά η αναλυτική λύση παρουσιάζει κάποιες αποκλίσεις από τα αριθμητικά αποτελέσματα. Πιθανότατα, αυτή η ποσοτική απόκλιση οφείλεται σε άλλες παραμέτρους οι οποίες δεν εξετάστηκαν εδώ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Από την ανάλυση που προηγήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια μπορούν να εξαχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα, όσον αφορά το την σεισμική απόκριση εδάφους με ρευστοποίηση. Στόχος της εργασίας ήταν η κατανόηση και η περιγραφή, ποσοτική και ποιοτική, της επιρροής του πάχους της ρευστοποιήσιμης άμμου, στην απόκριση του εν λόγου στρώματος.

Η ρευστοποίηση του στρώματος εξετάστηκε κυρίως μέσα από τη συνέπεια της απομείωσης της επιτάχυνσης στην κορυφή της ρευστοποιημένης άμμου σε σχέση με την βάση της. Για αυτό το λόγο, βασικό ρόλο διαδραμάτισαν οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν και εκφράζουν το λόγο της κίνησης στη βάση και την κορυφή της άμμου.

Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

(α) Παρατηρείται ότι σε κάθε περίπτωση το πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην απόκριση του εδάφους. Ποιοτικά παρατηρούνται τρεις ξεχωριστές περιοχές με αντίστοιχα διαφορετική συμπεριφορά της άμμου: για μικρά σχετικά πάχη, παρότι η άμμος πληρεί τα συνήθη κριτήρια ρευστοποίησης, προκαλείται έντονη διαστολικότητα με αποτέλεσμα ενώ οι υπερπιέσεις πόρων φτάνουν σε υψηλές τιμές ($r_u \approx 1.0$), η μέση τιμή του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u είναι πολύ μικρότερη εώς και μηδενική. Επίσης, η διέγερση στη βάση του στρώματος όχι μόνο δεν απομειώνεται αλλά αυξάνεται και φτάνει στην κορυφή έως και διπλάσια.

Για σχετικά μεγάλα πάχη άμμου, η ρευστοποίηση εμφανίζεται με τη συνήθη μορφή της και η επιτάχυνση στην κορυφή είναι υποπολλαπλάσια αυτής στη βάση. Για ενδιάμεσα πάχη του στρώματος της άμμου, παρουσιάζεται και μια ενδιάμεση συμπεριφορά, όπου η ρευστοποίηση δεν αναπτύσσεται πλήρως αλλά χαρακτηριστικά ρευστοποίησης (μερική απομείωση επιταχύνσεων, αύξηση υπερπίεσης πόρων και μέσο $r_{uav} \approx 0.5\text{-}0.8$) γίνονται αντιληπτά.

(β) Άλλες παράμετροι οι οποίοι εξετάστηκαν και εμφανίζονται να επηρεάζουν το φαινόμενο αυτό, είναι ο αρχικός δείκτης πόρων και η διαπερατότητα του στρώματος της άμμου, αλλά κρισιμότερη παράμετρος είναι η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης. Αντίθετα, το φαινόμενο δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από το υποκείμενο και (ίσως) από το υπερκείμενο στρώμα αργίλου αλλά ούτε και από τη μέγιστη επιτάχυνση της διέγερσης.

(γ) Για την όσο το δυνατόν πλήρη και ποσοτική περιγραφή του φαινομένου χρησιμοποιήθηκε η ταχύτητα διατμητικού κύματος εντός του ρευστοποιημένου εδάφους. Δείξαμε ότι είναι εφικτό να υπολογιστεί μια μέση τιμή για την ταχύτητα η οποία να αντιπροσωπεύει ποσοτικά το ρευστοποιημένο έδαφος. Επιπλέον, καταλήξαμε ότι η μέση ταχύτητα της ρευστοποιημένης άμμου εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την αρχική ταχύτητα του διατμητικού κύματος στην άμμο και μάλιστα ισχύει $V_s/V_{so} \approx 0.25\text{-}0.40$ (μέση τιμή περίπου 1/3).

(δ) Καταλήξαμε σε ένα κριτήριο για τον προσδιορισμό της περιοχής της πλήρους ρευστοποιημένης άμμου και τον προσδιορισμό του κρίσιμου πάχους της άμμου, με βάση το δείκτες απομείωσης της επιτάχυνσης στη κορυφή του ρευστοποιήσιμου στρώματος και δευτερευόντως το λόγο υπερπίεσης πόρων ως εξής :

- $I_{arias}<0.2$
- $I_{abs}<0.4$
- $I_{rms}<0.4$
- $r_{uav}>0.8$

Το όριο των παραπάνω κριτηρίων οδηγεί στην εύρεση ενός «κρίσιμου πάχους» πέρα από το οποίο η ρευστοποίηση προκαλεί πλήρη πρακτικά απόσβεση της σεισμικής επιτάχυνσης στην επιφάνεια της άμμου. Για την διατύπωση του εν λόγω κριτηρίου απαιτείται πρώτα να έχει ολοκληρωθεί η δυναμική ανάλυση του εδάφους, ώστε να είναι γνωστά τα επιταχυνσιογραφήματα στη βάση και στην κορυφή του στρώματος της ρευστοποιήσιμης άμμου.

(ε) Με βάση το παραπάνω κριτήριο προκύπτει αρχικά ότι στο κρίσιμο πάχος της άμμου σημαντικά επιδρούν οι τρεις παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο, δηλαδή η διαπερατότητα και ο δείκτης πόρων της άμμου και η περίοδος της διέγερσης. Ακολούθως όμως διαπιστώθηκε ότι η επίδραση των ανωτέρω παραμέτρων μπορεί να συνδυασθεί στην τιμή του ανηγμένου πάχους του ρευστοποιήσιμου (H_{liq} / λ_{liq}). Καταλήξαμε έτσι σε ένα πρακτικό κριτήριο για την εύρεση του κρίσιμου πάχους και την περιγραφή του φαινομένου, εφαρμόσιμο με εκ των προτέρων γνωστές γεωτεχνικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, για πλήρη απόσβεση του σεισμικού κραδασμού θα πρέπει το πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος να είναι μεγαλύτερο από 0.25-0.45 του αντίστοιχου μήκους κύματος (H_{cr} / λ_{liq} =0.25-0.45).

(ζ) Τέλος, στα πλαίσια διερεύνησης των μηχανισμών που διέπουν την απόσβεση της σεισμικής απόκρισης λόγω ρευστοποίησης, έγινε χρήση αναλυτικών μεθόδων με βάση την κυματική θεώρηση για την επίλυση του προβλήματος. Από τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης επιβεβαιώνεται τόσο η ύπαρξη του φαινομένου, όσο και η ποιοτική περιγραφή που πραγματοποιήθηκε αριθμητικά. Όμως, παρουσιάζεται μια συστηματική ποσοτική διαφοροποίηση στο τελικό κριτήριο καθώς προκύπτει ότι το κρίσιμο πάχος ισούται με 0.45-0.70 του μήκους του ρευστοποιημένου στρώματος. Η διαπίστωση αυτή είναι πιθανόν ότι υποδηλώνει την ύπαρξη και κάποιων άλλων μηχανισμών που δεν καλύπτονται από την κυματική θεώρηση, και θα πρέπει να διερευνηθούν ανεξάρτητα.

7.2 Σχόλια – Προτάσεις

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αποτελεί την πρώτη προσέγγιση του φαινομένου τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Πέραν τούτου, όλη η ανάλυση βασίζεται σε αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για 3-στρωτη στήλη εδάφους και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης προκειμένου τα συμπεράσματα που εξήχθησαν να γενικευθούν και εφαρμοσθούν στην πράξη. Συγκεκριμένα, προτείνονται οι ακόλουθες «δράσεις» μελλοντικής έρευνας:

(α) Πρώτον, απαιτείται η επιβεβαίωση του φαινομένου και των συμπερασμάτων με τη χρήση πραγματικών καταγραφών και πειραματικών

δεδομένων. Η σύγκριση καταγραφών σε πραγματική κλίμακα με τα παραπάνω συμπεράσματα θα αυξήσει την αξιοπιστία τους και θα καταδείξει πιθανά λάθη ή παρανοήσεις που έγιναν στην παρούσα ανάλυση. Επιπλέον, τα αριθμητικά αποτελέσματα θα πρέπει να προσεγγίζουν με πολύ καλή ακρίβεια αποτελέσματα πειραμάτων καθώς η προσομοίωση που έγινε βασίστηκε σε πειραματικές διατάξεις, οπότε τα σχετικά πειραματικά αποτελέσματα θα πρέπει να βρίσκονται σε συμφωνία με τα αριθμητικά.

(β) Δεύτερον, χρειάζονται περισσότερες αριθμητικές αναλύσεις ώστε να καλυφθεί μεγαλύτερο φάσμα περιπτώσεων. Έτσι, μπορούν να πραγματοποιηθούν αναλύσεις με δύο στρώματα εδάφους αντί για τρία και με διαφορετικά εδαφικά προφίλ. Είναι ιδιαίτερα απαραίτητη η εφαρμογή μη αρμονικών διεγέρσεων, πραγματικών και τεχνητών, με διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο, ώστε να επεκταθούν τα υπάρχοντα αποτελέσματα και σε αυτή την περίπτωση.

(γ) Τρίτον, πολύ σημαντικό είναι να ελεγχθεί η επίδραση του φαινομένου και σε άλλες συνέπειες της ρευστοποίησης εκτός απομείωσης της κίνησης λόγω ρευστοποίησης. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να διερευνήσουμε τι επιπτώσεις έχει η επιρροή του πάχους του ρευστοποιήσιμου στρώματος

- στις καθιζήσεις που προκαλούνται μετά το τέλος της ρευστοποίησης και επίσης,
- στις οριζόντιες μετατοπίσεις του εδάφους λόγω πλευρικής εξάπλωσης, πληρουμένων βεβαίως των προϋποθέσεων εκδήλωσης του φαινομένου (ύπαρξη κλίσης στην επιφάνεια του εδάφους ή/και αναβαθμού).

Κατόπιν της ολοκλήρωσης των παραπάνω θα διαθέτουμε μια πληρέστερη εικόνα του φαινομένου τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Συνεπώς, η συνέχεια της διερεύνησης του προβλήματος θα καθοριστεί από τα νέα αποτελέσματα και συμπεράσματα που θα έχουν εξαχθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ANDRIANOPOULOS, K. (2006), "Numerical modeling of static and dynamic behavior of elastoplastic soils", *Doctorate Thesis, Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens* (in Greek).

BIRD J. F., BOULANGER R. W., IDRISS I. M. (2005), "Engineering Geology / Liquefaction", *Encyclopedia of Geology*, Pages 525-534

BOUCKOVALAS G., ANDRIANOPOULOS K., PAPADIMITRIOU A. (2003), "A critical state interpretation for the cyclic liquefaction resistance of silty sands", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 23, Pages 115-125

BOUCKOVALAS G., ANDRIANOPOULOS K., PAPADIMITRIOU A. (2010), "Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geostructures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 30, Pages 895-911

LU XIAOBING, CUI PENG (2004), "The liquefaction and displacement of highly saturated sand under water pressure oscillation", *Ocean Engineering,* Volume 31, Pages 795–811

OSETROV V., FROHLICH H.-J., KOCH R., CHILLA E. (2000), "Acoustoelastic effect in anisotropic layered structures" , *Physical review B* , Volume 62, Number 21

RAMBERG W., OSGOOD W.R. (1943), "Description of stress-strain curves by three parameters", *Technical Note No.902*, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington D.C.

SHAHIR H., PAK A., TAIEBAT M., JEREMIC B. (2011), "Evaluation of Variation of Permeability in Liquefiable Soil under Earthquake Loading" , *in review*

TAIEBAT M., JEREMIC B., DAFALIAS Y., KAYNIA A., CHENG Z. (2010), "Propagation of seismic waves through liquefied soils", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 30, Pages 236–257

YOUD L., CARTER B. (2003), "Influence of soil softening and liquefaction on response spectra for bridge design", *Report No. UT-03.07*, Utah Department of Transportation Research and Development Division

ZEGHAL M., ELGAMAL A.-W., ZENG X., ARULMOLI K. (1999), "Mechanism of Liquefaction Response in Sand–Silt Dynamic Centrifuge Tests "*Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 18, Pages 71–85

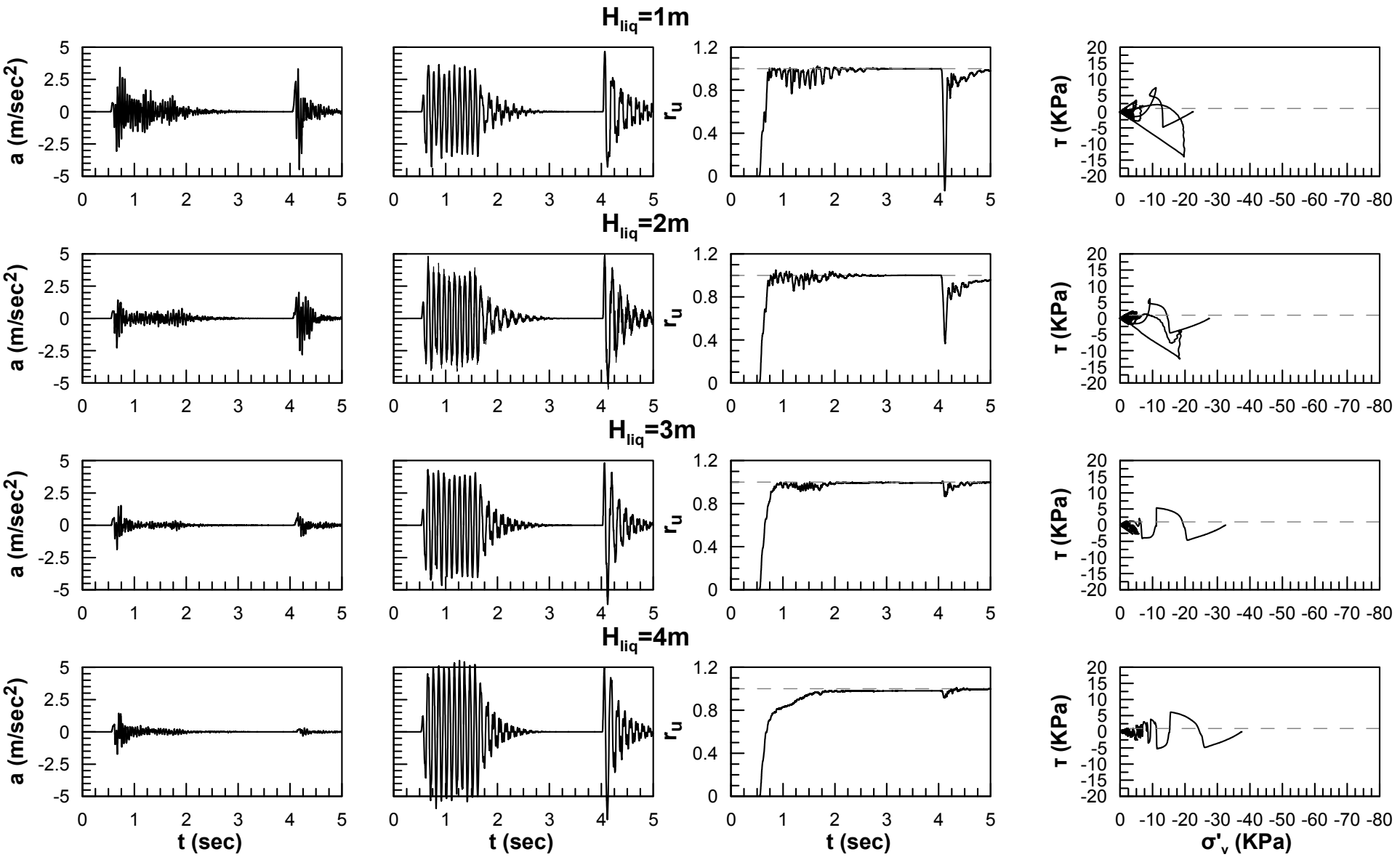
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

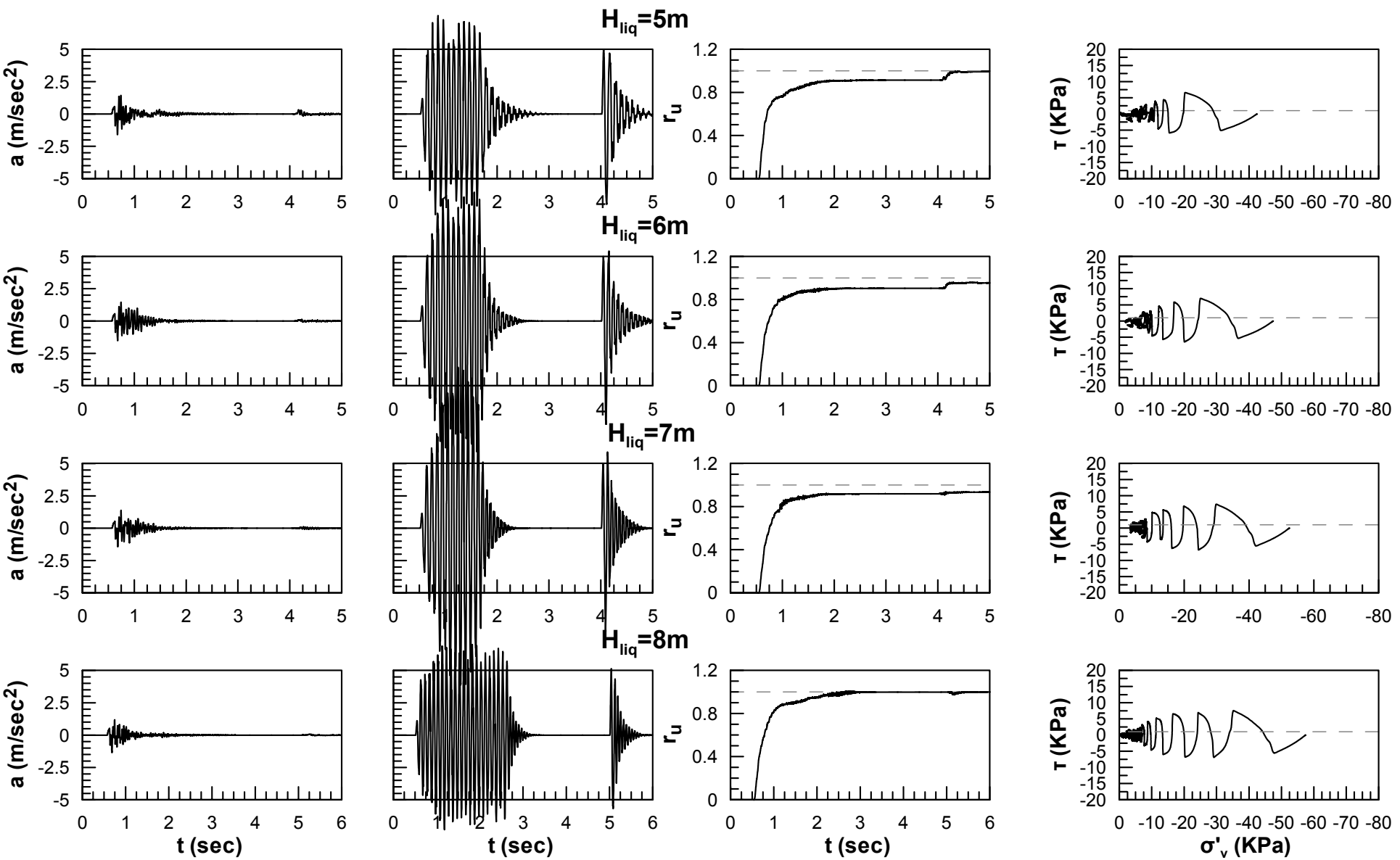
	Άργιλος κορυφής					Άργιλος βάσης				Άμμος				Διέγερση		
Ανάλυση	V_{so} (m/s)	c_u (kPa)	H (m)	PI (%)	ρ_{sat} (Mg/m^3)	V_{so} (m/s)	c_u (kPa)	PI (%)	ρ_{sat} (Mg/m^3)	e	Dr (%)	K (cm/s)	ρ_{sat} (Mg/m^3)	T (sec)	a_{max} (g)	βασικοί κύκλοι
1	106	15	2	30	2	300	120	30	2	**0.737**	**40**	Α.Σ.	2	**0.1**	0.3	10
2	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.737	40	Α.Σ.	2	**0.2**	0.3	10
3	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.737	40	Α.Σ.	2	**0.3**	0.3	10
4	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.737	40	Α.Σ.	2	**0.4**	0.3	10
5	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.737	40	Α.Σ.	2	**0.5**	0.3	10
6	106	15	2	30	2	300	120	30	2	**0.661**	**60**	Α.Σ.	2	**0.1**	0.3	10
7	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.661	60	Α.Σ.	2	**0.2**	0.3	10
8	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.661	60	Α.Σ.	2	**0.3**	0.3	10
9	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.661	60	Α.Σ.	2	**0.4**	0.3	10
10	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.661	60	Α.Σ.	2	**0.5**	0.3	10
11	106	15	2	30	2	300	120	30	2	**0.61**	**75**	Α.Σ.	2	**0.1**	0.3	10
12	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.61	75	Α.Σ.	2	**0.2**	0.3	10
13	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.61	75	Α.Σ.	2	**0.3**	0.3	10
14	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.61	75	Α.Σ.	2	**0.4**	0.3	10
15	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.61	75	Α.Σ.	2	**0.5**	0.3	10
16	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.61	75	**0.0021**	2	0.3	0.3	10
17	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.61	75	**0.006**	2	0.3	0.3	10
18	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.61	75	Α.Σ.	2	0.3	**0.2**	10
19	106	15	2	30	2	300	120	30	2	0.61	75	Α.Σ.	2	0.3	**0.4**	10
20	106	15	2	30	2	**100**	120	30	2	0.61	75	Α.Σ.	2	0.3	0.3	10
21	106	15	**4**	30	2	300	120	30	2	0.61	75	Α.Σ.	2	0.3	0.3	10

Α.Σ.=Αστράγγιστες Συνθήκες

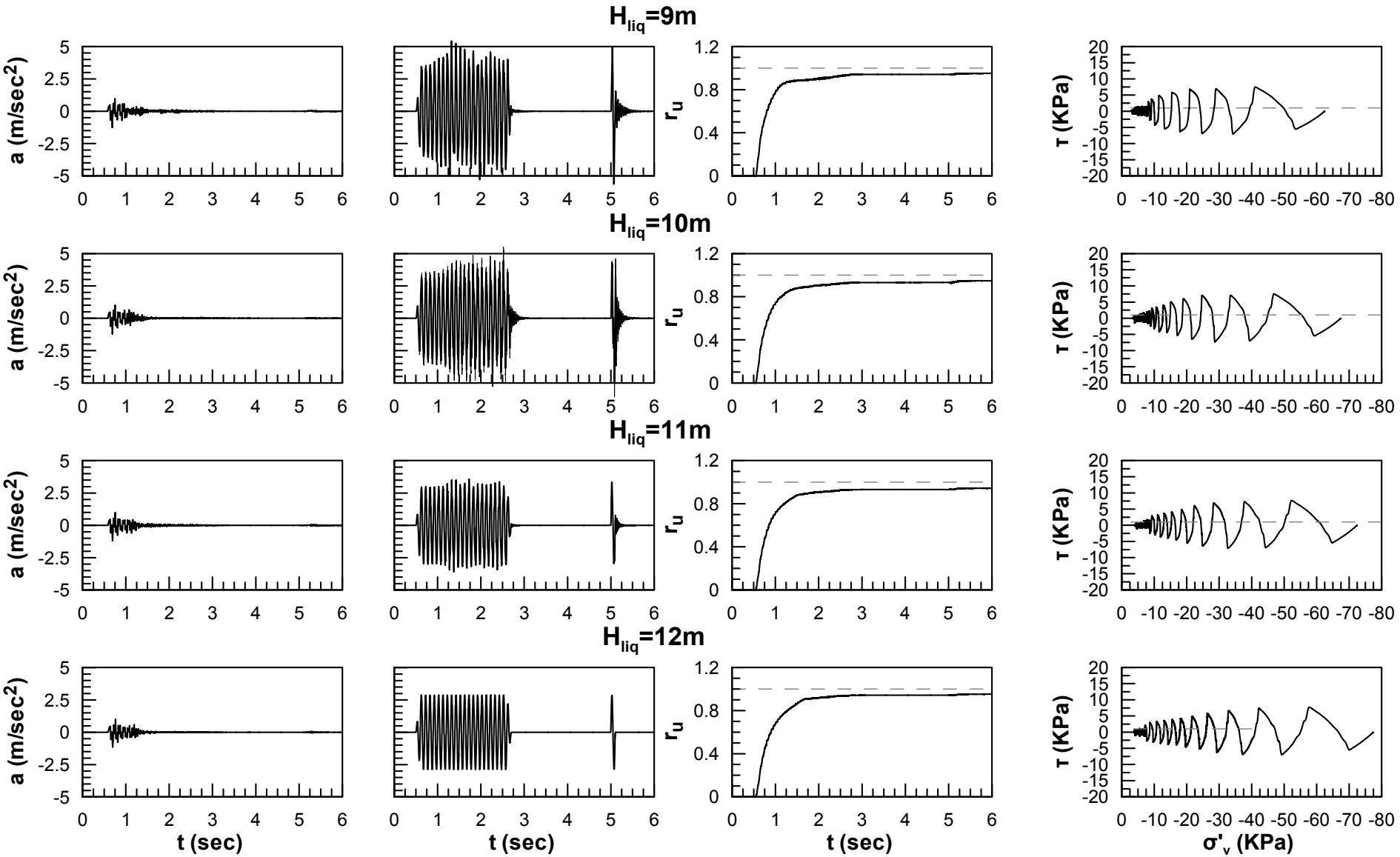
Ανάλυση 1.α



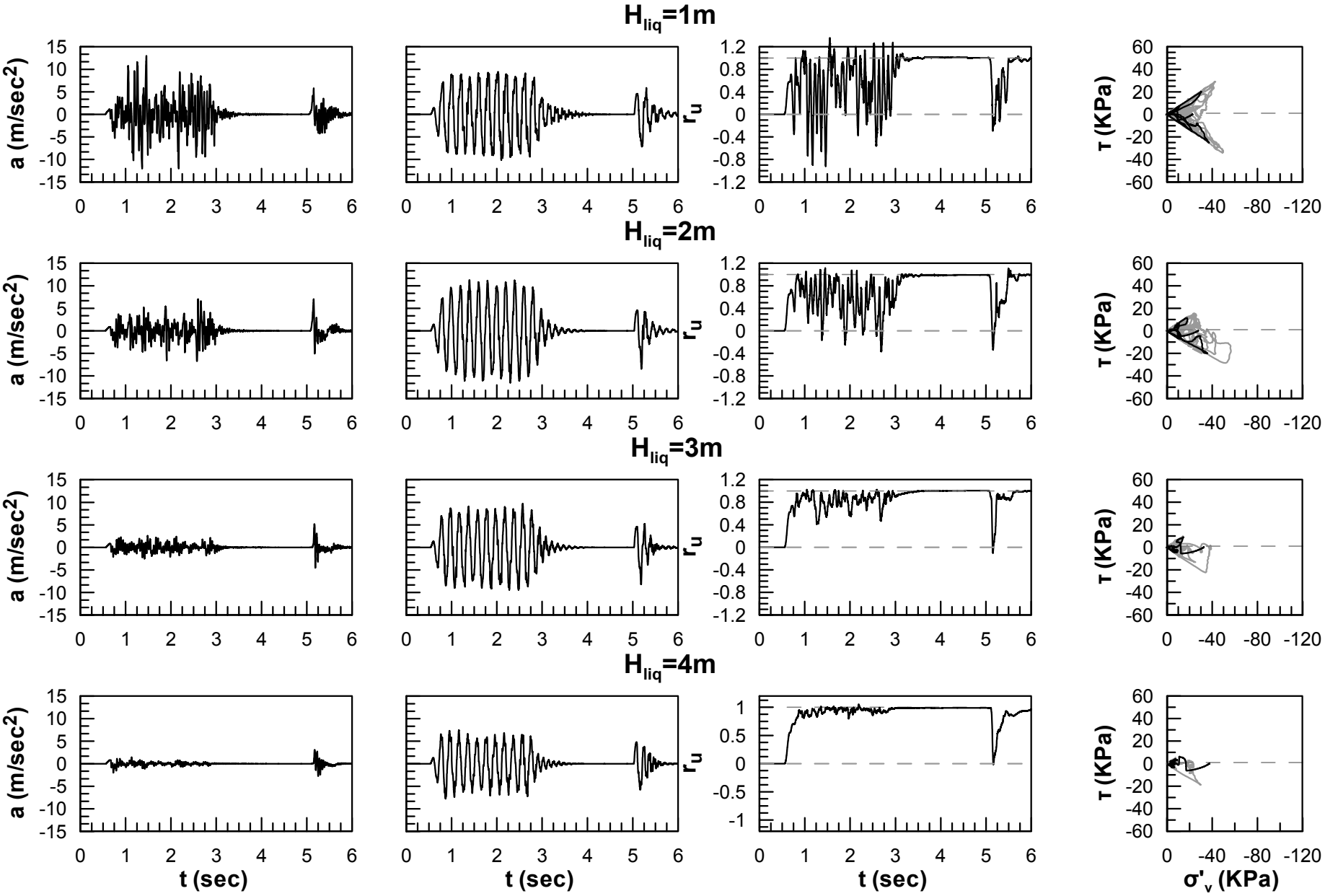
Ανάλυση 1.β



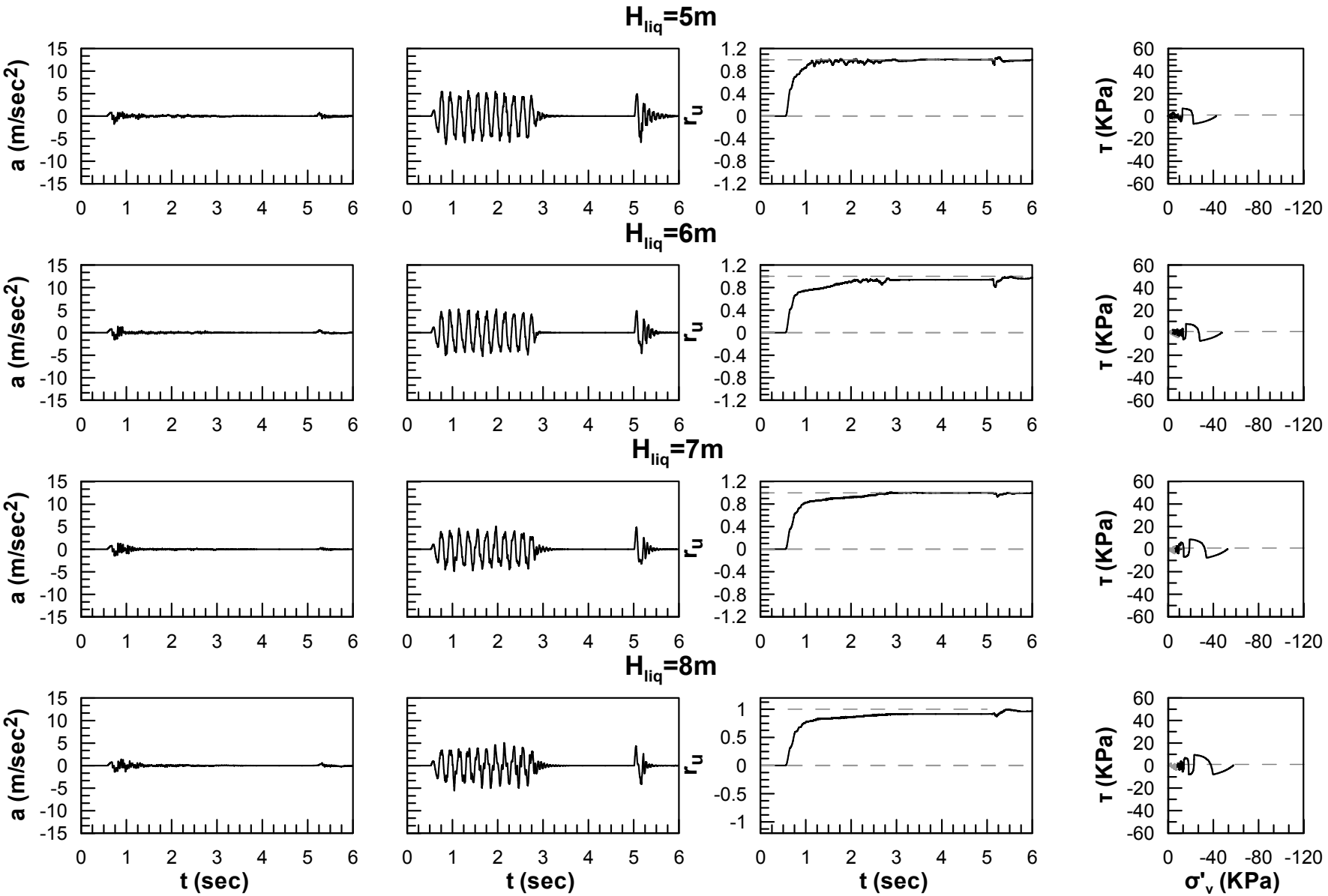
Ανάλυση 1.γ



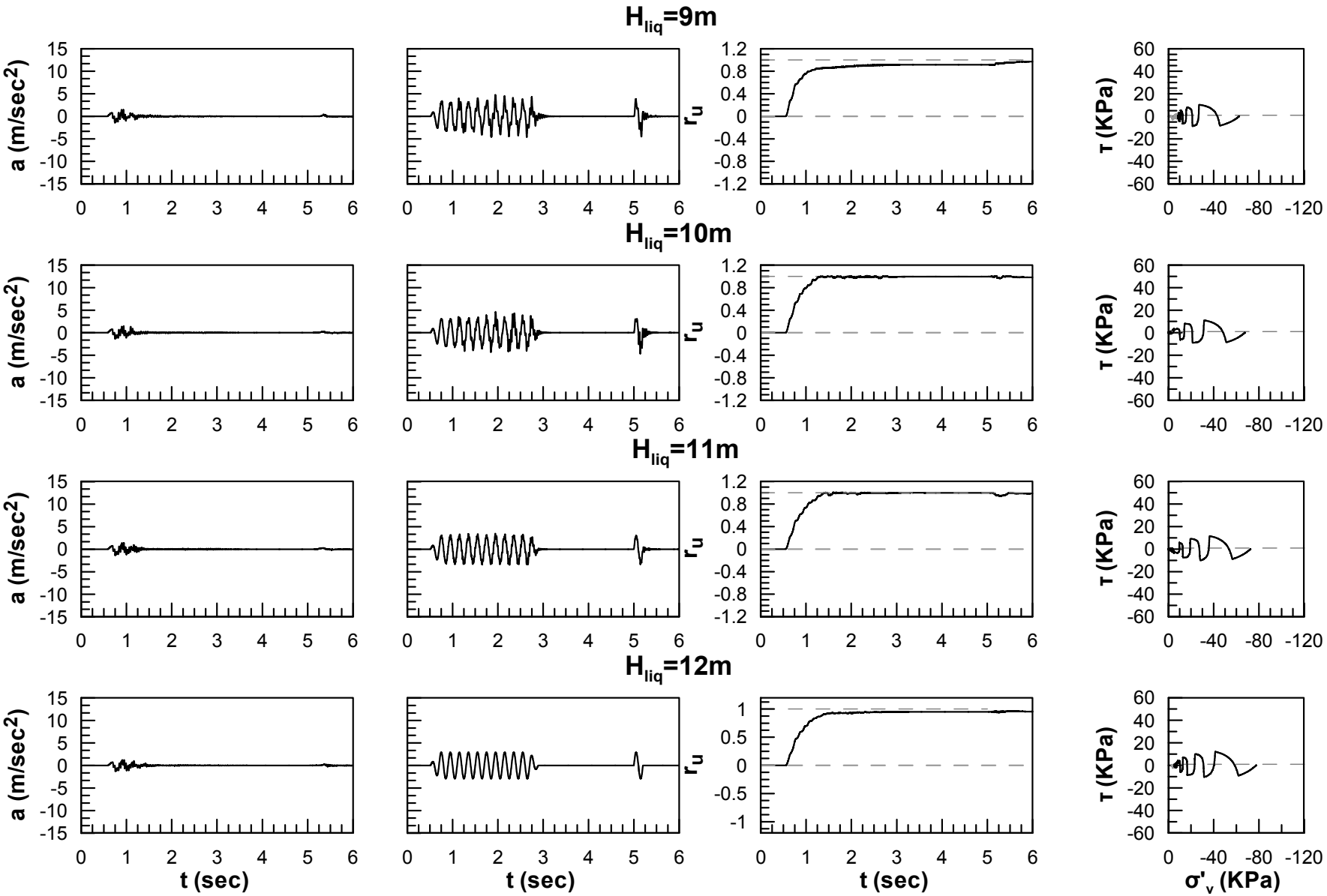
Ανάλυση 2.α



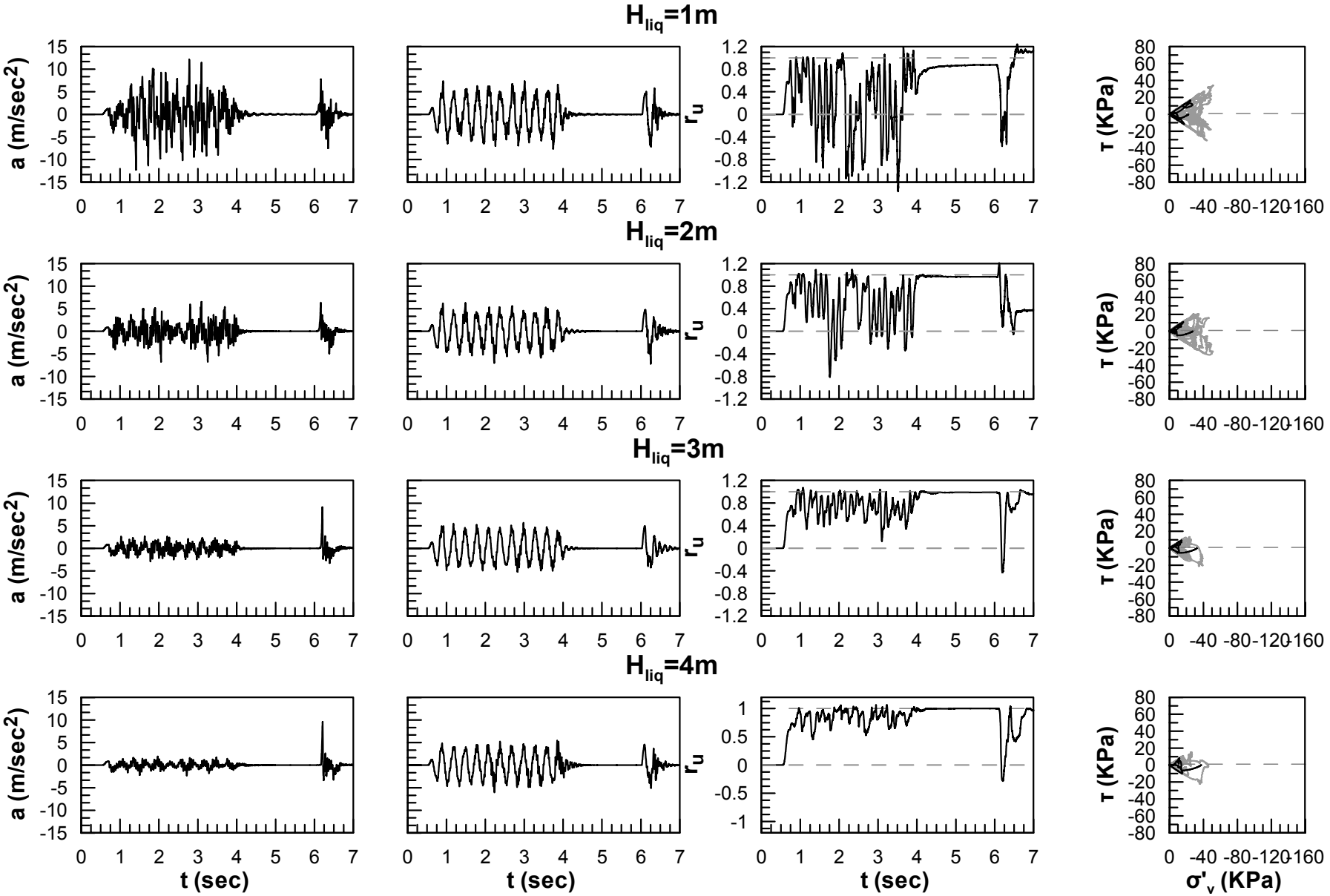
Ανάλυση 2.β



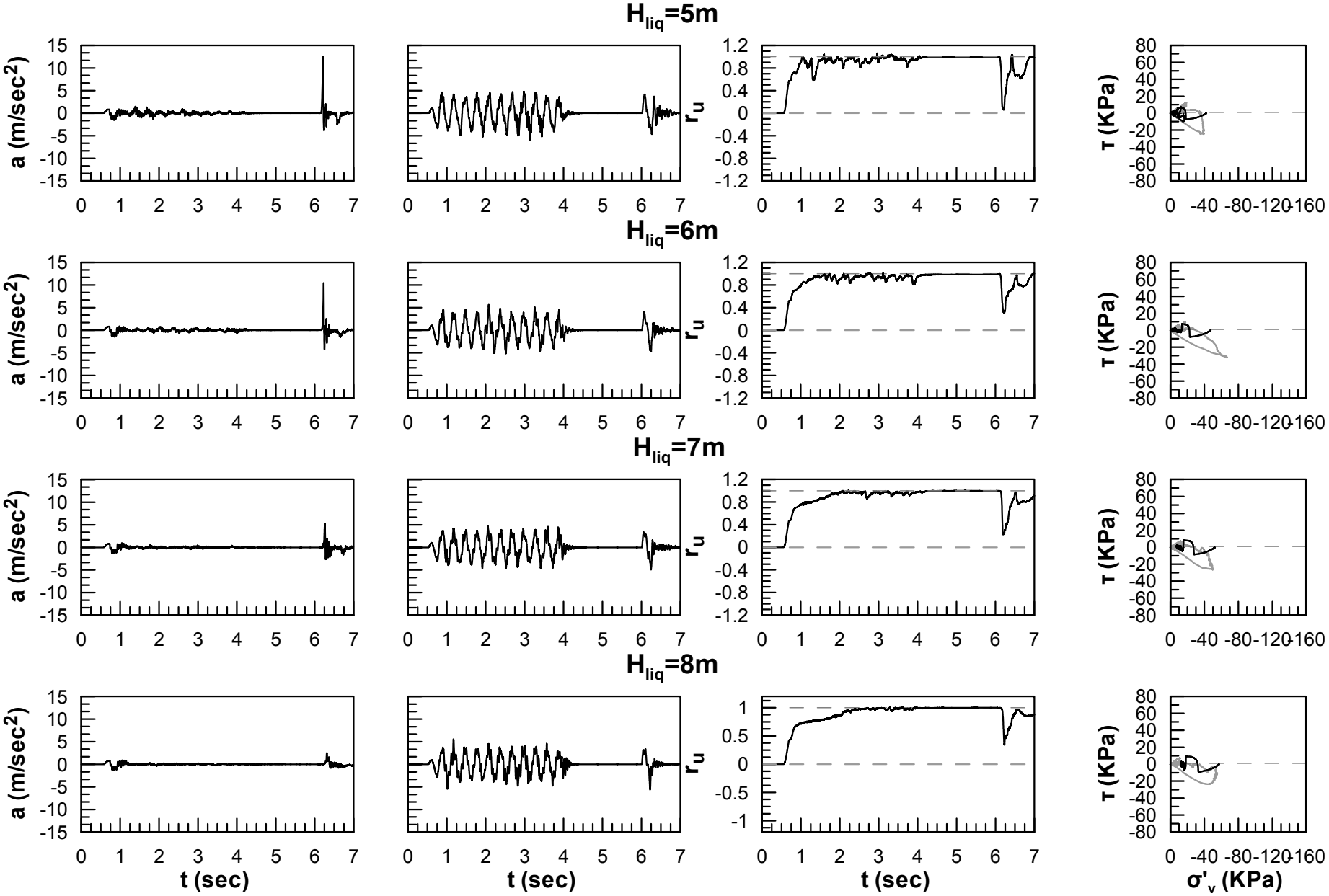
Ανάλυση 2.γ



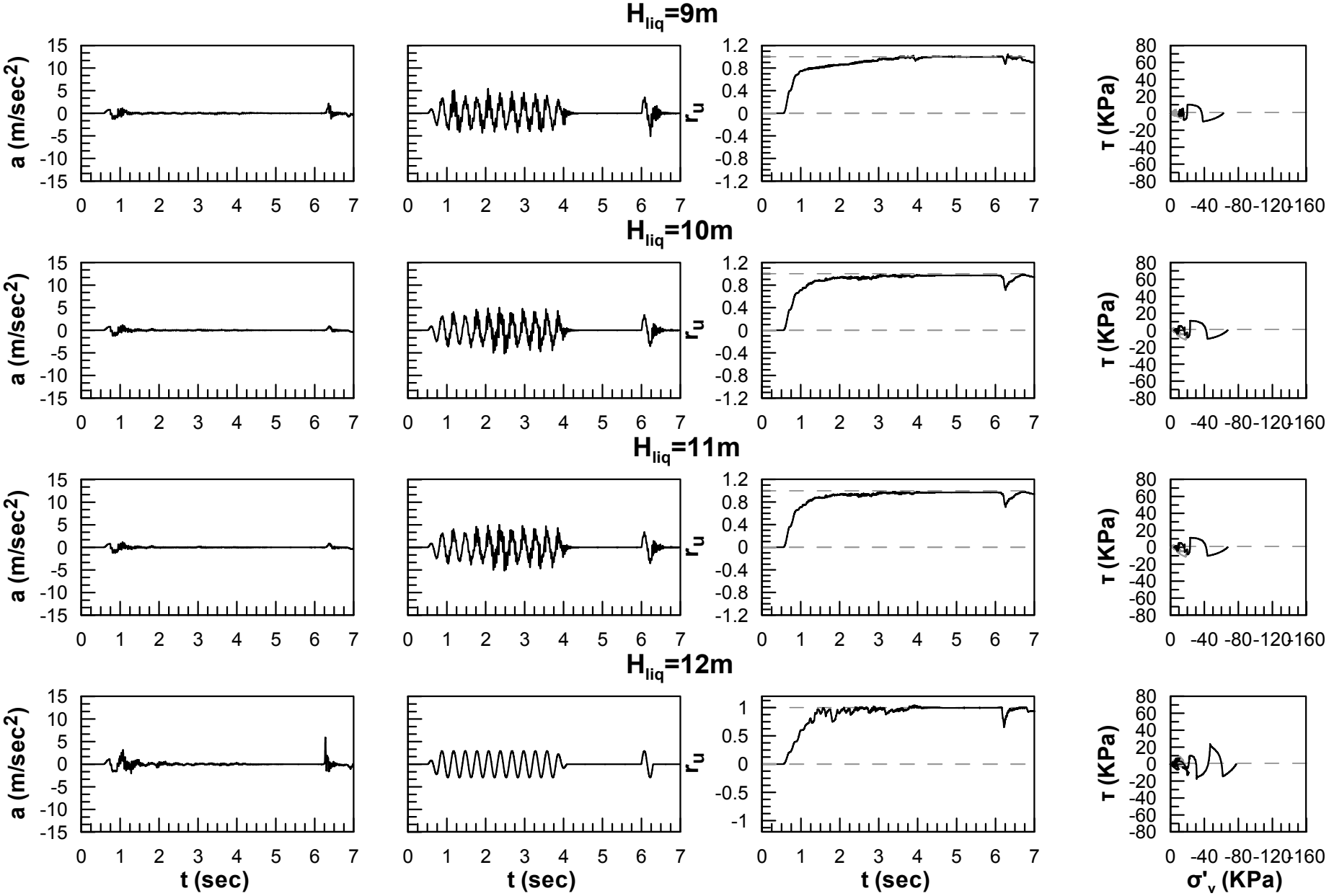
Ανάλυση 3.α



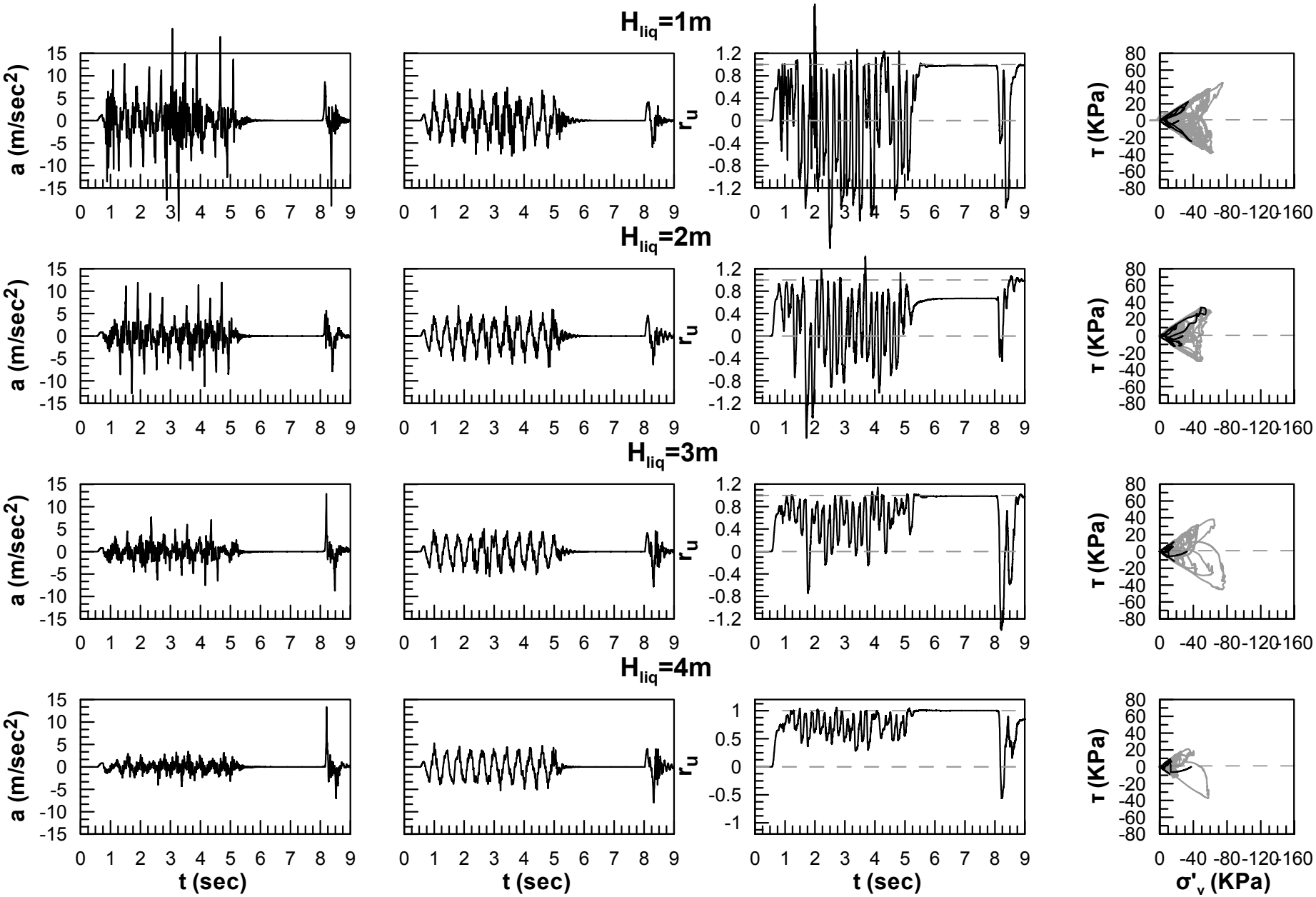
Ανάλυση 3.β



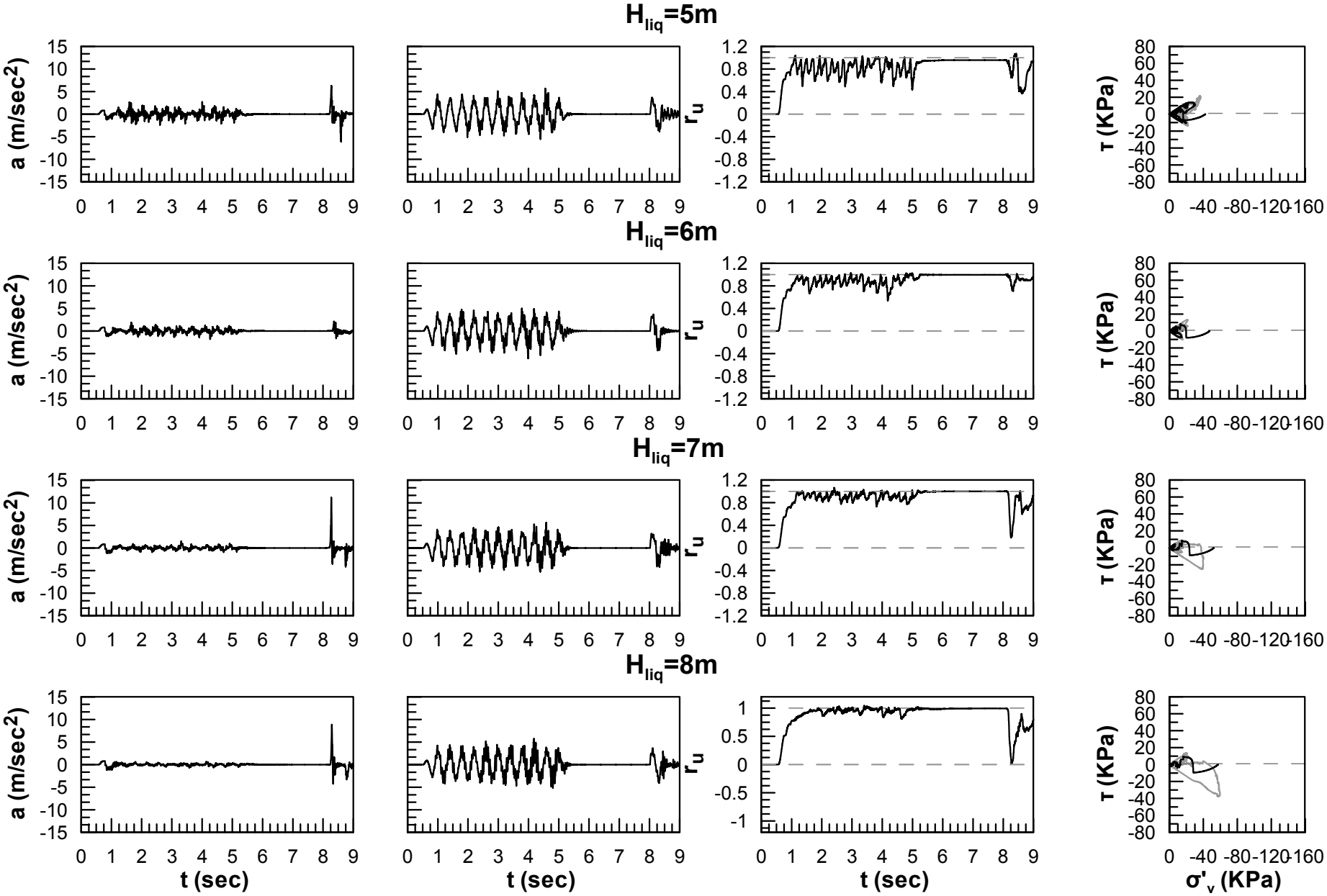
Ανάλυση 3.γ



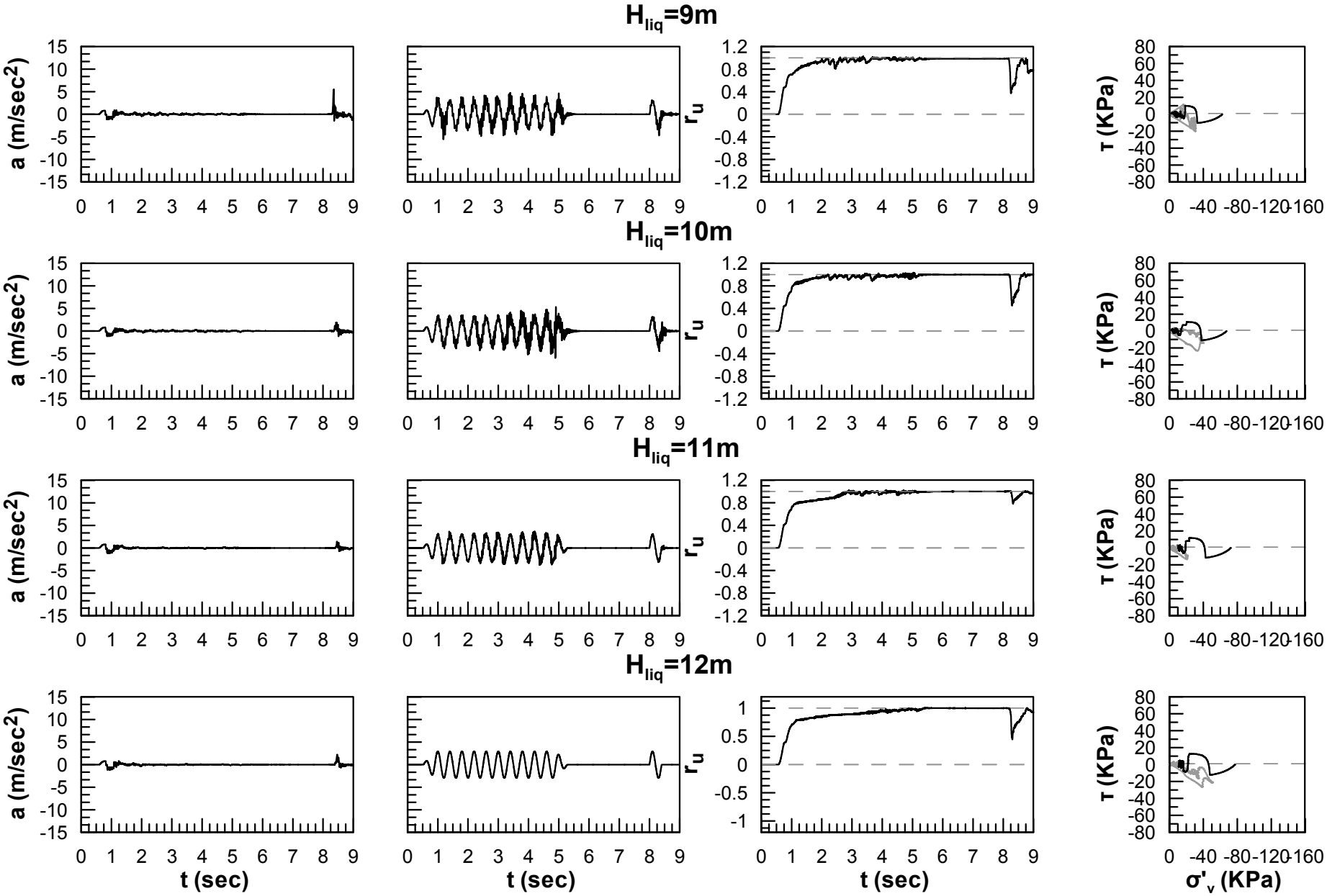
Ανάλυση 4.α



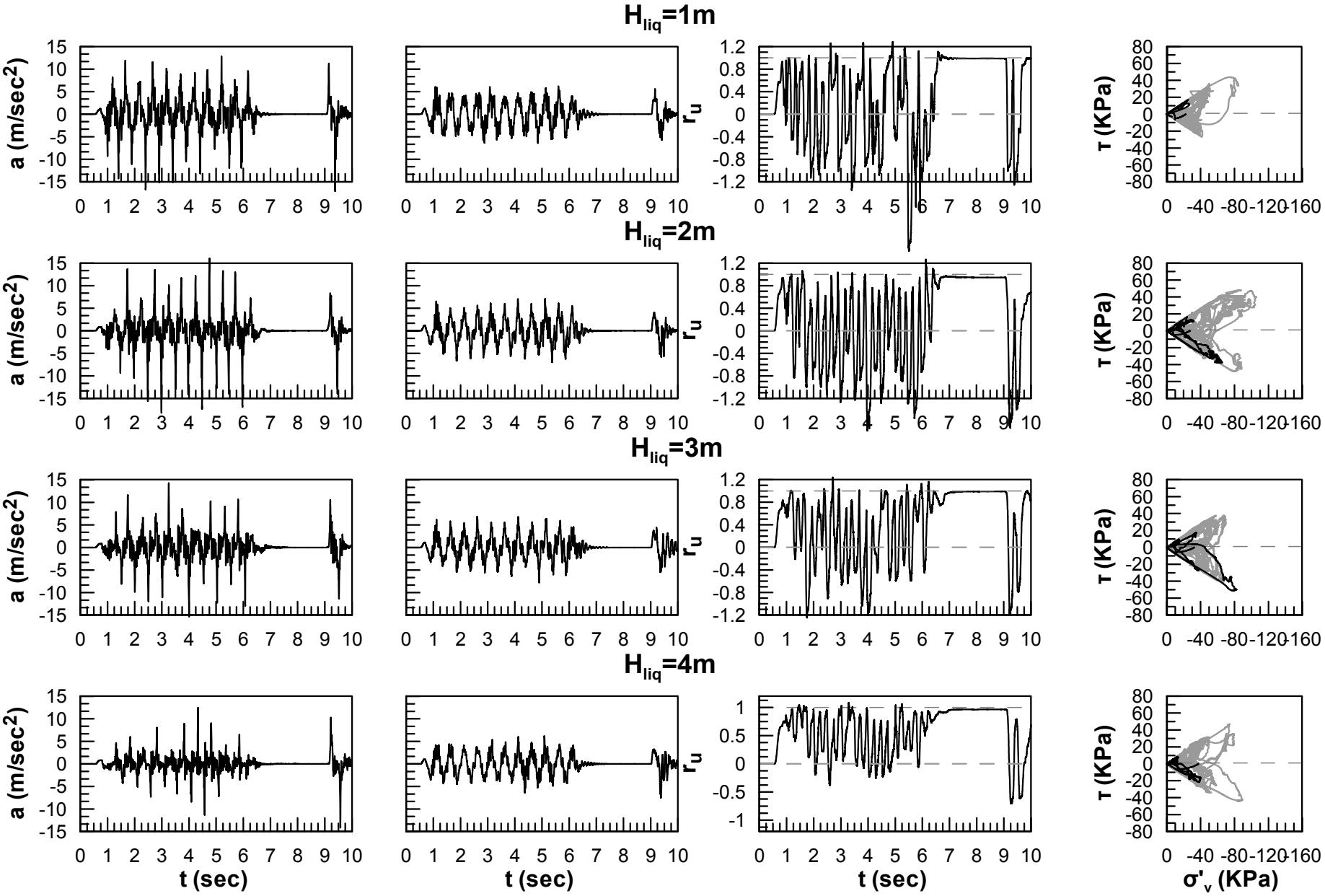
Ανάλυση 4.β



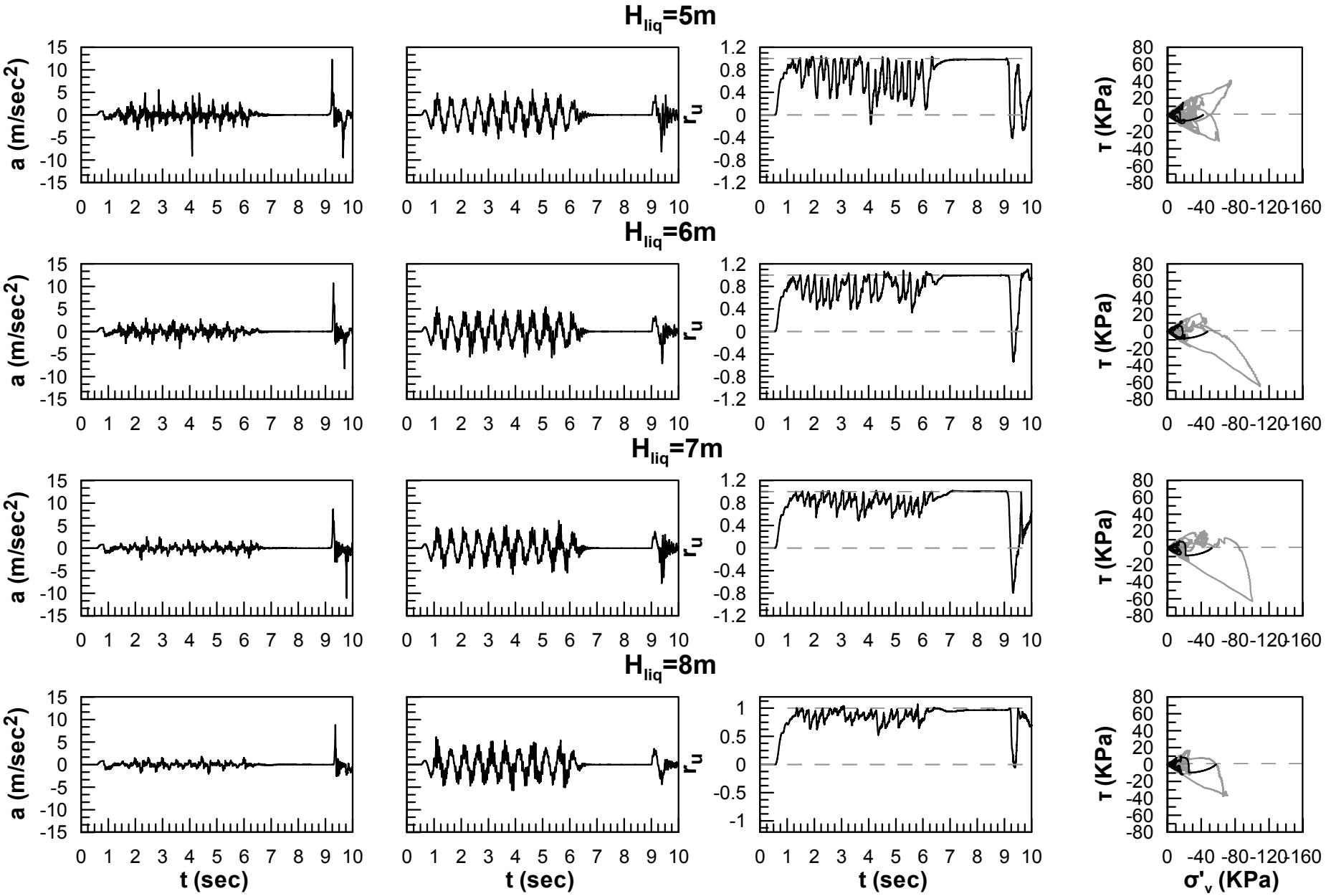
Ανάλυση 4.γ



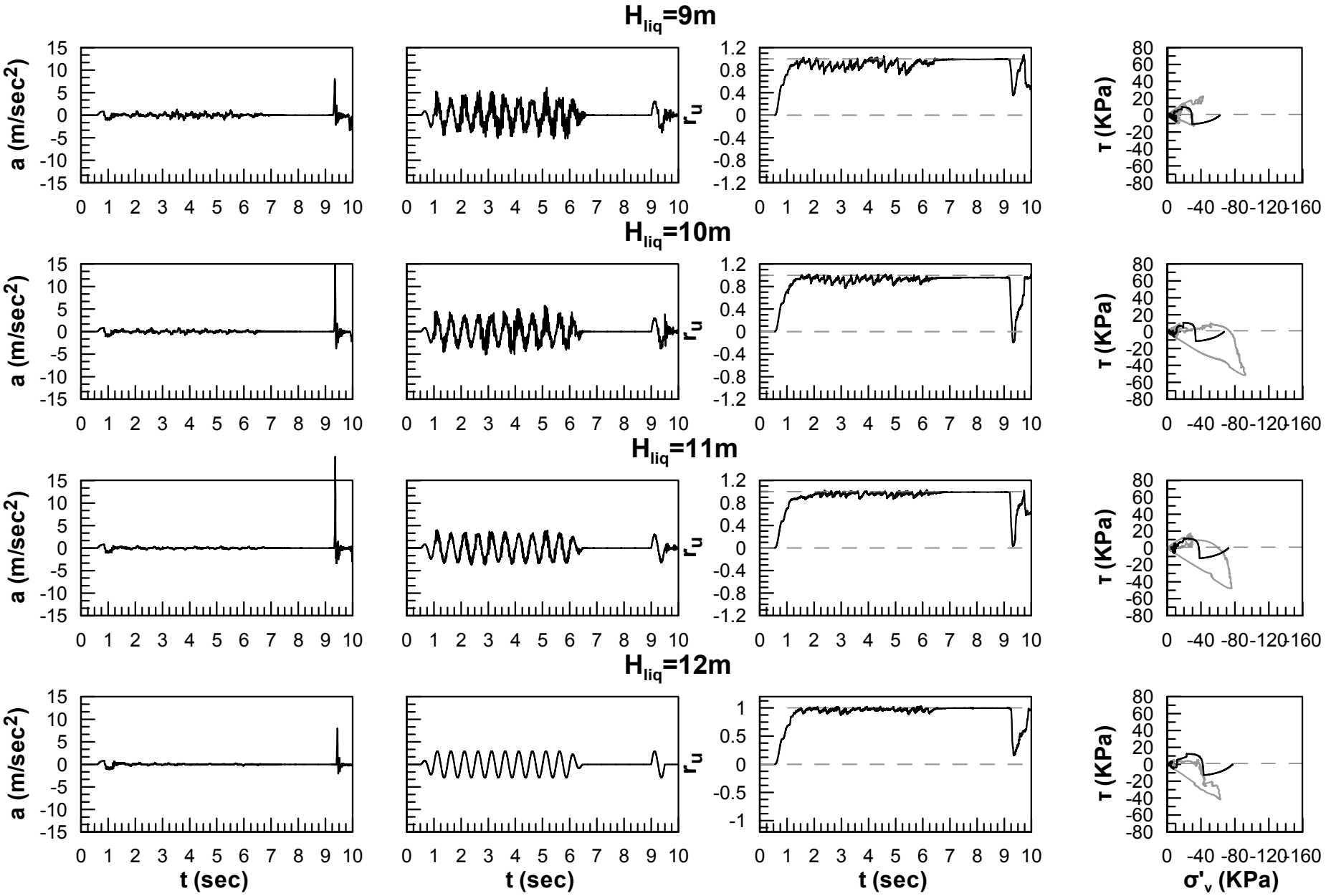
Ανάλυση 5.α



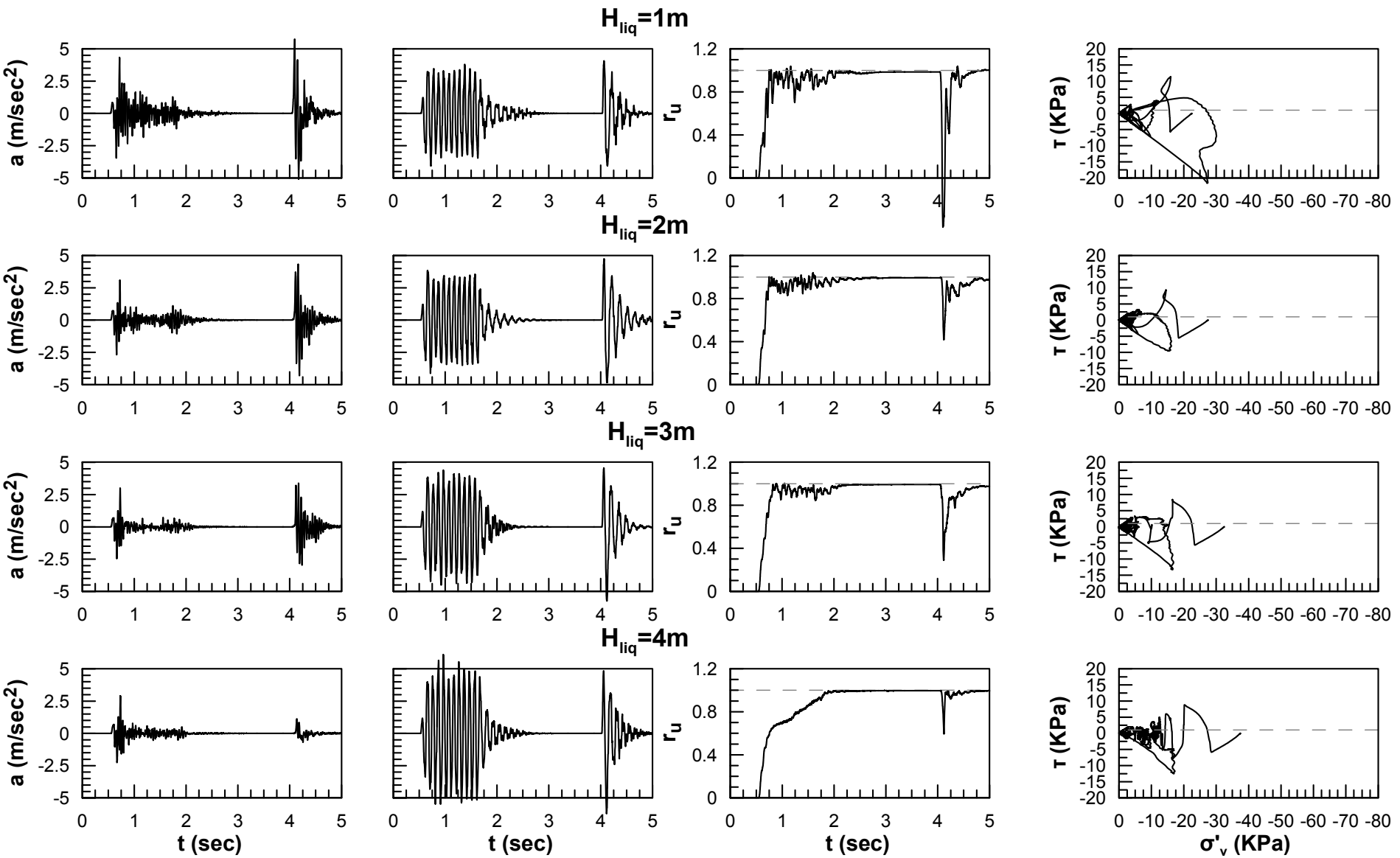
Ανάλυση 5.β



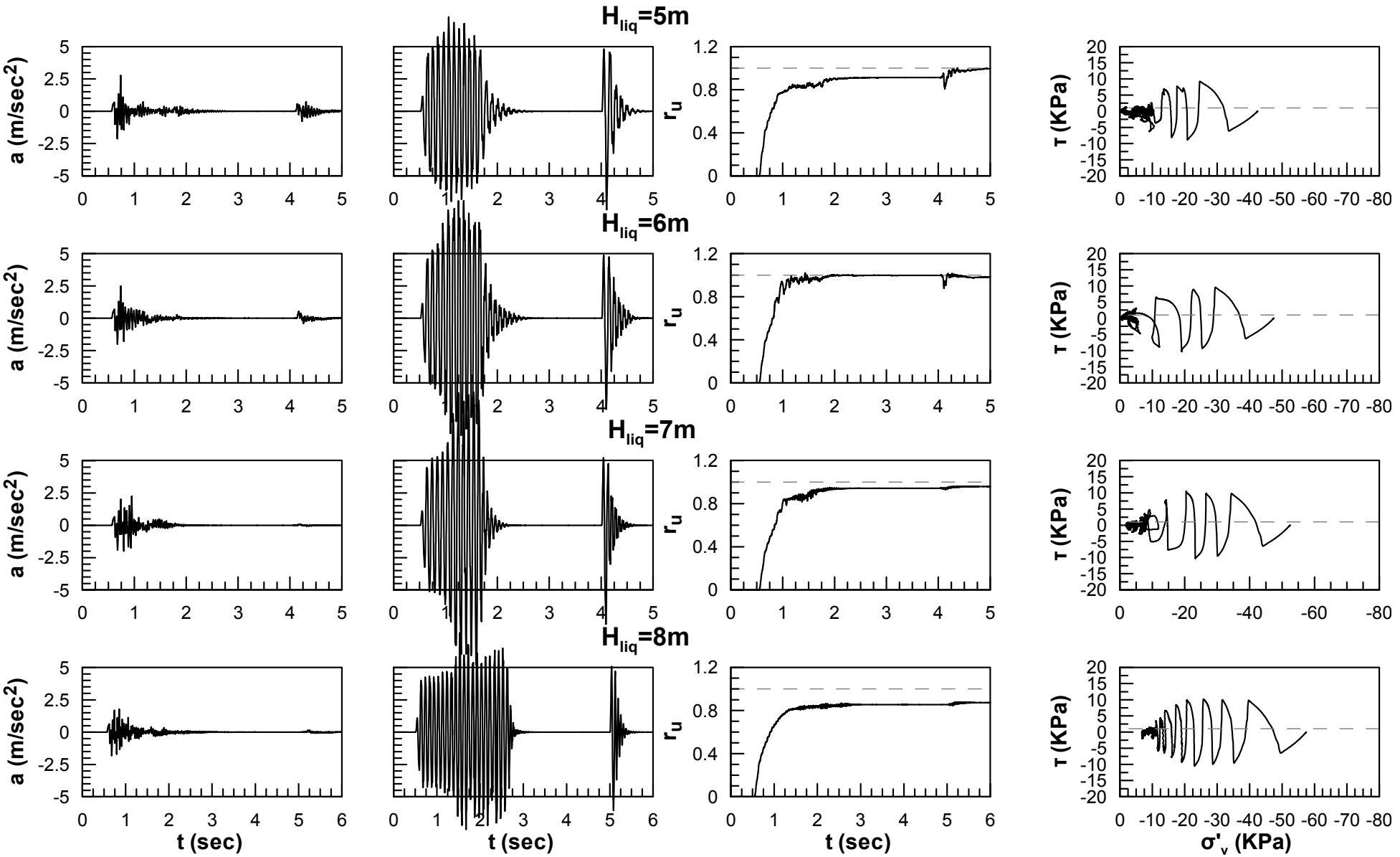
Ανάλυση 5.γ



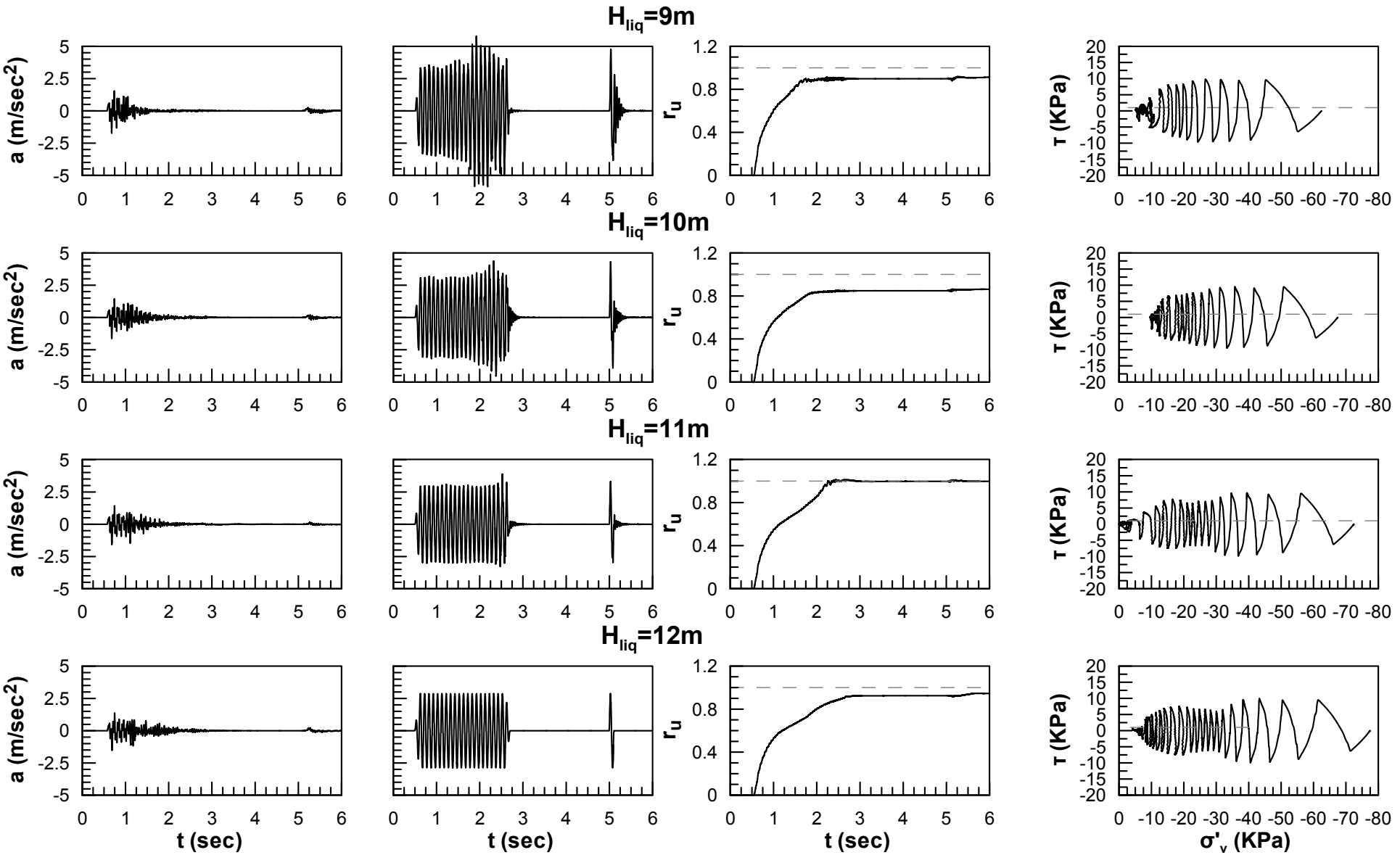
Ανάλυση 6.α



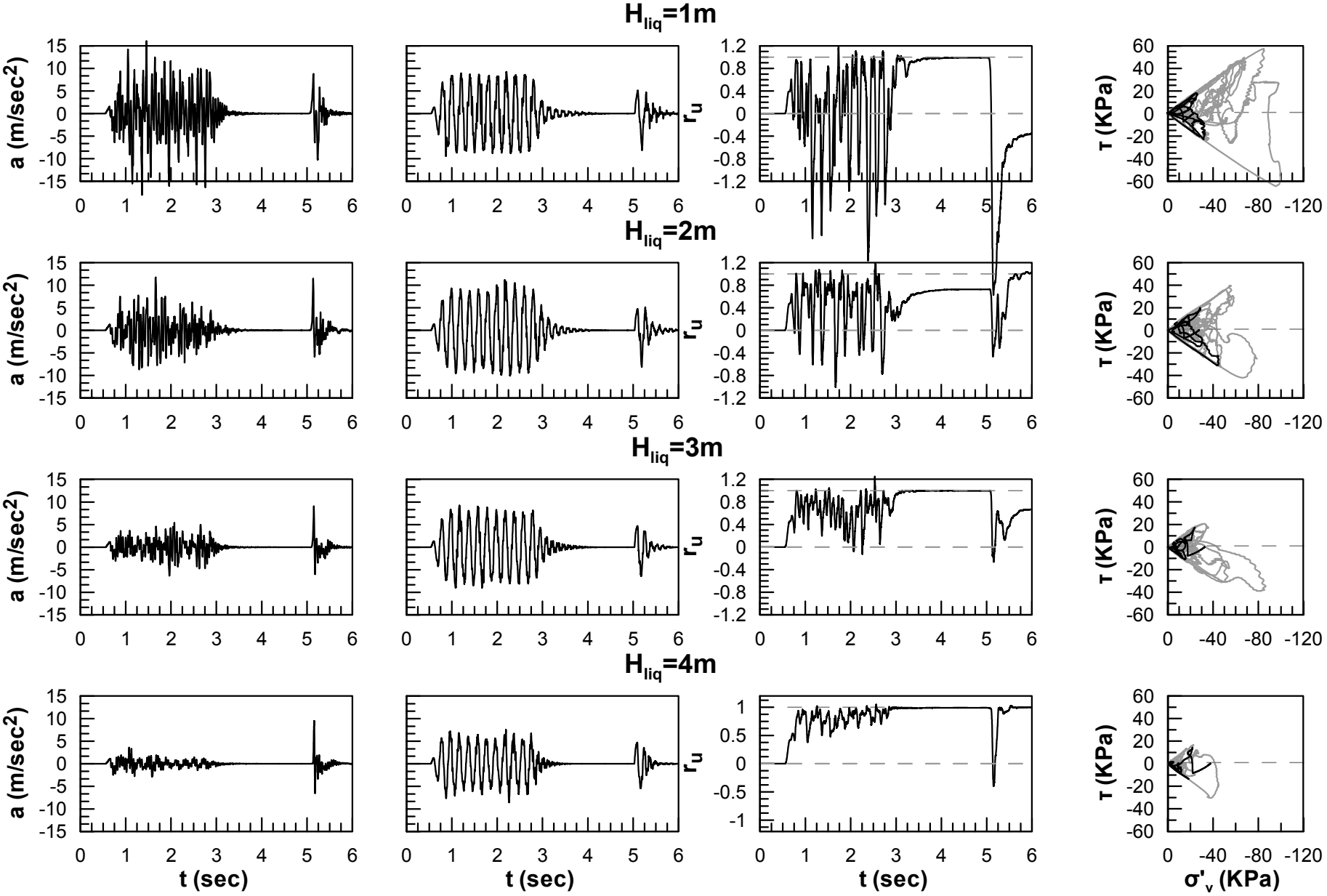
Ανάλυση 6.β



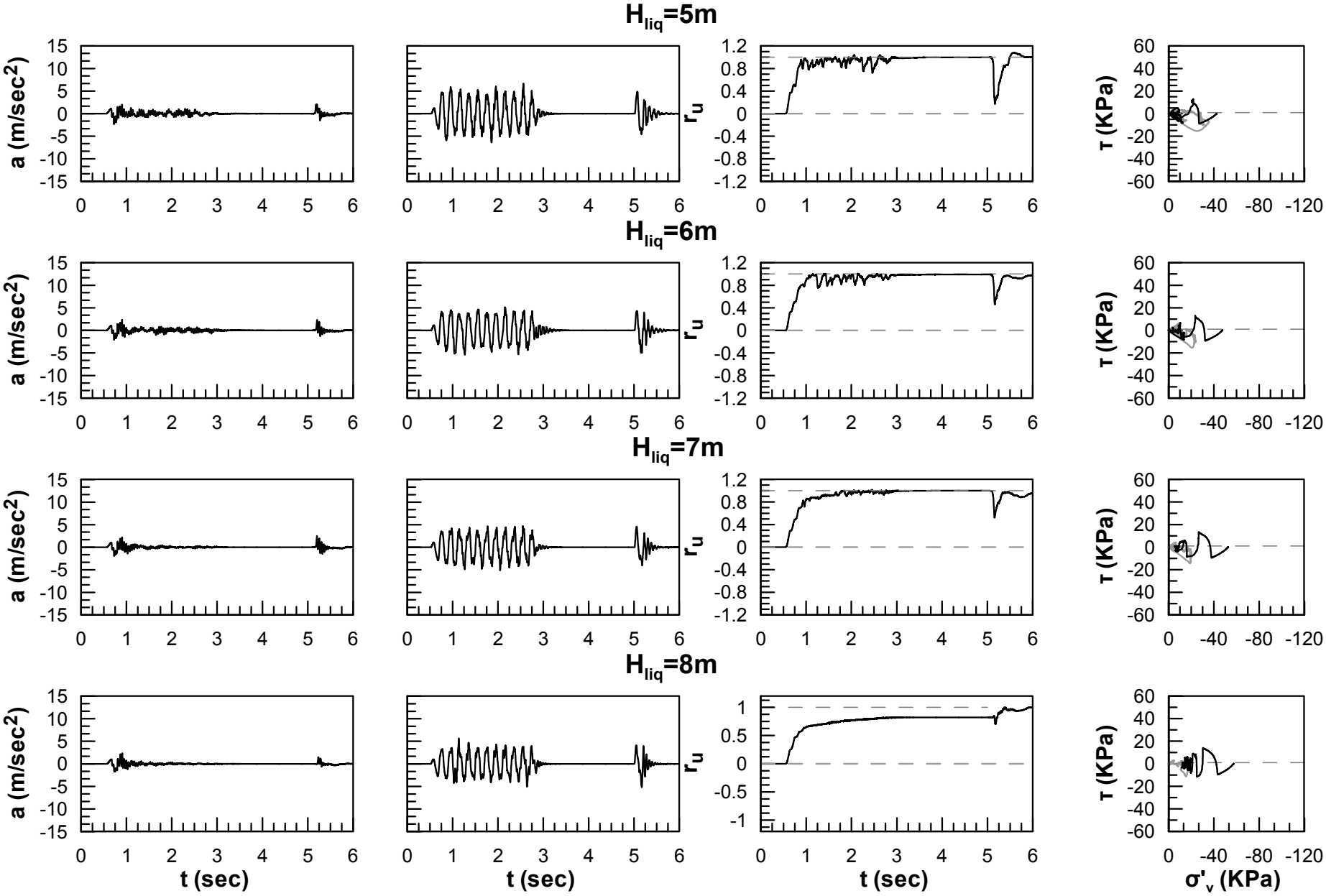
Ανάλυση 6.γ



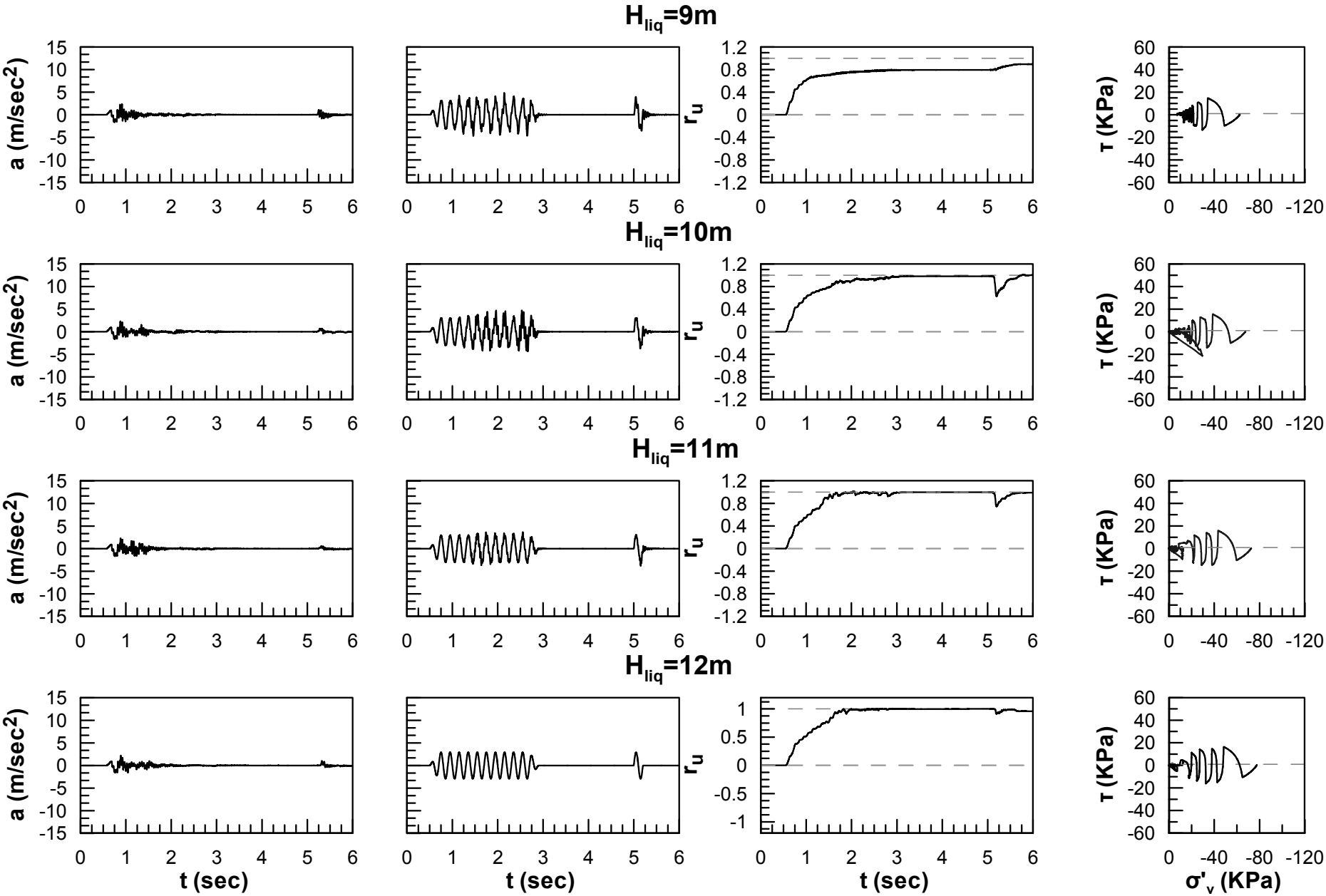
Ανάλυση 7.α



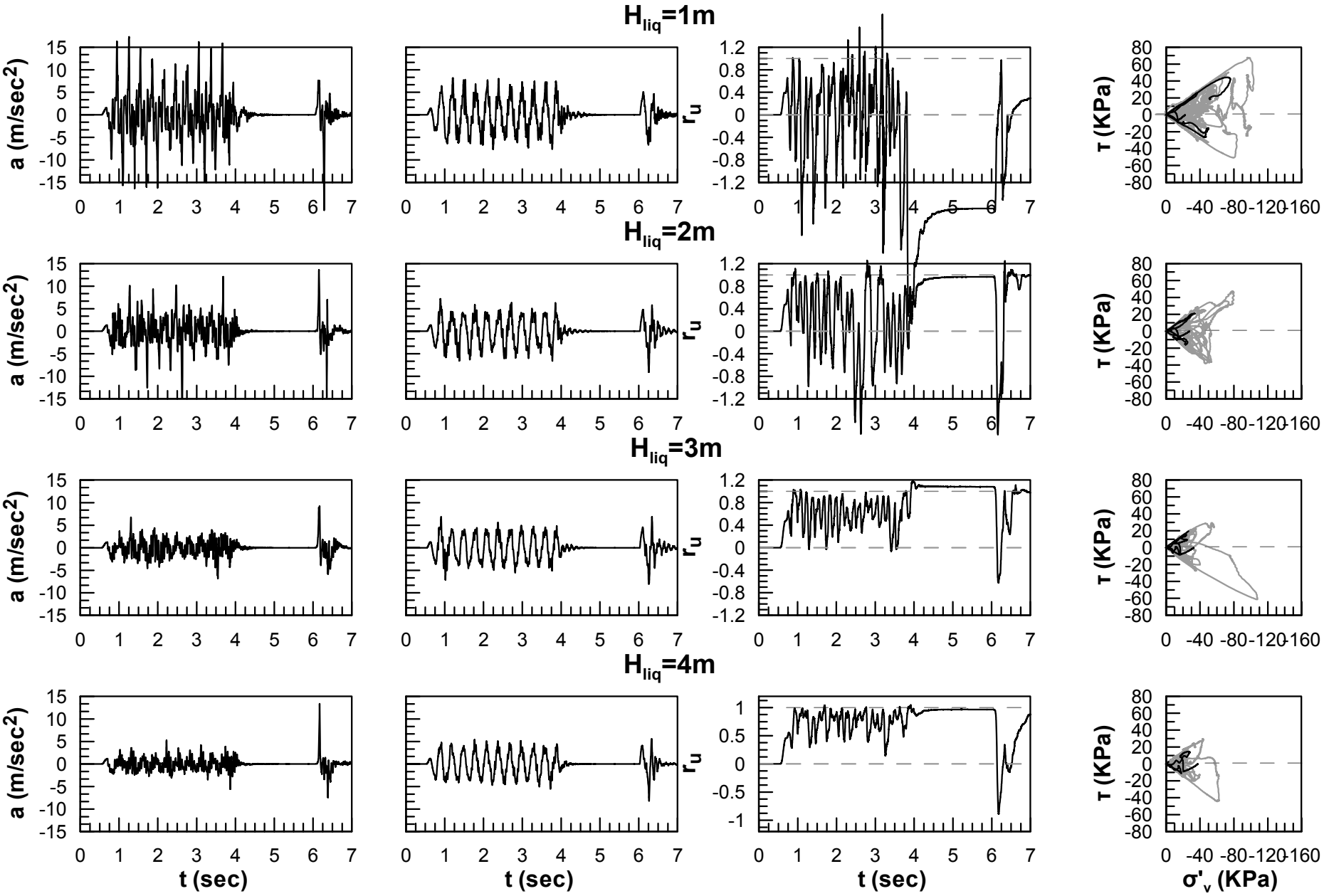
Ανάλυση 7.β



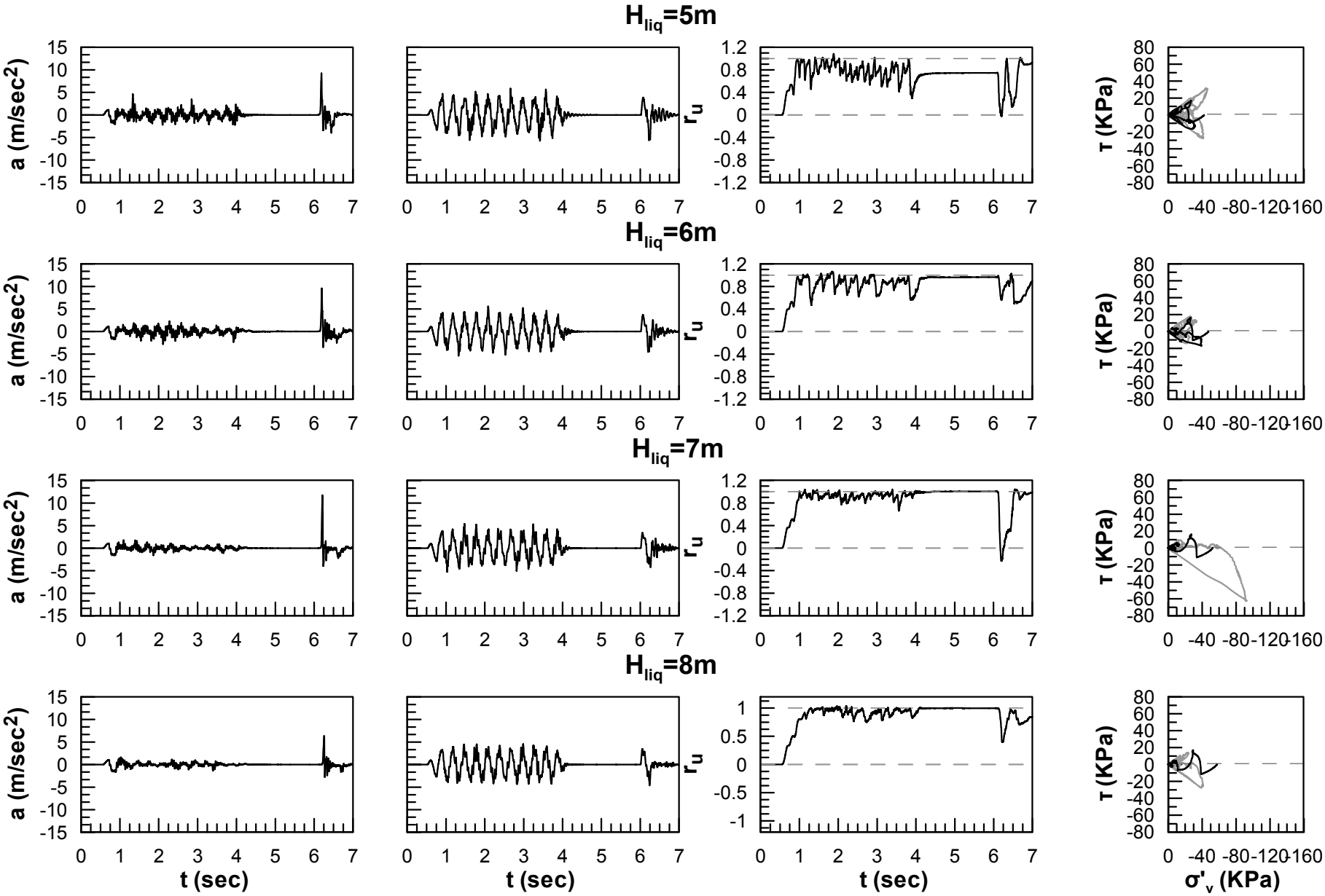
Ανάλυση 7.γ



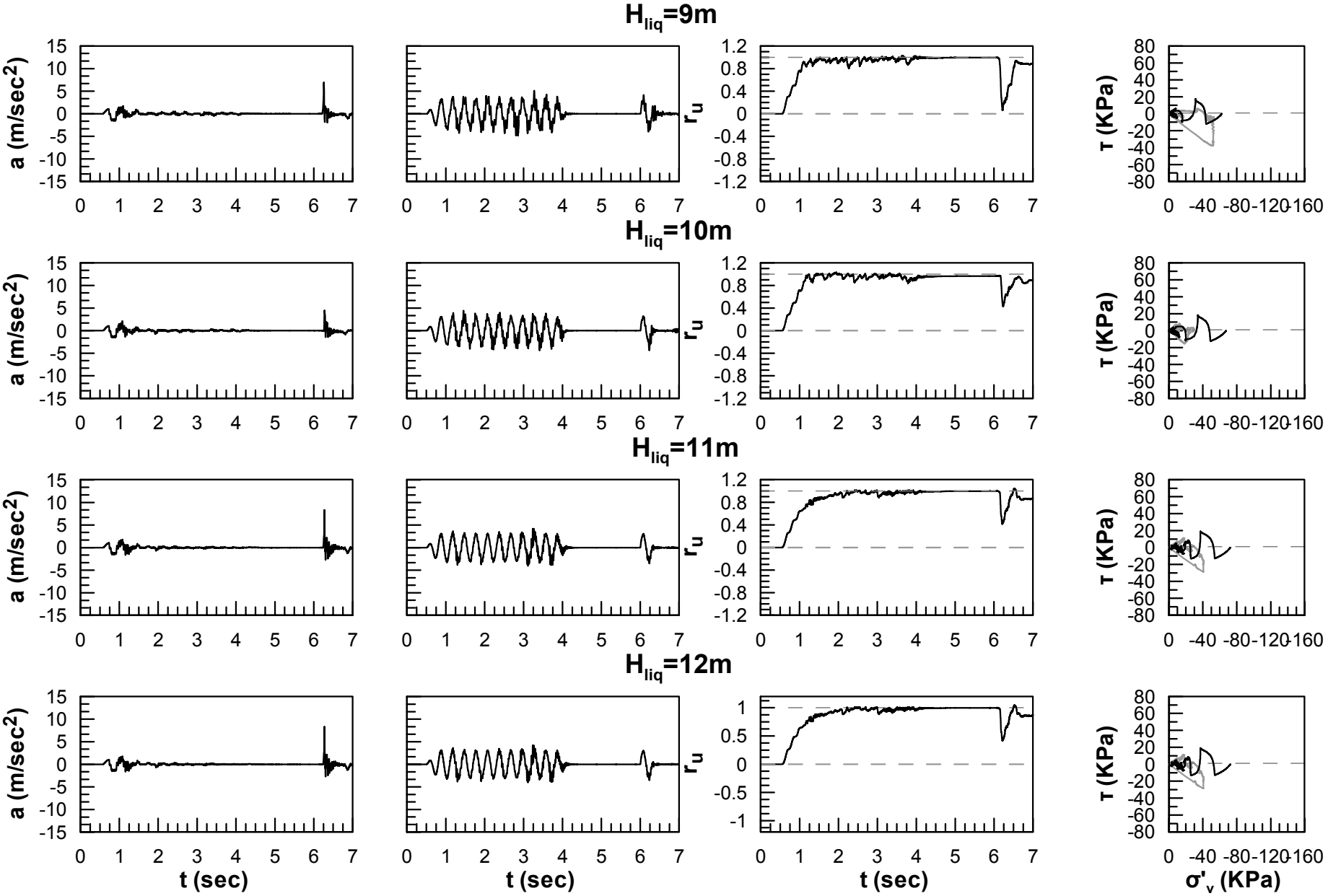
Ανάλυση 8.α



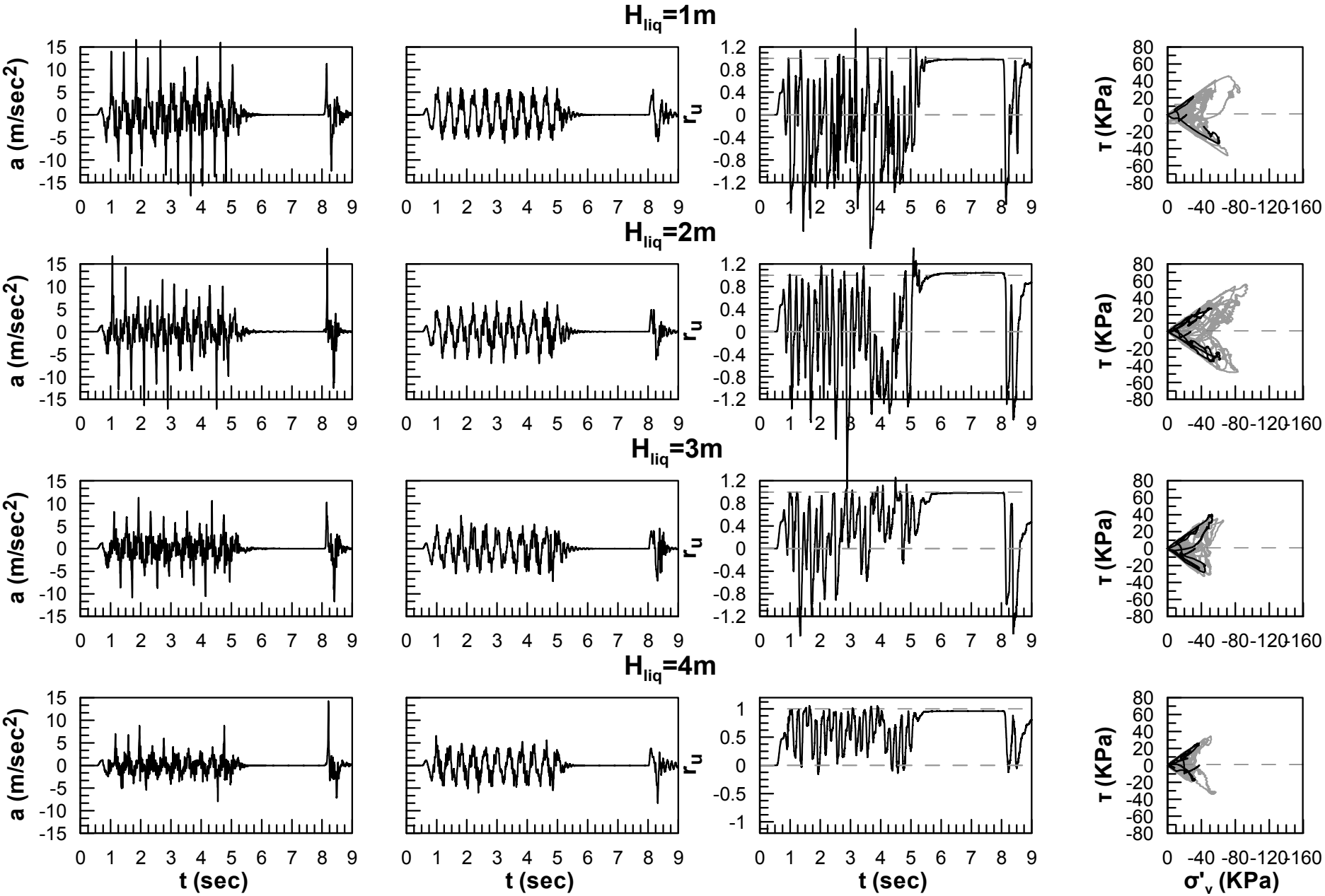
Ανάλυση 8.β



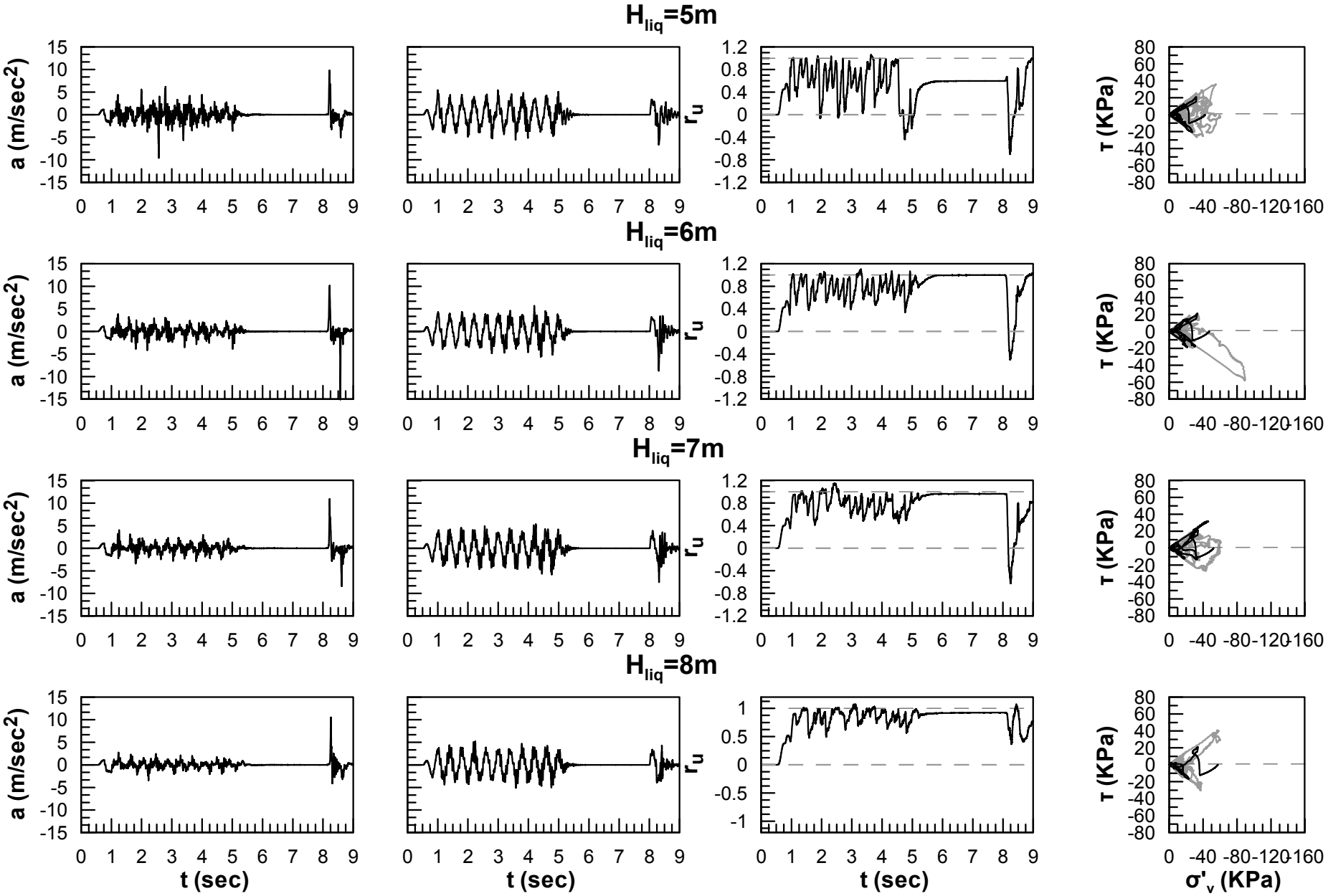
Ανάλυση 8.γ



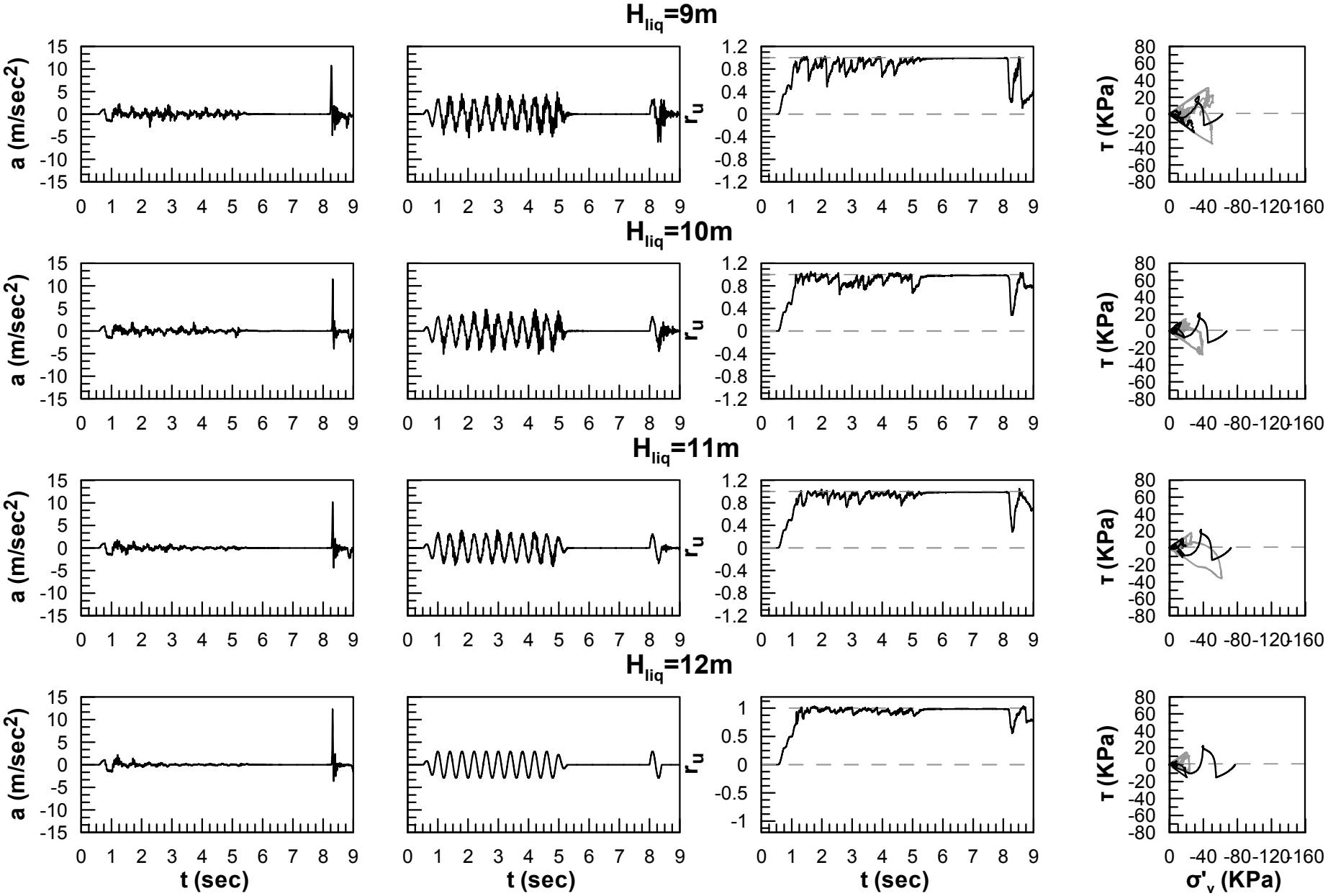
Ανάλυση 9.α



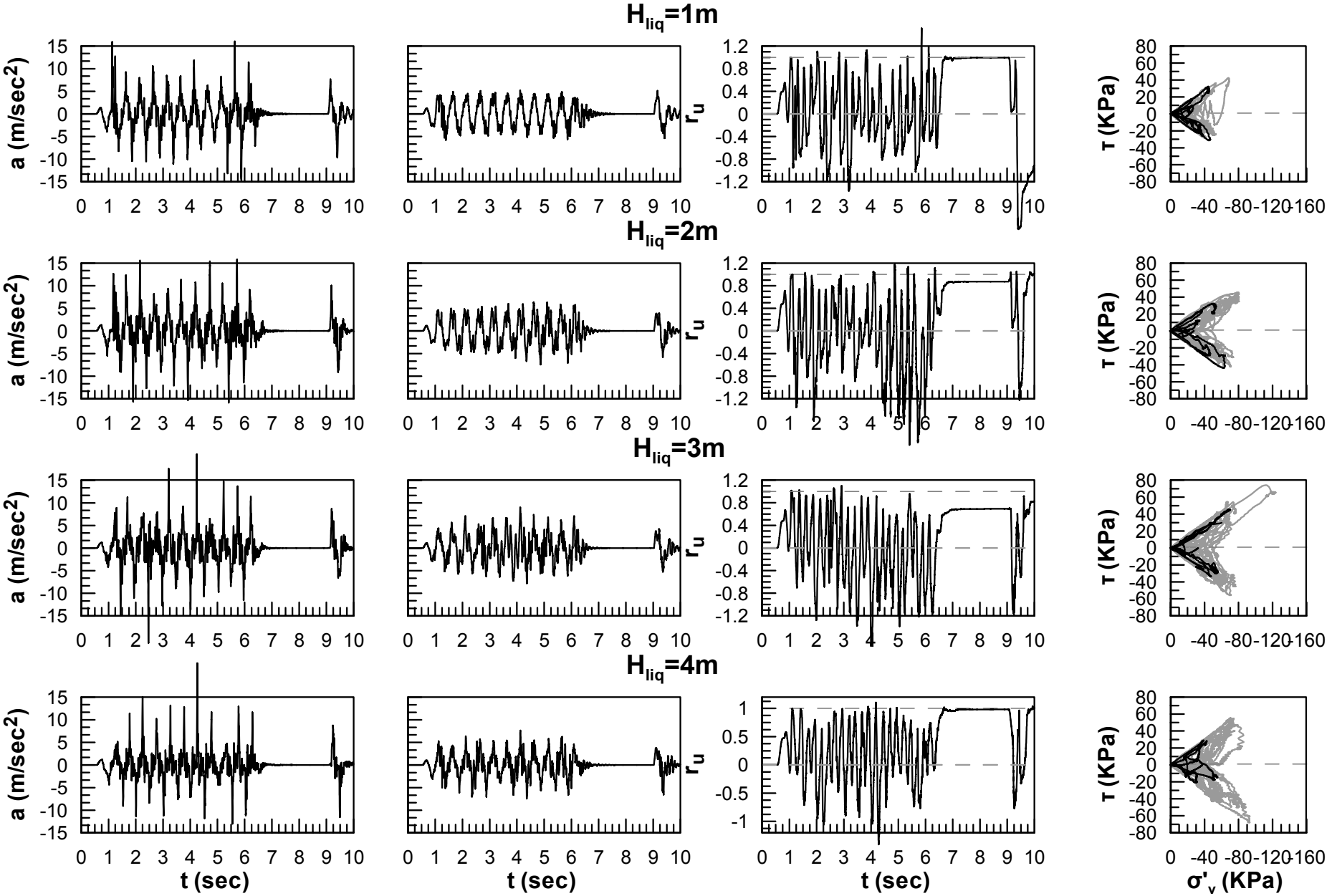
Ανάλυση 9.β



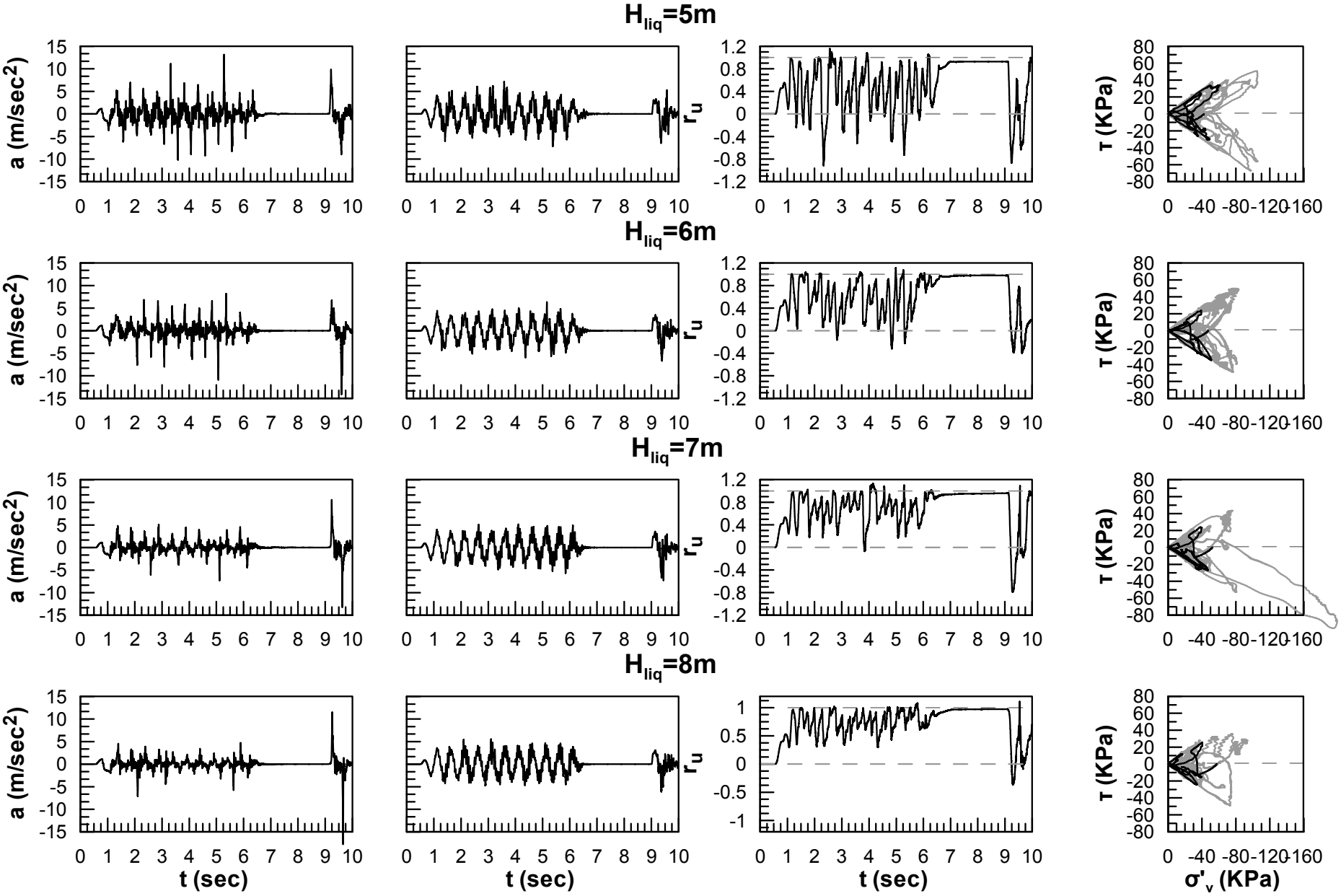
Ανάλυση 9.γ



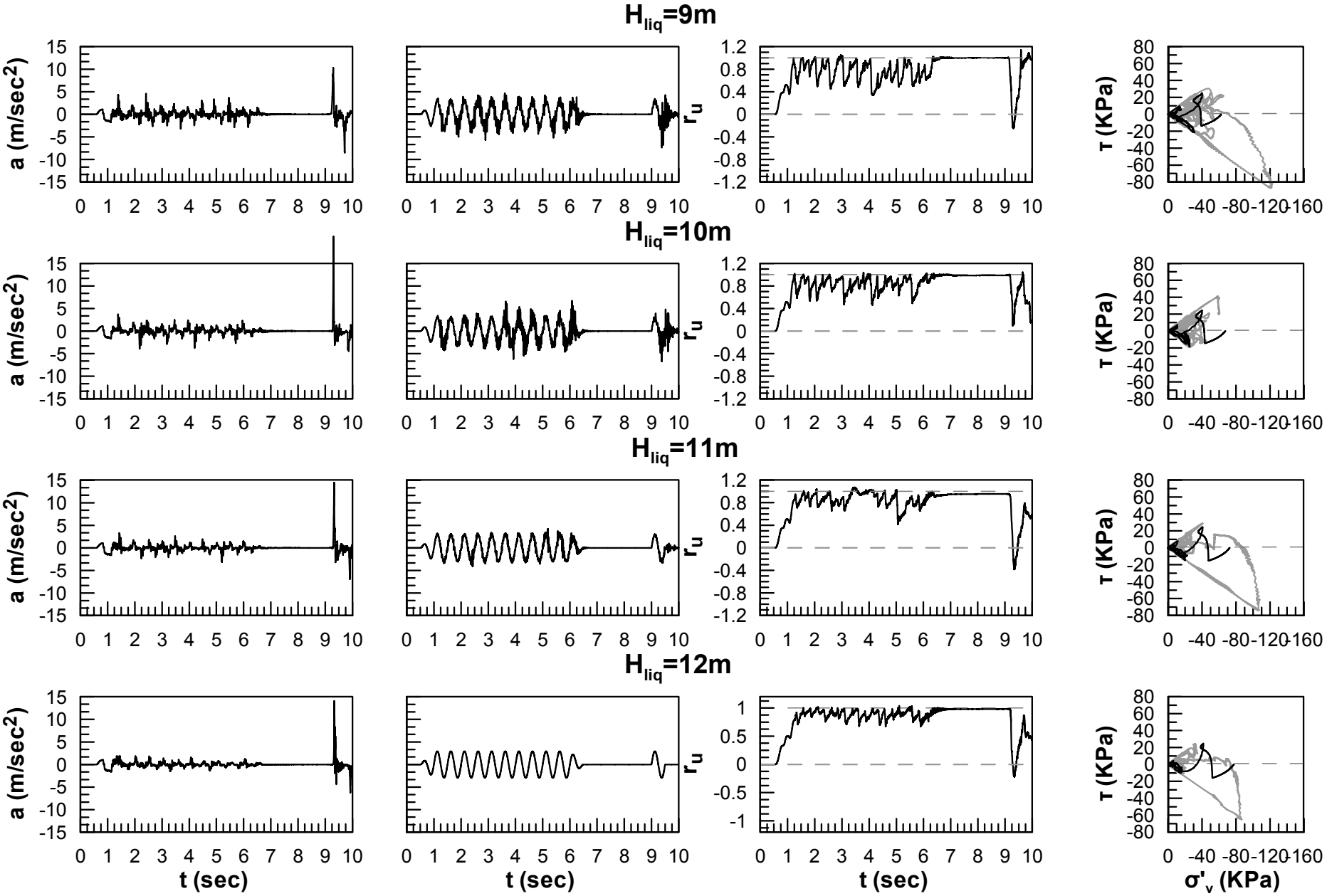
Ανάλυση 10.α



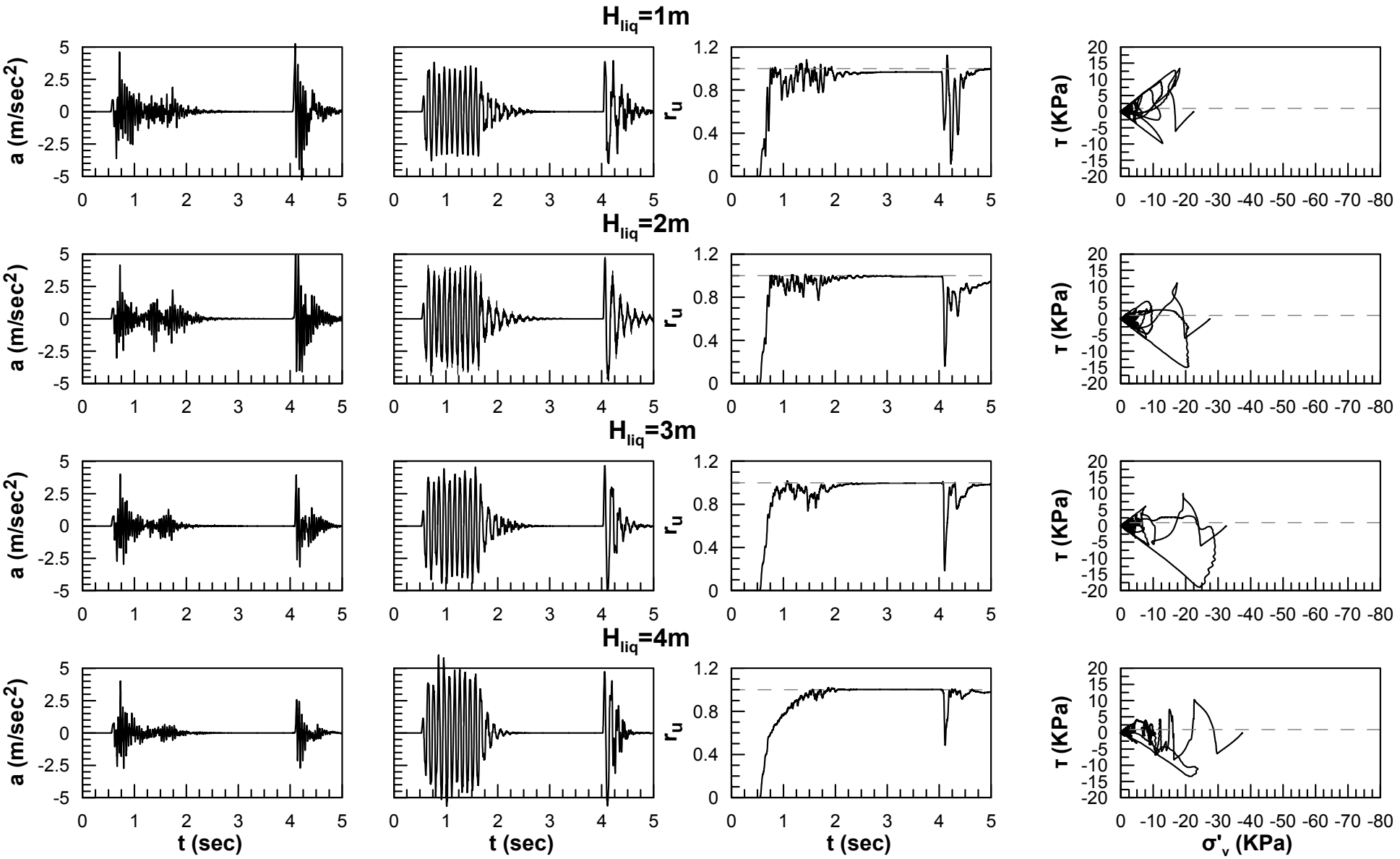
Ανάλυση 10.β



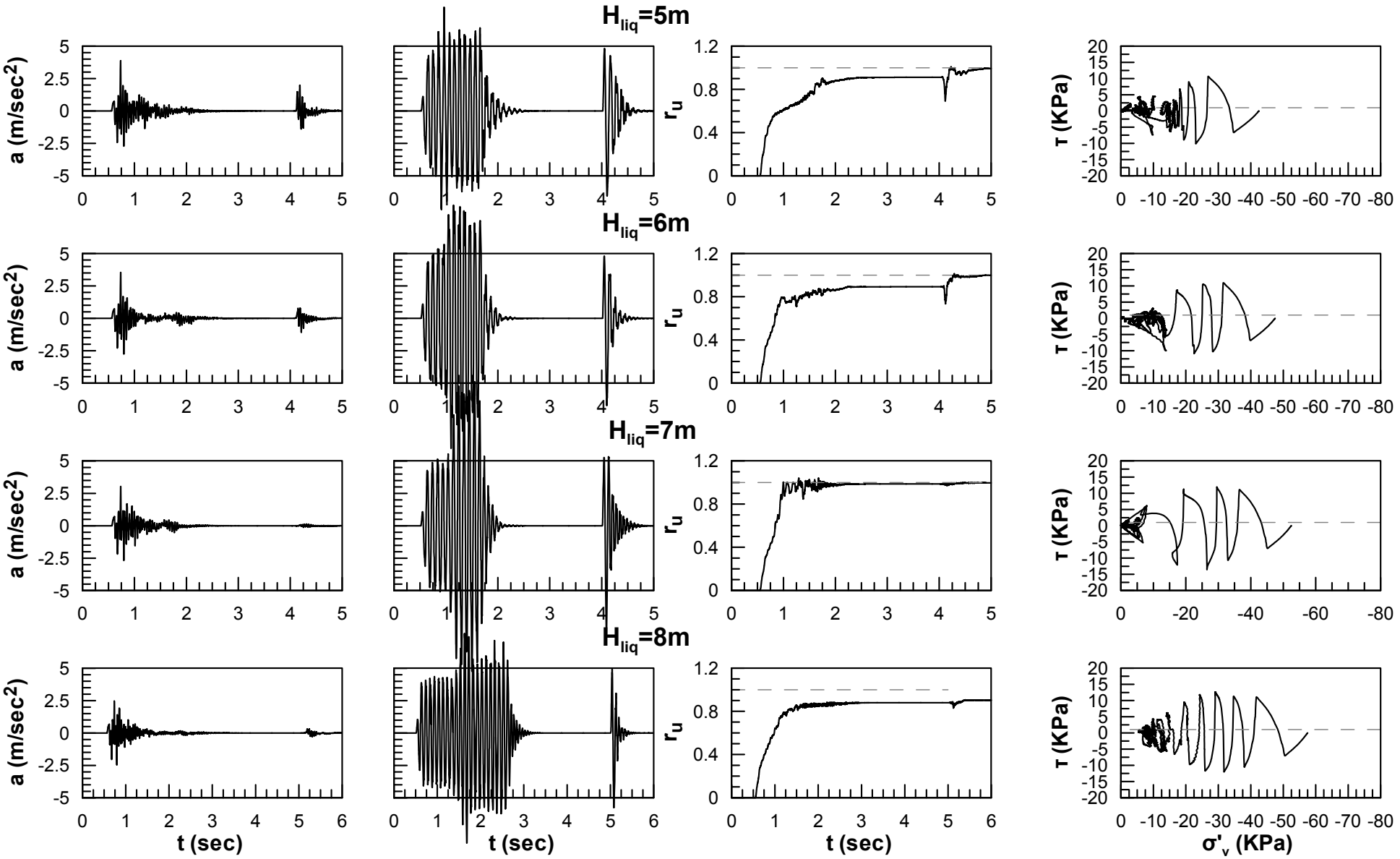
Ανάλυση 10.γ



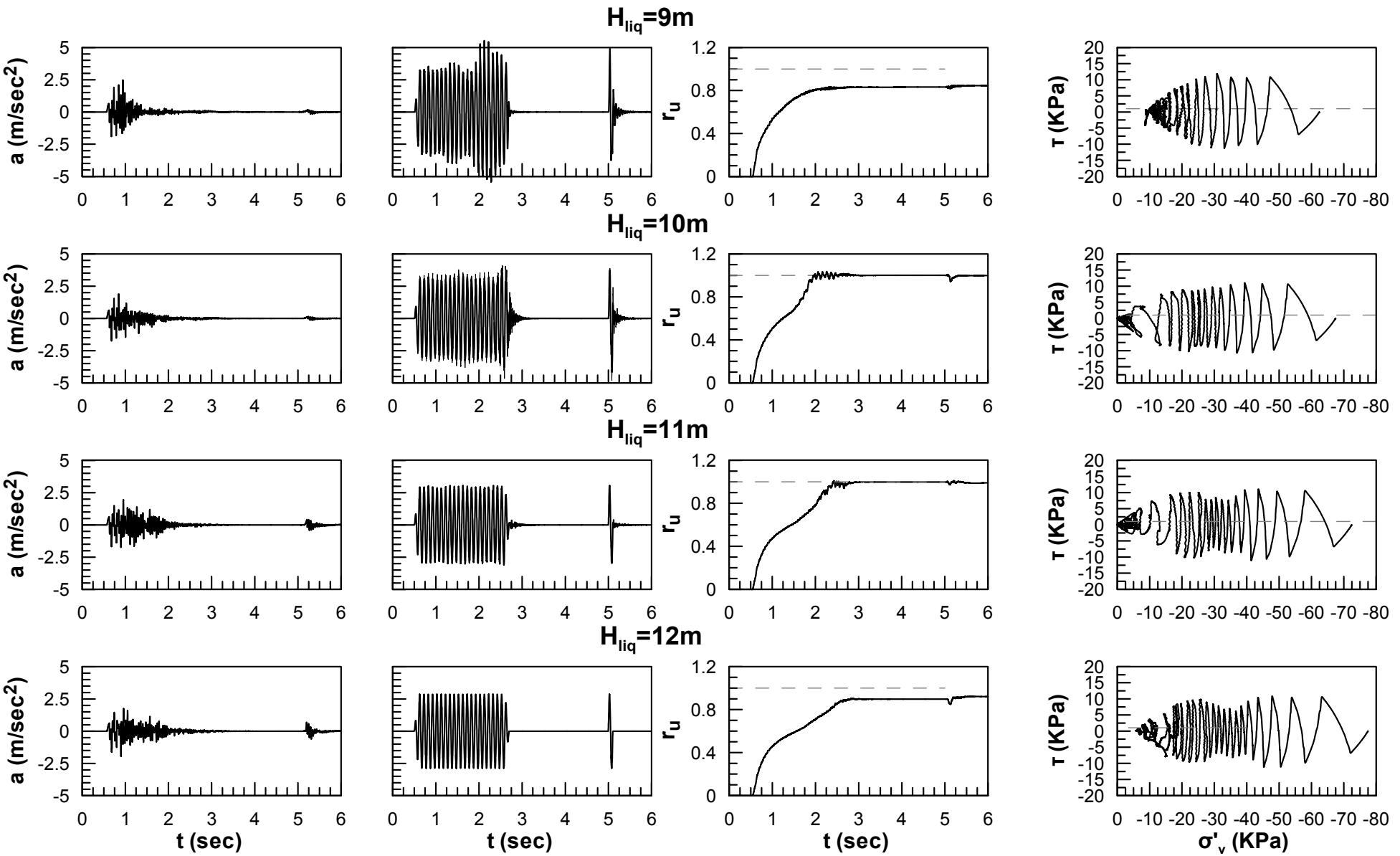
Ανάλυση 11.α



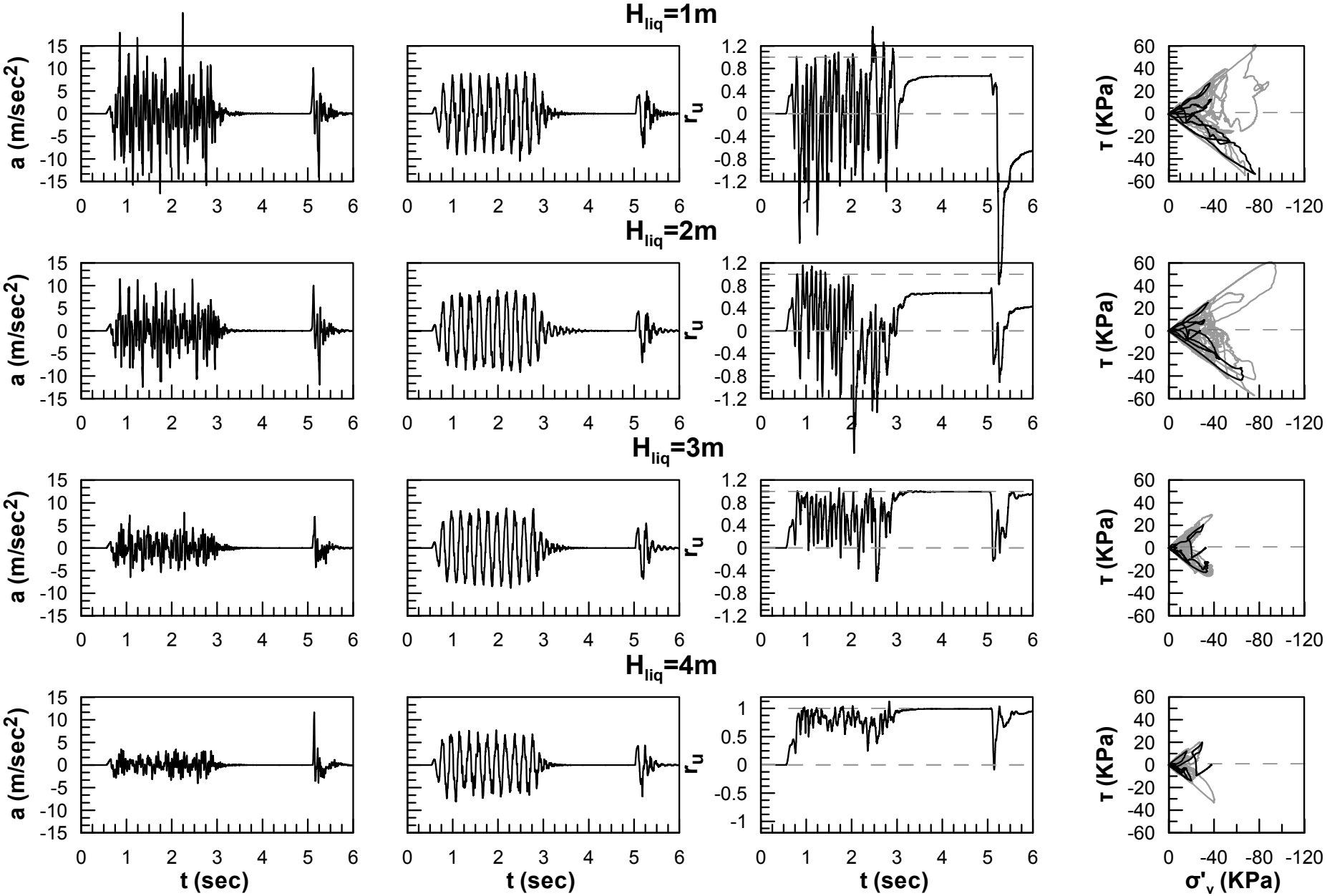
Ανάλυση 11.β



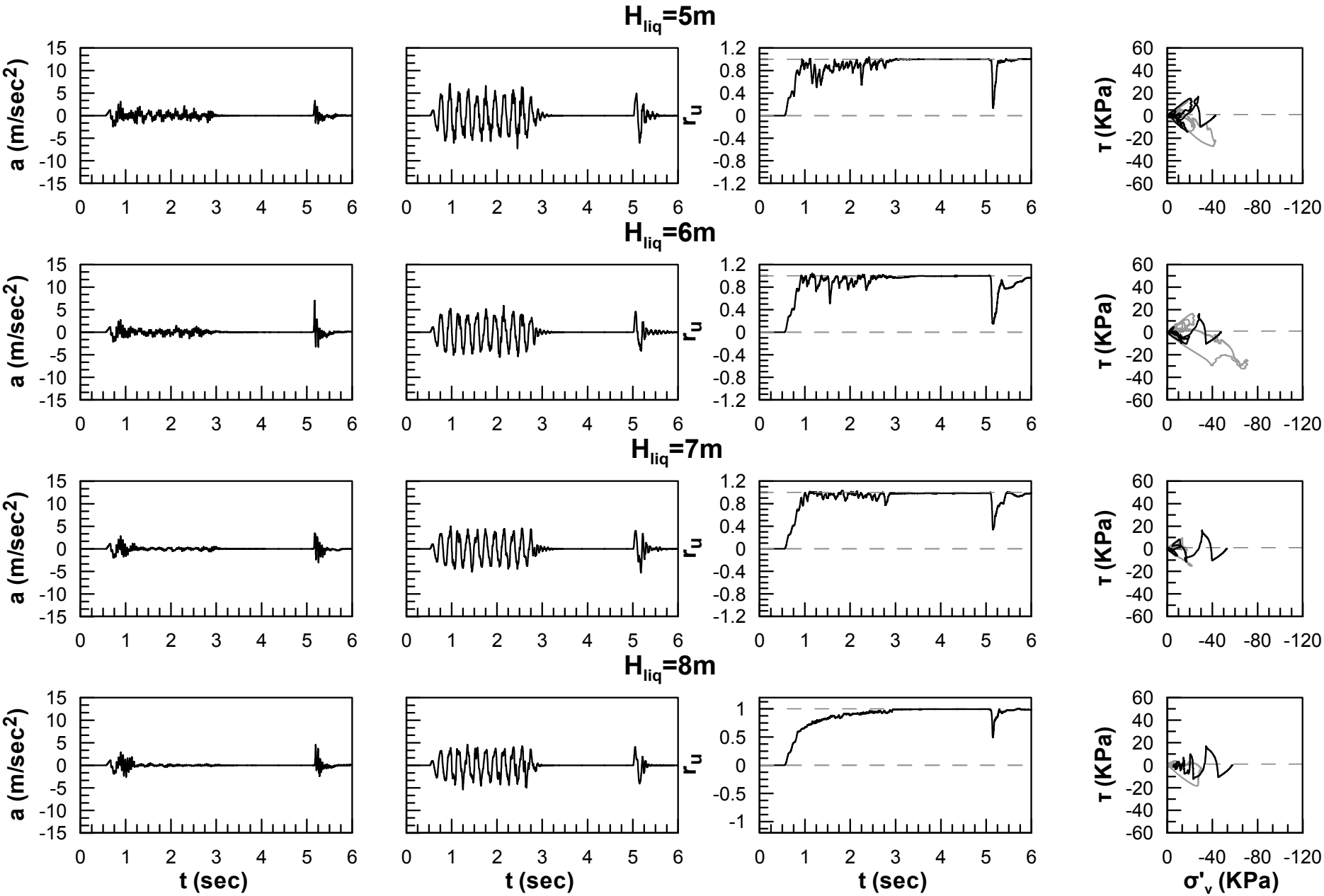
Ανάλυση 11.γ



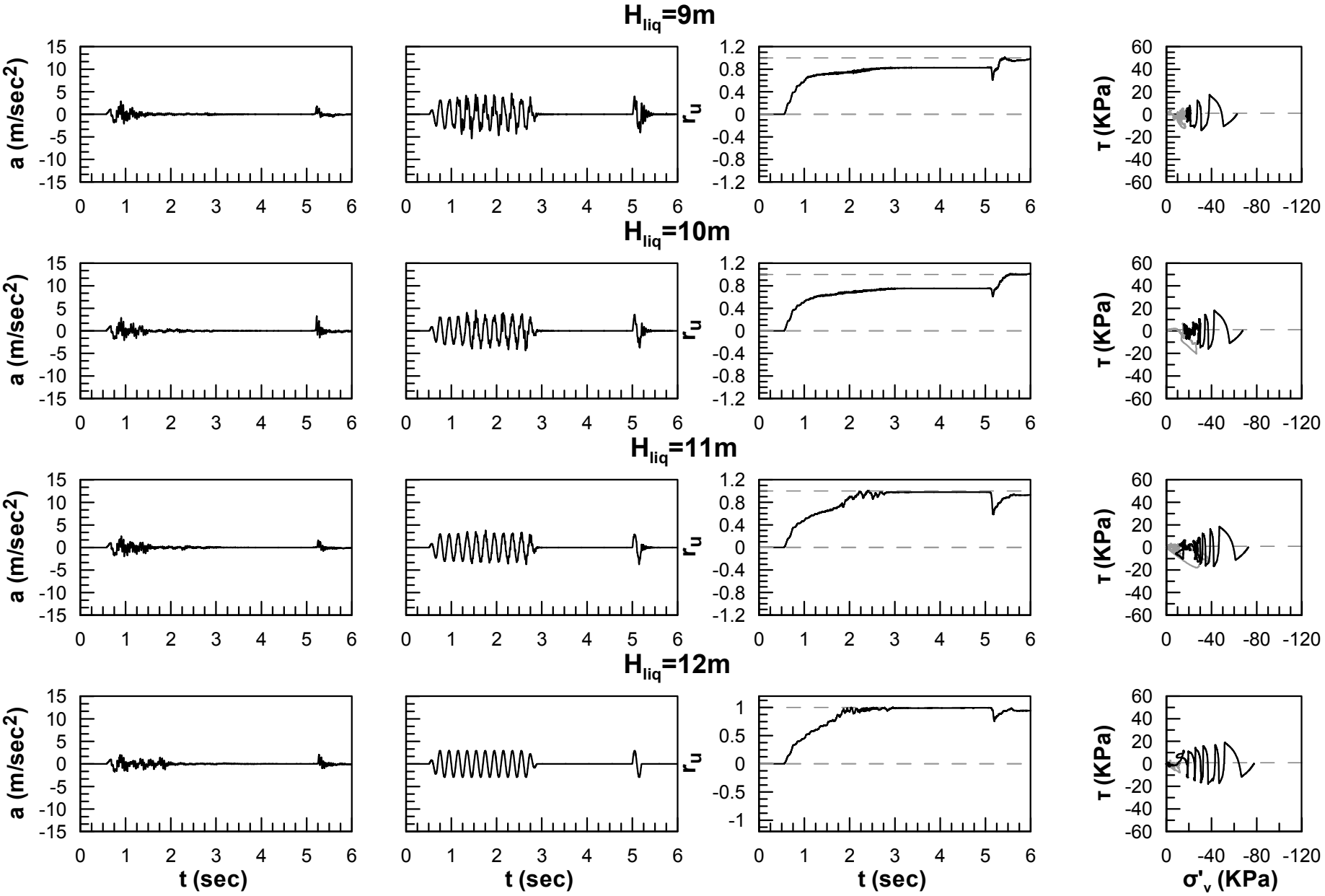
Ανάλυση 12.α



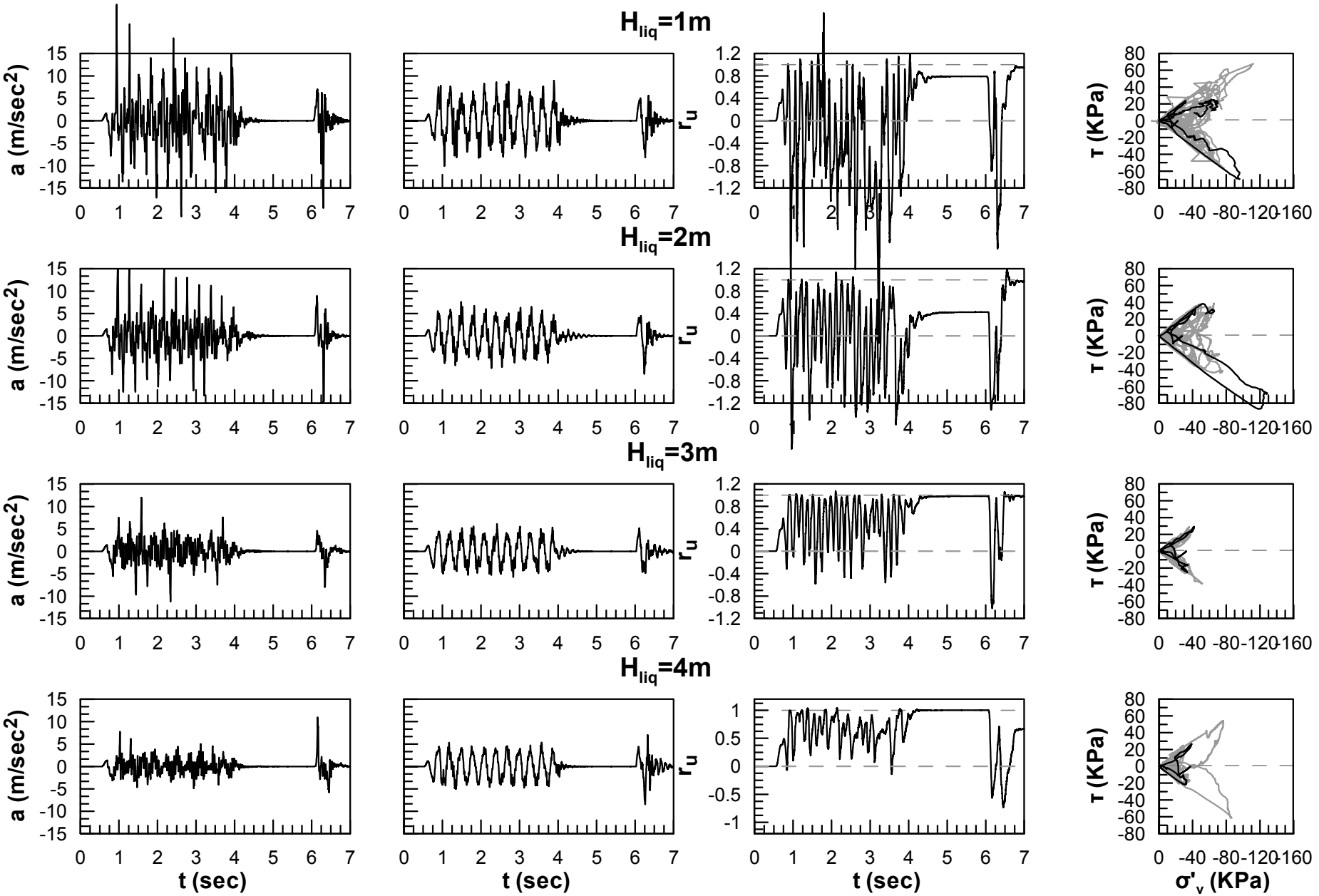
Ανάλυση 12.β



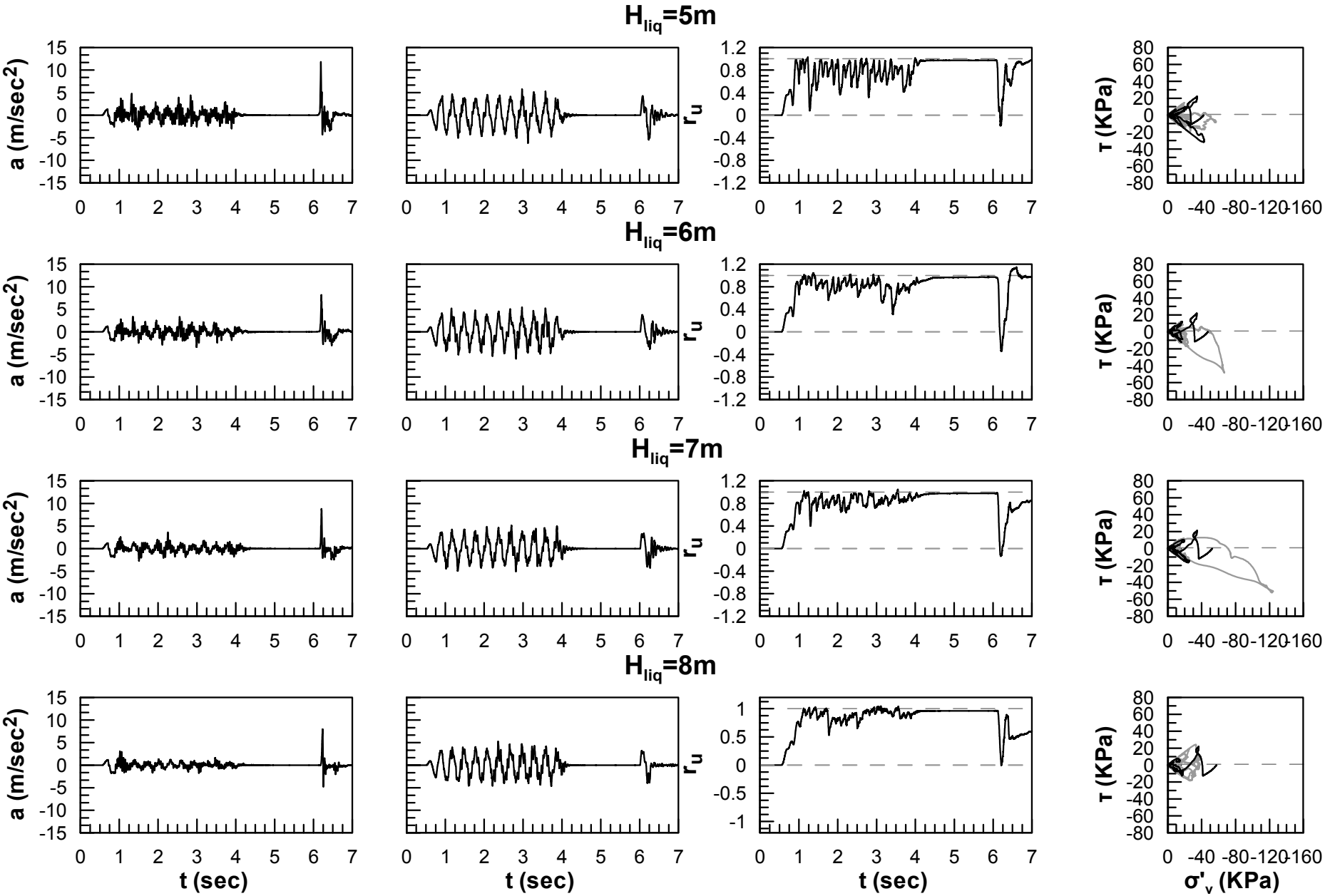
Ανάλυση 12.γ



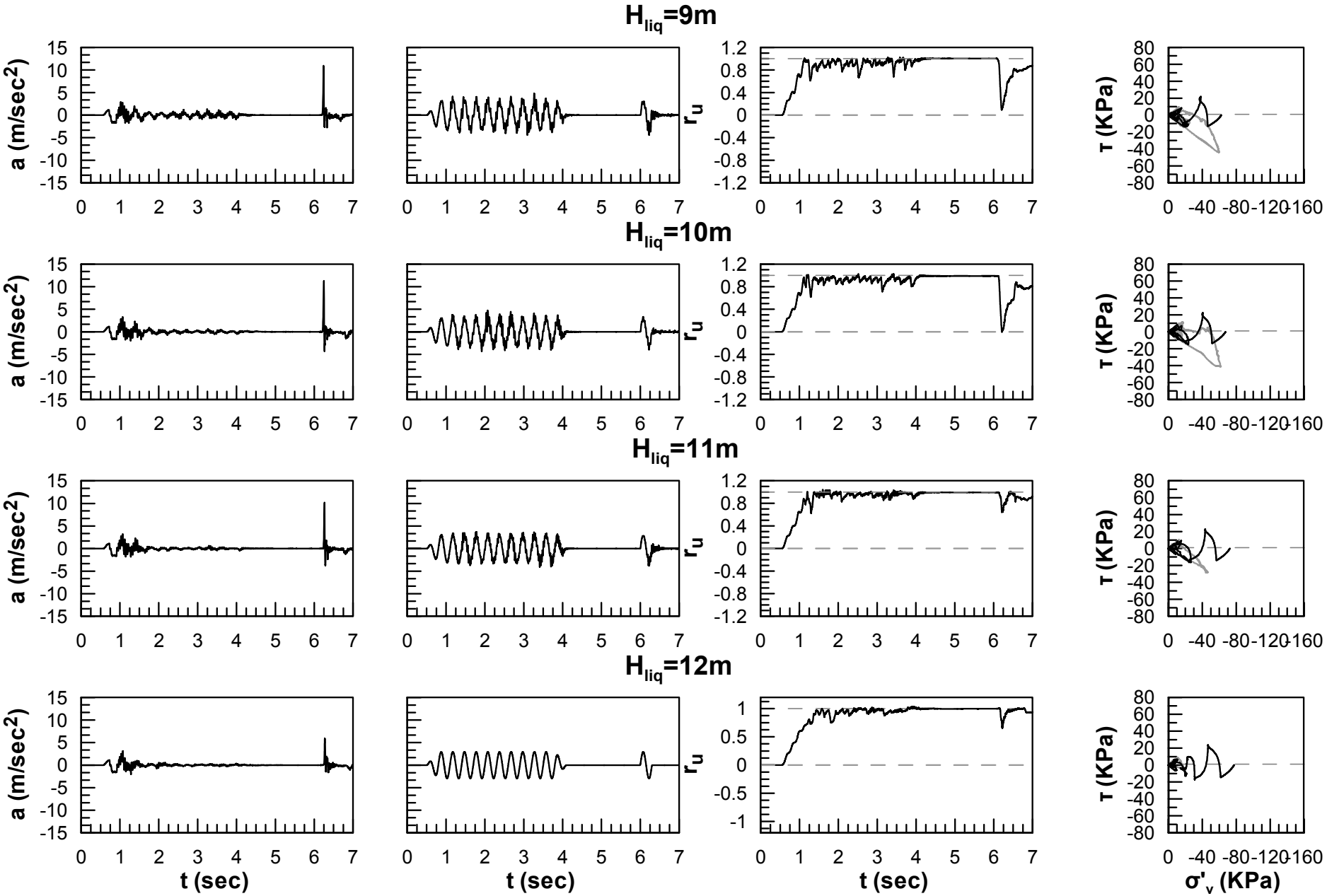
Ανάλυση 13.α



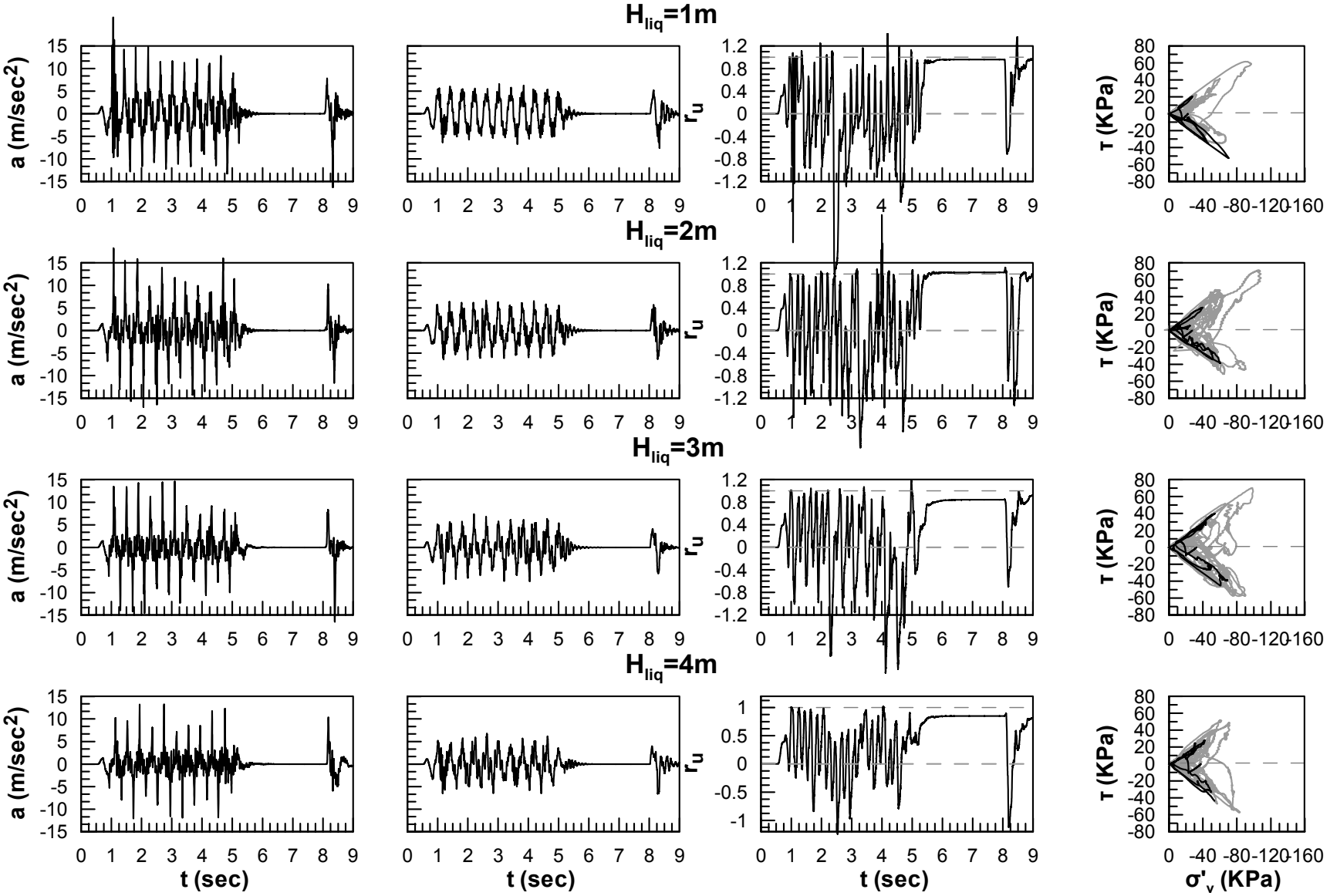
Ανάλυση 13.β



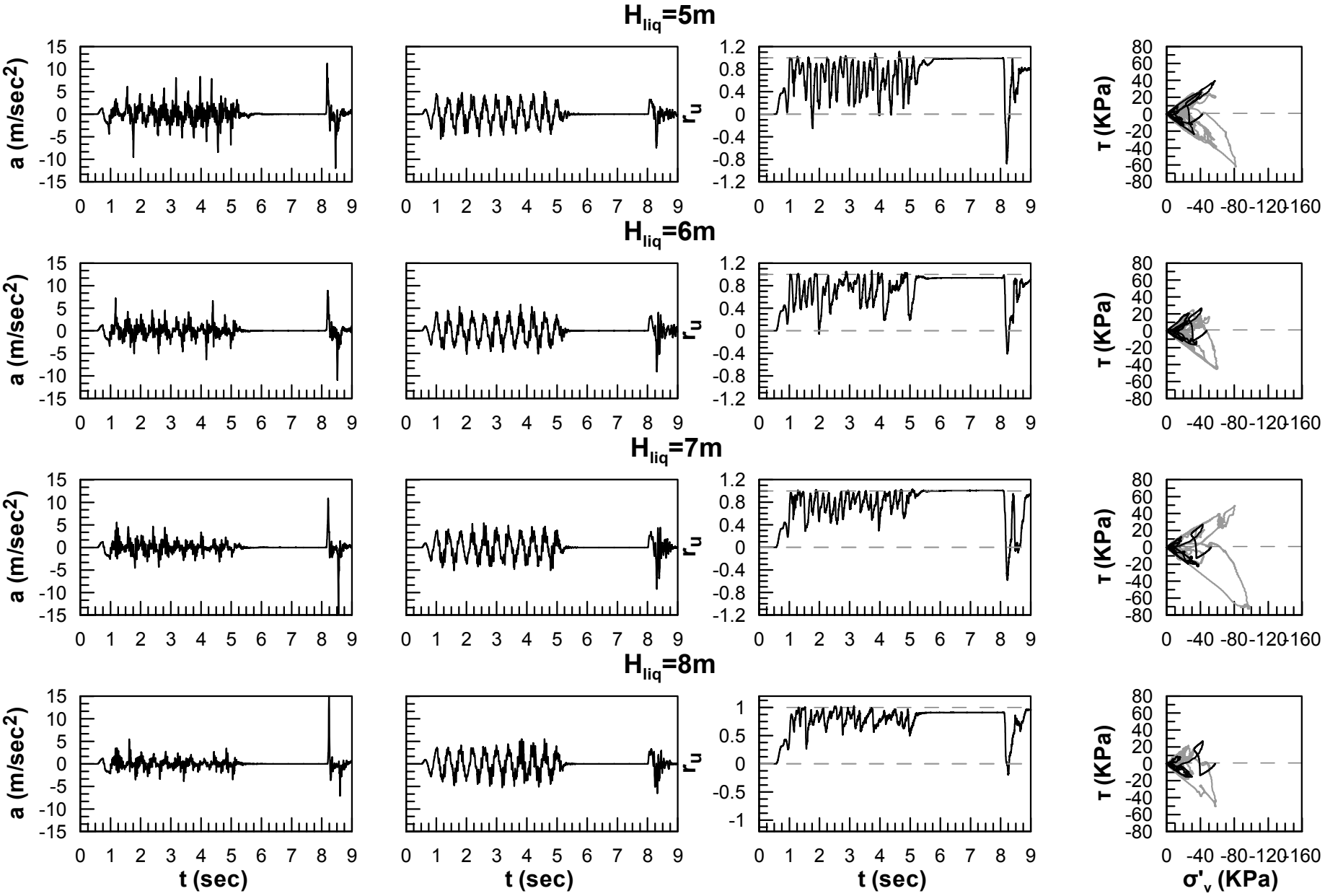
Ανάλυση 13.γ



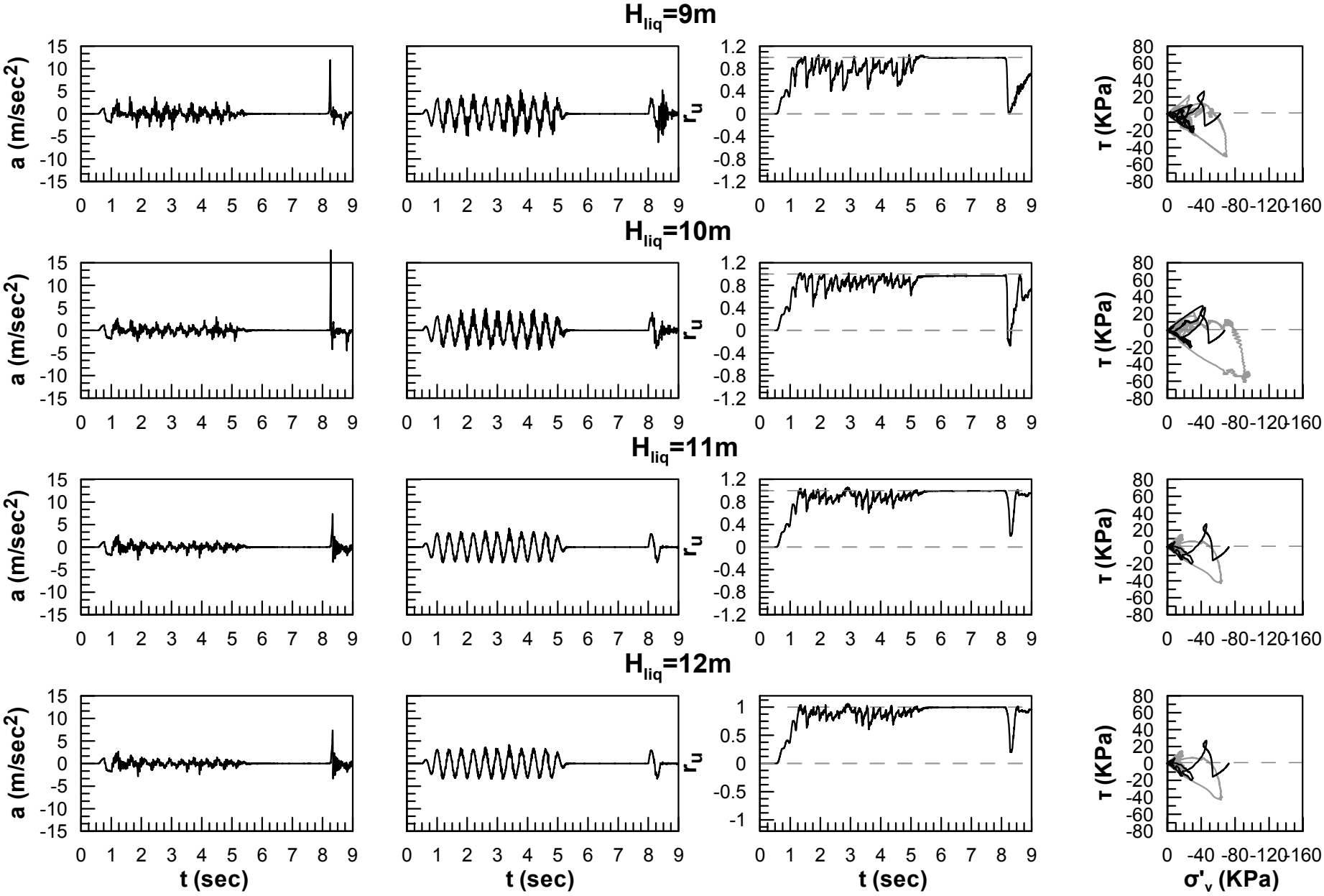
Ανάλυση 14.α



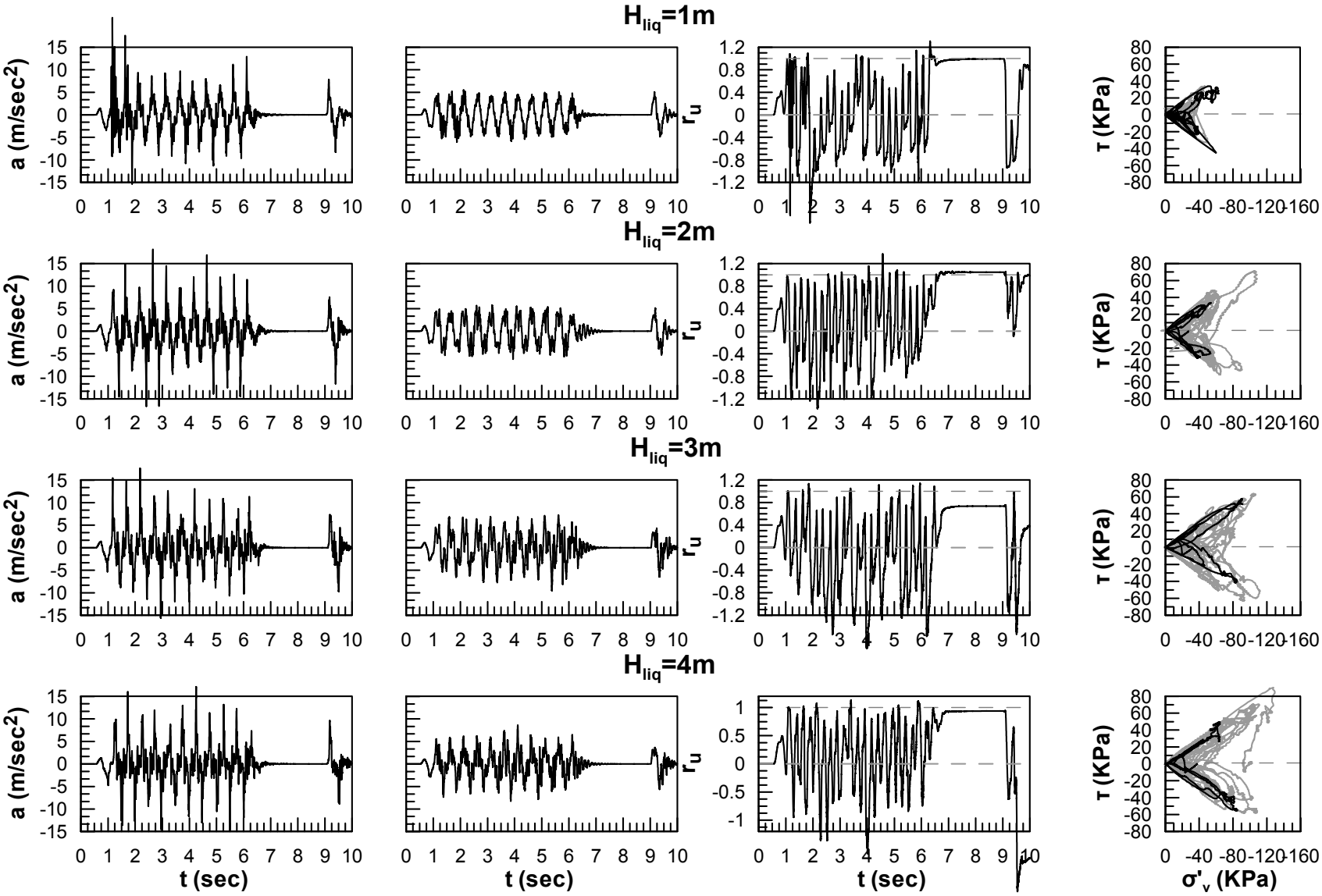
Ανάλυση 14.β



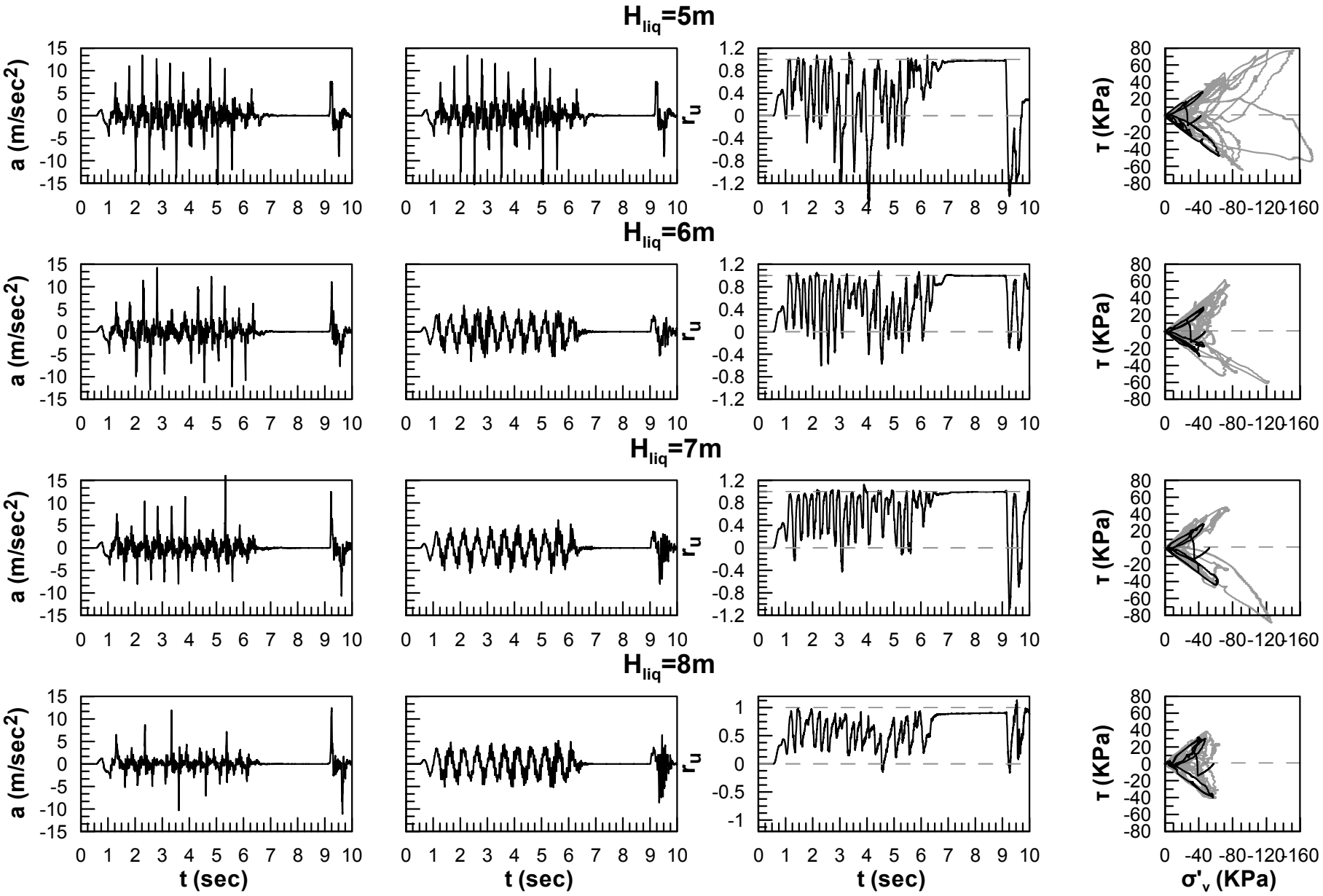
Ανάλυση 14.γ



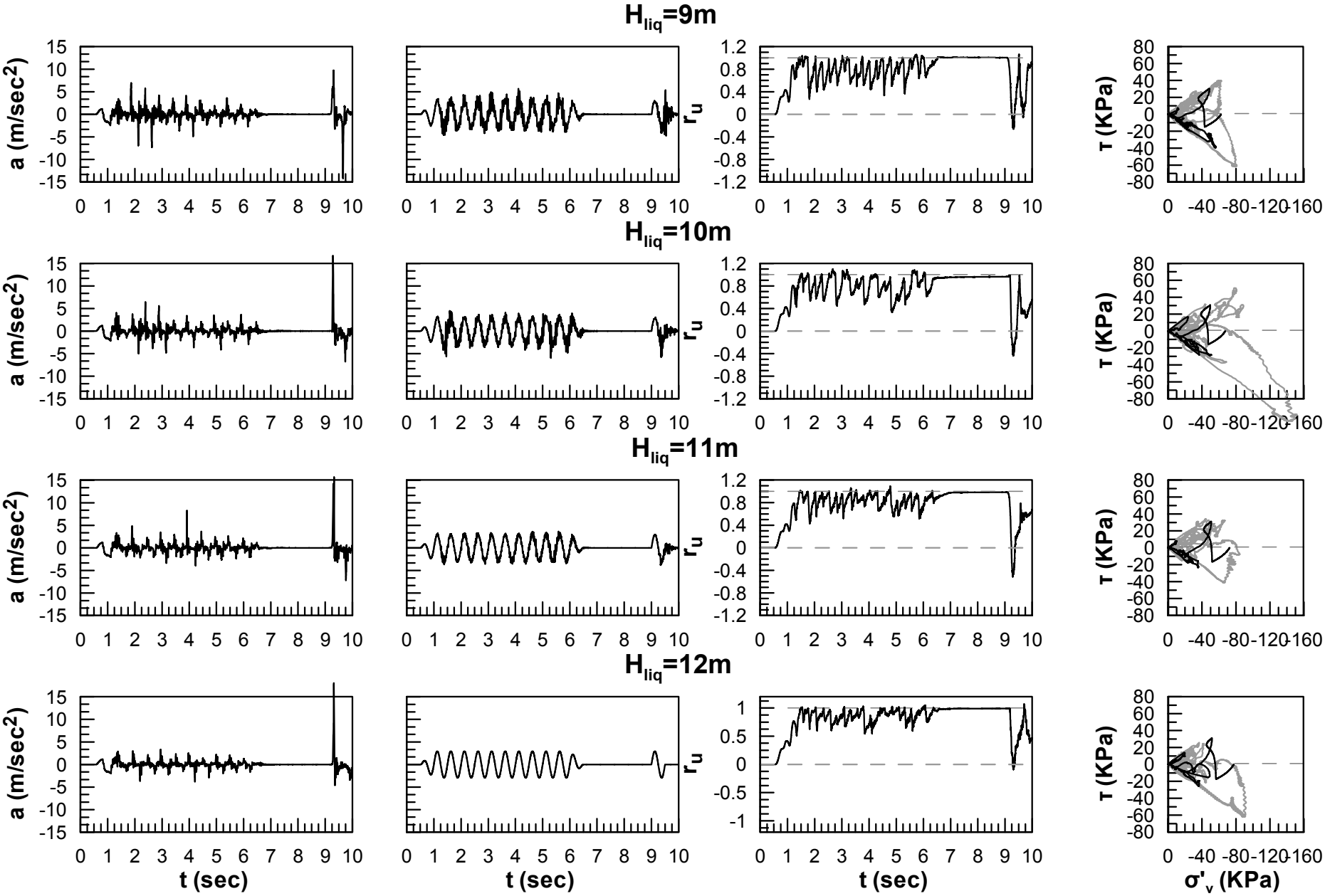
Ανάλυση 15.α



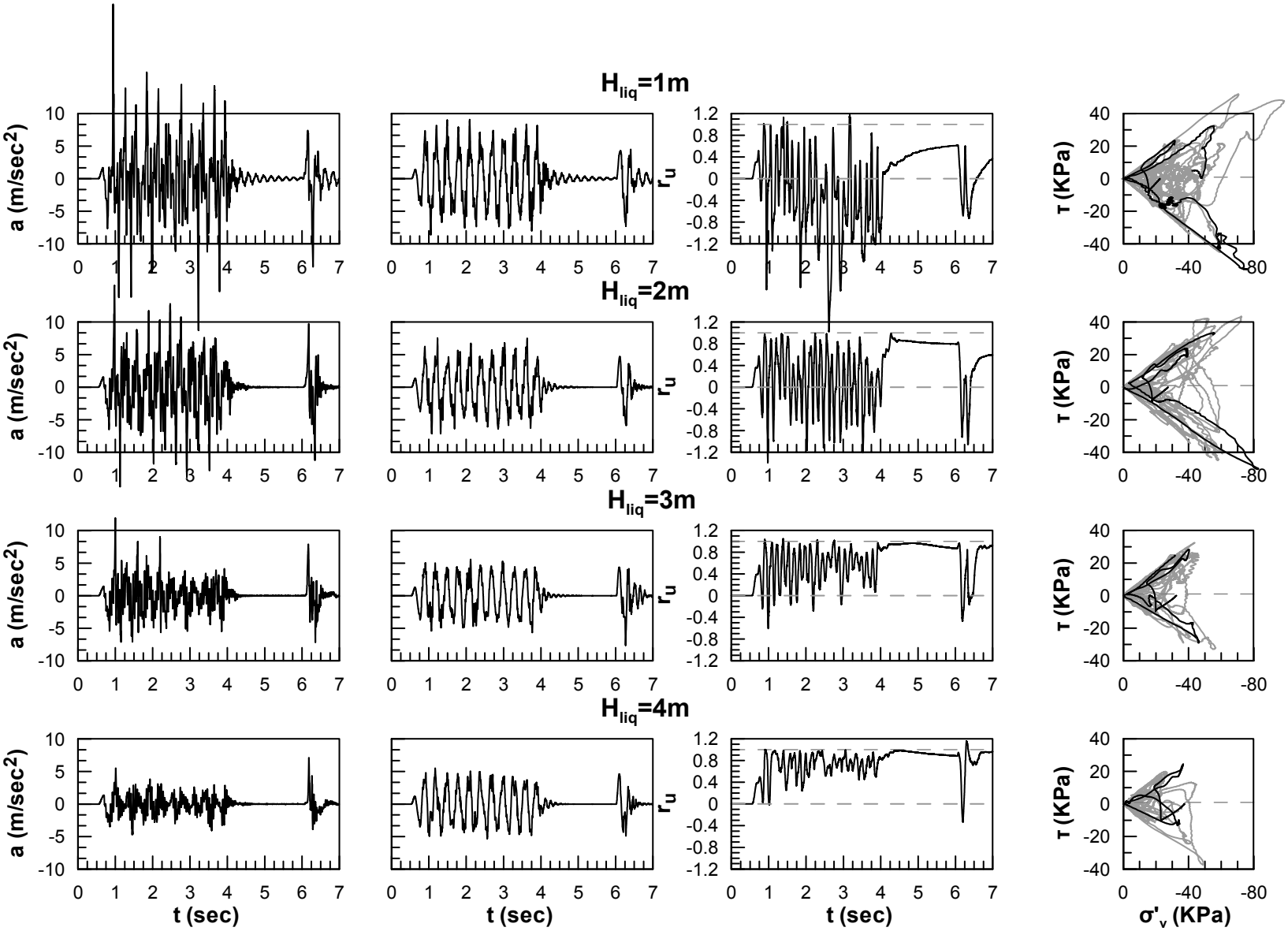
Ανάλυση 15.β



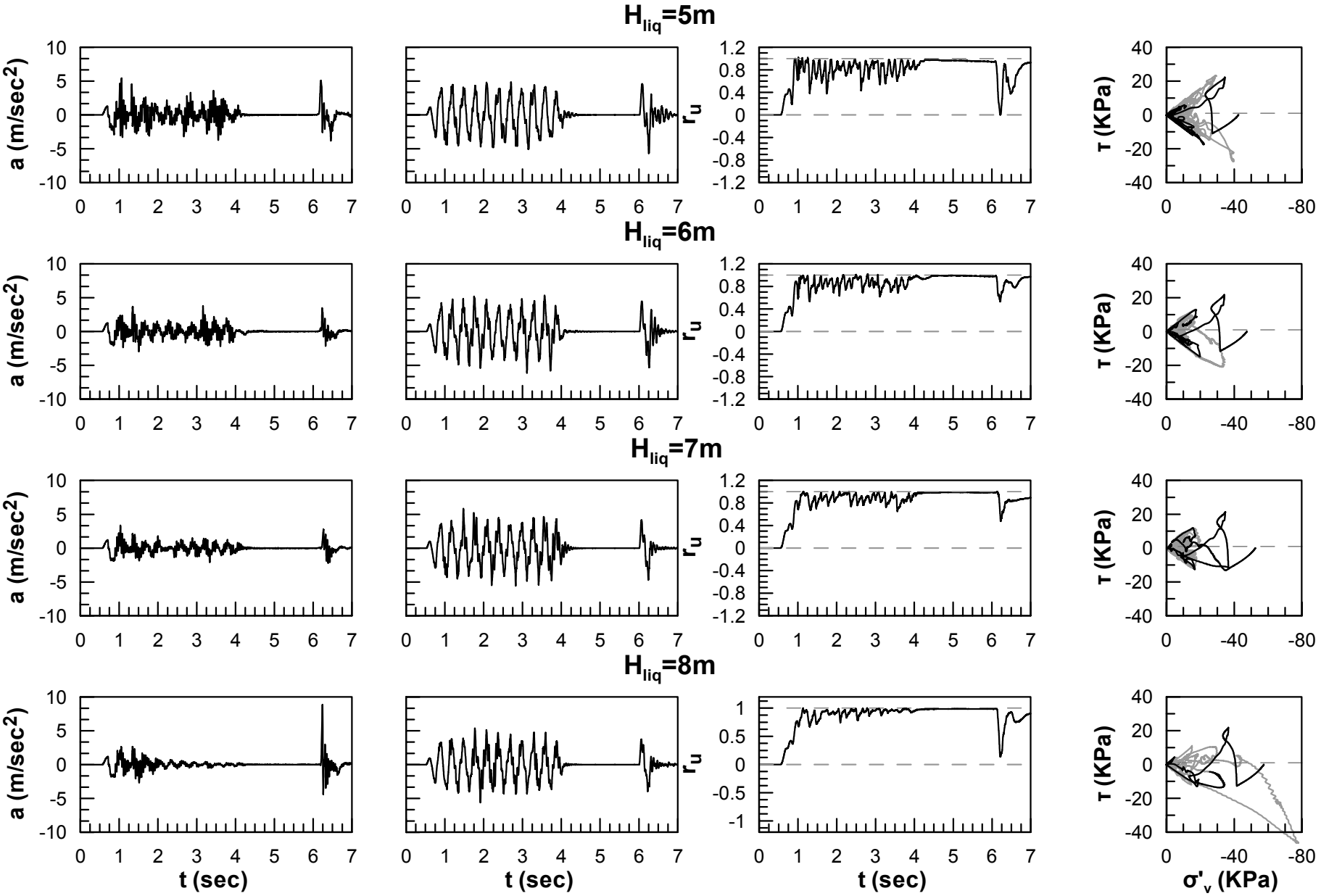
Ανάλυση 15.γ



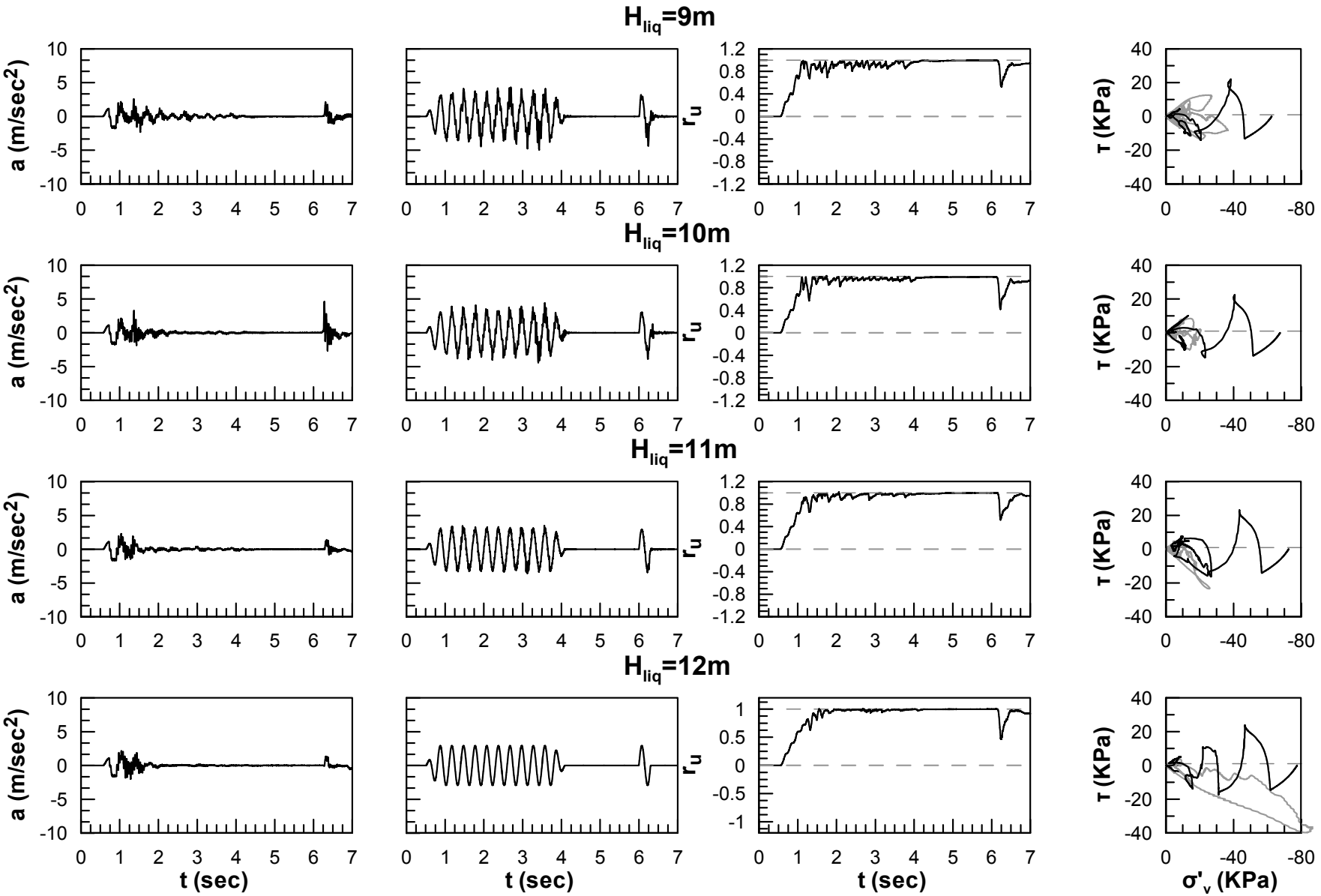
Ανάλυση 16.α



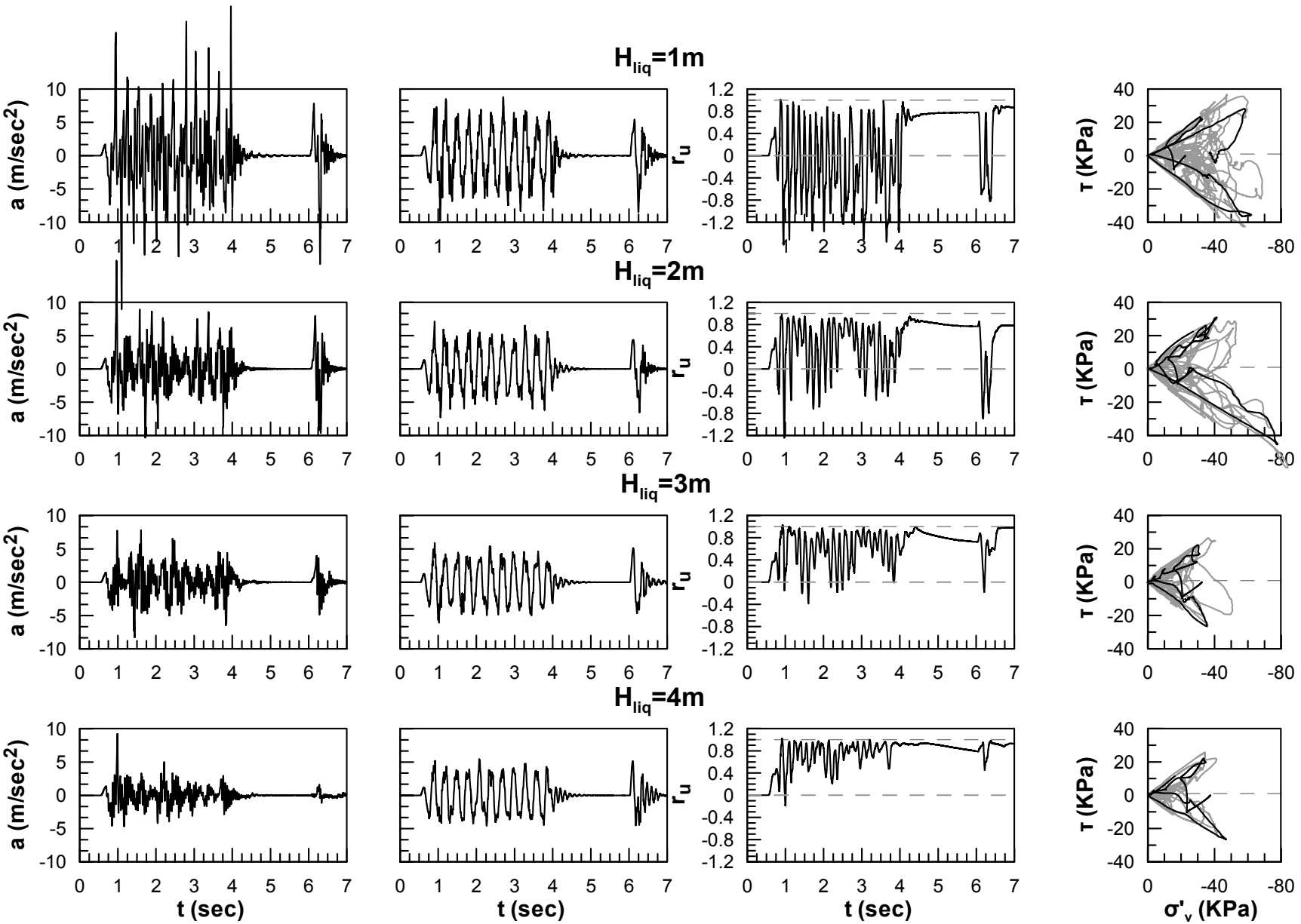
Ανάλυση 16.β



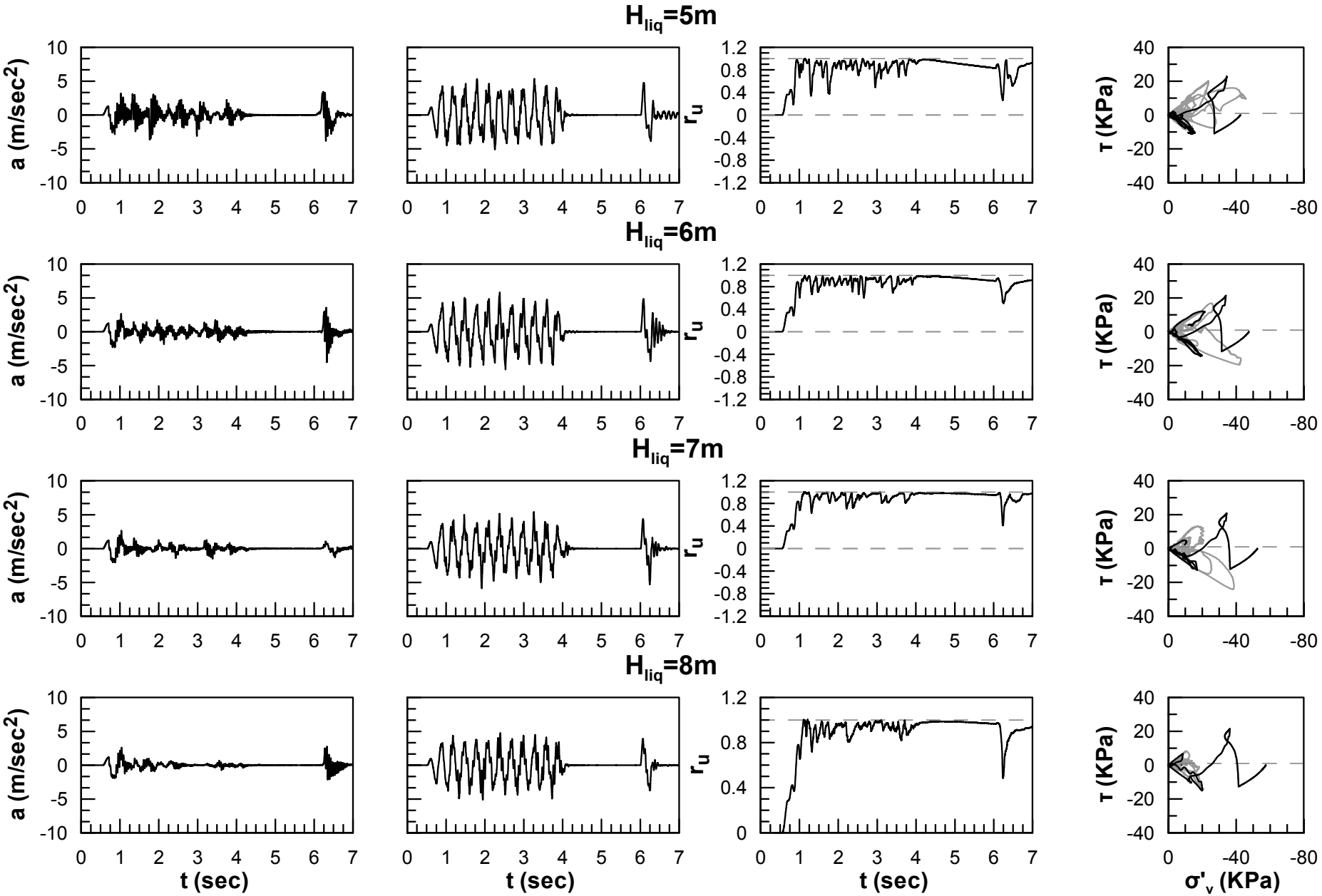
Ανάλυση 16.γ



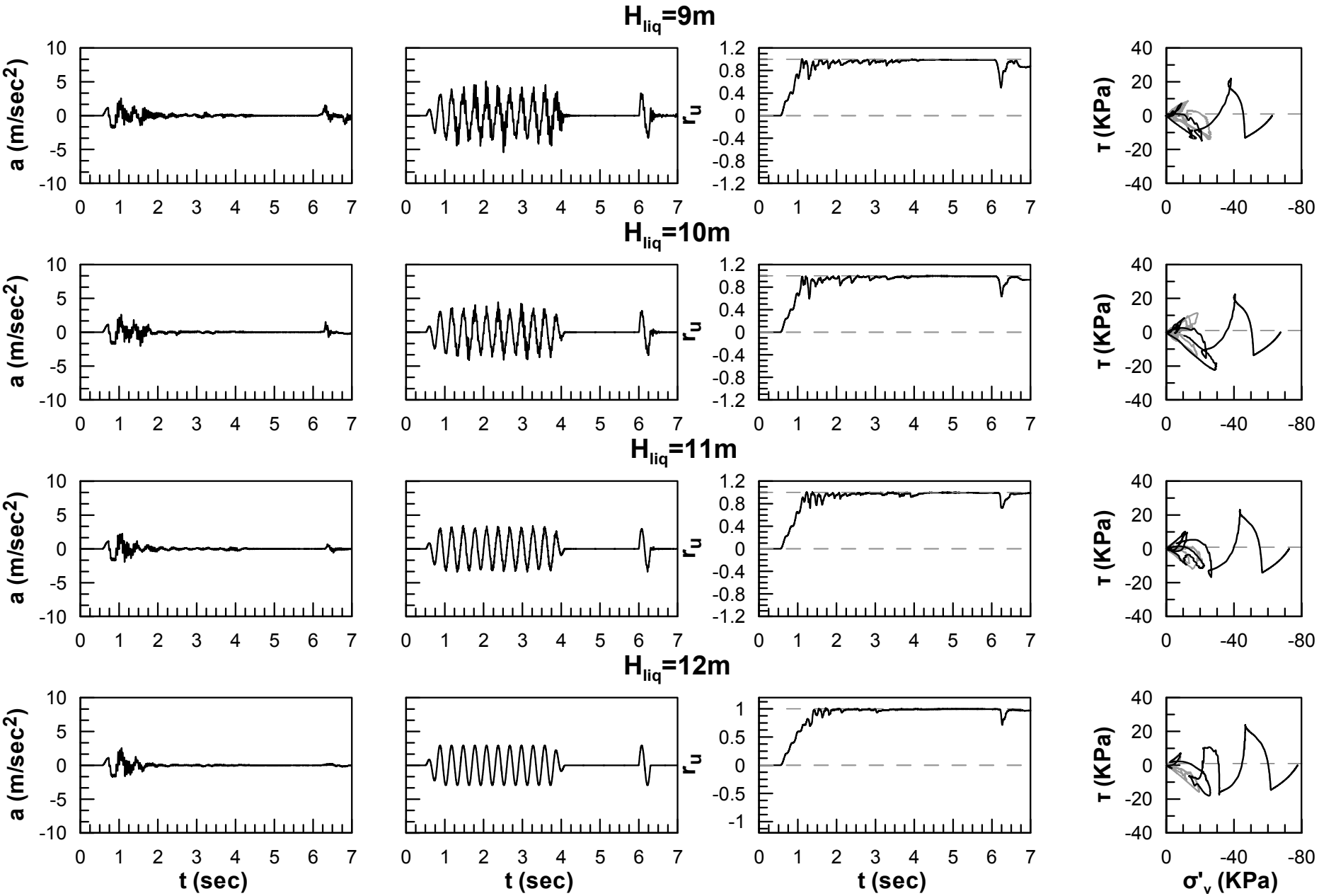
Ανάλυση 17.α



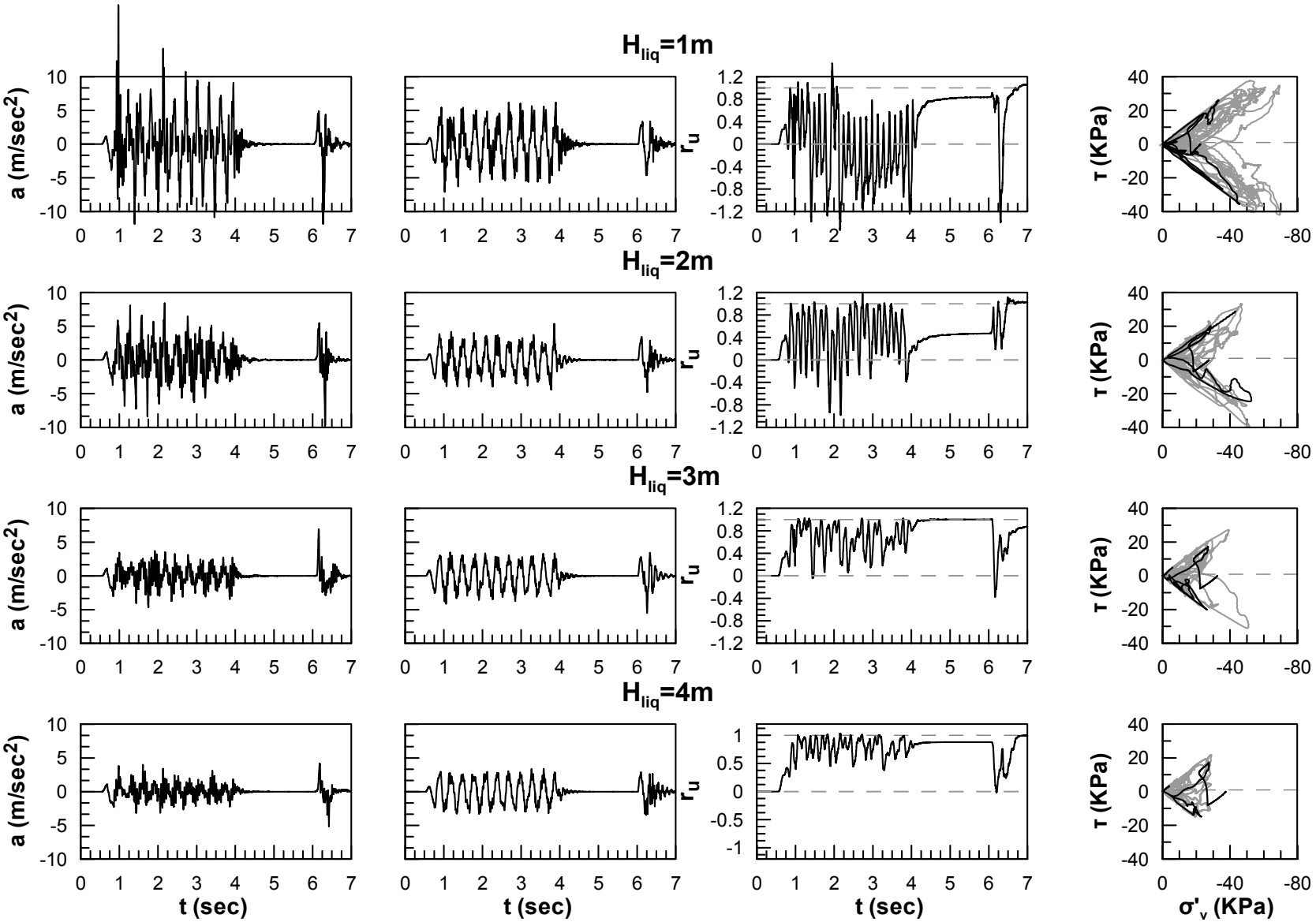
Ανάλυση 17.β



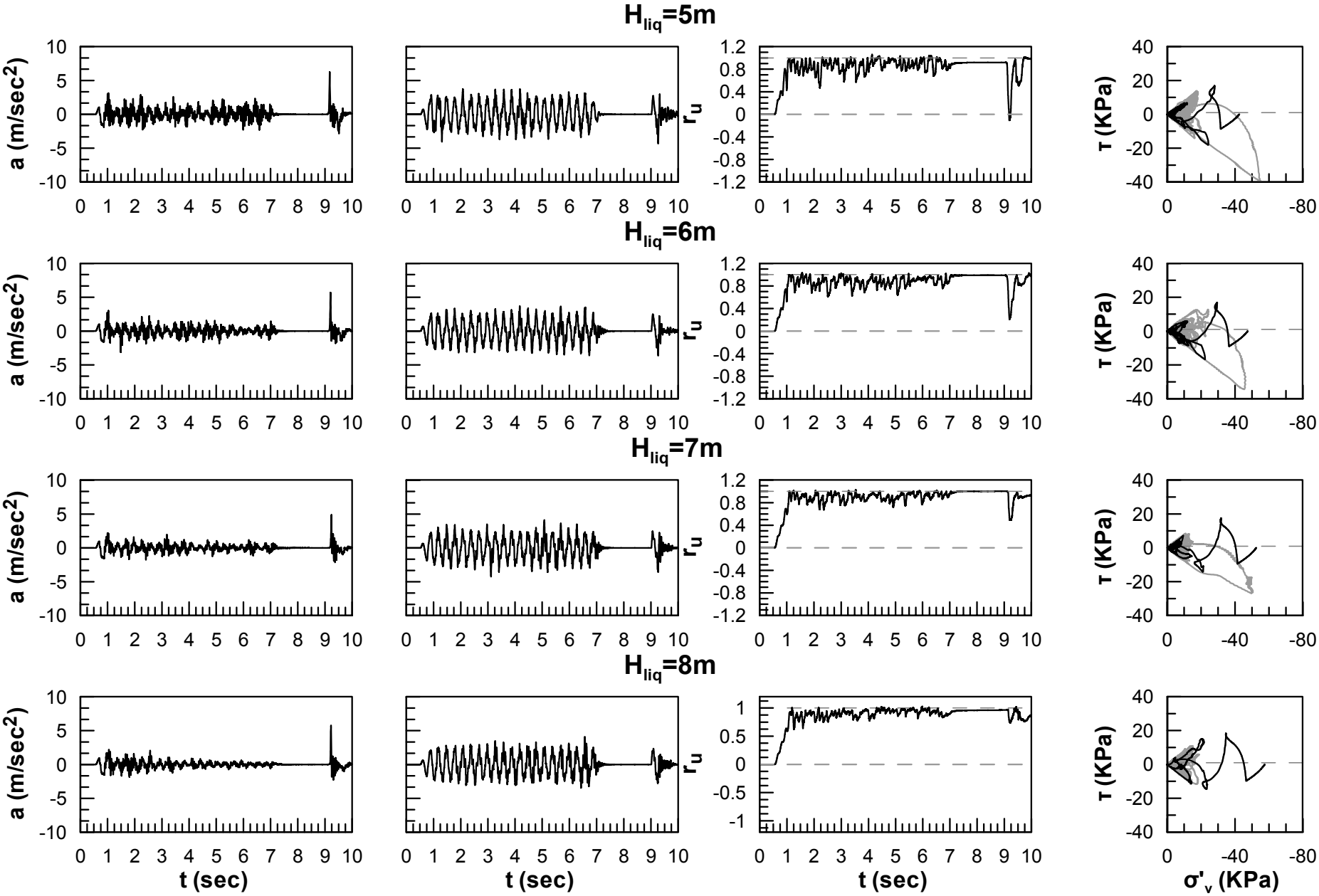
Ανάλυση 17.γ



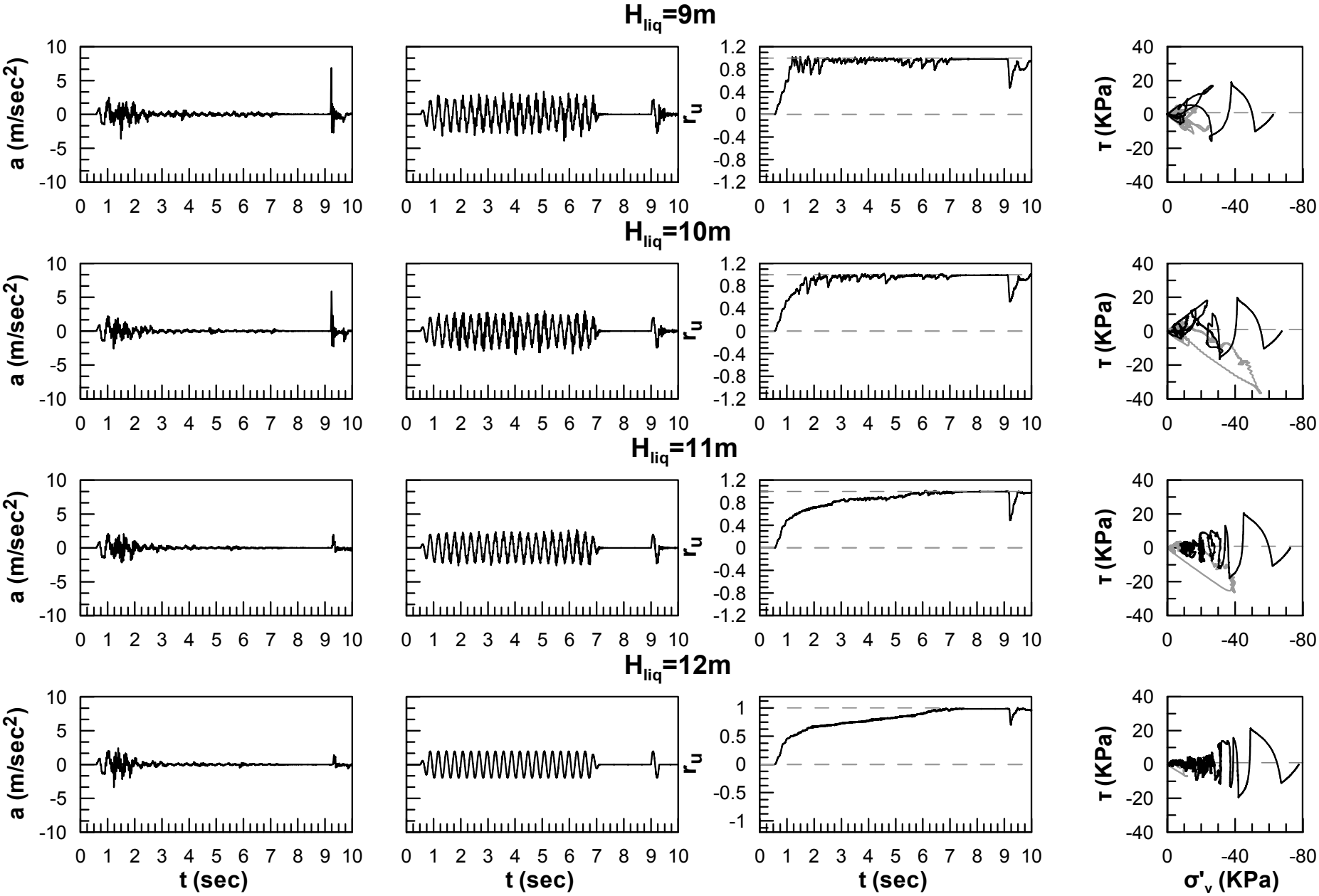
Ανάλυση 18.α



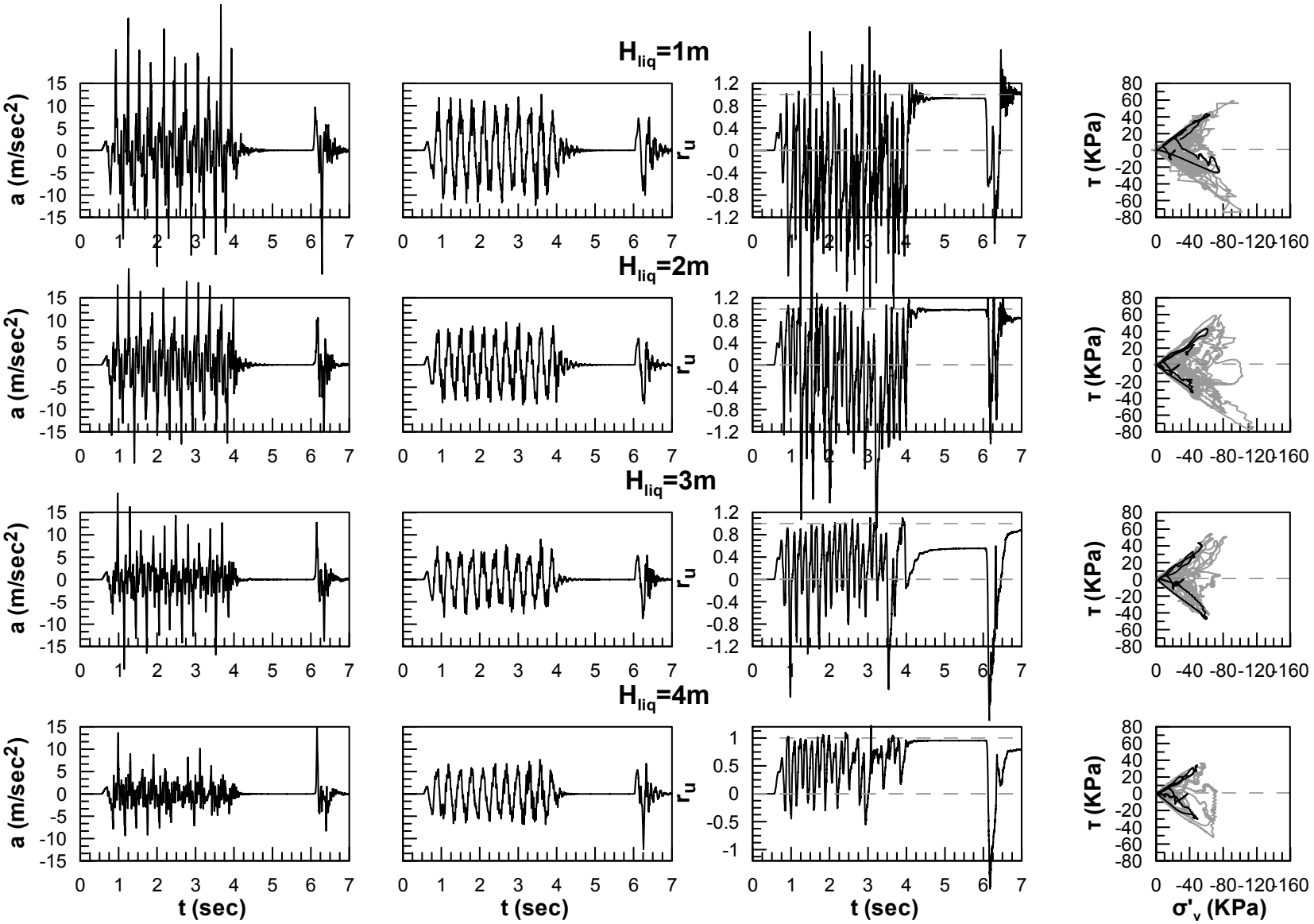
Ανάλυση 18.β



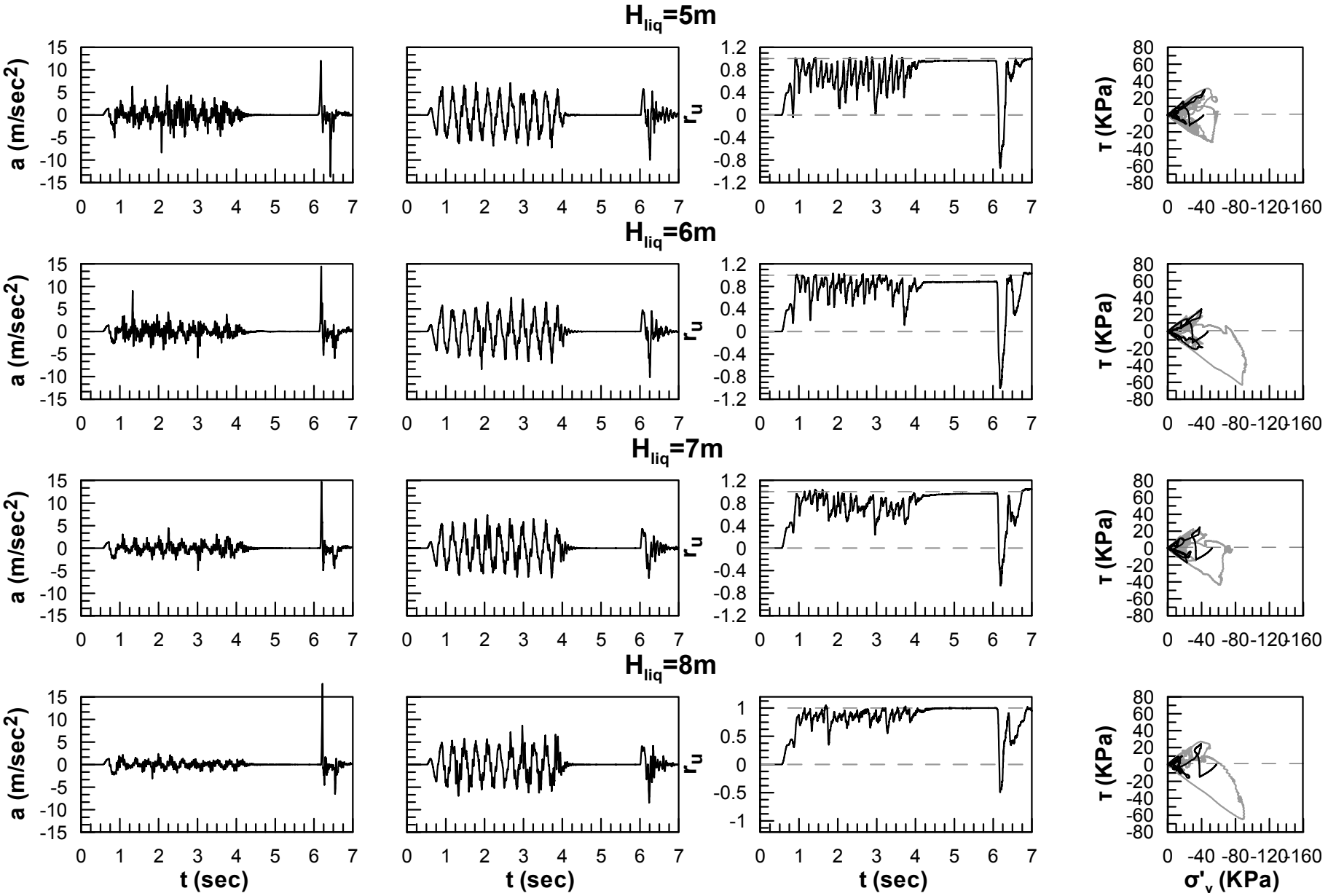
Ανάλυση 18.γ



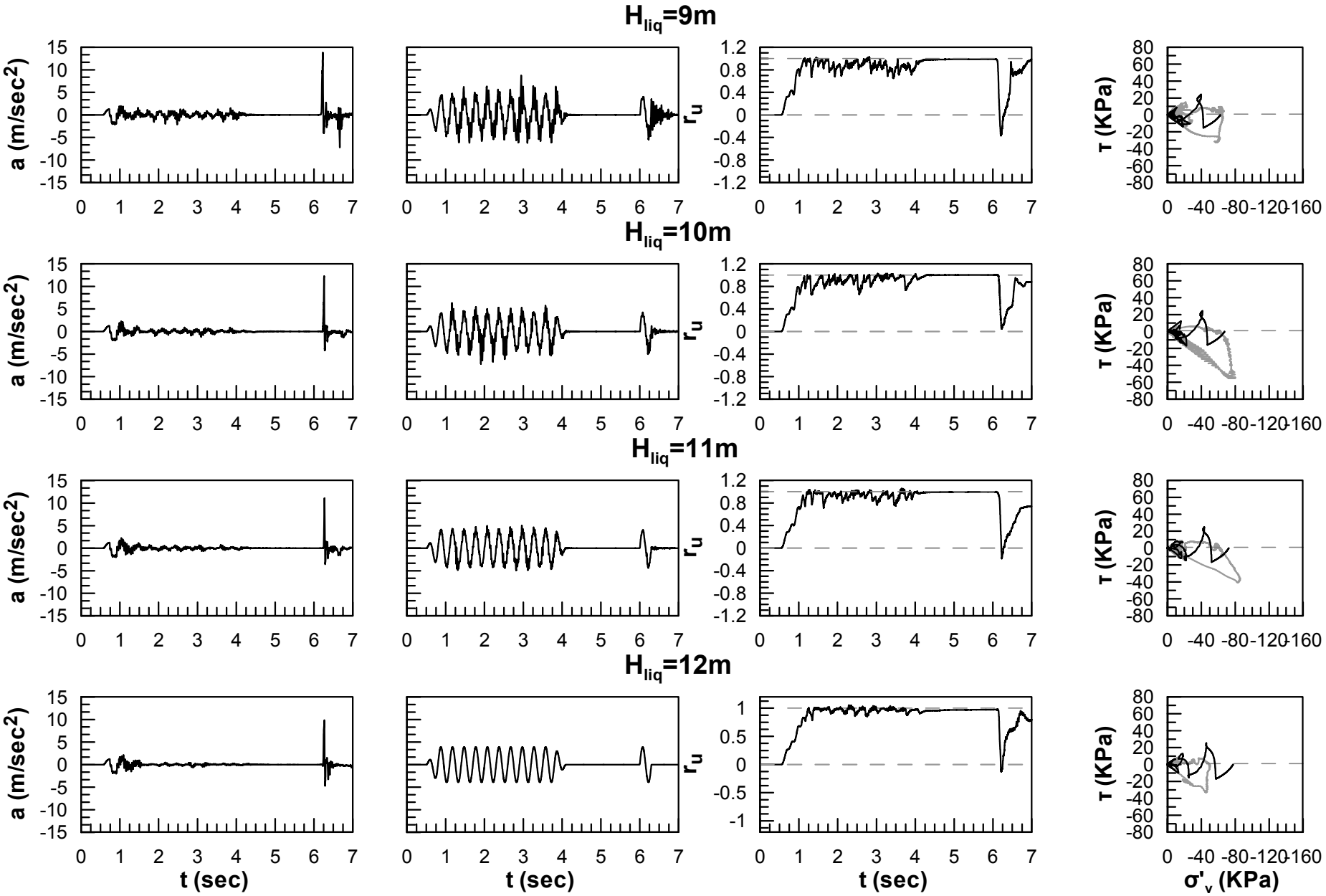
Ανάλυση 19.α



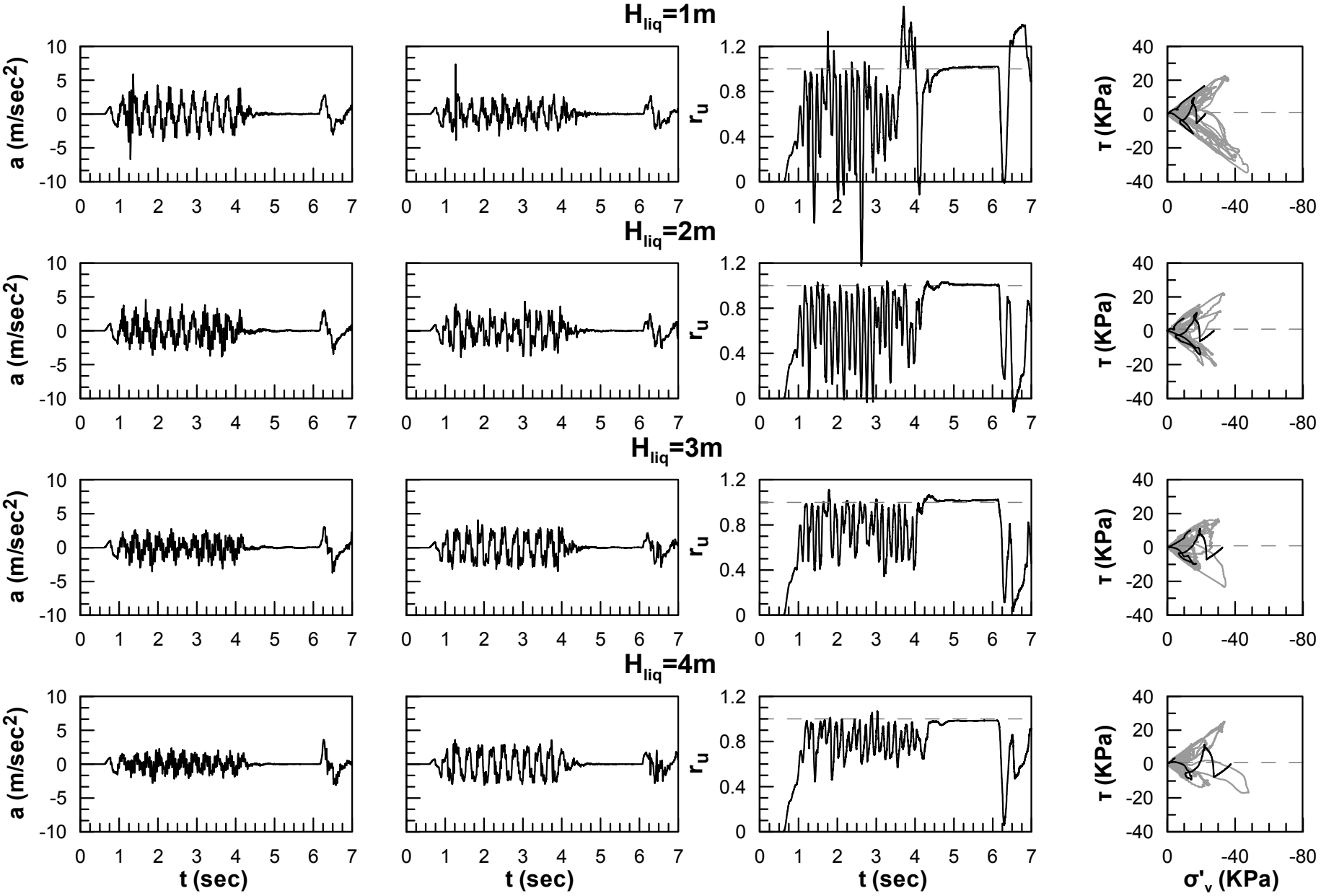
Ανάλυση 19.β



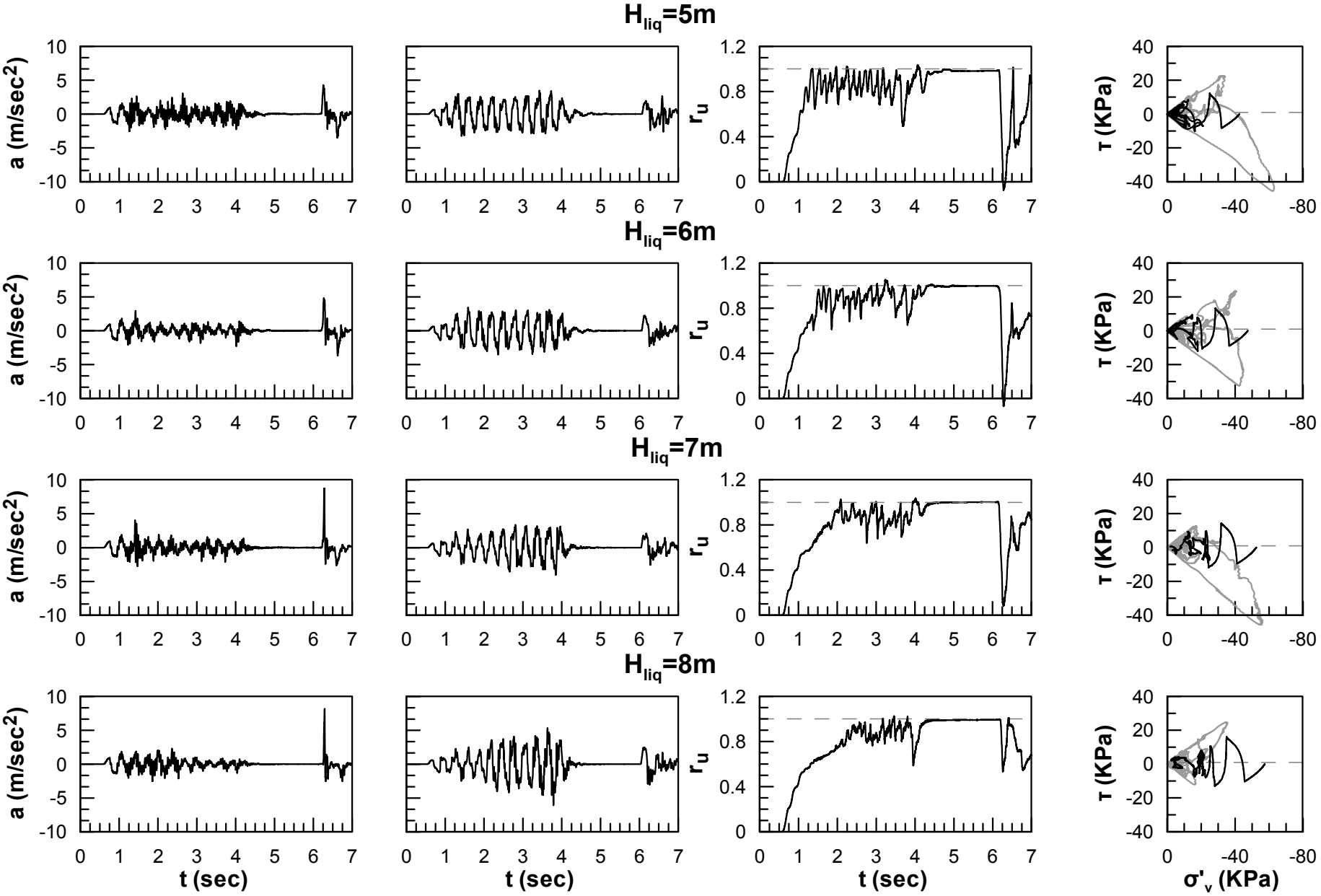
Ανάλυση 19.γ



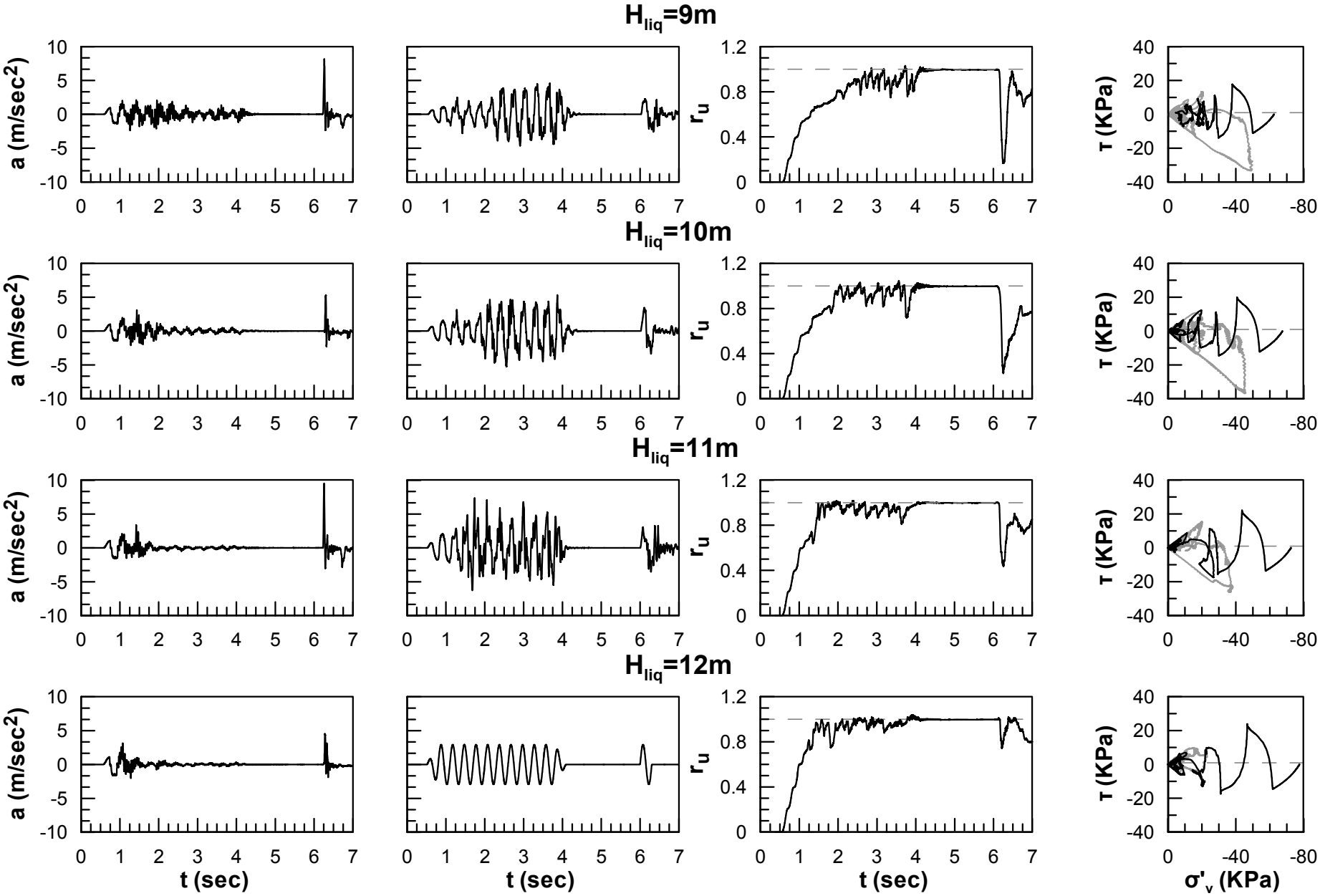
Ανάλυση 20.α



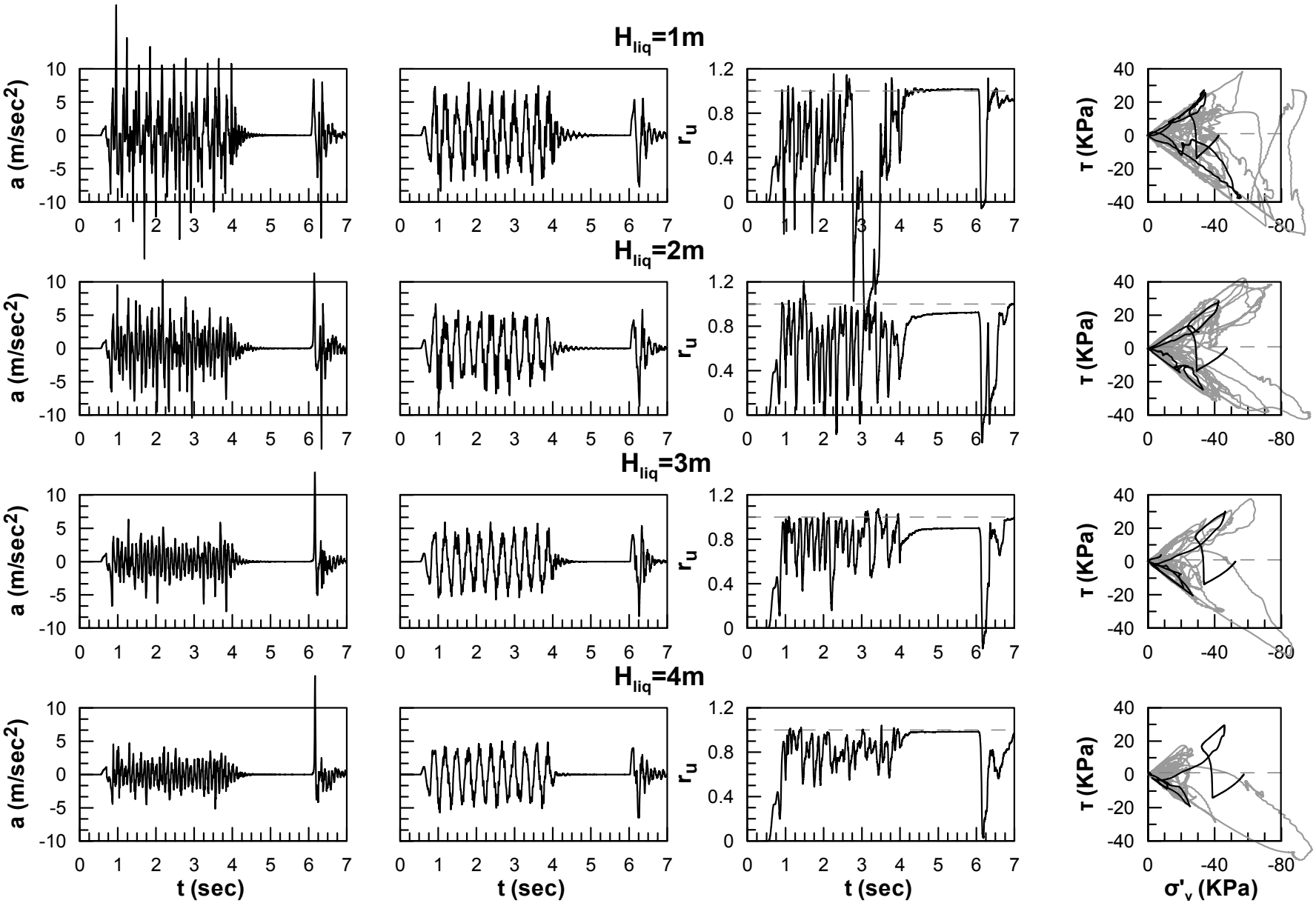
Ανάλυση 20.β



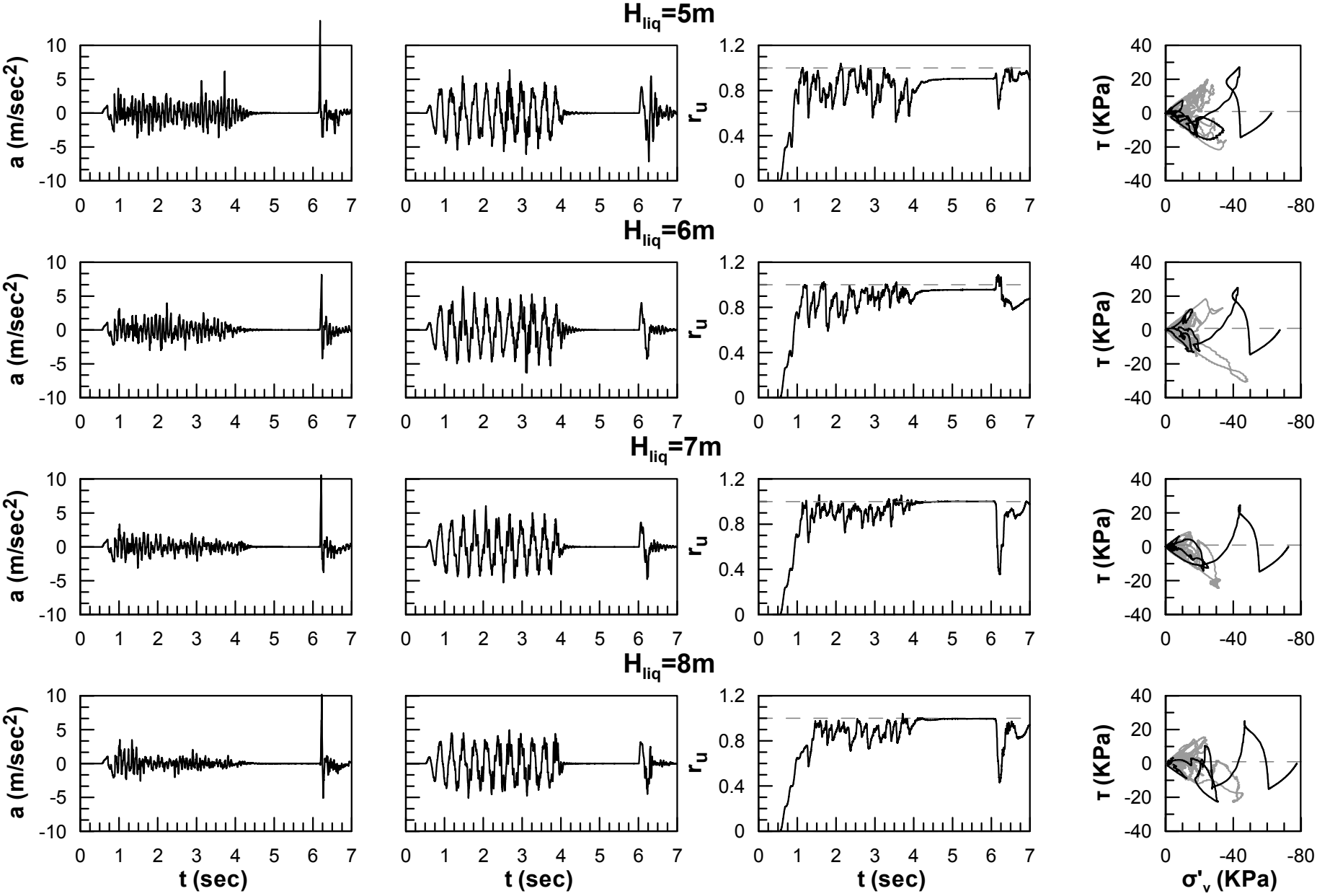
Ανάλυση 20.γ



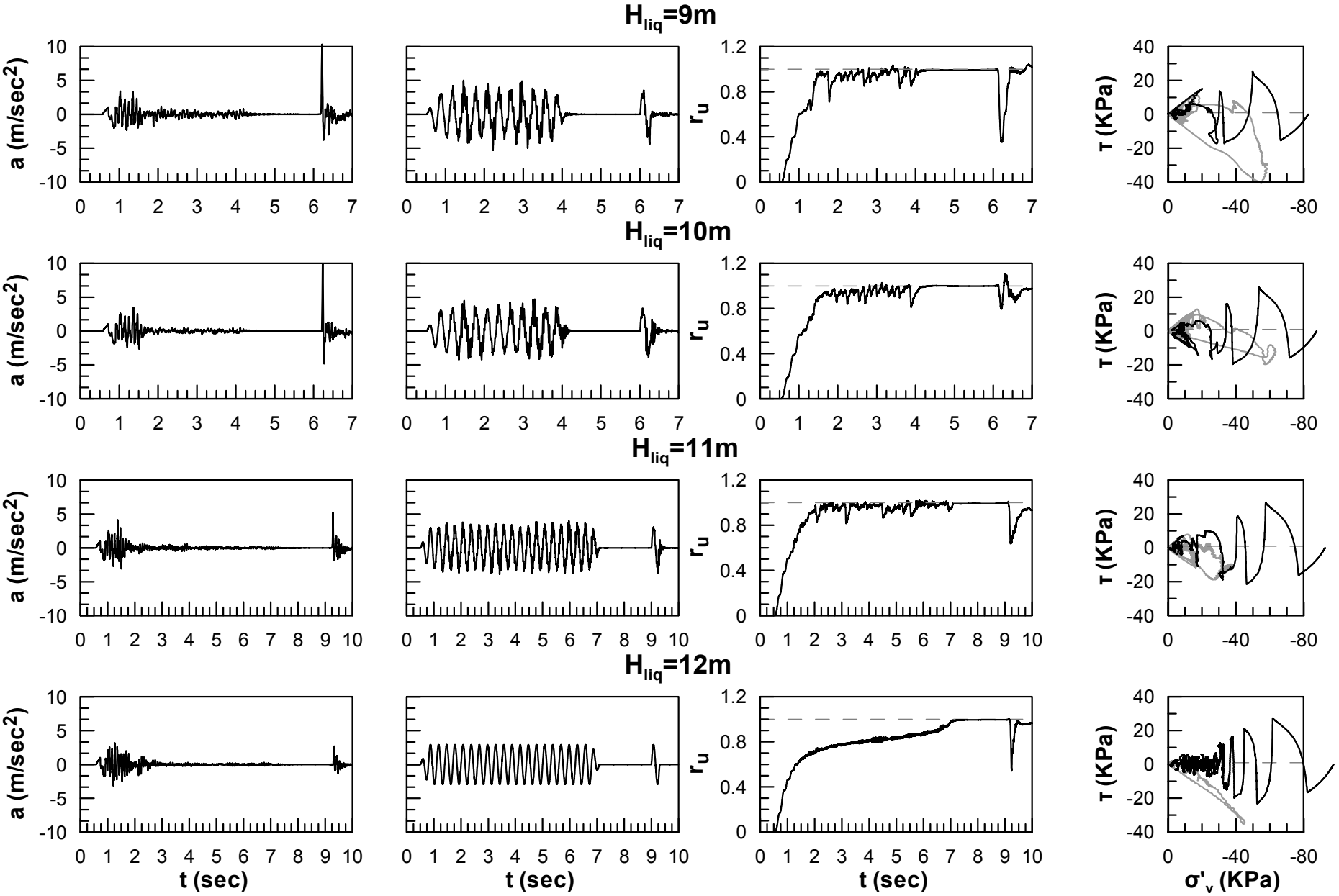
Ανάλυση 21.α



Ανάλυση 21.β

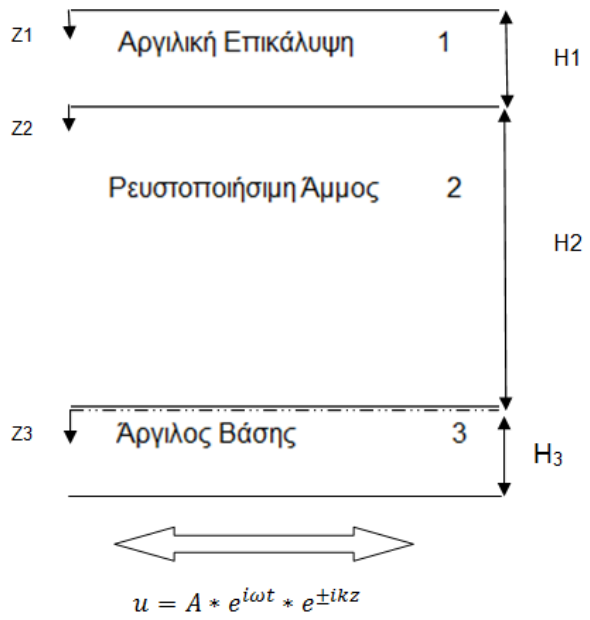


Ανάλυση 21.γ



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ



Σχήμα Β1 : Προσομοίωμα στήλης εδάφους για την αναλυτική επίλυση

Στρώμα 1 : Καθώς η διέγερση είναι αρμονική, για το στρώμα 1 η επίλυση της κυματικής εξίσωσης γράφεται ως εξής

$$u = A_1 * e^{i*\omega*t} * e^{i*k_1^**z_1} + B_1 * e^{i*\omega*t} * e^{-i*k_1^**z_1} \quad \text{(B1.1)}$$

όπου u η επιβαλλόμενη μετατόπιση, A το μέγιστο πλάτος, t ο χρόνος, ω η συχνότητα και k ο κυματικός αριθμός ($k = \frac{2*\pi}{\lambda}$, λ μήκος κύματος).

Η διατμητική τάση στο στρώμα 1 προκύπτει :

$$\tau = -G_1^* * \frac{\partial u}{\partial z_1} = -i * G_1^* * k_1^* * \left(A_1 * e^{i*k_1^**z_1} - B_1 e^{-i*k_1^**z_1}\right) * e^{i*\omega*t} \quad \text{(B1.2)}$$

Καθώς η διατμητική τάση στο όριο z_1=0 ίσχύει για κάθε χρονική στιγμή από την (B2) προκύπτει :

$$\tau = 0 = -i * G_1^* * k_1^* * (A_1 * 1 - B_1 * 1) * e^{i*\omega*t} \rightarrow A_1 = B_1 \quad \text{(B1.3)}$$

Μέσω της (B1.3) οι εξισώσεις (B1.1) και (B1.2) γίνονται :

$$u = A_1 * e^{i*\omega*t} * e^{i*k_1^**z_1} + A_1 * e^{i*\omega*t} * e^{-i*k_1^**z_1}$$

$$= A_1 * e^{i*\omega*t} * \left(e^{i*k_1^**z_1} + e^{-i*k_1^**z_1}\right) = 2 * A_1 * e^{i*\omega*t} * \cos\left(k_1^* * z_1\right) \quad \text{(B1.4)}$$

$$\tau = -i * G_1^* * k_1^* * \left(A_1 * e^{i*k_1^**z_1} - A_1 e^{-i*k_1^**z_1}\right) * e^{i*\omega*t} =$$

$$= -i * G_1^* * k_1^* * A_1 * \left(e^{i*k_1^**z_1} - e^{-i*k_1^**z_1}\right) =$$

$$= 2 * G_1^* * k_1^* * A_1 * e^{i*\omega*t} * \sin(k_1^* * z_1) \quad \text{(B1.5)}$$

Στρώμα 2 : Η ίδιες αρχικές εξισώσεις ισχύουν για το στρώμα 2

$$u = A_2 * e^{i*\omega*t} * e^{i*k_2^**z_2} + B_2 * e^{i*\omega*t} * e^{-i*k_2^**z_2} \quad \text{(B2.1)}$$

$$\tau = -i * G_2^* * k_2^* * \left(A_2 * e^{i*k_2^**z_2} - B_2 e^{-i*k_2^**z_2}\right) * e^{i*\omega*t} \quad \text{(B2.2)}$$

Στην διεπιφάνεια μεταξύ στρώματος 1 και στρώματος 2 πρέπει, για να ισχύει η συνέχεια των στρωμάτων, η τάση επάνω να είναι ταυτοτικά ίση με την τάση κάτω και η παραμόρφωση επάνω να είναι ταυτοτικά ίση με την παραμόρφωση κάτω. Συνεπώς :

$$u(z_1 = H_1) = u(z_2 = 0) \rightarrow$$

$$2 * A_1 * e^{i*\omega*t} * \cos(k_1^* * H_1) = A_2 * e^{i*\omega*t} * 1 + B_2 * e^{i*\omega*t} * 1 \rightarrow$$

$$2 * A_1 * \cos(k_1^* * H_1) = A_2 + B_2 \quad \text{(B2.3)}$$

$$\tau(z_1 = H_1) = \tau(z_2 = 0) \rightarrow$$

$$2 * G_1^* * k_1^* * A_1 * e^{i*\omega*t} * \sin(k_1^* * H_1) = -i * G_2^* * k_2^* * (A_2 * 1 - B_2 * 1) * e^{i*\omega*t}$$

$$\rightarrow i * 2 * A_1 * \frac{G_1^* * k_1^*}{G_2^* * k_2^*} * \sin(k_1^* * H_1) = A_2 - B_2 \quad \text{(B2.4)}$$

Από το άθροισμα των (B2.3) και (B2.4) προκύπτει :

$$A_2 = A_1 * \cos(k_1^* * H_1) + i * A_1 * \frac{G_1^* * k_1^*}{G_2^* * k_2^*} * \sin(k_1^* * H_1) \quad \text{(B2.5)}$$

$$B_2 = A_1 * \cos(k_1^* * H_1) - i * A_1 * \frac{G_1^* * k_1^*}{G_2^* * k_2^*} * \sin(k_1^* * H_1) \quad \text{(B2.6)}$$

Τελικώς για το Στρώμα 2 από τις (B2.1), (B2.2), (B2.5) έχουμε :

$$u = \left\{ \begin{array}{l} \left[A_1 * \cos(k_1^* * H_1) + i * A_1 * \frac{G_1^* * k_1^*}{G_2^* * k_2^*} * \sin(k_1^* * H_1)\right] * e^{i*k_2^**z_2} + \\ + \left[A_1 * \cos(k_1^* * H_1) - i * A_1 * \frac{G_1^* * k_1^*}{G_2^* * k_2^*} * \sin(k_1^* * H_1)\right] * e^{-i*k_2^**z_2} \end{array} \right\} * e^{i*\omega*t}$$

$$= 2 * A_1 * \left[\cos(k_1^* * H_1) * \cos(k_2^* * z_2) - \frac{G_1^* * k_1^*}{G_2^* * k_2^*} * \sin(k_1^* * H_1) * \sin(k_1^* * z_2)\right] *$$

$$* e^{i*\omega*t} \quad \text{(B2.7)}$$

Μας ενδιαφέρει ο λόγος $\frac{u(z_2=0)}{u(z_2=H_2)}$, ο οποίος προκύπτει άμεσα από τη σχέση (B2.7) με αντικατάσταση για z_2=0 και z_2=H_2.

Ως εκ τούτου, ο λόγος ενίσχυση της κίνησης από την βάση προς την κορυφή της άμμου ισούται με:

$$F = \frac{u(z_2 = 0)}{u(z_2 = H_2)}$$

$$= \frac{2 * A_1 \cos(k_1^* * H_1) * e^{i*\omega*t}}{2 * A_1 * \left[\cos(k_1^* * H_1) * \cos(k_2^* * H_2) - \frac{G_1^* * k_1^*}{G_2^* * k_2^*} * \sin(k_1^* * H_1) * \sin(k_1^* * H_2)\right] * e^{i*\omega*t}}$$

$$\rightarrow F = \frac{\cos(k_1^* * H_1)}{\cos(k_1^* * H_1) * \cos(k_2^* * H_2) - \frac{G_1^* * k_1^*}{G_2^* * k_2^*} * \sin(k_1^* * H_1) * \sin(k_1^* * H_2)}$$