



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ

**ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΡΘΟΠΕΔΙΚΟΥ
ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

ΜΕΛΕΤΙΟΥ ΛΙΑΣΚΟΥ

Επιβλέπων: Καθ. Παντελεήμων Ασβεστάς

Αθήνα 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

**PROCESSING AND ANALYSIS OF IMAGES OF ORTHOPAEDIC
INTEREST**

Ph.D. Thesis

by

MELETIOS LIASKOS

Supervisor: Prof. Panteleimon Asvestas

Athens 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΡΘΟΠΕΔΙΚΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

ΜΕΛΕΤΙΟΥ ΛΙΑΣΚΟΥ

Συμβουλευτική Επιτροπή: Καθ. Ασβεστάς Παντελεήμων (Επιβλέπων)
Καθ. Γεώργιος Ματσόπουλος
Αναπλ. Καθ. Κωστόπουλος Σπυρίδων

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή στις 13/03/2024

.....
Ε. Αθανασιάδης
Επ. Καθηγητής
Πα.Δ.Α.

.....
Π. Ασβεστάς
Καθηγητής
Πα.Δ.Α.

.....
Δ. Γκλώτσος
Καθηγητής
Πα.Δ.Α.

.....
Δ. Κάβουρας
Ομότιμος Καθηγητής
Πα.Δ.Α.

.....
Σ. Κωστόπουλος
Αναπλ. Καθηγητής
Πα.Δ.Α.

.....
Γ. Ματσόπουλος
Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Μ. Σαβελώνας
Επ. Καθηγητής
Παν. Θεσσαλίας

Αθήνα 2024

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Ο υπογράφων Μελέτιος Λιάσκος του Ιωάννη, υποψήφιος διδάκτορας του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας και δικαιούχος των πνευματικών δικαιωμάτων επί της διατριβής και δεν προσβάλω τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων. Για τη συγγραφή της διδακτορικής μου διατριβής δεν χρησιμοποίησα ολόκληρο ή μέρος έργου άλλου δημιουργού ή τις ιδέες και αντιλήψεις άλλου δημιουργού χωρίς να γίνεται αναφορά στην πηγή προέλευσης (βιβλίο, άρθρο από εφημερίδα ή περιοδικό, ιστοσελίδα κ.λπ.). Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της διατριβής μου μέχρι και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη.

Ημερομηνία 13/3/2024

Ο Δηλών



Ευχαριστίες

*Η διδακτορική αυτή διατριβή σηματοδοτεί την ολοκλήρωση της μακράς πορείας μου στη διεξοδική μελέτη και στην ανάλυση του *medical imaging*, με το οποίο ασχολήθηκα, συνδυάζοντας αρχικά τις γνώσεις που έλαβα ως απόφοιτος από το τμήμα Τεχνολογίας Ιατρικών Οργάνων του άλλοτε ΤΕΙ Αθήνας και εν συνεχεία εμβαθύνοντας ως κάτοχος του Μεταπτυχιακού Ιατρικής Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών και ήδη ως υποψήφιος διδάκτορας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.*

Στην πορεία μου αυτή, σημαντικός αρωγός και υποστηρικτής υπήρξε ο επιβλέπων καθηγητής μου κ. Ασβεστάς Παντελεήμων, ο οποίος συνέδραμε καταλυτικά στην υλοποίηση της παρούσας εκπόνησης, παραθέτοντας τις πολύτιμες παρατηρήσεις του. Ταυτόχρονα, δεν θα μπορούσα να παραλείψω τους καθηγητές κ.κ. Γεώργιο Ματσόπουλο και Μιχάλη Σαβελώνα για την αξιοσημείωτη συμβολή τους και τους ευχαριστώ θερμά για τη συμπαράσταση στην εν γένει εξέλιξή μου.

Περίληψη

Η ταχύτατη ανάπτυξη της βιολογίας και της γενετικής, σε συνδυασμό με τις τεχνολογικές εξελίξεις στο επίπεδο της συλλογής δεδομένων, καθιστά αναγκαία τη δημιουργία υπολογιστικών εργαλείων, τα οποία θα παρέχουν τη δυνατότητα στους χρήστες να επεξεργάζονται και να αναλύουν ευρύτατο όγκο πληροφοριών από διαφορετικές πηγές. Η διδακτορική διατριβή πραγματεύεται και εξετάζει αυτή τη νέα πρόοδο, στοχεύοντας, παράλληλα, στο σχεδιασμό και στην ανάπτυξη υπολογιστικών μεθόδων, οι οποίες προωθούν την ταχεία και αξιόπιστη επεξεργασία και ανάλυση βιο-δεδομένων, δηλαδή δεδομένων απεικόνισης των ανατομικών δομών ή δεικτών λειτουργίας του ανθρώπινου οργανισμού. Συγκεκριμένα, η εργασία επιχειρεί να αναδείξει τη σημασία των μεθόδων αυτών στην ανάλυση εικόνων ορθοπεδικού ενδιαφέροντος.

Στη μελέτη αναπτύσσονται αλγόριθμοι επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνων αξονικής (CT) και μαγνητικής (MRI) τομογραφίας της σπονδυλικής στήλης, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο, στο οποίο θα απεικονίζονται ταυτόχρονα οι σπόνδυλοι από την αξονική τομογραφία (CT), ενώ οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι και το κανάλι των νεύρων απεικονίζονται από τη μαγνητική τομογραφία (MRI), με όσο το δυνατόν περιορισμένη χειροκίνητη παρέμβαση και ταυτόχρονα χωρίς τους περιορισμούς των μοντέλων τεχνητής μάθησης. Με αυτόν τον τρόπο, θα επιτρέπεται η προ-εγχειρητική και μετεγχειρητική σύγκριση και αξιολόγηση χειρουργικών επεμβάσεων στη σπονδυλική στήλη.

Συγκεκριμένα, επιτυγχάνεται η τρισδιάστατη ευθυγράμμιση και σύντηξη των εικόνων από τις δύο ως άνω απεικονιστικές τεχνικές. Σε επόμενο στάδιο, εφαρμόζονται τεχνικές τμηματοποίησης, ώστε να απομονωθούν οι περιοχές ενδιαφέροντος, με αποτέλεσμα ένα σύνολο σπονδύλων από την αξονική τομογραφία και ένα σύνολο με μεσοσπονδύλιους δίσκους και κανάλι των νεύρων από τη μαγνητική τομογραφία. Τέλος, παρουσιάζονται τα υπολογιστικά εργαλεία που συγκρίνουν τα δημιουργηθέντα μοντέλα της σπονδυλικής στήλης.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται σε έξι (6) στάδια επεξεργασίας - ανάλυσης εικόνων, μεταξύ των οποίων: α) η σύνθεση των εικόνων από Αξονική και Μαγνητική Τομογραφία, β) η μεθοδολογία κατά Otsu με χρήση κατωφλίου και γ) η μεθοδολογία τμηματοποίησης κατά Chan-Vese. Αναλυτικότερα, στις εικόνες πραγματοποιήθηκε χειροκίνητη χάραξη του περιγράμματος των σπονδύλων και του μεσοσπονδύλιου δίσκου από ακτινολόγο ιατρό, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν αυτά ως σημεία αναφοράς για την σύγκριση με τα περιγράμματα που εξάγονται από την μεθοδολογία. Για την σύγκριση των περιοχών χρησιμοποιήθηκαν δύο δείκτες, ο μεν πρώτος για την ομοιότητα των σχημάτων *DSC (dice similarity coefficient)*, ο δε δεύτερος συγκρίνει τα σημεία του περιγράμματος *Hausdorff Distance*.

Στην προσέγγισή μας χρησιμοποιούμε τα σχήματα των σπονδύλων που προέρχονται από εικόνες αξονικής τομογραφίας. Αυτή η στρατηγική βασίζεται σε τρεις εκτιμήσεις: (1) οι εικόνες που παράγονται από την αξονική τομογραφία είναι

ακριβέστερες στην απεικόνιση των συμπαγών δομών όπως είναι οι σπόνδυλοι, (2) τα όρια των σπονδύλων επιβάλλουν έμμεσα περιορισμούς στην εύρεση των ορίων γειτονικών τους δομών (μεσοσπονδύλιος δίσκος και κανάλι νεύρων), (3) οι αιχμές των ανατομικών περιοχών είναι παρόμοιες στις εικόνες αξονικής και μαγνητικής τομογραφίας, επομένως τα προφίλ κλίσης και οι αρχές των σχημάτων που προέρχονται από τα μοντέλα ενεργών σχημάτων (*active shape models* 'ASMs') από τις εικόνες αξονικής τομογραφίας μπορούν να εφαρμοστούν και σε εικόνες μαγνητικής τομογραφίας. Αρχικά, εκπαιδεύουμε το μοντέλο *active shape model* (ASM) επάνω στους σπονδύλους από την Αξονική Τομογραφία. Εν συνεχεία, το εφαρμόζουμε επάνω σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας προκειμένου να ανεύρουμε και να εντοπίσουμε τα περιγράμματα των σπονδύλων και ακολούθως τις υπόλοιπες δομές. Αξιοποιώντας, επομένως τους σπονδύλους ως σημεία αναφοράς από την Αξονική Τομογραφία, ανιχνεύουμε το μεσοσπονδύλιο δίσκο και το κανάλι των νεύρων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας.

Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας συγκρίθηκαν με διάφορες μελέτες τμηματοποίησης των ίδιων ανατομικών περιοχών και κατέδειξαν ότι η παρούσα δοκιμή είναι μία εναλλακτική προσπάθεια εξαγωγής των περιγραμμάτων από τους σπονδύλους και τον μεσοσπονδύλιο δίσκο. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της τμηματοποίησης χρησιμοποιούνται για την ταυτόχρονη απεικόνιση σε μία εικόνα, συμβάλλοντας έτσι στην ευχερέστερη διάγνωση ποικίλων παθήσεων της σπονδυλικής στήλης και αντικατοπτρίζοντας συνολικά την παρεχόμενη πληροφορία σε μία εικόνα.

Στα πειραματικά αποτελέσματα πραγματοποιείται σύγκριση στην ακρίβεια της τμηματοποίησης, ανάμεσα στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την μεθοδολογία και στα αποτελέσματα που προέρχονται από άλλες δημοσιευμένες μεθόδους. Σε αντίθεση με τις υπάρχουσες συνδυαστικές μεθόδους, η προσέγγιση που προτείνεται στην παρούσα μελέτη δεν εξαρτάται από την διαθεσιμότητα ζευγών εικόνων αξονικής-μαγνητικής τομογραφίας, τα οποία σπανίως λαμβάνονται από τον ίδιο ασθενή. Επιπλέον, σε αντίθεση με τις μεθόδους που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία και βασίζονται στην μηχανική μάθηση, η προσέγγισή μας δεν εξαρτάται από δεδομένα μεγάλου όγκου για την εκπαίδευση του μοντέλου.

Μέχρι τώρα οι επιστημονικές εργασίες χρησιμοποιούσαν εικόνες από Αξονική ή Μαγνητική Τομογραφία για να τμηματοποιήσουν μόνο μία ανατομική δομή, αγνοώντας όλες τις υπόλοιπες γειτονικές τους, οι οποίες συνεκτιμώνται από τον γιατρό κατά την κλινική αξιολόγηση. Επομένως, σε αντίθεση με τη συνδυαστική πληροφορία των τριών απεικονιστικών μεθόδων που προτείνουμε, από μόνη της η αξιολόγηση του καναλιού των νεύρων ή του μεσοσπονδύλιου διαστήματος δεν προσφέρει τόσο αξιόπιστα αποτελέσματα. Η παρούσα μεθοδολογία εισάγει μία καινοτόμα υπολογιστική προσέγγιση για την εξαγωγή των ορίων των σπονδύλων, του μεσοσπονδύλιου δίσκου και του καναλιού των νεύρων, με συνδυαστική χρήση της ανατομικής πληροφορίας τριών ανατομικών δομών από τα δύο προαναφερόμενα απεικονιστικά συστήματα ταυτοχρόνως σε μία εικόνα. Ακόμα, σύμφωνα με τη μέθοδό μας, η εκπαίδευση του μοντέλου πραγματοποιείται μία

μόνο φορά σε εικόνες Αξονικής Τομογραφίας και στη συνέχεια εφαρμόζεται σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας, χωρίς να χρειάζεται πληθώρα εικόνων. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί η έλλειψη μεγάλου όγκου κλινικών δεδομένων, η οποία καταδεικνύει τη δυσκολία των μεθόδων οι οποίες βασίζονται σε αλγορίθμους βαθιάς μάθησης και ταυτόχρονα αναδεικνύει την προτεινόμενη από εμάς μέθοδο, για τους λόγους που προαναφέρθηκαν.

Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος δεν εξαρτάται από μεγάλο πλήθος εικόνων για την εκπαίδευση του μοντέλου, όπως αντίστοιχα απαιτείται σε μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν βαθιά μάθηση. Αντιθέτως, απαιτεί περιορισμένη παρέμβαση από τους χρήστες. Επίσης, τα αποτελέσματά της είναι συγκρίσιμα με τις υπόλοιπες μεθόδους αιχμής, όσον αφορά στην ποιότητα της τμηματοποίησης, όπως αυτό αποδεικνύεται από τις πειραματικές συγκρίσεις, ενώ αξιοσημείωτο είναι ότι, μέχρι και σήμερα, δεν ανευρίσκονται -είτε σε ερευνητικό είτε σε εμπορικό επίπεδο- τέτοιου είδους υπολογιστικά εργαλεία στην τεχνολογική φαρέτρα.

Λέξεις κλειδιά: Τμηματοποίηση, Σύνθεση Εικόνων, Μοντέλα Ενεργών Περιγραμμάτων, Μεσοσπονδύλιοι Δίσκοι, Κανάλι Νεύρων, Σπόνδυλοι.

Abstract

The rapid development of biology and genetics, combined with technological advances in data collection, makes it necessary to create computational tools that enable users to process and analyze a wide range of information from different sources. This PhD thesis addresses and examines this new advancement, while aiming at the design and development of computational methods that promote the rapid and reliable processing and analysis of bio-data, i.e. data imaging of the anatomical structures or functional indicators of the human body. In particular, the paper attempts to highlight the importance of these methods in the analysis of images of orthopaedic interest.

The study develops algorithms for the processing and analysis of computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) images of the spine in order to create a three-dimensional model in which the vertebrae are simultaneously imaged by CT, while the intervertebral discs and the nerve canal are imaged by MRI, with as little manual intervention as possible and at the same time without the limitations of artificial learning models. In this way, pre-operative and post-operative comparison and evaluation of spinal surgery will be allowed.

In particular, the three-dimensional alignment and fusion of the images from the two imaging techniques mentioned above is achieved. In a next step, segmentation techniques are applied to isolate regions of interest, resulting in a vertebral set from CT and a set with intervertebral discs and nerve canal from MRI. Finally, the computational tools comparing the generated spinal models are presented.

The proposed methodology is based on six (6) stages of image processing - analysis, including: a) the synthesis of images from CT and MRI, b) the Otsu methodology using thresholding and c) the Chan-Vese segmentation methodology. More specifically, manual contour tracing of the vertebral and intervertebral disc contours was performed on the images by a radiologist physician, in order to use these as reference points for comparison with the contours extracted by the methodology. Two indices were used to compare the regions, the first for the similarity of the DSC (dice similarity coefficient) shapes, and the second compares the Hausdorff Distance contour points.

In our approach we use the shapes of the vertebrae derived from CT images. This strategy is based on three considerations: (1) CT-derived images are more accurate in depicting solid structures such as vertebrae; (2) vertebral boundaries implicitly impose constraints on finding the boundaries of adjacent structures (intervertebral disc and nerve canal), (3) the peaks of anatomical regions are similar in CT and MRI images, therefore the gradient profiles and shape principles derived from active shape models (ASMs) from CT images can be applied to MRI images. First, we train the active shape model (ASM) onto the vertebrae from CT scans. Subsequently, we apply it over MRI images in order to find and locate the contours of the vertebrae and subsequently the other structures. Utilizing, therefore, the vertebrae as

reference points from the CT scan, we detect the intervertebral disc and the nerve canal from MRI images.

The results of the methodology were compared with several segmentation studies of the same anatomical regions and demonstrated that the present test is an alternative attempt to extract contours from the vertebrae and intervertebral disc. In addition, the segmentation results are used for simultaneous imaging on one image, thus contributing to a more convenient diagnosis of a variety of spinal diseases and reflecting the overall information provided on one image.

In the experimental results, a comparison is made on the accuracy of the segmentation between the results obtained by the methodology and those obtained by other published methods. Unlike existing combinatorial methods, the approach proposed in this study does not depend on the availability of CT-MRI image pairs, which are rarely obtained from the same patient. Moreover, unlike the methods presented in the literature based on machine learning, our approach does not depend on large-volume data for model training.

Until now, the literature has used CT or MRI images to segment only one anatomical structure, ignoring all other adjacent structures, which are taken into account by the physician during clinical evaluation. Therefore, in contrast to the combined information of the three imaging modalities we propose, the individual evaluation of the nerve canal or the intervertebral space does not provide such reliable results. The present methodology introduces an innovative computational approach to extract the boundaries of the vertebrae, intervertebral disc and nerve canal by combining the anatomical information of three anatomical structures from the two aforementioned imaging systems simultaneously in one image. Still, according to our method, model training is performed only once on CT images and then applied to MRI images, without the need for a plethora of images. It should also be noted the lack of a large amount of clinical data, which demonstrates the difficulty of methods based on deep learning algorithms and at the same time highlights our proposed method, for the reasons mentioned above.

Finally, the proposed method does not depend on a large number of images to train the model, as required in deep learning methodologies. Instead, it requires limited user intervention. Moreover, its results are comparable to other cutting-edge methods in terms of segmentation quality, as evidenced by experimental comparisons, and it is noteworthy that, to date, no such computational tools of this kind are found - either at the research or commercial level - in the technological quiver.

Keywords: Segmentation, Image Synthesis, Active Shape Models, Intervertebral Discs, Nerve Canal, Vertebrae.

Δημοσιεύσεις

1. **Meletios Liaskos**, Michalis A. Savelonas, Pantelis A. Asvestas and George K. Matsopoulos “Bimodal Active Shape Models for Cervical Vertebrae and Spinal Canal Boundary Extraction”, *Engineering Proceedings*, 50(1), (2023).
2. Bimodal active shape models for cervical vertebrae and spinal canal boundary extraction. **Liaskos Meletios**, Savelonas Michalis A., Asvestas Pantelis A., Matsopoulos George K. *Advances in Biomedical Sciences, Engineering and Technology*, Athens, 10-11 June, (2023).
3. **Meletios Liaskos**, Michalis A. Savelonas, Pantelis A. Asvestas, Dimitrios Papageorgiou, George K. Matsopoulos “Vertebrae, IVD and spinal canal boundary extraction on MRI, utilizing CT-trained active shape models”, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 16 2201-2214 (2021).
4. **Meletios Liaskos**, Michalis A. Savelonas, Pantelis A. Asvestas, Marios G. Lykissas, George K. Matsopoulos “Bimodal CT/MRI-Based Segmentation Method for Intervertebral Disc Boundary Extraction”, *MDPI. information*, 11(9) 448 (2020).

Πίνακας Περιεχομένων

1.1	Ανατομία Σπονδυλικής Στήλης	1
1.1.1	Σπονδυλικά Σώματα	4
1.1.2	Μεσοσπονδύλιος Δίσκος	7
1.1.3	Κανάλι Νεύρων	9
1.2	Παθήσεις Σπονδυλικής Στήλης	10
1.3	Τεχνικές Αποκατάστασης	13
2.1	Εισαγωγή	14
2.2	Μεθοδολογία	19
2.2.1	Γεωμετρικός Μετασχηματισμός	20
2.2.2	Τμηματοποίηση για την Εύρεση του Περιγράμματος των Σπονδύλων, σε Εικόνες Αξονικής Τομογραφίας	22
2.2.3	Προβολή των Σπονδύλων στην Μαγνητική Τομογραφία	24
2.2.4	Εντοπισμός του Μεσοσπονδύλιου Δίσκου	24
2.2.5	Τμηματοποίηση Αξονικής – Μαγνητικής Τομογραφίας για την Εύρεση του Περιγράμματος του Μεσοσπονδύλιου Δίσκου	25
2.2.6	Σύνθεση Εικόνων Αξονικής – Μαγνητικής Τομογραφίας	26
2.3	Αποτελέσματα – Αξιολόγηση	27
2.3.1	Αξιολόγηση των Μετρήσεων	27
2.3.2	Αποτελέσματα και Ανάλυση	28
2.4	Συμπεράσματα	34
3.1	Εισαγωγή	36
3.2	Μεθοδολογία	41
3.2.1	Εκπαίδευση ASM σε Εικόνες Αξονικής Τομογραφίας	42
3.2.2	Αλλαγή του Μεγέθους των Εικόνων και Αρχικοποίηση του ASM	44
3.2.3	Εφαρμογή ASM επάνω σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας - Ακολουθίας T1	45
3.2.4	Προβολή των Περιγραμμάτων των Σπονδύλων επάνω στην Ακολουθία T2	45
3.2.5	Εύρεση του Περιγράμματος από το Κανάλι των Νεύρων	46
3.2.6	Εύρεση των Ορίων του Μεσοσπονδύλιου Διαστήματος	47
3.3	Αποτελέσματα	48
3.3.1	Εικόνες που Χρησιμοποιήθηκαν	48
3.3.2	Μετρητές Απόδοσης	48

3.3.3	Αξιολόγηση των Μετρήσεων	49
3.4	Συμπεράσματα	56
4.1	Εισαγωγή	58
4.2	Μεθοδολογία	60
4.2.1	Εκπαίδευση του ASM σε οβελιαίες εικόνες από Αξονική Τομογραφία	61
4.2.2	Εφαρμογή του ASM σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted και έπειτα σε εικόνες T1-weighted	62
4.2.3	Εύρεση Περιγράμματος του Καναλιού των Νεύρων και του Μεσοσπονδύλιου Διαστήματος	64
4.3	Αποτελέσματα	66
4.3.1	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	66
4.3.2	Μετρικές Αξιολόγησης	67
4.3.3	Αποτελέσματα και Ανάλυση	67
4.4	Συμπεράσματα	69
5.1	Συμπεράσματα	70
5.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις	71

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1-1. Απεικόνιση σπονδυλικής στήλης. Η πλάγια προβολή δείχνει τις τρεις καμπύλες που σχηματίζουν το γράμμα "S". Η λорδωτική καμπύλη βρίσκεται στην αυχενική και οσφυϊκή περιοχή, ενώ η κυφωτική καμπύλη εμφανίζεται στην θωρακική και στην ιερή περιοχή. Οι μύες και οι σύνδεσμοι την κρατούν ευθυγραμμισμένη κατά την διάρκεια της κίνησης (Πηγή).	2
Εικόνα 1-2. Απεικόνιση της σπονδυλικής στήλης με τα τμήματά της. Με πράσινο χρώμα επισημαίνονται τα τμήμα της σπονδυλικής στήλης όπου υπάρχουν οι σπόνδυλοι (αριστερά) και οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι (δεξιά) της εικόνας (Πηγή ^[1]). ..	3
Εικόνα 1-3. Πλάγια όψη της ανθρώπινης οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης που δείχνει πέντε οσφυϊκούς σπονδύλους (L1 – L5) και ενδιάμεσους μεσοσπονδύλιους δίσκους. Οι νευρικές ρίζες (κίτρινες) εξέρχονται μέσω των μεσοσπονδύλιων τρημάτων. Πηγή εικόνας Dr David Oehme 2013 (Πηγή)..	4
Εικόνα 1-4. Η γενική δομή ενός σπονδύλου.	5
Εικόνα 1-5. Πρόσθια επιφάνεια σπονδύλου (Πηγή).	6
Εικόνα 1-6. Απεικόνιση δύο σπονδυλικών σωμάτων με τον μεσοσπονδύλιο δίσκο και το κανάλι των νεύρων (Πηγή).	6
Εικόνα 1-7. Απεικόνιση σπονδύλου με Αξονική Τομογραφία. Α: σπονδυλικό σώμα, Β: κανάλι νεύρων, C: εγκάρσια απόφυση, D: ακανθώδης απόφυση, E: αυχένας σπονδυλικού τόξου, F: πέταλο σπονδυλικού τόξου (Πηγή).	7
Εικόνα 1-8. Απεικόνιση των τριών τομών σπονδυλικής στήλης από Αξονική τομογραφία. α: εγκάρσια απεικόνιση, β: οβελιαία απεικόνιση, γ: στεφανιαία απεικόνιση (Πηγή).	7
Εικόνα 1-9. Απεικόνιση μεσοσπονδύλιου δίσκου.	8
Εικόνα 1-10. Μαγνητική Τομογραφία T2 οσφυϊκής μοίρας. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι.	9
Εικόνα 1-11. Μαγνητική Τομογραφία T2 οσφυϊκής μοίρας. Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται το κανάλι των νεύρων.	10
Εικόνα 1-12. Απεικόνιση κήλης μεσοσπονδύλιου δίσκου. Στον κόκκινο κύκλο απεικονίζεται η κήλη που πιέζει τις ρίζες και το κανάλι των νεύρων (Πηγή).	11
Εικόνα 1-13. Απεικονίζονται οι παθήσεις που μπορούν να εμφανιστούν στον μεσοσπονδύλιο δίσκο (Πηγή).	11
Εικόνα 1-14. Απεικόνιση Στένωσης Σπονδυλικής Στήλης ((Πηγή).).	12
Εικόνα 1-15. Απεικόνιση Σπονδυλολίστεσης του Ο5 σπονδύλου (Πηγή).	12
Εικόνα 2-1. Απεικόνιση των κύριων σταδίων της προτεινόμενης μεθοδολογίας.	20
Εικόνα 2-2. (α) Αρχική εικόνα Αξονικής Τομογραφίας, (β) Αρχική εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας, (γ) μετασχηματισμένη εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας (γ) Σύνθεση εικόνας Αξονικής – Μαγνητικής Τομογραφίας.	21
Εικόνα 2-3. Διάγραμμα ροής για την επιλογή κατωφλίου Otsu από εικόνες αξονικής τομογραφίας.	23
Εικόνα 2-4. (α) Αρχική εικόνα Αξονικής Τομογραφίας, (β) κατωφλίωση κατά Otsu με τρεις περιοχές, όπου η περιοχή με τον αριθμό '1' αντιστοιχεί στο φόντο (αποτύπωση με μαύρο χρώμα) και οι περιοχές με αριθμούς '2' και '3' αντιστοιχούν	

στους σπονδύλους (αποτύπωση με γκρι και με άσπρο χρώμα αντίστοιχα), (γ) αναπαράσταση της εικόνας με ένωση των περιοχών '2' και '3', (δ) αποτέλεσμα μετά τη συνένωση των γειτονικών τομών, (ε) το περίγραμμα των σπονδύλων στην αρχική εικόνα προβάλλεται εδώ με κόκκινο χρώμα.....	23
Εικόνα 2-5. (α) αποτελέσματα από την τμηματοποίηση των εικόνων Αξονικής Τομογραφίας, (β) κανονικοποιημένη εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας, (γ) αποτελέσματα μετά την σύνθεση των προηγούμενων εικόνων.	24
Εικόνα 2-6. (α) Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται το περίγραμμα των σπονδύλων, από το οποίο προκύπτει η 'λωρίδα' που περιγράφει τα όρια της σπονδυλικής στήλης με κόκκινο χρώμα, (β) εντοπισμός των θέσεων του μεσοσπονδύλιου δίσκου, (γ) περίγραμμα του μεσοσπονδύλιου δίσκου, το οποίο απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα.....	25
Εικόνα 2-7. (α) Χρησιμοποιείται <i>unsharp mask</i> που εφαρμόζεται σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας, (β) Η δυαδική εικόνα (απεικόνιση με μαύρο-άσπρο χρώμα) η οποία προέρχεται από την υποενότητα 2.2.4, χρησιμεύει για την αρχικοποίηση του περιγράμματος, (γ) ενεργό περίγραμμα που εφαρμόζεται σε εικόνες με βελτιωμένη αντίθεση (πράσινο χρώμα) κατόπιν εφαρμογής σαράντα (40) επαναλήψεων, (δ) εντοπισμός των ορίων του περιγράμματος του μεσοσπονδύλιου δίσκου.	26
Εικόνα 2-8. Παραδείγματα τρισδιάστατων αναπαραστάσεων των σπονδύλων: α) με κόκκινο χρώμα παρατίθεται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος και β) με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι σπόνδυλοι.	27
Εικόνα 2-9. (α) Μέσος όρος του δείκτη ομοιότητας Dice (DSC) % \pm SD, (β) μέσος όρος του δείκτη απόστασης Hausdorff, HD (mm) \pm SD.	30
Εικόνα 2-10. (α) Μέσος όρος DSC (%) \pm SD, (β) μέσος όρος HD (mm) \pm SD από τον Πίνακα 2.3.....	30
Εικόνα 2-11. Απεικόνιση εικόνων Αξονικής Τομογραφίας, όπου ανιχνεύονται οι σπόνδυλοι. Η τμηματοποίηση που προκύπτει πηγάζει από την προτεινόμενη μεθοδολογία. Οι εικόνες προέρχονται από διαφορετικά συστήματα και διαφορετικούς ασθενείς. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα περιγράμματα της μεθόδου, ενώ με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται τα περιγράμματα που χαράχθηκαν από ιατρούς.	31
Εικόνα 2-12. Απεικόνιση εικόνων Μαγνητικής Τομογραφίας στις οποίες ανιχνεύονται οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι. Η τμηματοποίηση που προέρχεται από την προτεινόμενη μεθοδολογία. Οι εικόνες πηγάζουν από διαφορετικά συστήματα και διαφορετικούς ασθενείς. Με κόκκινο χρώμα προσδιορίζονται τα περιγράμματα της μεθόδου, ενώ με πράσινο χρώμα προσδιορίζονται τα περιγράμματα που χαράχθηκαν από ιατρούς.	31
Εικόνα 2-13. Απεικόνιση στοιχείων οπτικοποίησης της πληροφορίας και από τα δύο συστήματα ταυτόχρονα. Οι εικόνες που παράγονται προέρχονται από την προτεινόμενη μεθοδολογία. Με γκρι χρώμα αποτυπώνονται οι σπόνδυλοι, ενώ με κόκκινο χρώμα οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι.	32
Εικόνα 2-14. Αλλαγή της ακρίβειας τμηματοποίησης σε σχέση με τους δείκτες DSC και HD, έναντι του μεγέθους της μάσκας (α, β) και των λειτουργιών επανάληψης (γ,	

δ). Με γραμμές χρώματος μπλε αποτυπώνονται τα δεδομένα από την Αξονική Τομογραφία, ενώ με γραμμές χρώματος κόκκινου αποτυπώνονται τα δεδομένα από την Μαγνητική Τομογραφία. Η δεύτερη παράμετρος ισχύει μόνο για την Μαγνητική Τομογραφία.	33
Εικόνα 3-1. Περίληψη των κύριων σταδίων της προτεινόμενης μεθόδου.....	42
Εικόνα 3-2. Διαδικασία εκπαίδευσης ASM με 16 σημεία: (α) τα 4 σημεία αναφοράς απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα, τα υπόλοιπα 12 σημεία χρησιμεύουν για το περίγραμμα του σπονδυλικού σώματος (πράσινο χρώμα), (β) χειροκίνητο σπονδυλικό περίγραμμα.	43
Εικόνα 3-3. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το χειροκίνητο περίγραμμα των σπονδύλων, το οποίο χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του ASM.....	44
Εικόνα 3-4. Προβολή των κέντρων των σπονδύλων επάνω σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας: (α) με άσπρο χρώμα απεικονίζονται τα σώματα σπονδύλων, όπως έχουν προκύψει από την εκπαίδευση του ASM από εικόνες Αξονικής Τομογραφίας, (β) με κόκκινες κουκίδες εμφανίζονται τα κέντρα των σπονδύλων, όπου προβάλλονται επάνω στην Μαγνητική Τομογραφία ακολουθίας T1.	44
Εικόνα 3-5. Παράδειγμα εφαρμογής του ASM, για την εύρεση του περιγράμματος (κόκκινο χρώμα) των σπονδύλων σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας με ακολουθία T1.....	45
Εικόνα 3-6. Παράδειγμα εικόνας Μαγνητικής Τομογραφίας ακολουθίας T2, όπου με μαύρο χρώμα απεικονίζονται τα σώματα των σπονδύλων.....	46
Εικόνα 3-7. Εύρεση του περιγράμματος του καναλιού των νεύρων: (α) με κόκκινο χρώμα αποτυπώνεται το περίγραμμα των προβαλλόμενων σπονδύλων, οι πράσινες οριζόντιες γραμμές βοηθούν στην εύρεση των πράσινων κύκλων, που βρίσκονται στην περιφέρεια των σπονδύλων και αποτελούν τα σημεία αναφοράς, (β) στα σημεία αναφοράς εφαρμόζουμε γραμμική παρεμβολή και από τις δύο πλευρές, απορρίπτουμε έπειτα το κομμάτι της εικόνας που βρίσκεται στα αριστερά, (γ) με άσπρο χρώμα φαίνεται το αποτέλεσμα από την χρήση κατωφλίου Otsu, (δ) με πράσινο χρώμα απεικονίζονται τα όρια από το κανάλι των νεύρων.	47
Εικόνα 3-8. Εξαγωγή των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου: (α) με άσπρο χρώμα φαίνονται τα αποτελέσματα της τμηματοποίησης του μεσοσπονδύλιου δίσκου, (β) με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα όρια του μεσοσπονδύλιου δίσκου επάνω σε εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας ακολουθίας T2.....	48
Εικόνα 3-9. Ανίχνευση των περιγραμμάτων των σπονδύλων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας: (α) με τον μέσο όρο Dice similarity coefficient DSC (%) \pm SD, (β) με τον μέσο όρο Hausdorff distance HD (mm) \pm SD από τον Πίνακα 3-1.....	52
Εικόνα 3-10. Ανίχνευση των περιγραμμάτων των μεσοσπονδύλιων διαστημάτων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας: (α) με τον μέσο όρο Dice similarity coefficient DSC (%) \pm SD, (β) με τον μέσο όρο Hausdorff distance HD (mm) \pm SD από τον Πίνακα 3-2.....	52
Εικόνα 3-11. Ανίχνευση του περιγράμματος του καναλιού των νεύρων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας: (α) με τον μέσο όρο Dice similarity coefficient DSC (%) \pm SD, (β) με τον μέσο όρο Hausdorff distance HD (mm) \pm SD από τον Πίνακα 3-3.....	53

Εικόνα 3-12. Παραδείγματα εξαγωγής ορίων των σπονδύλων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας ακολουθίας T2.....	53
Εικόνα 3-13. Παραδείγματα εξαγωγής ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας ακολουθίας T2.....	54
Εικόνα 3-14. Παραδείγματα εξαγωγής των ορίων του καναλιού νεύρων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας ακολουθίας T2.....	54
Εικόνα 3-15. Παραδείγματα απεικόνισης ταυτόχρονα των μεσοσπονδύλιων διαστημάτων και του καναλιού των νεύρων σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας ακολουθίας T2.	55
Εικόνα 3-16. Μέτρηση ποιότητας τμηματοποίησης (DSC και HD) έναντι διαφορετικής επιλογής επαναλήψεων (α-β), αλλαγή παρεμβαλλόμενων σημείων (γ-δ), αλλαγή αριθμού επαναλήψεων (ε-στ) και σημεία παρεμβολής (ζ-η).....	56
Εικόνα 4-1. Περίληψη των κύριων σταδίων της προτεινόμενης μεθοδολογίας.	61
Εικόνα 4-2. Διαδικασία εκπαίδευσης με ASM: (α) κύρια σημεία αναφοράς με κόκκινο χρώμα, δώδεκα δευτερεύοντα σημεία πάνω στο σώμα του σπονδύλου με μπλε χρώμα, (β) προσδιορισμένα χειροκίνητα περιγράμματα σπονδύλων.	62
Εικόνα 4-3. Παραδείγματα διαγραμμίσεων σπονδύλων που προέρχονται από χειροκίνητη διαδικασία, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του ASM.	62
Εικόνα 4-4. Τοποθέτηση ASM: Τα κέντρα των σπονδύλων προβάλλονται σε εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted.....	63
Εικόνα 4-5. Παραδείγματα εφαρμογής του ASM: Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα περιγράμματα των σπονδύλων μετά την εφαρμογή του μοντέλου σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted.....	63
Εικόνα 4-6. Αποτελέσματα ASM επάνω σε T2-weighted εικόνες. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το περίγραμμα των σπονδύλων.	64
Εικόνα 4-7. (α) Με μαύρο χρώμα σημειώνουμε το σώμα των σπονδύλων πάνω στην T2-weighted, (β) με πράσινο κύκλο σημειώνουμε τα κέντρα των σπονδύλων, τα οποία οριοθετεί το κόκκινο περίγραμμα, (γ) με μία πράσινη γραμμή σημειώνουμε τα σημεία αναφοράς εκατέρωθεν των σπονδυλικών σωμάτων, (δ) τα σημεία αναφοράς συνδέονται με <i>linear interpolation</i> ώστε να προκύψει η λωρίδα περιγραφής των περιοχών ενδιαφέροντος.....	65
Εικόνα 4-8. Εξαγωγή του περιγράμματος του καναλιού των νεύρων: (α) η κατακόρυφη γραμμή τμηματοποιεί το κανάλι των νεύρων από την αριστερή όψη, όπου βρίσκονται τα σημεία αναφοράς, (β) η προσκόπτουσα binary εικόνα, (γ) με πράσινη γραμμή περιγράφεται το όριο του καναλιού των νεύρων.....	65
Εικόνα 4-9. Παραδείγματα εύρεσης ορίων του καναλιού των νεύρων σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T2- weighted (σημειώνεται με πράσινο χρώμα).	66
Εικόνα 4-10. Παραδείγματα εύρεσης των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T2- weighted (σημειώνεται με κόκκινο χρώμα).	66
Εικόνα 4-11. Παραδείγματα απεικόνισης ταυτόχρονα των δύο περιοχών ενδιαφέροντος. Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνεται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος και με πράσινο χρώμα αποτυπώνεται το κανάλι των νεύρων.	69

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2-1. Σύνοψη των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών των μεθόδων.	17
Πίνακας 2-2. Ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις εικόνες αξονικής τομογραφίας με τις υπόλοιπες προτεινόμενες σύγχρονες μεθόδους.	29
Πίνακας 2-3. Ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις εικόνες μαγνητικής τομογραφίας με τις υπόλοιπες προτεινόμενες σύγχρονες μεθόδους.	29
Πίνακας 3-1. Ανίχνευση των ορίων των σπονδύλων από εικόνες Μαγνητικής τομογραφίας. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προτεινόμενη μέθοδο και από τις συγκρίσιμες σύγχρονες μεθόδους τμηματοποίησης. Η σύγκριση έγινε με την μέση τιμή από δύο ποσοτικούς δείκτες, τον Dice similarity coefficient (DSC) και τον Hausdorff distance (HD).....	50
Πίνακας 3-2. Ανίχνευση των ορίων του μεσοσπονδύλιου διαστήματος, από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας. Η σύγκριση έγινε με την μέση τιμή από δύο ποσοτικούς δείκτες, τον Dice similarity coefficient (DSC) και τον Hausdorff distance (HD), ως προς την τμηματοποίηση της συγκεκριμένης περιοχής.	51
Πίνακας 3-3. Ανίχνευση των ορίων του καναλιού των νεύρων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας. Η σύγκριση έγινε με τη μέση τιμή από δύο ποσοτικούς δείκτες, ήτοι τον Dice similarity coefficient (DSC) και τον Hausdorff distance (HD), ως προς την τμηματοποίηση της συγκεκριμένης περιοχής.	51
Πίνακας 4-1. Αξιολόγηση τμηματοποίησης για το περίγραμμα των σπονδύλων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας.	68
Πίνακας 4-2. Αξιολόγηση τμηματοποίησης για το περίγραμμα του μεσοσπονδύλιου δίσκου από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας.	68
Πίνακας 4-3. Αξιολόγηση τμηματοποίησης για το περίγραμμα του καναλιού των νεύρων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας.	68

Ορολογία

Αγγλικός Όρος	Ελληνικός όρος
Active Contour	Ενεργά Περιγράμματα
Active Shape Models (ASM)	Ενεργά Μοντέλα Σχήματος
Affine	Μετασχηματισμός 'Affine'
Case-Adaptive Graph	Προσαρμοστικό Γράφημα ανά Περίπτωση
Cauda equina	Ιππουρίδα
Closing Operations	Λειτουργίες Κλεισίματος
Computer Tomography	Αξονική Τομογραφία
Conus medullaris	Νωτιαίου Μυελού
Convolutional Kernels	Πυρήνες Συνελικτικού Δικτύου
Cubic	Κυβικός
Data-Driven	Δεδομένα
Deep Learning	Βαθιά Μάθηση
Deep Learning-Based	Βαθιά Μηχανική Μάθηση
Deep Networks	Βαθιά Δίκτυα
Deformable Atlas	Παραμορφώσιμος Άτλας
Deformable Models	Παραμορφώσιμα Μοντέλα
Dice Similarity Coefficient (DSC)	Συντελεστής Ομοιότητας
End plates	Ακρικές Πλάκες Σπονδύλων
Feed-Forward Neural Network	Νευρωνικό Δίκτυο Τροφοδότησης προς τα Εμπρός
Fully Convolutional Networks (FCNs)	Πλήρως Συνελικτικά Δίκτυα
Fully Convolutional Networks (FCNs)	Πλήρως Συνελικτικά Δίκτυα
Hausdorff Distance (HD)	Απόσταση Hausdorff (HD)
Heuristic	Ευρετικός
Hidden Markov Models (HMMs)	Μαρκov Μοντέλα
Learn-Based	Μοντέλα Μάθησης
Ligamentum flava	Ωχροί Σύνδεσμοι
Linear	Γραμμική
Linear Gray Level Normalization	Γραμμική Κανονικοποίηση Επιπέδων του Γκρι
Machine Learning-Based	Μηχανική Μάθηση
Machine Learning-Based	Βασισμένη στη Μηχανική Μάθηση
Magnetic Resonance Imaging	Μαγνητική Τομογραφία
Multi-Modal	Πολυτροπικά
Nearest Neighbor	Πλησιέστερων Γειτόνων
Otsu Thresholding	Κατωφλίωση Otsu
Principal Component Analysis	Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών

(PCA).	
Random Forest (RF)	Αλγόριθμος Τυχαιότητας
Region of Interest (ROI)	Περιοχή Ενδιαφέροντος
Region-Based	Μοντέλα Περιοχής
Segmentation	Τμηματοποίηση
Self-Similarity	Αυτο-Ομοιότητα
Self-Similarity Context	Πλαίσια Αυτό-Ολότητας
Shape-Constrained	Περιορισμένο Σχήμα
Sharpening	Όξυνση
Similarity-Based	Βάση Ομοιότητας
Spine	Σπονδυλική Στήλη
Support Vector Machine (SVM)	Μηχανή Υποστηρικτικών Διανυσμάτων
Support Vector-Machine (SVM)	Διανυσματική Μηχανή Υποστήριξης
Topology Constraints	Περιορισμοί Τοπολογίας
Transform	Μετασχηματισμός
Tree Classifier	Δενδροειδής Ταξινομητής
Watershed-Based	Προσέγγιση Κυματιδίων
Edge Detector	Ανίχνευση Ακμών
T1-weighted	T1-Σταθμισμένη
T2-weighted	T1- Σταθμισμένη

1 Εισαγωγή

Η σπονδυλική στήλη κατέχει νευραλγική θέση στην υπόσταση των οργανισμών, αποτελώντας ένα πολύ σημαντικό όργανό τους, το οποίο επιτελεί βασικότερες λειτουργίες για την επιβίωσή τους.

Η βασικότερη λειτουργία της σπονδυλικής στήλης στον άνθρωπο είναι η παροχή της κύριας υποστήριξης του ανθρώπινου σώματος, επιτρέποντάς του να στέκεται σε όρθια θέση, να λυγίζει και να στρίβει, ενώ ταυτόχρονα προστατεύει τον νωτιαίο μυελό από ενδεχόμενους τραυματισμούς και καταπονήσεις. Γύρωθεν της σπονδυλικής στήλης ανευρίσκονται ισχυρές μυϊκές ομάδες, οστά, εύκαμπτοι τένοντες, σύνδεσμοι και ευαίσθητα νεύρα τα οποία συνεπικουρούν το έργο της. Ωστόσο, θα πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι αν οποιαδήποτε από αυτές τις δομές υποστεί τραυματισμό, καταπόνηση ή ασθένεια, μπορεί να προκληθεί πόνος και ένταση στα σημεία της βλάβης, και να απαιτηθεί ιατρική ή και χειρουργική παρέμβαση.

1.1 Ανατομία Σπονδυλικής Στήλης

Η σπονδυλική στήλη στον ανθρώπινο σκελετό αποτελείται από τριάντα τρεις (33) σπονδύλους συναρθρωμένους κατά σειρά. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει επτά αυχενικούς, δώδεκα θωρακικούς, πέντε οσφυϊκούς, τέσσερις έως πέντε κοκκυγικούς σπονδύλους καθώς και το ιερό οστό, το οποίο αποτελείται από 5 τμήματα. Κάθε σπόνδυλος ομοιάζει με ημικυλινδρικό σώμα μεγέθους ανάλογου του τμήματος στο οποίο ανήκει. Πλαγίως, φέρει δύο εγκάρσιες αποφύσεις και πίσω μια ακανθώδη απόφυση, οι οποίες χρησιμεύουν στην πρόσφυση των μυών και των συνδέσμων. Στο κυλινδρικό του σώμα απολήγουν τα σπονδυλικά τόξα τα οποία, ενωμένα, σχηματίζουν έναν δακτύλιο. Οι επάλληλοι αυτοί δακτύλιοι δημιουργούν με τη σειρά τους έναν ενιαίο σωλήνα, τον *σπονδυλικό σωλήνα*, εντός του οποίου φέρεται ο νωτιαίος μυελός. Κάθε σπόνδυλος αρθρώνεται με τον υπερκείμενο και υποκείμενο σπόνδυλο μέσω των αρθρικών αποφύσεων.

Τα πολλαπλά τμήματα της σπονδυλικής στήλης ενώνονται με ενδιάμεσους δίσκους και υποστηρίζονται από επιπλέον δομικά υλικά, όπως είναι οι σύνδεσμοι και οι μύες. Ολόκληρη η σπονδυλική στήλη απεικονίζεται στην Εικόνα 1-1, η οποία παρουσιάζει τους σπονδύλους, όπως διαφοροποιούνται από τμήμα σε τμήμα. Στην εικόνα εμφανίζεται η σπονδυλική στήλη μέσω πλάγιας προβολής, κάνοντας εμφανή την καμπύλη που εμφανίζεται σε σχήμα 'S'.

Ο λαιμός (αυχενική μοίρα) και χαμηλά οι περιοχές της πλάτης (οσφυϊκή μοίρα) έχουν μια ελαφρά κοίλη καμπύλη, ενώ οι θωρακικές και οι ιερές περιοχές έχουν μια ήπια κυρτή καμπύλη (Εικόνα 1-1). Οι καμπύλες αυτές συμπεριφέρονται σαν

πιεσμένα ελατήρια προκειμένου να απορροφούν τους κραδασμούς, να διατηρείται η ισορροπία του σώματος και να επιτυγχάνεται ένα εύρος κίνησης σε όλη τη σπονδυλική στήλη. Οι σπόνδυλοι μεγεθύνονται προοδευτικά από την αυχενική μοίρα έως την οσφυϊκή. Παρατηρείται επίσης μεταβλητότητα στο μέγεθος των σπονδύλων σε κάθε επίπεδο με βάση τις εκάστοτε σωματικές διαστάσεις του ατόμου. Για παράδειγμα, ένας άνω θωρακικός σπόνδυλος σε μια μικρόσωμη γυναίκα μπορεί να έχει διάμετρο μόνο 2–2,5 cm. Αντίστοιχα, ένα μεγαλόσωμο αρσενικό μπορεί να έχει σπόνδυλο κατά μία έως δύο φορές μεγαλύτερο σε διάσταση. Αυτές οι διακυμάνσεις των σωματικών διαστάσεων επηρεάζουν τον όγκο του κάθε σπονδύλου.

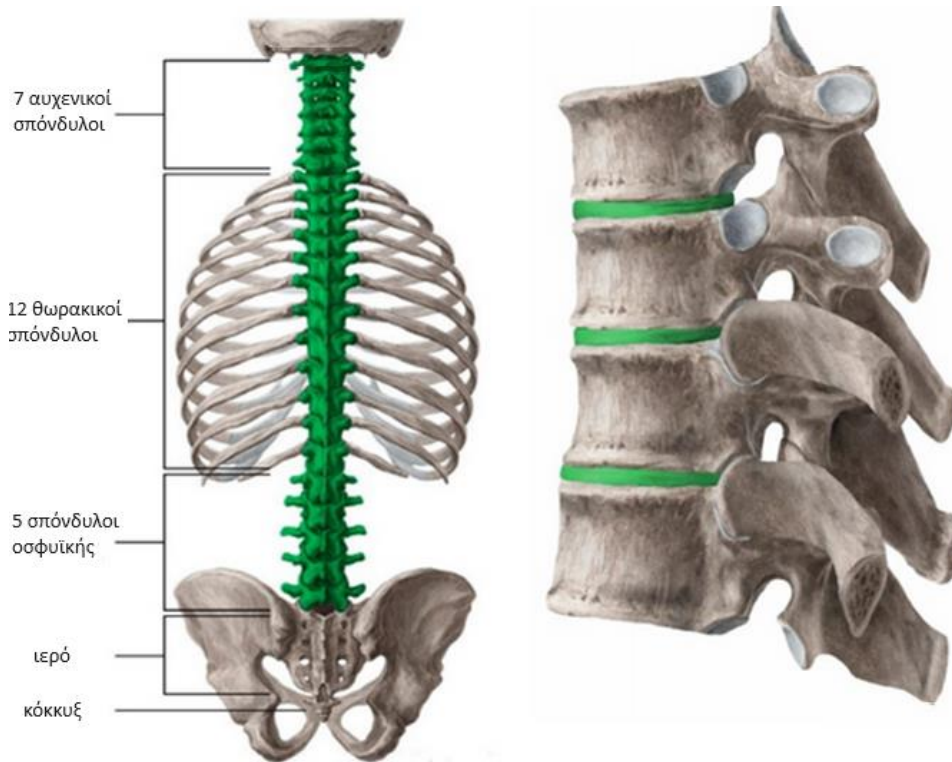
Οι μύες και η σωστή στάση του σώματος διατηρούν τις φυσικές καμπύλες της σπονδυλικής στήλης. Η ορθή στάση περιλαμβάνει εκπαίδευση του σώματος ώστε να στέκεται, να περπατά, να κάθεται και να ξαπλώνει με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε να ελαχιστοποιείται η καταπόνηση που ασκείται στους σπονδύλους κατά τη διάρκεια των κινήσεων ή δραστηριοτήτων που φέρουν βάρος. Αξίζει να σημειωθεί πως το υπερβολικό σωματικό βάρος, οι αδύναμοι μύες και άλλες καταπονητικές δυνάμεις μπορούν να αλλοιώσουν την ευθυγράμμιση της σπονδυλικής στήλης:



Εικόνα 1-1. Απεικόνιση σπονδυλικής στήλης. Η πλάγια προβολή δείχνει τις τρεις καμπύλες που σχηματίζουν το γράμμα "S". Η λорδωτική καμπύλη βρίσκεται στην αυχενική και οσφυϊκή περιοχή, ενώ η κυφωτική καμπύλη εμφανίζεται στην θωρακική και

στην ιερή περιοχή. Οι μύες και οι σύνδεσμοι την κρατούν ευθυγραμμισμένη κατά την διάρκεια της κίνησης (Πηγή¹).

Η πιο σημαντική λειτουργία της σπονδυλικής στήλης έγκειται στην προστασία του νωτιαίου μυελού, ο οποίος αποτελεί το κανάλι των νεύρων που προέρχεται από τον εγκέφαλο [1]. Μαζί με αυτή τη σημαντική λειτουργία, άλλες λειτουργίες της σπονδυλικής στήλης περιλαμβάνουν την υποστήριξη του σώματος, την αντοχή σε εξωτερικές δυνάμεις, την παροχή κινητικότητας, ευελιξίας, τη μεταφορά ερεθισμάτων και πληροφοριών καθώς και την προστασία από κρούσεις και τραυματισμούς.



Εικόνα 1-2. Απεικόνιση της σπονδυλικής στήλης με τα τμήματά της. Με πράσινο χρώμα επισημαίνονται τα τμήμα της σπονδυλικής στήλης όπου υπάρχουν οι σπόνδυλοι (αριστερά) και οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι (δεξιά) της εικόνας ([1]).

Η πολύπλοκη δομή της σπονδυλικής στήλης επιτρέπει να ασκείται την άσκηση δύναμης από το σώμα καθώς και την ύπαρξη μεγάλης ευελιξίας, ενώ παράλληλα παρέχει προστασία στον εύθραυστο νωτιαίο μυελό και στα εξερχόμενα νεύρα [2]. Η σταθερότητα της ανθρώπινης σπονδυλικής στήλης είναι απαραίτητη για την όρθια στάση και την πρόωση, καθώς και για τις κινήσεις τόσο των άνω όσο και των κάτω άκρων (Εικόνα 1-3). Οι σπόνδυλοι ποικίλλουν σε μέγεθος, με τον μικρότερο σπόνδυλο να βρίσκεται μέσα στην αυχενική περιοχή και τον μεγαλύτερο στην οσφυϊκή.

¹https://el.wiktionary.org/wiki/%CF%83%CF%80%CE%BF%CE%BD%CE%B4%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CF%83%CF%84%CE%AE%CE%BB%CE%B7



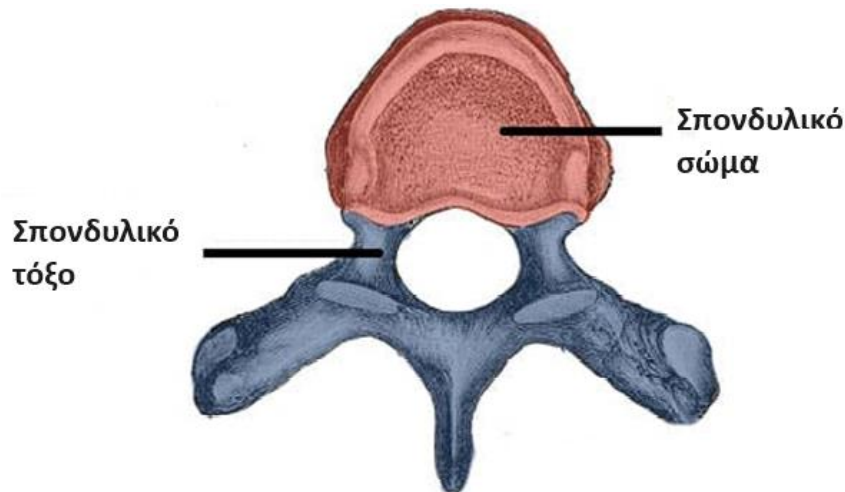
Εικόνα 1-3. Πλάγια όψη της ανθρώπινης οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης που δείχνει πέντε οσφυϊκούς σπονδύλους (L1 – L5) και ενδιάμεσους μεσοσπονδύλιους δίσκους. Οι νευρικές ρίζες (κίτρινες) εξέρχονται μέσω των μεσοσπονδύλιων τρημάτων. Πηγή εικόνας Dr David Oehme 2013 (Πηγή²).

1.1.1 Σπονδυλικά Σώματα

Ένας τυπικός σπόνδυλος αποτελείται από ένα σπονδυλικό σώμα στο μπροστινό μέρος και ένα σπονδυλικό τόξο στο πίσω μέρος. Ανάμεσα σε αυτά τα δύο μέρη βρίσκεται το σπονδυλικό τρήμα, το οποίο περικλείει το κανάλι των νεύρων ή τις νευρικές ρίζες, ανάλογα με το επίπεδο της σπονδυλικής στήλης. Εκατέρωθεν των δύο πλευρών του σπονδυλικού τόξου αναδύονται εγκάρσιες οστικές αποφύσεις στο πλάι, ενώ μια ενιαία οστική ακανθώδης απόφυση εμφανίζεται στη μέση οπίσθια γραμμή της σπονδυλικής στήλης.

Όλοι οι σπόνδυλοι έχουν μια βασική κοινή δομή. Καθένας αποτελείται από ένα πρόσθιο σπονδυλικό σώμα και ένα οπίσθιο σπονδυλικό τόξο (Εικόνα 1-4). Το σπονδυλικό σώμα αποτελεί το πρόσθιο τμήμα κάθε σπονδύλου και μεγαλώνει προς το κάτω μέρος της σπονδυλικής στήλης, προκειμένου να υποστηρίξουν καλύτερα το αυξημένο βάρος του σώματος [3].

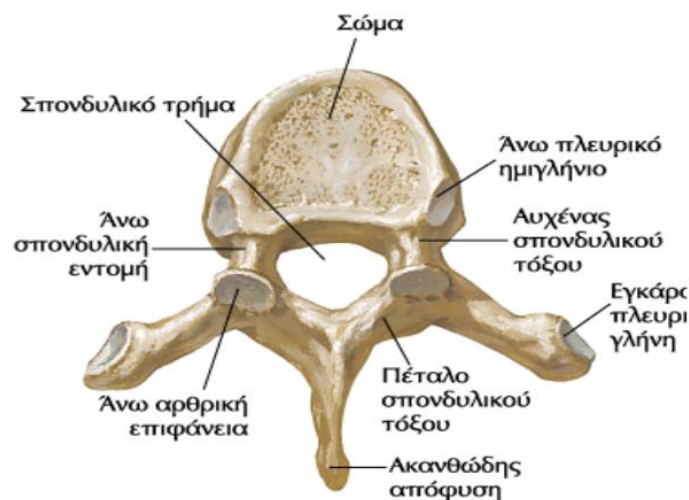
²https://www.researchgate.net/figure/a-side-view-of-human-lumbar-spine-David-Oehme-2013_fig1_333091555



Εικόνα 1-4. Η γενική δομή ενός σπονδύλου (Πηγή³).

Τα σπονδυλικά τόξα έχουν αρκετές οστέινες προεξοχές, οι οποίες λειτουργούν ως σημεία προσκόλλησης των μυών και των συνδέσμων, όπως αναλύονται κατωτέρω (Εικόνα 1-5) (Πηγή³):

- Ακανθώδης απόφυση: κάθε σπόνδυλος έχει μια ενιαία ακανθώδη απόφυση, κεντραρισμένη προς τα πίσω στο σημείο του τόξου.
- Εγκάρσια απόφυση: κάθε σπόνδυλος έχει δύο εγκάρσιες αποφύσεις, οι οποίες εκτείνονται πλευρικά και οπίσθια από το σπονδυλικό σώμα. Στους θωρακικούς σπονδύλους οι εγκάρσιες αποφύσεις συνδέονται με τις ρίζες.
- Αυχένιας σπονδυλικού τόξου: συνδέουν το σπονδυλικό σώμα με τα εγκάρσια σώματα.
- Πέταλο σπονδυλικού τόξου: συνδέει τις εγκάρσιες και ακανθώδεις δομές.
- Άνω αρθρική επιφάνεια: σχηματίζονται αρθρώσεις μεταξύ ενός σπονδύλου του άνω και του κάτω μέρους. Οι αρθρικές ενώσεις εντοπίζονται στη διασταύρωση των lamina και pedicles.



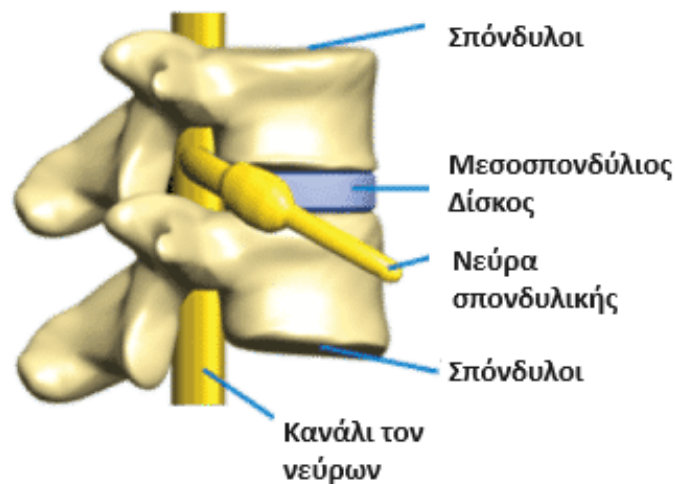
³ <https://teachmeanatomy.info/back/bones/vertebral-column/>

Εικόνα 1-5. Πρόσθια επιφάνεια σπονδύλου (Πηγή⁴).

Οι άνω και κάτω επιφάνειες των σπονδυλικών σωμάτων καλύπτονται από ένα λεπτό στρώμα υαλώδους χόνδρου, το οποίο σχηματίζει τις ακραίες πλάκες (end plates). Η ίνωση του δακτυλίου σχηματίζει έναν περιφερειακό δακτύλιο ινώδους ιστού, ο οποίος συνδέει παρακείμενες ακραίες πλάκες. Εντός του δακτυλίου βρίσκεται ο κεντρικός ένυδρος ζελατινώδης πυρήνας. Οι πρόσθιοι διαμήκεις και οπίσθιοι διαμήκεις σύνδεσμοι παρέχουν πρόσθετη υποστήριξη στα σπονδυλικά σώματα. Οι παρακείμενες αρθρικές αποφύσεις (ανώτερες και κατώτερες) συνδέονται μέσω αρθρικών αρθρώσεων. Ο προσανατολισμός των αρθρώσεων της όψης υπαγορεύει την κίνηση στην οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης. Συνήθως οι αρθρώσεις της οσφυϊκής όψης βρίσκονται σε μια πρόσθια-οπίσθια κατεύθυνση, η οποία επιτρέπει την ελευθερία κάμψης και έκτασης, αλλά περιορίζει την περιστροφή. Η πλάγια κάμψη είναι επίσης δυνατή στην ανθρώπινη οσφυϊκή μοίρα.

Διάφοροι σύνδεσμοι παρέχουν υποστήριξη συνδέοντας γειτονικά στοιχεία των σπονδυλικών τόξων. Το Ligamentum flava (ωχροί σύνδεσμοι) συνδέει παρακείμενους ιστούς, οι ισχυροί υπερακανθώδεις και ασθενέστεροι ενδιάμεσοι σύνδεσμοι συνδέουν γειτονικές ακανθώδεις αποφύσεις, ενώ οι λεπτοί ενδοεγκάρσιοι σύνδεσμοι ενώνουν γειτονικές εγκάρσιες αποφύσεις (Εικόνα 1-6).

Εκτός από τη δύναμη που παρέχουν οι σπονδυλικές αρθρώσεις και οι σύνδεσμοι, σημαντική υποστήριξη παρέχεται στη σπονδυλική στήλη και από τον περιβάλλοντα παρασπονδυλικό μυ, καθώς και από τους μύες του οπίσθιου και του πρόσθιου κοιλιακού τοιχώματος.

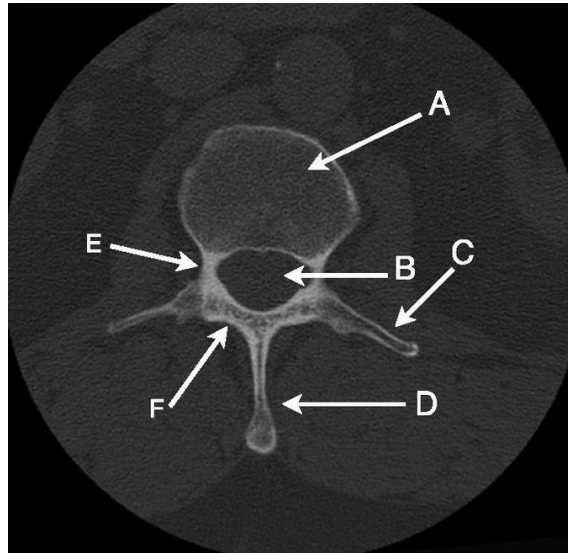


Εικόνα 1-6. Απεικόνιση δύο σπονδυλικών σωμάτων με τον μεσοσπονδύλιο δίσκο και το κανάλι των νεύρων (Πηγή⁵).

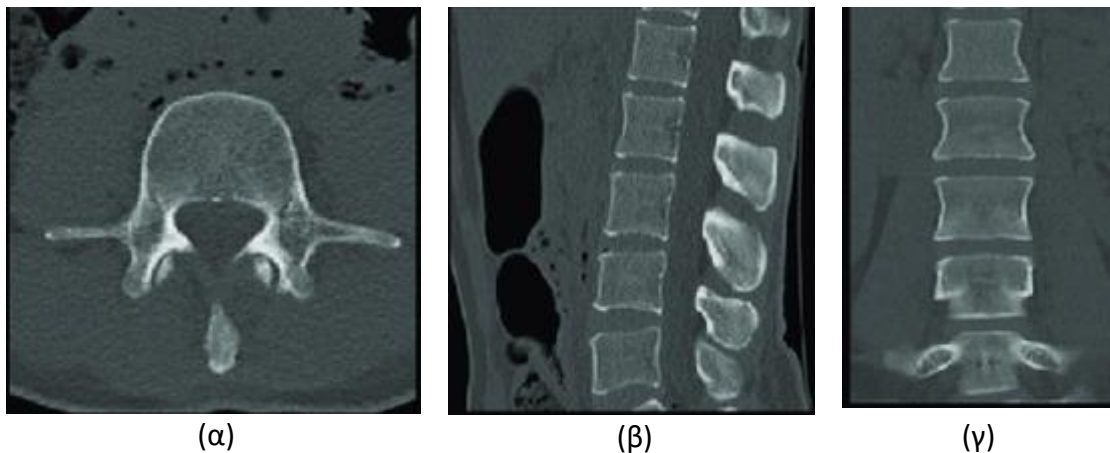
⁴ <https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/MED689>

⁵ <https://www.mychiro.com.my/spinal-disc/>

Οι δομές από τα σπονδυλικά σώματα, όπως όλα τα οστά στο ανθρώπινο σώμα, είναι περισσότερο συμπαγείς από τους υπόλοιπους μαλακούς ιστούς. Για αυτό το λόγο, για την καλύτερη απεικόνισή τους ενδείκνυται την Αξονική Τομογραφία. Στην Εικόνα 1-7 και Εικόνα 1-8 απεικονίζονται σπονδυλικά σώματα από μηχάνημα Αξονικής Τομογραφίας.



Εικόνα 1-7. Απεικόνιση σπονδύλου με Αξονική Τομογραφία. A: σπονδυλικό σώμα, B: κανάλι νευρών, C: εγκάρσια απόφυση, D: ακανθώδης απόφυση, E: αυχένας σπονδυλικού τόξου, F: πέταλο σπονδυλικού τόξου (Πηγή⁶).



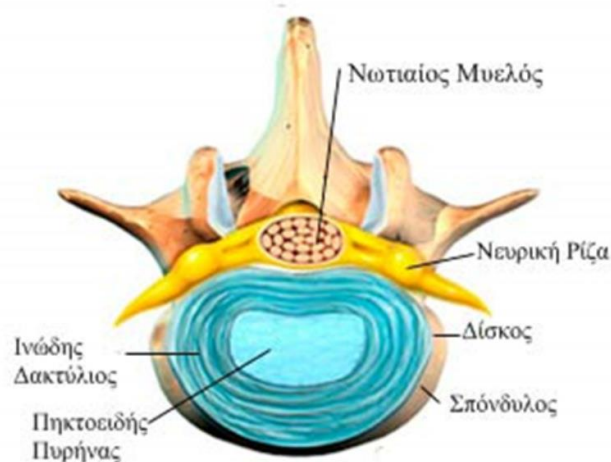
Εικόνα 1-8. Απεικόνιση των τριών τομών σπονδυλικής στήλης από Αξονική τομογραφία. α: εγκάρσια απεικόνιση, β: οβελιαία απεικόνιση, γ: στεφανιαία απεικόνιση.

1.1.2 Μεσοσπονδύλιος Δίσκος

Ο μεσοσπονδύλιος δίσκος χαρακτηρίζεται ως μια ινο-χόνδρινη άρθρωση μεταξύ γειτονικών σπονδύλων, η οποία έχει έναν κεντρικό ενυδατωμένο ζελατινώδη πυρήνα. Λεπτές ακραίες πλάκες υαλώδους χόνδρου είναι προσαρτημένες σε κάθε

⁶https://www.researchgate.net/figure/Axial-CT-image-of-lumbar-vertebra-using-bone-window-settings-A-Body-of-the_fig7_6667312

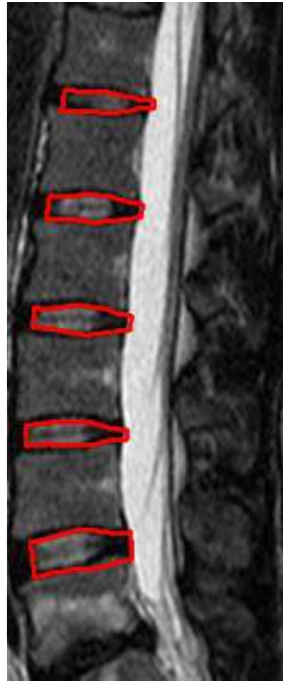
σπονδυλικό σώμα και ενώνονται με έναν εξωτερικό ινώδη δακτύλιο, ο οποίος αποτελείται από ομόκεντρα ελασματοποιημένες ίνες κολλαγόνου. Μικρές ποσότητες ελαστίνης διασυνδέονται ώστε να παρέχεται αντοχή και σταθερότητα. Οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι διευκολύνουν την κίνηση και την ευελιξία της σπονδυλικής στήλης, ενώ έχουν επίσης την ικανότητα να ανακάμπτουν από παραμόρφωση μετά από αξονική φόρτιση. Εξαιρουμένου του νερού, τα κυρίαρχα συστατικά της εξωκυτταρικής μήτρας του δίσκου είναι οι πρωτεογλυκάνες και το κολλαγόνο (Εικόνα 1-9). Ο δίσκος αυτός χάνει την ελαστικότητά του με το πέρασμα του χρόνου. Εν παραδείγματι, σε ένα νεαρό άτομο ο δίσκος είναι εξαιρετικά μαλακός και εύκαμπτος, αλλά όπως συμβαίνει και με άλλες δομικές ομάδες του σώματος, σταδιακά παρουσιάζει απώλεια της ελαστικότητάς του και γίνεται ευάλωτος σε τραυματισμούς. Ακόμη και σε άτομα ηλικίας 30 ετών, τα αποτελέσματα μαγνητικής τομογραφίας παρουσιάζουν φθορά του μεσοσπονδύλιου δίσκου σε ποσοστό περίπου 30% του πληθυσμού [5].



Εικόνα 1-9. Απεικόνιση μεσοσπονδύλιου δίσκου.

Η απεικόνιση του μεσοσπονδύλιου δίσκου γίνεται εμφανέστερη μέσω απεικόνισης από συστήματα Μαγνητικής Τομογραφίας, καθώς αποτελείται στην πλειονότητά του από νερό και ανήκει στα μαλακά μόρια (Εικόνα 1-10) (Πηγή⁷).

⁷<https://www.gethealthier.gr/t%CE%AF-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CE%BF-%CE%BC%CE%B5%CF%83%CE%BF%CF%83%CF%80%CE%BF%CE%BD%CE%B4%CF%8D%CE%BB%CE%B9%CE%BF%CF%82-%CE%B4%CE%AF%CF%83%CE%BA%CE%BF%CF%82-%CE%B7-%CE%BA%CE%AE%CE%BB%CE%B7/>

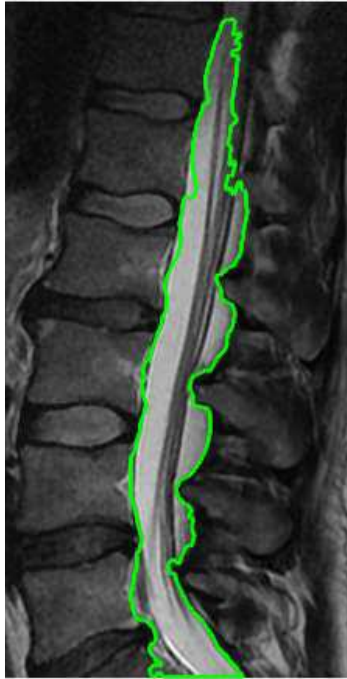


Εικόνα 1-10. Μαγνητική Τομογραφία T2 οσφυϊκής μοίρας. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι.

1.1.3 Κανάλι Νεύρων

Το κανάλι των νεύρων αποτελεί μια επέκταση του κεντρικού νευρικού συστήματος (ΚΝΣ), το οποίο περιλαμβάνει τον εγκέφαλο και τον νωτιαίο μυελό. Ο νωτιαίος μυελός βρίσκεται εντός της σπονδυλικής στήλης και εκτείνεται από το κάτω μέρος του εγκεφαλικού στελέχους, στην περιοχή που ονομάζεται προμήκης μυελός έως και το κάτω μέρος της σπονδυλικής στήλης, καθώς λεπταίνει σχηματίζοντας έναν κώνο που ονομάζεται μυελός κώνος. Ανατομικά, ο νωτιαίος μυελός εκτείνεται από την κορυφή του υψηλότερου οστού του λαιμού, ήτοι από τον σπόνδυλο A1 μέχρι περίπου στο επίπεδο του σπονδύλου O1, το οποίο είναι και το υψηλότερο οστό της κάτω ράχης και βρίσκεται ακριβώς κάτω από το θώρακα.

Στο κάτω μέρος του νωτιαίου μυελού (conus medullaris) βρίσκεται το cauda equina, μια συλλογή νεύρων που πήρε το όνομά του από τη λατινική μετάφραση της «ουράς του αλόγου». Το Εγκεφαλονωτιαίο Υγρό (ΕΝΥ) περιβάλλει τον νωτιαίο μυελό, ο οποίος επίσης θωρακίζεται από τρία προστατευτικά στρώματα που ονομάζονται μήνιγγες (σκληρή μήνιγγα, αραχνοειδής και pia mater) Εικόνα 1-11.

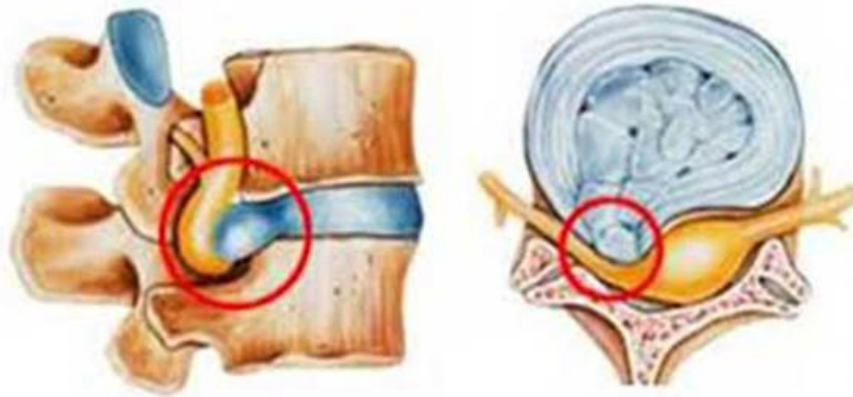


Εικόνα 1-11. Μαγνητική Τομογραφία T2 οσφυϊκής μοίρας. Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται το κανάλι των νεύρων.

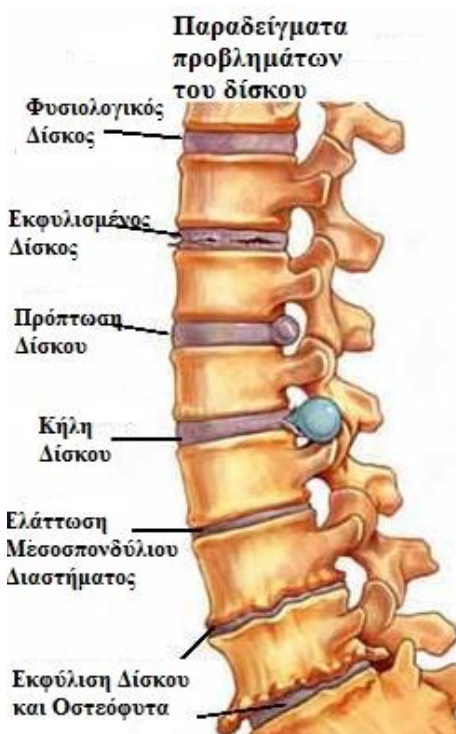
1.2 Παθήσεις Σπονδυλικής Στήλης

Ως παθήσεις της σπονδυλικής στήλης χαρακτηρίζονται οι παθήσεις των οποίων η αιτιολογία είναι η προοδευτική φθορά της σπονδυλικής στήλης λόγω ηλικίας, κληρονομικών ή γενετικών παραγόντων, κακής στάσης σώματος, συνεχούς καταπόνησης της σπονδυλικής στήλης λόγω επαγγέλματος ή συστηματικών νόσων. Οι εκφυλιστικές παθήσεις της σπονδυλικής στήλης μπορούν να επηρεάσουν σχεδόν όλες τις δομές της και οι πιο συνήθεις είναι η κήλη του μεσοσπονδύλιου δίσκου), η σπονδυλική στένωση και η σπονδυλολίσηση.

Η κήλη του μεσοσπονδύλιου δίσκου συνήθως εκδηλώνεται χωρίς κάποιο ιδιαίτερο τραυματικό περιστατικό, όπως η τυχόν άρση κάποιου μικρού βάρους ή η απότομη στροφή της οσφύς. Πρόκειται για μια ευρέως διαδεδομένη πάθηση του μυοσκελετικού συστήματος και συναντάται συχνότερα στην οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης μεταξύ των 35 και 50 ετών, ηλικίες κατά τις οποίες ο δίσκος έχει ήδη υποστεί σημαντικές εκφυλιστικές αλλοιώσεις. Η κήλη ενός οσφυϊκού μεσοσπονδύλιου δίσκου αποτελεί την πιο κοινή αιτία ισχιαλγίας, δηλαδή πόνου και υπαισθησίας στο πίσω μέρος του κάτω άκρου (Εικόνα 1-12, Εικόνα 1-13).



Εικόνα 1-12. Απεικόνιση κήλης μεσοσπονδύλιου δίσκου. Στον κόκκινο κύκλο απεικονίζεται η κήλη που πιέζει τις ρίζες και το κανάλι των νεύρων (Πηγή⁸).



Εικόνα 1-13. Απεικονίζονται οι παθήσεις που μπορούν να εμφανιστούν στον μεσοσπονδύλιο δίσκο (Πηγή⁹).

Αντιθέτως, η Σπονδυλική Στένωση συναντάται πιο συχνά σε ηλικίες άνω των 60 ετών. Η Στένωση Σπονδυλικής Στήλης ή Σπονδυλική Στένωση, είναι συχνά το τελικό αποτέλεσμα συγκεκριμένων εκφυλιστικών παθήσεων όπως η οστεοαρθρίτιδα ή η εκφυλιστική σπονδυλολίση και η κήλη μεσοσπονδύλιου δίσκου [3]. Εάν μάλιστα η στένωση αφορά στα νωτιαία νεύρα που εξέρχονται από τα μεσοσπονδύλια τρήματα, παρατηρούνται συμπτώματα και στα κάτω άκρα (Εικόνα 1-14).

⁸<https://www.neuronaccess.gr/o%CF%83%CF%86%CF%85i%CE%BA%CE%AE%CE%B4%CE%B9%CF%83%CE%BA%CE%BF%CE%BA%CE%AE%CE%BB%CE%B7>

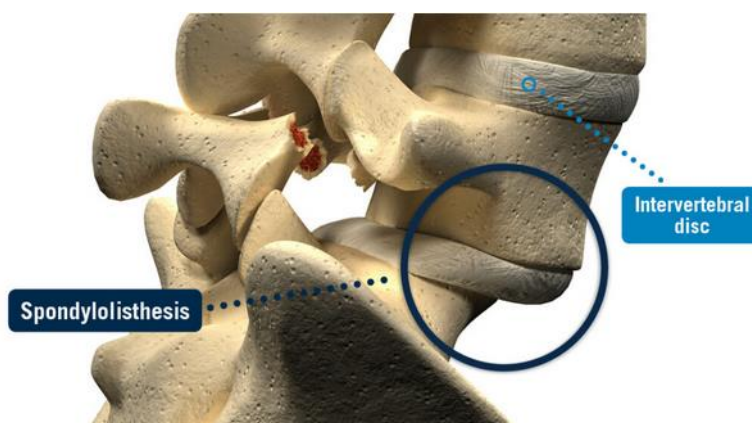
⁹<https://amearodopis.gr/>



Εικόνα 1-14. Απεικόνιση Στένωσης Σπονδυλικής Στήλης (Πηγή¹⁰).

Η Σπονδυλολίση στις περισσότερες περιπτώσεις είναι εκφυλιστική νόσος, ως αποτέλεσμα της συνολικής φθοράς της σπονδυλικής στήλης και εμφανίζεται στη μέση και μεγάλη ανθρώπινη ηλικία και ιδίως σε γυναίκες. Μια άλλη μορφή σπονδυλολίση που εμφανίζεται προκύπτει από μικρό-κατάγματα στο κάτω μέρος της σπονδυλικής στήλης. Η σπονδυλολίση μπορεί πιο σπάνια να είναι συγγενής, δηλαδή να υπάρχει εκ γενετής ελάττωμα στην ένωση των 2 σπονδύλων ή τραυματική, δηλαδή να εμφανιστεί μετά από πτώση ή χτύπημα στη μέση και τέλος παθολογική, όπως σε όγκους σπονδυλικής στήλης (Εικόνα 1-15).

Σε αρχικά στάδια δεν υπάρχουν συμπτώματα και η σπονδυλολίση είναι απλά ένα εύρημα σε μια ακτινογραφία οσφύς. Αργότερα, οι ασθενείς εμφανίζουν πόνο στην οσφύ, ενδεχομένως επεκτεινόμενη και προς τα δύο πόδια. Η στάση του σώματος είναι κάποιες φορές χαρακτηριστική για την εξέλιξη της συγκεκριμένης πάθησης.



Εικόνα 1-15. Απεικόνιση Σπονδυλολίσησης του Ο5 σπονδύλου (Πηγή¹¹).

¹⁰<https://www.sports-physio.gr/path-seis/myoskeletiko-syst-matos/spondylik-st-li/k-li-mesospondylioy-d-skoy.html>

1.3 Τεχνικές Αποκατάστασης

Οι τραυματισμοί της σπονδυλικής στήλης έχουν συχνά μεγάλη σημασία, καθώς μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρά προβλήματα που μπορεί να εμφανιστούν άμεσα, όπως μόνιμη νευρολογική βλάβη και αστάθεια της σπονδυλικής στήλης, αλλά και αρκετό χρόνο μετά τον τραυματισμό, όπως η εκφυλιστική νόσος και η επιδεινούμενη παραμόρφωση της σπονδυλικής στήλης. Η αρχική αντιμετώπιση των ασθενών με κάκωση σπονδυλικής στήλης πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένο ιατρικό και νοσηλευτικό προσωπικό στις παθήσεις της σπονδυλικής στήλης, ώστε να αποφευχθούν περαιτέρω επιπλοκές. Σημαντικός παράγοντας για την σωστή διάγνωση και αντιμετώπιση των παθήσεων είναι ο ακτινολογικός έλεγχος, καθώς και ο έλεγχος με αξονική και μαγνητική τομογραφία.

Οι τεχνικές αποκατάστασης και οι προσεγγίσεις θεραπειών των παραπάνω κακώσεων ποικίλουν και διαφέρουν, ανάλογα με το σημείο στο οποίο εντοπίζονται στην σπονδυλική στήλη καθώς και το είδος της βλάβης. Μερικές από τις κακώσεις που μπορεί να προκύψουν είναι οι στενώσεις του καναλιού των νεύρων, οι κήλες μεσοσπονδύλιου δίσκου, οι ολιστικοί σπόνδυλοι, τα κατάγματα κ.ο.κ. Στις μέρες μας, αυτές οι παραπάνω παθήσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν με ελάχιστα επεμβατικές χειρουργικές τεχνικές, παρέχοντας μικρότερο χρόνο νοσηλείας και αποκατάστασης, όπως επίσης και ελάχιστο ως μηδενικό μετεγχειρητικό πόνο.

¹¹<https://www.spondylos.gr/en/spondylolistheses/>

2 Χρήση Υβριδικού Μοντέλου Αξονικής – Μαγνητικής Τομογραφίας για την Ανίχνευση του Μεσοσπονδύλιου Δίσκου και την Εύρεση του Περιγράμματος του

2.1 Εισαγωγή

Η τμηματοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου έχει οδηγήσει σε πληθώρα μελετών γύρω από τον εντοπισμό του μέσα από ιατρικές απεικονίσεις, ιδίως από την περίοδο που παθήσεις της σπονδυλικής στήλης, όπως είναι κήλη μεσοσπονδύλιου δίσκου και σπονδυλολίση, καθίστανται χρόνιες [4]. Οι περισσότερες μελέτες σχετίζονται με την Μαγνητική Τομογραφία, καθώς αποτελεί απεικονιστική μέθοδο, η οποία εμφανίζει με μεγαλύτερη ευκρίνεια τους μαλακούς ιστούς (μεσοσπονδύλιους δίσκους και κανάλι νεύρων) [5]. Από την άλλη πλευρά, η Αξονική Τομογραφία παρέχει βελτιωμένη πληροφορία ως προς τις παθήσεις που σχετίζονται με σκληρούς ιστούς (σώματα σπονδύλων) [6], [7], [8]. Παρόλο που υπάρχει η ανάγκη της συνδυαστικής πληροφορίας, ελλείπουν οι προσεγγίσεις που βασίζονται στον συνδυασμό διαφορετικών ανατομικών δομών μέσα από τα δυο απεικονιστικά συστήματα, ήτοι Αξονική και Μαγνητική Τομογραφία.

Για τον εντοπισμό του μεσοσπονδύλιου δίσκου έχει παρατηρηθεί σωρεία μελετών, είτε με ημιαυτόματη είτε με πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία. Ο Zheng κ.ά. χρησιμοποίησε *Hough Transform (HT)* για τον εντοπισμό του δίσκου με εικόνες ακτινοσκοπικής απεικόνισης Αξονικής Τομογραφίας, σε συνδυασμό με χειροκίνητο προσδιορισμό της θέσης του δίσκου [9]. Ο Peng κ.ά. εντοπίζει τις αρθρώσεις των σπονδύλων από την ένταση των εικονοστοιχείων, επιλέγοντας με χειροκίνητο τρόπο την βέλτιστη οβελιαία τομή από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας [10]. Ο Schmidt κ.ά. προτείνει μία μέθοδο, η οποία χρησιμοποιεί ταξινομητές ανίχνευσης της σπονδυλικής στήλης [11]. Στη μέθοδο που υποστηρίζει χρησιμοποιεί έναν *tree-classifier* και επιλέγει χειροκίνητα τους μεσοσπονδύλιους δίσκους από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας οσφυϊκής μοίρας σπονδυλικής στήλης. Παρόμοιες μεθοδολογίες, οι οποίες εφαρμόζουν *heuristic-based* αλγορίθμους έχουν προταθεί από τον Corso και Alomari [12], [13]. Ο Stern πρότεινε μία αυτοματοποιημένη μεθοδολογία για τον εντοπισμό του μεσοσπονδύλιου δίσκου, η οποία έχει ως αφετηρία την εξαγωγή των κεντρικών γραμμών της σπονδυλικής στήλης και στην συνέχεια ανιχνεύει τα κέντρα των σπονδυλικών σωμάτων. Για την εύρεση του μεσοσπονδύλιου δίσκου ο Stern αναλύει το χρώμα των εικονοστοιχείων της εικόνας και την κλίση της κεντρικής γραμμής κατά μήκος της σπονδυλικής στήλης [14].

Επιπλέον, ανευρίσκονται και άλλες μέθοδοι εντοπισμού που χρησιμοποιούν αλγορίθμους *Markov Random Field (MRF)*. Εν παραδείγματι, ο Donner χρησιμοποιεί

MRF για να κωδικοποιήσει την αλληλεξάρτηση μεταξύ της θέσης του μεσοσπονδύλιου δίσκου με ολόκληρη την εικόνα [15]. Επιπλέον, ο Oktay και ο Akgül περιγράφουν μία μέθοδο για τον ταυτόχρονο εντοπισμό οσφυϊκών σπονδύλων και μεσοσπονδύλιου δίσκου από δισδιάστατες οβελιαίες εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας χρησιμοποιώντας *support vector-machine (SVM)*, ο οποίος βασίζεται σε αλγορίθμους *MRF* [4]. Ως πρώτο βήμα, η μέθοδός τους επεξεργάζεται τις πληροφορίες της περιοχής γύρω από κάθε σπόνδυλο και κάθε δίσκο, ώστε να εντοπίσει την κλίση τους. Σε δεύτερο στάδιο χρησιμοποιείται η δομή της σπονδυλικής στήλης με *Markov-chain*, προσεγγίζοντας με τον τρόπο αυτό την θέση των σπονδύλων και των μεσοσπονδύλιου δίσκου μέσα στην εικόνα. Παράλληλα, ο Kelm παρουσίασε έτερη προσέγγιση που βασίζεται στην χρήση *machine learning-based* αλγορίθμου, προκειμένου να χρησιμοποιήσει τεχνητή μάθηση για την ανίχνευση της θέσης της σπονδυλικής στήλης σε εικόνες Αξονικής και Μαγνητικής Τομογραφίας [16]. Για την ταυτόχρονη εκτίμηση της θέσης του προσανατολισμού και του μεγέθους της σπονδυλικής στήλης εφάρμοσε μεθοδολογία με τρεις ταξινομητές, οι οποίοι λειτουργούν ως ακολούθως: α) ο πρώτος προβαίνει στην εκτίμηση της πιθανής θέσης, β) ο δεύτερος πιθανολογεί την θέση και τον προσανατολισμό και γ) ο τρίτος επεξεργάζεται όλες τις παραμέτρους συνολικά. Η στρατηγική αυτή στοχεύει στον αποδοτικότερο εντοπισμό του μεσοσπονδύλιου δίσκου με τελικό στόχο την τμηματοποίησή του με *case-adaptive graph* τεχνική.

Η τμηματοποίηση μεσοσπονδύλιου δίσκου πραγματοποιείται με χειροκίνητες, ημιαυτόματες και αυτόματες μεθόδους επεξεργασίας εικόνας. Ο Chevrefils χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά υψής για να προσδιορίσει το περίγραμμα του μεσοσπονδύλιου δίσκου με αυτόματη τμηματοποίηση σε δισδιάστατες εικόνες από Μαγνητική Τομογραφία σε σκολιωτική σπονδυλική στήλη [17], [18]. Χαρακτηριστικά υψής σε συνδυασμό με τη μέθοδο *watershed-based*, αξιοποιήθηκαν για τον εντοπισμό του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Η Michorouliou πρότεινε μία ημιαυτόματη μεθοδολογία, στην οποία απαιτείται η επιλογή σημείων του αριστερότερου και του δεξιότερου σημείου του μεσοσπονδύλιου δίσκου [19]. Η πληροφορία από την θέση των σημείων καθοδηγούν τον αλγόριθμο τμηματοποίησης που βασίζεται σε *atlas-based* μέθοδο. Μία άλλη ημιαυτόματη μέθοδος που βασίζεται σε μοντέλα αναγνώρισης σχήματος προτάθηκε από τον Neubert [20]. Η μέθοδός του δημιουργεί μία καμπύλη κατά μήκος της σπονδυλικής στήλης, πάνω στην οποία τοποθετεί διαδραστικά τετράγωνα. Μεταγενέστερα, ο Neubert πρότεινε μία μέθοδο τμηματοποίησης που βασίζεται στην ανάλυση των τόνων του γκρι χρώματος στην εικόνα. Πρωτίστως, η μέθοδος αυτή αναγνωρίζει την τρισδιάστατη καμπύλη της σπονδυλικής στήλης και έπειτα εντοπίζει τον μεσοσπονδύλιο δίσκο χρησιμοποιώντας αλγόριθμο *Canny edge detector*, με τον οποίο αναγνωρίζεται η ένταση των χρωματικών τόνων του γκρι από τα εικονοστοιχεία [21]. Ως αποτέλεσμα, παράγεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο από τους μέσους όρους του σχήματος. Με αυτή τη διαδικασία ανιχνεύονται οι θέσεις των περιοχών ενδιαφέροντος στην εικόνα. Όλη η διαδικασία που περιγράφηκε

επαναλαμβάνεται και με την αντιστοίχιση των εντάσεων των τόνων του γκρι με τα εικονοστοιχεία της εικόνας.

Παράλληλα, είναι ευρέως διαδεδομένες οι μέθοδοι που βασίζονται σε *graph-based* μοντέλα [22], [23], [24], [25]. Η μέθοδος του Law για την ανίχνευση του μεσοσπονδύλιου δίσκου βασίζεται στην ανισοτροπική προσανατολισμένη ανίχνευση, απαιτώντας ελάχιστη αλληλεπίδραση από τον χρήστη [26]. Τα βήματα τμηματοποίησης αυτής της μεθόδου εκτελούνται χρησιμοποιώντας μία διαδικασία με πολλαπλά επίπεδα που βασίζεται στα ενεργά περιγράμματα. Ο Zhan χρησιμοποίησε φιλτράρισμα *Haar*, έναν ταξινομητή *Adaboost* και ένα αρθρωτό μοντέλο για τον υπολογισμό των χωρικών συσχετίσεων μεταξύ σπονδυλικών σωμάτων και του μεσοσπονδύλιου δίσκου [27]. Ένας συνδυασμός από *wavelet-based* ταξινόμηση, ο οποίος χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με *Adaboost* και επαναληπτικές διαδικασίες, προτάθηκε από τον Huang για την ανίχνευση και την τμηματοποίηση διαφορετικών περιοχών [6]. Ο Glocker χρησιμοποιεί *random forest (RF)* παλινδρόμηση και *hidden Markov models (HMMs)* για τον εντοπισμό και την αναγνώριση των σπονδύλων σε εικόνες αξονικής τομογραφίας [28], [29]. Επιπλέον, οι Lopez Andrade και Glocker χρησιμοποίησαν δύο συμπληρωματικά *RFs* για τον εντοπισμό του μεσοσπονδύλιου δίσκου, ακολουθώντας βήματα επεξεργασίας από *graph-cut-based* τμηματοποίηση [30]. Η τμηματοποίηση με *RF-based* βασίζεται σε ραδιοσυχνότητες και απαιτεί συγκεκριμένη και ειδική εκπαίδευση [31]. Οι Wang και Forsberg χρησιμοποιούν τα χαρακτηριστικά από τα κανάλια της εικόνας. Το μοντέλο που παρουσιάζουν αξιοποιεί τα γραφικά στοιχεία σε συνδυασμό με καταχωρημένους άτλαντες από μεσοσπονδύλιους δίσκους για τον εντοπισμό και την τμηματοποίησή τους [32]. Ο Korez προάγει ένα *supervised framework* για τον πλήρως αυτοματοποιημένο εντοπισμό και την τμηματοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου, μάλιστα ο ίδιος έχει αναπτύξει μία τεχνική που βασίζεται σε *RF-based* μοντέλο με διακριτά σημεία, βελτίωση επιφανείας, χαρακτηριστικά *Haar*, περιγραφές με *self-similarity context* και *shape-constrained* παραμορφώσιμα μοντέλα [33]. Ο Chen προτείνει μια μεθοδολογία η οποία συνδυάζει μια *data-driven* παλινδρόμηση, με έναν ταξινομητή και τη χρησιμοποιεί ως επίλυση για την αντιμετώπιση του προβλήματος εντοπισμού και τμηματοποίησης του μεσοσπονδύλιου δίσκου από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας με ακολουθία T2 [34].

Προσφάτως, μία νέα μεθοδολογία αναπτύχθηκε με την ονομασία *deep learning* για την αποτελεσματική ανάλυση των εικόνων της σπονδυλικής στήλης. Ο Cai αναφέρει την χρήση ενός ιεραρχικού τρισδιάστατου μοντέλου παραμόρφωσης για την αναγνώριση σπονδύλων από διαφορετικά απεικονιστικά συστήματα, με βάση το οποίο τα *multi-modal* χαρακτηριστικά εξάγονται από *deep networks* και χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των σπονδύλων [35].

Από την άλλη πλευρά, ανευρίσκονται μεταξύ άλλων και προσεγγίσεις που βασίζονται σε *watershed-based* τμηματοποίηση για την αναγνώριση διαφορετικών περιοχών ενδιαφέροντος. Παρόλα αυτά, οι εν λόγω προσεγγίσεις, όπως για

παράδειγμα οι αλγόριθμοι *deep network*, χρειάζονται μεγάλο όγκο δεδομένων για την εκπαίδευσή τους. Ειδικότερα, προκειμένου να αξιοποιηθεί και να λειτουργήσει ευχερώς ένα μοντέλο που περιλαμβάνει εικόνες από Αξονική και Μαγνητική Τομογραφία ενδέχεται να απαιτούνται πάνω από χίλια διακόσια (1200) ζεύγη εικόνων, ωστόσο ταυτόχρονα ελλείπει ο επαρκής έλεγχος για την υπερπροσαρμογή στον τρόπο αξιολόγησης των αναγνωρισμένων περιοχών. Σημειωτέον, με τη χρήση του εν θέματι μοντέλου δεν παρέχονται οι κατάλληλες λεπτομέρειες αφενός σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του αλγόριθμου κατά την τμηματοποίηση και αφετέρου σχετικά με την συνάρτηση ποιότητας-ακρίβειας κατά την αναγνώριση περιοχών ενδιαφέροντος. Παρά τις παραπάνω ελλείψεις, η μέθοδος του Cai είναι ενδιαφέρουσα επειδή συνδυάζει πληροφορίες από δεδομένα Αξονικής και Μαγνητικής Τομογραφίας [35].

Παρόμοια κριτήρια όσον αφορά στο μέγεθος και στο σύνολο των δεδομένων κατά την εκπαίδευση και την υπερπροσαρμογή εφαρμόζονται και σε άλλα συστήματα μάθησης, όπως του Suzani [36], που χρησιμοποιεί *feed-forward neural network* σε δεδομένα Αξονικής Τομογραφίας κατά Chen, ο οποίος χρησιμοποίησε *fully convolutional networks (FCNs)* σε τρισδιάστατες εικόνες με ευέλικτα τρισδιάστατα *convolutional kernels* σε δεδομένα από Μαγνητική Τομογραφία [37]. Εν κατακλείδι, το κύριο πρόβλημα που ανακύπτει κατά την εφαρμογή μοντέλων *deep learning* είναι η ύπαρξη μεγάλου όγκου τρισδιάστατων δεδομένων. Πολλώ δε μάλλον, στην περίπτωση της προσέγγισης που χρησιμοποιεί συνδυαστική πληροφορία από δύο διαφορετικά απεικονιστικά συστήματα ταυτόχρονα, απαιτείται η ύπαρξη ζεύγους εικόνων και από τα δύο συστήματα.

Ταυτόχρονα, παρατίθεται στην αναφορά υπ' αριθ. [8] σχετικά πρόσφατη συγκριτική μελέτη όπου παρουσιάζονται ποικίλες και νέες μέθοδοι, οι οποίες εστιάζουν στον εντοπισμό και στην τμηματοποίηση ανατομικών περιοχών από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας. Αξιοπρόσεκτο είναι ότι στην πλειονότητα των μελετών αυτών απαιτείται παρέμβαση από τον χειριστή, παρόλο που τα μοντέλα λειτουργούν σε δισδιάστατες οβελιαίες τομές αντί για τρισδιάστατα δεδομένα. Ως προς την κατωτέρω παρατιθέμενη αναφορά, όλες οι παρακάτω εργασίες έχουν εφαρμοστεί μόνο σε ένα απεικονιστικό σύστημα Αξονικής ή Μαγνητικής τομογραφίας, εκτός από την εργασία υπ' αριθ. [35]. Στον Πίνακα 2-1, συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί αρκετών καινούργιων προσεγγίσεων που υπάρχουν στην αναφορά [8]. Οι παρακάτω μεθοδολογίες συμπεριλαμβάνονται στην σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων από την τρέχουσα εργασία.

Πίνακας 2-1. Σύνοψη των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών των μεθόδων.

	Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί	Μέσος χρόνος επεξεργασίας
ΑΤ	Huang [6]	Τμηματοποίηση εικόνων με ανομοιογένεια		Ο χρόνος εξαρτάται από τις

	έντασης και μη διακριτά όρια		επαναλήψεις, 0.7-20.2 δευτ, 2.79 GHz Matlab.
Isaac [7]	Ένα μοντέλο μεταξύ αντικειμένων που εγγυάται ότι δεν παραμορφώνονται με τον μετασχηματισμό.	Απαιτείται η χειροκίνητη επιλογή του κέντρου, μεσοσπονδύλιου δίσκου.	50 δευτ, ανά σπόνδυλο, 2.4 GHz C++.
Lopez Andrade and Glocker [30]	Βελτιστοποίηση τμηματοποίησης με εκμάθηση.	L5-S1 πρέπει να εμφανίζεται ο δίσκος. Απαιτείται εκπαίδευση.	3 λεπτά, 3.5 GHz 4-cores Python και C++.
Wang and Forsberg [32]	Χρήση παράλληλης επεξεργασίας.	Η πολυπλοκότητα εξαρτάται από τον αριθμό των ατλάντων. Δομές με προβλήματα κατάτμησης, αποκλείονται από τους άτλαντες.	8 .5 λεπτά, 3 .2 GHz 4-cores Matlab και Cuda.
Chen [33]	Αξιοποίηση ευέλικτης τρισδιάστατης συνέλιξης. Γρήγορη ταξινόμηση.	Η δέσμευση μνήμης είναι ανάλογο της ανάλυσης της εικόνας.	3 .1 δευτ., 2 .5 GHz 4-cores Python.
MT			
Korez [32]	Υπολογιστικά αποδοτική αι ισχυρή.	Η υπολογιστική πολυπλοκότητα είναι ανάλογη με τον αριθμό των εικονοστοιχείων που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση. Παρουσιάζονται προβλήματα κομμένων τμημάτων εικόνων.	5 λεπτά, 3 .2 GHz 4-cores C++ και Matlab.

Στην υπάρχουσα εργασία παρουσιάζεται μία προσέγγιση για την ανίχνευση του περιγράμματος των σπονδύλων και του μεσοσπονδύλιου δίσκου με συνδυαστική πληροφορία. Παρόλο που μία τέτοια προσέγγιση προϋποθέτει διαθέσιμα δεδομένα (εικόνες) για κάθε ασθενή από Αξονική και Μαγνητική Τομογραφία, η παρούσα προτεινόμενη μεθοδολογία αξιοποιεί ολόκληρη την ανατομική πληροφορία από αμφότερα απεικονιστικά συστήματα. Για το τελικό αποτέλεσμα αξιοποιούνται εικόνες αποκλειστικά Μαγνητικής Τομογραφίας, ενώ ταυτόχρονα δεν απαιτείται μεγάλος όγκος εικόνων και η ανθρώπινη παρέμβαση παρατηρείται περιορισμένη. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της τμηματοποίησης από την παρούσα μεθοδολογία συγκρίνονται με άλλες παρεμφερείς μελέτες από την παρατιθέμενη βιβλιογραφία,

εισφέροντας συγκρίσιμα αποτελέσματα, παρά το γεγονός ότι η μέθοδος αυτή δεν βασίζεται σε μοντέλα *learning-based*.

Εκτός από την τμηματοποίηση, η σπονδυλική στήλη αναπαρίσταται μέσω μιας σύνθεσης, η οποία απαρτίζεται από δύο διαφορετικά απεικονιστικά συστήματα. Η συγκεκριμένη πρακτική θα μπορούσε ενδεχομένως να αποτελέσει μία διαφορετική οπτική στην διάγνωση πολλαπλών παθήσεων και παθολογιών σχετιζόμενων με την σπονδυλική στήλη και βασίζεται στις ιδιότητες και τα απεικονιστικά οφέλη που αποφέρει η Αξονική Τομογραφία. Ειδικότερα, με την βοήθεια της Αξονικής Τομογραφίας οι σπόνδυλοι εμφανίζονται πιο ευδιάκριτα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα απεικονιστικά συστήματα που υπάρχουν μέχρι και σήμερα. Υπό την οπτική αυτή, κάθε εικόνα προερχόμενη από τη Μαγνητική Τομογραφία σχετίζεται γεωμετρικά κατά την διαδικασία ευθυγράμμισής της με την αντίστοιχη εικόνα από την Αξονική Τομογραφία.

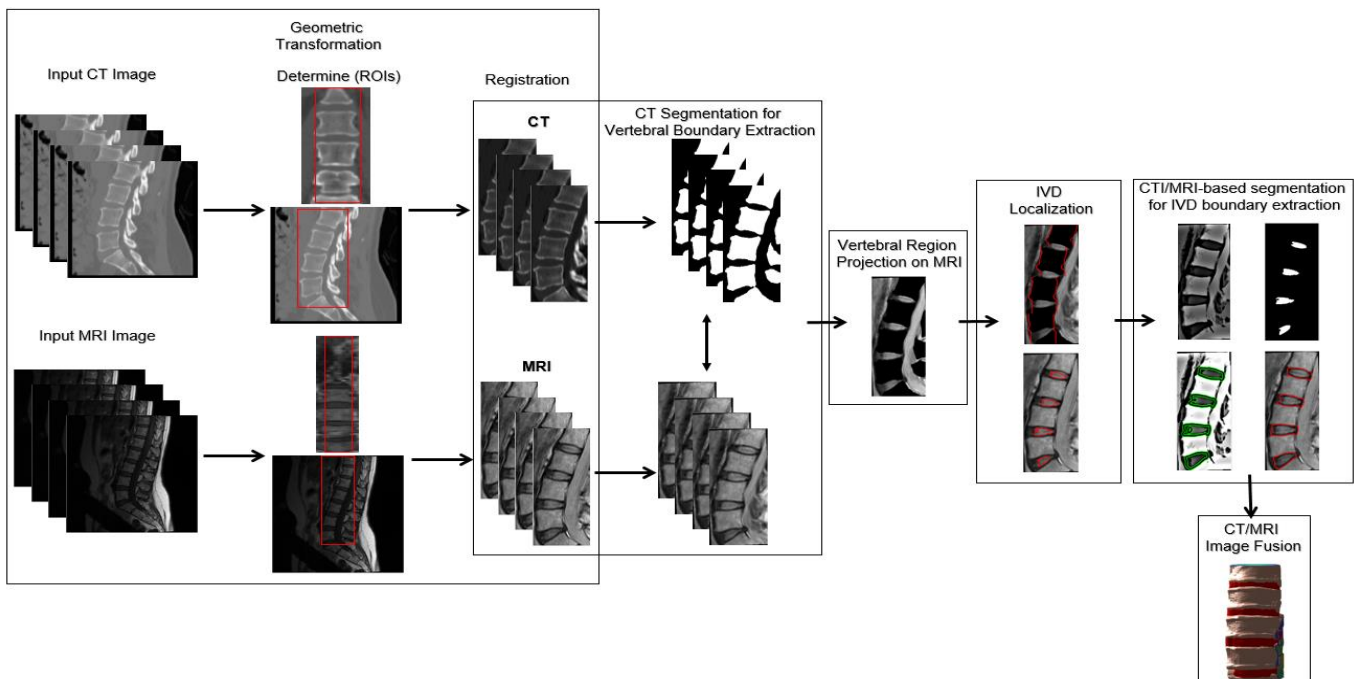
Εν συνεχεία, οι υπό εξέταση περιοχές όπου βρίσκονται οι σπόνδυλοι εξάγονται από οβελιαίες δισδιάστατες εικόνες Αξονικής Τομογραφίας και προβάλλονται επάνω στις αντίστοιχες οβελιαίες τομές από τη Μαγνητική Τομογραφία. Οι προβαλλόμενες περιοχές των σπονδύλων ορίζουν –με τον τρόπο αυτό– τα φυσικά όρια των αντίστοιχων περιοχών όπου βρίσκονται οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι, με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημεία αναφοράς για τον καθορισμό της θέσης τους και κατ' επέκταση για την ανίχνευσή τους. Στο τελικό στάδιο της τμηματοποίησης χρησιμοποιείται *region-based* με *active contour* μεθοδολογία με εφαρμογή στις περιοχές που έχουν εντοπιστεί ανάμεσα από τις τελικές πλάκες των σπονδύλων.

Το υπόλοιπο μέρος της παρούσας μελέτης έχει οργανωθεί και ταξινομηθεί ως εξής: Στην ενότητα 2.3 παρατίθενται και αναλύονται τα επιμέρους στάδια της προτεινόμενης μεθοδολογίας, ακολούθως η ενότητα 1.4 παρέχει μία πειραματική αξιολόγηση της σύνθεσης των εικόνων αξονικής και μαγνητικής τομογραφίας, η οποία συγκρίνεται με τις υπόλοιπες μεθόδους που παρουσιάζονται και τέλος, στην ενότητα 1.5 αναλύονται ενδελεχώς τα κύρια αποτελέσματα και συνοψίζονται εν όλω τα συμπεράσματα της εκπονούμενης εργασίας.

2.2 Μεθοδολογία

Η εν λόγω μελέτη στοχεύει στην ανεύρεση των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου και στην απεικόνιση της σπονδυλικής στήλης, αξιοποιώντας ταυτόχρονα εικόνες από δύο διακριτά απεικονιστικά συστήματα, ήτοι της Αξονικής και της Μαγνητικής τομογραφίας. Η ανασκόπησή μας αποτελείται από έξι κύρια στάδια επεξεργασίας, όπως αυτά υποδεικνύονται κατωτέρω, στην Εικόνα 2-1: (1) γεωμετρικός μετασχηματισμός προκειμένου να αναγνωριστούν τα βασικά χαρακτηριστικά από τις δομές που προσδιορίζονται με την Αξονική Τομογραφία, τα οποία εν συνεχεία προβάλλονται επάνω στις εικόνες από την Μαγνητική Τομογραφία, (2) τμηματοποίηση από παρεχόμενες εικόνες Αξονικής Τομογραφίας, με σκοπό τον προσδιορισμό των ορίων μέσω των σπονδύλων. Η προπεριγραφόμενη διαδικασία

δείχνει σημαντική για τα μετέπειτα στάδια της μεθοδολογίας που προτείνεται, επιτυγχάνεται δε με *linear gray level normalization* και αξιοποιεί την μέθοδο κατά Otsu μέσω χρήσης κατωφλίου τριών επιπέδων σε αποχρώσεις του γκρι, (3) με την προβολή των σπονδύλων επάνω στις εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας, εφαρμόζοντας την προσέγγιση από το στάδιο- ένα, (4) με τον συνακόλουθο εντοπισμό της θέσης του μεσοσπονδύλιου δίσκου μέσω της αφαίρεσης των εικόνων, (5) με την εξεύρεση των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου και την τμηματοποίηση και οριοθέτηση της περιοχής, εφαρμόζοντας τα σπονδυλικά όρια από το στάδιο- τρία. Συν τοις άλλοις, πραγματοποιείται και χρήση αλγορίθμου κατά Chan-Vese με ενεργά περιγράμματα, (6) ακολουθεί ο συνδυασμός των εικόνων που προέρχονται από την Αξονική και τη Μαγνητική Τομογραφία προς απεικόνιση της σπονδυλικής στήλης μαζί με όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος. Η παρούσα προκρίνει και υποστηρίζει μία μέθοδο, η οποία βασίζεται στις τρισδιάστατες εικόνες (Αξονικής – Μαγνητικής Τομογραφίας), παρόλο που τα στάδια της επεξεργασίας εφαρμόζονται σε δισδιάστατες εικόνες για κάθε τρισδιάστατο συνδυασμό δεδομένων.



Εικόνα 2-1. Απεικόνιση των κύριων σταδίων της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

2.2.1 Γεωμετρικός Μετασχηματισμός

Στο αρχικό στάδιο, χρησιμοποιείται ως είσοδος ένα ζεύγος τρισδιάστατων εικόνων από την Αξονική Τομογραφία και ένα αντίστοιχο από τη Μαγνητική Τομογραφία. Ο χρήστης, έπειτα, επιλέγει χειροκίνητα την περιοχή ενδιαφέροντος (region of interest 'ROI'), από τα ζεύγη των τρισδιάστατων εικόνων, ώστε να ξεκινήσει η επεξεργασία των δεδομένων. Αν και οι περιοχές ενδιαφέροντος αντιστοιχούν σε κοινές ανατομικές δομές, διαπιστώνεται διαφορετικό πλήθος εικόνων και διαφορετικό μέγεθος εικονοστοιχείων [38]. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι ο

προσδιορισμός της περιοχής ενδιαφέροντος είναι και η μοναδική ανθρώπινη παρέμβαση, η οποία απαιτείται στη μεθοδολογία που προτάσσουμε.

Η τρισδιάστατη περιοχή ενδιαφέροντος, εξαγόμενη από την Μαγνητική Τομογραφία μετασχηματίζεται γεωμετρικά, ούτως ώστε να ταιριάζει τελικά με την τρισδιάστατη περιοχή που ανιχνεύθηκε διαμέσου της αξονικής τομογραφίας. Η διαδικασία που περιγράφηκε πραγματοποιείται με τη βοήθεια του αλγορίθμου *one-to-one evolutionary optimization* [39] και με τις μεθόδους γεωμετρικού μετασχηματισμού κατά Wells [40], οι οποίες μάλιστα βασίζονται στην κοινή πληροφορία των εικόνων (Εικόνα 2-2).

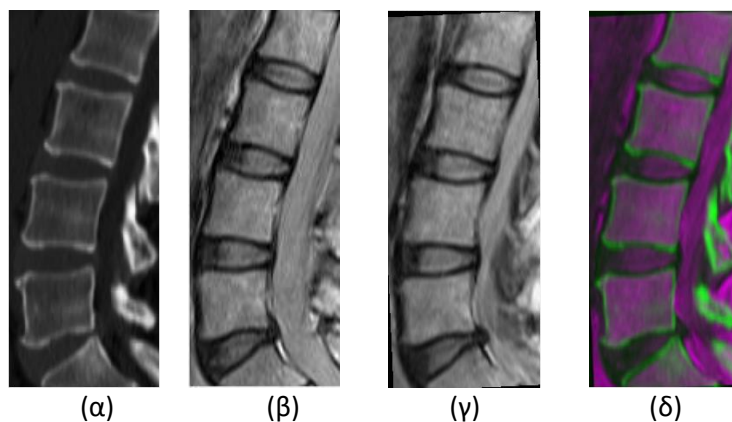
Με την παρούσα επεξεργασία διαφαίνεται πως τόσο η Αξονική όσο και η Μαγνητική Τομογραφία εμπεριέχουν πανομοιότυπες πληροφορίες για την συγκεκριμένη ανατομική περιοχή. Υπό αυτό το πρίσμα, χρησιμοποιείται μία συνάρτηση μετασχηματισμού T προκειμένου να υλοποιηθεί ο μετασχηματισμός και επακολούθως να βρεθεί η βέλτιστη θέση ταυτοποίησης της κοινής πληροφορίας των εικόνων εκ των δύο αναφερόμενων απεικονιστικών συστημάτων. Η παρακάτω συνάρτηση ποσοτικοποιείται μέσω της εντροπίας I :

$$\hat{T} = \operatorname{argmax}_T I(u(x), v(T(x))) \quad (2.1)$$

όπου:

$$I(u(x), v(T(x))) \equiv h(u(x)) + h(v(T(x))) - h(u(x), v(T(x))) \quad (2.2)$$

όπου x αναπαρίστανται οι συντεταγμένες των εικονοστοιχείων, $u(x)$ αναπαριστά το εικονοστοιχείο αναφοράς που αντιστοιχεί στα δεδομένα από την αξονική τομογραφία. Το $v(x)$ αναφέρεται στον όγκο των εικονοστοιχείων στην εικόνα εφαρμογής (μαγνητικής). Τα $h(u)$ και $h(v)$ αναπαριστούν τις εντροπίες των τυχαίων μεταβλητών u και v , αντίστοιχα. Όπου, $h(u, v) \equiv - \int p(u, v) \ln p(u, v) du dv$ αναπαρίσταται η κοινή εντροπία των μεταβλητών u , v . Ο υπολογισμός της εντροπίας βασίζεται στην εκτίμηση που πραγματοποιείται από την επικείμενη συνάρτηση πιθανότητας - πυκνότητας μέσω του παραθύρου πυκνότητας *Parzen*. Περισσότερες λεπτομέρειες αναλύονται στην αναφορά [39].



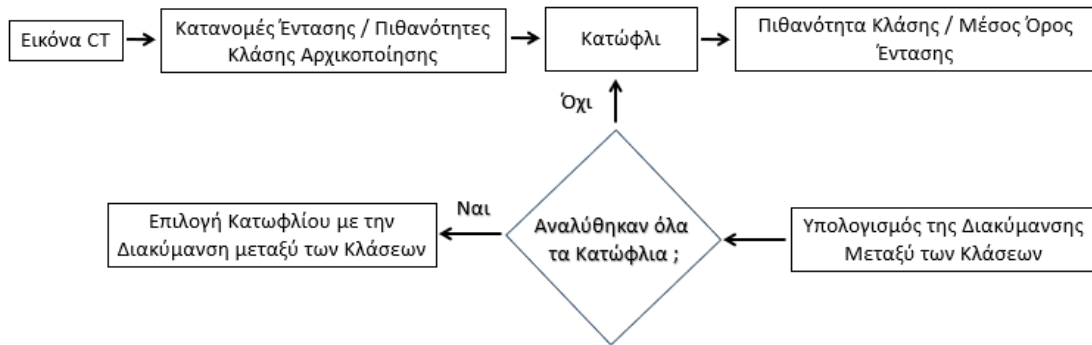
Εικόνα 2-2. (α) Αρχική εικόνα Αξονικής Τομογραφίας, (β) Αρχική εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας, (γ) μετασχηματισμένη εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας (γ) Σύνθεση εικόνας Αξονικής – Μαγνητικής Τομογραφίας.

2.2.2 Τμηματοποίηση για την Εύρεση του Περιγράμματος των Σπονδύλων, σε Εικόνες Αξονικής Τομογραφίας

Δεδομένου ότι οι σπονδυλικές περιοχές είναι εμφανέστερες και περισσότερο διακριτές στην Αξονική Τομογραφία, με τη μεθοδολογία μας εστιάζουμε στη συγκεκριμένη μορφή απεικόνισης για την εξεύρεση των σπονδυλικών περιγραμμάτων. Ωστόσο, στο στάδιο αυτό παρατηρούνται αρκετές προκλήσεις σχετικά με τον ακριβή εντοπισμό των ορίων σε αυτές τις μορφές των εικόνων. Πολύ περισσότερο, διαπιστώνονται ανομοιογένειες στις εντάσεις των τόνων του γκρι από τα εικονοστοιχεία στις διαφορετικές ανατομικές περιοχές, οι οποίες ενδεχομένως θα μπορούσαν να προκαλέσουν 'ψευδή' ελλείματα εντός της εικόνας, καθώς και αλλοίωση στην ένταση των χρωμάτων εξαιτίας της παρουσίας θορύβου, με αποτέλεσμα μια λανθασμένη τμηματοποίηση.

Στο σημείο αυτό εφαρμόζεται γραμμική κανονικοποίηση στις εντάσεις των χρωμάτων του γκρι, ως στάδιο προ-επεξεργασίας, με απώτερο σκοπό την αλλαγή κατανομής της έντασης των χρωμάτων στα εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν στις περιοχές ενδιαφέροντος (Εικόνα 2-3). Προβαίνουμε, επίσης, σε προ-επεξεργασία στις εικόνες Αξονικής Τομογραφίας, προκειμένου να οριοθετήσουμε με ευδιάκριτο τρόπο τις περιοχές ενδιαφέροντος. Στη συγκεκριμένη φάση, εφαρμόζουμε κατωφλίωση κατά Otsu με τρεις περιοχές ενδιαφέροντος για την εξαγωγή των σπονδυλικών περιγραμμάτων. Τα όρια που χρησιμοποιούνται επιλέγονται αυτόματα από μία 'μή παραμετρική' χωρίς επίβλεψη διαδικασία [41]. Ο αλγόριθμος εντοπίζει τα κατώφλια $k - 1$ που θα αξιοποιηθούν για k διαφορετικές κλάσεις, αυξάνοντας παράλληλα την διακύμανση μεταξύ διαφορετικών περιοχών.

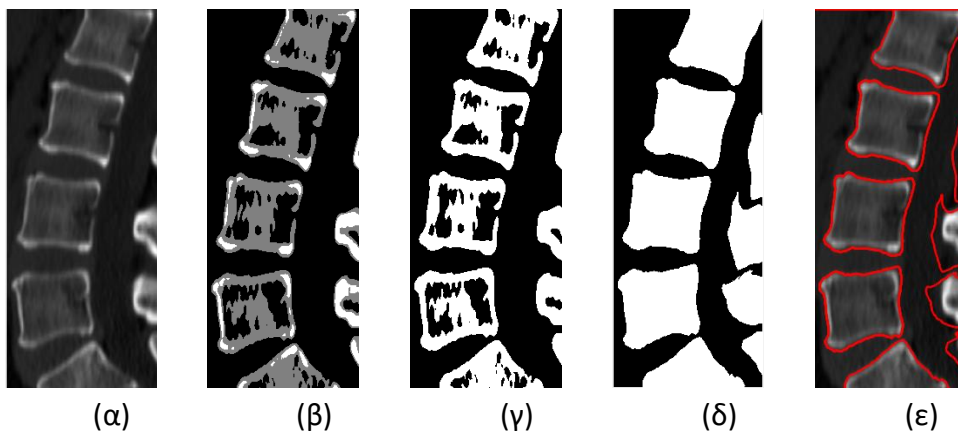
Τα κύρια σημεία του εν λόγω αλγορίθμου παρατηρούνται ως εξής: (1) Πρώτα, αρχικοποιούνται τα χρώματα των εικονοστοιχείων με πιθανοτικές κατανομές έντασης, με αποτέλεσμα να διαμορφώνονται κατηγορίες για κάθε περιοχή της εικόνας, έπειτα (2) εξετάζονται όλοι οι συνδυασμοί που έχουν προκύψει από τα κατώφλια που έχουν χρησιμοποιηθεί με τη συνδρομή της πιθανοτικής διαδικασίας. Εν συνεχεία, υπολογίζεται η μέση τιμή από τις τιμές των εικονοστοιχείων για έκαστη κλάση και η διακύμανση μεταξύ των κλάσεων αυτών, και ακολούθως (3) επιλέγονται οι τιμές του κατωφλίου που αντιστοιχούν στη μέγιστη διακύμανση μεταξύ των κλάσεων. Το σχήμα στην (Εικόνα 2-3) αναπαριστά το διάγραμμα ροής για την επιλογή του ορίου κατά Otsu. Οι τρεις υπό εξέταση κατηγορίες σχετίζονται με τις περιοχές της εικόνας και περιλαμβάνουν: το υπόβαθρο, τα σπονδυλικά σώματα και τα περιγράμματα των σπονδύλων (Εικόνα 2-4β). Σε αυτή την εικόνα είναι επίσης εμφανής η παρουσία 'κενών' μέσα στα σώματα των σπονδύλων, γεγονός που προκαλείται λόγω της ανομοιογένειας της έντασης των χρωμάτων εντός της εικόνας. Οι δύο εναπομείνουσες κατηγορίες συν ενώνονται και δημιουργείται η (Εικόνα 2-4γ).



Εικόνα 2-3. Διάγραμμα ροής για την επιλογή κατωφλίου Otsu από εικόνες αξονικής τομογραφίας.

Προκειμένου να διαχειριστούμε τα «κενά» που προκύπτουν λόγω της ανομοιογένειας της έντασης των εικονοστοιχείων από την χρήση της μεθόδου κατά Otsu, προχωρούμε σε συνένωση των κενών αυτών, τα οποία ανευρίσκονται μεταξύ των σπονδύλων μέσω των μορφολογικών φίλτρων *closing operations*. Αναλυτικότερα, εφαρμόζεται φίλτρο 10×10 με ακτίνα 2, με αποτέλεσμα την επίτευξη μερικής κατάτμησης, παρά την ύπαρξη περιοχών με ψευδή πληροφορία, ήτοι χωρίς να αντιστοιχούν αυτές στους σπονδύλους που εξετάζονται κατά περίπτωση, στο φόντο της εικόνας. Παρατηρείται δηλαδή ότι οι περιοχές αυτές δεν συσχετίζονται μεταξύ τους στο z επίπεδο.

Προκειμένου να επιλυθεί το παραπάνω πρόβλημα, προτείνουμε την αξιοποίηση της πληροφορίας από το επίπεδο z . Σε πρώτο βαθμό, αξιοποιούμε τις επόμενες και τις προηγούμενες τομές (συλλογή τριασδιάστατων δεδομένων) ώστε να εντοπίσουμε κοινά σημεία για το γέμισμα των «κενών» στους σπονδύλους. Ταυτόχρονα, λαμβάνουμε ως δεδομένο την ένταση των εικονοστοιχείων στις γειτονικές τομές, ώστε να προβούμε στη διόρθωση των «κενών» σημείων (Εικόνα 2-4δ,ε). Με τον τρόπο αυτό, οι περιοχές που ευρίσκονταν στο φόντο της εικόνας και δεν είχαν συμπεριληφθεί στους σπονδύλους, τελικά ενσωματώνονται σε αυτούς. Πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι η διαδικασία που περιγράφηκε πραγματοποιείται μόνο για τις κεντρικές περιοχές και δεν τυγχάνει εφαρμογής στις υπόλοιπες.



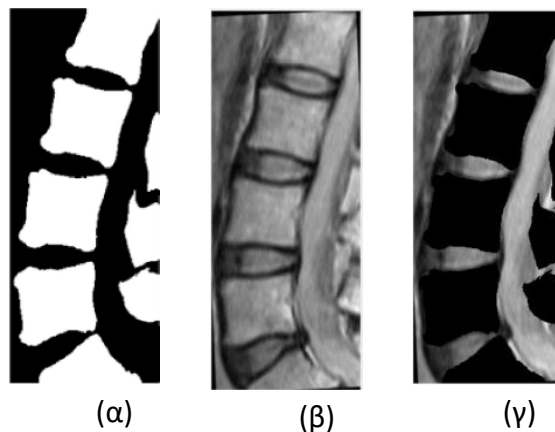
Εικόνα 2-4. (α) Αρχική εικόνα Αξονικής Τομογραφίας, (β) κατωφλίωση κατά Otsu με τρεις περιοχές, όπου η περιοχή με τον αριθμό '1' αντιστοιχεί στο φόντο (αποτύπωση με μαύρο

χρώμα) και οι περιοχές με αριθμούς '2' και '3' αντιστοιχούν στους σπονδύλους (αποτύπωση με γκρι και με άσπρο χρώμα αντίστοιχα), (γ) αναπαράσταση της εικόνας με ένωση των περιοχών '2' και '3', (δ) αποτέλεσμα μετά τη συνένωση των γειτονικών τομών, (ε) το περίγραμμα των σπονδύλων στην αρχική εικόνα προβάλλεται εδώ με κόκκινο χρώμα.

2.2.3 Προβολή των Σπονδύλων στην Μαγνητική Τομογραφία

Στις οβελιαίες εικόνες της Μαγνητικής Τομογραφίας παρατηρείται γραμμική κανονικοποίηση των χρωμάτων, τα οποία παραπέμπουν σε αποχρώσεις του γκρι. Οι περιοχές των σπονδύλων που αναγνωρίζονται στην Αξονική Τομογραφία, όπως αναλύθηκαν με λεπτομέρειες στην υποενότητα 2.2.2, προβάλλονται στις προεπεξεργασμένες εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω γεωμετρικού μετασχηματισμού, όπως προαναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 2.2.1.

Σε συνέχεια της διαδικασίας αυτής, προβαίνουμε σε αντικατάσταση του χρώματος των εικονοστοιχείων που αναπαρίσταται με μαύρο χρώμα (Εικόνα 2-5). Στο σημείο αυτό πρέπει να λεχθεί ότι η ακρίβεια στο εντοπισμό του μεσοσπονδύλιου δίσκου βρίσκεται στενά συνδεδεμένη και προσδιορίζεται από το συγκεκριμένο στάδιο.



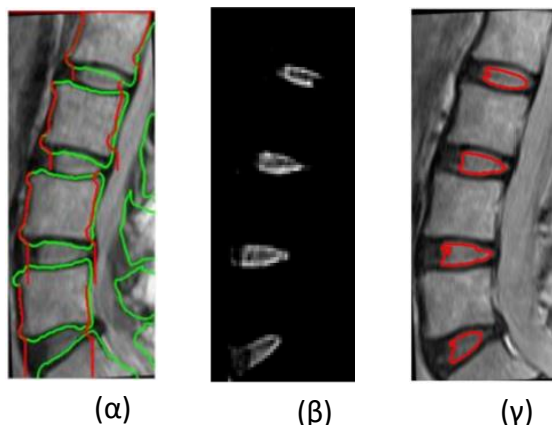
Εικόνα 2-5. (α) αποτελέσματα από την τμηματοποίηση των εικόνων Αξονικής Τομογραφίας, (β) κανονικοποιημένη εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας, (γ) αποτελέσματα μετά την σύνθεση των προηγούμενων εικόνων.

2.2.4 Εντοπισμός του Μεσοσπονδύλιου Δίσκου

Η περιοχή του μεσοσπονδύλιου δίσκου ανιχνεύεται και προσδιορίζεται με τα αποτελέσματα της διαδικασίας που περιγράφηκε ανωτέρω και χρησιμοποιήθηκε στην αμέσως προηγούμενη υποενότητα με στοιχεία 2.2.3. Πιο συγκεκριμένα, κατά την εξέλιξη της παραπάνω διαδικασίας, στις περιοχές που αποτυπώθηκαν με μαύρο χρώμα θα εφαρμόσουμε μία «λωρίδα» κατά μήκος των σπονδύλων (Εικόνα 2-5γ), ώστε να διαχωρισθεί και να αφαιρεθεί όλη η υπόλοιπη πληροφορία που δεν ανήκει μέσα στην προκαθορισμένη «λωρίδα». Τα σημεία της «λωρίδας» ορίζονται με σάρωση της εικόνας από αριστερά προς τα δεξιά και ακολούθως αποτυπώνεται τα πρώτο εικονοστοιχείο που ανήκει σε σπόνδυλο.

Η ίδια διαδικασία εκτελείται και με αντίστροφη κατεύθυνση, δηλαδή από δεξιά προς τα αριστερά, για κάθε έκαστη γραμμή της εικόνας. Εάν στην κατεύθυνση σάρωσης δεν ανευρεθεί σπόνδυλος, η συγκεκριμένη γραμμή εμφανίζεται κενή. Εν κατακλείδι, για κάθε γραμμή της εικόνας σημειώνονται δύο (2) εικονοστοιχεία, τα οποία με τη σειρά τους προσδιορίζουν τη «λωρίδα». Το τελικό αποτέλεσμα της συγκεκριμένης διαδικασίας απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα (Εικόνα 2-6α).

Μπορούμε εδώ να παρατηρήσουμε ότι, παρόλο που η διαδικασία αυτή αποτελεί έναν εμπειρικό τρόπο προσδιορισμού της «λωρίδας», παρέχει τα εχέγγυα για μία ακριβή προσέγγιση των περιοχών της σπονδυλικής στήλης και, κατ' επέκταση, του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Ακόμα περισσότερο, όταν αυτή η διαδικασία συνδυάζεται με τα αποτελέσματα από την ως άνω υποενότητα 2.2.3, ο εντοπισμός του μεσοσπονδύλιου δίσκου εντός της εικόνας είναι αρκετά ευχερής (Εικόνα 2-6β, γ). Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ότι απώτερος σκοπός της παραπάνω αναλυθείσας διαδικασίας είναι να προσδιοριστεί κατά προσέγγιση το σημείο όπου ανευρίσκεται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος μέσα στην εικόνα. Σε επόμενο στάδιο εφαρμόζεται το μοντέλο ενεργού περιγράμματος κατά Chan-Vese, το οποίο θα περιγραφεί σε επόμενη υποενότητα.

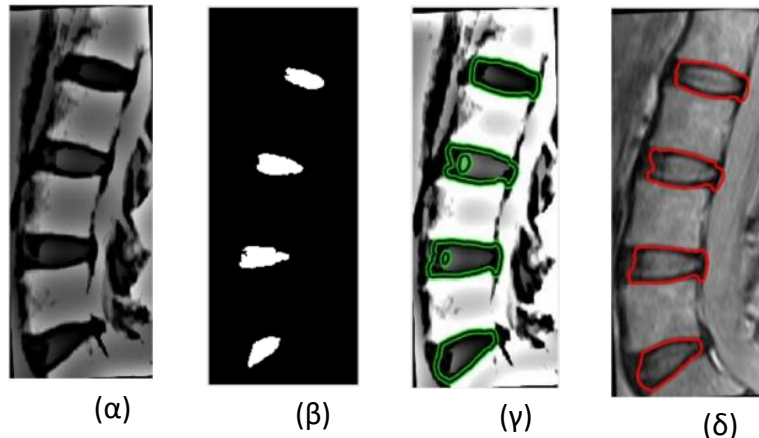


Εικόνα 2-6. (α) Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται το περίγραμμα των σπονδύλων, από το οποίο προκύπτει η 'λωρίδα' που περιγράφει τα όρια της σπονδυλικής στήλης με κόκκινο χρώμα, (β) εντοπισμός των θέσεων του μεσοσπονδύλιου δίσκου, (γ) περίγραμμα του μεσοσπονδύλιου δίσκου, το οποίο απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα.

2.2.5 Τμηματοποίηση Αξονικής – Μαγνητικής Τομογραφίας για την Εύρεση του Περιγράμματος του Μεσοσπονδύλιου Δίσκου

Σε αυτό το στάδιο στοχεύουμε στην ακριβή εύρεση των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Έχοντας ως αφετηρία την πρόχειρη προσέγγιση των περιοχών της σπονδυλικής στήλης, η οποία περιγράφεται στην υποενότητα 2.2.4, σε αυτό το στάδιο επεξεργασίας χρησιμοποιούμε μοντέλο ενεργού περιγράμματος κατά Chan-Vese [39]. Το συγκεκριμένο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται ανθεκτικό και δεν επηρεάζεται από τον τυχόν θόρυβο της εικόνας κατά την τμηματοποίηση του περιγράμματος.

Τα βήματα που ακολουθούμε σε αυτό το στάδιο είναι τα εξής: (1) βελτίωση της εικόνας εκ της μαγνητικής τομογραφίας μέσω φίλτρου *sharpening* κατά τους Saleh και Nordin [42] (Εικόνα 2-7α), (2) αρχικοποίηση του μοντέλου κατά Chan-Vese με τις πρόχειρες προσεγγίσεις της περιοχής ενδιαφέροντος της σπονδυλικής στήλης, όπως αυτές προέκυψαν κατά τα προλεχθέντα στην υποενότητα 2.2.4 (Εικόνα 2-7β), (3) ανίχνευση του περιγράμματος σε εικόνες που έχει προηγηθεί βελτίωση της αντίθεσής τους (Εικόνα 2-7γ), (4) εξαγωγή των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου μετά από χρήση ενεργού περιγράμματος (Εικόνα 2-7δ).



Εικόνα 2-7. (α) Χρησιμοποιείται *unsharp mask* που εφαρμόζεται σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας, (β) Η δυαδική εικόνα (απεικόνιση με μαύρο-άσπρο χρώμα) η οποία προέρχεται από την υποενότητα 2.2.4, χρησιμεύει για την αρχικοποίηση του περιγράμματος, (γ) ενεργό περίγραμμα που εφαρμόζεται σε εικόνες με βελτιωμένη αντίθεση (πράσινο χρώμα) κατόπιν εφαρμογής σαράντα (40) επαναλήψεων, (δ) εντοπισμός των ορίων του περιγράμματος του μεσοσπονδύλιου δίσκου.

2.2.6 Σύνθεση Εικόνων Αξονικής – Μαγνητικής Τομογραφίας

Εκτός από τα αποτελέσματα τμηματοποίησης της εικόνας, η προτεινόμενη μεθοδολογία παρέχει μία υβριδική απεικόνιση, η οποία βασίζεται στο συνδυασμό των δύο απεικονιστικών μεθόδων, δηλαδή της Αξονικής και της Μαγνητικής Τομογραφίας. Ακολουθεί μία οπτικοποίηση της σπονδυλικής στήλης, η οποία στηρίζεται στις υφιστάμενες εικόνες Αξονικής – Μαγνητικής Τομογραφίας. Όπως δε προαναφέρθηκε, οι σπονδυλικές περιοχές οι οποίες προσδιορίζονται σύμφωνα με την αναλυτική προσέγγιση που παραθέσαμε στην υποενότητα 2.2.2, προβάλλονται συνδυαστικά προς τις αντίστοιχες περιοχές της σπονδυλικής στήλης, όπως αυτές προσδιορίστηκαν και αναλύθηκαν στην υποενότητα 2.2.5.

Προς επίρρωση των όσων υποστηρίζονται με την παρούσα μεθοδολογία, παρατίθεται παρακάτω μια εικόνα, στη οποία απεικονίζεται το συνδυαστικό μοντέλο αναπαράστασης των δύο συστημάτων (Αξονικής – Μαγνητικής Τομογραφίας). Στις υπόλοιπες, μάλιστα, εικόνες παρουσιάζεται σε τρισδιάστατη μορφή η σπονδυλική στήλη από διαφορετικές οπτικές γωνίες, ως εξής: α) με κόκκινο χρώμα αποτυπώνονται οι περιοχές όπου εντοπίζεται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος, ενώ β) με γκρι χρώμα σημειώνονται οι περιοχές, οι οποίες

αντιπροσωπεύουν τους σπονδύλους (Εικόνα 2-8). Μέσω της διαδικασίας της διπλής απεικόνισης αμφότερων των περιοχών, ταυτόχρονα παρέχεται ένα ευκαταφρόνητο εργαλείο προς τη διάγνωση διαφορετικών παθολογιών σχετιζόμενων με τη σπονδυλική στήλη.



Εικόνα 2-8. Παραδείγματα τρισδιάστατων αναπαραστάσεων των σπονδύλων: α) με κόκκινο χρώμα παρατίθεται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος και β) με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι σπόνδυλοι.

2.3 Αποτελέσματα – Αξιολόγηση

Η προτεινόμενη προσέγγιση εφαρμόστηκε σε επτά (7) ζεύγη εικόνων Αξονικής - Μαγνητικής Τομογραφίας και αξιοποιήθηκαν συνολικά ενενήντα οκτώ (98) εικόνες, οι οποίες λήφθηκαν από διαφορετικά απεικονιστικά συστήματα. Το μέγεθος των εικονοστοιχείων και το πάχος της κάθε τομής κυμάνθηκε μεταξύ 0.33-0.37 mm και 1.5–3 mm για την Αξονική Τομογραφία και 0.47-0.55 mm και 3-4 mm για την Μαγνητική Τομογραφία αντίστοιχα. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι διαθέσιμα στο (<http://spineweb.digitalimaginggroup.ca>).

2.3.1 Αξιολόγηση των Μετρήσεων

Η μέθοδος που αναλύθηκε στην παρούσα μελέτη αξιολογήθηκε ποσοτικά, όπου κατά την τμηματοποίηση χρησιμοποιήθηκε ως βάση το περίγραμμα των περιοχών, ώστε να συγκριθούν οι κανονικές περιοχές με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από την μεθοδολογία. Για την εγκυρότητα και για την αξιοπιστία των παρατιθέμενων αποτελεσμάτων ειδικός ιατρός χάραξε τα περιγράμματα στις αρχικές εικόνες, τα οποία στη συνέχεια συγκρίθηκαν με τα ομόσημα της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Παράλληλα, αφενός υλοποιήθηκε μετρητής ομοιότητας σχημάτων, ο οποίος εφαρμόστηκε επάνω στα περιγράμματα των περιοχών ενδιαφέροντος Dice similarity coefficient (DSC) [43] και αφετέρου αξιοποιήθηκε ο συντελεστής Hausdorff distance (HD) [44], ο οποίος συνέδραμε στην αξιολόγηση της ακρίβειας της τμηματοποίησης. Ο δείκτης DSC συναρτάται από τον αριθμό των κοινών εικονοστοιχείων μεταξύ των δύο προς σύγκριση σχημάτων ενώ ο HD μετράει τις

αποστάσεις όλων των ζευγών από τις θέσεις των εικονοστοιχείων του περιγράμματος, όπου S_g και S_t είναι οι δυαδικές εικόνες (μαύρο – άσπρο χρώμα), οι οποίες λαμβάνονται από τη χειροκίνητη και την αυτόματη τμηματοποίηση, αντίστοιχα. Και στις δύο εικόνες, τα εικονοστοιχεία των δομών του περιγράμματος ορίζονται από ένα (άσπρο χρώμα) και όλη η υπόλοιπη εικόνα με 0 (μαύρο χρώμα). Επίσης, οι δείκτες X_g και Y_t αναπαριστούν τα όρια των δομών S_g και S_t , αντίστοιχα. Οι μαθηματικοί τύποι για τους δείκτες DSC και HD, περιγράφονται κατωτέρω στις εξισώσεις υπό στοιχεία (3) και (4), με τον παρακάτω τύπο:

$$DSC(S_g, S_t) = \frac{2|S_g \cap S_t|}{|S_g| + |S_t|} \quad (2.3)$$

$$HD(X_g, Y_t) = \max \left\{ \sup_{x \in X_g} \inf_{y \in Y_t} d(x, y), \sup_{y \in Y_t} \inf_{x \in X_g} d(x, y) \right\} \quad (2.4)$$

όπου η μετρική d , η οποία χρησιμοποιείται, αποτελεί την Ευκλείδεια απόσταση.

2.3.2 Αποτελέσματα και Ανάλυση

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της αξονικής τομογραφίας, τα οποία απορρέουν από την προταθείσα μεθοδολογία, πραγματοποιήθηκε μέσω ποσοτικής σύγκρισης των αποτελεσμάτων με τις μεθόδους των Huang και Isaac [6], [7] (Πίνακας 2-2). Περαιτέρω, τα αποτελέσματα από την τμηματοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου συγκρίθηκαν ποσοτικά με τέσσερις (4) μεθόδους από την βιβλιογραφία υπό στοιχεία [4] (Πίνακας 2-3). Στις Εικόνες υπ' αριθ. Εικόνα 2-9 και Εικόνα 2-10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, τα οποία καταγράφηκαν στους Πίνακες υπ' αριθ. Πίνακας 2-2 και Πίνακας 2-3 αντίστοιχα. Η Εικόνα 2-11 απεικονίζει την τελική τμηματοποίηση των σπονδύλων, αφού ολοκληρώθηκαν όλες οι διαδικασίες που εφαρμόστηκαν και στα δύο απεικονιστικά συστήματα.

Συνεπώς, εξετάζοντας τα αποτελέσματα που εξήχθησαν με την παρούσα μελέτη μας προς τις υπόλοιπες σύγχρονες μεθόδους που έχουν ευρέως υποστηριχθεί, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα πως η μεθοδολογία που υποστηρίζουμε συνιστά μια συγκρίσιμη και αξιότιμη προσπάθεια αντίστοιχη με τις δοκιμές που χρησιμοποιούν μεθόδους learning-based και για τους δύο τρόπους απεικόνισης.

Εκτός, μάλιστα, από την εξάρτηση που παρατηρείται πρώιμα από το στάδιο της εκπαίδευσης, οι μεθοδολογίες αιχμής που συγκρίνονται σημειώνουν επίσης πολυάριθμους περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, δυσχέρειες ως προς την ανίχνευση σοβαρών παθολογιών και εκφυλισμένων δομών, χρήση υψηλής χωρητικότητας μνήμης για τους υπολογισμούς τους και τέλος ορισμένες μεθοδολογίες παρατηρούνται εξαρτημένες από άτλαντες κλπ. Οι εν λόγω περιορισμοί συνοψίζονται στον Πίνακα 2-1.

Οι παρακάτω εικόνες αποτυπώνουν χαρακτηριστικά παραδείγματα τμηματοποίησης εικόνων της παρούσας μεθοδολογίας, τα οποία παρήχθησαν από

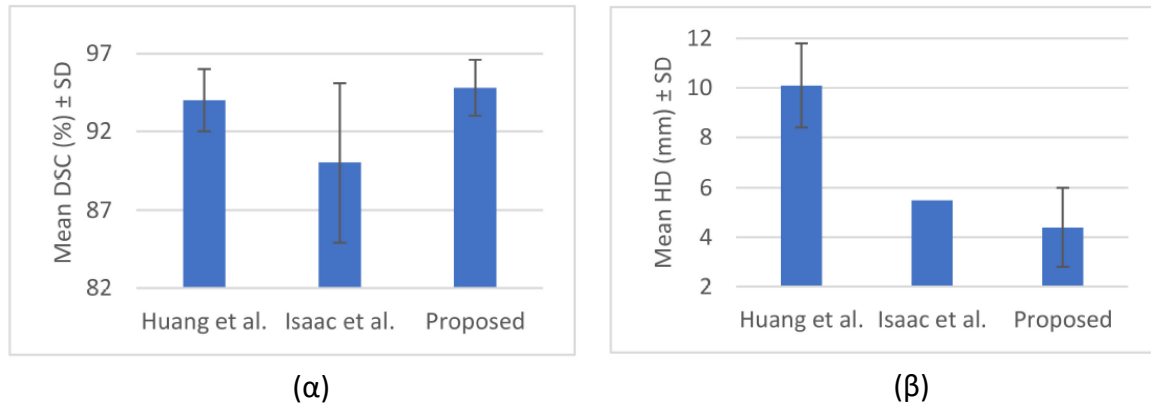
συστήματα Αξονικής και Μαγνητικής Τομογραφίας αντίστοιχα (Εικόνα 2-11, Εικόνα 2-12). Στην Εικόνα 2-11, μπορεί να διαπιστώσει κανείς ότι το περίγραμμα των σπονδύλων που ανιχνεύεται είναι όντως το πραγματικό. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τον ειδικό ιατρό που κλήθηκε να αξιολογήσει ποιοτικά τα αποτελέσματα της τμηματοποίησης μας. Ομοίως, στην Εικόνα 2-12, μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα όρια του μεσοσπονδύλιου δίσκου που ανιχνεύονται προσιδιάζουν στα πραγματικά, γεγονός που επίσης επιβεβαιώνεται από εμπειρογνώμονα ιατρό. Στην Εικόνα 2-13, παρατίθενται παραδείγματα οπτικοποίησης (από διαφορετικές γωνίες) συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων και από τις δύο απεικονιστικές μεθόδους, σημειώνοντας τους σπονδύλους και το μεσοσπονδύλιο διάστημα με χρήση διαφορετικών χρωμάτων.

Πίνακας 2-2. Ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις εικόνες αξονικής τομογραφίας με τις υπόλοιπες προτεινόμενες σύγχρονες μεθόδους.

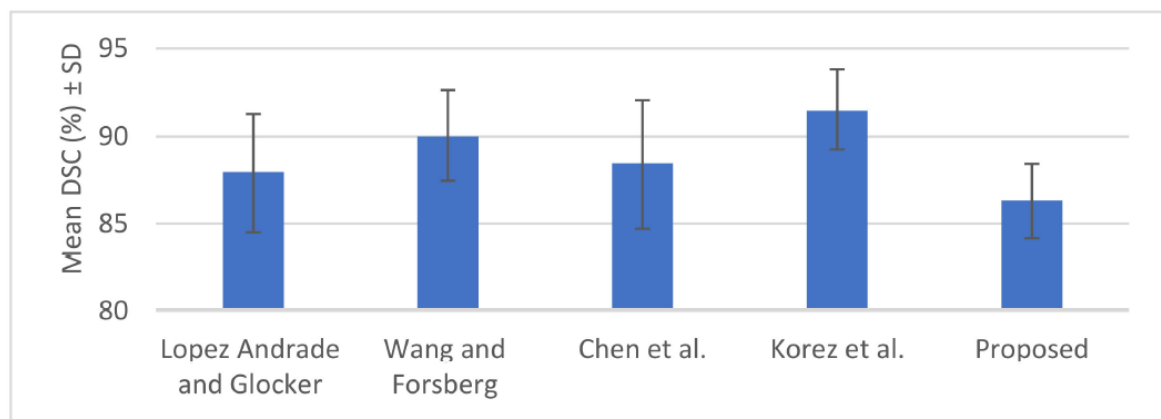
Μέθοδος	Μέσος όρος DSC (%) \pm SD	Μέσος όρος HD (mm) \pm SD
Huang [6]	94.0 \pm 2.0	10.1 \pm 1.7
Isaac [7]	90.0 \pm 5.1	5.5
Προτεινόμενη μεθοδολογία	94.8 \pm 1.8	4.4 \pm 1.6

Πίνακας 2-3. Ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις εικόνες μαγνητικής τομογραφίας με τις υπόλοιπες προτεινόμενες σύγχρονες μεθόδους.

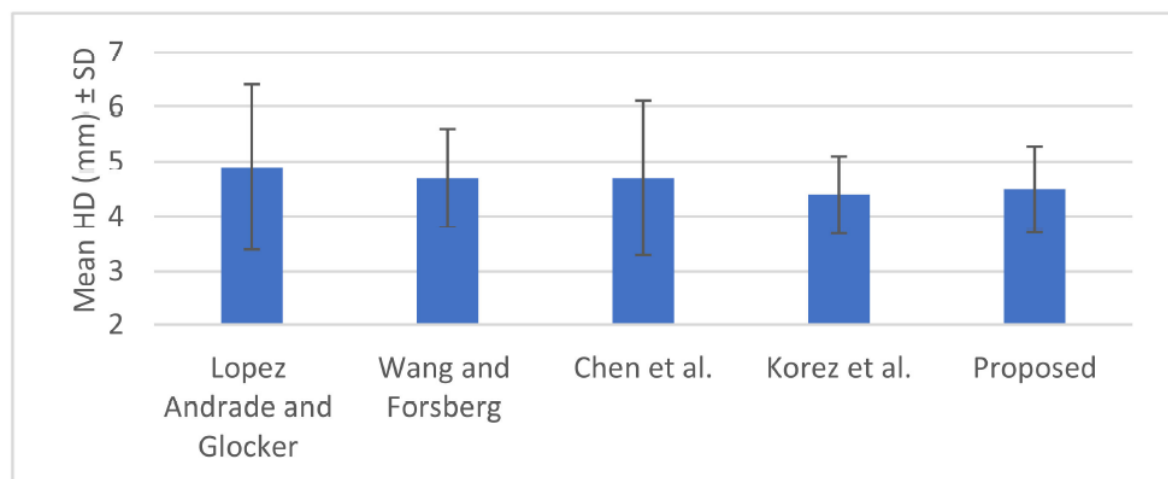
Μέθοδος	Μέσος όρος DSC (%) \pm SD	Μέσος όρος HD (mm) \pm SD
Lopez Andrade and Gloker [30]	87.9 \pm 3.4	4.9 \pm 1.5
Wang and Forsberg [29]	90.0 \pm 2.6	4.7 \pm 0.9
Chen [33]	88.4 \pm 3.7	4.7 \pm 1.4
Korez [32]	91.5 \pm 2.3	4.4 \pm 0.7
Προτεινόμενη μεθοδολογία	86.26 \pm 2.1	4.5 \pm 0.78



Εικόνα 2-9. Σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις εικόνες αξονικής τομογραφίας (α) Μέσος όρος του δείκτη ομοιότητας Dice (DSC) % ± SD, (β) μέσος όρος του δείκτη απόστασης Hausdorff, HD (mm) ± SD.

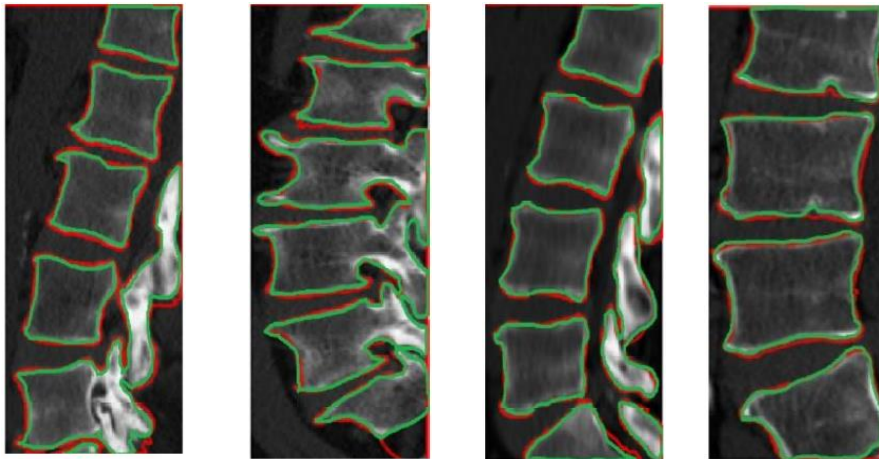


(α)

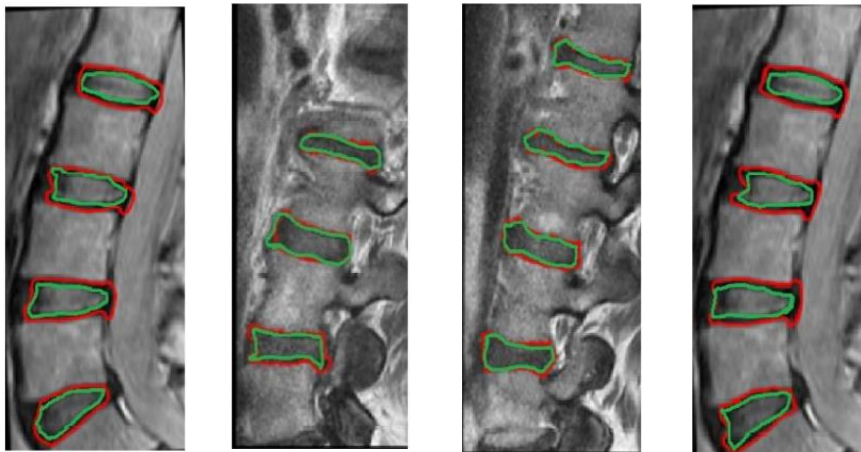


(β)

Εικόνα 2-10. Σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας (α) Μέσος όρος DSC (%) ± SD, (β) μέσος όρος HD (mm) ± SD από τον Πίνακα 2.3.



Εικόνα 2-11. Απεικόνιση εικόνων Αξονικής Τομογραφίας, όπου ανιχνεύονται οι σπόνδυλοι. Η τμηματοποίηση που προκύπτει πηγάζει από την προτεινόμενη μεθοδολογία. Οι εικόνες προέρχονται από διαφορετικά συστήματα και διαφορετικούς ασθενείς. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα περιγράμματα της μεθόδου, ενώ με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται τα περιγράμματα που χαραχθήκαν από ιατρούς.



Εικόνα 2-12. Απεικόνιση εικόνων Μαγνητικής Τομογραφίας στις οποίες ανιχνεύονται οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι. Η τμηματοποίηση που προέρχεται από την προτεινόμενη μεθοδολογία. Οι εικόνες πηγάζουν από διαφορετικά συστήματα και διαφορετικούς ασθενείς. Με κόκκινο χρώμα προσδιορίζονται τα περιγράμματα της μεθόδου, ενώ με πράσινο χρώμα προσδιορίζονται τα περιγράμματα που χαραχθήκαν από ιατρούς.



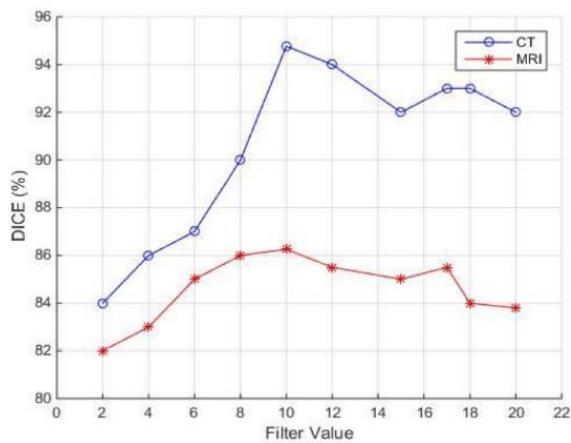
Εικόνα 2-13. Απεικόνιση στοιχείων οπτικοποίησης της πληροφορίας και από τα δύο συστήματα ταυτόχρονα. Οι εικόνες που παράγονται προέρχονται από την προτεινόμενη μεθοδολογία. Με γκρί χρώμα αποτυπώνονται οι σπόνδυλοι, ενώ με κόκκινο χρώμα οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι.

Από την άλλη πλευρά, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ένα έτερο σύνολο πειραμάτων που υλοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία περιλαμβάνουν την αξιολόγηση της ευρωστίας του προτεινόμενου μοντέλου, έναντι διαφορετικών παραμέτρων. Προς επιβεβαίωση, δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικοί τύποι μετασχηματισμού: *affine* και *similarity-based*. Επιπλέον, δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικοί μέθοδοι παρεμβολής: *linear*, *nearest neighbor*, και *cubic*. Ο μετασχηματισμός με *similarity-based* σε συνδυασμό με *linear interpolation* οδήγησε στην ακριβέστερη τμηματοποίηση υπό παραμέτρους: 100 επαναλήψεις παράγοντα ελέγχου ακτίνας ίσο με 1.05 και αρχική τιμή αναζήτησης ακτίνας 0.004. Αυτές οι παράμετροι δοκιμάστηκαν με διαφορετικές τιμές στα αποτελέσματα τμηματοποίησης. Για έκαστη αλλαγή τιμής παρατηρήθηκε διαφοροποίηση στους μετρικούς δείκτες DSC και HD, ή αλλαγή των αποτελεσμάτων σύμφωνα με τις διαφορετικές παραμέτρους. Στο σημείο αυτό, δοκιμάστηκε αλλαγή του μεγέθους της μάσκας για το μορφολογικό φιλτράρισμα, όπου με μπλε γραμμή διαφαίνονται τα αποτελέσματα από τις εικόνες Αξονικής Τομογραφίας, ενώ, με κόκκινη γραμμή διαφαίνονται τα αποτελέσματα από την Μαγνητική Τομογραφία (Εικόνα 2-14α, β).

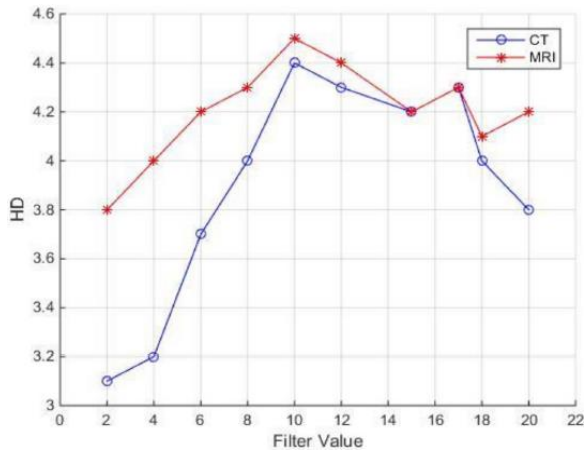
Συν τοις άλλοις, μπορεί να σημειωθεί ότι οι διαφορές στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου είναι μικρότερες από 5% σε σχέση με το DSC και λιγότερα από 0.2 εικονοστοιχεία σε σχέση με το HD, καθώς η συγκεκριμένη παράμετρος κυμαίνεται από 8 έως 12. Σε προηγούμενες παρουσιάσεις πειραματικών συγκρίσεων, η τιμή αυτή έχει οριστεί στο 10. Επιπλέον, οι διακυμάνσεις στον δείκτη DSC καθώς και στον HD, αλλάζοντας τον αριθμό των ενεργών επαναλήψεων περιγράμματος, κυμαίνεται από 20 έως 65 και απεικονίζεται στην Εικόνα 2-14γ, δ.

Κατά συνέπεια, παρατηρούμε ότι οι διαφορές που διαπιστώθηκαν ως προς την ακρίβεια είναι μικρότερες από 6%, σε σχέση με το DSC και λιγότερο από 1.5 εικονοστοιχεία σε σχέση με το HD. Στις πειραματικές συγκρίσεις που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, η τιμή αυτή ορίστηκε σε 30. Θα πρέπει εδώ να τονιστεί ότι σε αντίθεση με αυτές τις παραμέτρους, οι τιμές που χρησιμοποιούνται για την τμηματοποίηση στην Αξονική Τομογραφία (υποενότητα 2.2.2) επιλέγονται αυτόματα.

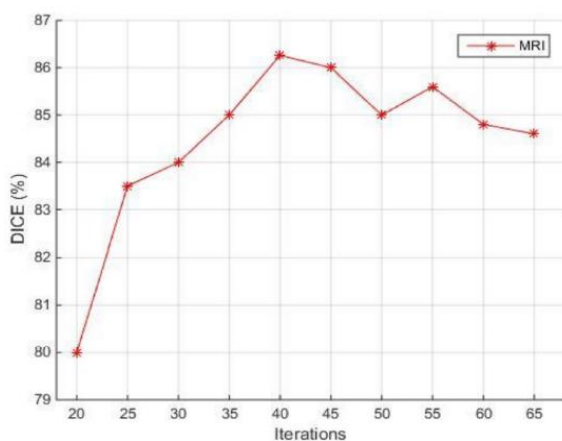
Ως τελευταία παρατήρηση, χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Matlab (Mathworks, MA, USA), για την υλοποίηση όλων των διαδοχικών βημάτων της παρούσας εφαρμογής για τις εικόνες τόσο της αξονικής, όσο και της μαγνητικής τομογραφίας. Ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας προσδιορίζεται κατά προσέγγιση στα τρία (3) λεπτά της ώρας, ενώ ο παραλληλισμός αυτών των σταδίων αναμένεται να μειώσει δραματικά τον χρόνο επεξεργασίας.



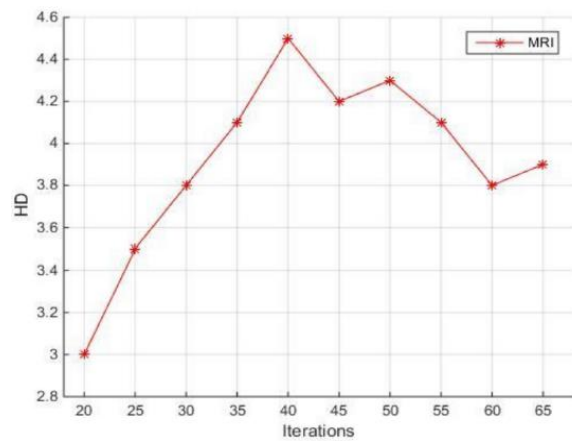
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 2-14. Αλλαγή της ακρίβειας τμηματοποίησης σε σχέση με τους δείκτες DSC και HD, έναντι του μεγέθους της μάσκας (α, β) και των λειτουργιών επανάληψης (γ, δ). Με γραμμές χρώματος μπλε αποτυπώνονται τα δεδομένα από την Αξονική Τομογραφία, ενώ

με γραμμές χρώματος κόκκινου αποτυπώνονται τα δεδομένα από την Μαγνητική Τομογραφία. Η δεύτερη παράμετρος ισχύει μόνο για την Μαγνητική Τομογραφία.

2.4 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία εισάγει μία καινοτόμα υπολογιστική προσέγγιση για την εξαγωγή των ορίων των σπονδύλων και των μεσοσπονδύλιων δίσκων, με βάση εικόνες προερχόμενες από αξονική και μαγνητική τομογραφία. Η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζει ποικίλα πλεονεκτήματα ως προς την επεξεργασία των εικόνων εκ Μαγνητικής και Αξονικής Τομογραφίας, καθώς α) αντλεί συμπληρωματικές πληροφορίες από δύο διαφορετικά απεικονιστικά συστήματα, β) δεν βασίζεται στην ηλεκτρονική μάθηση και δεν εξαρτάται από την διαθεσιμότητα μεγάλου όγκου αναγνωρισμένων δεδομένων, σε αντίθεση με τη συντριπτική πλειοψηφία των μεθόδων αιχμής, γ) η ποιότητα των αποτελεσμάτων της τμηματοποίησης που παράγονται από το μοντέλο, είναι συγκρίσιμη με την αντίστοιχη που επιτυγχάνεται μέσα από άλλες εξελιγμένες μεθόδους, δ) παρέχει συνδυαστική πληροφορία της σπονδυλικής στήλης, η οποία θα μπορούσε ενδεχομένως να βοηθήσει στη διάγνωση διαφορετικών παθολογοανατομικών προβλημάτων που σχετίζονται με αυτήν, έτι δε περισσότερο, η προτεινόμενη μέθοδος απαιτεί περιορισμένη παρέμβαση από πλευράς χειριστή.

Ανακεφαλαιώνοντας, η όλη διαδικασία έχει ως εναρκτήριο σημείο την ευθυγράμμιση των αντίστοιχων εικόνων Αξονικής και Μαγνητικής Τομογραφίας, ενώ ταυτόχρονα οι εικόνες των σπονδύλων τμηματοποιούνται προκειμένου να εξαχθούν τα όριά τους. Τα αποτελέσματα της Αξονικής Τομογραφίας συγχωνεύονται με τις εικόνες από την Μαγνητική Τομογραφία, ώστε να υπάρχει η καθοδήγηση για τα επόμενα στάδια εντοπισμού και τμηματοποίησης.

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα τμηματοποίησης των εικόνων από την Αξονική Τομογραφία χρησιμοποιούνται ως αναφορά για τον εντοπισμό και την εξαγωγή του περιγράμματος του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Προκειμένου να υλοποιηθεί το στάδιο αυτό, εφαρμόζεται μοντέλο ενεργού περιγράμματος κατά Chan-Vese σε περιοχές των εικόνων της μαγνητικής τομογραφίας, στις οποίες έχει μεσολαβήσει φιλτράρισμα για την ενίσχυση της αντίθεσής τους. Τελικά, οι εξαγόμενοι σπόνδυλοι και τα όρια του μεσοσπονδύλιου δίσκου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να παραχθεί μία υβριδική τρισδιάστατη απεικόνιση της σπονδυλικής στήλης.

Παράλληλα, η προταθείσα μέθοδος συγκρίθηκε με έτερες σύγχρονες μεθόδους όσον αφορά αφενός στην τμηματοποίηση των σπονδύλων από εικόνες Αξονικής Τομογραφίας και αφετέρου στην εύρεση περιγράμματος του μεσοσπονδύλιου δίσκου από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, τα αποτελέσματα ποσοτικοποιήθηκαν, ούτως ώστε να διαπιστωθεί η εγκυρότητά τους μέσα από δύο μετρικούς δείκτες, τον DICE και τον HD. Αυτοί οι δύο δείκτες υπέδειξαν ότι τα τελικά αποτελέσματα που εξήχθησαν ήταν τουλάχιστον

συγκρίσιμα με αυτά των υπόλοιπων μεθόδων, οι οποίες χρησιμοποιούν ως βάση την ηλεκτρονική μάθηση.

Επιπλέον, σε αντίθεση με τις ανταγωνιστικές μεθόδους, η προτεινόμενη δεν απαιτεί προηγούμενη γνώση με την μορφή άτλαντα ή μάθηση από προσημειωμένες εικόνες. Περαιτέρω, η μέθοδος που υποστηρίζεται στην παρούσα εκπόνηση εξαρτάται άμεσα από την διαθεσιμότητα ζευγών εικόνων Αξονικής - Μαγνητικής Τομογραφίας, τα οποία θα μπορούσαν να περιορίσουν την εφαρμογή της, αν ληφθεί υπόψη ότι αρκετές κλινικές πρακτικές που υιοθετούνται σήμερα χρησιμοποιούν μόνο μία απεικόνιση. Αξίζει δε να αναφερθεί ότι η υλοποίηση της διαδικασίας που περιγράφηκε εξελίσσεται με σχετικά πιο αργό ρυθμό, καθώς πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab λογισμικού, εν αντιθέσει με άλλες σύγχρονες μεθόδους.

Εν κατακλείδι, μια ερευνητική πρόκληση για μελλοντικές μελέτες θα μπορούσε να αποτελέσει ο σχεδιασμός υβριδικών προσεγγίσεων τα οποία ενσωματώνουν στοιχεία βασισμένα στην ηλεκτρονική μάθηση, τα οποία, επιπροσθέτως, θα μπορούσαν να λειτουργήσουν αξιόπιστα και σε μικρό πλήθος εικόνων με επισημασμένα ζεύγη Αξονικής – Μαγνητικής Τομογραφίας. Παράλληλα, η ανάπτυξη βελτιστοποιημένων υλοποιήσεων ως πρόσθετες πειραματικές μέθοδοι σε κλινικά σημαντικές περιπτώσεις, όπως η εύρεση και η παρουσίαση αφυδατωμένων ή κατεστραμμένων δίσκων, θα αποτελούσαν πάντοτε αντικείμενο συνεχόμενης και ενδελχούς έρευνας, προκειμένου να ανευρεθεί η βέλτιστη απεικόνιση των στοιχείων μέσω της Αξονικής και της Μαγνητικής Τομογραφίας.

3 Εύρεση Σπονδύλων, Μεσοσπονδύλιου Δίσκου και Περιγράμματος του Καναλιού των Νεύρων από Εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας, με Χρήση Μοντέλων Ενεργού Περιγράμματος σε Εικόνες Αξονικής Τομογραφίας

3.1 Εισαγωγή

Η κήλη του μεσοσπονδύλιου δίσκου είναι μία χρόνια νόσος του νωτιαίου μυελού, η οποία σχετίζεται με το κανάλι των νεύρων. Έχει παρατηρηθεί ότι, μεταξύ άλλων, μπορεί να προκληθεί από την στένωση του καναλιού των νεύρων και να προκαλέσει χρόνιο πόνο στη σπονδυλική στήλη. Επίσης, χαρακτηριστική συμπτωματολογία της εν λόγω πάθησης αποτελεί η μείωση της δύναμης στα κάτω άκρα και η εν γένει λειτουργική δυσκινησία. Η μέθοδος της απεικόνισης μέσω της μαγνητικής τομογραφίας επιλέγεται από τους ειδικούς για την αξιολόγηση και την επιβεβαίωση τέτοιων παθήσεων, όπως η παραπάνω αλλά και άλλες συναφείς.

Αντιθέτως, για την απεικόνιση σπονδυλικών σωμάτων και ανατομικών περιοχών με μεγάλη πυκνότητα, την καλύτερη επιλογή στη διαγνωστική φαρέτρα αποτελεί η αξονική τομογραφία. Με βάση τα όσα ανωτέρω αναλύθηκαν, παρατηρούμε ότι η χρήση ενός μοντέλου που θα αξιοποιούσε πλήρως την δυνατότητα των εικόνων από αμφότερα τα απεικονιστικά συστήματα εμφανίζεται ως μία λογική ερευνητική κατεύθυνση. Με γνώμονα το παραπάνω σκεπτικό, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο με συνδυαστική πληροφορία για την ανάπτυξη εργαλείων που βοηθούν στην διάγνωση παθολογικών καταστάσεων σχετιζόμενων με την σπονδυλική στήλη.

Ωστόσο, το κύριο πρόβλημα που ενυπάρχει στις υπάρχουσες συνδυαστικές προσεγγίσεις είναι ότι συνήθως στην κλινική πράξη ελλείπει η παρουσία ζευγών εικόνων του ίδιου ασθενούς από την αξονική και από τη μαγνητική τομογραφία αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό σαφώς περιπλέκει την εφαρμογή συνδυαστικών μεθόδων, ειδικά όταν αυτοί χρησιμοποιούν αλγορίθμους *deep learning*, οι οποίοι βασίζονται στην διαθεσιμότητα μεγάλου όγκου από ζεύγη εικόνων προερχόμενων από αξονική και μαγνητική τομογραφία.

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί ότι μέχρι σήμερα έχουν παρουσιαστεί πολυάριθμες μελέτες που σχετίζονται με τον εντοπισμό του μεσοσπονδύλιου δίσκου είτε με πλήρως αυτόματο είτε με ημιαυτόματο τρόπο. Το πρώτο κύμα από τέτοιες προσεγγίσεις βασίστηκε σε κλασικές μεθόδους ανάλυσης εικόνας. Ενδεικτικά, ο μετασχηματισμός Hough (*Hough transform* 'HT') [9] έχει

χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό των μεσοσπονδύλιων δίσκων σε εικόνες από βιντεοφθοροσκοπική αξονική τομογραφία. Στην αναφορά [45], παρουσιάζεται μία προσέγγιση που αξιοποιεί τις εντάσεις των εικονοστοιχείων από εικόνες μαγνητικής τομογραφίας για την ανίχνευση των σπονδύλων, με βάση μία χειροκίνητη επιλογή της 'βέλτιστης' οβελιαίας τομής. Στην αναφορά [46], επιτυγχάνεται η ανίχνευση της σπονδυλικής στήλης με την χρήση ενός ταξινομητή *tree classifier*, ο οποίος έχει εκπαιδευτεί στην εύρεση του οσφυϊκού δίσκου σε εικόνες μαγνητικής τομογραφίας. Ένας *heuristic* αλγόριθμος αναζήτησης χρησιμοποιείται για την αφαίρεση συγκεκριμένων περιοχών σε εκθετικό χώρο αναζήτησης. Παρόμοιες εφαρμογές έχουν προταθεί με την συγκεκριμένη μεθοδολογία [47], [13]. Στην αναφορά [14], για την ανίχνευση της κεντρικής γραμμής της σπονδυλικής στήλης χρησιμοποιείται αλγόριθμος, προφίλ έντασης και κλίσης, ώστε να εξαχθούν οι σπόνδυλοι και το μεσοσπονδύλιο διάστημα όπως εμφανίζονται στο κέντρο της εικόνας. Άλλες μέθοδοι εντοπισμού χρησιμοποιούν Markov random field (MRF), για να κωδικοποιήσουν την σχέση μεταξύ του μεσοσπονδύλιου δίσκου και ολόκληρης της εικόνας, κατασκευάζοντας ένα μοντέλο αναζήτησης [48]. Έχει, επίσης, προταθεί μία εποπτευόμενη μέθοδος για τον ταυτόχρονο εντοπισμό των οσφυϊκών σπονδύλων και του μεσοσπονδύλιου δίσκου από δισδιάστατες οβελιαίες εικόνες μαγνητικής τομογραφίας, μέσω ενός μοντέλου που υλοποιείται με *support vector machine* (SVM) [4]. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί πληροφορίες από την τοπική κλίση της εικόνας για κάθε σπόνδυλο και κάθε μεσοσπονδύλιο δίσκο. Με αυτό τον τρόπο αναζητείται η εύρεση της θέσης των υποψηφίων ανατομικών δομών εντός της εικόνας. Στη συνέχεια, η μέθοδος πιθανολογεί λανθάνουσες μεταβλητές για τις θέσεις των σπονδύλων και των δίσκων, εκμεταλλευόμενη το πλεονέκτημα που παρέχεται από Markov-chain-like επάνω στην δομή της σπονδυλικής στήλης. Επιπλέον, παρουσιάζεται μία προσέγγιση που βασίζεται σε machine learning-based μεθόδους, ήτοι σε ένα σύνολο τριών ταξινομητών για την εκτίμηση της θέσης, του προσανατολισμού και όλων των σχετικών παραμέτρων, οι οποίοι βρίσκονται στην προς ανίχνευση δομή [16]. Η παραπάνω στρατηγική ανίχνευσης αξιοποιείται για τον αποτελεσματικότερο εντοπισμό του μεσοσπονδύλιου δίσκου, ενώ η τμηματοποίηση αυτού πραγματοποιείται μέσω ενός μοντέλου που υλοποιείται με *adaptive graph cut*.

Η εύρεση του περιγράμματος του μεσοσπονδύλιου δίσκου έχει επιχειρηθεί πολλάκις με χειροκίνητες, ημιαυτόματες ή πλήρως αυτόματες μεθόδους. Η ανάλυση της υφής έχει χρησιμοποιηθεί για την αυτόματη εξαγωγή των ορίων του, μέσω της τμηματοποίησής του από εικόνες μαγνητικής τομογραφίας, ακόμα και σε περιπτώσεις σπονδυλικής στήλης με σκολίωση. Αυτού του είδους η τμηματοποίηση έχει πραγματοποιηθεί με εφαρμογή στατιστικών και φασματικών χαρακτηριστικών υφής, καθώς και προσεγγίσεις με *watershed-based* για τον προσδιορισμό των ορίων του περιγράμματος [49], [18]. Μία πιθανοτική ημιαυτόματη προσέγγιση τμηματοποίησης μεσοσπονδύλιου δίσκου βασισμένη σε άτλαντα έχει προταθεί για την εύρεση των σημείων αριστερά και δεξιά του δίσκου [19]. Αυτές οι πληροφορίες καθοδηγούν τον αλγόριθμο τμηματοποίησης, ο οποίος βασίζεται σε πιθανοτικό

άτλαντα. Περαιτέρω, ανάλυση εικόνων με στατιστικά σχήματα έχει χρησιμοποιηθεί με ημιαυτόματο τρόπο [20]. Η μεθοδολογία αυτή απαιτεί πρωτίστως επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος κατά μήκος της καμπύλης που δημιουργεί η σπονδυλική στήλη. Έπειτα, η ίδια ερευνητική ομάδα προτάσσει μία μέθοδο τμηματοποίησης, η οποία βασίζεται στην ανάλυση της έντασης των εικονοστοιχείων της εικόνας [50]. Στην προσέγγιση αυτή, αρχικά εντοπίζονται τα σημεία όπου βρίσκεται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος μέσα στην εικόνα μέσω ανιχνευτή αιχμών κατά την μέθοδο *Canny edge detection* και μέσω συμμετρίας έντασης των εικονοστοιχείων. Επάνω στις περιοχές ενδιαφέροντος εφαρμόζεται τρισδιάστατο μοντέλο αναγνώρισης σχημάτων. Αυτή η διαδικασία βελτιώνει την εικόνα και συνδυάζει τις εντάσεις των σημείων αναγνώρισης εντός ενός πλέγματος, μέσα από επαναληπτικές διαδικασίες.

Από την ερευνητική κοινότητα έχουν προταθεί, επίσης, παραλλαγές που βασίζονται σε *graph-based* μοντέλα [51], [23], [52], [53]. Εν παραδείγματι, έχει χρησιμοποιηθεί η ανιστροπική προσανατολισμένη ροή ανίχνευσης σε καθορισμένες περιοχές για την εξαγωγή του μεσοσπονδύλιου δίσκου, με ελάχιστη χειροκίνητη αλληλεπίδραση από τον χρήστη [13]. Σε άλλη περίπτωση έχουν χρησιμοποιηθεί φίλτρα Haar σε συνδυασμό με ταξινομητή Adaboost και ένα τοπικό αρθρωτό μοντέλο για την εκτίμηση της θέσης των σπονδύλων σε σχέση με το μεσοσπονδύλιο δίσκο [54]. Η χρήση ταξινομητή Adaboost έχει επίσης συνδυαστεί με *wavelets* και επαναληπτικές κανονικοποιήσεις περικοπών προκειμένου να εντοπιστεί και να τμηματοποιηθεί ο μεσοσπονδύλιος δίσκος [6]. Από την άλλη πλευρά, έχουν συνδυαστεί *Random forest* (RF) παλινδρόμηση και *Hidden Markov* μοντέλα, για τον εντοπισμό και την αναγνώριση των σπονδύλων από διαφορετικές περιοχές εμφάνισης σε εικόνες αξονικής τομογραφίας [48], [16]. Μία μεταγενέστερη μέθοδος που παρουσιάζεται εφαρμόσε RF για τον εντοπισμό του σημείου όπου βρίσκεται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος. Κατόπιν, ακολουθήθηκε τμηματοποίηση βάση του *graph-cut* μοντέλου. Ακολούθως, στην αναφορά [30] παρουσιάζεται μια έτερη προσέγγιση, βασισμένη σε RF συνιστώσα της μεθόδου αυτής και μέσω χρήσης εκπαίδευσης. Παράλληλα, έχει προταθεί ένα γραφικό μοντέλο που αξιοποιεί χαρακτηριστικά του καναλιού από διαφορετικά στάδια σε συνδυασμό με ένα σύνολο καταχωρημένων άτλαντων για τον συνδυασμένο εντοπισμό και την τμηματοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου [31]. Παρουσιάστηκε, επίσης, μέθοδος η οποία ενσωματώνει την ανίχνευση ανατομικών σημείων αναφοράς με RF, την ενίσχυση της αντίθεσης με φιλτράρισμα χαρακτηριστικών Haar, περιγραφές περιβάλλοντος εικόνας *self-similarity* και πληροφορίες από *deformable models* με περιορισμό σχήματος για τον αυτοματοποιημένο εντοπισμό και τμηματοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου [32]. Έχει δε προταθεί μεθοδολογία, η οποία εφαρμόζει *data-driven* ταξινόμηση παλινδρόμησης, με στόχο την επίλυση του προβλήματος εντοπισμού και τμηματοποίησης του μεσοσπονδύλιου δίσκου σε εικόνες T2 μαγνητικής τομογραφίας [33], [34]. Ομοίως, έχει προταθεί εναλλακτική κατεύθυνση για την ανάλυση εικόνων σπονδυλικής στήλης από αλγορίθμους *deep learning*. Έχει εφαρμοστεί, επιπροσθέτως, ένα ιεραρχικό τρισδιάστατο παραμορφώσιμο μοντέλο για την αναγνώριση σπονδύλων από διαφορετικά συστήματα απεικόνισης. Το

παραπάνω μοντέλο αξιοποιεί τα χαρακτηριστικά που προκύπτουν από *deep neural networks* [34].

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα μοντέλα αναγνώρισης περιοχών χρησιμοποιούν αλγόριθμους με *watershed* για την καθοδήγησή τους. Ωστόσο, το σύνολο των δεδομένων που απαιτούνται για την εκπαίδευση των μοντέλων αυτών είναι εξαιρετικά μεγάλο. Συγκεκριμένα, μπορεί να αποτελείται από τουλάχιστον 1200 ζεύγη εικόνων από αξονική και μαγνητική τομογραφία, ενώ ταυτόχρονα είναι πιθανό να υπάρχουν πολλά κοινά δεδομένα, τα οποία δεν αξιοποιούνται πλήρως. Αναφέρεται είναι ότι αυτού του είδους τα μοντέλα δεν μας παρέχουν λεπτομέρειες σχετικά με τον αλγόριθμο τμηματοποίησης που χρησιμοποιούν, ενώ η ευαισθησία τους και η ακρίβειά τους, ως προς την ποιότητα τμηματοποίησης των περιοχών, κατά την όλη διαδικασία αναγνώρισης, δεν αξιολογείται.

Παρότι, ωστόσο, ενυπάρχουν οι προαναφερθείσες ελλείψεις, η μέθοδος που προτείνουμε παρουσιάζει ενδιαφέρον υπό την έννοια ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει περισσότερα από ένα μοντέλα ταυτόχρονα [34]. Παρόμοιες διαδικασίες παρουσιάζονται και σε άλλες εργασίες, με μεγάλο μέγεθος δεδομένων που χρησιμεύουν στην εκπαίδευση και στην αξιολόγηση με *deep learning-based* αλγόριθμους [35], όπου εφαρμόστηκαν *feed-forward* νευρωνικά δίκτυα σε δεδομένα αξονικής τομογραφίας [36], [37]. Επίσης, η εφαρμογή *fully convolutional networks* (FCNs) με *convolutional kernels* υλοποιήθηκε σε τρισδιάστατα δεδομένα μαγνητικής τομογραφίας.

Συμπερασματικά το βασικότερο πρόβλημα κατά την εξέταση μοντέλων με *deep learning* είναι η επάρκεια μεγάλου διαθέσιμου όγκου από σύνολα αναγνωρισμένων δεδομένων που έχουν ταξινομηθεί χειροκίνητα από εξειδικευμένο προσωπικό, πολύ δε περισσότερο στην περίπτωση μιας πιθανής πολυπαραμετρικής προσέγγισης, κατά την οποία απαιτούνται ζεύγη δεδομένων από αξονική και από μαγνητική τομογραφία. Με εξαίρεση τη μέθοδο [34], η οποία χρησιμοποιεί *learning-based* αλγόριθμο με ένα μόνο σύστημα, δεν υπάρχει αλληλεξάρτηση μεταξύ δύο απεικονιστικών μεθόδων, ήτοι αξονικής και μαγνητικής τομογραφίας.

Η συγκριτική μελέτη που παρουσιάζεται στην αναφορά [31], αξιολογεί διαφορετικές μεθόδους τελευταίας τεχνολογίας για τον εντοπισμό και την εξαγωγή των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου, εστιάζοντας σε δεδομένα μαγνητικής τομογραφίας. Οι περισσότερες από τις μεθόδους που συγκρίνονται λειτουργούν με ημιαυτόματο τρόπο σε δισδιάστατες οβελιαίες εικόνες αντί για τρισδιάστατες εικόνες. Η πιο σημαντική παρατήρηση στο σημείο αυτό, με εξαίρεση την εργασία [34], είναι ότι όλες οι υπόλοιπες προσεγγίσεις υλοποιούνται σε ένα απεικονιστικό σύστημα. Συνακόλουθα, στον Πίνακα 3-1 συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί αυτών των προσεγγίσεων, καθώς και της προηγούμενης προσέγγισης που πραγματοποιήθηκε από την ομάδα μας [55].

Μία άλλη ανατομική δομή που σχετίζεται με την κήλη του μεσοσπονδύλιου δίσκου είναι το κανάλι των νεύρων. Η στένωση του καναλιού είναι πολυπαραγοντική, κατά την ιατρική βιβλιογραφία και καταλήγει σε οσφυϊκή ριζοπάθεια και μυελοπάθεια,

δύο σοβαρές παθήσεις, οι οποίες προκαλούν δυσκολία και περιορισμό της κίνησης [56]. Μπορούμε, στο σημείο αυτό, να συμπεράνουμε με ασφάλεια ότι ο προσδιορισμός του καναλιού των νεύρων και η ανίχνευση των παραμορφώσεών του, σε συνδυασμό με την αξιολόγηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου, είναι ουσιαστικής σημασίας για την ανάλυση της κήλης του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Ο Geonkar και οι συνεργάτες του [56] έχουν προτείνει μία προσέγγιση μηχανικής μάθησης που βασίζεται σε *support vector machines* (SVM), για την ανίχνευση των ορίων του καναλιού των νεύρων από εικόνες μαγνητικής τομογραφίας. Ωστόσο, η μέθοδός τους υστερεί σε υψηλή υπολογιστική ισχύ για την εκπαίδευση και την ανάλυση των δεδομένων.

Σε αυτή την εκπόνηση, προτείνουμε μία μέθοδο με συνδυαστική πληροφορία από δύο απεικονιστικά συστήματα για την εξαγωγή των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου και του καναλιού των νεύρων. Σε αντίθεση με την προηγούμενη συνδυαστική μέθοδο [55], η προτεινόμενη από εμάς δεν βασίζεται στην πιθανολόγηση των διαθέσιμων ζευγών από εικόνες αξονικής και μαγνητικής τομογραφίας, τα οποία συνήθως δε συλλέγονται στην κλινική πράξη. Ωστόσο, το προτεινόμενο μοντέλο εμφανίζεται ως συνδυαστικό, υπό την έννοια ότι χρησιμοποιεί τα σχήματα των σπονδύλων που εξάγονται από την αξονική τομογραφία. Τα σχήματα αυτά, καθώς και η πληροφορία που παρέχεται από την θέση του καναλιού των νεύρων επάνω στην εικόνα, χρησιμοποιούνται συνδυαστικά επάνω σε εικόνες μαγνητικής τομογραφίας. Ειδικότερα, η ως άνω στρατηγική ανίχνευσης βασίζεται σε τρεις εκτιμήσεις: 1) η απεικόνιση με το σύστημα της αξονικής τομογραφίας αναδεικνύει ευχερέστερα τις συμπαγείς δομές, όπως είναι οι σπόνδυλοι, 2) από τα σπονδυλικά όρια καθορίζεται και το περίγραμμα γειτονικών δομών στα όμορα σημεία (μεσοσπονδύλιος δίσκος και κανάλι νεύρων), 3) διαπιστώνεται ότι τα σημεία όπου βρίσκονται οι σπόνδυλοι στην αξονική τομογραφία είναι ίδια με εκείνα της μαγνητικής τομογραφίας. Κατά συνέπεια, οι δομές των σχημάτων της σπονδυλικής στήλης, καθώς και οι γεωμετρικές τους κλίσεις είναι πανομοιότυπες και στα δύο απεικονιστικά συστήματα.

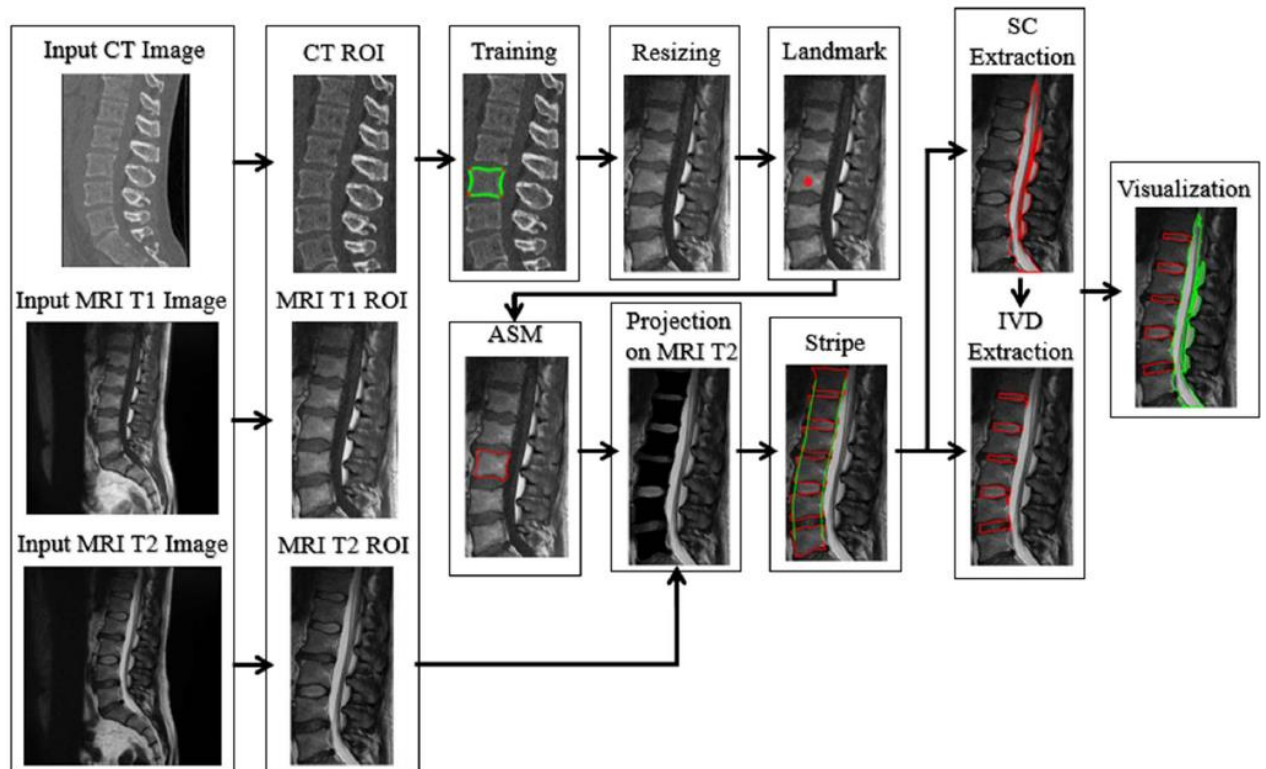
Ως εκ τούτου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε *active shape models* (ASM) κατά την εκπαίδευση στις εικόνες αξονικής τομογραφίας και να τα εφαρμόσουμε σε εικόνες μαγνητικής τομογραφίας, καθώς θα έχουν πανομοιότυπη συμπεριφορά. Παράλληλα, έχει παρατηρηθεί ότι τα μοντέλα με ASM δεν εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από μεγάλο όγκο δεδομένων για την εκπαίδευσή τους σε αντίθεση με τις μεθόδους *deep learning*. Εκτός από αυτά τα πλεονεκτήματα, η προτεινόμενη μέθοδος είναι ικανή να παρέχει αποτελέσματα τμηματοποίησης, τουλάχιστον συγκρίσιμης ποιότητας με τα αντίστοιχα που παρέχονται από τις μεθόδους αιχμής, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που βασίζονται σε *deep learning-based*. Στην προτεινόμενη μεθοδολογία το μόνο που απαιτείται είναι η περιορισμένη παρέμβαση από τον χρήστη.

Το υπόλοιπο αυτής της εργασίας οργανώνεται ως εξής: Στην ενότητα 2.3 παρουσιάζονται τα διάφορα στάδια της προτεινόμενης προσέγγισης, στην ενότητα

2.4 παρέχονται οι πειραματικές αξιολογήσεις σε πραγματικές εικόνες μαγνητικής τομογραφίας, με χρήση ASM σε δεδομένα με εικόνες αξονικής τομογραφίας, καθώς και οι συγκριτικές παρατηρήσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες αιχμής. Τέλος, στην ενότητα 2.5 συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα αυτής της εργασίας.

3.2 Μεθοδολογία

Η προτεινόμενη μέθοδος στοχεύει στην εξαγωγή των ορίων από τους σπονδύλους, το μεσοσπονδύλιο διάστημα και το κανάλι των νεύρων μέσω χρήσης οβελιαίων εικόνων μαγνητικής τομογραφίας, ούτως ώστε να βοηθήσει στην ανάλυση παθολογικών καταστάσεων της σπονδυλικής στήλης. Συγκεκριμένα, η προσέγγισή μας αξιοποιεί τα σχήματα των σπονδύλων που προέρχονται από εικόνες αξονικής τομογραφίας. Στη συνέχεια, η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται συμπληρωματικά στις εικόνες μαγνητικής τομογραφίας και προέρχεται εκ της εκπαίδευσης με *active shape model (ASM)* επάνω σε εικόνες αξονικής τομογραφίας. Με τον τρόπο αυτό, η πληροφορία μεταφέρεται μεταξύ των δύο συστημάτων. Θα μπορούσαμε να πούμε στο σημείο αυτό ότι συνολικά ακολουθείται μία διαδικασία αποτελούμενη από έξι βασικά στάδια, όπως απεικονίζονται και στην Εικόνα 3-1, ήτοι: 1) εκπαίδευση με ASM σε εικόνες αξονικής τομογραφίας για την εξαγωγή των σχημάτων από τους σπονδύλους, 2) επιλογή των περιοχών ενδιαφέροντος με αλλαγή του μεγέθους των εικόνων μαγνητικής τομογραφίας και τοποθέτηση του ASM επάνω σε κάθε εικόνα ξεχωριστά (η εκπαίδευση του ASM έχει πραγματοποιηθεί με εικόνες αξονικής τομογραφίας), 3) εφαρμογή του ASM σε εικόνες *T1-weighted* μαγνητικής τομογραφίας, 4) προβολή των περιγραμμάτων των σπονδύλων σε εικόνες *T2-weighted*, 5) εύρεση του περιγράμματος του καναλιού των νεύρων, 6) εξαγωγή του περιγράμματος του μεσοσπονδύλιου δίσκου.



Εικόνα 3-1. Περίληψη των κύριων σταδίων της προτεινόμενης μεθόδου.

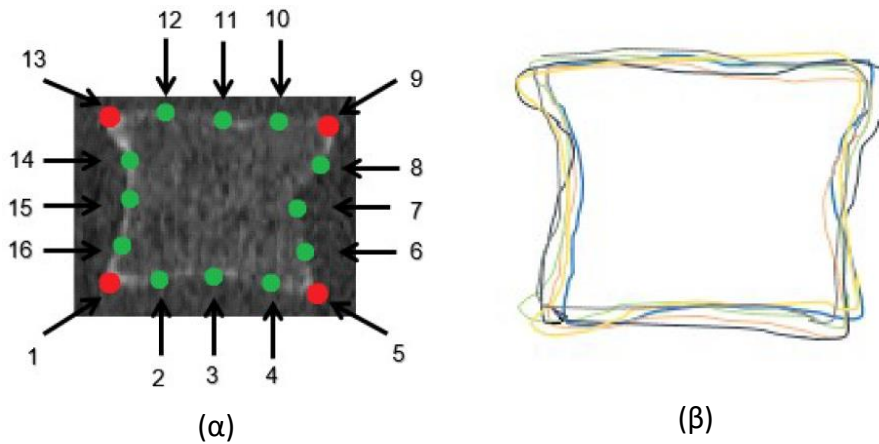
3.2.1 Εκπαίδευση ASM σε Εικόνες Αξονικής Τομογραφίας

Τα ASM αποτελούν ένα καθιερωμένο και χαρακτηριστικό παράδειγμα τμηματοποίησης εικόνας, το οποίο βασίζεται στις δομικές πληροφορίες των σχημάτων και συγκεκριμένα στα χαρακτηριστικά αυτών, τα οποία λαμβάνονται από εικόνες αναφοράς. Επάνω στις εικόνες αυτές περιγράφονται τα περιγράμματα των σχημάτων με σημεία αναφοράς και το περίγραμμα οριοθετείται από σημεία αναφοράς που έχουν τοποθετηθεί με χειροκίνητο τρόπο στο όριο κάθε δομής ενδιαφέροντος. Τα σχήματα που προκύπτουν, τελικά, μέσω της παραπάνω αναλυθείσας επεξεργασίας εμπεριέχουν όλη την πληροφορία για τις μεταβολές του σχήματος μέσω *principal component analysis* (PCA).

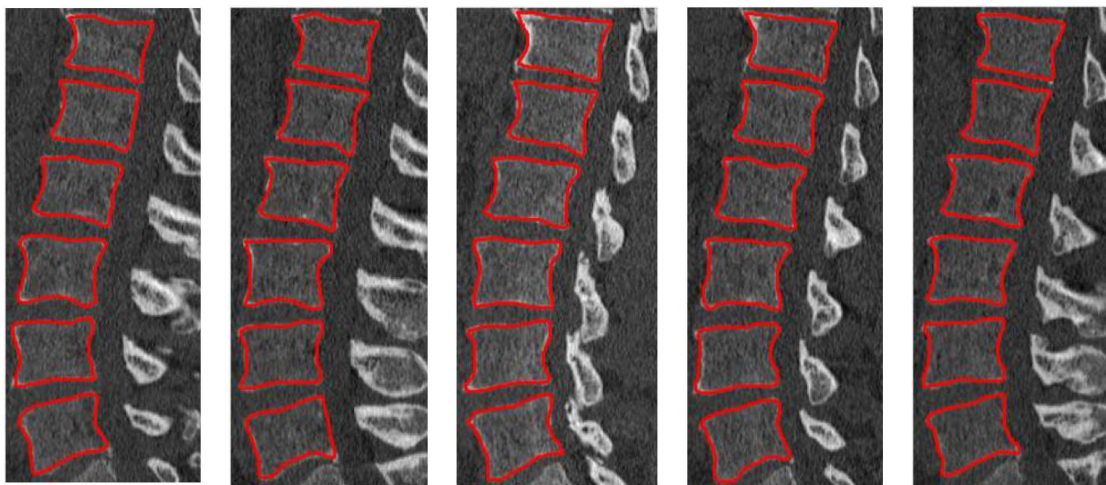
Στο πλαίσιο της προτεινόμενης μεθόδου, τα σημεία αναφοράς έχουν τοποθετηθεί από ειδικό ακτινολόγο ιατρό στα όρια των σπονδύλων, όπως φαίνεται στις εικόνες αξονικής τομογραφίας. Για κάθε ένα από τους έξι σπονδύλους, μεταξύ των επιπέδων O5 (οσφυϊκή μοίρα) και Θ12 (θωρακική μοίρα), εκπαιδεύεται ένα ξεχωριστό ASM, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν έξι διαφορετικά σχήματα, δηλαδή ένα για κάθε σπόνδυλο αντίστοιχα (Εικόνα 3-2α). Ο βασικός λόγος πρόκρισης και επιλογής της αξονικής τομογραφίας, προκειμένου να εντοπίσουμε και να σημειώσουμε τα σημεία αναφοράς, εντοπίζεται στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο σύστημα απεικονίζει ευκρινέστερα τα όρια των συμπαγών ανατομικών δομών [35]. Ειδικότερα, για την τοποθέτηση των σημείων αναφοράς

επιλέγεται η αξονική τομογραφία έναντι της μαγνητικής τομογραφίας και η όλη διαδικασία πραγματοποιείται από ειδικό ακτινολόγο ιατρό.

Για την εγκυρότητα δε της μεθόδου, δοκιμάστηκε και η αντίστροφη διαδικασία. Αναλυτικά, εκπαιδεύσαμε το μοντέλο με τον ASM επάνω στις εικόνες μαγνητικής τομογραφίας υλοποιήσαμε τα υπόλοιπα στάδια της διαδικασίας. Εν συνεχεία, συγκρίναμε τα παραχθέντα αποτελέσματα, τα οποία παρατηρήθηκαν εμφανώς βελτιωμένα, όταν η εκπαίδευση του ASM έλαβε χώρα σε εικόνες της αξονικής τομογραφίας (Κεφάλαιο 3.2.4). Στην Εικόνα 3-2, αριθμούνται παραδείγματα από την τοποθέτηση των 16 σημείων αναφοράς επάνω στους σπονδύλους, με χειροκίνητο τρόπο. Αντίθετα, στην Εικόνα 3-3 απεικονίζεται το περίγραμμα των σπονδύλων επάνω σε δισδιάστατες εικόνες οβελιαίας τομής αξονικής τομογραφίας, το οποίο τελικά χρησιμεύει για την εκπαίδευση του ASM.



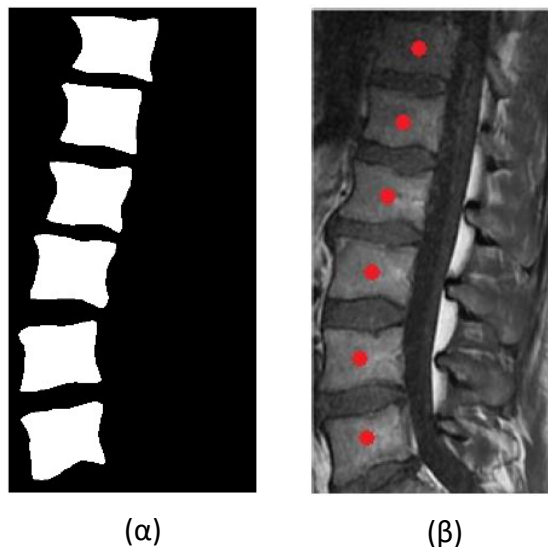
Εικόνα 3-2. Διαδικασία εκπαίδευσης ASM με 16 σημεία: (α) τα 4 σημεία αναφοράς απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα, τα υπόλοιπα 12 σημεία χρησιμεύουν για το περίγραμμα του σπονδυλικού σώματος (πράσινο χρώμα), (β) χειροκίνητο σπονδυλικό περίγραμμα.



Εικόνα 3-3. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το χειροκίνητο περίγραμμα των σπονδύλων, το οποίο χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του ASM.

3.2.2 Αλλαγή του Μεγέθους των Εικόνων και Αρχικοποίηση του ASM

Το επόμενο στάδιο στοχεύει στην εφαρμογή του ASM επάνω σε εικόνες μαγνητικής τομογραφίας. Προκειμένου να εφαρμοστεί η εκπαίδευση του ASM, απαιτούνται τρία στάδια προ-επεξεργασίας, δηλαδή: 1) οι περιοχές ενδιαφέροντος επιλέγονται χειροκίνητα και περικλείουν τους σπονδύλους μεταξύ των διαστημάτων, ήτοι από τον οσφυϊκό 5 (Ο5) έως τον θωρακικό 12 (Θ12) και η παραπάνω διαδικασία υλοποιείται στις εικόνες Αξονικής και Μαγνητικής Τομογραφίας, 2) με βάση τις περιοχές ενδιαφέροντος, κάθε μία εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας ακολουθείται είτε T1 είτε T2- διαφοροποιεί το μέγεθος της, ώστε να ομοιάζει με τις εικόνες αναφοράς που προέρχονται από την Αξονική Τομογραφία, οι δε εικόνες που παρήχθησαν από τη Μαγνητική Τομογραφία προσαρμόζονται στην εικόνα αναφοράς, αλλάζοντας έτσι το μέγεθος των εικονοστοιχείων, ενώ ταυτόχρονα, οι εικόνες της Αξονικής Τομογραφίας έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση του μοντέλου, 3) τα κέντρα από τους σπονδύλους, όπως προσδιορίζονται από την Αξονική Τομογραφία, συνδυάζονται με τα αντίστοιχα από τις εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας -ακολουθίας T1, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως ορόσημα για την αρχικοποίηση της θέσης του ASM, επάνω σε δισδιάστατες οβελιαίες εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας (Εικόνα 3-4).



Εικόνα 3-4. Προβολή των κέντρων των σπονδύλων επάνω σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας: (α) με άσπρο χρώμα απεικονίζονται τα σώματα σπονδύλων, όπως έχουν προκύψει από την εκπαίδευση του ASM από εικόνες Αξονικής Τομογραφίας, (β) με κόκκινες κουκίδες εμφανίζονται τα κέντρα των σπονδύλων, όπου προβάλλονται επάνω στην Μαγνητική Τομογραφία ακολουθίας T1.

3.2.3 Εφαρμογή ASM επάνω σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας -Ακολουθίας T1

Σε αυτό το στάδιο της μελέτης έχουν πραγματοποιηθεί έξι (6) διαφορετικές εκπαιδεύσεις ASM, ήτοι μία για κάθε έναν από τους έξι (6) σπονδύλους ξεχωριστά. Η εκπαίδευση υλοποιήθηκε επάνω σε δισδιάστατες οβελιαίες εικόνες Αξονικής Τομογραφίας. Ακολουθώς, σε κάθε ένα διάστημα από το οσφυϊκό 5 έως το θωρακικό 12 εφαρμόσθηκε το μοντέλο ASM επάνω στις αντίστοιχες θέσεις στις εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας με την ακολουθία T1. Μέσω της διαδικασίας της προβολικής απεικόνισης εντοπίστηκαν οι ανατομικές περιοχές που μας ενδιαφέρουν, ώστε να ξεκινήσει η εφαρμογή του μοντέλου.

Παρά τις διαφορές που εντοπίζονται στις εικόνες Αξονικής Τομογραφίας σε σύγκριση με τις αντίστοιχες από την Μαγνητική Τομογραφία, παρατηρήθηκε πως και στις δύο απεικονίσεις υπάρχει πανομοιότυπη συμπεριφορά τόσο στην κλίση της σπονδυλικής στήλης, όσο και στις εντάσεις των εικονοστοιχείων επάνω στο περίγραμμα των σπονδύλων. Έτσι λοιπόν, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα μοντέλα με ASM καθοδηγούνται από τις εντάσεις των εικονοστοιχείων [57], ο τρόπος εφαρμογής του ASM ανάμεσα σε δύο πανομοιότυπα απεικονιστικά συστήματα είναι έγκυρος και ορθός. Ο ισχυρισμός αυτός επαληθεύεται από την τμηματοποίηση και τα αποτελέσματα που παρήχθησαν από την παραπάνω μεθοδολογία (Εικόνα 3-5).



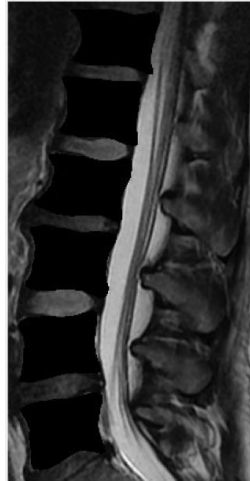
Εικόνα 3-5. Παράδειγμα εφαρμογής του ASM, για την εύρεση του περιγράμματος (κόκκινο χρώμα) των σπονδύλων σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας με ακολουθία T1.

3.2.4 Προβολή των Περιγραμμάτων των Σπονδύλων επάνω στην Ακολουθία T2

Τα όρια των σπονδύλων που εξήχθησαν από το προηγούμενο στάδιο επεξεργασίας προβάλλονται στις αντίστοιχες εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας με ακολουθία T2, έτσι ώστε να βοηθηθεί η εύρεση των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου και του καναλιού των νεύρων. Αυτές οι δύο δομές απεικονίζονται ευχερέστερα από εικόνες που ανήκουν στην ακολουθία T2, όπως συμβαίνει με όλες τις ανατομικές δομές που χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε συγκέντρωση νερού. Σε αυτό το

στάδιο επεξεργασίας, χρησιμοποιούμε την ακολουθία T1 ως αναφορά για την εύρεση των σπονδύλων. Έπειτα, στην παρακάτω εικόνα προβάλλουμε τους σπονδύλους, που ανιχνεύθηκαν από την διαδικασία ASM, επάνω στην ακολουθία T2.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι οι δύο ακολουθίες προέρχονται από τον ίδιο ασθενή κατά την διάρκεια μίας εξέτασης και η λήψη τους έγινε με βάση το ίδιο πρωτόκολλο. Ως εκ τούτου, επιβεβαιώθηκε ότι η θέση των ανατομικών περιοχών ανάμεσα στις δύο εικόνες είναι ακριβώς η ίδια (Εικόνα 3-6).



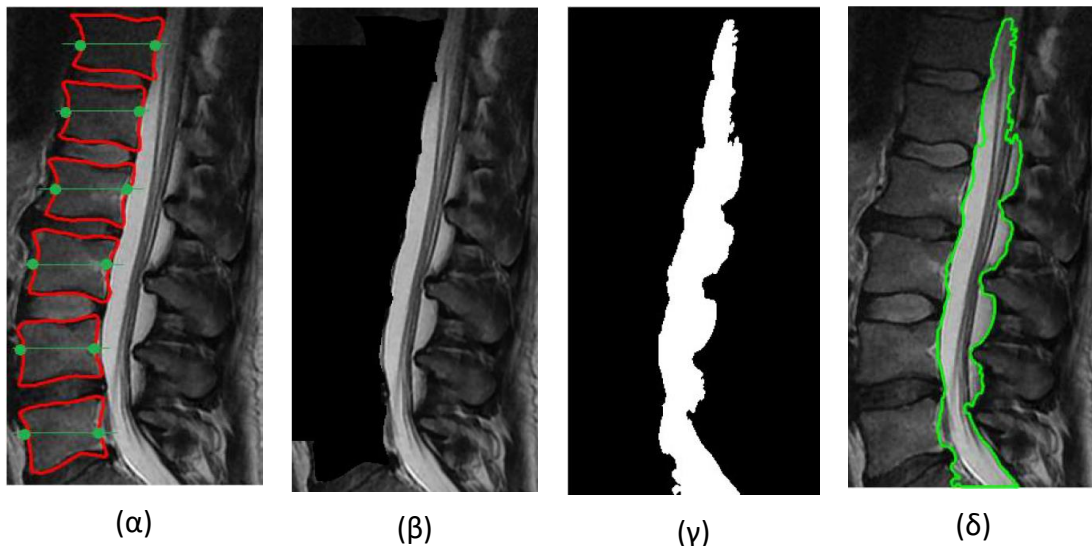
Εικόνα 3-6. Παράδειγμα εικόνας Μαγνητικής Τομογραφίας ακολουθίας T2, όπου με μαύρο χρώμα απεικονίζονται τα σώματα των σπονδύλων.

3.2.5 Εύρεση του Περιγράμματος από το Κανάλι των Νεύρων

Με τη βοήθεια της χωρικής ένδειξης των σημείων, όπου βρίσκονται τα όρια των σπονδύλων στην εικόνα, εντοπίζουμε τη σχετική θέση από το κανάλι των νεύρων και έπειτα ανευρίσκουμε το περίγραμμά του. Αρχικά, προσεγγίζουμε ως αφετηρία τα έξι (6) κέντρα των σπονδύλων και ορίζουμε έξι (6) οριζόντιες γραμμές κατά μήκος της εικόνας. Κάθε μία γραμμή ορίζει δύο σημεία αναφοράς, στην αριστερή και στη δεξιά μεριά του σπονδύλου. Τα δύο αυτά σημεία αναφοράς εντοπίζονται στην περιφέρεια του περιγράμματος του σπονδύλου και κατά συνέπεια, μέσα από αυτά, μπορούμε να δημιουργήσουμε δύο γραμμές, οι οποίες θα περιγράψουν τη συμπεριφορά της χαρακτηριστικής καμπύλης της σπονδυλικής στήλης (Εικόνα 3-7α).

Σε επόμενο στάδιο, ενώνουμε τα αριστερά και τα δεξιά σημεία της καμπύλης κατακόρυφα στην εικόνα, δημιουργώντας, έτσι, μία λωρίδα περιγραφής των ορίων του καναλιού των νεύρων. Εν συνεχεία, η περιοχή στα αριστερά της λωρίδας απορρίπτεται (το κανάλι των νεύρων σε αυτές τις τομές βρίσκεται στα δεξιά των σπονδύλων) και μεταβάλλουμε το χρώμα όλων των εικονοστοιχείων σε μαύρο (Εικόνα 3-7β). Στο εναπομείναν τμήμα της εικόνας εφαρμόζουμε κατώφλι Otsu με τρία (3) επίπεδα τόνων του γκρι, προκειμένου να εξαχθεί το περίγραμμα από το κανάλι των νεύρων. Από τα τρία (3) επίπεδα, τα δύο αντιστοιχούν στο φόντο της εικόνας (μαύρο χρώμα) και το τρίτο (3ο) επίπεδο του γκρι αντιστοιχεί στο κανάλι

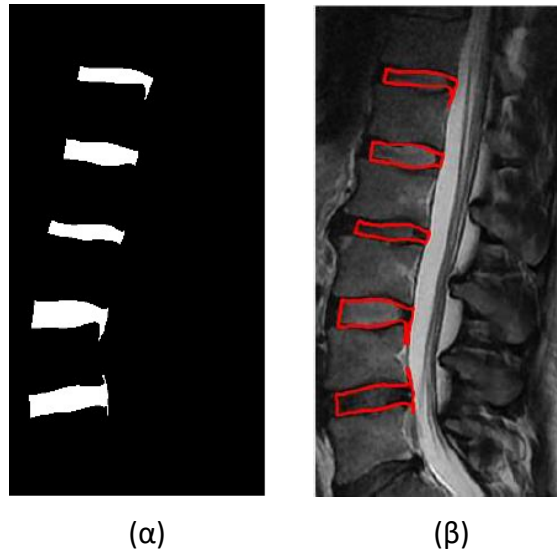
των νεύρων (Εικόνα 3-7γ). Το περίγραμμα του καναλιού των νεύρων απεικονίζεται με πράσινο χρώμα στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3-7δ).



Εικόνα 3-7. Εύρεση του περιγράμματος του καναλιού των νεύρων: (α) με κόκκινο χρώμα αποτυπώνεται το περίγραμμα των προβαλλόμενων σπονδύλων, οι πράσινες οριζόντιες γραμμές βοηθούν στην εύρεση των πράσινων κύκλων, που βρίσκονται στην περιφέρεια των σπονδύλων και αποτελούν τα σημεία αναφοράς, (β) στα σημεία αναφοράς εφαρμόζουμε γραμμική παρεμβολή και από τις δύο πλευρές, απορρίπτουμε έπειτα το κομμάτι της εικόνας που βρίσκεται στα αριστερά, (γ) με άσπρο χρώμα φαίνεται το αποτέλεσμα από την χρήση κατωφλίου Otsu, (δ) με πράσινο χρώμα απεικονίζονται τα όρια από το κανάλι των νεύρων.

3.2.6 Εύρεση των Ορίων του Μεσοσπονδύλιου Διαστήματος

Το τελευταίο στάδιο της προτεινόμενης μεθοδολογίας έχει ως σκοπό την εξεύρεση των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, ο μεσοσπονδύλιος δίσκος εντοπίζεται μεταξύ του σώματος, των σπονδύλων (άνωτηρη και κατώτερη τελική πλάκα) και του καναλιού των νεύρων. Χρησιμοποιώντας αυτή την προσέγγιση, απορρίπτουμε όλες τις περιβάλλουσες δομές από τα προηγούμενα στάδια της μεθοδολογίας, ώστε να εντοπίσουμε το περίγραμμα του μεσοσπονδύλιου δίσκου (Εικόνα 3-8). Επίσης αυτή η έμμεση μέθοδος ανίχνευσης και εξαγωγής των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου επιτρέπει την εύρεση πιθανής κήλης του μεσοσπονδύλιου δίσκου.



Εικόνα 3-8. Εξαγωγή των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου: (α) με άσπρο χρώμα φαίνονται τα αποτελέσματα της τμηματοποίησης του μεσοσπονδύλιου δίσκου, (β) με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα όρια του μεσοσπονδύλιου δίσκου επάνω σε εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας ακολουθίας T2.

3.3 Αποτελέσματα

3.3.1 Εικόνες που Χρησιμοποιήθηκαν

Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει εφαρμοστεί συνδυαστικά σε δύο (2) σύνολα δεδομένων διαφορετικών απεικονιστικών συστημάτων: 1) ένα σύνολο δεδομένων που έχει χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενη εργασία της ομάδας μας [55] και θα αναφέρεται ως DS1. Το DS1 αποτελείται από επτά (7) ζεύγη εικόνων Αξονικής και Μαγνητικής Τομογραφίας με ενενήντα οκτώ (98) οβελιαίες δισδιάστατες εικόνες. Το μέγεθος των εικονοστοιχείων και το πάχος των τομών διαφέρει ανάλογα με το απεικονιστικό σύστημα. Συγκεκριμένα, το εύρος για τα συστήματα Αξονικής Τομογραφίας υπολογίζεται μεταξύ 0,33–0,37 mm και 1,5–3 mm, ενώ για τα συστήματα Μαγνητικής Τομογραφίας το εύρος υπολογίζεται μεταξύ 0,47–0,55 mm και 3–4 mm αντίστοιχα. Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι δημόσια διαθέσιμες στον σύνδεσμο (<http://spineweb.digitalimaginggroup.ca>), 2) Το δεύτερο σύνολο δεδομένων αναφέρεται ως DS2 και αποτελείται από εννιά (9) ζεύγη εικόνων Μαγνητικής Τομογραφίας, όπου εμπεριέχονται τριάντα πέντε (35) οβελιαίες εικόνες. Τα μεγέθη των εικονοστοιχείων ποικίλουν σε εύρος μεταξύ 0,46–0,87 mm και το πάχος της τομής είναι 4 mm.

3.3.2 Μετρητές Απόδοσης

Η ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με την παρακάτω διαδικασία. Αναλυτικότερα, ειδικός ακτινολόγος ιατρός χαράσσει χειροκίνητα τα περιγράμματα των περιοχών όπως αυτά έχουν τμηματοποιηθεί αυτόματα από την παραπάνω αναλυθείσα μεθοδολογία. Στη συνέχεια, τα περιγράμματα συγκρίνονται ποσοτικά με τους συντελεστές ομοιότητας σχημάτων και περιγραμμάτων. Στην

προσέγγισή μας έχουν χρησιμοποιηθεί οι συντελεστές *Dice similarity coefficient (DSC)* και *Hausdorff distance (HD)* [44], ως μετρητές απόδοσης της τμηματοποίησης των σπονδύλων, του καναλιού των νεύρων και του μεσοσπονδύλιου διαστήματος.

Όπου S_g και S_t ορίζονται οι δυαδικές εικόνες (μαύρο - άσπρο), οι οποίες λαμβάνονται από την χειροκίνητη και την αυτόματη τμηματοποίηση αντίστοιχα. Και στις δύο εικόνες τα εικονοστοιχεία των δομών του περιγράμματος ορίζονται με 1 (άσπρο) και όλη η υπόλοιπη εικόνα με 0 (μαύρο). Επίσης όπου, X_g και Y_t προσδιορίζονται τα όρια των δομών S_g και S_t , αντίστοιχα. Οι μαθηματικοί τύποι για τους δείκτες DSC και HD, περιγράφονται στις εξισώσεις (1) και (2):

$$DSC(S_g, S_t) = \frac{2|S_g \cap S_t|}{|S_g| + |S_t|} \quad (3.1)$$

$$HD(X_g, Y_t) = \max \left\{ \sup_{x \in X_g} \inf_{y \in Y_t} d(x, y), \sup_{y \in Y_t} \inf_{x \in X_g} d(x, y) \right\} \quad (3.2)$$

όπου η μετρική $d()$ που χρησιμοποιείται είναι η Ευκλείδεια απόσταση.

3.3.3 Αξιολόγηση των Μετρήσεων

Σε όλες τις πειραματικές εφαρμογές που ακολούθησαν, το μοντέλο του ASM έχει εκπαιδευτεί σε είκοσι τέσσερις (24) οβελιαίες εικόνες Αξονικής Τομογραφίας από το σύνολο των δεδομένων DS2, χρησιμοποιώντας είκοσι (20) σημεία παρεμβολών, με πενήντα (50) επαναλήψεις για κάθε έναν από τους σπονδύλους, ούτως ώστε να μοντελοποιηθεί το σχήμα των σπονδύλων με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Οι παραπάνω ρυθμίσεις στις παραμέτρους έχουν προσδιοριστεί εμπειρικά και μετά από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων. Μία δειγματοληπτική έρευνα για την ευαισθησία των παραμέτρων και τον τρόπο που αυτοί διαφοροποιούν τα αποτελέσματα της τμηματοποίησης παρουσιάζεται στο τέλος αυτής της υποενότητας.

Με την εφαρμογή του ASM ανιχνεύθηκαν συνολικά: εκατόν πενήντα (150) διαφορετικοί σπόνδυλοι (εικοσιπέντε (25) εικόνες με έξι (6) σπονδύλους η κάθε μία), εκατόν εικοσιπέντε (125) μεσοσπονδύλια διαστήματα και είκοσι πέντε (25) κανάλια των νεύρων από δεδομένα Μαγνητικής Τομογραφίας. Επίσης, αξιολογήθηκαν τα δεδομένα από την ομάδα DS1, όπου εμπεριέχουν συνολικά: διακόσους δέκα (210) διαφορετικούς σπονδύλους (τριάντα πέντε (35) εικόνες με έξι (6) σπονδύλους η κάθε μία), εκατόν εβδομήντα πέντε (175) μεσοσπονδύλιους δίσκους και τριάντα πέντε (35) κανάλια νεύρων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας.

Περαιτέρω, οι Πίνακες υπ' αριθμούς Πίνακας 3-1 Πίνακας 3-2 Πίνακας 3-3 παρουσιάζουν πειραματικές συγκρίσεις, όπου συγκρίνεται η ποιότητα της τμηματοποίησης για την εύρεση του περιγράμματος των σπονδύλων, του μεσοσπονδύλιου δίσκου και του καναλιού των νεύρων. Παράλληλα, στους παρακάτω πίνακες απεικονίζεται και η σύγκριση των περιοχών αυτών και με άλλες

μεθόδους τμηματοποίησης. Στις εικόνες Εικόνα 3-9, Εικόνα 3-10 και Εικόνα 3-11 απεικονίζονται αυτά τα αποτελέσματα επάνω στις πραγματικές εικόνες που επεξεργάστηκαν. Μέσα από τους συγκεντρωτικούς πίνακες μπορούμε να οδηγηθούμε στο ασφαλές και αυταπόδεικτο συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη μέθοδος παράγει συγκρίσιμα αποτελέσματα τμηματοποίησης σε σχέση με τις υπόλοιπες σύγχρονες μεθόδους, όσον αφορά στους δείκτες σύγκρισης DSC και HD.

Ωστόσο, σε αντίθεση με προηγούμενη συνδυαστική μέθοδο [55], η προτεινόμενη δεν εξαρτάται από την διαθεσιμότητα των ζευγών εικόνων Αξονικής - Μαγνητικής Τομογραφίας, τα οποία είναι αρκετά δύσκολα να αποκτηθούν στην κλινική πράξη (συνήθως οι ιατροί επιλέγουν μία από τις δύο απεικονιστικές μεθόδους για τον ασθενή τους). Επιπροσθέτως, σε αντίθεση με τις πρόσφατες μεθόδους που βασίζονται στην μέθοδο με *deep learning-based* [25, 30], η προτεινόμενη δεν εξαρτάται από μεγάλο όγκο δεδομένων για την εκπαίδευση του μοντέλου της, καθώς είναι ευρέως γνωστό ότι στην κλινική πράξη είναι συνήθως δύσκολο να υπάρξει μεγάλος όγκος δεδομένων για μία πάθηση. Παρατηρείται, επίσης, ότι η τμηματοποίηση που πραγματοποιείται από την προτεινόμενη μέθοδο είναι ακριβής και αξιόπιστη σε αμφότερα τα σύνολα δεδομένων που αναλύθηκαν. Τέλος, μέσα από την τμηματοποίηση που πραγματοποιήθηκε, επαληθεύεται ο ισχυρισμός πως η εκπαίδευση με ASM σε εικόνες Αξονικής Τομογραφίας δύναται να εφαρμοστεί και σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας, επομένως περιληπτικά μπορεί να γίνει δεκτό ότι: 1) τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου μας είναι συγκρίσιμα με αυτά των υπόλοιπων σύγχρονων μεθόδων, 2) τα αποτελέσματα που εξήχθησαν είναι προσφορότερα για την εκπαίδευση του ASM σε σύγκριση με την εναλλακτική αντίστοιχης εκπαίδευσής του απευθείας σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας, και 3) η ποιότητα των αποτελεσμάτων της τμηματοποίησης από αυτή τη διαδικασία παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-1 -'Εκπαίδευση MT DS2'.

Η Εικόνα 3-12 και Εικόνα 3-14 απεικονίζουν παραδείγματα εύρεσης των περιγραμμάτων από σπονδύλους, μεσοσπονδύλιους δίσκους και κανάλια νεύρων, όπου ανιχνεύτηκαν με την προτεινόμενη μεθοδολογία σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας.

Στην Εικόνα 3-15, απεικονίζονται παραδείγματα εικόνων όπου υπάρχει συγκεντρωτική πληροφορία, ενώ απεικονίζεται ταυτόχρονα ο μεσοσπονδύλιος δίσκος και το κανάλι των νεύρων. Μπορεί, εδώ, να σημειωθεί ότι η εξαγωγή των ορίων είναι αρκετά ακριβής για τις περισσότερες ανατομικές δομές που ανιχνεύτηκαν.

Πίνακας 3-1. Ανίχνευση των ορίων των σπονδύλων από εικόνες Μαγνητικής τομογραφίας. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προτεινόμενη μέθοδο και από τις συγκρίσιμες σύγχρονες μεθόδους τμηματοποίησης. Η σύγκριση έγινε με την μέση τιμή από δύο ποσοτικούς δείκτες, τον Dice similarity coefficient (DSC) και τον Hausdorff distance (HD).

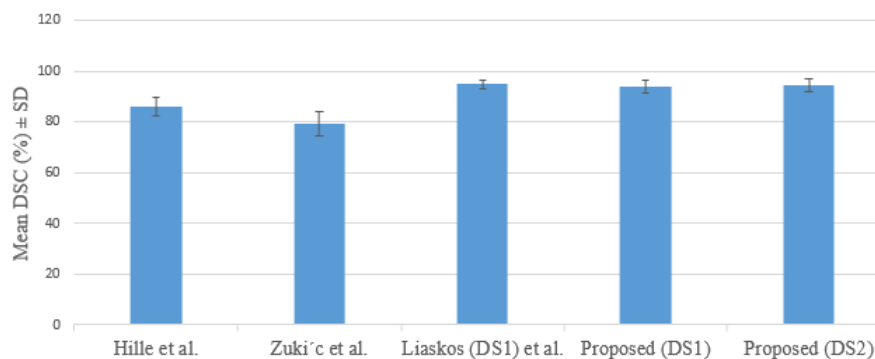
Μέθοδος	Μέσος Όρος DSC(%) \pm SD	Μέσος Όρος HD(mm) \pm SD
Hille [58]	86.0 \pm 3.9	6.9 \pm 1.1
Zuki'c [59]	79.3 \pm 5.0	11.9 \pm 2.6
Liaskos [55] (DS1)	94.8 \pm 1.8	4.4 \pm 1.6
Προτεινόμενη (DS1)	93.9 \pm 2.7	5.1 \pm 1.9
Προτεινόμενη (DS2)	94.2 \pm 2.5	4.8 \pm 1.8
Εκπαίδευση MT (DS2)	86.5 \pm 4.2	6.4 \pm 2.5

Πίνακας 3-2. Ανίχνευση των ορίων του μεσοσπονδύλιου διαστήματος, από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας. Η σύγκριση έγινε με την μέση τιμή από δύο ποσοτικούς δείκτες, τον Dice similarity coefficient (DSC) και τον Hausdorff distance (HD), ως προς την τμηματοποίηση της συγκεκριμένης περιοχής.

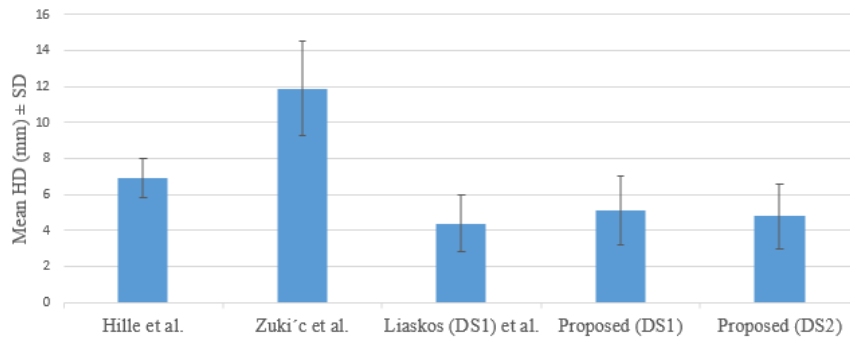
Μέθοδος	Μέσος Όρος DSC(%) \pm SD	Μέσος Όρος HD(mm) \pm SD
Lopez Andrade and Glocker [29]	87.9 \pm 3.4	4.9 \pm 1.5
Wang and Forsberg [31]	90.0 \pm 2.6	4.7 \pm 0.9
Chen [37]	88.4 \pm 3.7	4.7 \pm 1.4
Korez [32]	91.5 \pm 2.3	4.4 \pm 0.7
Liaskos [55] (DS1)	86.3 \pm 2.1	4.5 \pm 0.8
Προτεινόμενη (DS1)	85.9 \pm 0.1	3.7 \pm 0.1
Προτεινόμενη (DS2)	84.4 \pm 0.2	4.5 \pm 0.1
Εκπαίδευση MT (DS2)	78.4 \pm 1.9	5.9 \pm 1.6

Πίνακας 3-3. Ανίχνευση των ορίων του καναλιού των νεύρων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας. Η σύγκριση έγινε με τη μέση τιμή από δύο ποσοτικούς δείκτες, ήτοι τον Dice similarity coefficient (DSC) και τον Hausdorff distance (HD), ως προς την τμηματοποίηση της συγκεκριμένης περιοχής.

Μέθοδος	Μέσος Όρος DSC(%) \pm SD	Μέσος Όρος HD(mm) \pm SD
Gaonkar [56]	84.0 \pm 0.1	7.9 \pm 9.4
Προτεινόμενη (DS1)	80.25 \pm 0.13	6.46 \pm 5.74
Προτεινόμενη (DS2)	80.3 \pm 0.1	3.7 \pm 0.7
Εκπαίδευση MT (DS2)	72.8 \pm 2.1	5.8 \pm 2.4

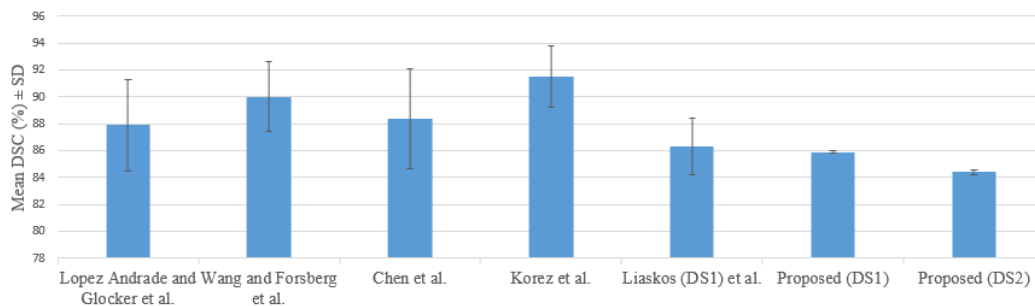


(α)

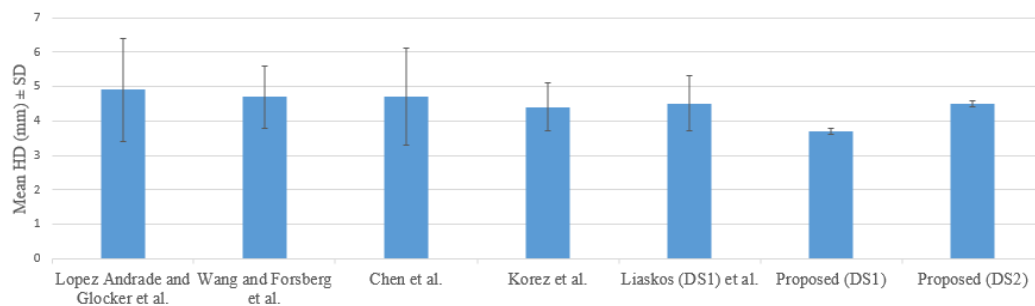


(β)

Εικόνα 3-9. Ανίχνευση των περιγραμμάτων των σπονδύλων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας: (α) με τον μέσο όρο Dice similarity coefficient DSC (%) ± SD, (β) με τον μέσο όρο Hausdorff distance HD (mm) ± SD από τον Πίνακα 3-1.

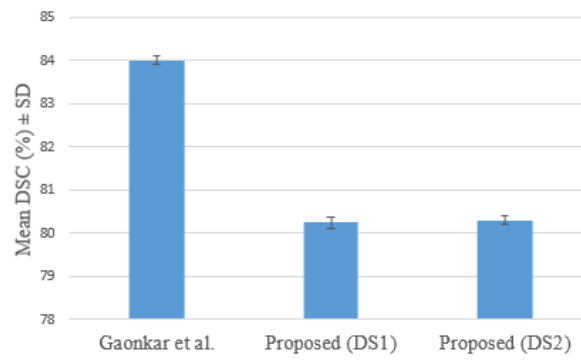


(α)

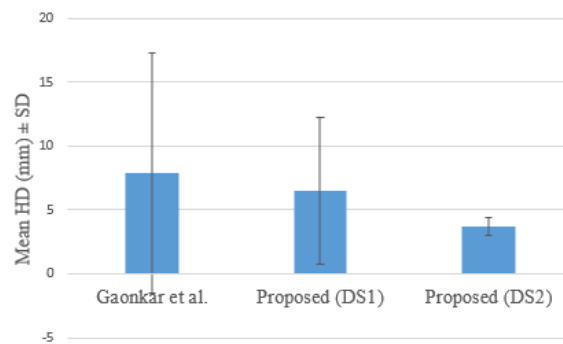


(β)

Εικόνα 3-10. Ανίχνευση των περιγραμμάτων των μεσοσπονδύλιων διαστημάτων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας: (α) με τον μέσο όρο Dice similarity coefficient DSC (%) ± SD, (β) με τον μέσο όρο Hausdorff distance HD (mm) ± SD από τον Πίνακα 3-2.

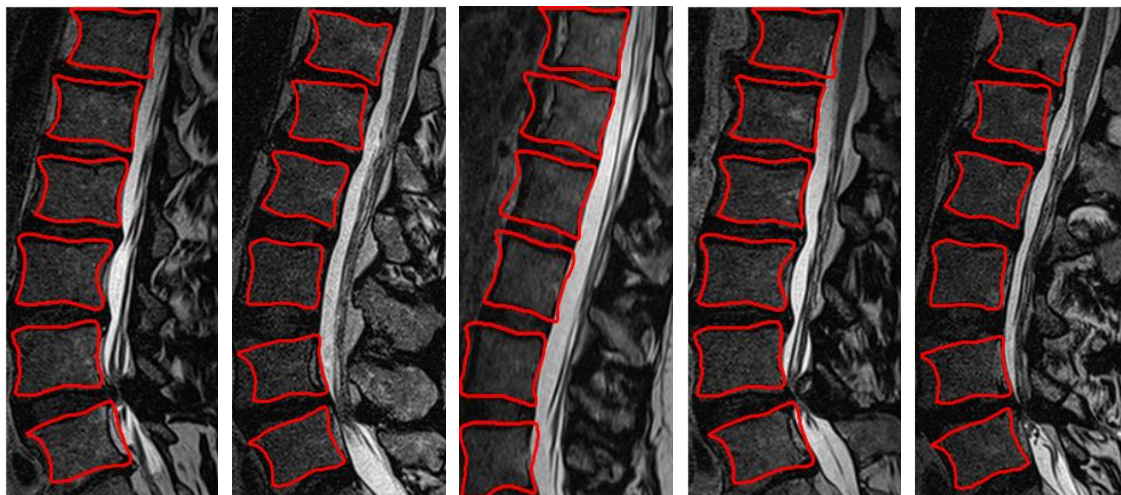


(α)

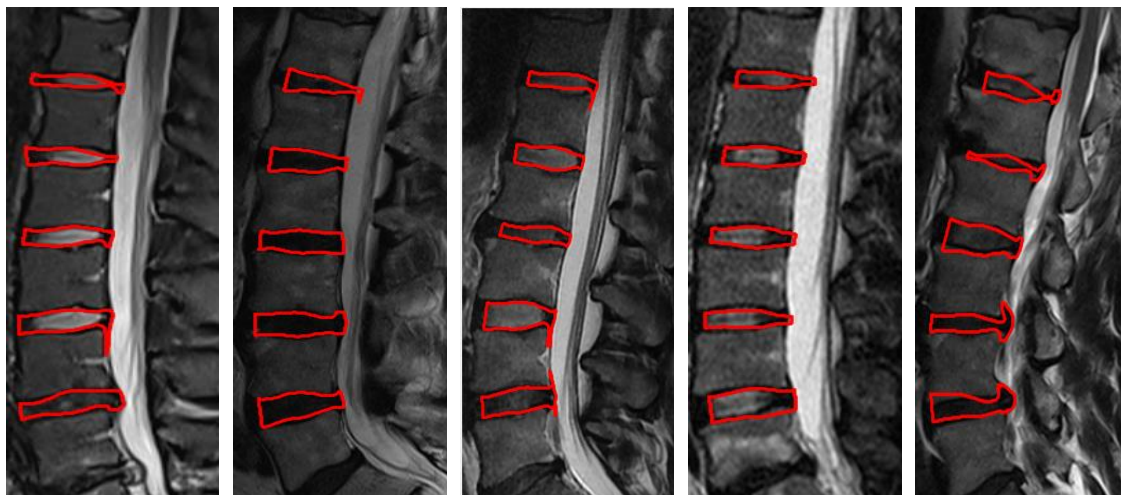


(β)

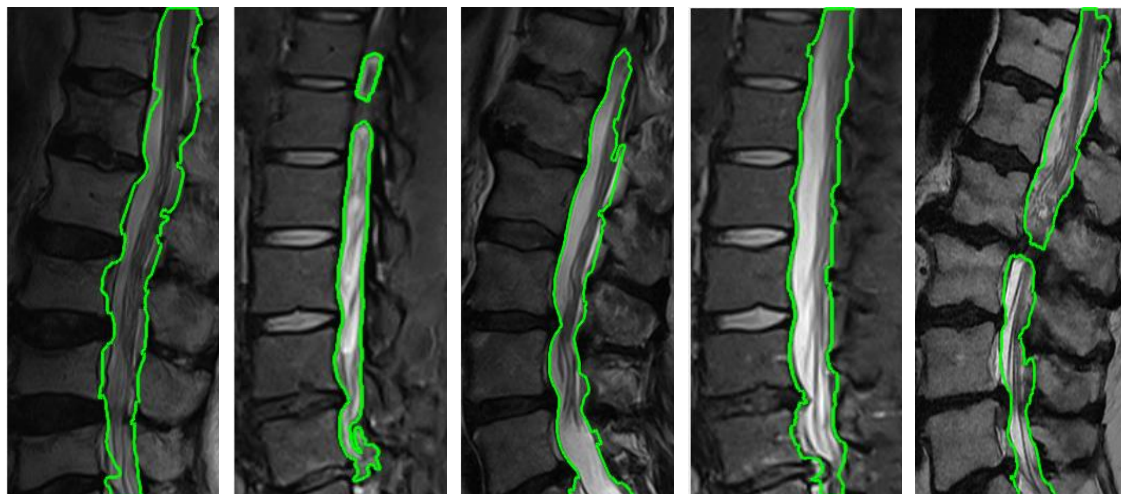
Εικόνα 3-11. Ανίχνευση του περιγράμματος του καναλιού των νεύρων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας: (α) με τον μέσο όρο Dice similarity coefficient DSC (%) ± SD, (β) με τον μέσο όρο Hausdorff distance HD (mm) ± SD από τον Πίνακα 3-3.



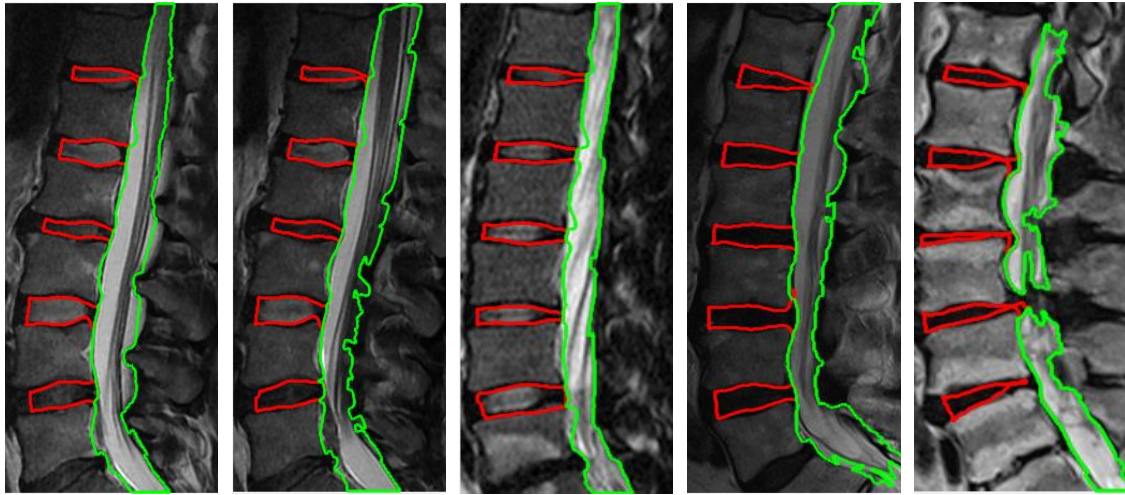
Εικόνα 3-12. Παραδείγματα εξαγωγής ορίων των σπονδύλων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας ακολουθίας T2.



Εικόνα 3-13. Παραδείγματα εξαγωγής ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας ακολουθίας T2.

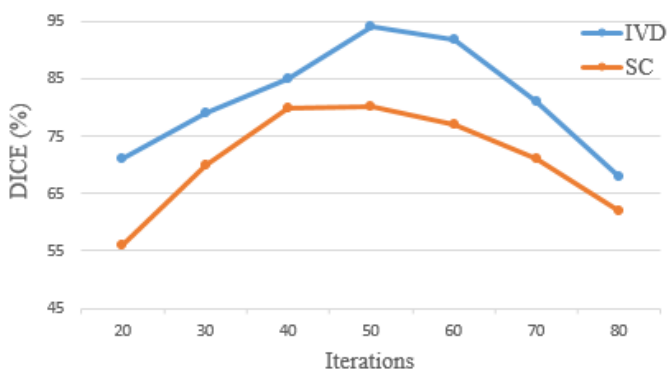


Εικόνα 3-14. Παραδείγματα εξαγωγής των ορίων του καναλιού νεύρων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας ακολουθίας T2.

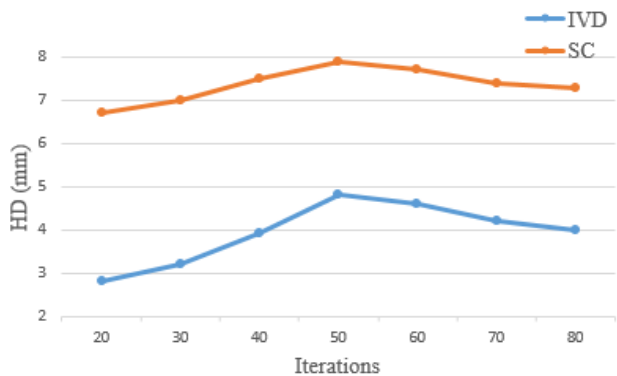


Εικόνα 3-15. Παραδείγματα απεικόνισης ταυτόχρονα των μεσοσπονδύλιων διαστημάτων και του καναλιού των νεύρων σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας ακολουθίας T2.

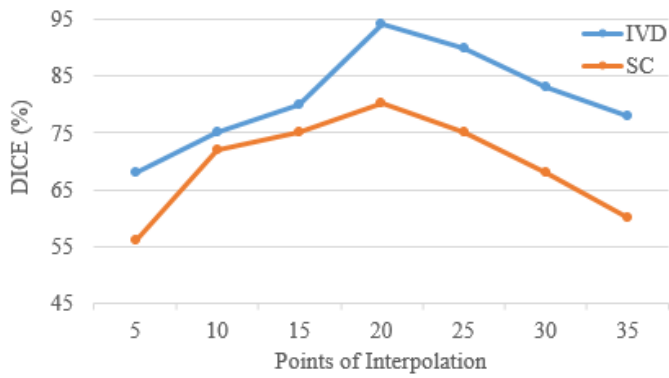
Από την άλλη πλευρά, πραγματοποιήθηκε μια άλλη πειραματική διαδικασία, η οποία αφορά στην αξιολόγηση της σταθερότητας της μεθόδου μας έναντι των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν. Μάλιστα, στην Εικόνα 3-16 απεικονίζονται τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων. Στο σημείο αυτό παρατηρήθηκε ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι σταθερή στα αποτελέσματά της, με ένα λογικό εύρος απόκλισης από τις προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων. Ακολουθώντας τις παρακάτω καμπύλες, χρησιμοποιούμε είκοσι (20) σημεία περιγράμματος και πενήντα (50) επαναλήψεις για την χρήση του ASM.



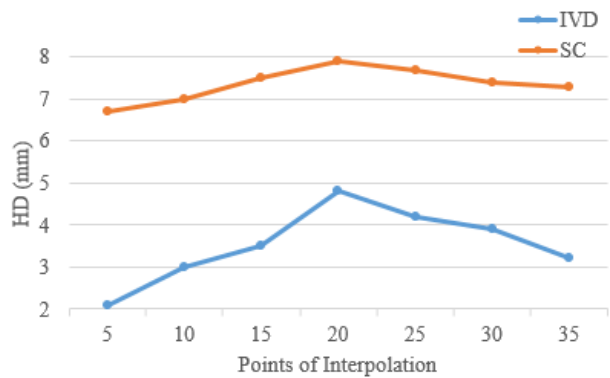
(α)



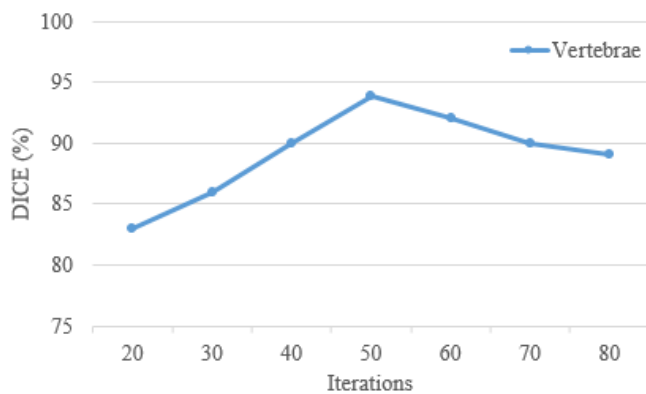
(β)



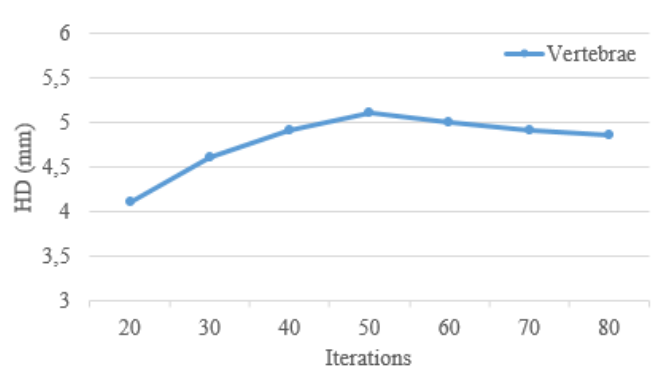
(γ)



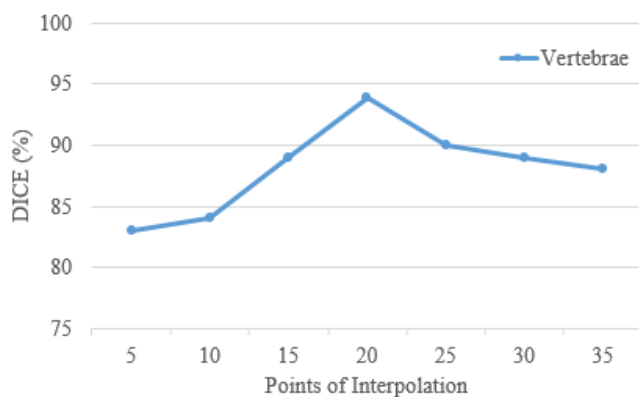
(δ)



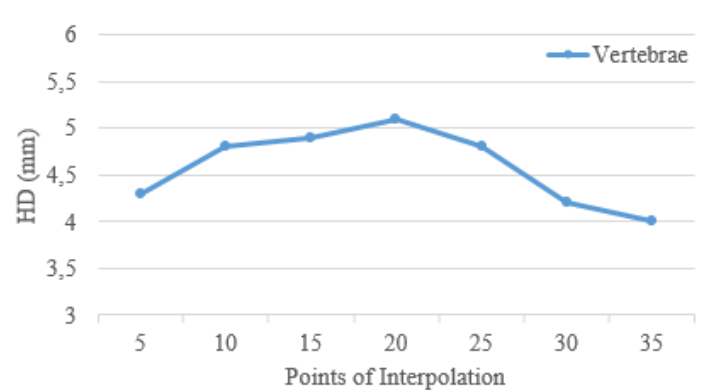
(ε)



(στ)



(ζ)



(η)

Εικόνα 3-16. Μέτρηση ποιότητας τμηματοποίησης (DSC και HD) έναντι διαφορετικής επιλογής επαναλήψεων (α-β), αλλαγή παρεμβλλόμενων σημείων (γ-δ), αλλαγή αριθμού επαναλήψεων (ε-στ) και σημεία παρεμβολής (ζ-η).

3.4 Συμπεράσματα

Αυτή η εργασία εισάγει αφενός μία υπολογιστική μεθοδολογία για την εξαγωγή ορίων σε σπονδύλους, μεσοσπονδύλια διαστήματα και κανάλια των νεύρων, αφετέρου βασίζεται στα σχήματα των σπονδύλων που προέρχονται από εικόνες Αξονικής Τομογραφίας, προκειμένου να προχωρήσουν τα υπόλοιπα βήματα επεξεργασίας και τελικά να εντοπιστούν τα περιγράμματα από το μεσοσπονδύλιο διάστημα και το κανάλι των νεύρων σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας. Σε

αντίθεση με τις προηγούμενες συνδυαστικές μεθόδους, η προτεινόμενη παρουσιάζει ανεξαρτησία και αυτοτέλεια από την διαθεσιμότητα ζευγών εικόνων Αξονικής – Μαγνητικής Τομογραφίας του ίδιου ασθενή, τα οποία συνήθως δεν αποκτώνται στην κλινική πράξη. Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με τις μεθόδους που βασίζονται σε *deep learning-based* αλγορίθμους, η παρούσα δεν απαιτεί μεγάλο όγκο δεδομένων για να πραγματοποιηθεί η εκπαίδευση του μοντέλου. Σε τελική ανασκόπηση, η ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου σε δύο (2) σύνολα δεδομένων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας, μας εισάγει στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η προσέγγισή μας είναι συγκρίσιμη με τις υπόλοιπες σύγχρονες μεθόδους όσον αφορά στην ποιότητα της τμηματοποίησης, όπως ποσοτικοποιείται μέσα από τους δείκτες DCS και HD,
- Η εκπαίδευση του ASM μπορεί να γίνει πρώτα σε εικόνες Αξονικής Τομογραφίας και στην συνέχεια να εφαρμοστεί σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας,
- Η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζει σταθερότητα και αξιοπιστία με ένα εύλογο εύρος αποκλίσεων από τις ρυθμιζόμενες παραμέτρους,
- Επιτρέπεται η μέτρηση των περιοχών, όπως είναι ο μεσοσπονδύλιος δίσκος και το κανάλι των νεύρων, οι οποίες παρέχουν πολύτιμες ενδείξεις για την αξιολόγηση παθήσεων όπως είναι η κήλη μεσοσπονδύλιου δίσκου και η στένωση του καναλιού των νεύρων,
- Για τη λειτουργία της μεθόδου μας απαιτείται απλώς περιορισμένη παρέμβαση από τον χρήστη

Οι μελλοντικές προοπτικές της παρούσας μελέτης περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, εστιασμένο πειραματισμό με διάφορες παθολογίες, όπως επί παραδείγματι, η ανίχνευση αφυδατωμένων μεσοσπονδύλιων δίσκων.

4 Χρήση Μοντέλων Ενεργού Περιγράμματος για την Εύρεση του Περιγράμματος σε Σπονδύλους, Μεσοσπονδύλιους Δίσκους και Καναλιού των Νεύρων από Εικόνες Αυχενικής Μοίρας

4.1 Εισαγωγή

Η ανθρώπινη αυχενική μοίρα αποτελείται από τους πρώτους επτά (7) σπονδύλους της σπονδυλικής στήλης. Οι παθολογίες των συγκεκριμένων δομών περιλαμβάνουν την κήλη του μεσοσπονδύλιου δίσκου και την στένωση του μεσοσπονδύλιου διαστήματος. Αυτές οι παθήσεις σχετίζονται με πόνο στην οσφυϊκή περιοχή και στον αυχένα. Η απεικόνιση με τη συνδρομή της Μαγνητικής Τομογραφίας είναι η συνηθέστερη επιλογή για την αξιολόγηση των μαλακών ανατομικών δομών [5], όπως είναι η κήλη του μεσοσπονδύλιου δίσκου και το κανάλι των νεύρων. Από την άλλη πλευρά, η απεικόνιση με το σύστημα της Αξονικής Τομογραφίας αναδεικνύει ευχερέστερα τις σκληρότερες ανατομικές δομές όπως είναι οι σπόνδυλοι. Ως εκ τούτου, η εύρεση των περιγραμμάτων αυτών των ανατομικών δομών είναι σημαντική για την αξιολόγηση των παραπάνω παθολογιών [6], [7], [60].

Στο πλαίσιο της εξαγωγής των περιγραμμάτων από το κανάλι των νεύρων έχουν προταθεί στην απεικονιστική βιβλιογραφία κάποιες συνδυαστικές μέθοδοι, ήτοι μέθοδοι, οι οποίες αναλύουν συνδυαστικά τα απεικονιστικά δεδομένα από εικόνες τόσο Αξονικής όσο και Μαγνητικής Τομογραφίας. Αν και αυτές οι μέθοδοι επωφελούνται από την συμπληρωματική πληροφορία, η οποία παρέχεται από τα δύο διαφορετικά απεικονιστικά συστήματα, στην κλινική πράξη σπάνια λαμβάνονται από τον ίδιο ασθενή δεδομένα από Αξονική και Μαγνητική Τομογραφία.

Αναλυτικά, εντοπίζεται ένας αξιοσημείωτος αριθμός μεθόδων, οι οποίες προχωρούν σε τμηματοποίηση στο κανάλι των νεύρων και ταυτόχρονα βασίζονται στην εξάρτηση των παθήσεων της σπονδυλικής στήλης και των σχημάτων των ανατομικών δομών. Ο Chen κ.ά. προτείνει μία μέθοδο όπου χρησιμοποιεί *deformable atlas* και *topology constraints* για την εξαγωγή των περιγραμμάτων σε αυχενικούς και θωρακικούς σπονδύλους, από τον A1 - A5 και από τον A1 - Θ4, αντίστοιχα, με τη χρήση εικόνων Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted και T2-weighted [61]. Ο Yiannakas κ.ά. [62], αξιολόγησε μία πλήρως αυτοματοποιημένη μέθοδο με χρήση *active surface-based method* για την εύρεση των ορίων του καναλιού των νεύρων σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted. Ο Lemay

κ.ά [63], προτείνουν μία μέθοδο για την εύρεση των περιγραμμάτων σε όγκους, οι οποίοι εντοπίζονται στο κανάλι των νεύρων σε σημεία της αυχενικής μοίρας. Μεταξύ τριών διαφορετικών τύπων όγκων, ήτοι *astrocytomas*, *ependymomas* και *hemangioblastomas*, ο Lemay κ.ά. εφαρμόζουν μια διαδοχική μεθοδολογία, η οποία βασίζεται σε αρχιτεκτονική *U-Net* και η οποία εφαρμόζεται σε δύο στάδια: α) ένα για τον εντοπισμό και β) ένα για την ταξινόμηση. Παράλληλα, ο Koh κ.ά. [64], συνδύασαν τα *active contours* με ένα μοντέλο *saliency-driven attention model* με αφετηρία τον εντοπισμό του καναλιού των νεύρων. Ο Asman κ.ά. [65], πρότειναν μία μεθοδολογία με πολλαπλούς άτλαντες για τον εντοπισμό και την τμηματοποίηση του καναλιού των νεύρων. Ο Zhang κ.ά. [66], πρότειναν το μοντέλο *SeUneter*, δηλαδή μία αρχιτεκτονική νευρωνικών δικτύων, η οποία είναι παρόμοια με το *U-Net*. Η μέθοδός τους ανιχνεύει το περίγραμμα από τρεις ανατομικές δομές: το μεσοσπονδύλιο διάστημα, τους σπονδύλους και το κανάλι των νεύρων. Επιπλέον, ο Arif κ.ά. [67], πρότειναν μία πλήρως αυτόματη μέθοδο για την εξαγωγή των ορίων από τους σπονδύλους που βρίσκονται στην αυχενική μοίρα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε εικόνες από ακτινογραφίες και βασίζεται πλήρως στα *fully convolutional networks (FCN)* και σε *UNet – Unet-S* αλγορίθμους. Ο Sahar κ.ά. [68] παρουσιάζουν μία μέθοδο, η οποία υλοποιείται με *k-means clustering*, προκειμένου να ανιχνευθούν τα όρια του θωρακοσφυϊκού καναλιού των νεύρων σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T2-weighted. Γίνεται δεκτό ότι ο παραπάνω μέθοδοι είτε απαιτούν μεγάλο αριθμό από διαθέσιμα δεδομένα είτε χειροκίνητες παρεμβάσεις από τους χρήστες.

Στην παρούσα εργασία προτείνουμε μία μέθοδο βασισμένη σε συνδυαστική πληροφορία από δύο διαφορετικά απεικονιστικά συστήματα, ήτοι της Αξονικής και της Μαγνητικής Τομογραφίας. Η προταθείσα μεθοδολογία είναι βασισμένη στην χρήση *active shape models* για τον εντοπισμό και την εύρεση του περιγράμματος από το κανάλι των νεύρων και του μεσοσπονδύλιου διαστήματος στην περιοχή της αυχενικής μοίρας, δηλαδή από τον σπόνδυλο A3 έως τον σπόνδυλο A7. Τα σχήματα των σπονδύλων από τις εικόνες που προέρχονται από την Αξονική Τομογραφία χρησιμοποιούνται ως αναφορά για την εκπαίδευση του *ASM*. Ακολούθως, το μοντέλο που προκύπτει από την εκπαίδευση εφαρμόζεται σε κάθε εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας T2-weighted, προκειμένου να ανευρεθούν τα όρια του μεσοσπονδύλιου δίσκου και του καναλιού των νεύρων.

Ειδικότερα, ένα σύνολο δεδομένων από δισδιάστατες στεφανιαίες εικόνες από Αξονική Τομογραφία χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του *ASM*. Αντίθετα, για την εφαρμογή του και για την αξιολόγησή του, αξιοποιούνται σύνολα δεδομένων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted και T2-weighted. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι όλα τα στάδια επεξεργασίας υλοποιούνται σε δισδιάστατες στεφανιαίες εικόνες και από τα δύο απεικονιστικά συστήματα. Συν τοις άλλοις, η παρούσα μέθοδος που προκρίνουμε δεν εξαρτάται από μεγάλο πλήθος εικόνων και δεδομένων για την εκπαίδευση του μοντέλου της, εν αντιθέσει με άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούν *deep learning* αλγορίθμους, ενώ παράλληλα απαιτείται περιορισμένη παρέμβαση από τον χρήστη. Στα δε σύνολα των

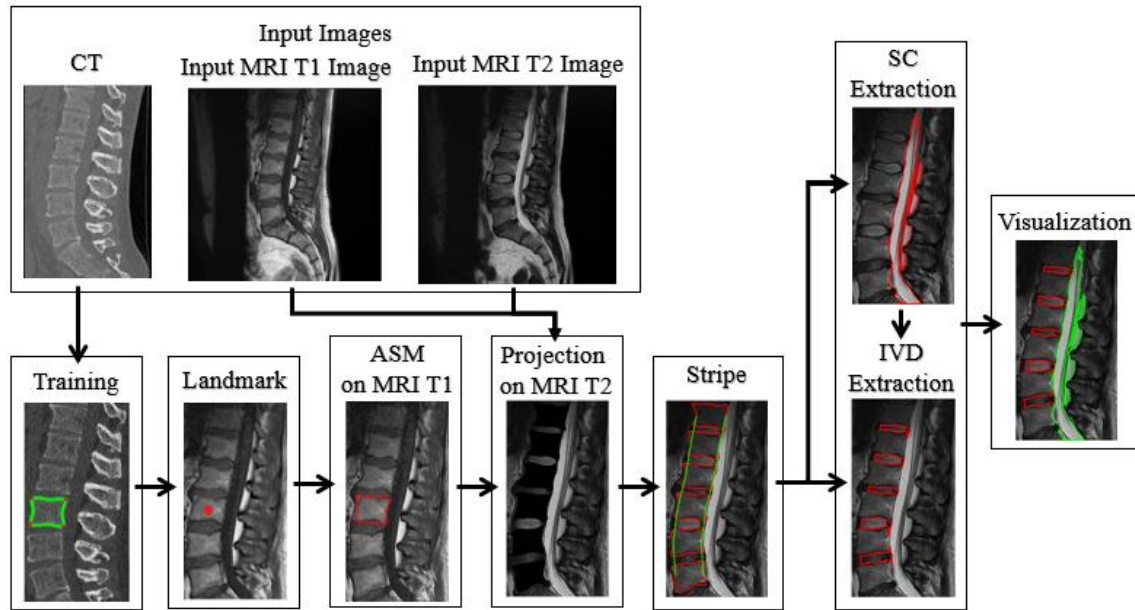
δεδομένων πραγματοποιείται πειραματική ποιοτική σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους αιχμής στις εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας, οι οποίες λήφθηκαν από τα αρχεία δημόσιου νοσοκομείου.

Το υπόλοιπο της εργασίας μας συνθέτουν τρεις ενότητες: Στην ενότητα 3.3 παρουσιάζονται τα βήματα της μεθοδολογίας που υλοποιήθηκε, στην ενότητα 3.4 παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της μεθόδου, συμπεριλαμβανομένων των συγκρίσεων με άλλες μεθόδους αιχμής, και στην ενότητα 3.5 συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα αυτής της εργασίας.

4.2 Μεθοδολογία

Στην προτεινόμενη μέθοδο χρησιμοποιούνται οβελιαίες εικόνες από δύο απεικονιστικά συστήματα (Αξονικής και Μαγνητικής Τομογραφίας), με απώτερο στόχο τον προσδιορισμό και την εύρεση των περιγραμμάτων από τους σπονδύλους, το κανάλι των νεύρων και το μεσοσπονδύλιο διάστημα. Αρχικά, χρησιμοποιείται η μεθοδολογία *Active Shape Model*, εφαρμοζόμενη σε οβελιαίες εικόνες Αξονικής Τομογραφίας, ώστε να γίνει η εκπαίδευση του μοντέλου με τα σχήματα και το περίγραμμα των σπονδύλων. Αυτές οι πληροφορίες για το περίγραμμα των σχημάτων μεταφέρονται στις εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας, όπου κατά τον τρόπο αυτό μπορούμε να ανιχνεύσουμε με ακρίβεια τα όρια των σπονδύλων επάνω σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted. Επιπροσθέτως, τα εξαγόμενα όρια των σπονδύλων χρησιμοποιούνται για να καθοδηγήσουν τα επόμενα βήματα της μεθοδολογίας, ούτως ώστε να ανιχνευτούν τα περιγράμματα από το κανάλι των νεύρων και το μεσοσπονδύλιο διάστημα.

Η παρούσα μέθοδος αποτελείται από τρία κύρια στάδια επεξεργασίας: 1) Εκπαίδευση του ASM σε οβελιαίες εικόνες από Αξονική Τομογραφία, προκειμένου να εκπαιδευτεί το μοντέλο με το περίγραμμα του σχήματος των σπονδύλων, 2) Εφαρμογή του ASM σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted και εν συνεχεία απεικόνιση επάνω σε εικόνες T1-weighted, 3) Εξαγωγή των ορίων του καναλιού των νεύρων και του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Η Εικόνα 4-1, που παρατίθεται, απεικονίζει το διάγραμμα που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση της μεθοδολογίας αυτής.

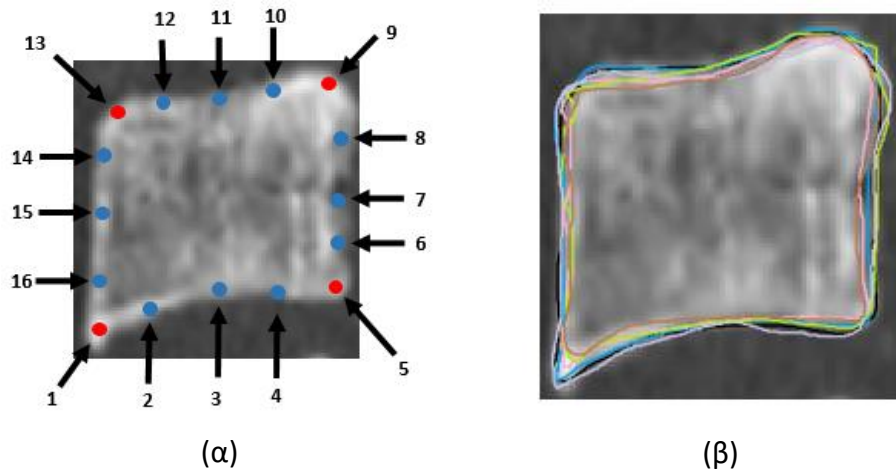


Εικόνα 4-1. Περίληψη των κύριων σταδίων της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

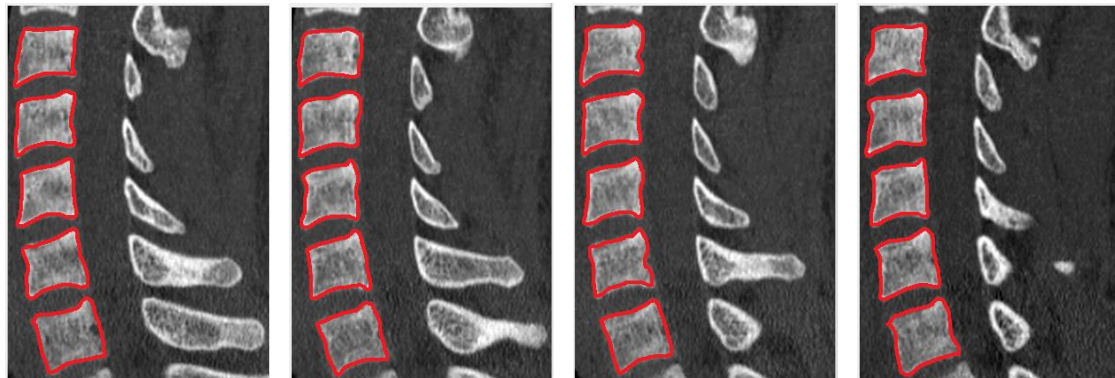
4.2.1 Εκπαίδευση του ASM σε οβελιαίες εικόνες από Αξονική Τομογραφία

Τα ASM είναι στατιστικά μοντέλα σχημάτων, τα οποία καθιερώνονται ως μία ισχυρή προσέγγιση που χρησιμοποιεί προηγούμενη γνώση (μέσα από μία διαδικασία εκπαίδευσης) για την εξαγωγή ορίων γνωστών αντικειμένων, ακόμα και με την παρουσία 'θορύβου' ή ακόμα και με ασυνάφειες [69]. Τα ASM προσδιορίζονται από μοτίβα εκμάθησης μεταβλητότητας των σχημάτων μέσω ενός εκπαιδευμένου συνόλου αντικειμένων της ίδιας κατηγορίας (με την ίδια συμπεριφορά), τα οποία εν τέλει περιγράφονται από σύνολα σημείων αναφοράς.

Στα πλαίσια της παρούσας μεθόδου, κάθε μοντέλο σχήματος εκπαιδεύεται σε οβελιαία τομή από εικόνες Αξονικής Τομογραφίας, στις οποίες αναπαρίσταται κάθε ένας από πέντε αυχενικούς σπονδύλους, ήτοι από τον A3 σπόνδυλο έως τον A7 σπόνδυλο. Για την εκπαίδευση του μοντέλου, ειδικός ακτινολόγος περιέγραψε χειροκίνητα τα όρια των σπονδύλων σε κάθε εικόνα και για κάθε σπόνδυλο, σημειώνοντας τέσσερα κύρια σημεία αναφοράς, ένα έκαστο σε κάθε γωνία, καθώς και δώδεκα επιπλέον δευτερεύοντα σημεία στα σώματα των σπονδύλων (Εικόνα 4-2). Η Εικόνα υπ' αριθμόν 3 απεικονίζει με κόκκινο χρώμα τις διαγραμμίσεις των περιγραμμάτων των πέντε σπονδύλων που προέρχονται από την χειροκίνητη χάραξη σημείων.



Εικόνα 4-2. Διαδικασία εκπαίδευσης με ASM: (α) κύρια σημεία αναφοράς με κόκκινο χρώμα, δώδεκα δευτερεύοντα σημεία πάνω στο σώμα του σπονδύλου με μπλε χρώμα, (β) προσδιορισμένα χειροκίνητα περιγράμματα σπονδύλων.



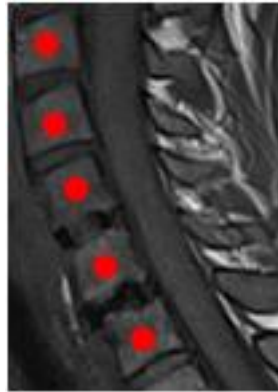
Εικόνα 4-3. Παραδείγματα διαγραμμίσεων σπονδύλων που προέρχονται από χειροκίνητη διαδικασία, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του ASM.

4.2.2 Εφαρμογή του ASM σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted και έπειτα σε εικόνες T2-weighted

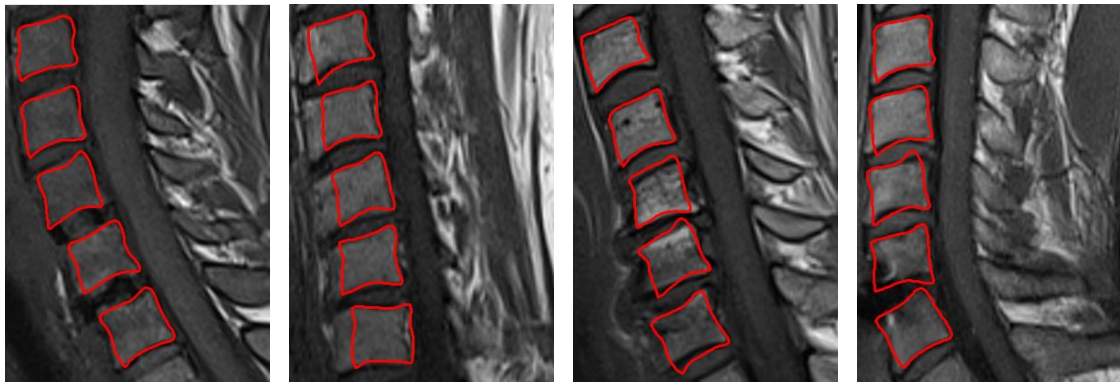
Σε αυτό το στάδιο, προσαρμόζουμε το μέγεθος των οβελιαίων εικόνων Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted, ώστε να ταιριάζουν στον χώρο με τα σημεία όπου βρίσκονται οι σπόνδυλοι που εντοπίστηκαν από την Αξονική Τομογραφία. Κάθε ένας από τους πέντε εκπαιδευμένους σπονδύλους με ASM, αντιπροσωπεύει το σχήμα από τον A3 έως τον A7 σπόνδυλο. Στη συνέχεια, προβάλλουμε τα περιγράμματα επάνω στην αντίστοιχη εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας T2-weighted. Παρόλο που τα δύο απεικονιστικά συστήματα διαφέρουν, παρατηρούμε πως είναι παρόμοια σε σχέση με το γκριζό χρώμα, με το οποίο απεικονίζονται τα όρια των σπονδύλων. Αυτή η ομοιότητα επιτρέπει την μεταφορά της πληροφορίας από τις εικόνες του ενός συστήματος στο άλλο με την χρήση του ASM, εάν εκλάβουμε ως δεδομένο ότι αυτά τα μοντέλα καθοδηγούνται από τις εντάσεις των εικονοστοιχείων [57].

Με στόχο την περαιτέρω αύξηση της ομοιότητας των χρωμάτων των εικονοστοιχείων με τους τόνους του γκρι, όλες οι εικόνες κανονικοποιούνται με

γραμμικό μετασχηματισμό. Ταυτόχρονα, η ομαλοποίηση του γκριζου χρώματος βοηθάει στην διάκριση των ορίων των σπονδύλων από τις υπόλοιπες γειτονικές ανατομικές δομές. Σε επόμενο βήμα, ανιχνεύονται τα κέντρα των σπονδύλων από τις οβελιαίες εικόνες Αξονικής Τομογραφίας και προβάλλονται επάνω σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted. Τα προβαλλόμενα κέντρα χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς για την αρχικοποίηση της διαδικασίας ανίχνευσης των ορίων με ASM επάνω στην εικόνα T1-weighted (Εικόνα 4-4). Στην Εικόνα 4-5 παρουσιάζονται παραδείγματα αποτελεσμάτων της εφαρμογής ASM σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted.



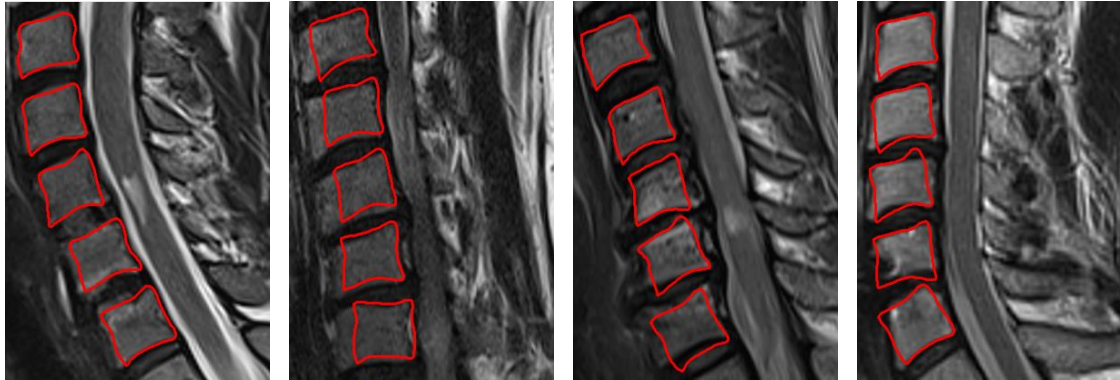
Εικόνα 4-4. Τοποθέτηση ASM: Τα κέντρα των σπονδύλων προβάλλονται σε εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted.



Εικόνα 4-5. Παραδείγματα εφαρμογής του ASM: Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα περιγράμματα των σπονδύλων μετά την εφαρμογή του μοντέλου σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted.

Στο αμέσως επόμενο στάδιο επεξεργασίας, τα περιγράμματα των σπονδύλων από τις T1-weighted εικόνες προβάλλονται επάνω σε εικόνες T2-weighted, προκειμένου να βοηθηθεί η επακόλουθη εύρεση των ορίων του καναλιού των νεύρων και του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Αυτές οι δύο ανατομικές δομές, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης νερού, απεικονίζονται καλύτερα σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T2-weighted. Έπειτα, προβάλλουμε επάνω στην T2-weighted τους σπονδύλους που έχουμε ανιχνεύσει στο προγενέστερο στάδιο από την T1-weighted.

Λόγω του πρωτοκόλλου λήψης των εικόνων, οι θέσεις που βρίσκονται οι ανατομικές δομές ανάμεσα στην T1 και T2 είναι ίδιες. Παρατηρούμε ότι προβάλλοντας τα περιγράμματα των σπονδύλων επάνω στην T2, υπάρχει ταύτιση θέσεων (Εικόνα 4-6).



Εικόνα 4-6. Αποτελέσματα ASM επάνω σε T2-weighted εικόνες. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το περίγραμμα των σπονδύλων.

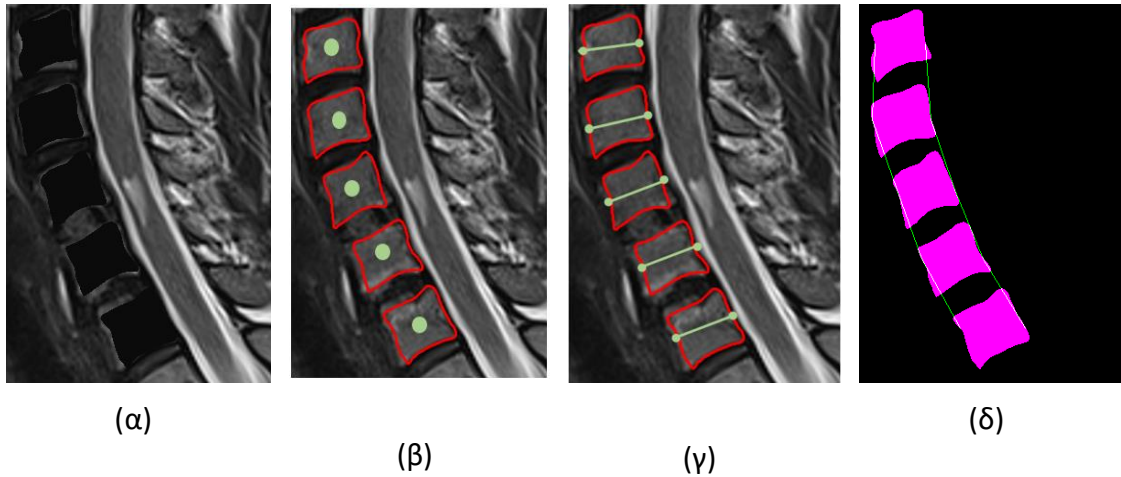
4.2.3 Εύρεση Περιγράμματος του Καναλιού των Νεύρων και του Μεσοσπονδύλιου Διαστήματος

Σε αυτό το σημείο της επεξεργασίας, χρησιμοποιούμε την πληροφορία που αντλήσαμε για την θέση και το περίγραμμα των σπονδύλων από το υποκεφάλαιο 4.2.2, ώστε να βρούμε το περίγραμμα του καναλιού των νεύρων και του μεσοσπονδύλιου δίσκου επάνω σε εικόνες T2-weighted. Λαμβάνοντας υπόψη ότι και οι τρεις παραπάνω δομές είναι γειτονικές και συνορεύουν τα όριά τους, μπορούμε, με αφετηρία τα όρια των σπονδύλων, να καθορίσουμε την θέση των υπόλοιπων ανατομικών δομών (Εικόνα 4-7α). Με τον τρόπο αυτό τελικά προκύπτει μία λωρίδα που περιγράφει το κανάλι των νεύρων.

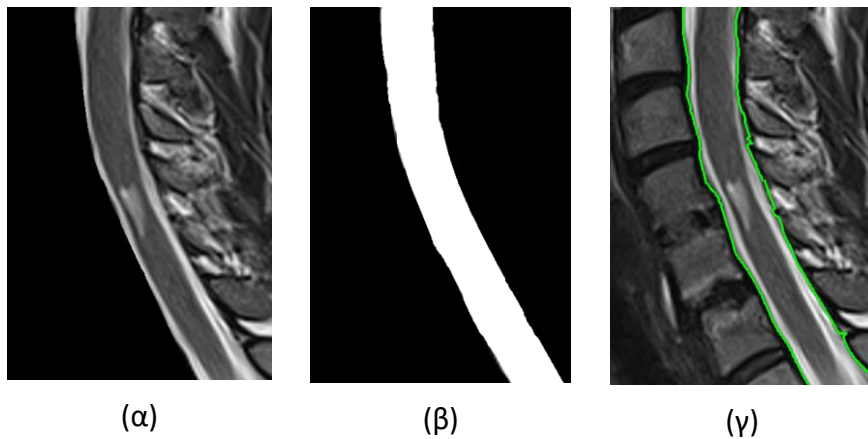
Αρχικά, ανευρίσκουμε τα κέντρα των σπονδύλων μέσα από τα περιγράμματά τους (Εικόνα 4-7β), με στόχο να εντοπίσουμε δύο σημεία του περιγράμματος κατά μήκος του κέντρου σπόνδυλου (Εικόνα 4-7γ). Από αυτή την διαδικασία προκύπτουν δέκα σημεία αναφοράς, δηλαδή ένα σε κάθε σπόνδυλο και για κάθε πλευρά, τα οποία, αν ενωθούν εκατέρωθεν με *linear interpolation*, δημιουργούν μία λωρίδα κατά την οποία: α) στο εσωτερικό της εντοπίζονται οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι και β) στην δεξιά μεριά εντοπίζεται το κανάλι των νεύρων (Εικόνα 4-7δ).

Οι περιοχές της εικόνας στα αριστερά της λωρίδας απορρίπτονται (Εικόνα 4-8α). Στην υπόλοιπη εικόνα χρησιμοποιούμε *Otsu thresholding* με τρεις (3) περιοχές των τόνων του γκρι για την εξεύρεση του περιγράμματος του καναλιού των νεύρων (Εικόνα 4-8β).

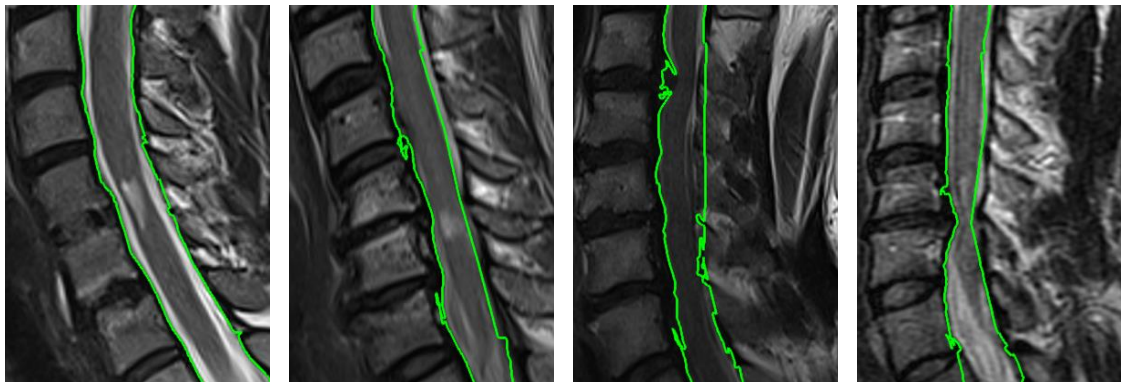
Γνωρίζοντας πως το κανάλι των νεύρων βρίσκεται στην αριστερή πλευρά αυτής της λωρίδας, μπορούμε να προσδιορίζουμε με ασφάλεια και ακρίβεια το περίγραμμά του (Εικόνα 4-9).



Εικόνα 4-7. (α) Με μαύρο χρώμα σημειώνουμε το σώμα των σπονδύλων πάνω στην T2-weighted, (β) με πράσινο κύκλο σημειώνουμε τα κέντρα των σπονδύλων, τα οποία οριοθετεί το κόκκινο περίγραμμα, (γ) με μία πράσινη γραμμή σημειώνουμε τα σημεία αναφοράς εκατέρωθεν των σπονδυλικών σωμάτων, (δ) τα σημεία αναφοράς συνδέονται με *linear interpolation* ώστε να προκύψει η λωρίδα περιγραφής των περιοχών ενδιαφέροντος.

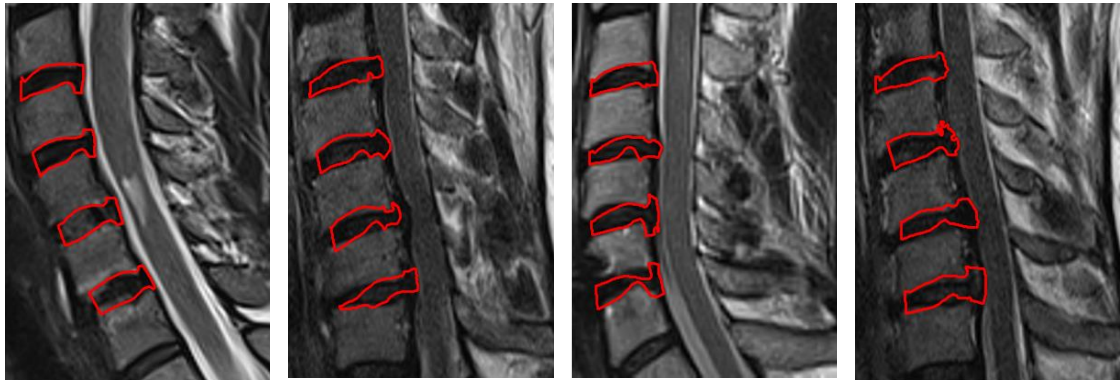


Εικόνα 4-8. Εξαγωγή του περιγράμματος του καναλιού των νεύρων: (α) η κατακόρυφη γραμμή τμηματοποιεί το κανάλι των νεύρων από την αριστερή όψη, όπου βρίσκονται τα σημεία αναφοράς, (β) η προσκόπτουσα binary εικόνα, (γ) με πράσινη γραμμή περιγράφεται το όριο του καναλιού των νεύρων.



Εικόνα 4-9. Παραδείγματα εύρεσης ορίων του καναλιού των νεύρων σε εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T2- weighted (σημειώνεται με πράσινο χρώμα).

Η μεθοδολογία ολοκληρώνεται με την εξαγωγή των ορίων του μεσοσπονδύλιου διαστήματος, το οποίο πραγματοποιείται αφαιρώντας τις προηγούμενες δομές που ανιχνεύτηκαν, δηλαδή τα σπονδυλικά σώματα και το κανάλι των νεύρων (Εικόνα 4-10).



Εικόνα 4-10. Παραδείγματα εύρεσης των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας T2- weighted (σημειώνεται με κόκκινο χρώμα).

4.3 Αποτελέσματα

4.3.1 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται σε έξι σετ εικόνων Μαγνητικής Τομογραφίας, τα οποία εμπεριέχουν είκοσι οβελιαίες τομές, με διαφορετικά μεγέθη εικονοστοιχείων από 0.4688 mm έως 0.6875 mm και πάχους τομής 3 mm. Η εκπαίδευση του ASM γίνεται σε ένα σύνολο δεδομένων Αξονικής Τομογραφίας, τα οποία φέρουν μέγεθος εικονοστοιχείων και πάχος τομής 0.33 mm και 1.5 mm αντίστοιχα, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν ως αναφορά για την εύρεση των σπονδυλικών ορίων.

Τα δύο σύνολα των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν από την Αξονική και τη Μαγνητική τομογραφία, είναι ανώνυμα και προέρχονται από αρχεία δημόσιου νοσοκομειακού ιδρύματος. Όλες οι διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν σε μελέτες που αφορούσαν ανθρώπινους συμμετέχοντες ήταν σύμφωνες με τα πρότυπα δεοντολογίας της θεσμικής ή/και εθνικής επιτροπής έρευνας και με τη Διακήρυξη του Ελσίνκι του 1964 και τις μεταγενέστερες τροποποιήσεις της ή συγκρίσιμα ηθικά πρότυπα. Επίσης, ελήφθη ενημερωμένη συγκατάθεση από όλους τους μεμονωμένους συμμετέχοντες που συμπεριλήφθηκαν στη μελέτη.

4.3.2 Μετρικές Αξιολόγησης

Για την ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων, ειδικός ακτινολόγος χάραξε χειροκίνητα το περίγραμμα των ανατομικών δομών που μας ενδιαφέρουν στις εικόνες Αξονικής και Μαγνητικής Τομογραφίας, ώστε να αξιοποιηθούν για την σύγκριση των αποτελεσμάτων από την αυτόματη διαδικασία. Ως μετρικές αξιολόγησης, χρησιμοποιούμε τον δείκτη ομοιότητας Dice Similarity Coefficient (DSC) [43] και τον δείκτη απόστασης Hausdorff (HD) [44]. Αμφότερες οι δύο μετρικές συγκρίνουν το περίγραμμα των δομών από την αυτόματη μέθοδο και το χειροκίνητο περίγραμμα: Το DSC εξαρτάται από τον αριθμό των κοινών εικονοστοιχείων, ενώ το HD προέρχεται από τις αποστάσεις όλων των ζευγών των εικονοστοιχείων.

Έστω S_g και S_t οι δυαδικές εικόνες που ορίζουν το περίγραμμα της δομής, όπως προκύπτει από την προτεινόμενη μέθοδο και το χειροκίνητο περίγραμμα του ειδικού ακτινολόγου αντίστοιχα. Και στις δύο εικόνες τα εικονοστοιχεία των δομών ορίζονται από 1 και τα υπόλοιπα από το 0. Έστω επίσης τα X_g και Y_t τα όρια των δομών σε S_g και S_t , αντίστοιχα. Το DSC ορίζεται ως εξής:

$$DSC(S_g, S_t) = \frac{2|S_g \cap S_t|}{|S_g| + |S_t|} \quad (4.1)$$

όπου S_g και S_t είναι όλες οι περιοχές των δομών που αναλύονται, $| \quad |$ δηλώνει τον αριθμό των εικονοστοιχείων με τιμή 1 και $S_g \cap S_t$ αποτελεί την τομή των δύο δομών. Ο δείκτης αξιολόγησης DSC αυξάνεται με την ομοιότητα. Το HD ορίζεται ως εξής:

$$HD(X_g, Y_t) = \max \left\{ \sup_{x \in X_g} \inf_{y \in Y_t} d(x, y), \sup_{y \in Y_t} \inf_{x \in X_g} d(x, y) \right\} \quad (4.2)$$

όπου X και Y αποτελούν τα περιγράμματα που συγκρίνονται. Το HD αντιπροσωπεύει την ομοιότητα μεταξύ δύο κλειστών ορίων και μετρά τη μέγιστη απόσταση μεταξύ οποιουδήποτε σημείου του ενός ορίου στο άλλο όριο.

4.3.3 Αποτελέσματα και Ανάλυση

Οι Πίνακες υπ' αριθμούς Πίνακας 4-1 Πίνακας 4-2 και Πίνακας 4-3 παρουσιάζουν πειραματικές συγκρίσεις μεταξύ της προτεινόμενης μεθόδου και άλλων μεθόδων αιχμής για την εξαγωγή ορίων σπονδύλων, μεσοσπονδύλιου δίσκου και καναλιού των νεύρων αντίστοιχα. Μπορεί, εδώ, να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα τμηματοποίησης της προτεινόμενης μεθοδολογίας, είναι συγκρίσιμα ή υψηλότερα με τις διάφορες μεθόδους από την βιβλιογραφία των Arif κ.ά. και Zhang κ.ά. Ο Πίνακας 4-1, περιλαμβάνει διαφορετικές αρχιτεκτονικές *neural network*. Η προτεινόμενη μέθοδος έχει αποτελέσματα τμηματοποίησης, τα οποία είναι συγκρίσιμα ή υψηλότερα σε σύγκριση με μεθόδους όπως των Zhang et al., σε σχέση με την εξαγωγή των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου (Πίνακας 4-2).

Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος έχει ποιότητα τμηματοποίησης, η οποία είναι συγκρίσιμη ή υψηλότερη με διάφορες περιπτώσεις των μεθόδων των Zhang et al. και Sahar et al., σε σχέση με την εξαγωγή ορίων του καναλιού των νεύρων (Πίνακας 4-3). Κάθε σύγκριση πραγματοποιήθηκε με χρήση των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στην αντίστοιχη αρχική εργασία. Στην Εικόνα 4-11 αποτυπώνονται παραδείγματα, όπου εμφανίζονται ταυτόχρονα οι περιοχές ενδιαφέροντος από διαφορετικούς ασθενείς.

Πίνακας 4-1. Αξιολόγηση τμηματοποίησης για το περίγραμμα των σπονδύλων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας.

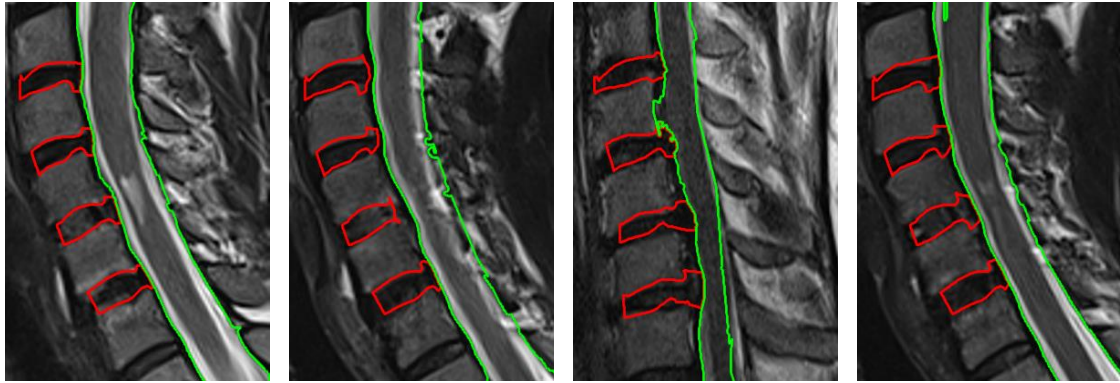
Μέθοδος	Mean DSC (%) \pm SD	Mean HD (mm) \pm SD
Arif et al. (Unet)	84 \pm 1.3	1.6 \pm 2.6
Arif et al. (UNet-S)	84 \pm 1.3	1.6 \pm 2.5
Zhang et al. (U-Net)	85.09 \pm 1.65	-
Zhang et al. (AttU-Net)	87.68 \pm 1.55	-
Zhang et al. (UNet++)	85.08 \pm 1.62	-
Zhang et al. (DeepLab-v3+)	88.78 \pm 1.78	-
Zhang et al. (TransUnet)	87.9 \pm 1.53	-
Zhang et al. (Swin-Unet)	84.51 \pm 1.55	-
Προτεινόμενη Μέθοδος	88.6 \pm 5.2	-

Πίνακας 4-2. Αξιολόγηση τμηματοποίησης για το περίγραμμα του μεσοσπονδύλιου δίσκου από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας.

Μέθοδος	Mean DSC (%) \pm SD
Zhang et al. (U-Net)	85.09 \pm 1.65
Zhang et al. (AttU-Net)	87.68 \pm 1.55
Zhang et al. (UNet++)	85.08 \pm 1.62
Zhang et al. (DeepLab-v3+)	88.78 \pm 1.78
Zhang et al. (TransUnet)	87.9 \pm 1.53
Zhang et al. (Swin-Unet)	84.51 \pm 1.55
Προτεινόμενη Μέθοδος	84.9 \pm 2.4

Πίνακας 4-3. Αξιολόγηση τμηματοποίησης για το περίγραμμα του καναλιού των νεύρων από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας.

Μέθοδος	Mean DSC (%) \pm SD	Mean HD (mm) \pm SD
Sahar et al.	81 \pm 4	12.3 \pm 2.4
Zhang et al. (U-Net)	85.09 \pm 1.65	-
Zhang et al. (AttU-Net)	87.68 \pm 1.55	-
Zhang et al. (UNet++)	85.08 \pm 1.62	-
Zhang et al. (DeepLab-v3+)	88.78 \pm 1.78	-
Zhang et al. (TransUnet)	87.9 \pm 1.53	-
Zhang et al. (Swin-Unet)	84.51 \pm 1.55	-
Προτεινόμενη Μέθοδος	90 \pm 3.5	4.3 \pm 2.7



Εικόνα 4-11. Παραδείγματα απεικόνισης ταυτόχρονα των δύο περιοχών ενδιαφέροντος. Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνεται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος και με πράσινο χρώμα αποτυπώνεται το κανάλι των νεύρων.

4.4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα μελέτη προκρίνουμε μία μέθοδο βασισμένη στην συνδυαστική πληροφορία με την χρήση Active Shape Model (ASM) για την εύρεση του περιγράμματος του μεσοσπονδύλιου δίσκου και του καναλιού των νεύρων στην περιοχή του αυχένα, από τον σπόνδυλο A3 έως των A7. Τα σχήματα των σπονδύλων από τις εικόνες Αξονικής Τομογραφίας χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του ASM. Το εκπαιδευμένο ASM μοντέλο εφαρμόζεται σε κάθε εικόνα Μαγνητικής Τομογραφίας T2-weighted, για την εξαγωγή των ορίων του μεσοσπονδύλιου δίσκου και του καναλιού των νεύρων. Ένα σύνολο με δεδομένα εικόνων από Αξονική Τομογραφία χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του ASM, ενώ σύνολα δεδομένων εικόνων Μαγνητικής Τομογραφίας T1-weighted και T2-weighted χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου. Όλες οι εικόνες προέρχονται από οβελιαίες τομές των δύο απεικονιστικών συστημάτων.

Σε όλο το εύρος της μελέτης, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές συγκρίσεις με μεθόδους αιχμής στα αποτελέσματα τμηματοποίησης που παράχθηκαν από την μεθοδολογία. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με την προτεινόμενη μέθοδο μπορούμε να εντοπίσουμε με ακρίβεια τους σπονδύλους, το μεσοσπονδύλιο δίσκο και το κανάλι των νεύρων. Μάλιστα, η μεθόδός μας αποδεικνύεται συγκρίσιμη ή βέλτιστη εν σχέση με την ακρίβεια των μεθόδων της βιβλιογραφίας, οι οποίες περιλαμβάνουν τεχνικές τμηματοποίησης με διαφορετικές αρχιτεκτονικές neural networks.

Επιπροσθέτως, η προτεινόμενη μέθοδος εξαρτάται λιγότερο από μεγάλες ποσότητες δειγμάτων εκπαίδευσης, συγκριτικά με τις μεθόδους deep learning, ενώ απαιτεί περιορισμένη παρέμβαση των χρηστών. Συν τοις άλλοις, η ταυτόχρονη απεικόνιση των περιοχών που τμηματοποιήθηκαν συντελεί στη διάγνωση μεγάλου εύρους παθολογιών του καναλιού των νεύρων. Εν κατακλείδι, οι μελλοντικές προοπτικές αυτής της εργασίας περιλαμβάνουν πιθανές υβριδικές προσεγγίσεις, οι οποίες στηρίζονται σε ASM που καθοδηγούν την τμηματοποίηση, βασισμένη σε neural networks.

5 Επίλογος

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αναδεικνύει μία καινοτόμα υπολογιστική προσέγγιση προς εύρεση των ορίων από τους σπονδύλους, το μεσοσπονδύλιο δίσκο και από το κανάλι των νεύρων μέσα από σύνθεση εικόνων Αξονικής και Μαγνητικής Τομογραφίας. Όλες οι αναφερόμενες μέθοδοι που παρουσιάζονται βασίζονται στην συνδυαστική πληροφορία, η οποία προέρχεται από τα δύο απεικονιστικά συστήματα κατά την απεικόνιση του ανθρώπινου σώματος. Πιο συγκεκριμένα, στα επιμέρους στάδια της επεξεργασίας αξιοποιήθηκαν τα 'σκληρά' ανατομικά στοιχεία (σπόνδυλοι) από εικόνες Αξονικής Τομογραφίας και τα 'μαλακά' ανατομικά στοιχεία (μεσοσπονδύλιο διάστημα και το κανάλι των νεύρων) από εικόνες Μαγνητικής Τομογραφίας.

Η παραπάνω προσέγγιση σημείωσε πληθώρα πλεονεκτημάτων ως προς το παραγόμενο αποτέλεσμα από τις επεξεργασμένες εικόνες, καθώς μέσω αυτής : α) αντλούνται συμπληρωματικές πληροφορίες κατά την επεξεργασία δύο διαφορετικών απεικονιστικών συστημάτων, β) μειώνεται η ανάγκη μεγάλου όγκου δεδομένων και διαθέσιμων εικόνων, σε αντίθεση με άλλες σύγχρονες μεθόδους ηλεκτρονικής μάθησης, γ) το τελικό αποτέλεσμα που παράγεται από την τμηματοποίηση των εικόνων είναι συγκρίσιμο σε σχέση με τις υπόλοιπες εξελιγμένες μεθόδους και δ) παρέχεται η δυνατότητα συνδυαστικής απεικονιζόμενης πληροφορίας της σπονδυλικής στήλης, η οποία ενδεχομένως θα μπορούσε να συμβάλλει στην επίλυση διάφορων παθολογοανατομικών προβλημάτων που σχετίζονται με αυτήν. Παράλληλα, τα παραγόμενα αποτελέσματα της τμηματοποίησης συγκρίνονται ποσοτικά με τους μορφολογικούς δείκτες DICE και HD με τις υπόλοιπες βιβλιογραφικές μεθόδους. Η σύγκριση αφορά στην εύρεση περιγραμμάτων σπονδύλων, μεσοσπονδύλιου διαστήματος και καναλιού των νεύρων μέσα από τις αντίστοιχες εικόνες. Σχετικά παρατηρήθηκε ότι οι δύο δείκτες υπέδειξαν ομοιότητα των αποτελεσμάτων με τις υπόλοιπες μεθόδους. Από την άλλη πλευρά, αξίζει να αναφερθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος απαιτεί περιορισμένη και ελάχιστη παρέμβαση από πλευράς χειριστή, ενώ συγκριτικά με τις βιβλιογραφικές αναφορές, δεν απαιτεί μεταφορά γνώσης από προηγούμενες εικόνες που έχουν προσομοιωθεί.

Εν κατακλείδι, η εργασία αυτή εισάγει και παρουσιάζει μία νέα οπτική στον τομέα της απεικόνισης, καθώς διαπιστώθηκε πως η εύρεση των περιγραμμάτων των σπονδύλων, του μεσοσπονδύλιου δίσκου και του καναλιού του νεύρων μπορεί να οδηγήσει σε μια υβριδική τρισδιάστατη απεικόνιση της σπονδυλικής στήλης. Συγκεκριμένα, γίνεται εφικτή η πλήρης αξιοποίηση των ανατομικών δομών από

δύο εξ ορισμού διαφορετικά συστήματα, τα οποία, ωστόσο, συνδυασμένα, παρέχουν συμπληρωματικά την μέγιστη πληροφορία.

5.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Μελλοντικές επεκτάσεις αυτής της εργασίας θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν τον σχεδιασμό υβριδικών προσεγγίσεων, τα οποία θα χρησιμοποιούν μοντέλα βασισμένα σε neural networks και θα μπορούσαν να λειτουργήσουν με αξιοπιστία σε μικρό πλήθος ζευγών εικόνων Αξονικής – Μαγνητικής Τομογραφίας. Παράλληλα, θα μπορούσε να υλοποιηθεί η αναγνώριση και η αξιολόγηση σημαντικών κλινικά παθολογιών όπως είναι η εύρεση αφυδατωμένων ή κατεστραμμένων μεσοσπονδύλιων δίσκων, η στένωση του μεσοσπονδύλιου διαστήματος ή ακόμα και η αξιολόγηση ολισθητικών σπονδύλων. Η σωστή εύρεση και αξιολόγηση των παραπάνω εκφυλιστικών παθήσεων της σπονδυλικής στήλης θα είναι πάντα αντικείμενο συνεχόμενης και ενδεδειγμένης έρευνας, ώστε να υπάρξει μια βέλτιστη απεικόνιση των ανατομικών στοιχείων της σπονδυλικής στήλης μέσα από εικόνες Αξονικής και Μαγνητικής Τομογραφίας.

Βιβλιογραφία

- [1] A. F. Brody, C. E. Sandra και E. J. Foster, «Materials for the Spine: Anatomy, Problems, and Solutions,» *Materials*, τόμ. 12, αρ. 2, p. 253, 2019.
- [2] B. W. Kiber, J. Press και A. Sciascia, «The Role of Core Stability in Athletic Function,» *Sports Med*, τόμ. 36, αρ. 3, pp. 189-98, 2006.
- [3] A. M. Agur και A. F. Dalley, *Grant's Atlas of Anatomy*, 12th ed., Lippincott Williams & Wilkins, 2009.
- [4] A. B. Oktay και Y. S. Akgul, «Simultaneous Localization of Lumbar Vertebrae and Intervertebral Discs With SVM-Based MRF,» *IEEE transactions on bio-medical engineering*, τόμ. 60, αρ. 9, pp. 2375-2383, 2013.
- [5] T. M. Emch και M. T. Modic, «Imaging of lumbar degenerative disk disease: history and current state,» *Skeletal Radiology*, τόμ. 40, αρ. 9, pp. 1175-89, 2011.
- [6] H. Juying, J. Fengzeng, H. Wu και L. Kaiyun, «An improved level set method for vertebra CT image segmentation,» *BioMedical Engineering OnLine*, τόμ. 48, αρ. 12, 2013.
- [7] I. M. Castro, J. M. Pozo, M. Pereañez , k. Lekadir, A. Lazary και A. F. Frangi, «Statistical Interspace Models (SIMs): Application to Robust 3D Spine Segmentation,» *IEEE Trans Med Imaging*, τόμ. 34, αρ. 8, pp. 1663-1675, 2015.
- [8] Z. Guoyan, C. Chengwen, D. L. Belavy, B. Ibragimov, R. Korez, V. Tomaz, H. Hutt, R. Everson, J. Meakin, I. L. Andrade και e. a. , «Evaluation and comparison of 3D intervertebral disc localization and segmentation methods for 3D T2 MR data: A grand challenge,» *Med image Anal*, τόμ. 35, pp. 327-344, 2017.
- [9] Y. Zheng, M. S. Nixon και R. Allen, «Automated segmentation of lumbar vertebrae in digital videofluoroscopic images,» *IEEE Trans Med Imaging*, τόμ. 23, αρ. 1, pp. 45-52, 2004.
- [10] P. Zhigang, Z. Jia, W. Wee και L. Jing-Huei, «Automated Vertebra Detection and Segmentation from the Whole Spine MR Images,» *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, pp. 2527-2530, 2005.
- [11] S. Schmidt, J. Kappes, M. Bergtholdt, V. Pekar, S. Dries, D. Bystrov και C. Schnörr, «Spine detection and labeling using a parts-based graphical model,» *Inf Process Med Imaging*, τόμ. 20, pp. 122-33, 2007.
- [12] J. J. Corso, R. S. Alomari και V. Chaudhary, «Lumbar disc localization and labeling with a probabilistic model on both pixel and object features,» *Med Image*

- Comput Assist Interv*, τόμ. 11, αρ. Pt1, pp. 202-10, 2008.
- [13] R. S. Alomary, J. J. Corso και V. Chaudhary, «Labeling of lumbar discs using both pixel- and object-level features with a two-level probabilistic model,» *IEEE Trans Med Imaging*, τόμ. 30, αρ. 1, pp. 1-10, 2011.
- [14] D. Stern, B. Likar, F. Pernus και T. Vrtovec, «Automated detection of spinal centrelines, vertebral bodies and intervertebral discs in CT and MR images of lumbar spine,» *Phys Med Biol*, τόμ. 55, αρ. 1, pp. 247-64, 2010.
- [15] R. Donner, B. Micusik, G. Langs και H. Bischof, «Sparse MRF Appearance Models for Fast Anatomical Structure Localisation,» σε *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, University of Warwick, UK, 2007.
- [16] M. B. Kelm, M. Wels, K. S. Zhou, S. Seifert, M. Suehling, Y. Zheng και D. Comaniciu, «Spine detection in CT and MR using iterated marginal space learning,» *Med Image Anal*, τόμ. 17, αρ. 8, pp. 1283-92, 2013.
- [17] C. Chevrefils, F. Cheriet, G. Grimard, M.-C. Miron και C.-E. Audin, «Quantitative evaluation of an automatic segmentation method for 3D reconstruction of intervertebral scoliotic disks from MR images,» *BMC Med Imaging*, τόμ. 12, αρ. 26, pp. 1017-1027, 2012.
- [18] C. Chevrefils, C. Farida, C.-E. Audin και G. Grimard, «Texture analysis for automatic segmentation of intervertebral disks of scoliotic spines from MR images,» *IEEE Trans Inf Technol Biomed*, τόμ. 13, αρ. 4, pp. 608-620, 2009.
- [19] S. K. Michopoulou, L. Costaridou, E. Panagiotopoulos, R. Speller, G. Panayiotakis και A. Todd-Pokropek, «Atlas-based segmentation of degenerated lumbar intervertebral discs from MR images of the spine,» *IEEE Trans Biomed Eng*, τόμ. 56, αρ. 9, pp. 2225-31, 2009.
- [20] A. Naubert, J. Fripp, C. Engstrom, R. Schwarz, L. Lauer, O. Salvado και S. Crozier, «Automated detection, 3D segmentation and analysis of high resolution spine MR images using statistical shape models,» *Phys Med Biol*, τόμ. 57, αρ. 24, pp. 8357-8376, 2012.
- [21] N. A. F. J. S. S. Chandra, C. Engstrom και S. Crozier, «Automated intervertebral disc segmentation using probabilistic shape estimation and active shape models,» σε *In Proceedings of the MICCAI Workshop & Challenge on Computational Methods and Clinical Applications for Spine Imaging*, Munich, Germany, 2015.
- [22] J. Carballido-Gamio, S. J. Belongie και S. Majumdar, «Normalized cuts in 3-D for spinal MRI segmentation,» *IEEE Trans Med Imaging*, τόμ. 23, αρ. 1, pp. 36-44, 2004.
- [23] H. Szu-Hao, C. Yi-Hong, L. Shang-Hong και N. L. Carol, «Learning-based vertebra

- detection and iterative normalized-cut segmentation for spinal MRI,» *IEEE Trans Med Imaging*, τόμ. 28, αρ. 10, pp. 1595-605, 2009.
- [24] A. M. Asem, A. S. Melih και F. A. Aly, «Vertebral body segmentation with prior shape constraints for accurate BMD measurements,» *Comput Med Imaging Graph*, τόμ. 38, αρ. 7, pp. 586-95, 2014.
- [25] B. A. Ismail, K. Punithakumar, G. Garvin, W. Romano και L. Shuo, «Graph cuts with invariant object-interaction priors: application to intervertebral disc segmentation,» *Inf Process Med Imaging*, pp. 221-232, 2011.
- [26] M. W. Law, K. Tay, A. Leung, G. J. Garvin και L. Shuo, «Intervertebral disc segmentation in MR images using anisotropic oriented flux,» *Med Image Anal*, τόμ. 17, αρ. 1, pp. 43-61, 2013.
- [27] B. Glocker, J. Feulner, A. Criminisi, R. D. Haynor και E. Konukoglu, «Automatic localization and identification of vertebrae in arbitrary field-of-view CT scans,» σε *In Proceedings of the MICCAI*, Nice, France, 2012.
- [28] B. Glocker, D. Zikic, E. Konukoglu, D. R. Haynor και A. Criminisi, «Vertebrae localization in pathological spine CT via dense classification from sparse annotations,» *Med Image Comput Comput Assist Interv*, τόμ. 16, αρ. 2, pp. 262-270, 2013.
- [29] I. L. Andrade και B. Glocker, «Complementary classification forests with graph-cut refinement for IVD localization and segmentation,» σε *In Proceedings of the MICCAI Workshop & Challenge on Computational Methods and Clinical Applications for Spine Imaging*, Munich, Germany, 2015.
- [30] B. Glocker, E. Konukoglu και D. Haynor, «Random forests for localization of spinal anatomy,» σε *In Medical Image Recognition, Segmentation and Parsing: Methods, Theories and Applications*, Orlando, FL, USA, 2016.
- [31] C. Wang και D. Forsberg, «Segmentation of Intervertebral Discs in 3D MRI Data Using Multi-atlas Based Registration,» σε *International Workshop on Computational Methods and Clinical Applications for Spine Imaging*, 2016.
- [32] R. Korez, B. Ibragimov, B. Likar και F. Pernuš, «Deformable model-based segmentation of intervertebral discs from MR spine images by using the SSC descriptor,» σε *In Proceedings of the MICCAI Workshop & Challenge on Computational Methods and Clinical Applications for Spine Imaging*, Munich, Germany, 2015.
- [33] C. Chen, D. Belavy, W. Yu, C. Chu, G. Armbrecht, M. Bansmann, D. Felsenberg και G. Zheng, «Localization and Segmentation of 3D Intervertebral Discs in MR Images by Data Driven Estimation,» *IEEE Trans Med Imaging*, τόμ. 34, αρ. 8, pp. 1719-1729, 2015.

- [34] C. Yunliang, O. Said, S. Manas, M. Landis και S. Li, «Multi-Modality Vertebra Recognition in Arbitrary Views Using 3D Deformable Hierarchical Model,» *IEEE Trans Med Imaging*, τόμ. 34, αρ. 8, pp. 1676-1693, 2015.
- [35] A. Suzani, A. Seitel, Y. Liu και S. Fels, «Fast Automatic Vertebrae Detection and Localization in Pathological CT Scans - A Deep Learning Approach,» σε *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2015*, 2015.
- [36] H. Chen, S. Shen, J. Qin, D. Ni, L. Shi, J. Cheng και P. Heng, «Automatic Localization and Identification of Vertebrae in Spine CT via a Joint Learning Model with Deep Neural Networks,» σε *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 2015.
- [37] H. Cheng, Q. Dou, X. Wang και P. A. Heng, «Deepseg: Deep segmentation network for intervertebral disc localization and segmentation,» σε *In Proceedings of the MICCAI Workshop & Challenge on Computational Methods and Clinical Applications for Spine Imaging*, , Munich, Germany, 2015.
- [38] M. Styner, C. Brechbühler, G. Székely και G. Gerig, «Parametric estimate of intensity inhomogeneities applied to MRI,» *IEEE Trans Med Imaging*, τόμ. 19, αρ. 3, pp. 153-165, 2000.
- [39] W. M. Wells, P. Viola, H. Atsumi, S. Nakajima και R. Kikinis, «Multi-modal volume registration by maximization of mutual information,» *Med Image Anal*, τόμ. 1, αρ. 1, pp. 35-51, 1996.
- [40] N. Otsu, «A threshold selection method from gray-level histograms,» *IEEE Trans Syst. Man. Cyber*, τόμ. 9, pp. 62-66, 1979.
- [41] T. F. Chan και L. A. Vese, «Active Contours Without Edges,» *IEEE Trans. Image Process*, τόμ. 10, pp. 226-277, 2001.
- [42] H. Salem και M. J. Nordin, «Improving diagnostic viewing of medical images using enhancement algorithms,» *J. Comput. Sci.*, τόμ. 7, pp. 1831-1838, 2011.
- [43] A. A. Taha και A. Hanbury, «Metrics for evaluating 3D medical image segmentation: analysis, selection, and tool,» *BMC Medical Imaging*, τόμ. 15, αρ. 29, 2015.
- [44] D. P. Huttenlocher, G. A. Klanderman και W. J. Rucklidge, «Comparing Images Using the Hausdorff Distance,» *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, τόμ. 15, pp. 850-863, 1993.
- [45] Z. Peng, J. Zhong, W. Wee και J.-H. Lee, «Automated Vertebra Detection and Segmentation from the Whole Spine MR Images,» σε *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2005.
- [46] S. Schmidt, J. Kappes, M. Bergtholdt, V. Pekar, S. Dries, D. Bystrov και C. Schnörr,

- «Spine detection and labeling using a parts-based graphical model,» *Inf Process Med Imaging*, τόμ. 20, pp. 122-133, 2007.
- [47] J. J. Corso, R. S. Alomari και V. Chaudhary, «Lumbar disc localization and labeling with a probabilistic model on both pixel and object features,» *Med Image Comput Assist Interv*, τόμ. 11, αρ. 1, pp. 202-210, 2008.
- [48] R. Donner, B. Micusik, G. Langs και H. Bischof, «Generalized sparse MRF appearance models,» *Image Vis Computer*, τόμ. 28, αρ. 6, pp. 1031-1038, 2010.
- [49] C. Chevretil, F. Chérier, G. Grimard και C.-E. Aubin, «Watershed segmentation of intervertebral disc and spinal canal from MRI images,» *Image Analysis and recognition*, pp. 1017-1027, 2007.
- [50] A. Neubert, J. Fripp, S. S. Chandra, C. Engstrom και S. Crozier, «Automated intervertebral disc segmentation using probabilistic shape estimation and active shape models,» σε *In Proc MICCAI Workshop & Challenge on Computational Methods and Clinical Applications for Spine Imaging*, Munich, Germany, 2015.
- [51] J. Carballido-Gamio, S. J. Belonjic και S. Majumdar, «Normalized cuts in 3-D for spinal MRI segmentation,» *IEEE Trans Med Imaging*, τόμ. 23, αρ. 1, pp. 36-44, 2004.
- [52] A. M. Asem, A. S. Melih και A. A. Farag, «Vertebral body segmentation with prior shape constraints for accurate BMD measurements,» *Comput Med Imaging Graph*, τόμ. 38, αρ. 7, pp. 586-595, 2014.
- [53] I. B. Ayed, K. Punithakumar, G. Garvin, W. Romano και S. Li, «Graph cuts with invariant object-interaction priors: application to intervertebral disc segmentation,» *Inf Process Med Imaging*, τόμ. 22, pp. 221-232, 2011.
- [54] Y. Zhan, D. Maneesh, M. Harder και X. Z. Sean, «Robust MR spine detection using hierarchical learning and local articulated model,» *Med Image Comput Assist Interv*, τόμ. 15, αρ. 1, pp. 141-148, 2012.
- [55] M. Liaskos, M. A. Savelonas, P. A. Asvestas, M. G. Lykissas και G. K. Matsopoulos, «32. Liaskos M, Savelonas M, Asvestas PA, Lykissas M, Matsopoulos GK (2020) Bimodal CT/MRI-based segmentation method for intervertebral disc boundary extraction. *Information* 11(9):448.,» *Information*, τόμ. 11, αρ. 9, p. 448, 2020.
- [56] B. Gaonkar, D. Villaroman, J. Beckett, C. Ahn, M. Attiah, D. Babayan, J. P. Villablanca, N. Salamon, A. Bui και L. Macyszyn, «Quantitative Analysis of Spinal Canal Areas in the Lumbar Spine: An Imaging Informatics and Machine Learning Study,» *AJNR Am J Neuroradiol*, τόμ. 40, αρ. 9, pp. 1586-1591, 2019.
- [57] M. Benjelloun, S. Mahmoudi και F. Lecron, «A Framework of Vertebra Segmentation Using the Active Shape Model-Based Approach,» *International Journal of Biomedical imaging*, 2011.

- [58] G. Hille, S. Saalfeld, S. Serowy και K. Tönnies, «Vertebral body segmentation in wide range clinical routine spine MRI data,» *Comput Methods Programs Biomed*, τόμ. 155, pp. 93-99, 2018.
- [59] D. Zukić, A. Vlasák, J. Egger και D. Hořínek, «Robust Detection and Segmentation for Diagnosis of Vertebral Diseases Using Routine MR Images,» *Computer Graphics Forum*, τόμ. 33, αρ. 6, pp. 190-204, 2014.
- [60] G. Zheng, C. Chu, B. Ibragimov, R. Korez και et al., «Evaluation and Comparison of 3D Intervertebral Disc Localization and Segmentation Methods for 3D T2 MR Data: A Grand Challenge,» *Medical Image Analysis*, τόμ. 35, pp. 327-344, 2016.
- [61] M. Chen, A. Carass, J. Oh, G. Nair, D. L. Pham, D. S. Reich και J. L. Prince, «Automatic magnetic resonance spinal cord segmentation with topology constraints for variable fields of view,» *Neuroimage*, τόμ. 83, pp. 1051-1062, 2013.
- [62] M. C. Yiannakas, A. M. Mustafa, L. D. Benjamin, H. Kearney, C. Tur, D. R. Altmann, F. D. Angelis, D. Plantone, O. Ciccarelli, D. H. Miller, J. Cohen-Adad και C. A. Gandini Wheeler-Kingshott, «Fully automated segmentation of the cervical cord from T1-weighted MRI using PropSeg: Application to multiple sclerosis,» *NeuroImage: Clinical*, τόμ. 10, pp. 71-77, 2016.
- [63] A. Lemay, C. Gros, Z. Zhuo, J. Zhang, Y. Duan, J. Cohen-Adad και Y. Liu, «Automatic multiclass intramedullary spinal cord tumor segmentation on MRI with deep learning,» *NeuroImage: Clinical*, τόμ. 31, 2021.
- [64] J. Koh, P. D. Scott και V. Chaudhary, «An automatic segmentation method of the spinal canal from clinical MR images based on an attention model and an active contour model,» σε *Conference: Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro, ISBI 2011*, Chicago, Illinois, USA, 2011.
- [65] A. J. Asman, F. W. Bryan, S. A. Smith, D. S. Reich και B. A. Landman, «Groupwise Multi-Atlas Segmentation of the Spinal Cord's Internal Structure,» *Med Image Anal*, τόμ. 18, αρ. 3, pp. 460-471, 2014.
- [66] X. Zhang, Y. Yang, Y.-W. Shen, P. Li, Y. Zhong, j. Zhou, K.-R. Zhang, C.-Y. Shen, Y. Li, M.-F. Zhang, L.-H. Pan, L.-T. Ma και H. Liu, «SeUneter: Channel attentive U-Net for instance segmentation of the cervical spine MRI medical image,» *Front Physiol*, τόμ. 13, 2022.
- [67] A. A. S. Masudur Rahman, K. Knapp και G. Slabaugh, «Fully automatic cervical vertebrae segmentation framework for X-ray images,» *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, τόμ. 157, αρ. 3, pp. 91-111, 2018.
- [68] S. Sabaghian, H. Dehghani και S. A. Hossein Batouli, «Fully automatic 3D

segmentation of the thoracolumbar spinal cord and the vertebral canal from T2-weighted MRI using K-means clustering algorithm,» *Spinal Cord*, τόμ. 58, pp. 811-820, 2020.

- [69] T. F. Cootes, C. J. Taylor, D. H. Cooper και J. Graham, «Active Shape Models- Their Training and Application,» *Computer Vision and Image Understanding*, τόμ. 61, αρ. 1, pp. 38-59, 1995.