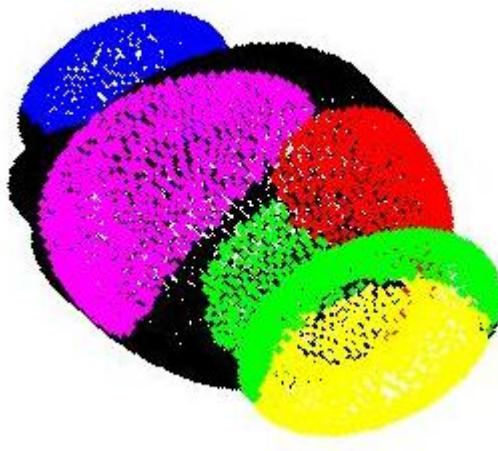


# **ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

## **ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**Ψηφιακή υδατοσήμανση τρισδιάστατων  
ψηφιοποιημένων μοντέλων με βάση την ομαδοποίηση  
του νέφους σημείων**



**Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των  
απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος  
Ειδίκευσης**

*Γαραζιώτη Α. Αντωνία*

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΠΛΑΛΗΣ**

*XANIA 2009*

**Η διατριβή της Γαρατζιώτη Α. Αντωνίας, εγκρίνεται:**

**Μπιλάλης Νικόλαος**

**Καθηγητής, Επιβλέπων**

---

**Αντωνιάδης Αριστομένης**

**Αναπληρωτής Καθηγητής**

---

**Μουστάκης Βασίλης**

**Αναπληρωτής Καθηγητής**

---

*Στους γονείς μου,  
Αριστείδη και Ελένη*

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Νικόλαο Μπιλάλη για την άρτια καθοδήγηση και βοήθεια που μου παρείχε σε όλη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Εμμανουήλ Μαραβελάκη, καθηγητή Εφαρμογών του Τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης, για το χρόνο που αφιέρωσε δίνοντας πρόσθετες επεξηγήσεις και συμβουλές επί του θέματος.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες .....	4
Περίληψη .....	9
1. Εισαγωγή .....	11
1.1 Νομοθεσία για την προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων .....	11
1.2 Εμπορικές Εφαρμογές της ψηφιακής υδατοσήμανσης .....	12
1.3 Ενσωμάτωση και ανίχνευση υδατόσημου .....	13
1.3.1 Ενσωμάτωση .....	13
1.3.2 Ανίχνευση .....	14
1.4 Κατηγορίες ψηφιακής υδατοσήμανσης .....	14
1.4.1 Ορατό υδατόσημο .....	14
1.4.2 Αόρατο υδατόσημο .....	15
1.5 Ιδιότητες ψηφιακής υδατοσήμανσης .....	16
1.5.1 Μη αντιληπτικότητα .....	16
1.5.2 Υπολογιστική πολυτπλοκότητα .....	18
1.5.3 Αξιόπιστη ανίχνευση .....	18
1.5.4 Ανθεκτικότητα σε επιθέσεις .....	18
1.6 Μέθοδοι δισδιάστατης υδατοσήμανσης .....	19
1.6.1 Μέθοδοι ενσωμάτωσης στο χρόνο .....	20
1.6.2 Μέθοδοι ενσωμάτωσης στη συχνότητα .....	21
1.7 Μέθοδοι τρισδιάστατης υδατοσήμανσης .....	21
2. Αλγόριθμος Υδατοσήμανσης .....	23
2.1 Ενσωμάτωση υδατόσημου .....	24
2.1.1 Δημιουργία των ομάδων νέφους σημείων (Point Clustering) .....	24
2.1.2 Δημιουργία πλέγματος για κάθε ομάδα σημείων (Mesh Generation – Meshing) .....	25
2.1.3 Φασματική ανάλυση πλέγματος (Mesh-Spectral Analysis) .....	27
2.1.4 Τροποποίηση των φασματικών συντελεστών πλέγματος βάση της δυαδικής πληροφορίας που θα ενσωματωθεί (Modulation) .....	28
2.1.5 Φασματική σύνθεση πλέγματος (Spectral Synthesis) .....	30
2.1.6 Δημιουργία υδατόσημου σε ομάδα σημείων «αφαιρώντας» τη συνδεσιμότητα του πλέγματος (Topology Removal- Point Set Generation) .....	30
2.2 Εξαγωγή υδατόσημου .....	31
2.2.1 Point Set Registration .....	32
2.2.2 Λήψη νέας γεωμετρίας (Resampling) .....	33
2.2.3 Δημιουργία των ομάδων νέφους σημείων (Point Clustering) .....	34
2.2.4 Δημιουργία πλέγματος για κάθε ομάδα σημείων (Mesh Generation – Meshing) .....	34
2.2.5 Φασματική ανάλυση πλέγματος (Mesh-Spectral Analysis) .....	35
2.2.6 Εξαγωγή του υδατόσημου με αποδιαμόρφωση των φασματικών συντελεστών πλέγματος (Demodulation) .....	35
3. Σχεδιαστικά - MATLAB .....	36
3.1 Δεδομένα .....	36
3.2 Ενσωμάτωση .....	37
3.2.1 Η συνάρτηση clusters – 1 <sup>ο</sup> βήμα .....	37
3.2.2 Η συνάρτηση meshing – 2 <sup>ο</sup> βήμα .....	40
3.2.3 Η συνάρτηση analysis – 3 <sup>ο</sup> βήμα .....	41
3.2.4 Η συνάρτηση modul – 4 <sup>ο</sup> βήμα .....	42
3.2.5 Η συνάρτηση mesh_spectral – 5 <sup>ο</sup> και 6 <sup>ο</sup> βήμα .....	43

3.3 Εξαγωγή Υδατόσημου .....	45
3.3.1 Η συνάρτηση pca – 1° βήμα .....	45
3.3.2 Η συνάρτηση resampling – 2° βήμα.....	45
3.3.3 Clustering – 3° βήμα .....	45
3.3.4 Meshing – 4° βήμα .....	45
3.3.5 Mesh-Spectral Analysis – 5° βήμα .....	45
3.3.6 Η συνάρτηση demodul – 6° βήμα .....	46
4. Αποτελέσματα .....	47
4.1 Ανθεκτικότητα στις Επιθέσεις .....	47
4.1.1 Περιστροφή και Άλλαγή μεγέθους .....	47
4.1.2 Μείωση των σημείων .....	49
4.1.3 Cropping – Αποκοπή τμήματος του μοντέλου .....	49
4.1.4 Προσθήκη θορύβου .....	50
4.2 Ενσωμάτωση και Ανίχνευση του υδατόσημου σε διάφορα μοντέλα .....	51
4.2.1 Λυχνάρι .....	51
4.2.2 Ανδρικό Ανθρώπινο Σώμα .....	53
4.2.3 Μήτρα .....	55
4.2.4 Πυξίδα .....	56
4.2.5 Ψάρι .....	58
4.2.6 Βάζο .....	59
4.2.7 Οινοχόος .....	60
4.2.8 Προχοίσκος .....	62
4.2.9 Ιππάριο .....	63
4.3 Χρόνοι ενσωμάτωσης και ανίχνευσης υδατόσημου .....	64
5. Συμπεράσματα .....	67
Βιβλιογραφία .....	68

## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ**

Εικόνα 1: Διαδικασία Ενσωμάτωσης.....	13
Εικόνα 2: Διαδικασία Ανίχνευσης .....	14
Εικόνα 3: Το λογότυπο της IBM .....	15
Εικόνα 4: Η πρωτότυπη εικόνα μαζί με το λογότυπο. ....	15
Εικόνα 5: (Αριστερά) Εικόνα με το αόρατο υδατόσημο πάνω δεξιά. (Δεξιά) Υδατόσημο και αποτέλεσμα για ένα κομμάτι της εικόνας που δεν περιέχει υδατόσημο.....	16
Εικόνα 6: (α) Αρχική εικόνα. (β) Υδατόσημο. (γ) Υδατοσημασμένη εικόνα. (δ) Υδατοσημασμένη εικόνα χωρίς οπτική συγκάλυψη (Visual masking). (ε) Διαφορά εικόνων α και γ. (ζ) Διαφορά εικόνων α και δ.....	17
Εικόνα 7: Διάγραμμα ροής διαδικασίας με επιθέσεις.....	19
Εικόνα 8: Ενσωμάτωση στο πεδίο του μετασχηματισμού .....	20
Εικόνα 9: Ανίχνευση στο πεδίο του μετασχηματισμού .....	20
Εικόνα 10: Δομή του αλγόριθμου ενσωμάτωσης μέσω σφαιρικής παραμετροποίησης.....	22
Εικόνα 11: Αλγόριθμος ενσωμάτωσης – Embedding .....	24
Εικόνα 12: (a) Το μοντέλο σε μορφή νέφους σημείων (34.839 σημεία). (b) Οι περιοχές που δεν έχουν μαύρο χρώμα ανήκουν στα πέντε clusters, το μέγεθος του καθενός είναι 4.000 σημεία. .....	25

Εικόνα 13: (a) Ο αλγόριθμος συνδέει με το σημείο ρ όλα τα σημεία που βρίσκονται σε ακτίνα r από το σημείο ρ.(b) Σημεία που ανήκουν σε πολλαπλές επιφάνειες μπορούν να «ραφτούν μαζί». .....	26
Εικόνα 14: (a) Τα αρχικά 1.633 σημεία. Προσέγγιση χρησιμοποιώντας το 1% (b), 3% (c), 5% (d), 10% (e) και 15% (f) των φασματικών συντελεστών.....	27
Εικόνα 15: Παράδειγμα του axis-aligned bounding box (AABB). ....	29
Εικόνα 16: Παράδειγμα ενός υδατοσημασμένου νέφους σημείων, με πράσινο χρώμα φαίνονται οι watermarked περιοχές.....	30
Εικόνα 17: Το μοντέλου του κουνελιού μετά τη δημιουργία επιφάνειας, με κόκκινο χρώμα φαίνονται διαφορετικές watermarked περιοχές.....	30
Εικόνα 18: Αλγόριθμος εξαγωγής (ανίχνευσης) – Extraction.....	32
Εικόνα 19: (a) Αντιστοιχία συντεταγμένων του μοντέλου αναφοράς P (μαύρο χρώμα) και του υδατοσημασμένου μοντέλου P' (άσπρο χρώμα). (b) Σχηματικά πως βρίσκονται τα αντίστοιχα σημεία ρ <sub>j</sub> του υδατοσημασμένου μοντέλου από τα σημεία ρ <sub>j</sub> του μοντέλου αναφοράς, με βάση την τρισδιάστατη ευκλείδεια απόσταση.....	34
Εικόνα 20: Τοποθέτηση μοντέλων στον τρισδιάστατο σαρωτή βάθους (3D scanner). .....	36
Εικόνα 21: Επιλογή πλήθους σημείων μέσω του Geomagic.....	37
Εικόνα 22: Τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση του μοντέλου "Λήκυθος". ....	38
Εικόνα 23: Γραφική απεικόνιση των clusters με κόκκινο, μπλε, κίτρινο, πράσινο και μωβ χρώμα, με μαύρο χρώμα είναι τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα cluster .....	39
Εικόνα 24: Το μοντέλο "Λήκυθος" μετά από περιστροφή. ....	39
Εικόνα 25: Τμήμα του πίνακα clust_info, οι συντεταγμένες που αντιστοιχούν στη θέση 3970 στον πίνακα points ανήκουν στο 5° cluster ενώ οι 3976 στο 2° cluster.....	40
Εικόνα 26: Απόσπασμα από τον πίνακα Mesh.....	41
Εικόνα 27: (α) $\beta=0,01$ και $c=5$ , (β) $\beta=0,01$ και $c=10$ . ....	43
Εικόνα 28: Το τελικό υδατοσημασμένο μοντέλο.....	44
Εικόνα 29: Υδατοσημασμένο μοντέλο, με κόκκινο είναι οι περιοχές στις οποίες έχει ενσωματωθεί το υδατόσημο.....	44
Εικόνα 30: Command window - αποτελέσματα της συνάρτησης extraction ..	46
Εικόνα 31: Με κόκκινο χρώμα φαίνεται το μοντέλο μετά την περιστροφή .....	48
Εικόνα 32: Το μοντέλο πριν (πράσινο χρώμα) και μετά (μαύρο χρώμα) την αλλαγή μεγέθους. ....	48
Εικόνα 33: Μείωση σημείων από 40.134 (α) σε 5.002 (β) και 1.002 (γ) σημεία. .....	49
Εικόνα 34: (α) Το αρχικό μοντέλο. (β) Το μοντέλο μετά την αποκοπή τμήματός του. (γ) Το μοντέλο μετά την αποκοπή τμήματός του με εμφάνιση των clusters που διατηρήθηκαν. ....	49
Εικόνα 35: α) Το μοντέλο χωρίς θόρυβο. (β) Το μοντέλο έπειτα από προσθήκη θορύβου 0.5%. (γ) Το μοντέλο έπειτα από προσθήκη θορύβου 0.8%. ....	50
Εικόνα 36: Σχέση σφάλματος bit και προσθήκης θορύβου για διάφορες τιμές του εύρους τροποποίησης του υδατόσημου β και της τιμής c (chip rate). ....	51
Εικόνα 37: (α) Το μοντέλο «Λυχνάρι» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων - 18.834 points.....	52
Εικόνα 38: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 2.000 σημεία. (Δεξιά) Υδατοσημασμένο μοντέλο (Watermarked model). .....	53

Εικόνα 39: (α) Το ανδρικό μοντέλο σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 16.659 points.....	54
Εικόνα 40: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 1.200 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model). .....	55
Εικόνα 41: (α) Το μοντέλο «Μήτρα» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 10.402 points.....	55
Εικόνα 42: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 800 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model). .....	56
Εικόνα 43: (α) Το μοντέλο «Πυξίδα» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 35.502 points.....	57
Εικόνα 44: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 2.000 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model). .....	57
Εικόνα 45: (α) Το μοντέλο «Ψάρι» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 32.502 points.....	58
Εικόνα 46: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 2.500 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model). .....	59
Εικόνα 47: (α) Το μοντέλο «Βάζο» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 14.998 points.....	59
Εικόνα 48: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 1.500 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model). .....	60
Εικόνα 49: (α) Το μοντέλο «Οινοχόος» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 32.500 points.....	61
Εικόνα 50: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 3.500 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model). .....	61
Εικόνα 51: (α) Το μοντέλο «Προχοίσκος» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 32.500 points.....	62
Εικόνα 52: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 2.800 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model). .....	63
Εικόνα 53: (α) Το μοντέλο «Ιππάριο» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 40.134 points.....	63
Εικόνα 54: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 2.000 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model). .....	64
Εικόνα 55: Χρόνοι ενσωμάτωσης και ανίχνευσης του υδατόσημου για διαφορετικά μοντέλα.....	65
Εικόνα 56: Χρόνοι ενσωμάτωσης και ανίχνευσης του υδατόσημου για διαφορετικά μοντέλα με ίδιο αριθμό clusters 2.000 σημεία.....	65
Εικόνα 57: Χρόνοι ενσωμάτωσης του υδατόσημου με ίδιο αριθμό σημείων και διάφορα clusters.....	66
Εικόνα 58: Χρόνοι ανίχνευσης του υδατόσημου με ίδιο αριθμό σημείων και διάφορα clusters.....	66

## Περίληψη

Η ανάπτυξη των ψηφιακών υπηρεσιών δημιούργησε νέες απαιτήσεις για τεχνικές που αφορούν την ασφάλεια των πολυμέσων και την προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων τους. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι η μέθοδος της ψηφιακής υδατοσήμανσης (digital watermarking), η οποία ενσωματώνει στο τρισδιάστατο μοντέλο ένα σήμα (υδατόσημο). Το υδατόσημο ενσωματώνεται μόνιμα, εισάγει μη αντιληπτές αλλαγές και περιέχει πληροφορίες για τον ιδιοκτήτη των πνευματικών δικαιωμάτων. Οι ιδιότητες που πρέπει να έχει η μέθοδος υδατοσήμανσης είναι: ανθεκτικότητα σε επιθέσεις, μη αντιληπτικότητα, υπολογιστική πολυπλοκότητα και αξιόπιστη ανίχνευση.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή είναι σε μορφή νέφους σημείων, τα οποία λήφθηκαν από τρισδιάστατους σαρωτές βάθους και αφορούν πολιτιστικά δεδομένα (αγγεία, αμφορείς, γλυπτά κ.α.) από το μουσείο της φιλοσοφικής σχολής Αθηνών. Η μέθοδος υδατοσήμανσης τρισδιάστατων μοντέλων που αναπτύσσεται σε αυτή την εργασία ορίζει ομάδες νέφους σημείων και εφαρμόζει σε κάθε μια από αυτές το υδατόσημο.

Το σύστημα ανίχνευσης αποτελείται από δύο διαδικασίες, την ενσωμάτωση και την ανίχνευση του υδατόσημου. Η ενσωμάτωση αποτελείται από έξι στάδια: 1) Δημιουργία των ομάδων νέφους σημείων (clusters). 2) Δημιουργία πλέγματος για κάθε ομάδα σημείων. 3) Φασματική ανάλυση πλέγματος για κάθε νέο πλέγμα που έχει δημιουργηθεί. 4) Τροποποίηση των φασματικών συντελεστών πλέγματος βάση της δυαδικής πληροφορίας που θα ενσωματωθεί. 5) Φασματική σύνθεση πλέγματος 6) Δημιουργία υδατόσημου σε ομάδα σημείων.

Η έξοδος της διαδικασίας ενσωμάτωσης είναι το υδατοσημασμένο τρισδιάστατο μοντέλο σε μορφή νέφους σημείων. Στην ανίχνευση του υδατόσημου εκτός από το υδατοσημασμένο μοντέλο, απαιτείται και το μοντέλο νέφους σημείων που χωρίζεται σε ομάδες (clusters), η διαδικασία αποτελείται επίσης από έξι στάδια: 1) Ευθυγράμμιση των μοντέλων. 2) Λήψη νέας γεωμετρίας. 3) Δημιουργία εκ νέου των ομάδων νέφους σημείων (clusters). 4) Δημιουργία πλέγματος για κάθε ομάδα σημείων. 5) Φασματική ανάλυση πλέγματος. 6) Εξαγωγή του υδατόσημου.

Ο αλγόριθμος αναπτύσσεται σε περιβάλλον MATLAB R2007b, τα δεδομένα εισόδου διαβάζονται από φύλλα του Excel και περιέχουν τις συντεταγμένες x,y,z των σημείων του τρισδιάστατου μοντέλου. Η εξαγωγή των συντεταγμένων του σκαναρισμένου μοντέλου γίνεται με τη χρήση του λογισμικού Geomagic Studio 7.

Μια σημαντική εφαρμογή της υδατοσήμανσης είναι η εξής, αν εκτεθεί το υδατοσημασμένο μοντέλο στο διαδίκτυο και χρησιμοποιηθεί από μη εξουσιοδοτημένο χρήστη, τότε ο ιδιοκτήτης μπορεί με τη βοήθεια του υδατόσημου να αποδείξει ότι είναι προϊόν κλοπής, παράνομης αντιγραφής. Η ψηφιακή υδατοσήμανση μπορεί να εφαρμοστεί από εταιρίες ηλεκτρονικού εμπορίου, μουσεία, ψηφιακές βιβλιοθήκες, εταιρίες που εμπορεύονται ψηφιακό υλικό, π.χ. ψηφιακές εικόνες μέσω του διαδικτύου, δημόσιες υπηρεσίες, μεμονωμένους χρήστες που κατέχουν μια συλλογή ψηφιακού υλικού και επιθυμούν να την τοποθετήσουν στο διαδίκτυο κ.α.

Η παρούσα διατριβή αναπτύσσεται σε 5 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή για την προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων, τη χρησιμότητα της ψηφιακής υδατοσήμανσης παρουσιάζοντας εφαρμογές της, ιδιότητες, κατηγορίες και μεθόδους που αφορούν υδατοσήμανση εικόνων και τρισδιάστατων μοντέλων. Στο

δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται βήμα προς βήμα ο αλγόριθμος ενσωμάτωσης του υδατόσημου καθώς και ο αλγόριθμος ανίχνευσης του υδατόσημου.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται σχεδιαστικά τα βήματα του αλγόριθμου, όπως υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον του MATLAB. Στο τέταρτο κεφάλαιο εμφανίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα τρεξίματα του αλγόριθμου σε εννέα διαφορετικά μοντέλα. Αναλύονται χρονικά και πειραματικά αποτελέσματα έπειτα από διάφορες επιθέσεις που δέχθηκε μοντέλο. Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο, αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία.

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Νομοθεσία για την προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων

Η ανάπτυξη των ψηφιακών υπηρεσιών δημιούργησε νέες απαιτήσεις για τεχνικές που αφορούν την ασφάλεια των πολυμέσων και την προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων τους. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας η αντιγραφή, η αναπαραγωγή των ψηφιακών δεδομένων και η αποστολή τους μέσω του διαδικτύου είναι μια εύκολη και απλή διαδικασία. Αυτές οι συνθήκες δημιούργησαν την ανάγκη για την εύρεση μιας μεθόδου ικανής να προστατέψει τα πνευματικά δικαιώματα των δημιουργών. Πρέπει να σημειωθεί ότι έρευνα, ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία γύρω από την προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων έχει αναπτυχθεί ραγδαία.

Αρκετές χώρες τα τελευταία χρόνια αναθεώρησαν τη νομοθεσία τους σχετικά με την πνευματική ιδιοκτησία. Ενδεικτικά αναφέρονται ο γαλλικός νόμος της 3.7.1985 καθώς και η κωδικοποίηση όλης της γαλλικής νομοθεσίας για τη διανοητική ιδιοκτησία, νόμος της 1.7.1992, επίσης το βρετανικό Copyright Designs and Patents Act 1998, ο ισπανικός νόμος της 9.10.1992. Στην Ελλάδα υπάρχει νομοθεσία που προστατεύει τα πνευματικά δικαιώματα. Είναι ο νόμος 2121/1993 για την πνευματική ιδιοκτησία και τα συγγενή δικαιώματα. Ο νόμος αυτός διαπνέεται από όλα τα σύγχρονα ρεύματα που έχουν αποτυπωθεί στις εθνικές νομοθεσίες των ευρωπαϊκών κυρίως χωρών και είναι εναρμονισμένος με την οδηγία 91/250/EOK για τη νομική προστασία των προγραμμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών, καθώς και με την οδηγία 92/100/EOK για το δικαίωμα εκμίσθωσης, δικαίωμα δανεισμού και ορισμένα συγγενικά δικαιώματα. Αν και ορισμένες ρυθμίσεις του είναι βασισμένες σε ξένα πρότυπα, ο νόμος 2121/1993 δεν αποτελεί αντιγραφή τους αλλά είναι καινούργιο νομοθέτημα που εντάσσεται πλήρως στο ελληνικό νομικό σύστημα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των ρυθμίσεων του είναι, η θέσπιση συγγενικών δικαιωμάτων υπέρ των ερμηνευτών ή εκτελεστών καλλιτεχνών, των παραγωγών υλικών φορέων ήχου ή εικόνας ή ήχου και εικόνας, καθώς και των ραδιοτηλεοπτικών οργανισμών, σε ευρύτερη έκταση από τη Διεθνή Σύμβαση της Ρώμης, ενώ παράλληλα Καθιερώνεται για πρώτη φορά ένα συγγενικό δικαίωμα υπέρ των εκδοτών που αφορά τη στοιχειοθεσία και τη σελιδοποίηση.

Η προστασία πολυμεσικής πληροφορίας είναι ένα θέμα που έχει απασχολήσει τη ερευνητική κοινότητα. Στο παρελθόν έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί μέθοδοι προστασίας πολυμεσικής πληροφορίας, που όμως δεν μπόρεσαν να διαφυλάξουν με πλήρη επιτυχία τα πνευματικά δικαιώματα ων κατόχων της. Ένα παράδειγμα είναι η ενσωμάτωση πληροφοριών που αφορούν τον κάτοχο των πνευματικών δικαιωμάτων στην κεφαλίδα (header) του ψηφιακού αρχείου. Σε αυτή τη περίπτωση, η αλλοίωση ή η απομάκρυνση αυτής της πληροφορίας, είναι πολύ εύκολη αφού η κεφαλίδα μπορεί να αλλαχθεί χωρίς να επηρεαστεί η πολυμεσική πληροφορία. Ένα δεύτερο παράδειγμα είναι η ενσωμάτωση αντιληπτών πληροφοριών στο ψηφιακό μέσο. Για παράδειγμα αυτό μπορεί να γίνει με την ενσωμάτωση του λογότυπου της ιδιοκτήτριας εταιρείας στην εικόνα ή στο video. Αυτό το παράδειγμα συναντάται ευρέως στις τηλεοπτικές εκπομπές αφού κάθε τηλεοπτικό κανάλι εκπέμπει και το λογότυπό του. Για να αντιγραφεί ένα τηλεοπτικό πρόγραμμα και να αναπαραχθεί χωρίς την άδεια του ιδιοκτήτη από άλλο δίσκο ή συνήθως αποκόπτεται το λογότυπο

της ιδιοκτήτριας εταιρείας. Γι' αυτό το λόγο σε περίπτωση σημαντικών εκπομπών, τα τηλεοπτικά κανάλια υιοθέτησαν την τακτική τοποθέτησης λογότυπου που καλύπτει σχεδόν όλη την οθόνη με σκοπό την αποτροπή της αντιγραφής. Έτσι στην πρώτη περίπτωση, λόγω του γεγονότος ότι η πληροφορία που ενσωματώνεται είναι αντιληπτή αλλά είναι πολύ εύκολα να απομακρυνθεί, ενώ στη δεύτερη, είναι τόσο εμφανής που μειώνει σημαντικά την ποιότητα της πολυμεσικής πληροφορίας. Επομένως γεννιέται η ανάγκη για μία μέθοδο ενσωμάτωσης πληροφορίας στο ψηφιακό μέσο που δεν είναι αντιληπτή, δεν υποβαθμίζει την ποιότητά του και κυρίως δεν μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα.

Η μέθοδος που ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις είναι η μέθοδος της ψηφιακής υδατοσήμανσης (digital watermarking). Η μέθοδος ενσωματώνει στην πολυμεσική πληροφορία (ήχος, εικόνα, video, τρισδιάστατος όγκος) ένα σήμα, το οποίο είναι γνωστό σαν υδατόσημο και εμπεριέχει πληροφορίες για τον ιδιοκτήτη των πνευματικών δικαιωμάτων. Το υδατόσημο ενσωματώνεται μόνιμα στην πολυμεσική πληροφορία και εισάγει μη αντιληπτές αλλαγές για την ανθρώπινη όραση και ακοή οι οποίες είναι ανιχνεύσιμες μόνο από έναν υπολογιστή.

## 1.2 Εμπορικές Εφαρμογές της ψηφιακής υδατοσήμανσης

Πρέπει να τονιστεί ότι η ψηφιακή υδατοσήμανση δεν χρησιμοποιείται μόνο για στατικές εικόνες αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και σε βίντεο, ήχο και κείμενο. Οι περιπτώσεις όπου μπορεί να γίνει εμπορική χρήση της είναι όλες όσες ικανοποιούν κάποια από τις παρακάτω ανάγκες:

- Ο δημιουργός και ιδιοκτήτης του ψηφιακού υλικού πρέπει να μπορεί να πιστοποιήσει τα πνευματικά του δικαιώματα σε κάθε περίπτωση.
- Ο ιδιοκτήτης θα πρέπει να μπορεί να εντοπίζει με κάποιον τρόπο όποιον κατέχει ή και προσπαθεί να διανείμει παράνομα το υλικό που του ανήκει.
- Κάθε προσπάθεια παραποίησης του ψηφιακού υλικού και διανομής του ως αυθεντικού θα πρέπει να είναι δυνατόν να εντοπιστεί και ενδεχομένως να επαναφερθεί το υλικό στην αρχική του κατάσταση.

Συγκεκριμένα σενάρια όπου μπορεί να εφαρμοστεί η ψηφιακή υδατοσήμανση είναι τα ακόλουθα :

Παρουσίαση στο Internet εικόνων π.χ. έργων τέχνης, ιστορικών στιγμών, ατομικών επιτευγμάτων κ.τ.λ., από κάποιο ηλεκτρονικό μουσείο ή ηλεκτρονική έκθεση, από κάποιον φορέα ή απλό ιδιώτη. Ανάλογα και με την επιθυμία του εκάστοτε ιδιοκτήτη μπορεί να εφαρμοστεί η κατάλληλη μέθοδος υδατοσήμανσης για να αποτρέψει κάθε αθέμιτη χρήση (οικειοποίηση-αμφισβήτηση πνευματικών δικαιωμάτων, παραποίηση του περιεχομένου, αντιγραφή και διανομή χωρίς άδεια, κ.τ.λ.) του ψηφιακού υλικού.

Στην περίπτωση μιας βιντεοσκόπησης όπου έχουν γίνει παρεμβάσεις, σε μια προσπάθεια παραποίησης της πραγματικότητας. Χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό

υδατόσημο που αλλοιώνεται σε κάθε αλλαγή, μπορεί να εντοπιστεί εάν η ταινία είναι η αυθεντική ή έχει αλλοιωθεί. Επίσης, υπάρχει πλέον και η δυνατότητα να αποκατασταθεί το περιεχόμενο των εικόνων που έχουν τροποποιηθεί, καθώς αποθηκεύεται πληροφορία στο υδατόσημο σχετικά με τις αλλαγές που έγιναν, ώστε να επιτρέπεται η αναστροφή τους.

Είναι ιδιαίτερα γνωστό το ζήτημα που έχει προκύψει με την ηλεκτρονική πειρατεία τραγουδιών στο Διαδίκτυο. Η ψηφιακή υδατοσήμανση θα μπορούσε να αποτελέσει μια λύση για τον εντοπισμό όσων εμπλέκονται παράνομα και την εξασφάλιση σε σημαντικό βαθμό των δικαιωμάτων των καλλιτεχνών και των δισκογραφικών εταιρειών.

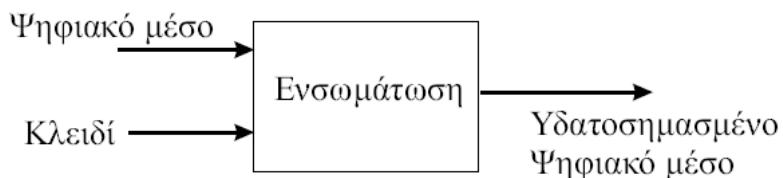
Ένα ακόμη πεδίο ελέγχου στο οποίο μπορεί να βοηθήσει η ψηφιακή υδατοσήμανση αφορά στον περιορισμό των λειτουργιών που μπορούν να εκτελεστούν σε ένα αντικείμενο. Για παράδειγμα με την προσάρτηση πληροφορίας που καθιστά αδύνατη την αντιγραφή του περισσότερες από μία φορά, έτσι με αυτό τον τρόπο περιορίζεται η ανεξέλεγκτη αναπαραγωγή από το πρωτότυπο.

### 1.3 Ενσωμάτωση και ανίχνευση υδατόσημου

Ένα σύστημα υδατοσήμανσης αποτελείται από δύο διαδικασίες, την ενσωμάτωση και την ανίχνευση του υδατόσημου, δηλαδή σε κάθε διαδικασία ενσωμάτωσης αντιστοιχεί μια διαδικασία ανίχνευσης και το αντίστροφο.

#### 1.3.1 Ενσωμάτωση

Σ' αυτή τη διαδικασία πραγματοποιείται η κατασκευή του υδατόσημου και η ενσωμάτωσή του στο ψηφιακό μέσο. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1, η διαδικασία ενσωμάτωσης παίρνει σαν εισόδους το πολυμεσικό σήμα και ένα κλειδί. Ο Κάθε ιδιοκτήτης / δημιουργός έχει στην κατοχή του ένα κλειδί και μπορεί μόνο αυτός να κάνει την ενσωμάτωση με αυτό το κλειδί. Η έξοδος της διαδικασίας ενσωμάτωσης είναι το υπογεγραμμένο πολυμεσικό σήμα. Αν ο ιδιοκτήτης / δημιουργός θελήσει να το εκθέσει π.χ. στο Διαδίκτυο, θα πρέπει να εκθέσει το υπογεγραμμένο πολυμεσικό σήμα. Έτσι σε περίπτωση χρήσης του από μη εξουσιοδοτημένο χρήστη, ο ιδιοκτήτης θα μπορέσει να αποδείξει ότι είναι προϊόν κλοπής ή παράνομής αντιγραφής.

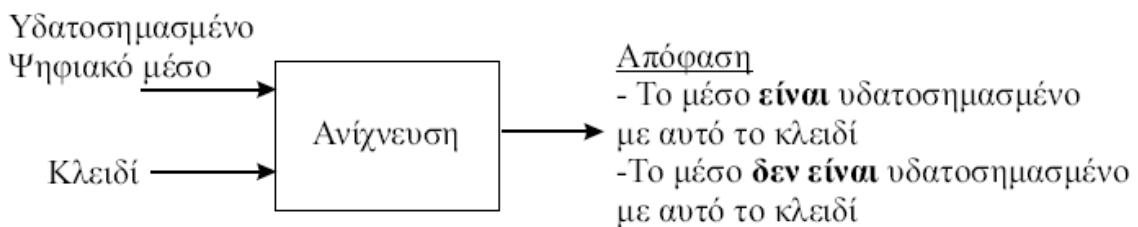


Εικόνα 1: Διαδικασία Ενσωμάτωσης

Εκτός από την κατασκευή του υδατόσημου και την ενσωμάτωσή του στο ψηφιακό μέσο, μπορεί να εφαρμοστεί και μία επιπλέον λειτουργία που ονομάζεται οπτική συγκάλυψη (visual masking), που συντελεί στη μείωση της αντιληπτικότητας των υδατόσημων.

### 1.3.2 Ανίχνευση

Στη διαδικασία της ανίχνευσης, λαμβάνεται η απόφαση για το εάν το ψηφιακό μέσο είναι υδατοσημασμένο ή όχι. Η διαδικασία ανίχνευσης έχει σαν εισόδους το κλειδί και το (πιθανόν) υδατοσημασμένο ψηφιακό μέσο (εικόνα 2). Η έξοδος της διαδικασίας ανίχνευσης είναι η απόφαση «Το ψηφιακό μέσο είναι υδατοσημασμένο με το υδατόσημο που προήλθε από το συγκεκριμένο κλειδί» ή «Το ψηφιακό μέσο δεν είναι υδατοσημασμένο με το υδατόσημο που προήλθε από το συγκεκριμένο κλειδί». Στη διαδικασία ανίχνευσης δε χρησιμοποιείται το αρχικό, μη υδατοσημασμένο ψηφιακό μέσο. Παρακάτω θα περιγραφούν οι ιδιότητες που πρέπει να ικανοποιεί η ψηφιακή υδατοσήμανση και κάποιοι ενδεικτικοί τρόποι ενσωμάτωσης – ανίχνευσης.



Εικόνα 2: Διαδικασία Ανίχνευσης

### 1.4 Κατηγορίες ψηφιακής υδατοσήμανσης

Καθώς λοιπόν όλο και περισσότερες εικόνες (κινούμενες ή μη) και άλλα ψηφιακά δεδομένα μεταφέρονται και παρουσιάζονται μέσω του Διαδικτύου, συχνά προκύπτει η ανάγκη για χρήση της ψηφιακής υδατοσήμανσης. Ποια είναι όμως η σημασία της;

Το υδατόσημο είναι ένα σύνολο δυαδικών δεδομένων που προσαρτώνται στο ψηφιακό αντικείμενο, τα πνευματικά δικαιώματα του οποίου θέλουμε να προστατεύσουμε. Το αποτέλεσμα αυτής της προσθήκης μπορεί να είναι είτε ορατό είτε αόρατο. Ας δούμε ένα παράδειγμα για την κάθε κατηγορία, από την ερευνητική μονάδα της IBM.

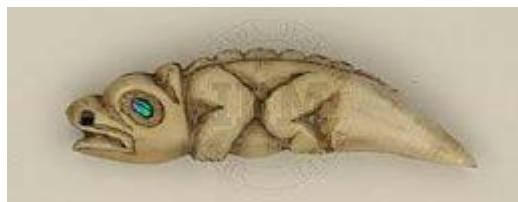
#### 1.4.1 Ορατό υδατόσημο

Το ορατό υδατόσημο αφορά στην ενσωμάτωση μιας ορατής εικόνας (συνήθως το λογότυπο της δικαιούχου εταιρίας), με τέτοιο τρόπο ώστε να φαίνεται ευκρινώς αλλά να μην αλλοιώνει το περιεχόμενο του προστατευόμενου αρχείου. Φυσικά, το

υδατόσημο στοχεύει εξ' ορισμού στο να αποτρέψει κάθε προσπάθεια απομάκρυνσης ή αντικατάστασής του από οποιονδήποτε επιχειρήσει να οικειοποιηθεί το προστατευόμενο αρχείο, κατά συνέπεια θα πρέπει να τοποθετείται κατάλληλα, ώστε η απομάκρυνσή του να οδηγεί π.χ. στην καταστροφή του αρχείου.



Εικόνα 3: Το λογότυπο της IBM.



Εικόνα 4: Η πρωτότυπη εικόνα μαζί με το λογότυπο.

Το υδατόσημο μπορεί να τοποθετηθεί με διάφορους τρόπους, επαναληπτικά σε όλη την εικόνα, δεξιά ή αριστερά, πάνω ή κάτω ή στο κέντρο της εικόνας, ανάλογα με τη θέση που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του δικαιούχου.

#### 1.4.2 Αόρατο υδατόσημο

Το αόρατο υδατόσημο αποτελεί δυαδική πληροφορία που ενσωματώνεται στην αρχική, αλλά παραμένει αόρατη και δεν την αλλοιώνει εμφανώς. Ο εντοπισμός της εφαρμογής αόρατου υδατόσημου σε ένα αρχείο γίνεται αλγορίθμικά, μέσω ειδικού συστήματος ανίχνευσης υδατόσημων. Ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιείται το αόρατο υδατόσημο, υπάρχουν και οι αντίστοιχες υποπεριπτώσεις:

- Υδατόσημο που καταστρέφεται - αλλοιώνεται όταν πραγματοποιείται ψηφιακή επεξεργασία μιας εικόνας χρησιμεύει στη διαδικασία απόδειξης της αυθεντικότητάς της. Για παράδειγμα αν το υδατόσημο παρουσιάζει αλλοιώσεις, συμπεραίνουμε ότι η εικόνα έχει υποστεί επεξεργασία και δεν θεωρείται πλέον αυθεντική. Είναι εμφανής η σκοπιμότητά του για την εκδίκαση υποθέσεων που βασίζονται σε εικόνες ως αποδεικτικά στοιχεία.
- Υδατόσημο που είναι ανθεκτικό σε διαφόρων μορφών αλλοιώσεις της αρχικής εικόνας όπως κοπή, φιλτράρισμα, συμπίεση ή αντικατάσταση μερών της. Η χρησιμότητά του έγκειται στην αντιμετώπιση περιπτώσεων όπου αμφισβητείται η ιδιοκτησία και η προέλευση μιας εικόνας.

Στην εικόνα 5 αριστερά φαίνεται η εικόνα με το αόρατο υδατόσημο πάνω δεξιά. Δεξιά φαίνεται το υδατόσημο που προκύπτει από τη χρήση ενός συστήματος

εντοπισμού υδατόσημων που προαναφέρθηκε καθώς και το αποτέλεσμα που δίνει το σύστημα για ένα κομμάτι της εικόνας που δεν περιέχει υδατόσημο.



**Εικόνα 5: (Αριστερά) Εικόνα με το αόρατο υδατόσημο πάνω δεξιά. (Δεξιά) Υδατόσημο και αποτέλεσμα για ένα κομμάτι της εικόνας που δεν περιέχει υδατόσημο.**

## 1.5 Ιδιότητες ψηφιακής υδατοσήμανσης

Παρακάτω θα αναλυθούν οι ιδιότητες της ψηφιακής υδατοσήμανσης. Αυτές είναι η μη αντιληπτικότητα, η υπολογιστική πολυπλοκότητα, η αξιόπιστη ανίχνευση και η ανθεκτικότητα σε επιθέσεις.

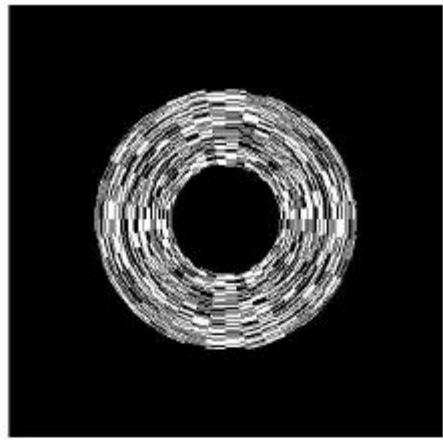
### 1.5.1 Μη αντιληπτικότητα

Η ενσωμάτωση του υδατόσημου στο ψηφιακό μέσο προκαλεί αλλαγές στο περιεχόμενό του, οι αλλαγές αυτές άλλοτε είναι αντιληπτές και άλλοτε μη αντιληπτές από τον άνθρωπο. Το υδατόσημο δε θα πρέπει να είναι αντιληπτό για δύο λόγους, ο πρώτος λόγος είναι ότι ένα αντιληπτό υδατόσημο μειώνει σημαντικά την ποιότητα του μέσου και ο δεύτερος λόγος είναι ότι μπορεί να εντοπιστεί ευκολότερα, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα σε έναν επίδοξο «πειρατή» να ελαττώσει την ισχύ του ή ακόμη και να το αφαιρέσει.

Στην περίπτωση της υδατοσήμανσης ψηφιακών εικόνων, το υδατόσημο αποφεύγεται να ενσωματωθεί σε ομογενείς περιοχές, όπου εκεί κάθε αλλαγή είναι εμφανής. Σε αυτές τις περιπτώσεις ενδείκνυται η ενσωμάτωση του υδατόσημου σε περιοχές με ακμές και έντονες εναλλαγές φωτεινότητας. Στην εικόνα 6 για παράδειγμα, αν το υδατόσημο ενσωματωθεί στον ώμο ή στο καπέλο της κοπέλας θα είναι εμφανές, ενώ αν ενσωματωθεί στα μαλλιά της θα είναι σχεδόν «αόρατο». Υπάρχουν μέτρα υπολογισμού της ποιότητας του υδατοσημασμένου μέσου σε σχέση με το μη υδατοσημασμένο, μερικά από αυτά είναι το SNR (Signal to Noise Ratio), το PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) κ.ά.



(α)



(β)



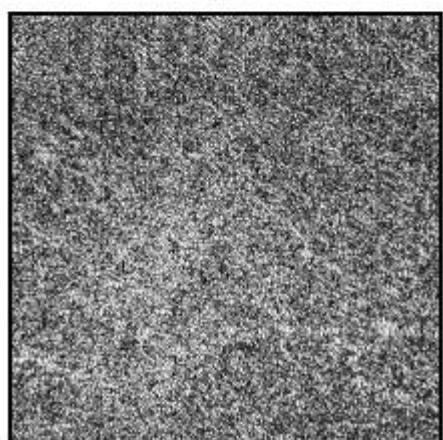
(γ)



(δ)



(ε)



(ζ)

Εικόνα 6: (α) Αρχική εικόνα. (β) Υδατόσημο. (γ) Υδατοσημασμένη εικόνα. (δ) Υδατοσημασμένη εικόνα χωρίς οπτική συγκάλυψη (Visual masking). (ε) Διαφορά εικόνων α και γ. (ζ) Διαφορά εικόνων α και δ.

### **1.5.2 Υπολογιστική πολυπλοκότητα**

Η διαδικασία ενσωμάτωσης υδατόσημου που χρησιμοποιεί μια ραδιοηλεοπτική εταιρία θα πρέπει να πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο, αφού το ραδιοηλεοπτικό πρόγραμμα που αναμεταδίδεται θα πρέπει να υδατοσημαίνεται την ίδια στιγμή. Ας υποθέσουμε μία μηχανή αναζήτησης ψηφιακών δεδομένων στο διαδίκτυο, η οποία ελέγχει κάθε ψηφιακό μέσο για το αν είναι υδατοσημασμένο ή όχι με ένα συγκεκριμένο υδατόσημο. Με αυτόν τον τρόπο, ο ιδιοκτήτης μπορεί να βρει τις ιστοσελίδες που χρησιμοποιούν προϊόντα δικής του πνευματικής ιδιοκτησίας. Σε αυτή την περίπτωση, η διαδικασία ανίχνευσης θα πρέπει να είναι πολύ γρήγορη. Συνεπώς, πρέπει τόσο η διαδικασία ανίχνευσης, όσο και η διαδικασία ενσωμάτωσης να εκτελούνται αν όχι σε πραγματικό χρόνο, τουλάχιστον ικανοποιητικά γρήγορα.

Στην περίπτωση που το ψηφιακό μέσο είναι μεγάλο (τρισδιάστατος όγκος ή video), ο χρόνος ενσωμάτωσης και ειδικότερα ο χρόνος ανίχνευσης είναι αρκετά μεγάλοι. Εάν το υδατοσημασμένο μέσο έχει υποστεί γεωμετρικές παραμορφώσεις (κλιμάκωση, αποκοπή, περιστροφή), τότε ο χρόνος ανίχνευσης αυξάνεται δραματικά.

Βάση των παραπάνω παραδειγμάτων, παρατηρείται ότι απαιτούνται πολύ μικροί χρόνοι εκτέλεσης, επομένως οι αλγόριθμοι θα πρέπει να είναι αρκετά γρήγοροι.

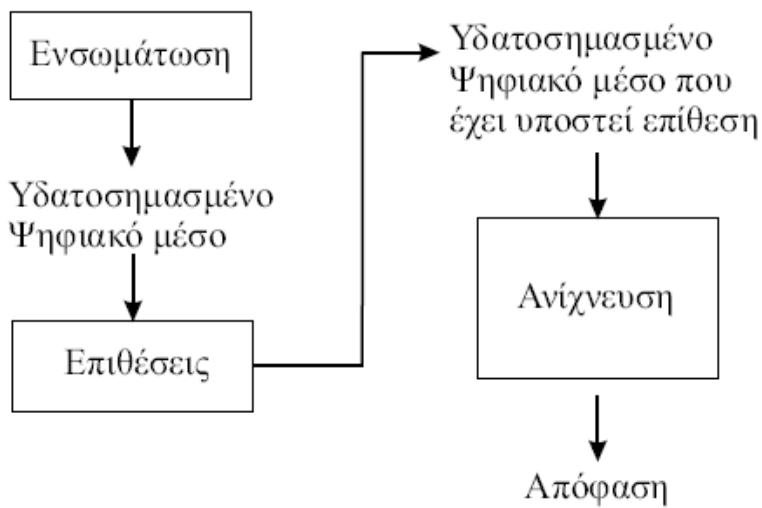
### **1.5.3 Αξιόπιστη ανίχνευση**

Είναι δυνατόν η διαδικασία ανίχνευσης να εξάγει λανθασμένα αποτελέσματα όσον αφορά το αν το ψηφιακό μέσο είναι υδατοσημασμένο ή όχι με ένα συγκεκριμένο τρόπο. Ειδικότερα, θεωρείται λάθος εσφαλμένης αποδοχής η περίπτωση κατά την οποία ανιχνεύεται ένα συγκεκριμένο υδατόσημο σε ψηφιακό μέσο το οποίο είτε είναι υδατοσημασμένο με άλλο υδατόσημο, είτε δεν είναι καθόλου. Ακόμη, λάθος εσφαλμένης απόρριψης υπάρχει όταν δεν ανιχνεύεται ένα υδατόσημο, ενώ είναι πράγματι ενσωματωμένο.

Η ανίχνευση θεωρείται αξιόπιστη όταν οι πιθανότητες εσφαλμένης αποδοχής και εσφαλμένης απόρριψης είναι πολύ μικρές ( $<10^{-5}$ ). Οι πιθανότητες λάθους μειώνονται σημαντικά όσο αυξάνεται η ένταση με την οποία ενσωματώνεται το υδατόσημο. Πρέπει όμως να αυξηθεί η ένταση τόσο ώστε να μην επηρεάσει την αντιληπτικότητα του υδατόσημου.

### **1.5.4 Ανθεκτικότητα σε επιθέσεις**

Στην περίπτωση που κάποιος θελήσει να αντιγράψει και να οικειοποιηθεί πολυμεσική πληροφορία που ανήκει σε άλλον γνωρίζοντας ότι αυτή είναι υδατοσημασμένη, πρέπει να προσπαθήσει αν όχι να αφαιρέσει το υδατόσημο, να το καταστήσει μη ανιχνεύσιμο. Αυτό μπορεί να γίνει με αλγόριθμους επεξεργασίας πολυμεσικών δεδομένων, όπως φιλτράρισμα, συμπίεση, εισαγωγή θορύβου ή γεωμετρικές παραμορφώσεις, όπως είναι η περιστροφή, η κλιμάκωση και η αποκοπή (εικόνα 7).



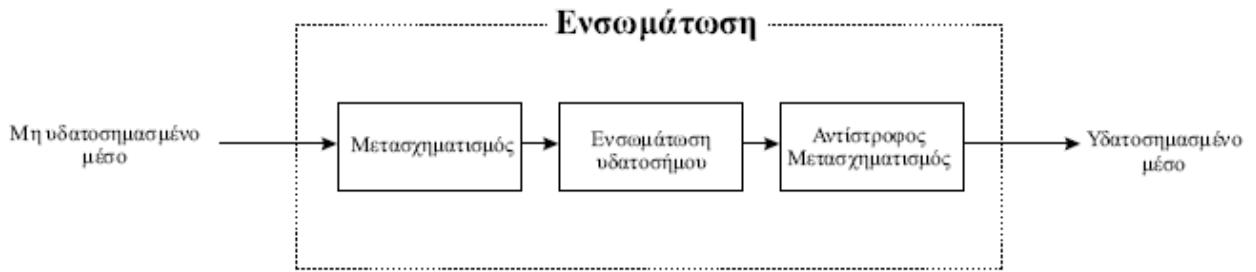
**Εικόνα 7: Διάγραμμα ροής διαδικασίας με επιθέσεις**

Οι παραπάνω αλγόριθμοι δεν τροποποιούν μόνο το πολυμεσικό σήμα, αλλά επηρεάζουν και το ενσωματωμένο υδατόσημο, δηλαδή το φιλτράρισμα, η συμπίεση και η εισαγωγή θορύβου είναι λειτουργίες που επηρεάζουν το συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος. Άρα, αν ενσωματωθεί το υδατόσημο στις κατάλληλες συχνότητες μπορεί να έχει περισσότερη αντοχή σε αυτές τις επιθέσεις. Οι γεωμετρικές παραμορφώσεις είναι πιο περίπλοκες, αφού επηρεάζουν το υδατόσημο σε μεγαλύτερο βαθμό.

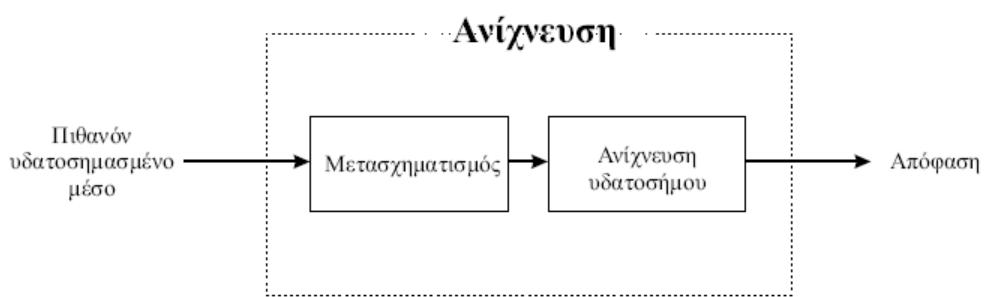
## 1.6 Μέθοδοι δισδιάστατης υδατοσήμανσης

Παρακάτω θα αναφερθούν μερικές μέθοδοι υδατοσήμανσης που αφορούν κυρίως εικόνες. Η ενσωμάτωση μπορεί να γίνει απευθείας στο πεδίο του χρόνου ή εναλλακτικά στους συντελεστές μετασχηματισμών του αρχικού μέσου. Στην περίπτωση της υδατοσήμανσης εικόνας, ενσωμάτωση στο πεδίο του χρόνου σημαίνει ότι το υδατόσημο θα ενσωματωθεί σ' αυτήν μέσω αλλαγών της φωτεινότητας κάποιων εικονοστοιχείων της.

Αν υπάρχει υδατοσήμανση στο πεδίο των συχνοτήτων τότε εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός στην εικόνα, ενσωματώνεται το υδατόσημο αλλάζοντας κάποιες τιμές των συντελεστών και έπειτα εφαρμόζεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός των τροποποιημένων συχνοτήτων, με αποτέλεσμα την υδατοσημασμένη εικόνα (εικόνα 8). Αντίστοιχα, στη διαδικασία της ανίχνευσης πρώτα εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός και κατόπιν ανιχνεύεται το υδατόσημο στο πεδίο στο οποίο ενσωματώθηκε (εικόνα 9).



Εικόνα 8: Ενσωμάτωση στο πεδίο του μετασχηματισμού



Εικόνα 9: Ανίχνευση στο πεδίο του μετασχηματισμού

Γενικότερα, η ενσωμάτωση στο πεδίο των συχνοτήτων παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με την ενσωμάτωση στο πεδίο του χρόνου. Με την ενσωμάτωση στο πεδίο των συχνοτήτων, καθορίζονται οι κατάλληλες συχνότητες σε σχέση με την επιθυμητή ανθεκτικότητα ενάντια στις επιθέσεις επεξεργασίας σήματος, αλλά και σε σχέση με την αντιληπτικότητα του υδατόσημου.

Αρκετά είδη επιθέσεων όπως το φιλτράρισμα, η συμπίεση και η προσθήκη θορύβου επηρεάζουν συχνοτικά το ψηφιακό μέσο. Επίσης μερικά είδη μετασχηματισμών (μετασχηματισμός Fourier) έχουν σημαντικές ιδιότητες, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον ανιχνευτή σε περίπτωση γεωμετρικών επιθέσεων, με σκοπό την ταχύτερη ανίχνευση του υδατόσημου.

### 1.6.1 Μέθοδοι ενσωμάτωσης στο χρόνο

Μία μέθοδος ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία: η εικόνα χωρίζεται σε δύο υποσύνολα A και B, όπου η φωτεινότητα των εικονοστοιχείων στο υποσύνολο A αυξάνεται κατά μία σταθερά k. Η ανίχνευση γίνεται μέσω της σύγκρισης των μέσων τιμών A και B. Η διαφορά αυτή αναμένεται να είναι ίση με k στην περίπτωση της υδατοσημασμένης εικόνας, ενώ στην περίπτωση της μη υδατοσημασμένης εικόνας αναμένεται να είναι ίση με μηδέν.

Σε μία άλλη μέθοδο υπολογίζονται αναλυτικά οι πιθανότητες εσφαλμένης ανίχνευσης και εσφαλμένης απόρριψης για την περίπτωση λευκών χαμηλοσυχνοτικών υδατοσήμων. Ακόμη σε άλλη μέθοδο, η υδατοσήμανση γίνεται μέσω της αυξομείωσης φωτεινότητας της εικόνας στο μπλε κανάλι. Το μέγεθος της αλλαγής της εξαρτάται από τη φωτεινότητα του εικονοστοιχείου. Η ανίχνευση του υδατόσημου γίνεται μέσω του υπολογισμού της μέσης τιμής της περιοχής γύρω από το εικονοστοιχείο.

### 1.6.2 Μέθοδοι ενσωμάτωσης στη συχνότητα

Μία μέθοδος ενσωμάτωσης υδατόσημου στη συχνότητα είναι η ενσωμάτωσή του στο διακριτό μετασχηματισμό του συνημιτόνου (DCT – Discrete Cosine Transform). Οι συντελεστές του μετασχηματισμού αναδιατάσσονται με κατεύθυνση zigzag έτσι ώστε να εμφανίζονται πρώτα οι χαμηλές συχνότητες. Κατόπιν, το υδατόσημο, που είναι μία ακολουθία ψευδοτυχαίων αριθμών, ενσωματώνεται στο πεδίο του μετασχηματισμού. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι η έξοδος της είναι πραγματική σε αντίθεση με άλλους μετασχηματισμούς (π.χ. Fourier), όπου η έξοδος είναι μιγαδική. Ακόμη, ο μετασχηματισμός αυτός υπολογίζεται αρκετά γρήγορα όταν εφαρμόζεται σε ήδη συμπιεσμένες περιοχές. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν μπορεί να αντιμετωπίσει τις γεωμετρικές επιθέσεις (σε αντίθεση με τον Fourier).

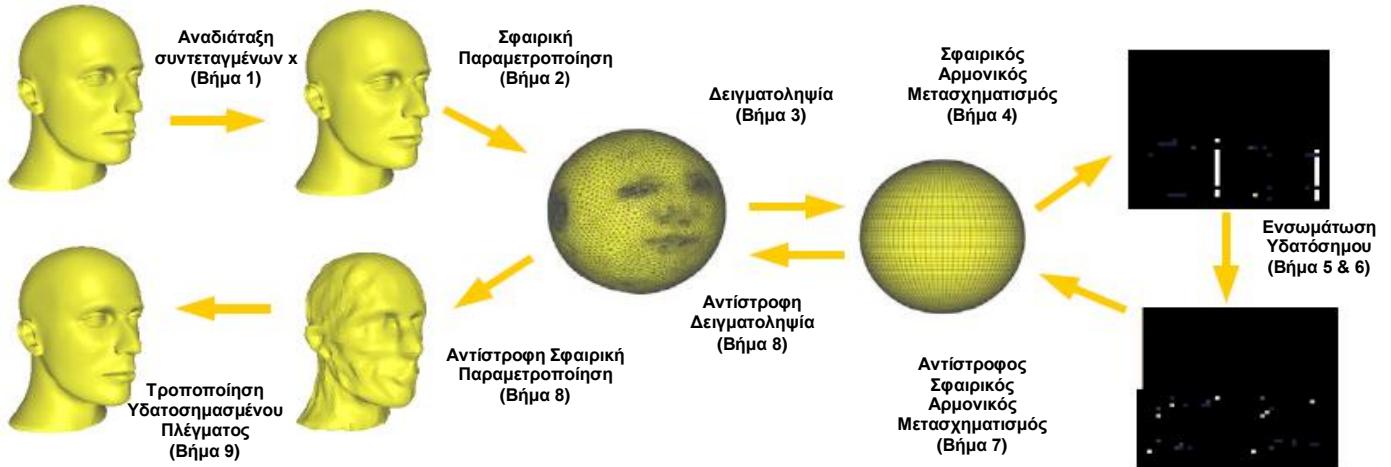
Υπάρχει ακόμη μία μέθοδος ενσωμάτωσης υδατόσημου στο πεδίο των κυματιδίων (Wavelets). Το πλεονέκτημα της χρήσης του πεδίου αυτού για ψηφιακή υδατοσήμανση είναι ότι το πεδίο αυτό δίνει συγχρόνως χωρική και συχνοτική πληροφορία. Ακόμη ο μετασχηματισμός Fourier Mellin (FMT), έχει ιδιότητες οι οποίες επιταχύνουν την ανίχνευση στην περίπτωση γεωμετρικά τροποποιημένης εικόνας. Η μέθοδος όμως είναι πολύπλοκη υπολογιστικά, αφού για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού απαιτούνται δύο μετασχηματισμοί Fourier. Τέλος, υπάρχουν μέθοδοι που χρησιμοποιούν αντιληπτική κάλυψη (visual masking) με σκοπό την ελάττωση της αντιληπτικότητας του υδατόσημου.

## 1.7 Μέθοδοι τρισδιάστατης υδατοσήμανσης

Μερικές από τις μεθόδους τρισδιάστατης υδατοσήμανσης είναι οι εξής:

- Υδατοσήμανση τρισδιάστατων μοντέλων πλέγματος με σφαιρική παραμετροποίηση.
- Υδατοσήμανση τρισδιάστατων μοντέλων πλέγματος μέσω του μετασχηματισμού SVD (Singular Value Decomposition).
- Υδατοσήμανση τρισδιάστατων μοντέλων πλέγματος χρησιμοποιώντας μπαλώματα CEGI (Complex Extended Gaussian Image).
- Υδατοσήμανση τρισδιάστατων μοντέλων στο πεδίο του διακριτού μετασχηματισμού Fourier.
- Υδατοσήμανση τρισδιάστατων μοντέλων με βάση την ομαδοποίηση του νέφους σημείων (Clusters).

Στην εικόνα 10 που ακολουθεί φαίνονται γραφικά τα βήματα της υδατοσήμανσης με σφαιρική παραμετροποίηση.



Εικόνα 10: Δομή του αλγόριθμου ενσωμάτωσης μέσω σφαιρικής παραμετροποίησης

Αναφορικά ο μετασχηματισμός SVD που χρησιμοποιείται στη δεύτερη μέθοδο είναι ένα μαθηματικό «εργαλείο» που βρίσκει πληθώρα εφαρμογών στο χώρο της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος. Στην ουσία αποτελεί την παραγοντοποίηση ενός πίνακα σε γινόμενο τριών πινάκων οι οποίοι μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για να μειωθεί ο θόρυβος του σήματος ή για να αναπαραχθεί το σήμα μελλοντικά από τις σημαντικότερες ιδιοτιμές και ιδιοδιανύσματά του. Πιο συγκεκριμένα ο μετασχηματισμός SVD έχει ως εξής:

Οποιοσδήποτε πίνακας  $A$  διαστάσεων  $m \times n$  με  $m > n$  μπορεί να γραφτεί σαν γινόμενο τριών πινάκων:

$$A = UDV^T$$

Όπου ισχύουν οι εξής ιδιότητες:

$$U^T U = V^T V = I$$

Ο πίνακας  $D$  είναι διαγώνιος με στοιχεία της κύριας διαγωνίου τις singular τιμές του πίνακα. Ο μετασχηματισμός SVD μπορεί να υπολογιστεί αποτελεσματικά με τη μέθοδο LAPACK.

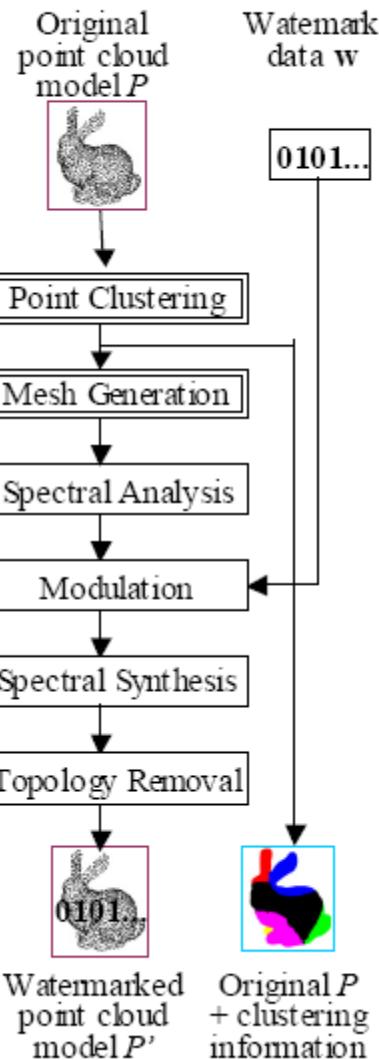
Από τις παραπάνω μεθόδους θα αναλυθεί και θα εφαρμοστεί η τελευταία: Υδατοσήμανση τρισδιάστατων μοντέλων με βάση την ομαδοποίηση του νέφους σημείων (clusters). Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα αναλυθούν τα βήματα του αλγορίθμου υδατοσήμανσης που επιλέχθηκε, τόσο για την διαδικασία ενσωμάτωσης όσο και για την διαδικασία ανίχνευσης του υδατόσημου.

## 2. Αλγόριθμος Υδατοσήμανσης

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος που χρησιμοποιεί ομάδες νέφους σημείων χρησιμοποιεί το ίδιο πεδίο συχνότητας στην τροποποίηση μορφής όπως ο αλγόριθμος πλέγματος [17] με μια σημαντική διαφορά, ένα μοντέλο με πλέγμα έχει την πληροφορία συνδεσιμότητας μεταξύ των κόμβων του πλέγματος η οποία είναι απαραίτητη για τη φασματική ανάλυση του πλέγματος, ενώ ένα μοντέλο που αποτελείται από νέφος σημείων δεν την έχει. Ο αλγόριθμος μας μετατρέπει τις ομάδες του νέφους σημείων σε μη-πολλαπλό (non-manifold) πλέγμα προτού εφαρμόζει την υδατοσήμανση. Παρακάτω αναφέρονται τα έξι βήματα της διαδικασίας ενσωμάτωσης:

- 1) Δημιουργία των ομάδων νέφους σημείων (clusters) – **Point Clustering**
- 2) Δημιουργία πλέγματος για κάθε ομάδα σημείων – **Mesh Generation**
- 3) Φασματική ανάλυση πλέγματος για κάθε νέο πλέγμα που έχει δημιουργηθεί – **Spectral Analysis**
- 4) Τροποποίηση των φασματικών συντελεστών πλέγματος βάση της δυαδικής πληροφορίας που θα ενσωματωθεί – **Modulation**
- 5) Φασματική σύνθεση πλέγματος – **Spectral Synthesis**
- 6) Δημιουργία υδατόσημου σε ομάδα σημείων «αφαιρώντας» τη συνδεσιμότητα του πλέγματος – **Topology Removal**

## Embedding



**Εικόνα 11: Αλγόριθμος ενσωμάτωσης – Embedding**

### 2.1 Ενσωμάτωση υδατόσημου

Παρακάτω θα αναλυθούν τα έξι βήματα της ενσωμάτωσης υδατόσημου.

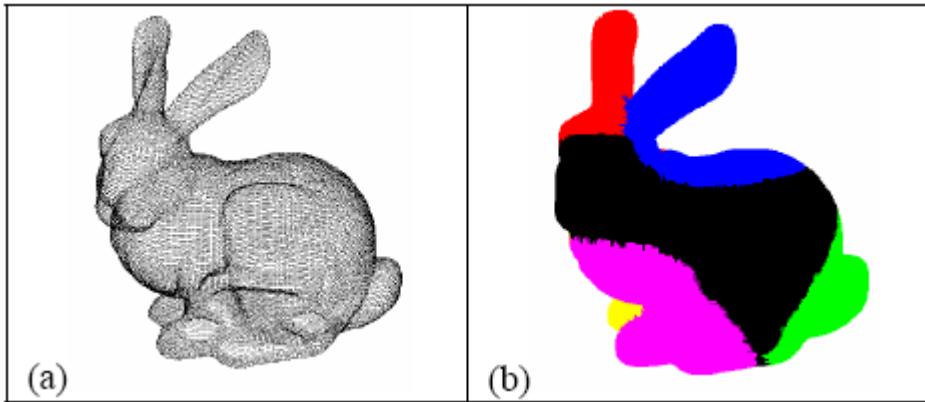
#### 2.1.1 Δημιουργία των ομάδων νέφους σημείων (Point Clustering).

Στο πρώτο βήμα της διαδικασίας ενσωμάτωσης χωρίζεται το νέφος σημείων του μοντέλου σε ομάδες, υποσύνολα (clusters) που καθένα από αυτά γίνεται ο «στόχος» του υδατόσημου. Η ομαδοποίηση εξυπηρετεί πολλούς σκοπούς. Πρώτον, ελαττώνει τα υπολογιστικά κόστη για το βήμα της φασματικής ανάλυσης πλέγματος. Δεύτερον, με την ενσωμάτωση πολλών αντιγράφων του ίδιου μηνύματος σε ομάδες, το υδατόσημο σαν σύνολο παρουσιάζει μεγαλύτερη ανοχή σε επιθέσεις όπως το τμηματικό κόψιμο (cropping), τοπικές παραμορφώσεις κ.α. Ακόμη η ομαδοποίηση βοηθάει το χρήστη στο να καθορίσει εκείνος που θέλει να εφαρμοστεί το υδατόσημο, για παράδειγμα σε ένα συγκεκριμένο σημείο του μοντέλου.

Μια ομάδα δημιουργείται όταν τα σημεία είναι κοντά μεταξύ τους βάση της τρισδιάστατης ευκλείδειας απόστασης (1). Για να δημιουργηθούν οι ομάδες ο χρήστης επιλέγει τυχαία σημεία τα οποία θέλει να είναι τα κεντρικά σημεία (seed points) του κάθε cluster. Ο αλγόριθμος ξεκινάει από τα κεντρικά σημεία και προσθέτει σημεία σε κάθε ομάδα ελέγχοντας τις αποστάσεις όλων των σημείων του μοντέλου και σταματάει εάν ένα cluster συναντήσει ένα άλλο ή τον εαυτό του, ή αλλιώς όταν ο αριθμός των σημείων του cluster υπερβεί το προκαθορισμένο κατώφλι. Το μέγεθος των clusters ορίζεται από το χρήστη. Στην εικόνα με το κουνέλι (εικόνα 12b) που φαίνεται παρακάτω, διακρίνονται πέντε clusters με διαφορετικά χρώματα (με μαύρο χρώμα απεικονίζονται τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα cluster) και το καθένα αποτελείται από 4.000 σημεία, το κουνέλι αποτελείται από 39.839 σημεία.

$$\sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2 + (p_z - q_z)^2} \quad (1)$$

όπου P και Q δύο σημεία με  $P=(p_x, p_y, p_z)$  και  $Q=(q_x, q_y, q_z)$ .

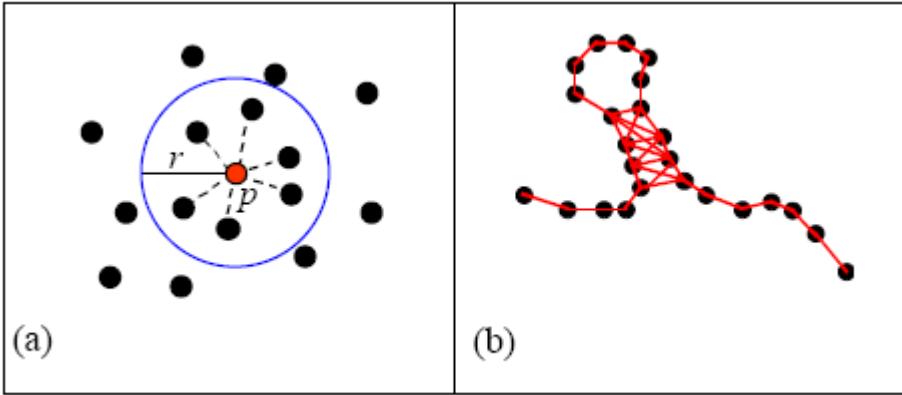


Εικόνα 12: (a) Το μοντέλο σε μορφή νέφους σημείων (34.839 σημεία). (b) Οι περιοχές που δεν έχουν μαύρο χρώμα ανήκουν στα πέντε clusters, το μέγεθος του καθενός είναι 4.000 σημεία.

### 2.1.2 Δημιουργία πλέγματος για κάθε ομάδα σημείων (Mesh Generation – Meshing).

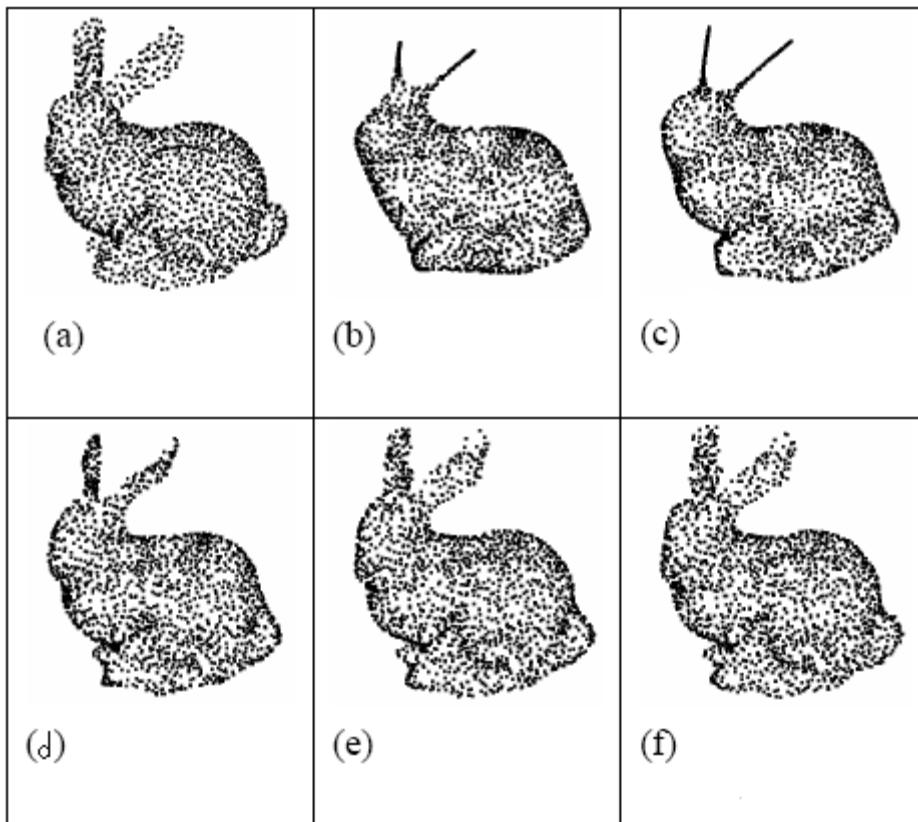
Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πλέγματος είναι σχετικά απλός και βασίζεται στην τρισδιάστατη ευκλείδεια «γειτονία». Δεδομένου ενός σημείου  $p$  από το νέφος σημείων  $P$  του μοντέλου, ο αλγόριθμος συνδέει όλα τα σημεία που βρίσκονται σε ακτίνα  $r$  με κέντρο το σημείο  $p$  (εικόνα 13a). Εάν η επιφάνεια του μοντέλου έχει σκαναριστεί πυκνά αρκετά, τότε το πλέγμα  $M$  που προκύπτει προσεγγίζει τη δισδιάστατη πολλαπλή επιφάνεια του μοντέλου ικανοποιητικά. Όμως αν το νέφος σημείων δεν είναι αρκετά πυκνό, τότε το πλέγμα μπορεί να παρουσιάζει οπές. Ακόμη, σημεία που προέρχονται από πολλαπλές επιφάνειες μπορούν να «ραφτούν μαζί» από το πλέγμα, δημιουργώντας ένα μη-πολλαπλό «τρισδιάστατο» πλέγμα (εικόνα 13b). Για τους σκοπούς της απεικόνισης και της τόρνευσης με NC μηχανή, τέτοιες οπές και σημεία που «ράβονται μαζί» δεν είναι επιθυμητά. Τέτοια

πλέγματα όμως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση σχεδίασης και για τη ψηφιακή υδατοσύμμανση ενός τρισδιάστατου μοντέλου που ορίζεται σαν ένα νέφος σημείων.



Εικόνα 13: (a) Ο αλγόριθμος συνδέει με το σημείο  $p$  όλα τα σημεία που βρίσκονται σε ακτίνα  $r$  από το σημείο  $p$ . (b) Σημεία που ανήκουν σε πολλαπλές επιφάνειες μπορούν να «ραφτούν μαζί».

Η εικόνα 14 δείχνει ένα παράδειγμα της προσέγγισης μορφής του μοντέλου χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο που περιγράφηκε παραπάνω. Σε αυτό το παράδειγμα δημιουργήθηκε πλέγμα από το μοντέλο του κουνελιού που αποτελείτο από 1.633 σημεία (σχετικά αραιή δειγματοληψία). Η ανάλυση μορφής του πλέγματος που προέκυψε έγινε βάση της φασματικής ανάλυσης πλέγματος - μέθοδος του Karni [13] - και αναδημιουργήθηκε η μορφή του χρησιμοποιώντας υποσύνολα των φασματικών συντελεστών (spectral coefficients). Έτσι η προσέγγιση μορφής του μοντέλου είναι παρόμοια με εκείνες βασίζονται στη φασματική ανάλυση πλέγματος χρησιμοποιώντας όμως δύο πολλαπλά πλέγματα του μοντέλου με τις ίδιες κορυφές.



**Εικόνα 14:** (a) Τα αρχικά 1.633 σημεία. Προσέγγιση χρησιμοποιώντας το 1% (b), 3% (c), 5% (d), 10% (e) και 15% (f) των φασματικών συντελεστών.

Η ακτίνα  $r$  για τη δημιουργία πλέγματος επιλέγεται έτσι ώστε: ο μέσος αριθμός των σημείων που ενώνονται να είναι ίσος με μία δεδομένη παράμετρο  $N_n$ . Δηλαδή, το  $N_n$  είναι ο μέσος βαθμός των κορυφών του μπαλώματος  $M_i$  για το cluster (ομάδα)  $i$ . Αν το  $N_n$  είναι πολύ μικρό το πλέγμα θα έχει οπές και τελικά στο  $N_n=0$  δημιουργείται ομάδα σημείων. Ακόμη για μεγάλες τιμές του  $N_n$  επιβραδύνεται η φασματική ανάλυση πλέγματος γιατί ο Laplacian πίνακας γίνεται μεγαλύτερος. Συγκρίνοντας την ανοχή σε επιθέσεις του υδατόσημου για διάφορες τιμές του  $N_n$ , παρατηρήθηκε ότι για  $N_n=12$ ,  $N_n=24$  και  $N_n=36$  τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια, μικρότερες τιμές του  $N_n$  παρουσίασαν και μικρότερη ανοχή σε επιθέσεις.

### 2.1.3 Φασματική ανάλυση πλέγματος (Mesh-Spectral Analysis).

Το βήμα της φασματικής ανάλυσης πλέγματος μετατρέπει τη μορφή του πλέγματος  $M_i$  του κάθε cluster του συνόλου σημείων  $P$  στο πεδίο ορισμού της «συχνότητάς» του (frequency domain). Δεδομένο ενός σετ  $n$  σημείων από ένα cluster και έχοντας τη συνδεσιμότητά τους, υπολογίζεται ένας Laplacian πίνακας διαστάσεων  $n \times n$   $K=D-A$ . Όπου  $D$  είναι ένας διαγώνιος πίνακας με στοιχεία διαγωνίου  $D_{ii}=d_i$  που είναι ο βαθμός της κορυφής  $i$  και ο πίνακας  $A$  είναι ένας πίνακας που αφορά τη συνδεσιμότητα του πολυγωνικού πλέγματος και τα στοιχεία του οποίου  $a_{ij}$  καθορίζονται ως εξής (2):

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν οι κορυφές } i \text{ και } j \text{ ενώνονται} \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (2)$$

Η ανάλυση ιδιοτιμών (eigenvalue decomposition) του πίνακα  $\mathbf{K}$  παράγει η ιδιοτιμές  $\lambda_i$  με ( $1 \leq i \leq n$ ) και η ιδιοδιανύσματα  $w_i$  με ( $1 \leq i \leq n$ ). Με κανονικοποίηση των ιδιοδιανυσμάτων  $w_i$ , προκύπτει η φασματική βάση του πλέγματος  $e_i$  (3) με ( $1 \leq i \leq n$ ).

$$e_i = \frac{w_i}{\|w_i\|} \quad (3)$$

Οι φασματικοί συντελεστές  $r_i = (r_{s,i}, r_{t,i}, r_{u,i})$  με ( $1 \leq i \leq n$ ) υπολογίζονται προβάλλοντας τις  $x, y, z$  συνιστώσες της κορυφής  $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ , ( $1 \leq i \leq n$ ) στο  $e_i$ . Οι  $s, t$  και  $u$  είναι οι φασματικοί άξονες που αντιστοιχούν στους  $x, y$  και  $z$  άξονες.

#### 2.1.4 Τροποποίηση των φασματικών συντελεστών πλέγματος βάση της διαδικής πληροφορίας που θα ενσωματωθεί (Modulation).

Ο αλγόριθμος ενσωματώνει το υδατόσημο τροποποιώντας το εύρος των φασματικών συντελεστών για το μπάλωμα του πλέγματος  $M_i$ . Κάθε φασματικός άξονας  $s, t$  και  $u$  έχει ένα διάνυσμα (φασματικός συντελεστής) μεγέθους  $n$ . Τα δεδομένα που θα ενσωματωθούν στο πλέγμα έχουν τη μορφή ενός  $bit$  διανύσματος μεγέθους  $m$ ,  $a = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ , στο οποίο κάθε  $bit$  παίρνει τις τιμές  $\{0, 1\}$ . Στη συνέχεια κάθε  $bit$   $a_j$  μετατρέπεται σε διπλότυπο βάση μιας τιμής  $c$  (chip rate) για να παράγει το διάνυσμα συμβόλου του υδατόσημου  $b = (b_1, b_2, \dots, b_{mc})$ ,  $b_i \in \{0, 1\}$  (4) μήκους  $m \cdot c \leq n$ .

$$b_i = a_j, \quad j \cdot c \leq i < (j+1) \cdot c \quad (4)$$

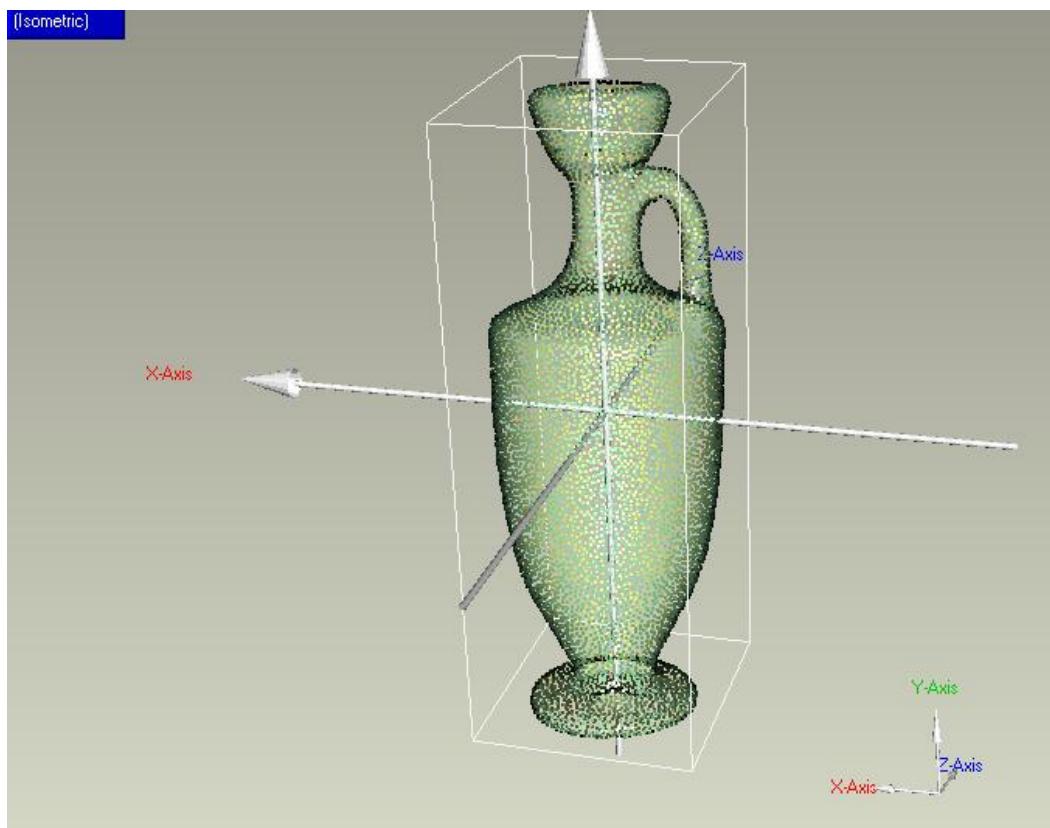
Τέτοια μετατροπή του διανύσματος  $b_i$  αυξάνει την ανοσία του θορύβου του υδατόσημου κατά τη διαδικασία αποδιαμόρφωσής του, όταν υπολογίζει το μέσο όρο του σήματος. Γι' αυτό το λόγο το διάνυσμα  $b_i$  μετατρέπεται ξανά σε ένα άλλο διάνυσμα  $b' = (b'_1, b'_2, \dots, b'_{mc})$ ,  $b'_i \in \{-1, 1\}$  ως εξής (5):

$$b'_i = \begin{cases} -1, & \alpha v b_i = 0 \\ 1, & \alpha v b_i = 1 \end{cases} \quad (5)$$

Έστω ότι μετατρέπονται οι φασματικοί συντελεστές του φασματικού άξονα  $s$ . Το  $r_{s,i}$  είναι ο  $i$ -th φασματικός συντελεστής πριν την υδατοσήμανση που αντιστοιχεί στο φασματικό άξονα  $s$  και  $p_i \in \{-1,1\}$  είναι ένας ψευδο-τυχαίος αριθμός συχνότητας (PRNS: pseudo-random number sequence) ο οποίος δημιουργείται από ένα γνωστό κλειδί-υδατόσημο  $k_w$ . Ακόμη, α  $(\alpha > 0)$  είναι το εύρος της τροποποίησης. Έτσι υπολογίζεται ο υδατοσημασμένος φασματικός συντελεστής  $\hat{r}_{s,i}$  (6):

$$\hat{r}_{s,i} = r_{s,i} + b_i \cdot p_i \cdot \alpha \quad (6)$$

Το εύρος της τροποποίησης  $\alpha$  υπολογίζεται με τη σχέση:  $\alpha = \varphi \cdot \beta$ , όπου  $\varphi$  είναι το μέγιστο μήκος του «ΚΟΥΤΙΟΥ» που περικλείει το μοντέλο και είναι ευθυγραμμισμένο με τους άξονές του (**AABB**) – **axis-aligned bounding box** (εικόνα 15) και το  $\beta$  είναι η αναλογία του εύρους τροποποίησης. Στη διαδικασία εξαγωγής απαιτείται το ίδιο κλειδί-υδατόσημο, το οποίο είναι το seed για το PRNS που προαναφέρθηκε. Ανάλογα με την εφαρμογή το κλειδί μπορεί να είναι κοινό και μπορεί να μεταφέρεται με ασφάλεια χρησιμοποιώντας κρυπτογραφία. Τέλος, εφαρμόζοντας αντίστοιχες τροποποιήσεις για τους συντελεστές  $t$  και  $u$  των φασματικών αξόνων παράγεται ένα υδατοσημασμένο σετ φασματικών συντελεστών  $\hat{r}_i = (\hat{r}_{s,i}, \hat{r}_{t,i}, \hat{r}_{u,i})$ .



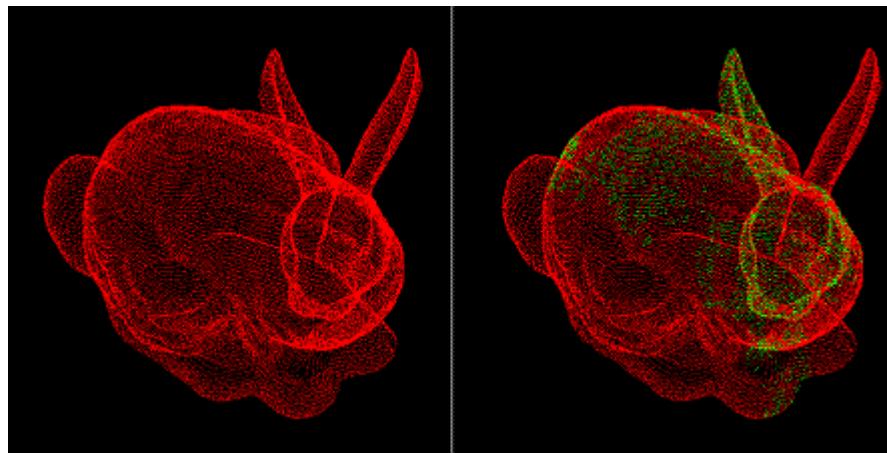
Εικόνα 15: Παράδειγμα του axis-aligned bounding box (AABB).

### 2.1.5 Φασματική σύνθεση πλέγματος (Spectral Synthesis).

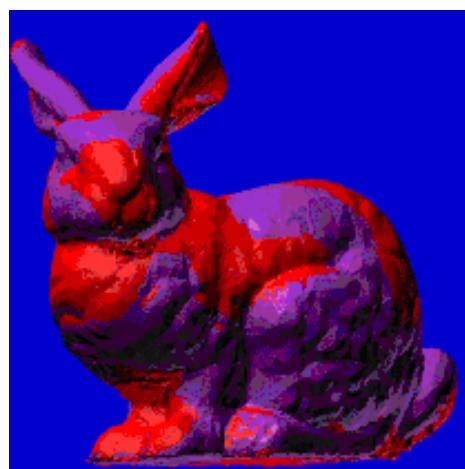
Πολλαπλασιάζοντας τα ιδιοδιανύσματα  $e_i$  με τους υδατοσημασμένους φασματικούς συντελεστές  $\hat{r}_i = (\hat{r}_{s,i}, \hat{r}_{t,i}, \hat{r}_{u,i})$  και αθροίζοντας κατά  $i$ , προκύπτουν οι συντεταγμένες των κορυφών του υδατοσημασμένου πλέγματος  $M'$ .

### 2.1.6 Δημιουργία υδατόσημου σε ομάδα σημείων «αφαιρώντας» τη συνδεσιμότητα του πλέγματος (Topology Removal- Point Set Generation).

Το υδατοσημασμένο νέφος σημείων  $P'$  προκύπτει αφαιρώντας τη συνδεσιμότητα των κορυφών του υδατοσημασμένου πλέγματος  $M'$  (εικόνα 16).



Εικόνα 16: Παράδειγμα ενός υδατοσημασμένου νέφους σημείων, με πράσινο χρώμα φαίνονται οι **watermarked** περιοχές.



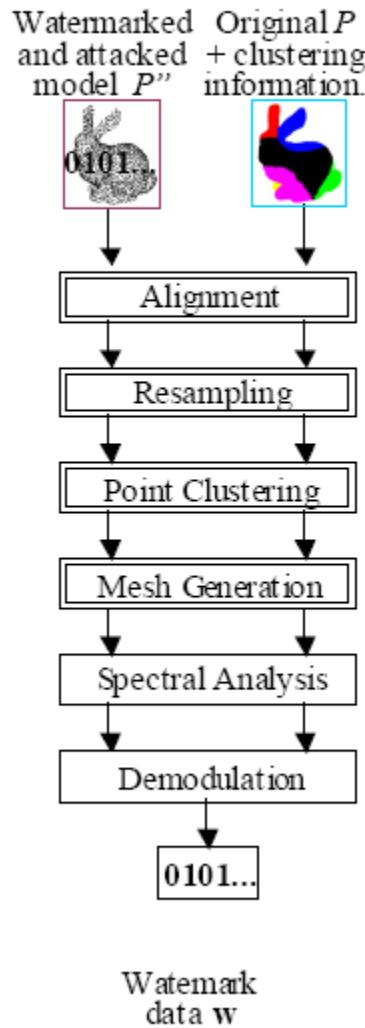
Εικόνα 17: Το μοντέλο του κουνελιού μετά τη δημιουργία επιφάνειας, με κόκκινο χρώμα φαίνονται διαφορετικές **watermarked** περιοχές.

## 2.2 Εξαγωγή υδατόσημου

Παρακάτω θα αναλυθούν τα έξι βήματα της διαδικασίας ανίχνευσης ή και αλλιώς εξαγωγής του υδατόσημου. Για την ανίχνευση του υδατόσημου απαιτείται το αρχικό μοντέλο αναφοράς, δηλαδή το μοντέλο χωρίς υδατόσημο και το υδατοσημασμένο μοντέλο που προέκυψε από τη διαδικασία ενσωμάτωσης.

- 1) Ευθυγράμμιση των μοντέλων – ***Alignment***
- 2) Λήψη νέας γεωμετρίας – ***Resampling***
- 3) Δημιουργία εκ νέου των ομάδων νέφους σημείων – ***Point clustering***
- 4) Δημιουργία πλέγματος για κάθε ομάδα σημείων – ***Mesh Generation***
- 5) Φασματική ανάλυση πλέγματος - ***Spectral Analysis***
- 6) Εξαγωγή του υδατόσημου με αποδιαμόρφωση των φασματικών συντελεστών πλέγματος - ***Demodulation***

## Extraction



**Εικόνα 18: Αλγόριθμος εξαγωγής (ανίχνευσης) – Extraction**

### 2.2.1 Point Set Registration

Η εξαγωγή του υδατόσημου απαιτεί ακριβή καταχώρηση (registration) του υδατοσημασμένου μοντέλου νέφους σημείων σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς. Ο αλγόριθμός χρησιμοποιεί για την καταχώρηση το υδατοσημασμένο μοντέλο μετασχηματισμένο. Ο μετασχηματισμός που χρησιμοποιείται στην ουσία υπολογίζει τη μήτρα συνδιακύμανσης (covariance matrix) από το σύνολο των σημείων και ονομάζεται **PCA** - Principal Component Analysis, Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών.

Η PCA προσέγγιση περιγράφει το μοντέλο με διαμόρφωση διανυσμάτων που προκύπτουν από τις συντεταγμένες των σημείων του. Με τη σειρά τους αυτά χρησιμοποιούνται σαν τον πληθυσμό ενός άλλου τυχαίου διανύσματος. Κάθε pixel στο αντικείμενο-μοντέλο μεταφράζεται σαν ένα τρισδιάστατο διάνυσμα  $X = \{(x_i, y_i, z_i)^T \mid i=1, \dots, n\}$ , όπου  $x_i, y_i, z_i$  είναι οι συντεταγμένες του μοντέλου και η είναι ο συνολικός αριθμός των σημείων. Το μέσο διάνυσμα πληθυσμού  $\mu$  και ο πίνακας συνδιακύμανσης  $C$  υπολογίζονται ως εξής:

$$u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (7)$$

και

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i X_i^T - uu^T \quad (8)$$

Αφού ο πίνακας συνδιακύμανσης είναι πραγματικός και θετικός είναι δυνατό να βρεθεί ένα σετ ορθοκανονικών ιδιοδιανυσμάτων. Έστω ο  $E$  είναι ένας πίνακας του οποίου οι σειρές είναι τα ιδιοδιανύσματα του  $C$  και είναι ταξινομημένος έτσι ώστε η πρώτη σειρά του  $E$  είναι το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ιδιοτιμή του  $C$  και η τελευταία σειρά του  $E$  αντιστοιχεί στη μικρότερη ιδιοτιμή, τότε:

$$Y = E(X - u) \quad (9)$$

Εξισώνοντας τον πίνακα ιδιοδιανυσμάτων του  $C$

$$E = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{pmatrix}$$

με τον πίνακα περιστροφής  $R = R_x(\theta_x) \cdot R_y(\theta_y) \cdot R_z(\theta_z)$ , όπου  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  είναι οι γωνίες περιστροφής των  $x, y, z$  αντίστοιχα, βρίσκεται ότι:

$$\begin{aligned} \theta_y &= \arcsin(e_{31}) \\ \theta_x &= \arcsin(-e_{32}/\cos \theta_y) \quad (10) \\ \theta_z &= \arcsin(-e_{21}/\cos \theta_y) \end{aligned}$$

Εάν  $C_A$  και  $C_B$  είναι τα κέντρα των  $A$  και  $B$  δεδομένων αντίστοιχα και  $E_A, E_B$  είναι οι πίνακες των ιδιοδιανυσμάτων  $A$  και  $B$ . Τότε για κάθε σημείο του  $X_A$  η νέα του θέση του  $X_B$  υπολογίζεται ως εξής:

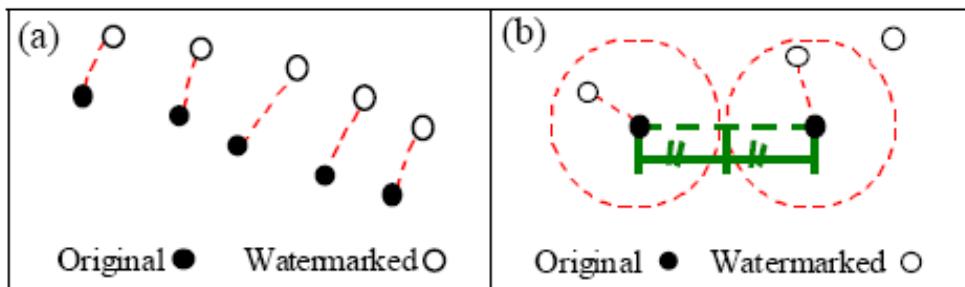
$$X_B = (E_B E_A^T (X_A - u_A)) + u_B \quad (11)$$

### 2.2.2 Λήψη νέας γεωμετρίας (Resampling).

Για να γίνει το υδατόσημο ανθεκτικό σε επιθέσεις που μεταβάλλουν το σύνολο των σημείων, όπως για παράδειγμα αλλαγή μεγέθους (scale), λαμβάνεται εκ νέου η γεωμετρία του υδατοσημασμένου μοντέλου  $P'$ .

Για να ληφθεί εκ νέου η γεωμετρία του  $P'$  από το  $P$ , αντικαθίστανται οι συντεταγμένες ενός σημείου  $p \in P$  με τις συντεταγμένες του σημείου  $p' \in P'$  το οποίο βρίσκεται πιο κοντά στο  $p$ , βάση της τρισδιάστατης ευκλείδειας απόστασης. Ορίζεται ένα κατώφλι (threshold) στο μέγεθος της γειτονιάς που θα εξετασθεί, έτσι ώστε το σημείο  $p'$  που θα αντικαταστήσει το σημείο  $p$  να μην βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από αυτό. Η τιμή που παίρνει το κατώφλι  $d_r$  είναι το  $\frac{1}{2}$  της ελάχιστης απόστασης του σημείου  $p_j$  από όλα τα σημεία του μοντέλου αναφοράς  $P$ . Δοκιμάστηκαν διαφορετικές τιμές για το  $d_r$ , αλλά αυτή η τιμή παρουσίασε μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στις επιθέσεις. Τα βήματα της λήψης νέας γεωμετρίας (resampling) φαίνονται παρακάτω (εικόνα 19):

- 1) Χρησιμοποιώντας τα σημεία του μοντέλου αναφοράς  $P$  σαν κορυφές, παράγεται ένα πλέγμα  $M_c$  για τη λήψη νέας γεωμετρίας.
- 2) Βρίσκεται ένα σημείο  $p'_i \in P'$  του οποίου η τρισδιάστατη ευκλείδεια απόσταση από ένα άλλο σημείο  $p_j \in P$  είναι η μικρότερη από όλα τα σημεία  $p' \in P'$ .
- 3) Εάν η απόσταση μεταξύ των σημείων  $p_i$  και  $p'_i$  έχει μικρότερη τιμή από το κατώφλι, τότε αντικαθίστανται οι συντεταγμένες του  $p_j$  με αυτές του  $p'_i$ .
- 4) Επαναλαμβάνονται τα βήματα 2-3 για όλα τα σημεία  $p_j$  του μοντέλου αναφοράς  $P$ .



Εικόνα 19: (a) Αντιστοιχία συντεταγμένων του μοντέλου αναφοράς  $P$  (μαύρο χρώμα) και του υδατοσημασμένου μοντέλου  $P'$  (άσπρο χρώμα). (b) Σχηματικά πως βρίσκονται τα αντίστοιχα σημεία  $p'_i$  του υδατοσημασμένου μοντέλου από τα σημεία  $p_j$  του μοντέλου αναφοράς, με βάση την τρισδιάστατη ευκλείδεια απόσταση.

### 2.2.3 Δημιουργία των ομάδων νέφους σημείων (Point Clustering).

Σε αυτό το βήμα χρησιμοποιείται ακριβώς η ίδια ομαδοποίηση του νέφους σημείων, όπως πραγματοποιήθηκε στη διαδικασία ενσωμάτωσης, με τη διαφορά ότι αυτή εφαρμόζεται στο μοντέλο που προέκυψε από το προηγούμενο βήμα (resampled point set)  $P''$ . Το νέφος σημείων χωρίζεται σε ομάδες με τον ίδιο τρόπο και είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν τα ίδια κέντρα των ομάδων (clusters) όπως έγινε στην ενσωμάτωση, ακόμη το μέγεθος του cluster πρέπει να είναι το ίδιο.

### 2.2.4 Δημιουργία πλέγματος για κάθε ομάδα σημείων (Mesh Generation – Meshing).

Επίσης χρησιμοποιείται ο ίδιος αλγόριθμος για τη δημιουργία πλέγματος, όπως αυτός εφαρμόστηκε στη διαδικασία ενσωμάτωσης. Η συνδεσιμότητα των σημείων του μοντέλου αναφοράς  $P$ , μεταφέρεται στο μοντέλο που προέκυψε από τη λήψη

νέας γεωμετρίας - resampled point set  $\mathbf{P}''$ . Έτσι προκύπτει το υδατοσημασμένο πλέγμα  $\mathbf{M}''$ .

### 2.2.5 Φασματική ανάλυση πλέγματος (Mesh-Spectral Analysis).

Όπως και στη διαδικασία ενσωμάτωσης η φασματική ανάλυση πλέγματος εφαρμόζεται σε κάθε ομάδα νέφους σημείων (clusters) για να παράγει τους φασματικούς συντελεστές  $r_i = (r_{x,i}, r_{y,i}, r_{z,i})$  του πλέγματος  $\mathbf{M}$  και επιπλέον για να παράγει και τους φασματικούς συντελεστές  $\hat{r}_i = (\hat{r}_{x,i}, \hat{r}_{y,i}, \hat{r}_{z,i})$  του υδατοσημασμένου πλέγματος  $\mathbf{M}''$ . Εφόσον τα πλέγματα  $\mathbf{M}$  και  $\mathbf{M}''$  έχουν τον ίδιο αριθμό κορυφών, η ανάλυση ιδιοτιμών (eigenvalue decomposition) είναι ίδια όπως στην ενσωμάτωση (βήμα 3) και τα αποτελέσματά της εφαρμόζονται στο υδατοσημασμένο πλέγμα  $\mathbf{M}''$ .

### 2.2.6 Εξαγωγή του υδατόσημου με αποδιαμόρφωση των φασματικών συντελεστών πλέγματος (Demodulation).

Το σήμα – υδατόσημο  $q_j$  υπολογίζεται ως εξής:

$$q_j = \frac{1}{3} \sum_{l \in \{x,y,z\}} \sum_{i=j \cdot c}^{(j+1) \cdot c - 1} \hat{r}_{l,i} \cdot h_i = \frac{1}{3} \sum_{l \in \{x,y,z\}} \sum_{i=j \cdot c}^{(j+1) \cdot c - 1} b_i \cdot a \cdot h_i^2 \quad (12)$$

Αν αγνοηθούν οι επιθέσεις και ο ψευδο-τυχαίος αριθμός συχνότητας (PRNS: pseudo-random number sequence)  $h_i$  συγχρονιστεί κατά τη διαδικασία ενσωμάτωσης και ανίχνευσης τότε το σήμα υπολογίζεται  $q_j = c \cdot a \cdot b_i'$ . Όπου το  $q_j \in \{-ac, ac\}$  και το  $a$  είναι πάντα θετικός αριθμός. Ακόμη τα bits του ενσωματωμένου υδατόσημου  $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_m)$  μπορούν να υπολογιστούν από τη συνάρτηση  $w_j = \text{sign}(q_j)$  (χρησιμοποιώντας C++).

Έτσι λοιπόν στο τέλος της διαδικασίας ανίχνευσης εξάγεται το υδατόσημο  $\mathbf{w}$  το οποίο πρέπει να είναι το ίδιο με το υδατόσημο της διαδικασίας ενσωμάτωσης.

### 3. Σχεδιαστικά - MATLAB

Ο αλγόριθμος αναπτύσσεται σε περιβάλλον MATLAB R2007b. Παρακάτω αναλύεται η επεξεργασία των δεδομένων, η ενσωμάτωση του υδατόσημου και η ανίχνευσή του.

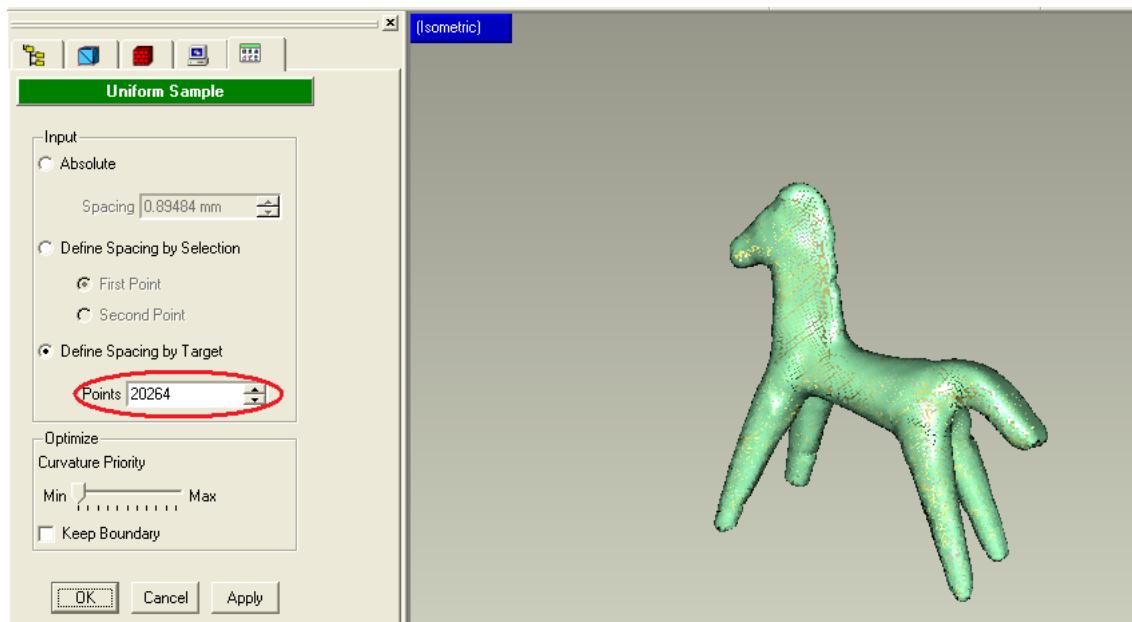
#### 3.1 Δεδομένα

Τα δεδομένα αποτελούνται από νέφη σημείων, τα οποία λήφθηκαν από τρισδιάστατο σαρωτή βάθους και αφορούν πολιτιστικά δεδομένα (αγγεία, αμφορείς, γλυπτά κ.α.) από το μουσείο της φιλοσοφικής σχολής Αθηνών. Στην εικόνα 20 φαίνεται η τοποθέτηση τριών μοντέλων στον τρισδιάστατο σαρωτή βάθους.



Εικόνα 20: Τοποθέτηση μοντέλων στον τρισδιάστατο σαρωτή βάθους (3D scanner).

Για περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Geomagic Studio. Με τη βοήθειά του μπορεί να επιλεχθεί το επιθυμητό πλήθος σημείων για το εκάστοτε μοντέλο (εικόνα 21). Πιο συγκεκριμένα στο user interface του Geomagic χρησιμοποιούνται τα εξής εργαλεία: *Points→Uniform Sample, Define Spacing by Target, Points: 20264 →OK*. Στη συνέχεια το μοντέλο αποθηκεύεται ως Vertex File, που περιέχει τις x,y,z συντεταγμένες του μοντέλου. Τέλος μετατρέπεται σε αρχείο Excel για μπορέσει να διαβαστεί από το MATLAB.



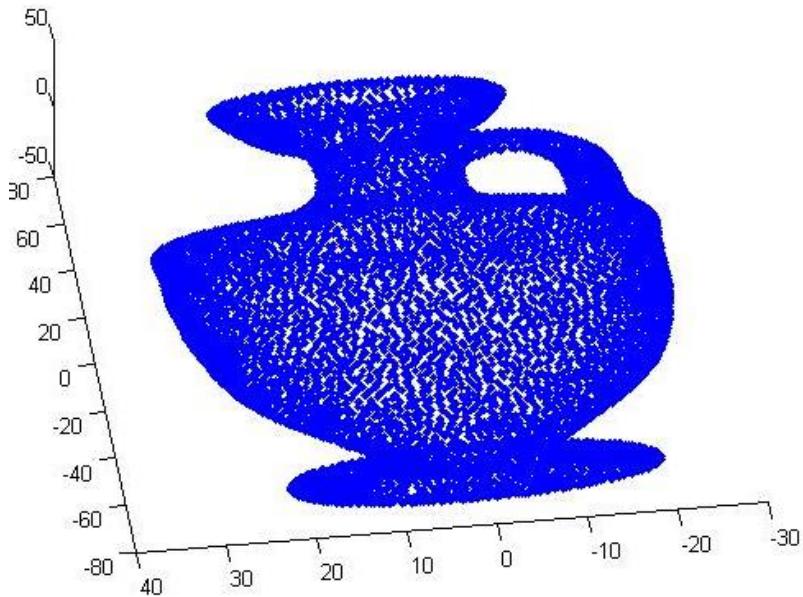
Εικόνα 21: Επιλογή πλήθους σημείων μέσω του Geomagic.

### 3.2 Ενσωμάτωση

Δημιουργήθηκε σε ένα M-file μια συνάρτηση **program** () η οποία καλεί τις παρακάτω 5 συναρτήσεις.

#### 3.2.1 Η συνάρτηση **clusters** – 1° βήμα

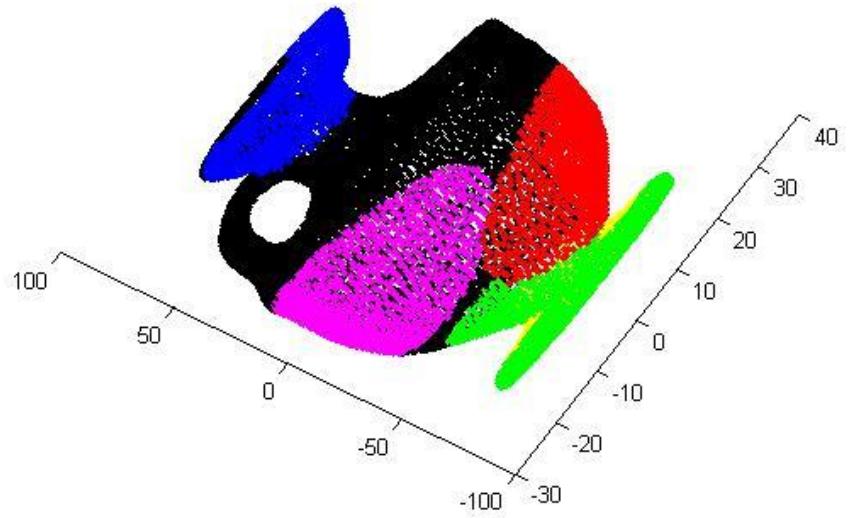
Η συνάρτηση **clusters** (k), παίρνει σαν είσοδο τη μεταβλητή k: μέγεθος του cluster (ομάδας νέφους σημείων) . Αρχικά διαβάζει από ένα αρχείο excel τις συντεταγμένες x,y,z του τρισδιάστατου μοντέλου – πίνακας *points* (εικόνα 22), ο πίνακας έχει διαστάσεις vx3, όπου v ο αριθμός των σημείων του εκάστοτε μοντέλου. Στη συνέχεια ορίζονται από το χρήστη πέντε κέντρα των clusters, αφού πέντε θα είναι και ομάδες των σημείων στις οποίες θα ενσωματωθεί το υδατόσημο. Ο αριθμός των clusters επιλέγεται από το χρήστη, αλλά κυμαίνεται συνήθως στα 5-6 ανάλογα με την πολυπλοκότητα του μοντέλου και τον αριθμό των σημείων του. Έπειτα δημιουργείται ένας μονοδιάστατος πίνακας με την ονομασία – *clust\_info*, στον οποίο η κάθε γραμμή θα αντιστοιχεί στο αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα *points*. Αρχικά όλα τα σημεία δεν ανήκουν σε κανένα cluster εκτός από τα κέντρα τους, οπότε αρχικοποιείται ο πίνακας *clust\_info* – διαστάσεων vx1 και τα κέντρα των clusters, τοποθετώντας τον αντίστοιχο αριθμό του cluster. Σημείωση: στο πρόγραμμα MATLAB, εμφανίστηκαν κάποια προβλήματα μνήμης, έτσι αντί για τη συνηθισμένη αρχικοποίηση με τη συνάρτηση zeros, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση sparse που «συμπιέζει» τα μηδενικά ενός πίνακα, καταναλώνοντας λιγότερη μνήμη.



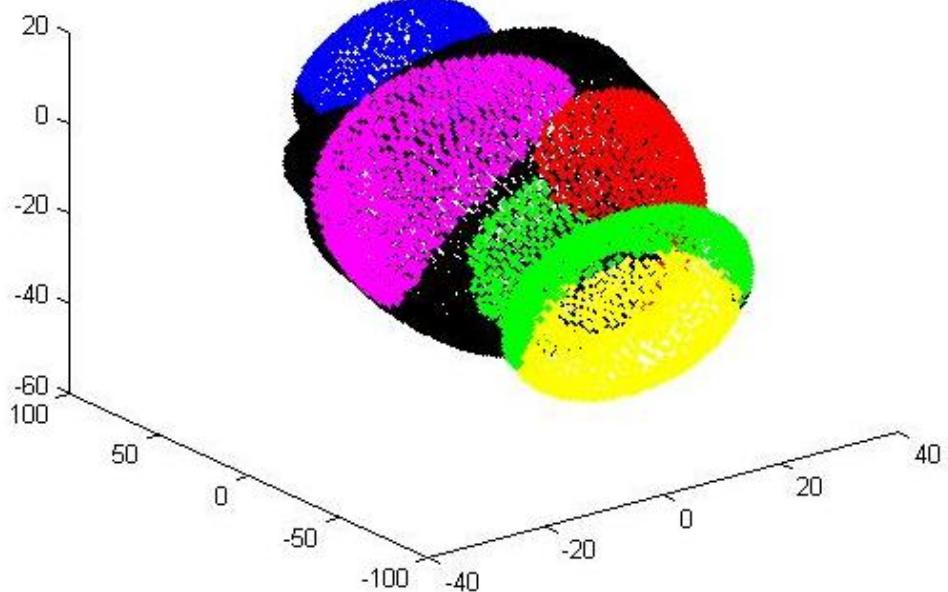
Εικόνα 22: Τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση του μοντέλου "Λήκυθος".

Στη συνέχεια για το  $1^{\circ}$  cluster, η συνάρτηση `find(clust_info == 0)`, βρίσκει στο μονοδιάστατο πίνακα `clust_info` ποιες εγγραφές δεν έχουν την τιμή 1, δηλαδή ποιες θέσεις – `points` δεν ανήκουν σε κανένα cluster και οι τιμές αυτές αποθηκεύονται στον πίνακα `array`. Έπειτα στον πίνακα `A` τοποθετούνται οι συντεταγμένες που δεν ανήκουν σε κάποιο cluster και στη μεταβλητή `size_of_A` αποθηκεύεται ο αριθμός των στοιχείων που δεν είναι ταξινομημένα ακόμα. Στον πίνακα `C` αποθηκεύονται όλες οι ευκλείδειες αποστάσεις ανά ζεύγη των στοιχείων του πίνακα `A`, από αυτές χρησιμοποιούνται οι πρώτες `size_of_A` αποστάσεις, για το λόγο ότι χρειάζονται οι αποστάσεις μεταξύ των κέντρων και όλων των αταξινόμητων σημείων του μοντέλου. Μετά βρίσκεται το σημείο που έχει τη μικρότερη απόσταση και η θέση του είναι στην πρώτη θέση του πίνακα `pos`. Τέλος τοποθετείται στο  $1^{\circ}$  cluster το σημείο, αδειάζει ο πίνακας `C` και επαναλαμβάνεται η διαδικασία αυτή για όλα τα σημεία, από 1 έως ν δηλαδή. Το ίδιο ισχύει και για τα υπόλοιπα τέσσερα clusters, όταν ολοκληρωθούν και οι πέντε επαναλήψεις των clusters στον πίνακα `clust_info` έχουν αποθηκευτεί : ποια σημεία ανήκουν σε ποιο cluster και τοποθετούνται σε πίνακες ξεχωριστά για να απεικονιστούν γραφικά.

Στις εικόνες 23-24 φαίνονται τα clusters, στο  $1^{\circ}$  cluster ανήκουν τα σημεία με κόκκινο χρώμα, στο  $2^{\circ}$  cluster τα σημεία με μπλε χρώμα, στο  $3^{\circ}$  cluster τα σημεία με κίτρινο χρώμα, στο  $4^{\circ}$  cluster τα σημεία με πράσινο χρώμα, στο  $5^{\circ}$  cluster τα σημεία με μωβ χρώμα και τέλος με μαύρο χρώμα απεικονίζονται τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα cluster. Η συνάρτηση `clusters` ( $k$ ) έχει σαν έξοδο τον πίνακα `points` που περιέχει τις συντεταγμένες  $x,y,z$  των σημείων, και τον πίνακα `clust_info` (εικόνα 25) που περιέχει την πληροφορία: ποια σημεία αντιστοιχούν σε ποιο cluster.



Εικόνα 23: Γραφική απεικόνιση των clusters με κόκκινο, μπλε, κίτρινο, πράσινο και μωβ χρώμα, με μαύρο χρώμα είναι τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα cluster .



Εικόνα 24: Το μοντέλο "Λήκυθος" μετά από περιστροφή.

(3962,1)	3
(3963,1)	2
(3964,1)	3
(3966,1)	3
(3967,1)	1
(3968,1)	1
(3970,1)	5
(3971,1)	2
(3972,1)	2
(3973,1)	2
(3974,1)	2
(3975,1)	1
(3976,1)	2
(3978,1)	4
(3980,1)	1
(3984,1)	4
(3985,1)	1
(3986,1)	3
(3988,1)	3



Εικόνα 25: Τμήμα του πίνακα `clust_info`, οι συντεταγμένες που αντιστοιχούν στη θέση 3970 στον πίνακα `points` ανήκουν στο 5<sup>ο</sup> cluster ενώ οι 3976 στο 2<sup>ο</sup> cluster.

### 3.2.2 Η συνάρτηση `meshing` – 2<sup>ο</sup> βήμα

Η συνάρτηση `meshing` (`N,points,clust_info`), παίρνει σαν είσοδο τον πίνακα `points` που περιέχει τις συντεταγμένες x,y,z των σημείων, τον πίνακα `clust_info` που δείχνει σε ποιο cluster ανήκει το κάθε σημείο και τη παράμετρο `N`, η οποία είναι ο μέσος αριθμός των κορυφών του μπαλώματος - patch  $M_i$  για κάθε cluster  $i$ . Για  $N=12$ , τα αποτελέσματα σε ότι αφορά την ανοχή του υδατόσημου σε επιθέσεις ήταν καλύτερα σε σχέση με τις τιμές  $N=24$  και  $N=36$ . Γίνεται η αρχικοποίηση του πίνακα `Mesh` διαστάσεων  $vxx$ , στον οποίο θα αποθηκεύεται η πληροφορία για το πλέγμα που θα δημιουργηθεί, δηλαδή ποια σημεία ενώνονται μεταξύ τους και ποια δεν ενώνονται. Επίσης αρχικοποιείται και ο πίνακας `r`, που θα περιέχει τη τιμή της ακτίνας  $r$  για κάθε cluster και έχει διαστάσεις  $5 \times 1$ , αφού πέντε είναι τα cluster που επιλέχθηκαν.

Στη συνέχεια με τη συνάρτηση `find` βρίσκονται ποια σημεία ανήκουν σε κάθε cluster, μετά υπολογίζεται και ταξινομείται κατά φθίνουσα σειρά η ευκλείδεια απόσταση για καθένα από αυτά. Έπειτα υπολογίζεται η μέση ακτίνα των σημείων που θα ενωθούν ανά cluster. Τέλος αν η ευκλείδεια απόσταση για κάθε cluster είναι μικρότερη από το  $r_i$ , τη μέση ακτίνα του, τότε αυτό σημαίνει ότι τα σημεία ενώνονται και η τιμή στον πίνακα `Mesh` θα είναι 1, αλλιώς θα παραμείνει 0. Επομένως η συνάρτηση `meshing` (`N,points,clust_info`), έχει σαν έξοδο τον πίνακα `Mesh`  $vxx$ , ο οποίος έχει τις τιμές 1 και 0, για τα σημεία που ενώνονται μεταξύ τους και γι' αυτά που δεν ενώνονται (εικόνα 26).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1
4	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
6	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
7	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
8	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Εικόνα 26: Απόσπασμα από τον πίνακα Mesh.

### 3.2.3 Η συνάρτηση analysis – 3<sup>o</sup> βήμα

Η συνάρτηση [analysis](#) (Mesh,points,clust\_info), παίρνει σαν είσοδο τον πίνακα *Mesh* που περιέχει πληροφορίες για το πλέγμα, δείχνει δηλαδή ποια σημεία ενώνονται μεταξύ τους και ποια όχι, τον πίνακα *points* που περιέχει τις συντεταγμένες x,y,z των σημείων και τον πίνακα *clust\_info* που δείχνει σε ποιο cluster ανήκει το κάθε σημείο. Σε αυτήν τη συνάρτηση υπολογίζεται αρχικά ένας Laplacian πίνακας διαστάσεων  $n \times n$  **K=D-A**. Όπου *D* είναι ένας διαγώνιος πίνακας με στοιχεία διαγωνίου  $D_{ii}=d_i$  που είναι ο βαθμός της κορυφής *i* και ο πίνακας *A* είναι ένας πίνακας που αφορά τη συνδεσιμότητα του πολυγωνικού πλέγματος. Επομένως ο πίνακας *A* είναι ο πίνακας *Mesh* που προέκυψε από το προηγούμενο βήμα και ο πίνακας *D* υπολογίζεται ως εξής: σε ένα πίνακα *C* αποθηκεύονται οι εγγραφές με την τιμή 1, δηλαδή ποια σημεία ενώνονται μεταξύ τους, σε μία μεταβλητή *num* αποθηκεύεται το μέγεθος του πίνακα *C* και έπειτα τοποθετείται σε κάθε διαγώνιο στοιχείο  $D_{ii}$  η τάξη της κορυφής *i*. Με τη συνάρτηση [eigs](#) προκύπτει η ανάλυση ιδιοτιμών (eigenvalue decomposition) του πίνακα **K** παράγει η ιδιοτιμές  $\lambda_i$  με ( $1 \leq i \leq n$ ) και η ιδιοδιανύσματα  $w_i$  με ( $1 \leq i \leq n$ ), με τη μέθοδο του Arnoldi. Στη συνέχεια διαιρώντας τον πίνακα *W* των ιδιοδιανυσμάτων με τη νόρμα του, προκύπτει η βάση του φασματικού πλέγματος *E*.

Όπως έχει προαναφερθεί, οι φασματικοί συντελεστές  $r_i=(r_{s,i}, r_{t,i}, r_{u,i})$  με ( $1 \leq i \leq n$ ) υπολογίζονται προβάλλοντας τις x,y,z συνιστώσες της κορυφής  $v_i=(x_i, y_i, z_i)$ , ( $1 \leq i \leq n$ ) στο  $e_i$  και οι  $s,t$  και  $u$  είναι οι φασματικοί άξονες που αντιστοιχούν στους x,y και z άξονες. Ο πίνακας *X* περιέχει τις συντεταγμένες x για κάθε cluster, αντίστοιχα ο πίνακας *Y* τις συντεταγμένες y και ο πίνακας *Z* για τις συντεταγμένες z. Με την προβολή του  $x_i$  στο  $e_i$  προκύπτει ο *S* άξονας, ο οποίος είναι ο φασματικός συντελεστής για τη συντεταγμένη x. Ομοίως με την προβολή του  $y_i$  στο  $e_i$  προκύπτει ο *T* άξονας, που είναι ο φασματικός συντελεστής για τη συντεταγμένη y και τέλος με την προβολή του  $z_i$  στο  $e_i$  προκύπτει ο *U* άξονας, ο οποίος είναι ο φασματικός συντελεστής για τη συντεταγμένη z. Οι τρεις συντελεστές *S,T,U* αποθηκεύονται σε ένα πίνακα *spectral*, οποίος είναι και η έξοδος της συνάρτησης [analysis](#).

### 3.2.4 Η συνάρτηση modul – 4° βήμα

Η συνάρτηση **modul** (spectral), παίρνει σαν είσοδο τον πίνακα **spectral** και δίνεται από το χρήστη η τιμή του **φ** που είναι το μέγιστο μήκος του «κουτιού» που περικλείει το μοντέλο και είναι ευθυγραμμισμένο με τους άξονές του (AABB) – axis-aligned bounding box, με τα εργαλεία του Geomagic βρίσκεται το μέγιστο αυτό μήκος. Ακόμη δίνεται το **β** που είναι η αναλογία του εύρους τροποποίησης (modulation amplitude ratio) και παίρνει συνήθως τις τιμές  $\beta=0,01$  και  $\beta=0,002$ . Το φ και το β χρειάζονται για να υπολογιστεί το εύρος της τροποποίησης  $\alpha=\varphi\cdot\beta$ .

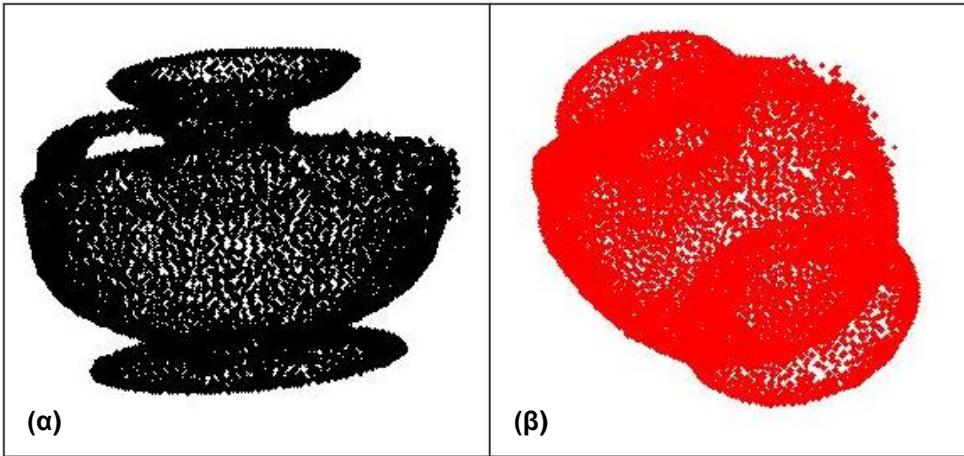
Τα δεδομένα που θα ενσωματωθούν στο πλέγμα έχουν τη μορφή ενός *bit* διανύσματος μεγέθους  $m$ ,  $\mathbf{a}=(a_1,a_2,\dots,a_m)$ , στο οποίο κάθε *bit* παίρνει τις τιμές {0,1}. Έτσι επιλέχθηκε ο πίνακας α διαστάσεων 1x48, που με βάση τη κωδικοποίηση ASCII σχηματίζεται η λέξη **CADLAB** (Computer Aided Design Laboratory) πίνακας 1.

Binary	Graphic
0100 0011	C
0100 0001	A
0100 0100	D
0100 1100	L
0100 0001	A
0100 0010	B

Πίνακας 1: Κωδικοποίηση ASCII

Στη συνέχεια κάθε *bit*  $a_j$  μετατρέπεται σε διπλότυπο βάση μιας τιμής  $c$  (chip rate),  $c=5$  ή  $c=10$  για να παράγει το διάνυσμα συμβόλου του υδατόσημου (watermark symbol vector)  $\mathbf{b}=(b_1,b_2,\dots,b_m)$ ,  $b_i \in \{0,1\}$  μήκους  $m \cdot c \leq n$ . Έπειτα το  $b$  μετατρέπεται σε ένα άλλο διάνυσμα  $\mathbf{b}'$ , που έχει τιμές -1 και 1, δηλαδή όπου πριν το  $b$  είχε την τιμή 0 τώρα το  $b'$  έχει την τιμή -1. Ακόμη δημιουργείται ένας τυχαίος πίνακας  $P$ ,  $p_i \in \{-1,1\}$  είναι ένας ψευδο-τυχαίος αριθμός συχνότητας (PRNS: pseudo-random number sequence), ο ίδιος ακριβώς πίνακας πρέπει να χρησιμοποιηθεί αργότερα για την εξαγωγή του υδατόσημου και γι' αυτό αποθηκεύεται σε ένα αρχείο. Έχοντας όλες αυτές τις μεταβλητές υπολογίζονται οι υδατοσημασμένοι φασματικοί συντελεστές

$\hat{r}_{s,i} = r_{s,i} + b_i \cdot p_i \cdot \alpha$ ,  $\hat{r}_{t,i} = r_{t,i} + b_i \cdot p_i \cdot \alpha$ ,  $\hat{r}_{u,i} = r_{u,i} + b_i \cdot p_i \cdot \alpha$  και αποθηκεύονται στον πίνακα **spectral\_modul** διαστάσεων  $vx3$ , που είναι και η έξοδος της συνάρτησης **modul**. Σημείωση: Στο τέλος της διαδικασίας παρατηρήθηκε ότι το τελικό υδατοσημασμένο μοντέλο παρουσίασε οπτικές διαφορές σε σχέση με το αρχικό μοντέλο όσο αυξανότανε το εύρος τροποποίησης  $\alpha$ , έτσι για καλύτερα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκε η μικρότερη τιμή του  $\beta=0,002$ .

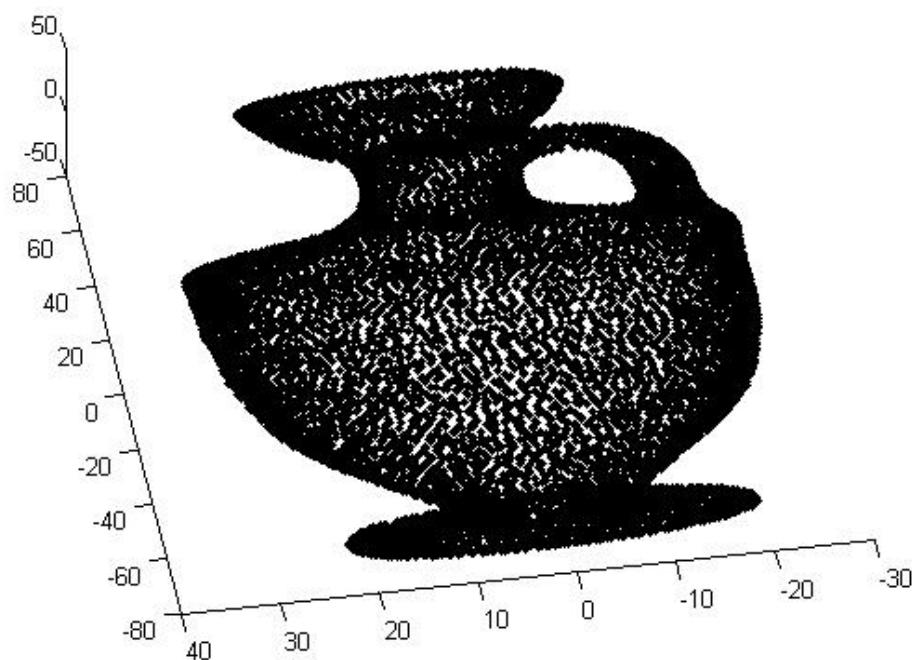


Εικόνα 27: (α)  $\beta=0,01$  και  $c=5$  , (β)  $\beta=0,01$  και  $c=10$ .

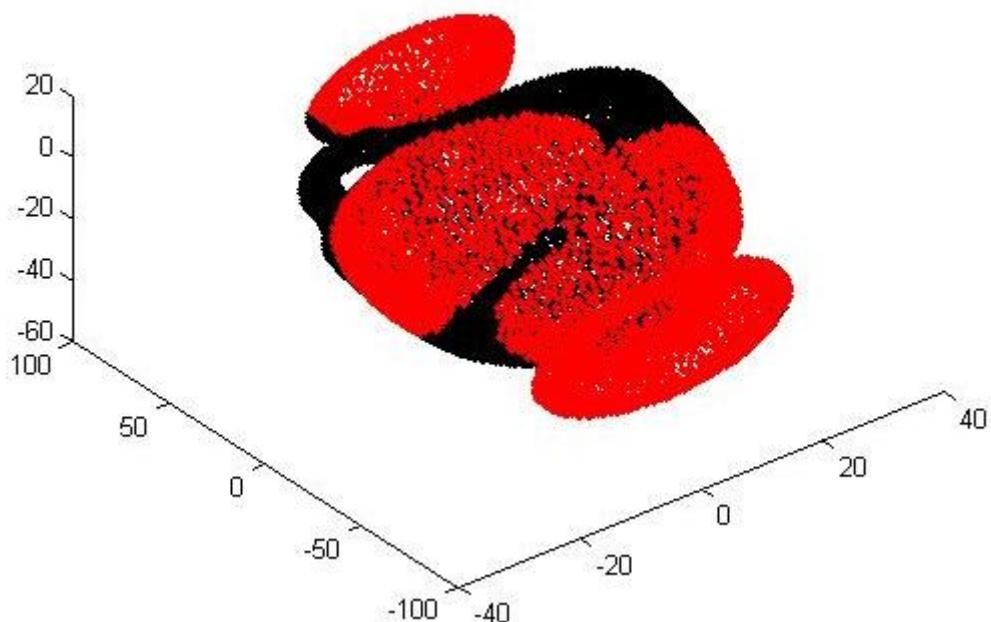
### 3.2.5 Η συνάρτηση mesh\_spectral – 5° και 6° βήμα

Η συνάρτηση `mesh_spectral` (`spectral_modul,clust_info,points`), έχει σαν είσοδο τον πίνακα `spectral_modul` που περιέχει τους υδατοσημασμένους φασματικούς συντελεστές (watermarked spectral coefficients), τον πίνακα `points` που περιέχει τις συντεταγμένες  $x,y,z$  των σημείων και τον πίνακα `clust_info` που δείχνει σε ποιο cluster ανήκει το κάθε σημείο. Αρχικοποιείται ο πίνακας που θα περιέχει τις υδατοσημασμένες συντεταγμένες διαστάσεων  $vx3$  - `watermarked_points`, αρχικά ποια σημεία δεν ανήκουν σε κανένα cluster και τα αποθηκεύει στον πίνακα `watermarked_points`. Έπειτα για κάθε cluster βρίσκει ποιας σημεία ανήκουν σε αυτό, φορτώνει τον πίνακα `E` που προέκυψε από το βήμα 3 και πολλαπλασιάζοντας τα ιδιοδιανύσματα  $e_i$  με τους υδατοσημασμένους φασματικούς συντελεστές

$\hat{r}_i = (\hat{r}_{s,i}, \hat{r}_{t,i}, \hat{r}_{u,i})$  και αθροίζοντας κατά  $i$ , προκύπτουν οι συντεταγμένες των κορυφών του υδατοσημασμένου πλέγματος  $M'$ ,  $X$ ,  $Y$  και  $Z$  που αποθηκεύονται στον πίνακα `watermarked_points` που θα είναι και η έξοδος της διαδικασίας ενσωμάτωσης. Στην εικόνα 28 φαίνεται γραφικά το υδατοσημασμένο μοντέλο νέφους σημείων και στην εικόνα 29 με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι περιοχές – clusters στις οποίες είναι ενσωματωμένο το υδατόσημο.



Εικόνα 28: Το τελικό υδατοσημασμένο μοντέλο



Εικόνα 29: Υδατοσημασμένο μοντέλο, με κόκκινο είναι οι περιοχές στις οποίες έχει ενσωματωθεί το υδατόσημο.

### 3.3 Εξαγωγή Υδατόσημου

Αντίστοιχα με τη διαδικασία ενσωμάτωσης δημιουργήθηκε σε ένα M-file μια συνάρτηση [extraction](#) () η οποία καλεί τις παρακάτω 6 συναρτήσεις.

#### 3.3.1 Η συνάρτηση `pca` – 1<sup>o</sup> βήμα

Η συνάρτηση [pca](#) () διαβάζει από αρχεία excel τις συντεταγμένες του αρχικού μοντέλου Xa και τις συντεταγμένες του υδατοσημασμένου μοντέλου (watermarked points) Xb. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός PCA (2.2.1) και προκύπτει ένας νέος πίνακας Yb που θα είναι και η έξοδος της συνάρτησης.

#### 3.3.2 Η συνάρτηση `resampling` – 2<sup>o</sup> βήμα

Η συνάρτηση [resampling](#) (Xa,Yb), έχει σαν είσοδο τον πίνακα Xa (πίνακας points που περιέχει τις συντεταγμένες του αρχικού μοντέλου ) ανάστροφο και τον πίνακα Yb που προέκυψε από τον προηγούμενο βήμα. Αρχικά βρίσκεται ένα σημείο  $r_i' \in P'$  του οποίου η τρισδιάστατη ευκλείδεια απόσταση από ένα άλλο σημείο  $r_j \in P$  είναι η μικρότερη από όλα τα σημεία  $r' \in P'$ . Στη συνέχεια υπολογίζονται και αποθηκεύονται σε ένα πίνακα D οι ευκλείδειες αποστάσεις του σημείου  $r_i$  από όλα τα σημεία του αρχικού μοντέλου P. Ταξινομούνται και ορίζεται το κατώφλι (threshold) που είναι το  $\frac{1}{2}$  της ελάχιστης απόστασης του σημείου  $r_j$  από όλα τα σημεία του μοντέλου αναφοράς P. Στον πίνακα E υπολογίζονται οι ευκλείδειες αποστάσεις του σημείου  $r_i'$  από όλα τα σημεία του μοντέλου P'. Έπειτα υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ του σημείου  $r_j$  και  $r_i'$  και αποθηκεύεται στη μεταβλητή k, αν το k έχει μικρότερη τιμή από το κατώφλι, τότε αντικαθίστανται οι συντεταγμένες του  $r_j$  με αυτές του  $r_i'$ . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα σημεία  $r_j$  του μοντέλου αναφοράς P. Σαν έξοδο η συνάρτηση [resampling](#) έχει το resampled μοντέλο P''.

#### 3.3.3 Clustering – 3<sup>o</sup> βήμα

Χρησιμοποιείται η ίδια ομαδοποίηση του νέφους σημείων, όπως πραγματοποιήθηκε στη διαδικασία ενσωμάτωσης (3.1.1) με τη διαφορά ότι ο πίνακας points είναι ο πίνακας P'' (resampled point set) που προέκυψε από το προηγούμενο βήμα. Τρέχει επομένως στο command window η συνάρτηση [clusters](#) διαβάζοντας το νέο πίνακα συντεταγμένων και μέσα στη συνάρτηση [extraction](#) καλείται το αρχείο [clust\\_info.mat](#), το οποίο περιέχει τις πληροφορίες για το ποια σημεία αντιστοιχούν σε ποιο cluster.

#### 3.3.4 Meshing – 4<sup>o</sup> βήμα

Ομοίως και για τη συνάρτηση [meshing](#), η συνδεσιμότητα των σημείων του μοντέλου αναφοράς P μεταφέρεται στο resampled point set P'', μέσα στη συνάρτηση [extraction](#) καλείται το αρχείο [Mesh.mat](#), πίνακα που περιέχει τις πληροφορίες για τη συνδεσιμότητα του πλέγματος M''.

#### 3.3.5 Mesh-Spectral Analysis – 5<sup>o</sup> βήμα

Εφόσον τα πλέγματα M και M'' έχουν τον ίδιο αριθμό κορυφών, η ανάλυση ιδιοτιμών (eigenvalue decomposition) είναι ίδια όπως στην ενσωμάτωση και τα αποτελέσματά της εφαρμόζονται στο υδατοσημασμένο πλέγμα M''. Άρα απλά καλείται το αρχείο [spectral.mat](#) που δημιουργήθηκε στη διαδικασία ενσωμάτωσης.

### 3.3.6 Η συνάρτηση demodul – 6<sup>ο</sup> βήμα

Η συνάρτηση `demodul` που θα έχει σαν έξοδο το υδατόσημο `w`, μπορεί να γραφτεί με δύο τρόπους 1) είτε με βάση τον τύπο 12 (2.2.5), 2) είτε ακολουθώντας την ακριβώς αντίστροφη διαδικασία της συνάρτησης `modul`. Το υδατόσημο πρέπει να είναι ακριβώς το ίδιο όπως αυτό εισάχθηκε στη διαδικασία ενσωμάτωσης. Έτσι από το `w` που θα προκύψει αφαιρείται ο πίνακας `a` που περιέχει τη πληροφορία βάση κωδικοποίησης ASCII και ο πίνακας `z` ( $z=w-a$ ) πρέπει να είναι μηδενικός (εικόνα 30).

```
>> extraction

ans =
Empty matrix: 1-by-0          ←

w =
Columns 1 through 21

    0    1    0    0    0    0    1    1    0    1    0    0    0    0    0    0    1    0    1    0

Columns 22 through 42

    1    0    0    0    1    0    0    1    1    0    0    0    1    0    0    0    0    0    0    1

Columns 43 through 48

    0    0    0    0    1    0
```

Εικόνα 30: Command window - αποτελέσματα της συνάρτησης `extraction`

## 4. Αποτελέσματα

### 4.1 Ανθεκτικότητα στις Επιθέσεις

Εξετάστηκε η ανθεκτικότητα του υδατόσημου σε διάφορες επιθέσεις με τις εξής παραμέτρους: υδατόσημο 48 bits, αναλογία εύρους τροποποίησης (amplitude ratio)  $\beta=0,002$ , παράγοντας διπλότυπου (duplication factor)  $c=10$  και  $N_n=12$  που είναι ο μέσος αριθμός των κορυφών κάθε μπαλώματος για κάθε cluster.

#### 4.1.1 Περιστροφή και Αλλαγή μεγέθους

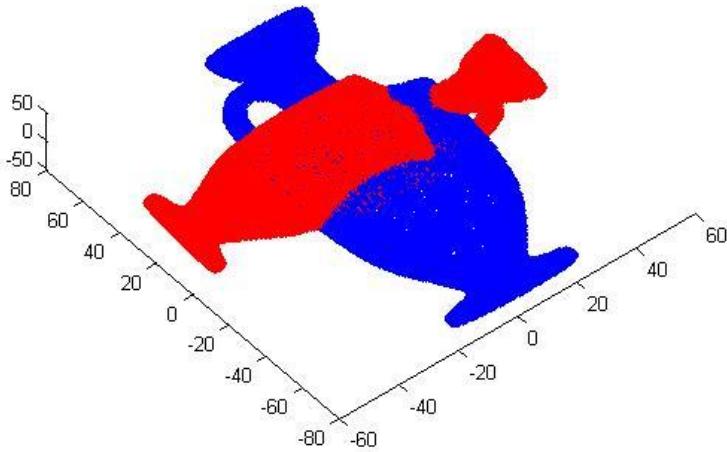
Το μοντέλο «Λήκυθος» (εικόνα 31) περιστράφηκε κατά  $90^\circ$  στον άξονα x, κατά  $45^\circ$  στον άξονα y και κατά  $180^\circ$  στον άξονα z. Η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την περιστροφή είναι η συνάρτηση **rotation** () και ο πίνακας περιστροφής είναι ο R (1):

$$R = [x, y, z] \cdot \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a & 0 \\ \sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos a \cdot \cos \gamma - \sin a \cdot \cos \beta \cdot \sin \gamma & -\cos a \cdot \sin \gamma - \sin a \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma & \sin \beta \cdot \sin a \\ \sin a \cdot \cos \gamma + \cos a \cdot \cos \beta \cdot \sin \gamma & -\sin a \cdot \sin \gamma + \cos a \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma & -\sin \beta \cdot \cos a \\ \sin \beta \cdot \sin \gamma & \sin \beta \cdot \cos \gamma & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

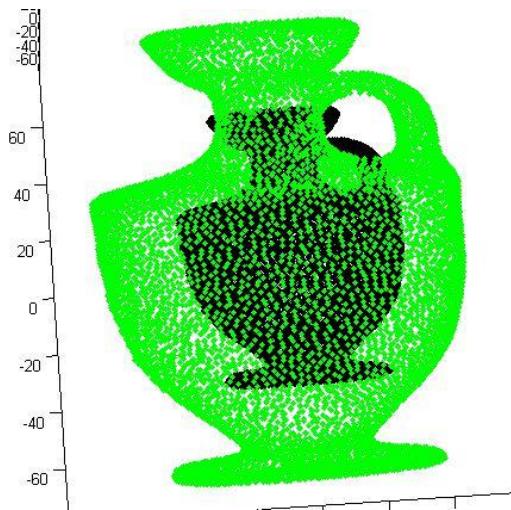
Με  $a=90^\circ(1,571 \text{ rad})$ ,  $\beta=45^\circ (0,7854 \text{ rad})$  και  $\gamma=180^\circ(3,1416 \text{ rad})$

Στην εικόνα 31 φαίνεται το υδατοσημασμένο μοντέλο με μπλε χρώμα και το περιστραμμένο μοντέλο κατά x,y,z, με κόκκινο χρώμα.



**Εικόνα 31: Με κόκκινο χρώμα φαίνεται το μοντέλο μετά την περιστροφή**

Για την αλλαγή μεγέθους (scale) απλά χρειάστηκε να πολλαπλασιαστεί ο πίνακας που περιέχει τις συντεταγμένες του υδατοσημασμένου μοντέλου με την επιθυμητή τιμή. Για παράδειγμα το μοντέλο σμικρύνθηκε κατά 0,6 (εικόνα 32), με μαύρο χρώμα φαίνεται το μοντέλο μετά την αλλαγή μεγέθους και με πράσινο χρώμα το υδατοσημασμένο μοντέλο.

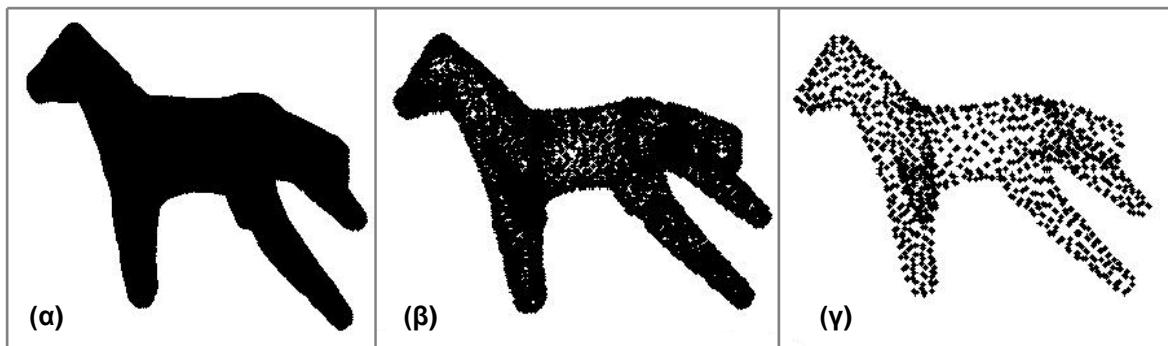


**Εικόνα 32: Το μοντέλο πριν (πράσινο χρώμα) και μετά (μαύρο χρώμα) την αλλαγή μεγέθους.**

Δεν παρατηρήθηκε φθορά στο υδατόσημο ούτε κατά την περιστροφή, ούτε κατά την αλλαγή μεγέθους του μοντέλου. Βάση βιβλιογραφίας αναφέρεται ότι σε μερικά συμμετρικά μοντέλα το υδατόσημο χάνεται μετά από αυτές τις επιθέσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί σε ορισμένες περιπτώσεις η εγγραφή των σημείων σε συμμετρικά μοντέλο αποτυχαίνει. Στα .. μοντέλα που ενσωματώθηκε το υδατόσημο σε αυτήν την εργασία δεν παρατηρήθηκε αλλαγή του και μετά τις επιθέσεις αυτές.

#### 4.1.2 Μείωση των σημείων

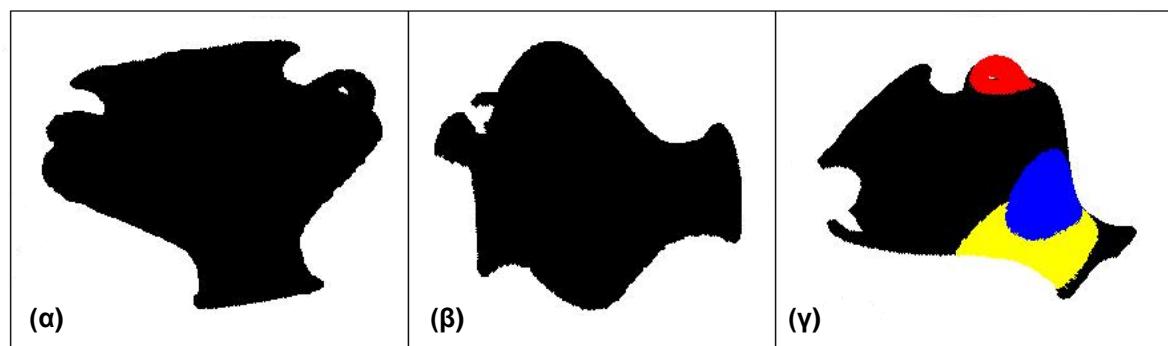
Στο μοντέλο Ιππάριο τα σημεία μειώθηκαν από 40.134 σε 5.002 και έπειτα σε 1.002 σημεία (εικόνα 33 (α),(β),(γ) ), χωρίς να υπάρξει απώλεια του υδατόσημου. Όμως όταν εφαρμόστηκε η ίδια μείωση σημείων συνδυαζόμενη με περιστροφή, το υδατόσημο αλλοιώθηκε. Η αλλοίωση αυτή οφείλεται σε μη ακριβή καταχώρηση του υδατοσημασμένου μοντέλου νέφους σημείων σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς (registration failure).



Εικόνα 33: Μείωση σημείων από 40.134 (α) σε 5.002 (β) και 1.002 (γ) σημεία.

#### 4.1.3 Cropping – Αποκοπή τμήματος του μοντέλου

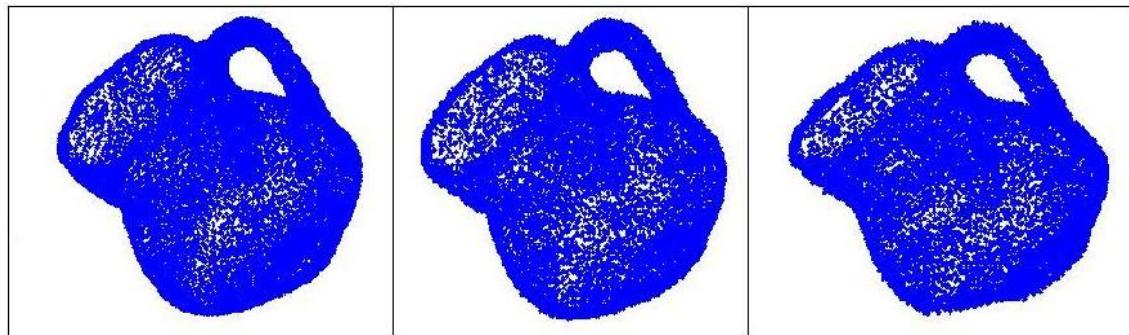
Το υδατόσημο μπορεί να εξαχθεί χωρίς απώλειες μετά από συγκεκριμένη (όχι αυθαίρετη) αποκοπή τμήματος του μοντέλου εικόνα 34 (β),(γ). Αυτό συμβαίνει γιατί το υδατόσημο ενσωματώθηκε πέντε φόρες (αριθμός των clusters: 5) στο μοντέλο και τουλάχιστον ένα εκ των clusters δεν αποκόπηκε τελείως. Αυτό φαίνεται στη εικόνα 34 (γ), με μπλε χρώμα απεικονίζεται το cluster που δεν επηρεάστηκε από την αποκοπή (cropping).



Εικόνα 34: (α) Το αρχικό μοντέλο. (β) Το μοντέλο μετά την αποκοπή τμήματός του. (γ) Το μοντέλο μετά την αποκοπή τμήματός του με εμφάνιση των clusters που διατηρήθηκαν.

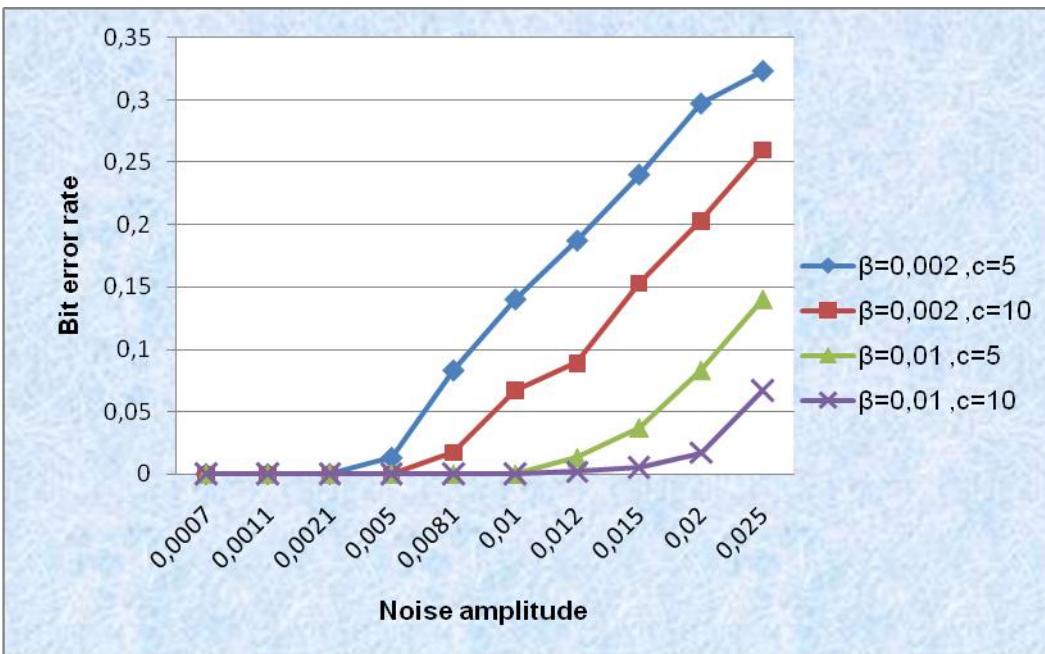
#### 4.1.4 Προσθήκη θορύβου

Προστέθηκε τυχαίος θόρυβος στο 0.5% του εύρους του μεγίστου μήκους του «ΚΟΥΤΙΟΥ» που περικλείει το μοντέλο και είναι ευθυγραμμισμένο με τους άξονές του (AABB) – axis-aligned bounding box. Παρά την εμφανή αλλοίωση μορφής του μοντέλου (εικόνα 35 (β),(γ)), το υδατόσημο εξήχθηκε χωρίς αλλοιώσεις. Όμως για επιπλέον αύξηση του θορύβου στο 0.8% το υδατόσημο χάθηκε μερικώς.



Εικόνα 35: α) Το μοντέλο χωρίς θόρυβο. (β) Το μοντέλο έπειτα από προσθήκη θορύβου 0.5%. (γ) Το μοντέλο έπειτα από προσθήκη θορύβου 0.8%.

Το γράφημα που απεικονίζεται στη συνέχεια (εικόνα 36) δείχνει τη σχέση μεταξύ του εύρος του πρόσθετου θορύβου (additive noise amplitude), του εύρους τροποποίησης του υδατόσημου  $\beta$  (watermark modulation amplitude), της τιμής  $c$  (chip rate) και του σφάλματος του bit που προκύπτει από την εξαγωγή του υδατόσημου. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο «Λήκυθος» με σύνολο σημείων 10.006, και ενσωματώθηκε υδατόσημο 48 bit χωρίς ομαδοποίηση. Οι τιμές που φαίνονται στο γράφημα είναι οι μέσες τιμές 20 επαναλήψεων του αλγόριθμου. Παρατηρείται ότι η τιμή του σφάλματος αυξάνεται βαθμιαία, όσο αυξάνεται ο πρόσθετος θόρυβος. Όσο όμως αυξάνεται η τιμή του  $\beta$  ή η τιμή του  $c$  ή και τα δύο.



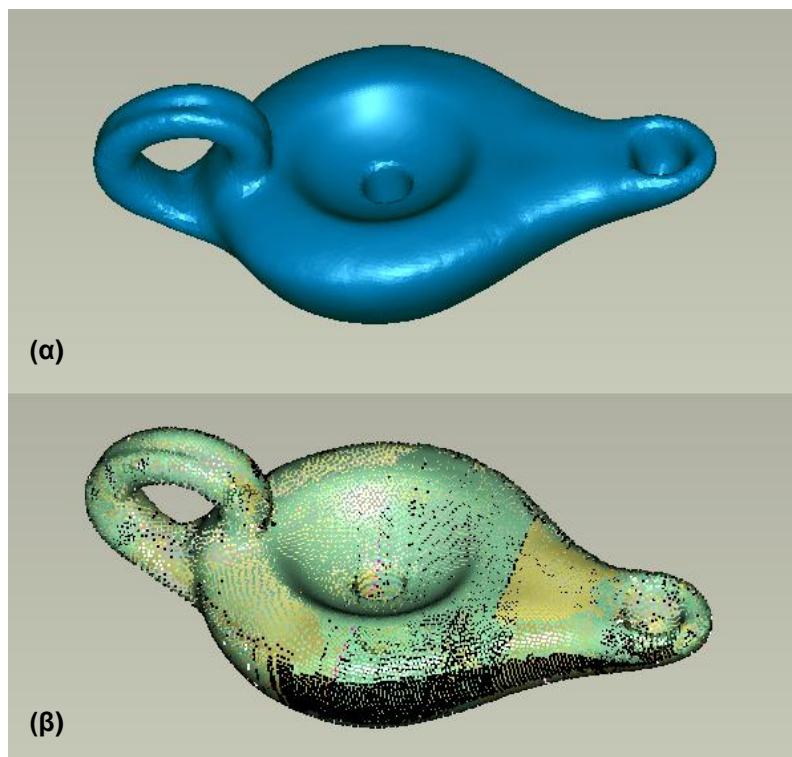
Εικόνα 36: Σχέση σφάλματος bit και προσθήκης θορύβου για διάφορες τιμές του εύρους τροποποίησης του υδατόσημου  $\beta$  και της τιμής  $c$  (chip rate).

Από το σύνολο των παραπάνω επιθέσεων συμπεραίνουμε ότι η μέθοδος υδατοσήμανσης που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζει ορισμένη ανθεκτικότητα στην περιστροφή και αλλαγή μεγέθους, στην προσθήκη θορύβου, στη μείωση του νέφους σημείων και στην αποκοπή τμήματος του μοντέλου. Το υδατόσημο όμως μπορεί να αλλοιωθεί εάν υπάρξουν συνδυαζόμενες επιθέσεις, όπως για παράδειγμα η μείωση σημείων με περιστροφή ή αλλαγή μεγέθους. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν επιτυγχάνεται ακριβή καταχώρηση του υδατοσημασμένου μοντέλου νέφους σημείων σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς (registration failure).

## 4.2 Ενσωμάτωση και Ανίχνευση του υδατόσημου σε διάφορα μοντέλα

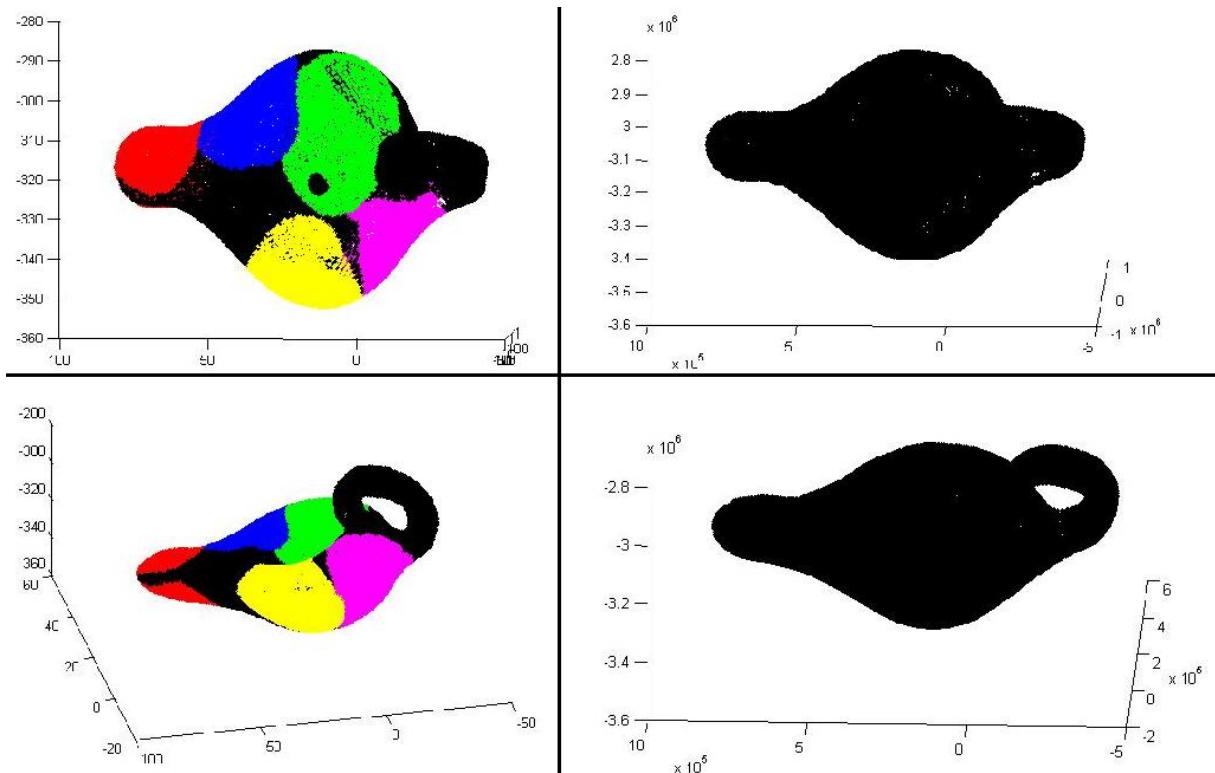
### 4.2.1 Λυχνάρι

Το μοντέλο «Λυχνάρι» αποτελείται από 18.834 σημεία (εικόνα 37 (β)), το υδατόσημο ενσωματώθηκε και εξάχθηκε με επιτυχία σε χρόνο 5' 53" και 1' 37" αντίστοιχα. Το μέγεθος του κάθε cluster που χρησιμοποιήθηκε είναι 2.000 σημεία.



Εικόνα 37: (α) Το μοντέλο «Λυχνάρι» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων - 18.834 points.

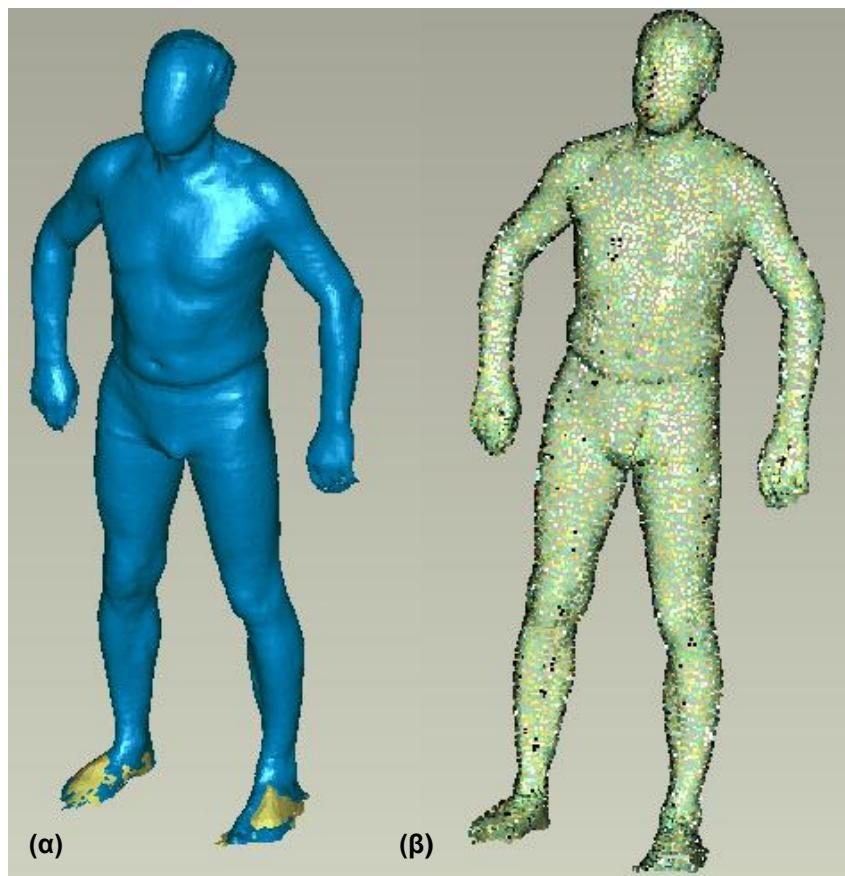
Στο αριστερό μέρος της εικόνας 38 φαίνεται η γραφική απεικόνιση των clusters του μοντέλου με κόκκινο, μπλε, κίτρινο, πράσινο και μωβ χρώμα, με μαύρο χρώμα είναι τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα cluster .Στο δεξί μέρος της εικόνας φαίνεται το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου.



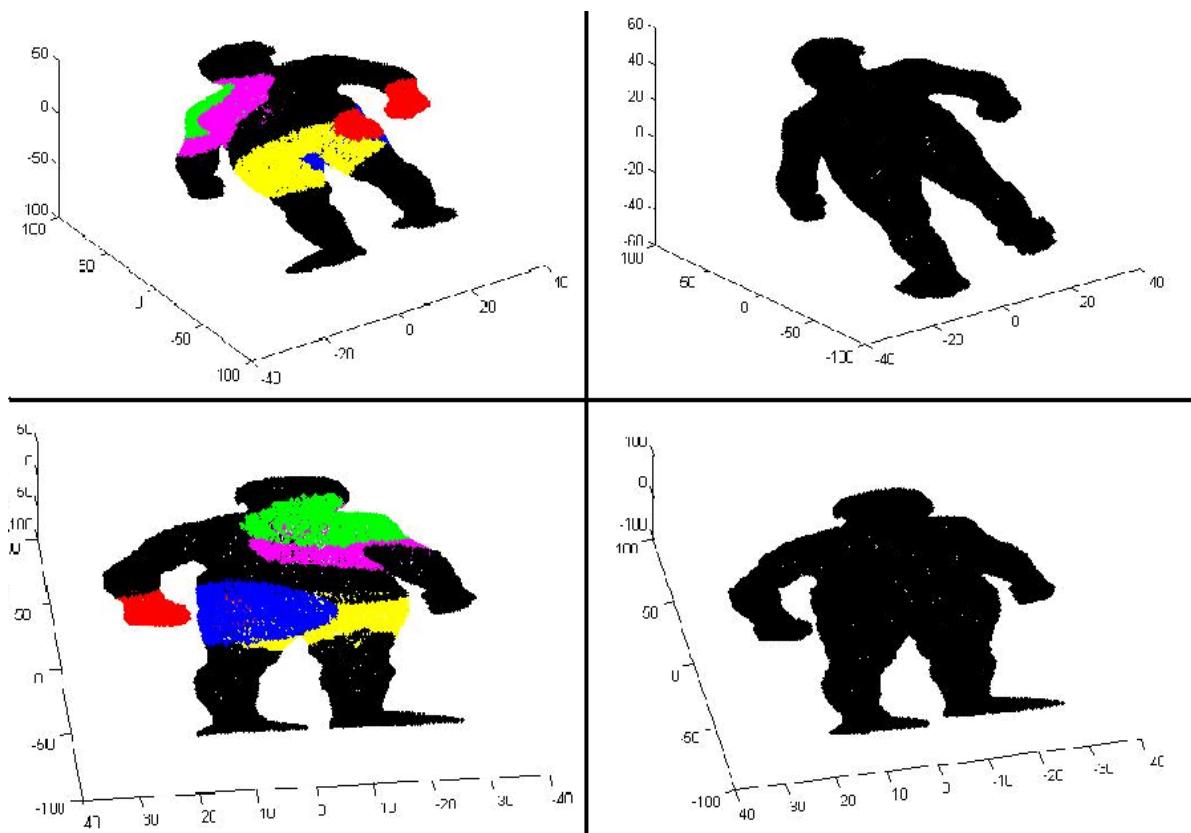
**Εικόνα 38:** (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 2.000 σημεία. (Δεξιά) Υδατοσημασμένο μοντέλο (Watermarked model).

#### 4.2.2 Ανδρικό Ανθρώπινο Σώμα

Το μοντέλο «male» αποτελείται από 16.659 σημεία (εικόνα 39 (β)), η διαδικασία της ενσωμάτωσης του υδατόσημου διήρκησε 3 λεπτά και 44 δευτερόλεπτα ενώ η διαδικασία εξαγωγής του 30 δευτερόλεπτα , 1.200 σημεία είναι το μέγεθος του κάθε cluster που χρησιμοποιήθηκε. Στην εικόνα 40 (αριστερά) φαίνεται η γραφική απεικόνιση των clusters του μοντέλου με κόκκινο, μπλε, κίτρινο, πράσινο και μωβ χρώμα, με μαύρο χρώμα είναι τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα cluster .Στο δεξί μέρος της εικόνας φαίνεται το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου.



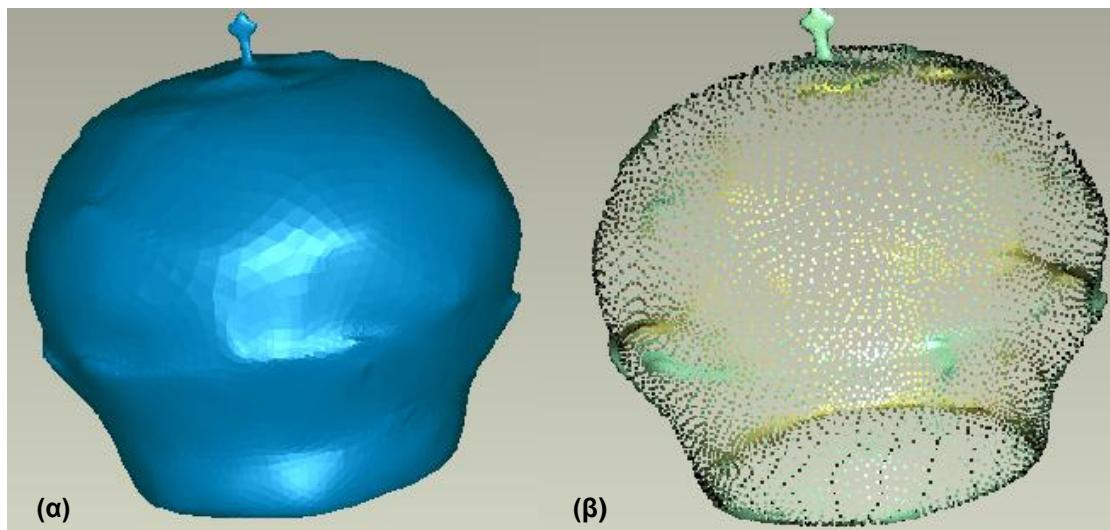
Εικόνα 39: (α) Το ανδρικό μοντέλο σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 16.659 points.



Εικόνα 40: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 1.200 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model).

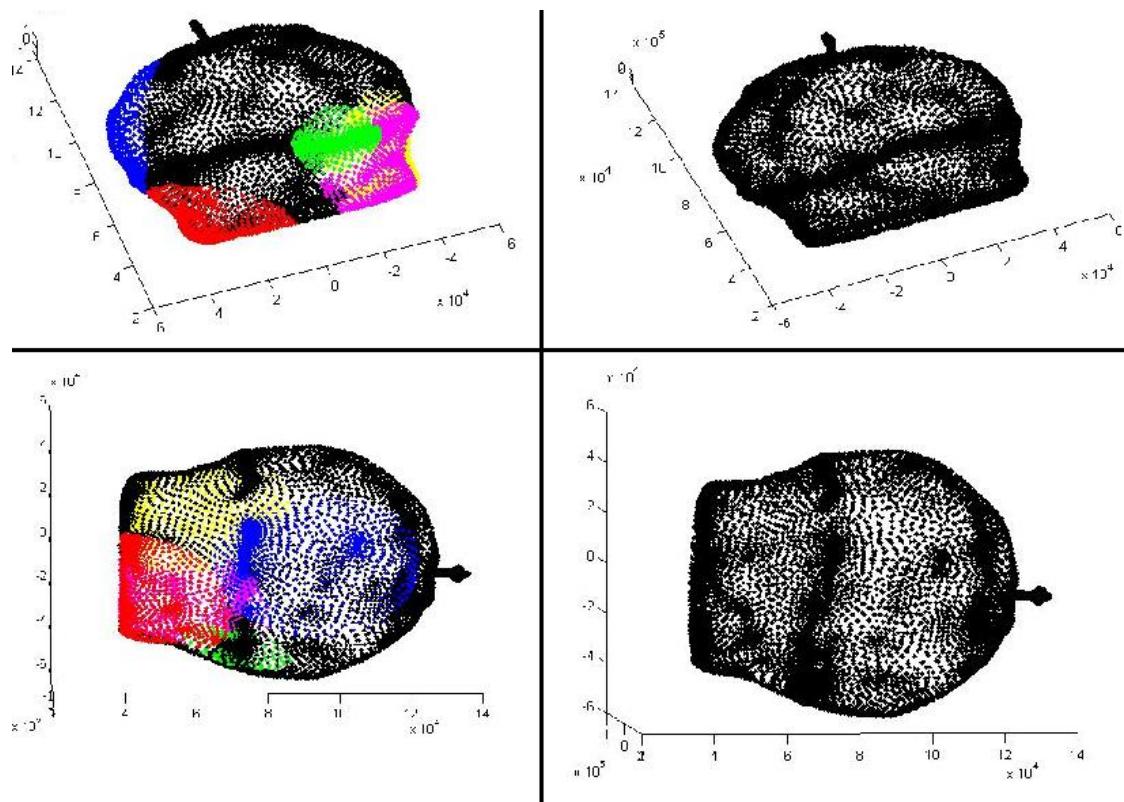
#### 4.2.3 Μήτρα

Το μοντέλο «Μήτρα» αποτελείται από 10.402 σημεία (εικόνα 41 (β)), το υδατόσημο ενσωματώθηκε και εξάχθηκε με επιτυχία σε χρόνο 45'' και 13'' αντίστοιχα. Το μέγεθος του κάθε cluster που χρησιμοποιήθηκε είναι 800 σημεία.



Εικόνα 41: (α) Το μοντέλο «Μήτρα» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 10.402 points.

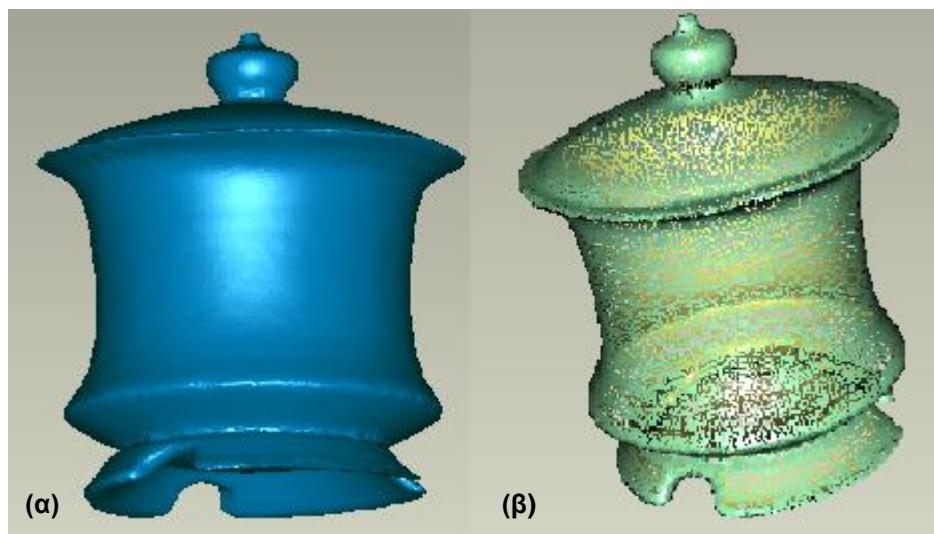
Στο αριστερό μέρος της εικόνας 42 φαίνεται η γραφική απεικόνιση των clusters του μοντέλου «Μήτρα» με κόκκινο, μπλε, κίτρινο, πράσινο και μωβ χρώμα, με μαύρο χρώμα είναι τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα cluster .Στο δεξιό μέρος της εικόνας φαίνεται το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου.



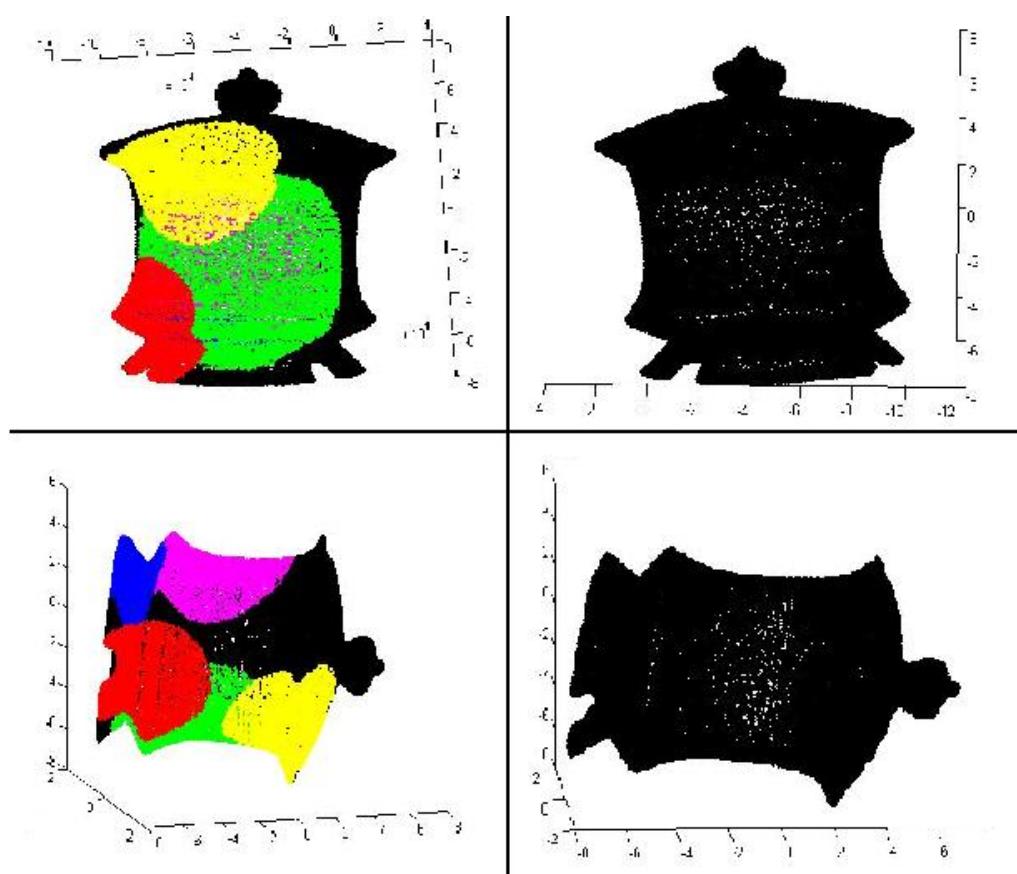
**Εικόνα 42: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 800 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model).**

#### 4.2.4 Πυξίδα

Το μοντέλο «Πυξίδα» αποτελείται από 32.502 σημεία (εικόνα 43 (β)), η διαδικασία της ενσωμάτωσης του υδατόσημου διήρκησε 14' 44'' και η διαδικασία εξαγωγής του 3' 48'', 2.000 σημεία είναι το μέγεθος του κάθε cluster που χρησιμοποιήθηκε. Στην εικόνα 44 (αριστερά) φαίνεται η γραφική απεικόνιση των clusters του μοντέλου με κόκκινο, μπλε, κίτρινο, πράσινο και μωβ χρώμα, με μαύρο χρώμα είναι τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα cluster, δεξιά φαίνεται το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου.



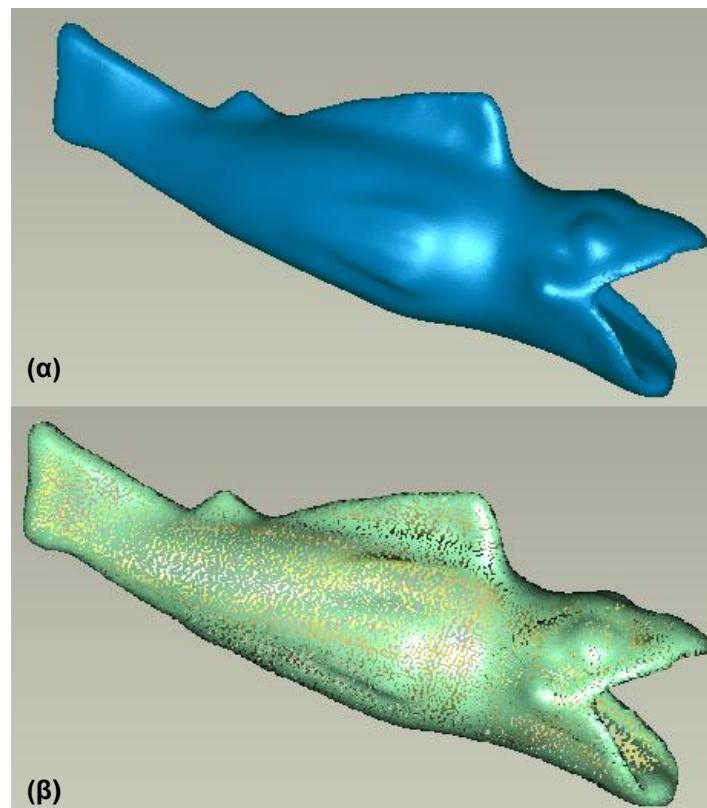
Εικόνα 43: (α) Το μοντέλο «Πυξίδα» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 35.502 points.



Εικόνα 44: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 2.000 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model).

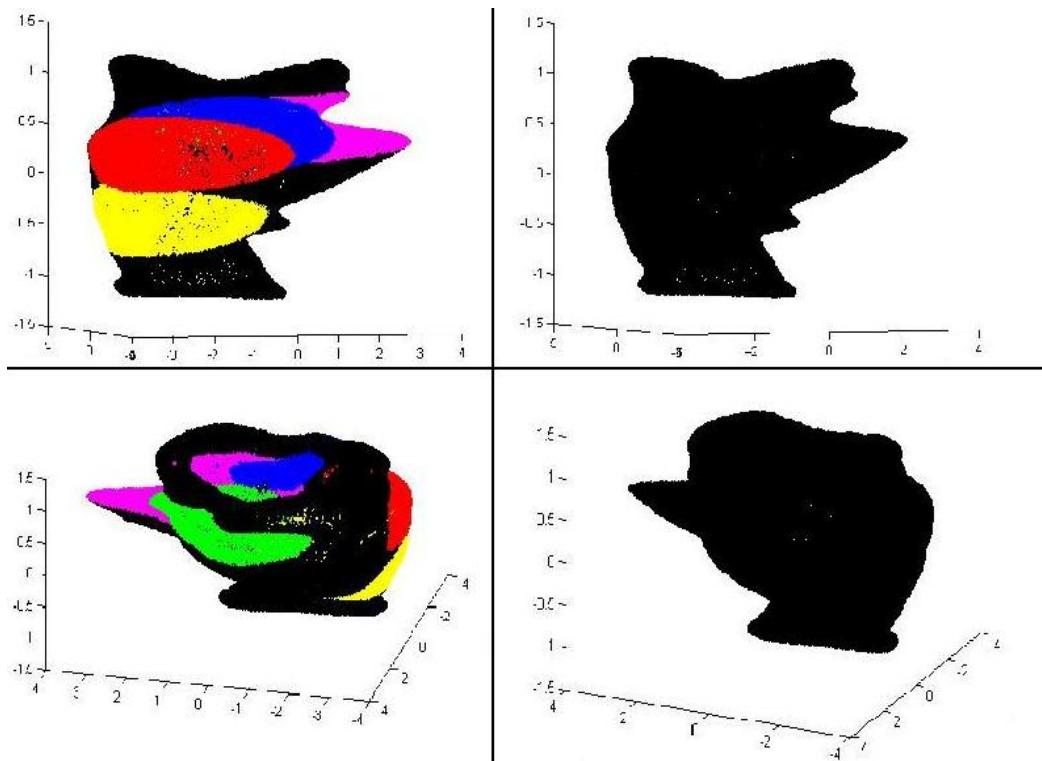
#### 4.2.5 Ψάρι

Το μοντέλο «Ψάρι» αποτελείται και αυτό από 32.502 σημεία (εικόνα 45 (β)), το μέγεθος του κάθε cluster που χρησιμοποιήθηκε είναι 2.500 σημεία. Οι χρόνοι ενσωμάτωσης του υδατόσημου και ανίχνευσής του, είναι 9' 34" και 3' 14" αντίστοιχα.



Εικόνα 45: (α) Το μοντέλο «Ψάρι» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 32.502 points.

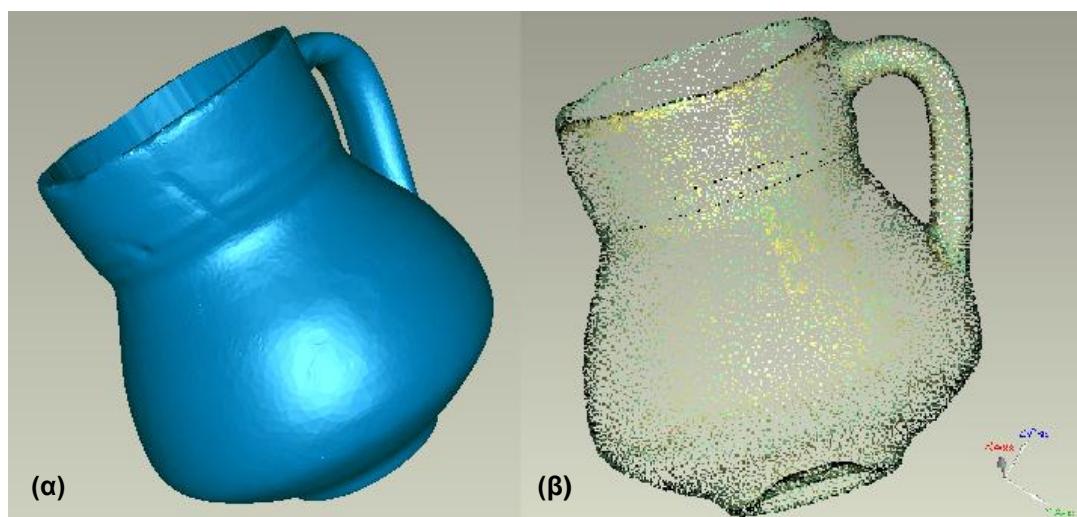
Στην εικόνα 46 (δεξιά) φαίνεται το υδατοσημασμένο μοντέλο, στο αριστερό μέρος της εικόνας 46 φαίνεται η γραφική απεικόνιση των clusters του μοντέλου με κόκκινο, μπλε, κίτρινο, πράσινο και μωβ χρώμα, με μαύρο χρώμα είναι τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα cluster.



**Εικόνα 46:** (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 2.500 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model).

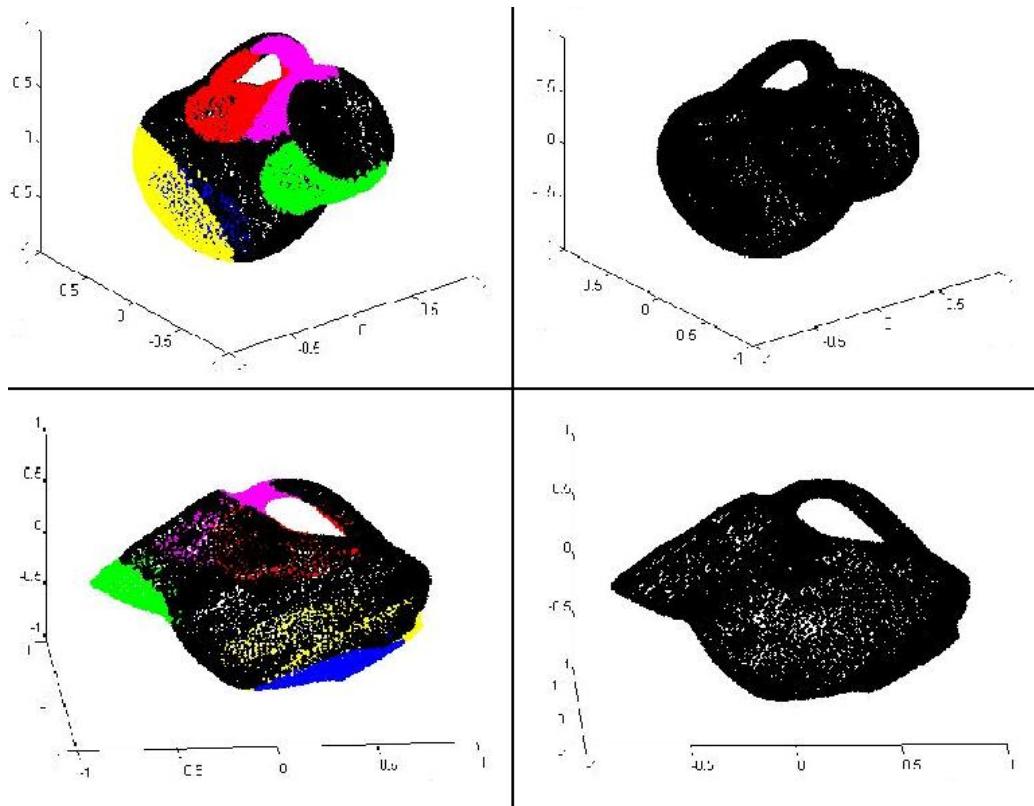
#### 4.2.6 Βάζο

Το μοντέλο «Βάζο» αποτελείται από 14.998 σημεία (εικόνα 47 (β)), το υδατόσημο ενσωματώθηκε και εξάχθηκε με επιτυχία σε χρόνο 2' 09" και 46" αντίστοιχα. Το μέγεθος του κάθε cluster που χρησιμοποιήθηκε είναι 1.500 σημεία.



**Εικόνα 47:** (α) Το μοντέλο «Βάζο» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 14.998 points.

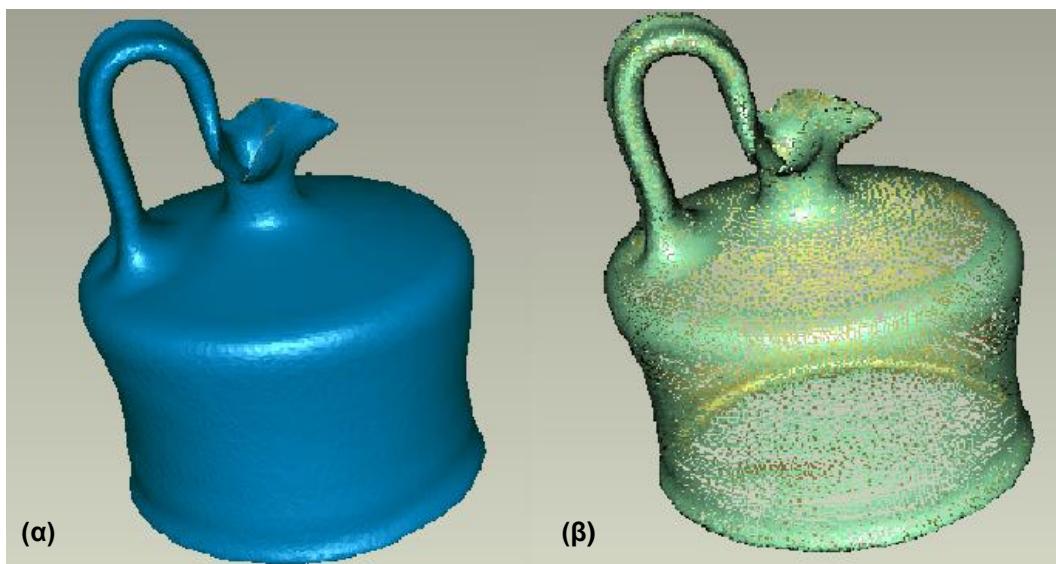
Ακολουθεί η εικόνα 48, όπου στο αριστερό μέρος της φαίνεται η γραφική απεικόνιση των clusters του μοντέλου «Βάζο» με κόκκινο, μπλε, κίτρινο, πράσινο και μωβ χρώμα, με μαύρο χρώμα είναι τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα cluster .Στο δεξί μέρος της εικόνας φαίνεται το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου.



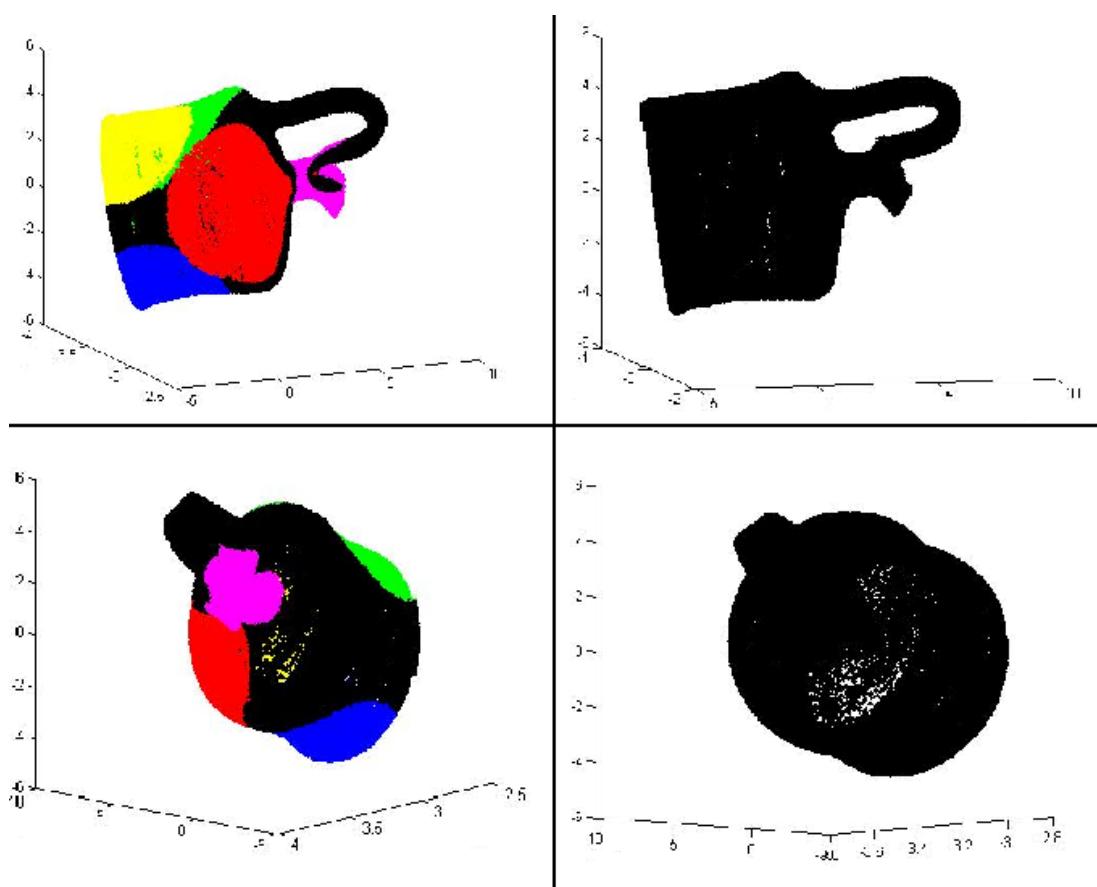
**Εικόνα 48:** (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 1.500 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model).

#### 4.2.7 Οινοχόος

Το μοντέλο «Οινοχόος» αποτελείται από 32.500 σημεία (εικόνα 49 (β)), η διαδικασία της ενσωμάτωσης του υδατόσημου διήρκησε 15' 28'' και η διαδικασία εξαγωγής του 8' 22'', 3.500 σημεία είναι το μέγεθος του κάθε cluster που χρησιμοποιήθηκε. Παρακάτω, στην εικόνα 50 (αριστερά) φαίνεται η γραφική απεικόνιση των clusters του μοντέλου με κόκκινο, μπλε, κίτρινο, πράσινο και μωβ χρώμα, με μαύρο χρώμα είναι τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα cluster, δεξιά φαίνεται το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου.



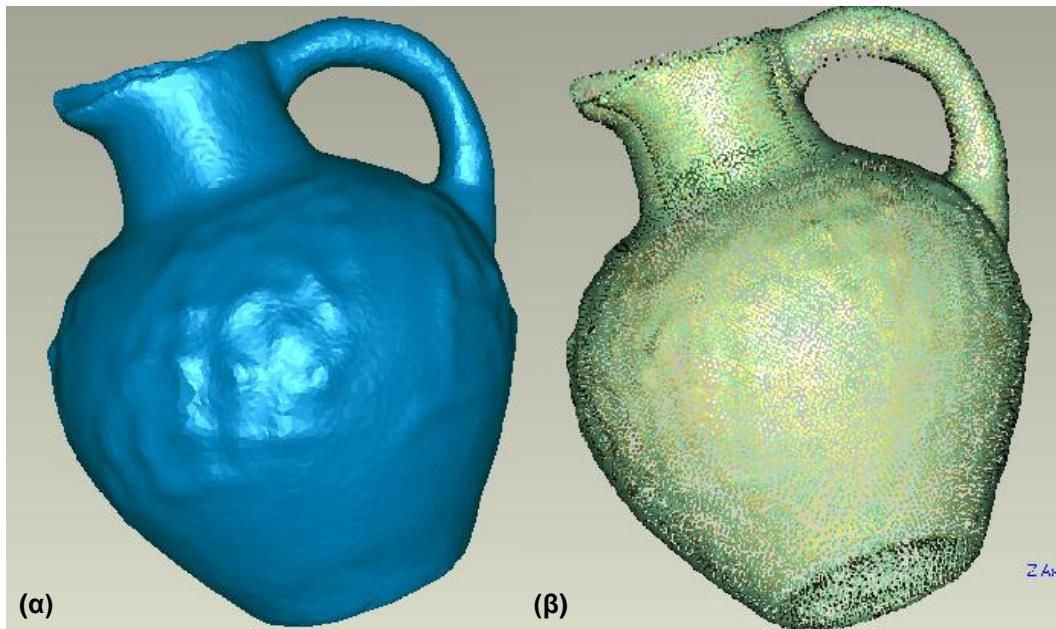
Εικόνα 49: (α) Το μοντέλο «Οινοχόος» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 32.500 points.



Εικόνα 50: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 3.500 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model).

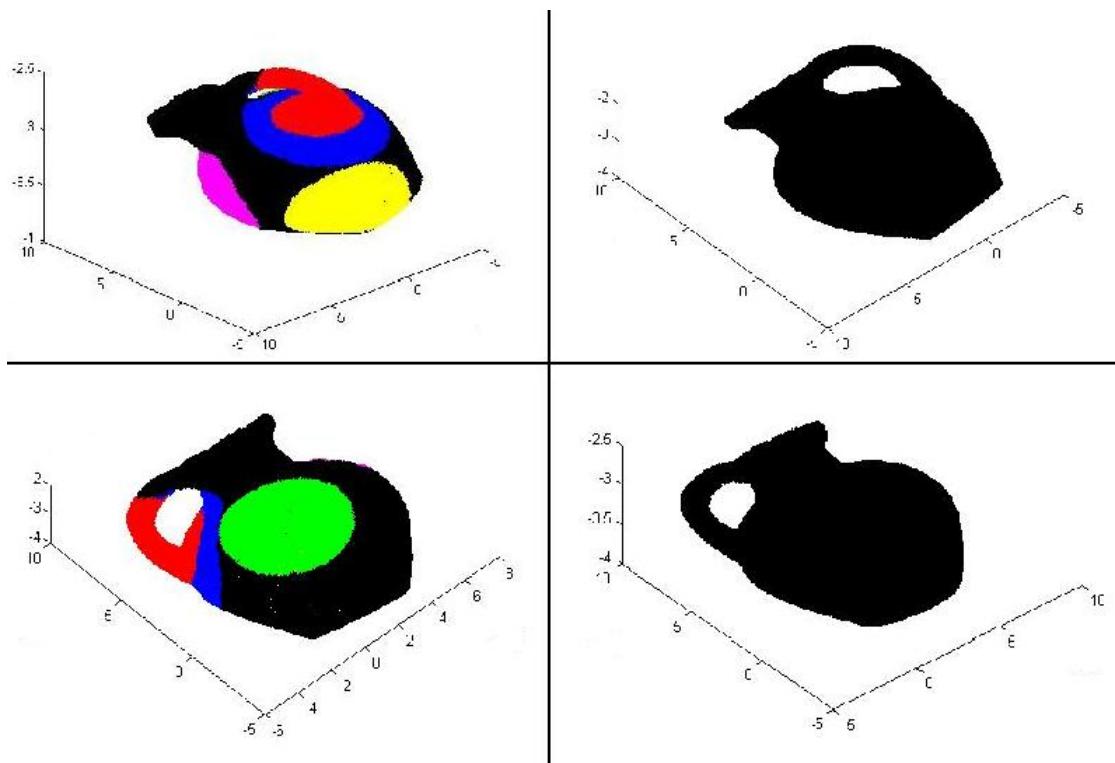
#### 4.2.8 Προχοίσκος

Το μοντέλο «Προχοίσκος» αποτελείται και αυτό από 32.500 σημεία (εικόνα 51 (β)), το μέγεθος του κάθε cluster που χρησιμοποιήθηκε είναι 2.800 σημεία. Οι χρόνοι ενσωμάτωσης του υδατόσημου και ανίχνευσής του, είναι 10' 31" και 4' 11" αντίστοιχα.



Εικόνα 51: (α) Το μοντέλο «Προχοίσκος» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 32.500 points.

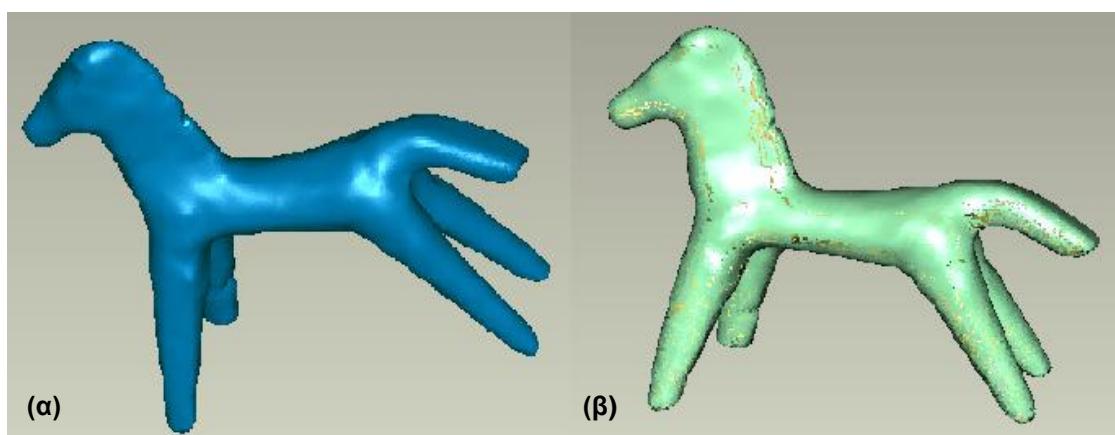
Στην εικόνα 52 (δεξιά) φαίνεται το υδατοσημασμένο μοντέλο, στο αριστερό μέρος της εικόνας 52 φαίνεται η γραφική απεικόνιση των clusters του μοντέλου με κόκκινο, μπλε, κίτρινο, πράσινο και μωβ χρώμα, με μαύρο χρώμα είναι τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα cluster.



**Εικόνα 52:** (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 2.800 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model).

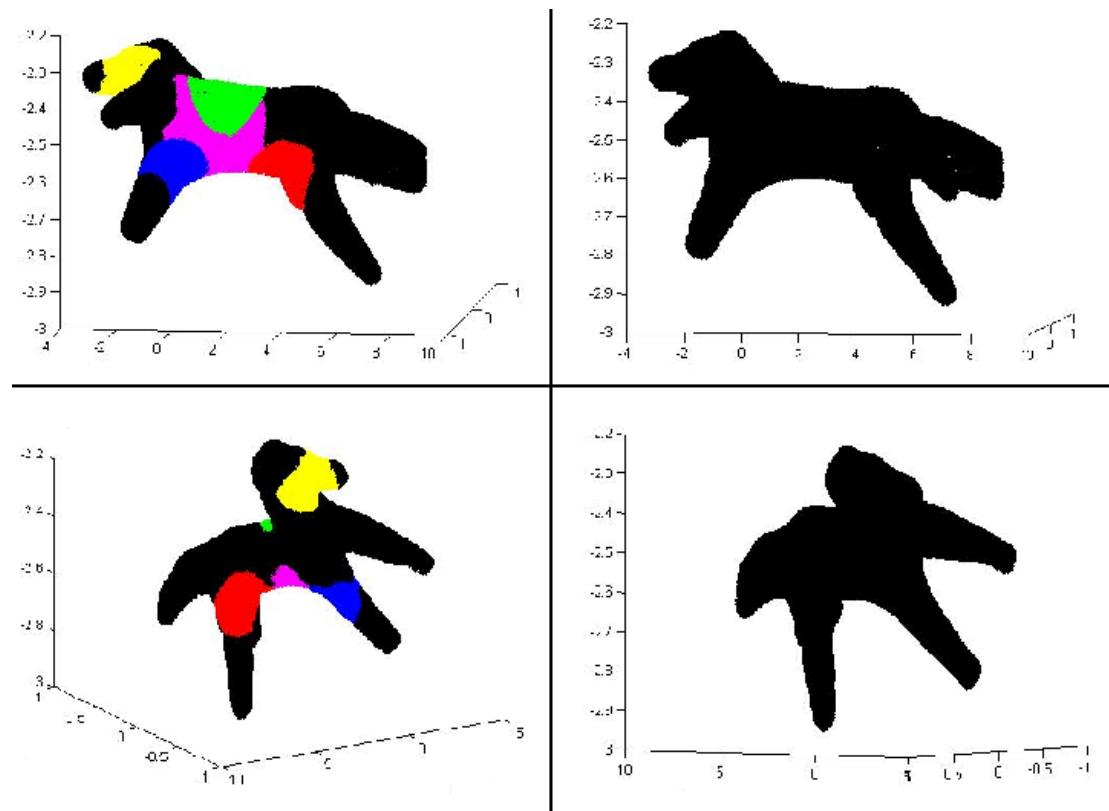
#### 4.2.9 Ιππάριο

Το μοντέλο «Ιππάριο» αποτελείται από 40.134 σημεία (εικόνα 53 (β)), η διαδικασία της ενσωμάτωσης του υδατόσημου διήρκησε 12 λεπτά και 22 δευτερόλεπτα ενώ η διαδικασία εξαγωγής του 2 λεπτά και 3 δευτερόλεπτα , 2.000 σημεία είναι το μέγεθος του κάθε cluster που χρησιμοποιήθηκε.



**Εικόνα 53:** (α) Το μοντέλο «Ιππάριο» σε wrapped μορφή. (β) Νέφος σημείων – 40.134 points.

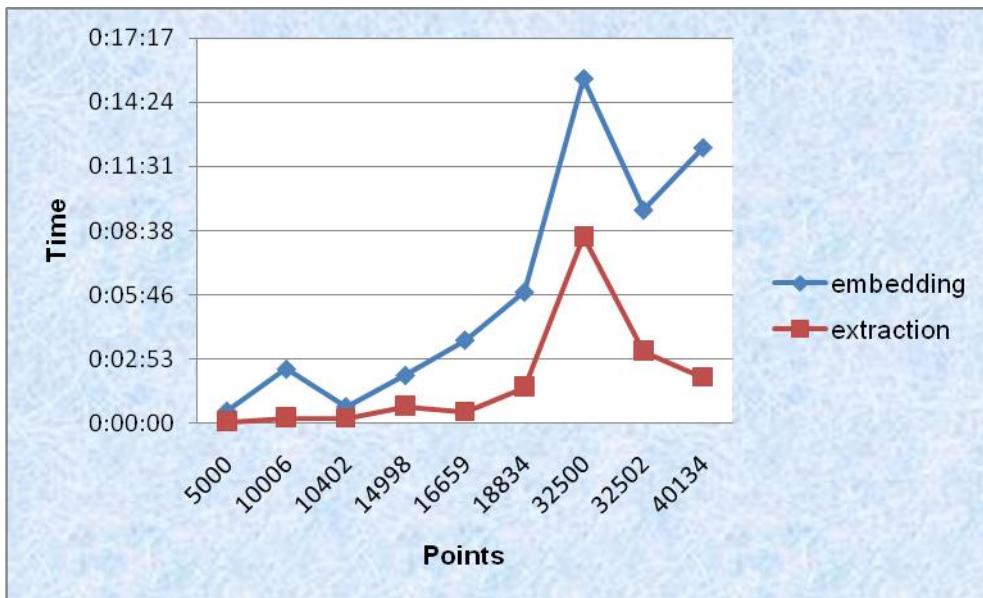
Ακολουθεί η εικόνα 54, όπου στο αριστερό μέρος της φαίνεται η γραφική απεικόνιση των clusters του μοντέλου «Ιππάριο» με κόκκινο, μπλε, κίτρινο, πράσινο και μωβ χρώμα, με μαύρο χρώμα είναι τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα cluster .Στο δεξί μέρος της εικόνας φαίνεται το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου.



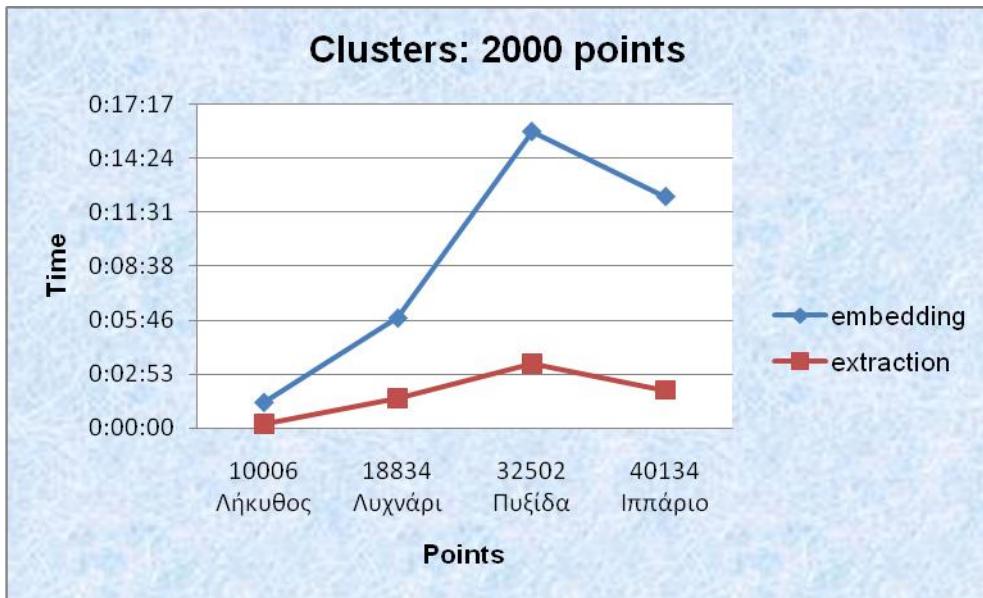
**Εικόνα 54: (Αριστερά) Με χρώματα (εκτός του μαύρου) φαίνονται τα clusters του μοντέλου, το μέγεθος του κάθε cluster είναι 2.000 σημεία. (Δεξιά) Το μοντέλο μετά την ενσωμάτωση του υδατόσημου (Watermarked model).**

#### 4.3 Χρόνοι ενσωμάτωσης και ανίχνευσης υδατόσημου

Στο παρακάτω γράφημα (εικόνα 55) φαίνονται οι χρόνοι τρεξίματος ενσωμάτωσης (embedding) και ανίχνευσης (extraction) του υδατόσημου εννέα μοντέλων. Τα μοντέλα ποικίλουν ως προς τον αριθμό των σημείων τους και ως προς το μέγεθος των clusters τους. Στη συνέχεια (εικόνα 56) φαίνονται οι χρόνοι τρεξίματος τεσσάρων μοντέλων με διαφορετικό αριθμό σημείων, αλλά με ίδιο αριθμό clusters 2.000 σημείων.

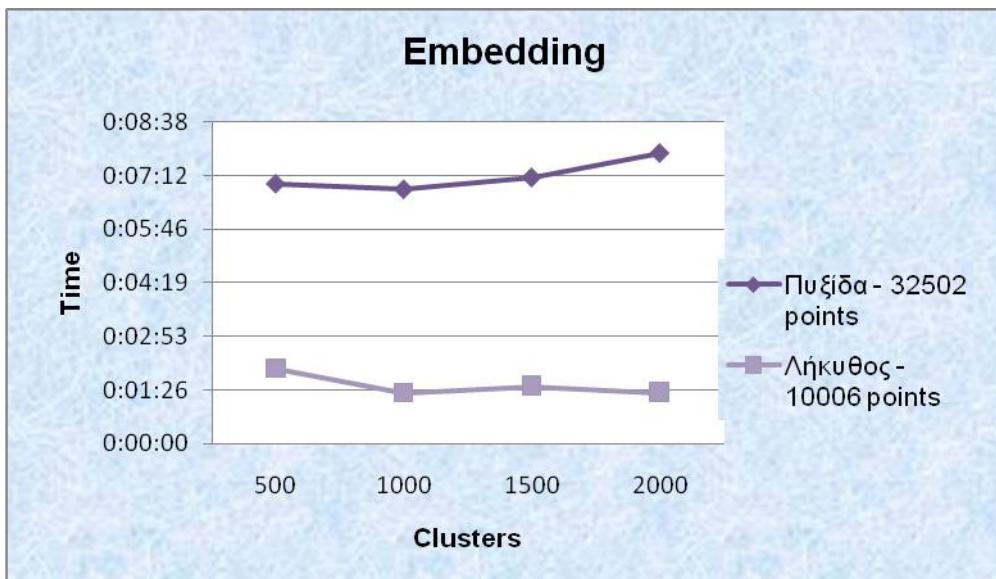


Εικόνα 55: Χρόνοι ενσωμάτωσης και ανίχνευσης του υδατόσημου για διαφορετικά μοντέλα.

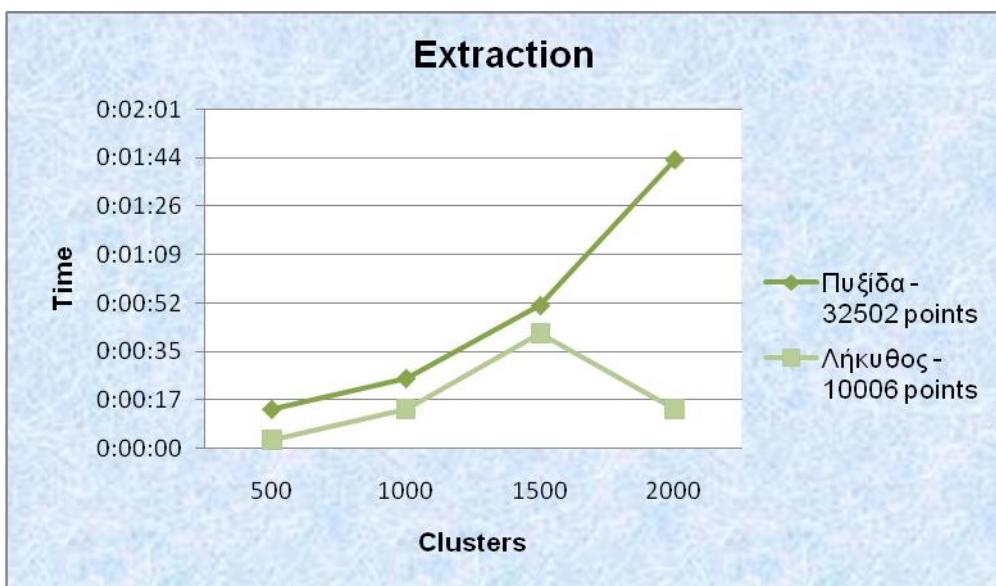


Εικόνα 56: Χρόνοι ενσωμάτωσης και ανίχνευσης του υδατόσημου για διαφορετικά μοντέλα με ίδιο αριθμό clusters 2.000 σημεία.

Παρατηρείται ότι οι χρόνοι τρεξίματος δεν είναι πάντα ανάλογοι με το πλήθος των σημείων και το μέγεθος των clusters τους, για παράδειγμα το μοντέλο «Πυξίδα» με 32.502 σημεία χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να ενσωματώσει και να ανιχνεύσει αντίστοιχα το υδατόσημο, από το μοντέλο «Ιππάριο» 40.134 σημείων έχοντας τον ίδιο αριθμό clusters 2.000 σημεία. Επομένως συμβάλλουν και άλλοι παράγοντες όπως: η γεωμετρία του μοντέλου, η ακρίβεια σάρωσης των σημείων του μοντέλου, τα σημεία που ορίστηκαν σαν κέντρα του κάθε cluster και η απόσταση που έχουν μεταξύ τους. Ακολουθούν γραφήματα (εικόνες 57, 58) που δείχνουν τους χρόνους μοντέλων με ίδιο αριθμό σημείων αυτή τη φορά (32.502 και 10.006 σημεία), αλλά διαφορετικά clusters.



Εικόνα 57: Χρόνοι ενσωμάτωσης του υδατόσημου με ίδιο αριθμό σημείων και διάφορα clusters.



Εικόνα 58: Χρόνοι ανίχνευσης του υδατόσημου με ίδιο αριθμό σημείων και διάφορα clusters.

## 5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάστηκε ένας αλγόριθμος που ενσωματώνει και ανιχνεύει στη συνέχεια το υδατόσημο σε τρισδιάστατα νέφη σημείων. Η ενσωμάτωση του υδατόσημου εφαρμόζεται σε ομάδες νέφους σημείων (clusters). Η ομαδοποίηση εξυπηρετεί πολλούς σκοπούς:

Πρώτον, ελαττώνει τα υπολογιστικά κόστη για το βήμα της φασματικής ανάλυσης πλέγματος. Δεύτερον, με την ενσωμάτωση πολλών αντιγράφων του ίδιου μηνύματος σε ομάδες, το υδατόσημο σαν σύνολο παρουσιάζει μεγαλύτερη ανοχή σε επιθέσεις. Ακόμη η ομαδοποίηση βοηθάει το χρήστη στο να καθορίσει εκείνος που θέλει να εφαρμοστεί το υδατόσημο, για παράδειγμα σε ένα συγκεκριμένο σημείο του μοντέλου. Ο αλγόριθμός ομαδοποίησης (clustering) είναι σχετικά απλός και βασίζεται στην ευκλείδεια γειτονία.

Τα υδατοσημασμένα μοντέλα δεν παρουσίασαν οπτικές διαφορές με τα αρχικά μοντέλα, ικανοποιώντας την απαίτηση της μη αντιληπτικότητας του υδατόσημου. Επίσης το υδατόσημο ανιχνεύτηκε επιτυχώς, ικανοποιώντας την απαίτηση της αξιόπιστης ανίχνευσης του υδατόσημου

Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο αλγόριθμος παρουσιάζει ανθεκτικότητα στην πλειοψηφία των επιθέσεων όπως η περιστροφή και αλλαγή μεγέθους, η προσθήκη θορύβου, η μείωση του νέφους σημείων και η αποκοπή τμήματος του μοντέλου. Όταν όμως υπάρχουν συνδυαζόμενες επιθέσεις το υδατόσημο αλλοιώνεται λόγω της μη ακριβής καταχώρησης του υδατοσημασμένου μοντέλου νέφους σημείων σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς (registration failure). Επομένως μελλοντικά απαιτείται η βελτίωση της τεχνικής καταχώρησης.

Επίσης θα μπορούσε να δοκιμαστεί και άλλη γλώσσα προγραμματισμού (π.χ. C++) για την ανάπτυξη του αλγορίθμου, καθ' ότι στο περιβάλλον του MATLAB παρουσιάστηκαν ορισμένα προβλήματα μνήμης για μοντέλα άνω των 60.000 σημείων.

## Βιβλιογραφία

- [1] Ryutarou Ohbuchi, Akio Mukaiyama, Shigeo Takahashi, "Watermarking a 3D shape model defined as a point set", International Conference on Cyberworlds, 2004.
- [2] Ryutarou Ohbuchi, Akio Mukaiyama, Shigeo Takahashi, "A Frequency-Domain Approach to Watermarking 3D Shapes", EUROGRAPHICS, Volume 21, No 3, 2002.
- [3] Suk-Hwan Lee , Ki-Ryong Kwon, "Mesh watermarking based projection onto two convex sets", Multimedia Systems, No 13, p. 323–330, 2008.
- [4] Ryutarou Ohbuchi, Hiroshi Masuda, Masaki Aono, "Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models", Proc. ACM Multimedia, p.261-272, 1997.
- [5] Zachi Karni, Craig Gotsman, " Spectral Compression of Mesh Geometry", Proc. SIGGRAPH 2000, p.279-286,2000.
- [6] F. Hartung, P. Eisert, B. Girod, "Digital Watermarking of MPEG-4 Facial Animation Parameters", Computer and Graphics, p. 425-435,1998.
- [7] F. Cayre, P. Rondao-Alface, F. Schmitt, B. Macq, H. Maitre, "Application of spectral decomposition to compression and watermarking of 3D triangle mesh geometry", Signal Processing : Image Communication, 18(4), p.309-319, 2003.
- [8] Ingemar J. Cox, Matt L. Miller, " The First 50 Years of Electronic Watermarking", EURASIP Journal on Applied Signal Processing, No 2, p. 126–132, 2002.
- [9] Corsini Massimiliano, Thesis: "Towards Blind and Robust Perceptual Watermarking of 3D Objects", Universita Degli Studi di Firenze, 2004.
- [10] Zhou Zude, Ai Qingsong, Liu Quan, "A SVD-based Digital Watermarking Algorithm for 3D Mesh Models", School of Information Engineering, P. R. China.
- [11] Li Li, David Zhang, Zhigeng Pan, Jiaoying Shi, Kun Zhou, Kai Ye, "Watermarking 3D mesh by spherical parameterization", Computers & Graphics 28 p. 981–989, 2004.
- [12] Zhentai Lu, Wufan Chen, " Fast and Robust 3D Image Registration Algorithm Based on Principal Component Analysis", School of Biomedical Engineering Southern Medical University Guang Zhou, China.

[13] Σολαχίδης Βασίλειος, Διδακτορική Διατριβή με θέμα: “ Προστασία Γνευματικών Δικαιωμάτων Πολυμεσικής Πληροφορίας με Χρήση Ψηφιακής Υδατοσήμανσης”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκη, Θεσσαλονίκη 2004.

[14] [www.optionsnet.gr/article/psifiaki\\_ydatogr-final.pdf](http://www.optionsnet.gr/article/psifiaki_ydatogr-final.pdf)

[15] [http://en.wikipedia.org/wiki/Bounding\\_volume](http://en.wikipedia.org/wiki/Bounding_volume)

