



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ  
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΣΠΟΓΓΩΔΟΥΣ ΟΣΤΟΥ ΣΤΙΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ  
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ  
ΟΣΤΕΟΠΟΡΩΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΠΟΓΓΩΔΟΥΣ  
ΟΣΤΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ**

**ΜΠΕΛΕΣΙΩΤΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**

**A.M. 1047303**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ, ΜΕΛΟΣ Ε.ΔΙ.Π**

Διπλωματική εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών του

Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών  
Παναγιώτης Μπελεσιώτης

© 2023 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ**

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε

από τον

**ΜΠΕΛΕΣΙΩΤΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ**

1047303

την 19 Οκτωβρίου 2023

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

---

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

### **ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΣΠΟΓΓΩΔΟΥΣ ΟΣΤΟΥ ΣΤΙΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΟΣΤΕΟΠΟΡΩΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΠΟΓΓΩΔΟΥΣ ΟΣΤΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη μελέτη της επίδρασης της αρχικής δομής και της πυκνότητας του σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων, με σκοπό τη βελτιωμένη κατανόηση της οστεοπόρωσης και την ανάπτυξη νέων μεθόδων διάγνωσης. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν αντίγραφα σπογγώδους οστού από πολυγαλακτικό οξύ (PLA), θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (TPU) και πολυπροπυλένιο (PP), με σχετική ποσότητα οστού ανά μονάδα όγκου (BV/TV) 15%, 21% και 34% αντίστοιχα. Επίσης δημιουργήθηκαν δοκίμια (PLA) (PP) & (TPU) με σταθερά ελεγχόμενη δομή, και ίδιες αναλογίες 15%, 21% και 34% και με πάχος δοκίδων 0,2 και δοκίμια PLA σταθερής δομής για (Tr.Th) 0,2-0,4-0,5 & 0,6 mm, με σκοπό την προσομοίωση του οστού και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Όλα τα δοκίμια κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D PRINTING) και υποβλήθηκαν σε πειράματα υπερήχων στα οποία μετρήθηκε η ταχύτητα του ήχου μέσα από το δοκίμιο (SOS), η εξασθένιση ευρέως φάσματος (BUA) με τη μέθοδο through-transmission. Επίσης η οπισθοσκέδαση (backscatter) με τη μέθοδο pulse-echo για δύο είδη μεταλλακτών εστιακών και μη εστιακών (Focus-unfocus) πραγματοποιήθηκε μόνο για δοκίμια του σπογγώδους οστού. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμίων του οστού είναι το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), το πολυπροπυλένιο (PP) και η θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (TPU), ενώ τα δοκίμια σταθερής δομής κατασκευάστηκαν με το υλικό (PLA).

Η κατανόηση της αρχιτεκτονικής του σπογγώδους οστού είναι σπουδαίας σημασίας έργο καθώς μας επιτρέπει την πρόβλεψη και την αντιμετώπιση πολλών παθήσεων όπως είναι η οστεοπενία και η οστεοπόρωση. Η σύγκριση των χαρακτηριστικών δοκιμίου σπογγώδους οστού με αντίστοιχης πυκνότητας δοκίμια σταθερής διατομής από ίδια υλικά θα βοηθήσει στην εξαγωγή

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

συμπερασμάτων για την ορθή και κατάλληλη χρήση υλικών και δομών σε τομείς της εμβιομηχανικής και βιοιατρικής τεχνολογίας.

Λέξεις κλειδιά :

Σπογγώδες οστό, οστεοπόρωση, τρισδιάστατη εκτύπωση, υπέρηχοι, οπισθοσκέδαση

## **ABSTRACT**

### **INFLUENCE OF TRABECULAR BONE ARCHITECTURE AND MATERIAL ON ULTRASOUND CHARACTERISTICS USING 3D-PRINTED TRABECULAR BONE MODELS**

The aim of this thesis is to study the effect of the initial structure and the density of trabecular bone on the acoustic parameters of ultrasound, with the goal of understanding better about osteoporosis and developing new diagnostic methods. Specifically, replicas of trabecular bone were created from polylactic acid (PLA), thermoplastic polyurethane (TPU), and polypropylene (PP), with a relative bone volume fraction (BV/TV) of 15%, 21%, and 34%, respectively. Additionally, specimens (PLA) (PP) & (TPU) with a stable controlled structure and the same volume fractions of 15%, 21%, and 34%, as well as a thickness of 0.2, were created. PLA specimens with a stable structure for (Tr.Th) 0.2-0.4-0.5 & 0.6 mm were also prepared for simulating bone and evaluating the results.

All specimens were fabricated using the 3D printing method and were subjected to ultrasound experiments to measure the speed of sound through the specimen (SOS) and the broadband ultrasound attenuation (BUA) using the through-transmission method. Additionally, backscatter using the pulse-echo method for two types of focal and unfocused transducers (Focus-unfocus) was performed only for specimens of trabecular bone. The materials used for constructing the bone specimens were polylactic acid (PLA), polypropylene (PP), and thermoplastic polyurethane (TPU), while the specimens with a stable structure were made from PLA material.

Understanding the architecture of trabecular bone is of great importance as it allows us to predict and address various conditions such as osteopenia and osteoporosis. Comparing the characteristics of trabecular bone specimens with specimens of the same material but different densities will help

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

draw conclusions for the appropriate use of materials and structures in the fields of biomechanics and biomedical technology.

Key words :

Cancellous bone, osteoporosis, 3D printing, Ultrasound, Backscatter

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 1 Σημαντικότερα μεγέθη για τη φυσική των υπερήχων.....                                                                       | 17 |
| Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά του εκτυπωτή Ultimaker 2+.....                                                                              | 34 |
| Πίνακας 3 με τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του PLA.....                                                                       | 37 |
| Πίνακας 4 με τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του TPU.....                                                                       | 38 |
| Πίνακας 5 με τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του PP.....                                                                        | 40 |
| Πίνακας 6 με τις ρυθμίσεις που έγιναν στον εκτυπωτή για την εκτύπωση των δοκιμίων.....                                               | 42 |
| Πίνακας 7 με τα φυσικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....                 | 44 |
| Πίνακας 8 με τα φυσικά χαρακτηριστικά από τα δοκίμια με τις σταθερές δομές για πάχος δοκίδας 0.2mm .                                 | 45 |
| Πίνακας 9 με τα φυσικά χαρακτηριστικά από τα δοκίμια με τις σταθερές δομές για πάχος δοκίδας 0.4mm, 0.5mm, 0.6mm                     | 45 |
| Πίνακας 10 με τα μέτρα και το μέσο όρο των ταχυτήτων των τριών υλικών για τα διαφορετικά BV/TV στις τρεις διευθύνσεις.....           | 51 |
| Πίνακας 11 με τις τιμές BUA των τριών υλικών για τα διαφορετικά BV/TV στις τρεις διευθύνσεις σε μονάδες db/MHz .                     | 55 |
| Πίνακας 12 με τις τιμές και τον μέσο όρο BUA των τριών υλικών για τα διαφορετικά BV/TV στις τρεις διευθύνσεις σε μονάδες db/MHz/cm . | 56 |

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 13 τα μέτρα ελαστικότητας των δοκιμίων για κάθε υλικό ανά BV/TV στις τρεις διευθύνσεις.....                                                  | 60 |
| Πίνακας 14 Πίνακας με τις τιμές της ταχύτητας από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-x.....        | 76 |
| Πίνακας 15 με τις τιμές της ταχύτητας από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-y. ....               | 77 |
| Πίνακας 16 με τις τιμές της ταχύτητας από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-z. ....               | 78 |
| Πίνακας 17 με τις τιμές της εξασθένισης BUA από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-x.....          | 79 |
| Πίνακας 18 με τις τιμές της εξασθένισης BUA από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-y.....          | 80 |
| Πίνακας 19 με τις τιμές της εξασθένισης BUA από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-z. ....         | 81 |
| Πίνακας 20 με τις τιμές της εξασθένισης Bua/cm από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-x.....       | 82 |
| Πίνακας 21 με τις τιμές της εξασθένισης Bua/cm από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-y.....       | 83 |
| Πίνακας 22 με τις τιμές Ταχύτητας για το σπογγώδες οστό και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων από PLA στη διεύθυνση του x-άξονα..... | 87 |

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 23 με τις τιμές ταχύτητας για το σπογγώδες οστό και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων από PLA στη διεύθυνση του y-άξονα.....                       | 88 |
| Πίνακας 24 με τις τιμές ταχύτητας για το σπογγώδες οστό και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων από PLA στη διεύθυνση του z-άξονα. ....                      | 89 |
| Πίνακας 25 με τις τιμές Bua σε μονάδες db/MHz για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων στη διεύθυνση του x-άξονα. ....    | 90 |
| Πίνακας 26 με τις τιμές Bua σε μονάδες db/MHz για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων στη διεύθυνση του y-άξονα. ....    | 91 |
| Πίνακας 27 Bua για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,2mm και 0,4mm στη διεύθυνση του y-άξονα. ....                                 | 92 |
| Πίνακας 28 Bua για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,5mm και 0.6mm στη διεύθυνση του y-άξονα. ....                                 | 92 |
| Πίνακας 29 με τις τιμές Bua σε μονάδες db/MHz για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων στη διεύθυνση του z-άξονα.....     | 93 |
| Πίνακας 30 με τις τιμές Bua σε μονάδες db/MHz/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων στη διεύθυνση του x-άξονα. .... | 94 |
| Πίνακας 31 με τις τιμές Bua σε μονάδες db/MHz/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων στη διεύθυνση του y-άξονα. .... | 96 |
| Πίνακας 32 Τιμές Bua σε μονάδες db/MHz/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων στη διεύθυνση του z-άξονα.....         | 97 |

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 33 Με τα μέτρα ελαστικότητας του σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών στη διεύθυνση x.....  | 99  |
| Πίνακας 34 Με τα μέτρα ελαστικότητας του σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών στη διεύθυνση y.....  | 100 |
| Πίνακας 35 Με τα μέτρα ελαστικότητας του σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών στη διεύθυνση z. .... | 101 |

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1 Σχηματική απεικόνιση διαφορετικών τύπων σπογγώδους οστού(Singh 1978).....                                     | 8  |
| Εικόνα 2 Συμπαγές και σπογγώδες οστό .....                                                                             | 8  |
| Εικόνα 3 Σήμα υπολογισμού ταχύτητας για το νερό και για το δοκίμιο .....                                               | 20 |
| Εικόνα 4 Διάγραμμα εξασθένισης ευρέως φάσματος.Η BUA είναι η κλίση της γραμμικής περιοχής. ....                        | 21 |
| Εικόνα 5 Πρόβλεψη της εξασθένισης που οφείλεται στη σκέδαση συναρτήσει της συχνότητας                                  | 27 |
| Εικόνα 6 Πρόβλεψη διαφορικής διατομής σκέδασης σε σπογγώδες οστό με πορώδες 70% για διαφορετικά μεγέθη σκεδαστών. .... | 28 |
| Εικόνα 7 Πρόβλεψη της εξασθένισης μοντέλο υγρών σφαιρών. ....                                                          | 29 |
| Εικόνα 8 εκτυπωτής Ultimaker 2+ .....                                                                                  | 34 |
| Εικόνα 9 Εκτυπωτής Ultimaker 2+ σε εκτύπωση σπογγώδους οστού. ....                                                     | 35 |
| Εικόνα 10 Χημική δομή PLA .....                                                                                        | 37 |
| Εικόνα 11 Εικόνα 8 Χημική δομή TPU.....                                                                                | 39 |
| Εικόνα 12 Πολυμερισμός του προπυλενίου σε πολυπροπυλένιο. ....                                                         | 40 |
| Εικόνα 13 δοκίμιο σπογγώδους οστού με BV/TV=34% g-code. ....                                                           | 43 |
| Εικόνα 14 δοκίμιο σπογγώδους οστού με BV/TV=21% g-code. ....                                                           | 43 |
| Εικόνα 15 Εκτυπωμένα δοκίμια σταθερών δομών από PLA με διαφορετικά πάχη δοκίδων. ....                                  | 46 |
| Εικόνα 16 δοκίμιο σπογγώδους οστού κατά τη διαδικασία αφαίρεσης φυσαλίδων με το νόμο Bernoulli. ....                   | 47 |

---

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών και Εμβιομηχανικής

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 17 δοκίμιο σπογγώδους οστού κατά τη διαδικασία μέτρησης με υπερήχους. ....                                          | 48 |
| Εικόνα 18 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια από τα τρία υλικά συναρτήσει της πυκνότητας. ....        | 51 |
| Εικόνα 19 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA στους τρεις άξονες συναρτήσει της ταχύτητας. ....    | 52 |
| Εικόνα 20 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια TPU στους τρεις άξονες συναρτήσει της ταχύτητας. ....    | 52 |
| Εικόνα 21 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PP στους τρεις άξονες συναρτήσει της ταχύτητας. ....     | 53 |
| Εικόνα 22 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA, PP, TPU στον άξονα x συναρτήσει της ταχύτητας. .... | 53 |
| Εικόνα 23 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA, PP, TPU στον άξονα y συναρτήσει της ταχύτητας. .... | 54 |
| Εικόνα 24 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA, PP, TPU στον άξονα z συναρτήσει της ταχύτητας. .... | 54 |
| Εικόνα 25 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA στους τρεις άξονες συναρτήσει της εξασθένισης. ....  | 56 |
| Εικόνα 26 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια TPU στους τρεις άξονες συναρτήσει της εξασθένισης. ....  | 57 |
| Εικόνα 27 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PP στους τρεις άξονες συναρτήσει της εξασθένισης. ....   | 57 |

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

|                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 28 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα τρία υλικά PLA, PP , TPU στη διεύθυνση x.....                                                                                       | 58 |
| Εικόνα 29 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα τρία υλικά PLA, PP , TPU στη διεύθυνση y.....                                                                                       | 58 |
| Εικόνα 30 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα τρία υλικά PLA, PP , TPU στη διεύθυνση z. ....                                                                                      | 59 |
| Εικόνα 31 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA στους τρεις άξονες συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας. ....                                                            | 60 |
| Εικόνα 32 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PP στους τρεις άξονες συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας. ....                                                             | 61 |
| Εικόνα 33 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PP στους τρεις άξονες συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας. ....                                                             | 61 |
| Εικόνα 34 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA, PP, TPU στον άξονα x συναρτήσει του Μέτρου ελαστικότητας. ....                                                         | 62 |
| Εικόνα 35 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA, PP, TPU στον άξονα y συναρτήσει του Μέτρου ελαστικότητας. ....                                                         | 62 |
| Εικόνα 36 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA, PP, TPU στον άξονα z συναρτήσει του Μέτρου ελαστικότητας. ....                                                         | 63 |
| Εικόνα 37 Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο PLA με όγκο οστού προς συνολικό όγκο BV/TV=15% στη διεύθυνση z με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου d1=8mm. .... | 64 |

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

Εικόνα 38 Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο PLA με όγκο οστού προς συνολικό όγκο  $BV/TV=21\%$  στη διεύθυνση x με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου  $d1=8mm$ . ..... 65

Εικόνα 39 Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο PP με όγκο οστού προς συνολικό όγκο  $BV/TV=21\%$  και μέσος όρος πέντε μετρήσεων(focus) στη διεύθυνση z με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου  $d1=8mm$ . ..... 66

Εικόνα 40 Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο TPU με όγκο οστού προς συνολικό όγκο  $BV/TV=21\%$  και μέσος όρος πέντε μετρήσεων(focus), στη διεύθυνση x με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου  $d1=8mm$ . ..... 67

Εικόνα 41 Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο TPU με όγκο οστού προς συνολικό όγκο  $BV/TV=21\%$  και μέσος όρος πέντε μετρήσεων(focus) στη διεύθυνση z με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου  $d1=8mm$ . ..... 67

Εικόνα 42 Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο PLA, PP, TPU με όγκο οστού προς συνολικό όγκο  $BV/TV=21\%$  και μέσος όρος πέντε μετρήσεων(focus) στη διεύθυνση y με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου  $d1=8mm$ . ..... 68

Εικόνα 43 Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο PLA με όγκο οστού προς συνολικό όγκο  $BV/TV=34\%$  και μέσος όρος πέντε μετρήσεων(focus) στη διεύθυνση y με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου  $d1=8mm$ . ..... 69

Εικόνα 44 Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο TPU με όγκο οστού προς συνολικό όγκο  $BV/TV=34\%$  και μέσος όρος πέντε μετρήσεων(focus) στη διεύθυνση y με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου  $d1=8mm$ ..... 70

---

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών και Εμβιομηχανικής

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 45 Συντελεστής οπισθοσκέδασης συναρτήσει της συχνότητας για δύο τρισδιάστατα μοντέλα οστού απο PLA, TPU στη διεύθυνση x.....                                   | 71 |
| Εικόνα 46 Συντελεστής οπισθοσκέδασης συναρτήσει της συχνότητας για δύο τρισδιάστατα μοντέλα οστού απο PLA, TPU στη διεύθυνση y.....                                   | 72 |
| Εικόνα 47 Συντελεστής οπισθοσκέδασης συναρτήσει της συχνότητας για δύο τρισδιάστατα μοντέλα οστού απο PLA, TPU στη διεύθυνση z.....                                   | 73 |
| Εικόνα 48 Πυκνότητες PLA σταθερής δομής για πάχος δοκίδας 0,2mm συναρτήσει BV/TV....                                                                                  | 74 |
| Εικόνα 49 Πυκνότητες PP σταθερής δομής για πάχος δοκίδας 0,2mm συναρτήσει BV/TV.....                                                                                  | 75 |
| Εικόνα 50 Πυκνότητες TPU σταθερής δομής για πάχος δοκίδας 0,2mm συναρτήσει BV/TV....                                                                                  | 75 |
| Εικόνα 51 Πυκνότητες PLA, PP , TPU σταθερής δομής για πάχος δοκίδας 0,2mm συναρτήσει BV/TV.....                                                                       | 76 |
| Εικόνα 52 Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει των ταχυτήτων των δοκιμών σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-x ..... | 77 |
| Εικόνα 53 Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει των ταχυτήτων των δοκιμών σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-y. .... | 78 |
| Εικόνα 54 Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει των ταχυτήτων των δοκιμών σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-z.....  | 79 |
| Εικόνα 55 Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει της BUA των δοκιμών σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-x. ....       | 80 |
| Εικόνα 56 Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει της BUA των δοκιμών σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-y. ....       | 81 |

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 57 Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει της BUA των δοκιμίων σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-z.....     | 82 |
| Εικόνα 58 Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει της Bua/cm των δοκιμίων σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-x. .... | 83 |
| Εικόνα 59 Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει της Bua/cm των δοκιμίων σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-y. .... | 84 |
| Εικόνα 60 Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει της Bua/cm των δοκιμίων σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-z.....  | 84 |
| Εικόνα 61 Πυκνότητες PLA σπογγώδους οστού και των δειγμάτων από PLA σταθερής δομής για τα διαφορετικά πάχη δοκίδων συναρτήσει BV/TV .....                           | 86 |
| Εικόνα 62 Πυκνότητες PLA σπογγώδους οστού και των δειγμάτων από PLA σταθερής δομής για τα διαφορετικά πάχη δοκίδων συναρτήσει BV/TV= 15-21-34 .....                 | 86 |
| Εικόνα 63 Ταχύτητες για το σπογγώδες οστό και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων από PLA στη διεύθυνση του x-άξονα συναρτήσει του BV/TV. ....        | 87 |
| Εικόνα 64 Ταχύτητες για το σπογγώδες οστό και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων από PLA στη διεύθυνση του y άξονα συναρτήσει του BV/TV.....         | 88 |
| Εικόνα 65 Ταχύτητες για το σπογγώδες οστό και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων από PLA στη διεύθυνση του z-άξονα συναρτήσει του BV/TV. ....        | 89 |
| Εικόνα 66 Bua για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,2mm και 0.4mm στη διεύθυνση του x-άξονα.....                            | 90 |

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 67 Bua για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,5mm και 0.6mm στη διεύθυνση του x-άξονα.....                | 91 |
| Εικόνα 68 Bua για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,2mm και 0.4mm στη διεύθυνση του z-άξονα. ....               | 93 |
| Εικόνα 69 Bua για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,5mm και 0.6mm στη διεύθυνση του z-άξονα. ....               | 94 |
| Εικόνα 70 Bua/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,2mm και 0.4mm στη διεύθυνση του x-άξονα. ....            | 95 |
| Εικόνα 71 Bua/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,5mm και 0.6mm στη διεύθυνση του x-άξονα. ....            | 95 |
| Εικόνα 72 Bua/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,2mm και 0.4mm στη διεύθυνση του y-άξονα. ....            | 96 |
| Εικόνα 73 Bua/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,5mm και 0.6mm στη διεύθυνση του y-άξονα. ....            | 97 |
| Εικόνα 74 Bua/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,2mm και 0.4mm στη διεύθυνση του z-άξονα.....             | 98 |
| Εικόνα 75 Bua/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,5mm και 0.6mm στη διεύθυνση του z-άξονα.....             | 98 |
| Εικόνα 76 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA οστό και σταθερών δομών στη διεύθυνση x συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας. .... | 99 |

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

|                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 77 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA οστό και σταθερών δομών στη διεύθυνση y συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας. .... | 100 |
| Εικόνα 78 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA οστό και σταθερών δομών στη διεύθυνση z συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας.....  | 101 |

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

**BV/TV (%) :** Σχετική ποσότητα οστού ανά μονάδα όγκου

**PLA :** Πολυγαλακτικό οξύ

**PP :** Πολυπροπυλένιο

**TPU :** Θερμοπλαστική πολυουρεθάνη

**°C:** Βαθμοί Κελσίου

**A (m<sup>2</sup>):** Τετραγωνικά μέτρα (Επιφάνεια)

**TPU:** Θερμοπλαστική Πολυουθεράνη

**FDM:** Fused Deposition Manufacturing

**BV (Bone Volume):** Όγκος οστού

**mm:** Χιλιοστά

**Ca:** Ασβέστιο

**s (sec):** Δευτερόλεπτο

**cm<sup>3</sup>:** Κυβικά εκατοστά (επιφάνεια)

**mm<sup>3</sup>/s:** Κυβικά χιλιοστά ανά δευτερόλεπτο (Παροχή)

**gr/cm<sup>3</sup>:** Γραμμάριο ανά κυβικό εκατοστό (Πυκνότητα)

**F (N):** Νιούτον (Δύναμη)

**GPa:** Γιγαπασκάλ (Τάση)

**m:** Μέτρο

**m<sup>2</sup>:** Τετραγωνικό μέτρο (Επιφάνεια)

**BS/BV:** Bone Surface to Bone Volume

**BUA:** (Broadband Ultrasound Attenuation) Εξασθένιση ευρέως φάσματος

**by :** Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης

**C(f):** Συντελεστής διόρθωσης λόγω εξασθένισης

**Cwat, Csam:** Ταχύτητα διάδοσης υπερήχου στο νερό, στο δοκίμιο

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

**S0(f):** Μέσος όρος των τιμών του φάσματος ισχύος του δοκιμίου αναφοράς

**SB(f):** Μέσος όρος των τιμών του φάσματος ισχύος της περιοχής ενδιαφέροντός μας δοκιμίου

**SOS:** (Speed Of Sound) – Ταχύτητα του ήχου **Sr:** (Steradian) – Σερακτίνιο

**asc :** Εξασθένιση οφειλόμενη στη σκέδαση **bsc:** (Backscatter coefficient)

$\gamma^2$ : Μέση τετραγωνική διακύμανση

**κε, κρ, κθ, ρθ:** Συμπίεστικότητα και πυκνότητα στη θέση r, κθ και ρθ οι αντίστοιχες μέσες τιμές

$\mu^2$ : Μέση τετραγωνική διακύμανση της ταχύτητας

**ρ:** Πυκνότητα σκεδαστή

**σb:** Διαφορική διατομής σκέδασης

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

|                                                              |             |
|--------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>                                         | <b>IV</b>   |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                         | <b>VI</b>   |
| <b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....</b>                               | <b>VIII</b> |
| <b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ.....</b>                   | <b>XII</b>  |
| <b>ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ .....</b>                                     | <b>XX</b>   |
| <b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....</b>                                      | <b>XXII</b> |
| <b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....</b>                                     | <b>1</b>    |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....</b>                                      | <b>2</b>    |
| <b>1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΜΑ .....</b>                                  | <b>2</b>    |
| <b>1.2 ΟΣΤΑ.....</b>                                         | <b>3</b>    |
| <b>1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΑ .....</b> | <b>9</b>    |
| <b>1.4 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....</b>              | <b>10</b>   |
| <b>1.5 ΟΣΤΕΟΠΟΡΩΣΗ .....</b>                                 | <b>11</b>   |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....</b>                                      | <b>13</b>   |
| <b>2.1 ΗΧΟΣ .....</b>                                        | <b>13</b>   |
| <b>2.2 ΥΠΕΡΗΧΟΙ .....</b>                                    | <b>16</b>   |
| <b>2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΥΠΕΡΗΧΩΝ .....</b>                      | <b>18</b>   |
| <b>2.4 ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΠΕΡΗΧΩΝ .....</b>              | <b>19</b>   |

---

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών  
και Εμβιομηχανικής

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

|                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------|------------|
| <b>2.5 ΜΕΤΑΛΛΑΚΤΕΣ-ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ(PROBES-TRANSDUCERS) .....</b>    | <b>29</b>  |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ .....</b>                | <b>31</b>  |
| <b>3.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....</b>         | <b>31</b>  |
| <b>3.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....</b>                              | <b>32</b>  |
| <b>3.3 3D ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ ULTIMAKER 2+ .....</b>                     | <b>33</b>  |
| <b>3.4 ΥΛΙΚΑ.....</b>                                          | <b>35</b>  |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>                                        | <b>41</b>  |
| <b>4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....</b>                        | <b>41</b>  |
| <b>4.2 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΙΚΡΙΩΜΑΤΩΝ.....</b>   | <b>44</b>  |
| <b>4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ .....</b>  | <b>47</b>  |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>           | <b>50</b>  |
| <b>5.1 ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΠΟΓΓΩΔΟΥΣ ΟΣΤΟΥ .....</b>                      | <b>50</b>  |
| <b>5.2 ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΔΟΜΗΣ 0,2MM .....</b>                  | <b>74</b>  |
| <b>5.3 ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΔΟΜΗΣ PLA 0,2-0,4-0,5-0,6 MM .....</b> | <b>85</b>  |
| <b>5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>                                   | <b>102</b> |
| <b>5.5 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ.....</b>             | <b>103</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΠΗΓΕΣ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>                   | <b>104</b> |

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την υλοποίηση αυτής της σπουδαστικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Κο Δρ. Αποστολόπουλο Κωνσταντίνο για όλη του την συνεχή καθοδήγηση, σε όλα τα βήματα της εργασίας και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Κα Δέσποινα Δεληγιάννη που μου έδωσε την ευκαιρία να υλοποιήσω τη διπλωματική μου εργασία, στο εργαστήριο εμβιομηχανικής του τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Ευχαριστώ πολύ τον καθηγητή Κο. Πολύζο Δημοσθένη που μου έκανε την τιμή να είναι μέλος της τριμελούς επιτροπής. Ευχαριστώ πολύ το εργαστήριο και όλα τα μέλη του καθώς μου προσέφεραν όλα τα υλικά που χρειάστηκαν για την εκπόνηση των πειραμάτων καθώς και όλον τον απαραίτητο εξοπλισμό. Θερμές ευχαριστίες στον Δρ. Μάρτιν Βασίλειο Νικηφορίδη για την πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε στην πειραματική διαδικασία των σταθερών δομών. Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερα την οικογένειά μου για την στήριξη που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ

- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 :  
Οστά και οστεοπόρωση
- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 :  
Κύματα-υπέρηχοι. Βασικές ιδιότητες των υπερήχων, ακουστικές ιδιότητες (SOS, BUA, BSC), χαρακτηριστικά των αισθητήρων μεταλλακτών(transducers).
- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 :  
Τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, παρουσίαση των υλικών κατασκευής των δοκιμίων PLA, PP και TPU, περιγραφή ιδιοτήτων αυτών, (μηχανικές και θερμικές ιδιότητες), παρουσίαση του εκτυπωτή Ultimaker 2+ στον οποίον έγιναν οι εκτυπώσεις των ικριωμάτων.
- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Περιγραφή της κατασκευής των δειγμάτων και η πειραματική διαδικασία.
- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με την επίδραση της δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού και των δοκιμίων σταθερής διατομής, στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.
- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Πηγές-Βιβλιογραφία.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών και Εμβιομηχανικής

---

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η κατανόηση των ακουστικών ιδιοτήτων του σπογγώδους οστού και η επίδρασή του στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων έχουν αποτελέσει αντικείμενο έντονης έρευνας στον τομέα της ιατρικής και της ιατρικής απεικόνισης καθώς και στην επιστήμη της εμβιομηχανικής. Η εξέλιξη των υπερήχων και η προσπάθεια για καλύτερη κατανόηση και διάγνωση της οστεοπόρωσης ανέδειξαν τη σημασία της κατανόησης των ακουστικών ιδιοτήτων μέσω των οστών. Σε αυτό το πλαίσιο η παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση έχει σκοπό να παρουσιάσει και να αναλύσει τα κυριότερα ευρήματα και τις τελευταίες εξελίξεις σχετικά με τις ακουστικές ιδιότητες των οστών καθώς και το ρόλο των υπερήχων στην αξιολόγηση της οστικής πυκνότητας, προτού εξετάσουμε την επίδραση της αρχικής δομής και της πυκνότητας του σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής εργασίας ως αρχίσουμε με μια εισαγωγή στις θεμελιώδεις αρχές των οστών και της οστεοπόρωσης.

### **1.2 ΟΣΤΑ**

Τα οστά αποτελούν ένα από τα θεμελιώδη στοιχεία του ανθρώπινου οργανισμού καθώς υποστηρίζουν τη δομή και τη λειτουργία του. Η οστική πυκνότητα και η ενδεχόμενη παραμόρφωση της, όπως συμβαίνει με την οστεοπόρωση έχει μεγάλη σημασία για την υγεία του ανθρώπου. Τα οστά αποτελούνται από ασβεστοποιημένες πρωτεΐνες και θεωρούνται ως ζωντανός ιστός καθώς φέρουν αιμοφόρα αγγεία και διάφορα μεταλλικά στοιχεία. Συνεπώς θα μπορούσαμε να τα θεωρήσουμε ως ένα σύνθετο υλικό αποτελούμενο από κολλαγόνο, το οποίο είναι μια ινώδης πρωτεΐνη καθώς και φωσφορικό ασβέστιο. Στο ανθρώπινο σώμα δεν υπάρχει άλλος σκληρότερος

---

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών  
και Εμβιομηχανικής

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

ιστός. Το περισσότερο ασβέστιο στο ανθρώπινο σώμα βρίσκεται σε ποσοστό 99% στα δόντια και στα οστά. Τα οστά χαρακτηρίζονται από μεγάλη ανομοιογένεια και πολύπλοκη δομή. Η σύσταση τους είναι και αυτή εξαιρετικά πολύπλοκη και περιλαμβάνει την οστική μήτρα που αποτελείται κυρίως από κρυστάλλους ασβεστίου και κολλαγόνο. Οι κρύσταλλοι ασβεστίου προσδίδουν τη σκληρότητα και την ανθεκτικότητα στα οστά ενώ το κολλαγόνο προσδίδει την ελαστικότητα και την αντοχή τους. Επιπλέον αποτελούνται από κύτταρα μεταξύ των οποίων είναι τα οστεοκύτταρα και τα χονδροκύτταρα. Ο ρόλος των οστεοκυττάρων τα καθιστά υπεύθυνα για την ανάπτυξη και τη συντήρηση της οστικής μήτρας. Όπως προαναφέρθηκε αποτελούνται από αιμοφόρα αγγεία που παρέχουν τροφοδοσία στα κύτταρα και στην οστική μήτρα. Επίσης αυτά τα αγγεία μπορούν να μεταφέρουν αίμα και να συμβάλλουν στην αναπαραγωγή και επιδιόρθωση των οστών. Τέλος, εκτός από το ασβέστιο τα οστά περιέχουν επίσης φώσφορο σε μικρές ποσότητες και άλλα μεταλλικά στοιχεία όπως μαγνήσιο, νάτριο κάλιο. Αυτά τα μεταλλικά στοιχεία είναι απαραίτητα για τη διατήρηση της ισορροπίας των ηλεκτρολυτών στο σώμα. Το κυριότερο ανόργανο συστατικό είναι ο υδροξαπίτης και σε δεύτερο βαθμό είναι το ανθρακικό ασβέστιο. Άλλα ανόργανα συστατικά είναι το χλωριούχο ασβέστιο αλλά και αλκαλικά μέταλλα σε μικρές ποσότητες. Τα παραπάνω ανόργανα συστατικά εναποτίθενται στον οστεοειδή ιστό και σταδιακά κρυσταλλοποιούνται.

Ο ερυθρός μυελός, που είναι υπεύθυνος για την παραγωγή των αιμοπεταλίων, βρίσκεται θέση σε ένα είδος οστού, που ονομάζεται σπογγώδες οστό καθώς έχει μια πλεγματική δομή με μικρές δοκίδες οστού τις οστεοδοκίδες. Το δοκιδωτό ή σπογγώδες οστό βρίσκεται μέσα στον αυλό του οστού και είναι πιο ελαστικό και πιο εύκαμπτο, έχει υψηλό ρυθμό μεταβολισμού και μπορεί να αναδιαμορφώνεται ταχέως. Το 30-90% του σπογγώδους οστού είναι πορώδες και εκεί φιλοξενείται ο μυελός των οστών. Όταν αρχίσει να υφίσταται οστεοπόρωση το πορώδες αυξάνει και αποκτά μεγαλύτερες οπές συνεπώς και μικρότερη ποσότητα οστού.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

Μπορούμε να διαχωρίσουμε τα οστά σε τρία επίπεδα δομικής οργάνωσης :

- Μοριακό επίπεδο
- Μικροσκοπικό επίπεδο
- Μακροσκοπικό επίπεδο

### **ΜΟΡΙΑΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ**

Στο μοριακό επίπεδο το οστό αναλύεται χημικά και δομικά, αναλύοντας τον οστικό ιστό σε αυτό το επίπεδο βλέπουμε την πολύπλοκη χημική δομή και τα μόρια που το απαρτίζουν. Ορισμένα από τα κυριότερα μόρια και δομικά στοιχεία που βρίσκονται στα οστά σε μοριακό επίπεδο περιλαμβάνουν τα εξής, το κολλαγόνο το οποίο είναι μια κύρια πρωτεΐνη που αποτελεί τον ιστό των οστών. Αυτή η ινώδης πρωτεΐνη αποτελεί το πλαίσιο για τα άλλα μόρια στα οστά και παρέχει ελαστικότητα και αντοχή. Οι κρύσταλλοι με τη σειρά τους αποτελούν το ανόργανο συστατικό των οστών και αποτελούνται κυρίως από ασβέστιο και φώσφορο παρέχοντας τη σκληρότητα και την ανθεκτικότητα στα οστά. Σε ένα πλήρες ανεπτυγμένο οστό τα ανόργανα συστατικά υπάρχουν σε ποσοστό 60-65% του ξηρού βάρους. Ο υδροξαπίτης είναι ένα σημαντικό μόριο που βρίσκεται στα οστά αποτελεί το κύριο συστατικό των κρυστάλλων ασβεστίου και παρέχει τη σκληρότητα και την ανθεκτικότητα που απαιτείται ώστε να υποστηριχθεί ο σκελετός του ανθρώπινου σώματος. Οι κρύσταλλοι του υδροξαπίτη βρίσκονται κατά μήκος των ινιδίων του κολλαγόνου, τα οποία έχουν διάμετρο 50-70nm. Ο οστίτης ιστός αποτελείται από τα οστεοκύτταρα, τους οστεοβλάστες και τις οστεοκλάστες. Τα οστεοπρογονικά κύτταρα που προέρχονται από τα αρχέγονα μεσεγχυματικά κύτταρα βρίσκονται και αυτά στο μυελό των οστών και παράγουν τους οστεοβλάστες. Οι οστεοβλάστες μπορούν να παράγουν νέο οστό και ρυθμίζουν τη δραστηριότητα των οστεοκλαστών. Συνεπώς τα οστά δεν είναι στατικές δομές αλλά διατηρούνται συνεχώς μέσω μιας διαδικασίας ονομαζόμενης οστικής αναδόμησης. Αυτή είναι μια συνεχής και ζωντανή διαδικασία που ρυθμίζεται από τις δραστηριότητες των οστεοβλαστών και των οστεοκλάστων. Οι οστεοκλάστες είναι μεγάλα κύτταρα με πολλαπλούς πυρήνες, έχουν

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

διάμετρο 20-100μm και είναι υπεύθυνα για την απορρόφηση του οστικού ιστού. Κατά τη διαδικασία αυτή, οι οστεοκλάστες αποσπούν ανόργανα συστατικά και πρωτεΐνες από το οστό, επιτρέποντας την ανανέωση και την επιδιόρθωση του οστικού ιστού. Εκτός από το κολλαγόνο, υπάρχουν και άλλες πρωτεΐνες στο οστό, όπως οι οστεοποντίνες και οι οστεοκαλκίνες. Αυτές οι πρωτεΐνες συνδράμουν στη διατήρηση της δομής του οστού και στη ρύθμιση της μεταβολής του ασβεστίου. Επίσης είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα οστά περιέχουν και άλλα συστατικά όπως γλυκοπρωτεογλυκάνες (GAGs) που βοηθούν στη διατήρηση της υγρασίας αλλά και της δομής του οστικού ιστού. Στο μοριακό επίπεδο, το οστό είναι εξοπλισμένο με πολυάριθμα ιόντα νατρίου, καλίου και μαγνησίου τα οποία διαδραματίζουν ρόλο στην ηλεκτροφυσιολογία και την οστική ανάπτυξη.

## ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Στα θηλαστικά διακρίνονται 2 βασικοί τύποι οστικού ιστού. Στο πεταλλιώδη οστικό ιστό, το κολλαγόνο και ο συνδεόμενος υδροξυαπίτης αποτελούν στρώσεις, γνωστές ως οστέινα πετάλια με πάχος περίπου 5μm. Εντός αυτού του πεταλίου, τα ινίδια του κολλαγόνου εμφανίζονται να προσανατολίζονται προς μια κατεύθυνση. Ορισμένοι ειδικοί θεωρούν ότι όλα τα ινίδια σε ένα πετάλιο έχουν τον ίδιο προσανατολισμό. Ωστόσο είναι πιο πιθανό τα ινίδια με συγκεκριμένη διεύθυνση να καταλαμβάνουν μόνο μικρές περιοχές με τον προσανατολισμό τους να μεταβάλλεται εντός του πεταλίου.

Ο δεύτερος τύπος οστού σχηματίζεται γύρω από τα αγγεία, όπου το οστό αφαιρείται από τις οστεοκλάστες, με αποτέλεσμα να δημιουργείται η κοιλότητα Haversian με περίπου 100μm διαμέτρου. Τα τοιχώματα αυτής της κοιλότητας είναι ομαλά και το οστό εναποτίθεται εσωτερικά σε συγκεντρωτικές στρώσεις. Στο κέντρο της κοιλότητας υπάρχει τουλάχιστον ένα αιμοφόρο αγγείο.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## **ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ**

Το οστό αποτελεί έναν πολύπλοκο και οργανωμένο ιστό που διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην υποστήριξη και στην προστασία του ανθρώπινου σώματος. Σε μακροσκοπικό επίπεδο, το οστό χωρίζεται σε 2 κύριες κατηγορίες: Το συμπαγές και το σπογγώδες οστό.

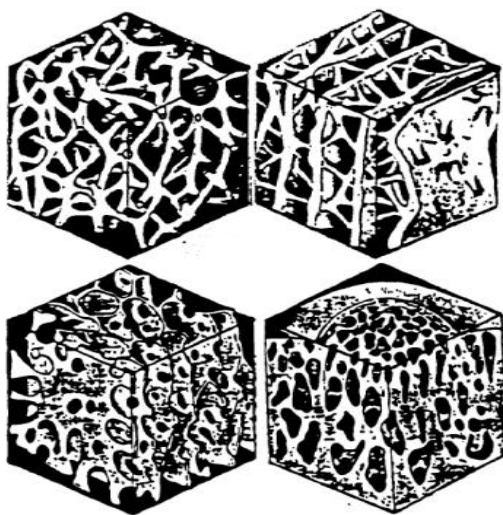
Το συμπαγές οστό είναι πυκνό και διαθέτει λίγους πόρους, περιοχές όπου συχνά βρίσκονται οστεοκύτταρα, αγγεία και οστικά σωληνάκια. Αυτή η σχεδόν ομογενής δομή, του παρέχει αυξημένη δομή και σταθερότητα, κάνοντάς το ιδανικό για την προστασία των ζωτικών οργάνων και την υποστήριξη του σώματος.

Αντίθετα το σπογγώδες οστό είναι πιο πορώδες, με μια πλοκή από οστικά διαφράγματα που δημιουργούν μια σπογγώδη δομή. Αυτή η μορφή οστού, παρέχει αντοχή στο σκελετό χωρίς να προσθέτει υπερβολικό βάρος. Είναι πιο ελαστικό από το συμπαγές οστό και συχνά περιέχει μυελό, που είναι ο τύπος παραγωγής των κόκκινων και των λευκών αιμοσφαιρίων. Μελέτες αποκαλύπτουν ότι το σπογγώδες οστό διαθέτει μια ενδιαφέρουσα μορφολογία, με μεγάλη ποικιλία στην αρχιτεκτονική του δομή. Οι ιστοί από τους οποίους αποτελείται και η μακροσκοπική του δομή μπορεί να παρουσιάζουν ανισοτροπίες, χαρακτηριστικό που μπορεί να επηρεάσει τις μηχανικές του ιδιότητες. Με βάση τον Singh(1978) έγινε λεπτομερής περιγραφή της μορφολογίας του σπογγώδους οστού από διαφορετικά μέρη του ανθρώπινου σκελετού και έτσι προέκυψε μεγάλος πλούτος αρχιτεκτονικής ποικιλίας. Έτσι, με βάση την εικόνα που ακολουθεί μπορεί να γίνει διαχωρισμός στους τύπους Ι(επάνω αριστερά εικόνα), Ια(επάνω δεξιά εικόνα), Ιθ, Ιγ, ΙΙα, ΙΙβ(κάτω αριστερά εικόνα) και ΙΙγ(κάτω δεξιά εικόνα).

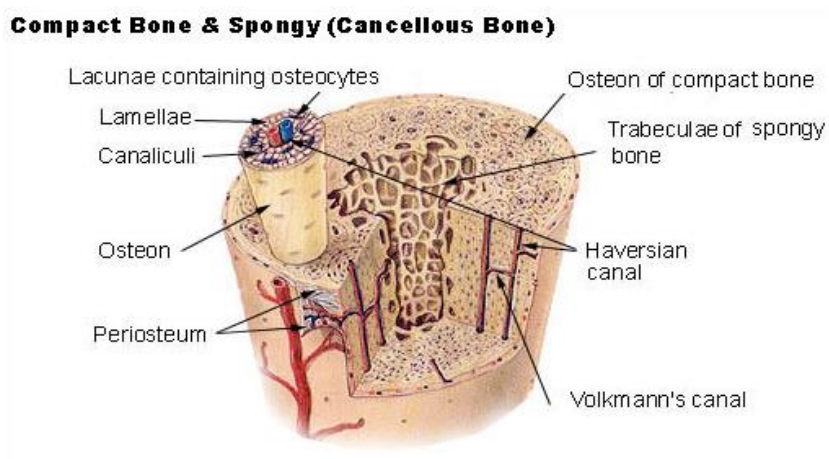
Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 1** Σχηματική απεικόνιση διαφορετικών τύπων σπογγώδους οστού(Singh 1978)



**Εικόνα 2** Συμπαγές και σπογγώδες οστό

<https://training.seer.cancer.gov/anatomy/skeletal/tissue.html>

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

### 1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΑ

Το σπογγώδες οστό, με τη μοναδική και πολύπλοκη δομή του, διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στη βιομηχανική ακεραιότητα του ανθρώπινου σκελετού. Η κατανόηση της λειτουργίας, της δομής και της συμπεριφοράς του σπογγώδους οστού είναι απαραίτητη για την πρόληψη, τη διάγνωση και τη θεραπεία πληθώρας ορθοπεδικών παθολογικών καταστάσεων, όπως η οστεοπόρωση μια ασθένεια που χαρακτηρίζεται από τη μείωση της πυκνότητας του οστού αλλά και την αυξημένη ευθραυστότητα των οστών.

Μέσω της ιστομορφομετρίας, είναι δυνατή η λεπτομερής ανάλυση των χαρακτηριστικών του σπογγώδους οστού.

Οι σημαντικότερες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη δομή του σπογγώδους οστού είναι :

- BV/TV (Relative bone volume), σχετική ποσότητα του οστού ανά μονάδα όγκου. Είναι αδιάστατο μέγεθος και μετράται σε % ή σε κλάσμα της μονάδας.
- BS/BV (Bone surface to volume ratio), είναι η σχετική επιφάνεια του οστού ανά μονάδα όγκου, και χαρακτηρίζει την συνθετότητα της δομής. Υπολογίζεται από το 3D  $\mu$ CT, και μετράται σε  $mm^{-1}$
- Tb.Th. (Trabecular thickness), αφορά το πάχος της δοκίδας. Υπολογίζεται από μετρήσεις στο επίπεδο (2D), θεωρώντας δύο μοντέλα δοκίδων, το μοντέλο των παράλληλων πλακών (parallel plate) και το μοντέλο των κυλινδρικών ράβδων (cylinder rod model).
- Tr.Sp. (Trabecular separation), αφορά το μέσο πλάτος των πόρων (κάθετα στην διεύθυνση των δοκίδων) και μετράται σε mm ή σε  $\mu m$ , και για τα δύο μοντέλα.
- Tr.N. (Trabecular number), αφορά την μέση απόσταση των δοκίδων, από κορυφογραμμή σε κορυφογραμμή (ridges), και μετράται σε mm και για τα δύο μοντέλα.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

- D.A. (Degree of anisotropy). Ένα υλικό χαρακτηρίζεται ανισότροπο όταν οι ιδιότητες του αλλάζουν σε διάφορες διευθύνσεις. Το σπογγώδες οστό είναι γενικά ανισότροπο υλικό με μεγάλη πολυπλοκότητα στη δομή του.

## 1.4 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Τα οστά έχουν κάποιες καθοριστικές φυσικές ιδιότητες, όπως η πυκνότητα, η πυκνότητα των οστικών αλάτων και η πορώδης δομή τους. Η πυκνότητα αναφέρεται στην αναλογία της μάζας ενός αντικειμένου σε σχέση με τον όγκο του. Ακριβώς η ίδια αρχή ισχύει και το σπογγώδες οστό ωστόσο ισχύουν κάποιοι σύνθετοι προβληματισμοί. Όσον αφορά τη μάζα εξετάζεται η ύπαρξη ή όχι μυελού, ενώ για τον όγκο λόγω της ύπαρξης του πορώδους οδηγούμαστε σε 2 λύσεις : η μία λύση εξετάζει τον όγκο συνολικά (πόροι και μυελός) και ονομάζεται ολικός όγκος (Weaver and Chalmers 1996 and Bell 1967), ενώ η δεύτερη υπολογίζει τον όγκο χωρίς τον μυελό αγνοώντας του πόρους και ονομάζεται όγκος μήτρας καλουπιού (Volume of the solid matrix excluding the marrow vascular spaces Arnold and Tont, 1967).

Αναφορικά με την πυκνότητα, μπορεί να υποδιαιρεθεί σε :

- Πραγματική πυκνότητα (real density) : ορίζεται σαν το πηλίκο της υγρής μάζας του δοκιμίου προς τον πραγματικό όγκο του οστού.
- Φαινόμενη ή ισοδύναμη πυκνότητα (apparent density) : Ορίζεται σαν το πηλίκο της μάζας του δοκιμίου του οστού χωρίς την ύπαρξη του μυελού, προς τον συνολικό όγκο του δοκιμίου.

Η πυκνότητα των οστικών αλάτων αναφέρεται στην περιεκτικότητα των ανόργανων στοιχείων στο οστό. Μερικά ανόργανα στοιχεία που περιέχονται είναι : C, O, F, Ca, P, H, S, Cl, K, Zn, Fe, Si τα οποία είναι σε μορφή ανόργανων ή οργανικών μεγαλομοριακών ενώσεων. Μερικές από αυτές είναι : : MgO, ZnO, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NaCl.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

Το σπογγώδες οστό όπως υποδηλώνει και το όνομά του, έχει μια πορώδη δομή που το διακρίνει από το συμπαγές οστό. Η δομή αυτή μπορεί να επηρεαστεί και το οστό να γίνει ευάλωτο σε ορισμένες παθήσεις όπως η οστεοπόρωση ή να επηρεαστεί από τη θεραπεία με συγκεκριμένα φάρμακα, αν και πρωτεύουσας σημασίας παράγοντας θεωρείται η ηλικία και η διατροφή. Τα υλικά που περιέχουν πορώδη δομή διακρίνονται για τις ξεχωριστές και πολυδιάστατες φυσικές τους ιδιότητες σε σχέση με τα συμπαγή. Η παρουσία πόρων, ειδικά όταν αυτοί περικλείουν υγρά στοιχεία μπορεί να περιπλέξει ιδιαίτερα την κατανόηση των υλικών αυτών. Ως πορώδες ορίζεται ο λόγος του όγκου των κενών προς τον συνολικό όγκο του σώματος. Συνήθως η αναλογία αυτή υπολογίζεται χωρίς πρόβλημα, σε αντίθεση με τη δομή και το σχήμα των πόρων όπου η περιγραφή δεν είναι το ίδιο εύκολη. Σε περίπτωση που οι πόροι είναι σφαίρες ίδιας διαμέτρου μπορεί να γίνει ποσοτική περιγραφή αλλά τις περισσότερες φορές η γεωμετρία των πόρων είναι τέτοια που καθιστά την περιγραφή τους αδύνατη.

## 1.5 ΟΣΤΕΟΠΟΡΩΣΗ

Η οστεοπόρωση αποτελεί μια διαδεδομένη παθολογία του οστικού συστήματος, που χαρακτηρίζεται από τη μείωση της πυκνότητας του οστού και την επακόλουθη αυξημένη ευθραυστότητα των οστών. Όπως περιεγράφηκε προηγουμένως, η οστεοπόρωση διαταράσσει την ισορροπία ανάμεσα στην ανασύνθεση και την αποδόμηση, οδηγώντας σε μια προοδευτική απώλεια της οστικής μάζας. Αυτή η απώλεια της οστικής μάζας με την πάροδο της ηλικίας είναι φυσιολογικό φαινόμενο. Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι η οστεοπόρωση δεν είναι μονοδιάστατη αλλά έχει διάφορες υποκατηγορίες όπως η πρωτογενής και η δευτερογενής οστεοπόρωση. Ο ορισμός της οστεοπόρωσης βασίζεται στη μέτρηση της οστικής πυκνότητας όπως ορίζεται από τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που επικεντρώνονται στη διάγνωση της οστεοπόρωσης και της εκτίμησης του κινδύνου γήρανσης,

---

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών και Εμβιομηχανικής

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

ιδιαίτερα σε γυναίκες μετά την εμμηνόπαυση, έχουν αναπτυχθεί διάφορες διαγνωστικές τεχνικές όπως :

- Συστήματα εκτίμησης ρίσκου SCORE
- Κλινική αξιολόγηση και εργαστηριακές εξετάσεις
- Ακτινολογικές τεχνικές
- Μέτρηση πυκνότητας οστού μέσω μη επεμβατικών τεχνικών π.χ. DEXA

Πέρα από τις διαγνωστικές τεχνικές είναι εξίσου σημαντική η πρόληψη και η θεραπεία της οστεοπόρωσης. Στοιχεία πρόληψης περιλαμβάνουν την εξισορρόπηση της διατροφής με πλούσιες πηγές ασβεστίου, την άσκηση, την αποφυγή καπνίσματος και υπερβολικού αλκοόλ. Είναι απαραίτητο για τον καθένα να είναι ενημερωμένος για την οστεοπόρωση καθώς η έγκαιρη διάγνωση και παρέμβαση μπορεί να μειώσει σημαντικά τον κίνδυνο καταγμάτων και άλλων συναφών προβλημάτων.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 ΗΧΟΣ

Ο ήχος αναφέρεται στη μηχανική διαταραχή που διαδίδεται μέσω ενός ελαστικού μέσου, όπως ο αέρας τα υγρά και τα στερεά. Προκαλείται από σώματα που δονούνται ή ταλαντώνονται δημιουργώντας κύματα. Αυτά τα κύματα, είναι γνωστά ως ηχητικά κύματα και μπορούν να είναι είτε διαμήκη είτε εγκάρσια, ανάλογα με τον τρόπο διάδοσης τους. Στα ρευστά, ο ήχος μεταδίδεται κυρίως με διαμήκη κύματα, ενώ στα στερεά μπορεί να υπάρχουν και τα 2 είδη κυμάτων. Για να διαδοθεί ο ήχος απαιτείται η ύπαρξη ενός μέσου μεταξύ ενός σώματος πομπού και ενός σώματος δέκτη. Αυτό το μέσο μπορεί να είναι στερεό, υγρό, αέριο ή ακόμα και πλάσμα. Ωστόσο στο απόλυτο κενό ο ήχος δεν μπορεί να διαδοθεί. Για να φανταστούμε πώς διαδίδεται ο ήχος, μπορούμε να φέρουμε ως παράδειγμα έναν συνεχή σωρό από ελατήρια και μάζες όπου όταν μια από αυτές τις μάζες δονείται, προκαλεί μια αλυσιδωτή αντίδραση στις άλλες μάζες μέσω των ελατηρίων. Η Μετατόπιση μπορεί να γίνει κατά μήκος του μέσου(διαμήκης) ή κάθετα προς αυτό(εγκάρσια). Στην πραγματικότητα ο ήχος ταξιδεύει στον αέρα με ταχύτητα περίπου 331.5 m/s υπό ορισμένες συνθήκες. Η ταχύτητα αυτή μπορεί να αλλάξει ανάλογα τη θερμοκρασία ή την ατμοσφαιρική πίεση.

Τα χαρακτηριστικά φαινόμενα του ήχου είναι τα εξής :

- Ανάκλαση
- Περίθλαση
- Διάθλαση
- Φαινόμενο Doppler
- Παρεμβολή

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## **KYMATΑ**

Ένας από τους τρόπους με τους οποίους ταξιδεύει η ενέργεια χωρίς μεταφορά μάζας (Keller 1958) με κύριο χαρακτηριστικό την περιοδικότητα στο χώρο και στο χρόνο. Η διαδικασία με την οποία μεταφέρεται η ενέργεια από μία περιοχή σε μία άλλη ονομάζεται διάδοση.

Επίπεδο, σφαιρικό, κυλινδρικό κύμα, είναι το κύμα που έχει επίπεδες, σφαιρικές και κυλινδρικές ισοφασικές αντίστοιχα επιφάνειες. Στάσιμο κύμα είναι το κύμα που οι ισοφασικές του ή οι δεσμικές του επιφάνειες, δεν ταξιδεύουν στο χώρο. Ισοφασική επιφάνεια είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που βρίσκονται μέσα στην ίδια περίοδο και έχουν την ίδια φάση.

Μερικά χαρακτηριστικά των κυμάτων είναι :

- Δεσμός είναι το σημείο με μηδενική απομάκρυνση για κάθε χρονική στιγμή  $t$ .
- Κυματικός αριθμός ή κυματάριθος: Το μέτρο του διανύσματος της διεύθυνσης του κύματος ( $k$ ,  $k=2\pi/\lambda$ ) ( $1/m$ ).
- Εξασθένιση του κύματος (attenuation): είναι η βαθμιαία ελάττωση του πλάτους του κύματος.
- Διασκόρπιση (dispersion): είναι η βαθμιαία μεταβολή του σχήματος ενός κύματος που οφείλεται στην ιδιότητα του μέσου να διαδίδει τα διάφορα αρμονικά κύματα που συνθέτουν το κύμα, με διαφορετικές φασικές ταχύτητες (ανάλογα του  $\omega$ ).
- Απόσβεση (dissipation): είναι ο φυσικός μηχανισμός που δημιουργεί τα φαινόμενα της εξασθένισης. Η απώλεια ενέργειας λόγω απόστασης οφείλεται σε μετατροπή της μηχανικής ενέργειας ή οποιασδήποτε άλλης μορφής ενέργειας σε θερμότητα ή στην εκτροπή της ενέργειας από την κύρια διεύθυνση διάδοσης.
- Σκέδαση (scattering): Όταν η πορεία διάδοσης ενός κύματος διακόπτεται από οποιαδήποτε ανομοιογένεια συμπίεστότητας ή πυκνότητας, τότε έχουμε το φαινόμενο της σκέδασης. Σκέδαση\* (Chivers 1997) μπορεί να θεωρηθεί ως η

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

αλλαγή του εύρους, της συχνότητας, της φασικής ταχύτητας ή της διεύθυνσης της κυματικής διάδοσης σαν αποτέλεσμα της ανομοιομορφίας του μέσου εντός του οποίου διαδίδεται και οφείλεται στο πεπερασμένο μέγεθος των σκεδαστών, συγκρινόμενο με το μήκος κύματος και μετράται σε  $\text{Sr-1 cm}^{-1}$ .

- Ενεργειακή διατομή σκέδασης (Ε.Δ.Σ.): Όταν το σκεδαζόμενο κύμα σκορπίσει σφαιρικά γύρω από την ανομοιογένεια τότε αναφερόμαστε στην Ε.Δ.Σ. και ορίζεται σαν η μέση ισχύς του σκεδαζομένου κύματος από διάφορες ανομοιογένειες του μέσου που οριοθετούνται από έναν όγκο  $V$ , προς τον όγκο αυτόν.
- Διαφορική διατομή σκέδασης  $180^\circ$  (Δ.Δ.Σ.) (Backscattering): Η Δ.Δ.Σ.  $180^\circ$  εκφράζει το ποσοστό της ισχύος του κύματος που σκεδάζεται στις  $180^\circ$  προς την ένταση του προσπίπτοντος κύματος.
- Στερακτίνο (Steradian - Sr): Στερεή γωνία που έχει την κορυφή της στο κέντρο μιας θεωρητικής σφαίρας και κόβει περιοχή της επιφάνειας της σφαίρας ίσου εμβαδού με το εμβαδό τετραγώνου πλευράς ίση με την ακτίνα της σφαίρας. Μία σφαίρα περιέχει  $4\pi$  steradians.
- Nepers (Np): Αδιάστατη μονάδα που εκφράζει τον λόγο δύο ομοειδών ποσοτήτων με λογαριθμικό τρόπο. Χρησιμοποιεί σαν βάση τον αριθμό 2,71878 σε αντίθεση με την μονάδα dB που χρησιμοποιεί ως βάση τον αριθμό 10 ( $1 \text{ Neper} = 8,686 \text{ decibels}$ ).

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## 2.2 ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Οι υπέρηχοι είναι ηχητικά κύματα που έχουν συχνότητα υψηλότερη από 20KHz, το οποίο είναι το ανώτατο όριο της ανθρώπινης ακοής για του περισσότερους ενήλικους. Παρόλο που δεν μπορούμε να τους ακούσουμε, έχουν εκτεταμένες εφαρμογές στην καθημερινή ζωή και στην επιστήμη. Ορισμένες εφαρμογές βρίσκουν στον τομέα της ιατρικής καθώς η υπερηχογραφία είναι μια μη επεμβατική διαδικασία που χρησιμοποιεί υπέρηχους για την παραγωγή εικόνων των εσωτερικών οργάνων του σώματος. Σε βιομηχανικό επίπεδο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθαρισμό εξαρτημάτων ή ακόμη και στον έλεγχο των προϊόντων για ελαττώματα ή για την ανίχνευση ρωγμών. Συνήθως το εύρος των συχνοτήτων που χρησιμοποιείται στους ελέγχους είναι από 50MHz έως και 100 KHz. Στον τομέα της ναυτιλίας τα υποβρύχια μέσω των σόναρ ραντάρ μπορούν να ελέγχουν και να εκτιμούν την απόσταση από τον βυθό ή άλλων αντικειμένων. Τέλος πολλά ζώα όπως οι νυχτερίδες χρησιμοποιούν τους υπερήχους για τον εντοπισμό τροφής ή για πλοήγηση.

Είναι γνωστό ότι τα μέσα, είτε είναι αέρια, στερεά ή υγρά, μπορούν να υποστούν ταλάντωση. Όταν η ταλάντωση γίνεται με ταχύτητα που υπερβαίνει το ακουστικό όριο της ανθρώπινης ακοής την αναφέρουμε ως υπέρηχο. Τα κύματα αυτά παράγονται από ταλαντώσεις μικροσκοπικών σωματιδίων του μέσου σαν να ήταν συνδεδεμένα με ελαστικές δυνάμεις. Ο ρόλος της ταλάντωσης και ο τρόπος με τον οποίο διαπερνά το μέσο εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες του μέσου καθώς και από τη φύση της διέγερσης που προκάλεσε την ταλάντωση. Η κίνηση των σωματιδίων του μέσου κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης μπορεί να περιγραφεί είτε ως μετατόπιση συναρτήσει της θέσης και του χρόνου  $\zeta=f(z,t)$  είτε ως μεταβολή της πίεσης του ήχου συναρτήσει της θέσης και του χρόνου  $p=f(z,t)$ . Ενώ το ηλεκτρικό δυναμικό που παράγεται από έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο είναι ανάλογο με το ηχητικό κύμα που δημιουργείται  $U=f(z,t)$ . Η σύνθετη φύση των αντανakλάσεων και των ταλαντώσεων σε συγκεκριμένα μέσα καθιστά την ερμηνεία των φαινομένων πολύ πιο δύσκολη.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα σημαντικότερα μεγέθη που αφορούν τη φυσική των υπερήχων και τη διαδοσή του στα δοκίμια :

| ΜΕΓΕΘΗ                              | ΤΥΠΟΣ              | ΜΟΝΑΔΑ<br>ΜΕΤΡΗΣΗΣ(S.I)            |
|-------------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| Γωνιακή ταχύτητα                    | $\omega = 2 \pi f$ | rad/s                              |
| Συχνότητα                           | $f = 1/T$          | 1/s ή Hz (Hertz)                   |
| Ταχύτητα του ήχου                   | C                  | m/s                                |
| Μήκος κύματος                       | $\lambda = c/f$    | m                                  |
| Μετατόπιση σωματιδίου               | $\xi$              | m                                  |
| Ταχύτητα σωματιδίου                 | v                  | m/s                                |
| Πυκνότητα                           | $\rho$             | kg/m <sup>3</sup>                  |
| Δύναμη                              | F                  | kgm/s ή N (Newton)                 |
| Διαφορά της πίεσης του ήχου         | p                  | kg /m s <sup>2</sup> ή Pascal (Pa) |
| Ο λόγος του Poisson                 | $\mu, m$           |                                    |
| Μέτρο ελαστικότητας                 | E                  | kg /ms <sup>2</sup>                |
| Μέτρο διάτμησης                     | G                  | kg /ms <sup>2</sup>                |
| Ακουστική εμπίεση                   | $Z = \rho c$       | kg /ms <sup>2</sup> s              |
| Ακουστική ισχύς                     | P                  | Watt (W)                           |
| Πυκνότητα ακουστικής ισχύος(ένταση) | J                  | W/m <sup>2</sup>                   |

**Πίνακας 1** Σημαντικότερα μεγέθη για τη φυσική των υπερήχων.

## 2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Οι υπέρηχοι είναι μια ανερχόμενη τεχνική όσον αφορά την αξιολόγηση του οστού και ιδιαίτερα όταν πρόκειται για την ανίχνευση της οστεοπόρωσης καθώς και για τον προσδιορισμό στοιχείων που καθορίζουν τις μηχανικές ιδιότητες των οστών. Η μεταβολή της group velocity και phase velocity (Isaac Chen and Subatra Saha(1987)) καθώς και η μεταβολή των κυμάτων fast wave και slow wave (Yoshiki Nagatani and Katsunori Mizuno (2008)) είναι οι κυριότερες μέθοδοι διάγνωσης της οστεοπόρωσης. Υπάρχουν διάφορες παραδοσιακές μέθοδοι που προβλέπουν τον κίνδυνο εμφάνισης κατάγματος όπως είναι οι ακτίνες X, η μαγνητική τομογραφία (MRI), τεχνικές ποσοτικών υπερήχων κ.λ.π. οι οποίες σε συνδυασμό με τη χρήση υπερήχων μπορούν να προσφέρουν μια πιο ολοκληρωτική εικόνα για τη συνολική υγεία του οστού. Παρακάτω παρουσιάζονται τα σημαντικά πλεονεκτήματα της χρήσης των υπερήχων.

- Ευαισθησία στις μικροαρχιτεκτονικές αλλαγές : Οι υπέρηχοι μπορούν να ανιχνεύσουν μικρές αλλαγές στη μικροαρχιτεκτονική του οστού, πράγμα που τους καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμους στην πρόληψη και στην ανίχνευση πρώιμων σταδίων οστεοπόρωσης.
- Ακρίβεια στη διάγνωση της οστεοπόρωσης : Πολλές μελέτες έχουν δείξει πως οι υπέρηχοι αποτελούν σημαντικό εργαλείο στη διάγνωση της οστεοπόρωσης δίνοντας πολλές πληροφορίες για την πυκνότητα του οστού μέσω μετρήσεων της ταχύτητας του ήχου (Speed Of Sound) αλλά και μέσω της εξασθένισης ευρέως φάσματος (Broadband Ultra sound Attenuation).
- Διαγνωστικές εξετάσεις με υπερήχους στον ανθρώπινο οργανισμό : Στον τομέα της ιατρικής η χρήση υπερήχων είναι ευρέως διαδεδομένη για τη διάγνωση πολλαπλών παθήσεων. Συγκεκριμένα μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για ασθένειες

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

εσωτερικών οργάνων όπως παθήσεις του θυροειδούς, ασθένειες του μαστού αλλά και πληροφορίες σχετικά με την κίνηση εσωτερικών οργάνων όπως είναι η καρδιά.

- Μη καταστροφικός έλεγχος για το μέσο: Όπως προαναφέρθηκε η χρήση υπερήχων είναι ακίνδυνη για το μέσο. Παρόλο που ο ήχος είναι ευδιάκριτος μέσα στο μέσο που διαπερνά, δεν προκαλεί μόνιμες αλλαγές και δεν φέρει ιοντίζουσα ακτινοβολία όπως άλλες τεχνικές, καθιστώντας τους ιδανικούς για τη διάγνωση ασθενειών χωρίς τη μόνιμη μεταβολή του μέσου που εξετάζεται. Μέσω της αλληλεπίδρασης των ηχητικών κυμάτων με διάφορα υλικά, είναι δυνατή η αξιολόγηση της κατάστασης ενός υλικού.

## 2.4 ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

### TAXYTHTA TOY HXOY(SOS-Speed Of Sound)

Για να μετρηθεί η ταχύτητα του ήχου μέσα από το οστό χρησιμοποιείται η μέθοδος “through transmission”, κατά την οποία χρησιμοποιούνται δύο μετατροπείς-μεταλλάκτες που βρίσκονται μέσα στο νερό και ο πρώτος λειτουργεί σαν πομπός στέλνοντας έναν παλμό ευρείας συχνότητας στο σπογγώδες οστό, ενώ ο δεύτερος είναι τοποθετημένος ακριβώς απέναντι και λειτουργεί σαν δέκτης για το εξασθενημένο σήμα που διαπερνά το οστό λόγω της απόσβεσης που έχει υποστεί. Στα σήματα αυτά παρατηρούμε αρχικά έναν ελάχιστο παλμό, ξεκινώντας από αυτό το σημείο αυτό ως την επόμενη σημαντική μεταβολή του παλμού, τόσο για το νερό όσο και για το δείγμα, παίρνουμε αυτόν το χρόνο διέλευσης και γνωρίζοντας την απόσταση ανάμεσα σε μεταλλάκτη πομπό και μεταλλάκτη δέκτη μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του ήχου από τη σχέση :

$$C_{sam} = \frac{1}{\frac{1}{C_{wat}} + \frac{\Delta t}{d}}$$

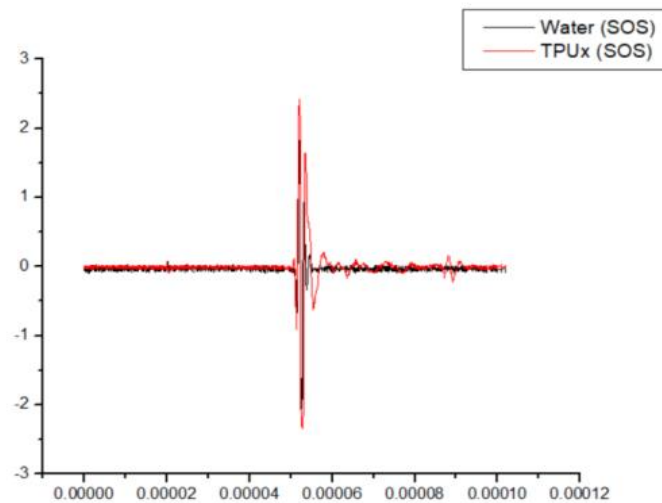
Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

Όπου:

- $C_{wat}$  και  $C_{sam}$ , είναι οι ταχύτητες διάδοσης των υπερήχων στο νερό και στο δοκίμιο αντίστοιχα.
- $d$  το πάχος του δοκιμίου
- $\Delta t$  η διαφορά ( $t_{sam}-t_{wat}$ ) των χρόνων διέλευσης μέσα από το δοκίμιο και μέσα από το νερό αντίστοιχα.



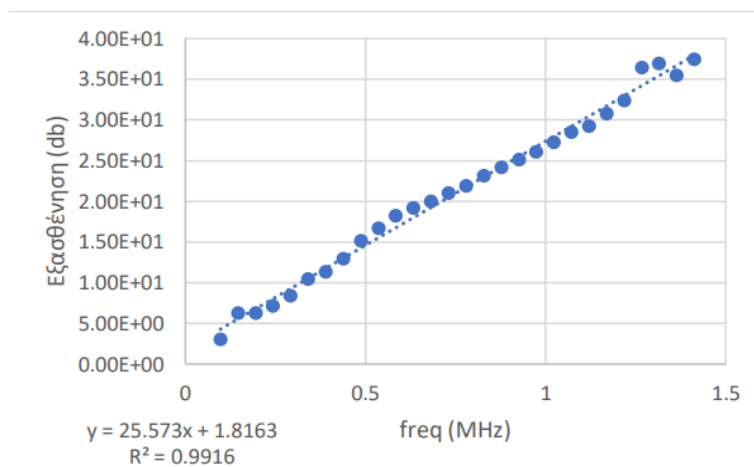
**Εικόνα 3** Σήμα υπολογισμού ταχύτητας για το νερό και για το δοκίμιο

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

### ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗ ΕΥΡΕΩΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ (BUA)

Η Broadband Ultrasound Attenuation(BUA) αναφέρεται στην απώλεια ενεργειακής ικανότητας ενός υπερήχου όταν διέρχεται μέσα από ένα υλικό, όπως το νερό ή το οστό. Αυτή η ενεργειακή απώλεια συμβαίνει λόγω απορρόφησης ή σκέδασης. Μέσω της μεθόδου Through Transmission μπορούμε να καταγράψουμε αυτήν την ενεργειακή απώλεια του σήματος. Ο συντελεστής εξασθένησης μετράται σε μονάδες dB και αντιπροσωπεύει τον δεκαδικό λογάριθμο του λόγου των ευρών του φάσματος της ισχύος του κύματος που διαδίδεται μέσω του δοκιμίου και του νερού αντίστοιχα, δηλαδή από τον τύπο:  $20\log(\text{FFT}_{\text{water}}/\text{FFT}_{\text{sample}})$ . Όταν αναλύουμε την εξασθένηση σε σχέση με την πυκνότητα παρατηρούμε μια γραμμική σχέση. Η κλίση της γραμμικής αυτής περιοχής σε συνάρτηση με τη συχνότητα αντιστοιχεί στην τιμή της BUA.



**Εικόνα 4** Διάγραμμα εξασθένησης ευρέως φάσματος. Η BUA είναι η κλίση της γραμμικής περιοχής.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

### **ΟΠΙΣΘΟΣΚΕΔΑΣΗ(BSC)**

Η σκέδαση είναι μία από τις βασικότερες διαδικασίες που συμβαίνουν όταν ένας υπέρηχος διέρχεται μέσα από ένα υλικό, ειδικά σε περιπτώσεις που το υλικό έχει πολύπλοκη δομή ή ανόμοια δομή όπως το οστό. Όταν ένας υπέρηχος προσκρούει σε ένα σωματίδιο ή σε μια ανομοιογένεια εντός του υλικού τότε μπορεί να σκεδαστεί σε διάφορες κατευθύνσεις.

Οι μετρήσεις της διαφορικής διατομής σκέδασης πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας την τεχνική pulse-echo. Αυτό σημαίνει ότι χρησιμοποιείται ένας μεταλλάκτης ο οποίος μπορεί να εστιάζει ή μη και να λειτουργεί ταυτόχρονα ως πομπός και ως δέκτης.

Η διαφορική διατομή σκέδασης  $180^\circ$  σε συνάρτηση με την συχνότητα υπολογίζεται με την μέθοδο των Roberjot et al., (1996) και Chaffai et al., (2002). Τα σήματα RF που λαμβάνονται από τα δείγματα οστού είναι διαθέσιμα σε βήματα 1 mm και παράγονται από μια 2D σάρωση του δείγματος. Η διατομή της υπέρηχης δέσμης μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση  $2.44\lambda F/d = 6.75\text{mm}$  (Wear et al., 2001) για μεταλλάκτη συχνότητας 1MHz, όπου :

- $\lambda$  : το μήκος κύματος
- $F$  : το μήκος εστίασης
- $d$  : η διάμετρος του μεταλλάκτη.

Από το σήμα που παράγεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής επιλέγεται μια περιοχή συγκεκριμένου μήκους ώστε να υπολογιστεί η σκέδαση  $180^\circ$ . Αυτός ο υπολογισμός απαιτεί διόρθωση του σήματος χρησιμοποιώντας το παράθυρο Hamming, καθώς και τρεις διορθωτικούς συντελεστές για σφάλματα που προκύπτουν από την εξασθένιση που υφίσταται το σήμα περνώντας μέσα από το οστό, την εξάρτηση της συχνότητας από τον όγκο που εξετάζεται και στη διάθλαση που συμβαίνει όταν ο ήχος συναντά την διεπιφάνεια νερού με οστό (Xu et al., 1993). Τέλος το φάσμα της ισχύος που προκύπτει από την ανάλυση Fourier διαρείται με το αντίστοιχο φάσμα μιας ατσάλινης πλάκας που χρησιμοποιείται σαν δοκίμιο αναφοράς. Η επιφάνεια της πλάκας απέχει από τον μεταλλάκτη την ίδια απόσταση με αυτήν ανάμεσα στον μεταλλάκτη και το κεντρικό σημείο από την περιοχή ελέγχου του δείγματος που αξιολογούμε. Η σχέση που εκφράζει το φαινόμενο συντελεστή σκέδασης :

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

$$\hat{\mu}_B(f) = \frac{\langle S_B(f) \rangle}{\langle S_0(f) \rangle}$$

Όπου :

- $\langle S_B(f) \rangle$  : ο μέσος όρος των τιμών του φάσματος της ισχύος που λαμβάνεται σε διαφορετικές θέσεις που αντιστοιχούν στον όγκο του δοκιμίου που θέλουμε να ελέγξουμε
- $\langle S_0(f) \rangle$  : οι τιμές του φάσματος της ισχύος από το δοκίμιο αναφοράς

Για την καθορισμένη περιοχή του φάσματος, οι επαναλαμβανόμενες μετρήσεις και η λήψη του μέσου όρου τους παίζουν κεντρικό ρόλο στην αποφυγή σφαλμάτων. Αυτό βοηθάει στην εξάλειψη των πιθανών στατιστικών ανακολουθιών που προκύπτουν. Ο συντελεστής της σκέδασης που παρατηρείται απαιτεί διόρθωση λόγω διαφόρων πηγών σφάλματος, όπως η ανάκλαση στην επιφάνεια του οστού, η μείωση της ισχύος του σήματος διερχόμενο μέσα από το οστό, και η συχνότητα που σχετίζεται με τον εξεταζόμενο όγκο. Τέλος όταν αξιολογούμε μετρήσεις από την εσωτερική περιοχή ενός οστικού δείγματος αυτές θα πρέπει να διορθώνονται και να προσαρμόζονται λαμβάνοντας υπόψη την εξασθένηση.

Η διαφορική διατομή σκέδασης  $180^\circ$  (Chaffai et al., 2002) είναι ίση με:

$$\mu_B(f) = \hat{\mu}_B(f) A_d(f) C(f) Factors(f)$$

Όπου :

- $C(f)$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης λόγω της εξασθένησης
- $A_d(f)$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης λόγω της διάθλασης και ισούται με 0.99
- ο  $Factors(f)$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης και εξαρτάται από τη συχνότητα στον όγκο της υπό εξέτασης περιοχής του δοκιμίου

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

Ο συντελεστής  $C(f)$  δίνεται από τη σχέση :

$$C(f) = e^{4\hat{a}(f)z} \frac{4\hat{a}(f)d}{e^{2\hat{a}(f)d} - e^{-2\hat{a}(f)d}}$$

και ο συντελεστής  $Factors(f)$  δίνεται από τη σχέση :

$$Factors(f) = \frac{1}{0.63^2} \frac{k^2 a^2}{8\pi d \left[ 1 + \left( \frac{ka^2}{4F} \right) \right]}$$

Όπου :

- $(1/0.63)^2$  είναι ο διορθωτικός παράγοντας για τη Hamming gate συνάρτηση
- $a(f)$  είναι ο εξαρτημένος από τη συχνότητα συντελεστής εξασθένησης σε μονάδες Nepers/MHz/cm
- $d$  είναι το μήκος του όγκου ελέγχου,  $z$  είναι η απόσταση από την αρχή του εξεταζόμενου οστού μέχρι το μέσο του όγκου που ελέγχεται
- $k = 2\pi/\lambda$  είναι ο κυματικός αριθμός,  $a$  είναι η ακτίνα του μεταλλάκτη και  $F$  είναι η εστιακή απόσταση.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΣΚΕΔΑΣΗΣ 180° ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ**

Όταν εξετάζουμε ένα μέσο με ανομοιογένειες που εμφανίζονται τυχαία, όπως είναι το σπογγώδες οστό, ανατρέχουμε σε δύο κύριες συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης για την μοντελοποίησή του. Εξετάζοντας τον τρόπο με τον οποίο οι υπέρηχοι διαδίδονται στο εν λόγω μέσο, επικεντρωνόμαστε στην διαφορική διατομή σκέδασης 180°. Οι βασικές υποθέσεις της θεωρίας αυτής συνοψίζονται ως εξής :

- Πρώτον θεωρούμε πως το δείγμα που εξετάζουμε διαθέτει ομοιογενείς στατιστικές ιδιότητες και παρουσιάζει ισοτροπία.
- Δεύτερον, αποκλείουμε την παρουσία πολλαπλών φαινομένων σκέδασης. Σε σπογγώδη οστά, τέτοια φαινόμενα θα εμφανίζονταν μόνο εάν οι διαστάσεις των δοκίδων ήταν παρόμοιες με αυτές του μήκους κύματος.
- Τρίτον, προϋποθέτουμε την παρουσία ασθενούς σκέδασης, που συνδέεται με τις μικρές μεταβολές στις διακυμάνσεις της συμπίεστότητας και της πυκνότητας. Αυτή η υπόθεση ισχύει μόνο όταν ο λογάριθμος του εύρους του συντελεστή εξασθένισης στη διεύθυνση διάδοσης του υπερήχου, κυμαίνεται μεταξύ 0,2-0,5 (Ishimaru 1997).

Το εύρος του συντελεστή εξασθένισης σε ένα ανομοιογενές τυχαίο μέσο για το μοντέλο του πυκνού πληθυσμού, δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_x^2 = \langle \gamma^2 \rangle \frac{2}{3\sqrt{2}} a k^2 L \sqrt{\pi}$$

Όπου : L είναι η απόσταση που διανύει ο υπέρηχος στα δοκίμια (στα πειράματά μας είναι 8mm). Ο συντελεστής εξασθένισης είναι συνάρτηση της ποσότητας  $ak^2$ , διότι το L και το  $\langle \gamma^2 \rangle$  είναι σταθερά. Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση για την μέγιστη τιμή διακύμανσης του δείκτη διάθλασης  $\langle \gamma^2 \rangle$  που είναι 0.4, (συμβαίνει για πορώδες πάνω από 65%), η διακύμανση του εύρους μπορεί να κριθεί ως ασθενής για συχνότητες πάνω από 600 kHz και για μέγεθος σκεδαστών μικρότερο από 300μm. Επομένως τα πειραματικά δεδομένα εμπίπτουν στα όρια της ασθενούς σκέδασης

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών

---

και Εμβιομηχανικής

### **Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης πυκνού πληθυσμού (Densely populated autocorrelation function):**

Σε ένα μέσο με τυχαίες ανομοιογένειες, η ένταση της σκέδασης ενός κύματος μπορεί να διαφέρει ανάλογα τη θέση και την κατεύθυνση. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης χρησιμοποιείται για να περιγράψει πως αυτές οι διαφορές στην ένταση σχετίζονται μεταξύ τους σε διάφορες αποστάσεις. Ένας από τους πιο σημαντικούς τομείς εφαρμογής της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης είναι η διαφορική διατομή σκέδασης σε πυκνά μέσα. Εδώ η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, μπορεί να προσφέρει πληροφορίες για την μικροδομή του συστήματος που εξετάζεται.

Στο βόειο σπογγώδες οστό οι δοκίδες είναι πυκνά κατανομημένες. Επομένως οι μέσες τιμές συμπίεστότητας  $\kappa_0$  και της πυκνότητας  $\rho_0$  δεν προέρχονται αποκλειστικά από τις τιμές του υγρού που περιβάλλει τις δοκίδες(μυελός), αλλά επίσης και από αυτές των δοκίδων-σκεδαστών. Έτσι το σπογγώδες οστό μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μέσο με μεγάλη συγκέντρωση δοκίδων όπου  $\rho f < \kappa_0$  και  $\kappa f < \kappa_0$ . Διατυπώνοντας το διαφορετικά το σπογγώδες οστό είναι ένα μέσο όπου κάθε ανομοιομορφία του είναι πιο ασυμπίεστη και πιο πυκνή από το περιβάλλον μέσο. Έχει αποδειχθεί ότι η διαφορική διατομή σκέδασης  $\sigma_b$  και η εξασθένιση  $a_{sc}$  καθορίζονται από τις παρακάτω μαθηματικές σχέσεις :

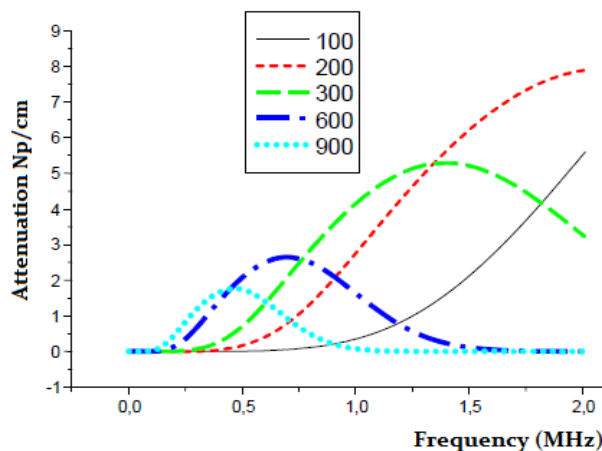
$$\sigma_b = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \gamma^2 k^6 a^5 e^{-2a^2 k^2}$$
$$a_{sc} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{k^2 \mu^2}{6} a e^{-\frac{9k^2 a^2}{2}} (-2 - 9a^2 k^2 + e^{4a^2 k^2} (2 + a^2 k^2))$$

Όπου :

- $a$  είναι το μέγεθος του σκεδαστή
- $\mu^2$  η μεταβολή της ταχύτητας
- και  $k = 2\pi / \lambda$ .

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 5** Πρόβλεψη της εξασθένισης που οφείλεται στη σκέδαση συναρτήσει της συχνότητας

### Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης σφαιρικής κατανομής (Fluid Sphere autocorrelation function) :

Υποθέτοντας ένα τυχαίο μέσο στο οποίο υπάρχουν σφαίρες ίδιας ακτίνας διασκορπισμένες τυχαία, με διαφορετική πυκνότητα και συμπιεστότητα από το εν λόγω μέσο, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης αυτού του μέσου (σφαιρική συνάρτηση κατανομής) έχει προσδιοριστεί από την αυτοσυσχέτιση μιας σφαίρας σε τρεις διαστάσεις (Insana και Brown 1993). Η διαφορική διατομή σκέδασης  $\sigma_b$  και η απορρόφηση  $\alpha_{sc}$  έχουν αποδειχθεί ότι καθορίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\sigma_b = \frac{k^4 V_s^2 \bar{n} \gamma_0^2}{16\pi^2} \left( \frac{3}{2ka} J_1(2ka) \right)$$

όπου:

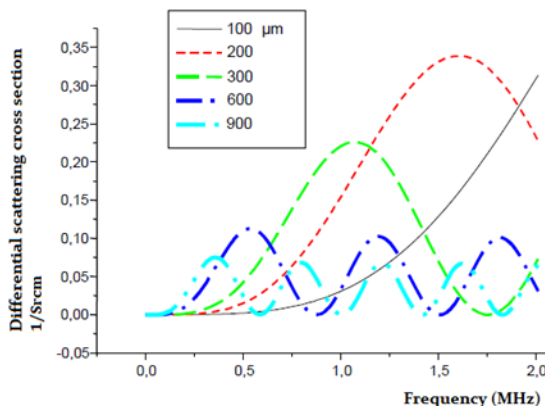
- $J_1$  πρώτου βαθμού και πρώτου είδους σφαιρική συνάρτηση Bessel
- $V_s$  ο συνολικός όγκος σφαιρικών σκεδαστών ακτίνας  $a$
- $\eta$  ο μέσος όρος σκεδαστών ανά μονάδα όγκου στο μέσο
- $\gamma_0$  η μέση τετραγωνική διακύμανση ανά σκεδαστή

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

$$a_{sc} = \frac{k^2 \mu^2}{2} \left[ \frac{10 - 9 \cos 2ak - \cos 6ak}{36ak^2} + \frac{1}{a^3 k^4} \left( \frac{41}{108} + \frac{3(-2 + 4a^2 k^2) \cos 2ak}{16} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{(-2 + 36a^2 k^2) \cos 6ak}{432} \right) + \frac{3 \sin 2ak + \sin 6ak}{6k} + \frac{1}{8a^2 k^3} ((-6 + 4a^2 k^2) \sin 2ak + \right. \\ \left. + \frac{1}{81} (-6 + 36a^2 k^2) \sin 6ak) \right]$$

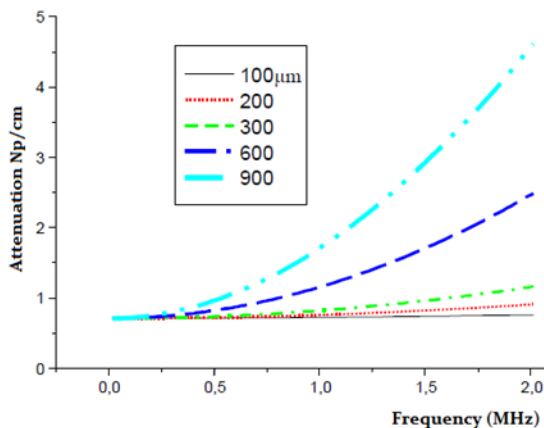
Όπου  $\mu^2$  είναι η διακύμανση της ταχύτητας.



**Εικόνα 6** Πρόβλεψη διαφορικής διατομής σκέδασης σε σπογγώδες οστό με πορώδες 70% για διαφορετικά μεγέθη σκεδαστών.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



Εικόνα 7 Πρόβλεψη της εξασθένισης μοντέλο υγρών σφαιρών.

## 2.5 ΜΕΤΑΛΛΑΚΤΕΣ-ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ (PROBES-TRANSDUCERS)

Οι μεταλλάκτες αισθητήρες γνωστοί και ως probes ή transducers, είναι στοιχεία που μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Στο πεδίο των υπερήχων, αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να μετατρέπουν τους ηλεκτρικούς παλμούς σε υπερήχους και αντίστροφα. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι στον τομέα της ιατρικής υπερηχογραφίας καθώς μπορούν να παράγουν εικόνες των εσωτερικών δομών του σώματος. Στον τομέα της βιομηχανίας είναι επίσης χρήσιμοι καθώς μπορούν να ανιχνεύσουν ρωγμές ή ατέλειες στο εσωτερικό των υλικών. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι παραγωγής ηχητικών κυμάτων όπως με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών μηχανισμών (Electromagnetic Acoustic Transducers-EMATS), με φύλλα ημικρυσταλλικού πλαστικού (PVDF) ή ακόμη και μέσω Laser. Η πλέον γνωστή μέθοδος είναι η ενεργοποίηση των πιεζοκρυστάλλων. Τα υλικά από τα οποία είναι φτιαγμένοι οι πιεζοκρυστάλλοι, περιλαμβάνουν φυσικούς κρυστάλλους, όπως τον χαλαζία ή τον τουρμαλίνη αλλά και κεραμικά υλικά. Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται σε αυτούς,

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

προκαλεί αλλαγές στις διαστάσεις τους, παράγοντας υπερήχους. Αντιστρόφως, τα κύματα υπερήχων μπορούν να προκαλέσουν μηχανικές αλλαγές που μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα στα άκρα του πιεζοκρυστάλλου. Οι πιεζοκρύσταλλοι συχνά λειτουργούν καλύτερα κοντά στη συχνότητα συντονισμού τους, όπου η πίεση που παράγεται είναι ανάλογη της τάσης ενεργοποίησης.

Τα σπουδαιότερα τεχνικά χαρακτηριστικά των μεταλλακτών είναι:

- **Ηχητικό πεδίο (Sound Field):** Το σύνολο των τιμών της πίεσης σε κάθε σημείο του χώρου σχηματίζει το ηχητικό πεδίο, το οποίο διακρίνεται σε δύο ζώνες. Στην ζώνη του εγγύς και στη ζώνη του απομακρυσμένου πεδίου.
- **Εγγύς Πεδίο (Near Field Length):** Είναι η απόσταση της πηγής (η επιφάνεια του μεταλλάκτη) από την θέση όπου η δέσμη παρουσιάζει την μέγιστη τιμή πίεσης.
- **Απομακρυσμένο πεδίο (Far Field):** Είναι η αντίστοιχη θέση πίσω από το NFL όπου η κατανομή της πίεσης μηδενίζεται, αφού πρώτα μειώνεται βαθμιαία, προοδευτικά.
- **Σχήμα δέσμης (Beam shape):** Είναι το «θεωρητικό» σχήμα του ηχητικού πεδίου, που ορίζεται από το σύνολο των τιμών της πίεσης. Για τους κυκλικής διατομής μεταλλάκτες, η δέσμη είναι κωνικής μορφής όπου μειώνεται η διατομή της μέχρι το NFL και μετά αυξάνεται.
- **Διαστάσεις (Element size  $D$  ή  $a \times b$ ):** Οι μεταλλάκτες έχουν κυκλική ή ορθογωνική διατομή. Το μέγεθος της διατομής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την μορφή του μεταφερόμενου ηχητικού πεδίου.
- **Κεντρική Συχνότητα (Central frequency):** Η κορυφή της καμπύλης της απόκρισης του αισθητήρα.
- **Μεταλλάκτες εστίασης και μη (focus-unfocus):** Είναι οι μεταλλάκτες που εστιάζουν την δέσμη των υπερήχων σε ένα μικρό (focus) ή σε ένα μεγαλύτερο (unfocus) τμήμα του υλικού, δίνοντας έτσι αντίστοιχες πληροφορίες για τις περιοχές αυτές.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ**

### **3.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ**

Η τρισδιάστατη εκτύπωση, ή 3D εκτύπωση, αποτελεί μια επαναστατική τεχνολογία που επιτρέπει την παραγωγή τρισδιάστατων αντικειμένων από ψηφιακά αρχεία που περιέχουν σχέδια. Αντί για την παραδοσιακή τεχνολογία αφαίρεσης υλικού, όπως η τόνρευση και το φρεζάρισμα, η 3D εκτύπωση ακολουθεί προσθετική διαδικασία και επιτρέπει την εναπόθεση υλικού σε στρώσεις έως ότου δημιουργηθεί το τελικό αντικείμενο. Κάθε μία από αυτές τις στρώσεις μπορεί να θεωρηθεί ως λεπτή κομμένη διατομή του αντικειμένου. Τα υλικά που χρησιμοποιεί ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής μπορεί να είναι πλαστικά, μέταλλα, κεραμικά βιοϋλικά ακόμα και σεληνιακή σκόνη. Η τεχνολογία αυτή δεν είναι νέα, με την πρώτη της εφαρμογή να χρονολογείται τη δεκαετία του 1980 από τον Charles Hull, ο οποίος έδωσε την ονομασία "stereolithography" δηλαδή στερεολιθογραφία. Ο Hull εμπνευσμένος από τη σκέψη της δημιουργίας αντικειμένων μέσω της στοίβαξης λεπτών στρωμάτων πλαστικού θεώρησε ότι με τη βοήθεια του φωτός θα μπορούσε να διαμορφώσει το επιθυμητό σχήμα. Ύστερα από καιρό κατάφερε να διαμορφώσει μια τεχνική κατά την οποία ένας υπολογιστής καθοδηγούσε μια ακτίνα υπεριώδους φωτός πάνω σε ένα δοχείο γεμάτο με φωτοευαίσθητο υλικό, το οποίο στο σημείο όπου χτυπούσε η ακτίνα, μετασχηματιζόταν σε σταθερή μορφή. Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει προσφέρει σημαντικές καινοτομίες σε πολλούς τομείς όπως στη βιομηχανία, την αεροναυπηγική και την ιατρική. Η μεγάλη ποικιλία υλικών προσφέρει στη βιομηχανία τη δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων και εξαρτημάτων που θα ήταν δύσκολο να παραχθούν με παραδοσιακές μεθόδους.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## **ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ**

- Στερεολιθογραφία(SLA-Stereolithography)
- Επιλεκτική Συγκόλληση Λείζερ(SLS-Selective Laser Sintering)
- Ψηφιακή Εκτύπωση Στεγανότητας(DLP-Digital Light Processing)
- Εκτύπωση Binder Jetting
- Εκτύπωση με έγχυση υλικού (FDM-Fused Deposition Modelling)

### **3.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**

Αρχικά για να ξεκινήσει μια διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης απαιτείται ένα τρισδιάστατο σχέδιο του αντικειμένου προς εκτύπωση. Αυτό επιτυγχάνεται είτε μέσω προγράμματος CAD είτε μέσω ενός τρισδιάστατου σαρωτή. Στη συνέχεια προκειμένου να ξεκινήσει η πραγματική διαδικασία εκτύπωσης χρειάζεται να γίνει η επιλογή του κατάλληλου υλικού που θα εξυπηρετήσει τις ανάγκες του αντικειμένου που πρόκειται να εκτυπωθεί. Οι επιλογές των υλικών είναι πλούσιες καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλαστικά, ρητίνες, μέταλλα, υφάσματα κ.λ.π.

Πρωτού ξεκινήσει η διαδικασία, χρειάζεται να εφαρμοστεί κόλλα ή να καθαριστεί η επιφάνεια προκειμένου να έχει σωστή πρόσφυση το υλικό στην πλατφόρμα του εκτυπωτή. Αφού μεταφερθεί το ψηφιακό σχέδιο στον εκτυπωτή, το μηχάνημα ξεκινάει με την κατασκευή του αντικειμένου. Ο χρόνος εκτύπωσης ποικίλλει από λίγα λεπτά έως μερικές ημέρες ανάλογα με το βαθμό δυσκολίας και την ακρίβεια του σχεδίου. Μετά το τέλος της διαδικασίας εκτύπωσης το αντικείμενο ενδέχεται να μην είναι άμεσα χρησιμοποιούμενο και να χρειάζεται ορισμένες τελικές εργασίες όπως το φινίρισμα κάποιας επιφάνειας ή την αφαίρεση κάποιας δομής υποστήριξης.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

### 3.3 3D ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ ULTIMAKER 2+

Ο ultimaker 2+, χρησιμοποιήθηκε ως εκτυπωτής για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ο εκτυπωτής αυτός λειτουργεί με βάση την τεχνολογία εναπόθεσης τήγματος (FDM). Σε αυτήν την τεχνική, λιωμένο θερμοπλαστικό υλικό, εξωθείται από μια κεφαλή ακροφυσίου κινούμενη στους τρεις άξονες του χώρου, δημιουργώντας το αντικείμενο στρώμα προς στρώμα. Αυτή η διαδικασία παρόλο που φαίνεται απλή εμπλέκει σύνθετες παραμέτρους όπως το πάχος του στρώματος, την γραμμική ταχύτητα και το πλάτος εξώθησης. Οι FDM εκτυπωτές διακρίνονται για την αξιοπιστία, την οικονομική αποδοτικότητα τους και ικανότητα αναπαραγωγής πολύπλοκων δομών με ακρίβεια, όπως είναι το σπογγώδες οστό. Παρόλα αυτά, όπως και σε άλλες τεχνικές εκτύπωσης έτσι και σε αυτήν το τελικό αντικείμενο μπορεί να απαιτεί επεξεργασία ώστε να έχει την επιθυμητή εμφάνιση στην επιφάνεια του. Ο παρακάτω πίνακας διαθέτει τα βασικά χαρακτηριστικά του Ultimaker 2+.

#### ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ULTIMAKER 2+

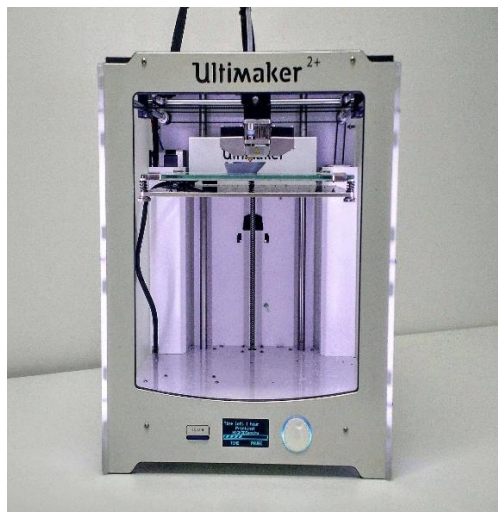
| Τεχνολογία            | Fused Deposition Modeling                                                                                                    | Κρεβάτι εκτύπωσης     | Θερμαινόμενο γυαλί                                                                                                                                                              |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Όγκος εκτύπωσης       | 223 x 223 x 205 mm                                                                                                           | Θερμοκρασία κρεβατιού | 50 – 100 °C                                                                                                                                                                     |
| Διακριτότητα στρώσεως | 0.25 mm nozzle: 150 to 60 μm<br>0.40 mm nozzle: 200 to 20 μm<br>0.60 mm nozzle: 400 to 20 μm<br>0.80 mm nozzle: 600 to 20 μm | Ταχύτητα εκτύπωσης    | 0.25 mm nozzle: έως 8 mm <sup>3</sup> /s<br>0.40 mm nozzle: έως 16 mm <sup>3</sup> /s<br>0.60 mm nozzle: έως 23 mm <sup>3</sup> /s<br>0.80 mm nozzle: έως 24 mm <sup>3</sup> /s |

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

|                          |                             |                      |                                         |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| <b>XYZ ακρίβεια</b>      | 12.5, 12.5, 5 $\mu\text{m}$ | Θερμοκρασία nozzle   | 180 – 260°C                             |
| <b>Διάμετρος νήματος</b> | 2.85 mm                     | Υποστηριζόμενα υλικά | PLA, ABS, CPE, CPE+, PC, Nylon, TPU 95A |

**Πίνακας 2** Χαρακτηριστικά του εκτυπωτή Ultimaker 2+.

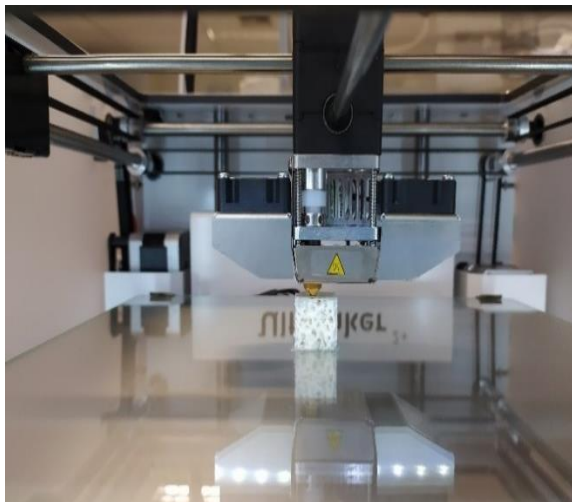


**Εικόνα 8** εκτυπωτής Ultimaker 2+

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 9** Εκτυπωτής Ultimaker 2+ σε εκτύπωση σπογγώδους οστού.

### 3.4 ΥΛΙΚΑ

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκαν από τρία διαφορετικά υλικά αντίγραφα βόειου οστού με σκοπό την αξιολόγηση και τη μελέτη της επίδρασης του υλικού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δειγμάτων στον εκτυπωτή Ultimaker 2+ είναι το πολυγαλακτικό οξύ (Polylactic Acid - PLA), η θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (Thermoplastic Polyurethane - TPU) και τέλος το πολυπροπυλένιο (Polypropylene -PP). Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν (οστά και σταθερής δομής) αποτελούνται από διαφορετικές τιμές BV/TV και συγκεκριμένα 15% BV/TV, 21% BV/TV, 34% BV/TV. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιασθούν τα τρία αυτά υλικά καθώς και οι θερμικές και μηχανικές ιδιότητες τους.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

### **ΠΟΛΥΓΑΛΑΚΤΙΚΟ ΟΞΥ (PLA)**

Τα τελευταία χρόνια, η σημασία των βιοδιασπώμενων υλικών έχει αναδειχθεί εν μέσω των αυξανόμενων περιβαλλοντικών ανησυχιών. Το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) έχει κεντρικό ρόλο σε αυτήν την εξέλιξη. Πρόκειται για ένα θερμοπλαστικό πολυμερές με υψηλή αντοχή και ελαστικότητα προερχόμενο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Είναι ένα υλικό ιδανικό για διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές όπως η παραγωγή συσκευασίας, ποτηριών αναψυκτικών κ.α. Στον τομέα της ιατρικής μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε βιοσυμβατά ιατρικά σκευάσματα, σε εφαρμογές στεντ και διαχείρισης πληγών, ορθοπεδικές συσκευές κ.α.

Ωστόσο είναι σημαντικό να σημειωθεί πως το PLA δεν είναι κατάλληλο για να έρθει σε επαφή με τρόφιμα ή για εφαρμογές in-vivo.

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 έγινε δημοφιλές χάρη στη βιοδιασπώμενη φύση του και τις εξαιρετικές του ιδιότητες με πολλές εταιρείες να του δίνουν βάση ως μια εναλλακτική λύση στα πετροχημικά πολυμερή. Παρακάτω στον πίνακα δίνονται τιμές με τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του πολυγαλακτικού οξέος

| <b>ΠΟΛΥΓΑΛΑΚΤΙΚΟ ΟΞΥ (PLA)</b><br><b>ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ</b> |                        |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Ρυθμός ροής τηγμένου                                                      | 6.09 g/10min           |
| Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης                                           | ~60 °C                 |
| Θερμοκρασία τήξης                                                         | 145-160 °C             |
| Πυκνότητα                                                                 | 1.24 g/cm <sup>3</sup> |
| Όριο διαρροής                                                             | 49.5MPa                |
| Όριο θραύσης                                                              | 45.6 MPa               |
| Μέτρο Ελαστικότητας                                                       | 2346.5 MPa             |
| Αντίσταση στη κάμψη                                                       | 103.0 MPa              |
| Μέτρο Κάμψης                                                              | 3150.0 MPa             |
| Επιμήκυνση διαρροής                                                       | 3.3%                   |

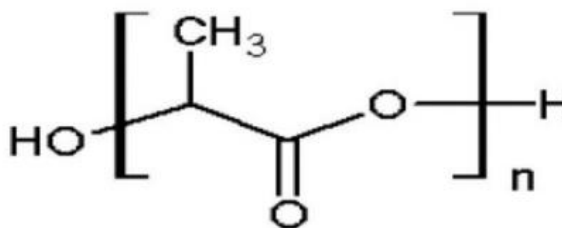
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών  
και Εμβιομηχανικής

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

|                                  |                                                              |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Επιμήκυνση θραύσης               | 5.2%                                                         |
| Χημική Σύνθεση Πολυγαλακτικό οξύ | (C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> |
| Διάμετρος                        | 2.85 ± 0.10 mm                                               |
| Βάρος καρουλιού                  | 750 gr                                                       |
| Μήκος νήματος                    | 95 m                                                         |
| Χημική σταθερότητα               | Βιοδιασπώμενο                                                |

**Πίνακας 3** με τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του PLA



**Εικόνα 10** Χημική δομή PLA

### ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΟΛΥΟΥΡΕΘΑΝΗ (TPU95A)

Η θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (TPU) είναι ένα θερμοπλαστικό ελαστομερές που διακρίνεται για τις εξαιρετικές του ιδιότητες. Βρίσκει χρήση σε ποικίλες εφαρμογές όπως στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, στην αεροδιαστημική αλλά και στην ιατρική. Κύριες εφαρμογές του περιλαμβάνουν την κατασκευή οργάνων του αυτοκινήτου, εργαλεία, ιμάντες και ιατρικές συσκευές. Το TPU χρησιμοποιείται ευρέως στην τρισδιάστατη εκτύπωση καθώς τα αντικείμενα που εκτυπώνονται με το υλικό αυτό παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στην τριβή, στις κρούσεις και σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Επιπλέον, σαν υλικό έχει υψηλή ελαστικότητα και εξαιρετική αντοχή σε λάδια. Το TPU κατηγοριοποιείται με βάση δύο τύπους: σε Πολυαιθέρα Πολυουρεθάνη Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών

και Εμβιομηχανικής

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

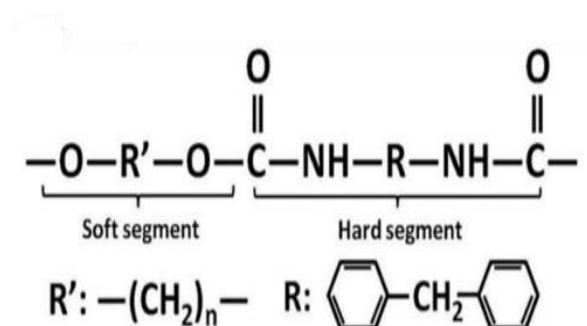
και σε Πολυεστέρα Πολυουρεθάνη, με καθένα να προσφέρει διαφορετικά χαρακτηριστικά ανάλογα με την εφαρμογή. Η διαδικασία παραγωγής του περιλαμβάνει την αντίδραση μιας πολυόλης με ένα δισοκυανικό οξύ δίνοντας του μια σειρά από χρήσιμες ιδιότητες. Ωστόσο παρόλο την ευελιξία που προσφέρει σαν υλικό η εκτύπωση με TPU μπορεί να έχει δυσκολίες λόγω της μεγάλης του ευκαμπτότητας. Ο παρακάτω πίνακας δίνει τις σημαντικές τιμές για τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του TPU.

| <b>ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΟΛΥΟΥΡΕΘΑΝΗ TPU95A</b> |                        |
|------------------------------------------|------------------------|
| <b>ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ</b>  |                        |
| Ρυθμός ροής τηγμένου                     | 15.9 g/10min           |
| Θερμοκρασία τήξης                        | 220 °C                 |
| Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης          | -24 °C                 |
| Θερμική παραμόρφωση στα 0.455 Mpa        | 74 °C                  |
| Θερμική παραμόρφωση στα 1.82 Mpa         | 49 °C                  |
| Μέτρο Ελαστικότητας                      | 26.0 MPa               |
| Πυκνότητα                                | 1.21 g/cm <sup>3</sup> |
| Αντοχή στο όριο διαρροής                 | 8.6 MPa                |
| Αντοχή κατά τη θραύση                    | 39.0 MPa               |
| Επιμήκυνση στο όριο διαρροής             | 55%                    |
| Επιμήκυνση κατά τη θραύση                | 580 %                  |
| Μέτρο Κάμψης                             | 78.7 MPa               |
| Αντίσταση στην κάμψη                     | 4.3 MPa                |

**Πίνακας 4** με τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του TPU.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



Εικόνα 11 Εικόνα 8 Χημική δομή TPU

## ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (PP)

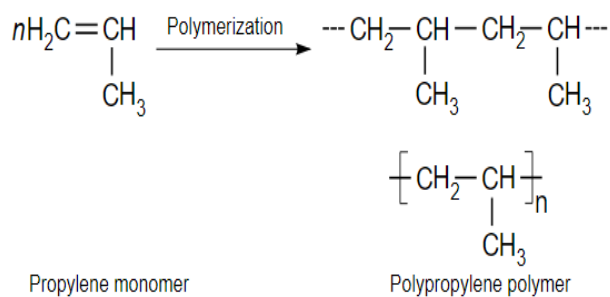
Το πολυπροπυλένιο (PP) είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που παρασκευάζεται από την αντίδραση πολυμερισμού του προπενίου. Εξαιτίας της πολυπλοκότητάς του, βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε αντικείμενα καθημερινής χρήσης όπως είδη νοικοκυριού, ιατρικές συσκευές, αλλά και στη βιομηχανία για την κατασκευή σωλήνων και δεξαμενών. Το υλικό αυτό διακρίνεται για τη χαμηλή του πυκνότητα, την υψηλή θερμική αντοχή και την μεγάλη ευκαμπτότητά του, καθιστώντας το ιδανικό για διάφορες εφαρμογές. Επιπρόσθετα, η ικανότητά του να συνδυάζεται με ενισχυτικούς παράγοντες ή άλλα πολυμερή προσδίδει στο PP ακόμη καλύτερες ιδιότητες. Στον τομέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, το PP είναι ιδιαίτερα προτιμώμενο για την παραγωγή ανθεκτικών αντικειμένων, ωστόσο, δεν είναι συνιστώμενο για εφαρμογές *in vivo*. Ο παρακάτω πίνακας δίνει τις τιμές για τις σημαντικότερες θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του PP.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

| <b>ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ (PP)</b><br><b>ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ</b> |                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Ρυθμός ροής τηγμένου                                                  | 20 g/10min                                               |
| Θερμοκρασία τήξης                                                     | 130 °C                                                   |
| Πυκνότητα                                                             | 0.89 g/cm <sup>3</sup>                                   |
| Μέτρο Ελαστικότητας                                                   | 220 Mpa                                                  |
| Όριο διαρροής                                                         | 8.7MPa                                                   |
| Όριο θραύσης                                                          | Δεν βρέθηκε όριο κατά τη διάρκεια και εύρος των δοκιμών. |
| Επιμήκυνση διαρροής                                                   | 18%                                                      |
| Επιμήκυνση θραύσης                                                    | >300%                                                    |
| Αντίσταση στην κάμψη                                                  | 13MPa                                                    |
| Μέτρο κάμψης                                                          | 305MPa                                                   |

**Πίνακας 5** με τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του PP



**Εικόνα 12** Πολυμερισμός του προπυλενίου σε πολυπροπυλένιο.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Προκειμένου να γίνουν τα απαραίτητα πειράματα και να μελετηθεί η επιρροή του υλικού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων ήταν απαραίτητη η κατασκευή εννέα 3D εκτυπωμένων δοκιμίων σπογγώδους οστού από τρία διαφορετικά υλικά και για τρεις διαφορετικούς λόγους BV/TV αλλά και δεκαοχτώ δοκιμίων σταθερής δομής με πορώδες, για τις ίδιες αναλογίες BV/TV προσαρμόζοντας το πάχος των δοκίδων σε 2, 4, 5, 6, mm για το πολυγαλακτικό οξύ PLA και σε 2mm για το πολυπροπυλένιο PP και τη θερμοπλαστική πολυουρεθάνη TPU. Σχετικά με τα μοντέλα των οστών, αυτά υπήρχαν στη διάθεση του εργαστηρίου ως ψηφιακά αρχεία λόγω προηγούμενης έρευνας που είχε γίνει με σκοπό τη συσχέτιση της μικροδομής του σπογγώδους οστού με τις ακουστικές και μηχανικές ιδιότητες σε συνθήκες οστεοπόρωσης (Tsirigotis, Apostolopoulos and Deligianni, 2021). Η διαδικασία όμως ώστε να προκύψουν τα τρισδιάστατα μοντέλα οστών είχε μια σειρά βημάτων. Αρχικά με ειδική διαδικασία αφαιρέθηκε ο μυελός των οστών και στη συνέχεια εφαρμόστηκε μικροσκοπική τομογραφία X-ray με χρήση σαρωτή X-CUBE, όπου με τη συνδρομή ενός αλγορίθμου δόθηκε εικόνα για τα οστικά και τα μη οστικά Pixel. Για τις ανάγκες της έρευνας, επιλέχθηκε μια περιοχή ενδιαφέροντος 6mm(110 x 110 x 110voxel). Το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο προέκυψε από την εφαρμογή των επεξεργασμένων εικόνων στο λογισμικό InVesalius 3.11 και αποθηκεύτηκε ως αρχείο της μορφής .stl που μπορεί να γίνει αναγνώσιμο από ένα άλλο λογισμικό κοπής ανοιχτού κώδικα που επικοινωνεί με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή το Ultimaker Cura . Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα υπόλοιπα δοκίμια της σταθερής δομής. Οι δομές αυτές εισήχθησαν στο λογισμικό Ultimaker Cura, ωστόσο πριν τη διαδικασία του Slicing προσαρμόστηκε το πάχος των δοκίδων (Trabecular thickness) για κάθε λόγο BV/TV σε 0.2-0.4-0.5-0.6mm, επιλέγοντας στο Cura την επιλογή lines

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

και συγκεκριμένα την επιλογή infill line distance. Τέλος όλα τα δοκίμια εισάγονται σε μια κάρτα SD, η οποία τοποθετείται στον εκτυπωτή για να ξεκινήσει η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων. Κάθε δείγμα εκτυπώθηκε μεμονωμένα, χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά υλικά, τα οποία αγοράστηκαν από την Ultimaker και αποθηκεύτηκαν με βάση τις αναγραφόμενες οδηγίες του κατασκευαστή. Τα υλικά αυτά ήταν πολυγαλακτικό οξύ (PLA), η θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (TPU) και το πολυπροπυλένιο (PP). Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας με τις ρυθμίσεις του εκτυπωτή για το κάθε υλικό εκτύπωσης.

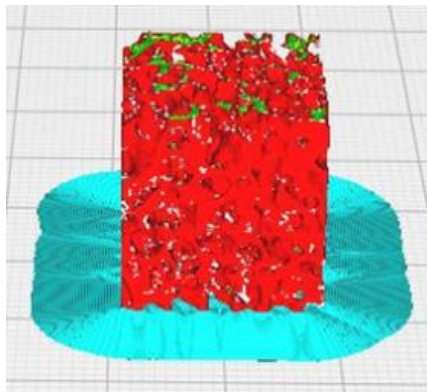
| ΥΛΙΚΟ | ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ<br>ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ(mm) | ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ<br>ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ(°C) | ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ<br>ΠΛΑΚΑΣ(°C) | ΤΑΧΥΤΗΤΑ<br>ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ(mm/s) |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| PLA   | 0,25                        | 210                           | 60                        | 30                          |
| PP    | 0,25                        | 220                           | 100                       | 25                          |
| TPU   | 0,25                        | 210                           | 60                        | 30                          |

**Πίνακας 6** με τις ρυθμίσεις που έγιναν στον εκτυπωτή για την εκτύπωση των δοκιμίων.

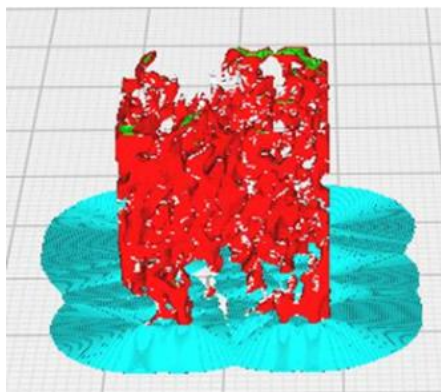
Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 13** δοκίμιο σπογγώδους οστού με  $BV/TV=34\%$  g-code.



**Εικόνα 14** δοκίμιο σπογγώδους οστού με  $BV/TV=21\%$  g-code.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

#### 4.2 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΙΚΡΙΩΜΑΤΩΝ

Στη συνέχεια, ακολουθεί ένας πίνακας με τα φυσικά χαρακτηριστικά των τρισδιάστατων εκτυπώσεων των οστικών αντιγράφων που καταγράφηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C. Για τη μέτρηση της μάζας χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή ζυγαριά ακριβείας, ενώ ο όγκος καθορίστηκε από τις εξωτερικές μετρήσεις των κύβων με τη χρήση ενός ηλεκτρονικού παχύμετρου.

| ΔΙΑΣΤΑΣΗ<br>(mm) | ΥΛΙΚΟ                           | PLA   |       |       | TPU   |       |       | PP    |       |       |
|------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | BV/TV                           | 15%   | 21%   | 34%   | 15%   | 21%   | 34%   | 15%   | 21%   | 34%   |
|                  | X                               | 16    | 18.2  | 18.5  | 15.8  | 17.8  | 18.3  | 15.8  | 17.9  | 18.1  |
|                  | Y                               | 16    | 18.7  | 18.3  | 16    | 18.1  | 18.5  | 16.1  | 17.7  | 17.9  |
|                  | Z                               | 18.4  | 18.1  | 18.5  | 17.3  | 18.2  | 18.3  | 17.5  | 18.1  | 18.3  |
|                  | Μάζα (gr)                       | 0.71  | 1.58  | 2.74  | 0.635 | 1.444 | 2.438 | 0.465 | 0.941 | 1.602 |
|                  | Όγκος (cm <sup>3</sup> )        | 4.710 | 6.160 | 6.263 | 4.373 | 5.863 | 6.195 | 4.451 | 5.734 | 5.929 |
|                  | Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> ) | 0.150 | 0.256 | 0.437 | 0.145 | 0.246 | 0.393 | 0.104 | 0.164 | 0.270 |

**Πίνακας 7** με τα φυσικά χαρακτηριστικά των δοκιμών που κατασκευάσθηκαν με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά των σταθερών δομών για κάθε υλικό και για τα πάχος δοκίδας 0,2 mm

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

|                  |   | ΥΛΙΚΟ                           | PLA(0,2mm) |       |       | TPU(0,2mm) |       |       | PP(0,2mm) |       |       |
|------------------|---|---------------------------------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|-----------|-------|-------|
|                  |   | BV/TV                           | 15%        | 21%   | 34%   | 15%        | 21%   | 34%   | 15%       | 21%   | 34%   |
| ΔΙΑΣΤΑΣΗ<br>(mm) | X |                                 | 20         | 19.98 | 20.09 | 20.08      | 20.1  | 20.11 | 19.38     | 19.41 | 20.09 |
|                  | Y |                                 | 20.02      | 19.9  | 20.19 | 19.9       | 20.11 | 19.92 | 19.89     | 19.81 | 19.82 |
|                  | Z |                                 | 20         | 20.04 | 20.29 | 19.98      | 20.11 | 19.78 | 19.5      | 19.43 | 20.09 |
|                  |   | Μάζα (gr)                       | 1.46       | 2.025 | 3.325 | 1.403      | 2     | 3.121 | 0.883     | 1.364 | 2.195 |
|                  |   | Όγκος (cm <sup>3</sup> )        | 8.008      | 7.967 | 8.229 | 7.983      | 8.116 | 7.923 | 7.516     | 7.471 | 7.999 |
|                  |   | Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> ) | 0.182      | 0.254 | 0.404 | 0.175      | 0.246 | 0.393 | 0.117     | 0.182 | 0.274 |

**Πίνακας 8** με τα φυσικά χαρακτηριστικά από τα δοκίμια με τις σταθερές δομές για πάχος δοκίδας 0.2mm .

|                   |   | ΥΛΙΚΟ                           | PLA(0,4mm) |       |       | PLA(0,5mm) |       |       | PLA(0,6mm) |        |        |
|-------------------|---|---------------------------------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|--------|--------|
|                   |   | BV/TV                           | 15%        | 21%   | 34%   | 15%        | 21%   | 34%   | 15%        | 21%    | 34%    |
| ΔΙΑΣΤΑΣ<br>H (mm) | X |                                 | 24.24      | 24.45 | 24.53 | 24.7       | 25.56 | 25.56 | 24.41      | 24.28  | 24.34  |
|                   | Y |                                 | 24.56      | 24.75 | 24.41 | 24.99      | 25.25 | 25.71 | 24.48      | 24.51  | 24.73  |
|                   | Z |                                 | 23.9       | 23.94 | 23.99 | 24.83      | 24.81 | 24.81 | 23.62      | 23.55  | 23.74  |
|                   |   | Μάζα (gr)                       | 2.51       | 3.47  | 6.092 | 2.747      | 4.083 | 6.259 | 2.87       | 3.389  | 4.62   |
|                   |   | Όγκος (cm <sup>3</sup> )        | 14.22      | 14.48 | 14.36 | 15.32      | 16.01 | 16.30 | 14.114     | 14.014 | 14.289 |
|                   |   |                                 |            |       |       | 2          | 3     |       |            |        |        |
|                   |   | Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> ) | 0.176      | 0.239 | 0.424 | 0.179      | 0.254 | 0.383 | 0.241      | 0.241  | 0.323  |

**Πίνακας 9** με τα φυσικά χαρακτηριστικά από τα δοκίμια με τις σταθερές δομές για πάχος δοκίδας 0.4mm, 0.5mm, 0.6mm .

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 15** Εκτυπωμένα δοκίμια σταθερών δομών από PLA με διαφορετικά πάχη δοκίδων.

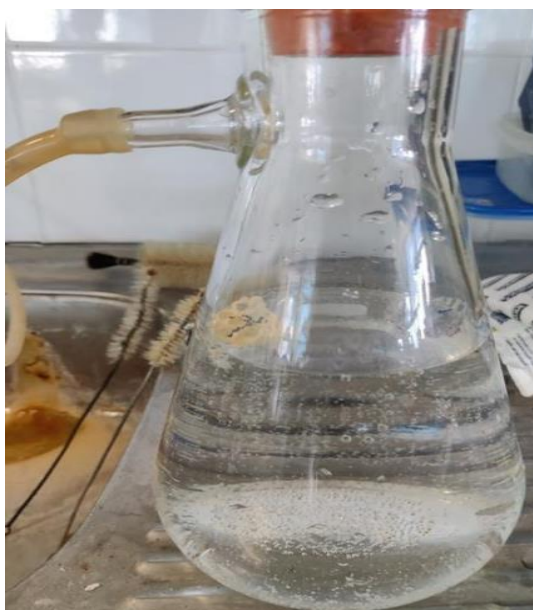
Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

#### 4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

Τα πειραματικά στάδια πραγματοποιήθηκαν εντός των εγκαταστάσεων του εργαστηρίου Εμβιομηχανικής της σχολής, όπου υπήρχε πρόσβαση σε όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό. Τα δοκίμια αφού εκτυπώθηκαν και υπολογίσθηκαν οι φυσικές τους ιδιότητες υποβλήθηκαν σε μετρήσεις μέσω υπερήχων σε μια λεκάνη απεσταγμένου νερού. Ήταν σημαντικό το νερό να βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου 25 βαθμών κελσίου και να έχουν αφαιρεθεί οι φυσαλίδες αέρα από το εσωτερικό των δοκιμίων. Αυτό επιτεύχθηκε τοποθετώντας τα δοκίμια σε ειδική φιάλη κενού από όπου με τη χρήση του νόμου Bernoulli απομακρύνθηκαν οι φυσαλίδες αέρα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



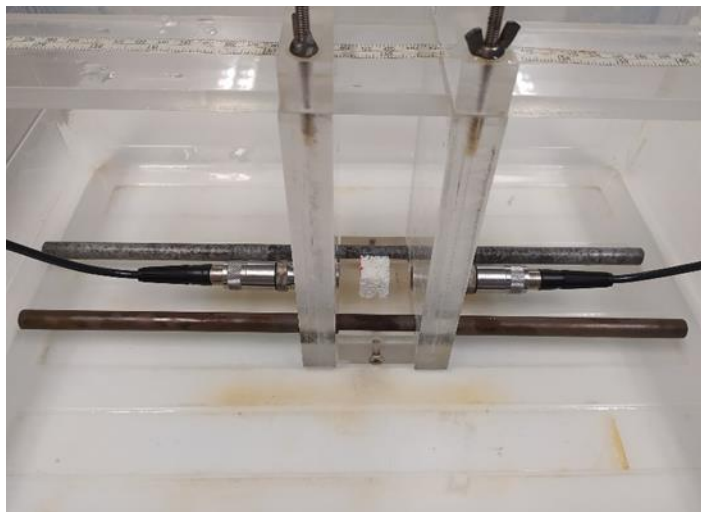
**Εικόνα 16** δοκίμιο σπογγώδους οστού κατά τη διαδικασία αφαίρεσης φυσαλίδων με το νόμο Bernoulli.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν στη λεκάνη απεσταγμένου νερού εντός μιας βάσης με μια διάταξη που μπορούσε να προσαρμόσει την απόσταση ανάμεσα στους δύο μεταλλάκτες για τους σκοπούς του πειράματος όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 17** δοκίμιο σπογγώδους οστού κατά τη διαδικασία μέτρησης με υπερήχους.

Οι μεταλλάκτες που είχαμε στη διάθεσή μας ήταν βυθιζόμενοι εστιακοί μεταλλάκτες(Focused) Panametrics, V303,  $d=0.5\text{inch}$ , με συχνότητα 1MHz και εστιακή απόσταση  $F=20\text{ mm}$  και μη εστιακοί(Unfocused) Panametrics, V303,  $d=0.5\text{inch}$ , με συχνότητα 1MHz και εστιακή απόσταση  $F=23\text{ mm}$ .

Οι μεταλλάκτες με τη σειρά τους, συνδέονται σε έναν λήπτη υπερήχων και σε έναν υπερηχητικό δέκτη παλμών (USD 10NF, Krautkraemer, Germany) που μπορεί να λειτουργήσει με τους 2 μεταλλάκτες συνδεδεμένους συνευθειακά με τον πρώτο ως πομπό και τον δεύτερο ως δέκτη, είτε ταυτόχρονα με έναν μεταλλάκτη που θα έχει το διπλό ρόλο του πομπού και του δέκτη(Pulse Echo). Τα σήματα συλλέχθηκαν από παλμογράφο HAMEG 35MHz. Τα κύρια χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν περιλαμβάνουν την ταχύτητα του ήχου μέσα από το δοκίμιο αλλά και το νερό (SOS), την εξασθένιση ευρέως φάσματος (BUA) και τη διαφορική διατομή σκέδασης  $180^\circ$ . Τα παραπάνω χαρακτηριστικά και οι μέθοδοι υπολογισμού έχουν αναλυθεί στο κεφάλαιο 2 της διπλωματικής αυτής εργασίας. Ακολουθήθηκαν πρωτόκολλα βασισμένα σε άλλες

---

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών και Εμβιομηχανικής

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

ερευνητικές μεθόδους. Οι τεχνικές του Roberjot(1996) και Chaffai(2000) χρησιμοποιήθηκαν για την ερμηνεία των δεδομένων και συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της διαφορικής διατομής σκέδασης  $180^\circ$  σε σχέση με τη συχνότητα. Ο υπολογισμός της διαφορικής διατομής σκέδασης  $180^\circ$  έγινε με εστιακούς μεταλλάκτες για 5 μετρήσεις ανά δοκίμιο και ανά διεύθυνση, με μικρές μετατοπίσεις για την κάθε μία. Η τοποθέτηση του δείγματος σε διαφορετικές θέσεις προσφέρει καλύτερες εις βάθος προβολές της δομής του εξεταζόμενου στοιχείου και επιτρέπει τη σάρωση μεγαλύτερης και ευρύτερης περιοχής. Οι μετρήσεις αυτές αφορούσαν μια περιοχή ενδιαφέροντος  $d=8\text{mm}$  εντός του δοκιμίου και στη συνέχεια συγκρίνονται με δεδομένα που προκύπτουν από την ανάλυση με μια ατσάλινη πλάκα ,η οποία χρησιμοποιείται σαν δοκίμιο αναφοράς. Αυτό το βήμα είναι κρίσιμο για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, καθώς λαμβάνονται υπόψη διορθωτικοί παράγοντες που σχετίζονται με την εξασθένηση, σύμφωνα με την μεθοδολογία των O'Donnell και Muller (1981). Επιπλέον, εφαρμόζεται η συνάρτηση Hamming και λαμβάνεται υπόψη η εξασθένηση των υπερήχων, βάσει των ερευνών του Xu (1993). Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι μεταβολές της ταχύτητας, της εξασθένησης καθώς επίσης και της οπισθοσκέδασης που υφίσταται ο υπέρηχος όταν διαδίδεται διαμέσου των δοκιμίων των οστών καθώς και τα διαγράμματα υπολογισμού του μέτρου Ελαστικότητας (E) και στα τρία υλικά PLA, PP, & TPU και στις τρεις διευθύνσεις X, Y, Z. Επίσης σε ότι αφορά τα δοκίμια σταθερής δομής από PLA με διάμετρο δοκίδων 0,2-0,4-0,5 & 0,6 mm παρουσιάζονται διαγράμματα που αφορούν στις ακουστικές παραμέτρους της ταχύτητας, της εξασθένησης ευρέως φάσματος και του μέτρου Ελαστικότητας (E).

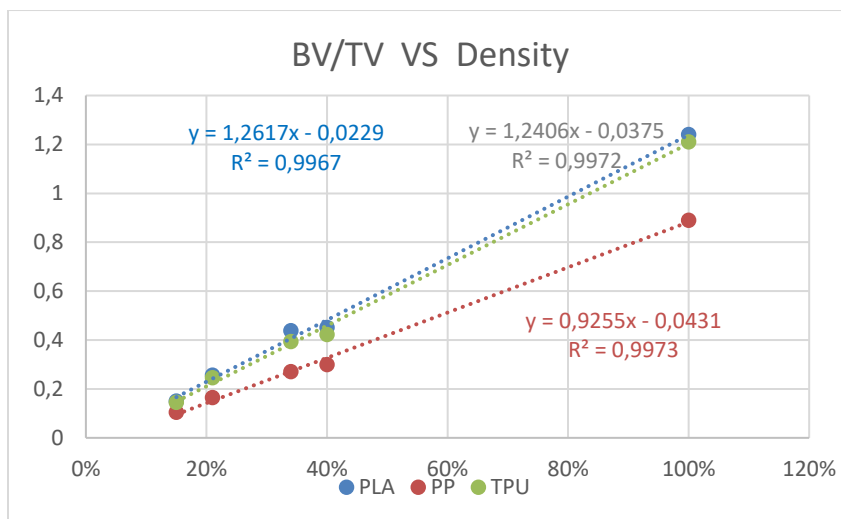
### **5.1 ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΠΟΓΓΩΔΟΥΣ ΟΣΤΟΥ**

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι ακουστικές ιδιότητες (ταχύτητα (SOS) – εξασθένηση (BUA) και οπισθοσκέδαση (Bsc) για τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με υλικό PLA και αναλογίες BV/TV=15-21-34%

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## Πυκνότητα



**Εικόνα 18** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια από τα τρία υλικά συναρτήσει της πυκνότητας.

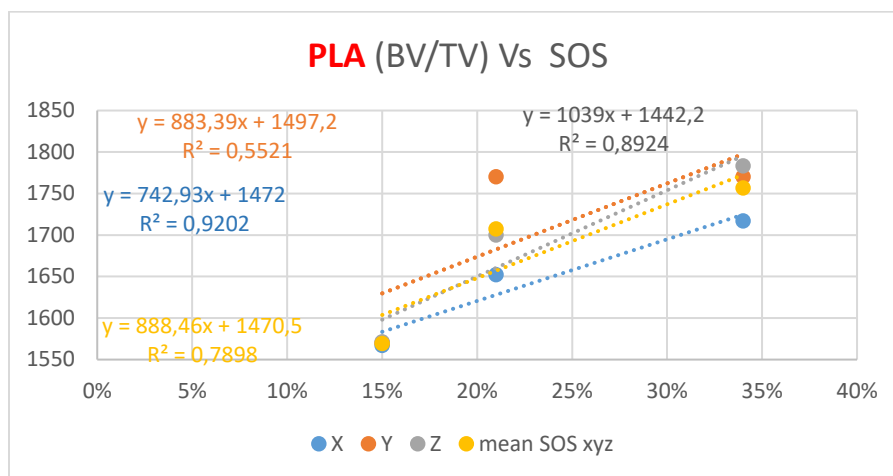
## Ταχύτητα του ήχου

| ΥΛΙΚΟ     | PLA  |      |      | TPU  |      |      | PP   |      |      |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| BV/TV     | 15%  | 21%  | 34%  | 15%  | 21%  | 34%  | 15%  | 21%  | 34%  |
| X (m/s)   | 1567 | 1652 | 1717 | 1481 | 1562 | 1563 | 1481 | 1631 | 1700 |
| Y (m/s)   | 1570 | 1770 | 1770 | 1467 | 1601 | 1588 | 1544 | 1626 | 1695 |
| Z (m/s)   | 1571 | 1700 | 1783 | 1498 | 1560 | 1583 | 1550 | 1636 | 1736 |
| mean SOS  | 1569 | 1707 | 1757 | 1482 | 1574 | 1578 | 1525 | 1631 | 1710 |
| XYZ (m/s) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

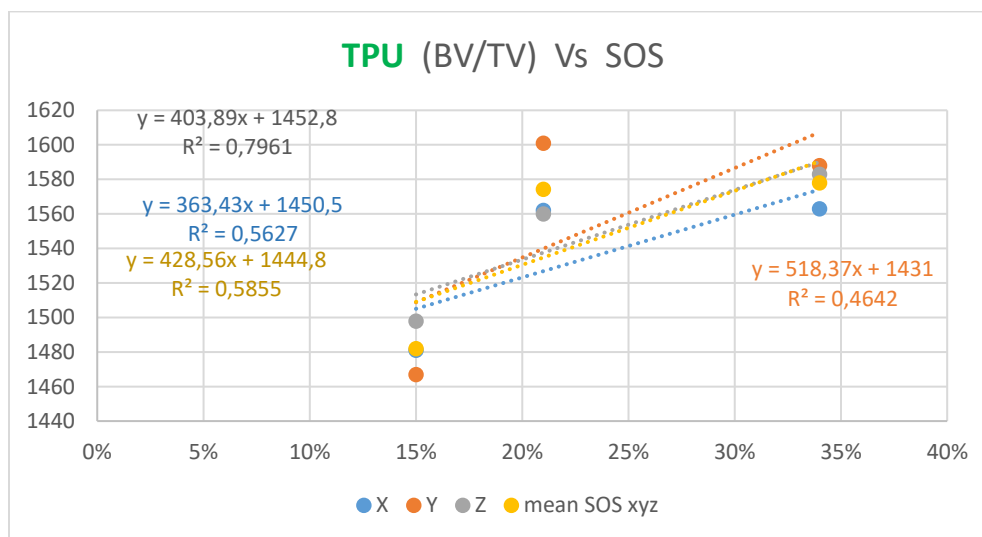
**Πίνακας 10** με τα μέτρα και το μέσο όρο των ταχυτήτων των τριών υλικών για τα διαφορετικά BV/TV στις τρεις διευθύνσεις.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



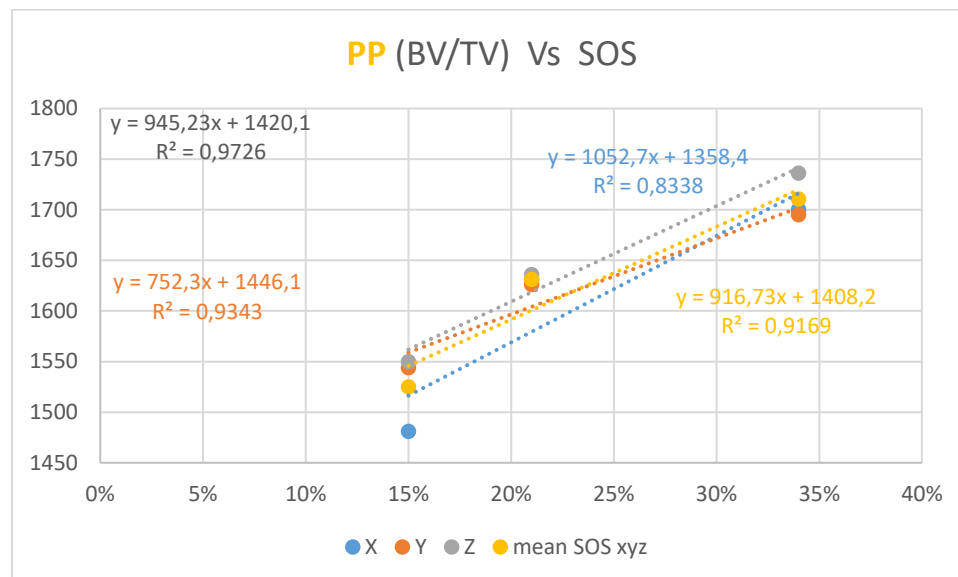
**Εικόνα 19** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμιο PLA στους τρεις άξονες συναρτήσει της ταχύτητας.



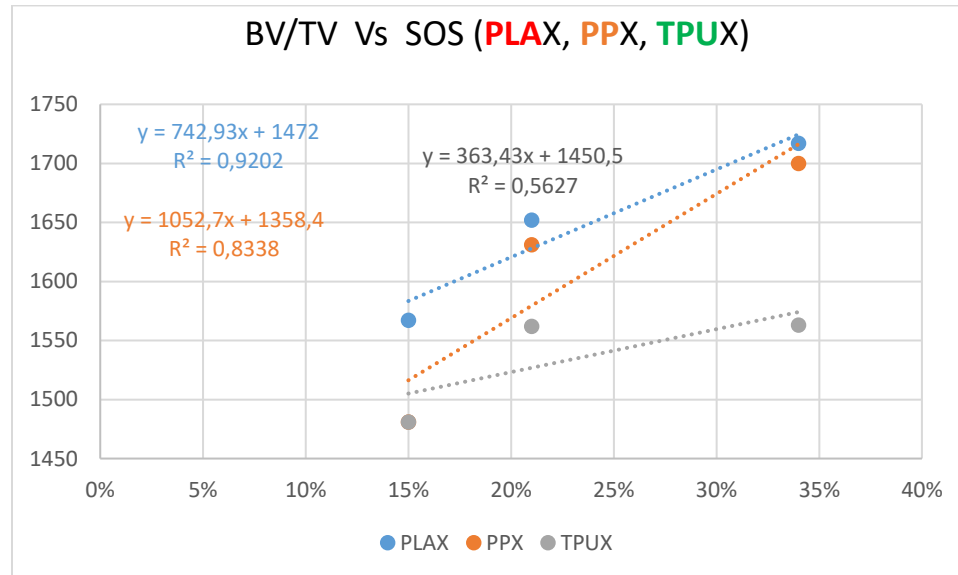
**Εικόνα 20** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμιο TPU στους τρεις άξονες συναρτήσει της ταχύτητας.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



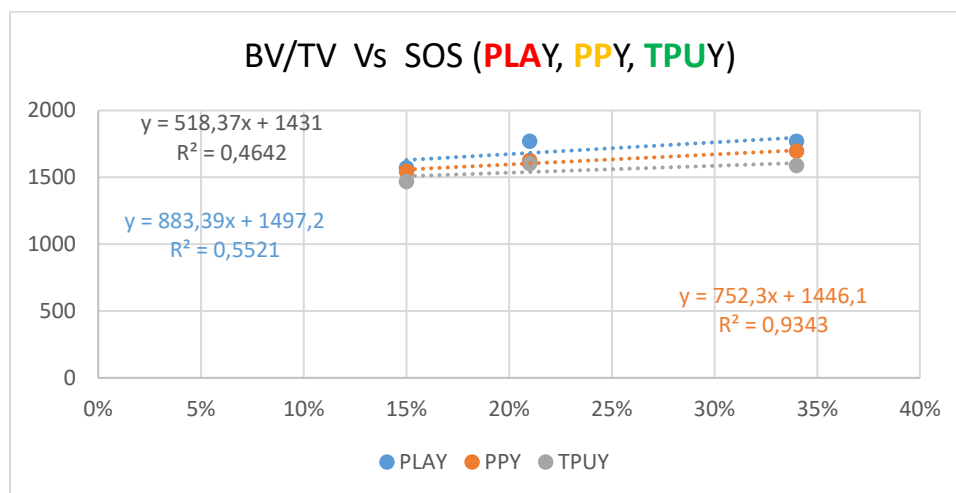
**Εικόνα 21** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμιο PP στους τρεις άξονες συναρτήσει της ταχύτητας.



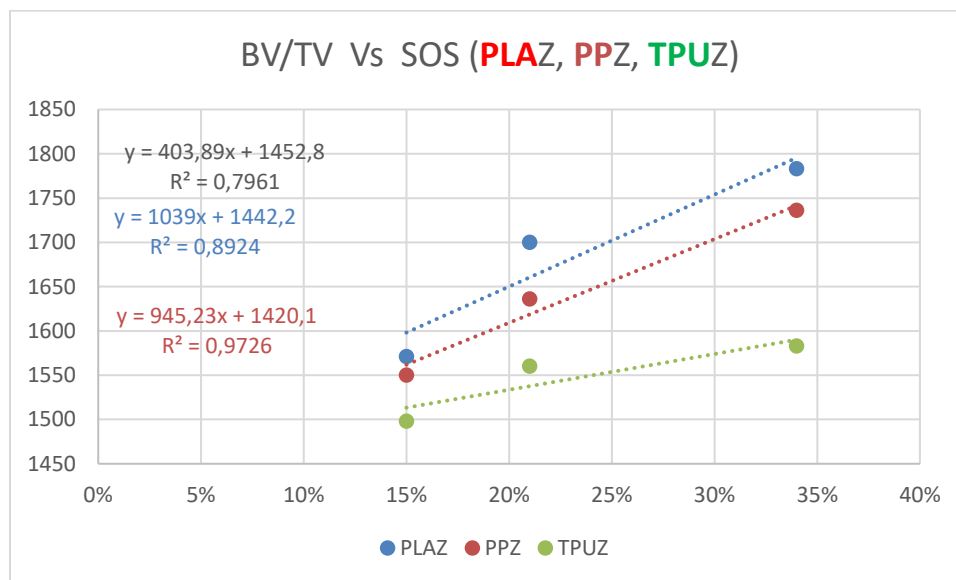
**Εικόνα 22** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA, PP, TPU στον άξονα x συναρτήσει της ταχύτητας.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 23** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA, PP, TPU στον άξονα y συναρτήσει της ταχύτητας.



**Εικόνα 24** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA, PP, TPU στον άξονα z συναρτήσει της ταχύτητας.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## Εξασθένιση Ευρέως Φάσματος

### Υπολογισμός Bua

Στο πεδίο του χρόνου παίρνουμε το διάγραμμα του δοκιμίου και του νερού. Στη συνέχεια τα μεταφέρουμε στο πεδίο των συχνοτήτων με την επιλογή FFT Analysis του προγράμματος Origin και το BUA (Db/MHz/cm) υπολογίζεται από την γραμμική περιοχή της καμπύλης, όπου στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται η συχνότητα σε MHz ενώ η κατακόρυφη είναι η στήλη  $20\log(\text{FFTwater}/\text{FFTsample})$ .

| ΥΛΙΚΟ      | PLA    |        |        | TPU   |        |        | PP     |        |        |
|------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| BV/TV      | 15%    | 21%    | 34%    | 15%   | 21%    | 34%    | 15%    | 21%    | 34%    |
| X (db/MHz) | 22,572 | 40,494 | 54,801 | 5,176 | 13,659 | 25,333 | 10,94  | 18,784 | 22,341 |
| Y (db/MHz) | 20,171 | 40,445 | 56,519 | 5,605 | 12,165 | 25,245 | 13,169 | 26,185 | 31,473 |
| Z (db/MHz) | 17,690 | 59,997 | 46,346 | 5,157 | 13,347 | 22,336 | 14,604 | 16,678 | 42,896 |

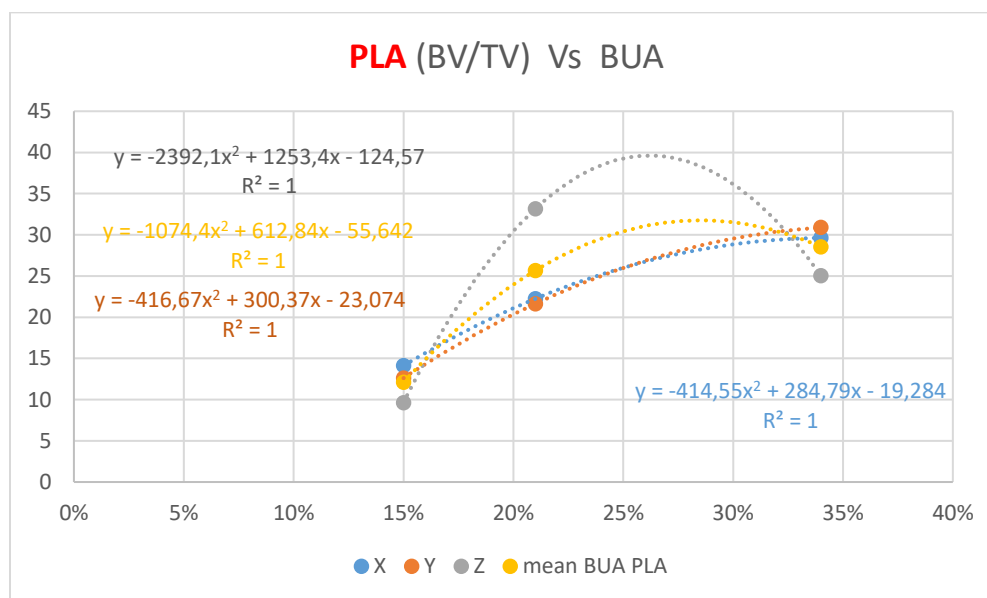
**Πίνακας 11** με τις τιμές BUA των τριών υλικών για τα διαφορετικά BV/TV στις τρεις διευθύνσεις σε μονάδες db/MHz .

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

| ΥΛΙΚΟ         | PLA    |        |        | TPU   |       |        | PP    |        |        |
|---------------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| BV/TV         | 15%    | 21%    | 34%    | 15%   | 21%   | 34%    | 15%   | 21%    | 34%    |
| X (db/MHz/cm) | 14,107 | 22,240 | 29,622 | 3,275 | 7,673 | 13,843 | 6,924 | 10,490 | 12,343 |
| Y (db/MHz/cm) | 12,606 | 21,628 | 30,884 | 3,503 | 6,720 | 13,645 | 8,179 | 14,793 | 17,582 |
| Z (db/MHz/cm) | 9,614  | 33,147 | 25,051 | 2,980 | 7,333 | 12,205 | 8,345 | 9,214  | 23,440 |
| mean BUA      | 12,109 | 25,671 | 28,519 | 3,252 | 7,242 | 13,231 | 7,816 | 11,499 | 17,788 |

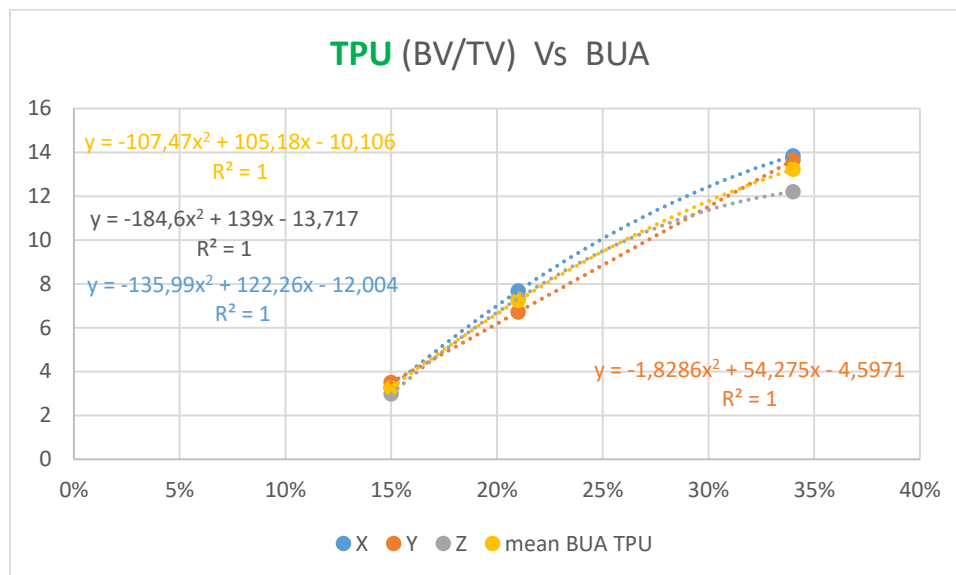
**Πίνακας 12** με τις τιμές και τον μέσο όρο BUA των τριών υλικών για τα διαφορετικά BV/TV στις τρεις διευθύνσεις σε μονάδες db/MHz/cm .



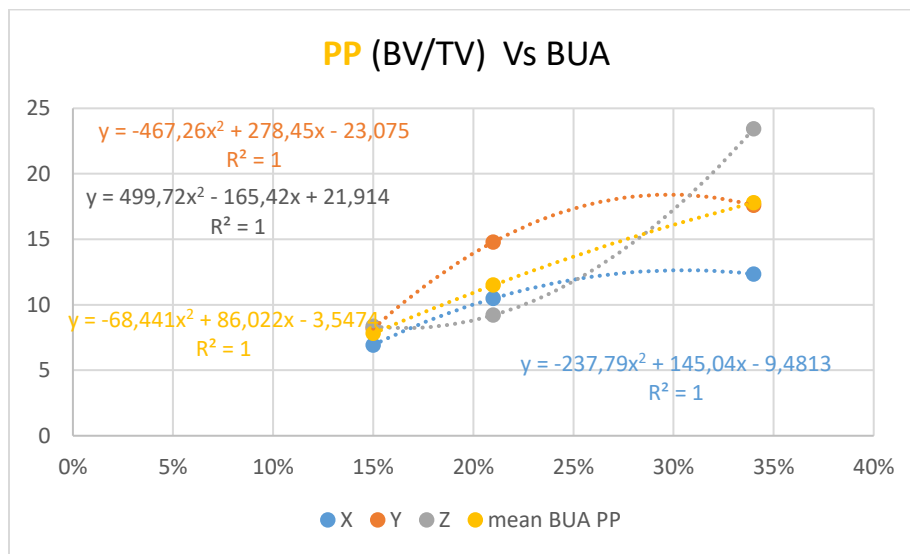
**Εικόνα 25** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA στους τρεις άξονες συναρτήσει της εξασθένισης.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



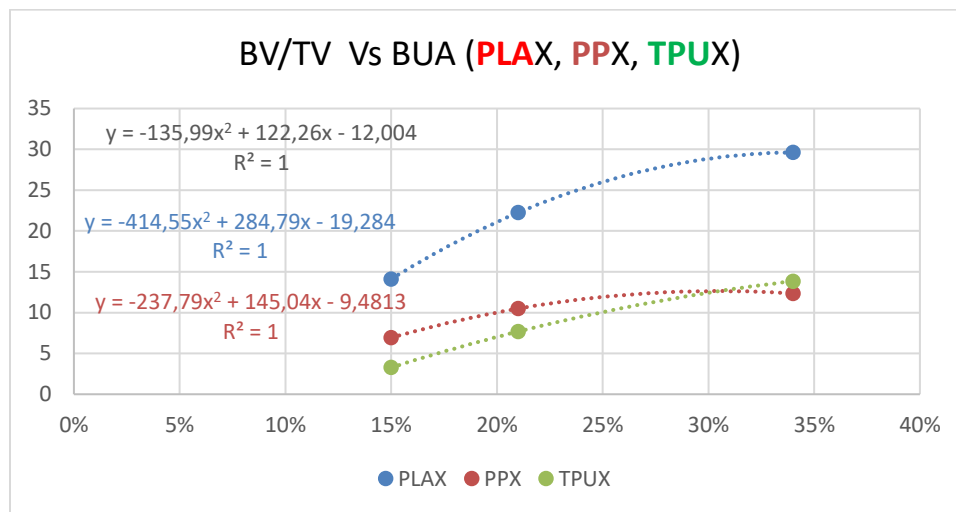
**Εικόνα 26** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια TPU στους τρεις άξονες συναρτήσει της εξασθένισης.



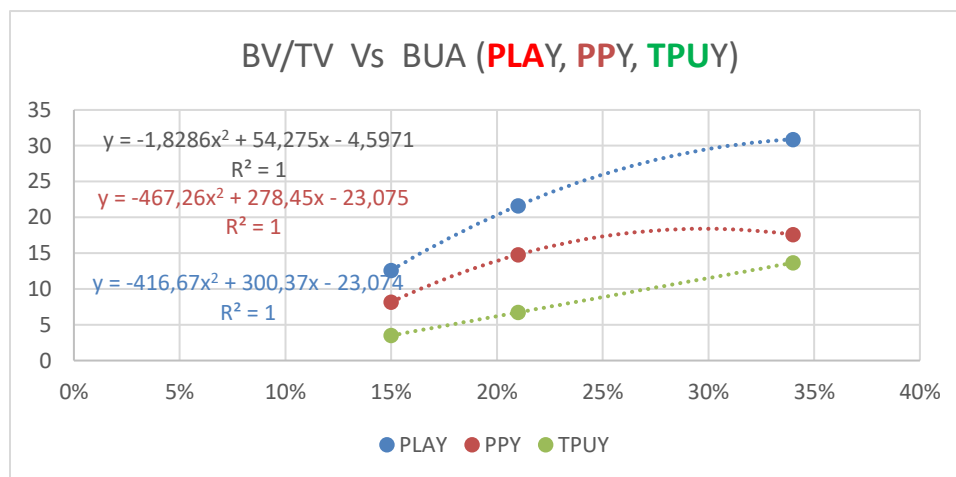
**Εικόνα 27** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PP στους τρεις άξονες συναρτήσει της εξασθένισης.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



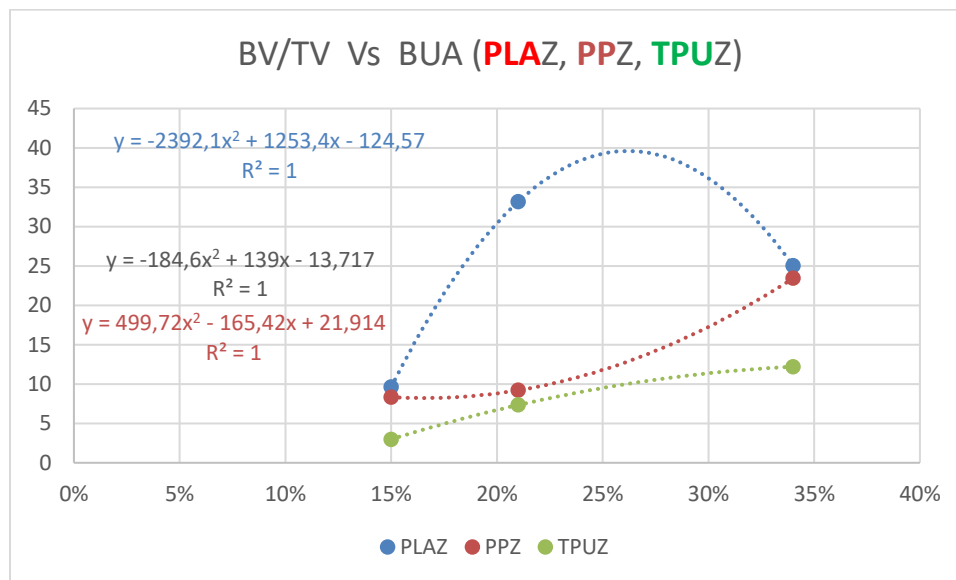
**Εικόνα 28** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα τρία υλικά PLA, PP , TPU στη διεύθυνση x.



**Εικόνα 29** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα τρία υλικά PLA, PP , TPU στη διεύθυνση y.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



Εικόνα 30 Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα τρία υλικά PLA, PP , TPU στη διεύθυνση z.

### Μέτρο Ελαστικότητας E

Ένα από τα βασικά εργαλεία στο μη καταστροφικό έλεγχο υλικών είναι η χρήση υπερήχων. Οι υπέρηχοι παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την εσωτερική δομή και τις μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού μέσω της ταχύτητας διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων σε αυτό.

Η ελαστική σταθερά, ή σταθερά Young E, του υλικού είναι στενά συνδεδεμένη με την ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων  $u$  μέσα στο υλικό μέσω της σχέσης:

$$E(\text{GPa}) = \rho u^2$$

όπου:

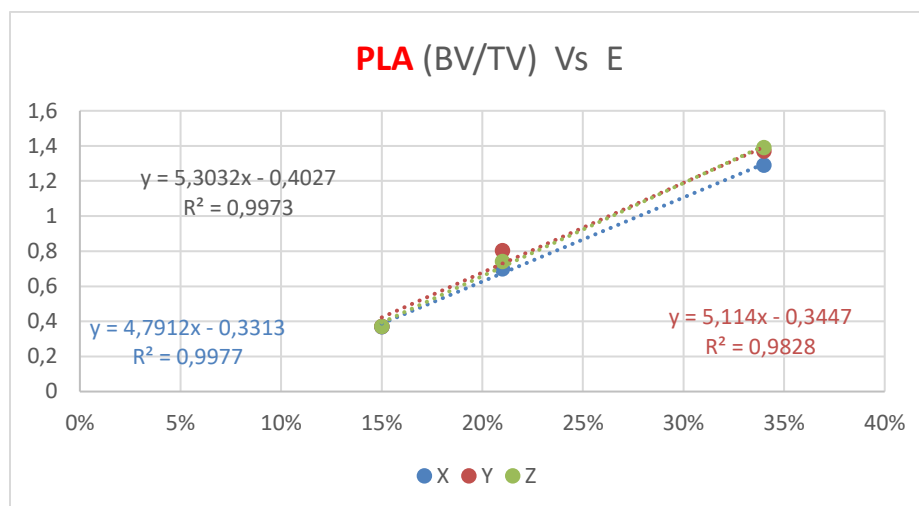
- $E$ : Ελαστική σταθερά του υλικού (σταθερά Young), εκφρασμένη σε GPa.
- $\rho$ : Πυκνότητα του υλικού, μετρούμενη σε  $\text{kg/m}^3$ .
- $u$ : Ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων μέσα στο υλικό.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

| ΥΛΙΚΟ   | PLA     |        |        | TPU    |        |        | PP     |        |        |
|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| BV/TV   | 15%     | 21%    | 34%    | 15%    | 21%    | 34%    | 15%    | 21%    | 34%    |
| X (GPa) | 0,37012 | 0,6999 | 1,2897 | 0,3184 | 0,6008 | 0,9613 | 0,2291 | 0,4365 | 0,7808 |
| Y (GPa) | 0,37154 | 0,8035 | 1,3705 | 0,3124 | 0,6312 | 0,9923 | 0,2490 | 0,4338 | 0,7762 |
| Z (GPa) | 0,37201 | 0,7412 | 1,3907 | 0,3258 | 0,5993 | 0,9861 | 0,2509 | 0,4391 | 0,8142 |

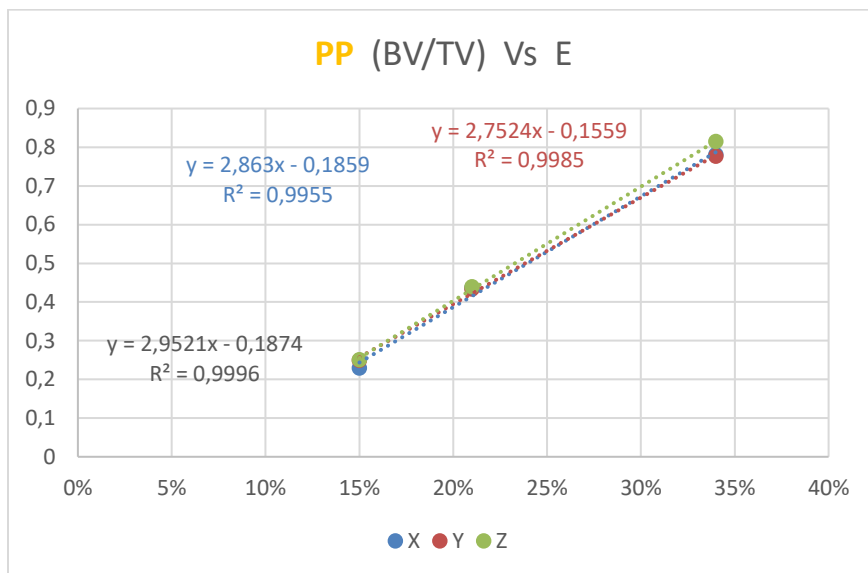
**Πίνακας 13** τα μέτρα ελαστικότητας των δοκιμών για κάθε υλικό ανά BV/TV στις τρεις διευθύνσεις.



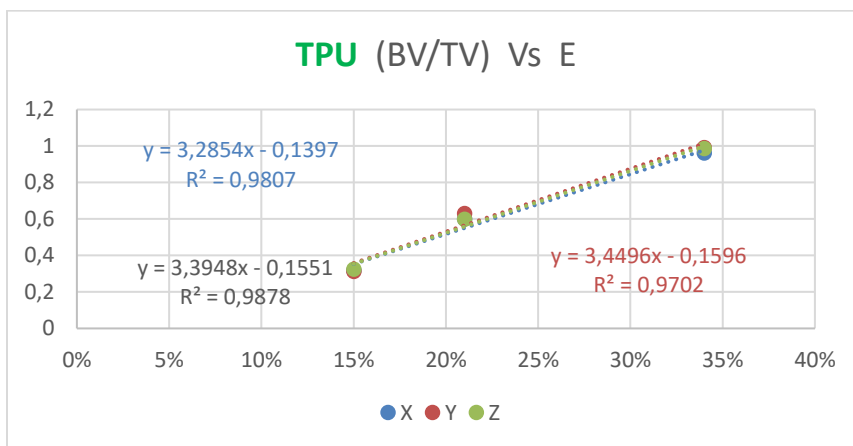
**Εικόνα 31** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA στους τρεις άξονες συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



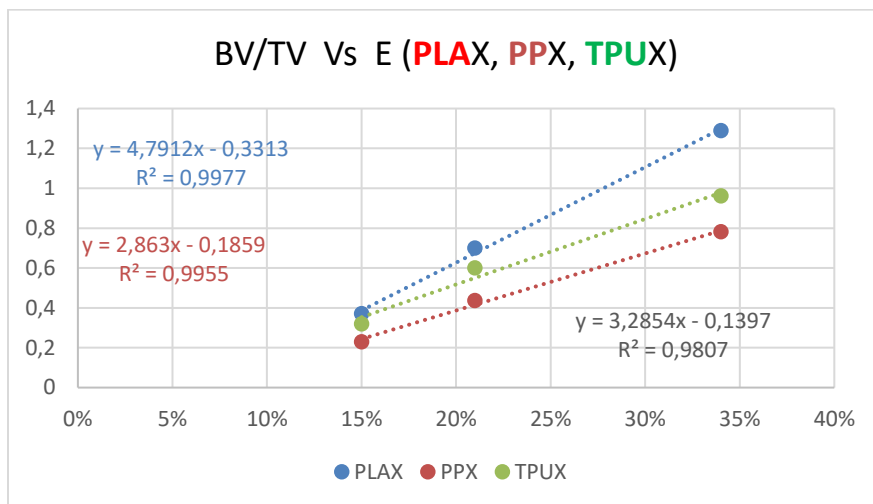
**Εικόνα 32** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PP στους τρεις άξονες συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας.



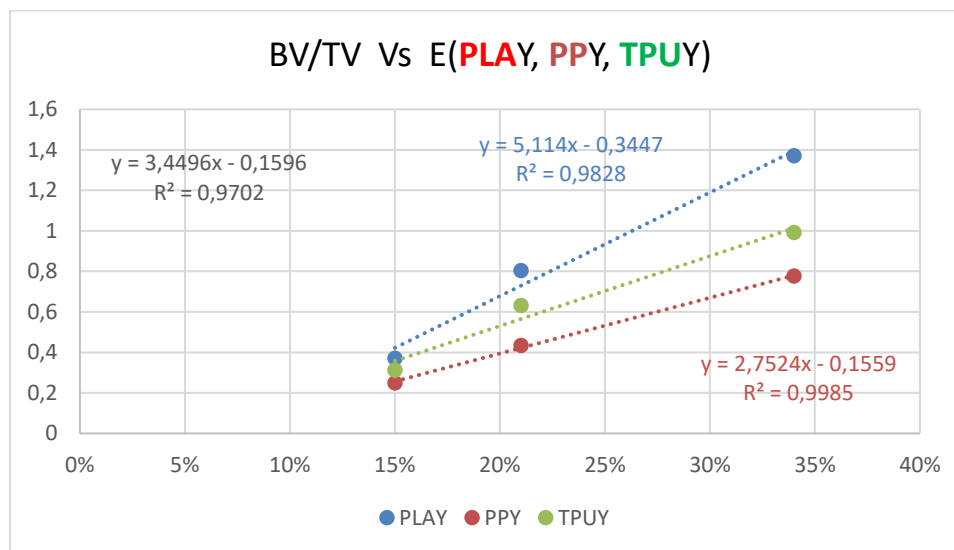
**Εικόνα 33** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PP στους τρεις άξονες συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



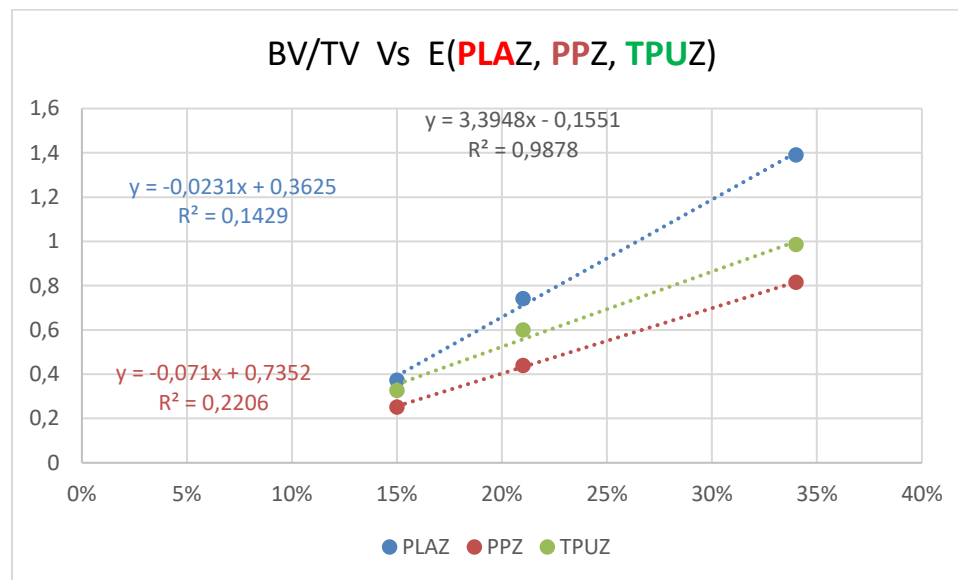
**Εικόνα 34** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA, PP, TPU στον άξονα x συναρτήσει του Μέτρου ελαστικότητας.



**Εικόνα 35** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA, PP, TPU στον άξονα y συναρτήσει του Μέτρου ελαστικότητας.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



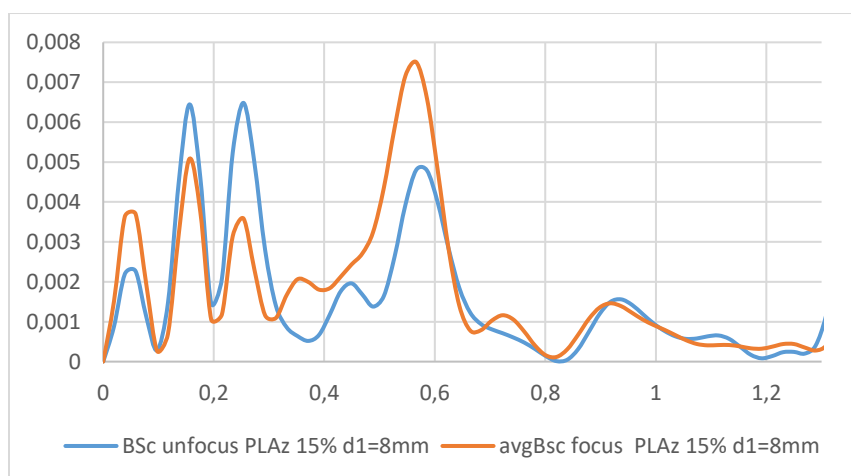
**Εικόνα 36** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA, PP, TPU στον άξονα z συναρτήσει του Μέτρου ελαστικότητας.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΟΠΙΣΘΟΣΚΕΔΑΣΗΣ

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται μία σύγκριση του συντελεστή οπισθοσκέδασης (Bsc) που ελήφθη για την ίδια περιοχή με unfocus και focus transducers. Η μέτρηση focus που απεικονίζεται στα διαγράμματα είναι ο μ.ο. 5 μετρήσεων στην ίδια περιοχή που ελήφθη μία μέτρηση

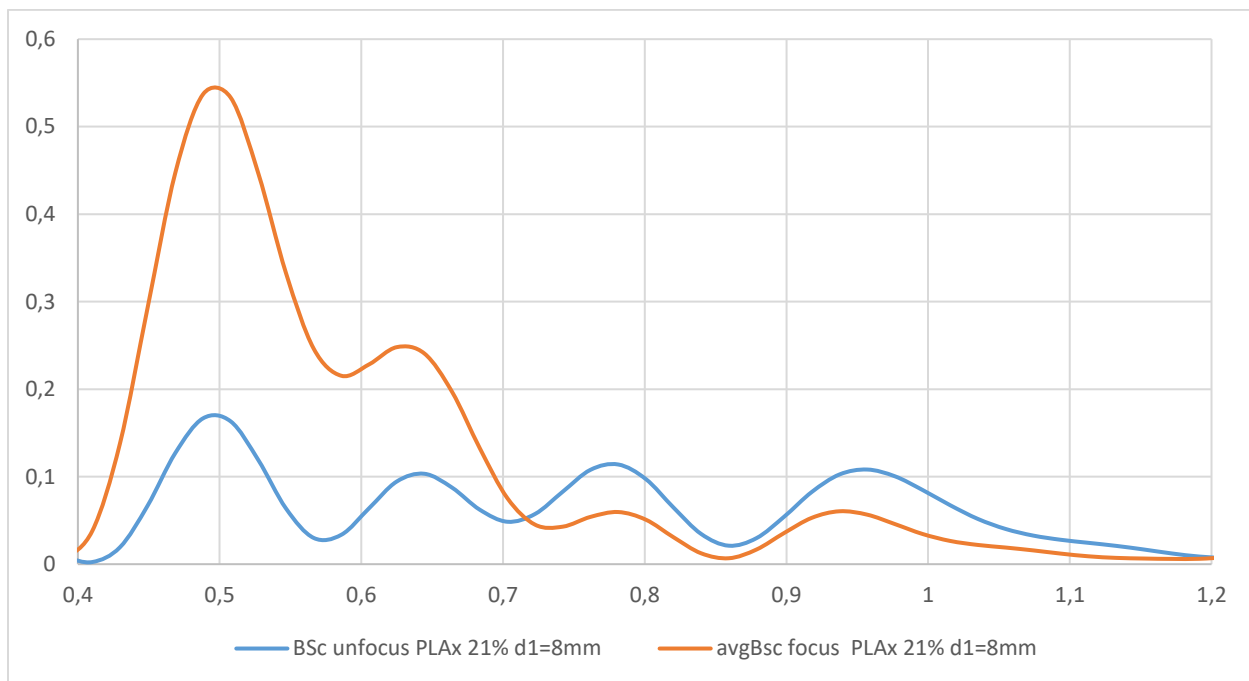


**Εικόνα 37** Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο PLA με όγκο οστού προς συνολικό όγκο BV/TV=15% στη διεύθυνση z με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου d1=8mm.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

$a=600\mu\text{m}(\text{F-UN})$   $a=480\mu\text{m}(\text{F-UN})$   $a=380\mu\text{m}/a=390\mu\text{m}$   $a=330\mu\text{m}/a=320\mu\text{m}$



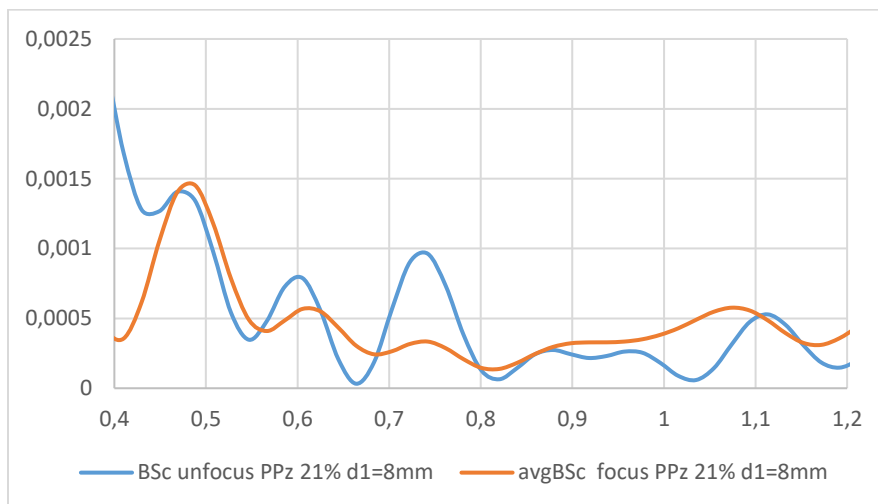
**Εικόνα 38** Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο PLA με όγκο οστού προς συνολικό όγκο  $BV/TV=21\%$  στη διεύθυνση x με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου  $d1=8\text{mm}$ .

Οι κορυφές των διαγραμμάτων αντιστοιχούν βάσει του μοντέλου του Πυκνού Πληθυσμού σε διαστάσεις δοκίδων για unfocus 600, 480, 380 & 330  $\mu\text{m}$  και για focus 600, 480, 390 & 320  $\mu\text{m}$ .

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

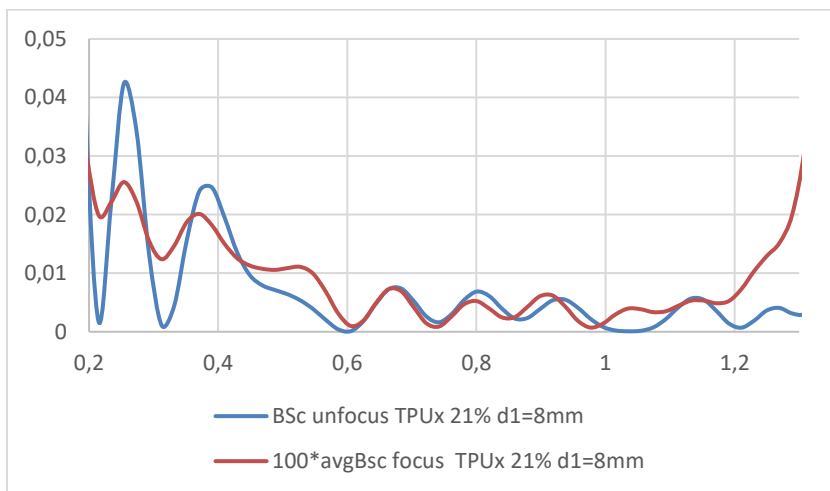
Μπελεσιώτης Παναγιώτης



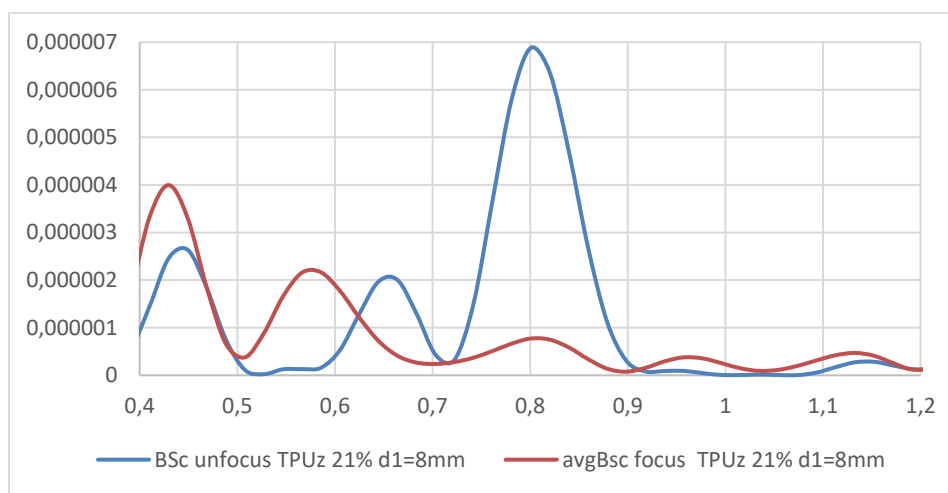
**Εικόνα 39** Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο PP με όγκο οστού προς συνολικό όγκο  $BV/TV=21\%$  και μέσος όρος πέντε μετρήσεων(focus) στη διεύθυνση z με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου  $d1=8mm$ .

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



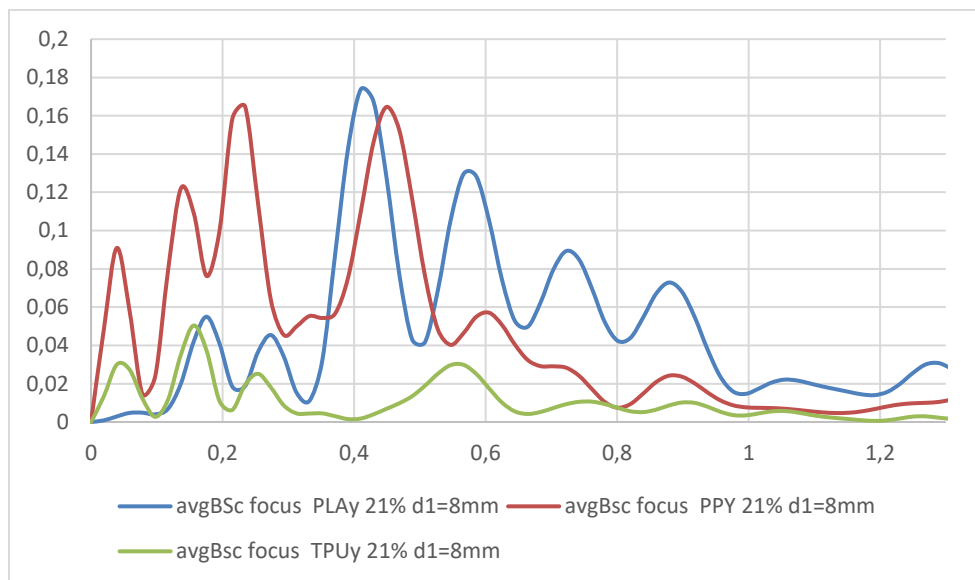
**Εικόνα 40** Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο TPU με όγκο οστού προς συνολικό όγκο  $BV/TV=21\%$  και μέσος όρος πέντε μετρήσεων(focus), στη διεύθυνση x με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου  $d1=8mm$ .



**Εικόνα 41** Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο TPU με όγκο οστού προς συνολικό όγκο  $BV/TV=21\%$  και μέσος όρος πέντε μετρήσεων(focus) στη διεύθυνση z με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου  $d1=8mm$ .

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

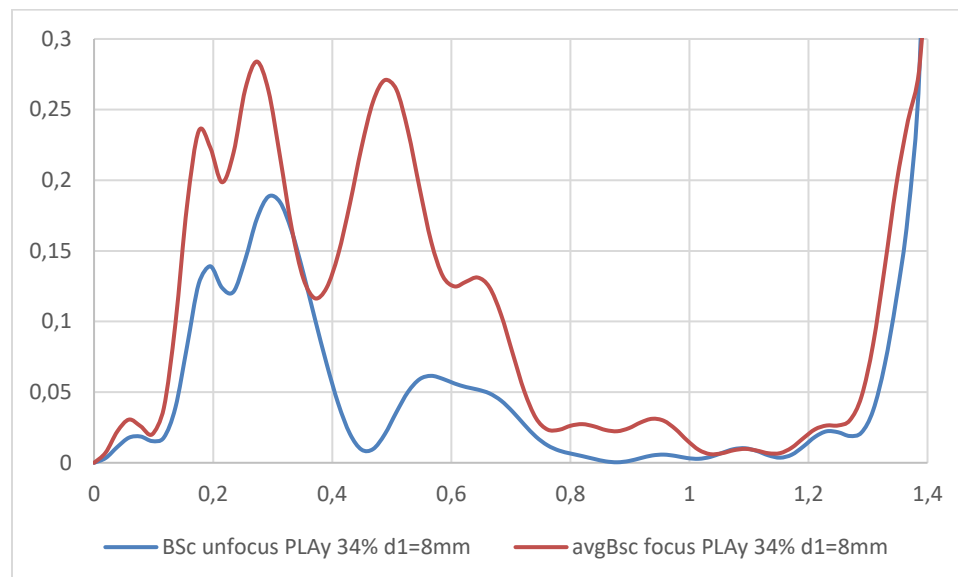
Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 42** Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο PLA, PP, TPU με όγκο οστού προς συνολικό όγκο  $BV/TV=21\%$  και μέσος όρος πέντε μετρήσεων (focus) στη διεύθυνση y με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου  $d1=8mm$ .

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

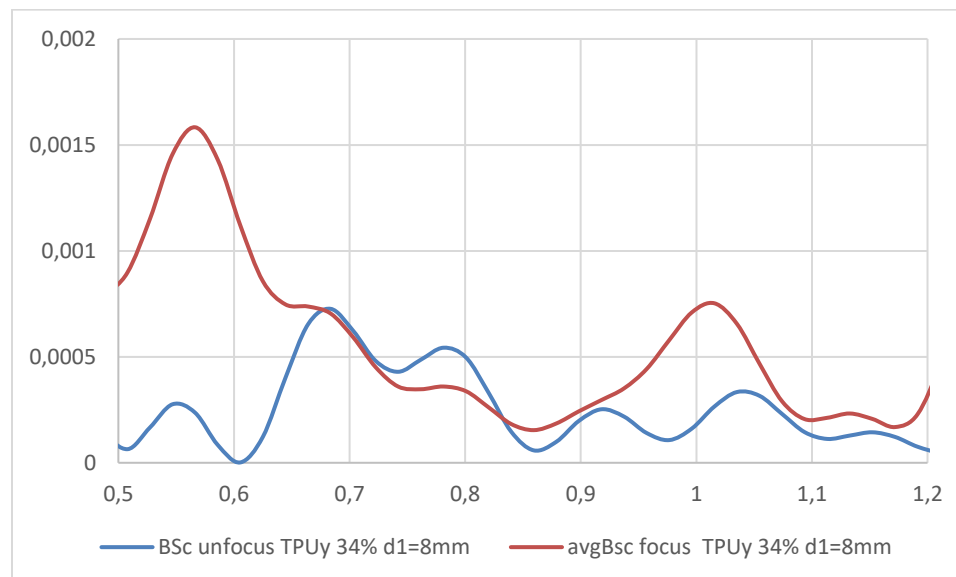
Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 43** Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο PLA με όγκο οστού προς συνολικό όγκο  $BV/TV=34\%$  και μέσος όρος πέντε μετρήσεων(focus) στη διεύθυνση y με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου  $d1=8mm$ .

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 44** Συντελεστής οπισθοσκέδασης για το δοκίμιο TPU με όγκο οστού προς συνολικό όγκο BV/TV=34% και μέσος όρος πέντε μετρήσεων(focus) στη διεύθυνση y με μη εστιακούς και με εστιακούς μεταλλάκτες για όγκο ελέγχου d1=8mm

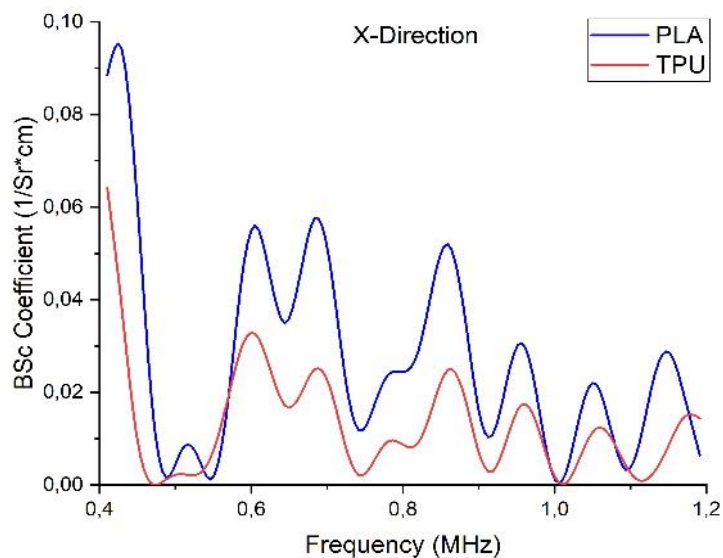
### Σχέση πυκνότητας και σκέδασης

Από τα παρακάτω διαγράμματα παρατηρήθηκε ότι ο υπέρηχος υφίσταται μεγαλύτερη σκέδαση σε υλικά με μεγαλύτερη πυκνότητα (PLA) έναντι υλικών με μικρότερη (TPU)

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

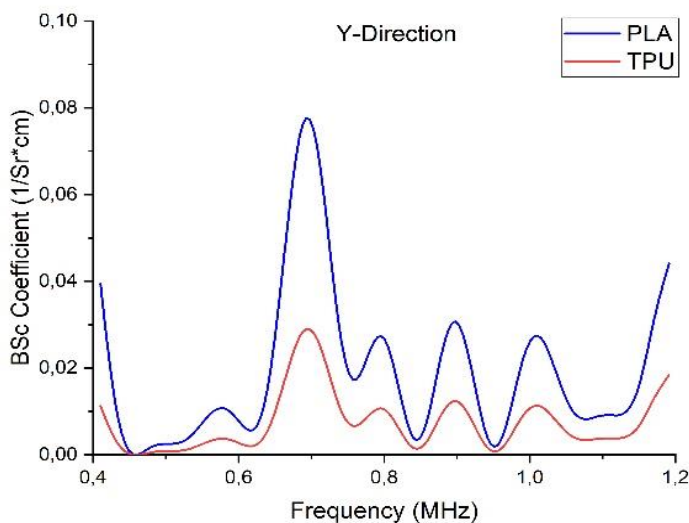


**Εικόνα 45** Συντελεστής οπισθοσκέδασης συναρτήσει της συχνότητας για δύο τρισδιάστατα μοντέλα οστού απο PLA, TPU στη διεύθυνση x

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

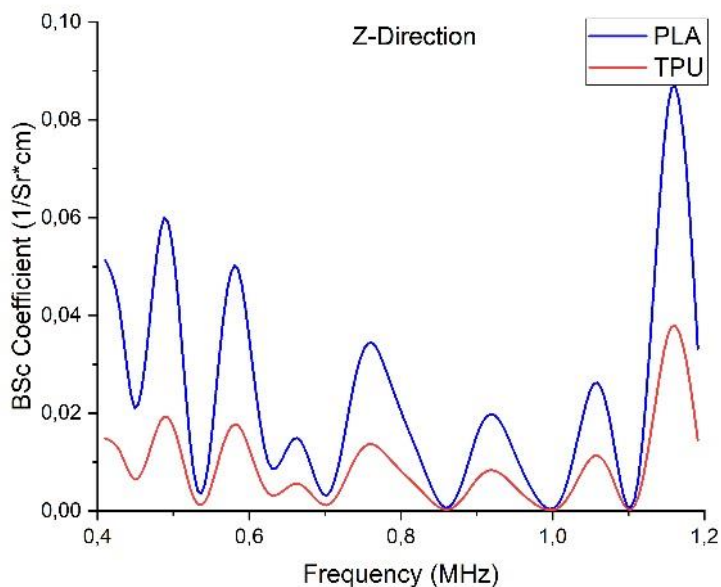


**Εικόνα 46** Συντελεστής οπισθοσκέδασης συναρτήσει της συχνότητας για δύο τρισδιάστατα μοντέλα οστού απο PLA, TPU στη διεύθυνση y

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 47** Συντελεστής οπισθοσκέδασης συναρτήσει της συχνότητας για δύο τρισδιάστατα μοντέλα οστού απο PLA, TPU στη διεύθυνση z

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

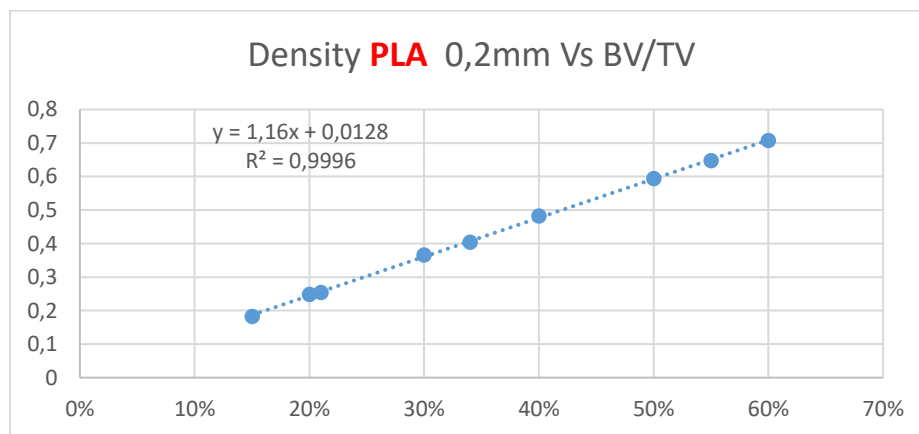
---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## 5.2 ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΔΟΜΗΣ 0,2MM

### ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

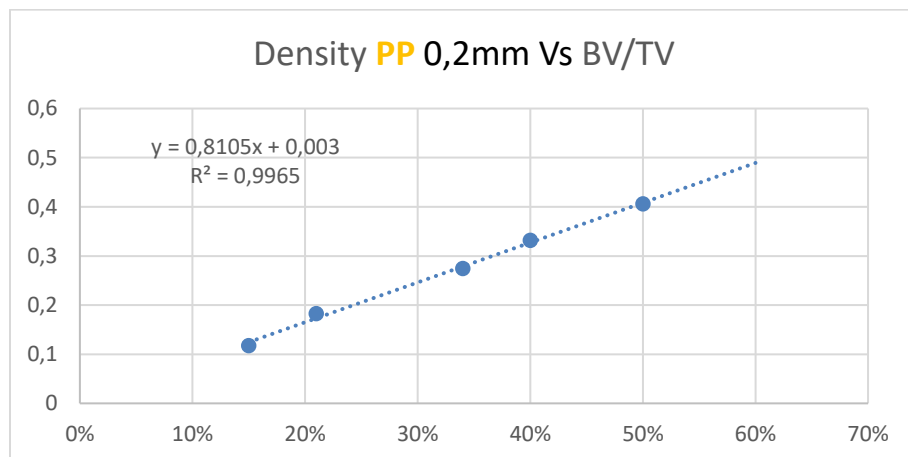
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της πυκνότητας των υλικών PLA, PP & TPU συναρτήσει του BV/TV τα οποία παρουσιάζουν εξαιρετική γραμμικότητα, γεγονός που υποδεικνύει την ορθή κατασκευή τους αλλά και τις σωστές λήψεις μετρήσεων. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν με περισσότερα από 15,21,34% BV/TV για να επαληθευθεί η σωστή κατασκευή τους (λογισμικό, εκτυπωτής κ.λπ.).



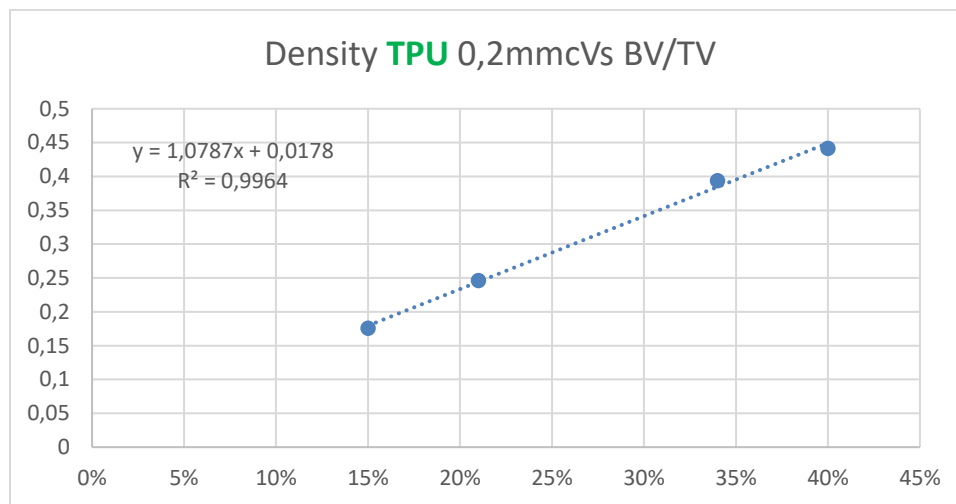
**Εικόνα 48** Πυκνότητες PLA σταθερής δομής για πάχος δοκίδας 0,2mm συναρτήσει BV/TV.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



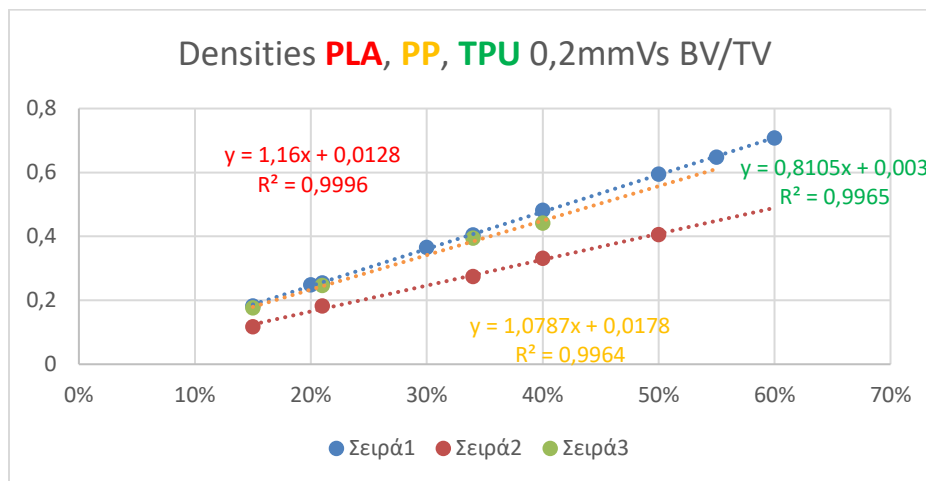
**Εικόνα 49** Πυκνότητες PP σταθερής δομής για πάχος δοκίδας 0,2mm συναρτήσκει BV/TV.



**Εικόνα 50** Πυκνότητες TPU σταθερής δομής για πάχος δοκίδας 0,2mm συναρτήσκει BV/TV.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 51** Πυκνότητες PLA, PP , TPU σταθερής δομής για πάχος δοκίδας 0,2mm συναρτήσει BV/TV.

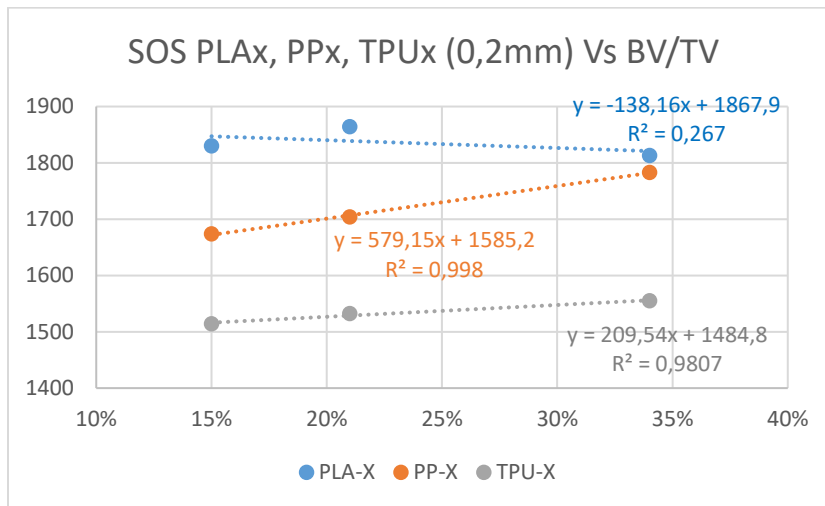
### Ταχύτητα του ήχου

| BV/TV | SOS plax 0.2mm | SOS ppx 0.2mm | SOS tpux 0.2mm |
|-------|----------------|---------------|----------------|
| 15%   | 1830           | 1674          | 1514           |
| 21%   | 1864           | 1704          | 1532           |
| 34%   | 1813           | 1783          | 1555           |

**Πίνακας 14** Πίνακας με τις τιμές της ταχύτητας από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-x.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



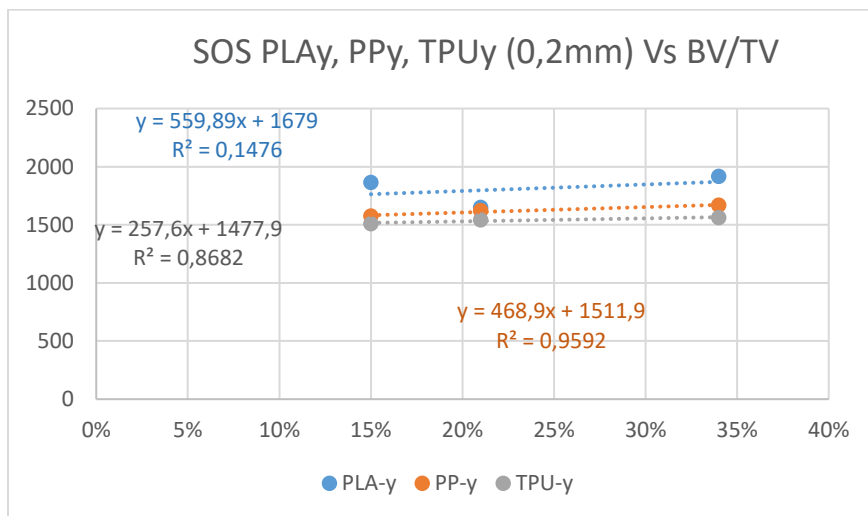
**Εικόνα 52** Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει των ταχυτήτων των δοκιμίων σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-x

| BV/TV | SOS play 0.2mm | SOS ppy 0.2mm | SOS tpuy 0.2mm |
|-------|----------------|---------------|----------------|
| 15%   | 1864           | 1575          | 1509           |
| 21%   | 1649           | 1621          | 1543           |
| 34%   | 1916           | 1668          | 1562           |

**Πίνακας 15** με τις τιμές της ταχύτητας από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-y.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



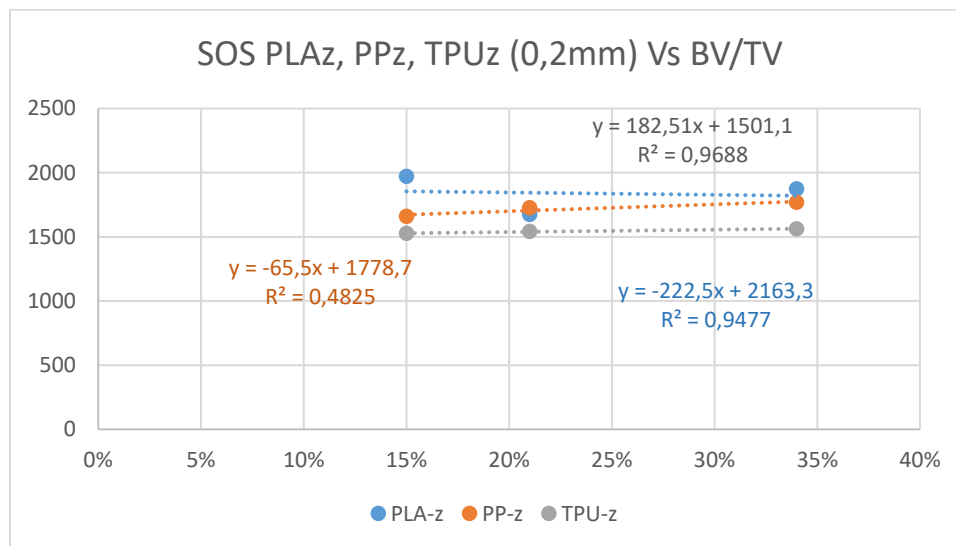
**Εικόνα 53** Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει των ταχυτήτων των δοκιμίων σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-γ.

| BV/TV | SOS plaz 0.2mm | SOS ppz 0.2mm | SOS tpuz 0.2mm |
|-------|----------------|---------------|----------------|
| 15%   | 1971           | 1658          | 1526           |
| 21%   | 1674           | 1726          | 1543           |
| 34%   | 1874           | 1768          | 1562           |

**Πίνακας 16** με τις τιμές της ταχύτητας από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-z.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 54** Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει των ταχυτήτων των δοκιμίων σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-z.

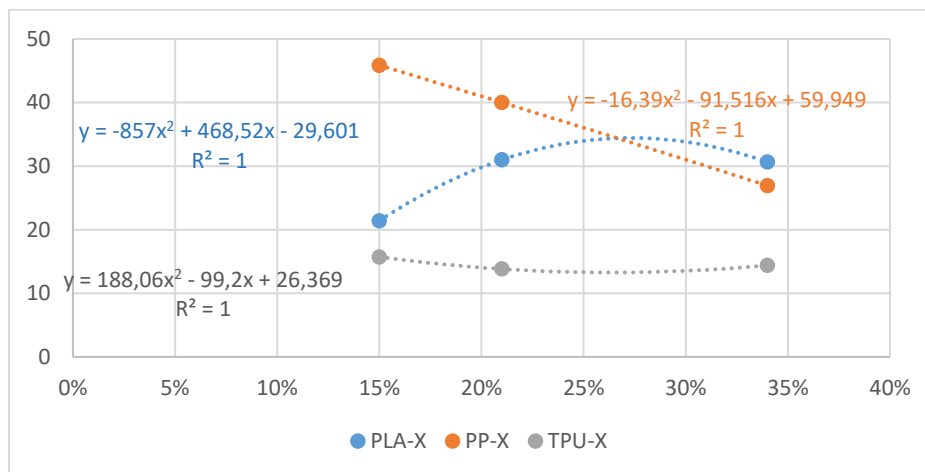
### Εξασθένιση ευρέως φάσματος

| BV/TV       | BUA plax 0.2mm | BUA ppx 0.2mm | BUA tpux 0.2mm |
|-------------|----------------|---------------|----------------|
| 15%(db/MHz) | 21,395         | 45,853        | 15,72          |
| 21%(db/MHz) | 30,995         | 40,008        | 13,83          |
| 34%(db/MHz) | 30,627         | 26,939        | 14,38          |

**Πίνακας 17** με τις τιμές της εξασθένισης BUA από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-x.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



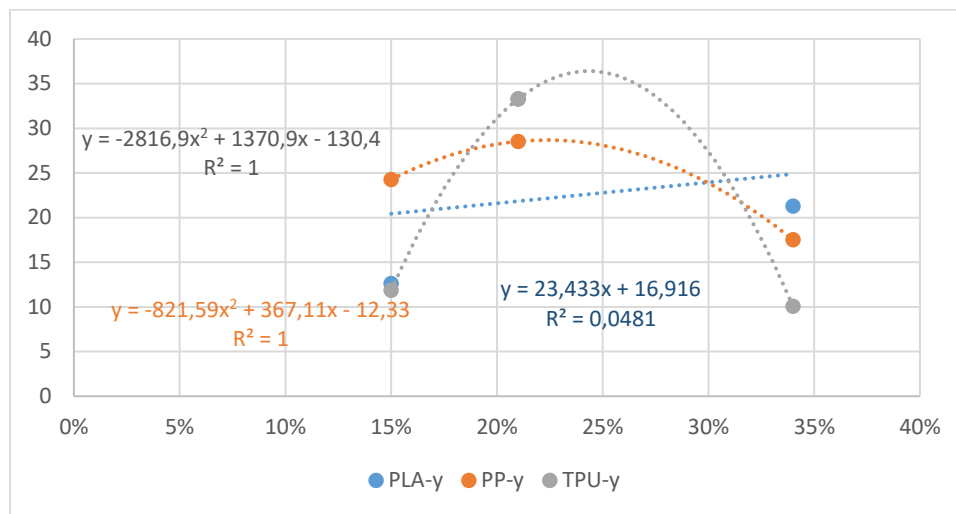
**Εικόνα 55** Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει της BUA των δοκιμίων σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-x.

| BV/TV       | BUA play 0.2mm | BUA ppy 0.2mm | BUA tpuy 0.2mm |
|-------------|----------------|---------------|----------------|
| 15%(db/MHz) | 12,605         | 24,25         | 11,86          |
| 21%(db/MHz) | 33,274         | 28,53         | 33,27          |
| 34%(db/MHz) | 21,271         | 17,51         | 10,08          |

**Πίνακας 18** με τις τιμές της εξασθένησης BUA από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-y.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



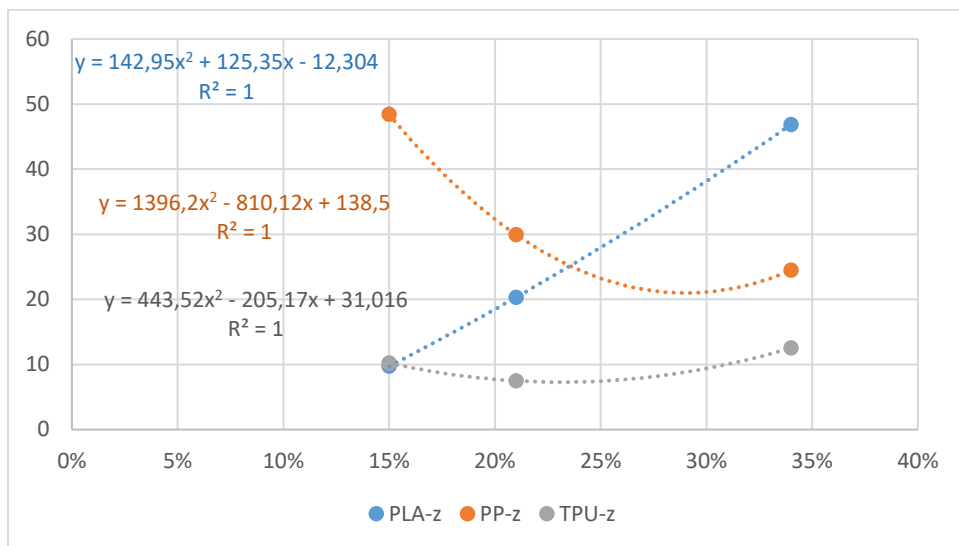
**Εικόνα 56** Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει της BUA των δοκιμίων σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-γ.

| BV/TV       | BUA plaz 0.2mm | BUA ppz 0.2mm | BUA tpuz 0.2mm |
|-------------|----------------|---------------|----------------|
| 15%(db/MHz) | 9,7145         | 48,4          | 10,22          |
| 21%(db/MHz) | 20,323         | 29,95         | 7,49           |
| 34%(db/MHz) | 46,839         | 24,46         | 12,53          |

**Πίνακας 19** με τις τιμές της εξασθένισης BUA από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-z.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



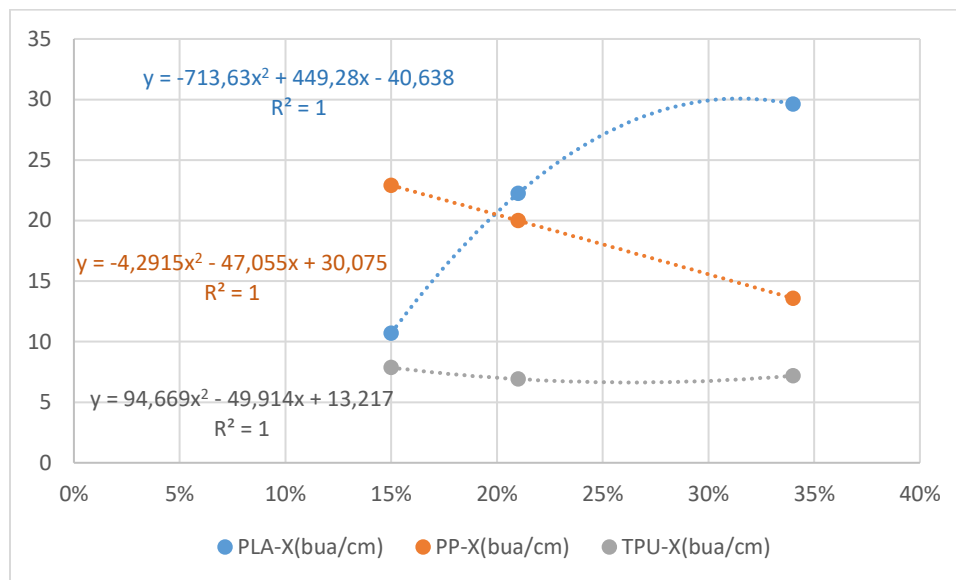
**Εικόνα 57** Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει της BUA των δοκιμίων σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-z.

| BV/TV          | BUA plax 0.2mm | BUA ppx 0.2mm | BUA tpux 0.2mm |
|----------------|----------------|---------------|----------------|
| 15%(db/MHz/cm) | 10,6975        | 22,92         | 7,86           |
| 21%(db/MHz/cm) | 22,24          | 20,004        | 6,91           |
| 34%(db/MHz/cm) | 29,622         | 13,58         | 7,19           |

**Πίνακας 20** με τις τιμές της εξασθένισης Bua/cm από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-x.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



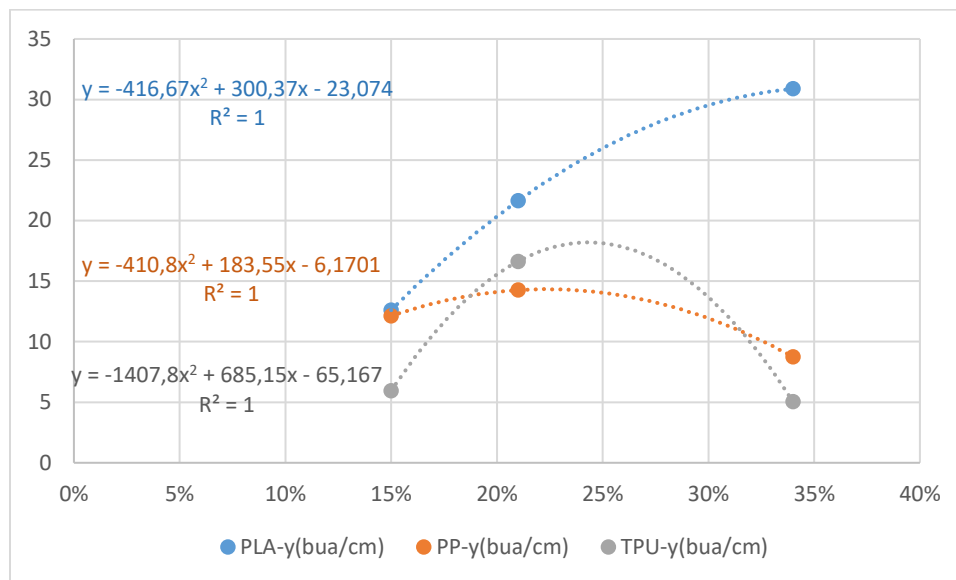
**Εικόνα 58** Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει της Bua/cm των δοκιμίων σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-x.

| BV/TV          | BUA play 0.2mm | BUA ppy 0.2mm | BUA tpuy 0.2mm |
|----------------|----------------|---------------|----------------|
| 15%(db/MHz/cm) | 12,606         | 12,12         | 5,93           |
| 21%(db/MHz/cm) | 21,628         | 14,26         | 16,63          |
| 34%(db/MHz/cm) | 30,884         | 8,75          | 5,04           |

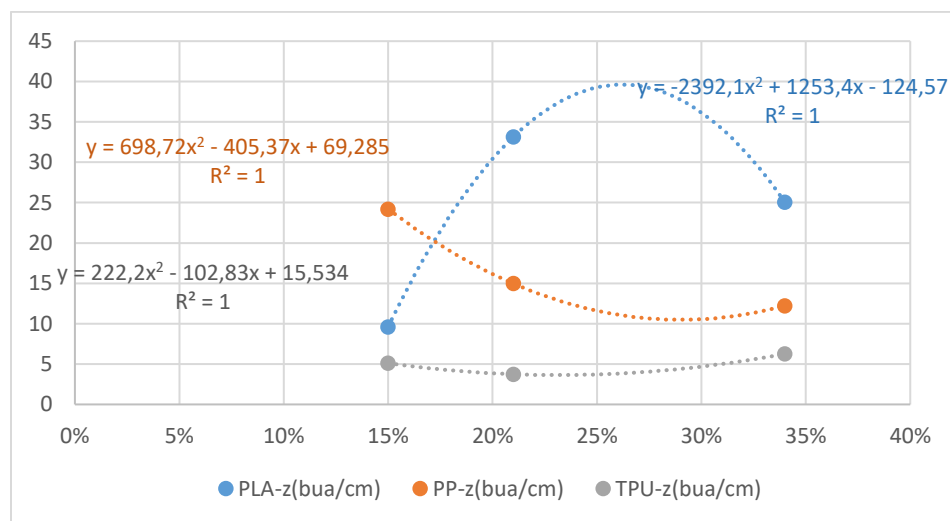
**Πίνακας 21** με τις τιμές της εξασθένισης Bua/cm από τα δοκίμια των σταθερών δομών με πάχος δοκίδων 0.2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-y.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 59** Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει της Bua/cm των δοκιμών σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-γ.



**Εικόνα 60** Όγκος οστού προς τον συνολικό όγκο BV/TV συναρτήσει της Bua/cm των δοκιμών σταθερής δομής με πάχος δοκίδας 0,2mm για τα τρία υλικά στη διεύθυνση-z.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

### 5.3 ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΔΟΜΗΣ PLA 0,2-0,4-0,5-0,6 MM

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι ακουστικές ιδιότητες (ταχύτητα (SOS) – εξασθένηση (BUA) και οπισθοσκέδαση (Bsc) για τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με υλικό PLA και αναλογίες BV/TV=15-21-34% όπως τα αντίστοιχα δοκίμια σπογγώδους οστού. Επίσης σε κάθε αναλογία BV/TV κατασκευάστηκαν δομές με πάχη δοκίδων 0,2-0,4-0,5 & 0,6mm (κεφ. 4 εικ.15). Η κατασκευή των δοκιμίων σταθεράς δομής έγινε με το λογισμικό Ultimaker cura ως εξής:

#### **Infill Density 15%:**

- 1) 24mm<sup>3</sup> cube with 0,4mm and infill line distance 2,6667mm
- 2) 25mm<sup>3</sup> cube with 0,5mm and infill line distance 3,3333mm
- 3) 24mm<sup>3</sup> cube with 0,6mm and infill line distance 4,0000mm

#### **Infill Density 21%:**

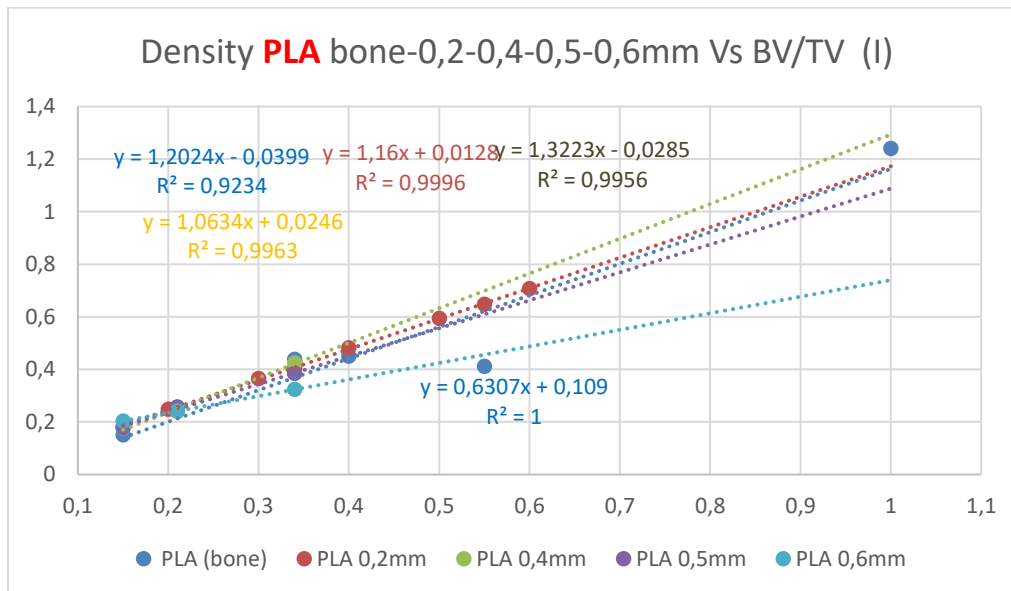
- 1) 24mm<sup>3</sup> cube with 0,4mm and infill line distance 1,9048mm
- 2) 25mm<sup>3</sup> cube with 0,5mm and infill line distance 2,3810mm
- 3) 24mm<sup>3</sup> cube with 0,6mm and infill line distance 2,8571mm

#### **Infill Density 34%:**

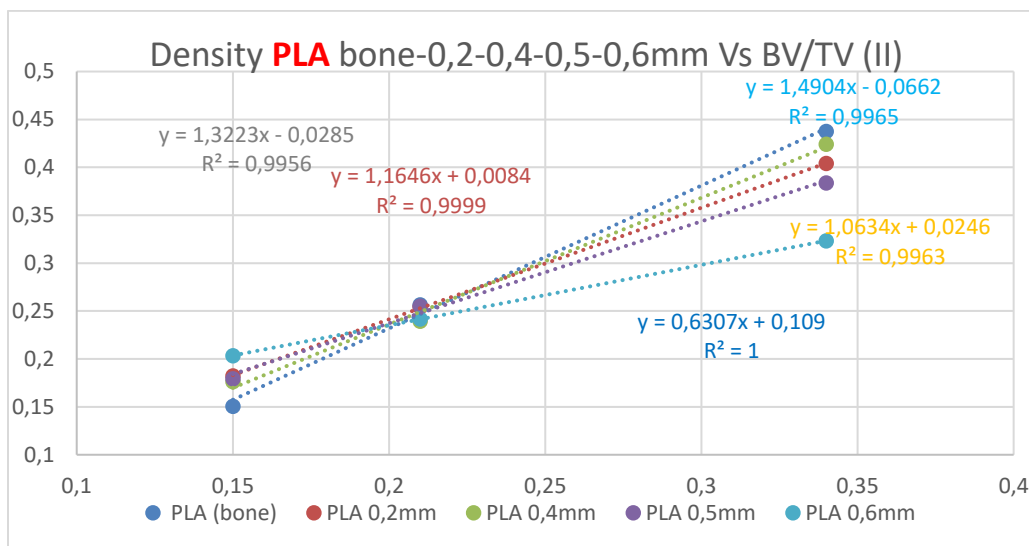
- 1) 24mm<sup>3</sup> cube with 0,4mm and infill line distance 1,1765mm
- 2) 25mm<sup>3</sup> cube with 0,5mm and infill line distance 1,4706mm
- 3) 24mm<sup>3</sup> cube with 0,6mm and infill line distance 1,7647mm

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 61** Πυκνότητες PLA σπογγώδους οστού και των δειγμάτων από PLA σταθερής δομής για τα διαφορετικά πάχη δοκίδων συναρτήσει BV/TV



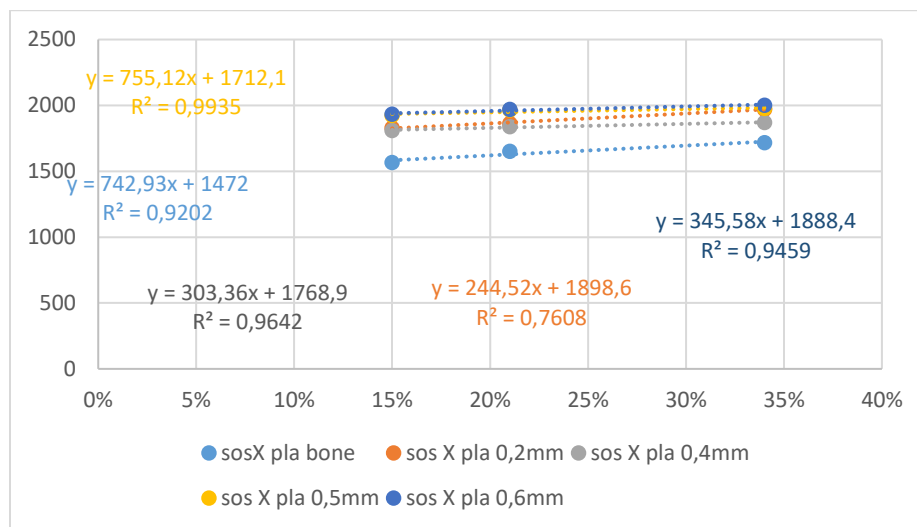
**Εικόνα 62** Πυκνότητες PLA σπογγώδους οστού και των δειγμάτων από PLA σταθερής δομής για τα διαφορετικά πάχη δοκίδων συναρτήσει BV/TV= 15-21-34

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

| BV/TV | sosX pla bone | sosX pla 0.2mm | sosX pla 0.4mm | sosX pla 0.5mm | sosX pla 0.6mm |
|-------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 15%   | 1567m/s       | 1830m/s        | 1810m/s        | 1925m/s        | 1934m/s        |
| 21%   | 1652m/s       | 1864m/s        | 1839m/s        | 1965m/s        | 1970m/s        |
| 34%   | 1717m/s       | 1971m/s        | 1870m/s        | 1977m/s        | 2003m/s        |

**Πίνακας 22** με τις τιμές Ταχύτητας για το σπογγώδες οστό και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων από PLA στη διεύθυνση του x-άξονα.



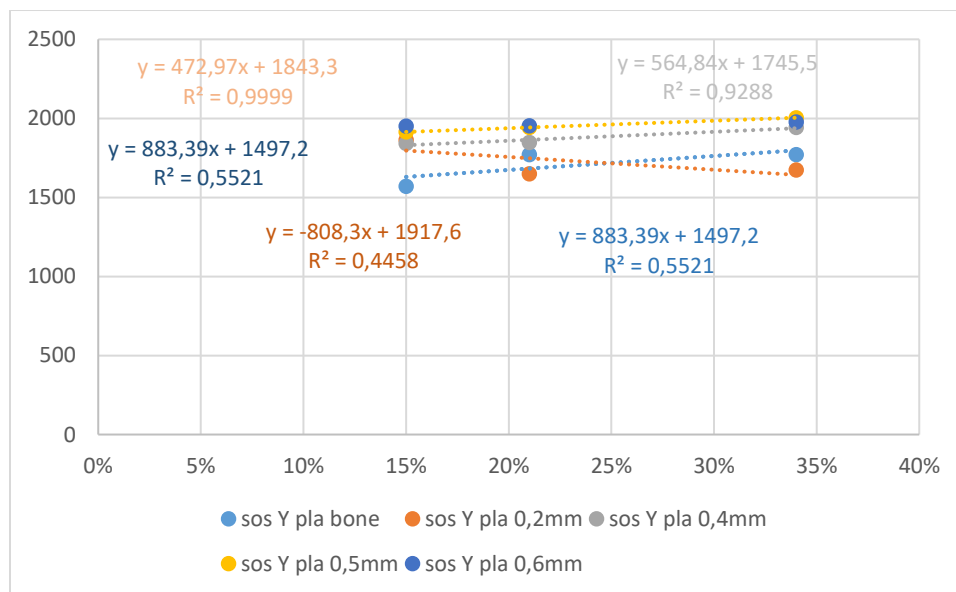
**Εικόνα 63** Ταχύτητες για το σπογγώδες οστό και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων από PLA στη διεύθυνση του x-άξονα συναρτήσεως του BV/TV.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

| BV/TV | sosY pla bone | sosY pla 0.2mm | sosY pla 0.4mm | sosY pla 0.5mm | sosY pla 0.6mm |
|-------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 15%   | 1570m/s       | 1864m/s        | 1842m/s        | 1914m/s        | 1951m/s        |
| 21%   | 1770m/s       | 1649m/s        | 1847m/s        | 1943m/s        | 1952m/s        |
| 34%   | 1770m/s       | 1674m/s        | 1943m/s        | 2004m/s        | 1977m/s        |

**Πίνακας 23** με τις τιμές ταχύτητας για το σπογγώδες οστό και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων από PLA στη διεύθυνση του y-άξονα.



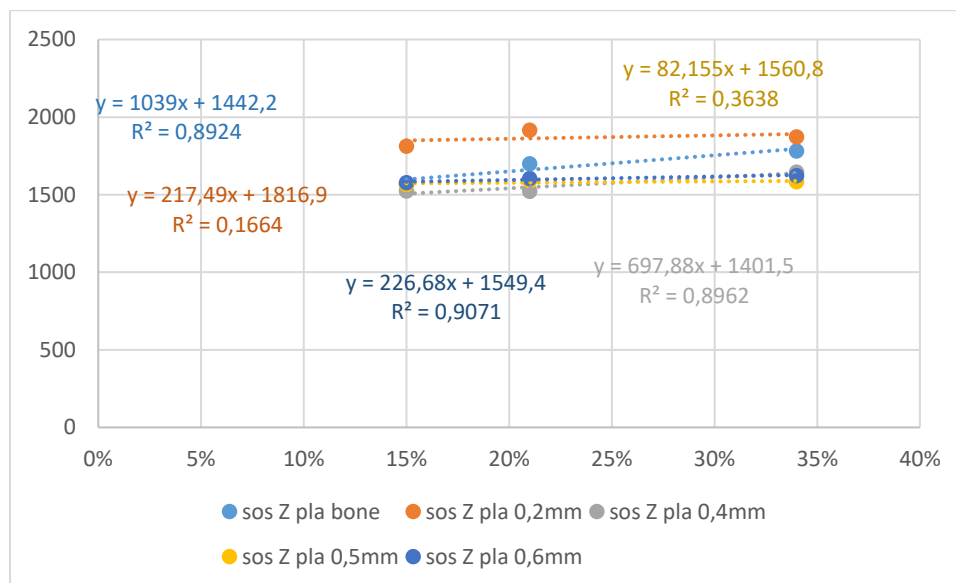
**Εικόνα 64** Ταχύτητες για το σπογγώδες οστό και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων από PLA στη διεύθυνση του y άξονα συναρτήσει του BV/TV.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

| BV/TV | sosZ pla bone | sosZ pla 0.2mm | sosZ pla 0.4mm | sosZ pla 0.5mm | sosZ pla 0.6mm |
|-------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 15%   | 1571m/s       | 1813m/s        | 1524m/s        | 1565m/s        | 1578m/s        |
| 21%   | 1700m/s       | 1916m/s        | 1522m/s        | 1590m/s        | 1605m/s        |
| 34%   | 1783m/s       | 1874m/s        | 1647m/s        | 1585m/s        | 1624m/s        |

**Πίνακας 24** με τις τιμές ταχύτητας για το σπογγώδες οστό και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων από PLA στη διεύθυνση του z-άξονα.



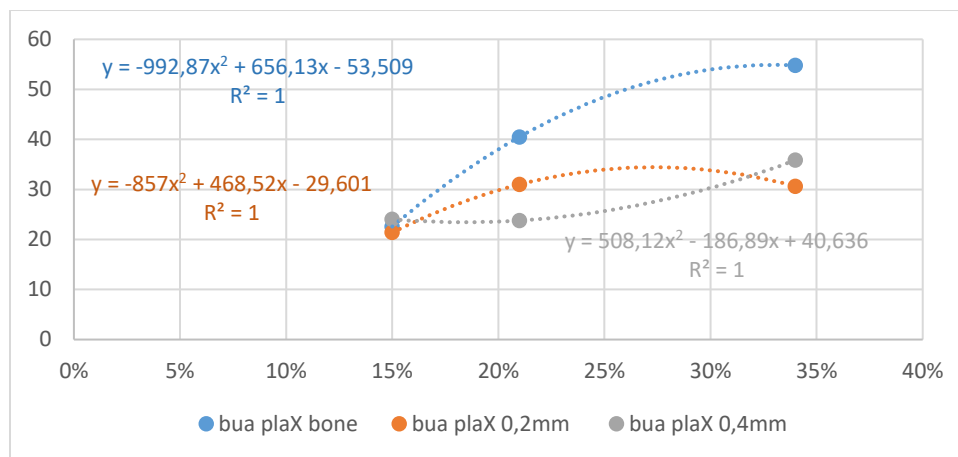
**Εικόνα 65** Ταχύτητες για το σπογγώδες οστό και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων από PLA στη διεύθυνση του z-άξονα συναρτήσει του BV/TV.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

| BV/TV | BUA plax bone | BUA plax 0.2mm | BUA plax 0.4mm | BUA plax 0.5mm | BUA plax 0.6mm |
|-------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 15%   | 22,572 db/MHz | 21,395 db/MHz  | 24,035 db/MHz  | 46,141 db/MHz  | 35,370 db/MHz  |
| 21%   | 40,494 db/MHz | 30,995 db/MHz  | 23,797 db/MHz  | 34,229 db/MHz  | 34,717 db/MHz  |
| 34%   | 54,801 db/MHz | 30,627 db/MHz  | 35,832 db/MHz  | 35,426 db/MHz  | 48,584 db/MHz  |

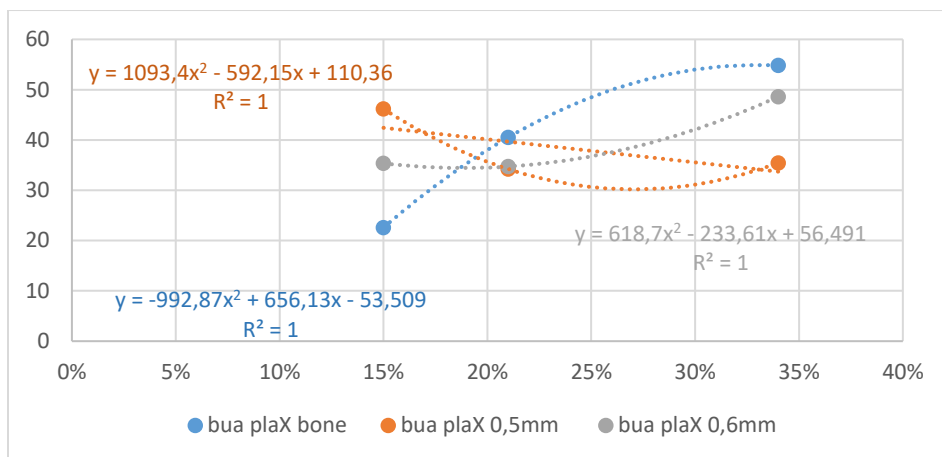
**Πίνακας 25** με τις τιμές Bua σε μονάδες db/MHz για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων στη διεύθυνση του x-άξονα.



**Εικόνα 66** Bua για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,2mm και 0.4mm στη διεύθυνση του x-άξονα.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



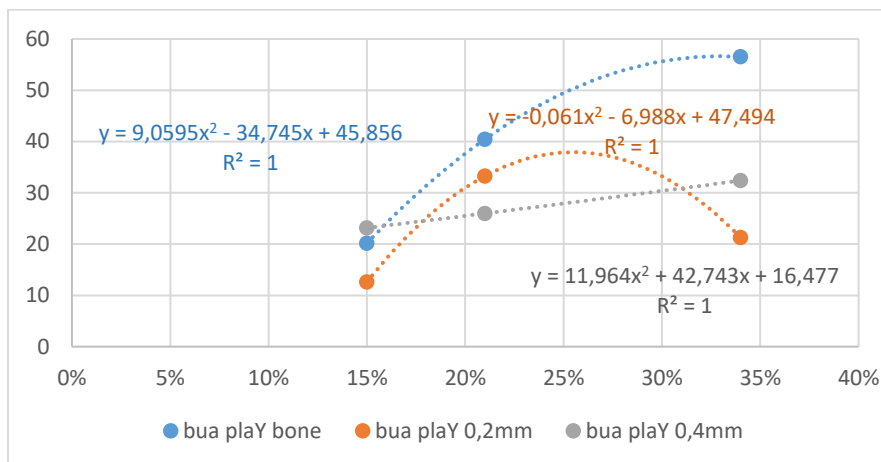
**Εικόνα 67** Bua για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,5mm και 0.6mm στη διεύθυνση του x-άξονα.

| BV/TV | BUA play bone | BUA play 0.2mm | BUA play 0.4mm | BUA play 0.5mm | BUA play 0.6mm |
|-------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 15%   | 20,171 db/MHz | 12,605 db/MHz  | 23,158 db/MHz  | 49,521 db/MHz  | 32,867 db/MHz  |
| 21%   | 40,445 db/MHz | 33,274 db/MHz  | 25,981 db/MHz  | 36,940 db/MHz  | 32,103 db/MHz  |
| 34%   | 56,519 db/MHz | 21,271 db/MHz  | 32,393 db/MHz  | 31,682 db/MHz  | 47,458 db/MHz  |

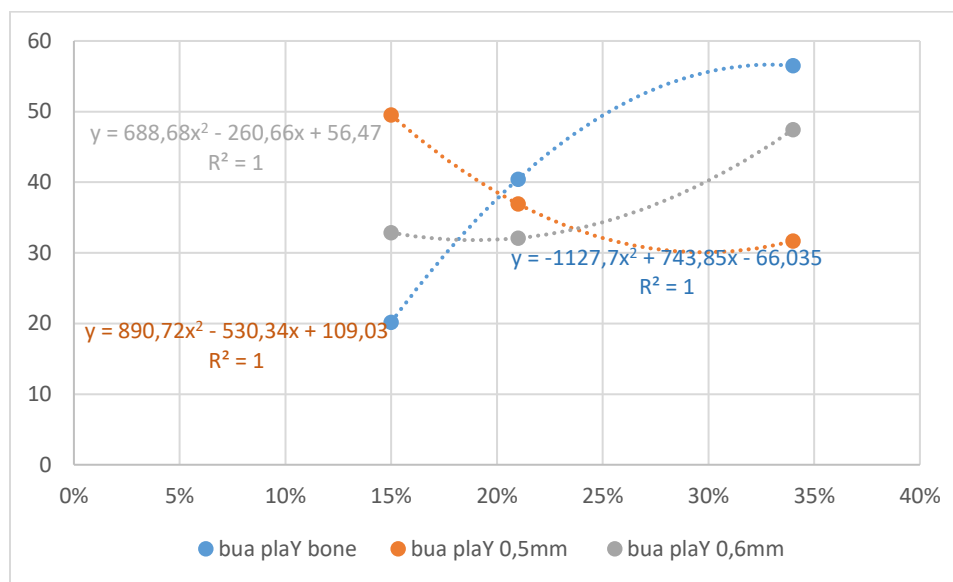
**Πίνακας 26** με τις τιμές Bua σε μονάδες db/MHz για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων στη διεύθυνση του y-άξονα.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Πίνακας 27** Bua για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,2mm και 0,4mm στη διεύθυνση του y-άξονα.



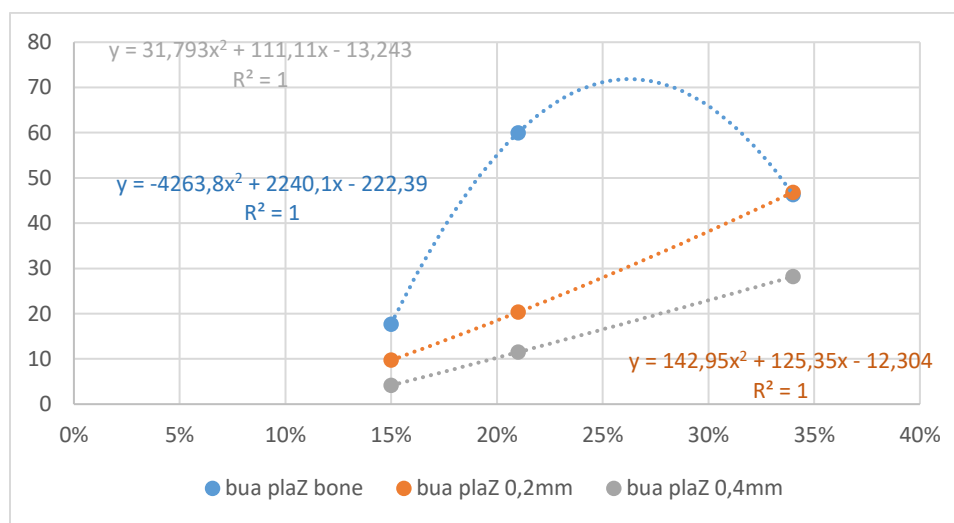
**Πίνακας 28** Bua για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,5mm και 0.6mm στη διεύθυνση του y-άξονα.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

| BV/TV | BUA plaz bone | BUA plaz 0.2mm | BUA plaz 0.4mm | BUA plaz 0.5mm | BUA plaz 0.6mm |
|-------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 15%   | 17,690 db/MHz | 9,7145 db/MHz  | 4,1379 db/MHz  | 13,035 db/MHz  | 7,8261 db/MHz  |
| 21%   | 59,997 db/MHz | 20,323 db/MHz  | 11,491 db/MHz  | 20,801 db/MHz  | 29,966 db/MHz  |
| 34%   | 46,346 db/MHz | 46,839 db/MHz  | 28,208 db/MHz  | 22,053 db/MHz  | 14,441 db/MHz  |

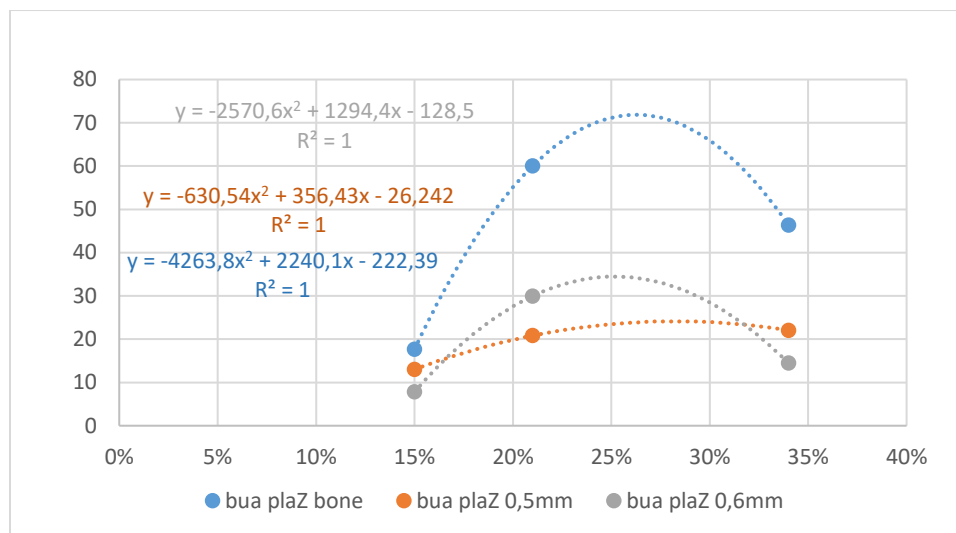
**Πίνακας 29** με τις τιμές Bua σε μονάδες db/MHz για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων στη διεύθυνση του z-άξονα.



**Εικόνα 68** Bua για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,2mm και 0.4mm στη διεύθυνση του z-άξονα.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



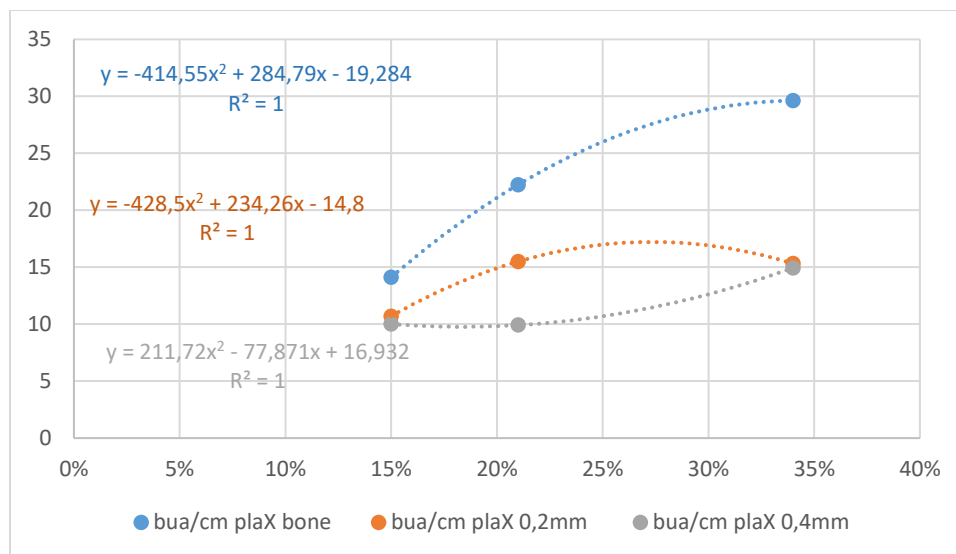
**Εικόνα 69** Bua για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,5mm και 0.6mm στη διεύθυνση του z-άξονα.

| BV/TV | BUA plax bone | BUA plax 0.2mm | BUA plax 0.4mm | BUA plax 0.5mm | BUA plax 0.6mm |
|-------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 15%   | 14,107        | 10,697         | 10,014         | 18,456         | 14,737         |
| 21%   | 22,24         | 15,497         | 9,915          | 13,691         | 14,465         |
| 34%   | 29,622        | 15,313         | 14,93          | 14,170         | 20,243         |

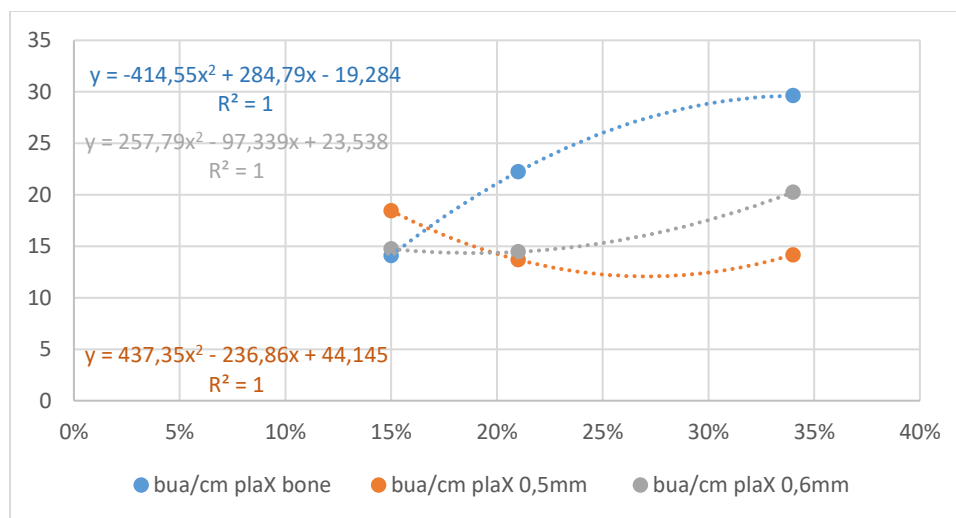
**Πίνακας 30** με τις τιμές Bua σε μονάδες db/MHz/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων στη διεύθυνση του x-άξονα.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 70** Bua/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,2mm και 0.4mm στη διεύθυνση του x-άξονα.



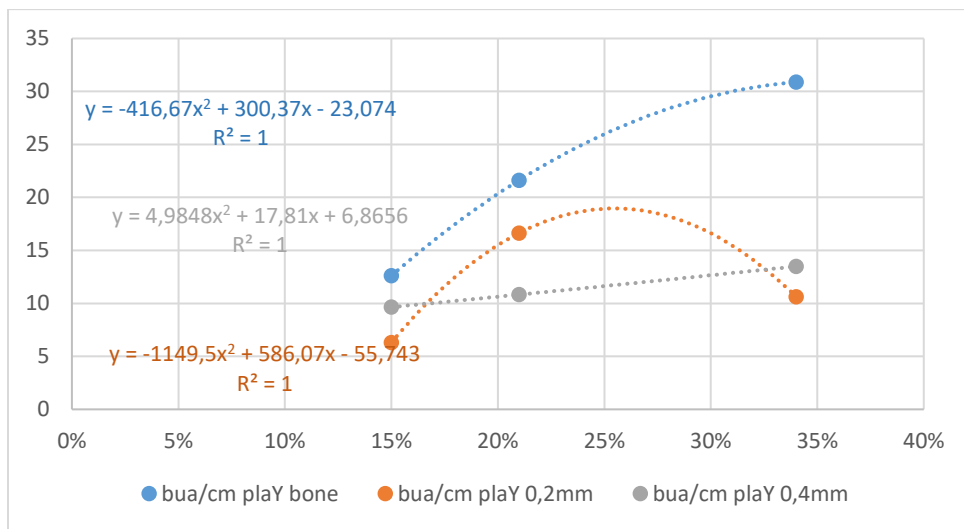
**Εικόνα 71** Bua/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,5mm και 0.6mm στη διεύθυνση του x-άξονα.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

| BV/TV | BUA play bone | BUA play 0.2mm | BUA play 0.4mm | BUA play 0.5mm | BUA play 0.6mm |
|-------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 15%   | 12,606        | 6,302          | 9,649          | 19,808         | 13,694         |
| 21%   | 21,628        | 16,637         | 10,825         | 14,776         | 13,376         |
| 34%   | 30,884        | 10,635         | 13,497         | 12,672         | 19,774         |

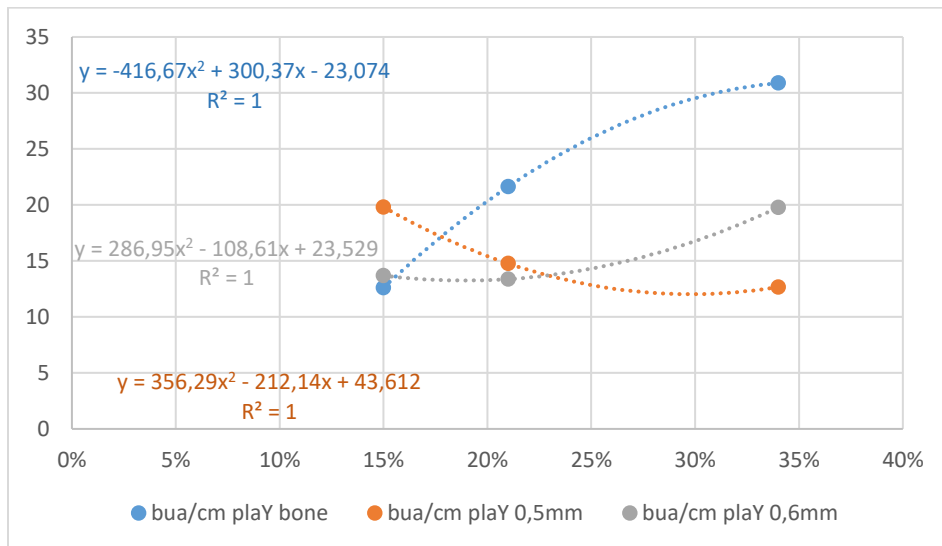
**Πίνακας 31** με τις τιμές Bua σε μονάδες db/MHz/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων στη διεύθυνση του y-άξονα.



**Εικόνα 72** Bua/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,2mm και 0.4mm στη διεύθυνση του y-άξονα.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



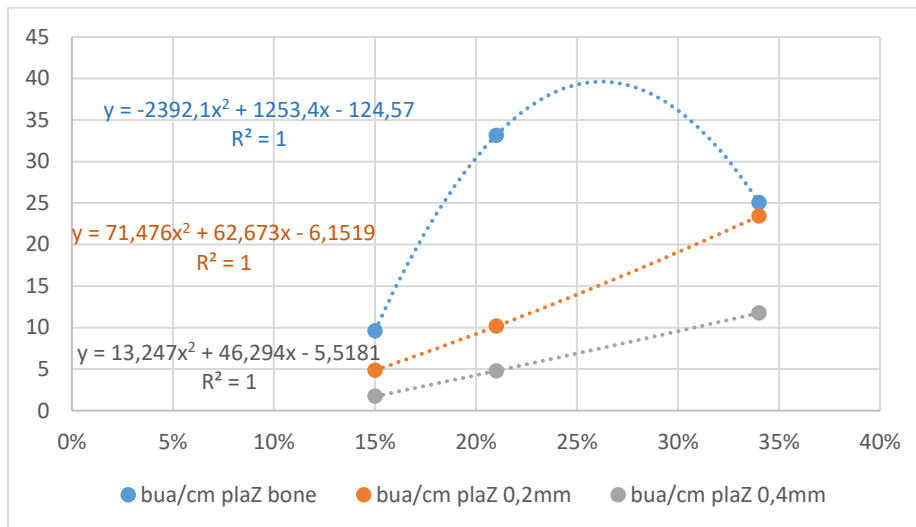
**Εικόνα 73** Bua/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,5mm και 0.6mm στη διεύθυνση του y-άξονα.

| BV/TV | BUA plaz bone | BUA plaz 0.2mm | BUA plaz 0.4mm | BUA plaz 0.5mm | BUA plaz 0.6mm |
|-------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 15%   | 9,614         | 4,857          | 1,724          | 5,214          | 3,260          |
| 21%   | 33,147        | 10,161         | 4,787          | 8,320          | 12,485         |
| 34%   | 25,051        | 23,419         | 11,753         | 8,821          | 6,017          |

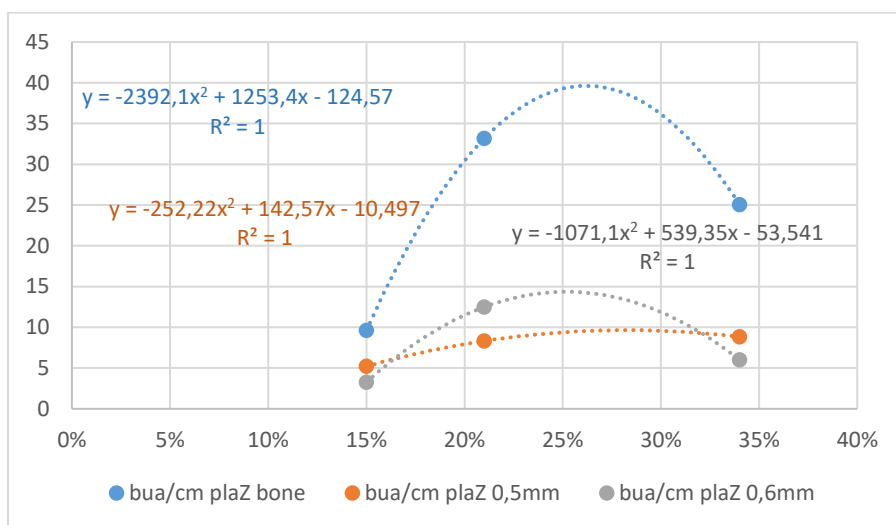
**Πίνακας 32** Τιμές Bua σε μονάδες db/MHz/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών με τα διαφορετικά πάχη δοκίδων στη διεύθυνση του z-άξονα.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης



**Εικόνα 74** Bua/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,2mm και 0.4mm στη διεύθυνση του z-άξονα.



**Εικόνα 75** Bua/cm για το δοκίμιο PLA σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών για πάχη δοκίδων 0,5mm και 0.6mm στη διεύθυνση του z-άξονα.

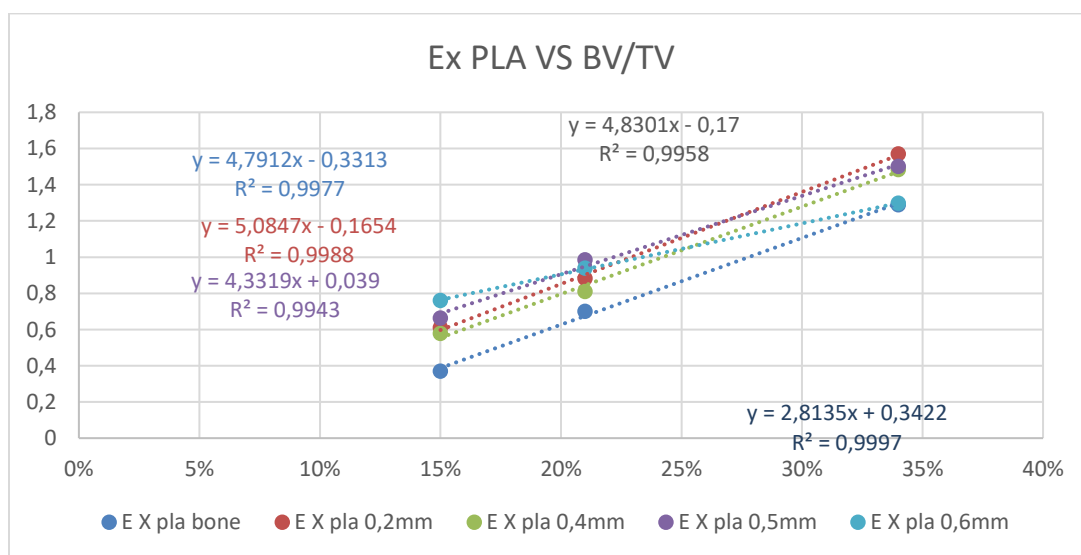
Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

### METPO ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ PLAbone VS PLA(0,2-0,4-0,5-0,6)

| BV/TV | Ex pla bone | Ex pla 0.2mm | Ex pla 0.4mm | Ex pla 0.5mm | Ex pla 0.6mm |
|-------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 15%   | 0.370 GPa   | 0.610 GPa    | 0.577 GPa    | 0.664 GPa    | 0.760 GPa    |
| 21%   | 0.699 GPa   | 0.883 GPa    | 0.810 GPa    | 0.986 GPa    | 0.938 GPa    |
| 34%   | 1.289 GPa   | 1.569 GPa    | 1.483 GPa    | 1.500 GPa    | 1.297 GPa    |

**Πίνακας 33** Με τα μέτρα ελαστικότητας του σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών στη διεύθυνση x.



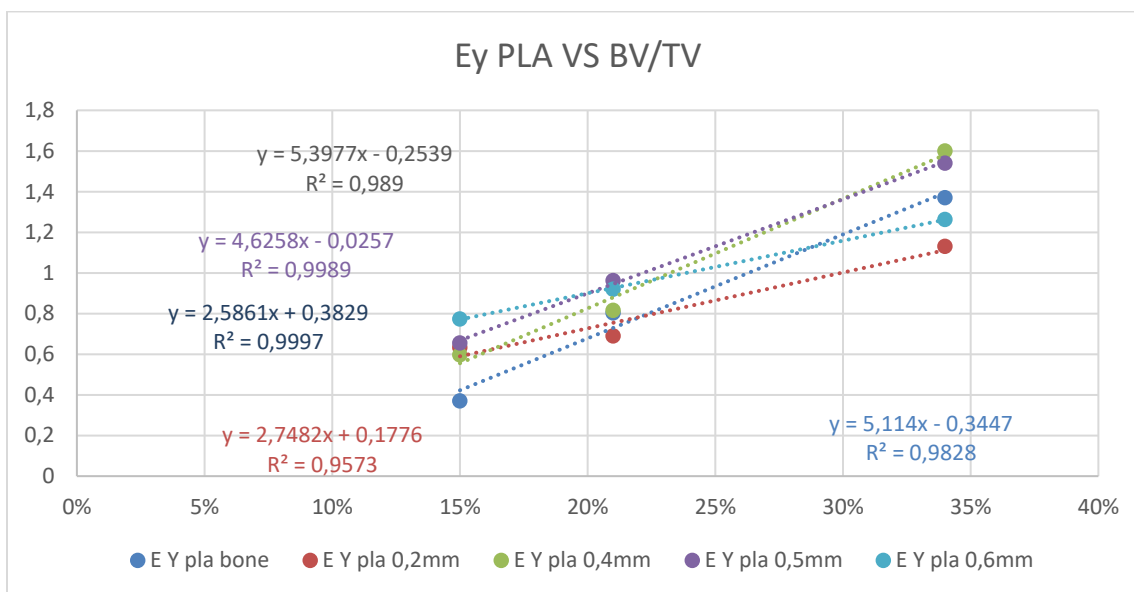
**Εικόνα 76** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA οστό και σταθερών δομών στη διεύθυνση x συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

| BV/TV | Ey pla bone | Ey pla 0.2mm | Ey pla 0.4mm | Ey pla 0.5mm | Ey pla 0.6mm |
|-------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 15%   | 0.375 GPa   | 0.633 GPa    | 0.598 GPa    | 0.656 GPa    | 0.773 GPa    |
| 21%   | 0.803 GPa   | 0.691 GPa    | 0.817 GPa    | 0.962 GPa    | 0.921 GPa    |
| 34%   | 1.370 GPa   | 1.132 GPa    | 1.601 GPa    | 1.541 GPa    | 1.263 GPa    |

**Πίνακας 34** Με τα μέτρα ελαστικότητας του σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών στη διεύθυνση y.



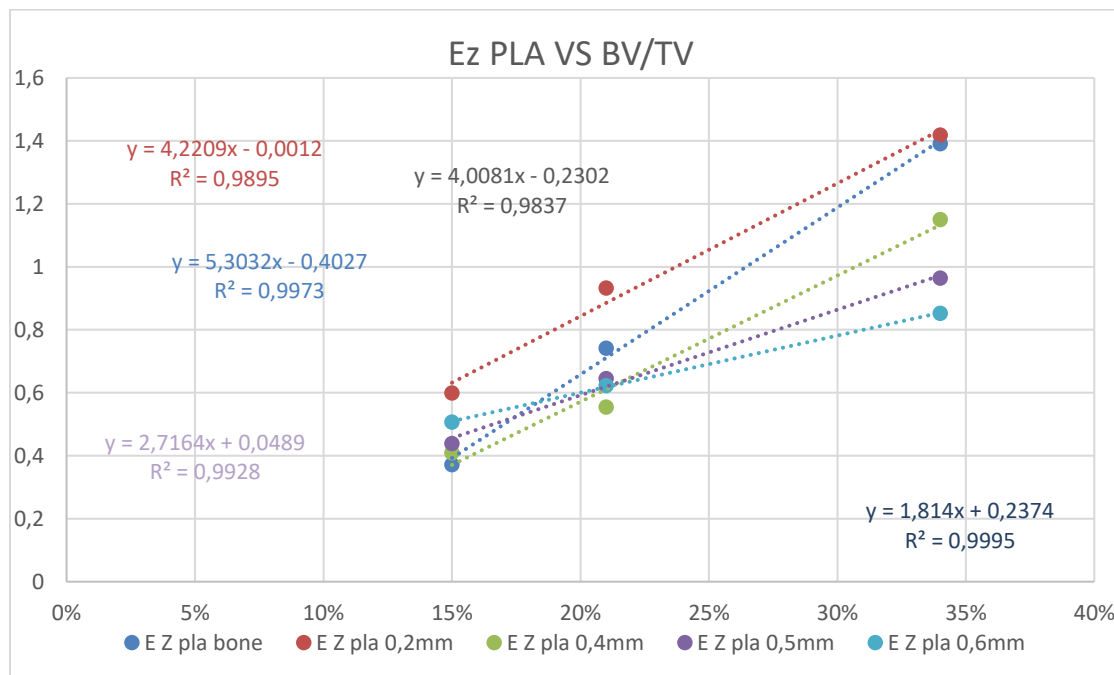
**Εικόνα 77** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA οστό και σταθερών δομών στη διεύθυνση y συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

| BV/TV | Ez pla bone | Ez pla 0.2mm | Ez pla 0.4mm | Ez pla 0.5mm | Ez pla 0.6mm |
|-------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 15%   | 0.372 GPa   | 0.599 GPa    | 0.409 GPa    | 0.438 GPa    | 0.506 GPa    |
| 21%   | 0.741 GPa   | 0.932 GPa    | 0.554 GPa    | 0.644 GPa    | 0.622 GPa    |
| 34%   | 1.390 GPa   | 1.418 GPa    | 1.150 GPa    | 0.964 GPa    | 0.852 GPa    |

**Πίνακας 35** Με τα μέτρα ελαστικότητας του σπογγώδους οστού και των σταθερών δομών στη διεύθυνση z.



**Εικόνα 78** Όγκος οστού προς το συνολικό όγκο(BV/TV) για τα δοκίμια PLA οστό και σταθερών δομών στη διεύθυνση z συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

## 5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η 3D εκτύπωση επιτρέπει την κατασκευή πολλών διαφορετικών δοκιμίων με ίδια αρχιτεκτονική δομή τόσο σπογγώδους οστού όσο και δοκιμίων με σταθερή δομή (PLA, PP, TPU 0,2-0,4-0,5-0,6mm) ώστε να μελετάμε την επίδραση της μεταβαλλόμενης πυκνότητας στις ακουστικές παραμέτρους, γεγονός που είναι σημαντικό για την μελέτη της δομικής υποβάθμισης, που μας δίνει πληροφορίες για την οστεοπενία και την οστεοπόρωση.
- Υψηλή συσχέτιση του BV/TV με την φαινόμενη πυκνότητα των δοκιμίων τόσο του σπογγώδους οστού όσο και δοκιμίων σταθερών δομών.
- Επίσης παρουσιάζεται υψηλή συσχέτιση BV/TV με την ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων (SOS) διαμέσου των δοκιμίων, της εξασθένισης ευρέως φάσματος (BUA), του μέτρου Ελαστικότητας (E) τόσο των δοκιμίων σπογγώδους οστού όσο και των σταθερών δομών και στις τρεις δ/νσεις.
- Επίσης ο υπέρηχος υφίσταται μεγαλύτερη σκέδαση σε υλικά (με μεγαλύτερη πυκνότητα (d) και μέτρο Ελαστικότητας (E) (PLA) έναντι υλικών με μικρότερη πυκνότητα και μικρότερο μέτρο Ελαστικότητας (TPU).
- Επιπλέον παρατηρείται πολύ καλή συσχέτιση του συντελεστή οπισθοσκέδασης (Bsc) που υπολογίσθηκε για ίδιες θέσεις των δοκιμίων σπογγώδους οστού και ίδιας πυκνότητας τόσο με unfocus όσο και με focus transducers δίνοντας έτσι την δυνατότητα μελέτης «δύσκολων περιοχών οστού» σε καταστάσεις in vivo, με focus transducers.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

- Τέλος παρατηρείται υψηλή συσχέτιση των ακουστικών παραμέτρων SOS και BUA μεταξύ των δοκιμών σταθερής αρχιτεκτονικής δομής στο υλικό PLA για διάφορα πάχη δοκίδων 0,2-0,4-0,5 και 0,6mm όπως και στα διαφορετικά υλικά PLA, PP και TPU για πάχος δοκίδων 0,2mm.

## 5.5 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

- Μελέτη ακουστικών παραμέτρων σε περισσότερα υλικά και περισσότερες αναλογίες (BV/TV) με unfocus και focus transducers, και σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών.
- Συσχέτιση άλλων ιδιοτήτων όπως Stiffness Index, φασική ταχύτητα κ.λπ. των υλικών PLA, PP, και TPU με την πυκνότητα για διαφορετικές αναλογίες (BV/TV).
- Μελέτη ακουστικών ιδιοτήτων σε καταστάσεις *in vivo*
- Κατασκευή δοκιμών σταθερής διατομής με συνδυασμό διαφορετικών παχών δοκίδων
- (Υποδ. Θεωρία Fagan – Σκέδαση από κυλινδρικούς σκεδαστές) για προσέγγιση δομής σπογγώδους οστού.
- Τέλος χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση η πιθανή σύνδεση της διαφορικής διατομής σκέδασης με τον ακριβή αριθμό δοκίδων στο σπογγώδες οστό.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΠΗΓΕΣ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βαλάκος, Ε., Νικήτα, Ε. and Παπαβασιλείου, Σ. (2015) Βιολογική ανθρωπολογία στην πράξη. Available at: <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/3843> (Accessed: 5 January 2021).
- Currey, J. (1984). Comparative mechanical properties and histology of bone. *American Zoologist*, 24(1), 5-12.
- Currey, J. D. (1984). Effects of differences in mineralization on the mechanical properties of bone. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 304(1121), 509-518
- Barbos, M. P., Bianco, P., & Ascenzi, A. (1982). Structural and biomechanical analysis of osteonic compact bone: a new method. In *Biomechanics: Principles and Applications* (pp. 261- 266). Springer, Dordrecht.
- Singh, I. (1978). The architecture of cancellous bone. *Journal of anatomy*, 127(Pt 2), 305.
- Ascenzi, A., Benvenuti, A., & Bonucci, E. (1982). The tensile properties of single osteonic lamellae: technical problems and preliminary results. *Journal of biomechanics*, 15(1), 29-37.
- Borah, B., Dufresne, T. E., Chmielewski, P. A., Gross, G. J., Prenger, M. C., & Phipps, R. J. (2002). Risedronate preserves trabecular architecture and increases bone strength in vertebra of ovariectomized minipigs as measured by three-dimensional microcomputed tomography. *Journal of Bone and Mineral Research*, 17(7), 1139-1147.
- Odgaard, A., & Gundersen, H. J. G. (1993). Quantification of connectivity in cancellous bone, with special emphasis on 3-D reconstructions. *Bone*, 14(2), 173-182.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

- Parfitt, A. M., Drezner, M. K., Glorieux, F. H., Kanis, J. A., Malluche, H., Meunier, P. J., ... & Recker, R. R. (1987). Bone histomorphometry: standardization of nomenclature, symbols, and units: report of the ASBMR Histomorphometry Nomenclature Committee. *Journal of bone and mineral research*, 2(6), 595-610
- Ulrich, D., Van Rietbergen, B., Laib, A., & Ruegsegger, P. (1999). The ability of threedimensional structural indices to reflect mechanical aspects of trabecular bone. *Bone*, 25(1), 55- 60.
- Odgaard, A. (1997). Three-dimensional methods for quantification of cancellous bone architecture. *Bone*, 20(4), 315-328
- Galante, J., Rostoker, W., & Ray, R. D. (1970). Physical properties of trabecular bone. *Calcified tissue research*, 5(1), 236-246
- Bourbié, T., Coussy, O., Zinszner, B., & Junger, M. C. (1992). Acoustics of porous media
- Crawford, F. S. (1971). *Berkeley physics course: Ondas*. 3 (Vol. 3). Reverté
- Keller, J. B. (1958). Surface waves on water of non-uniform depth. *Journal of Fluid Mechanics*, 4(6), 607-614.
- Langton, C. M., Palmer, S. B., & Porter, R. W. (1984). The measurement of broadband ultrasonic attenuation in cancellous bone. *Engineering in medicine*, 13(2), 89-91
- J. A., & Tavakoli, M. B. (1990). Ultrasonic attenuation and velocity in bone. *Physics in Medicine & Biology*, 35(10), 1387
- Langton, C. M., Ali, A. V., Riggs, C. M., Evans, G. P., & Bonfield, W. (1990). A contact method for the assessment of ultrasonic velocity and broadband attenuation in cortical and cancellous bone. *Clinical physics and physiological measurement*, 11(3), 243.
- Ashman, R. B., & Rho, J. Y. (1988). Elastic modulus of trabecular bone material. *Journal of biomechanics*, 21(3), 177-181.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

- Gibson, L. J. (1985). The mechanical behaviour of cancellous bone. *Journal of biomechanics*, 18(5), 317-328.
- Wear, K. A. (2001). Fundamental precision limitations for measurements of frequency dependence of backscatter: Applications in tissue-mimicking phantoms and trabecular bone. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(6), 3275-3282.
- O'Donnell, M., & Miller, J. G. (1981). Quantitative broadband ultrasonic backscatter: An approach to nondestructive evaluation in acoustically inhomogeneous materials. *Journal of Applied Physics*, 52(2), 1056-1065.
- Tourin, A., Derode, A., Peyre, A., & Fink, M. (2000). Transport parameters for an ultrasonic pulsed wave propagating in a multiple scattering medium. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(2), 503-512
- Insana, M. F., Brown, D. G., & Shung, K. K. (1993). Acoustic scattering theory applied to soft biological tissues. *Ultrasonic scattering in biological tissues*, 75-124
- Farah, S., Anderson, D.G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications - A comprehensive review. *Advanced drug delivery reviews*, 107, 367-392
- Technical data sheet PLA, Published by Ultimaker Company, 2017. URL <https://ultimaker.com/materials/pla>
- Technical data sheet TPU 95A, Published by Ultimaker Company, 2017. URL <https://ultimaker.com/materials/tpu-95a>
- Technical data sheet PP, Published by Ultimaker Company, 2017. URL <https://ultimaker.com/materials/s-series-pp>
- Athanasios, T., Konstantinos, A., & Despoina, D. (2021). Three- dimensional-printed replica models of bone for experimentally decoupling trabecular bone properties contribution to ultrasound propagation parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149(1), 296- 306.

Μελέτη επίδρασης της αρχιτεκτονικής δομής και της πυκνότητας σπογγώδους οστού στις ακουστικές παραμέτρους των υπερήχων για τη μελέτη της οστεοπόρωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα σπογγώδους οστού τρισδιάστατης εκτύπωσης.

---

Μπελεσιώτης Παναγιώτης

- Deligianni, D. D., & Apostolopoulos, K. N. (2007). Characterization of dense bovine cancellous bone tissue microstructure by ultrasonic backscattering using weak scattering models. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(2), 1180-1190.
- Αποστολόπουλος, Κ. (2009). Διάδοση υπερήχων σε σπογγώδες οστό in vitro. Επίδραση των μεταβολών της μικροδομής στην σκέδαση των υπερήχων σ'ένα πειραματικό μοντέλο οστεοπόρωσης (Doctoral dissertation).
- Κωνσταντίνος Σπ. (2022) Διάδοση υπερήχων μέσω 3D εκτυπωμένων ικριωμάτων προσομοίωσης οστών για διάγνωση οστεοπόρωσης (Διπλωματική εργασία)
- Anastasia Manta. Ultrasound propagation through trabecular structures : influence of structure and material 2021
- Κώρου Β. (2021) Μετρήσεις των ακουστικών ιδιοτήτων των υπερήχων σε 3D εκτυπωμένα μοντέλα οστών (Διπλωματική εργασία)