Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών και Εμβιομηχανικής

Εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής και Ταλαντώσεων

Ομάδα Δομικής Ανάλυσης Κατασκευών και Ευφυών Υλικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επίδραση της υγρασίας στην επίδοση διάγνωσης βλάβης σε πλάκες από σύνθετα υλικά με λινάρι με πιεζοηλεκτρικούς διεγέρτες και αισθητήρες

ΤΣΙΤΣΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

1067315

Επιβλέπων: Χρυσοχοΐδης Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής

Διπλωματική εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών του Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2024

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών
Τσίτσας Παναγιώτης
© 2024 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών
Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών και Εμβιομηχανικής
Εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής και Ταλαντώσεων
Ομάδα Δομικής Ανάλυσης Κατασκευών και Ευφυών Υλικών

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε

από τον

Τσίτσα Παναγιώτη

1067315

την 8/7/2024

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα. Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

Επίδραση της υγρασίας στην επίδοση διάγνωσης βλάβης σε πλάκες από σύνθετα υλικά με λινάρι με πιεζοηλεκτρικούς διεγέρτες και αισθητήρες

Τσίτσας Παναγιώτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση της υγρασίας στην επίδοση διάγνωσης βλάβης σε πλάκες από σύνθετα υλικά με λινάρι με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών διεγερτών και αισθητήρων. Αρχικά, παρουσιάζεται το κίνητρο της υψηλής ζήτησης βιώσιμων και ελαφρών υλικών από τις βιομηχανίες καθώς και το βασικό μειονέκτημα των υλικών από φυτικές ίνες που είναι ο υδρόφιλος χαρακτήρας τους σε συνδυασμό με τον υπαρκτό κίνδυνο μικρής βλάβης κρούσης. Στο επόμενο κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση των δημοσιεύσεων στους επιστημονικούς τομείς της απορρόφησης νερού από φυτικά σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες λινού, της βλάβης σε αυτά τα υλικά από χαμηλή ενέργεια κρούσης και της χρήσης υπερηχητικών κυμάτων με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων παρασκευάστηκαν πλάκες από μη υφαντές ίνες λιναριού, τυχαία κατανεμημένες, με εποξειδική ρητίνη, η οποία επιλέχθηκε λόγω της υδροφοβικής της φύσης. Από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού προσδιορίστηκαν οι συχνότητες για τις λιγότερο διασκορπιστικές θεμελιώδεις ιδιομορφές. Βάσει των χαρακτηριστικών διασκόρπισης συναρτήσει των συχνοτήτων προέκυψε η επιλογή των πιεζοκεραμικών στοιχείων που κολλήθηκαν στα πλακίδια σε συγκεκριμένη ορθογώνια διάταξη με σκοπό τη διάδοση κυμάτων σε διάφορες κατευθύνσεις. Εξήχθησαν τα κυματικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων σε πρώιμο στάδιο κι έπειτα μια ομάδα δοκιμίων υποβλήθηκε σε κρούση χαμηλής ενέργειας και μετά όλα βυθίστηκαν στο νερό μέχρι τον κορεσμό τους. Σε τακτά χρονικά διαστήματα μετά τη βύθιση στο νερό, το βάρος των πάνελ μετρήθηκε με τη χρήση εργαστηριακής ζυγαριάς και πραγματοποιήθηκαν σε αυτά

μετρήσεις της κυματικής διάδοσης. Με αυτό τον τρόπο διερευνήθηκαν οι μεταβολές των χαρακτηριστικών της κυματικής διάδοσης λόγω της πρόσληψης υγρασίας τόσο στα υγιή όσο και στα δοκίμια με ζημιά. Επιπρόσθετα, έγινε μια εκτίμηση της επίδρασης της απορρόφησης νερού στα χαρακτηριστικά διασκορπισμού του σήματος της κυματικής διάδοσης μέσω μετρήσεων κατεύθυνσης χρησιμοποιώντας το Laser Doppler Vibrometer ως αισθητήριο. Τέλος, μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα της μεθόδου των κατευθυνόμενων υπερηχητικών κυμάτων για την ανίχνευση βλάβης κρούσης χαμηλής ενέργειας στα διάφορα στάδια του κορεσμού, παρουσία δηλαδή υδάτινου περιβάλλοντος.

Λέξεις κλειδιά:

Απορρόφηση Νερού, Λινάρι, Κυματική Διάδοση, Πιεζοηλεκτρικά, Βλάβη Κρούσης

Effect of moisture on the structural health monitoring evaluation of flax composite laminates using piezoelectric actuator/sensor pairs

Tsitsas Panagiotis

ABSTRACT

In this thesis, the effect of moisture on the structural health monitoring evaluation of flax composite laminates was investigated using piezoelectric actuator/sensor pairs. Initially, the motivation of the high demand for sustainable and lightweight materials from industries was presented as well as the main disadvantage of plant fiber materials which is their hydrophilic nature combined with the inherent risk of minor impact damage. In the next chapter, a literature review was made of publications in the scientific fields of water absorption by flax fiber-reinforced plant composites, damage to these materials by low energy impact loading and the use of ultrasonic waves with piezoelectric transducers to monitor structural integrity. To carry out the experiments, plates of non-woven flax fibers, randomly distributed, were prepared with epoxy resin, which was selected due to its hydrophobic nature. Additionally, based on the mechanical properties of the material, the frequencies for the least dispersive fundamental modes were determined. Based on the dispersion characteristics as a function of the frequencies, the selection of the piezoceramic elements that were glued to the tiles in a specific rectangular arrangement in order to propagate waves in various directions resulted. The wave characteristics of the samples were extracted at an pristine stage and then a group of samples were subjected to a low energy impact and then all were immersed in water until saturation. At regular intervals after immersion in water, the weight of the panels was measured using a laboratory scale and wave propagation measurements were performed on them. In this way, the changes in wave propagation characteristics due to moisture

uptake in both healthy and damaged specimens were investigated. Additionally, an assessment of the effect of water absorption on the dispersion characteristics of the wave propagation signal was made through directional measurements using the Laser Doppler Vibrometer as sensor. Finally, the effectiveness of the guided ultrasonic wave method for the detection of low-energy impact damage at the various stages of saturation, i.e. in the presence of an aqueous environment, was studied.

Keywords:

Water Absorption, Flax, Wave Propagation, Piezoelectrics, Impact Damage

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ..... **V**

ABSTRACT ..... **VII**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ..... **IX**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ **1**

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ **3**

1.1 ΚΙΝΗΤΡΟ **3**

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ **5**

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ **7**

2.1 ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΝΕΡΟΥ **7**

2.2 ΒΛΑΒΗ ΚΡΟΥΣΗΣ **8**

2.3 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΜΕ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ **9**

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ **11**

3.1 ΠΛΑΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ **11**

3.2 ΥΛΙΚΑ **12**

3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ **15**

3.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΡΟΥΣΗΣ **17**

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ **19**

4.1 ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ **19**

4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΟΣΗ **21**

4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ..... 28

4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΒΛΑΒΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ..... 34

4.5 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΒΛΑΒΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ 41

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 45

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α 47

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β 70

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ 89

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ 112

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε 115

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ 129

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ 130

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ 132

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ 141

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 143

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Χρυσοχοΐδη Νικόλαο για την ευκαιρία και την εμπιστοσύνη του να ερευνήσω ένα τόσο καινοτόμο πεδίο, την καθοδήγηση του, την υποστήριξη του αλλά και για την συνεργασία μας. Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους μεταδιδακτορικούς ερευνητές κ. Μπαρούνη Αντιγόνη και κ. Ρεκατσίνα Χριστόφορο για την συμβολή τους σε αυτή την έρευνα. Θερμές ευχαριστίες σε όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Δομικής Ανάλυσης Κατασκευών και Ευφυών Υλικών για τις πολύτιμες βοήθειες τους και την υποστήριξη τους. Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην αναφέρω την υποστήριξη της οικογένειας και των φίλων μου όλα αυτά τα χρόνια για να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται τα κίνητρα και οι στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας προκειμένου να δοθεί μια επισκόπηση της έρευνας που διεξήχθη.

1.1 ΚΙΝΗΤΡΟ

Τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχουν ανάγκες για υλικά φιλικά προς το περιβάλλον, έτσι οι βιομηχανίες υιοθετούν νέους κανονισμούς και η επιστημονική έρευνα στρέφεται προς αυτή την κατεύθυνση. Η αυξανόμενη ζήτηση στη βιομηχανία υψηλών επιδόσεων (αεροδιαστημική, αεροναυπηγική) για πιο ελαφριά βιώσιμα υλικά, αλλά εξίσου ισχυρά σε σύγκριση με τα παραδοσιακά μη ανακυκλώσιμα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος, όπως ο άνθρακας και το γυαλί, έχει περάσει πλέον και σε άλλους βιομηχανικούς τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η ναυτιλία, οι κατασκευές και η ενέργεια, καθιστώντας την ανάπτυξη τέτοιων ενισχυτικών υλικών ακόμη πιο σημαντική. Ως εκ τούτου, η χρήση φυσικών φυτικών ινών ως ενίσχυση σε πολυμερή σύνθετα υλικά για την παραγωγή χαμηλού κόστους οικολογικών υλικών έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον [1]. Λόγω των υψηλών ειδικών ιδιοτήτων τους, του χαμηλού ενεργειακού κόστους παραγωγής και επεξεργασίας τους, της χαμηλής πυκνότητας και της καλής βιοδιασπασιμότητας φυτικές ίνες όπως το λινάρι θεωρούνται ιδανικές για την ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον σύνθετων υλικών [2].

Παρόλο που οι φυτικές ίνες όπως το λινάρι βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στις αυτοκινητο-βιομηχανίες και τις ναυπηγικές κατασκευές λόγω των εξαιρετικών μηχανικών επιδόσεων όσον αφορά την ακαμψία και την αντοχή στην κρούση, ακόμη και κάτω από δύσκολες και απαιτητικές περιβαλλοντικές συνθήκες έχουν κάποια μειονεκτήματα στην απόδοσή τους. Κύριο τους ελάττωμα είναι η υδρόφιλη εγγενής τάσης τους λόγω της κυτταροδομής τους που τις καθιστά ευαίσθητες σε περιβάλλον υγρασίας.

Επιπλέον, οι βλάβες από κρούση, ιδίως σε χαμηλή ταχύτητα, είναι κοινά αναγνωρισμένο ότι θεωρούνται ως μία από τις σοβαρότερες απειλές για τις σύνθετες κατασκευές. Επομένως, αποτελεί πρόκληση να ερευνηθεί αν η ανίχνευση της βλάβης από κρούση σε αυτού του είδους τις κατασκευές υπό συνθήκες υδάτινου περιβάλλοντος είναι εφικτή και πώς αυτή επηρεάζεται. Χρειάζονται, λοιπόν, εργαλεία παρακολούθησης ικανά να καταγράφουν την επίδραση της υγρασίας στα σύνθετα υλικά με σκοπό να διασφαλίζεται η αντοχή τους.

Ο μη καταστροφικός έλεγχος έχει χρησιμοποιηθεί όλα αυτά τα χρόνια για να εκτιμά το μέγεθος της ζημιάς και να αξιολογεί την πρόοδό της, παρέχοντας μια ασφαλή εκτίμηση της υπολειπόμενης ζωής της κατασκευής. Από τις ποικίλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, η χρήση υπερηχητικών κυμάτων, που παράγονται με διάφορες μεθόδους διέγερσης και ανίχνευσης (π.χ. πομποί δέκτες, μόνιμα προσαρτημένοι ενεργοποιητές και αισθητήρες πιεζοηλεκτρικών πλακιδίων ή ταινιών), φαίνεται να είναι μια από τις πιο ενθαρρυντικές μεθόδους για την παρακολούθηση της δομικής κατάστασης (SHM), ικανή να αναγνωρίζει, να εντοπίζει βλάβες στις σύνθετες κατασκευές και να διασφαλίζει τη δομική τους ακεραιότητα, να βελτιώνει την αξιοπιστία και να μειώνει το κόστος του κύκλου ζωής. Ωστόσο, η χρήση υπερηχητικών κυμάτων ως μέτρο της υποβάθμισης του σύνθετου υλικού λόγω της πρόσληψης υγρασίας είναι πολύ περιορισμένη.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στη παρούσα εργασία γίνεται πειραματική μελέτη για την διερεύνηση της επίδρασης της απορρόφησης υγρασίας στα χαρακτηριστικά της κυματικής διάδοσης σε πλάκες ενισχυμένες από σύνθετο φυτικό υλικό λινάρι χρησιμοποιώντας ζεύγη ενεργοποιητών και αισθητήρων πιεζοηλεκτρικών πλακιδίων για την διέγερση και τη λήψη υπερηχητικών κατευθυνόμενων κυμάτων.

Οι κύριοι στόχοι αυτής της διατριβής συνοψίζονται παρακάτω:

- Επίδραση της απορρόφησης υγρασίας στα χαρακτηριστικά της κυματικής διάδοσης
- Εκτίμηση της επίδρασης της απορρόφησης υγρασίας στα χαρακτηριστικά της κυματικής διασποράς
- Επίδραση της απορρόφησης υγρασίας στην αποτελεσματικότητα της ανίχνευσης βλάβης κρούσης χαμηλής ενέργειας μέσω της κυματικής διάδοσης

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τις αναφερόμενες δημοσιεύσεις στους επιστημονικούς τομείς της απορρόφησης νερού από φυτικά σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες λινού, της βλάβης σε σύνθετα υλικά με λινάρι από χαμηλή ενέργεια κρούσης και της χρήσης υπερηχητικών κυμάτων με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία.

2.1 ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΝΕΡΟΥ

Ποικίλες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για την απορρόφηση νερού από σύνθετα φυτικά υλικά. Αρχικά, παρατηρήθηκε η διαχυτικότητα να διπλασιάζεται για κάθε αύξηση του όγκου των πόρων μέχρι να επιτευχθεί ένα πλατό [3]. Το γεγονός ότι συχνά υπάρχει μια ανομοιόμορφη διατομή των ινών είναι μια πρόκληση για το σχεδιασμό του σύνθετου υλικού με λινό. Όταν οι ίνες λιναριού είναι σε επαφή ή βυθισμένες στο νερό, η εσωτερική τους δομή αλλάζει και παρατηρείται διόγκωση των ινών [4] που οδηγεί τελικά στον σχηματισμό κενών και μικρορωγμών στις περιοχές διεπαφής ίνας – μήτρας κι ως εκ τούτου στη μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της συνολικής αντοχής. Η κατανόηση του μηχανισμού απορρόφησης υγρασίας και τις επιδράσεις του στις μηχανικές ιδιότητες είναι σημαντική για τα σύνθετα υλικά από φυτικές ίνες, εξετάζοντας την αλλοίωση της αντοχής τους στη θραύση 6 , την καμπτική τους αντοχή [5] 7, η οποία μειώνεται σε σύγκριση με συνθήκες μη παρουσίας υγρασίας. Αυτά συμβαίνουν λόγω μεγαλύτερης μικρό-ρωγμής λόγω διόγκωσης των ινών που δημιουργεί κακή διεπιφάνεια ίνας μήτρας κατά τη φόρτιση κάμψης όπως καθώς και τη διεπιφανειακή αντοχή μεταξύ ίνας μήτρας.

Η επιφανειακή συγκόλληση γίνεται ασθενής με την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία οδηγώντας σε θραύση των ινών και ταχύτερη αστοχία [6]. Η υγροθερμική, λοιπόν, γήρανση επηρεάζει τόσο τις μηχανικές ιδιότητες όσο και τους μηχανισμούς αστοχίας [7]-[8]. Ακόμα, έχει αποδειχθεί η απορρόφηση νερού αυξάνει με την αύξηση του ποσοστού της σχετικής υγρασίας, 50% για 16 ημέρες ισούταν με 100% υγρασία για 1 ημέρα. Έχει ερευνηθεί ότι οι χημικές

προσθήκες, όπως οι ενώσεις βορίου στη μήτρα, αυξάνουν την αντίσταση στην πρόσληψη νερού των ινών λινού [9]. Επιπλέον, έχει μελετηθεί η επίδραση του υβριδισμού των ινών λιναριού με ίνες γυαλιού και έχει αποδειχθεί ότι πέρα των σημαντικών βελτιώσεων στη μηχανική απόδοση υπάρχει και μια συμπεριφορά απώθησης της υγρασίας [10].

2.2 ΒΛΑΒΗ ΚΡΟΥΣΗΣ

Άλλες δύο μελέτες είναι πολύ εύστοχες, καθώς αναλύουν το δεύτερο μειονέκτημα, που είναι η χαμηλής ενέργειας κρούση, σε συνδυασμό με το πρώτο. Οι ίνες λιναριού έχουν αρνητική επίδραση στη χαμηλή αντοχή κρούσης λόγω της περιορισμένης ολκιμότητας και της κοίλης δομής τους. Έτσι, παρατηρήθηκε ότι η αντοχή κρούσης βελτιώνεται αξιοσημείωτα με την αντικατάσταση ενός μικρού ποσοστού ινών λινού με ίνες γυαλιού και βγαίνει διπλά κερδισμένο από την μηδαμινή ικανότητα απορρόφησης νερού από το γυαλί [10]. Επιπρόσθετα, μια μικρή ποσότητα πρόσληψης νερού βελτιώνει το φορτίο κρούσης και την αντίσταση στην κρούση [11]. Η απορρόφηση ενέργειας κατά τη διάτρηση στο σύνθετο υλικό λιναριού-MAPP ξεπέρασε αυτή των σύνθετων υλικών λιναριού-εποξειδικής μήτρας περισσότερο από 50%. Παρά την πιο έντονη μείωση των ιδιοτήτων μετά την κρούση, τα σύνθετα υλικά λιναριού-εποξειδικής μήτρας εξακολουθούν να παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερες στατικές ιδιότητες σε σύγκριση με τα αντίστοιχα λινάρι-MAPP [12]. Τέλος, μελετήθηκαν υβριδικά ελάσματα λιναριού, γυαλιού και λιναριού-γυαλιού σε δοκιμές κρούσης χαμηλής ταχύτητας και αποδείχθηκε ότι το λινάρι απορροφά περισσότερη ενέργεια, αλλά παρουσιάζει μεγαλύτερη ζημιά σε χαμηλότερα ενεργειακά επίπεδα [13]. Οι υβριδικές πλάκες έχουν παρόμοια συμπεριφορά όπως τα δείγματα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού.

2.3 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΜΕ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ

Η διάδοση κατευθυνόμενων κυμάτων σε δομικές κατασκευές με πιεζοηλεκτρικούς διεγέρτες αισθητήρες έχει κερδίσει έδαφος τις τελευταίες δεκαετίες [14]. Μια αρχική προσπάθεια διερεύνησε την αποτελεσματικότητα των κυμάτων Lamb για την ανίχνευση ζημιών σύνθετα υλικά, παρουσιάζοντας πειραματικά αποτελέσματα που υποδεικνύουν την ικανότητά τους να ανιχνεύουν διάφορες μορφές βλάβης και να προσδιορίζουν τη θέση τους με υψηλή ακρίβεια [15]. Άλλη μια σημαντική έρευνα καταδεικνύει την σκοπιμότητα χρήσης αποκρίσεων κυμάτων Lamb μέσω Laser Vibrometer, που επικυρώνεται μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων και απλών πειραμάτων με πιεζοκεραμικούς αισθητήρες, δίνοντας έμφαση στη μετεπεξεργασία σήματος ως κρίσιμης σημασίας, με το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου να βρίσκεται στην απόκτηση ενός ολοκληρωμένου 2D εκτός επιπέδου κυματοπεδίου Lamb για δομική ανάλυση [16]. Αργότερα, αριθμητικές προσομοιώσεις και πειραματικές δοκιμές επικυρώνουν τη χρήση πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών/αισθητήρων που προσφέρουν πληροφορίες για τις επιπτώσεις της μικροδομής στη διάδοση των κυμάτων και επιδεικνύουν δυνατότητες για ποσοτική ανίχνευση ζημιών σε κατασκευές [17]. Επιπλέον, δύο διαφορετικά είδη πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων, ενσωματωμένων και επιφανειακά τοποθετημένων, συγκρίνονται για ανίχνευση και εντοπισμό ζημιάς κρούσης, παρακολούθηση της ενέργειας κρούσης και της εξέλιξης της ρωγμής [18]-[19].

Ακόμη, μια διερεύνηση ενός πάνελ λιναριού-πολυαιθυλενίου τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά, εξέτασε τις καμπύλες διασποράς για διαφορετικές κατευθύνσεις ινών και συχνότητες χρησιμοποιώντας καθοδηγούμενα κύματα, σήματα μεταβατικού χρόνου που επεξεργάζονται μέσω μετασχηματισμών χρόνου-συχνότητας. Η μοντελοποίηση κυματικών πεπερασμένων στοιχείων είναι πιο κατάλληλη για αναλύσεις υψηλής συχνότητας, ενώ οι πειραματικές καμπύλες διασποράς προσφέρουν εντοπισμένες και ακριβείς πληροφορίες για την ανίχνευση ασυνεχειών εντός της δομής [20].

Μια άλλη σημαντική μελέτη επικεντρώθηκε στη διάδοση των κυμάτων Lamb, διερευνώντας τη δημιουργία διαφόρων κυματομορφών κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και διέγερσης. Δύο διαφορετικές μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση, μια ημιαναλυτική λύση [21], [22] και η μέθοδος TDSFE [23]. Αποδείχθηκε η δυνατότητα και των δύο λύσεων να συλλάβουν με ακρίβεια τα κύματα που δημιουργούνται κατά μήκος της σύνθετης λωρίδας, δείχνοντας εξαιρετική συμφωνία μεταξύ της μοντελοποιημένης και της παρατηρούμενης συμπεριφοράς [24]. Μια βασική πτυχή της προηγούμενης εργασίας ήταν η καινοτομία της στην ανίχνευση αλλαγών στη συμπεριφορά των κυμάτων καθώς αυτές διαδίδονταν μέσω πολύπλοκων δομών. Αυτή η ικανότητα διάκρισης των αλλαγών στα χαρακτηριστικά των κυμάτων αντιπροσωπεύει μια σημαντική πρόοδο στον τομέα, με συνέπειες για την κατανόηση και την ανάλυση της συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών υπό διαφορετικές συνθήκες. Χρησιμοποιώντας υπερηχητικά κατευθυνόμενα κύματα με αυξανόμενο βήμα συχνότητας σε πλάκες CFRP, βρέθηκε ότι η μέγιστη καθυστέρηση ToF ισοδυναμούσε με το μέγεθος της ζημιάς και η εξασθένηση της λειτουργίας A_0 επηρεάστηκε από το μήκος της ζημιάς στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος [25].

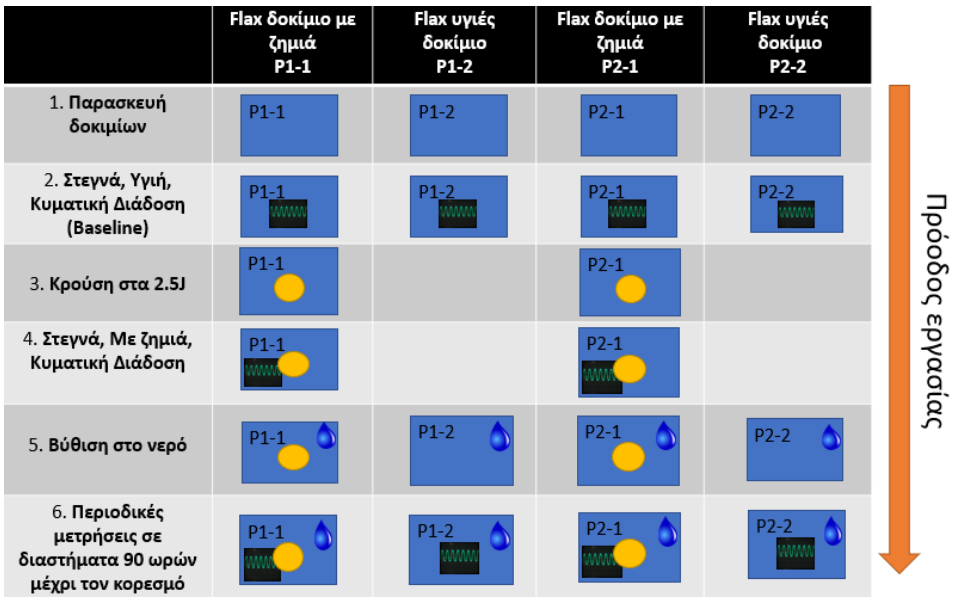
Επιπρόσθετα, διερευνήθηκε η επίδραση της περιεκτικότητας σε υγρασία στη διάδοση των υπερηχητικών κυμάτων στο κονίαμα, ως σύνθετο υλικό δείχνοντας ότι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία, αλλά το πλάτος της κυματομορφής έδειξε ποικίλη συμπεριφορά με την περιεκτικότητα σε υγρασία [26]. Η περιεκτικότητα σε υγρασία σε σύνθετες δομές άνθρακα/εποξειδικού υλικού παρακολουθήθηκε χρησιμοποιώντας κύματα Lamb, όπου τοποθετήθηκαν μετατροπείς στη μία επιφάνεια των σύνθετων πλακών [27]. Οι λειτουργίες κύματος A_0, S_0 και S_1 μετρήθηκαν πριν και μετά τη γήρανση του υλικού, δείχνοντας ότι η ευαισθησία της εξασθένησης A_0 θα μπορούσε να είναι ένας μετρητής της περιεκτικότητας σε υγρασία. Η ενσωμάτωση εύκαμπτων αισθητήρων, κατάλληλων για παρακολούθηση γήρανσης κατά την κατασκευή, σε σύνθετα υλικά άνθρακα/εποξειδικό χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της πρόσληψης υγρασίας χωρίς πρόσθετο μέσο, δείχνοντας την αποτελεσματικότητά τους στην παρακολούθηση διάχυσης υγρασίας [28].

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει την διαδικασία του πειράματος, τα υλικά που παρασκευάστηκαν για την ανάγκη του, τα χαρακτηριστικά αυτών αλλά και τις διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν.

3.1 ΠΛΑΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ

Για την έρευνα ακολουθείται το παρακάτω πλάνο που απεικονίζεται στην Εικόνα 3.1.1.



Εικόνα 3.1.1 : *Πλάνο προόδου εργασιών για το πείραμα*

Πιο συγκεκριμένα, παρασκευάζονται τα δοκίμια από σύνθετο φυτικό υλικό λινάρι και λαμβάνονται οι αρχικές μετρήσεις στην αρχική τους στεγνή και υγιή κατάσταση. Οι πλάκες χωρίζονται σε 2 ομάδες. Η πρώτη ομάδα που περιλαμβάνει τις P1-2 και P2-2 χρησιμοποιείται για να εξεταστεί η επίδραση της απορρόφησης νερού στην κυματική διάδοση. Η δεύτερη ομάδα που αποτελείται από τις P1-1 και P2-1 και υποβλήθηκε σε κρούση και βύθιση στο νερό σκοπός ήταν

η διερεύνηση της ανίχνευσης βλάβης υπό την επίδραση της υγρασίας. Μετά την κρούση λήφθηκαν μετρήσεις. Για την απορρόφηση υγρασίας τα δοκίμια τοποθετούνται μέσα σε ένα δοχείο από απιονισμένο νερό σε θερμοκρασία δωματίου 23±3°C. Οι πλάκες αφαιρούνταν από το δοχείο περιοδικά σε διαστήματα περίπου 90 ωρών. Σε κάθε μεσοδιάστημα, η επιφάνεια στεγνώθηκε με απορροφητικό χαρτί και μετρήθηκαν εκ νέου η μάζα και οι διαστάσεις. Έπειτα, τα δείγματα τοποθετούνταν ξανά στο δοχείο. Ο χρόνος εμβάπτισης συνεχίστηκε για 540 ώρες για να διασφαλιστεί ότι ήταν αρκετός για να επιτευχθεί κορεσμός στην περιεκτικότητα σε υγρασία.

3.2 ΥΛΙΚΑ

Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν 4 ελάσματα από σύνθετο οργανικό υλικό. Ειδικότερα, κατασκευάστηκαν, με τη μέθοδο hand-layup, από στεγνές ίνες μη υφαντού λιναριού (non-woven flax fabric) εμποτισμένες με εποξειδική ρητίνη, που επιλέχθηκε λόγω της υδροφοβικής της φύσης, και σκληρύνθηκαν (curing) χρησιμοποιώντας compression molding σε ελεγχόμενο περιβάλλον θερμοκρασίας και πίεσης. Τέσσερις στρώσεις χρησιμοποιήθηκαν για κάθε πλάκα, δημιουργώντας ένα σύνθετο έλασμα επιφάνειας (200x150)mm^2 και πάχους 3mm. Τα πάνελ σκληρύνθηκαν εκ νέου στους 80°C για δύο ώρες, για να μειωθεί τόσο η θερμική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες των ινών όσο και η επίδραση του συντελεστή διαστολής του καλουπιού αλουμινίου στις επιφανειακές συνθήκες του σύνθετου υλικού. Τέλος, τα πλακίδια σφραγίστηκαν με δύο μερών εποξειδική κόλλα γύρω από τις άκρες, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι δεν θα απορροφήσει υγρασία από τις άκρες κατά τη βύθιση στο νερό. Με αυτόν τον τρόπο, οι επάνω και κάτω επιφάνειες καθώς και η περιοχή που έχει υποστεί ζημιά θα είναι υπεύθυνες για την υγρασία που θα απορροφηθεί, σε μια προσπάθεια προσομοίωσης μιας πραγματικής θαλάσσιας εφαρμογής των σύνθετων υλικών από λινάρι. Η μάζα των τεσσάρων τελικών πλακών, Plate 1-1, Plate 1-2, Plate 2-1 and Plate 2-2, μετρήθηκε και παρουσιάζεται στο Πίνακα 3.2.1.

Πλάκα No.:	**P1-1**	**P1-2**	**P2-1**	**P2-2**
Μάζα (gr)	107.76	108.7	112.35	101.78

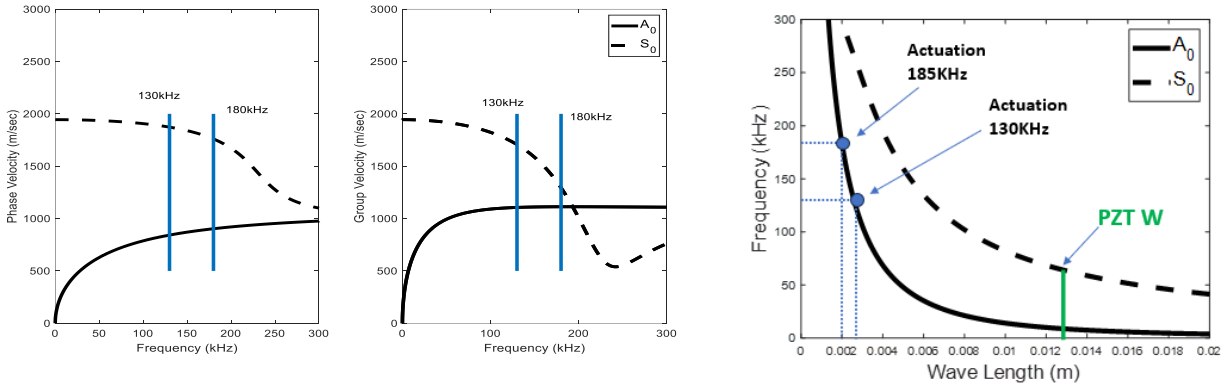
Πίνακας 3.2.1 : *Μετρούμενη μάζα των τελικών πλακών*

Οι ελαστικές ιδιότητες των ελασμάτων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

$E_1\ (GPa)$	$E_2\ (GPa)$	$E_3\ (GPa)$	v_{12}	$G_{12}\ (GPa)$	**Flexural modulus (GPa)**
6.26	6.26	6.26	0.308	3.87	19.43

Πίνακας 3.2.2 : *Ελαστικές ιδιότητες των σύνθετων πλκών.*

Βάσει αυτών προέκυψαν οι καμπύλες διασκορπισμού αφού πρώτα υπολογίστηκαν με χρήση ενός ημιαναλυτικού εργαλείου που περιλαμβάνει κινηματικές υψηλής τάξης [29] για τις θεμελιώδεις ιδιομορφές S_0 και A_0 , όπως φαίνονται στο Figure 3.2.1.

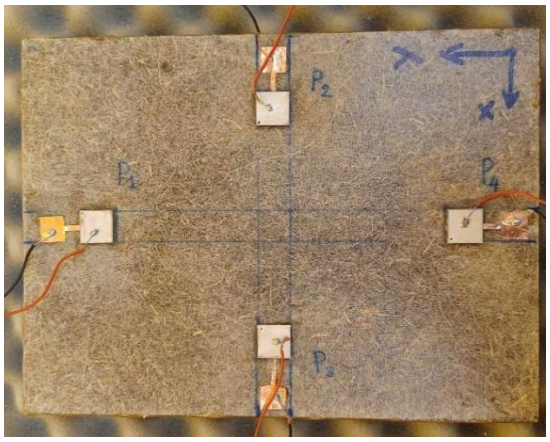


(a) (b)

Figure 3.2.1: *Χαρακτηριστικές καμπύλες διασκορπισμού της σύνθετης πλάκας πάχους 3mm:* a) *φασική ταχύτητα με συχνότητα / ομαδική ταχύτητα με συχνότητα,* b) *κυματικός αριθμός με συχνότητα*

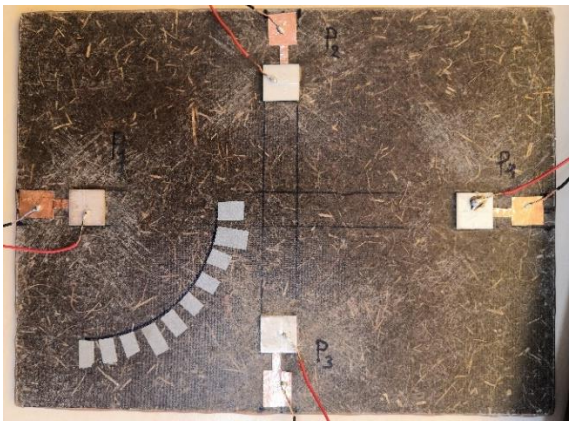
Με σκοπό την ανίχνευση ζημιάς μεγέθους έως 2mm επιλέγονται δύο διακριτές συχνότητες διέγερσης στα 130 και 185 kHz. Ειδικότερα, μια συχνότητα διέγερσης στα 130 kHz παρουσιάζει λιγότερα χαρακτηριστικά διασποράς, αλλά μπορεί να αποκαλύψει εκτάσεις ζημιάς μέχρι 2.5mm. Από την άλλη, στη συχνότητα των 185 kHz , μπορούμε να κάνουμε σάρωση για αστοχία υλικού να εκτείνεται στο πλαίσιο των 2mm, θεωρώντας ωστόσο μία πιο διασκορπιστική S_0 μαζί με μια αρκετά σταθερή λειτουργία A_0, αντίστοιχα.

Στις παραπάνω καμπύλες βασίζεται και η επιλογή των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Στο μέσο των πλευρών κάθε πλάκας έχουν κολληθεί πιεζοηλεκτρικά πιεζοκεραμικά στοιχεία τύπου PZT57 (της εταιρείας CTS [30]) τετραγωνικού σχήματος με πλευρά 12.7mm και πάχος 1mm με σκοπό τη διάδοση κυμάτων σε διάφορες κατευθύνσεις. Είναι πολωμένα στη διεύθυνση του πάχους και προσαρτημένα στην επιφάνεια και δύναται να λειτουργήσουν ως ενεργοποιητές ή αισθητήρες, όπως φαίνονται στην Εικόνα 3.2.1.



Εικόνα 3.2.1 : *Η ενισχυμένη πλάκα από ίνες σύνθετου υλικού λιναριού εξοπλισμένη με τα πιεζοηλεκτρικά.*

Επίσης, στην πλάκα P2-2 έχει κολληθεί και αυτοκόλλητη αντανακλαστική ταινία σε ακτίνα R=45mm για ένα τεταρτημόριο για μετρήσεις με το Laser.

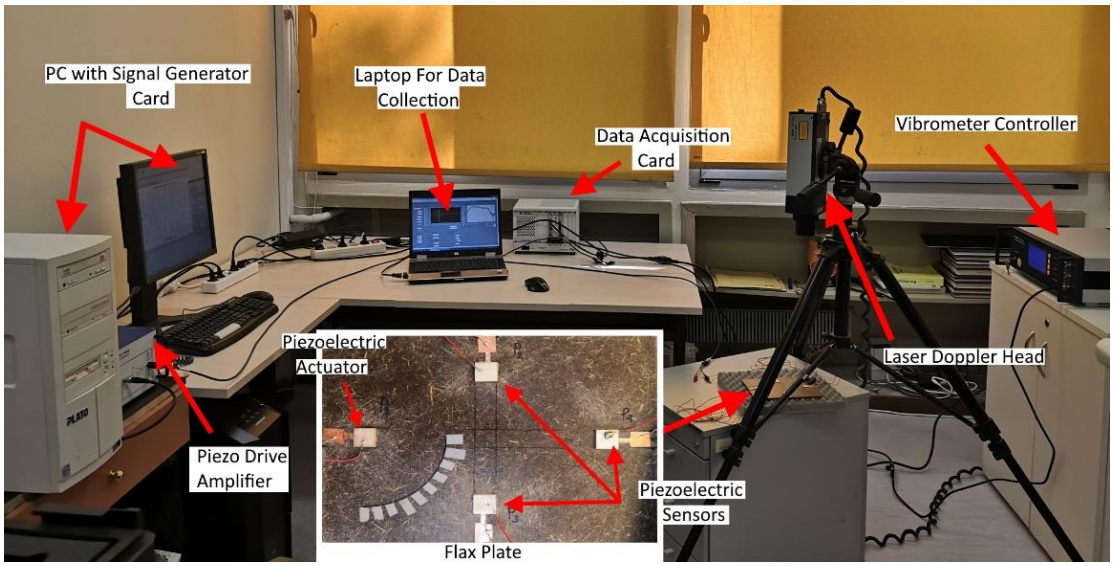


Εικόνα 3.2.2 : *Η πλάκα P2-2 με την αντανακλαστική αυτοκόλλητη ταινία και τα πιεζοηλεκτρικά.*

3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Κάθε πλάκα είναι αστήριχτη πάνω σε ένα αφρώδες υλικό. Πραγματοποιούνται μετρήσεις στις συχνότητες 130 και 185 kHz δύο διαφορετικές διαμορφώσεις της «pitch-catch» μεθόδου: (i) P1 ως ενεργοποιητής και τα υπόλοιπα πιεζοηλεκτρικά ως αισθητήρια (ii) P3 ως ενεργοποιητής και τα άλλα ως αισθητήρια.

Η Εικόνα 3.3.1 αντικατοπτρίζει την πειραματική εγκατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, το αρχικό σήμα δημιουργείται από μία μονάδα γέννησης σήματος (όπου το ψηφιακό γίνεται αναλογικό μέσω κάρτας) με μέγιστο πλάτος 1Volt και μετά ενισχύεται 50 φορές από έναν ενισχυτή που τελικά συνδέεται με τους ακροδέκτες του πιεζοηλεκτρικού ενεργοποιητή. Ο ενισχυτής ταυτόχρονα συνδέεται με την κάρτα λήψης δεδομένων υψηλής συχνότητας, όπου μετριέται ο χρόνος απόκρισης. Οι παραγόμενοι παλμοί διαδίδονται μέσα στην πλάκα και καταγράφονται είτε από το πιεζοηλεκτρικό αισθητήριο είτε από την αντανακλαστική επιφάνεια μέσω του Laser Doppler.
Στην περίπτωση χρήσης του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα το σήμα καταγράφεται από την κάρτα λήψης δεδομένων υψηλής συχνότητας {10MHz DAQ board} (όπου από αναλογικό γίνεται ψηφιακό) και στην συνέχεια αποθηκεύεται στον Η/Υ.



Εικόνα 3.3.1 : *Πειραματική Εγκατάσταση για την κυματική διάδοση*

Στην περίπτωση χρήσης του Laser Doppler Vibrometer μετριούνται οι εγκάρσιες μετατοπίσεις με πλάτος εισόδου 5V και ευαισθησία 500nm/V. Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο γίνεται η καταγραφή και η ψηφιοποίηση. Σε όλες τις πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιείται ως διέγερση ένας παλμός Gauss, ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f(t) = A\cos(2\pi f_c(t - t_0))\, e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} \qquad (3.3.1)$$

,όπου A το μέγιστο πλάτος του παλμού, f_c η συχνότητα του παλμού και σ η απόκλιση, η οποία προκύπτει βάσει του αριθμού των κύκλων N_c που εμπεριέχονται στον παλμό ως:

$$\sigma = \frac{1}{2\pi f_c \frac{1}{N_c}} \qquad (3.3.2)$$

Επιλέγονται 7 κύκλοι μέγιστου πλάτους 1V στις κεντρικές συχνότητες των 130 και 185 kHz. Ενδεικτικά η μορφή του παλμού στο παρακάτω σχήμα:

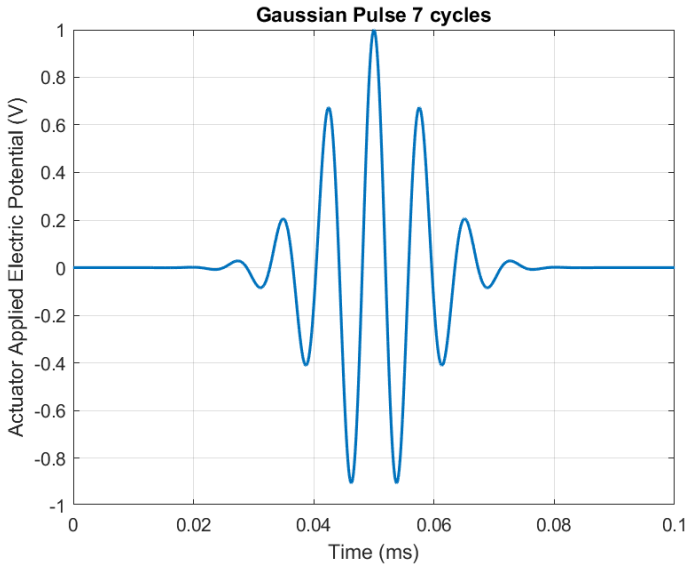
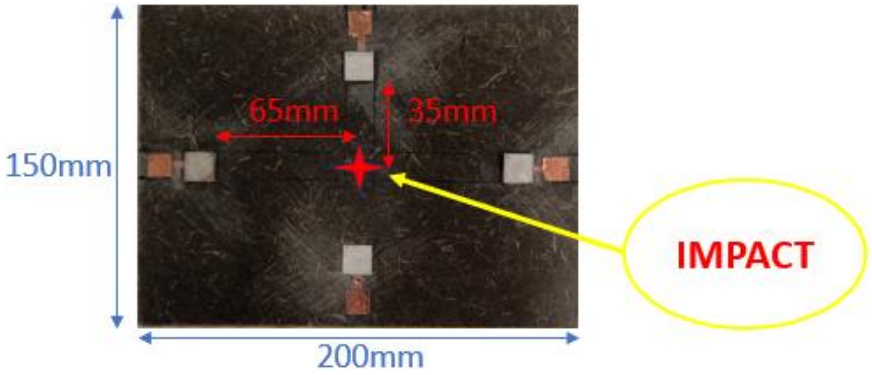


Figure 3.3.1: *Παλμός διέγερσης Gauss 7 κύκλων στα 130 kHz*

3.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΡΟΥΣΗΣ

Ένα έλασμα από κάθε σειρά, δηλαδή οι πλάκες Plate 1-1 και Plate 2-1, υποβλήθηκαν σε κρούση χαμηλής ενέργειας στο γεωμετρικό τους κέντρο όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 3.4.1.



Εικόνα 3.4.1: *Σχηματική απεικόνιση της θέσης της κρούσης στο δοκίμιο με διαστάσεις.*

Η κρούση πραγματοποιήθηκε σε μηχανή κρούσης τύπου πτώσης βάρους και συγκεκριμένα στην Instron CEAST 9350, , σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D7136. . Χρησιμοποιήθηκε όργανο μειωμένου βάρους χαμηλής ταχύτητας με σχήμα του κρουστικού εκκρεμούς ημισφαιρικό, διαμέτρου 19mm και μάζας 4.79kg.



Εικόνα 3.4.2: *Πειραματική διάταξη μηχανής κρούσης Instron CEAST 9350.*

Η ενέργεια κρούσης που εφαρμόστηκε βασίστηκε στις ιδιότητες του υλικού και προέκυψε στα 2.5J. Επιλέχθηκε πολύ μικρής ενέργειας κρούση καθώς δεν επιθυμούσαμε να κάνουμε ορατή τη ζημιά στις επιφάνειες της πλάκας. Το ύψος της απελευθέρωσης του κρουστικού εκκρεμούς καθώς και η ταχύτητα του ρυθμίστηκαν αυτόματα σύμφωνα με τη δοθείσα ενέργεια κρούσης και την τοποθετημένη μάζα στη μηχανή. Ακολουθούν τα διαγράμματα φορτίου-χρόνου και ενέργειας-χρόνου αντίστοιχα. Το φορτίο για την συγκεκριμένη ενέργεια έφτασε κοντά στην τιμή των 275N.

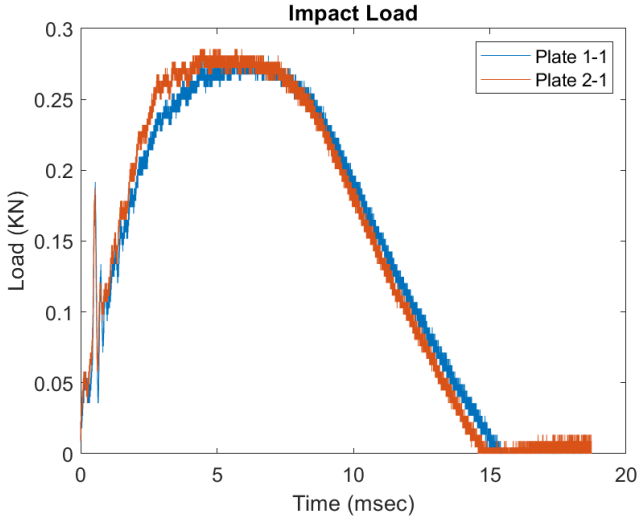


Figure 3.4.1: *Χρονική απόκριση του κρουστικού φορτίου μεταξύ των δύο πλακιδίων P1-1 και P2-1.*

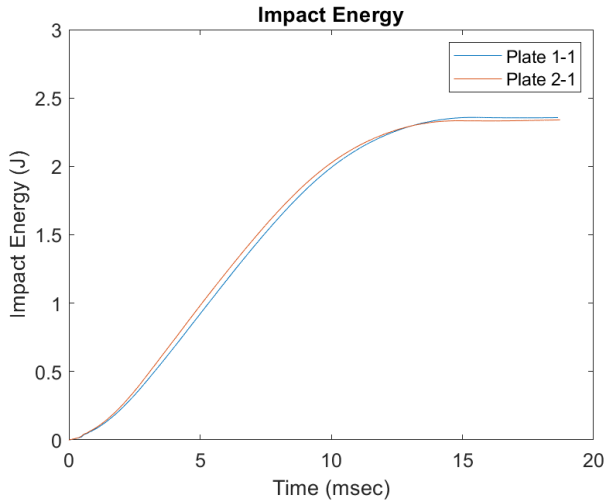


Figure 3.4.2 *Χρονική απόκριση της ενέργειας κρούσης μεταξύ των δύο πλακιδίων P1-1 και P2-1.*

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την απορρόφηση υγρασίας τόσο στα χαρακτηριστικά των πλακιδίων όσο και στη κυματική διάδοση.

4.1 ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Ο ρυθμός πρόσληψης νερού υπολογίστηκε σύμφωνα με την σχέση:

$$M_{(\%)} = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100 \qquad (4.1.1)$$

, όπου $M_{(\%)}$ είναι η πρόσληψη υγρασίας σε ποσοστό, M_t η μάζα του εμποτισμένου με νερό δοκιμίου τη δεδομένη χρονική στιγμή, M_0 είναι η αρχική μάζα του δοκιμίου σε ξηρή κατάσταση. Έτσι, με βάση την πειραματική διαδικασία και την προηγούμενη σχέση προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα που απεικονίζει την αύξηση της μάζας για κάθε μία από τις τέσσερις πλάκες με την πάροδο του χρόνου που παρέμειναν στο νερό.

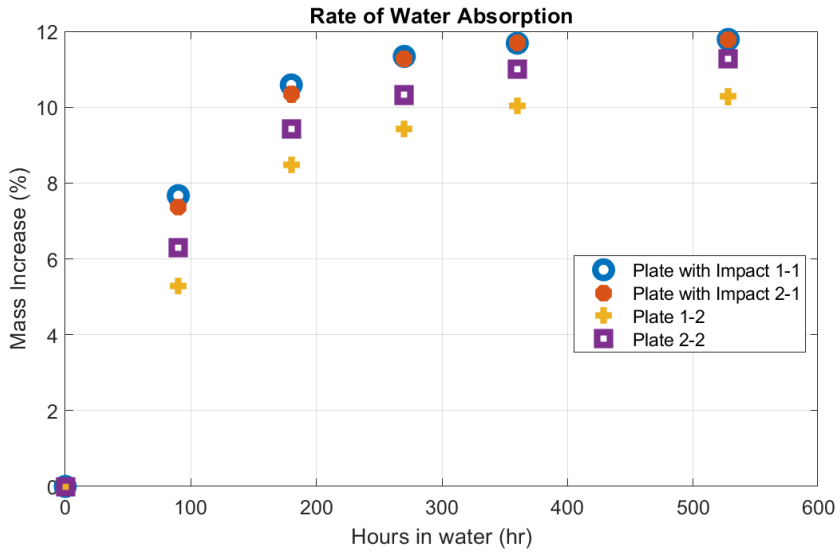


Figure 4.1.1: *Αύξηση μάζας (%) ως συνάρτηση του χρόνου εμβάπτισης.*

Είναι προφανές ότι μετά από περίπου 400 ώρες εμβάπτισης, η καμπύλη για κάθε πλάκα έχει σχεδόν ανέβει, υποδεικνύοντας ότι η διαδικασία απορρόφησης νερού μπορεί να θεωρηθεί ολοκληρωμένη. Στις 528 ώρες φαίνεται πως έχει σχεδόν ολοκληρωθεί ο κορεσμός, καθώς παρατηρείται πλατό.

Η μορφή των καμπυλών είναι παρόμοια με άλλες στην έρευνα και ακολουθεί τον 1ο νόμο του Fick και τις παραλλαγές σύμφωνα με την βιβλιογραφία.

Είναι αξιοσημείωτη παρατήρηση ότι ο ρυθμός αύξησης της μάζας είναι υψηλότερος στις πλάκες Plate1-1, Plate2-1 που έχουν υποστεί ζημιά από κρούση, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Αναμενόμενο λόγω του ότι δημιουργήθηκαν πόροι από την κρούση.

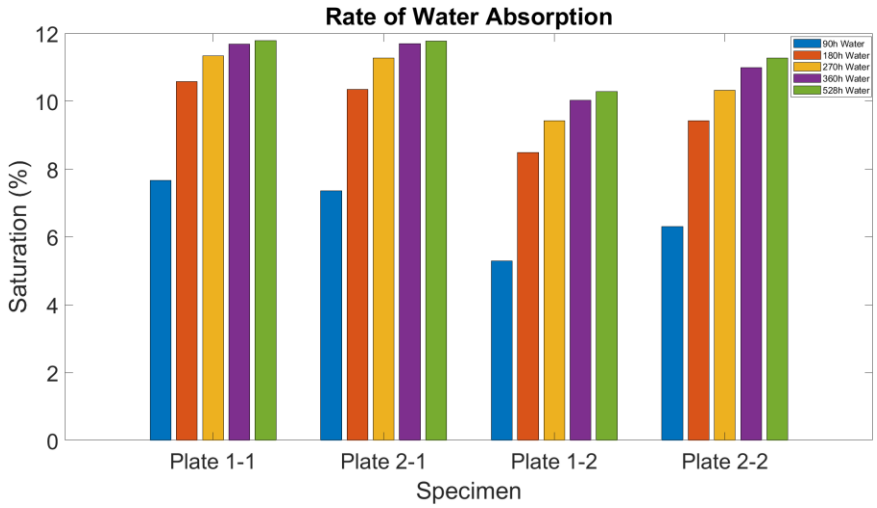


Figure 4.1.2: *Αύξηση μάζας (%) των δοκιμίων σε μορφή ραβδογράμματος.*

ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Μετά από 180 ώρες εμβάπτισης στο νερό παρατηρήθηκε αύξηση 0.3mm στο πάχος σε όλες τα δοκίμια. Είναι αναμενόμενη αυτή η μεταβολή και βάσει του νόμου της διαχυτικότητας υπάρχει σύνδεση ανάμεσα στη μάζα και στο πάχος. Επίσης, οι πλάκες ήταν ελαφρώς καμπυλωμένες στο τέλος του κορεσμού.

4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΟΣΗ

Το αρχικό στάδιο της πειραματικής ανάλυσης στοχεύει στη διερεύνηση της επίδρασης της υγρασίας στη μέθοδο «pitch-catch» της κυματικής διάδοσης με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία κολλημένα στην επιφάνεια της πλάκας.

Επομένως, σε αυτή τη φάση εξετάζονται τα δοκίμια χωρίς ζημιά P1-2 και P2-2. Γίνονται μετρήσεις με ζεύγη πιεζοηλεκτρικών (i) P1 ως ενεργοποιητής και τα υπόλοιπα ως αισθητήρια, (ii) P3 ως ενεργοποιητής και τα άλλα ως αισθητήρια στις συχνότητες των 130kHz και 185kHz και για τα πέντε στάδια του κορεσμού.

Ενδεικτικό γράφημα της χρονικής απόκρισης της ηλεκτρικής τάσης για τα 130kHz είναι αυτό που φαίνεται στο Figure 4.2.1. Σε αυτό είναι ορατή η σταδιακή μείωση του πλάτους του σήματος, η χρονική καθυστέρηση της άφιξης του, καθώς και η αλλαγή της κυματομορφής. Στα 185kHz, όπως φαίνεται στο Figure 4.2.2, δρα πιο καταλυτικά η απορρόφηση υγρασίας με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό η κυματομορφή σε σύγκριση πάντα με την αρχική.

Αντίστοιχα τα υπόλοιπα γραφήματα για τα εξεταζόμενα ζεύγη πιεζοηλεκτρικών βρίσκονται στο Παράρτημα Α. Κάθε φορά συγκρίνεται το Αρχικό σήμα ‘Initial’, απεικονιζόμενο με κόκκινο χρώμα, με το σήμα μετά από **(a)** 90 ώρες εμβάπτισης ‘Water-1’, **(b)** 180 ώρες εμβάπτισης ‘Water-2’, **(c)** 270 ώρες εμβάπτισης ‘Water-3’, **(d)** 360 ώρες εμβάπτισης ‘Water-4’, **(e)** 528 ώρες εμβάπτισης ‘Water-5’.

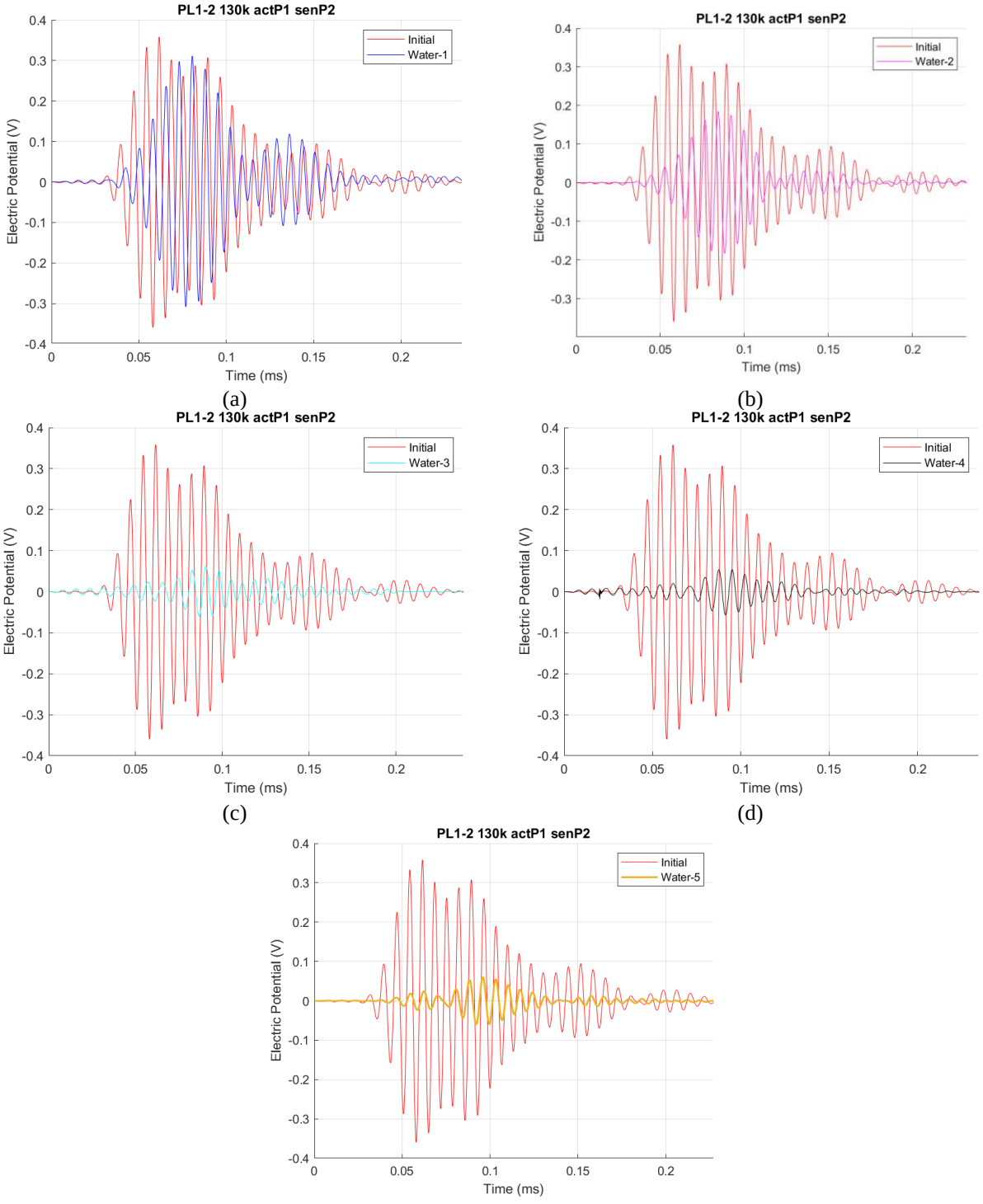


Figure 4.2.2: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.*

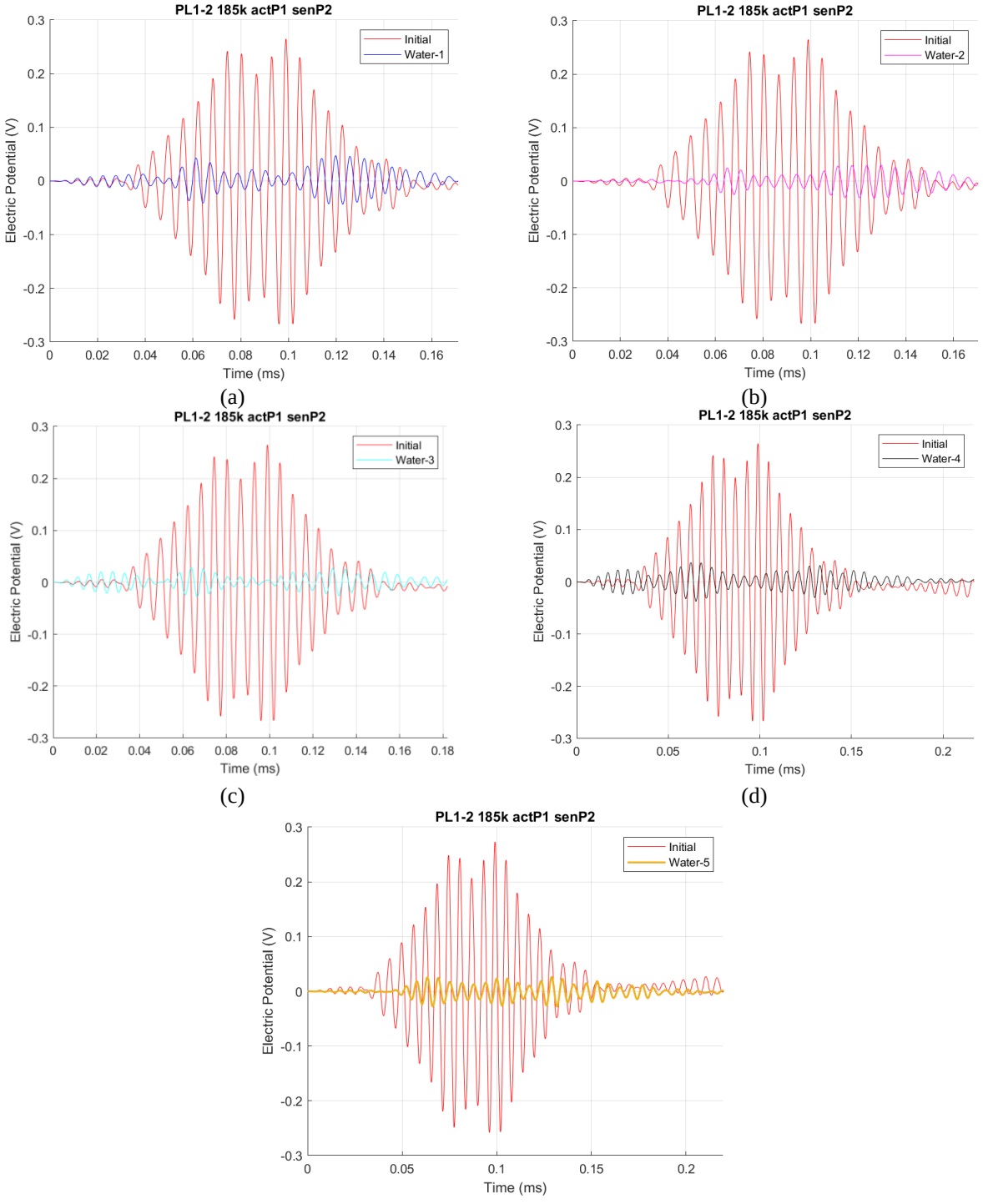


Figure 4.2.3: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.*

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Είναι ξεκάθαρο από όλες τις μετρήσεις ότι το σήμα του αισθητήρα υφίσταται σημαντική παραμόρφωση λόγω της απορροφούμενης υγρασίας. Τόσο το πλάτος της κυματομορφής όσο και ο χρόνος που ταξιδεύει το σήμα στην κατασκευή «ToF» επηρεάζονται, και συγκεκριμένα με δραστικές μειώσεις στο πλάτος και αυξήσεις στο ToF που παρατηρούνται. Αυτή η τάση εντείνεται με μεγαλύτερες περιόδους εμβάπτισης.

Δεν κατέστη δυνατός ο υπολογισμός όλων των ToF καθώς σε κάποια σήματα εμφανιζόταν ένα είδος κυματομορφής στην αρχή και αυτό χρήζει περεταίρω έρευνας. Αναλυτικά για τις μεταβολές στο ToF θα μιλήσουμε στην επόμενη υποενότητα 4.3.
Ενδεικτικά παρουσιάζεται η μεταβολή του ToF για την πλάκα P1-2 για το ζεύγος P1-P4 στα 130kHz.

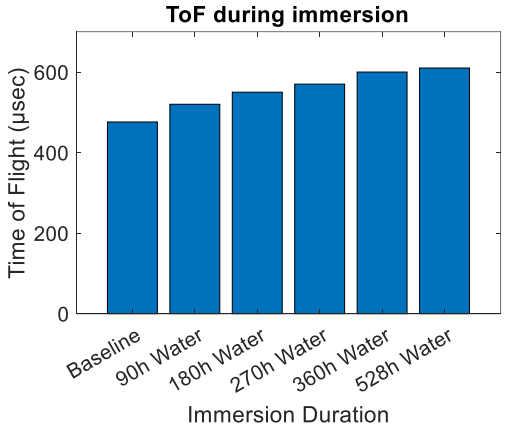


Figure 4.2.4: *Μεταβολή του ToF ανά περίοδο 90 ωρών εμβάπτισης στο νερό.*

Επειδή το πλάτος έχει διακυμάνσεις στο πόσο μειώθηκε και δεν είναι δυνατό να ποσοτικοποιήσουμε αυτή τη μεταβολή εισάγουμε μια νέα παράμετρο το εμβαδόν “Area” του ληφθέντος σήματος. Πρόκειται στην ουσία για ένα περίβλημα γύρω από το σήμα ένα άνω κι ένα κάτω όριο που με την κατάλληλη διακριτοποίηση κάθε φορά μας δίνει το εμβαδόν της περιβάλλουσας περιοχής.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται ένα επεξηγηματικό σχήμα της εν λόγω περιοχής που υπολογίζεται το εμβαδό.

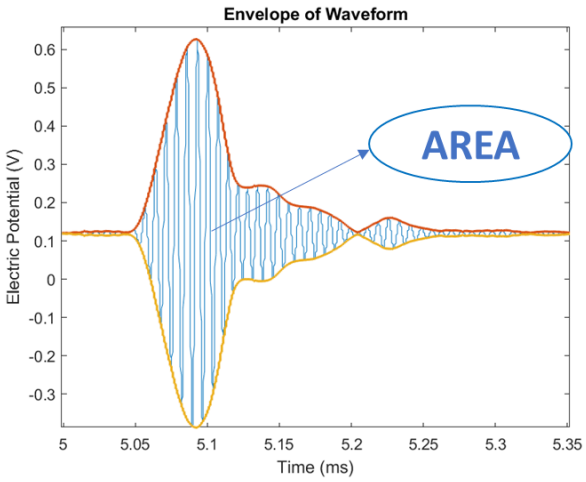
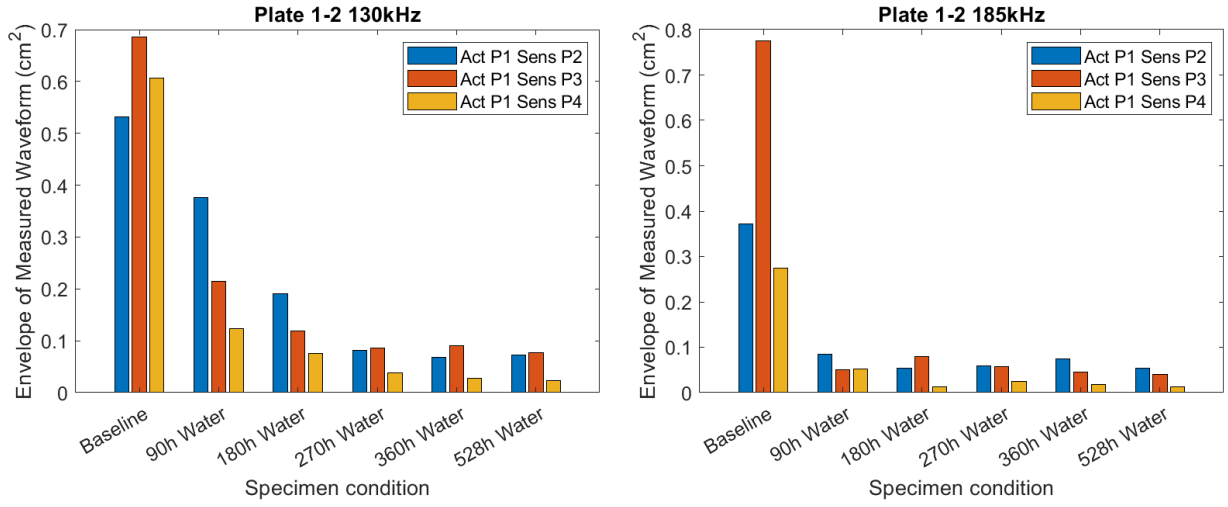


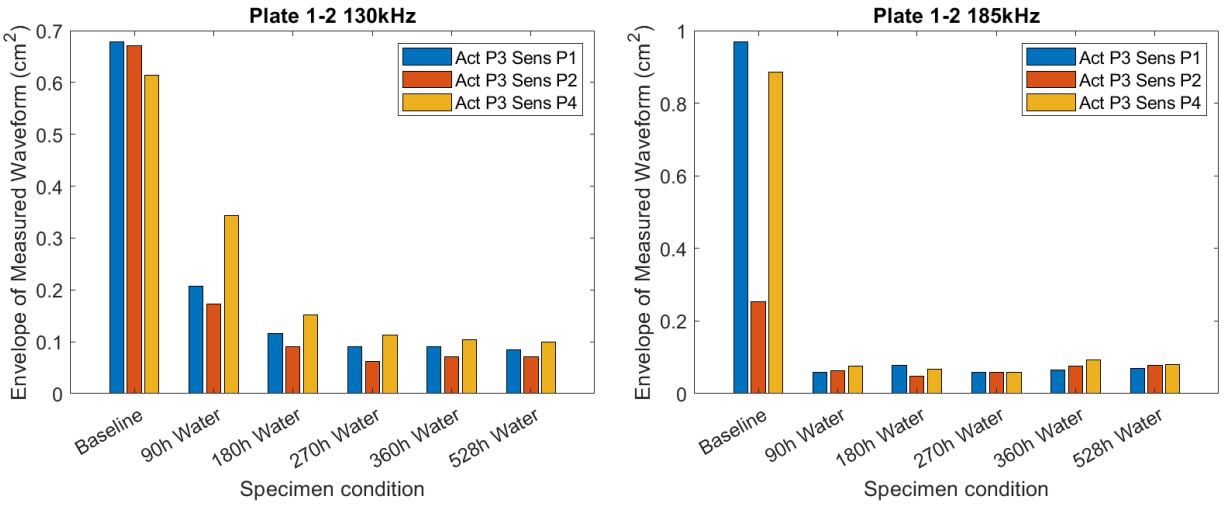
Figure 4.2.5: *Περιβάλλουσα περιοχή κυματομορφής.*

Έτσι προκύπτουν οι μεταβολές των εμβαδών:



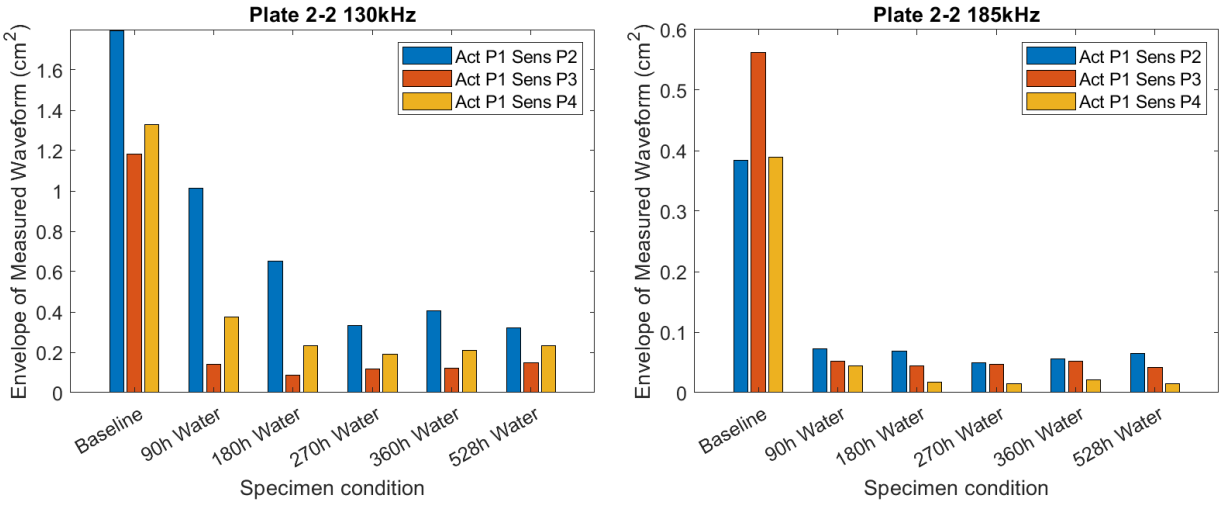
(a) (b)

Figure 4.2.6: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P1-2 και ενεργοποιητή το P1 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.*



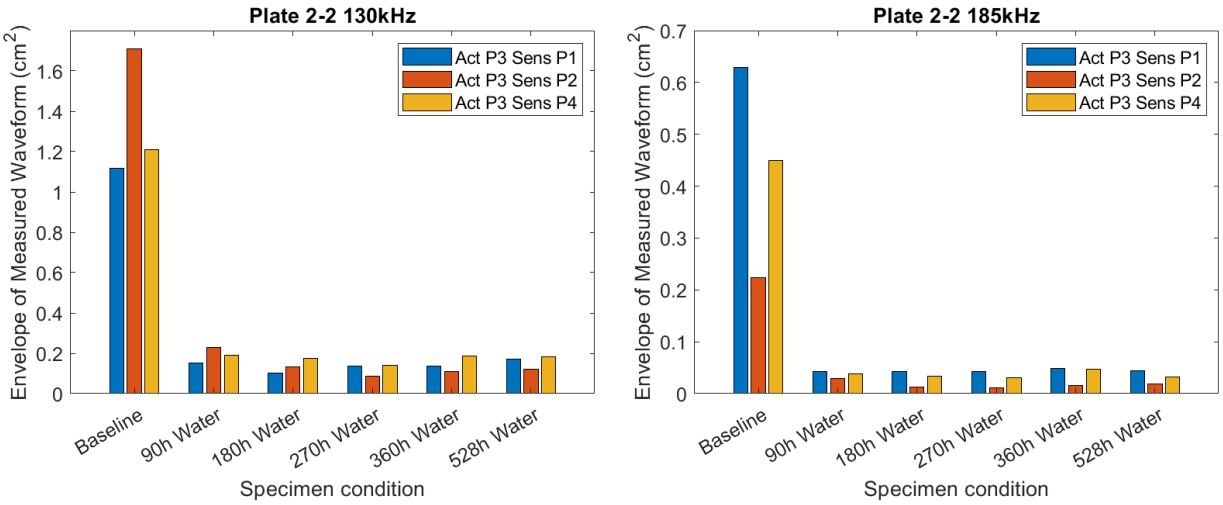
(a) (b)

Figure 4.2.7: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P1-2 και ενεργοποιητή το P3 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.*



(a) (b)

Figure 4.2.8: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P2-2 και ενεργοποιητή το P1 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.*



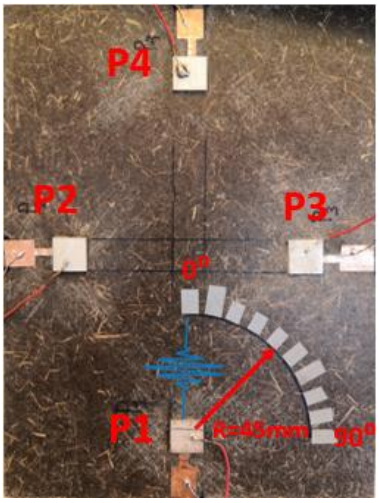
(a) (b)

Figure 4.2.9: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P2-2 και ενεργοποιητή το P3 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.*

Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και από τα γραφήματα των εμβαδών της περιβάλλουσας περιοχής των κυματομορφών και για τα δύο εξεταζόμενα δοκίμια. Καταγράφεται ξεκάθαρη μείωση του εμβαδού σε όλα τα σήματα. Οι μεταβολές μετά τις 90 ώρες εμβάπτισης στο νερό είναι μικρές.

4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτή την ενότητα της πειραματικής ανάλυσης γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της υγρασίας στα χαρακτηριστικά διασκορπισμού του σήματος της κυματικής διάδοσης.
Γίνονται μετρήσεις κατεύθυνσης για ένα τεταρτημόριο με βήμα 10^0 χρησιμοποιώντας το Laser Doppler Vibrometer ως αισθητήριο και ενεργοποιητή το πιεζοηλεκτρικό P1 στην πλάκα P2-2, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.1, με ρύθμιση συχνοτήτων ενεργοποιητή στα 130kHz και 185kHz και για τα πέντε στάδια του κορεσμού.



Εικόνα 4.3.1: *Πλάκα P2-2 για μετρήσεις με Laser Doppler και διεγέρτη το P1.*

Χαρακτηριστικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα της χρονικής απόκρισης της ηλεκτρικής τάσης για 0^0 μέσω των Figure 4.3.1 και Figure 4.3.2 για τα 130 και 185 kHz αντίστοιχα. Στα 130kHz είναι έντονη η διαφορά στο μοτίβο της κυματομορφής, ενώ οι μεταβολές πλάτους και ToF είναι πιο αισθητές στα 185kHz.

Επισημαίνεται ότι το Αρχικό σήμα ‘Initial’ απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα και συγκρίνεται με το σήμα μετά από **(a)** 90 ώρες εμβάπτισης ‘Water-1’, **(b)** 180 ώρες εμβάπτισης ‘Water-2’, **(c)** 270 ώρες εμβάπτισης ‘Water-3’, **(d)** 360 ώρες εμβάπτισης ‘Water-4’, **(e)** 528 ώρες εμβάπτισης ‘Water-5’. Τα γραφήματα για τις υπόλοιπες μοίρες παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

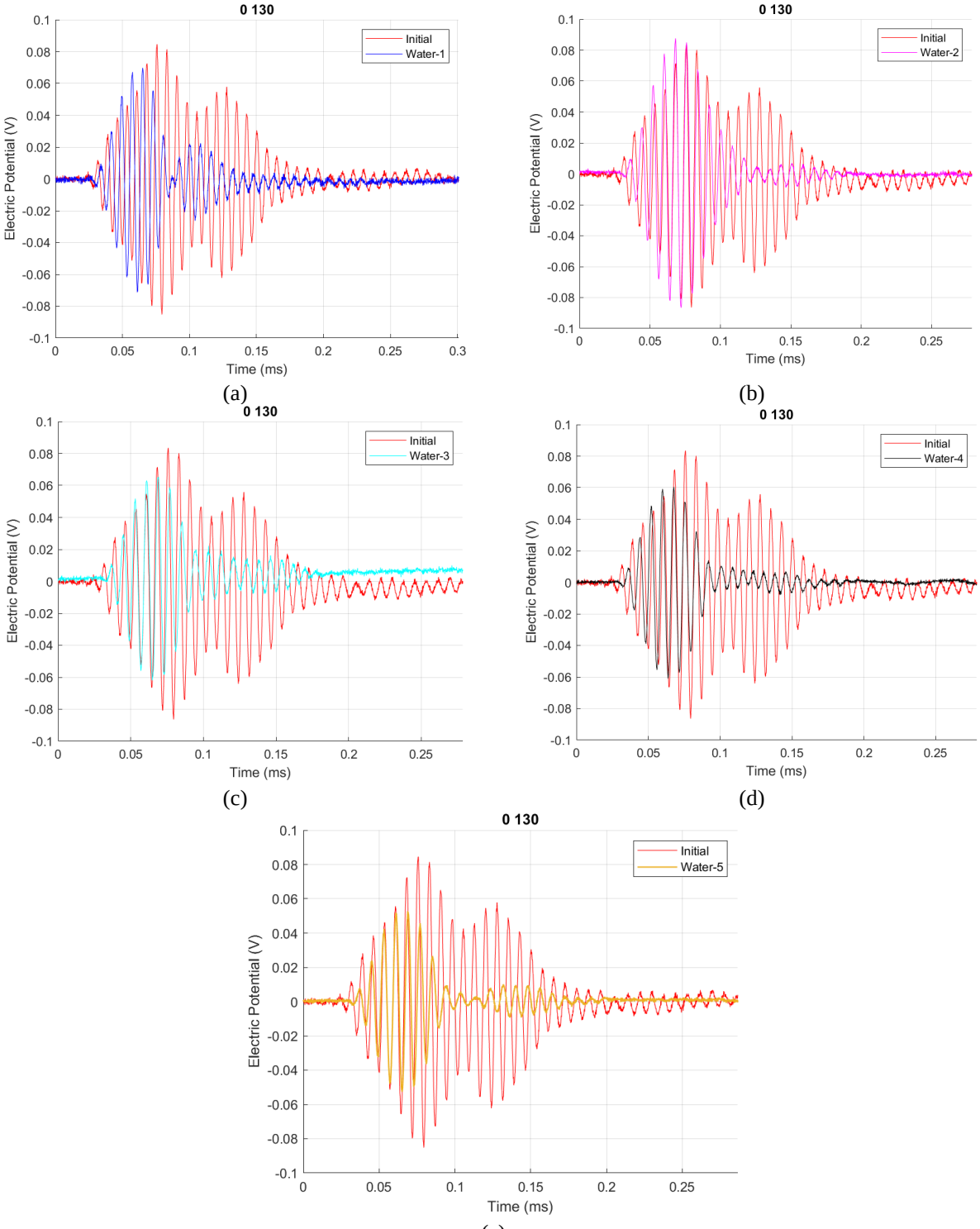


Figure 4.3.1: Μετρήσεις κατεύθυνσης 0^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.*

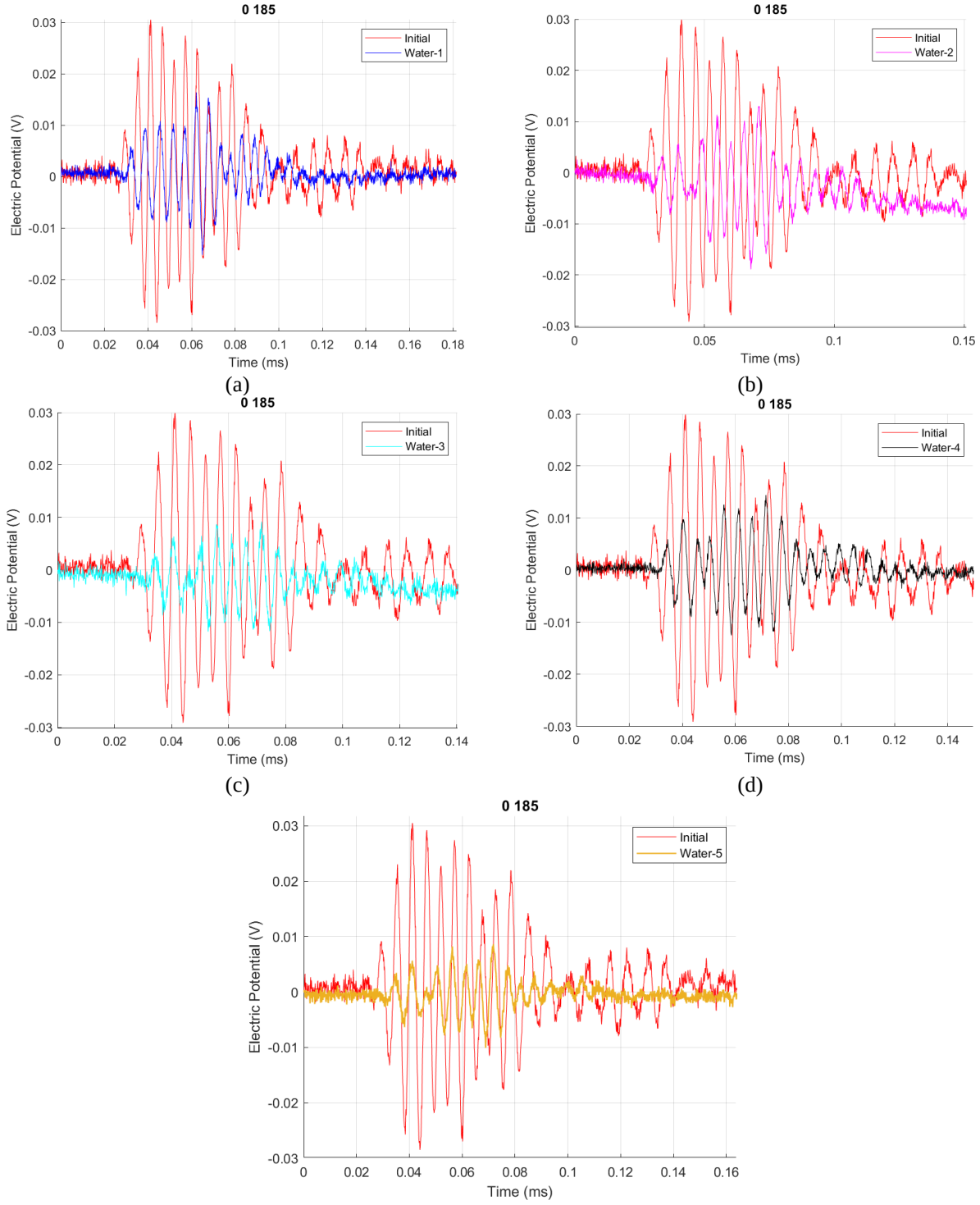


Figure 4.3.2: Μετρήσεις κατεύθυνσης 0^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.*

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

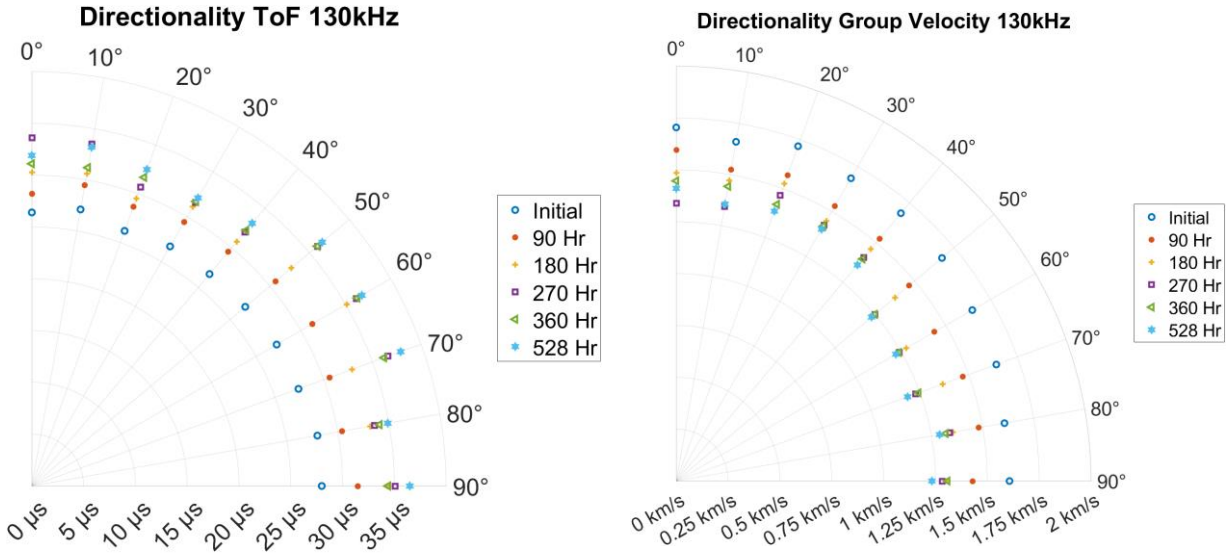
Ομοίως κι εδώ το σήμα από το Laser Doppler υφίσταται σημαντική μεταβολή στην ιδιομορφή του λόγω της απορροφούμενης υγρασίας. Στη συχνότητα των 185kHz είναι πιο διασκορπιστικό. Τόσο το πλάτος της κυματομορφής όσο και ο χρόνος που ταξιδεύει το σήμα στην κατασκευή «ToF» επηρεάζονται. Ειδικότερα, το πλάτος μειώνεται πιο έντονα στις 60^0 και 70^0 , όπως φαίνεται στα Appendix B Figure 11-14, γεγονός που μάλλον έχει να κάνει με μεγαλύτερη συγκέντρωση ινών σε αυτή τη διεύθυνση. Γενικά παρατηρούνται μεταβολές στο πλάτος, που στα 185kHz είναι πιο εμφανείς, αλλά στα υπόλοιπα είναι μικρές μετά την $1^η$ μέτρηση από τη βύθιση στο νερό και για αυτό η έρευνα επικεντρώνεται στο ToF.

Παρατηρούνται ξεκάθαρα αυξήσεις στο ToF, οι οποίες εντείνονται με την πάροδο του χρόνου εμβάπτισης. Έτσι, το σήμα επεξεργάστηκε κατάλληλα μέσω κώδικα στο Matlab για να φύγει ο θόρυβος που εμφανίζει στην αρχή και να γίνει πιο εύκολος ο υπολογισμός του ToF που στηρίζεται στη Μέση Τυπική Απόκλιση. Στα επόμενα γραφήματα παρουσιάζεται η μεταβολή του ToF ακτινικά για τις περιόδους εμβάπτισης στο νερό. Γνωρίζοντας την απόσταση από το πιεζοηλεκτρικό διεγέρτη μέχρι την ανακλαστική επιφάνεια που παίρνονται οι μετρήσεις υπολογίζεται η ομαδική ταχύτητα του κύματος γνωστή ως “Group Velocity”:

$$Group\ Velocity = \frac{R}{ToF} \qquad (4.3.1)$$

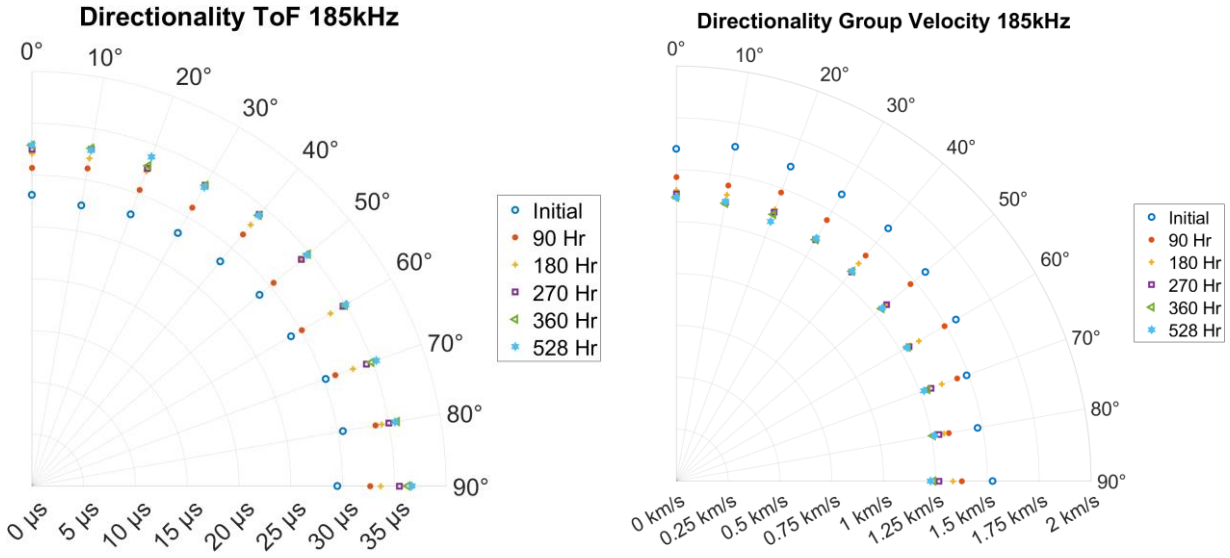
, με R=45mm όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.1.

Επομένως, προκύπτουν αναλόγως τα διαγράμματα για τα 130kHz και τα 185kHz αντίστοιχα:



(a) (b)

Figure 4.3.3: *Μεταβολή* (a) *ToF και* (b) *Group Velocity κατά τη διάρκεια της εμβάπτισης στα 130kHz.*



(a) (b)

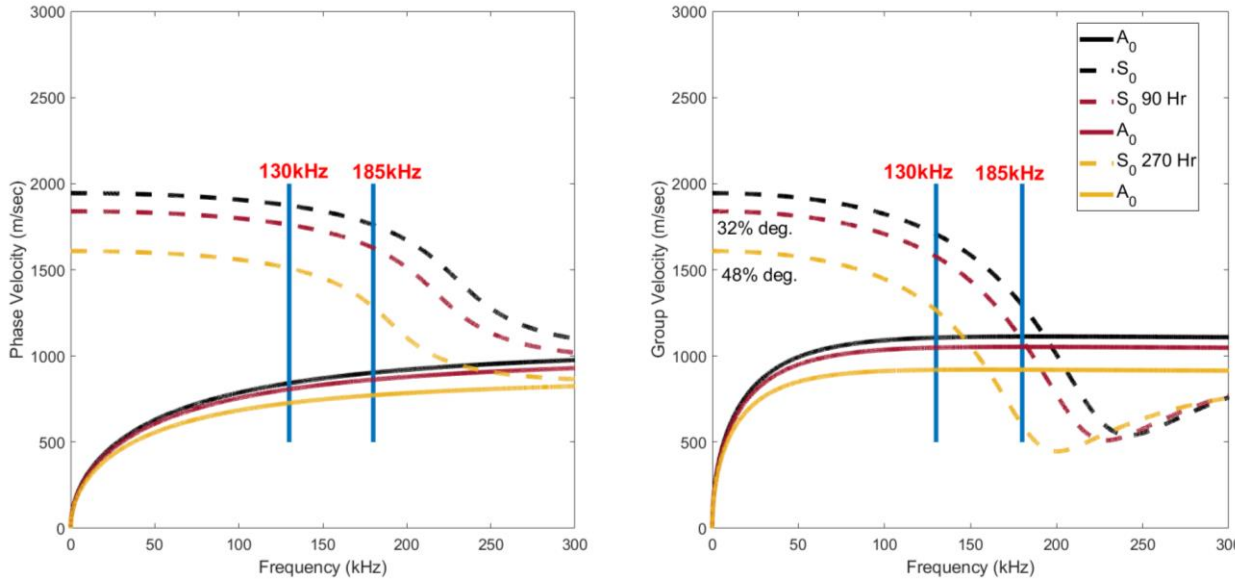
Figure 4.3.4: *Μεταβολή* (a) *ToF και* (b) *Group Velocity κατά τη διάρκεια της εμβάπτισης στα 185kHz.*

ΣΧΟΛΙΑ

Η αύξηση του ToF στα 185kHz είναι πιο συντηρητική από ότι στα 130kHz. Στη συχνότητα των 130kHz και για τις περιοχές από 50^0 έως 70^0 παρατηρείται πιο μεγάλη αύξηση όπως ακριβώς και με το πλάτος που εμφάνιζε τεράστια μείωση, άρα σίγουρα περισσότερη υγρασία σε αυτό το σημείο και συνεπώς μεγαλύτερη ποσότητα ινών λιναριού. Ακόμα, όσο πλησιάζεται ο κορεσμός οι μεταβολές είναι αρκετά μικρές.

Αντίθετα από το ToF κινείται το Group Velocity για το οποίο επιβεβαιώνεται η αρχική καμπύλη του συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης, αφού στα 130kHz η ταχύτητα κυμαίνεται γύρω στα 1730 m/sec, ενώ στα 185kHz στα 1500 m/sec.

Έχοντας υπολογίσει όλες τις ομαδικές ταχύτητες γίνεται μια ασφαλής εκτίμηση της επίδρασης της υγρασίας στα χαρακτηριστικά διασκορπισμού και συγκεκριμένα στις θεμελιώδεις ιδιομορφές S_0 και A_0 για τις 90 και 270 ώρες εμβάπτισης. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα προκύπτει 32% και 48% μείωση των ταχυτήτων για 90 και 270 ώρες αντίστοιχα το οποίο συνεπάγεται με υποβάθμιση των ιδιοτήτων της κατασκευής.



(a) (b)

Figure 4.3.5: *Μεταβολή* (a) *ToF και* (b) *Group Velocity κατά τη διάρκεια της εμβάπτισης.*

4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΒΛΑΒΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ

Το τελικό στάδιο της πειραματικής ανάλυσης στοχεύει στη διερεύνηση της επίδρασης της υγρασίας στην ευαισθησία ανίχνευσης βλάβης κρούσης μέσω της μεθόδου «pitch-catch» με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία κολλημένα στην επιφάνεια της πλάκας.

Τα δοκίμια P1-1 και P2-1 έχουν υποστεί κρούση χαμηλής ενέργειας, έχουν παρθεί μετρήσεις και βυθίζονται στο νερό. Γίνονται μετρήσεις με ζεύγη πιεζοηλεκτρικών (i) P1 ως ενεργοποιητής και τα υπόλοιπα ως αισθητήρια, (ii) P3 ως ενεργοποιητής και τα άλλα ως αισθητήρια στις συχνότητες των 130kHz και 185kHz και για τα πέντε στάδια του κορεσμού.

Παρακάτω επιλέγονται τα Figure 4.4.1 και Figure 4.4.2 για 130 και 185 kHz αντίστοιχα ως τα πιο αντιπροσωπευτικά που συνδυάζουν ισχυρή παρουσία βλάβης, αφού πρόκειται για το ζεύγος P1-P4 που διέρχεται από την περιοχή κρούσης, σε συνδυασμό με απορρόφηση υγρασίας. Τα υπόλοιπα διαγράμματα βρίσκονται στο Παράρτημα Γ.

Το σήμα μετά την Κρούση ‘Impact’ απεικονίζεται με πράσινο χρώμα και συγκρίνεται με το σήμα μετά από **(a)** 90 ώρες εμβάπτισης ‘Water-1’, **(b)** 180 ώρες εμβάπτισης ‘Water-2’, **(c)** 270 ώρες εμβάπτισης ‘Water-3’, **(d)** 360 ώρες εμβάπτισης ‘Water-4’, **(e)** 528 ώρες εμβάπτισης ‘Water-5’.

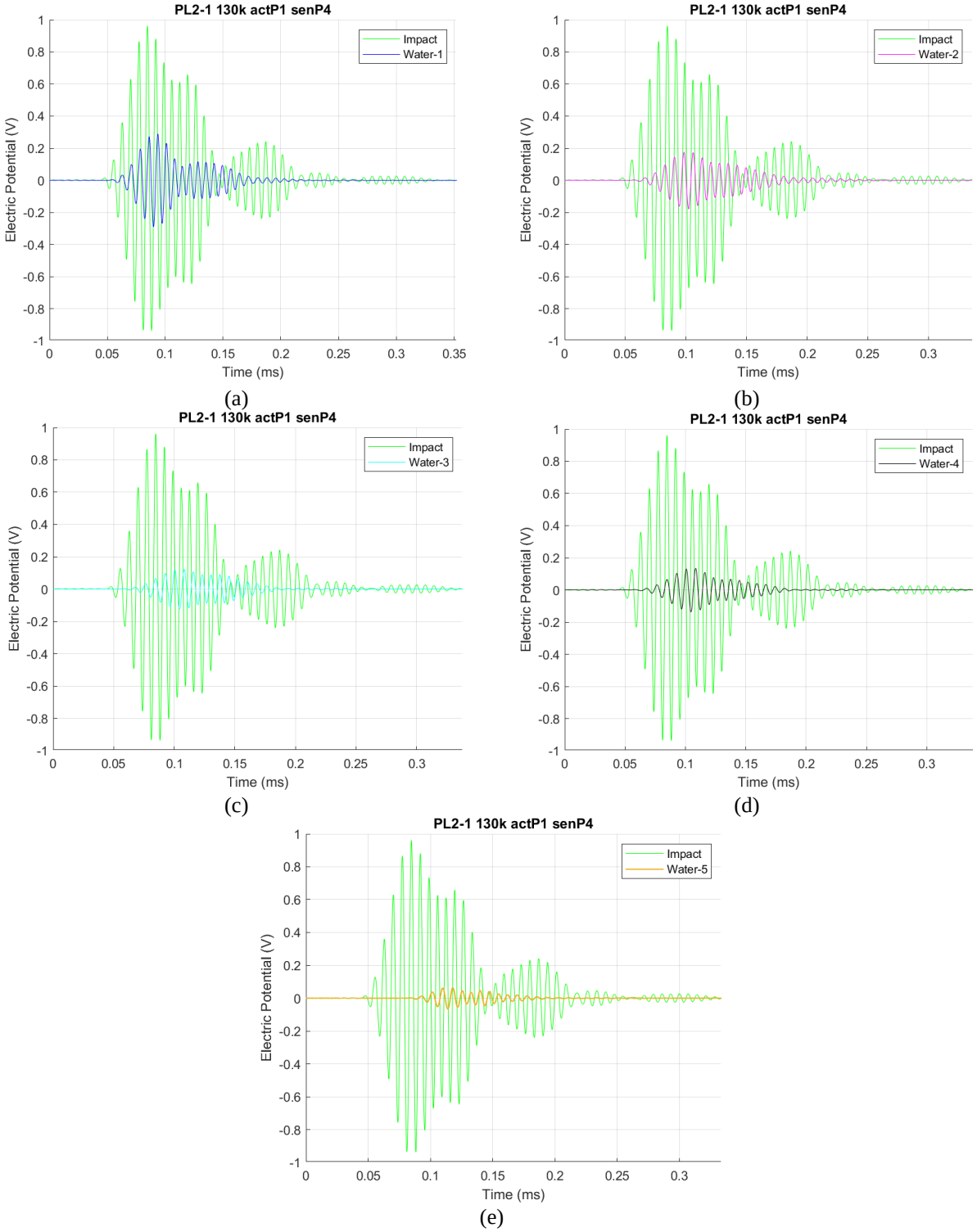


Figure 4.4.1: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.*

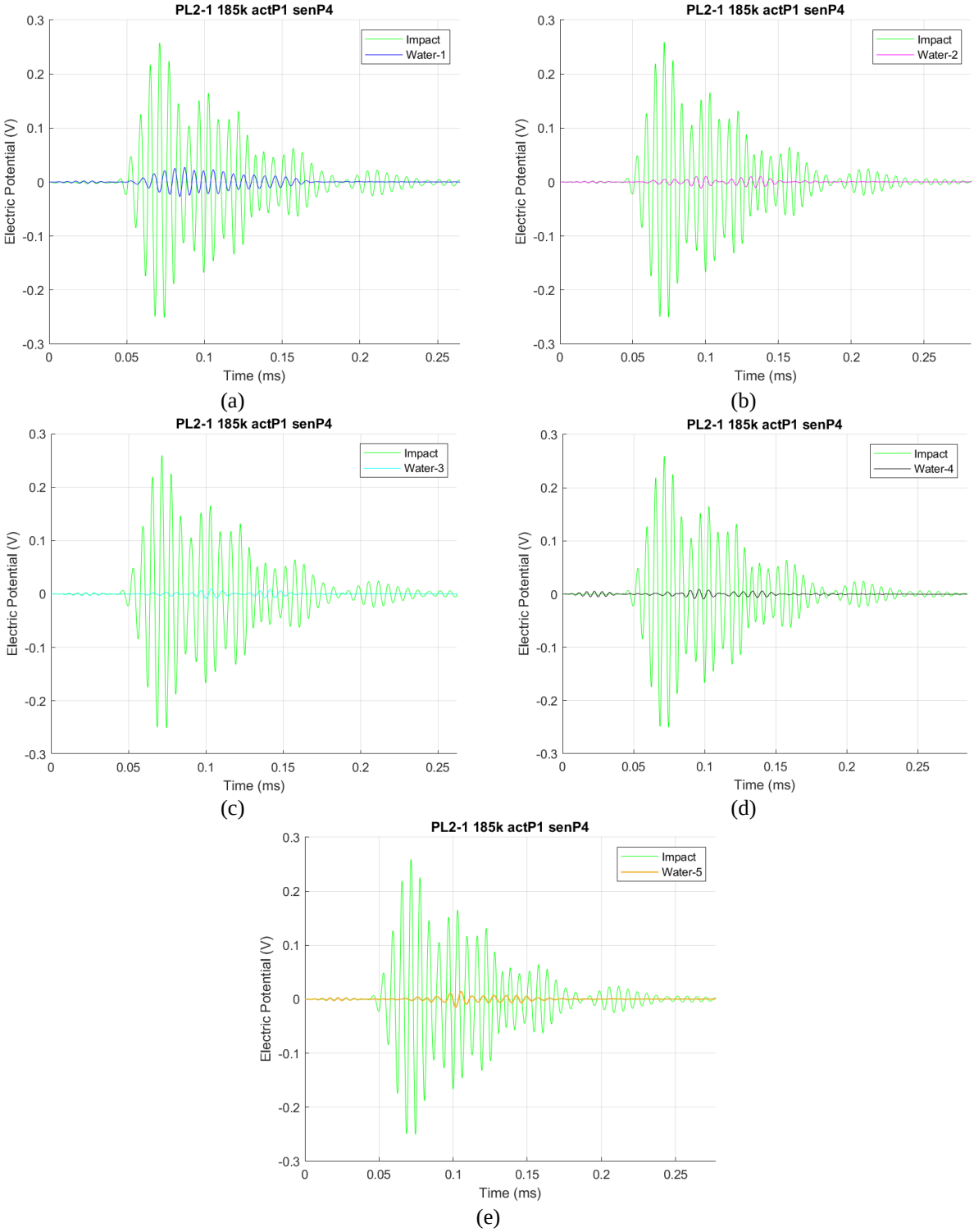


Figure 4.4.2: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.*

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Όμοια συμπεριφορά με τις υγιείς πλάκες παρατηρείται στις πλάκες με βλάβη κρούσης, αφού η υγρασία δρα καταλυτικά και σε αυτές. Ουσιαστικές αλλαγές χαρακτηρίζουν το μοτίβο της χρονικής απόκρισης της τάσης του αισθητηρίου λόγω της πρόσληψης νερού.

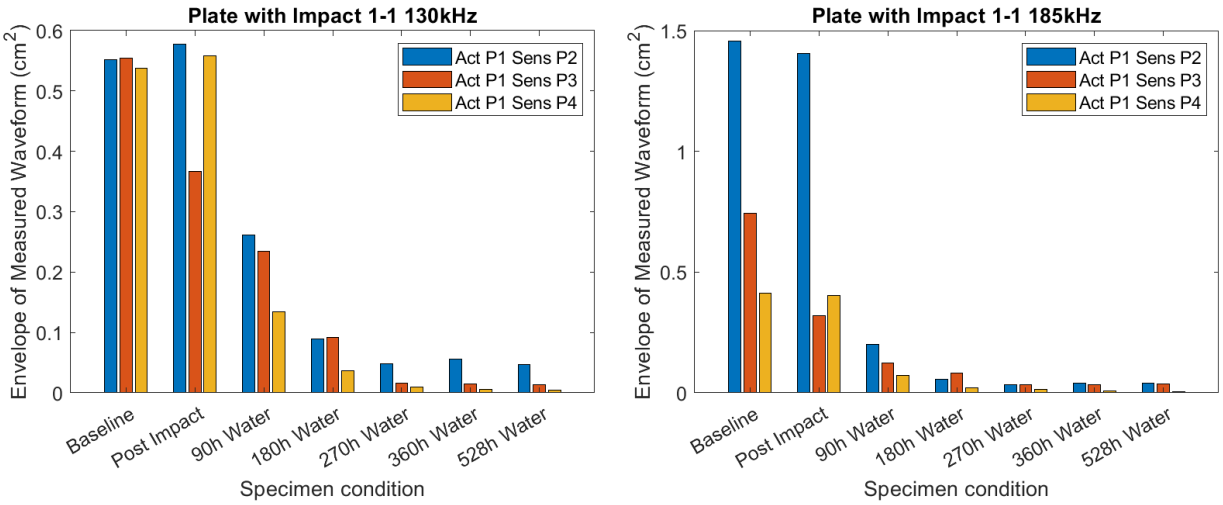
Ακόμα, είναι εμφανής η ραγδαία αύξηση του ToF, το οποίο σχεδόν φτάνει να διπλασιαστεί στο τέλος του κορεσμού σε σύγκριση με το βασικό σήμα της κρούσης.

Αξιοσημείωτη είναι, επίσης, η μείωση του πλάτους του σήματος, με την πλάκα P1-1 να χαρακτηρίζεται με πιο ασθενέστερα σήματα σε όλες τις περιοχές και την υγρασία να επιδρά πιο πολύ σε αυτήν. Αυτό επιβεβαιώνεται κι από το Figure 4.4.1 που φαίνεται ξεκάθαρα η P1-1 στις 90 και 180 ώρες να απορροφά λίγη παραπάνω ποσότητα νερού από την πλάκα P2-1. Γενικά και για τα δύο δοκίμια ισχύει ότι το πλάτος μειώνεται πιο γρήγορα στα 185kHz, ενώ στα 130kHz φτάνει κοντά στο μηδέν στις 270 ώρες. Στην περιοχή που διαπερνά τη ζημιά από κρούση, δηλαδή μεταξύ των ζευγαριών πιεζοηλεκτρικών P1-P4 και P2-P3, το σήμα είναι πιο ασθενές και άρα η απορρόφηση υγρασίας είναι πιο έντονη εκεί.

Ενδιαφέρον για διερεύνηση παρουσιάζει η ιδιομορφή που εμφανίζεται στην αρχή σε κάποιες περιπτώσεις.

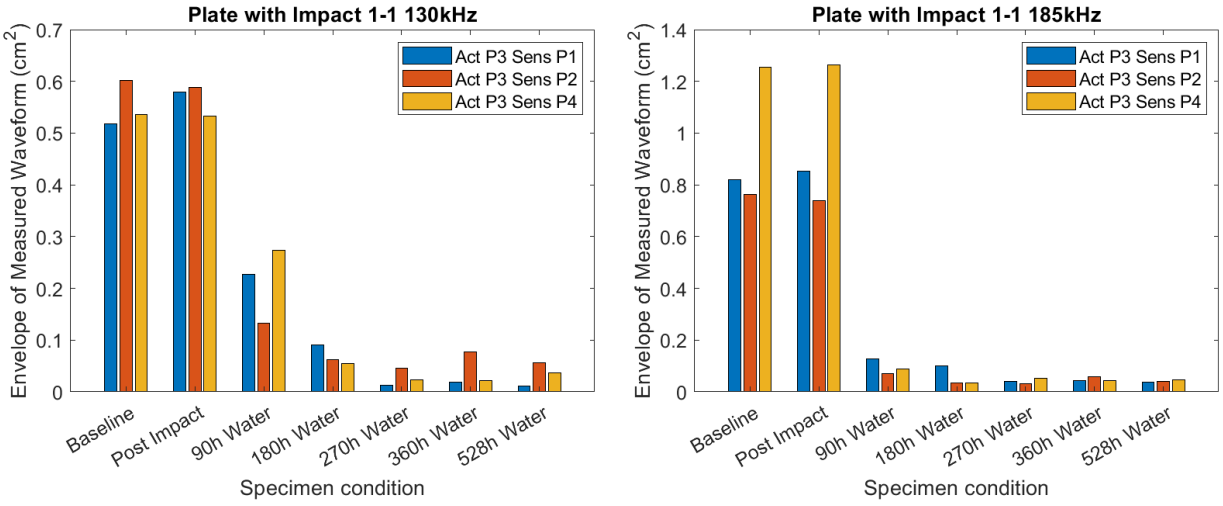
Για την μεταβολή του πλάτους χρησιμοποιείται πάλι η παράμετρος του εμβαδού “Area” του ληφθέντος σήματος, όπως αναλύθηκε και στην Ενότητα 4.2. Να σημειωθεί ότι έχει υπολογιστεί και το εμβαδόν των αποκρίσεων πριν την κρούση.

Έτσι προκύπτουν παρακάτω οι μεταβολές των εμβαδών:



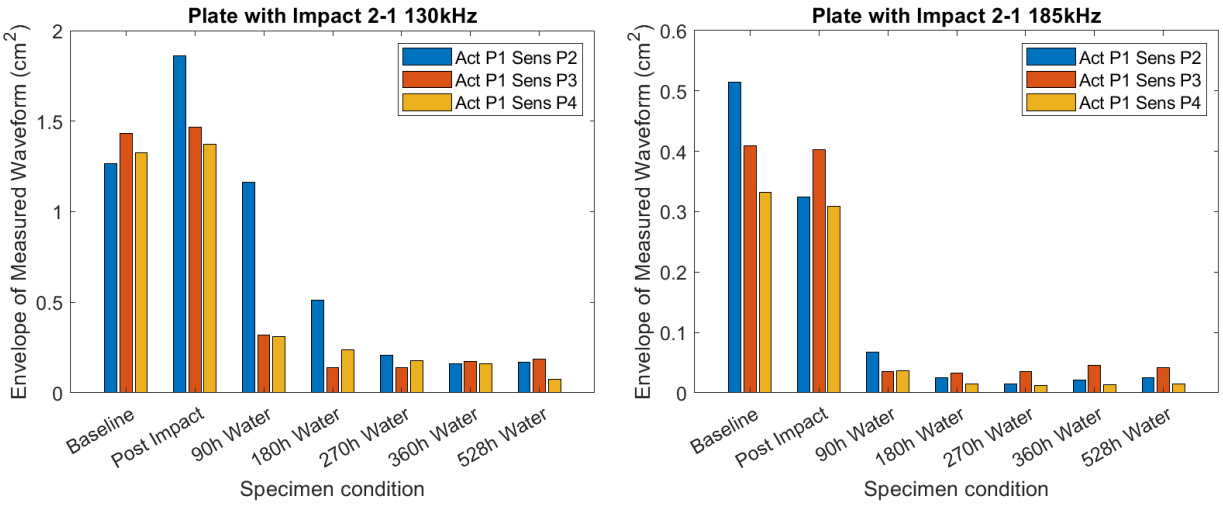
(a) (b)

Figure 4.4.3: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P1-1 και ενεργοποιητή το P1 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.*



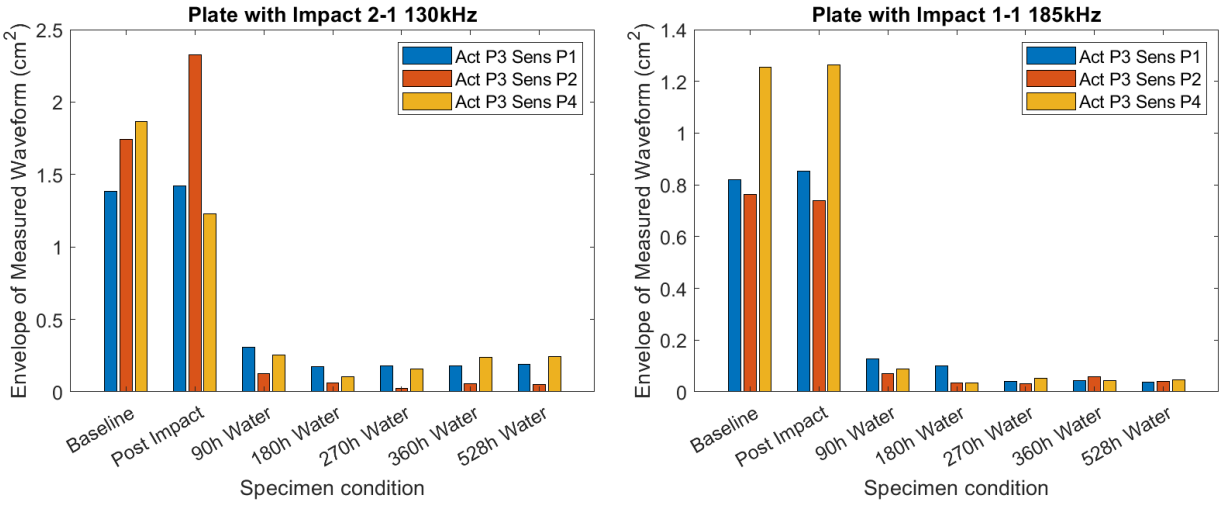
(a) (b)

Figure 4.4.4: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P1-1 και ενεργοποιητή το P3 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.*



(a) (b)

Figure 4.4.5: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P2-1 και ενεργοποιητή το P1 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.*



(a) (b)

Figure 4.4.6: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P2-1 και ενεργοποιητή το P3 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.*

Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και από τα γραφήματα των εμβαδών της περιβάλλουσας περιοχής των κυματομορφών και για τα δύο εξεταζόμενα δοκίμια με βλάβη. Καταγράφεται ξεκάθαρη μείωση του εμβαδού σε όλα τα σήματα με πιο έντονα την πλάκα P1-1.

4.5 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΒΛΑΒΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα υποενότητα διερευνάται η ευαισθησία στην ανίχνευση ζημιάς κρούσης σε υδάτινο περιβάλλον. Στην ουσία για κάθε στάδιο μετρήσεων μέχρι τον κορεσμό πρόκειται να γίνει σύγκριση των σημάτων μεταξύ της υγιούς πλάκας και της πλάκας με βλάβη για κάθε σειρά πλακών, δηλαδή ανάμεσα στις P1-2 με P1-1 και P2-2 με P2-1 αντίστοιχα.
Όμως για να έχει νόημα αυτή η μελέτη, η ανάλυση θα γίνει μόνο για τις περιπτώσεις που είναι σχεδόν πανομοιότυπα τα αρχικά σήματα μεταξύ των δοκιμίων της ίδιας σειράς, όπως φαίνονται στο Παράρτημα Δ.

Επομένως κρατάμε τους επιλεγμένους με ✓ και όχι τους σημαδεμένους με ☒ .

Actuator-Sensor	Serie P1 130kHz	Serie P1 185kHz	Serie P2 130kHz	Serie P2 185kHz
P1-P2	✓	☒	✓	☒
P1-P3	☒	✓	☒	✓
P1-P4	✓	☒	✓	✓
P3-P1	☒	✓	☒	✓
P3-P2	✓	☒	✓	✓
P3-P4	✓	☒	☒	✓

Πίνακας 4.5.1: *Επιλογές για σύγκριση σημάτων*

Ενδείκνυνται για απεικόνιση τα διαγράμματα της Σειράς P2 για το ζεύγος P1-P4, δηλαδή τα Figure 4.5.1 και Figure 4.5.2, μιας και είναι από τα λίγα που ικανοποιούν την προαναφερθείσα συνθήκη και για τις δύο συχνότητες. Έτσι τα υπόλοιπα παρατίθενται στο Παράρτημα Ε.

Το υγιές σήμα ‘Healthy’, που απεικονίζεται με μπλε χρώμα, συγκρίνεται με το σήμα κρούσης ‘2.5J Impact’ με πορτοκαλί χρώμα για **(a)** 90 ώρες εμβάπτισης, **(b)** 180 ώρες εμβάπτισης, **(c)** 270 ώρες εμβάπτισης, **(d)** 360 ώρες εμβάπτισης, **(e)** 528 ώρες εμβάπτισης.

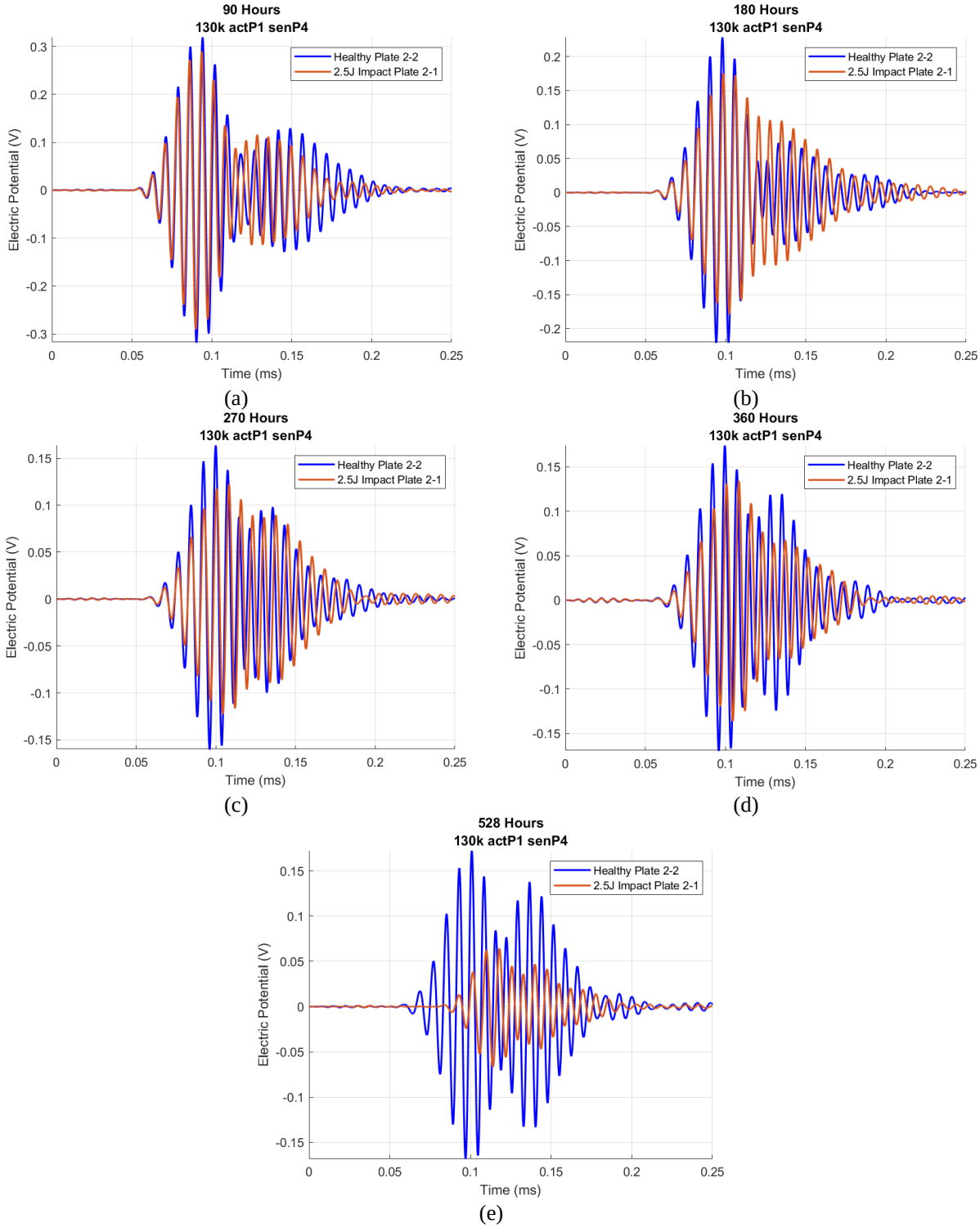


Figure 4.5.1: *Σειρά πλάκας **P2** με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 130Hz.*

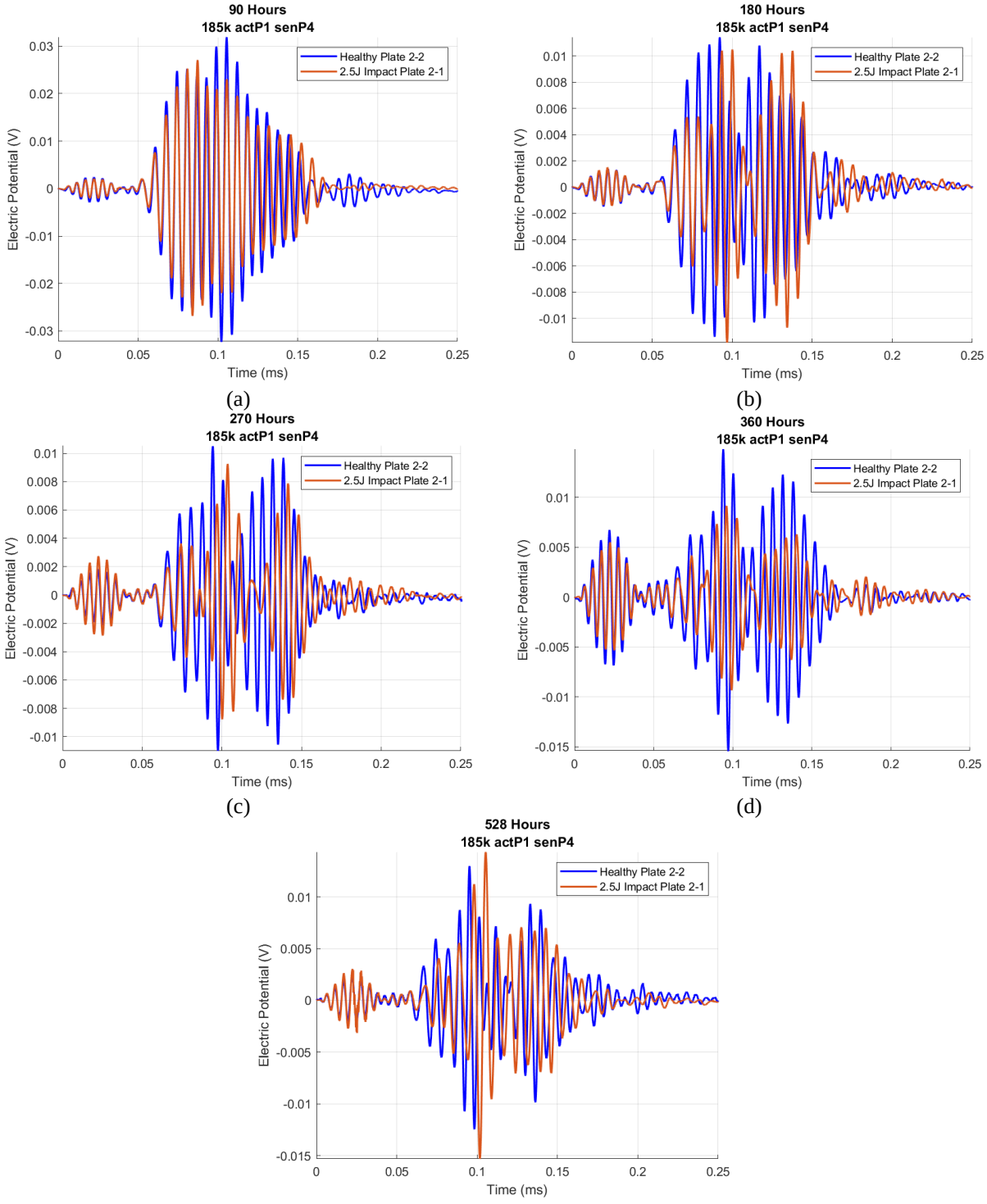


Figure 4.5.2: *Σειρά πλάκας **P2** με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 185Hz.*

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι ξεκάθαρο ότι η βλάβη κρούσης δύναται να εντοπιστεί σε οποιοδήποτε στάδιο του κορεσμού. Η ευαισθησία στην ανίχνευση αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου εμβάπτισης στο νερό, καθώς χαρακτηρίζεται από ισχυρές μεταβολές στο μοτίβο της κυματομορφής, στο πλάτος και στο ToF του σήματος. Αυτό βέβαια οφείλεται και στο γεγονός ότι υπάρχει διαφορά στο ρυθμό πρόσληψης νερού, αφού οι πλάκες με κρούση απορροφάνε πιο πολύ.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εμφάνιση μιας ιδιομορφής στην αρχή της οποίας το πλάτος αυξάνεται μετά από κάποιο χρονικό διάστημα της βύθισης στο νερό. Για τα δοκίμια με βλάβη αυτό το πλάτος είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα αντίστοιχα υγιή δοκίμια. Προκαλεί αίσθηση το ότι δεν εμφανίζεται σε όλα τα σήματα αλλά στα περισσότερα και συγκεκριμένα:

- Σειρά 1: 130kHz [P1-P2 P3-P2], 185kHz [P1-P3, P3-P1]
- Σειρά 2: 185kHz [P1-P3, P1-P4, P3-P1, P3-P2, P3-P4]

Χρήζει περαιτέρω ελέγχου αν και φαίνεται να κυριαρχεί στα 185kHz που είναι πιο διασκορπιστικό το σήμα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή καθοδηγούμενων υπερηχητικών κυμάτων που διεγείρονται και λαμβάνονται από ένα δίκτυο μετατροπέων PZT προσαρτημένων σε μια δομή από σύνθετο φυτικό υλικό, όπως το λινάρι, είναι μια από τις πολλά υποσχόμενες προσεγγίσεις για την παρακολούθηση της πρόσληψης υγρασίας σε αυτή, με σκοπό να διασφαλιστεί η αντοχή τους. Στη παρούσα εργασία διεξήχθη μια πειραματική μελέτη για την επίδραση της υγρασίας στα χαρακτηριστικά της κυματικής διάδοσης. Έτσι διαπιστώνεται ότι:

- Οι πλάκες που δέχονται κρούση απορροφούν και περισσότερη υγρασία.

- Η απορρόφηση νερού επιδρά καταλυτικά στην κυματική διάδοση τόσο στις υγιείς όσο και στις πλάκες με ζημιά:
  - Δραστική μείωση στο πλάτος του μετρούμενου σήματος
  - Σημαντικές αλλαγές στο ToF
  - Αλλαγές στο μοτίβο της κυματομορφής
  - Ο ρυθμός μεταβολής της διάδοσης του κύματος διαφέρει μεταξύ των δύο συχνοτήτων διέγερσης

- Η πρόσληψη υγρασίας αυξάνει τη διασκόρπιση του σήματος
  - Οι νέες ταχύτητες διάδοσης μετά την εμβάπτιση στο νερό αναφέρονται σε υλικά με σημαντικά μειωμένες ιδιότητες.

- Η βλάβη κρούσης αποτυπώνεται στην χρονική απόκριση παρουσία υδάτινου περιβάλλοντος
  - Η βύθιση στο νερό φαίνεται να επηρεάζει ελαφρώς την ευαισθησία στην παρουσία ζημιάς
  - Ενδείξεις ότι ο ρυθμός εμβάπτισης στο νερό διαφέρει

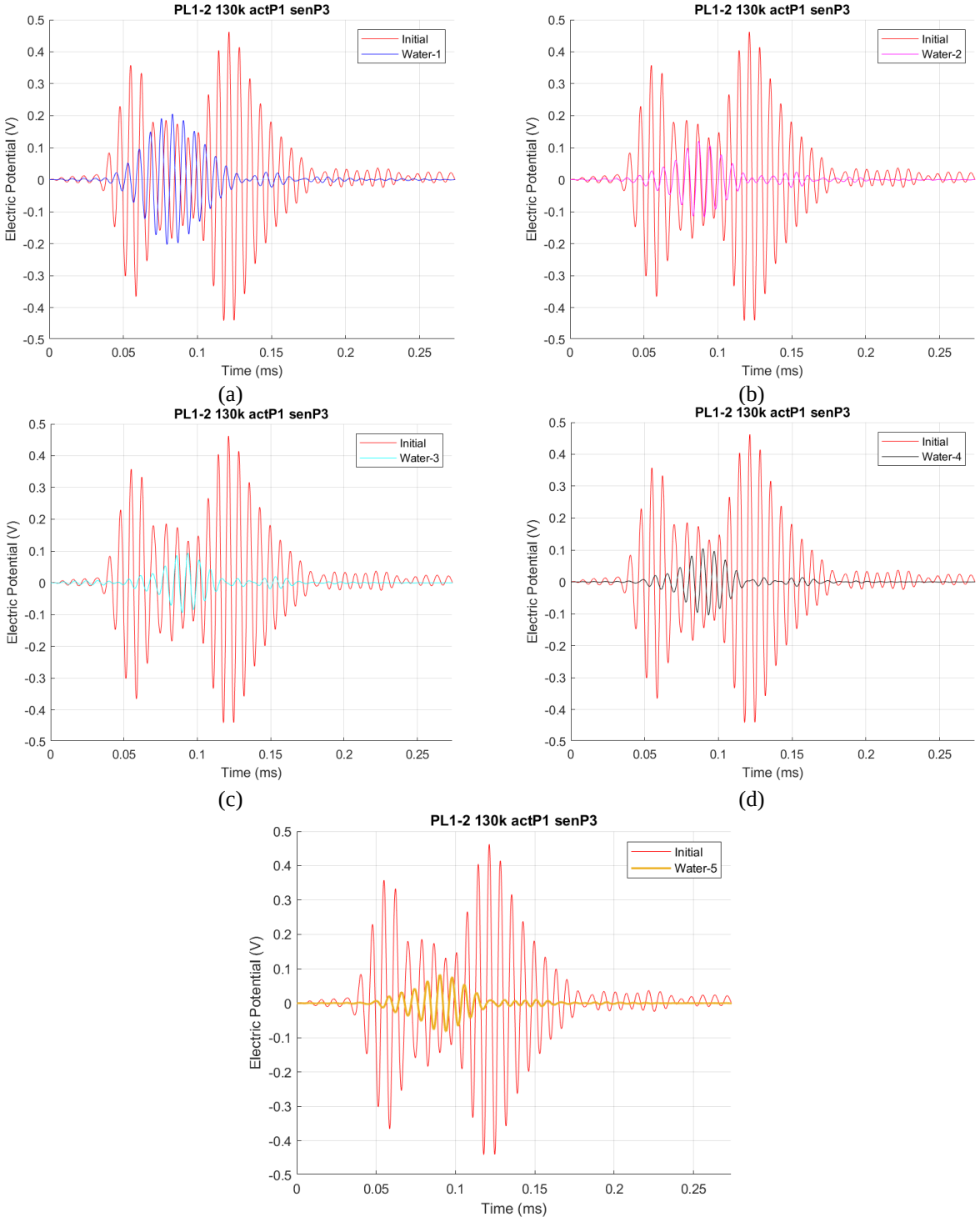
Σημειώνεται ότι σίγουρα υπάρχει και υγροθερμική φθορά των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων που πιθανότατα ενσωματώνεται στις μεταβολές του ληφθέντος σήματος. Τέλος, το καλάι που κολλήθηκαν τα καλώδια αλλάχθηκε, διότι μετά τις 360 ώρες βύθισης στο νερό έχασε τις ηλεκτρικές του ιδιότητες και δεν πέρναγε καθόλου ρεύμα.

Όπως τονίστηκε και προηγουμένως χρειάζεται διερεύνηση των νέων κυματομορφών που δημιουργούνται με την υγρασία. Μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να ενσωματώσουν τα υγροθερμικά αποτελέσματα σε υπάρχοντα ηλεκτρομηχανικά αριθμητικά εργαλεία μέσω πεπερασμένων στοιχείων για να βελτιώσουν την κατανόηση για την επίδραση της υγρασίας στον εντοπισμό ζημιών από κρούση.

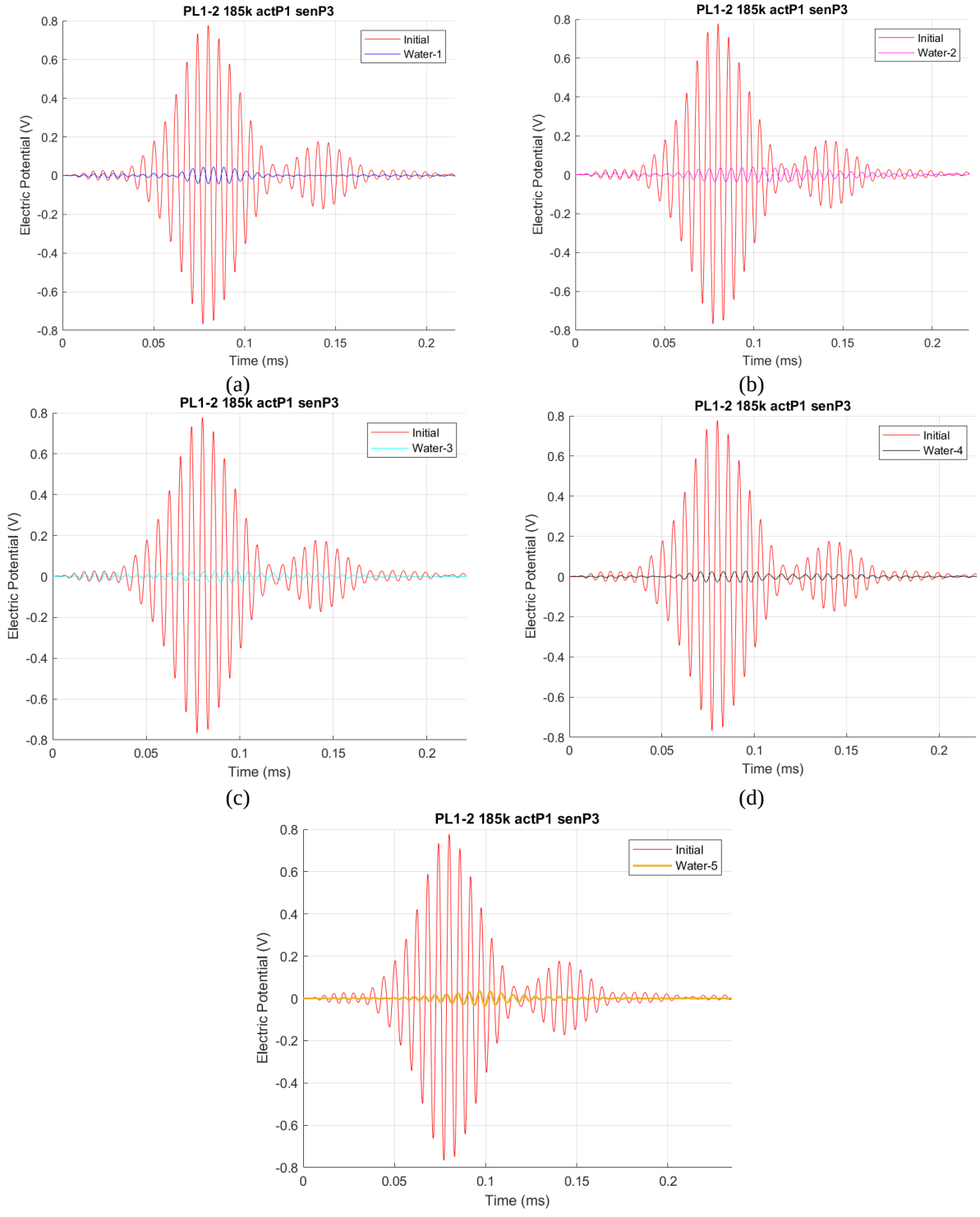
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΣΗΜΑΤΩΝ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΔΟΥ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΥΓΙΕΙΣ ΠΛΑΚΕΣ P1-2 & P2-2

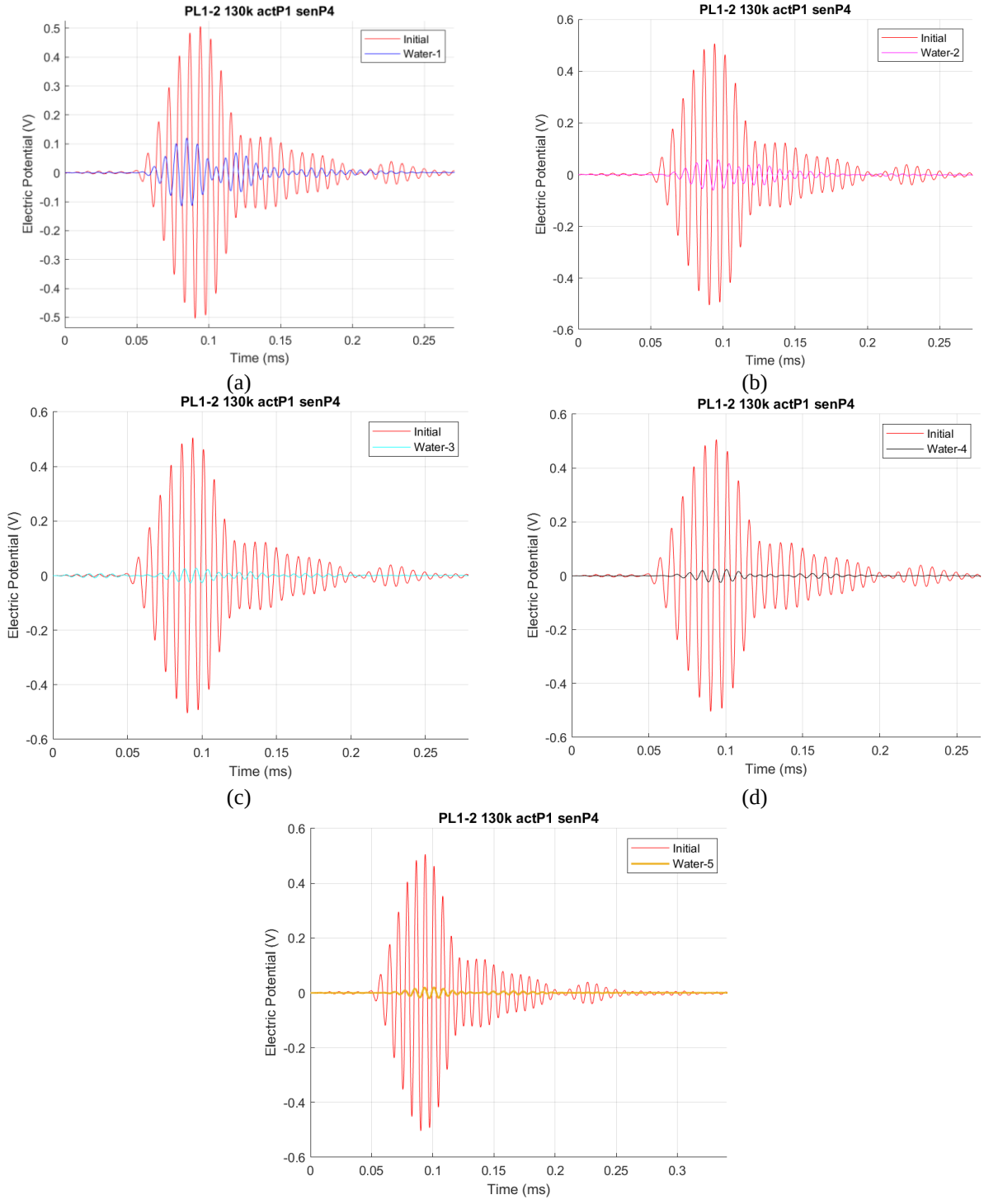
Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται τα διαγράμματα της χρονικής απόκρισης της ηλεκτρικής τάσης του εκάστοτε αισθητηρίου κάθε πλάκας, με μετρήσεις στις συχνότητες των 130kHz και 185kHz, συγκρίνοντας πάντα το Αρχικό σήμα 'Initial', απεικονιζόμενο με κόκκινο χρώμα, με το σήμα μετά από **(a)** 90 ώρες εμβάπτισης 'Water-1', **(b)** 180 ώρες εμβάπτισης 'Water-2', **(c)** 270 ώρες εμβάπτισης 'Water-3', **(d)** 360 ώρες εμβάπτισης 'Water-4', **(e)** 528 ώρες εμβάπτισης 'Water-5'.



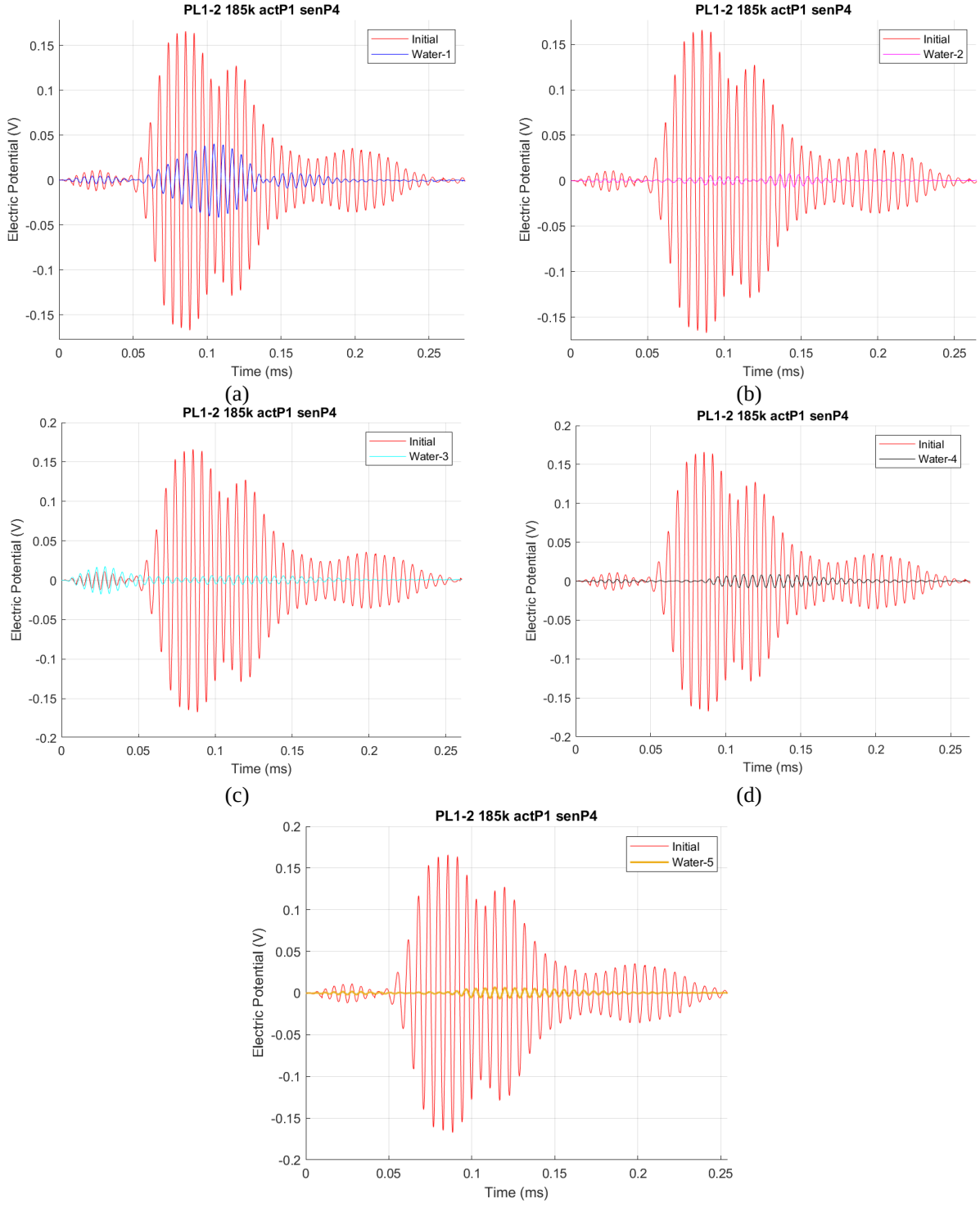
Appendix A Figure 1: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 130kHz.*



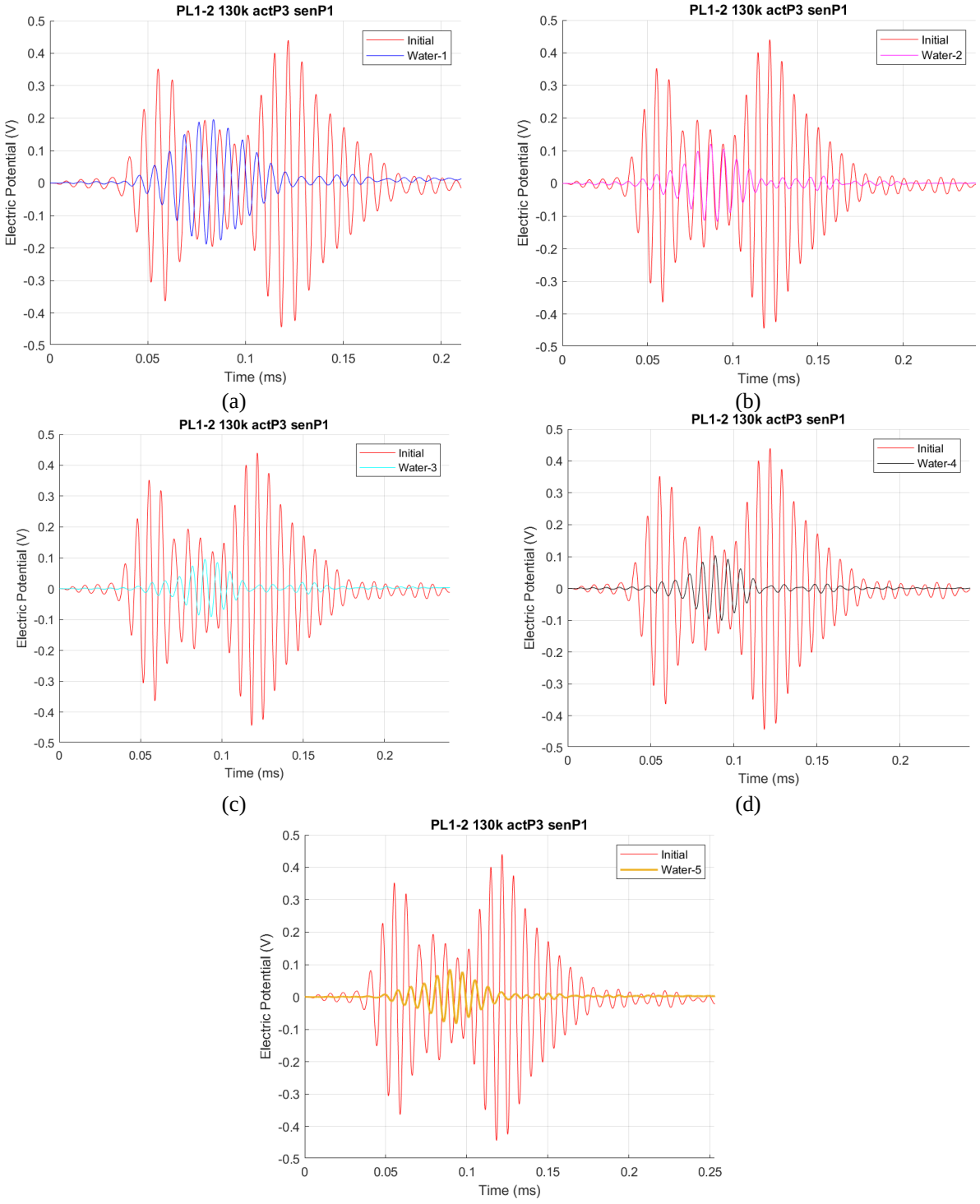
Appendix A Figure 2: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 185kHz.*



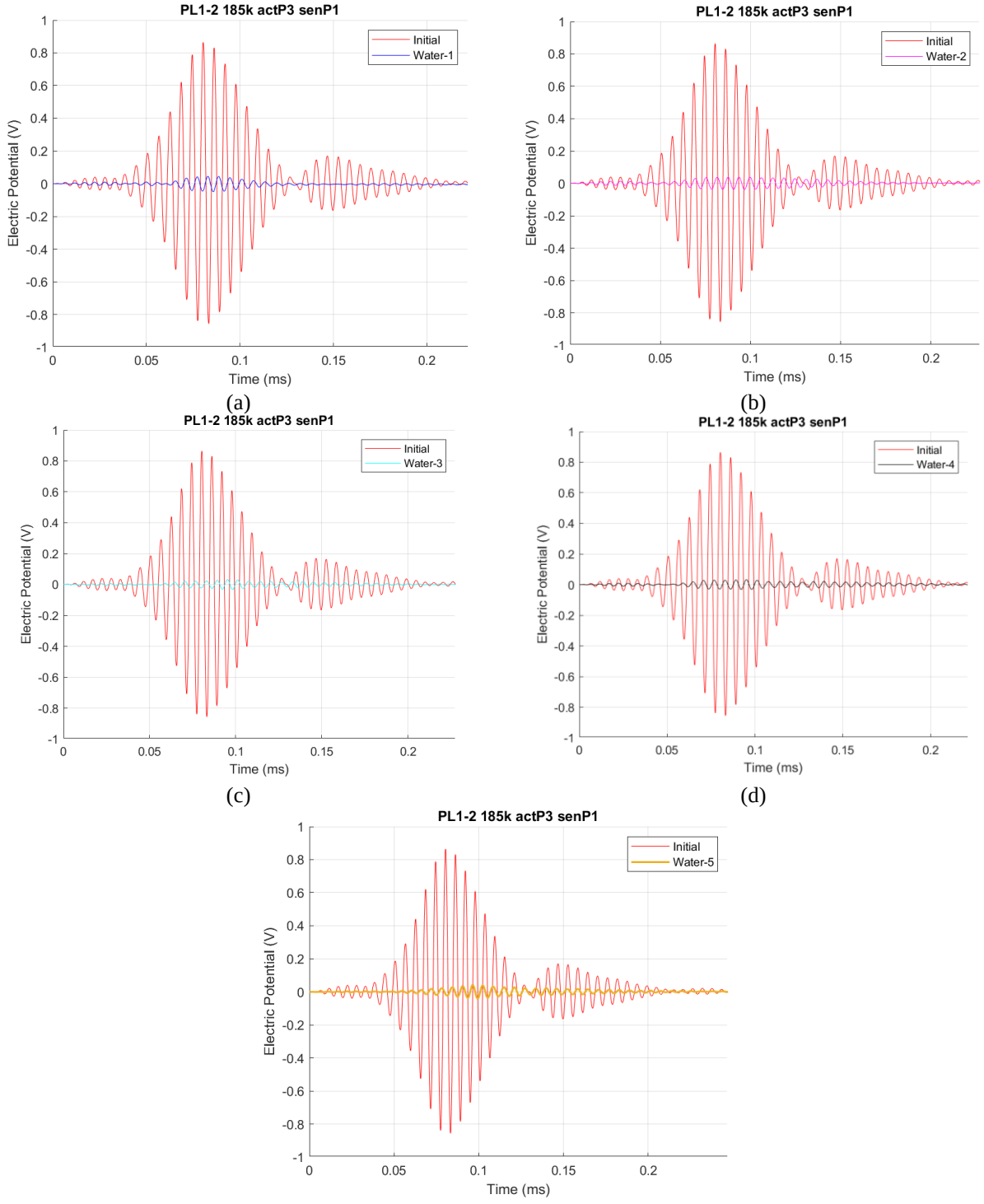
Appendix A Figure 3: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.*



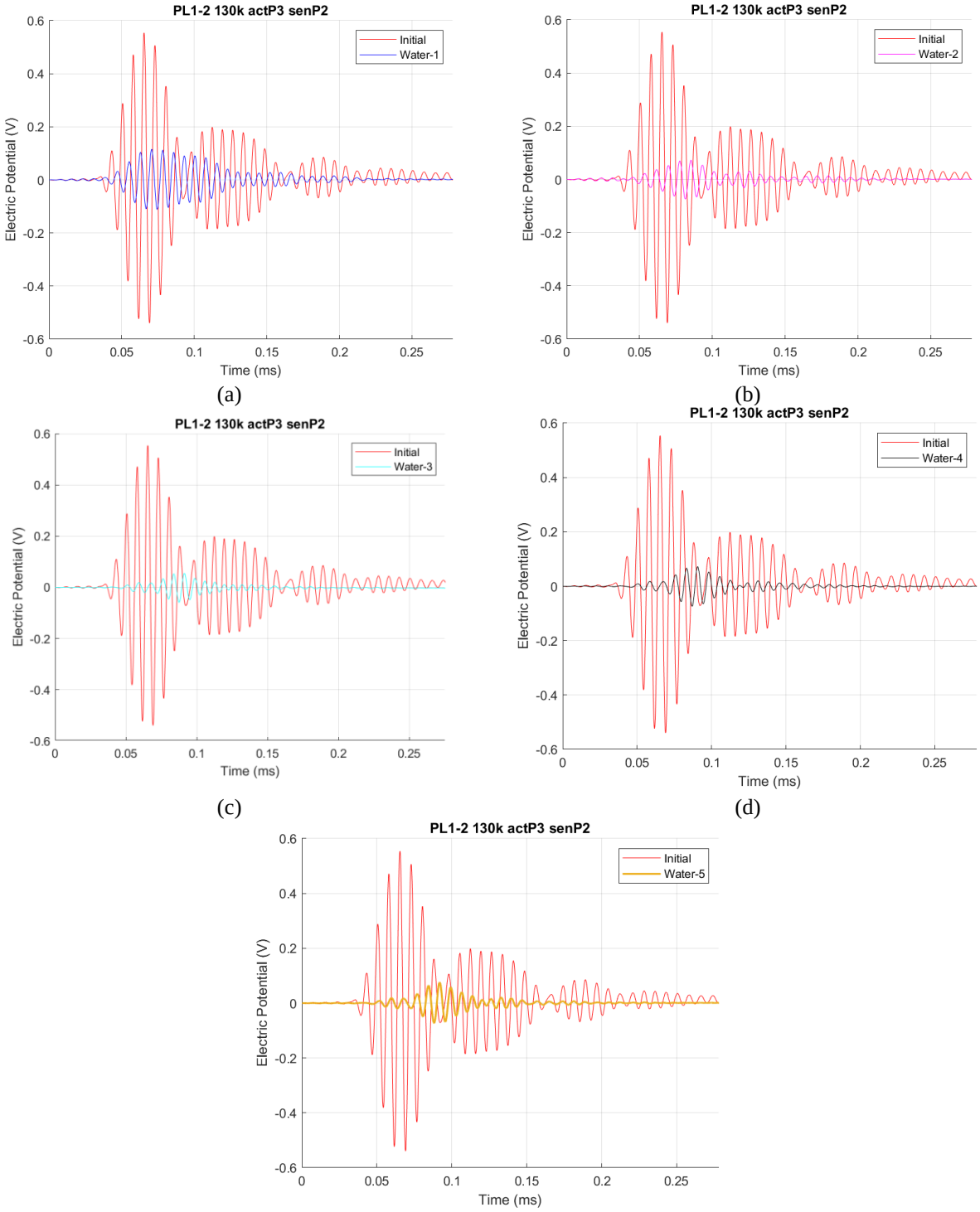
Appendix A Figure 4: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.*



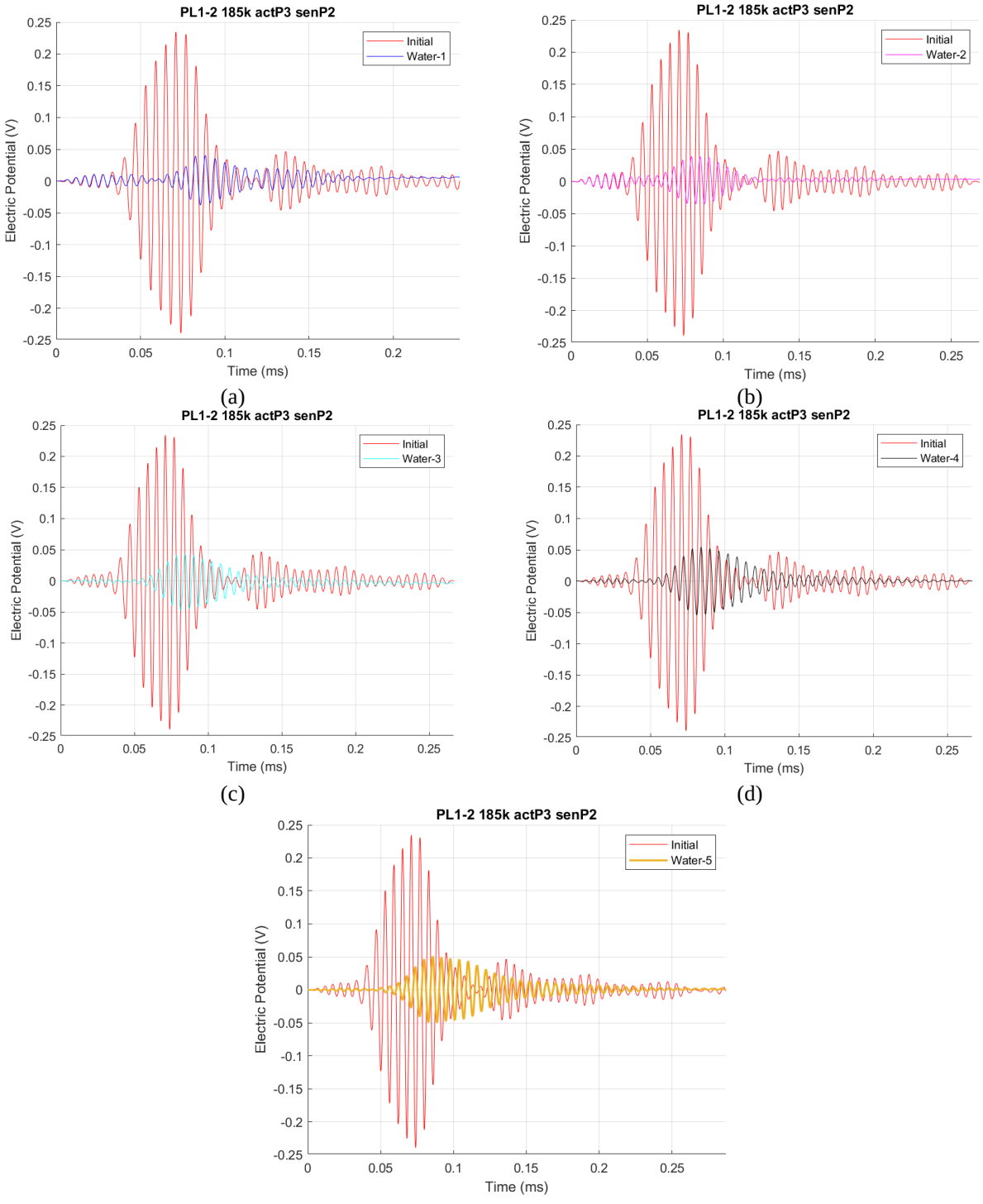
Appendix A Figure 5: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 130kHz.*



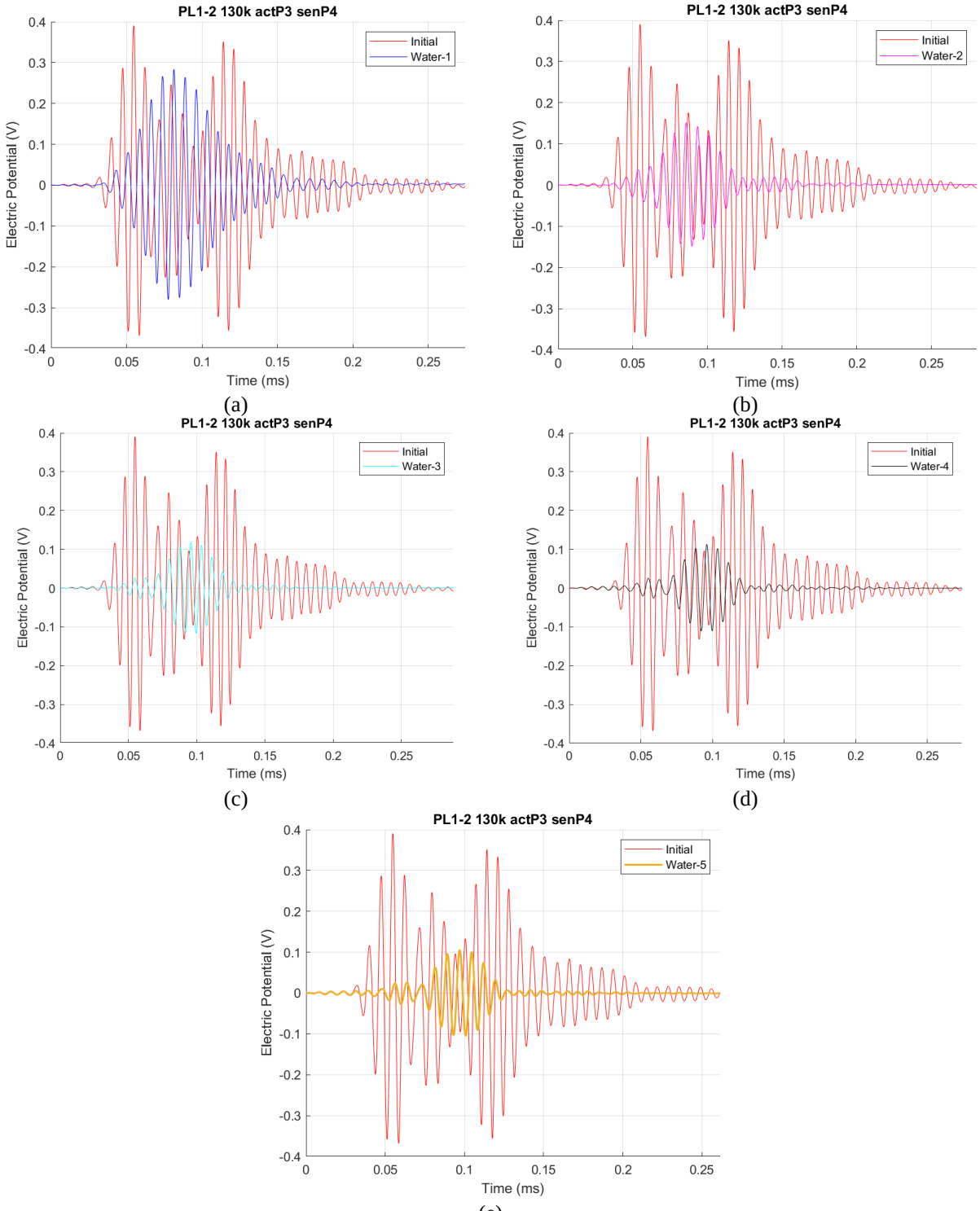
Appendix A Figure 6: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 185kHz.*



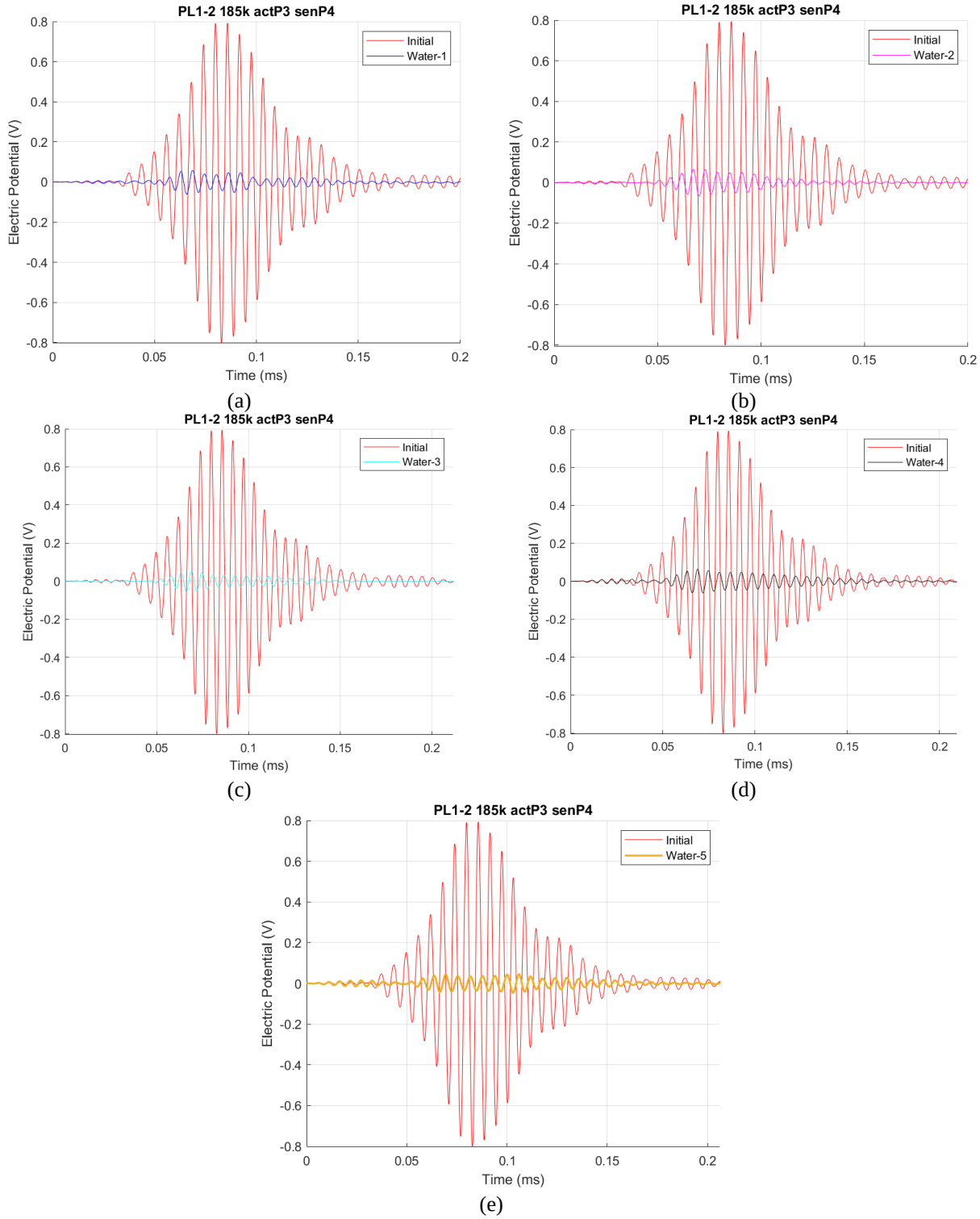
Appendix A Figure 7: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.*



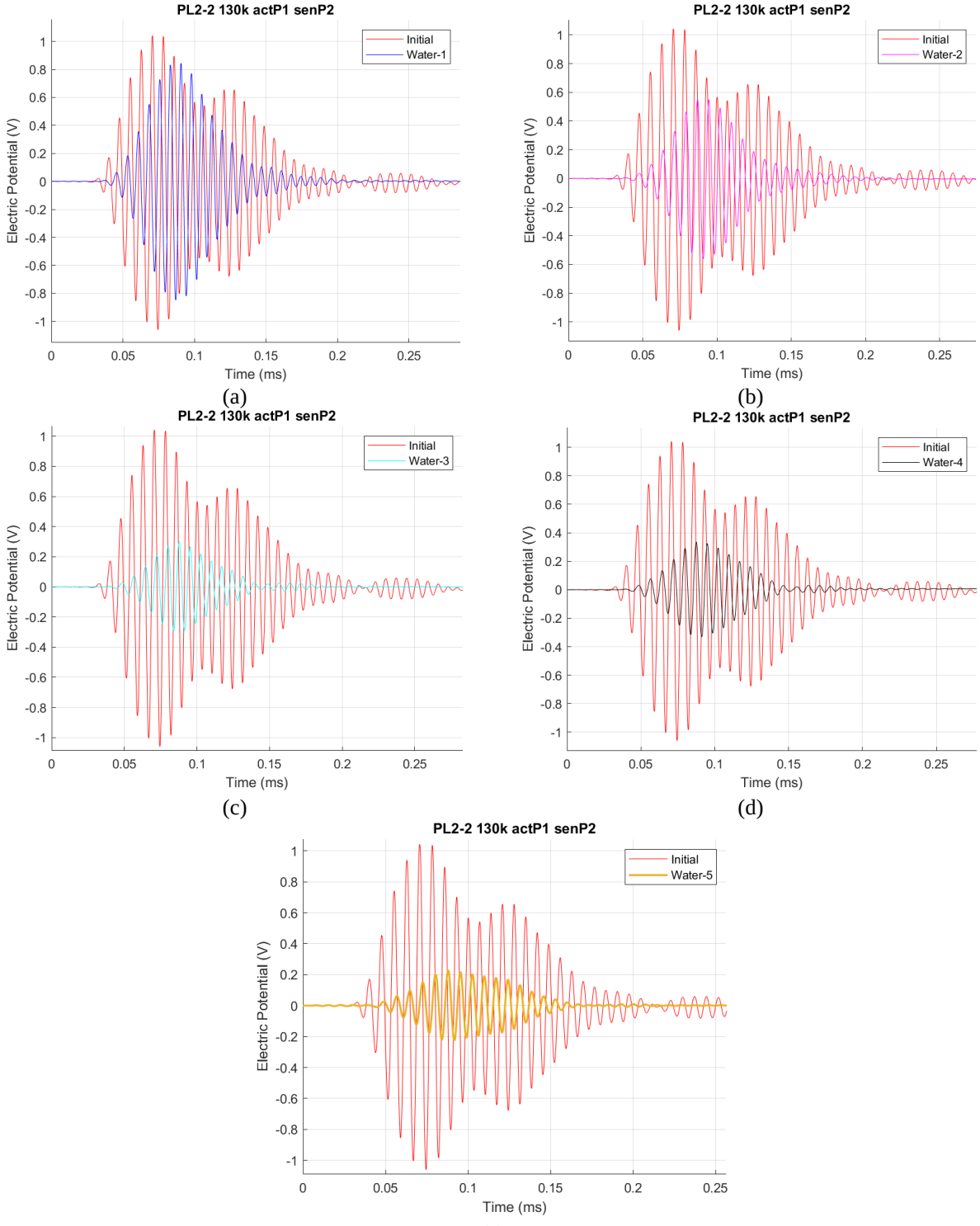
Appendix A Figure 8: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.*



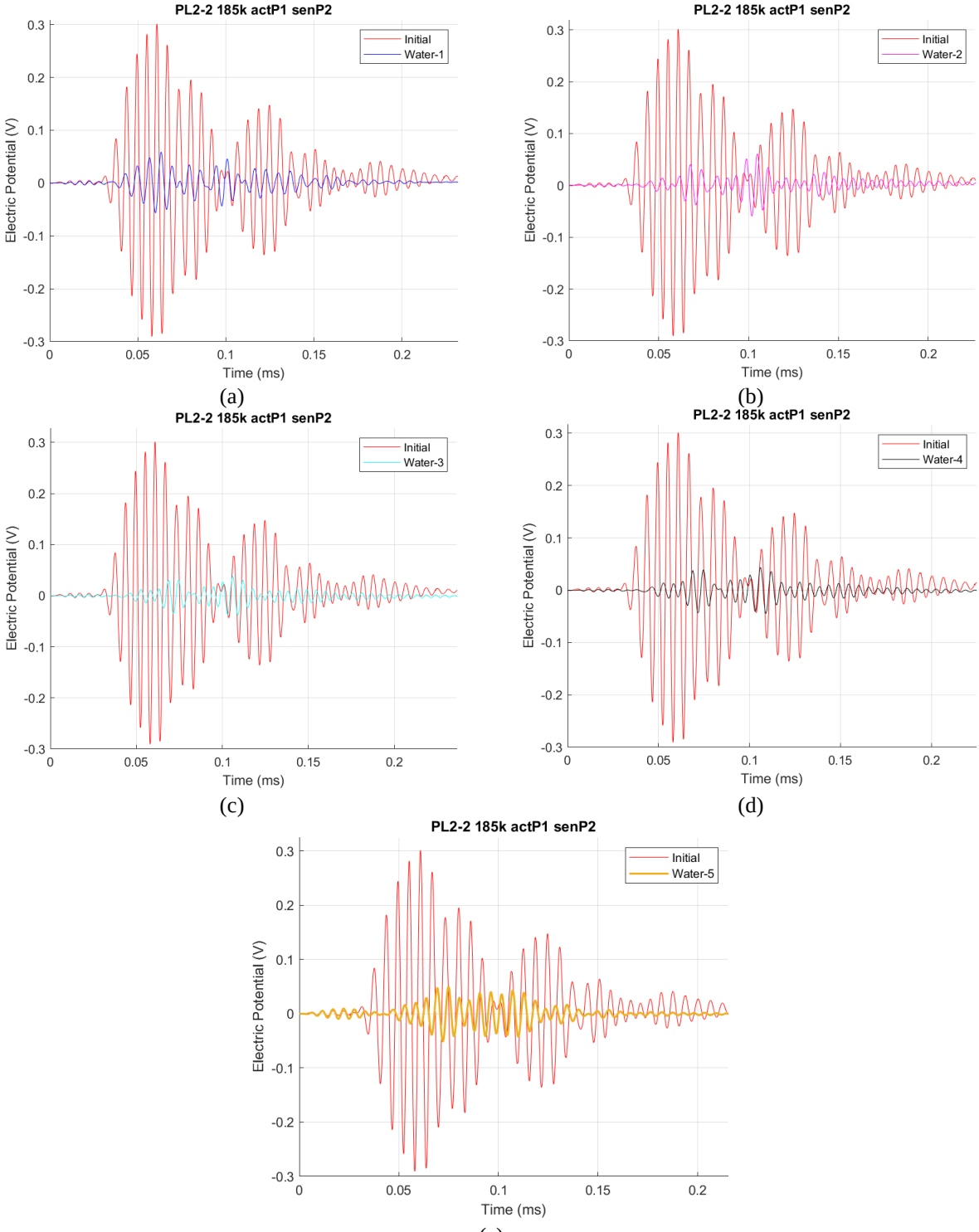
Appendix A Figure 9: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.*



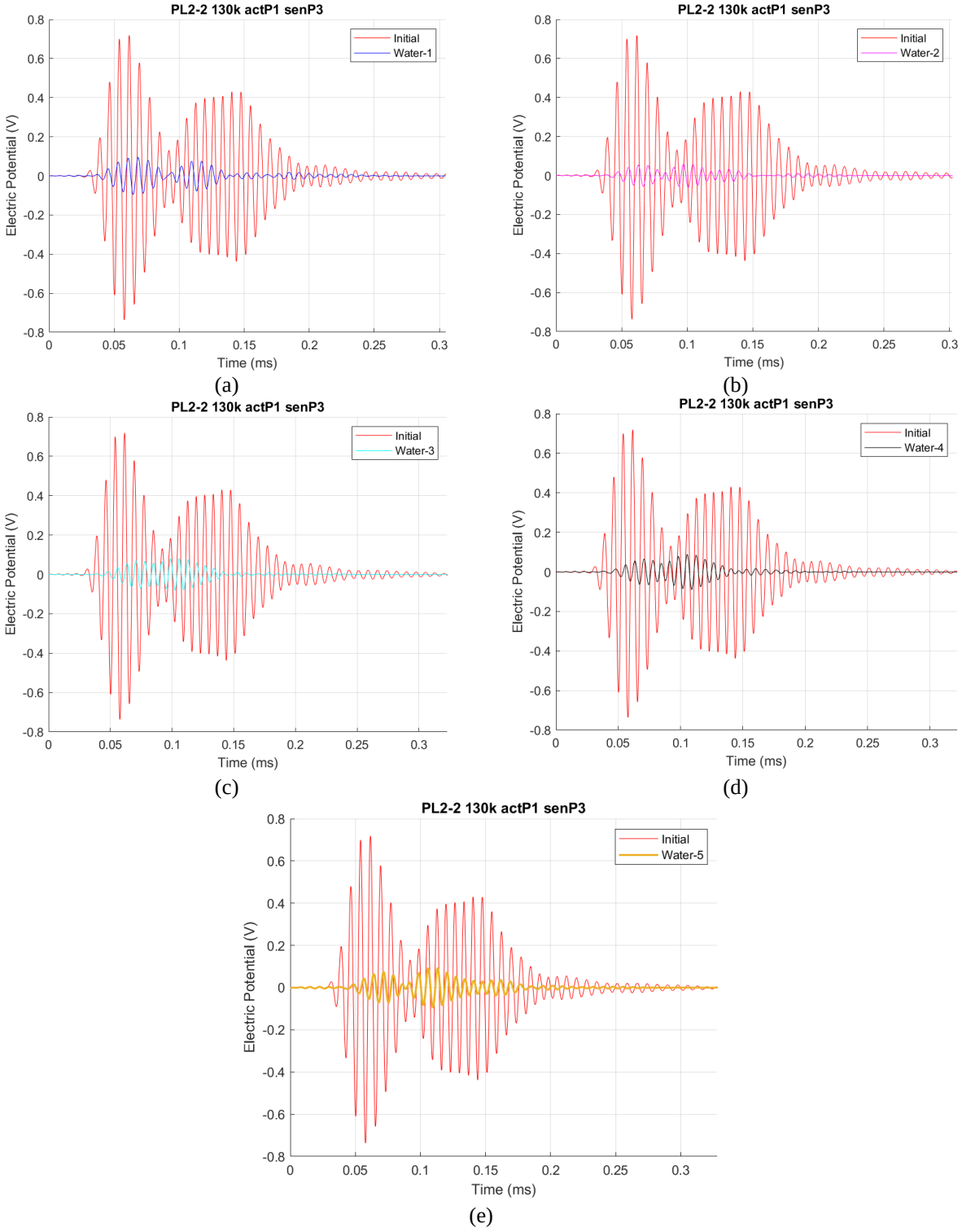
Appendix A Figure 10: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.*



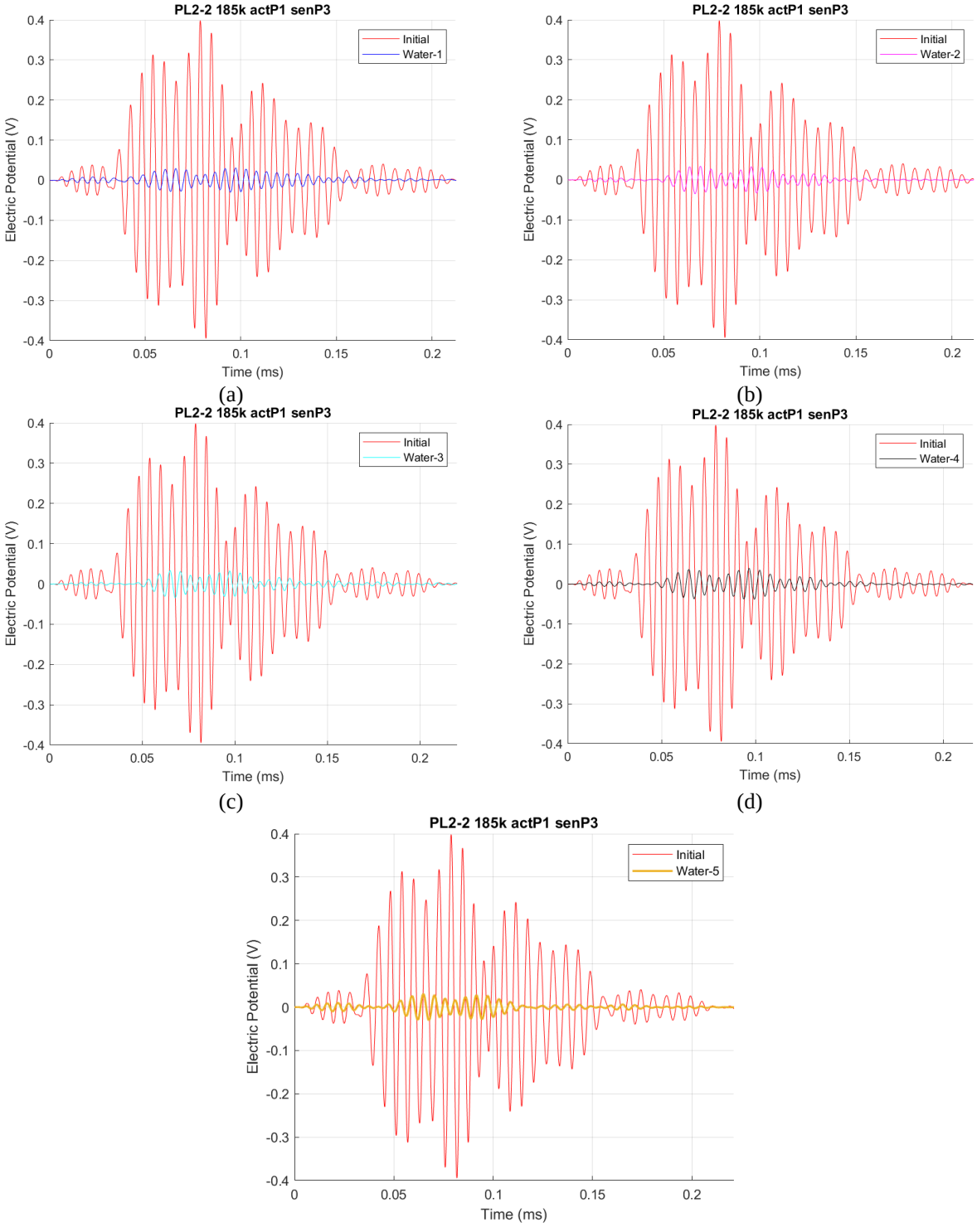
Appendix A Figure 11: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.*



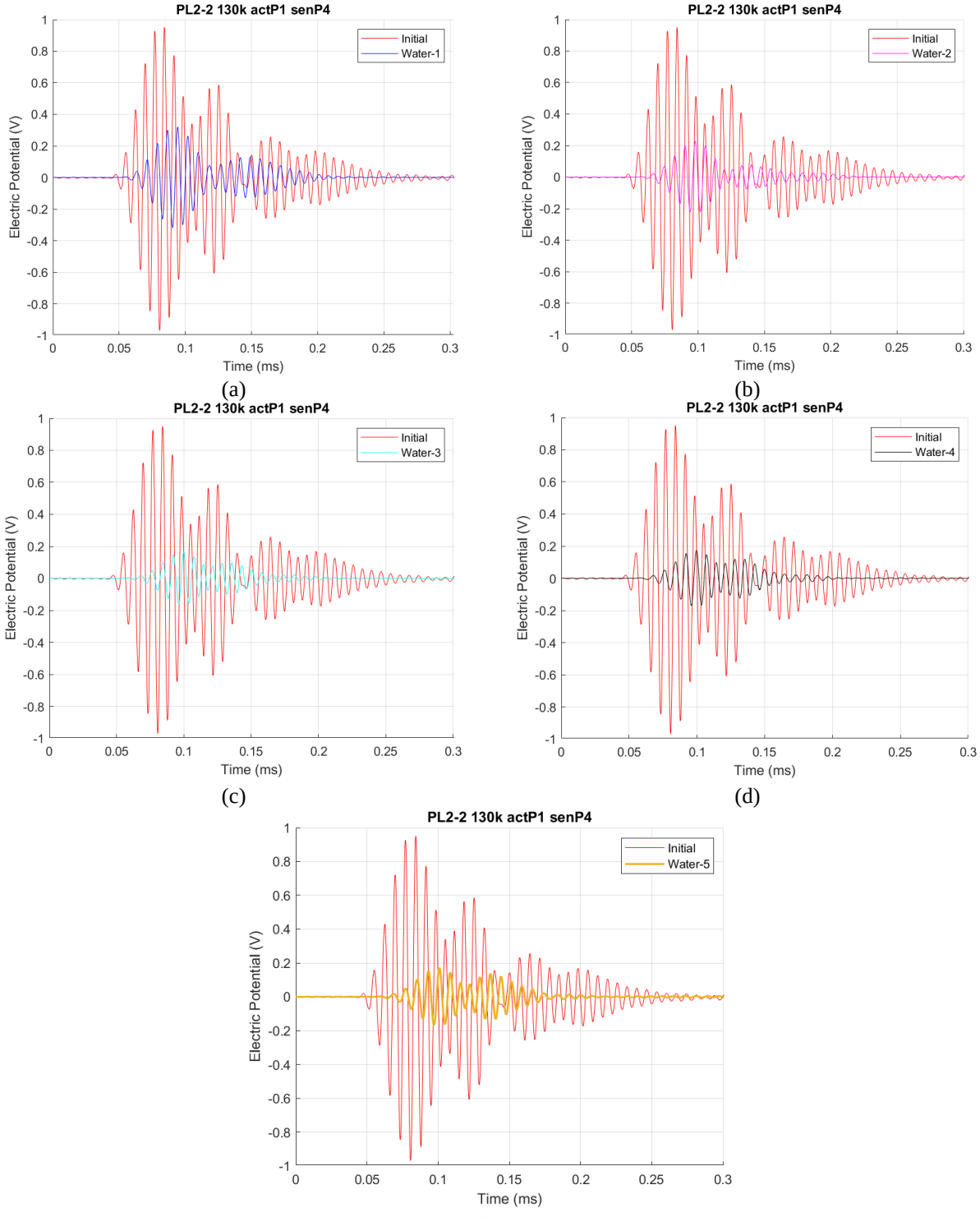
Appendix A Figure 12: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.*



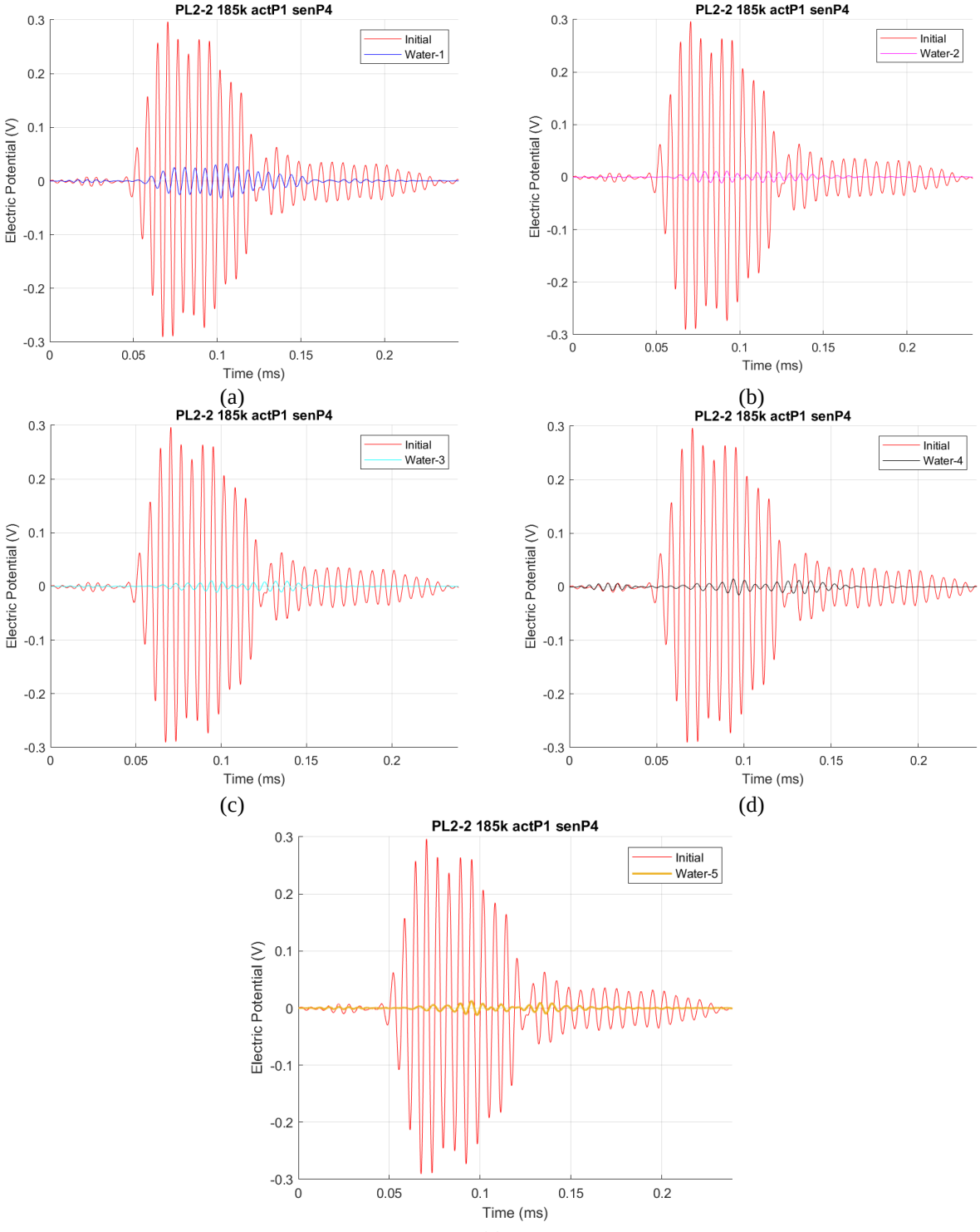
Appendix A Figure 13: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 130kHz.*



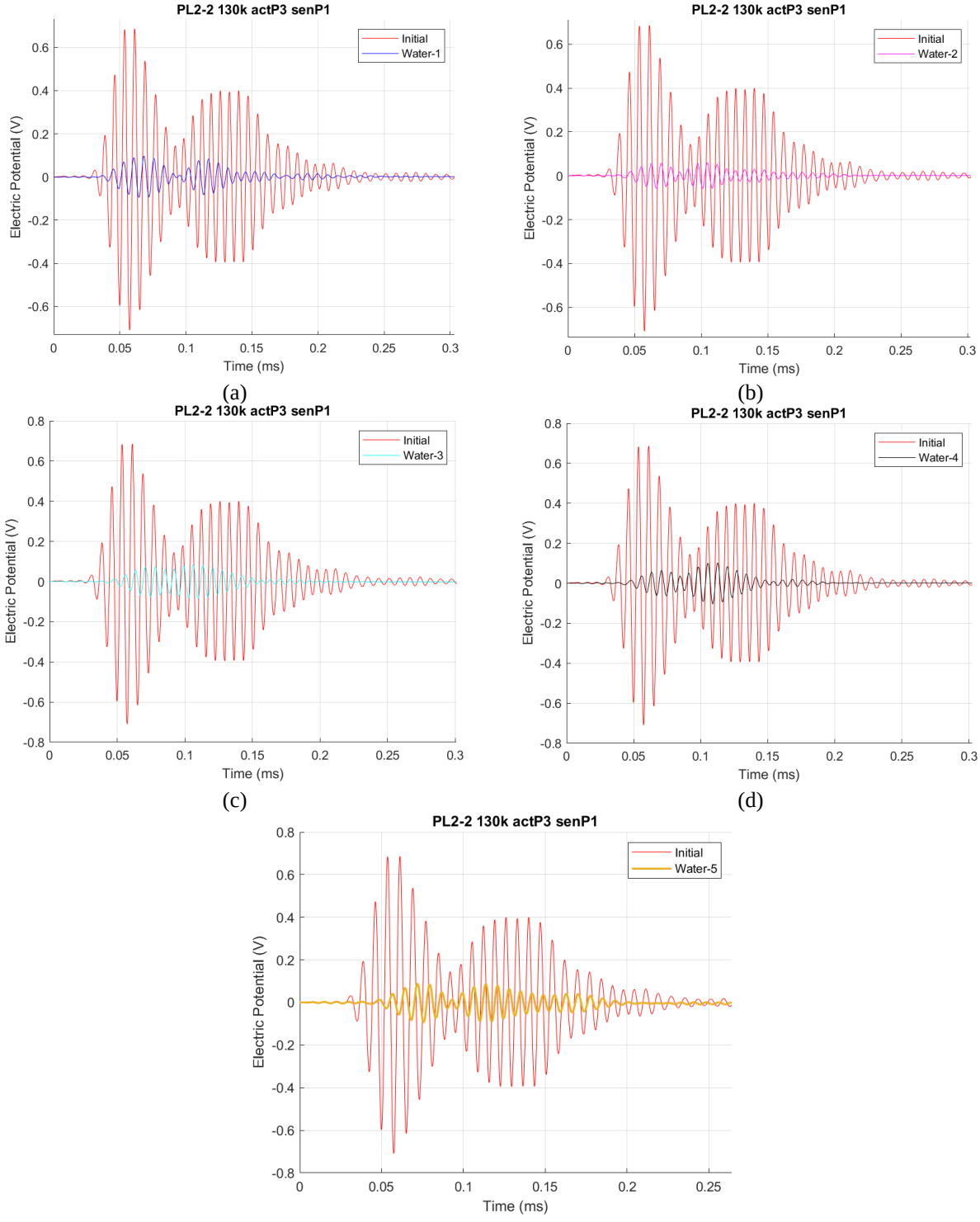
Appendix A Figure 14: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 185kHz.*



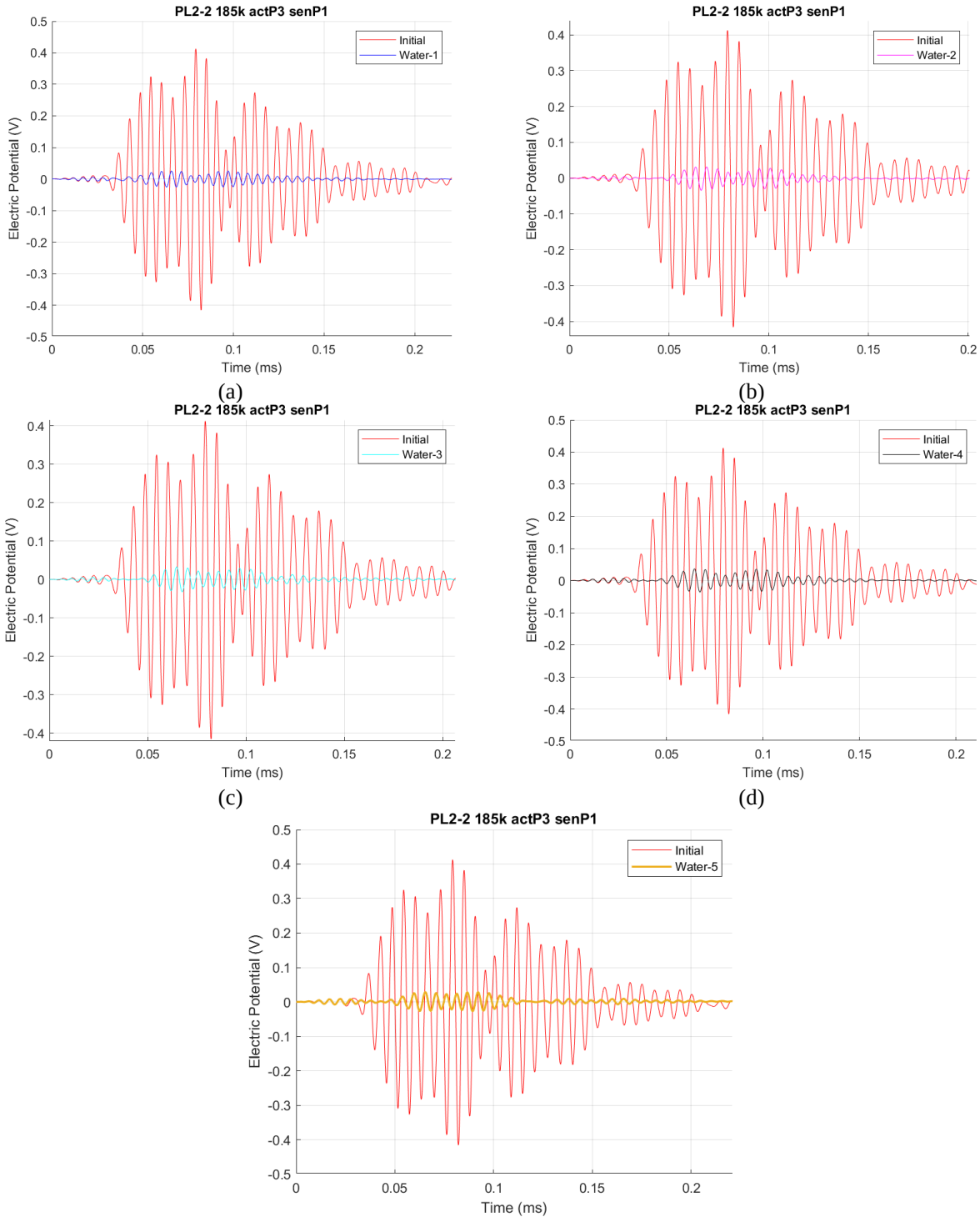
Appendix A Figure 15: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.*



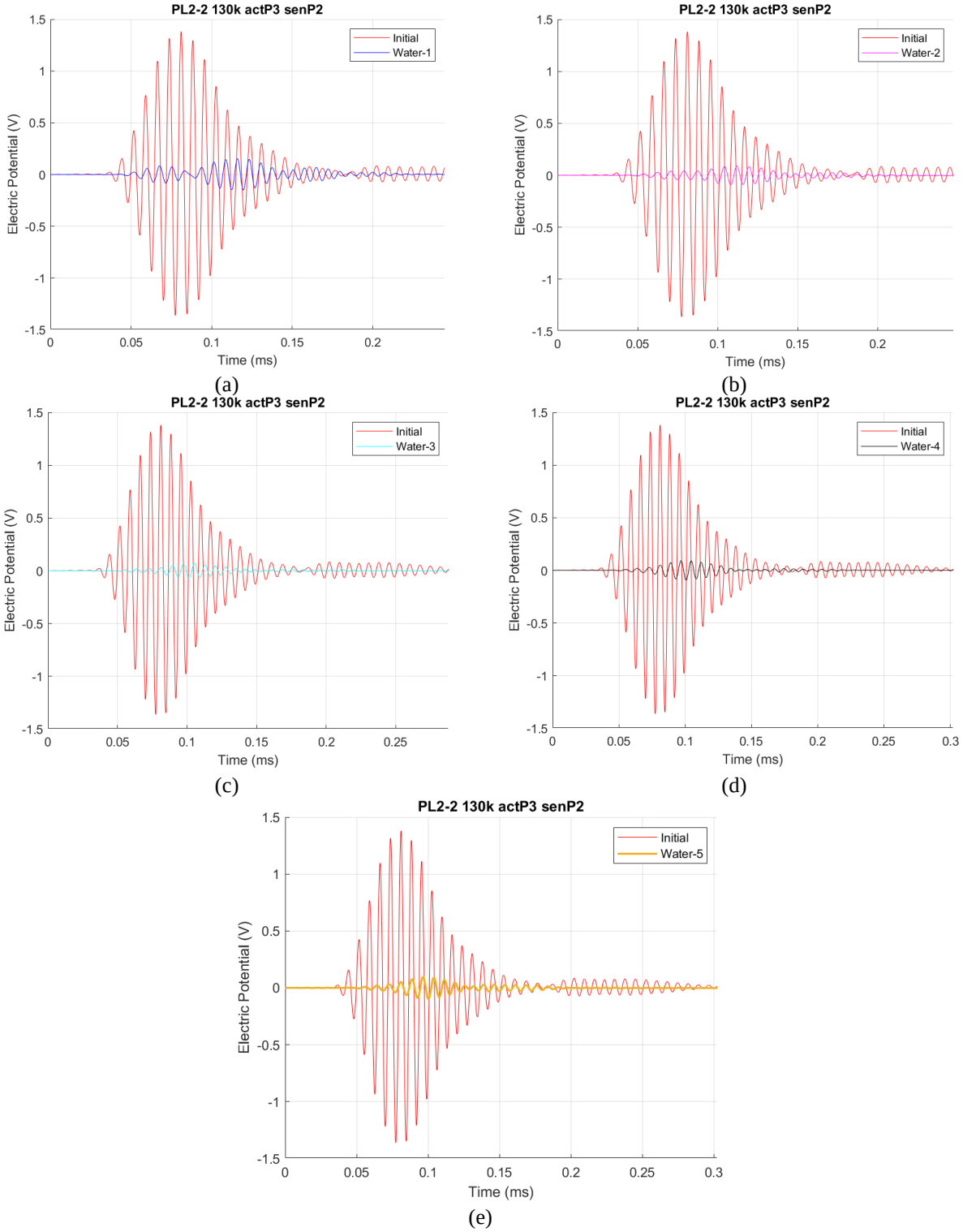
Appendix A Figure 16: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.*



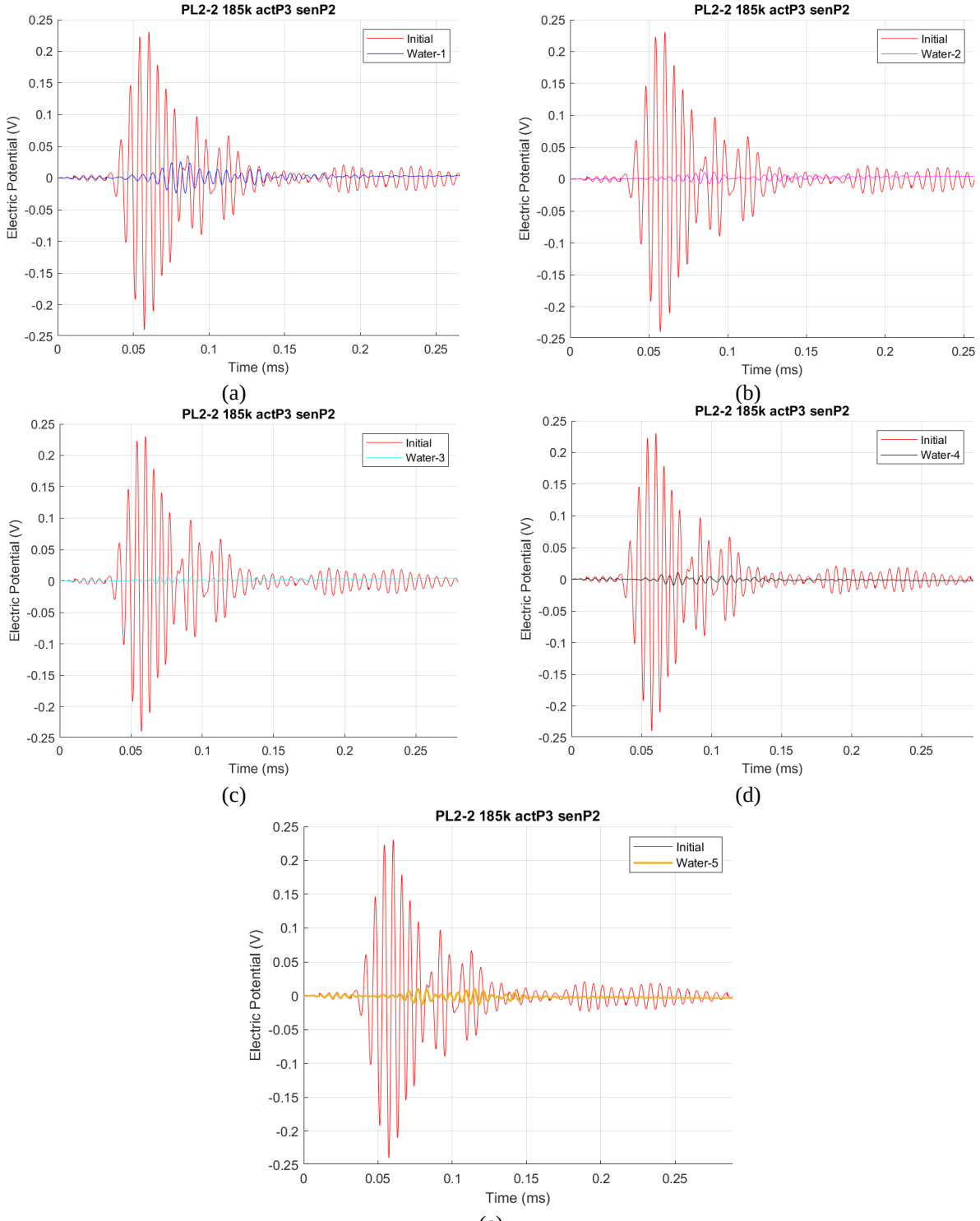
Appendix A Figure 17: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 130kHz.*



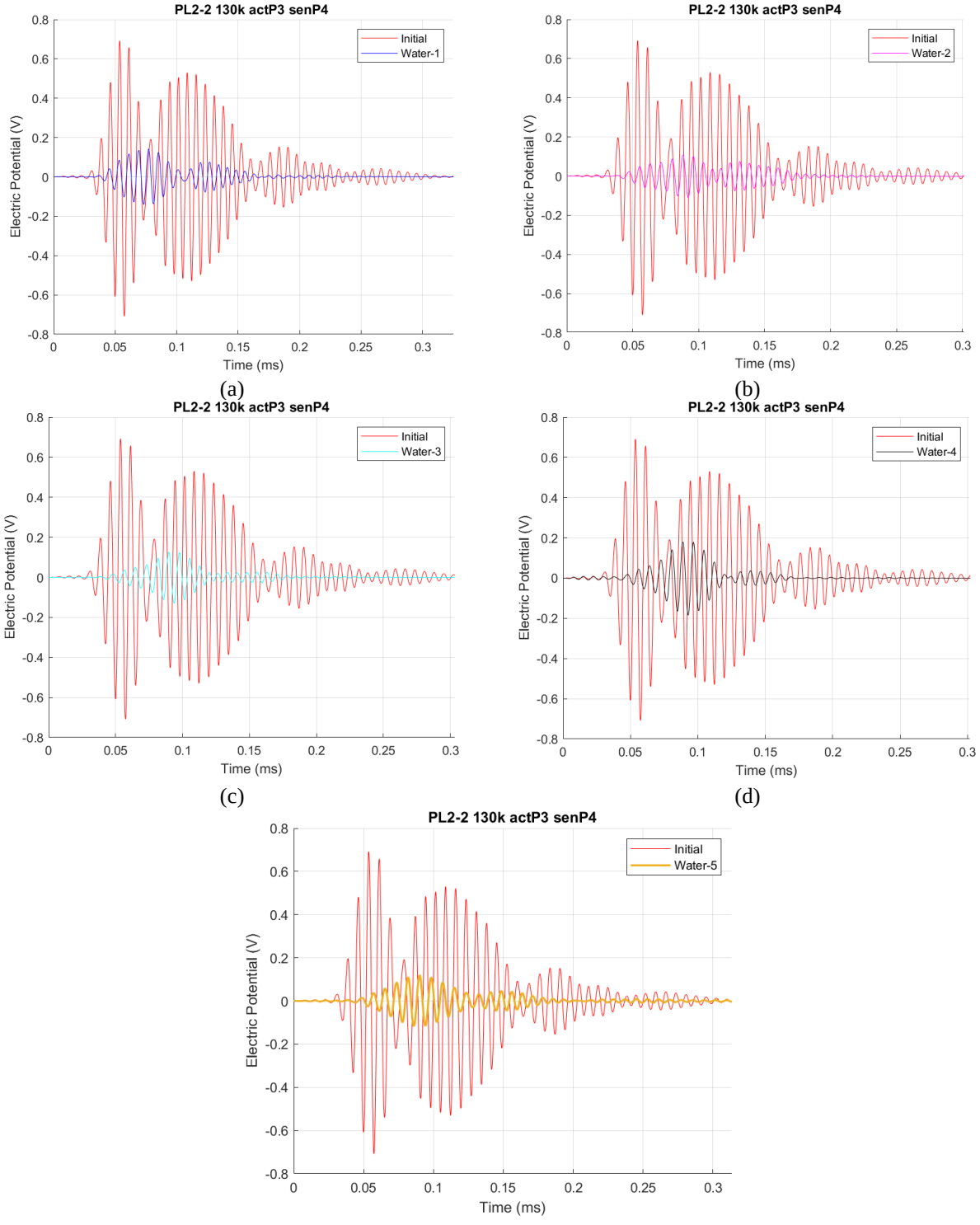
Appendix A Figure 18: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 185kHz.*



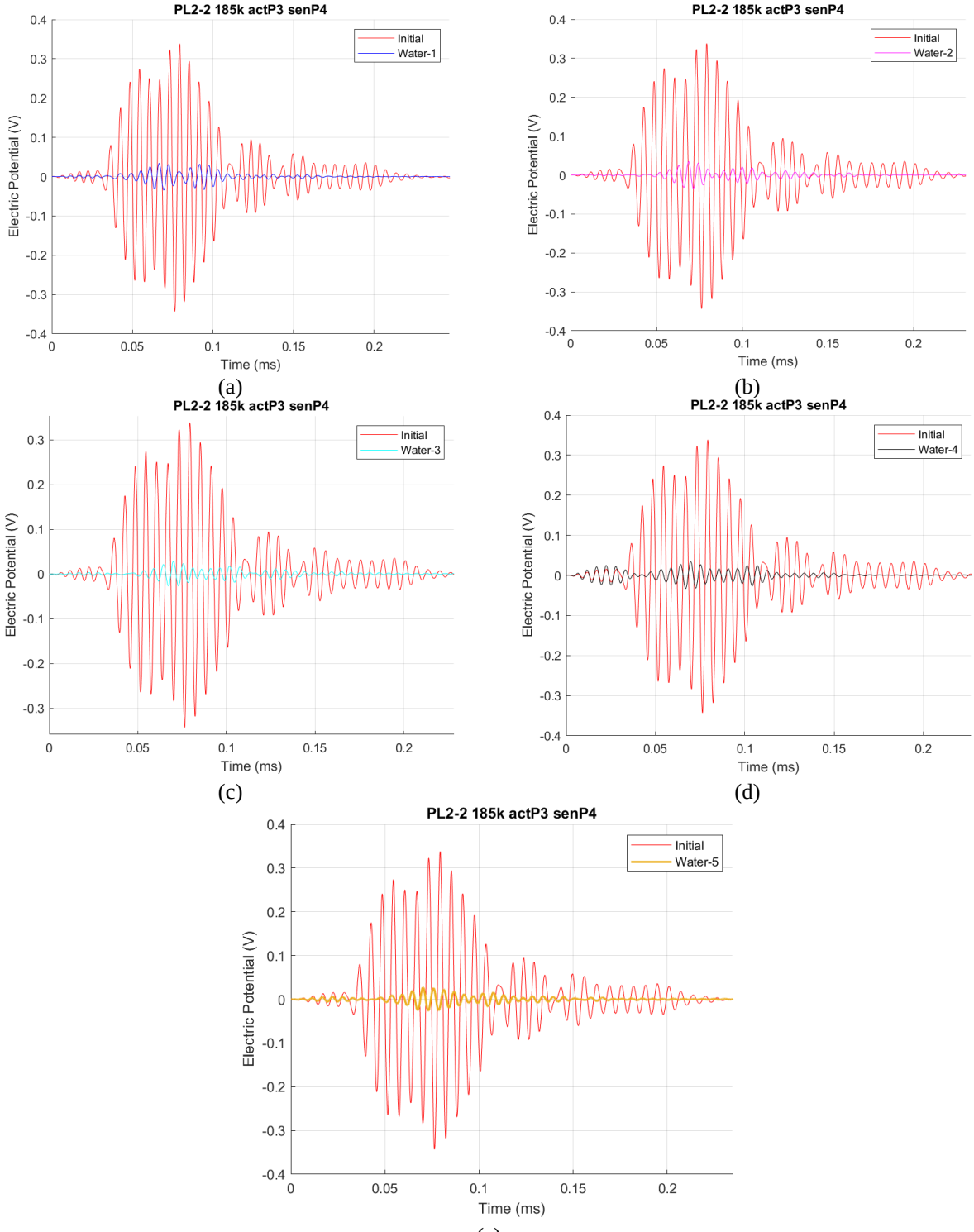
Appendix A Figure 19: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.*



Appendix A Figure 20: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.*



Appendix A Figure 21: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.*

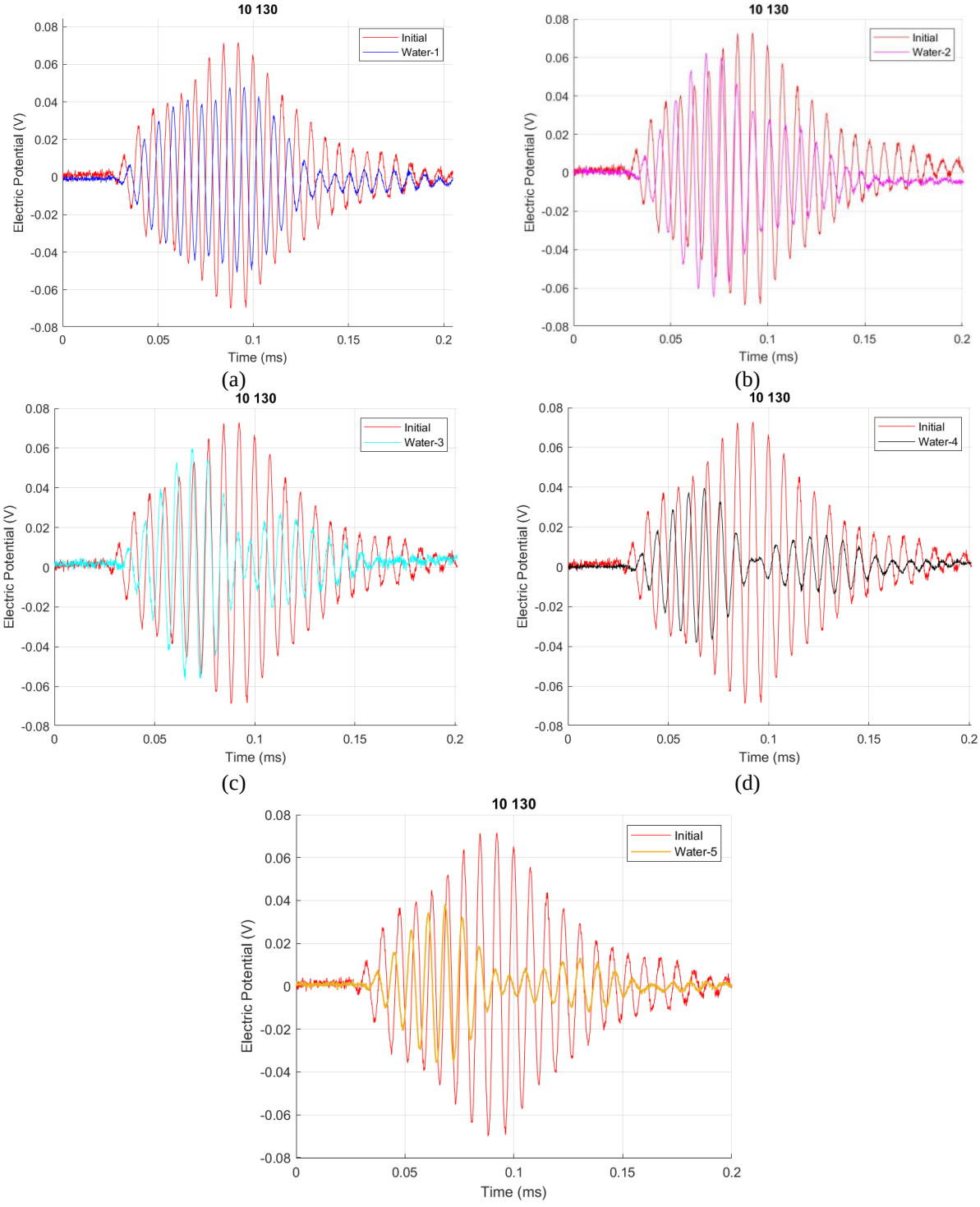


Appendix A Figure 22: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.*

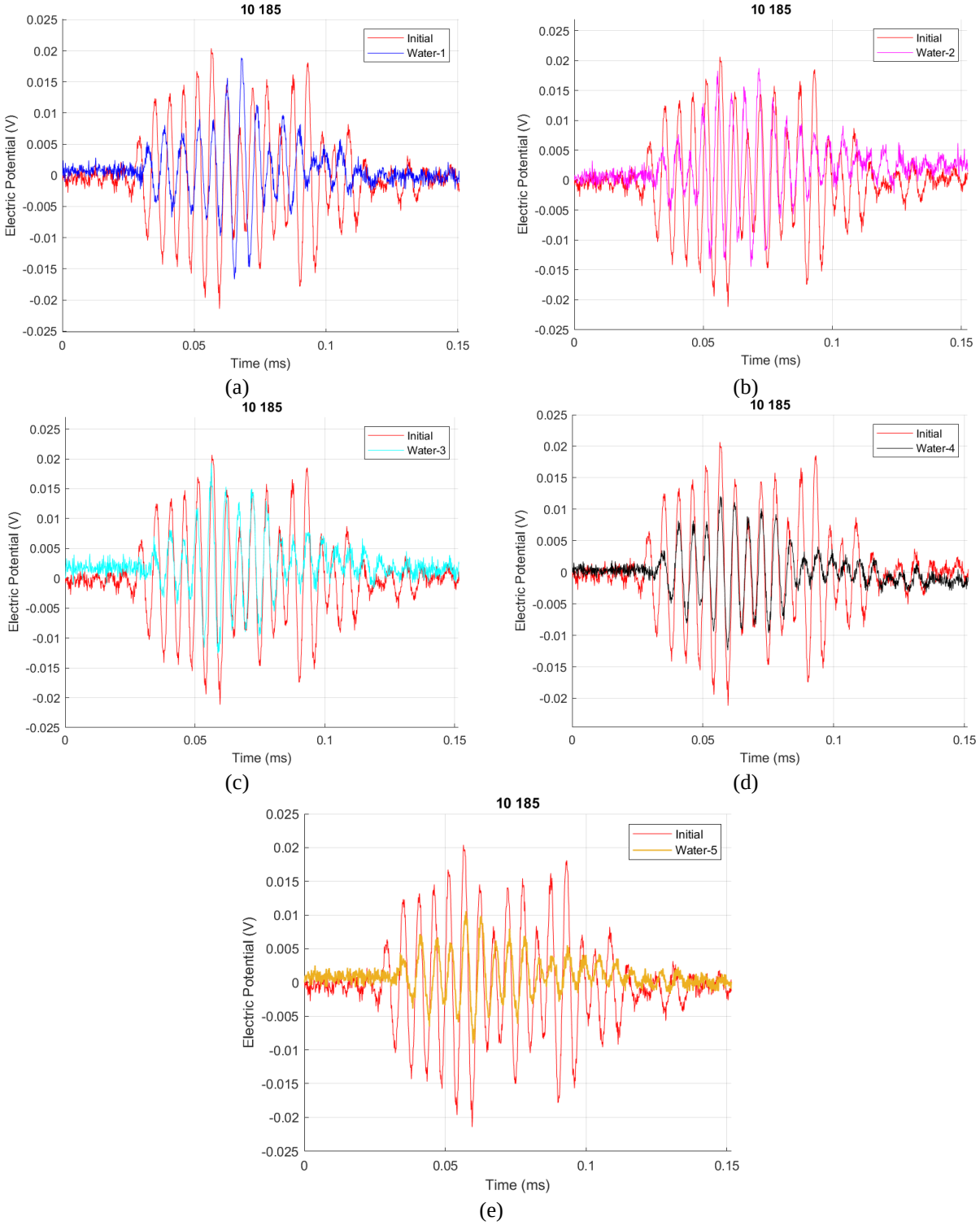
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΔΟΥ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΓΙΗ ΠΛΑΚΑ P2-2

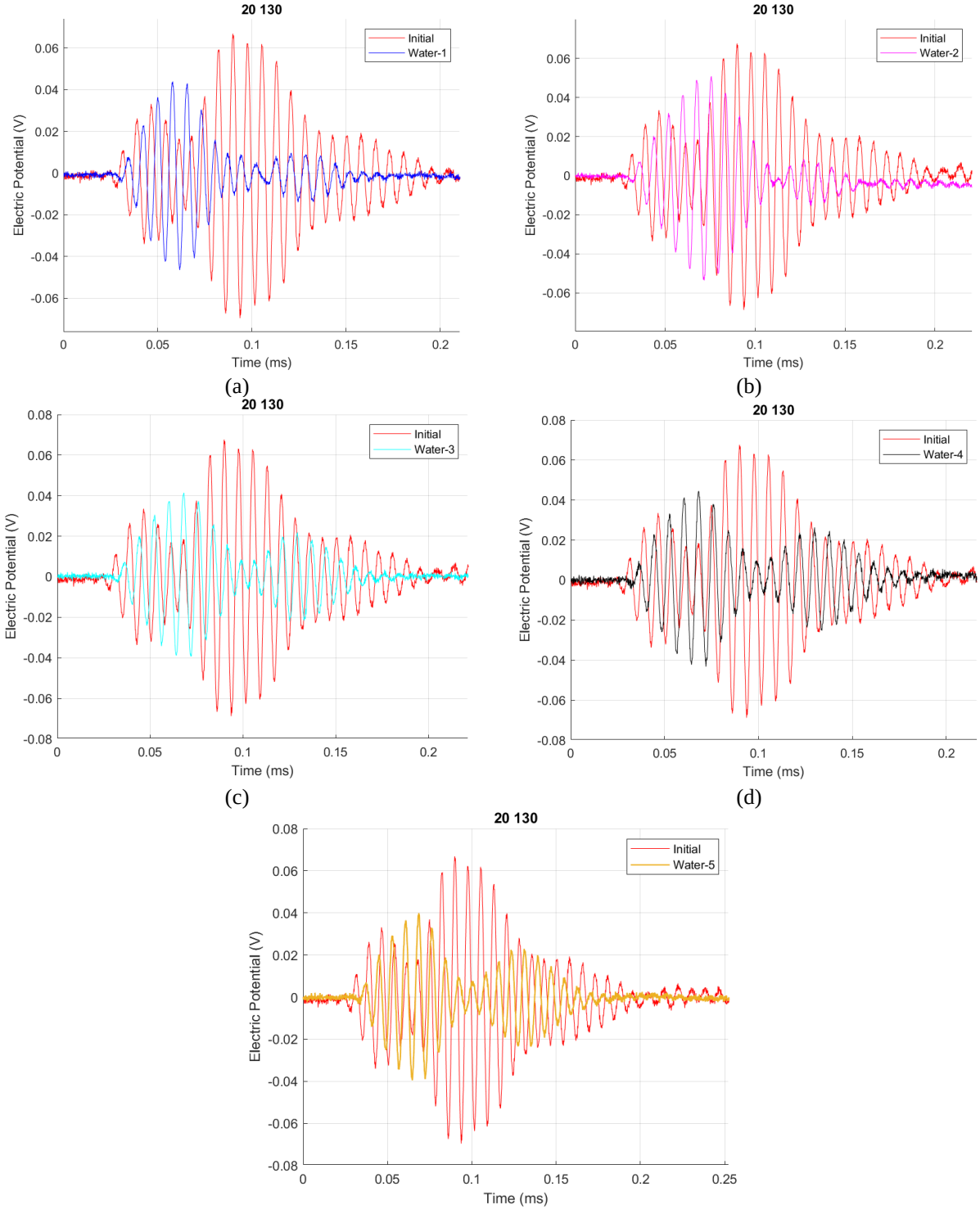
Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται τα διαγράμματα της χρονικής απόκρισης της ηλεκτρικής τάσης από 10^0 έως 90^0 για κάθε 10^0 συγκρίνοντας πάντα το Αρχικό σήμα 'Initial', απεικονιζόμενο με κόκκινο χρώμα, με το σήμα μετά από **(a)** 90 ώρες εμβάπτισης 'Water-1', **(b)** 180 ώρες εμβάπτισης 'Water-2', **(c)** 270 ώρες εμβάπτισης 'Water-3', **(d)** 360 ώρες εμβάπτισης 'Water-4', **(e)** 528 ώρες εμβάπτισης 'Water-5'.



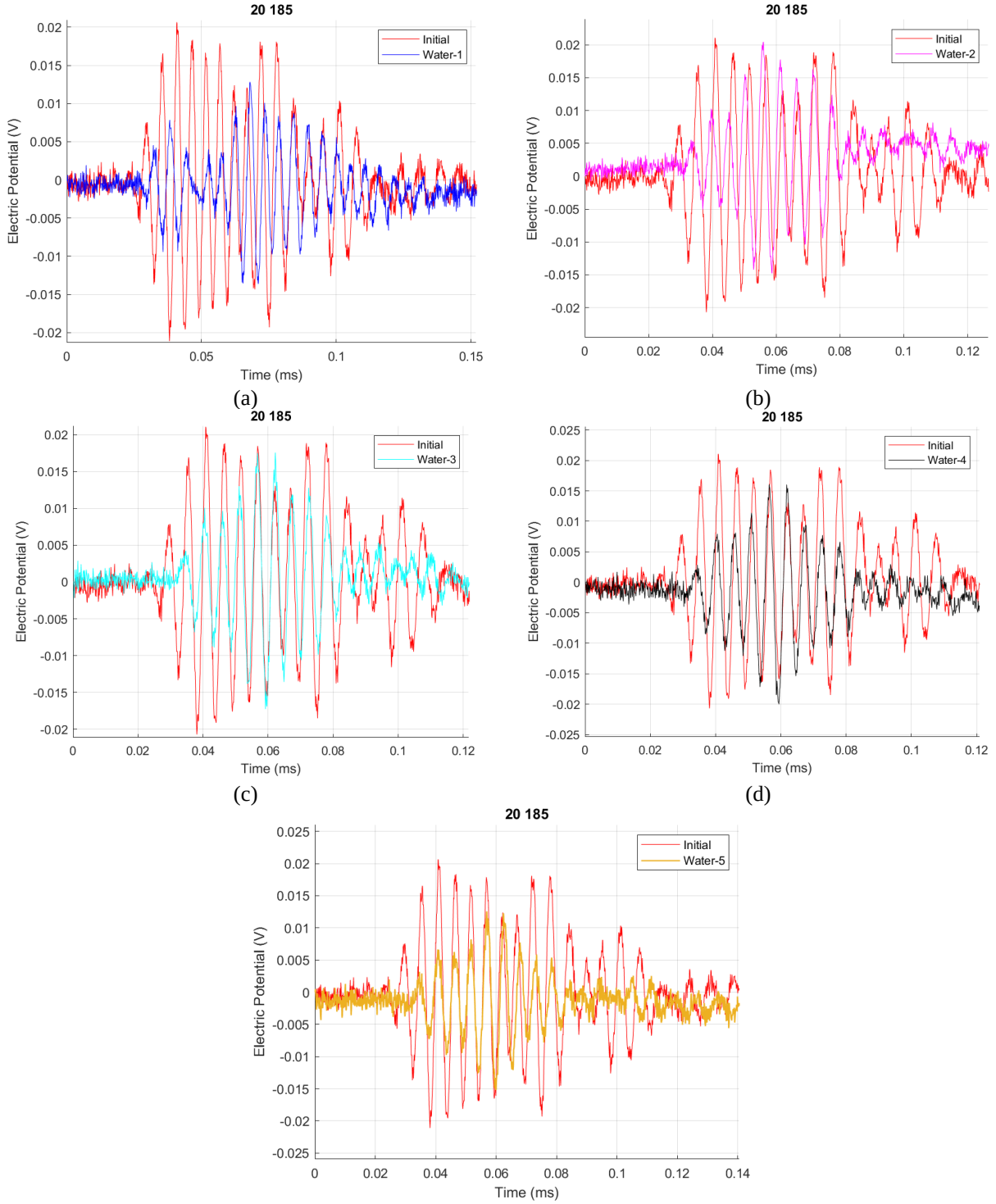
Appendix B Figure 1: Μετρήσεις κατεύθυνσης 10^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.*



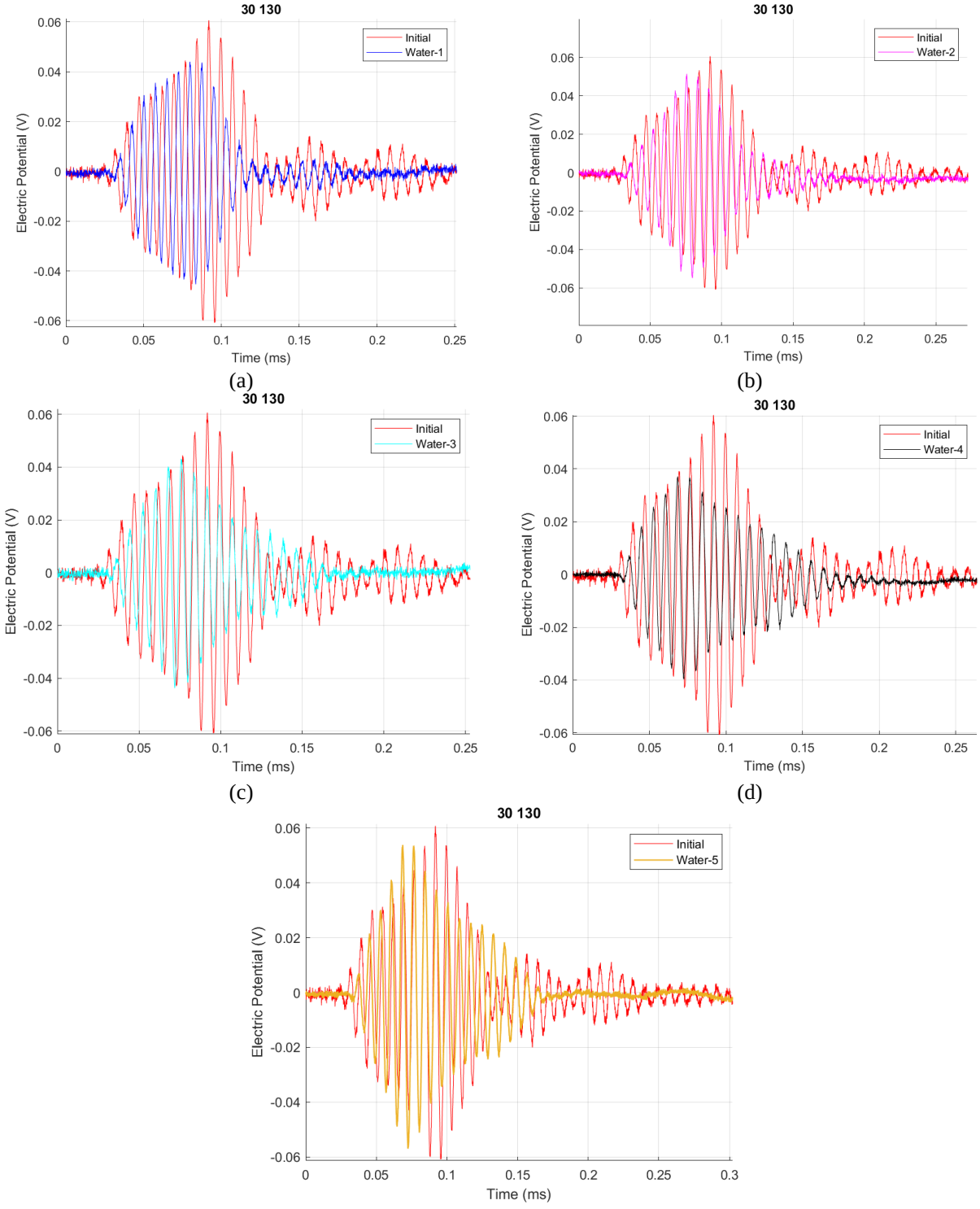
Appendix B Figure 2: Μετρήσεις κατεύθυνσης 10^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.*



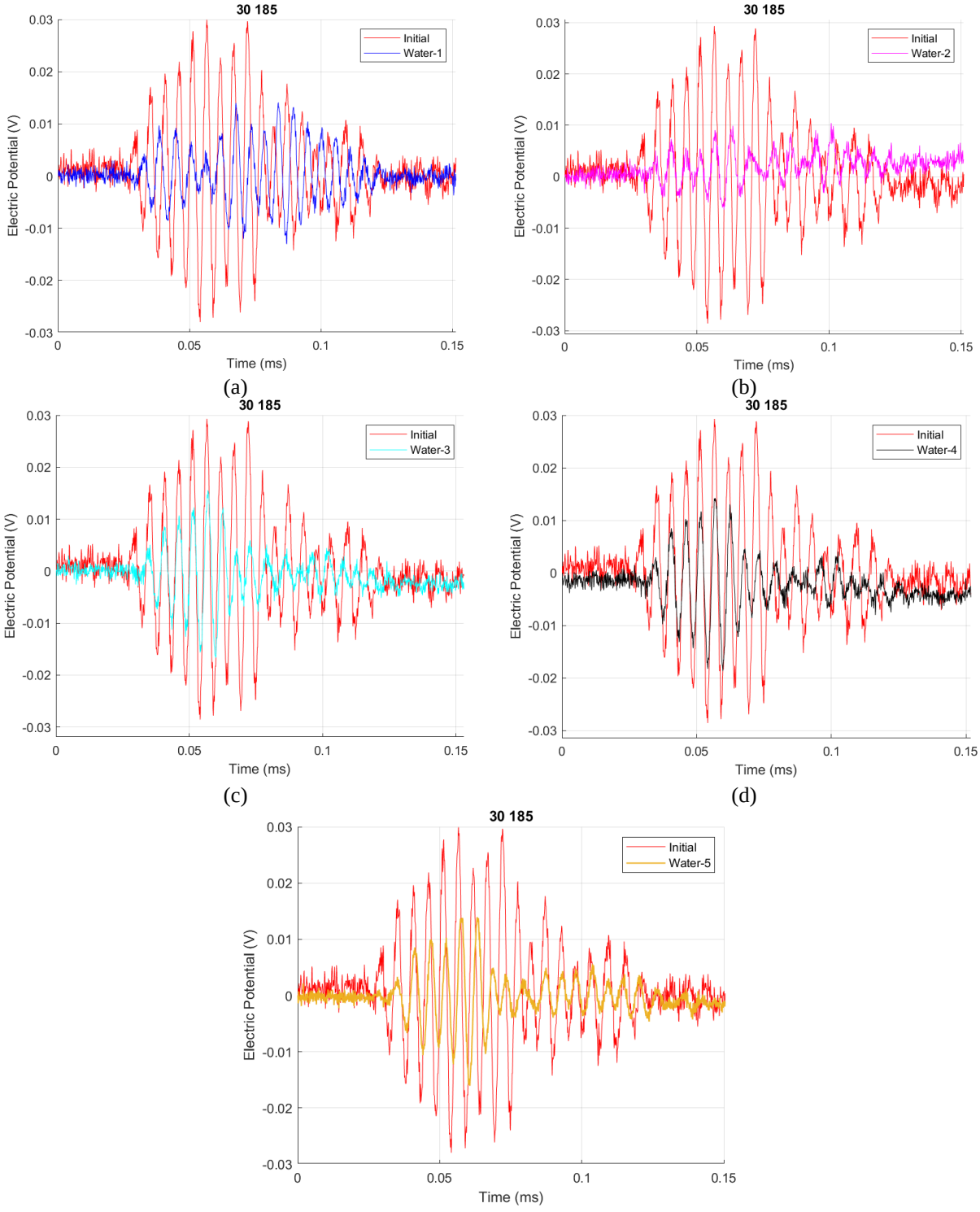
Appendix B Figure 3: Μετρήσεις κατεύθυνσης 20^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.*



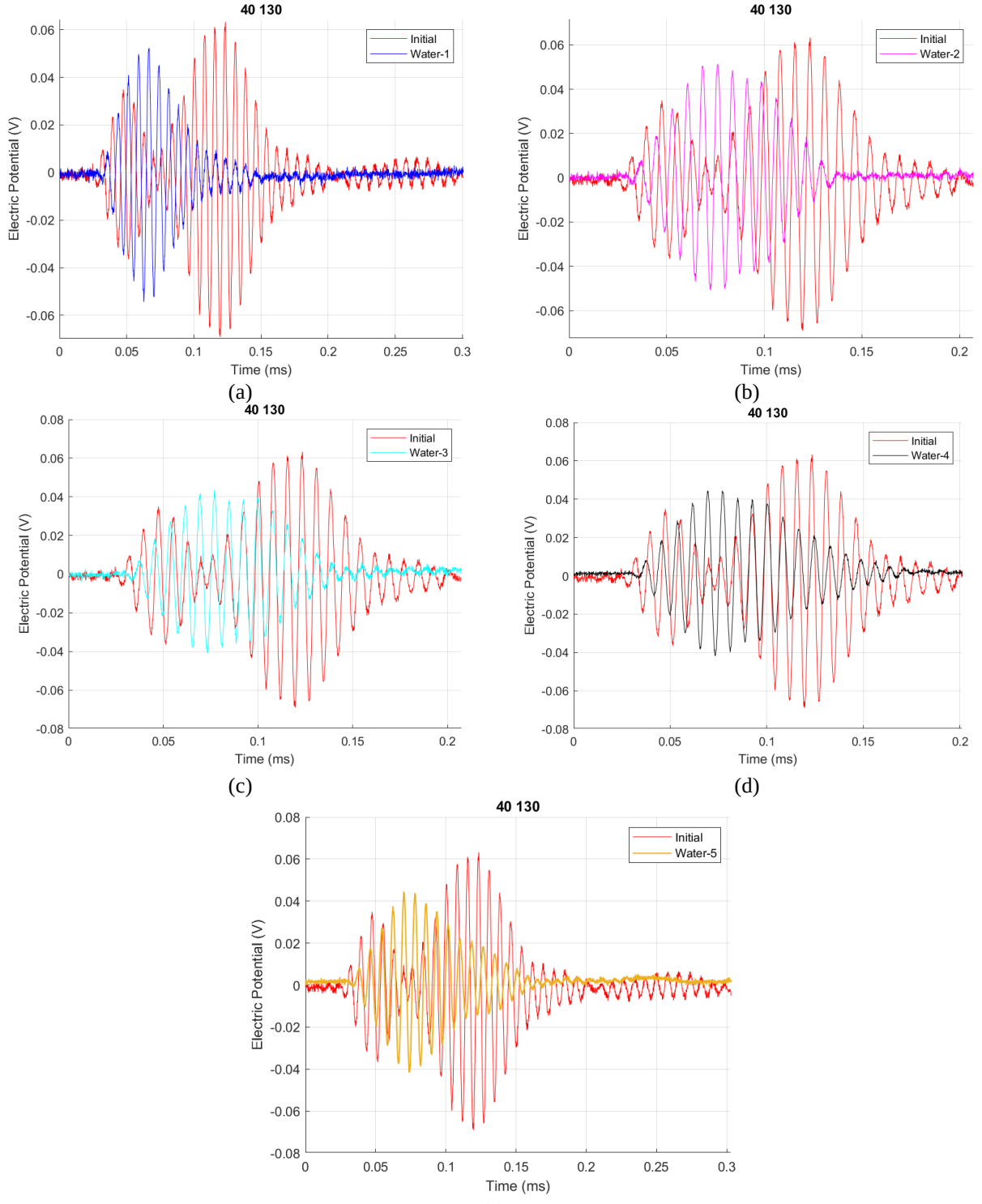
Appendix B Figure 4: Μετρήσεις κατεύθυνσης 20^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.*



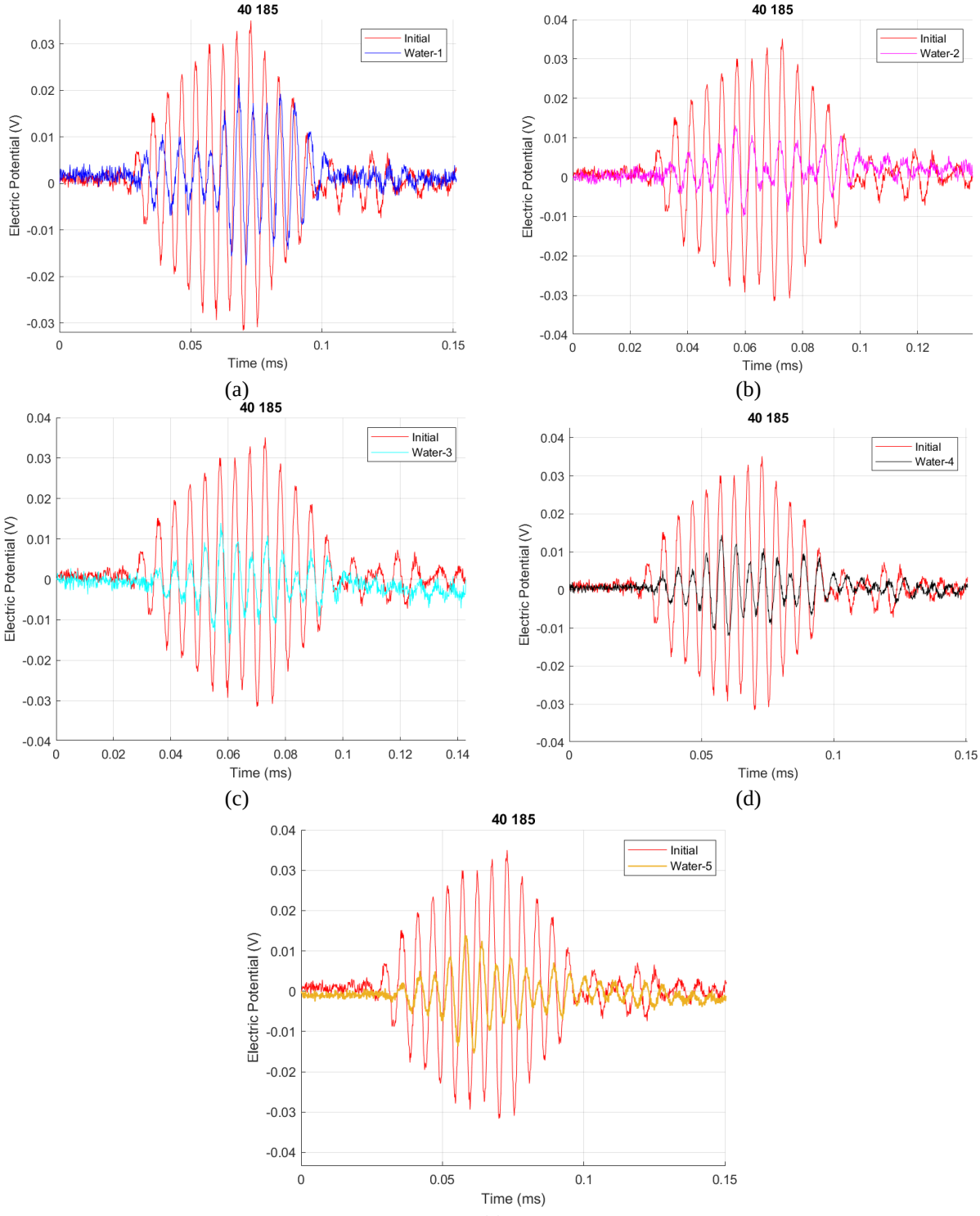
Appendix B Figure 5: Μετρήσεις κατεύθυνσης 30^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.*



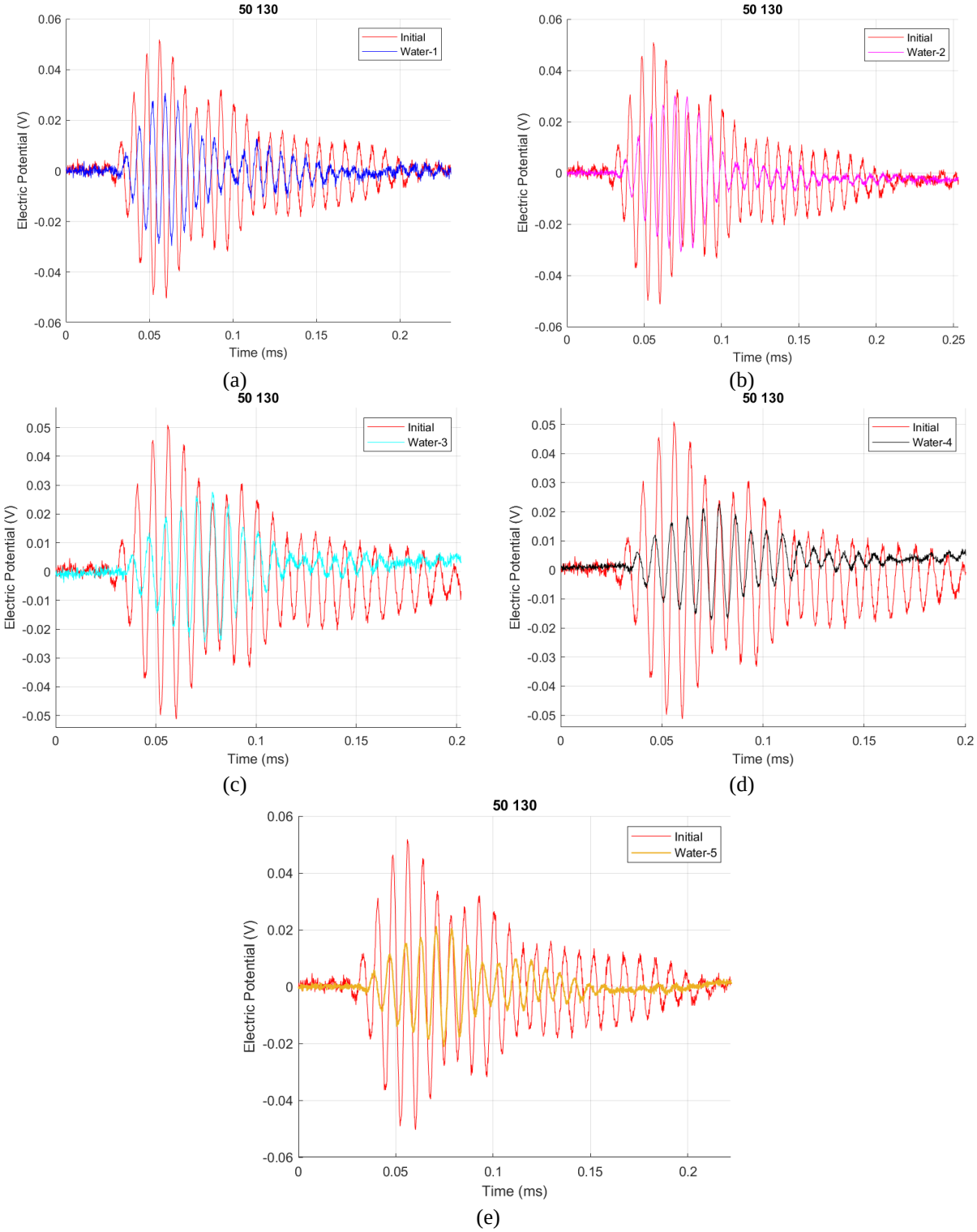
Appendix B Figure 6: Μετρήσεις κατεύθυνσης 30^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.*



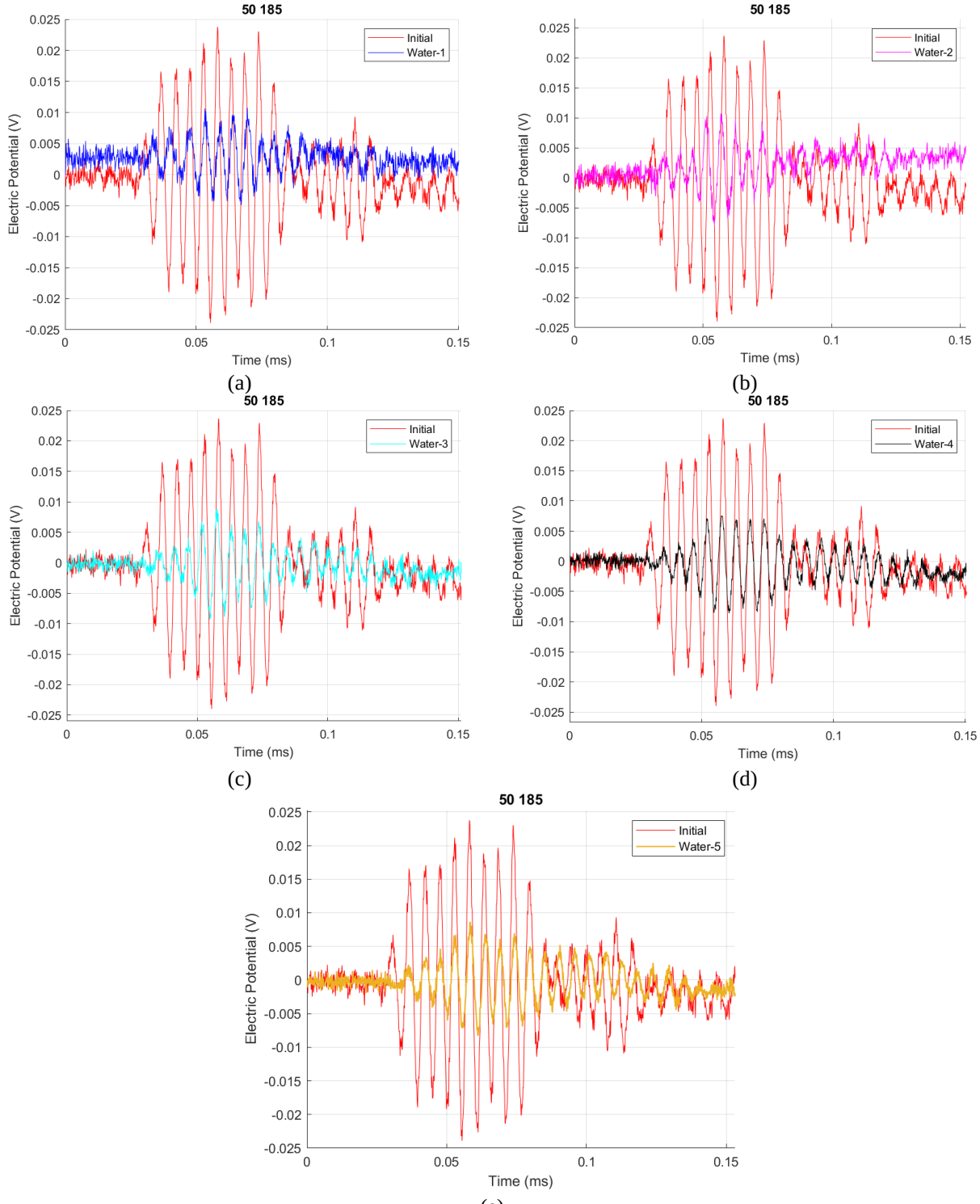
Appendix B Figure 7: Μετρήσεις κατεύθυνσης 40^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.*



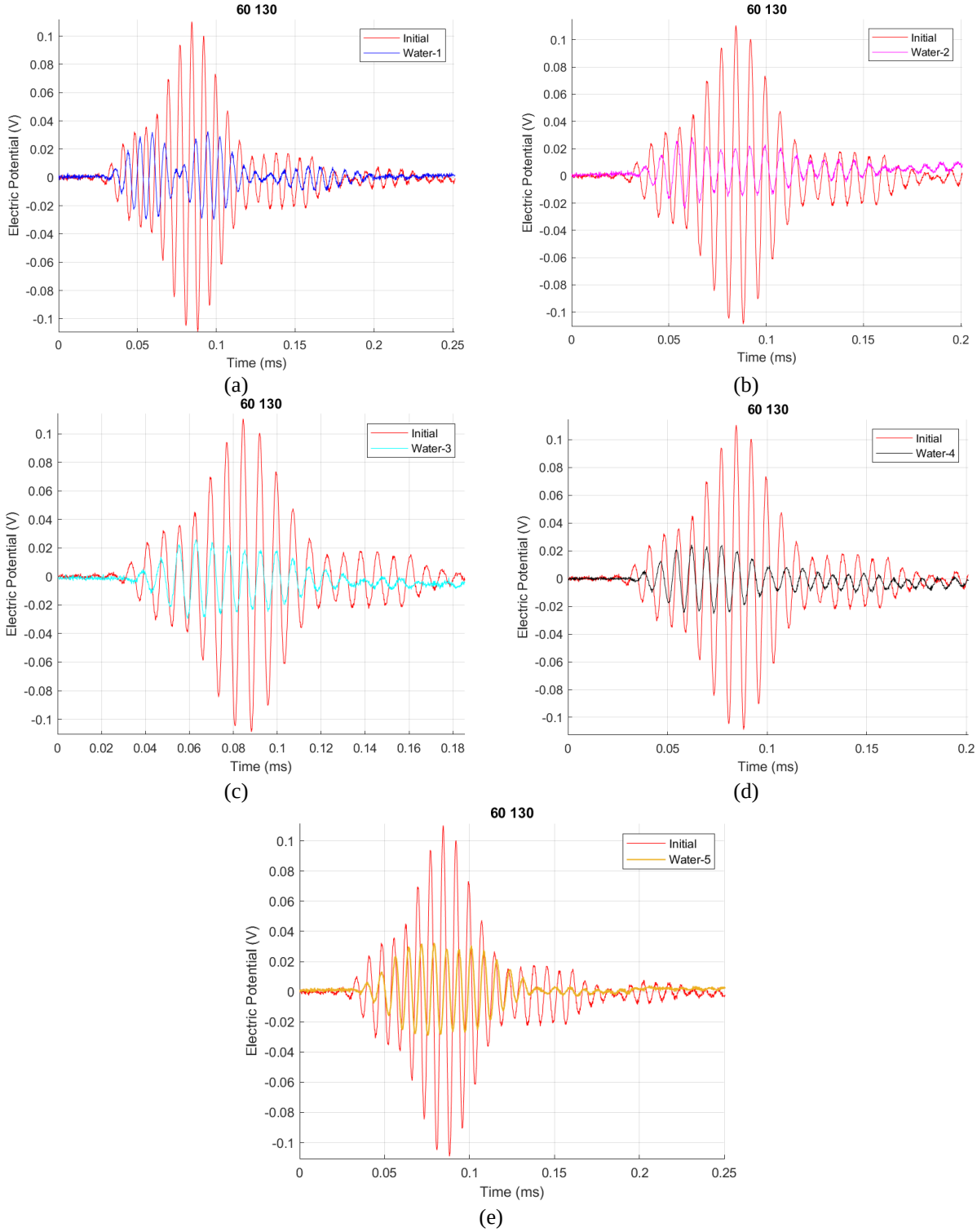
Appendix B Figure 8: Μετρήσεις κατεύθυνσης 40^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.*



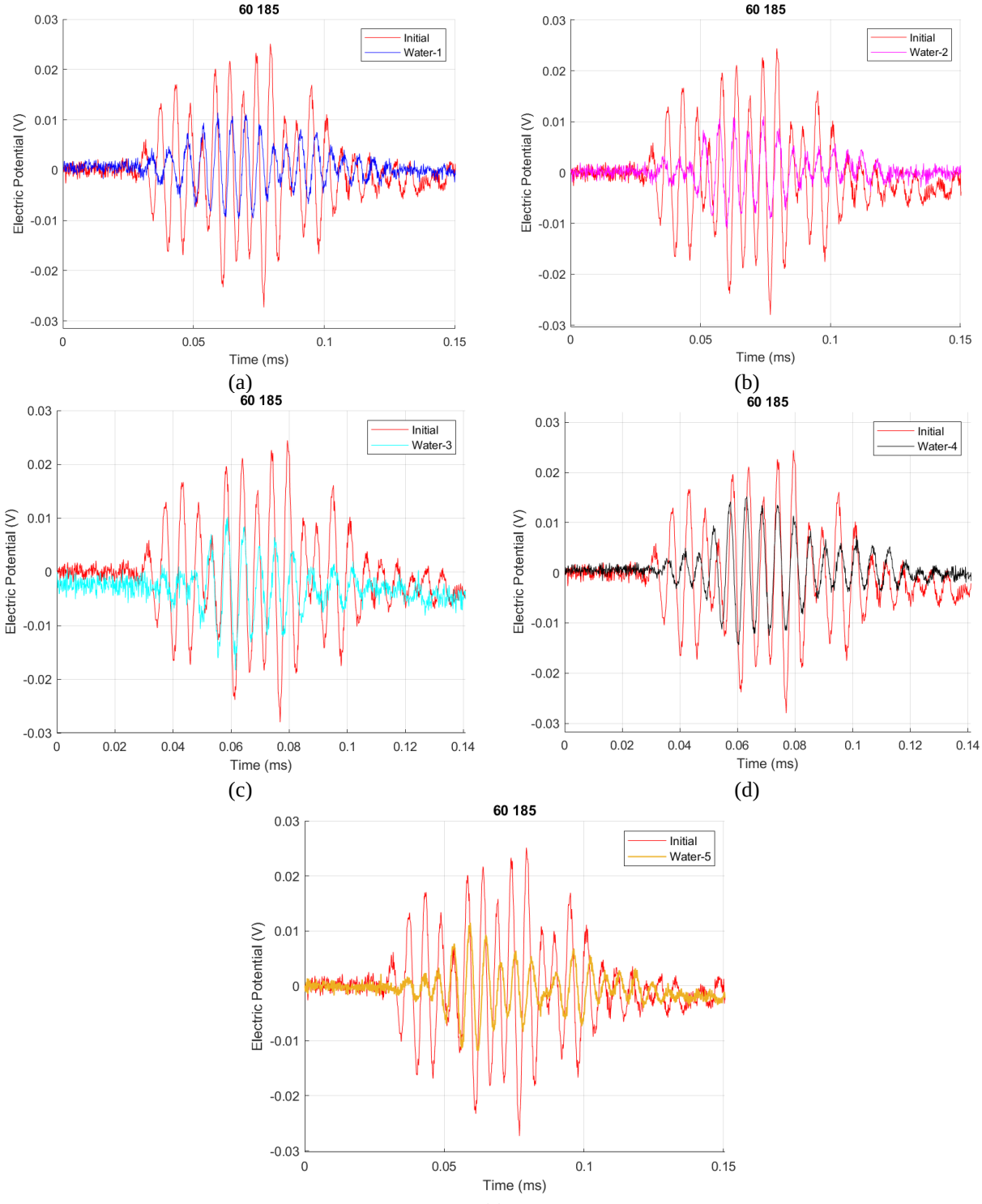
Appendix B Figure 9: Μετρήσεις κατεύθυνσης 50^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.*



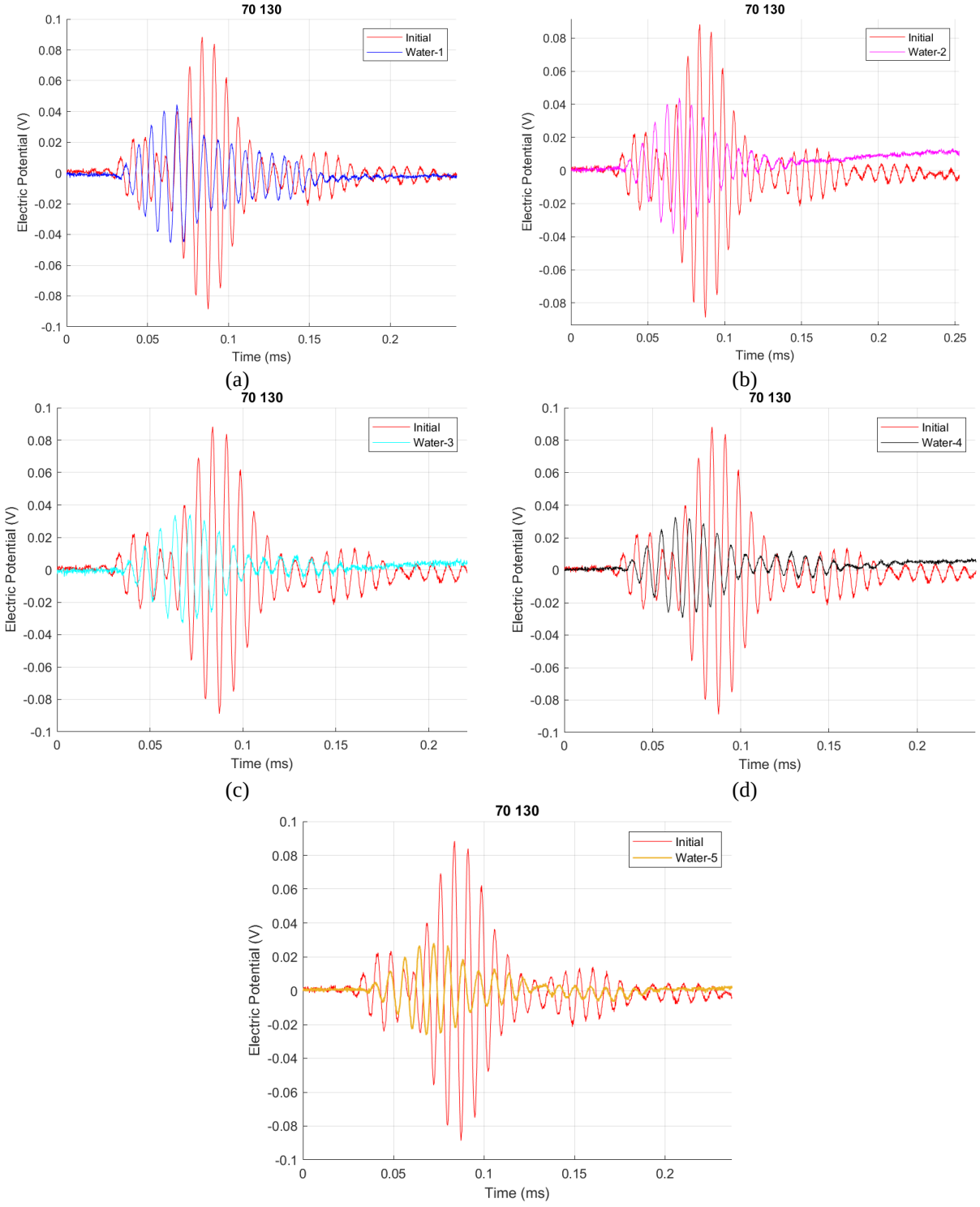
Appendix B Figure 10: Μετρήσεις κατεύθυνσης 50^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.*



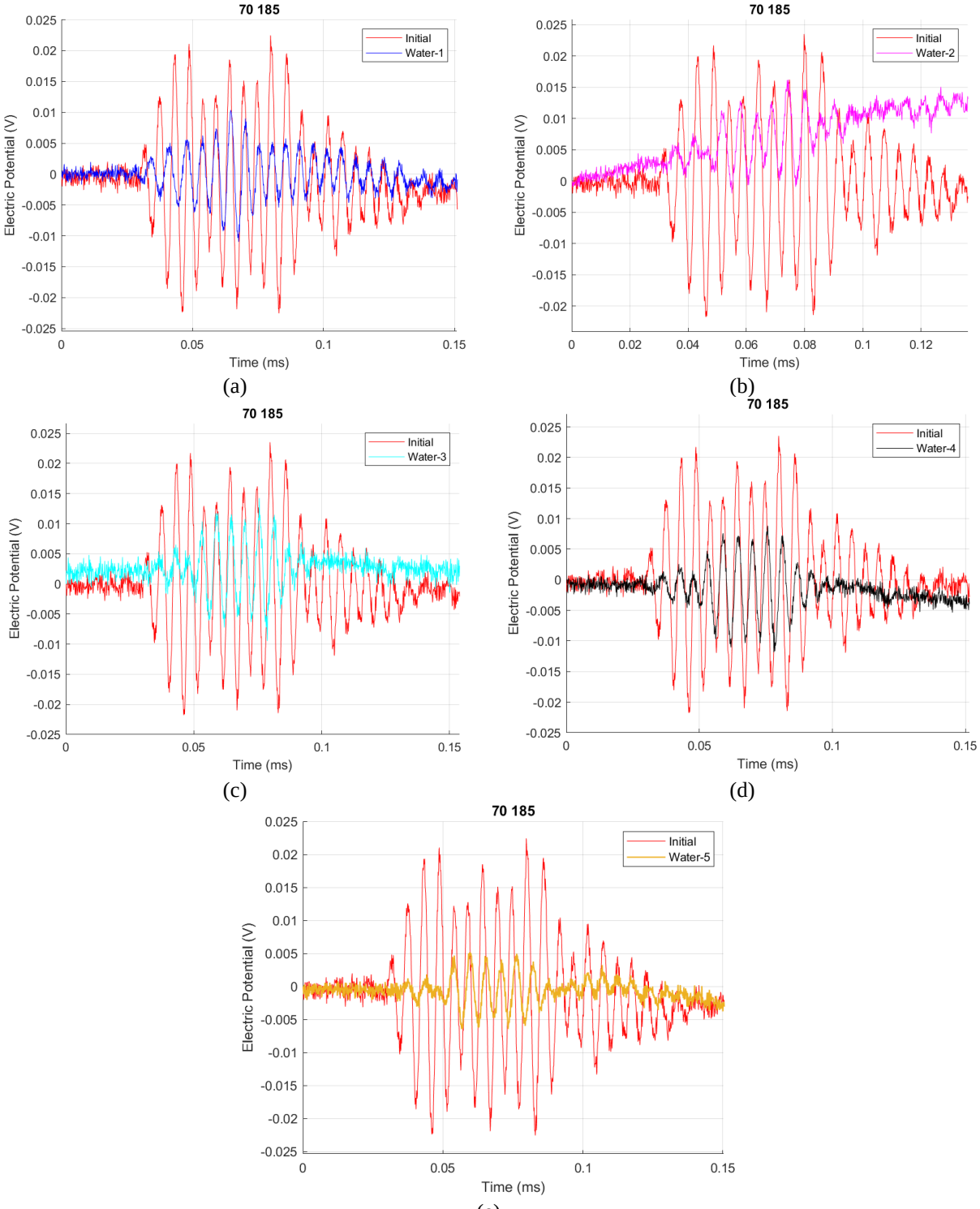
Appendix B Figure 11: Μετρήσεις κατεύθυνσης 60^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.*



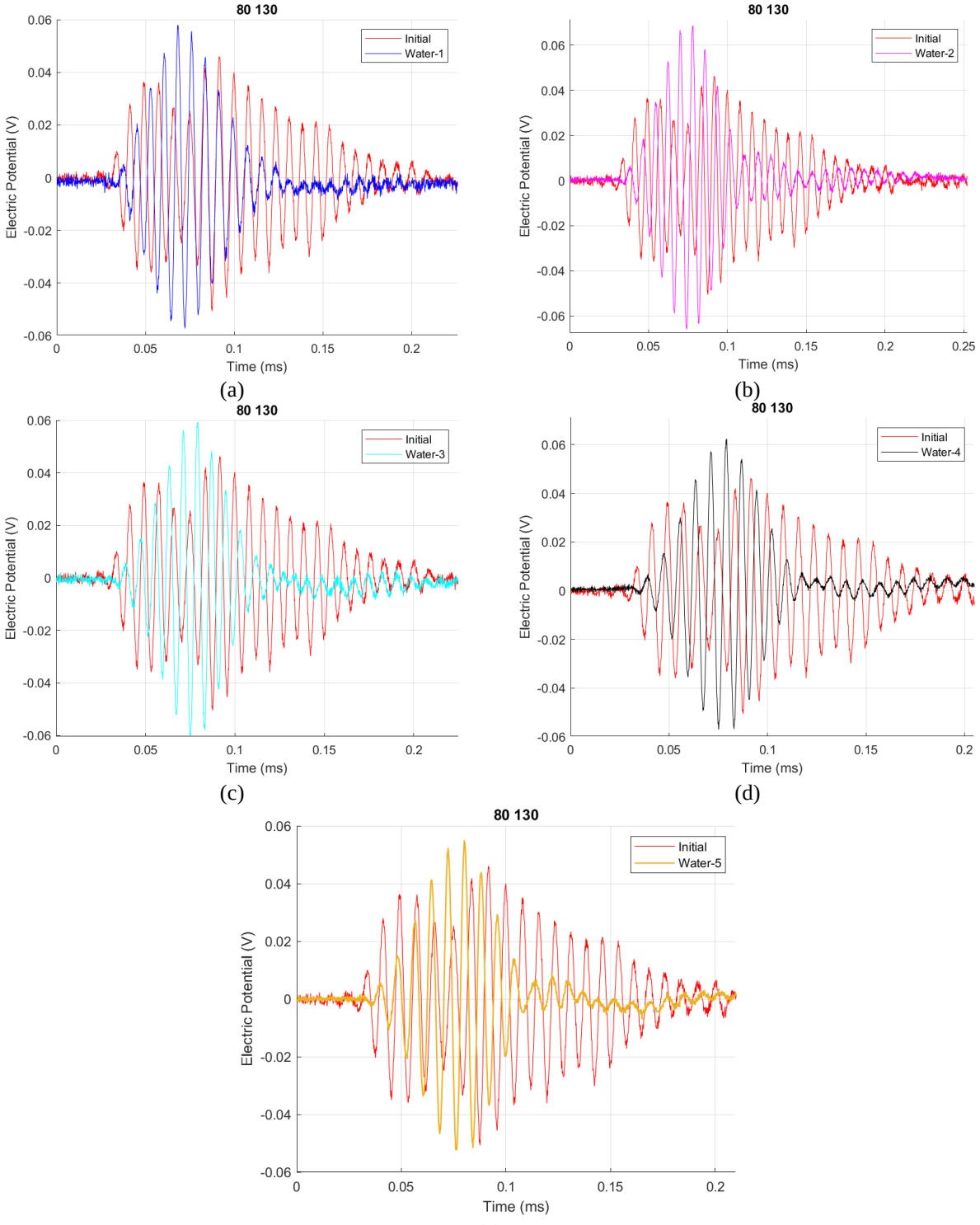
Appendix B Figure 12: Μετρήσεις κατεύθυνσης 60^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.*



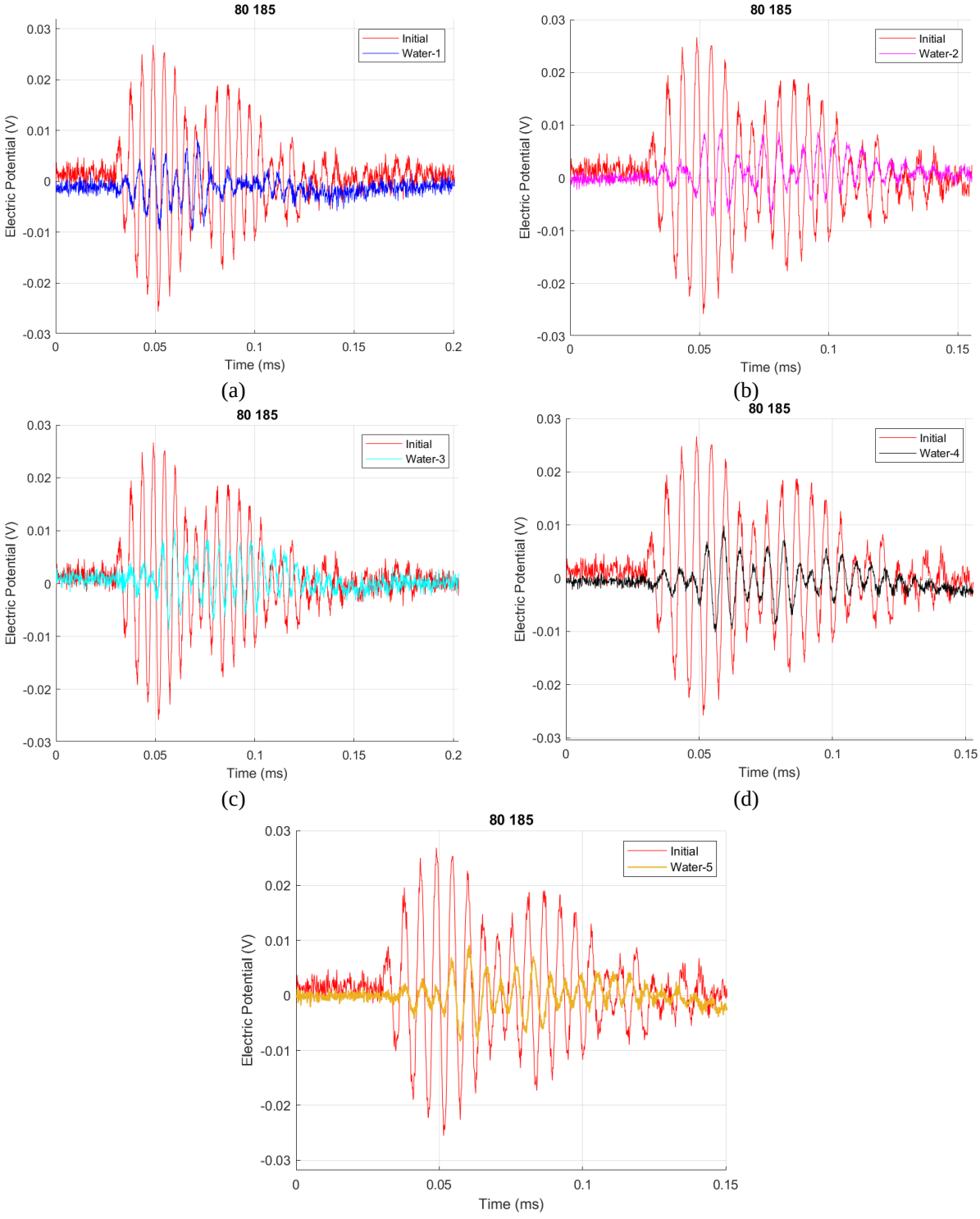
Appendix B Figure 13: Μετρήσεις κατεύθυνσης 70^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.*



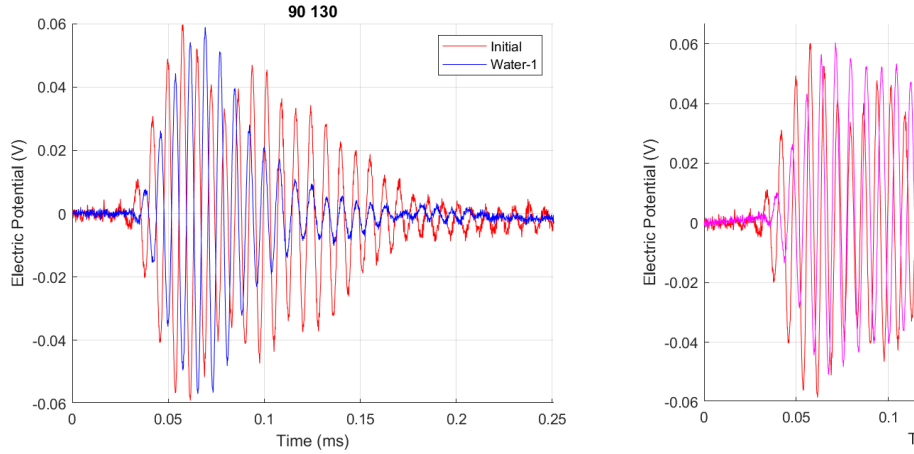
Appendix B Figure 14: Μετρήσεις κατεύθυνσης 70^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.*



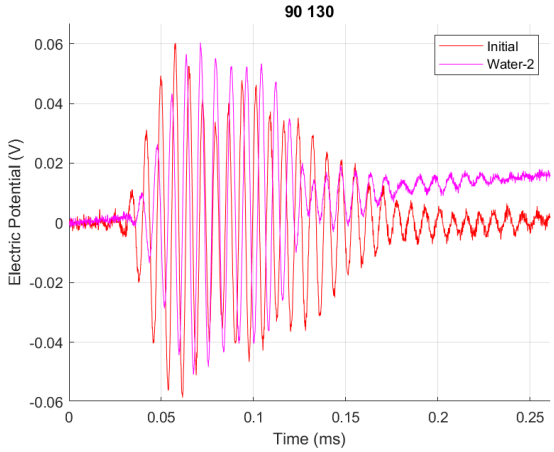
Appendix B Figure 15: Μετρήσεις κατεύθυνσης 80^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.*



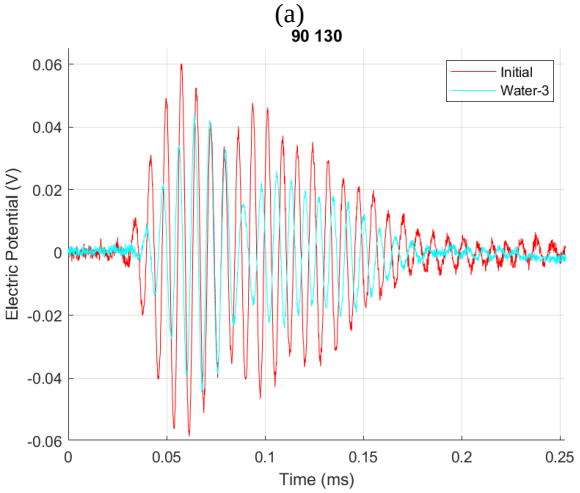
Appendix B Figure 16: Μετρήσεις κατεύθυνσης 80^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.*



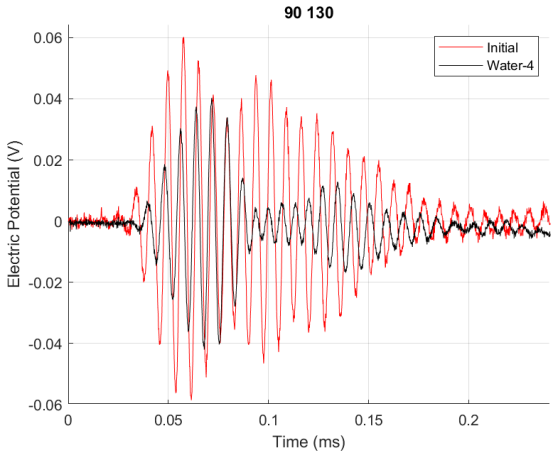
(a)



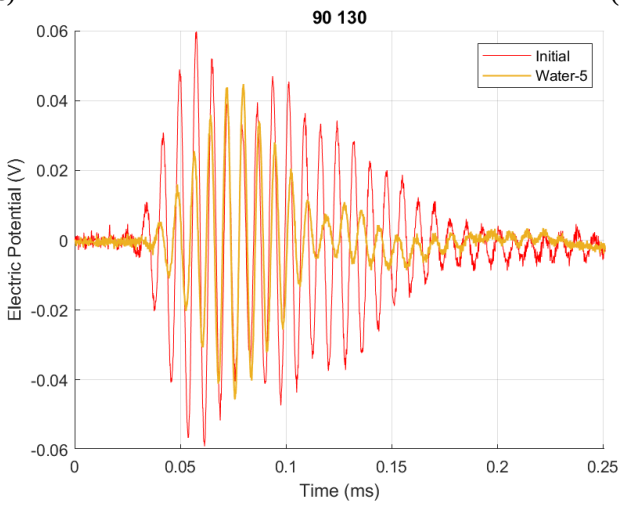
(b)



(c)

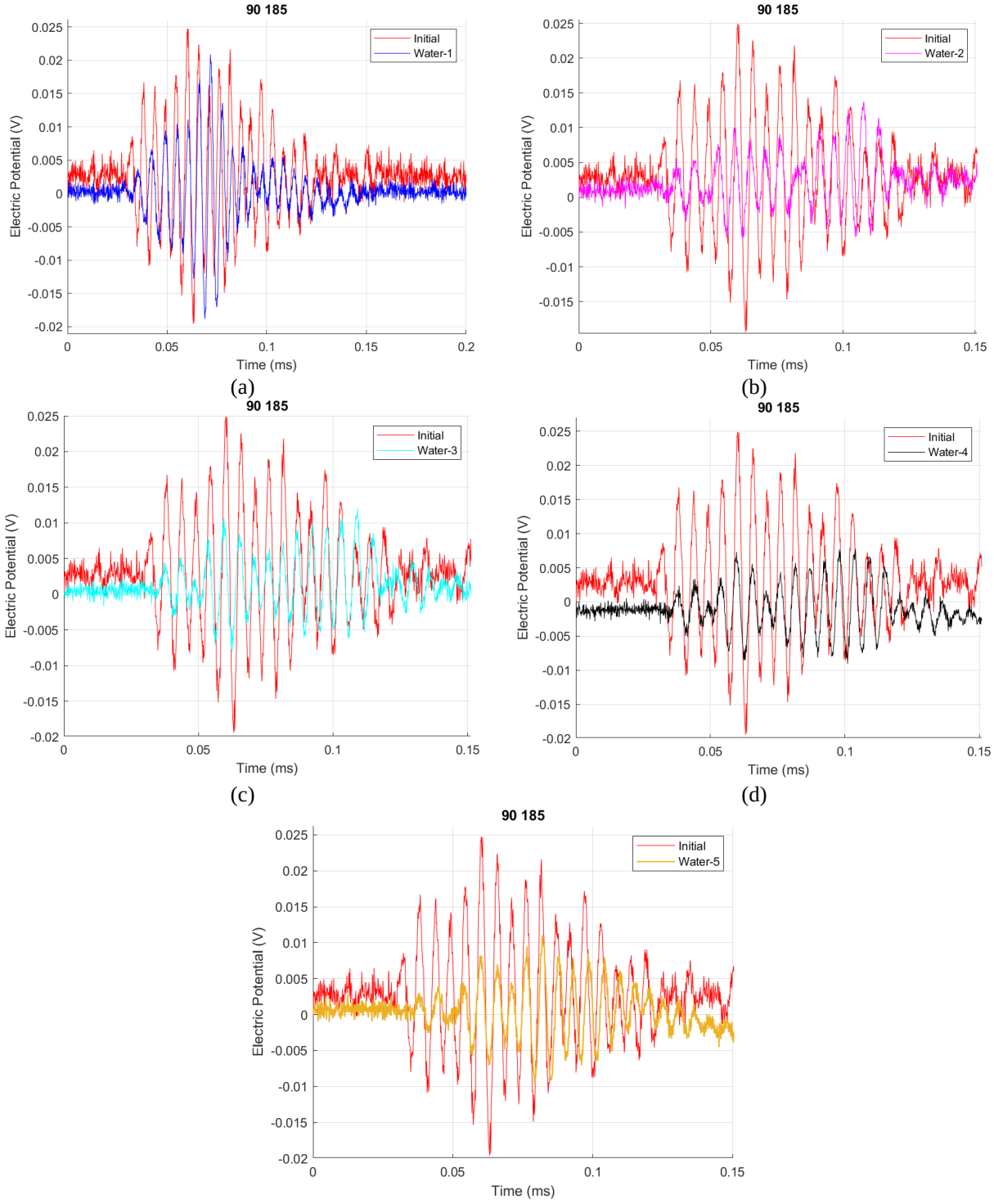


(d)



(e)

Appendix B Figure 17: Μετρήσεις κατεύθυνσης 90^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.*

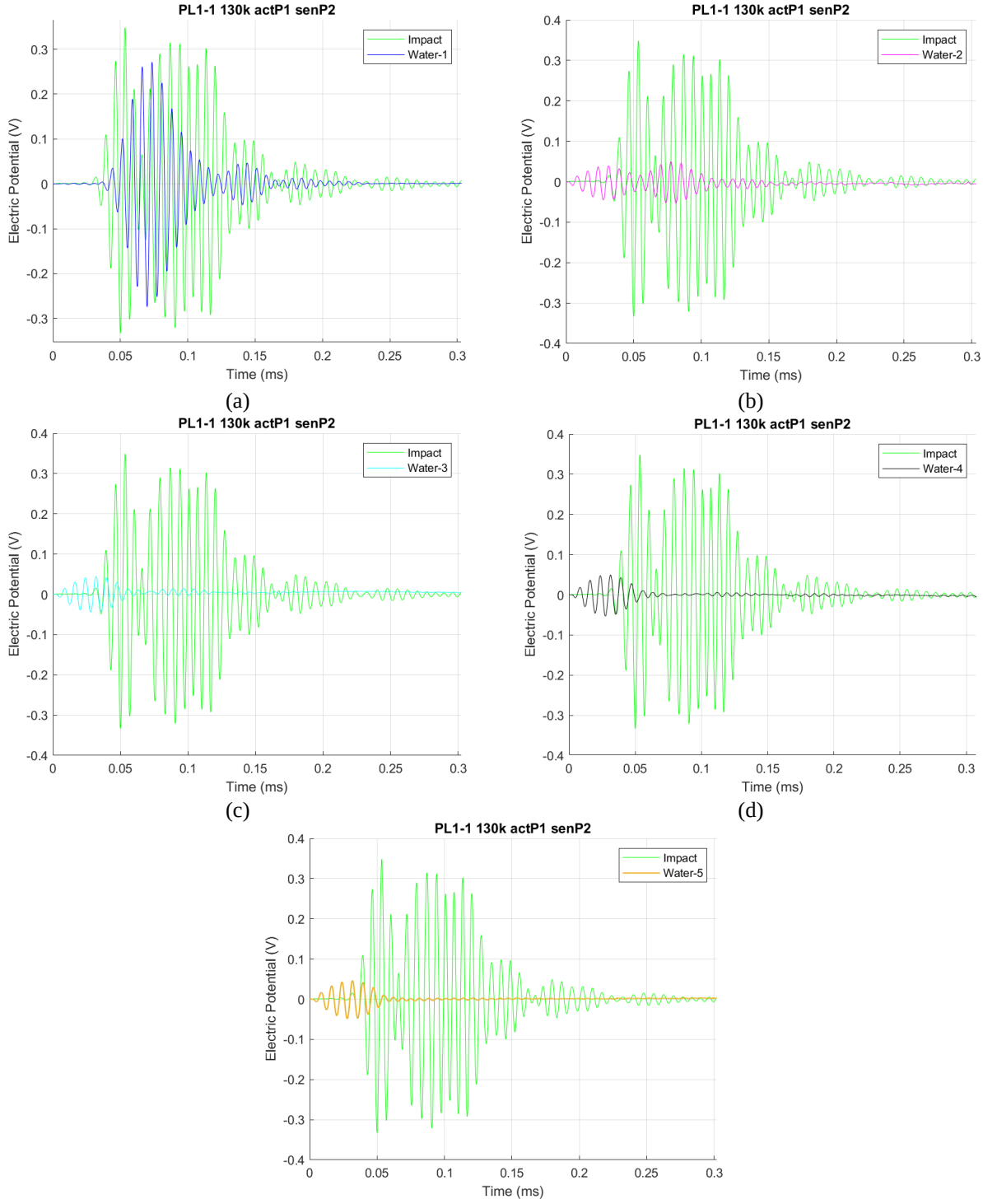


Appendix B Figure 18: Μετρήσεις κατεύθυνσης 90^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.*

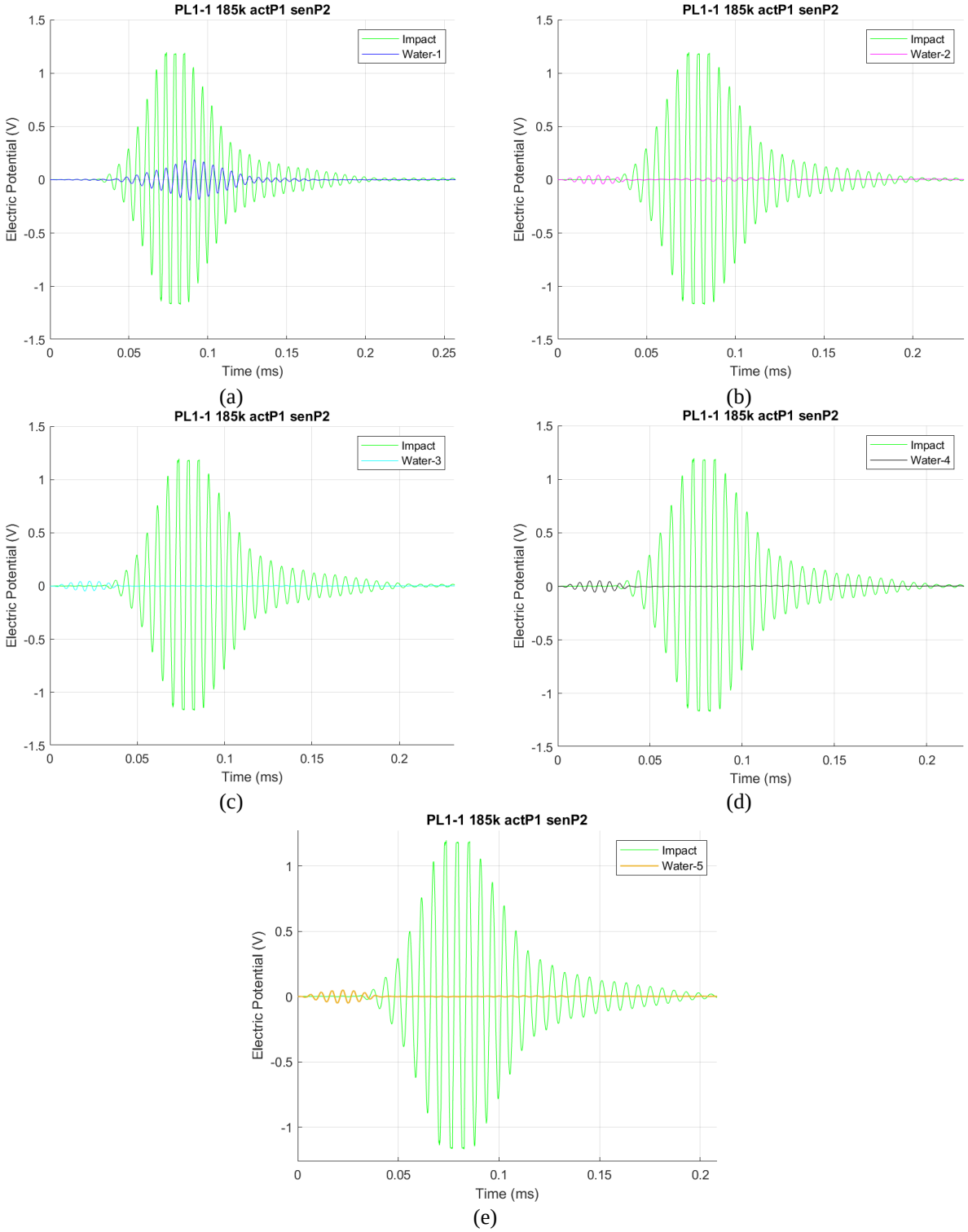
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΣΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΡΟΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΔΟΥ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΛΑΚΕΣ ΜΕ ΖΗΜΙΑ P1-1 & P2-1

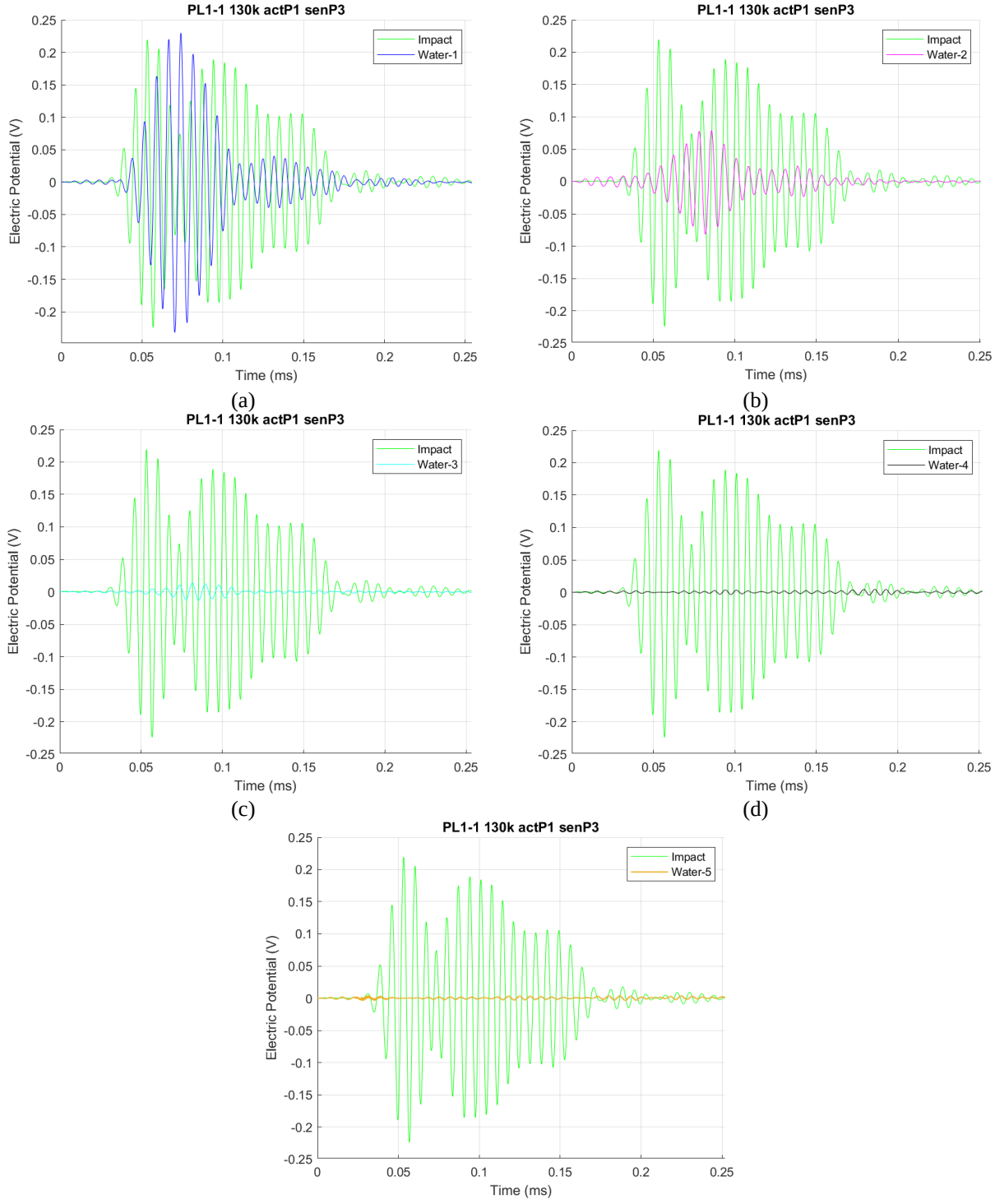
Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται τα διαγράμματα της χρονικής απόκρισης της ηλεκτρικής τάσης του εκάστοτε αισθητηρίου κάθε πλάκας, με μετρήσεις στις συχνότητες των 130kHz και 185kHz, συγκρίνοντας πάντα το σήμα Κρούσης 'Impact', απεικονιζόμενο με πράσινο χρώμα, με το σήμα μετά από **(a)** 90 ώρες εμβάπτισης 'Water-1', **(b)** 180 ώρες εμβάπτισης 'Water-2', **(c)** 270 ώρες εμβάπτισης 'Water-3', **(d)** 360 ώρες εμβάπτισης 'Water-4', **(e)** 528 ώρες εμβάπτισης 'Water-5'.



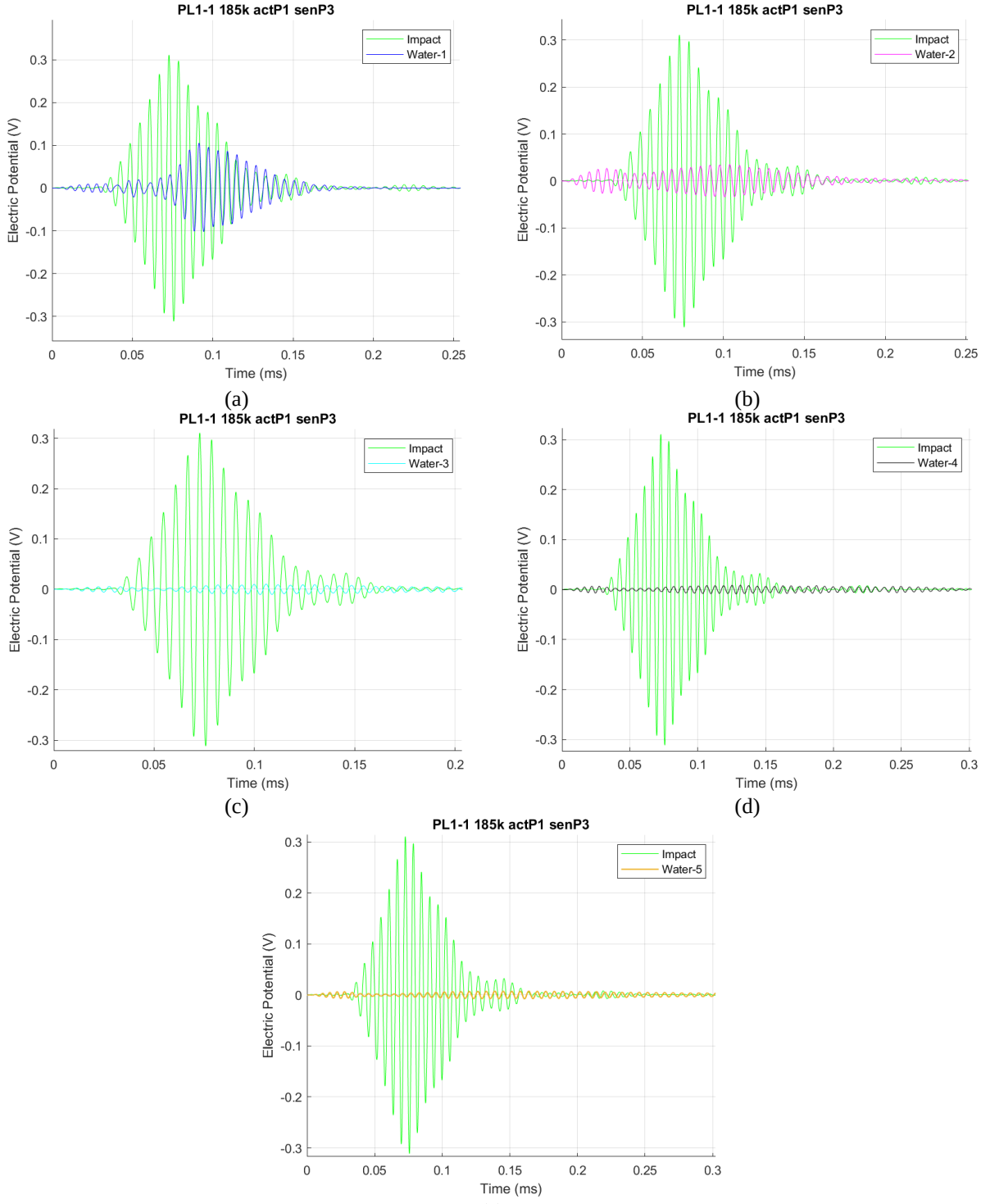
Appendix Γ Figure 1: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.*



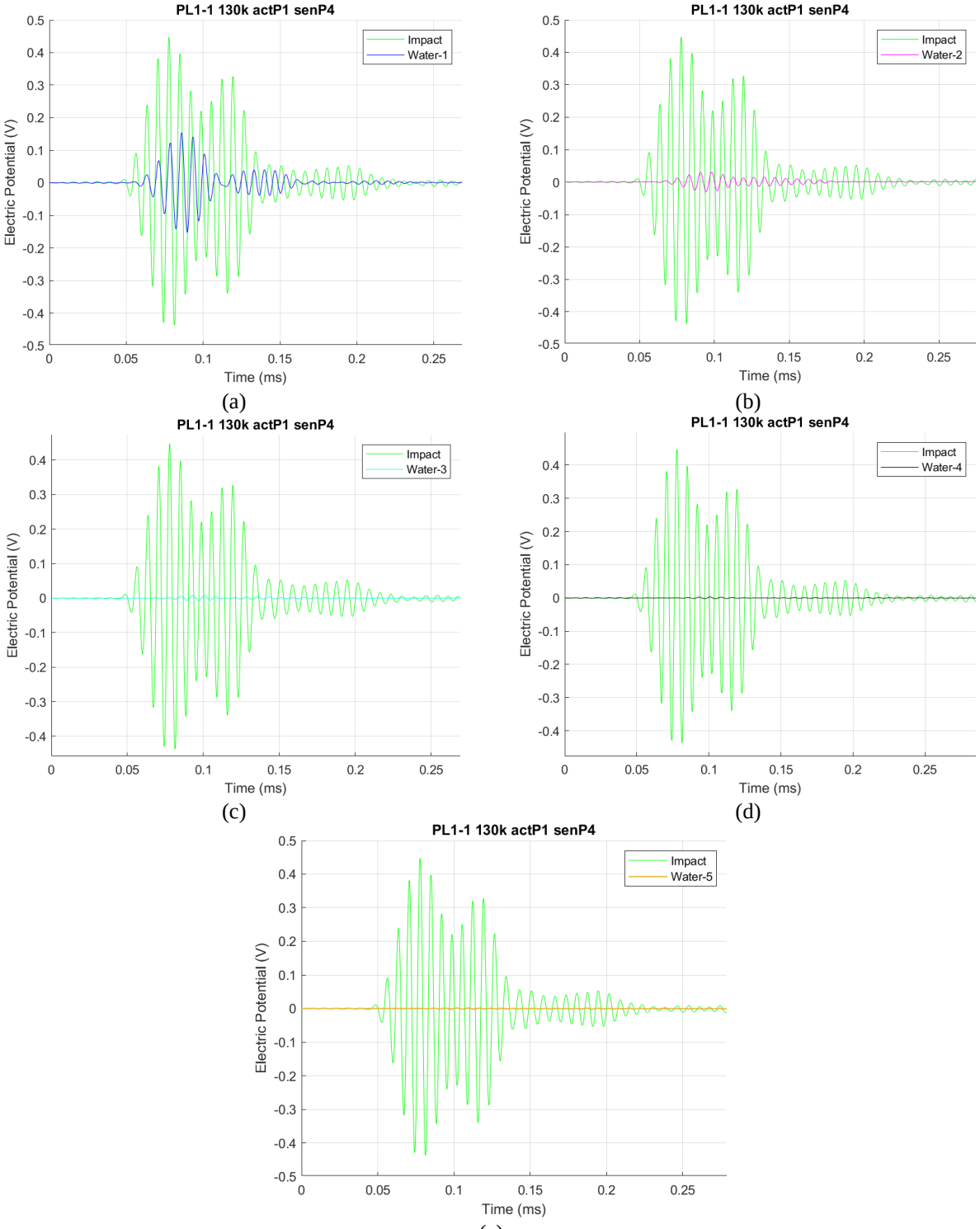
Appendix Γ Figure 2: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.*



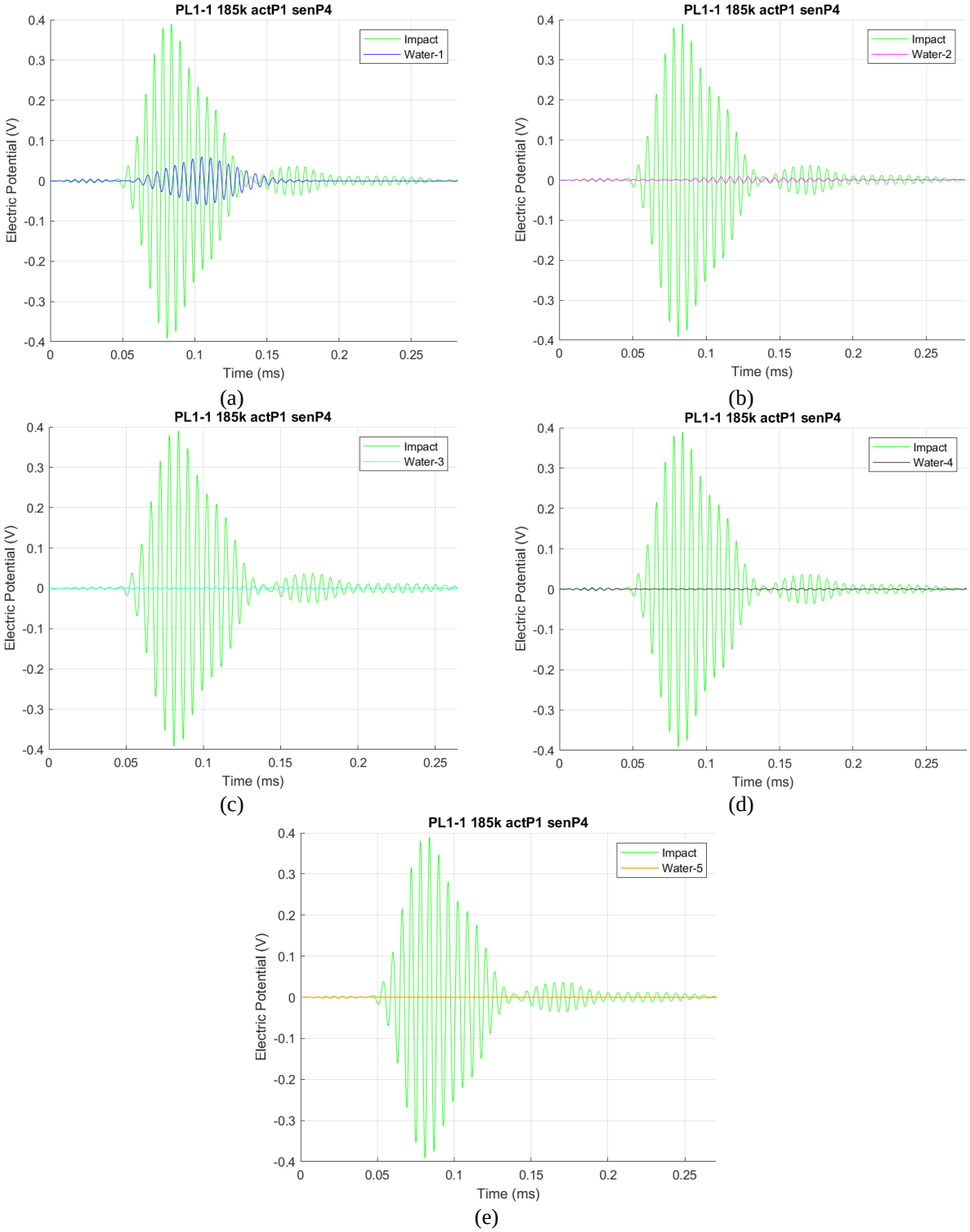
Appendix Γ Figure 3: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 130kHz.*



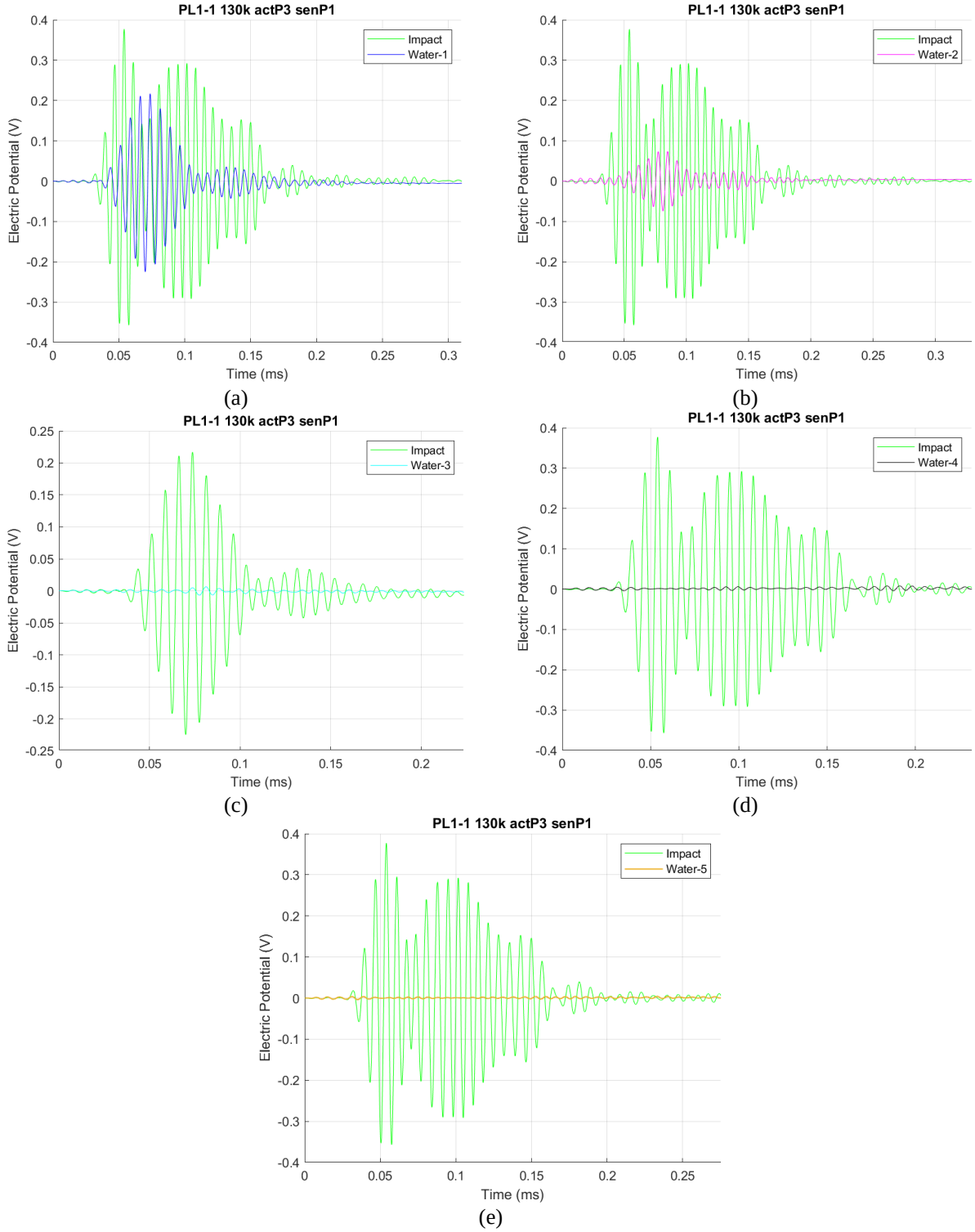
Appendix Γ Figure 4: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 185kHz.*



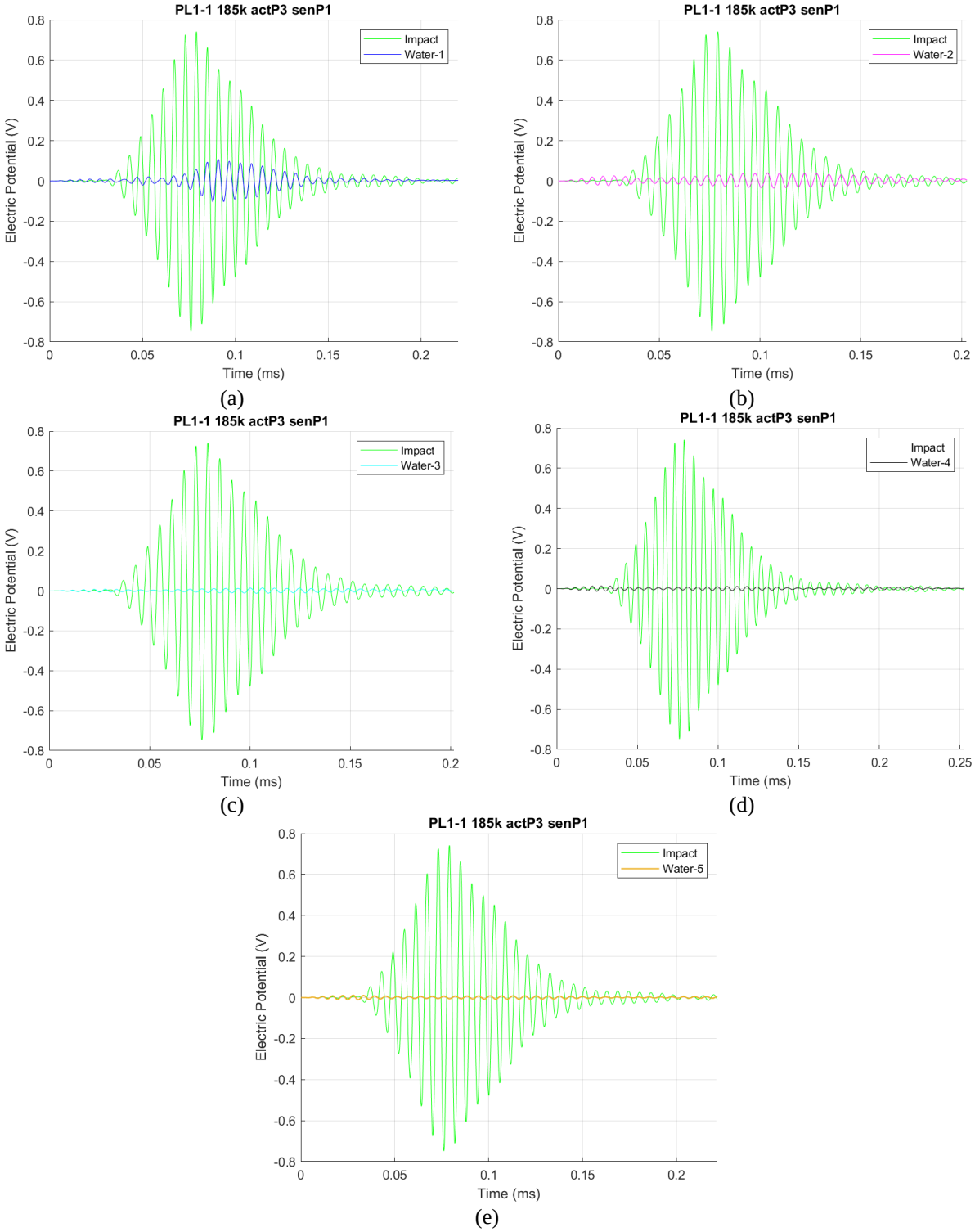
Appendix Γ Figure 5: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.*



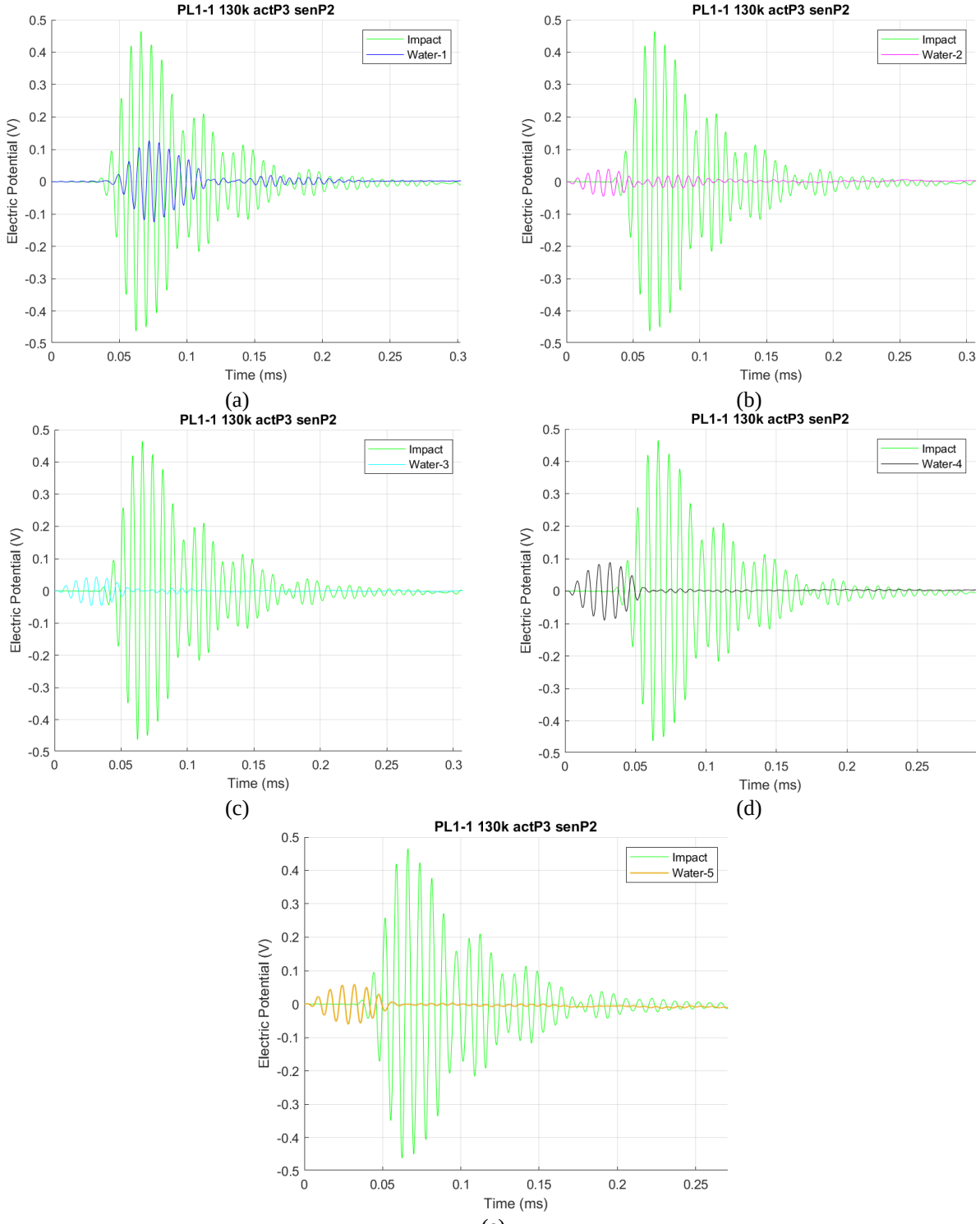
Appendix Γ Figure 6: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.*



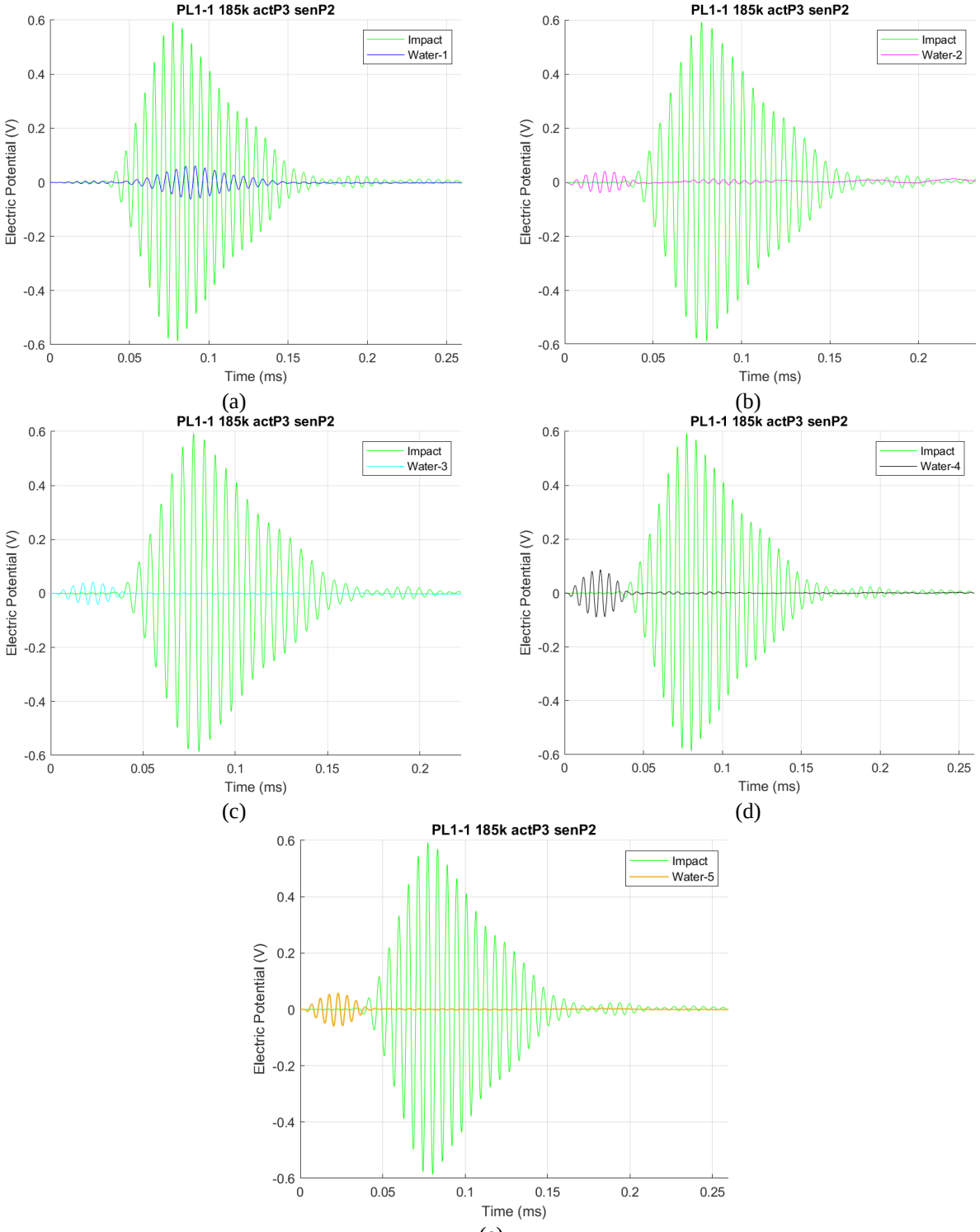
Appendix Γ Figure 7: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 130kHz.*



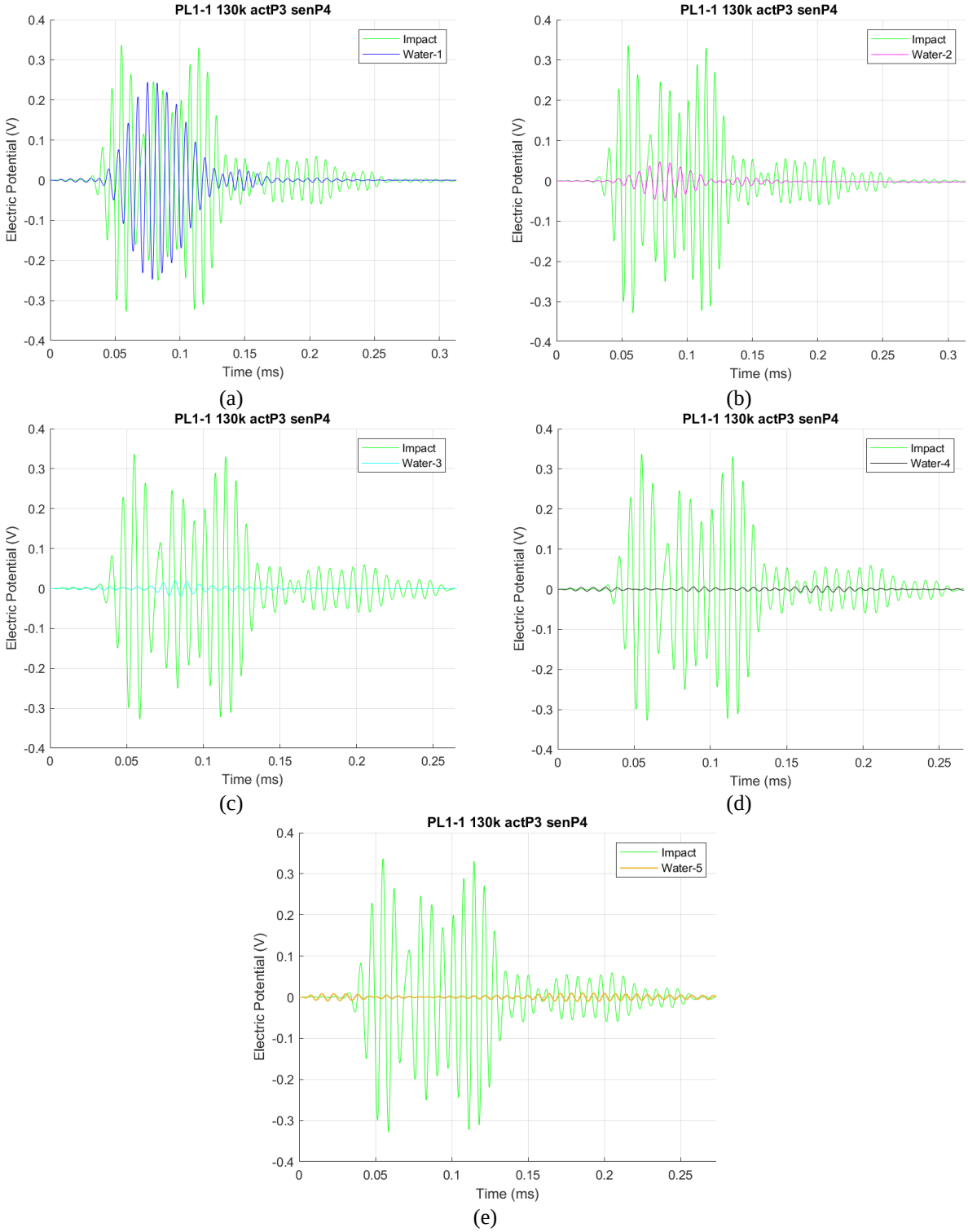
Appendix Γ Figure 8: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 185kHz.*



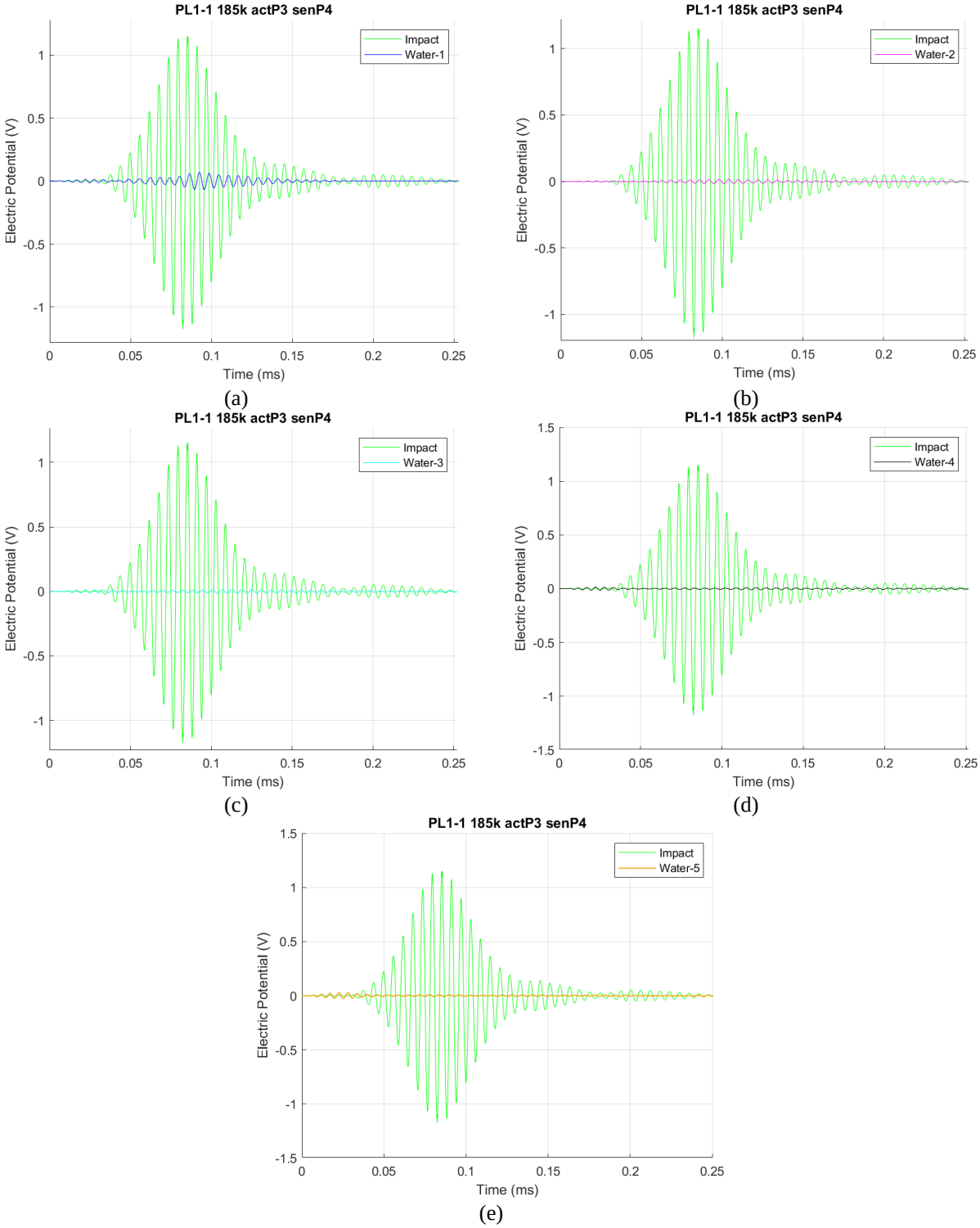
Appendix Γ Figure 9: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.*



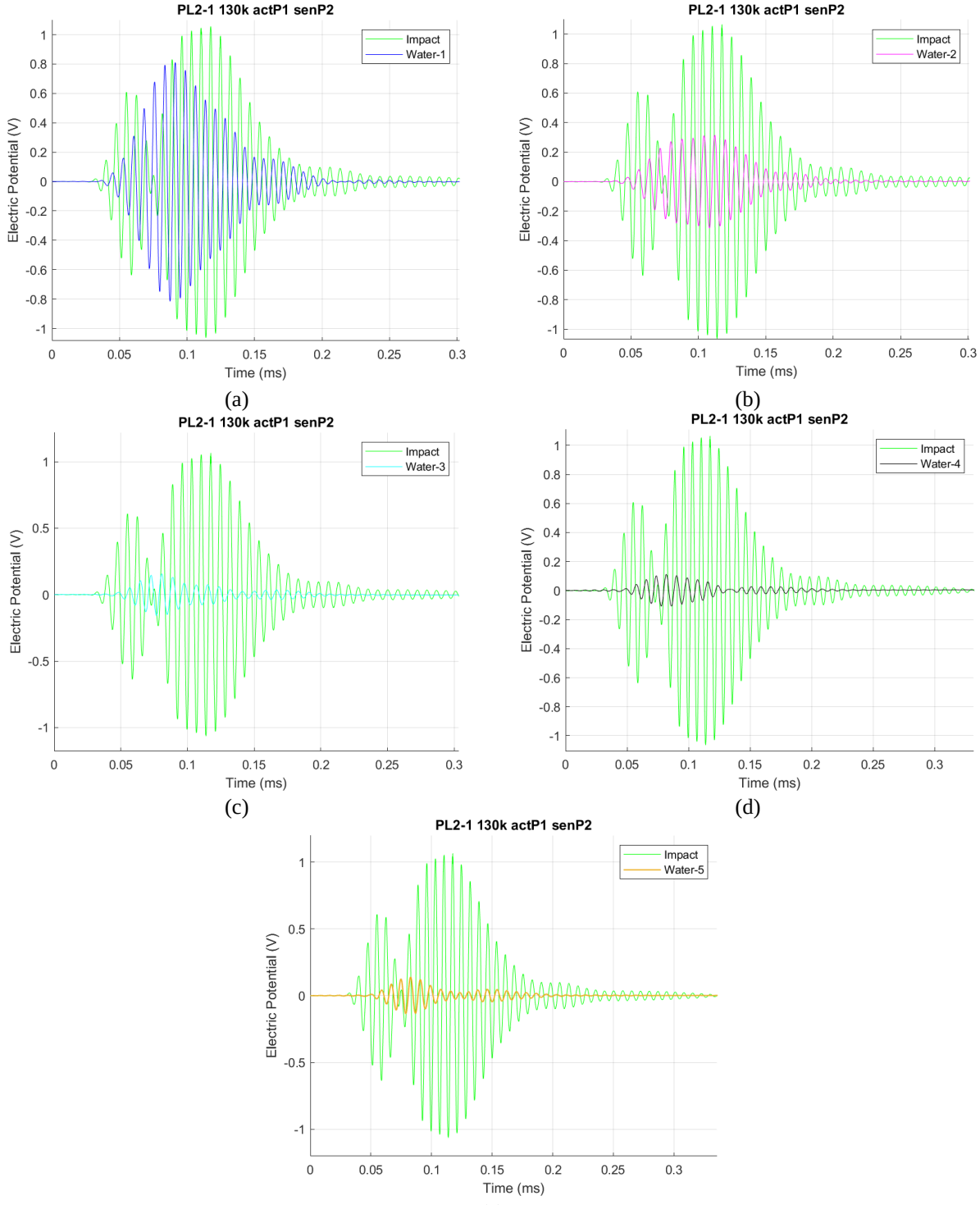
Appendix Γ Figure 10: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.*



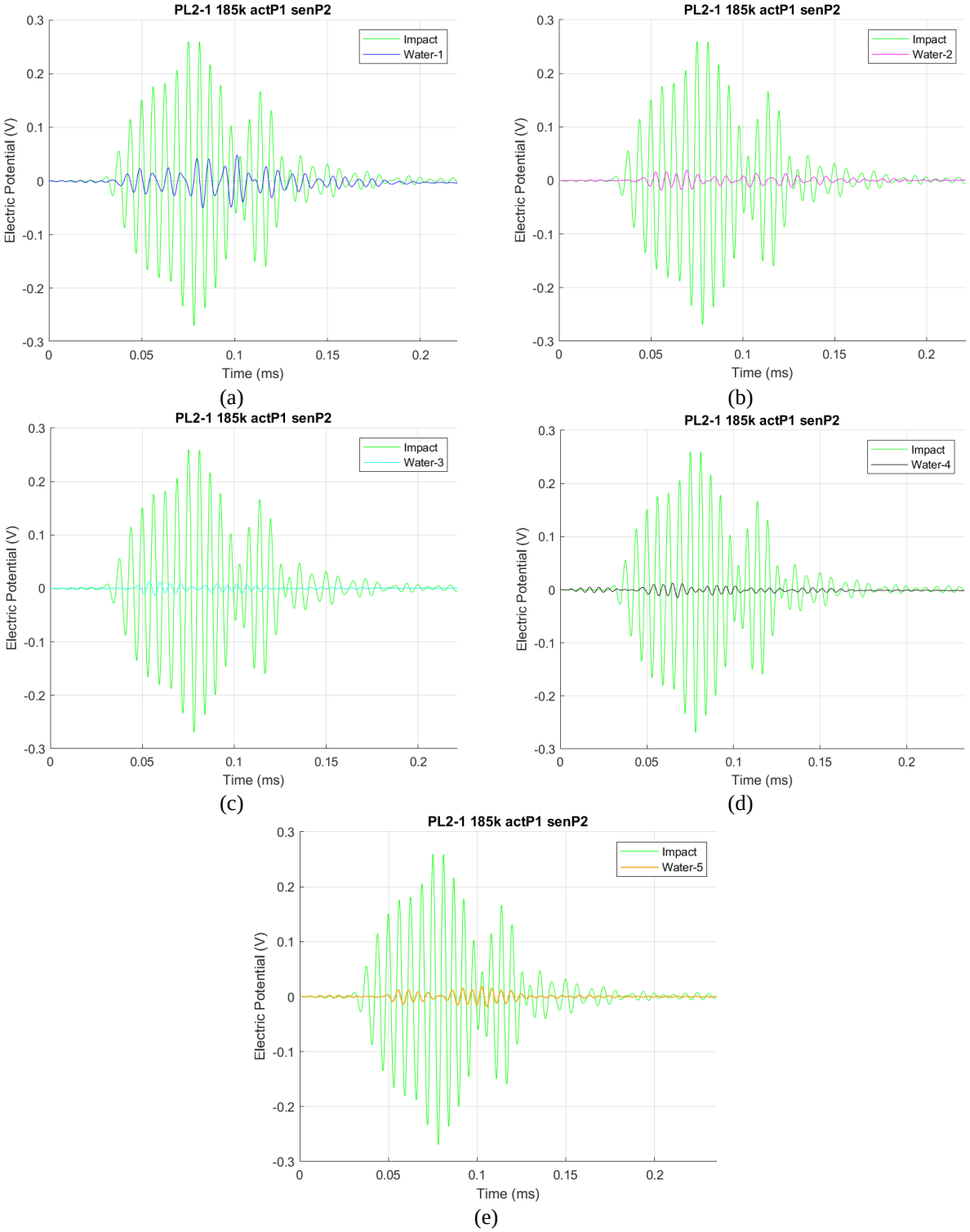
Appendix Γ Figure 11: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.*



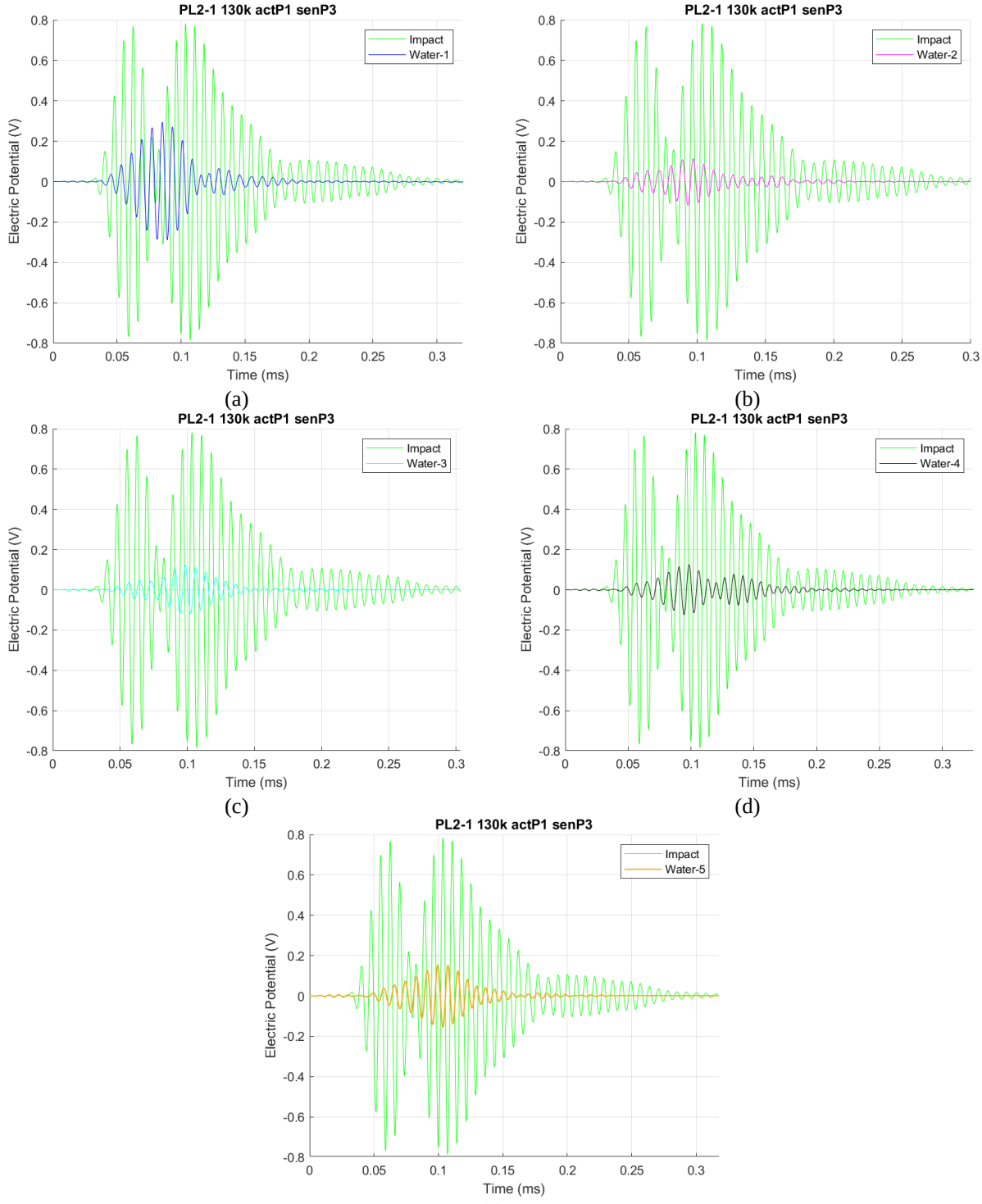
Appendix Γ Figure 12: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.*



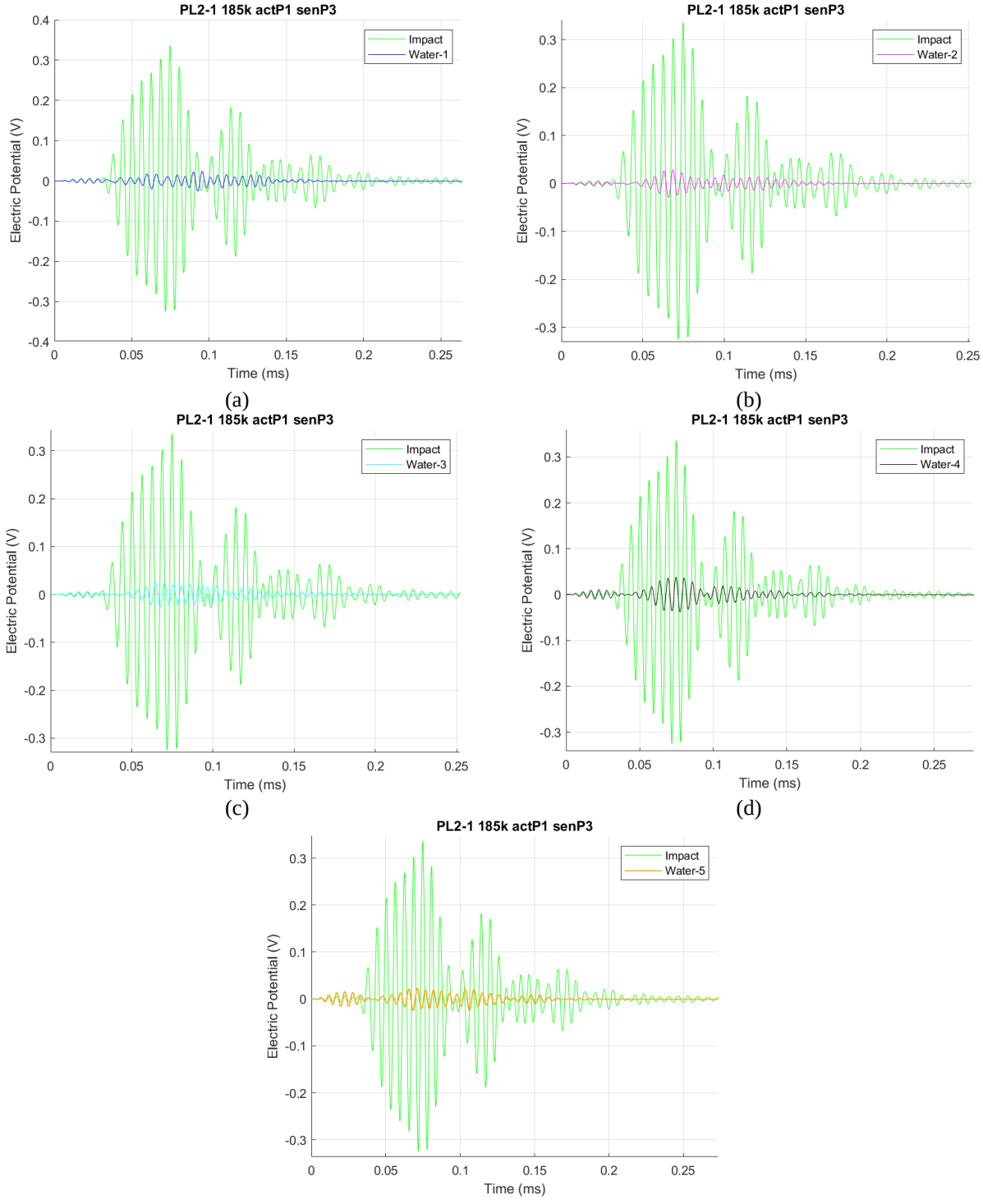
Appendix Γ Figure 13: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.*



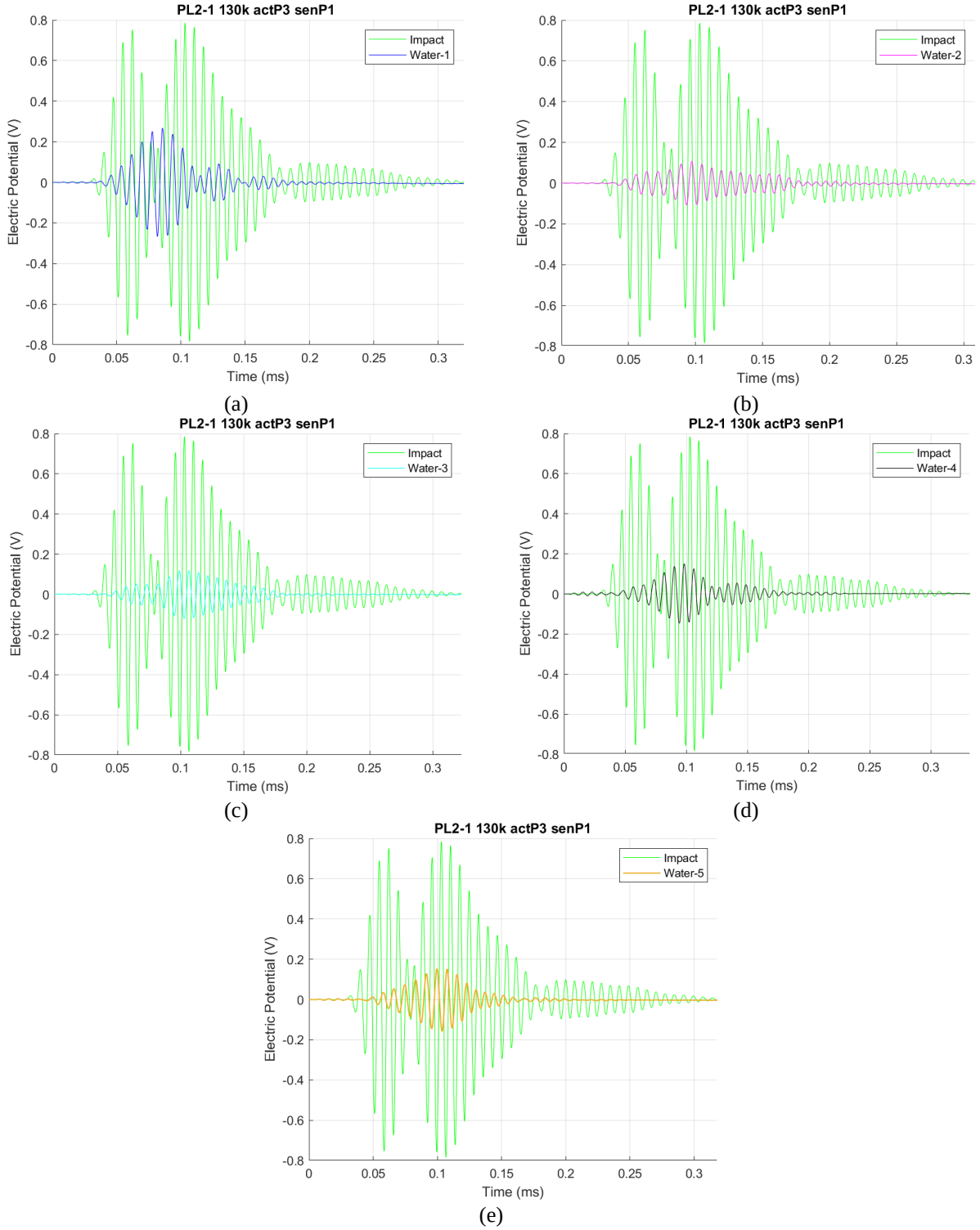
Appendix Γ Figure 14: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.*



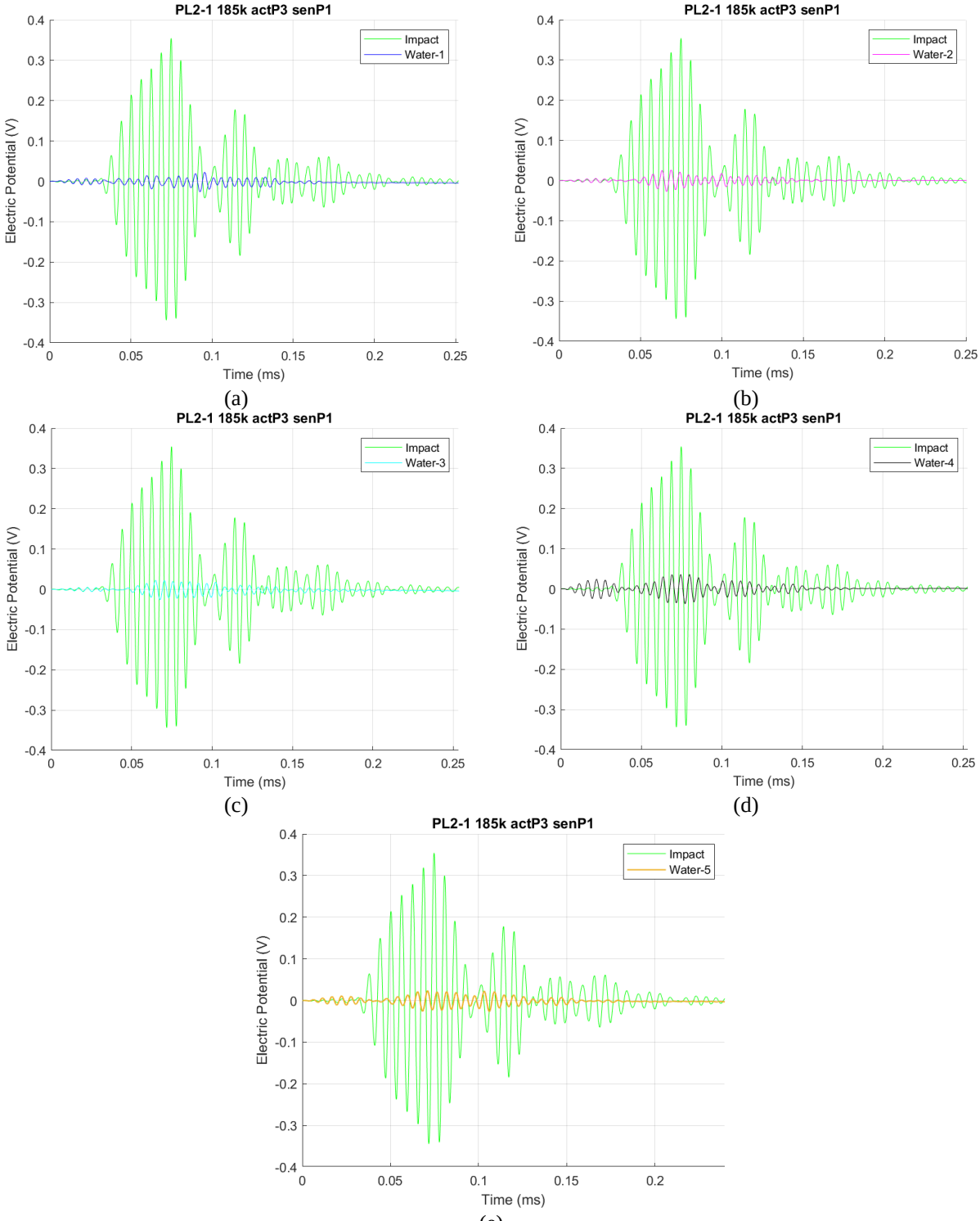
Appendix Γ Figure 15: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 130kHz.*



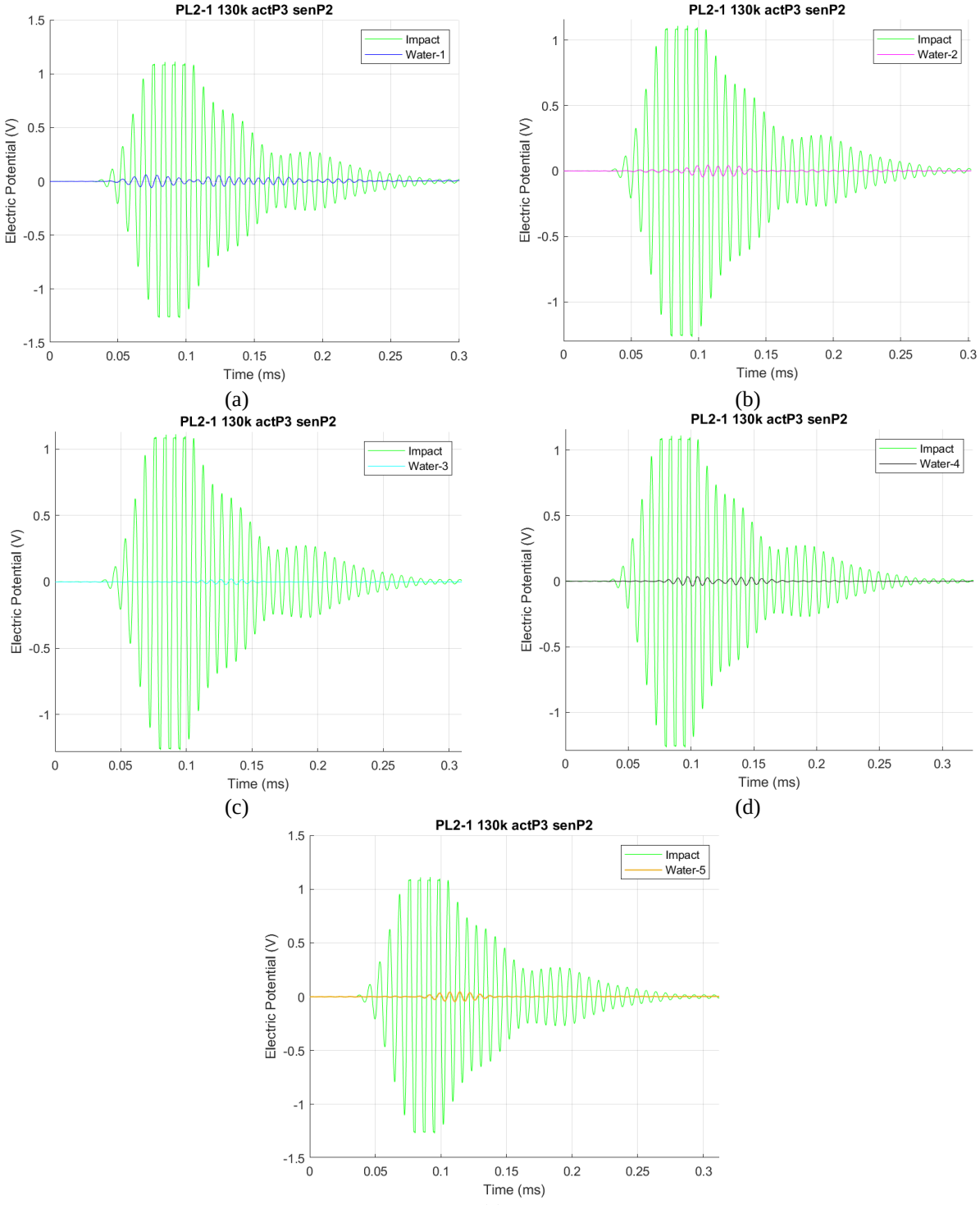
Appendix Γ Figure 16: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 185kHz.*



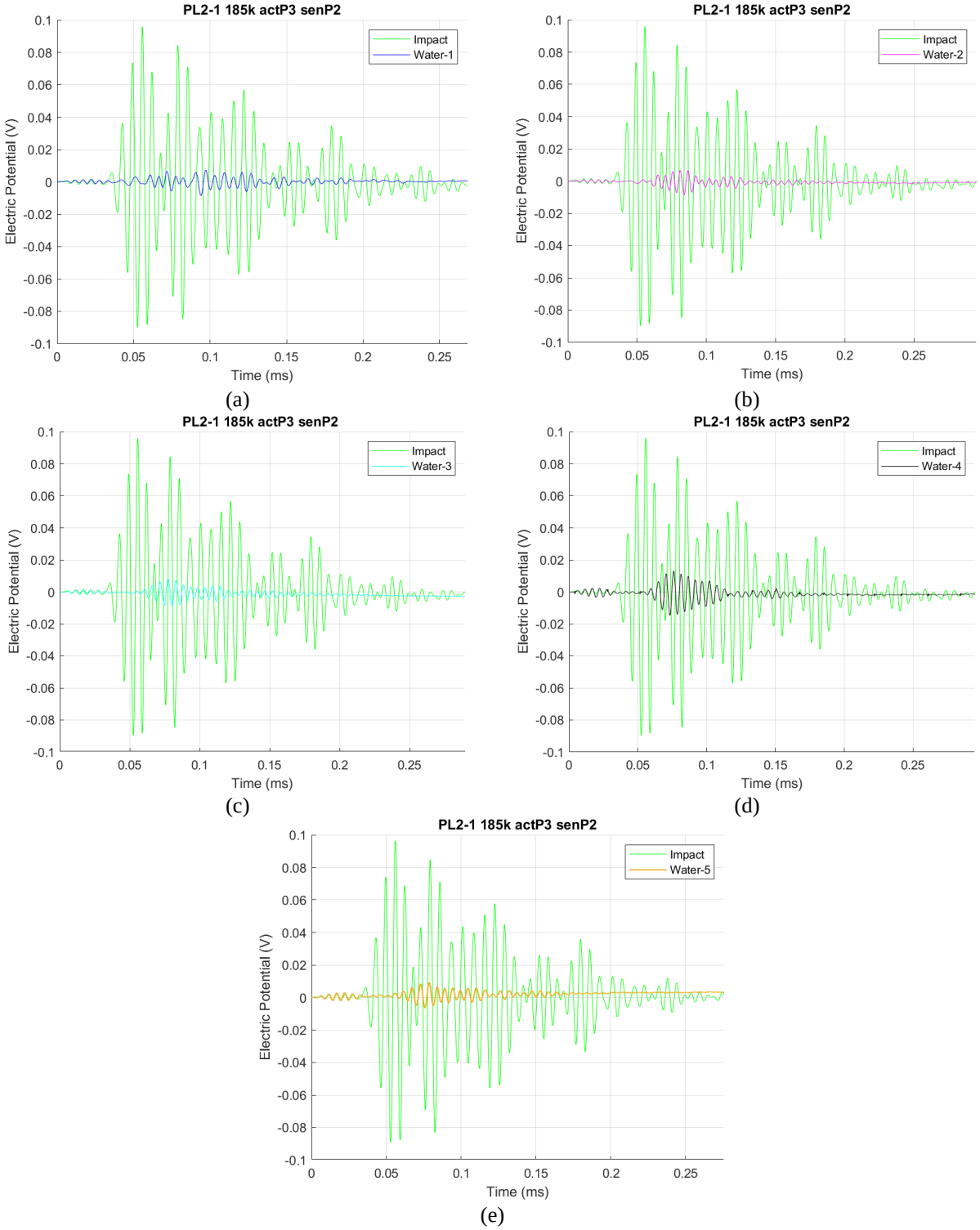
Appendix Γ Figure 17: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 130kHz.*



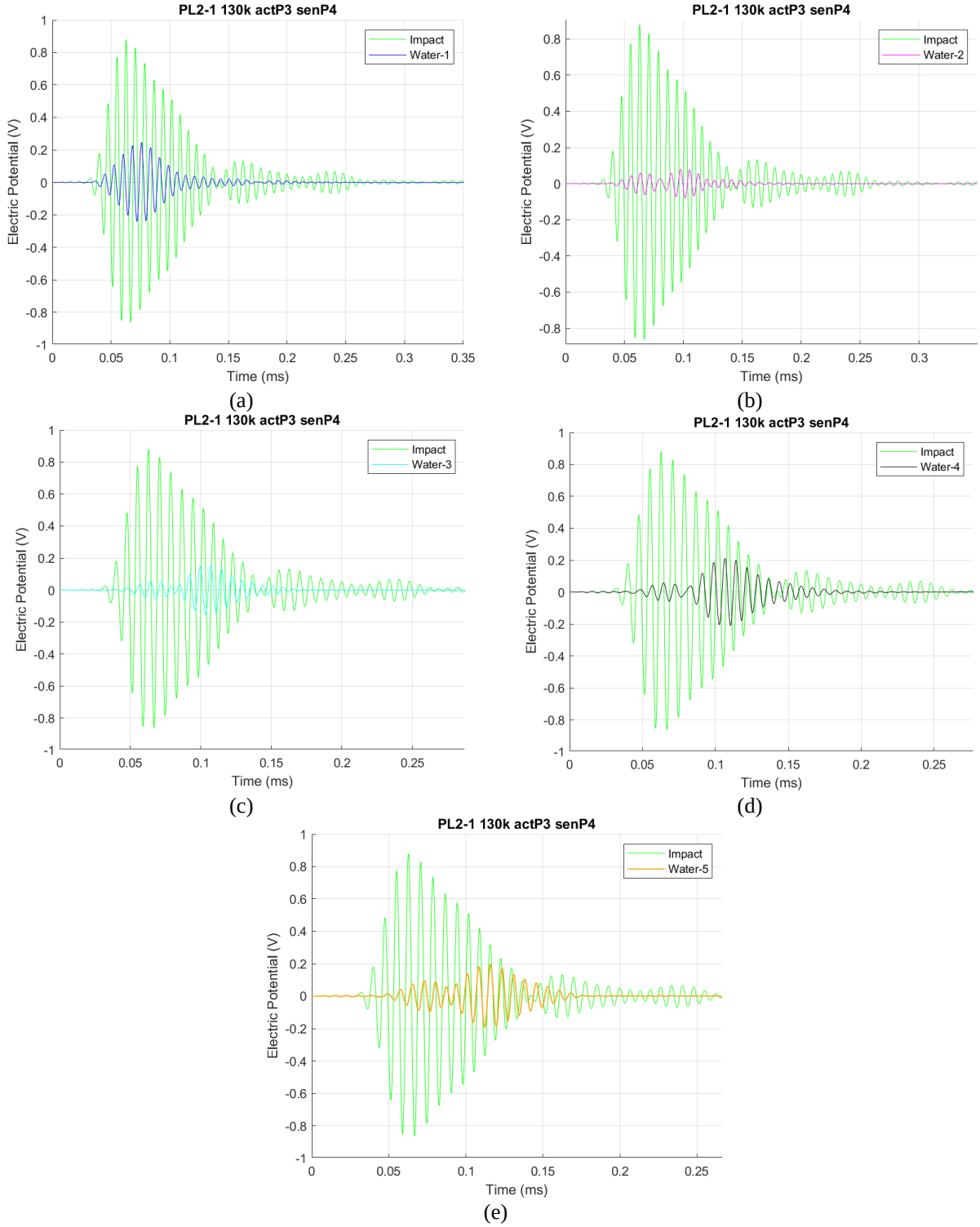
Appendix Γ Figure 18: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 185kHz.*



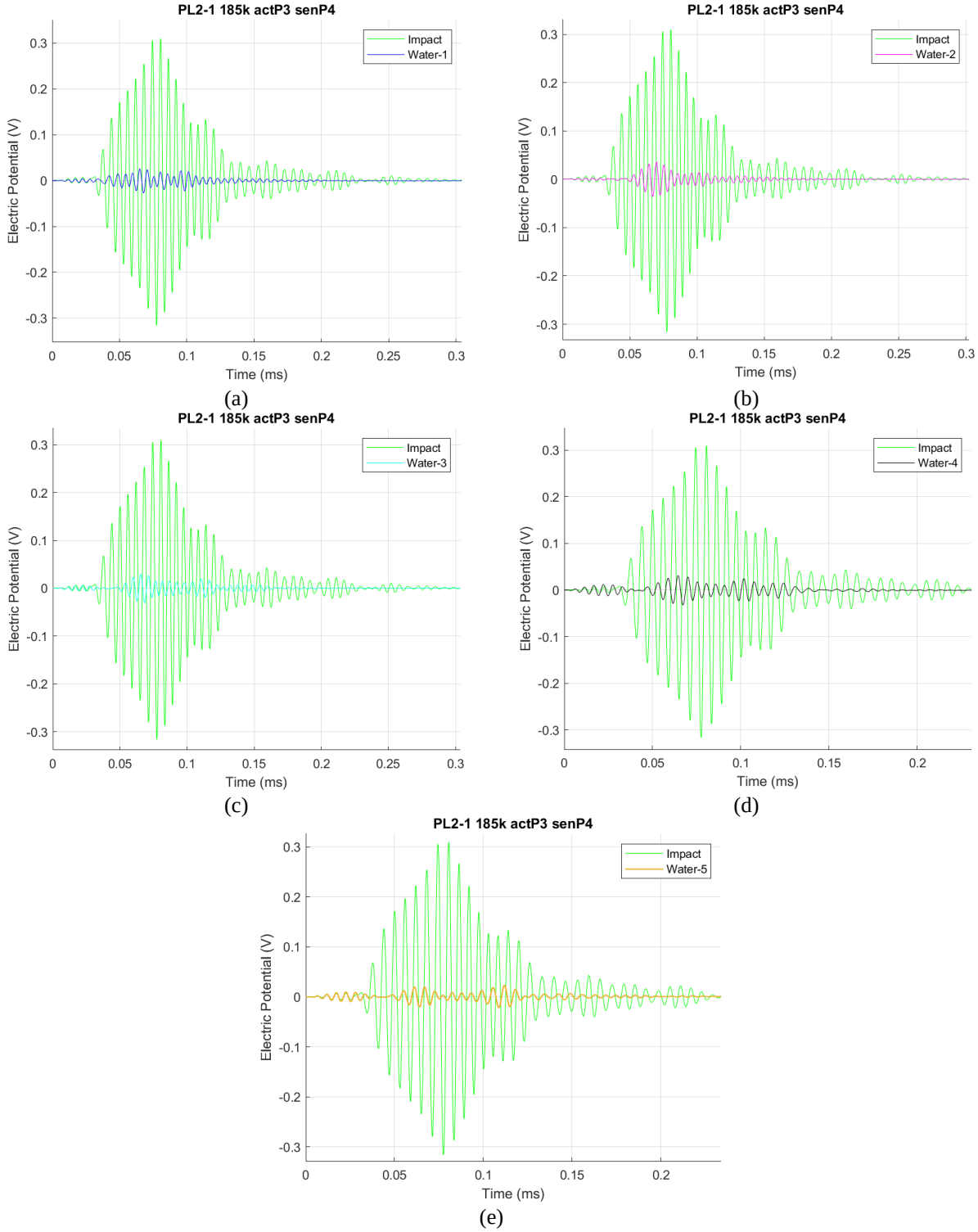
Appendix Γ Figure 19: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.*



Appendix Γ Figure 20: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.*



Appendix Γ Figure 21: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.*



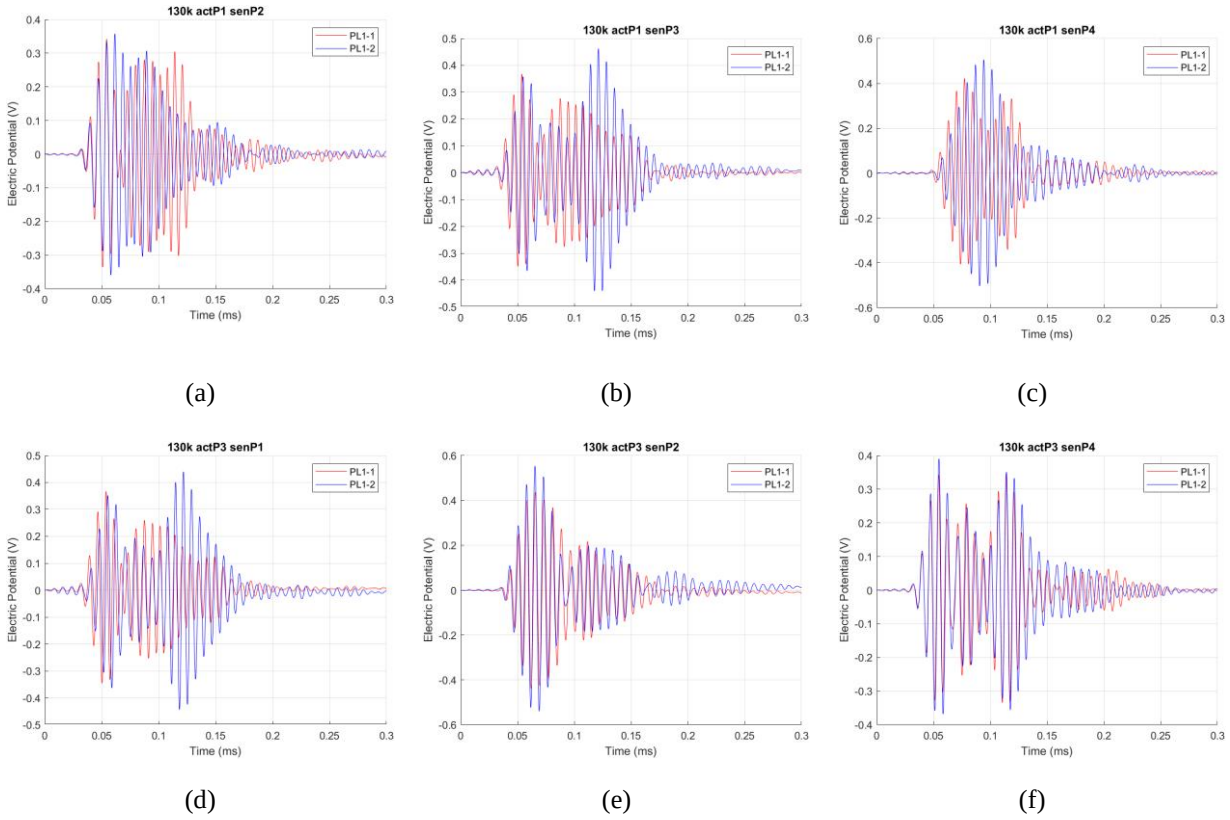
Appendix Γ Figure 22: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΧΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΕΙΡΕΣ ΠΛΑΚΩΝ P1 ΚΑΙ P2

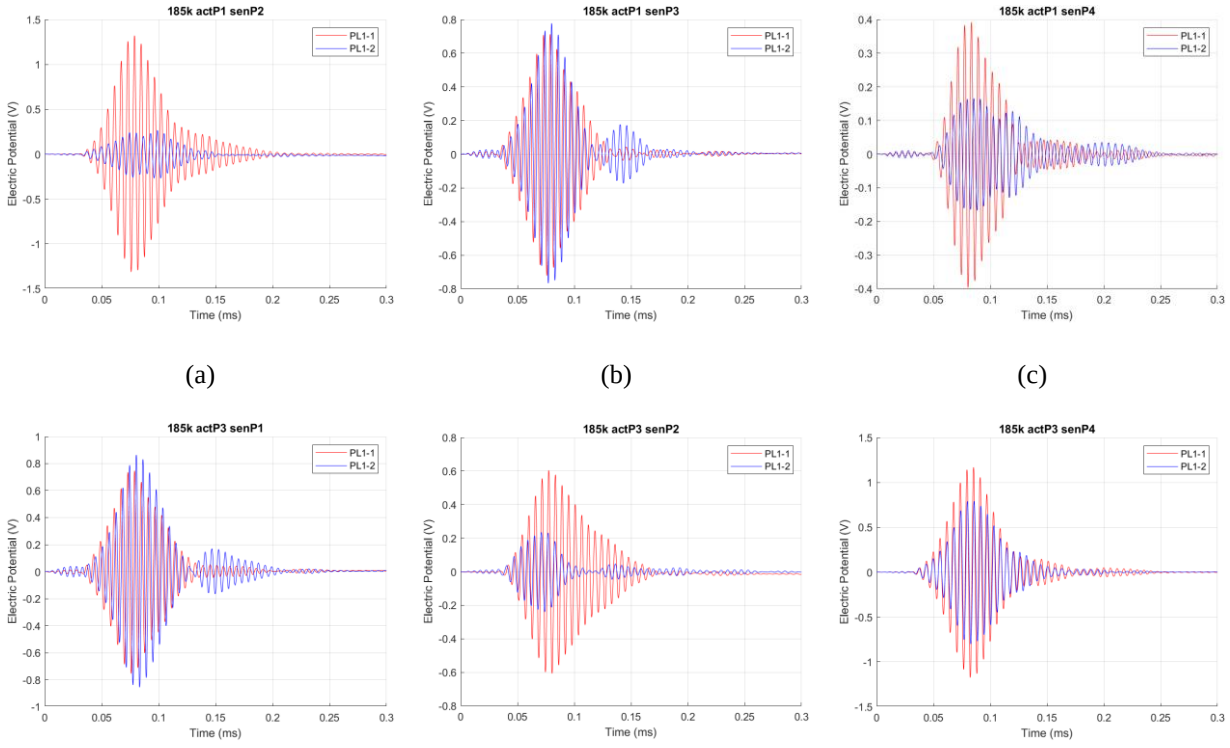
Ακολουθούν σε δύο πίνακες ανά Σειρά πλακών για 130 και 185 kHz με ζεύγη πιεζοηλεκτρικών (a) P1-P2, (b) P1-P3, (c) P1-P4, (d) P3-P1, (e) P3-P2, (f) P3-P4.

Σειρά P1 130kHz



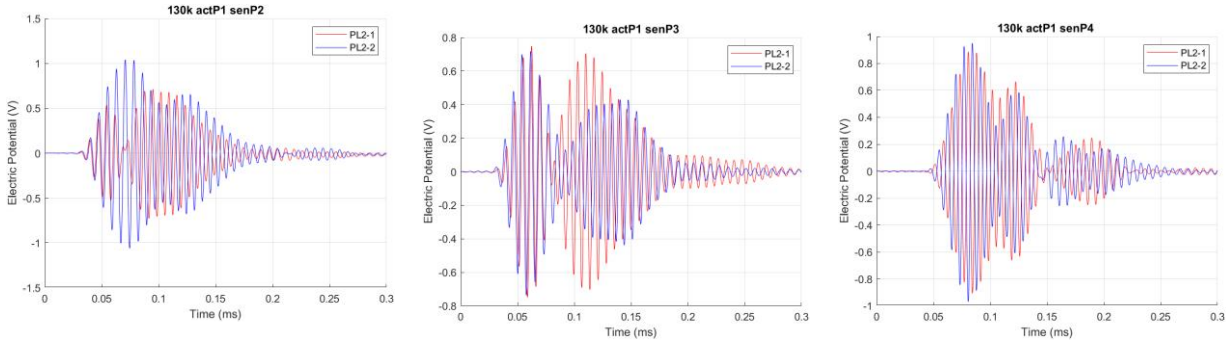
Appendix Δ Figure 1: *Σειρά*

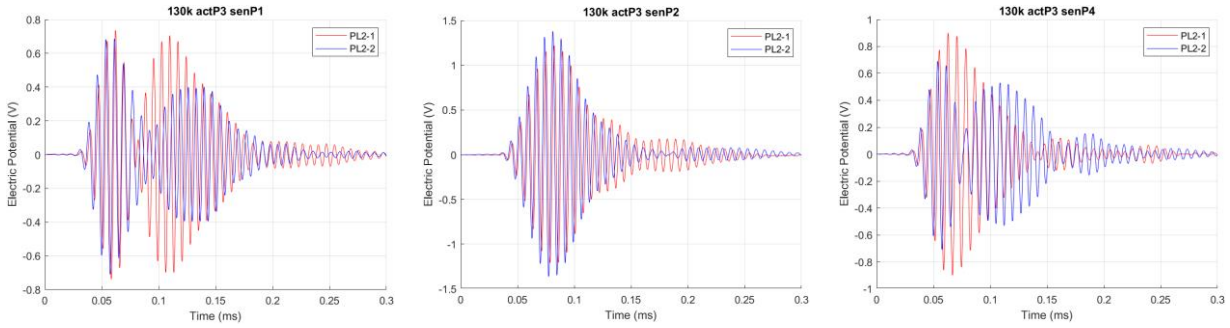
Σειρά P1 185kHz



Appendix Δ Figure 2: *Σειρά P1 185kHz*.

Σειρά P2 130kHz

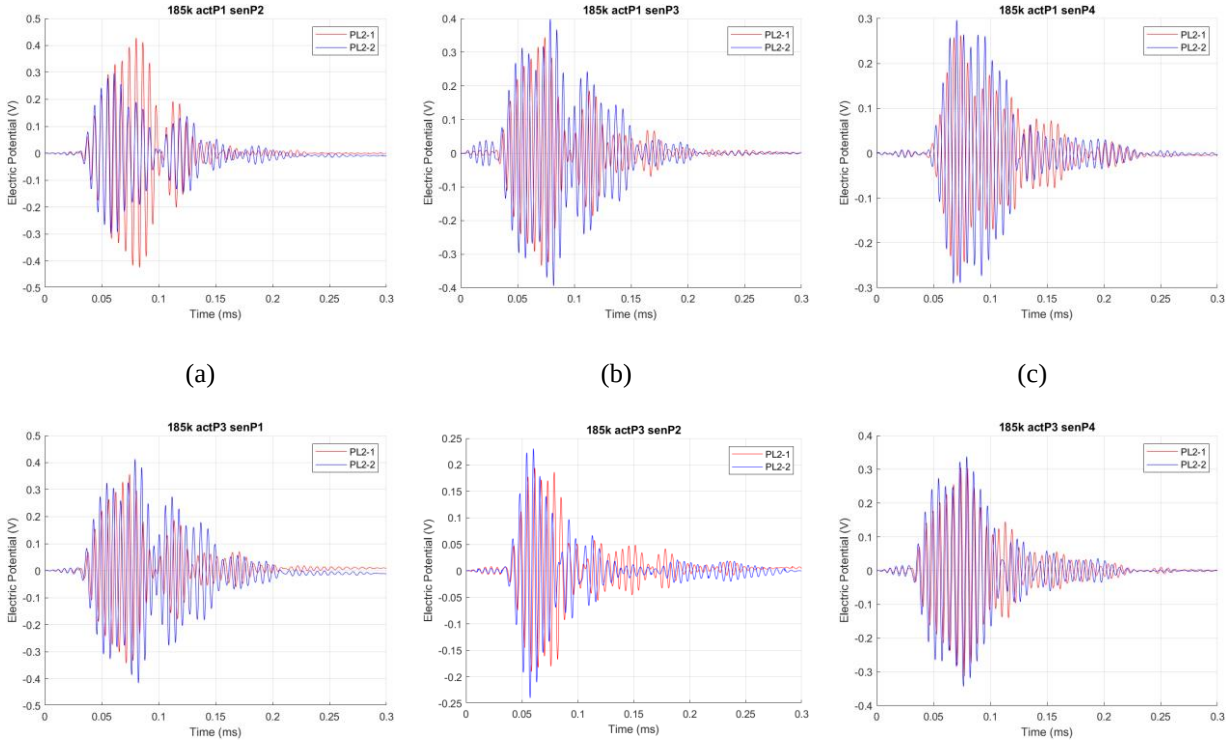




(d) (e) (f)

Appendix Δ Figure 3: *Σειρά P2 130kHz***.**

Σειρά P2 185kHz



(a) (b) (c)

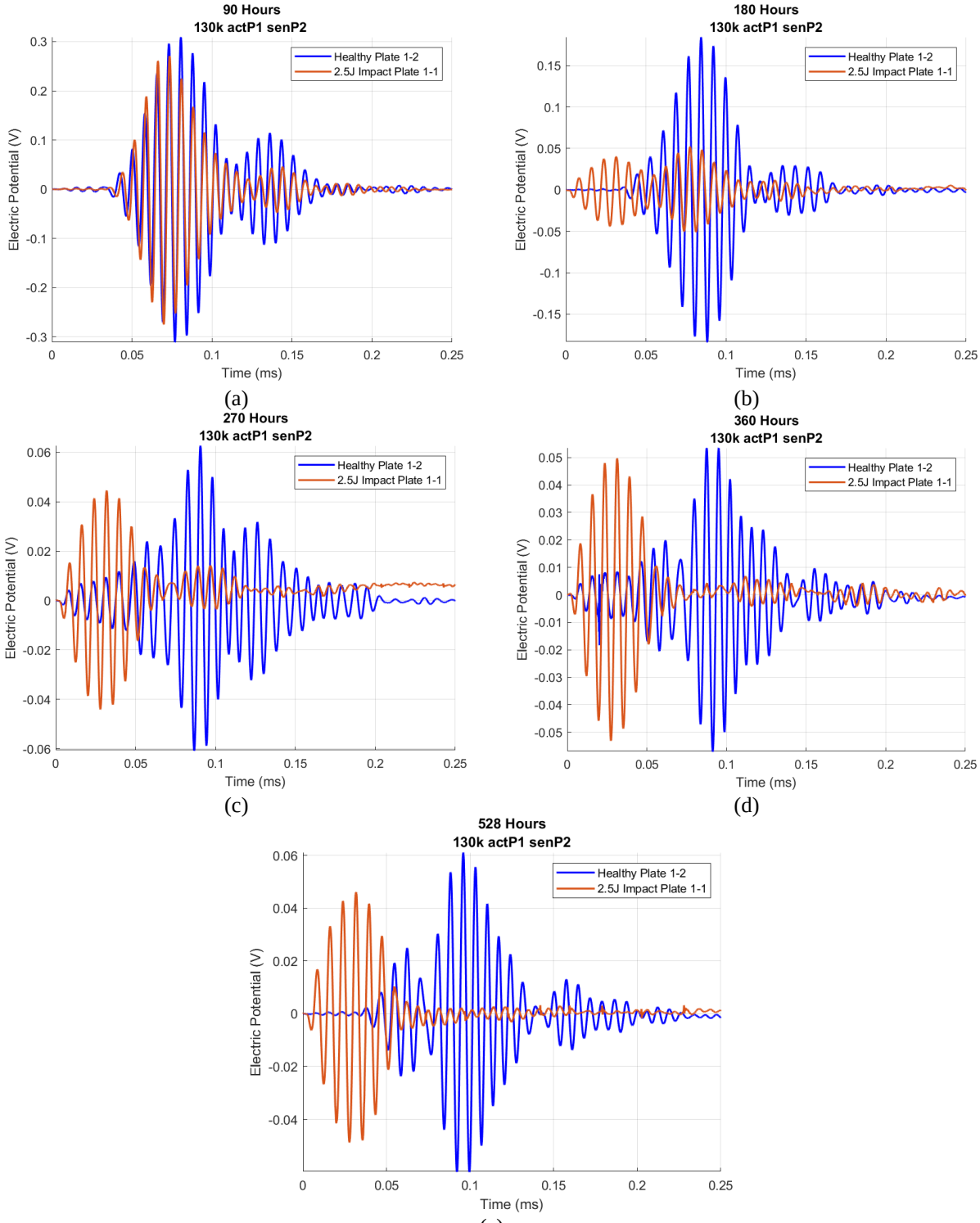
(d) (e) (f)

Appendix Δ Figure 4: *Σειρά P2 185kHz***.**

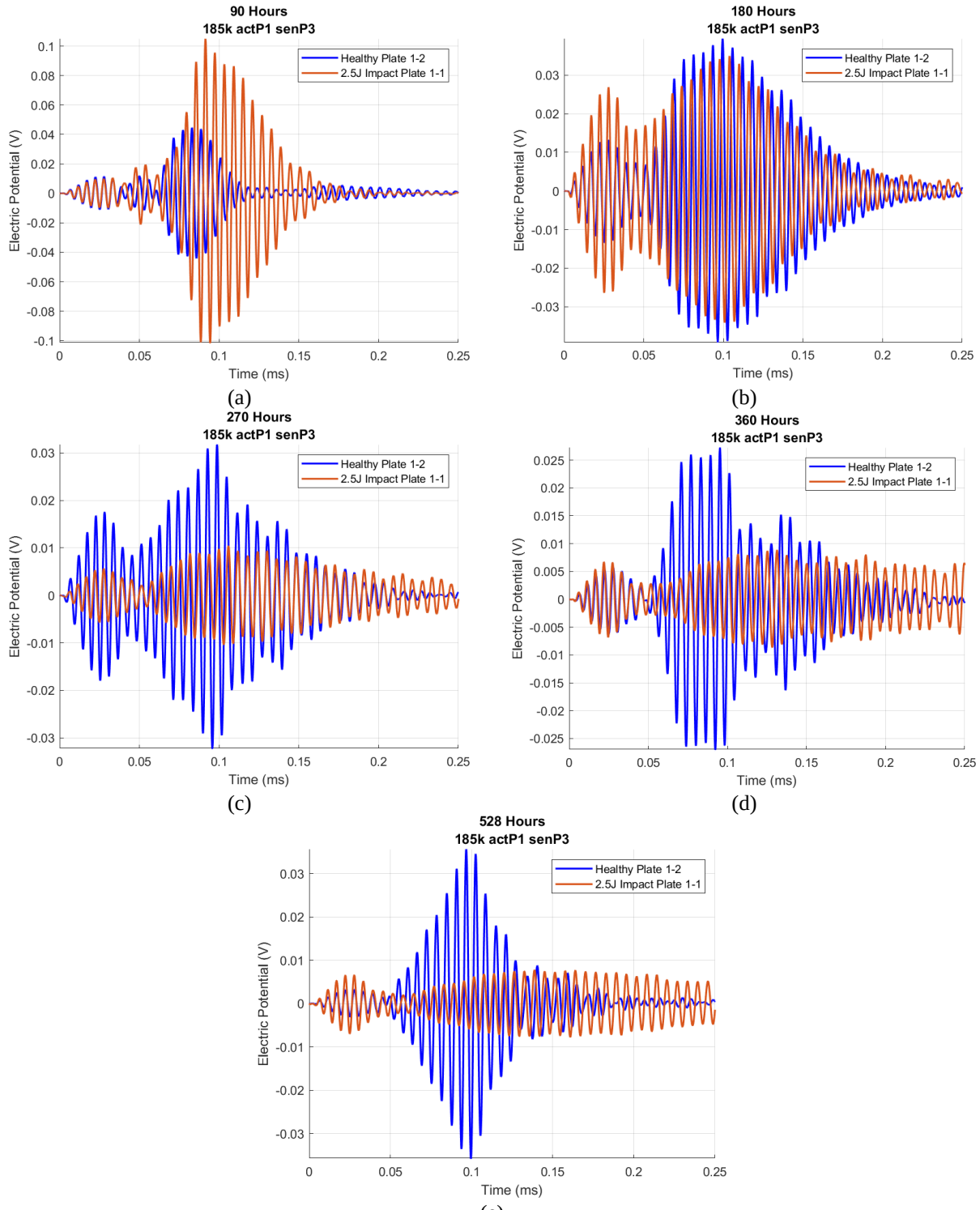
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΥΓΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕ ΖΗΜΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΕΙΡΕΣ ΠΛΑΚΩΝ P1 ΚΑΙ P2

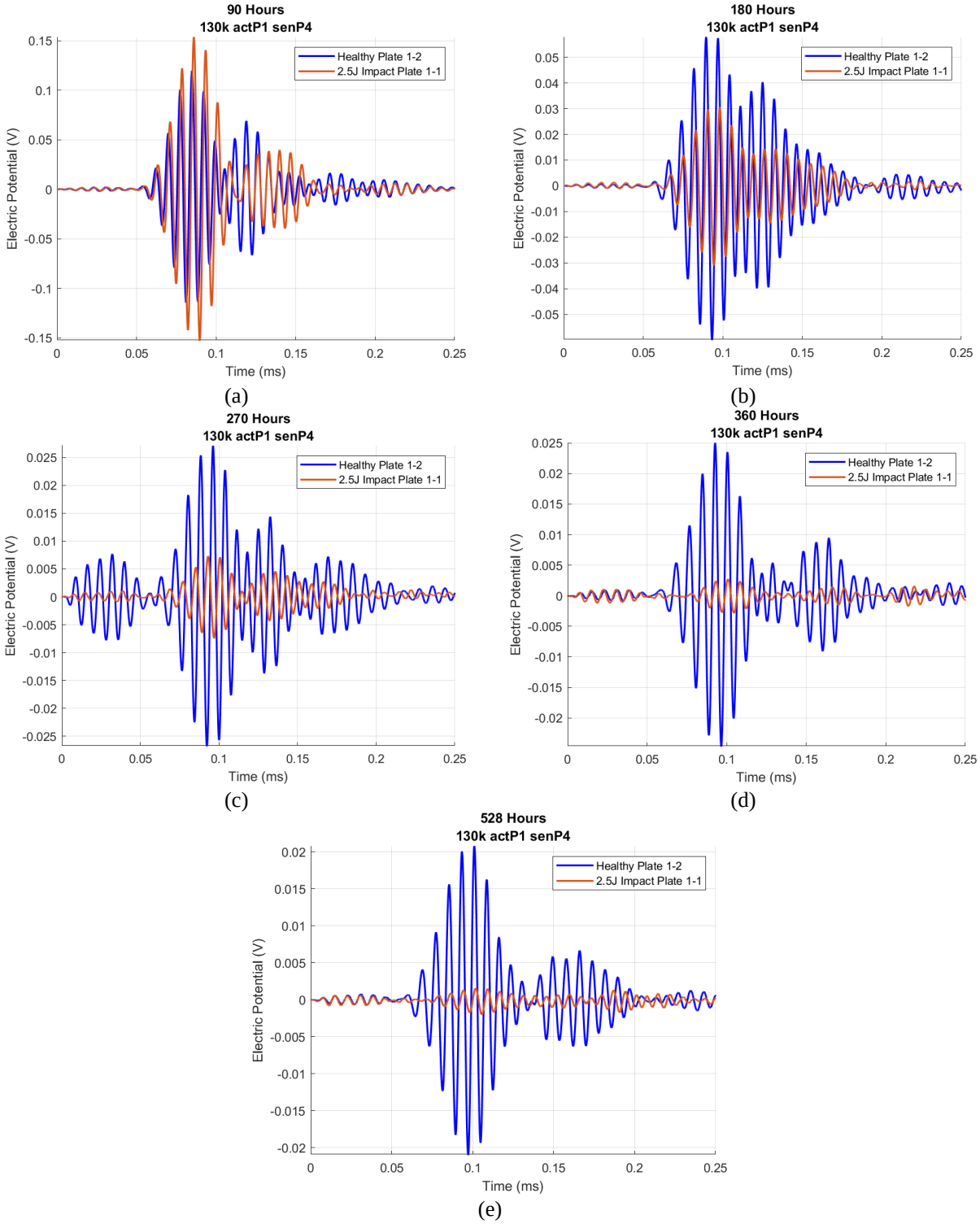
Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται τα διαγράμματα της χρονικής απόκρισης της ηλεκτρικής τάσης του εκάστοτε αισθητηρίου κάθε σειράς πλάκας συγκρίνοντας πάντα το υγιές σήμα 'Healthy' με μπλε χρώμα και το σήμα κρούσης '2.5J Impact' απεικονιζόμενο με πορτοκαλί χρώμα για **(a)** 90 ώρες εμβάπτισης, **(b)** 180 ώρες εμβάπτισης, **(c)** 270 ώρες εμβάπτισης, **(d)** 360 ώρες εμβάπτισης, **(e)** 528 ώρες εμβάπτισης.



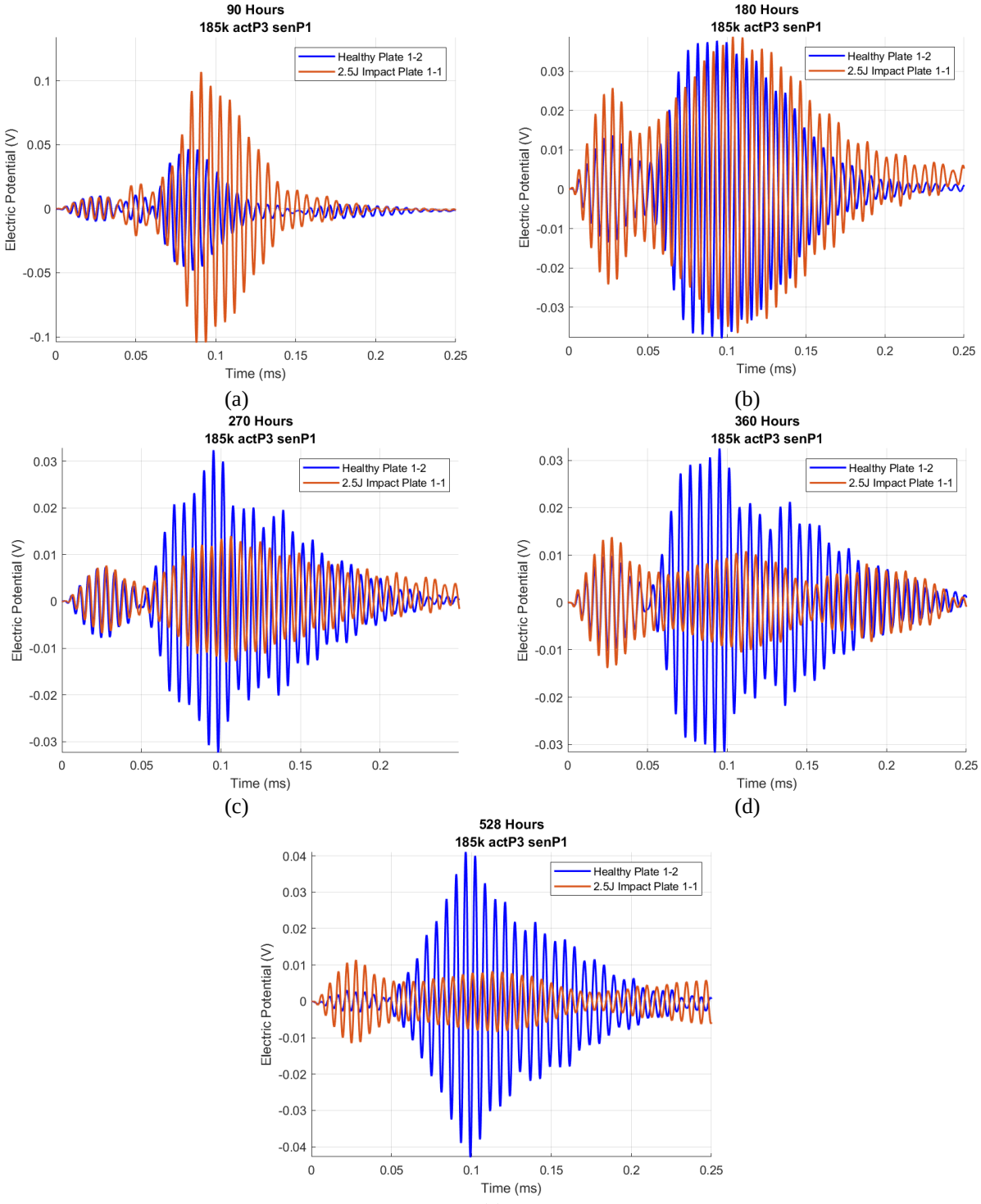
Appendix E Figure 1: *Σειρά πλάκας **P1** με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 130Hz.*



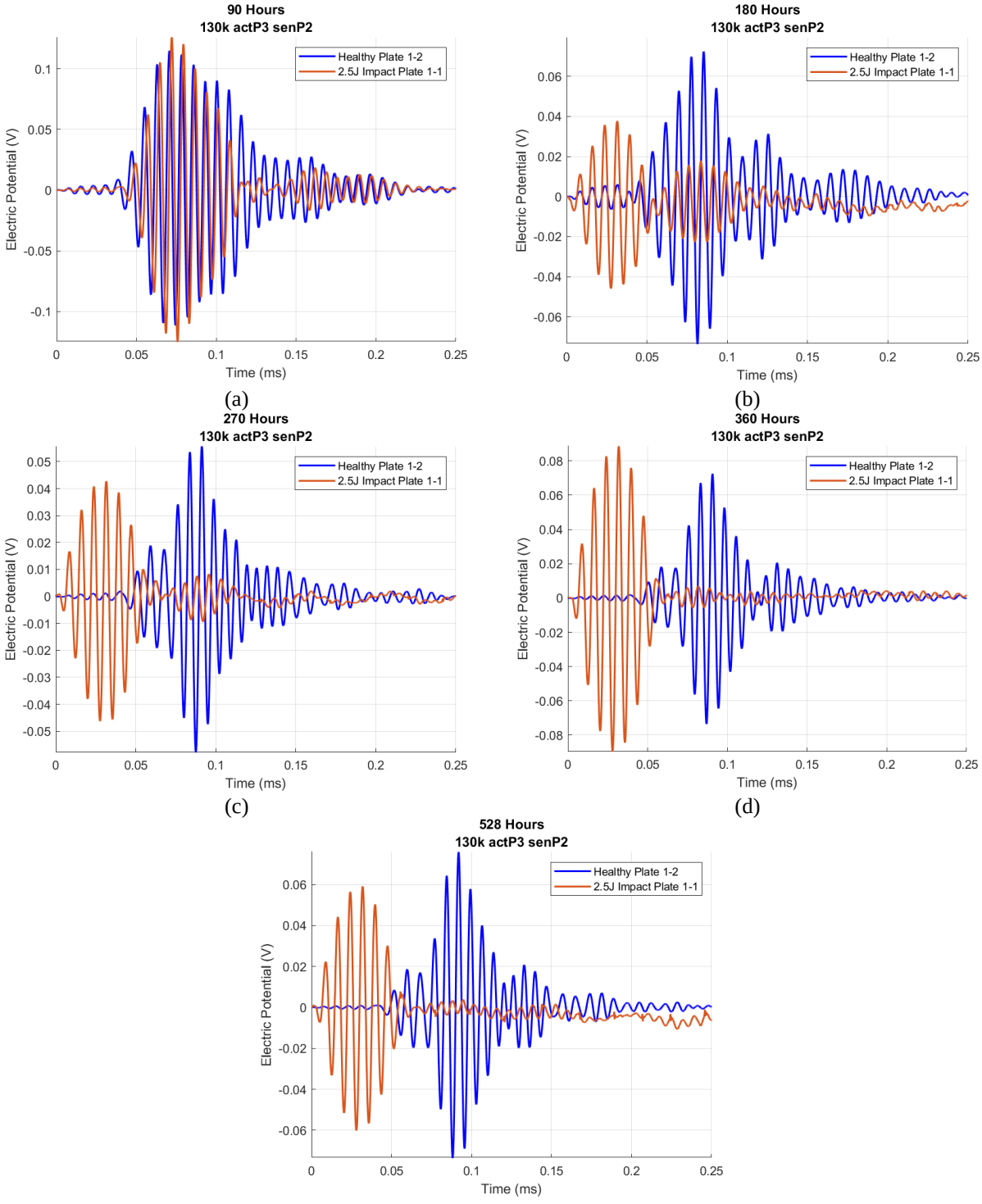
Appendix E Figure 2: *Σειρά πλάκας **P1** με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 185Hz.*



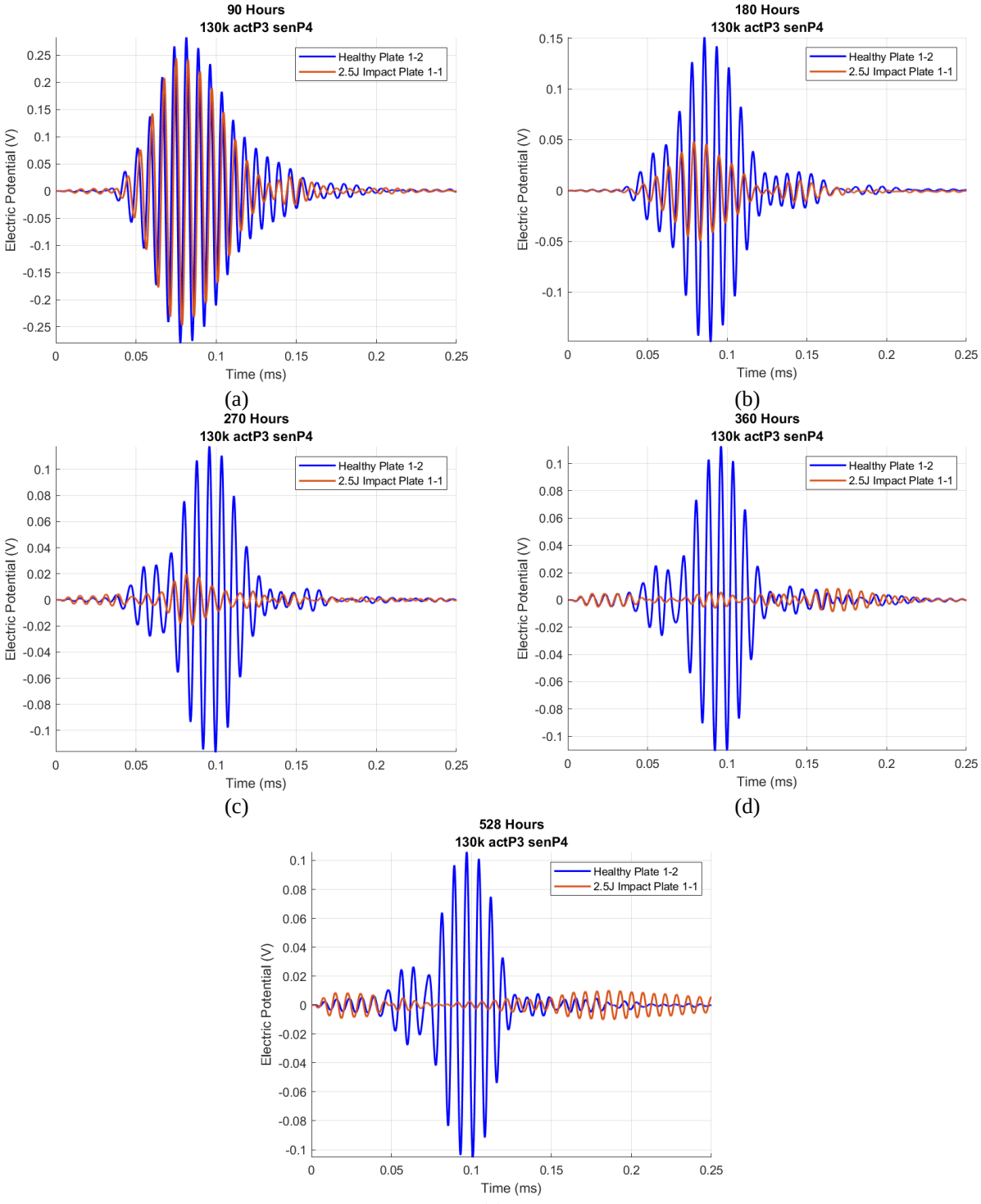
Appendix E Figure 3: *Σειρά πλάκας **P1** με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 130Hz.*



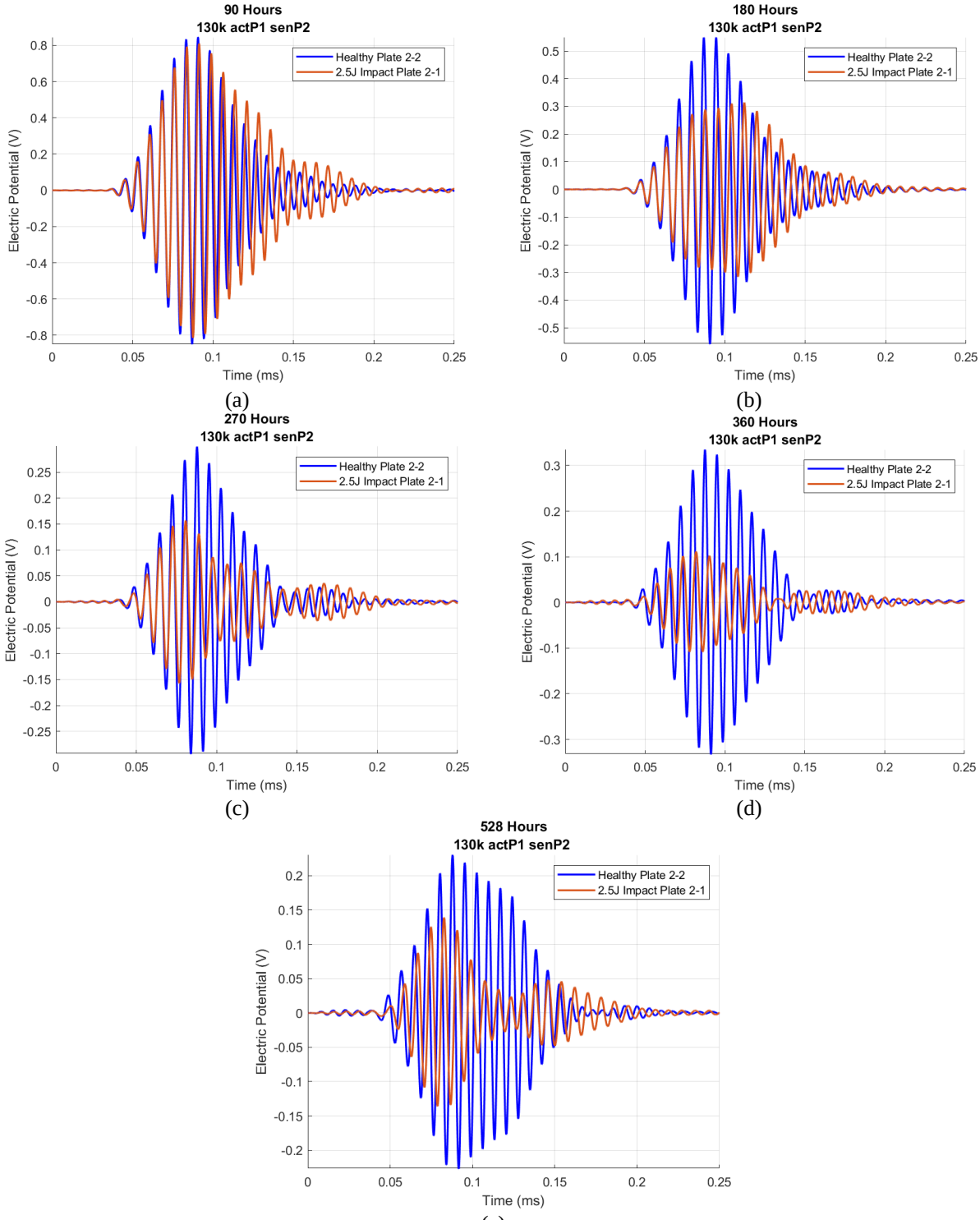
Appendix E Figure 4: *Σειρά πλάκας **P1** με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 130Hz.*



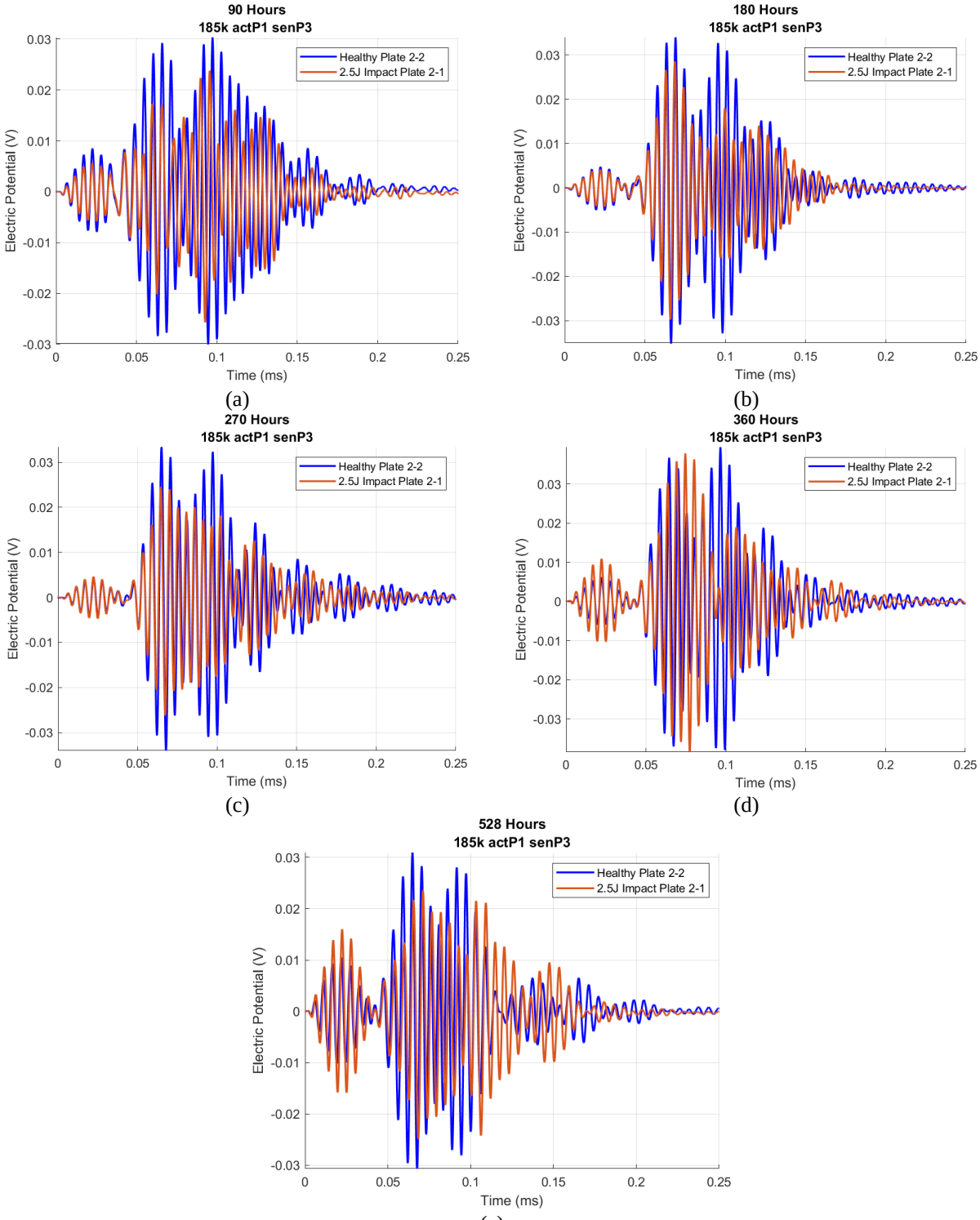
Appendix E Figure 5: *Σειρά πλάκας **P1** με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 130Hz.*



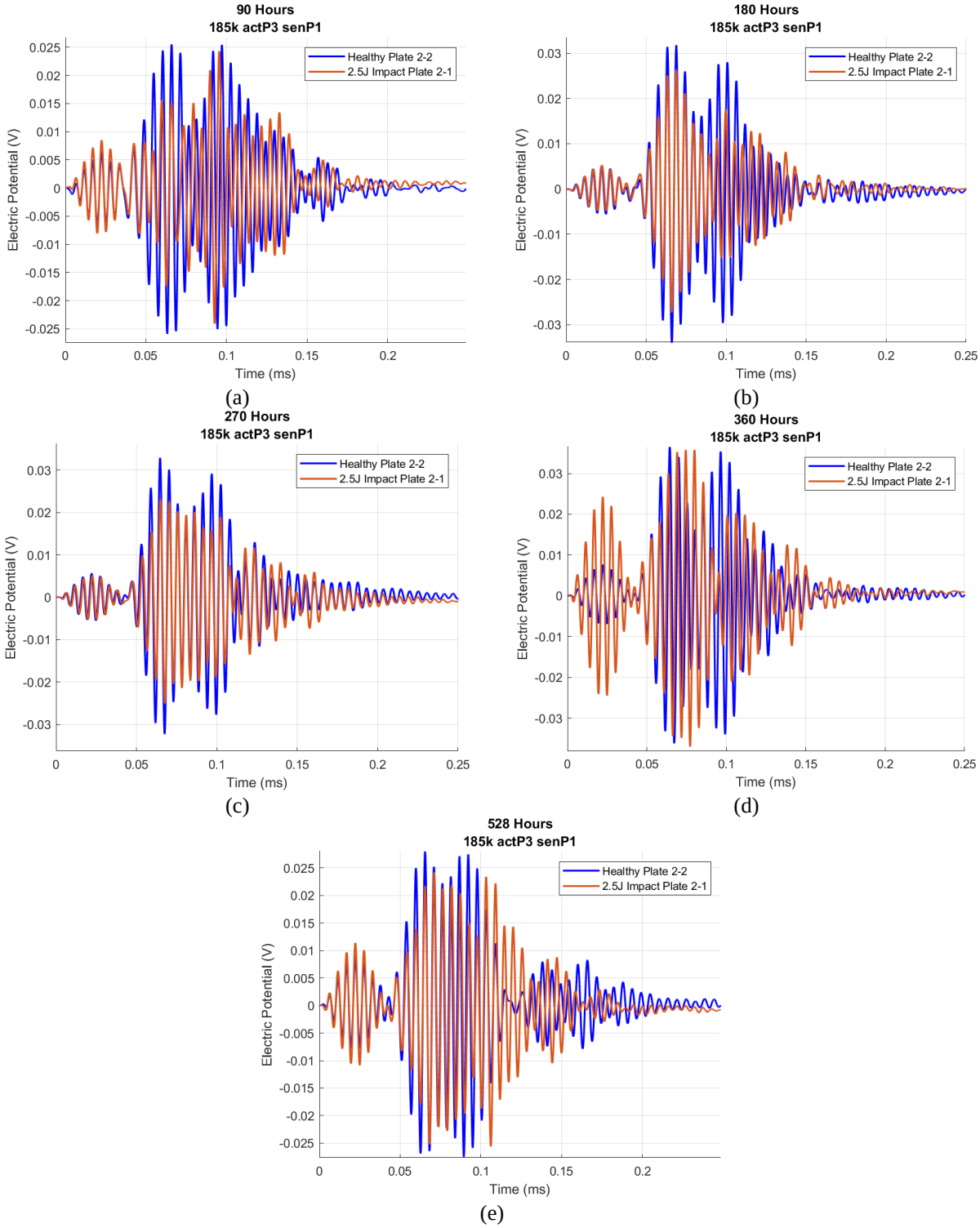
Appendix E Figure 6: *Σειρά πλάκας **P1** με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 130Hz.*



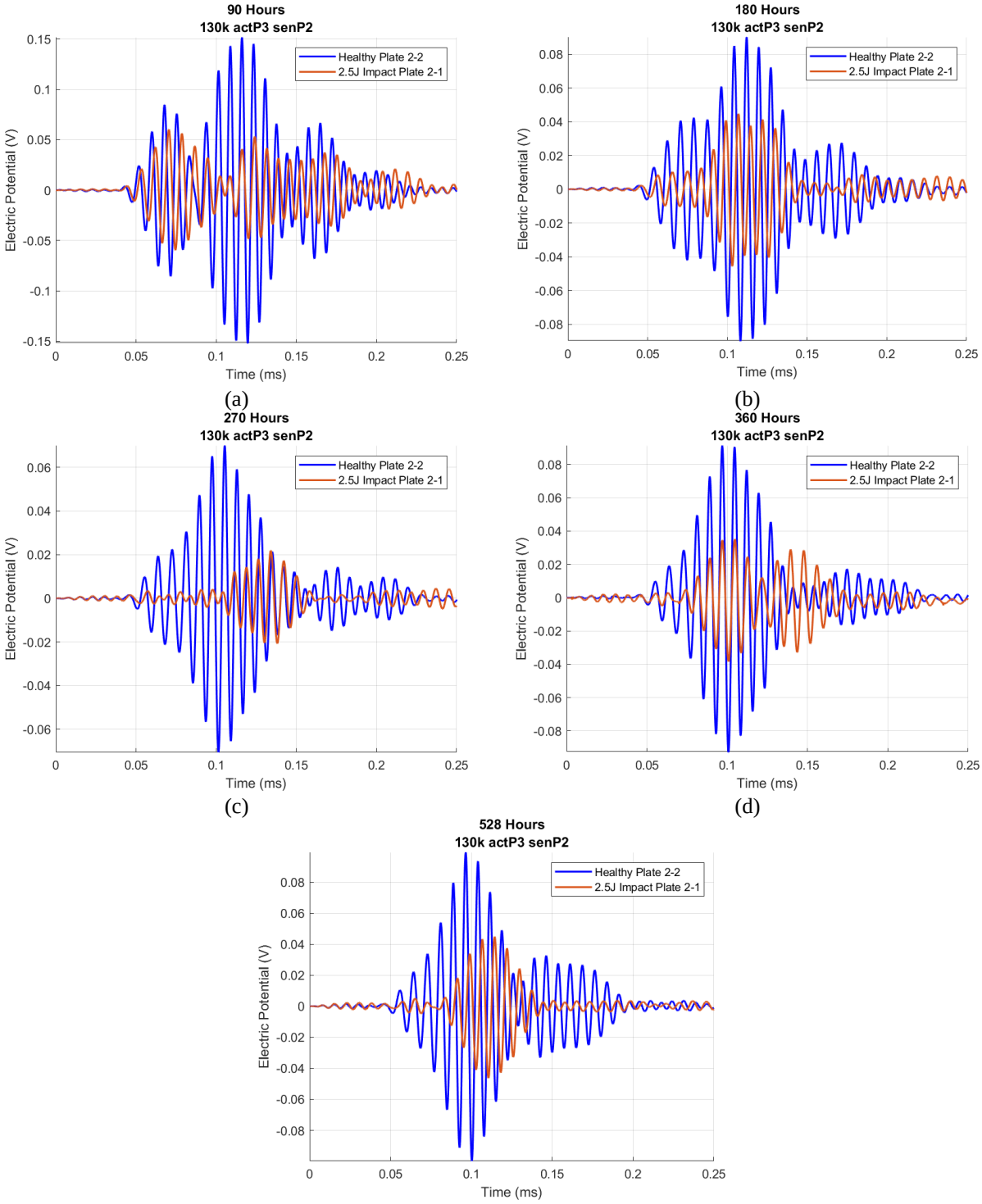
Appendix E Figure 7: *Σειρά πλάκας **P2** με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 130Hz.*



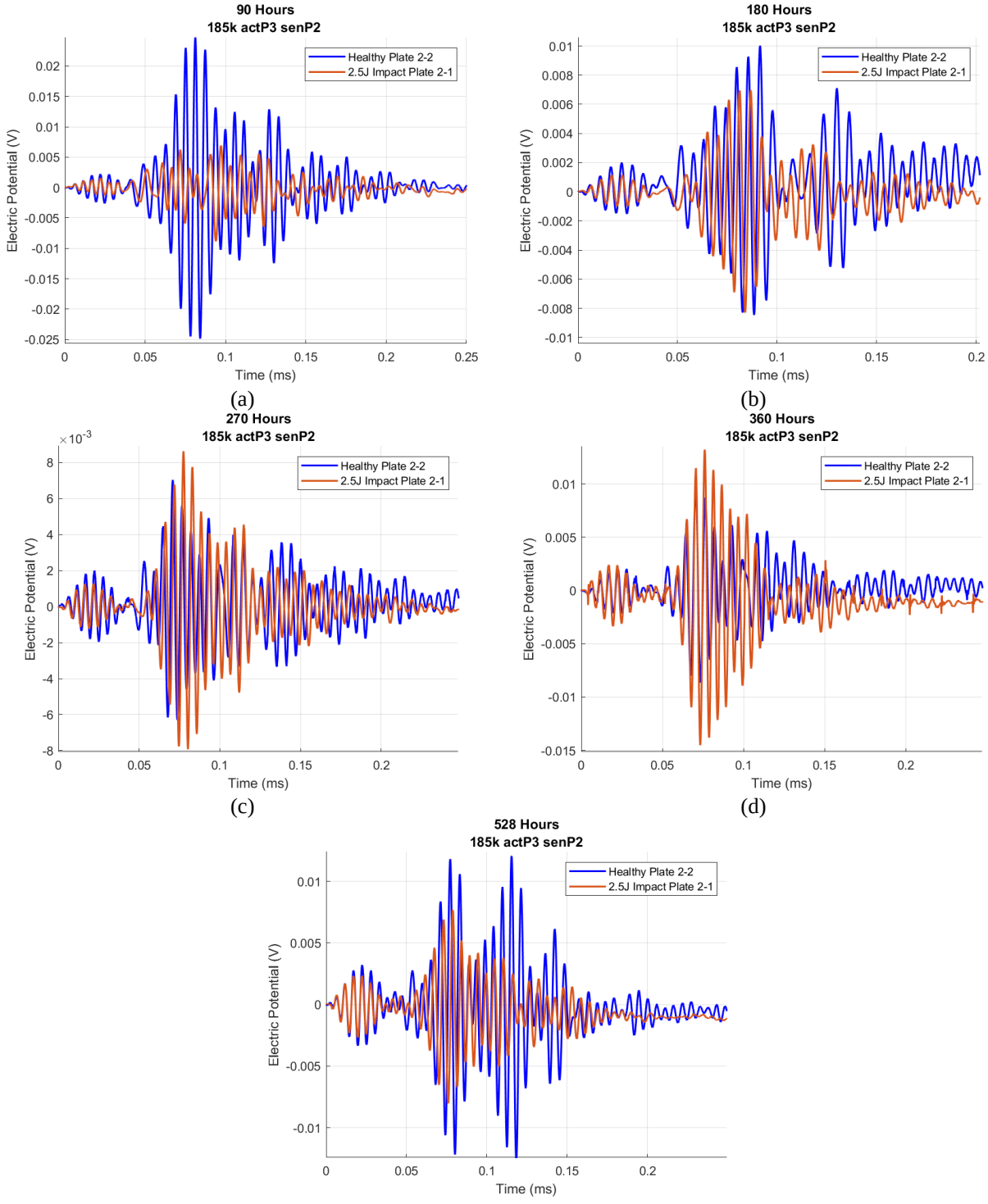
Appendix E Figure 8: *Σειρά πλάκας **P2** με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 185Hz.*



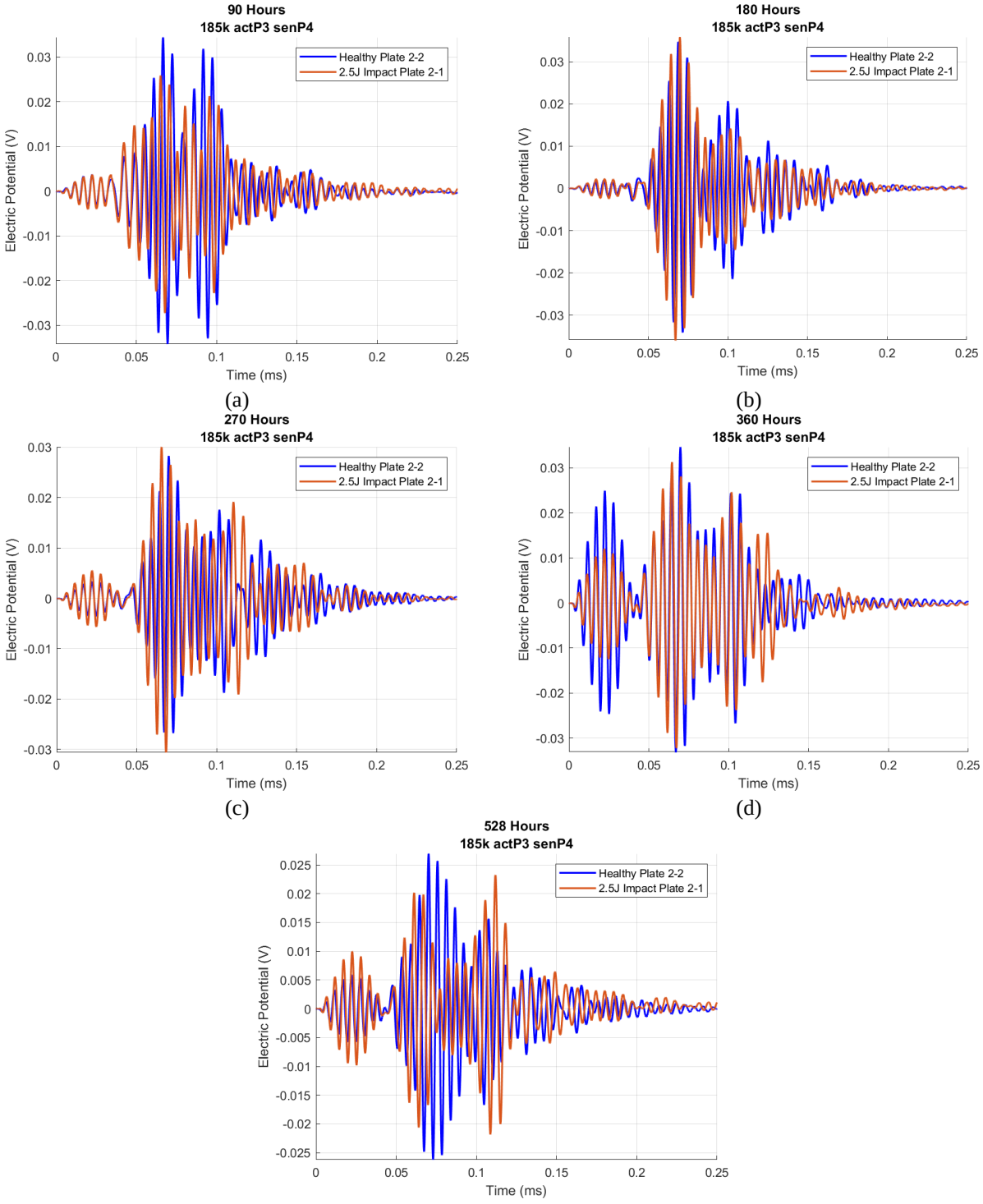
Appendix E Figure 9: *Σειρά πλάκας **P2** με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 185Hz.*



Appendix E Figure 10: *Σειρά πλάκας **P2** με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 130Hz.*



Appendix E Figure 11: *Σειρά πλάκας **P2** με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.*



Appendix E Figure 12: *Σειρά πλάκας **P2** με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 185Hz.*

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.2.1 : *Μετρούμενη μάζα των τελικών πλακών* 13

Πίνακας 3.2.2 : *Ελαστικές ιδιότητες των σύνθετων πλκών.* 13

Πίνακας 4.5.1: *Επιλογές για σύγκριση σημάτων* 41

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.1.1 : *Πλάνο προόδου εργασιών για το πείραμα* 11

Εικόνα 3.2.1 : *Η ενισχυμένη πλάκα από ίνες σύνθετου υλικού λιναριού εξοπλισμένη με τα πιεζοηλεκτρικά.* 14

Εικόνα 3.2.2 : *Η πλάκα P2-2 με την αντανακλαστική αυτοκόλλητη ταινία και τα πιεζοηλεκτρικά.* 14

Εικόνα 3.3.1 : *Πειραματική Εγκατάσταση για την κυματική διάδοση* 15

Εικόνα 3.4.1: *Σχηματική απεικόνιση της θέσης της κρούσης στο δοκίμιο με διαστάσεις.* 17

Εικόνα 3.4.2: *Πειραματική διάταξη μηχανής κρούσης Instron CEAST 9350.* 17

Εικόνα 4.3.1: *Πλάκα P2-2 για μετρήσεις με Laser Doppler και διεγέρτη το P1.* 28

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Figure 3.2.1: *Χαρακτηριστικές καμπύλες διασκορπισμού της σύνθετης πλάκας πάχους 3mm:* a) *φασική ταχύτητα με συχνότητα / ομαδική ταχύτητα με συχνότητα,* b) *κυματικός αριθμός με συχνότητα* 13

Figure 3.3.1: *Παλμός διέγερσης Gauss 7 κύκλων στα 130 kHz*..... 16

Figure 3.4.1: *Χρονική απόκριση του κρουστικού φορτίου μεταξύ των δύο πλακιδίων P1-1 και P2-1.* 18

Figure 3.4.2 *Χρονική απόκριση της ενέργειας κρούσης μεταξύ των δύο πλακιδίων P1-1 και P2-1.* 18

Figure 4.1.1: *Αύξηση μάζας (%) ως συνάρτηση του χρόνου εμβάπτισης.*..... 19

Figure 4.1.2: *Αύξηση μάζας (%) των δοκιμίων σε μορφή ραβδογράμματος.*..... 20

Ενδεικτικό γράφημα της χρονικής απόκρισης της ηλεκτρικής τάσης για τα 130kHz είναι αυτό που φαίνεται στο Figure 4.2.1. Σε αυτό είναι ορατή η σταδιακή μείωση του πλάτους του σήματος, η χρονική καθυστέρηση της άφιξης του, καθώς και η αλλαγή της κυματομορφής. Στα 185kHz, όπως φαίνεται στο Figure 4.2.2, δρα πιο καταλυτικά η απορρόφηση υγρασίας με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό η κυματομορφή σε σύγκριση πάντα με την αρχική. 21

Figure 4.2.2: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.*..... 22

Figure 4.2.3: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.*..... 23

Figure 4.2.4: *Μεταβολή του ToF ανά περίοδο 90 ωρών εμβάπτισης στο νερό.*..... 24

Figure 4.2.5: *Περιβάλλουσα περιοχή κυματομορφής.*..... 25

Figure 4.2.6: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P1-2 και ενεργοποιητή το P1 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.* 25

Figure 4.2.7: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P1-2 και ενεργοποιητή το P3 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.* 26

Figure 4.2.8: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P2-2 και ενεργοποιητή το P1 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.* 26

Figure 4.2.9: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P2-2 και ενεργοποιητή το P3 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.* 27

Figure 4.3.1: Μετρήσεις κατεύθυνσης 0^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.* 29

Figure 4.3.2: Μετρήσεις κατεύθυνσης 0^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.* 30

Figure 4.3.3: *Μεταβολή* (a) *ToF και* (b) *Group Velocity κατά τη διάρκεια της εμβάπτισης στα 130kHz.* 32

Figure 4.3.4: *Μεταβολή* (a) *ToF και* (b) *Group Velocity κατά τη διάρκεια της εμβάπτισης στα 185kHz.* 32

Figure 4.3.5: *Μεταβολή* (a) *ToF και* (b) *Group Velocity κατά τη διάρκεια της εμβάπτισης.* 33

Figure 4.4.1: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.* 35

Figure 4.4.2: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.* 36

Figure 4.4.3: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P1-1 και ενεργοποιητή το P1 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.* 38

Figure 4.4.4: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P1-1 και ενεργοποιητή το P3 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.* 38

Figure 4.4.5: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P2-1 και ενεργοποιητή το P1 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.* 39

Figure 4.4.6: *Η διακύμανση του εμβαδού των κυματομορφών για την Πλάκα P2-1 και ενεργοποιητή το P3 για* (a) *130kHz και* (b) *185kHz.* 39

Figure 4.5.1: *Σειρά πλάκας P2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 130Hz.* 42

Figure 4.5.2: *Σειρά πλάκας P2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 185Hz.* 43

Appendix A Figure 1: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 130kHz.* 48

Appendix A Figure 2: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 185kHz.* 49

Appendix A Figure 3: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.* 50

Appendix A Figure 4: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.* 51

Appendix A Figure 5: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 130kHz.* 52

Appendix A Figure 6: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 185kHz.* 53

Appendix A Figure 7: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.* 54

Appendix A Figure 8: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.* 55

Appendix A Figure 9: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.* 56

Appendix A Figure 10: *Πλάκα P1-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.* 57

Appendix A Figure 11: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.* 58

Appendix A Figure 12: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.* 59

Appendix A Figure 13: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 130kHz.* 60

Appendix A Figure 14: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 185kHz.* 61

Appendix A Figure 15: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.* 62

Appendix A Figure 16: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.* 63

Appendix A Figure 17: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 130kHz.* 64

Appendix A Figure 18: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 185kHz.* 65

Appendix A Figure 19: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.* 66

Appendix A Figure 20: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.* 67

Appendix A Figure 21: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.* 68

Appendix A Figure 22: *Πλάκα P2-2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.* 69

Appendix B Figure 1: Μετρήσεις κατεύθυνσης 10^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.* 71

Appendix B Figure 2: Μετρήσεις κατεύθυνσης 10^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.* 72

Appendix B Figure 3: Μετρήσεις κατεύθυνσης 20^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.* 73

Appendix B Figure 4: Μετρήσεις κατεύθυνσης 20^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.* 74

Appendix B Figure 5: Μετρήσεις κατεύθυνσης 30^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.* 75

Appendix B Figure 6: Μετρήσεις κατεύθυνσης 30^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.* 76

Appendix B Figure 7: Μετρήσεις κατεύθυνσης 40^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.* 77

Appendix B Figure 8: Μετρήσεις κατεύθυνσης 40^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.* 78

Appendix B Figure 9: Μετρήσεις κατεύθυνσης 50^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.* 79

Appendix B Figure 10: Μετρήσεις κατεύθυνσης 50^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.* 80

Appendix B Figure 11: Μετρήσεις κατεύθυνσης 60^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.* 81

Appendix B Figure 12: Μετρήσεις κατεύθυνσης 60^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.* 82

Appendix B Figure 13: Μετρήσεις κατεύθυνσης 70^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.* 83

Appendix B Figure 14: Μετρήσεις κατεύθυνσης 70^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.* 84

Appendix B Figure 15: Μετρήσεις κατεύθυνσης 80^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.* 85

Appendix B Figure 16: Μετρήσεις κατεύθυνσης 80^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.* 86

Appendix B Figure 17: Μετρήσεις κατεύθυνσης 90^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 130kHz.* 87

Appendix B Figure 18: Μετρήσεις κατεύθυνσης 90^0 *Πλάκας P2-2 με ενεργοποιητή P1 στα 185kHz.* 88

Appendix Γ Figure 1: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.* 90

Appendix Γ Figure 2: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.* 91

Appendix Γ Figure 3: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 130kHz.* 92

Appendix Γ Figure 4: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 185kHz.* 93

Appendix Γ Figure 5: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.* 94

Appendix Γ Figure 6: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.* 95

Appendix Γ Figure 7: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 130kHz.* 96

Appendix Γ Figure 8: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 185kHz.* 97

Appendix Γ Figure 9: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.* 98

Appendix Γ Figure 10: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.*..... 99

Appendix Γ Figure 11: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 130kHz.*..... 100

Appendix Γ Figure 12: *Πλάκα P1-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 185kHz.*..... 101

Appendix Γ Figure 13: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 130kHz.*..... 102

Appendix Γ Figure 14: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 185kHz.*..... 103

Appendix Γ Figure 15: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 130kHz.*..... 104

Appendix Γ Figure 16: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 185kHz.*..... 105

Appendix Γ Figure 17: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 130kHz*..... 106

Appendix Γ Figure 18: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 185kHz*..... 107

Appendix Γ Figure 19: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 130kHz*..... 108

Appendix Γ Figure 20: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 185kHz*..... 109

Appendix Γ Figure 21: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 130kHz*..... 110

Appendix Γ Figure 22: *Πλάκα P2-1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 185kHz*..... 111

Appendix Δ Figure 1: *Σειρά P1 185kHz.*..... 112

Appendix Δ Figure 2: *Σειρά P1 185kHz.*..... 113

Appendix Δ Figure 3: *Σειρά P2 130kHz.*..... 114

Appendix Δ Figure 4: *Σειρά P2 185kHz.*..... 114

Appendix E Figure 1: *Σειρά πλάκας P1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 130Hz.*..... 116

Appendix E Figure 2: *Σειρά πλάκας P1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 185Hz.*..... 117

Appendix E Figure 3: *Σειρά πλάκας P1 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P4 στα 130Hz.*..... 118

Appendix E Figure 4: *Σειρά πλάκας P1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 130Hz.*..... 119

Appendix E Figure 5: *Σειρά πλάκας P1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 130Hz.*..... 120

Appendix E Figure 6: *Σειρά πλάκας P1 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 130Hz.*..... 121

Appendix E Figure 7: *Σειρά πλάκας P2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P2 στα 130Hz.*..... 122

Appendix E Figure 8: *Σειρά πλάκας P2 με ενεργοποιητή P1 και αισθητήρα P3 στα 185Hz.*..... 123

Appendix E Figure 9: *Σειρά πλάκας P2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P1 στα 185Hz.*..... 124

Appendix E Figure 10: *Σειρά πλάκας P2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 130Hz*..... 125

Appendix E Figure 11: *Σειρά πλάκας P2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P2 στα 185kHz*... 126

Appendix E Figure 12: *Σειρά πλάκας P2 με ενεργοποιητή P3 και αισθητήρα P4 στα 185Hz*..... 127

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

f $[Hz]$	Συχνότητα
ω $[rad/s]$	Κυκλική συχνότητα
A_0	Θεμελιώδες αντισυμμετρικό κύμα
S_0	Θεμελιώδες συμμετρικό κύμα
SHM	Παρακολούθηση Δομικής Ακεραιότητας
NDE	Μη Καταστροφική Αξιολόγηση
NDT	Μη Καταστροφικός Έλεγχος
GW	Κατευθυνόμενα Κύματα
PZT	Πιεζοηλεκτρικό Κεραμικό Στοιχείοzirconate και titanate μολύβδου (Pb[Zr*x*Ti1-*x*]O3)
f_C $[Hz]$	Κεντρική συχνότητα
σ	Απόκλιση παλμού Gauss
N_C	Αριθμός κύκλων
Amplitude	Πλάτος
ToF	Χρόνος που ταξιδεύει το διαδιδόμενο κύμα στην κατασκευή

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] K. L. Pickering, M. G. A. Efendy, and T. M. Le, "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 83. Elsevier Ltd, pp. 98–112, Apr. 01, 2016. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.08.038.

[2] A. Bourmaud, J. Beaugrand, D. U. Shah, V. Placet, and C. Baley, "Towards the design of high-performance plant fibre composites," *Progress in Materials Science*, vol. 97. Elsevier Ltd, pp. 347–408, Aug. 01, 2018. doi: 10.1016/j.pmatsci.2018.05.005.

[3] R. H. Newman, "Auto-accelerative water damage in an epoxy composite reinforced with plain-weave flax fabric," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 40, no. 10, pp. 1615–1620, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.compositesa.2009.07.010.

[4] A. Moudood, A. Rahman, A. Öchsner, M. Islam, and G. Francucci, "Flax fiber and its composites: An overview of water and moisture absorption impact on their performance," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 38, no. 7, pp. 323–339, Apr. 2019, doi: 10.1177/0731684418818893.

[5] J. César dos Santos *et al.*, "Ageing of autoclaved epoxy/flax composites: Effects on water absorption, porosity and flexural behaviour," *Compos B Eng*, vol. 202, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108380.

[6] D. Scida, M. Assarar, C. Poilâne, and R. Ayad, "Influence of hygrothermal ageing on the damage mechanisms of flax-fibre reinforced epoxy composite," *Compos B Eng*, vol. 48, pp. 51–58, May 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.12.010.

[7] M. Berges *et al.*, "Influence of moisture uptake on the static, cyclic and dynamic behaviour of unidirectional flax fibre-reinforced epoxy laminates," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 88, pp. 165–177, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.05.029.

[8] Y. Li and B. Xue, "Hydrothermal ageing mechanisms of unidirectional flax fabric reinforced epoxy composites," *Polym Degrad Stab*, vol. 126, pp. 144–158, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.02.004.

[9] A. Avci, A. A. Eker, M. S. Bodur, and Z. Candan, "Water absorption characterization of boron compounds-reinforced PLA/flax fiber sustainable composite," *Int J Biol Macromol*, vol. 233, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123546.

[10] M. Ghasemzadeh-Barvarz, C. Duchesne, and D. Rodrigue, "Mechanical, water absorption, and aging properties of polypropylene/flax/glass fiber hybrid composites," *J Compos Mater*, vol. 49, no. 30, pp. 3781–3798, Dec. 2015, doi: 10.1177/0021998314568576.

[11] Y. Shen *et al.*, "Effect of temperature and water absorption on low-velocity impact damage of composites with multi-layer structured flax fiber," *Materials*, vol. 12, no. 3, Feb. 2019, doi: 10.3390/ma12030453.

[12] F. Bensadoun, D. Depuydt, J. Baets, I. Verpoest, and A. W. van Vuure, "Low velocity impact properties of flax composites," *Compos Struct*, vol. 176, pp. 933–944, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.05.005.

[13] A. K. Barouni and H. N. Dhakal, "Damage investigation and assessment due to low-velocity impact on flax/glass hybrid composite plates," *Compos Struct*, vol. 226, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111224.

[14] M. J. S. Lowe, “WAVE PROPAGATION | Guided Waves in Structures,” in *Encyclopedia of Vibration*, Elsevier, 2001, pp. 1551–1559. doi: 10.1006/rwvb.2001.0173.

[15] H. Wu *et al.*, “Damage detection in composite materials using Lamb wave methods,” 2002.

[16] W. J. Staszewski, B. C. Lee, L. Mallet, and F. Scarpa, “Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: I. Lamb wave sensing,” *Smart Mater Struct*, vol. 13, no. 2, pp. 251–260, Apr. 2004, doi: 10.1088/0964-1726/13/2/002.

[17] C. Yang, L. Ye, Z. Su, and M. Bannister, “Some aspects of numerical simulation for Lamb wave propagation in composite laminates,” *Compos Struct*, vol. 75, no. 1–4, pp. 267–275, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.compstruct.2006.04.034.

[18] M. Dziendzikowski, A. Kurnyta, K. Dragan, S. Klysz, and A. Leski, “In situ Barely Visible Impact Damage detection and localization for composite structures using surface mounted and embedded PZT transducers: A comparative study,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 78, pp. 91–106, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.ymssp.2015.09.021.

[19] B. Qi *et al.*, “Study of impact damage in PVA-ECC beam under low-velocity impact loading using piezoceramic transducers and pvdf thin-film transducers,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/s18020671.

[20] G. Petrone, “Dispersion curves for a natural fibre composite panel: Experimental and numerical investigation,” *Aerosp Sci Technol*, vol. 82–83, pp. 304–311, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ast.2018.08.029.

[21] A. K. Barouni and D. A. Saravanos, “A layerwise semi-analytical method for modeling guided wave propagation in laminated composite infinite plates with induced surface

excitation," *Wave Motion*, vol. 68, pp. 56–77, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.wavemoti.2016.08.006.

[22] P. D. Dissertation Antigoni Barouni Patras, "Semi-Analytical Wave Propagation Models in Composite Plates of General Laminations for Structural Health Monitoring Applications," 2016.

[23] P. D. Dissertation Christoforos S Rekatsinas, "Time Domain Spectral Finite Element Methods for the Simulation of Wave Propagation in Composite Layered Structures with Active Piezoelectric Sensors," 2016.

[24] A. K. Barouni and C. S. Rekatsinas, "Study on the propagation of stress waves in natural fiber composite strips," *Journal of Composites Science*, vol. 5, no. 1, 2021, doi: 10.3390/jcs5010034.

[25] L. Tan *et al.*, "Impact Damage Detection Using Chirp Ultrasonic Guided Waves for Development of Health Monitoring System for CFRP Mobility Structures," *Sensors*, vol. 22, no. 3, Feb. 2022, doi: 10.3390/s22030789.

[26] S. Okazaki, H. Iwase, H. Nakagawa, H. Yoshida, and R. Hinei, "Effect of moisture distribution on velocity and waveform of ultrasonic-wave propagation in Mortar," *Materials*, vol. 14, no. 4, pp. 1–14, Feb. 2021, doi: 10.3390/ma14040790.

[27] M. Cinquin, M. Castaings, B. Hosten, P. Brassier, and P. Pérès, "Monitoring of the moisture content in carbon-epoxy plates using Lamb waves," *NDT and E International*, vol. 38, no. 1, pp. 37–44, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.ndteint.2004.06.006.

[28] M. Hübner, D. Lepke, E. Hardi, M. Koerdt, A. S. Herrmann, and W. Lang, "Online monitoring of moisture diffusion in carbon fiber composites using miniaturized flexible material integrated sensors," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 8, Apr. 2019, doi: 10.3390/s19081748.

[29] C. S. Rekatsinas, C. V. Nastos, T. C. Theodosiou, and D. A. Saravanos, "A time-domain high-order spectral finite element for the simulation of symmetric and anti-symmetric guided waves in laminated composite strips," *Wave Motion*, vol. 53, pp. 1–19, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.wavemoti.2014.11.001.

[30] CTS, "Piezoelectric Components and Devices."

[31] Adnan H. Nayfeh, (1995), "Wave Propagation in Layered Anisotropic Media with Applications to Composites" , ELSEVIER, USA.