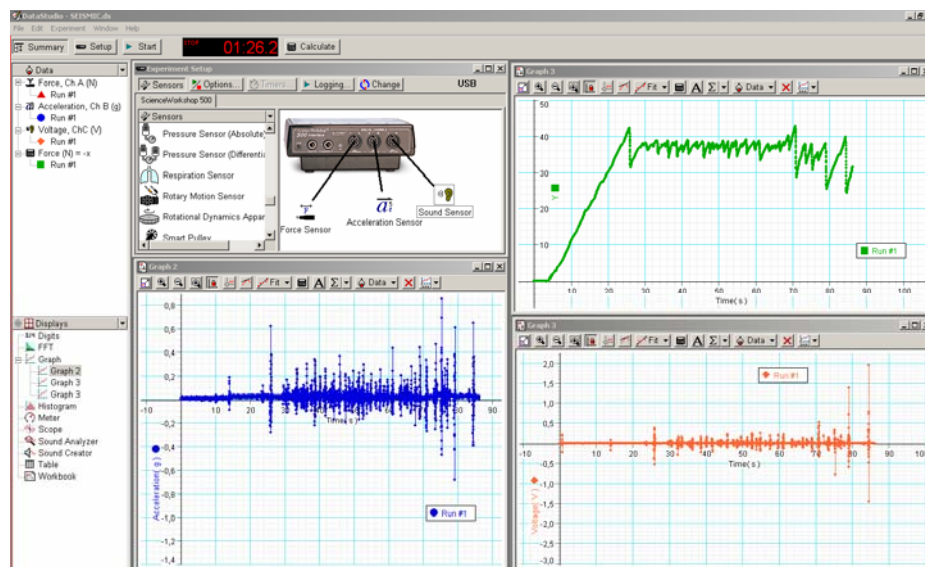




Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ



**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ**



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΑΥΡΟΥΔΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ 2013



Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ



**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΑΥΡΟΥΔΑΚΗΣ

Επιβλέπων : *Δρ. Βασίλης Σάλτας*
Επίκουρος Καθηγητής

Επιτροπή Αξιολόγησης : *Δρ. Βασίλης Σάλτας*
Δρ. Φίλιππος Βαλλιανάτος
Δρ. Ιωάννης Φυτίλης

Ημερομηνία Παρουσίασης : *15 Μαρτίου 2013*

Αύξων Αριθμός Πτυχιακής Εργασίας :

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο *Εργαστήριο Γεωφυσικής και Σεισμολογίας* του Τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, κατά το χρονικό διάστημα Ιανουάριος 2012 – Δεκέμβριος 2012, υπό την επίβλεψη του Επικ. Καθηγητή Βασίλη Σάλτα.

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου εκτίμηση στον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ Βασίλειο Σάλτα για την καθοδήγηση και ενθάρρυνση του κατά τη διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας. Ο αμείωτος ενθουσιασμός του καθ' όλο το παραπάνω χρονικό διάστημα, έδιναν όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην εργασία μου.

Επίσης είμαι ευγνώμων στους συμφοιτητές μου Αναστάσιο Πεπονή, Δημήτριο Πασσάλη, Σάββα Τζαβάρα, κ.ά. , για τη βοήθειά τους σε τεχνικής φύσεως θέματα καθώς, και τις πολύ χρήσιμες συμβουλές τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Δρ Φ. Βαλλιανάτο και Δρ Ι. Φυτίλη για το χρόνο που αφιέρωσαν στην υπόδειξη των λαθών της παρούσας εργασίας.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η κατασκευή εκπαιδευτικής πειραματικής διάταξης προσομοίωσης της σεισμικής κίνησης και συγκεκριμένα του μηχανισμού προσκόλλησης-ολίσθησης (stick-slip) που αποτελεί έναν από τους κύριους μηχανισμούς γένεσης των σεισμών. Χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρια καταγραφής της δύναμης που εξασκείται από ελατήριο κατά την κίνηση συνδεδεμένης μάζας που ολισθαίνει πάνω σε επίπεδη επιφάνεια με μεγάλο συντελεστή τριβής, της επιτάχυνσης που αυτή υφίσταται καθώς και της ταυτόχρονης εκπομπής ακουστικών σημάτων. Τα δεδομένα που καταγράφονται κατά τη διάρκεια της κίνησης μπορούν να δώσουν μία άμεση κατανόηση του μηχανισμού κίνησης stick-slip και των υποκείμενων φυσικών φαινομένων.

INSTALLATION AND OPERATION OF AN EDUCATIONAL EXPERIMENTAL APPARATUS FOR THE SIMULATION OF SEISMIC MOTION

Abstract

The main purpose of the present thesis is the installation and operation of an educational experimental apparatus which simulates the seismic motion through the stick-slip motion of a mass along a flat surface with high roughness. Different kinds of sensors were used for the simultaneous recording of the force, acceleration and sound emission during the stick-slip motion of a mass-spring system with various weights and different spring constants. The recorded experimental data can be used for a direct understanding of the stick-slip motion and the underlying physical mechanisms.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Μηχανισμός προσκόλλησης – ολίσθησης (stick-slip)	9
2.1 Μαθηματική περιγραφή του μηχανισμού stick-slip	9
2.2 Εξάρτηση της κίνησης από την ταχύτητα του σώματος	14
2.3 Γενικά περί των σεισμών	16
2.4 Μηχανισμοί γένεσης των σεισμών	18
2.5 Η κίνηση stick-slip ως μηχανισμός γένεσης των σεισμών	21
2.5.1 Εργαστηριακά πειράματα εμφάνισης της κίνησης stick-slip κατά τη θραύση πετρωμάτων.....	21
2.5.2 Προτεινόμενα μοντέλα για την κίνηση stick-slip	24
2.6 Η κίνηση stick-slip σε άλλα φυσικά φαινόμενα	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Πειραματικό μέρος	27
3.1 Πειραματική διάταξη	27
3.2 Χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες.....	29
3.2.1 Αισθητήρας μέτρησης δύναμης	31
3.2.2 Αισθητήρας μέτρησης επιτάχυνσης	33
3.2.3 Αισθητήρας καταγραφής ήχου	34
3.2.4 Συσκευή διασύνδεσης και συλλογής δεδομένων (DataLogger)	36
3.2.5 Γραφικό περιβάλλον απεικόνισης δεδομένων	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Πειραματικά αποτελέσματα	38
4.1 Προκαταρκτικές μετρήσεις	38
4.1.1 Πειραματικός υπολογισμός της σταθεράς των ελατηρίου και των	

	συντελεστών τριβής	38
4.2	Επίδρασης της ταχύτητας κίνησης στην προσκόλληση - ολίσθηση	39
4.3	Επίδρασης της μάζας και της σταθεράς του ελατηρίου.....	44
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	54
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή

Ένας μεγάλος αριθμός φυσικών φαινομένων χαρακτηρίζεται από πολύ ευδιάκριτα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά και η δυναμική τους εξέλιξη μπορεί να περιγραφεί από εναλλασσόμενες καταστάσεις ή φάσεις. Στη στατική κατάσταση (φάση) στο σύστημα συσσωρεύεται δυναμική ενέργεια και στη δυναμική κατάσταση η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε κινητική. Τέτοιου είδους φαινόμενα είναι παρόμοια σε περιγραφή με το πρόβλημα της ολίσθησης με τριβή ενός σώματος που εμφανίζει ελαστικές ιδιότητες. Η κίνηση αυτή αναφέρεται συνήθως ως κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης (stick – slip motion) και αποτελεί τη βάση περιγραφής για τη μελέτη πολλών φαινομένων που χαρακτηρίζονται από την παρουσία τριβής ολίσθησης μεταξύ σωμάτων με ελαστικά χαρακτηριστικά.

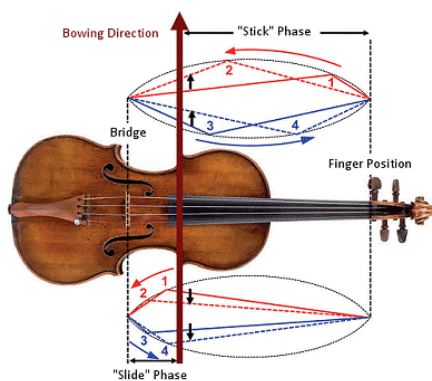
Χαρακτηριστικά παραδείγματα (Σχήμα 1.1) φαινομένων διαφορετικής προέλευσης (φυσικής ή τεχνητής) που εμφανίζουν δύο ασυνεχείς – διακοπτόμενες καταστάσεις είναι:

- ✓ Ο μηχανισμός εκπομπής ήχου στο βιολί
- ✓ Η κίνηση του υαλοκαθαριστήρα αυτοκινήτου σε στεγνή υάλινη επιφάνεια ή ο παραγόμενος ήχος κατά την κίνηση του δακτύλου στην επιφάνεια ενός ποτηριού
- ✓ Η τροχοπέδηση στα αυτοκίνητα
- ✓ Οι εδαφικές κατακρημνίσεις ή οι χιονοστιβάδες
- ✓ Ο μηχανισμός γένεσης πολλών σεισμών

Το πιο απλό σύστημα που παρουσιάζει την εν λόγω κίνηση, αποτελεί το σύστημα ελατηρίου – σώματος που ολισθαίνει σε μία επιφάνεια με τριβές. Για το σύστημα αυτό, η μεταβολή της δύναμης του ελατηρίου με τη μετατόπιση του σώματος απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2. Αρχικά, η δύναμη αυξάνεται γραμμικά με τη μετατόπιση (ελαστική περιοχή) έως και το σημείο C όπου έχουμε απόκλιση από τη γραμμικότητα. Στο σημείο D παρουσιάζεται μέγιστη δύναμη και το σώμα ξαφνικά ολισθαίνει κατά τη διεύθυνση της δύναμης με αποτέλεσμα η δύναμη να ελαττώνεται (σημείο E). Το σώμα τότε προσκολλάται στο επίπεδο και η δύναμη αυξάνεται ως το σημείο F όπου εμφανίζεται πάλι η κίνηση ολίσθησης. Εναλλακτικά, σταθερή κίνηση μπορεί να προκύψει υπό προϋποθέσεις η οποία και



(α)



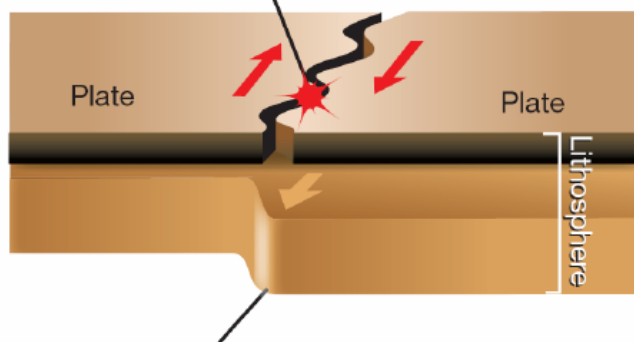
(β)



(γ)

Stick-slip motion

The brittle crust sticks and releases.



The upper mantle is plastic and flows.

(δ)

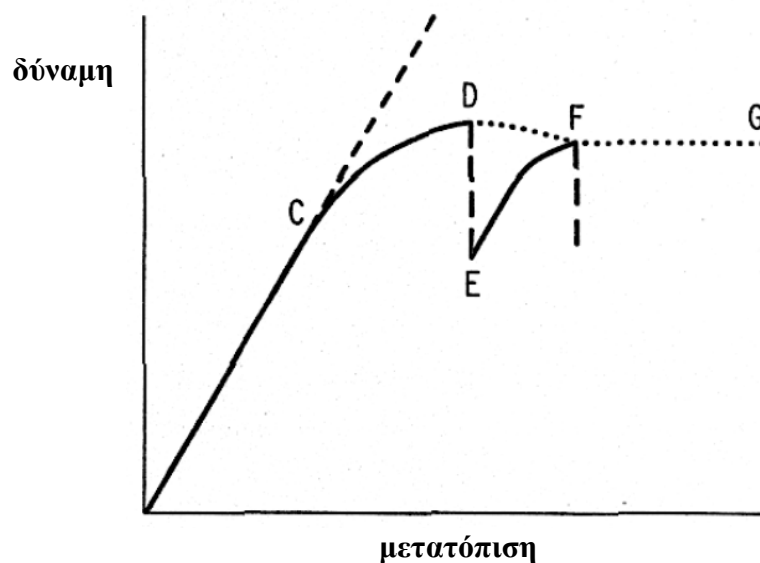
Σχήμα 1.1. Φαινόμενα όπου εμφανίζεται ο μηχανισμός προσκόλλησης – ολίσθησης κατά την περιγραφή της κίνησης.

- (α) κίνηση χιονοστιβάδας
- (β) κίνηση χορδής οργάνου
- (γ) σύστημα ελατηρίου – μάζας που ολισθαίνει με τριβές σε επιφάνεια που κινείται με σταθερή ταχύτητα
- (δ) κίνηση λιθοσφαιρικών πλακών κατά την οποία ο εύθραυστος φλοιός συσσωρεύει ενέργεια κατά τη μεταβατική κατάσταση της ακινησίας του και απελευθερώνει (εκδήλωση ενός σεισμικού γεγονότος) κατά την επακόλουθη ξαφνική του κίνηση.

υποδηλώνεται από τη διακεκομμένη γραμμή DFG στο σχήμα 1.2. Αναλυτική περιγραφή του απλοποιημένου αυτού συστήματος θα δοθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Ο βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή και λειτουργία μίας πειραματικής διάταξης με την κατάλληλη προσαρμογή διαφόρων αισθητηρίων που θα προσομοιώνει την κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης που εμφανίζεται στους μηχανισμούς γένεσης των σεισμών. Η διάταξη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικό σκοπό στα πλαίσια εργαστηριακών μαθημάτων περιβαλλοντικής φυσικής η/και γεωφυσικής, αφού εμφανίζονται τα φαινόμενα τριβής (στατικής και τριβής ολίσθησης) καθώς και η εφαρμογή τους στην εν λόγω κίνηση που συσχετίζεται με τη δημιουργία των σεισμικών γεγονότων.

Οι Brace και Byerlee (1966) ήταν οι πρώτοι που πρότειναν την αστάθεια κατά την τριβή που εμφανίζεται στην κίνηση της προσκόλλησης – ολίσθησης ως μηχανισμό γένεσης των σεισμών σε προϋπάρχοντα ρήγματα και τη συσχέτισαν με εργαστηριακά πειράματα θραύσης πετρωμάτων. Η κίνηση των επιφανειών των ρηγμάτων (χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα στην Αμερική) μπορεί να συμβεί ξαφνικά προκαλώντας την εκδήλωση ενός σεισμικού γεγονότος. Κατά τη διάρκεια αυτής της κίνησης, αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις ενώ οι επιφάνειες του ρήγματος μπορεί να παραμείνουν στη συνέχεια ακίνητες μέχρι κάποια χρονική στιγμή όπου η ολίσθηση τους θα ξαναπαρουσιαστεί. Τέτοιου είδους διακοπτόμενη κίνηση σε προϋπάρχοντα ρήγματα διαπιστώθηκε ότι είναι παρόμοια με την ξαφνική διακοπτόμενη κίνηση που παρατηρείται κατά την ολίσθηση με τριβή μεταξύ επιφανειών πετρωμάτων σε εργαστηριακής κλίμακας πειράματα. Η δυνατότητα αυτή της μελέτης των μηχανισμών γένεσης των σεισμών υπό το πρίσμα ελεγχόμενων εργαστηριακών πειραμάτων, έδωσε ώθηση στη διενέργεια εκτεταμένων μελετών προκειμένου να διερευνηθεί η φύση και οι συνθήκες της κίνησης προσκόλλησης – ολίσθησης. Εκτενέστερη αναφορά στο μηχανισμό αυτό δίνεται στο επόμενο κεφάλαιο. Επίσης, στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή της θεωρίας που αφορά στις βασικές αρχές περιγραφής του μηχανισμού προσκόλλησης – ολίσθησης όπως αυτή μπορεί να περιγραφεί μέσω του απλοποιημένου συστήματος κίνησης ελατηρίου – μάζας σε επιφάνεια με τριβές.



Σχήμα 1.2. Γραφική παράσταση δύναμης – μετατόπισης που εμφανίζεται για το σύστημα ελατηρίου – σώματος που ολισθαίνει με τριβές σε επίπεδη επιφάνεια.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιγραφή της πειραματικής διάταξης με αναλυτική αναφορά στα αισθητήρια όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό για την καταγραφή της δύναμης και της επιτάχυνσης που υφίσταται το κινούμενο σώμα καθώς και των ακουστικών σημάτων που εκπέμπονται ταυτόχρονα. Η ταυτόχρονη αυτή καταγραφή των ηχητικών σημάτων μας παρέχει μία απλοποιημένη εικόνα για την κατανόηση της εμφάνισης των πρόδρομων (ή ταυτόχρονων) σημάτων (ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης) που εκπέμπονται πριν (ή κατά τη διάρκεια) των σεισμικών γεγονότων και του τρόπου που αυτά συσχετίζονται με την ενόργανη καταγραφή της σεισμικής κίνησης με χρήση σεισμομέτρων, επιταχυνσιογράφων, κλπ.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από διάφορους συνδυασμούς ελατηρίων διαφορετικής σταθεράς, μαζών και ταχύτητας κίνησης του σώματος (κυβόλιθος) που ολισθαίνει με τριβή πάνω σε επίπεδη επιφάνεια που παρουσιάζει δύο διαφορετικούς συντελεστές στατικής (και κινητικής) τριβής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Μηχανισμός προσκόλλησης – ολίσθησης (stick – slip)

2.1 Μαθηματική περιγραφή της κίνησης προσκόλλησης – ολίσθησης

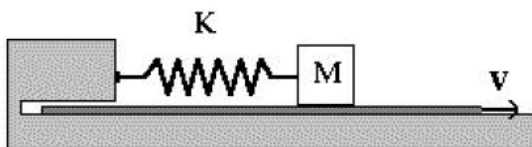
Το απλούστερο σύστημα για τη μελέτη της κίνησης προσκόλλησης – ολίσθησης αποτελείται από σώμα μάζας M που κινείται μέσω ελατηρίου σταθεράς k πάνω σε επίπεδη επιφάνεια με τριβές. Η ελεύθερη άκρη του ελατηρίου κινείται με σταθερή ταχύτητα v_s (Σχήμα 1.γ). Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντίστοιχη διάταξη (δες Σχήμα 2.1) όπου το ελατήριο είναι ακλόνητα στερεωμένο σε σταθερό σημείο και το σώμα ολισθαίνει πάνω σε επίπεδη επιφάνεια που κινείται με σταθερή ταχύτητα v .

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την κίνηση της παραπάνω μάζας είναι η ακόλουθη:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + A \frac{dx}{dt} + f\left(\frac{dx}{dt}, x, t_0\right) + k(x - vt) = 0 \quad (2.1)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, ο 2^{ος} όρος περιγράφει τη δύναμη απόσβεσης του συστήματος που μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της ταχύτητας με την οποία κινείται το σώμα, ενώ ο 3^{ος} όρος αποτελεί τη δύναμη τριβής που γενικά εξαρτάται από διάφορους παράγοντες μεταξύ των οποίων η ταχύτητα του σώματος, ο χρόνος της μόνιμης επαφής του σώματος με την επιφάνεια και η σχετική τους θέση. Ο τελευταίος όρος στη σχέση 2.1 περιγράφει τη δύναμη που ασκείται από το ελατήριο.

Στην απλούστερη προσέγγιση, μπορούμε να αγνοήσουμε τη δύναμη απόσβεσης και να θεωρήσουμε ότι η δύναμη της τριβής ολίσθησης εκφράζεται μέσω του εμπειρικού νόμου Coulomb, δηλαδή είναι σταθερή και ανεξάρτητη από την ταχύτητα κίνησης του σώματος. Για το σύστημα σώματος – ελατηρίου του σχήματος 2.1, έστω $x=x(t)$ η θέση του κινούμενου σώματος ενώ υποθέτουμε ότι η αρχή του συστήματος αναφοράς βρίσκεται στο σημείο που βρίσκεται το σώμα τη χρονική στιγμή $t=0$, όπου το ελατήριο είναι στο φυσικό του μήκος. Η εξίσωση κίνησης (2.1) θα πάρει την ακόλουθη μορφή:



Σχήμα 2.1. Σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού πειράματος κίνησης σώματος μάζας M σε επίπεδη επιφάνεια υπό την επίδραση δύναμης μέσω ελατηρίου σταθεράς k . Ισοδύναμα, αντί να κινείται το σώμα μέσω του ελατηρίου, ολισθαίνει το επίπεδο πάνω στο οποίο βρίσκεται το σώμα με σταθερή ταχύτητα v .

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = F_s - F_{el} \quad (2.2)$$

όπου F_s είναι η δύναμη της στατικής τριβής και F_{el} είναι η ελαστική δύναμη επαναφοράς του ελατηρίου. Σε κάθε χρονική στιγμή μεταγενέστερη του $t=0$, η στατική τριβή ισούται με τη δύναμη επαναφοράς του ελατηρίου και το σώμα παραμένει ακίνητο (προσκολλημένο) πάνω στο επίπεδο. Η κίνηση του επομένως (λόγω κίνησης του επιπέδου με ταχύτητα v) θα περιγράφεται από την εξίσωση:

$$x(t) = vt \quad (2.3)$$

Έστω ότι τη χρονική στιγμή t_1 , η ελαστική δύναμη του ελατηρίου

$$F_{el} = kx(t) = k \cdot v \cdot t \quad (2.4)$$

ισούται με τη μέγιστη δύναμη της στατικής τριβής

$$F_{\max} = \mu_s N = \mu_s Mg \quad (2.5)$$

όπου η κάθετη αντίδραση πάνω στο σώμα από το επίπεδο ισούται με το βάρος του σώματος και μ_s είναι ο συντελεστής στατικής τριβής των δύο επιφανειών, που θεωρούμε ότι είναι ανεξάρτητος του εμβαδού της επιφάνειας επαφής.

Προκειμένου να επιτευχθεί η κίνηση της διαδοχικής προσκόλλησης και ολίσθησης του σώματος, η μόνη απαραίτητη συνθήκη που χρειάζεται είναι η μέγιστη δύναμη στατικής τριβής F_{\max} να είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη της κινητικής τριβής. Από τη χρονική στιγμή t_1 το σώμα κινείται ολισθαίνοντας προς τα πίσω πάνω στο κινούμενο επίπεδο, υπό την επίδραση αυτή τη φορά της ελαστικής δύναμης του ελατηρίου και της δύναμης κινητικής τριβής:

$$F_d = \mu_d N = \mu_d Mg \quad (2.6)$$

όπου μ_d ο συντελεστής της κινητικής τριβής, ανεξάρτητος της μάζας M , της ταχύτητας v και της επιφάνειας επαφής. Η εξίσωση κίνησης επομένως για την φάση ολίσθησης θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = F_d - kx(t) \quad (2.7)$$

με τις ακόλουθες αρχικές συνθήκες για τη χρονική στιγμή t_1 :

$$\begin{cases} x(t_1) = \frac{\mu_s N}{k} \\ \left[\frac{dx}{dt} \right]_{t_1} = v \end{cases} \quad (2.8)$$

Ορίζοντας ένα νέο σύστημα αναφοράς $y=y(t)$ για τη θέση του σώματος, ως εξής:

$$y(t) = x(t) - \frac{F_d}{k} \quad (2.9)$$

θα έχουμε

$$M \frac{d^2y}{dt^2} = M \frac{d^2x}{dt^2} \quad \text{και} \quad x(t) = y(t) + \frac{F_d}{k}$$

Και με αντικατάσταση των παραπάνω στην εξίσωση κίνησης (2.7), αυτή απλουστεύεται ως εξής:

$$M \frac{d^2y}{dt^2} = -ky(t) \quad (2.10)$$

Αντίστοιχα, οι οριακές συνθήκες (2.8) θα τροποποιηθούν ως εξής:

$$\begin{cases} y(t_1) = \frac{(\mu_s - \mu_d) N}{k} \\ \left[\frac{dy}{dt} \right]_{t_1} = v \end{cases} \quad (2.11)$$

Η διαφορική εξίσωση κίνησης 2.10 είναι η εξίσωση που περιγράφει τον απλό αρμονικό ταλαντωτή και έχει ως γνωστό την ακόλουθη λύση:

$$y(t) = A \cos(\omega t + \phi) = A \cos \omega t \cdot \cos \phi - A \sin \omega t \cdot \sin \phi \quad (2.12)$$

όπου τα A και ϕ εξαρτώνται από τις αρχικές συνθήκες και το ω δίνεται ως γνωστό από τη σχέση:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (2.13)$$

Εκλέγοντας $t_1=0$, οι αρχικές συνθήκες (2.11) θα μας δώσουν αντίστοιχα μέσω της (2.12):

$$y(t_1 = 0) = A \cos \phi = \frac{(\mu_s - \mu_d)N}{k}$$

και

$$\frac{dy}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \phi) \quad \text{και} \quad \frac{dy}{dt}(t_1 = 0) = -\omega A \sin \phi = v$$

Η λύση επομένως (εξίσ. 2.12) βάσει των παραπάνω σχέσεων γίνεται:

$$y(t) = \frac{(\mu_s - \mu_d)N}{k} \cos \omega t + \frac{v}{\omega} \sin \omega t \quad (2.14)$$

Έτσι τελικά για την κίνηση ολίσθησης θα έχουμε:

$$x(t) = \frac{\mu_d N}{k} + \frac{(\mu_s - \mu_d)N}{k} \cos \omega t + \frac{v}{\omega} \sin \omega t \quad (2.15)$$

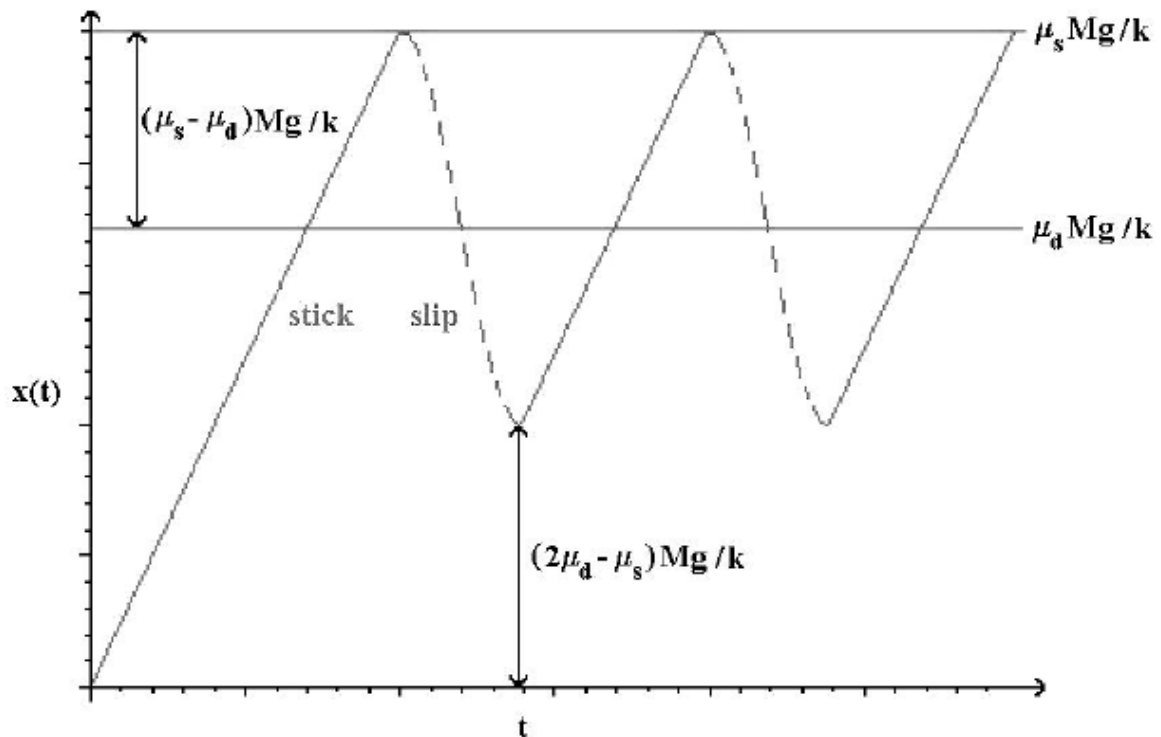
Θεωρώντας κίνηση με μικρή ταχύτητα, θα ισχύει:

$$\frac{v}{\omega} = v \sqrt{\frac{M}{k}} \ll \frac{(\mu_s - \mu_d)N}{k} \quad (2.16)$$

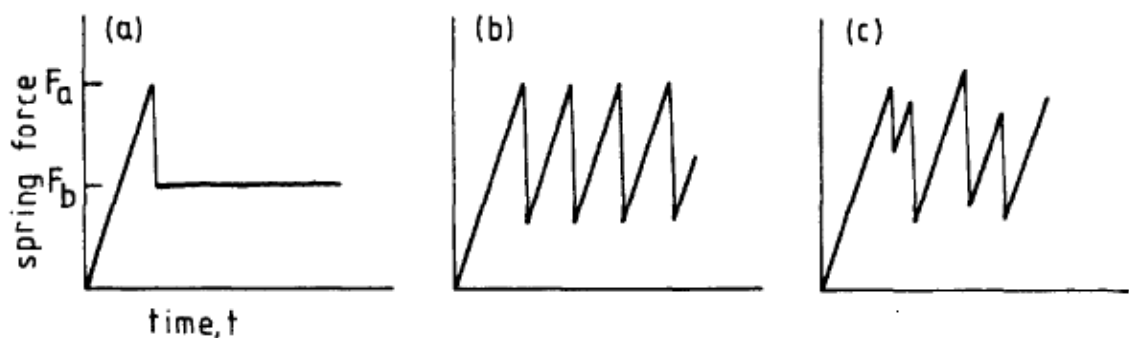
και ο όρος που περιέχει το $\sin \omega t$ στην (2.15) μπορεί να αγνοηθεί χωρίς σημαντικό σφάλμα. Για παράδειγμα, για $M=1\text{kg}$, $k=1\text{N/m}$ και $(\mu_s - \mu_d)N=1\text{N}$, η παραπάνω συνθήκη δίνει ταχύτητα $v \ll 1\text{m/s}$.

Έτσι, η κίνηση του σώματος στην κατάσταση ολίσθησης είναι μία αρμονική ταλάντωση με πλάτος $(\mu_s - \mu_d)N/k$. Για σταθερές τιμές των M και k , το πλάτος ταλάντωσης εξαρτάται αποκλειστικά από τη διαφορά μεταξύ των δύο συντελεστών στατικής και κινητικής τριβής.

Η φάση ολίσθησης διαρκεί μισή περίοδο κίνησης όπου το σώμα αποκτά την ταχύτητα v αφού ακινητοποιείται στο επίπεδο. Έχουμε επομένως μία περιοδική εναλλαγή των δύο καταστάσεων κίνησης, δηλαδή της προσκόλλησης και της ολίσθησης. Η κίνηση αυτή απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 2.2. Η ίδια κατάσταση της ιδανικής αρμονικής κίνησης παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.3b, όπου απεικονίζεται αυτή τη φορά η δύναμη που ασκείται από το ελατήριο ($F_{el}=kx(t)$). Η περίπτωση (a) αντιπροσωπεύει την σταθερή κατάσταση κίνησης όπου δεν εμφανίζεται η εναλλαγή των κινήσεων προσκόλλησης – ολίσθησης, ενώ στην περίπτωση (c) η εναλλαγή της κίνησης παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά, που αντιπροσωπεύει την κίνηση σε πραγματικά συστήματα..



Σχήμα 2.2. Γραφική παράσταση της θέσης του σώματος $x=x(t)$ για την κίνηση που προκύπτει από τη λύση της διαφορικής εξίσωσης (2.7). Το σώμα ταλαντώνεται με πλάτος που καθορίζεται από τη διαφορά των δύο συντελεστών στατικής και κινητικής τριβής.



Σχήμα 2.3. Γραφική παράσταση της δύναμης που ασκείται στο ελατήριο ως προς το χρόνο. (α) σταθερή κατάσταση (β) περιοδική κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης και (c) χαοτική κίνηση

2.2 Εξάρτηση της κίνησης από την ταχύτητα του σώματος

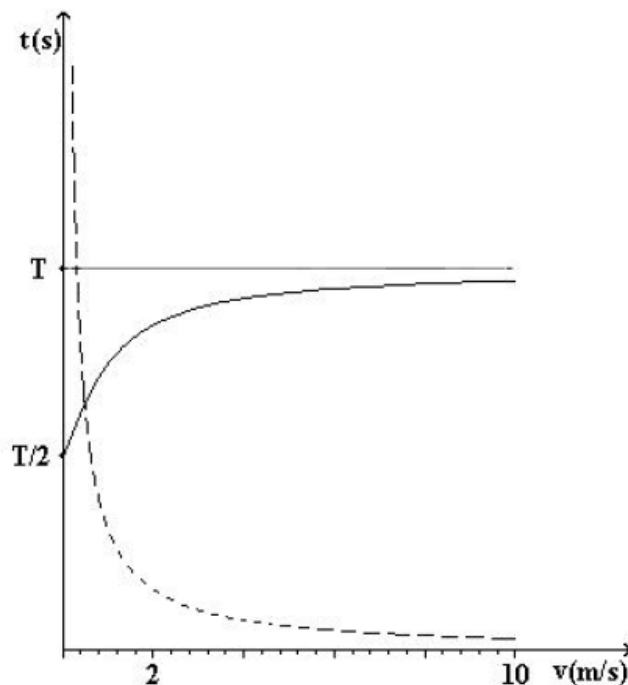
Στην περίπτωση που η ταχύτητα κίνησης αυξάνεται ενώ όλες οι άλλες παράμετροι του προβλήματος παραμένουν σταθερές, η φάση προσκόλλησης γίνεται ολοένα και πιο σύντομη, μέχρι που εξαφανίζεται στο όριο των μεγάλων ταχυτήτων.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.2, η προσκόλληση αντιστοιχεί σε μία μετατόπιση του σώματος με ταχύτητα v , κατά $2(\mu_s - \mu_d)N/k$, το διπλάσιο δηλαδή του πλάτους κίνησης στη φάση της ολίσθησης. Ο χρόνος επομένως της κίνησης στη φάση της προσκόλλησης θα δίνεται από τη σχέση:

$$T_{\text{stick}} = \frac{2(\mu_s - \mu_d)N}{kv} \approx \frac{c}{v} \quad (2.17)$$

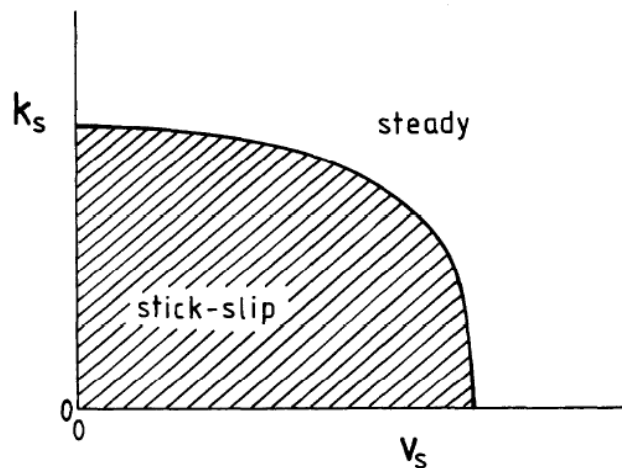
Είναι δηλαδή αντιστρόφως ανάλογος της ταχύτητας κίνησης του σώματος.

Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζεται η χρονική διάρκεια των δύο καταστάσεων (προσκόλληση και ολίσθηση) για διαφορετικές τιμές της ταχύτητας v . Όπως παρατηρούμε, για μικρή ταχύτητα κίνησης, η διάρκεια της προσκόλλησης είναι μεγάλη ενώ ο χρόνος ολίσθησης τείνει στο $T/2$, δηλαδή στην ημιπερίοδο της ταλάντωσης, όπως αυτή προκύπτει από τη λύση της 2.15, στο όριο των χαμηλών ταχυτήτων. Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, η διάρκεια της προσκόλλησης ελαττώνεται απότομα και τείνει ασυμπτωτικά στο μηδέν, ενώ η διάρκεια της ολίσθησης τείνει σε μία σταθερή τιμή T . Υπάρχει δε, μία κρίσιμη τιμή της ταχύτητας όπου έχουμε μετάβαση από κινήσεις με $T_{\text{stick}} \gg T_{\text{slip}}$ σε κινήσεις με $T_{\text{stick}} \ll T_{\text{slip}}$.



Σχήμα 2.4. Γραφική παράσταση όπου απεικονίζεται ο χρόνος όπου διαρκεί η προσκόλληση του σώματος (διακεκομμένη γραμμή) και ο χρόνος (περίοδος) της κίνησης (ολίσθησης) για διαφορετικές ταχύτητες κίνησης. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, $M=1\text{kg}$, $k=25\text{N/m}$, $\mu_s=1$ και $\mu_d=0.5$. Η περίοδος της περιοδικής κίνησης είναι περίπου 1.3s .

Τα προηγούμενα αναφέρονται στην περίπτωση που μεταβάλλεται μόνον η ταχύτητα του σώματος ενώ οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθεροί. Η κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης παρουσιάζεται κάτω από μία κρίσιμη τιμή της ταχύτητας κίνησης, πάνω από την οποία η κίνηση είναι συνεχής χωρίς φαινόμενα προσκόλλησης (δες Σχήμα 2.3a). Η κρίσιμη αυτή τιμή της ταχύτητας αλλάζει αν αλλάξει η σταθερά δύναμης του ελατηρίου και η εξάρτηση αυτή της κρίσιμης ταχύτητας από τη σταθερά του ελατηρίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5, όπου παρατηρούμε ότι οριοθετείται μία περιοχή (σκιασμένη) όπου εμφανίζεται η κίνηση προσκόλλησης ολίσθησης, ενώ έξω από αυτή η κατάσταση κίνησης είναι σταθερή.



Σχήμα 2.5. Γραφική παράσταση όπου απεικονίζεται η περιοχή εμφάνισης της κίνησης προσκόλλησης – ολίσθησης για διαφορετικές τιμές ταχύτητας v_s και σταθεράς ελατηρίου k_s . Έξω από τη γραμμοσκιασμένη περιοχή η κίνηση περιγράφεται από το Σχήμα 2.3a.

2.3 Γενικά περί των σεισμών

Οι σεισμοί είναι αδιαμφισβήτητα φυσικά φαινόμενα εξαιρετικής πολυπλοκότητας. Από ένα αρκετά μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων και επιστημονικών μελετών που προέκυψαν μετά την ραγδαία ανάπτυξη του κλάδου της σεισμολογίας ως αυτόνομης επιστήμης κατά την δεκαετία του '60 με τη δημιουργία και εγκατάσταση των πρώτων σεισμολογικών δικτύων σε παγκόσμια κλίμακα, έγινε δυνατή και η ουσιαστικότερη μελέτη των σεισμών που οδήγησε σε πολλά και σημαντικά ευρήματα. Αυτά σε πρώτο στάδιο αφορούσαν κυρίως τη φύση, τη γένεση και την γεωγραφική κατανομή των σεισμών, ενώ στα χρόνια που ακολούθησαν ως και τη σημερινή εποχή τα αποτελέσματα της σεισμολογικής έρευνας αξιοποιήθηκαν σε ικανοποιητικό βαθμό και σε πρακτικό επίπεδο, με την δημιουργία και εφαρμογή κατάλληλων, ανά τον κόσμο, αντισεισμικών κανονισμών.

Από τα πρώτα κιάλας βήματα της σεισμολογικής έρευνας, έγινε αντιληπτό από τους επιστήμονες ότι οι σεισμοί δεν ήταν δυνατό να προβλεφθούν με την απλή εφαρμογή ενός γνωστού φυσικού νόμου, γιατί αποτελούν φαινόμενα που παρουσιάζουν σε αρκετά μεγάλο βαθμό χαοτικό χαρακτήρα, όπως ακριβώς συμβαίνει με τα ατμοσφαιρικά και με τα μετεωρολογικά φαινόμενα.

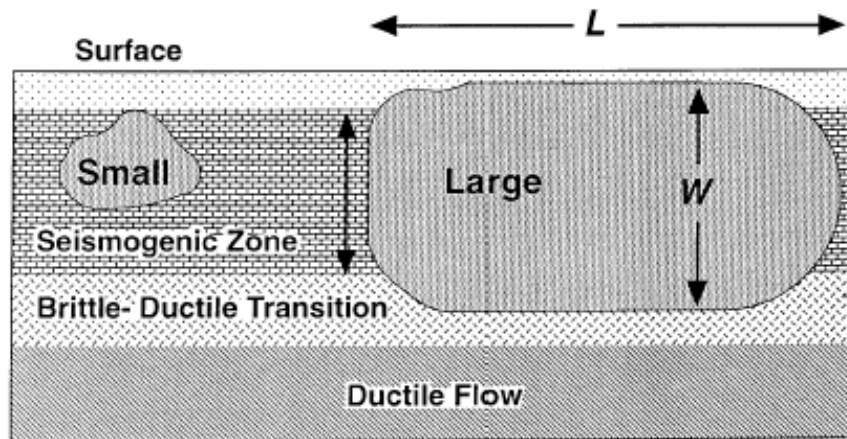
Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών, που είναι αποδεκτή από το σύνολο πλέον της επιστημονικής κοινότητας, προβλέπει κατά κάποια έννοια τους σεισμούς, αφού βρισκόμαστε σήμερα σε θέση να διαχωρίζουμε τις περιοχές χαμηλής σεισμικότητας από τις περιοχές υψηλής σεισμικότητας. Επιπλέον, η πιθανότητα να συμβεί ένας ισχυρός σεισμός στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πιθανότητα της γένεσης ενός σεισμού στο εσωτερικό μιας λιθοσφαιρικής πλάκας. Ακόμα ένα σημαντικό στοιχείο που προκύπτει από την παραπάνω θεωρία είναι το γεγονός ότι σε ορισμένο διάστημα χρόνου, αναμένεται το συνολικό άθροισμα της σεισμικής ροπής που εκλύεται σε παγκόσμια κλίμακα να είναι σε συμφωνία με τις σχετικές κινήσεις των τεκτονικών πλακών όπως αυτές καθορίζονται από την ανάλυση των μαγνητικών ανωμαλιών.

Οι όροι “μεγάλος” ή “πολύ ισχυρός” σεισμός χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν εκείνα τα γεγονότα που διαρρηγνύουν προς τα κάτω ολόκληρο το εύρος της σεισμογενούς ζώνης των ρηγμάτων (Σχήμα 2.6), δηλαδή το τμήμα εκείνο των ρηγμάτων που δύναται να αναπτύσσει τάσεις και να τις απελευθερώνει απότομα. Οι σεισμοί αυτοί προκαλούν το μεγαλύτερο ποσοστό από το σύνολο των καταστροφών σε παγκόσμια κλίμακα, καθώς και τις ισχυρότερες δονήσεις. Επίσης τα ρήγματα στα οποία αναφερόμαστε όταν πρόκειται για θέματα πρόγνωσης είναι τα πολύ ενεργά ρήγματα με ρυθμούς ολίσθησης ίσους ή μεγαλύτερους των 10mm/year, στα οποία οι ρυθμοί επανάληψης κυμαίνονται από δεκαετίες ως πολλές εκατοντάδες χρόνια.

Κατά το παρελθόν έχουν γίνει πολλές απόπειρες, ώστε να καθοριστεί με σαφήνεια ποιο πρέπει να είναι το κατάλληλο περιεχόμενο μιας ανακοινώσιμης πρόγνωσης σεισμού. Τα βασικά χαρακτηριστικά μιας πρόγνωσης επικείμενου ή μελλοντικού σεισμού πρέπει να είναι τα εξής: i) ο χρόνος γένεσης του σεισμού, ii) το κατά προσέγγιση επίκεντρο, iii) το κατά προσέγγιση μέγεθος και iv) οι αβεβαιότητες στον υπολογισμό των αναφερθέντων ή η πιθανότητα για την επαλήθευση της πρόγνωσης.

Ανάλογα με το χρονικό διάστημα για το οποίο πραγματοποιείται μια πρόγνωση διακρίνουμε τρία είδη: τη βραχείας διάρκειας πρόγνωση (για διάστημα λίγων ημερών), τη μεσοπρόθεσμη πρόγνωση (για μερικά χρόνια) και την μακράς διάρκειας πρόγνωση (για μερικές δεκαετίες).

Βραχείας διάρκειας πρόγνωση είναι το είδος της πρόγνωσης που συγκέντρωσε ένα μεγάλο αριθμό ερευνητικών προσπαθειών κατά τις τελευταίες δεκαετίες, χωρίς ωστόσο τα επιθυμητά αποτελέσματα. Βασικός σκοπός των προσπαθειών αυτών ήταν ο εντοπισμός και η μελέτη πρόδρομων σεισμικών φαινομένων με στόχο την άμεση πρόγνωση ενός επικείμενου σεισμού. Τα πρόδρομα φαινόμενα μπορούν να είναι σεισμολογικής φύσεως (π.χ.



Σχήμα 2.6. Τα δύο είδη σεισμών, μικροί και ισχυροί, όπου L είναι το μήκος της διάρρηξης κατά μήκος ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης και W είναι το προς τα κάτω πλάτος αυτής. Οι μικροί σεισμοί δεν διαρρηγνύουν ολόκληρο το πλάτος W που είναι ικανό να υποστεί ρήξη από κάποιο σεισμό. Αντίθετα οι μεγάλοι και οι ισχυροί σεισμοί διαρρηγνύουν το πλάτος W , διαρρηγνύοντας έτσι και ολόκληρο το πλάτος της σεισμογενούς ζώνης. Οι μικρότερες διάρρηξεις μπορούν να αναπτυχθούν κατά δύο διαστάσεις L και W , ενώ οι διάρρηξεις των ισχυρών σεισμών μπορούν να παρουσιάσουν ανάπτυξη μόνο κατά τη διάσταση L .

προσεισμοί) και γεωλογικής φύσεως (π.χ. τεκτονική ανύψωση περιοχών, μικρής έκτασης εκδήλωση διακλάσεων και ρωγμών), είτε ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα (μεταβολές της έντασης του γήινου ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου) ή ακόμα και παρατηρούμενες μεταβολές στη στάθμη των υδροφόρων στρωμάτων μιας περιοχής, αυξημένη εκπομπή ραδονίου κτλ. Παρόλα αυτά, η μελέτη των πρόδρομων φαινομένων δεν οδήγησε σε ακριβείς στο σύνολό τους προγνώσεις.

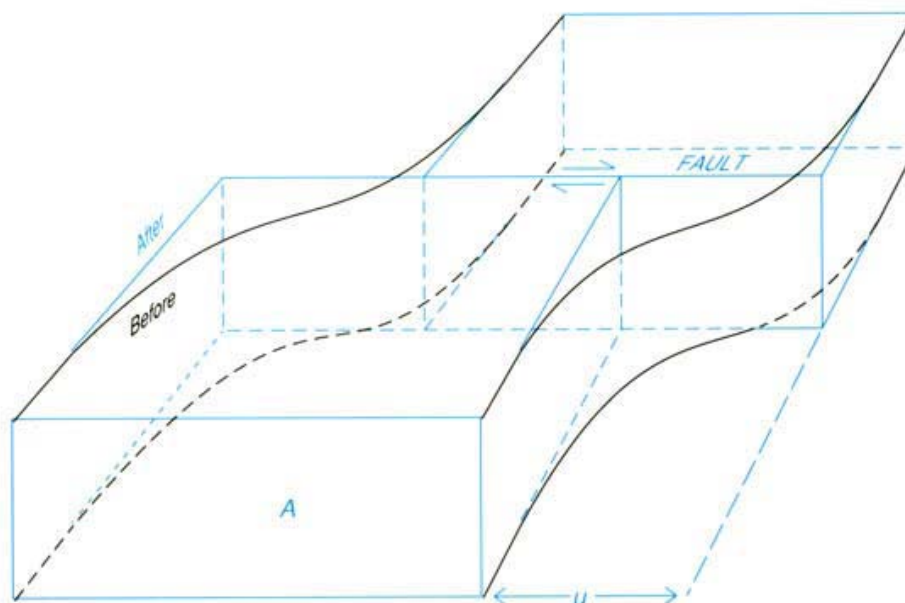
Σημαντικά βήματα πραγματοποιήθηκαν προς τη κατεύθυνση της μεσοπρόθεσμης πρόγνωσης τα τελευταία 15 χρόνια κυρίως με το μοντέλο του κρίσιμου σεισμού που βασίζεται σε αρχές της στατιστικής φυσικής. Η ανάπτυξη και η εξέλιξη του μοντέλου αυτού κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, συνέβαλε ουσιαστικά στη στατιστική πρόγνωση των σεισμών. Το μοντέλο αυτό όμως έχει παράγει και σημαντικά αποτελέσματα που αφορούν την ίδια τη μεσοπρόθεσμη πρόγνωση, με καθορισμό σχέσεων για το μέγεθος και το χρόνο γένεσης ενός επικείμενου σεισμού, καθώς και των σχετικών αβεβαιοτήτων που συνοδεύουν τις σχέσεις αυτές. Παρόλα αυτά σε ότι αφορά το επίκεντρο οι αβεβαιότητες εξακολουθούν να παραμένουν σημαντικές.

Μακράς διάρκειας πρόγνωση μπορεί να εφαρμοσθεί για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας σε μεγάλες σχετικά περιοχές και να οδηγήσει στη λήψη χρήσιμων μακροπρόθεσμης κλίμακας αντισεισμικών μέτρων στις περιοχές αυτές. Έτσι εφαρμογή των μεθόδων πρόγνωσης αυτού του τύπου στηρίζονται κυρίως στο προσδιορισμό του σεισμικού κύκλου για μια περιοχή και στον υπολογισμό της περιόδου επανάληψης των ισχυρών σεισμών του κύκλου. Παρόλα αυτά η άμεση πρόγνωση σεισμών σε τόσο μεγάλο βάθος χρόνου δεν είναι εφικτή σύμφωνα με την υπάρχουσα επιστημονική γνώση.

2.4 Μηχανισμοί γένεσης των σεισμών

Σύμφωνα με τη θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών οι κύριες αιτίες γένεσης των σεισμών είναι οι ίδιες οι κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών (τεκτονικοί σεισμοί). Λόγω των κινήσεων αυτών προκαλείται ελαστική παραμόρφωση των πετρωμάτων και συσσώρευση μεγάλων ποσών δυναμικής ενέργειας μέσα σε αυτά (ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης), που οδηγεί σε μια σταδιακή αύξηση των τάσεων και παραμόρφωση του σεισμογόνου χώρου. Όταν η τιμή των τάσεων αυτών ξεπεράσει το όριο αντοχής των πετρωμάτων εκατέρωθεν ενός ρήγματος, προκαλείται έκλυση της συσσωρευμένης ενέργειας υπό μορφή ελαστικής ενέργειας και δημιουργία μιας νέας κατάστασης δυναμικής ισορροπίας για τη λιθόσφαιρα. Καθώς όμως οι κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών συνεχίζονται, νέες τάσεις συσσωρεύονται στα πετρώματα που εκτονώνονται με νέους σεισμούς κτλ.

Από τις πρώτες και σημαντικότερες παρατηρήσεις πάνω στη σταδιακή συσσώρευση της παραμόρφωσης στα ρήγματα και την εκτόνωση της συσσωρευμένης αυτής ενέργειας μέσω των σεισμών ήταν αυτές του Reid (1911). Στις παρατηρήσεις αυτές οφείλεται και η σταδιακή αποδοχή της άποψης που θεωρούσε ως βασικό αίτιο γένεσης των σεισμών τα ρήγματα και τις διάφορες τεκτονικές διεργασίες που λάμβαναν χώρα σε αυτά. Έτσι ο ίδιος, ερμηνεύοντας τα γεωδαιτικά δεδομένα που είχε συλλέξει πριν και μετά από τον ισχυρό σεισμό του San Francisco Bay (1906) από περιοχές κατά μήκος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα, πρότεινε με βάση την θεωρία του (θεωρία της ελαστικής ανάπλασης – elastic rebound theory), ότι ο επόμενος ισχυρός σεισμός στη περιοχή, θα πραγματοποιούνταν όταν οι επικρατούσες τάσεις επανέλθουν στα επίπεδα που τις χαρακτήριζαν ακριβώς πριν το σεισμό του 1906. Η θεωρία αυτή του Reid απέκτησε σημαντική ιστορική και πρακτική αξία, αφού στην συνέχεια επαληθεύτηκε από την τεκτονική των λιθοσφαιρικών πλακών και αποτέλεσε συγχρόνως και την βάση για την ανάπτυξη πολλών νεότερων θεωριών της σεισμολογίας, όπως είναι η γνωστή θεωρία των σεισμικών κενών. Αυτή η αρχική δηλαδή υπόθεση του Reid, για μια αργή και σταδιακή συσσώρευση των τάσεων, είναι αυτό που ακριβώς σήμερα αναγνωρίζουμε ως κίνηση των τεκτονικών πλακών.



Σχήμα 2.7. Μετατόπιση u πριν και μετά το σεισμό σε κατακόρυφο ρήγμα παράταξης (strike-slip) περιοχής A , σύμφωνα με τη θεωρία ελαστικής ανάπλασης (Reid, 1911). Τα βέλη υποδεικνύουν τη σχετική κίνηση που είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση του ρήγματος.

Σήμερα πλέον γνωρίζουμε ότι οι σεισμοί δεν συμβαίνουν τυχαία στο χώρο και στο χρόνο. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο και η επιστήμη προχώρησε σε διάκριση της σεισμικής δράσης, τόσο ανάλογα με το χρόνο (προσεισμοί, μετασεισμοί, σμηνοσεισμοί), όσο και με τον χώρο (επιφανειακοί, ενδιάμεσοι και μεγάλοι βάθους) στον οποίο πραγματοποιούνται αυτοί. Επίσης έχει αποδειχθεί ότι κάποιες χρονικές μεταβολές, όπως είναι π.χ. η εξασθένηση της συχνότητας των μετασεισμών, ακολουθούν σε ικανοποιητικό βαθμό καλά προσδιορισμένους εμπειρικούς νόμους όπως είναι π.χ. ο νόμος του Omori που τροποποιήθηκε αργότερα από τον Utsu (1961):

$$n(t) = K / (c+t)^p$$

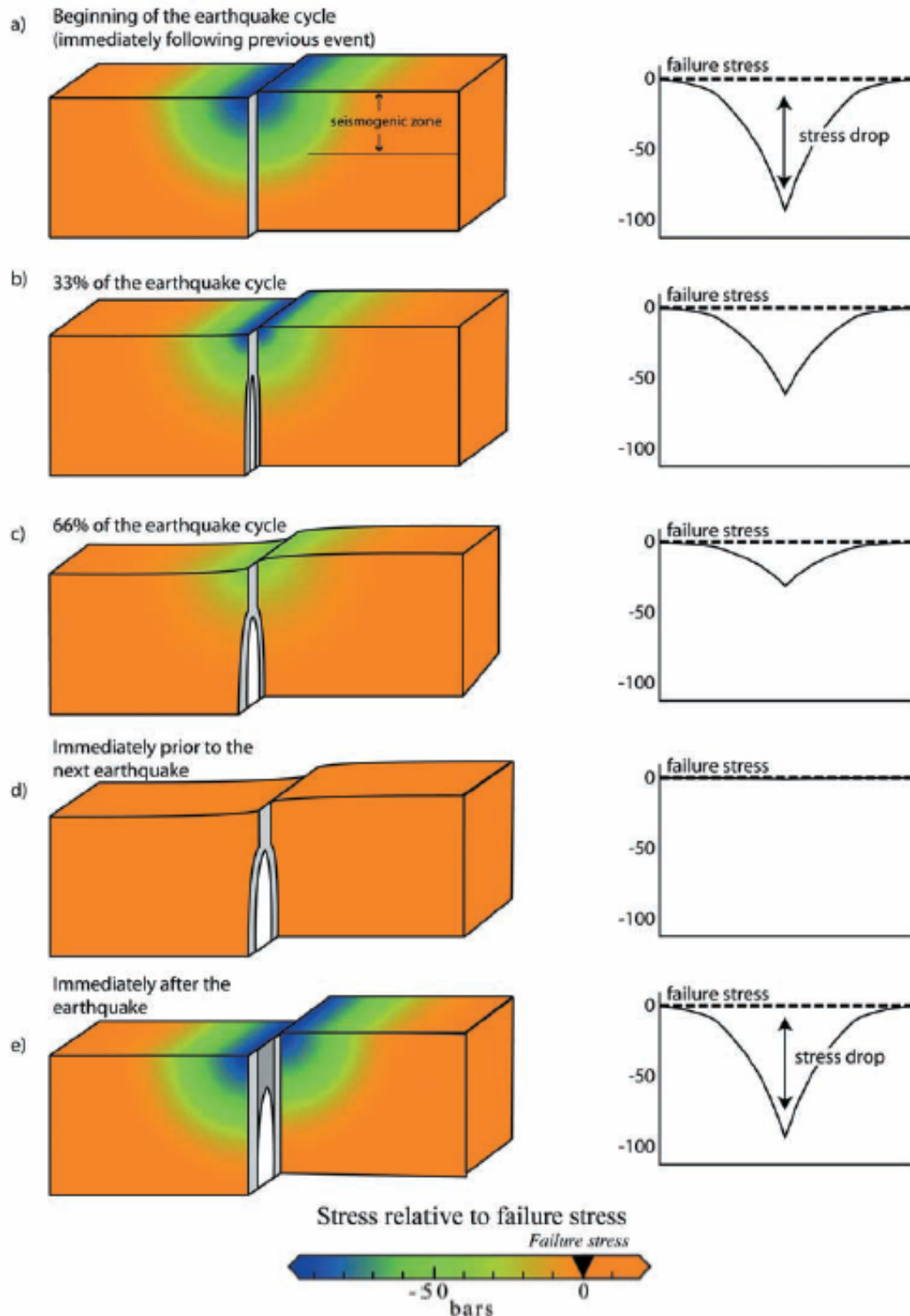
όπου $n(t)$ είναι ο αριθμός των μετασεισμών σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα t , K είναι ο ρυθμός ελάττωσης των μετασεισμών, c η παράμετρος αντιστάθμισης του χρόνου και p παράμετρος που εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού στον εστιακό χώρο με τιμές μεταξύ 0.7-1.5. Αντίστοιχες σχέσεις έχουν προταθεί και σε ότι αφορά τους προσεισμούς, όπως είναι αυτή του Papazachos (1975):

$$n = n_1 (\tau - t)^h$$

όπου n είναι ο αριθμός των μετασεισμών στη μονάδα χρόνου, t ο χρόνος από την αρχή της προσεισμικής ακολουθίας και n_1 , τ , h παράμετροι. Επίσης, σημαντικός αριθμός παρόμοιων μαθηματικών μοντέλων και μηχανισμών που έχουν προταθεί κατά καιρούς, στις περισσότερες των περιπτώσεων ανταποκρίνονται κατά πολύ στους αντίστοιχους πραγματικούς μηχανισμούς της φύσης.

Από σύγχρονες μελέτες και παρατηρήσεις έχει αποδειχθεί ότι οι μεταβολές των στατικών τάσεων που προκαλούνται κατά τη γένεση ενός σεισμού σε μια περιοχή, ασκούν μια ισχυρή επίδραση στο επίκεντρο και το χρόνο γένεσης μελλοντικών σεισμών, καθώς και στη μεταγενέστερη σεισμικότητα τη περιοχής εν γένει. Δύο βασικές κατευθύνσεις έρευνας στο θέμα των μεταβολών αυτών αφορούν τη δημιουργία σκιερών ζωνών τάσεων μετά τη γένεση ισχυρών σεισμών και τη προκαλούμενη σεισμικότητα από μεταβολές των τάσεων Coulomb. Άμεση συνέπεια των παραπάνω αποτελεί η σύγχρονη άποψη κατά την οποία οι συσσωρευόμενες τάσεις πριν από κάποιο σεισμό δεν συγκεντρώνονται αποκλειστικά πάνω στο σεισμογόνο ρήγμα αλλά σε μια ευρύτερη περιοχή γύρω από αυτό (σεισμογόνος χώρος). Οι μεταβολές του πεδίου των τάσεων κατά τη διάρκεια του σεισμικού κύκλου για ένα κατακόρυφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης απεικονίζονται στο Σχήμα 2.8.

Έχει διαπιστωθεί επίσης ότι η κατανομή των τάσεων σε ένα σύστημα ρηγμάτων δεν είναι ομοιόμορφη και ενιαία. Αντιθέτως, χαρακτηρίζεται από αρκετά μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας και καθορίζεται από το ιστορικό των σεισμών, συγκεκριμένα των πολύ μεγάλων σεισμών σε ένα σύστημα ρηγμάτων. Έτσι, το μεγαλύτερο μέρος αυτής της πολυπλοκότητας των σεισμικών διεργασιών, προκύπτει από την ευαισθησία της κατανομής των τάσεων στις λεπτομέρειες που παρουσιάζει η κατανομή της ολίσθησης στους μεγάλους σεισμούς. Δηλαδή, ασήμαντες διαφορές στο μήκος της διάρρηξης έχουν σοβαρή επίδραση στο υποκείμενο πεδίο των τάσεων σε γειτονικά τμήματα ρηγμάτων. Ωστόσο, οι σεισμικές διεργασίες που παρεμβάλλονται στο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο ισχυρών γεγονότων είναι συνήθως ακόμα πιο πολύπλοκες. Για το λόγο αυτό το χάος και η μη γραμμικότητα, προκύπτουν κυρίως κατά την ασταθή ολίσθηση σε ισχυρούς σεισμούς και παρόλο που οι μικρότεροι σεισμοί υπερισχύουν αριθμητικά των μεγαλύτερων σεισμών, οι μεγάλοι σεισμοί εκλύουν το μεγαλύτερο ποσοστό σεισμικής ροπής και ενέργειας.



Σχήμα 2.8 Εξέλιξη των μεταβολών των τάσεων σε ένα κατακόρυφο ρήγμα απείρου μήκους κατά τη διάρκεια του σεισμικού κύκλου. Το ανώτερο τμήμα του ρήγματος χαρακτηρίζεται ως σεισμογενές, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη η ολίσθηση πραγματοποιείται ασεισικά. Το πορτοκαλί χρώμα αντιπροσωπεύει τις τιμές των τάσεων για τις οποίες πραγματοποιείται ολίσθηση στο ρήγμα (διατμητικές τάσεις ολίσθησης). (a) Ακριβώς μετά τη γένεση του σεισμού οι τάσεις γύρω από το ρήγμα ελαττώνονται σχηματίζοντας σκιερή ζώνη. (b,c) Στο 33% του σεισμικού κύκλου το ανώτερο τμήμα του ρήγματος «κλειδώνει», ενώ το κατώτερο ολισθαίνει ασεισικά, με αποτέλεσμα τη σμίκρυνση της σκιερής ζώνης. Στο 66% η σκιερή ζώνη ελαττώνεται ακόμα περισσότερο. (d) Ακριβώς πριν τον επόμενο σεισμό στο ρήγμα το ανώτερο τμήμα αυτού προσεγγίζει τη τιμή της τάσεως ολίσθησης. (e) Η σεισμική ολίσθηση επαναφέρει τις τάσεις στο στάδιο (a) με επαύξηση της συνολικής ολίσθησης στο ρήγμα.

2.5 Η κίνηση stick-slip ως μηχανισμός γένεσης σεισμών

2.5.1 Εργαστηριακά πειράματα εμφάνισης της κίνησης stick-slip κατά τη θραύση πετρωμάτων

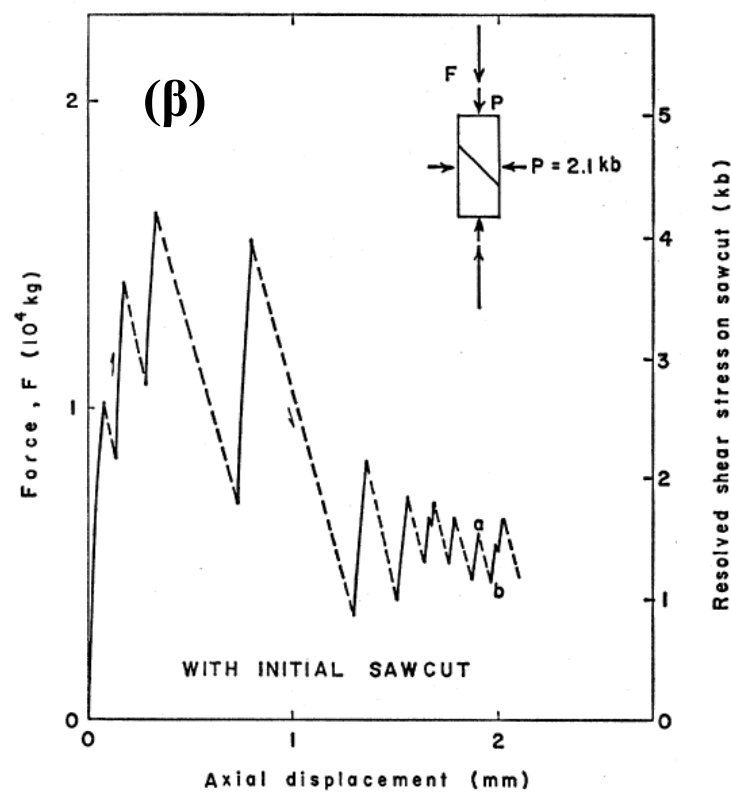
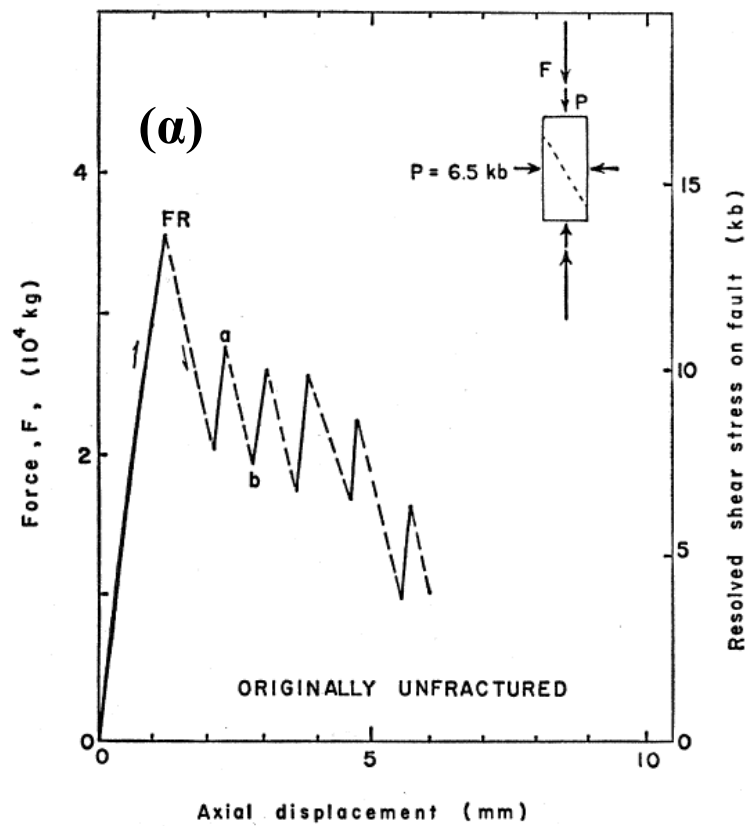
Από καθαρά μηχανική άποψη, ένα σεισμικό γεγονός δημιουργείται από μία ξαφνική αστάθεια. Διαφορετικού είδους αστάθειες έχουν προταθεί κατά καιρούς, όπως η θραύση (fracture), η διατμητική τήξη (shear melting), ο ερπυσμός (creep) και η κίνηση stick-slip, προκειμένου να προσδιοριστούν οι πηγές των σεισμικών γεγονότων. Από όλες αυτές τις αστάθειες, η τελευταία που προκαλεί εναλλαγή στην κίνηση, έλαβε ιδιαίτερη προσοχή σε πειράματα που διεξήχθησαν υπό ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες.

Όταν δύο επιφάνειες ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη, η κίνηση που προκύπτει είναι συνήθως απότομη με σταδιακές παύσεις, παρά ομαλή. Στην περίπτωση των σεισμών, το φαινόμενο stick-slip αναφέρεται στην γρήγορη κίνηση μεταξύ δυο επιφανειών ενός ρήγματος όταν αυτές οι δυο επιφάνειες ξεκολλούνε η μια από την άλλη. Το πέτρωμα παραμορφώνεται ή λυγίζει αλλά κατέχει τη θέση του μέχρι να γίνει ο σεισμός. Όταν το πέτρωμα επανέλθει στην αρχική του θέση τότε έχουμε ελαστική ανάκαμψη (elastic rebound). Στο φαινόμενο stick-slip το ρήγμα που δημιουργείται παράγει ενέργεια με τη μορφή σεισμικών κυμάτων, δημιουργώντας έτσι το σεισμό.

Τέτοια ξαφνική διακοπτόμενη κίνηση σε προϋπάρχον ρήγμα στη γη είναι παρόμοια με την ξαφνική διακοπτόμενη κίνηση που έχει παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια ολίσθησης με τριβή ανάμεσα σε επιφάνειες πετρωμάτων σε εργαστηριακά πειράματα. Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζονται τα αποτελέσματα εργαστηριακών πειραμάτων θραύσης πετρωμάτων από τους Brace και Byerlee, όπου παρουσιάζεται εμφανώς η επαναλαμβανόμενη κίνηση της προσκόλλησης και ολίσθησης. Στο Σχήμα 2.9α παρουσιάζεται η μεταβολή της εφαρμοζόμενης δύναμης συναρτήσει της αξονικής μετατόπισης σε κυλινδρικό δείγμα γρανιτικού πετρώματος που δεν έχει υποστεί αρχικά θραύση. Στο δείγμα εφαρμόζεται αρχικά υδροστατική πίεση και εφαρμόζεται επιπλέον μονοαξονική συμπίεση. Η συμπίεση αυξάνει μέχρι τη δημιουργία ρήγματος που υποδηλώνεται με τη διακεκομμένη γραμμή στο ένθετο του σχήματος 2.9α και με την ένδειξη FR στην καμπύλη τάσης – μετατόπισης. Στο σημείο αυτό της δημιουργίας της ρωγμής, η πίεση ελαττώνεται απότομα από τα 6.5kb περίπου στα 5kb και η κίνηση της ρωγμής σταματάει ξαφνικά. Με επακόλουθη αύξηση της συμπίεσης στο δείγμα σε μία ορισμένη τιμή, παρατηρούμε πάλι την ελάττωση της πίεσης με την ταυτόχρονη κίνηση και την ξαφνική επακόλουθη παύση (τμήμα ab στο σχήμα). Η διαδοχική αυτή κίνηση μπορεί να εξακολουθήσει να εξελίσσεται στο δείγμα με ακαθόριστο τρόπο όπου σε κάθε ελάττωση της πίεσης, το ρήγμα μετατοπίζεται κατά λίγο.

Σε παρόμοιο πείραμα, το δείγμα που συμπιέζεται με τον ίδιο τρόπο, έχει υποστεί πρωτύτερα θραύση ή έχει κοπεί κατά τη διεύθυνση όπου θα σχηματιζόταν η ρωγμή κατά την εφαρμογή της συμπίεσης. Η συμπεριφορά του δείγματος κατά την ολίσθηση του ρήγματος εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9β, όπου εμφανίζεται ανάλογη συμπεριφορά με το αδιατάραχτο δείγμα.

Η παραπάνω συμπεριφορά με τη διακοπτόμενη κίνηση της ρωγμής στο δείγμα (κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης) εμφανίζεται σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών εκτέλεσης του πειράματος. Η εν λόγω κίνηση εμφανίζεται σε δείγματα που έχουν κορεστεί με νερό καθώς και σε ξηρά δείγματα, όπως και σε διαφορετικές τραχύτητες των επιφανειών ολίσθησης του δείγματος.



Σχήμα 2.9. Διάγραμμα δύναμης – αξονικής μετατόπισης κατά την εφαρμογή μονοαξονικής φόρτισης δειγμάτων γρανίτη. Στην περίπτωση (α) το δείγμα σπάει στο σημείο FR ενώ στο (β) το δείγμα έχει υποστεί εκ των προτέρων θραύση κατά τη διαγώνια διεύθυνση που υποδεικνύεται στο ένθετο σχήμα.

2.5.1 Προτεινόμενα μοντέλα για την κίνηση stick-slip

Διάφοροι φυσικοί μηχανισμοί έχουν προταθεί για να εξηγήσουν την εμφάνιση της κίνησης προσκόλλησης – ολίσθησης κατά τη διάρκεια της ολίσθησης με τριβή μεταξύ δύο ξηρών επιφανειών, μέσω των αποτελεσμάτων που έχουν ληφθεί από πειράματα με πετρώματα και εύθραυστα μέταλλα. Τέσσερις διαφορετικές θεωρίες έχουν αποδώσει την κίνηση αυτή σε διαφορετικών ειδών αστάθειες που δημιουργούνται είτε λόγω θρυμματισμού (brittle instability), λόγω πλαστικότητας (plastic instability), λόγω ερπυσμού (creep instability) ή/και λόγω θερμικής μεταβολής (thermal softening).

Έχει αποδειχθεί πειραματικά από τους Bowden και Leben (1939) ότι κατά τη διάρκεια της ολίσθησης μεταξύ δύο επιφανειών, αυξάνει η θερμοκρασία τους. Αυτό οδήγησε στην ιδέα ότι η κινητική τριβή θα μπορούσε να είναι μικρότερη από τη στατική τριβή γιατί η αύξηση της θερμοκρασίας των επιφανειών θα είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής τους. Αυτή η περίπτωση θα μπορούσε να παρατηρηθεί για υψηλές ταχύτητες κίνησης του σώματος στην επιφάνεια ολίσθησης (Σχήμα 2.1) οδηγώντας σε μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του (κοντά στο σημείο τήξης) και την επακόλουθη μεταφορική του κίνηση σε συνδυασμό με μία ταλαντωτική κίνηση, σύμφωνα με επικρατούσες θεωρίες. Ο μηχανισμός αυτός της εξασθένησης του υλικού λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του, έχει προταθεί ως πιθανός μηχανισμός γένεσης σεισμών μεγάλου βάθους από τον Ogowan (1960) και τους Griggs και Baker (1969). Ωστόσο, ο μηχανισμός αυτός αποτυγχάνει να εξηγήσει την αστάθεια που εμφανίζεται κατά την ολίσθηση ανάμεσα σε πετρώματα σε εργαστηριακής κλίμακας πειράματα. Ο μηχανισμός αυτός απαιτεί ένα διάστημα σταθερής ολίσθησης που να προηγείται της ξαφνικής κίνησης αλλά, τα πειραματικά ευρήματα δείχνουν ότι η ξαφνική ολίσθηση λαμβάνει χώρα χωρίς καμία ανιχνεύσιμη προηγούμενη μη ελαστική παραμόρφωση του υλικού. Επιπλέον, ο έλεγχος των δύο επιφανειών που ολισθαίνουν μεταξύ τους σε θερμοκρασία δωματίου, δείχνει ότι η δέβρις δημιουργείται μάλλον ως προϊόν της θραύση των ορυκτών του υλικού παρά ως προϊόν της υποτιθέμενης αύξησης της θερμοκρασίας κοντά στο σημείο τήξης του υλικού.

Στη θεωρία ερπυσμού (creep) η οποία προτάθηκε από τους Ishlinski και Kragelsk (1944) και ερμηνεύει την κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης, η στατική τριβή είναι συνάρτηση του χρόνου επαφής μεταξύ των δύο επιφανειών που βρίσκονται σε σχετική κίνηση. Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο, όταν οι δύο επιφάνειες είναι ακίνητες, η ένωση στο σημείο επαφής παραμορφώνεται με αποτέλεσμα η ενεργός επιφάνεια επαφής να αυξάνει με το χρόνο. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, ο χρόνος επαφής είναι πολύ μικρός και δεν επέρχεται καμία αλλαγή. Εφόσον η δύναμη της τριβής είναι η δύναμη που απαιτείται για τη διάτμηση των επαφών, τότε η δύναμη που απαιτείται για την έναρξη της ολίσθησης αφού το σώμα έχει παραμείνει για αρκετό χρόνο ακίνητο, θα είναι μεγαλύτερη από την τριβή κατά τη διάρκεια της κίνησης. Η δύναμη δηλαδή της στατικής τριβής είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη της κινητικής τριβής. Ωστόσο, η δύναμη που απαιτείται για να “σπάσει” τις επαφές δεν εξαρτάται μόνον από το μέγεθος τους, όπως προτείνει η θεωρία, αλλά θα πρέπει να εξαρτάται επίσης από την αντοχή στη διάτμηση του υλικού. Έτσι, η τριβή θα είναι η ίδια ανεξάρτητα εάν οι επαφές είναι μεγάλες και μικρής αντοχής, ή μικρές και μεγάλης αντοχής. Πειραματικές δοκιμές σε δείγματα κυλινδρικών πετρωμάτων που ήταν αρχικά κομμένα υπό γωνία ως προς την κάθετη διεύθυνση όπου εφαρμοζόταν πίεση, υπό την ταυτόχρονη εφαρμογή επιπλέον παράπλευρης πίεσης, οδήγησαν σε παρατηρούμενη κίνηση μέσω βίαιης προσκόλλησης – ολίσθησης. Ωστόσο, δεν βρέθηκε κανένας συσχετισμός μεταξύ της απαιτούμενης δύναμης για την έναρξη της ξαφνικής κίνησης και του χρόνου σταθερής επαφής μεταξύ των 2 επιφανειών, όπως θα προέβλεπε το συγκεκριμένο μοντέλο.

Ο Rabinowicz (1959) πρότεινε ότι η δύναμη της τριβής μεταβάλλεται σε σχέση με τη μετατόπιση των δύο επιφανειών. Μία περίπτωση εφαρμογής είναι η ολίσθηση μεταξύ δύο καθαρών όμοιων μεταλλικών επιφανειών. Με την έναρξη της κίνησης, οι ενώσεις στα σημεία επαφής των δύο επιφανειών αυξάνονται σε μέγεθος και η τριβή αυξάνεται κι αυτή. Σε επακόλουθο στάδιο, οι ενώσεις σταματάνε να μεγαλώνουν και αρχίζουν να λεπταίνουν και τελικά σπάνε. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας η τριβή ελαττώνεται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και η δύναμη της τριβής που απαιτείται για την πρόκληση της ολίσθησης παρουσιάζει διακυμάνσεις με τη σχετική μετατόπιση των δύο επιφανειών (σώματος και επιφάνειας ολίσθησης). Ως επακόλουθο παρουσιάζεται η κίνηση του σχήματος 2.3. Επιπλέον, το μέγεθος της ελάττωσης της δύναμης κατά τη διάρκεια της ξαφνικής ολίσθησης μεταξύ μεταλλικών επιφανειών θα μπορούσε να ελαττωθεί με την αύξηση της σκληρότητας του χρησιμοποιούμενου ελατηρίου και σε μερικές περιπτώσεις, η κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης θα μπορούσε να εξαλειφθεί τελείως. Σε αυτό το μοντέλο τριβών, η αστάθεια προκύπτει από τις διακυμάνσεις της τριβής κατά την πλαστική παραμόρφωση (plastic deformation) των ενώσεων στις επιφάνειες επαφής και μπορεί να ερμηνεύσει την εν λόγω κίνηση σε περιπτώσεις πετρωμάτων όπως ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης και πετρωμάτων πλούσιων σε σερπεντίνη, χλωρίτη και τάλκη. Ωστόσο αποτυγχάνει να ερμηνεύσει τη συμπεριφορά της κίνησης αυτής μεταξύ επιφανειών πολύ ψαθυρών πετρωμάτων, όπως ο γρανίτης σε θερμοκρασία δωματίου.

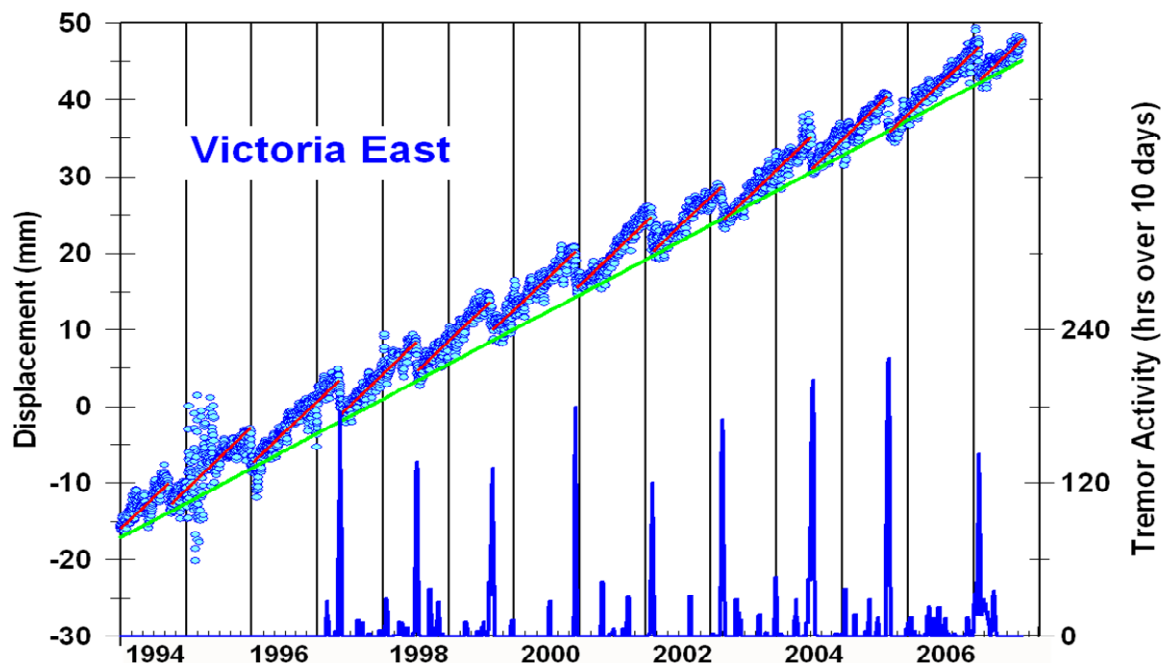
Ο Byerlee (1967) πρότεινε ότι όταν δύο επιφάνειες ψαθυρών υλικών έρχονται σε επαφή, οι εξοχές που έχουν οι επιφάνειες αυτές λόγω της τραχύτητας που εμφανίζουν, “κλειδώνουν” μεταξύ τους. Εφόσον το κάθετο φορτίο είναι αρκετά μεγάλο ώστε να εμποδίσει τις επιφάνειες να κινηθούν πάνω από τις ανωμαλίες που αυτές παρουσιάζουν, η ολίσθηση θα εμφανιστεί όταν στις μικροσκοπικές ενώσεις επέλθει τοπικά θραύση. Στο μοντέλο αυτό της εύθραυστης αστάθειας (brittle instability) η δύναμη της τριβής είναι η δύναμη που απαιτείται για το σπάσιμο αυτών των “δεσμών” και στην προκύπτουσα ολίσθηση, η δύναμη της τριβής θα αυξάνεται όταν οι επιφάνειες κλειδώνουν μεταξύ τους λόγω των ανωμαλιών που παρουσιάζουν και θα ελαττώνεται αντίστοιχα όταν έχουμε θραύση αυτών. Η επαναλαμβανόμενη αυτή διαδικασία θα προκαλέσει την αυξομείωση της τριβής κατά τη μετατόπιση του σώματος και όπως και στην περίπτωση της πλαστικής παραμόρφωσης, η κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης θα λάβει χώρα εφόσον η μείωση της τριβής με τη μετατόπιση εμφανίζεται με ρυθμό μεγαλύτερο από ότι το σύστημα φόρτισης (ελατήριο) μπορεί να παρακολουθήσει. Το εν λόγω μοντέλο, ερμηνεύσει ικανοποιητικά πολλά αποτελέσματα σε πειράματα τριβής που αφορούν στην κίνηση διαμαντιού σε επιφάνεια LiF_2 , όπου τα σπασίματα συμπίπτουν ακριβώς με την έναρξη της κίνησης στην επαναλαμβανόμενη κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης. Επίσης, ερμηνεύει την ολίσθηση μεταξύ επιφανειών διαφόρων πετρωμάτων όπου η παρατηρούμενη κίνηση είναι μία βίαιη επαναλαμβανόμενη προσκόλληση – ολίσθηση όπου τα προϊόντα της φθοράς προκύπτουν από το υλικό που παρουσιάζει τη μικρότερη αντοχή.

2.6 Η κίνηση stick – slip σε άλλα φυσικά φαινόμενα

Αξιοσημείωτες είναι οι ομοιότητες που παρουσιάζονται αναφορικά με την κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης και σε άλλα φυσικά φαινόμενα, όπως οι εδαφικές κατακρημνίσεις (landslides). Οι κατολισθήσεις μας παρέχουν, με τη δυνατότητα πρόσβασης στις περιοχές όπου εμφανίζονται, την ευκαιρία να μελετήσουμε διαφορετικών ειδών κινήσεις που παρουσιάζουν αναλογίες με την κίνηση των ρηγμάτων στο φλοιό της γης.

Μετρήσεις πεδίου και πειράματα μεγάλης κλίμακας που έχουν διεξαχθεί, επιδεικνύουν ότι οι κατολισθήσεις παρουσιάζουν μεταξύ των άλλων και κινήσεις προσκόλλησης – ολίσθησης, κατ' αναλογία με τα διαφορετικά είδη κίνησης που συναντάμε στα ρήγματα και στις ζώνες βύθισης.

Μηχανικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί που περιγράφουν την εν λόγω κίνηση θεωρώντας τη βαρύτητα ως τη δύναμη που οδηγεί την κίνηση σε πορο-ελαστικά μέσα που μπορεί να είναι κορεσμένα με νερό με ελεγχόμενη την πίεση στους πόρους του μέσου στη ζώνη διάτμησης. Υπό την προϋπόθεση ότι στις επιφάνειες επαφής οι δυνάμεις τριβής ακολουθούν μη γραμμικό ρυθμό μεταβολής (και όχι το νόμο Coulomb), εμφανίζεται μετάβαση από τη σταθερή κατάσταση της ολίσθησης σε περιοδική κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης. Στην περίπτωση αυτή, η εμφάνιση της κίνησης προσκόλλησης – ολίσθησης που προβλέπεται από το μοντέλο, εμφανίζεται απουσία μίας ελαστικής οδηγούσας δύναμης, όπως στην περίπτωση του συστήματος ελατηρίου – μάζας. Η δύναμη αυτή, αντικαθίσταται από τη διάχυση στους πόρους του μέσου και η απαραίτητη ενέργεια για την αντιστροφή της διάχυσης παρέχεται από τη δυναμική ενέργεια της βαρύτητας. Η διαφορά στην προκειμένη περίπτωση έγκειται στο γεγονός ότι η δύναμη βαρύτητας δεν παρουσιάζει τη συμπεριφορά του εφρησυχασμού που έχει το ελατήριο που επιστρέφει εν μέρει στην αρχική του κατάσταση.



Σχήμα 2.10. Διάγραμμα της μετατόπισης σε κατολίσθηση για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα ετών (1994-2007) στην περιοχή της Βικτώριας (ΗΠΑ) όπου παρατηρείται η περιοδική εναλλαγή στην κίνηση. Η μικροσεισμική δραστηριότητα εμφανίζεται κυρίως στα χρονικά διαστήματα όπου παρατηρείται ταυτόχρονα η ολίσθηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Πειραματικό μέρος

3.1 Πειραματική διάταξη

Για την υλοποίηση της πειραματικής διάταξης, πέραν από τη χρήση των κατάλληλων αισθητηρίων, χρησιμοποιήθηκαν υλικά μικρού κόστους, ενώ η κατεργασία τους όπου αυτή απαιτούνταν καθώς και η προσαρμογή τους στην πειραματική διάταξη, πραγματοποιήθηκε στο μηχανουργείο του Τμήματος.

Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκε ξύλινη πλατφόρμα μήκους 1.4m στο ένα άκρο της οποίας προσαρμόστηκε κατάλληλα μία τροχαλία για την ολίσθηση ενός κυβόλιθου μέσω ελατηρίου. Πάνω στην πλατφόρμα, τοποθετήθηκαν γυαλόχαρτα σχετικά μεγάλης τραχύτητας που δημιουργούν την απαραίτητη τριβή κατά την ολίσθηση του κυβόλιθου, ώστε να είναι εμφανής η ζητούμενη κίνηση προσκόλλησης - ολίσθησης (σχήμα 3.1.α).

Δοκιμάστηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί τύπων γυαλόχαρτου και διαφορετικών μαζών καθώς και ελατηρίων διαφορετικής σταθεράς, προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα και επιπλέον να μπορεί να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο εξαρτάται η κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης από αυτούς τους παράγοντες.

Για την διεξαγωγή του πειράματος τα αισθητήρια όργανα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- Αισθητήρας μέτρησης δύναμης,
- Αισθητήρας μέτρησης επιτάχυνσης,
- Αισθητήρας καταγραφής ήχου,
- Σύστημα συλλογής δεδομένων και απεικόνισης τους σε πραγματικό χρόνο.

Οι παραπάνω αισθητήρες προσαρμόστηκαν κατάλληλα πάνω στον κυβόλιθο που δύναται να ολισθαίνει με τη χρήση της χειροκίνητης τροχαλίας στην επιφάνεια της πλατφόρμας και συνδέθηκαν με το σύστημα συλλογής δεδομένων (Σχήμα 3.1β).

Στη συνέχεια παρατίθενται οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες με αναλυτική περιγραφή για τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τη λειτουργία τους.



(α)



(β)

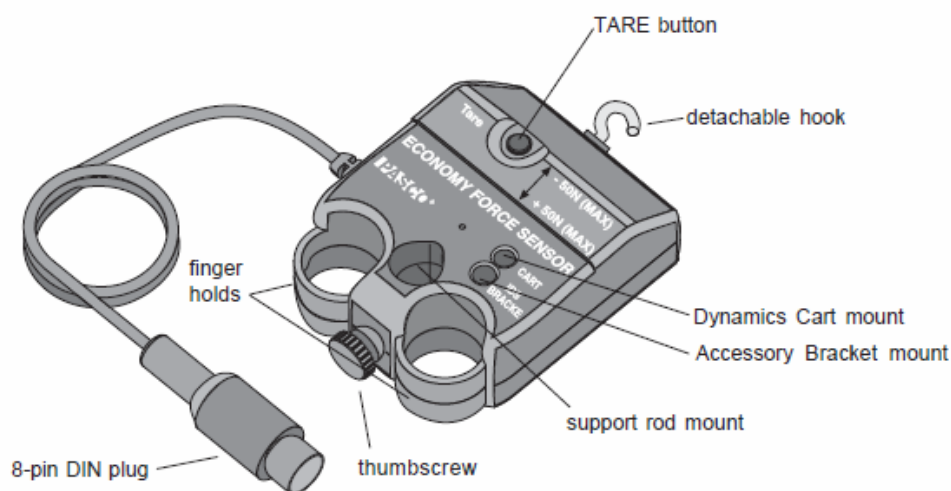
Σχήμα 3.1. Πειραματική διάταξη όπου διακρίνονται οι αισθητήρες καταγραφής δύναμης, επιτάχυνσης και ηχητικών σημάτων προσαρμοσμένοι πάνω στον κυβόλιθο, που μπορεί να ολισθαίνει με τη χρήση χειροκίνητης τροχαλίας πάνω σε τραχιά επιφάνεια με δύο διαφορετικούς συντελεστές τριβής (β) λεπτομέρεια της προηγούμενης εικόνας όπου φαίνονται οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες

3.2 Χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες

3.2.1 Αισθητήρας μέτρησης δύναμης (economy force sensor)

Ο αισθητήρας αυτός έχει σχεδιαστεί από την Pasco. Έχει έξοδο που κυμαίνεται από - 8 volts ως +8 volts και διακύμανση μετρούμενης δύναμης μεταξύ -50 N έως +50 N. Παράγει τάση εξόδου 0 volts για μηδενική δύναμη και +8 volts για +50 N. Σπρώχνοντας το γάντζο του αισθητήρα παίρνουμε θετικές τιμές ενώ τραβώντας αρνητικές.

Ο αισθητήρας αυτός έχει μετρητές μηχανικής παραμόρφωσης (strain gauges) τοποθετημένους σε ειδικά σχεδιασμένα σημεία σε σχήμα S και ενσωματωμένο προστατευτικό όριο έτσι ώστε όταν εφαρμοστεί δύναμη >50 N να μην καταστρέφεται. Περιλαμβάνει επίσης ένα καλώδιο με βύσμα 8 επαφών και έναν γάντζο (Σχήμα 3.2). Η συσκευή έχει μια βίδα η οποία βιδώνει με το χέρι στην άκρη απέναντι από τον γάντζο, καθώς επίσης και δυο θέσεις δακτύλων. Στο πάνω μέρος έχει μια θέση για την τοποθέτηση επιπρόσθετου αισθητήρα (Dynamics Cart) και μια θέση (IDS Bracket) για την επιφάνεια υποστηρίγματος για την προσθήκη του αισθητήρα σε δυναμική θέση και ένα κουμπί μηδενισμού.



Σχήμα 3.2. Σχηματική απεικόνιση του αισθητήρα μέτρησης δύναμης

Ο Economy Force Sensor είναι ένας εξαιρετικός, χαμηλού κόστους, γενικής χρήσης αισθητήρας δύναμης για χρήση σε φοιτητικά εργαστήρια. Οι οπές δακτύλου το καθιστούν ιδανικό για φορητή χρήση. Μπορεί να συνδεθεί και να δουλεύει παράλληλα με άλλους αισθητήρες χρησιμοποιώντας το κατάλληλο Data Logger. Είναι ιδανικός για μέτρηση δύναμης σε κατακόρυφο, οριζόντιο, ή συνδυασμό αυτών άξονα. Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Τυπικές Εφαρμογές

- Μέτρηση δύναμης που ασκείται από μια ταλαντευόμενη μάζα
- Μέτρηση δύναμης κατά τη διάρκεια ελαστικής ή ανελαστικής σύγκρουσης

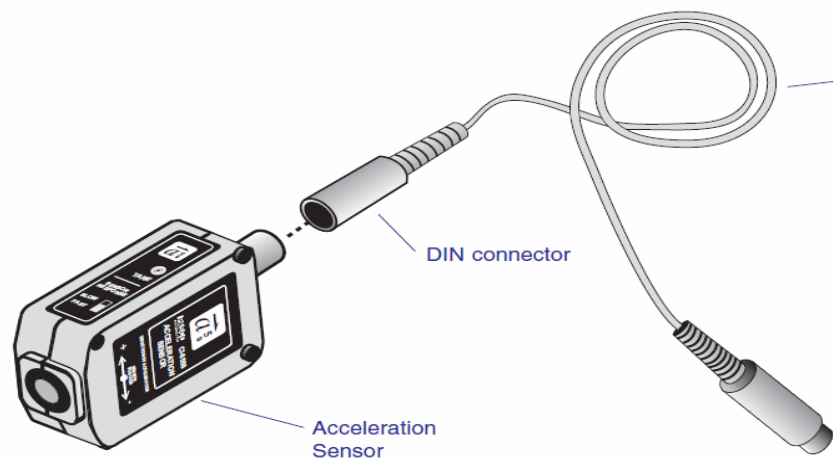
Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα μέτρησης δύναμης

Force Range	±50 N
Output Voltage	+8 V for +50 N (pushing) +8 V for =50 N (pulling)
Output Noise	±2 mV
Resolution	0.03 N or 3.1 grams
Force Slew Rate	30 N/ms
Bandwidth Limit	2 KHz (internal low pass filter)
Output Drive	12 meters of cable without instability
Beam Deflection	0.28 m
Zero (Tare) Function	Push button
Force Overload Protection	Up to 75 N without damage
Pin Configuration	8-pin DIN plug
Mounting Options	Mounts on PASCO carts Mounts on standard 12.7 mm diameter rods

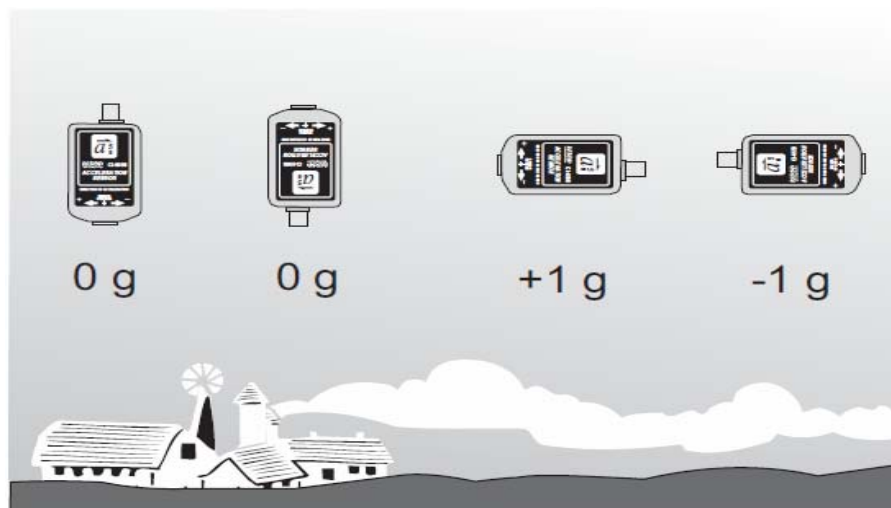
3.2.2 Αισθητήρας μέτρησης επιτάχυνσης (Acceleration Sensor)

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας επιτάχυνσης έχει σχεδιαστεί για μέτρηση της επιτάχυνσης (και επιβράδυνσης) που κυμαίνεται μέχρι ± 5 φορές την επιτάχυνση της βαρύτητας της Γης με ακρίβεια $0,01g$ ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$).

Ο αισθητήρας παράγει μια διπολική έξοδο που μπορεί να διαφέρει από $+5 \text{ g}$ έως -5 g ανάλογα με την κατεύθυνση της επιτάχυνσης. Είναι ικανός να διακρίνει αλλαγές στην επιτάχυνση της τάξης του 1 milli-g . Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζεται ο αισθητήρας και ο τρόπος ορθής χρήσης του.



Σχήμα 3.3. Σχηματική απεικόνιση του αισθητήρα μέτρησης επιτάχυνσης



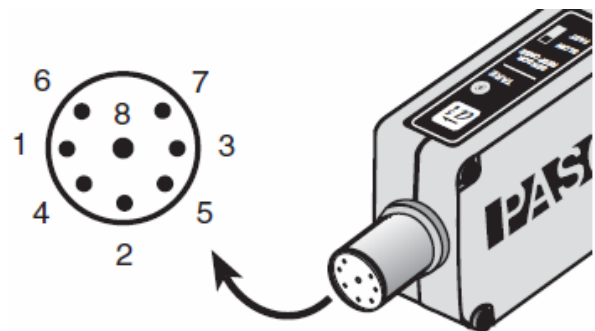
Σχήμα 3.4. Σχηματική απεικόνιση του τρόπου χρήσης του αισθητήρα για την καταγραφή της επιτάχυνσης που υφίσταται.

Πίνακας 3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα μέτρησης επιτάχυνσης

- Μέγιστη αξιοποιήσιμη επιτάχυνση: $\pm 5 \text{ g}$ ή 50 m/s^2
- Σήμα εξόδου: 1 V / g
- Ακρίβεια: $0,01 \text{ g}$ ή $0,1 \text{ m/s}^2$
- Διακριτική ικανότητα: $0,001 \text{ g}$ ή $0,01 \text{ m/s}^2$
- Σφάλμα ευθυγράμμισης του αισθητήρα ανίχνευσης της επιτάχυνσης:
 $\pm 1^\circ$ (ως σφάλμα ευθυγράμμισης ορίζεται η γωνία μεταξύ της πραγματικής και της ενδεικνυόμενης διεύθυνσης του άξονα ευαισθησίας)
- Απόλυτη μέγιστη επιτάχυνση χωρίς να καταστραφεί το στοιχείο ανίχνευσης: 1000 g για $0,5 \text{ ms}$

Προδιαγραφές DIN Connector

- 1: αναλογική έξοδο (+), 0 έως 10 V
- 2: αναλογική έξοδο (-), λόγου σήματος
- 3: (χωρίς σύνδεση)
- 4: $+5 \text{ V DC}$ ρεύματος
- 5: γείωση
- 6: $+12 \text{ V}$ συνεχούς ρεύματος
- 7: -12 V συνεχούς ρεύματος
- 8: (χωρίς σύνδεση)

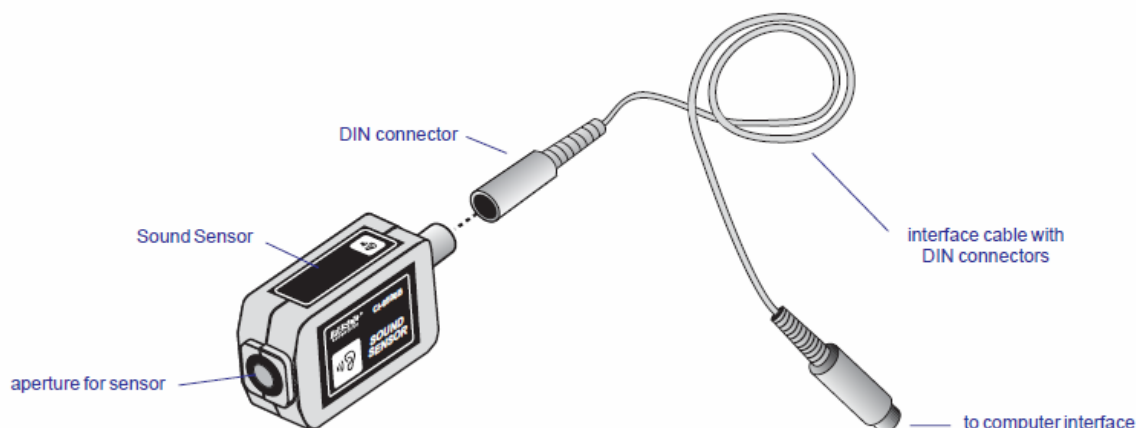


3.2.3 Αισθητήρας καταγραφής ήχου (sound sensor)

Ο αισθητήρας αυτός είναι σχεδιασμένος για να χρησιμοποιείται μαζί με το Pasco Interface και να μετράει τη σχετική ένταση του ήχου. Το αισθητήριο στοιχείο είναι ένα μικρόφωνο το οποίο αποτελείται από μια μεμβράνη, ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο και ένα τρανζίστορ το οποίο επιφέρει ενίσχυση του ήχου (>60 dB) και ευρεία απόκριση συχνότητας (20 - 16,000 Hz).

Η έξοδος είναι διπολική και κυμαίνεται ανάμεσα σε $\pm 10V$. Όταν η ευαισθησία αυξάνεται ο αισθητήρας εντοπίζει επίπεδα τάσης τόσο χαμηλά όσο 0,00005 volts που αντιστοιχούν στα επίπεδα έντασης ήχου που μόλις με τα βίαια ακούγονται από το ανθρώπινο αυτί. Ήχοι επιπέδου 45 dB ως και μεγαλύτερα των 100 dB καταγράφονται εύκολα.

Ο παλμογράφος επιτρέπει σε μας να δούμε τι μας δίνει η έξοδος του αισθητήρα κατευθείαν και η FFT λειτουργία του, θα μετατρέψει το σήμα από τον αισθητήρα σε συχνότητα. Αυτές οι δυο λειτουργίες επιτρέπουν σε μας να ερευνήσουμε τη σύνθεση συχνότητας του ήχου που παράγεται από την ανθρώπινη φωνή ή ενός μεγαφώνου χρησιμοποιώντας τα ηχητικά κύματα. Οι λειτουργίες του παλμογράφου και του FFT μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα.



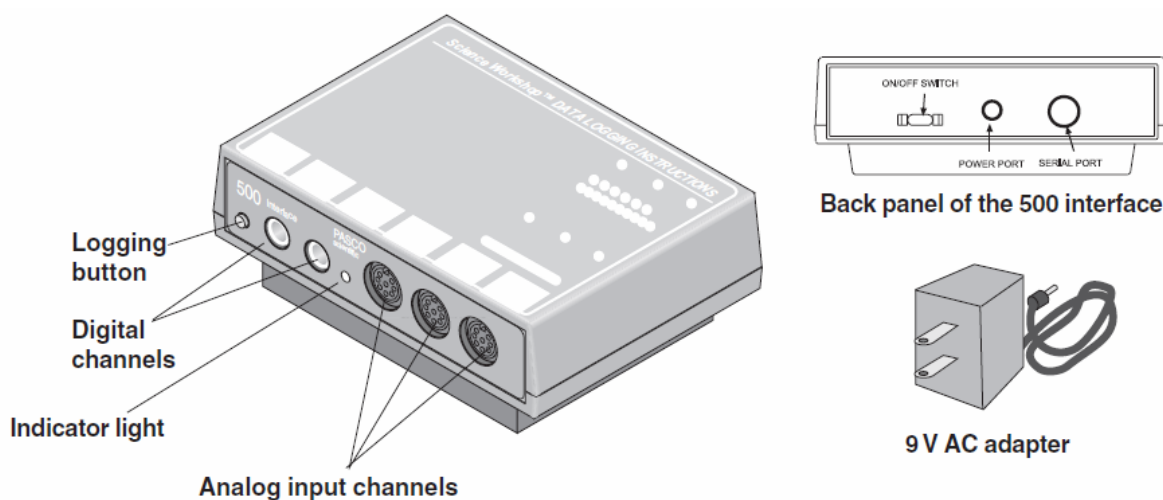
Σχήμα 3.5. Σχηματική απεικόνιση του αισθητήρα μέτρησης ήχου

3.2.4 Συσκευή διασύνδεσης και συλλογής δεδομένων – Science Workshop 500 Interface

Το Pasco science workshop 500 interface είναι μια συσκευή ανάκτησης πληροφοριών σχεδιασμένη για χρήση με το λογισμικό της Data Studio. Σε αυτή τη συσκευή συνδέονται όλα τα αισθητήρια που έχουμε επιλέξει.

Είναι σχεδιασμένο για να παίρνουμε μετρήσεις εντός εργαστηριακού χώρου ή στο ύπαιθρο με τη χρήση μπαταριών. Για τη συλλογή δεδομένων όλα όσα χρειαζόμαστε είναι οι αισθητήρες και η συσκευή αυτή (data logger). Περιέχει 50 kB αποθηκευτικό χώρο (buffer) για την αποθήκευση των δεδομένων που παίρνουμε.

Περιλαμβάνει 3 αναλογικά κανάλια εισόδου και 2 ψηφιακά κανάλια. Συνδέεται σειριακά ή με τη χρήση USB θύρας με H/Y για τη μεταφορά των δεδομένων εφόσον λειτουργεί αυτόνομα (με χρήση μπαταριών) ή για την καταγραφή σε πραγματικό χρόνο των εξόδων διάφορων συμβατών αισθητηρίων.



Σχήμα 3.6. Σχηματική απεικόνιση του συστήματος συλλογής δεδομένων

3.2.5 Γραφικό περιβάλλον απεικόνισης δεδομένων, Data Studio

Για τη συλλογή, απεικόνιση και αποθήκευση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το γραφικό περιβάλλον DataStudio της εταιρίας PASCO που έχει πλήρη συμβατότητα με τα χρησιμοποιούμενα αισθητήρια και τη συσκευή συλλογής δεδομένων (Science Workshop 500).

Συνοπτικά, αφού διασυνδεθούν φυσικά όλα τα αισθητήρια με το σύστημα συλλογής δεδομένων, γίνεται η αντίστοιχη επιλογή των αισθητηρίων στην επιλογή *Experiment Setup* προκειμένου να αντιστοιχηθούν αυτοί στα 3 αναλογικά κανάλια και να καθοριστούν οι παράμετροι της δειγματοληψίας.

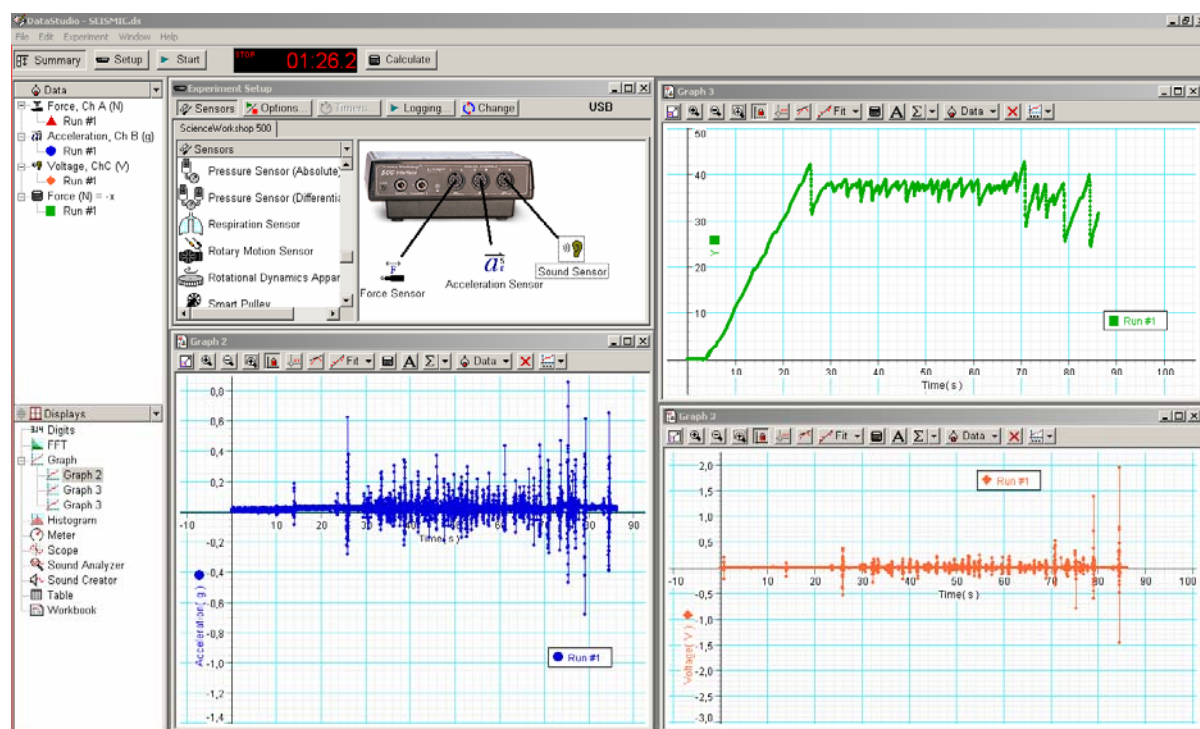
Επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα διαφορετικής συχνότητας δειγματοληψίας για κάθε αναλογικό κανάλι εισόδου, η δειγματοληψία καθορίστηκε στα 100Hz για όλους τους αισθητήρες ώστε να συμπίπτει με τη δειγματοληψία που χρησιμοποιείται συνήθως σε σεισμόμετρα και επιταχυνσιογράφους που καταγράφουν σεισμικά γεγονότα.

Στη συνέχεια επιλέγεται η δημιουργία των γραφημάτων απεικόνισης των τριών αισθητηρίων ως προς το χρόνο. Από τις διάφορες επιλογές των γραφημάτων, καθορίστηκαν οι μονάδες μέτρησης των μετρούμενων μεγεθών.

Για όλες τις ρυθμίσεις που έγιναν, υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης με μορφή μιας “δραστηριότητας” (activity) προκειμένου να είναι αυτή διαθέσιμη με τη μορφή που έχει αποθηκευτεί όποτε το επιθυμούμε.

Το γραφικό περιβάλλον λειτουργίας του συγκεκριμένου πειράματος, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7, όπου παράλληλα παρουσιάζονται και οι χρονοσειρές των μετρήσεων που λήφθηκαν από τα αισθητήρια όργανα.

Για περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων, υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής των μετρήσεων σε αρχεία τύπου ASCII για την εισαγωγή τους σε άλλα προγράμματα απεικόνισης και ανάλυσης (π.χ. OriginLab).



Σχήμα 3.7. Το γραφικό περιβάλλον λειτουργίας, συλλογής και απεικόνισης των δεδομένων από τα διάφορα αισθητήρια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Πειραματικά Αποτελέσματα

4.1 Προκαταρκτικές μετρήσεις

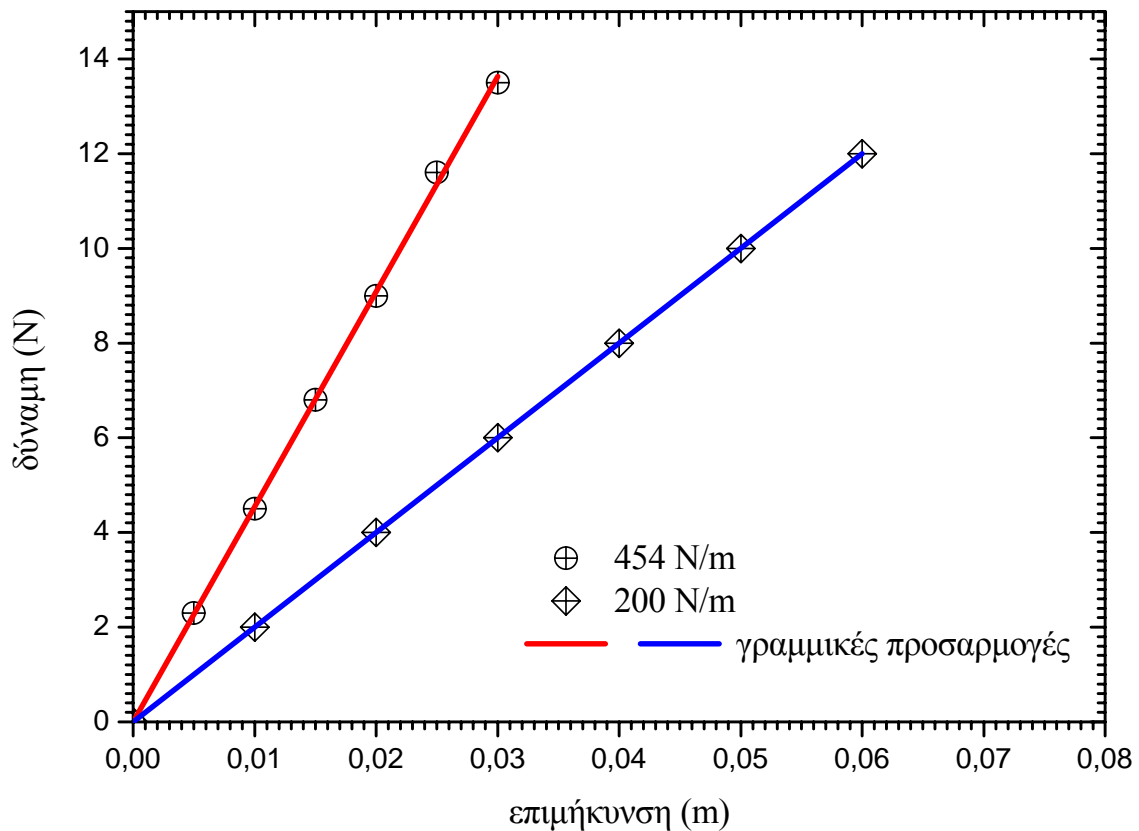
4.1.1 Πειραματικός υπολογισμός της σταθεράς των ελατηρίων και των συντελεστών τριβής

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά ελατήρια άγνωστης σταθεράς k και επιφάνειες από γυαλόχαρτο πάνω στις οποίες ολισθαίνει κυβόλιθος, προκειμένου να επιτύχουμε μεγάλο συντελεστή τριβής (στατικής και κινητικής).

Αρχικά μετρήθηκε πειραματικά η σταθερά του κάθε ελατηρίου, προκειμένου να επιλέξουμε τα κατάλληλα για την εμφάνιση της κίνησης προσκόλλησης – ολίσθησης. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ. 2, η περίοδος της κίνησης εξαρτάται αφενός από τη διαφορά των συντελεστών στατικής και κινητικής τριβής και αφετέρου από τη σταθερά του χρησιμοποιούμενου ελατηρίου, για δεδομένη ταχύτητα σχετικής κίνησης των δύο επιφανειών. Για να είναι εμφανής η κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης που θέλουμε να αναπαράγουμε και να πραγματοποιούνται αρκετές επαναλήψεις μέσα στο περιορισμένο μήκος που έχει η τράπεζα που κατασκευάστηκε για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκαν δύο ελατήρια από τα υπάρχοντα.

Η σταθερά του καθενός μετρήθηκε εφαρμόζοντας σταθερή δύναμη μέσω του αισθητήρα μέτρησης δύναμης που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και μετρώντας την επιμήκυνση του κάθε φορά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1 όπου απεικονίζονται ταυτόχρονα και οι γραμμικές προσαρμογές που έγιναν για τον υπολογισμό των σταθερών, k_i . Έτσι, προέκυψε ότι τα δύο ελατήρια έχουν σταθερές 454 N/m και 200 N/m.

Προκαταρκτικές μετρήσεις μας έδειξαν τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται το κάθε σύστημα σώμα – ελατήριο αναφορικά με τον τρόπο που αυτό ολισθαίνει σε επιφάνεια με τριβές. Γενικά, κατά την εφαρμογή δύναμης σε ένα σώμα που προσπαθεί να ολισθήσει σε οριζόντιο επίπεδο με σταθερή ταχύτητα, όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο κεφάλαιο, η δύναμη της στατικής τριβής αυξάνεται μέχρι κάποια μέγιστη τιμή, πέρα από την οποία αρχίζει η ολίσθηση του σώματος με σταθερό ή διακοπτόμενο τρόπο. Η τελευταία περίπτωση, αφορά στην κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης, όπως εκτενώς αναφερθήκαμε στο 2^ο κεφάλαιο.



Σχήμα 4.1. Γραφική παράσταση δύναμης – παραμόρφωσης (επιμήκυνσης) για τα δύο διαφορετικά ελατήρια που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη. Από τις γραμμικές προσαρμογές προέκυψαν οι σταθερές τους, k_i .

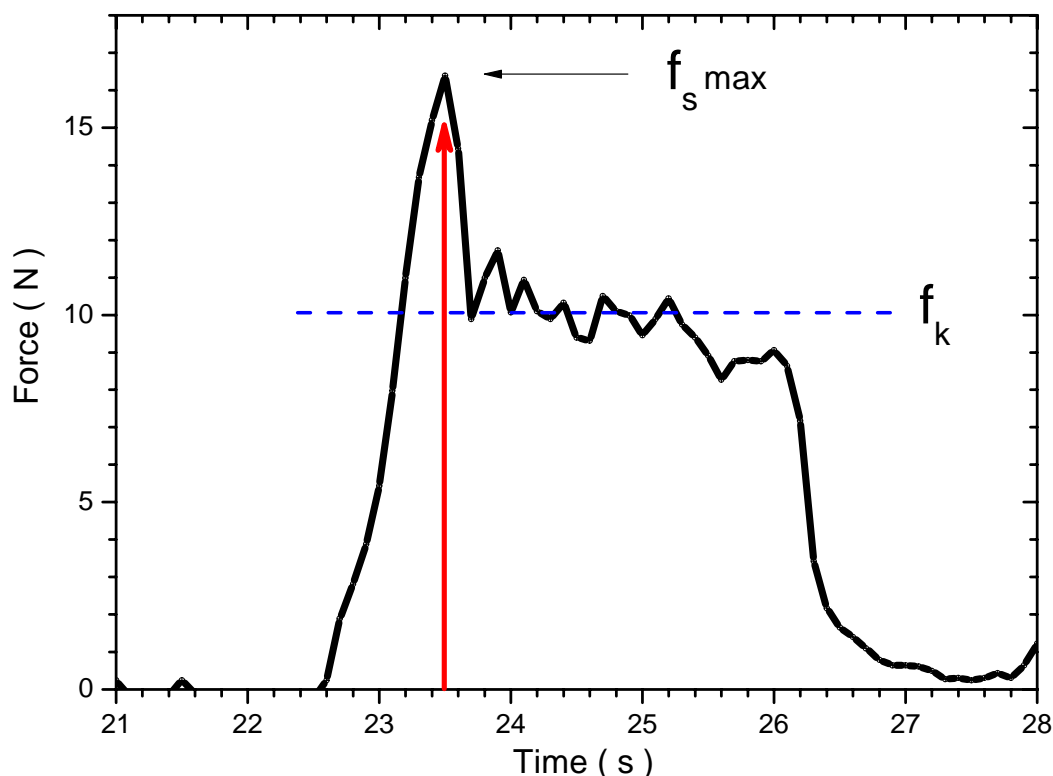
Η περίπτωση της σταθερής κίνησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2 όπου απεικονίζεται η μεταβολή της εφαρμοζόμενης δύναμης (και επομένως της τριβής) σε σώμα που ολισθαίνει με σταθερή ταχύτητα σε οριζόντια επιφάνεια, όπως αυτή καταγράφηκε από τον αισθητήρα δύναμης. Η κίνηση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς τη χρήση ελατηρίου για την κίνηση της μάζας. Η κίνηση ξεκινάει τη χρονική στιγμή $t=23.5s$ όπου και παρουσιάζεται η μέγιστη δύναμη της στατικής τριβής (περίπου 16N) αλλά για τη διατήρηση της κίνησης η απαιτούμενη δύναμη είναι αρκετά μικρότερη (περίπου 10N). Μετά τα 26s, παύει να επενεργεί δύναμη πάνω στο σώμα και αυτό σταματάει να κινείται.

Βάσει της απλοποιημένης προσέγγισης που κάναμε κατά την περιγραφή της κίνησης στην παράγραφο 2.1, η δύναμη της τριβής στη στατική και την κινητική περίπτωση, περιγράφεται από το νόμο Coulomb, οπότε και μπορούμε να υπολογίσουμε τους συντελεστές στατικής και κινητικής τριβής για σώμα μάζας $m=1.5kg$, ως ακολούθως:

$$\mu_s = \frac{F_{s \max}}{N} = \frac{F_{s \max}}{mg} = 1.09$$

και

$$\mu_k = \frac{F_k}{N} = \frac{F_k}{mg} = 0.68$$



Σχήμα 4.2. Γραφική παράσταση της εφαρμοζόμενης δύναμης σε σώμα που ολισθαίνει με σταθερή ταχύτητα σε επιφάνεια.

Στους υπολογισμούς αυτούς, οι τιμές της μέγιστης στατικής τριβής και της κινητικής τριβής ήταν 16N και 10N, αντίστοιχα. Η κατάσταση αυτή της κίνησης αφορά στην περίπτωση που δεν είναι εμφανής η κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης και μπορεί να πραγματοποιηθεί όπως προαναφέρθηκε, μεταβιβάζοντας μέσω μη ελαστικού νήματος τη δύναμη πάνω στο σώμα, χωρίς δηλαδή τη χρήση ελατηρίου. Η παραπάνω συνθήκη όπου ο συντελεστής στατικής τριβής είναι μεγαλύτερος του συντελεστή κινητικής τριβής πρέπει να πληρείται προκειμένου να εμφανιστεί κατά την κίνηση του σώματος η επαναλαμβανόμενη προσκόλληση και ολίσθηση του.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα που καταγράφηκαν για διαφορετικούς συνδυασμούς σταθεράς ελατηρίου k και μάζας m του σώματος που ολισθαίνει. Για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς, το πείραμα εκτελέστηκε για δύο τουλάχιστον διαφορετικές σταθερές ταχύτητες ολίσθησης, που αντιστοιχούν σε μία αργή και μία γρήγορη κίνηση. Επειδή η κίνηση μεταδίδεται μέσω της χειροκίνητης τροχαλίας, καταβλήθηκε προσπάθεια ώστε η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής να παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της κίνησης.

4.2 Επίδρασης της ταχύτητας κίνησης στην προσκόλληση - ολίσθηση

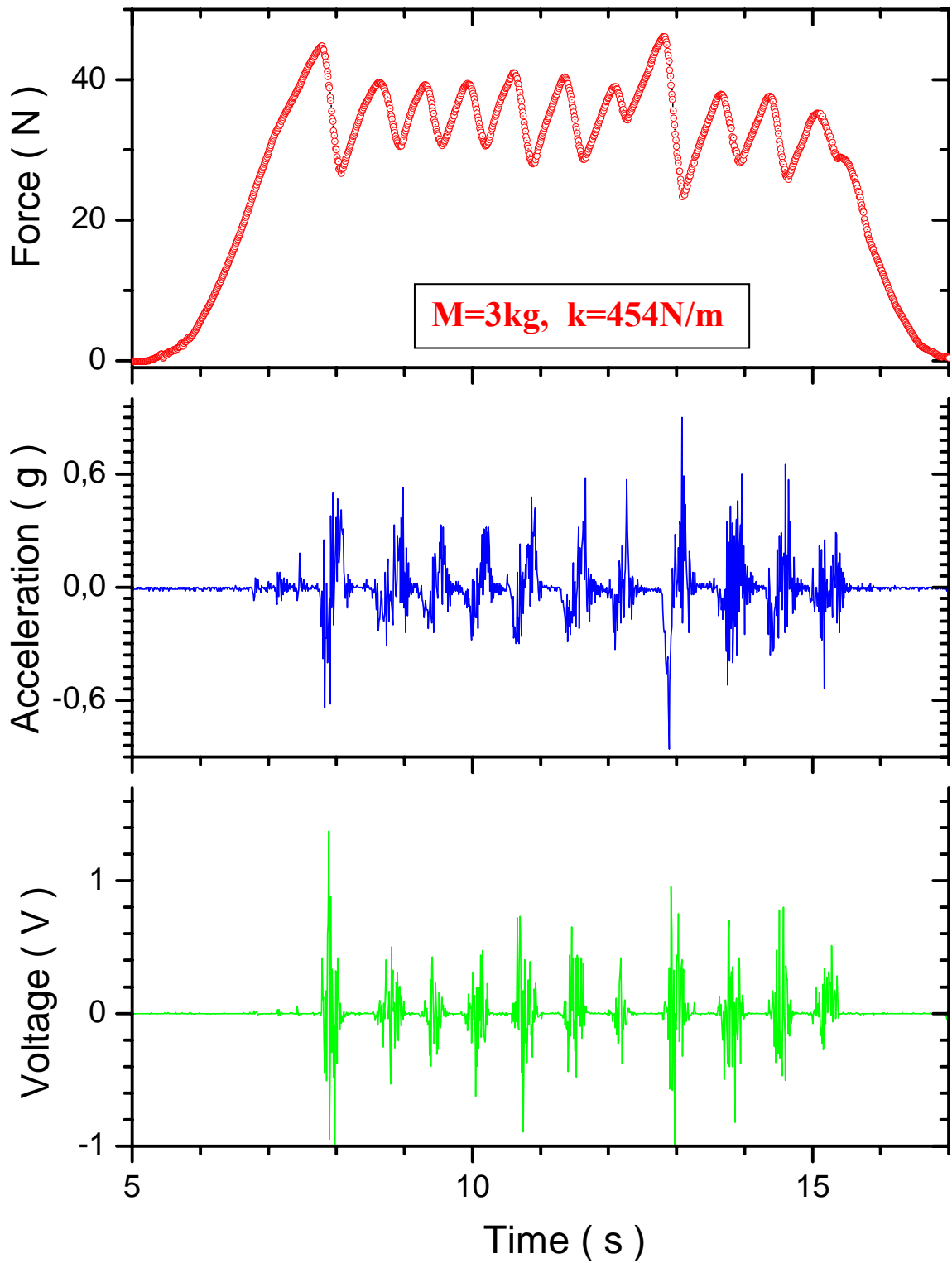
Στα Σχήματα 4.3 – 4.5 απεικονίζονται οι καταγραφές της δύναμης, της επιτάχυνσης και των ακουστικών σημάτων που καταγράφηκαν κατά την κίνηση του σώματος μάζας $M=3\text{kg}$ από ελατήριο σταθεράς $k=454\text{N/m}$ για τρεις διαφορετικές ταχύτητες κίνησης του δεξιού άκρου του ελατηρίου (δες Σχήμα 3.1.α). Και στις τρεις περιπτώσεις, παρατηρούμε την εμφάνιση της κίνησης προσκόλλησης – ολίσθησης όπου παρουσιάζεται ως αυξομείωση της καταγραμμένης δύναμης που ασκούμε στο ελατήριο για να κινήσουμε τη μάζα. Λεπτομέρεια των καταγραφών για την κίνηση του Σχήματος 4.3, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.

Όπως υποδηλώνεται από τη διακεκομμένη γραμμή στο Σχήμα 4.5, η έναρξη της κίνησης εμφανίζεται με την απότομη μείωση της δύναμης που ασκείται στο σώμα (συσσωρεύτηκε υπό τη μορφή δυναμικής ενέργειας μέσω του ελατηρίου) και εκδηλώθηκε με τη βίαιη κίνηση του, προσδίνοντας σε αυτό μεγάλη επιτάχυνση (περίπου $0.6g$). Οι αυξομειώσεις δε της δύναμης προκαλούν και αντίστοιχες μεταβολές στην επιτάχυνση που υφίσταται το σώμα κατά την κίνηση του.

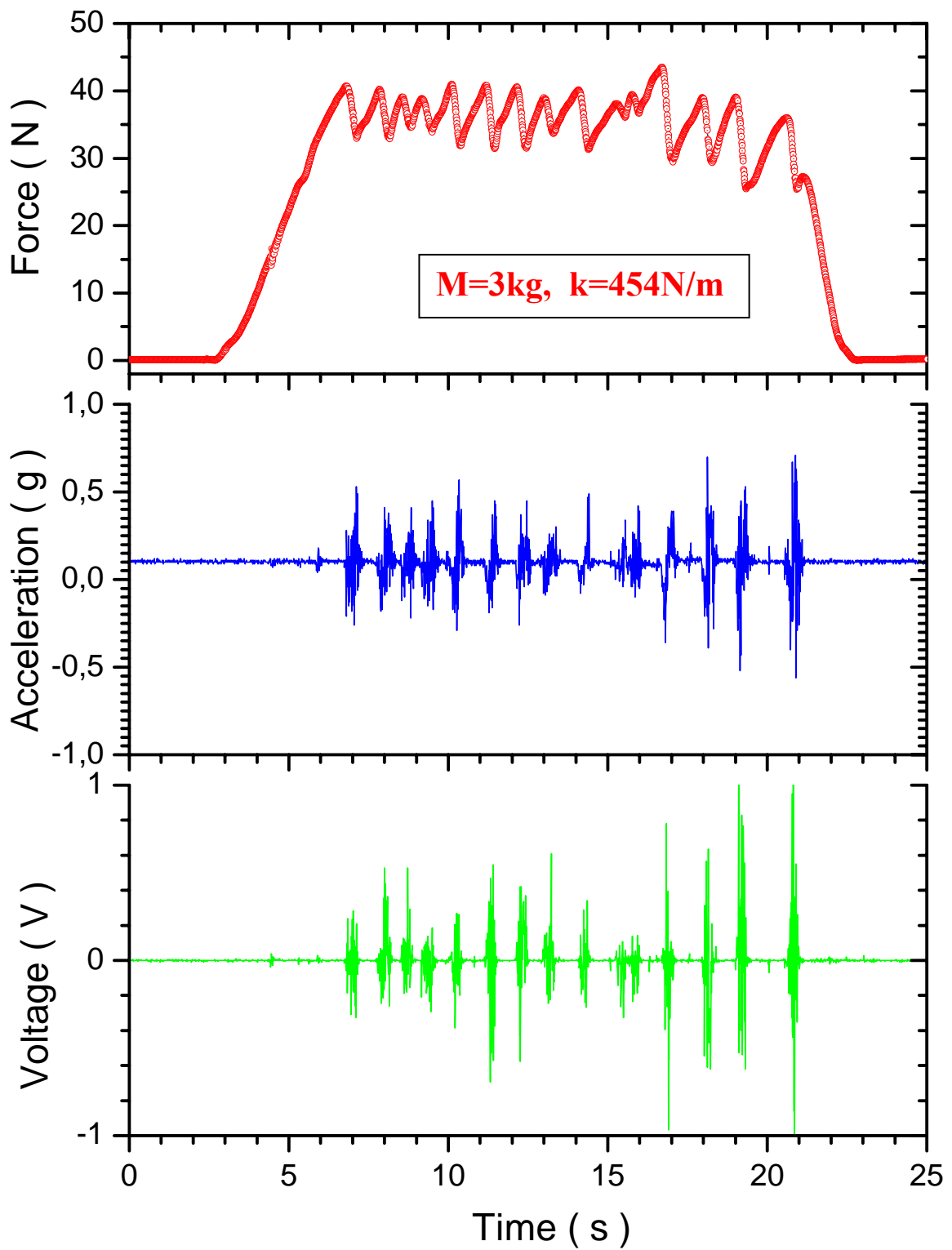
Περίπου στα 70s της κίνησης (Σχήμα 4.5), παρατηρούνται μεγαλύτερες διακυμάνσεις της δύναμης με την απόσταση εξαιτίας του γεγονότος ότι το σώμα αρχίζει να κινείται σε επιφάνεια με μεγαλύτερο συντελεστή τριβής. Υπενθυμίζουμε ότι η συνολική επιφάνεια διαδρομής του σώματος, περιλαμβάνει δύο διαφορετικά γυαλόχαρτα με διαφορετική τραχύτητα το καθένα (μεγαλύτερη το δεύτερο) και άρα και συντελεστή τριβής. Αντίστοιχα, καταγράφονται μεγαλύτερες επιταχύνσεις κατά τη βίαιη κίνηση του σώματος στη 2^η επιφάνεια και μεγαλύτερης έντασης ακουστικές εκπομπές.

Στην περίπτωση που η ταχύτητα κίνησης του σώματος είναι μεγάλη (Σχήμα 4.3), παρατηρούμε ότι η κίνηση προσκόλλησης - ολίσθησης είναι αρκετά πιο εμφανής υπό την έννοια ότι οι διακυμάνσεις της δύναμης είναι αρκετά μεγαλύτερες. Παρατηρούμε επίσης ότι η κίνηση γίνεται πιο περιοδική (δες Σχήμα 4.3) με τη δύναμη να έχει σχεδόν σταθερό πλάτος. Σημειωτέον ότι στο 13^ο δευτερόλεπτο της κίνησης του σώματος (Σχήμα 4.3) όπως αναφέρθηκε ήδη, το σώμα αλλάζει επιφάνεια ολίσθησης και μεταβαίνει σε κατάσταση όπου ο συντελεστής τριβής είναι μεγαλύτερος.

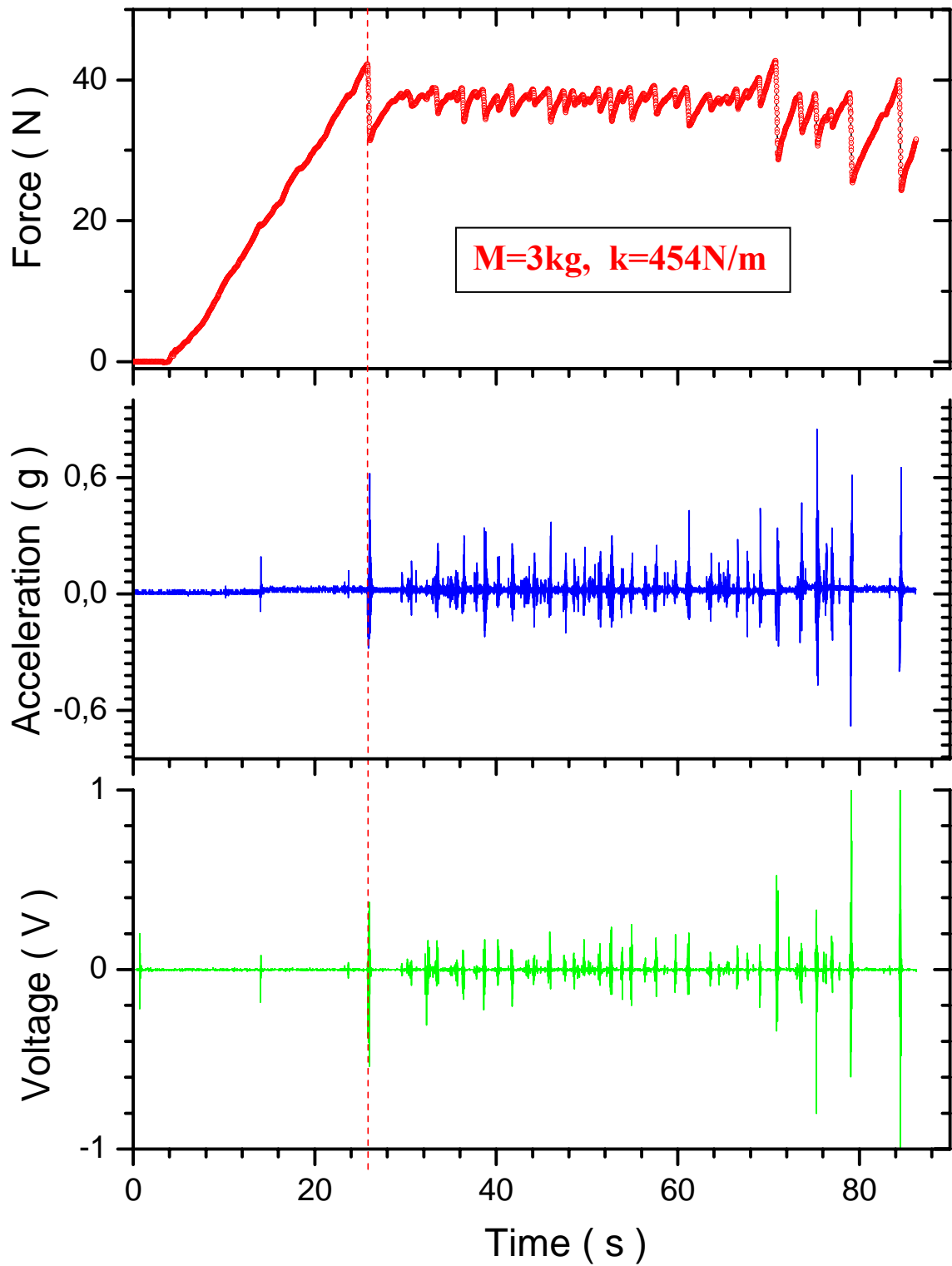
Με την ελάττωση της ταχύτητας του σώματος (Σχήματα 4.4 και 4.5) ελαττώνεται το πλάτος της δύναμης που ασκείται από το ελατήριο στο σώμα. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι ο χρόνος της προσκόλλησης - ολίσθησης ελαττώνεται. Ενδεικτικά, για μεγάλη ταχύτητα κίνησης που αντιστοιχεί σε πείραμα μικρής χρονικής διάρκειας (Σχήμα 4.3), η περίοδος είναι περίπου 0.7s, ενώ στην περίπτωση που η ταχύτητα ελαττώνεται (μεγαλύτερη διάρκεια κίνησης, Σχήμα 4.4), η περίοδος αυξάνεται σε 0.9s. Η παρατήρηση αυτή είναι σε πλήρη συμφωνία με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.2 όπου με την αύξηση της ταχύτητας του σώματος, ο χρόνος (περίοδος) της προσκόλλησης μειώνεται.



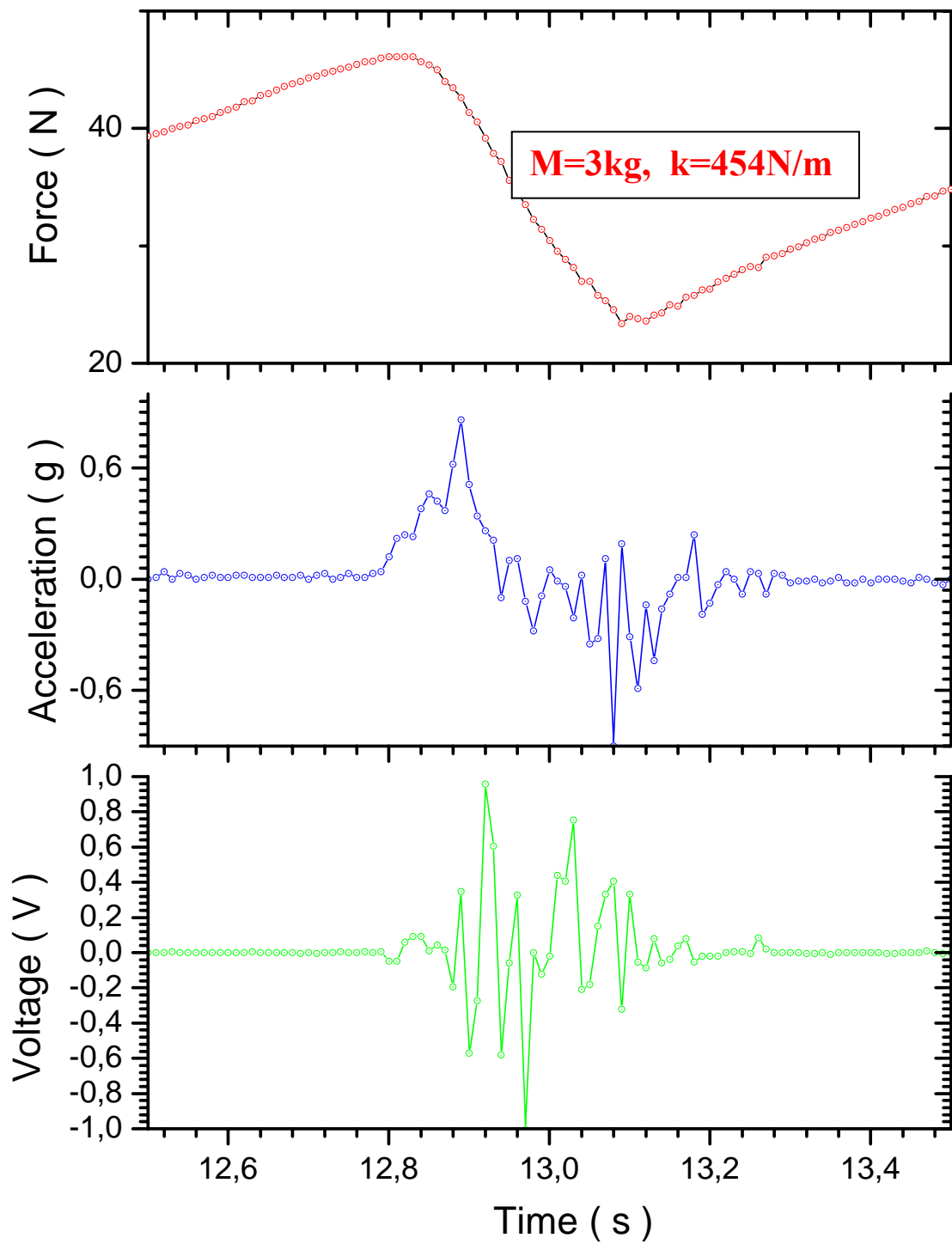
Σχήμα 4.3. Καταγραφές δύναμης, επιτάχυνσης και ηχητικών σημάτων κατά τη διάρκεια πειράματος με τη χρήση μάζας 3kg και του ελατηρίου σταθεράς 454N/m. Διάρκεια πειράματος 16s.



Σχήμα 4.4. Καταγραφές δύναμης, επιτάχυνσης και ηχητικών σημάτων κατά τη διάρκεια πειράματος με τη χρήση μάζας 3kg και του ελατηρίου σταθεράς 454N/m. Διάρκεια πειράματος 22s.



Σχήμα 4.5. Καταγραφές δύναμης, επιτάχυνσης και ηχητικών σημάτων κατά τη διάρκεια πειράματος με τη χρήση μάζας 3kg και του ελατηρίου σταθεράς 454N/m. Διάρκεια πειράματος 85s.



Σχήμα 4.6. Μεγέθυνση των προηγούμενων καταγραφών του Σχήματος 4.3 για την κίνηση κατά το 13^ο δευτερόλεπτο της κίνησης.

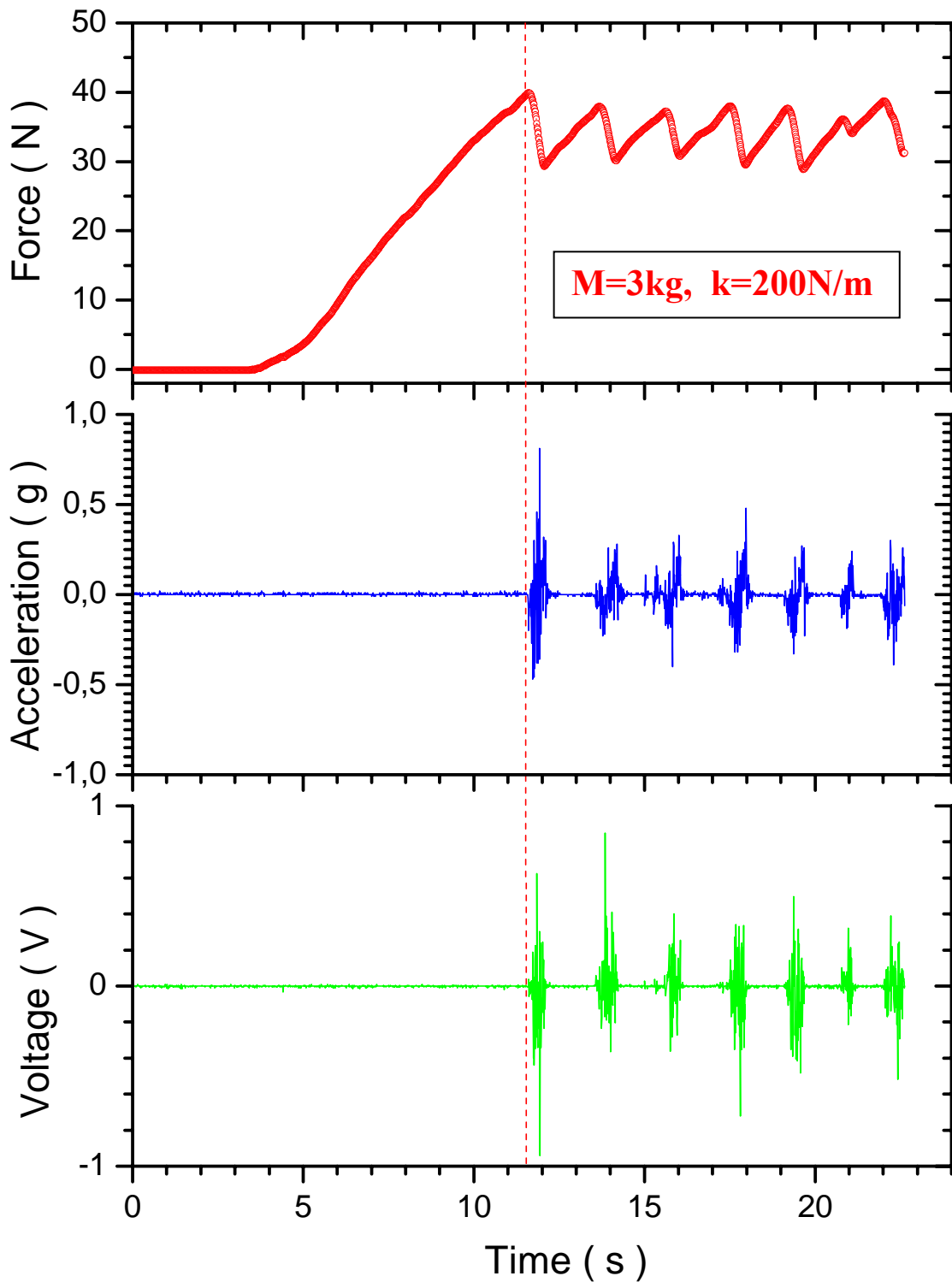
4.3 Επίδρασης της μάζας και της σταθεράς του ελατηρίου

Στα Σχήματα 4.7 – 4.9 απεικονίζονται οι καταγραφές της δύναμης, της επιτάχυνσης και των ακουστικών σημάτων για την ίδια μάζα σώματος που είχαμε και προηγουμένως ($M=3\text{kg}$) αλλά για το ελατήριο με τη μικρότερη σταθερά (200N/m). Σε κάθε περίπτωση, όπως και προηγουμένως, οι εντάσεις των ακουστικών σημάτων είναι ανάλογες της επιτάχυνσης που υφίσταται το σώμα κατά τη βίαιη κίνηση του.

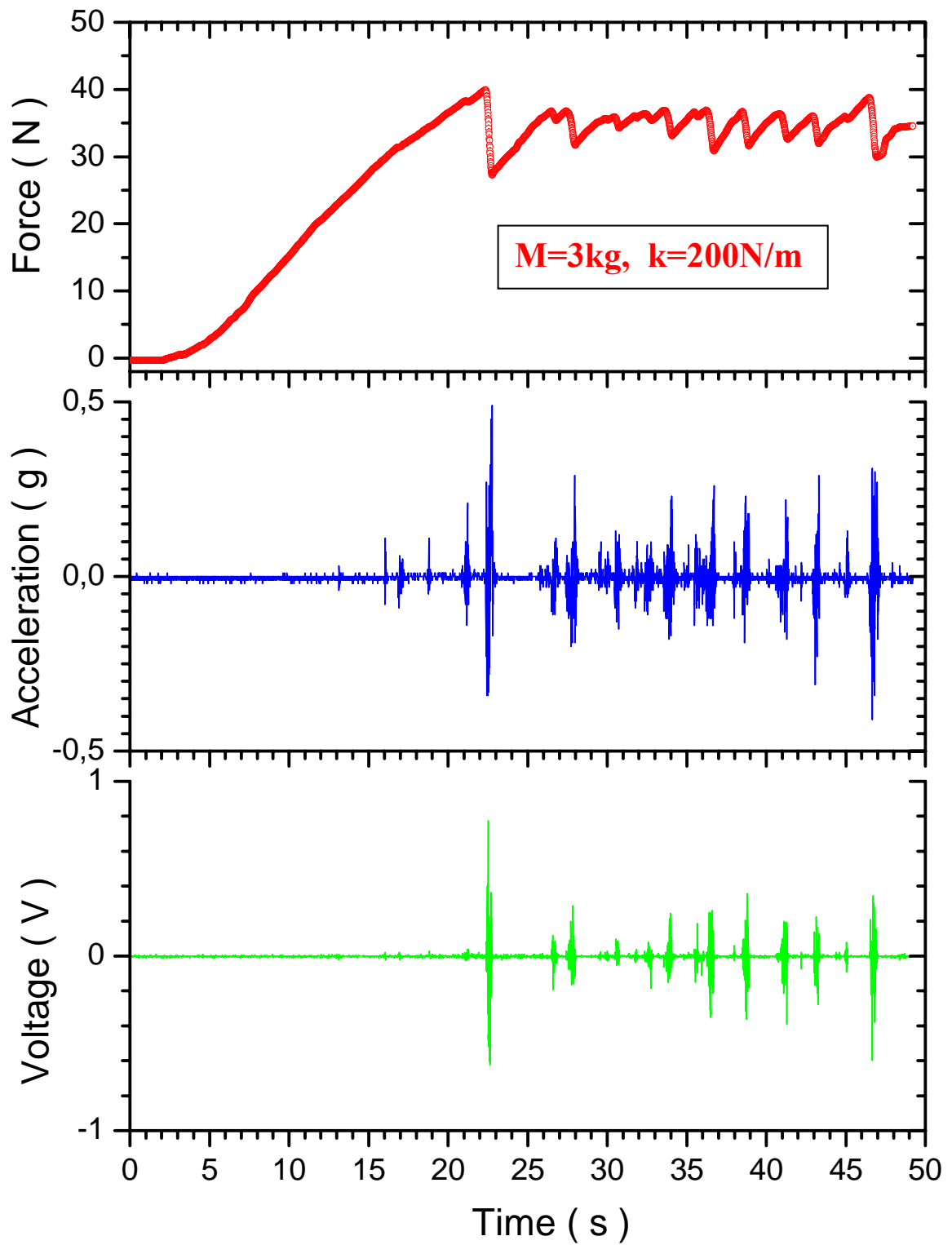
Συγκριτικά με το πείραμα που αφορούσε στην ίδια μάζα και στην ίδια περίπου χρονική διάρκεια κίνησης (ίδια ταχύτητα του κυβόλιθου) αλλά με τη χρήση του σκληρότερου ελατηρίου (Σχήμα 4.4), διαπιστώνουμε ότι η περίοδος της παρατηρούμενης προσκόλλησης – ολίσθησης στο Σχήμα 4.7 έχει αυξηθεί. Συγκεκριμένα, από περίπου 1s για την περίπτωση του ελατηρίου με σταθερά 454N/m , η περίοδος αυξάνεται σε σχεδόν 1.9s για το ελατήριο σταθεράς 200N/m . Το γεγονός αυτό είναι σε συμφωνία με τα όσα αναφέρθηκαν στην 2.2 όπου η περίοδος της κίνησης είναι αντιστρόφως ανάλογη της σταθεράς του χρησιμοποιούμενου ελατηρίου. Επίσης, το πλάτος ταλάντωσης είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση αυτή, σε συμφωνία με τη θεωρία.

Στη συνέχεια, κρατώντας την ίδια τιμή για τη σταθερά ελατηρίου (δηλ. 200N/m) χρησιμοποιήθηκε σώμα μικρότερης μάζας ($M=1.5\text{kg}$). Οι μετρήσεις απεικονίζονται στα Σχήματα 4.10 – 4.12. Προφανώς, με τη χρήση σώματος μικρότερης μάζας (μισή στην περίπτωση μας), η μέγιστη δύναμη στατικής τριβής θα ελαττωθεί και αυτή στο μισό. Επιπλέον, ο χρόνος της προσκόλλησης και της επακόλουθης ολίσθησης έχει αυξηθεί, αφού σύμφωνα με τη σχέση 2.17, είναι ανάλογος της κάθετης δύναμης, δηλαδή της μάζας του σώματος. Πράγματι, η περίοδος της επαναλαμβανόμενης κίνησης έχει μειωθεί περίπου στο μισό με την μείωση στο ήμισυ και της μάζας του σώματος. Επίσης, το πλάτος ταλάντωσης παρατηρούμε ότι ελαττώνεται, πράγμα αναμενόμενο αφού, σύμφωνα με το Σχήμα 2.2, το πλάτος ταλάντωσης είναι ανάλογο της κάθετης δύναμης, δηλαδή της μάζας του σώματος.

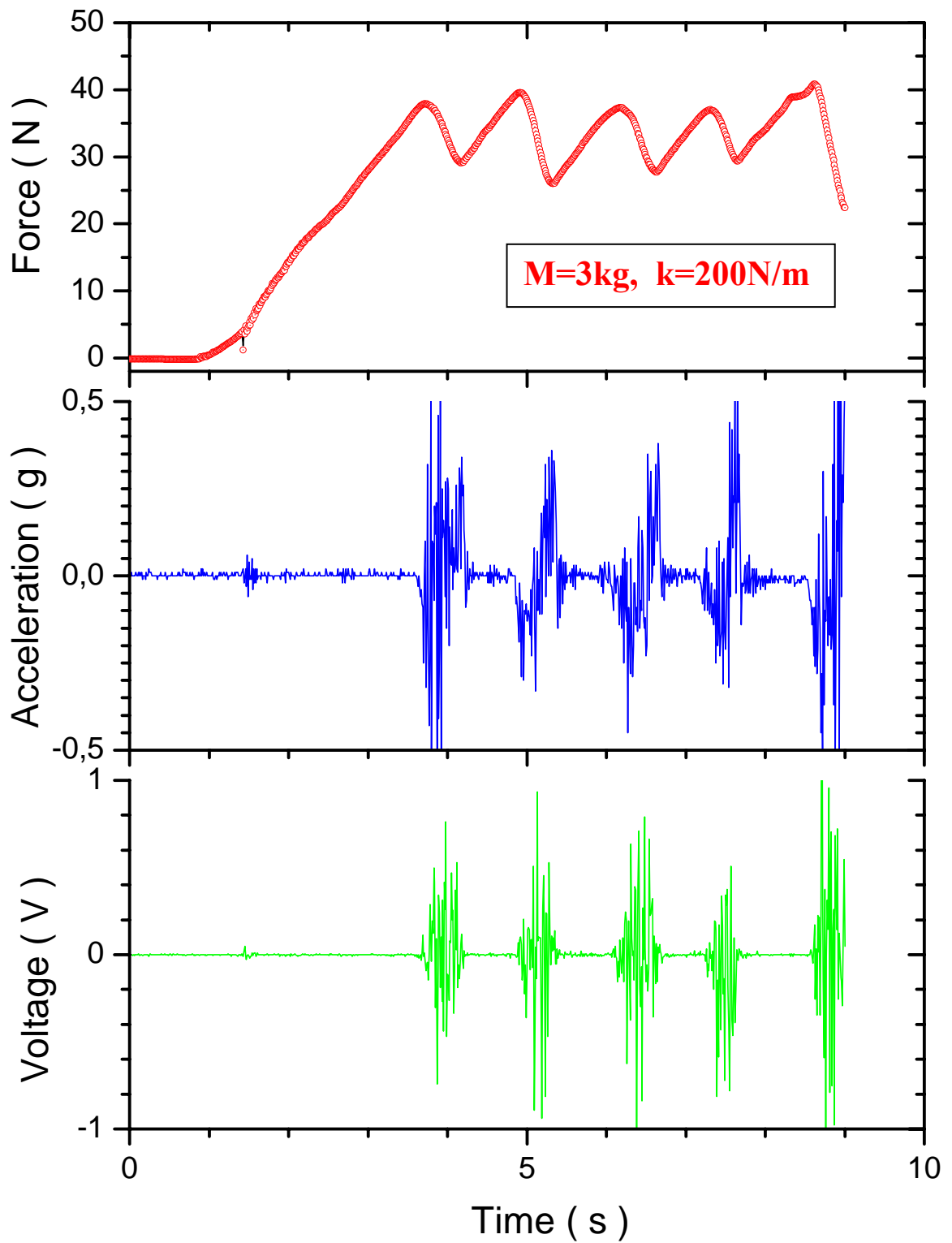
Στο τελευταίο σετ πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκε η μικρότερη μάζα σε συνδυασμό με το σκληρότερο ελατήριο. Τα αποτελέσματα των καταγραφών παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.13 – 4.15. Στις μετρήσεις αυτές είναι πιο εμφανής η διαδικασία μετάβασης σε σταθερή κίνηση, αφού η περίοδος της προσκόλλησης – ολίσθησης έχει μειωθεί σύμφωνα με τη σχέση 2.17. Με τη χρήση δηλαδή σώματος μικρότερης μάζας ή/και σκληρότερου ελατηρίου, η κίνηση από την ασταθή κατάσταση της προσκόλλησης – ολίσθησης θα μεταβεί σε σταθερή κατάσταση κίνησης.



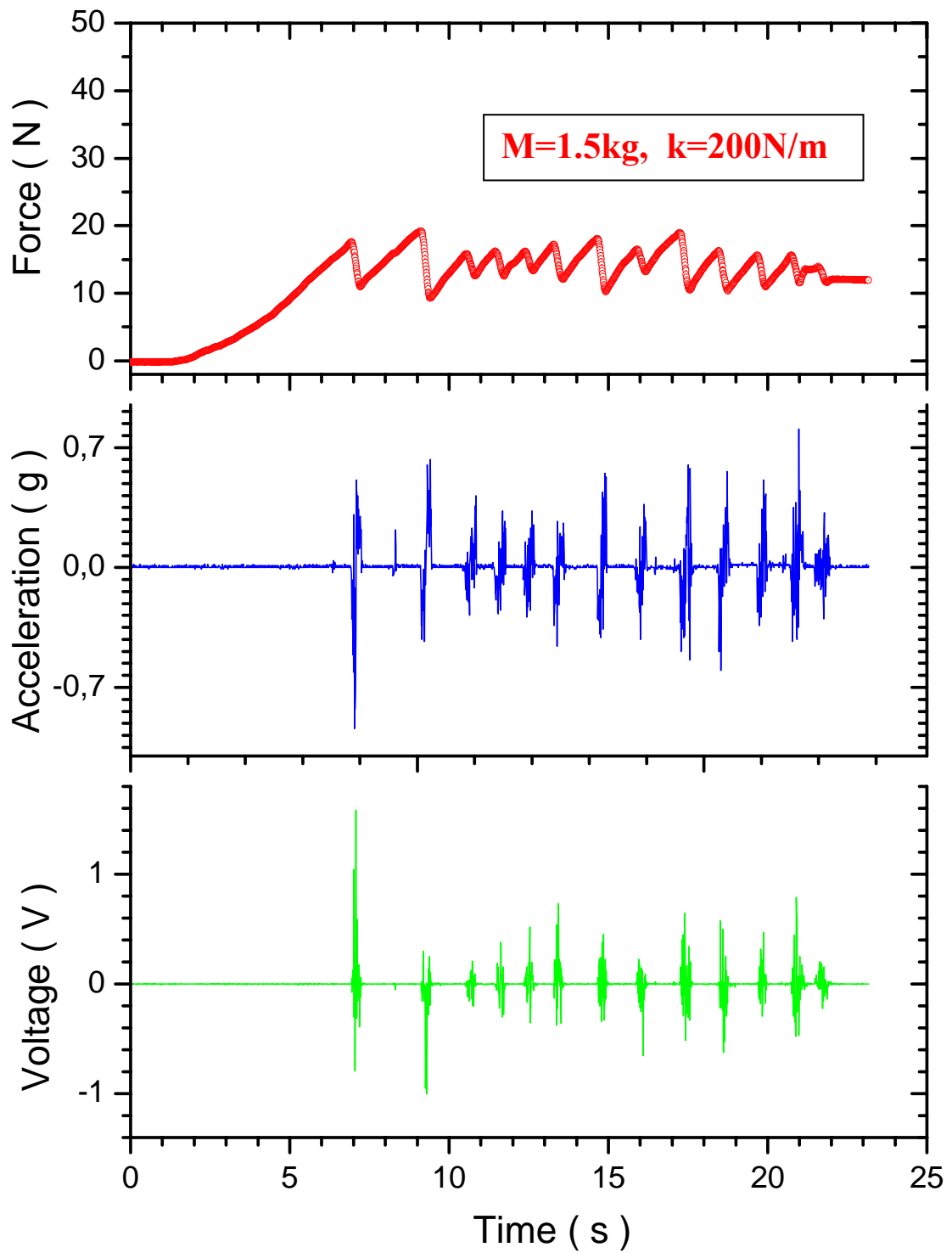
Σχήμα 4.7. Καταγραφές δύναμης, επιτάχυνσης και ηχητικών σημάτων κατά τη διάρκεια πειράματος με τη χρήση μάζας 3kg και του ελατηρίου σταθεράς 200N/m. Διάρκεια πειράματος 23s.



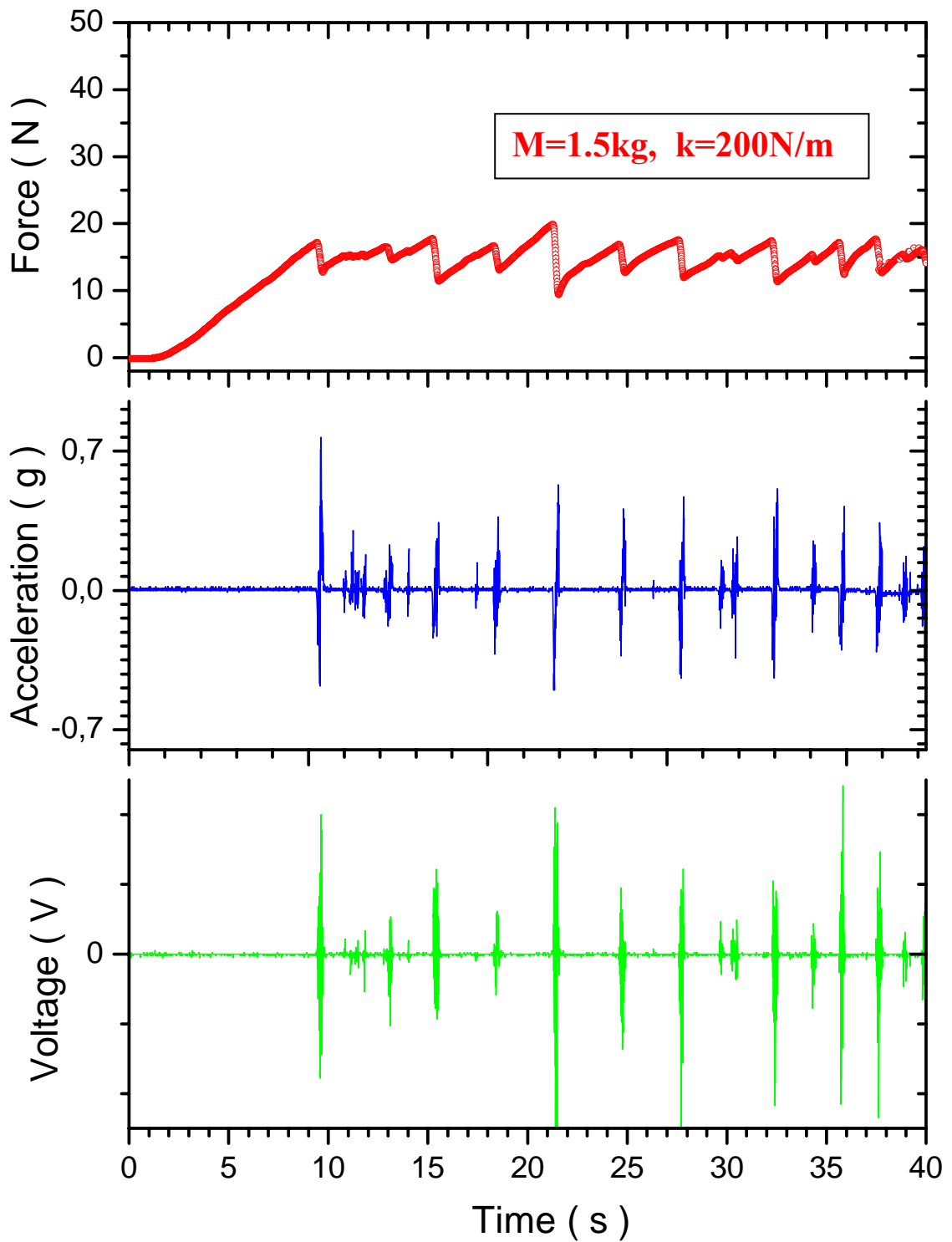
Σχήμα 4.8. Καταγραφές δύναμης, επιτάχυνσης και ηχητικών σημάτων κατά τη διάρκεια πειράματος με τη χρήση μάζας 3kg και του ελατηρίου σταθεράς 200N/m. Διάρκεια πειράματος 50s.



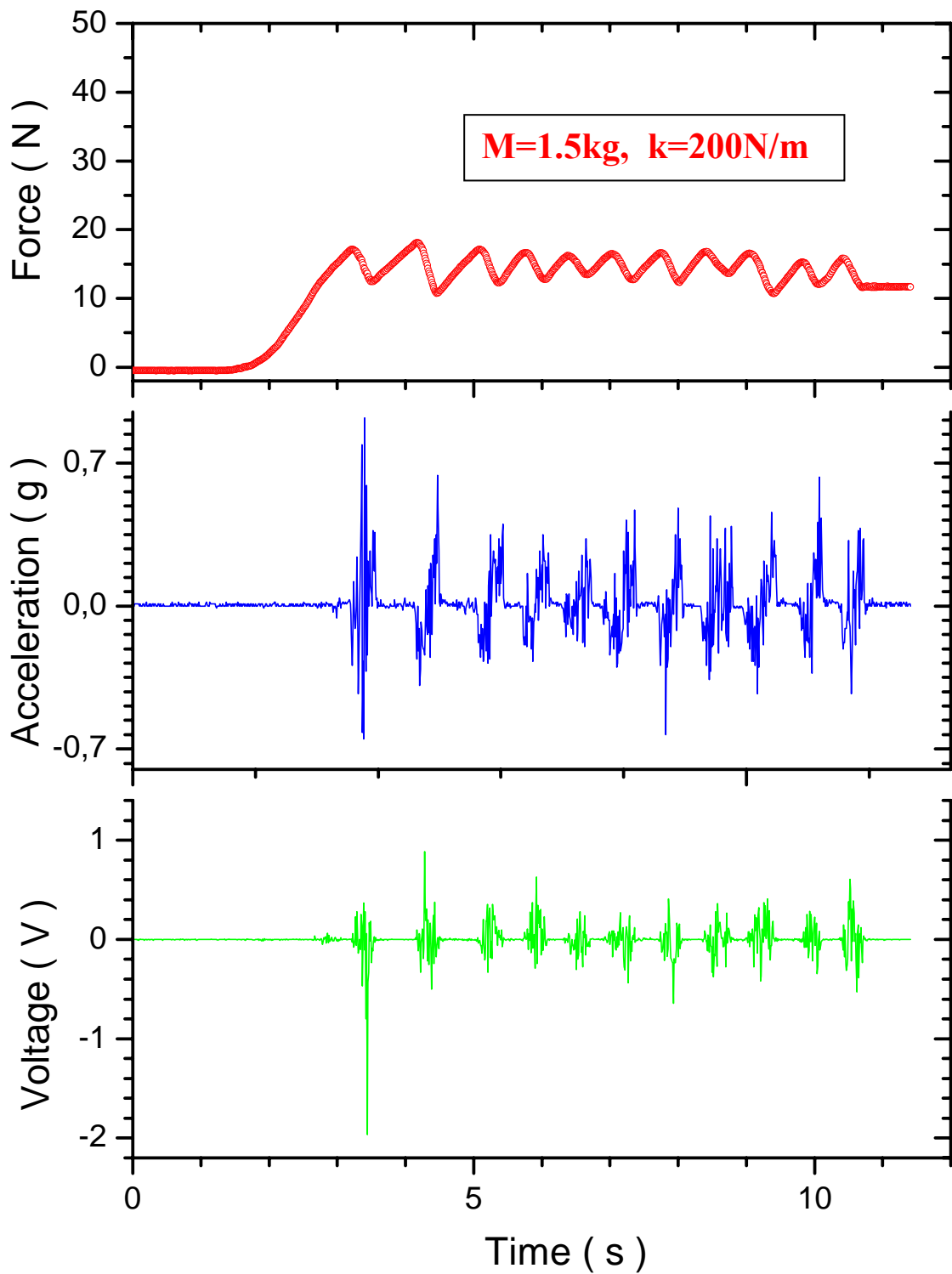
Σχήμα 4.9. Καταγραφές δύναμης, επιτάχυνσης και ηχητικών σημάτων κατά τη διάρκεια πειράματος με τη χρήση μάζας 3kg και του ελατηρίου σταθεράς 200N/m. Διάρκεια πειράματος 10s.



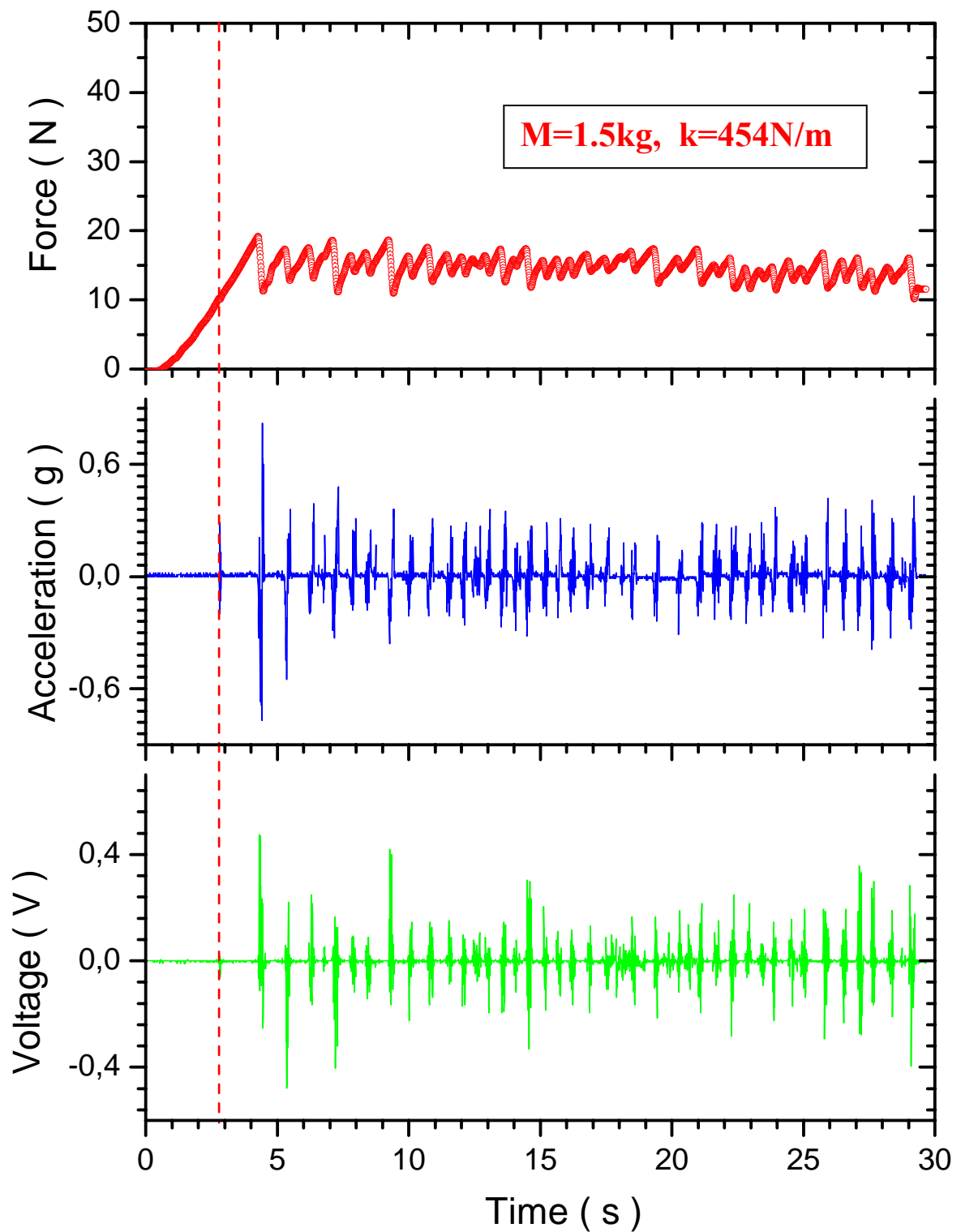
Σχήμα 4.10. Καταγραφές δύναμης, επιτάχυνσης και ηχητικών σημάτων κατά τη διάρκεια πειράματος με τη χρήση μάζας 1.5kg και του ελατηρίου σταθεράς 200N/m. Διάρκεια πειράματος 22s.



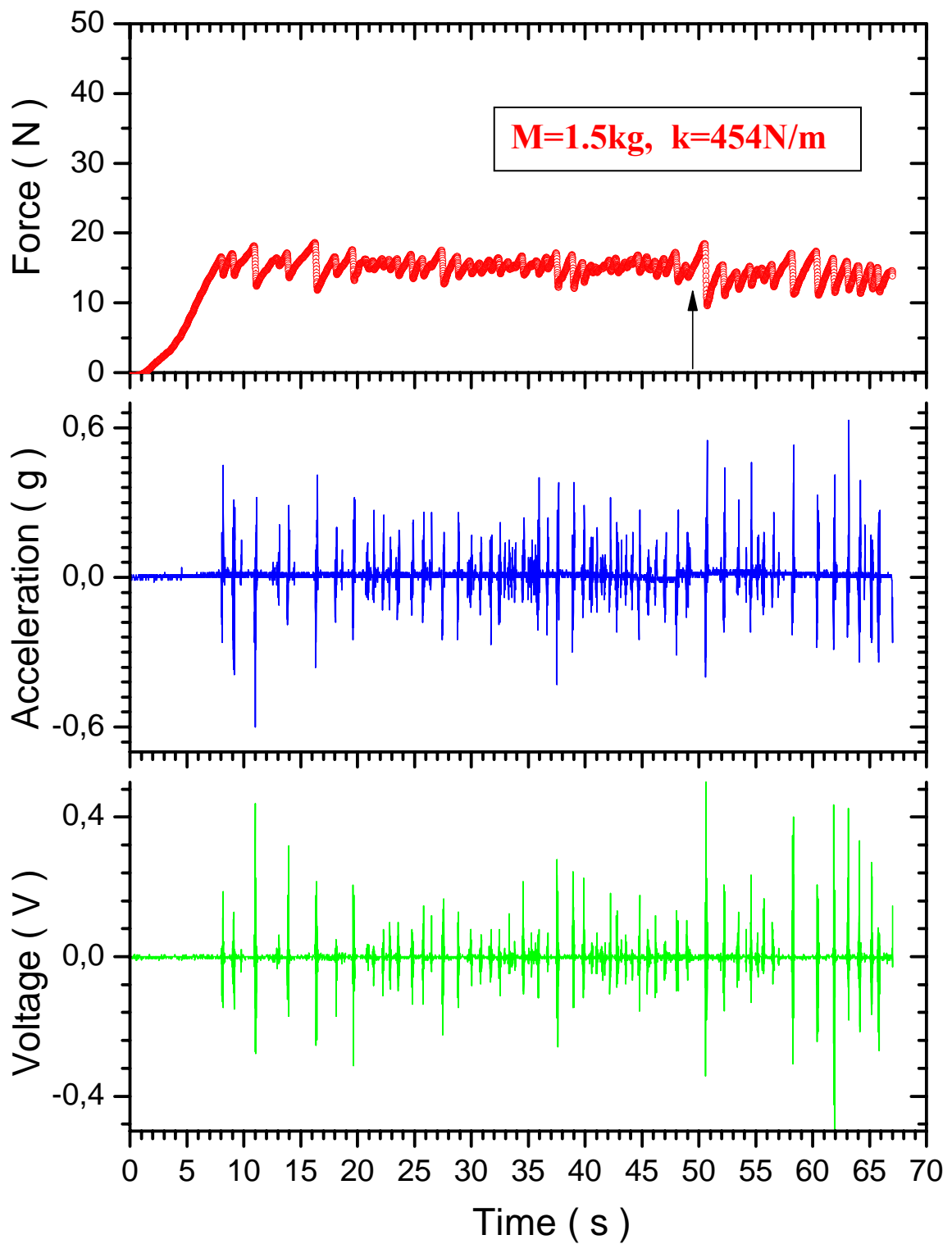
Σχήμα 4.11. Καταγραφές δύναμης, επιτάχυνσης και ηχητικών σημάτων κατά τη διάρκεια πειράματος με τη χρήση μάζας 1.5kg και του ελατηρίου σταθεράς 200N/m. Διάρκεια πειράματος 40s.



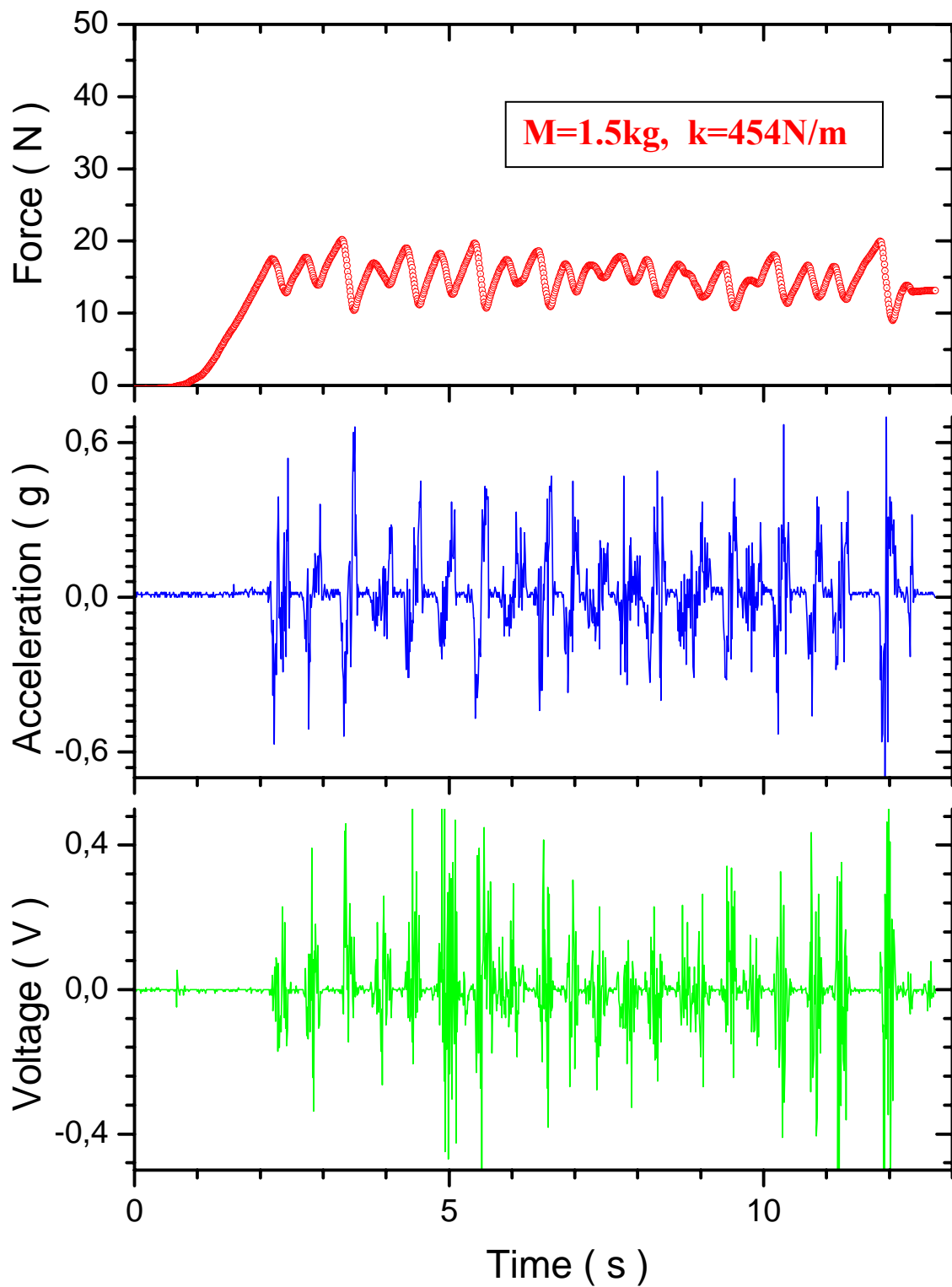
Σχήμα 4.12. Καταγραφές δύναμης, επιτάχυνσης και ηχητικών σημάτων κατά τη διάρκεια πειράματος με τη χρήση μάζας 1.5kg και του ελατηρίου σταθεράς 200N/m. Διάρκεια πειράματος 11s



Σχήμα 4.13. Καταγραφές δύναμης, επιτάχυνσης και ηχητικών σημάτων κατά τη διάρκεια πειράματος με τη χρήση μάζας 1.5kg και του ελατηρίου σταθεράς 454N/m. Διάρκεια πειράματος 30s.



Σχήμα 4.14. Καταγραφές δύναμης, επιτάχυνσης και ηχητικών σημάτων κατά τη διάρκεια πειράματος με τη χρήση μάζας 1.5kg και του ελατηρίου σταθεράς 454N/m. Διάρκεια πειράματος 70s.



Σχήμα 4.15. Καταγραφές δύναμης, επιτάχυνσης και ηχητικών σημάτων κατά τη διάρκεια πειράματος με τη χρήση μάζας 1.5kg και του ελατηρίου σταθεράς 454N/m. Διάρκεια πειράματος 70s.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία αφορούσε στην υλοποίηση και λειτουργία μιας πειραματικής διάταξης που προσομοιώνει την κίνηση προσκόλλησης – ολίσθησης (stick – slip) που αποτελεί ένα βασικό μηχανισμό γένεσης σεισμικών γεγονότων στο φλοιό της γης. Πέραν από την κατασκευή της διάταξης που αποτελούσε το κύριο μέρος της εργασίας, εξετάστηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν το μηχανισμό της συγκεκριμένης κίνησης, όπως η μάζα του κινούμενου σώματος, η ταχύτητα του, ο διαφορετικός συντελεστής τριβής σώματος – επιφάνειας και η σταθερά του ελατηρίου που μεταφέρει τη δύναμη στην κινούμενη μάζα.

Η εν λόγω διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια ενός φοιτητικού εργαστηρίου περιβαλλοντικής Φυσικής ή/και Γεωφυσικής όπου, αφενός μπορούν να εξεταστούν βασικές έννοιες Φυσικής αναφορικά με τις δυνάμεις των τριβών (στατική και κινητική τριβή), αφετέρου δε, να συσχετιστούν αυτές με τα φαινόμενα των σεισμών και τους βασικούς μηχανισμούς που τους διέπουν.

Η πειραματική διάταξη μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη ενός αυτόματου μηχανισμού κίνησης, σε αντικατάσταση της υπάρχουσας χειροκίνητης τροχαλίας που μεταφέρει την κίνηση στη μάζα που ολισθαίνει πάνω στην ξύλινη τράπεζα. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί ελεγχόμενη και σταθερή ταχύτητα κίνησης της μάζας, παράγοντας που επηρεάζει την εμφάνιση της κίνησης προσκόλλησης – ολίσθησης και μπορεί να αναδείξει τη μετάβαση από την κατάσταση αυτή στη κατάσταση της σταθερή κίνησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1/ Stic-Slip as a Mechanism for Earthquakes, W.F.Brace – J.D.Byerlee, Science, New Series, Vol.153, No.3739 (Aug.26, 1966), pp.990-992.
- 2/ What We Can Learn About Stick-Slip Dynamics, F.di Liberto, E.Balzano, M.Serpico, F.Peruggi, Mechanics ab Materials Vols.24-25 (2010) pp 343-348.
- 3/ Laboratory Studies of Stick-Slip and their Application to Earthquakes W.F.Brace, Department of Earth and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- 4/ Earthquakes and Friction Laws, Christopher H.Scholz, Nature (vol 391) January 1998.
- 5/ Sliding Friction, B.N.J. Persson, Surface Science Reports (1999) 83-119.
- 6/ The mechanism of Stick-Slip, J.D.Byerlee, U.S.Geological Survey, Menlo Park, California (U.S.A).
- 7/ Friction Of Rocks, J.D.Byerlee, Pageoph , Vol. 116 (1978), Birkhauser Verlag.
- 8/ Transitions in dynamics of acoustic emission at stick-slip movement of rock samples at different stiffness of spring-block system, Tamaz Chelidze, Teimuraz Matcharashvili, Natalia Zhukova, and Ekaterine Mepharidze, M.Nodia Insitute of Geophysics, Tbilisi, Georgia.
- 9/ Analysis of Stick-Slip and Earthquake Mechanism, Yoshiaki Ida, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 11 (1975) 147-156.
- 10/ Application of some dynamic properties of stick-slip to earthquakes, Mitiyasu Ohnaka, Geophysics .J.R. astr. Society (1978) 53, 311-318.
- 11/ Earthquake Mechanism, Kehti Aki, Tectonophysics, Elsevier Publishing Company, Amsterdam –Netherlands.
- 12/ Iverson, R. M.; Schaeffer, D. G., The Transition from Stable Creep to Stick-slip Instability in Gravity-driven Landslide Motion, American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract #T22B-07.
- 13/ Τσάμπας Ανέστης, Το μοντέλο του κρίσιμου σεισμού σε περιοχές χαμηλής σεισμικότητας της Ευρώπης, διατριβή ειδίκευσης, ΑΠΘ, 2006.

- 14/ http://www.pasco.com/file_downloads/product_manuals/Economy-Force-Sensor-Manual-CI-6746.pdf
- 15/ http://www.pasco.com/file_downloads/product_manuals/Acceleration-Sensor-Manual-CI-6558.pdf
- 16/ http://www.pasco.com/file_downloads/product_manuals/Sound-Sensor-Manual-CI-6506B.pdf
- 17/ http://www.pasco.com/file_downloads/product_manuals/ScienceWorkshop-500-Interface-Manual-CI-6400.pdf
- 18/ <http://www.pasco.com/datastudio/>
- 19/ <http://earthquake.usgs.gov/research/modeling/earthquakeMachine/>